

许秋园, 王丹, 全国明, 等. 皇竹草竞争抑制入侵植物假臭草的潜力 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 58-64.
XU Qiuyuan, WANG Dan, QUAN Guoming, et al. Potential of *Pennisetum hybridum* for controlling invasive plant *Praxelis clematidea*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 58-64.

皇竹草竞争抑制入侵植物假臭草的潜力

许秋园^{1,2}, 王 丹¹, 全国明³, 章家恩^{1,2}, 李赛飞¹

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 广东省生态循环农业重点实验室/广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心/农业部华南热带农业环境重点实验室, 广东 广州 510642;
3 广州城市职业学院 城市建设工程系, 广东 广州 510405)

摘要:【目的】探索安全有效控制华南地区危害严重的入侵杂草假臭草 *Praxelis clematidea* 的方法, 检验皇竹草 *Pennisetum hybridum* 是否具有竞争抑制乃至替代控制假臭草的潜力。【方法】设置一系列不同比例皇竹草与假臭草的混种盆栽试验, 测定 2 种植物的竞争指数及形态特征。【结果】假臭草的竞争平衡指数为-0.97~ -0.40, 在所有比例的混种处理中均小于 0, 说明皇竹草始终处于竞争优势地位。皇竹草的单株生物量随着假臭草的种植比例增加而增加, 从最低 48.98 g 增加至最高 161.66 g; 假臭草与皇竹草混种限制了假臭草的茎、叶的发育和生长, 导致混种处理的假臭草单株总叶面积比单种假臭草减少 43.4%~68.2%、单株总茎长减少 49.4%~63.6%、单株分枝数减少 46.1%~71.6%。【结论】皇竹草对假臭草有竞争抑制作用, 具有替代控制假臭草的潜力。

关键词: 皇竹草; 假臭草; 竞争平衡指数; 生物量; 入侵植物; 生态防控
中图分类号: Q948.1; S451.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)05-0058-07

Potential of *Pennisetum hybridum* for controlling invasive plant *Praxelis clematidea*

XU Qiuyuan^{1,2}, WANG Dan¹, QUAN Guoming³, ZHANG Jiaen^{1,2}, LI Saifei¹

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture/Guangdong Engineering Research Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture/Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China; 3 Department of Urban Construction Engineering, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 510405, China)

Abstract: 【Objective】To explore the method for safely controlling *Praxelis clematidea*, one of the most invasive plant in South China, and study the potential of *Pennisetum hybridum* to compete with and replace *Praxelis clematidea*. 【Method】Pot experiment with a series of planting ratios of *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* was conducted. Competitive indices and morphological traits of two plant species were measured. 【Result】Competitive balance indices of *Praxelis clematidea* ranged from -0.97 to -0.40, lower than zero in all treatments with different planting ratios, indicating *Pennisetum hybridum* had a competitive dominance. The biomass per plant of *Pennisetum hybridum* increased from 48.98 g to 161.66 g with increasing ratio of planted *Praxelis clematidea*. Mixing two plant species suppressed growth and development of stem and

leaf for *Praxelis clematidea*, and resulted in that total leaf area, total stem length and branch number per plant of *Praxelis clematidea* decreased by 43.4%–68.2%, 49.4%–63.6% and 46.1%–71.6% respectively compared with those in monoculture of *Praxelis clematidea*. 【Conclusion】 *Pennisetum hybridum* has competitive inhibition against *Praxelis clematidea*. It is a prospective candidate to control and replace *Praxelis clematidea*.

Key words: *Pennisetum hybridum*; *Praxelis clematidea*; competitive balance index; biomass; invasive plant; ecological control

替代控制是一种应用前景广阔的入侵杂草控制方法。该方法根据种间竞争和群落自然演替的规律,通过人为引入具有竞争力的植物,减少甚至清除群落中的有害入侵植物^[1]。竞争力强的本地植物是用于替代控制外来入侵植物的理想选择,然而本地植物中竞争能力高于入侵植物的种十分有限,成功的实践更是鲜有报道。因此,研究者们开始尝试利用入侵潜力较低的外来物种替代控制入侵植物^[2-4]。Kuebbing 等^[5]通过分析前人的研究发现,在外来植物之间的相互作用类型中,竞争性相互作用十分常见。种间竞争作用可以阻止入侵植物在邻近群落中定植,从而在一定的空间尺度内限制其扩散^[6]。种间竞争在外来物种之间的普遍性及其竞争效果为利用外来植物控制入侵植物提供了理论基础。植物通过改变性状与相邻的植物竞争有限的自然资源(如光照、水分和土壤养分等)^[6],方式包括通过吸收和利用公共资源的直接竞争和通过阻碍相邻植物获取资源的间接竞争^[7-8]。因此,种间竞争的结果,同时取决于植物对相邻植物的抑制能力及其耐受抑制作用的能力 2 个方面^[9]。由于物种的抑制能力和耐受能力并不必然具有负相关或正相关关系^[6],而且入侵物种大多对相邻的植物具有化感作用,因此在选择用于替代控制的植物时应同时考察其对目标植物的抑制能力及耐受能力。

