

DOI: 10.5846/stxb201211071559

张丽坤, 王朔, 冯玉龙. 紫茎泽兰种子形态特征和萌发特性与其入侵性的关系. 生态学报, 2014, 34(13): 3584-3591.

Zhang L K, Wang S, Feng Y L. Effects of seed characteristics and germination on invasiveness of *Ageratina adenophora*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3584-3591.

紫茎泽兰种子形态特征和萌发特性与其入侵性的关系

张丽坤^{1,2}, 王 朔³, 冯玉龙^{3,*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐腊 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳 110866)

摘要: 利用纸皿法在不同条件下比较研究了紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora*) 和 3 种同亚族本地植物种子萌发特性, 同时比较了种子大小等形态特性, 探讨了种子形态特征和萌发特性与紫茎泽兰成功入侵的关系。紫茎泽兰种子重量、长度、宽度以及冠毛长度均小于 3 种本地植物; 在不同的释放高度下, 紫茎泽兰种子的沉降速度低于本地植物。紫茎泽兰种子萌发温度范围广, 在亚适宜的低温下, 萌发率和萌发指数均高于本地植物白头婆和水泽兰。紫茎泽兰种子萌发对水和盐胁迫响应更强烈, 但在适宜条件下, 紫茎泽兰种子的萌发率和萌发速度均显著高于 3 种本地植物。这些特性可能与紫茎泽兰的入侵性有关。

关键词: 紫茎泽兰; 本地植物; 种子形态; 萌发; 温度; 水分; 盐胁迫; 入侵

Effects of seed characteristics and germination on invasiveness of *Ageratina adenophora*

ZHANG Likun^{1,2}, WANG Shuo³, FENG Yulong^{3,*}

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Bioscience and Biotechnology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: *Ageratina adenophora* is a noxious invasive weed worldwide. However, the mechanisms underlying its invasiveness are still not well elucidated. To explore the effects of seed characteristics on invasiveness of this invader, *A. adenophora* was compared with three native species in terms of seeds morphological traits and germination responses to environmental factors including temperatures, water, and salt. The invader was significantly lower in seed weight, length, width, and pappus length than three phylogenetically closely related native plant species. Seed settlement velocity was lower for the invader although the difference between the invader and two natives (*E. japonicum* and *E. chinense*) was not significant. Small seeds facilitated spread of the invader. Compared with the seeds of two natives (*E. japonicum* and *E. chinense*), seeds of the invader germinated in a wider range of temperature. In sublow temperature (15 and 20 °C), germination ratio and germination index were higher for the invader than for two natives (*E. japonicum* and *E. stoechadosmum*). Responses of seed germination to water and salt stress were stronger for the invader relative to three natives. At suitable conditions (without water and salt stress), however, germination ratio and germination index were higher for the invader than for three natives. These traits mentioned above may facilitate successful invasion of *A. adenophora*.

Key Words: *Ageratina adenophora*; germination; invasion; native congeners; salt; seed size; temperature; water

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30830027, 31270582); 云南省自然科学基金 (2009CD119)

收稿日期: 2012-11-07; 修订日期: 2014-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fyl@xtbg.ac.cn

随着全球经济一体化进程的加快、人类交往的增加以及对环境干扰的加剧,外来生物入侵已成为全球性的社会经济和环境问题,是全球变化的重要组成部分^[1],对入侵的控制也成为本世纪人类重大任务之一。目前人们对外来生物成功入侵的机制还不十分清楚,而这是有效预防和控制外来生物入侵的前提。有研究表明,繁殖能力和外来植物的入侵能力呈正相关^[2]。植物的种子是维系植物亲代和子代关系的桥梁,种子的形态和种子的萌发特性既反映了亲代的繁殖特性,又反映了子代幼苗建群的能力。种子的大小是一个相对稳定的性状,是植物生活史的重要特征^[3],影响种子萌发、幼苗建群、存活、个体适合度以及植物生活史特征的表达^[4],最终影响整个群落的物种组成、结构和功能^[5]。因此,入侵植物种子形态和萌发特性的研究能够部分地解答外来植物的入侵机制,为入侵植物的防治提供理论依据。

