



香根草通讯

Vetiver Newsletter

第 12 卷 第 2 期

2009 年 6 月

香根草系统在我国的应用与发展 20 年历程回顾*

徐礼煜

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

环境保护是当今世界面对的一项紧迫任务,也是我国经济建设和社会发展中所面临的一项十分重要的基础性工作,被列入必须长期坚持的一项基本国策。水土保持与污染治理是广义环境保护的两大方面。对其采取的措施虽多种多样,但生物工程措施越来越受到人们的关注。

香根草 (*Vetiveria zizanioides* 最近有人将其归入金须茅属,更名为 *Chrysopogon zizanioides*),于 1988 年由格雷姆肖先生引入世界银行中国南方红壤开发项目,并称之为香根草技术 (vetiver grass technology, VGT) 主要应用于中国南方红壤的水土保持。2000 年在泰国召开的第二届国际香根草会议上,人们把香根草技术更名为香根草系统 (vetiver system, VS),特指实用的、价格低廉的、维护简单的水土保持、土地稳固和修复的香根草生物工程技术。至今,香根草在我国的应用已经历了 20 年。由于香根草抗逆性强、适应性广、速生快长、生物量大、根系发达又具有优良的力学特性、固土力强、种植简易、管理方便,花费低廉,自 20 世纪 80 年代以来研究不断深入,并得到了越来越广泛的应用。本文回顾了 20 年来香根草在我国的应用、研究和推广,旨在为更好地将该技术应用于我国生态环境的保护,服务于国民经济建设。

1 香根草系统在农业上的应用

香根草刚引入中国南方红壤开发区不足 1 年,其所表现的广泛适应性、速生性等“神奇”特性引起人们普遍关注。1989 年 10 月 20—23 日由农业部和水利部合作于福建邵武召开了香根草种植技术研讨会,推广香根草在我国的试验研究及应用。20 年来,香根草系统在农业的许多方面得到广泛应用 (Xu *et al.*, 2003)。

1.1 用于果、茶、旱作坡地水土保持

将香根草系统应用于果、茶园、农地,尤其是坡耕地的水土保持,是香根草系统在农业上应用的主要方面。首先在江西、福建两省的红壤一期开发项目县种植、示范。1989 年春,江西红壤项目办引进 1 万 kg 香根草苗在红壤开发项目区内的 6 县 (贵溪、金溪、临川、东乡、崇仁、进贤) 1 所 (江西省红壤研究所) 试种,面积达 200 余 hm^2 ;福建省红壤项目区的 7 县 29 个茶、果场引种 3 万 kg 香根草苗,所保护的面积达 130 hm^2 以上。所有种植都按“绿皮书”《香根草:防治侵蚀的绿篱》技术规程(中国红壤地区开发项目联合办公室, 1990),一般每隔 2 m 等高距在果、茶、农作物行间种植 1 行或 2 行,成带状,或绕地四周再种 1 圈,以保护果园、农地。由于当时种苗量有限,一般丛距 20 cm,而不是现在所要求的 10 cm;每丛 2~3 株,并施于少量磷肥或复合肥,经 1 年长成封行达 75% 的草篱,第 2 年形成紧密草篱,有效拦截地表径流和泥沙,促水渗入土壤。据江西、福建、广东等省设置的标准径流场试验表明其拦截径流效果在 32.7%~59.7%,防止土壤侵蚀效果 63.8%~92.7% (夏汉平等, 1996; 胡建业等, 1997)。另一方面,香根草篱在雨季可使 0~20 和 20~40 cm 土层的含水量分别提高 20.3% 和 4.1%,旱季则分别增大到 42.1% 和 13.3% (夏汉平等, 1996; 陈龙江, 1998)。

1993 年起,此项技术进一步在赣、闽、湘、浙、桂等 5 省区南方二期红壤开发项目县、市及“中国南方水土保持项目”区推广开来。以江西为例,涉及 19 个县、场的 43 条小流域,全面实施了等高香根草篱,累计面积达 2 万 hm^2 (胡建业等, 1997),为控制红壤垦殖初期的水土流失发挥了重要作用。

1.2 应用茎叶覆盖保墒,改善田间生态环境

原载《生态学杂志》2009, 28(7); 本文有删改, 参考文献略。

种在果、茶和其他农作物行间的香根草（主要是水土保持草蒿），一般每年2月底对越冬枯萎茎叶刈割。此前，在6月中下旬至9月中旬对茎叶刈割3~4次，而割下的茎叶就地用作果、茶、旱作物的抗旱（防寒）覆盖材料，覆盖在果、茶树盘（或结合施肥埋入土中），可获得夏季降温保墒抗旱，冬季保暖防寒而作物增产的显著效果。例如，陈凯等(1994)在江西临川小华山（28.0°N，116.5°E，海拔50 m）红壤岗地桔园试验观测，栽种香根草并刈割茎叶覆盖树盘比未种香根草的同类桔园，树冠中部在高温伏早期日均气温降低2.8℃，空气相对湿度提高4.3%，光照强度减弱18600 lx；树盘表土温度日平均、最高值和日较差分别减少5.1℃、19.1℃和20.8℃，其最低值则增高1.7℃；根际土壤日均温下降1.7℃，含水率提高2.8%。这说明，栽植香根草对改良红壤坡地桔园小气候环境有明显的效应，尤其在高温伏早期有良好的降温保湿作用。