假臭草 *Praxelis clematidea* 是原产于南美洲的 1 年生菊科草本植物,于 20 世纪 80 年代首次出现在香港,近年来已大面积入侵华南地区,占据道路两旁的空地、荒草地、果园和农田^[10],目前对其还没有生态高效的防治清除方法。该植物喜较湿润及阳光充足的环境。皇竹草 *Pennisetum hybridum* 是一种多年生直立丛生禾本科植物,由象草 *Pennisetum purpureum* 和美洲狼尾草 *Pennisetum typhoideum* 杂交选育而成^[11],入侵风险极小^[12]。皇竹草作为一种植株高大、生长快速的复合型经济作物,在替代控制该入侵杂草方面可能具有较大的潜力。因此,为了检验使用皇竹草替代控制假臭草是否具有可行性,同时为了检验皇竹草作为替代控制工具的竞争

机制和优势,本研究以假臭草和皇竹草作为对象设置了不同比例的混种盆栽试验。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

分别收集假臭草种子和皇竹草新鲜茎段进行育苗。苗床统一使用按 3:1 的体积比混合均匀的有机水藓基质泥炭土和珍珠岩(丹麦品氏)作为基质。假臭草的种子采自广州市华南农业大学增城教学科研基地,经 40 ℃ 温水浸泡 24 h 后均匀撒播于苗床中自然萌发;皇竹草茎段采集自华南农业大学资源环境学院教学科研基地附近,分节后扦插到苗床中。

育苗约 3 周后,选择生长健壮、株高 18~30 cm 的幼苗分别将皇竹草和假臭草按 1:3、2:2 和 3:1 的数量比例移栽到塑料盆中,每盆共种植 4 株幼苗,每个处理 5 个重复(盆)。另设皇竹草和假臭草单种(即二者数量比例为 4:0 和 0:4)作为对照。花盆规格为 23.0 cm(上口径)×15.0 cm(下口径)×21.0 cm(高),每盆装土 5 kg。试验用土采自华南农业大学资源环境学院教学科研基地附近未被外来植物入侵的荒坡地表层土。采集的土壤经充分混匀并过 5 mm 筛后再填入盆,土壤全氮质量分数 0.86 g·kg⁻¹、全磷质量分数 0.62 g·kg⁻¹、全钾质量分数 25.14 g·kg⁻¹、碱解氮质量分数 384.18 mg·kg⁻¹、有效磷质量分数 37.73 mg·kg⁻¹ 和有效钾质量分数 152.34 mg·kg⁻¹。种植 25 周后,对植物形态特征进行测量,并采集整株植物测定生物量。

1.2 植物生物量分配及形态性状的测定

用直尺测定每株植物的枝条长度,计算分枝数。收集植株的所有叶片,使用扫描仪扫描后用 Adobe Photoshop CS2 9.0.2 (Adobe Systems, 美国)统计叶面积。所有植株的根、茎、叶等器官分离后于 70 ℃ 烘箱中烘 72 h,达到恒质量后用电子天平称质量,得到每棵植株的根系及地上部生物量。对根系及地上部生物量求和得到单株生物量。比叶面积 (SLA) = 总叶面积/叶片干质量。根冠比为根系

与地上生物量的比值。其中,单株生物量、各器官生物量、总叶面积、总茎长、分枝数和比叶面积均表示单棵植株的对应指标,盆中有多棵植物时取相应指标的平均值代表 1 个重复。

1.3 植物生长指标的计算和数据分析

计算相对产量 (RY)、总相对产量 (RY_t) 和竞争平衡指数 (CB)^[13]:

$$RY_H = Y_{HJ}/Y_H,$$
(1)

$$RY_J = Y_{JH}/Y_J,$$
(2)

$$RY_t = RY_H + RY_J,$$
(3)

$$CB_J = \ln [(RY_H \times p)/(RY_J \times q)],$$
(4)

