

邻苯二甲酸对橡胶树 RRIM600 种子萌发和幼苗生长的影响

王纪坤^{1,2}, 安 锋^{1,2}, 周立军^{1,2}, 彭文涛^{1,2}, 程琳琳^{1,2}, 谢贵水^{1,2}

1. 中国热带农业科学院橡胶研究所, 海南海口 571701; 2. 海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南儋州 571737

摘 要: 根系分泌物是植物自毒物质的重要来源之一, 研究表明邻苯二甲酸是一种公认的自毒物质, 也是橡胶树根系分泌物中含量较高的物质之一。为探究邻苯二甲酸对橡胶树自身是否具有自毒作用, 考察不同浓度 (0.05、0.50、1.00、2.00 mmol/L) 邻苯二甲酸溶液对橡胶树 RRIM600 种子萌发、幼苗生长的影响。结果表明: (1) 不同浓度邻苯二甲酸均推迟橡胶树种子的初始萌发时间, 对种子发芽率、发芽速率和萌发整齐度均存在抑制作用, 且浓度越高抑制作用越强, 与对照相比, 2.00 mmol/L 邻苯二甲酸处理的发芽率、发芽指数、发芽速率、发芽势分别下降了 23.60%、42.75%、37.18%、58.69%。(2) 不同浓度邻苯二甲酸均抑制橡胶树芽长、芽粗、根粗的生长, 减少了幼苗生物量的积累; 在 0.05~2.00 mmol/L 浓度范围内, 芽长、芽粗、根粗、芽重和根重分别下降了 12.91%~40.70%、20.05%~21.59%、7.89%~34.13%、16.18%~26.47%、20.00%~36.00%。(3) 随邻苯二甲酸浓度增加, 橡胶树幼苗细胞膜脂过氧化程度逐渐加重, 丙二醛 (malonaldehyde, MDA) 含量逐渐增加; 游离脯氨酸和可溶性糖含量也逐渐增加。(4) 橡胶树幼苗色素含量和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性随邻苯二甲酸浓度增加呈现先增加后减少的趋势, 而超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性随邻苯二甲酸浓度增加而逐渐减少; 0.05 mmol/L 的邻苯二甲酸促进幼苗叶绿素 b 的积累, 降低了叶绿素 a 含量, 并提高 CAT 活性, 降低了 POD 和 SOD 活性; 当浓度达到 0.50 mmol/L 时, 叶绿素 a、叶绿素总量和类胡萝卜素含量积累至最大, POD 和 SOD 活性持续下降; 在 2.00 mmol/L 时, 所有色素含量和 3 种抗氧化酶活性均降至最低。综上, 邻苯二甲酸推迟了橡胶树 RRIM600 种子初始萌发时间, 降低种子萌发率和萌发速率, 导致橡胶树幼苗生理功能紊乱, 并抑制生长发育。该研究结果可为客观评价邻苯二甲酸对橡胶树自毒作用提供基础数据支撑。

关键词: 邻苯二甲酸; 橡胶树; 种子萌发; 生长

中图分类号: S794.1 文献标识码: A

Effects of Phthalic Acid on Seed Germination and Seedling Growth of Rubber Tree RRIM600

WANG Jikun^{1,2}, AN Feng^{1,2}, ZHOU Lijun^{1,2}, PENG Wentao^{1,2}, CHENG Linlin^{1,2}, XIE Guishui^{1,2}

1. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Hainan Danzhou Tropical Agro-ecosystem National Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China

Abstract: Root exudates are one of the important sources of plant autotoxic substances. Studies have shown that phthalic acid is a well known allelopathic autotoxic substance, and it is also one of the substances with higher content in rubber tree root exudates. In order to explore whether phthalic acid has an autotoxic effect on rubber tree, the effects of different concentrations (0.05, 0.50, 1.00, 2.00 mmol/L) of phthalic acid solutions on the seed germination and seedling growth of rubber tree RRIM600 were investigated. Phthalic acid delayed the initial germination time of rubber tree seeds, and reduced the germination rate, germination speed and uniformity of seeds germination. Compared with the control, the germination rate, germination index, germination speed, and uniformity of seeds germination of 2.00 mmol/L phthalic acid treatment decreased by 23.60%, 42.75%, 37.18%, 58.69%. All concentrations of phthalic acid

收稿日期 2022-06-21; 修回日期 2022-08-26

基金项目 现代农业产业技术体系建设专项资金项目 (No. CARS-33-ZP1); 海南省科技项目 (No. ZDYF2020072)。

作者简介 王纪坤 (1979—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 热带作物栽培与生理。E-mail: kunjiwang@163.com。

treatment inhibited the growth of shoot length, diameter of shoot base, root diameter, and reduced the seedling biomass accumulation. In the concentration range of 0.05–2.00 mmol/L, the shoot length, diameter of shoot base, root diameter, shoot weight and root weight reduced by 12.91% to 40.70%, 20.05% to 21.59%, 7.89% to 34.13%, 16.18% to 26.47%, 20.00% to 36.00%. The content of soluble sugar, proline and malondialdehyde (MDA) increased gradually with the increase of phthalic acid concentration, along with the degree of cell membrane lipid peroxidation gradually increased. The pigment content and catalase (CAT) activity of rubber tree seedlings increased first and then decreased with the increase of phthalic acid treatment concentration, while peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities decreased with the increase of phthalic acid treatment concentration. 0.05 mmol/L phthalic acid promoted the accumulation of chlorophyll b in seedlings, decreased the content of chlorophyll a, increased the activity of CAT, reduced POD and SOD activity. When the concentration reached 0.50 mmol, the content of chlorophyll a, total amount of chlorophyll, and carotenoid accumulated to the maximum, and decreased the activities of POD and SOD, at 2.00 mmol/L, the activities of POD and SOD continued to decrease. In conclusion, phthalic acid delayed the initial germination time of rubber tree RRIM600 seeds, decreased the seed germination rate and germination rate, led to the disorder of the physiological function of rubber tree seedlings, and inhibited the growth and development. The results could provide basic data support for the evaluation of the autotoxicity of phthalic acid on rubber trees.

