

# 多功能作物皇竹草引种的环境风险评价

郑海<sup>1,2</sup>, 易自成<sup>1,2</sup>, 黎俏文<sup>1,2</sup>, 骆世明<sup>1,2</sup>, 李锦开<sup>1,2</sup>, 黎华寿<sup>1,2\*</sup>

(1. 华南农业大学农业部热带农业环境重点开放实验室, 广州 510642; 2. 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 外来热带植物皇竹草(*Pennisetum hybridum*)具有高光合力、高再生力和强抗旱力,而且耐刈割、高产量和富营养价值,近年作为饲料、燃料(能源植物)、工业原料和环境治理材料等在各地试种和推广。由于皇竹草具生长快、生物量大、易克隆繁殖、易扩张等生物学特性,人们对引种扩种皇竹草的生态风险十分关注。以皇竹草为材料,结合文献分析和种植调研考察,比较了皇竹草与华南典型本地杂草芒草(*Miscanthus sinensi*)和入侵植物飞机草(*Eupatorium odoratum* L.)的生态特性,并以通用的国际外来物种入侵风险评价体系,对皇竹草引种的生态风险进行了评价。结果表明皇竹草抗逆性强、生势旺盛,但不具备入侵植物的繁殖扩张、化感作用和难以自然或人工控制等生态特征;其物种入侵风险指数按“引入型的评估指标体系”评价得分为23.5,按“存在型的评估指标体系”评价风险得分为27.5,比照入侵风险评估综合指标体系评价其风险等级为“可接受引进”;此外,通过文献分析和对我国南方及河南、内蒙古自治区等种植调研考察,迄今为止国内外均未发生皇竹草入侵为害的报道。因此,在我国发展皇竹草引起生物入侵风险的可能性极小。

**关键词:** 皇竹草; 外来物种; 环境风险; 管理措施

**中图分类号:** X820.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2014)02-0288-10    doi:10.11654/jaes.2014.02.013

## Environmental Risk Assessment of Exotic *Pennisetum hybridum* as a Biofuel and Forage Crop

ZHENG Hai<sup>1,2</sup>, YI Zi-cheng<sup>1,2</sup>, LI Qiao-wen<sup>1,2</sup>, LUO Shi-ming<sup>1,2</sup>, LI Jin-kai<sup>1,2</sup>, LI Hua-shou<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of South China Tropical Agriculture Environment, Ministry of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Hybrid Giant Napier (*Pennisetum hybridum*) was hybridized from elephant grass and African *Pennisetum*. It is an exotic multipurpose crop with high photosynthetic efficiency and strong drought-resistance, and has been used as an energy and forage grass. However, there is little information available about its eco-environmental risks. In this paper, environmental risks of *Pennisetum* were assessed by comparing *Pennisetum* with typical local weeds and invasive plants, based on literature analysis and planting onsite survey. The results showed that *Pennisetum* did have the ecological characteristics of invasive plants with invasion risk score of 23.5 (by introduction-type evaluation system) and 27.5 (by existence-type evaluation system). Our results suggest that *Pennisetum* is little dangerous and an acceptable species to be introduced in tropical area.

**Keywords:** *Pennisetum hybridum*; exotic plants; environmental risk; management measure

生物入侵(Biological invasions)因其会对生态环境和社会经济发展产生巨大的危害而成为全球关注的热点问题,生物入侵对生物多样性减少的影响仅次于生境丧失和生境片段化。入侵种是指通过有意或无

意的人类活动引入、在当地的自然或半自然生态系统中形成了自我再生能力,给当地的生态系统或景观造成明显影响的物种。中国的生物入侵问题日趋严重,世界自然保护联盟(IUCN)公布的世界上最恶劣的100种外来入侵物种,约有一半已入侵我国<sup>[1-2]</sup>。紫茎泽兰、薇甘菊、互花米草、水葫芦、红火蚁和湿地松粉蚜等外来入侵物种已对我国生物多样性和生态环境造成了严重的破坏并导致了巨大的经济损失<sup>[3-4]</sup>。

皇竹草(*Pennisetum hybridum*)又名杂交狼尾草,为多年生三倍体禾本科植物,原产于哥伦比亚的热带

收稿日期:2013-09-16

基金项目:国家重大基础研究项目(973)(2011CB100400-G)子项目;  
国家自然科学基金项目(41073059);广东省科技计划项目  
(B020304008, 0203-E12147)

作者简介:郑海(1986—),男,博士研究生,专业方向为污染生态学。

\*通信作者:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

植物。皇竹草属  $C_4$  植物,光合效率高,营养较丰富,我国于 20 世纪 80 年代作为牧草引进,近年逐渐引起关注并被用于饲料、造纸、饮料、食品等领域。由于其根系发达,生长迅速,抗逆性强,对生存环境要求低,在贫瘠退化的红壤、沙地和水土流失严重的陡坡地均能生长而逐渐被应用于环境治理和保护<sup>[5-8]</sup>。近年来利用多年生能源禾草作为应对气候变化和能源危机成为世界关注的热点,推动了将皇竹草用于生物质能领域的尝试<sup>[9]</sup>。但是,由于皇竹草生长速度快、容易克隆繁殖、具有生物量大、较容易扩张等生物学特性,人们对引种扩种皇竹草的生态风险也十分关注,如广东粤海生物能源有限公司规划的 10 万亩皇竹草基地生物质燃料发电项目,其环境影响评价的焦点问题便是大面积引种皇竹草的生态风险问题。对外来物种的风险评估起步于有害生物风险分析(Pest Risk Analysis,简称 PRA),其管理对象是检疫对象和农林业危险性病虫害。PRA 主要针对物种(外来的杂草、害虫和病原微生物等)的无意引进带来的风险<sup>[1,4,10-12]</sup>。迄今未发现有关皇竹草引种生态风险评价的报道,为此,本文结合国内外文献分析和广东境内皇竹草种植基地的情况,研究皇竹草与植物入侵相关的生理生态学特性及其对当地生物多样性的可能影响,为外来植物皇竹草引种生态风险评价提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 皇竹草与华南地区典型杂草和典型入侵植物的生态特性调查

在全面收集国内外有关皇竹草、华南地区典型杂草芒草和恶性入侵植物飞机草等的文献资料基础上,对分布在广东省境内的[韶关乐昌和南雄退化红壤坡地(约 200  $\text{hm}^2$ )、珠海斗门盐碱滩涂地(约 180  $\text{hm}^2$ )、广州增城与从化赤红壤(约 80  $\text{hm}^2$ )、湛江雷州、赤坎区赤红壤坡地(约 150  $\text{hm}^2$ )]皇竹草种植基地进行多次实地调研考察,并在华南农业大学的校内农场和宁西教学科研基地的荒草地及耕地进行了 4 年的种植试验<sup>[13]</sup>,获得有关皇竹草与华南地区典型杂草芒草和恶性入侵植物飞机草、微甘菊等植物的生物学特性、生态特征和生境影响的资料,进而归纳比较皇竹草和典型杂草芒草和恶性入侵植物飞机草、微甘菊等的生态特征与环境风险。

