

网络出版时间:2014-03-26 17:09

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.033

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.033.html

环境因素对入侵植物控制效率影响的研究综述

高 扬¹,唐 龙²,梁宗锁³,张跃进³,李 鹏¹,李占斌¹

(1 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;2 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049;

3 西北农林科技大学 生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 在对入侵植物进行控制与管理时,环境因素对控制效率有一定的影响。文章介绍了生境特征影响入侵植物控制以及生态系统恢复效率的方式与机制;同时,论述了入侵区域社会、经济发展差异等人文环境对入侵植物控制效率的影响。并以入侵植物互花米草和土著种芦苇为例,阐述了控制效率与自然环境的关系。

[关键词] 入侵植物;杂草;管理;生境依赖性

[中图分类号] S451

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)04-0165-06

Research progress on control of invasive plants under different environmental conditions

GAO Yang¹,TANG Long²,LIANG Zong-suo³,
ZHANG Yue-jin³,LI Peng¹,LI Zhan-bin¹

(1 Institution of Water Resources and Hydro-electric Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an,Shaanxi 710048,China;

2 School of Human Settlements and Civil Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an,Shaanxi 710049,China;

3 School of Life Sciences,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: Environmental conditions affect the control efficiency of invasive plants. This study introduced the mechanism how environmental conditions affect the control of invasive plants and restoration of ecosystem. The effects of culture environmental conditions including differences in social and economic development on control efficiency of invasive plants were discussed as well. At last, invasive *Spartina alterniflora* and restored native *Phragmites australis* were taken as examples to elaborate the relationship between control efficiency and natural environments.

Key words: invasive plants; weeds; management; habitat-dependence

干扰理论指出,干扰与生境异质性间的相互作用使得植被格局产生空间分化^[1]。这一原理说明入侵植物的控制效率存在生境依赖性,即同一控制处理的效率有可能沿着某些环境因子的梯度而变化。一方面,入侵植物凭借其宽阔的生态幅广泛分布于

异质性程度很高的生态系统中,甚至可以分布于不同类型的生境中^[2-4];而异质性较高的生境则可通过多样化的方式影响控制过程中的某些重要环节,进而导致相同的控制体系对不同生境中的同一入侵植物的治理效率有所差异。例如喜旱莲子草(*Alter-*

[收稿日期] 2013-02-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31100301);环境工程国家重点学科培育学科项目(106-5X1204);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20126118120014);陕西省科技计划项目(2013kw19-01);陕西省自然科学基金项目(2012JQ7025);中央高校基本科研业务费专项(XJJ2011065);西安理工大学科学研究计划项目(106-211112);西安理工大学教师博士科研启动经费项目(106-211202)

[作者简介] 高 扬(1976—),女,陕西西安人,讲师,博士,主要从事环境生态学研究。E-mail:gaoyang@xaut.edu.cn

[通信作者] 唐 龙(1976—),男,陕西扶风人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事植物生态学研究。

E-mail:tanglong@mail.xjtu.edu.cn

nanthera philoxeroides M. Griseb)可入侵陆生与水生生境,而其天敌 *Arcola malloi* 能很好地控制水生生境中的喜旱莲子草种群,却无法控制陆生和湿生生境中的喜旱莲子草^[4]。采用刈割方法治理扁穗冰草(*Agropyron cristatum* L. Gaertn.)时,其种子产量、萌发率以及幼苗成活率均随着土壤含水量的增加而提高,导致刈割法在水分条件适宜的区域难以对扁穗冰草达到较高的控制效率^[5]。这些研究暗示,在控制入侵植物时,需要根据生境特征选择、构建和实施控制措施。另一方面,入侵植物控制过程不可避免会受到治理区域经济、政策等社会因素的约束,因而生境异质性将通过影响治理与恢复的投入影响控制效率。

本研究综合论述了入侵植物治理效率、土著植被恢复效率以及控制资源分配与供给的生境依赖性,并以治理入侵植物互花米草和恢复土著植物芦苇的研究为例,说明利用控制效率生境依赖性提高入侵植物控制效果的途径,以期能引起研究者与自然资源管理人员对入侵植物控制过程中生境特征的重视,进而构建生境专一性(habitat-specific)控制体系,提高入侵植物的控制效率,降低成本。

