果 树 学 报 2026,43(8):2150-2162
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250578

盐胁迫下6个品种大果沙枣幼苗生理生化与解剖结构响应差异

卢鹏浩[1],米亚司尔•库拉西[1,2#],陈启民[1*],何 苗[1],王 丹[1],罗青红[1]

([1]新疆维吾尔自治区林业科学院治沙研究所,乌鲁木齐 830063;[2]喀什地区林木种苗管理站,新疆喀什 844000)

摘 要:【目的】探究大果沙枣(*Elaeagnus moorcroftii*)不同品种的耐盐性差异。**【方法】**以6个品种的一年生幼苗为材料,系统分析盐胁迫下生理生化指标及茎叶解剖结构的变化。**【结果】**随着胁迫时间的延长,丙二醛(MDA)和可溶性糖(SS)含量整体上持续上升;可溶性蛋白质(SP)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性及脯氨酸(Pro)含量整体上均呈现先上升后下降趋势;而过氧化物酶(POD)活性总体上升。在解剖结构方面,雅丰叶片栅栏组织发达、细胞排列紧密,木质部发育良好;白沙甜下表皮细胞外壁较厚,维管形成层较宽;策勒大黄叶肉组织疏松,维管组织发育较弱。**【结论】**SP含量、MDA含量及SOD活性是评价耐盐性的关键指标。6个品种的耐盐性排序为雅丰>白沙甜>麦盖提3号>巴楚1号>策勒大黄>金莎。本研究结果为大果沙枣耐盐品种选育及盐碱地生态修复提供了理论依据。

关键词:大果沙枣;盐胁迫;生理响应;解剖结构;耐盐性评价

中图分类号:S793.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2150-13

Effects of salt stress on physiological and biochemical characteristics as well as leaf and stem anatomical structures of seedlings from different varieties of *Elaeagnus moorcroftii*

Lu Penghao[1], Miyasier·Kulaxi[1,2#], Chen Qimin[1*], He Miao[1], Wang Dan[1], Luo Qinghong[1]

([1]Institute of Desert Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830063, Xinjiang, China; [2]Kashgar Prefecture Forest Seedling Management Station, Kashgar 844000, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】Soil salinization is a critical environmental factor limiting the sustainable development of agriculture and forestry worldwide. High salinity induces osmotic stress, ion toxicity, and oxidative damage in plants, leading to growth inhibition, metabolic disorders, and even mortality. *Elaeagnus moorcroftii*, a perennial tree species of the *Elaeagnaceae* family, exhibits strong tolerance to drought, salt, and wind erosion, making it a valuable species for vegetation restoration in arid and semi-arid regions of Northwest China. While previous studies have explored its salt tolerance at the species level, systematic comparisons of salt tolerance among different varieties, integrating both physiological and anatomical responses, remain scarce. This study aims to evaluate the salt tolerance of six major cultivated varieties of *E. moorcroftii* by analyzing their physiological, biochemical, and anatomical responses under salt stress, thereby providing a theoretical basis for the selection and breeding of salt-tolerant genotypes and their application in saline-alkali land restoration.【Methods】One-year-old seedlings of six *E. moorcroftii* varieties (Jinsha, Bachu No. 1, Baishatian, Maigaiti No. 3, Celedahuang and Yafeng) were selected for the experiment. The seedlings were subjected to a gradual salt stress treatment using 500 mmol·L^{-1} NaCl solution, with the concentration incrementally increased every two days

收稿日期:2025-11-24 **接受日期:**2026-01-18

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项“大果沙枣绿色高产栽培机制及配套技术研究示范”

作者简介:卢鹏浩,男,硕士,研究方向为林木抗逆生理。E-mail:370699120@qq.com。#为共同第一作者。

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:xjchenqimin@126.com

until a total of 2000 mL was applied. Soil electrical conductivity was monitored to maintain a target salinity level of 0.4% ± 0.1%. Control groups were irrigated with an equivalent volume of deionized water. Physiological and biochemical indicators, including malondialdehyde (MDA), soluble sugar (SS), soluble protein (SP), proline (Pro), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT), were measured at 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 days after stress initiation. Leaf and stem anatomical structures were examined after 25 days of stress using paraffin sectioning and microscopic imaging. Data were analyzed using SPSS 26.0 for ANOVA and Duncan's multiple range tests, and principal component analysis (PCA) was performed to comprehensively evaluate salt tolerance.【Results】Under salt stress, the contents of MDA and SS increased continuously across all varieties, indicating progressive membrane lipid peroxidation and osmotic adjustment. SP content and the activities of SOD and CAT showed an initial increase, followed by a decline, suggesting an early activation of defense mechanisms that weakened under prolonged stress. The proline (Pro) content showed a dynamic change of first increasing and then decreasing, with the most significant accumulation occurring at the 25th day. POD activity increased consistently throughout the stress period, highlighting its role in long-term oxidative stress mitigation. Anatomical observations revealed variety-specific structural adaptations. Yafeng exhibited well-developed palisade tissue, tightly arranged mesophyll cells, and robust xylem development. Baishatian showed a thickened lower epidermal cell wall and a wider vascular cambium. In contrast, Celedahuang had loose mesophyll tissue and underdeveloped vascular bundles. Leaf thickness and main vein thickness were significantly affected by salt stress, while upper and lower epidermal thickness remained largely unchanged. Stem anatomy also showed notable changes, with Yafeng displaying enhanced xylem and vascular bundle development, whereas Jinsha showed reductions in these traits. Principal component analysis identified SP, MDA, and SOD as the key indicators for salt tolerance evaluation. The first three principal components accounted for 84.98% of the total variance. Based on comprehensive scores derived from PCA, the salt tolerance of the six varieties was ranked as follows: Yafeng＞Baishatian＞Maigaiti No. 3＞Bachu No. 1＞Celedahuang＞Jinsha.【Conclusion】This study demonstrates that salt tolerance in *E. moorcroftii* is variety-specific and involves coordinated physiological, biochemical, and anatomical adaptations. The more salt-tolerant varieties, such as Yafeng and Baishatian, exhibited efficient osmotic regulation, strong antioxidant enzyme activity, and favorable anatomical traits such as dense mesophyll tissue, thickened epidermal layers, and well-developed vascular systems. In contrast, sensitive varieties like Jinsha showed weaker regulatory capacity and structural integrity under stress. The key indicators SP, MDA, and SOD effectively reflect the osmotic adjustment, membrane stability, and antioxidant capacity of the plants under salt stress. These findings provide a scientific basis for the selection and breeding of salt-tolerant *E. moorcroftii* varieties and support their use in the ecological restoration of saline-alkali lands.

Key words: *Elaeagnus moorcroftii*; Salt stress; Physiological response; Anatomical structure; Salt tolerance evaluation

土壤盐渍化是制约全球农业与林业可持续发展的关键环境因子之一。高盐环境会引发植物渗透胁迫、离子毒害及氧化损伤，导致其生长受阻、代谢紊乱，严重时甚至死亡[1-2]。选育和推广耐盐植物种质，已成为盐渍化土地生态修复与可持续利用的重要途径。

大果沙枣（*Elaeagnus moorcroftii*）作为胡颓子科胡颓子属多年生乔木，具有较强的耐旱、耐盐和抗风沙能力，是我国西北干旱、半干旱地区植被恢复的优良树种[3]。近年来，围绕大果沙枣在盐胁迫下的种子萌发[4]、光合生理[5]及外源调节[6]等方面已开展相关研究，初步揭示了其耐盐潜力。然而，现有研究多

集中于物种的整体响应，未见对不同品种间耐盐性差异的系统比较，特别是结合生理生化指标与解剖结构特征的综合评价研究尚显不足[7-8]。

鉴于此，笔者以新疆6种主栽大果沙枣（金莎、巴楚1号、麦盖提3号、白沙甜、策勒大黄、雅丰）为研究对象，通过模拟盐胁迫环境，动态监测其渗透调节物质含量、抗氧化酶活性及茎叶解剖结构的变化，旨在明晰不同品种的耐盐机制与适应策略，为耐盐品种筛选及区域化栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

试验材料选自新疆6个本地优良大果沙枣（*Elaeagnus moorcroftii*）品种，分别为金莎、巴楚1号、麦盖提3号、白沙甜、策勒大黄和雅丰。2023年3月下旬，于新疆林业科学院佳木国家重点林木良种基地，选取生长健壮、大小均一的1年生扦插苗，裸根移栽至定制栽培盆中（盆高36 cm，上口径34.5 cm，底径26.5 cm，配备托盘）。栽培基质取自基地大田的耕作土，总盐含量（*w*，后同）0.072%，pH为7.35，每盆均匀装土20 kg。定植后的苗木置于室外标准化管理场地（设遮雨棚），进行常规水肥管理，待其恢复正常生长。

