

刘铎, 白爽, 齐学斌, 等. 小麦百农矮抗 58 幼苗对 Na_2SO_4 胁迫响应及阈值鉴定 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (1): 9-16.

LIU D, BAI S, QI X B, et al. Response and Tolerance Threshold of Bainong Aikang-58 Wheat Seedlings toward Na_2SO_4 Stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (1): 9-16.

小麦百农矮抗 58 幼苗对 Na_2SO_4 胁迫响应及阈值鉴定

刘 铎^{1,2}, 白 爽³, 齐学斌^{1,4}, 宁东峰¹, 梁志杰^{1,2,4}, 郭 魏^{1,4}, 李 平^{1,4*}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点
开放实验室, 河南 新乡 453002; 3. 北京市八大处公园管理处, 北京 100041;
4. 农业农村部农产品质量安全水环境因子风险评估实验室, 河南 新乡 453002)

摘 要:【目的】百农矮抗 58 是我国小麦的主栽品种之一, 探讨百农矮抗 58 幼苗对 Na_2SO_4 胁迫响应机制, 并界定其对 Na_2SO_4 胁迫耐受阈值, 进而为进一步深入研究提供基础数据, 也为农业生产实践提供科学依据与理论指导。

【方法】通过水培试验, 设置不同浓度 (0、20、40、60、80、100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) Na_2SO_4 胁迫处理, 通过测定株高、鲜重、生物量、各种抗氧化酶活性、质膜透性、丙二醛 (MDA) 含量及渗透调节物质含量, 研究 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗生长与生理的影响。【结果】随着 Na_2SO_4 浓度的升高, 小麦幼苗的株高、鲜重及生物量均下降, 小麦幼苗的各种抗氧化酶活性会随着 Na_2SO_4 浓度的升高而不断升高, 当超过一定阈值后会下降, MDA 含量和质膜透性会随着 Na_2SO_4 浓度的升高而升高, 最大值分别为对照的 3.20 倍和 4.94 倍; 小麦幼苗叶片的叶绿素含量随着 Na_2SO_4 浓度的升高而下降; 小麦体内的可溶性糖含量随着 Na_2SO_4 浓度的升高呈先上升后下降的变化趋势, 在 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可溶性糖含量最高; 脯氨酸含量则随着 Na_2SO_4 浓度的升高而升高, 最大值为对照的 8.51 倍。【结论】根据试验结果界定小麦百农矮抗 58 耐 Na_2SO_4 胁迫阈值为 80~100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

关键词: 盐碱地; 矮抗 58; Na_2SO_4 胁迫; 阈值

中图分类号: S 512

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 01-0009-08

Response and Tolerance Threshold of Bainong Aikang-58 Wheat Seedlings toward Na_2SO_4 Stress

LIU Duo^{1,2}, BAI Shuang³, QI Xuebin^{1,4}, NING Dongfeng¹, LIANG Zhijie^{1,2,4}, GUO Wei^{1,4}, LI Ping^{1,4*}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China; 2. Key Laboratory of High-efficiency and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of CAAS, Xinxiang, Henan 453002, China; 3. Administering Department of Beijing Badachu Park, Beijing 100041, China; 4. Water Environment Factor Risk Assessment Laboratory of Agricultural Products Quality and Safety, Ministry of Agriculture, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: 【Objective】Bainong Aikang-58 is one of the major wheat cultivars in China. To investigate the response mechanism of Bainong Aikang-58 seedling to Na_2SO_4 stress was discussed and to define its tolerance threshold to Na_2SO_4 stress was determined so as to provide basic data support for further research and scientific basis and theoretical guidance for agricultural production practice. 【Method】Effects of Na_2SO_4 stress at 0, 20, 40, 60, 80, and 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ on the growth and physiology of the wheat seedlings were studied in a hydroponic experimentation. 【Result】As the Na_2SO_4 concentration in the medium increased, the plant height, fresh weight, and biomass of the seedlings decreased. The activity of each antioxidant enzyme in wheat seedlings would continuously increase with the increase of Na_2SO_4 concentration, and would decrease after exceeding a certain threshold. The membrane permeability and content of MDA in the synplasmic membrane increase with increasing of Na_2SO_4 concentration to maximize 3.2 and 4.94 times of the control. The chlorophyll content in the leaves were decreased with the increase of Na_2SO_4 concentration. The soluble sugar content in wheat increased first and then decreased with the increase of Na_2SO_4 concentration. The soluble sugar concentration was the highest at 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Whereas, the

收稿日期: 2020-10-12 初稿; 2020-12-10 修改稿

作者简介: 刘铎 (1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事植物逆境生理生态研究 (E-mail: ld258825@126.com)

* 通信作者: 李平 (1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源环境研究 (E-mail: firilp@163.com)

基金项目: 中央级公益性行业科研院所基本科研业务费项目 (FIRI2019-04-01); 国家重点研发计划支持项目 (2017YFD0800403); 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-FIRI-03)

proline content kept increasing to reach a maximum that was 8.51 times of control. 【Conclusion】 The tolerance threshold of Bainong Aikang-58 wheat seedling toward Na_2SO_4 stress was determined to be 80–100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Key words: saline-alkali soil; Bainong Aikang-58; Na_2SO_4 stress; tolerance threshold

