

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.240001

模拟氮沉降对入侵植物藿香蓟与伴生种铁苋菜竞争关系的影响

陈旭波¹, 陈健春¹, 张亚芬², 骆争荣¹, 贾 静^{1*}

¹丽水学院生态学院, 浙江 丽水 323000; ²浙江旅游职业学院, 浙江 杭州 311231

摘要:【目的】探究氮沉降对入侵植物与本地植物竞争关系的影响, 阐明其如何改变物种竞争能力并影响入侵植物。【方法】以入侵植物藿香蓟和本地植物铁苋菜为对象, 开展 de Wit 替代竞争试验。通过浇灌不同浓度的 NH_4Cl 溶液模拟不同氮沉降水平对植物株高、地上生物量和分枝数的影响。相对邻株效应指数 (R_{NE}) 和取代系列图表被用来评估两者的竞争关系。【结果】单种栽培时, 中高氮处理 (6 和 $12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 对藿香蓟收获时株高生长和地上生物量有显著的促进作用, 而氮处理组显著提高了铁苋菜收获时株高生长和地上生物量。两种混栽时, 不管哪种栽培比例下, 藿香蓟收获时株高在各个氮处理组之间均无显著差异; 收获时高氮组的铁苋菜株高均显著高于对照组。中高氮处理显著提高了藿香蓟在中高栽培比例 (0.50 和 0.75) 下的分枝数; 高氮处理显著提高了铁苋菜在高栽培比例下的分枝数。 R_{NE} 表明藿香蓟在高栽培比例时, 铁苋菜对其氮处理组的竞争作用并不显著; 铁苋菜在高栽培比例时, 氮处理提高了藿香蓟的竞争力, 低氮处理 ($3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 时其竞争最为明显。取代系列试验图表明, 在任何混种方式下铁苋菜实际生物量均低于预期; 低氮处理时, 高栽培比例下的藿香蓟地上部分生物量和混种总生物量均高于预期值。【结论】氮沉降显著影响了藿香蓟与铁苋菜的生长及其种间竞争关系。氮沉降特别是低氮沉降增加了藿香蓟的竞争优势。

关键词: 氮沉降; 种间关系; 竞争; 藿香蓟; 铁苋菜



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of simulated nitrogen deposition on the competitive relationship between invasive *Ageratum conyzoides* L. and its co-occurring indigenous forb *Acalypha australis* L.

CHEN Xubo¹, CHEN Jianchun¹, ZHANG Yafen², LUO Zhengrong¹, JIA Jing^{1*}

¹College of Ecology, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China;

²Tourism College of Zhejiang, Hangzhou, Zhejiang 311231, China

Abstract: 【Aim】 In order to further understand the effect of nitrogen deposition on the competitive relationship between invasive and indigenous species, and to elucidate how it changes species competitiveness and affects invasive plants. 【Method】 A de Wit replacement competitive experiment with the invasive plant *Ageratum conyzoides* and the native plant *Acalypha australis* was performed. The effects of different levels of nitrogen deposition on plant height, aboveground biomass and number of branches were simulated by watering different concentrations of NH_4Cl solutions. Relative neighbor effect (R_{NE}) and replacement diagrams were used to estimate interspecific competition. 【Result】 In monoculture, medium and high nitrogen treatments (6 and $12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) significantly promoted the height growth and aboveground biomass of *Ageratum conyzoides* at harvest. whereas, the nitrogen treatment group significantly increased the height growth and aboveground biomass of *Acalypha australis* at harvest. When two species are mixed, regardless of the cultivation ratio, there was no significant difference in plant height between different nitrogen treatment groups during the harvest of *Ageratum conyzoides*. At harvest, the height of the *Acalypha australis* in the high nitrogen group was significantly higher than that in the control group. Medium and high nitrogen treatments significantly increased the number of branches of *Ageratum conyzoides* at medium and high cultivation ratios (0.50 and 0.75). Under high cultivation ratios, high nitrogen treatment significantly increased the number

收稿日期 (Received): 2024-01-02 接受日期 (Accepted): 2024-04-30

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY20C030002); 浙江省教育厅科研项目 (Y202249963)

