

北缘油茶对不同海拔生境的生理响应

吴 炜¹, 高小明², 胡娟娟³, 余云云⁴, 束庆龙^{4*}

(1. 安徽省农业科学院农业工程研究所, 合肥 230031; 2. 合肥幼儿师范高等专科学校, 合肥 230013;

3. 皖西学院环境与旅游学院, 六安 237012; 4. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘 要: 为了了解油茶叶片生理指标对海拔高度变化的响应关系和规律, 为北缘油茶的推广提供相应理论依据, 以舒城县晓天镇海拔 100 至 800 m 的油茶林为研究对象, 分别测定其叶片细胞活性物质含量和活性, 比较不同海拔油茶叶片生理生化指标的差异。结果表明, 随着海拔从 100 m 上升到 800 m, 油茶叶片的 MDA、Pro、可溶性糖含量分别提高了 759.01%、294.39% 和 40.93%; POD、CAT 和 SOD 3 种酶活性分别提高了 120.06%、165.32% 和 62.47%。油茶各项细胞生理活性物质指标与海拔高度相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。由此可见, 油茶的内在抗逆性随海拔升高而得到显著提高。中国油茶栽培正在向北缘地区推进, 在生产中可采取相应的措施, 例如运用水、肥、光等条件的调控等抗逆性栽培技术, 从而提高植株的抗寒性。

关键词: 油茶; 海拔; 生理指标; 抗寒性

中图分类号: S794.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)04-0655-05

Physiological responses of northern *Camellia oleifera* to the habitats in different altitudes

WU Wei¹, GAO Xiaoming², HU Juanjuan³, YU Yunyun⁴, SHU Qinglong⁴

(1. Agricultural Engineering Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. Hefei Preschool Education College, Hefei 230013; 3. College of Environment and Tourism, West Anhui University, Lu'an 237012;

4. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The relations between physiological indexes of *Camellia oleifera* leaves and altitudes were clarified to provide references for the popularization of "Northward *C. oleifera*". We studied the activities and the contents of active substances in leaves of *C. oleifera* at 800 - 1 000 m altitudes in Shucheng County, Xiaotian Town, in order to compare the differences of physiological indexes between different altitudes. As altitude increased from 100 m to 800 m, the contents of malondialdehyde (MDA), proline (Pro) and soluble sugar in *C. oleifera* leaves rose by 759.01%, 294.39% and 40.93%, respectively, and the activities of peroxidase (POD), catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) increased by 120.06%, 165.32% and 62.47%, respectively, indicating that the correlations between each cell physiological indexes of *C. oleifera* and altitudes were all at very significant levels ($P < 0.01$). The resistance of *C. oleifera* was significantly improved with the increasing altitude. A series of techniques in resistance cultivation, such as controlling the conditions of water, chemical fertilizer, light, etc., can be taken to improve the cold resistance, moving the *C. oleifera* cultivation in northern margin forward.

Key words: *Camellia oleifera*; altitude; physiological indexes; cold resistance

油茶 (*Camellia oleifera* Abel) 属山茶科 (*Theaceae*) 山茶属 (*Camellia* L.) 植物, 是中国南方特有的木本油料树种, 是与油棕、油橄榄、椰子齐名的世界四大木本油料之一。油茶大都种植在山地, 发展油茶在缓解中国日益紧张的食用油供给矛盾的

同时, 还可以置换出耕地用于种植粮食, 对于人多地少的中国粮油安全意义重大^[1]。为了扩大种植面积, 有人提出了发展中国油茶的“北移南扩”方针。安徽省地处油茶分布的最北缘地区, 油茶种植也在不断向较高纬度和较高海拔的地区推进。然而, 在