1.2 试验设计

试验于2023年7月中旬进行，此时苗木平均高度80 cm以上。每个品种选取20盆生长势一致的苗木，随机分为两组：对照组（CK，10盆）与盐胁迫处理组（CL，10盆）。盐胁迫处理参考新疆盐碱地分级标准[9]，采用500 mmol·L^{-1} NaCl溶液进行浇灌。自处理首日起，每日08:00对处理组苗木进行浇灌，初始NaCl浓度为100 mmol·L^{-1}，之后每2 d递增100 mmol·L^{-1}，直至累计浇入盐溶液总量达2000 mL（低于土壤饱和持水量2760 mL）。采用WET-HH2土壤测定仪动态监测土壤电导率，当土壤含盐量达到0.4%目标阈值后，改为浇灌等量去离子水以维持胁迫浓度。对照组在整个试验期间始终浇灌等量去离子水。所有处理的托盘渗出液均回灌至原盆中。

1.3 指标测定与方法

1.3.1 *生理生化指标测定* 盐胁迫处理后的第0、5、10、15、20、25、30天，分别采集对照组和处理组苗木自上而下第3枚健康叶片，每次重复取样10枚，分别记作CK0、CL0、CK5、CL5、CK10、CL10、CK15、CL15、CK20、CL20、CK25、CL25、CK30、CL30。样品经液氮速冻后，转移至−40 ℃超低温冰箱保存，用于后续生理指标测定。丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法测定[10]；超氧化物歧化酶（SOD）活性参考氮蓝四唑（NBT）光化还原法测定[11]；过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定[12]；过氧化氢酶（CAT）活性及脯氨酸（Pro）、可溶性糖（SS）和可溶性蛋白质（SP）含量均使用北京Solarbio公司相应ELISA检测试剂盒测定，具体操作严格遵循说明书。

1.3.2 *解剖结构观察* 盐胁迫处理25 d后，分别采集各组健康叶片及茎段（当年生中部）样品。样品经蒸馏水充分清洗后，使用打孔器从叶片上取直径6 mm的圆片，茎段截取长度约1 cm小段，迅速投入FAA固定液（75%乙醇、冰醋酸、甲醛体积比90∶5∶5）中固定。固定完成后，参照李亚男等[13]的石蜡切片法制备组织切片，厚度为8~10 μm。采用番红-固绿对制片染色后，于光学显微镜下观察并拍照。利用Image-J图像分析软件测量叶片厚度、主脉厚度、上下表皮厚度、细胞结构紧实度，以及茎的髓半径、维管束半径、木质部与韧皮部半径等关键解剖指标[14]。

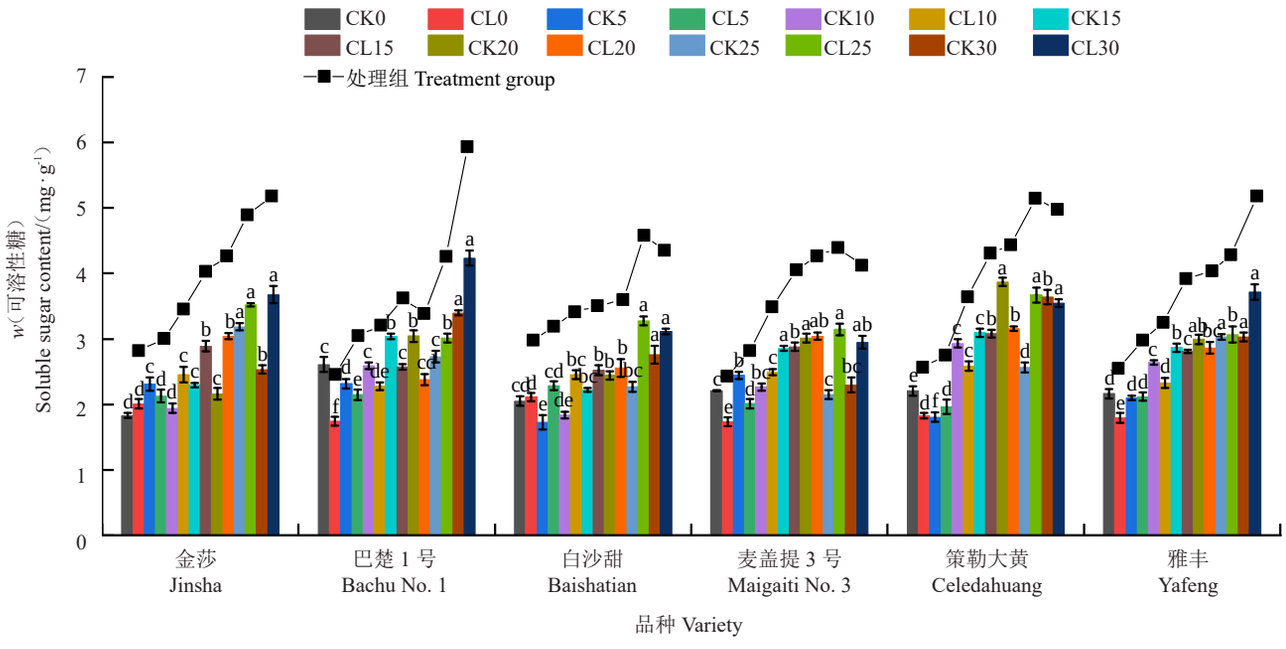
1.4 数据处理

采用SPSS 26.0软件进行统计分析。所有数据均以平均值±标准差表示。采用单因素方差分析（ANOVA）进行差异显著性检验，若处理间存在显著差异，则用Duncan's新复极差法进行多重比较（显著性水平设定为$P<0.05$）。利用Origin 2021软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对大果沙枣叶片渗透调节物质的影响

2.1.1 *可溶性糖含量的变化* 如图1所示，在盐胁迫下，各品种大果沙枣叶片可溶性糖（SS）含量随胁迫时间延长总体呈上升趋势。白沙甜、麦盖提3号和策勒大黄的SS含量（*w*，后同）在胁迫第25天达到峰值，分别为3.273、3.145和3.671 mg·g^{-1}，较胁迫0天（初始值）显著提高了0.55、0.81和1.01倍，分别为同期对照组的144.13%、146.25%和143.20%。金莎、巴楚1号和雅丰的SS含量则在胁迫第30天升至最高，分别为3.677、4.236和3.717 mg·g^{-1}，较初始值显著提升0.83、1.42和1.07倍，分别为同期对照组的145.13%、124.66%和122.74%。以上研究结果表明，盐胁迫诱导了幼苗叶片中可溶性糖的积累。



不同小写字母表示同一品种不同胁迫天数呈显著差异（$P<0.05$）。下同。

Different small letters indicate significant difference among different stress days for the same variety ($P<0.05$). The same below.

图 1　盐胁迫下 6 个品种大果沙枣可溶性糖含量的比较

Fig. 1　Comparison of soluble sugar content in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

2.1.2　可溶性蛋白质含量的变化　盐胁迫下，大果沙枣叶片可溶性蛋白质（SP）含量整体上呈先升高后下降的动态变化模式（图 2）。不同品种 SP 含量达到峰值的时间存在差异。麦盖提 3 号和策勒大黄在胁迫第 15 天达到最大值，分别为 34.803 和 31.267 μg·g^{-1}，较胁迫第 0 天分别显著升高 1.85 倍和 5.99 倍，分别为同期对照组的 293.51%和 294.46%；金莎、巴楚 1 号、白沙甜和雅丰的 SP 含量则在第 20 天达到峰值，较胁迫第 0 天显著增加 1.51~2.21 倍，为同期对照组的 225.05%~390.96%。胁迫期间，白沙甜、麦盖提 3 号、雅丰各处理组 SP 含量均高于同期对照组，尤其在胁迫中期（15~20 d）积累最为明显，表明可溶性蛋白质的快速合成与积累是大果沙枣短期应对盐胁迫的关键策略之一。