作者简介: 陈旭波, 男, 高级实验师。研究方向: 入侵生态学。E-mail: chenxubo@163.com

* 通信作者 (Author for correspondence), 贾静, E-mail: sonojia@126.com

of branches of *Acalypha australis*. R_{NE} showed that at high cultivation ratios, the competitive effect of *Acalypha australis* on nitrogen treatment groups of *Ageratum conyzoides* was not significant. When the cultivation ratio of *Acalypha australis* was high, nitrogen treatment improved the competitiveness of *Ageratum conyzoides*, and it was most obvious under low nitrogen treatment ($3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$). The replacement diagrams showed that the actual biomass of *Acalypha australis* was lower than expected under any mixed planting method. Under low nitrogen treatment, the aboveground biomass of *Ageratum conyzoides* and total biomass of two species were higher than expected under high cultivation ratios. 【Conclusion】 Nitrogen deposition significantly affects the growth of *Ageratum conyzoides* and *Acalypha australis* and their interspecific competition. Nitrogen deposition, especially low nitrogen deposition, increases the competitive advantage of *Ageratum conyzoides*.

Key words: nitrogen deposition; interspecific relationship; competition; *Ageratum conyzoides*; *Acalypha australis*

由于氮沉降水平能影响植物的生理生态特征、凋落物分解速率、土壤微生物群落以及理化性质,进而影响生物多样性(伍丙德等, 2022), 为此,氮沉降对生态系统的影响受到了学者的关注(Xu *et al.*, 2021), 植物和土壤微生物协同响应氮添加的机制是当前研究领域的前沿热点之一(肖春艳等, 2023)。

由于不同种类的植物氮营养利用策略存在明显差异,故氮沉降水平和方式均会对植物的生长产生影响(伍丙德等, 2022)。研究表明,适量的氮沉降可明显增加植物的株高、地上部分生物量等功能性状,但是随着氮沉降水平的提升,这种促进作用减弱甚至变为抑制效应(Peng *et al.*, 2016)。低氮利于入侵植物的竞争,如刺槐 *Robinia pseudoacacia* L. 在低中氮水平下显著抑制本地植物麻栎 *Quercus acutissima* Carr. 的生长(Luo *et al.*, 2014)。入侵植物豚草 *Ambrosia artemisiifolia* L. 在低氮水平下具有显著的种间竞争优势(陆光亚等, 2012),但其竞争优势在高氮水平下下降。然而,也有研究显示,喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb. 的表型可塑性和氮水平呈正相关(杨永清等, 2011)。紫茎泽兰 *Ageratina adenophora* (Sprengel) R. M. King & H. Robinson 随氮水平的升高其入侵能力更强(Lei *et al.*, 2012)。高氮处理下鬼针草 *Bidens pilosa* L. 的竞争力和竞争耐受性均较高(韦春强等, 2023)。可见,基于不同植物种类的氮营养策略的差异,氮沉降及其水平对于不同入侵植物竞争力的影响不同。为此,氮沉降如何影响入侵植物与本地植物的竞争力受到学者的关注,开展相关研究可以评估全球氮沉降背景下外来植物的入侵风险,预测其扩散趋势,为其管控及保护本地植物提供科学依据。

藿香蓟 *Ageratum conyzoides* L. 原产于热带美

洲,我国西至西藏,北至黑龙江均有发现,广泛分布于南方各省,并已造成严重危害,为我国重点管理的外来入侵植物。其入侵能力受到了广泛的关注(Amarpreet *et al.*, 2023)。有研究发现,藿香蓟对环境因子、外源尿素添加以及种间竞争均表现出较强的可塑性(陈旭波等, 2023; 许微楠等, 2019)。然而,在氮沉降背景下藿香蓟与本地种之间的竞争力的变化情况未见报道。藿香蓟与铁苋菜 *Acalypha australis* L. 在浙江丽水分布广泛,其生态位高度重叠(张亚芬等, 2022),为此,以藿香蓟与铁苋菜为试验材料,探讨氮沉降对其生长和竞争力的影响,具有一定的现实意义。明确氮沉降对藿香蓟的生长及对其与本地种竞争力的影响,可用于预测藿香蓟的扩散趋势,为其风险防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

藿香蓟和铁苋菜为一年生草本植物,在丽水市常年混生,花果期重叠。分别采集植物种子在温室大棚进行育苗,随机挑选长势一致的幼苗,移至装有相同质量和类型土壤的花盆(外口径 29 cm,底径 19 cm,外高 19 cm)中开展竞争试验。