胡建业等(1997)在江西省红壤研究所低丘桔园用刈割的香根草覆盖柑桔树盘（每株树盘盖12 kg干香根草）与等量稻草覆盖和不覆盖进行比较，在续晴5和16 d测定0~60 cm土层的水分日均蒸散强度香根草覆盖处理分别为1.4和1.1 mm，比等量稻草覆盖处理减小0.8和0.9倍，比不覆盖减少0.5和1.0倍；在伏旱续晴16 d时0~60 cm土层，香根草覆盖的比稻草覆盖和无覆盖的分别多贮水4.5%和17.9%，秋旱末期其差值进一步扩大，香根草覆盖区分别多贮水10.3%和27.8%；香根草覆盖可延长抗旱6~10 d。

1.3 以香根草为主成分的复合农林业项目

1998年在中国香根草网络的推动下，使香根草系统扩展到中国南方16省区，面积超过20万hm²。为了更好地发挥香根草在山坡地水土保持和农林业生产上的作用，从2001年起中国香根草网络先后在皖鄂大别山区及广西龙胜山区开展了以香根草为主成分的复合农林业项目。这些项目将我国贫困山区的生态环境保护与扶贫结合起来，以便在保持水土、改善农田生态环境的同时为贫困山区农民带来经济效益，从而达到持续发展的目的。主要包括以下措施（Xu, 2003a, 2004）：

- 1) 引进香根草系统，帮助农民防止水土流失，保护生态环境及农村基础设施（如公路、水库）。
- 2) 引进和推广适当的复合农林业技术，如林粮间作（如香根草、板栗、小麦间作系统），固氮树木和植物、等高种植技术以及作物的多样性等，将生态环境保护与粮食增产和农民增收结合起来。
- 3) 建立由香根草篱保护的经济树生态园，并以香根草饲养家畜、覆盖地表、沤制绿肥、编织工艺品，提高生态经济效益。
- 4) 修建电灌站、水坝、水池等小型水利设施，农作物跟经济树木间作，增加果树和粮食生产。
- 5) 通过对妇女进行蚕桑养殖、茶叶生产和用香根草编制工艺品的培训与示范，提高妇女的社会和经济地位。
- 6) 通过各种活动把上述技术和经验推广到周边山区，并通过国内、外香根草网络和出版物介绍到全国和全世界（徐礼煜和卢升奎, 2003）。

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，中国香根草网络与桂林市有关单位合作于2007年10月在龙胜举办了国际香根草编织培训班。并将编织培训在广西、安徽等省继续下去，以便鼓励农民自发种植更多香根草保护好环境。

1.4 应用香根草茎叶培肥改土、促进作物增产

种植在果、茶园和坡耕地上的香根草蒿，每年割3~4次可获8~15 kg·hm⁻¹鲜草，而纯种地为58~100 t·hm⁻²、根系24 t·hm⁻²以上。据江西省红壤研究所测定，香根草茎叶（干质量）的全量C、N、P和K分别为422、17.4、0.5和7.5 g·kg⁻¹，根系依次为402、2.1、0.6和5.8 g·kg⁻¹。因而，用其覆盖或用作肥料施入，能有效改良土壤提高土壤肥力，促进作物增产。

卢升奎和钟家有(1997)设计的香根草切碎耕入旱地的培肥改土3年定位试验表明，施入干香根草茎叶4.5和2.25 t，其土壤有机质、总孔隙率、全量N、P与速效N、P均有提高，土壤容重降低；玉米籽实产量分别比未施增产34.8%和10.1%。

陈凯等(1994)的试验结果也表明，红壤坡地柑桔园栽植香根草并覆盖树盘能改善土壤理化性质。与未栽香根草相比，土壤容重下降0.09 mg·cm⁻³，孔隙率增加3.8%；pH值上升0.65，有机质、全N、水解N、速效P和速效K的含量分别增加4.60 g·kg⁻¹、0.29 g·kg⁻¹、17 mg·kg⁻¹、2.4 mg·kg⁻¹和51 mg·kg⁻¹；Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu、B和Mo等营养元素的含量依次提高274、21.85、18.27、1.59、1.90、0.32、0.04和0.01 mg·kg⁻¹；土壤总氨基酸提高57.44 mg·kg⁻¹，促进了柑桔增产。

1.5 应用于风沙地的防风固沙及海、河岸、塘基的稳固

根据香根草发达深扎的根系及耐旱、耐瘠、适应性强的特性，福建、江西等省将其应用于风沙地及海岸、河岸、池塘基种植，能够快速成蒿。草蒿似风障一样防风固沙，起到固岸护坡及稳定河、海岸及塘基的良好效果。

张菁(1996)于1994年在平潭县中楼乡 0.44 hm^2 的霍霍巴园地(风速常年 $8.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,沙化90%的沙地)与北风(主风向)垂直,按 $6\sim 8\text{ m}$ 距离与霍霍巴种植行平行,种植香根草带800多m。当年就形成茎、叶茂密的草篱,2年生植株高 2 m 以上,香根草篱已成为密不透风的天然屏障,背风面风力减小明显,且距草篱越近越显著。距草篱 5 m 处减小了58.8%,距草篱 2 m 处减小了79.4%。

1995年3月,张菁等(1997)在上攀河两岸、流水海边渔池坡岸种植香根草带2000余m,当年草带成篱发挥固岸护坡效果,减少了土壤剥蚀,拦住泥沙不下河、下池。据测定,1年生 1 m 长草篱一冬季下来拦蓄泥沙达 7.5 kg ,2年生的达 17.0 kg 。

