

土壤酶活抑制剂和外源植物调节剂对薇甘菊的抑制效应

吴家龙, 李 铤, 梁春梅, 张俊涛*

广州市林业和园林科学研究院/广州市生态园林科技协同创新中心, 广东广州 510405

摘 要: 薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 是中国首批外来入侵物种, 对亚热带地区生态安全的危害极大, 土壤酶活抑制剂和植物生长调节剂在植物生长调控中发挥至关重要的作用。本研究通过 7 个月的盆栽连续培养试验, 研究不同浓度土壤酶活抑制剂和外源植物调节剂对旺长期、现蕾期、开花期、盛花期和结籽期薇甘菊生长的影响, 浓度设置为: 1、15 g/L 脲酶抑制剂[N-(N-butyl) thiophosphoric triamide, NBPT], 1、15 g/L 硝化抑制剂(nitrification inhibitor, DMPP), 25、50 mg/L 脱落酸(abscisic acid, ABA), 1、10 g/L 矮壮素(chlormequat, CCC)。结果表明: 高、低浓度的土壤酶活抑制剂和植物生长调节剂对薇甘菊生长及土壤碱解氮、速效磷含量的影响有一定差异, 其中, 矮壮素和 DMPP 对薇甘菊的抑制作用明显, 而 15 g/L NBPT 对薇甘菊生长具有促进作用。总之, 10 g/L 矮壮素对旺长期薇甘菊生长具有抑制作用, 而 15 g/L DMPP 则对盛花期薇甘菊生长具有抑制作用, 二者联合施用可为薇甘菊全生命周期的综合防治提供理论依据。

关键词: 薇甘菊; 土壤; 酶活抑制剂; 植物调节剂; 抑制效应

中图分类号: S765; Q946.885.9

文献标志码: A

Inhibitory Effects of Soil Enzyme Activity Inhibitors and Exogenous Plant Regulators on *Mikania micrantha*

WU Jialong, LI Ting, LIANG Chunmei, ZHANG Juntao*

Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture / Guangzhou Collaborative Innovation Center on Science-tech of Ecology and Landscape, Guangzhou, Guangdong 510405, China

Abstract: *Mikania micrantha* is one of the first invasive species in China, which poses a big threat to the ecological security of subtropical regions. Soil enzyme activity inhibitors and plant growth regulators play central roles in plant growth regulation. In this paper, the effects of different concentrations of soil enzyme activity inhibitors [1 g/L and 15 g/L NBPT, N-(N-butyl) thiophosphate triamide, 1 g/L and 15 g/L nitrification inhibitor DMPP] and exogenous plant regulators (25 mg/L and 50 mg/L ABA, abscisic acid, 1 g/L and 10 g/L CCC, chlormequat) on the growth of *M. micrantha* during its vigorous growth period, budding period, flowering period, peak flowering period, and seed setting period were studied through a 7-month continuous pot culture experiment. The results showed that high and low concentrations of soil enzyme activity inhibitors and plant growth regulators had different effects on the growth status of chamomile and the content of alkaline hydrolyzed nitrogen and available phosphorus in the soil. Among them, chloramphenicol and DMPP had a significant inhibitory effect on chamomile, while 15 g/L NBPT had a promoting effect on chamomile growth. In summary, 10 g/L chloramphenicol had an inhibitory effect on the vigorous growth of chamomile, while 15 g/L DMPP had an inhibitory effect on the vigorous flowering period of chamomile. The combined application of the two could provide a theoretical basis for the comprehensive prevention and control of chamomile throughout its lifecycle.

Keywords: *Mikania micrantha*; soil; enzyme activity inhibitors; plant regulators; inhibitory effect

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.12.019

收稿日期 2024-04-24; 修回日期 2024-05-24

基金项目 广州市科技计划项目“海珠湿地薇甘菊综合防控技术研究与示范”(No. 202005000002)。

作者简介 吴家龙(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 园林绿地土壤修复和园林绿废资源化利用。*通信作者 (Corresponding author): 张俊涛 (ZHANG Juntao), E-mail: 350965652@qq.com。

生物入侵被认为是造成生物多样性丧失的第二主导性因素，其生态破坏性仅次于生境直接破坏^[1]。薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 是原产于热带美洲的菊科、假泽兰属多年生草本植物或灌木状攀缘藤本植物，是受人类活动显著影响而造成危害的入侵物种之一^[2]，已在我国华南乃至其他地区入侵并广泛扩散^[3-6]，对当地农田、林地、果园、自然保护地等生态系统的稳定性和生物多样性造成巨大威胁^[7]。2023 年 1 月 1 日起，薇甘菊被列入重点管理外来入侵物种名录^[8]。根据生长规律，薇甘菊的生长可划分为萌发期 (3—4 月)、生长期 (5—6 月)、旺长期 (7—9 月)、现蕾期 (10 月)、开花期 (11 月)、盛花期 (12—1 月)、结籽期 (1—2 月)，其生长状况与其所处的生境条件 (如气候、水分、土壤、金属离子等)^[2,9]及植物生长调节剂^[10]等因素有关。