Keywords: phthalic acid; rubber tree; seed germination; growth

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.08.011

橡胶树 (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) 是我国热区最大的经济树种, 其割胶产生的天然橡胶在通用性能和抗撕裂性能方面显著优于合成橡胶, 是重要的工业原料和战略资源^[1]。我国从 20 世纪 50 年代开始种植橡胶树, 目前种植面积约为 113.3 万 hm^2 、年产天然橡胶约 80 万 t ^[2], 但由于橡胶树多年连作与多代种植, 胶园已出现土壤酸化严重、地力衰减、根病面积扩大^[3-5]、单位面积产量下降等连作问题, 影响了天然橡胶产业的可持续发展, 威胁到我国天然橡胶生产的战略安全。

化感作用是指植物通过适当的途径向环境释放特定的化学物质, 从而直接或间接影响邻近或后续同种或是不同种植物萌发和生长的效应^[6], 如果化感物质的供体和受体是同一种植物, 且对该植物的生长发育产生不利影响, 则这种现象被称为自毒作用, 是化感作用的一种特殊形式^[7-8]。自毒作用是植物连作障碍形成的主要原因之一。有研究指出, 酚酸类化合物是目前公认的自毒物质, 会对植物细胞膜的通透性、酶的含量与活性、矿物质元素的吸收与利用、蛋白质和核酸的代谢、光合作用等生理活动产生负面影响^[8]。

邻苯二甲酸是酚酸类物质中最具代表性的化感物质, 也是橡胶树根系分泌物的含量较高的物质之一^[9-10]。已有研究显示邻苯二甲酸能够抑制莴苣和小豆根生长^[11-12], 而对萝卜、辣椒种子萌发及幼苗生长的影响表现为“低促高抑”^[13-14]; 还能导致燕麦、玉米以及百合幼苗膜脂过氧化, 抑制幼苗生物量增加^[15-17]。目前其对橡胶树种子

萌发和幼苗生长等方面影响的研究未见报道。因此, 为明确邻苯二甲酸对橡胶树是否存在自毒作用, 本研究以橡胶树 RRIM600 种子和幼苗为试验材料, 采用外源邻苯二甲酸模拟研究其对橡胶树种子萌发、幼苗生长和生理指标的影响, 探索橡胶树自毒作用效应, 以期为客观评价邻苯二甲酸对橡胶树自毒作用危害提供基础数据支撑, 进而为橡胶树连作障碍机制提供化感方面的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试橡胶树品种为 RRIM600, 种子采自中国热带农业科学院橡胶研究所种质圃; 邻苯二甲酸为分析纯, 由国药集团化学试剂有限公司提供。

1.2 方法

1.2.1 种子发芽与幼苗生长试验 试验于 2021 年 8—9 月在中国热带农业科学院橡胶研究所实验室内进行, 选取健康种子 30 粒, 使用高锰酸钾进行消毒, 然后放在铺有 3 层滤纸的培养皿中, 加入不同浓度的邻苯二甲酸溶液 (分别为 0.05、0.50、1.00、2.00 mmol/L), 以加蒸馏水为对照, 每个处理 3 次重复, 然后将培养皿放置在温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 70% 的人工气候箱中浸种培养, 光周期为 13 h 光照/11 h 暗室, 每天补充相应浸提液, 保持滤纸湿润, 连续浸种 20 d, 每天 9:00 记录种子萌发数量。

经上述处理后得到的橡胶苗, 再继续培养 10 d 后, 测定芽长、根长、苗鲜重、根鲜重等指

标，每个处理 3 次重复，每个重复选 5 株，并取样品叶片在室内测定其他生理指标。

1.2.2 生理指标测定 叶绿素 (Chl) 和类胡萝卜素含量参考高俊凤^[18]的方法进行测定。丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定；脯氨酸 (proline, Pro) 含量使用酸性茚三酮比色法测定；超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性采用氮蓝四唑法测定；过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性采用愈创木酚法测定；过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性采用紫外吸收法测定^[19]。

1.3 数据处理

种子发芽率、发芽势、发芽指数采用以下公式计算：

$$\text{种子发芽率} = \frac{\text{发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = \frac{\text{发芽高峰期种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数} (G_1) = \sum(G_t/D_t)$$

式中， G_t 为发芽第 t 天时的发芽数， D_t 为相应的发芽天数^[20]。

采用 Excel 2016 软件进行数据整理，通过 SPSS 25 软件进行单因素方差分析和 Duncan's 多重样本差异显著性分析 ($P < 0.05$)，利用 Origin 2016 软件作图。

2 结果与分析

2.1 邻苯二甲酸对橡胶树种子萌发的影响

从图 1 可以看出，邻苯二甲酸均延缓了种子初始萌发时间，降低了种子发芽率。不同处理的橡胶树种子初始发芽时间不同，对照种子在浸种后 7 d 开始发芽，而邻苯二甲酸处理的种子在浸种后 9 d 才开始发芽；随着浸种时间的增加，各处理的橡胶树种子的发芽率逐渐增加，在浸种的

