

香根草系统应用 技术参考手册

Paul Truong, 夏汉平,
Tran Tan Van, Elise Pinners 编著



香根草技术: 解决环境问题行之有效的“绿色”手段

香根草系统应用 技术参考手册

Paul Truong, 夏汉平,
Tran Tan Van, Elise Pinnars 编著
熊国炎, 熊炜焯, 夏汉平 译
夏汉平 校



ASIA PACIFIC AFRICA

谨以此手册献给国际著名香根草专家、泰国地质技术工
程师 Diti Hengchaovanich 先生，以表达我们对他的深切怀念。
Diti 开创性地将香根草技术大规模应用在公路与铁路的固土
护坡等方面，多年来为国际香根草事业的发展作出了宝贵贡
献。世界各地众多的香根草受益者将以感激的心情永远怀念
他。

序

香根草系统：解决环境问题行之有效的“绿色”手段

香根草具有许多独特的性能，因而用途广泛，环境友好，效果甚佳且使用简单。可以说，世界上众多植物种类中，没有几种能与香根草媲美，也没有几种像香根草那样被人类默默无闻地应用了数百年，却在最近 20 年又突然在世界范围内被广泛推广和传播。世界上很少有植物能像香根草一样形成“活生生的墙体”或“活生生的泥沙过滤带”或“活生生的钉子”，从而产生强大的抗拉力与固着力，因此香根草被广泛推崇为“神奇植物”或“奇特之草”。

香根草 (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) 这一种独特的热带草类，最近有人将其重新命名为 *Chrysopogon zizanioides*。香根草系统 (VS) 就是建立在香根草应用基础上的。香根草可以在非常广泛的气候和土壤条件下生长，若栽种与管理得当，可应用于热带、亚热带和地中海气候条件下的任何地方。香根草具有许多特性，这些特性发挥的整体作用非常独特，使香根草看起来简直不像一个单独的物种。若把香根草种植成可持续生长的绿篱，该绿篱就会具备许多至为重要的特性，使其可以在许多方面得到应用，于是形成了 VS。

由于 VS 的应用，目前香根草已在近 100 个国家和地区推广种植。该植物起源于印度南部，一般情况下开花不结实，没有入侵性。一般用分蘖栽植法进行繁育，最好是设置苗圃，用裸根苗进行繁殖。香根草的平均繁育速率因条件而异，正常情况下在种植 3 个月后代 1:30（在中国可能达不到这一速率—校者注）。苗圃的草苗收集后，以 3 株小苗（分蘖）为一束，沿等高线以 15 cm 以内的丛距规范种植。定植的草苗长大成熟后，就会成为挺拔直立的绿篱带，缓冲并分散沿坡面流下的径流，同时过滤径流夹带的泥沙。发育良好的香根草绿篱可以减少 70% 的地表径流和 90% 的泥沙流失。香根草绿篱定植之后，就会在原地挺立。于是，绿篱后侧截留分散的泥沙就会越来越多，久而久之就会形成在香根草保护下的永久梯地。这是一种成本低但劳动力集约型（与劳动力成本关系密切）的技术，具有很高的效益/成本比。若应用在民用工程设施保护时，其成本仅为传统保护工程措施的 1/20 左右（在中国为 1/5~1/10 左右—校者注）。工程技术人员将香根草根系比作“有生命的土壤钉子”，因为香根草根系的平均抗拉强度为软钢的 1/6。

香根草可用于保护小流域与集水区，使其环境不致受到破坏。环境污染特别是有些点源污染是来自：1) 水土流失；2) 过剩的土壤养分以及污染源流出的重金属和除虫剂。香根草在防治这类污染方面特别有用武之地，而且在防治水土流失与环境污染两方面的用途是紧密联系在一起的。过去 20 年里，许多国家对香根草进行了大量的试验和广泛的应用。结果表明，该植物在防治自然灾害（洪灾、滑坡、边坡塌落、河岸侵蚀、灌渠侵蚀、海岸侵蚀和蓄水设施崩塌等），保护环境（防治土地与水体污染、处理固液态废物和改良土壤等）和在很多其它方面特别有效。

香根草的各种应用还直接或间接促进农村的扶贫工作，这些应用包括保护并改良农田，保持土壤水分，生产农副产品，保护农村基础设施等。香根草可直接用来制作农副产品，增加农民的经济收入。凡是与农村和社区发展有关的社团组织，大多都可参与香根草的应用工作。如果可能的话，香根草的应用工作可以与社区、政区和区域的发展计划结合起来做。如果各个部门和社区都参与香根草应用工作的话，与香根草系统有关的大小生产商就有机会得到发展，于是就会形成一个有利可图的香根草行业：有的人繁殖香根草种植材料；有的人利用香根草美化景观，稳定坡地，或满足其它需求；有的人出售香根草副产品，如手工艺品、地表覆盖物、房顶覆盖材料、青饲料和其它产品等。因此，香根草技术确实可以为广大农村社区显著脱贫致富创造良机。这种技术为公众所有，其有关信息都可以免费获得。

然而，香根草应用的潜力仍然非常巨大，而有关香根草应用的信息，还有待于让广大的民众进一步知晓。此外，有些地方或民众对香根草的价值和有效性仅仅是勉强相信，或者表示担心，甚至怀疑。香根草的有些应用之所以不成功，在很多情况下并非是香根草系统本身出了问题，而是对香根草的一知半解或者对香根草方法应用不当所致。

本手册涉猎广泛，叙述详尽，内容实用，总结并展望了越南、中国和世界各地的香根草工作。手册提出的技术推介和观察案例，都是根据现实情况和实践中发生的问题及其解决方法据实介绍的。我们相信手册将会在推广香根草系统的人群中得到广泛应用，也会被翻译成多种语言。手册的作者很非常出色的工作，我们应当向他们致谢！

手册首先用越文和英文编写。但因为印刷方面的缘故，越文版首先面世。目前，越文和英文版均已发行。最近，它正被翻译成中文、法文和西班牙文等出版发行。



Dick Grimshaw
国际香根草网络主席与创始人

前 言

世界银行曾编写了一本名叫《香根草—防治侵蚀的绿篱》小册子（1987）。这是第一本香根草手册，由国际著名的香根草专家 John Greenfield 先生编著，通常被称作“绿书”。这些年来，有关香根草的研究论述与应用报告堪称汗牛充栋。在浏览这些丰富的研究与应用成果之后，本手册的作者们认识到，目前已到重新编写一本新的册子以替代“绿书”的时候了。这本新册子应该更广泛地涵盖有关香根草应用的新领域。新册子的作者同国际香根草网络（TVNI）交换了自己的想法，并得到了 TVNI 的热情支持。于是，经过 4 位作者的共同努力，终于形成了这本手册。

手册综合性地阐述了香根草系统（VS）在坡地加固和基础设施保护、废物和污水处理、污染土地改良及生物修复等方面的应用。与“绿书”相似，手册还阐述了 VS 在上述各种应用中的方法和原理，介绍了世界上有关香根草应用的研究与发展最新成果，包括许多非常成功的范例，特别是在两个香根草“大国”——越南与中国的应用实例。编此手册的主要目的是向规划设计人员、工程技术人员及其他潜在香根草用户介绍 VS。这些人员或许还不甚了解生物工程法和植物修复法的有效性。

本手册是国际同行交流与合作的结晶，由澳大利亚的 Paul Truong 博士、中国的夏汉平博士、越南的 Tran Tan Van 博士与荷兰的 Elise Pinnars 工程师共同完成（4 位作者的简介附后），尽管 4 位作者对手册各章的撰写和编辑均有所贡献，但各章的编写仍有如下分工：

第 1 章：Paul Truong

第 2 章：Paul Truong

第 3 章：Tran Tan Van

第 4 章：Paul Truong

第 5 章：Elise Pinnars

第 6 章：夏汉平

本手册首先用英文编写，并由部分作者译成越文，而越文版遂获得首先付印的机会。在手册撰写和越文版的出版过程中，得到了荷兰王国驻越南大使馆与河内水资源大学提供的资助与支持。手册中所介绍的很多越南项目，得到了 Donner 基金会、美国 Wallace Genetic 基金会、英国 Ambertone 信托公司、丹麦政府以及荷兰王国驻越南大使馆的资金资助。手册中所介绍的中国香根草项目得到了中国国家自然科学基金、中国科学院、广东省自然科学基金，以及相关的政府部门、科研单位、高校、企业的大力支持，还有 TVNI、美国 Wallace Genetic 基金会、日本和德国政府等国际机构的小额资助等。作者非常感谢他们的支持和鼓励。

手册所用的资料，并非完全引自作者们自身完成的研究和发展工作，同时也引用了世界各地从事香根草事业的同行们的成果，尤其是引用近几年越南和中国的成果。作者向下列人士所做的贡献与提供的支持表示谢意：

澳大利亚: Cameron Smeal, Ian Percy, Ralph Ash, Frank Mason, Barbara and Ron Hart, Errol Copley, Bruce Carey, Darryl Evans, Clive Knowles-Jackson, Bill Steentsma, Jim Klein, Peter Pearce

越南: 广义省农业与农村发展厅、农业推广中心的 Vo Thanh Thuy; 芹苴大学的 Le Viet Dung, Luu Thai Danh, Le Van Be, Nguyen Van Mi, Le Tan Phong, Duong Minh, Le Van Hon; 胡志明市农林大学的 Pham Hong Duc Phuoc, Le Van Du; 广义省 AusAID 资助的自然灾害防治项目的主承包商 Kellogg Brwon Root (KBR)的 Ian Sobey; 胡志明高速公路沿线香根草项目主承包商 Thien Sinh 与 Thien An 有限公司的 Tran Ngoc Lam, Nguyen Tuan An
中国: 徐礼煜, 廖新侗, 束文圣, 孔旭辉, 洪浩, 徐远新, 林宾, 张平, 冯子元, 冯志恒, 郭俊彦, 敖惠修, 何道泉, 刘世忠等

TVNI: Dick Grimshaw, John Greenfield, Dale Rachmeler, Criss Juliard, Mike Pease, Joan and Jim Smyle, Mark Dafforn, Bob Adams

泰国: Narong Chomchalow, Diti Hengchaovanich, Surapol Sanguankaeo, Suwanna Parisi, Reinhardt Howeler, 土地发展部, 皇室项目开发委员会 (RDPB)

菲律宾: Eddie Balbarino, Noah Manarang

印度: L. Haridas

印度尼西亚: David Booth

老挝: Werner Stur

中国台北: 王裕文

荷兰: Henk-Jan Verhagen

南非: Roley Nofke, Johnnie van den Berg

刚果: Alain Ndona

此外, Mary Wilkowski (夏威夷香根草网络), John Greenfield 和 Dick Grimshaw 负责手册英文版的编辑工作, 作者亦向这些机构和人士致谢。

手册由各自独立的 6 章组成。若读者从事某一指定类别的香根草应用工作, 仅仅参阅其中对应的某个章节即可。但是, 我们还是强烈建议, 无论从事哪一类应用的工作者, 最好也同时阅读第 1 章。因为第 1 章阐述了香根草的特性, 与其在各个方面的应用密切相关。当然, 在很多情况下阅读第 2 章也是有用的。对于中国的读者而言, 阅读第 6 章又是必不可少的。

有关手册各章节更详细的信息, 请登录国际香根草网络的网站 www.vetiver.org 和其他国家与地区网站 (见附件二), 这些网站有很多相关的信息与连接。

Paul Truong, 夏汉平, Tran Tan Van, Elise Pinnars

目 录

序.....	i
前言.....	iii

第 1 章 香根草特性

1 引言.....	1
2 香根草的特性	1
2.1 形态特性.....	1
2.2 生理特性.....	2
2.3 生态特性.....	3
2.4 对寒冷天气的耐受性.....	3
2.5 适应性范围综述.....	4
2.6 遗传特性.....	5
2.6.1 <i>Vetiveria zizanioides</i> (L.) Nash.....	5
2.6.2 <i>Vetiveria nemoralis</i> A. camus.....	5
2.6.3 <i>Vetiveria nigritana</i> (Benth.) Stapf.....	7
2.7 成为杂草的可能性.....	7
3 结论.....	7

第 2 章 香根草的繁殖方法

1 引言.....	8
2 香根草苗圃.....	8
3 繁育方法.....	9
3.1 将成熟的香根草束掰开制备裸根苗.....	9
3.2 利用植物母体的某些部分繁育种苗.....	9
3.2.1 制备香根草插条.....	10
3.2.2 制备水葫芦溶液.....	11
3.2.3 处理与栽植.....	11
3.2.4 使用裸根苗与插条的优缺点.....	12
3.3 芽育法或离体繁殖法.....	12
3.4 组织培养.....	12
4 移植材料的制备.....	13

4.1 营养袋或营养钵.....	13
4.2 栽植条带.....	13
4.3 使用营养袋或栽植条带的优缺点.....	14
5 越南香根草苗圃简介.....	14

第3章 利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施

1 可利用香根草系统来防止或减轻的自然灾害类型.....	15
2 坡地稳定性和稳定坡地的一般原理.....	16
2.1 坡地情况.....	16
2.2 坡地稳定性.....	16
2.2.1 天然山坡地、开挖坡地、公路边坡等.....	16
2.2.2 河岸侵蚀、海岸侵蚀及蓄水设施的不稳定性.....	16
2.2.3 驱动力.....	17
2.2.4 阻力.....	17
2.3 坡地崩塌类型.....	17
2.4 人类对坡地崩塌的影响.....	17
2.5 坡地崩塌防治.....	18
2.5.1 鉴别.....	18
2.5.2 预防.....	18
2.5.3 矫正.....	18
2.6 利用植被稳定坡地.....	19
2.6.1 有关植被措施对坡地的影响以及栽植植被的限制条件.....	20
2.6.2 越南利用植被稳定坡地的情况.....	21
3 利用香根草系统稳定坡地.....	21
3.1 香根草适用于稳定坡地的一些特性.....	21
3.2 香根草适用于防治水灾的一些特性.....	23
3.3 香根草根系的抗拉强度与土壤剪切力.....	23
3.4 水力特性.....	25
3.5 孔隙水压.....	25
3.6 利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施.....	26
3.7 香根草系统的优点与缺点.....	27

3.8 香根草系统与其它技术类型相结合.....	28
3.9 计算机建模.....	28
4 适用的设计和技术.....	28
4.1 忠告.....	28
4.2 种植时间.....	30
4.3 苗圃.....	30
4.4 种植前的准备工作.....	30
4.5 设计规格.....	30
4.5.1 天然山坡地、开挖坡地、公路边坡等.....	30
4.5.2 河岸、海岸侵蚀以及不稳定的蓄水设施.....	31
4.6 种植规格.....	31
4.7 维护.....	32
5 越南利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施的情况.....	33
5.1 香根草系统在越南中部沙丘保护中的应用.....	33
5.2 香根草系统在河岸侵蚀防治中的应用.....	36
5.2.1 香根草系统在越南中部河岸侵蚀防治中的应用.....	36
5.2.2 香根草系统在越南广义省河岸保护中的应用试验与推广.....	36
5.2.3 香根草系统在湄公河三角洲河岸侵蚀防治中的应用.....	38
5.3 香根草系统在越南海岸侵蚀防治中的应用.....	39
5.4 香根草系统在越南公路边坡稳定中的应用.....	40
6 结论.....	42

第 4 章 利用香根草系统预防及处理水体和土地污染

1 引言.....	43
2 香根草系统如何发挥作用.....	43
3 香根草适用于环境保护的特性.....	43
3.1 形态特性.....	44
3.2 生理特性.....	44
4 水污染的防治与处理.....	45
4.1 减少废水量.....	45
4.1.1 化粪池污水处置.....	45

4.1.2 垃圾填埋场渗出液处置.....	45
4.1.3 工业废水处置.....	46
4.2 改善废水水质.....	46
4.2.1 在农田里拦截碎屑物质、泥沙和农业化学物质.....	46
4.2.2 对污染物和重金属的吸收与耐性.....	47
4.2.3 湿地.....	48
4.2.4 工业废水的计算机建模.....	50
4.2.5 家庭废水的计算机建模.....	50
4.2.6 将来发展趋势.....	50
5 污染土地处理.....	51
5.1 对逆境的耐受性.....	51
5.1.1 对强酸、Al 和 Mn 毒的耐性.....	51
5.1.2 对土壤高盐度和高碱度的耐性.....	52
5.1.3 重金属在香根草体内的分布.....	52
5.1.4 对重金属的耐性.....	53
5.2 采矿迹地的改良和植物修复.....	53

第 5 章 农田侵蚀治理及香根草的其它用途

1 引言.....	54
2 进行水土保持, 保证农业生产可持续发展.....	54
2.1 水土保持原理.....	54
2.2 适用于水土保持的香根草特性.....	54
2.3 等高埂和梯地系统与香根草流通系统之对比.....	55
2.4 在冲积平原的应用.....	57
2.5 在坡地的应用.....	57
2.6 设计与推广: 农民的想法.....	61
3 农田应用的其它主要方面.....	62
3.1 作物保护: 玉米地和稻田的螟虫防治.....	62
3.2 牲畜饲料.....	63
3.3 幕盖材料: 防治杂草及保持土壤水分.....	64
4 农田改良及保护洪灾灾民社区.....	65

4.1 沙丘固定.....	65
4.2 提高半干旱地区沙质和盐渍碱土的生产力.....	67
4.3 强酸性硫酸盐土的侵蚀防治.....	67
4.4 保护洪灾灾民社区和聚居点.....	69
4.5 农场基本设施的保护.....	69
5 其它用途.....	70
5.1 制作手工艺品.....	70
5.2 盖房顶材料.....	71
5.3 制作泥砖.....	71
5.4 制作绳索.....	72
5.5 制作装饰品.....	72
5.6 提炼香根草油,用作药品和香料.....	72

第 6 章 香根草技术在中国的发展概况

1 香根草在中国的自然分布.....	75
1.1 采自海南岛的香根草标本及海南岛的野生香根草状况.....	75
1.2 广东的野生香根草状况.....	75
2 早年的利用与研究情况.....	77
3 香根草技术用于水土保持与环境治理.....	78
3.1 早期发展阶段.....	78
3.2 公路与铁路护坡.....	79
3.2.1 公路护坡.....	79
3.2.2 铁路护坡.....	82
3.3 垃圾场的植被恢复与改造.....	82
3.3.1 最早的复垦工程.....	82
3.3.2 效益分析.....	83
3.4 金属矿山的生态恢复.....	84
3.5 污染水体的净化.....	86
3.6 生态农业建设.....	87
3.7 采石场的复垦.....	89
3.8 河道与水库边坡的治理.....	90

4 企业在推广香根草技术过程中所起的作用.....	92
4.1 宏日草业集团暨广州宏日园林工程有限公司.....	92
4.2 广东晖华环境科技有限公司.....	93
4.3 广州市香根草业科技有限公司.....	94
4.4 广州市艾棵环保科技有限公司.....	95
4.5 广州沛丰环保科技有限公司.....	96
4.6 千江企业有限公司.....	98
4.7 杭州之江香根草工程有限公司.....	99
5 有关香根草的研究进展.....	100
5.1 生长发育与生理生态特性.....	100
5.2 水土保持、固土护坡与土壤改良特性.....	101
5.3 重金属污染土壤的植物修复与污水净化.....	102
5.4 组织培养与植株再生.....	103
5.5 其他方面的研究进展.....	104
6 成绩、问题与展望.....	106
6.1 取得的成果.....	106
6.2 存在的问题.....	107
6.3 发展展望.....	107
参考文献.....	109
附录一：缩写词与符号解释表.....	116
附录二：全球部分香根草网络组织机构.....	118
附录三：作者简介.....	120
后记.....	122

第 1 章 香根草特性

1 引言

香根草 (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash.) 为禾本科香根草属植物。香根草系统 (VS) 则是以香根草的各种不同应用为基础构建的。1980 年代中期, 世界银行首先将 VS 引入印度的水土保持项目中。目前, VS 在水土保持中的应用依然在农田管理上发挥重要作用。然而, 过去 20 年对香根草所做的研究和发展工作清楚地表明, 由于香根草具有非凡的特性, VS 可以作为一种生物工程技术, 应用在陡坡稳固、废水处理、污染土壤和水体的植物修复以及其它环境保护方面。

VS 有何用处, 为什么会有这些用处? VS 是一种简单易行、实用性强、成本低廉、维护简易却非常有效的手段。它可以应用在水土保持、泥沙流失控制、坡地稳定与改良以及植物修复等方面。由于它是一种植物性技术, 所以也是一种环境友好型技术。

如果将香根草一行行种植, 就会形成香根草绿篱。香根草绿篱能有效地将径流速度降低, 并使之分流。这样一来, 就可以减轻土壤侵蚀, 保持土壤水分, 将流失的泥沙和土壤化学养分就地拦截下来。诚然, 任何植物绿篱都可以发挥类似的作用, 但香根草绿篱比其它系统都略胜一筹。这是因为, 香根草具有许多非凡而独特的形态和生理特性, 从而使之发挥更有效的作用。此外, 香根草的根系下扎非常深, 发育得又浓又密, 可以将土壤紧固, 而且香根草本身也可以在速度甚大的水流冲击下, 依然原地屹立。香根草所具有的这种深根性与生长迅速特性, 使得它具有很强的耐旱性, 因而非常适合用来稳定陡坡。

2 根草的特性

2.1 形态特性

- 香根草没有匍匐茎或根状茎, 却发育了结构庞大、性状优良且生长迅速的根系。在某些情况下, 香根草的根系在种植后的第一年就可以深扎到 3~4 m 深度的地方 (国内测得第一年大多为 2~2.5 m 深—校者注)。深扎的根系使香根草具有极其耐旱的特性, 强大的水流也难以将其冲走。
- 香根草的茎挺拔而直立, 使其在较深的流水中也能挺立 (图 1-1)。
- 香根草具有很强的抗虫害、抗病害及抗火灾的特性。
- 香根草密集种植时, 能形成茂密的绿篱 (图 1-1)。绿篱能有效地滤截泥沙, 并使径流分散。
- 香根草地下根冠能发出新芽, 使其具有抗火灾、抗霜冻、抗交通工具碾压以及耐高强度放牧的特性 (图 1-2)。

- 香根草的茎节一旦被截留下来的泥沙埋没，就会发出新根，于是，香根草就会继续往上生长。若截留下来的泥沙不被搬走的话，淤积物最终会形成梯地。



图 1-1: 香根草的茎干挺拔而直立(左); 密集栽植时形成绿篱(右)



图 1-2: 香根草在森林火灾中景象(左); 火灾后 2 个月返青生长(右)

2.2 生理特性

- 香根草耐受极端的气候条件，也能忍受极端的气候条件变化。例如，它能耐受长期的干旱、洪涝、水淹，也可忍受-14~55℃的极端温度条件（极端气温低于-10℃的情况可能会将香根草冻死—校者注）。
- 在经受干旱、霜冻、盐渍及其他不利条件的影响之后，一旦气候条件变好或者土壤条件有所改善，香根草就能迅速地重新生长。
- 香根草能耐受范围极宽的土壤 pH 条件（3.3~12.5）。在此酸度范围内无需对土壤进行改良，香根草即能生长。
- 香根草能耐受高量的除虫剂和除草剂。
- 香根草能高效吸收溶解的养分，如 N 和 P，也可高效吸收污染水体中的重金属。
- 香根草对生长介质中高含量的酸性物质、碱性物质、盐、Na 和 Mg 具有很高的耐受性（图 1-3, 1-4）。
- 香根草对土壤 Al、Mn 和重金属，如 As、Cd、Cr、Ni、Pb、Hg、Se 和 Zn 等，具有较高的耐受性。



图 1-3: 生长在沿海沙丘上的香根草(左); 生长在盐渍土上的香根草(右)



图 1-4: 生长在强酸性硫酸盐土上的香根草(左); 生长在碱土和钠质碱土上的香根草(右)

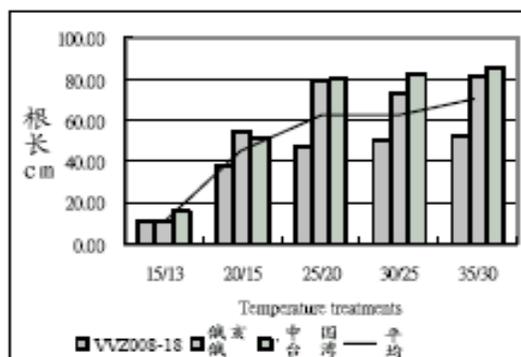
2.3 生态特性

尽管香根草对上述极端气候和土壤条件具有极高的耐受性，但作为一种热带草类，它却不耐阴。

遮光会延缓香根草的生长，长期遮光甚至会终止香根草的生长。因此，只有在不遮光且无树木杂草遮挡的条件下，香根草才会生长良好。在香根草定植阶段，应当对杂草进行控制，以便使香根草顺利生长。在侵蚀地或者不稳定地面上，香根草首先将侵蚀减轻，并将侵蚀地面（特别是陡坡地）稳定下来。之后，由于养分和水分得到保持，地面的微环境有所改善，其他先锋植物或者播种植物能够着生。由于香根草具有这样的特性，可以将其看作是退化土地的保育植物。

2.4 对寒冷天气的耐受性

尽管香根草是一种热带草类，但其在极端酷冷的条件下仍能存活，且生长旺盛。在冰冻条件下，香根草的顶部生长点会萎死，但其地下生长点依然存活。在澳洲，即使在 -14°C 的冰冻条件下，香根草的生长也无大碍（在中国，香根草最好不要种在极端气温低于 -10°C 的地区—校者注）。在美国乔治亚州，香根草能在 -10°C 的土壤温度下存活，但土温低至 -15°C 时，则不能继续活下去了。最近的研究表明， 25°C 是香根草根系生长的最佳温度，而温度降到 13°C 时，香根草根系依然继续生长。在土温范围为 15°C （日）~ 13°C （夜）时，地上部分嫩尖生长甚微，但根的生长速率仍较高。这说明此时的香根草依然未进入休眠状态。按外插法推算，香根草根系在 5°C 左右才进入休眠状态（图 1-5）。



遗传型: VVZ008-18、俄亥俄、中国台湾, 后二者基本上和 Sunshine 相同
 温度处理: 日15□/夜13□
 (王裕文, 私人通讯)

图 1-5: 土壤温度对香根草生长的影响

2.5 适应性范围综述

我们将香根草的适应性总结性地列在表 1-1 之中。

表 1-1: 香根草在澳大利亚和其它国家的适应性范围

条件特性		澳大利亚	其它国家
不利的土壤条件	酸度(pH)	3.3~9.5	4.2~12.5 (高量可溶性铝)
	盐渍度(减产 50%)	17.5 mS/cm	
	盐渍度(存活)	47.5 mS/cm	
	Al 含量(铝饱和度%)	68%~87%	
	Mn 含量	>578 mg/kg	
	碱度	48%	
	Mg 含量	2400 mg/kg	
肥料: 香根草具较多菌根, 所以能在非常贫瘠的土壤上定植		氮与磷(300 kg/ha DAP)	氮与磷, 农家肥
重金属	As	100~250 mg/kg	
	Cd	20 mg/kg	
	Cu	35~50 mg/kg	
	Cr	200~600 mg/kg	
	Ni	50~100 mg/kg	
	Hg	>6 mg/kg	
	Pb	>1500 mg/kg	
	Se	>74 mg/kg	
Zn	>750 mg/kg		
气候	年均雨量	450~4000 mm	250~5000 mm
	霜冻(地温)	-11□	-22□
	热浪	45□	55□
	干旱(无有效降水)	15 个月	
适口性		牛、马、兔、羊、袋鼠等	牛、羊、猪、鱼
营养值		N = 1.1% P = 0.17% K = 2.2%	粗蛋白质 3.3% 粗脂肪 0.4% 粗纤维 7.1%

2.6 遗传特性

目前，以环境保护为目的而被利用的香根草有以下3种。

2.6.1 *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash

该种最近被一些学者重新归类为 *Chrysopogon zizanioides* L. 起源于印度次大陆的香根草有2种：*V. zizanioides* 和 *V. lawsonii*。*V. zizanioides* 有许多不同的品种。一般而言，起源于印度南部的品种都已被人类栽培，且拥有庞大而强有力的根系。这些品种有多倍体倾向，而且表现出很强的不育性，因此被认为不会成为具有蔓延侵略性的杂草。起源于印度北部的品种在恒河和印度 Indus 盆地很常见，它们依然野生，但根系不发达。这些品种为双倍体，被认为会成为杂草，但其蔓延侵略性倒不一定很强。在 VS 中，我们决不推荐使用这些起源于印度北部的品种。我们知道，绝大多数针对香根草诸多应用方式所进行的研究工作以及田间试验中涉及的品种，都是起源于印度南部的栽培种。这些栽培种都与 Monto 和 Sunshine 遗传型紧密相关。DNA 研究证实，目前热带和亚热带国家进行的生物工程和生物修复项目中所用的香根草 *V. zizanioides* 中，约有 60% 都属于 Monto/Sunshine 遗传型。

2.6.2 *Vetiveria nemoralis* A. camus

V. nemoralis A. camus 是东南亚本地香根草种，广泛分布在泰国、老挝和越南的高地上，在柬埔寨和缅甸也有分布。在泰国，这种香根草广泛用来盖房顶。它并非不育型，与香根草 *V. zizanioides* 的主要区别在于：后者更为高大，且其茎干更为厚实，更为挺立，而且后者的根系也更为茂密，下扎更深，其叶片更宽，沿叶片中脉有一区域呈淡绿色（图 1-6~1-9）。

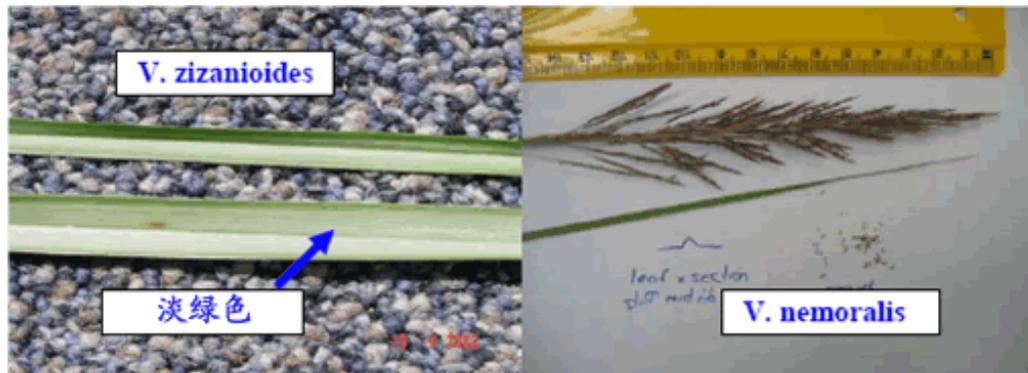


图 1-6：香根草 *V. zizanioides*(左)的叶片；*V. nemoralis* 的叶片(右)



图 1-7：*V. zizanioides* 与 *V. nemoralis* 的根系差异

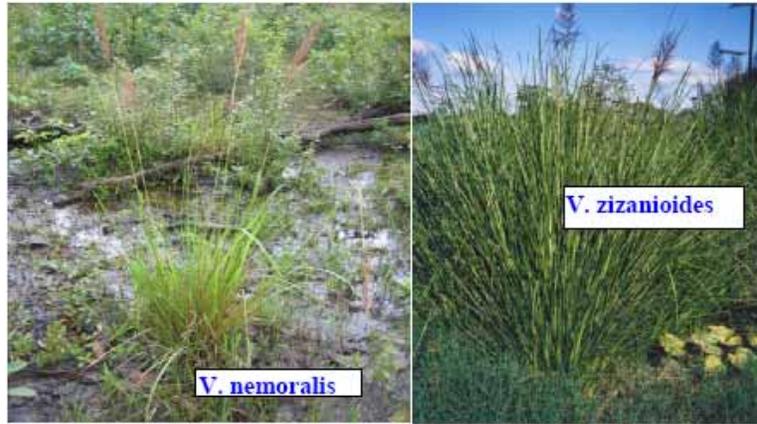


图 1-8: 香根草 *V. nemoralis* 的地上部分(左); *V. zizanioides* 的地上部分(右)



图 1-9: 种在土壤中的香根草根(左与中); 长在水中的香根草根(右)

虽然 *V. nemoralis* 的应用不如 *V. zizanioides* 有效, 但农民依然认可 *V. nemoralis* 在水土保持中的用处。越南中部高地的农民和中部沿海省份 (例如广义省) 的农民就利用它来稳定水稻田田埂 (图 1-10)。



图 1-10: 越南广义省的 *V. nemoralis*(左); 越南中部高地的 *V. nemoralis* (右)

2.6.3 *Vetiveria nigritana* (Benth.) Stapf

这种香根草是非洲南部和西部的土著种，其应用主要局限在非洲大陆上。而且，其种子非常有活力，因此其应用范围应当被限制它的原产地范围内（图 1-11）。



图 1-11: 西非马里的 *V. nigritana*

2.7 成为杂草的可能性

香根草栽培品种中，凡起源于印度南部者，为不具备杂草侵犯性的植物。它们既不会长出生殖根，也不会长出根状茎，其繁殖也是通过用分蘖或分株插栽，即营养繁殖法完成的。任何一种植物，如果被用作生物工程材料，其前提条件是不会成为当地的杂草。就此而言，不育性的香根草栽培种（例如 Monto, Sunshine, Karnataka, Fiji 和 Madupatty 等品种）是很理想的材料。在斐济，引进香根草作覆盖物的历史已有 100 余年，在蔗糖产业中利用香根草进行水土保持的历史也有 50 余年。在这样一个新环境里，香根草并没有半点成为杂草的迹象。如果想消灭香根草也很容易，只要喷洒草甘膦，或者将其从根冠以下清除即行。

3 结论

香根草 *V. nemoralis* 植株矮小，生长缓慢，最重要的是，它的根系非常短小，因而并不适合于用于固土护坡。此外，尚未有研究证明其具有处理废水或进行植物修复的能力。所以，凡是本手册所列举的香根草应用项目，其材料都是针对香根草 *V. zizanioides* 的。

第 2 章 香根草的繁育方法

1 引言

由于香根草主要的应用途径有多种，因而需要大量的种苗。香根草系统（VS）应用成功与否，种植材料的质量高低是重要的影响因素，这就需要建立有能力生产大量高质量且低成本种植材料的苗圃。为防止香根草可能在新环境中成为杂草，在各种应用项目中，仅限于选用不育的香根草种（*V. zizanioides*）。DNA 测试证明，全世界目前所植的不育香根草栽培品种，在遗传学上同美国所用的 Sunshine 栽培品种以及澳大利亚所用的 Monto 栽培品种相似。这 2 个栽培品种均起源于印度南部，且均为不育型，所以须用营养繁殖法等方法繁育种苗。

2 香根草苗圃

繁殖香根草时，需要建立苗圃，由苗圃提供营养繁殖和组织培养的原种材料。按照下列标准规划或建立的香根草苗圃，其生产能力高，管理也方便。

- 土壤类型：应选取沙壤土来建立苗圃。这样，挖掘香根草种苗时比较容易，而且也不易损伤其根冠和根系。粘壤土也可接受，但不要在粘重土壤上建苗圃。
- 地形：建议选用稍微倾斜的坡地，这样在万一发生过度浇灌或过多雨水时，可避免滞水情况发生。平地也可以选用，但应注意防止滞水，因为滞水会影响初植幼苗的生长。不过，香根草成熟后也可在滞水的情况旺盛生长。
- 遮光条件：香根草是 C₄ 植物，喜欢充沛的阳光，遮光会影响香根草生长，所以建议在开旷的地方建立苗圃。但在半遮光的条件下种植香根草也是可以接受的。
- 种植格局：香根草应种植成整齐的长行，这样便于机械收获。
- 收获方法：香根草成熟后，既可用机械方法收获，也可用人工收获。机械收获时，成熟的香根草应从地下 20~25 cm 处连根挖出，注意不要伤害香根草的根颈；所用的机械最好是单铧拨土犁或经特别调整的圆盘犁。
- 灌溉方法：香根草苗栽植后的头几个月，运用高架灌溉方法，可以使灌溉水均匀惠及所有苗株。香根草苗稍为长高或成熟后，宜用漫灌法。
- 操作员工：拥有训练有素的员工是香根草苗圃成功的关键，因此应事先培训操作员工。
- 种植机械：在苗圃大规模种植草苗时，最好能用改良型的草苗种植机或移植机(图 2-1)。
- 其他农用机械：苗床整理、除草、修剪和收获等都需要应用一些基本的农用机械。



图2-1：香根草苗的机械种植(左)与人工种植(右)

3 繁育方法

繁育香根草的常用方法有以下 4 种：

- 将成熟的大丛香根草束掰开成一丛丛，就形成裸根苗。裸根苗可供即时移栽，也可供营养袋培育。
- 应用香根草种苗的各个不同部分（主要是茎节一校者注）繁育香根草。
- 芽育法或离体繁殖法可应用于香根草的大规模繁育。
- 组织培养法。利用植物体的极小部分进行组织培养，亦可大规模繁育香根草。

3.1 将成熟的香根草束掰开制备裸根苗

将香根草种苗束掰开成一丛丛裸根苗的过程应当很细心，每丛裸根苗应有 2~3 株分蘖和一部分根冠。分开后，将每丛种苗去除“尾巴”，保留 20 cm 长（指地上部分保留 20 cm 一校者注）（图 2-2）。种苗掰开与截尾后，应进行各种浸濡处理，例如将种苗蘸上催根激素液、农家肥浆（牛马粪尿）、泥浆，或干脆就在浅水池中浸泡，直到新根长出（图 2-3）。裸根苗应置于阳光充足且湿润的地方，这样可生长得更迅速一些。

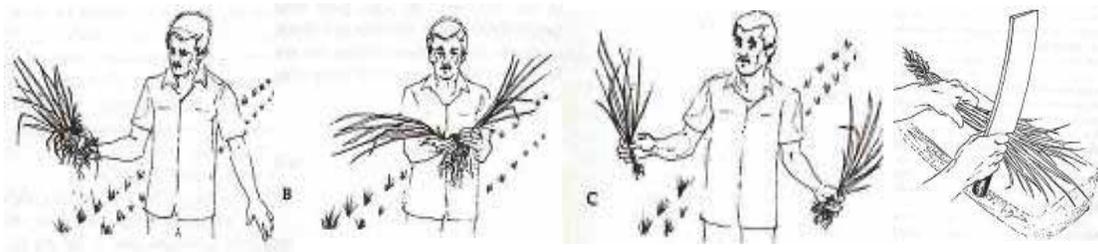


图 2-2：香根草分苗与截尾示意图

3.2 利用植物母体的某些部分繁育种苗

香根草母体中有 3 个部分可以用来繁育。它们是：

- 香根草的分蘖；
- 香根草的根冠，即茎和根之间的坚实部分；
- 香根草的茎秆（茎节）。



图2-3：准备好待栽的裸根苗(左)；裸根苗蘸上泥浆或牛粪尿等农家肥(右)

草秆就是草茎。香根草茎秆坚实（不中空）、挺立、坚硬，拥有明显的、带侧芽的节。在适当的湿度条件下，茎秆可从节上生出新根和新的茎叶。将香根草茎秆切成一段段，置于或插在湿润的沙土里，每个带侧芽的节很快就会长出侧根和新苗。下面这种繁育方法是由胡志明市农林大学的 Le Van Du 先生开发出来的。该方法的 4 个步骤为：

- 将香根草茎秆切成一段段，形成一个节；
- 将 10% 的水葫芦（*Eichhornia crassipes*）水溶液喷洒在茎节上（水葫芦水溶液的制备见本章 3.2.2 节—校者注）；
- 用塑料袋将茎节完全盖住，静置 24 小时；
- 将茎节蘸上泥浆或农家肥，插植在整理好的苗床上。

3.2.1 制备香根草插条

香根草茎节：

选用香根草的老茎，因为老茎比嫩茎有更多的成熟芽和节。将老茎在节下 1~2 cm 处切成长 3~5 cm 的一段段（每段保留 6~8 cm 长度的可能会更好一些—校者注），并将其老叶皮剥去。在插植一周左右后，新的茎叶就会生长出来。

香根草分蘖：

- 选用成熟的香根草苗，其植株最少拥有 3~4 片发育完好的叶片；
- 将香根草苗束小心掰开，保证每丛都带有根基和根系（图 2-4）。

香根草根冠：

香根草根冠是成熟香根草的根基，新苗就是从根基上长出来的。使用时，仅能选用成熟根冠的顶部（图 2-5）。

（实际上，香根草的营养繁殖主要还是依靠分蘖产生新的幼苗。用茎节或其他部位繁殖的效果都不是很理想，除非使用一些特殊的药剂，这样又会明显增加繁殖成本—校者注。）



图 2-4：香根草老的分蘖苗(左)和嫩的分蘖苗(右)



图 2-5：香根草根冠(左)；带节的香根草茎秆(右)

3.2.2 制备水葫芦溶液

水葫芦水溶液中，含有许多激素和生长调节剂，其中包括赤霉素和许多吲哚乙酸混合物（IAA）。制备水葫芦溶液的方法如下：

- 从湖塘或河沟中捞取水葫芦；
- 将捞取的水葫芦置于 20 L 的塑料袋中，将袋口扎紧；
- 将装有水葫芦的口袋静置约 1 个月，直至水葫芦分解腐烂为止；
- 将烂渣的固体部分弃之不用，仅取用液体部分；
- 将溶液滤清，置于凉处待用（如上所述，将 10%的水葫芦溶液喷洒在香根草的茎节上）。

3.2.3 处理与栽植

由图 2-6 和 2-7 展示处理与栽植过程。



图 2-6：用 10%水葫芦溶液喷洒香根草插条(左)，再用袋子将插条盖住，放置 24 小时(右)