### 1.2 皇竹草外来植物的入侵风险评估

根据国际上较通用的外来物种入侵风险评价体系,对皇竹草引种风险进行评价。欧健等<sup>[10,14-15]</sup>在《中

华人民共和国出入境检验检疫植物检疫证书》IPPC(2001)的 ISPM 第 11 号《检疫性有害生物风险分析》标准、中国有害生物风险分析程序等基础上提出了“外来物种风险评估指标框架”,基于指标体系构建的原则和评估指标框架,构建了“外来植物入侵风险评估指标体系”。该指标体系沿袭了国际上通用的指标框架的一、二级指标结构,并设置了 45 个三级操作指标及具体评价准则。其中,三级操作指标中特色评估指标的选取和设计充分考虑了引入地的自然环境、生态系统特点、外来植物入侵现状和经济行业特征。各级指标的权重采用层次分析法加以确定。根据第 4 个一级轮换指标组可将所构建的体系分为“引入型的评估指标体系”和“存在型的评估指标体系”两套评估指标,以满足不同的风险评估管理需求。评估系统采用各级指标按权重(分值)逐层分配,评估对象通过对 6 个一级指标组的风险评分权重(传入的可能性 15%、定植的可能性 15%、扩散的可能性 15%、入侵史与物种型 10%、已入侵分布情况 10%、危害与影响 30%、防治的可行性 15%)加和得到最后的评价结果。该方法体系在厦门市当地共 50 种较为熟识的、评估信息较为完备且具有代表性的外来植物物种的实施评估中验证,最终的评价结果与外来物种的实际危害情况相符合,所构建的指标体系能够较好地反映评估物种的实际风险水平,说明本评估方法科学可靠<sup>[10-11,14-15]</sup>。因此本文直接套用欧健和卢昌义的评价体系与评价方法以及国内外相关的文献、评价数据信息<sup>[12,15]</sup>,结合笔者在广东韶关、珠海、广州等的实验与实地调查<sup>[13]</sup>,综合评价皇竹草的潜在风险。

### 1.3 国内外皇竹草分布的调查总结

为更好地了解皇竹草种植概况及其是否存在生态风险,2010 年至今连续 4 年,笔者在广东省广州、湛江和韶关等地进行了种植试验,在对皇竹草基地进行实地调查基础上,采用收集文献资料分析法,对种植皇竹草的不同地区和更长时间序列的生态风险调查进行总结与分析。

## 2 结果分析

### 2.1 皇竹草与本地典型杂草芒草和入侵植物飞机草的生态特性比较

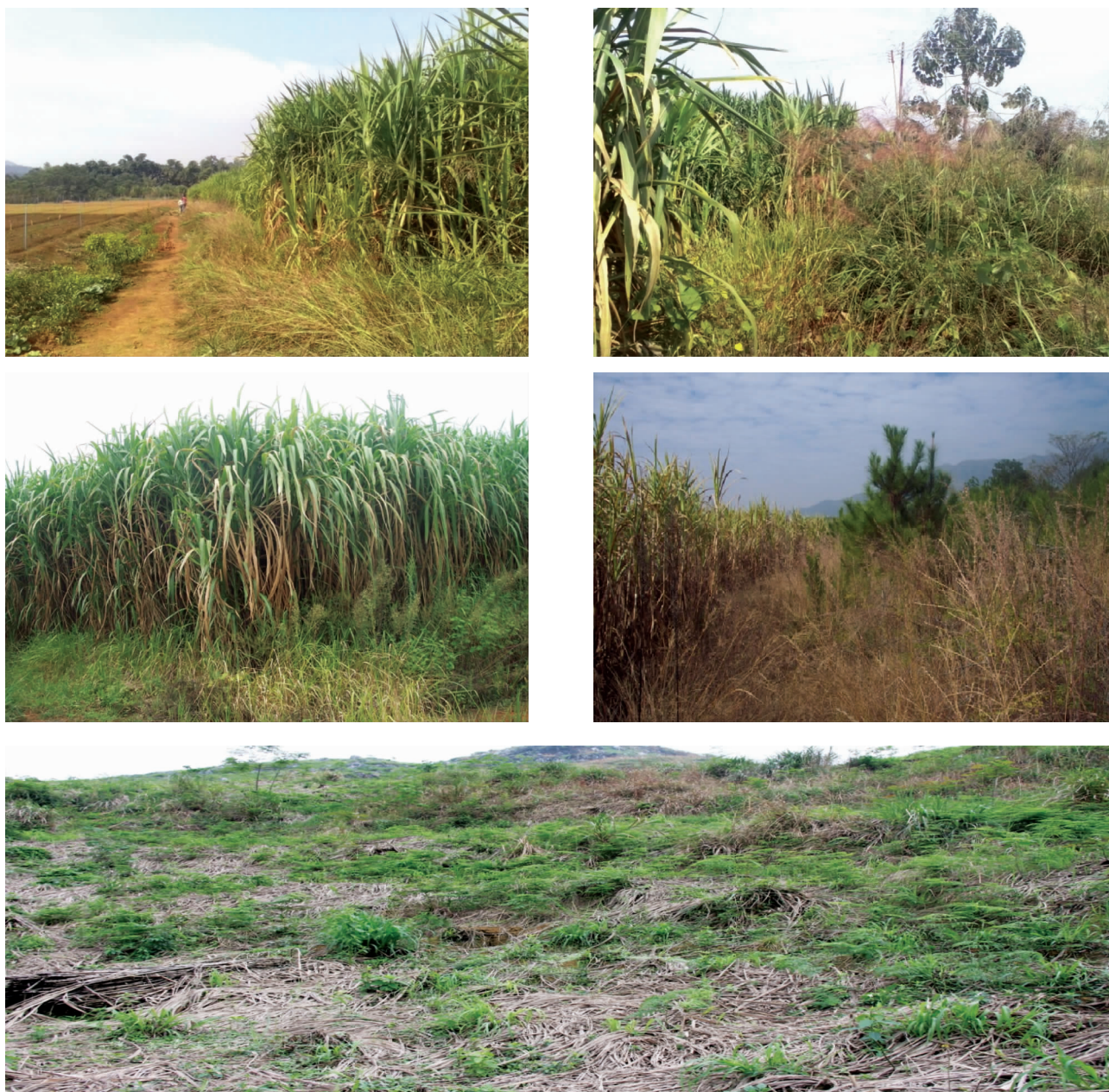
在文献分析基础上,根据我们在广东韶关、珠海、广州、湛江等地调研考察和华南农业大学校内农场和宁西教学科研基地 4 年多的种植试验(图 1),获得皇