20 d 后发芽率达到最高；整个发芽试验期间，对照种子发芽率始终高于所有邻苯二甲酸浸种处理。说明所有浓度邻苯二甲酸对橡胶树种子萌发均存在抑制作用。

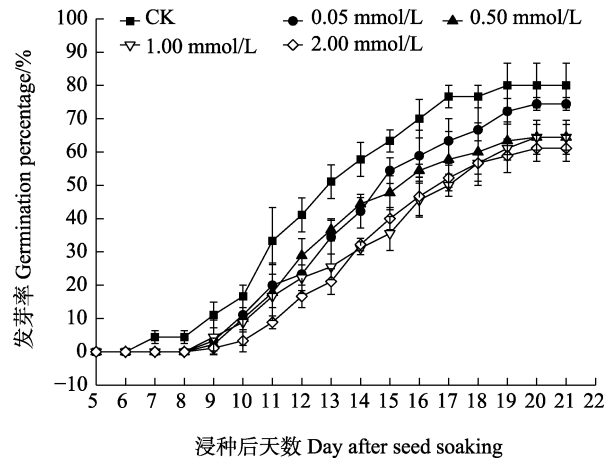


图 1 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树种子初始萌发时间和发芽率

Fig. 1 Initial germination time and germination rate of rubber tree seeds treated with different concentrations of phthalic acid

由表 1 可以看出，橡胶树种子发芽率、发芽势、发芽指数和发芽速率均随邻苯二甲酸浓度升高呈现下降趋势，且各指标均显著低于对照，表明 0.05~2.00 mmol/L 邻苯二甲酸显著抑制橡胶树种子萌发；不同浓度邻苯二甲酸处理的种子发芽率比对照分别下降了 6.94%、19.40%、19.40%、23.60%，发芽势比对照分别下降了 32.61%、28.26%、50.00%、58.69%，发芽指数比对照分别下降了 23.46%、28.13%、37.67%、42.75%，发芽速率比对照分别下降了 17.20%、24.33%、31.39%、37.18%。由此可见，不同浓度邻苯二甲酸均对橡胶树种子发芽率、萌发速率和萌发的整齐度产生抑制作用，且浓度越高抑制作用越强。

表 1 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树种子萌发状况

Tab. 1 Germination status of rubber tree seeds treated with different concentrations of phthalic acid

处理浓度 Treatment concentration/(mmol·L ⁻¹)	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index	发芽速率 Germination speed
CK	80.00±6.67 ^a	51.11±5.09 ^a	14.46±1.30 ^a	1.91±0.18 ^a
0.05	74.44±1.92 ^b	34.44±5.09 ^b	11.07±1.10 ^b	1.58±0.13 ^b
0.50	64.44±5.09 ^c	36.67±3.33 ^b	10.39±0.98 ^b	1.45±0.10 ^c
1.00	64.44±3.85 ^c	25.56±3.85 ^c	9.01±0.73 ^c	1.31±0.09 ^d
2.00	61.11±3.85 ^c	21.11±3.85 ^d	8.28±0.83 ^c	1.20±0.18 ^c

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.2 邻苯二甲酸对橡胶树生长的影响

由表 2 可以看出, 0.05~2.00 mmol/L 的邻苯二甲酸处理均不同程度抑制芽长、芽基径、根粗的生长, 并减少了幼苗生物量的积累, 所有生长指标在邻苯二甲酸达到 2.00 mmol/L 降至最低。与对照相比芽长下降 12.91%~40.70%、芽基径下降 20.05%~21.59%、根粗下降 7.89%~34.13%、芽重下降 16.18%~26.47%、根重下降 20.00%~36.00%, 但不同浓度邻苯二甲酸处理间的芽基径、

芽重和根重等指标差异不显著。与对照相比, 0.05 mmol/L 的邻苯二甲酸处理促进了根的伸长, 当邻苯二甲酸浓度达到 1.00 mmol/L 时, 开始抑制根的伸长, 且浓度越高抑制作用越强。所有生长指标在 2.00 mmol/L 时达到最低。上述结果表明, 邻苯二甲酸抑制橡胶树幼苗芽的伸长和生物量积累, 降低了芽基径和根粗的生长, 而对根生长的影响表现为“低促高抑”, 且 2.00 mmol/L 邻苯二甲酸对幼苗生长抑制作用最大。

表 2 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树幼苗生长状况

Tab. 2 Growth status of rubber tree seedlings treated with different concentrations of phthalic acid

处理浓度 Treatment concentration/(mmol·L ⁻¹)	芽长 Shoot length/cm	芽基径 Diameter of shoot base/mm	根长 Root length/cm	根粗 Root width/mm	全株重 Whole plant weight/g	芽重 Shoot weight/g	根重 Root weight/g
CK	14.91±3.30 ^a	3.89±0.62 ^a	4.33±0.92 ^b	3.68±0.41 ^a	1.17±0.10 ^a	0.68±0.11 ^a	0.50±0.05 ^a
0.05	12.98±1.71 ^b	3.11±0.57 ^b	4.85±1.26 ^a	2.95±0.47 ^b	0.92±0.25 ^b	0.52±0.12 ^b	0.40±0.16 ^{ab}
0.50	9.35±3.51 ^c	3.07±0.56 ^b	4.36±1.35 ^b	3.05±0.69 ^b	0.87±0.12 ^b	0.51±0.13 ^b	0.36±0.09 ^b
1.00	8.85±2.80 ^d	3.10±0.28 ^b	4.28±1.13 ^b	3.39±0.37 ^b	0.90±0.24 ^b	0.57±0.15 ^b	0.33±0.13 ^b
2.00	8.84±2.56 ^d	3.05±0.37 ^b	3.24±0.82 ^c	2.93±0.39 ^b	0.86±0.13 ^b	0.50±0.09 ^b	0.32±0.09 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 邻苯二甲酸对橡胶树幼苗色素含量的影响

