

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 01. 005

干旱胁迫对光叶珙桐幼苗抗氧化系统的影响*

高兴国¹, 王磊¹, 杨顺强², 陈家德³, 刘健君², 裴文仙¹

(1. 昭通学院 化学与生命科学学院, 云南 昭通 657000; 2. 昭通学院 农学院, 云南 昭通 657000;
3. 昭通市疾病预防控制中心, 云南 昭通 657000)

摘要: 通过研究干旱胁迫对光叶珙桐幼苗抗氧化酶系统相关物质的影响, 以探究光叶珙桐幼苗对干旱胁迫的适应能力。设置对照组、5%、10%、15%、20% PEG-6000 梯度浓度对3年生光叶珙桐幼苗进行干旱胁迫处理, 提取叶片中RWC、SOD、POD和CAT和MDA进行比较研究。结果表明:(1)随着光叶珙桐幼苗遭受干旱胁迫程度加剧与胁迫时间的延长, 叶片中RWC急剧减少, SOD、POD与CAT酶活性均先上升后下降, MDA含量先下降后上升;(2)SOD变化不显著, 在光叶珙桐抗旱机制中发挥的作用最小;而POD活性和CAT活性均变化明显, 二者协同作用, 在不同程度的胁迫下分别起到清除自由基的作用, 以降低自由基对植株造成伤害;(3)POD活性在24h轻度胁迫处理下高出CK组409.14%, CAT在重度胁迫处理下高出CK组191.49%, 二者在严重胁迫(20%PEG)处理下又降至接近CK组水平, 说明POD在轻度胁迫时发挥其保护作用, 随着干旱胁迫程度的加剧, CAT发挥着保护膜脂的主要作用, 在严重胁迫下二者活性均降低;(4)MDA含量先下降后上升, 说明在干旱胁迫初期, 在保护酶协同作用下减少了MDA的生成, 在严重胁迫处理时含量积累升高到CK组含量的29.86%, 表明随胁迫程度的加剧保护酶活性受到明显抑制。光叶珙桐对干旱胁迫较为敏感, 水因子成为光叶珙桐生长的主要限制条件。

关键词: 光叶珙桐; 相对含水量; 超氧化物歧化酶活性; 过氧化物酶活性; 过氧化氢酶活性; 丙二醛含量; 自由基
中图分类号: S 792.99; Q 945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-8246 (2019) 01-0023-06

The Effect of Drought Stress on Antioxidant Enzymes System of *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange Seedlings

GAO Xing-guo¹, WANG Lei¹, YANG Shun-qiang², CHEN Jia-de³, LIU Jian-jun², PEI Wen-xian¹

(1. Faculty of Chemistry and Life Sciences, Zhaotong College, Zhaotong Yunnan 657000, P. R. China;
2. Faculty of Agricultural, Zhaotong College, Zhaotong Yunnan 657000, P. R. China;
3. Zhaotong Centers for Disease Control and Prevention, Zhaotong Yunnan 657000, P. R. China)

Abstract: For understanding the adaptability and countermeasures of *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange seedlings to drought stress, the effects of drought stress on the related substances of antioxidant enzymes in its seedlings were studied. Drought stress treatment were made for 3-year-old *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange seedlings with different concentration of control group, and 5%, 10%, 15% and 20% PEG-6000 gradients, and a comparative study was conducted after extraction of RWC, SOD, POD and CAT and MDA from its leaves. The results showed that: (1) With the severity of drought stress and the prolongation of stress time, RWC decreased rapidly, the enzyme activity of SOD, POD and CAT increased at the beginning, and then descended, MDA contents decreased at the beginning and then increased; (2) There was no significance change on SOD, and SOD played a minimal role in the drought resistance mechanism. POD activity and CAT activity changed significantly,

* 收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 云南省教育厅项目《光叶珙桐抗旱机制研究》(ZD2015018)。

第一作者简介: 高兴国 (1973-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: 772342121@qq.com

通讯作者简介: 王磊 (1966-), 男, 教授, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: ztwle@sohu.com

and they worked synergistically as scavenging free radicals under different stress; (3) POD activity was 409.14% higher than CK under slight stress with 24h, CAT activity was 191.49% higher than CK under severe stress. Both POD and CAT decreased and close to CK under very severe stress (20% PEG). This indicated that with the increase of drought stress, CAT played a major role in protecting membrane lipids, and their activities decreased under very severe stress; (4) The content of MD decreased at the beginning and then increased, which indicated that in the early stage of drought stress, the production of MDA was reduced under the synergistic action of protective enzymes. The accumulation of protective enzymes under very severe stress increased to 29.86% of CK, which indicated that the activity of protective enzymes was significantly inhibited with the increase of drought stress. The study showed that *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange is sensitive to drought stress and water factor is the critical element for its growth.