1.6 应用香根草嫩茎叶喂饲牛羊,发展畜牧业

四川省农牧厅土肥处及江西省红壤开发总公司对香根草的饲用营养价值的分析结果表明,鲜嫩香根草茎叶蛋白质含量比紫花苜蓿、聚合草、三叶草、甘薯藤、稻草高,稍低于紫云英;干草虽比紫花苜蓿等饲草低,但比青储饲料玉米和最常用的牲畜越冬饲料稻草、青稞草都高,蛋白氨酸接近上述饲草,赖氨酸则明显高于上述饲草(四川省农牧厅土肥处,1992),表明嫩香根草是牛、羊、猪、兔、鱼等的较好饲料,尤其喂养牛、羊适口性较好。

1.7 应用茎叶制作草粉培养食用菌,发展农村经济

香根草是一种优质菌草。应用其茎叶育出香菇、毛木耳、黑木耳、盾形木耳、平菇、鲍鱼菇、凤尾菇、磨菇、金针菇、灵芝、猴头菇、竹荪、滑菇等食用菌和药用菌。香菇生物转化率达80%左右,平菇、毛木耳可达100%(张菁,1996)。

综合各地资料,在中上肥力地纯种香根草,2年生可产干草 $60\sim 100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,按80%转化率即可转化鲜香菇 $48\sim 80\text{ t}$,按目前市场价格($4\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算产值可达 $19.2\sim 32\text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同时,栽培食用菌的下脚料(废菌料)富含菌丝体,是一种优质饲料,可用于喂饲畜禽及池鱼等,可多层利用。

2 香根草生物工程技术在边坡防护上的应用

香根草由茎和分蘖地下部分产生不定根组成发达须根系统,密集呈网状向纵深发展,一般深达 $2\sim 3\text{ m}$,甚至 5 m 。香根草根系抗拉强度达 $40\sim 120\text{ MPa}$ (平均 75 MPa)(Hengchaovanich,1998),约相当于一般钢材极限抗拉强度的 $1/6$ 。显著高于许多乔、灌硬树木根系的力学抗张强度。因而,香根草根系的穿孔力特强,能穿透硬磐(在坚硬的红粘土网纹层可见多根根系组合成束向下穿孔),和在砾石之间、岩层之间薄弱处穿透。同时,香根草根系数量多成网状而深扎,与土壤接触面积大,其固土能力强。通过抗张力、摩擦力和粘附作用等对土壤发挥像钢筋似的增强作用。同时,由于香根草生物量大,在美国得克萨斯州,在灌溉条件下每年可产生 $100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 干物质,相当于 $350\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 鲜叶。中国的实验也表明, 100 m^2 香根草在连续3年中可分别产生覆盖材料 11.4 、 14.7 和 17.8 t 鲜叶。巨大的生物量所导致的蒸腾作用可减少边坡中土壤的水分,起到加固边坡的作用。

正因如此,人们将香根草广泛应用于边坡的固定,尤其是公路和铁路边坡的固定。早在1996年前后中国科学院华南植物所就开始将香根草应用于广东省的公路护坡(敖惠修等,1998)。试验表明,在一定的栽培措施下,香根草生长迅速, $5\sim 6$ 个月即可形成致密的绿篱带,对护坡固土产生显著效果,并节省大量经费。

1997年中国香根草网络在福州召开的《国际香根草学术研讨会》上,泰国学者Diti Hengchaovanich较为系统地介绍了将香根草技术应用于工程保护,尤其是公路边坡防护的理论基础和成功经验,引起了与会者的极大兴趣。在中国,改革开放以来,公路、铁路等建设飞速发展,将香根草这一经济实用的生物工程技术应用于保护工程边坡和保护周边地区的生态环境有着广泛的应用潜力。

据此,中国香根草网络于2年之后,即1999年10月又在南昌召开了《国际香根草生物工程技术保持水土与工程保护讲习研讨会》,会上邀请了国际知名专家向从事公路建设的工程师们系统介绍了香根草技术在工程保护上的应用,使香根草系统在我国公路边坡防护上迅速推广开来,并扩展到了铁路、水库、矿山、垃圾场等领域(Xu,2002b,2005a,2005b)。

2.1 香根草技术在福建省公路边坡防护上的应用

实践表明,香根草篱不仅以短暂时间快速保护好公路边坡,而且有效的防治边坡上的泥沙和石块冲向公路下面的水稻田。1997年“福州会议”使香根草系统在福建省得到了广泛的应用。1999年在福泉高速公路上有近 2 万 m^2 的上边坡利用香根草进行保护。这个上边坡主要由粗颗粒的母质物质组成,极易发生滑坡。它的种植成功表明,香根草不仅能用于保护下边坡,同样也可以用来保护土壤结构差、养分贫瘠的上边坡。

另一个利用香根草保护大型公路上边坡的事例在该省的三明市清流县。三明市公路局于 1999 年 3 月在清流县北山大滑坡整治工程中种植了 10000 m² 香根草, 很快形成绿篱, 达到防护和绿化双重效益。2000 年调查时发现, 香根草每丛分蘖数由 2~3 株已发展成 30 多株, 最少的也达到 6~9 株, 根深达 80 cm 以上, 最短也有 52 cm, 其国土防护作用极为明显(刘中辉, 2002)。

