



引用格式: 张燕婷, 方筱, 郭荣, 等. 施肥对鼠尾草属 2 种外来植物资源分配的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1395-1401. [ZHANG Y T, FANG X, GUO R, et al. Effects of fertilization on resource allocation of two exotic plants of *Salvia* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(9): 1395-1401.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230763

施肥对鼠尾草属 2 种外来植物资源分配的影响

张燕婷^{1,2}, 方筱^{1,2}, 郭荣^{1,2}, 曾盛琪^{1,2}, 闫晓慧¹, 胡世俊^{2*}

(1 西南林业大学 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 昆明 650224; 2 西南林业大学 国家林草局生物多样性保育重点实验室, 昆明 650224)

摘要 【目的】比较鼠尾草属 2 种外来植物一串红和椴叶鼠尾草在不同营养条件下生长、繁殖、防御方面资源分配策略, 了解椴叶鼠尾草的入侵机制。【方法】采用盆栽试验法, 以 2 种外来植物为材料, 设置对照(0 g)、低肥(2 g)和高肥(4 g) 3 个营养梯度, 测定生长、繁殖指标, 物理防御、化学防御指标和营养物质含量。【结果】(1) 2 种植物的生物量、营养物质含量和花的化学防御能力均为高肥处理>低肥处理>对照, 叶的物理和化学防御能力为高肥处理<低肥处理<对照。(2) 在相同条件下, 椴叶鼠尾草的株高、叶片数、花数、总生物量高于一串红, 将 43%~52% 的总生物量分配给有性生殖, 叶的物理和化学防御指标也高于一串红, 但花的化学防御指标和营养物质含量比一串红低。椴叶鼠尾草叶的化学防御物质含量比花高, 一串红则相反。【结论】2 种植物在资源充足的条件下会减少叶防御投入, 增加生长繁殖的投入。椴叶鼠尾草侧重叶的防御, 一串红侧重花的防御。

关键词 外来植物; 椴叶鼠尾草; 一串红; 资源分配; 土壤营养

中图分类号 Q945.79 **文献标志码** A

Effects of fertilization on resource allocation of two exotic plants of *Salvia*

ZHANG Yanting^{1,2}, FANG Xiao^{1,2}, GUO Rong^{1,2},
ZENG Shengqi^{1,2}, YAN Xiaohui¹, HU Shijun^{2*}

(1 Key Laboratory of Forest Disaster Early Warning and Control of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Key Laboratory of Biodiversity Conservation of the State Forestry and Grassland Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract [Objective] Comparison of resource allocation strategies in terms of growth, reproduction and defense under different nutrient conditions between two exotic plants of the *Salvia tiliifolia* and *Salvia splendens*, to understand the invasion mechanism of *S. tiliifolia*. [Methods] By pot experiments, two exotic plants of *Salvia* were chosen as experimental materials. Three nutrient gradients [control (0 g), low fertilizer (2 g), and high fertilizer (4 g)] were established. Indexes of growth, reproduction, physical defense, chemical defense, and content of nutrient substances were measured. [Results] (1) The biomass, nutrient content, and chemical defense capability of flowers in both species followed the order: High fertilization > low fertilization > control, while the physical and chemical defense capabilities of leaves fol-

收稿日期: 2023-11-27; 修改稿收到日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160378); 云南省高层次人才项目(YN-WR-QNBJ-2018-300)

作者简介: 张燕婷(1998—), 女, 在读研究生, 主要从事植物入侵研究。E-mail: 2232704259@qq.com

* 通信作者: 胡世俊, 博士, 副教授, 主要从事植物入侵研究。E-mail: shijunhu@126.com

lowed the opposite order: Control > low fertilization > high fertilization. (2) Under the same condition, *S. tiliifolia* exhibited higher plant height, leaf number, flower number, and total biomass compared to *S. splendens*, allocating 43%–52% of its total biomass to sexual reproduction. The physical and chemical defense indices of leaves were also higher in *S. tiliifolia* than in *S. splendens*, but the chemical defense indices of flowers and nutrient content were lower. The leaf of *S. tiliifolia* showed higher content of chemical defense substances than flower, and the *S. splendens* was the opposite. [Conclusion] Under conditions of abundant resources, both species reduce investment in leaf defense and increase investment in growth and reproduction. *S. tiliifolia* focuses on leaf defense, while *S. splendens* focuses on flower defense.

