

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2022.04.003

三峡水库消落带外来植物组成及分布特征

罗高行^{1,2,3}, 黄远洋⁴, 孙小祥², 李小红², 刘莹², 马茂华², 吴胜军², 陈吉龙², 易雪梅^{2*}
¹重庆交通大学, 重庆 400074; ²中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714;
³中国科学院大学重庆学院, 重庆 400714; ⁴重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160

摘要:【目的】探究三峡水库消落带外来植物的物种组成及分布特征,为库区外来植物管理防控、生物多样性保护和生态安全管理提供理论支持和数据参考。【方法】通过对库区消落带外来植物的实地调查,结合文献资料,研究外来植物的物种组成、原产地、引入途径、生活型及消落带外来植物的分布现状。【结果】三峡水库消落带存在 66 种外来植物,隶属于 22 个科 50 属,其中菊科、豆科、茄科和苋科是三峡水库消落带外来植物的优势科,共有 40 种,占总种数约 60.6%,菊科的数目最多,达到 21 种;外来植物中来源于美洲的物种最多,达到 66.7%;生活型以一年生草本植物居多;花果期多集中于 5—10 月份;外来植物中分布最为广泛的物种是大狼把草、喜旱莲子草、鬼针草、钻叶紫菀、小蓬草和土荆芥;三峡水库内库首和库中区域消落带分布的外来植物较多。【结论】三峡水库消落带外来植物种类较多,分布广泛,在常年回水区外来植物入侵态势较为严重,入侵植物防控的形势不容乐观。建议结合消落带管理方法和消落带植物群落特征建立外来植物防治机制,积极采取相关措施,加强消落带外来植物扩散机制及其对本地生态系统影响的研究。

关键词: 外来植物; 三峡水库消落带; 物种组成; 分布现状



开放科学标识码
(OSID 码)

Composition and distribution characteristics of exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China

LUO Gaochang^{1,2,3}, HUANG Yuanyang⁴, SUN Xiaoxiang², LI Xiaohong², LIU Ying²,
MA Maohua², WU Shengjun², CHEN Jilong², YI Xuemei^{2*}

¹Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; ²Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; ³Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; ⁴Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China

Abstract: 【Aim】In order to minimise the unwanted ecological effects of the Three Gorges Reservoir, we studied the species composition and distribution characteristics of exotic plants in the areas of the reservoir that is periodically inundated by the fluctuating water level. 【Method】Through field surveys of exotic plants in the fluctuating water zone, supplemented by literature data, the species composition, origin, introduction method, life form, and distribution status of exotic plants were studied. 【Result】In total, 66 species of exotic plants belonging to 22 families and 50 genera were recorded. Among them, Compositae, Leguminosae, Solanaceae, and Amaranthaceae were the dominant families, with a total of 40 species that accounted for approximately 60.6% of all the species identified. Species belonging to the Compositae family had the largest number, with 21 species. Non-native the species from America were the most abundant, comprising 66.7% of all detected species. Annual herbs were the most common life form, and the flowering and fruiting periods were mainly from May to October. The most widely distributed species were *Bidens frondosa* L., *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., *Bidens pilosa* L., *Symphyotrichum subulatum* (Michx.) G. L. Nesom, *Erigeron canadensis* L., and *Dysphania ambrosioides* (Linnaeus) Mosyakin & Clemants. Overall, many exotic plants were distributed throughout the water-level fluctuating zone at the head and the middle of the Three Gorges Reservoir. 【Conclusion】There were

收稿日期(Received): 2022-03-02 接受日期(Accepted): 2022-09-05
基金项目: 三峡库区消落区(重庆段)生态环境调查及生态恢复技术示范项目(5000002021BF40001); 国家自然科学基金项目(51779241,51709250); 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jscx-dxwtBX0007); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2015490911)
作者简介: 罗高行,男,硕士研究生。研究方向: 外来植物。E-mail: luogaohang@cigit.ac.cn
* 通信作者(Author for correspondence), 易雪梅, E-mail: yixuemei@cigit.ac.cn

numerous species of exotic plants widely distributed throughout the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. The invasion of exotic plants was severe, especially in the perennial backwater area, and the prevention and control of invasive plants was not effective. It is suggested that prevention and control mechanisms for exotic plants be combined with the management methods of the fluctuation zone. Moreover, these mechanisms should be created with the characteristics of the plant community in mind.

Key words: exotic plants; water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir; species composition; distribution status

外来植物,是某种植物通过各种方式跨越自身的迁徙能力,扩散到原生境以外的其他地区,能够正常完成生活周期并建立种群的植物(何家庆,2011)。由于全球变化、经济发展和人类活动的不断加剧,越来越多的植物以前所未有的速率扩散到新的区域,造成农林牧业减产,生物多样性和生态系统稳定性下降(李叶等,2010),甚至对当地生态系统、人类健康和社会经济造成严重威胁(马骏等,2015)。

三峡大坝建成并正常运行后,在 145~175 m 高程的水库两岸,形成周期性涨落幅度高达 30 m、面积达 348.9 km² 的水库消落带(Stone, 2011; Yan *et al.*, 2015; 徐建霞等,2015)。作为陆地生态系统和水域生态系统的过渡地带(童笑笑,2017),三峡水库消落带在水源涵养、养分协调和污染物迁移转化等方面具有重要功能(Chen, 2009; Zhang & Lou, 2011)。随着原有长江自然消落带的消失和人类活动的干扰,三峡库区植物群落发生明显变化的同时也给外来植物的进入带来新的契机,位于水陆交错带的消落带区域成为外来植物入侵的热点区域(Hood & Naiman, 2000)。

大量外来植物的入侵会对消落带较为脆弱的生境造成影响和破坏,威胁本地植物群落的多样性(Wang *et al.*, 2022),影响生态系统功能。为保护三峡水库消落带的生态环境,提高生物多样性,需要对消落带外来植物进行全面系统的调查研究并合理管控。研究显示,2003—2015 年期间,三峡库区的外来物种以每年 3.5 种的速度增加(Xiong *et al.*, 2018);2014 年三峡库区外来植物达 435 种,其中入侵植物 76 种(陆楠,2014)。目前少量的关于三峡水库消落带外来植物的研究中,集中关注了消落带的生境因素对入侵植物的影响,如距大坝距离(Wang *et al.*, 2022)、土地利用和景观基质组成机构(黄金夏等,2022; Chen *et al.*, 2016),缺少对消落带外来植物较为系统全面的认知和分析。