据福州市公路局研究, 在 3 个不同地点对相同面积采用不同的保护措施, 即香根草护坡、干砌片石护坡和浆砌片石护坡(其中干砌片石和浆砌片石护坡厚度以 30cm 计算), 采用香根草护坡比其他护坡节省 22 元·m² 以上。

在 2000—2002 年, 福建省连城、永春、安溪、仙游、延平、连江等公路局或分局都种植了香根草, 据不完全统计, 防护边坡面积超过 20 万 m²。不少公路局或分局也都建立起了自己的香根草草苗繁殖基地。在福建省交通科技发展项目第一批计划中, 列入了“公路边坡香根草绿篱防护研究”一项。福建省公路学会还于 2001 年 6 月在南平召开了“公路边坡香根草绿篱保护现场交流会”, 有力地促进了该省香根草事业的发展。

2.2 香根草系统在江西省公路边坡防护上的应用

江西省公路管理局与南昌水利水电高等专科学校合作, 在水土流失严重、塌方频繁的武夷山地区建立了大型示范区。他们选择了极易塌方的公路路段于 1999 年 3 月种植了香根草, 种植面积约 10000 m², 坡度 30°~60°, 海拔 280~750 m。虽然绝对高度不算太高, 但山地气候却较典型, 常有雾气, 光照不足对香根草生长有一定的影响。然而香根草 98% 成活, 经一个生长季后即形成草篱, 边坡就被牢牢固定, 没有出现塌方。

在“南昌会议”上, 中外代表参观了示范现场, 现场展示出: 1) 香根草在非常瘠薄的、由粗粒花岗岩形成的土壤母质上可以正常生长, 并经短暂数月即可有效地保护公路边坡; 2) 应用香根草固坡经济实惠, 其成本仅仅是“硬措施”的 1/9~1/10; 3) 香根草不仅保护了公路边坡, 保障了交通, 而且有效保护了沿途生态环境。

该课题为香根草技术在江西乃至全国在工程方面的传播、应用奠定了基础(徐建云等, 2000)。据不完全统计, 从 1999 年 3 月~2007 年 10 月, 江西省香根草公路护坡的面积已达 183.2 万 m²。种植范围也从山区公路防治边坡塌方扩展到湖边公路防治水浪冲击(卢升鉴和傅恒生, 2008)。

2.3 香根草系统在浙江等省公路部门的兴起

在“南昌会议”之后, 浙江省开始了香根草在公路上的应用与推广。在“南昌会议”上浙江省公路管理局派员出席, 从国内外专家的发言中获得了有关香根草的基本知识。后来, 他们又去福建参观了香根草苗圃和应用示范现场, 并在杭州发起成立了“杭州之江香根草工程有限公司”。在杭州建立起浙江省第一个香根草苗圃。于 2000 年 4 月在丽水地区 330 国道上选择了易塌方地段 10600 m² 的边坡种植了香根草。此后又在 52 省道应用香根草保护边坡, 十分成功。

2000 年 11 月浙江省交通厅组织了鉴定会, 这也是在我国首次组织的利用香根草系统保护公路边坡成果鉴定会。为香根草系统在浙江省公路部门的推广奠定了基础。2001 年 6 月浙江省交通厅发文要求在全省推广这一新技术。从而加速了香根草系统在浙江省的进一步发展。

目前该省香根草已应用在 27° 10' N~31° 5' N, 119° 10' E~120° 15' E, 遍及全省浙北、浙西南和中部等 7 个地(市、县)。其海拔 3.5~865 m, 地形由低到高为湖州平原, 金衢盆地、丽水、台州等丘陵山区; 并对矿山复绿做了少量试验。土壤为红壤、山地黄壤土、红黄泥土、片石沙土、风化生石质土等酸性、碱性土壤。累计种植面积为 63.56 万 m², 所保护的公路类型包含国道、省道、县级公路、以及高速公路(赵肇庆, 2008)。据有关部门提供资料与工程造价比, 至少节约资金 2500 万元。在 2003 年第三届国际香根草大会上, 获得香根草公路边坡防护三等奖和优秀技术证书荣誉。

与此同时, 在江苏、湖北、贵州等省应用香根草进行公路防护工作也不断展开。徐礼煜(2008)在对宁合高速公路江苏段边坡调查的基础上, 选择了 8 个易塌方的上边坡, 对边坡的坡度、坡向、植被、土壤侵蚀情况、边坡稳定程度等等进行研究, 最终落实了 3 个最不稳定的上边坡作为试验研究对象。研究表明, 香根草在该地区生长良好, 有较强的适应性, 并可在短时期内在边坡上形成稠密的绿篱, 既绿化了边坡, 又能有效控制水土流失和稳定边坡。这一廉价的生物工程技术为香根草系统在该地区公路边坡防护上的应用和推广奠定了基础。并很快推广到江苏省其他公路边坡的防护上。

2.4 香根草生物工程技术在铁路边坡防护上的应用

中国科学院南京土壤研究所(中国香根草网络)与新长铁路有限责任公司合作, 于 2001 年春首次在铁路边坡上进行了试验, 该试验段属冲积平原区, 地势平坦, 地下水位较高。土壤中细砂、粉砂含量较高, 而粘粒含量较少。本段属高填方(5m 左右)路基, 边坡坡度 1:1.5, 填料为取自两侧农田或附近集中取土坑的冲积物, 土质松散, 不稳定, 雨后边坡水坑、水槽较多, 易发生坍塌和滑坡。在香根草种植 3 个月后, 即 8 月 30