1.2 竞争试验

设置 de Wit 替代系列试验,藿香蓟和铁苋菜的种植比例为 4 : 0、3 : 1、2 : 2、1 : 3 和 0 : 4,每盆植株总数为 4 株(图 1),其中 4 : 0 或 0 : 4、3 : 1、2 : 2、1 : 3 分别表示单种栽培(1.00)、高栽培比例(0.75)、中等栽培比例(0.50)、低栽培比例(0.25)。氮沉降模拟用 NH_4Cl 溶液,共设置 4 个水平的氮沉降处理,分别为 0 (对照组, N_0)、3 (低氮处理, N_1)、6 (中氮处理, N_2)、12 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (高氮处理, N_3),每个处理 5 个重复。所有处理组分 3 次施肥(每次间隔 10 d)。将花盆呈行列式随机摆放在实验楼楼顶一个矩形区域内,花盆间距为 50 cm 左右。种植

10 d 后测量植株初始高度 (精确到 0.1 cm), 试验期间每个处理浇定量水 (施肥当天不浇额外水), 及时除病虫害。

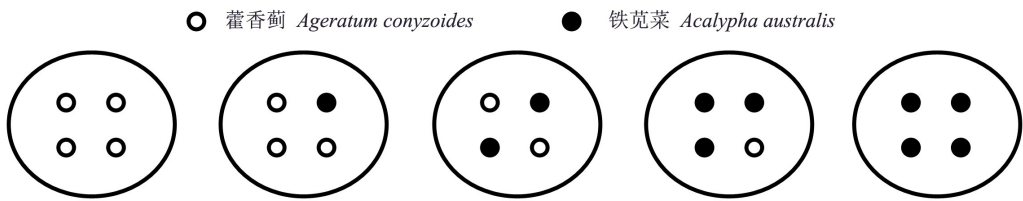


图 1 竞争试验设计图
Fig.1 Competition experiment design diagram

1.3 指标测定

每次施肥 10 d 后测量植株高度 (精确到 0.1 cm), 在植株收获时测量植株最终高度, 共计测量 3 次, 测量时间分别是移栽后 25、35 和 45 d。将收获的藿香蓟和铁苋菜 (含生殖器官) 分开, 分别统计每盆植株分枝数后放入烘箱, 80 ℃ 烘干至恒重。用电子天平 (精确到 0.001 g) 分别测量每盆植株干重。根据 Puy *et al.* (2021) 提出的种间竞争强度常以地上部分生物量为基础来计算, 因此, 本研究通过测定植株地上部分生物量来分析藿香蓟和铁苋菜的种间竞争能力。

1.4 种间竞争能力分析

采用相对邻株效应指数 (relative neighbor effect, R_{NE}) 衡量物种的竞争优势 (柳牧青等, 2022; Markham & Chanway, 1996)。

$$R_{NE} = \frac{Y_{-N} - Y_{+N}}{Y}$$

式中, Y_{-N} 是当周围物种不存在时的平均生物量; Y_{+N} 是当周围物种存在时的平均生物量; $Y_{-N} > Y_{+N}$ 时, Y 是 Y_{-N} ; 当 $Y_{+N} > Y_{-N}$ 时, Y 是 Y_{+N} 。

R_{NE} 处于 -1 和 1 之间。负值代表周围物种存在时对目标物种具有促进作用, 正值代表目标物种受到周围物种的抑制作用。试验中藿香蓟 R_{NE} 值代表铁苋菜对其产生的竞争强度, 铁苋菜 R_{NE} 值代表藿香蓟对其产生的竞争强度。

采用取代系列图表展示取代系列试验的结果。根据物种实际生物量与预期生物量之间的关系, 进行种间比较 (柳牧青等, 2022; 王晋萍等, 2012)。若实际生物量与预期生物量相等, 说明种内竞争与种间竞争相等; 反之, 表明种内竞争和种间竞争不相等。实际生物量是指藿香蓟和铁苋菜混栽时每盆中各物种的实测生物量, 预期生物量是指藿香蓟或铁

苋菜单种时的株均生物量乘以混栽时该物种的植株数量, 以上述 2 种值绘制取代系列试验图表。

1.5 数据分析

利用 SPSS 18.0 的单因素分析方法 (ANOVA) 分析不同栽培比例或者氮处理水平间的株高、地上部分生物量和分枝数的差异性; 利用 t 检验分析邻近效应与 0 之间的差异性。