Key words exotic plants; *Salvia tiliifolia*; *Salvia splendens*; resource allocation; soil nutrition

当前生物入侵已经成为全球性问题,中国是生物入侵最为严重的国家之一^[1]。有些外来种在新栖息地成为入侵种,对其入侵机制我们知之甚少,但对于它们的治理至关重要^[2]。外来植物在入侵过程中会遇到多种异质环境,土壤养分状况是影响其生长最重要的因素^[3-4],这是因为植物在生长过程中不断适应环境的变化,将有限的资源按照最佳比例,最合理地分配到各个器官中,使适合度达到最大^[5]。在资源分配时,生长、繁殖和防御方面的分配权衡直接影响植物本身是否能在新环境中生存繁衍,可用的资源是植物决定防御策略的重要因素,对植物本身来说,植物防御与适应成本相关,维持一定的防御水平需要消耗大量资源^[6]。尽管许多研究发现土壤营养状况与植株防御间具有正相关、负相关、不相关等多种结果^[3],且不少假说试图阐述营养水平如何影响生长与防御,但这些假说受到各种质疑^[7]。可见,营养如何影响生长、防御投资仍需要深入研究。入侵植物灵活有效的资源分配策略,能促进其入侵、扩散。因此,研究入侵植物在不同营养条件下资源分配策略有利于了解其入侵机制。

椴叶鼠尾草(*Salvia tiliifolia*)和一串红(*Salvia splendens*)同属于唇形科鼠尾草属植物。椴叶鼠尾草近几年在云南快速入侵^[8],而一串红需要在人工栽培下才能存活^[9]。关于椴叶鼠尾草的研究主要集中于其化学成分上^[10-11],对其入侵机制的研究很少,故本研究以这2种外来植物为材料,研究土壤营养对其生长、繁殖、防御分配的影响,比较2种植物在不同的营养条件下生长、繁殖、防御策略的差异,探讨椴叶鼠尾草的入侵机制,为其综合治理提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试椴叶鼠尾草和一串红种子采自西南林业大

学校园周围,于腐殖土中培育1个月后,选择长势一致的幼苗(幼苗地径0.2 cm,苗高5 cm)移栽到外口径为12.7 cm,底径为9 cm,高为11 cm的塑料花盆中,每盆种植1株幼苗。栽培用土按红土:腐殖土为3:1的体积比例混合均匀后填入盆内,保证每盆装土量到花盆的2/3处,将幼苗置于西南林业大学温室中培育,室内温度为27℃,相对湿度为70%,定期浇水。

1.2 施肥处理

椴叶鼠尾草和一串红的幼苗移栽40 d后,对植株进行对照(不施肥)、低肥(2 g)、高肥(4 g)处理,每个处理重复5株,各施肥处理每次每株于盆中放置2 g缓释复合肥,低肥处理施肥1次,高肥处理施肥2次(隔30 d施1次肥)。供试肥料为亨坤缓释复合肥,主要成分是氮磷钾, $N+P_2O_5+K_2O \geq 45\%$ 。试验2022年6月18日开始,8月17日结束,共60 d。

1.3 测定指标及方法

试验结束后测量各植株的株高、叶片数、花数等指标。在样品采集后使用电子天平及时称量叶片鲜重,鲜重的叶片烘干至恒重后,称其干重。叶干物质含量=叶干重/叶鲜重^[4]。用考马斯亮蓝法^[12]测定叶片可溶性蛋白含量。

将各植株叶、花、茎和根器官进行分离,分别装入纸袋,于60℃条件下烘干至恒重,称其干重并记录。将烘干后2种植物的叶片和花研磨成粉末,测定单宁、总酚、黄酮、可溶性糖的含量。用香草醛法^[13]测定单宁含量,用芦丁法^[14-15]测定黄酮含量,用Folin-Ciocalteus法^[16]测定总酚含量,用蒽酮-硫酸法^[17]测定可溶性糖含量。

1.4 数据处理

所有数据均使用Excel 2007和SPSS 26.0进行处理和分析。用单因素(one-way ANOVA)和LSD法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。用Graph-Pad Prism8软件作图。

2 结果与分析

2.1 椴叶鼠尾草和一串红生长、繁殖指标变化

由表 1 可知,在低肥处理条件下,椴叶鼠尾草的花数、叶鲜重、叶干重及一串红的叶片数、叶鲜重、叶干重、总生物量显著高于对照($P<0.05$)。在高肥

处理条件下,除 2 种植物的根干重和椴叶鼠尾草的株高较对照变化不显著外,其余各生物量指标均显著高于对照($P<0.05$)。2 种植物的各生物量指标均为高肥处理最高,低肥处理次之,对照最低。在相同条件下,除了叶鲜重、叶干重和根干重外,其余生物量指标均为椴叶鼠尾草比一串红高。

表 1 不同施肥处理下 2 种植物的生长、繁殖指标
Table 1 Growth and reproduction indexes of two plants under different fertilization treatments

