网络出版时间:2025-07-18 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.01.010

# 云南松幼苗生长及生理生化特性对干旱复水的响应

刘成尧,梁思懿,吴俊文,顾建尧,段怀娇
(西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224)

[摘 要] 【目的】探究不同程度干旱胁迫下云南松幼苗对复水的响应,揭示干旱胁迫云南松幼苗在复水环境下的适应策略,为云南松造林与管理提供理论依据。【方法】以一年生云南松幼苗为试验材料,通过盆栽试验,设置正常水分(CK)、轻度干旱(LD)、中度干旱(MD)和重度干旱(SD)4 个处理,持续干旱 30 d 后复水,复水 7 d 后测算不同干旱胁迫处理云南松幼苗的株高、地径、生物量等生长指标,以及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和丙二醛(MDA)、可溶性蛋白含量等生理指标,计算其表型可塑性指数,并对各指标进行主成分分析。【结果】①与正常水分(CK)处理相比,复水后 LD 和 MD 处理云南松幼苗的株高和地径均无显著差异,而 SD 处理云南松幼苗的株高和地径分别显著降低了 21.09%和 19.06%。随干旱胁迫程度的加重,复水后云南松幼苗细根生物量、细根和粗根生物量占比以及根冠比均呈上升趋势,云南松幼苗各器官生物量的分配符合最优先分配理论。②复水后云南松幼苗针叶仍具有较高酶活性。与正常水分(CK)处理相比,复水后 LD 处理云南松幼苗针叶可溶性糖含量较 CK 显著下降,MD 处理无显著变化;LD 和 MD 处理云南松幼苗针叶的 MDA 含量均与 CK 无显著差异;SD 处理云南松幼苗针叶可溶性糖和 MDA 含量分别显著提高了 45.35%和 88.72%,表明 LD 和 MD 处理云南松幼苗受到的损伤可在复水后快速恢复,且恢复程度远远大于 SD 处理。③茎生物量、根冠比、细根生物量、SOD 活性、可溶性蛋白和 MDA 含量的表型可塑性指数均较大。主成分分析结果表明,云南松幼苗地径、株高、游离脯氨酸、总生物量及 POD、SOD、CAT 活性的特征向量较大。【结论】复水后不同干旱胁迫处理云南松幼苗生长的恢复程度具有显著差异,轻度和中度干旱胁迫对云南松幼苗造成的伤害可在复水后快速恢复,且恢复程度远大于重度干旱胁迫。云南松幼苗的地径、株高、生物量以及 SOD、POD、CAT 活性和 MDA、游离脯氨酸、可溶性蛋白质含量为响应干旱复水的主要指标。

[关键词] 云南松;干旱复水;干旱胁迫;森林培育
[中国分类号] S791.257 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)01-0099-10

# Response of growth and physiological-biochemical characteristics in *Pinus yunnanensis* seedlings to drought and re-watering

LIU Chengyao, LIANG Siyi, WU Junwen, GU Jianyao, DUAN Huaijiao
(*College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*)

**Abstract**: 【Objective】 The study aimed to investigate the responses of *Pinus yunnanensis* seedlings to re-watering under different degrees of drought stress, and their adaptive strategies of *P. yunnanensis* seedlings during post-drought rehydration, thereby providing a theoretical foundation for afforestation and sustainable management of *P. yunnanensis*. 【Method】 A pot experiment was conducted on one-year-old *P. yunnanensis* seedlings under four drought treatments: normal water (CK), light drought (LD), moderate drought (MD) and severe drought (SD). After 30 days of continuous drought stress, seedlings were rewa-

[收稿日期] 2024-09-29 [修回日期] 2024-11-27
[基金项目] 国家自然科学基金项目(31960306)
[作者简介] 刘成尧(1999—),男,江苏丰县人,在读硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:chengyao19999@163.com
[通信作者] 吴俊文(1990—),男,云南嵩明人,副教授,硕士生导师,主要从事植物生理生态研究。E-mail:wujunwen@swfu.edu.cn

tered for 7 days. Growth parameters, specifically the height, ground diameter and biomass of *P. yunnanensis* seedlings, along with physiological traits, such as the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA) and soluble protein were measured. Phenotypic plasticity indices were calculated, followed by the principal component analysis on each index. 【Result】① Compared with normal water (CK) treatment, no significant differences were observed in plant height and ground diameter of *P. yunnanensis* seedlings treated with LD and MD after rewate-ring. Whereas the plant height and ground diameter of *P. yunnanensis* seedlings treated with SD were significantly lower than those of CK by 21.09% and 19.06%, respectively. With the increase of drought degree, the fine root biomass, proportions of fine root and thick root biomass, and root/shoot ratio of *P. yunnanensis* seedlings increased after re-watering, aligning with the optimal partitioning theory for biomass allocation. ② The enzyme activities in the needles of *P. yunnanensis* seedlings retained high after re-watering. The content of soluble sugar in needles of *P. yunnanensis* seedlings treated with LD was significantly lower than that of CK, but no significant change was observed in MD treatment. Compared to CK, there was no significant difference in MDA content of LD and MD treatments. SD-treated seedlings exhibited 45.35% and 88.72% higher soluble sugars and MDA than CK, respectively, indicating incomplete recovery under SD versus rapid resilience in LD and MD treatments. ③ Phenotypic plasticity indices were notably high for stem biomass, root-shoot ratio, and fine root biomass, SOD activity, soluble protein content, and MDA levels. Principal component analysis showed that eigenvetors of ground diameter, plant height, free proline, total biomass, POD and CAT and SOD activity of *P. yunnanensis* seedlings were higher. 【Conclusion】 *P. yunnanensis* seedlings exhibited significant divergence in growth recovery under different drought treatments. Seedlings subjected to light and moderate drought stress exhibited rapid recovery after re-watering, with recovery degree significantly surpassing that under severe drought. Ground diameter and height, biomass allocation, activities of SOD, POD, and CAT, changes in MDA, proline, and soluble protein contents emerged are the main indicators of response to drought-rewatering adaptability in *P. yunnanensis*.

