

HUANGHE SANJIAOZHOU  
MICAORUQIN YU FANGZHI JISHU

# 黄河三角洲 米草入侵与防治技术

田家怡 钦佩 等著



化学工业出版社

# 黄河三角洲米草入侵与防治技术

田家怡 钦 佩 等著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分八章。第一章和第二章介绍了黄河三角洲地区米草的引种历史、分布面积与扩展动态；第三、四、五章通过野外生境调查、监测与室内试验分析，系统研究了米草的生物学与生态学特性，重点研究了米草生态系统的结构与组成，分析了米草入侵的生态后果；第六章通过对芦苇化感物质的研究，芦苇替代互花米草模型模拟，为芦苇替代米草提供了理论支撑；第七、八章根据研发的互花米草生物质综合利用新技术（利用互花米草秸秆做奶牛粗饲料、天然着色剂、特种水产饲用添加剂、复合米草降脂胶囊等生物矿质系列产品），及米草的正、负生态功能，本着“兴利除弊”的原则，提出了“生态控制和综合利用”相结合的控制、治理米草的一套具有特色的创新技术方案。

本书可供从事农业、林业、水利、环保、海洋、气象、生态保护、生态环境管理及区域可持续发展研究的政府决策部门、科研单位、大中专院校的有关人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

黄河三角洲米草入侵与防治技术/田家怡, 钦佩等著. —北京: 化学工业出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-122-07621-2

I. 黄… II. ①田…②钦… III. 黄河-三角洲-牧草-侵入种-防治 IV. X173

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 008885 号

---

责任编辑: 郎红旗 李姿娇

装帧设计: 周 遥

责任校对: 吴 静

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9½ 字数 226 千字 2009 年 12 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

# 《黄河三角洲米草入侵与防治技术》

## 编写人员名单

田家怡 钦 佩 刘长安 申保忠 石东里

李建庆 于 祥 王 光 刘金娥 周文宗

## 前 言

外来有害生物入侵是当今世界除环境污染之外的第二大生态环境问题，对全球生态平衡构成了巨大威胁，受到了国际社会的广泛关注。据统计，入侵我国的外来生物已达 400 多种。自 20 世纪 60 年代以来，我国先后从英国和北美引进了大米草 (*Spartina anglica*)、互花米草 (*S. alterniflora*)、狐米草 (*S. patens*) 和大绳草 (*S. cynosuroides*) 4 个草种。其中，大米草、互花米草和狐米草在国外一些地区表现出了很强的入侵性。我国在当时引种米草的目的是为了在沿海滩涂进行生态建设，例如，利用大米草和互花米草的良好促泥沙沉降功能和高生产力特性，在沿海滩涂大量栽种，用于固堤护岸、防浪促淤、围垦造陆和发展畜牧等，并已经取得了一定的经济效益。但米草的负面效应也日益凸现，其入侵海滨潮间带淤泥质滩涂，改变潮间带生态系统的结构和功能，从而影响生产和环境。例如，破坏生物栖息环境，造成贝类等多种生物因窒息而死亡，致使水产养殖业遭受重大损失；其发达的根系又堵塞航道，给运输、渔业等带来诸多不便。米草入侵和种群暴发的生态后果影响到海滨地区的生物多样性保护事业和经济社会的发展，因此，很多国家已经着手对米草入侵进行生态控制和防治。英国早在 20 世纪初期，就对大米草进行控制和清除，澳大利亚于 20 世纪 80 年代也开始对米草危害进行评估和防治，美国加州于 2001 年成立米草控制项目组，华盛顿州毒草控制委员会也将互花米草列入毒草名单。2003 年 1 月，我国国家环境保护总局正式将互花米草列入我国首批公布的 16 种外来入侵物种之中。

不可否认，米草被引种后，也产生了许多正面效应，包括增加潮间带土地面积，减轻海岸侵蚀，防浪护堤，增加河口湾的生产力，提供牲畜饲料，增加部分鸟类种类和数量，以及增加某些底栖无脊椎动物、有益微生物等。因此，对米草入侵的管理就存在一个权衡问题，是需要利用米草的正面效应，还是控制或根除米草以降低米草入侵所带来的一系列负面效应，目前成为生态学家争论的问题。

我国黄河三角洲地区米草被引种以来，在防治海岸侵蚀、防浪护堤等方面发挥了一定作用，但在沿海尤其是山东省东营市河口区仙河镇五号桩和小清河口成灾面积已达 600hm<sup>2</sup> 以上，零星可见成草面积约 4000hm<sup>2</sup>，草籽漂浮面积约 6000hm<sup>2</sup> 以上。2004 年 1 月 7 日，民革山东省委员会向山东省政府呈交了《关于防治外来入侵有害物种入侵的建议》的提案，引起了山东省政府的高度重视，指示要尽快摸清米草的分布和危害，并进行风险评估和控制治理技术措施的研究。

为此，山东省环境保护局于 2003 年 2 月将“黄河三角洲地区米草的生态调查与防治关键技术研究”面向全社会公开招标，滨州学院与南京大学联合投标该研究项目。经山东省环境保护局科顾委组织专家评审，确定了滨州学院与南京大学承担该重点科技项目。山东省环境保护局于 2004 年 4 月 30 日以《关于下达二〇〇四年山东省环境保护重点科技项目（第一批）及结转项目的通知》（鲁环发〔2004〕95 号）形式，正式下达该研究项目。2004 年 10 月 15 日，山东省环境保护局在济南组织召开了该项目研究实施方案论证会，11 月 20 日与滨州学院、南京大学正式签订了科技合同。该研究也是国家“十一五”科技支撑计划项目“黄河三角洲生态系统综合整治技术与模式”（项目编号：2006BAC011A13），国家自然科学基金

