

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.04.009

# 金沙江下游外来入侵植物入侵风险评估 ——以乌东德和白鹤滩电站库区为例

熊浩荣<sup>1</sup>, 邓鑫欣<sup>2</sup>, 于江<sup>2</sup>, 邓云木<sup>3</sup>, 伍小刚<sup>1</sup>, 张月华<sup>1,4</sup>, 何秀林<sup>1</sup>, 张培春<sup>1</sup>, 潘开文<sup>1</sup>, 张林<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 四川成都610041; <sup>2</sup>中国三峡建工(集团)有限公司, 北京101100; <sup>3</sup>成都龙泉山城市森林公园管委会, 四川成都610000; <sup>4</sup>中国科学院大学, 北京100049

**摘要:**【目的】基于金沙江下游外来物种入侵防控需要, 以其干流上乌东德和白鹤滩电站库区为例, 调查库区内的外来入侵植物并评估入侵风险, 为该区域外来植物入侵防控和生态安全建设提供数据支撑。

【方法】运用样线、样方调查法结合文献资料掌握库区内外来入侵植物种类组成和入侵现状, 采用层次分析法建立外来入侵植物风险评估体系, 对其入侵过程、入侵现状以及危害与防治等方面进行综合评估, 并根据等级划分标准确定入侵风险等级。【结果】乌东德和白鹤滩电站库区共记录到外来入侵植物103种, 隶属28科70属。其中, I级风险的外来入侵植物5种, II级风险12种, III级风险24种, IV级风险28种, V级风险34种。【结论】乌东德和白鹤滩电站库区的外来入侵植物种类较多, 但多数处于低风险等级(IV、V级), 危害较小, 高风险等级(I、II级)外来入侵植物共17种。建议重点防控高风险等级的外来入侵植物, 尽可能降低其对金沙江下游生态安全的威胁。

**关键词:** 外来入侵植物; 入侵现状; 入侵风险; 指标体系; 金沙江



开放科学标识码  
(OSID 码)

## Invasion risk assessment of alien invasive plants in the lower reaches of the Jinsha River, a case study of reservoir areas of Wudongde and Baihetan Hydropower Stations

XIONG Haorong<sup>1</sup>, DENG Xinxin<sup>2</sup>, YU Jiang<sup>2</sup>, DENG Yunmu<sup>3</sup>, WU Xiaogang<sup>1</sup>, ZHANG Yuehua<sup>1,4</sup>, HE Xiulin<sup>1</sup>, ZHANG Peichun<sup>1</sup>, PAN Kaiwen<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; <sup>2</sup>China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Beijing 101100, China; <sup>3</sup>Chengdu Longquan Mountain Urban Forest Park Administrative Committee, Chengdu, Sichuan 610000, China; <sup>4</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** 【Aim】 In response to a desire to prevent and control the spread of alien invasive species (AIPs) in the lower reaches of the Jinsha River, this study focuses on the reservoir areas of Wudongde and Baihetan Power Stations in the mainstream. This study aimed to elucidate the species composition and invasion status of AIPs and investigate the presence of alien invasive plants in these reservoir areas. Additionally, in this study, the risk of invasion was assessed to support the prevention of the expansion of alien invasive plants, as well as to enhance the ecological security in the study area. 【Method】 We conducted a comprehensive analysis of AIPs using a combination of transects, sample survey methods, and a literature review. A hierarchical analysis was employed to establish a risk assessment system for AIPs. The system evaluates the invasion process, status, associated hazards, and prevention and control measures. Finally, the invasion risk level was determined based on the grading standards. 【Result】 Based on the results, a

收稿日期(Received): 2023-10-04 接受日期(Accepted): 2023-11-29

基金项目: 中国三峡(建工)集团有限公司科研项目(JG-EP-030222001、JG-EP-030222002); 中国科学院西部之光项目(2022XBZG\_XBQNXX\_A\_003)

作者简介: 熊浩荣, 男, 实习研究员。研究方向: 植物资源学。E-mail: xiong1730@163.com

\* 通信作者(Author for correspondence), 张林, E-mail: zhanglin@cib.ac.cn

total of 103 documented AIPs across 70 genera and 28 families were identified. Among these, five alien invasive plants were categorized as level I risk, 12 as level II risk, 24 as level III risk, 28 as level IV risk, and 34 as level V risk. 【Conclusion】 While numerous species of AIPs were found in the reservoir areas, the majority fell within the low-risk levels (IV, V), posing minimal harm. However, 17 invasive alien plants were categorized as high risk (I, II). Thus, we recommend prioritizing the prevention and control measures for these high-risk alien invasive plants to minimize threats to the ecological security of the Lower Jinsha River.

**Key words:** alien invasive plants; invasion status; invasion risk; index system; Jinsha River

外来入侵植物普遍具有生态位广、繁殖能力强、抗逆性高、传播途径多样化等特征,严重威胁入侵地区的生态系统和生物多样性(Banerjee *et al.*, 2019; Pyšek *et al.*, 2020; Rai & Singh, 2020)。近年来,随着全球气候变化加剧和人员物资往来频繁,外来入侵植物在我国种类数量和出现频率均呈持续增加趋势。最新研究结果显示,我国现有外来入侵植物 403 种(Hao & Ma, 2023),是全球受外来植物入侵威胁最严重的国家之一。

外来入侵物种风险评估研究是开展其风险管理工作的基础,通过风险评估明确外来物种传入与扩散的风险,制定针对性的监测预警措施,可以有效抑制其扩散(万方浩等, 2010; Bacher *et al.*, 2018; Blackburn *et al.*, 2014)。目前,外来入侵物种风险评估大多采用多指标综合评估方法,根据入侵物种的生物学与生态学特征、产生的危害程度等方面确定各项指标并赋值,从而得到该入侵物种的综合得分情况,进而判断其入侵风险(李惠茹等, 2022)。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是多指标综合评估方法中使用最多的方法之一,在国外已被广泛应用于外来入侵物种的风险评估及管理决策(Morey & Veette, 2021)。近年来,我国学者也利用 AHP 评估了不同空间尺度(省、市、县、流域尺度等)下外来入侵植物的入侵风险(付岚等, 2012; 宋佳琳等, 2023; 王鹏等, 2022; 张璞进等, 2019),明确了不同入侵植物在特定区域的风险等级,为相关区域入侵植物的防控和管理提供了重要依据。我国幅员辽阔,入侵植物对不同区域和生态系统的危害状况也有较大差别。例如,蓖麻 *Ricinus communis* L. 在南方地区为多年生草本植物,繁殖能力强,每年产生大量种子,但在北方地区则为一年生草本,传播能力相对较差,难以形成稳定种群;刺槐 *Robinia pseudoacacia* L. 对我国北方地区森林群落的物种多样性影响较大,在南方地区则影响轻微或无危害(马金双, 2020)。因此,依据研究区域内实际情况开展评估工作,才能更加准确地判定