2 结果与分析

2.1 藿香蓟和铁苋菜在不同氮处理和栽培比例下的植株高度及单栽时的生物量

由图 2 可知, 在单栽环境下, 氮处理对藿香蓟各个时期的株高影响不同。25 d 后的株高在各个氮处理下无显著差异。35 d 后藿香蓟的株高在低氮处理下显著低于对照组和中氮处理组 ($P < 0.05$), 与高氮处理组无差异。45 d 后株高在低氮处理下和对照组无显著差异, 但是显著低于中氮处理和高氮处理组, 中高氮处理对藿香蓟的株高生长有显著的促进作用。收获时, 中氮和高氮处理组的藿香蓟地上部分生物量显著高于对照组和低氮处理组 ($P < 0.05$)。在单栽环境下, 铁苋菜 25 和 35 d 后株高在不同氮处理水平间均无显著差异。45 d 后, 氮处理组的株高显著高于对照组, 氮处理促进了铁苋菜的生长。氮处理组显著提高了铁苋菜地上部分生物量。

混栽时, 藿香蓟栽培 25 d 后, 栽培比例为 0.50 时, 高氮处理组的株高显著高于对照组。栽培 35 d 后, 栽培比例为 0.75 时, 所有氮处理组的株高均显著高于对照组。而 45 d 后, 在所有栽培比例下, 藿香蓟株高在各个氮处理组与对照组之间均无显著差异。铁苋菜在栽培 35 d 之后, 其株高在高氮处理组与对照组之间无显著差异, 而在栽培 45 d 后, 所有栽培比例下, 高氮组的株高均显著高于对照组。

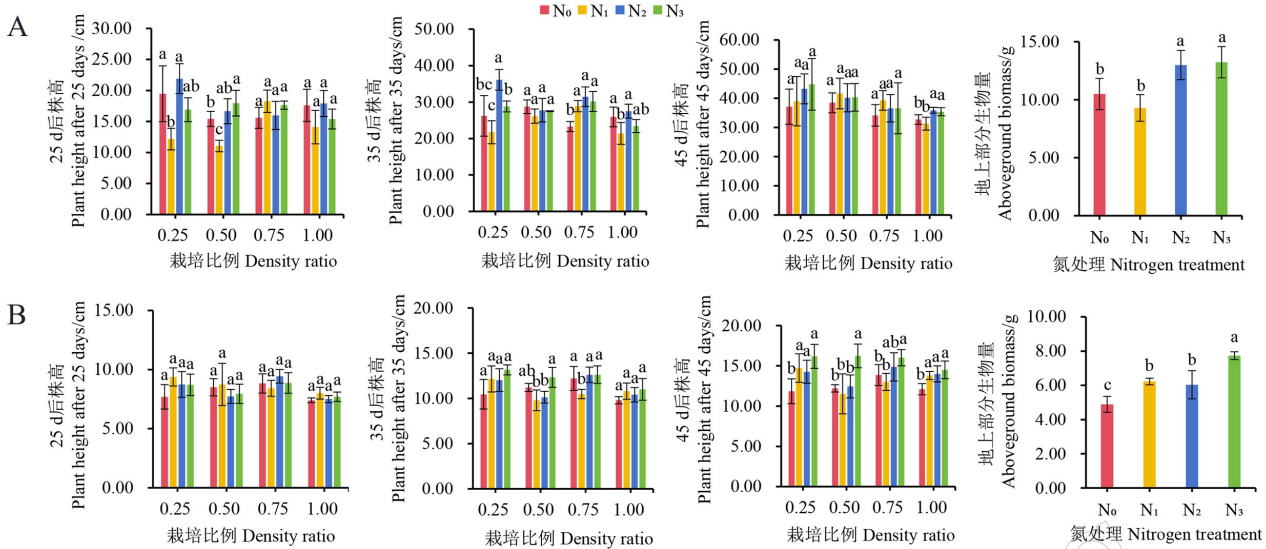


图 2 藿香蓟 (A) 和铁苋菜 (B) 不同混栽比和不同氮处理下的株高及单栽生物量

Fig.2 Plant height and average biomass per plant when planted alone of *Ageratum conyzoides* (A) and *Acalypha australis* (B) at different nitrogen treatment levels when planted under different cultivation ratios

不同小写字母表示在不同氮处理水平下差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate a significant difference among nitrogen treatment levels ($P<0.05$).