本研究通过对三峡水库消落带外来植物的实地调查和相关资料收集,探究三峡水库消落带外来植物的组成和空间分布特征,为库区外来植物的管

理防控、生物多样性保护和生态安全管理提供理论支持和数据参考。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合区域,主要覆盖重庆市和湖北省,地形复杂,大部分地区为高山峡谷地带。研究区属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 15~18℃,气温年较差和日较差大,具有冬暖春早、夏热秋迟的特点。年平均降雨量为 1150.26 mm,雨量充沛但空间分布不均匀(李月臣等,2013)。本研究区域为三峡水库的消落带区域,分布在湖北省和重庆市所有库区区县,包括长江干流消落带、主要支流消落带和江心洲区域。

1.2 样方调查

本研究于 2019—2021 年,对三峡水库消落带外来植物进行较为全面、持续的野外实地调查。为保证外来植物分布特征数据的独立和完整性,采用 2021 年 8—9 月的野外植物样方调查数据。在三峡库区,自重庆市江津区、江北区沿长江而下直至湖北省恩施市、宜昌市,共 22 个区县,采取样带和样方结合的取样法,在消落带区域分别设置 3 条沿河流横向梯度的高程带(145~155、155~165、165~175 m),共 127 个样点,每个样点的 3 个高程中分别设置 2~3 个样方,最终根据实际情况共设置样方 412 个(图 1)。

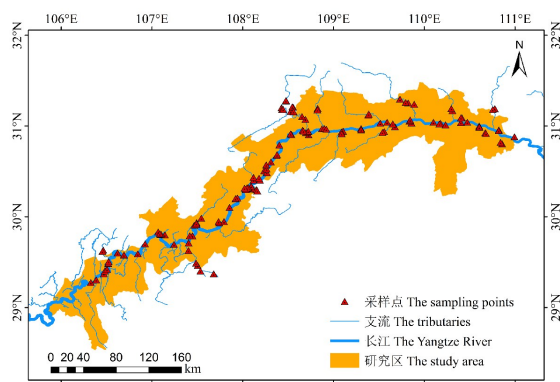


图 1 三峡库区消落带样方调查点分布图

Fig.1 Distribution of sample survey points in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir Area

三峡库区消落带植被主要是草本植物,灌、乔木极少,因此野外调查中设置样方以 1 m×1 m 的草本调查样方为主,另外选取具有代表性的灌丛调查样方,设置为 5 m×5 m;而乔木调查样方设置为 10 m×10 m。记录样方内所有物种的种名、高度、盖度、物种数、生活型(生活史和花果期)、生物量(地上、地下)和高程值。

1.3 确定外来植物及花果期

根据目前公布的 4 批《中国外来入侵物种名单》,结合《中国外来入侵植物名录》(马金双和李慧茹,2018)、《中国外来植物》(何家庆,2011)和《生物入侵:中国外来入侵植物图鉴》(万方浩等,2012)等有关文献资料,收集消落带外来植物原产地、传入途径等信息。另外通过《中国植物志》(中国科学院中国植物志编辑委员会,2004)以及 iplant 植物智网站(<http://www.ipiant.cn/frps>)查询植物物种的生活型、物种来源地和引入途径等,以进一步分析消落区外来植物的特征。

本研究参考《中国外来入侵植物名录》对外来植物入侵等级的划分原则,将三峡水库消落带外来植物划分为 6 个入侵等级(恶性入侵类、严重入侵类、局部入侵类、一般入侵类、有待观察类和建议排除类),将前 4 类归为外来入侵植物类,有待观察类和建议排除类归为外来非入侵植物类。

本研究调查的外来植物花果期主要分为春季、夏季、春夏、春秋、夏秋、夏冬、秋冬和全年 8 类。根据三峡库区气候条件,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—翌年 2 月为冬季。

1.4 计算相关指标

三峡水库消落带植物群落以草本为主,沿长江呈连续性带状分布,受到消落带夏落冬涨水文情势的强烈影响。生态位宽度(niche breadth)是指一个种群或物种在一个群落中所利用的各种不同资源的总和。本研究采用 Levins (1968)的生态位宽度指数 B_i 来分析不同物种对消落带生境的适应和分布状况,公式为: $B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r (P_{ij})^2}$ 。式中, B_i 为物种 i 的生态位宽度; P_{ij} 是物种 i 在给定地点 j 中的占比; r 为地点数。

重要值是反映植物群落多样性较为常用的指标(张美文等,2013),以综合数值来表示某种植物

在群落中的地位和作用,公式为:重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3。式中,相对密度是样地内某一物种的个体数与全部物种个体数的比;相对频度是样地内某一种的频度与全部种的频度之和的比;相对盖度是样地内某一种的盖度与全部种的盖度之和的比。

2 结果

2.1 外来植物组成

2.1.1 物种组成 经过野外调查和文献资料的整理分析得到,三峡水库消落带外来植物共有 66 种,隶属于 22 个科 50 属(表 1)。其中,菊科 Asteraceae、苋科 Amaranthaceae、豆科 Fabaceae 和茄科 Solanaceae 这 4 科植物是三峡水库消落带外来种的优势科,共有 40 种,占总种数的 60.6%。而菊科的数目最多,达到 21 种,占总种数的 31.8%;其次为苋科,有 7 种,占总种数的 10.6%;豆科和茄科均有 6 种,分别各占总种数的 9.1%;大戟科 Euphorbiaceae、伞形科 Apiaceae 和玄参科 Scrophulariaceae 均有 3 种;禾本科 Poaceae 和旋花科 Convolvulaceae 各有 2 种;其余 13 科外来植物都只有 1 种,共占比 19.7%。由此可见,三峡水库消落带外来植物存在明显的优势科现象。从属的结构组成来看,只有苋科的苋属 *Amaranthus* 所包含物种数最多,共 6 种,明显高于其他属,但也只占总种数的 9.1%,而剩余的 49 个植物属包含植物都在 3 种及以下,其中有 3 种外来植物的属有 2 个,有 2 种外来植物的属有 7 个,只有 1 种外来植物的属有 40 个。因此,在属这一级的分类组成上,外来植物普遍分布较为分散,不存在明显的优势属现象。