0 引言

【研究意义】盐碱胁迫是重要的植物非生物胁迫限制因素,严重抑制农作物生长发育^[1-2]。据统计,全球目前约有盐碱地 9.54 亿 hm^2 , 约占土地总面积的 7%, 其中我国盐碱地面积达到 991 3 万 hm^2 , 约占全部土地面积的 10%^[3]。我国盐碱地在全国 23 个省、市、自治区都有分布。在盐碱地中最常见的盐分类型是 NaCl , 但在全球以及我国广泛分布的盐碱地中, 土壤盐分类型多种多样, 有些盐分甚至相比 NaCl 对植物的伤害更大, 其中以阴离子 SO_4^{2-} 为主要组分的硫酸盐就是非常重要的一种盐分组成类型。例如在我国新疆天山山脉以南地区的盐碱土中就以硫酸盐为主, 华北平原交界洼地一带的浅色草甸盐碱土中 SO_4^{2-} 占阴离子总量的 80% 以上^[4-5]。其形成原因, 一方面受地壳风化等自然因素影响, 另一方面随着工业化的进程不断加深, 工厂废液大量排放, SO_2 等气体大量排放, 导致土壤中的 Na_2SO_4 等含量快速增加^[6], 进而对农作物生长构成威胁, 因此研究农作物耐硫酸盐胁迫具有重要意义。【前人研究进展】小麦是我国乃至全球重要的粮食作物^[7-8], 对于我国粮食安全起到至关重要的作用, 土地盐碱化会严重抑制小麦的正常生长, 降低小麦产量, 进而威胁粮食安全^[9]。钮力伟等^[10]通过研究证明盐胁迫下小麦的叶绿素含量会降低, 质膜透性与脯氨酸含量则会升高。时丽冉等^[11]通过研究证明 NaCl 胁迫下小麦幼苗生长会受到明显抑制, 丙二醛 (MDA) 和脯氨酸含量会升高, 各种抗氧化酶活性会明显增大。Kazem Poustini^[12]通过研究发现, NaCl 胁迫下小麦生物量明显下降, Na^+ 积累增加 K^+/Na^+ 明显会降低。相比于盐敏感品种, 耐盐性较强的小麦品种生物量下降较少, Na^+ 积累较少, 同时 K^+/Na^+ 明显也较小。Xie 等^[13]研究了不同浓度 NaCl 胁迫对 3 种小麦种子萌发与幼苗生长的影响, 通过研究发现随着 NaCl 浓度升高, 小麦的种子发芽率、株高、根系长度及幼苗鲜重均出现下降。通过测定不同浓度 NaCl 胁迫下小麦离子与光合指标, 鉴定了不同品种小麦耐盐性强弱, 并发现野生型小麦相比于硬粒小麦耐盐性更好。Klay 等^[14]通过测定不同浓度 NaCl 胁迫下小麦离子与光合指标, 鉴定了不同品种小麦耐盐性强弱, 并发现野生型小麦相比于硬粒小麦耐盐性更好。由以上研究可以看出, 以往更多的是以 NaCl 为

胁迫介质来研究盐胁迫对小麦生长与生理的影响及鉴定不同品种小麦耐盐性, 主要关注 NaCl 盐胁迫对小麦生长与生理的影响, 而有关 Na_2SO_4 胁迫对小麦生长与生理影响的研究则鲜见报道。【本研究切入点】小麦百农矮抗 58 是我国小麦主栽品种之一, 具有高产、优质、抗倒伏、抗寒及抗病的特点。然而有关小麦百农矮抗 58 对 Na_2SO_4 胁迫响应及阈值鉴定研究还未见报道。【拟解决的关键问题】研究 Na_2SO_4 胁迫对我国小麦主栽品种百农矮抗 58 生长、抗氧化调节、渗透调节及叶绿素含量指标变化的影响, 分析百农矮抗 58 对 Na_2SO_4 胁迫的响应机制, 并界定百农矮抗 58 耐受 Na_2SO_4 胁迫的阈值。旨在为小麦耐 Na_2SO_4 胁迫研究提供科学数据, 同时为小麦栽培生产提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试小麦品种为矮抗 58。将小麦种子用 75% 酒精进行消毒, 再用蒸馏水反复漂洗几次, 放入育苗盒中进行培养, 育苗培养 5 d 后, 移栽至黑色塑料桶中用 1/2Hogland 营养液进行培养, 营养液 pH 值 6.5, 每盆 5 孔, 每孔 2 株幼苗, 共计 10 株。用人工 LED 灯进行光照培养, 每日光/暗周期为 10 h/14 h, 昼/夜温度分别为 25℃/20℃, 相对湿度为 60%~70%。培养 30 d 之后, 分别用 20、40、60、80、100、120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SO_4 溶液进行胁迫处理, 溶液 pH 值 6.5, 胁迫 5 d 之后取样测定各指标。

1.2 测试方法

用称重法测定植物样品鲜重和生物量, 直尺测定植物株高。用电导率仪测定植物质膜透性^[15], 丙酮提取法测定叶绿素含量^[16], 磺基水杨酸法测定脯氨酸含量^[17], 蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[18]。愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性^[19], 紫外吸收法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性^[19], 氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性^[19], 硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 含量^[19]。