式中, Y_H 和 Y_J 分别为皇竹草和假臭草在单种时每盆产量的平均值, Y_{HJ} 和 Y_{JH} 分别为二者在不同处理中每盆的产量, RY_H 和 RY_J 分别为二者的相对产量; q 和 p 分别为皇竹草和假臭草在某个处理中的种植占比 (q + p = 1), 当皇竹草和假臭草比例为 4:0、3:1、2:2、1:3 和 0:4 时, q 分别为 1.00、0.75、0.50、0.25 和 0, p 分别为 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00。RY_t < 1 表明 2 种植物种间竞争作用强于种内竞争作用; RY_t > 1 表明情况相反; RY_t = 1 表明种间与种内竞争的强度基本持平。CB_J 和 CB_H 分别为二者的竞争指数, 由于 CB_J = -CB_H, 本文只计算假臭草的竞争平衡指数 CB_J 来表示 2 个物种之间的竞争关系。CB_J > 0 表明假臭草在竞争中处于优势; CB_J = 0 表

明 2 个物种竞争能力相等; CB_J < 0 表明物种假臭草在竞争中处于劣势; CB_J 的绝对值越大, 说明 2 种植物的竞争能力差距越大。根据种植比例和单种产量可得到植物在每个处理中的理想相对产量 (RY_e), 在混种比例为 4:0、3:1、2:2、1:3 和 0:4 时, 皇竹草的 RY_e 分别为 1.00、0.75、0.50、0.25 和 0, 假臭草的 RY_e 则为 0、0.25、0.50、0.75 和 1.00。

采用单一样本 t 检验分别比较 RY 与 RY_e、RY_t 与 1 及 CB 与 0 之间的差异; 皇竹草和假臭草在单种与混种处理间各性状的种内差异采用单因素方差分析及 LSD 多重比较进行检验, 皇竹草和假臭草观测值与预测值的差异采用 t 检验进行比较。所有分析在 R 软件 (R ver. 3.5.3)^[14] 中完成。

2 结果与分析

2.1 皇竹草和假臭草的形态差异

单作条件下, 皇竹草植株体型远大于假臭草。皇竹草的单株生物量、地下部生物量及地上部生物量均显著高于假臭草, 分别约为后者的 8、24 和 6 倍 (P < 0.01, 表 1)。这表明皇竹草比假臭草具有更高的资源利用能力。另一方面, 皇竹草的根冠比也显著大于假臭草, 是假臭草根冠比的 3.77 倍 (P = 0.009, 表 1), 而单株总茎长、分枝数和比叶面积均显著小于假臭草 (P < 0.001, 表 1), 表明 2 种植物具有不同的资源获取策略。

表 1 皇竹草和假臭草单作条件下的单株生物量及形态特征 (x̄ ± SE, n=5)

Table 1 Biomass per plant and morphological traits for *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* under monoculture

物种 Species	生物量/g Biomass				
	全株 Plant	地下部 Root	地上部 Shoot	茎 Stem	叶 Leaf
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	48.98 ± 3.83	16.25 ± 2.40	32.73 ± 1.59	27.50 ± 1.21	5.23 ± 0.48
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	6.06 ± 0.30	0.69 ± 0.04	5.37 ± 0.27	3.40 ± 0.18	1.98 ± 0.11
P	0.001	0.007	<0.001	<0.001	0.005
物种 Species	根冠比 Root to shoot ratio	总叶面积/cm ² Total leaf area	总茎长/cm Total stem length	分枝数 Branch number	比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹) Specific leaf area
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	0.49 ± 0.06	829.39 ± 83.42	167.55 ± 7.83	1.20 ± 0.09	139.30 ± 6.55
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	0.13 ± 0.00	874.31 ± 36.02	843.33 ± 41.72	30.80 ± 1.31	434.93 ± 17.65
P	0.009	0.646	<0.001	<0.001	<0.001