基金“黄河三角洲湿地生态安全评价研究”(30770412)项目的研究内容之一。

该项研究历时四年多,采用实地勘察、遥感图像信息提取、GPS技术、社会调查、访谈以及文献资料相结合的方法,查清了黄河三角洲地区米草的引种历史、分布面积与扩展动态;通过野外生境调查、监测与室内试验分析,系统研究了米草的生物学与生态学特性,重点研究了米草生态系统的结构与组成,分析了米草入侵的生态后果;通过对芦苇化感物质的研究,芦苇替代互花米草模型模拟,为芦苇替代米草提供了理论支撑,创立了“微地貌水质饰变促进芦苇对米草的生物替代技术”;研发了互花米草生物质综合利用新技术(利用互花米草秸秆做奶牛粗饲料、天然着色剂、特种水产饲用添加剂、复合米草降脂胶囊等生物矿质系列产品),获国家发明专利2项,申请专利6项;根据米草的正、负生态效应,本着“兴利除弊”的原则,提出了“生态控制和综合利用”相结合的控制、治理米草的一套具有特色的创新技术方案。

该项研究得到了山东省环境保护局的大力支持,中国科学院青岛海洋研究所,东营市海洋与水产局、水产养殖服务中心、海洋渔业环境监测站、环境保护监测站,滨州市环境保护监测站等单位以及滨州市农业植保站刘庆年研究员给予了我们很大帮助,滨州学院院长助理李长海教授做了大量组织协调工作,闫永利副教授、李甲亮博士、刘庆博士、夏江宝博士、孙景宽硕士等参与了部分研究工作,在此一并表示感谢!

本书是在“黄河三角洲地区米草的生态调查与防治关键技术研究”技术报告的基础上,进一步修改、充实和提炼而完成的。目前,对米草的生态功能的研究正在逐步深入,对米草的控制和治理也正在探索之中。米草是兼有正、负生态效应的外来种,本书的出版,旨在推动米草生态功能评价和综合利用,以达到“兴利除弊”之目的。

鉴于我们的水平所限,书中不妥和不足之处,敬请各位同仁和广大读者批评指正。

作者

2009年10月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第一章 米草研究概述</b> .....           | 1  |
| 第一节 米草引种研究.....                   | 1  |
| 一、米草引种历史.....                     | 1  |
| 二、米草引种研究进展.....                   | 2  |
| 第二节 米草生态功能研究.....                 | 3  |
| 一、米草正面生态功能.....                   | 3  |
| 二、米草负面效应.....                     | 8  |
| 第三节 米草入侵机制研究概述 .....              | 13 |
| 一、米草入侵模式 .....                    | 13 |
| 二、米草入侵与爆发机制 .....                 | 14 |
| 三、米草爆发模式 .....                    | 20 |
| 第四节 米草综合防治技术 .....                | 20 |
| 一、物理法 .....                       | 21 |
| 二、化学法 .....                       | 22 |
| 三、生物防治法 .....                     | 23 |
| 四、生物替代法 .....                     | 24 |
| 五、综合防治法 .....                     | 24 |
| <b>第二章 黄河三角洲米草分布面积与扩展速度</b> ..... | 26 |
| 第一节 米草分布面积 .....                  | 26 |
| 一、米草引种简况 .....                    | 26 |
| 二、米草分布面积调查 .....                  | 26 |
| 第二节 米草扩展速度 .....                  | 27 |
| 一、米草扩展速度计算方法 .....                | 28 |
| 二、米草扩展速度计算结果 .....                | 28 |
| <b>第三章 黄河三角洲米草分布区主要生态因子</b> ..... | 30 |
| 第一节 气候因子 .....                    | 30 |
| 一、气温 .....                        | 30 |
| 二、降水 .....                        | 30 |
| 三、风 .....                         | 31 |
| 四、光照 .....                        | 31 |
| 五、蒸发量 .....                       | 31 |
| 第二节 灾害性气候因子 .....                 | 32 |
| 一、暴雨 .....                        | 32 |
| 二、大风 .....                        | 32 |
| 三、冰雹 .....                        | 32 |



|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 四、风暴潮 .....                          | 32 |
| 第三节 地形因子 .....                       | 32 |
| 一、古代黄河三角洲平原海岸 .....                  | 33 |
| 二、近代黄河三角洲平原海岸 .....                  | 33 |
| 三、潍北平原海岸 .....                       | 34 |
| 第四节 水质因子 .....                       | 34 |
| 一、米草分布区水质因子 .....                    | 34 |
| 二、浅海水质因子 .....                       | 36 |
| 第五节 底质因子 .....                       | 39 |
| 一、监测站点 .....                         | 39 |
| 二、监测时间 .....                         | 40 |
| 三、监测项目与方法 .....                      | 40 |
| 四、监测结果与分析 .....                      | 40 |
| 第六节 生态因子对米草扩展的影响 .....               | 40 |
| 一、盐度 .....                           | 40 |
| 二、潮汐 .....                           | 41 |
| 三、水温 .....                           | 41 |
| 四、基质因子 .....                         | 41 |
| 五、水质 .....                           | 41 |
| <b>第四章 黄河三角洲米草生物学与生态学特性</b> .....    | 43 |
| 第一节 米草生物系统学 .....                    | 43 |
| 一、生物系统学 .....                        | 43 |
| 二、变种及生态型 .....                       | 44 |
| 第二节 米草形态解剖特点 .....                   | 44 |
| 一、大米草形态解剖特点 .....                    | 44 |
| 二、互花米草形态解剖特点 .....                   | 46 |
| 第三节 米草生物学特性观测 .....                  | 46 |
| 一、大米草生物学特性观测 .....                   | 46 |
| 二、互花米草生物学特性观测 .....                  | 46 |
| 第四节 米草生态学特性 .....                    | 47 |
| 一、广盐性 .....                          | 47 |
| 二、耐淹性 .....                          | 47 |
| 三、高适应性 .....                         | 48 |
| 四、强繁殖扩展能力 .....                      | 48 |
| 五、竞争入侵能力强 .....                      | 48 |
| <b>第五章 黄河三角洲米草入侵对盐沼生态系统的影响</b> ..... | 50 |
| 第一节 米草入侵对盐沼底泥微生物的影响 .....            | 50 |
| 一、研究方法 .....                         | 50 |
| 二、结果与分析 .....                        | 51 |
| 第二节 米草入侵对盐沼浮游植物的影响 .....             | 55 |