1.3 数据统计与分析

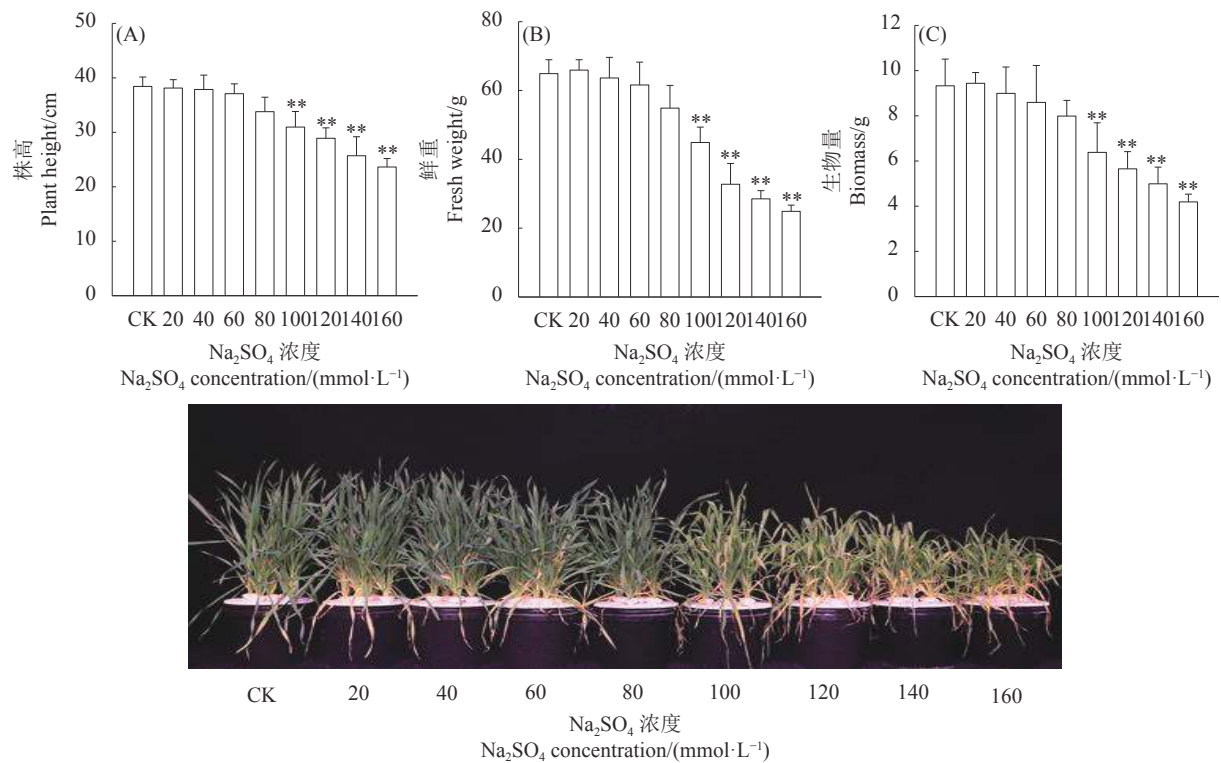
所有指标采用 SPSS 19.0 数据统计软件进行分析, 用单因素方差分析法分析不同胁迫处理对小麦幼苗生长与生理特性的影响, 采用 LSD 法进行多重比较。采用 sigmaplot10.0 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗生长的影响

由图 1 可以看出，低浓度的 Na₂SO₄ 胁迫（20~80 mmol·L⁻¹）对小麦幼苗的株高、鲜重和生物量影响均不大，当 Na₂SO₄ 浓度为 100、120、140、160 mmol·L⁻¹

时，株高分别为 CK 的 80.6%、75.2%、66.9%、61.5%，与 CK 比差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ）；鲜重分别为 CK 的 69.2%、50.5%、43.9%、38.3%，与 CK 比差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ）；生物量分别为 CK 的 68.4%、60.6%、53.5%、44.9%，与 CK 比差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ）。



注：*代表与对照（CK）相比差异达到显著水平（ $P<0.05$ ），**代表与对照相比差异达到极显著水平（ $P<0.01$ ），图 2~4 相同
Note: * represents significant difference compared with control group (CK) ($P < 0.05$); ** represents extremely significant difference compared with control group ($P < 0.01$). Figures 2-4 were the same

图 1 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗生长影响
Fig. 1 Effect of Na₂SO₄ stress on growth of wheat seedlings

由以上试验结果可以得出，低浓度的 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗生长影响不大，随着浓度的升高，对小麦生长的抑制作用逐渐显现。高浓度的 Na₂SO₄ 胁迫能够明显抑制小麦幼苗的正常生长。

2.2 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗抗氧化系统的影响

由图 2 可以看出，低浓度的 Na₂SO₄ 胁迫下小麦各种抗氧化酶活性变化不明显，随着 Na₂SO₄ 浓度升高，各个抗氧化酶活性总体呈现升高的趋势。过氧化酶（POD）活性在 80 mmol·L⁻¹ Na₂SO₄ 胁迫下明显升高，在 Na₂SO₄ 浓度为 80、100、120、140、160 mmol·L⁻¹ 时 POD 活性分别为 CK 的 1.33、1.39、1.48、1.56、1.41 倍，与 CK 差异均达显著水平（ $P<0.05$ ），其中：Na₂SO₄ 浓度为 140 mmol·L⁻¹ 时 POD 活性最大，随后降低。当 Na₂SO₄ 浓度为 60、80、100、120 mmol·L⁻¹

时，过氧化氢酶（CAT）活性分别为 CK 的 1.37、1.52、1.34、1.22 倍，与 CK 差异均达到显著水平（ $P<0.05$ ），其中：Na₂SO₄ 浓度为 80 mmol·L⁻¹ 时，CAT 活性最大，之后随着 Na₂SO₄ 浓度的升高而降低。在 Na₂SO₄ 浓度为 80、100、120、140、160 mmol·L⁻¹ 时，超氧化物酶（SOD）活性分别为 CK 的 5.91、7.07、7.72、8.58、6.50 倍，与 CK 差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ），其中：Na₂SO₄ 浓度为 140 mmol·L⁻¹ 时，SOD 活性最大，随后降低。在 Na₂SO₄ 浓度为 80、100、120、140、160 mmol·L⁻¹ 时，丙二醛（MDA）含量分别为 CK 的 2.26、2.55、2.78、2.91、3.20 倍，与 CK 差异均达极显著水平（ $P<0.01$ ）。当 Na₂SO₄ 浓度超过 60 mmol·L⁻¹ 后小麦幼苗的质膜透性开始增大，在 80、100、120、140、160 mmol·L⁻¹ Na₂SO₄ 胁迫下，小麦幼苗质膜透

性分别是 CK 的 2.75、4.23、4.60、4.82、4.94 倍，与 CK 差异均达极显著水平 ($P < 0.01$)。说明低浓

度的 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗质膜透性影响不大，高浓度 Na_2SO_4 胁迫下小麦幼苗质膜透性显著增高。

