

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.014

引用格式:李铭怡,杨毅,郭士维,等.盐胁迫下羧甲基纤维素对植被混凝土中狗牙根生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(3):891-904

LI Ming-yi, YANG Yi, GUO Shi-wei, et al. Effects of Carboxymethyl Cellulose on the Physiological Characteristics of *Cynodon Dactylon* under Salt Stress in Vegetation Concrete[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):891-904

## 盐胁迫下羧甲基纤维素对植被混凝土中狗牙根生理特性的影响

李铭怡<sup>1,3,4</sup>, 杨毅<sup>1,3</sup>, 郭士维<sup>1,3,4</sup>, 耿启明<sup>1,3\*</sup>, 贾濠基<sup>1,3</sup>, 王福豪<sup>1,3</sup>,  
朱祥祥<sup>1,3</sup>, 刘瑛<sup>2</sup>, 许文年<sup>1,3,4</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 湖北工业大学河湖智慧健康感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北武汉 430000; 3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002; 4. 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北宜昌 443002)

**摘要:**为探究羧甲基纤维素(CMC)对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根(*Cynodon dactylon*)生理特性的影响。选择狗牙根为试验材料,通过开展控制性模拟试验,设置正常条件( $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、轻度盐胁迫( $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、中度盐胁迫( $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、重度盐胁迫( $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )四种盐分梯度和0%, 0.1%, 0.2%, 0.4%四种羧甲基纤维素浓度处理,研究羧甲基纤维素对不同盐胁迫程度下狗牙根生理特性的影响。结果表明:随着盐胁迫程度的加剧和胁迫时间的延长,狗牙根生理性能下降;羧甲基纤维素处理能有效提升狗牙根的株高、生物量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和脯氨酸含量,降低胞间 $\text{CO}_2$ 浓度和丙二醛含量,增强狗牙根的耐盐能力。正常盐分、轻度盐胁迫和中度盐胁迫施加0.4%羧甲基纤维素效果最佳,重度盐胁迫施加0.2%羧甲基纤维素效果最佳。

**关键词:**盐胁迫;植被混凝土;生态修复;羧甲基纤维素;生理特性

中图分类号:Q945.79

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0891-14

## Effects of Carboxymethyl Cellulose on the Physiological Characteristics of *Cynodon Dactylon* under Salt Stress in Vegetation Concrete

LI Ming-yi<sup>1,3,4</sup>, YANG Yi<sup>1,3</sup>, GUO Shi-wei<sup>1,3,4</sup>, GENG Qi-ming<sup>1,3\*</sup>, JIA Hao-ji<sup>1,3</sup>, WANG Fu-hao<sup>1,3</sup>,  
ZHU Xiang-xiang<sup>1,3</sup>, LIU Ying<sup>2</sup>, XU Wen-nian<sup>1,3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education(China Three Georges University), Yichang, Hubei Province 443002, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Hubei University of Technology, Wuhan, 430000, China; 3. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei Province Hubei Province 443002, China; 4. Hubei Provincial Engineering Research Center of Cement-based Ecological Restoration Technology, China Three Georges University, Yichang, Hubei Province 443002, China)

**Abstract:** To investigate the effects of Carboxymethyl cellulose (CMC) on the physiological characteristics of *Cynodon dactylon* under Salt Stress in vegetation concrete, a controlled simulation experiment was conducted. The experiment utilized *Cynodon dactylon* as the test material, with four salinity gradients [normal salt level ( $0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), mild Salt Stress ( $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), moderate Salt Stress ( $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), and severe Salt Stress ( $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )] and four CMC concentration treatments (0%, 0.1%, 0.2%, 0.4%), The study examined the impacts of CMC on the physiological characteristics of *Cynodon dactylon* under varying Salt Stress intensities. The results

收稿日期:2025-04-27;修回日期:2025-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(42207544);湖北省教育厅科学技术研究项目(D20231203);三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(2023KDZ11);湖北工业大学河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室开放研究基金项目(HGKFYB08)资助

作者简介:李铭怡(1988-),女,汉族,河北邯郸人,博士,副教授,主要从事边坡与生态防护研究,E-mail:limingyi@ctgu.edu.cn;\*通信作者 Author for correspondence, E-mail:gengqimingctgu@163.com

showed that with the intensification of Salt Stress and the extension of stress duration, the physiological performance of *Cynodon dactylon* decreased. Carboxymethyl cellulose (CMC) treatment effectively enhanced the plant height, biomass, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and proline content of *Cynodon dactylon*, reduced the intercellular CO<sub>2</sub> concentration and malondialdehyde content, and enhanced its ability of salt stress. Specifically, under normal salt conditions, mild salt stress, and moderate salt stress, the application of 0.4% CMC yielded the best promoting effect on the growth of *Cynodon dactylon*; whereas under severe Salt Stress, 0.2% CMC showed the optimal growth-promoting efficacy.

**Key words:** Salt Stress; Vegetation concrete; Ecological remediation; Carboxymethyl cellulose; Physiological property

交通、水利等工程建设在促进地方经济发展的同时不可避免地会对工程所在地的生态环境造成强烈干扰,形成了很多裸露边坡,进而引发水土流失、生态破坏、地质灾害频发等一系列问题,严重危及工程安全及扰动区周边的环境、景观与可持续发展,扰动边坡生态修复已成为全球学者重点关注的课题<sup>[1]</sup>。植被混凝土生态修复技术作为一种可以兼具工程防护和生态修复双重功能的边坡生态修复技术,通过构筑植物生长的生境基材从而达到生态恢复的目的<sup>[2]</sup>。但当工程应用到滨海、矿山等高盐地区时,受制于盐渍土的影响,植被易处于盐胁迫环境中;盐胁迫会导致植物失水、渗透失衡、光合速率下降、生长缓慢、水分和养分的吸收能力下降<sup>[3-6]</sup>,还会导致基材通透性降低、土壤肥力下降、养分利用效率低<sup>[5,7]</sup>等现象,这些因素严重影响植被混凝土边坡生态修复进程和恢复生态系统的稳定性。

羧甲基纤维素(Carboxymethyl cellulose, CMC)是一种醚类化合物,具有来源广、成本低、无毒无害和易被土壤微生物降解等优点<sup>[8]</sup>,其黏稠度高,可增加土壤颗粒间的凝聚力,具有良好的保水效果,可以作为良好的土壤改良剂<sup>[9]</sup>。同时,CMC对植物生长也有着良好的促进作用,杜甫等<sup>[10]</sup>研究表明,含CMC的复合水凝胶可以提高烟苗(*Nicotiana tabacum*)的生物量,提高烟苗的净光合速率和气孔导度,降低丙二醛含量;王永杰等<sup>[11-13]</sup>研究发现,施加CMC可以促进植物种子的生长和发育,提高植物生物量。但针对盐胁迫下植被混凝土植物生理影响的应用及报道鲜见,若能能将CMC应用在盐碱地区边坡生态修复中,将有助于解决边坡生态修复中因盐胁迫导致的植物生长受限、植被重建困难等难题。

狗牙根(*Cynodon dactylon*)作为护坡先锋植物,广泛分布于热带和亚热带地区,其种植成本低且有效规避非本地物种相关的生态风险,还具有抗逆性强、易栽培、水土保持强等特性<sup>[14]</sup>。然而CMC是否增强盐胁迫下植被混凝土中的狗牙根的抗逆性,有待进一步研究。本研究以狗牙根为试验材

料,分析不同盐胁迫程度下CMC对护坡植物狗牙根生长、光合作用和抗逆性等生理生态特征的影响,以此探讨CMC对狗牙根耐盐性的生理机制,优选出最优配比,以期为植被混凝土技术在盐碱地区推广应用提供理论和技术支撑,也为盐碱区域的植被选育和生态恢复提供新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

研究区位于湖北省宜昌市三峡大学室外植物繁育基地(30°43'31"N、111°19'28"E),属亚热带季风性湿润区,全年平均气温16.9℃,平均降雨量1215.6 mm,年日照总时数1100~1300 h。植物选用植被混凝土边坡生态修复先锋植物狗牙根,其种子由湖北润智生态科技有限公司边坡生态修复工程项目提供。涉及的主要材料包括种植土、水泥、有机物料和改良剂。所用种植土采用湖北省宜昌市本地黄棕壤土,经风干、去除根系、石子等杂质,粉碎后过2 mm筛备用,水泥选择华新水泥(宜昌)有限公司生产的P.O42.5普通硅酸盐水泥,有机物料选用锯末,购自宜昌华新木材厂,改良剂采用湖北润智生态科技有限公司生产的专利产品润智生态剂。配置方案参照国家现行能源行业标准《水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范》(NB/T 35082—2016),所配置的植被混凝土各干料质量比为种植土:水泥:有机物料:改良剂=100:8:6:4。

### 1.2 试验设计

本研究采用双因素试验,因素1为不同的盐胁迫梯度:正常条件N0(NaCl含量为0 g·kg<sup>-1</sup>)、轻度盐胁迫N1(NaCl含量为3 g·kg<sup>-1</sup>)、中度盐胁迫N2(NaCl含量为6 g·kg<sup>-1</sup>)、重度盐胁迫N3(NaCl含量为9 g·kg<sup>-1</sup>);因素2为不同浓度的CMC:CK(0%)、T1(0.1%)、T2(0.2%)、T3(0.4%),试验共16个处理,每个处理6个重复,总计96盆。植物种植采

