

## 能源草生态风险评估体系的构建

郭孟齐 薛帅<sup>1,2\*</sup> 易自力<sup>1,2</sup> 杨塞<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院,长沙 410128;

(2. 芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室,长沙 410128)

**摘要** 为构建一套专门用来评估能源草生态风险等级的体系,本研究通过文献法与专家咨询法确立分布特征、扩散特征、繁殖特征、遗传特征、适应特征、危害特征和被控制特征7个方面共计33个与能源草生态风险评估相关的指标。然后通过yaahp10.1软件利用层次分析法对各指标进行权重赋值,进而构建相应的生态风险评估体系。最后选取10种已知生态风险等级的高大禾草对该体系进行检验,并依据检验结果对评价体系的生态风险等级层次进行划分。结果表明所构建的体系可以有效地辨别出不同物种的生态风险等级,并将风险等级层次划分为高危生态风险(系统评分>74.5),一定生态风险(系统评分在54.5~74.5)和基本无生态风险(系统评分<54.5)。

**关键词** 能源草; 生态风险评估; 层次分析法; 评价体系

中图分类号 Q948

文章编号 1007-4333(2019)01-0022-08

文献标志码 A

## Construction of the ecological risk assessment system for bioenergy grasses

GUO Mengqi<sup>1</sup>, XUE Shuai<sup>1,2\*</sup>, YI Zili<sup>1,2</sup>, YANG Sai<sup>1,2</sup>

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Engineering Laboratory of Miscanthus Ecological Applications, Changsha 410128, China)

**Abstract** The aim of this study was to construct a dedicate ecological risk assessment (ERA) system for bioenergy grasses. The ERA system constructed in this study was composed by 33 questions related to ecological risk traits screened by literature and expert consultations. The trait's scoring process was calculated using the yaahp 10.1 software by analytic hierarchy process (AHP) method. Additionally, 10 tall herbaceous species, whose ecological risks were already defined, were used to test the accuracy of the ERA system. The results showed that the ERA system could accurately confirm the ecological risk of the evaluated plants. Based on the accuracy testing results, classification of the different ecological risk levels for our ERA system was conducted. The results were as following: species with the ERA score higher than 74.5 were defined as the species with high invasion risk (named 'Rejection'); species with the scores of 54.5-74.5 were defined as uncertain ecological risk, which need further evaluation (named 'Evaluate'); species with the scores lower than 54.5 were defined as the ecological safe plants (named 'Accept').

**Keywords** bioenergy grasses; ecological risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); assessment system

能源草是指可以直接作为燃料或用来生产生物质能源的草本植物和灌木的统称,其在解决化石燃料短缺和减轻环境污染等方面具有重要的作用<sup>[1-2]</sup>。随着能源草商业化的开发与利用,对其大规模种植可能引发的生物入侵和破坏自然环境等问题越来越

受到关注<sup>[3]</sup>。这主要是因为能源草与入侵性植物有许多相似的特征,例如耐贫瘠、耐干旱、病虫害少、繁殖力强和生物产量积累快等<sup>[4-5]</sup>。因此,为确保能源草种植区域内的生态安全,在大规模种植之前应对能源草的生态风险进行综合评价<sup>[6-7]</sup>。

收稿日期: 2018-01-31

基金项目: 湖南省“青年百人计划”项目(5404921);湖南农业大学青年自然科学基金项目(16QN21)

第一作者: 郭孟齐,硕士研究生,E-mail: guomengqi1020@163.com

通讯作者: 薛帅,讲师,主要从事芒属植物生态应用技术开发研究,E-mail: xue\_shuai@hunau.edu.cn

目前,国际上用来评价植物生态风险的体系有很多,比如澳大利亚杂草风险评估体系 WRA (Weed Risk Assessment System)、中欧风险评估体系 WG-WRA (The Risk Assessment for Central Europe)和太平洋-夏威夷杂草风险评估体系等,其中应用最广泛的是 WRA。WRA 由 49 个问答题构成,主要从待评定物种的生物学和生态学特征、分布、危害以及扩散模式等方面来评定其生态风险<sup>[8]</sup>。据统计,WRA 可以正确识别 90% 以上的入侵杂草以及 70% 以上的非入侵杂草<sup>[9]</sup>。目前,基于 WRA 的基本框架已经衍生出了多种适用于不同地区和不同物种的生态风险评价体系,并都得到了成功地应用<sup>[10-11]</sup>。

