

马金平, 格桑旺堆, 郝国辉. 树葆装置对汾西花椒抗寒抗旱生理指标的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1): 123-129.

MA J P, Gesangwangdui, HAO G H. The effect of tree preservation device on the physiological indicators of cold and drought resistance of *Zanthoxylum bungeanum* in fenxi[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 123-129.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.14

树葆装置对汾西花椒抗寒抗旱生理指标的影响

马金平¹, 格桑旺堆², 郝国辉¹

(1. 山西农业大学 林学院, 山西 晋中 030801; 2. 西藏自治区水土保持局, 西藏 拉萨 850000)

摘要:为探究树葆装置对山西省大红袍花椒树冬春季抗寒抗旱性能的影响,以山西省4年生大红袍花椒树上的1年生花椒枝条为试验材料,在传统浇灌冬水培土措施(对照)、布设安装树葆装置下分别对上一年度12月至次年4月的气温、土层深度0~20、20~40 cm的土壤质量含水量及花椒枝条的可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、超氧化物歧化酶、相对电导率等生理指标进行测定。结果表明,随着气温的降低,对照和树葆处理的花椒枝条的5个生理指标均升高,气温与2个处理的生理指标数值呈极显著负相关。与对照相比,树葆装置具有相对稳定的土壤质量含水量,土壤质量含水量与2个处理的各生理指标数值的相关性不显著。树葆处理的花椒枝条中可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、超氧化物歧化酶、相对电导率在不同时间测定的数值均低于同期传统措施的数值,但除相对电导率测定值与同期传统措施数值间具有显著差异外,其余4个生理指标的差异均不显著。综上,安装树葆装置的土壤质量含水量较为稳定,树葆措施比对照显示出稍强的抗寒抗旱作用。

关键词:花椒;树葆装置;抗寒;抗旱;生理指标

中图分类号:S573.9

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2026)01-0123-07

The Effect of Tree Preservation Device on the Physiological Indicators of Cold and Drought Resistance of *Zanthoxylum bungeanum* in Fenxi

MA Jinping¹, Gesangwangdui², HAO Guohui¹

(1. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Water and Soil Conservation Bureau of Xizang Autonomous Region, Lasa 850000, China)

Abstract: To investigate the effect of tree preservation devices on the cold and drought resistance of *Zanthoxylum bungeanum* Dahongpao in Fenxi county of Shanxi province during winter and spring, in this study, 1-year-old branches on 4-year-old *Zanthoxylum bungeanum* Dahongpao trees were used as experimental materials. Under traditional winter watering and soil cultivation measures (control) and the installation of tree preservation devices, the air temperature from December to April, soil moisture content at depths of 0-20 cm and 20-40 cm, as well as physiological indicators such as soluble sugar, soluble protein, free proline, superoxide dismutase, and relative conductivity of *Zanthoxylum bungeanum* branches were measured and analyzed. The results showed that with the decrease of air temperature, all five physiological indicators of *Zanthoxylum bungeanum* branches in both the control and tree preservation treatments increased, and there was an extremely significant negative correlation between air temperature and physiological indicator values. Compared with the control, the tree preservation device had a relatively stable soil mass moisture content, and the correlation between the values of various physiological indicators in the two treatments and soil mass moisture content was weak. The values of soluble sugar, soluble protein, free proline, superoxide dismutase, and relative conductivity measured at different times in the tree preservation treatment were all lower than those of the traditional measure during the same period. Except for the significant difference in relative conductivity, the differences in the other four physiological indicators were not significant. Overall, the soil mass moisture content of the installation of tree preservation devices were relatively stable, and the tree preservation measures showed slightly stronger cold and drought resistance compared to the control.