如图 2 所示, 除叶绿素 a 外, 橡胶树叶片其他色素含量随邻苯二甲酸处理浓度的增加表现为先增加后减少的趋势。0.05 mmol/L 的邻苯二甲酸处理幼苗叶绿素 a 显著下降, 比对照降低 21.18%, 叶绿素 b 显著升高, 并达到峰值, 比对照增加 58.01%, 叶绿素总量和类胡萝卜素含量无显著变化; 当邻苯二甲酸浓度达到 0.50 mmol/L 时, 叶绿素 a、叶绿素总量与类胡萝卜素含量达到峰值, 与对照相比, 叶绿素 a 增加 37.78%, 叶绿素总量增加 33.92%、类胡萝卜素增加 29.06%; 当浓度达到 1.00 mmol/L 时, 叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量与类胡萝卜素含量均下降, 至 2.00 mmol/L 时所有色素含量降至最低。这些结果说明, 0.05 mmol/L 与 0.50 mmol/L 邻苯二甲酸诱导叶绿素和类胡萝卜素含量的增加, 进行补偿生长, 提高光能利用效率; 1.00 mmol/L 和 2.00 mmol/L 邻苯二甲酸处理导致色素结构被破坏, 色素含量下降, 抑制幼苗光合作用。

2.4 邻苯二甲酸对橡胶树丙二醛和渗透调节物质含量的影响

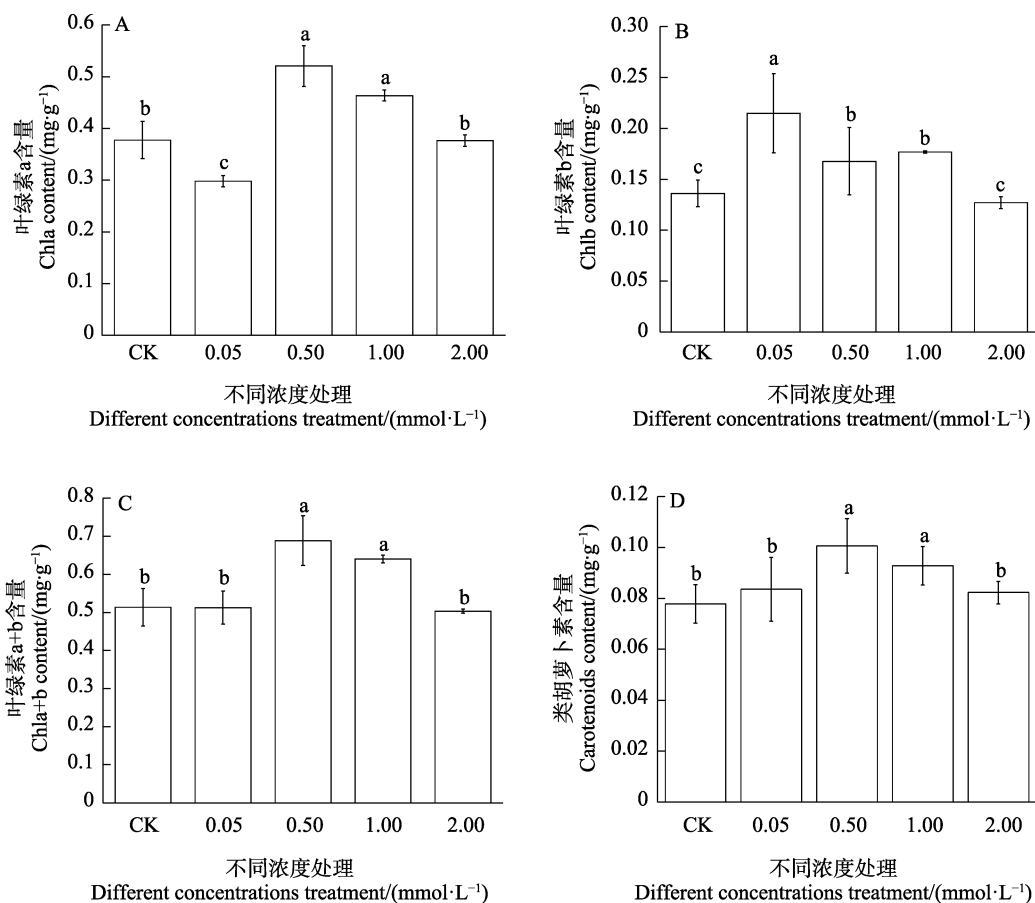
由图 3 可见, 邻苯二甲酸对橡胶树幼苗丙二

醛和渗透调节物质含量变化均随处理浓度增加基本上呈现逐渐增加的趋势。不同浓度邻苯二甲酸处理的橡胶树 MDA 含量均显著高于对照, 2.0 mmol/L 邻苯二甲酸处理的 MDA 含量最高, 比对照高 50.95%。说明邻苯二甲酸使幼苗细胞中发生膜脂过氧化作用, 且随处理浓度增加膜脂过氧化程度逐渐增加。

由图 3 可见, 不同浓度邻苯二甲酸处理均显著促进橡胶树游离脯氨酸含量的增加, 2.00 mmol/L 邻苯二甲酸处理的游离脯氨酸含量最高, 比对照高 71.91%。0.05 mmol/L 邻苯二甲酸处理的可溶性糖与对照差异不显著, 当邻苯二甲酸浓度超过 0.50 mmol/L 时, 可溶性糖均不同程度增加 ($P<0.05$), 2.0 mmol/L 邻苯二甲酸处理的可溶性糖含量最高, 比对照高 35.32%。这说明游离脯氨酸在 0.05 mmol/L 邻苯二甲酸胁迫处理时产生响应, 当浓度达到 0.50 mmol/L 后, 游离脯氨酸和可溶性糖共同产生响应, 且游离脯氨酸响应邻苯二甲酸胁迫的启动浓度低于可溶性糖。

