

白枪杆幼苗叶片形态和生理性状对钙的响应

张梅, 董琼, 段华超, 叶澜, 李燕燕, 金友帆

(西南林业大学 西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 云南昆明 650224)

摘要: 【目的】研究不同钙浓度对白枪杆 *Fraxinus malacophylla* 幼苗的叶片形态指标、叶绿素质量分数及酶活性的影响, 了解白枪杆幼苗在不同钙浓度下的生长发育情况, 以进一步探究白枪杆对不同钙浓度的环境适应性。【方法】以 1 年生白枪杆实生苗为材料, 研究 0 (对照)、25、50、75 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理对白枪杆幼苗的叶片形态指标、叶绿素质量分数和酶活性的影响。【结果】不同钙浓度处理对白枪杆幼苗的叶片形态结构、叶绿素质量分数和酶活性有不同的影响。不同钙浓度处理间, 白枪杆幼苗的叶片形态结构除比叶长和比叶面积随钙浓度的增加而增加外, 其余相关指标均呈先上升后下降的趋势, 且叶片数、叶生物量、比叶长、比叶面积、叶绿素质量分数、过氧化氢酶活性、过氧化物酶活性与对照差异显著 ($P < 0.05$)。在钙浓度 ≥ 50 mmol·L⁻¹ 时, 对白枪杆幼苗无抑制作用, 说明白枪杆幼苗对中、低钙浓度具喜适性; 钙浓度为 75 mmol·L⁻¹ 时, 对白枪杆幼苗生长发育有抑制作用, 说明钙浓度过高会抑制白枪杆幼苗的生长。当钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时, 白枪杆幼苗叶片形态指标及叶片相关指标、叶绿素质量分数及酶活性均达到最大值, 白枪杆幼苗生长发育最好。【结论】白枪杆幼苗适宜生长的钙浓度为 50 mmol·L⁻¹, 钙浓度过高会抑制白枪杆幼苗的生长、叶片叶绿素质量分数和叶片酶活性。图 1 表 2 参 28

关键词: 白枪杆; 钙; 叶片形态; 生理特性

中图分类号: S718.43 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0845-07

Response of leaf morphological and physiological traits of *Fraxinus malacophylla* seedlings to calcium

ZHANG Mei, DONG Qiong, DUAN Huachao, YE Lan, LI Yanyan, JIN Youfan

(Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountainous China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] This study, with an investigation of the effects of different calcium concentrations on leaf morphological indexes, chlorophyll content and enzyme activity of *Fraxinus malacophylla* seedlings, is aimed to better understand the growth and development of *F. malacophylla* seedlings under different calcium concentrations so as to further explore the environmental adaptability of *F. malacophylla* seedlings when treated with different calcium concentrations. [Method] With 1-year-old *F. malacophylla* seedlings selected as the materials, a research was conducted of the effects of 0 (ck), 25, 50, 75 mmol·L⁻¹ calcium treatments on their leaf morphological indexes, chlorophyll content and enzyme activity. [Result] Different calcium concentrations had different effects on leaf morphological indexes, chlorophyll content and enzyme activity of *F. malacophylla* seedlings. When treated with different calcium concentrations, with the increase of calcium concentration, all indexes of leaf morphology and structure of *F. malacophylla* seedlings increased first and then

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2022-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31260191); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2021J0166, 2022Y581)

作者简介: 张梅 (ORCID: 0000-0003-2069-0902), 从事植被恢复与利用研究。E-mail: 1123941129@qq.com。通信作者: 董琼 (ORCID: 0000-0002-0390-9469), 副教授, 博士, 从事植被恢复和经济林栽培研究。E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn

decreased, except for specific leaf length and specific leaf area which increased, whereas leaf number, leaf biomass, specific leaf length, specific leaf area, chlorophyll content, catalase activity and peroxidase activity were significantly different from those in control ($P < 0.05$). When the calcium concentration was more than $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the treatment had no inhibitory effect on *F. malacophylla* seedlings, indicating that *F. malacophylla* seedlings responded favorably to medium-low calcium concentration. When the concentration of calcium was $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, it inhibited the growth and development of *F. malacophylla* seedlings, implying that too high a calcium concentration can inhibit the growth of *F. malacophylla* seedlings. When the calcium concentration was $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the leaf morphological indexes, leaf related indexes, chlorophyll content and enzyme activity of *F. malacophylla* seedlings reached the maximum, and the growth and development of *F. malacophylla* seedlings were the best. [Conclusion] The optimal calcium concentration for the growth of *F. malacophylla* seedlings is $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ since too high a calcium concentration inhibits the growth, leaf chlorophyll mass fraction and leaf enzyme activity of *F. malacophylla* seedlings. [Ch, 1 fig. 2 tab. 28 ref.]

Key words: *Fraxinus malacophylla*; calcium; leaf shape; physiological characteristics

钙作为植物生长发育的重要调节因子及必需的矿质营养元素之一, 不仅对维持细胞壁、细胞膜和膜结合蛋白具有一定的稳定性, 而且还可作为细胞内生理生化反应的第二信使耦合外部信号^[1]。钙能提高植物组织细胞的多种抗性, 如植物抗寒^[2]、抗旱^[3]、抗病^[4]、抗重金属毒害^[5]及耐盐胁迫^[6]等逆境。钙还具有改善植物光合作用, 提高植物叶片中叶绿素含量的作用^[7]。钙对增强植物叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)及其他相关保护酶的活性起着重要作用^[8]。植物种类不同, 对钙的适宜浓度不同, 钙浓度过高或过低都会影响植物的生长发育, 当钙浓度适宜时才能促进植物生长发育。白枪杆 *Fraxinus malacophylla* 是木犀科 Oleaceae 梣属 *Fraxinus* 双子叶落叶乔木, 树高约 10 m, 主要分布于云南和广西, 是石漠化治理中优良的阔叶伴生树种^[9]。其树皮灰白色, 芽裸露, 翅果匙形, 根系发达, 萌蘖力强。白枪杆不仅可以制作家具与农具, 而且还具有极高的药用价值^[10-12], 有较好的发展前景^[13]。白枪杆主要分布在中国石漠化治理重点区域, 具有很强的适应性。该区域的生态治理也是国家高度重视的问题之一, 土壤中钙含量是非岩溶地区的 2~3 倍。目前, 有关白枪杆的相关研究集中在激素和肥料^[13-14]、造林技术^[15]和土壤水分^[16-17]等方面, 但关于白枪杆幼苗野外生长对环境中不同钙浓度的适应机制尚不清楚。本研究以 1 年生白枪杆幼苗为材料, 研究了不同钙浓度对白枪杆幼苗叶片形态及生理特性的影响, 以期对白枪杆培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及材料

研究材料为 1 年生白枪杆实生苗, 2020 年 1 月播种, 2020 年 6 月由云南建水移至西南林业大学树木园。炼苗 15 d 后植入营养钵中, 营养钵上口口径 160 mm, 下口径 110 mm, 高 120 mm, 基质配比为 $V(\text{红壤}):V(\text{河沙}):V(\text{珍珠岩})=5:3:2$, 每盆种植 1 株幼苗。7 月 5 日, 选取长势均匀一致的苗木开始试验。于 2020 年 7 月 5 日至 11 月 13 日在西南林业大学格林温室 ($25^{\circ}03'N$, $102^{\circ}45'E$) 进行。温室海拔为 1 904 m, 温度为 $16\sim 30^{\circ}C$, 空气相对湿度为 23%~67%, 大气二氧化碳质量浓度为 $400\sim 412 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 光照充足。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组试验, 4 个施钙(氯化钙)处理分别为 0(对照)、25、50 和 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 每个处理 10 株苗, 重复 3 次, 共计 120 株苗。

在不同处理组每盆幼苗的根系周围浇灌 50 mL 不同钙浓度溶液, 对照组则施加 50 mL 去离子水, 每隔 15 d 施钙 1 次, 连续施钙 8 次。试验期间, 正常管理苗木。

