

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2022.04.006

替代物种与除草剂对紫茎泽兰的防效及其互作效应

崔宇琛^{1,2+}, 钊 丽^{1,2}, 温丽娜², 范泽文^{1,2}, 张付斗^{2,3*}, 马光宗³, 申时才^{2,3},
徐高峰^{2,3}, 杨韶松^{2,3+}, 徐 云^{2,3}, 郑凤萍^{2,3}

¹云南大学资源植物研究院, 云南 昆明 650504; ²云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南 昆明 650205; ³云南省澜湄农业生物安全联合研究中心, 云南 昆明 650205

摘要:【目的】研究替代物种与选择性除草剂, 以实现紫茎泽兰安全、高效和绿色的防控。【方法】采用植物间竞争试验法测定替代物种(高丹草、非洲狼尾草和黑麦草)和除草剂对紫茎泽兰的防效及其互作效应。【结果】高丹草、非洲狼尾草和黑麦草的竞争力依次强于紫茎泽兰。随着3种替代物种密度比例增加, 紫茎泽兰的株高、分枝、根冠比、叶面积比均受到显著抑制, 当替代物种与紫茎泽兰密度比为5:1时, 高丹草、非洲狼尾草和黑麦草对紫茎泽兰的替代控制效果分别为55.1%、46.9%和40.3%。除草剂氨氯吡啶酸、三氯吡氧乙酸、氯氟吡氧乙酸和二氯吡啶酸的毒力测定表明, 二氯吡啶酸相对最高, LC_{90} 为 $902.1\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但三氯吡氧乙酸对替代物种的安全性相对最好, 对高丹草、非洲狼尾草和黑麦草选择性指数分别为3.75、2.79和2.67。高丹草和非洲狼尾草与紫茎泽兰种植密度比例为3:1时, 结合二氯吡啶酸和三氯吡氧乙酸, 非洲狼尾草和二氯吡啶酸结合表现拮抗作用, 与三氯吡氧乙酸结合表现加成作用; 高丹草和二氯吡啶酸结合表现加成作用, 与三氯吡氧乙酸结合表现增效作用, 在同等取得90%防效的情况下, 可减少三氯吡氧乙酸用量20.0%~35.0%(即210.0~370.0 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)。【结论】合理的替代物种结合除草剂应用可实现互作增效, 可作为紫茎泽兰综合防控的重要措施。

关键词: 紫茎泽兰; 替代控制; 除草剂应用; 互作效应; 综合防控



开放科学标识码
(OSID 码)

Control effects of alternative species and herbicides on *Ageratina adenophora* and their interaction

CUI Yuchen^{1,2+}, CHUAN Li^{1,2}, WEN Lina², FAN Zewen^{1,2}, ZHANG Fudou^{2,3*}, MA Guangzong³,
SHEN Shicai^{2,3}, XU Gaofeng^{2,3}, YANG Shaosong^{2,3+}, XU Yun^{2,3}, ZHENG Fengping^{2,3}

¹ School of Agriculture, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650504, China; ² Agricultural Environment and Resource Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China; ³ Yunnan Lancang-Mekong Agricultural Bio-Security International Science and Technology Cooperation Joint Research Center, Kunming, Yunnan 650205, China

Abstract: 【Aim】 To explore the ecological management of *Ageratina adenophora* through combinations of alternative species and herbicide applications. 【Method】 The control effects of competitive species (such as *Sorghum bicolor*×*S. sudanense*, *Pennisetum squamulatum*, and *Lolium perenne*) and herbicides (such as aminopyralid, triclopyr, fluroxypyr, and clopyralid) on *A. adenophora* and their interaction effects were determined using competition experiments. Three ratios of these competitive species and the invasive species were utilized (1:1, 3:1, 5:1) in a complete randomized design with 4 replicates. 【Result】 The competitive balance index of *S. bicolor*×*S. sudanense*, *P. squamulatum* and *L. perenne* was greater than zero for most ratios, except for the 1:1 ratio of *L. perenne* and *A. adenophora*. Plant height, branch, root shoot ratio, and leaf area ratio of *A. adenophora* were significantly reduced with increasing proportions of the three alternative species. The replacement control effects of *S. bicolor*×*S. sudanense*, *P. squamulatum* and *L. perenne* on *A. adenophora* were 55.1%, 46.9% and 40.3% at the highest ratio of three alternative species: *A. adenophora* (5:1), respectively. Toxicity test showed that among the four herbicides analyzed, the clopyralid had the highest bio-

收稿日期(Received): 2021-11-10 接受日期(Accepted): 2022-01-20
基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2600400); 云南省重点研发计划项目(202103AF14007); 云南省重大科技专项计划(202102AE090003)
作者简介: 崔宇琛, 女, 硕士研究生。研究方向: 入侵生态学和生态防控。E-mail: Cuiyuchen292@126.com; 杨韶松, 男, 副研究员。研究方向: 入侵生态学和生态防控。E-mail: yshaos@163.com
+ 同等贡献作者(The two authors contributed equally to this work)
* 通信作者(Author for correspondence), 张付斗, E-mail: fdzh@vip.sin.com

activity ($LC_{90}=902.1\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$) in *A. adenophora*. However, triclopyr had higher safety to three alternative species, with the selectivity index of 3.75, 2.79 and 2.67 to *S. bicolor*×*S. sudanense*, *P. squamulatum*, and *L. perenne*, respectively. For a ratio of *S. bicolor*×*S. sudanense* and *P. squamulatum* to *A. adenophora* of 3 : 1 plus triclopyr and clopyralid application, *P. squamulatum* showed an antagonistic effect with clopyralid and an additive effect with triclopyr. *S. bicolor*×*S. sudanense* had an additive effect with clopyralid and synergistic effect with triclopyr, respectively. Compared to triclopyr application alone over 90% of the control rate, the use dosage of triclopyr was reduced by 20.0%–35.0% (i.e., 210.0–370.0 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) when *S. bicolor*×*S. sudanense* and triclopyr combination. 【Conclusion】 These results suggest that alternative species competition and herbicide combinations can achieve a more secure, sustainable, and long-term control of *A. adenophora*.