2.5 邻苯二甲酸对橡胶树幼苗酶活性的影响

由图 4 可见, 橡胶树 SOD、POD 活性随邻苯二甲酸处理浓度增加而逐渐减少, 1.00 mmol/L 与

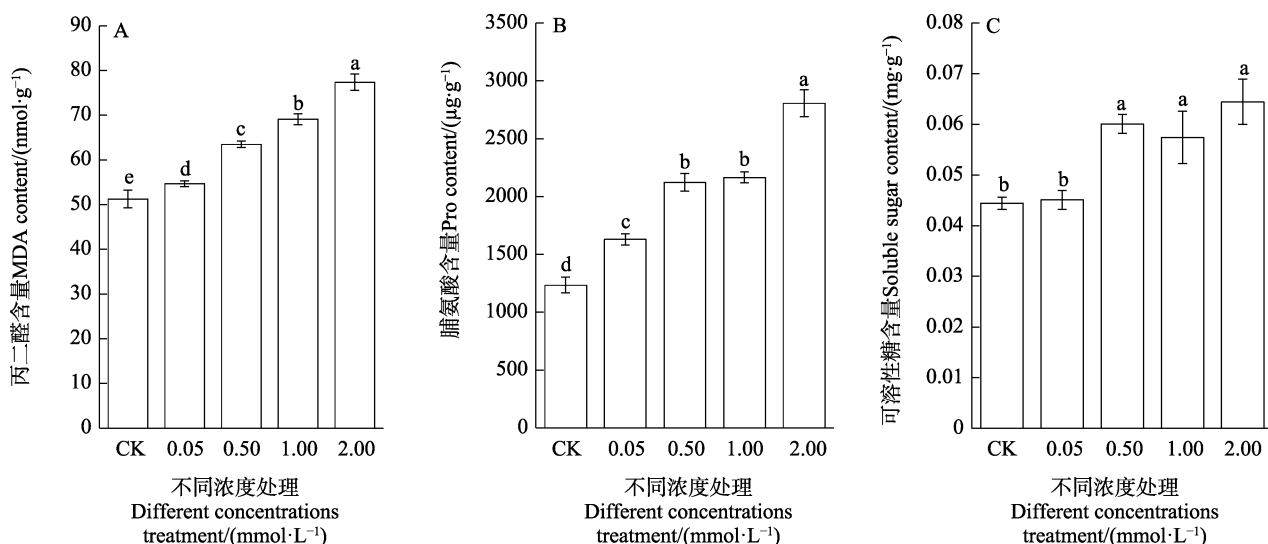


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树叶片色素含量

Fig. 2 Pigment content of rubber tree leaves treated with different concentrations of phthalic acid

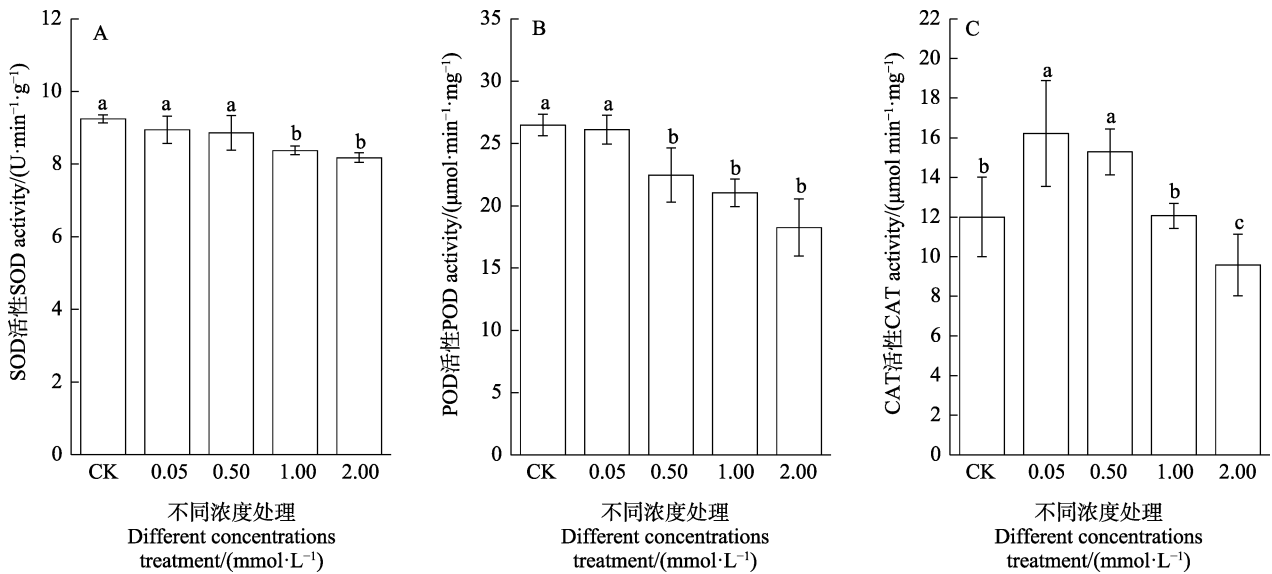


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树叶片 MDA、游离脯氨酸和可溶性糖含量

Fig. 3 MDA, free proline and soluble sugar contents in rubber tree leaves treated with different concentrations of phthalic acid



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同浓度邻苯二甲酸处理下的橡胶树叶片 SOD、CAT 和 POD 活性

Fig. 4 Activity of SOD, CAT and POD in rubber tree leaves treated with different concentrations of phthalic acid

2.00 mmol/L 邻苯二甲酸处理橡胶树 SOD 活性显著低于对照 ($P < 0.05$), 0.50、1.00、2.00 mmol/L 邻苯二甲酸处理橡胶树 POD 活性显著低于对照; CAT 活性随邻苯二甲酸处理浓度增加而先增加后减少, 0.05、0.50 mmol/L 邻苯二甲酸处理橡胶树 CAT 活性均显著高于对照, CAT 活性峰值均为 0.05 mmol/L, 其活性比对照高 80.15%; 当邻苯二甲酸浓度达到 2.00 mmol/L 时, 所有酶活性均降至最低。上述结果表明, 在低浓度邻苯二甲酸胁迫过程中, SOD、POD 活性受到抑制, CAT 活性未完全受到抑制, CAT 在抵御邻苯二甲酸胁迫作用明显; 但高浓度邻苯二甲酸抑制所有酶活性, 且 2.00 mmol/L 对所有酶活性影响最大。