|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| 一、研究方法 .....                | 55        |
| 二、结果与分析 .....               | 56        |
| 三、米草入侵对浮游植物的影响 .....        | 58        |
| 第三节 米草入侵对盐沼浮游动物的影响 .....    | 59        |
| 一、研究方法 .....                | 60        |
| 二、结果与分析 .....               | 60        |
| 三、米草入侵对浮游动物的影响 .....        | 63        |
| 第四节 米草入侵对盐沼底栖动物的影响 .....    | 64        |
| 一、研究方法 .....                | 64        |
| 二、结果与分析 .....               | 65        |
| 三、米草入侵对盐沼底栖动物的影响 .....      | 77        |
| 第五节 米草入侵对盐沼昆虫的影响 .....      | 78        |
| 一、研究方法 .....                | 79        |
| 二、结果与分析 .....               | 79        |
| 三、对盐沼昆虫的影响 .....            | 81        |
| 第六节 米草入侵对盐沼鸟类的影响 .....      | 82        |
| 一、调查站点与调查时间 .....           | 82        |
| 二、结果与分析 .....               | 82        |
| 三、对盐沼鸟类的影响 .....            | 85        |
| 第七节 米草入侵对盐沼生态系统的综合影响 .....  | 85        |
| 一、对底泥微生物的影响 .....           | 85        |
| 二、对浮游植物的影响 .....            | 85        |
| 三、对浮游动物的影响 .....            | 86        |
| 四、对底栖动物的影响 .....            | 86        |
| 五、对昆虫类的影响 .....             | 87        |
| 六、对鸟类的影响 .....              | 87        |
| 第八节 黄河三角洲米草风险评估 .....       | 88        |
| 一、米草风险评价指标体系与评价方法 .....     | 88        |
| 二、米草风险评价结果 .....            | 89        |
| <b>第六章 互花米草生态控制技术 .....</b> | <b>93</b> |
| 第一节 微地貌水文饰变生态工程技术 .....     | 93        |
| 一、微地貌水文饰变生态工程设计 .....       | 94        |
| 二、试验观测方法 .....              | 97        |
| 三、试验结果与分析 .....             | 97        |
| 第二节 芦苇替代互花米草模型模拟 .....      | 101       |
| 一、模型假设 .....                | 102       |
| 二、模型推导 .....                | 102       |
| 三、参数计算 .....                | 102       |
| 四、模型建立 .....                | 103       |
| 五、模拟结果 .....                | 103       |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第三节 芦苇替代互花米草过程中的化感作用研究          | 104 |
| 一、互花米草群落中一种特异性根际微生物的鉴定及其功能      | 104 |
| 二、芦苇凋落物对互花米草益生菌的化感效应            | 106 |
| 三、芦苇凋落物对互花米草种子萌发和幼苗生长的化感效应      | 107 |
| <b>第七章 米草综合利用技术</b>             | 110 |
| 第一节 米草综合利用研究概况                  | 110 |
| 一、米草生物质及其营养成分                   | 110 |
| 二、米草综合利用                        | 112 |
| 第二节 一种控制外来种互花米草的方法              | 115 |
| 一、互花米草与代表性牧草的营养成分比较             | 115 |
| 二、互花米草饲喂奶牛试验                    | 115 |
| 第三节 互花米草饲用着色剂技术                 | 117 |
| 一、互花米草饲用着色剂 (BMCA) 饲喂 AA 肉鸡增色试验 | 117 |
| 二、互花米草饲用着色剂 (BMCA) 饲喂蛋鸭增色试验     | 117 |
| 三、应用前景                          | 118 |
| 第四节 互花米草特种水产饲用添加剂技术             | 118 |
| 一、实验方法                          | 119 |
| 二、试验结果与分析                       | 120 |
| 第五节 互花米草复合降脂胶囊技术                | 122 |
| 一、配方与生产工艺                       | 122 |
| 二、互花米草复合降脂胶囊人群试验                | 124 |
| <b>第八章 黄河三角洲米草综合防治对策</b>        | 125 |
| 第一节 米草综合防治的必要性                  | 125 |
| 一、正确评价米草的正负功能                   | 125 |
| 二、米草综合防治的必要性                    | 126 |
| 第二节 米草综合防治对策和建议                 | 127 |
| 一、建立外来生物入侵管理的法律法规和制度            | 127 |
| 二、建立多部门分工协作的防范和控制外来生物入侵的监控机制    | 127 |
| 三、建立外来生物入侵风险评估程序与制度             | 127 |
| 四、建立外来入侵生物米草信息系统及早期预警体系         | 127 |
| 五、建立外来入侵生物米草跟踪监测体系              | 128 |
| 六、深入开展米草入侵的生态研究                 | 128 |
| 七、加快米草防治关键技术的研究                 | 128 |
| 八、加强米草综合利用技术的研发                 | 129 |
| 九、加强关于米草知识的宣传教育                 | 129 |
| <b>参考文献</b>                     | 130 |

# 第一章 米草研究概述

随着经济全球化、国内外贸易的大幅度增长、国际交往的日益频繁和旅游业的蓬勃发展,从国外引入和入侵的生物种类日益增多。外来有害生物入侵已对全球生态平衡构成巨大威胁,受到了国际社会的广泛关注。在全球范围内,外来有害生物入侵是继生境破坏之后严重影响生物多样性的第二大威胁因素。米草属(*Spartina*)属于禾本科虎尾草族,起源于北美东海岸和墨西哥湾。该属于1879年由Schreber命名,全球现有15种(王卿等,2006),均为多年生耐盐植物,广布世界各地沿海地区(唐廷贵等,2003),主要分布在欧、美、亚、大洋四洲温带和亚热带地区的海涂,其最适的生境为河口湾。由于在原产地的生态系统中具有重要的生态功能(Chapman&Hall,1992),米草的一些物种已被传到了世界许多国家和地区。从扩散的情况看,7种米草被认为具有很强的入侵性,其中大米草(*Spartina anglica*)和互花米草(*S. alterniflora*)是全球性的入侵种,在国际上已得到了广泛的关注和研究(陈中义等,2004)。