Key words: *Ageratina adenophora*; replacement control; herbicide application; interaction effect; comprehensive control

外来入侵有害生物严重影响农林生产及生态安全,备受世界各国生态学领域的重视和社会的关注 (Huang *et al.*, 2009; Kleunen *et al.*, 2015; Mack *et al.*, 2000)。紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Spreng.) 自 20 世纪经中越边境传入我国云南以来,已迅速扩展分布于云南、贵州、四川、广西、西藏等西南地区,波及各类农林生态系统和自然植被生态系统,造成了生物多样性的严重丧失和生态系统的破坏 (黄梅芬等, 2008; Zhao *et al.*, 2012)。

自 20 世纪 80 年代以来,我国对紫茎泽兰的防控技术进行了大量探索并取得重要成就。如研究人工根除的时期、条件和管理等 (Wan *et al.*, 2010), 经济林、牧草、果树和作物的种间竞争性 (华劲松, 2013; 李林等, 2016; 朱文达等, 2015, 2018; Shen *et al.*, 2021), 除草剂的种类、用量和次数等 (刘宗华等, 2013)。实践表明,紫茎泽兰具有很强的繁殖、竞争和生态适应能力,多以单优种群出现,连片密集分布,可迅速侵占农田、林地、天然草地、路边和闲置空地等,物理防治费时费工,很难见效 (Poudel *et al.*, 2019; Wan *et al.*, 2010)。化学防治紫茎泽兰以草甘膦、苯嘧磺草胺、嘧磺隆和毒莠定等除草剂为主,尽管防效高、见效快和成本低,但是这些药剂基本为非选择性的灭生型除草剂,难以解决其环境污染严重、群落演替加速和药害风险高等生态负面影响 (曹勘程等, 2005; 张林龙, 2012)。利用其他具有经济价值和生态价值的物种对其种间竞争实施替代控制,被视为具有生态安全性的绿色防控途径,如牧草、大豆 *Glycine max* (Linn.) Merr., 油菜 *Brassica chinensis* L., 石榴 *Punica granatum* L. 和菊芋 *Helianthus tuberosus* L. 等被认可为有效替代控制紫茎泽兰的植物,但该方法具有见效慢和滞后性强等局限性 (高宾尚等, 2017)。

在外来入侵植物的综合治理中,首要措施是运

用生态位占据、种间互作和资源竞争等原理,筛选和应用具有竞争优势的物种实施生物取代、群落构建和生态调控,创造不利于紫茎泽兰生长发育的条件,有效降低其入侵性 (Li *et al.*, 2015)。然而,在紫茎泽兰发展成为单优种群的适生区/境,在替代控制的基础上往往需要结合物理或化学措施,才能实现安全、高效和绿色的防控目标。由于当前生产常用的物理和化学措施普遍不具备选择性,也给防控的安全性带来了极大困难。为此,本文针对紫茎泽兰的替代物种及其选择性除草剂的应用,研究了不同替代物种和除草剂对该入侵植物的防控效果及其互作效应,提出了以高丹草 *Sorghum bicolor*×*S. sudanense* 替代控制为基础并结合三氯吡氧乙酸增效的技术措施,旨在获得高效、安全与持久防控紫茎泽兰的重要途径,为构建综合治理技术体系提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

植物材料:前期预试验选出替代物种材料高丹草、非洲狼尾草 *Pennisetum squamulatum* Fresen, 黑麦草 *Lolium perenne* L. 和紫茎泽兰。高丹草、非洲狼尾草、黑麦草均由云南省农业科学院嵩明科技园资源保存扩繁圃选出。

试剂耗材:480 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 三氯吡氧乙酸 EC (Triclopyr) (山东埃森化学有限公司)、21% 氨基吡啶酸 SL (Aminopyralid) (杭州颖泰生物科技有限公司)、200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯氟吡氧乙酸 EC (Fluroxypyr) [安道麦辉丰(江苏)有限公司] 和 75% 二氯吡啶酸 SG (Clopyralid) (江苏瑞邦农化股份有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 替代物种对紫茎泽兰的竞争试验 替代控制试验测定对入侵植物紫茎泽兰的竞争能力,采用相对产量 (relative yield, RY) (De Wit, 1960)、相对

产量总和 (relative yield total, RYT) (Fowler, 1982)、竞争平衡指数 (competitive balance index, CBa) (Wilson, 1988) 进行竞争作用和替代物种及其密度评价。首先在塑料大棚中的试验地分别划出 2 m×2 m 的试验小区,并用塑料板进行四周隔离。2021 年 5 月初从云南省昆明市嵩明县小街镇 (103°12′051″E, 25°11′283″N, 海拔 1876.4 m) 野外紫茎泽兰发生区挖取该入侵植物幼苗,挑选 2~3 叶长势均匀一致的幼苗,分别移栽在各试验小区。待其成活后的第 3 天,以高丹草、黑麦草和非洲狼尾草作为替代物种,分别按照与紫茎泽兰 1 : 1、3 : 1 和 5 : 1 的密度试验。试验同时设置紫茎泽兰单独种植 20 株·m⁻²,以及高丹草、黑麦草和非洲狼尾草分别单独种植 20、60 和 100 株·m⁻²,作为未竞争的对照。试验共设置 19 个混生和单独生长的处理,各处理均设 4 次重复,完全随机区组排列。

1.2.2 除草剂对紫茎泽兰的防效和对替代物种的选择性测定 基于 1.2.1 对紫茎泽兰竞争试验的替

代物种,在塑料盘 (20 cm×50 cm) 内撒播紫茎泽兰、高丹草、黑麦草和非洲狼尾草种子各 24 盆,并在昼夜温度为 28 ℃/22 ℃、相对湿度 75%RH、每天光照 12 h (8 : 00—20 : 00) 的温室中培养,供除草剂毒力生物测定。对苗后 10 d 的幼苗期进行间苗,控制密度为 40 株·盆⁻¹,生长至第 40 天的生长旺盛期进行试验。