目前，薇甘菊的防治措施主要分为物理法^[11] (如郁闭遮荫、拔除)、化学法^[12-14] (如除草剂)、生物法^[15-17] (如田野菟丝子、天敌昆虫)。其中，化学方法具有易操作、高效、药效相对持久等优点，但也存在环境污染和生物健康风险。目前，薇甘菊的化学防治主要集中于新型除草剂研发方面，对薇甘菊生存的土壤缺乏必要的关注。土壤养分是植物生长的主要养分来源，其中氮是植物生长的必需元素，其转化和代谢在很大程度上受诸如硝酸还原酶、脲酶等催化酶及其活性支配。土壤硝化抑制剂和脲酶抑制剂均是氮肥增效剂 (nitrogen fertilizer synergist)，二者已广泛用于农业生产，是一种环境友好型的肥料添加剂。硝化抑制剂可有效减少硝态氮在土壤中的生成和累积^[18]，脲酶抑制剂还可以抑制植物对氮素的吸收和转运^[19]。然而，尚无利用土壤酶活抑制剂影响薇甘菊生长的相关研究。植物生长调节剂是人工合成的 (或从微生物中提取)，对植物的生长和发育具有调节作用的化学物质。常见的植物生长调节剂主要有乙烯、赤霉素、脱落酸、矮壮素、吲哚乙酸等，具有用量小、见效快、对环境副作用小等优点。

目前，关于薇甘菊的抑制研究大多采用单一的外源抑制类物质^[12]，而且忽视了薇甘菊不同生长期的综合抑制效应研究，导致薇甘菊防控的系统性不足。迄今，尚无开展薇甘菊不同生长期综合性防治的研究。基于此，本文以薇甘菊为研究对象，分别选取不同浓度的土壤氮转化酶活抑

制剂 (脲酶抑制剂、硝化抑制剂) 和植物生长调节剂 (脱落酸、矮壮素)，研究土壤酶活抑制剂和外源植物调节剂对不同生长期薇甘菊生长的影响，以为薇甘菊的科学高效防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤基本理化性质：pH 6.60，电导率 (EC) 为 0.28 mS/cm，有机质为 223.60 g/kg，碱解氮为 984.10 mg/kg，速效磷为 93.04 mg/kg，速效钾为 97.90 mg/kg。

供试植物：薇甘菊幼苗采自广州市海珠湿地薇甘菊入侵区。

供试土壤酶活抑制剂：土壤脲酶抑制剂 (NBPT，正丁基硫代磷酰三胺，化学式： $C_4H_{14}N_3PS$ ，纯度 97%，上海君伯生物科技有限公司，CAS 号：94317-64-3)，硝化抑制剂 (DMPP，3,4-二甲基吡唑磷酸盐，化学式： $C_5H_{11}N_2O_4P$ ，纯度 95%，上海君伯生物科技有限公司，CAS 号：202842-98-6)。

供试外源植物生长调节剂：脱落酸 [ABA，(S)-5-(1-羟基-4-氧代-2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-甲基-(2Z,4E)-戊二烯酸，分子式： $C_{15}H_{20}O_4$ ，纯度 $\geq 99\%$ ，上海君伯生物科技有限公司，CAS 号：21293-29-8]，矮壮素 (chlormequat，2-氯-N,N,N-三甲基乙铵氯化物，分子式： $C_{14}H_9Cl_5$ ，纯度 $\geq 98\%$ ，广东翁江化学试剂有限公司，CAS 号：999-81-5)。

1.2 方法

1.2.1 试验设置 在广州市林业和园林科学研究院露天试验场，将采自广州市海珠湿地薇甘菊入侵区的薇甘菊幼苗移植于装有 2 kg 基质土的圆形塑料钵中 (底径 21 cm，盆口直径 24 cm，盆高 19 cm)，待薇甘菊长势一致 (30 d)，分别添加不同抑制剂和植物生长调节剂，试验处理见表 1。每个处理设置 3 次重复，试验周期为 7 个月 (2023 年 7 月—2024 年 2 月，涵盖薇甘菊的旺长期、现蕾期、开花期、盛花期和结籽期)。施加量参考各处理剂的推荐量进行设置，每 2 周添加 1 次，具体视天气情况而定。在添加抑制剂前、后每隔 2 周连续测定薇甘菊茎长和 SPAD 值，以月为单位对数据进行统计。培养结束后分别采集薇甘菊叶片、茎和根，称其鲜重，用去离子水洗净，烘干后称重。对盆钵内土壤破坏性取样，用四分法截

表 1 土壤酶活抑制剂和植物生长调节剂不同浓度设置
Tab. 1 Different concentration settings for soil enzyme activity inhibitors and plant growth regulators

编号 No.	处理剂 Agent	浓度 Concentration	施加量 Application amount/mL	施用方式 Application method
CK	蒸馏水			灌施
T ₁	NBPT	1 g/L		
T ₂	NBPT	15 g/L		灌施
T ₃	DMPP	1 g/L		
T ₄	DMPP	15 g/L	100	
T ₅	脱落酸	25 mg/L		
T ₆	脱落酸	50 mg/L		喷施
T ₇	矮壮素	1 g/L		
T ₈	矮壮素	10 g/L		

留 1/4 份混合成 1 份土样，风干后过 2 mm 筛，用于测定土壤碱解氮、速效磷等理化指标。

1.2.2 指标测定 采用电位法测定土壤 pH，采用电导法测定电导率（EC），采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机质含量，采用碱解扩散法测定水解性氮含量，采用碳酸氢钠浸提法测定有效磷含量，植物叶片生物量指标均采用常规方法测定。