竹草生物学基本特性的数据资料<sup>[13]</sup>。皇竹草适应性强、对土壤要求不高、抗旱力强、保水固土力强,分蘖力强、根须发达,具有 C<sub>4</sub> 植物光合能力强、生物量大、种茎易繁殖的特点,但不能种子繁殖、不耐低温霜冻、不耐水淹。对皇竹草与华南地区典型本地种芒草和外来入侵植物飞机草的生态特性进行调查比较,结果如

表 1 所示,皇竹草的生长势与本地典型杂草类似,但不具备自我扩张的能力,不具有入侵植物种如飞机草的强繁殖力与化感作用等生物学特征,皇竹草繁殖扩张能力也远不如本地常见杂草芒草。

为了更好地分析皇竹草是否成为入侵植物,表 2 就皇竹草与入侵植物可能具备的生物学特性逐一比



高草植物为皇竹草,示周边的乔灌木伴生植物,正下方照片为韶关乐昌坪石种植基地  
越冬皇竹草地上部枯死物覆盖后初春各种杂草等自然恢复重新生长的情形

The tall grass in those photos are *Pennisetum*, showing the surrounding bushes and grass accompanying plants. Photo at the bottom shows the Napier grass and various weeds seeding in early spring after upper dead by wintering and re-growth of natural recovery at Pingshi Town, Lechang Country, Shaoguan City, Guangzhou Province

图 1 广州韶关湛江市皇竹草种植基地植物群落(示皇竹草及周边植物)典型照片

Figure 1 The typical photo of *Pennisetum* communities and its surroundings plants in planting base of Guangzhou, Shaoguan, and Zhanjiang City in Guangdong Province



表 1 皇竹草与本地的典型杂草(芒草)和入侵植物种(飞机草)生态特性比较  
Table 1 Ecological comparisons of *Pennisetum* with typical native weeds(*Miscanthus sinensis*) and  
invasive plants(*Eupatorium odoratum*) in introduced region

| 生态特性 Ecological characteristics                     | 皇竹草 <i>Pennisetum hydridum</i> <sup>[5-9,13]</sup>            | 芒草 <i>Miscanthus sinensis</i> <sup>[16]</sup>                                   | 飞机草 <i>Eupatorium odoratum</i> L. <sup>[17-18]</sup>                                |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 生物发育,成熟期                                            | 生育期一般在 120 d 左右;栽后约 7~10 d 出芽,6—10 月是生长旺盛季节,11 月以后气温降低,生长速度减慢 | 实生苗生长缓慢,3 年后才加速生长,第 4 年才能开花结实                                                   | 从生型的多年生草本或亚灌木,一般在 11 月—翌年 2 月开花,2—4 月结实和种子成熟                                        |
| 繁殖力,营养繁殖体适应力或者果实和种子产量                               | 亚热带和温带地区栽培,多不抽穗,仅表现为营养生长,只进行无性繁殖;茎节扦插或根茎分株移栽方式,快速扩繁           | 有性和无性繁殖但结实率低,一般不用种子繁殖,地下茎发达,能适应各种土壤                                             | 有性和无性繁殖均较强,每棵植株种子数达 7.2 万~38.7 万粒,种子极小而轻,千粒重仅 0.164 g,适于风媒传播,分枝与克隆繁殖力强              |
| 分布区                                                 | 全国大部分地区都可栽种;但低温不能越冬                                           | 原种产于中国南北各地                                                                      | 已入侵扩散至云南、海南、广东、香港、澳门、广西和贵州西南部等地                                                     |
| 繁殖体具有长距离传播的机制                                       | 繁殖体为茎节或分蘖,丛生,不能长距离传播                                          | 走茎和分蘖繁殖,不能长距离传播                                                                 | 种子数量多、传播力强、萌发生长快、分枝与克隆繁殖能力高,具长距离传播机制                                                |
| 化感作用                                                | 无                                                             | 无                                                                               | 有,化感物质主要是黄酮类、生物碱和非蛋白氨基酸等物质,而挥发油中则主要是萜类化合物、烷烃类化合物和含氧化合物、脂肪族化合物和芳香族化合物                |
| 寄生习性                                                | 无                                                             | 无                                                                               | 无                                                                                   |
| 种子的形态性状                                             | 三倍体,不能形成花粉,或雌蕊发育不良,一般不结实                                      | 颖果                                                                              | 瘦果                                                                                  |
| 生存期限,越冬能力,开花行为,种子产生,种子休眠,萌发,幼苗存活,异型杂交频率,花粉发育能力,散播能力 | 生长期一般在 15 ℃以上,湿润土壤;低于 5 ℃时停止生长,低于 0 ℃的不能越冬;温带地区不开花,不传播花粉,不结籽  | 喜温暖湿润气候,最适气温为 25~30 ℃;能耐低温,可以安全越冬,种子萌发需要高温、高湿和光照条件,成熟种子发芽率 98%,贮存 8 年,发芽率仍达 80% | 在年均温高于 19 ℃最冷月均温在 12 ℃以上、雨量 900~2000 mm、相对湿度 75%~90%的地带生长特别旺盛;不耐低温;种子数量多、传播力强、萌发生长快 |
| 抗逆性                                                 | 耐酸性、耐高温、耐干旱、耐火烧,但不耐水涝                                         | 能耐 pH4 的酸性土壤,耐寒,耐旱                                                              | 抗逆性和入侵性强                                                                            |
| 光合速率,竞争优势                                           | C <sub>4</sub> 植物,光合速率高,生长快,生物量大,具竞争优势                        | 光合速率高,生长快,生物量大,具竞争优势                                                            | 净光合速率大,光合能力强,能充分利用光能快速生长、扩散和蔓延,具竞争优势                                                |

较。从中可见,皇竹草除抗逆性强、光合速率高、生物量大、具垂直空间竞争优势等特征外(这也是它被作为能源植物的优势条件),并不具备入侵植物具有的强繁殖力、强生长势、化感作用和难以自然或人工控制等生物学特性与生态学特征。

2.2 皇竹草外来植物入侵的风险评估

参照欧健<sup>[10,15]</sup>的方法,按外来植物入侵风险评估指标体系进行皇竹草引入华南的生态风险评估,其引入型评估结果见表 3。

2.2.1 传入阶段风险(15%)

(1)人为有意引入的可能性(2%):皇竹草可以通过人为有意引入(2分);

(2)人为无意引入的可能性(2%):不易被人为无意传播(0分);

(3)自然扩散传入的可能性(2%):不会(0分);

(4)传入次数和传入数目(2%):已发生多次传入(2分);

(5)目前传入途径的管理现状(4%):未列入控制

对象,在现有外来物种管理手段下允许其引入(0.5分);

(6)检疫措施执行情况(2%):不列入国家和地方的检疫对象,不需要检疫(0分)。

2.2.2 定植阶段的风险(15%)

(1)环境适生性(5%):适合华南地区的气候条件及环境状况(5分);