分别按照三氯吡氧乙酸 900 g·hm⁻²、氨基吡啶酸 1200 g·hm⁻²、氯氟吡氧乙酸 450 g·hm⁻² 和二氯吡啶酸 270 g·hm⁻² 的推荐用量,按照推荐量的 0.50、0.75、1.00、1.25 和 1.50 倍进行生物活性测定,按 600 L·hm⁻² 兑水,对茎叶喷雾处理,并设置喷清水 (未施药) 处理作为空白对照 (CK),每处理均设 4 次重复。

1.2.3 替代控制与除草剂应用防控紫茎泽兰的互作效应 在前期单独替代试验和除草剂试验基础上,开展替代物种和除草剂互作效应试验,具体组合方案见表 1。

表 1 替代物种、除草剂及其组合处理
Table 1 Alternative species and herbicide treatment and dosage

替代控制或单独应用除草剂 Alternative control or alone herbicide application			高丹草替代结合除草剂应用 <i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i> herbicide combination			非洲狼尾草结合除草剂应用 <i>P. squamulatum</i> herbicide combination		
A 系列 Series A	替代物种或除草剂 Alternative species or herbicide	除草剂用量 Herbicide dosage/ (g·hm ⁻²)	B 系列 Series B	除草剂 Herbicide	除草剂用量 Herbicide dosage/ (g·hm ⁻²)	C 系列 Series C	除草剂 Herbicide	除草剂用量 Herbicide dosage/ (g·hm ⁻²)
1	高丹草 <i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i>	0	1	同 A 系列处理 1 Same as series A treatment 1		1	-	-
2	非洲狼尾草 <i>P. squamulatum</i>	0	2	-	-	2	同 A 系列处理 2 Same as series A treatment 2	
A3	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	530.0	B3	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	530.0	C3	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	530.0
A4	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	690.0	B4	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	690.0	C4	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	690.0
A5	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	850.0	B5	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	850.0	C5	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	850.0
A6	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	1060.0	B6	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	1060.0	C6	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	1060.0
A7	二氯吡啶酸 Clopyralid	450.0	B7	二氯吡啶酸 Clopyralid	450.0	C7	二氯吡啶酸 Clopyralid	450.0
A8	二氯吡啶酸 Clopyralid	585.0	B8	二氯吡啶酸 Clopyralid	585.0	C8	二氯吡啶酸 Clopyralid	585.0
A9	二氯吡啶酸 Clopyralid	720.0	B9	二氯吡啶酸 Clopyralid	720.0	C9	二氯吡啶酸 Clopyralid	720.0
A10	二氯吡啶酸 Clopyralid	900.0	B10	二氯吡啶酸 Clopyralid	900.0	C10	二氯吡啶酸 Clopyralid	900.0
CK	0	0	CK	同 A 系列 CK 处理 Same as series A treatment CK		CK	同 A 系列 CK 处理 Same as series A treatment CK	

各处理所用高丹草或非洲狼尾草替代控制紫茎泽兰,均以替代种与入侵种 3 : 1 密度比播种。
For each treatment, *P. squamulatum* or *S. bicolor*×*S. sudanense* was used to replace the control of *A. adenophora*, and they were sown at a density ratio of 3 : 1 between the replacement species and the invasive species.

1.3 调查方法与数据处理

1.3.1 替代物种对紫茎泽兰的竞争试验 对在温室中培养至第 75 d 的紫茎泽兰进行株高 (cm)、分

枝 (枝·株⁻¹)、地上部生物量/产量 (叶+茎鲜重)、根冠比 (根鲜重/地上部鲜重) 和叶面积比 (总叶面积/总鲜重) 等表型特征调查;每小区随机挖出 5 株

紫茎泽兰植株,自来水冲洗并晾干水分后称鲜重。

1.3.2 除草剂对紫茎泽兰的防效和对替代物种的选择性测定 在施药后 25 d,调查各处理的地上部分植株并换算单位面积的鲜重($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。分别与空白对照(CK)比较,按照防效/ $\% = (\text{CK} - \text{TR}) \times 100 / \text{CK}$ 公式计算出不同除草剂及其用药水平的防治或抑制效果。式中 CK 为空白对照的植株鲜重($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$);TR 为处理的植株鲜重($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。以不同除草剂用量下的紫茎泽兰鲜重防效($\%$),建立毒力回归方程并求解出对该靶标杂草防效 90%的用量(即 LC_{90} 值);通过对替代物种的抑制率($\%$)建立毒力回归方程求解出对其他非靶标植物 10%的用量(即 LC_{10} 值);进一步求解选择性指数(EI)=非靶标植物的 LC_{10} 值/靶标杂草 LC_{90} 值。选择性指数越大,表明对紫茎泽兰的防治效果及对替代物种的安全性越高。

1.3.3 替代控制与除草剂应用防控紫茎泽兰的互作效应 除草剂施用后 25 d,调查紫茎泽兰的地上部分生物量(鲜重),依据 1.3.2 的方法计算出各处理对紫茎泽兰的实际防效($\%$);基于替代控制但未施用除草剂下(处理 1 或处理 2)对紫茎泽兰的防效(X),以及各除草剂不同用量下的防效(Y),参照除草剂生物测定联合作用的 Gowing 公式及其改进评价方法,计算出理论防效 $E_0 = X + Y(100 - X) / 100$; $E - E_0 > 5\%$ 为增效作用; $E - E_0 < 5\%$ 为拮抗作用; $E - E_0$ 介于 $\pm 5\%$ 为加成作用, $E - E_0$ 值越大,增效作用越显著。

用 Excel 整理数据,用 SPSS 13.0 进行统计分析,使用邓肯新复极差法进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 替代物种对紫茎泽兰的竞争作用及其影响