图 2-7: 将香根草种苗蘸上农家肥(左), 再栽植在整理好的苗床上(右)

3.2.4 使用裸根苗与插条的优缺点

优点:

- 是高效、经济和快捷地制备香根草移植材料的途径;
- 体积小, 运输成本低;
- 易于人工栽植;
- 在面积大的地区, 大量的草苗可用机械栽植。

缺点:

- 易干燥或易受极端温度条件的影响;
- 可在田间就地存放的时间有限;
- 要求在湿润的土壤条件中栽植;
- 最初几周要进行频繁的灌溉;
- 应在条件优越的地点建立苗圃, 以便灌溉。

3.3 芽育法或离体繁殖法

越南芹苣大学的 Le Van Be 博士开发了一种非常简单而又实用的芽育方法 (Lê Vãn Bé *et al.*, 2006)。该方法由 4 个离体繁育阶段组成, 所有阶段均在液态介质中完成。

- 诱导侧芽发育;
- 繁育新苗;
- 促进新苗上的根系发育;
- 在荫棚或玻璃房中促使其成长。

□

3.4 组织培养

香根草种植材料大量培育的另一种方法是组织培养法。组织培养只需利用香根草母株中的某些特殊组织 (如根尖、幼嫩花梗、侧芽组织等) 便可进行。这种方法在园艺上已属常规使用的方法, 程序也比较规范。各实验室使用的组织培养法也许略有不同, 但使用的材料都是极小的一块组织, 使之在无菌环境里和特殊的基质上生长; 之后, 再让所长出的小幼苗在适宜介质中充分发育, 形成草苗。欲知详情, 请参考 Truong (2006)。

4 移植材料的制备

香根草裸根苗以及上述方法制备的草苗成熟到一定程度后，可进一步制作成营养袋、营养钵或者栽植条带等移植材料。这样，在条件比较恶劣的情况下，也可以保证提高移栽成活率。

4.1 营养袋或营养钵

将一半土壤和一半盆栽混合料装入一个个小钵或塑料袋里，然后将香根草苗插植在这些小钵或塑料袋中，放置 3~6 个星期。放置时间长短视温度条件而定，当秧苗最少长出 3 枝嫩苗时，即可供移栽（图 2-8）。



图2-8：香根草裸根苗与营养钵苗(左)；将草苗置入营养袋(中)；制备后待栽的营养袋苗(右)

4.2 栽植条带

栽植条带实际上是从营养袋育苗方法改进而来的。此时不是用一个一个的塑料袋，而是使用特备的长条基质，香根草裸根苗致密地插植在这些长条基质里，这样可方便运输和移植。在条件较差的地方，如陡坡地种植这些条带苗时，可节省劳动力。更重要的是，用这种方法种植的草苗几乎不用淋，且成活率很高，因为苗的根部完整无损（图 2-9）。因此，对于雨水稀少且无水源的地方采种这一方法是非常有效的。



图2-9：置于容器中的栽植条带(左)；将栽植条带从容器取出(中)；待栽的栽植条带(右)

4.3 使用营养袋或栽植条带的优缺点

优点:

- 秧苗壮实，不会因为暴露在不利的高温和湿度条件下而受到影响；
- 移植后，无需频繁的淋水或灌溉；
- 移植后，返青和生长的速度都比裸根苗快；
- 在种植地点可以堆放较长时间；
- 在条件较差或环境恶劣的地方运用此法的效果更佳。

缺点:

- 制作成本较高；
- 制作时间较长，需 4~5 星期或更长时间；
- 运输体积和重量大，运输成本亦较高；
- 运到种植地点后，若不能在一周内定植，则维护成本较高。

5 越南香根草苗圃简介

越南各地都成功建立了香根草苗圃（图2-10, 2-11）。



图2-10：在越南南部的香根草苗圃：芹苴大学(左)；安江省(右)



图2-11：在越南中南部的香根草苗圃：广义省(左)；平和省(右)

第 3 章 利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施

1 可利用香根草系统来防止或减轻的自然灾害类型

除了防治土壤侵蚀之外，香根草系统（VS）也可用来减轻甚至完全消弭许多其它类型的自然灾害的危害。例如，可以用来治理滑坡、泥石流、公路边坡失稳、河岸侵蚀、灌渠侵蚀、海岸线侵蚀、堤坝和土坝边坡侵蚀等。

大雨过后，基质和土壤都处于水分饱和状态，结果导致许多山体产生滑坡或泥石流。例如，1996年在越南奠边省 Muong Lay 区就发生了灾难性的大滑坡、泥石流和突发性洪灾；1999年在海文山口发生了大滑坡，使越南南北交通瘫痪了 2 个多星期，其修复工程花费了 100 多万美元。越南最大的滑坡规模超过 100 万 m³（发生在平定省 Hoai Nhon 区 Thiet Dinh 湖，Tuy An 区的 An Nghiêp 和 An Linh 社区，以及在普晏省等），不但造成了财产损失，也导致了人员伤亡。

在整个越南，河岸冲蚀、海岸线侵蚀和堤坝崩塌屡屡发生。典型的事件有河内 Phu Tho 以及越南中部数省（如承天、广南、广义、平定）的河岸冲蚀；南定省海后区的海岸线侵蚀；湄公河三角洲发生的河岸冲蚀和海岸侵蚀等。这些灾难性事件一般发生在雨季，与洪水及暴风雨相应成灾。可是，某些时候也有例外，即在旱季发生，甚至在河水水位达到最低时发生，正如在广治省 Cam Lo 区 Hau Vien 村所观察到的一样。

在人类活动频繁，人类活动起决定性作用的地区，滑坡更加频繁，几成家常便饭。越南胡志明高级公路的河静-崑嵩段的长度超过 1000 km，其中有近 200 km（约占 20%）最易发生滑坡或者出现路坡不稳的情况。这是因为人们忽视了该路段地质条件十分不利的事实，而公路的建筑质量也差强人意。最近，Yen Bai, Lao Cai, Bac Kan 等乡镇又发生了滑坡，因为当地政府决定扩建住房，允许开挖山坡，在本来因开路而变陡的边坡上再大挖了一把。

在越南，较强地震也会引起滑坡。例如，1983年在 Tuan Giao 区，2001年在 Dien Bien 镇到 Lai Chau 区一线，就发生了这样的滑坡。

从严格的经济观点看来，对灾难性事件进行善后处理的成本十分昂贵，而且国家对这些善后处理的拨款预算是永远不够的。例如，河流护岸的成本一般为 20 万~30 万美元/km，有时则高达 70 万~100 万美元/km。最昂贵的是湄公河三角洲的 Tan Chau 大坝，成本高达近 700 万美元/km。据估算，广平省河岸保护经费需要 2000 万美元，可是，该省河岸保护的年预算只有区区 30 万美元。海堤的建筑成本通常为 70 万~100 万美元/km，有些工程段更加昂贵，甚至高达 250 万美元/km。2005 年 9 月，第七号风暴冲垮了一段段的海堤。有些海堤管理者认为，即使更坚固一些的海堤（能抵御 9 级的风暴）也抵御不了这样强劲的风暴袭击。于是，政府开始考虑建造更加坚固的海堤（能抵御高达 12 级的风暴），成本将为 700 万~1000 万美元/km。

可是，预算总是有限的。结果只能在局部地方，在非常关键部位建造坚固的结构性保护设施，而永远也不可能在全河段或整条海岸线都建筑这类昂贵的设施。因为预算有限，成堆的问题也就迟迟得不到解决。

上述这些灾难性事件，无不意味着是某种类型的坡地易于崩塌或者易于产生泥石流倾泻，而是由于在重力作用下，大量岩屑和泥土都向坡下移动所致。此类泥石流物质移动过程有些可能非常缓慢，几乎不可觉察，但有些则异常迅速，导致灾难瞬间发生。此类自然灾害事件也许由多种原因造成，我们应当了解这些原因，并掌握一些使坡地稳固的基本原理。这些信息可使我们利用 VS 的生物工程方法来有效减轻灾害影响。

2 坡地稳定性和稳定坡地的一般原理

2.1 坡地情况

有些坡地的坡面曲线缓缓变化，而有些坡地则异常陡峭。经自然侵蚀而形成的坡地形状首先取决于岩石/土壤的类型、土壤的自然性状与气候等。对于一些抗滑动的岩石/土壤来说，特别是在干旱地区，化学风化作用缓慢，而物理风化作用旺盛。这类条件形成的坡地，其顶部呈微曲状或棱角状，悬崖面近乎垂直。岩屑组成的坡面为 30~35°左右的坡度，这是松散物质能基本保持稳定状态的最大坡度。

对于一些不抗滑动的岩石和土壤来说，特别是在湿润地区，风化作用加速，也容易发生侵蚀。这种条件下形成的坡地往往覆盖一层厚厚的土被，其坡顶呈曲型，而坡基呈凹型。

2.2 坡地稳定性

2.2.1 天然山坡地、开挖坡地、公路边坡等

此类坡地的稳定性取决于 2 种力量，即驱动力和阻力的互相作用。驱动力促使物质沿坡面向下运动，而阻力则阻止这种运动。一旦驱动力克服阻力，此类坡地就变得不稳定。

2.2.2 河岸侵蚀、海岸侵蚀及蓄水设施的不稳定性

某些水利工程师认为，河岸、海岸及蓄水建筑物的负荷同其它类型的坡地不一样，所以处理河堤与海岸侵蚀及蓄水设施不稳定性的作法应当与其它类型区分开来。不过，我们的看法是，这些侵蚀和不稳定性也都是受一个相同的原理，即驱动力和阻力的互相作用所制约，一旦驱动力克服阻力，就会发生崩塌。

话虽如此，岸线侵蚀以及蓄水设施不稳定性的情况的确要复杂一些，因为它们是水力同重力互相作用的结果：水力作用于河床、海床及岸趾、坝趾，而重力则就地作用于岸线物质。当岸趾、坝趾以及邻近岸趾、坝趾的河床、海床侵蚀增强时，岸线的高度和角度就随之增大。若增大的岸线高度和角度到达一个临界点，使重力超过了岸线物质的剪切强度，就会使岸线或堤坝等发生崩塌。崩塌之后，塌落的岸线物质就会被水流直接带走。此后，有些物质堆积下来，成为河床、海床物质；有些物质或者分散开来成为冲刷水负荷，或者沿岸线、坝趾堆积下来，成为静止障碍物，或者成为细小而分散的团聚体。

受河流水力控制的岸线退缩过程本质上具有两重性。河流水力对岸线物质进行剪切侵蚀，使岸线退缩逐步增大。此外，由于近岸河床侵蚀，使岸高增大，或者河水对岸线下部的侵蚀使岸身变陡，都会使岸线变得不稳定，并导致岸线物质崩塌。根据岸线组成物质性质和岸体剖面的几何特性，岸线在几种可能机制中的任一种的作用下均会发生崩塌，崩塌的类型有平面的、旋滚的和悬臂的等。非河水控制的岸线退缩机制则包括海浪冲刷以及管涌和淘蚀型崩塌。这些作用还与岸线的层状结构以及不利的地下水条件有关。

2.2.3 驱动力

重力是主要的驱动力，还有坡度、气候、坡地物质、特别是水等，都会连同重力一起，形成联合驱动效果：

- 陡坡上发生的崩塌要比缓坡上发生的频繁得多；
- 水在引起坡地崩塌方面起关键作用，在坡趾部位尤其如此：
 - 水以河流或海浪形式发生作用，侵蚀坡地基部，带走坡地支撑物，增强驱动力。
 - 水也能通过增加坡地负荷来增强驱动力。这就是说，水填充原来排空的坡地物质的孔隙和裂缝，使坡地总质量增加，受到重力的作用也就随之增大。
 - 水的存在形成孔隙水压，使坡地物质的剪切强度降低。更重要的是，孔隙水压的骤然变化（包括陡然提高或降低）在导致坡地崩塌方面起决定性作用。
 - 水同坡地表面岩石和土壤的相互作用（化学风化），会使表面物质慢慢弱化，从而使其剪切强度降低，阻力减少。

2.2.4 阻力

阻力主要来自坡地物质的剪切强度。剪切强度是黏结力（即物质颗粒之间相互结持在一起的能力）和内摩擦力（即物质内颗粒之间的摩擦力）的函数。阻力同驱动力的作用相反。

阻力同驱动力之比为安全因子（SF）。若 $SF > 1$ ，则坡地处于安全状态，否则就不安全。所以，应当使坡地的 SF 值保持在较高的状态，至于应保持多高，则取决于坡地的重要程度以及坡地崩塌后造成的损失大小。通常 SF 为 1.2~1.3 时，是尚可接受的边缘值。

简言之，坡地稳定性是如下因子的函数：岩石/土壤类型及其强度，坡地几何性质（高度、角度），气候，植被和时间。每个因子在控制阻力和驱动力方面都扮演重要的角色。

2.3 坡地崩塌类型

按照物质移动类型以及涉及的物质类型，坡地崩塌可以分为若干类型（表 3-1）。

2.4 人类对坡地崩塌的影响

滑坡是一种自然发生的现象，称作地质侵蚀。无论是否有人在场，滑坡或者坡地崩塌都会照样发生。但是，人类对土地的利用的确对坡地施加了重要影响。自然条件（地震、强风暴等）并非可以人为控制，但人类活动正在改变地形与地貌（例如开挖坡地，破坏森林和城市化等）。不利自然条件同人类活动相结合，就会造成灾难性的坡地崩塌。

表 3-1: 坡地崩塌类型

物质移动类型		涉及的物质	
		岩石	泥土
崩落		岩崩	土崩
滑坡	旋滚式	岩块滚落	土块滚落
	渐进式	岩块滑动	土屑滑动
泥石流	缓慢	岩块蠕动	泥土蠕动 物质饱和或未固结 土流 泥浆流(含水量高达 30%)
	快速		碎屑流 碎屑崩塌
复合型	2 种或多种移动类型的结合		

2.5 坡地崩塌防治

坡地崩塌防治分为 3 个步骤：1) 鉴别可能发生坡地崩塌的地方；2) 预防或阻止坡地崩塌；3) 当发生坡地崩塌后，及时采取措施矫正。要想取得防治坡地崩塌的最佳效果，首先应对坡地地质条件有充分了解。

2.5.1 鉴别

鉴别可能崩塌的坡地应由训练有素的技术人员操作。鉴别时，首先判读航空照片，辨认以往曾经发生过滑坡或崩塌的地点，并进行野外调查，找出可能不稳定的地点。凡是发现如下现象的坡地就可以将其鉴别为可能发生山泥倾泻的地点：陡峭坡地；坡地物质层面向谷底倾斜；泥炭堆地形（生长幼树，具有不规则的团堆状地表）；渗水；以往曾发生过滑坡的地区。掌握这些信息之后，可以编制坡地崩塌风险地图，标出易于发生滑坡的地区。

2.5.2 预防

相对于滑坡和坡地不稳定的事后矫正，滑坡和坡地不稳定的预防在成本上更为划算。预防的方法有多种。例如，调控排水状况，降低坡地高度及使其角度变小，覆盖植被，修建挡土墙，建造石头杆柱以及喷洒混凝土（这种混凝土的颗粒/团聚体较细，可以利用强力水泥泵将其喷洒到坡面上。内含添加混合物，可令其快速干燥）。重要的是，所用的方法应当正确，而且运用得当。这些方法是支持性的，追加性的。其首要目的是确保坡地内部在结构上处于稳定状态（至少在一定时期内如此）。在使用这些方法时，应当充分了解当地的地质条件。

2.5.3 矫正

通过设置排水系统降低水压，可以矫正某些滑坡，防止其进一步滑动。然而，如果沿公路或者其它重要地方的坡地不稳定，就得进行处理。不过处理工作成本通常很高。其实，若处置得当而且及时，在地表或地表下设置排水系统是相当有效的措施。但这一处置法往往被人完全忽略和放弃，所以就得实施更为费力、更为昂贵的处理方法了。

目前，为了稳固坡地，防治河岸侵蚀和海岸侵蚀，最常用的办法就是建造刚性的保护工程设施（例如混凝土或砌石铺面，交叉拱，护坡墙等）。可是，这些方法沿用了数十年，维护费用日增，但坡地照样崩塌，侵蚀甚至更加严重。那么，这些设施的主要弱点是什么呢？

从严格的经济角度来看，这些刚性设施非常昂贵，而政府对此类工作的预算拨款却非常有限。从技术和环境角度分析研究之后，我们提出如下几个值得思考的方面。

1) 石料和混凝土都是从别的地方开采或生产出来的，那么其它地方无疑也会因为开采而产生新的环境问题。

2) 局部性设置的刚性设施并没有将波浪和流水的能量吸收。其主要问题在于这些设施并没有遵照就地解决问题的原则，反而造成巨大的能量梯度，从而造成更大的湍流，结果引起更多的侵蚀。尤其这些设施是局部性设置，所以在某个地方就会突然终断，与天然岸线之间缺乏逐渐而平稳的过渡。因而，这些设施简直就是把侵蚀搬移到别的地方，即搬移到对岸或上下游去。这样一来，与其说这些设施减轻了灾害，还不如说它们对整条河流而言加重了灾害。类似的事例，我们在越南中部好多个省份里都可以找到。

3) 刚性设施将大量石料、沙料和水泥引进河流系统，将大量岸上的泥土堆置和搬移到河里。这些做法最终会使河流淤积，改变河流的动力学性质，提高河床，使洪泛和岸线侵蚀问题变得更加糟糕。这一问题在越南尤为严重，因为这里的工人在将岸线形状改变的同时，常常将余泥直接倾倒入河里。为了稳定不稳的岸线，工人常常将石头直接扔到河里，或将石块置在河床里以使水流明显变浅。若这样修建的堤坝最终一旦崩溃，大量的建筑废渣就散落在河水中，造成河床的人为堆积。

4) 刚性设施并非天然的东西，与侵蚀土壤的柔软地面并不相容。因为侵蚀土壤固结且松土已被冲刷或侵蚀殆尽，水就会从下面掏挖其上面的刚性设施层。这种事例比比皆是。例如，广义省 Thach Nham 堰紧下游右岸的堰面就因而破裂并崩溃。工程师们试图用砌石（有或没有混凝土框架）来代替混凝土板，但仍未解决次表面侵蚀问题。沿海后海堤的事例最为典型。因为这条海堤下面的泥土基础已被冲刷殆尽，整段石砌堤面就自然崩溃了。

5) 刚性设施只能暂时性地减少侵蚀，在发生大滑坡时，崩塌面很深，它无法将坡地稳定下来。

6) 在越南，最常用的稳定公路边坡的方法就是设立混凝土或砌石护坡墙。然而，大部分这类护坡墙都是消极的，简直就是静静地等待坡地崩塌。而一旦坡地崩塌，这类护坡墙也就跟着完蛋。沿胡志明高级公路一线，这样的事例屡见不鲜。这些刚性设施在地震时也会遭到破坏。

此外，有些刚性设施，如石墙坝体固定沙丘等方面的应用并不合适，但人们依然建造这些刚性设施。在越南中部新建公路上，这样的事例依然可以看得到。

2.6 利用植被稳定坡地

利用植被作为生物工程手段来改良土地、防治侵蚀及稳固坡地的做法已经开展了若干世纪。近数十年来，这种做法明显变得更加普遍。究其原因，部分因为有关将植被用于工程设计的知识和信息越来越多，但也归功于这类“软”措施的良好效益/成本比及其环境友好特性。

在前面提到的这些因素影响下，坡地会因下列缘故变得不稳定：1) 表面侵蚀或者“面蚀”；2) 内部结构弱化。面蚀若未受控制，往往会引起细沟侵蚀和冲状侵蚀，久而久之，就会使坡地的稳定性消失。内部结构弱化会引起土体移动或者滑坡。既然面蚀也会导致坡地崩塌，我

们就应当将坡面保护看作与其他结构性设施同等重要。可是，面蚀的严重性一向被人们低估。坡面的保护是一种有效、经济和治本的预防性措施，而其他结构加固措施则是矫正性的。在许多情况下，只要采取了预防性措施，就足以确保坡地的持续稳定性。预防性措施的成本比矫正性措施低得多。

良好的草本植被覆盖可以非常有效地防止面状侵蚀和细沟侵蚀，而深根植物（例如树木和灌丛）则能增强土体的稳定性。可是，新造坡地的表层往往尚未固结，所以尽管受到良好的植被覆盖，仍可能发生细沟侵蚀或冲沟侵蚀。深根植物生长缓慢，而且在如此不利的环境中不易着生。这就是说，利用当地树木和草类来保护地面的传统方法，在很多情况下不能及时确保所需的坡地稳定性。

2.6.1 有关植被措施对坡地的影响以及栽植植被的限制条件

表 3-2 和 3-3 分别显示了植被对坡地稳定的两面影响以及坡度对植被定植的限制性条件。

表 3-2: 植被对坡地稳定性的物理性影响

影响	物理特性
有利影响	
根系加固作用，对土壤的架拱作用，拱壁作用，锚固作用；树木俘获松动的砾石	根系通气性、分布和形态；根系抗拉强度；树木的间距、直径和埋深，种植层次的密度和倾斜度；土壤的剪切强度性质
由于根系的吸收和蒸腾作用，消耗土壤水分，提高土壤的吸持力	土壤含水量；地下水位；孔隙压力/土壤的吸持力
植物叶部拦截降水，并使水分蒸发和蒸腾	在坡地上的净降水
在排灌渠上，提高对水力的抗性	曼宁系数(Manning's coefficient)
不利影响	
根系对近地表岩石和砾石的楔入作用；在台风中被连根拔起	根区的通气性、分布和形态
粗大而沉重的树木加重坡地的负荷(但有时反而是有利影响，依情况而定)	植被的平均重量
风力负荷	设计预计回报周期内的风速；树群成熟树木的平均树高
维持入渗量	土壤中依深度变化的含水量

表 3-3: 坡度对植被定植的限制

坡度 (°)	植被类型	
	草类	灌丛/乔木
0~30	不甚困难；可以运用常规种植技术	不甚困难；可以运用常规种植技术
30~45	用小枝蔓生和草皮铺种方法的困难性增加；可以运用常规种植方法进行水浇播种	种植困难性增加
>45	需考虑运用特殊种植方法	一般应在梯地埂上种植

2.6.2 越南利用植被稳定坡地的情况

在越南，在修建刚性设施的同时，也利用一些软措施，即试图利用植被方法解决问题。防治河岸侵蚀方面，最流行的生物工程方法恐怕就是沿河岸种植竹子。但种植竹子的办法最不好，万一竹丛被洪水冲走，顺流而下，就有可能冲垮桥梁，毁坏它所碰到的任何物件。因为竹子的抗拉强度很高，它自己是不会折断的。而防治海岸侵蚀则用红树林（mangrove）、木麻黄（*Casuarina equisetifolia*）、野菠萝（wild pineapple）和 nipa palm（*Nypa fructicans*）等。但是，在应用这些植物时，也发现一些主要的弱点。例如：

- 竹子生长成丛，不能形成封闭、致密的绿篱。于是，洪水就会集中从竹丛之间的空隙汹涌而过，水流破坏力激增，从而造成更大的侵蚀。
- 竹子头重脚轻，其球状的大丛根系下扎相对较浅（仅深 1~1.5 m），与其高大茂密的竹冠并不平衡。因此，一丛丛竹子给河岸增加不少负荷，对河岸稳定性并无益处。
- 由于竹子具有球状的大丛根系，在许多情况下，会发生下面土壤不稳定的情况，从而可能导致更大的滑坡发生。在越南中部的几个省份就发现过若干因广泛生长竹子林带而引发河岸崩塌的例子。
- 生长红树林的地方，红树林形成非常好的缓冲带，将波力减小，从而减轻了海岸侵蚀。但是，红树林很难定植，而且成长缓慢。因为老鼠喜欢吃红树林的种子和种苗，所以往往是栽种数百顷，只小片成林。这种现象，最近在河静省就有报导。
- 在越南中部的沙丘上，种植了成千上万公顷的木麻黄树，而且历史悠久。野菠萝则沿河岸、溪畔和其它河渠堤埂而植，或在沙丘上沿等高线布种。这些植物能减少风力，治理风沙，却不能固定流沙。因为它们的根系太浅，也没有形成致密的绿篱。在广平省，尽管人们在河渠的沙堤顶部种植木麻黄和野菠萝树，但流沙依然象一只只手掌侵入到农田中。而且这 2 种植物对气候甚为敏感，木麻黄苗木在极冷冬天（低于-15℃）不能存活，而野菠萝在越南北方闷热夏天也会死亡。

幸运的是，香根草生长迅速，在恶劣条件下也能定植，其深扎而庞大的根系在相对较短的时间内就可以产生牢固性网状结构体。因此，只要我们很好地学习下面要叙述的应用技术，并认真地加以遵循的话，香根草就可以成为传统植被的合适替代者。

3 利用香根草系统稳定坡地

3.1 香根草适用于稳定坡地的一些特性

对于香根草的独特属性，在全世界热带与亚热带地区已经进行了研究、测试和开发，香根草作为真正非常有效的生物工程手段已得到确认。

1) 从技术上说，香根草是草本植物。但是，应用在固土护坡方面，香根草表现得有如速生乔木和灌木。若以单位面积计，其根系比树木强大得多，下扎也更深。

2) 香根草的根系下扎极深，体积庞大，结构优良，生长第一年就可以伸展到 2~3 m 深处。在填土坡地上的许多试验显示，香根草根在 12 个月内就可以下扎到 3.6 m 的深度。香根草庞大而茂密的根系将土壤紧固，使香根草本身也极难被连根拔起，从而也极耐干旱。需要说

明的是，香根草一般不会下扎到地下水位之处。因此，在地下水位高的地方，其根系就不会像在较干旱土中下扎那么深。

3) 香根草根系的强度与许多乔木相比毫不逊色，甚至更胜一筹。香根草根系的平均抗拉强度约为 75 Mpa，相当于软钢钢筋的 1/6。在深度为 0.5 m 处，其剪切强度增量为 39%。如此高的抗拉强度在固持陡坡方面发挥着积极作用。

4) 香根草根系能穿透板结的土壤剖面，例如热带地区常见的硬磐和块状粘盘均能穿透，对填土和表土起了良好的锚固作用。

5) 将香根草紧靠在一起成行种植，就会形成致密的绿篱。绿篱降低径流流速，使水流分散，形成非常有效的过滤带，从而将侵蚀控制。而且绿篱降低流速并将其分散，使径流有更多时间渗入地下。

6) 香根草绿篱能形成非常有效的过滤带，有助于使地表径流的湍度降低。香根草茎秆被截留的泥沙埋住时，它的节可以发出新根，这样，香根草又可以从新地面上往上长。于是，在香根草绿篱上方，就会形成一道道梯地，其上的泥沙不会被移开。由于堆积的泥沙很肥沃，而且泥沙中往往含有当地植物的种子，这些种子就很容易发芽萌生。

7) 香根草可以耐受极端的气候和环境变化，可以忍耐长期的干旱、洪灾、水淹，也可以忍受-14~55℃的极端温度范围 (Truong *et al.*, 1996)。在经过干旱、霜冻、盐渍和其它恶劣土壤条件之后，一旦这些恶劣条件消失，香根草很快又可重新生长。

8) 香根草对土壤酸性、盐渍型、碱性和酸性硫酸盐土条件表现了极高的耐受性 (Le and Truong, 2003)。

9) 将香根草在坡地沿等高线成行紧靠在一起种植，固土效果就会很好地发挥出来。等高种植的香根草能稳定天然坡地、开挖形成的坡地以及堆填的坝体等。香根草的根系深扎，活力十足，有助于从结构上来稳定坡地。它的叶茎将地表径流分散，减轻侵蚀并将泥沙截留，有利于当地植物种着生 (图 3-1)。



图 3-1: 香根草地上部分形成一道厚实的生物绿篱带与过滤网(左); 根系形成一道致密的网(右)

Hengchaovanich (1998) 观察到，香根草在坡度为150% (~56°) 的陡坡上也能垂直生长。其生长快速，强度超群，使其胜过其它植物而成为稳定陡坡的优秀候选者。它还具备另一项优点，就是其根系的穿透力胜过许多树木的。其强劲有力而富于进取的根系能穿透板结的土

壤和硬磐，甚至还可穿透某些薄弱的岩石层与沥青混凝土地面。Hengchaovanich将香根草的根系形容为活生生的土钉，或将其比拟为长达2~3 m、通常用在“硬办法”中固坡的销钉。将香根草的上述能力与其在恶劣土壤条件下能快速定植的优点结合起来考虑，可以看出香根草在稳定坡地方面，比其它所有植物都更加合适。

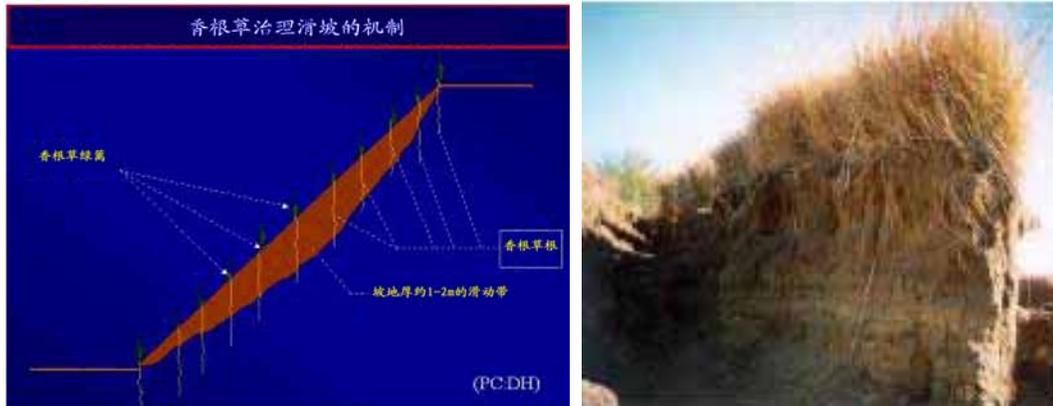


图 3-2: 利用香根草稳定坡地的原理(左); 香根草根系加固大坝, 使之不致被洪水冲垮(右)

3.2 香根草适用于防治水灾的一些特性

将香根草顺着或垂直于波浪或水流方向成行种植，就可以减轻由水流造成的灾害影响，如洪水、河岸或海岸侵蚀、坝体或堤岸失稳等。在此方面，香根草以下的独特性质至为有用：

- 由于根系扎深和强度均超乎寻常，成熟的香根草能抵御高速水流的冲击，不至于被冲走。在澳大利亚昆士兰州北部，香根草在洪水期流速超过 3.5 m/s 的河水中，依然挺立。在昆士兰南部，香根草在洪水期流速高达 5 m/s 的排水渠中，同样屹立不倒。
- 在水层较浅或流速较缓的地方，香根草以其挺拔直立的茎秆形成一道屏障，将流速降低，将泥沙拦截下来。事实上，香根草能在水深达 0.6~0.8 m 处保持直立状态。
- 在水深流速大的地方，香根草的叶子会向下弯垂，这样，在降低流速的同时还可以额外地保护土壤表层。
- 将香根草种植在蓄水设施（如水坝或堤坝）上时，香根草绿篱有助于降低流速，减轻波浪爬高与漫顶的危害，最终防止过多的水流流入这些设施保护的地域。香根草绿篱还有助于减轻常常在水流或波浪退缩时发生的所谓溯源侵蚀的危害。
- 作为一种湿地植物，香根草能抵御较长时间的水淹。中国的研究显示，香根草在清水中淹没超过 2 个月后，仍然存活（实测淹水 4 个月也能存活—校者注）。

3.3 香根草根系的抗拉强度与土壤剪切力

Hengchaovanich 与 Nilaweera (1998) 报导说，香根草根系的抗拉强度随其直径的减少而增大，就是说，强壮细根贡献的阻力比粗根还大。当直径范围为 0.2~2.2 mm 时，香根草根系的抗拉强度范围为 40~180 MPa。在根径范围为 0.7~0.8 mm 时（这是香根草根系最常见的直

径大小)，香根草的平均抗拉强度为约 75 MPa，大概相当于软钢的 1/6。可见，香根草的根强度很大，甚至比许多硬木根的长度还要大。这对加固坡地有很好的效果（图 3-3 与表 3-4）。

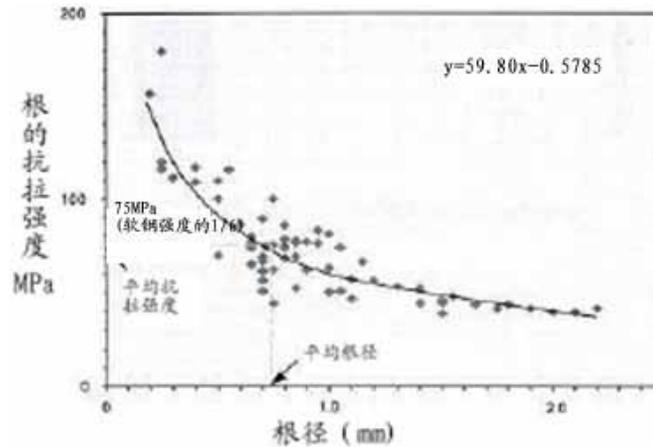


图 3-3: 香根草根系的直径分布与抗拉强度的关系

表 3-4: 各种植物根系的抗拉强度

植物学名	俗名	抗拉强度 (MPa)
<i>Saslix spp</i>	柳树	9~36
<i>Populus spp</i>	杨树	5~38
<i>Alnus spp</i>	桤木	4~74
<i>Pseuditsuga spp</i>	黄杉	19~61
<i>Acer sacharinum</i>	银白槭	15~30
<i>Tsuga heterophylla</i>	异叶铁杉	27
<i>Vaccimum spp</i>	越橘	16
<i>Hordeum vulgare</i>	大麦草	15~31
	一般草类	2~20
	苔藓	2~7 kPa
<i>Vetiveria zuzanioides</i>	香根草	40-120 (平均 75)

Hengchaovanich 与 Nilaweera (1998) 在一项土壤剪切力试验中也发现，种植间距为 15 cm 的 2 年龄香根草绿篱，能将其附近 50 cm 宽 0.25 m 深处的土壤剪切力提高 90%；此后提高幅度虽然随土壤深度加大而逐步降低，但仍能将 0.5 m 土壤深处的剪切力提高 39%，1 m 深处的提高 12.5%。如果按植物根纤维体积计，香根草根系增强土壤剪切力的效果相对更大。香根草根系茂密而庞大，其提高效果为 6~10 kPa/kg 根/m³ 土壤；而其它树木根则仅提高 3.2~3.7 kPa/kg 根/m³ 土壤（图 3-4）。

程洪等人对 Hengchaovanich 与 Nilaweera 有关根系强度的研究加以补充观测（程洪和张新全, 2002; Cheng *et al.*, 2003）。他们对几种草类做进一步测试后发现，虽然香根草的根径为 8 种测试草种中的第二细，但其抗拉强度几乎比这些植物的高 3 倍，平均达 85 Mpa，比 Hengchaovanich 与 Nilaweera 所测到的值还高出 10 Mpa（表 3-5）。

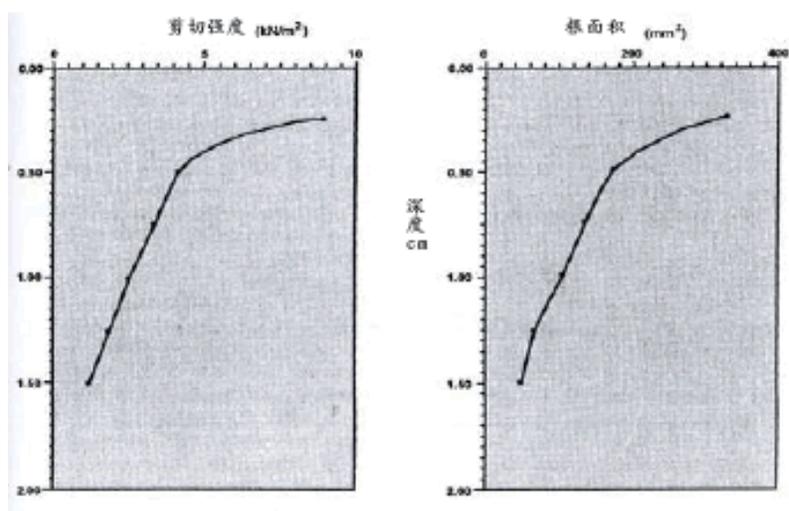


图 3-4: 香根草根剪切强度

表 3-5: 各种草根的直径和抗拉强度

草种	拉丁名	根的平均直径 (mm)	平均抗拉强度 (MPa)
水莎草	<i>Juncus serotinus</i>	0.38±0.43	24.50±4.2
白三叶草	<i>Trifolium repens</i>	0.91±0.11	24.64±3.36
假俭草	<i>Eremochloa ophiuroides</i>	0.66±0.05	27.30±1.74
百喜草	<i>Paspalum notatum</i>	0.73±0.07	19.23±3.59
毛花雀稗	<i>Paspalum dilatatum</i>	0.92±0.28	19.74±3.00
马尼拉草	<i>Zoysia matrella</i>	0.77±0.67	17.55±2.85
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	0.99±0.17	13.45±2.18
香根草	<i>Vetiveria zizanioides</i>	0.66±0.32	85.10±31.2

3.4 水力特性

香根草成行栽种时成为茂密的绿篱。香根草茎秆挺拔，使绿篱高至少为 0.6~0.8 m，形成一道活生生的屏障，降低径流的速度，并使之分流。只要精心筹划，香根草绿篱可以有效地将水流分散，并将径流水引导到稳定区域，或将其引导到适当的排水渠，安全地处理。

澳大利亚南昆士兰大学开展了一项水槽试验，目的是将香根草绿篱与带状耕作设计结合起来，以防治洪灾。试验证实了香根草绿篱在深水流中的良好水力特性（图 3-5）。香根草绿篱成功地降低洪水流速，限制泥沙的移动，作物行间受到的侵蚀非常有限，从而使高粱幼苗完全得到保护，免于洪水之害（Dalton *et al.*, 1996）。

3.5 孔隙水压

植被可以使坡面径流的渗透率提高。但有人担心，太多的水会使土壤孔隙水压提高，反而造成坡地不稳。可是，田间观察表明，坡地的稳定性实际上反而提高了。首先，香根草绿篱沿等高线设置，或者按修正的格局线状设置，可以截留或者分散坡地上的径流水。香根草

庞大的根系以及流通效应可以将多余的水更均匀并逐步地分配，有助于水分在局部地方积聚。其次，下渗水看来是增加了，但草类对土壤水分的消耗强度增高，时间也持续，因此抵消了增加的水分。澳大利亚一项关于作物土壤水分竞争的研究显示，在降水量低的条件下，草类会消耗绿篱附近 1.5 m 范围内的土壤水分。由于该区域水分下渗量增加，使径流减少，侵蚀减轻。从地质技术观点看来，这些都有助于保持坡地的稳定性。在陡坡（30~60°）上，1 m 的行间垂直间距（VI）是很小的。因此，水分消耗能进一步更快地促进坡地的稳定过程（Dalton *et al.*, 1996）。

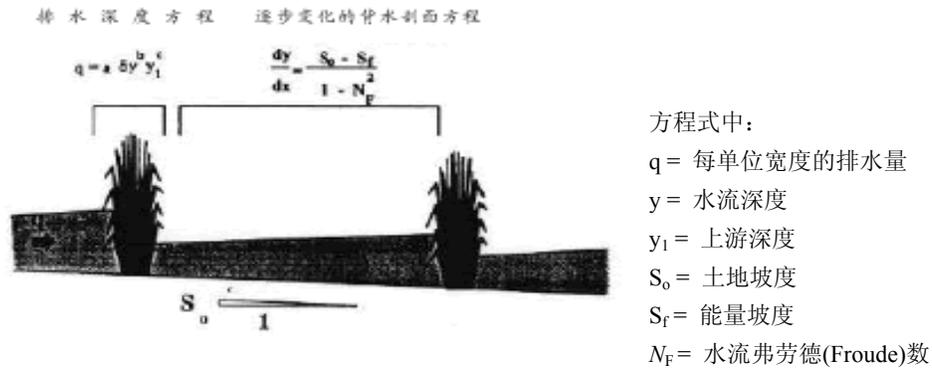


图 3-5：洪水通过香根草绿篱时的水力学模型

3.6 利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施

总的来说，由于其独特的特性，香根草在治理侵蚀方面非常有效。无论治理开挖坡地和填土坡地，或者治理其它与道路建设有关的坡地侵蚀方面，香根草均有用武之地。在防治高度易蚀或易于分散的土壤（例如钠质碱土、碱土、酸性土和酸性硫酸盐土）侵蚀方面，香根草特别有效。

对下列设施进行侵蚀治理与坡地稳定工作，种植香根草能产生很好的效果：

- 公路和铁路沿线的坡地稳定。这对山区农村道路坡地特别有效，因为当地居民缺乏资金来稳定公路边坡，而这些地区还常常建筑公路；
- 堤坝和水坝边坡的稳定，减轻渠道、河岸和海岸的侵蚀，保护硬建筑（如砌石、混凝土护坡墙、石笼等）本身；
- 涵洞进出水口上的坡地（涵洞拱座）；
- 混凝土、石头结构与易侵蚀土壤表面交会处；
- 在涵洞入水口处作为滤带，拦截泥沙；
- 在涵洞出水口处降低流水动能；
- 在冲沟沟头按等高线种植香根草绿篱，用于稳定冲沟沟头侵蚀；
- 在大农场堤坝坝体和沿河岸高水位线边沿种植数行香根草绿篱，防止波浪造成的侵蚀；
- 在林场陡坡入山公路路肩以及砍伐后出现的冲沟（运材道）上种植香根草带，将它们稳定下来。