Key words: *Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange; relative water content; SOD activity; POD activity; CAT activity; MDA content; free radical

植物在进化过程中与其生长环境相适应,植物的分布与生长受光、温、水等生态因素的影响。水因子是限制植物分布地域与生长状况的主要因素,也是物种的引种驯化必须考虑的条件之一。全球气候变化与水资源的重新分配,干旱胁迫影响了原生境植物的正常生长与更替。干旱胁迫使植物细胞丢失水分,水分代谢失衡导致细胞内物质代谢方式改变,引起细胞内活性氧自由基大量积累进而造成对植物的伤害。

光叶珙桐 [*Davidia involucrata* var. *vilmoriniana* (Dode) Wange] 为珙桐科 (Davidiaceae) 珙桐属 (*Davidia*) 植物,是珙桐 (*Davidia involucrata* Baill) 的唯一变种,与珙桐主要区别为叶背面无毛,幼时叶脉上有稀疏柔毛或粗毛^[1]。双子叶植物,新生代第三纪孑遗植物,野生种主要分布于云南、四川、贵州、湖北等地的局部地区,生长地多为潮湿、多雨雾、夏凉冬寒的凉湿型气候,对于干旱等逆境条件的抵抗及自我调节能力较弱,常与珙桐混生,资源稀少,属国家一级保护植物^[2]。目前仅发现云南省昭通市大关县境内的三江口自然保护区有大量光叶珙桐成片生长^[3-4]。对于珙桐的引种驯化、栽培技术、生存特性等的研究较多,而对于干旱胁迫的承受能力的研究相对较少。对珙桐抗旱研究的文献有王宁宁等分析了珙桐苗对于干旱胁迫的响应^[5-6],吴庆贵等对珙桐幼苗对土壤干旱胁迫的响应的研究^[7],姜瑞芳等对珙桐幼苗受土壤基质和水分的影响的研究^[8]。在对试验材料进行处理过程中,人为设置土壤持水量梯度,无法准确确定植物根系周围水势值,只能大致限定土壤含水量^[9]。因此,采用渗透调节剂 PEG-6000 对 3 年生光叶珙桐幼苗模拟梯度干旱胁迫,测定光叶珙桐幼

苗叶片在不同胁迫程度下抗氧化相关物质超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性以及相对含水量 (RWC) 和丙二醛 (MDA) 含量,以分析光叶珙桐幼苗抗氧化系统对于干旱胁迫的响应。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

光叶珙桐幼苗为云南大关三江口保护区 (28°09'42"-28°14'51"N, 103°53'38"-104°01'55"E) 管理局提供的一年生苗,幼苗在冬末春初休眠期萌动前移植到昭通学院化学学院三楼光照较好处进行盆栽,使用土壤与原生境相同红黄壤种植,每盆 1 株,统一肥水管理,在透明遮雨棚下模拟自然生境再生长 2 年。选取长势一致 3 年生珙桐苗用清水浸泡清洗干净根部,放入用 Hoagland's 营养液^[10]配制的 PEG-6000 梯度浓度溶液中培养,溶液浓度为 5% (T1 轻度胁迫)、10% (T2 中度胁迫)、15% (T3 重度胁迫)、20% (T4 严重胁迫),对照组 (CK) 用 Hoagland's 液培养,每一个处理组采用 3 株进行实验。

1.2 测定指标

分别选取胁迫 24h 与 48h 的光叶珙桐同位置功能叶片,将其剪碎 (去除大叶脉),按实验要求称量一定量叶片进行相关数据的测定,每一数据的测定分别重复 3 次。

叶片 RWC 采用烘干法^[11]测定;SOD 活性采用 NBT 还原法测定^[12];POD 与 CAT 活性的测定用愈创木酚染色法^[13];MDA 含量按照张志良等的方法测定和计算^[13]。