收稿日期: 2018-10-20

基金项目: 安徽省农业科学院院长基金 (17B1321) 和皖西学院 2018 年度校级自然科学研究项目 (WXZR201802) 共同资助。

作者简介: 吴 炜, 博士, 助理研究员。E-mail: 59830729@qq.com

* 通信作者: 束庆龙, 教授。E-mail: qlshu@ahau.edu.cn

油茶北移的过程中,可能存在低温冻害等气候风险。因此,掌握油茶的抗寒性及其机理,避免冻害风险的出现,是北缘油茶种植者必须关注的重要问题。

海拔是一个重要的地形因子,环境中各种生态因子例如气温、空气湿度及降雨量、太阳光及紫外线辐射强度等,随着海拔升高均发生了不同程度的变化。气温会随着海拔升高而降低,从而对植物生长产生影响^[2]。许多研究表明,海拔高度与林木的生理指标变化有紧密的相关关系。在连香树^[3]、沙拐枣^[4]、天女木兰^[5]、珙桐^[6]、冷杉^[7]和长白山白桦^[8]等多种树种上均有研究,在栽培作物上有水稻^[9]、马铃薯^[10]、藜麦^[11]、苹果^[12]、茶叶^[13]、烤烟^[14]和橡胶树^[15]等也有不同程度研究,但到目前为止,不同海拔高度对油茶生理生化特性的影响尚鲜见报道。

气温是影响油茶生长发育的重要因素之一,普通油茶作为经济树种栽培的下限年平均气温要求在14℃以上,在这一临界温度之上的地方栽培油茶,油茶的经济性能才可能得到有效体现。安徽省舒城县晓天镇年均气温为13.6℃,按海拔每升高100 m温度下降0.6℃计算,海拔800 m处年均气温仅为9.4℃,该温度条件可能是目前所知的油茶栽培范围内的最寒冷区域。作者以舒城县晓天镇海拔100 m至800 m的油茶为研究对象,测定其叶片丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)、可溶性糖含量,以及过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性,拟揭示油茶生理生化指标对海拔高度的响应情况,以期为今后改进北缘油茶的栽培和抚育措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采集地及供试品种

为了更好地反映较高海拔和纬度等低温环境对油茶生长发育以及生理指标的影响,本试验材料采集于中国北缘油茶海拔最高的地区—安徽省舒城县晓天镇,该地位于大别山区东北坡,地处东经116°31',北纬31°01'~31°05',属于北亚热带湿润季风气候区,无霜期200 d,年平均气温13.6℃,年均降雨量1 574 mm,海拔最高处达到810 m以上。

供试品种为大别山1号,树龄约42年生。

1.2 样品采集方法

采样时间选择在12月下旬,一天内全部采样完毕。采用MAGELLAN explorer 500型GPS测量海拔高度并选择同一坡向阳坡,分别在位于100、200、300、400、500、600、700和800 m海拔高度采集样品。每级海拔高度随机选定5株样株,共选样株

40株,分别采集各组植株树冠中、上部四周的当年生枝条,保存于密封袋中,带回实验室待测。

1.3 测定方法

(1) 丙二醛(MDA)含量:取1 g鲜重叶片将其剪碎,加10%三氯乙酸(TCA) 2 mL和少量石英砂,研磨;进一步加入8 mL TCA充分研磨,匀浆以4 000 r·min⁻¹离心10 min,去上清液,采用硫代巴比妥酸反应法^[12]测定MDA含量。

(2) 脯氨酸(Pro)含量:准确称取待测叶片鲜重0.5 g,加入5 mL 3%的磺基水杨酸溶液研磨,匀浆移至离心管中,在沸水浴中提取10 min,冷却,3 000 r·min⁻¹,取上清液,采用酸性茚三酮法^[16]测定。

(3) 可溶性糖含量:采用蒽酮法^[12]测定。取新鲜油茶容器苗叶片0.1 g,剪碎后放入含10 mL蒸馏水的试管中,封口后在沸水中浸提30 min,浸提2次,提取液稀释定容至25 mL。吸取0.5 mL提取液(对照加蒸馏水)于试管中,再加1.5 mL蒸馏水,计算公式:

$$\text{可溶性糖含量}(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})=(C/a \times V \times n)/W$$

C—标准方程求得糖量(μg); V—提取液总体积(mL); n—稀释倍数; a—吸取样品液体积(mL); W—样品鲜重(g)。

(4) 过氧化物酶(POD)活性:取鲜重1.0 g叶片,加入10 mL 20 mmol·L⁻¹ pH值为7.8的磷酸缓冲液,研磨成匀浆,离心机离心4 000 r·min⁻¹,取上清液,采用愈创木酚^[17]显色法进行测定。