比较研究是生态学上常用的方法,外来入侵植物和本地近缘植物间的比较更有利于揭示与入侵相关的性状^[6-7]。Feng 和 Zheng 等^[8-10]的比较研究表明,与本地种相比,我国恶性外来入侵植物紫茎泽兰(*Ageratina adenophora* (Sprengel) R. M. King and H. Robinson [syn. *Eupatorium adenophorum*, Asteraceae]),把更多的叶氮分配到光合机构,具有更高的光合能力、光合氮利用效率和生物量,并把更多的生物量分配到地上器官,降低了根生物量分数,具有更强的环境适应能力^[8-10]。这些特性与紫茎泽兰的入侵性有关,但紫茎泽兰和本地植物繁殖特性和种子萌发特性的比较研究还未见报道,尽管有关紫茎泽兰种子形态和萌发特性的研究已有报道^[11-13]。本文通过比较研究紫茎泽兰与本地近缘种白头婆(*E. japonicum* Thunb)、多须公(*E. chinense* Linn.)和水泽兰(*E. stoechadosmum* Hance)种子大小、形态和萌发特性的差异,进一步探讨紫茎泽兰成功入侵的机制。

1 材料和方法

1.1 材料

紫茎泽兰、白头婆和多须公的种子于 2008 年 4—10 月采自昆明市郊区,该地年均气温 14.5℃,年均降雨量为 1094.1 mm^[14]。水泽兰种子于 2008 年 12 月采集自西双版纳热带植物园,该园年均气温

21.7℃,年均降雨量为 1550mm^[15]。

1.2 种子形态参数测量

随机选取成熟、饱满、干燥种子各 800 粒,每 100 粒为 1 组,用万分之一分析天平称重,计算种子单粒重。随机选取 100 粒种子,每 10 粒为 1 组,在解剖镜(SMZ-B2/T2,郑州南北仪器设备有限公司)下测量种子长度、宽度和冠毛长度。

1.3 种子沉降速度

根据郭强等^[16]和郝建华等^[17]的方法,并加以改进,测量种子沉降速度。用表面光滑的白纸板折成边长为 15 cm,高分别为 50、100 和 150 cm 的三棱柱,三棱柱的一面镶嵌一条宽度为 10 cm 的透明塑料,用于观察种子的运动轨迹。三棱柱直立安放在平滑的中间放有培养皿的发光底座上,培养皿不仅可以用来收集下落的种子,同时能辅助检验种子是否垂直下落,发光装置便于观察种子运动轨迹。三棱柱顶部封死,中间留有一个小孔,由此释放种子,以减小风力对种子初始速度的影响。令各植物种子分别从 50、100 和 150 cm 3 个高度自由下落,每个物种测定 20 粒带冠毛的种子。具体测量方法是:用镊子轻轻夹住种子,在小孔中间自然松开镊子。用秒表记录从种子释放到达底部的时间。种子沉降速度为自由下落高度与所需时间之比。

1.4 环境条件对种子萌发的影响

2009 年 7 月采用培养皿滤纸法于光照培养箱(LRH-250-G,广东医疗器械厂)内进行种子萌发实验,每天光照时间为 12 h(光量子辐射为 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),每皿 50 粒饱满的种子(将种子的冠毛清除,以免影响实验观察),3 次重复。种子萌发以胚根出现为标志,每天记录萌发情况。测定温度对不同植物种子萌发影响时,实验分别在 10、15、20、25、30 和 35℃恒温条件下进行;测定水分胁迫和盐胁迫对不同植物种子萌发影响时,萌发实验分别在水势为 0、-0.05、-0.2、-0.4、-0.6 和 -0.8 MPa 的聚乙二醇-6000 溶液以及盐浓度为 0、0.01、0.05、0.09、0.18 mol/L 的氯化钠溶液中进行,变温可能对种子萌发有利^[18],因此,该部分实验在日/夜温度为 25/20℃条件下进行。萌发率=萌发种子数量/实验所用种子数量 $\times 100\%$;萌发指数(衡量种子萌发速度的指标) $= \sum G_t/D_t$,式中 G_t 为第 t 日萌发的种子数, D_t 为相应的萌发日数。

1.5 数据分析

用一元方差分析检验物种对种子形态参数和沉降速度的影响,如物种的效应显著,进一步用多重比较(Duncan 法)检验种间差异。用一元方差分析检验物种和处理对种子萌发率和萌发指数的影响,如物种和处理的效应显著,进一步用多重比较(Duncan 法)检验相同处理下各参数的种间差异和同一物种在不同处理下的差异。数据分析采用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)。

2 结果

2.1 种子形态特征

紫茎泽兰和 3 种本地植物的种子形态相似(图 1),都是具棱、具冠毛的瘦果,但种子粒重($F=19.56, P<0.001$)、长($F=32.23, P<0.001$)、宽($F=17.44, P<0.001$)、冠毛长($F=11.045, P<0.001$)的种间差异均极显著。紫茎泽兰的种子比本地植物更小、冠毛更短(表 1)。