1.3 统计与分析

用 SPSS 13.0 进行数据统计分析。用 Excel 2003 软件作图。

2 结果与分析

2.1 叶片中 RWC 变化

叶片 RWC 也是对植物耐旱能力的体现，越耐旱的植物，叶片 RWC 下降越平缓，反之则下降较快。由图 1 可知，光叶珙桐幼苗叶片 RWC 对干旱胁迫的响应非常明显，各种处理的叶片 RWC 随干旱胁迫程度加剧而降低，RWC 在胁迫强度梯度与时间序列上均明显减少。不同胁迫强度下，随着胁迫强度的加剧，叶片 RWC 均明显减少。RWC 在干旱胁迫 24h 前下降迅速，主要是植物细胞内自由水含量减少，渗透势增高，到 24h 后丢失水分减缓。在同一处理强度下叶片 RWC 从 24h 到 48h 逐渐降低，在 T1 处理下叶片 RWC 快速降低，24h 下降到 CK 组的 55.4%，出现叶片轻度萎蔫，最为严重的是 T4 到 48h 时，RWC 下降到 CK 组的 58.56%，叶片出现萎蔫加剧现象，当 PEG 浓度达到 25% 时，48h 时直接导致光叶珙桐植株死亡。叶片的 RWC 下降先快后慢，RWC 持续降低。在 T1 组叶片出现大量丢失水分现象，说明光叶珙桐对干旱胁迫反应灵敏，对干旱环境的适应能力较差。

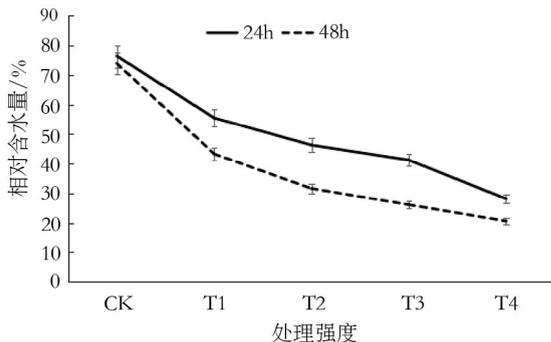


图 1 干旱胁迫下叶片相对含水量的变化

Fig. 1 Changes of relative water content in leaves under drought stress

2.2 干旱胁迫对光叶珙桐幼苗保护酶活性的影响

2.2.1 叶片中 SOD 活性变化

SOD 能够清除活性氧以保护植物不受损伤^[14-15]。SOD 酶活性在整个干旱胁迫过程中轻微增加 (图 2)，在 24h 时 T1 平缓轻微升高、T2 轻微降低，在 T3 达到最高点，T4 开始下降，与 CK 组对照分别上升 3.17%、-0.78%、14.70%、5.32%。48h

时酶活性呈先升后降再上升，T4 达到最顶点，与 CK 组对照分别上升 12.33%、11.63%、4.31%、17.76%，到 T4 时 SOD 酶活性明显升高。说明在干旱胁迫条件下 SOD 酶活性增强不明显，对外界干旱胁迫难于快速作出反应，清除活性氧自由基作用不够，难于实现对自身细胞膜的保护，致使光叶珙桐不能很好地适应干旱环境。

