

干扰方式对香蕉园入侵杂草群落种间关联的影响

只佳增, 杜浩, 周劲松, 赵丽娟, 刘学敏, 张建春*

云南省红河热带农业科学研究所, 云南河口 661300

摘要:【目的】探讨干扰方式对香蕉园入侵杂草群落种间关联的影响。【方法】在样方调查的基础上, 运用方差比率法(V_R)、 χ^2 检验、联结系数 A_c 、Ochiai 指数 I_0 、Spearman 秩相关分析法研究人工挖除、药剂除草、机械割除 3 种干扰方式下香蕉园入侵杂草的种间关联特征。【结果】白花鬼针草、阔叶丰花草、鹅肠菜为香蕉农田入侵杂草的主要建群种, 入侵杂草群落总体方差比率 V_R 均大于 1, 3 种杂草管理方式群落种间总体呈显著正联结趋势。 χ^2 检验显示, 人工挖除方式有 3 个种对显著联结, 1 个种对(香附子-两耳草)极显著联结; 药剂除草方式有 3 个种对显著联结; 机械割除方式有 6 个种对显著联结, 3 个种对(鹅肠菜-败酱叶菊苣、阔叶丰花草-败酱叶菊苣、阔叶丰花草-无刺含羞草)极显著联结。联结系数 A_c 、联结程度 I_0 分析得到的结果与 χ^2 检验基本一致, 达到显著和极显著联结的种对较少, 大部分入侵杂草种间联结性较弱。Spearman 相关性分析显示, 人工挖除、药剂除草、机械割除 3 种干扰方式的入侵杂草显著相关的种对比例均较低, 分别为 18.2%、14.3%、13.6%。【结论】3 种干扰方式的香蕉园入侵杂草种间关系均较松散, 机械割除方式的杂草群落更趋于稳定。阔叶丰花草在不同干扰方式下与种间都有显著的关联性, 对杂草群落稳定共存发挥重要作用, 在香蕉园杂草生物防治中具有利用潜力。

关键词: 香蕉园; 干扰方式; 入侵杂草; 种间联结



开放科学标识码
(OSID 码)

Interspecific association of invasive weeds community on different disturbance modes in banana fields

ZHI Jiazeng, DU Hao, ZHOU Jinsong, ZHAO Lijuan, LIU Xuemin, ZHANG Jianchun*

Honghe Research Institute of Tropical Agriculture in Yunnan Province, Hekou, Yunnan 661300, China

Abstract: 【Aim】 We studied the interspecific association of the invasive weed community in banana fields under different disturbance modes. 【Method】 We performed field surveys and used the variance ratio method, χ^2 test, association coefficient, Ochiai index, and Spearman rank correlation analysis to identify the interspecific association characteristics of invasive weeds in banana fields under three interference modes of artificial weeding, chemical weeding, and mechanical weeding. 【Result】 *Bidens pilosa*, *Spermacoce alata*, and *Myosoton aquaticum* were found to be the main invasive weeds under the three models in banana fields. The overall variance ratio V_R of invasive weed communities was greater than 1, and there was a significant positive association trend among the weeds under the three management modes. χ^2 test showed that there were 3 species pairs of significant association and 1 species pairs (*Cyperus rotundus* & *Paspalum conjugatum*) of extremely significant association in artificial weeding; There were 3 species pairs in the way of chemical weeding; There were 6 species pairs of significant association and 3 species pairs (*Myosoton aquaticum* & *Erechtites valerianifolius*, *Spermacoce alata* & *Erechtites valerianifolius*, *Spermacoce alata* & *Mimosa diplotricha* var. *inermis*) of extremely significant association in mechanical cutting. The results obtained from the analysis of association coefficient (A_c), association degree (I_0), and χ^2 test inspection were consistent. Few species pairs were significant or extremely significant, and the interspecific association of most invasive weeds was weak. Spearman correlation analysis showed that in artificial weeding, chemical weeding, and mechanical weeding, the proportions of species pairs significantly related to invasive weeds were low: 18.2%, 14.3%, and 13.6%, respectively. 【Conclusion】 The weed community exhibited positive succession under mechanical cutting, which indicated that moderate reduction in disturbance which was beneficial for community stability. *Spermacoce alata* showed a significant correlation with species under different disturbance modes, indicating its potential role in the stable coexistence of weed communities and

收稿日期(Received): 2022-09-27 接受日期(Accepted): 2023-09-18

基金项目: 云南技术创新人才培养计划(202205AD160038); 云南省科技计划(202004AR040006)

作者简介: 只佳增, 男, 硕士, 助理研究员。研究方向: 农业生态学。E-mail: 303567395@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 张建春, E-mail: ynhhzc@126.com

its potential for use in the biological control of weeds in banana fields.

Key words: banana fields; disturbance modes; invasive weeds; interspecific association

植物种间联结性能够直观和有效地反映群落的结构、功能、动态以及种间的相互关联性,常用于测度植物种间关系(张央等,2022),种间联结性反映了群落种间的相互作用及物种与环境因子间的耦合关系,是维持群落多样性及生态系统功能的重要生态过程(吴焦焦等,2020)。物种的空间分布格局在一定程度上可以反映种间的关联程度,当2个物种关联程度较高时,它们通常会出现在相同区域(Ma *et al.*,2022)。植物群落的总体联结性体现种间总体关联性,可以用来表征群落演替的阶段,当总体联结性较低时,群落总体呈现负的关联性,群落处于演替前中期;当总体联结性较高时,群落处于演替稳定期(吴鑫磊等,2022)。种间关系具有明显的环境依赖性,这种依赖性在胁迫环境下可能更为复杂,并可能直接影响植物的生存。因此,从种间关联角度研究胁迫环境下植物功能性状的种间差异,有利于揭示种间关系在植物功能性状变异中的作用(程久菊等,2022; Amat *et al.*,2015)。