物种 Species	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	叶片数 Number of leaves	花数 Number of flowers	叶鲜重 Leaf fresh weight/g
椴叶鼠尾草 <i>S. tiliifolia</i>	对照 Control	56.38±1.59a	93.40±17.77b	566.40±67.97c	0.28±0.13c
	低肥 Low fertilization	64.66±4.84a	168.80±31.66b	1585.60±315.31b	1.84±0.40b
	高肥 High fertilization	69.12±6.44a	450.00±29.46a	2860.60±405.16a	4.90±0.61a
一串红 <i>S. splendens</i>	对照 Control	20.60±1.02b	32.00±5.69c	8.40±1.33b	0.61±0.07c
	低肥 Low fertilization	23.90±1.08ab	57.00±8.95b	47.40±17.51ab	5.78±1.31b
	高肥 High fertilization	25.78±1.43a	131.60±8.98a	54.20±17.00a	11.53±1.16a

物种 Species	处理 Treatment	叶干重 Leaf dry weight/g	花干重 Flower dry weight/g	茎干重 Stem dry weight/g	根干重 Root dry weight/g	总生物量 Total biomass/g
椴叶鼠尾草 <i>S. tiliifolia</i>	对照 Control	0.11±0.05c	0.79±0.10b	0.72±0.09b	0.23±0.02a	1.85±0.24b
	低肥 Low fertilization	0.57±0.13b	1.97±0.47b	1.53±0.44ab	0.31±0.08a	4.38±1.10b
	高肥 High fertilization	1.48±0.16a	4.19±0.81a	1.83±0.36a	0.43±0.09a	7.93±1.38a
一串红 <i>S. splendens</i>	对照 Control	0.11±0.01b	0.13±0.04b	0.30±0.10b	0.39±0.10a	0.92±0.21b
	低肥 Low fertilization	1.35±0.36a	0.35±0.11ab	0.64±0.12ab	0.42±0.10a	2.98±0.53a
	高肥 High fertilization	2.07±0.37a	0.65±0.21a	0.87±0.16a	0.61±0.19a	4.20±0.83a

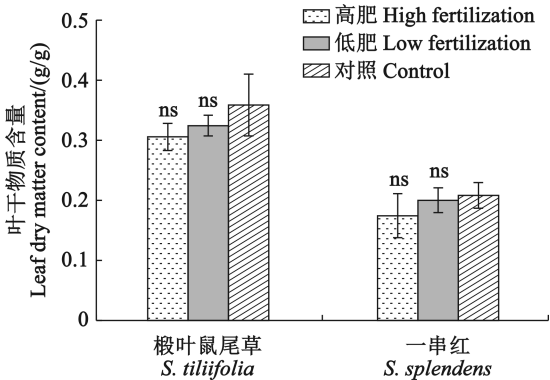
注:不同小写字母表示同一植物不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences of the same plant between different treatments ($P<0.05$). The same as below.

2.2 椴叶鼠尾草和一串红物理防御指标变化

由图 1 所知,椴叶鼠尾草和一串红的叶干物质含量均为对照最高,低肥处理次之,高肥处理最低。在相同条件下,椴叶鼠尾草的叶干物质含量比一串红高。

2.3 椴叶鼠尾草和一串红化学防御指标变化

由表 2 可知,与对照相比,椴叶鼠尾草的花黄酮含量、花单宁含量和一串红的叶单宁含量在高肥处理条件下显著提高($P<0.05$)。除一串红的叶单宁含量外,2 种植物叶的化学防御物质含量均为高肥处理最低,低肥处理次之,对照最高;花的化学防御物质含量均为高肥处理最高,低肥处理次之,对照最低。椴叶鼠尾草叶的化学防御物质含量比花高,一串红则相反。椴叶鼠尾草叶的化学防御物质含量比一串红高,花的化学防御物质含量则比一串红低。



ns 表示处理与对照间无显著差异($P>0.05$)。

图 1 不同施肥处理下椴叶鼠尾草和一串红的叶干物质含量

ns indicates no significant difference between treatment and control($P>0.05$).