3 个替代物种在不同密度下对紫茎泽兰的竞争作用及其表型影响测定表明,竞争平衡指数 CBa 可以看出 3 种替代植物对紫茎泽兰的竞争能力,黑麦草相对最弱,其次是非洲狼尾草,高丹草相对最强。黑麦草在与紫茎泽兰的密度比为 1 : 1 时,其竞争力没有紫茎泽兰强($\text{RYT} < 1$ 且 $\text{CBa} < 0$);密度为 3 : 1 时,竞争力基本与紫茎泽兰相等($\text{CBa} = 0$);密度为 5 : 1 时,竞争力大于紫茎泽兰($\text{CBa} > 0$),且能通过竞争作用将紫茎泽兰排除出去($\text{RYT} = 1$)。高丹草和非洲狼尾草与紫茎泽兰在密度为 1 : 1 时,与紫茎泽兰的竞争能力相等($\text{CBa} = 0$);密度为 3 : 1 及以上时,其竞争力强于紫茎泽兰($\text{CBa} > 0$),且可通过竞争排除紫茎泽兰($\text{RYT} > 1$)。同时,不同物种在不同密度比处理时,高丹草替代控制的效果相对较好,为 33.8% ~ 55.1%;其次是非洲狼尾草,替代控制效果为 32.0 ~ 46.9%;替代控制作用较差的黑麦草,防效只有 27.6% ~ 40.3%(表 2)。通过对紫茎泽兰在替代物种不同密度混种处理的株高、分枝和叶面比等表型及其可塑性测量分析(图 1),该入侵植物在受到竞争力越强的替代物种竞争时,其株高矮化、分枝较少的表型越明显,而且可塑性越低。

表 2 不同替代物种对紫茎泽兰的竞争作用及其替代控制效果

Table 2 Competition and replacement control effects of different alternative species on *A. adenophora*

处理 Treatment	密度比 Density ratio	对紫茎泽兰的竞争作用 Competitive effect on <i>A. adenophora</i>								替代控制 效果 Control effect /%
		单种产量 Single yield/(g · 株 ⁻¹)		混种产量 Mixed yield/(g · 株 ⁻¹)		相对产量 Relative yield		相对产量 总和 Relative yield total	竞争平衡 指数 Competitive balance index	
		替代种 Alternative species	入侵种 Invade species	替代种 Alternative species	入侵种 Invade species	替代种 Alternative species	入侵种 Invade species			
高丹草：紫茎泽兰	1 : 1	9.93	13.61	6.22	9.01	0.67c	0.66a	0.66b	0.00d	33.8d
<i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i> :	3 : 1	9.92	13.61	15.87	7.68	1.60a	0.56b	1.08a	1.04b	43.6bc
<i>A. adenophora</i>	5 : 1	9.74	13.61	17.19	6.11	1.76a	0.45c	1.11a	1.37a	55.1a
黑麦草：紫茎泽兰	1 : 1	5.98	13.61	3.05	9.85	0.51d	0.72a	0.62b	-0.35e	27.6e
<i>L. perenne</i> : <i>A. adenophora</i>	3 : 1	5.73	13.61	3.88	9.18	0.68c	0.67a	0.68b	0.00d	32.5d
	5 : 1	5.65	13.61	7.93	8.12	1.40b	0.60b	1.00a	0.86c	40.3c
非洲狼尾草：紫茎泽兰	1 : 1	7.64	13.61	5.21	9.26	0.68c	0.68a	0.68b	0.00d	32.0d
<i>P. squamulatum</i> :	3 : 1	7.33	13.61	10.86	8.02	1.48b	0.59b	1.04a	0.92bc	41.1c
<i>A. adenophora</i>	5 : 1	7.31	13.61	11.62	7.23	1.59a	0.53c	1.06a	1.10b	46.9b

同列表以不同字母表示在 0.05 水平上差异性。
Different letters within the same column signify significant differences at $P < 0.05$.

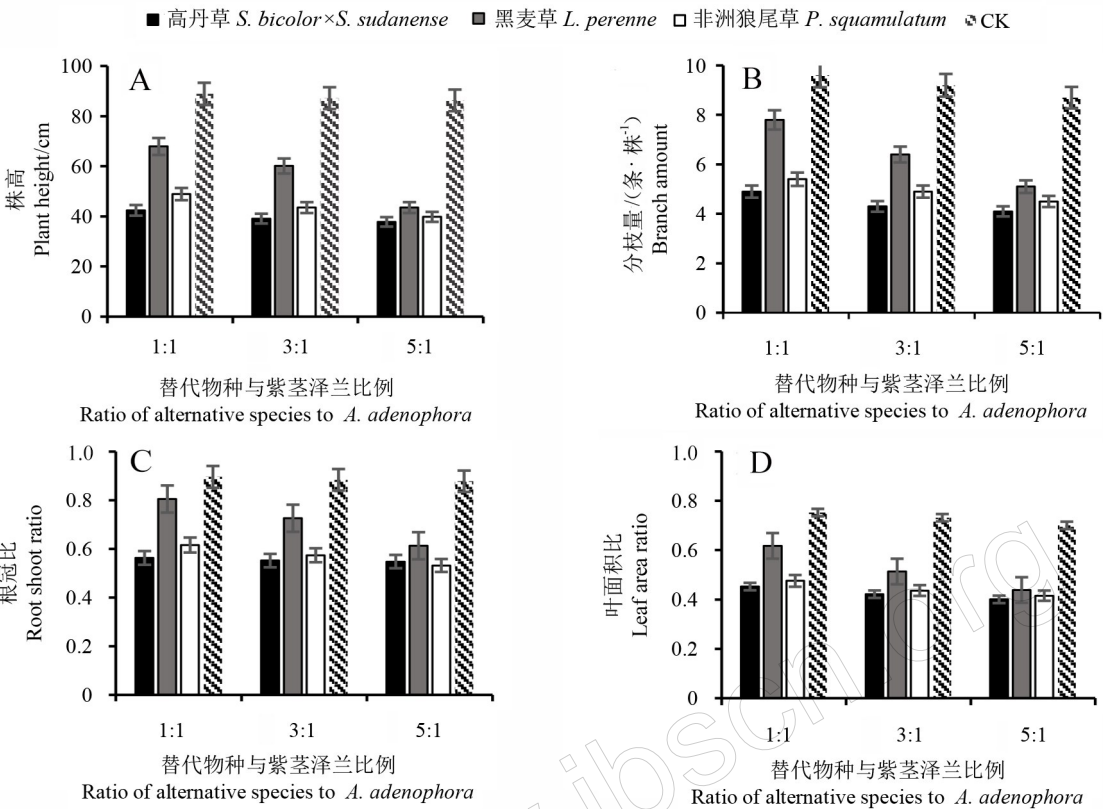


图 1 不用替代物种与密度比例对紫茎泽兰形态特征的影响

Fig.1 Morphological characteristics of *A. adenophora* under different alternative species and density ratios