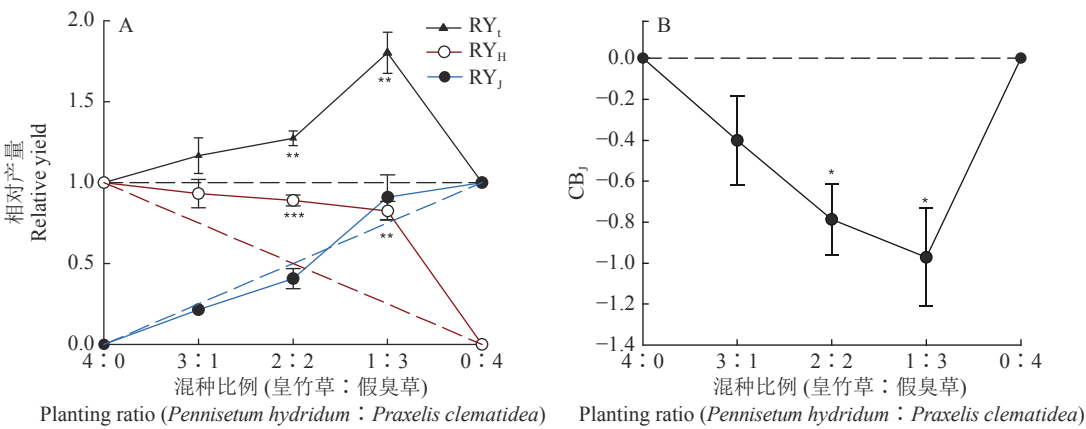
2.2 皇竹草和假臭草的竞争关系

由图 1 可知, 皇竹草种内竞争激烈, 2 种植物的

种内及种间竞争关系随着混种比例的变化而变化。皇竹草和假臭草混种比例为 2:2 和 1:3 处理的

RY_t 显著大于 1.00, 分别为 1.27($P=0.009$) 和 1.80($P=0.008$), 表明混种处理中皇竹草的种内竞争作用强于种间竞争作用。在所有处理中, 假臭草的相对产量都与预期值无显著差异, 表明假臭草的种内竞争和种间竞争相对平衡。在混种比例为 2:2 和 1:3 时, 皇竹草的相对产量显著高于预期值 0.50 和 0.25, 分别为 0.89($P<0.001$) 和 0.83 ($P=0.002$), 观测值与预期值的差距随着种植比例的降低而增高, 表明皇竹草种内竞争较强, 混种处理缓

解了皇竹草的种内竞争。所有混种处理中的假臭草的竞争平衡指数均小于 0, 范围为-0.97~-0.40, 其中混种比例为 2:2 和 1:3 时的竞争平衡指数与 0 差异显著, 分别为-0.79($P=0.020$) 和-0.97($P=0.030$), 表明在与皇竹草的竞争中, 假臭草处于劣势。而且假臭草的竞争平衡指数随着皇竹草种植比例降低而降低, 说明皇竹草的种间竞争能力随着自身密度的降低而增强。



与实线同色的虚线表示该指标的预期值($\bar{x} \pm SE, n=5$); “*”、“**”和“***”分别表示测量值与预期值的差异达到 0.05、0.01 和 0.001 的显著水平 (t 检验)

The dashed line with the same color of the solid line shows the expected value for this index($\bar{x} \pm SE, n=5$); “*”, “**” and “***” indicate the difference between the observed and expected values at the significance levels of 0.05, 0.01 and 0.001 respectively (t test)

图 1 不同混种比例下皇竹草和假臭草的相对产量 (RY_H 和 RY_J)、总相对产量 (RY_t) 以及假臭草的竞争平衡指数 (CB_j)

Fig. 1 The relative yield of *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* (RY_H and RY_J), the total relative yield (RY_t) and the competitive balance index (CB_j) for *Praxelis clematidea* under different planting ratios

2.3 混种比例对 2 种植物生物量分配的影响

单因素方差分析显示 2 种植物的混种显著影响了皇竹草的单株、地下部、地上部、茎、叶生物量及根冠比 ($P<0.05$), 但只对假臭草地下部生物量和茎、叶生物量有显著影响 ($P<0.05$, 表 2)。皇竹草的单株生物量、地下部、地上部生物量及茎、叶生物量均随着自身种植比例的下降发生不同程度的增加, 在自身种植比例为 0.25 (皇竹草和假臭草混种比例为 1:3) 时达到最大值, 分别为单种时的 3.3、3.8、3.1、3.0 和 3.1 倍 ($P<0.05$, 图 2), 其单株生物量自单种时的 48.98 g 增加至 161.66 g (混种比例为 1:3)。皇竹草的根冠比在混种比例为 3:1 时是单种时的 1.6 倍 ($P<0.05$), 但混种比例为 2:2 和 1:3 时只略为升高, 与单种没有显著差异。假臭草的单株生物量和地下部生物量在自身种植比例为 0.25 (混种比例为 3:1) 时最高, 分别为单种时的 1.5 和 1.6 倍 ($P<0.05$)。其地上部生物量无显著变化, 但混种处理中茎生物量比单种高, 叶生物量比单种低, 其中茎生物量最高时 (混种比例为 3:1) 是