参考根系研究常用的“直径法”^[20]和“根序法”^[21]，根据根系的直径（*d*）、分枝和颜色，将薇甘菊根系划分为 3 个等级：一级，*d*>2 mm，褐色；二级，1 mm≤*d*≤2 mm，白色；三级，*d*<1 mm，毛细须根。考虑到薇甘菊根系发达，相互缠绕且易断，故采用定量与定性相结合的方法分析薇甘菊根系直径分布。

1.3 数据处理

利用 Excel 软件进行数据整理和初步分析；采用 SPSS 软件对不同处理薇甘菊的生长状况、土壤理化性质和酶活进行单因素方差分析、Duncan 多重比较和相关性分析并作图。通过 R 软件包 ADE-4 对不同处理薇甘菊的生长状况、生物量和土壤养分含量特征进行主成分分析(principal component analysis, PCA)^[22-23]。

2 结果与分析

2.1 不同处理薇甘菊叶绿素和茎长的变化

不同浓度 NBPT、DMPP、脱落酸和矮壮素处理后薇甘菊叶片的叶绿素含量变化如图 1。随着培养时间的延长，各处理薇甘菊叶片的 SPAD 值总体呈逐渐下降的趋势。在整个培养周期内，T₁、

T₂ 和 T₈ 处理薇甘菊叶片的 SPAD 值均高于 CK，其中 T₂ 和 T₈ 处理始终维持在相对较高的水平，最高值分别为 40.4（7 月）和 38.2（8 月）。12 月之前，各处理薇甘菊叶片的 SPAD 值变化相对平缓，之后的 1 月，除 T₈ 外，其他处理均呈现明显下降，并于 2 月逐步回升。12 月之后，T₃、T₄ 和 T₆ 处理薇甘菊叶片的 SPAD 值明显低于 CK，其中 T₄ 处理的薇甘菊叶片全部凋落（SPAD 值记为 0）。

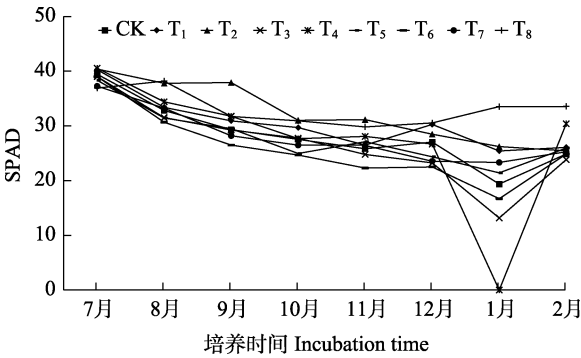


图 1 不同处理薇甘菊叶片 SPAD 值随培养时间的变化
Fig. 1 Changes in SPAD values of chamomile leaves under different treatments with culture time

不同处理薇甘菊茎长变化如图 2 所示。各处理的茎长呈先增后趋于稳定的趋势。7—12 月，薇甘菊茎长由 50 cm 生长至约 250 cm，增长了近 3 倍，其中，8—11 月增长速度最快，11 月之后增长速度放缓，其中 T₆ 和 T₈ 处理的增长较慢，CK 茎长最大（263.8 cm）。8 月之后，T₆、T₇ 和 T₈ 的茎长明显低于其他处理（215~229 cm）。

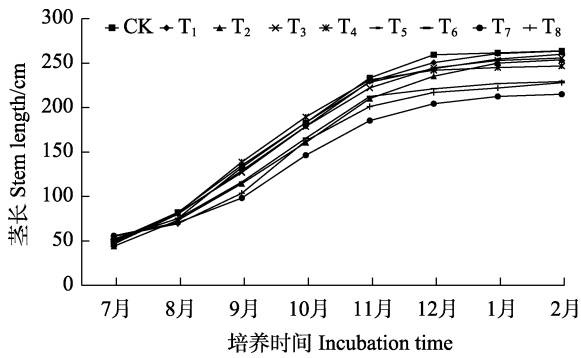


图 2 不同处理薇甘菊茎长随培养时间的变化
Fig. 2 Changes in stem length of chamomile under different treatments with culture time

2.2 不同处理对薇甘菊叶绿素、茎长和茎粗的影响

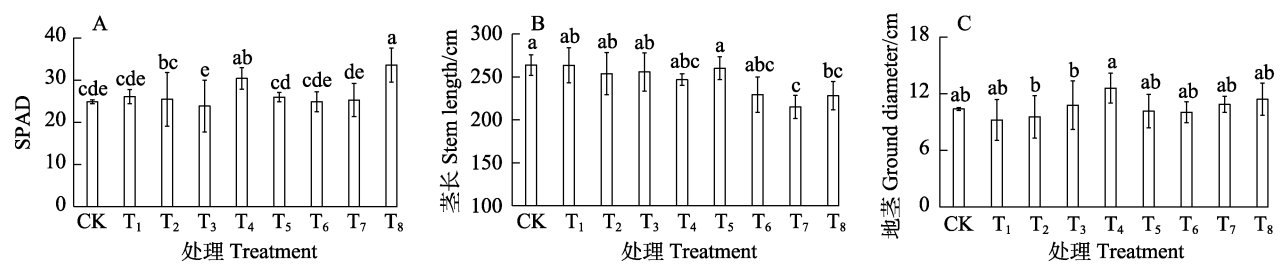
由图 3A 可知，不同处理培养结束后，T₈ 和 T₄ 处理的薇甘菊叶片 SPAD 值最高，显著高于其