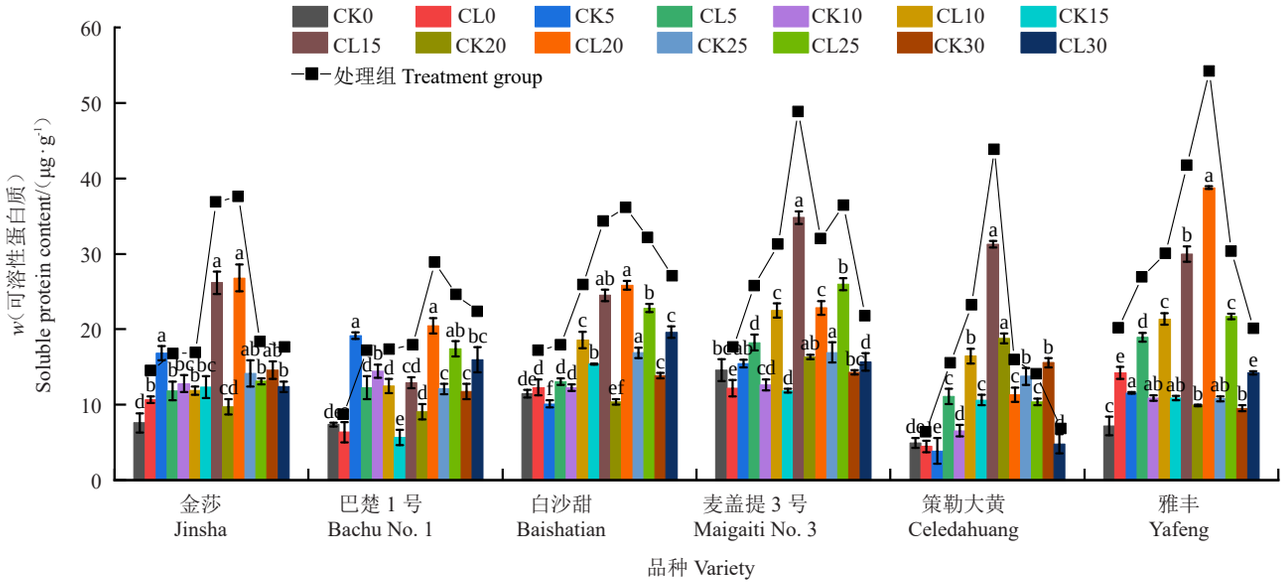


图 2　盐胁迫下 6 个品种大果沙枣可溶性蛋白质含量的比较

Fig. 2　Comparison of soluble protein content in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

2.1.3 脯氨酸含量的变化 如图3所示，盐胁迫诱导大果沙枣叶片脯氨酸（Pro）含量整体上呈先升后降的典型动态响应。胁迫初期（0~15 d），各品种的Pro含量普遍较低，如白沙甜在第15天含量仅为19.427 μg·g^{-1}，与对照组无明显差异；进入胁迫中期（15~25 d），各品种Pro含量均快速积累，并于第25天达到峰值，其中金莎和巴楚1号积累幅度最大，含量分别为110.920和120.237 μg·g^{-1}，较胁迫第0天分别升高3.92倍和4.99倍，分别为同期对照组的426.4%和386.6%；至胁迫后期（30 d），部分品种Pro含量呈现下降趋势。上述研究结果表明，脯氨酸的主动积累是大果沙枣中后期响应盐胁迫的重要渗透调节机制，且不同品种间的积累能力存在明显差异。

2.1.4 丙二醛含量的变化 丙二醛（MDA）含量变化可反映细胞膜脂过氧化程度。如图4所示，随着盐胁迫时间延长，各品种MDA含量整体上持续上升，表明细胞膜系统遭受明显的氧化损伤。巴楚1号MDA含量（*b*，后同）在胁迫第25天即达峰值

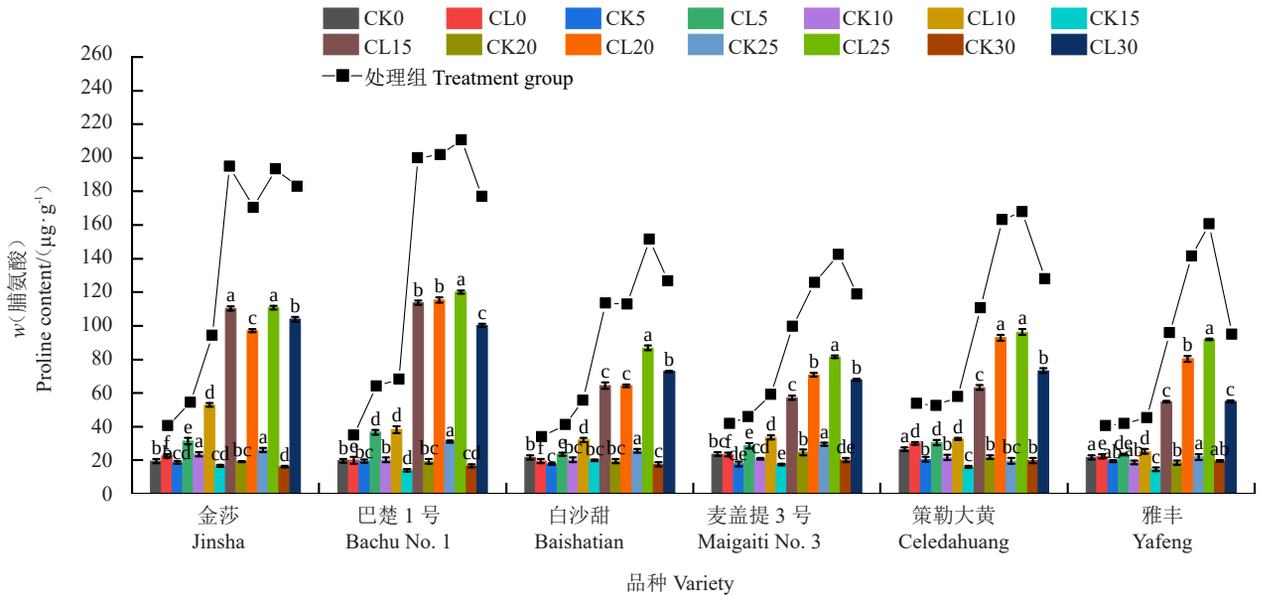


图3 盐胁迫下6个品种大果沙枣Pro含量的比较

Fig. 3 Comparison of Pro content in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

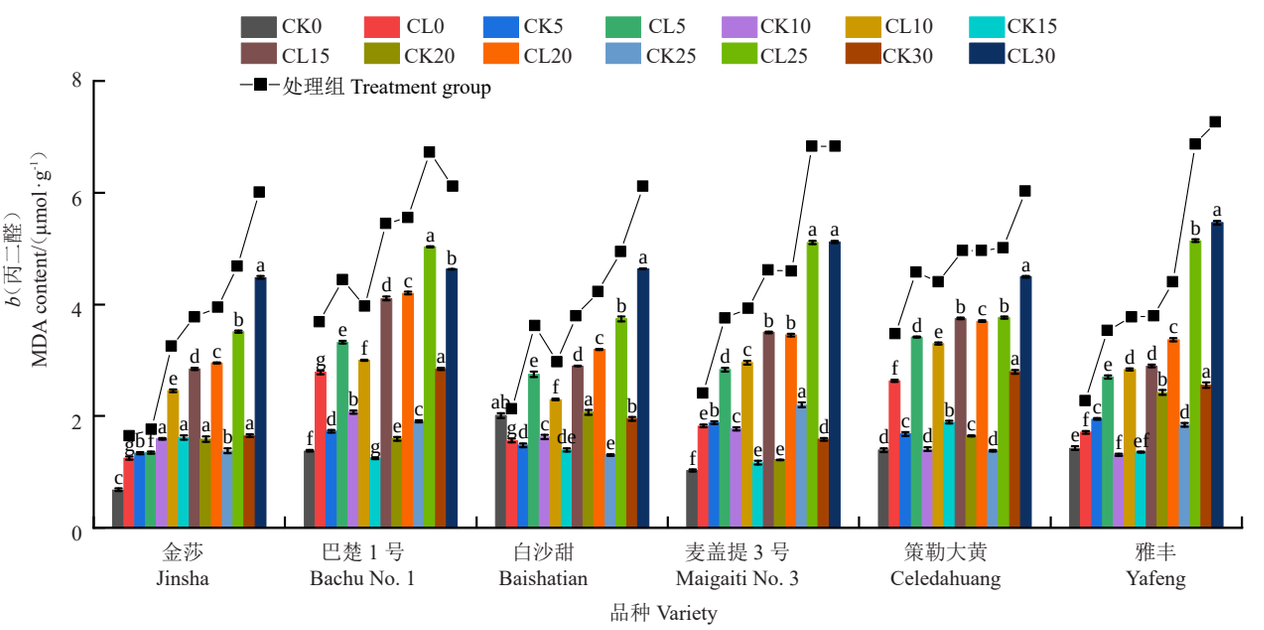


图4 盐胁迫下6个品种大果沙枣MDA含量的比较

Fig. 4 Comparison of MDA content in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

（5.028 μmol·g^{-1}），较胁迫第 0 天升高 0.81 倍，为同期对照组的 263.66%。其他 5 个品种则在第 30 天达到最大值（4.480~5.461 μmol·g^{-1}），较胁迫第 0 天显著升高 0.71~2.58 倍，为同期对照组的 160.91%~322.47%，其中雅丰的 MDA 积累量最高。整体上看，盐胁迫明显加剧了膜脂过氧化产物 MDA 的积累，且不同品种间受损程度不同，暗示其耐盐性存在差异。