由于具备独特的特性，香根草在防治由水造成的灾害（例如洪水、海河岸侵蚀、水坝和堤防侵蚀和坡地不稳定）方面亦非常有效。它也能够保护桥梁、涵洞拱座以及混凝土、石头结构与土壤交会处。在保护填充了高度易蚀或易于分散的土壤（如钠质碱土、碱土、酸性土包括酸性硫酸盐土）的坝体方面，香根草也特别有效。

3.7 香根草系统的优点与缺点

优点：

1) 相对于传统工程措施而言，VS 的主要优点在于其低成本和长寿命。例如，在中国，VS 可以节约 80%~90% 的成本 (Xie *et al.*, 1997; Xia *et al.*, 1999)。在澳大利亚，依所用的方法而异，V 与各类传统工程措施相比，节省成本范围为 60%~73% (Bracken and Truong, 2002)。总而言之，其最大成本仅为传统工程措施的 30%。此外，香根草绿篱定植之后，其每年的维护费用还可以显著降低。

2) 正如其它生物工程技术一样，VS 是一种治理侵蚀、稳定坡地的天然方法，对环境友好。这种方法可将传统刚性工程措施（例如混凝土和石头建筑）的“硬外表”形象“软化”。这一点在城市地区或者半城半乡地区尤为重要，因为这些地区的居民对基础设施的景观要求较高。

3) VS 的长期维护成本很低。与传统工程设施日久陈旧相反，绿色技术当植被成熟之后，其性能反而有所改进。在种植的头 2 年，VS 需要进行有计划的维护。一旦定植，理论上是不需要维护的。因此，香根草在边远地区应用特别合适，因为在这些地区要对工程进行维护特别困难，成本也太高。

4) 在贫瘠、高度易蚀和分散的土壤上，应用香根草特别有效。

5) 在劳动力低廉的地区应用 VS 特别合适。

6) 香根草绿篱是一种天然的、软性的生物技术，是刚性或硬性措施的一种生态友好型替代技术。

缺点：

1) 不耐阴是香根草的主要缺点。尤其是在定植阶段，香根草特别不耐遮阴。部分遮光会妨碍香根草的生长，明显遮光则会终止其生长。长远看来，这会降低它与耐阴植物的竞争能力。不过，这种缺点在坡地稳定的初始阶段是无碍的。因为初始阶段需要用先锋植物来改善坡地的微环境，以使坡地有能力接受其它自我入侵或者计划引种的当地乡土植物。这时，香根草可是一种理想的先锋种。

2) 只有完全定植一段时间后，VS 才能产生生态效益。在温暖气候条件下一般为 2~3 个月生效；在较冷气候下需要 4~6 个月。这种由定植到生效的耽搁，可以通过早栽或者在干季即开始栽种加以弥补。

3) 香根草绿篱只有在绿篱封闭后，才能充分发挥其效益。因此，绿篱中如发现缺株和空隙，就得及时补栽。

4) 在极高极陡的坡地上，很难种植和浇灌植物。

5) 在定植阶段，得防止牲畜啃吃香根草（在营养生长期也得防止牲畜啃吃一校者注）。

在考虑上述优缺点后，我们认为香根草作为一种生物工程手段的优点胜过它的缺点，在作为先锋植物时，香根草的优点更加突出。

在稳定坝体方面，来自世界各地的证据都支持应用香根草。在利用香根草来稳定道路边坡方面，澳大利亚、巴西、中美洲、中国、埃塞俄比亚、斐济、印度、意大利、马达加斯加、马来西亚、菲律宾、南非、斯里兰卡、委内瑞拉、越南和西印度群岛都积累了相当多经验。尼泊尔和南非则把香根草与地质工程技术应用项目结合起来实施。

3.8 香根草系统与其它技术类型相结合

无论单独应用或者与其它传统方法结合应用，香根草均行之有效。例如，在河岸或堤防的某一段，砌石或混凝土结构加固其水下部分，而香根草则加固其上部。这种并行应用，可以创造一种稳定和安全的因素（但情况并非总是如此，也并非总有必要）。香根草也可以与竹子（传统上用来保护河岸）种在一起。经验证明，单种竹子有很多缺点，若加上香根草，就可以将缺点加以克服。但正如前面所述，若竹子被洪水冲走的话，会造成严重问题，特别是在河流桥梁不高的地方。

3.9 计算机建模

Prati Amati, Srl (2006) 同米兰大学合作，开发了一种软件。该软件可以确定香根草根系提高绿篱下各种土壤剪切力的总量或百分比。这一软件有助于弄清香根草对稳定陡峭边坡，特别是土质坝体的贡献率。在土壤条件和坡地条件都比较平均的情况下，香根草绿篱将坡地的稳定性提高约 40%。

在运用该软件时，操作人员需输入与具体坡地有关的地质技术参数：

- 土壤类型和坡度；
- 最大含水量；
- 土壤最低结持度。

该程序将会按照坡度情况提供每平方米所需的植株数以及行距数据。例如：

- 一块坡度 30°的坡地，按每米长度种 10 株计，每平方米需种 6 株（丛）香根草，而行距为约 1.7 m；
- 一块坡度 45°的坡地，按每米长度种 10 株计，每平方米需要种 10 株（丛）香根草，而行距为约 1 m。

4 适用的设计和技术

4.1 忠告

VS 是一门新技术。为追求最佳效益，我们就需要学习研究这一新技术，应用这一技术时，方法也应得当。不遵循这些基本原则，结果就会令人失望，甚至得到糟糕的结果。VS 是一门水土保持技术，新近又被称为一种生态工程技术。要有效地应用 VS，就得了解生物学、土壤学、水力学、水文学和地质技术原理等方面的知识。实施较大规模的项目时，还涉及大量的

工程设计和建筑工程。所以，VS 最好是由有经验的专家，而不是由当地居民自行实施。可是，群众参与的原则和以社区为基础的管理也非常重要。所以，应用这一技术时，应当由香根草应用专家、农学家和地质技术工程师合作来设计和实施，并请当地农民加以协助。此外，香根草虽然是草类，但其表现有如树木，这是因为它的根系十分庞大和茂密，而且扎得很深。更令人称奇的是，VS 还能根据不同的应用目的，发挥香根草某一方面的不同特性。例如，它深扎的根系能将土地稳定，其茂密的茎叶能分散水流，拦截泥沙，其对恶劣条件的超常耐受性，使其可以用于治理土壤和水体污染。

VS 也有应用失败的时候，但这并非香根草本身或者建议使用的某项技术出了问题，而是应用不当所致。例如，菲律宾曾利用香根草来稳定新建公路的边坡，但结果十分令人失望，应用失败。事后发现，参与项目的人员，包括设计 VS 的工程师、供应香根草种苗的苗圃人员、工地监督人员以及栽植香根草的工人，以往都没有这方面的工作经验，也没有接受过相关培训。

越南的经验说明，如果使用得当，香根草的应用都是十分成功的；使用不当导致失败，一点也不奇怪。在越南中部高地，香根草用来保护坝体，效果很好。可是，在沿胡志明高级公路大规模种植香根草时，在很高的陡坡上没有开挖等高梯埂就直接栽种，结果功亏一篑。简言之，为了让 VS 应用在基础设施保护等方面获得成功，所有决策者、设计师和工程师都应牢记如下忠告。

技术忠告：

- 为确保项目成功，应由训练有素的人员进行设计和审核。
- 在项目实施初期，在香根草栽种后的头几个月，即香根草正在定植过程中，应确保种植地点处于稳定状态，以免地基崩塌。香根草在成熟后，才能充分发挥效益，在香根草未成熟的过渡期，应避免坡地可能崩塌。
- VS 最好用于坡度不超过 45~50°的土质坡地（措施得当，80°以下的陡坡都可应用——校者注）。
- 香根草在遮阴的地点生长不良，所以不要将其种在桥梁正下方或者其它荫蔽的地点。

对决策、计划和组织工作的忠告：

- 时机：做计划时，应考虑培育移栽材料时的季节和时间。
- 维护和补苗：在栽种早期，香根草有一个未能发挥效益的时段。做计划和预算时应考虑补种部分种苗的可能。
- 采办：项目所有采办事务（包括劳动力、农家肥、种苗和移栽材料、维护合同等）应就地解决，也能够就地解决。在当地雇用劳力，对当地社区也是一种刺激，可鼓励当地居民在香根草未定植成熟前开展保护草苗的工作，维持项目的质量和可持续性。
- 社区参与：当地社区应参与项目的设计、材料采办和维护，参与越多越好。应当同当地社区居民签订合同，以便对苗圃、质量/数量规格以及维护/保护等事务进行管理。
- 计划：在制定计划和做预算时，决策者应有创新观念，随时准备考虑 VS。为此，他们也需要一些激励和鼓励，才能在订计划时考虑采纳这一成本效益好的方法，而不会采用更昂贵的传统方法。

- 统筹综合：制定政策的人员应在基础设施保护的综合计划中，建议将 VS 列为计划的一部分。VS 应用的规模要足够大，以便确保专业人员的实质参与，而且也能使系统能逐步发挥效益。

4.2 种植时间

香根草的种植好坏是工程成功与否及成本高低的关键。譬如，在旱季栽植就需要大量浇灌，成本昂贵。越南中部的经验显示，在条件极端严酷的沙丘上，要使香根草定植，每天得浇灌 1~2 次；若不浇灌，则生长极差。在胡志明高级公路开挖坡地上大规模种植香根草时，由于很难选择最佳种植时机，结果在种植的头几个月就得采用机械浇灌的方法，每天浇水。

香根草一般需要 3~4 个月的时间来定植成熟，在不利条件下则需 5~6 个月。由于香根草一般在草龄为 9~10 个月时能充分发挥效益，所以应在雨季开始时进行大规模种植（这意味着苗圃开发和移栽材料的生产都应与大規模移栽的时间表相配合）。

特别在越南北方，可在冬春之际进行移栽。在越南北方，当气温降到 10℃ 时，香根草就不生长了。可是，香根草可以在这样的寒冷天气中存活，一旦冬雨降临，天气变暖，又可以恢复生长。

在越南中部，气温一般都保持在 15℃ 以上，可以在春天开始时进行大规模种植。此处对苗圃应更精心照料，以保证草苗生长良好和快速繁育。

4.3 苗圃

任何项目能否取得成功，都取决于是否拥有高质量且数量充足的香根草种苗。在第二章，我们详细地讨论了苗圃的建立以及香根草种苗的繁育方法。要获得充足的种苗，并非都得建立大型苗圃。相反，个体农户就可以建立若干小型的苗圃（每个几百平方米），并将其管理好。这些农户同项目签订合同，接受项目的订货，项目按种苗数量付款。

4.4 种植前的准备工作

如果要大规模种植香根草，而这又牵涉到当地社区居民参与的话，那么，大规模种植工作就得按如下步骤操作：

- 步骤 1：专家考察项目地点，现场调查，找出问题，设计技术实施方案；
- 步骤 2：与当地居民商讨解决发现的问题；
- 步骤 3：利用研讨会和培训班的方式介绍新技术；
- 步骤 4：通过建立苗圃、签订购买移栽材料与维护合同等，组织试验性种植；
- 步骤 5：监督实施；
- 步骤 6：通过研讨会、田间交流互访等，讨论试验性成果；
- 步骤 7：组织大规模种植。

4.5 设计规格

4.5.1 天然山坡地、开挖坡地、公路边坡等

稳定天然的山坡地、开挖坡地、公路边坡等坡地，应实施如下规格：

- 坡度不能大于 1:1 (水平:垂直) 或者 45°。如可能的话, 建议坡度再小一些, 例如 1.5:1。在易侵蚀土壤上或高雨量地区实施时, 坡度还要小一些 (如前所述, 只发措施得当, 管理到位, 80°以下的陡坡都可实施一校者注)。
- 香根草应当按等高线横坡种植, VI 为 0.8~1 m (由下坡往上量度)。在高度易侵蚀土壤上种植时, VI 应为 0.8 m; 在比较稳定的坡地, VI 可以提高到 1~1.5 m。
- 第一行应种植在边坡顶部的边缘。凡是高度大于 1.5 m 的所有边坡, 都得种植这么一行。
- 最后一行应种植在边坡底部; 在开挖坡地上, 则沿排水沟边沿种植。
- 在第一行和最后一行之间, 香根草则按上述规格种植。
- 在高度超过 10 m 的坡地上, 建议每隔 5~8 m 的 VI 设置 1~3 m 宽的等高埂或平台。

4.5.2 河岸、海岸侵蚀以及不稳定的蓄水设施

为了减轻洪水灾害, 保护海岸、河岸、堤防和坝体, 建议按如下规格进行设计:

- 岸坡坡度不要大于 1.5:1; 建议为 2.5:1。
- 香根草应沿 2 个方向种植:
 - 在稳定岸线时, 应成行与水流方向 (水平) 平行种植, 大致呈等高线, 行距 0.8~1 m (由下坡往上量度);
 - 为降低水流流速, 应成行与水流方向成直角设置, 在易侵蚀土壤上行距为 2 m, 在稳定土壤上可宽至 4 m。
- 第一水平行应种植在岸线的顶部, 最后一行则种在岸线的低水位线处。由于有些地方的水位随季节变化, 若时机合适, 可以将香根草种在远低于水位线之下的部位。
- 在第一行和最后一行之间, 应沿岸线的长度方向按等高线种植, 行距规格如上所述。
- 由于水位高的缘故, 最底一行的定植要比上面各行来得慢。在这一情形下, 底部各行应在土壤最干爽时种植。有些香根草是为保护抗盐大堤种植的, 因此, 一年中某些时候水会变得特别咸, 这会影响香根草的生长。这种情况下可考虑用当地一些耐盐植物 (包括红树林) 来替代香根草。
- 在各种应用方式中, VS 都可以与其它传统的工程措施 (包括砌石、混凝土砌块、护坡墙) 结合起来运用。例如, 堤防和坝体的下部可以覆盖砌石和土工织物的结合物, 上部则可以由香根草绿篱加以保护。

4.6 种植规格

- 开挖深宽约为 15~20 cm 的垄沟。
- 将根系发育良好的香根草 (每丛 2~3 条) 置于沟行的中间, 侵蚀土壤上株距为 10~12 cm, 正常土壤上的株距为 15 cm。
- 在坡地、公路边坡和填土堤防/坝体上的土壤一般都较为贫瘠, 所以在大规模种植时, 最好用营养袋和营养钵繁苗, 这样可以快速定植。如果加上少量优良的土壤-农家肥混合物浆根则更佳。天然河岸的土壤一般较肥沃, 最初的浇灌也有保证, 所以用一般裸根苗种植就行了。
- 用厚 2~3 cm 的土将苗根盖上, 踩紧。

- 种植后的香根草施以 N 肥和 P 肥（如 DAP）或者 NPK 肥（注：经验说明香根草对 K 肥的响应不是很明显），施量为 100 g/m。若土壤为酸性或者为硫酸盐土，则可施以同量的石灰。
- 如不下雨，种植当天应浇水。
- 为减少香根草定植阶段的杂草生长，可事先施用除草剂。

4.7 维护

浇灌

- 天气干旱时，种植后头 2 周得每天浇水，之后每隔一天浇灌一次。
- 再后，每周浇灌 2 次，直至其完全定植为止。
- 香根草成熟之后，无需灌溉。

补种

- 种植之后一个月内，凡有死亡、缺失或者被水冲走的植株，都得补种。
- 在香根草完全定植之前，继续对生长情况进行监测。

杂草防治

- 种植后头一年，应防止杂草生长，尤其是要防治蔓藤性杂草。
- 不要用草甘膦除草剂，因为香根草对草甘膦很敏感。

施肥

如果土壤贫瘠，在香根草生长过程中应施用 DAP 或 NPK 肥 1~2 次（DAP 肥用作追肥并非很有效，建议用 NPK 复合肥—校者注）。

修剪

种植后 5 个月，应对香根草进行定期修剪。这一点也很重要。

应当将香根草绿篱修剪到离地面 15~20 cm 处（离地面 30 cm 左右可能更好一些—校者注）。这一技术看似简单，但它可以促进香根草新蘖从基部生长，也可以减少老干叶的数量，使之不致对嫩枝蘖产生过分遮阴。

修剪还可以改善绿篱的外观，也可以降低火灾危险。

修剪下来的鲜叶，可以用作牲畜青饲料，制造手工艺品，甚至可以用来盖房顶。请注意，若以防治自然灾害为目的设置的绿篱，则不要过分地用于其他目的。

此后的修剪每年可以进行 2~3 次（在中国一般每年剪割 1~2 次即可—校者注）。在台风季节，应注意保留香根草完整的长叶，台风季节结束后，可立即进行修剪。另外，在台风季节开始前 3 个月修剪也是合适的。

围栅防畜

在香根草的数月定植期内，也许应对绿篱设置围栅，以防止游牧牲口对香根草的侵害或人为破坏。不过，成熟香根草的老茎甚为粗硬，牲畜不再感兴趣。所以，建议在种植后的数月间，在有需要的地方，给香根草绿篱设置围栅，保护草苗。这也许是明智的。

5 越南利用香根草系统防灾减灾及保护基础设施的情况

5.1 香根草系统在越南中部沙丘保护中的应用

在越南中部沿海，有一片面积为 70,000 ha 的辽阔地区为沙丘所覆盖，气候和土壤条件均非常严酷。在风力作用之下，沙丘迁移，往往风沙漫天。在众多永久性或暂时性溪流的作用下，流沙也常常发生。风沙和流沙将大量的沙子从沙丘上推向陆地，往狭窄的沿海平原运送。沿着越南中部海岸线，巨大的“沙舌”日复一日地吞噬着那片平原。政府很早就实施了一项绿化计划，广种木麻黄、野菠萝、桉树与合欢等树种。不过，当这些绿化植物长大成林之后，只能减轻风沙为害而无法消除。直至今日，这个地区的流沙依然如故。（树木不能固定沙丘，尤其是对其滑动面毫无作用。国际粮农组织（FAO）在北非做过此项工作，花费了大量人力财力，但还是失败了。）

2002 年 2 月，在荷兰大使馆小项目计划的财政资助下，在 Elise Pinnars 和 Pham Hong Duc Phuoc 的技术支持下，越南地球科学与矿物资源研究所的 Tran Tan Van 博士在越南中部沿海开展了一项固定沙丘的试验。在农民田地和某林业企业之间，有一座被溪流侵蚀得支离破碎的沙丘，正好充当农民和企业之间的天然界线。侵蚀发生已有年头，也引发了上述 2 家的一些冲突。试验在沙丘上沿等高线成行种植香根草，4 个月之后，香根草长成了封闭的绿篱，固定了沙丘。该林业企业对此印象非常深刻，于是在其它沙丘上也大规模地种上了香根草，甚至用香根草来保护桥台。此时，正逢当地 10 年来最冷的冬天，温度降到 10℃ 以下，农民不得不 2 次重栽他们的水稻和木麻黄，但香根草在如此寒冷的条件下存活下来，当地人对此再度啧啧称奇。2 年之后，当地的植物（主要是木麻黄和野菠萝）也重新生长起来。由于其它树木的遮阴作用，香根草在逐渐消失，但它已完成了自己的历史使命。这一项目再次证明，只要精心管理，香根草能在非常严酷的土壤和气候条件下生长（图 3-6）。



图 3-6：1999 年 Le Thuy (广平) 的流沙使水泵站的地基暴露(左)；
这位女士的房屋地基也被移动的沙丘掏空(右)

在该试验项目成功之后，2003 年初召开了一次研讨会。40 余位来自当地政府部门、非政府组织、越中大学和沿海省份的代表出席会议。借助于这次研讨会，本书部分作者和其他与会者有机会收集和总结地方的实践经验，如香根草的种植时间、浇灌和施肥等。此后，越南

世界宣明会（WVW）在 2003 年决定资助广治省 Vinh Linh 和 Trieu Phong 这 2 个地区开展另一项目，也是应用香根草来固定沙丘（图 3-7~3-11）。



图 3-7：试验地全貌(左)；2002 年 4 月上旬，栽植 1 个月后的香根草(右)



图 3-8：2002 年 7 月，栽植 4 个月后(左)；2002 年 11 月，茂密的香根草绿篱开始形成(右)



图 3-9：香根草苗圃(左)；2002 年 11 月，大规模栽植香根草(右)

据荷兰代尔夫特技术大学 Henk Jan Verhagen 的看法，香根草也可有效地减轻风沙危害。为防止风沙，香根草可以横着风向种植，特别是在沙丘之间的低地，风速增大，更需要这样的种植方式。例如，在中国福建省外海的平潭岛，香根草绿篱成功地降低风速，治理了流沙。



图 3-10: 由香根草保护的一号国道大桥桥台(左); 2004 年 12 月, 香根草被当地植物替代(右)



图 3-11: 2003 年 2 月, 研讨会代表野外考察, 见到香根草在经历了 10 年来最冷的冬天后依然青绿(左); 2003 年 6 月, 广治省农民在 WVV 的资助下, 参观当地的一个苗圃(右)



图3-12: 2002年3月在某养虾塘基旁开展的VS试验

排水渠经此将洪水排到Vinh Dien河去(左); 2002年11月, 大规模香根草栽植与砌石设施结合保护Vinh Dien河的河堤(右)

5.2 香根草系统在河岸侵蚀防治中的应用

5.2.1 香根草系统在越南中部河岸侵蚀防治中的应用

在上述荷兰使馆资助项目的框架内，还利用种植香根草来防止岘港市河岸侵蚀、虾塘堤侵蚀以及公路路基侵蚀（图 3-12~3-14）。2002 年 10 月，当地政府堤坝管理部在几条河流的数段堤岸上大规模种植香根草。此后，政府当局决定资助一个坡地稳定项目，即在岘港沿着通往 Bana 工程的山区公路上种植香根草。该项目显示了政府部门采纳香根草技术的步伐。



图 3-13：2004 年 12 月，经过 2 个洪水季节的洗礼，在岘港地区与砌石设施相结合的香根草旺盛生长(左)；当地农民栽植香根草来保护自己的养虾塘(右)



图 3-14：香根草保护的堤坝，堤坝下部是混凝土坝基，上部则是香根草和砌石的结合结构(左)；顺化“香水河滨”河湾一景，对面是香根草护坡景观(右)

5.2.2 香根草系统在越南广义省河岸保护中的应用试验与推广

作为该试点项目的另一结果，我们还建议在广义省将香根草用在减轻其它自然灾害方面。2003 年 7 月，在 Tran Tan Van 博士的技术支持下，广治省农业推广中心的 Vo Thanh Thuy 和他的同事在 4 个地点种植香根草，这些地点包括几个区的灌溉渠和防海水倒灌堤坝。香根草在所有地点都生长茂盛，尽管尚处幼年阶段，却在当年的大洪水中屹立不倒（图 3-15~3-18）。

在这些试验成功之后，项目决定在其它 3 个区的堤段上大规模种植香根草。这次种植是与砌石工程结合在一起的。设计也做了一些改动，就是使香根草更好地适应当地的条件。他们将红树种和其它耐盐的植物种在最下面一行，使之更好地抵御高盐度，并有效保护坝趾。结果的确令人鼓舞，当地社区也更乐意利用香根草来保护自己的土地了。



图 3-15: 沿 Tra Bong 河堤栽植的香根草(左); 沿该河河口防盐堤两侧栽植的香根草(右)



图 3-16: 防盐堤上游面向河水面用传统砌石和混凝土护坡的堤坝(左); 与其相对的渠岸因表面侵蚀已变得面目全非(右)



图 3-17: Tra Khuc 河在 Binh Thoi 社区的一段, 河岸受到严重侵蚀(左); 当地农民用最传统而原始的沙包保护河堤(右)



图 3-18: 当地民众种植香根草(左); 2005 年 11 月, 洪水季节过后, 河堤巍然不动(右)

5.2.3 香根草系统在湄公河三角洲河岸侵蚀防治中的应用

在 Donner 基金会资助下，并得到 Paul Truong 博士的技术协助，芹苴大学的 Le Viet Dung 及其同事在湄公河三角洲开展了河岸侵蚀治理工作。这里每年洪水期受水淹时间长达 5 个月，干季与洪季水位高差悬殊，达 5 m，洪水期水流迅猛。此外，河岸土壤质地为冲积粉沙土和壤土，雨季极易被侵蚀。近年来，越南经济发展了，河上航行的船只都已机动化，强有力的引擎激起巨浪，加剧河岸侵蚀。尽管如此，香根草已在此屹立，保护了大片宝贵的农田，使之免遭侵蚀（图 3-19~3-20）。



图 3-19：越南安江省用香根草稳固一段河堤(左)，稳固一段天然河岸(右)



图 3-20：沿洪灾安置中心边坡种植的香根草绿篱(左)；红线显示约有 5 m 的范围受香根草保护而未被水毁(右)

安江省实施了一项综合的香根草计划。该省每年都发生洪水，洪水可达 6 m 深。全省渠道系统长达 4932 km，每年都需要维护和修整。其长达 4600 km 的堤坝网络保护着 20.9 万 ha 的农田，使之免遭洪灾。这些堤坝每年的侵蚀量为 375 万 m^3 ，每年需要 130 万美元加以修整。

该地区有 181 个居民聚居区，社区建在河流疏浚堆积物上，也需要防治侵蚀，防备洪水。根据地区的情况和洪涝深度，香根草或者单独，或者与其它植物一起，担负着稳定这一地区的任务并获得成功。结果，现今湄公河三角洲的海岸堤坝系统上，河岸堤防系统上，以及各处河岸和渠道上，都可见一行行的香根草。在 2002~2005 年间，将近使用了 200 万个营养袋香根草苗，种植长度达 61 km。

在 2006~2010 年间，安江省 11 个区有望在 3100 ha 的堤坝上种植 2025 km 长的香根草绿篱。这些地方若不给予保护的话，就会有 37.5 亿 m^3 的土壤被侵蚀掉，而且得从河渠里疏浚 500 万 m^3 的泥沙。若以 2006 年现汇价计算，安江一省在该时期的堤坝维修费用就得超过 1550 万美元。在这一农村地区应用 VS，妇孺制备营养袋，男人种植，能为当地居民带来额外收入。

5.3 香根草系统在越南海岸侵蚀防治中的应用

在 Donner 基金会资助下，并得到 Paul Truong 博士的技术协助，胡志明市农林大学的 Le Van Du 于 2001 年在酸性硫酸盐土上开展工作，利用香根草稳定鹅贡省的渠道和海堤系统。尽管土壤条件恶劣，但仅仅几个月时间，香根草就在堤坝上茁壮生长。目前，香根草在保护着海堤，防止土壤侵蚀，而且促进当地植物生长（图 3-21）。

经 Tran Tan Van 博士的推荐，丹麦红十字会于 2004 年资助了一项利用香根草保护海堤的试点项目。该项目位于南定省的海后区（图 3-22）。项目计划人到现场一看就感到惊奇和兴奋，因为该地早些年就已种植了香根草，香根草正在保护一条数公里长的海堤内侧。尽管设计并未符合常规，但香根草还是管用。更重要的是，这一事实增强了当地社区的信心，让他们知道香根草确实有效。2005 年第七号台风过后，由砌石结构保护的几段海堤被冲垮。这样，香根草的有效性更加被给予肯定，当地农民也要求大规模种植香根草。



图 3-21： 香根草栽植在鹅贡省天然红树林后面的一条酸性硫酸盐土的海堤上(左)；
香根草减轻地表侵蚀，并促进当地草类重新萌生(右)



图 3-22： 越南北部南定省，新修海堤外侧栽植的香根草(左)；
南定堤坝管理厅在海堤内侧栽植的香根草(右)

泰国诗琳通公主殿下是国际香根草网络的赞助人，她对居住在下龙地区台风通道上人们的利益非常关心。他们在那儿居住，其生活状况取决于海堤的稳定性。泰国 Chaipattana 基金会是泰国国王建立的私人机构。2006 年，诗琳通公主资助该基金会开展一个项目，帮助越南稳定南定省的海后区的海堤。2005 年 7 月，该处海堤被第六、七号台风冲垮过。2006 年 7 月，泰国的工程师与香根草专家莅临海后区，与越南农业与农村发展部一道落实项目的实施。

5.4 香根草系统在越南公路边坡稳定中的应用

胡志明市农林大学的 Pham Hong Duc Phuoc 和 Thien Sinh 公司在越南中部利用香根草稳定开挖坡地的试验获得成功之后，2003 年越南运输部批准在数百公里长的高速公路上，以及广宁、岷港和庆和等省的国道及省道上广泛应用香根草来稳定坡地（图 3-23）。



图 3-23：沿胡志明高速公路种植香根草来稳定开挖坡地
边坡仅由香根草来保护(左)；香根草与传统砌石措施相结合(右)

毫无疑问，这是世界上最大的利用 VS 保护基础设施的项目。胡志明高速公路全长超过 3000 km。香根草正在或即将栽植在公路沿线各种不同类型的土壤上，包括北方冷冬气候下的山地粗骨土到南方湿热气候下的酸性硫酸盐土。香根草在这条公路上广泛应用来稳定开挖坡地工程以保护这条公路。例如：

- VS 首先用作坡地表面保护措施，结果大大降低了径流引起的侵蚀。否则这些坡地就会被冲毁，泥沙流到下游去（图 3-24 和 3-25）；
- 香根草防止了浅层崩塌，大大稳定了开挖坡地，从而显著地防止路坡的深层崩塌；
- 在某些的确发生了深层崩塌的地段，香根草依然在发挥很好的作用，它延缓崩塌，减少崩塌量；
- VS 使公路保持了田园风光的美感，使之成为生态友好型公路。

在一条通往胡志明高速公路的公路上，Pham Hong Duc Phuoc 示范了如何应用 VS，显示 VS 的效益和可持续性。他细心地监测着香根草的发展，包括种植 6 个月后的定植率（65%~100%）、株高（95~160 cm）、分蘖率（18~30 个分蘖/丛）以及其根系在边坡上下扎的深度（表 3-6）。



图 3-24: 水土流失与石土倾泻(左); 石土倾泻物向下游远处搬移, 影响了承天省 A Luoi 区一条村落(右)



图 3-25: 植被破坏后, 在广平 Da Deo 山口的开挖坡地连续地发生极严重的崩塌(左); 自从在崩塌坡面种植一行行香根草后, 坡地慢慢变得坚实, 崩塌土体明显减少(右)

表 3-6: Hon Ba 公路边坡上香根草根下扎深度

	边坡类型	边坡部位	根系深度 (cm)			
			6 个月	12 个月	1.5 年	2 年
1	开挖边坡	底部	70	120	120	120
2		中部	72	110	100	145
3		顶部	72	105	105	187
4	填土边坡	底部	82	95	95	180
5		中部	85	115	115	180
6		顶部	68	70	75	130

利用香根草保护胡志明高速公路沿线开挖坡地的成败富有指导意义。那就是:

- 坡地内部首先须稳定。由于香根草在成熟时才发挥效益, 所以在其未成熟前的过渡期坡地有可能崩塌。香根草最快在种植 3~4 个月后才能开始稳定坡地。所以种植时机很重要, 要防止坡地在雨季崩塌;

- 坡度以不超过 45~50°为宜；定期修剪能确保香根草持续生长和分蘖，因而有助于形成茂密而有效的绿篱。

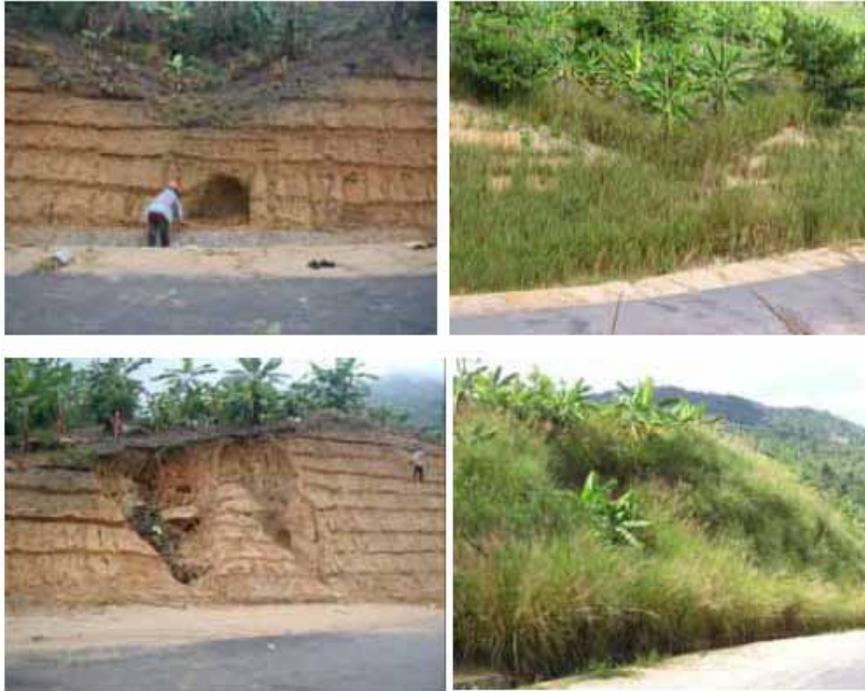


图 3-26: Pham Hong Duc Phuoc 在庆和省一条通往 Hon Ba 的公路的保护项目

稍下几场雨，新修的边坡就发生了严重的侵蚀(左边 2 幅)；同一地点，种植香根草 8 个月后，边坡被稳固，侵蚀完全制止，并防止在雨季发生进一步侵蚀(右边 2 幅)

6 结论

本章介绍了有关 VS 许多应用类型的研究工作与获得的成果。这样，我们就有足够的例证说，香根草有许多优点，VS 的确是一种非常有效、经济、以社区为本、环境友好且具持续性的生物工程技术，尽管它也有一些缺点。VS 可以用来保护基础设施，防灾减灾，且一旦定植就可以持续利用好几十年，但只需要很少的维护。世界上，许多国家和地区应用 VS 都获得成功，如澳大利亚、巴西、中美洲、中国、埃塞俄比亚、印度、意大利、马来西亚、尼泊尔、菲律宾、南非、斯里兰卡、泰国、委内瑞拉和越南，等等。然而，应当强调的是，要想获得成功，最重要最关键的就是选取高质量的种植材料，精心设计，采用正确的施工技术。

第 4 章 利用香根草系统预防及处理水体和土地污染

1 引言

在研究利用香根草的超群属性进行水土保持的过程中，我们发现香根草还具备一些独特的生理和形态特性特别适用于环境保护，尤其是适用于防止和处理水体和土地污染。这类突出的特性包括其对盐、酸、碱、钠质碱以及所有重金属和农业化学物的高度耐受性。此外，还有香根草在吸收和耐受高浓度养分的独特能力，及其在湿地条件下迅猛生长过程中消耗大量水分的能力。利用香根草系统（VS）进行废水处理，是对植物修复技术的创新，其应用潜力巨大。VS 这门技术天然、绿色、简易、实用而且成本低廉。此外，香根草茎叶还可作为副产品制作手工艺品，充当牲畜饲料、盖房顶材料、幕盖物和燃料等。这里列举的还仅仅是部分用途。

VS 高效、简易而且成本低廉，在许多热带和亚热带国家备受欢迎。许多国家利用 VS 来处理家庭废水、市政废水和工业废水，用来进行采矿迹地的植物修复和改良。

2 香根草系统如何发挥作用

VS 通过如下途径来防止和处理水体和土壤污染。

VS防止和处理水体污染：

- 减少废水的数量；
- 改良废水和污染水体的水质。

VS防止和处理土地污染：

- 防治面源污染；
- 对污染土地进行植物修复；
- 拦截径流水体中的侵蚀物质和废物；
- 吸收重金属；
- 处理废水池以及渗出液池中的养分；
- 处理其它污染物。

3 香根草适用于环境保护的特性

我们在第一章已经提到过，香根草有几种特性可以直接运用于废水处理。下面再介绍一下这些形态和生理特性。

3.1 形态特性

- 香根草的根系庞大、生长迅速而下扎很深。在良好的土壤条件下，它在 12 个月内可下扎到 3.6 m 的深度。
- 由于根系深扎，香根草能耐受极度干旱，也使土壤水分渗透顺畅。其根系还能穿透板结土壤（硬磐），也使土壤的深层排水良好。
- 庞大的香根草根系中，多数根非常细，其平均直径为 0.5~1.0 mm（Cheng *et al.*, 2003）。这样的根系形成庞大的根际圈，有利于细菌和真菌的生长和繁殖，从而有利于污染物的吸收，加快土壤中的硝化过程。
- 香根草的苗茎挺拔直立，可以高达 3 m（一般为 1.8~2.5 m 左右的高度—校者注）。若将香根草紧靠种植在一起，就会形成一道活生生的屏障，减缓水流速度，形成有效的生物滤带，拦截径流中各种的泥沙，甚至石块（图 4-1）。



图 4-1: 香根草形态特性

3.2 生理特性

- 对酸、碱、盐渍、钠碱和含 Mg 量高的土壤耐受性强。
- 对含 Al、Mn 以及含重金属（如 As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se, Zn）的水体和土壤的耐受性强（Truong and Baker, 1998）。
- 吸收溶解在污染水体中的 N 和 P 的效率很高（图 4-2）。
- 对土壤中高含量的 N 和 P 养分的耐受性很强（图 4-3）。

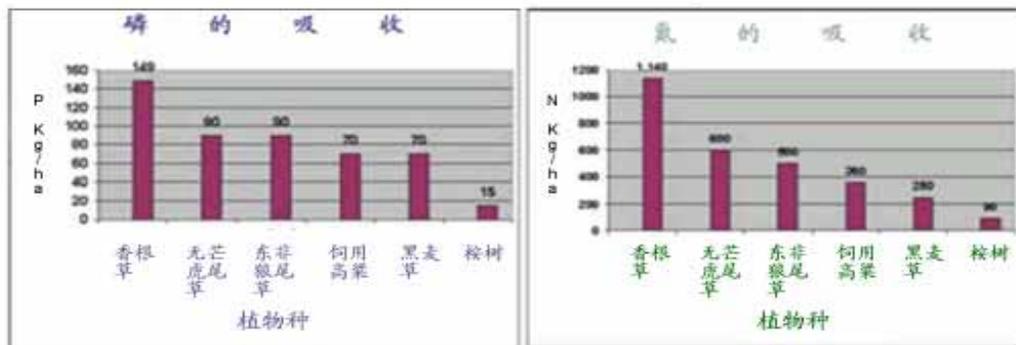


图 4-2: 香根草吸收 N 和 P 的能力与其它植物相比

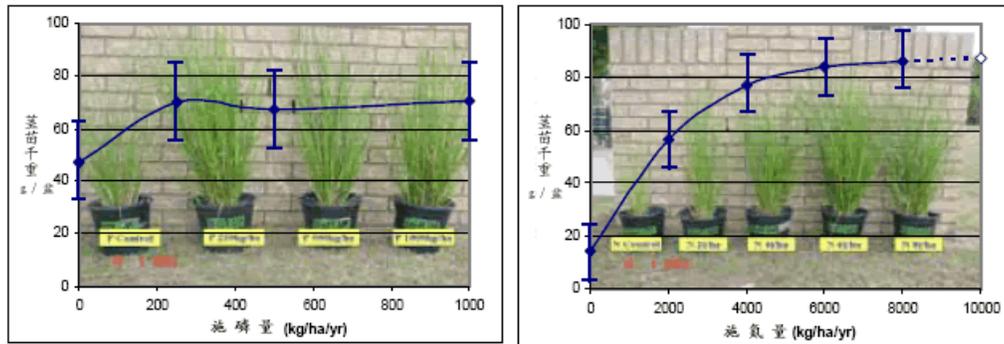


图 4-3: 香根草在不同 N 和 P 施用量的情况下生物量变化

- 对除草剂和杀虫剂的耐受性很强；
- 能破坏与除草剂和杀虫剂结合的有机化合物；
- 遭受干旱、霜冻、火烧、盐渍等逆境条件侵袭之后，一旦逆境消除，能迅速重新生长。

4 水污染的防治与处理

澳大利亚、中国、泰国和其它国家对香根草进行了广泛的相关研究、开发和应用。这些工作肯定了香根草在处理民用和工业污染废水方面非常有效。

4.1 减少废水量

要大规模地完全消除或减少废水，植物方法是目前唯一可行和实用的方法。在澳大利亚，香根草已取代了其它树木和草原性草类，成为处理和处置垃圾堆填地渗出液以及家庭和工业废液的最有效手段。

下面的估算可以对香根草用水率有一个量化概念：在理想的温室条件下，1 kg 香根草地上部分（干重）的用水量为 6.86 L/天。12 周龄香根草处于其生长周期高峰，此时生物量约为 30.7 t/ha，其可能用水量则为 279 kL/ha/天（Truong and Smeal, 2003）。

4.1.1 化粪池污水处置

1996 年，VS 首次在澳大利亚应用于污水处理。此后，在一个公园进行的试验里，在不到 50 m² 的地方种植了大约 100 株香根草。这些香根草将一间厕所排出的污液全部吸干，但其它植物，包括生长快速的热带草类、树木和作物，如甘蔗和香蕉都树做不到这一点（Truong and Hart, 2001）。VS 还可以清除水体中的蓝绿藻（图 4-4）。

4.1.2 垃圾填埋场渗出液处置

垃圾填埋场渗出液的处置在大城市是一个大难题，因为这些渗出液都受到重金属和其它有机、无机污染物的污染。在澳大利亚和中国，人们从填埋场底部收集渗出液，灌溉种植在填埋场顶部土丘和护坝土坡上的香根草，从而较好地解决这一问题。实际上，由于香根草生长旺盛，垃圾填埋场在早季的渗出液还不够用来灌溉香根草。种植 3.5 ha 香根草，在夏天每月可有效地处置 4 ML 的渗出液，在冬天每月则能处置 2 ML（Percy and Truong, 2005）。



