

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.43001

叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶片光合性能及籽粒产量的影响

孙照华¹ 任 昊¹ 王洪章¹ 王子强² 姚海燕³ 辛爱美⁴ 赵 斌¹
张吉旺¹ 任佰朝¹ 刘 鹏^{1,*}

¹ 黄淮海区域玉米技术创新中心 / 山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; ² 滨州市农业科学研究院, 山东滨州 256603; ³ 无棣县农业农村局, 山东无棣 251900; ⁴ 肥城市农村经济管理服务中心, 山东肥城 271600

摘 要: 硅是作物生长的有益元素, 有助于缓解作物遭受的盐胁迫。本试验以大田试验种植的登海 605 为试验材料, 分别于小喇叭口期(V9)、大喇叭口期(V12)和抽雄期(VT)进行喷施硅制剂($8 \text{ g L}^{-1} \text{ SiO}_2$)处理, 并以同期喷施等量清水为对照, 旨在探讨不同时期叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶片光合性能及籽粒产量的影响, 为滨海盐碱地夏玉米抗逆增产提供理论依据。结果表明, 与对照相比, 不同时期喷施叶面硅制剂, 均能够显著增加盐碱地夏玉米叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性, 降低丙二醛(MDA)含量, 缓解光合器官的损伤和光合色素的降解; V9、V12、VT 期叶面喷施硅制剂处理 R6 期, 叶面积指数 2 年平均分别提高 6.28%、7.16%、6.66%, 2023 年 R3 期叶绿素含量分别提高 6.62%、7.52%、7.47%。喷施硅制剂提高了叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)以及胞间 CO_2 浓度(C_i); V9、V12、VT 期叶面喷施硅制剂处理 R3 期 P_n 两年平均分别提高 11.64%、11.73%、16.39%。光合速率提升促进了干物质积累及其向籽粒的转运, R6 期干物质积累量分别提高 8.46%、8.88%、9.67%, 穗粒数和千粒重显著提高, 最终籽粒产量在 2022 年和 2023 年分别提升了 7.24%、10.47%、12.94%和 6.23%、7.99%、11.25%; 综上, 本试验条件下, 滨海轻中度盐碱地夏玉米生产过程中以 VT 期喷施叶面硅制剂的增产效果最佳, 主要是缓解了氧化胁迫、提升了光合性能、促进了干物质积累与转运。

关键词: 夏玉米; 滨海盐碱地; 硅; 光合性能; 产量

Effects of foliar silicon sprays on leaf photosynthetic performance and grain yield of summer maize in coastal saline-alkali soil

SUN Zhao-Hua¹, REN Hao¹, WANG Hong-Zhang¹, WANG Zi-Qiang², YAO Hai-Yan³, XIN Ai-Mei⁴, ZHAO Bin¹, ZHANG Ji-Wang¹, REN Bai-Zhao¹, and LIU Peng^{1,*}

¹ Huang-Huai-Hai Regional Maize Technology Innovation Center / College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; ² Academy of Agricultural Sciences of Binzhou, Binzhou 256603, Shandong, China; ³ Agriculture and rural Bureau of Wudi County, Wudi 251900, Shandong, China; ⁴ Rural Economic Management Service Center of Feicheng, Feicheng 271600, Shandong, China

Abstract: Silicon is a beneficial element for crop growth and can effectively alleviate salt stress in crops. This study aims to explore the alleviating effect of foliar spraying of silicon on salt stress in coastal saline-alkali summer maize in China, providing a theoretical basis for enhancing stress resistance and increasing yield in coastal saline-alkali summer maize. Denghai 605, planted in the field test, was selected as the test material. A silicon preparation ($8 \text{ g L}^{-1} \text{ SiO}_2$) was sprayed at the V9, V12, and VT stages, while the control group was sprayed with the same amount of water. The effects of foliar spraying with silicon preparation at

本研究由山东省重点研发计划项目(LJNY202103), 山东省现代农业产业技术体系建设项目(SDAIT-02-08)和山东省重大科技创新工程计划项目(2021CXGC010804-05)资助。

This study was supported by the Key Research and Development Project of Shandong Province (LJNY202103), the Shandong Province Key Agricultural Project for Application Technology Innovation (SDAIT-02-08), and the Major Scientific and Technological Innovation Project in Shandong Province (2021CXGC010804-05).