2.2　盐胁迫对大果沙枣叶片抗氧化酶系统的影响

2.2.1　*超氧化物歧化酶活性的变化*　超氧化物歧化酶（SOD）是植物体内清除超氧阴离子自由基的关键酶。如图 5 所示，盐胁迫下，各品种大果沙枣幼苗叶片的 SOD 活性整体上均呈先升高后下降的趋势。巴楚 1 号和白沙甜的 SOD 活性在胁迫第 15 天达到峰值，分别为 296.506 和 203.190 U·g^{-1}，较胁迫第 0 天分别显著升高 2.10 倍和 0.73 倍，分别为同期对照组的 263.33% 和 275.62%。麦盖提 3 号、策勒大黄和雅丰的活性峰值出现在第 20 天，分别为 212.710、268.914 和 262.320 U·g^{-1}，较胁迫第 0 天分别显著提升 5.62 倍、2.25 倍和 2.33 倍。金莎 SOD 活性响应较迟，于第 25 天达到峰值（191.627 U·g^{-1}）。总体而言，除金莎外，其他品种在胁迫中期均表现

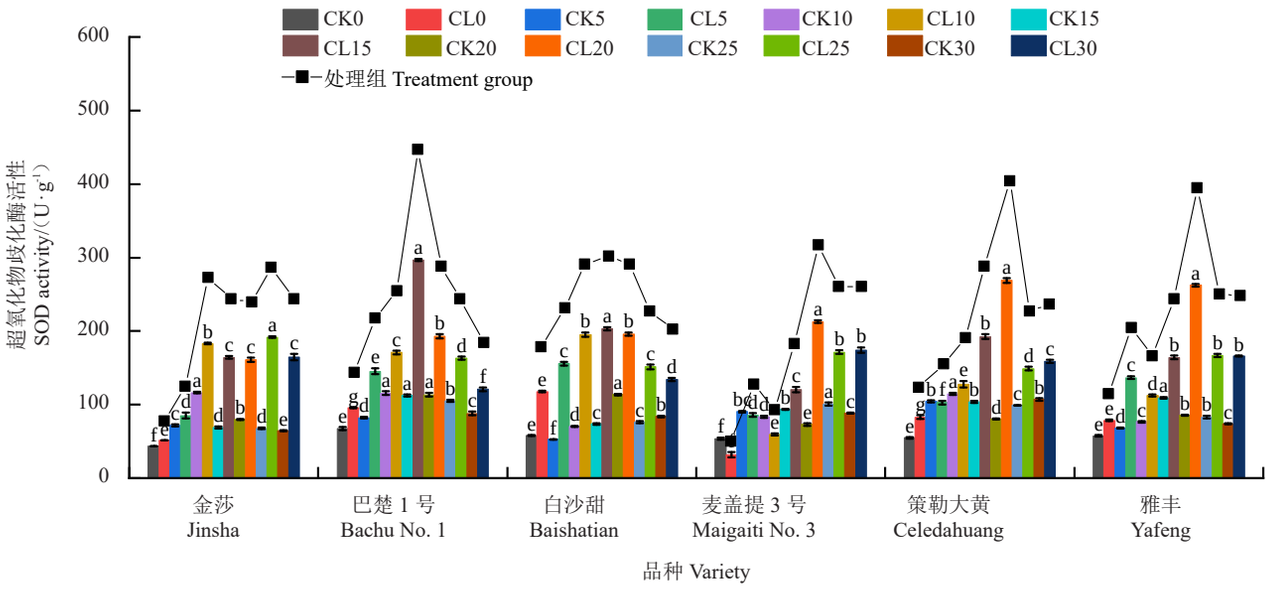


图 5　盐胁迫下 6 个品种大果沙枣 SOD 活性的比较

Fig. 5　Comparison of SOD activity in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

出较强的 SOD 活性诱导能力，表明其能有效启动初级抗氧化防御机制。胁迫后期酶活性普遍下降，可能与长期胁迫下酶系统功能受损或合成受抑有关。

2.2.2　*过氧化物酶活性的变化*　过氧化物酶（POD）在分解过氧化物、缓解氧化损伤中发挥重要作用。由图 6 可知，盐胁迫初期，各品种 POD 活性受到不同程度抑制，至第 30 天时均升至峰值，表现出持续的诱导效应。其中，策勒大黄的 POD 活性在整个胁迫期间持续上升且增幅最大，从胁迫第 0 天的 98.706 U·g^{-1} 升至第 30 天的 351.239 U·g^{-1}，增幅达 2.56 倍，为第 30 天对照组的 430.43%。金莎、巴楚 1 号、白沙甜、麦盖提 3 号和雅丰在第 30 天的 POD 活性也分别较胁迫第 0 天显著升高 1.80~8.15 倍。POD 活性的持续增强表明，大果沙枣主要通过激活 POD 途径来应对长期盐胁迫引发的氧化损伤。

2.2.3　*过氧化氢酶活性的变化*　如图 7 所示，盐胁迫下，过氧化氢酶（CAT）活性整体呈先升后降的变化趋势。胁迫第 0 天时，多数品种 CAT 活性均低于对照组，其中麦盖提 3 号受抑制最为明显（为对照的 84.34%）。胁迫中期（15 d），雅丰 CAT 活性迅速上升至峰值 405.783 U·g^{-1}，较胁迫第 0 天显著升高 1.39 倍，为同期对照组的 193.04%，表现出快速的应激响应能力。然而，随着胁迫的持续，所有品种的 CAT 活性在后期均下降；至第 30 天时，巴楚 1 号 CAT 活性降至最低（149.383 U·g^{-1}）。上述结果表明，CAT 活性响应主要集中在胁迫中期，可能在长期高强度

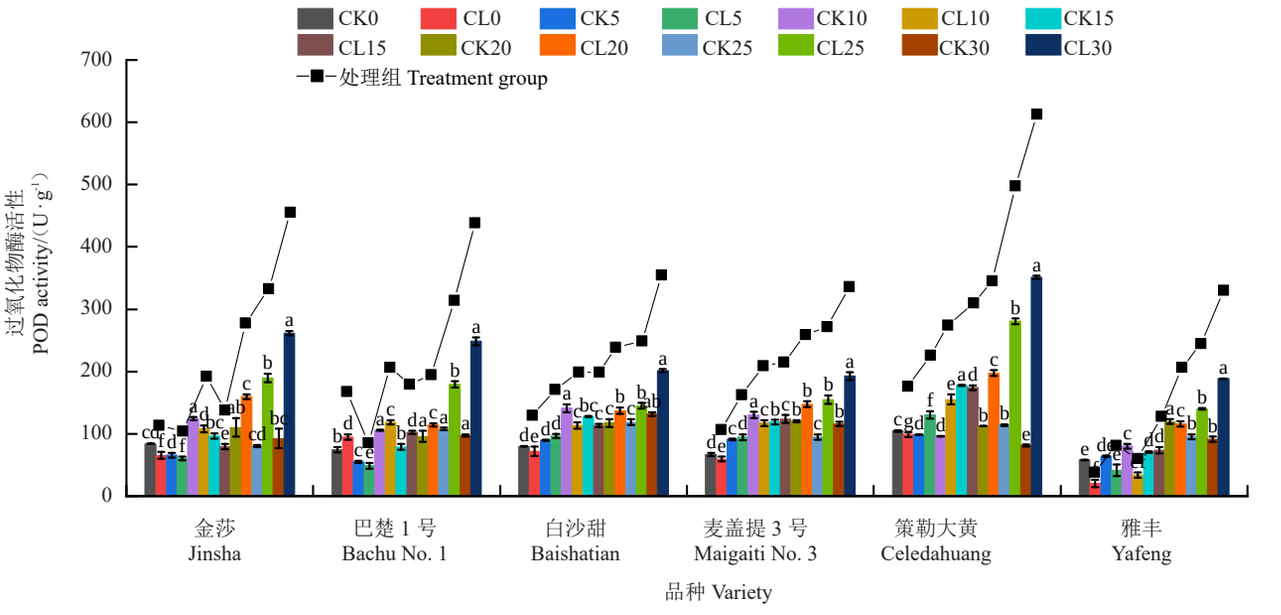


图 6 盐胁迫下 6 个品种大果沙枣 POD 活性的比较

Fig. 6 Comparison of POD activity in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