**Key words**: *Pinus yunnanensis*; drought re-watering; drought stress; silviculture

当今全球气候变化显著,干旱频率日益增加,降雨分配失衡,甚至出现旱涝交替现象[1]。作为植物常见的非生物胁迫,干旱严重限制着植物的生长[2]。水分是对树木生长影响最大的限制性因子之一,干旱事件给树木生存和生长发育造成最直接的影响就是水分缺失[3]。干旱复水后,植物在形态、生理生化等方面会发生一系列适应性变化,这可以反映植物自身的抗旱能力和复水后的恢复能力[4]。已有研究表明,植物在轻度和中度干旱胁迫后产生的伤害,可在复水后予以抵消甚至还会出现补偿效应[5]。植物干旱后复水能促进株高、叶片加速生长,以及干物质积累速率增加等,这是植物对环境变化的适应[6-7]。也有研究表明,干旱胁迫解除后植物形态和生长速率变化要在一周左右才能显著表现出来[8]。因此,研究植物在干旱复水过程中的生理机制,对分析其抗旱能力差异和再生与重建,以及提高农林业植物生产力具有重要意义[9]。

处于逆境胁迫时,植物会通过改变抗旱基因、保护酶活性、内源激素以及渗透调节物质含量等来缓解逆境胁迫[10]。植物体内的酶活性能在一定程度上反映其抗逆性,保护酶通过清除自由基来抑制脂质过氧化作用,从而保护植物细胞膜不受伤害[11]。已有研究表明,随着干旱胁迫时长的增加,云南松和栀子苗木的相对电导率,叶绿素、丙二醛、脯氨酸、可溶性糖含量以及超氧化物歧化酶活性等均有不同程度上升,但变化幅度因干旱胁迫程度以及渗透调节物质类型不同而有差异[12-14]。也有研究表明,在干旱后期杜仲(*Eucommia ulmoides*)幼苗可溶性蛋白质和可溶性糖含量显著升高,但复水后出现不同程度的下降[15]。因此,研究植物对干旱复水的响应,有助于了解其对逆境的适应机制。

云南松(*Pinus yunnanensis*)是中国西南地区的特有树种之一,分布在四川西部、云南、贵州西部及广西西北部等地区,是云南省主要森林建群种[16]。云南松具有适应性强、耐干旱瘠薄、木材用途广等优点,是荒山造林以及水土流失治理的重要树种[17]。

其松脂作为多种工业原料，在建筑、医药、食品和香料等多个行业广泛应用，云南松是西南地区最重要的采松脂树种[18-19]。多年来，学者开展了大量关于干旱胁迫对云南松影响的研究[20-21]，但关于云南松对干旱复水后的响应机制尚未见报道。为此，本研究分析了不同干旱胁迫程度下的云南松幼苗复水后生长和生理生化特性的变化，探究云南松对干旱复水的响应，以期为云南松造林与管理提供理论依据。

# 1　材料与方法

## 1.1　试验地概况

试验地位于西南林业大学树木园（102°46′E，25°03′N），地处亚热带高原季风气候区，海拔 1 964 m，气候温和，全年无霜期 240 d，年平均气温 16.5 ℃，年平均降水量 1 035 mm，年平均相对湿度 67%。该地区土壤类型为红壤土。搭建大棚温度 19～38 ℃，空气相对湿度 24%～49%。

## 1.2　试验材料

云南松良种（编号为云 R-SS-PY-035-2020）由双柏县马龙河林场提供。2022 年 4 月将 150 株 8 月龄云南松幼苗运至西南林业大学树木园，将其移栽至口径 20.5 cm、地径 14.5 cm、高 18.5 cm 的塑料花盆中进行适应性种植。每盆定植 1 株，每盆装入 3.5 kg 混合土（红河建水山区向阳坡红壤土与昆明市嵩明县松针营养腐殖土按质量比 3∶2 混合。试验土壤体积质量为 1.001 g/cm$^3$，pH 6.65，全碳、全氮、全磷含量分别为 3.26，5.98 和 0.62 g/kg），花盆底部放置托盘，幼苗移栽后保持其土壤水分含量为田间持水量，以确保幼苗尽快成活。

## 1.3　试验设计

干旱胁迫试验于 2022 年 10 月 1 日开始，10 月 30 日结束，共持续 30 d，采用盆栽试验模拟干旱条件，干旱梯度的划分参考吴俊文等[22]的方法，设置 4 个水分梯度处理，即正常水分（CK）、轻度干旱（light drought，LD）、中度干旱（medium drought，MD）和重度干旱（severe drought，SD）。设定各干旱梯度的土壤含水量分别为田间持水量的 90%±5%，75%±5%，60%±5%，45%±5%，即实际含水量分别保持为 19.13%～21.38%，15.75%～18.00%，12.38%～14.63%，9.00%～11.25%。用土壤水分测定仪测定土壤实际含水量，用称重法控制水分，每天 17:00 称量盆栽质量，根据目标质量进行控水或浇水。持续干旱结束后（11 月 1 日）进行复水处理，恢复并保持土壤含水量均为正常水分（CK），11 月 8 日结束复水后进行取样。每个处理取 4 棵云南松幼苗，采用全株收获法并按叶、茎、粗根和细根进行分类标记。取样时，取各处理云南松幼苗顶端长短一致的新鲜针叶，用锡纸包裹后放入液氮罐中冷冻保存，用于生理指标的测定。

## 1.4　测定指标及方法

1.4.1　生长指标　用卷尺测量云南松幼苗的株高，用游标卡尺测定其地径。每个处理取 4 株云南松幼苗，采用全株收获法分叶、茎、粗根和细根烘干后称各器官干质量以获得其生物量，计算总生物量、各器官生物量占比和根冠比。

各器官生物量占比＝（各器官生物量/总生物量）×100%；

根冠比＝（粗根生物量＋细根生物量）/（叶生物量＋茎生物量）。

1.4.2　生理指标　采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶（SOD）活性，愈创木酚显色法测定过氧化物酶（POD）活性，紫外可见分光光度法测定过氧化氢酶（CAT）活性，硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）含量，考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量，磺基水杨酸法测定游离脯氨酸含量，苯酚比色法测定可溶性糖含量[23]。