农田杂草发生普遍、危害严重,是困扰农业健康发展的一个重要因素,传统耕作方式中对杂草的干扰管理措施常用的有使用化学除草剂、人工挖除和割草机除草等,不同的耕作方式是造成农田生态系统的干扰程度差异的主要因素(闵安民等,2005)。干扰对杂草种子库的种类组成有一定的影响,强干扰有利于一年生杂草和外来物种生存,免耕或减少干扰有利于多年生杂草的发生(李秉华等,2017)。我国农田耕作制度长期以来强调“清耕除草”,人为活动的干扰较为频繁,杂草演替更迭较快,致使农田杂草外来种的入侵已成为十分普遍的现象(郝丽芬等,2022)。外来入侵杂草会因其强大的适应能力及进入到新环境后占有生态位等打破生态系统平衡,排斥原有物种,导致当地植物多样性下降(Chen *et al.*,2020)。然而,有些入侵杂草由于根系浅、自然建群能力强以及植株较为低矮的特性,在生物防治中具有较大的应用潜力(左玉环等,2019)。纪红等(2021)通过研究阔叶丰花草 *Spermacoce alata* Aublet 对荔枝园杂草群落多样性的影响发现,阔叶丰花草定植改变了杂草群落结构,降低了恶性杂草牛筋草 *Eleusine indica* (L.) Gaertn.、

马唐 *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. 等的重要值,有利于荔枝园杂草管理。目前,国内关于干扰对农田生态系统杂草种间关系影响的报道较少,而杂草的种间联结性能够更加直观和有效地反映群落的结构、动态以及种间的相互关系,通过研究入侵杂草群落种间关联格局,从种间关联角度预测种群竞争结局和群落演替的方向,对预测农田杂草群落演替,特别是预测不同耕作方式对农田杂草群落的演替及有效防治杂草具有重要指导意义(孟祥杰等,2021;王虎琴等,2016;轩诗壮等,2021;张亚芬等,2022)。

香蕉 *Musa* spp. 是热带地区重要的经济作物,云南红河河流域的香蕉面积和产量均占云南全省的80%,香蕉是该地区主要农业经济来源之一,高温高湿的香蕉园杂草生长旺盛,以禾本科和菊科杂草居多,这些杂草光合效率高,根系发达,营养生长能力强,能快速向生殖生长过渡,最终与作物争夺水分和养分(杜浩等,2020)。只佳增(2020)研究发现,云南山地香蕉园的杂草种类丰富,没有明显的单优势种,雨季和旱季的杂草在生态位宽度和重叠上有着显著的变化,雨季优势草以马唐、香附子 *Cyperus rotundus* L. 等单子叶杂草为主,旱季优势草以白花鬼针草 *Bidens pilosa* L.、小飞蓬 *Erigeron canadensis* L. 等阔叶杂草为主,入侵杂草以连片斑块状分布于香蕉园,演替成该地优势杂草。目前已开展了香蕉园杂草群落物种多样性及优势种群生态位的研究,但关于杂草种间关系的研究还未见报道,鉴于此,本文拟通过研究不同人为干扰(使用除草剂、人工挖除、机械割除)方式下香蕉园入侵杂草的种间关联格局,阐明不同干扰方式对香蕉农田生态系统的物种影响,预测入侵杂草群落的演替方向及稳定机制,为有效进行杂草生物防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于云南省河口县云南省红河热带农业科学研究所基地内(22°34'27"N, 103°52'26"E),海拔98~176 m,属低山河谷丘陵地貌,为热带季风雨林温热型气候,年平均温度22.6℃,年平均降雨量1587.3 mm,降雨长达163 d,为高温高湿气候。香蕉园土壤为红河河流域冲积的酸性黄色砂壤土,供

试土壤理化性质 pH 值 4.83、有机质 11.09 g · kg⁻¹、全氮 0.71 g · kg⁻¹、速效磷 28.60 mg · kg⁻¹、速效钾 256.0 mg · kg⁻¹ (只佳增等, 2020), 是香蕉栽培较为理想的种植地, 试验地栽培的香蕉为自主选育品种及巴西蕉, 均为中秆品种。

1.2 研究方法

试验于 2018—2021 年进行, 设置 3 个杂草管理方式 (人工挖除、药剂除草、机械割除), 每个除草方式 3 个重复, 平均每种除草方式的样地为 3 hm², 总面积为 9 hm²。其中, 人工挖除频率为每 2 个月 1 次, 把杂草全部 (包括部分土壤种子) 铲除; 药剂除草频率为每 4 个月 1 次, 喷洒除草剂 (32% 滴酸 · 草甘膦, 用量为 13.5 kg · hm⁻²) 使杂草枯死; 机械割除每 2 个月 1 次, 只割除地上部分, 根部以下还存活, 所有样地其他生产方式相同。每个干扰方式随机设立 9 个 10 m × 10 m 的固定样方 (每个重复设 3 个样方), 样方内采用 “M” 5 点取样法 (赵丽娅等, 2021) 设置取样点, 每样点面积为 1 m², 每个样地 45 个采样点, 共 135 个采样点。每年冬春季、夏秋季各调查 1 次, 共采集 3 年试验样地杂草种类、密度、多度和盖度等基本数据。

1.3 数据分析

1.3.1 重要值及优势度 本研究共调查到杂草 97 种, 其中入侵杂草 25 种, 占杂草总数的 25.8%, 计算所有杂草的重要值 (important value, I_v)、优势度 (dominance of species, D), 对主要入侵杂草群落、种间进行关联度分析 (张金屯, 2018)

$$D = \text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度} \quad (1)$$

$$I_v / \% = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) \times 100 / 3 \quad (2)$$

1.3.2 群落总体联结性 群落的总体联结性体现群落中种群间总的关联性, 用 Schluter 提出的方差比率 (variance ratio, V_R) 检验种间总体的关联性 (赵丽娅等, 2021)。

$$\text{总物种数方差 } S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 \quad (3)$$

$$\text{总样本方差 } \delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i (1 - P_i) \quad (4)$$

$$\text{方差比率 } V_R = S_T^2 / \delta_T^2 \quad (5)$$

式中, T_j 为样地 j 内出现的物种数, t 为样地中出现的物种平均数, N 为总的样地数; $P_i = n_i / N$, 为物种 i 出现的频率, n_i 为物种 i 出现的样地数, S 为总的物

种数。当 $V_R > 1$, 表示种间呈净的正关联, $V_R < 1$, 表示种间呈净的负关联, $V_R = 1$, 表示总体种间无关联。再采用统计量 ($w = V_R \times N$) 检验关联程度, 若 $w < \chi_{0.95}^2(N)$ 或 $\chi_{0.05}^2(N) < w$, 表示种间总体联结显著, 若 $\chi_{0.95}^2(N) < w < \chi_{0.05}^2(N)$, 表示种间总体联结不显著。