(5) 过氧化氢酶(CAT)活性:取0.5 g鲜重叶片,注入62.5 mmol·L⁻¹磷酸缓冲液(体积为2 mL),研磨至匀浆,于4℃、1 200 r·min⁻¹离心30 min,取上清液,采用过氧化氢反应法进行测定^[18-19]。

(6) 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定:称取叶片0.5 g,剪碎放在研钵中,加入少量石英砂和0.05 mol·L⁻¹磷酸缓冲液2 mL研磨成浆,转移到2 mL离心试管中,用离心机离心10 min,提取上清液。采用氮蓝四唑光化还原法进行测定^[20]。

1.4 统计分析方法

试验数据分析采用Microsoft Excel 2007和SPSS17.0软件进行数据统计分析和图表处理,所有数据和平均值的偏离程度均用标准差表示,用单因素方差分析结合Duncan新复极差法对组间差异进行分析。

2 结果与分析

2.1 丙二醛(MDA)含量的比较

MDA的产生量是鉴别逆境伤害的指标之一^[21]。

如图 1 所示, 海拔 100 m 处 MDA 的含量为 $0.527 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在 400 m 处为 $1.279 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, MDA 含量升高了 242.69%; 当海拔为 800 m 处 MDA 的含量为 $4.520 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, MDA 含量比海拔 100 m 处提升高达 759.01%。

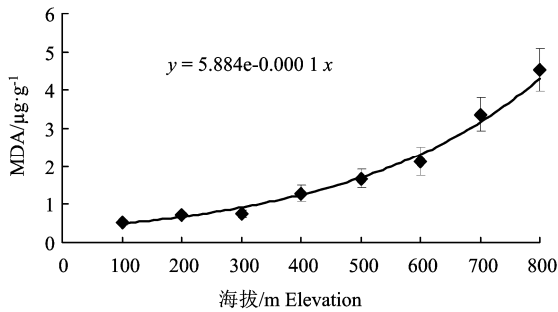


图 1 不同海拔油茶叶片丙二醛含量

Figure 1 MDA contents in *C. oleifera* leaves among different elevations

通过单因素方差分析和多重比较结果表明, 不同海拔油茶叶片丙二醛含量差异极显著 ($P < 0.01$); 不同海拔油茶叶片丙二醛含量两两之间, 除了 300 与 400 m、300 与 500 m、400 与 500 m 差异不显著 ($P > 0.05$), 其余两两之间差异均达到显著 ($P < 0.05$)。

2.2 游离脯氨酸(Pro)含量的比较

在低温逆境下植物可通过积累大量脯氨酸来增加细胞的渗透调节能力, 降低质膜受冻害的程度^[22]。不同海拔油茶叶片游离脯氨酸平均含量如图 2 所示。海拔 100 m 处油茶叶片脯氨酸含量为 $279.667 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 海拔 400 m 处为 $438.333 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 比海拔 100 m 处增加了 56.73%, 而海拔 800 m 处的 Pro 含量为 $823.334 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 比海拔 100 m 处的增加了 194.39%。

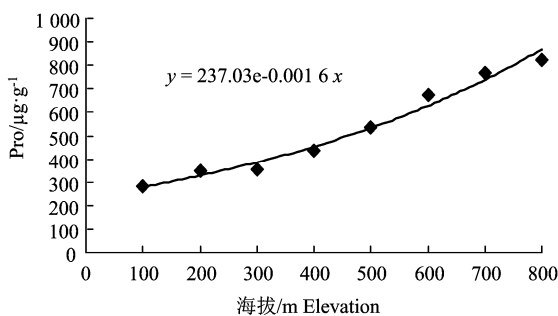


图 2 不同海拔油茶叶片游离脯氨酸含量

Figure 2 Free Pro contents in *C. oleifera* leaves from different elevations

单因素方差分析表明, 不同海拔油茶叶片脯氨酸含量差异极显著 ($P < 0.01$)。多重比较结果表明, 不同海拔油茶叶片脯氨酸含量, 海拔 100 与 200 m、700 与 800 m 差异显著 ($P < 0.05$); 海拔 200 与 300 m 差异不显著 ($P > 0.05$); 其余两两之间差异均极显著 ($P < 0.01$)。