用盆栽试验,在植被混凝土中添加不同质量的NaCl,并充分搅拌混合均匀,以此模拟盐渍土,将配置好的植被混凝土进行装盆,盆栽分为两层,先铺基层8 cm(不含种子),再铺面层2 cm(含种子),植物生长在过程中除正常浇水养护外,不添加其它物质;盐胁迫从播种时开始,分别在播种30天和60天后随机选取三个重复花盆进行植物株高、生物量、光合指标、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)的分析测定。

### 1.3 指标测定及方法

**1.3.1 生长指标测定** 用钢卷尺测量植株基部到生长点的长度为株高;将植株从基径处用剪刀分为地上和地下两部分,用清水清洗,擦拭干净后,105℃杀青15min,70℃烘干至恒重后分别测定地上部和地下部干重,记为地上生物量和地下生物量。

**1.3.2 光合指标测定** 采用LI-6400便携式光合仪在晴天上午9:00—11:00,测定狗牙根功能叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )和气孔导度( $G_s$ ),每个处理6个重复。

**1.3.3 抗逆指标测定** 脯氨酸(Pro)采用茚三酮比色法测定<sup>[15]</sup>;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定<sup>[16]</sup>。

### 1.4 数据分析

采用Excel2016和SPSS22.0进行数据统计,并进行主成分分析;使用Origin2023b作图;LSD法进

行单因素方差分析检验不同处理间显著性,并进行Pearson相关性分析;SPSS 22.0进行三因素方差分析,使用Shapiro-Wilk检验法检验数据正态性,Levene检验法检验因变量方差齐性,Mauchly检验法检验数据间独立性,构建方差分析模型,输出核心统计量,统计三个自变量单一作用、两两交互以及三者联合交互效应的显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同因子对狗牙根生理特性影响的三因素方差分析

盐浓度、CMC浓度和时间单一作用对狗牙根生理特性指标均在0.001水平具有统计学意义;盐浓度和CMC浓度交互作用对狗牙根株高和净光合速率在0.001水平具有统计学意义,对地下生物量在0.01水平具有统计学意义;盐浓度和时间交互作用对狗牙根株高、地上生物量、地下生物量和脯氨酸含量在0.001水平具有统计学意义,对丙二醛含量和胞间CO<sub>2</sub>浓度的影响分别在0.01和0.05水平具有统计学意义;CMC浓度和时间交互作用对狗牙根株高在0.001水平具有统计学意义,对狗牙根地下生物量和脯氨酸含量在0.05水平具有统计学意义;盐浓度、CMC浓度和时间三因素交互作用对狗牙根株高在0.001水平具有统计学意义,对地上生物量在0.05水平具有统计学意义。

表1 不同因子对狗牙根生长与生理特性的三因素方差分析

Table 1 Three-factor analysis of variance on the effects of different factors on the physiological characteristics of *Cynodon dactylon*

| 因子<br>Factor | 各生长指标的F值 F value of each physiological index |           |           |           |          |           |           |           |           |
|--------------|----------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | H                                            | Agb       | Ugb       | $P_n$     | $G_s$    | $C_i$     | $T_r$     | Pro       | MDA       |
| A            | 211.22***                                    | 457.97*** | 130.12*** | 68.24***  | 38.42*** | 110.08*** | 275.26*** | 258.21*** | 108.01*** |
| B            | 76.57***                                     | 36.84***  | 28.91***  | 42.38***  | 44.04*** | 23.44***  | 14.13***  | 34.04***  | 28.31***  |
| C            | 1047.27***                                   | 651.19*** | 506.25*** | 119.27*** | 97.03*** | 316.13*** | 489.49*** | 600.91*** | 189.22*** |
| A×B          | 5.09***                                      | 0.91      | 2.73**    | 4.95***   | 0.30     | 1.27      | 1.11      | 1.85      | 0.81      |
| A×C          | 52.38***                                     | 55.58***  | 31.8***   | 7.22***   | 1.69     | 3.25*     | 1.61      | 12.57***  | 4.16**    |
| B×C          | 14.79***                                     | 2.43      | 3.42*     | 1.08      | 0.34     | 0.21      | 2.09      | 3.54*     | 1.52      |
| A×B×C        | 5.43***                                      | 2.32*     | 0.95      | 0.71      | 0.54     | 0.45      | 0.14      | 1.15      | 0.61      |

注:A表示盐浓度;B表示CMC浓度;C表示时间; $P_n$ ,净光合速率, $T_r$ ,蒸腾速率, $G_s$ ,气孔导度, $C_i$ ,胞间CO<sub>2</sub>浓度,H,株高,Agb,地上生物量,Ugb,地下生物量,Pro,脯氨酸,MDA,丙二醛;\*、\*\*、\*\*\*,分别表示在0.05、0.01和0.001水平具有统计学意义

Note: A denotes salt concentration; B denotes CMC concentration; C denotes time;  $P_n$ , net photosynthetic rate;  $T_r$ , transpiration rate;  $G_s$ , stomatal conductance;  $C_i$ , intercellular CO<sub>2</sub> concentration; H, plant height; Agb, aboveground biomass; Ugb, underground biomass; Pro, proline; MDA, malondialdehyde; \*, \*\*, and \*\*\* denote statistical significance at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively

### 2.2 CMC对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根株高的影响

如图1所示,盐胁迫会抑制狗牙根的生长,而CMC处理对其有一定的缓解效果。胁迫30 d时,

CMC处理对狗牙根株高均有不同程度的增加。正常条件下,CMC处理组株高较对照组(CK)的提升未达到显著水平;轻度与重度盐胁迫下,CMC处理组株高较CK显著增加( $P<0.05$ );中度盐胁迫下,

仅 T3 处理组株高较 CK 显著提升。胁迫 60 d 时, 各盐胁迫程度下 CMC 处理组株高均与 CK 存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。正常条件与重度盐胁迫在 T2 处理

组株高达到最大值, 分别为 33.23 cm 和 17.27 cm; 轻度与中度盐胁迫在 T3 处理组株高达到最大值, 分别为 26.1 cm 和 21.5 cm。

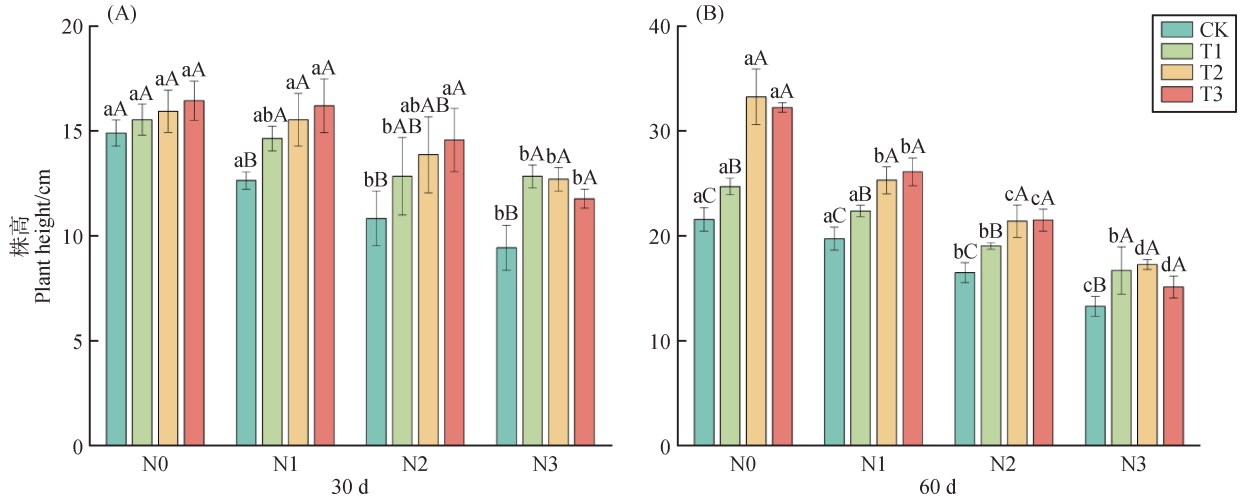


图1 不同处理对狗牙根株高的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on the plant height of *Cynodon dactylon*

注: N0, 正常条件; N1, 轻度盐胁迫; N2, 中度盐胁迫; N3, 重度盐胁迫, CK, CMC 浓度 0%; T1, CMC 浓度 0.1%; T2, CMC 浓度 0.2%; T3, CMC 浓度 0.4%。不同小写字母表示相同 CMC 浓度处理下不同盐胁迫程度间的差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示在相同盐胁迫程度不同 CMC 浓度处理下差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

Note: N0, Normal salinity; N1, Mild Salt Stress; N2, Moderate Salt Stress; N3, Severe Salt Stress. CK, Carboxymethyl cellulose (CMC) concentration at 0%; T1, CMC concentration at 0.1%; T2, CMC concentration at 0.2%; T3, CMC concentration at 0.4%. Different lowercase letters indicate significant differences among different degrees of salt stress under the treatment with the same Carboxymethyl cellulose concentration ( $P < 0.05$ ), while different uppercase letters indicate significant differences among treatments with different Carboxymethyl cellulose concentrations under the same degree of Salt Stress ( $P < 0.05$ ). The same as below

### 2.3 CMC对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根生物量的影响

如图2所示, 随着盐胁迫时间的延长, 狗牙根地上生物量整体呈上升趋势, CMC处理对盐胁迫下狗牙根的地上生物量具有显著影响 ( $P < 0.05$ )。胁迫

30d时, 与CK相比, 正常条件、轻度盐胁迫、中度盐胁迫和重度盐胁迫各处理组的地上生物量分别增加 5.38%~7.64%, 8.50%~14.80%, 14.09%~27.44% 和 13.19%~22.39%。胁迫 60 d 时, 与CK相比, 正常条件、轻度盐胁迫、中度盐胁迫和重度盐