收稿日期: 2025-04-04

基金项目: 山西农业大学博士科研启动(2021BQ13)

作者简介: 马金平, 讲师, 博士, 主要从事水土保持及应用研究, E-mail: sxaumjp@sxau.edu.cn

Keywords: *Zanthoxylum bungeanum*; tree preservation device; cold resistance; drought resistance; physiological indicator

冷害胁迫包括低温(0~15℃)和冷冻(<0℃),是一种重要的环境制约因素,易诱发花椒细胞膜系统受损及代谢紊乱,导致越冬期抽条甚至植株死亡,严重影响花椒的成活率与幼树建成^[1]。山西省汾西县属于黄土高原残垣沟壑区,生态脆弱,是以旱作农业为主的山区农业县,年均降水量仅 551 mm,且降水分布不均,冬春季节干旱多风,叠加低温冻害与倒春寒等极端气候事件,极易诱发花椒等经济林木发生严重的生理性干旱与越冬抽条,导致幼树成活率低下,严重制约了当地产业的建园成效。花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)适应性强,萌蘖性强,耐寒、耐旱^[2],作为当地重要的抗旱经济树种,其生长与产量高度依赖温度条件和土壤水分。而传统树木防寒或保墒措施,如覆盖地膜^[3]、土壤冬灌处理^[4]、修剪枝条^[5]、喷保护剂^[6]等存在水资源利用率低、保护时效短等局限性。

早在 20 世纪 70 年代,科学家已发现植物在受到低温或干旱胁迫时,通常会被迫产生一些生理变化来应对外界伤害^[7]。BATES 等^[8]在 1973 年研究发现,水分胁迫时游离脯氨酸的快速积累,可达到正常值的 100 倍,并提出茚三酮比色的简易测定方法。GIANNOPOLITIS 等^[9]在 1977 年提出超氧化物歧化酶(SOD)能催化超氧化物自由基转化成氧气和过氧化氢。经过大量研究总结,科学家得出可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸作为植物主要的渗透调节物质^[10-11],在植物遇到低温胁迫时,会逐渐累积,在胞液中浓度上升,降低渗透势,从而提高植物抗寒性,同时促进水分吸收。植物在干旱、寒冷等逆境胁迫下会做出氧化应激反应,增强抗氧化酶活性,产生大量的抗氧化酶,如 SOD、丙二醛(MDA)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)等,反映植物受胁迫程度^[12-14]。CHEN 等^[15]研究发现,四季茶幼苗抗寒性的 6 个关键差异生理指标之一为电导率。

近年来,新型节水技术“树葆”装置通过雨水收集与微区水分调控,在干旱地区植被恢复中展现出巨大的潜力(专利号 CN2016210512180)^[16]。该装置结合地表覆盖与地下蓄水功能,理论上可缓解土壤蒸发与植物需水间的矛盾。然而,现有研究多集中于苗木阶段,对成龄经济林木,比如花

椒在越冬及萌芽期的生理响应机制尚不明确,尤其是树葆装置对土壤水分运移机理与植物抗逆生理的协同调控效应缺乏实证数据。

本研究以 4 年生大红袍花椒树为试验对象,对比分析树葆装置与传统措施对以下关键科学问题的影响:冬季至萌芽期土壤水分的时空分布特征;极端低温及倒春寒条件下花椒枝条的渗透调节与抗氧化能力;装置集水保墒效能与植物生理适应的相关性。为黄土高原经济林木节水抗逆栽培提供技术支撑,并为干旱区生态恢复设备的优化设计提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西省临汾市汾西县季家庄村(北纬 36°26',东经 111°34'),为典型的黄土高原残垣沟壑区,以山地和丘陵为主。温带大陆性气候,四季分明,气候特点为冬季少雪严寒,春季多风干旱,历年平均降雨量为 551 mm,年均日照时数为 2 600 h,年平均气温为 10.1℃,极端最低温度为 -19.2℃,全年无霜期 187 d。