* 通信作者(Corresponding author): 刘鹏, E-mail: liup@sdaa.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: sunzh0228@163.com

Received (收稿日期): 2024-01-04; Accepted (接受日期): 2024-05-21; Published online (网络出版日期): 2024-06-05.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240603.1823.006>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

different stages on leaf photosynthetic performance and grain yield of summer maize in coastal saline-alkali soil were investigated. The results demonstrated that foliar spraying of silicon preparations at different stages significantly increased the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) in saline-alkali summer maize leaves compared to the control group. It also reduced the content of malondialdehyde (MDA), alleviating the damage to photosynthetic organs and the degradation of photosynthetic pigments. The leaf area index at the R6 stage increased by 6.28%, 7.16%, and 6.66% in the V9, V12, and VT stages, respectively, while the chlorophyll content at the R3 stage increased by 6.62%, 7.52%, and 7.47% in 2023. Silicon spraying increased the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), and intercellular CO_2 concentration (C_i) of leaves. Foliar spraying of silicon preparation at the V9, V12, and VT stages increased the P_n of the R3 stage by 11.64%, 11.73%, and 16.39%, respectively. The biomass at the R6 stage increased by 8.46%, 8.88%, and 9.67%, respectively, and there was a significant increase in the number of grains per spike and 1000-grain weight. Ultimately, the grain yield increased by 7.24%, 10.47%, 12.94%, 6.23%, 7.99%, and 11.25% in 2022 and 2023, respectively. In summary, under the conditions of this experiment, foliar spraying of silicon preparations at the VT stage had the most significant effect on increasing yield in summer maize production in coastal light to moderate saline-alkali soil. This effect was mainly attributed to the alleviation of oxidative stress, improvement of photosynthetic performance, and promotion of biomass accumulation and transportation.

Keywords: summer maize; coastal saline-alkali soil; silicon; photosynthetic performance; yield

玉米是我国第一大粮食作物,我国玉米供求关系长期处于“紧平衡”状态,在耕地资源严重制约下,进一步提升单产是确保总产、保障国家粮食安全的重要途径^[1-2]。盐碱地是我国最主要的中低产田类型,总量高达 9.9×10^7 公顷,占我国耕地面积的 20% 以上,并且呈现逐年增加的趋势,而已开垦种植利用的盐碱地仅占我国盐碱地总面积的 10%^[3-4]。山东省盐碱地面积约 5.93×10^5 hm^2 ,其中滨海盐碱地约占 75%^[5]。滨海盐碱地受海潮和地下水的影响,土壤盐渍化严重,理化性质不良,养分释放缓慢^[6-7],土壤含盐量高、pH 高,会对植物造成渗透胁迫、离子毒害以及氧化损伤,加速叶片衰老,并降低气孔导度和净光合速率,影响植物养分吸收、生长发育,妨碍产量形成,随着盐浓度的增加,甚至会造成植株死亡^[8-10]。因此,在我国耕地面积刚性限制下,合理开发利用滨海盐碱地,采取一定技术措施缓解盐胁迫对夏玉米生产胁迫效应,提升滨海盐碱地夏玉米抗逆增产性能,对保障我国粮食安全,促进农民增收与农业可持续发展具有重要意义。

硅(Si)在土壤中的含量仅次于氧,占地壳的 28%,土壤中的大多数硅以硅酸盐结晶或沉淀形式存在,而植物主要以单硅酸(H_4SiO_4)的形态吸收硅,所以土壤中能够被植物直接吸收利用的有效硅含量较低^[11]。硅不是植物生长的必需元素,但是对植物遭受的盐胁迫具有一定缓解作用^[12],硅被植物吸收后,以水合无定形二氧化硅聚合物的形式积聚于各种组织的表皮上,修复植物受损结构,维持植物细胞和组织构造的完整性^[13-14];硅可在细胞壁上形成双层硅角质层,使细胞壁矿化,还可通过增加渗透调节物质含量,减少植物对盐离子的吸收和向地上部的运输^[15]。盐胁迫条件下小麦植株吸收的硅,一