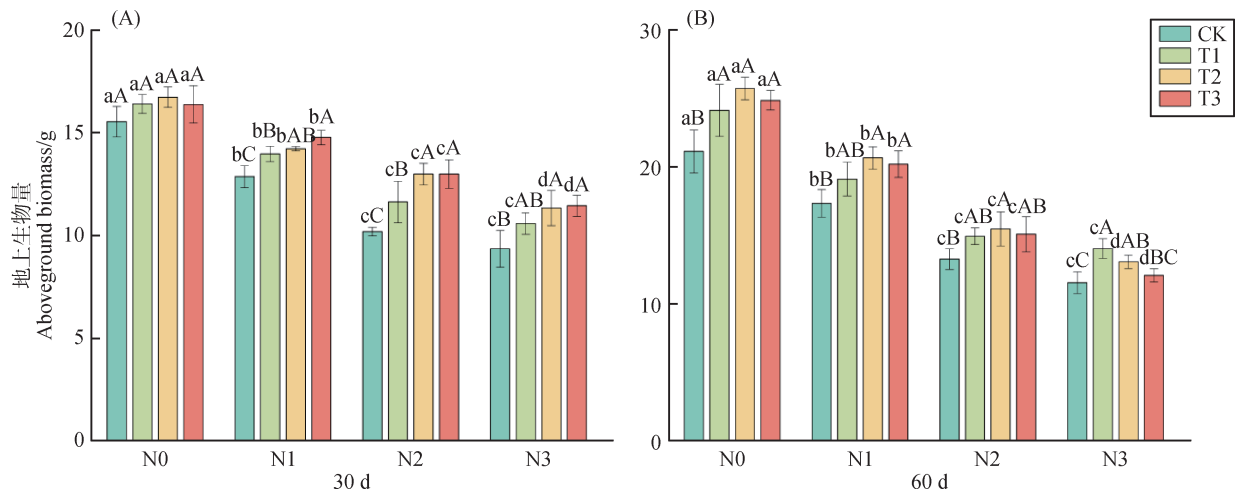


图2 不同处理对狗牙根地上生物量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on the aboveground biomass of *Cynodon dactylon*

胁迫各处理组的地上生物量分别增加 14.22%~21.72%、10.23%~19.18%、12.64%~16.66% 和 4.60%~21.66%。

如图 3 所示,随着盐胁迫时间的延长,狗牙根地下生物量整体呈上升趋势,且 CMC 处理对盐胁迫下狗牙根的地下生物量具有显著影响( $P<0.05$ )。胁迫 30 d 时,经不同浓度 CMC 处理后,狗

牙根地下生物量均有不同程度的提高;其中,除正常条件下各处理组和中度盐胁迫下 T1 处理组外,其余各处理组的地下生物量较 CK 均存在显著差异( $P<0.05$ )。胁迫 60 d 时,与 CK 相比,重度盐胁迫下 T3 处理组地下生物量下降 3.40%,但差异未达显著水平,其余各处理组的地下生物量均有所提高。

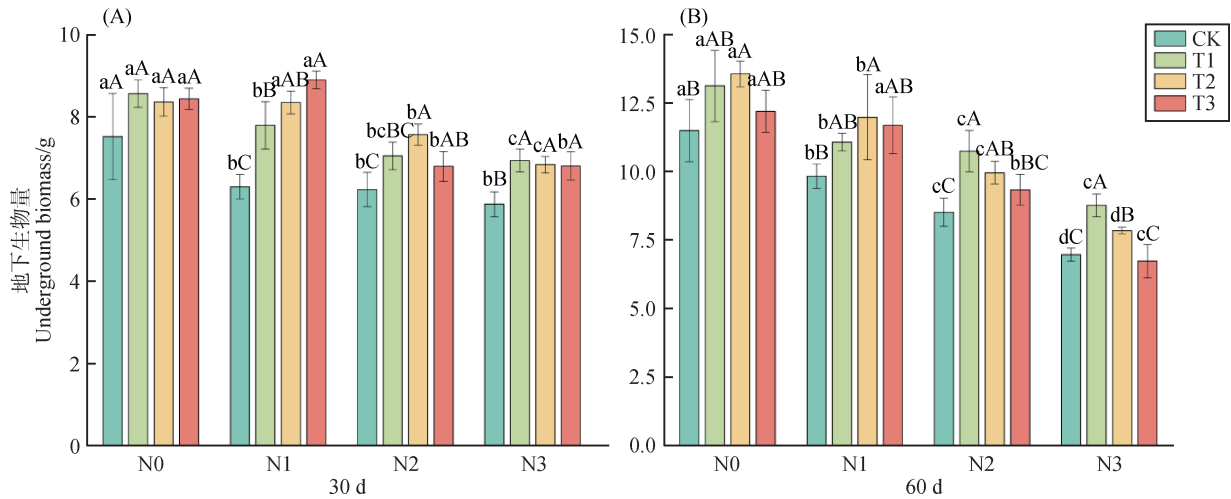


图3 不同处理对狗牙根地下生物量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the underground biomass of *Cynodon dactylon*

## 2.4 CMC对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根光合特性的影响

**2.4.1 狗牙根净光合速率变化** 植物光合特性中净光合速率作为重要的参数之一,可反映植物同化 $\text{CO}_2$ 的能力,进而反映出植株的生长状况<sup>[17]</sup>。随盐胁迫程度加剧,狗牙根 $P_n$ 整体呈下降趋势,不同浓度CMC处理对其有一定的缓解作用(图4)。胁迫30d时,中度盐胁迫下T1处理组的 $P_n$ 较CK下降3.84%,但差异不显著,其余各处理组的 $P_n$ 均有所提升;重度盐胁迫下T2处理组的 $P_n$ 提升幅度最大,其余各盐胁迫程度均在T3处理组的 $P_n$ 提升最多,且存在显著性差异( $P<0.05$ )。胁迫60d时,与CK相比,正常条件、轻度盐胁迫和中度盐胁迫的T1处理组 $P_n$ 分别下降1.17%、1.03%和3.23%,但差异均不显著;正常条件、轻度盐胁迫、中度盐胁迫和重度盐胁迫均在T3处理组的 $P_n$ 最高,分别较CK增加8.00%、14.84%、0.39%和8.84%。

**2.4.2 狗牙根气孔导度变化** 气孔是连接植物与外界大气的纽带,是植物体与外界交流的生命通道,外界 $\text{CO}_2$ 通过气孔吸收进入植物体内并进行光合作用<sup>[18]</sup>,气孔的张开程度会影响植物体细胞的生

命代谢过程和效率<sup>[19]</sup>。如图5所示,随着盐胁迫程度加剧及盐胁迫时间延长,狗牙根的 $G_s$ 整体呈显著下降趋势( $P<0.05$ )。胁迫30d时,与CK相比,狗牙根 $G_s$ 随CMC浓度升高呈逐渐上升趋势,且各盐胁迫程度均在T3处理组的 $G_s$ 增幅最为显著( $P<0.05$ )。胁迫60d时, $G_s$ 的变化趋势与30天时基本一致。与CK相比,在正常条件、轻度盐胁迫和中度盐胁迫下均以T3处理组的 $G_s$ 提升最多,分别提高9.98%、15.52%和18.05%;重度盐胁迫下则以T2处理组的提升最为显著,提高了16.15%,且差异均显著( $P<0.05$ )。

**2.4.3 狗牙根胞间 $\text{CO}_2$ 浓度变化** 如图6所示,随盐胁迫时间延长及胁迫程度加剧,狗牙根的 $C_i$ 增加总体呈上升趋势,不同浓度CMC处理后狗牙根 $C_i$ 均有所下降。胁迫30d时,正常条件下T3处理组、轻度盐胁迫下T2处理组和中度盐胁迫下T2和T3处理组的 $C_i$ 较CK存在显著性差异( $P<0.05$ );在重度盐胁迫下T1-T3处理组狗牙根 $C_i$ 较CK下降1.87%~2.93%。胁迫60d时,轻度盐胁迫下狗牙根 $C_i$ 在T2处理组降至最低,较CK下降1.87%;各盐胁迫程度均在T3处理组降至最低。