3 讨论

植物的自毒作用一般会对同种或同类植物的生长发育和器官建成具有抑制作用。种子萌发和植株生长对外界环境胁迫较为敏感, 常被作为鉴定植物自毒作用的生物指标。邻苯二甲酸是橡胶树根系分泌的主要次生代谢产物之一, 已被证明是一种典型的酚酸类自毒物质。本研究结果表明, 0.05~2.00 mmol/L 邻苯二甲酸胁迫的橡胶树种子发芽率和幼苗植株鲜重显著减少, 说明邻苯二甲酸对橡胶树种子萌发和幼苗生长存在抑制作用。这与前人观察到邻苯二甲酸对小豆、玉米、马铃薯^[21-23]等作物种子萌发和幼苗生长的抑制作用的

研究结果一致。种子在萌发过程中内部发生复杂的物质代谢和酶促反应。邻苯二甲酸抑制橡胶树种子萌发机制可能是影响种子内部的物质代谢及代谢关键酶的活性, 使种子发生劣变、活力下降, 进而导致种子初始萌发时间延后, 发芽率下降的关键因素。该机制在苏文桢等^[13]发现的邻苯二甲酸能够抑制辣椒种子活力, 降低其发芽率中得到印证。

叶绿素是光合作用的主要色素, 其含量水平是植物受到胁迫的特征指标之一。类胡萝卜素是辅助色素, 被认为是低分子量的抗氧化剂, 具有淬灭活性氧的作用, 保证叶绿体正常的光电子传递。非生物胁迫环境下, 植株中叶绿素含量减少, 光合膜透性急剧增加, 光合膜受损加剧, 由于膜的损伤促使叶绿素分子从叶绿素复合蛋白中暴露, 更容易与 O_2 接触, 促使活性氧生成, 加剧光合色素的降解和光合机构的损伤, 使植株光合能力下降^[24]。本研究中, 低浓度邻苯二甲酸诱导幼苗提高叶片叶绿素含量和类胡萝卜素, 随着邻苯二甲酸浓度增加, 胁迫加剧, 叶绿素含量和类胡萝卜素逐渐降低, 并呈现不可逆的趋势。说明橡胶树在低浓度邻苯二甲酸胁迫时, 通过积累幼苗叶绿素含量, 提高光能利用效率, 进行补偿生长, 同时提高类胡萝卜素含量来淬灭过多的活性氧, 避免对叶绿体膜结构的伤害, 维持叶片的光合作用; 但随着邻苯二甲酸浓度升高, 橡胶树自身调

节机制减弱, 保护系统失调, 导致叶绿素和类胡萝卜素酶合成缓慢或快速分解, 光合作用下降。这与邻苯二甲酸对辣椒叶片叶绿素含量影响的结果相似^[13]。

MDA 是细胞中发生膜脂氧化的最终分解产物, 其含量水平可作为逆境条件下细胞内发生膜脂过氧化损伤的指标^[25]。邻苯二甲酸胁迫下, 橡胶树幼苗 MDA 含量显著增加, 表明膜脂过氧化伤害加剧, 这与 BAI 等^[26]在海棠幼苗结果一致, 说明邻苯二甲酸对光合膜和细胞膜结构形成伤害。此外, 前人研究显示 MDA 含量的增加与非生物胁迫后 O₂和 H₂O₂含量的增加有关^[27], 邻苯二甲酸胁迫导致 MDA 的增加可能触发橡胶树产生活性氧自由基 (ROS) 并诱导氧化应激, 破坏细胞膜结构, 导致细胞完整性丧失。渗透调节是植物抵御逆境胁迫的一种适应性反应, 是一种重要的耐胁迫机制。植物通过积累渗透调节物质来调节细胞内渗透势、维持平衡水势, 以维持正常的细胞功能和新陈代谢^[14, 28]。脯氨酸与可溶性糖是植物的 2 种重要的渗透调节物质。本研究观察到, 0.05 mmol/L 邻苯二甲酸胁迫时脯氨酸增加, 当邻苯二甲酸达到 0.50 mmol/L 后, 脯氨酸与可溶性糖含量均显著增加, 表明橡胶树通过积累游离脯氨酸与可溶性糖来调节细胞内渗透势, 维持水分平衡及细胞膜的稳定性, 而脯氨酸受邻苯二甲酸胁迫启动浓度低于可溶性糖。

正常生长条件下, 细胞内氧自由基的产生和消除存在动态平衡。生物与非生物胁迫会导致活性氧的形成, 活性氧增多会影响膜的通透性, 损坏 DNA 和蛋白质, 诱导膜脂过氧化, 并最终导致程序性细胞死亡。SOD、CAT、POD 是植物重要的抗氧化保护酶系统, 通过提高抗氧化酶活性来清除过量活性氧, 从而抵御逆境胁迫^[29-30]。本研究观察到, 0.05、0.50 mmol/L 邻苯二甲酸胁迫显著抑制 SOD、POD 活性, 促进 CAT 活性, 膜脂过氧化, 幼苗体内活性未能及时得到清除, 膜结构受损, MDA 含量增加; 当邻苯二甲酸处理浓度达到 1.00 mmol/L 后, 抗氧化酶系统被破坏, SOD、POD、CAT 活性均降低, 体内活性氧含量增加, 膜脂过氧化程度加剧。这与耿广东等^[12]、郭伟等^[15]在辣椒和燕麦的研究结果一致。