1.3.3 种间关联分析 为了排除物种分布的偶然性, 只统计样方内出现 5 次以上的物种, 进行种间关联分析, 种间联结性基于建立 2 × 2 联列表, 统计 2 个物种在样方内出现的次数, 再用连续性 Yates 校正的 χ^2 检验定性判定种间联结性 (徐满厚等, 2016)。

$$\chi^2 = \frac{N [|ad - bc| - 0.5N]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)} \quad (6)$$

式中, N 为总样方数; a 为 A 和 B 物种同时出现的样方数; b 为只有 B 物种出现的样方数; c 为只有 A 物种出现的样方数; d 为 A 和 B 物种都没有出现的样方数。若 $\chi^2 \geq 6.635$, 表示种间联结性极显著 ($P \leq 0.01$); $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, 种间联结性显著 ($0.01 < P \leq 0.05$); $\chi^2 < 3.841$, 种间联结性不显著。

χ^2 不能定量区分联结程度, 采用联结系数 (association coefficient, A_c) 进一步检验种间的关联程度 (李娟和张昱, 2022)。

$$\text{当 } ab \geq cd \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)} \quad (7)$$

$$\text{当 } ad < cd, \text{ 且 } d \geq a \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)} \quad (8)$$

$$\text{当 } ad < cd, \text{ 且 } d < a \text{ 时, } A_c = \frac{ad - bc}{(b+d)(c+d)} \quad (9)$$

联结系数 A_c 值域为 $[-1, 1]$, A_c 越趋近 -1, 表示 2 个物种间负联结性越强; A_c 越趋近 1, 表示 2 个物种间正联结性越强; $A_c = 0$, 表示 2 个物种间完全独立。

为减小 A_c 联结系数受 d 值影响产生误差, 采用 Ochiai 指数 (I_0) 测定种对间的正联结程度 (徐满厚等, 2016)。

$$I_0 = \frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}} \quad (10)$$

$0 \leq I_0 \leq 1$, I_0 值与 a 值密切相关, 表示种对的联结性程度和相伴随机出现的概率, 指数越大, 种对同时出现在样方中的概率越大, 种对间联结程度越趋向于正联结。

1.3.4 种间相关性 种间相关性用 Spearman 秩相关系数 $r(i, k)$ 定量分析, 其原理是利用物种优势度数据 (温鑫鸿等, 2022)。

$$r(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (X_{ij} - X_{kj})^2}{N^3 - N} \quad (11)$$

式中, N 为样方数, X_{ij} 和 X_{kj} 为物种 i 和物种 k 在样方 j 中的秩。

2 结果与分析

2.1 主要入侵杂草群落物种概况

如表 1 所示, 香蕉园入侵杂草绝大部分为来源于美洲的物种, 不同人为干扰方式下入侵杂草的重要值有一定的差异, 人工挖除、药剂除草、机械割除方式下入侵杂草重要值 I_V 占比分别为 35.16%、

50.35%、52.91%, 人工挖除方式对入侵杂草分布影响较大, 重要值占比最低。在不同干扰下的白花鬼针草 I_V 为 12.22%~18.24%, 阔叶丰花草 I_V 为 6.41%~12.68%, 为绝对优势杂草, 小飞蓬、野苘蒿 *Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore、鹅肠菜 *Myosoton aquaticum* (L.) Scop. 为主要优势杂草。

2.2 不同群落总体联结性分析

群落的总体联结性分析见表 2, 不同干扰方式下入侵杂草群落总体方差比率 V_R 均大于 1, 且检验的统计量 w 均大于 $\chi_{0.05}^2(45) = 61.66$, 不同干扰方式下入侵杂草群落种间总体均表现显著正联结性。

表 1 不同干扰方式香蕉园入侵杂草重要值

Table 1 Values of invasive weeds in banana fields at different interference modes

编号 No.	物种名称 Species	重要值 I_V / %			来源地 Origin area
		人工挖草 Artificial weeding	药剂除草 Chemical weeding	机械割除 Mechanical weeding	
1	藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	0.48	1.04	1.31	墨西哥及邻近地区 Mexico and adjacent areas
2	白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	12.22	13.89	18.24	热带美洲 Tropical America
3	牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i>	0.50	0.08	0.10	南美洲 South America
4	小飞蓬 <i>Erigeron canadensis</i>	2.60	1.98	2.15	北美和中美洲 North and Central America
5	野苘蒿 <i>Crassocephalum crepidioides</i>	1.04	1.98	1.52	非洲 Africa
6	蓝花野苘蒿 <i>Crassocephalum rubens</i>	0.17	0.08	0.24	热带非洲 Tropical America
7	败酱叶菊苣 <i>Erechtites valerianifolius</i>	0.00	0.80	2.65	热带美洲 Tropical America
8	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	0.97	0.99	2.95	墨西哥 Mexico
9	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.57	0.14	0.00	欧洲和地中海沿岸 Europe and the Mediterranean coast
10	欧洲千里光 <i>Senecio vulgaris</i>	0.00	0.23	0.00	欧洲 Europe
11	鳢肠 <i>Eclipta prostrate</i>	0.62	0.45	0.10	美洲 America
12	节节麦 <i>Aegilops tauschii</i>	0.19	0.00	0.11	欧洲 Europe
13	两耳草 <i>Paspalum conjugatum</i>	1.57	1.38	0.32	南美洲 South America
14	芥菜 <i>Capsella bursa-pastoris</i>	0.09	0.08	0.10	西亚和欧洲 West Asia and Europe
15	鹅肠菜 <i>Myosoton aquaticum</i>	3.59	4.08	6.66	欧洲 Europe
16	反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>	0.20	0.33	0.00	美洲 America
17	皱果苋 <i>Amaranthus viridis</i>	0.37	0.41	0.00	南美洲 South America
18	青葙 <i>Celosia argentea</i>	0.27	0.32	0.21	印度 India
19	铜锤草 <i>Oxalis corymbosa</i>	0.81	2.79	0.62	热带美洲 Tropical America
20	飞扬草 <i>Euphorbia hirta</i>	0.98	0.98	0.68	热带美洲 Tropical America
21	珠子草 <i>Phyllanthus niruri</i>	0.18	0.16	0.21	中美洲 Central America
22	无刺含羞草 <i>Mimosa diplotricha</i> var. <i>inermis</i>	0.17	4.04	4.08	热带美洲 Tropical America
23	阔叶丰花草 <i>Spermacoce alata</i>	6.41	12.68	9.12	热带美洲 Tropical America
24	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	0.71	0.73	0.77	印度 India
25	龙珠果 <i>Passiflora foetida</i>	0.45	0.72	0.75	热带美洲 Tropical America
合计 Total		35.16	50.35	52.91	