尽管 WRA 准确性和实用性非常好,但其在评价能源草的生态风险方面还存在着某些局限性<sup>[12]</sup>。首先,运用 WRA 评价能源草生态风险时,一些专业术语的模糊不清(例如“栽培”与“驯化”)会导致评分时的不确定性,进而影响评价结果的准确性。其次,由于 WRA 缺乏某些入侵植物应具有的典型指标(例如,繁殖特征),在利用其评价入侵性强的能源草时会导致评估值偏低<sup>[5]</sup>。最后,WRA 并不能有效辨别出能源草的生态风险等级<sup>[13-14]</sup>。而目前关于构建能源草生态风险评价体系的研究较少。本研究拟构建一种适用于能源草的生态风险评价体系,以为能源草的生态风险管理提供决策和参考依据,同时也为更好地推广能源草种植提供指导作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 评价体系构建原则

**系统性原则:**依据现有的生态风险评价研究理论,需要全方位地选取与能源草生态风险评价相关的指标,并将各个方面串联成一个有机的整体,从而构建出全面而系统的能源草生态风险评价体系。

**独立性原则:**要明确评价体系中各指标的指向性,从而避免指标间内容上的交叉与重复,以保证评价体系结果的准确性。

**可操作性原则:**应保证评价指标所需的相关信息和资料方便获取,以确保评价体系易于操作。

### 1.2 评价指标筛选

本研究先通过文献法(中国知网和 Web of Science)查找与物种生态风险评价相关的中英文文

献,从中初步选出评价指标 52 个;再通过问卷调查法向相关专家咨询这 52 个指标的重要性;然后回收整理、统计研究,最终筛选出 33 个专家认为最重要的和同时文献中引用频次较高的评价指标。

### 1.3 指标权重赋值

为构建准确有效的评价体系,需要对上述筛选出的 33 个评价指标进行权重赋值。本研究先通过 yaahp10.1 软件利用层次分析法构建指标层次结构模型,基于层次模型再构建判断矩阵问卷;然后将问卷通过电子邮件邮寄给 20 位专家,专家依据层次分析法的指标重要性判断准则(表 1)来填写问卷;再利用 yaahp 10.1 软件对回收的调查问卷进行一致性检验,最终得到 15 份有效问卷;最后基于有效问卷,利用软件中的群决策功能计算出各指标的权重赋值。

表 1 判断指标间相对重要性的标度

Table 1 Definition of the scores used to express the relative importance of the compared traits

重要性标度 Importance score	含义 Definition
1	2 个指标间相比较,具有同等重要性
3	2 个指标间相比较,前者比后者稍重要
5	2 个指标间相比较,前者比后者明显重要
7	2 个指标间相比较,前者比后者强烈重要
9	2 个指标间相比较,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值

### 1.4 体系验证

本研究选取 10 种生态风险等级已经确定的高大禾草来检验所建立的体系,并依据检验结果来划分能源草生态风险等级标准。检验评估所需的资料信息主要来源于学术文献与互联网的查阅。学术文献主要参考中国知网和相关外文文献数据库(Google Scholar)等,互联网信息主要参考国内外的外来入侵物种数据库(<http://www.chinaias.cn/wjpart/index.aspx>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 评价指标

本研究筛选出 7 个方面共计 33 个指标,同时运用层次分析法构建能源草生态风险评估系统的递阶

层次结构模型(图 1),其中目标层是能源草生态风险评价,准则层为分布特征、繁殖特征、扩散特征、遗传特征、适应特征、危害特征和被控制特征,方案层为其在国内自然分布、其在国外自然分布、分布生境多样性和物种生活类型等 33 个指标。

**分布特征:**国内自然分布,指待评价物种在国内天然存在的范围,分为广泛(分布在 50%以上省市地区)、较多(分布在 20%~50%省市地区)、少量(分布在 20%以下省市地区)和无(国内没有分布)4 个等级;国外自然分布,指待评价物种在国外天然存在范围,分为广泛(分布在 20%以上国家和地区)、较多(分布在 10%~20%国家和地区)、少量(分布在 10%以下国家和地区)和无(国外没有分布)4 个等级;分布生境,指待评价物种分布范围内生态环境的丰富程度,分为多种生境和单一生境 2 个等级;物种生活类型,指待评价物种在其分布范围内的主要生存方式,分为水生为主和陆生为主以及两者兼有。