1.2 试验材料

供试树种为 4 年生大红袍花椒树,供试材料为 1 年生花椒枝条,花椒树的株行距为 3 m×4 m。

树葆装置购自运城市高新科技有限公司,如图 1 所示。

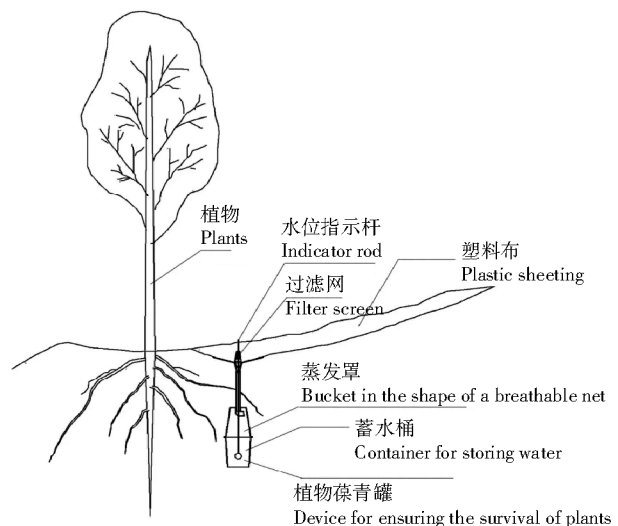


图 1 树葆装置示意

Fig.1 Schematic diagram of Shubao device

树葆装置由面积为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的塑料布和植物葆青罐组成。塑料布平铺在地表,起到收集雨水、防止蒸发、保温保湿的作用。植物葆青罐埋入地面以下。塑料布收集的雨水蓄入植物葆青罐。植物葆青罐总高 40 cm ,上部带有孔洞的蒸发罩高 20 cm ,可以将多余的水分渗透到土壤中;葆青罐下部蓄水桶高 20 cm ,不带孔洞,起到蓄积雨水的作用。

1.3 试验设计

试验随机选取30棵4年生大红袍花椒树,其中15棵花椒树在2022年10月安装树葆装置,另外15棵在2022年12月12日采用传统的浇水和培土措施(对照)。树葆装置安装在花椒树水平距离 0.75 m 处理设树葆蓄水桶,然后以蓄水桶为圆心,将周围土地平整成外高内低的斜坡,塑料覆盖在平整好的土地上,四边用土压实。安装树葆装置时,面积为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的塑料布铺设在花椒树的一侧,去掉四周压土的宽度,集水面积大约在 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。当地传统浇水培土措施在每年12月土壤上冻前,浇冻水,增强其保墒抗冻效果,7 d后在根部覆土 $30\sim 40\text{ cm}$,围成土堆,对根茎部保温。

1.4 测定指标及方法

土壤取样在距离花椒树干水平距离 50 cm 处,用土钻分别在土壤深度 $0\sim 20$ 、 $20\sim 40\text{ cm}$ 取样。树葆装置的土壤取样需揭开花椒树和植物葆青罐之间覆盖的塑料布,取样后将多余的土壤填入孔洞,并整平汇水坡面,覆盖好塑料布。植物取样在土壤取样的3棵花椒树上,随机选择长势相同、健康

的1年生花椒枝条,剪下花椒枝条进行测定,每个处理重复3次。

气温采用当地气象资料。采用烘干称重法测定土壤质量含水量。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[17]。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[18]。游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮比色法测定^[18]。SOD活性采用氮蓝四唑法测定^[18]。相对电导率采用电导率法测定。

1.5 数据分析

采用Excel 2024软件整理数据,Origin 2021绘制图表,用SPSS 29.0软件描述对照和树葆处理各阶段生理指标的均值和标准差,温度和土壤质量含水量与2个处理的生理指标相关性采用双变量皮尔逊双尾相关性分析,采用独立样本 t 检验对树葆处理和对照的各生理指标进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 气温的变化

图2为山西省临汾市汾西县2022年12月至2023年4月连续5个月的气温变化,其中,2022年12月至次年2月为持续的低温,最低气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,土壤属于冻土。2—3月气温逐步回暖,平均气温达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,4月的平均气温达到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最高气温可达 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,但是在4月19日至4月26日有倒春寒天气,平均气温突然降至 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时花椒枝叶复苏,很多枝条上已经开花,受此寒害的影响,可能导致花椒产量降低、品质下降,甚至绝收等不利影响。