污水中还含有高量的硝酸盐 (100 mg/L) 和磷酸盐 (10 mg/L) (左杯); 经过 4 天处理后, VS 将 N 含量降到 6 mg/L(降低 94%), P 降到 1 mg/L(降低 90%)(右杯)

图4-4: 香根草4天内清除蓝绿藻的效果

4.1.3 工业废水处置

在澳大利亚昆士兰州, 有一间大型的食品加工厂和一间大型屠牛场, 每天产生大量工业废水 (各为 1.4 ML/天)。这些废水都通过用来灌溉香根草而得到成功的处置 (Smeal *et al.*, 2003)。

4.2 改善废水水质

面源污染是对世界环境的最大威胁。面源污染问题在工业化国家广泛存在, 在发展中国家更为严重, 因为发展中国家往往缺乏足够的资源来消除这一问题。

一般而言, 植物方法是改善水质的最可行和最有效的方法。

4.2.1 在农田里拦截碎屑物质、泥沙和农业化学物质

在澳大利亚, 科学家在甘蔗和棉花农场开展了一项香根草研究。结果表明, 香根草绿篱能有效拦截颗粒状的养分 (如 P 和 Ca), 除草剂 (如敌草隆、氟乐令、扑草净和伏草隆等) 和杀虫剂 (硫酸盐板硫烷、毒死蜱、对硫磷和溴丙磷等)。若将香根草绿篱与排水渠走向呈横向种植, 就可以将这些养分和化合物就地截留下来 (Truong *et al.*, 2002) (图 4-5)。

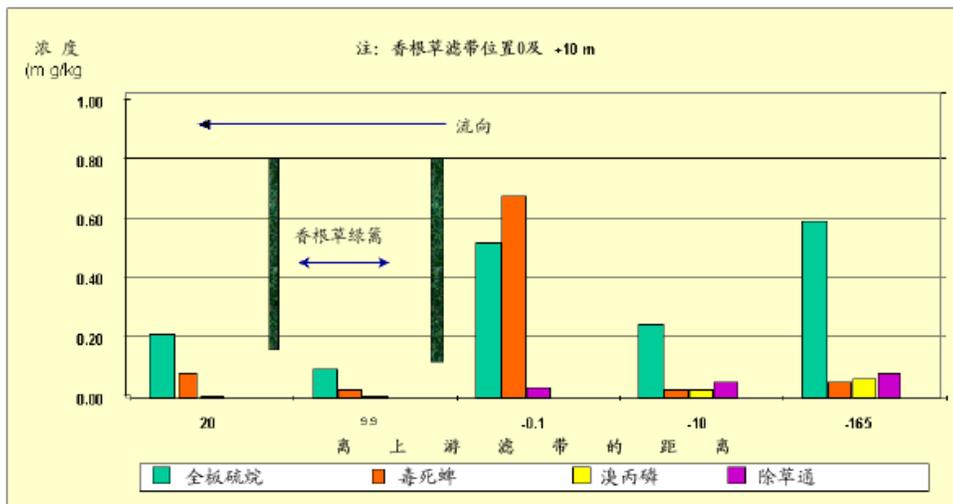


图 4-5: 香根草滤带上下游位置堆积土壤的杀虫剂或除草剂浓度

在泰国碧武里府 Huai Sai 皇家发展研究中心，研究人员的试验表明，沿等高线横坡种植的香根草绿篱形成了一道有生命的大坝。同时，绿篱的根系形成了一道地下屏障，吸收土壤中夹带的杀虫剂残留物，不让它们流进下面的水体。地上部分厚厚的绿篱带也可以将径流中夹带的碎屑物和土壤颗粒拦截下来（Chomchalow, 2006）。

4.2.2 对污染物和重金属的吸收与耐性

香根草处理污水的主要作用是它可以迅速吸收养分和重金属的能力及其对它们的强耐性。尽管这些养分和重金属在香根草体内的含量没有在某些超积累植物体内的那么高，但香根草生长迅速，产量高，干物质产量高达 100 t/ha/年，它从污染土地上带走的养分和重金属量就远比大多数超积累植物带走的大。

在越南南方的一间海鲜加工厂做了一项示范试验，以测算废液在香根草地里应当滞留多长时间才能使其所含的硝酸盐和磷酸盐浓度降到可接受的水平。结果表明，在处理 48 和 72 小时之后，废液中的全 N 含量分别降低了 88%和 91%，全 P 含量分别降低了 80%和 82%。可见，处理 48 和 72 小时，香根草从废液中分别带走的全 N 量和全 P 量并无显著差异（Luu *et al.*, 2006）。此次试验之后，湄公河三角洲一些渔场开始种植香根草，用于稳定塘基，净化鱼塘水体，处理渔场的其它废水（图 4-6）。



图 4-6：湄公河三角洲淡水渔场的侵蚀防治和污水处理

在越南北方，北宁省小造纸厂和北江省小氮肥厂排出的废水都被养分和化学物质高度污染，就像垃圾填埋场的渗出液一般。这些工厂排出的废水直接排入红河三角洲的一条小河中。技术人员在 2 个厂地都种植了香根草，并在 2 个月后旺盛生长。本书写作时，北宁省小造纸厂的香根草总的来说长得不错，但靠近污染水的几个地方，香根草却表现了中毒症状。另一方面，北江省小氮肥厂的香根草生长旺盛，尽管这里污染严重。在此地，生长在半湿地条件下的香根草长得很好，可望能明显地降低当地的污染物水平（图 4-7）。

在澳大利亚，有人利用化粪池排出的污水对 5 行香根草进行潜流灌溉。5 个月后，流过 2 行香根草的渗出液的全 N 浓度降低了 83%，流过 5 行的降低了 99%。同样，全 P 浓度则分别降低了 82%与 85%（Truong and Hart, 2001）（图 4-8）。



图 4-7: 越南北宁的香根草(左); 越南北江的香根草(右)

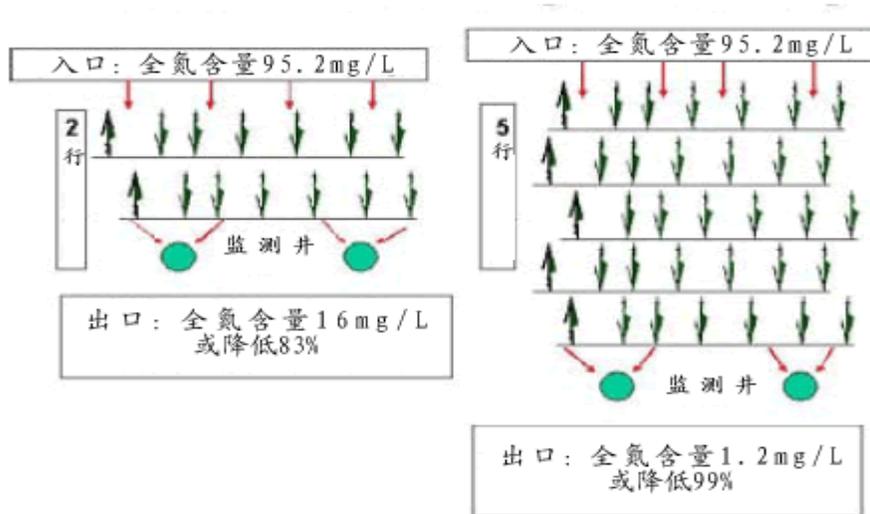


图 4-8: 香根草降低家庭废水中 N 浓度的有效性

在中国, 养猪场排出的养分和重金属是水体污染的主要来源。猪场废水中含有高量的 N 和 P 以及 Cu 和 Zn, 这些元素是作为生长素加入饲料中的。试验结果表明, 香根草具有非常强的净化作用。其对 Cu 和 Zn 的吸收和净化率 >90%; 对 As 和 N >75%; 对 Pb 为 30%~71%, 对 P 在 15%~58% 之间 (Xuhui *et al.*, 2003; Liao *et al.*, 2003)。

4.2.3 湿地

天然和人工湿地均能有效地降低工农业用地径流中的污染物量。利用湿地去除污染物时, 需要应用一套生物过程, 包括微生物转化, 以及一些理化过程, 如吸附、沉淀或沉积过程。

在澳大利亚的湿地条件下, 与其它湿地植物, 如黄花鸢尾 (*Iris pseudacorus*)、香蒲 (*Typha* spp.)、大水茺 (*Schoenoplectus validus*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 相比较, 香根草的用水率最高。在 60 天内, 香根草的用水率为 600 ml/天/盆, 比香蒲高 7.5 倍 (Cull *et al.*, 2002)。在澳大利亚建造了一个湿地用于处理一个小乡镇的废水, 目的是减少或清除该镇每天排入河道的 500 ML 废水 (图 4-9)。令人难以置信的是, 香根草湿地吸收了该镇排出的所有废水 (Ash and Truong, 2003) (表 4-1)。



图 4-9：香根草湿地(左)；用香根草处理澳大利亚某小镇的废水(右)

表 4-1：香根草处理前后废液质量水平

测试指标	单位	新鲜进水	2002/03年结果	2004年结果	排放许可值
pH		7.3~8.0	9.0~10.0	7.6~9.3	6.5~8.5
溶解氧	mg/L	0~2	12.5~20	8.1~9.2	最小 2.0
5 日 BOD	mg/L	130~300	29~70	1~7	最大 20~40
固态悬浮物	mg/L	200~500	45~140	11~16	最大 30~60
TN	mg/L	30~80	13~20	4.1~5.7	最大 6.0
TP	mg/L	10~20	4.6~8.8	1.4~3.3	最大 3.0

中国的养猪量全世界第一。1998 年，仅广东一省就有 1600 多个养猪场，其中 130 余个每年生产 10,000 多头商品猪。大型猪场每天产生 100~150 吨废水，里面混有大量猪粪，致使废水中养分浓度极高。因此，如何处置猪场废水是一个很大的问题。于是，人们考虑利用湿地来处理，认为无论从减少废水的巨大数量或者处理其中所含的大量养分来看，湿地处理都是最有效的途径。为了确定哪一种植物最适合湿地系统，包括香根草在内的数十种最有去污潜力的植物被用来实验。结果显示，排名前三的是香根草、风车草 (*Cyperus alternifolius*) 和高秆莎草 (*Cyperus exaltatus*)。然而，高秆莎草到了秋天就枯萎休眠，待翌年春天才复苏。既然污水处理需常年进行，所以香根草和风车草被认为是最适合处理猪场废水的湿地植物 (Liao, 2000)。越南也开展了应用香根草浮床处理猪场废水的工作 (图 4-10)。



图 4-10：越南某猪场废水塘中的香根草浮床(左)；中国的香根草浮床(右)

过去几年，泰国也开展了利用 VS 在人工湿地中处理废水的研究，工作做得非常扎实。有个试验是利用香根草的 3 个生态型（Monto、Surat Thani 和 Songkhla 3）来处理木薯粉厂的废水。研究者运用了 2 种处理方式：a. 将废水引入香根草湿地，保持 2 周，之后排干；b. 将废水引入香根草湿地，保持 1 周，之后排干，这样连续进行 3 周。在 2 种处理方式中，Monto 生态型表现最佳，其茎叶、根系和生物量生长最迅速，其茎叶和根系吸收的 P、K、Mn、Cu 的量最高（还有根系吸收的 Mg、Ca、Fe，茎叶吸收的 Zn、N 亦为最高）。Surat Thani 生态型的茎叶吸收的 Mg 和根系吸收的 Zn 最高；而 Songkhla 3 的茎叶吸收的 Ca、Fe 和根系吸收的 N 最高（Chomchalow, 2006）。

4.2.4 工业废水的计算机建模

计算机模型日益成为环境系统管理不可或缺的工具，包括综合废水管理计划，如工业废水处置等也离不开计算机建模。澳大利亚昆士兰州环境保护局已经采纳“利用陆地灌溉处置废液模型”（Model for effluent disposal using land irrigation, MEDLI）作为工业废水管理的基础模型。利用 VS 来处置废水的最令人瞩目的最新发展，就是校准 MEDLI 用于进行香根草对养分的吸收和废水灌溉的模拟（Vieritz *et al.*, 2003; Truong *et al.*, 2003a; Wagner *et al.*, 2003; Smeal *et al.*, 2003）。

4.2.5 家庭废水的计算机建模

最近，在澳大利亚的亚热带地区开发了一种计算机模型，用于估算究竟需要栽种多大面积的香根草才能处置每个家庭排放的废水和污水。例如，若以家居每人每天排放污水 120 L 计，要处理一个 6 口之家排放的污水，就得栽种面积为 77 m² 的香根草，其密度为 5 株/m²。

4.2.6 将来发展趋势

全世界都在喊缺水，所以应当将废水视为一种可再生资源，而不是有待处置的难题。目前的趋势是将废水循环再用于工业生产和家庭生活，而不是将其处置放弃。因此，作为废水处理 and 循环的简易、卫生而且成本低廉的方法，VS 用于处理和循环因人类活动产生的污水的潜力是非常巨大的（图 4-11）。

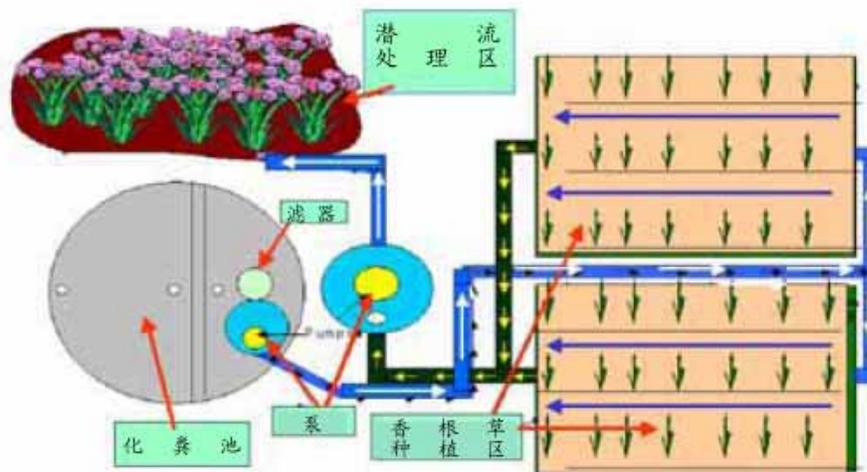


图 4-11：家用处置系统构造

在废水处理方面有一项最令人耳目一新的工作，是将香根草应用在一种以土壤为基质的芦苇床上。在这个新型应用系统里，产出水的数量和质量都可调节，从而使之满足一套标准（图 4-12）。澳大利亚的 GELITA Asia Pacific Africa 公司目前正在开发和测试这套系统。系统的详情可以参阅文献 Smeal *et al.*（2006）。

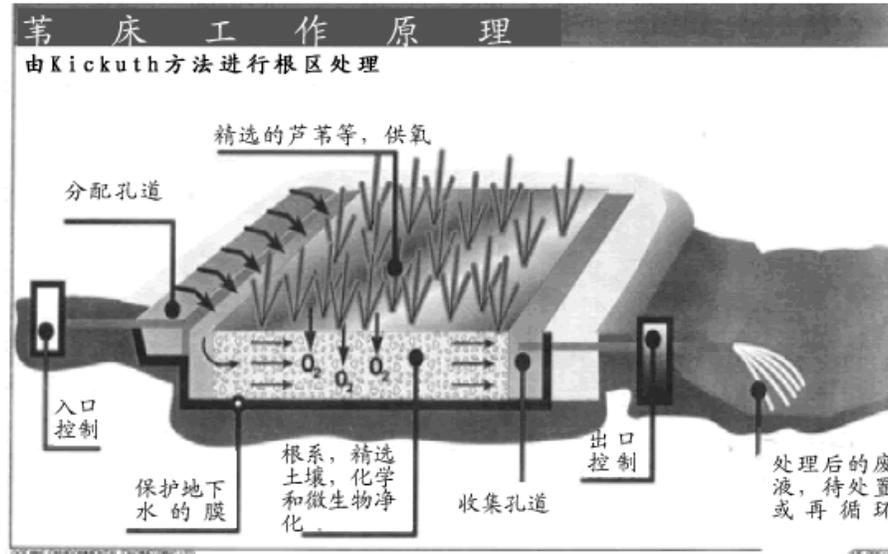


图 4-12: 典型芦苇床的工作原理

5 污染土地处理

过去 15 年里，环境保护领域中最重要进展之一是发现了香根草对恶劣土壤条件和重金属毒性的耐性。这一里程碑式的发现开辟了 VS 应用的新领域，即利用 VS 改良污染甚至有毒的土地。

5.1 对逆境的耐受性

5.1.1 对强酸、Al 和 Mn 毒的耐性

研究表明，即使在极度的酸性条件（如 $\text{pH} = 3.8$ ）或者 Al 饱和度非常高（68%）的土壤条件下，香根草的生长也不会受到影响。田间试验证实，香根草在 $\text{pH} = 3.0$ 以及 Al 饱和度高达 83%~87% 的情况下仍能获得较满意的生长。然而，香根草在铝饱和度 90% 和 $\text{pH} = 2.0$ 的条件下则不能存活，因此其耐性阈值差不多位于 68%~90% 之间。香根草对 Al 的耐性是无与伦比的，因为多数植物在铝饱和度不到 30% 时就会受到严重影响。至于香根草对 Mn 的耐性，在土壤 Mn 含量高达 578 mg/kg，土壤 pH 低至 3.3，植株 Mn 含量高达 890 mg/kg 时，香根草生长完全不受影响。由于香根草对 Al 和 Mn 的耐性如此之高，所以人们就将其成功应用在土壤 pH 3.5 左右、氧化 pH 低至 2.8 的酸性硫酸盐土的侵蚀控制方面（Truong and Baker, 1998）（图 4-13 和 4-14）。

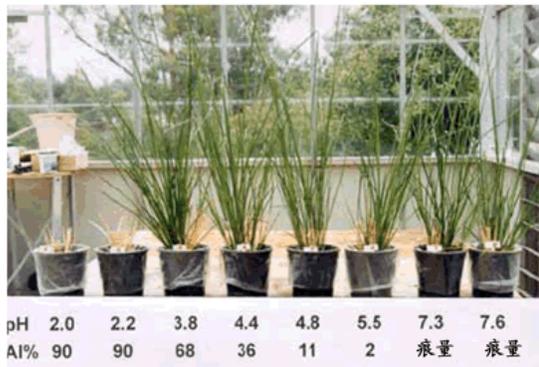


图 4-13: 野外条件下, 香根草在土壤 pH=3.8 以及 Al 饱和度为 68% 时仍旺盛生长

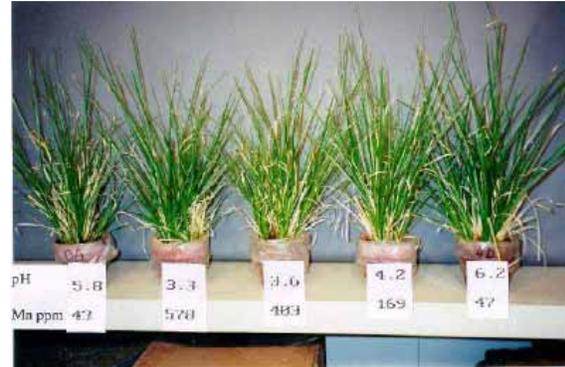


图 4-14: 在土壤 pH=3.3 与 Mn 含量高达 578 mg/kg 时, 香根草的生长不受影响

5.1.2 对土壤高盐度和高碱度的耐性

香根草对盐度耐性的阈值为 $EC_{se} = 8 \text{ dS/m}$ (图 4-15)。同生长在澳大利亚的一些最耐盐的作物和草原植物相比仍略胜一筹, 这些植物包括百慕大草 (*Cynodon dactylon*) (其盐度耐性阈值为 6.9 dS/m)、无芒虎尾草 (*Chloris gayana*) (7.0 dS/m)、麦草 (*Thynopyron elongatum*) (7.5 dS/m)、大麦 (*Hordeum vulgare*) (7.7 dS/m)。当有足够的 N 和 P 供应时, 香根草在一个可交换性 Na 含量高达 44% 的 Na 质斑脱土尾矿上和在一个可交换性 Na 含量高达 33% 的煤矿上都获得令人满意的生长。与 Ca (1200 mg/kg) 存在相比, 当高水平的 Mg (2400 mg/kg) 存在时将进一步加剧这类矿山的碱度 (Truong, 2004)。



图 4-15: 香根草耐受土壤的高盐度

注意左起第 3 盆的坡度相当于海水盐度的一半

5.1.3 重金属在香根草体内的分布

重金属在香根草植株体内的分布可分成 3 种情况:

- Zn 在茎叶和根系之间几乎均匀分布 (40%) ;
- 根吸收的 As、Cd、Cr 和 Hg 只有极少量转移到茎叶中 (1%~5%) ;
- 部分的 Cu、Pb、Ni 和 Se 转移到植株地上部 (16%~33%) (Truong, 2004) 。

5.1.4 对重金属的耐性

香根草对重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Se、Zn 等都有很高的耐性（表 4-2）。

表 4-2: 香根草和其它植物对重金属的耐性阈值比较

重金属	土壤中的阈值 (mg/kg, 速效)		植物中的阈值 (mg/kg)	
	香根草	其它植物	香根草	其它植物
As	100~250	2.0	21~72	1~10
Cd	20~60	1.5	45~48	5~20
Cu	50~100	缺	13~15	15
Cr	200~600	缺	5~18	0.02-0.20
Pb	>1500	缺	>78	缺
Hg	>6	缺	>0.12	缺
Ni	100	7~10	347	10~30
Se	>74	2~14	>11	缺
Zn	>750	缺	880	缺

5.2 采矿迹地的改良和植物修复

香根草的形态和生理特性超群，所以被人们用来改良矿山迹地与废石场，并对尾矿进行植物修复。香根草在这方面的应用至少在以下国家获得成功（图 4-16）。

- 澳大利亚：煤矿、金矿、膨土矿和铝土矿；
- 智利：铜矿；
- 中国：铅锌矿、铝土矿、油页岩矿、稀土矿（Shu, 2003; Xia, 2004）；
- 南非：金矿、钻石矿和铂矿；
- 泰国：铅矿；
- 菲律宾：镍矿（图 4-16）；
- 委内瑞拉：铝土矿（Lisena *et al.*, 2006; Luque *et al.*, 2006）（图 4-16）。



图 4-16: 委内瑞拉 Los Pijiguaos 地区铝土矿用香根草修复后的景观(左)
菲律宾一镍矿被香根草和棕绳网有效保护，避免了流失与污染(右)

第5章 农田侵蚀治理及香根草的其它用途

1 引言

许多国家多年的经验都说明，就算农民采用香根草来保持水土，但这并不一定是他们采用香根草的初衷。例如，在委内瑞拉，农民种植香根草最初只是将香根草用作编制手工艺品的材料。手工艺人喜欢香根草的干叶，因为它们既漂亮又容易编织。在这种情形下，将香根草引入水土保持应用方面就变得更容易了。在喀麦隆，人们最初将香根草当作驱除蛇类的屏障。在其它地方，香根草被当作地界篱笆，因为用树木当界篱仍会有隙可乘。还有一些地方，人们最初将香根草当作粮豆仓的驱虫物，也将其用来防治玉米螟虫（如南非）。

本章我们将向读者介绍农民利用香根草的几种最常见方式。

2 进行水土保持，保证农业生产可持续发展

2.1 水土保持原理

水土保持的目的，是控制或减轻由于水力和风力造成的土壤侵蚀。在水力造成的水土流失方面，由于流过土地表面的水量过大，或者水流速度很大，土壤颗粒被水流带走。风蚀则由地表或裸露地面的高速风力造成。因此，水蚀治理的主要目标，就是保护土壤表面，使雨点不至于将土壤颗粒从地表溅走，或利用植被覆盖降低径流量，并控制或降低流经地表的水流速度。我们可以设计等高或者分流的土埂（或梯地），将径流分流到安全出水口或者水道处，或者分流到设有植物屏障的排水系统中。植物屏障的最好例子就是香根草绿篱，绿篱横坡设置，或者等高设置，从而可以控制径流，将水流分散，或者降低流速，使水流在缓慢通过绿篱时得到过滤。风蚀和水蚀的侵蚀力都与流速（向坡下流去的水流速度或风力）成正比，所以，保护土壤的主要原理就是降低水流或气流的速度。如果设置得当，香根草绿篱可以有效地控制水蚀与风蚀。

保水措施的目标是提高水分向土体的渗透量。如利用植被，尤其是利用植物绿篱，这一目标很容易达到。将香根草绿篱横坡或沿等高线建立，茂密的绿篱就可以形成缓慢的渗透屏障，使水流分散，并降低其流速。这样，土壤就可以有更长的时间来吸收水分，绿篱也可以更多地拦截泥沙。

2.2 适用于水土保持的香根草特性

香根草具有以下对于水土保持特别重要的独特性能：

- 固定土壤的根系：下扎深，穿透力强，须根多；
- 挺拔直立的茎干能形成茂密的绿篱，从而有效延缓和分散水流速度，降低其侵蚀力；

- 能忍耐各种不利的土壤条件和贫瘠土壤，例如能耐受酸性硫酸盐土、碱土、盐渍土和钠质碱土环境；
- 具备抵御长期淹水的能力；
- 适应一系列气候条件：在越南北方较冷山区和中部极度干旱的沿海沙丘上均能生长；
- 易用营养繁殖；
- 不育，尽管开花但不结种子。因为香根草（*V. zizanioides*）没有匍匐茎或根状茎，在哪儿种植就保持在哪儿生长，不会成为杂草。与能产生可育性种子的越南本地种 *V. nemoralis* 不同，*V. zizanioides* 是不育性的，且有庞大的根系。本手册的第 1 章已充分介绍了 2 种香根草的显著区别。
- 香根草的根系垂直生长，很少侧根。这确保香根草与其它经济作物间种时，不会与它们竞争养分和水分。

手册第 1 章已详细介绍了香根草的这些特性。本章将重点介绍香根草的头 2 种特性，即根系固定土壤的作用以及其能形成茂密绿篱的能力，二者在农业方面的作用非常重要。香根草的强大根系在农田土壤侵蚀治理作用方面，是其它植物不可比拟的。在平原土地和冲沟底部，咆哮洪流的速度极具破坏性。在这种情况下，香根草纵深而强大的根系能防止其植株被洪流冲走，能在极其迅猛的激流中屹立不倒（图 5-1）。

除了能减轻坡地的表面侵蚀之外，香根草的强大根系还有助于坡地稳定。如第一章所述，香根草纵深发达的细根可以降低滑坡和坡地崩塌的风险。香根草的茎干直立挺拔，形成茂密的绿篱，可以降低水流速度，争取更多时间让水分向土壤中渗透，如有必要还将多余的径流水分流。这就是香根草用于农业的“流通”侵蚀控制原理，它可应用在高雨量地区的泛滥平地 and 陡坡地上。

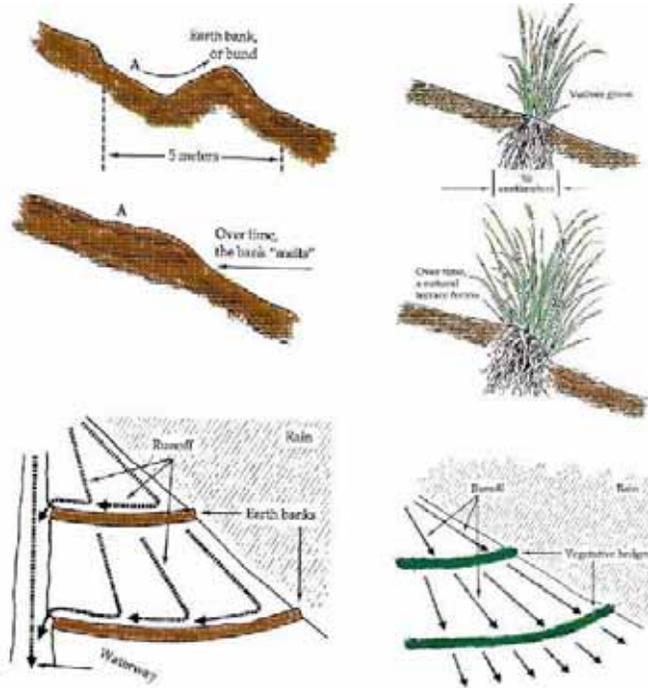


图5-1：澳大利亚某水道上的洪水扫平了乡土草类，但香根草不为所动，其挺拔的茎干降低流速，削弱洪流的侵蚀力

2.3 等高埂和梯地系统与香根草流通系统之对比

世界银行曾进行一次综述评估，对比了不同水土保持系统的有效性和实用性。结果发现，建筑性措施必须受地点限制，要求具备详尽的工程措施和设计，而且所有硬设施均需定期维护。许多事例都说明，建筑性设施的确可以减少土壤流失，但不能显著减少径流，某些情况下对土壤水分状况还有负面作用（Grimshaw, 1988）。相反，将香根草横坡种植或者沿等高线

种植，这一植物保护系统就会在坡地上形成一道保护屏障，减缓径流流速，拦截泥沙。因为该屏障仅仅过滤径流而常常不会将其改道，水流通过绿篱，流速甚低地到达坡底，因而不会造成侵蚀，也不会某一特殊地方滞留。这就是香根草的“流通”系统（Greenfield, 1989）。这一“流通”系统与等高梯地/水道系统截然不同。在梯地/水道系统中，径流水由梯地收集，迅速地由地里改道，从而增加其侵蚀潜力。因为所有的径流水都在水道中汇集，所以很多侵蚀就在农田特别是坡地上发生了，而且这些水还从农田里流走，永远地消失。相对而言，“流通”系统将这些水分保持下来，并防止土壤从水道上流失（图 5-2）（Greenfield, 1989）。



等高埂(左上); 等高埂将径流水改道(左下); 建植香根草绿篱，日久形成等高埂或梯地(右上); 香根草绿篱减缓径流，提高渗透率，使水分留在土壤中(右下)

图5-2: 等高埂和香根草绿篱对拦截地表径流的效果比较

在降水量低的地区，例如越南的中部高地和中部沿海地区，水分保持措施非常重要。为了设置有效的防治侵蚀、控制泥沙的屏障，所用的植物种最好应具备如下特征（Smith and Srivastava, 1989）：

- 形成直立、挺拔、均一而茂密的绿篱，以有效抵御漫过地表的水流；同时具备庞大、深扎的根系，以固定土壤，防止绿篱附近发生沟蚀和冲刷；
- 在水分和养分胁迫下仍能存活，在雨后能迅速恢复生长；
- 造成的作物产量损失应当很小（绿篱植物应该不会成为杂草，不会同作物竞争水分、养分和阳光，不会滋生病虫害）；
- 仅仅需占一窄行的地方就可以发挥作用；
- 为农民提供可带来经济价值的材料。

香根草恰恰具备上述所有特性。它非常奇特，无论在干旱或潮湿的条件下均生长旺盛，在某些极端的土壤条件下亦能生长，在温度变化非常宽的范围内也能存活（Grimshaw, 1988）。

2.4 在冲积平原的应用

对于越南主要河流的所有洪泛平原来说，VS 是一种治理洪水侵蚀的重要工具。它的应用不仅仅局限于越南北部的红河三角洲和南部的湄公河三角洲。在越南中部沿海省份，其应用尤为重要，因为这一带经常发生山洪，造成毁灭性破坏。例如，义安省 Lam 河的洪泛平原就发生了这样的洪水。

在洪泛平原，香根草绿篱可以产生如下功效：

- 降低洪流速度和径流的侵蚀力，使庄稼不被冲走；
- 就地拦截肥沃的冲积土壤，保持平原的肥力；
- 在雨量较低的地方（例如宁顺省），提高土壤水的入渗率。

作物的条带耕作法，类似于香根草绿篱的“流通”系统。但条带耕作法不能降低径流速度，所以不能防止作物被洪水冲走。这种方法还有一点与 VS 不同，它需要实行一套严格的作物轮作制，这样在发生干旱时就不能实施，因为此时作物根本就不能下种。在澳大利亚的 Darling Downs 地区的洪泛平原上，条带耕作法已经被有效地用来减轻洪水对庄稼的危害，并用在易遭深度洪水侵袭的缓坡地带控制侵蚀。在该地区的 Jondaryan 开展了一项大型田间试验，总长超过 3000 m 的 6 行香根草按 90 m 的行距等高种植。这一行行的香根草永久性地保护土地，防御洪水。从现场某个小水流收集到的数据表明，绿篱显著降低径流的深度，相应地也减少流过绿篱的水流的能量。在一块低洼地，仅仅一道绿篱就拦截了 7.25 吨的泥沙。过去几年这里遭遇了几次大洪水，但结果证实，VS 成功地降低洪水速度，限制了土体移动，在庄稼条带里极少发生侵蚀（Truong *et al.*, 1996; Dalton *et al.*, 1996a, 1996b）。该试验显示，VS 是澳大利亚洪泛平原条带耕作法的有力替代技术（图 5-3）。



图 5-3：洪水流经香根草绿篱，肥沃的泥沙被拦截下来(左)；在澳大利亚 Darling Downs 洪泛平原上，受香根草绿篱保护的高粱作物在洪水中安然无恙(右)

2.5 在坡地的应用

在印度一块坡度为 1.7% 的庄稼地上，沿等高线建植的香根草绿篱将径流（按降雨量的百分比计）从 23.3%（对照）降低到 15.5%，将土壤流失从 14.4 t/ha 降低到 3.9 t/ha，而且 4 年间高粱的产量从 2.52 t/ha 提高到 2.88 t/ha（图 5-4）。产量的提高应归功于 VS 对整个地形系列的保护，从而使水土得到就地保持（Truong, 1993）。在国际半干旱热带作物研究所的小块

试验地，与香茅草或石垒埂相比，香根草绿篱在控制径流和土壤流失方面更为有效。在坡度为 2.8% 时，香根草区的径流仅为对照区的 44%，而在坡度为 0.6% 时，仅为对照的 16%。与对照相比，香根草绿篱平均使径流减少 69%，使土壤流失减少 76% (Rao *et al.*, 1992)。



图5-4: 用于保护缓坡地的香根草绿篱

印度农民一直使用香根草篱作地埂，可形成明显的梯地(左)；在埃塞俄比亚的一块玉米地，香根草起到了很好的保护作用(右)

在尼日利亚，研究人员在一块坡度为 6%、坡长为 20 m 的坡地底端部设立香根草条带，作坡地径流试验。试验历经 3 个生长季，测试香根草条带对土水流失量、土壤持水量和作物产量的影响。结果表明，香根草条带使整整 20 m 坡段的土壤及其化学状态均保持稳定。在香根草保护的情况下，豇豆增产 11%~26%，玉米增产约 50%。相形之下，在不设香根草绿篱保护的 20 m 径流区（对照），土壤流失和径流比试验区分别高出 70% 和 130%。香根草条带使土壤持水量依深度不同提高了 1.9%~50.1%。整个对照区侵蚀土壤的养分状况都比香根草区差得多，香根草区的 N 利用率提高了大约 40%。这一试验显示了香根草绿篱在尼日利亚环境中作为水土保持手段的有效性 (Babola *et al.*, 2003)。

在委内瑞拉和印度尼西亚，研究人员在一系列坡地、土壤类型和作物类型上开展了研究，也得到和上面类似的结果。在南非纳塔尔省的陡坡甘蔗地里，香根草绿篱越来越多地取代了等高埂和水道。因为当地农民们认识到，从长远眼光看，VS 是最有效、成本最低的水土保持手段 (Grimshaw, 1993)。在印度，研究人员在 Maheswaran 小流域作了一项研究，分析了工程措施和香根草植物屏障两者的成本效益。结果，由于 VS 高效益与低成本，因此被认为比工程措施有更高的利润，即使在初期也是如此 (Rao, 1993)。

在澳大利亚，过去 20 多年做了大量的研究和开发工作。这些研究肯定了国外有关香根草的发现，尤其是肯定了香根草在水土保持、冲沟稳定、退化地改良以及在水道和低地拦截泥沙的有效性。此外，研究还证明了香根草的其它多功能性：

- 在 Darling Downs 洪泛平原上控制洪水侵蚀；
- 在酸性硫酸盐土上治理侵蚀；
- 在北昆士兰陡坡甘蔗地上取代等高埂。

在越南，大部分有关 VS 在农田应用的经验均通过“木薯项目”获得（这是日本的一个基金项目（1994-2003），旨在加强在亚洲以及在中国、泰国和越南木薯耕作制度的可持续性）。该项目由越南太原农林大学、国立土壤肥力研究所以及越南农业科学研究院等合作实施，是

与 Yen Bai、Phu Tho、Tyen Quang 和太原北部山区的农民以及与承天省山区和西南地区的农民通力合作下完成的（注：木薯（*Manihot esculenta*）是湿润热带地区最重要粮食作物之一，但在发展中国家，如果这种块茎作物单作的话，就会成为最容易引起侵蚀的作物）。因此，促进木薯作物的可持续生产是非常重要的。在上述项目中，农民测试了几种组合：1) 间作（例如与花生等高种植）；2) 引入改良的种植材料（如低分枝的品种以减少雨水的影响），同时结合增施有机肥或化肥；3) 抗侵蚀绿篱，如 VS 的应用就被认为是减少侵蚀最有效的措施之一（参见 CIAT 木薯项目）（图 5-5 和 5-6）。



图5-5: 使水土流失成为一目了然的现场(CIAT木薯项目)



图5-6: Dong Rang木薯地, 农民种植香根草绿篱减轻侵蚀

治理土壤流失的效果:

VS 能减少土壤流失，又能保持农田土壤的肥力，所以农民最终会认识 VS 的重要性。若农田土壤既深厚又肥沃，农民可能尚未体会到土壤保持的价值，因为农民想到的只是工作以及向土地的索取。可是，若坡地耕作比较繁重的地方，农民得向土地施用农家肥或者化学肥料。在此情况下，香根草的积极作用则不但体现在减少土壤侵蚀方面，也会体现在保持土壤肥力和防止土壤表面径流方面（表 5-1）（Truong and Loch, 2004）。在较为潮湿的地区，香根草深扎和庞大的根系还具有另一项优点，就是吸收可溶性养分，使之不会消失在更深的、植物难以吸收到的土层里。香根草收割并用作覆盖物时，这些养分又归还土壤，于是实现养分循环（图 5-7）。

在越南北部山区，人们传统上用狗舌草（*Tephrosia*）和野菠萝来建造绿篱（有时与梯地结合起来），以减少土壤流失。然而，野菠萝的效果很差，因为它的茎干很粗，形成土包造成积水，甚至迫使积水从土包之间的窄隙流走，结果还增加侵蚀。狗舌草定植之后倒是有效，可惜不过两三年就会死亡。所以，在那些坡度不是很陡的地方，香根草绿篱是很受欢迎的替代措施，它可替代费时费工的传统梯田措施（图 5-8）。

表 5-1: VS 对农田土壤流失和径流的影响

国家	土壤流失 (t/ha)			径流 (雨量之%)		
	对照	常规法	VS	对照	常规法	VS
泰国	3.9	7.3	2.5	1.2	1.4	0.8
委内瑞拉	95.0	88.7	20.2	64.1	50.0	21.9
委内瑞拉(坡度 15%)	16.8	12.0	1.1	88	76	72
委内瑞拉(坡度 26%)	35.5	16.1	4.9			
越南	27.1	5.7	0.8			
孟加拉		42	6-11			
印度		25	2			
		14.4	3.9		23.3	15.5



图5-7: 越南北部Dong Rang山区, 土壤被截留在香根草绿篱背后, 绿篱还就地形成幕盖, 控制径流和侵蚀, 形成天然梯地, 并使坡度变缓



图 5-8: 越南中部高地, 香根草治理咖啡种植园的侵蚀

还有一个项目则与众不同, 那就是越南农林大学的 Pham Hong Duc Phuoc 博士负责的工作。他带领一组研究人员在越南西南部的同奈省咖啡种植园坡地上对香根草水土保持的性质进行实验。

在印度尼西亚，通过一个学校的有机生物园教学项目，香根草技术非常有效地引入到农业系统中。在巴厘扶贫项目中，香根草由学校的孩子们种在各种生物园和路边，然后再由他们把学到的技能带回家（图 5-9）。



图5-9：香根草
绿篱保护50%
坡度上的学校
有机园地(东巴
厘扶贫项目)

2.6 设计与推广：农民的想法

在利用香根草治理农田土壤侵蚀时，有一件事情很清楚：农民在决定是否采用香根草以及如何应用香根草时，会考虑很多因素（Agrifood Consulting International, 2004）。参与研究的农民（被资助参与试验的富裕农民）透露了他们的想法。在他们的各种想法中，最关心的是采用改良的作物品种与优质化肥。所以，在看待是否或愿意将香根草当作首选水土保持方法的问题上，参加研究的农民同其它农民的想法并不一样。

一旦农民懂得香根草的原理，有机会认识 VS 长期和短期的作用，他们就会更倾向于采用 VS。因而，重要的是把农民置于香根草应用的中心位置，让他们参与进来，使人人都懂得根据自己的实际情况对种植技术（如推荐的间距）加以调整。懂得这些，田间工作人员就能更好地指导农民，保证 VS 获得成功。利用发放参与津贴或者其它物质奖励办法鼓励农民协助 VS 试验。下面我们列了一个清单，说明农民在决定是否大规模施行 VS 时考虑的主要问题。

1) 土壤侵蚀问题到底有多严重？

- 土壤剖面有多深？
- 如何才能让当地和下游的农民观察到土壤流失问题？
- 土壤流失的严重性或代价如何？如果农民对土地施肥，他们当然更加愿意努力保护他们的投资，不让投资随径流流走，或者渗漏到土壤深处（深根香根草能回收可溶性 N，使之不会很快地渗漏到根系无法到达的土壤深层）。
- 在一定的坡度和土壤质地条件下，土壤为何易于被侵蚀？
- VS 如何与其它已有的侵蚀治理方法（例如等高垄、石垒等高埂、塑料幕盖、低枝而冠部迅速封闭的植物措施等）相比较。