日观察,最大株高达到 195 cm,茎粗而硬,发挥了良好的固坡作用,形成的绿篱能够拦住从铁路边坡上部滚下的石子(Xu, 2003b)。

同年 10 月召开了“香根草应用于铁路边坡防护试验成果鉴定会”。近 40 名专家出席了该会,与会代表参观了示范现场,充分肯定了香根草系统在铁路边坡防护上的作用。并将香根草作为绿色固坡植物正式纳入于 2003 年颁布的《铁路路基边坡绿色防护技术暂行规定》中。此后,在江苏、福建、安徽等地在铁路边坡防护上进行了更为广泛的应用,并逐步向我国南方其他地区推开。

2.5 香根草系统在水利水电工程建设中的应用

由于香根草不仅具有很强的固坡效果,而且耐旱、耐湿,因而在中国水利水电系统中得到了推广应用,主要是由以广州市香根草业科技有限公司为主的企业进行实施。到目前为止,该企业已经在湖南、湖北、广东、广西及云南、贵州等省区的水利水电工程建设中进行了应用,特别是在国家级的一些重点工程建设中的应用。

比较典型的应用工程有:湖南省张家界鱼潭水电站边坡滑坡治理、武汉市汉江口固滩护岸工程、武汉市青龙山水库边坡防护工程、广西百色水利枢纽工程前方营地右江河岸保护工程、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、广东省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、广东河源市新丰江水库岸边坡固土工程等(冯子元和柯成椿, 2003)。

2.6 香根草在其他方面的防护

由于香根草具有很好的边坡防护性能,因而也不断应用于其他边坡的防护,尤其是土质边坡的防护,包括上边坡和下边坡。如在广东,将香根草应用于保护山丘上面和对面的民居;应用香根草稳固学校操场旁的边坡;应用香根草稳固垃圾填埋场大坝和改善垃圾场环境等。同时在将香根草应用于矿山尾矿植被恢复的同时也对矿渣产生固定作用。

3 香根草技术在中国环境保护上的应用

3.1 应用香根草进行尾矿植被恢复

徐礼煜等(2002)开展了应用香根草进行尾矿植被的恢复工作。结果表明,香根草对立地环境的要求不高,具有较强的适应性,是采石场以及其他不毛之地如尾矿的斜坡固定和快速绿化的先锋植物。在种植时一般不需采取特殊技术和措施。此外,由于香根草适应性强,生长快,能有效改善种植地的微域生态环境,从而促进其他植物的生长,加速了采石场和其他矿山的植被恢复(方长久和张国发, 2003)。

3.2 建立人工湿地净化污水

香根草是一种高生物量的两栖植物,也是一种理想的可用于构建人工湿地的植物。香根草人工湿地用于污水处理有较多优点(张军和束文圣, 2003)。夏汉平和李美茹(1998)研究了香根草及另外 3 种植物在垃圾渗滤液培养下的反应,结果显示:1)水葫芦在 HCL 和 LCL 2 种污水中均受毒害致死;百喜草在 HCL 中不能存活,在 LCL 中受严重伤害;水花生在 HCL 中受较重伤害,但在 LCL 形成庞大的生物体;香根草在 2 种污水中亦受伤害,但其受害症状在 4 种植物中最轻。2)在两种表现耐性较强的植物中,在净化 LCL 方面,水花生总体上优于香根草;但在 HCL 中,被观测的 7 个水质指标中,香根草的净化均优于水花生,其中 NH_4^+-N 被净化效率最高,为 77%~91%,此外,香根草对磷也有较强的净化率(>74)。3)广州李坑垃圾填埋场渗滤液含高浓度的污染物,未达排放标准,渗滤液具有较强的植物毒性,可能对植物及周围环境有损害,因而需要进一步净化,香根草和水花生可分别用于净化高浓度和低浓度的渗滤液。

林学瑞(2002)构建香根草模拟人工湿地,研究不同基质对香根草湿地处理垃圾渗滤液的影响,试验用垃圾渗滤液同样采自李坑垃圾填埋场,在温室建立 8 组香根草模拟人工湿地处理含高 COD 和 NH_4^+-N 的垃圾渗滤液,每组 3 次重复,其中 5 组调查不同基质(包括煤矸石、粉煤灰、煤渣、土壤、和砾石),3 组调查添加木屑碳(C)源,2 组调查香根草有、无对人工湿地处理垃圾渗滤液效能的影响。试验结果表明:1)垃圾渗滤液经各组模拟人工湿地处理后,总体上 pH 值升高,电导率(EC)值、总悬浮性固体(TSS)值、颜色值和出水体积均下降。COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、总凯氏氮(TKN)、TP、TSP(可溶性磷)均有较高去除率。2)基质不同的模拟人工湿地中,以煤矸石为基质对去除 EC、 NH_4^+-N 、TKN、TP、TSP 和 TSS 的效果最好;以煤渣为基质对去除颜色、COD、 NO_3^--N 和 TSS 的效果最好;以粉煤灰为基质对去除 TP 和 TSP 的效果相对较好;以土壤为基质对 TP 和 TSP 去除效果最差;以砾石为基质居中。3)添加木屑后,模拟人工湿地出水的 pH 升高,EC 和颜色值下降;对 NH_4^+-N 、TKN 和 TSS 去除率显著地下降,对 NO_3^--N 去除率显著地增加;减少了 COD、TP 和 TSP 的去除率;导致香根草生物量和分蘖数降低。4)入口垃圾渗滤液的 NH_4^+-N 浓度影响香根草在模拟人工湿地