2.1.2 物种来源及引入途径 由图 2A 可以看出,三峡水库消落带外来植物的原产地可分为美洲、欧洲、亚洲、非洲及多重来源。其中外来植物原产于美洲的有 44 种,占总数的 66.7%,尤其是南美洲地区,如苏门白酒草 *Erigeron sumatrensis* Retz.、假臭草 *Praxelis clematidea* Cassini;来自于欧洲的外来植物有 10 种,占比达到 15.2%,如苦苣菜 *Sonchus oleraceus* L.和野胡萝卜 *Daucus carota* L.;来源于亚洲的有 8 种,占比 12.1%,其中来自于印度地区的居多,如苘麻 *Abutilon theophrasti* Medicus 和洋金花 *Datura metel* L.;来源于非洲的有 3 种,占比 4.5%,如蓖麻 *Ricinus communis* L.;有多重来源的外来植物只有 1 种,原产地分布于欧洲及西亚的豆瓣菜 *Nasturtium officinale* R. Br.(何家庆,2011)。

表 1 三峡水库消落带外来植物编目

Table 1 The catalogue of exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

科名 Family	属名 Genus	物种名 Species name	入侵种 Invasive species	入侵等级 Invasion level
菊科 Asteraceae	泽兰属 <i>Eupatorium</i>	破坏草 * <i>Ageratina adenophora</i>	是 Yes	1
	藿香蓟属 <i>Ageratum</i>	藿香蓟 * <i>Ageratum conyzoides</i>	是 Yes	1
	豚草属 <i>Ambrosia</i>	豚草 * <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	是 Yes	1
	鬼针草属 <i>Bidens</i>	大狼把草 * <i>Bidens frondosa</i>	是 Yes	1
	鬼针草属 <i>Bidens</i>	鬼针草 * <i>Bidens pilosa</i>	是 Yes	1
	秋英属 <i>Cosmos</i>	黄秋英 <i>Cosmos sulphureus</i>	是 Yes	4
	野茼蒿属 <i>Crassocephalum</i>	野茼蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	是 Yes	2
	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	一年蓬 * <i>Erigeron annuus</i>	是 Yes	1
	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	香丝草 <i>Erigeron bonariensis</i>	是 Yes	2
	飞蓬属 <i>Erigeron</i>	小蓬草 * <i>Erigeron canadensis</i>	是 Yes	1
	白酒草属 <i>Eschenbachia</i>	苏门白酒草 * <i>Erigeron sumatrensis</i>	是 Yes	1
	黄顶菊属 <i>Flaveria</i>	黄顶菊 * <i>Flaveria bidentis</i>	是 Yes	1
	牛膝菊属 <i>Galinsoga</i>	牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i>	是 Yes	2
	向日葵属 <i>Helianthus</i>	菊芋 <i>Helianthus tuberosus</i>	否 No	6
	假泽兰属 <i>Mikania</i>	微甘菊 * <i>Mikania micrantha</i>	是 Yes	1
	银胶菊属 <i>Parthenium</i>	银胶菊 * <i>Parthenium hysterophorus</i>	是 Yes	1
	假臭草属 <i>Praxelis</i>	假臭草 * <i>Praxelis clematidea</i>	是 Yes	1
	千里光属 <i>Senecio</i>	欧洲千里光 <i>Senecio vulgaris</i>	是 Yes	4
	一枝黄花属 <i>Solidago</i>	加拿大一枝黄花 * <i>Solidago canadensis</i>	是 Yes	1
	苦苣菜属 <i>Sonchus</i>	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	是 Yes	4
苋科 Amaranthaceae	联毛紫菀属 <i>Symphytotrichum</i>	钻叶紫菀 * <i>Symphytotrichum subulatum</i>	是 Yes	1
	莲子草属 <i>Alternanthera</i>	喜旱莲子草 * <i>Alternanthera philoxeroides</i>	是 Yes	1
	苋属 <i>Amaranthus</i>	凹头苋 <i>Amaranthus blitum</i>	是 Yes	2
	苋属 <i>Amaranthus</i>	老鸦谷 <i>Amaranthus cruentus</i>	是 Yes	3
	苋属 <i>Amaranthus</i>	绿穗苋 <i>Amaranthus hybridus</i>	是 Yes	2
	苋属 <i>Amaranthus</i>	反枝苋 * <i>Amaranthus retroflexus</i>	是 Yes	1
	苋属 <i>Amaranthus</i>	刺苋 * <i>Amaranthus spinosus</i>	是 Yes	1
豆科 Fabaceae	苋属 <i>Amaranthus</i>	苋 <i>Amaranthus tricolor</i>	是 Yes	4
	苜蓿属 <i>Medicago</i>	南苜蓿 <i>Medicago polymorpha</i>	是 Yes	4
	苜蓿属 <i>Medicago</i>	紫苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	是 Yes	4
	草木樨属 <i>Melilotus</i>	印度草木樨 <i>Melilotus indicus</i>	否 No	5
	草木樨属 <i>Melilotus</i>	草木樨 <i>Melilotus officinalis</i>	是 Yes	4
	刺槐属 <i>Robinia</i>	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	是 Yes	4
茄科 Solanaceae	车轴草属 <i>Trifolium</i>	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	是 Yes	2
	曼陀罗属 <i>Datura</i>	毛曼陀罗 <i>Datura innoxia</i>	是 Yes	2
	曼陀罗属 <i>Datura</i>	洋金花 <i>Datura metel</i>	是 Yes	4
	假酸浆属 <i>Nicandra</i>	假酸浆 <i>Nicandra physalodes</i>	是 Yes	3
	酸浆属 <i>Alkekengi</i>	苦蕒 <i>Physalis angulata</i>	是 Yes	4
	茄属 <i>Solanum</i>	喀西茄 <i>Solanum myriacanthum</i>	是 Yes	2
	茄属 <i>Solanum</i>	珊瑚樱 <i>Solanum pseudocapsicum</i>	否 No	5
玄参科 Scrophulariaceae	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	直立婆婆纳 <i>Veronica arvensis</i>	是 Yes	4
	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	阿拉伯婆婆纳 <i>Veronica persica</i>	是 Yes	2
	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	婆婆纳 <i>Veronica polita</i>	是 Yes	4
伞形科 Apiaceae	芫荽属 <i>Coriandrum</i>	芫荽 <i>Coriandrum sativum</i>	否 No	6
	细叶旱芹属 <i>Cyclospermum</i>	细叶旱芹 <i>Cyclospermum leptophyllum</i>	是 Yes	4
	胡萝卜属 <i>Daucus</i>	野胡萝卜 <i>Daucus carota</i>	是 Yes	2
大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	是 Yes	2
	大戟属 <i>Euphorbia</i>	斑地锦 <i>Euphorbia maculata</i>	是 Yes	4
	蓖麻属 <i>Ricinus</i>	蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	是 Yes	2
禾本科 Poaceae	燕麦属 <i>Avena</i>	野燕麦 * <i>Avena fatua</i>	是 Yes	2
	雀稗属 <i>Paspalum</i>	双穗雀稗 <i>Paspalum distichum</i>	是 Yes	3
旋花科 Convolvulaceae	虎掌藤属 <i>Ipomoea</i>	牵牛 <i>Ipomoea nil</i>	是 Yes	2
	虎掌藤属 <i>Ipomoea</i>	圆叶牵牛 * <i>Ipomoea purpurea</i>	是 Yes	1
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草属 <i>Oxalis</i>	红花酢浆草 <i>Oxalis corymbosa</i>	是 Yes	4