**繁殖特征:**繁殖类型,指待评价物种产生新个体的主要方式,分为有性生殖为主、无性生殖为主以及两者兼有;生活史,指待评价物种经历整个生命过程所需的周期,分为一年生、两年生和多年生 3 个等级;无性繁殖能力,指待评价物种在单位时间内通过无性繁殖产生后代的数量,分为很强(单株扩繁 100

株以上)、较强(单株扩繁 50~100 株)、中等(单株扩繁 20~50 株)和较弱(单株扩繁 20 株以下)4 个等级;单株结实数,指待评价物种通过有性生殖单株产生种子的数量,分为很高(单株 1 000 粒以上)、较高(单株 500~1 000 粒)、较低(单株 100~500 粒)和低(单株 100 粒以下)4 个等级;传粉媒介,指待评价物种的传粉形式。

**扩散特征:**种子千粒重,待评价物种 1 000 粒种子的质量,分为 >1.0、0.5~1.0 g 和 <0.5 g 这 3 个等级;种子有刺或芒,指待评价物种种子是否有易于传播的刺或芒;生长速度,单位时间内待评价物种生长快慢的程度;主要传播方式,指待评价物种扩散到其他地方的主要方式;人为引起扩散,指待评价物种扩散到其他地方是否由人为引起。

**遗传特征:**遗传多样性,指待评价物种自然状态下种内遗传多样性的丰富程度,分为丰富、较丰富和单一 3 个等级;DNA-C 值,指待评价物种单倍体的基因组大小,分为 <1.40、1.40~14.00、14.01~35.00 pg 和 >35.00 pg 4 个等级;野生多倍体种类,指待评价物种自然状态下是否存在多倍体;与亲缘物种杂交,指待评价物种能否与亲缘关系近的同属不同种或不同属物种杂交,分为只能种内杂交、能与同属不同种杂交和能跨属杂交 3 个等级。

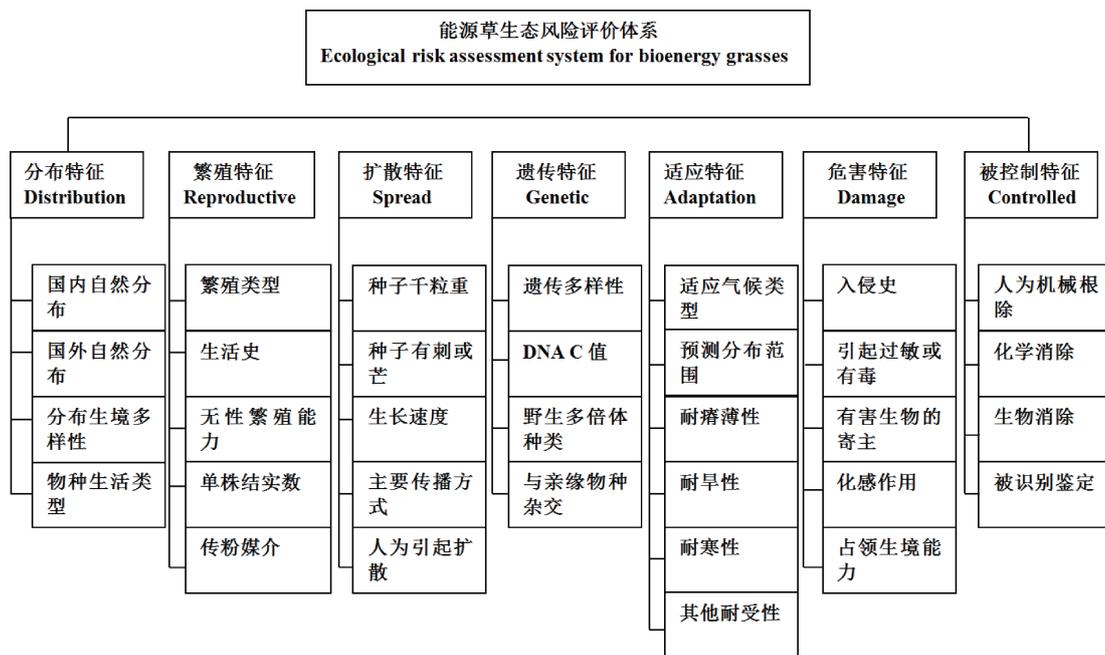


图 1 能源草生态风险评价体系层次模型

Fig. 1 The hierarchy model of ecological risk assessment system for bioenergy grasse