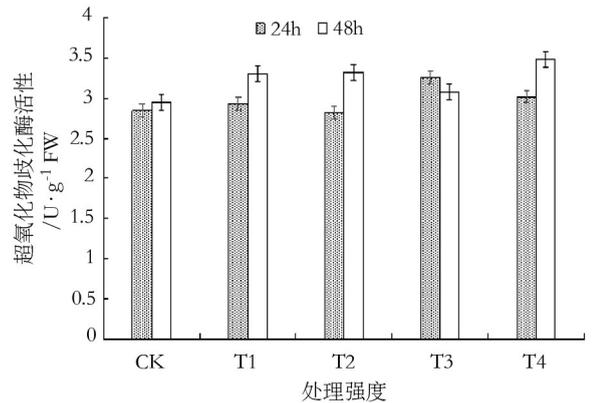


图 2 干旱胁迫下叶片 SOD 活性的变化

Fig. 2 Changes of SOD activities in leaves under drought stress

2.2.2 叶片中 POD 活性变化

POD 可以使 H_2O_2 转变成 H_2O 和 O_2 ，避免光叶珙桐幼苗受到活性氧的毒害作用。由图 3 可知，24h 叶片中 POD 活性在 T1 处理迅速升高，高出 CK 组 409.14%，与 CK 组相比，POD 活性从 $27.476 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 增加到 $139.859 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 。POD 活性的突增，表明植物内部对干旱的诱导性生成新的 POD 的结果^[16]。到达 T4 时，POD 的活性开始失活，POD 活性又迅速回落到 CK 组水平。在 48h 时 T1POD 酶活性为 $37.261 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ ，T2 处理下 POD 酶活性为 $19.511 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ ，T2 处理甚至低于 CK 组 16.56%，T1 与 T2 之间 POD 酶活性差异不大，在 T3、T4 处理下，光叶珙桐叶片中的 POD 酶活性迅速增加到 $97.491 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ 与 $105.498 U \cdot g^{-1}FW \cdot min^{-1}$ ，分别高出 CK 组 97.4%、105.50%。说明随着干旱胁迫时间的增加，光叶珙桐为了适应所处的胁迫环境，激发机体内部的保护机制，引起 POD 的活性发生改变，与其它抗氧化酶一起协同抵抗氧化，降低自由基以防止进一步对伤害光叶珙桐植株。齐淑艳等对牛膝菊 (*Galinsoga parviflora*) POD 进行的研究结果也是呈现先上升后下降趋势^[17]。

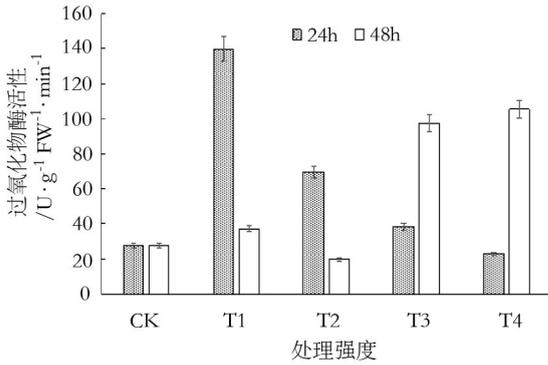


图3 干旱胁迫下叶片 POD 活性的变化

Fig. 3 Changes of POD activities in leaves under drought stress

2.2.3 叶片中 CAT 活性变化

CAT 也可清除植物体内的 H_2O_2 等。叶片 CAT 活性随着干旱胁迫程度的加强和胁迫时间的延长逐渐升高然后降低 (图 4), 到 24h 升高幅度分别是 CK 组的 51.22%、127.89%、191.49%、43.01%。各胁迫强度下 48hCAT 酶活性值均低于 24h 酶活性值, 在 T1-T3 处理下 CAT 酶活性降至 24h 的 26.109%、35.781%、41.595%; 在 T4 处理下, CAT 酶逐渐失活, 酶活性值有所回落, 降至 T3 的 49.06%, 24h 与 48h 均比 CK 组高 51.22%。酶的活性不随胁迫时间的延长而降低, T3 下叶片中 CAT 值达到最高, 达到 CK 组 191.49%。说明叶片中对于干旱胁迫比较敏感的 CAT, 对光叶珙桐抵抗干旱胁迫有着重要的作用, 随着干旱胁迫强度的加大, CAT 酶活性逐渐增强 (T1 至 T3), 但达到严重胁迫强度时, CAT 酶活性降低 (T4), 说明对抗短时间、低强度的干旱胁迫 CAT 的作用是行之有效的, 但不能抵抗长时间与高强度的干旱胁迫, 在各干旱胁迫处理组的后期 (48h) CAT 活性降低。

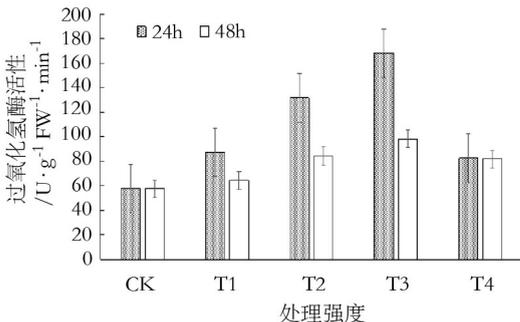


图4 干旱胁迫下叶片 CAT 活性的变化

Fig. 4 Changes of CAT activities in leaves under drought stress

2.3 叶片中 MDA 含量变化

由图 5 可知, MDA 含量在 T1 降到最低值, 然后逐渐缓慢上升, 随着干旱胁迫的增加, 光叶珙桐叶片中的活性氧逐渐得到积累, 在 T3 与 T4 中 MDA 含量分别是 CK 组的 20.98%、29.86%。出现持续性的快速累加效应。与韩蕊莲等研究的沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 叶片在持续较长时间重度干旱胁迫下, 使细胞膜遭受不可逆转的伤害相似^[18]。轻度干旱胁迫对光叶珙桐叶片 MDA 含量没有太大影响, 只是随着胁迫强度递增与胁迫时间延长平缓上升, 植物叶片 MDA 含量与干旱胁迫程度基本呈现正比增加^[19], T3、T4 增长明显。