单种时的 2.0 倍, 叶生物量最低时 (混种比例为 2:2) 是单种时的 0.4 倍 ($P<0.05$)。混种处理中, 假臭草的根冠比与单种中的均无显著差异, 但在混种比例为 2:2 和 3:1 时, 其根冠比显著高于混种比例为 1:3 的处理 ($P<0.05$)。表明混种比例显著影响了 2 种植物的生物量积累及分配。随着自身种植比例下降, 皇竹草生物量积累大幅增加, 且通过增加地下部生物量的分配适应种间竞争压力的上升; 假臭草生物量积累有小幅上升, 并通过增加茎生物量的分配适应种间竞争压力的上升。

2.4 混种比例对 2 种植物形态的影响

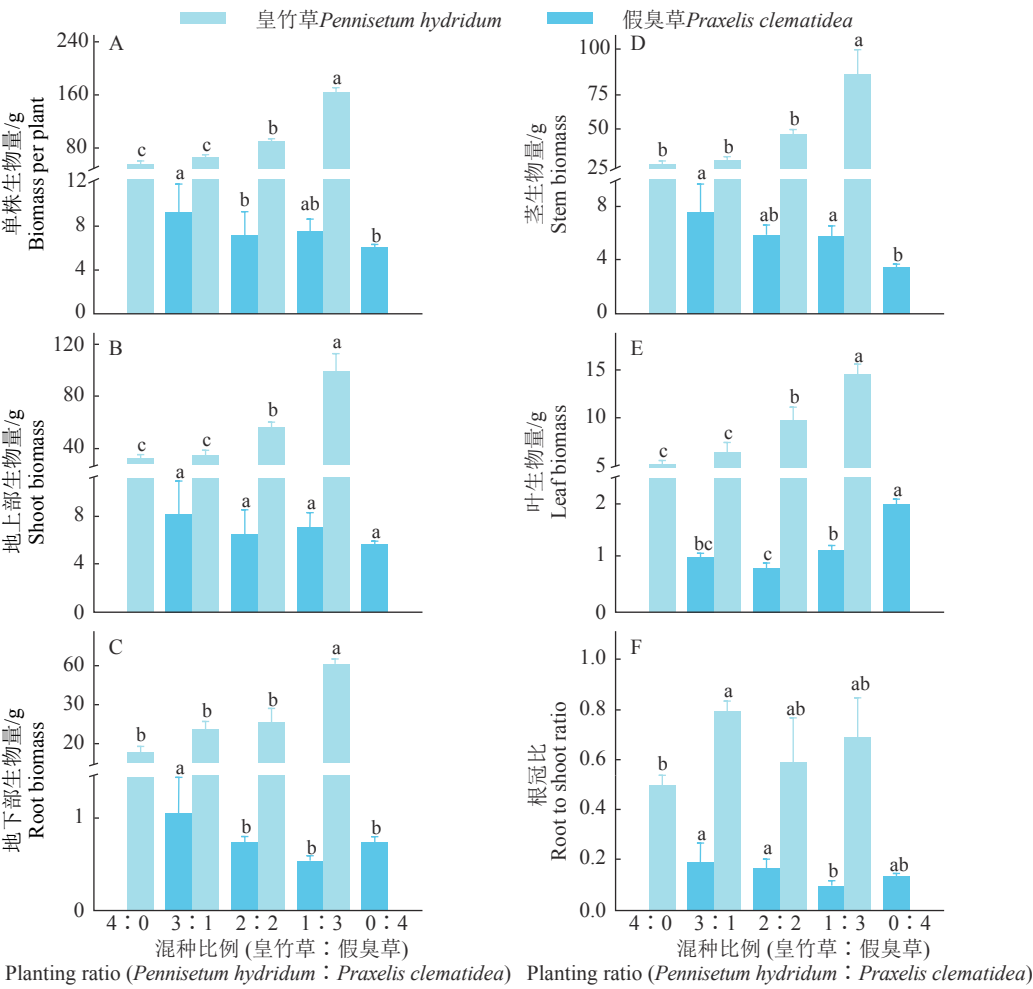
混种比例不仅影响了植物的生物量分配, 还影响了植物的其他形态指标。方差分析显示, 混种比例显著影响了皇竹草的总叶面积、总茎长和比叶面积 ($P<0.05$), 对分枝数无显著影响; 混种比例同样显著影响了假臭草的总叶面积、总茎长和分枝数 ($P<0.05$), 但对其比叶面积无显著影响 (表 2)。皇竹草在混种处理中的总叶面积显著低于单种, 且在皇竹草和假臭草比例为 2:2 时最低, 其比叶面积在混