部分在细胞壁上沉积,缓解盐胁迫造成的细胞损伤,另一部分可介导酶促反应、激活抗氧化系统以及产生渗透产物等形式,减少盐离子的吸收^[16]。在水稻中,硅也是通过物理和生理生化途径增强植株耐盐性^[17]。硅在植株体内的积累可以减少盐离子吸收,增强质膜稳定性;还可以通过调节抗氧化酶活性,保持活性氧(ROS)代谢平衡;缓解光合器官的损伤和光合色素的降解,保证植物光合作用正常进行^[18]。通过叶面喷施硅制剂,可以增加植物对硅的吸收,一定程度缓解植物遭受的盐胁迫^[13]。

前人研究表明,硅对缓解玉米、小麦等禾本科作物盐胁迫具有积极作用^[19-20],然而,这些研究多针对于不同硅制剂的施用浓度,但在玉米上硅制剂的最佳喷施时期尚不明确,不同时期施用硅制剂缓解玉米盐胁迫的生理机制,有待于进一步深入研究。本试验通过设置 3 个不同的喷施硅制剂时期,进行大田试验研究缓解滨海轻中度盐碱地夏玉米盐胁迫的硅制剂最佳喷施时期,以期为滨海盐碱地开发利用、提升盐碱地夏玉米产量提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于山东省西北部滨州市无棣县小泊头镇($38^{\circ}3'N$, $117^{\circ}36'E$),地处北温带东亚季风大陆性气候区,雨热同期,土壤类型为棕壤土,2022 年播前 0~20 cm 耕作层土壤养分含量为:有机质 $13.91 g kg^{-1}$ 、全氮 $0.94 g kg^{-1}$ 、全磷 $2.50 g kg^{-1}$ 、全钾 $10.37 g kg^{-1}$ 、碱解氮 $80.50 mg kg^{-1}$ 、速效磷 $6.03 mg kg^{-1}$ 、速效钾 $143.61 mg kg^{-1}$, pH 8.5, 0~20 cm 土层含盐量为 1.5‰~3‰,为轻中度盐碱地。

1.2 试验设计

预试验于 2022 年夏玉米播种前在试验区进行, 预试验土壤理化性状与正式试验相同, 选用玉米品种登海 605 为预试验材料, 设置不同硅制剂(Na_2SiO_3)喷施浓度, 分别为 $0.5\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ ($\text{S}_{0.5}$); $1\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_1); $2\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_2); $4\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_4); 8 g

$\text{L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_8); $12\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_{12}); $16\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ (S_{16}), 以喷施清水为对照(CK), 在拔节期(V6)进行喷施处理, 于喷施后 7 d, 通过测定叶面积指数、SPAD 值和净光合速率(P_n), 筛选本试验硅制剂最佳喷施浓度。预试验结果如表 1 所示, 以叶面喷施硅制剂浓度为 $8\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ 效果最佳。

表 1 不同浓度硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶面积指数、SPAD 值和净光合速率的影响
Table 1 Effects of different concentrations of silicon preparation on leaf area index, SPAD value, and net photosynthetic rate of summer maize in coastal saline-alkali soil

处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index	SPAD 值 SPAD value	净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)
CK	0.98 e	42.17 b	25.77 c
$\text{S}_{0.5}$	1.00 e	42.33 b	25.93 c
S_1	1.07 d	43.60 ab	26.60 bc
S_2	1.09 cd	44.13 ab	26.63 bc
S_4	1.14 bc	45.13 a	28.17 ab
S_8	1.21 a	45.07 a	28.93 a
S_{12}	1.19 ab	44.10 ab	28.27 ab
S_{16}	1.12 cd	42.87 b	25.43 c

同列标以不同小写字母表示在 0.05 概率水平差异显著。CK: 喷施清水; $\text{S}_{0.5}$: 喷施 $0.5\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_1 : 喷施 $1\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_2 : 喷施 $2\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_4 : 喷施 $4\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_8 : 喷施 $8\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_{12} : 喷施 $12\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_{16} : 喷施 $16\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$ 。
Different lowercase letters within the same column indicate significant difference at the 5% probability level. CK: spraying water; $\text{S}_{0.5}$: spraying $0.5\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_1 : spraying $1\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_2 : spraying $2\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_4 : spraying $4\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_8 : spraying $8\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_{12} : spraying $12\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$; S_{16} : spraying $16\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$.