1.3 数据采集与测定方法

处理 120 d 后, 采用 YMJ-C 智能叶面积测量仪测定白枪杆幼苗的叶长、叶宽、叶长宽比、叶面积和

叶周长。将白枪杆幼苗叶片剪碎混合进行相关生理指标测定，其中用乙醇浸提法测定叶绿素质量分数^[18]，用愈创木酚比色法测定 POD 活性^[18]，用氮蓝四唑光法测定 SOD 活性^[19]，用紫外吸收法测定 CAT 活性^[19]。

1.4 数据分析

利用 Excel 和 SPSS 进行数据整理与统计分析，利用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 比较不同钙浓度处理下白枪杆幼苗叶片形态指标、叶片相关指标、叶绿素质量分数和酶活性的差异，运用 LSD 检验法进行多重比较；采用 Graphpad Prism 8.0 制图。

2 结果与分析

2.1 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗叶片形态指标的影响

由表 1 可知：白枪杆幼苗的叶片形态指标随着钙浓度升高均呈先上升后下降的趋势。白枪杆幼苗的叶片数在不同钙浓度处理下与对照差异显著 ($P < 0.05$)，在钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，叶片数达到最大值，且叶片数是对照的 1.33 倍。白枪杆幼苗的叶长、叶宽、叶长宽比、叶周长及叶面积在不同钙浓度处理下与对照均无显著差异 ($P > 0.05$)，在钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，叶长、叶宽、叶长宽比、叶周长及叶面积均达到最大值，且叶长、叶宽、叶长宽比、叶周长和叶面积分别是对照的 1.22、1.01、1.08、1.21 和 1.17 倍。

表 1 不同钙浓度处理下白枪杆幼苗叶片形态指标的变化

Table 1 Change of leaf shape determination result of *F. malacophylla* seedling under different calcium concentrations

钙浓度/(mmol·L ⁻¹)	叶片数/片	叶长/cm	叶宽/cm	叶长宽比	叶周长/cm
0	16.83±2.48 b	6.89±1.34 a	2.98±0.40 a	2.22±0.19 a	29.27±4.84 a
25	21.50±2.43 a	7.22±0.98 a	3.18±0.34 a	2.45±0.27 a	29.84±4.84 a
50	22.50±4.51 a	7.43±1.14 a	3.22±0.28 a	2.41±0.14 a	36.18±27.01 a
75	12.33±2.88 c	7.23±1.14 a	3.17±0.34 a	2.30±0.27 a	31.45±3.97 a
均值	18.29±5.10	7.19±1.10	3.13±0.33	2.34±0.23	31.69±5.98
钙浓度/(mmol·L ⁻¹)	叶面积/cm ²	叶面积指数	叶生物量/g	比叶长/(cm·g ⁻¹)	比叶面积/(cm ² ·g ⁻¹)
0	184.36±68.61 a	0.92±0.34 a	1.09±0.34 a	4.90±1.14 b	123.07±47.71 b
25	192.52±66.84 a	0.96±0.33 a	1.17±0.50 a	7.41±4.31 b	216.69±162.82 b
50	216.71±99.31 a	1.08±0.49 a	1.53±0.33 a	7.49±3.71 b	235.38±203.47 b
75	164.78±35.31 a	0.82±0.18 a	0.82±0.26 b	23.82±15.39 a	554.86±361.36 a
均值	189.59±69.01	0.94±0.34	1.06±0.53	10.90±10.86	282.50±267.09

说明：数据为平均值±标准差，同列不同字母表示同一指标在不同钙浓度间差异显著 ($P < 0.05$)