Fig. 1 Leaf dry matter content of *S. tiliifolia* and *S. splendens* under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理下 2 种植物的化学防御指标

Table 2 Chemical defense indexes of two plants under different fertilization treatments

物种 Species	处理 Treatment	总酚含量 Total phenolic content/($\mu\text{g/g}$)		黄酮含量 Flavonoid content/($\mu\text{g/g}$)		单宁含量 Tannin content/(mg/g)	
		叶 Leaf	花 Flower	叶 Leaf	花 Flower	叶 Leaf	花 Flower
椴叶 鼠尾草 <i>S. tiliifolia</i>	对照 Control	13787.82 $\pm$ 794.09a	6426.47 $\pm$ 512.30a	2815.60 $\pm$ 189.19a	681.18 $\pm$ 80.60b	2.62 $\pm$ 0.49a	1.15 $\pm$ 0.20b
	低肥 Low fertilization	11712.18 $\pm$ 3 583.27a	6981.09 $\pm$ 608.71a	2552.46 $\pm$ 364.90a	752.60 $\pm$ 86.85ab	2.53 $\pm$ 0.18a	1.58 $\pm$ 0.15ab
	高肥 High fertilization	7002.10 $\pm$ 1710.93a	7619.75 $\pm$ 635.43a	2457.22 $\pm$ 113.51a	960.19 $\pm$ 78.32a	2.24 $\pm$ 0.19a	1.69 $\pm$ 0.12a
一串红 <i>S. splendens</i>	对照 Control	9943.28 $\pm$ 2 141.33a	10014.71 $\pm$ 3032.80a	1628.35 $\pm$ 380.70a	1465.40 $\pm$ 500.11a	1.38 $\pm$ 0.11b	32.80 $\pm$ 21.63a
	低肥 Low fertilization	6695.38 $\pm$ 1061.48a	13084.73 $\pm$ 1729.86a	880.58 $\pm$ 180.14a	2066.59 $\pm$ 311.64a	1.41 $\pm$ 0.25b	46.65 $\pm$ 12.64a
	高肥 High fertilization	5913.87 $\pm$ 422.44a	16493.70 $\pm$ 3927.66a	852.31 $\pm$ 92.79a	2650.67 $\pm$ 768.13a	2.62 $\pm$ 0.24a	73.06 $\pm$ 3.90a

2.4 椴叶鼠尾草和一串红营养物质指标变化

由表 3 可知,与对照相比,一串红的叶可溶性蛋白含量在高肥和低肥处理条件下显著提高($P<0.05$),椴叶鼠尾草叶和花的营养物质含量在高肥处理条件下显

著提高($P<0.05$)。2 种植物的营养物质含量均为高肥处理最高,低肥处理次之,对照最低。2 种植物的花可溶性糖含量比叶可溶性糖含量低。在相同条件下,椴叶鼠尾草叶和花的营养物质含量比一串红低。

表 3 不同施肥处理下 2 种植物的营养物质指标

Table 3 Nutrient indexes of two plants under different fertilization treatments

物种 Species	处理 Treatment	叶可溶性蛋白 Leaf soluble protein	叶可溶性糖 Leaf soluble sugar	花可溶性糖 Flower soluble sugar
椴叶鼠尾草 <i>S. tiliifolia</i>	对照 Control	2.31 $\pm$ 0.18b	86.92 $\pm$ 7.18b	24.64 $\pm$ 2.82b
	低肥 Low fertilization	2.42 $\pm$ 0.10b	101.12 $\pm$ 4.76ab	29.27 $\pm$ 2.60b
	高肥 High fertilization	3.17 $\pm$ 0.27a	114.74 $\pm$ 6.69a	37.42 $\pm$ 2.26a
一串红 <i>S. splendens</i>	对照 Control	3.50 $\pm$ 0.09b	107.91 $\pm$ 3.42a	34.99 $\pm$ 9.23a
	低肥 Low fertilization	4.07 $\pm$ 0.24a	122.02 $\pm$ 12.79a	47.31 $\pm$ 2.91a
	高肥 High fertilization	4.33 $\pm$ 0.09a	130.54 $\pm$ 13.24a	51.62 $\pm$ 8.87a

3 讨 论

改变形态特征和生物量分配模式是植物适应不同环境和资源的重要策略,植物通过优化生物量分配来适应不同环境^[18-20]。高生物量和高生长速率有利于入侵植物迅速占据空间,从而成功入侵^[21]。生物量分配模型有助于更好地了解植物(尤其是入侵植物)对不同环境的适应对策,为其适应机制和入侵能力提供更多信息。株高的增加有利于获取空间和光照等资源,提高竞争力和入侵能力^[22-23];叶片是植物接受光能进行光合作用的场所,植株的总叶面积增加,可以增强捕获光能的能力^[17,24];花生物量分配较多,有利于产生大量种子^[25]。在本试验中,2 种植物的各生物量指标随着施肥程度的增加

而增长,说明 2 种植物在资源丰富的条件下,会增加生物量的投入来适应环境,这与喂玉响宝等^[26]研究施肥量对西南桦林下幼龄云南红豆杉生长和生物量影响结果一致。椴叶鼠尾草的株高、叶片数、花数、花干重、茎干重、总生物量指标比一串红高,说明椴叶鼠尾草在相同条件下,竞争能力较强,且有较高的繁殖投入,有利于提高后代的数量,满足自身生长需求。椴叶鼠尾草较大的株高、叶生物量分配、花生物量分配,是其适应相应的异质环境和生长发育的需要,这表明了其灵活的生长和资源分配策略。