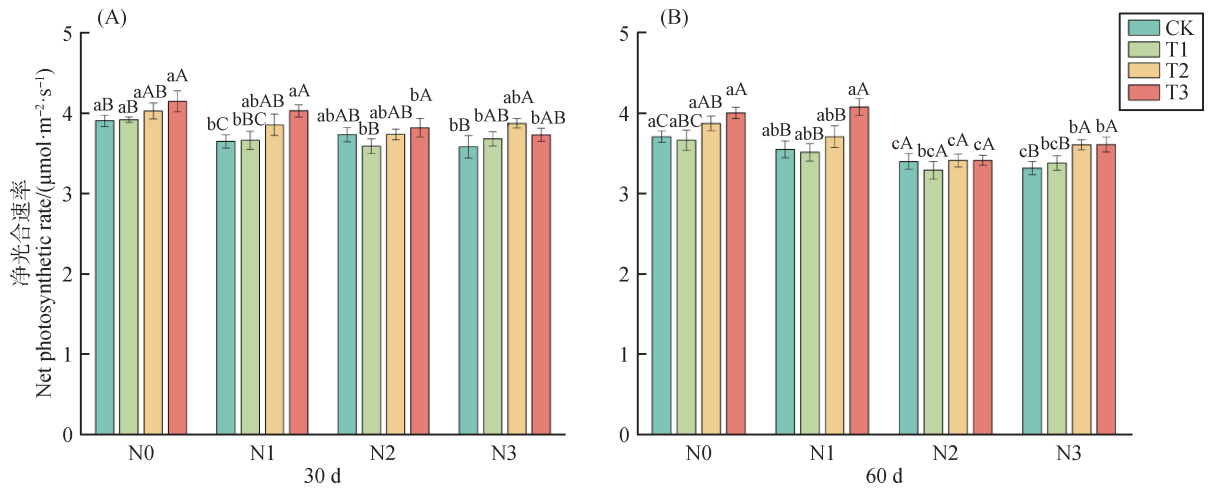


图 4 不同处理对狗牙根净光合速率的影响

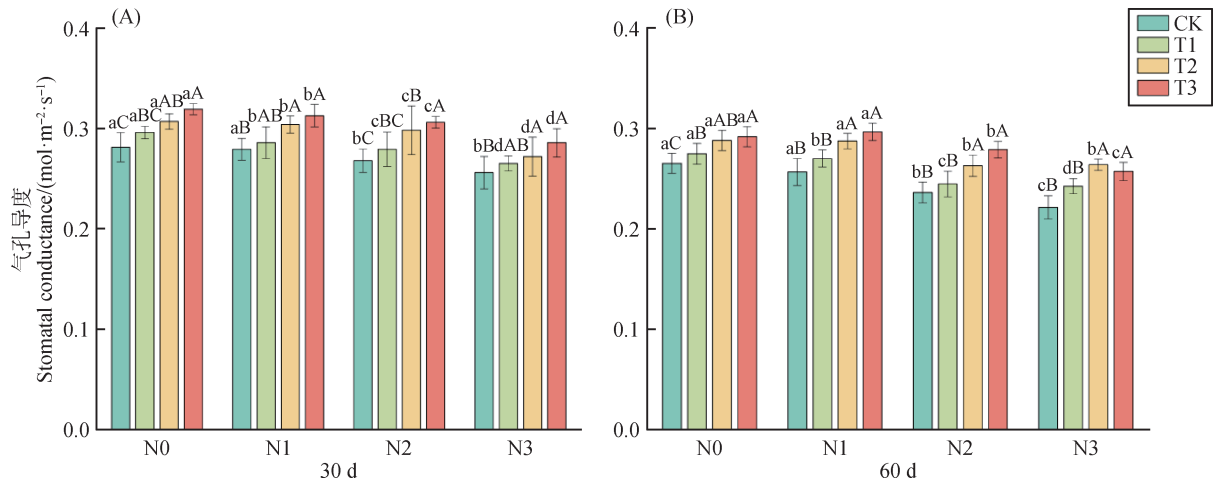
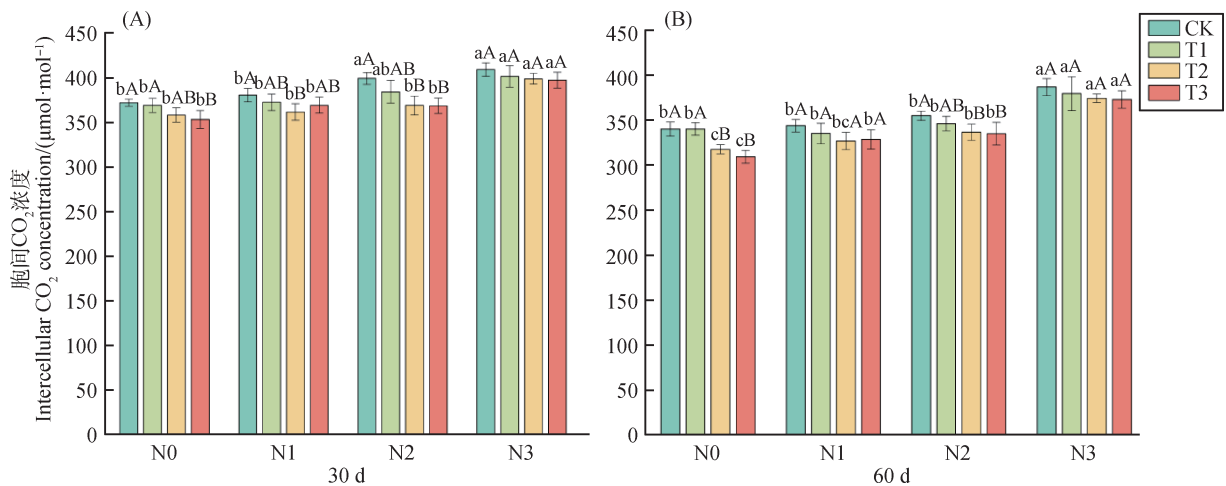
Fig. 4 Effects of different treatments on the net photosynthetic rate of *Cynodon dactylon*

图 5 不同处理对狗牙根气孔导度的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on the stomatal conductance of *Cynodon dactylon*图 6 不同处理对狗牙根胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响Fig. 6 Effects of different treatments on the intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of *Cynodon dactylon*

**2.4.4 狗牙根蒸腾速率变化** 蒸腾速率可反映植物蒸腾作用的强弱,强烈的蒸腾作用会超过植物根部对水分的吸收速度,从而造成植物的萎蔫,最终

导致死亡<sup>[20]</sup>。不同处理下,狗牙根  $T_r$  随胁迫时间延长和胁迫程度加剧呈降低趋势(图 7)。胁迫 30 d 时,与 CK 相比,CMC 处理的狗牙根  $T_r$  均有提高;其

中仅轻度盐胁迫下 T3 处理组存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余各处理组较 CK 的差异不显著。胁迫 60 d 时, 重度盐胁迫下 T2 处理组的  $T_r$  达到峰值, 其余各盐胁迫程度均在 T3 处理组达到峰值; 与 CK 相

比, 正常条件、轻度盐胁迫和重度盐胁迫下 T3 处理组的  $T_r$  分别增加 8.28%、9.69% 和 8.25%, 重度盐胁迫下 T2 处理组的  $T_r$  增加 10.12%, 且均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

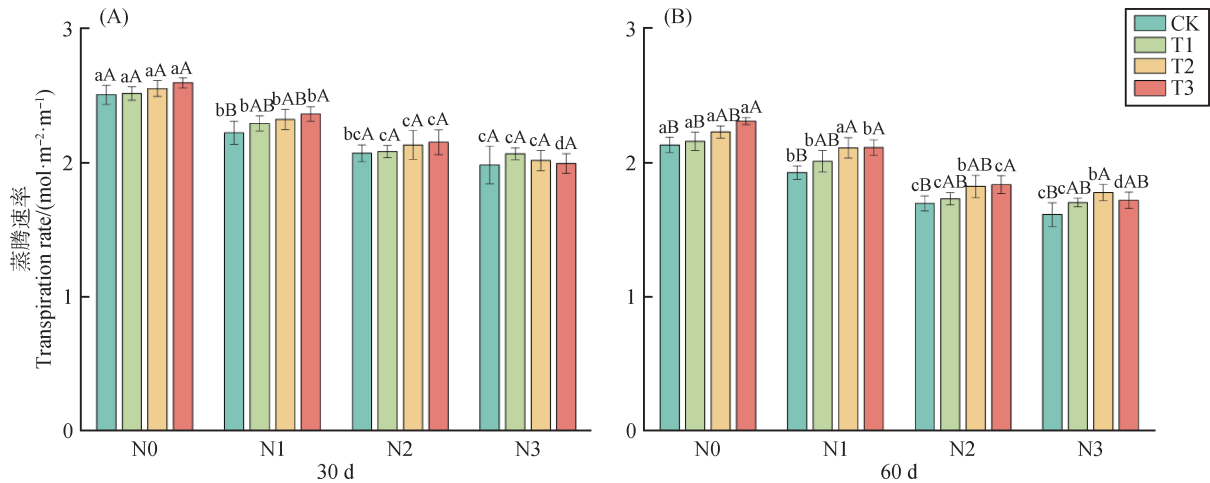


图7 不同处理对狗牙根蒸腾速率的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on the transpiration rate of *Cynodon dactylon*

## 2.5 CMC对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根Pro含量的影响

如图8所示, 狗牙根的Pro含量随着干旱程度的加剧呈上升趋势, 而不同浓度的CMC处理进一步增加了Pro含量。胁迫30 d时, 与CK相比, 各盐胁迫程度下处理组狗牙根Pro含量有所提升, 且均在T3处理组提升至最高; 其中, 正常条件、轻度盐胁迫、中

度盐胁迫和重度盐胁迫下 T3 处理组 Pro 含量较 CK 分别提升 22.34%、15.43%、12.77% 和 12.28% ( $P < 0.05$ )。胁迫 60 d 时, 其变化趋势与胁迫 30 d 时基本一致。与 CK 相比, 正常条件、轻度盐胁迫、中度盐胁迫和重度盐胁迫下的 Pro 含量分别增加 11.33%~38.50%、9.74%~19.44%、10.70%~18.47% 和 9.95%~13.96%。