## 第一节 米草引种研究

### 一、米草引种历史

大米草是一种多年生禾本科植物,原产英国南海岸,是欧洲海岸米草和美洲互花米草的自然杂交种。该种植物耐盐、耐淹能力强,生长繁殖快,生态幅宽,是一种优良的促淤、护堤、保岸和改造滩涂的盐生植物(贺士元等,1991)。关于大米草的最早纪录,始于1666年Merrett对英国海岸米草的描述(仲崇信,1993)。英国的Royal Commission on Coast Erosion于1907年启动了一项对大米草保堤护岸和造陆功能的研究,并于1929年出版了《米草的经济可行性》一书,在世界范围内引起了大米草需求的大幅增加。到了1936年,世界上已有130多个国家有种植(张敏等,2003)。目前大米草广布于英国、美国、法国、德国、丹麦、中国、荷兰、新西兰、爱尔兰和澳大利亚等许多国家。荷兰自1923年引种大米草,到1967年发展到4000~5800hm<sup>2</sup>,目前已占据绝大部分沿海河口,造成严重的危害。法国的大米草分布面积在1967年为4000~8000hm<sup>2</sup>;英国的大米草在1967年为12100hm<sup>2</sup>,到1991年占据河口盐沼总面积(44370hm<sup>2</sup>)的95.25%;澳大利亚自1930年引种大米草,目前的总分布面积为880hm<sup>2</sup>;美国的米草主要分布于华盛顿州、俄勒冈州和加利福尼亚州的太平洋沿岸,其中华盛顿州自1961年向Puget Sound地区引种了不育的*S. townsendii*,但后来发现是可育的*S. anglica*,引入后扩展十分迅速,目前在该地区面积已达3311hm<sup>2</sup>。

1963年南京大学的仲崇信教授从英国和丹麦引进4批大米草苗和种子,1964年育成壮苗44株,取得引种育苗的初步成功。1965~1966年,在江苏盐城滩涂建立了我国第一块大米草湿地40hm<sup>2</sup>,1979年盐城大米草发展面积近8000hm<sup>2</sup>。1980年引种到福建,之后逐渐被其他沿海省市引种繁殖并取得成功(高尚士,1991)。经过近40年的推广和自然传播,在我国沿海90多个市、县栽培大米草36000hm<sup>2</sup>,间断分布在北纬40°35'至北纬21°27',即由辽宁省盘锦至广东省电白、鸭绿江口至广西合浦全长15000km海岸带范围内(赵大昌等,

1996; 朱晓佳等, 2003)。大米草表现出很强的入侵性, 在浙江、江苏等地生长尤为繁茂。福建省自 1981 年在罗源湾引种大米草 667hm<sup>2</sup>, 至今已发展到 10000hm<sup>2</sup>。在北方气候寒冷、海水盐度高、生态环境十分恶劣的条件下, 大米草仍能抗冰凌、耐高盐、耐低温而长盛不衰, 在渤海湾淤泥质滩涂上, 有史以来第一次出现了绿色的海岸。大米草是一种改造滩涂的优良植物, 也是一种盐渍土裸地上植物群落形成的先锋植物 (赵大昌等, 1996)。

1979 年南京大学的仲崇信教授又从美国引进了南方高秆生态型的互花米草。互花米草是禾本科米草属的多年生草本植物, 原产北美洲大西洋沿岸, 从加拿大的纽芬兰, 到美国的佛罗里达州及墨西哥湾均有分布, 是当地盐沼优势种。互花米草主要以无性分蘖的方法进行繁殖, 伴以种子繁殖, 在光滩上能迅速成丛, 一般无其他伴生种。移栽 3 个月后, 株高能从 10~20cm 增长到 150~190cm, 株数从 2~3 株发展到 220~350 株, 草丛向外扩展 0.8~1.2m。短短的 30 年, 我国的沿海北起鸭绿江口, 南至广西北部湾的沿海滩涂上都有它的分布, 该物种的种群现已发展到 53000hm<sup>2</sup> 以上。由此可见, 作为一个外来种, 互花米草属于 r 型对策者, 它以较高的繁殖能力和扩散能力得以生存 (朱晓佳等, 2003)。

近年来南京大学生物技术研究所又从美国特拉华大学海洋研究院盐生生物实验室引进第三种米草, 即狐米草 (*Spartina patens*)。狐米草原产北美东海岸、加拿大魁北克至美国佛罗里达及得克萨斯潮滩高潮带及砂质草地, 是一种优良的耐盐植物, 也是美国的干草资源。目前, 我国正在推广种植狐米草。