2.2 不同氮处理和栽培比例下藿香蓟和铁苋菜植株的分枝数

由图 3A 可知,不同栽培比例下,不同的氮处理对藿香蓟的单株分枝数有显著影响 ($P<0.05$)。当栽培比例为 0.25 时,低氮和高氮处理显著促进了藿香蓟分枝数的产生。当栽培比例为 0.50 和 0.75 时,中高氮处理均显著促进了藿香蓟分枝数的产生。栽培比例为 1.00 时,氮处理抑制了藿香蓟分枝数的产生,促进了高度生长。

由图 3B 可知,在栽培比例为 0.25 和 0.50 时随着氮处理水平的提高,铁苋菜单株分枝数并没有显著增加。随着栽培比例的提高,高氮处理组显著提高了铁苋菜的分枝数。栽培比例为 0.75 时,高氮处理对铁苋菜分枝的产生尤为明显。栽培比例为 1.00 时,氮处理组均显著提高了铁苋菜的分枝数。

2.3 相对邻株效应

由图 4A 可知,藿香蓟在低栽种比例时,在任何氮处理水平下,铁苋菜对其竞争作用均达到极显著水平 ($P<0.01$)。在中等栽培比例时,铁苋菜在无氮处理时对藿香蓟存在极显著的竞争作用,在高氮处理时对藿香蓟存在显著的竞争作用;而低中氮处理下,这种竞争作用不显著。在高栽培比例时,各个氮处理组的铁苋菜对藿香蓟的竞争均不显著。由图 4B 可知,铁苋菜在中低栽培比例时,在任何氮处理水平下,藿香蓟对其均产生了极显著的竞争作用

($P<0.01$)。铁苋菜在高栽培比例时,在无氮处理下,藿香蓟对铁苋菜的竞争作用不显著。在低氮处理下,藿香蓟的竞争作用达到了极显著, R_{NE} 值在低氮处理组达到最大。在中高氮处理下,竞争作用仍然达到显著水平。由此推测,氮处理特别是低氮处理有利于藿香蓟保持对铁苋菜的竞争力。

2.4 藿香蓟和铁苋菜的取代试验系列图表

由图 5 可知,在任何氮处理下,铁苋菜的实际生物量均小于预期生物量,说明铁苋菜在任何藿香蓟混栽比例下均受到了抑制。在无氮处理下,藿香蓟在任何混栽比例下其实际生物量均小于预期生物量,说明此时藿香蓟受到了抑制。在低氮处理下,藿香蓟混栽比例为 0.50 时,藿香蓟实际生物量接近预期生物量,而在混栽比例为 0.75 时,藿香蓟实际生物量已经高于预期生物量,此时 2 种混种实际生物量同样高于预期,说明此时藿香蓟具有竞争优势。上述现象同样出现在高氮处理下,藿香蓟混栽比例为 0.75 时,此时 2 种混种的实际生物量已经接近混种预期生物量,藿香蓟实际生物量也高于预期。而在中氮处理下,藿香蓟混栽比例为 0.75 时,其实际生物量也接近预期。由此推测,氮处理特别是低氮处理提高了藿香蓟在高栽培比例下的竞争优势,其中低氮处理使藿香蓟在中等栽培比例下同样保持竞争优势。

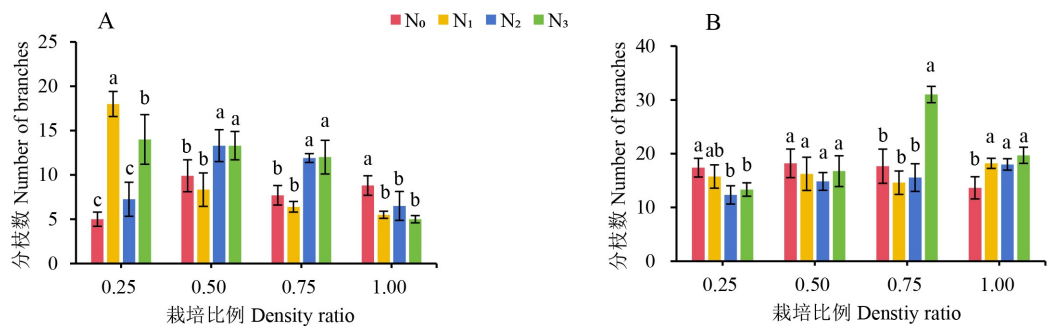


图 3 不同栽培比例和不同氮处理下藿香蓟 (A) 和铁苋菜 (B) 的单株分枝数

Fig.3 Number of single plant branches of *Ageratum conyzoides* (A) and *Acalypha australis* (B) at different nitrogen treatment levels when planted under different cultivation ratios

不同小写字母表示在不同氮处理水平下差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate a significant difference among nitrogen treatment levels ($P<0.05$).