适应特征：适应气候类型，指待评价物种适应生存范围的气候带（热带、亚热带、温带、亚寒带、寒带和高原山地气候等）的数目，分为非常多（>5 种），较多（2~5 种）和较少（<2 种）3 个等级；预测分布范围，指通过各种模型预测待评价物种适宜生存的地区总和，分为适合国内 50% 以上省市地区、适合国内 50% 以下省市地区 2 个等级；耐瘠薄性，指待评价物种在贫瘠土地上的生存能力，分为强（正常生长）、中等（生长受到抑制）和弱（不能生长）3 个等级；耐旱性，指待评价物种对干旱的适应能力，分为强（正常生长）、中等（生长受到抑制）和弱（不能生长）3 个等级；耐寒性，指待评价物种对低温的适应性，以越冬存活率表示，分为强、中等和弱 3 个等级；其他耐受性，指待评价物种对其他逆境（如重金属和盐碱地等）的适应能力，分为强（正常生长）、中等（生长受到抑制）和弱（不能生长）3 个等级。

危害特征：入侵史，指待评价物种是否有过入侵其他地区的历史；引起过敏或有毒，指待评价物种是否对包括人在内的动物造成过敏或毒害；有害生物或病原体的寄主，指有害生物或病原体能否寄生在待评价物种上；化感作用，指待评价物种通过释放某种化学物质抑制周围植物生长的能力，分为强、弱和无 3 个等级；占领生境能力，指待评价物种挤占周围其他植物生存环境的能力，分为强、中等和弱 3 个等级。

被控制特征：人为机械根除，指通过人力或机械来根除待评价物种的难易程度，分为很困难、困难、较容易和容易 4 个等级；化学消除，指通过化学方法来消除待评价物种的难易程度，分为困难、较容易和容易 3 个等级；生物防除，指通过生物方式来消除待评价物种的难易程度，分为困难、较容易和容易 3 个等级；被识别鉴定，指待评价物种被检疫识别的困难程度，分为困难、较容易和容易 3 个等级。

**2.2 能源草生态风险评价体系的建立**

基于 1.3 描述的指标赋值方法，得到各层次指标权重赋值结果（表 2）。由赋值结果可知，在准则层中扩散特征的权重值最大为 0.200 3，遗传特征的权重值最小仅为 0.076 5；方案层中各指标权重间差别不大，权重范围为 0.008 1~0.053 3。为了方便计算，本研究设置评价体系的总分为 100 分，并将各个指标的权重值结果保留小数点后两位。基于此得出各指标的具体分值，同时参考 2.1.1 部分为各方案层的评估标准赋相应的分值，由此完成能源草生态风险评估系统的构建（表 3）。

**表 2 各层次指标权重赋值结果**

Table 2 Weighting results of the traits used to construct the ecological risk assessment system

准则层(分值) Guidelines (Score)	方案层 Programlayer	权重 Weight
分布特征 (0.102 1) Distribution	国内自然分布	0.032 1
	国外自然分布	0.032 1
	分布生境多样性	0.016 4
	物种生活类型	0.021 5
繁殖特征 (0.184 5) Reproductive	繁殖类型	0.032 2
	生活史	0.025 1
	无性繁殖能力	0.029 5
	单株结实数	0.050 1
扩散特征 (0.200 3) Spread	传粉媒介	0.047 6
	种子千粒重	0.031 8
	种子有刺或芒	0.026 5
遗传特征 (0.076 5) Genetic	生长速度	0.040 3
	主要传播方式	0.050 2
	人为引起扩散	0.051 5
	遗传多样性	0.017 5
适应特征 (0.163 2) Adaptation	DNA-C 值	0.029 3
	野生多倍体种类	0.008 1
	与亲缘物种能否杂交	0.021 6
	适应气候类型	0.029 4
危害特征 (0.148 8) Damage	预测分布范围	0.019 2
	耐瘠薄性	0.034 1
	耐旱性	0.031 2
	耐寒性	0.031 2
被控制特征 (0.124 6) Controlled	其他耐受性(耐盐碱、耐重金属等)	0.018 1
	入侵史	0.053 3
	引起过敏或有毒	0.024 1
	有害生物或病原体的寄主	0.009 2
总一致性检验	化感作用	0.040 6
	占领生境能力	0.021 6
	人为机械根除	0.045 3
总一致性检验	化学消除	0.027 4
	生物消除	0.029 3
总一致性检验	被识别鉴定	0.022 6