## 二、米草引种研究进展

1963 年春, 周恩来总理主持召开“全国海涂工作会议”, 南京大学的仲崇信教授提出引种大米草保滩护堤、促淤造陆的建议, 终获批准 (钦佩, 2007)。1963 年 7 月, 仲崇信出访荷兰、英国, 实施引种大米草。1965~1966 年, 仲崇信等和江苏新洋试验站合作, 在盐城滩涂建立了我国第一块米草湿地 40hm<sup>2</sup>。1978 年, 全国科学大会给南京大学大米草研究颁奖。1978 年, 在江苏启东召开了全国第一次大米草科研现场会, 蒋南翔同志与会并建议成立“南京大学大米草及海滩开发研究所”。1979 年, 全国大米草人工植被已发展到 3.33 万公顷, 栽植面积居世界首位。1979 年, 在浙江温岭召开了全国第二次大米草科研现场会。1979 年, 仲崇信等赴美引进互花米草等三种米草。1981 年, 互花米草在福建罗源湾引种成功, 以后陆续分别在江苏、浙江等省滩涂引种成功。1983 年, 《大米草吸收汞及净化环境》研究论文发表, 标志着我国米草用于环境净化与修复方面的研究取得新进展。1985 年, 仲崇信主编的《米草研究的进展》研究论文集出版, 标志着我国米草研究的系统化和理论化。1986~1992 年, 米草提取液即生物矿质液及其 10 个系列产品通过省部级科技成果鉴定, 并获国家教委科技进步三等奖, 标志着米草的应用开发迈出了新步伐。1992 年, 钦佩、仲崇信主编的《米草的应用研究》论文集出版, 标志着我国米草应用研究的深入和逐步走向市场。1994 年, 农业部资助的互花米草加工的“生物矿质食品添加剂”通过鉴定, 并在江苏大丰定点正式生产。1996 年, 国际生态工程学会给南京大学大米草研究所颁发“米草生态工程”一等奖。1997 年, 浙江省水利厅的“互花米草保滩护堤生态工程”项目通过了省级科技成果鉴定。1998 年, 华东师范大学河口海岸研究所在长江口承担的“种草 (米草) 引鸟生态工程”项目获得成功, 为浦东新机场的安全保障做出了贡献。是年, 南京大学主持的“耐盐优质牧草狐米草大规模繁殖及细胞工程育种”项目正式获准列入“国家海洋 863 计划”, 2000 年 10 月通过专家验收。2001 年 5 月, 天津市绿化委员会在渤海湾引种南京大学课题组狐米草细胞工程苗, 标志着耐盐优质牧草狐米草大规模繁殖逐步走向产业化。2004

年, 复旦大学的陈家宽、李博课题组在 *Hydrobiologia* 等杂志发表关于米草入侵长江口对当地生态系统和生物多样性的负面影响的论文, 以原位研究的试验数据揭示了其入侵性, 拉开了米草负面功能研究的序幕。2005 年 12 月, 南京大学主持的“海滨盐沼生态修复和生态工程模式的研究与应用”获教育部科技进步二等奖。2007 年 1 月, 钦佩主持的“互花米草的生态控制和综合利用研究”项目通过了教育部组织的专家鉴定。该项目将理论与应用、模式与技术、生态效益与经济效益相结合, 是我国对外来种互花米草生态控制和应用生态学研究的一个重要探索, 并已显示了巨大的示范意义和市场潜力。

## 第二节 米草生态功能研究

米草耐盐、耐淹, 光合效率高, 在海岸带、河口等广阔淤泥质潮滩具有高度的生态适应性 (Thompson, 1991), 因而在很多国家和地区形成大爆发 (Ayres et al, 2002; Callaway et al, 1992), 对生态系统危害极为严重 (Frid et al, 1999; Kriwoken et al, 2000; Mcenulty et al, 2001)。在我国米草的种群爆发也产生了一系列的生态问题, 与世界上其他国家一样, 对外来物种米草的生态功能也存在着很大的争议。

### 一、米草正面生态功能

米草是宿根性强的草本植物, 具有非常发达的地下茎, 用地下茎和种子繁殖, 具有抗逆性强、适应性广、分蘖力和繁殖力强、种群密度高、群落生物量大等特点。自 1963 年引入以来, 米草适应了我国海岸带自然环境而正常生长发育, 具有明显的促淤造陆、保滩护岸、环境保护等生态功能, 并有显著的经济效益, 是一种改造滩涂的优良植物, 也是一种盐渍土裸地植物群落的先锋植物。经过 40 年栽培、观察和实验研究, 已充分证明米草在保护我国海岸生态环境方面具有多种积极作用。

#### (一) 促淤造陆

米草促淤是指其庞大的根系能固定滨海松软流动的受潮水间断浸渍的淤泥质土壤。当米草生长发育形成密集的植物群落后, 挟带泥沙的潮流进入米草滩时, 由于米草的阻挡, 冠层内的水流切变速度减小, 能量便大量消耗, 潮流挟带的悬浮泥沙及其絮凝体沉积速率减小, 黏性细颗粒泥沙便在草滩上沉积, 长此以往, 滩面逐渐淤高 (时钟, 1997)。米草具有消浪、缓流、拦截潮水带来的泥沙、促进滩面淤积和增高的功能, 进而为滨海光滩裸地植树种草或农田垦殖创造了新的环境。荷兰利用大米草的促淤造陆功能, 淤造出面积为 490hm<sup>2</sup> 的世界第一块新陆地。过去 1000 年英国东海岸的 Wash 湾的大米草已淤造出 4.6 万公顷的肥沃土地 (孙书存等, 2004)。浙江温岭海滩种植 267hm<sup>2</sup> 大米草, 8 年后即达到围垦的高程, 围滩面积达 400hm<sup>2</sup>, 这是我国利用大米草从海中取得的第一块陆地 (田星星, 1996)。上海引种米草加快造淤, 40 年围垦长江口滩涂新增土地 7.2 万公顷, 约等于第二次世界大战后日本围垦土地的总和 (钦佩等, 2002)。

米草促淤造陆的生态过程十分迅速。据报道, 在欧洲米草的淤积率达 20~200mm·a<sup>-1</sup>, 在英国一些沿海, 大米草海岸已有 1800mm 的淤积量, 在我国海岸淤积率高达 260mm·a<sup>-1</sup> (Chung, 1990), 而在大米草生长较少的华盛顿和俄勒冈的淤积量为 2.3~2.6mm·a<sup>-1</sup> (Thom, 1992)。1993 年, 在我国珠海南水大基进行的比较试验表明, 米草滩涂的促淤造陆效果比同等高程的光滩淤积一般要快 2.0~2.5 倍, 海湾连片的互花米草带淤积速率每年达 500m<sup>2</sup> (朱晓佳等, 2003)。在江苏射阳互花米草草滩每平方公里每年比光滩多淤积 42857m<sup>3</sup> 的泥沙 (徐国万等, 1993; 仲崇信, 1991)。有关实验表明, 米草的生长密度越大,

促淤造陆的功能越强；种植大米草的海滩地带，其泥沙的淤积速度要快 2~3 倍，滩面比未种大米草的光滩每年多淤高 10~20cm（徐国万等，1993；傅宗甫，1997；陈宏友，1990）。