该地区外来植物的风险等级。

金沙江下游大部分地区属西南干旱河谷区,区域内生态系统多样,生物种类丰富,是长江上游生态保护的关键地段之一(高俊刚等, 2016)。同时,河谷内峡谷深切、干旱缺水、水土流失严重,生态本底脆弱(余杭等, 2020)。整个金沙江流域临近西南边境,历史上与中南半岛交流频繁,故而入侵植物具有传入时间早、种类数量多等特点(邓鑫欣等, 2023)。据报道,金沙江下游已有紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Sprengel) R. M. King & H. Robinson、马缨丹 *Lantana camara* L.、土荆芥 *Dysphania ambrosioides* (Linnaeus) Mosyakin & Clemants 等多种恶性入侵植物分布,并在局部区域泛滥成灾,给当地生态环境和农业生产造成了巨大损失(潘红丽等, 2021; 徐成东和陆树刚, 2006)。近年来,金沙江下游干流竣工了白鹤滩等 4 座巨型梯级水电站,导致该区域的人为干扰程度进一步增大,外来入侵植物成功侵入的机率增加(吴晓雯等, 2006)。目前,虽有部分学者探讨了金沙江下游外来入侵植物的组成特征和空间分布状况(邓鑫欣等, 2023),但并未系统评估其潜在入侵风险,该区域外来入侵植物的风险状况仍缺乏全面认知。

乌东德和白鹤滩电站分属金沙江下游巨型梯级电站群的一、二级,分别为世界第七大和第二大水电站,其库区生态环境状况对金沙江下游具有较好的表征性。本研究在调查分析库区外来入侵植物组成特点和入侵特征的基础上,采用层次分析法,依据区域自然生态因子和社会发展现状构建入侵风险评估指标体系,综合评价其入侵风险,从而为金沙江下游外来入侵植物的早期监测预警和防控措施制定提供参考,也为金沙江全流域外来入侵植物的防控决策提供数据支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

金沙江下游即攀枝花至宜宾段,河道全长约

800 km。区域内基带气候为南亚热带,年均温度 15~20 ℃,年均降水量 800~1200 mm,其中 80%集中在 5—10 月。河谷内蒸发量较大,可达 2500~4000 mm,为典型的西南干旱河谷特征(孙龙等,2023)。河谷内海拔 500~2500 m,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,受人为活动影响,河谷中下部原始植被消失殆尽,现为多种旱性稀树灌草丛和农业栽培作物;海拔 1500 m 上的河谷中上部则分布有栲、栎、松等森林植被以及高山草甸(孙龙等,2023;吴宁和乔永康,1994)。乌东德和白鹤滩电站库区主要涉及四川省攀枝花市、凉山彝族自治州,云南省昭通市、楚雄彝族自治州、昆明市等 6 市(州)11 县(区),流域面积约 40.61 万 km<sup>2</sup>。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 外来入侵植物野外调查** 2022 年 8 月在乌东德和白鹤滩电站库区内开展外来入侵植物野外调查(邓鑫欣等,2023)。在约 380 km 的金沙江河道周边,共选取 83 个调查点位开展样线调查,包含了道旁、村落、农地、撂荒地、沟渠、果园、渣场、河滩、消落带、灌草丛、森林等库区主要生境类型。在每个调查点设置 1~3 km 的调查样线 1~3 条,调查记录样线内的入侵植物的种类、生境及空间分布信息。同时,在每条样线上随机布设样方 2~4 个,记录样方内植物种类、数量、高度、盖度、生活型等群落基本信息。考虑到调查区域的主要植被类型为灌草丛和农田作物,因此野外调查以 1 m×1 m 的草本调查样方和 5 m×5 m 的灌丛调查样方为主,果园、森林调查样方为 20 m×20 m。调查样方总计 865 个,其中草本样方 788 个,灌木样方 60 个,乔木样方 17 个。在野外调查的基础上,根据《中国外来入侵植物志》(1~5 卷)、《中国外来入侵植物名录》、《中国植物志》(1~80 卷)等专业书籍确定外来入侵植物种类、生活型、原产地、入侵途径等基本信息。

**1.2.2 入侵风险评估体系的建立** 本研究除集成以往文献中普遍关注的指标外,也结合专家咨询意见适当增加部分指标,构建符合金沙江下游地区特征的评估指标体系(彭宗波等,2013;王鹏等,2022;王铁梅等,2020;魏子璐等,2021;张璞进等,2019)。基于外来入侵植物入侵过程、入侵现状以及危害与防治等方面,本风险评估体系确定了“传入阶段”“适生阶段”“扩散阶段”“入侵现状”“危害

和影响”“防控性”这 6 个最为常用的一级指标;并结合金沙江下游实地情况,将一级指标分解为 19 个二级指标,既包括“入侵途径”“繁殖方式”“扩散途径和距离”“种群大小”“生态危害性”“防控效果”等常用指标,也增设了“水流对传播的影响”“占据的生境类型”等更能反映研究区域特征的评估指标。同时,在二级指标下设立评估标准,对入侵植物各个二级指标进行评估判断。

梳理相关文献并咨询生物学、生态学领域相关专家进一步确定一、二级指标的判断矩阵(王鹏等,2022;王铁梅等,2020;易照勤等,2018),将判断矩阵导入 yaahp 软件(<https://www.metadecsn.com/yaahp/>)计算相应的指标权重值以及一致性比率(consistency ratio, CR)。若 CR 小于 0.1,则认为该矩阵具有满意的一致性;若不满足此条件,适当调整矩阵比对的标度值,直至通过一致性检验为止(梁勇,2013)。

本风险评估体系总分为 100 分,根据各级指标权重的占比赋予评估指标相应分值,对评估指标进行分值量化,并依据评估标准判断外来入侵植物的具体得分(张璞进等,2019)。评估标准所对应的分值受二级指标权重的约束,通过咨询生物学、生态学领域专家确定(表 1)。统计各外来入侵植物 19 个二级指标得分总和,得出外来入侵植物的风险值。最后根据风险值高低划分外来入侵植物的风险等级。

## 2 结果分析

### 2.1 外来入侵植物物种组成

据调查,乌东德和白鹤滩库区现有外来入侵植物 103 种,隶属 28 科 70 属。按照多种科(≥10 种)、中等种科(5~9 种)、寡种科(2~4 种)、单种科(1 种)的标准划分科类型(王友国等,2021),结果如表 2 所示。28 科外来入侵植物中,多种科为菊科 Asteraceae (24 种)、豆科 Fabaceae (15 种)、茄科 Solanaceae (10 种),共 3 科 49 种;中等种科为大戟科 Euphorbiaceae、苋科 Amaranthaceae、禾本科 Poaceae、旋花科 Convolvulaceae,共 4 科 26 种;寡种科为锦葵科 Malvaceae、仙人掌科 Cactaceae、景天科 Crassulaceae、柳叶菜科 Onagraceae,共 4 科 11 种;单种科有大麻科 Cannabaceae、罂粟科 Papaveraceae、落葵科 Basellaceae、商陆科 Phytolaccaceae 等 17 科,共 17 种。

表 1 乌白库区外来入侵植物风险评估体系

Table 1 Risk assessment system of alien invasive plants in the reservoir areas of Wudongde and Baihetan Hydropower Stations