总一致性检验 CR=0.040 1

由表 3 可知，7 个准则层的分值依次是 10、18、20、8、16、15 和 13 分。其中扩散特征的分值最大，其次是繁殖特征，两者占据评估体系总分值的 38%，表明扩散特征与繁殖特征是评价能源草生态风险最重要的 2 个准则层指标。适应特征的分值

表3 能源草生态风险评价体系

Table 3 The ecological risk assessment system for bioenergy grasses

准则层(分值) Guideline and its score	方案层(分值) Program layer and its score	评估标准(分值) Assessment criteria(Score)
分布特征(10) Distribution	1.1 国内自然分布 (3)	广泛(3.0) 较多(2.0) 少量(1.0) 无(0.0)
	1.2 国外自然分布 (3)	广泛(3.0) 较多(2.0) 少量(1.0) 无(0.0)
	1.3 分布生境多样性 (2)	多种生境(2.0) 单一生境(1.0)
	1.4 物种生活类型 (2)	水生为主(1.0) 陆生为主(1.0) 两者兼有(2.0)
繁殖特征(18) Reproductive	2.1 繁殖类型 (3)	有性生殖为主(2.0) 无性生殖为主(1.0) 两者兼有(3.0)
	2.2 生活史 (3)	一年生(1.0) 二年生(2.0) 多年生(3.0)
	2.3 无性繁殖能力 (3)	很强(3.0) 较强(2.0) 中等(1.0) 较弱(0.0)
	2.4 单株结实数 (5)	很高(5.0) 较高(3.0) 较低(2.0) 低(1.0)
	2.5 传粉媒介 (4)	风力(4.0) 虫鸟(2.0) 未知(2.0)
扩散特征(20) Spread	3.1 种子千粒重 (3)	<0.5 g(3.0) 0.5~1.0 g(2.0) >1.0 g(1.0)
	3.2 种子有刺或芒 (3)	有(3.0) 无(0.0)
	3.3 生长速度 (4)	很强(4.0) 较强(3.0) 中等(2.0) 较弱(1.0)
	3.4 主要传播方式 (5)	风力传播(5.0) 水流传播(3.0) 动物传播(3.0)
	3.5 人为引起扩散 (5)	无意(5.0) 有意(2.0) 未知(2.5)
遗传特征(8) Genetic	4.1 遗传多样性 (2)	很丰富(2.0) 较丰富(1.0) 单一(0.0)
	4.2 DNA-C 值 (3)	<1.40 pg(3.0) 1.40~14.00 pg(2.0) >35.00 pg(0.0) 未知(1.5分)
	4.3 野生多倍体种类 (1)	有(1.0) 无(0.0)
	4.4 与亲缘物种能否杂交 (2)	能与不同属物种杂交(2.0) 能与同属 不同种杂交(1.0) 只能种内杂交(0.0)
适应特征(16) Adaptation	5.1 适应的气候类型 (3)	非常多(3.0) 较多(2.0) 较少(1.0)
	5.2 预测的分布范围 (2)	分布在中国 50%以上省市地区(2.0) 分布在中国 50%以下省市地区(1.0)
	5.3 耐瘠薄性 (3)	强(3.0) 中等(2.0) 弱(1.0)
	5.4 耐旱性 (3)	强(3.0) 中等(2.0) 弱(1.0)
	5.5 耐寒性 (3)	强(3.0) 中等(2.0) 弱(1.0)
	5.6 其他耐受性(耐盐碱、耐重金属等) (2)	强(2.0) 中等(1.0) 弱(0.5分)