表 2 皇竹草和假臭草混种对其单株生物量及形态特征影响的单因素方差分析 (n = 5)

Table 2 Effects of planting ratio on biomass per plant and morphological traits of *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* analyzed by one-way ANOVA

物种 Species	单株生物量		地下部生物量		地上部生物量		茎生物量		叶生物量	
	Biomass per plant		Root biomass		Shoot biomass		Stem biomass		Leaf biomass	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	34.63	<0.001	12.99	0.003	16.77	0.001	18.66	0.001	25.37	<0.001
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	1.40	0.290	4.88	0.017	1.55	0.252	4.60	0.018	30.16	<0.001

物种 Species	根冠比		总叶面积		总茎长		分枝数		比叶面积	
	Root to shoot ratio		Total leaf area		Total stem length		Branch number		Specific leaf area	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	5.52	0.033	29.49	<0.001	8.54	0.007	2.82	0.104	7.22	0.014
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	3.09	0.069	31.79	<0.001	16.97	<0.001	26.46	<0.001	0.54	0.662



各图中，不同小写字母表示处理间的种内差异显著 ($P < 0.05$, LSD 法)
In each graph, different lowercase letters indicate significant difference among treatments within species ($P < 0.05$, LSD method)

图 2 不同比例混种处理中皇竹草和假臭草的单株生物量分配 ($\bar{x} \pm \text{SE}$, $n = 5$)
Fig. 2 Biomass distributions per plant of *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* in treatments of different planting ratios

种比例为 2:2 时显著低于单种, 总茎长度在混种比例为 2:2 和 1:3 时显著大于 3:1 混种, 分枝数则随着混种比例的降低而降低 ($P < 0.05$, 图 3)。表明随着种内竞争缓和、种间竞争加剧, 皇竹草适应性地减少了自身分枝数并延长了茎的长度。假臭草在混种处理中总叶面积、总茎长和分枝数显著低于单种 ($P < 0.05$), 和单种相比, 混种处理中的假臭草总叶面

积减少 43.4%~68.2%、总茎长减少 49.4%~ 63.6%、分枝数减少 46.1%~71.6%(图 3)。表明在混种处理中, 皇竹草和假臭草的叶片生长和分枝的形成均受到了抑制, 但皇竹草通过延长茎的长度适应种间竞争。假臭草的总叶面积、总茎长和分枝数均显著减小, 表明其地上生物量没有显著变化是枝条加粗、茎生物量增加的结果。