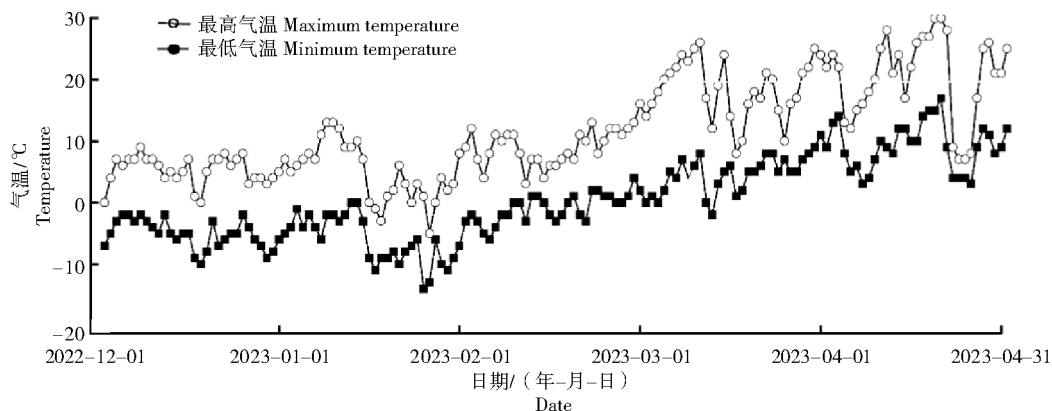


图2 2022年12月至2023年4月气温

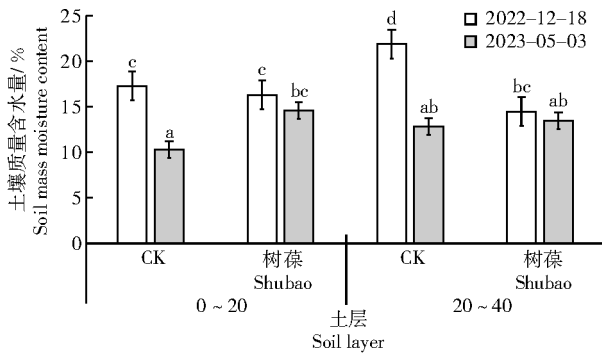
Fig.2 Temperature changes from December 2022 to April 2023

2.2 土壤质量含水量的变化

从图3可以看出,12月浇灌冬水后测定土壤平

均质量含水量,对照的平均质量含水量高于树葆组,对照在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中土壤质量含水量为

17.27%, 20~40 cm 土层的含水量为 21.85%; 树蔭组在 0~20、20~40 cm 深度的土壤质量含水量分别为 16.28% 和 14.45%。在 5 月测定质量含水量时, 对照 0~20、20~40 cm 深度的土壤质量含水量分别为 10.29% 和 12.82%; 树蔭组 0~20、20~40 cm 深度的土壤质量含水量分别为 14.61% 和 13.45%, 对照的平均质量含水量低于树蔭。综上分析得出, 树蔭装置具有集水、防止蒸发、保水的功能, 能够长时间提供比较均衡的土壤水分。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicated significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same as below

图 3 土壤质量含水量的变化

Fig.3 Changes in soil mass moisture content

2.3 树蔭和对照处理的生理指标的变化

树蔭处理和对照对大红袍花椒枝条生理特性的影响情况如图 4 所示, 自入冬以来, 大红袍花椒 1 年生枝条的生理指标均产生了较大变化。

从图 4 可以看出, 对照的可溶性糖含量在 12、2、3、5 月的平均值分别为 31.77、82.94、40.51、27.15 g/kg, 树蔭组的可溶性糖含量同期的平均值分别为 28.09、64.04、34.92、19.81 g/kg。可溶性糖含量的月际变化呈现明显的季节性特征, 2 月 2 个处理含量均达到峰值。值得注意的是, 树蔭组的可溶性糖含量在各月均低于对照组, 降幅达 17.3%~28.5%, 表明树蔭装置可能通过改善水分供应状况, 减轻了花椒树的渗透调节压力。

由图 4 可知, 对照可溶性蛋白含量在 12、2、3、5 月的平均值分别为 3.18、5.48、5.12、0.43 g/kg, 树蔭组的可溶性蛋白含量同期的平均值分别为 2.68、4.33、3.65、0.17 g/kg。可溶性蛋白含量的动态变化与糖分积累趋势相似, 树蔭组的可溶性蛋白含量始终低于对照, 但在严寒的 2 月差异最大, 树蔭组降低 21.0%, 5 月出现急剧下降, 对照为 0.43 g/kg, 树蔭组为 0.17 g/kg, 这可能与春季新梢生长导致的营养消耗有关。