图 1 紫茎泽兰和 3 种本地植物种子形态特性

Fig.1 Seed morphological traits of *Eupatorium adenophorum* and its native congeners
a. 紫茎泽兰 *Ageratina adenophora*; b. 白头婆 *E. japonicum* Thunb; c. 多须公 *E. chinense* Linn.; d. 水泽兰 *E. stoechadosmum* Hance

表 1 紫茎泽兰和本地植物种子粒重、长度、宽度、冠毛长的差异

Table 1 Differences in seed traits including weight, length, width, pappus length among <i>Eupatorium adenophorum</i> and its native congeners				
指标 Parameter	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	白头婆 <i>E. japonicum</i>	多须公 <i>E. chinense</i>	水泽兰 <i>E. stoechadosmum</i>
粒重 Weight/mg	0.046±0.002d	0.264±0.002c	0.352±0.003b	0.492±0.007a
种长 Length/mm	0.919±0.011d	2.923±0.0263c	3.022±0.035b	4.343±0.025a
种宽 Width/mm	0.150±0.002d	0.557± 0.003c	0.663±0.009b	0.638±0.009a
冠毛长 Pappus length/mm	3.682±0.316c	3.901±0.541b	3.996±0.682ab	4.146±0.719a

不同字母表示种间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 种子的沉降速度

方差分析结果表明,同一物种在不同高度下的沉降速度差异均不显著。在相同释放高度下,4种植物种子的沉降速度快慢顺序为:水泽兰>白头婆>多

须公>紫茎泽兰,紫茎泽兰种子沉降速度显著低于水泽兰种子,但与白头婆和多须公种子的沉降速度差异不显著(表2)。

表 2 紫茎泽兰和本地植物种子沉降速率 (cm/s) 的差异

Table 2 Differences in seed Settlement velocity (cm/s) among *A. adenophora* and native species

高度 Height/cm	紫茎泽 <i>A. adenophora</i>	兰水泽兰 <i>E. stochadosmum</i>	多须公 <i>E. chinense</i>	白头婆 <i>E. japonicum</i>
50	50.02±2.58	b 101.06±3.63a	52.54±3.03b	57.93±2.25b
100	50.51±2.63	b 107.97±3.78a	55.01±3.78b	59.62±2.66b
150	52.09±2.68	b 112.19±4.52a	56.96±4.17b	61.68±3.07b

不同字母表示物种间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 环境因子对种子萌发的影响

温度对紫茎泽兰和3种本地植物种子萌发率和萌发指数影响显著(图2)。紫茎泽兰和水泽兰在10—35℃的温度范围内都能萌发,且在15—30℃范围内紫茎泽兰种子萌发率差异不显著 ($F=1.064$, $P=0.423$),均保持在较高水平,而水泽兰种子萌发率差异显著 ($F=4.724$, $P=0.021$)。白头婆和多须公

的种子萌发温度范围则略窄,10℃时不能萌发(图2)。在15、20和30℃下,白头婆和水泽兰(30℃时不显著)的种子萌发率显著低于紫茎泽兰,35℃时水泽兰的种子萌发率显著高于紫茎泽兰;15—30℃范围内多须公与紫茎泽兰的种子萌发率差异不显著。在20—30℃范围内,紫茎泽兰的种子萌发指数差异不显著 ($F=3.104$, $P=0.089$),均保持在较高水平,而