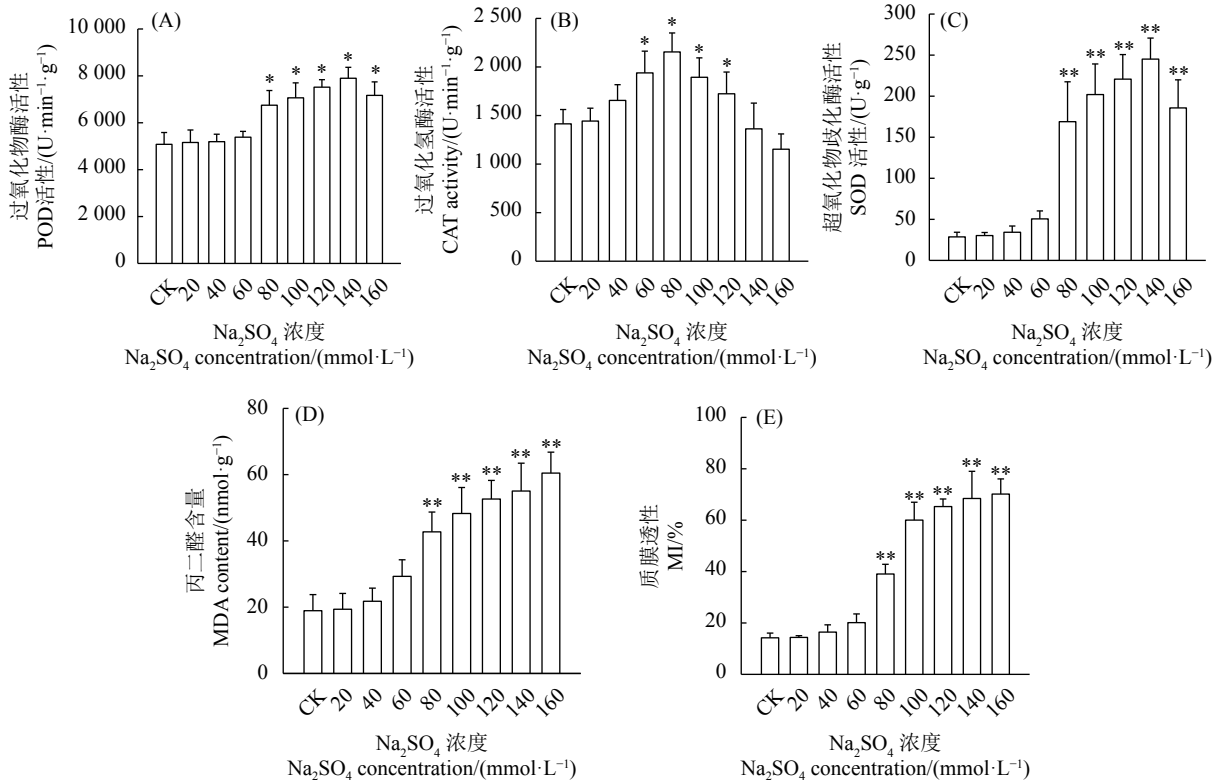


图 2 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗抗氧化系统影响

Fig. 2 Effect of Na_2SO_4 stress on antioxidant system of wheat seedlings

2.3 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗叶绿素含量的影响

由图 3 可以看出，随着 Na_2SO_4 胁迫浓度的升高，小麦幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及总叶绿素含量都会降低。 Na_2SO_4 浓度越高，试管中叶绿素提取液颜色越浅。当 Na_2SO_4 浓度为 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，叶绿素 a 含量为 CK 的 89.4%，与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)；在 Na_2SO_4 浓度为 100、120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，叶绿素 a 含量分别为 CK 的 72.6%、57.6%、47.4%、41.1%，与 CK 比差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在 Na_2SO_4 浓度为 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，叶绿素 b 含量为 CK 的 72.6%，与 CK 比差异达到显著水平 ($P < 0.05$)；在浓度 Na_2SO_4 为 100、120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，叶绿素 b 含量分别为 CK 的 68.4%、37.7%、31.8%、25.9%，与 CK 差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在 Na_2SO_4 浓度为 80、100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，类胡萝卜素含量分别为 CK 的 80.4% 和 64.9%，与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)；在 Na_2SO_4 浓度为 120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，类胡萝卜素含量分别为 CK 的 56.6%、48.4%、43.9%，与 CK 差异均达到极

显著水平 ($P < 0.01$)。在 Na_2SO_4 浓度为 60 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，总叶绿素含量为 CK 的 93.5%，与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)；在 Na_2SO_4 浓度为 80、100、120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，总叶绿素含量分别为 CK 的 84.7%、71.4%、52.0%、43.0%、36.8%，与 CK 差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

综上所述，低浓度的 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及总叶绿素含量影响不大，但在高浓度的 Na_2SO_4 胁迫下小麦幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素及总叶绿素显著降低。

2.4 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗渗透调节物质含量的影响

由图 4 可以看出，随着 Na_2SO_4 胁迫浓度的升高，小麦幼苗叶片的可溶性糖含量呈先升高后下降的变化趋势。当浓度为 80 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，可溶性糖含量最高，为 CK 的 1.4 倍，与 CK 差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。随着浓度的进一步升高，可溶性糖含量不断降低。当浓度为 120、140 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，可溶性糖含量为对照的 73% 和 76.2%，与 CK 差异显著