2.2 不同除草剂对紫茎泽兰的防效及对替代物种的安全性

三氯吡氧乙酸和氨基吡啶酸在推荐用量的0.50倍时对紫茎泽兰的防效达70.0%以上,在推荐用量1.25~1.50倍时防效达90.0%以上;而氯氟吡氧乙酸和二氯吡啶酸在生产常规用量下对紫茎泽兰的防效较低,在1.50倍时防效也仅63.3%和50.9%。4种除草剂在0.50倍应用下对3种替代植物均未表现抑制作用,而1.50倍用量均有一定的抑制程度,其中氨基吡啶酸相对较严重,对3种替代植物的抑制率分别为20.2%、22.7%和25.5%(表3)。

4种除草剂对紫茎泽兰的生物活性大小为二氯吡啶酸>氨基吡啶酸>三氯吡氧乙酸>氯氟吡氧乙酸,对替代植物的选择性大小为三氯吡氧乙酸>二氯吡啶酸>氯氟吡氧乙酸>氨基吡啶酸,对高丹草的安全性较好,其次是非洲狼尾草,黑麦草相对最不安全。按照化学除草“安全第一、防效次之”的基本原则,供试的4种除草剂以三氯吡氧乙酸相对最好,该除草剂对紫茎泽兰的 LC_{90} 为 $1062.0\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,对高丹草、非洲狼尾草和黑麦草选择性指数(EI)分别为3.75、2.79和2.67;其次是二氯吡啶酸,对紫茎

泽兰毒力最强, LC_{90} 为 $902.1\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,但对高丹草、非洲狼尾草和黑麦草选择性指数(EI)分别为1.32、1.47和1.09(表4)。

2.3 替代物种和除草剂的互作效应

由表5可知,在未施用除草剂情况下,以高丹草和非洲狼尾草作为替代物种,在替代种与入侵种的密度为3:1时(处理1和处理2),对紫茎泽兰的替代控制效果分别为40.2%和37.7%。单独应用除草剂(处理A系列),施用三氯吡氧乙酸530.0、690.0、850.0和1060.0 $\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时(处理A3~A6),防效分别为68.3%、72.8%、80.1%和89.0%;施用二氯吡啶酸450.0、585.0、720.0和900.0 $\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时(处理A7~A10),防效分别为46.4%、58.3%、71.9%和88.5%。各除草剂用量下所测定的防效(%)与其毒力回归方程(表4)计算结果一致。

替代物种与除草剂组合,以高丹草作为替代物种(处理B系列),应用三氯吡氧乙酸(处理B3~B6),对紫茎泽兰的实际防效(E)为86.7%~97.3%,分别较理论防(E_0)81.0%~93.4%大5%,表现为互作增效;而应用二氯吡啶酸(处理B7~B10),对紫茎泽兰的实际防效(E)-理论防效(E_0)

介于±5%,表现为加成作用。以非洲狗尾草作为替代物种(处理 C 系列),应用三氯吡氧乙酸(处理 C3~C6),对紫茎泽兰的防效同样表现为加成作用;应用二氯吡啶酸(处理 C7~C10),则表现为拮抗作用 $[(E-E_0)<(\pm 5\%)]$ 。进一步对高丹草替代控制结

合三氯吡氧乙酸的增效组合分析(处理 B3~B6),三氯吡氧乙酸 690.0~850.0 g·hm⁻²时,防效为 90.6%~95.4%;与单独应用三氯吡氧乙酸 1060.0 g·hm⁻²(处理 A6)相比,可减少应用该除草剂 210.0~370.0 g·hm⁻²(达到 20.0%~35.0%)。

表 3 不同除草剂对替代作物和紫茎泽兰的防效

Table 3 Control effects of different herbicides on alternative species and *A. adenophora*

除草剂 Herbicide	倍数 Multiples	施用量 Dosage /(g·hm ⁻²)	紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>		高丹草 <i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i>		黑麦草 <i>L. perenne</i>		非洲狼尾草 <i>P. squamulatum</i>	
			鲜重	抑制率	鲜重	抑制率	鲜重	抑制率	鲜重	抑制率
			Weight/ (g·m ⁻²)	Inhibitory rate/%	Weight/ (g·m ⁻²)	Inhibitory rate/%	Weight/ (g·m ⁻²)	Inhibitory rate/%	Weight/ (g·m ⁻²)	Inhibitory rate/%
三氯吡氧乙酸 Triclopyr	0.50	450	44.5	70.3	198.6	0.0	114.6	0.0	146.9	0.0
	0.75	675	30.1	79.9	198.6	0.0	114.0	0.5	146.3	0.4
	1.00	900	21.6	85.6	197.5	1.1	112.8	1.6	145.0	1.3
	1.25	1125	10.2	93.2	197.0	1.6	111.8	2.4	143.7	2.2
	1.50	1350	4.3	97.1	196.3	2.3	110.1	3.9	141.5	3.7
氨基吡啶酸 Aminopyralid	0.50	600	29.1	80.6	195.1	3.5	109.9	4.1	141.6	3.6
	0.75	900	14.8	90.1	193.2	5.4	107.5	6.2	139.3	5.2
	1.00	1200	7.3	95.1	186.8	11.8	104.9	8.5	136.0	7.4
	1.25	1500	2.5	98.3	184.7	13.9	97.9	14.6	129.0	12.2
	1.50	1800	0.0	100.0	178.4	20.2	85.4	25.5	113.6	22.7
氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	0.50	250	97.7	34.8	198.6	0.0	114.6	0.0	146.9	0.0
	0.75	375	89.7	40.1	198.6	0.0	114.0	0.5	146.5	0.3
	1.00	500	78.0	47.9	197.2	1.4	112.5	1.8	144.7	1.5
	1.25	625	67.0	55.3	195.8	2.8	111.0	3.1	142.6	2.9
	1.50	750	55.0	63.3	195.1	3.5	109.2	4.7	141.5	3.7
二氯吡啶酸 Clopyralid	0.50	150	115.5	22.9	198.6	0.0	114.6	0.0	146.9	0.0
	0.75	225	104.6	30.2	198.4	0.2	114.3	0.3	146.9	0.0
	1.00	300	97.1	35.2	198.0	0.6	112.8	1.6	145.7	0.8
	1.25	375	87.9	41.3	197.3	1.3	111.7	2.5	144.8	1.4
	1.50	450	73.6	50.9	195.4	3.2	110.1	3.9	143.1	2.6
对照 CK	-	0	149.8	0.0	198.6	0.0	114.6	0.0	146.9	0.0