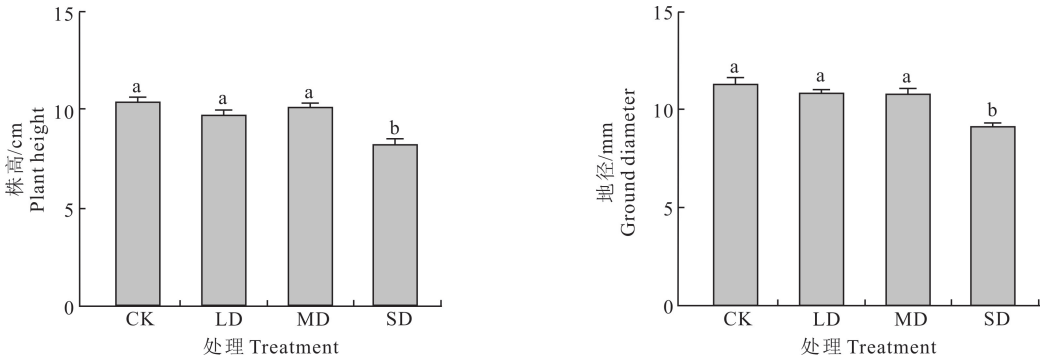
## 1.5　数据处理

试验数据均用“平均值±标准差”表示，采用 Excel 2016 软件进行试验数据整理，用 SPSS 27.0 统计分析软件对试验数据进行单因素方差分析（One-way ANOVA）和主成分分析，用 Graphpad pism 9.5 软件绘图，用可塑性指数法[24]计算云南松幼苗的表型可塑性指数。

# 2　结果与分析

## 2.1　干旱复水对云南松幼苗生长的影响

干旱复水对云南松幼苗生长的影响如图 1 所示。由图 1 可知，与正常水分（CK）相比，干旱复水对云南松幼苗的株高和地径生长均有影响，但干旱胁迫程度不同，复水对其幼苗生长的影响也不同。复水后，SD 处理云南松幼苗的株高和地径分别为 8.23 cm 和 9.17 mm，比正常水分（CK）处理显著降低了 21.09%和 19.06%（$P<0.05$），LD 和 MD 处理云南松幼苗的株高和地径与 CK 无显著差异。上述结果表明，复水后 LD 和 MD 处理云南松幼苗株高和地径的恢复程度远大于 SD 处理。




CK. 正常水分;LD. 轻度干旱;MD. 中度干旱;SD. 重度干旱。

图柱上标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

CK. Normal water content; LD. Light drought; MD. Moderate drought; SD. Severe drought.

Different lowercase letters above columns indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 干旱复水对云南松幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of drought-rewatering on the growth of *Pinus yunnanensis* seedlings

## 2.2 干旱复水对云南松幼苗生物量的影响

2.2.1 生物量积累 干旱复水对云南松幼苗生物量积累的影响如图 2 所示。由图 2 可知,与正常水分(CK)相比,干旱复水对云南松幼苗各器官生物量均有影响。复水后 SD 处理云南松幼苗叶的生物量为 3.57 g/株,较正常水分(CK)处理显著降低了 30.67%;MD 和 SD 处理云南松幼苗茎的生物量分别为 2.41 和 2.02 g/株,较正常水分(CK)处理显著降低了 30.35%和 41.62%;LD 处理云南松幼苗粗根的生物量为 1.10 g/株,较 CK 处理显著降低了 23.08%;LD 和 MD 处理云南松幼苗细根生物量与 CK 无显著差异,而 SD 处理细根生物量为 0.98 g/株,较 CK 显著提高了 27.27%;LD 和 SD 处理云南松幼苗总生物量显著低于 CK 处理。

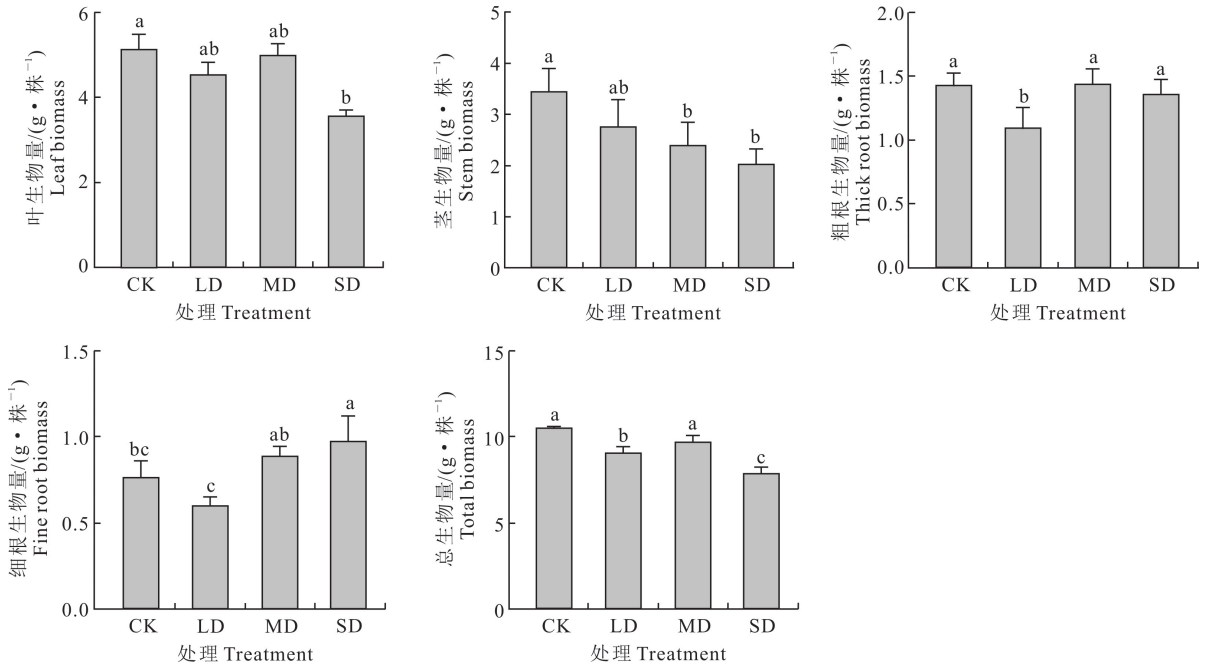



图 2 干旱复水对云南松幼苗生物量积累的影响

Fig. 2 Effects of drought-rewatering on biomass accumulation in *Pinus yunnanensis* seedlings