续表 1

科名 Family	属名 Genus	物种名 Species name	入侵种 Invasive species	入侵等级 Invasion level
雨久花科 Pontederiaceae	凤眼莲属 <i>Eichhornia</i>	凤眼蓝 * <i>Eichhornia crassipes</i>	是 Yes	1
十字花科 Brassicaceae	豆瓣菜属 <i>Nasturtium</i>	豆瓣菜 <i>Nasturtium officinale</i>	是 Yes	4
商陆科 Phytolaccaceae	商陆属 <i>Phytolacca</i>	垂序商陆 * <i>Phytolacca americana</i>	是 Yes	1
莎草科 Cyperaceae	莎草属 <i>Cyperus</i>	风车草 <i>Cyperus involucratus</i>	否 No	5
牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>	野老鹳草 <i>Geranium carolinianum</i>	是 Yes	2
马齿苋科 Portulacaceae	土人参属 <i>Talinum</i>	土人参 <i>Talinum paniculatum</i>	是 Yes	4
马鞭草科 Verbenaceae	马缨丹属 <i>Lantana</i>	马缨丹 * <i>Lantana camara</i>	是 Yes	1
落葵科 Basellaceae	落葵薯属 <i>Anredera</i>	落葵薯 * <i>Anredera cordifolia</i>	是 Yes	1
藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	土荆芥 * <i>Dysphania ambrosioides</i>	是 Yes	1
锦葵科 Malvaceae	苘麻属 <i>Abutilon</i>	苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>	是 Yes	3
唇形科 Lamiaceae	罗勒属 <i>Ocimum</i>	罗勒 <i>Ocimum basilicum</i>	否 No	5
柏科 Cupressaceae	落羽杉属 <i>Taxodium</i>	落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	否 No	5

表中带 * 植物属于目前公布的 4 批中国外来入侵物种名单。
The plants with * in the table belong to the four lists of alien invasive species in China.

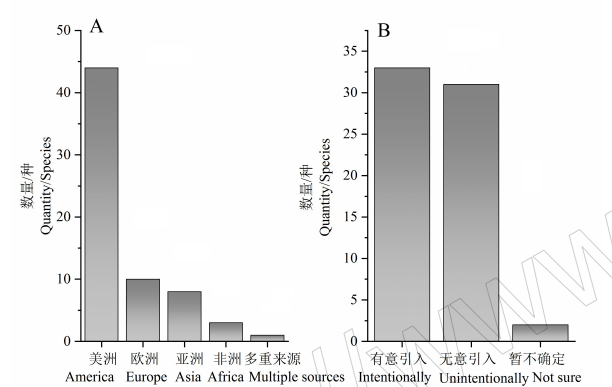


图 2 三峡水库消落带外来植物原产地 (A) 及引入途径 (B)
Fig.2 Origin and introduction way of exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

根据是否有人为主动因素的参与,将三峡水库消落带外来植物的引入途径分为无意引入和有意引入 2 种方式,另外将自然扩散的方式列为无意引入中。由图 2B 可知,在三峡水库消落带的 66 种外来植物中,有 33 种外来植物属于有意引入,大多是作为牧草、药物、观赏植物或农产品人为引进,比如紫苜蓿 *Medicago sativa* L.、喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. 等作为牧草饲料引进,垂序商陆 *Phytolacca americana* L. 作为药用植物引进。有 31 种外来植物都属于无意引入,其中包括一些通过自然扩散方式引入的植物,如鬼针草 *Bidens pilosa* L. 通过附着于动物皮毛或人类活动无意携带引入,钻叶紫菀 *Symphytotrichum subulatum* (Michx.) G. L. Nesom 产生大量具有冠毛的瘦果,随风散布进行传播,而自然扩散的破坏草种子产量大且细小有毛,可随风飘散。另有 2 种外来植物假

酸浆 *Nicandra physalodes* (L.) Gaertner 和老鸦谷 *Amaranthus cruentus* Linnaeus, 引入途径暂时不详。

2.1.3 植物生活型 由图 3 可以看出,在三峡水库消落带的 66 种外来植物中,有 60 种草本植物,占总数的 90.9%。其中一年生草本植物 33 种,其繁殖方式多为有性繁殖,种子产量较高,如小蓬草 *Erigeron canadensis* L.、大狼把草 *Bidens frondosa* L. 和香丝草 *Erigeron bonariensis* L. 等,在消落带的分布也较广;一年生或两年生草本植物有 9 种;一年生或多年生草本植物有 3 种;两年生草本有 1 种;多年生草本有 14 种。另有灌木 2 种,分别为珊瑚樱 *Solanum pseudocapsicum* L. 和马缨丹 *Lantana camara* L.; 木质藤本有 2 种,为微甘菊 *Mikania micrantha* H. B. K. 和落葵薯 *Anredera cordifolia* (Tenore) Steenis; 乔木有 2 种,为刺槐 *Robinia pseudoacacia* L. 和落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.。在这些植物中,一般分布较广的植物种子产量较高,而一些种子产量较少的植物,如豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 和毛曼陀罗 *Datura innoxia* Mill., 分布的样方数较少,分布区域狭窄。

如图 4 所示,大多数外来植物花果期处在春、夏、秋 3 个阶段,尤其集中于 5—10 月份,外来植物花果期只处于春季和夏季的分别只有 2 和 3 种;花果期在春夏期有 6 种;跨越春、夏和秋 3 个季节的外来植物有 17 种;花果期是夏秋期的外来植物数量最多,有 34 种;花果期集中于秋季的植物只有 2 种;而花果期延伸到冬季的外来植物不多,只有 2 种,分别为假臭草和苦蕒 *Physalis angulata* L., 前者花期跨越全年,后者的花果期从夏季可延伸至秋、冬两季。