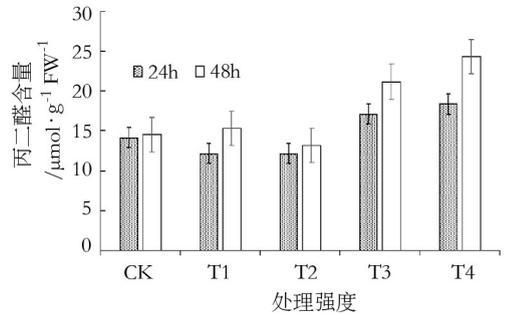


图5 干旱胁迫下叶片 MDA 含量的变化

Fig. 5 Changes of MDA content in leaves under drought stress

3 结论与讨论

3.1 叶片 RWC 变化特征

叶片 RWC 是植物组织水分亏缺程度反映^[20]。光叶珙桐叶中 RWC 随胁迫强度递增与胁迫时间延长逐渐降低, 24h 与 48h 低强度胁迫时叶片 RWC 下降速度都很快, 与范苏鲁等对大丽花 (*Dahlia pinnata*) 干旱胁迫研究的影响不相同, 大丽花在水分胁迫初期, 轻度胁迫下, 相对含水量与对照的差异不显著, 中度和重度胁迫下显著小于对照^[21]。而光叶珙桐在轻度胁迫时就大量丢失水分, 中度和重度胁迫下下降速度减缓差异不显著, 主要是细胞中高渗透压减少了水分的散失。

3.2 抗氧化酶系统变化特征

植物细胞内存在着活性自由基产生和清除的两个过程^[22], 细胞不断产生活性自由基, 同时又形成了清除活性氧的抗氧化系统。保护酶 SOD、POD、CAT 作为抗氧化系统中的重要酶类, 从实验结果可见, 这些保护酶在光叶珙桐对抗逆境时发挥着重要作用。植物对干旱等逆境的抵抗能力是这些

酶相互协调作用的结果^[23]。光叶珙桐遭受一定程度的干旱胁迫时，原有 SOD、POD、CAT 各种酶之相互协作关系被破坏，植物体内自由基难于像正常生长时得以清除达到产生与清除的平衡，促使植物积累更多活性自由基。

通过本研究可见，光叶珙桐幼苗在干旱胁迫下抗氧化酶活性都发生了改变，但变化幅度及进程均存在差异，与大多数研究相似^[17,20,24-28]。因光叶珙桐的 SOD 活性随胁迫时间与程度加剧而增加不明显，说明在干旱胁迫条件下光叶珙桐对外界干旱胁迫难以快速作出反应，清除活性氧自由基作用不够，难以实现对自身细胞膜的保护，致使光叶珙桐不能很好地适应干旱环境；而 POD 酶活性在 24h 时先升后降，POD 活性在轻度胁迫时达到整个处理时期的最高值又逐渐下降，说明光叶珙桐为了适应所处的胁迫环境，激发机体内部保护机制，但随着干旱胁迫强度的加大而快速下降，失活越来越严重，但到 48h 时随干旱胁迫强度递增，POD 活性增强，表明 POD 在干旱胁迫下对抵抗外界干旱有一定的作用；在轻、中、重度胁迫下，CAT 不断增多，在强度不同的干旱胁迫下起到清除危害植物自由基的作用，CAT 严重度胁迫下难以维持较高水平的活性，酶都接近 CK 水平，说明 POD 与 CAT 在干旱胁迫下具有一定的协同作用，以增加酶活性来抵抗外界干旱，均只能对抗程度较轻的干旱胁迫，严重胁迫处理下保护酶活性大幅降低，对于抵抗胁迫无能为力。总体而言，光叶珙桐幼苗对干旱的抗性差，抗氧化酶系统对自身细胞的保护能力弱，耐旱能力有限。