总之, 邻苯二甲酸抑制橡胶树幼苗生长发育机制可能是邻苯二甲酸胁迫导致橡胶树产生活性氧, 影响了细胞代谢活动和生理功能, 使幼苗生

长受到抑制; 尽管幼苗在低浓度邻苯二甲酸胁迫下通过增加 CAT 活性来清除活性氧, 并提高光合色素含量进行光合补偿生长以及增加渗透调节物质平衡渗透势, 但这只能缓解邻苯二甲酸胁迫的影响, 却不能够消除邻苯二甲酸引起的所有伤害; 高浓度邻苯二甲酸胁迫下, 幼苗色素含量降低, 光合作用补偿生长消失, 抗氧化酶系统遭到破坏, 酶活性下降, 细胞膜结构遭到破坏, 活性氧急剧增加, 幼苗生长进一步受到抑制。

综上所述, 邻苯二甲酸积累推迟了橡胶树 RRIM600 种子初始萌发时间, 降低种子萌发率和萌发速率, 导致橡胶树幼苗物质代谢和生理功能紊乱, 并抑制生长发育, 具有化感自毒作用。本试验仅研究橡胶树种子萌发和幼苗生长发育的影响, 关于其对橡胶树胶乳产量的影响还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 曾霞, 安泽伟, 胡彦师, 程汉. 橡胶树种质胶乳 5 种金属离子含量差异和年度变化研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 378-383.
ZENG X, AN Z W, HU Y S, CHENG H. Difference and annual variation of five metal ions in latex of 13 *Hevea* germplasms[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(2): 378-383. (in Chinese)
- [2] 刘锐金, 黄华孙. “十四五”时期推动天然橡胶产业健康发展的思考[J]. 中国热带农业, 2021(4): 5-12.
LIU R J, HUANG H S. Thoughts on promoting the sound development of natural rubber industry during the 14th five-year plan period[J]. China Tropical Agriculture, 2021(4): 5-12. (in Chinese)
- [3] 覃建文, 蒋云川. 云南省勐满农场润河生产队二代胶园橡胶幼树根病危害及防治对策[J]. 北京农业, 2015(27): 106-107.
QIN J W, JIANG Y C. Root disease damage and control measures of young rubber trees in the second-generation rubber plantation of Runhe Production Team of Mengman Farm, Yunnan province[J]. Beijing Agriculture, 2015(27): 106-107. (in Chinese)
- [4] 何向东, 吴小平. 海南垦区胶园肥力演变探研[J]. 热带农业科学, 2002(1): 16-22.
HE X D, WU X P. Evolution of rubber plantation soil fertility in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2002(1): 16-22. (in Chinese)
- [5] 张玲玲, 兰天, 朱治强, 吴蔚东. 海南热带砖红壤有机组分对植胶与橡胶连作的响应[J]. 热带生物学报, 2016, 7(2):

- 204-210.
ZHANG L L, LAN T, ZHU Z Q, WU Y D. The response of organic compositions of Hainan Latosols to rubber planting and rubber continuous cropping[J]. Journal of Tropical Biology, 2016, 7(2): 204-210. (in Chinese).
- [6] 李春英, 关佳晶, 李玉正, 苏伟然, 田瑶, 王婷婷, 李申, 赵春建. 南方红豆杉水浸提液对喜树种子发芽和幼苗生长的化感作用[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1564-1570.
LI C Y, GUAN J J, LI Y Z, SU W R, TIAN Y, WANG T T, LI S, ZHAO C J. Allelopathic effects of aqueous extracts from *Taxus chinensis* var. *mairei* on seed germination and seedling growth of *Camptotheca acuminata*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4) : 1564-1570. (in Chinese)
- [7] 孙莎莎, 韩亚萍, 闫燕燕, 巩彪, 史庆华. 外源亚精胺处理对自毒作用下黄瓜胚根生理生化特性的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 163-170.
SUN S S, HAN Y P, YAN Y Y, GONG B, SHI Q H. Effect of exogenous spermidine treatment on physiological and biochemical characteristics of the cucumber radicles under autotoxicity[J]. Plant Physiology Journal 2020, 56(2): 163-170. (in Chinese)
- [8] 李敏, 闫兴富, 马丽, 马璐, 时榕. 酚酸类化感自毒物质对枸杞种子萌发的抑制作用[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2072-2079.
LI M, YAN X F, MA L, MA L, SHI R. Allelopathic inhibition of phenolic acids on germination of wolfberry (*Lycium barbarum* Linn.)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2072-2079. (in Chinese)
- [9] 尹玉莲, 王文斌, 吴小平, 罗雪华, 吴建文. 橡胶树根际土壤浸提液的 GC-MS 分析[J]. 中国农学通报, 2008(2): 437-440.
YIN Y L, WANG W B, WU X P, LUO X H, WU J W. GC-MS analysis of rhizosphere- soil extract of rubber tree (*Hevea brasiliensis*)[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008(2): 437-440. (in Chinese)
- [10] 王文斌, 吴小平, 尹玉莲, 郭海超, 罗雪华. 水培条件下橡胶树幼苗根系分泌物的 GC-MS 分析[J]. 热带作物学报, 2010, 31(12): 2281-2286.
WANG W B, WU X P, YIN Y L, GUO H C, LUO X H. GC-MS analysis of rubber seedling root exudates with nutrient solution cultivation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(12): 2281-2286. (in Chinese).
- [11] 王发财. 外源邻苯二甲酸对小豆根系生长的化感效应研究[J]. 青海农林科技, 2017(4): 13-16, 94.
WANG F C. Effect of 1, 2-benzenedicarboxylic acid on root growth of adzuki bean[J]. Qinghai Agriculture and Forestry Technology, 2017(4): 13-16, 94. (in Chinese).
- [12] 耿广东, 张素勤, 程智慧. 邻苯二甲酸对莴苣的化感作用及其作用机理[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 656-659.
GENG G D, ZHANG S Q, CHENG Z H. Allelopathy of 1,2-benzenedicarboxylic acid and its mechanism[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2008, 34(6): 656-659. (in Chinese).
- [13] 苏文楨, 李根新, 朱强龙, 张瑜, 王强, 吴才君. 邻苯二甲酸对辣椒种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2021(24): 8-15.
SU W Z, LI G X, ZHU Q L, ZHANG Y, WANG Q, WU C J. Effects of phthalate on seed germination and seedling growth of pepper[J]. Northern Horticulture, 2021(24): 8-15. (in Chinese)
- [14] 杨延杰, 王晓伟, 赵康, 陈宁, 林多. 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6074-6080.
YANG Y J, WANG X W, ZHAO K, CHEN N, LIN D. Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6074-6080. (in Chinese)
- [15] 郭伟, 薛盈文, 于崧, 孙海燕. 邻苯二甲酸与对羟基苯甲酸对燕麦幼苗生长及抗氧化特性的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(10): 1885-1892.
GUO W, XUE Y W, YU S, SUN H Y. Effects of phthalic acid and p-hydroxybenzoic acid on seedling growth and antioxidant properties of oat (*Avena nuda*)[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(10): 1885-1892. (in Chinese)
- [16] 马倩, 郭伟, 薛盈文, 于崧, 陆旺, 刘梦红. 邻苯二甲酸与对羟基苯甲酸对玉米种子萌发的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 294-300.
MA Y, GUO W, XUE Y W, YU S, LU W, LIU M H. Effects of phthalic acid and p-hydroxybenzoic acid on seed germination of maize[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(2): 294-300. (in Chinese)
- [17] HUA C P, XIE Z K, WU, Z J, ZHANG Y B, GUO Z H, QIU Y, WANG L, WANG Y J. The physiological and biochemical effects of phthalic acids and the changes of rhizosphere fungi diversity under continuous cropping of Lanzhou Lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*)[J]. Hortscience, 2019, 54(2): 253-261.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74-76.
GAO J F. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 74-76. (in Chinese)
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 167-281. (in Chinese)
WANG X K. Principles and techniques of plant physiology