根据仲崇信对大米草和互花米草在我国沿海促淤量的调查（见表 1）（仲崇信，1991），米草在全国沿海各地的促淤效果都十分显著，这也是引进大米草和互花米草的初衷之一。

表 1 大米草和互花米草在我国沿海的促淤量

| 地点 | 种植时间      | 淤积量<br>/cm | 平均淤积量<br>/cm · a <sup>-1</sup> | 资料来源           | 备注             |
|----|-----------|------------|--------------------------------|----------------|----------------|
| 辽宁 | 锦西        | 10 年       | 29.0                           | 2.9            | 马福民通信          |
| 河北 | 唐海柏各庄     | 7~8 年      | 30.0~40.0                      | 3.75~5.0       | 王重廉通信          |
| 天津 | 海口站       | 1 年        | 1.6                            | 1.6            | 王金铸通信          |
|    |           | 2 年        | 8.2                            | 4.1            | 王金铸通信          |
|    |           |            |                                |                | 测量海拔高度         |
| 河北 | 黄骅子牙新河北岸  | 10 年       | 71.9                           | 7.19           | 王金铸通信          |
|    | 黄骅        | 3 年        | 30~36                          | 10~12          | 孙陆章口述          |
|    |           |            |                                |                | △              |
|    | 寿光羊角沟     | 1 年        | 5~10                           | 5~10           | 寿光县科委          |
|    |           | 3 年        | 30                             | 10             | 寿光县科委          |
| 山东 |           | 4 年        | 50(74*)                        | 12.8(18.5*)    | 寿光县科委          |
|    |           | 12 年       | 120                            | 10             | 寿光县科委          |
|    |           |            |                                |                | * 为最大值         |
|    | 掖县朱由公社    | 9 年        | 30                             | 3.3            | 掖县科委           |
|    | 连云港宿城公社   | 2 年 2 月    | 25~30                          | 11.4~13.8      | 汪鹏程通信          |
|    | 灌云        | 10 年       | 155                            | 15.5           | 张宏漠通信          |
|    | 射阳        | 1 年        | 6~8                            | 6~8            |                |
|    |           | 1 年        | 18~20                          | 18~20          |                |
|    |           | 1 次台风      | 10                             | 10             | 孙孟槐通信          |
|    |           | 3 个月 20 天  | 5.5~6.5                        | (Zhou 等, 1990) | 40m 宽草带前 10m 处 |
|    |           | 1 年        | 7~8                            | 7~8            | 陈才俊            |
| 江苏 | 东台        | 1 年        | 18~20                          | 18~20          | 卓荣宗、徐国万        |
|    |           | 3 年        | 27.9                           | 9.3            | 卓荣宗、徐国万        |
|    |           |            |                                |                | △              |
|    | 如东小岸河口    | 3 年        | 80                             | 26~67          | 大米草所           |
|    | 启东        | 4 年        | 93                             | 23.3           | 曹豪             |
|    |           | 3 年        | 7.5~9                          | 2.5~3          | 黄兴逵            |
|    |           | 3 年        | 37                             | 12.3           | 黄兴逵            |
|    |           | 1 年        | 29                             | 29             | 黄兴逵            |
|    |           |            |                                |                | △, 最大值         |
|    | 舟山小干农场海滩  | 5 年        | 20                             | 4              | 郑长安            |
|    | 镇海后施棉花良种场 | 8 年        | 30~35                          | 4.75 4.375     | 棉花良种场          |
|    | 镇海大契公社    | 1 年        | 44.1                           | 44.1           | 王秀芳            |
|    | 镇海大契公社    | 1 年        | 12.18                          | 12.18          | 王秀芳            |
|    | 镇海大契公社    | 1 年        | 11.6                           | 11.6           | 王秀芳            |
|    | 宁海        | 4 年        | >50                            | >12.5          | 青株农场           |
|    |           | 1 年 2 个月   | 15                             | 12.84          | 长街公社           |
|    | 黄岩        | 4 年        | >12                            | >3             | 石柱公社           |
|    |           | 4 年        | 30                             | 7.5            | 农业局            |
| 浙江 | 温岭        | 2 年 6 个月   | 19                             | 7.56           | 卓荣宗            |
|    |           | 1 年        | 14.6                           | 14.6           |                |
|    |           | 1 年        | 5                              | 5              |                |
|    |           | 1 年 2 个月   | 10 15                          | 8.57 13.78     |                |
|    |           | 7 年        | 80                             | 11.4           |                |
|    |           | 4 年        | 66~68                          | 16.5~17        | 东方公社           |
|    |           | 1 年        | 15~20                          | 15~20          | 观岙公社山头大队       |

续表

| 地点 | 种植时间 | 淤积量<br>/cm | 平均淤积量<br>/cm · a <sup>-1</sup> | 资料来源  | 备注    |
|----|------|------------|--------------------------------|-------|-------|
| 浙江 | 玉环   | 2 年        | 40                             | 20    | 桐丽公社  |
|    |      | 5 年        | 80                             | 16    | 桐丽公社  |
|    |      | 5 年        | 60                             | 12    | 东青大队  |
|    |      | 1 年        | 15~20                          | 15~20 | 东青大队  |
|    | 平阳   | 3 年        | 50                             | 16.67 | 第一农场  |
| 福建 | 莆田   | 1 年        | 20                             | 20    | 蔡兆元通信 |
|    | 泉州   | 1 年        | 5                              | 5     | 徐峨通信  |
|    |      | 3 年        | 9                              | 3     | 叶德炽通信 |
|    |      | 1 年        | >2                             | >2    | 东海乡   |
|    | 厦门   | 3 年        | 3                              | 1     | 叶德炽通信 |
| 广西 | 合浦   | 4 年        | 12                             | 3     | 合浦科委  |