1 入侵植物控制效率生境依赖性的方式与机制

1.1 生境特征对入侵植物控制效率的影响

1.1.1 对治理措施技术因子的影响 入侵植物治理常用的措施有物理法、化学法、生物控制法以及综合控制法 4 种^[6]。从治理措施的角度分析,构成治理措施的 6 个技术因子包括面积、程度、频次、时令、类型和强度^[6],它们都有可能受到生境因子的调节,进而使治理效率沿生境梯度变化。

物理法的强度因子较易受到生境的影响。打捞、砍伐、拔除以及刈割等物理方法的强度是指在一定时间内,去除某一范围中入侵植物需要投入的劳动力或机械力等,生境特征对其的调节体现在增加或减少劳动难度,从而使同样强度的治理体系的效率随生境的变化而变化。例如,在美洲东部松软的潮滩,只有将设备特殊化才适合^[7-8],增加了互花米草和大米草等治理工作的强度,降低了治理的“性价比”;这种现象同样出现在英国,有关人员使用轻型履带车将大米草草皮碾压并埋于土层之下,在土壤硬度较大的高潮区取得了良好的效果;但在低潮区,由于基质太过松软,大型机械的工作效率明显降低^[7-8]。火烧对低潮位互花米草的治理效率远小于

高潮位,原因是低潮位互花米草斑块的地表有积水或土壤水分过饱和,这些水分大大降低了火烧过程中地表及浅层土壤的温度,即降低了火烧的强度,进而保护了互花米草的地下芽,导致治理效率下降^[7-8]。

化学措施中,除草剂的浓度可被视为强度,其易受到生境因素的调节。例如潮汐、降雨以及水流都会降低除草剂浓度。另外,挥发性农药在植物体表面的滞留时间也会受到光照强度、风速等生境因子的影响,这些因子通过调节进入植物体内除草剂的剂量而影响治理效率。

生物控制体系中对生境变化最敏感的技术因子是天敌种类,其次是天敌种群大小即生物控制法的强度。作为生命体,天敌生物只有在生境筛选中存活下来,才有可能成为治理的生物因素,且会持续受到气候以及资源等生境条件的影响,其种群能否发展至可控制入侵植物的水平则取决于天敌生物对生境的适合度大小。例如,与喜旱莲子草分布范围相比,其某些天敌昆虫正常生长和繁殖所需的气候条件比较窄,致使生物控制因素在这些昆虫自身生态幅以外的区域难以起到治理作用^[4]。即使在天敌生物适宜的生态幅内,由于环境的变化,某些区域的治理效果也不理想;例如,在用双金叶甲(*Chrysolina quadrigemina*)治理入侵杂草贯叶连翘(*Hypericum perforatum*)的研究中发现,发生林火的区域不仅有利于贯叶连翘的种群发展,而且可限制双金叶甲的存活和扩散^[9],导致火灾发生区域的治理效率降低。

入侵植物综合控制法(Integrated invasive plant management, IIPM)在恶性杂草的清除工作中应用越来越广泛。目前对此类方法的研究不多,尚缺乏生境特征影响其控制效率的研究资料。与采用单一措施相比,综合控制法受生境影响的方式多样,即生境可能会通过影响一项综合工程中某项措施的效率,进而影响到整体的效率,同时也不排除生境对各项措施存在着协同或抑制效应。

需要补充的是,环境承受能力的差异也会影响入侵植物的治理效率。一方面,一些控制措施没有选择性,包括火烧、水淹及广谱除草剂等等,将对实施区域的许多非治理目标植被造成伤害,因此这些方法在一些具有特有、稀有物种的区域应谨慎使用;另一方面,在一些入侵区域的生态、人文价值较高,例如自然保护区、国家公园、古迹等区域内,禁止实施具有污染和潜在危险性的控制措施。因此,尽管有些方法治理效率较高、成本较低,但在某些区域并