- and biochemistry experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 167-281. (in Chinese)
- [20] 刘勇, 刘燕, 胡茂飞, 赵许朋, 杨丹. 头花蓼水浸提液的化感自毒作用[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(3): 520-526.
LIU Y, LIU Y, HU M F, ZHAO X P, YANG D. Research on allelopathic autotoxicity of water extracts of *Polygonum capitatum*[J]. Jiangsu Journal Agriculture Sciences, 2018, 34(3): 520-526. (in Chinese)
- [21] 宋慧. 小豆连作障碍中自毒机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
SONG H. Autointoxication in adzuki bean replant[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- [22] 柴强, 冯福学. 玉米根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物的化感效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2007(5): 43-48.
CHAI Q, FENG F X. Identification of root exudation of *Zea mays* L. and allelopathy of 1,2 -benzenedicar-boxylic acid[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007(5): 43-48. (in Chinese)
- [23] 蔺琰东, 秦舒浩, 王丽, 刘玉汇, 余斌, 张俊莲, 王蒂. 外源邻苯二甲酸二甲酯和苯甲酸对马铃薯组培苗生长的化感效应[J]. 广东农业科学, 2011, 38(9): 17-20.
LIN Y D, QIN S H, WANG L, LIU Y H, YU B, ZHANG J L, WANG D. Allelopathic effects of exogenous dimethyl phthalate and benzoic acid on the growth of potato tissue culture seedlings[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(9): 17-20. (in Chinese).
- [24] 王纪坤, 王立丰. 巴西橡胶树 GT1 袋装实生苗旱害响应机制研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2271-2275.
WANG J K, WANG L F. Study on drought response mechanisms in bag seedlings of GT1 of *Hevea brasiliensis* Muell arg[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(6): 2271-2275. (in Chinese).
- [25] 杨红兰, 冯守富, 尹永昌, 敖福春, 黄秋婵. 锰胁迫对降香黄檀幼苗期生理特性的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(27): 149-151.
YANG H L, FENG S F, YIN Y C, AO F C, HUANG Q C. Effects of manganese stress on physiological characteristics of *Dalbergia* in seedling stage[J]. South China Agriculture, 2020, 14(27): 149-151. (in Chinese)
- [26] BAI R, MA F W, DONG D, ZHAO X. Phthalic acid induces oxidative stress and alters the activity of some antioxidant enzymes in roots of *Malus prunifolia*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2009, 35: 488-494.
- [27] LARA-NUNEZ A, ROMERO-ROMERO T, VENTURA J L, BLANCAS V, ANAYA A L, CRUZ-ORTEGA R. Allelochemical stress causes inhibition of growth and oxidative damage in *Lycopersicon esculentum* Mill[J]. Plant Cell and Environment, 2006, 29: 2009-2016.
- [28] 赵秋毅, 李元跃, 陈融斌, 潘文, 陈政强, 徐佳佳, 李容伟, 高苏蕊, 刘畅. 邻苯二甲酸二丁酯污染对老鼠筋幼苗抗逆性生理特性的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(6): 70-77.
ZHAO Q Y, LI Y Y, CHEN R B, PAN W, CHEN Z Q, XU J J, LI R W, GAO S R, LIU C. Effects of dibutyl phthalate pollution on stress resistance physiological characters of the *Acanthus Ilicifolius* L. seedlings[J]. Marine Sciences, 2018, 42(6): 70-77. (in Chinese)
- [29] KUMARI A, KAUR R. Modulation of biochemical and physiological parameters in *Hordeum vulgare* L. seedlings under the influence of benzyl-butyl phthalate[J]. Peer J, 2019, 7: e6742.
- [30] 吴凤芝, 赵凤艳, 姜佰文. 苯丙烯酸对土培黄瓜幼苗抗氧化酶和脯氨酸含量的影响[J]. 土壤通报, 2007(4): 741-744.
WU F Z, ZHAO F Y, JIANG B W. Effects of cinnamic acid on peroxidation of the plasma membrane of cucumber seedlings[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 27(4): 1335-1340. (in Chinese)