表 4 除草剂对不同植物的毒力回归方程

Table 4 Regression equation of herbicide toxicity to different plants

测试物种 Test species	除草剂 Herbicides	毒力回归方程 Toxicity regression equation	LC ₁₀ /(g·hm ⁻²)	LC ₉₀ /(g·hm ⁻²)	选择性指数 Selectivity index
紫茎泽兰 <i>A. adenophora</i>	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	$y=0.0297x+58.46$ ($R^2=0.9818$)	-	1062.0	-
	氨基吡啶酸 Aminopyralid	$y=0.0157x+74.02$ ($R^2=0.9072$)	-	1017.8	-
	氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	$y=0.0578x+19.40$ ($R^2=0.9955$)	-	1221.5	-
	二氯吡啶酸 Clopyralid	$y=0.0895x+9.26$ ($R^2=0.9875$)	-	902.1	-
高丹草 <i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i>	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	$y=0.0280x-1.48$ ($R^2=0.9468$)	3978.6	-	3.75
	氨基吡啶酸 Aminopyralid	$Y=0.0140x-5.80$ ($R^2=0.9684$)	1128.7	-	1.11
	氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	$y=0.0780x-2.38$ ($R^2=0.9423$)	1587.2	-	1.30
	二氯吡啶酸 Clopyralid	$y=0.0100x-1.94$ ($R^2=0.8381$)	1194.0	-	1.32
黑麦草 <i>L. perenne</i>	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	$y=0.0043x-2.20$ ($R^2=0.9732$)	2837.2	-	2.67
	氨基吡啶酸 Aminopyralid	$y=0.0171x-8.70$ ($R^2=0.8824$)	1096.6	-	1.08
	氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	$y=0.0096x-2.78$ ($R^2=0.9679$)	927.8	-	1.03
	二氯吡啶酸 Clopyralid	$y=0.0133x-2.34$ ($R^2=0.9368$)	1331.3	-	1.09
非洲狼尾草 <i>P. squamulatum</i>	三氯吡氧乙酸 Triclopyr	$y=0.0410x-2.16$ ($R^2=0.9588$)	2965.9	-	2.79
	氨基吡啶酸 Aminopyralid	$y=0.0151x-7.86$ ($R^2=0.8633$)	1182.8	-	1.16
	氯氟吡氧乙酸 Fluroxypyr	$y=0.0080x-2.32$ ($R^2=0.9682$)	1540.0	-	1.26
	二氯吡啶酸 Clopyralid	$y=0.0088x-1.68$ ($R^2=0.9167$)	1327.3	-	1.47

表 5 替代物种与除草剂防控紫茎泽兰的互作效应

Table 5 Interaction effect of alternative species and herbicide application on *A. adenophora*

除草剂处理及其用量 Herbicide treatment and its dosage			A 系列未替代控制 Unreplacement control		B 系列高丹草替代 Replacement of <i>S. bicolor</i> × <i>S. sudanense</i>				C 系列非洲狼尾草替代 Replacement of <i>P. squamulatum</i>			
除草剂 Herbicides	编号 No.	用量 Dosage /(g · hm ⁻²)	鲜重 Weight /(g · m ⁻²)	防效 Control effect /%	鲜重 Weight /(g · m ⁻²)	实际防效 Actual control effect/%	理论防效 Theoretical control effect/%	互作 效应 Interaction/%	鲜重 Weight /(g · m ⁻²)	实际防效 Actual control effect/%	理论防效 Theoretical control effect/%	互作 效应 Interaction/%
—	1	0.0	—	—	495.1	40.2	—	—	—	—	—	—
—	2	0.0	—	—	—	—	—	—	515.8	37.7	—	—
三氯吡氧乙酸 Triclopyr	3	530.0	262.4	68.3	109.9	86.7 ⁺	81.0	>5%	155.6	81.2	80.3 [*]	±5%
	4	690.0	225.2	72.8	77.6	90.6 ⁺	83.7	>5%	127.5	84.6	83.1 [*]	±5%
	5	850.0	164.8	80.1	37.9	95.4 ⁺	88.1	>5%	82.0	90.1	87.6 [*]	±5%
	6	1060.0	91.1	89.0	22.2	97.3 ⁺	93.4	±5%	47.2	94.3	93.1 [*]	±5%
二氯吡啶酸 Clopyralid	7	450.0	443.8	46.4	261.4	68.4 [*]	67.9	±5%	245.9	70.3	66.6 ⁻	<5%
	8	585.0	345.2	58.3	182.8	77.9 [*]	75.1	±5%	191.2	76.9	74.0 ⁻	<5%
	9	720.0	232.6	71.9	121.5	85.3 [*]	83.2	±5%	127.5	84.6	82.5 ⁻	<5%
	10	900.0	95.2	88.5	67.7	91.8 [*]	93.1	±5%	68.7	91.7	92.8 ⁻	<5%
CK	CK	0.0	827.9	0.0	—	—	—	—	—	—	—	—

三氯吡氧乙酸和二氯吡啶酸的用量分别按照其 LC₉₀ 值 1062.0 和 902.1 g · hm⁻² 的 50%、65%、80% 和 100% 计算出接近水平的用药量；按照实际防效 (*E*) - 理论防效 (*E*₀) >、< 或介于 ±5% 的情况，评价为增效、拮抗或加成作用，并分别以⁺、⁻或^{*}标识。

The dosages of triclopyr and clopyralid were calculated according to their LC₉₀ values of 1062.0 and 50%, 65%, 80% and 100% of 902.1 g · hm⁻², respectively. According to the actual control effect (*E*) - the theoretical control effect (*E*₀) >, < or between ±5%, the synergism, antagonism or additive effects were evaluated and marked as ⁺, ⁻ or ^{*}, respectively.