不能使用,进而影响了该区域入侵植物的治理效率。

1.1.2 对入侵植物抵抗能力和再生长能力的影响

入侵植物的某些生理过程、组织结构会随着生境的变化而变化,因此不同生境中的同一入侵植物的耐逆能力有所不同,导致治理效率随环境梯度而发生变化。有研究证明,在适宜的条件下,一些入侵植物对天敌生物的采食作用具有很强的耐受性,增加处理的强度对这些植物几乎无影响;例如,在适宜的生境中,增大生物控制因素的种群,进而增强取食强度,都难以显著增加对入侵植物金银花(*Lonicera japonica*)和乌桕(*Sapium sebiferum* L. Roxb.)的伤害程度^[10]。另有报道称,适宜条件下,天敌生物的取食作用甚至可激发某些入侵植物的补偿生长(compensatory growth),导致控制行为反而促进了入侵植物的生长^[11]。因此只有在胁迫生境中,增加采食强度的方法才可行。Schutzenhofer等^[12]发现,只有在土壤水分含量较低的区域,食草作用对入侵植物 *Lespedeza cuneata* 的繁殖才会产生实质性阻碍。直胸跳甲(*Arcola malloi*)对陆生生境中的喜旱莲子草种群控制效率较低,其主要原因是陆生喜旱莲子草茎的木质化程度较高,导致直胸跳甲化蛹困难而无法完成生活史^[13]。由此可见,陆生喜旱莲子草依靠木质化程度较高的茎抵御了天敌化蛹,使得用直胸跳甲对喜旱莲子草的治理效率总体并不理想。另有报道称,在含水量高的区域,入侵植物白苞猩猩草(*Euphorbia heterophylla*)的蒸腾作用等生理活动旺盛,药物吸收迅速且传导较快,因而控制效率较高^[14]。

生境可以通过调节入侵植物的再生长能力影响治理效率。植物在适宜的环境中,受伤植物生理过程通畅,有充足的物质和能量供应,可保证植物恢复速度较快、恢复程度较高;而在不利生境中的植物的生理过程受阻,使得愈伤组织生长发育过程得不到必要的物质和能量,当胁迫持续时间达到一定阈值时,可引起受伤植物的死亡。例如,Watson等^[15]发现,在适宜的环境中,中国象鼻虫(食叶性)(*Cleopus japonicus*)对入侵植物大叶醉鱼草(*Buddleja davidii*)的采食作用不仅大幅度提高了该入侵植物的光利用率,而且提高了能量向叶片的分配比例,可补偿落叶对生长的负效应;而在非适宜的环境中,被采食的叶片很快就枯萎脱落。在某些情况下,有利于生长的生境将阻碍入侵植物的愈伤,从而提高控制效率。湖泊、河道及池塘是水生恶性杂草 *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms 适宜的生存环境^[16],但经打

捞处理后,淹水环境中的新生幼苗的呼吸将受到水体的抑制,导致其再生长程度降低,进而提高治理效率。

由于各种现实原因,入侵植物并不能被彻底清除、或可再次进入治理区域并定植,而治理后的生境将通过影响目标种的再次定植、扩散的能力而影响治理效率。通常情况下,干扰后的残留种群多以小型斑块的形式存在^[17],而新定植的繁殖体则以个体、小种群存在,这些繁殖体对所处生境的适宜程度将是决定其能否再次爆发的主要因素之一。且这些经过控制处理的残留植株或新定植植株的生长速度与繁殖效率可能非常高,随着时间的推移,其繁殖体极有可能再次扩散,因而即便在入侵植物治理以后仍存在再次入侵的风险^[17]。由此可见,在治理区域中需通过长期监测以便及时发现并治理新定植的入侵植物。

1.2 生境特征对土著植被恢复效率的影响

1.2.1 对土著恢复目标种适应能力的影响

生境能够改变恢复目标植物的生长表现与种群特征,进而导致不同生境中同一土著植物恢复速率与恢复程度的差异。因而,需要依据生境的特征选择适宜的土著植物种作为恢复目标种。