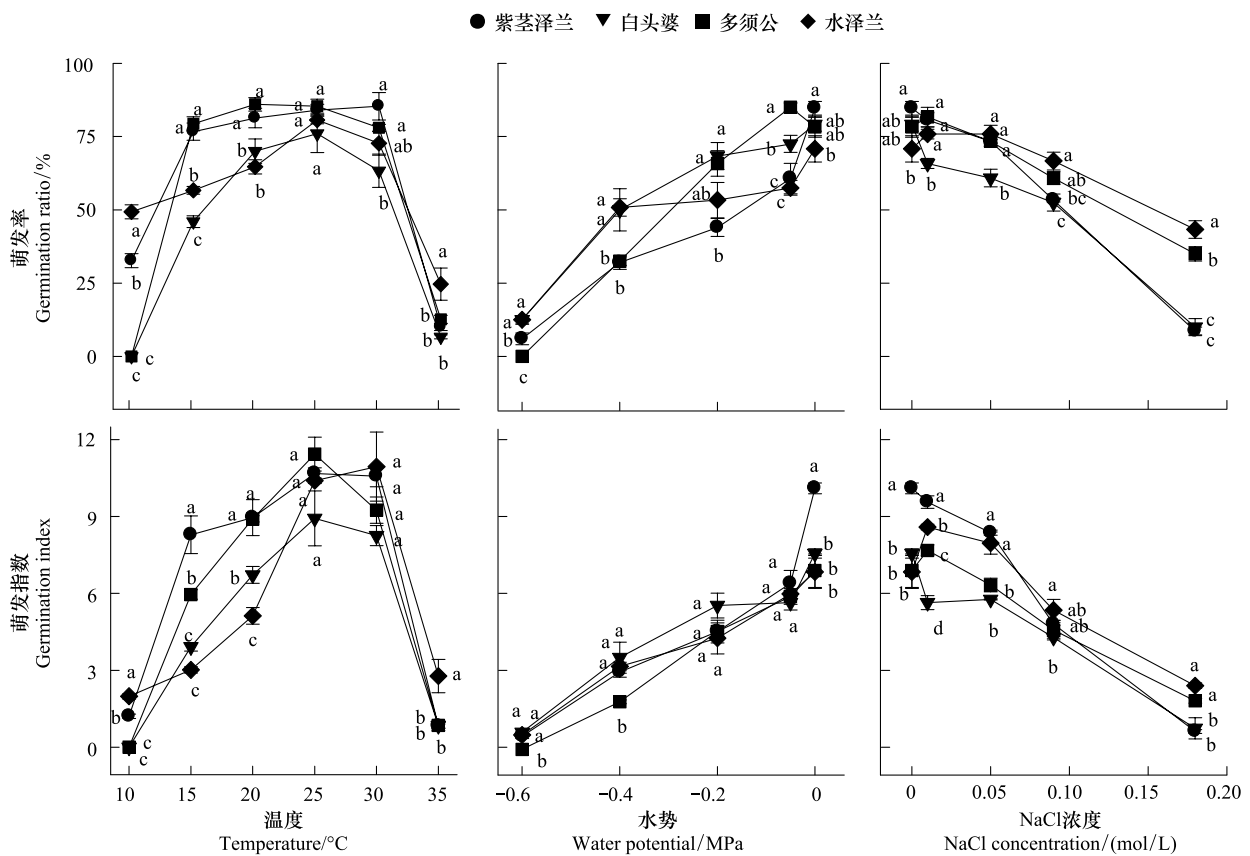


图 2 温度、水势和盐浓度对紫茎泽兰和本地植物种子萌发率和萌发指数的影响

Fig.2 Effects of temperature, water potential, and salt concentration on seed germination ratio and germination index in *A. adenophora* and native species

表 3 种子萌发率与水势和盐浓度的关系

Table 3 Relationships between seed germination ratio and water potential or salt concentration

	物种 Species	线性方程 Linear equations	R^2	F
水胁迫 Water stress	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	$y = 102.267 + 18.850x$	0.960	382.131 ***
	白头婆 <i>E. Japonicum</i>	$y = 99.000 + 14.521x$	0.794	61.636 ***
	多须公 <i>E. Chinense</i>	$y = 107.167 + 18.938x$	0.825	75.443 ***
	水泽兰 <i>E. stoechadosmum</i>	$y = 84.583 + 11.979x$	0.733	43.824 ***
盐胁迫 Salt stress	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	$y = 110.558 - 17.663x$	0.891	155.539 ***
	白头婆 <i>E. Japonicum</i>	$y = 99.094 - 15.734x$	0.900	170.679 ***
	多须公 <i>E. Chinense</i>	$y = 102.542 - 14.104x$	0.798	74.833 ***
	水泽兰 <i>E. stoechadosmum</i>	$y = 93.844 - 11.526x$	0.622	31.278 ***

*** $P < 0.001$

白头婆 ($F = 7.857$, $P = 0.009$)、多须公 ($F = 5.416$, $P = 0.025$) 和水泽兰 ($F = 10.226$, $P = 0.004$) 的种子萌发指数差异显著 (图 2)。在 15 和 20℃ (多须公除外) 时, 本地植物种子萌发指数均显著低于紫茎泽兰, 30℃ 时白头婆和多须公的种子萌发指数也显著低于紫茎泽兰。