2.3 可溶性糖含量的比较

可溶性糖通过降低细胞质的冰点防止细胞内结冰^[23], 对高海拔植物组织抵御低温具有积极作用, 可使植物安全地度过低温季节。由图 3 可以看出, 海拔 100 m 处油茶叶片的可溶性糖含量为 6.19%, 海拔 400 m 处的含量为 7.87%, 而海拔 800 m 处的含量提高到 8.71%。海拔 400 m 处可溶性糖含量比海拔 100 m 处提高了 27.14%, 海拔 800 比 100 m 处提高了 40.71%。

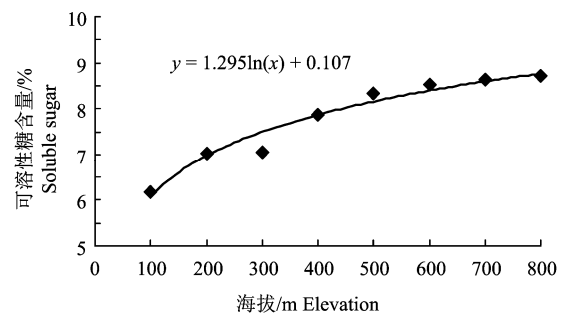


图 3 不同海拔油茶叶片可溶性糖含量

Figure 3 Soluble sugar contents in *C. oleifera* leaves from different elevations

由单因素方差分析可知, 不同海拔油茶叶片可溶性糖含量差异极显著 ($P < 0.01$)。多重比较结果表明, 不同海拔油茶叶片可溶性糖含量, 除了海拔 200 与 300 m、500 与 700 m、500 与 800 m, 其余两两之间均差异极显著 ($P < 0.01$)。

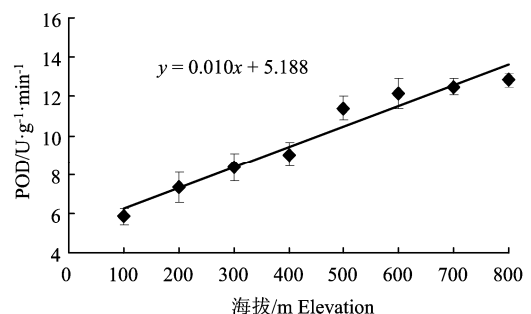


图 4 不同海拔油茶叶片过氧化物酶活性

Figure 4 POD activity in *C. oleifera* leaves from different elevations

2.4 过氧化物酶(POD)活性的比较

POD 广泛存在于植物体, 主要存在于叶绿体中, 是一种重要的自由基清除酶, 该酶催化 H_2O_2 氧化, 以清除 H_2O_2 对细胞生物功能分子的破坏作用, 从而起到对细胞的保护作用^[14]。如图 4 所示, 油茶叶片过氧化物酶活性随着海拔的升高而提高, 相比 100 m 处, 800 m 处的 POD 活性提高了 120.06%。

方差分析表明, 不同海拔油茶叶片过氧化物酶活性差异极显著 ($P < 0.01$)。经多重比较结果表明, 叶片 POD 活性两两之间, 300 与 400 m、600 与 700

m、600与800 m、700与800 m差异不显著 ($P>0.05$); 其余两两之间差异均极显著 ($P<0.01$)。

2.5 过氧化氢酶 (CAT) 活性的比较

CAT 属于血红蛋白酶, 其重要的功能是在叶中去除光呼吸时产生的过氧化氢, 催化体内积累的过氧化氢分解为水和分子氧, 从而减少过氧化氢对植物组织的伤害。由图 5 可知, 随着海拔的升高, CAT 活性呈现明显的上升趋势, 海拔从 100 m 升高到 800 m, 油茶叶片 CAT 的活性增加了 165.32%。