植物会采用多种防御机制来保护自己免受天敌的攻击^[27],但植物的防御会受到许多外在因素的影响,如可利用的资源状况^[28]。物理防御是植物通过自身组织器官的形态结构来抵御不利生存环境的防

御方式,如植物单位叶面积的干重、叶片厚度、叶干物质含量等^[29]。叶干物质含量与叶片韧性呈正相关,具有高的叶干物质含量的植物更能抵抗物理危害,间接增加对食草昆虫的抗性^[30],叶干物质含量越大,物理防御能力越强。碳养分平衡假说认为随着可利用养分的增加,植物可能将更多资源用于生长,而降低防御的资源分配^[31]。本研究中,在不同施肥处理条件下 2 种植物的叶干物质含量减少,植株的物理防御能力减弱。在相同条件下,椴叶鼠尾草的叶干物质含量比一串红高,说明椴叶鼠尾草的物理防御能力强于一串红。次生代谢物质被认为是植物化学防御最重要的方式,酚类物质含量通常作为化学防御的主要指标^[27]。在本研究中,除一串红的叶单宁含量外,在不施肥处理或贫脊条件下,2 种植物的叶化学防御物质含量较高,表明 2 种植物可根据资源状况来改变防御物质的投资,在资源充足的情况下,会减少化学防御的投入。最优防御假说(optimal defense hypothesis)是解释植物防御分配的一个重要假说,它预测对植物生长和繁殖贡献更大的器官将得到更好的防御^[32]。花是植物的生殖器官,花被取食会降低植物的繁殖能力,干扰植物与传粉者的相互作用,影响到植物的生存与适合度^[14],因此许多植物会在花的防御上投入更多资源。在本研究中,2 种植物在充分的资源下,会将更多的资源投入到花的防御中。

在本研究中,椴叶鼠尾草叶的化学防御物质含量比花高,一串红则相反;椴叶鼠尾草叶的化学防御物质含量比一串红高,而花的化学防御物质含量比一串红低。最优防御理论指出,植物体内防御的分配是由组织在适应度损失、攻击概率和防御成本方面的价值决定的,花和叶之间化学防御物质分配的差异不能仅仅用器官价值的差异来解释,需要考虑到防御的成本和器官的寿命^[33]。花在决定植物适应性和塑造植物进化中起着不可或缺的作用,保护它们的策略可能与保护叶子的策略不同^[34]。化学防御物质在花中的分配可能取决于阻止植食昆虫的优势和阻止传粉媒介的劣势之间的平衡,如果防御性化学物质在花中分配的劣势相当大,植物可能不会在花中分配高水平的防御性化学物质^[33]。对大多数植物来说,叶片是与光合作用和蒸腾作用高度相关的主要组织^[32],在大部分生长季节都存在,而生殖器官只存在有限的时间^[14],在某些物种中花的化学防御物质含量可能更低,因为花组织的损失实际上可能比叶片的损失更少地降低适应性^[35]。入侵种缺乏专食性天敌,再加上椴叶鼠尾草花很小,花期短,对昆虫的吸引力弱,因此,其花被取食的概率小,不需要投入太多

的防御物质,而一串红的花,花期较长,可见性高,容易被食草动物发现和攻击,使其成为攻击者的营养目标,所以花的化学防御物质含量较高。

营养物质是影响昆虫生长发育的重要因素,植物本身缺乏某种营养物质,会影响昆虫的正常发育,降低害虫的存活率,从而达到抗虫的目的^[36]。植物在进化过程中,为抵御植食性昆虫的损害,通过调整体内营养物质的含量,影响昆虫对植物的选择性,植物体内的可溶性糖和可溶性蛋白是昆虫生长、发育和繁殖所需的营养物质,昆虫通过取食植物来吸收这些营养,以维持其生命活动^[37]。可溶性糖含量的降低会影响昆虫的取食。研究表明,抗虫与感虫油菜品种的可溶性糖含量存在差异,可溶性糖含量越低,其抗虫性越强^[36,38]。可溶性蛋白含量会影响昆虫生长发育与存活率,可溶性蛋白含量越高,越容易吸引昆虫取食^[39-40]。韦婉玲等^[41]发现螨害指数与可溶性蛋白含量极显著正相关,螨害指数较高的木薯品种其抗螨性较弱且叶片可溶性蛋白含量较高。在本研究中,施肥处理条件下,2 种植物的营养物质含量均增加,充足的肥料可促进光合作用,从而增加干物质积累,可溶性糖含量和可溶性蛋白含量也随之增加。王占超等^[42]在水溶肥对促成盆栽伊藤牡丹‘芭茨拉’开花品质的影响的研究中发现随水溶肥浓度的增加,可溶性蛋白质和可溶性糖含量随之增大。许多植物性状研究表明,营养丰富的物种特别容易受到天敌的影响,植物不同器官被取食风险主要取决于所含营养成分的性质和含量^[43],2 种植物均为叶可溶性糖含量比花可溶性糖含量高,说明叶比花更容易受到昆虫取食。在相同条件下,由于椴叶鼠尾草的营养物质含量比一串红低,降低了昆虫取食的概率。