随着水势的降低, 紫茎泽兰和 3 种本地植物种子萌发率和萌发指数均呈降低的趋势 (图 2, 表 3)。在水势为 0 MPa 时, 紫茎泽兰的种子萌发率显著高于水泽兰, 与白头婆和多须公的差异不显著 (图 2); 但萌发指数均显著高于 3 种本地植物 (图 2)。在水势为 -0.05、-0.2、-0.4 和 -0.6 MPa 时, 紫茎泽兰的种子萌发率显著低于白头婆和多须公, 但与水泽兰差异不显著 (-0.6 MPa 时除外, 图 2)。在水势为 -0.05 和 -0.2 MPa 时, 种子萌发指数的种间差异不显著; 在水势为 -0.4 和 -0.6 MPa 时, 紫茎泽兰的种子萌发指数高于多须公, 但与白头婆和水泽兰差异不显著 (图 2)。种子萌发率对水势的线性回归方程表明, 紫茎泽兰拟合直线的斜率高于白头婆和水泽兰, 但低于多须公 (表 3)。

随着盐浓度的升高, 紫茎泽兰和 3 种本地植物种子萌发率和萌发指数均呈降低的趋势 (图 2, 表 3)。当 NaCl 浓度为 0 mol/L 时, 紫茎泽兰的种子萌发率高于水泽兰, 与白头婆和多须公的差异不显著 (图 2); 但萌发指数均显著高于 3 种本地植物 (图 2)。当 NaCl 浓度为 0.01 mol/L 时, 紫茎泽兰种子的萌发指数仍显著高于 3 种本地植物; 萌发率显著高于白头婆, 但与多须公和水泽兰差异不显著 (图 2)。当 NaCl 浓度为 0.05 mol/L 时, 紫茎泽兰种子的萌发指数高于白头婆和多须公, 但与水泽兰差异不显著;

萌发率高于白头婆, 但与多须公和水泽兰差异不显著。当 NaCl 浓度为 0.09 mol/L 时, 紫茎泽兰种子的萌发指数与 3 种本地植物差异均不显著; 萌发率低于水泽兰, 但与白头婆和多须公差异不显著。当 NaCl 浓度为 0.18 mol/L 时, 紫茎泽兰种子的萌发率和萌发指数均低于多须公和水泽兰, 但与白头婆差异不显著。种子萌发率对盐浓度的线性回归方程表明, 紫茎泽兰拟合直线的斜率高于 3 种本地植物 (表 3), 表明紫茎泽兰种子萌发对盐胁迫更敏感。

3 讨论

3.1 种子特性

紫茎泽兰的入侵是通过其种子随风等外力传播实现的^[19]。紫茎泽兰和 3 种本地植物种子都是具棱、具冠毛的瘦果, 形态相似, 但紫茎泽兰种子更小更轻。有研究表明, 相对于大种子的植物, 种子较小的植物在风媒传播中, 具有更多向外扩散的机会^[19-20]; 相同形状和结构的种子在同样的风速和高度下, 较小的种子传播得更远^[21-22]; 小种子高的表面积与重量比和带有冠毛等特征被认为是风传播种子提高自身传播能力的进化特点^[23]。郝建华等^[19]发现, 紫茎泽兰等 10 种入侵菊科植物连萼瘦果的水平扩散距离与冠毛数量相关不显著, 而与连萼瘦果的重量呈显著负相关、与冠毛长度显著正相关。根据牛顿第二定律, 一旦存在外推动力 (主要为风力) 的情况下, 较小的种子就会有更大的初始速度和更大的加速度, 这就会使得较小的种子扩散更快和更远。本研究发现, 与 3 种本地植物相比, 紫茎泽兰的种子较小较轻, 在密闭空间中紫茎泽兰的自由沉降速度较小, 这些特性都有利于紫茎泽兰向外扩散。

种子传播机理模型认为,种子传播速度和范围不仅和种子形态相关,还和种子释放高度即植株高度相关^[24-27],释放高度越高,传播越快越远。有研究表明,在同质种植园中,紫茎泽兰的植株高度高于3种本地植物^[15],与3种本地植物相比,紫茎泽兰的种子在向外扩散中具有优势。

种子重量不仅影响其传播,还与植物产生的种子数量密切相关^[28],种子越大,植物产生的种子数量则越少^[29]。产生小种子可以使植物在不增加投资的前提下增加种子数量,有利于抵御捕食和不良环境的影响^[30-31]。繁殖能力,尤其是有性繁殖能力与外来植物的入侵性密切相关^[32]。紫茎泽兰种子小,但数量巨大,紫茎泽兰当年开花植株的头状花絮数约为 (36.7 ± 3.2) 个^[33],按每头状花序平均种子量为 (62.01 ± 0.45) 粒计算^[34],每株当年生紫茎泽兰的种子产量约为2276粒,这对其成功入侵具有重要的意义。