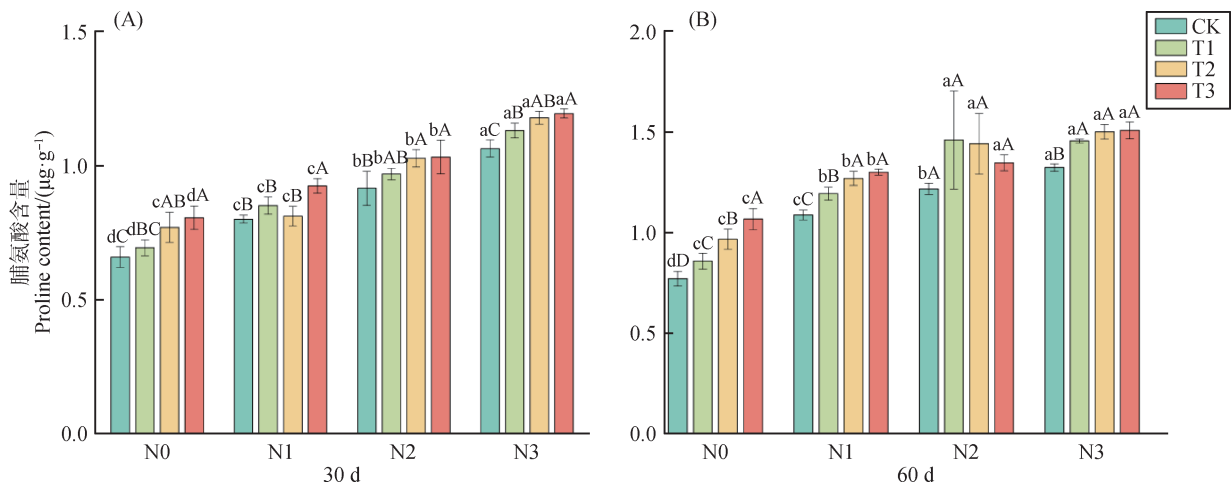


图8 不同处理对狗牙根脯氨酸的影响

Fig. 8 Effects of different treatments on proline in *Cynodon dactylon*

## 2.6 CMC对盐胁迫下植被混凝土中狗牙根MDA含量的影响

如图9所示, 随盐胁迫程度加剧, 狗牙根MDA含量呈上升趋势, 不同浓度CMC处理后, 其MDA

含量均有所降低。胁迫30 d时, 与CK相比, CMC处理均使狗牙根MDA含量下降, 但差异均不显著。胁迫60天时, 与CK相比, 正常条件和中度盐胁迫下 T2 处理组的 MDA 含量下降幅度最大, 分别为

22.91% 和 15.60%;轻度盐胁迫下 T3 处理组的 MDA 含量下降最多,下降了达 22.40%;重度盐胁迫

下 T1 处理组的 MDA 含量下降最为显著,降幅为 15.65%,且都存在显著差异( $P<0.05$ )。

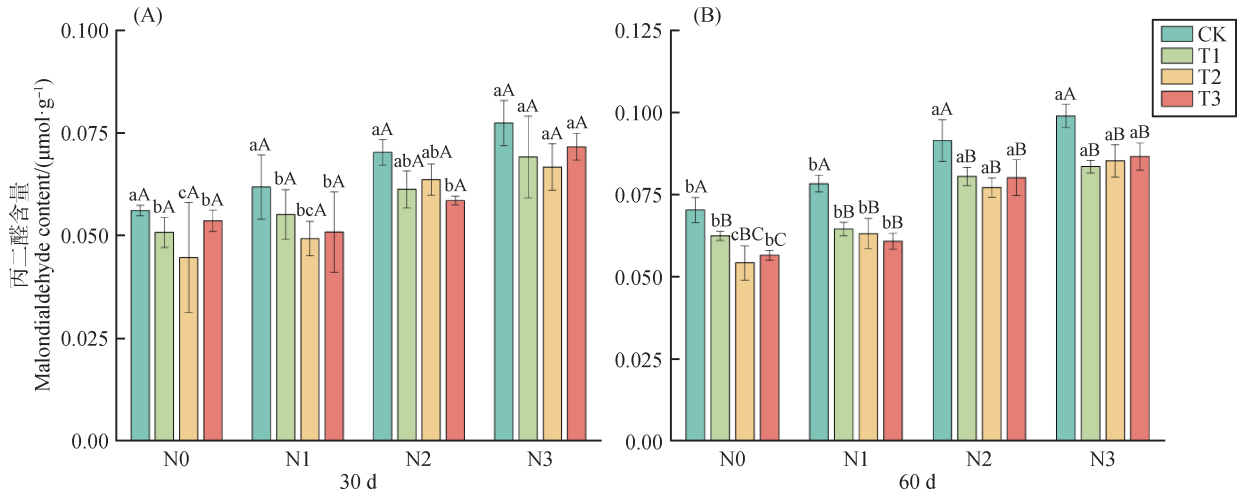


图 9 不同处理对狗牙根丙二醛的影响

Fig. 9 Effects of different treatments on Malondialdehyde in *Cynodon dactylon*

### 2.7 盐胁迫下不同 CMC 对狗牙根生理效应的综合评价

**2.7.1 相关性分析** 将 CMC 处理后 30 d、60 d 狗牙根的 9 个生长生理指标进行相关性分析,见表 2、表 3。结果表明,狗牙根的  $P_n$ 、H、Abg、Ubg、 $G_s$  与  $T_r$  呈极显著正相关( $P<0.01$ );狗牙根的  $P_n$  是反映其光合作用能力的重要指标,其高低决定了有机物质的积累量,

为植物生长发育提供能量和物质基础; $P_n$  影响着植物的生长发育,CMC 处理后  $P_n$  改善植物光合效率,增强狗牙根地下根系的生长活力和形态结构,提升其株高和生物量。 $P_n$  与  $C_i$ 、Pro、MDA 呈极显著负相关( $P<0.01$ ),随着  $P_n$  的提高,狗牙根光合能力获得改善,消耗更多的胞间二氧化碳,MDA 和 Pro 含量逐渐降低,根系吸收利用较多的光合养分和能量物质。

表 2 30 天时不同处理下狗牙根各项指标的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of each index of 30d *Cynodon dactylon* under different treatments

| 指标 Index | H        | Abg      | Ubg      | $P_n$    | $G_s$    | $C_i$    | $T_r$    | Pro     | MDA |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----|
| H        | 1        |          |          |          |          |          |          |         |     |
| Abg      | 0.839**  | 1        |          |          |          |          |          |         |     |
| Ubg      | 0.741**  | 0.796**  | 1        |          |          |          |          |         |     |
| $P_n$    | 0.663**  | 0.696**  | 0.617**  | 1        |          |          |          |         |     |
| $G_s$    | 0.634**  | 0.674**  | 0.655**  | 0.563**  | 1        |          |          |         |     |
| $C_i$    | -0.748** | -0.824** | -0.660** | -0.603** | -0.737** | 1        |          |         |     |
| $T_r$    | 0.783**  | 0.904**  | 0.699**  | 0.706**  | 0.552**  | -0.741** | 1        |         |     |
| Pro      | -0.550** | -0.737** | -0.474** | -0.392** | -0.372*  | 0.612**  | -0.805** | 1       |     |
| MDA      | -0.725** | -0.788** | -0.700** | -0.489** | -0.612** | 0.681**  | -0.731** | 0.626** | 1   |

注: \*表示相关性显著( $P<0.05$ ); \*\*表示相关性极显著( $P<0.01$ )。  $P_n$ , 净光合速率;  $T_r$ , 蒸腾速率;  $G_s$ , 气孔导度;  $C_i$ , 胞间  $CO_2$  浓度; H, 株高; Abg, 地上生物量; Ubg, 地下生物量; Pro, 脯氨酸; MDA, 丙二醛。下同

Note: \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).  $P_n$ , Net photosynthetic rate;  $T_r$ , Transpiration rate;  $G_s$ , Stomatal conductance;  $C_i$ , Intercellular  $CO_2$  concentration; H, Plant height; Abg, Aboveground biomass; Ubg, Underground biomass; Pro, Proline; MDA, Malondialdehyde. The same as below

**2.7.2 主成分分析** 将狗牙根生理指标数据进行标准化处理,消除量纲不同引起的不利影响。使用 KMO 检验法与 Barlett 球形检验法进行因子分析的适用性检验,检验结果如表 4 所示,KMO 值等于 0.727,大于 0.700; Bartlett 球形检验结果为 230.270,显著性为 0.000,表明指标间存在相互关系,彼此不相互独立,数据支持主成分分析。同时,

按照累计方差贡献率大于 85%,提取两个公因子,累计方差贡献率为 90.942%,故提取两个公因子就可以反映原变量的 90.942% 的方差,如表 5 所示。

对不同方式处理下狗牙根生理指标进行主成分分析,提取累计方差贡献率大于 85% 的第一、第二主成分,第一、第二主成分方差贡献率分别为 81.729% 和 9.213%,如表 6 所示。决定第一主成

表 3 60 天时不同处理下狗牙根各项指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of each index of 60 d *Cynodon dactylon* under different treatments

| 指标 Index | H        | Abg      | Ubg      | $P_n$    | $G_s$    | $C_i$    | $T_r$    | Pro     | MDA |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----|
| H        | 1        |          |          |          |          |          |          |         |     |
| Abg      | 0.895**  | 1        |          |          |          |          |          |         |     |
| Ubg      | 0.838**  | 0.883**  | 1        |          |          |          |          |         |     |
| $P_n$    | 0.712**  | 0.694**  | 0.544**  | 1        |          |          |          |         |     |
| $G_s$    | 0.792**  | 0.718**  | 0.623**  | 0.730**  | 1        |          |          |         |     |
| $C_i$    | -0.841** | -0.773** | -0.736** | -0.538** | -0.717** | 1        |          |         |     |
| $T_r$    | 0.886**  | 0.953**  | 0.826**  | 0.773**  | 0.799**  | -0.762** | 1        |         |     |
| Pro      | -0.509** | -0.718** | -0.633** | -0.412** | -0.269   | 0.472**  | -0.670** | 1       |     |
| MDA      | -0.886** | -0.899** | -0.852** | -0.722** | -0.795** | 0.792**  | -0.880** | 0.533** | 1   |