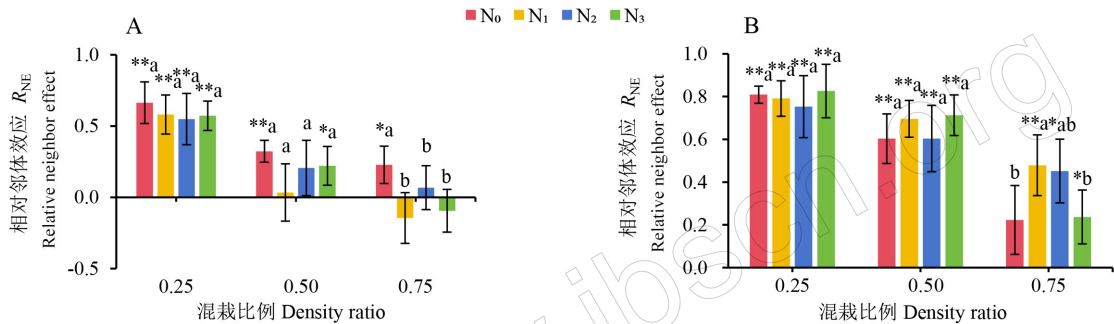


图 4 藿香蓟 (A) 和铁苋菜 (B) 在不同混栽比例下的相对邻株效应

Fig.4 Relative neighbor effect of *Ageratum conyzoides* (A) and *Acalypha australis* (B) at different proportions

不同小写字母表示同一混栽比例在不同氮水平下差异显著 ($P<0.05$)；* 代表 R_{NE} 值与 0 具有显著差异 ($P<0.05$)；

** 代表 R_{NE} 值与 0 具有极显著差异 ($P<0.01$)。

Different lowercase letters indicate a significant difference in the same proportion at different nitrogen treatment levels ($P<0.05$)；* represents a significant difference between the R_{NE} value and 0 ($P<0.05$)；** represents a very significant difference between the R_{NE} value and 0 ($P<0.01$)。

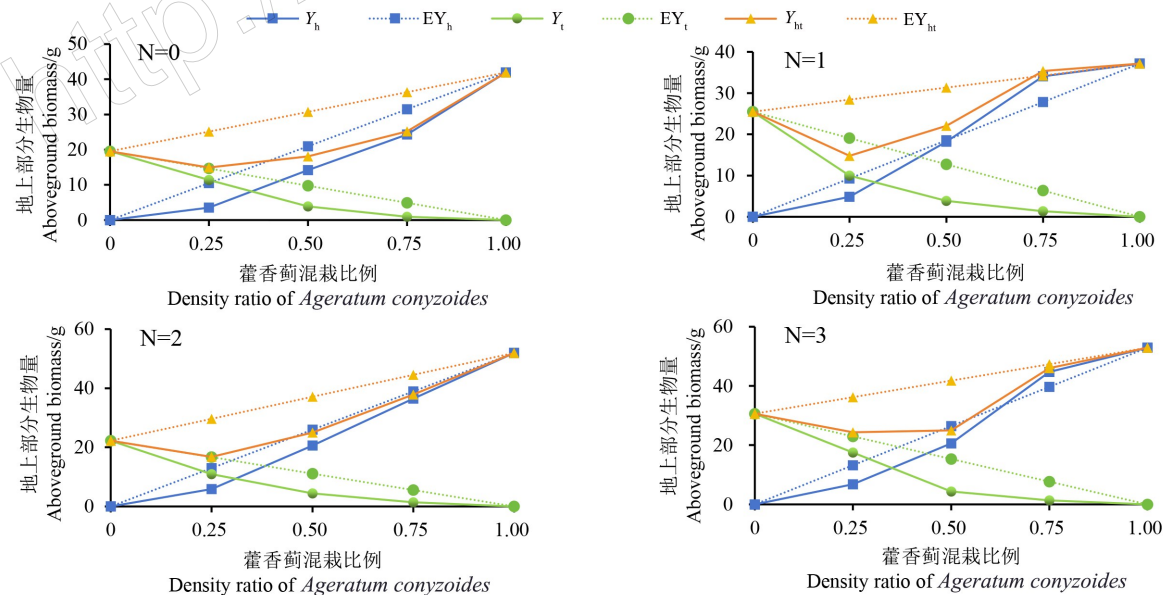


图 5 不同氮水平下的取代试验

Fig.5 Replacement diagrams at different nitrogen treatment levels

Y_h 和 Y_t 分别代表藿香蓟和铁苋菜每盆的实际生物量； Y_{ht} 代表两混栽物种的实际总生物量。 EY_h 和 EY_t 分别代表藿香蓟和铁苋菜每盆的预期生物量； EY_{ht} 代表两混栽物种的预期总生物量。

Y_h and Y_t represent actual biomass of *Ageratum conyzoides* and *Acalypha australis* each pot； Y_{ht} represents actual total biomass of the two species.