白枪杆幼苗叶片生长发育过程中，不同钙浓度对白枪杆幼苗叶片的叶面积指数、叶生物量、比叶长、比叶面积有不同的影响。白枪杆幼苗在不同钙浓度处理间幼苗叶面积指数差异不显著 ($P > 0.05$)，随着钙浓度的升高呈先上升后下降的趋势，当钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，叶面积指数达到最大值，且叶面积指数是对照的 1.17 倍；当钙浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白枪杆幼苗叶生物量与其他 3 个处理有显著差异 ($P < 0.05$)，随着钙浓度的升高呈先上升后下降的趋势。当钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，叶生物量达到最大值；当钙浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白枪杆幼苗比叶长及比叶面积与其他 3 个处理差异显著 ($P < 0.05$)，随着钙浓度的升高而升高，均在钙浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值。

2.2 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗叶绿素质量分数的影响

由表 2 可知：白枪杆幼苗不同钙浓度处理间叶片叶绿素质量分数差异显著 ($P < 0.05$)，随着钙浓度的增加，白枪杆幼苗叶片叶绿素质量分数均呈先上升后下降的趋势，均在钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时达到最大值，其中，叶绿素 a 为 $(2.14 \pm 0.32) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，叶绿素 b 为 $(0.62 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，叶绿素 (a+b) 为 $(2.77 \pm 0.42) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，叶绿素 a/b 为 3.44 ± 0.10 ，与对照相比，增幅分别为 32.92%、21.57%、30.66% 和 8.52%。当钙浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，对白枪杆幼苗叶片的叶绿素质量分数有促进作用。

表2 不同钙浓度处理下白枪杆幼苗叶片叶绿素质量分数的变化

Table 2 Change of chlorophyll content determination of *F. malacophylla* seedling under different calcium concentrations

钙浓度/(mmol·L ⁻¹)	叶绿素a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素(a+b)/(mg·g ⁻¹)	叶绿素a/b
0	1.61±0.11 c	0.51±0.05 b	2.12±0.12 c	3.17±0.35 b
25	1.91±0.34 b	0.59±0.09 a	2.53±0.43 ab	3.25±0.11 b
50	2.14±0.32 a	0.62±0.10 a	2.77±0.42 a	3.44±0.10 a
75	1.80±0.28 b	0.56±0.08 b	2.36±0.36 b	3.22±0.13 b

说明：数据为平均值±标准差，同列不同字母表示同一指标在不同钙浓度间差异显著($P<0.05$)

2.3 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗酶活性的影响

2.3.1 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗 POD 活性的影响 由图 1A 可知：当钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时，白枪杆幼苗 POD 活性与其他处理差异显著 ($P<0.05$)，随着钙浓度的增加，白枪杆幼苗叶片中 POD 活性呈先增加后下降的趋势，施钙处理的 POD 活性均高于对照。与对照相比，20、50 和 75 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理的白枪杆幼苗叶片中的 POD 活性分别增加了 12.42%、41.56% 和 19.63%。当钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时，白枪杆幼苗叶片中 POD 活性最强。

2.3.2 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗 SOD 活性的影响 由图 1B 可知：白枪杆幼苗不同钙浓度处理间 SOD 的活性差异不显著 ($P>0.05$)。随着钙浓度的增加，白枪杆幼苗叶片中 SOD 活性呈先增加后下降的趋势。在钙浓度为 75 mmol·L⁻¹ 时，SOD 活性最低。与 50 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理相比，对照、25 和 75 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理下白枪杆幼苗叶片 SOD 活性分别降低了 4.56%、1.69% 和 13.56%。当钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时，白枪杆幼苗叶片中的 SOD 活性最强。

2.3.3 不同钙浓度处理对白枪杆幼苗 CAT 活性的影响 由图 1C 可知：随着钙浓度的增加，白枪杆幼苗 CAT 活性呈先增加后下降的趋势，50 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理与对照差异显著 ($P<0.05$)。在 4 个处理中，50 mmol·L⁻¹ 钙浓度处理的 CAT 活性最高，对照的 CAT 活性最低。钙浓度过高会抑制白枪杆幼苗 CAT 活性的增加，但施钙处理 CAT 活性均高于对照。因此，施钙处理能有效提高白枪杆幼苗叶片的 CAT 活性，在钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时，白枪杆幼苗 CAT 活性最强。