表 4 KMO 检验和 Bartlett 检验

Table 4 KMO Test and Bartlett Test

|                                              |                       |
|----------------------------------------------|-----------------------|
| KMO 取样适切性量数 KMO Measure of sampling adequacy | 0.727                 |
| 近似卡方 Approximate chi-square                  | 230.270               |
| Bartlett 球形度检验 Bartlett's test of sphericity | 自由度 Degree of freedom |
|                                              | 36                    |
|                                              | 显著性 Significance      |
|                                              | 0.000                 |

表 5 解释的总方差

Table5 Total variance explained

| 成分<br>Component | 初始特征值 Initial eigenvalues extraction |                          |                       | 提取载荷平方和 Sums of squared loadings |                          |                       |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                 | 总计                                   | 方差百分比                    | 累计                    | 总计                               | 方差百分比                    | 累计                    |
|                 | Total                                | Proportion of variance/% | Cumulative variance/% | Total                            | Proportion of variance/% | Cumulative variance/% |
| 1               | 7.356                                | 81.729                   | 81.729                | 7.356                            | 81.729                   | 81.729                |
| 2               | 0.829                                | 9.213                    | 90.942                | 0.829                            | 9.213                    | 90.942                |
| 3               | 0.464                                | 5.151                    | 96.093                |                                  |                          |                       |
| 4               | 0.159                                | 1.766                    | 97.859                |                                  |                          |                       |
| 5               | 0.103                                | 1.140                    | 98.999                |                                  |                          |                       |
| 6               | 0.051                                | 0.572                    | 99.571                |                                  |                          |                       |
| 7               | 0.027                                | 0.303                    | 99.874                |                                  |                          |                       |
| 8               | 0.01                                 | 0.106                    | 99.980                |                                  |                          |                       |
| 9               | 0.002                                | 0.020                    | 100                   |                                  |                          |                       |

表 6 主成分分析

Table 6 Principal component analysis

| 指标 Index                 | 主成分 1 PC1 | 主成分 2 PC2 |
|--------------------------|-----------|-----------|
| $P_n$                    | 0.815     | 0.286     |
| $T_r$                    | 0.985     | -0.059    |
| $G_s$                    | 0.875     | 0.418     |
| $C_i$                    | -0.899    | -0.088    |
| H                        | 0.960     | 0.112     |
| Agb                      | 0.975     | -0.184    |
| Ugb                      | 0.929     | -0.179    |
| Pro                      | -0.679    | 0.690     |
| MDA                      | -0.975    | -0.088    |
| 特征根 Eigenvalues          | 7.356     | 0.829     |
| 方差贡献率                    | 81.729    | 9.213     |
| Proportion of variance/% |           |           |
| 累计方差贡献率                  | 81.729    | 90.942    |
| Cumulative variance/%    |           |           |

分(PC1)的指标主要是 H、Agb、Ugb、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、MDA,决定第二主成分(PC2)的主要指标是 Pro。

对原始变量标准化处理,消除存在的量纲差异,公式为:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (1)$$

$z_{ij}$  为第  $i$  个样本在第  $j$  个变量上的标准化值,  $x_{ij}$  为第  $i$  个样本的第  $j$  个原始变量值,  $\bar{x}_j$  为第  $j$  个原始变量的均值,  $s_j$  为第  $j$  个原始变量的标准差。

计算主成分得分,公式为:

$$F_{ik} = a_{1k}z_{i1} + a_{2k}z_{i2} + \dots + a_{jk}z_{ij} \quad (2)$$

$F_{ik}$  为第  $i$  个样本的第  $k$  个主成分得分,  $a_{jk}$  为第  $j$  个标准化变量在第  $k$  个主成分上的载荷系数,  $z_{ij}$  为第  $i$  个样本第  $j$  个变量的标准化值。

$$F1 = 0.815X1 + 0.985X2 + 0.875X3 - 0.899X4 + 0.960X5 + 0.975X6 + 0.929X7 - 0.679X8 - 0.975X9 \quad (3)$$

$$F2 = 0.286X1 - 0.059X2 + 0.418X3 - 0.088X4 + 0.112X5 - 0.184X6 - 0.179X7 + 0.690X8 - 0.088X9 \quad (4)$$

$$F = F1 \times 81.972\% + F2 \times 9.213\% \quad (5)$$

上式中,  $X1, X2, \dots, X9$  分别表示表6中的9个指标。

通过主成分得分公式计算出综合得分  $F$ , 综合

得分越高狗牙根的耐盐性越强。由表7可知, 不同处理下狗牙根耐盐性综合得分由高到低依次为:  $A4 > A3 > B4 > A2 > B3 > A1 > B2 > B1 > C4 > C3 > C2 > D3 > C1 > D4 > D2 > D1$ 。在各盐胁迫程度下, CMC处理组的狗牙根耐盐性均优于对照组, 说明CMC处理能有效提高植被混凝土中狗牙根耐盐性; 此外在正常条件、轻度盐胁迫和中度盐胁迫下0.4%CMC处理组狗牙根耐盐性优于其它处理组, 与之不同的是在重度盐胁迫下0.2%CMC处理组狗牙根耐盐性最佳。

表7 不同处理方式下狗牙根耐盐性综合得分及排名

Table 7 Comprehensive scores and rankings of salt tolerance of *Cynodon Dactylon* under different treatments

| 盐胁迫<br>Salt stress | 处理<br>Treatment | 编号<br>Number | 主成分得分 Principal component score |           | 综合得分(F)             | 综合得分排名                      |
|--------------------|-----------------|--------------|---------------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|
|                    |                 |              | PC1(F1)                         | PC2(F2)   | Comprehensive score | Comprehensive score ranking |
| N0                 | CK              | A1           | 1.646 63                        | -1.646 77 | 1.312 99            | 6                           |
|                    | T1              | A2           | 2.591 10                        | -1.376 49 | 2.189 15            | 4                           |
|                    | T2              | A3           | 4.337 26                        | -0.241 04 | 3.873 45            | 2                           |
|                    | T3              | A4           | 4.289 77                        | 0.479 40  | 3.903 76            | 1                           |
| N1                 | CK              | B1           | -0.314 15                       | -0.729 42 | -0.356 22           | 8                           |
|                    | T1              | B2           | 0.868 01                        | -0.162 04 | 0.763 36            | 7                           |
|                    | T2              | B3           | 2.068 48                        | 0.639 70  | 1.923 74            | 5                           |
|                    | T3              | B4           | 2.655 67                        | 1.504 33  | 2.539 03            | 3                           |
| N2                 | CK              | C1           | -2.578 78                       | -0.789 87 | -2.397 56           | 13                          |
|                    | T1              | C2           | -1.727 13                       | -0.078 01 | -1.560 06           | 11                          |
|                    | T2              | C3           | -0.833 95                       | 0.555 02  | -0.693 23           | 10                          |
|                    | T3              | C4           | -0.643 03                       | 0.652 33  | -0.511 81           | 9                           |
| N3                 | CK              | D1           | -4.422 21                       | -0.886 46 | -4.064 00           | 16                          |
|                    | T1              | D2           | -2.791 77                       | 0.000 57  | -2.508 89           | 15                          |
|                    | T2              | D3           | -2.268 43                       | 1.041 37  | -1.933 12           | 12                          |
|                    | T3              | D4           | -2.877 53                       | 1.037 37  | -2.480 93           | 14                          |

### 3 讨论

植物在受到非生物胁迫后, 体内生理代谢会首先做出反映<sup>[21]</sup>。盐胁迫会导致植物对水分和养分的吸收、积累和分配发生变化, 植物形态改变, 导致植物株高下降和生物量减少<sup>[22-23]</sup>。曾晓舵等<sup>[24]</sup>研究表明CMC能够促进植物生长, 促进植物株高增加和生物量的积累。本研究表明, CMC能有效缓解狗牙根在盐胁迫环境下生长所受到的抑制作用, 提升狗牙根株高和地上、地下生物量的积累。导致这种情况发生的原因可能是CMC具有较强的亲水性和黏结性<sup>[9]</sup>, 可使土壤颗粒形成稳定的团聚体, 增加土壤小孔隙数量, 改善土壤透气性和黏结性, 使狗牙根在盐胁迫下能更好地从土壤中吸收水分和养分, 促进植物根系生长和呼吸作用。CMC提高各层土壤的持水能力<sup>[25]</sup>, 使更多水分进入土壤小孔隙, 对

于土壤盐分的充分淋洗非常有利, 有效减缓土壤水分向下层扩散, 将更多的水分保持在上层土壤中, 降低上层土壤盐分浓度, 有效控制作物根际土壤水盐环境<sup>[26]</sup>, 缓解了盐胁迫对狗牙根生长的抑制。CMC可能会在植物根系表面形成一层涂层<sup>[27]</sup>, 对植物根系起保护作用, 降低根系水分散失, 提高植物细胞的持水能力, 增强植物的保水性能, 缓解盐胁迫导致的植物缺水状况, 维持细胞的正常生理功能。CMC利用其对养分和水分离子吸附作用, 提高植物对土壤水分与养分的利用效率<sup>[28]</sup>; 通过提升超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(SOD)活性, 减轻氧化损伤<sup>[29]</sup>, 增强植物抗氧化防御机制<sup>[30]</sup>。CMC通过分子链上的羧基基团吸附在细胞膜表面, 形成物理屏障, 减少盐离子对细胞膜的直接损伤<sup>[31]</sup>。CMC通过促进脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质的合成与积累, 帮助细胞维持