他处理 ($P<0.05$), 其他处理间均无显著差异。各处理的薇甘菊茎长如图 3B 所示, 各处理薇甘菊茎长介于 215.0~263.8 cm 之间, CK 和 T_5 处理的薇甘菊茎长显著高于 T_7 和 T_8 ($P<0.05$), 其余各处理间均无显著性差异。各处理的薇甘菊地径范围为 9.2~12.6 mm, T_4 显著高于 T_2 和 T_3 ($P<0.05$), 其余各处理间均无显著性差异 (图 3C)。

2.3 不同处理对薇甘菊生物量的影响

各处理的薇甘菊根鲜重如图 4A 所示。 T_2 处理的根鲜重显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其中, T_4 处理的根鲜重显著低于除 T_6 以外的其他处理 ($P<0.05$)。从相同处理剂不同浓度角度分析, T_4 、 T_6 均分别显著低于 T_3 、 T_5 , 且均显著低于 CK, T_2 则显著高于 T_1 ($P<0.05$)。与根鲜重的变化趋

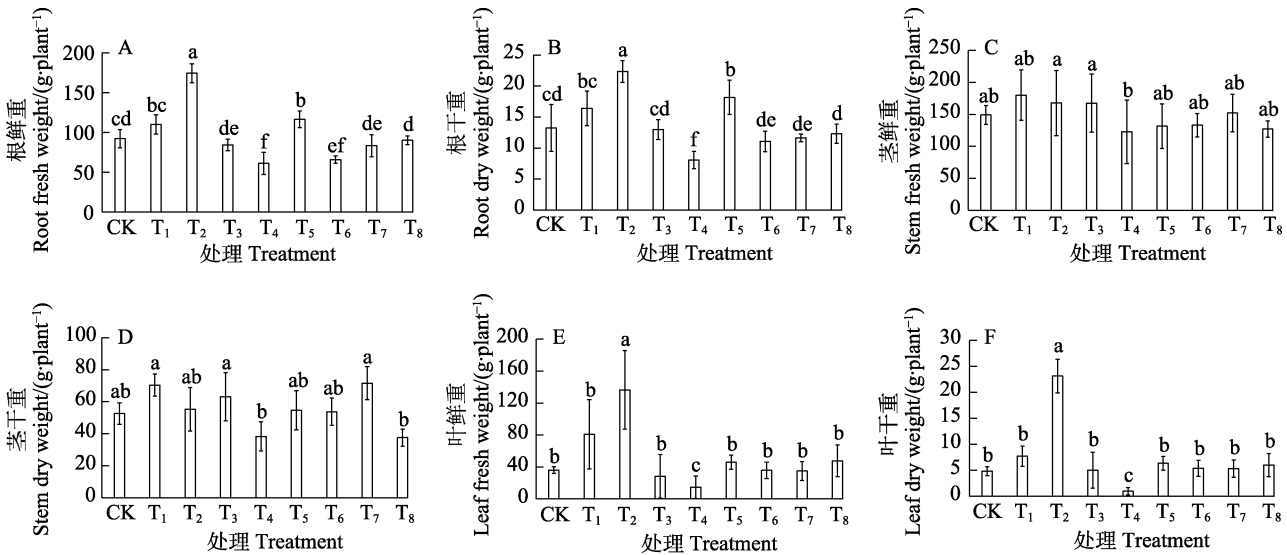
势相似, T_2 处理的薇甘菊根干重 (22.35 g/株) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其次是 T_1 和 T_5 处理, T_4 处理最低, 仅为 8.07 g/株, 其他处理间无显著差异 (图 4B)。各处理的薇甘菊茎鲜重介于 123.0~180.1 g/株之间, 其中, T_2 和 T_3 显著高于 T_4 ($P<0.05$), 其他处理间无显著差异 (图 4C)。各处理的薇甘菊茎干重为 37.5~71.6 g/株, 其中, T_1 、 T_3 和 T_7 显著高于 T_4 和 T_8 ($P<0.05$), 其他处理间无显著差异 (图 4D)。不同处理的薇甘菊叶生物量差异较大, 各处理薇甘菊叶鲜重以 T_2 处理最高, 达 136.4 g/株, 最低的 T_4 仅为 14.5 g/株, T_2 显著高于 T_4 (图 4E)。与叶鲜重类似, T_2 处理 (23.1 g/株) 显著高于 T_4 (0.99 g/株, $P<0.05$), 其他处理间无显著差异 (图 4F)。



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 3 不同处理的薇甘菊叶片 SPAD、茎长和地茎

Fig. 3 SPAD, stem length and rhizome of chamomile under different treatments



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 4 不同处理的薇甘菊生物量

Fig. 4 Biomass of chamomile under different treatments

2.4 不同处理对薇甘菊根形态的影响

经观察, 各处理的薇甘菊根直径分布见表 2。

T_1 和 T_2 处理的三级根系最多, 其次是 CK, 而其他处理, 尤其是 T_4 和 T_8 处理的三级根系极少,

主要以一级和二级根系为主。T₁ 和 T₆ 处理的二级根系较少，说明 T₁ 处理的根以一级和三级为主，T₆ 则以一级根系为主。除 T₂ 和 CK 外，其他处理薇甘菊的一级根系呈多或较多。