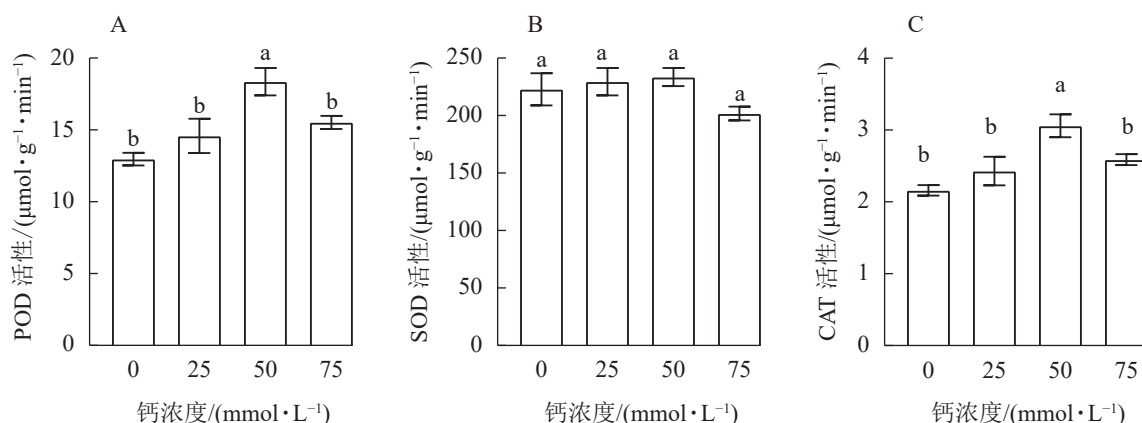


图1 不同钙浓度处理下白枪杆幼苗酶活性的变化

Figure 1 Change of enzymatic activity of *F. malacophylla* seedling under different calcium concentrations

3 讨论

在植物生长发育过程中需要相当数量的钙才能维持正常生长，土壤环境中钙较多的石漠化区域，植物亦经常受到钙胁迫抑制。部分植物通过减少叶片数、叶长、叶宽和叶生物量等来适应胁迫下的生长^[20]。吴朝波等^[8]研究表明：钙浓度过高会抑制槟榔 *Areca catechu* 幼苗生长。李香君等^[21]研究发现：钙浓度过低或过高会抑制沙地樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 幼苗的生长，适宜的钙浓度可促进沙地樟子松幼苗生长发育。本研究表明：随着钙浓度的升高，白枪杆幼苗的叶片数、叶长、叶宽和叶面积等叶片形态指标均呈先增加后减少的趋势，当钙浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时，白枪杆幼苗的叶片数、叶长、叶宽、

叶面积、叶周长和叶生物量等达到最大值。当钙浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，对白枪杆幼苗的叶片形态及相关指标有抑制作用。综上所述，适宜的钙浓度可以促进白枪杆幼苗的生长，而钙浓度过高会抑制白枪杆幼苗的生长。

植物的叶面积直接影响着植物对光和碳的获取能力，比叶面积则反映不同植物获取资源的能力及对生存环境的适应性。江志标等^[20]研究表明：比叶面积小对干旱贫瘠的地方适应能力较强，比叶面积大则获取资源和保持体内营养的能力越强。本研究表明：随着钙浓度的增加，叶面积呈先增加后减少的趋势。中、低钙浓度对白枪杆幼苗的生长有促进作用，当钙浓度过高时，白枪杆幼苗会通过减少叶片面积来适宜高钙环境。白枪杆幼苗叶片的比叶面积随着钙浓度的升高而增大，说明白枪杆幼苗在不同钙浓度处理下获取资源和保持体内营养的能力增强。

植物中的叶绿素则是光合作用的物质基础及重要色素^[22]，因此，叶绿素质量分数的高低在一定程度上反映了植物光合能力的强弱。孙悦^[23]研究表明：钙浓度的增加会使油松 *Pinus tabulaeformis* 幼苗叶片中叶绿素质量分数呈先增加后减少的趋势。李香君等^[21]表明：钙浓度的增加会降低槟榔叶片中的叶绿素质量分数。本研究表明：随着钙浓度的增加，白枪杆幼苗叶片中叶绿素质量分数均呈先升高后降低的趋势。所以，适宜的钙浓度可以提高植物叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 (a+b)，过高的钙浓度可以抑制白枪杆幼苗中的叶绿素质量分数的增加。