本试验于 2022 年和 2023 年 2 个夏玉米生长季, 选用玉米品种登海 605 为试验材料, 采用裂区设计, 主区为是否喷施硅制剂, 依据前期试验结果确定硅制剂(Na_2SiO_3)喷施浓度为 $8\text{ g L}^{-1}\text{ SiO}_2$, 以相同时期喷施清水处理为对照; 裂区为喷施时期, 分别于小喇叭口期(V9)、大喇叭口期(V12)和抽雄期(VT)喷施。试验设置 3 次重复, 共 18 个小区; 小区面积 150 m^2 (长 25 m、宽 6 m)。处理时使用电动喷雾器进行喷施, 喷施量为 600 L hm^{-2} 。该试验除喷施硅制剂外, 生长期不不使用其他化控试剂。种植密度为 $67,500\text{ 株 hm}^{-2}$, 行距 60 cm, 株距 25 cm; 所用肥料为活性腐殖酸复合肥(N : P_2O_5 : K_2O =25 : 12 : 5), 施用量为 900 kg hm^{-2} , 于播前一次性施入。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 叶面积指数 各处理于小喇叭口期处理后 7 d (V9+7 d)、大喇叭口期处理后 7 d (V12+7 d)、抽雄期处理后 7 d (VT+7 d)、乳熟期(R3)、成熟期(R6), 在田间选取 5 株长势均匀有代表性的植株, 测量其全部叶片的叶长、叶宽, 计算叶面积指数。

完全展开叶单叶叶面积(cm^2)=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.75;

未完全展开叶单叶叶面积(cm^2)=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.5;

叶面积指数=(单株叶面积×小区株数)/小区面积。

1.3.2 叶绿素含量 各处理于 V9+7 d、V12+7 d、VT+7 d、R3 期选取长势均匀有代表性的植株测定穗位叶(吐丝前测定最上面一片完全展开叶)叶绿素含量。采用乙醇丙酮法^[21]提取, 用紫外分光光度计(UV-2450, 日本)测定吸光度, 计算叶绿素含量。

1.3.3 气体交换参数 各处理于 VT+7 d、R3 期使用 CIRAS-II 光合仪(PP Systems, 美国), 选择晴天 10:00—12:00 在 $1600\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ 光照强度条件下测定, 每个小区选取长势均匀有代表性的植株, 测定植株穗位叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。

1.3.4 抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量 各处理于 VT+7 d、R3 期选取长势均匀有代表性的植株, 取穗位叶, 去离子水洗净后用滤纸将表面水分吸干, 液氮速冻后保存于超低温冰箱用于测定叶片相关生理指标。采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[22], 采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[22], 采用紫外吸收法测定过氧化氢酶

(CAT)活性^[22], 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[23]。

1.3.5 干物质积累量 于 V9+7 d、V12+7 d、VT+7 d、R3 期、R6 期取样, 各处理选取 5 株长势均匀有代表性的植株, 将地上部按茎秆、叶片、雌穗、雄穗和苞叶分开, 105℃杀青 30 min 后 80℃烘至恒重, 称重。

1.3.6 籽粒产量及产量构成因素 于 R6 期, 在每个处理内选取 5 个 9 m² (5.0 m×1.8 m)具有代表性的玉米样方, 将其全部果穗收获、晾晒, 测定其产量及产量构成因素。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Origin 2021 软件进行处理与绘图, 运用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, 并采用 LSD 法进行差异比较。