表 2 不同群落种间的总体关联性

Table 2 Overall associations among species in different communities

群落类型 Type of community	方差比率 V_R	检验统计量 w Statistics w	χ^2 临界值 χ^2 threshold value	总体关联性 Overall association
人工挖除 Artificial weeding	3.19	95.70	[26.51, 61.66]	显著正联结 Significantly positive association
药剂除草 Chemical weeding	2.39	71.70	[26.51, 61.66]	显著正联结 Significantly positive association
机械割除 Mechanical weeding	5.17	155.10	[26.51, 61.66]	显著正联结 Significantly positive association

2.3 种间联结性分析

显著联结,1 对极显著联结;药剂除草方式下共组成

2.3.1 χ^2 检验 通过 χ^2 检验可以看出(表 3、4、5),人工挖除方式下入侵杂草间共组成 55 个种对,其中 3 对

105 个种对,其中 3 对显著联结;机械割除方式下共组成 66 个种对,其中 6 对显著联结,3 对极显著联结。

表 3 人工挖除方式下入侵杂草群落的 χ^2 统计量检验
Table 3 Invasive weeds communities χ^2 statistical test of artificial weeding

编号 No.	2	4	5	8	9	11	13	20	23	24
4	0.16									
5	1.04	1.20								
8	0.02	2.24	0.38							
9	0.23	0.01	3.85*	0.01						
11	0.58	2.24	6.61*	0.78	0.01					
13	0.02	0.01	0.14	3.00	2.59	0.00				
20	0.18	0.01	0.01	0.14	0.09	0.32	0.03			
23	0.23	1.05	1.29	1.41	0.64	0.01	4.75*	2.87		
24	0.03	0.25	0.85	0.15	0.38	0.60	7.35**	0.00	3.38	
25	0.03	0.25	0.03	0.15	0.38	0.15	0.46	0.00	0.38	0.19

* 表示 $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, 种间联结性显著 ($0.01 < P \leq 0.05$); ** 表示 $\chi^2 \geq 6.635$, 种间联结性极显著 ($P \leq 0.01$)。

* indicates $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, the association between species were significant ($0.01 < P \leq 0.05$); ** indicates $\chi^2 \geq 6.635$, the association between species were extremely significant ($P \leq 0.01$).

表 4 药剂除草方式下入侵杂草群落的 χ^2 统计量检验
Table 4 Invasive weeds communities χ^2 statistical test of chemical weeding

编号 No.	1	2	4	5	8	11	13	15	17	19	20	22	23	24
2	0.03													
4	1.74	0.65												
5	0.00	0.17	0.54											
8	0.11	0.24	0.94	0.00										
11	3.38	1.29	3.06	0.21	0.08									
13	0.15	0.38	0.17	0.00	3.00	1.41								
15	0.85	0.12	0.00	0.17	0.14	1.29	0.38							
17	0.19	0.85	0.11	0.96	0.11	0.38	0.6	0.85						
19	0.03	0.02	0.02	1.35	0.88	0.23	2.82	0.02	3.63					
20	0.75	1.04	0.83	0.15	0.02	0.23	0.02	3.60	3.63	0.02				
22	1.84	1.51	0.04	0.00	0.18	0.44	3.43	4.35*	0.46	0.45	2.17			
23	0.11	0.74	0.01	0.54	0.04	0.01	0.17	0.00	0.11	2.05	0.02	0.04		
24	0.19	5.76*	2.71	0.00	2.87	0.38	2.39	0.03	0.19	0.03	1.47	1.84	0.11	
25	0.00	0.98	1.65	0.63	0.03	0.09	0.14	0.01	0.00	0.18	0.18	3.31	4.37*	0.00

* 表示 $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, 种间联结性显著 ($0.01 < P \leq 0.05$)。

* indicates $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, the association between species were significant ($0.01 < P \leq 0.05$).

表 5 机械割除方式下入侵杂草群落的 χ^2 统计量检验
Table 5 Invasive weeds communities χ^2 statistical test of mechanical weeding

编号 No.	1	2	4	5	7	8	15	20	22	23	24
2	0.52										
4	0.02	0.04									
5	0.70	0.00	3.03								
7	0.58	0.90	0.02	5.19*							
8	0.07	4.34*	1.41	0.01	0.16						
15	0.02	0.04	0.02	5.19*	11.72**	0.16					
20	0.01	0.16	0.23	0.08	2.11	1.05	2.11				
22	0.02	0.04	0.47	0.88	5.42*	0.16	0.47	0.23			
23	0.07	4.34*	0.16	2.64	7.66**	0.05	3.91*	0.01	7.66**		
24	0.02	0.52	0.02	0.00	0.02	0.07	0.02	0.01	0.02	2.24	
25	0.02	0.30	0.02	0.70	0.02	0.07	0.02	1.41	0.02	0.38	0.02

* 表示 $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, 种间联结性显著 ($0.01 < P \leq 0.05$); ** 表示 $\chi^2 \geq 6.635$, 种间联结性极显著 ($P \leq 0.01$)。

* indicates $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$, the association between species were significant ($0.01 < P \leq 0.05$); ** indicates $\chi^2 \geq 6.635$, the association between species were extremely significant ($P \leq 0.01$).