EY_h and EY_t represent the expected biomass of *Ageratum conyzoides* and *Acalypha australis* per pot；

EY_{ht} represents the expected total biomass of the two species.

3 讨论

氮沉降在一定程度上可促进植物的生长,达到一定的阈值后会使环境出现氮富营养化状态,与植物生理生态功能密切相关的功能性状,如株高、地上部分生物量等性状会出现相应的响应(Jiang *et al.*, 2019)。在单栽环境下,中高氮处理组显著增加了藿香蓟收获时的株高和地上部分生物量。而氮处理均显著增加了铁苋菜收获时的株高和地上部分生物量。这种促进作用在本地植物铁苋菜上的表现更加明显,高氮处理组与对照组相比,株高和地上部分生物量分别增加了 19.83% 和 58.12%,而藿香蓟分别增加了 8.26% 和 26.14%。这种变化与不同植物的氮营养和利用策略不同相关。单栽环境下的藿香蓟株高和地上部分生物量在中高氮处理组之间并无显著差异,这与高氮水平下对株高的促进作用逐渐减弱的观点相符(陆光亚等, 2012; Peng *et al.*, 2016)。研究发现,混栽时,高种植比例下的氮处理显著增加了藿香蓟的中期生长,而在任何种植比例下藿香蓟收获时的株高在各个处理组之间均无显著差异,铁苋菜株收获时株高在高氮处理组具有明显的优势。这可能与种间竞争的存在会改变生境变化对植物的影响有关(Vallano *et al.*, 2012),对藿香蓟株高而言,铁苋菜的竞争影响大于氮处理的影响,使得氮处理影响不再显著,也可能与藿香蓟高速株高生长能力相关(陈旭波等, 2023)。当环境养分充足时,植物种间的竞争往往更倾向地上部分,通过增加分枝数不仅能获得较多的光资源,而且还能抑制相邻植物的生长(Wan *et al.*, 2019)。试验结果表明,中高氮处理显著提高了藿香蓟在中高栽培比例下的分枝数。高氮处理显著提高了铁苋菜在高栽培比例下的分枝数。研究结果与高氮下紫茎泽兰和鬼针草的分枝数显著增加的结果相似(王满莲和冯玉龙, 2005; 韦春强等, 2023)。

R_{NE} 结果表明,藿香蓟在高栽培比例时,铁苋菜对其氮处理组的竞争作用并不显著,这与氮处理提高了藿香蓟的分枝数及种间竞争的不对称性有着关联。而藿香蓟在中等栽培比例时,高氮处理有利于铁苋菜竞争优势的发挥,这与此时铁苋菜株高显著增加有关。铁苋菜在高栽培比例时,氮处理有利于藿香蓟的竞争优势的发挥,低氮处理时藿香蓟对其竞争最为明显,此时铁苋菜的株高与分枝数均显

著低于高氮处理组。取代系列试验图也表明氮处理特别是低氮处理提高了藿香蓟在高栽培比例下的竞争优势。综合上述结论发现,氮处理有利于藿香蓟发挥竞争抑制作用,这种作用在低氮处理组发挥最为明显。这与入侵植物豚草的研究结论相似(陆光亚等, 2012)。虽然高氮水平使藿香蓟的竞争能力有所降低,但其入侵潜能依然存在,在本地植物被抑制的前提下,其生物量接近预期值,特别是藿香蓟高栽培比例时,其生物量高于预期值。

氮沉降背景下的外来入侵植物与本地植物的生长和竞争的差异与两者的营养利用特别是氮资源的利用差异显著相关。本试验结果同样表明了入侵植物更倾向于在低氮水平上表现出更强的竞争力(伍丙德等, 2022)。种间竞争的改变还与氮沉降引起的土壤理化性质的变化以及土壤中微生物群落的变化密切相关,氮沉降降低了菌根与本地植物宿主之间的共生关系(Concepcions *et al.*, 2005),进一步增强了入侵植物地下部分的竞争能力。今后,氮沉降引起的入侵植物与本地植物的地下竞争及其机制研究值得关注。