一级指标(权重占比) Primary indicator (weight ratio)	二级指标(权重占比) Secondary indicator (weight ratio)	评估标准 Assessment criterion	得分 Score
传入阶段 Introduction stage (8%)	传入阶段 Introduction stage (4%)	自然扩散 Natural diffusion	1
		无意引入 Unintentional introduction	2
		有意引入 Intentional introduction	4
	重视程度 Degree of importance (4%)	未被列入《重点管理外来入侵物种名录》 Unrecord in the List of Alien Invasive Species under Key Management	0
已被列入《重点管理外来入侵物种名录》 Record in the List of Alien Invasive Species under Key Management		4	
适生阶段 Adaptation and survive stage (14%)	繁殖方式 Modes of reproduction (3%)	主要依靠无性繁殖 Mainly relies on asexual reproduction	1
		主要依靠种子繁殖 Mainly relies on seeds for reproduction	2
		种子繁殖和无性繁殖兼有 Both seed propagation and asexual propagation	3
	种实及其他繁殖体数量 Number of seeds and other propagules (3%)	少量 A small quantity	1
		中等量 Moderate quantity	2
		大量 A large quantity	3
	环境的适应能力 Environmental adaptability (5%)	研究区域环境与入侵植物原产地或归化地不同 The environment of study area is different from original place or naturalized area	1
		研究区域环境与入侵植物原产地或归化地类似 The environment of study area is likeness to original place or naturalized area	2
		研究区域环境与入侵植物原产地或归化地相同 The environment of study area is equal to original place or naturalized area	5
	繁殖频率 Breeding frequency (3%)	无性繁殖弱或有性繁殖多年 1 次 Asexual reproduction is weak or sexual reproduction occurs once in many years	1
无性繁殖一般或有性繁殖每年 1 次 Asexual reproduction ability is average or sexual reproduction occurs once a year		2	
无性繁殖强或有性繁殖每年多次 Asexual reproduction ability is strong or sexual reproduction occurs multiple times per year		3	
扩散阶段 Dispersal stage (18%)	扩散途径和距离 Dispersal pathways and distances (6%)	利用 1~2 种途径进行短距离扩散 Using 1-2 ways for short-distance diffusion	1
		利用 1~2 种途径进行长距离扩散 Using 1-2 ways for long-distance diffusion	3
		可利用多种途径进行长距离扩散 Using multiple ways for long-distance diffusion	6
	生活型 Plant life form (4%)	木本 Woody plants	1
		多年生草本 Perennial herb	2
		一二年生草本 Annual or biennial herb	4
	水流对传播的影响 Effects of water flow on plant dispersal (4%)	不能依靠水流传播 Seeds or vegetative propagule cannot be dispersed by water flow	0
		可以依靠水流传播 Seeds or vegetative propagule can be dispersed by water flow	4
种子特征对传播的影响 Effects of Seed characteristics on dispersal (4%)	种子不具有冠毛、翅膀或绒毛等特征 Seeds do not have featuresplant such as pappus, wings, or down	0	
	种子具有冠毛、翅膀或绒毛等特征 Seeds have features such as pappus, wings, or down	4	
入侵现状 Invasion status (24%)	占据的生境类型 Occupied habitat type (6%)	1 种生境 One type of habitat	1
		2~3 种生境 Two or three types of habitats	3
		3 种以上生境 More than 3 types of habitats	6
	频度 Frequentness (6%)	低<30% Low<30%	1
		中 30%~60% Medium 30%-60%	3
		高>60% High>60%	6
	国内该物种分布情况 Domestic distribution (6%)	只在云南省、四川省分布 Only distributed in Yunnan and Sichuan provinces	1
只在南方地区分布 Only distributed in Southern China		3	
在全国大部分地区分布 Distributed in most areas of China		6	
种群大小 Population size (6%)	小 Small	1	
	中 Medium	3	
	大 Large	6	

续表 1

一级指标(权重占比) Primary indicator (weight ratio)	二级指标(权重占比) Secondary indicator (weight ratio)	评估标准 Assessment criterion	得分 Score
危害和影响 Harm and impact (28%)	经济危害性 Economic hazard (9%)	影响较小 Less impact	2
		影响一般 Medium impact	4
		影响较大 Greater impact	9
	生态危害性 Ecological hazard (10%)	影响较小 Less impact	2
		影响一般 Medium impact	5
		影响较大 Greater impact	10
	牲畜、人类健康的危害性 Hazards to livestock and human health (9%)	影响较小 Less impact	2
		影响一般 Medium impact	4
		影响较大 Greater impact	9
防控性 Prevention and control (8%)	防控强度 Prevention and control intensity (3%)	保持观察 Maintain an observation	1
	防控效果 Prevention and control effect (5%)	需采取措施加以控制 Measures need to be taken to control	2
		需多种方式综合治理 Multiple prevention and control methods are needed for integrated management	3
		防治较容易,投入成本低 Prevention and treatment is easier and investment cost is low	1
		防治较困难,需短期的人力和资金投入 Prevention and control are difficult and require short-term manpower and financial investment	2
		防治困难,需长期人力和资金投入 Prevention and control are difficult and require long-term manpower and financial investment	5

表 2 乌白库区外来入侵植物科的统计

Table 2 Family statistics of alien invasive plants in the reservoir areas of Wudongde and Baihetan Hydropower Stations

科的类型 Types of family	科数量 Number of family	科百分比 Percentage of family/%	种数量 Number of species	种百分比 Percentage of species/%
多种科 Multiple family	3	10.71	49	47.57
中等种科 Medium family	4	14.29	26	25.24
寡种科 Depauperate family	4	14.29	11	10.68
单种科 Monotypic family	17	60.71	17	16.50
总计 Total	28	100.00	103	100.00

按照多种属(≥6 种)、寡种属(2~5 种)、单种属(1 种)的标准划分属类型(马伟民等,2011),结果如表 3 所示。70 属外来入侵植物中,多种属仅有大戟属 *Euphorbia* 1 属,含 7 种;寡种属有虎掌藤属

*Ipomoea*、苋属 *Amaranthus*、茄属 *Solanum*、飞蓬属 *Erigeron* 等 16 属,共有 43 种;单种属有紫茎泽兰属 *Ageratina*、银胶菊属 *Parthenium*、赛葵属 *Malvastrum*、蒺藜草属 *Cenchrus* 等 53 属,共计 53 种。

表 3 乌白库区外来入侵植物属的统计

Table 3 Genera statistics of alien invasive plants in the reservoir areas of Wudongde and Baihetan Hydropower Stations

属的类型 Types of genera	属数量 Number of genera	属百分比 Percentage of family/%	种数量 Number of species	种的百分比 Percentage of species/%
多种属 Multiple genera	1	1.43	7	6.80
寡种属 Depauperate genera	16	22.86	43	41.75
单种属 Monotypic genera	53	75.71	53	51.46
总计 Toal	70	100.00	103	100.00

## 2.2 外来入侵植物生活型

乌东德和白鹤滩电站库区的外来入侵植物包括乔木、灌木、一年生草本、一年生或二年生草本、一年生或多年生草本、多年生草本 7 类。其中,一年生草本最多,有 49 种,占该区域外来入侵植物总数的 47.57%,常见有三叶鬼针草 *Bidens pilosa* L.、银胶菊、飞