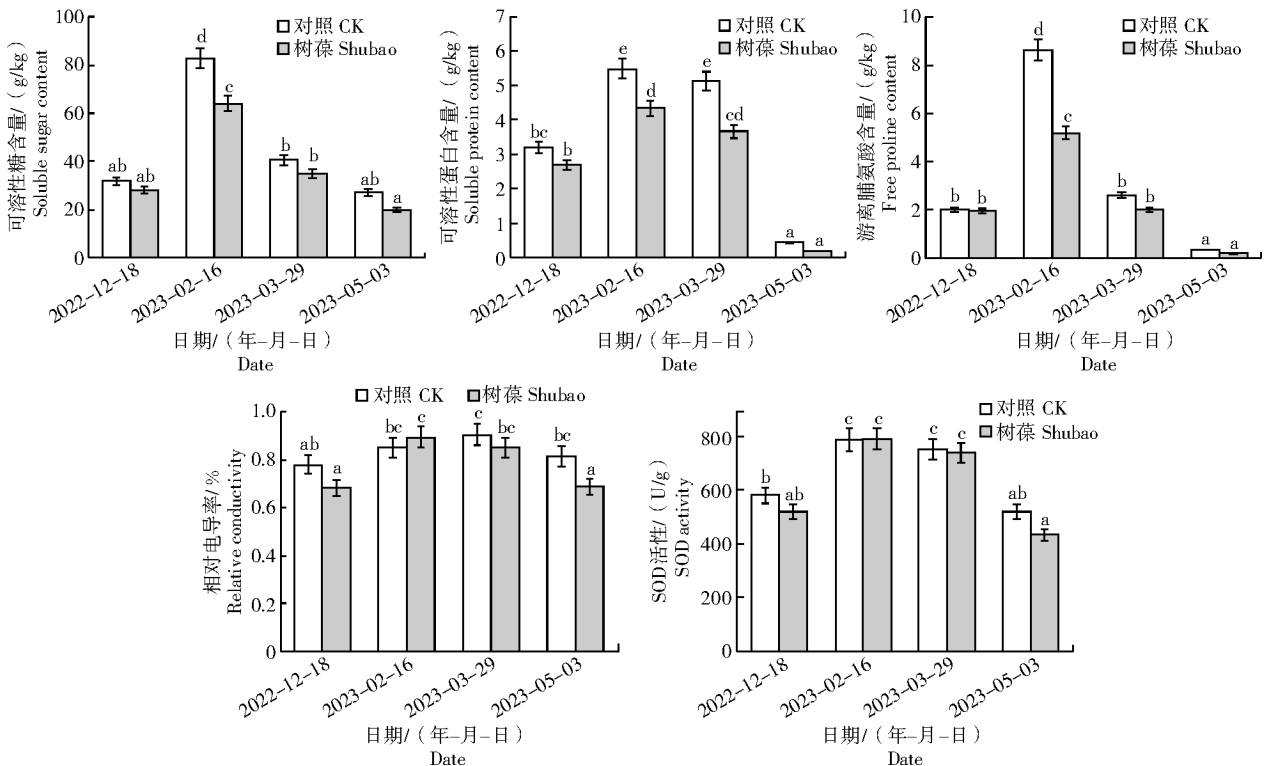


图 4 2 个处理对冬春季花椒生理指标的影响

Fig.4 The effects of two treatments on physiological indicators of *Zanthoxylum bungeanum* in winter and spring

由图4可知,对照的游离Pro含量在12、2、3、5月的平均值分别为2.02、8.63、2.61、0.35 g/kg,树葆组的游离Pro含量同期的平均值分别为1.95、5.20、2.01、0.18 g/kg。游离脯氨酸作为重要的渗透调节物质,其2月峰值含量是12月的4.3倍,强烈响应低温胁迫。树葆组的脯氨酸积累量较对照降低39.7%,这种差异说明树葆处理显著缓解了花椒树的渗透胁迫程度。

从图4可以看出,对照的相对电导率在12、2、3、5月的平均值分别为0.78%、0.85%、0.90%、0.81%,同期树葆组的相对电导率平均值分别为0.68%、0.89%、0.85%、0.69%。相对电导率的变化显示,树葆组在12月和5月的数值均低于对照,降幅达12.8%~14.8%,这2个时期分别对应初冬降温和春季干旱的关键阶段。较低的细胞膜透性表明树葆装置能有效维持细胞膜完整性。