注：表中数据除埋桩、土壤剖面与测量海拔高程三种方法为绝对值外，其余都为草滩高于光滩的相对值；备注栏内有“△”者为互花米草，其余均是大米草。

一些学者通过实验和实测流速等进一步探讨了米草促淤的动力机制，为米草促淤功能提供了理论解释。如庄武艺等（1991）通过对澳大利亚东南部海湾的库纳湾潮滩环境中的海草带及沙滩的潮流流速、悬移质含量、沉积物组成的野外实际测量和分析，表明潮滩中的海草足以使其底层的潮流流速减弱 40%~60%，悬移质含量减少 20%~35%。时钟等（1998）用室内水槽实验的方法，测量不同高度互花米草冠层水流平均流速剖面，研究了互花米草对流速的减缓作用。在长江口南汇东滩分别对光滩、海草、互花米草近底层流速、瞬时水位和悬沙浓度进行测定，表明盐沼内植物的摩擦使近底层流速减少 16%~71%，波浪传入盐沼后能量迅速降低，盐沼中悬沙浓度较相邻光滩低（时钟等，1998）。

## （二）保滩护岸

海岸带由于受到潮汐、波浪、近岸流、河川径流、泥沙供应、植被分布及海平面升降等因素的影响，常表现出蚀退或淤长，形成侵蚀型、淤长型和稳定型海岸（彭建等，2000）。对于侵蚀型海岸，由于波浪、潮流等的侵蚀作用，可能造成海岸、堤坝的侵蚀、倒塌，给沿海人民的生命财产带来损失。为减轻上述因素的破坏，特别是防止与减少风暴潮对潮滩、堤岸带来的危害，保滩护岸工作就显得尤为重要。而米草能以其庞大而又密集根系，固结土粒以减少波浪的冲击；粗壮的茎秆和浓密的叶冠层，能减少风力的侵蚀，故有防风、消浪、保滩、护堤的作用（陈卫东等，1996）。

1987 年胜利油田建造的桩西石质和水泥质防潮大堤长 37km，耗资亿元，3 年后堤基损坏严重，出现空洞，抗风能力下降。1990 年胜利油田采用米草生态工程保护桩西海堤获得成功，发挥了抗灾减灾的作用（仲崇信，1992）。据江苏射阳水利局资料，1986~1995 年实施互花米草生态工程 9 年来，米草在侵蚀型海滩上发展到了 1610hm<sup>2</sup>，保护海岸线 22.47km，取代了石砌护岸措施，节省了护岸工程费、人工费及防汛维护费等 320 万元（宋连清，1997；张馥桂，1994）。1990 年 11 月，苍南县三角牌高程 8.3m 的海堤由于无互花米草保护，有 200m 标准海堤护浪墙被台风巨浪冲塌，而沙中镇海堤前有 20~30m 宽的互花米草保护，台风风浪的破坏程度就小。温州市养殖场海堤和灵昆岛 200hm<sup>2</sup> 的八六海堤前有较宽的互花米草保护，台风过后海堤无损，而堤前无互花米草的灵昆对虾养殖场海堤则被台风风浪冲毁（钦佩等，2002）。江苏如东县东凌垦区 1982 年围成，围区南部互花米草封滩后，有效抵御了风浪的侵蚀，而围区北部堤外无互花米草种植，则受风浪侵蚀严重，堤坝不得不



进行二次大修(陈才俊, 1994)。据研究, 在 5m 高的风浪通过 100m 宽的互花米草带时, 米草带消浪能力为 97%, 对 6m 高的风浪其消浪能力为 81%, 对 7m 高的风浪其消浪能力为 65% (朱晓佳等, 2003)。试验证明, 生长在温带淤泥质潮滩上部 15cm 高的茂密的大米草, 可使波高降低 71%, 波能衰减 92% (陈卫东等, 1996)。据张万钧 (1999) 研究, 种植大米草能消浪能 90%, 消浪高 71%, 他们在天津市开发区 (在海涂和盐田上建成) 堤外的中低潮位带种植大米草, 高潮位带种植柽柳 (*Tamarix chinensis*), 堤坝上种植白蜡 (*Fraxinus* sp.)、毛白杨 (*Populus tomentosa*), 组成乔、灌、草混交林海防林带, 能抵御百年一遇的海潮。

有的学者对米草的护岸机理进行了探讨。如卢声明等 (1996) 研究表明, 当波浪向岸传播时, 互花米草在波浪作用下, 向前上方摆动; 当其弯曲达到一定程度后, 在浮力和其自身产生的恢复力作用下, 米草向后上方摆动, 从而使向前传播的波浪能衰减; 其在温州市围垦处现场观测结果, 波高 40~45cm, 60m 宽的互花米草带可消浪 60% 左右, 堤前水深 0.8m、宽 20~30m 的互花米草带可消除 8~10cm 的波高波浪; 7~8m 宽的互花米草可消除 8~10cm 波浪的 50%。傅宗甫 (1997) 对互花米草消浪的试验表明, 种植 40m 宽的互花米草带, 其消浪能力为 67% 波高, 相当于建造 2.0m 高的潜坝的消浪效果。米草的消浪护岸功能主要是通过控制高潮位附近的波浪, 消耗其波能来实现的。生长于潮间带的米草, 因其根系发达、植株粗壮, 连片分布后可形成很好的“生物软堤坝”, 高潮位附近的波浪伴随着强大的波能冲击米草滩带时, 由于米草的柔韧性, 植株随波摆动并对波浪产生反作用, 使波能大大降低, 从而降低高潮位波浪对其后海岸、堤坝的冲刷破坏作用 (李加林, 2004)。

### (三) 护港减淤

海潮携带大量泥沙进入沿海河口, 致使河床、航道、闸门等严重淤塞。河口外海滩上的米草可截留潮水中的泥沙, 从而减轻河口的淤积, 具有护港减淤、便利航船的功能 (仲维畅, 2007)。对江苏射阳新洋港 6 年的实际观测证实, 大米草每年可减少回归航道的泥沙量约 33.33 万立方米 (陈宏友, 1998)。米草能固结潮水沟和港道的岸壁, 并刷新潮沟、港道深度, 使其宽深比缩小、横截面呈 U 形; 在潮流和风浪过程中, 避免了潮沟的溯源侵蚀和沟边滩面被刷低, 限制潮沟和港道的大幅摆动, 从而起了保港减淤的作用 (陈宏友, 1998; 沈永明等, 2003a)。米草滩外侧 (向海) 出现内高外低的陡坎 (沈永明等, 2003a), 这可能会使河口宽而浅的状况得以改善, 并有望抑制拦门沙的形成 (陈宏友, 1998)。