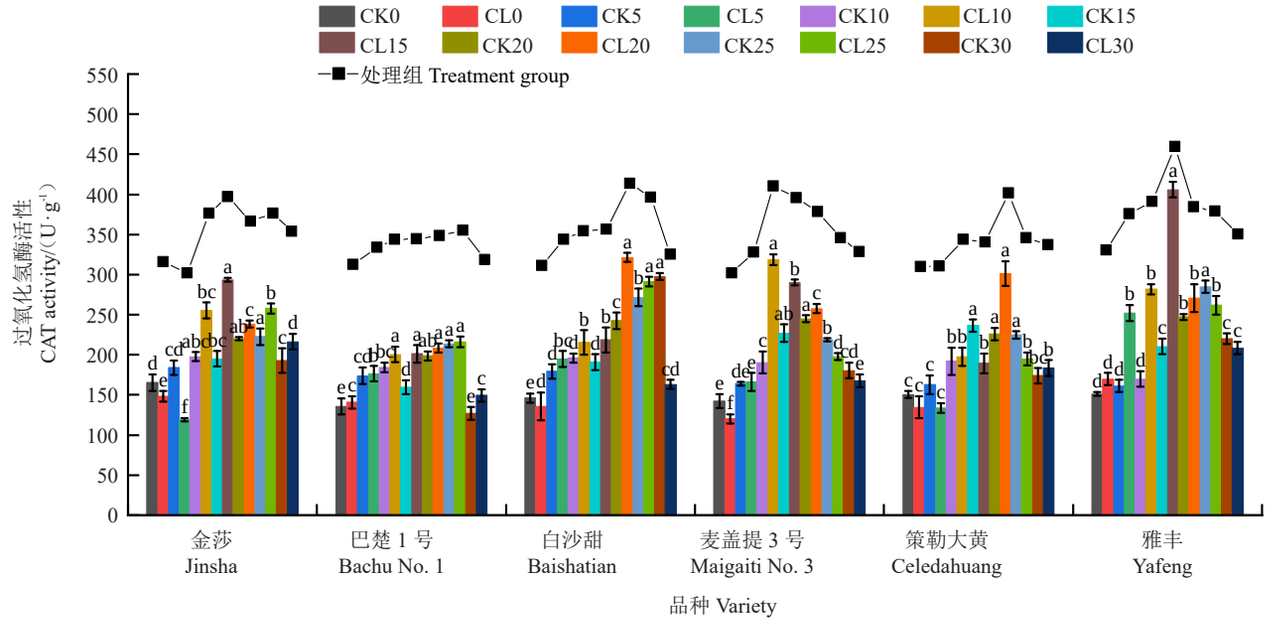


图 7 盐胁迫下 6 个品种大果沙枣 CAT 活性的比较

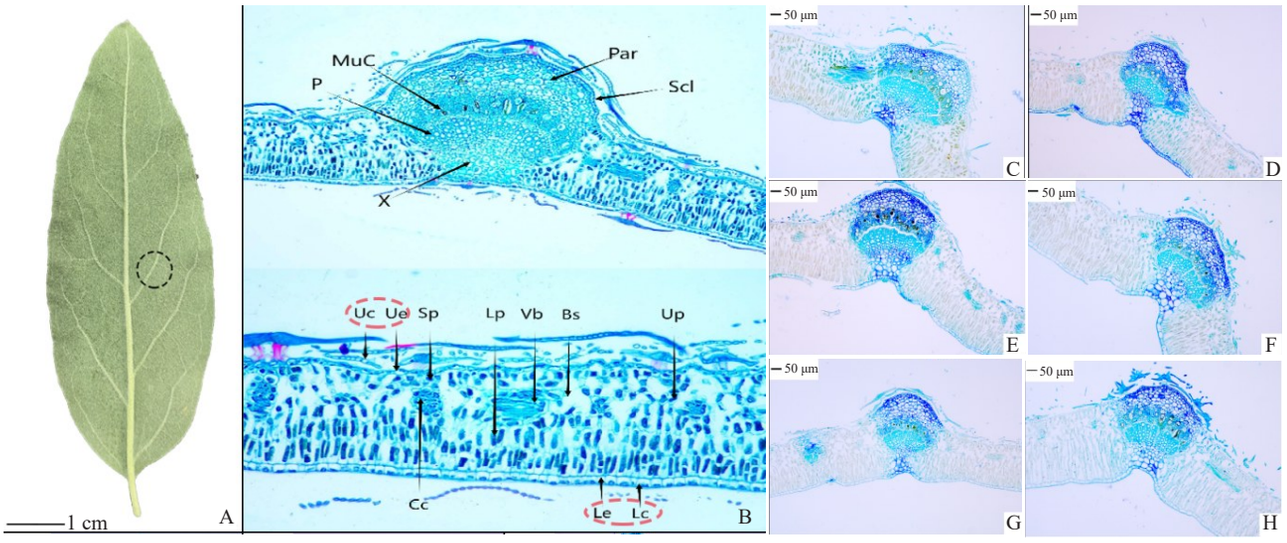
Fig. 7 Comparison of CAT activity in six varieties of *Elaeagnus moorcroftii* under salt stress

胁迫下其活性维持能力有限。

2.3 盐胁迫对大果沙枣幼苗叶片及茎形态组织结构的影响

2.3.1 *叶片解剖结构特征* 盐胁迫下，各品种大果沙枣幼苗叶片解剖结构呈现典型双子叶植物特征，但品种间存在明显差异（图 8）。金莎与巴楚 1 号的主脉韧皮部、维管束较为发达；麦盖提 3 号的海绵组织中可见排列规律的含晶细胞；白沙甜的下表皮细胞外壁明显增厚；策勒大黄的叶肉组织排列疏松，细胞间隙较大，海绵组织分布稀疏且主脉次生组织较少；雅丰的叶肉组织细胞排列紧密，栅栏组织发达且占据较大空间。

2.3.2 *盐胁迫对叶片解剖指标的影响* 由表 1 可知，盐胁迫显著影响叶片解剖结构。与对照组（CK）相比，胁迫组（CL）的叶片厚度（TL）和主脉厚度（MVT）均发生显著变化（$P<0.05$）。其中，白沙甜



本图像在 10×10 倍数下应用显微镜摄像头拍摄得到。A. 叶片解剖位置；B. 叶片石蜡切片显微结构；C. 金莎；D. 巴楚 1 号；E. 麦盖提 3 号；F. 白沙甜；G. 策勒大黄；H. 雅丰。P. 韧皮部；MuC. 黏液细胞；Par. 薄壁组织；Scl. 厚壁组织；X. 木质部；Uc. 上表皮角质层；Ue. 上表皮细胞；Sp. 海绵细胞；Lp. 下表皮栅栏细胞；Vb. 维管束；Bs. 维管束鞘；Up. 上表皮栅栏细胞；Cc. 含晶细胞；Le. 下表皮细胞；Lc. 下表皮角质层。

This image was captured by a microscope camera under a 10× × 10× objective. A. Schematic diagram of the leaf showing the anatomical location; B. Light micrograph of the leaf paraffin section; C. Jinsha; D. Bachu No. 1; E. Maigaiti No. 3; F. Baishatian; G. Celedahuang; H. Yafeng; P. Phloem; MuC. Mucus cells; Par. Thin-walled tissue; Scl. Thick walled tissue; X. Xylem; Uc. Upper epidermal stratum corneum; Ue. Upper epidermal cells; Sp. Sponge cells; Lp. Lower epidermal palisade cells; Vb. Vascular bundle; Bs. Vascular bundle sheath; Up. Upper epidermal palisade cells; Cc. Crystal-containing cells; Le. Lower epidermal cells; Lc. Lower epidermal stratum corneum.

图 8　大果沙枣叶解剖结构的差异性比较

Fig. 8　Comparison of anatomical differences in the leaves of *Elaeagnus moorcroftii*

表 1　盐胁迫对 6 个品种大果沙枣叶解剖结构的影响

Table 1　Effects of salt stress on the anatomical structure of leaves of six varieties of *Elaeagnus moorcroftii*

指标 Index	处理组 Treatment group	品种 Variety					
		金莎 Jinsha	巴楚 1 号 Bachu No. 1	麦盖提 3 号 Maigaiti No. 3	白沙甜 Baishatian	策勒大黄 Celedahuang	雅丰 Yafeng
叶片厚度 Leaf lamina thickness/μm	CK	248.22±10.71 aA	207.64±7.51 aAB	204.27±7.73 bBC	199.80±8.97 bC*	197.41±10.1 bC	234.72±4.67 bC*
	CL	232.12±4.33 bAB	201.27±8.42 cBC	199.75±2.90 cBC	258.87±8.69 aA*	193.84±14.25 cC	251.00±1.73 abA*
主脉厚度 Main vein thickness/μm	CK	366.7±11.47 aA	265.43±14.90 cC*	361.69±8.56 aA*	344.96±9.18 aA	360.64±8.91 aA*	301.90±4.74 bB
	CL	363.65±10.68 aA	316.37±0.58 bB*	329.06±9.17 bB*	328.22±6.34 bB	288.56±4.18 cC*	312.03±9.01 bBC
上表皮细胞厚度 Thickness of upper epidermis/μm	CK	5.96±0.43 aA	5.67±0.77 aA	6.50±0.76 aA	5.68±0.37 aA	5.94±0.75 aA	6.37±0.95 aA
	CL	5.52±0.13 abA	5.07±0.46 bA	6.68±0.70 aA	6.49±0.58 abA	6.33±0.15 abA	6.30±0.81 abA
下表皮细胞厚度 Thickness of lower epidermis/μm	CK	8.58±0.27 bB	10.65±0.95 abAB*	10.54±0.67 abAB	12.35±1.79 aAB	12.83±1.66 aA	11.29±0.72 abAB*
	CL	10.29±1.26 bA	12.71±0.67 abA*	11.83±1.85 abA	13.93±1.26 aA	11.45±0.76 abA	14.05±1.50 aA*
细胞结构紧实度 Cell structural compactness/%	CK	46.18±0.01 aA	57.13±0.05 aA	57.19±0.03 aA	55.59±0.07 aA	44.79±0.10 aA	56.52±0.03 aA
	CL	45.90±0.03 bB	52.72±0.03 abAB	54.11±0.03 aAB	55.09±0.04 aAB	44.71±0.01 bB	56.63±0.01 aA