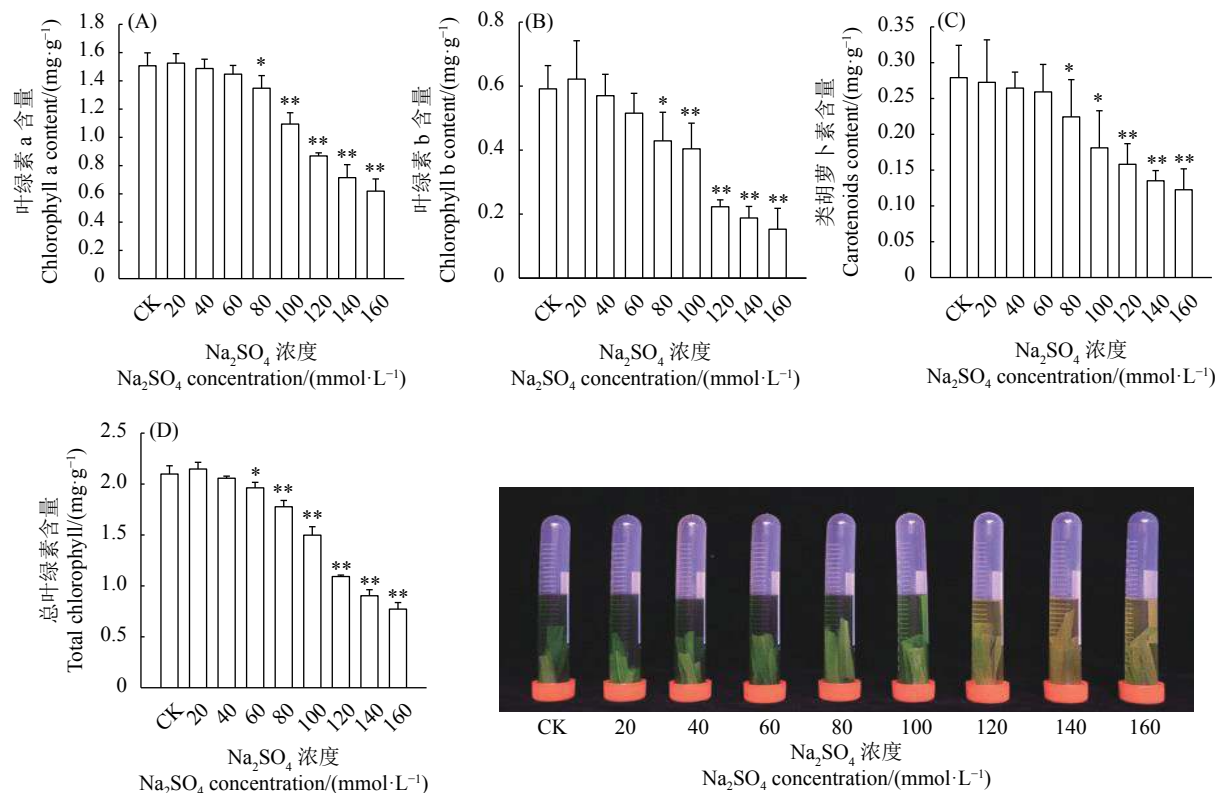


图 3 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effect of Na₂SO₄ stress on chlorophyll content in leaves of wheat seedlings

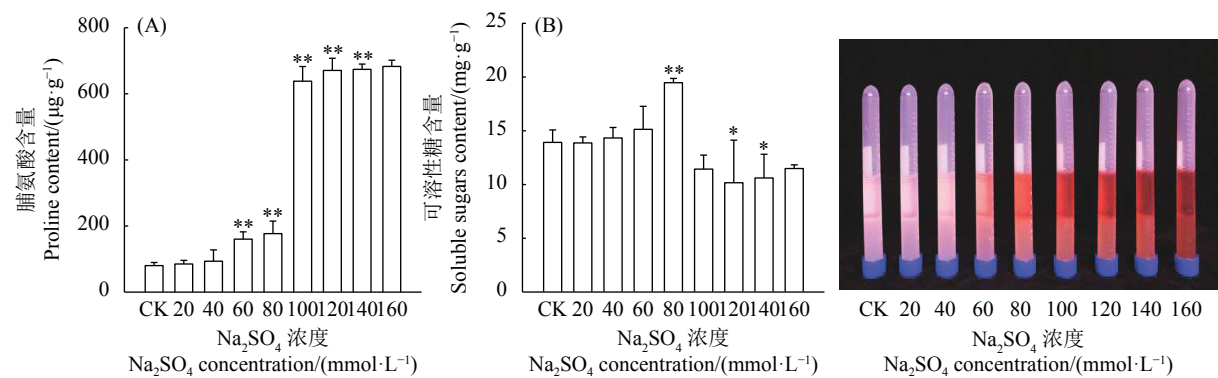


图 4 Na₂SO₄ 胁迫对小麦幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effect of Na₂SO₄ stress on content of osmosis regulators in wheat seedlings

($P < 0.05$)。当最高浓度 $160\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，为对照的 82.6%，差异不显著。随着 Na_2SO_4 胁迫浓度的升高小麦幼苗的脯氨酸含量一直升高， Na_2SO_4 胁迫浓度越高试管中脯氨酸提取液颜色越深。低浓度 Na_2SO_4 胁迫下，脯氨酸含量较小，当 Na_2SO_4 胁迫浓度为 60、80、100、120、140、160 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，小麦幼苗脯氨酸含量分别为对照的 2.00、2.20、7.95、8.36、8.40、8.51 倍，达到极显著差异 ($P < 0.01$)。

3 讨论

盐碱地是全球受到广泛关注的环境问题，盐碱

胁迫是植物重要的非生物胁迫限制因素。受自然和人为因素的影响，如气候因素、水文因素及不合理的农业灌溉方式等，盐碱地面积还在不断扩大^[20]。然而，盐碱地的成分复杂，很多地方盐碱地的主要成分是以碳酸盐和硫酸盐为主，其中 Na_2SO_4 就是盐碱地中一种非常重要的盐分组成类型。

3.1 Na₂SO₄ 胁迫对小麦生长的影响

盐碱胁迫对植物影响的最直观体现，就是抑制植物正常生长^[21]。同样以往的研究发现， NaCl 胁迫会抑制小麦正常生长，低浓度下抑制效果不明显，当超过一定阈值后抑制效果明显^[22]。从本试验结果