表 3(续)

准则层(分值) Guideline and its score	方案层(分值) Program layer and its score	评估标准(分值) Assessment criteria(Score)
危害特征(15) Damage	6.1 入侵史	(6) 国内有入侵史(6.0) 国外有入侵史(3.0) 无入侵史(0.0) 未知(3.0)
	6.2 引起过敏或有毒	(2) 有(2.0) 无(0.0)
	6.3 有害生物或病原体的寄主	(1) 是(1.0) 否(0.0)
	6.4 化感作用	(4) 强(4.0) 弱(2.0) 无(0.0) 未知(2.0)
	6.5 占领生境能力	(2) 强(2.0) 中等(1.0) 较弱(0.5)
被控制特征(13) Controlled	7.1 人为机械根除	(4) 很困难(4.0) 困难(3.0) 较容易(2.0) 容易(1.0)
	7.2 化学消除	(3) 困难(3.0) 较容易(2.0) 容易(1.0)
	7.3 生物消除	(3) 困难(3.0) 较容易(2.0) 容易(1.0)
	7.4 被识别鉴定	(3) 困难(3.0) 较容易(2.0) 容易(1.0)

(16分)与危害特征的分值(15分)相近,说明能源草的适应特征与其危害特征对于评价其生态风险同等重要。遗传特征的分值(8分)最小,仅为总分值的8%,说明,相比于其他特征其遗传特征最不重要。

从表3上可见,某些方案层指标的评估标准中有“未知”选项。为确保评估体系结果的准确性,针对这些指标评估标准的赋值,本研究采取平均值的方法。以“入侵史”为例,其总分为6分,而在其评估标准中的“未知”选项分值为3分。

### 2.3 体系检验

选用已知生态风险等级的物种来检验构建的能源草生态风险评价系统,一方面可以验证该体系是否可以辨别出不同物种的生态风险等级,另一方面可以验证其能否辨别出具有不同生态风险特征的物种。此外,检验的结果还可以为能源草的生态风险等级划分提供依据。

结合能源草的生长特性与构建的评价体系指标,本研究选取10种已知生态风险等级的高大禾草作为检验对象,并将这10种高大禾草分为以下三类:

第一类(标识为I):有文献报道且具有严重危害的,并已经造成大规模生态环境破坏的高大禾草。

第二类(标识为II):有文献报道且具有入侵潜力,但尚未造成严重影响的高大禾草。

第三类:无生态风险的高大禾草。

用于检验的10种高大禾草的生态风险评定结果如表4所示。其中,I类物种占据了评估分值的前三位,假高粱的生态风险评估分值最高为85分,II类物种评估分值排名4~7位,而无风险物种则排名在后三位。评估结果与10种高大禾草的实际生态风险等级一致,说明本研究构建的能源草生态风险评价体系能较好地鉴别出参评物种的生态风险等级。

本研究将II类物种得分的最高值设为体系高危生态风险等级的分值下限,即得分>74.5分的能源草物种将被视为具有高危生态风险,应禁止推广种植。得分在54.5~74.5的能源草物种具有一定的生态风险,需要更多具体的信息来进一步研究其生态风险,如果引进,需要采取相应的监管措施来预防其造成生态破坏。得分<54分的能源草物种基本无生态风险,可以被引进用来推广种植。设定的能源草生态风险评价等级及管理策略如表5所示。

### 3 讨论

由于常用的WRA体系在评估能源草生态风险等级方面存在不准确性,因此还需要建立一套专门用来评估能源草生态风险等级的体系。本研究先采用文献和调查法筛选出用于评价能源草生态风险的指标,然后利用yaahp10.1软件通过层次分析法对指标进行权重赋值,最后选取10种已知生态风险等

表4 10种高大禾草生态风险的检验结果

Table 4 Ecological risk scores of the 10 tall herbaceous species calculated by the present study-built ERA system