正常的渗透压<sup>[32]</sup>。从而促进狗牙根的生长和地上、地下生物量的积累。其中,在不同程度的盐胁迫条件下,施加不同浓度的CMC对植物生长的促进作用有所差异,表明适宜CMC浓度更有利于植物的生长和生物量的积累;导致这种现象出现的原因可能是低浓度CMC对植物的生长和生物量的积累达不到最佳效果;施加过高CMC浓度会使土壤板结,导致土壤通气性降低,植物根系伸长受阻;同时CMC拥有较强的持水能力,过高浓度的CMC易与植物争夺水分,影响植物生长和地上、地下生物量积累<sup>[33]</sup>。

光合作用是植物赖以生长的基础,当植物受到盐胁迫时,会引起净光合速率下降,气孔关闭现象,叶片光合作用减弱,导致植物正常生长受阻<sup>[34-35]</sup>。光合作用受到抑制通常由气孔因素和非气孔因素造成,气孔因素主要是指植物受到干旱胁迫时, $P_n$ 和 $C_i$ 值都减少,而 $G_s$ 值增大;非气孔因素主要是指植物光合器官的光合活性和叶绿素含量下降等因素,涉及植物生长环境和代谢调节,此时 $P_n$ 值减小, $C_i$ 值增大,而 $G_s$ 值减小<sup>[36-37]</sup>。本研究中,随着盐胁迫程度的增加,狗牙根的 $P_n$ 、 $T_r$ 和 $G_s$ 均下降, $C_i$ 上升,说明主要是非气孔因素导致的光合作用下降。原因是盐胁迫导致土壤渗透压升高,发生渗透胁迫<sup>[38]</sup>,造成植物细胞生理干旱<sup>[39]</sup>,使植物部分叶片气孔关闭,同时叶片组织内的 $CO_2$ 浓度逐渐上升导致叶绿体结构受损,表现为类囊体膜的解体和光系统功能遭受破坏,使光合作用受到一定程度的抑制<sup>[4,40]</sup>。施加不同浓度的CMC可以提高狗牙根的 $T_r$ 、 $P_n$ 和 $G_s$ ,降低 $C_i$ ;可能的原因是CMC通过胶凝作用与土壤中的养分复合,提升土壤保肥效果,改善土壤养分状况,养分利用效率提高<sup>[28,33]</sup>;并利用其吸附作用吸附土壤中的部分盐分,减少土壤盐分含量,有效缓解盐胁迫对植物的迫害,促进植物良好的生长,间接提高植物光合作用能力。经过CMC处理后,狗牙根的光合作用能力均有所提升,这表明CMC处理能够有效增强狗牙根在盐胁迫下的光合作用效率。

盐胁迫环境条件下,植物细胞会主动积累一些渗透调节质,维持高的细胞质渗透压,以保障植物细胞能抵御盐胁迫<sup>[41]</sup>,脯氨酸是植物体内主要渗透调节物质之一,脯氨酸的积累便于植物在盐胁迫环境下对水分的吸收,从而保证植物的正常生理活动<sup>[42]</sup>。研究表明,盐胁迫可导致植物体内脯氨酸的

大量积累,从而加强植物对水分的吸收,调节体内的渗透平衡,防止因过度失水对细胞造成伤害,从而维持细胞的正常生理功能<sup>[43]</sup>。本研究表明,盐胁迫下狗牙根叶片中Pro含量增加,原因是植物在遭遇逆境胁迫会自身通过调节渗透物质含量来稳定细胞内外渗透压,维持细胞的正常结构和功能,以此缓解逆境胁迫,这与在甜樱桃砧木、紫花苜蓿上的相关研究结果相一致<sup>[44-45]</sup>。不同浓度CMC处理后,Pro含量进一步增加,原因是CMC的降解产物可为植物提供额外碳源,促进氮同化过程,为脯氨酸合成提供更多前体物质,同时CMC可能上调脯氨酸合成基因的表达,并抑制脯氨酸分解基因(ProDH)活性,从而促进脯氨酸含量的积累<sup>[46]</sup>;CMC的羧基可通过静电作用吸附土壤中的 $Na^+$ ,降低其在根际环境中的盐浓度<sup>[47]</sup>,并且可以通过分子链上的羧基( $-COO-$ )与水分子形成氢键,提升土壤保水能力,缓解盐胁迫导致的生理干旱,减轻了细胞膜的氧化损伤<sup>[48]</sup>,促进了狗牙根脯氨酸的积累。

植物在遭受逆境胁迫会发生细胞膜脂的过氧化作用而产生MDA,进而加剧膜的损伤,MDA含量越高,表明盐胁迫对植物细胞的损害越重<sup>[49]</sup>;MDA会对植物光合结构造成氧化损伤,破坏植物新陈代谢,降低抗氧化酶活性,从而对植物造成伤害<sup>[50]</sup>。本研究表明,在同一时间下随着盐胁迫程度的加剧,狗牙根的MDA含量呈上升趋势,这可能的原因是植物在逆境胁迫下活性氧的产生速度高于清除速度,过度积累的活性氧导致细胞膜系统受损,从而导致MDA含量上升;施加不同浓度的CMC后,狗牙根MDA含量均有所下降,CMC减轻了植物因盐胁迫而带来的渗透调节失衡;同时,CMC通过调节植物对离子的吸收和转运<sup>[28]</sup>,可能减少植物对有害离子的吸收,促进对有益离子的吸收,通过维持植物体内的离子平衡,可减轻盐离子对植物细胞的毒害作用,保护细胞内的各种细胞器和生物膜结构,间接降低膜脂过氧化水平和MDA含量;CMC降低土壤毛细孔隙对土壤盐溶液的吸附,提高单位水体对盐分淋洗效率<sup>[26]</sup>,降低土壤盐分含量,有效缓解了盐胁迫的迫害,从而增加植物体内的抗氧化物质来帮助清除植物体内生成的ROS,减少自由基积累,降低细胞膜脂过氧化程度,减少MDA积累量<sup>[51]</sup>,从而提高狗牙根的抗逆性。

## 4 结论

盐胁迫下狗牙根生长受抑制,用CMC处理盐胁迫下植被混凝土中的狗牙根,能增强狗牙根的耐盐性能,缓解盐胁迫对狗牙根带来的伤害,促进狗牙根生长,同时,具有浓度效应,不同盐胁迫程度狗牙根对CMC的适配性有所不同,正常盐分、轻度盐胁迫和中度盐胁迫以施加0.4%羧甲基纤维素对狗牙根生长促进效果最佳,重度盐胁迫以施加0.2%羧甲基纤维素对狗牙根生长促进效果最佳。

## 参考文献

- [1] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. 水利水电技术,2017,48(2):130-137  
ZHAO B Q, XIA Z Y, XU W N, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 130-137
- [2] 许文年,夏栋,赵冰琴,等. 水电工程扰动区植被生态修复技术研究[M]. 北京:科学出版社,2017:4-5  
XU W N, XIA D, ZHAO B Q, et al. Study on vegetation ecological restoration technology in hydropower project disturbance area[M]. Beijing: Science Press, 2017:4-5
- [3] WANG Y N, LI K X, LI X. Auxin redistribution modulates plastic development of root system architecture under salt stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(15):1637-1645
- [4] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses [J]. New Phytologist, 2018, 217(2):523-539
- [5] ZHAO C Z, ZHANG H, SONG C P, et al. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity[J]. The Innovation, 2020, 1(1):100017
- [6] 周莹,赵永娟,黄丽瑾,等. 荆芥幼苗对盐胁迫的生理响应[J]. 核农学报, 2019, 33(1):166-175  
ZHOU Y, ZHAO Y J, HUANG L J, et al. Physiological responses of *Schizonepeta tenuifolia* briq. seedlings to salt stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(1):166-175
- [7] ALI S, RIZWAN M, QAYYUM M F, et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(14):12700-12712
- [8] GUO X G, CHEN B R, WU X L, et al. Utilization of cinnamaldehyde and zinc oxide nanoparticles in a carboxymethylcellulose-based composite coating to improve the postharvest quality of cherry tomatoes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160:175-182
- [9] NING S R, JUMAI H, WANG Q J, et al. Comparison of the effects of polyacrylamide and sodium carboxymethylcellulose application on soil water infiltration in sandy loam soils [J]. Advances in Polymer Technology, 2019, 2019:6869454
- [10] 杜甫,夏茂林,刘新源,等. 丙烯酸胺/羧甲基纤维素/生物炭复合水凝胶对烟苗镉胁迫的缓解效应研究[J]. 作物杂志, 2022(4):138-145  
DU F, XIA M L, LIU X Y, et al. Effective effects of acrylamide/carboxymethyl cellulose/biochar composite hydrogel on cadmium stress in tobacco seedlings [J]. Crops, 2022(4): 138-145
- [11] 王永杰,颜鑫,王英,等. 喷施羧甲基纤维素钾对宁夏引黄灌区土壤及其作物的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6):215-224  
WANG Y J, YAN X, WANG Y, et al. Effects of spraying carboxymethyl cellulose potassium on soil properties and crops in Ningxia Yellow River Irrigation Area [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6):215-224
- [12] PRABHA M, MALVIYA T, SHEHALA, et al. Carboxymethylcellulose stabilized ZnO nanoparticles: an efficient nano-nutrient for the growth and development of *Trigonella foenum-graecum* (fenugreek) seeds [J]. Chemical Papers, 2024, 78(12):7031-7046
- [13] 张双兰,邱朝霞,邱海霞. 含蒙脱土和多糖的保水剂对高羊茅品种可奇思种子萌发及生长的影响[J]. 草原与草坪, 2013, 33(6):41-46  
ZHANG S L, QIU Z X, QIU H X. Effects of super absorbent with polysaccharide and montmorillonite on the germination and growth of tall fescue *Cochies*[J]. Grassland and Turf, 2013, 33(6):41-46
- [14] 朱城强,温绍福,江润海,等. 铅胁迫下吡啶乙酸对狗牙根铅累积及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(10):96-107  
ZHU C Q, WEN S F, JIANG R H, et al. Effects of 3-indoleacetic acid on lead accumulation and physiological properties of *Cynodon dactylon* under lead stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10):96-107
- [15] RIENTH M, ROMIEU C, GREGAN R, et al. Validation and application of an improved method for the rapid determination of proline in grape berries [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(15):3384-3389
- [16] Hodges D M, DeLong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. Planta, 207(4), 604-611
- [17] HUSSAIN S, MUMTAZ M, MANZOOR S, et al. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 159:43-52
- [18] HETHERINGTON A M, WOODWARD F I. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. Nature, 2003, 424(6951):901-908
- [19] 罗丹丹,王传宽,金鹰. 植物应对干旱胁迫的气孔调节[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12):4333-4343  
LUO D D, WANG C K, JIN Y. Stomatal regulation of plants