(2)自身的生物学特性与生活史特性(10%):可在枝节处生长根茎或匍匐枝,被切割后的残体容易生成新的植株;有较强的抗逆性,对生长环境要求不严格,生长速度较快种子可以特定方式度过不利阶段,如在土壤中保持较长的活性(大于 1 年),种苗出苗率较高。(具有上述三种繁殖特性共得分 3.5 分)。

2.2.3 扩散的阶段(15%)

(1)扩散的能力与方式(8%):无法利用风力、水流、动物携带或取食传播,只能人为有意种植扩散(0.5分);

(2)扩散的制约因素情况(7%):有潜在的人为有

表 2 入侵植物的生物学特性与生态特征及其与皇竹草相应特征

Table 2 Biological characteristics and ecological features of common invasive plants and *Pennisetum hybridum*

| 入侵植物特征<br>Invasive plant characteristics                     | 入侵物种举例<br>Invasive species example <sup>[17-18, 25]</sup>                                                                     | 皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i> <sup>[13, 20-24, 26]</sup>            |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 生物发育快,成熟早                                                    | 微甘菊 ( <i>Mikania micrantha</i> )、水葫芦 [ <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms]等                                            | 生育期一般在 120 d 左右; 栽后约 7~10 d 出芽, 6—10 月是皇竹草生长旺盛季节, 11 月以后气温降低, 生长速度减慢 |
| 繁殖力强, 营养繁殖体适应力强或者果实和种子产量高                                    | 水葫芦能以有性和无性两种方式繁衍后代, 而在入侵早期, 无性生殖更是主要的; 每逢春夏之际, 水葫芦依靠匍匐枝与母株分离的方式, 每 5 d 就能克隆出一个新植株, 用不了多少时间它就能铺满整个水域, 可形成绵延数十公里长的绿岛, 淤塞河道、影响通航 | 温带地区栽培多不抽穗, 仅表现为营养生长, 只进行无性繁殖; 茎节扦插或根茎分株移栽方式, 快速扩张                   |
| 分布区广                                                         | 空心莲子菜 ( <i>Alternanthera philoxeroides</i> ) 具有水生、陆生两种生态型, 入侵时可以由陆至水, 顺水而下, 再由水至陆                                             | 全国大部分地区都可栽种; 低温不能越冬                                                  |
| 繁殖体具有长距离传播的机制                                                | 微甘菊种子较轻, 且带有冠毛, 具有多种传播方式, 有利于种子快速传播; 这种低生殖成本特征和多样化传播方式, 其藤蔓高速生长, 攀援和蔓延, 营养繁殖力也很强                                              | 繁殖体为茎节或根茎, 不能长距离传播                                                   |
| 具有明显化感作用                                                     | 能产生生物毒素以抑制其他植物的生长, 例如加拿大一支黄花, 它的根系能分泌抑制其他植物生长的化学物质, 从而破坏土著种的生长, 占领大片领地                                                        | 无                                                                    |
| 具有寄生习性                                                       | 菟丝子 ( <i>Cuscuta chinensis</i> Lam.)                                                                                          | 无                                                                    |
| 种子形态性状类似于作物                                                  | 可以伴随作物传播, 如微甘菊、菟丝子等                                                                                                           | 三倍体, 不能形成花粉, 或雌蕊发育不良, 一般不结实                                          |
| 生存期限, 越冬能力, 开花行为, 种子产生, 种子休眠, 萌发, 幼苗存活, 异型杂交频率, 花粉发育能力, 散播能力 | 生存期限, 植物数量, 越冬能力, 开花行为, 种子产生, 种子休眠, 萌发, 幼苗存活, 异型杂交频率, 花粉发育能力, 散播能力                                                            | 生长期一般在 15 ℃ 以上, 湿润土壤; 低于 5℃ 时停止生长, 低于 0 ℃ 的不能越冬; 温带地区不开花, 不传播花粉, 不结实 |
| 抗逆性强                                                         | 空心莲子菜不但不畏严寒酷暑, 而且就算死亡了, 只要植株没有完全腐烂, 待到时机成熟, 依然会复活为害                                                                           | 耐酸性、耐高温、耐干旱、耐火烧, 但不耐水涝                                               |
| 光合速率高, 具竞争优势                                                 | 光合速率高, 生长快, 生物量大, 具竞争优势等                                                                                                      | C <sub>4</sub> 植物, 光合速率高, 生长快, 生物量大, 具竞争优势                           |

意扩散区域, 无或少有病虫害有效的天敌(1 分)。

2.2.4 入侵史与物种型(10%)

(1) 他地分布与入侵史(6%): 国内外入侵史与总体分布(0 分);

(2) 生活型与生境多样性(4%): 生活型与生境多样不明显, 主要分布于人为控制的农田环境下(0 分)。

2.2.5 (潜在的)危害与影响(30%)

(1) 对生态环境的影响(8%): 对农田生态系统过程影响极微、对生态系统因子的影响也很小(1 分);

(2) 对生物多样性的影响(12%): 对水分、养分等生长限制因素有竞争(2 分), 没有化感作用, 但能形成浓密的植丛, 不具有攀援或高密闭度的生长习性, 可高密度占领生境, 形成荫蔽, 从而影响当地物种的生长, 能在生境中形成浓密的植丛, 形成荫蔽(2 分), 不能自然杂交(0 分), 也不为病虫害的寄主或滋生害虫(0 分), 植株是无毒或无刺(0 分), 对当地保护区或特有物种群落不存在威胁(0 分)。(共得分 5 分);

(3) 对经济及其他方面的影响(10%): 对农林业基本无不利影响(0.5 分), 对水产和港口河道航运基

本无影响(0 分), 对旅游景观资源的影响中性或甚微(0.5 分); 对人群健康及生活条件无明显影响(0 分)。

2.2.6 防治的可行性(15%)

(1) 防治方法与效果(11%): 人工机械防治或除草剂化学防治, 协同防除效果更好(1.5 分)。

(2) 防治成本(4%): 防治过程快捷, 成本低(0.5 分), 防治措施的副作用小(0.5 分)。

可见, 按“引入型的评估指标体系”评价得分为 23.5 分(表 3)。同理依据同样的指标对已有皇竹草的地区按“存在型的评估指标评分体系”进行评价, 其环境风险得分为 27.5(表 3)。综合上述结果, 对照外来植物引入风险等级标准(表 4), 风险等级评价得分 0~36, 风险可接受, 允许引进; 得分 36~60, 有一定的风险, 需要进一步的获取相关信息或采取防范监控措施; 得分 60~100, 入侵风险高, 不可接受, 禁止引进。可知皇竹草引入华南地区的风险分值小于 36, 风险等级为可接受, 其管理策略为可以引进。此外, 根据欧健<sup>[10, 14]</sup>对华南地区存在的三裂叶蟛蜞菊、凤眼莲等 10 种典型外来植物入侵风险评价结果风险分值在 58.5~75.5, 可知皇竹草的评价风险得分远远小于这些入侵