3.3 MDA 变化特征

膜脂氧化越严重，植株受到的伤害越大，MDA 积累越多^[27]。光叶珙桐在干旱胁迫初期，MDA 含量随干旱胁迫时间与强度增加而逐渐增多，表明干旱胁迫对光叶珙桐幼苗下因膜脂过氧化造成伤害，T1 组 MDA 含量略有上升，T2 组中度胁迫处理使光叶珙桐幼苗经过抗旱锻炼具备了部分适应性，POD 与 CAT 活性得到增强，清除了细胞中的活性氧，MDA 含量显著减少，但在处理 T3 与 T4 中，MDA 含量比 CK、T1 和 T2 明显增加。表明轻度胁迫时，在保护酶协同作用产生少量 MDA，如果出现严重程度的胁迫，保护酶活性将受到抑制^[28]。受到重度与严重程度的胁迫之后保护酶活性失活，氧含量上升导致丙二醛含量升高，对光叶珙桐造成程度较大的伤害。48h 的丙二醛含量在 4

个胁迫处理组中都比 24h 的增多，说明随胁迫时间的增加保护酶活性受到的抑制也增强，丙二醛的含量得以积累。

综上所述，光叶珙桐幼苗抗旱性能与自身保护酶活性、丙二醛含量等有着密切关系，但 SOD 酶活性整个实验中增强不显著，对外界干旱胁迫难以快速作出反应，POD 在轻度胁迫下反应灵敏，但在重度胁迫下迅速失活，CAT 对短时间、低强度的作用是行之有效的，但不能抵抗长时间与严重程度的干旱胁迫；失水过快，使光叶珙桐难以通过维持较高的叶片相对含水量来保持其 PS II 功能的完整性，无法保持光合作用较高水平；达到重度胁迫与严重胁迫致使 MDA 浓度急剧升高。总体而言，光叶珙桐对于抵抗干旱胁迫的能力较弱，比较适宜生长于水湿条件较好的环境，水因子成为光叶珙桐向干旱环境引种和自然扩张的主要限制条件。

参考文献：

- [1] 郑小江, 刘金龙, 肖浩, 等. 珙桐与光叶珙桐过氧化氢酶活性及酶谱研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2009(3): 261-263.
- [2] 常乐, 夏宜平. 中国珙桐在世界上的分布与应用现状. [EB/OL]. <http://www.doc88.com/p-156262165981.html>
- [3] 王磊, 代勋, 黄良江, 等. 三江口自然保护区的珙桐种群分布状态的研究[J]. 西部林业科学, 2009, 38(3): 72-75.
- [4] 王磊, 杨顺强, 代勋, 等. 云南大关三江口自然保护区光叶珙桐资源保护现状及对策[J]. 绿色科技, 2010(8): 10-13.
- [5] 王宁宁, 胡增辉, 沈应柏. 珙桐苗木叶片光合特性对土壤干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 101-108.
- [6] 王宁宁. 珙桐苗木光合特性对干旱、光照强度和二氧化碳浓度的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [7] 吴庆贵, 杨敬天, 邹利娟, 等. 珙桐幼苗生理生态特性对土壤干旱胁迫的响应[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(2): 119-122.
- [8] 姜瑞芳, 刘艳红. 土壤基质和水分对珙桐幼苗生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 134-139, 164.
- [9] 张云贵, 谢永红. PEG 在模拟植物干旱胁迫和组织培养中的应用(综述)[J]. 亚热带植物通讯, 1994(2): 61-64.
- [10] 戴必胜, 杨敏, 陈秀虎. 霍格兰溶液培养对水仙生长发育的影响[J]. 武汉植物学研究, 2006(5): 485-488.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司西安公司, 2000: 9-21.
- [12] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理实验指导[M].

北京:中国农业出版社,1997:152-154,161-163.

[13]张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导(4版)[M].北京:高等教育出版社,2009:100-101,125-126.

[14]董晶晶,齐淑艳,郭婷婷.PEG模拟干旱胁迫对入侵植物牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)抗氧化酶系统的影响[J].沈阳大学学报(自然科学版),2014,26(3):184-189.

[15]颜淑云,周志宇,邹丽娜,等.干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J].干旱区研究,2011,28(1):139-145.

[16]贾慧,其力木格,李特日根,等.外源 SNP 对干旱胁迫下不同马铃薯品种叶片抗氧化酶活性的影响[J].西北植物学报,2016,36(3):551-557.

[17]齐淑艳,段继鹏,郭婷婷,等.入侵植物牛膝菊种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应[J].生态学杂志,2014,33(5):1190-1194.