3.2 种子萌发特性

环境因素对种子萌发的影响直接影响入侵植物的蔓延和种群数量^[35]。紫茎泽兰种子萌发温度范围较广(图2),这与王文琪^[20]、Lu等^[13]和Li和Feng^[14]的研究结果一致。与本地植物白头婆和水泽兰相比,紫茎泽兰种子萌发对温度不敏感,在15—30℃时,萌发率和萌发指数均较高,利于其入侵不同海拔和纬度的生境。在亚适宜低温(15、20℃)下,紫茎泽兰种子的萌发优势更明显,有利于其种子早萌发和幼苗定植,以便在苗期种间竞争中处于有利地位。

但是,紫茎泽兰种子萌发对水和盐胁迫的适应能力并不比本地植物强,随着胁迫强度的加剧,紫茎泽兰种子萌发率和萌发指数下降趋势更明显(图2,表2)。紫茎泽兰幼苗的胚根和胚轴小于本地植物^[36],这与其较小的种子相一致,使得紫茎泽兰在幼苗期对环境的适应能力和竞争能力均较差。幼苗期是紫茎泽兰生活史中最脆弱的时期^[37]。但在适宜环境条件下,紫茎泽兰种子能够快速且大量的萌发。这使得紫茎泽兰能够利用有利时机在不利生境中萌发、定植,向更大的空间扩散,从而逃避风险和繁殖成功^[18,32],消除了小种子物种在幼苗萌发期存在的劣势^[22]。而且,长到一定大小后,紫茎泽兰比本地植物具有更强的适应能力、资源获取能力和利

用能力^[1,10-12,15]。

总之,紫茎泽兰种子小、数量多、易于随风扩散,至少部分弥补了种子萌发和幼苗抗逆性较弱的缺点;在亚适宜低温下紫茎泽兰种子萌发好于本地植物白头婆和水泽兰,有利于生长季早期其种子早发、快发和幼苗定植,以便于苗期在种间竞争中处于有利地位;大量的种子向外扩散,使紫茎泽兰有更多的机会找到适宜的环境,且在适宜的环境下能快速、大量萌发。这些特性可能与紫茎泽兰的成功入侵有关。

3.3 治理建议

与本地近缘种相比,紫茎泽兰扩散能力和幼苗期后竞争能力较强,但萌发期和苗期抗逆性较弱。抑制紫茎泽兰种子的成熟是降低其种子扩散的有效方法,强胜等认为唯有连根铲除方能恢复本土植被^[38],在紫茎泽兰种子成熟前去除整株植物并焚烧,同时进行替代控制既能削弱紫茎泽兰种子扩散,又能部分抑制紫茎泽兰土壤种子库中的种子萌发。在替代控制区内,在紫茎泽兰的种子萌发期多批次去除紫茎泽兰幼苗,防止紫茎泽兰长大后对替代物种的竞争排挤,能巩固替代控制的效果。但利用植物替代策略实施大规模紫茎泽兰生态修复工程还需进行大量深入的野外实验研究^[38]。

References:

- [1] Feng Y L, Liao Z Y, Zhang R, Zheng Y L, Li Y P, Lei Y B. Adaptive evolution in response to environmental gradients and enemy release in invasive alien plant species. *Biodiversity Science*, 2009, 17 (4): 340-352.
- [2] He J Y, Xie C Q. Application of the Reproductive Biology on the Research of the Invasive Alien Plant. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 38 (2): 217-221.
- [3] Westoby M, Jurado E, Leishman M. Comparative evolutionary ecology of seed size. *Trends in Ecology and Evolution*, 1992, 7: 368-372.
- [4] Wang J H, Du G Z, Cui X L, Zheng X F, and Qi W. Germination characteristics of 61 common woody species from the eastern Qinghai Tibet plateau of china and their life history correlates. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33 (1): 171-179.
- [5] Silvertown J W. Seed size, life span and germination dates co-adapted features of plant life history. *American Naturalist*, 1981, 118: 860-864.