扬草 *Euphorbia hirta* L.等;其次为多年生草本 32 种(31.07%),主要包括白苞猩猩草 *Euphorbia heterophylla* L.、赛葵 *Malvastrum coromandelianum* (L.) Gurcke、羽芒菊 *Tridax procumbens* L.等;其余依次为灌木 7 种(6.80%),包括马缨丹、木豆 *Cajanus cajan* (L.) Mill-sp.、望江南 *Senna occidentalis* (Linnaeus) Link 等;一年

或多年生草本 6 种(5.83%),包括蓖麻、土人參 *Talinum paniculatum* (Jacq.) Gaertn.、秋英 *Cosmos bipinnatus* Cavanilles 等;一年生或二年生草本 5 种(4.85%),包括节节麦 *Aegilops tauschii* Coss.、草木樨 *Melilotus suaveolens* Ledebour、苏门白酒草 *Erigeron sumatrensis* Retz. 等;乔木仅 4 种(3.88%),分别为银合欢 *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit、黑荆 *Acacia mearnsii* De Wilde、刺槐、假烟叶树 *Solanum erianthum* D. Don。

### 2.3 外来入侵植物传入途径

分布在乌东德和白鹤滩电站库区的外来入侵植物主要通过“有意引入”“无意引入”“自然扩散”这 3 种途径进入我国境内。其中,通过“有意引入”进入的外来入侵植物数量最多(62 种),占总数的 60.19%。有意引入是人类多以提高经济收益、观赏、环保等为主要目的而有意实行的引种活动,如马缨丹、五爪金龙 *Ipomoea cairica* (L.) Sweet 等作为观赏植物引入,垂序商陆 *Phytolacca americana* L.、洋金花 *Datura metel* L. 等作为药用植物引入,银合欢、木豆等作为护坡植物引入(马金双,2020)。

通过“无意引入”进入的外来入侵植物共有 36 种(34.95%)。无意引入是指随着人类贸易、运输、旅行等活动而无意识地引进,如野燕麦 *Avena fatua* L.、节节麦等随种子及货物运输等方式进入我国(马金双,2020)。

通过“自然扩散”进入我国的外来入侵植物有 5 种(4.85%)。自然扩散是指除人为因素外,植物在原产地或者外来入侵植物先在周边国家或地区成功归化后,借助风力、水流等自然媒介或鸟类等生物媒介传入的方式。如紫茎泽兰由缅甸扩散至我国云南南部,银胶菊在南亚和东南亚归化后蔓延进入我国(马金双,2020)。

### 2.4 外来入侵植物原产地

乌东德和白鹤滩库区的 103 种外来入侵植物来源于 6 类地区,其中原产于北美洲的物种最多,共有 63 种(61.73%),主要包括小蓬草 *Erigeron canadensis* L.、藿香蓟 *Ageratum conyzoides* L.、牛膝菊 *Galinsoga parviflora* Cav. 等;其次为非洲 16 种(15.53%),包括紫苜蓿 *Medicago sativa* L.、野苘蒿 *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore、猪屎豆 *Crotalaria pallida* Ait. 等;原产南美洲[如空心莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.、假臭草 *Praxelis clematidea* Cassini、毛曼陀罗 *Datura in-*

*noxia* Mill. 等]和亚洲(如大麻 *Cannabis sativa* L.、苘麻 *Abutilon theophrasti* Medicus、黄花棊 *Sida acuta* Burm. F. 等)的入侵植物均为 10 种(19.42%);来自欧洲(如药用蒲公英 *Taraxacum officinale* F. H. Wigg.、聚合草 *Symphytum officinale* L.)和大洋洲[如田菁 *Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.、黑荆]的入侵植物相对较少,均为 2 种(3.88%)。

### 2.5 外来入侵植物风险评估

经计算,103 种外来入侵植物的风险值在 37~92 分(表 4)。参照《中国外来入侵植物名录》以及类似研究(马金双和李惠茹,2018;宋佳琳等,2023;王鹏等,2022;魏子璐等,2021),综合考虑本研究区域的外来入侵植物的实地状况,按风险值高低划为 5 个风险等级。同时,多次调整风险值区间后,以最能反映本研究区域外来入侵植物实际风险现状的 10 风险值作为区间划分标准。

风险值  $\geq 77$  划为 I 级风险外来入侵植物,包括紫茎泽兰、三叶鬼针草、银胶菊、空心莲子草、藿香蓟 5 种植物。划定依据一方面是大于该分值的入侵植物目前均已被列入《重点管理外来入侵物种名录》,危害严重,是防治管理的重点对象。另一方面,这 5 种植物在金沙江下游分布极为广泛,2 座电站库区涉及的 11 个县(区)均有分布,并且已入侵森林、农田、消落带等多种生态系统,对当地生态环境和经济造成较严重影响。

风险值为 67~76 划为 II 级风险外来入侵植物,共 12 种。其中,部分物种具有严重的危害性,如小蓬草、马缨丹、苏门白酒草等有明显化感作用,能较大程度危害农作物、牲畜或人类等(马金双,2020),但其分布范围不及 I 级风险物种,影响程度次之;另一部分危害性低于 I 级风险物种,如粗毛牛膝菊 *Galinsoga quadriradiata* Ruiz et Pav.、银合欢等,因其在调查区域分布广泛,同样对该区域的生态环境和经济有较大影响。

风险值为 57~66 划为 III 级风险外来入侵植物,有白苞猩猩草、蓟罂粟、赛葵、飞扬草、刺花莲子草 *Alternanthera pungens* H. B. K. 等 24 种,在调查区域的会东县、宁南县、巧家县等有较大面积分布或局部分布,对生态环境和经济造成一定程度的负面影响或具较大潜在危害。

风险值为 47~56 划为 IV 级风险外来入侵植物,包括龙舌兰 *Agave americana* L.、蒺藜草 *Cenchrus*

*echinatus* L.、黄花檉、假酸浆 *Nicandra physalodes* (L.) Gaertner 等 28 种,在调查区域的永仁县、禄劝县、东川区等县(区)局部分布,对生态环境和社会经济尚未造成明显影响。

风险值为 37~46 划为 V 级风险外来入侵植物,有小叶冷水花 *Pilea microphylla* (L.) Liebm.、草木樨、少花龙葵 *Solanum americanum* Miller 等 34 种,在调查区域内偶有分布,其危害性有待观察。

### 3 讨论

#### 3.1 外来入侵植物组成现状

本次共调查到 103 种入侵植物,占全国入侵植物总数的 25%,可见该区域现分布着较多的外来入侵植物。究其原因,可能是受到气候环境条件和人为活动的共同作用。金沙江下游属亚热带气候区,光热条件充足(刘北桦等,2007),冬季河谷内无严寒天气,适合普遍喜热怕冷的外来入侵植物越冬。另一方面,该区域内人口密度较大,农耕历史长、强度高,河谷中下部的原生植被遭到较大破坏(高俊刚等,2016),有利于外来入侵植物的传入、定殖和扩散。近年来,金沙江下游水电站、道路等大型工程的建设以及水果、药材等经济作物引种栽培力度较大,进一步增加了外来入侵植物传入和扩散的便利性。