4 结 论

(1)植株生长与叶防御呈负相关,与营养物质含量呈正相关。随着施肥程度的加深,椴叶鼠尾草和一串红增加了生物量、花化学防御物质含量、营养物质含量,减少向叶防御方面的投入,增加生长繁殖的分配。

(2)与一串红相比,椴叶鼠尾草有较强的竞争力,可将 43%~52%的总生物量分配给有性生殖,产生更多的后代,促进其在入侵地上的快速扩张;椴叶鼠尾草叶的防御能力较强,花的化学防御物质含量及营养物质含量均较低,其花小,没有被取食的情况,因此花的防御投入低,该植物的防御对策十分优化。

(3)椴叶鼠尾草会调整自身物质分配比例从而更好地适应不同环境条件,这种分配对策有利于其生存、繁殖和成功入侵。

参考文献:

- [1] 杜素洁, 郭建洋, 赵浩翔, 等. 近 10 年我国入侵生物预防与监控研究[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 410-418.
DU S J, GUO J Y, ZHAO H X, *et al.* Research progresses on management of invasive alien species in China[J]. *Plant Protection*, 2023, 49(5): 410-418.
- [2] CASTILLO-CAMPOS G, GARCÍA-FRANCO J G, MARTÍNEZ M L, *et al.* Alien and potentially invasive plants in four lagoons on the island of Cozumel, Mexico[J]. *Plants*, 2023, 12(9): 1918.
- [3] VAN HEE S, STOCKMANS I, ALINÇ T, *et al.* Effects of plant-beneficial fungi on plant growth and herbivore resistance under contrasting fertilizer conditions[J]. *Plant and Soil*, 2023, 493(1): 157-172.
- [4] 王飞, 陈文业, 郭树江, 等. 沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 77-87.
WANG F, CHEN W Y, GUO S J, *et al.* Response of leaf functional traits of *Calligonum mongolicum* to habitat changes[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 77-87.
- [5] DORMONT L, FORT T, BESSIÈRE J M, *et al.* Sources of floral scent variation in the food-deceptive orchid *Orchis mas-cula*[J]. *Acta Oecologica*, 2020, 107: 103600.
- [6] DE LONG J R, SUNDQVIST M K, GUNDALE M J, *et al.* Effects of elevation and nitrogen and phosphorus fertilization on plant defence compounds in subarctic tundra heath vegeta-tion[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30(2): 314-325.
- [7] BINAMA B, BEHRENDT M, MÜLLER C. Responses of *Bunias orientalis* to short-term fungal infection and insect herbivory are independent of nutrient supply[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2022, 48(11): 827-840.
- [8] 刘杰, 闫晓慧, 胡世俊. 模拟昆虫取食对 2 种入侵植物生长繁殖的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(6): 119-124.
LIU J, YAN X H, HU S J. Effects of simulated herbivory on the growth and reproduction of two invasive plant[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2019, 36(6): 119-124.
- [9] 秦宇婷. 一串红(*Salvia splendens*)与同属 6 种植物种间杂交亲和性及 F₁ 观察[D]. 北京: 北京农学院, 2020.
- [10] 范敏. 3 种鼠尾草属植物中二萜的化学成分及生物活性研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [11] 范敏, 段宝忠, 夏从龙, 等. 椴叶鼠尾草中 1 个新的克罗烷型二萜化合物[J]. 中草药, 2020, 51(18): 4610-4613.
FAN M, DUAN B Z, XIA C L, *et al.* A new neo-clerodane diterpenoid from *Salvia tiliifolia* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(18): 4610-4613.
- [12] KUAI J, LI X Y, XIE Y, *et al.* Leaf characteristics at re-covery stage affect seed oil and protein content under the in-teractive effects of nitrogen and waterlogging in rapeseed[J]. *Agriculture*, 2020, 10(6): 207.
- [13] ARROUSSI J, OUERFELLI M, SMAOUI A, *et al.* An-tioxidant activity of seven plant extracts collected from Tuni-sia and their allelopathic potential on *Lactuca sativa* L. and *Phalaris minor* L. [J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 148: 135-143.
- [14] 周颖, 刘杰, 闫晓慧, 等. 模拟昆虫取食对牛膝菊防御特征的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 808-812.
ZHOU Y, LIU J, YAN X H, *et al.* Effects of simulated insect herbivory on defense traits of *Galinsoga parviflora* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 808-812.
- [15] MAJETIC C J, CASTILLA A R, LEVIN D A. Losing a scent of one's self: Is there a reduction in floral scent emission in self-pollinating *Phlox cuspidata* versus outcrossing *Phlox drummondii*? [J]. *International Journal of Plant Sci-ences*, 2019, 180(1): 86-92.