2 结果与分析

2.1 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶面积指数的影响

如图 1 所示, 随着生育进程的推进, 叶面积指数呈先升高后降低的趋势。除 2022 年 V9+7 d 时硅制剂对叶面积指数无显著影响外, 其他各处理均显

著提高了夏玉米叶面积指数, 而不同时期之间以及硅制剂与时期互作对叶面积指数无显著影响。2022 年和 2023 年, 与对照相比, V9、V12 期喷施硅制剂处理在 VT+7 d 时叶面积指数分别增加了 4.45%、5.65%和 6.43%、5.77%; V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理在 R3 期叶面积指数分别增加了 4.88%、5.04%、3.01%和 8.28%、6.74%、7.22%; R6 期叶面积指数分别增加了 5.87%、6.71%、6.91%和 6.68%、7.61%、6.41%。

2.2 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶绿素含量的影响

如图 2 所示, 从 V9+7 d 时到 R3 期, 盐碱地夏玉米叶片叶绿素含量逐渐升高; 喷施硅制剂对夏玉米叶片叶绿素含量的提高具有极显著影响, 而不同时期之间以及硅制剂与时期互作对叶片叶绿素含量的提高只在 VT+7 d 时具有显著影响。2022 年和 2023 年, 与对照相比, V9、V12 期喷施硅制剂处理在 VT+7 d 时叶片叶绿素含量分别增加了 9.80%、11.57%和 8.93%、8.36%; V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理在 R3 期叶片叶绿素含量 2022 年和 2023 年分别增加了 11.17%、7.24%、6.85%和 6.62%、7.52%、7.47%。

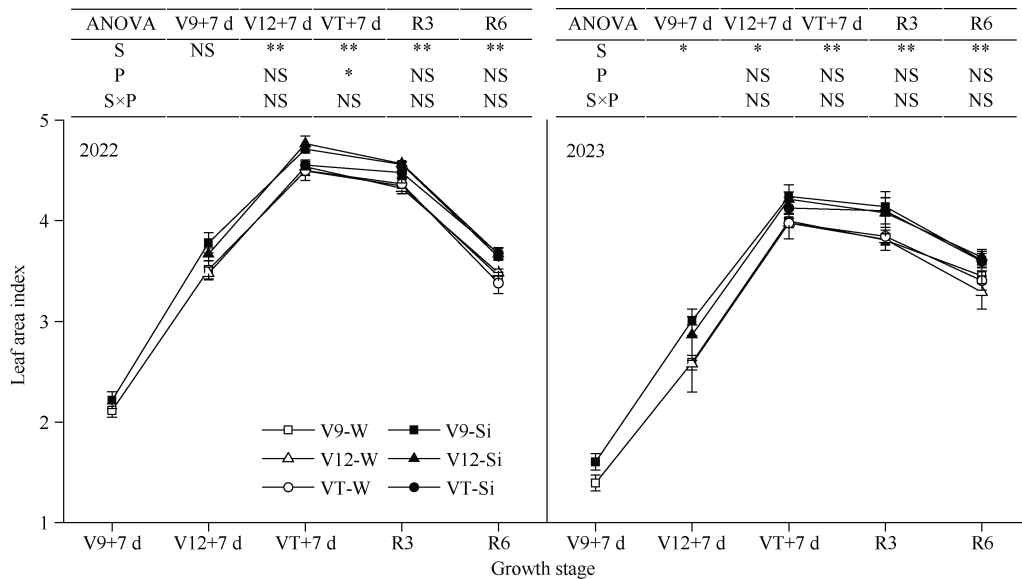


图 1 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶面积指数的影响

Fig. 1 Effects of foliar silicon sprays on leaf area index of summer maize in coastal saline-alkali soil

V9-W: 小喇叭口期喷施清水; V9-Si: 小喇叭口期喷施硅制剂; V12-W: 大喇叭口期喷施清水; V12-Si: 大喇叭口期喷施硅制剂; VT-W: 抽雄期喷施清水; VT-Si: 抽雄期喷施硅制剂。V9+7 d、V12+7 d、VT+7 d、R3 和 R6 分别代表小喇叭口期处理后 7 d、大喇叭口期处理后 7 d、抽雄期处理后 7 d、乳熟期和成熟期。S: 硅制剂; P: 喷施时期。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。

V9-W: spraying water in 9-leaf stage; V9-Si: spraying silicon preparation in 9-leaf stage; V12-W: spraying water in 12-leaf stage; V12-Si: spraying silicon preparation in 12-leaf stage; VT-W: spraying water in tasseling stage; VT-Si: spraying silicon preparation in tasseling stage. V9+7 d, V12+7 d, VT+7 d, R3 and R6 represent 7 days after treatment of the 9-leaf stage, 7 days after treatment of the 12-leaf stage, 7 days after treatment of the tasseling stage, milking stage, and maturity stage, respectively. S: silicon; P: spraying stage. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significance.