2.3.2 种间联结系数 将 A_c 值划分 5 个区间, 其中, A_c 值在 $[-1, -0.5]$ 说明种对间负联结性较高; 值在 $(-0.5, -0.2]$ 说明种对间有负联结性, 但联结不紧密; A_c 值在 $(-0.2, 0.2)$ 说明种对间联结性较弱, 呈相互独立趋势; A_c 值在 $[0.2, 0.5)$ 说明种对间有正联结性, 但联结不紧密; A_c 值在 $[0.5, 1]$ 说明种对间正联结性较高。由联结系数 A_c 值半矩阵图(图 1)可知, 人工挖除方式下, A_c 值在 $(-0.2, 0.2)$ 的种对有 43 对(占总对数的 78.2%), A_c 值在 $[0.2, 0.5)$ 的种对有 10 对(18.2%), A_c 值在 $[0.5, 1]$ 的种对有 2 对(3.6%); 药剂除草方式下, A_c 值在 $[-1, -0.5]$ 的种对有 19 对(18.1%), A_c 值在 $(-0.5,$

$-0.2]$ 的种对有 17 对(16.2%), A_c 值在 $(-0.2, 0.2)$ 的种对有 42 对(40.0%), A_c 值在 $[0.2, 0.5)$ 的种对有 23 对(21.9%), A_c 值在 $[0.5, 1]$ 的种对有 4 对(3.8%); 机械割除方式下, A_c 值在 $[-1, -0.5]$ 的种对有 6 对(9.1%), A_c 值在 $(-0.5, -0.2]$ 的种对有 16 对(24.2%), A_c 值在 $(-0.2, 0.2)$ 的种对有 35 对(53.1%), A_c 值在 $[0.2, 0.5)$ 的种对有 7 对(10.6%), A_c 值在 $[0.5, 1]$ 的种对有 2 对(3.0%)。结果显示, 人工挖除方式下入侵杂草间趋向于正联结, 总体联结不紧密; 药剂除草、机械割除方式下入侵杂草间负联结性强于正联结性。

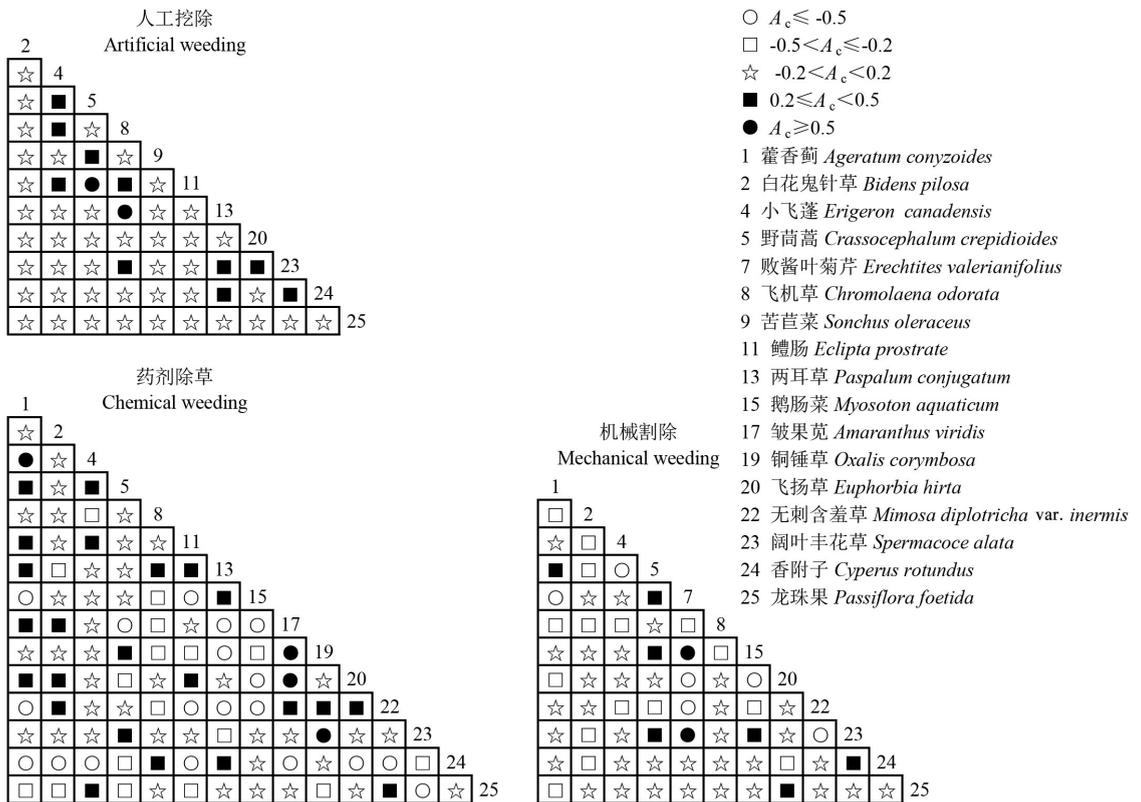


图 1 不同干扰方式下入侵杂草种间联结系数半矩阵图

Fig.1 Semi matrix of interspecific association coefficient of invasive weeds at different interference modes

2.3.3 种间正联结程度 I_0 值表示种对的正联结程度和共同出现的概率, 将 I_0 值划分 3 个区间, I_0 值为 $[0, 0.5)$ 说明种对间联结程度和共同出现的概率较低, I_0 值为 $[0.5, 0.8)$ 说明种对间联结程度和共同出现的概率较高, I_0 值为 $[0.8, 1]$ 说明种对间联结程度和共同出现的概率极高。由 I_0 值半矩阵图(图 2)可知, 人工挖除方式下, I_0 值为 $[0, 0.5)$ 的种对有 42 对(占总对数的 76.4%), I_0 值为 $[0.5,$

$0.8)$ 的种对有 13 对(23.6%); 药剂除草方式下, I_0 值为 $[0, 0.5)$ 的种对有 80 对(76.2%), I_0 值为 $[0.5, 0.8)$ 的种对有 25 对(23.8%); 机械割除方式下, I_0 值为 $[0, 0.5)$ 的种对有 53 对(80.3%), I_0 值为 $[0.5, 0.8)$ 的种对有 12 对(18.2%), I_0 值为 $[0.8, 1]$ 的种对有 1 对(1.5%)。结果表明, 不同干扰方式下大部分入侵杂草种间正联结程度较弱, 只有少部分种对间有较强的联结性, 这与 A_c 值分析结果相似。