可以看出低浓度 Na_2SO_4 浓度胁迫对小麦幼苗株高、鲜重及生物量的影响并不大,但是当 Na_2SO_4 浓度超过 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后小麦幼苗的株高、鲜重和生物量明显减小,萎蔫程度加深。从本试验结果可以看出,硫酸盐胁迫与其他盐分胁迫结果相似,在低浓度盐胁迫下对小麦生长影响不大,但是当超过 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之后小麦生长就会受到显著抑制。

3.2 Na_2SO_4 胁迫对小麦抗氧化系统的影响

植物在正常生长条件下体内活性氧的产生与清除之间保持动态平衡,但当植物遭遇盐碱胁迫时这种动态平衡就会被打破,活性氧过多积累会对植物造成氧化胁迫^[23]。以往研究证实,NaCl 胁迫下小麦各种抗氧化酶活性会升高,同时 MDA 含量和质膜透性会增大。从本试验可以看出, Na_2SO_4 胁迫同样会对小麦幼苗造成氧化胁迫,低浓度 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗各个抗氧化酶活性影响不大,但是,当 Na_2SO_4 浓度超过 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后各个抗氧化酶活性开始升高,以抵御由 Na_2SO_4 胁迫引起的氧化胁迫,当浓度超过一定阈值后各个抗氧化酶活性还会降低。这主要是由于高浓度的 Na_2SO_4 胁迫导致其抗氧化调节系统崩溃引起的,并且随着浓度继续升高,MDA 含量也不断升高,这主要也是由氧化胁迫引起的。质膜透性是衡量植物耐盐性非常重要的指标^[24],由本试验可以看出,低浓度 Na_2SO_4 浓度胁迫对小麦幼苗质膜透性的影响并不大,但是当 Na_2SO_4 浓度 $\geq 80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,小麦幼苗的质膜透性明显增大。

由本试验结果可以看出, Na_2SO_4 胁迫下,小麦为了抵御氧化胁迫会提高各个抗氧化酶活性,当胁迫浓度超过一定阈值后抗氧化酶活性会明显增大,同时 MDA 含量和质膜透性明显增大。并且当超过一定浓度,小麦自身的抗氧化系统会丧失抵抗能力,进而各个抗氧化酶活性会降低。在其他同类研究中也发现,盐胁迫下随着盐浓度升高,柃柳的抗氧化酶活性会增高,当超过一定浓度后其抗氧化酶活性则会降低^[25]。造成这种现象的主要原因是,当胁迫浓度超过一定阈值之后,植物的抗氧化系统防御能力就会崩溃,抗氧化酶活性就会降低,进而丧失抵御氧化胁迫的能力。

3.3 Na_2SO_4 胁迫对小麦叶绿素含量的影响

植物光合作用对于植物的正常生长发育至关重要^[26],盐碱胁迫会显著抑制植物正常光合作用^[27],而叶绿素是植物光合作用的物质基础,叶绿素含量是衡量光合作用强弱的重要指标,因此,植物叶绿素含量也是评判其耐盐碱性的重要指标之一^[28-30]。郑世英等的研究表明,NaCl 胁迫会降低小麦叶绿素含量^[31]。

由本试验可以看出,低浓度的 Na_2SO_4 胁迫对小麦幼苗叶片叶绿素含量影响并不大,与对照处理相比,各叶绿素组分及总叶绿素含量基本相当,但是当 Na_2SO_4 浓度超过 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,小麦幼苗的各叶绿素组分及总叶绿素含量大幅度减少。

3.4 Na_2SO_4 胁迫对小麦渗透调节物质含量的影响

土壤中积累过多的盐分便会引起土壤水势降低,造成植物吸水困难,进而引起生理干旱^[32]。植物为了抵御由盐碱胁迫引起的渗透胁迫,便会在体内合成渗透调节物质来维持正常的细胞渗透压,从而达到抵御渗透胁迫的目的^[33-34]。可溶性糖是一种非常重要的渗透调节物质,其含量是衡量植物耐盐性的重要指标^[35],前人研究发现 NaCl 胁迫下,小麦可溶性糖含量会升高^[36],由本试验可以看出,同样随着 Na_2SO_4 浓度的升高,小麦幼苗可溶性糖含量呈先上升后下降的变化趋势,当 Na_2SO_4 浓度为 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小麦幼苗的可溶性糖含量最高,随着浓度的继续升高,可溶性糖含量呈下降趋势。脯氨酸是植物体内重要的氨基酸,在植物体内普遍以游离状态存在^[37]。脯氨酸具有很强的结合水能力,以此可以提高盐碱胁迫下植物抵御渗透胁迫的能力^[38]。与此同时脯氨酸还可以清除植物体内积累的过多的活性氧,维持膜稳定性^[39]。前人研究发现,NaCl 胁迫下小麦脯氨酸含量会升高^[36]。由本试验得出,低浓度 Na_2SO_4 对小麦幼苗脯氨酸含量的影响不太明显,当浓度超过 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时小麦幼苗的脯氨酸含量显著提高,从脯氨酸提取液表型图也可以看出,高浓度下颜色显著加深。

本研究系统探讨 Na_2SO_4 胁迫对于小麦生长与生理的影响,并且将生长、叶绿素及脯氨酸表型图与数据图有机结合起来,形象表现了不同浓度 Na_2SO_4 胁迫对于小麦生长、叶绿素含量、脯氨酸含量影响的变化过程,是对以前研究的补充与发展。今后还有待进一步研究不同浓度 Na_2SO_4 胁迫对小麦相关功能基因和转录因子表达情况的影响,并通过代谢组学和离子组学研究不同浓度 Na_2SO_4 胁迫对小麦代谢产物合成及不同离子含量变化的影响,从更深层次分析其机理。同时,将进一步研究不同盐分组成对小麦影响的差异性,包括离子转运、抗氧化调节、渗透调节、光合响应等,为揭示其机理提供理论支撑,为生产实践提供指导。