中的作用，过高浓度渗滤液可对香根草产生毒害作用。5) 延长水力停留时间 (HRT) 可以显著提高 NO_3^- -N 的去除率。6) 香根草的存在对整个模拟人工湿地系统净化污水效能有着重要的作用。种植香根草的模拟人工湿地对渗滤液 COD, NH_4^+ -N, TKN, NO_3^- -N, TP, TSP 和 TSS 的去除比不种植的分别高 9.09%, 12.93%, 15.72%, 104.8%, 17.44%, 57.02% 和 1.61%。

廖新梯和骆世明(2002)分别以香根草和风车草为植被，按 1.0 m×0.5 m×0.8 m 建立湿地，通过四季试验研究其对猪场废水 N、P、有机物的净化功能。结果表明：1) 两湿地对 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 去除率受污水停留时间和污水浓度影响较大。春季，香根草和风车草人工湿地对 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 有明显的去除效果；秋季，二者对去除废水 TN 均有效果，在去除 TP 上，香根草湿地效果明显。2) 4 个季节香根草或风车草人工湿地对 COD 和 BOD 均有较稳定的去除效果，2 湿地抗有机负荷冲击能力强。

夏汉平等(2002)用香根草、芦苇、宽叶香蒲、蒲草构建人工湿地处理炼油废水。在建立后早期，湿地对第 1 批高浓度废水中 NH_4^+ -N、COD、BOD 和油的去除分别是 97.7%、78.2%、91.4%和 95.3%，对第 1 批低浓度废水中 NH_4^+ -N、COD、BOD 和油的去除分别是 97.1%、71.5%、73.7%和 89.8%。但随时间推移，净化效果有一定下降。湿地对 NH_4^+ -N、COD、BOD 和油的去除效率始终表现为 NH_4^+ -N>油类>BOD>COD。被试验的 4 种植物在污水湿地中的生长表现均好于清水湿地，对污水的净化率，香根草和另外 3 种植物间无显著差异。在清水培养阶段，香根草的分蘖形成速率为 4 个种最低，但在污水阶段，开始上升，而另外 3 种的分蘖速度则明显下降，可能表明，香根草对含油废水环境的适应性比芦苇、宽叶香蒲、蒲草更强。

郑春荣等(1998)研究了香根草在富营养水体净化中应用的可能性，采集了受到生活污水污染的河水、池塘水和自来水 3 种水体，用浮岛法将香根草种植其上，生长 4~5 周。结果表明，香根草在水体中能正常生长，河水、塘水经香根草处理 3~4 周后，水体感官现状明显改善，透明度提高，总磷的去除率达 97%，总氮去除率达 70%以上，因此，香根草是一种良好的净化富营养水体的植物，具有应用前景。

总之，香根草人工湿地已展现了较强的净化污水潜力，并获得日益增加的关注。已有的研究为该技术在中国的应用奠定了基础，然而尚需要进一步完善。在中国的一些地区，由于不合适的气候因素，对这一技术了解较少，或缺乏相应的技术及管理人员等原因，在一定程度上，制约了香根草人工湿地在当地的发展应用。

4 香根草网络及其在香根草系统发展与传播上的作用

1990 年“国际香根草信息网络”成立，并于 1995 年更名为“国际香根草网络”。网络成立后在推动、协调全球香根草系统的研究、应用和推广方面做了大量工作。先后于 1996 年(泰国)、2000 年(泰国)、2003 年(中国)和 2006 年(委内瑞拉)召开了 4 次大型国际会议，以及许多地区性会议；多次颁发香根草奖金和资质证书；出版了有关香根草的书籍、墙报、通讯等等；组织、协调和支持香根草的研究和培训。与此同时，一些地区性香根草网络(如亚泰香根草网络、地中海香根草网络等等)以及国家级香根草网络也都相应成立。这些网络的成立对于香根草系统在全球的发展起到了举足轻重的作用。为了协调和促进香根草系统的研究、发展与推广，在国际香根草网络的支持下，中国香根草网络于 1996 年在中国科学院南京土壤研究所宣告成立(Xu, 2002a)。成立后主要做了以下工作：

4.1 建立网络信息库

作为网络工作的重要内容就是信息传播，而作为信息传播的一个重要环节，首先应了解全国有那些单位或个人可能对香根草系统感兴趣，香根草系统可能应用于那些领域。为此，中国香根草网络专门对全国的农、林、水土保持、生态、环保、国土、公路、铁路、矿山、土建等各有关学科的教学、科研、政府部门、及技术推广部门有关信息加以收集、整理。了解他们之间的联系，为资料的发放和信息传播奠定基础。