表 3 风险评估指标体系法对皇竹草作为外来植物入侵的评价结果<sup>[10,15,17-25]</sup>Table 3 Assessment of *Pennisetum hybridum* by index system for invasive species risk assessments

| 评价指标系统 Evaluation System |                            |                         | 评价分值 Evaluation scores |                     |      |     |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|------|-----|
| 一级指标及其权重                 | 二级指标及其权重                   | 三级指标及其权重                | 引入型                    | 存在型                 |      |     |
| 1.传入阶段风险 15%             | 1.1 引入途径 11%               | 1.1.1 人为有意引入的可能性 3%     | 2                      | 3                   |      |     |
|                          |                            | 1.1.2 人为无意引入的可能性 3%     | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 1.1.3 自然扩散传入的可能性 2%     | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 1.1.4 物种传入次数及传入的数目 3%   | 2                      | 2                   |      |     |
|                          | 1.2 引入途径的管理现状 4%           | 1.2.1 法规控制及关注程度 2%      | 0.5                    | 0                   |      |     |
| 2.定殖阶段风险 15%             | 2.1 环境适生性 5%               | 1.2.2 检疫措施情况 2%         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 2.1.1 气候适宜度 3%          | 2                      | 2                   |      |     |
|                          | 2.1.2 土壤及水域环境适宜度 2%        | 3                       | 3                      |                     |      |     |
|                          | 2.2 自身的生物学特性及生活史特征 10%     | 2.2.1 繁殖方式 2%           | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 2.2.2 成熟植株有性繁殖频率 1%     | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.3 无性繁殖能力 2%         | 1                      | 1                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.4 生长速度 1%           | 1                      | 1                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.5 抗逆性 1%            | 1                      | 1                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.6 单株产生种子数量 1%       | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.7 种子库存活期 1%         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 2.2.8 萌芽率(或出苗率) 1%      | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 3.扩散阶段风险 15%            | 3.1 扩散能力与方式 8%         | 3.1.1 风力传播 2%       | 0    | 0   |
|                          |                            |                         |                        | 3.1.2 水流传播 2%       | 0    | 0   |
| 3.1.3 动物取食或携带传播 2%       | 0                          |                         |                        | 0                   |      |     |
| 3.1.4 人类媒介传播 2%          | 0.5                        |                         |                        | 0.5                 |      |     |
| 3.2 扩散的制约因素 7%           | 3.2.1 潜在的扩散区域(生境)情况 4%     |                         | 1                      | 1                   |      |     |
| 4.入侵史与物种型 10%            | 4.1 他地分布情况及入侵史 6%          | 3.2.2 天敌 3%             | 0                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 4.1.1 国内该物种的分布情况与入侵史 3% | 0                      | —                   |      |     |
|                          | 4.2 物种型 4%                 | 4.1.2 国外该物种的分布情况与入侵史 3% | 0                      | —                   |      |     |
|                          |                            | 4.2.1 生活型 2%            | 0                      | —                   |      |     |
|                          |                            | 4.2.2 生境类型多样性 2%        | 0                      | —                   |      |     |
| 4* 物种分布及丰度 10%           | 4.1 物种分布范围与密度 6%           | 4.1.1 物种总体分布范围 4%       | —                      | 2                   |      |     |
|                          |                            | 4.1.2 分布密度 2%           | —                      | 0                   |      |     |
|                          | 4.2 分布区状况 4%               | 4.2.1 分布区域中造成负面影响的比例 2% | —                      | 0                   |      |     |
|                          |                            | 4.2.2 分布的生境类型 2%        | —                      | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 5.(潜在的)危害与影响 30%        | 5.1 对生态环境的影响 8%        | 5.1.1 对生态系统过程的影响 4% | 0.5  | 0.5 |
| 5.1.2 对生态系统因子的影响 4%      | 0.5                        |                         |                        | 0.5                 |      |     |
| 5.2 对生物多样性的影响 12%        | 5.2.1 对水、养分等生长限制因素的竞争 2%   |                         | 2                      | 2                   |      |     |
|                          | 5.2.2 化感抑制作用 2%            |                         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          | 5.2.3 能否高密度占领生境 2%         |                         | 2                      | 2                   |      |     |
|                          | 5.2.4 能否自然杂交 2%            |                         | 0                      | 1(0)                |      |     |
|                          | 5.2.5 是否为病虫害的寄主或可滋生害虫 1%   |                         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          | 5.2.6 植株是否有毒或有刺 1%         |                         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          | 5.2.7 对当地保护区或特有物种、群落的威胁 2% |                         | 0                      | 0                   |      |     |
| 5.3 对经济及其他方面的影响 10%      | 5.3.1 对农、林业的影响 4%          |                         | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          | 5.3.2 对水产养殖业或港口河道航运的影响 2%  |                         | 0                      | 0                   |      |     |
|                          | 5.3.3 对旅游景观资源的影响 2%        |                         | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          | 5.3.4 对人群健康的影响 2%          |                         | 0                      | 0                   |      |     |
| 6.防治的可行性 15%             | 6.1 防治的方法与效果 11%           |                         | 6.1.1 机械防除 3%          | 0.5                 | 0.5  |     |
|                          |                            |                         | 6.1.2 化学防除 3%          | 0.5                 | 0.5  |     |
|                          |                            | 6.1.3 生物防治 3%           | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 6.1.4 边界协同防除的必要性 2%     | 0                      | 0                   |      |     |
|                          | 6.2 防治成本 4%                | 6.2.1 防治投入 2%           | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 6.2.2 防治措施的副作用 2%       | 0.5                    | 0.5                 |      |     |
|                          |                            | 评价风险分值                  |                        | 23.5                | 27.5 |     |



表 4 外来植物引入风险等级标准表<sup>[10,15]</sup>  
Table 4 Grades of invasion species risk

| 风险等级 Risk level | 分级标准 Grading standards | 管理策略 Management strategy             |
|-----------------|------------------------|--------------------------------------|
| 可接受             | 0~36                   | 可以引进                                 |
| 具有一定的风险         | 36.5~60                | 具有一定的风险,需要获取相关信息进一步研究,如若引进,应采取相应监控措施 |
| 不可接受            | 60.5~100               | 入侵风险高,禁止引进                           |

植物,其入侵风险等级为可接受级,在亚热带地区无入侵风险。

2.3 皇竹草种植推广概况与典型种植区生态风险结果分析

据资料汇总分析,我国最早于 1981 年经江苏省农科院土壤肥料研究所从美国引进皇竹草,此后中国热带农科院热带牧草研究中心也于 1984 年从哥伦比亚国际热带农业中心引进并在海南岛试种成功,并先后在海南、广东、广西、江西、湖南、四川、云南、贵州引种推广获得成功。在我国多数省(区)有作为牧草和水保植物、能源禾草进行种植的试验与推广应用,近几年在宁夏、甘肃、江苏、安徽、河南、新疆、北京、山东、陕西、辽宁也开始引种推广,建设种植基地。从对皇竹草种植基地的实地考察和文献报道看,皇竹草不具备外来入侵植物的特性,类比国内外皇竹草种植的实例,迄今为止暂时还没有皇竹草造成生态入侵风险的报道个案。