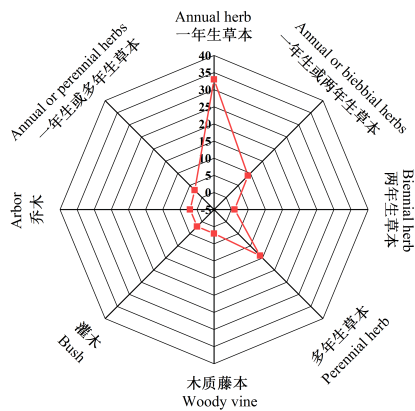


图 3 三峡水库消落带外来植物类型图

Fig.3 Type diagram of exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

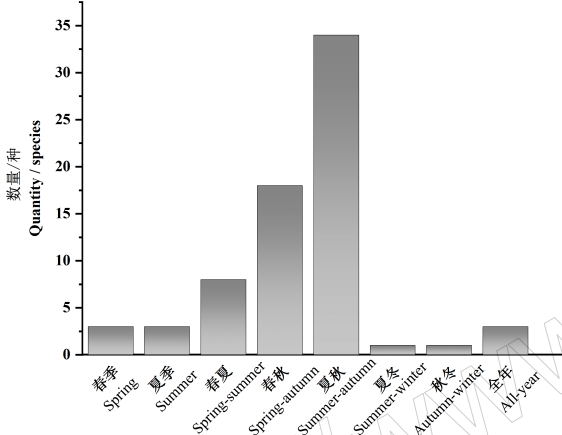


图 4 三峡水库消落带外来植物花果期季节分布图

Fig.4 Seasonal distribution diagram of exotic plants with flowers and fruit period in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

2.1.4 外来入侵植物 三峡水库消落带的 66 种外来植物中有 59 种为外来入侵种, 占有所有外来植物的 89.4%, 其中包括 23 种恶性入侵植物、15 种严重入侵植物、4 种局部入侵植物、17 种一般入侵植物; 另有 7 种为外来非入侵种, 包括 5 种有待观察种、建议排除种 2 种, 分别是芫荽 *Coriandrum sativum* L. 和菊芋 *Helianthus tuberosus* L.

在消落带这 66 种外来植物中, 共有 24 种在目前已公布的 4 批中国外来入侵物种名单上 (表 1), 其中有 23 种为恶性入侵植物, 野燕麦 *Avena fatua* L. 则被定性为严重入侵植物。该名单上的外来入侵植物都是在中国已经产生较大危害, 对生态环境和社会经济造成一定影响, 需要严加防治的物种。

2.2 外来植物的分布特征

2.2.1 主要外来植物 通过对野外样方调查数据的统计 (图 5), 在三峡水库消落带出现样方频次最高的外来植物是大狼把草, 达到 136 次; 其次是喜

旱莲子草和小蓬草, 出现样方频次分别达到了 94 和 63 次; 鬼针草为 46 次, 钻叶紫菀为 35 次, 藿香蓟 *Ageratum conyzoides* L. 和土荆芥 *Dysphania ambrosioides* (Linnaeus) Mosyakin & Clemants 分别为 28 和 27 次, 草木樨 *Melilotus officinalis* (L.) Pall. 是 24 次。另外还有苘麻、一年蓬 *Erigeron annuus* (L.) Pers.、假酸浆、豚草、细叶旱芹 *Cyclospermum leptophyllum* (Persoon) Sprague ex Britton & P. Wilson、野胡萝卜和苏门白酒草出现频次都在 5 次及以上, 其他外来植物出现频次都低于 5 次, 数量不多, 分布较少。

选取出现频次 5 次以上的外来植物进行生态位宽度统计。数值最高的外来植物是大狼把草, 达到 34.1; 其次是生态位宽度为 23.3 的喜旱莲子草; 鬼针草、小蓬草、钻叶紫菀和土荆芥数值都在 10 以上, 分别是 19.2、16.7、16.1 和 13.4; 藿香蓟、豚草、草木樨、苘麻和一年蓬的生态位宽度分别是 9.0、8.8、7.8、7.1、5.4, 其他外来植物的生态位宽度都低于 5, 分布不够广泛。

综合分析消落带外来植物出现频次和生态位宽度, 确定三峡水库消落带最主要的 6 种外来植物为大狼把草、喜旱莲子草、小蓬草、鬼针草、钻叶紫菀和土荆芥。

2.2.2 主要外来植物的分布 由图 6 可知, 在三峡水库消落带区域, 分布区县最多的是喜旱莲子草, 在调查所涉及的 22 个区县中, 共有 17 个区县样方调查中出现喜旱莲子草, 其重要值最高的区县为万州区, 其次是丰都县、忠县和长寿区; 鬼针草在自重庆市江北区顺流而下, 直至湖北省宜昌市秭归县的 16 个区县都有出现, 分布具有连续性, 重要值在库中和库首区域明显较高; 钻叶紫菀在 15 个区县内有所分布, 重要值最高的大渡口区 and 渝北区都位于重庆市主城区区域; 大狼把草在涪陵区顺流而下至夷陵区的 14 个区县有所分布, 在水库常年回水区重要值明显较高; 小蓬草在 13 个区县有所分布, 其中在库中地区的万州区和忠县, 以及重庆市主城区的重要值较高。上述 5 种外来植物都表现出明显的连通聚集特征。土荆芥在 12 个区县内有出现, 但整体分布较为零散, 重要值在位于支流消落带的开州区最高。

2.2.3 消落带主要外来植物 分析样方调查数据中外来植物的出现频次和重要值, 确定三峡水库各区县内消落带最主要的外来植物 (图 7)。其中大狼

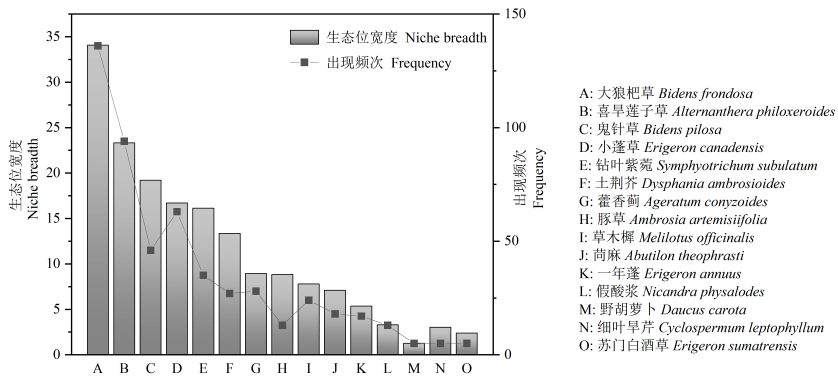


图 5 三峡库区消落带主要外来植物出现频次和生态位宽度图

Fig.5 Frequency and ecological niche breadth map of major exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