菊科、豆科、茄科和大戟属是金沙江下游乌东德和白鹤滩库区外来入侵植物的优势科属,这与三峡库区、昆明市等周边区域乃至全国的外来入侵植物的优势科属基本一致(罗高行等,2022;强胜和张欢,2022;殷根深等,2023)。上述科、属植物大多具有种子量大,耐干旱、瘠薄或抗逆性强等特征(Waheed *et al.*, 2023)。此外,突出的传播能力也是其成为优势类群的重要因素,如菊科植物多具有冠毛、钩刺等附属结构,可借助风力、水流、人类活动等多种途径传播(王德艳等,2017; Shi *et al.*, 2023);本次调查到的部分豆科(如猪屎豆等)、茄科(如曼陀罗 *Datura stramonium* L.等)以及大戟属(如猩猩草 *Euphorbia cyathophora* Murr.等)除借助上述途径被动扩散外,还可通过果实(成熟的荚果或蒴果)开裂将种子弹射出去的方式向四周主动扩散(Forget *et al.*, 2005),从而扩大其种群分布范围。

在生活型上,草本型外来入侵植物在该区域具有较大的种类数量优势,其中又以一年生草本种类最多(49 种)。前期调查发现,草本型外来入侵植物在库区道旁、村落、农地、消落带等库区主要生境

中均广泛分布(邓鑫欣等,2023),这可能与其对环境的适应能力有关。首先,相比木本植物的木质茎,草本植物的草质茎进化优势更突出,繁殖力和环境适应能力更强(刘冰等,2022;魏小兰和张蕴薇,2009)。其次,草本型外来入侵植物占优也可能同其生活史对策有较强关联性。研究表明,草本型入侵植物中常见的 r-选择生活史对策具有生活史短、结实量大、个体量小等特点,使其在竞争中具有优势,增加了其入侵成功概率(张斯斯和肖宜安,2013; Zhao *et al.*, 2021)。

本次调查记录到的外来入侵植物多是出于观赏、药用、饲料、改善环境等目的而有意引入我国境内,其次为随人类贸易、运输、旅行等活动无意传入我国,可见外来入侵植物的入侵与人类活动密切相关。本研究中,原产地为北美洲地区的外来入侵植物种类最多,这与全国外来入侵植物的主要来源地一致(Hao & Ma, 2023)。其他区域已开展的调查研究也发现,北美洲是我国外来入侵植物主要来源地(郝丽芬等,2022)。这可能是在世界植物区系范围内,北美和东亚植物区系呈间断分布,具有相似的植物类群;加之北美与我国纬度相似,故起源于北美洲的植物能较好地适应我国的自然环境条件,更易在我国入侵(郝丽芬等,2022;胡海花,2020)。

#### 3.2 外来入侵植物风险评估指标的确立

在评估指标的选取上,本研究一方面沿用了部分常见指标,如繁殖、扩散方式等体现外来入侵植物自身生物学特性的指标,也包括表征经济、生态和人类健康危害性的指标(王铁梅等,2020);另一方面,充分结合研究区域的实际情况,相应增设了一些更能反映本地区外来入侵植物特征的指标。例如,考虑到研究区域为典型的干热气候区,植物生存和种群扩散受水热因素制约较大,在评估指标中重点考虑了外来入侵植物对本区域干旱、高温的适应能力,通过判断入侵植物原产地或归化地与本区域的环境气候条件的相似程度,从而筛选出更适应本区域的外来入侵植物。同时,评价区域内河流众多,能够通过水流传播的外来入侵植物在金沙江下游具有更高的扩散风险,故而选取了“是否可以依靠水流传播”这一指标对其进一步筛选。此外,也确立了“占据生境的类型”“频度”“种群大小”等反映研究区域入侵现状的评估指标,增加了评估结果的客观性及合理性。

表 4 乌白库区外来入侵植物种类及其风险值  
Table 4 Species and risk value of alien invasive plants in the reservoir areas of Wudongde and Baihetan Hydropower Stations

科	属	种	得分	风险等级	科	属	种	得分	风险等级
Family	Gene	Species	Score	Risk grade	Family	Gene	Species	Score	Risk grade
天门冬科	龙舌兰属	龙舌兰	56	IV	商陆科	商陆属	垂序商陆	66	III
禾本科	山羊草属	节节麦	59	III	紫茉莉科	紫茉莉属	紫茉莉	63	III
	燕麦属	野燕麦	65	III	落葵薯科	落葵薯属	落葵薯	71	II
	黑麦草属	硬直黑麦草	46	V	土人参科	土人参属	土人参	47	IV
	蒺藜草属	蒺藜草	53	IV	马齿苋科	马齿苋属	马齿苋	50	IV
	糖萼草属	红毛草	46	V	仙人掌科	仙人掌属	仙人掌	52	IV
	黍属	大黍	51	IV	梨果仙人掌属	梨果仙人掌属	梨果仙人掌	52	IV
罂粟科	罂粟属	罂粟	62	III	单刺仙人掌属	单刺仙人掌属	单刺仙人掌	52	IV
景天科	伽蓝菜属	伽蓝菜	51	IV	长春花属	长春花属	长春花	51	IV
		棒叶落地生根			龙珠果	龙珠果	龙珠果	51	IV
		<i>Kalanchoe delagoensis</i>			聚花草	聚花草	聚花草	42	V
豆科	决明属	落地生根	57	III	五爪金龙	五爪金龙	五爪金龙	62	III
		双荚决明	40	V	裂叶牵牛	裂叶牵牛	裂叶牵牛	49	IV
		望江南	41	V	变色牵牛	变色牵牛	变色牵牛	49	IV
	山扁豆属	山扁豆	51	IV	牵牛	牵牛	牵牛	49	IV
	银合欢属	银合欢	68	II	圆叶牵牛	圆叶牵牛	圆叶牵牛	63	III
	相思树属	相思树	37	V	少花龙葵	少花龙葵	少花龙葵	45	V
	猪屎豆属	猪屎豆	42	V	牛茄子	牛茄子	牛茄子	40	V
	山蚂蝗属	南美山蚂蝗	44	V	假烟叶树	假烟叶树	假烟叶树	45	V
	木豆属	木豆	44	V	毛果茄	毛果茄	毛果茄	46	V
	大翼豆属	紫花大翼豆	41	V	假酸浆	假酸浆	假酸浆	51	IV
		<i>atropurpureum</i>			毛曼陀罗	毛曼陀罗	毛曼陀罗	63	III
	田菁属	田菁	45	V	洋金花	洋金花	洋金花	60	III
	刺槐属	刺槐	40	V	曼陀罗	曼陀罗	曼陀罗	60	III
	苜蓿属	紫苜蓿	47	IV	苦蕒	苦蕒	苦蕒	50	IV
	草木樨属	草木樨	46	V	毛酸浆	毛酸浆	毛酸浆	39	V
	车轴草属	杂种车轴草	38	V	北美车前	北美车前	北美车前	46	V
		白车轴草	51	IV	马缨丹	马缨丹	马缨丹	75	II
大麻科	大麻属	大麻	44	V					