值得注意的是,土著植物可能因无法适应被入侵植物强烈改变过的生境而导致恢复效率较差。许多入侵植物被称为生态系统工程师,它们能够显著改变被入侵区域的生境特征^[18-19]。这极可能造成土著生物适宜生存环境的丧失,使得治理入侵种后直接引入恢复目标种的效果不佳。例如,由于根系发达,翻耕后互花米草斑块下土壤孔隙水中的铵盐以及硫化物很快达到毒害程度,相对于光滩,这类生境中的土著植物幼苗寿命一般不会超过1年^[20]。同时,已退化的环境状态还具有一定的“持续性”,即使某些土著植物能够适应而存活,但在相当长的一段时间内,其种群发展也明显受限。因此,“对已改变生境的适应能力”应是选取恢复目标种的原则之一。这一观点可以从外来植物成功入侵的理论得到支持,即入侵种通过对环境因子的修饰,使得土著物种无法快速适应新生境而在竞争中处于劣势,而改变了的环境对入侵种可能非常有利,其凭借着与环境相互作用的优势迅速占领土著生物退让出的生态位,种群不断扩大而爆发成灾^[18-23]。由此可见,许多土著植物可能并不能适应被入侵植物修饰的生境,使得恢复效率并不高。

1.2.2 对恢复群落发展轨迹的影响

就入侵植物

治理后土著植物群落的恢复而言,一方面要确保植物群落不再向入侵植物为建群种的方向发展,因而在治理目标种与恢复目标种同时存在时,生境特征要更有利于土著植物的生长;另一方面,即使入侵植物被清除,植物群落是否向期望的方向发展,在很大程度上也取决于生境特征,这是因为植物群落动态与群落所处的环境密切相关。

生境特征通过调节残留入侵植物与目标土著种的竞争关系影响土著植物群落恢复的轨迹。入侵植物与土著植物的竞争平衡取决于二者对生长条件的适应度^[24]。有学者明确指出,生境条件决定入侵植物与土著植物的竞争关系^[25]。例如,Chen 等^[26]的试验表明,当土壤盐度升高时,互花米草对海三棱藨草的竞争能力增强,导致该特有种在高盐度区域消失。这意味着,在恢复过程中,如果治理目标种有残留,则生境特征决定着恢复目标种与残留入侵植物竞争平衡的移动方向,进而决定恢复群落的发展方向,因此会在一定程度上影响恢复效率。

在入侵植物被清除的区域,生境也会影响土著植物群落的组成、结构与发展,即治理区域植物群落未来的恢复轨迹将依赖于生境特征对早期定居种间相互作用的影响,进而影响群落集合。Byers 等^[27]通过对生态系统有关生命与非生命状态的耦合模型证明:无机环境与生物有机体间的反馈可以调节生态系统的局部状态,即恢复轨迹将受到生境变化的强烈影响,生境的变化不仅会影响群落的构成,还会影响生态系统物理构造的持续性。

1.3 人文环境特征对入侵植物控制效率的影响

地区的财政投入、入侵区域的土地利用形式和入侵区域管理权责的划分是影响入侵植物控制效率的 3 个人文环境要素。

首先,入侵植物控制是一项非常昂贵的事业^[28-31],相对于经济发达地区,经济较落后的区域难以提供充足的资源进行入侵植物控制,因此同一入侵植物在不同的行政区域治理效率存在显著差异。美国每年直接或间接用于主要入侵种管理的费用高达 1 366 亿美元^[29],而中国政府仅用于打捞凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)的费用就超过 1 亿元人民币^[30]。但高昂的控制费用不是任何一个地区都能承担的,因此对于生态幅宽的入侵种而言,其种群在一些入侵区域会被控制,而在另一些地区则自然发展,进而影响了控制的总体效率。

其次,一般情况下,经济效益高的人工生态系统,其入侵植物的治理效率比较高,尤其是农田、鱼

塘以及经济林等个人资产中的入侵植物往往被业主主动清除;相反,公共绿地尤其是弃耕地、路肩以及一般的自然生态系统,例如丘陵、河道及草原等生态系统中的入侵植物被控制的强度并不高,甚至从没有被治理过^[21]。同时,生态价值高的生态系统,例如自然保护区、国家公园的入侵植物会得到较为有效的控制;而在普通生态系统中的入侵植物一般不会被受到干扰,典型的例子是,昆明政府数次大规模打捞滇池的凤眼莲,而其周边的小湖泊、河道甚至人工观赏池塘中的凤眼莲却可以年年盛开“美丽的花”^[32]。