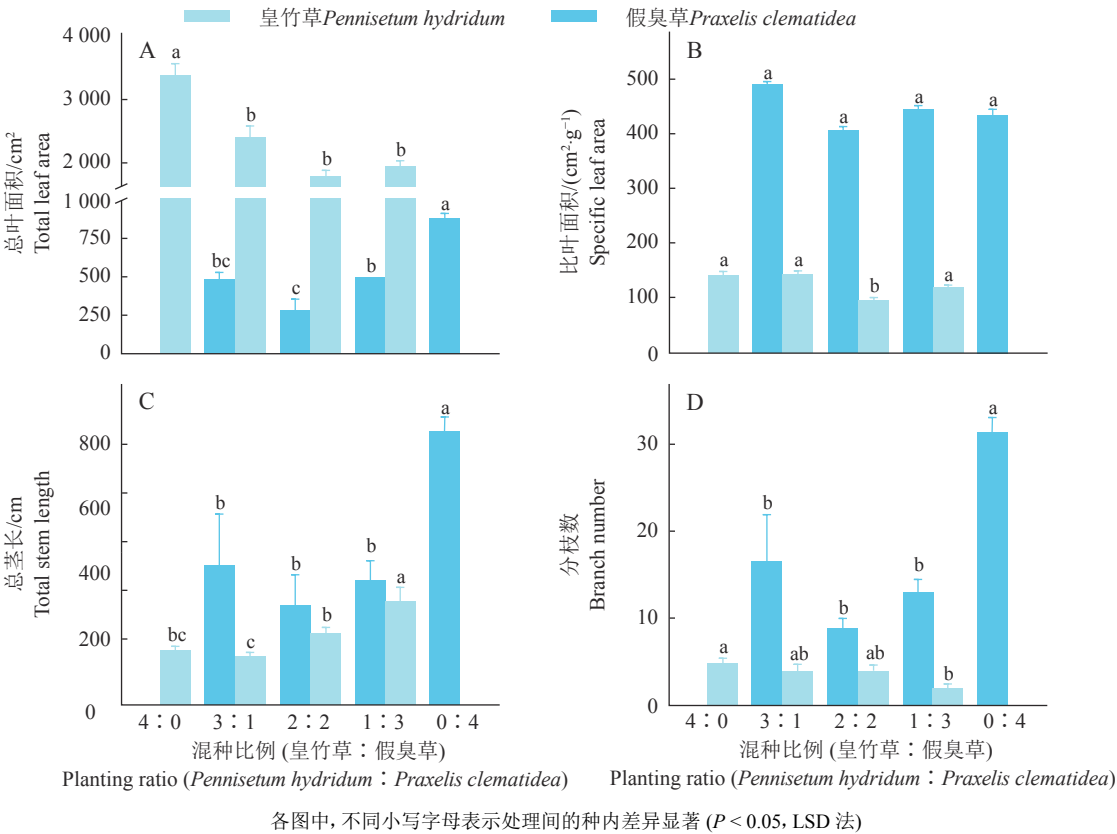


图 3 不同比例混种处理中皇竹草和假臭草的形态特征 ($\bar{x} \pm SE$, $n = 5$)

Fig. 3 Morphological characteristics of *Pennisetum hybridum* and *Praxelis clematidea* in treatments of different planting ratios

3 讨论与结论

植株高大的植物在光照竞争上往往较有优势, 同时强壮的根系可使植物在土壤养分竞争中较易占据优势地位^[6]。由于具有这些优势, 皇竹草等高且入侵风险低的植物常被作为控制入侵害草的优良候选植物^[15-17]。本研究结果显示, 随着竞争者假臭草的种植比例增大, 皇竹草减少了总叶面积和分枝, 同时延长了茎长, 从而增加光照的截获, 加强对假臭草的遮阴抑制。这是植物通过波长变化感受到相邻植物的存在后, 调整生物量分配以增强光竞争能力的结果^[7-8]。尽管假臭草与高大的皇竹草在光资源竞争中处于明显劣势, 但随着皇竹草的种植比例增加, 假臭草的生物量积累并没有受到明显的抑

制。这可能是由于假臭草面对在光竞争方面毫无机会的对手时, 调整了自身的竞争策略^[8], 其根冠比的变化及总叶面积和茎长的减小正说明了这一点。一般而言, 植物生物量的分配与植物地上地下的竞争能力息息相关, 例如根冠比随着光照降低而降低、随着养分和水分减少而增加^[18]。面对过于高大的竞争者时, 植物的叶片和茎的生长可能受到抑制, 转而选择忍耐遮阴的策略, 植物长期采取这种策略将导致有机物积累减少、竞争能力下降^[8]。本研究发现, 随着皇竹草的种植比例上升, 假臭草选择了耐受遮阴并增强地下部分竞争能力的策略。皇竹草不仅在光竞争中表现出优势, 而且表现出对假臭草化感作用的耐受性。有研究表明, 假臭草能分泌化感物质, 对其他杂草有明显的排斥作用, 尤其对种子

萌发的抑制作用明显^[19]。一方面本研究发现皇竹草生物量积累不仅没有因假臭草种植比例增加而受到抑制甚至有所促进,另一方面皇竹草以种茎繁殖可避免其萌发受到假臭草的化感抑制^[12]。

前人研究发现,光照较强的生境中植物的比叶面积较小^[20-21],另一方面比叶面积与环境可获取水量具有正相关关系^[22]。本研究中,皇竹草比叶面积的减少可能是光竞争缓和的结果,也可能是该混种比例(2:2)下土壤水分竞争剧烈所导致的。有研究者在柱花草 *Stylosanthes guianensis* 替代控制假臭草的研究中发现,柱花草需要较高的植株比例才能有效抑制假臭草生长^[23]。但在本研究中,由于皇竹草种内竞争较剧烈,虽然在所有处理中皆处于竞争优势地位,但在混种比例较低时(1:3)竞争优势更为明显,因此在利用皇竹草的竞争优势控制假臭草时,应注意适当降低其自身的种植密度。

综上,皇竹草在与入侵杂草假臭草的竞争中处于优势地位,能影响假臭草的生物量分配,并且可耐受假臭草的化感作用^[19],具有替代控制该入侵杂草的潜力。但皇竹草的种内竞争较强,故在野外应用时需控制好其自身的种植密度,以免影响其本身的产量及对假臭草的控制效果。

参考文献:

[1] PIEMEISEL R L, CARNSNER E. Replacement control and biological control[J]. *Science*, 1951, 113(2923): 14-15.