续表 4

科 Family	属 Genus	种 Species	得分 Score	风险等级 Risk grade	科 Family	属 Genus	种 Species	得分 Score	风险等级 Risk grade
荨麻科 Urticaceae	冷水花属 <i>Pilea</i>	小叶冷水花 <i>Pilea microphylla</i>	46	V	唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	椴叶鼠尾草 <i>Salvia tiliifolia</i>	39	V
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	关节酢浆草 <i>Oxalis articulata</i>	40	V	菊科 Asteraceae	蒲公英属 <i>Taraxacum</i>	药用蒲公英 <i>Taraxacum officinale</i>	52	IV
大戟科 Euphorbiaceae	蓖麻属 <i>Ricinus</i>	蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	64	III	菊科 Asteraceae	地胆草属 <i>Elephantopus</i>	白花地胆草 <i>Elephantopus tomentosus</i>	41	V
		白苞猩猩草 <i>Euphorbia heterophylla</i>	65	III			野茼蒿 <i>Grassocephalum crepidioides</i>	60	III
大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	猩猩草 <i>Euphorbia cyathophora</i>	50	IV	菊科 Asteraceae	野茼蒿属 <i>Grassocephalum</i>	香蕊草 <i>Erigeron bonariensis</i>	63	III
		飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	60	III			小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	74	II
叶下珠科 Phyllanthaceae	叶下珠属 <i>Phyllanthus</i>	斑地锦 <i>Euphorbia maculata</i>	49	IV	菊科 Asteraceae	苏门白酒草 <i>Erigeron sumatrensis</i>	苏门白酒草 <i>Erigeron sumatrensis</i>	72	II
		南欧大戟 <i>Euphorbia peplis</i>	43	V			钻叶紫菀	67	II
柳叶菜科 Onagraceae	月见草属 <i>Oenothera</i>	匍匐大戟 <i>Euphorbia prostrata</i>	50	IV	菊科 Asteraceae	联毛紫菀属 <i>Symphotrichum</i>	<i>Symphotrichum subulatum</i>	44	V
		匍匐大戟 <i>Euphorbia serpens</i>	49	IV			秋英 <i>Cosmos bipinnatus</i>	44	V
锦葵科 Malvaceae	黄麻属 <i>Corchorus</i>	纤梗叶下珠 <i>Phyllanthus tenellus</i>	44	V	菊科 Asteraceae	秋英属 <i>Cosmos</i>	秋英 <i>Cosmos sulphureus</i>	43	V
		粉花月见草 <i>Oenothera rosea</i>	52	IV			白秋英 <i>Cosmos sulphureus</i>	73	II
锦葵科 Malvaceae	黄麻属 <i>Corchorus</i>	四翅月见草 <i>Oenothera tetragyna</i>	39	V	菊科 Asteraceae	鬼针草属 <i>Bidens</i>	白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	57	III
		长蒴黄麻 <i>Corchorus olitorius</i>	47	IV			婆婆针 <i>Bidens bipinnata</i>	86	I
苋科 Amaranthaceae	黄麻属 <i>Corchorus</i>	粉花月见草 <i>Oenothera rosea</i>	52	IV	菊科 Asteraceae	金鸡菊属 <i>Coreopsis</i>	三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	37	V
		赛葵 <i>Malvastrum coronandelianum</i>	65	III			大花金鸡菊 <i>Coreopsis grandiflora</i>	49	IV
苋科 Amaranthaceae	黄麻属 <i>Corchorus</i>	黄花稔 <i>Sida acuta</i>	49	IV	菊科 Asteraceae	万寿菊属 <i>Tagetes</i>	万寿菊 <i>Tagetes erecta</i>	79	I
		苋 <i>Amaranthus blitum</i>	66	III			银胶菊 <i>Parthenium hysterophorus</i>	63	III
苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	苋 <i>Amaranthus blitum</i>	66	III	菊科 Asteraceae	牛膝菊属 <i>Galinsoga</i>	多花百日菊 <i>Zinnia peruviana</i>	46	V
		长芒苋 <i>Amaranthus spinosus</i>	69	II			羽芒菊 <i>Tridax procumbens</i>	61	III
苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	刺苋 <i>Amaranthus spinosus</i>	69	II	菊科 Asteraceae	牛膝菊属 <i>Galinsoga</i>	牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i>	66	III
		皱果苋 <i>Amaranthus viridis</i>	60	III			粗毛牛膝菊 <i>Galinsoga quadriradiata</i>	67	II
苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	空心莲子草	80	I	紫茎泽兰属 <i>Ageratina</i>	紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>	紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i>	92	I
		Alternanthera <i>philoxeroides</i>	64	III			假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	74	II
苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	刺花莲子草 <i>Alternanthera pungens</i>	71	II	假臭草属 <i>Praxelis</i>	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	79	I
		土荆芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	71	II			藿香蓟属 <i>Ageratum</i>	藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	45
苋科 Amaranthaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	Alternanthera <i>philoxeroides</i>	64	III	假臭草属 <i>Praxelis</i>	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	79	I
		刺花莲子草 <i>Alternanthera pungens</i>	71	II			熊耳草 <i>Ageratum houstonianum</i>	45	V

### 3.3 外来入侵植物风险等级情况

既有的入侵植物风险评估工作中,风险等级数的划分上并不唯一(王鹏等, 2022; 王铁梅等, 2020)。为便于同全国尺度和其他区域类似研究相对比,也为了更客观地反映库区内外来入侵植物的实际情况,本研究将外来入侵植物划分为 5 类风险等级。此外,不同研究中风险等级对应的风险值区间阈值也各有差别,如有学者以 5 或 5.5 风险值作为区间阈值(宋佳琳等, 2023; 魏子璐等, 2021)。这是由于不同的评估指标、赋权方式以及权重差异导致了风险值范围的变动。基于此,本研究多次调整风险值区间,确立以 10 风险值作为区间阈值,其风险等级结果最符合本研究区域外来入侵植物的实地入侵情况及危害现状。

根据评价结果,乌东德和白鹤滩库区外来入侵植物中属 I 级和 II 级风险等级的共有 17 种,这些物种在《中国外来入侵植物名录》中也被划分为入侵等级较高的 1 级(恶性入侵种)或 2 级(严重入侵种)(马金双等, 2018),有 13 种已被列入《重点管理外来入侵物种名录》。这 17 种是本区域风险极高的外来入侵植物,需重点对其进行管理。被评为 III 级风险等级的入侵植物有 24 种,其中包括 4 种被《中国外来入侵植物名录》划定为 1 级(恶性入侵种)的物种,分别为垂序商陆、五爪金龙、圆叶牵牛 *Ipomoea purpurea* Lam.、肿柄菊 *Tithonia diversifolia* A. Gray。目前,这些恶性入侵种在本研究中的风险等级稍低,主要受入侵现状的影响。例如,在实地调查中,肿柄菊在调查样方中频度仅为 2.35%,明显低于 I 级风险等级中的紫茎泽兰(71.76%)。朱枫等(2018)也证实肿柄菊目前在金沙江河谷地区分布区域相对有限。鉴于 III 级风险的物种仍表现出入侵性较强的特征,需密切关注其种群发展趋势,必要时对其进行人为清除。被评为 IV 级和 V 级的外来入侵植物共 62 种,占本区域外来入侵植物总数的 60.19%,故 IV 级和 V 级构成本地区外来入侵植物风险等级的主体。这些物种在库区总体表现出分布较少或入侵性较低或危害性较低的特征,对周边地区的生态状况或生产生活造成的影响有限或近无,故对这两级别风险的物种进行适当的监测观察即可。