- [6] Zheng L, Feng Y L. The effects of eco-physiological traits on carbon gain in invasive plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (6): 1430-1438.
- [7] Latimer A M. Comparative performance of invasive and native *Celastrus* species across environmental gradients. *Population Ecology*, 2007, 154: 273-282.
- [8] Feng Y L. Nitrogen allocation and partitioning in invasive and native *Eupatorium* species. *Physiologia Plantarum*, 2008a, 132: 350-358.
- [9] Feng Y L. Photosynthesis, nitrogen allocation and specific leaf area in invasive *Eupatorium adenophorum* and native *Eupatorium japonicum* grown at different irradiances. *Physiologia Plantarum*, 2008b, 133: 318-326.
- [10] Zheng Y L, Feng Y L, Liu W X, Liao Z Y. Growth, biomass allocation, morphology and photosynthesis of invasive *Eupatorium adenophorum* and its native congeners grown at four irradiances. *Plant Ecology*, 2009, 203:263-271.
- [11] Lu P, Sang W G, Ma K P. Effects of environmental factors on germination and emergence of Crofton weed (*Eupatorium adenophorum*). *Weed Science*, 2006, 54: 452-457.
- [12] Li Y P, Feng Y L. Differences in seed morphometric and germination traits of crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) from different elevations. *Weed Science*, 2009, 57: 26-30.
- [13] Niu Y F, Feng Y L, Xie J L, Luo F C. Effects of disturbance intensity on seed germination, seedling establishment and growth of *Ageratina adenophora*. *Guihaia*, 2011, 31(6): 795-800.
- [14] Zang G F, Su W H. Floristic Phytogeography of Pteridophytes of Kunming Xishan, Yunnan. *Journal of mountain science*, 2004, 22 (2): 193-198.
- [15] Zu H. Reclassification of monsoon tropical forests in southern Yunnan, SW China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 170-174.
- [16] Guo Q, Zhu M, Xu L, Zhai B P. Seed settlement velocity of five weed species. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 519-523.
- [17] Hao J H, Qiang S, Du K N, and Gao Y X. Wind-dispersed traits of cypselas in ten Asteraceae alien invasive species. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 957-965.
- [18] Wang W Q, Wang J J, Zhao Z M. Influence of Environmental Factors on Seed Germination of *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(2): 346-349.
- [19] Beres I, Kazinczi G, Narwal S S. Allelopathic plants. 4 Common ragweed (*Ambrosia elatior* L. syn *A. artemisiifolia*). *Allelopathy Journal*, 2002, 9(1):27-34.
- [20] Wu G L, Du G Z, Shang Z H. Contribution of seed size and its fate to vegetation renewal A review. *Chinese Journal Of Applied Ecology*, 2006, 17(10):1969-1972.
- [21] Augspurger C K, Franson S E. Wind dispersal of artificial fruits varying in mass, area and morphology. *Ecology*, 1987, 68: 27-42.
- [22] Matlack G R. Diaspore size, shape, and fall behavior in wind-dispersed plant species. *American Journal of Botany*, 1987, 74: 1156-1160.
- [23] Chambers J C. Relationship between seed fates and seedling establishment in alpine ecosystems. *Ecology*, 1995, 76: 2124-2133.
- [24] Norberg R A. Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. *Biological Reviews*, 1973, 48:561-596.
- [25] Green D S. The terminal velocity and dispersal of spinning samaras. *American Journal of Botany*, 1980, 67:1218-1224.
- [26] Zheng J M, Sang W G And Ma K P. Advances in Model Construction of Anemochoric Seed Long Distance Dispersal. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 414-425.
- [27] Zhu Ge X L, Zhu M, Guo Q. Prediction of wind dispersal distance of seeds base on linear and mechanistic models. *Journal of China University of Metrology*, 2011, 22(2): 181-184.
- [28] Weiher E, van der Werf A, Thompson K, Roderick M, Garnier E, Eriksson O. Challenging theophrastus: A common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10: 609-620.
- [29] Smith C C, Fretwell S D. The optimal balance between the size and number of offspring. *American Naturalist*, 1974, 108: 499-506.
- [30] Thompson K. Seed and seed banks. *New Phytologist*, 1987, 106: 23-24.
- [31] Guo Q, Brown J H, Valone T J, Kachman S D. Constrains of seed size on plant distribution and abundance. *Ecology*, 2000, 81: 2149-2155.
- [32] Barret S C H. Crop mimicry in weeds. *Economic Botany*, 1983, 27: 255-282.
- [33] Wang J F, Gao X, Dang W G. Survival traits of Crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) seedlings in different habitats. *Biodiversity Science*, 2008, 16(4): 346-352.
- [34] Li A F, Gao X M, Dang W G, Wang J F. Growth trends of Crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) seedlings in different habitats. *Biodiversity Science*, 2007, 15(5): 479-485.
- [35] Zhang F J, Li J Q, Xu X Y, Guo A Y, Hu J R, Du S X, Wan F H. Influence of environmental factors on seed germination of *Flaviera bidentis* (L.) Kuntze. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):1947-1953.
- [36] Han L H, Liu C, Zheng Y L. Contrast of Seeds Characteristics Between *Eupatorium Adenophora* and Three Kinds Native Congenerst. *Seed*, 2010, 29(2): 73-76.
- [37] Wang J F, Feng Y L. Allelopathy and light acclimation characteristic for *Ageratina adenophora* seedlings grown in man-made communities, *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1809-1817.
- [38] Wan F H, Liu W X, Guo J Y, Qiang S, Li B P, Wang J J, Yang