2) 与农场其它经营项目相比，耕作系统到底有多重要？农民对保护能挣钱项目进行投资更感兴趣，主要表现在：

- 这块地的相对价值多高（从而愿意投入劳力和金钱）？
 - 农民的一般财力如何？他/她对这块土地能投入多少劳力/金钱？什么事务（例如水稻田或者非农业劳动）会与现行事务在时间和金钱上进行竞争？
 - 农民对土地的所有权是否有足够信心，从而努力去将其改良？
 - 农民家庭到土地的距离是否有利于劳力上的投入？
 - 农民是否会将香根草应用到其它互补性方面去？
- 3) 农民是否有空闲土地开辟香根草苗圃来繁育种苗？否则如何获得种苗？
 - 4) 什么政策阻碍水土保持措施的实施？
 - 5) 有什么生态限制条件影响香根草的利用？（例如，香根草不耐阴，但香根草一旦定植之后，遮阴就并非一个大问题）。

农民很想将 VS 加以测试，将其同其它水土保持做法加以比较并结合起来应用。

3 农田应用的其它主要方面

3.1 作物保护：玉米地和稻田的螟虫防治

在非洲和亚洲，螟虫侵害玉米、高粱、水稻和小米，其幼虫在庄稼叶子上产卵。南非 Potchefstroom 大学环境科学学院的昆虫学家 Van den Berg 等（2003）发现，蛾子喜欢在种植在庄稼周围的香根草叶上产卵，而不是在玉米或水稻等庄稼上。在有选择的情况下，约 90% 的卵都产在香根草上而不是庄稼上。这一现象被称为是“推-拉系统”（图 5-10）。

螟虫幼虫很难在香根草叶上成活。这是因为，香根草的叶表面较粗糙，有细齿，在其上孵化出来的幼虫很难随意移动。结果，幼虫从香根草叶面掉到地面上，导致很高的死亡率，约 90%（图 5-11）。香根草还是许多益虫的寄主，这些益虫能捕食侵害庄稼的害虫。

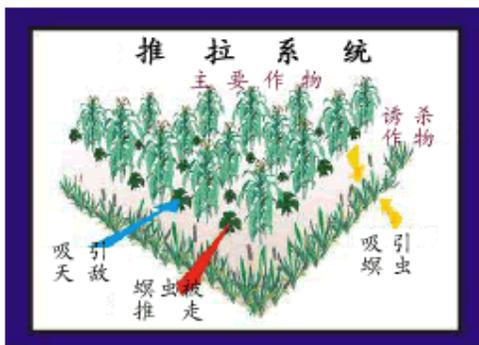


图 5-10：推-拉系统：香根草吸引害虫在其上产卵，但害虫幼虫的成活率极低



图5-11：香根草粗糙的叶表面，使害虫难以寄生，螟虫的幼虫从叶上掉到地上死去

芹苴大学目前正与 Van den Berg 博士开展合作，研究如何将香根草的上述效应应用到水稻生产中去。初步研究结果非常令人鼓舞。Van den Berg 还报道了甘蔗螟虫 (*Eldana saccharina*) 亦选择在香根草上产卵。在印度，人们亦发现香根草茎上生有螟虫 (*Chilo partellus*)

(图 5-12)。香根草绿篱为一些益虫(如 *Chrysopidae* sp.) 提供良好的生境地。香根草本身还不能有效控制害虫,但它可作为害虫综合治理系统的一部分来维持作物健康(图 5-13)。



图5-12: 螟虫 (*Chilo partellus*)



图5-13: 香根草在农场应用于防治玉米螟虫
(南非, 祖鲁土地)

3.2 牲畜饲料

香根草叶是适口性好的青饲料,牛、山羊和绵羊都喜欢吃。表 5-2 比较了香根草和澳大利亚其它亚热带草类的营养价值。幼嫩香根草富有营养,可与无芒虎尾草和东非狼尾草媲美。不过,成熟香根草的营养价值很低,粗蛋白缺乏(图 5-14)。

越南的研究表明,香根草可以部分地取代成熟的巴拉草(*Brachiaria mutica*),用来喂饲山羊羔(Nguyen *et al.*, 2007)。

一般来说,香根草叶是作为水土保持措施的有用副产品。如果根据气候条件每 1~3 个月修剪 1 次,香根草叶是有营养价值的。香根草生长 1~3 个月(依气候条件而定)的嫩茎叶有较高的营养价值,收割或修剪下来可当饲料。其养分含量像许多热带草类一样,依季节、生长期和土壤肥力而异。在印度,香根草被修剪下来喂牛,适口性很好(图 5-14)。当香根草用于其他目的时,用作饲料则表明了它的附加值。在越南广平省,在经历了一个极端严酷的冬天后,香根草成了当地唯一的青饲料来源,原因是其他饲草植物全部在严寒中冻死。另外,在养猪场废物上长大的香根草含有高量的粗蛋白、胡萝卜素和叶黄素,相对较低含量的 Ca、Fe、Cu、Mn 和 Zn,而重金属(Pb、As 和 Cd)的含量在可接受范围内(Liu *et al.*, 2003)。



图 5-14: 水牛在种香根草的埧上吃草(左); 牛在吃幼嫩香根草(右)

香根草能在极高水平的 N（高达 10,000 kg N/ha）环境中生长。当香根草作为人工湿地用于处理废水的主要成分时，每年可产 100 t 的干物质。香根草在盐渍土上亦生长良好。例如，在印度哈里亚纳邦的一些盐渍土地区，地下水位较高，香根草可产生 70 t/ha 的干物质用作饲料。有关香根草用作饲料的潜能还应从 2 方面开展研究，一是用作牧草栽培管理方面；二是筛选更适合作饲料的品种。

表 5-2: 澳大利亚香根草、无芒虎尾草和东非狼尾草的营养价值

分析项	单位	香根草			无芒虎尾草	东非狼尾草
		嫩苗	成熟体	老龄	成熟体	成熟体
能量(反刍)	kCal/kg	522	706	969	563	391
消化率	%	51	50	-	44	47
蛋白质	%	13.1	7.93	6.66	9.89	17.9
脂肪	%	3.05	1.30	1.40	1.11	2.56
Ca	%	0.33	0.24	0.31	0.35	0.33
Mg	%	0.19	0.13	0.16	0.13	0.19
Na	%	0.12	0.16	0.14	0.16	0.11
K	%	1.51	1.36	1.48	1.61	2.84
P	%	0.12	0.06	0.10	0.11	0.43
Fe	mg/kg	186	99	81.40	110	109
Cu	mg/kg	16.5	4.0	10.90	7.23	4.51
Mn	mg/kg	637	532	348	326	52.4
Zn	mg/kg	26.5	17.5	27.80	40.3	34.1

3.3 覆盖材料: 防治杂草及保持土壤水分

香根草的硅含量比其它热带草类的高，如白茅 (*Imperata cylindrica*)。所以要弄断它的茎叶，得多花一些时间。这些特性使香根草成为理想的覆盖材料和盖房顶的材料（用来盖房顶时，不会招惹虫子）。

防治杂草：当香根草叶子（无论全草还是碎草）均匀铺在地面时，香根草就会形成一层厚厚的草垫，抑制杂草的生长。在越南中部高地咖啡园、可可园以及印度茶园，香根草覆盖成功地治理了杂草（图 5-15 和 5-16）。



图 5-15: 越南中部高地咖啡园，香根草治理侵蚀(左)，并形成覆盖，抑制杂草的生长(右)

水分保持：厚厚的香根草幕盖提高土壤水分的渗透率，减少蒸发。这一点在气候干热地区，例如宁顺等越南中部沿海省份尤为重要。幕盖还可以防止雨点对土壤表面造成的溅蚀，消除这类土壤侵蚀的重要成因。



图 5-16：印度南部 Tata 茶园，香根草治理侵蚀并提供幕盖物

4 农田改良及保护洪灾灾民社区

4.1 沙丘固定

在越南中部沿海地区，沙丘占地超过 70,000 ha。由于风速甚高，而且在强降雨中容易受到侵蚀，这些沙丘流动性特别大。若不加以固定，这些沙丘就会步步逼进，入侵宝贵农田，摧毁庄稼，壅塞溪流。结果，当地农民为此吃尽苦头，蒙受巨大损失。传统上也有一些对付沙丘流动的方法，包括种植木麻黄和野菠萝，建造小型沙堤等，但并无效果。到今天为止，种植香根草是最能解决问题的措施。

下面，我们介绍一项研究个例。在越南广平省有个林业企业的苗圃，苗圃和沙丘群之间有一条蜿蜒的小溪，正好充当二者的界河。沙丘趾部被小溪侵蚀得支离破碎。由于小溪掏空了沙丘坡脚，将沙搬运到下游，在下游灌溉农田上堆积下来。下游的农民为了抵御沙流，试图修筑沙堤来对付。虽然有所成效，但却只是将流沙之祸转嫁给别的农庄。于是，这一问题挑起农民之间以及农民与苗圃之间的冲突，由于小溪已从苗圃改道流向沙丘。

对此，研究人员从溪沿开始沿沙丘坡地等高种植了 4 行香根草。仅仅 4 个月后，所植香根草形成了茂密的绿篱，固定了沙丘趾部。林业企业对此印象非常深刻，它在其它沙丘上也大规模地种上了香根草，甚至利用香根草来保护桥基。此时，正逢当地 10 年来最冷的冬天，温度降到 10℃ 以下，农民被迫将他们的水稻和木麻黄重栽 2 次。然而，香根草在如此寒冷的条件下存活下来，使当地人再度啧啧称奇。2 年之后，当地的植物（主要是木麻黄和野菠萝）也在香根草绿篱行间重新着生。由于当地树木的遮阴作用，香根草本身渐渐消失，但它已完成了自己的历史使命。这一项目再次证明，香根草能够抵抗非常严酷的土壤和气候条件。

在利用香根草进行沙丘固定时，有几个问题应当考虑。

1) 与当地社区一起评估与规划。这点很重要，因为当地社区的作用是：

- 在规划提供有价值的想法；
- 贡献财力；
- 为项目实施提供劳动力；
- 保护和维持种植的香根草；
- 从种植和维护现场的雇工中受益。

2) 培训当地民众。在向当地民众传授香根草繁育、种植和维护知识的同时，也应向他们介绍香根草的其它用途（如用作青饲料、手工艺品等）。

3) 繁殖。可与当地苗圃订立繁育并供应香根草种苗的合同。

4) 维护和监测。当地社区可以负责监测和维护种下的香根草。干燥的流沙有时埋没或冲走香根草幼苗，因此早期维护是相当重要的。

图 5-17 和 5-18 显示越南广平省 Le Thuy 区沙丘上所栽的香根草绿篱。图 5-19 显示当地社区在当地林业工作者的支持下，扩大香根草的种植。

香根草在控制风沙方面照样非常有效。此时，香根草应与风向呈横向种植，尤其是在沙丘之间的沟槽地带更应如此，因为此处风力一般会加速。在塞内加尔海滩沙丘上，曾试验过这一用途（图 5-20）。在中国东部外海的平潭岛，也曾使用过这一方法。



图 5-17: 2002 年 4 月上旬，香根草种植 1 个月。注意顶行上面的覆盖物



图 5-18: 2002 年 10 月中旬，香根草种植 7 个月后。注意香根草行间重新恢复生长的木麻黄



图 5-19: 越南广平的社区在当地林业部门支持下，扩大香根草工程实施的现场



图 5-20: 塞内加尔—海滩度假村，香根草固定沙丘的效果

4.2 提高半干旱地区沙质和盐渍碱土的生产力

在越南中南部沿海的宁顺和平顺 2 省，气候条件比较特殊。虽然它们均位于沿海地带，但气候却属半干旱类型，年雨量仅有 200~300 mm。因此，这里极端缺乏淡水，农作和畜牧用水困难。

在沿海沙丘上，“土壤”均为属盐渍型、碱性及钠碱性，在表土之下，马上出现薄薄的一层石膏（钠碱性-石钙质）层。由于土壤条件非常恶劣（石膏层有效地妨碍植物根系向下面较湿润层次穿透），而且雨量极少，使得这个地区的农业生产受到严重限制。该沿海沙丘极易遭受风蚀，下雨时又极易遭受水蚀，所以植被非常稀疏，能收获的青饲料也极少。故此，这里的群众生活极端贫困。

在 2003~2005 年间，胡志明市农林大学的 Le Van Du 教授和他的学生在上述沙丘盐渍与钠碱土上种植香根草，目的是试验 VS 能否提高此类处于荒漠般条件下的农田生产力。通过试验，他们了解到，只要在初始灌溉条件下能够定植，香根草就会长得格外好。种植后的头 2 个月，香根草的生长速度比其它植物快两三倍，在非盐渍沙土（含沙 96%）上的生物量为 12 吨（鲜重），而在碱性-钠碱性土壤上为 25 吨。在 3 个月内，香根草的根系穿透紧实的石膏层，达到 70 cm 深处，触及到当地玉米、葡萄和其它作物无法问津的地下水层（图 5-21）。研究人员还注意到，仅仅经过 3 个月的试验，土壤肥力已有显著改善，可溶性盐含量和 pH 值大大下降。尽管以前种植了 3 年葡萄，土壤 pH 值也几乎不变，但种植香根草之后，从土壤表面到 1 m 深度范围内，pH 值下降 2 个单位，可溶性盐含量也下降了。而且，由于土壤钠含量猛然下降了一半多，当地作物如玉米和葡萄等的产量也大大地提高了（图 5-22）。



图 5-21：香根草根系穿透紧实的石膏层，直达地下水位，生长旺盛

4.3 强酸性硫酸盐土的侵蚀防治

在酸性硫酸盐土地区发展农业和水产养殖业，需要建造有效而稳定的排灌系统。在这些地区，通常的做法是利用当地的土壤（粘粒含量高，pH 值低，毒性大）来建造堤坝等基本设施。但是，这样建造的基础设施基本上是寸草不生，因而容易发生土壤侵蚀。酸性硫酸盐土地区地势低平，年年都有洪泛灾害，当地居民苦不堪言。



图 5-22: 沙质土原貌(左); 同样的土壤经香根草幕盖改良之后已被利用改造为葡萄园(右)

越南不同地区发现的酸性硫酸盐土其特性是相同的: 含极酸性的硫酸盐, 干季 pH 值在 2.0~3.0 之间, Al、Fe 和 SO_4^{2-} 含量高。酸性硫酸盐土粘粒含量高, 变干后会龟裂形成许多孔隙, 使水容易进入土体, 在雨季或发生洪水时引发土壤侵蚀。结果, 在干旱季节极少乡土植物能在其上着生存活, 即使一些当地认为耐性极强的植物种也不例外。

可是, 在越南极酸的硫酸盐土地区, 香根草在 5 个试点都成功地稳定了酸性硫酸盐土建造的堤坝, 并控制了水渠岸线的侵蚀。这 5 个点为前江省保护一座居民点以及一座洪水灾民安置社区的一条防洪堤(图 5-23), 隆安省 3 条防洪堤以及胡志明市附近一条防洪堤中的一段。

在酸性硫酸盐土壤上种植香根草时, 如果使用塑料营养袋, 则比较容易定植。将香根草裸根苗直接种在酸性硫酸盐土上时, 一般很难成活。但是, 如果种植时在垄沟里加入少量的石灰、肥沃表土或者粪肥的话, 80%以上的香根草裸根苗都能正常生长。

在试验中, 技术人员获得了如下成果:

- 若香根草能定植, 4 个月后就能降低土壤流失量。此时, 光板河渠堤坝的土壤流失率为 400~750 t/ha。相比之下, 由香根草保护的河渠堤坝土壤流失率则为 50~100 t/ha。
- 12 个月后, 土壤流失量变得无足轻重。
- 待河渠堤坝完全稳定之后, 将香根草修剪至 20~30 cm 高。修剪下来的茎叶则用来幕盖堤坝的裸露部分 (Le and Truong, 2006)。



图 5-23: 越南前江省, 一处由酸性极高的硫酸盐土坝体在香根草种植前(左)与种植后(右)

4.4 保护洪灾灾民社区和聚居点

在越南南部湄公河三角洲的几个省份，每年都要发生大洪水。这些洪水通常达 6~8 m 深，持续 3~4 个月。除非建在有主要堤坝系统保护的地段，否则当地的房子年年遭水淹。劫后农民每年都得重建自己的房子，做出很大的牺牲。

为了解决这个问题，地方政府划出一些地势相对较高、又从周围取土进一步垫高的地方，用作洪水灾民社区或聚居点。这些建筑区地势较高，足可免于每年冗长洪水水淹之苦。不过，它们倚赖的堤围极易遭受侵蚀，需要保护，以免遭在洪水季节受强大洪流和巨浪的冲击。建植香根草绿篱可以非常有效地保护这些堤围免遭洪水侵蚀（图 5-24）。在旱季，这些绿篱还带来附带的好处，就是可以用它们来处理社区污水和废水。



图 5-24: 越南安江省 Tan Chau 区洪灾灾民安置中心(或聚居点)(左); 聚居点的堤坝(右)

4.5 农田基本设施的保护

VS 用途很多，可以广泛用在保护农田基本设施方面，例如稳定农田堤防、水产养殖区堤坝和农村公路等（图 5-25）。图 5-25 所示是从一片受季节性洪水威胁的农田（背景）通往河流的一条冲沟，冲沟将农田的水排到河里去。香根草减轻冲沟对农田的影响，也保护了受冲沟威胁的虾塘，尤其是保护了将虾塘水排入冲沟的地段，即最容易受到侵蚀的地方（图 5-27）。



图 5-25: 越南广义省的一条乡村公路。公路右段有香根草保护，左段未受保护



图 5-26: 香根草保护越南岷港紧靠冲沟的虾塘
该工程由荷兰驻越南大使馆资助，是越南第一个香根草环保项目的一部分

香根草还稳固紧邻土路和河流的坡地，使山区避免滑坡，使洪泛平原不致发生河岸侵蚀。在菲律宾和印度，香根草也广泛种植在坡地水田作为地界的窄窄田埂上，使田埂稳定。这样，香根草加固了田埂边，相对来说就等于减少了田埂的宽度，增加了农作的面积。此外，香根草在旱季时还可充当牛饲料，这也就是香根草的附加好处吧。



图 5-27：越南广义省，香根草按十字格子状设置，用以保护虾塘

5 其它用途

5.1 制作手工艺品

在泰国、菲律宾、拉丁美洲以及非洲的农村，香根草叶用来制作高质量的精美手工艺品。这成为农民挣钱的重要手段（图 5-28、5-29、5-30）。环太平洋香根草网络（PRVN）出版了一本小册子，叫做“泰国的香根草手工艺品”（Department of Industrial Promotion, 1999）。这是一本图文并茂、装帧精美、非常实用的指导手册。读者可从后面的参考文献里查阅如何获得这本小册子。此外，泰国 RDPB 可以为外国参与者提供制作香根草手工艺品的免费培训。



图 5-28：泰国的香根草手工艺品



图 5-29：委内瑞拉的香根草手工艺产品



图5-30：用香根草编的床上用品和制作的环保型篮子

5.2 盖房顶材料

泰国、非洲和南太平洋岛屿国家的农民利用香根草来盖房顶。他们认为香根草特别好用，如果用来盖房顶的话，香根草叶比白茅还经久耐用，使用寿命最少是白茅的 2 倍（图 5-31）。还有一些用户报告说，用香根草盖的房顶还可以驱除白蚁。

5.3 制作泥砖

非洲塞内加尔人广泛利用香根草秆来制作泥砖，这样制作的泥砖不会出现裂痕。泰国人造房子时，也将香根草叶加入泥浆混合物里制作泥砖和柱子。这种建筑材料导热率相当低，所以建成的建筑物舒适，能源效率也高。这是一项适用的劳动密集型技术。



图 5-31：斐济、越南和津巴布韦用香根草盖的房顶(从左到右)

5.4 制作绳索

水稻是湄公河三角洲的主要农作物。这里的稻农发明了香根草叶的另外一种用途：用来制作既柔韧又结实的草绳，用来捆绑稻秧或者稻秆。这里的人们原来通常用香蕉杆、灯心草和 *Nypa fruticans* 来制草绳。但是，现在他们都说香根草叶制造的草绳甚至比原来所用的草绳还好，更加柔韧、结实（图 5-32）。



图 5-32：利用香根草保护沿一条河流的木质建筑(左)；割下香根草制草绳，用来捆稻谷(右)

5.5 制作装饰品

成熟香根草的花序呈淡紫色，外观非常好看，可以做成切花、盆花（图 5-33）；还可用景观植物，种在花园或其它公共场所（例如湖畔或公园等地）用来美化环境（图 5-34）。

5.6 提炼香根草油，用作药品和香料

在非洲、印度和南美洲，香根草根被广泛用作医疗目的，用来治疗从一般感冒到癌症等百般疾病。美国的研究证实，香根草根提炼的精油具有抗氧化特性，可用于减轻/预防癌症。香根草油具有镇静功效，所以，印度和泰国的医疗师广泛地用它来实施芳香疗法（表 5-3）。

澳大利亚的漂亮花头和中国的切花展览



越南西贡Thien Sing公司的盆花



图 5-33: 澳大利亚、中国和越南用香根草制的装饰品



图 5-34: 澳大利亚布里斯班，豪华郊区湖畔的香根草

香根草油的化学组成及用途

香水类用途:

- 纯香精油（本色香水）— 因低挥发性，从而有利于其他芳香物质附着其中；
- 香根草醇 — 具微弱香味，在乙醇中溶解度高，具备制作固着剂和混合剂的良好品质；
- 稀释态 — 用于调味品、清新剂及致冷剂（如科隆香水，花露水等）。

药用芳香疗法:

- 皮肤病，有针对中枢神经系统（CNS）的效用；
- 止鼻血，治蜂叮。
-

表 5-3: 世界香根草油的产量与使用量

U.C. Lavania (印度勒克瑙中央药用与芳香植物研究所)

世界香根草油年产量	250 t
估价	80 美元/kg
香根草油主要生产国	海地、印度尼西亚（爪哇）、中国，印度、巴西、日本
香根草油主要消费国	美国、欧洲（法国）、印度、日本
香根草油的主要用途	香水类（香水、混合剂、固着剂）、调味品、化妆品、咀嚼胶
香根草根的其它用途	应用于制作多种致冷剂

第 6 章 香根草技术在中国的发展概况

1 香根草在中国的自然分布

1.1 采自海南岛的香根草标本及海南岛的野生香根草状况

中国是世界上为数不多的有野生香根草分布的国家之一。目前似乎还不清楚中国国内在何时何地最早发现香根草，也不能肯定是谁最先采集其标本，但在中国科学院华南植物园（前华南植物研究所）标本馆里所保存的一份于 1930 年代采自海南岛的标本无疑是国内最早采集的香根草标本之一了。这份标本是刘心祈先生于 1936 年 9 月 5 日在海南感恩县白沙村附近采集的，其环境是“野生路旁沙地，无阴干燥”（图 6-1）。1950 年代梁盛森（1957）也报道：“最近在海南岛也发现有野生的岩兰草（注：早年香根草在中国亦被称为岩兰草），植物形态与栽培种无显著区别，不过所采得的根有香有不香，因发现在低洼地并且已是多年生长，是否因植地环境或根龄过老关系，尚未得知，现海南有关方面已移入栽培，进行研究观察”。1960 年，华南植物所专家在海南进行植被调查时，也发现在卤水湖边等一些湿生环境中也有天然的香根草群落。后来，黄步汉和张敬熙（1964）撰文指出，海南岛临高县多文、文昌、黄流一带亦有小面积分布。因此，几乎可以肯定，海南岛是中国最早发现野生香根草的地方，且不止一处，其生境条件也明显不同。

然而，近 40 年来，几乎再无文献报道海南岛的野生香根草资源情况。为了查证海南野生的香根草资源，夏汉平等曾到海南岛进行了长达 7 天的野外走访调查，几乎走遍了全岛，但仍未发现任何野生香根草的痕迹（夏汉平和敖惠修，2001）。也许海南岛的野生香根草资源已经完全消失，这不能不令人感到遗憾。



图 6-1: 早在 1936 年从海南岛采集到的香根草标本

1.2 广东的野生香根草状况

除海南岛外，广东亦发现有野生的香根草。1957 年 5 月华南植物所的专家对广东省进行植被普查时，发现位于吴川县东北部的冲积平原上有大片大片天然的香根草群落。由于当时香根草处在营养生长期，只知是一个新种，但无法确定其种类，同年 11 月在植物抽穗开花后又对该群落进行了详细复查，发现群落中的优势种是著名的芳香植物香根草。1959 年又再次组织专门调查队对群落的分布、蕴藏量等作调查，并进行了提炼精油与造纸试验。结果表明，这一野生草种既能提炼出优质精油，也能造出高级纸张（黄步汉和张敬熙，1964）。

当时的调查结果显示，这一带香根草群落的总面积高达 100,000 亩（图 6-2）。当地群众称之为“草蓆”，把香根草称为“白茅”、“油茅”、“茅骨”等。样方调查统计结果表明，在整个群落香根的蕴藏量达 19,100 多吨，若以浸提法的出油率 2.13% 计算，能提 406~503 吨香根油。茎叶与提过油的根渣约 119,000 吨，可造纸 42,800 吨（黄步汉和张敬熙, 1964）。



图 6-2: 分布在广东吴川一带的野生香根草群落

然而，从 1960 年代开始，这片颇有价值的湿地开始遭到破坏。当时有关部门发动群众挖掘香根提炼精油。由于香根草通常是靠分蘖来自发繁殖，速度较慢，成片挖掘后，不仅使香根草的数量减少，而且使景观破碎化。1970 年代后，由于人口的剧增，人类的活动对湿地的影响更大，如运河的开凿，水坝的兴建，社区和村落的扩展等。特别是 1980 年代以来，大片大片被开垦为果基鱼塘。结果原来高达 100,000 亩的天然香根草群落，如今剩下仅几百亩了，而且单位面积的香根草数量也明显减少（夏汉平和敖惠修, 1998）。

目前，野生香根草在我国是一种十分重要且非常稀缺的资源，亟待保护。海南岛的野生香根草已不再存在，因此保护广东吴川一带仅存的香根草群落就显得更加紧迫。然而，目前它们仍未得以任何保护，并且还处在动物啃食和人工挖掘的危险中（图 6-3）。这片珍贵的香根草湿地如果还不加以保护，很快就可能在这种强劲的开发势头中消失殆尽，到时丧失的恐怕远不只是一片湿地或一块草原（夏汉平和敖惠修, 1998）。



图 6-3: 分布在广东吴川一带的野生香根草

零星分布在水塘等湿地区域(左)，遭到动物严重啃食，亟待保护(右)

2 早年的利用与研究情况

尽管中国早在 1936 年就发现了野生的香根草,在 1950 年代又发现了大片的香根草湿地,但中国当时栽培的香根草基本上还是从国外引进的。主要是在 1950 年代中期从印度引进,也有部分是从印尼引种过来(梁盛森,1957)。最早对香根草的系统报道是在 1957 年(梁盛森,1957),这篇名为“岩兰草”的文章从生产情况、植物生态与特性、繁殖和栽培、收获加工、岩兰草油的物理化学性质 5 个方面对香根草作了介绍,为随后在国内开展的引种栽培、加工提炼起了先导性作用。

那时,中国有关部门引种栽培香根草的主要目的是用来提炼精油,用于出口创汇,当时还并未意识到它的优良水土保持特性。引种栽培和加工提炼基地主要集中在广东(包括海南岛)、福建、浙江等沿海省区(陶战,1992)。然而,当时种苗相当缺乏且繁殖速度较慢,因此当时所开展的一些实验研究也就主要集中在如何快速繁殖种苗和如何获得产量高、含油量高且油质好的根等方面。除了常规的分蘖繁殖外,当时所获得的成功的繁殖方法还有(夏汉平,1998):1)茎节插条法;2)穗秆扦插法;3)纵剖茎繁殖法;4)切顶繁殖法等。当时所创造的在栽培上能促进早生快发的技术有:1)水培催根法;2)假植催根法(表 6-1);3)浆根法;4)斜植法;5)留母株繁殖法等。当时所采取的在管理上能提高分蘖速度的措施有:1)精耕细作,加强管理;2)适当修剪;3)合理密植,等等。此外,当时的观测还发现,香根草不宜种得太深,一般 3~4 cm 较为合适(表 6-2);种得太深反而不利于香根草的成活,且分蘖速率变慢(华景鹤,1958)。显然,这些繁殖栽培与管理方法仍能对目前和今后开展这方面的工作起一定的借鉴与参考作用。然而,到 1960 年代前后,因加工提炼香根油的成本高,利润低且油质较差等原因,有关香根草的栽培与加工工作逐渐停止,结果很多栽培在农场的香根草变成了“野草”而零星地分布在一些地方。

表 6-1: 假植与不假植处理对香根草成活率的影响(杨兴新,1959)

天气状况	处理	成活率(%)	备注
高温干旱	假植	98.0	1) 插植株数各为 500 株 2) 7 月 6 日种植, 8 月 4 日检查
	不假植	76.8	
低温干旱	假植	92.0	1) 插植株数各为 200 株 2) 1 月 17 日种植, 2 月 10 日检查
	不假植	81.0	

表 6-2: 种植深浅对成活率和分蘖的影响

种植深度 (cm)	成活率 (%)	4 个月后每丛平均分蘖数
3-4	96.6	24.7
5-6	92.3	15.4
7-8	91.3	9.5

3 香根草技术用于水土保持与环境治理

3.1 早期发展阶段

由于上述原因，从1960年代中期到1980年代中后期，香根草在中国被弃之荒野，成为无人问津的“野草”。直到1988年，时任世界银行亚洲司农业处处长、现国际香根草网络主席 Dick Grimshaw 先生亲自前来中国传授和推广香根草的水土保持技术，才使得该植物重新被利用（图 6-4）。从此，在国际香根草网络和世界银行的支持下，我国南方闽赣川粤湘浙滇黔琼等省区几乎同时开始了有关香根草的研究、推广和应用工作。为能迅速推广这一神奇植物，农业部和水利部于1989年11月在福建主持召开了香根草种植技术研讨会（图 6-4）。这是国内举办的第一个专门研讨香根草的会议，也是世界上最早举行的同类会议之一。1991年4月又在江西举办了一次培训班。1996年，中国香根草网络在中国科学院南京土壤研究所成立。1997年10月中国香根草网络在福州成功召开了一次国际性的香根草研讨会（图 6-5），并正式出版了研究文集，产生了较大反响（徐礼煜, 1998）。从此，香根草技术（VGT）在中国大陆开始受到重视并逐渐推广开来。



图 6-4: 1998 年下半年，时任世界银行亚洲司农业处处长、现国际香根草网络主席 Dick Grimshaw 先生亲自前来中国江西、福建等地传授和推广香根草技术，并在福建发现了“野生”的香根草



图 6-5: 1989 年福建香根草种植技术研讨会合影(左); 1997 年国际香根草学术研讨会现场(右)

左图中间为 Dick Grimshaw 先生; 右图右二为 Paul Truong 博士, 左一夏汉平博士

在香根草推广应用的头 10 年，江西、广东、福建等省起到了先锋作用，并在近 20 个省、自治区和直辖市逐渐推广应用开来（图 6-6）。江西的香根草工程首先得益于世界银行的红壤项目在该省的实施，从而使得这一绿篱在“红色沙漠”上大面积推广。据报道，到 1996 年底，江西省红壤开发项目中涉及到的 19 个县和农场的 43 条小流域全面实施了等高种植香根草篱的措施，受香根草保护的面积累积达 20,000 ha（胡建业, 1997）。在广东，香根草不仅使退化的坡地农业生态系统得到恢复，而且在公路护坡、水库、堤坝的保护，垃圾场和采矿废弃地的复垦以及桉树林坡地水土流失治理等方面都显示出了明显效果（夏汉平等, 1996, 1997; 敖惠修等 1997; Liao *et al.*, 1998）。在福建，香根草不仅广泛用于保护坡地果园和农地，还用于海滨固沙，效果普遍良好（阮伏水和周伏建, 1995; 徐礼煜和周伏建, 1997; 张菁, 1998）。最近 10 年，以广东地区为典型代表，香根草的推广应用除用于水土流失治理外，主要用于道路护坡、垃圾场与金属尾矿的生态恢复、污染水体的净化、河道与水库的边坡治事、采石场与垃圾场的生态恢复，以及生态农业建设等各个方面（Xia, 2001）。具体推广应用及取得的成效分述如下。

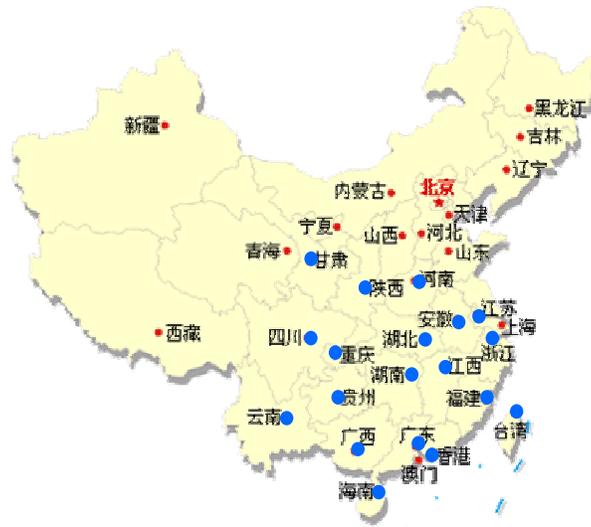


图 6-6: 香根草在中国引种推广示意图

3.2 公路与铁路护坡

3.2.1 公路护坡

公路边坡的保护与治理是香根草技术在我国应用最早的领域之一。早在 1995 年，中国科学院华南植物所的敖惠修高工和夏汉平博士等就与广东省公路局等部门合作，在 105 国道广东从化的良口和吕田路段实施了公路边坡的治理。当时在良口路段选择了一块坡度为 25~30° 的严重崩塌边坡，在吕田路段选择了 4 块坡度高达 30~40° 的陡坡实施香根草工程（敖惠修等, 1997）。结果，在良口路段，2 个月后香根草开始形成绿篱带，4 个半月后就形成致密的绿篱，使水土流失得到及时有效的控制，在草篱上方泥沙淤积平均高度 6~8 cm，而没有绿篱带的对照边坡则冲走表土 2~3 cm（图 6-7）。在吕田路段，因坡度更陡且土质更差，结果香根草的长势明显不如良口路段，尽管如此，香根草绿篱带对控制边坡水土流失与滑坡以及边坡的绿化美化等也都起到了一定作用（敖惠修等, 1997）。



图 6-7: 105 国道从化市良口路段于 1995 年应用香根草技术治理边坡的现场

在实施香根草技术之前，公路滑坡严重，工作人员在清理因滑坡而冲进路面的泥土（左）；种植香根草绿篱 4 个月后，坡面被完全稳固，黄泥被绿色植被覆盖（右）

由于香根草技术 105 国道的成功实施，广州市公路局得知消息后于 1996 年在广州一环路天鹿湖路段实施了另一个护坡工程。工程开展之前，该路段的边坡均为光秃秃的裸坡，寸草不生，而且下边坡的坡面已被雨水冲刷出条条水沟，路基开始下沉，路面开裂、渗水，路肩边同整个路基都有崩塌之危险。公路部门对此十分着急。工程于 1996 年 3 月下旬实施，5 月 15 日进行第一次观测，发现香根草几乎全部成活，成活率超过 98%；7 月 2 日进行第 2 次观测，香根草长势旺盛，并已开始成带，平均每丛分蘖数猛增到 14 株。9 月 26 日进行第 3 次观测，这时的香根草已经变成致密的绿篱带，平均每丛的分蘖达 18.2 个。1996 年雨季的雨水较多，比往年的平均值高出 20%，而且暴雨较频繁，结果沿下边坡的一条排水沟都被雨水冲毁，而受香根草带保护的路基与坡面受损甚微；更为重要的是，路肩开裂和下沉的趋势得到了完全控制（敖惠修等, 1997; 夏汉平等, 1997）。然而，与之相对的用箭仔树（*Mimosa sepiaria*）作护坡植物的对照坡面，在同时期内被雨水冲刷出数条宽 1~2 m、深 1~1.5 m、长 10~20 m 的深沟，整个坡面显得破碎不堪（图 6-8）。

2000 年 11 月，对现场进行第 4 次观测，结果实施工程的边坡已经完全被茂密的植被覆盖，其中下边坡的植被覆盖率超过 98%，而且整个坡面已经完全稳固，不再有水土流失发生；上边坡的植被覆盖率亦达 85%，除个别地方还有少量泥沙被冲刷外，整个边坡也处在相当稳定的状态，不会再产生严重水土流失或滑坡现象。更为重要的是，边坡的生物多样性显著增加，工程实施前，没有一种植物在坡面上生长。4 年 8 个月后，共有 65 种植物侵入，其中草本 34 种，藤本有 13 种，乔、灌木 18 种，物种侵入的先后顺序与数量多少都明显呈现为草本—藤本—灌木—乔木（夏汉平等, 2002a）。然而，对照坡面只有黑莎草(*Gahnia tristis*)和五节芒(*Miscanthus floridulus*)的侵入，植被覆盖率不到 1%，其侵入的植物种类和数量与受保护的坡面相比都相差甚远（图 6-8）。由于该工程的治理效果显著，中央电视台（CCTV）于 2000 年春对此进行了现场采访，并在《走近科学》栏目中予以专题报道。



图 6-8：广州市一环路天鹿湖路段应用香根草技术治理边坡现场

最初边坡完全裸露，水土流失严重(左上)；工程实施 8 个月后，下边坡被绿篱带完全稳固，其他植物亦入侵生长(右上)；同期对照下边坡被冲得支离破碎，侵蚀十分严重(左下)；4 年后，上坡亦被植被覆盖，水土流失得到有效控制，而对面的对照边坡依旧寸草不生，侵蚀严重(右下)

广东的推广应用获得成功，香根草技术迅速在南方多个省区用于公路护坡。例如，1999 年，江西省公路局与南昌水利水电高等专科学校合作，在坡度为 30~60°且极易塌方的公路边坡上开展了 10,000 m²的香根草工程。当时所花成本仅为“硬措施”的 1/5 左右，经过一个生长季节后，边坡被茂密的草带牢牢固定，效果良好。该工程也因此荣获 2002 年中国公路学会三等奖，并在中国交通报、中国交通人才网站上广为宣传（徐礼煜等，2003）。据统计，江西省仅在 1999~2002 年的 4 年间，就有 10 余个县市约 48.5 万 m²的公路采用香根草护坡，节省经费 1500 多万元。

福建是另一个香根草技术开展公路护坡的大省。早在 1998 年，福建省公路管理局就向全省公路部门发文，建议全省各地在开展公路护坡时积极采用香根草技术。1999 年，福泉（福州—泉州）高速公路上开展了近 20,000 m²的香根草护坡工程，这在当时是全国面积最大的香根草护坡工程。据不完全统计，到 2002 年底，福建省利用香根草保护公路边坡的面积超过 20 万 m²，不少公路部门还建立了自己的香根草种苗繁育基地。福建省公路学会还于 2001 年 6 月在南平县召开了“公路边坡香根草绿篱保护现场交流会”；该学会在 2002 年 9 月还组织人员前往浙江考察与交流香根草技术（徐礼煜等，2003）。

此外，贵州、广西、云南、湖北、湖南、浙江、安徽等省区也都较大规模地开展了香根草的公路护坡工程，受保护的边坡达数百万平方米。中国在应用香根草技术开展公

路护坡的规模与效果方面一直走在世界的前面，并根据不同的地区、不同的土质与坡面类型探讨了不同种植方式，制定了不同的技术规程（徐积江, 2005; 熊元等, 2006; 邹显华, 2007），包括返季节施工的技术措施（陈务豪等, 2004），而且还计算出了不同类型坡面的工程成本与效果（冯子元, 2003）。预计今后在公路护坡方面的应用会有更快的发展。

3.2.2 铁路护坡

与公路护坡相比，香根草技术在铁路护坡上的应用起步较晚且发展相对较慢。2001年春，中国香根草网络与新长铁路有限责任公司合作，首次将香根草技术引入铁路护坡工程中。工程地点位于当时还处在建设中的新长铁路（江苏新沂至浙江长兴）的江苏省太兴市黄桥镇段的边坡上，边坡坡度 1:1.5，属填土边坡。填料取自两侧农田或附件集中取土坑的海相冲积物（砂性土），土质松散，不稳定，雨后极易产生流失与滑坡。当年 4 月，12 万株香根草苗等高种植在边坡上，覆盖 4079 m² 的边坡面积。种植后的前 5 个月，香根草经受住了持续的阴雨、持续高温以及暴雨和温差骤变等恶劣天气的考验；边坡在香根草绿篱的作用下保持稳定，基本未出现水槽、水坑和沉降现象，安全度过了当年的雨季；此外，采用香根草技术还大大节省工程成本，实际支出只相当于“浆砌片石排水骨架护坡”措施的 17%（图 6-9）。由于工程取得成功，同年 10 月他们组织召开了“香根草应用于铁路边坡防护试验成果鉴定会”，与会专家与领导通过参观现场与交流讨论，充分肯定了香根草技术在铁路边坡防护上的作用（徐礼煜等, 2003）。此后，铁路部门在江苏、安徽、福建等地进行了更多的试验与应用，亦获得成功（张栋和王炳龙, 2006）。



图 6-9：有关专家在考察兴长铁路边坡实施香根草工程半年后的效果(左)；
香根草应用于兴长铁路边坡防护试验成果鉴定会(右)