钙在植物细胞中可以活化多种酶，还可以维持植物细胞生理平衡。SOD 活性是鉴定植物抗逆性的重要生理生化指标，主要功能是将超氧阴离子自由基 (O_2^-) 转化为双氧水 (H_2O_2) 和氧气 (O_2)^[24]。POD 和 CAT 是防止细胞内氧化的保护酶，主要功能是去除植物体内的过氧化物和 H_2O_2 ，从而减少对细胞膜的损伤^[25-27]。因此，SOD、POD 和 CAT 的平衡有助于清除植物中的活性氧物种并维持细胞功能^[28]。吴朝波等^[8]、孙悦^[23]研究发现：钙浓度过高会抑制植物体内酶活性。在本研究中，POD、SOD 和 CAT 活性随钙浓度的增加先升高后降低；当钙浓度 $\leq 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白枪杆幼苗叶片的 POD、SOD 和 CAT 活性升高。当钙浓度 $> 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，白枪杆幼苗叶片的 POD、SOD 和 CAT 活性降低，说明钙浓度过高抑制了的 POD、SOD 和 CAT 活性的提高。白枪杆幼苗在 25 和 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 钙浓度处理下，酶活性均随钙浓度的增加而增加，表现出协同增效作用，可以维持细胞活性氧平衡。当钙浓度达 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，3 种酶活性不同程度降低，表明超出了白枪杆的耐盐能力，植株体内活性氧过多对保护酶造成损害，导致酶活性降低，造成活性氧清除能力降低，抑制白枪杆幼苗生长。

4 结论

钙浓度会影响白枪杆幼苗叶片的形态指标、叶绿素质量分数和酶活性，白枪杆的叶片形态指标除比叶长和比叶面积随钙浓度的增加而增加外，其余相关指标均呈先上升后下降的趋势，白枪杆幼苗的叶绿素质量分数、酶活性随着钙浓度的升高均呈先增加后降低的趋势。当钙浓度在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，对白枪杆幼苗的叶片生长发育有一定促进作用，提高了白枪杆幼苗叶片中叶绿素质量分数，增加了白枪杆幼苗叶片中的 POD、SOD、CAT 活性。中、低钙浓度对白枪杆幼苗生长有不同程度的促进作用，说明白枪杆对中、低钙浓度处理具有一定的喜适性。

5 参考文献

- [1] LIANG Wenjuan, WANG Meiling, AI Xizhen. The role of calcium in regulating photosynthesis and related physiological indexes of cucumber seedlings under low light intensity and suboptimal temperature stress [J]. *Sci Hort*, 2009, **123**(1): 34 – 38.
- [2] YAN Chunlan, WANG Jianbo, LI Rongqian. Effect of heat stress on calcium ultrastructural distribution in pepper anther [J]. *Environ Exp Bot*, 2002, **48**(2): 161 – 168.
- [3] LI Ze, TAN Xiaofeng, LU Ku, *et al.* The effect of CaCl_2 on calcium content, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of tung tee seedlings under drought conditions [J]. *Photosynthetica*, 2017, **55**: 553 – 560.
- [4] 李波, 刘畅, 李红, 等. 外源氯化钙对‘龙牧 807’苜蓿幼苗干旱缓解效应分析[J]. 草地学报, 2020, **28**(4): 990 – 997.
LI Bo, LIU Chang, LI Hong, *et al.* Analysis of the effect of exogenous calcium chloride on drought alleviation of ‘Longmu