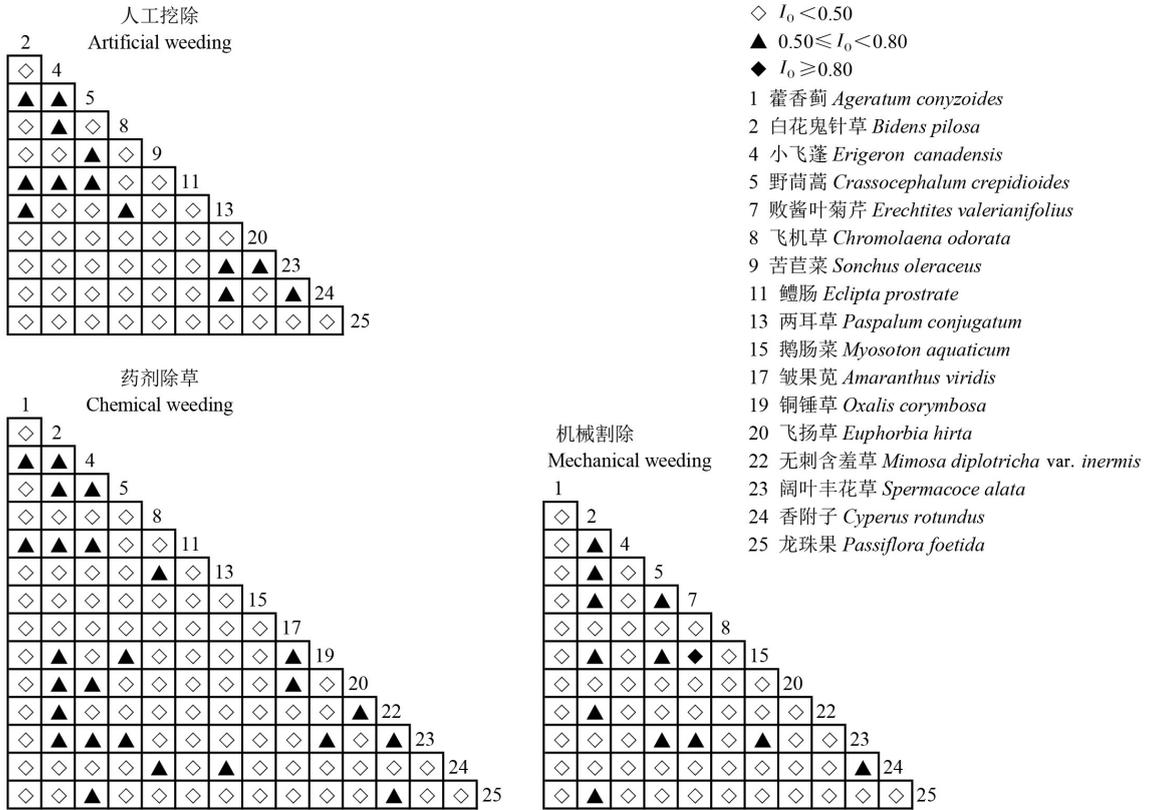


图 2 不同干扰方式下入侵杂草种间正联结程度半矩阵图

Fig.2 Semi matrix of interspecific interspecific association degree of invasive weeds at different interference modes

2.4 种间相关性分析

种间联结性是定性分析,而种间相关性是定量分析,后者具有更高的灵敏度(赵丽娅等,2021)。由秩相关分析(表6、7、8)可知,人工挖除方式下,有9个种对呈显著正相关,占16.4%,1个种对呈显著负相关,占1.8%;药剂除草方式下,有10个种对

呈显著正相关,占9.5%,5个种对呈显著负相关,占4.8%;机械割除方式下,有6个种对呈显著正相关,占9.1%,3个种对呈显著负相关,占4.5%。在3种干扰方式下同时出现的28个种对中,有5个种对的相关显著性发生了改变。

表 6 人工挖除方式下入侵杂草群落的秩相关系数半矩阵

Table 6 Semi matrix of rank correlation coefficient of invasive weeds communities of artificial weeding

编号 No.	2	4	5	8	9	11	13	20	23	24	25
4	-0.17										
5	-0.01	0.43 *									
8	-0.05	0.37 *	0.27								
9	0.04	0.04	0.48 **	-0.05							
11	0.07	0.43 *	0.55 **	0.29	0.18						
13	0.10	-0.08	-0.08	0.41 *	-0.37 *	-0.05					
20	-0.07	0.03	-0.03	0.11	0.08	0.23	-0.16				
23	0.02	0.15	-0.29	0.28	-0.25	-0.09	0.44 *	0.34			
24	0.20	-0.17	-0.26	-0.03	-0.22	-0.24	0.55 **	0.00	0.46 *		
25	0.24	0.01	-0.10	0.14	-0.22	-0.06	0.17	-0.13	0.00	0.10	

* 表示种间显著相关($P < 0.05$); ** 表示种间极显著相关($P < 0.01$)。

* indicates significant correlation between species ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation between species ($P < 0.01$).

表7 药剂除草方式下入侵杂草群落的秩相关系数半矩阵

Table 7 Semi matrix of rank correlation coefficient of invasive weeds communities of chemical weeding

编号 No.	1	2	4	5	8	11	13	15	17	19	20	22	23	24
2	-0.19													
4	0.17	0.02												
5	-0.02	-0.10	0.19											
8	0.08	-0.27	-0.24	-0.04										
11	0.62**	-0.18	0.13	0.14	0.15									
13	0.14	-0.34	0.06	-0.11	0.47**	0.22								
15	-0.26	-0.08	0.21	0.22	-0.19	-0.33	0.17							
17	0.04	0.50**	0.15	-0.30	-0.20	-0.02	-0.24	-0.26						
19	-0.12	0.39*	0.22	0.36	-0.32	-0.2	-0.38*	-0.06	0.44*					
20	0.34	0.08	0.08	-0.2	-0.15	0.44*	-0.10	-0.47**	0.47**	0.12				
22	-0.33	0.46*	-0.10	-0.12	-0.17	-0.25	-0.40*	-0.44*	0.32	0.29	0.24			
23	0.04	0.25	0.08	0.32	0.32	0.15	0.04	-0.08	-0.01	0.27	-0.10	0.18		
24	-0.22	-0.34	-0.26	0.02	0.43*	-0.08	0.59**	0.07	-0.22	-0.09	-0.27	-0.37*	-0.10	
25	-0.02	-0.26	0.19	-0.21	0.09	-0.13	0.24	0.07	0.01	-0.28	-0.03	0.19	-0.26	-0.02

* 表示种间显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示种间极显著相关 ($P < 0.01$)。

* indicates significant correlation between species ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation between species ($P < 0.01$).