G Q, Niu H B, Gui R F, Huang W K, Jiang Z L, Wang W Q. Invasive mechanism and control strategy of *Ageratina adenophora* (Sprengel). *Science China Life Science*, 2011, 41(1): 13-21.

参考文献:

- [1] 冯玉龙, 廖志勇, 张茹, 郑玉龙, 李扬苹, 类延宝. 外来入侵植物对环境梯度和天敌逃逸的适应进化. *生物多样性*, 2009, 17(4): 340-352.
- [2] 贺俊英, 谢彩琴. 繁殖生物学特性在外来入侵植物入侵性中的意义. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2009, 38(2): 217-221.
- [4] 王桔红, 杜国祯, 崔现亮. 青藏高原东缘 61 中常见木本植物种子萌发特性及其生活史的关联. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 171-179.
- [6] 郑丽, 冯玉龙. 入侵植物的生理生态特性对碳积累的影响. *生态学报*, 2005, 25(6): 1430-1438.
- [13] 牛燕芬, 冯玉龙, 谢建磊, 罗富成. 干扰强度对群落中紫茎泽兰种子萌发、幼苗定植和生长的影响. 2011, *广西植物*, (6): 795-800.
- [14] 张光飞, 苏文华. 云南昆明西山蕨类植物区系地理. *山地学报*, 2004, 22(2): 193-198.
- [15] 朱华. 滇南热带季雨林的一些问题讨论. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 170-174.
- [16] 郭强 朱敏 徐勒 翟保平. 五种杂草种子沉降速度. *生态学杂志*, 2008, 27(4): 519-523.
- [17] 郝建华, 强 胜, 杜康宁, 邵元兴. 十种菊科外来入侵种连萼瘦果风力传播的特性. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 957-965.
- [18] 王文琪, 王进军, 赵志模. 环境因子对紫茎泽兰种子萌发的影响. *中国农业科学报*, 2007, 23(2): 346-349.
- [20] 武高林, 杜国祯, 尚占环. 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [26] 郑景明, 桑卫国, 马克平. 种子的长距离风传播模型研究进展. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 414-425.
- [27] 诸葛晓龙, 朱敏, 郭强. 线性及机理模型的种子风传扩散距离预测. *中国计量学院学报*, 2011, 22(2): 181-184.
- [33] 王瑾芳, 高贤明, 党伟光. 不同生境条件下紫茎泽兰实生幼苗的生存特性比较. *生物多样性*, 2008, 16(4): 346-352.
- [34] 李爱芳, 高贤明, 党伟光. 不同生境条件下紫茎泽兰幼苗生长动态. *生物多样性*, 2007, 15(5): 479-485.
- [35] 张凤娟, 李继泉, 徐兴友, 郭艾英, 胡京蕊, 杜淑欣, 万方浩. 2009. 环境因子对黄顶菊种子萌发的影响. *生态学报*, 29(4): 1947-1953.
- [36] 韩利红, 刘潮, 郑玉龙. 紫茎泽兰与 3 种同属本地植物种子特性比较. *种子*, 2010, 29(2): 73-76.
- [37] 王俊峰, 冯玉龙. 人工群落中苗期紫茎泽兰的化感作用和对光环境的适应. *生态学报*, 2006, 26(6): 1809-1817.
- [38] 万方浩, 刘万学, 郭建英, 强胜, 李保平, 王进军, 杨国庆, 牛红榜, 桂富荣, 黄文坤, 蒋智林, 王文琪. 外来植物紫茎泽兰的入侵机理与控制策略研究进展. *中国科学: 生命科学*, 2011, 41(1): 13-21.