### 3.4 外来入侵植物防控建议

鉴于金沙江下游外来入侵植物的传入主要与

人类活动密切相关,在未来应重视本区域的植物引种活动。首先,引种时应加强植物检疫,从源头上控制外来植物的进入;其次,需加强对引种植物的隔离试种工作,提前确认其入侵风险(殷万东等, 2020)。同时,考虑到该区域现有的外来入侵植物主要来源于北美洲,故应尤其注意防范来自北美洲的植物。针对现有的 I 和 II 级风险入侵植物,一方面加强防治,充分考虑其生理生化特性,统筹采用物理、化学和生物防治方法,探索“一种一策”的有效防治措施(Clements *et al.*, 2019; Shrestha, 2019)。另一方面,应利用物种分布模型结合气候变化场景,预测识别气候变化下外来入侵植物的生态适宜区和未来扩散趋势(Adhikari *et al.*, 2022; Fang *et al.*, 2021),做好高风险外来入侵植物的监测和预警工作。针对 III 级风险入侵植物,应根据其入侵现状的动态变化及时更新风险评估工作,提前做好防治准备措施。

此外,需高度重视分布在库区消落带上的外来入侵植物。实地调查发现,在 2 座电站库区消落带生境上,已分布有相当数量的外来入侵植物。以乌东德库区元谋县江边乡为例,本次调查在该处消落带共计调查到 15 种外来入侵植物(I 和 II 级 3 种, III 级 7 种, IV 和 V 级 5 种),其中分布面积较大的有银胶菊、赛葵、刺花莲子草、羽芒菊等。消落带上的入侵植物会对消落带的缓冲、过渡和景观功能造成较大的负面影响(黄金夏等, 2022; Wang *et al.*, 2022),同时利用水流向下游及周边地区传播扩散的风险也相对较大,故应结合消落带土壤、水文特征和植被恢复策略建立防治机制(罗高行等, 2022; Catford & Jansson, 2014)。例如,对消落带上的外来入侵植物进行清除后种植生长快、耐水淹的本地物种,加快恢复消落带植被,从而缓解外来入侵植物的入侵(Holmes *et al.*, 2005)。

最后,应加大对公众的宣传教育力度,提高公众对外来入侵植物的认识及防患意识,鼓励公众参与到入侵植物的调查、监测和防治工作中(肖俞等, 2023),进一步推动金沙江下游外来入侵植物的防控工作。

### 参考文献

邓鑫欣, 于江, 熊浩荣, 伍小刚, 张月华, 张培春, 何秀林, 潘开文, 张林, 2023. 金沙江下游乌东德和白鹤滩电站库

- 区外来入侵植物组成和分布. 应用与环境生物学报: 1-36. [2023-10-03]. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2023.03008.
- 付岚, 赵鸣飞, 龚玲, 刘全儒, 2012. 东江流域河岸带外来入侵植物调查分析及其风险评估. 安徽农业科学, 40(3): 1689-1693.
- 高俊刚, 吴雪, 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 姚治君, 2016. 基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区. 生态学报, 36(1): 134-147.
- 郝丽芬, 韩雨轩, 吴乾美, 王瑞, 林克剑, 2022. 中国草地外来生物入侵现状与防控建议. 植物保护, 48(4): 10-20.
- 胡海花, 2020. 东亚-北美被子植物区系系统发育多样性格局比较研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学.
- 黄金夏, 易雪梅, 贾伟涛, 刘莹, 张松林, 李小红, 吴胜军, 马茂华, 2022. 三峡库区消落带外来植物入侵与景观基质组成结构的关联性. 应用生态学报, 33(2): 477-488.
- 李惠茹, 严靖, 杜诚, 闫小玲, 2022. 中国外来植物入侵风险评估研究. 生态学报, 42(16): 6451-6463.
- 梁勇, 2013. 基于模糊理论外来入侵生物风险评估研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.
- 林敏, 郝建华, 2011. 苏州外来植物入侵风险评估体系及牛膝菊的入侵风险. 生态科学, 30(5): 507-511.
- 刘北桦, 蒋云, 张士功, 陶陶, 2007. 川滇金沙江流域南亚热带气候区特色农业发展研究. 中国农业资源与区划, 28(2): 7-11.
- 刘冰, 向晓媚, 谭璐, 王志成, 杨含茹, 陈功锡, 2022. 湖南省德夯峡谷生境种子植物功能性状多样性. 西北植物学报, 42(9): 1591-1599.
- 罗高行, 黄远洋, 孙小祥, 李小红, 刘莹, 马茂华, 吴胜军, 陈吉龙, 易雪梅, 2022. 三峡水库消落带外来植物组成及分布特征. 生物安全学报, 31(4): 309-318.
- 马伟民, 阎平, 吴玲, 冯元忠, 2011. 中国帕米尔高原-喀喇昆仑山地区莎草科植物多样性及区系分析. 江苏农业科学, 39(5): 470-472.
- 潘红丽, 李慧超, 余志祥, 蔡蕾, 李旭华, 刘兴良, 2021. 攀枝花市入侵植物马缨丹群落的物种组成与多样性研究. 生态环境学报, 30(6): 1177-1182.
- 彭宗波, 蒋英, 蒋菊生, 2013. 海南岛外来植物入侵风险评估指标体系. 生态学杂志, 32(8): 2029-2034.
- 强胜, 张欢, 2022. 中国农业生态系统外来植物入侵及其管理现状. 南京农业大学学报, 45(5): 957-980.
- 宋佳琳, 王慧, 刘红梅, 张飞雪, 张海芳, 杨殿林, 赵建宁, 2023. 保定市清苑区外来入侵植物及其入侵风险评估. 农业资源与环境学报, 40(2): 314-323.
- 孙龙, 卢涛, 孙涛, 孙然好, 2023. 金沙江下游典型库区消落带植被恢复模式. 生态学报, 43(2): 826-837.
- 万方浩, 彭德良, 王瑞, 2010. 生物入侵: 预警篇. 北京: 科学出版社.
- 王德艳, 张大才, 胡世俊, 闫晓慧, 2017. 云南菊科入侵植物入侵机制及其利用研究进展. 生物安全学报, 26(4): 259-265.
- 王鹏, 黄娇, 熊雪, 龙凤, 吴雨, 王雯, 2022. 乐山地区外来入侵植物风险评估. 生物安全学报, 31(3): 268-277.
- 王铁梅, 平晓燕, 林长存, 2020. 外来牧草入侵风险评估体系研究. 草地学报, 28(3): 727-733.
- 王友国, 庄华蓉, 张庆刚, 臧德奎, 2021. 重庆市入侵植物种类组成及分布格局分析. 中国野生植物资源, 40(5): 84-90.
- 魏小兰, 张蕴薇, 2009. 草本植物的非典型性应用. 草业科学, 26(9): 34-39.
- 魏子璐, 朱峻熠, 潘晨航, 王义英, 胡沁沁, 周颖, 金水虎, 2021. 宁波市外来入侵植物及其入侵风险评估. 浙江农林大学学报, 38(3): 552-559.
- 吴宁, 乔永康, 1994. 四川省宁南县干热河谷植物区系. 山地研究, 12(1): 21-26.
- 吴晓雯, 罗晶, 陈家宽, 李博, 2006. 中国外来入侵植物的分布格局及其与环境因子和人类活动的关系. 植物生态学报, 30(4): 576-584.
- 肖俞, 李宇然, 段禾祥, 任正涛, 冯圣碧, 姜志诚, 李家华, 张品, 胡金明, 耿宇鹏, 2023. 高黎贡山外来植物入侵现状及管控建议. 生物多样性, 31(5): 126-134.
- 徐成东, 陆树刚, 2006. 云南的外来入侵植物. 广西植物, 26(3): 227-234.
- 易照勤, 王洪峰, 穆立蓄, 2018. 帽儿山国家森林公园路域生态系统外来植物危害风险评估. 生态与农村环境学报, 34(3): 216-223.
- 殷根深, 张双双, 程文磊, 席辉辉, 董洪进, 2023. 云南省外来入侵植物的区系成分及多样性分析. 生物安全学报, 32(1): 16-24.
- 殷万东, 吴明可, 田宝良, 于宏伟, 王麒云, 丁建清, 2020. 生物入侵对黄河流域生态系统的影响及对策. 生物多样性, 28(12): 1533-1545.
- 余杭, 孙凡, 李松阳, 刘颖, 贺静雯, 林勇明, 王道杰, 李键, 2020. 不同区段金沙江下游山地失稳性坡面土壤有机碳含量特征. 应用与环境生物学报, 26(5): 1192-1199.
- 张璞进, 赵利清, 梁晨霞, 张国龙, 张迁迁, 岳丽, 徐步云, 杨劼, 张培青, 清华, 2019. 内蒙古外来植物入侵风险评估. 生态学杂志, 38(7): 1973-1981.
- 张斯斯, 肖宜安, 2013. 中国外来入侵植物生活型与性系统多样性. 植物研究, 33(3): 351-359.
- 朱枫, 王四海, 陈剑, 李宁云, 吴超, 2018. 外来入侵植物肿柄菊在云南的分布特征及其影响因素. 生态学杂志, 37(9): 2573-2580.