- [16] KUPINA S, FIELDS C, ROMAN M C, *et al.* Determina-tion of total phenolic content using the folin-C assay: Single-laboratory validation, first action 2017. 13 [J]. *Journal of AOAC International*, 2018, 101(5): 1466-1472.
- [17] 岳世彦, 周荣荣, 南铁贵, 等. 粉葛与葛根中主要化学成分的含量比较[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(10): 2689-2697.
YUE S Y, ZHOU R R, NAN T G, *et al.* Comparison of major chemical components in *Puerariae Thomsonii Radix* and *Puerariae Lobatae Radix* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2022, 47(10): 2689-2697.
- [18] 张桥英, 彭少麟. 增温对入侵植物马缨丹生物量分配和异速生长的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6670-6676.
ZHANG Q Y, PENG S L. Effects of warming on the biomass al-location and allometric growth of the invasive shrub *Lantana ca-mara* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6670-6676.
- [19] 王雨晴, 吴莎, 许言, 等. 科尔沁沙地不同种源元宝枫功能性状变异及其环境驱动因子研究[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 300-309.
WANG Y Q, WU S, XU Y, *et al.* Study on the variation of functional traits and environmental driving factors of different species origins of *Acer truncatum* in the Horqin Sandy Land [J]. *Ac-ta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(2): 300-309.
- [20] 聂婷婷, 董乙强, 杨合龙, 等. 禁牧对伊型绢蒿种群数量特征及其构件生物量分配的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(3): 483-490.
NIE T T, DONG Y Q, YANG H L, *et al.* Effects of grazing exclusion on the population characteristics of *Seriphidium tran-siliense* and its component biomass allocation [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(3): 483-490.
- [21] 张世航, 龚莉, 戈玉莹, 等. 不同密度下入侵植物北美车前生物量分配与异速生长关系[J]. 草业科学, 2021, 38(10): 1938-1949.
ZHANG S H, GONG L, GE Y Y, *et al.* Biomass allocation and allometric relationships of the invasive plant species *Plantago virginica* grown at different densities [J]. *Pratac-ultural Science*, 2021, 38(10): 1938-1949.
- [22] WANG C Y, CHENG H Y, WEI M, *et al.* Plant height and leaf size: Which one is more important in affecting the suc-cessful invasion of *Solidago canadensis* and *Conyza canad-ensis* in urban ecosystems? [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 127033.
- [23] 代景忠, 闫瑞瑞, 张小英, 等. 有机肥对羊草营养生长期功能性状变化的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 194-204.

DAI J Z, YAN R R, ZHANG X Y, *et al.* Effects of organic fertilizers on changes of functional traits in vegetative growth period of *Leymus chinensis*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(2): 194-204.

[24] 吴天柔, 安明态, 王琨, 等. 贵州北盘江喀斯特地区 6 种兰科植物结构及其生态适应性[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 319-329.

WU T R, AN M T, WANG K, *et al.* The vegetative organ structure and ecological adaptability of six orchid species in Karst area in the Beipan River of Guizhou Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(2): 319-329.

[25] 仇晓玉, 徐知远, 土艳丽, 等. 入侵植物印加孔雀草在不同生境的种群构件生物量及其分配特征[J]. 广西植物, 2021, 41(3): 447-455.

QIU X Y, XU Z Y, TU Y L, *et al.* Module biomass and allocation characteristics of invasive plant *Tagetes minuta* populations in different habitats[J]. *Guihaia*, 2021, 41(3): 447-455.

[26] 眼玉响宝, 王春胜, 寸德志, 等. 施肥量对西南桦林下幼龄云南红豆杉生长、生物量和紫杉醇含量的影响[J]. 西部林业科学, 2023, 52(5): 29-36.

GENYU X B, WANG C S, CUN D Z, *et al.* Effects of fertilization on growth, biomass and taxol content for young *Taxus yunnanensis* in *Betula alnoides* forests[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2023, 52(5): 29-36.