4.2 促进香根草系统的广泛传播

中国香根草网络成立后的首要任务是传播香根草系统。针对不同层次的读者编印了出版物：1)《香根草通讯》，主要介绍国内外香根草研究的新成果、新进展、新技术。一般每年出版 4 期，中文本，但有时为了将中国的进展情况向国外传播，也出版英文版。2)《香根草与水土保持》活页文选，它以不同色彩的纸张向农业单位或农业推广人员介绍香根草的用途和实用技术。3)《当代复合农林业》季刊，主要向复合农林业工作者介绍香根草系统在复合农林业中的应用。为了更加广泛散发香根草技术，网络于 2001 年印制了大量明信片式的贺年卡，在春节前夕发给全国各地有关单位或个人。并编辑、翻译和出版了《香根草研究与展望》，《香根草在稳定斜坡与控制侵蚀上的作用》，《香根草——防治侵蚀的绿篱》，《香根草系统及其在中国的研究与应用》和《香根草系统的理论与实践》等。此外，Paul Truong 和夏汉平编著了《第三届国际香根草大会会刊》英文本。所

有这些不同的出版物散发给不同的读者，满足了不同层次、不同学科读者的要求，为香根草系统在中国乃至世界上的广泛传播做出了贡献。

4.3 通过公共媒介传播香根草系统

为了促进香根草系统为广大公众所了解，在各界同行们的共同努力下，不少公共媒体对香根草系统从不同角度进行了介绍。据不完全统计，中央电视台、参考消息、科学时报、交通时报、南京日报、金陵晚报、江苏商报、广州日报、广西日报、桂林晚报、丽水日报、岳西报、农民日报、安徽经济报等等均对香根草作了报道。与此同时，诸多科技杂志也对科学工作者对香根草系统的研究作了报道，涉及到很多领域，诸如农、林、水土保持、生态、植物、土壤、水利、公路、铁路、交通等。

4.4 组织召开不同类型会议和培训

召开会议是促进交流和发展的有效途径。中国香根草网络组织或协调组织的 1997 年福州会议、1999 年南昌会议和 2003 年广州会议对于总结经验、将香根草系统扩展到工程保护、环境保护领域分别起到促进作用。多次邀请国外专家来华介绍经验。在南昌会议上还邀请了私营企业人士出席，开创了私营企业在传播香根草系统上的历史，并在全国各地发挥了重要作用。

虽然香根草系统在中国的传播已有些年头，但仍然有不少人对香根草系统较为陌生。为此，中国香根草网络组织了不同类型的培训班。如香根草系统培训班，香根草繁殖技术培训班，香根草保护茶树、板栗等经济林培训班、以及国际香根草编织培训班等等，努力促进香根草系统的传播和推广。

4.5 示范与访问

树立一个好的种植典型胜过课堂教学。在宣传和推广香根草系统时往往可以看到由于人们受教育的程度不同，经历不一样，接收香根草系统的程度也不一样。因而在应用香根草系统时表现得参差不齐。为此，中国香根草网络在检查、评估项目的基础上，有意识的组织人们参观香根草种植好的和应用香根草系统得当的农户。并给他们发给一定的奖励，鼓励人们向他们学习。此外，省际之间也进行了考察与访问，如在香根草系统应用走在全国前列的福建省公路学会一行 11 人于 2000 年 9 月去浙江省考察了香根草系统在浙江山地的应用情况。

为了更好的学习国外经验，中国香根草网络还于 2000 年在泰国召开第二届国际香根草会议之后，专门组织了十多位中国专家和私营企业人士去实地访问。此外，某些省属香根草网络也组织了类似的出国考察活动。

4.6 发放草苗和提供试验经费协调试验与研究

中国香根草网络除免费提供信息和资料外，还在国际香根草网络的支持下，向全国各地有意试种香根草的单位和个人免费提供草苗和试验经费，促进示范推广。同时，在野外调查研究的基础上，协调有关单位共同申请或主持香根草项目，促进了香根草系统在不同地区和单位的合作与传播。

5 香根草系统的应用潜力

20 年的历程告诉我们，虽然香根草系统在我国有了广泛的应用，但仍有很大的应用潜力，概括起来大致有以下几个方面：

1) 适宜香根草栽种的中国南方荒山荒地有 200 多万公顷，多为山丘、瘦瘠、零星荒地，其中有不少是不毛之地，造林成活率低。作为先锋植物，将香根草等高栽在不毛之地上，几个月之后就能形成草篱，有效地拦截地表径流和泥沙，改善地表生态环境和土壤水肥状况，为造林提供条件。

2) 随着基础建设的快速发展和矿产品市场需求增长，投入低、产出高的露采矿业得以蓬勃发展。仅南京市废弃露采矿山数量达 680 余座。这些露采矿山，景观破坏严重，生态系统严重退化，大面积裸露矿渣，一般植物难以生长。部分废弃矿山由于遭受地质破坏，废弃物不合理堆放，常常诱发滑坡、塌崩等地质灾害，对当地人民生产和生命财产构成威胁，生态恢复困难。此外，部分矿山废弃物含有重金属类污染物，污染周围水、土和生物环境。而香根草在矿山植被恢复上具有很大的应用潜力，不少地方已经利用香根草恢复了矿山和采石场的植被。

3) 随着国民经济的飞速发展，中国对燃油的需求不断增长。寻求生物能源成为世界热门话题。但中国是一个人多地少的大国，不可能投入大量耕地用于生产燃料作物。而香根草由于耐贫瘠、耐污染、生物量大、多年生，可以生长在不毛之地乃至污水水面上，既可清除污水中富营养化元素，又能源源不断地生产出茎叶从而转换成燃料，一举两得。