表 2 不同处理的薇甘菊根直径分布
Tab. 2 Root diameter distribution of chamomile under different treatments

处理 Treatment	等级 Level		
	一级 First level	二级 Second level	三级 Third level
CK	—	++	++
T ₁	++	—	+++
T ₂	—	++	+++
T ₃	++	++	—
T ₄	++	++	---
T ₅	+	++	—
T ₆	++	—	—
T ₇	++	+	--
T ₈	++	+	---

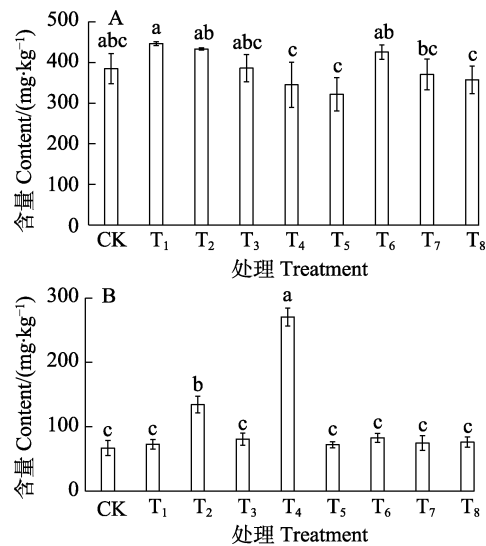
注：+++表示极多；++表示较多；+表示多；—表示少；--表示较少；---表示极少。
Note: +++ indicates most; ++ indicates more; + indicates many; — indicates few; -- indicates fewer; --- indicates fewest.

2.5 不同处理对土壤速效氮和有效磷含量的影响

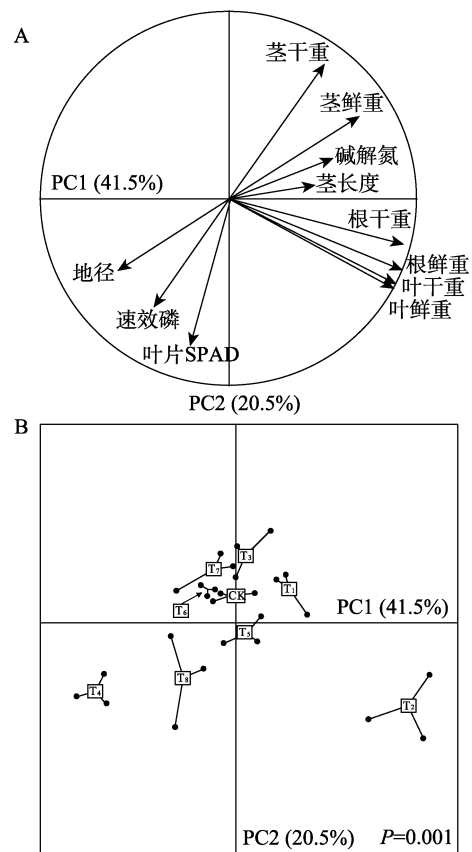
各处理的土壤碱解氮含量介于 321.6~446.5 mg/kg 之间，其中，T₁、T₂、T₆ 处理的土壤碱解氮含量显著高于 T₄、T₅、T₈ 处理 ($P<0.05$)，T₁~T₈ 处理的土壤碱解氮含量与 CK 均无显著性差异 (图 5A)。不同处理的土壤速效磷含量在 66.95~270.51 mg/kg 之间，其中，T₄ 处理显著高于 T₂，T₄ 和 T₂ 处理的土壤速效磷含量显著高于其他处理 (66.95~82.78 mg/kg，图 5B)。

2.6 不同处理薇甘菊生长状况、生物量和土壤养分含量的主成分分析

不同处理薇甘菊生长情况、生物量和土壤养分含量的主成分分析结果表明 (图 6)，第 1 主成分 (PC1) 累计方差贡献率为 41.5%，第 2 主成分 (PC2) 累计方差贡献率为 20.5%，主成分累计方差贡献率达到 63.6%，可以反映不同处理薇甘菊生长情况等相关指标的大部分信息，且受第 1、第 2 主成分的综合影响，不同处理样点的空间分布差异极显著 ($P<0.01$)。PC1 和 PC2 的空间载荷图表明，PC1 主要与薇甘菊根干重、茎长、茎鲜重、根鲜重、叶干重、叶鲜重及土壤碱解氮含量



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).
图 5 不同处理土壤碱解氮 (A) 和速效磷 (B) 含量
Fig. 5 Soil alkaline hydrolyzed nitrogen (A) and available phosphorus (B) content under different treatments



A: 主成分载荷图; B: 主成分得分图。
A: Load diagram of principal component; B: Scoring diagram of principal component.
图 6 各处理薇甘菊生长状况、生物量和土壤养分含量的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of growth status, biomass, and soil nutrient content of chamomile under different treatments

指标参数密切相关,受 PC1 不同处理下薇甘菊生长状况参数的影响,各处理样点空间分布差异极显著 ($P<0.01$) (图 6A); T_2 处理样点显著向根干重、根鲜重、叶鲜重、叶干重升高的方向偏移, T_1 处理样点显著向茎长、茎鲜重和土壤碱解氮含量升高的方向偏移,而 T_4 处理则显著偏向地径增大的方向 (图 6B)。表明 T_2 和 T_1 处理的薇甘菊生物量较大,长势较好。PC2 主要与茎干重、土壤速效磷、叶片 SPAD 等参数密切相关 (图 6A),受 PC2 参数影响, T_8 处理样点向土壤速效磷、叶片 SPAD 升高的方向偏离, T_3 处理薇甘菊倾向于具有更高的茎干重 (图 6B)。