[27] GUO Q, MAJOR I T, HOWE G A. Resolution of growth-defense conflict: Mechanistic insights from jasmonate signaling[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2018, 44: 72-81.

[28] PICHERSKY E, RAGUSO R A. Why do plants produce so many terpenoid compounds? [J]. *The New Phytologist*, 2018, 220(3): 692-702.

[29] DYER L A, PHILBIN C S, OCHSENIDER K M, *et al.* Modern approaches to study plant-insect interactions in chemical ecology[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2018, 2: 50-64.

[30] DESCOMBES P, MARCHON J, PRADERVAND J N, *et al.* Community-level plant palatability increases with elevation as insect herbivore abundance declines[J]. *Journal of Ecology*, 2017, 105(1): 142-151.

[31] THAKUR M P, KÜNNE T, UNSICKER S B, *et al.* Invasive earthworms reduce chemical defense and increase herbivory and pathogen infection in native trees[J]. *The Journal of Ecology*, 2021, 109(2): 763-775.

[32] SHAN L P, SONG C C, ZHANG X H, *et al.* Plant defence allocation patterns following an increasing water level gradient in a freshwater wetland [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105542.

[33] OGURO M, SAKAI S. Difference in defense strategy in flower heads and leaves of Asteraceae: Multiple-species approach [J]. *Oecologia*, 2014, 174(1): 227-239.

[34] CHRÉTIEN L T S, KHALIL A, GERSHENZON J, *et al.* Plant metabolism and defence strategies in the flowering stage: Time-dependent responses of leaves and flowers under attack[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2022, 45(9): 2841-2855.

[35] DE LA PASCUA D R, SMITH-WINTERSCHIEDT C, DOWELL J A, *et al.* Evolutionary trade-offs in the chemical defense of floral and fruit tissues across genus *Cornus* [J]. *American Journal of Botany*, 2020, 107(9): 1260-1273.

[36] 杨金睿, 肖关丽. 植物抗虫生理研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(6): 130-136.

YANG J R, XIAO G L. The insect-resistance physiology of plants: A review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(6): 130-136.

[37] 冯建雄, 董晓亮, 杨博慧, 等. 油菜叶片营养物质含量和防御酶活性与其对黄宽条跳甲抗性的关系[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 49-54.

FENG J X, DONG X L, YANG B H, *et al.* Relationships between the nutrient contents and activities of defense enzymes in rape leaves and its resistance to *Phyllotreta humilis* [J]. *Plant Protection*, 2019, 45(3): 49-54.

[38] 贾尊尊, 付开赞, 丁新华, 等. 烟粉虱持续取食对棉花叶片防御酶活性、营养物质和代谢产物含量的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 916-924.

JIA Z Z, FU K Y, DING X H, *et al.* The influence of *Bemisia tabaci* (Gennadius) stress on the enzyme activity, nutrient and metabolite content of cotton leaves[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(4): 916-924.

[39] BOUWMEESTER H, SCHUURINK R C, BLEEKER P M, *et al.* The role of volatiles in plant communication[J]. *The Plant Journal*, 2019, 100(5): 892-907.

[40] 陈磊, 王宇飞, 李海平, 等. 荞麦叶片生化物质含量和防御酶活性与其对西伯利亚龟象抗性的关系[J]. 应用昆虫学报, 2022, 59(4): 888-899.

CHEN L, WANG Y F, LI H P, *et al.* Relationship between the biochemical content of buckwheat leaves, defensive enzyme activity and resistance to *Rhinoncus sibiricus*[J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2022, 59(4): 888-899.

[41] 韦婉玲, 罗兴录, 潘晓璐, 等. 木薯不同品种朱砂叶螨抗性与其叶片内含物的关系[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 13-21.

WEI W L, LUO X L, PAN X L, *et al.* Relationship between resistances of different cassava varieties to *Tetranychus cinnabarinus* and their leaves content[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(5): 13-21.

[42] 王占超, 史帅营, 高双成, 等. 水溶肥对促成盆栽伊藤牡丹‘芭茨拉’开花品质的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(5): 845-853.

WANG Z C, SHI S Y, GAO S C, *et al.* Effect of water-soluble fertilizer on flowering quality of potted itoh peony ‘Bartzella’ under forcing cultivation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(5): 845-853.

[43] 王秋芬, 胡启蒙, 吝亚杰, 等. 美国白蛾危害前后树木可溶性糖含量与抗虫性的关系[J]. 广东农业科学, 2015, 42(22): 73-78.

WANG Q F, HU Q M, LIN Y J, *et al.* Relationship between soluble sugar content and insect resistance of target tree species infected by *Hyphantria cunea* (Drury) [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(22): 73-78.