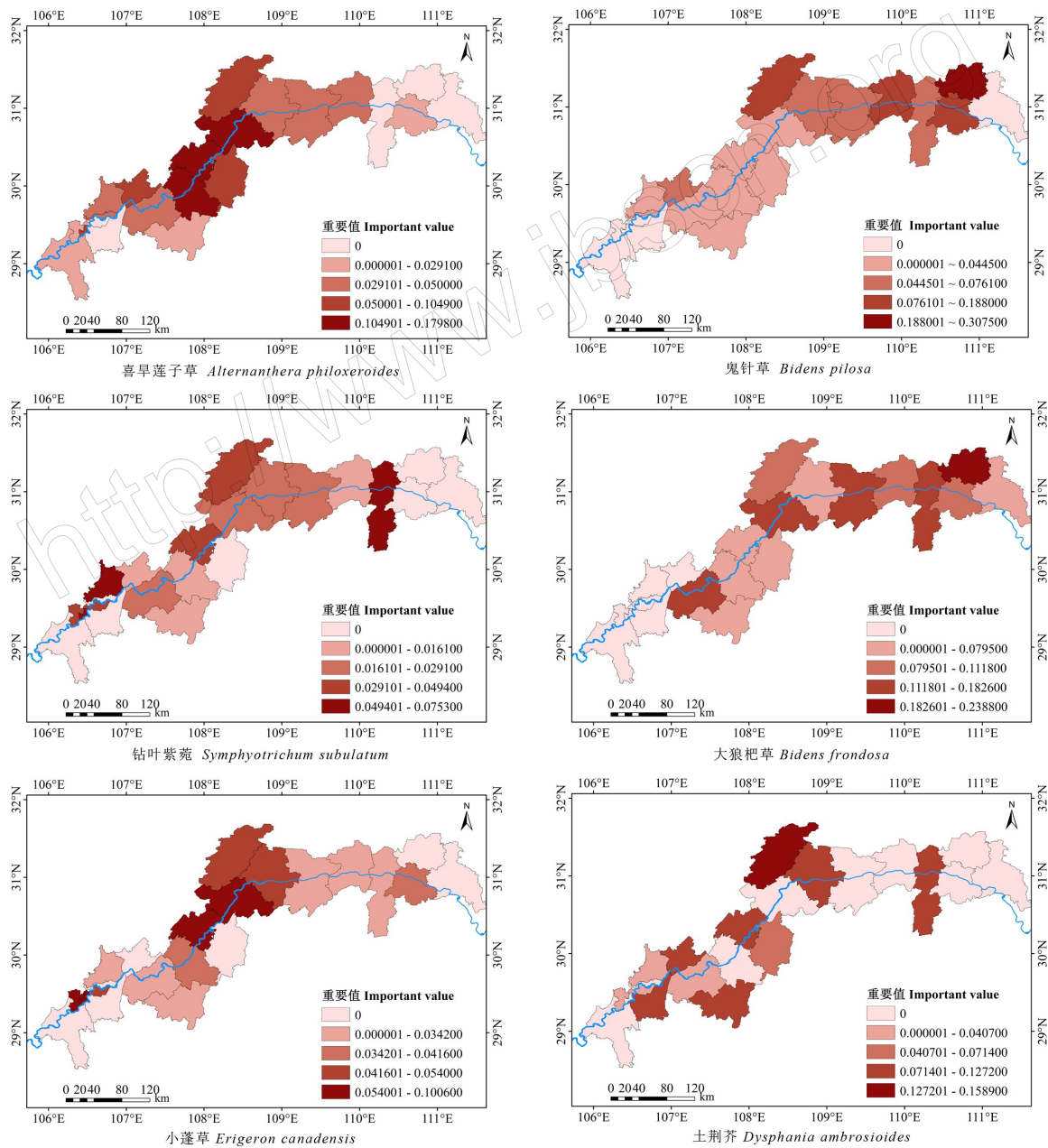


图 6 三峡水库消落带主要外来植物分布图

Fig.6 Distribution area of major exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

杷草在万州区、云阳县、奉节县、巫山县、巴东县、秭归县、兴山县和夷陵区都是最主要的外来植物,分布呈现明显的集聚特征,集中分布于水库常年回水区所处的区县,尤其是库首区域;喜旱莲子草在江津区、渝北区、江北区、长寿区、涪陵区、丰都县、石柱土家族自治县、忠县和万州区的分布广泛,这些区县多处于库尾和库中区域,受地域因素影响明显;小蓬草在九龙坡区、南岸区和渝北区是最主要的外来植物,集中分布于重庆市主城区;土荆芥则在武隆区和巴南区为最主要的外来植物,其中武隆区是长江支流消落带上的区县;另外兴山县和开州区的鬼针草分布广泛,钻叶紫菀在大渡口区是最主要的外来植物。

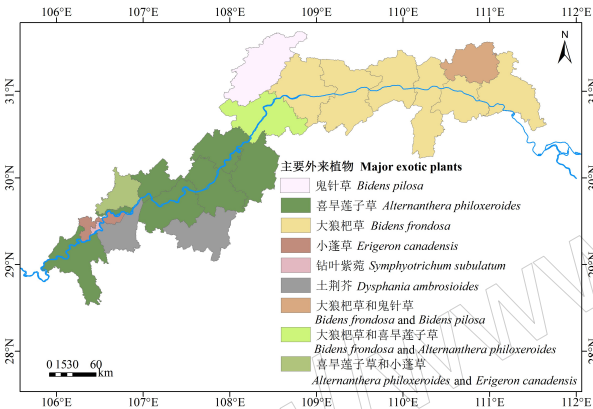


图 7 三峡库区消落带主要外来植物分布图
Fig.7 Distribution diagram of major exotic plants in the water-level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir

3 讨论

3.1 三峡水库消落带外来植物组成特征

三峡水库消落带的 66 种外来植物中,菊科、苋科、豆科和茄科是优势科,其中菊科的数目最多,达到 21 种。库区消落带分布最广泛的 6 种外来植物中,大狼把草、小蓬草、鬼针草和钻叶紫菀都是菊科。Yang *et al.* (2012) 统计调查三峡库区 145 ~ 172 m 高程内的 22 个样点,同样发现菊科是包含植物种数最多的科之一;孙鹏飞等(2020)对秭归段消落带植物进行调查,确定菊科为消落带的优势科,与本文结论有相通之处。许光耀等(2019)对中国归化植物组成进行分析,发现其中菊科数目较多;同时菊科是目前我国草地入侵植物种类最多的科(曹婧等,2020),其分布广泛,用途较广,在世界各地多作为观赏类植物,经人为引进后多发生逸生,在入侵地区大面积蔓延扩散。由于大多数菊科入侵植物为一年生植物,其种子产量高且重量轻,具