3 讨论

极强的光合作用^[24]和延伸能力^[10]是薇甘菊具有顽强生命力和侵占能力的基础,也是其防治难度大的重要原因。本研究结果表明,总体上,在培养期内各处理的薇甘菊叶片 SPAD 值均呈不同程度的下降,但茎长却呈“S”型曲线,即随着培养时间的延长,各处理的薇甘菊茎长先升高,最后趋于稳定。其中 15 g/L DMPP 处理的叶片在盛花期全部凋落,10 g/L 矮壮素处理的茎长始终处于较低水平。试验过程中观察到,10 g/L 矮壮素处理的薇甘菊叶片卷曲,边缘焦化,颜色浓绿,叶片 SPAD 值较高,说明该处理明显抑制了薇甘菊生长,使其呈现一定的“浓缩”效应。

霍尔莫兹效应 (Hormetic effect) 是普遍存在于自然界中的自然现象,常表现为有毒物质在低浓度时表现出有益作用,在高浓度时表现负面作用^[22]。本研究试验培养结束时,除 NBPT 和矮壮素处理外,DMPP、脱落酸处理的薇甘菊生长指标总体均呈现高浓度抑制、低浓度促进的规律,因此符合霍尔莫兹效应^[22]。国内已有研究得出,NBPT 的添加量参考值为肥料添加量的 1%^[25],美国、加拿大、澳大利亚、欧洲等国家或地区的研究中,NBPT 添加量为 0.01%~0.25%^[26]。NBPT 是目前农业上广泛应用的脲酶抑制剂之一^[27],其主要作用原理是通过抑制土壤脲酶活性,降低尿素的分解速率,进而提高尿素类氮肥利用率。然而,将 NBPT 用于薇甘菊等植物生长抑制剂的研究尚无报道,故其剂量无从参考。本研究中,与 1 g/L NBPT 相比,高浓度的 NBPT (15 g/L) 能够促进薇甘菊的生长,说明该浓度尚未达到抑制薇甘菊的临界浓度。本研究中,与 CK 相比,添加

土壤酶活抑制剂的处理间碱解氮含量无显著差异,这可能与本研究试验周期长及氮素易流失特性有关。值得注意的是,15 g/L DMPP 处理的土壤速效磷含量最高,可能是因为该处理植物长势较差,限制了薇甘菊对土壤有效磷的吸收,然而这一推测并不适用于 15 g/L NBPT 处理,其相关作用机理有待进一步研究。

薇甘菊主根粗壮,根系发达。笔者在研究中观察到,各处理的薇甘菊根系错综复杂且相互缠绕,几乎占据整个盆钵,甚至从盆钵底部排水孔钻出。各处理的薇甘菊根直径分布结果表明,15 g/L DMPP 和 10 g/L 矮壮素处理的薇甘菊根以一级和二级为主,三级根数量极少,15 g/L DMPP 处理的根地径明显高于其他处理,说明 15 g/L DMPP 对薇甘菊根部有明显的抑制作用,主要体现在抑制三级根 ($d<1$ mm) 的产生。与之不同的是,NBPT 处理的薇甘菊无明显主根,三级根较多,与之对应的一级 ($d>2$ mm) 和二级根 ($1\text{ mm}\leq d\leq 2\text{ mm}$) 较少。试验结束时,观察到所有处理的薇甘菊根部均处于存活状态,一方面说明本研究所选用的土壤酶活抑制剂和外源植物调节剂的施用剂量均未达到薇甘菊的致死浓度,另一方面也从侧面证明了薇甘菊具有抗逆性强的特点。故在今后的研究中,开展薇甘菊对土壤酶活抑制剂及植物生长调节剂的毒性试验,确定精确的薇甘菊生长抑制浓度显得尤为必要,同时应开展相关抑制剂的生态毒理学研究,全面评估其生态环境风险。值得注意的是,试验培养结束时,所有处理的土壤中均有蚂蚁存在,其中以 10 g/L 矮壮素处理的最多。除蚂蚁外,CK 中还发现了蜂类幼虫,1 g/L DMPP、15 g/L DMPP 和 10 g/L 矮壮素处理均有金龟子幼虫,除金龟子幼虫外,10 g/L 矮壮素处理中还观察到马陆。因此,以上现象可间接反映出本研究选取的土壤酶活抑制剂和植物调节剂及其施用剂量均未对土壤动物丰富度和多样性造成明显的抑制效应。然而,基于生态环境安全考虑,对植物以及土壤环境指示性生物 (如蚯蚓等) 的安全性评价有待进一步验证。综上所述,10 g/L 矮壮素能够有效抑制旺长期的薇甘菊伸展,15 g/L DMPP 能明显抑制薇甘菊盛花期生物量。今后的研究可继续开展薇甘菊萌发期、生长期、现蕾期、开花期和结籽期的有效抑制剂种类、剂量及安全性评价方面的深入研究,为薇甘菊全生命周期防治提供新的研究思路。