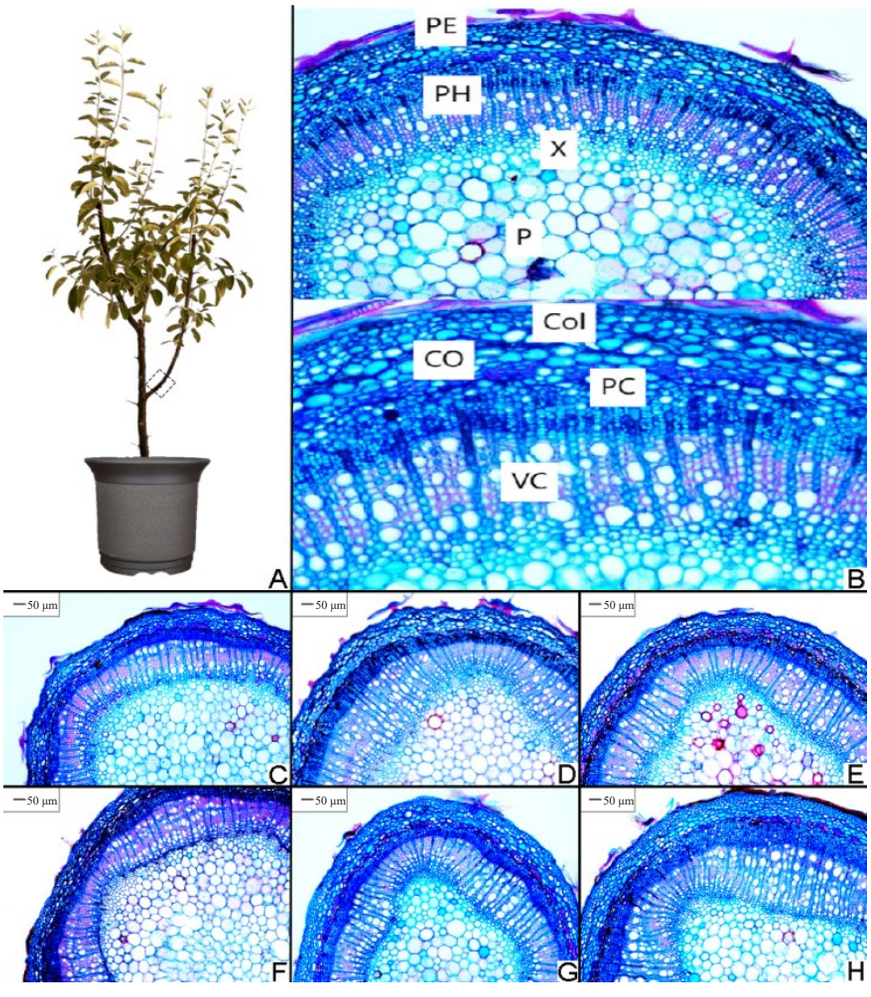
注：*表示同一品种在不同处理间差异显著（$P<0.05$）；不同字母表示同一处理在不同品种间差异显著，小写字母表示 $P<0.05$，大写字母表示 $P<0.01$。下同。

Note：* indicates significant difference between different treatments of the same variety ($P<0.05$); Different letters indicate significant difference in the same treatment among different varieties, lowercase letters indicate $P<0.05$, and uppercase letters indicate $P<0.01$. The same below.

和雅丰的叶片厚度增加最为显著，分别较CK增加29.56%和6.94%；金莎的主脉厚度最大，而策勒大黄最小，分别较CK减小0.83%和19.99%。策勒大黄和金莎的叶肉细胞紧实度（CTR）与巴楚1号无显著差异，而显著低于其他品种。然而，各品种的上表皮细胞厚度（UE）在对照与处理间均无显著差异（$P>0.05$）。以上研究结果表明，盐胁迫主要影响叶肉组织和主脉的发育，而对上表皮细胞厚度的影响较小。

2.3.3 茎解剖结构特征 茎组织解剖观察表明（图9），盐胁迫下各品种茎结构均具备双子叶木本植物的典型特征，但品种间适应性结构存在差异。麦盖提3号、金莎和巴楚1号的导管周围厚壁细胞直径较小；白沙甜的维管形成层较厚，髓部占横切面比例较大；策勒大黄的髓部导管直径普遍偏小且多分布于边缘区域；雅丰的木质部则尤为发达。上述结构特征反映了不同品种在水分输导与机械支撑方面的适应策略。

2.3.4 盐胁迫对茎解剖指标的影响 盐胁迫对茎解剖结构产生了显著影响（表2）。与CK相比，CL组在髓半径（ME）、维管束半径（VB）、木质部半径（X）和韧皮部半径（PH）等指标上均发生显著变化（$P<0.05$）。巴楚1号的髓半径增幅最大（80.93%），策勒大黄增幅最小（5.02%）。雅丰在VB、X和PH方面均显著大于巴楚1号外的其他品种，较CK分别增大



图像在10×10倍数下应用显微镜摄像头拍摄 . A. 植株整体形态；B. 茎横切面的石蜡切片显微结构图；C. 金莎；D. 巴楚 1 号；E. 麦盖提 3 号；F. 白沙甜；G. 策勒大黄；H. 雅丰。PE. 表皮；CO. 皮层；Col. 厚角组织；PC. 薄壁组织；PH. 韧皮部；VC. 维管形成层；X. 木质部；P. 髓。

This image was captured by a microscope camera under a 10× × 10× objective. A. Overall morphology of the plant; B. Microscopic structure of the stem paraffin section; C. Jinsha; D. Bachu No. 1; E. Maigaiti No. 3; F. Baishatian; G. Celedahuang; H. Yafeng; PE. Epidermis; CO. Cortex; Col. Collenchyma; PC. parenchyma; PH. Phloem; VC. Vascular formation layers; X. Xylem; P. Pith.

图9 大果沙枣茎解剖结构的差异性比较

Fig. 9 Comparison of anatomical differences in the stem structure of *Elaeagnus moorcroftii*

表2　盐胁迫对6个品种大果沙枣茎解剖结构的影响

Table 2　Effects of salt stress on the anatomical structure of six varieties of *Elaeagnus moorcroftii*

指标 Index	处理组 Treatment group	品种 Variety		
		金莎 Jinsha	巴楚1号 Bachu No. 1	麦盖提3号 Maigaiti No. 3
髓半径 Marrow radius/μm	CK	327.83±19.53 bB	265.51±31.65 cBC*	407.49±14.38 aA*
	CL	361.62±13.17 cC	480.38±6.42 aA*	361.45±18.14 cC*
维管束半径 Vascular bundle radius/μm	CK	162.92±8.27 abAB*	109.79±4.05 cC*	189.18±12.01 aA
	CL	124.92±11.39 dD*	215.11±16.37 abAB*	167.95±10.28 cC
木质部半径 Xylem radius/μm	CK	117.38±10.96 abAB*	75.23±4.09 cC*	142.73±14.82 aA
	CL	87.87±9.93 dC*	150.79±10.90 abAB*	123.51±14.25 cB
韧皮部半径 Phloem radius/μm	CK	45.54±2.80 bAB*	34.56±2.98 bB*	46.44±3.36 abAB
	CL	37.05±1.74 cC*	64.32±11.41 abAB*	44.44±5.43 cBC
髓占比 Proportion of marrow/%	CK	54.84±0.03 bcAB*	59.40±0.08 abcAB	59.08±0.02 abcAB
	CL	63.95±0.04 aAB*	62.18±0.01 abAB	54.34±0.04 cBC
维管束占比 Proportion of vascular bundles/%	CK	27.28±0.02 aA*	24.52±0.01 aA	27.42±0.01 aA
	CL	22.04±0.01 dC*	27.83±0.02 bcAB	25.20±0.01 cdBC
木质部占比 Proportion of xylem/%	CK	19.66±0.02 abA*	16.81±0.01 abA*	20.68±0.02 aA
	CL	15.49±0.01 dC*	19.49±0.01 bcABC*	18.52±0.02 cdBC
韧皮部占比 Proportion of phloem/%	CK	7.62±0.00 abAB*	7.71±0.01 abAB	6.74±0.01 bB
	CL	6.54±0.00 bA*	8.33±0.02 abA	6.68±0.01 bA