4 结论

从本试验结果可以得出,当 Na_2SO_4 浓度 $\geq 80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,百农矮抗 58 小麦生长受到明显抑制,各

种抗氧化酶活性明显增强, 质膜透性与 MDA 含量明显增高, 叶绿素含量明显降低, 脯氨酸与可溶性糖含量明显增高。因此, 综合分析百农矮抗 58 小麦对于 Na_2SO_4 胁迫浓度阈值界于 $80\sim 100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 此值可作为相似生态区域农业生产的参考值, 为生产实践提供指导。

参考文献:

- [1] ZHANG G C, DAI L X, DING H, et al. Response and adaptation to the accumulation and distribution of photosynthetic product in peanut under salt stress [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19 (3): 690–699.
- [2] 张金林, 李惠茹, 郭姝媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展 [J]. *草业学报*, 2015, 24 (12): 220–236.
ZHANG J L, LI H R, GUO S Y, et al. Research advances in higher plant adaptation to salt stress [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24 (12): 220–236. (in Chinese)
- [3] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望 [J]. *世界林业研究*, 2018, 31 (4): 70–75.
ZHU J F, CUI Z R, WU C H, et al. Research advances and prospect of saline and alkali Land greening in china [J]. *World Forestry Research*, 2018, 31 (4): 70–75. (in Chinese)
- [4] 鄯金标, 张福锁, 田长彦. 新疆盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [6] 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等. 植物对氯化钠和硫酸钠胁迫生理响应研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2015, 28 (4): 17–23.
LIU Z X, ZHANG H X, YANG X Y, et al. Research progress on physiological responses of plants to NaCl and Na_2SO_4 stress [J]. *World Forestry Research*, 2015, 28 (4): 17–23. (in Chinese)
- [7] LOUTFY N, SAKUMA Y, GUPTA D K, et al. Modifications of water status, growth rate and antioxidant system in two wheat cultivars as affected by salinity stress and salicylic acid [J]. *Journal of Plant Research*, 2020, 133 (4): 549–570.
- [8] 马凤霞, 王沛, 张敏, 等. 叶面喷施硒肥对不同品种小麦产量及籽粒硒含量的影响 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 51 (1): 25–30.
MA F X, WANG P, ZHANG M, et al. Effect of selenium fertilizer spraying on wheat yield of different varieties and grain selenium content [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 51 (1): 25–30. (in Chinese)
- [9] 徐亚军, 赵龙飞, 邢鸿福, 等. 内生细菌对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸和丙二醛的影响 [J]. *生态学报*, 2020 (11): 1–12.
XU Y J, ZAO L F, XING H F, et al. Effects of endophytic bacteria on proline and malondialdehyde of wheat seedlings under salt stress [J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2020 (11): 1–12. (in Chinese)
- [10] 钮力亚, 王伟, 王伟伟, 等. 盐胁迫下小麦品种生理指标的变化规律 [J]. *中国农学通报*, 2019, 35 (2): 1–4.
NIU L Y, WANG W, WANG W W, et al. Physiological indexes of wheat varieties under salt stress: the change law [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35 (2): 1–4. (in Chinese)
- [11] 时丽冉, 白丽荣, 吕亚慈, 等. 小麦杂交品种衡 9966 苗期耐盐性分析 [J]. *作物杂志*, 2018 (6): 149–153.
SHI L R, BAI L R, LYU Y C, et al. Analysis of salt tolerance at the seedling stage of wheat hybrid variety heng 9966 [J]. *Crops*, 2018 (6): 149–153. (in Chinese)
- [12] POUSTINI K, ESMAEILI A, ABBASI A, et al. Ion concentration and energy response of two wheat cultivars to salt stress [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 43 (1): 1–11.
- [13] XIE X, ZHAO F, ZHENG Y, et al. Identification of Tolerance of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) With Different Ploidy under Salt Stress [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental ence*, 2020, 598 (1): 12074–12076.
- [14] KLAY I, RIAHI L, AMARA H S, et al. Genotypic variability for salt stress tolerance among wild and cultivated wheat germplasms at an early development stage [J]. *Open Agriculture*, 2019 (4): 375–380.
- [15] WEI L, LV B, WANG M, et al. Priming effect of abscisic acid on alkaline stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 90: 50–57.
- [16] 王利军, 马履一, 王爽, 等. 水盐胁迫对沙枣幼苗叶绿素荧光参数和色素含量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19 (12): 122–127.
WANG L J, MA L Y, WANG S, et al. Effects of water ang salt stress on chlorophyll fluorescence parameters and pigment contents of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19 (12): 122–127. (in Chinese)
- [17] DIAO Q, SONG Y, QI H. Exogenous spermidine enhances chilling tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings via involvement in polyamines metabolism and physiological parameter levels [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37 (11): 230.
- [18] BAO G, HE F, CHEN W, et al. Physiological effects of different concentrations of chloride deicing salt and freeze–thaw stress on *Secale cereale* L. seedlings [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 39 (1): 15–25.
- [19] 刘铎, 丛日春, 高卫东, 等. 盐碱胁迫对柳树抗氧化酶的影响 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37 (5): 53–57.
LIU D, CONG R C, GAO W D, et al. Effects of salt and alkali stresses on antioxidases of willow [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37 (5): 53–57. (in Chinese)
- [20] 许迪, 李益农, 龚时宏, 等. 面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理 [J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37 (1): 63–72.
XU D, LI Y N, GONG S H, et al. Waterlogging and saline-alkaline management for development of sustainably irrigated agriculture [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37 (1): 63–72. (in Chinese)
- [21] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对 2 种栎树苗期生长和根系生长发育的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34 (4): 1021–1029.
WANG S F, HU Y X, SUN H J, et al. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (4): 1021–1029. (in Chinese)
- [22] 孟祥浩, 林琪, 张玉梅, 等. 盐胁迫对小麦萌发的影响及耐盐指标的