2.2.2 生物量分配 干旱复水对云南松幼苗生物量分配的影响如图 3 所示。由图 3 可知,复水后,不同干旱胁迫处理云南松幼苗叶和茎生物量占比均与 CK 无显著差异;SD 处理云南松幼苗粗根生物量占比为 17.21%,较 CK 显著提高了 30.18%($P<0.05$);MD 和 SD 处理云南松幼苗细根生物量占比分别为 9.19%和 12.33%,较 CK 显著提高了 29.44%和 73.66%;MD 和 SD 处理云南松幼苗根冠比分别为 0.32 和 0.42,较 CK 显著提高了 23.08%和 61.54%。

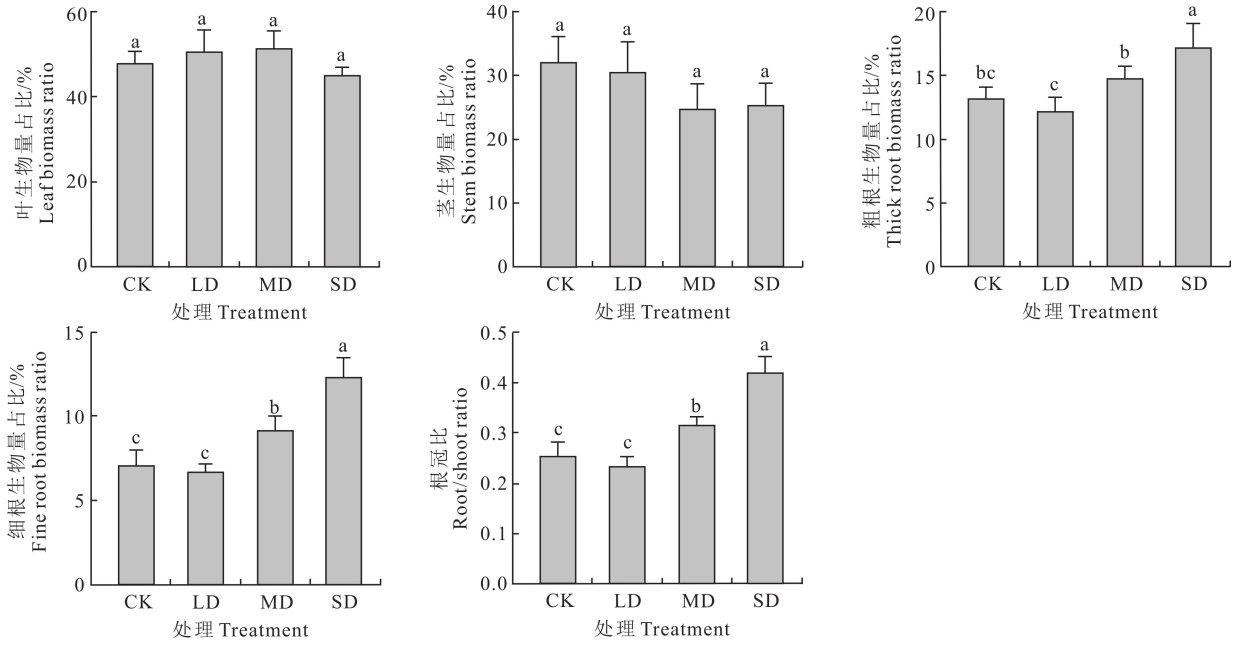



图 3　干旱复水对云南松幼苗生物量分配的影响

Fig. 3　Effects of drought-rewatering on biomass allocation in *Pinus yunnanensis* seedlings

### 2.3　干旱复水对云南松幼苗针叶抗氧化酶活性的影响

干旱复水对云南松幼苗针叶抗氧化酶活性的影响如图 4 所示。由图 4 可知，复水后，不同干旱胁迫处理云南松幼苗针叶抗氧化酶活性存在显著差异（$P<0.05$），LD 处理云南松幼苗针叶 CAT 活性为 0.48 U/g，比 CK 显著降低了 9.43%；MD 处理云南松幼苗针叶 CAT 活性为 0.81 U/g，比 CK 显著提高了 50.94%。复水后，LD、MD 和 SD 处理云南松幼苗针叶 POD 活性分别为 33.83，65.59 和 25.03 U/g，较 CK 分别显著提高了 71.73%，232.94%和 27.06%；LD、MD 和 SD 处理云南松幼苗针叶 SOD 活性分别为 260.28，162.87 和 180.38 U/g，较 CK 分别显著提高了 263.77%，127.63%和 152.1%。上述结果表明，干旱复水后云南松幼苗针叶仍具有较高的抗氧化酶活性。

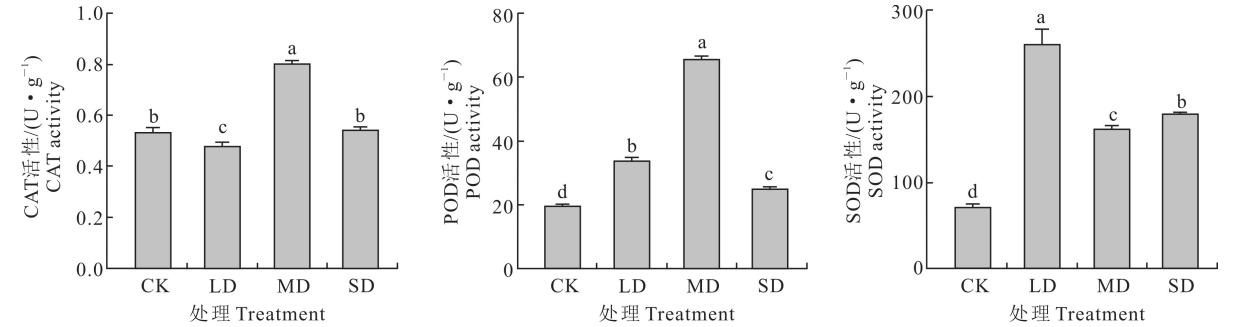



图 4　干旱复水对云南松幼苗针叶抗氧化酶活性的影响

Fig. 4　Effects of drought-rewatering on antioxidant enzyme activities in needles of *Pinus yunnanensis* seedlings