从图4可以看出,对照的SOD活性在12、2、3、5月的平均值分别为580.80、784.68、751.70、518.42 U/g,树葆组的SOD活性同期的平均值分别为518.90、790.44、738.38、432.85 U/g。SOD活性的变化呈现“冬季高-春季低”的特点,但2个处理组间差别不大。树葆组在5月的SOD活性为432.85 U/g,比对照降低16.5%,这可能与水分条件改善后活性氧积累减少有关,这与同期相对电导率的下降趋势具有一致性。

2.4 气温与花椒生理指标的相关性分析

从表1可以看出,不同时间段气温与可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、相对电导率、SOD活性的皮尔逊相关系数分别为-0.719、-0.913、-0.776、-0.460、-0.765,显著性 $P < 0.01$,说明这5个生理指标均随气温的降低而升高,呈显著和极显著负相关。

表1 气温与各生理指标皮尔逊相关性检验

Tab.1 Pearson correlation test between temperature and various physiological indicators

指标 Indicator	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	游离脯氨酸 Free proline	相对电导率 Relative electrical conductivity	SOD
相关系数 Correlations coefficient	-0.719**	-0.913**	-0.776**	-0.460*	-0.765**
显著性(双尾) Significance(dual tailed)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注:*表示指标随气温变化差异显著($P < 0.05$);**表示指标随气温变化差异极显著($P < 0.01$)。

Note: * indicated that the indicators had a significant difference with the change of temperature($P < 0.05$); ** indicated that the index had a extremely significant difference with the change of temperature($P < 0.01$).

2.5 土壤质量含水量与花椒生理指标的相关性分析

从表2可以看出,不同时间段土壤质量含水量与可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、相对电导率、SOD活性的皮尔逊相关系数分别为0.149、0.003、-0.09、0.443、0.243,显著性 $P >$

0.05,说明各生理指标含量的高低与土壤质量含水量无显著相关性。据此推断采取树葆措施后由于土壤质量含水量的变化较小,未对调节植物抗寒性形成显著差异,气温仍是影响植物抗寒性的关键影响因子。

表2 土壤质量含水量与各生理指标皮尔逊相关性检验

Tab.2 Pearson correlation test between soil mass moisture content and various physiological indicators

指标 Indicator	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	游离脯氨酸 Free proline	相对电导率 Relative electrical conductivity	SOD
相关系数 Correlations coefficient	0.149	0.003	-0.09	0.443	0.243
显著性(双尾) Significance(dual tailed)	0.643	0.992	0.782	0.149	0.446

2.6 树葆组与对照的生理指标的t检验分析

由表3可知,对树葆组和对照的各生理指标的差异性进行独立样本t检验,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、相对电导率、SOD活性的独立样本t检验结果,显著性P值分别为

0.357、0.305、0.340、0.024、0.519。树葆组与对照的相对电导率显著性 $P = 0.024 < 0.05$,说明2个处理的相对电导率具有显著差异,树葆组的相对电导率均值为0.78%,对照为0.84%,树葆组的相对电导率显著小于对照,据此推断当植物受到逆境

环境影响时,树葆措施对植物细胞膜会产生一定程度的保护作用,降低细胞破坏,减少细胞内的电解质外渗。其余生理指标的显著性 P 均大于0.05,

说明树葆组与对照的差异不显著,但树葆组均值低于对照组均值,反映了树葆措施与传统措施相比,具有一定的抗寒抗旱效果。

表3 树葆组和对照的生理指标独立样本 t 检验

Tab.3 Independent sample t -tests of physiological indicators for tree preservation and control

t 检验 t test	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	游离脯氨酸 Free proline	相对电导率 Relative electrical conductivity	SOD
显著性(双尾) Significance(dual tailed)	0.357	0.305	0.340	0.024	0.519