- 807' alfalfa seedlings [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2020, **28**(4): 990 – 997.
- [5] GABARA B, KRAJEWSKA M, STECKA E. Calcium effect on number, dimension and activity of nucleoli in cortex cells of pea (*Pisum sativum* L.) roots after treatment with heavy metals [J]. *Plant Sci*, 1995, **111**(2): 153 – 161.
- [6] SÖNMEZ F, GÜLSER F. Effects of humic acid and Ca(NO₃)₂ on nutrient contents in pepper (*Capsicum annuum*) seedling under salt stress [J]. *Acta Agric Scand Sect B Soil Plant Sci*, 2016, **66**(7): 613 – 618.
- [7] 周君, 肖伟, 陈修德, 等. 外源钙对‘黄金梨’叶片光合特性及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2018, **54**(3): 449 – 455.
- ZHOU Jun, XIAO Wei, CHEN Xiude, *et al.* Effect of ecogenous calcium on leaf photosynthetic charactertics and fruit quality of ‘Whangkeumbae’ pear [J]. *Plant Physiol J*, 2018, **54**(3): 449 – 455.
- [8] 吴朝波, 任承才, 朱明军, 等. 外源钙对槟榔生长、生理及养分吸收的影响[J]. 广东农业科学, 2021, **48**(5): 83 – 91.
- WU Chaobo, REN Chencai, ZHU Mingjun, *et al.* Effect of exogenous Ca on the growth, physiology and nutrient absorption of Betel Nut [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2021, **48**(5): 83 – 91.
- [9] 中国植物志编辑委员会. 中国植物志 (第 61 卷: 木犀科)[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- Editorial Committee of Flora China. *Flora of China (Vol. 61: Oleaceae)*[M]. Beijing: Sciences Press, 1999.
- [10] HE Zhengda, UEDA S, INOUE K, *et al.* Secoiridoid glucosides from *Fraxinus malacophylla* [J]. *Phytochemistry*, 1993, **35**(1): 177 – 181.
- [11] 郭良君, 谭兴起, 郑巍. 白枪杆化学成分的研究 (II)[J]. 中南药学, 2012, **10**(9): 661 – 663.
- GUO Liangjun, TANG Xingqi, ZHENG Wei. Chemical constituents of *Fraxinus malacophylla* Hemsl (II) [J]. *Cent South Pharm*, 2012, **10**(9): 661 – 663.
- [12] 谭兴起, 郭良君, 郑巍, 等. 白枪杆的化学成分研究 (I)[J]. 中国药房, 2013, **24**(43): 4081 – 4083.
- TAN Xingqi, GUO Liangjun, ZHENG Wei, *et al.* Study on chemical components of *Fraxinus malacophylla* (I) [J]. *China Pharm*, 2013, **24**(43): 4081 – 4083.
- [13] 夏泽源, 何祯, 徐云鹏, 等. 氮磷钾配比施肥和激素处理对白枪杆生长的影响[J]. 林业调查规划, 2016, **41**(3): 82 – 86.
- XIA Zeyuan, HE Zhen, XU Yunpeng, *et al.* Effect of N/P/K fertilization and hormone treatment on the growth of *Fraxinus malacophylla* Hemsl [J]. *For Invent Plan*, 2016, **41**(3): 82 – 86.
- [14] 段华超, 郑鑫华, 李燕燕, 等. 外源植物激素对白枪杆幼苗生物量分配的影响[J]. 林业资源管理, 2021(3): 76 – 83.
- DUAN Huachao, ZHENG Xinhua, LI Yanyan, *et al.* Effect of exogenous plant hormones on biomass allocation of *Fraxinus malacophylla* seedlings [J]. *For Resour Manage*, 2021(3): 76 – 83.
- [15] 李坤, 董丽, 陈强, 等. 云南石漠化地区植被生态修复群落特征研究[J]. 中国园林, 2017, **33**(11): 41 – 46.
- LI Kun, DONG Li, CHEN Qiang, *et al.* Communities characteristics of vegetation ecological restoration in rocky desertification area in Yunnan [J]. *Chin Landscape Archit*, 2017, **33**(11): 41 – 46.
- [16] 高洁, 李兴彪, 李乡旺, 等. 滇东南半干旱石漠化治理 8 个主要树种抗旱性研究[J]. 西南林业大学学报, 2015, **35**(2): 1 – 10.
- GAO Jie, LI Xingbiao, LI Xiangwang, *et al.* A study on the drought resistance of governance trees in semi-arid southern subtropical rocky desertification mountain of southeast Yunnan [J]. *J Southwest For Univ*, 2015, **35**(2): 1 – 10.
- [17] 黄俊威, 孙永磊, 周金星, 等. 白枪杆生长特性及光合特性对不同土壤水分的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(6): 1254 – 1260.
- HUANG Junwei, SUN Yonglei, ZHOU Jinxing, *et al.* Growth and photosynthetic characteristic responses of *Fraxinus malacophylla* to different soil moisture conditions [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1254 – 1260.
- [18] 沈徐悦, 张浪, 陈蓉蓉, 等. 盐胁迫对望春玉兰幼苗形态和相关生理指标的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(2): 289 – 295.
- SHEN Xuyue, ZHANG Lang, CHENG Rongrong, *et al.* Effect of NaCl stress on the morphology and related physiology indexes of *Magnolia biondii* seedlings [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(2): 289 – 295.
- [19] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- WANG Xuekui, HUANG Jianliang. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [20] 江志标, 陈双林, 郭子武, 等. 覆土控鞭高品质竹笋栽培对高节竹叶片形态和养分化学计量特征的影响[J]. 浙江农林