2.3.1 国内种植皇竹草的情况

2009 年至今,我们每年均对粤西湛江(南亚热带)、珠江三角洲广州珠海(中亚热带)和粤北韶关南雄和乐昌坪石(中亚热带,四季分明)的皇竹草种植基地情况进行调研考察,观察到皇竹草均为直立丛生,没有向周边自行扩散的能力,不开花不具种子只能靠种茎和分蘖繁殖,也没有化感抑制其他植物的现象,其枯落物残茬等不会抑制其他植物(如图 1 右下角的坪石种植基地越冬皇竹草地上部枯死后初春各种杂草和越冬皇竹草自然恢复重新生长的情形)。图 1 同时显示了皇竹草地块周边伴生植物乔灌木品种丰富,乡土植物如松、杉、竹子和各种阔叶树,桃金娘、岗松、五节芒、类芦、棕叶芦、鸡屎藤等灌木植物,以及铁芒箕等蕨类植物都能在周边正常生长。总之,乡土植物的生物多样性没有受到皇竹草生长的影响。

据报刊和文献资料统计,在国内除青海没有种植的报道以外,其他各省份都有种植或试种。其中以贵州、云南、广东、广西、四川等地的种植面积最大。图2是根据有关文献报道的资料整理出的皇竹草在中国的种植分布图,从不同地区和长时间序列的生态风险

调查考察结果来看,迄今还没有皇竹草生态入侵为害的报道。

2.3.2 国外种植皇竹草的情况

据联合国粮农组织(FAO)和国外网站热带牧草网([www.tropicalforages.info](http://www.tropicalforages.info))报道,全球很多国家和地区种植了皇竹草,其中包括非洲国家乍得、刚果、喀麦隆、加纳、乌干达、马达加斯加和南非;拉丁美洲的美国、波多黎各、古巴、巴西;东南亚的泰国、菲律宾、印度、孟加拉国、中国和澳大利亚等(图 3)。查阅国内外相关的资料,迄今暂时还没有出现皇竹草生态入侵为害的报道。

3 讨论

中国环保部《外来入侵物种环境风险评估技术规范》提出对草本植物风险的评估,主要评估三方面:一是其建立自然种群可能性,评估气候相似性、可育的种子、自然杂交、自花授粉、授粉者、无性繁殖、生命周期、耐荫性和抗土壤贫瘠等内容;二是扩散可能性的评估,评估种子产量和发芽率、适应长距离传播的器官或结构、有利于携带传播的拟态性、被有意或无意传播、自然力传播等方面;三是生态危害的评估,主要评估是否人工繁育、特殊器官、化感作用、被寄生、可食性、毒性、传播病虫害、引发火灾、可控制性等方面<sup>[27]</sup>。事实上,相关内容在国际通用的外来生物入侵的环境风险评估指标体系中均有反映<sup>[19,27]</sup>,本文对皇竹草种植风险的环境评估,较好地地将上述有关内容进行了定量半定量,并通过实际种植基地的环境调查进行验证,从而为较理想的环境风险评估提供了技术路线和具体方法途径。本文对外来物种环境风险评估的思路和方法,可供同类工作参考。

本文章的评价结论,对解除人们的疑虑,科学应用推广具备水保植物、饲料植物和能源植物的多功能植物皇竹草,以及推动皇竹草产业化发展具有重要的意义。事实上,合理建立皇竹草种植与综合利用基地对生物多样性保护和生态建设有重要意义。与普通农作物相比,多年生能源作物减少了化肥农药等投入使用,减少了土壤侵蚀,有助于保护生物多样性和农业生

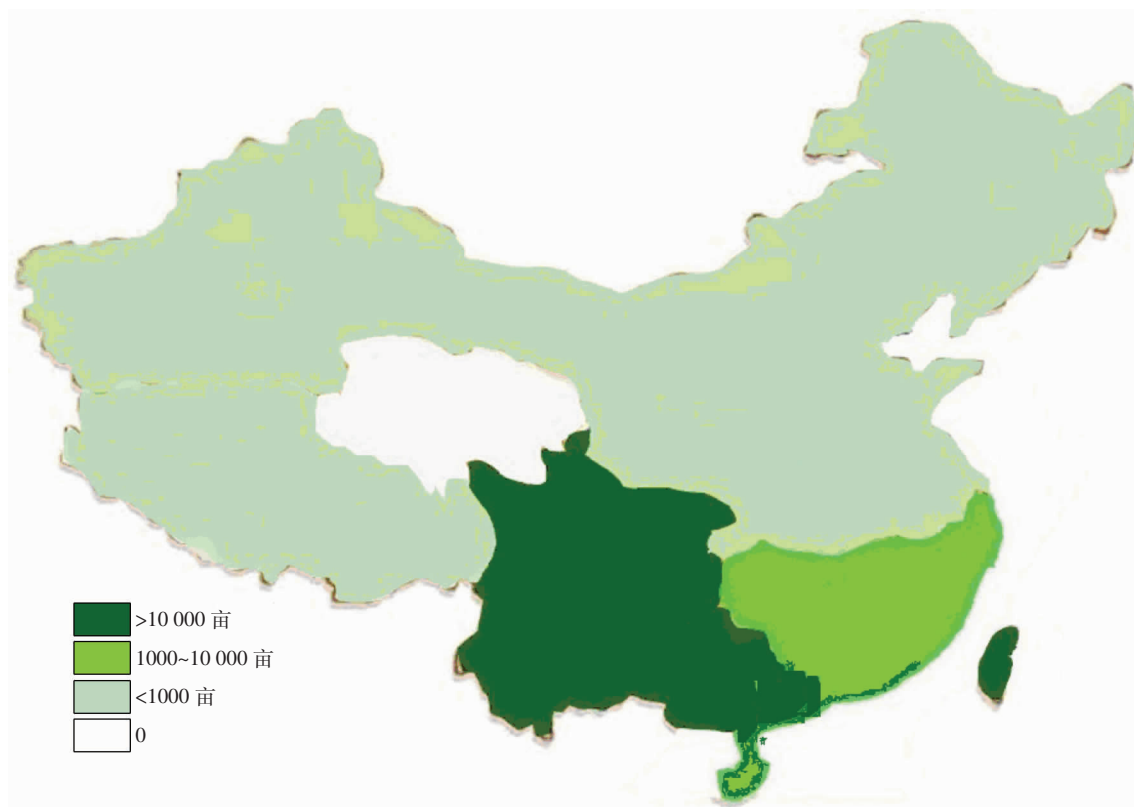
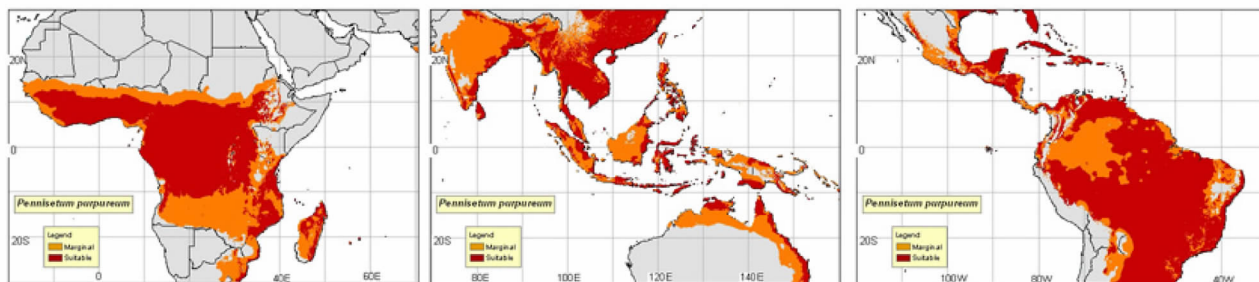