表8 机械割除方式下入侵杂草群落的秩相关系数半矩阵

Table 8 Semi matrix of rank correlation coefficient of invasive weeds communities of mechanical weeding

编号 No.	1	2	4	5	7	8	15	20	22	23	24
2	-0.22										
4	0.11	0.12									
5	0.13	-0.30	-0.22								
7	-0.01	-0.02	0.07	0.65**							
8	0.01	-0.04	-0.27	0.15	0.08						
15	-0.05	-0.08	0.01	0.45*	0.71**	-0.13					
20	0.02	-0.14	0.18	-0.08	-0.06	0.34	-0.25				
22	-0.07	0.08	-0.30	-0.37*	-0.47**	0.02	-0.29	-0.26			
23	0.29	-0.19	-0.01	0.26	0.20	0.11	0.48**	-0.13	-0.28		
24	0.08	-0.06	-0.21	-0.22	-0.31	0.22	-0.10	-0.13	0.59**	-0.04	
25	-0.24	0.13	-0.33	-0.35	-0.31	-0.05	-0.33	-0.10	0.50**	-0.41*	0.10

* 表示种间显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示种间极显著相关 ($P < 0.01$)。

* indicates significant correlation between species ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation between species ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 不同干扰方式下香蕉园入侵杂草组成及群落总体关联情况

3种方式下重要值前三的入侵杂草都是白花鬼针草、阔叶丰花草、鹅肠菜,成为香蕉农田杂草的主要建群种。药剂除草和机械割除方式下入侵杂草优势度较人工挖除高,其中两耳草 *Paspalum conjugatum* Berg. 等禾本科杂草在人工挖除方式下的重要值较高,而飞机草 *Chromolaena odorata* (Linnaeus) R. M. King & H. Robinson、无刺含羞草 *Mimosa diplotricha* var. *inermis* (Adelb.) Verdc. 等阔叶杂草在机械割除方式下有较高的重要值,这是由于干扰程度大的环境下以演替更新快的禾本科和一年生杂草为主(赵丽娅等,2021)。3种杂草管理方式群

落种间总体呈显著正联结趋势,机械割除方式下入侵杂草总体种间关联性更强,群落更趋向稳定,这可能与机械割除方式只割除地上部分,根部以下还存活,未破坏土壤种子库,对环境压力较药剂除草和人工挖除小有关,可见,干扰程度是影响杂草群落分布格局的重要因素之一(张婧等,2017)。

3.2 不同干扰方式下香蕉园入侵杂草的种间关联格局

种间关联性可以反映群落种间的相互作用关系,种间竞争与互利同时发生,并且二者的作用强度及平衡状态与环境条件密切相关(姜倪皓等,2022)。采用3种检验方法(χ^2 检验、联结系数 A_c 、Ochiai 指数 I_0) 分析各种对间的关联性得到结果基本一致,达到显著和极显著的种对较少,大部分入侵杂草种间联结性较弱,只有少部分种对间有较强

的联结性。本研究中相同物种在 3 种干扰方式下, 种间关联性质、关联程度有很大的差异, 种间关联性在一定程度上反映了种间的相互关系及其与环境因子的关系, 而种间的关系也一定程度上受环境因子的影响(何淑嫻等, 2019; 赵丽娅等, 2021)。研究显示, 人工挖除方式下的群落中显著正联结的为两耳草等少数一年生杂草, 而药剂除草和机械割除方式下显著正联结的以一年生阔叶杂草居多, 速生型杂草间表现出一定的协同性, 能够促进彼此的生长。在机械割除方式下, 种间联结作用更显著, 杂草群落呈正向演替趋势, 推测该管理方式下干扰因素相对前二者较小, 增强了气候因子及生境因子的效应, 是导致种对间正负联结作用加强的主要原因(方楷等, 2012)。此外, 各检验方法存在一定的差异, 如 χ^2 检验是由物种在样方中是否出现得来, 在一定程度上弱化了种间关联, 不可避免地会损失信息量(崔玉华等, 2021; 郭佳琦等, 2021; 姜倪皓等, 2022); 在联结系数 A_c 检验中, 当 $a=0$ 时, A_c 夸大了 2 个物种均不出现的联结性, 导致负联结种对要多于正联结种对(吴艳玲等, 2016)。阔叶丰花草在不同干扰方式下与种间都有显著的关联性, 说明阔叶丰花草对环境的敏感性较低, 具有极强的适应性, 有在农田杂草群落稳定共存中发挥重要作用的潜力, 这与纪红等(2021)的研究结果相似。种间关系在一定程度上取决于植物所处外界环境的压力强度, 然而, 本研究只探讨了干扰方式对入侵杂草种间关联的影响, 干扰对种间关系的影响应综合考虑温度、光照、水分和土壤等环境因子的变化(赵丽娅等, 2021), 还有待进一步研究。

Spearman 秩相关分析中, 人工挖除、药剂除草、机械割除 3 种干扰方式下的入侵杂草显著相关的种对比例均较低, 分别为 18.2%、14.3%、13.6%, 其中绝对优势入侵杂草白花鬼针草与阔叶丰花草之间也没有显著相关性, 说明二者的种间关系比较松散, 优势入侵种间的独立性较强, 这与农田生态系统人为干扰程度大, 先锋植物占有各自优势的生态位, 加之农田杂草演替更新快, 处于演替初期的群落种间的关联性较弱, 甚至表现出较强的负关联(姜倪皓等, 2022; 申旭芳等, 2021)。此外取样尺度及取样量也会影响种间关系的分析结果, 在本研究取样过程中, 不同群落内种对间的正负联结数相差不大, 正负联结种对比例趋近于 1, 说明本研究取

样尺度合理有效(何光熊等, 2023)。

综上所述, 不同干扰方式下的香蕉园入侵杂草总体表现出正关联, 但是大部分入侵杂草种间联结性较弱, 只有少数种间有较强的联结性, 种间关系表现较为松散。机械割除方式下的杂草群落更趋于正向演替, 可见, 适度的减小干扰程度有利于群落稳定。阔叶丰花草在杂草群落稳定共存中发挥重要作用, 在香蕉园杂草生物防治中具有利用潜力。