- ADHIKARI P, LEE Y H, ADHIKARI P, HONG S H, PARK Y S, 2022. Climate change-induced invasion risk of ecosystem disturbing alien plant species: an evaluation using species distribution modeling. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 880987.
- BACHER S, BLACKBURN T M, ESSL F, GENOVESI P, HEIKKILÄ J, JESCHKE J M, JONES G, KELLER R, KENIS M, KUEFFER C, MARTINOU A F, NENTWIG W, PERGL J, PYŠEK P, RABITSCH W, RICHARDSON D M, ROY H E, SAUL W C, SCALERA R, VILÀ M, WILSON J R U, KUMSCHICK S, 2018. Socio-economic impact classification of alien taxa (SEICAT). *Methods in Ecology and Evolution*, 9(1): 159–168.
- BANERJEE A K, GUO W X, HUANG Y L, 2019. Genetic and epigenetic regulation of phenotypic variation in invasive plants-linking research trends towards a unified framework. *NeoBiota*, 49: 77–103.
- BLACKBURN T M, ESSL F, EVANS T, HULME P E, JESCHKE J M, KÜHN I, KUMSCHICK S, MARKOVÁ Z, MRUGAŁA A, NENTWIG W, PERGL J, PYŠEK P, RABITSCH W, RICCIARDI A, RICHARDSON D, SENDEK A, VILÀ M, WILSON J R U, WINTER M, GENOVESI P, BACHER S, 2014. A unified classification of alien species based on the magnitude of their environmental impacts. *PLoS Biology*, 12(5): e1001850.
- CATFORD J A, JANSSON R, 2014. Drowned, buried and carried away: effects of plant traits on the distribution of native and alien species in riparian ecosystems. *New Phytologist*, 204(1): 19–36.
- CLEMENTS D R, DAY M D, OEGGERLI V, SHEN S C, WESTON L A, XU G F, ZHANG F D, ZHU X, 2019. Site-specific management is crucial to managing *Mikania micrantha*. *Weed Research*, 59(3): 155–169.
- FANG Y Q, ZHANG X H, WEI H Y, WANG D J, CHEN R D, WANG L K, GU W, 2021. Predicting the invasive trend of exotic plants in China based on the ensemble model under climate change: a case for three invasive plants of Asteraceae. *Science of the Total Environment*, 756: 143841.
- FORGET P M, LAMBERT J E, HULME P E, VANDER WALL S B, 2005. *Seed fate: predation, dispersal and seedling establishment*. Wallingford UK: CABI Publishing.
- HAO Q, MA J S, 2023. Invasive alien plants in China: an update. *Plant Diversity*, 45(1): 117.
- HOLMES P M, RICHARDSON D M, ESLER K J, WITKOWSKI E T F, FOURIE S, 2005. A decision-making framework for restoring riparian zones degraded by invasive alien plants in South Africa. *South African Journal of Science*, 101(11): 553–564.
- MOREY A C, VEETTE R C, 2021. A participatory method for prioritizing invasive species: ranking threats to Minnesota's terrestrial ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 290: 112556.
- PYŠEK P, HULME P E, SIMBERLOFF D, BACHER S, BLACKBURN T M, CARLTON J T, DAWSON W, ESSL F, FOXCROFT L C, GENOVESI P, JESCHKE J M, KÜHN I, LIEBHOLD A M, MANDRAK N E, MEYERSON L A, PAUCHARD A, PERGL J, ROY H E, SEEBENS H, VAN KLEUNEN M, VILÀ M, WINGFIELD M J, RICHARDSON D M, 2020. Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95(6): 1511–1534.
- RAI P K, SINGH J S, 2020. Invasive alien plant species: their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111: 106020.
- SHI X, LI R, ZHANG Z, QIANG S, 2021. Microstructure determines floating ability of weed seeds. *Pest Management Science*, 77(1): 440–454.
- SHRESTHA B B, 2019. Management of invasive alien plants in Nepal: current practices and future prospects // GARKOTI S C, VAN BLOEM S J, FULÉ P Z, SEMWAL R L. *Tropical ecosystems: structure, functions and challenges in the face of global change*. Singapore: Springer Singapore: 45–68.
- WAHEED M, HAQ S M, ARSHAD F, BUSSMAN R W, ALI H M, SIDDIQUI M H, 2023. Phyto-ecological distribution patterns and identification of alien invasive indicator species in relation to edaphic factors from semi-arid region. *Ecological Indicators*, 148: 110053.
- WANG Y F, LIU Y, MA M, DING Z, WU S J, JIA W T, CHEN Q, YI X M, ZHANG J, LI X H, LUO G H, HUANG J X, 2022. Dam-induced difference of invasive plant species distribution along the riparian habitats. *Science of the Total Environment*, 808: 152103.
- ZHAO W, LIU T, LIU Y, 2021. The significance of biomass allocation to population growth of the invasive species *Ambrosia artemisiifolia* and *Ambrosia trifida* with different densities. *BMC Ecology and Evolution*, 21(1): 1–13.