图 2 皇竹草在中国的种植分布图

Figure 2 Map for Hybrid Giant *Pennisetum hybridum* distribution in China

深色的是最适合种植的区域,较浅的是种植的边缘区域

The darker color is the most suitable areas, the lighter one is the marginal areas

图 3 全球适合种植皇竹草的国家和地区<sup>[20-21]</sup>Figure 3 Nations and regions suitable for Hybrid Giant *Pennisetum hybridum* in the world

态。在易侵蚀土地、湿地和农村边际边缘土地种植皇竹草,更有利于改善生态环境,促进农业经济发展<sup>[22-24]</sup>。美国就大面积种植能源作物对土壤、水和生物多样性的影响研究表明,柳枝稷在田纳西州两个区域的种植实现了能源作物代替传统作物,并明显降低土壤侵蚀和养分流失;在美国威斯康星州的研究也表明,种植柳枝稷不仅能提供生物能源,更为重要的是为草地鸟类生存提供了一种生态环境,促进草地鸟类的生物多样性<sup>[26,28]</sup>。有关皇竹草对水分、土壤养分的需求和抗逆

性,目前已开展了一些工作<sup>[9,13,20-24,29-32]</sup>,我们初步研究也表明它具有联合内生固氮菌,对养分利用效率高、耐贫瘠能力和抗干旱能力强(待发表)。当前,长江中上游地区实施“皇竹草种养产业一体化”工程,已取得了明显的经济、生态、社会效益,特别是在三峡库区生态建设及退耕还草养畜工程中发挥了重要作用<sup>[6-8,13]</sup>。可见,种植抗逆性强、耐旱、耐湿、耐瘠、耐酸性、抗倒伏、生物产量高的优质能源禾草皇竹草等,既能治理退化红壤、改善区域生态环境,又能充分发挥红壤资



源的生产潜力,具有重要的实践意义。

当然,皇竹草大面积的推广也要注意不合理种植可能对生物多样性和地力的影响,特别要作好种植区规划,合理布局,防治大面积单一种植带来生物单一的生态风险,因此在栽种时必须注意与周边环境协调,尽可能的建立缓冲过渡带,避免生物多样性的锐减<sup>[33-34]</sup>。

此外,由于皇竹草属热带植物,气温只有在8℃以上时才能生存分蘖,0℃以下将会冻伤。因此,南岭以北特别是长江以北地区除非有防寒保种的措施,否则不建议发展<sup>[9,13,22]</sup>。将待评估环境风险的外来物种与引入地生活习性相似的典型乡土物种及入侵种进行生物学特性和生态学特征的比较,有助于初步判断该物种可能带来的生态风险大小,在此基础上应用国际通用的外来生物入侵的环境风险评估指标体系进行半定量的评估,可以比较好地满足引种评估的需要,同时通过调研考察物种在其他地方包括起源地和引种区的生态影响,则可以较好地确定物种的环境风险和研究其环境管理策略。当然,正如我国学者马克平课题组研究所指出,应该将物种的入侵性和被入侵地的可入侵性的交互作用综合考量,因为入侵物种造成的生态影响和生态系统中的入侵风险与入侵物种的丰富度并不完全吻合,表现出不确定性。马克平等研究认为,我国各省入侵风险的高危地区是东部居中或沿海地区,在全球变暖背景下,北纬33°线以北的河北、山东、河南和江苏的入侵植物防治工作更应受到高度的重视,而尽管南方地区(云南、广西和广东等省)的入侵物种最多,但入侵物种危害并不是最严重地区。该研究和本文对皇竹草环境风险评估评分取值的考量方法相类似,均充分考虑物种与引入地生态环境条件相互作用,这对今后研究环境风险评估指标体系及其应用有参考价值<sup>[35]</sup>。

## 4 结论

皇竹草的生长势与本地典型杂草类似,也具备抗逆性强、光合速率高、生物量大、具垂直空间竞争优势等特征,但并不具备入侵植物的强繁殖力、强生长势、化感作用和难以自然或人工控制等生态特征。根据国际通用的外来物种入侵风险评价体系评价,皇竹草外来植物入侵风险评估结果为:按引入地评估的风险分值小于36,按“存在型”对项目地风险进行评价,其环境风险得分为27.5,两类评估的风险等级均为可接受,其管理策略为“可以引进”。迄今为止,我国大多数