有特殊的附属结构,如冠毛和刺,这一特性导致菊科植物在三峡库区容易随风、水等自然条件迅速传播扩散。消落带周期性的水淹胁迫限制了大多数植物的生长,造成了部分生态位的空缺,同时也为大多生长发育迅速、适应性强、繁殖快(罗欢等,2019)、能在较短的时间内完成整个生活史的菊科植物提供了入侵契机和生存空间。

三峡水库消落带的外来植物中有意引入的物种较多,通常作为观赏植物、牧草等有意引入。无意引入和自然引入的物种一般是其种子随风、水流自然扩散,或者由于人类活动如旅游、运输等方式传入。三峡水库蓄水建坝之后,水流速度减缓,库区人类频繁的日常活动、船运航行以及工厂企业的生活排污,都为外来物种的进入提供了条件。三峡水库消落带外来植物主要来源于美洲,这个结论与董东平和叶永忠(2007)、芮振宇等(2020)、宋兴江等(2021)、吴雪慧等(2021)、王宜凡和贺俊英(2021)分别对河南省、安徽省、陕西省、江西省和内蒙古自治区外来植物的研究相近,美洲大陆与中国所在的欧亚大陆存在明显的地理隔离,而且中国与北美洲的气候环境相近,大量外来植物登陆中国后能够适宜生存并快速繁殖。

三峡库区在 10 月份进行蓄水,保持 175 m 的水位直到 12 月份,该阶段为长江上游流域的枯水期。而 5—9 月则为汛期,三峡库区在此阶段进行放水,保持水位在 145 m。三峡库区消落带长达半年的水淹和季节性的水位波动,使库区消落带的物种组成以较能适应苛刻环境的一年生和二年生草本植物为主。与王强等(2011)、张爱英等(2016)、郭燕等(2019)对三峡库区消落带植物的研究结果基本符合。刘维曄等(2011)在消落带调查发现一年生草本植物占比 45.46%,而柯智溢等(2020)认为在消落带 145~165 m 以一年生草本为主,在 165 ~ 175 m 多年生草本为优势种。

三峡水库消落带大多数植物花果期处于夏秋季节,集中 5—10 月,此阶段三峡水库水位较低(145~156 m),只有一少部分外来入侵植物花果期在蓄水期,即 10 月底至 12 月份,此阶段水位较高,如野茼蒿,其花果期为 7—11 月。所以外来植物在三峡水库消落带的生长繁殖受到水文波动的显著影响,具有部分筛选的作用:当植物花果期处于水库水位较低的月份,较能适应生存,在此时间段尽

量完成整个生活史;花果期处于水位上涨时期的植物,其生长繁殖就受到了严重的限制。

3.2 三峡水库消落带外来植物分布特征

三峡水库消落带外来植物在涪陵区至秭归县这一段区域分布较多,该区域属于库区的常年回水区,外来植物在该区域的分布,在数量和种类上都比变动回水区有明显的增加。外来植物进入消落带后能够适应生存,受到生境尤其是水文条件的制约,而水库常年回水区和变动回水区的地域差异,对外来植物的分布产生了一定影响。常年回水区和变动回水区的水文变化具有较大差异,常年回水区基本保持水库的形态,水较深,流速缓慢,具备水库蓄水和天然航道通行的功能,而变动回水区在水库和天然河流的状态之间进行年内切换,水流和泥沙运动复杂(江小青和孔繁忠,2020)。在最近的相关研究中,黄金夏等(2021)认为在涪陵下游区域(即常年回水区域),水位的剧烈变化导致入侵植物分布及物种数明显增多。相比于变动回水区,常年回水区水位变动剧烈,却受人为调控而周期性涨落,因此外来植物在水位变动期间易于进入消落带,并能在之后相对稳定的环境进行生长繁殖。同时常年回水区域具备良好的通航条件,而航运和贸易可以促进外来植物的引入(Xiong *et al.*, 2018),三峡水库通航为外来植物进入消落带扩散传播提供了一定条件,而航运更加发达的常年回水区也可能存在更多的外来植物、更加严重的入侵态势。

三峡水库消落带分布最为广泛的6种外来植物是大狼把草、喜旱莲子草、鬼针草、钻叶紫菀、小蓬草和土荆芥,都属于恶性入侵植物,会对当地生态环境造成较大的影响和破坏。

消落带66种外来植物中,有59种已确定为外来入侵种,会对消落带环境产生明显或暂时不明显的威胁。如喜旱莲子草,偏湿生和富营养化的生境,尤其是水陆交界区域(潘晓云等,2007),在消落带适应力强,生长繁殖快速;鬼针草,生长繁殖迅速,争夺生境资源和空间,影响生态多样性;同属于恶性入侵种的加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L.,虽然在消落带分布不多,影响暂时不明显,但对生境会产生较大威胁,仍需要进行防治。

4 不足与建议

本研究于2019—2021年对三峡水库消落带的外来植物进行了较为全面、持续的野外调查,但受

限于调查时间和频次,可能仍有外来植物尚未录入。对三峡水库消落带外来植物分布特征分析也只着重描述空间上的区县分布,对外来植物在不同高程、不同时期的分布未有论述,也未能更加详细分析外来植物在干、支流和南北岸的分布特征。关于外来植物在常年回水区分布较多、入侵态势较为严重的现象,未能对在不同水文波动下外来植物的入侵机制进行更深层次分析。以上问题和内容,都需要在之后研究中通过更加细致、深层次的工作进行完善和解决。

消落带作为陆地生态系统和水体生态系统的交错带,外来入侵植物可能直接影响消落带的缓冲、过渡等功能,该区域的外来植物管控严重影响三峡水库整体的生态安全。对于现已呈入侵态势的物种,应结合消落带管理方法和消落带植物群落特征建立防治机制,积极采用物理防治、生物防治和生态防治的相关措施;对于暂无明显危害的外来物种也应保持警惕,结合长期观测开展消落带外来植物适应及扩散机制研究。在进行消落带景观营造和生态绿化时,应因地制宜利用本地植物,对于外来植物谨慎引种,建立生物入侵的风险评价体系,提高公众的生物入侵和生态安全意识,加强外来植物对本地生态系统的影响及其扩散机制研究。

参考文献

曹婧, 徐晗, 潘绪斌, 戎郁萍, 2020. 中国草地外来入侵植物现状研究. 草地学报, 28(1): 1–11.