[2] ZHOU T, LIU S C, FENG Z L, et al. Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 12980.

[3] 朱宏伟, 孟玲, 李保平. 黑麦草与入侵杂草紫茎泽兰苗期的相对竞争力[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(1): 29-32.

[4] 蒋智林, 刘万学, 万方浩, 等. 非洲狗尾草与紫茎泽兰的竞争效应[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1347-1354.

[5] KUEBBING S E, NUÑEZ M A. Negative, neutral, and positive interactions among nonnative plants: Patterns, processes, and management implications[J]. *Glob Change Biol*, 2015, 21(2): 926-934.

[6] ASCHEHOUG E T, BROOKER R, ATWATER D Z, et al. The mechanisms and consequences of interspecific competition among plants[J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2016, 47(1): 263-281.

[7] CHITWOOD D H, KUMAR R, RANJAN A, et al. Light-induced indeterminacy alters shade-avoiding tomato leaf-morphology[J]. *Plant Physiol*, 2015, 169(3): 2030-2047.

[8] GRUNTMAN M, GROß D, MÁJEKOVÁ M, et al. Decision-making in plants under competition[J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 2235.

[9] GOLDBERG D E. Components of resource competition

in plant communities [M]// GRACE J B, TILMAN D. *Perspectives on plant competition*, Amsterdam: Elsevier, 1990: 27-49.

[10] 程汉亭, 范志伟, 沈奕德, 等. 外来入侵植物假臭草的研究进展[J]. *杂草科学*, 2010, 28(3): 1-4.

[11] 张辉, 余光辉, 吕志英. 皇竹草的特性及其在西部开发中的应用[J]. *林业科技开发*, 2004, 18(3): 14-16.

[12] 郑海, 易自成, 黎俏文, 等. 多功能作物皇竹草引种的环境风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 288-297.

[13] WILSON J B. Shoot competition and root competition[J]. *J Appl Ecol*, 1988, 25(1): 279.

[14] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing[M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.

[15] 罗娜. 不同牧草替代紫茎泽兰的试验效果调查[J]. *绿色科技*, 2017(13): 19-20.

[16] LI Q W, YI Z C, LI H S, et al. The assessment of replacement control for *B. Pilosa* L. with *Pennisetum hydridum*, a typical bioenergy crop and *Sesbania cannabina* Pers[C]//Science and Engineering Research Center. *Proceedings of 2015 International Conference on Computer Science and Environmental Engineering (CSEE 2015)*, Beijing: DEStech Publications, 2015: 146-156.

[17] XU Q Y, WANG D, QUAN G M, et al. *Pennisetum hydridum*'s potential for controlling invasive *Chromolaena odorata*[J]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 5990.

[18] HUANG Q Q, SHEN Y D, LI X X, et al. Performance of the invasive *Eupatorium catarium* and *Ageratum conyzoides* in comparison with a common native plant under varying levels of light and moisture[J]. *Weed Biol Manag*, 2017, 17(2): 112-121.

[19] 邓文爽, 张玉宁, 赖洁莹, 等. 假臭草化感作用的研究进展[J]. *广东化工*, 2018, 45(2): 106-107.

[20] ROSATI A, BADECK F W, DEJONG T M. Estimating canopy light interception and absorption using leaf mass per unit leaf area in *Solanum melongena*[J]. *Ann Bot*, 2001, 88(1): 101-109.

[21] PONS T L, POORTER H. The effect of irradiance on the carbon balance and tissue characteristics of five herbaceous species differing in shade-tolerance[J]. *Front Plant Sci*, 2014, 5: 12.

[22] KNIGHT C A, VOGEL H, KROYMANN J, et al. Expression profiling and local adaptation of *Boechera holboellii* populations for water use efficiency across a naturally occurring water stress gradient[J]. *Mol Ecol*, 2006, 15(5): 1229-1237.

[23] 李雪枫, 王坚, 徐圳鑒. 混播比例对热研 2 号柱花草和假臭草早期生长竞争能力的影响[J]. *杂草学报*, 2017, 35(2): 46-54.