另外,管理权责的混乱也会使有效的控制行为难以实施,导致治理效率降低。例如,对于入侵互花米草的控制而言,许多国家潮间带控制权归属混乱,通常受陆地法规和海洋环境条例的重叠影响。控制的权责难以划分,因此控制策略难以及时、有效地实施^[33];在美国的维拉帕湾(Willapa),潮间带的管理责任为联邦、州、当地政府以及土地所有人共有^[8],因此,对于该河口湿地的管理决定几乎不可能达成一致,协调各方意见也是一个耗时耗力的过程^[8],导致入侵的互花米草大面积扩散。这种现象还存在于澳大利亚塔斯马尼亚(Tasmania)的塔马(Tamar)河滨湿地^[20],以及中国的上海崇明东滩河口盐沼^[33]。崇明东滩湿地的管理权责归属多个部门,互花米草的促淤能力可使滩涂每年向海发育 100~150 m,进而使滩涂面积显著增加,因而互花米草的扩散有利于水务与国土资源部门,而互花米草的存在限制了鸟类的筑巢、觅食^[33],从而伤害了鸟类保护部门的利益。因此,各机构对于是否需要治理互花米草难以达成共识,进而延误了治理,使得互花米草入侵面积不断扩大。可见,尽早明确各权责部门的利益和职责,有利于构建有效的控制策略。

2 生境特征对互花米草控制效率影响的研究实例

为了证明生境特征是否对治理及恢复效率存在影响,笔者曾在上海崇明东滩设置了 2 条垂直于堤坝、东西走向的样带,每样带从海滩到大堤依次设置 5 个样区,每条样带上最东端的样区均设在海滩最前沿的互花米草斑块中,最西端的样区则在排除人为干扰的前提下,尽可能靠近大堤,中间 3 个样区依照互花米草斑块的分布状况排列;每样区中进行刈割与种植芦苇的处理。

研究发现,刈割法治理互花米草的效率取决于

淹水时间,时间越长,效率越高^[34-37],这是由于淹水阻碍了刈割互花米草新生苗的呼吸,达到一定阈值后,将使其新生植株窒息死亡^[21,34-40]。栽植芦苇的恢复效率取决于土壤孔隙水盐度^[21,40]。盐度越高,恢复土著植物的效率越低^[40],这是由于芦苇虽然具有一定的耐盐能力,但仍属于拒盐型植物^[41],这不仅决定了淡水是其适宜生境,同时还决定了其生长会随着盐度的增高而受到抑制。

3 结 语

生境特征可通过不同的方式与机制影响入侵植物的控制效率以及土著植物的恢复速度。因此建议在入侵植物的控制过程中,依据生境特征选择控制方法,并适当调整入侵植物控制策略,从而提高控制效率、降低控制成本。同时,恢复植物的多样性和生态系统过程将是入侵植物控制的发展趋势。研究生态系统的生境特征对植物组成的影响,将为构建恢复植物稳定的组合提供直接依据。入侵生态系统的恢复不仅包括土著植物的恢复,还包括消费者及分解者种群的恢复。阐明生境特征影响消费者与分解者种群动态的方式与机制,进而为生态系统过程的恢复提供帮助,将有利于生态系统的健康与稳定。

[参考文献]