董东平, 叶永忠, 2007. 河南外来入侵植物区系成分与成灾机制. 河南科学, 25(5): 765–769.

郭燕, 杨邵, 沈雅飞, 肖文发, 程瑞梅, 2019. 三峡水库消落带现存植物自然分布特征与群落物种多样性研究. 生态学报, 39(12): 4255–4265.

何家庆, 2011. 中国外来植物. 上海: 上海科学技术出版社.

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.

江小青, 孔繁忠, 2020. 三峡库区库岸稳定与岸线变化趋势分析. 长江技术经济, 4(2): 5–11.

柯智溢, 王琴, 沈秋月, 谢梦婷, 肖衡林, 刘瑛, 2020. 三峡水库忠县至秭归县段消落带植被群落特征研究. 长江流域资源与环境, 29(9): 1975–1985.

李叶, 林培群, 余雪标, 郑勇奇, 张川红, 2010. 外来植物入侵研究. 广东农业科学, 37(5): 156–159.

- 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋, 2013. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. *生态学报*, 33(1): 168-178.
- 刘维璋, 杨帆, 王杰, 王勇, 2011. 三峡水库干流和库湾消落区植被物种动态分布研究. *植物科学学报*, 29(3): 296-306.
- 陆楠, 2014. 三峡库区外来植物特征及其入侵风险. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学.
- 罗欢, 覃丽婷, 刘可丹, 和太平, 2019. 南宁市园林绿地系统外来入侵植物物种调查与分析. *杂草学报*, 37(4): 31-36.
- 马金双, 李慧茹, 2018. 中国外来入侵植物名录. 北京: 高等教育出版社.
- 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯, 2015. 三峡库区生态脆弱性评价. *生态学报*, 35(21): 7117-7129.
- 潘晓云, 耿宇鹏, ALEJANDRO S, 张文驹, 李博, 陈家宽, 2007. 入侵植物喜旱莲子草: 生物学、生态学及管理. *植物分类学报*, 45(6): 884-900.
- 芮振宇, 钟耀华, 刘姚, 张震, 2020. 安徽省外来植物入侵状况分析. *生物安全学报*, 29(1): 59-68.
- 宋兴江, 张文刚, 陈晓艳, 刘芮伶, 姚鑫, 马婧昊, 王佳宁, 史岩, 冉俊杰, 安玉霞, 刘刚, 2021. 陕西省外来植物组成与分布现状. *生态学杂志*, 40(12): 3800-3809.
- 孙鹏飞, 沈雅飞, 王丽君, 杨邵, 郭燕, 肖文发, 程瑞梅, 2020. 三峡库区秭归段水位消落带草本植物多样性分析. *林业科学研究*, 33(6): 96-104.
- 童笑笑, 2017. 三峡库区澎溪河消落带植物群落空间格局及生境影响分析. 硕士学位论文. 重庆: 中国科学院大学 (中国科学院重庆绿色智能技术研究院).
- 万方浩, 刘全儒, 谢明, 2012. 生物入侵: 中国外来入侵植物图鉴. 北京: 科学出版社.
- 王强, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 陈忠礼, 李波, 2011. 三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响. *自然资源学报*, 26(10): 1680-1693.
- 王宜凡, 贺俊英, 2021. 内蒙古外来入侵植物种类调查及相关分析. *生物安全学报*, 30(4): 256-262.
- 吴雪惠, 高丽琴, 毛丽云, 姜铁涵, 杨光耀, 唐明, 2021. 江西省外来植物现状. *生物安全学报*, 30(4): 250-255.
- 徐建霞, 彭刚志, 王建柱, 2015. 三峡库区香溪河消落带植被多样性及分布格局研究. *长江流域资源与环境*, 24(8): 1345-1350.
- 许光耀, 李洪远, 莫训强, 孟伟庆, 2019. 中国归化植物组成特征及其时空分布格局分析. *植物生态学报*, 43(7): 601-610.
- 张爱英, 熊高明, 樊大勇, 谢宗强, 2016. 三峡水库运行对淹没区及消落带植物多样性的影响. *生态学杂志*, 35(9): 2505-2518.
- 张美文, 李波, 王勇, 蒋道松, 黄璜, 侯志勇, 2013. 洞庭湖区退田还湖区域草本植物群落多样性特征. *应用与环境生物学报*, 19(3): 434-443.
- 中国科学院中国植物志编辑委员会, 2004. 中国植物志. 北京: 科学出版社.
- CHEN H, WU Y Y, YUAN X Z, GAO Y, WU N, ZHU D, 2009. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 114: 18301.
- CHEN Z, SCHMIDT B, SCHFFER A, 2016. Uptake and decomposition of the herbicide propanil in the plant *Bidens pilosa* L. dominating in the Yangtze Three Gorges Reservoir (TGR), China. *Environmental Science & Pollution Research*, 24(12): 1-13.
- HOOD W G, NAIMAN R J, 2000. Vulnerability of riparian zones to invasion by exotic vascular plants. *Plant Ecology*, 148: 105-114.
- LEVINS R, 1968. *Evolution in changing environments: some theoretical explorations*. Princeton: Princeton University Press.
- STONE R, 2011. The legacy of the Three Gorges Dam. *Science*, 333: 817-817.
- WANG Y F, LIU Y, MA M H, 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.
- XIONG W, WANG H, WANG Q, TANG J F, BOWLER P A, XIE D, PAN L, WANG Z X, 2018. Non-native species in the three gorges dam reservoir: status and risks. *BioInvasions Records*, 7(2): 153-158.
- YAN Q Y, BI Y L, DENG Y, HE Z L, WU L Y, VAN NOSTRAND J D, SHI Z, LI J J, WANG X, HU Z Y, YU Y H, ZHOU J Z, 2015. Impacts of the Three Gorges Dam on microbial structure and potential function. *Scientific Reports*, 5: 8605.
- YANG F, LIU W W, WANG J, LIAO L, WANG Y, 2012. Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges Project: clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone. *Acta Ecologica Sinica*, 32(2): 89-98.
- ZHANG Q F, LOU Z P, 2011. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China. *Environmental Science & Policy*, 14: 1132-1138.