序号	物种等级	物种名称	拉丁名	评估分值
Serial number	Invasion level	Species name	Latin name	Assessment score
1	I	假高粱	<i>Sorghumhalepense</i> (L.) Pers.	85.0
2	I	毒麦	<i>Lolium temulentum</i> L.	77.5
3	I	互花米草	<i>Spartina alterniflora</i> Loisel	77.0
4	II	蒺藜草	<i>Cenchrus echinatus</i> L.	74.5
5	II	铺地黍	<i>Panicum repens</i> L.	73.5
6	II	野燕麦	<i>Avena fatua</i> L.	72.5
7	II	苏丹草	<i>Sorghumsudanense</i> (Piper) Stapf	60.5
8	无风险	高粱	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	54.0
9	无风险	甘蔗	<i>Saccharum officinarum</i>	50.5
10	无风险	玉米	<i>Zea mays</i> L.	47.5

表5 能源草生态风险等级评估标准

Table 5 Definition of the ecological risk level for the present study-built ERA system

评估值	评估等级	管理策略
Assessment score	Assessment level	Management strategy
0~54.0	基本无生态风险,可接受	无风险或风险较低,可以引进并推广种植
54.5~74.5	具有一定生态风险	需要更多具体信息来进一步研究其生态风险,如确需种植,需要采取监管措施来预防其造成生态破坏
75.0~100.0	高危生态风险,不可接受	具有极高的入侵风险,应禁止引进

级的高大禾草对体系进行检验。与 WRA 及其他生态风险评价体系相比,本研究构建的能源草生态风险评价系统不仅包含传入、适应、繁殖、扩散、危害和防治等完整的生态风险评价过程<sup>[15]</sup>,而且在此基础上又增加遗传与分布特征,同时在方案层中增加结实率、DNA-C 值和预测分布范围等。能源草的遗传、分布特征与其生态风险等级关系密切;遗传特征越不稳定,越能扩展能源草所适应的生态幅,其可利用的潜在资源也就越多,分布范围就会扩大,进而生态风险等级就越高<sup>[16]</sup>;物种的 DNA-C 值越小,其细胞分裂周期就越短,生长速度就越快,相应的其生态风险等级也就越高<sup>[17]</sup>。许多生态风险评价体系在适应特征的方案层中都会选取“耐逆性”这一指标<sup>[18]</sup>,而本研究详细地在方案层中将“耐逆性”分为“耐瘠薄性”、“耐旱性”、“耐寒性”以及“其他耐受性”。能源草自身具有较强的逆境适应性,但是同一能源草对不同逆境以及不同能源草对同一逆境的适应度均不同<sup>[19]</sup>,选择不同逆境的耐受性作为方案里的指标可以使评估结果更准确。

层次分析法是一种对多目标进行定性与定量相结合的决策分析方法,在环境与安全问题方面得到广泛的应用<sup>[20]</sup>。本研究利用层次分析法构建能源草生态风险评价系统,结果总一致性  $CR=0.0401$ ,  $<0.1$ ,表明构建的体系合理有效,同时不同指标的赋值结果表明对应指标对于能源草生态风险的重要性不同。本研究得出扩散与繁殖特征对于能源草生态风险评价最为重要,其次是适应特征,正是因为扩散、繁殖与适应特征,芦竹、藨草和芒草等能源草经常出现在入侵物种名单上<sup>[21]</sup>。

本研究应选取多种能源草作为检验体系的对象,但国内外目前供参考的确定生态风险等级的能源草信息较少,故本研究仅以 10 种生态风险已知的高大禾草作为检验对象。评估结果表明,假高粱、毒麦和互花米草等得分最高,生态风险危害也最大,这与国家入侵物种名录的结果是一致的,此外其他高大禾草得分结果与其实际生态风险也基本相符。这表明本体系可以有效地辨别出不同物种的生态风险等级,并以 74.5 和 54.5 分作为划分相应生态风险

等级的分数。但由于选取植物样本少,使得划分结果有一定的局限性,仅能表明物种大致的生态风险等级。随着对能源草生态风险评价领域的不断深入研究,关于其生态风险等级划分的标准也会日趋完善,从而能为能源草的生态风险评价管理提供更好的决策和参考依据。