- 筛选 [J]. *华北农学报*, 2014, 29 (4): 175-180.
- MENG X H, LIN Q, ZHANG Y M, et al. Effects of salt stress on germination of wheat and screening of salt tolerance indices [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29 (4): 175-180. (in Chinese)
- [23] GONG B, WEN D, VANDENLANGENBERG K, et al. Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 157: 1-12.
- [24] BING-SHENG L, XIAO-WEI L, HONG-YUAN M, et al. Differences in Growth and Physiology of Rice in Response to Different Saline-Alkaline Stress Factors [J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105 (6): 1889.
- [25] 朱金方, 刘京涛, 陆兆华, 等. 盐胁迫对中国柽柳幼苗生理特性的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (15): 5140-5146.
- ZHU J F, LIU J T, LU Z H, et al. Effects of salt stress on physiology characteristics of *Tamarix chinensis* Lour. seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (15): 5140-5146. (in Chinese)
- [26] LI H D, GAO H Y. Effects of different nitrogen application rate on allocation of photosynthetic electron flux in Rumex K-1 leaves [J]. *Journal of Plant Physiology & Molecular Biology*, 2007, 33 (5): 417-424.
- [27] ZHANG Y, KAISER E, ZHANG Y, et al. Short-term salt stress strongly affects dynamic photosynthesis, but not steady-state photosynthesis, in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 149: 109-119.
- [28] 刘莉娜, 张卫强, 黄芳芳, 等. 盐胁迫对银叶树幼苗光合特性与叶绿素荧光参数的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2019, 39 (6): 601-607.
- LIU L N, ZHANG W Q, HUANG F F, et al. Effects of NaCl stress on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence of heritiera littoralis seedlings [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39 (6): 601-607. (in Chinese)
- [29] 王玥琳, 徐大平, 杨曾奖, 等. 移植和钾肥对降香黄檀光合特性与叶绿素含量的影响 [J]. *植物科学学报*, 2018, 36 (6): 879-887.
- WANG Y L, XU D P, YANG Z J, et al. Effects of transplantation and potassium fertilizer on the photosynthetic characteristics and chlorophyll content of dalbergia odorifera [J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36 (6): 879-887. (in Chinese)
- [30] 于爽, 杨新宇, 高剑, 等. 盐碱胁迫对龙葵幼苗生长及叶绿素含量的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2018, 46 (7): 131-134.
- YU S, YANG X Y, GAO J, et al. Effects of saline-alkali stress on growth and chlorophyll content of solanum nigrum seedlings [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46 (7): 131-134. (in Chinese)
- [31] 郑世英, 郑芳, 徐建, 等. 外源硅对NaCl胁迫下小麦幼苗生长及光合特性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2015, 35 (1): 111-115.
- ZHENG S Y, ZHENG F, XU J, et al. Effects of silicon on the biomass and photosynthetic characteristics of wheat seedlings under NaCl stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35 (1): 111-115. (in Chinese)
- Chinese)
- [32] 王康君, 樊继伟, 陈凤, 等. 植物对盐胁迫的响应及耐盐调控的研究进展 [J]. *江西农业学报*, 2018, 30 (12): 31-40.
- WANG K J, FAN J W, CHEN F, et al. Research advances in response of plants to salt stress and regulation of salinity tolerance [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30 (12): 31-40. (in Chinese)
- [33] 王秀娟, 杨会青. 盐碱胁迫下西伯利亚白刺的渗透调节物质的变化 [J]. *热带农业科学*, 2010, 30 (2): 34-36.
- WANG X J, YANG H Q. Changes of osmosis-regulating substance of nitaria sibirica pall. under salt-alkali stress in Daqing [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2010, 30 (2): 34-36. (in Chinese)
- [34] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 等. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (24): 8511-8517.
- LI Z Y, CONG R C, YANG Q S, et al. Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (24): 8511-8517. (in Chinese)
- [35] 方志红, 董宽虎. NaCl胁迫对碱蒿可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26 (16): 147-149.
- FANG Z H, DONG K H. Effects of NaCl stress on soluble protein contents and soluble carbohydrate contents of artemisia cnethifolia [J]. *Chinese Agricultural Science bulletin*, 2010, 26 (16): 147-149. (in Chinese)
- [36] 杨颖丽, 李翠祥, 滕玉瑾, 等. NaCl胁迫下两种春小麦新品种渗透性调节反应的比较 [J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52 (1): 93-99.
- YANG Y L, LI C X, TENG Y J, et al. Comparison osmotic adjustment in two new spring wheat varieties under NaCl stress [J]. *Journal of northwest normal university(Natural Science)*, 2016, 52 (1): 93-99. (in Chinese)
- [37] 代洪苇, 周盈盈, 郑姝婷, 等. 茶树脯氨酸转运蛋白基因鉴定及表达分析 [J]. *西北植物学报*, 2020, 40 (6): 937-948.
- DAI H W, ZHOU Y Y, ZHENG S T, et al. Identification and expression profiling analysis of CsProTs gene family in tea plant [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40 (6): 937-948. (in Chinese)
- [38] 焦蓉, 刘好宝, 刘贯山, 等. 论脯氨酸累积与植物抗渗透胁迫 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (7): 216-221.
- JIAO R, LIU H B, LIU G S, et al. Discussion of accumulation of proline and Its relationship with osmotic stress tolerance of plants [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (7): 216-221. (in Chinese)
- [39] 周万海, 冯瑞章, 师尚礼, 等. NO对盐胁迫下苜蓿根系生长抑制及氧化损伤的缓解效应 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (11): 3606-3614.
- ZHOU W H, FENG R Z, SHI S L, et al. Nitric oxide protection of alfalfa seedling roots against salt-induced inhibition of growth and oxidative damage [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (11): 3606-3614. (in Chinese)

(责任编辑: 杨小萍)