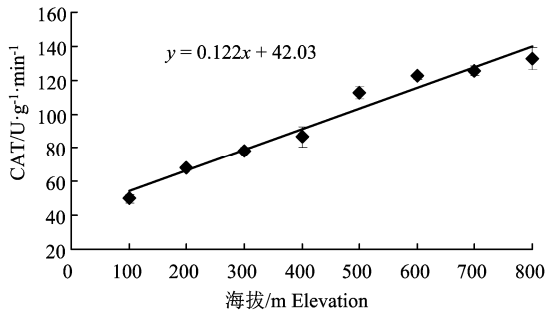


图 5 不同海拔油茶叶片过氧化氢酶活性

Figure 5 CAT activity in *C. oleifera* leaves from different elevations

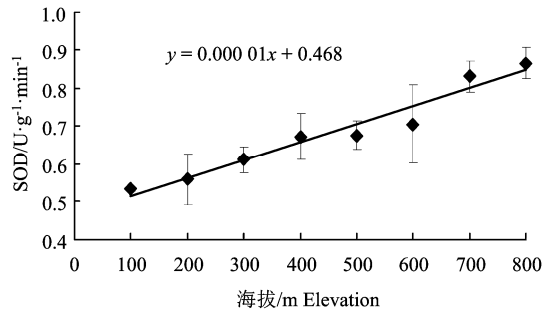


图 6 不同海拔油茶叶片超氧化物歧化酶活性

Figure 6 SOD activity in *C. oleifera* leaves from different elevations

方差分析表明, 不同海拔油茶叶片 CAT 活性差异极显著 ($P<0.01$)。经多重比较结果表明, 不同海拔油茶叶片 CAT 活性, 200 与 300 m、300 与 400 m、500 与 600 m、600 与 700 m、600 与 800 m、700 与 800 m 差异不显著 ($P>0.05$); 其余两两之间差异均极显著 ($P<0.01$)。

2.6 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的比较

SOD 是植物细胞保护性酶系统中的重要酶类, 其活性大小可以反映细胞对逆境的适应能力。由图 6 可以看出, 海拔从 100 m 升高到 800 m, 油茶叶片 SOD 活性升高了 62.47%。

经方差分析, 不同海拔油茶叶片 SOD 活性差异极显著 ($P<0.01$)。经多重比较结果表明, 不同海拔油茶叶片超氧化物歧化酶活性, 海拔 100 与 600 m、300 与 700 m、400 与 800 m、500 与 800 m 差异显著 ($P<0.05$); 海拔 100 与 700 m、100 与 800 m、200

与 700 m、200 与 800 m、300 与 800 m 差异极显著 ($P<0.01$); 其余两两之间均差异不显著 ($P>0.05$)。

3 讨论与结论

MDA 含量是衡量膜脂过氧化程度的一个重要指标, 是脂质过氧化作用的产物, 其含量多少可代表膜损伤程度的大小^[24]。海拔从 100 m 上升到 800 m, 油茶叶片 MDA 含量提高了 759.01%, 这说明在这次寒流到来之后, 随着海拔的上升, 低温对油茶叶片产生的伤害明显有加重的趋势。

低温胁迫下植物体内可溶性糖、Pro 含量与植物抗寒性之间存在相关性^[25], 可溶性糖和 Pro 都是植物体内重要的渗透调节物质, 可溶性糖的积累能提高细胞的保水能力, 防止活性氧对膜脂和蛋白质的过氧化作用^[26-28]。游离脯氨酸是稳定植物体内物质代谢的重要因素^[29], 在低温逆境下植物可通过积累大量脯氨酸来增加细胞的渗透调节能力, 降低质膜受冻害的程度^[30]。许多研究认为, 温度受海拔影响最大^[31-34], 随着海拔增加, 月平均气温降低, 日温差变得较大^[26-27]。本研究显示, 随着海拔从 100 m 升高至 800 m, 油茶叶片中的 Pro 和可溶性糖都升高了 194.39% 和 40.93%, 提高了油茶的抗寒能力。