3.3 垃圾场的植被恢复与改造

3.3.1 最早的复垦工程

最早将香根草技术用于垃圾场的生态恢复工作始于 1997 年。供试垃圾场位于中国科学院华南植物所的大院内，面积约 600 m²，以前主要用来堆放该所职工的生活垃圾。但从 1996 年下半年开始，广州市的生活垃圾统一由市环卫部门运走处理，该垃圾场便封闭停止使用。但半年过去了，垃圾场仍恶臭熏天，寸草不生，苍蝇、老鼠等蔓延猖獗；不

仅如此，它对景观的影响亦相当明显。于是，从 1997 年 3 月开始夏汉平博士等试图用香根草技术对它进行恢复。香根草于当年 3 月种植，成活率高达 100%且长势非常旺盛，110 天后平均每丛分蘖数达 25 个，最高达 40 个，分蘖速度和长势明显快过种在苗圃地的香根草种苗（图 6-10）。这可能是由于香根草的根系发达，深入到垃圾中后，能充分吸收垃圾中的养分。8 个月后垃圾场变成一片茂密的草地，香根草的覆盖率几乎达 100%，苍蝇、老鼠不见踪影，原来的臭气被清新的空气取代，整个环境得到彻底改观。用力从中拔出 2 丛香根草，令人难以置信的是，香根草强大的根系将垃圾中的纸片、布衣、塑料、木块乃至铁皮等都穿透固结起来，形成一个庞大的根系“集团”（夏汉平等, 2002b）。难怪香根草能在垃圾场内长得如此茂盛！2 年后，该垃圾场被改造成为一个土质条件极好的苗圃。



图 6-10：应用香根草技术改造一小型垃圾场

当年位于华南植物所园区内的一个垃圾场，寸草不生且环境污染严重。注意刚种上去的香根草(左)；4 个月后，垃圾场就被香根草覆盖，且有多种植物入侵进来(右)

这是中国也很可能是全球第一个应用香根草技术垦复与改造垃圾场的实例。由于效果极好，当时在中国香根草界乃至整个国际香根草界都产生了很大反响。随后，将香根草技术用于垃圾场的恢复工作很快就在中国很多地方推广开来，仅广东就有广州、东莞、中山等开展此项工作，效果明显。例如，在 2001~2004 年间，广州某公司就利用香根草技术对广州市占地面积最大的垃圾场大田山垃圾场进行了恢复与改造，香根草较好地起到了覆盖、固定和净化作用，改造效果得到广州市有关部门的充分肯定。

3.3.2 效益分析

根据对上述垃圾场所做的植被恢复与改造工作，以及结合过去 10 年开展香根草生态工程的经验，我们认为应用香根草生态工程对垃圾场进行生物修复时能产生较大的经济效益与良好的社会效益。现以一个面积为 10 亩的垃圾场为例，对其投入、产出和效益作如下分析（夏汉平等, 2002b）。

投入

1) 材料投入

- 主要材料 香根草：16000株/亩×10亩×0.1元/株 = 16000元
- 次要材料 其它乔灌木：300株/亩×10亩×3元/株 = 9000元

2) 隐形支出

- 技术与设计 (暂不考虑)
 - 劳动力支出
 - A. 挖穴种植: $10\text{人} \times 10\text{天} \times 50\text{元/天.人} = 5000\text{元}$
 - B. 挖泥填穴: $5000\text{ kg/亩} \times 10\text{亩} \times 0.15\text{元/kg} = 7500\text{元}$
 - C. 养护管理: $2\text{人} \times 60\text{天} \times 40\text{元/天} = 4800\text{元}$
 - 运输、灌溉及其它开支: $700\text{元/亩} \times 10\text{亩} = 7000\text{元}$
- 3) 总计支出: $16000+9000+5000+7500+4800+7000 = 49300\text{元}$, 平均: 7.4元/m^2 。

产出与效益

1) 经济效益

- 直接产出: 最初种植的每亩1.6万株香根草苗, 2年后至少可达40万株, 即使按低于市场价的20%来算, 即每株0.08元, 则产值为3.2万元, 10亩地则为32万元;
- 土地资源再利用价值: 种植香根草2年后, 垃圾场可被改造重新利用。垃圾场一般位于城郊, 改良后土壤肥沃, 土地价值较高, 一般可达10万元/亩, 10亩地计100万元。

因此, 10亩垃圾场经香根草生态工程改造后所创造的总效益为: $32 + 100 = 132\text{万元}$, 平均 198元/m^2 , 经济效益相当显著。诚然, 以上分析的部分数据只是估计值或理论值, 实际情况肯定会有一定的出入。

2) 生态效益和社会效益

- 改善环境。应用香根草生态工程对垃圾场进行生物修复的效果明显, 不仅能使垃圾得到植被覆盖, 而且使场内及周边的空气得到净化, 减少污水渗出、减低渗出污水浓度, 控制鼠、蝇繁衍, 最终使城郊生态环境得到明显改善。
- 降低环保成本。该生态工程方案还能大大降低环境保护的费用成本。按以往的治理措施, 不仅花费高, 而且效果也不是很明显, 工业化的负面影响也较大。生态工程的应用, 既体现自然界的发展规律, 又符合国家的环保政策, 还减少环保治理的费用。
- 土地再利用。城市垃圾堆放场, 不仅污染环境, 还占用大量的宝贵土地。实施香根草生态工程方案, 最大限度地实现了土地的再利用。当垃圾场经过2年左右的生物治理后, 大部分垃圾被降解, 污物被净化或吸收, 垃圾场最终能改造成高质量的苗圃、花圃、果园或用作其它目的, 使宝贵的土地资源得到充分再利用。
- 清理盲流、稳定社会治安。城市垃圾场往往滞留了大量的拾荒者, 不仅容易导致疾病传播, 影响城市形象, 而且给社会治安带来不稳定的因素。垃圾场经过生态工程改造后, “垃圾盲流”便无所适从, 社会又获得一片“净土”。

3.4 金属矿山的生态恢复

由于香根草具有较强的抗逆性和对重金属的强耐性, 因而被认为是最适合在金属矿山与尾矿开展生态恢复的物种之一。早在1999年, 香根草技术就开始用于中国的矿山恢复, 是由夏汉平博士和中山大学束文圣博士合作在广东乐昌铅锌矿的一个尾矿上开展的。当时, 该尾矿的重金属 Pb、Zn 的含量极高, 都超过 3000 mg/kg , 尾矿基质极度贫瘠, 尾矿上寸草不生,

而且尾矿周围亦遭受严重污染 (Shu *et al.*, 2000; 夏汉平和束文圣, 2001)。种植香根草前, 先将尾矿基质通过添加少量客土进行改良并施一定量的基肥, 然后将香根草裸根苗直接种在尾矿上。很快, 香根草就生长起来, 并覆盖住尾矿 (图 6-11)。该实验示范成功后, 香根草技术很快就在乐昌铅锌矿推广应用开来, 取得非常好的生态恢复效果 (图 6-11)。



图 6-11: 香根草技术应用于粤北铅锌矿的生态恢复
香根草直接种在尾矿上(左); 香根草在矿区农田土壤上茂盛生长(右)

从 1999 年开始, 华南植物所还协助中国石化集团茂名石油化工公司开展油页岩废渣场的生态恢复工作, 其中一个重要的生态恢复物种就是香根草。工程实施的结果表明, 香根草同样是油页岩废渣场开展生态恢复的优良先锋种, 在废渣场的生态恢复过程中具有不可替代的先锋作用 (夏汉平等, 2000a; Xia, 2004)。

最近几年, 香根草技术开始应用于稀土矿的植被恢复, 亦取得明显成效。例如, 2004 年广东省农科院就在广东兴宁市大坪镇的一个稀土矿上成功开展了香根草生态工程。在工程实施前, 开采后的矿山景观遭受严重破坏, 而且水土流失严重, 土质极差。香根草种植 3-6 个月, 不仅能正常生长, 而且开始起到固土护坡作用; 2 年后, 原本寸草不生的光裸地逐渐转变成绿色的青山, 水土流失亦被完全控制 (图 6-12)。另外, 2008 年夏汉平博士亦与江西定南县某矿业公司合作在当地开展稀土矿的生态恢复工作, 在一片 5000 m² 的矿山上种上了香根草, 其生态效益开始显现。公司对目前取得的初步效果表示满意, 并计划从 2009 年起全面采用香根草技术恢复当地开采后的矿山。

目前, 香根草技术在矿山与矿区的应用已经变得非常普遍, 除广东外, 在江西、湖南、浙江、贵州、江苏等省区都有成功应用的报道, 其应用的广泛程度仅次于公路护坡。我国因矿山开采导致的生态破坏和环境污染越来越严重, 而开采之后的生态恢复又非常滞后。显然, 香根草技术的良好效果为我国南方地区今后的矿山恢复提供了一条捷径。



图 6-12: 香根草用于粤东稀土矿的植被恢复

开采后的矿山完全裸露，水土流失严重(左)；香根草于 2005 年 5 月引种至此，1 年后覆盖矿山坡面，固坡、覆盖与绿化的效果非常明显(右)

3.5 污染水体的净化

香根草之所以能用来处理污水，主要是因为：1) 生物量较大，能从污水中吸收相对较多的养分，如 N、P 等；2) 能忍耐较高的污染物浓度；3) 根系发达，有利于根际环境污染物的降解；4) 该植物较大多数湿地植物具有更高的蒸腾速率。用香根草处理污水主要是通过建植人工湿地的方式来进行，因为它适应湿生环境，甚至在长时间淹水的情况下，仍能存活；而且其密集挺拔的茎干能减缓水流速度，增加污水滞流时间，从而提高污水中沉积物的沉淀效率，也使得植物能充分吸收污水中的养分。此外，香根草对病虫害具有较强的抗性，这使之较其他植物建立的人工湿地更易管理，降低运行成本。

近几年，用香根草建植人工湿地处理各类污水在中国逐步开展起来。例如，2001 年，中山大学在广州龙洞村用香根草、美人蕉 (*Canna indica*) 等植物建植了一个面积达 1300 m² 的环形人工湿地，用于处理该村上千居民的生活污水。湿地成功运行了 3 年时间。后因社区建设需要，该湿地不得不拆除。夏汉平等还在世界上首次用香根草人工湿地处理炼油废水获得成功 (Xia *et al.*, 2003)。他们在中国石化集团茂名石化公司建植了一个小型人工湿地，然后种上 4 种草本植物，香根草、芦苇 (*Phragmites communis*)、宽叶香蒲 (*Typha latifolia*) 和蒲草 (*Lepironia articulata*)，测试它们处理炼油废水的效果。在为期 2 个月的处理过程中，人工湿地在前期对炼油废水的净化效率很高，对第一批高浓度废水中氨氮、COD、BOD 和油的去除率分别是 97.7%、78.2%、91.4% 和 95.3%，对第一批低浓度污水分别是 97.1%、71.5%、73.7% 和 89.8%。但是，随着时间的推移，湿地的净化效果有一定程度的下降，然后逐渐趋于稳定。在观测期内，不同植物对废水的净化率很接近，基本上无显著性差异。在清水培养阶段，香根草产生分蘖的速度是 4 个种中最低的；进入处理水培养阶段，香根草的分蘖速度升高，而其他 3 种的却下降，这意味着香根草对恶劣环境的适宜性——特别是经较长时间的适应后——可能比其他 3 个种更强 (图 6-13)。而且随着时间的推移，大概 4 个月左右后，蒲草出现大面积死亡，宽叶香蒲的长势也明显变差，但香根草和芦苇仍维持旺盛生长 (Xia *et al.*, 2003)。

除建植人工湿地外，将香根草种在浮床上亦表现出良好的净化效果。例如，广东省农科院就在其生态农业园内制作了大量的香根草浮床，用来净化猪场排出的废水，结果，香根草不仅旺盛生长，而且表现出较好的净化效果 (图 6-13)。



图 6-13: 香根草人工湿地用于处理工业炼油废水(左), 香根草浮床处理猪粪场废水(右)

3.6 生态农业建设

1988 年, 当香根草技术引入中国时, 首先就是用于红壤地区的农业坡耕地的保护, 并且立即见效。1991 年起, 香根草开始在广东应用, 首先也是用于赤红壤地区的水土流失山区, 保护农业坡耕地。当年在一块被称为“火焰山”的赤红壤坡地上开展用香根草技术治理水土流失与坡地复合农林业试验。仅过 2 年, 这块面积达 40 ha、以香根草为纽带的生态农业坡地就基本建立起来(敖惠修等, 1993)。后来, 香根草技术在中国广泛用于生态农业建设与农村脱贫方面, 其中最具代表性的实例当属中国香根草网络在安徽大别山地区开展的复合农林业技术项目(徐礼煜等, 2003)。

2001 年中国香根草与复合农林业技术项目在新西兰志愿机构支援计划、新西兰救世军、澳大利亚国际发展署、澳大利亚救世军和港澳救世军的支持下开始实施。该项目目的是扶贫, 同时保护自然资源。主要通过以下措施实现其目标(徐礼煜等, 2003):

- 引进香根草技术, 帮助人们了解香根草在防止水土流失、持续农业、工程保护(如公路、水库)和改善农民生活上的作用;
- 引进和推广适当的复合农林业技术, 如林粮间作技术、等高种植技术以及作物的多样性等;
- 建立由香根草篱保护的经济植物园, 并用香根草饲养家畜、覆盖地表、沤制绿肥、编制工艺品等, 以提高经济植物园的收益, 增加农民收入;
- 通过修建电灌站、水坝、农作物跟经济树木间作并根据土壤条件和植物分析进行合理施肥来增加粮食生产;
- 通过对妇女进行蚕桑养殖、茶叶生产与加工和用香根草编制工艺品的培训与示范, 帮助提高妇女的社会和经济地位;
- 通过各种活动把上述技术和经验推广到整个大别山区, 并通过国内、国外香根草网络和出版物介绍到全国和全世界。

基于此项目经过多年的考察和科学试验, 并结合当地的社会和经济条件, 项目受到当地政府和农民的热烈欢迎。该项目主要通过香根草技术控制侵蚀, 同时发展经济林控制水土流失, 使农民获得更大的经济效益(图 6-14)。



图 6-14: 对大别山地区的农民开展各式各样的有关香根草技术的培训
室内授课(左), 野外示范讲解(右)

为了进一步促进香根草的应用和推广, 使得农民在利用香根草保持水土的同时得到更加直接的经济效益, 在德国基督教发展服务社、TVNI、泰国 RDPB 等国际机构的支持下, 中国香根草网络与广西桂林市农业环境保护监测站、龙胜县农业局、泗水乡政府合作, 于 2007 年 10 月 21 日~11 月 4 日在香根草与复合农林业技术项目实施区—广西桂林龙胜县泗水乡举办了一次国际香根草编织培训班(蒋冬荣等, 2008)。培训班邀请了 3 名泰国技术人员前来授课, 对 20 多名中国学员进行了全过程培训。由于办班前深入广泛宣传和各方面的精心筹备; 办班过程泰国专家的悉心传授以及学员们的勤奋学习, 培训取得了巨大成功, 赢得了各方的一致赞誉(图 6-15)。



图 6-15: 2007 年 10 月在广西桂林举办的国际香根草编织培训班
开幕式现场(左); 学员们在认真学习编织技术(右)

归纳起来, 香根草技术在生态农业建设与农村经济发展方面的作用主要通过以下几方面来实现。1) 通过生物绿篱作用对坡耕地防治水土流失, 固土护坡; 2) 通过生物绿篱作用对风沙地防风固沙, 保肥保墒; 3) 通过茎叶覆盖地表保墒保肥, 改善田间小气候; 4) 通过根系对下层养分的吸收, 增加土壤养分, 促进作物增产; 5) 通过建植人工湿地净化农业污水(如畜牧业、养殖业和农村生活污水), 改善农村生态环境; 6) 利用幼嫩茎叶作饲料, 发展畜牧业; 7) 利用根系提炼精油, 发展加工业; 8) 利用成熟植株编制工艺品, 发展手工业。

3.7 采石场的复垦

石场开采导致严重的环境、植被与景观破坏，而石场绿化，特别是石壁绿化又是一件十分困难的工作，甚至是一个世界性的难题。导致石壁复绿极度困难的原因在于：1) 石壁表面光滑，无任何土壤或松散基质；2) 石壁总是十分陡峭，通常超过达 70~80°，甚至 90°；3) 多数石壁往往有相当的高度，通常数十米，甚至上百米，施工十分困难。目前常用的石壁复绿方法有（杨冰冰等, 2005）：1) 垒砌阶梯法；2) 爆破燕窝法；3) 爆破平台法；4) 网格喷播法等；5) 景观再造法。这些方法或因施工难度大或因造价昂贵或因效果不佳而难以实施，或实施后效果欠佳。2000 年开始，香根草技术在中国用于采石场生态恢复。经过几年的研究与探索，一种将香根草技术与特殊槽板制作及施工工艺相结合的香根草复合生态技术终于应运而生，它较为成功地解决了采石场的石壁绿化问题。和传统的香根草技术一样，该技术是利用香根草的固土护坡特性，同时结合一些抗性强、景观效果好、生态效益高的乡土植物，在石壁面建成永久牢固的生态体系（Zhang and Xia, 2003）。

典型案例是对广州科学城荔枝山采石场的复垦。这是该科学城里唯一的采石场，严重影响了科学城的自然景观，因此很有必要对它进行复绿。然而，用人工措施复绿该采石场是极其困难的，这是因为：1) 石壁面最高达 90 m，而且十分陡峭，几乎垂直地表；2) 石壁基部没有平台，只有一片超过 30 m 潭水。严格地说，那是一个挖掘石头而形成的深坑。目前坑内集满了雨水，因而施工极度困难，其难度几乎达到石场复绿的极限。工程于 2003 年夏天开始实施，仅仅用了半年左右时间就完成全部工程，取得了令人意想不到的神奇效果，3 年后石壁几乎全部复绿（图 6-16）。该工程在施工期间正值第三届国际香根草大会（ICV-3）在广州召开，大会组委会将施工现场作为代表的参观点，所有参观代表无不工程的难度所惊叹，TVNI 主席 Dick Grimshaw 先生称它是全世界难度最高的香根草工程。2004 年 11 月，世界水土保持学会（WASWC）主席 Samran Sombatpanit 博士专程到现场参观，对工程效果给予了极高的评价，并当场向工程的总负责人颁发荣誉证书。

目前，应用香根草技术复绿采石场或陡峭石壁在广东地区已经变成一种常见的生态恢复措施，它已在深圳、东莞、广州、珠海、中山、云浮等地成功实施，在广西、贵州、云南、等地也推广开来，效果明显。



图 6-16: 广州科学城荔枝山采石场的石壁复绿

采石场原貌，陡峭石壁下面是一个又深又大的水塘(左)；工程完工 3 年后仍保持非常好的覆盖效果(右)

3.8 河道与水库边坡的治理

与用于农业坡耕地的保护和公路护坡相比，香根草技术在治理和保护河道与水库边坡方面的应用开展得较晚，始于最近 10 年左右，但它的发展速度很快，应用越来越多，主要原因是既耐水淹又能固土护坡的植物种类极少，而香根草就是其中一种。迄今，香根草技术在中国已成功用于大江大河、小沟小涌、水库水塘、湖泊海口等各类水利水体设施的保护与治理。

2000 年中国科学院华南植物所与广东省航务工程总公司合作，在北江大堤广东三水段开展了一段长约 900 m 的边坡治理与护坡工程，即“三维土工网加固航道边坡试验工程”，目的是试图解决北江两岸波浪对边坡的冲蚀与水土流失问题，并试图找到对河岸带进行植被恢复的方法。本项目是工程措施与生物措施相结合的典型，其中土石方工程部分由航务公司负责，植草护坡试验由华南植物所负责，航务公司参与（图 6-17）。结果显示，边坡上所种植物香根草与百喜草（*Paspalum notatum*）都生长良好，水土保持、护坡、防浪和绿化覆盖的效果都很好（夏汉平等, 2002c）。2005 年，该项目通过了由广东省航务局组织的专家鉴定，获得一致好评（图 6-17）。



图 6-17：在北江大堤广东三水段开展的航道边坡加固工程

组织单位为广东省航道局，承担单位为广东省航务工程总公司，协作单位为华南植物研究所等(左上)；工程实施前，边坡被雨水和浪涛冲刷的支离破碎(右上)；香根草与百喜草种在河岸边坡上(左下)；2 个月后，植物措施开始发挥作用，边坡受到保护，景观得到改善(右)

另一个治理小河涌的典型例子发生在广州市区。2002 年，中科院华南植物所受广州市区防洪工程建设指挥部的邀请，在广州赢洲生态公园开展河涌适宜草种筛选试验示范工程。经过对数十种草种的栽培观测，发现香根草是最适合在河涌边坡推广应用的草种之一。于

是，工程指挥部在 2003 年对整个公园的河涌进行改造，所采用的草种就是在 2002 年的试验示范工程中筛选出来的，其中有相当一部分河涌使用了香根草，护坡效果、去污效果与景观效果都较好（图 6-18）。因此，该工程被指定为 ICV-3 的参观现场，会议代表在当天参观过程中都对香根草的神奇效果给予了充分肯定。



图 6-18：广州赢洲生态公园开展河涌生态改造试验示范(左)；改造后的河涌景观，香根草长在河道两边，不仅固土护坡、净化污水，还美化环境(右)

至于将香根草技术用于水库边坡的保护，虽然还不是很普遍，但也有很多成功的例子。例如，2004 年，夏汉平博士邀请广州某公司在广西贵港市武思江水库成功治理了 2 块严重崩塌的边坡。在开展香根草工程之前，这 2 块边坡都存在严重滑坡现象，之前采取过多种措施进行治理，但均未成功。香根草工程于 2004 年 8 月开展，采用乔、灌、草立体配置方法，所种植物除香根草外，还包括垂叶榕、大红花、百喜草、狗牙根、蟛蜞菊等多种其他植物。然而，由于施工期间正处在极端高温无雨的天气下，结果，除香根草和蟛蜞菊外，其余植物全部热死、干死。由于天气恶劣，香根草在前期的状况也非常糟糕，很长时间还不能返青生长，只是勉强存活下来。不过，到了翌年春天，香根草迅速成长起来，很快将坡面覆盖并稳固。2005 年 6 月，广西遭受了百年一遇的强降雨过程，许多地区出现了严重的洪涝灾害和大量的滑坡塌方现象。武思江水库当月的降雨量达到了 366.4 mm，其中 6 月 5 日的最大日降雨量为 79.8 mm。经过该雨季的考验，水库的这 2 个治理坡面都基本保持稳定。相反，以前应用的其他护坡方案或多或少都出现了不同程度的险情或水土流失现象。这说明“香根草技术”的应用是成功的，基本达到了预期的目的，既控制了原来严重滑坡的局面，又使坡面获得了绿化美化的效果。该工程得到当地政府的高度赞扬（图 6-19）。

程龙飞等（2005）从岩土力学角度解释了香根草技术能有效用于护岸防冲系统的原因。他们提出，香根草纵深发达的根系使之具有较高的锚固力和抗剪力；通过在开孔的铰链式混凝土块铺面系统中种植香根草，其根系在基土中盘根错节，使基础土体成为土与草根的复合材料，草根可视三维加筋材料，使土体强度提高，这样就更有利于护岸防冲系统的稳定。

近几年，对河道、水库、堤坝等水利水电设施的保护正逐渐成为香根草技术应用的主战场（夏汉平等, 2002c; 冯子元等, 2002; 夏汉平等, 2004; 蔡锡安等, 2004）。

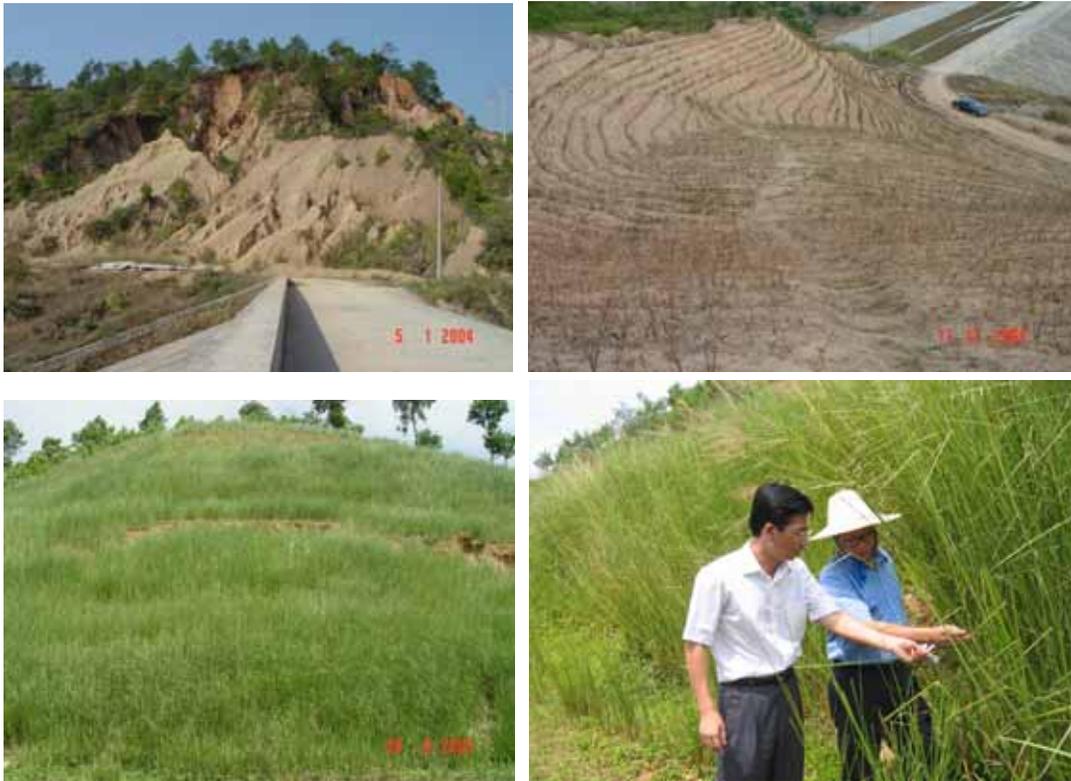


图 6-19: 广西贵港武思江水库的生态护坡工程

严重崩塌的水库边坡原貌(左上); 香根草工程在此实施, 但因为高温干旱, 种植 4 个月后仍未能返青(右上); 经过近一年后, 香根草绿篱终于形成, 坡面受到保护(左下); 广西水利厅领导在夏汉平博士的陪同下, 亲临现场考察, 并给予很高评价(右)

4 企业在推广香根草技术过程中所起的作用

在香根草技术引入中国的头 10 年 (1988-1997), 其推广应用的步伐一直较慢。一方面是由于人们对这一新技术还不甚了解, 甚至连它的很多功能都还未被发现; 另一方面是由于它还未走向市场, 没有企业去推动它。从 1998 年开始, 一些企业家开始认识到香根草的神奇功能, 并洞察到该技术的潜在市场价值。于是, 从那时起, 一些环保科技或园林绿化企业陆续开始涉足香根草, 一些专门经营香根草技术和相关业务的新公司也相继成立起来。从此, 香根草技术在中国特别是在广东地区的推广速度明显加快 (Xia, 2002)。

4.1 宏日草业集团暨广州宏日园林工程有限公司

宏日草业集团是中国最先涉足香根草技术的公司。1997 年底, 当集团董事长洪浩先生得知香根草这一新生事物之后, 立即找到夏汉平博士, 咨询相关的技术问题及推向市场的可能性。当他得知该技术已经成熟并且有较好的市场前景后, 便立即着手工作。很快他就在宏日草业集团下面成立了一个子公司—广州宏日园林工程有限公司。1998 年春, 公司率先建立了一个 10 亩的香根草基地; 翌年春, 基地又扩大到 50 亩, 这在当时是中国最大的香根草基地。

有了种苗后，公司就立即开始寻找市场，2000年他们就在中山市南阳巷成功实施了第一个城市社区的边坡治理工程。随后，工程接踵而至，先后开展了河源新丰江水库潮间带护坡工程、中山市蒂峰山垃圾场护坡工程、中山市外环路、景观路护坡与绿化工程、惠州市“惠澳大道”护坡工程、惠州学院操场边坡护坡工程、中山市珠江河口河岸绿化工程等。其中影响较大的工程有中山市蒂峰山垃圾场护坡工程，该工程曾作为第三届国际香根草大会的参观现场，泰国公主诗琳通亲临现场考察，并给予较高评价。另一个较有影响的工程是2005年在珠江中山段开展的河岸绿化工程。该河段由于靠近海边，土壤出现明显的盐渍化，一般植物难以生长。公司在此实施了面积达12万m²的河岸绿化工程，香根草在河岸边长得十分茂盛，形成一道亮丽的风景线（图6-20）。此外，公司还将香根草种植在城市高档住宅小区，以美化 and 装点小区环境（图6-21）。



图6-20：种植在珠江中山段河岸的香根草，一望无际，十分壮观



图6-21：在广州市某高级住宅小区湖边点缀的香根草，婷婷玉立，优雅别致

4.2 广东晖华环境科技有限公司

该公司于1999年底由广州绿晖园林公司有限公司与中国科学院华南植物所联合成立，因而是一个专门经营香根草的股份制公司。公司董事长徐远新女士是中国第一位从事香根草经营的女企业家。公司甫一成立，就紧锣密鼓地开始了香根草的推广应用工作。他们开展的第一个工程就是对深圳市一采石场的绿化。虽然该石场的复垦难度在一般采石场中不算太大，但对于一个新成立的绿化公司而言，那也是一个巨大的挑战。对此，公司克服种种困难，边施工边摸索边总结，终于按要求完成了工程，达到护坡与复垦的目的。公司还趁第四届中国国际园林花卉博览会（2001年10月~2002年2月）在广州召开的机会，在博览会现场建造了一个香根草花园，花园内不仅有模拟的香根草生态工程，还有以香根草为材料制作的精美小屋和香根草工艺品等（图6-22）。由于花园新颖别致，荣获了大会组委会颁发的环境保护特别奖，在博览会期间还吸引了成千上万的游客前来观光，包括国家水利部有关领导和泰国香根草界的同行。公司的工作还曾获得国家“星火计划”50万元的专项资助以加速香根草技术的推广应用，这是国家有关部门对香根草技术推广应用给予的第一笔专项资助。此外，公司还特别注重种苗基地建设，早在2000年就建立了一个面积达250亩的巨大香根草苗圃基地，当时是全世界最大的一个香根草苗圃基地。

最近几年，该公司在江西赣丰线（赣州市到崇义县与湖南交界的丰洲）等地开展了多个公路护坡的大型香根草生态工程，均取得良好效果，而且他们还把施工技术与取得的效果撰写成论文在学术刊物上予以发表（徐积江等, 2005）。



图 6-22：在第四届中国国际园林花卉博览会现场建立的微型香根草工程(左)；
还有优雅别致的香根草亭子与工艺品展览吸引了大量的参观者(右)

4.3 广州市香根草业科技有限公司

公司成立于 2000 年初，显然是专门为经营香根草而成立，而且这是中国第一家很可能也是世界上第一家以“香根草”命名的公司。虽然都是经营香根草技术，但和其他公司略有不同的是，该公司主要将香根草技术用于河道、水库、电站、溢洪道等水利水电工程及相关设施的保护方面，其中代表性的工程有：湖南张家界鱼潭水电站边坡滑坡治理工程、武汉市青龙山水库边坡防护工程、广西百色右江河岸保护工程、广西罗城燕山水库溢洪道边坡治理工程、广西龙滩水电站库区边坡治理工程、广东新兴县狮塘水电站的崩岗壁治理工程、广东饶平县汤溪水库溢洪道加固工程、湖北武汉市汉江口固滩护岸工程等（图 6-23）。这些工程的成功实施为香根草技术在水利水电建设方面的应用打下坚实的基础。公司总经理冯子元先生曾到泰国参加过由亚太地区香根草网络举办的国际香根草技术培训班，因此他对香根草技术的了解与掌握较为透彻。不仅如此，几乎每做一项工程，他都仔细观测，认真总结，并撰写成文发表，迄今已发表了 10 余篇有关的学术论文与工程报告。目前，该公司已经形成一套较为成熟的可应用于水利水电工程的施工与管理方法。

当然，该公司也将香根草技术应用于公路护坡等方面。例如，前几年他们在京珠高速湖南郴州段就成功开展了一个大型的护坡工程（图 6-24）。此外，公司近几年开始注重对香根草根系的利用，他们规模化种植物香根草后大量收集根系，然后卖给一些化学提炼厂用于提取精油，这在一定程度上又恢复了国内加工提炼香根油的产业。据了解，该公司将逐渐加大在香根草根系利用方面的工作，以满足国内外市场对香精油的需求。



图6-23: 在湖北汉江口河岸实施工程3月后的香根草景观



图6-24: 在尚未通车的京珠高速公路湖南郴州段开展香根草护坡工程

4.4 广州市艾棵环保科技有限公司

公司成立于2001年，也是一个为经营香根草技术而新成立的公司。公司总经理张平先生是一位最具挑战精神的企业家，他将香根草技术主要用于最难实施也最难成功的采石场复垦领域，特别是针对石壁的复绿。他一开始他就率公司实施了一个迄今为止仍为全球面积最大的采石场复绿工程。施工现场名叫白藤山采石场，位于珠海市金湾区，是一个特大型采石场。工程面积约6万 m^2 ，由3个紧挨的小采石场、8块大型石壁面构成，石壁坡度大都超过 80° ，有些地方就是垂直的石壁，平均高度约50m，最高点超过80m，因此复垦难度非常大。工程于2002年春开始施工，所采用的是一种全新的香根草复合生态工程技术。香根草在石壁上生长良好，达到了复垦的目的，成功解决了石壁的复绿问题（图6-25）。如前所述，这种香根草复合生态工程技术就是利用香根草固有的固土护坡特性，同时结合其他性状优良、生态效益高的乡土植物，再通过安装在石壁面上的水泥板槽，将植物种植在板槽内，从而建成永久牢固的复合生态体系。其核心机制是：1）特殊槽板制作及施工工艺；2）建置在水泥槽上的以香根草为主体的绿篱带；3）乔、灌、草、藤等植物群落的有机搭配以及由此产生的有效的营养循环生态体系；4）特殊的保水保肥技术措施；5）精细的管理措施。该技术成果撰写成论文应邀在ICV-3上宣读（Zhang and Xia, 2003），获得与会代表的浓厚兴趣，并荣获国际香根草网络成就奖一等奖。该技术由张平和夏汉平共同发明，并于2003年申请了国家发明专利。

完成白藤山采石场的复绿工程后，公司紧接着又实施了本章3.7节所述的广州科学城荔枝山采石场恢复工程。该工程的面积虽然不是很大，但施工难度可能超过任何一个采石场。工程不仅获得成功，而且效果比白藤山采石场的更好；更重要的是，随着时间的推移，植被覆盖的效果似乎越来越好（图6-15）。这2个工程的成功实施与良好效果为公司赢得了极大的荣誉，随后各地大批的采石场业主邀请张平先生开展同类工作，这也使得艾棵公司在近几年成为中国开展香根草工程赢得业务量最大的公司，并且获得非常可观的经济效益与社会效益。此外，该公司在贵州、安徽等地的高速公路护坡方面也做了大量工作。

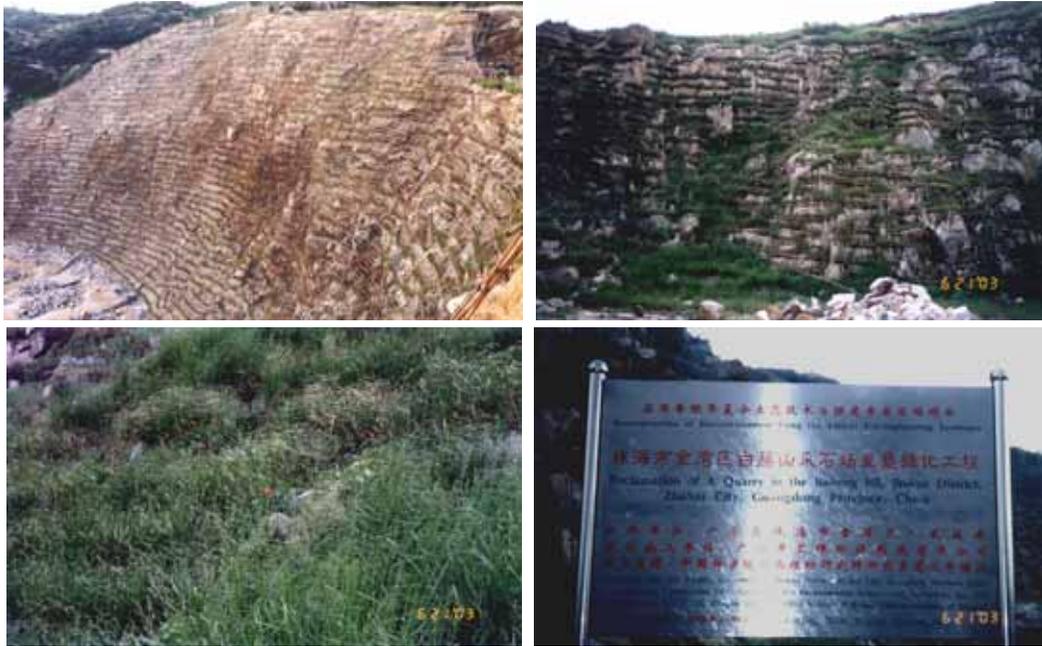


图 6-25: 珠海市金湾区白藤山采石场复垦绿化工程

在陡壁上采用香根草复合生态工程技术施工(左上); 工程实施 10 个月后的部分现场效果(右上); 香根草在板槽和石缝中茂盛生长(左下); 工程现场竖立的展示牌(右下)

4.5 广州沛丰环保科技有限公司

广州沛丰环保科技有限公司是最晚成立的一家经营香根草技术的公司，创建于 2004 年 3 月。公司以香根草技术为核心，专门为治理水土流失、恢复破坏或退化的生态系统和改良环境等方面提供设计和施工工程。虽然公司成立时间不长，但发展势头良好，2005 年在渝湛高速公路湛江段就实施了 10 万多 m^2 的香根草护坡工程。该工程把香根草技术成功应用于高岭土上边坡、碎石上边坡、填方下边坡的边坡治理，湿地处理以及岩石边坡复绿等多个方面，其中最快的种植一个月后就能达到良好的效果，并且经历了多场大暴雨的巨大考验。其良好的效果赢得了高速公路有关领导与专家的充分肯定与赞赏，CCTV 于 2006 年 5 月专程到现场拍摄专题节目，并现场采访公司总经理林宾先生（图 6-26）。



图 6-26: 渝湛高速公路湛江段香根草护坡工程

实施 1 年后效果(左); CCTV 记者现场采访沛丰公司总经理林宾先生(右)

最近 2 年，沛丰公司在广州市南沙区珠江入海口附近开展珠江河岸绿化与护坡工程。工程现场离南海边约 10 km，工程实施前，河堤破碎，肮脏，抗洪抗浪能力差。工程于 2006 年 5 月开始实施，施工面积达 45,000 m²，长度为 6 km。施工时先将河堤坡面平整，且将迎水面分成 2 级，中间设置一个平台，再铺垫碎石，然后安置中间带孔的螺母形水泥砖。待土木工程结束后，就进行植物绿化工程。方法是先向水泥砖的孔内填土，再在孔内种植植物。在工程实施前先在现场进行了数月的草种筛选试验，选择了香根草、百喜草、柠檬萱草 (*Hemerocallis citrina*)、野花生 (*Arachis pintoi*) 以及其它一些水生植物，如风车草 (*Cyperus alternifolius*)、宽叶泽苔 (*Caldesia grandis*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*)、菖蒲 (*Acorus calamus*) 等，结果表明香根草和百喜草的总体效果最佳。因此，工程实施时在迎水面较低一级种植香根草，较高一级种植百喜草。目前已完工 4 万多 m²，效果良好，香根草种植 40 天后就呈现出翠绿的景观，一年后变得非常致密、茂盛，百喜草也生长得十分繁茂。特别是香根草展示出了较强的耐盐性、耐淹性、耐热性和耐旱性。例如，有几丛种在河床的香根草，尽管经常遭到咸水浸泡，但仍然茁壮成长。预计全部工程完成之后，珠江口岸将呈现一道亮丽而又翠绿的风景线 (图 6-27)。



图 6-27：珠江入海口南沙段香根草护坡工程

江岸原貌(左上)；香根草护坡工程实施 40 天后景观(右上)；10 个月后香根草变得非常致密，河岸形成一道亮丽的风景线(左下)；项目负责人林宾先生对高质量完成全部工程充满信心(右下)

4.6 千江企业有限公司

最初，千江企业有限公司当初是一个经营油漆与环保设备等业务的公司，与香根草几乎毫无关系。从1998年开始，当公司得知香根草技术后，便立即和华南植物研究所合作开始了香根草的组织培养工作，很快就成为中国第一家大规模组培香根草的企业。1999年，公司开始实施第一个香根草工程，也是难度较大的采石场复绿。该石场名叫大华采石场，位于深圳市郊。由于没有陡壁，相对而言较易复绿，最终取得成功（图6-28）。随后，公司还采用香根草与爬墙虎(*Parthenocissus*)结合对多条公路进行护坡，均取得较好效果与效益（图6-29）。



图6-28：深圳大华采石场种植香根草复绿的效果



图6-29：一段乡村公路用香根草与爬墙虎进行护坡，效果较好



图 6-30：广州大田山垃圾场实施香根草生态工程的恢复效果

垃圾场最早实施恢复工程的一个边坡(左上)；最晚开展恢复工程的边坡(右上)；垃圾场顶部的恢复状况(左下)；

Dick Grimshaw 先生(右二)亲临现场为“生态恢复示范基地”揭牌(右下)