3 讨论

外来入侵植物的防控中,对种间竞争作用的研究并用于替代控制,一直是生态防控的重要课题。研究证实,利用具有经济价值和生态价值的物种实施替代控制,是对重大入侵植物实施绿色防控的重要途径。该项技术的关键是对替代物种竞争作用的评价、筛选和利用。研究表明,牧草特高和多年生黑麦草对胜红蓟 *Ageratum conyzoides* L. 有较好防效(李勤奋等,2012);红薯 *Ipomoea batatas* (L.) Lam. 在薇甘菊 *Mikania micrantha* Kunth 幼苗期有很好的替代控制效果,薇甘菊在其竞争作用下的株高、分枝、叶、茎节不定根和生物量等均受到显著抑制(申时才等,2012);紫茎泽兰与非洲狗尾草混种条件下,紫茎泽兰根系长度、体积、表面积和生物量比单种时减小,表明非洲狗尾草地下竞争能力强于紫茎泽兰(蒋智林等,2014);在紫茎泽兰入侵早期利用黄花蒿进行替代控制,可以抑制紫茎泽兰种群数量的扩增,降低紫茎泽兰的根冠比(孙娜娜等,2015);百喜草 *Paspalum notatum* Flugge 对紫茎泽兰中、轻度入侵的区域有较强的替代控制作用,在重度入侵的区域有明显的抑制生长的作用(龙忠富等,2011);黑麦草和紫花苜蓿 *Medicago sativa* L. 与紫茎泽兰以高密度和小比例的方式种植时,紫茎

泽兰的株高和干重受到明显的抑制,紫茎泽兰表现出较弱的竞争性(于亮等,2009)。这些结果表明,替代物种因其生物学、生态学的不同,对某一入侵植物的竞争作用差异显著。本研究结果表明,黑麦草、非洲狼尾草和高丹草在与紫茎泽兰的竞争中,替代控制效果不仅与替代物种的竞争力相关,而且受到替代物种的密度显著影响,其中竞争优势强的高丹草可在与紫茎泽兰密度比为 1 : 1 时应用于替代控制,但竞争优势不强的黑麦草则需要在该入侵植物的密度比达 5 : 1 方能有效替代。

外来植物的表型及其可塑性,通常是衡量其入侵性的重要指标(Lambers & Poorter,1992),外来入侵植物在入侵地域/生境受到生物或非生物因子的胁迫时,能够通过形态、生理和生活史等方面积极主动地调整,以应对逆境所带来的压力而维持生存(熊韞琦和赵彩云,2020)。例如薇甘菊在受到干旱胁迫下,尽管茎节减少、主茎缩短,但能增加分枝寻找可利用的资源(张付斗等,2011)。本研究发现,紫茎泽兰在竞争力较强的高丹草 5 : 1 的高密度压力下,其株高、分枝、根冠比和叶面积比等各项指标均受到强烈抑制且可塑性低;而在竞争力较弱的黑麦草 1 : 1 的低密度压力下,各表型指标与其单独生长的差异不大且可塑性相对较强。结果

进一步表明入侵植物紫茎泽兰在受到生物因子的胁迫,其表型可塑性能否在种间竞争中生存,也是影响替代控制效果的关键。

安全防控是化学防治的首要事项,非选择性灭生型除草剂可作为长期防控紫茎泽兰等重大入侵植物的重要手段。刘宗华等(2013)研究表明,使用草甘膦+苯嘧磺草胺+苯嘧磺草胺专用助剂喷施对紫茎泽兰的防除效果与持效性较高。朱文达等(2013)的研究表明,采用苯嘧磺草胺、甲嘧磺隆不仅能有效抑制紫茎泽兰开花结果,还能很好地控制发生密度。卢向阳等(2012)的研究表明,氨基吡啶酸持续控制紫茎泽兰更好,24%氨基吡啶酸用量为 $3000\sim 6000\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,紫茎泽兰复发率仅为 $0\sim 8.5\%$ 。江赢等(2011)认为,41%草甘膦异丙胺盐水剂、50%草甘膦可湿性粉剂对紫茎泽兰的防治效果较好。目前,报道的这些防控紫茎泽兰的除草剂普遍具有高效、广谱性强的特点,常常局限于紫茎泽兰的单优群落防控应用。同时也由于这些除草剂选择性差,在应用中难以保障对其他作物/植物的药害,特别是在替代控制入侵植物的过程中的应用也鲜见报道。本研究开展了三氯吡氧乙酸、二氯吡啶酸、氯氟吡氧乙酸、氨基吡啶酸对紫茎泽兰的防治效果试验,同时测定分析了不同替代物种的选择性指数,发现三氯吡氧乙酸与二氯吡啶酸不仅对紫茎泽兰的毒力活性高(LC_{90} 值分别为1062.0和 $902.1\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$),同时对高丹草和非洲狼尾草的安全性强,如相对最安全的三氯吡氧乙酸对高丹草、非洲狼尾草和黑麦草选择性指数分别达到3.75、2.79和2.67。

综上所述,本研究通过替代物种和除草剂对紫茎泽兰的防控效果及其选择性研究,进一步证实替代控制与化学防治的合理结合可实现互作增效,例如在高丹草替代控制紫茎泽兰的基础上,可减少三氯吡氧乙酸的用量 $210.0\sim 370.0\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,与未替代控制而单独使用该除草剂达到相同90%防效的用量相比减施20.0%~35.0%。这些研究结果为创新和发展以替代控制为核心的综合治理体系,进一步提供了依据。