4 结论

10 g/L 矮壮素对旺长期薇甘菊有抑制作用, 15 g/L DMPP 对盛花期薇甘菊有抑制作用, 二者联合施用可为薇甘菊全生命周期综合防治提供理论依据。

参考文献

- [1] WILCOVE D S, ROTHSTEIN D, DUBOW J, PHILLIPS A, LOSOS E. Quantifying threats to imperiled species in the United States[J]. *BioScience*, 1998, 48(8): 607-615.
- [2] 胡亮, 邓太阳, 张庆生, 李鸣光. 入侵藤本薇甘菊对酸性土壤的适应性[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(9): 1439-1445.
HU L, DENG T Y, ZHANG Q S, LI M G. The adaptation of *Mikania micrantha* to acid soil[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2016, 25(9): 1439-1445. (in Chinese)
- [3] 唐尚杰, 杨龙, 刘美洁, 黄钰辉, 甘先华, 尹光彩, 孙中宇. 深圳大鹏半岛薇甘菊的空间发生规律[J]. *生物安全学报*, 2023, 32(3): 226-234.
TANG S J, YANG L, LIU M J, HUANG Y H, GAN X H, YIN G C, SUN Z Y. Spatial pattern of the occurrence of *Mikania micrantha* in Dapeng peninsula, Shenzhen[J]. *Journal of Biosafety*, 2023, 32(3): 226-234. (in Chinese)
- [4] 曾晓丽, 喻三鹏, 田茂娟, 张念念, 班启明, 邱建生. 入侵植物薇甘菊在贵州的潜在适生区及其变化趋势[J]. *生物安全学报*, 2024, 33(2): 169-176.
ZENG X L, YU S P, TIAN M J, ZHANG N N, BAN Q M, QIU J S. Suitable growth areas of the invasive plant *Mikania micrantha* in Guizhou and its trends[J]. *Journal of Biosafety*, 2024, 33(2): 169-176. (in Chinese)
- [5] 苟志辉, 王鑫, 曾亚红, 钟圣赞, 卢国鹏. 薇甘菊在海南岛分布特征及其生长环境调查[J]. *热带农业科学*, 2024, 44(3): 57-66.
GOU Z H, WANG X, ZENG Y H, ZHONG S Y, LU G P. Investigation of the distribution and growth environment of *Mikania micrantha* H.B.K. on Hainan island[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2024, 44(3): 57-66. (in Chinese)
- [6] 朱彬, 黄乔乔. 薇甘菊种群在海南扩张过程中种子大小和萌发性状的进化[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(7): 1988-1994.
ZHU B, HUANG Q Q. Evolution of seed size and germination traits of expanding populations of *Mikania micrantha* in Hainan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(7): 1988-1994. (in Chinese)
- [7] HOLM L G, PLUCKNETT D L, PANCHO J V, HERBEBGEB J S, HILBIG W, HALLE S. The world's worst weeds: distribution and biology[M]. Hawaii: The University Press of Hawaii, 1977: 320-327.
- [8] 农业农村部, 自然资源部, 生态环境部, 住房和城乡建设部, 海关总署, 国家林草局. 重点管理外来入侵物种名录公告第 567 号[EB/OL]. (2023-01-04)[2024-03-12]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2022/202212/202301/t20230104_6418238.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Natural Resources, Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Housing and Urban Rural Development, General Administration of Customs, National Forestry and Grassland Administration. Announcement No. 567 on the key management of the list of invasive alien species[EB/OL]. (2023-01-04)[2024-03-12]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2022/202212/202301/t20230104_6418238.htm. (in Chinese)
- [9] 王家宜, 余涵霞, 赖玉芳, 万方浩, 钱万强, 彭长连, 李伟华. 入侵杂草薇甘菊与本地植物粉葛对水分胁迫的生理响应[J]. *生物多样性*, 2017, 25(12): 1267-1275.
WANG J Y, YU H X, LAI Y F, WAN F H, QIAN W Q, PENG C L, LI W H. Physiological response of the invasive weed *Mikania micrantha* and the native species *Pueraria lobata* var. *thomsonii* to water stress[J]. *Biodiversity*, 2017, 25(12): 1267-1275. (in Chinese)
- [10] 梁浩林, 郑亚萍, 姜朝阳, 岳茂峰, 李伟华. 低光下薇甘菊茎的伸长特征及其生理基础[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(1): 70-78.
LIANG H L, ZHENG Y P, JIANG C Y, YUE M F, LI W H. Stem elongation characteristics of *Mikania micrantha* and its physiological basis under low light condition[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2022, 30(1): 70-78. (in Chinese)
- [11] 户连荣, 泽桑梓, 张知晓, 季梅, 刘凌. 薇甘菊人工速效郁闭及其遮荫控制技术研究[J]. *西部林业科学*, 2018, 47(2): 96-100.
HU L R, ZE S Z, ZHANG Z X, JI M, LIU L. Study on the control of *Mikania micrantha* by using artificial quick closure and shade[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2018, 47(2): 96-100. (in Chinese)
- [12] 宋雪, 王辉, 伍洲洲, 咎欣, 胡长云, 咎启杰. 质量分数 25% 滴酸·氨氯吡水剂对薇甘菊生理生化特征影响及防除效果研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2003-2009.
SONG X, WANG H, WU Z Z, ZAN X, HU C Y, ZAN Q J. Study on the effect of 25% 2,4-D *Picloram* aqueous solution on physiological and biochemical characteristics of *Mikania micrantha* and its control effect[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2020, 29(10): 2003-2009. (in Chinese)
- [13] 黄永禄, 刘晓亮, 唐文伟, 曾东强. 18% 2,4-滴微乳剂防治非耕地薇甘菊田间药效试验[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(3): 406-409.
HUANG Y L, LIU X L, TANG W W, ZENG D Q. Field tri-