实际上，该公司在应用香根草技术最具特色的领域是开展垃圾场的生态恢复。最具体表性的一个工程是对广州市大田山垃圾场的生态恢复。大田山垃圾场当时是广州面积最大的垃圾场，由于被垃圾填满，封场后必须对它进行恢复。公司说服广州市有关部门采用了香根草技术。工程于2001年春天开始，前后经过3年多的施工才全部完成，覆盖面积达35,000 m²。实施香根草技术除了稳定垃圾场边坡外，还过滤和净化垃圾渗滤液，最终对垃圾场实现生态恢复。几年过去了，香根草一直生长良好，非常茂盛，有效地稳定了边坡，净化了污水，产生了良好的生态效益和社会效益。该工程被ICV-3组委会指定为大会参观现场，泰国公主诗琳通和TVNI主席Dick Grimshaw先生都曾莅临现场考察，并给予高度评价。Dick Grimshaw还于2002年4月亲临现场为该公司与中山大学生命科学学院联合建立的“广州市大田山固体废弃物填埋场生态恢复示范基地”揭牌（图6-30）。

4.7 杭州之江香根草工程有限公司

该公司成立于2000年7月，这是中国又一家以“香根草”命名的公司。顾名思义，该公司位于杭州，也是华东地区知名度最高的经营香根草技术的私营公司。该公司的一大特点是建立了一片十分壮观的香根草种苗基地，每年生产数以百万计的香根草种苗（图6-31）。公司每年实施多个香根草护坡工程，特别是在公路边坡治理方面摸索出了一套较好的施工与管理方法，使得其实施的工程基本上都能取得较好的效果（图6-32）。不过，略感遗憾的是，据说前两年该公司改名为杭州固绿交通工程有限公司，尽管公司仍以实施香根草生态工程为主，但也开展其他工程护坡措施。



图6-31：壮观的香根草种苗基地



图6-32：香根草公路护坡工程

此外，这几年开展过香根草工程的公司还有：广东昆鹏科技发展有限公司、广州市白沃生态科技公司、广州增城某农场（公司）、云南绿大地企业有限公司，等等。一些企业还对ICV-3给予了不同程度的支持，如宏日集团、广东晖华环境科技有限公司、广州艾棵环保科技有限公司、广州市香根草业环境科技有限公司等。这些公司为广东甚至为中国香根草技术的发展与推广起了较大的作用。

5 有关香根草的研究进展

如前所述,早在1950年代引种香根草提炼根油的同时,就开始了一些对香根草的试验研究与观测。当时开展试验观测的目的主要是如何快速繁殖香根草种苗以及如何培育出含油量高、油质好的好根来(夏汉平,1998)。自1980年代中期以来,国内外所开展的有关香根草的栽培管理方法与我国在1950年代所得到的观测结果是基本一致的,这表明我国在这方面的观测研究远远走在世界前列。然而,由于从1960年代以来对香根草的栽培和加工逐渐停止,国内对它的观测研究也就随之中断。对香根草的综合试验研究始于1980年代末,这与重新利用这一植物同步的,而且很多方面的研究走在世界的前面。

5.1 生长发育与生理生态特性

在引种栽培与种苗繁殖方面,早期有引种试验(陈法杨等,1991;高维森等,1991)和繁殖试验(丁光敏和方德厚,1990),后来又成功获得组织培养,并得到年增殖率可达1,000,000的组培方法(吴楚彬等,1998;杨冰冰等,2007)。在生态特性方面有香根草的生长习性与生态适应性观测(陈凯等,1993;夏汉平等,1994)。研究表明,施肥和修剪有利于香根草分蘖(陈法杨等,1991;陈旭辉等,1998);但修剪要适度,一般每年修剪1~2次即可,过多的修剪反而不利于香根草生长(夏汉平等,1994;夏汉平和卢雪琴,2003;刘金根等,2007)。香根草对P较敏感,在缺P土壤上要特别注意增施P肥,否则其生长会受到严重抑制(夏汉平等,1996;夏汉平和卢雪琴,2003)。如果是在瘦坡地上种植香根草,由于施肥促进了其生长发育和分蘖形成,结果施肥处理的地表径流和土壤侵蚀比对照分别减少25%和55%(陈旭辉等,1998)。香根草为阳性植物,不耐阴,遮光显著影响其生长,恢复光照,其生物产量、分蘖率、株高增长等都能得到不同程度的恢复,其中以分蘖速度的恢复较快,而株高生长和干物质累积的恢复来得稍慢一些(夏汉平等,1994;夏汉平和卢雪琴,2003)。不过,在香根草不同的生长阶段,遮光对其产生的影响并不完全相同,对成活率和前期生长的影响较小,但在旺盛生长期,遮光的影响极其明显(刘金根等,2006)。

香根草具有很强的抗旱能力(夏汉平和李美茹,1998;夏汉平等,1998)。长时间干旱胁迫虽然会影响其生长,但恢复淋水后又很快恢复正常生长(刘金祥等,2005b)。香根草也非常耐淹,在经历了120天的完全淹水后,香根草仍能存活(Xia *et al.*, 2003)。香根草之所以耐淹,主要是因为淹水后其净光合速率、气孔导度、蒸腾速率增加;淹水胁迫下香根草体内保护酶系统产生了适应性变化,保持了体内自由基的平衡,从而使之具有极强的耐涝能力(韩立亚等,2008);而且有性繁殖的香根草保持了亲本水陆两栖的特性(刘金祥和王铭铭,2005;刘金祥等,2005a)。这为香根草应用于水库、河流潮间带的水土保持与生态治理以及用于建植人工湿地处理污水等提供了理论依据。虽然香根草既耐旱又耐淹,但在移栽香根草种苗时,应保持土壤适度水分,过干或过湿的土壤环境都不利于香根草的返青、生长与分蘖的形成(刘红霞等,2006)。

研究表明,香根草具有较强的抗盐性,用海水浇灌香根草对其生长发育不会产生明显影响(高文玲等,2008);导致其生物量下降50%的土壤电导率为20.9 dS/m,属抗盐种类(夏

汉平等, 2000b)。香根草之所以有较强抗盐性, 主要是因为它表现出拒盐特性, 而且将所吸收的盐大部分 (尤其是 Na^+) 滞留在根系内 (夏汉平等, 2000b)。

5.2 水土保持、固土护坡与土壤改良特性

香根草已经被充分证明是一种优良的水土保持植物, 由香根草所形成的植被对地表径流、土壤侵蚀和对 N、P 流失的控制效果好于由刺槐 (*Robinia Pseudoacacia*) 林、旱冬瓜 (*Alnus nepalensis*) 林或圣诞树 (*Acacia mearnsii*) 林的效果 (王震洪等, 2006)。在桉树林下, 香根草区的地表径流和土壤侵蚀比柱花草 (*Stylosanthes guyanensis*) 区分别低 15.2% 和 28.2% (Liao *et al.*, 1998)。大量的观测表明, 和无篱措施相比, 香根草篱措施在坡耕地上对控制土壤侵蚀和地表径流具有十分明显的效果, 它能使径流量减少 60% 左右, 土壤侵蚀量减少 90%~95% 左右 (夏汉平等, 1996; 卓慕宁等, 2007a, 2007b)。一般而言, 香根草篱在种植后的第一年可控制 60%~70% 左右的土壤侵蚀, 从第二年开始就可控制 90% 左右的侵蚀, 并基本保持这个水平 (王芳等, 2006)。当香根草与一些抗逆性强、适应性广的乡土植物—包括乔木、灌木、草本、藤本—进行有机搭配, 并在需要时辅以一定的工程措施, 用于水土流失治理和退化生态系统的恢复与重建时, 就被称之为“香根草生态工程”(The Vetiver Eco-engineering) (夏汉平等, 1998)。但在国际上, 开展香根草工程时通常都只有香根草这一个种, 即把香根草等高种植成带来控制土壤侵蚀和恢复退化生境, 因此它有时又被称为“香根草绿篱技术”(The Vetiver Grass Hedgerow Technique) (National Research Council, 1993)。很显然, 无论是防治和恢复的效果还是绿化美化环境的效果, 应用香根草生态工程都要比单一种的香根草绿篱技术好; 而且, 多种植物配置比单一植物能更好地抵抗疾病和虫害的侵袭。根据福州市公路局研究, 采用香根草技术、干砌片技术和浆砌片技术进行护坡时, 前者护坡的成本比后两者节省 22 元/ m^2 以上 (徐礼煜等, 2003)。一般情况下, 采用香根草技术治理滑坡所需的成本仅为“石墙”技术的 10%~20% (Xia *et al.*, 1999)。

关于香根草根力学方面的研究主要是程洪等参照 Hengchaovanich 和 Nilaweera (1998) 的实验开展了香根草根固土护坡的力学观测, 综合比较了几种不同植物的根系抗拉力和根系剪切力, 为利用香根草生物措施代替或部分代替工程上的措施提供了力学理论依据 (程洪等, 2003)。最近, 张宏波等 (2008) 的现场观测表明, 种植香根草后, 公路边坡土壤的物理与力特征参数产生明显变化: 上层土体的内摩擦角 ϕ 从 17.2° 增加为 18.2° , 增长 8%, 粘聚力 c 从 25.4 kPa 增加到 27.3 kPa, 增加 6%, 土坡的稳定性也明显提高, 安全系数从 1.391 提高到 1.566, 增加了 12.6%; 而香根草根系达不到的下层土体的天然容重、内摩擦角和粘聚力等几乎不变。这表明, 香根草护坡可大幅度提高土壤的抗破坏力, 从而提高土体稳定性。归纳起来, 香根草在固土护坡方面表现出的神奇效果主要体现在 (姚环等, 2007): 1) 香根草具有纵深发达的根系, 根系抗拉力随着根数量的增加而显著增大, 它们对边坡起着类似“活铆钉”的作用; 2) 香根草明显改善边坡土体的力学特性, 显著地提高土体的抗剪强度, 从而提高边坡的稳定性; 3) 快速簇生成丛的香根草绿篱带不仅可防止降雨对坡面的直接击溅, 还可分散径流和减少坡面径流量, 从而显著地减低降雨和径流对坡面的侵蚀量, 对边坡表面起着良好的保护作用; 4) 强大的蒸腾作用迫使根系吸收土体中大量的水分, 从而降低土体中含水量和

孔隙水压力, 进而提高边坡土体的强度, 增强边坡的稳定性; 5) 穿透深度大、分布面广的香根草根系像有生命的“活性钢筋网”, 它与边坡土体牢固结合共同作用, 发挥成拱作用, 与土体融合胶结形成类似原位复合的重力墙式柔性挡土结构, 可较好地防止或控制边坡位移或失稳的发生; 6) 香根草根系网的存在, 可明显提高边坡土体的抗剪强度指标内聚力及内摩擦角, 从而有效地提高挡土墙的抗滑与抗倾覆能力, 增加挡墙边坡的稳定性。

在坡地果园种植香根草不仅能培肥土壤, 增加土壤养分和氨基酸含量, 而且还能改善农田小气候, 从而促进果树生长与果实产量增加。陈凯等(1994)发现在柑桔园内种植香根草可提高土壤有机质、多种养分和微量元素的速效成分以及 20 种氨基酸的含量。夏汉平等(1996)观测到在酸性紫色土上种植香根草 29 个月后, 可使土壤 pH 值上升 0.5~0.7, 孔隙度增加近 5%, 土壤有机质、全氮、速效氮、速效钾等养分的含量都有不同程度的增加, 并能明显改善农田小气候, 但香根草不仅不增加土壤中的速效磷含量, 反而使其明显降低。陈旭辉等(1998)亦观测到缺磷土壤会严重影响香根草的成活率与生长发育。用香根草篱进行公路护坡时, 种草坡面 0~20 cm 土壤含水量为 14.2%, 而对照坡面仅为 9.8% (敖惠修等, 1997)。香根草工程在改善农田小气候方面的效果也较明显。在夏季, 它可使果园内的气温下降 1.2~1.9℃, 相对湿度增加 1.7%~4.3% (夏汉平等, 1996); 在冬季, 草篱又是果园挡风御寒的天然屏障, 能减缓冷空气对流和扩散, 使果园温度提高 1~3℃, 又具有良好的防冻保温作用 (陈凯等, 1993)。受香根草带保护的坡地作物比在梯田保护下的增产 5% (阮伏水等, 1995)。

5.3 重金属污染土壤的植物修复与污水净化

香根草对重金属的耐性较强, 它可在一般植物难以立足的金属矿山或尾矿或重金属污染的土壤上生长, 这为应用香根草恢复矿山或修复重金属污染土壤提供了先决条件。研究表明, 香根草对 Cu、Pb 或 Zn 的耐性强于观鹅草 (*Roegneria kamoji*) (田胜尼等, 2004); 香根草在油页岩废渣场上生长良好, 可用于废渣场的生态恢复 (夏汉平等, 2000a; Xia, 2004)。香根草对铅锌尾矿也表现较强的适应性与较好的恢复效果 (夏汉平和束文圣, 2001; 杨兵等, 2005); 而且, 它还可使矿渣的理化性状得到改善, 甚至使矿渣的养分含量增加 (张国发和姜旭红, 2004)。然而, 尽管香根草能在高污染的矿山与尾矿上生长, 并产生较好的生态恢复效果, 但它对重金属的吸收能力并不是很强, 目前还未发现香根草对哪种重金属达到超富集水平。一般来说, 香根草对 Pb、Zn 的累积量明显大于 Cu, 香根草植物体中元素总含量表现为 Ni>Cr>Pb>Cd, 而且将吸收的重金属大部分滞留在根部 (夏汉平和束文圣, 2001; 韩露等, 2005)。施肥并不能明显增加香根草体内重金属的浓度, 但能增加香根草的总吸收量, 因为施肥促进了生物量的增加 (Xia, 2004; 杨兵等, 2005)。但是, 也有研究发现, 施用 N 肥能促进香根草地上部生长, 显著提高地上部特别是叶的 Cd 和 Zn 含量, 导致其修复效率成倍显著增加。因此, 为改善香根草对较贫瘠土壤中 Cd、Zn 污染的修复效率, 应对香根草适施 N 肥, 并控制或者不施 P、K 肥为佳 (郑小林等, 2007)。此外, 香根草对铝毒亦有较强的抗性, 它可使土壤的可交换 Al 含量从 2.10 cmol (1/3Al³⁺)/kg 下降到 1.45 cmol (1/3Al³⁺)/kg (夏汉平等, 1996)。这为香根草恢复 Al 毒土壤提供了理论依据。

夏汉平等（1999）最早在国内开展香根草处理污染的效果研究，发现它对垃圾渗滤液有较好的净化效果，对 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 等的净化率分别为 32.8%~35.3%、28.1%~31.9%、86.7%~89.2%、74.3%~78.1%，其总体表现与净化效果明显优于水葫芦和百喜草，甚至好过水花生（*Alternanthera philoxeroides*）。刘继文和刘继余（2006）还发现，种植香根草对防治煤矿矸石山的二次污染有明显效果，可将矸石山淋溶废水中的悬浮物削减 75%，COD 削减 71%。不过，香根草对污水中污染物的吸收能力并不是很强，它的去污方式除根系的吸收作用，主要还是通过根际微生态系统的综合作用来达到净化目的（夏汉平, 2000）。香根草非常适应人工湿地环境，不仅茎叶生长茂盛，分蘖快，根系的伸展也极强，而且没有病虫害（黄丽华等, 2006）。这些特征注定香根草人工湿地能表现出较强的污染处理效果。

处理污水最常用的手段是建植人工湿地。例如，廖新梯和骆世明（2002a, 2002b）观测到香根草和风车草（*Cyperus alternifolius*）人工湿地对猪场废水的 COD、BOD、TN 都有较好去除效果，其中对 COD 的去除率最高接近 90%，对 TP 的净化则是香根草湿地明显好过风车草湿地。但是，净化效率受植物密度、季节、污水滞留时间等因素的影响。处理污水的另一种措施是建植人工浮床或浮岛（Kong *et al.*, 2003; 李翠芬等, 2007）。例如，用香根草建植的人工浮床在 5 个星期内可清除猪场废水中 90% 以上的 Cu 和 Zn，60% 以上的 As 和 N，59%~85% 的 P，30%~71% 的 Pb，以及 13%~58% 的 Hg（Kong *et al.*, 2003）。香根草对水体中的 N、P 还表现出很强的吸收能力，在猪场氧化塘水面的人工浮床上培育 75 天，每株香根草可吸收 1944 mg N 和 282 mg P（刘士哲等, 2005）。然而，用单一的香根草种建植人工湿地或浮床处理污水并非总是有效，有时效果也不甚明显，甚至较差（张志勇等, 2007）。这时就应考虑用香根草与其他植物搭配，即采用多种植物配置措施以提高人工湿地或浮床处理污水的效率（李睿华等, 2006a）。例如，香根草+沉水植物带对污染河水的净化效果就比较好，对河水中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除率分别为 43.5%、71.1% 和 69.3%（李睿华等, 2006b）。另外，香根草作为一种植物对污染物的抗性总是有限的，灌溉污水的浓度如果太高，香根草不仅起不到净化作用，反而有可能受到严重胁迫。因此，不宜将香根草用来处理浓度很高的污水，待处理污水的浓度最好控制在 35% 以下（王如意等, 2005）。

5.4 组织培养与植株再生

在过去 10 年里，有关香根草的组织培养和植株再生技术的研究陆续开展起来并取得成功。1998 年，中国科学院华南植物研究所率先在国内开展了香根草的组织培养研究，发现 6-BA 和激动素可促进绿芽的分化与生长，且以 1~2 mg/L 的浓度为宜，2,4-D 和 NAA 浓度在 0.5 和 1 mg/L 以下较合适；通过组织培养繁殖香根草，年增殖率可达 100 万（吴楚斌等, 1998）。马国华等（2000）接着开展了进一步的研究，他们以香根草的嫩叶鞘基部切段为外植体，再取其试管苗的基部切段诱导体细胞胚胎发生和芽的器官发生，发现生长素是诱导外植体分化和形成体细胞胚的关键，而芽的形成则源于体细胞胚的萌发，它们是由 NAA 或低浓度的 2,4-D 所诱导的。该研究建立了有效的香根草循环诱导再生体系和试管苗繁殖体系，为进一步研究香根草的生物技术奠定了良好基础。随后，马镇荣等（2003, 2006）对香根草体细胞胚胎发生及形成条件进行了深入的研究，认为香根草离体发育的启动可在外植体的表皮细胞或薄壁细

胞中进行, 这些细胞逐渐发育为胚性细胞, 体细胞胚是单细胞起源的, 且其胚性愈伤的再生能力很强, 在继代条件下可以长期保持。他们还观察到一些只有在双子叶植物中才出现的鱼雷形体细胞胚。此后, 韩露等 (2004) 及郑贵朝等 (2005) 也分别用嫩叶鞘、茎节和茎段诱导出了香根草的愈伤组织及再生植株, 所建立起来的植株再生体系及胚性愈伤组织为香根草的遗传转化奠定了良好基础, 符合生物工程对离体培养的要求。例如, 韩露等 (2004) MS 培养基附加 0.5 mg/L 6-BA + 2.0 mg/L 2,4-D 的激素组合对香根草茎段愈伤组织的诱导效果最佳; 将产生的愈伤组织团转入分化培养基中, 诱导不定芽, 其最适分化培养基为 MS 附加 3.5 mg/L 6-BA + 0.2 mg/L IAA, 再生苗在 MS 培养基附加 3.0 mg/L 6-BA + 0.5 mg/L IAA 的培养基上, 进行生根培养效果较好。可见, 香根草的茎段和茎节均可作为外植体。

杨冰冰等在最近几年较好地建立了香根草的植株再生体系, 并对转基因技术开展了初步研究, 取得重要进展。他们以香根草的腋芽为外植体进行离体培养, 以 MS 为基本培养基, 对胚性愈伤组织的诱导和植株再生体系的建立进行了优化。结果表明, 适宜的诱导愈伤培养基为 MS + 2.0 mg/L 2,4-D + 1.0 mg/L 6-BA, 愈伤组织诱导率最高可达 96.7%; 适宜的分化培养基为 MS + 1.0 mg/L 6-BA; 适宜的生根培养基为 1/2 MS + 0.1 mg/L IBA + 0.1 mg/L PP₃₃₃。不同品种在相同培养条件下的愈伤诱导率存在较大差异。香根草的胚性愈伤组织具有单子叶植物典型的胚胎结构, 其植株再生能力在继代条件下可以长期保持, 继代 18 次的愈伤组织其植株再生能力仍高达 92.0%, 即使继代 24 次后仍可达 81.6%。香根草高效再生系统的建立为香根草开展基因工程及遗传转化方面的研究奠定了基础, 也为大规模繁殖香根草种苗提供了新的技术保障 (杨冰冰等, 2007)。此外, 他们还把 *otsA* 基因用 Sac I/Kpn I 双酶切后, 插入到双元表达载体 p1301UN 的多克隆位点区, 构建成植物表达载体 p1301UN-*otsA*, 再采用冻融法将重组质粒转移到 DH5a。酶切分析和测序结果都证明其成功性。然后建立了一个有效的香根草遗传转化系统: 将胚性愈伤组织在浓度为 OD₆₀₀ = 0.4-0.5 的农杆菌 EHA105/p1301 中浸染 20 分钟, 转移到共培养培养基中 25℃ 暗培养 4 天, 再转移到筛选培养基 SIM 中 25℃ 暗培养 4 周。经过以上处理后, GUS 瞬时检测结果表明, 18% 的胚性愈伤为潮霉素 B (HygB) 抗性愈伤 (Yang *et al.*, 2008)。他们通过对香根草腋芽离体培养的研究, 建立了一套高效的香根草组织培养再生系统; 并以农杆菌 EHA105/pCAMBIA1305.1 为介导, 建立了一套有效的香根草遗传转化系统; 还构建了的植物双元表达载体 p1301UN-*otsA*。这种载体具有易于检测和筛选, 比较适合单子叶植物遗传转化等优点。然后以农杆菌 EHA105/p1301UN-*otsA* 为介导, 开展了将 *otsA* 转化到香根草植物基因组中的研究, 以期增加香根草体内海藻糖的含量, 从而提高其抗逆性的目的 (图 6-33)。

5.5 其他方面的研究进展

这几年, 有关对香根草进行二次开发利用的研究取得了不少新的成果。例如, 香根草被发现用作食用菌的培养基非常理想。用 38% 的香根草, 10% 的象草, 30% 的芒萁, 20% 的麸皮, 1% 的石膏, 1% 的石灰时配制的培养基培养毛木耳, 其菌丝体生长势最强, 生长速度最快, 生物学效率可以达到 127.5% (方白玉和林辉, 2005)。香根草残体作为番茄育苗基质亦是可行的, 只不过在使用前应进行适当的堆沤或增加氮肥用量 (苗兵兵等, 2005)。

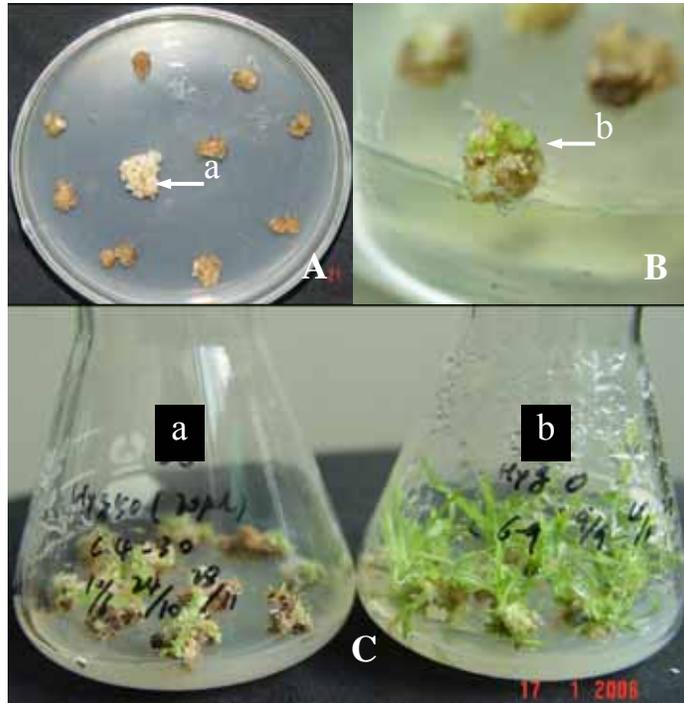


图 6-33: 香根草在农杆菌介导下的遗传转化

在 HygB 筛选诱导培养基中生长 4 周后的抗性愈伤(箭头 a)(A); 在 HygB 筛选分化培养基中生长 4 周后的抗性小苗(箭头 b)(B); 在 HygB 筛选分化培养基中生长 8 周后的抗性小苗明显生长延迟(a), 而无 HygB 筛选压的对照生长良好(b)(C)

如前所述, 早在 1950 年代香根草就被发现可作为造纸原料制造高级纸张。近来的试验进一步表明, 香根草的平均纤维长度为 0.698 mm, 有较好的可制浆性, 不过其制浆造纸性能尚不及狼尾草和象草(黄寿恩, 2006)。

最近, 陈先茂等(2007)观测发现, 水稻螟虫有明显偏爱在香根草上产卵的特性, 因此可用香根草作为诱集植物来治理水稻螟虫, 从而可大大压缩施药面积和用药量, 有一定的经济效益和显著的生态效益; 利用香根草治理水稻螟虫的最佳种植时期为 3 月底至 4 月初、种植面积应为稻田总面积的 6%~10%。这一发现为进一步加大香根草的生态农业建设奠定了很好的理论基础。

此外, 香根草还被发现对丛枝菌根(AM)有较强的感染力, 这对提高植物抗御不良环境的能力、促进植物生长等方面都会有所帮助(高丽霞等, 2007)。

香根草有数十种生态型, 中国目前发现或引种了 10 多种(夏汉平和刘世忠, 2003)。不同的生态型不仅在外型和生长速度方面有差异, 其土壤改良与生物学效应也会有所不同。例如, 来自印度的 Karnataka 生态型在生长、发育、分蘖等方面的综合表现优于其他 10 多种生态型(夏汉平和刘世忠, 2003); 不仅如此, Karnataka 品种下面的土壤线虫还显著高于来自美国的 Sunshine 品种下面的土壤线虫, 这说明从生物学效应来看 Karnataka 品种可能有更好的应用前景(邵元虎等, 2007)。

6 成绩、问题与展望

6.1 取得的成果

综上所述，中国的香根草技术，无论是理论研究还是实际应用，在过去 20 年里都取得了可喜的成果。在理论研究方面，以中国科学院华南植物研究所（园）为代表，对香根草的形态特征、引种栽培、生理生态特性、种质资源、生态工程与效应、组织培养、植株再生等方面都进行了研究，取得一系列研究成果，夏汉平博士也因此获得全球第一个“香根草冠军奖”（2003）以及其他 7 项国际大奖。20 年来，全国先后有数十家单位加入到香根草的研究与开发应用中，迄今已发表有关香根草的学术论文达 300 篇左右，出版了 6 本有关香根草的专著与研究论文集，相关的研究与推广应用成果获 30 多次（项）国内外大奖。如中国香根草网络于 2002 年被国际侵蚀控制协会（IECA）授予“杰出环保奖”；束文圣、徐礼煜、卢升銮、夏汉平等各获得过一次“泰国国王香根草奖”，这也使中国成为全球获“泰国王奖”人数最多的国家之一。由于中国在香根草研究与推广应用方面取得的可喜成就，TVNI 将第三届国际香根草大会（ICV-3）放在中国举行（图 6-34）。在广东省农科院、中国科学院华南植物所、华南农业大学和广东省草业与环境协会的精心组织下，ICV-3 于 2003 年 10 月 6~9 日在广州隆重召开，并取得巨大成功与丰硕的成果，赢得了国际香根草界的广泛赞誉（Truong and Xia, 2003; 夏汉平, 2003)。在推广应用方面，香根草技术已在中国南方近 20 个省区推广开来，广泛用于水土流失治理、公路铁路护坡、河岸水库边坡保护、金属矿山的生物修复、垃圾场与采石场的植被恢复、污染水体的净化以及生态农业建设等方面。迄今至少开展了数以百计甚至数以千计的香根草生态工程，绝大多数都取得了成功。近 10 年来，由于香根草技术所表现出的良好市场前景，出现了以广州为中心，南方地区一大批私营企业从事香根草技术市场运作的景象，从而大大加快了该技术的推广应用。



在主席台上就坐的领导与贵宾是(从左至右): TVNI 主席 Dick Grimshaw 先生、原国家水利部部长杨振怀先生、广东省副省长宋海博士、泰国公主 Maha Chakri Sirindhorn、中国科学院副院长陈竺院士、泰国皇室 Chaipattana 基金会秘书长 Sumet Tantivejkul 博士

图 6-34: 2003 年 10 月 6~9 日在广州召开的第三届国际香根草大会

6.2 存在的问题

尽管香根草技术在中国的研究与推广应用都取得可喜成绩，但不可否认的是，无论是理论研究还是实际应用，该技术都还存在一些问题有待解决。

1) 从目前的研究来看，主要集中在水土保持、污染控制、恶劣环境的生态恢复、土壤改良等。然而，有关香根草在水土保持与污染控制方面的机理仍不是特别清楚；甚至连香根草根系在不同基质、不同水分、不同养分条件下的生长状况等都有待进一步研究。

2) 香根草对很多重金属都有一定的吸收能力，加之其生物量巨大，因此应用香根草净化重金属污染土壤是可行的，很多地方也在推广应用。然而，香根草所吸收的重金属大部分富集在根系中，如何提高地上部分的吸收量是亟待解决的问题。此外，其本身吸收的重金属如何妥善处理也是需要认真思考的。

3) 从香根草根部分提取的香根油具有一定的驱虫作用，但生长在土壤中的香根草对根区周围的土壤生物似乎并没有明显影响，原因何在？迄今，有关香根草地下部分的土壤动物、菌根情况及其与香根草的相互作用等方面的研究还罕见报道。

4) 香根草不耐阴、生长太高、冬季枯黄、低温难以存活等缺陷较为明显。尽管为克服这些缺陷做了大量的研究，但都未能从根本上解决这些问题。显然，通过改进栽培措施来解决这些问题的可能性不大，最有效的手段应该是发展转基因技术。然而，目前该技术用于香根草的进展还非常缓慢，虽然已经开展了一些前期工作，但关键性的技术问题还未解决。

5) 香根草作为一种药用植物栽培来提炼精油在商业上有较大的发展潜力，但目前国内栽培的香根草普遍还存在精油含量不高与质量欠佳的状况，这使得以从事收获根系与提炼精油为目的生产者难以获得可观的利润，从而大大影响了香根油在国内市场上的开发。另外，挖取香根草的根系提炼精油有可能对环境造成一定的影响或产生新的水土流失，如何解决这个问题也有待于我们进一步研究。

6) 香根草技术用于固土护坡与环境治理总体上是有效的、可行的，迄今为止所实施的工程大多数是成功的。但是，由于某些原因，也有一些工程失败了或效果不理想。“好事不出门，坏事行千里”，一次失败产生的负面影响可能要超过 10 次成功所产生的正面影响。因此，如何尽可能避免工程失败也是值得我们深思的。

7) 香根草技术是一种生物或生态技术措施，不同于“硬性”的工程措施。由于植物生长发育的特殊性，每年植物（特别是草本植物）会有一个生长发育的轮换过程。这时如果管理跟不上，工程现场的景观就会明显变差，虽然达到了恢复自然生态的目的，但势必会因景观不好等原因而难以让人完全接受。因此，要想香根草技术能保持长久的生命力，其景观不佳的问题（尤其是在冬天）也是迟早需要解决的。

6.3 发展展望

我国南方红壤地区 11 个省区的水土流失面积已由 50 年代的 60 万 km^2 上升到 80 年代的 69 万 km^2 ，占国土面积的 28%，是我国人地矛盾十分突出、水土流失又相当严重的地区。特别是近 20 年来，人口急剧增加，人类活动加剧，以及工业化和城市化的加速发展，使得华南地区乃至全国的水土流失变得相当严峻，不少地方还呈现逐年上升之势。目前，我国的水土

流失面积高达 179 万 km²，每年因水土流失损失的沃土超过 50 亿吨。广东的水土流失面积由建国初期的 7444 km² 上升到 80 年代上半期的 17,000 km²。最近 10 年，广东在水土流失治理方面做了大量工作，取得了较显著成效，但目前仍有 1 万多平方公里的水土流失面积（夏汉平等, 2000c）。很显然，南方地区的水土流失地基本上都可以用香根草生态工程进行治理。

1998 年，长江和珠江流域都发生了大洪水，而且近年来这 2 大流域的洪灾几乎每年都有发生，有些年份还十分严重。例如，2005 年和 2008 年珠江流域又相继发生较大范围的洪涝灾害，并导致严重的水土流失、滑坡与泥石流等次生灾害。这除了降雨量较大的原因外，另一个重要原因是上游的植被遭到严重破坏。虽然这 2 个流域特别是长江流域的生态防护林工程已开展多年，但整个流域内的水土流失仍相当严峻。这除了人为破坏外，另一个主要原因是由于人工林的水土保持效果并不理想，因为林下没有地被物或“生物坝”，因而在雨水的击溅与冲刷下，水土流失照样产生。显然，如果在这 2 大流域大规模开展香根草生态工程，则不仅能有效控制土壤侵蚀，改善全流域的生态环境，而且还可能提高流域内瘠薄红壤的土壤肥力，从而促进整个流域的生产和社会发展（夏汉平, 1999）。

现已证明，香根草有较强的耐盐性能，如果把它种在沿海滩涂，很可能对滩涂的保护、对滩涂生境的改善和盐渍地的改良等都起一定作用。而目前我国大面积的滩涂地亟待保护。香根草对有机污染物和垃圾污水也表现出了很强的抗性和净化能力，因此用香根草作先锋植物来复垦工业污染区和垃圾堆放地以及用它净化污水，亦将是一种有效的生物改良措施。此外，我国南方地区还有大量的公路、铁路、水库、堤坝、荒山、裸坡、石场等需要保护、恢复或亟待控制水土流失。如前所述，香根草可用于重金属的植物修复或重金属污染地的生态恢复。目前，我国的重金属污染土壤高达 2000 万 ha；因矿山开采累计被破坏的土地达 288 万 ha，而且每年仍以 4.67 万 ha 的速度增加（束文圣等, 2000）。可以肯定，这些被污染被破坏的土地有相当一部分是可以通过香根草技术得以修复或恢复的。而且，大面积种植香根草还可在一定程度上缓解我国南方地区饲料紧缺的局面。

特别值得一值的是，2008 年 5 月 12 日，四川汶川发生了里氏 8.0 级大地震。这场自新中国成立以来所发生的破坏程度最重、受灾范围最广的大地震，不仅导致了巨大的人员伤亡和财产损失，而且还给当地的生态环境带来了灾难性的破坏。具体而言，一是很多山体出现滑坡、水土流失与泥石流等次生地质灾害；二是在灾后防疫过程中使用大量消毒剂、灭菌剂，以及生活垃圾、生活污水、腐烂动物尸体的影响等，导致当地的土壤和水体（包括地下水）出现不同程度的污染。由于受灾地区位于岷山-横断山生物多样性保护关键地区，是生物多样性丰富、生态环境非常敏感的地区，是长江上游重要的生态屏障。因此恢复当地的生态系统显得尤为重要和紧迫。目前，灾后重建，包括生态恢复的工作正全面展开。显然，香根草技术在这里大有用武之地，无论是治理水土流失、滑坡与泥石流，还是开展山体植被恢复甚至污水处理等，都可考虑使用香根草生态工程技术或将其与其他工程措施或生物措施结合起来实施。

总之，香根草技术是一种投入少、回报多、生态效益、社会效益和经济效益都不错的技术。大面积推广和实施对国土治理、环境保护和农业的可持续发展乃至整个国民经济的健康发展都可起到积极的推动作用，在我国必将呈现出越来越广阔的发展前景。

参 考 文 献

- Adams R.P., Dafforn M.R. 1997. DNA fingerprints (RAPDs) of the pantropical grass, *Vetiveria zizanioides* L., reveal a single clone, "Sunshine," is widely utilised for erosion control. Special Paper, The Vetiver Network, Leesburg Va, USA.
- Adams R.P., Zhong M., Turuspekov Y., Dafforn M.R., Veldkamp J.F. 1998. DNA fingerprinting reveals clonal nature of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, Gramineae and sources of potential new germplasm. *Molecular Ecology*, 7: 813-818.
- Agrifood Consulting International. 2004. Integrating Germplasm, Natural Resource, and Institutional Innovations to Enhance Impact: The Case of Cassava-Based Cropping Systems Research in Asia, CIAT-PRGA Impact Case Study. A Report Prepared for CIAT-PRGA.
- Ash R., Truong P. 2003. The use of vetiver grass wetland for sewerage treatment in Australia. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 140-150.
- Bracken N., Truong P. 2002. Application of vetiver grass technology to the stabilization of road infrastructure in the wet tropical region of Australia. Proceedings of the Second International Conference on Vetiver. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok. pp. 448-452.
- Cheng H., Yang X.J., Liu A.P., Fu H.S., Wan M. 2003. A study on the performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 403-410.
- Chomchalow N. 2001. The Utilization of vetiver as medicinal and aromatic plants with special reference to Thailand. Technical Bulletin No. 2001/1. Pacific Rim Vetiver Network / Office of the Royal Development Project Board, Bangkok, Thailand.
- Chomchalow N. 2006. Review and update of the Vetiver System R&D in Thailand. Proceedings of Regional Conference on Vetiver, Cantho, Vietnam.
- Chomchalow N., Chapman K. 2003. Other uses and utilization of vetiver. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 502-514.
- CIAT-PRGA. 2004. Impact of participatory natural resource management research in cassava- based cropping systems in Vietnam and Thailand. Impact Case Study DRAFT submitted to SPIA.
- Cull R.H., Hunter H., Hunter M., Truong P. 2002. Application of vetiver grass technology in off-site pollution control. II. Tolerance to herbicides under selected wetland conditions. Proceedings of the Second International Conference on Vetiver. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok. pp. 404-411.
- Dalton P.A., Smith R.J., Truong P. 1996. Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped floodplain, hedge hydraulics. *Agriculture and Water Management*, 31: 91-104.
- Department of Industrial Promotion. 1999. Vetiver Handicrafts in Thailand. Technical Bulletin No. 1999/1. Pacific Rim Vetiver Network / Office of the Royal Development Project Board, Bangkok, Thailand.
- Greenfield J.C. 1989. Vetiver Grass: The Ideal Plant for Vegetative Soil and Moisture Conservation. ASTAG - The World Bank, Washington D.C., USA.
- Grimshaw R.G. 1988. ASTAG Tech. Papers. World Bank, Washington D.C., USA.
- Hart B., Cody R., Truong P. 2003. Hydroponic vetiver treatment of post septic tank effluent. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 128-139.
- Hengchaovanich D. 1998. Vetiver grass for slope stabilization and erosion control, with particular reference to engineering applications. Technical Bulletin No. 1998/2. Pacific Rim Vetiver Network / Office of the Royal Development Project Board, Bangkok, Thailand.
- Hengchaovanich D., Nilaweera N.S. 1998. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. Proceedings of the First International Conference on Vetiver. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok. pp.153-158.

- Jaspers-Focks D.J., Algera A. 2006. Vetiver grass for river bank protection. Proc. Fourth Vetiver International Conf. Venezuela.
- Kong X.H., Lin W.W., Wang B.Q., Luo F.H. 2003. Study of vetiver's purification for wastewater from pig farm. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 181-185.
- Le V.D., Truong P. 2003. Vetiver system for erosion control on drainage and irrigation channels on severe acid sulfate soil in southern Vietnam. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 284-292.
- Le V.D., Truong P. 2006. Vetiver grass for sustainable agriculture on adverse soils and climate in South Vietnam. Proceedings of the Fourth International Conference on Vetiver. Venezuela.
- Lê Văn Bé, Võ Thanh Tân, Nguyễn Thị Tố Uyên. 2006. Low cost micropropagation of vetiver grass. Proceedings of the Fourth International Conference on Vetiver. Venezuela.
- Liao B.W., Zheng D.Z., Zheng S.F. 1998. Studies on the effects of the soil and water conservation of vetiver grass in Eucalyptus plantation. Proceedings of the First International Conference on Vetiver. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok. pp. 159-165.
- Liao X.D., Luo S.M., Wu Y.B., Wang Z.S. 2003. Studies on the abilities of *Vetiveria zizanioides* and *Cyperus alternifolius* for pig farm wastewater treatment. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp.186-193.
- Lisena M., Tovar C., Ruiz L. 2006. Estudio Exploratorio de la Siembra del Vetiver en un Área Degradada por el Lodo Rojo. Proceedings of the Fourth International Conference on Vetiver. Venezuela.
- Liu P.X., Zheng C.T., Lin Y.C., Luo F.H., Lu X.L., Yu D.Q. 2003. Dynamic state of nutrient contents of vetiver grass. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp.305-309.
- Luque R., Lisena M., Luque O. 2006. Vetiver system for environmental protection of open cut bauxite mine at Los Pijiguaos, Venezuela. Proceedings of the Fourth International Conference on Vetiver. Venezuela.
- Luu T.D., Le V.P., Le V.D., Truong P. 2006. Wastewater treatment at a seafood processing factory in the Mekong delta, Vietnam. Proceedings of the Fourth International Conference on Vetiver. Venezuela.
- Namwongprom K., Nanakorn M. 1992. Clonal propagation of vetiver in vitro. Proceedings of the 30th Annual Conference on Agriculture, Thailand.
- National Research Council. 1993. Vetiver Grass: A Thin Green Line Against Erosion. National Academy Press, Washington, D.C.
- Nguyen V.H., Nguyen T.H.N., Vo A.Q., Pham V.N. 2007. Digestibility of nutrient content of Vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) by goats raised in the Mekong Delta, Vietnam. Proceedings of Vietnam National Vetiver Workshop, Cantho. June 2007.
- Nippon Foundation. 2003. From the project 'Enhancing the Sustainability of Cassava-based Cropping Systems in Asia'. On-farm soil erosion control: Vetiver System on-farm, a participatory approach to enhance sustainable cassava production. Proceedings from International Workshop of the 1994-2003 Project in SE Asia (Viet Nam, Thailand, Indonesia & China).
- Percy I., Truong P. 2005. Landfill leachate disposal with irrigated vetiver grass. National Conference on Landfill. Brisbane, Australia.
- Pham H.D.P. 2002. Using vetiver to control soil erosion and its effect on growth of cocoa on sloping land. Nong Lam University, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Prati Amati, Srl. 2006. Shear strength model. "PRATI ARMATI Srl" info@pratiarmati.it.
- Purseglove J.W. 1972. Tropical Crops: Monocotyledons 1. John Wiley & Sons, New York
- Shu W.S., Zhao Y.L., Yang B., Xia H.P., Lan C.Y. 2004. Accumulation of heavy metals in four grasses grown on lead and zinc mine tailings. Journal of Environmental Sciences, 16: 730-734.
- Shu W.S., Xia H.P., Zhang Z.Q., Lan C.Y., Wong M.H. 2002. Use of vetiver and other three grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. International Journal of Phytoremediation, 4: 47-57.