### (四) 防治污染

我国海岸带的环境污染与治理问题越来越受到社会的关注和重视。陆源性的大量废水、固体废物仍然经过海岸带向海洋倾排, 加之海上油气开采、交通运输等经济活动, 致使近海水域受到不同程度的污染, 河口、港湾区域尤为严重, 海水富营养化、赤潮现象常有发生, 威胁海洋生态系统。但大米草、互花米草能吸收、富集、降解污水中的有机物、氮磷营养盐、重金属等, 从而降低水中污染物的含量, 使水体得到净化。漆国先等 (1999) 对大米草在内陆地区贵州省气候条件下进行的生长适应性及净化污水能力实验结果表明, 引入贵州的大米草不仅有较强的生长能力, 而且对有机污水中的 BOD<sub>5</sub>、氮、磷等有很好的净化效果。污水在处理系统中停留 3 天, 其 BOD<sub>5</sub> 和总磷的去除率分别达 90% 以上; 停留 5 天, 总氮和氨氮的去除率也在 90% 以上。刘军普等 (2002) 实验表明, 互花米草具有耐盐碱、耐污能力, 对污水有明显的净化作用, 对总磷和氨氮的平均去除率分别为 32.1%、38.8%, 在海岸带大面积种植互花米草, 可以降低海水中氮、磷的总量; 经污水灌溉的互花米草营养成

分中,粗蛋白、粗脂肪含量与优质牧草苜蓿 (*Medicago* sp.) 基本相当,且毒物含量符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2001) 中家禽、猪配饲料指标要求。许德芝(2002)在春、夏、秋三季对大米草净化污水的试验结果表明,利用大米草净化生活污水是可行的,对污染物的去除率均达 85% 以上。周玳等(1985)的试验显示,大米草地上部分吸收富集的汞是环境中汞的 10~56 倍,根部可达 250~2500 倍,可见大米草吸收富集重金属的能力很强。田吉林等(2004)用大米草对有机汞的净化试验显示,大米草耐氯化甲基汞 ( $\text{MeHgCl}$ ) 毒性的临界浓度为  $15\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,是烟草的 3 倍。大米草可主动吸收有机汞并部分地转化为无机汞,积累在大米草的地下部分。大米草吸收汞的盆栽试验发现,幼苗在含汞  $296.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的土壤中生长期 3 个月,其根部富集汞量达  $3006.9\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;水培试验结果表明,大米草实生苗在含汞  $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的培养液中生长 1 个月,其根部富集汞量达  $30000\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上(田星星,1995)。此外,互花米草还可以用来降解水产养殖和石油生产带来的污染,降低对近海营养盐的贡献和赤潮发生的可能性(孙书存等,2004; Hubbard et al, 1999; Johnson et al, 1997; Leendertsc et al, 1996; Lin et al, 1998; Lindau et al, 1999)。米草同其他绿色植物一样,通过光合作用和呼吸作用与大气进行二氧化碳和氧气交换,对维持大气氧平衡、降低大气温室效应起到了非常重要的作用。米草叶片分布有大量的毛孔,对大气中的灰尘具有明显的阻挡、过滤和吸附作用(Lindau et al, 1999)。

#### (五) 改良土壤

米草属植物是一种泌盐的盐生植物,根系吸收盐分,经盐腺分泌到体外。据浙江温岭报道,米草滩地围垦 5 年脱盐率达 68.01%,土壤含盐量由 1.216% 下降至 0.389% (张征云等,2004)。大米草也是一种高光效植物,茎叶繁茂、根系发达,在滩涂种植有利于改善土壤理化性质,提高土壤肥力和有机质含量。大米草发达的根系使土壤的通透性增强,土壤空隙增加,氨离子含量降低,有机质含量增高,对土壤有明显的改良作用(赵清良等,1997)。据测定,大米草根区土壤有机质含量达 1.55%,比根区外土壤提高 67% (李爱民等,1994),氮、磷等营养元素也相应提高。同时,海滩上栽种大米草后一般比邻近光滩的有机质含量逐年有所增加,并能有效地控制和减轻土壤返盐程度(仲崇信等,1985)。研究发现,互花米草对盐沼土壤的改良作用更为明显,土壤有机质的含量与互花米草生长年数相关程度较高;互花米草盐沼土壤有机质含量在由海堤向外水平方向上变化的平均梯度为每 100m 距离减少  $0.87\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,垂直方向上的平均梯度为每向下 1cm,土壤有机质含量减少  $0.05\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (沈永明等,2003b)。互花米草在增加潮滩盐土植被类型和植被带的宽度的同时,也加速了盐土植被演替的进程(沈永明等,2005),有效地改良了海岸带盐土(左平等,2008)。此外,米草可以提高盐土的团粒含量、空隙度、透水性和空气含量,均有助于土壤改良。浙江台州农科所在种植大米草后的滩涂上栽植柑橘,成本低,柑橘品质好,增产增值显著,经济效益较高(张征云等,2004)。

#### (六) 保护生物多样性

米草生态系统位于海陆过渡地带,受海陆多种生态因子的综合影响,系统具有较高的营养物质和能量来源。由于米草地下根茎发达,随着滩面的逐年淤高,根茎被埋藏愈来愈深,根茎与淤泥胶结在一起,土壤中形成大量有机物,有利于底栖生物的生存、穴居和繁衍。据李爱民等(1994)对大米草根区土壤中有益微生物的研究,固氮菌、纤维素分解菌和硝化细菌的数量明显多于对照土壤。童远瑞等(1985)对大米草潮间带动物多样性的调查表明,米草滩区底栖无脊椎动物种数和生物多样性比光滩明显增加,总生物密度增加了 19 倍,其中