指标 Index	处理组 Treatment group	品种 Variety		
		白沙甜 Baishatian	策勒大黄 Celedahuang	雅丰 Yafeng
髓半径 Marrow radius/μm	CK	436.43±8.01 aA	246.60±11.52 cC	416.47±11.27 aA
	CL	434.20±6.68 bB	258.98±12.67 dD	407.09±15.49 bB
维管束半径 Vascular bundle radius/μm	CK	158.37±16.35 bAB	141.62±7.74 bBC*	150.00±7.03 bB*
	CL	185.66±7.86 bcBC	160.32±7.17 cCD*	239.30±9.38 aA*
木质部半径 Xylem radius/μm	CK	97.05±8.91 bcBC*	93.09±12.21 bcBC*	101.71±8.11 bcBC*
	CL	135.21±6.98 bcB*	118.59±8.52 cBC*	171.61±5.54 aA*
韧皮部半径 Phloem radius/μm	CK	61.31±7.61 aA	48.53±4.48 abAB	48.29±8.48 abAB*
	CL	50.45±3.82 bcABC	41.73±1.84 cC	67.68±4.14 aA*
髓占比 Proportion of marrow/%	CK	64.40±0.02 abA	49.87±0.03 cB	67.73±0.02 aA*
	CL	64.67±0.01 aA	48.80±0.02 cC	54.39±0.02 bcBC*
维管束占比 Proportion of vascular bundles/%	CK	23.40±0.03 aA	28.66±0.02 aA	24.43±0.02 aA*
	CL	27.66±0.01 bcAB	30.21±0.01 abA	31.96±0.01 aA*
木质部占比 Proportion of xylem/%	CK	14.34±0.02 bA*	18.86±0.03 abA*	16.60±0.02 abA*
	CL	20.14±0.01 abcAB*	22.33±0.01 abAB*	22.93±0.01 aA*
韧皮部占比 Proportion of phloem/%	CK	9.07±0.01 abAB	9.80±0.01 aA*	7.83±0.01 abAB
	CL	7.52±0.01 abA	7.88±0.01 abA*	9.04±0.01 aA

59.53%、68.72%和40.15%；而金莎的VB、X和PH均显著减小。在组织比例方面，所有指标均发生显著改变。上述研究结果表明，盐胁迫明显改变了茎的解剖结构。其中，雅丰的结构适应性最强，而金莎最为敏感。

2.4　基于主成分分析的耐盐性综合评价

2.4.1　*主成分分析*　为综合评价6个大果沙枣品种的耐盐性，本研究对盐胁迫下幼苗的7项关键生理生化指标进行了主成分分析（PCA）。由表3可知，前3个主成分（PC1、PC2、PC3）的累计贡献率达84.980%，能够较好地代表原始指标所包含的信息。其中，PC1的贡献率为48.317%，其特征向量中SP含量（−0.995）和CAT活性（−0.870）的载荷绝对值较大，主要反映植物的渗透调节与过氧化氢清除能力；PC2的贡献率为21.306%，与MDA含量（0.813）和SS含量（−0.710）密切相关，代表膜脂过氧化程度及碳代谢响应；PC3的贡献率为15.357%，与SOD活性（0.647）关联较强，主要反映超氧自由基的清除能力。

2.4.2　*耐盐性排序*　基于主成分分析结果，计算各品种的主成分得分及综合得分。由表4可知，在第

表3 生理生化指标R型分析主分量

Table 3 Principal components derived from R-mode analysis of physiological and biochemical indicators

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3
SP含量 SP content	−0.995	−0.030	−0.092
CAT活性 CAT activity	−0.870	−0.276	0.207
POD活性 POD activity	0.818	−0.170	−0.467
Pro含量 Pro content	0.704	0.005	0.469
MDA含量 MDA content	0.161	0.813	−0.409
SS含量 SS content	0.586	−0.710	−0.001
SOD活性 SOD activity	0.320	0.470	0.647
特征值Eigenvalue	3.382	1.491	1.075
贡献率Contribution rate/%	48.317	21.306	15.357
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	48.317	69.623	84.980

表4 不同品种大果沙枣综合得分和排名

Table 4 Comprehensive scores and ranking of six *Elaeagnus moorcroftii* varieties

品种 Variety	PC1得分 PC1 score	PC2得分 PC2 score	PC3得分 PC3 score	综合得分 Composite score	排名 Ranking
金莎Jinsha	−1.770	−0.560	−0.601	−1.067	6
巴楚1号 Bachu No. 1	−1.244	1.458	−0.387	−0.350	5
麦盖提3号 Maigaiti No. 3	1.091	−0.775	−0.621	0.266	3
白沙甜 Baishatian	0.760	1.110	−0.147	0.581	2
策勒大黄 Celedahuang	−0.561	−0.379	1.035	−0.193	4
雅丰Yafeng	1.725	−0.855	0.722	0.762	1

一主成分（PC1）上，雅丰、麦盖提3号和白沙甜得分较高，表明其具有较强的渗透调节与初级抗氧化能力。在第二主成分（PC2）上，巴楚1号和白沙甜得分较高。在第三主成分（PC3）上，策勒大黄和雅丰表现突出。根据综合得分排序，6个品种的耐盐性由强到弱依次为雅丰＞白沙甜＞麦盖提3号＞策勒大黄＞巴楚1号＞金莎。

3 讨 论

土壤盐渍化通过引发渗透胁迫、离子毒害及氧化应激等系列反应，严重影响植物正常生长发育[15]。本研究系统比较了6个大果沙枣品种在盐胁迫下的生理生化及解剖结构响应，结果表明，品种间耐盐性存在明显差异，其适应机制主要体现在渗透调节、抗氧化防御及结构重塑三方面。

在渗透调节方面，随着胁迫时间的延长，大果沙枣幼树通过积累可溶性糖与脯氨酸等有机溶质以维持细胞渗透平衡[16]。可溶性蛋白含量呈先上升后下降趋势，暗示其在胁迫初期参与渗透调节，而在胁迫后期可能因蛋白质降解加速或合成受抑而下降，这与周晓瑾等[17]、孙聪聪等[18]在银杏中的研究结论一致。不同品种的渗透物质积累动态存在差异，如金莎和巴楚1号在胁迫中后期Pro显著积累，而雅丰和麦盖提3号则在较早阶段启动SP快速合成响应，反映出品种间渗透调节策略的时序差异。

在抗氧化酶系统方面，SOD、POD和CAT活性的变化共同反映了大果沙枣对盐诱导氧化胁迫的协同应对。胁迫初期，SOD活性上升，表明植株能够积极清除超氧自由基；胁迫后期其活性下降，可能与酶蛋白质降解或活性氧过量产生有关。这与NaCl胁迫下藜麦的抗氧化酶活性响应相似[19]。POD活性在整个胁迫期间持续增强，尤其在策勒大黄中表现突出，表明其在该品种的抗氧化防御中发挥主导作用。CAT活性则呈现先上升后下降趋势，与NaCl胁迫下苹果砧木的响应模式相似[20]，表明其在胁迫中期发挥关键作用。不同酶类活性的动态变化表明，大果沙枣的抗氧化防御具有时间依赖性和品种特异性。

在解剖结构方面，耐盐性较强的品种（如雅丰、白沙甜）表现出更有利于维持水分平衡和减少胁迫损伤的结构特征。雅丰叶片栅栏组织发达、细胞排列紧密、茎中木质部增厚等有助于提高水分输导效率和提高机械支持力；白沙甜叶片下表皮细胞外壁加厚、维管形成层发达，可能利于减少水分流失和促进物质运输。相比之下，策勒大黄叶肉组织疏松、细胞间隙大，金莎维管组织发育较弱，这些结构特征可能削弱了其耐盐能力。结构适应性变化与刘睿等[21]

在木榄和朱宇旌等[22]在小花碱茅中的研究结果相似，进一步证实了植物通过结构调整增强对盐胁迫的适应性。

基于主成分分析结果，SP含量、MDA含量和SOD活性是区分大果沙枣耐盐性的关键指标，分别代表渗透调节能力、膜损伤程度和抗氧化潜力。综合来看，雅丰在生理响应与结构适应方面均表现优异，其强耐盐性源于突出的渗透调节能力、稳定的膜系统及发达的输导结构；而金莎在多项指标中表现较弱，耐盐性相对较差。本研究为大果沙枣耐盐品种选育提供了理论依据，也为进一步解析其耐盐分子机制奠定了基础。

4　结　论

本研究通过分析盐胁迫下6个大果沙枣品种的生理生化指标与解剖结构变化，系统评价了其耐盐性强弱及适应机制。幼苗通过动态调节渗透物质（可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白）含量与抗氧化酶（SOD、POD、CAT）活性以应对盐胁迫。其中，丙二醛含量持续上升，反映了盐胁迫下不同程度的膜脂过氧化损伤。耐盐性较强的品种（如雅丰、白沙甜）具有叶片栅栏组织发达、细胞排列紧密、茎木质部增厚等有利于水分维持与输导的结构特征。可溶性蛋白含量、丙二醛含量及超氧化物歧化酶活性是评价大果沙枣耐盐性的关键指标。综合来看，6个品种的耐盐性由强至弱依次为雅丰＞白沙甜＞麦盖提3号＞巴楚1号＞策勒大黄＞金莎。本研究从生理生化响应与结构适应两方面揭示了大果沙枣不同品种的耐盐机制，为耐盐种质选育及其在盐渍化地区的推广种植提供了理论依据与实践参考。

参考文献 References：

[1] Zhang M J，Liu Y L，Han G L，Zhang Y，Wang B S，Chen M. Salt tolerance mechanisms in trees：Research progress[J]. Trees，2021，35(3)：717-730.