[18]韩蕊莲,梁宗锁.干旱胁迫下沙棘叶片细胞膜透性与渗透调节物质研究[J].西北植物学报,2003,23(1):23-27.

[19]郝敬虹,易旻,尚庆茂,等.干旱胁迫下外源水杨酸对黄瓜幼苗膜脂过氧化和光合特性的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):717-723.

[20]桑子阳,马履一,陈发菊.干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[J].西北植物学报,2011,31(1):109-115.

[21]范苏鲁,苑兆和,冯立娟,等.干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):651-657.

[22]阎秀峰,祖元刚.干旱胁迫对红松幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J].生态学报,1999,19(6):850-854.

[23]孙景宽,夏江宝,田家怡,等.干旱胁迫对沙枣幼苗根茎叶保护酶系统的影响[J].江西农业大学学报,2009,31(5):879-884.

[24]孙国荣,彭永臻,阎秀峰,等.干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J].林业科学,2003,39(1):165-167.

[25]贾文杰,王祥宁,马璐琳,等.干旱胁迫对东方百合根叶生理功能及花粉育性的影响[J].西北植物学报,2017,37(11):2194-2203.

[26]李瑞姣,陈献志,岳春雷,等.干旱胁迫对日本莱菔幼苗光合生理特性的影响[J].生态学报,2018,38(6):2041-2047.

[27]谢志玉,张文辉,刘新成.干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J].西北植物学报,2010,30(5):948-954.

[28]王春春,谢利娟,韩蕾,等.干旱处理对不同品种筋杜鹃光合特性的影响[J].西南林业大学学报,2018,38(4):70-75.

(编辑:成伶俐)

[上接第 22 页]

[8]Shin C G, An D G, Song H H, *et al.* Beauvericin and enniatins H, I and MK1688 are new potent inhibitors of human immunodeficiency virus type-1 integrase[J]. Journal of Antibiotics, 2009, 62(12):687-690.

[9]Nilanonta C, Isaka M, Kittakoop P, *et al.* Antimycobacterial and antiplasmodial cyclodepsipeptides from the insect pathogenic fungus *Paecilomyces tenuipes* BCC 1614[J]. Planta Medica, 2000, 66(08):756-758.

[10]Castlebury L A, Sutherland J B, Tanner L A, *et al.* Short communication; use of a bioassay to evaluate the toxicity of beauvericin to bacteria. [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 1999, 15(1):119-121.

[11]Meca G, Sospedra I, Soriano J M, *et al.* Antibacterial effect of the bioactive compound beauvericin produced by *Fusarium proliferatum* on solid medium of wheat. [J]. Toxicon, 2010, 56(3):349-354.

[12]Dzoyem J P, Melong R, Tsamo A T, *et al.* Cytotoxicity, antioxidant and antibacterial activity of four compounds produced by an endophytic fungus *Epicoccum nigrum*, associated with *Entada abyssinica* [J]. Revista Brasileira De Farmacognosia, 2017, 27:251-253.

[13]Xu L, Wang J, Zhao J, *et al.* Beauvericin from the en-

dophytic fungus, *Fusarium redolens*, isolated from *Dioscorea zingiberensis* and its antibacterial activity[J]. Natural Product Communications, 2010, 5:811-814.

[14]卢轩,陈刚,裴月湖.单菌多产物策略及其在药物先导化合物研发中的应用[J].沈阳药科大学学报,2011,28(8):640-645.

[15]Fang X, Yang B, Cheng Z, *et al.* Synthesis and antimicrobial activity of novel chalcone derivatives[J]. Res Chem-Interm, 2014, 40(4):1715-1725.

[16]党悦方,田娇,尚娇,等.太白山 4 种药用地衣抑菌活性研究[J].西北大学学报(自然科学版),2014,44(3):433-438.

[17]赵敏,谭钢文,唐小异,等.十种中药提取物与抗生素合用对铜绿假单胞菌最小抑菌浓度影响的体外实验[J].湖南师范大学学报(医学版),2011,8(4):80-83.

[18]韦洪娟,林贞建,李德海,等.单菌多次级代谢产物方法及其在微生物代谢产物研究中的应用[J].微生物学报,2010,50(6):701-709.

[19]林淑婷,李从发,胡晓苹,等.不同发酵方式对海南粗榧内生真菌 CH1307c 合成次级代谢产物的影响[J].热带作物学报,2016,37(7):1407-1412.

(编辑:胡光辉)