### 2.4　干旱复水对云南松幼苗针叶渗透调节物质含量的影响

由图 5 可知，干旱复水后，不同程度干旱胁迫处理云南松幼苗针叶渗透调节物质和丙二醛含量有显著差异（$P<0.05$）。其中 LD、MD 和 SD 处理云南松幼苗针叶的游离脯氨酸含量分别为 17.96，15.86 和 10.39 μg/g，较 CK 显著降低了 14.92%，24.87%和 50.78%；不同干旱胁迫处理云南松幼苗针叶的可溶性蛋白含量与 CK 无显著差异。干旱复水后，LD 处理云南松幼苗针叶的可溶性糖含量为 88.33 mg/g，较 CK 显著降低了 24.3%；SD 处理云南松幼苗针叶的可溶性糖含量为 169.61 mg/g，较 CK 显著提高了 45.35%。干旱复水后，LD 和 MD 处理云南松幼苗针叶的 MDA 含量与 CK 无显著差异，而 SD 处理云南松幼苗针叶的 MDA 含量为 26.59 nmol/g，较 CK 显著提高了 88.72%（$P<$

0.05)。上述结果表明,云南松幼苗在轻度和中度干旱胁迫下受到的损伤可在复水后快速恢复,且恢复程度大于重度干旱胁迫。

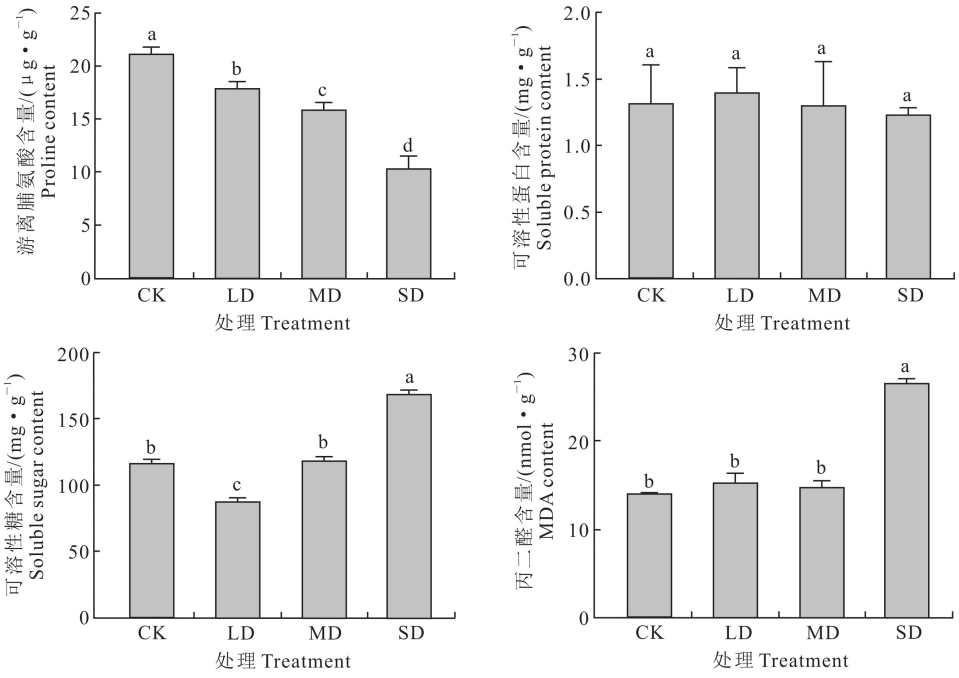



图 5 干旱复水对云南松幼松幼苗渗透调节的影响

Fig. 5 Effects of drought-rewatering on osmotic regulation of *Pinus yunnanensis* seedlings

## 2.5 干旱复水对云南松幼苗各指标表型可塑性指数的影响

由图 6 可知,干旱复水后,不同程度干旱胁迫处理云南松幼苗各生长指标和生理指标的表型可塑性指数为 0.22～0.77。在生长指标中,茎生物量的表型可塑性指数最大(0.55),其次是根冠比和细根生物量,地径的表型可塑性指数最小(0.22);在生理指标中,可溶性蛋白含量的表型可塑性指数最大(0.77),其次是 SOD 活性和 MDA 含量,可溶性糖含量的表型可塑性指数最小(0.45)。表明云南松幼苗主要通过改变茎生物量、根冠比和细根生物量以及 SOD 活性和可溶性蛋白、MDA 含量来响应干旱复水环境的变化。

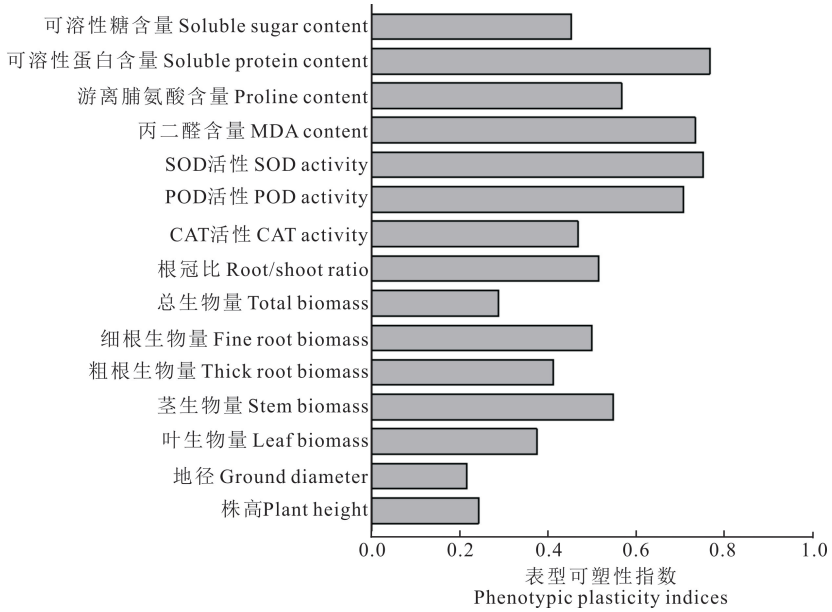



图 6 云南松幼苗各指标在干旱复水环境下的表型可塑性指数

Fig. 6 Phenotypic plasticity indices of *Pinus yunnanensis* seedlings under drought-rewatering