- [1] 李 博,赵 斌,彭容豪,等.陆地生态系统生态学原理[M].北京:高等教育出版社,2005.
Li B,Zhao B,Peng R H,et al. Principles of terrestrials ecosystem ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 殷萍萍,李建东,殷 红,等.三裂叶豚草入侵对植物生物多样性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):189-194.
Yin P P,Li J D,Yin H,et al. Impacts of *Ambrosia trifida* invasion on plant biodiversity [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(4): 189-194. (in Chinese)
- [3] 朱 慧,马瑞君.入侵杂草五爪金龙有性繁育系统的初步研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(5):211-216.
Zhu H, Ma R J. Preliminary studies on breeding system of invasive weed *Ipomoea cairica* L. [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(5): 211-216. (in Chinese)
- [4] 潘晓云,耿宇鹏,Alejandro S,等.入侵植物喜旱莲子草:生物学、生态学及管理[J].植物分类学报,2007,45(6):884-900.
Pan X Y,Geng Y P,Alejandro S,et al. Invasive *Alternanthera philoxeroides*: Biology, ecology and management [J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 2007, 45(6): 884-900. (in Chinese)
- [5] Hansen M J. Evaluating management strategies and recovery of an invasive grass (*Agropyron cristatum*) using matrix population models [J]. Biological Conservation, 2007, 140(1): 91-99.
- [6] 高 扬,唐 龙,张 猛,等.依据干扰理论优化入侵植物控制的研究进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(3):57-68.
Gao Y,Tang L,Zhang M,et al. Research progress of disturbance ecology theory as a framework for control of invasive plants [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 57-68. (in Chinese)
- [7] 王 卿,安树青,马志军,等.入侵植物互花米草:生物学、生态学及管理[J].植物分类学报,2006,44(5):559-588.
Wang Q, An S Q, Ma Z J, et al. Invasive *Spartina alterniflora*: Biology, ecology and management [J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 2006, 44(5): 559-588. (in Chinese)
- [8] Hedge P, Kriwoke L K, Patten K. A review of *Spartina* management in Washington State, US [J]. Journal of Aquatic Plant Management, 2003(41): 82-90.
- [9] Swope S M. Variable effects of a generalist parasitoid on a biocontrol seed predator and its target weed [J]. Ecological Applications, 2012, 22(1): 20-34.
- [10] Robert E L. Arboricultural introductions and long-term changes for invasive woody plants in remnant urban forests [J]. Forests, 2012, 3(3): 745-763.
- [11] Lu X M. History of exposure to herbivores increases the compensatory ability of an invasive plant [J]. Biological Invasions, 2012, 14(3): 649-658.
- [12] Schutzenhofer M R, Valone T J, Knight T M. Herbivory and population dynamics of invasive and native *Lespedeza* [J]. Oecologia, 2009, 161(1): 57-66.
- [13] 马瑞燕,王 韧.不同生态型的喜旱莲子草对莲草直胸跳甲化蛹能力的影响[J].植物生态学报,2004,28(1):24-30.
Ma R Y, Wang R. Effect of morphological and physiological variations in theecotypes of alligatorweed, *Alternanthera philoxeroides* on the pupation rate of its biocontrol agent *Agasicles hygrophila* [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(1): 24-30. (in Chinese)
- [14] Zanatta J F, Procopio S O, Manica R, et al. Soil water contents and glyphosate efficacy in controlling *Euphorbia heterophylla* [J]. Planta Daninha, 2007, 25(4): 799-811.
- [15] Watson M C, Watt M S, Withers T M, et al. Potential for *Cleopop japonicus* to control the weed *Buddleja davidii* in plantation forests in New Zealand [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(1): 78-83.
- [16] 高 雷,李 博.入侵植物凤眼莲研究现状及存在的问题[J].植物生态学报,2004,28(6):735-752.
Gao L, Li B. The study of a specious invasive plant, water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): Achievements and challenges [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(6): 735-752. (in Chinese)
- [17] Siebert T, Branch G M. Influences of biological interactions on community structure within seagrass beds and sandprawn-