- Smeal C., Hackett M., Truong P. 2003. Vetiver system for industrial wastewater treatment in Queensland, Australia. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 79-90.
- Tran T.V., et al. 2002. Report on geo-hazards in 8 coastal provinces of Central Vietnam - current situation, forecast zoning and recommendation of remedial measures. Archive Ministry of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam.
- Tran T.V., Pinnars E., Truong P. 2003. Coast dune stabilization in Central Vietnam. Proceedings of the Third International Vetiver Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 274-283.
- Tran T.V., Pinnars E. 2003. Introduction of vetiver grass technology (Vetiver System) to protect irrigated, flood prone areas in Central Coastal Viet Nam. Final Report for the Royal Netherlands Embassy, Hanoi.
- Truong P. 1998. Vetiver grass technology as a bio-engineering tool for infrastructure protection. Proceedings of North Region Symposium. Queensland Department of Main Roads, Cairns. pp.46.
- Truong P. 1999. Vetiver grass technology for land stabilisation, erosion and sediment control in the Asia Pacific region. Proceeding of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilisation. Manila, The Philippines. pp. 72-84.
- Truong P. 2004. Vetiver grass technology for mine tailings rehabilitation. In: Barker D., Watson A., Sompatpanit S., Northcut B. and Maglinao A. (eds.), Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization. Science Publishers Inc. NH, USA. pp. 379-389.
- Truong P. 2006. Vetiver propagation: nurseries and large scale propagation. Workshop on Potential Application of the VS in the Arabian Gulf Region, Kuwait City.
- Truong P., Baker D. 1998. Vetiver grass system for environmental protection. Technical Bulletin No. 1998/1. Pacific Rim Vetiver Network / Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- Truong P., Hart B. 2001. Vetiver system for wastewater treatment. Technical Bulletin No. 2001/2. Pacific Rim Vetiver Network / Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- Truong P., Loch R. 2004. Vetiver System for erosion and sediment control. Proceedings of the 13th International Soil Conservation Organization Conference, Brisbane, Australia.
- Truong P., Mason F., Waters D., Moody P. 2002. Application of vetiver grass technology in off-site pollution control. I. Trapping agrochemicals and nutrients in agricultural lands. Proceedings of the Second International Conference on Vetiver. Office of the Royal Development Project Board, Bangkok. pp. 296-302.
- Truong P., Smeal C. 2003. Research, development and implementation of vetiver system for wastewater treatment at GELITA Australia. Technical Bulletin No. 2003/3. Pacific Rim Vetiver Network / Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- Truong P., Truong S., Smeal C., Hackett M. 2003. Application of the vetiver system in computer modeling for industrial wastewater disposal. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 538-548.
- Truong P., Xia H.P. 2003. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing.
- Van den Berg J., Midega C., Wadhams L.J., Khan Z.R. 2003. Can vetiver grass be used to manage insect pests on crops? Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp.262-273.
- Veldkamp J.F. 1999. A revision of *Chrysopogon* Trin. including *Vetiveria* Bory (Poaceae) in Thailand and Melanesia with notes on some other species from Africa and Australia. *Austrobaileya*, 5: 503-533.
- Vieritz A., Truong P., Gardner T., Smeal C. 2003. Modeling Monto vetiver growth and nutrient uptake for effluent irrigation schemes. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 91-104.
- Wagner S., Truong P., Vieritz A., Smeal C. 2003. Response of vetiver grass to extreme nitrogen and phosphorus supply. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp.105-114.

- Shu W.S. 2003. Exploring the potential utilization of vetiver in treating acid mine drainage (AMD). Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp.215-221.
- Shu W.S., Xia H.P., Zhang Z.Q., Lan C.Y., Wong M.H. 2002. Use of vetiver and other three grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: field experiment. International Journal of Phytoremediation, 4(1): 47-57.
- Xia H.P. 2001. Development of vetiver system in Guangdong Province, China. Technique Bulletin, No. 2001/3, Pacific Rim Vetiver Network / Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- Xia H.P. 2002. Natural vetiver communities distributed in China. Far Eastern Agriculture, (2): 18-20.
- Xia H.P. 2002. Role of Private Sector in Disseminating the Vetiver System with Special Reference to China. Technique Bulletin, No. 2002/1, Pacific Rim Vetiver Network / Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Thailand.
- Xia H.P. 2004. Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land. Chemosphere, 54: 345-353.
- Xia H.P., Ao H.X., Liu S.Z., He D.Q. 1999. Application of the Vetiver Eco- engineering for the prevention of highway slippage in South China. In: Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization. Manila, The Philippines. pp.522-527.
- Xia H.P., Ke H.H., Deng Z.P., Tan P., Liu S.Z. 2003. Ecological effectiveness of constructed wetlands in treating oil refined wastewater. Acta Ecologica Sinica, 23(7): 1344-1355.
- Xia H.P., Lu X.Q., Ao H.X., Liu S.Z. 2003. A preliminary report on tolerance of vetiver to submergence. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 564-569.
- Xie F.X. 1997. Vetiver for highway stabilization in Jianyang county: demonstration and extension. Proceedings Abstracts. International Vetiver Workshop, Fuzhou, China.
- Yang B.B., Wu G.J., Ma Z.R., Xia H.P. 2008. Efficient regeneration system and Agrobacterium- mediated transformation of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. Pakistan Journal of Botany, 40(2): 911-921.
- Zhang P, Xia H.P. 2003. Revegetation of quarry using a complex vetiver eco-engineering technique. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. China Agriculture Press, Beijing. pp. 324-332.
- 敖惠修, 何道泉, 夏汉平. 1993. 香根草在水土流失区种植试验. 广东农业科学, (4): 28-29.
- 敖惠修, 夏汉平, 刘世忠, 何道泉. 1997. 香根草生物工程在公路护坡的试验初报. 广州环境科学 (2): 19-22.
- 蔡锡安, 夏汉平, 崔玉炎. 2004. 广州流溪河河岸缓冲带生态治理的优良草种筛选试验. 生态环境, 13(3): 342-346.
- 陈法扬, 李凤, 程洪. 1991. 香根草引种试验研究. 水土保持通报, 11(3): 60-64.
- 陈凯, 胡国谦, 丁华新, 章康泽, 饶辉茂, 吴华清, 徐林华. 1993. 香根草—红壤坡地水土保持的优良草篱植物. 热带作物科技, (6): 10-13.
- 陈凯, 胡国谦, 饶辉茂, 徐林华, 吴华清. 1994. 红壤坡地柑桔园栽植香根草的生态效应. 生态学报, 14(3): 249-254.
- 陈务豪, 曾念辉, 王寿林, 程洪, 付恒生, 杨小洁. 2004. 香根草植物篱护坡反季节施工技术, 2(3): 130-131.
- 陈先茂, 彭春瑞, 姚锋先, 关贤交, 王华伶, 邓国强. 2007. 利用香根草诱杀水稻螟虫的技术及效果研究. 江西农业学报, 19(12): 51-52, 56.
- 陈旭晖, Hill R D, 夏锦慧. 1998. 香根草施肥与防治土壤侵蚀的效果. 西南农业学报, 11(2): 52-57.
- 程洪, 蔡儒珍, 傅恒生, 万明, 彭跃山, 蒋水龙. 2003. 公路工程中的香根草等高植物篱护坡技术. 华东公路, (1): 45-47.
- 程洪, 张新全. 2002. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究. 水土保持通报, 22(5): 20-23.
- 程龙飞, 孙树林, 裴洪军. 2005. 香根草—铰链式混凝土块护岸系统机理分析. 岩土工程学报, 27(5): 562-566.
- 丁光敏, 方德厚. 1990. 香根草育苗技术初探. 中国水土保持, (9): 37.
- 方白玉, 林辉. 2005. 香根草栽培毛木耳的研究. 韶关学院学报, 26(6): 83-85.
- 冯子元. 2003. 香根草技术在道路边坡中的应用与成本分析. 公路, (4): 136-138.

- 冯子元, 黎泽, 张延军. 2002. “生态绿篱加固工程”的新型材料—香根草及其在水利工程中的应用. 广东水利水电, (6): 46-47, 50.
- 高丽霞, 陈羽, 仲崇录, 陈珍. 2007. 香根草根际 AM 菌的感染特性. 草业科学, 24(8): 52-54.
- 高维森, 张宁, 张信宝. 1991. 香根草引种试验初报. 中国水土保持, (2): 29-31.
- 高文玲, 王波, 陈卫平, 刘金根, 卞新民. 2008. 不同浓度海水灌溉对香根草生长的影响. 草原与草坪, (1): 28-32.
- 韩立亚, 王艳杰, 迟晓艳, 侯月利, 朱建军. 2008. 香根草对淹水胁迫生理响应的研究. 安徽农业科学, 36(5): 1755-1757.
- 韩露, 刘必融, 潘超, 张小平. 2004. 香根草愈伤组织的诱导和快速繁殖. 安徽师范大学学报(自然科学版), 27(4): 443-445.
- 韩露, 张小平, 刘必融, 许迪楼. 2005. 香根草对土壤中几种重金属离子富集能力的比较研究. 生态学杂志, 22(5): 20-23.
- 华景鹤. 1958. 香根草繁殖方面几个问题. 热带作物, (12): 17.
- 胡建业, 薛惠仙, 周才文. 1997. 香根草在红壤开发中的应用研究. 当代复合农林业, 5(3): 55-59.
- 黄步汉, 张敬熙. 1964. 芳香植物野香根草初步研究. 广东省植物学会论文集. 广州: 广东省科学技术协会. 114-121.
- 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍. 2006. 7 种人工湿地植物根系扩展能力比较研究. 上海环境科学, 25(4): 174-176.
- 黄寿恩. 2006. 象草、香根草、狼尾草用于造纸原料的研究. 纸和造纸, 25(增刊): 24-26.
- 蒋冬荣, 张新生, 漆光成, 廖江彦, 王丹. 2008. 香根草的引种与应用. 广西园艺, 19(1): 30-31.
- 李翠芬, 熊燕梅, 夏汉平. 2007. 介绍一种新型的园林生态工艺—人工浮岛. 广东园林, 29(4): 29-32.
- 李睿华, 管运涛, 何苗, 胡洪营, 蒋展鹏. 2006a. 用美人蕉、香根草、荆三棱植物带处理受污染河水. 清华大学学报(自然科学版), 46(3): 366-370.
- 李睿华, 管运涛, 何苗, 胡洪营, 蒋展鹏. 2006b. 河岸混合植物带处理受污染河水中试研究. 环境科学, 27(4): 651-654.
- 梁盛森. 1957. 岩兰草. 热带作物, (22): 29-31.
- 廖新梯, 骆世明. 2002a. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究. 应用生态学报, 13(1): 113-117.
- 廖新梯, 骆世明. 2002b. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究. 应用生态学报, 13(6): 719-722.
- 刘红霞, 刘金根, 丁奎敏, 卞新民. 2006. 土壤含水量对冬季移植香根草生长发育的影响. 中国草地学报, 28(2): 48-51.
- 刘继文, 刘继余. 2006. 香根草在煤矿矸石山污染防治中的应用探讨. 能源环境保护, 20(4): 53-54.
- 刘金根, 刘红霞, 陈卫平, 高文玲, 卞新民. 2007. 刈割对香根草生长发育的影响. 草原与草坪, (4): 82-86.
- 刘金根, 刘红霞, 丁奎敏, 卞新民. 2006. 遮光对香根草生长发育的影响研究. 草业科学, 23(4): 36-38.
- 刘金祥, 李文送, 刘家琼. 2005a. 模拟光条件下有性繁殖香根草光合生理的研究. 生态学杂志, 24(4): 390-394.
- 刘金祥, 王铭铭, 肖生鸿, 刘家琼. 2005b. 干旱胁迫对香根草生长及光合生理主要特征的影响. 四川草原, (3): 28-30.
- 刘金祥, 王铭铭. 2005. 淹水胁迫对香根草生长及光合生理的影响. 草业科学, 22(7): 71-73.
- 刘士哲, 林东教, 何嘉文, 唐淑军, 何臻铸. 2005. 猪场污水漂浮栽培植物修复系统的组成及净化效果研究. 华南农业大学学报, 26(1): 46-49.
- 马国华, 夏汉平, 姜蕴兰. 香根草不同外植体诱导体细胞胚胎发生和器官发生. 热带亚热带植物学报, 8(1): 55-59.
- 马廷, 周成虎, 蔡强国. 2006. 不同植物篱坡面的土壤侵蚀过程 CA 模拟. 地理研究, 25(6): 959-966.
- 马镇荣, 刘卫, 王昌虎, 夏汉平, 凌定厚. 2003. 香根草体细胞胚胎发生的细胞学特点与形成. 生态学报, 23(7): 1290-1296.

- 马镇荣, 杨冰冰, 夏汉平. 2006. 影响香根草体细胞胚胎发生和植株再生因素初探. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(1): 55-50.
- 苗兵兵, 罗健, 林东教, 刘士哲. 2005. 漂浮栽培系统收获植物残体作为番茄育苗基质的应用研究, 农业工程学报, 21(增刊): 133-136.
- 阮伏水, 周伏建. 1995. 坡土果园开发水土保持新模式. 农村生态环境(学报), 11(2): 7-10, 14.
- 邵元虎, 夏汉平, 周丽霞, 林永标, 赵灿灿, 傅声雷. 2007. 香根草属和狼尾草属植物对土壤线虫营养类群的影响. 热带亚热带植物学报, 15(1): 1-8.
- 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 2000. 中国矿业废弃地的复垦对策研究. 生态科学, 19(2): 24-29.
- 陶战. 1992. 香根草—一种理想水土保持植物. 世界农业, (3): 49-50.
- 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 夏汉平, 李志安. 2004. 香根草和鹅观草对 Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究. 生态学杂志, 21(3): 15-19, 26.
- 王芳, 蒋志荣, 李小军. 2006. 香根草在深圳市水土保持中的应用研究. 水土保持研究, 13(1): 142-143.
- 王如意, 何品晶, 邵立明, 张斌, 李国建. 2005. 渗滤液灌溉对香根草胁迫及抗氧化系统的影响. 中国环境科学, 25(2): 155-159.
- 王震洪; 吴学灿; 李英南. 2006. 滇池流域荒台地植被恢复工程控制面源污染生态机理. 环境科学, 27(1): 37-42.
- 吴楚彬, 姜蕴兰, 卢小良, 胡玉姬, 马国华. 1998. 香根草的组织培养和植株再生. 香根草研究与展望. 北京: 中国农业科技出版社. pp. 167-168.
- 夏汉平. 1998. 50 年代中国开展的有关香根草繁殖与栽培管理试验. 香根草研究与展望. 北京: 中国农业科技出版社. pp. 153-158.
- 夏汉平. 1999. 论长江与珠江流域的水灾、水土流失及植被生态恢复工程. 热带地理, 19(2): 124-129.
- 夏汉平. 2000. 香根草和水花生对垃圾水中 N、P、Cl 的吸收效果. 植物生态学报, 24(5): 613-616.
- 夏汉平. 2003. 第三届国际香根草大会介绍. 生态学报, 23(10): 2199-2200.
- 夏汉平, 敖惠修. 1998. 中国野生的香根草种及其保护与分类问题. 生物多样性, 6(4): 292-297.
- 夏汉平, 敖惠修. 2001. 海南野生香根草资源调查报告. 热带农业科学, 21(2): 40-43.
- 夏汉平, 敖惠修, 何道泉, 刘世忠, 陈龙江. 1996. 香根草在土壤改良与水土保持中的作用. 热带地理, 16: 265-270.
- 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠. 1998. 香根草生态工程—实现可持续发展的生物技术. 生态学杂志, 17(6): 44-50.
- 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠. 2002a. 香根草生态工程应用于公路护坡的效益研究. 草业科学, 19(1): 52-56.
- 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠, 何道泉. 2002b. 应用香根草对垃圾场进行植被恢复及净化垃圾污水的研究. 广州环境科学, 17(1): 34-37.
- 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠, 王广奎. 2002c. 在北江大堤植草护坡的效益研究. 热带地理, 22(4): 359-362.
- 夏汉平, 敖惠修, 刘世忠, 何道泉. 1997. 香根草—优良的水土保持植物. 生态科学, 16(1): 75-82.
- 夏汉平, 蔡锡安, 杨冰冰. 2004. 广州市瀛洲生态公园河涌开展生态治理的适宜草种筛选研究. 草业科学, 21(1): 54-60.
- 夏汉平, 孔国辉, 敖惠修, 刘世忠, 邓钊平, 梁朝, 柯宏华, 李丽华, 谭鹏. 2000a. 4 种草本植物对油页岩矿渣中 Pb、Cd 的吸收特性比较试验研究. 农村生态环境, 16(4): 28-32.
- 夏汉平, 刘世忠, 敖惠修. 2000b. 香根草等三种植物的抗盐性比较. 应用与环境生物学报, 6(1): 7-17.
- 夏汉平, 刘世忠, 敖惠修. 2000c. 优良水土保持植物与坡地复合农林业. 北京: 气象出版社.
- 夏汉平, 李美茹. 1998. 香根草、百喜草和水花生 3 种植物的抗性比较. 香根草研究与展望. 北京: 中国农业科技出版社. pp. 45-49.
- 夏汉平, 刘世忠. 2003. 香根草优良生态型筛选研究. 草业学报, 12(2): 97-105.
- 夏汉平, 卢雪琴. 2003. 香根草的栽培管理方法研究. 草业科学, 20(7): 69-73.

- 夏汉平, 束文圣. 2001. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究. 生态学报, 21(7): 1121-1129.
- 夏汉平, 王庆礼, 孔国辉. 1999. 垃圾污水的植物毒性及植物净化效果之研究. 植物生态学报, 23(4): 289-301.
- 熊元, 孙锐锋, 王文华. 2006. 贵州公路边坡香根草种植技术规程. 贵州农业科学, 34(增刊): 67-69.
- 徐积江, 肖玉林, 徐晖. 2005. 香根草在公路不同路段栽种方法的探讨. 重庆交通学院学报, 24(5): 84-87.
- 徐礼煜主编. 1998. 香根草研究与展望. 北京: 中国农业科技出版社.
- 徐礼煜, 方长久, 万明, 秦景辉主编. 2003. 香根草系统及其在中国的研究与应用. 香港: 亚太国际出版有限公司.
- 徐礼煜, 夏汉平主编. 2008. 香根草系统的理论与实践. 北京: 中国广播电视出版社.
- 徐礼煜, 周伏建. 1997. 香根草在中国南方的应用前景—以福建省为例. 当代复合农林业, (1): 13-15.
- 杨冰冰, 夏汉平, 黄娟, 刘春常. 2005. 采石场石壁生态恢复研究进展. 生态学杂志, 24(2): 181-186.
- 杨冰冰, 夏汉平, 马镇荣. 2007. 香根草组织培养技术的研究. 草业学报, 16(4): 93-99.
- 杨兵, 蓝崇钰, 束文圣. 2005. 香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收. 生态学报, 25(1): 45-50.
- 姚环, 沈骅, 李颢, 林燕滨. 2007. 香根草固土护坡工程特性初步研究. 中国地质灾害与防治学报, 18(2): 63-68.
- 杨兴新. 1959. 两种香根繁殖方法的初步总结. 热带作物, (10): 18-19.
- 张栋, 王炳龙. 2006. 香根草应用于铁路边坡防护的力学研究. 水土保持通报, 26(6): 94-96.
- 张国发, 姜旭红. 2004. 利用香根草进行尾矿植被恢复初探. 环境污染与防治, 26(6): 458-460.
- 张宏波, 姚环, 林燕滨. 2008. 香根草护坡稳定性效果浅析. 土工基础, 22(1): 52-55.
- 张菁. 1998. 滨海风沙地香根草篱防风固沙效益与应用前景. 香根草研究与展望. 北京: 中国农业科技出版社. pp. 179-191.
- 张志勇, 冯明雷, 杨林章. 2007. 浮床植物净化生活污水中 N、P 的效果及 N₂O 的排放. 生态学报, 27(10): 4333-4341.
- 郑贵朝, 胡事君, 张善信. 2005. 吴川香根草的离体培养和快速繁殖技术. 中国热带农业, (2): 39-40.
- 郑小林, 朱照宇, 黄伟雄, 梁志伟, 黄妃本. 2007. N、P、K 肥对香根草修复土壤镉、锌污染效率的影响. 西北植物学报, 27(3): 560-564.
- 邹显华. 2007. 香根草在济广高速公路江西段路基边坡防护中的应用. 交通节能与环保, (4): 46-49.
- 卓慕宁, 李定强, 郑煜基. 2007a. 高速公路弃土场的水土流失监测及其生态治理. 水土保持通报, 27(4): 96-99.
- 卓慕宁, 李定强, 郑煜基. 2007b. 高速公路弃土场堆积边坡的生态防护试验. 生态学杂志, 26(6): 912-916.

附录一：缩写词与符号解释表

序号	缩写词 或符号	全称	中文术语	书中位置	备注
1	2,4-D	2,4-dichlorophenoxyacetic acid	2,4-二氯苯氧乙酸	103, 104	
2	6-BA	6-benzylaminopurine	6-苄氨基嘌呤	103, 104	
3	°	Degree	度	多处	纬度或坡度
4	□	Degree centigrade	度	多处	摄氏温度
5	Al	Aluminum	铝	多处	
6	AM	Arbuscular Mycorrhizae	丛枝菌根	105	亦可写为 AMF
7	As	Arsenic	砷	多处	
8	BOD	Biochemical oxygen demand	生化需氧量	49, 86, 103	
9	Ca	Calcium	钙	多处	
10	CCTV	China Central Television	中国中央电视台	80, 96, 97	
11	Cd	Cadmium	镉	多处	
12	CIAT	Interntational Centre for Tropical Agriculture	国际热带农业中心	59	
13	cm	Centimeter	厘米	多处	
14	CNS	Central nervous system	中枢神经系统	74	
15	COD	Chemical oxygen demand	化学需氧量	86, 103	
16	Cr	Chromium	铬	多处	
17	Cu	Copper	铜	多处	
18	DAP	Diammonium phosphate	重磷酸铵	4, 32	
19	dS	Deci Siemens	西门子	52, 100	
20	EC	Electrical conductivity	电导率	52	
21	<i>et al.</i>	et alia	以及其他	多处	拉丁语
22	FAO	Food and Agriculture Organization	国际粮农组织	33	总部在意大利罗马
23	Fe	Ferrum	铁	多处	拉丁语
24	GUS	β-glucuronidase	β-葡萄糖苷酸酶	104	
25	ha	Hectare	公顷	多处	
26	Hg	Mercury	汞	多处	亦称水银
27	HygB	Hygromycin B	潮霉素B	105	
28	ICV-3	The Third International Conference on Vetiver	第三届国际香根草大会	多处	2003年10月在广州召开
29	IAA	Indol acetic acid	吲哚乙酸	11, 104	
30	IBA	indole-3-butyric acid	吲哚丁酸	104	
31	IECA	International Erosion Control Assoiation	国际侵蚀控制协会	106	总部在印度克钦(Kochi)
32	K	Potassium	钾	多处	
33	kCal	Kilo calorie	千卡	64	

34	kg	Kilogram	千克、公斤	多处	
35	kL	Kilo liter	千升	45	
36	km	Kilometer	千米、公里	多处	
37	kPa	Kilo Pascal	千帕	24, 101	
38	L	Liter	升	多处	
39	m	Meter	米	多处	
40	Mg	Magnesium	镁	多处	
41	mg	Milligram	毫克	多处	
42	ML	Mega liter	百万升	45, 46, 48	
43	ml	Milliliter	毫升	48	
44	mm	Millimeter	毫米	多处	
45	Mn	Manganese	锰	多处	
46	MPa	Mega Pascal	百万帕	多处	又称“兆帕”
47	MS	Murashige and Skoog	基本培养基	104	
48	N	Nitrogen	氮	多处	
49	Na	Sodium	钠	2, 52, 101	
50	NAA	α -naphthaleneacetic acid	α -萘乙酸	103	
51	Ni	Nickel	镍	多处	
52	otsA	Trehalose-6-phosphate synthase	海藻糖-6-磷酸合成酶	104	
53	P	Phosphate	磷	多处	
54	Pb	Plumbum, Lead	铅	多处	
55	PP333	Poclobutrazo	多效唑	104	
56	RDPB	Royal Development Projects Board	皇室项目开发委员会	iv, 70, 88	泰国皇室机构
57	s	Second	秒	23	
58	Se	Selenium	硒	多处	
59	SF	Safety factor	安全因子	17	
60	SIM	Selected induction medium	筛选诱导培养基	104	
61	t	Ton	吨	多处	
62	TN	Total Nitrogen	总氮	49, 103	
63	TP	Total phosphate	总磷	49, 103	
64	VGT	Vetiever Grass Techniqe	香根草技术	多处	
65	VI	Vertical interval	垂直间隔	26, 31	
66	VS	Vetiver System	香根草系统	多处	
67	WASWC	World Association for Soil and Water Conservation	世界水土保持学会	89	
68	WVV	World VisionVietnam	越南世界宣明会	34, 35	
69	Zn	Zinc	锌	多处	

注：“书中位置”是指在书中的页面数。如果缩写词或符号在书中出现的页面数不超过3处（同一页面不论出现几次也只算1处），则在“书中位置”栏中写明所出现的具体页面数字；如果出现的页面超过3处，则在该栏中写上“多处”。

附录二：全球部分香根草网络组织机构

<p>国际香根草网络 The Vetiver Network International Dick Grimshaw 709 Briar Rd, Bellingham WA 98225 USA 邮箱: vetiversystems@comcast.net r.grimshaw@comcast.net 网址: www.vetiver.org</p>	<p>埃塞俄比亚香根草网络 Ethiopian Vetiver Network Debela Dinka Guda P. O. Box 11939 Addis Ababa Ethiopia 邮箱: dideguda@yahoo.com</p>
<p>中国香根草网络 China Vetiver Network 徐礼煜 南京市北京东路 71 号(南京市 821 信箱) 中国科学院南京土壤研究所 邮编: 210008 邮箱: vetiver@jlonline.com lyxu@mail.issas.ac.cn 网址: www.vetiver.org.cn</p>	<p>印度香根草网络 India Vetiver Network Mr. P.Haridas, Thykkat Pannikot House P.O.Thiruvalli Malappuram District Kerala. 679 348 India 邮箱: potttekadharidas@gmail.com 网址: www.vetiver.org.in</p>
<p>喀麦隆香根草网络 Cameroon Vetiver Network Ngwainmbi Simon Chia PO Box 10, Belo, Boyo Division Northwest province Bamenda Cameroon 邮箱: ngsimonc@gmail.com</p>	<p>意大利香根草网络 Italian Vetiver Network PRATI ARMATI Srl Via Martiri di Belfiore 3 - 20090 Opera (Milano) Italy 邮箱: info@vetiver.it 网址: www.vetiver.it</p>
<p>刚果香根草网络 Congo DR Vetiver Network Alain Ndona Av. Kilangwe 2763 Lemba-Terminus Kinshasa R.D. Congo 邮箱: alinondona@yahoo.fr</p>	<p>印度尼西亚香根草网络 Indonesia Vetiver Network David Booth Yayasan Ekoturin Jl. Tunjung Sari No. 2 Yz Padangsambian Kaja Denpasar, Bali 80117 Indonesia 邮箱: info@eastbalipovertyproject.org 网址: www.eastbalipovertyproject.org/vetiver</p>

<p>肯尼亚香根草网络 Kenya Vetiver Network James Orwino Egerton University Department of Agricultural Engineering Egerton P.O. Box 536 Kenya 邮箱: joowin@yahoo.com</p>	<p>菲律宾香根草网络 Philippines Vetiver Network Ed Balbarino VSU-IC, Inavs, Isabel. Leyte Philippines 邮箱: edbalbarino58@yahoo.com</p>
<p>拉丁美洲香根草网络 Latin America Vetiver Network Dr. Oscar S. Rodriguez P. Av. Ppal. El Piñal No. 38 Qta. Don Bosco Sector El Piñal. El Limon Maracay 2105 Venezuela 邮箱: osrp1958@gmail.com</p>	<p>坦桑尼亚香根草网络 Tanzania Vetiver Network Mr. Anthony Makoye P.O. Box 31050 Dar es Salaam Tanzania 邮箱: vetivertz1999@hotmail.com</p>
<p>摩洛哥香根草网络 Morocco Vetiver Network Dr. Criss Juliard 30 Lot. Khaless, Gayville, Temara Plage Morocco 邮箱: cjuliard@mtds.com</p>	<p>泰国香根草网络 Thailand Vetiver Network Office of the Royal Development Projects Board 78 Rajdamnern Nok Avenue Dusit, Bangkok 10300 Thailand 邮箱: spasiri_2000@yahoo.com 网址: http://thvn.rdpb.go.th/</p>
<p>新西兰香根草网络 New Zealand Vetiver Network John Greenfield Edmonds Road, Keri Keri Bay of Islands 0452 NEW ZEALAND 邮箱: 27@xtra.co.nz</p>	<p>委内瑞拉香根草网络 Venezuela Vetiver Network Dr. Oscar S. Rodriguez P. Av. Ppal. El Piñal No. 38 Qta. Don Bosco Sector El Piñal. El Limon Maracay 2105 Venezuela 邮箱: osrp1958@gmail.com</p>
<p>环太平洋香根草网络 Pacific Rim Vetiver Network Narong Chomchalow Office of the Royal Development Projects Board 78 Rajdamnern Nok Avenue, Dusit Bangkok 10300, Thailand (泰国) 邮箱: narongchc@au.edu 网址: http://prvn.rdpb.go.th/</p>	<p>越南香根草网络 Vietnam Vetiver Network Tran Tan Van Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR) Ministry of Natural Resources and Environment Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam 邮箱: trantv@gmail.com</p>

附录三：作者介绍

Paul Truong 博士



编写本手册的发起者与主要作者。国际香根草网络亚太地区事务主任、Veticon 咨询公司主席。过去 18 年期间，他以香根草系统在环境保护方面应用为目的，广泛地开展了许多有关香根草研究、发展和应用的项目。Truong 是国际上最权威的香根草专家之一，在香根草对严酷条件的耐受性、对重金属耐受性、香根草在污染防治方面的作用等领域做了大量开创性研究工作。这些研究成为香根草技术在有毒废物和采矿迹地治理以及污水处理方面应用的里程碑，也使其数次荣获世界银行及泰国王奖。迄今他已发表了数十篇有关香根草研究与应用的学术论文，并被世界同行广泛引用。他还和夏汉平博士合作主编出版了《Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition》。

夏汉平 博士



编写本手册的主要作者。国际知名香根草专家，中国科学院华南植物园研究员，博士研究生导师。他从 1991 年开始涉足香根草，17 年来从未间断。他对香根草的研究几乎涉及到各个方面，包括对香根草的形态特征、引种栽培、生理生态特性、种质资源、生态工程与效应、组织培养、植株再生与转基因技术等，特别是在公路护坡、污水净化、石场与垃圾场的生态恢复等方面做了开创性工作，取得了一系列研究成果，也因此获得全球第一个“香根草冠军奖”以及泰国王奖等 8 项国际大奖。迄今他已发表了 40 篇有关香根草研究与应用的学术论文，并被世界同行广泛引用。他作为主要负责人成功组织召开了 ICV-3。

作为研究生导师，已经培养了 3 名专门从事香根草研究的学生，包括 1 名博士与 2 名硕士。从 2000 年起享受国务院政府特殊津贴。

Tran Tan Van 博士



编写本手册的主要作者。越南香根草网络协调人。作为越南地球科学与矿物资源研究所副所长，他负责提出防治自然灾害的建议。自从香根草技术于 6 年前引入越南以来，他不但成为越南香根草技术的优秀实践者，还成为该技术的战略领导者。在此 6 年间，他在香根草推广方面贡献颇多。他使越南人民广泛地接受了香根草技术，并使香根草技术在多个不同政府部委、非政府组织和公司的共同推广下，在越南 64 个省中的 40 个得到应用。最初，他将香根草技术引进沿海沙丘的防风固沙之中，现在他的工作涵盖了防治洪水对海岸、河岸、海堤的损害以及防止它们盐化，还用于保护坡地，防治边坡侵蚀，防止滑坡，以及利用香根草防治土壤及水体污染等。2006 年，在委内瑞拉加拉加斯召开的第四届国际香根草大会上，他荣获国际香根草网络颁发的第二个“香根草冠军”奖项。

Elise Pinnars 女士



编写本手册的作者之一。工程师，国际香根草网络副理事。1990 年代后期开始投身香根草系统事业，在喀麦隆西北部从事农业及农村道路项目工作。2001 年，Elise Pinnars 女士来到越南，担任越南香根草网络的顾问。她致力于在越南和国际上发展和推进越南香根草网络，为网络提供组织工作建议，寻求财政资助，并向世界知名的荷兰海岸工程师介绍香根草系统。她参与了越南香根草网络开展的第一个香根草项目的实施。该项目由荷兰王国驻越南大使馆资助，在越南广平省和岬港沿海应用香根草来稳定沙丘，并将香根草应用在其他方面。过去一年半里，她在河内担任国际农粮咨询公司顾问。2007 年夏天，她转战肯尼亚，仍打算继续致力于与香根草系统的推广和发展事业。

后 记

香根草 (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) 属于禾本科香根草属的一种多年生草本植物, 原产印度, 但在东南亚、非洲大陆、南美、中国等地都有香根草的野生群落分布。最早利用香根草的国家也是印度。从目前所能查找到的证据表明, 有关香根草的最早记录出现在公元 1103~1174 年前后印度民间呈现给皇室的铜碟上。在美洲, 有关香根草的栽培利用亦有长久历史。远在美国独立战争前很多年, 新奥尔良州的种植者就已从印度引种香根草。在路易斯安那州成立的时候, 香根草根就已经被当地人制作成香袋放入衣柜中, 用以驱虫和防霉; 在该州一个古老的文献中曾有这样的记载: “似乎昆虫特别讨厌香根草, 凡有香根草的地方就不会有虫子出现……因此, 香根草就好像我们食物中的盐一样不可缺少”。1950 年代, 新西兰学者 John Greenfield 先生在斐济甘蔗坡地长期进行水土保持的试验研究工作, 他经过近 30 年的观测, 前后试用了近 20 种被认为有可能产生良好水土保持效果的植物作对比, 结果发现种植香根草绿篱才是热带和亚热带地区最出色的水土保持生物措施。1985 年, 他将这一成果公布于世, 立刻引起世人关注, 并在世界银行的支持下从 1986 年开始迅速在印度等国推广开来。1989 年国际香根草网络 (TVNI) 成立, 香根草也很快就在世界各地广泛传播开来, 并被誉为人类战胜水土流失的新希望。近 10 多年来, 人们在应用香根草的过程中发现它在环境治理、污水处理、生态恢复以及生态农业建设等方面亦有较明显的效果, 因此它又被广泛称之为“神奇之草” (Miracle grass)。

香根草技术 (Vetiver Grass Technology, 简称 VGT) 系指应用香根草这一植物或应用以该植物为主的多种植物进行水土保持、固土护坡、环境治理、污染处理等并产生一定效果的技术。最初, 全球香根草界普遍将香根草应用于上述目的所采取的措施统称为“香根草技术”。2000 年在泰国召开的第二届国际香根草会议上, 又有专家提出将香根草技术改名为香根草系统 (Vetiver System), 特指以香根草为主体材料开展的实用、价格低廉、维护简单的水土保持或环境治理的生态工程技术。它的主要功能是将活体香根草应用于农业或非农业保护, 而将其修剪物或干植株作为副产品应用于工艺品编织、食用菌培养、房顶覆盖、动物饲养、和草药目的等, 即从全方位利用香根草, 因此被称之为“香根草系统”。

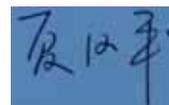
为了向世人介绍香根草的神奇功效, 有关香根草的专著陆续问世。如“前言”中所述, 世界银行于 1987 年编写了一本名叫《Vetiver Grass: The Hedge against Erosion》的小册子。这是全球第一本有关香根草的著作, 由 John Greenfield 先生编著, 通常被称作“绿书”。虽然该书只对香根草作了很简单的介绍, 但非常受青睐, 到 2000 年已经再版了 5 次, 并译成了数十种语言出版发行。近些年来, 专家们对香根草又做了更深入的研究, 有关香根草的应用也越来越广, 由此发表的研究论文和应用报告也大量出现。在浏览这些丰富研究应用成果之后, 本手册的作者们认识到, 目前已到重新编写一本新的册子, 以替代“绿书”的时候了。正是在这样的背景下, 曾在一起工作过的 3 位国际香根草专家 Paul Truong, Tran Tan Van 和 Elise Pinner 经过讨论, 决定编写一本“新书”。新书定名为《Vetiver System Applications Technical Reference Manual》, 即“香根草系统应用技术参考手册”。手册刚完成时只包括前面 5 章, 即

被 TVNI 出版发行，同时被译成越南文出版。随后 Paul Truong 博士将手册的电子版发送给我们中国同行，TVNI 主席 Dick Grimshaw 先生给本人也寄来印刷出来的手册，他俩都希望我们将它译成中文出版发行。本人浏览全书后，觉得这是一本值得参考的技术手册，特别适合目前正在从事香根草技术应用与推广的企业及工程技术人员。但遗憾的是，书中的案例基本上都来自越南，部分来自澳大利亚，而来自其他国家的少之又少，因此译成中文出版多少有些欠缺。于是，本人向 Paul Truong 和 Dick Grimshaw 建议，中文版再添加一章，专门介绍中国的情况，特别是近 10 年来香根草技术在中国取得的研究成果与推广应用成果。Paul Truong 和 Dick Grimshaw 对此表示高度认可，并给出中文版的作者排序为 Paul Truong, 夏汉平, Tran Tan Van 和 Elise Pinnars。Tran Tan Van 和 Elise Pinnars 也对此表示了认同。

于是，熊国炎和熊炜焯先生应邀翻译了全书（前 5 章）。本人做少量补充翻译，同时对原著和译文进行了全面校对、更正与编辑。尽管如此，书中仍然存在一些问题，如第 5 章与第 3 章有部分内容重复；一些文献在书中引用，但在书末的“参考文献”却未列出；还有一些文献列在了“参考文献”中，但在正文里面似乎并未明确引用或未标出引文。由于某些原因，这些问题一时难以解决或不宜由本人“擅自”解决，因此只好仍保留在译著中。如果因此而给读者阅读带来不便或其他问题，则请谅解。随后，本人单独撰写完成第 6 章，并在原稿基础上增加了 3 个附录。附录一为缩写词与符号解释表，目的是方便读者查阅书中出现的符号与缩写；附录二是方便读者通过网络迅速查阅有关香根草的信息或与国内外的香根草网络组织联系；附录三对本书的 4 位作者做了一个简短介绍。

如前所述，目前国际上大多数同行已认可“Vetiver System”这一表述，Paul Truong, Tran Tan Van 和 Elise Pinnars 在撰写本手册时都采用这一术语，因此，本书前 5 章也基本上将其译成为“香根草系统”（个别地方根据上下文仍译成“香根草技术”），书名也直译过来。然而，本人坚持认为，在中国使用“香根草技术”这一表述更恰当一些，主要原因：一是国内对香根草的应用主要还是集中在国土护坡与环境治理方面，对香根草本身的利用还较少；二是国人更认可“技术”而非“系统”这一术语。而且，本人还觉得，目前对香根草的应用的确是一种“技术”的应用，尽管这种技术谈不上很复杂、很高深。鉴于此，本书第 6 章仍使用“香根草技术”这一术语。但不论是哪种表述，其实质基本上是一样的，即应用香根草这一物种，使之产生生态效益、经济效益或社会效益。

最后，作者和译者都由衷感谢中国科学院华南植物园领域部署创新经费、澳大利亚 GELITA Asia Pacific Africa 公司与 TVNI 对手册翻译与出版所给予的部分资助。本人还感谢 Paul Truong 博士与 Dick Grimshaw 先生对手册中文版编撰与出版过程中给予的诸多关注与建议；当然还要感谢所有为中国香根草技术的发展作出过贡献、给予过关注的社会各界人士。最后，衷心祝愿中国的香根草事业能为国家的生态环境建设与社会经济发展作出越来越大的贡献。



2008 年 7 月于中国科学院华南植物园