- als of 18% 2,4-D micro-emulsion against *Mikania micrantha* in non-cultivated land[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(3): 406-409. (in Chinese)
- [14] 郭成林, 马跃峰, 覃建林, 马永林. 30 种除草剂对豚草和薇甘菊的防效初步评价[J]. 植物保护, 2014, 40(2): 179-183.
GUO C L, MA Y F, QIN J L, MA Y L. Chemical control effects of 30 kinds of herbicides on *Ambrosia artemisiifolia* and *Mikania micrantha*[J]. Plant Protection, 2014, 40(2): 179-183. (in Chinese)
- [15] 张付斗, 岳英, 申时才, 徐高峰, 郭晋, 张玉华. 菟丝子属植物在云南对薇甘菊的控制效果及其安全性调查评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 365-370.
ZHANG F D, YUE Y, SHEN S C, XU G F, GUO J, ZHANG Y H. The control effect of *Cuscuta* on *Mikania micrantha* and their ecological index in Yunnan[J]. Journal of Ecology and Environment, 2017, 26(3): 365-370. (in Chinese)
- [16] 宋雪, 蒋露, 郭强, 孙延军, 咎启杰. 应用田野菟丝子防治薇甘菊对其他植物的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(4): 139-150.
SONG X, JIANG L, GUO Q, SUN Y J, ZAN Q J. Effect of other plants by applying *Cuscuta campestris* Yuncker to control *Mikania micrantha* H.B.K.[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 139-150. (in Chinese)
- [17] 李云琴, 季梅, 刘凌, 户连荣, 张知晓, 泽桑梓. 云南省林地薇甘菊防控研究进展[J]. 生物安全学报, 2019, 28(1): 1-6.
LI Y Q, JI M, LIU L, HU L R, ZHANG Z X, ZE S Z. Progress in prevention and control of *Mikania micrantha* in Yunnan forestland[J]. Journal of Biosafety, 2019, 28(1): 1-6. (in Chinese)
- [18] YU Q G, YE X Z, CHEN Y X, ZHANG Z J, TIAN G M. Influences of nitrification inhibitor 3,4-dimethyl pyrazole phosphate on nitrogen and soil salt-ion leaching[J]. Journal of Environment Science, 2008, 20(3): 304-308.
- [19] 徐丽萍, 王旭, 侯晓娜, 刘红芳, 保万魁, 孙蓓蓓. 脲酶抑制剂 NBPT 对三种类型土壤中 UAN 氮溶液氮素转化和氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 126-136.
XU L P, WANG X, HOU X N, LIU H F, BAO W K, SUN J F. Effects of urease inhibitors (NBPT) on nitrogen transformation and ammonia volatilization of UAN nitrogen solution in three types of soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(3): 126-136. (in Chinese)
- [20] TRUMBORE S E, GAUDINSKI J B. The secret lives of roots[J]. Science, 2003, 302(5649): 1344-1345.
- [21] PREGITZER K S, KUBISKE M E, YU C K, HENDRICK R L. Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species[J]. Oecologia, 1997, 111(3): 302-308.
- [22] WU J L, REN Z L, ZHANG C, MOTELIA-HEINO M, DENG T, WANG H Y, DAI J. Effects of soil acid stress on the survival, growth, reproduction, antioxidant enzyme activities, and protein contents in earthworm (*Eisenia fetida*)[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(27): 33419-33428.
- [23] 吴家龙, 郭彦彪, 张池, 邓婷, 王皓宇, 杨淇钧, 刘青, 周波, 任宗玲, 戴军. 华南矿区与非矿区土壤酸化特征及铝形态分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 21-30.
WU J L, GUO Y B, ZHANG C, DENG T, WANG H Y, YANG Q J, LIU Q, ZHOU B, REN Z L, DAI J. Acidification characteristics and aluminum speciation in soil from mining and non-mining areas of Southern China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 21-30. (in Chinese)
- [24] 金梦娇, 刘博, 王抗抗, 张广忠, 钱万强, 万方浩. 薇甘菊光能利用及叶绿素合成在不同光照强度下的响应[J]. 中国农业科学, 2022, 55(12): 2347-2359.
JIN M J, LIU B, WANG K K, ZHANG G Z, QIAN W Q, WAN F H. Light energy utilization and response of chlorophyll synthesis under different light intensities in *Mikania micrantha*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(12): 2347-2359. (in Chinese)
- [25] CHIEN S H, PROCHNOW L L, CANTARELLA H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 267-322.
- [26] 王小彬, 蔡典雄. 脲酶抑制剂 NBPT 在农业中的应用[J]. 中国化工, 1998(5): 53-55.
WANG X B, CAI D X. The application of urease inhibitor NBPT in agriculture[J]. China Chemical Industry, 1998(5): 53-55. (in Chinese)
- [27] 胡霁堂. 植物营养学(下册)[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 23.
HU A T. Plant nutrition (Volume 2)[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 23. (in Chinese)