Wildi 等^[35]认为, 植物体内保护性物质对海拔升高的响应有着各自不同的模式, POD、CAT、SOD 是植物细胞内重要的 3 类抗氧化酶, 能分解体内有毒性作用的自由基和 H_2O_2 , 对维持细胞内的活性氧水平具有重要的作用。本研究中, 随着海拔的升高, 油茶中的 POD、CAT 和 SOD 活性的变化规律大致相同, 都呈现出随着海拔升高而增大的趋势。当海拔从 100 m 升高至 800 m 时, 3 种酶活性分别提高了 120.06%、165.32% 和 62.47%, 这说明随着海拔升高和温度的降低, 油茶为了适应环境, 提高了自我保护的能力。

廖兴利等^[3]分析了四川甘洛马鞍山自然保护区不同海拔梯度连香树生理指标, 结果显示 SOD 活性、可溶性糖含量均随着海拔升高呈下降趋势; 随着海拔从 100 m 升高至 800 m 时, MDA 和 Pro 含量分别升高了 3.98 倍和 4.43 倍。朱军涛等^[4]研究了昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔的生理响应, 结果发现其 MDA、Pro 含量随着海拔上升而减小, 分别减小了 184.06% 和 290.21%; SOD、POD 及 CAT 活性中, 只有 CAT 活性随海拔上升而升高, 其余 2 种酶的活性均随着海拔的升高而降低。林小虎等^[5]以生长在河北老岭自然保护区不同海拔的天女木兰叶为对象, 研究了天女木兰叶中 SOD、POD

活性以及 MDA 含量的变化, 结果发现天女木兰叶中 SOD、POD 活性以 MDA 含量随海拔梯度的变化规律相同, 都会呈现先降低再升高的趋势。梁建萍^[36]和 Polle^[37]等相关研究结果与其类似。而本研究中显示在油茶分布北缘地区冬季自然低温条件下, 随着海拔的升高, 油茶叶片的 MDA、POD、可溶性糖含量都明显升高, SOD、POD 和 CAT 3 种酶的活性也得到显著提高, 这与许多前人的研究结论有显著不同, 这可能与本研究海拔高度差不大有关。

本研究发现, 海拔从 100 m 升高到 800 m, 油茶的 MDA、可溶性糖、Pro 含量以及 SOD、POD、CAT 活性都有不同程度的升高。个别数据点偏离拟合曲线, 可能是因为不同海拔高度的植株其他生境条件对植株的影响, 如土壤条件等。

本研究表明, 油茶的内在抗逆性随海拔升高而提高, 这是油茶在环境选择压力下长期适应的结果。在油茶的栽培生产中可采取相应的栽培措施, 例如在相对海拔较高的地方选择抗逆性良种、建立育苗基地和运用抗逆性栽培技术, 这对油茶北移工程的成功具有重要意义。

参考文献:

- [1] 束庆龙. 油茶栽培技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013.
- [2] TRANGUILLINI W 著. 李文华, 廖俊国, 译. 高山林线生理生态[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.
- [3] 廖兴利, 黎云祥, 权秋梅, 等. 连香树生理生化物质随海拔的变化及其适应性研究[J]. 广西植物, 2011, 31(5): 641-645, 574.
- [4] 朱军涛, 李向义, 张希明, 等. 昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔生境的生理生态响应[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 602-609.
- [5] 林小虎, 秘树青, 郭振清, 等. 不同海拔天女木兰叶抗氧化酶活性与光合色素含量[J]. 经济林研究, 2011, 29(2): 60-64.
- [6] 张绍先, 苏智先, 高菊, 等. 不同海拔对珙桐叶片生理指标的影响[J]. 四川林业科技, 2013, 34(2): 10-15.
- [7] 刘济铭, 幸福梅, 杨小林, 等. 色季拉山不同海拔梯度冷杉幼苗的基本特征及生理指标变化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(5): 623-630.
- [8] 周驿之, 程艳霞, 樊莹, 等. 不同生境幼苗移植到同一生境下对环境因子的响应: 以长白山白桦幼苗生理性状和形态为例[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(11): 6-12, 88.
- [9] 孙婷, 刘涛, 靳百慧, 等. 不同海拔水稻耐冷特性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2016, 31(3): 387-391.
- [10] 叶宏达, 达布希拉图, 沙本才, 等. 海拔梯度对马铃薯光合特性和荧光特性的影响[J]. 作物杂志, 2017(5): 93-99.
- [11] 刘文瑜, 李健荣, 黄杰, 等. 海拔对藜麦苗期生理指标的影响[J]. 甘肃农业科技, 2018(9): 17-21.
- [12] 曹永华, 金高明, 刘兴禄, 等. 不同海拔红富士苹果叶片生理及果实品质的研究[J]. 西北农业学报, 2016, 25(12): 1821-1828.
- [13] 丁园, 张宝林. 不同海拔高度下庐山茶园土壤性质及茶叶生化指标的变化[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(6): 959-962.
- [14] 李俊, 张静, 李伟, 等. 不同海拔高度对膜下小苗移栽烤烟生长生理的影响[J]. 农产品加工, 2018(6): 48-52.
- [15] 田耀华, 周会平, 罗虎, 等. 海拔梯度对橡胶树生理特性及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(4): 623-629.
- [16] 李玲, 李娘辉, 蒋素梅, 等. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [17] 高保山, 董燕南, 王保柱. 树木生命力的电特性分析[J]. 河北农业大学学报, 1997, 20(1): 71-73.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [19] 郝建军, 刘延吉. 植物生理实验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
- [20] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [21] 潘瑞炽, 潘瑞炽, 王小菁, 等. 植物生理学[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [22] 张富玮, 张东亚, 李建贵. 低温胁迫对蓝靛果忍冬渗透调节物质的影响[J]. 经济林研究, 2017, 35(2): 127-131.
- [23] PALONEN P. Relationship of seasonal changes in carbohydrates and cold hardiness in canes and buds of three red raspberry cultivars[J]. J Am Soc Hortic Sci, 1999, 124(5): 507-513.
- [24] TROLL W, LINDSLEY J. A photometric method for the determination of proline[J]. J Biol Chem, 1955, 215(2): 655-660.
- [25] 李小玲, 华智锐, 祝颖, 等. 低温胁迫对高山杜鹃生理特性影响的研究[J]. 江西农业学报, 2018, 30(5): 68-72.
- [26] 李小燕, 丁丽萍. 自然越冬状态下四翅滨藜抗寒性生理指标的动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 11-12.
- [27] 王小媚, 任惠, 刘业强, 等. 低温胁迫对杨桃品种抗寒生理生化指标的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 270-275.
- [28] 赵喜亭, 蒋丽微, 宋萍萍, 等. 怀黄菊微滴玻璃化超低温保存再生植株的生理和同工酶分析[J]. 河南农业科学, 2016, 45(5): 111-114; 120.
- [29] 赵文昊, 姚云峰, 郭月峰. 柠条锦鸡儿细根生长与游离脯氨酸含量关系研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2018, 55(5): 1121-1126.
- [30] 邓凤飞, 杨双龙, 龚明. 外源 ABA 对低温胁迫下小桐子幼苗脯氨酸积累及其代谢途径的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(2): 221-226.
- [31] 康华靖, 刘鹏, 徐根娣, 等. 大盘山自然保护区香果树对不同海拔生境的生理生态响应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 865-872.
- [32] REINERS W A, HOLLINGER D Y, LANG G E. Temperature and evapotranspiration gradients of the white mountains, new Hampshire, USA[J]. Arct Alp Res, 1984, 16(1): 31.
- [33] KORNER C. Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems [M]. 2nd ed. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [34] CRIDDLE R S, HOPKIN M S, MCARTHUR E D, et al. Plant distribution and the temperature coefficient of metabolism[J]. Plant Cell Environ, 1994, 17(3): 233-243.
- [35] WILDI B, LUTZ C. Antioxidant composition of selected high alpine plant species from different altitudes[J]. Plant Cell Environ, 1996, 19(2): 138-146.
- [36] 梁建萍, 牛远, 谢敬斯, 等. 不同海拔华北落叶松针叶三种抗氧化酶活性与光合色素含量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1414-1419.
- [37] POLLE A, RENNENBERG H. Field studies on Norway spruce trees at high altitudes: II. Defence systems against oxidative stress in needles[J]. New Phytol, 1992, 121(4): 635-642.