[2] 杨宁，练慧雯，汪阳东，陈益存，施翔 . 盐胁迫下弗吉尼亚栎生理响应与耐盐性评价[J]. 生态学杂志，2025，44(9)：2895-2906.
Yang Ning，Lian Huiwen，Wang Yangdong，Chen Yicun，Shi Xiang. Physiological response and salt tolerance evaluation of *Quercus virginiana* under salt stress[J]. Chinese Journal of Ecology，2025，44(9)：2895-2906.

[3] 刘巧玲，刘丽燕，盛玮 . 新疆大果沙枣果实营养分析及开发利用[J]. 现代园艺，2021，44(9)：54-56.
Liu Qiaoling，Liu Liyan，Sheng Wei. Nutritional analysis and development utilization of *E. moorcroftii* Wall. ex Schlecht.[J]. Contemporary Horticulture，2021，44(9)：54-56.

[4] 陈建新，李明，王娟，吕艳娥，赵金娜，张赛丰，程丹，吕晋慧 . 不同处理方式对沙枣种子萌发的影响研究[J]. 种子，2022，41(6)：70-75.
Chen Jianxin，Li Ming，Wang Juan，Lü Yan’e，Zhao Jinna，Zhang Qianfeng，Cheng Dan，Lü Jinhui. Study on effects of different treatments on seed germination of *Elaeagnus angustifolia* L.[J]. Seed，2022，41(6)：70-75.

[5] 乔梅生，季志平 . 沙枣幼苗在干旱胁迫下的光合特性研究[J]. 陕西林业科技，2022，50(2)：5-8.
Qiao Meisheng，Ji Zhiping. Photosynthetic characteristics of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under drought stress[J]. Shaanxi Forest Science and Technology，2022，50(2)：5-8.

[6] 蔡粟唯 . 外源钙对盐碱胁迫下沙枣的生理影响研究[D]. 长春：吉林农业大学，2022.
Cai Suwei. Physiological effects of exogenous ealcium on *Elaeagnus angustifolia* under saline-alkali stress[D]. Changchun：Jilin Agricultural University，2022.

[7] 武海雯，杨秀艳，王计平，刘正祥，朱建峰，张华新 . 沙枣改善盐碱土壤养分的研究进展[J]. 生态学杂志，2019，38(11)：3527-3534.
Wu Haiwen，Yang Xiuyan，Wang Jiping，Liu Zhengxiang，Zhu Jianfeng，Zhang Huaxin. A review on the improvement of salt-affected soil nutrients by *Elaeagnus angustifolia* L.[J]. Chinese Journal of Ecology，2019，38(11)：3527-3534.

[8] 代金玲，锡林呼，张胜利，白玉娥 . 沙枣耐盐性研究进展[J]. 世界林业研究，2019，32(2)：19-23.
Dai Jinling，Xi Linhu，Zhang Shengli，Bai Yu’e. Research progress on salt tolerance of *Elaeagnus angustifolia*[J]. World Forestry Research，2019，32(2)：19-23.

[9] DB65/T 4458—2021 南疆盐碱地土壤调理剂施用技术规程[S].
DB65/T 4458—2021 Technical regulations for application of soil conditioner in saline-alkali land in southern Xinjiang[S].

[10] Masayasu M，Hiroshi Y. A simplified assay method of superoxide dismutase activity for clinical use[J]. Clinica Chimica Acta，1979，92(3)：337-342.

[11] Spitz D R，Oberley L W. An assay for superoxide dismutase activity in mammalian tissue homogenates[J]. Analytical Biochemistry，1989，179(1)：8-18.

[12] Doerge D R，Divi R L，Churchwell M I. Identification of the colored guaiacol oxidation product produced by peroxidases[J]. Analytical Biochemistry，1997，250(1)：10-17.

[13] 李亚男，严炜，罗丽娟，吕玉兰，黄家雄 . 一种低毒透明剂制作植物叶片石蜡切片的方法[J]. 热带农业科学，2019，39(4)：58-61.
Li Yanan，Yan Wei，Luo Lijuan，Lü Yulan，Huang Jiaxiong. Preparation of paraffin sections of plant leaves with a low-toxic transparent agent[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture，2019，39(4)：58-61.

[14] 木巴热克·阿尤普，艾沙江·买买提，郭春苗，徐叶挺，买买提依

明•阿有甫，龚鹏，杨波 . 基于叶片显微及亚显微结构的新疆扁桃 10 个主栽品种抗旱性综合评价[J]. 果树学报，2019，36(3)：347-358.
Mubareke · Ayoupu，Aishajiang · Maimaiti，Guo Chunmiao，Xu Yeting，Maimaitiyiming · Ayoufu，Gong Peng，Yang Bo. Comprehensive evaluation of drought resistance of 10 main cultivars of almond (*Amygdalus* communis L.) in Xinjiang by means of leaf microstructure and ultrastructure[J]. Journal of Fruit Science，2019，36(3)：347-358.

[15] Morton M J L，Awlia M，Al-Tamimi N，Saade S，Pailles Y，Negrão S，Tester M. Salt stress under the scalpel-dissecting the genetics of salt tolerance[J]. The Plant Journal，2019，97(1)：148-163.

[16] 陈宏艳，李小二，李忠光 . 糖信号及其在植物响应逆境胁迫中的作用[J]. 生物技术通报，2022，38(7)：80-89.
Chen Hongyan，Li Xiaoer，Li Zhongguang. Sugar signaling and its role in plant response to environmental stress[J]. Biotechnology Bulletin，2022，38(7)：80-89.

[17] 周晓瑾，黄海霞，张婷，齐建伟，罗永忠 . 盐胁迫对裸果木幼苗生长和叶片抗逆生理指标的影响[J]. 西北植物学报，2023，43(9)：1509-1517.
Zhou Xiaojin，Huang Haixia，Zhang Ting，Qi Jianwei，Luo Yongzhong. Response of seedling growth and leaf resistance physiological indexes of *Gymnocarpos przewalskii* to NaCl stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2023，43(9)：1509-1517.

[18] 孙聪聪，赵海燕，郑彩霞 . NaCl 胁迫对银杏幼树渗透调节物质及脯氨酸代谢的影响[J]. 植物生理学报，2017，53(3)：470-476.
Sun Congcong，Zhao Haiyan，Zheng Caixia. Effects of NaCl stress on osmolyte and proline metabolism in *Ginkgo biloba* seedling[J]. Plant Physiology Journal，2017，53(3)：470-476.

[19] 刘文瑜，杨发荣，黄杰，魏玉明，金茜 . NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报，2017，37(9)：1797-1804.
Liu Wenyu，Yang Farong，Huang Jie，Wei Yuming，Jin Qian. Response of seedling growth and the activities of antioxidant enzymes of *Chenopodium quinoato* salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2017，37(9)：1797-1804.

[20] 王朱莉，金喜丽阁，李文胜，张萍 . NaCl 胁迫对 4 种苹果砧木幼苗叶片生理及光合指标的影响[J]. 果树学报，2025，42(8)：1700-1721.
Wang Zhuli，Jin Xilige，Li Wensheng，Zhang Ping. Effects of NaCl stress on leaf physiology and photosynthetic indexes of four apple rootstocks[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(8)：1700-1721.

[21] 刘睿，孙伟，巢牡香，吉成均，王旻，叶波平 . 盐胁迫下木榄幼苗叶片的解剖学变化[J]. 热带亚热带植物学报，2009，17(2)：169-175.
Liu Rui，Sun Wei，Chao Muxiang，Ji Chengjun，Wang Min，Ye Boping. Leaf anatomical changes of *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings under salt stress[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany，2009，17(2)：169-175.

[22] 朱宇旌，张勇，胡自治，阎顺国 . 小花碱茅茎适应盐胁迫的显微结构研究[J]. 中国草地，2000，22(5)：6-9.
Zhu Yujing，Zhang Yong，Hu Zizhi，Yan Shunguo. Studies on the microscopic structure of *Puccinellia tenuiflora* stem under salinity stress[J]. Grassland of China，2000，22(5)：6-9.