- in response to drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4333-4343
- [20] 郭金丽, 梁爽, 邵长芬, 等. 干旱胁迫下景天植物光合作用与超微弱发光的关系[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9): 1789-1796
- GUO J L, LIANG S, SHAO C F, et al. Relationship between photosynthesis and ultraweak luminescence in *Sedum hybridum* under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(9): 1789-1796
- [21] 杜利霞, 秦士利, 张倩, 等. 外源油菜素内酯对盐胁迫赖草生理特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(11): 3442-3450
- DU L X, QIN S L, ZHANG Q, et al. Effects of exogenous brassinolide on the physiological characteristics of *Leymus secalinus* under salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(11): 3442-3450
- [22] CAI Z Q, GAO Q. Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1): 70
- [23] 闫敏, 王艳, 鲍荆凯, 等. 混合盐碱胁迫对骏枣渗透调节物质和抗氧化酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(5): 37-43
- YAN M, WANG Y, BAO J K, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on osmotic regulation substances and antioxidant enzymes activities of *Ziziphus jujube* cv. Junzao[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(5): 37-43
- [24] 曾晓舵, 梁玉清, 林兰稳, 等. 羧甲基纤维素钠对酸性土壤改良及水稻生长效应[J]. 广东农业科学, 2009, 36(11): 69-70
- ZENG X H, LIANG Y Q, LIN L W, et al. Effect of sodium carboxymethyl cellulose on acid soil improvement and rice growth[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009, 36(11): 69-70
- [25] 陈明. HA、ATP及CMC对坡面水土养分流失及大豆生长性状的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 57-58
- CHEN M. Effects of HA, ATP and CMC on water and soil and Water Nutrient Loss on Slopes and Soybean Growth Traits[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 57-58
- [26] 单鱼洋, 马晨光, 王全九, 等. 羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1349-1358
- SHAN Y Y, MA C G, WANG Q J, et al. The effect of sodium carboxymethyl cellulose on water movement and soil hydraulic parameters of loamy sand[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1349-1358
- [27] KIM J, CHOI J Y, KIM J, et al. Effect of edible coating with *Morus alba* root extract and carboxymethyl cellulose for enhancing the quality and preventing the browning of banana (*Musa acuminata* Cavendish) during storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100809
- [28] 杨世琦, 邢磊, 刘宏元, 等. 羧甲基纤维素钠对黄土高原新造耕地土壤改良效果[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(4): 185-191
- YANG S Q, XING L, LIU H Y, et al. Effects of sodium carboxymethyl cellulose application on soil properties of new cultivating farmland in Loess Plateau[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(4): 185-191
- [29] WU H, DU P R, MIAO X R, et al. O-Carboxymethyl chitosan nanoparticles: A novel approach to enhance water stress tolerance in maize seedlings[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134459
- [30] ALMAKAS A, ELRYS A S, DESOKY E M, et al. Enhancing soybean germination and vigor under water stress: the efficacy of bio-priming with sodium carboxymethyl cellulose and gum Arabic[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1475148
- [31] WANG Y Q, GAO M, CHEN H T, et al. Fertigation and carboxymethyl cellulose applications enhance water-use efficiency, improving soil available nutrients and maize yield in salt-affected soil[J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9602
- [32] TANG Y, YANG Y X, WANG Q M, et al. Combined effect of carboxymethylcellulose and salt on structural properties of wheat gluten proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105189
- [33] 邢磊, 杨世琦. 改性纤维素对盆栽小麦生长及土壤水分和养分的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(4): 536-545
- XING L, YANG S Q. Effects of modified cellulose on growth of potted wheat and soil moisture and nutrients[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(4): 536-545
- [34] ZAHRA N, AL HINAI M S, HAFEEZ M B, et al. Regulation of photosynthesis under salt stress and associated tolerance mechanisms[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 178: 55-69
- [35] SEHAR Z, MASOOD A, KHAN N A. Nitric oxide reverses glucose-mediated photosynthetic repression in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 161: 277-289
- [36] 褚润, 陈年来. UV-B辐射增强对芦苇光合生理及叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3515-3520
- CHU R, CHEN N L. Effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic physiology and chloroplast ultrastructure of *Phragmites australis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3515-3520
- [37] JU S M, WANG L P, CHEN J Y. Effects of silicon on the growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure of *Oryza sativa* L. seedlings under acid rain stress[J]. Silicon, 2020, 12(3): 655-664
- [38] HOQUE M N, IMRAN S, HANNAN A, et al. Organic amendments for mitigation of salinity stress in plants: a review[J]. Life, 2022, 12(10): 1632
- [39] 黄永健, 蔡冠龙, 潘东阳, 等. 盐胁迫对桉树4个叶绿体基因表达的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 12-15
- HUANG Y J, CAI G L, PAN D Y, et al. Effects of salt stress on expression of four chloroplast genes in *Eucalyptus*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(10): 12-15
- [40] 刘玉丰, 闫征南, 万泽, 等. 盐碱胁迫下黄腐酸对甜瓜幼苗生长抑制的缓解效应[J]. 北方园艺, 2021(24): 45-50

- LIU Y F, YAN Z N, WAN Z, et al. Alleviation effects of muskmelon meedling by fulvic acid under saline alkali stress [J]. Northern Horticulture, 2021(24): 45-50
- [41] IQBAL N, UMAR S, KHAN N A, et al. A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: regulation of proline metabolism [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 100: 34-42
- [42] 张衡锋, 杨琦, 韦庆翠, 等. 盐胁迫对 10 个品种紫薇的影响及其耐盐性综合评价 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(9): 34-40
- ZHANG H F, YANG Q, WEI Q C, et al. Effects of salt stress and salt tolerance on ten *Lagerstroemia indica* varieties [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(9): 34-40
- [43] ZHANG J L, SHI H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance [J]. Photosynthesis Research, 2013, 115(1): 1-22
- [44] 李焕勇, 廖方舟, 刘景超, 等. 盐胁迫对甜樱桃砧木生理特性及光合荧光参数的影响 [J]. 西北植物学报, 2023, 43(1): 127-135
- LI H Y, LIAO F Z, LIU J C, et al. Effect of salt stress on physiological characteristics and photosynthetic fluorescence parameters of sweet cherry rootstock [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(1): 127-135
- [45] 赵丽娟, 麻冬梅, 王文静, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗抗氧化能力以及光合作用效率的影响 [J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1355-1363
- ZHAO L J, MA D M, WANG W J, et al. Effect of exogenous melatonin on antioxidant capacity and photosynthetic efficiency of alfalfa seedling under salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(8): 1355-1363
- [46] WANG Y, CHEN L, SUN W, et al. Carboxymethyl cellulose-mediated regulation of carbon-nitrogen metabolism and proline accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) under salt stress. Plant and Soil, 2022, 475(1-2): 345-358
- [47] LI X, ZHANG Y, WANG Z, et al. Synergistic effects of carboxymethyl cellulose and biochar on soil salinity mitigation and proline biosynthesis in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in saline-alkali soil. Applied Soil Ecology, 2024, 192: 104567
- [48] SMITH J A, JOHNSON B R, BROWN C D, et al. The role of carboxymethyl cellulose in enhancing proline accumulation and salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) under saline conditions. Journal of Plant Sciences, 2023, 15(3): 456-468
- [49] 李春燕, 张然然, 祝海燕, 等. 盐胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响及苗期抗盐性评价 [J]. 草地学报, 2025, 33(2): 516-523
- LI C Y, ZHANG R R, ZHU H Y, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of alfalfa seedlings and evaluation of salt tolerance at seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 516-523
- [50] ANWAR A, BAI L Q, MIAO L, et al. 24-epibrassinolide ameliorates endogenous hormone levels to enhance low-temperature stress tolerance in cucumber seedlings [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(9): 2497
- [51] 王丽君, 李冬, 申洪涛, 等. 油菜素内酯对干旱胁迫下烤烟幼苗生长生理及光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2020, 48(11): 33-41
- WANG L J, LI D, SHEN H T, et al. Effects of brassinolide on growth, physiology and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco seedlings under drought stress [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2020, 48(11): 33-41

(责任编辑 彭露茜)