3 结论与讨论

本研究表明,树葆装置具有土壤水分调控效果。树葆装置在越冬期12月的土壤含水量略低于传统浇冻水处理,但在春季5月表现出更好的保水能力,0~20 cm土层含水量(14.61%)显著高于对照组(10.29%)。这表明树葆通过塑料布阻隔蒸发和蓄水罐的缓释供水,能够更持久地维持土壤水分平衡。传统浇冻水+覆土虽能短期提升土壤含水量,但水分易通过地表蒸发和深层渗漏流失。树葆装置与传统措施相比,能够收集雨水和雪水,增加土壤含水量,通过塑料布抑制蒸发,并结合蓄水罐的缓慢供水,形成“雨季集水-旱季供水”的可持续模式,这与黄土高原秋春雨春用的水分管理策略高度契合^[19]。潘昕等^[20]在青藏高原的干旱胁迫盆栽试验中,通过设置4个干旱水平,对比6种供试植物叶片的生理指标,脯氨酸含量、蛋白质含量、可溶性糖含量均随干旱程度的增加而升高,以此提高细胞的渗透调节能力。土壤水分最佳效果是维持在田间持水量的70%左右,在季节性干旱期间,树葆装置能够更持久地维持土壤水分平衡,缓解春季干旱对花椒树的胁迫影响。同时,葆青罐中的水分运移是饱和水分向四周的扩散运动,所以,紧挨葆青罐的土壤呈现饱和状态,而土壤含水量随水平距离的增大,逐渐减小。因此,树葆安装成功与否的关键在于是否根据植物需水量和降水量,精准确定葆青罐的位置及塑料布覆盖范围和面积。

本研究表明,树葆处理能够减少渗透调节物质。树葆处理的可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸含量在冬季2月均低于对照,如树葆组的可溶性糖含量为64.04 g/kg,对照组为82.94 g/kg,树葆组渗透调节物质含量较低,说明树葆可能通过改善水分供应,植物无需过度合成渗透物质,以维

持细胞稳态,从而减少了花椒树因干旱和低温诱导的渗透调节物质积累。这一点与陈泽^[3]在不同防寒措施能显著降低国槐幼苗可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸的研究结果相同。而CAI等^[21]对茄子叶片进行生理指标和转录组测序,结果发现,POD活性和可溶性蛋白是茄子耐寒性的关键生理指标。或许对于不同的植物细胞结构不同,故应对胁迫,各种植物调节的途径不同。

本研究表明,树葆处理可以增加细胞膜稳定性。树葆5月的相对电导率显著低于对照,表明其能有效减轻细胞膜损伤,提升花椒树的抗寒抗旱能力。相对电导率的显著降低进一步验证了树葆对细胞膜的保护作用,这与干旱区植物在低温胁迫下膜透性增大的普遍规律一致。唐丽等^[4]研究表明,低温胁迫情况下大花树状月季的相对电导率迅速增大,与本研究的观点一致。在正常情况下,植物细胞膜对所需物质具有选择能力,当植物遭受逆境时,细胞膜遭受破坏,膜透性增大,造成细胞内的电解质渗透率增大。

本研究表明,树葆处理可以提高SOD活性。虽然2个处理的SOD活性无显著差异,但树葆组在5月萌芽期活性为432.85 U/g,与对照(518.42 U/g)相比较低,可能与水分条件改善后氧化胁迫减轻有关。这与CHEN等^[15]的研究结论一致,认为植株在受到低温冷害时,正常情况下会产生大量的氧自由基,使细胞膜脂过氧化。为维持正常的生理代谢,植株体内存在的抗氧化系统在受到胁迫时启动,其中SOD、POD、CAT是比较重要的抗氧化酶,能够共同合作有效地清除植物细胞内积累的氧自由基,因此,抗氧化酶活性能够反映出植株受胁迫的程度^[12]。

本研究表明,气温与生理指标具有极强的关联性。皮尔逊相关性分析表明,测定的生理指标,包括可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、电导率、

SOD均与气温呈极显著负相关,证实低温是诱导花椒树抗逆生理响应的关键驱动因子。董志刚等^[5]研究发现,倒春寒是山西晋南葡萄冻害原因之一。树葆通过稳定土壤水分,部分缓解了低温胁迫的负面影响。

本试验仅观测了一个年度周期,发现树葆装置对花椒树抗逆性的提升效果在萌芽期尤为显著,但冬季保水效能仍有提升空间,连续多年的长期效应表现需持续监测。本试验未分析树葆对花椒产量和品质的影响,后续可结合果实指标评价经济效益;未来可优化装置结构,如增加集水面积或调节塑料集雨布的位置等,增强树木越冬性能。

参考文献:

- [1] DING Y L, SHI Y T, YANG S H. Advances and challenges in uncovering cold tolerance regulatory mechanisms in plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(4):1690-1704.
- [2] 马其云. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社, 1997.
MA Q Y. *Flora of China*[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [3] 陈泽. 不同防寒措施对国槐幼苗生理特性的影响[J]. *绿色科技*, 2022, 24(5):130-131.
CHEN Z. Effects of different cold-proof measures on physiological characteristics of *Sophora japonica* seedlings[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(5):130-131.
- [4] 唐丽, 张延歌, 罗亦殷, 等. 不同防寒技术处理对大花树状月季生理生化指标的影响[J]. *经济林研究*, 2017, 35(3):213-218.
TANG L, ZHANG Y G, LUO Y Y, et al. Effects of different cold protection treatments on physiological and biochemical indexes of tree rose with big flowers[J]. *Nonwood Forest Research*, 2017, 35(3):213-218.
- [5] 董志刚, 马小河, 赵旗锋, 等. 山西晋南葡萄冻害原因调查及防治措施[J]. *山西果树*, 2011(2):32-33.
DONG Z G, MA X H, ZHAO Q F, et al. Investigation on the causes of grape freezing injury in Jinnan, Shanxi Province and its control measures[J]. *Shanxi Fruits*, 2011(2):32-33.
- [6] ZHANG Y L, HAN M Y, WU L J, et al. Screening of efficient antifreeze agents to prevent low-temperature stress in vines[J]. *Agronomy*, 2025, 15(1):48.
- [7] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2):248-254.
- [8] BATES L S, WALDREN R P, TEARE I D. Rapid determination of free proline for water-stress studies[J]. *Plant and Soil*, 1973, 39(1):205-207.
- [9] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1989, 59(2):309-341.
- [10] CHEN L J, XIANG H Z, MIAO Y, et al. An overview of cold resistance in plants[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(4):237-245.
- [11] 郝雨叶, 路琦, 阿力木·阿木提, 等. 低温胁迫对扁桃优株生理特性的影响[J]. *山西农业科学*, 2024, 52(1):68-78.
HAO L Y, LU Q, ALIMU A, et al. The effect of low temperature stress on the physiological characteristics of almond superior plants[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2024, 52(1):68-78.
- [12] KE J H, WANG J X, WU S L, et al. Study on low temperature physiology and evaluation of cold resistance of different peony varieties[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2023, 21(2):993-1005.
- [13] 邹原东, 韩振芹, 刘宪东, 等. 金叶紫穗槐抗寒生理研究[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(18):3492-3496.
ZOU Y D, HAN Z Q, LIU X D, et al. Physiological research on cold resistance of *Amorpha fruticosa* cv. jinye[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(18):3492-3496.
- [14] YE M H, WANG D Y, LI R X, et al. SIAN2 overexpression improves cold resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by regulating glycolysis and ascorbic acid metabolism[J]. *Genomics*, 2025, 117(1):110978.
- [15] CHEN M, ZHU X Z, HOU M Y, et al. Effects of low-temperature stress on cold resistance biochemical characteristics of Dali and siqiu tea seedlings[J]. *Horticulturae*, 2024, 10(8):823.
- [16] 赵树海. 植物葆青罐: ZL201610818338.7[P]. 2016-12-14.
ZHAO S H. Device for ensuring the survival of plants: ZL201610818338.7[P]. 2016-12-14.
- [17] 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, 2008:129-131.
KONG X S, YI X F. *Experimental technology of plant physiology*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008:129-131.
- [18] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2006.
WANG X K. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [19] 刘国栋, 赵文强, 杨瑞. 新型雨水收集系统在干旱区造林中的应用评价[J]. *农业水管理*, 2023, 276:108067.
LIU G D, ZHAO W Q, YANG R. Evaluation of a new rain-water harvesting system for afforestation in arid areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 276:108067.
- [20] 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对青藏高原6种植物生理指标的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(13):3558-3567.
PAN X, QIU Q, LI J Y, et al. Physiological indexes of six plant species from the Tibetan Plateau under drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13):3558-3567.
- [21] CAI P, LAN Y H, GONG F Y, et al. Comparative physiology and transcriptome response patterns in cold-tolerant and cold-sensitive varieties of *Solanum melongena*[J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1):256.