4) 人类因燃烧化石燃料导致的 CO_2 排放，加剧了气候变化，这是全球变暖的重要因素。而生物固碳是目前控制 CO_2 最直接且副作用最少的方法。报道指出，大约有 10000~50700 万 t 碳存储于深根型草地中，*Andropogon guyanus* 草（须芒草属）可吸存 $53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \text{CO}_2$ ，以有机质形式予以固定，相当于存储 $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

香根草的生物量远高于 *Andropogon guyanus*，每丛即可存储约 2.5 kg，潜力巨大（Grimshaw，2008）。
参考文献（略）

香根草系统在疏排地下水上的作用

正如在埃塞俄比亚开展的研究所证实的那样，香根草系统在疏排地下水方面具有巨大潜力。香根草怎么能够做到这一点？为什么香根草在这方面比其它植物做得都好？

以下的段落是格雷姆肖写的。不过，其他人对格雷姆肖的原文也做了一些补充（见括号内内容，其后有补充者名字）。作者认为，香根草之所以在疏排地下水方面能发挥巨大作用，其原因在于：

(1) 沿等高线种植的香根草绿篱挺拔而直立，可以在降水径流通过绿篱向坡下流去之前将径流分散开来（即使绿篱顺坡种植也可以，条件是绿篱得一直设置到冲沟的底部，而且还继续延伸到冲沟对岸。这样，久而久之冲沟就可以被填满。由于径流流过绿篱的整个长度时都受到绿篱的过滤，所以就不会发生侵蚀。这一点即使是沿等高线建筑的人工埂也不可能做到 - John Greenfield）。绿篱背后上坡 2m 或更远之地，往往会形成一汪水洼（我相信，该水洼在上坡地带能延伸数米之远，尽管水洼的深度仅有数毫米，但可以湿润土壤，打开土表封皮，使土壤吸收水分 - John Greenfield）。

(2) 绿篱将径流分散开来，径流通过绿篱均匀地向坡下流去，增大了整个下坡地带的水分入渗率（这种湿润坡下土壤的作用，可能会同绿篱之下土壤保持的水分结合在一起，使整片土壤得以湿润。这是否能成为某项研究的设想？绿篱之后的水力‘湿润’曲线规模究竟有多大 - John Greenfield）。

(3) 香根草的根系非常独特、浓密，下扎很深，足以穿透犁底层和其他硬磐，因而打通雨水向地下水入渗的通道。香根草植株的枝叶非常浓密，雨水流经香根草绿篱时的速度异常缓慢，为雨水下渗过程争取了足够长的时间。其它草类的特性难与香根草匹敌，特别是其绿篱密度和根系特性都大大不如香根草。此外，其它草类多数不耐旱，不抗火，也难抵牲口过度啃食，但香根草却游刃有余。

说明：良好的绿篱间耕作实践，例如少耕法（我不喜欢少耕法。少耕法使地面留下的一些小沟沟得不到平整，农具在这些地面持续颠簸容易毁坏。应当用凿形犁而不是圆盘犁或者拔土板进行耕犁 - John Greenfield）或者等高种植，可以进一步将径流减少。

研究结果大多表明，香根草绿篱与可类比的生物系统相比较，优点犹多。但是要说明的是，这些实验是在标准径流地块进行的，所以并没有反映小流域的实际。在小流域里，雨水往往汇集在一定的水道中流动，流速甚大。此外，许多实验为期一年，也许顶多两年。因此也就没有考虑香根草形成绿篱的非凡能力，也没有考虑到随着时间推移香根草绿篱会越发浓密的事实。

用工程手段修筑的梯田，或者其他工程性水土保持建筑能精确地将水流分流到排水道去。这样一来，这些排水道迟早会成为冲沟。（莱索托的例子就很典型。在该国，为农田所修的工程系统反而把农田本身给毁了 - John Greenfield）。工程设施不能增大农田的雨水入渗率，因为它们没有穿透硬磐，因而不能提高入渗率。此外，这些设施占地过广，成为杂草和鼠辈的藏身之地，维护费用不菲。（这些设施的引水道固然流水滔滔，但紧接着堤坝的下坡地带却过于缺水干旱，作物难于长好。工程性水土保持设施将水排出农地，这是雨饲农业农民最不希望的。 - John Greenfield）。

此外，香根草绿篱可以减轻暴风雨灾害。例如，当洪都拉斯遭受飓风米特奇袭击时，香根草绿篱就发挥了很好的减灾作用。（一些工程师和科学家批评说，香根草绿篱固然能提高雨水入渗率，但同时也提高土壤的孔隙水压，因而降低坡地的稳定性。可是，在洪都拉斯遭受飓风米特奇袭击时，受到香根草绿篱保护的坡地却安然无恙。这就说明，香根草对坡地的强化保护作用，足可补偿土壤孔隙水压的任何变化。这种双向作用需要进行重点研究 - Don Miller）。凡是种植了香根草绿篱的农地都受到了充分的保护（Texas A&M）。（在海啸发生地带，香根草绿篱也大有益处。在低地铁路和封闭公路路段，凡是种植香根草绿篱的，绿篱就可以引导海啸越过路面，使路基不至于被海啸掏空而导致道路彻底破坏 - John Greenfield）。

（熊国炎译）

主办：中国科学院南京土壤研究所 中国香根草网络，南京市第 821 信箱，南京市北京东路 71 号
邮编：210008，电话：(025) 86881269，传真：(025) 86881000
E-mail: vetiver@jlonline.com 或 lyxu@issas.ac.cn Homepage: <http://www.vetiver.org.cn>