## 参考文献 References

- [1] 高瑞芳,张建国. 能源草研究进展[J]. 草原与草坪, 2013, 33(1):89-96  
Gao R F, Zhang J G. Research progress in bioenergy grasses[J]. *Grassland and Turf*, 2013, 33(1):89-96(in Chinese)
- [2] 李平,孙小龙,韩建国,刘天明. 能源植物新看点:草类能源植物[J]. 中国草地学报, 2010, 32(5): 97-100  
Li P, Sun X L, Han J G, Liu T M. A new source of bioenergy-energy grass[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(5): 97-100 (in Chinese)
- [3] Demirbas A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(11):S108-S117
- [4] Raghu S, Anderson R C, Daehler C C, Davis A S, Wiedenmann R N, Simberloff D, Mack R N. Adding biofuels to the invasive species fire? [J]. *Science*, 2006, 313(5794): 1742-1742.
- [5] Barney J N, Ditomaso J M. Nonnative species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? [J]. *Bioscience*, 2008, 58(1):64-70
- [6] Davis A S, Brainard D C, Gallandt E R. Introduction to the invasive plant species and the new bioeconomy symposium[J]. *Weed Science*, 2008, 56(6):866-866
- [7] Schnitzler A, Essl F. From horticulture and biofuel to invasion: The spread of *Miscanthus taxa* in the USA and Europe[J]. *Weed Research*, 2015, 55(3):221-225
- [8] Pheloung P C, Williams P A, Halloy S R. A weed risk assessment model for use as a biosecurity tool evaluating plant introductions[J]. *Journal of Environmental Management*, 1999, 57(4):239-251
- [9] Flory S L, Lorentz K A, Gordon D R, Sollenberger L E. Experimental approaches for evaluating the invasion risk of biofuel crops[J]. *Environmental Research Letters*, (2012-07-04)DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/045904
- [10] Gordon D R, Onderdonk D A, Fox A M, Stocker R K. Consistent accuracy of the Australian weed risk assessment system across varied geographies[J]. *Diversity & Distributions*, 2008, 14(2):234-242
- [11] Mcclay A, Sissons A, Wilson C, Davis S. Evaluation of the Australian weed risk assessment system for the prediction of plant invasiveness in Canada[J]. *Biological Invasions*, 2010, 12(12):4085-4098
- [12] Davis A S, Cousens R D, Hill J, Mack R N, Simberloff D, Raghu S. Screening bioenergy feedstock crops to mitigate invasion risk[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2010, 8(10):533-539
- [13] Cousens R. Risk assessment of potential biofuel species: an application for trait-based models for predicting weediness[J]. *Weed Science*, 2008, 56(6):873-882
- [14] 陈超,袁小环,滕文军,杨学军,武菊英. 狼尾草属植物生物学特性、生态适应性、观赏性和入侵风险关系的探讨[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2):374-381  
Chen C, Yuan X H, Teng W J, Yang X J, Wu J Y. Biological characteristics, ecological adaptability, ornamentality, and invasion risk of *Pennisetum* species [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2):374-381(in Chinese)
- [15] 彭宗波,蒋英,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, 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 (in Chinese)
- [16] Scheiner S M. Genetics and evolution of phenotypic plasticity[J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1993, 24(1):35-68
- [17] 李国旗,张纪林. 生物的C值矛盾与其生态适应性的关系初探[J]. 大自然探索, 1999(2):61-66  
Li G J, Zhang J L. A primary research on relationship between C value paradox and its ecological adaptation of the life [J]. *Exploration of Nature*, 1999(2):61-66(in Chinese)
- [18] 林建勇,温远光,韦洁,赵金龙. 北部湾经济区外来植物入侵风险评估[J]. 现代农业科技, 2011(8):130-131  
Lin J Y, Wen Y G, Wei J, Zhao J L. Risk assessment of exotic plants invasion in Beibu Gulf economic zone [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(8):130-131, 133 (in Chinese)
- [19] 张蕴薇,李洪超,杨富裕,谢光辉. 我国能源草耐盐性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6):159-164  
Zhang Y W, Li H C, Yang F Y, Xie G H. Recent advances in salt tolerance of bioenergy grass in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6):159-164(in Chinese)
- [20] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5):148-153  
Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(5):148-153(in Chinese)
- [21] Quinn L D, Allen D J, Stewart J R. Invasiveness potential of *Miscanthus sinensis*: Implications for bioenergy production in the United States [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2010, 2(6):310-320