### 2.6　干旱复水后云南松幼苗各指标的主成分分析

对云南松幼苗生长指标和生理指标进行主成分分析，结果如表 1 所示。由表 1 可知，3 个主成分的累计方差贡献率为 87.013%，说明这 3 个主成分可以代替干旱复水后云南松幼苗生长的所有信息。第 1 主成分的方差贡献率为 49.178%，其中地径、株高、游离脯氨酸含量、总生物量的特征向量较大；第 2 主成分的方差贡献率为 22.153%，其中 POD 和 CAT 活性的特征向量较大；第 3 主成分的方差贡献率为 15.682%，其中 SOD 活性的特征向量较大。该结果表明，地径、株高、游离脯氨酸含量、总生物量及 POD、SOD、CAT 活性为云南松幼苗响应干旱复水的主要指标。

**表 1　干旱复水环境下云南松幼苗各指标的主成分分析**

Table 1　Principal component analysis of seedling indexes of Pinus yunnanensis under drought re-watering environment

| 指标 Indicators | 主成分 1 Principal component 1 | 主成分 2 Principal component 2 | 主成分 3 Principal component 3 |
|---|---|---|---|
| 株高 Plant height | 0.968 | 0.158 | −0.008 |
| 地径 Ground diameter | 0.986 | −0.050 | 0.043 |
| 叶生物量 Leaf biomass | 0.892 | 0.255 | −0.009 |
| 茎生物量 Stem biomass | 0.741 | −0.309 | −0.386 |
| 粗根生物量 Thick biomass | 0.011 | 0.655 | −0.641 |
| 细根生物量 Fine biomass | −0.580 | 0.610 | −0.373 |
| 总生物量 Total biomass | 0.923 | 0.187 | −0.306 |
| 根冠比 Root/shoot ratio | −0.937 | 0.243 | 0.063 |
| 过氧化氢酶活性 CAT activity | 0.125 | 0.964 | 0.187 |
| 过氧化物酶活性 POD activity | 0.162 | 0.788 | 0.580 |
| 超氧化物歧化酶活性 SOD activity | −0.326 | −0.285 | 0.849 |
| 丙二醛含量 MDA content | 0.574 | 0.691 | 0.426 |
| 游离脯氨酸含量 Proline content | 0.945 | −0.242 | −0.105 |
| 可溶性蛋白含量 Soluble protein content | 0.094 | −0.122 | 0.221 |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content | −0.821 | 0.241 | −0.468 |
| 特征值 Eigenvalues | 7.377 | 3.323 | 2.352 |
| 方差贡献率/% Variance contribution rate | 49.178 | 22.153 | 15.682 |
| 累计贡献率/% Cumulative contribution rate | 49.178 | 71.331 | 87.013 |

## 3　讨　论

干旱胁迫影响植物生长发育，植物在不同干旱程度或干旱时间后复水会表现出不同的恢复状态[25-26]。本研究中，干旱复水后，除 SD 处理云南松幼苗的株高和地径显著低于 CK 外，LD 和 MD 处理云南松幼苗的株高和地径均与 CK 无显著差异，表明 LD 和 MD 处理对云南松幼苗造成的伤害可在复水后快速恢复，且恢复程度大于 SD。干旱复水后，LD 处理云南松幼苗的粗根生物量显著低于 CK，但 SD 处理云南松幼苗的细根生物量显著高于 CK，这可能是由于在严重干旱环境下，云南松幼苗为了汲取土壤深处的水分而需要更发达的根系，因此积累了更多的生物量，这与 WU 等[27]对白刺花（*Sophora davidii*）的研究结果一致。在逆境环境下，植物会通过改变生物量的分配模式来补偿资源短缺，从而提高获取资源的能力[28]。本研究中，不同干旱胁迫处理复水后云南松幼苗叶生物量和茎生物量占比均与 CK 无显著差异，SD 处理复水后云南松幼苗粗根生物量占比显著高于 CK，MD 和 SD 处理复水后云南松幼苗细根生物量占比和根冠比均显著高于 CK，表明在逆境胁迫下，云南松幼苗根作为最受限制的器官，将得到资源的最优先配置，符合最优先分配理论[28]，这与徐飞等[29]对刺槐（*Robinia pseudoacacia*）的研究结果一致。

SOD、POD 和 CAT 是植物细胞抵御活性氧伤害的重要保护酶，干旱胁迫会导致植物体内的保护酶活性升高，并且在复水后较长一段时间内仍保持较高的活性[15,30]。在本研究中，干旱复水后 LD、MD 和 SD 处理云南松幼苗的 POD 和 SOD 活性以及 MD 处理的 CAT 活性仍显著高于 CK，这与李春燕等[30]对侧柏（*Platycladus orientalis*）的研究结果一致。受到逆境胁迫时，植物细胞代谢受阻产生活性氧，当活性氧超过一定阈值就会导致膜脂过氧化，产生丙二醛（MDA），因此丙二醛含量可以用来衡量植物的受损程度[31]。在本研究中，干旱复水后 LD 和 MD 处理云南松幼苗的 MDA 含量与 CK 无显著差异，而 SD 处理云南松幼苗的 MDA 含量显著高于 CK。表明轻度和中度干旱胁迫对云南松幼苗造成的损伤可在复水后快速恢复，这与 TIAN 等[5]对拟

南芥(*Arabidopsis thaliana*)的研究结果相似。植物体内渗透物质含量的增加,可以调节渗透势和保持平衡,提高植物对逆境的适应能力[10]。已有研究表明,在干旱胁迫环境下,植物会通过主动积累可溶性糖和可溶性蛋白等物质来提高细胞液浓度,维持细胞膨胀压,防止原生质过度脱水,以维持正常的生命活动[32]。在本研究中,干旱复水后,云南松幼苗针叶游离脯氨酸含量均显著低于 CK,可溶性蛋白含量与 CK 无显著差异,只有 SD 处理云南松幼苗针叶可溶性糖含量仍显著高于 CK。表明干旱胁迫下云南松幼苗积累的渗透物质可在复水后得到有效缓解,SD 处理云南松幼苗针叶可溶性糖含量仍显著高于 CK,也间接说明轻度和中度干旱胁迫对云南松幼苗造成的伤害可在复水后快速恢复,且恢复程度大于重度干旱胁迫,这与金思雨等[33]对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的研究结果相似。