- dominated sandflats [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, 340(1): 11-24.
- [18] 唐 龙, 高 扬, 赵 斌, 等. 生态系统工程师: 理论与应用 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3343-3355.
Tang L, Gao Y, Zhao B, et al. Ecosystem engineers: Theory and applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3343-3355. (in Chinese)
- [19] Tang L, Gao Y, Wang C H, et al. A plant invader declines through its modification to habitats: A case study of a 16-year chronosequence of *Spartina alterniflora* invasion in a salt marsh [J]. Ecological Engineering, 2012, 49(12): 181-185.
- [20] Lambrinos J G. Managing invasive ecosystem engineers: The case of *Spartina* in pacific estuaries [M]//Kim C, James B, William W, et al. Ecosystem engineers: Plant to protists. New York: Academic Press, 2007.
- [21] 唐 龙. 刈割、淹水及芦苇替代综合控制互花米草的生态学机理研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2009.
Tang L. Control of *Spartina alterniflora* by an integrated approach of clipping, waterlogging and ecological replacement with reed: An experimental study of ecological mechanisms [D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese)
- [22] Pickett S T A, Cadenasso M L, Bartha S. Implications from the buell-small succession study for vegetation restoration [J]. Applied Vegetation Science, 2009, 4(1): 41-52.
- [23] Scott A J, Morgan J W. Recovery of soil and vegetation in semi-arid Australian old fields [J]. Journal of Arid Environments, 2012, 76(1): 61-71.
- [24] Manea A. Competitive interactions between native and invasive exotic plant species are altered under elevated carbon dioxide [J]. Oecologia, 2011, 165(3): 735-741.
- [25] McKenney J L, Cripps M G, Price W J, et al. No difference in competitive ability between invasive North American and native European *Lepidium draba* populations [J]. Plant Ecology, 2007, 193(4): 293-303.
- [26] Chen Z Y, Li B, Zhong Y, et al. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences [J]. Hydrobiologia, 2004, 528(3): 99-106.
- [27] Byers J E, Cuddington K, Jones C G, et al. Using ecosystem engineers to restore ecological systems [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(9): 493-500.
- [28] Reeder T, Hacker S. Factors contributing to the removal of a marine grass invader (*Spartina anglica*) and subsequent potential for habitat restoration [J]. Estuaries and Coasts, 2004, 27(2): 244-252.
- [29] Pimentel D, McNair S, Janecka J, et al. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 84(1): 1-20.
- [30] 鞠瑞亭, 李 慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展 [J]. 生物多样性, 2012, 20(5): 581-611.
- Ju R T, Li H, Shi Z R, et al. Progress of biological invasions research in China over the last decade [J]. Biodiversity Science, 2012, 20(5): 581-611. (in Chinese)
- [31] Daniel S, Jean-Louis M, Piero G, et al. Impacts of biological invasions: What's what and the way forward [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2012, 28(1): 58-66.
- [32] 李 博, 廖成章, 高 雷, 等. 入侵植物凤眼莲管理中的若干生态学问题 [J]. 复旦大学学报: 自然科学版, 2004, 43(2): 267-274.
Li B, Liao C Z, Gao L, et al. Strategic management of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), an invasive alien plant [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2004, 43(2): 267-274. (in Chinese)
- [33] 徐宏发, 赵云龙. 上海市崇明东滩鸟类自然保护区科学考察集 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
Xu H F, Zhao Y L. Science survey on Chongming Dongtan migration birds nature reserve of Shanghai [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [34] Tang L, Gao Y, Wang J Q, et al. Designing an effective clipping regime for controlling invasive plant *Spartina alterniflora* in an estuarine salt marsh [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 874-881.
- [35] Tang L, Gao Y, Wang C H, et al. How does tidal region and treatment timing influence the frequency of clipping invasive *Spartina alterniflora*: Implication for reducing management costs [J]. Biological Invasions, 2010, 12(3): 593-601.
- [36] Gao Y, Tang L, Wang J Q, et al. Clipping at early florescence is more efficient for controlling invasive plant *Spartina alterniflora* [J]. Ecological Research, 2009, 24(5): 1033-1041.
- [37] 高 扬. 入侵植物互花米草控制体系的优化研究 [D]. 陕西杨凌: 中国科学院水土保持研究所, 2009.
Gao Y. Optimizing control regime of invasive plant *Spartina alterniflora* [D]. Yangling, Shaanxi: Chinese Academy of Sciences Institute Water and Soil Conservation, 2009. (in Chinese)
- [38] Wang Q, Wang C H, Zhao B, et al. Effects of growing conditions on the growth of and interactions between salt marsh plants: Implications for invasibility of habitats [J]. Biological Invasions, 2006, 8(7): 1547-1560.
- [39] Engloner A I. Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*): A review [J]. Flora, 2009(204): 331-346.
- [40] Tang L, Gao Y, Wang C H, et al. Habitat heterogeneity influences restoration efficacy: Implications of a habitat-specific management regime for an invaded marsh [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013(125): 20-26.
- [41] 李双跃, 王丹丹, 杨静慧, 等. 芦苇、香蒲和荷花的耐盐性研究 [J]. 北方园艺, 2012(20): 61-63.
Li S Y, Wang D D, Yang J H, et al. Study on salt tolerance of *Phragmites australis*, *Typha latifolia* and *Nelumbo nucifera* Gaertn [J]. Northern Horticulture, 2012(20): 61-63. (in Chinese)