省区和南美、东南亚等国均有引种植,但未见发生皇竹草入侵为害的报道。综上,在我国发展皇竹草造成生物入侵风险的可能性极小。

## 参考文献:

- [1] 李振宇,解 焱.中国外来入侵种[M].北京:中国林业出版社,2002:43-45.  
Li Z Y, Xie Y. Invasion of alien plants invasion China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 43-45.
- [2] Xu H, Qiang S, Genovesi P, et al. An inventory of invasive alien species in China[J]. *NeoBiota*, 2012, 15: 1-26.
- [3] Weber E, Sun S, Li B. Invasive alien plants in China: Diversity and ecological insights[J]. *Biological Invasions*, 2008, 10:1411-1429.
- [4] 史刚荣,马成仓.外来植物成功入侵的生物学特征[J].应用生态学报,2006,17(4):727-732.  
Shi G R, Ma C C. Biological characteristics of alien plants successful invasion[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4):727-732.
- [5] Wang X L, Su C J. Study on impact of *Pennisetum Hybridum* hedgerow technology in slope croplands on soil chemical properties[C]// Proceedings of 2011 world congress on engineering and technology. Institute of Electrical and Electronics Engineers, inc. 2011.
- [6] 廖晓勇,陈治谏,罗 辑,等.三峡库区皇竹草的生物学特性与栽培模式[J].中国草地,2003,25(5):27-31.  
Liao X Y, Chen Z J, Luo J, et al. Biological character and cultivation of Hybrid Giant Napier in the Three Gorges Reservoir[J]. *Grassland of China*, 2003, 25(5): 27-31.
- [7] 马崇坚,刘发光.皇竹草在生态环境治理中的应用研究进展[J].中国水土保持,2012(1):41-44.  
Ma C J, Liu F G. Research progress on application of the Hybrid Giant Napier in the ecological environment [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(1): 41-44.
- [8] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等.陡坡地皇竹草水土保持效益研究[J].水土保持学报,2002,16(4):34-36.  
Liao X Y, Chen Z J, Liu S Q, et al. Soil and water conservation benefit from Hybrid Giant Napier in slopeland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(4):34-36.
- [9] 王会勤.能源植物皇竹草的品种选育及生产乙醇研究[D].郑州:河南农业大学,2009.  
Wang H Q. Research on breeding and production of ethanol of energy plant Hybrid Giant Napier[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [10] 欧 健.厦门外来物种入侵风险评估研究[D].厦门:厦门大学,2008.  
OU J. The study on the alien plants invasion and its risk assessment in Xiamen City[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [11] 丁 晖,石碧清,徐海根.外来物种风险评估指标体系和评估方法[J].生态与农村环境学报,2006,22(2):92-96.  
Ding H, Shi B Q, Xu H G. Index system and methodology for risk assessment of alien species[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*,

- 2006, 22(2): 92–96.
- [12] 缪丽华, 季梦成, 王莹莹, 等. 湿地外来植物香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)入侵风险研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 425–431.
- Miao L H, Ji M C, Wang Y Y, et al. Study on invasion risk of *Hydrocotyle vulgaris* an alien species in wetlands[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2011, 37(4): 425–431.
- [13] 李锦开. 皇竹草生物学基本特性及其引种的生态风险评估[D]. 广州: 华南农业大学, 2012.
- [14] 彭宗波, 蒋摇英, 蒋菊生. 海南岛外来植物入侵风险评价指标体系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2029–2034.
- Peng Z B, Jiang Y Y, Jiang J S. Risk evaluation indicator system for exotic plant invasion in Hainan Island, South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 2029–2034.
- [15] 欧健, 卢昌义. 厦门市外来物种入侵现状及其风险评价指标体系[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1240–1244.
- OU J, LU C Y. Present situation of alien plants invasion and its risk assessment system in Xiamen City[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1240–1244.
- [16] 詹伟君, 任君霞, 金松恒, 等. 能源植物芒草的农学特性研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(1): 119–124.
- Zhan W J, Ren J X, Jin S H, et al. Research progress on agronomic characteristics of *Miscanthus*[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2012, 29(1): 119–124.
- [17] 余香琴, 冯玉龙, 李巧明. 外来入侵植物飞机草的研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 591–600.
- Yu X Q, Feng Y L, Li Q M. Review of research advances and prospects of invasive *Chromolaena odorata*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 591–600.
- [18] 中国农业科学院植物保护研究所. 中国外来入侵植物数据库[DB/OL]. <http://www.agripests.cn/base23.asp>, 2013.
- Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences. China invasive plants database[DB/OL]. [Http://www.agripests.cn/base23.asp](http://www.agripests.cn/base23.asp), 2013.
- [19] 联合国粮食及农业组织国际植物保护公约秘书处. 国际植物检疫措施标准有害生物危险性分析框架[S]. 2007.
- The Secretariat of United Nations International Plant Protection Convention of FAO. The International standards for phytosanitary measures—framework for pest risk analysis[S]. 2007.
- [20] FAO. *Pennisetum purpureum*[DB/OL]. <http://www.fao.org/ag/agA/A-GAP/FRG/afris/Data/137.HTM>, 2009.
- [21] Muldoon D K, Pearson C J. Hybrid *pennisetum* in a warm temperature climate: Regrowth and stand-over forage production[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1977, 17(85): 277–283.
- [22] Muldoon D K, Pearson C J. Hybrid *pennisetum* in a warm temperate climate: Productivity span and effects of nitrogen fertilizer and irrigation on summer production and survival[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1977, 17(89): 982–990.
- [23] CIAT/FAO Collaboration on Tropical Forages. *Pennisetum purpureum* Schumach [DB/OL]. <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/data/pf000301.htm>. 2013.
- [24] Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), International Livestock Research Institute (ILRI), CSIRO Sustainable Ecosystems, Tropical Forages. An interactive selection tool: *Pennisetum purpureum* [DB/OL], [http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Pennisetum\\_purpureum.htm](http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Pennisetum_purpureum.htm), 2010.
- [25] Institute of Plant Protection of Chinese Academy of Agricultural Sciences. The databases of invasive alien plants in China[DB/OL]. <http://www.agripests.cn/base23.asp>, 2013.
- [26] 解新明, 周峰, 赵燕慧, 等. 多年生能源禾草的产能和生态效益[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2329–2342.
- Xie X M, Zhou F, Zhao Y H, et al. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2329–2342.
- [27] 中国环境保护部. 外来入侵物种环境风险评估技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- Chinese Ministry of Environmental Protection. Technical specifications for assessment on environmental risk of alien invasive species[S]. Beijing: China Environmental Science Publishing House, 2010.
- [28] Roth A M, Sample D W, Ribic C A, et al. Grassland bird response to harvesting switchgrass as a biomass energy crop[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28: 490–498.
- [29] Peite C, Lee K C, Syu F S, et al. Implications of biomass pretreatment to cost and carbon emissions: Case study of rice straw and *Pennisetum* in Taiwan[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 108: 285–294.
- [30] Dong J K, Young J S, Tsukasa S, et al. Uptake and translocation of cesium-133 in napiergrass (*Pennisetum purpureum* Schum.) under hydroponic conditions[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 82: 122–126.
- [31] Orodho A B. The role and importance of Napier grass in the smallholder dairy industry in Kenya[DB/OL]. [http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/Newpub/napier/napier\\_kenya.htm](http://www.fao.org/ag/agp/agpc/doc/Newpub/napier/napier_kenya.htm). 2006.
- [32] Ma C, Naidu R, Liu F, et al. Influence of hybrid giant Napier grass on salt and nutrient distributions with depth in a saline soil[J]. *Biodegradation*, 2012, 23(6): 907–923.
- [33] Simberloff D, Parker I M, Windle P N. Introduced species policy, management, and future research needs[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3: 12–20.
- [34] Gasparatos A, Stromberg P, Takeuchi K. Biofuels, ecosystem services and human wellbeing: Putting biofuels in the ecosystem services narrative[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3–4): 111–128.
- [35] Bai F, Chisholm R, Sang W, et al. Spatial risk assessment of alien invasive plants in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7624–7632.