植物在生长过程中不断与周围环境进行选择和被选择性适应,最终形成生理和形态上的适应[34]。表型可塑性是植物适应环境和应对逆境的重要机制,不仅可以反映植物的生长发育状态,还可以反映植物对环境的适应能力[35]。本研究中,干旱复水环境下云南松幼苗的茎生物量、根冠比、细根生物量、可溶性蛋白和 MDA 含量以及 SOD 活性的表型可塑性指数较大,说明云南松幼苗主要通过改变茎生物量、根冠比、细根生物量、可溶性蛋白和 MDA 含量以及 SOD 活性响应干旱复水环境的变化。主成分分析结果表明,云南松幼苗地径、株高、游离脯氨酸含量、总生物量及 POD、SOD、CAT 活性的特征向量较大,表明上述指标为云南松幼苗干旱复水时的主要恢复指标。

## 4 结 论

1)与正常水分(CK)相比,复水后 SD 处理云南松幼苗的株高、地径和叶生物量显著降低。随干旱胁迫程度的加重,复水后云南松幼苗的细根生物量和粗根生物量占比以及根冠比呈上升趋势,各器官生物量的分配符合最优先分配理论。

2)复水后 LD、MD 和 SD 处理云南松幼苗针叶的 POD 和 SOD 活性以及 MD 处理的 CAT 活性仍显著高于 CK,SD 处理云南松幼苗的 MDA 含量显著高于 CK。干旱复水后云南松幼苗针叶游离脯氨酸含量均显著低于 CK,可溶性蛋白含量与 CK 无显著差异,SD 处理云南松幼苗针叶可溶性糖含量显著高于 CK。

3)干旱复水环境下,云南松幼苗的茎生物量、根冠比、细根生物量、SOD 活性以及可溶性蛋白和 MDA 含量的表型可塑性指数较大。主成分分析结果表明,云南松幼苗地径、株高、游离脯氨酸含量、总生物量及 POD、SOD、CAT 活性的特征向量较大。表明地径、株高、生物量,POD、SOD、CAT 活性和 MDA、游离脯氨酸、可溶性蛋白含量为云南松幼苗响应复水的主要指标。

## [参考文献]


[1] ZHANG Z H,CAO B L,GAO S,et al. Grafting improves tomato drought tolerance through enhancing photosynthetic capacity and reducing ROS accumulation[J]. Protoplasma,2019,256(4):1013-1024.

[2] RUBIN R L,VAN GROENIGEN K J,HUNGATE B A. Plant growth promoting rhizobacteria are more effective under drought: a meta-analysis[J]. Plant and Soil,2017,416(1):309-323.

[3] 刘元玺,王丽娜,吴俊文,等. 云南松幼苗非结构性碳水化合物对干旱胁迫的响应及其激素调控[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(1):60-70.
LIU Y X,WANG L N,WU J W,et al. Response of non-structural carbohydrates of *Pinus yunnanensis* seedlings to drought stress and the hormonal regulation mechanism[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2024,52(1):60-70.

[4] ZHUANG L,CHEN Y N. Physiological responses of three contrasting plant species to groundwater level changes in an arid environment[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2006,48(5):520-526.

[5] TIAN K,WANG Y,CHEN D,et al. Influence of drought stress and post-drought rewatering on phytoremediation effect of *Arabidopsis thaliana*[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2022,108(3):594-599.

[6] 高志红,陈晓远,罗远培. 冬小麦分蘖期复水对根、冠生长及其相互关系的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(5):145-150.
GAO Z H,CHEN X Y,LUO Y P. Effects of rewatering during tillering stage after previous water stress on winter wheat root and shoot growth and their relations[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2007,25(5):145-150.

[7] 梁鹏,邢兴华,周琴,等. α-萘乙酸对干旱和复水处理下大豆幼苗生长和光合作用的影响[J]. 大豆科学,2011,30(1):50-55.
LIANG P,XING X H,ZHOU Q,et al. Effect of NAA on growth and photosynthetic characteristic of soybean seedling under drought and re-watering[J]. Soybean Science,2011,30(1):50-55.

[8] 陈晓远,罗远培. 土壤水分变动对冬小麦生长动态的影响[J]. 中国农业科学,2001,34(4):403-409.
CHEN X Y,LUO Y P. The influence of fluctuated soil mois-

ture on growth dynamic of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica，2001，34(4)：403-409.

[9] CHEN J，DONG T F，DUAN B L，et al. Sexual competition and N supply interactively affect the dimorphism and competiveness of opposite sexes in *Populus cathayana*[J]. Plant，Cell & Environment，2015，38(7)：1285-1298.

[10] 欧立军，陈波，邹学校. 干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J]. 生态学报，2012，32(8)：2612-2619.
OU L J，CHEN B，ZOU X X. Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper[J]. Acta Ecological Sinica，2012，32(8)：2612-2619.

[11] 刘玉英，王三根，徐泽，等. 不同茶树品种干旱胁迫下抗氧化能力的比较研究[J]. 中国农学通报，2006，22(4)：264-268.
LIU Y Y，WANG S G，XU Z，et al. Comparison study on the antioxidation ability of different tea varieties in drought stress [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2006，22(4)：264-268.

[12] 孙琪，蔡年辉，陈诗，等. 干旱胁迫对云南松苗木生理特征的影响[J]. 西南林业大学学报，2016，36(3)：18-22.
SUN Q，CAI N H，CHEN S，et al. Effect of drought stress on physiological characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings [J]. Journal of Southwest Forestry University，2016，36(3)：18-22.

[13] 罗孟容. 两种土壤基质下干旱胁迫对栀子生长及生理的影响[D]. 长沙：中南林业科技大学，2021.
LUO M R. Effects of drought stress on the growth and physiology of *Gardenia jasminoides* in tow soil substrates[D]. Changsha：Central South University of Forestry & Technology，2021.

[14] 刘元玺，吴俊文，王丽娜，等. 云南松幼苗生长及生理生化特性对持续干旱胁迫的响应[J/OL]. 分子植物育种，2023：1-16.(2023-05-19)[2024-12-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230518.1319.004.html.
LIU Y X，WU J W，WANG L N，et al. The growth and physiological and biochemical characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings in response to persistent drought stress[J/OL]. Molecular Plant Breeding，2023：1-16.(2023-05-19)[2024-12-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230518.1319.004.html.