参考文献

曹勘程,芮昌辉,孟香清,袁会珠,郭美霞,杨代斌,陈福良,何兰,陈耕,张育森,曾溢曦,2005.紫茎泽兰的化

- 学防除及综合利用研究//农业生物灾害预防与控制研究.北京:中国植物保护学会:74-79.
- 华劲松,2013.几种优质牧草替代种植对紫茎泽兰的防控效果分析.湖北农业科学,52(10):2368-2370,2376.
- 黄梅芬,奎嘉祥,徐驰,钟声,段新慧,2008.紫茎泽兰的生态学研究概况.杂草科学,26(1):1-5.
- 江赢,欧国腾,韩勇,李吉松,蔡卫东,赵翔翔,2011.紫茎泽兰化学防除试验.杂草科学,29(4):54-57.
- 蒋智林,王五云,雷桂生,桂富荣,刘万学,李正跃,2014.紫茎泽兰与4种功能型草本植物根系生长特征和竞争效应.应用生态学报,25(10):2833-2839.
- 李林,曹勘程,喻大昭,朱文达,颜冬冬,欧阳灿彬,2016.油菜对紫茎泽兰的替代控制效果.中国油料作物学报,38(4):513-517.
- 李勤奋,李光义,刘振迪,2012.5种牧草植物对胜红蓟田间替代控制研究.中国农学通报,28(35):13-18.
- 刘宗华,罗晓玲,王琴,孙辉,王云梅,2013.药剂防除川西南紫茎泽兰的初步研究.中国植保导刊,33(8):61-63.
- 龙忠富,刘华荣,孟军江,卢敏,2011.百喜草对紫茎泽兰的生物替代控制作用.贵州农业科学,39(8):212-215.
- 卢向阳,张锦华,左相兵,郑雅婧,刘冰,韩猛,高攀,2012.4种除草剂对松林中紫茎泽兰的防控效果.林业实用技术(3):35-36.
- 申时才,徐高峰,张付斗,李天林,张玉华,2012.红薯对薇甘菊的竞争效应.生态学杂志,31(4):850-855.
- 孙娜娜,谭永钦,马洪菊,周兴苗,王永模,2015.黄花蒿对紫茎泽兰竞争效应的影响.华中农业大学学报,34(1):38-44.
- 熊韞琦,赵彩云,2020.表型可塑性与外来植物的成功入侵.生态学杂志,39(11):3853-3864.
- 于亮,李世吉,桂富荣,李正跃,2009.黑麦草和紫花苜蓿对紫茎泽兰的竞争作用研究.云南农业大学学报,24(2):164-168.
- 张付斗,李天林,徐高峰,吴迪,张玉华,2011.薇甘菊不同生长方式下的繁殖特征比较.植物学报,46(1):59-66.
- 张林龙,2012.化学除草剂:生态环境的杀手.生态经济(11):14-17.
- 朱文达,曹勘程,颜冬冬,李林,刘晓燕,郭章碧,陈耕,2013.除草剂对紫茎泽兰防治效果及开花结实的影响.生态环境学报,22(5):820-825.
- 朱文达,何燕红,李林,2015.大豆竞争替代紫茎泽兰的种植模式研究.中国油料作物学报,37(2):214-219.
- 朱文达,颜冬冬,何燕红,李林,欧阳灿彬,曹勘程,2018.石榴替代控制紫茎泽兰的种植模式研究.江西农业学报,30(1):65-69.
- DE WIT C T, 1960. On competition. *Versl Landbouwk On-*

- derzoek, 66(8): 1–82.
- FOWLER N, 1982. Competition and coexistence in a North Carolina grassland: III mixtures of component species. *Journal of Ecology*, 70(1): 77–92.
- HUANG Q Q, WU J M, BAI Y Y, ZHOU L, WANG G X, 2009. Identifying the most noxious invasive plants in China: role of geographical origin, life form and means of introduction. *Biodiversity and Conservation*, 18(2): 305–316.
- KLEUNEN M V, DAWSON W, ESSL F, PERGL J, WINTER M, WEBER E, KREFT H, WEIGELT P, KARTESZ J, NISHINO M, ANTONOVA L A, BARCELONA J F, CABEZAS F J, CARDENAS D, CARDENAS T, CASTANO N, CHACON E, CHATELAIN C, EBEL A L, FIGUEIREDO E, NICOL F, QUENTIN J G, HENDERSON L, INDERJIT, KUPRIYANOV A, MASCIADRI S, MEERMAN J, MOROZOVA O, MOSER D, NICKRENT D L, PATZELT A, 2015. Global exchange and accumulation of non-native plants. *Nature*, 525: 100–103.
- LAMBERS H, POORTER H, 1992. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. *Advances in Ecological Research*, 22: 187–261.
- LI W H, LUO J N, TIAN X S, 2015. A new strategy for controlling invasive weeds: selecting valuable native plants to defeat them. *Scientific Reports*, 28: 13–18.
- MACK R N, LONSDALE W M, EVANS H, CLOUT M, BAZZAZ F A, SIMBERLOFF D, 2000. Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 10(3): 689–710.
- POUDEL A S, JHA P K, SHRESTHA B B, MUNIAPPAN R, 2019. Biology and management of the invasive weed *Ageratina adenophora* (Asteraceae): current state of knowledge and future research needs. *Weed Research*, 59(2): 79–92.
- SHEN S C, XU G F, LI D Y, YANG S S, JIN G M, LIU S F, CLEMENTS D R, CHEN A D, RAO J, WEN L L, TAO Q, ZHANG S Y, YANG J Z, ZHANG F D, 2021. Potential use of *Helianthus tuberosus* to suppress the invasive alien plant *Ageratina adenophora* under different shade levels. *BMC Ecology and Evolution*, 21: 85.
- WAN F H, LIU W X, GUO J Y, QIANG S, LI B P, WANG J J, YANG G Q, NIU H B, GUI F R, HUANG W K, JIANG Z L, WANG W Q, 2010. Invasive mechanism and control strategy of *Ageratina adenophora* (Sprengel). *Science China Life sciences*, 53(11): 1291–1298.
- WILSON J B, 1988. Shoot competition and root competition. *Journal of Applied Ecology*, 25(1): 279–296.
- ZHAO Y J, YANG X J, XI X Q, GAO X M, SUN S, 2012. Phenotypic plasticity in the invasion of crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) in China. *Weed Science*, 60(3): 431–439.

(责任编辑:郭莹)