参考文献

- 陈旭波, 章雨希, 张亚芬, 骆争荣, 2023. 入侵植物藿香蓟表型可塑性对种间竞争的响应. *植物科学学报*, 41(1): 37-43.
- 柳牧青, 杨小凤, 石钰铭, 刘雨薇, 李小蒙, 廖万金, 2022. 模拟酸雨对入侵植物豚草与伴生种鬼针草竞争关系的影响. *植物生态学报*, 46(8): 932-940.
- 陆光亚, 王晋萍, 桑卫国, 2012. 氮沉降对外来种豚草入侵能力与竞争能力的影响. *东北林业大学学报*, 40(6): 60-66.
- 王晋萍, 董丽佳, 桑卫国, 2012. 不同氮素水平下入侵种豚草与本地种黄花蒿、蒙古蒿的竞争关系. *生物多样性*, 20(1), 3-11.
- 王满莲, 冯玉龙, 2005. 紫茎泽兰和飞机草的形态、生物量分配和光合特性对氮营养的响应. *植物生态学报*, 29(5): 697-705.
- 韦春强, 李象钦, 唐赛春, 潘玉梅, 2023. 模拟氮沉降对鬼针草及其近缘本地植物的影响. *生物安全学报*, 32(1): 25-32.
- 伍丙德, 韦梅, 王舒, 姜坤, 王从彦, 彭萧, 张帮磊, 李月娥, 2022. 氮沉降与外来入侵植物对本地生态系统的影响及其机制的研究进展. *太原学院学报(自然科学版)*, 40(3): 77-86.

肖春艳, 郝情情, 陈晓舒, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 2023. 基于文献计量的大气氮沉降研究进展. *生态学报*, 43(3): 1294–1307.

许微楠, 郑珊珊, 余其娇, 骆争荣, 2019. 环境因子对藿香蓟形态、存活和繁殖的影响. *丽水学院学报*, 41(5): 34–40.

杨永清, 龙富波, 张伟, 张学江, 2011. 入侵植物喜旱莲子草对光、氮及其互作的表型可塑性反应. *贵州农业科学*, 39(4): 38–41.

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.

AMARPREET K, SHALINDER K, HARMINDER P S, AVISHEK D, BHAGIRATH S C, HAYAT U, RAVINDER K K, DAIZY R B, 2023. Ecology, biology, environmental impacts, and management of an agro-environmental weed *Ageratum conyzoides*. *Plants*, 12(12): 2329–2343.

CONCEPCIONS S, CROWLEY D E, ALLEN E B, 2005. Soil microorganisms of a native shrub and exotic grasses along a nitrogen deposition gradient in southern California. *Applied Soil Ecology*, 32(1): 13–26.

JIANG K, WU B D, WANG C Y, RAN Q, 2019. Ecotoxicological effects of metals with different concentrations and types on the morphological and physiological performance of wheat. *Energy & Environmental Science*, 167: 345–353.

LEI Y B, WANG W B, FENG Y L, ZHENG Y L, GONG H D, 2012. Synergistic interactions of CO₂ enrichment and nitrogen deposition promote growth and ecophysiological advantages of invading *Eupatorium adenophorum* in Southwest China. *Planta*, 236(4): 1205–1213.

LUO Y J, GUO W H, YUAN Y F, LIU J, DU N, WANG R Q, 2014. Increased nitrogen deposition alleviated the competitive effects of the introduced invasive plant *Robinia pseudoacacia* on the native tree *Quercus acutissima*. *Plant Soil*, 385: 63–75.

MARKHAM J H, CHANWAY C P, 1996. Measuring plant neighbour effects. *Functional Ecology*, 10: 548–549.

PENG Y, PENG PH, LI J J, 2016. Simulated nitrogen deposition influences the growth and competitive ability of *Centaurea stoebe* populations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(7): 679–685.

PUY J, DE BELLO F, DVORAKOVA H, MEDINA N G, LATZEL V, CARMONA C P, 2021. Competition-induced transgenerational plasticity influences competitive interactions and leaf decomposition of offspring. *New Phytologist*, 229(6): 3497–3507.

VALLANO D M, SELMANTS P C, ZAVALA E S, 2012. Simulated nitrogen deposition enhances the performance of an exotic grass relative to native serpentine grassland competitors. *Plant Ecology*, 213(6): 1015–1026.

WAN L Y, QI S S, ZOU C B, DAI Z C, REN G Q, CHEN Q, ZHU B, DU D L, 2019. Elevated nitrogen deposition may advance invasive weed, *Solidago canadensis*, in calcareous soils. *Journal of Plant Ecology*, 12(5): 846–856.

XU S Q, LIU X Y, SUN Z C, HU C C, WANEK W, KOBAYASHI K, 2021. Isotopic elucidation of microbial nitrogen transformations in forest soils. *Global Biogeochem Cycles*, 35(12): e2021GB007070.

(责任编辑:陈晓雯)