参考文献

- 程久菊, 张雪妮, 张子洋, 陈静, 2022. 艾比湖不同水盐环境荒漠植物种间关联格局下的叶片功能性状差异分析. *植物资源与环境学报*, 31(3): 18-25.
- 崔玉华, 韩有志, 张梦孜, 杨秀清, 赵占合, 2021. 不同干扰强度下针阔混交林树种空间格局及种间关联性. *应用生态学报*, 32(6): 2053-2060.
- 杜浩, 只佳增, 李宗锴, 周劲松, 杨绍琼, 陈伟强, 2020. 香蕉园施用白花鬼针草的控草增效作用. *生物安全学报*, 29(4): 306-312.
- 方楷, 宋乃平, 魏乐, 安慧, 2012. 不同放牧制度对荒漠草原地上生物量及种间关系的影响. *草业学报*, 21(5): 12-22.
- 郭佳琦, 陈俊辰, 黄旬, 黄佳乐, 赵丽娅, 李兆华, 2021. 喜旱莲子草入侵群落主要物种生态位和种间联结研究. *生态环境学报*, 30(8): 1607-1616.
- 郝丽芬, 韩雨轩, 吴乾美, 王瑞, 林克剑, 2022. 中国草地外来生物入侵现状与防控建议. *植物保护*, 48(4): 10-20.
- 纪红, 尹爱国, 岳茂峰, 周天, 2021. 阔叶丰花草对荔枝园杂草群落特征及物种多样性的影响. *生物安全学报*, 30(2): 150-155.
- 何光熊, 史正涛, 闫帮国, 杨溟舟, 孙毅, 王艳丹, 余建琳, 和润莲, 史亮涛, 方海东, 2023. 封育对于热河谷 Savanna 植物群落种间关联性的影响. *草业学报*, 32(2): 1-14.
- 何淑嫻, 李伟, 程希平, 谭芮, 松卫红, 2019. 践踏干扰对碧塔海高寒草甸植被茎叶性状、物种多样性和功能多样性的影响. *生态学报*, 39(6): 2063-2070.
- 姜倪皓, 张世浩, 张诗函, 2022. 哀牢山紫茎泽兰入侵群落主要物种种间联结及环境解释. *生态环境学报*, 31(7): 1370-1382.
- 李秉华, 刘小民, 许贤, 吴国强, 王贵启, 2017. 玉米不同种植密度、耕作模式和水管理对杂草的影响. *杂草学报*, 35(3): 34-37.
- 李娟, 张昱, 2022. 燕山北部板栗林下杂草群落动态及生态位研究. *水土保持学报*, 36(3): 201-206.

- 孟祥杰, 梁玉刚, 陈璐, 王忍, 龚向胜, 张印, 马微微, 袁娇, 黄璜, 陈灿, 2021. 厢作、平作下不同稻田生态种养模式对杂草群落及物种多样性的影响. 西南农业学报, 34(11): 2482-2489.
- 闵安民, 郭亨孝, 李红霞, 赵蓉, 2005. 不同除草处理对经济林果园地水土保持作用的初步研究. 水土保持学报, 19(2): 49-52.
- 申旭芳, 康永祥, 李华, 巫翠华, 张利利, 2021. 黄土区土坎植被群落草本优势种的种间关联性研究. 西北林学院学报, 36(2): 38-45.
- 王虎琴, 孙国俊, 王哲明, 李粉华, 2016. 茅山丘陵地区茶园秋季杂草种群生态位. 杂草学报, 34(1): 26-30.
- 温鑫鸿, 王其炳, 潘辉, 王李睿, 陈妍, 何东进, 2022. 天宝岩柳杉群落主要乔木种群的种间联结性. 森林与环境学报, 42(1): 1-10.
- 吴焦焦, 张文, 高岚, 谭星, 乐佳兴, 田秋玲, 冯大兰, 黄小辉, 齐代华, 许一丰, 梁洪海, 吴铭河, 黄诗夏, 刘芸, 2020. 三峡库区次生黄栌灌木林的群落特征及种间联结性. 生态学报, 40(12): 4053-4063.
- 吴艳玲, 吕世杰, 刘红梅, 卫智军, 2016. 不同放牧强度对短花针茅草原植物种群种间关系的影响. 生态科学, 35(6): 34-40.
- 吴鑫磊, 龙婷, 徐超, 梁艳君, 韦健丽敏, 李景文, 2022. 东北红豆杉不同生境群落种间关联性. 植物科学学报, 40(1): 31-38.
- 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 刘彤, 2016. 植物种间联结研究内容与方法评述. 生态学报, 36(24): 8224-8233.
- 轩诗壮, 苗福泓, 赵怡然, 王国良, 孙惠文, 吕祥永, 孙娟, 2021. 苜蓿-杂草生态化学计量特征对不同播种方式的响应. 中国草地学报, 43(6): 43-52.
- 张金屯, 2018. 数量生态学. 3版. 北京: 科学出版社.
- 张婧, 左小安, 吕朋, 周欣, 连杰, 刘良旭, 岳喜元, 2017. 科尔沁沙地草地植被对围封和放牧的响应. 中国沙漠, 37(3): 446-452.
- 张央, 李志, 安明态, 李晓芳, 汪伟, 2022. 极小种群野生植物贵州地宝兰群落生态位特征及种间关系. 植物资源与环境学报, 31(3): 1-10.
- 张亚芬, 郑子洪, 陈旭波, 骆争荣, 2022. 入侵植物藿香蓟与常见伴生杂草的生态位特征. 生态学报, 42(9): 3727-3737.
- 赵丽娅, 钟韩珊, 齐开, 梅新, 2021. 围封和放牧对科尔沁沙地植物群落种间关联的影响. 生态学报, 41(9): 3724-3733.
- 只佳增, 周劲松, 杜浩, 李宗锴, 王朝, 高梅, 张光勇, 陈伟强, 2020. 云南山地香蕉园主要杂草生态位. 热带作物学报, 41(2): 394-400.
- 左玉环, 刘高远, 杨莉莉, 梁连友, 同延安, 2019. 陕西渭北柿子园种植白三叶草对土壤养分和生物学性质的影响. 应用生态学报, 30(2): 518-524.
- AMAT B, CORTINA J, ZUBCOFF J J, 2015. Community attributes determine facilitation potential in a semi-arid steppe. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17(1): 24-33.
- CHEN E, LIAO H, CHEN B, PENG S, 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi are a double-edged sword in plant invasion controlled by phosphorus concentration. *New Phytologist*, 226(2): 295-300.
- MA Y, LI Q, PAN S, LIU C, HAN M, BRANCELJ A, 2022. Niche and interspecific associations of *Pseudoanabaena limnetica*: exploring the influencing factors of its succession stage. *Ecological Indicators*, 138: 108806-108815.

(责任编辑: 陈晓雯)