- 大学学报, 2017, **34**(6): 1155 – 1160.
- JIANG Zhibiao, CHEN Shuanglin, GUO Ziwu, *et al.* Leaf morphology and C, N, and P stoichiometry of *Phyllostachys promiens* under soil cover with rhizome controlling cultivation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2017, **34**(6): 1155 – 1160.
- [21] 李香君, 张广岐, 李慧, 等. 外源钙对沙地樟子松幼苗生长及生理特性的影响[J]. 土壤通报, 2021, **52**(5): 1095 – 1103.
LI Xiangjun, ZHANG Guangqi, LI Hui, *et al.* Effects of exogenous calcium on growth and physiological characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings in sandy land [J]. *Soil Bull*, 2021, **52**(5): 1095 – 1103.
- [22] SNEHA S, RISHI A, CHANDRA S. Effect of short term salt stress on chlorophyll content, protein and activities of catalase and ascorbate peroxidase enzymes in pearl millet [J]. *Am J Plant Physiol*, 2014, **9**(1): 32 – 37.
- [23] 孙悦. 钙对油松幼苗生长及生理特征影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
SUN Yue. *Effect of Calcium on Growth and Physiological Characteristics of Pinus tabulaeformis Seedlings*[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [24] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. 植物生理学报, 2020, **56**(12): 2571 – 2584.
WEI Jin, XU Chang, LI Kexin, *et al.* Progress on superoxide dismutase and plant stress resistance [J]. *Plant Physiol J*, 2020, **56**(12): 2571 – 2584.
- [25] RAHMAN A, MOSTOFA M G, NAHAR K, *et al.* Exogenous calcium alleviates cadmium-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by regulating the antioxidant defense and glyoxalase systems [J]. *Braz J Bot*, 2016, **39**(2): 393 – 407.
- [26] 俞墩, 郑剑, 余学军. 外源草酸对绿竹等抗氧化酶和木质化的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(3): 556 – 562.
YU Tun, ZHENG Jian, YU Xuejun. Effects of exogenous oxalic acid on antioxidant enzymes and lignification of *Bambusa oldhami* shoots [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(3): 556 – 562.
- [27] 贾丽, 刘盟盟, 张洪芹, 等. 冷蒿抗氧化防御系统对机械损伤的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(3): 462 – 470.
JIA Li, LIU Mengmeng, ZHANG Hongqin, *et al.* Antioxidant defense system responses of *Artemisia frigida* to mechanical damage [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(3): 462 – 470.
- [28] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, *et al.* Reactive oxygen gene network of plants [J]. *Trends Plant Sci*, 2004, **9**(10): 490 – 498.