[15] 何凤，刘攀峰，王璐，等. 干旱胁迫及复水对杜仲苗生理特性的影响[J]. 植物生理学报，2021，57(3)：661-671.
HE F，LIU P F，WANG L，et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Eucommia ulmoides* seedling[J]. Plant Physiology Journal，2021，57(3)：661-671.

[16] 邓喜庆，皇宝林，温庆忠，等. 云南松林在云南的分布研究[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2013，35(6)：843-848.
DENG X Q，HUANG B L，WEN Q Z，et al. A research on the distribution of *Pinus yunnanensis* forest in Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)，2013，35(6)：843-848.

[17] 李贤伟. 云南松研究现状及动态[J]. 四川农业大学学报，1995，13(3)：309-314，363.
LI X W. A review of researches on *Pinus yunnanensis*[J]. Journal of Sichuan Agricultural University，1995，13(3)：309-314，363.

[18] 王瑞苓，吴春华，刘祥义，等. 不同生长状况对云南松产脂的影响[J]. 安徽农业科学，2021，49(3)：116-118.
WANG R L，WU C H，LIU X Y，et al. Effects of different growth index on resin production of *Pinus yunnanensis* Franch[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2021，49(3)：116-118.

[19] YU C L，CHEN C W，GONG Q H，et al. Preparation of polymer microspheres with a rosin moiety from rosin ester，styrene and divinylbenzene[J]. Polymer International，2012，61(11)：1619-1626.

[20] SHEN J Y，LI Z S，GAO C J，et al. Radial growth response of *Pinus yunnanensis* to rising temperature and drought stress on the Yunnan Plateau，Southwestern China[J]. Forest Ecology and Management，2020，474：118357.

[21] ZHAO Z J，WANG L N，LIU Y X，et al. Effects of drought on non-structural carbohydrates and C，N，and P stoichiometric characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings[J]. Journal of Forestry Research，2023，35(1)：94-106.

[22] 吴俊文，刘珊，李吉跃，等. 干旱胁迫下广东石漠化地区造林树种光合和耗水特性[J]. 生态学报，2016，36(11)：3429-3440.
WU J W，LIU S，LI J Y，et al. Photosynthetic and water consumption of tree species utilized for afforestation of rocky desert in Guangdong Province [J]. Acta Ecological Sinica，2016，36(11)：3429-3440.

[23] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
GAO J F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing：Higher Education Press，2006.

[24] PANDITHARATHNA P A K A K，SINGHAKUMARA B M P，GRISCOM H P，et al. Change in leaf structure in relation to crown position and size class for tree species within a Sri Lankan tropical rain forest[J]. Botany，2008，86(6)：633-640.

[25] CHAVES M M，MAROCO J P，PEREIRA J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant [J]. Functional Plant Biology，2003，30(3)：239-264.

[26] 杜建雄，侯向阳，刘金荣. 草地早熟禾对干旱及旱后复水的生理响应研究[J]. 草业学报，2010，19(2)：31-38.
DU J X，HOU X Y，LIU J R. A study on physiological response to drought and re-watering treatments in Kentucky bluegrass[J]. Acta Protoculture Sinica，2010，19(2)：31-38.

[27] WU F Z，BAO W K，LI F L，et al. Effects of drought stress and N supply on the growth，biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings[J]. Environmental and Experimental Botany，2007，63(1)：248-255.

[28] POORTER H，NAGEL O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light，$CO_2$，nutrients and water：a quantitative review[J]. Functional

Plant Biology,2000,27(6):595-607.

[29] 徐飞,郭卫华,徐伟红,等.刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J].北京林业大学学报,2010,32(1):24-30.
XU F,GUO W H,XU W H,et al. Effects of water stress on morphology,biomass allocation and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University,2010,32(1):24-30.

[30] 李春燕,王进鑫,薛设.干旱及复水对侧柏幼苗叶片抗氧化酶活性的影响[J].西北林学院学报,2015,30(2):33-37,58.
LI C Y,WANG J X,XUE S. Effect of drought and rewatering on the activity of protect enzymes in the leaves of *Platycladus orientalis* seedings[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(2):33-37,58.

[31] 胡杨,李钢铁,李星,等.干旱胁迫对细穗柽柳幼苗生长和生理生化指标的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(6):43-50.
HU Y,LI G T,LI X,et al. Growth and physiological index of *Tamarix leptostachys* Bunge seedlings under soil drought stress[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2021,23(6):43-50.

[32] 赵英,赵凯丽,朱宇林,等.干旱胁迫与复水对喀斯特地区红背山麻杆生长及生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(8):59-68.
ZHAO Y,ZHAO K L,ZHU Y L,et al. Effects of drought stress and re-watering on growth and physiology characteristics of *Alchornea trewioides* in Karst areas[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2023,51(8):59-68.

[33] 金思雨,彭祚登.刺槐苗木碳水生理参数对长期干旱及复水的响应变化[J].北京林业大学学报,2023,45(8):43-56.
JIN S Y,PENG Z D. Changes in response of carbon and water physiological parameters of *Robinia pseudoacacia* seedlings to long-term drought and rehydration[J]. Journal of Beijing Forestry University,2023,45(8):43-56.

[34] BRADSHAW A D. Unravelling phenotypic plasticity:why should we bother? [J]. New Phytologist,2006,170(4):644-648.

[35] NICOTRA A B,ATKIN O K,BONSER S P,et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate[J]. Trends in Plant Science,2010,15(12):684-692.

(责任编辑:陈丽)

(上接第98页)

[55] 郭滨德,王晓春,张远东.阈值温度和积温对川西高原林线岷江冷杉径向生长的影响[J].生态学报,2019,39(3):895-904.
GUO B D,WANG X C,ZHANG Y D. Effects of accumulated and threshold temperatures on the radial growth of *Abies faxoniana* in the alpine timberline,Western Sichuan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):895-904.

[56] SALOMÓN R L,PETERS R L,ZWEIFEL R,et al. The 2018 European heatwave led to stem dehydration but not to consistent growth reductions in forests [J]. Nature Communications,2022,13(1):28.

[57] 张鹏翼,梁宇,马天啸,等.长白山区域森林主要树种迁移动态对气候变化的滞后响应[J].生态学杂志,2022,41(9):1674-1682.
ZHANG P Y,LIANG Y,MA T X,et al. The migration of main tree species lags behind climate change in Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(9):1674-1682.

(责任编辑:窦春蕊)