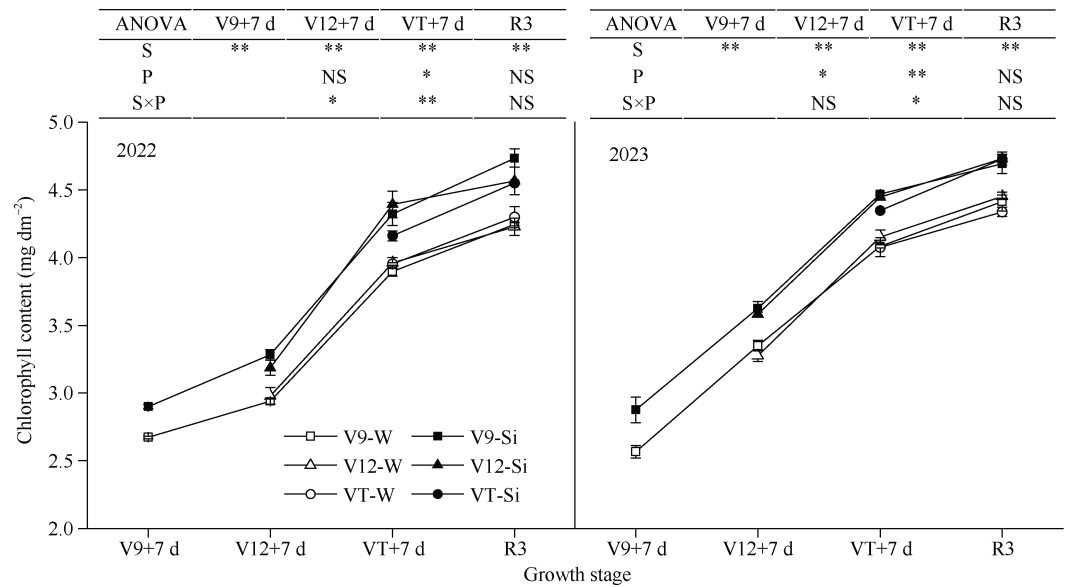


图 2 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of foliar silicon sprays on chlorophyll content of summer maize in coastal saline-alkali soil

处理同图 1。V9+7 d、V12+7 d、VT+7 d 和 R3 分别代表小喇叭口期处理后 7 d、大喇叭口期处理后 7 d、抽雄期处理后 7 d 和乳熟期。S: 硅制剂; P: 喷施时期。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Fig. 1. V9+7 d, V12+7 d, VT+7 d, and R3 represent 7 days after treatment of the 9-leaf stage, 7 days after treatment of the 12-leaf stage, 7 days after treatment of the tasseling stage, and milking stage, respectively. S: silicon; P: spraying stage. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significance.

2.3 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶片气体交换参数的影响

2.3.1 净光合速率(P_n) 不同时期喷施硅制剂均显著提高了叶片 P_n (图 3-A, B)。2 年数据显示, VT+7 d 时和 R3 期 P_n 均为 VT 期喷施硅制剂处理表现最好。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 P_n 在 VT+7 d 时分别提高 12.48%、12.39%、15.95%和 13.35%、11.74%、14.62%; 叶片 P_n 在 R3 期分别提高 7.73%、8.00%、14.49%和 15.54%、15.46%、18.29%。以 VT 期喷施硅制剂对 P_n 的提升效果最佳, 为增加干物质积累及转运奠定了基础。

2.3.2 蒸腾速率(T_r) 与对照相比, 除 2022 年 VT+7 d 时 V9、VT 期喷施硅制剂处理外, 不同时期喷施硅制剂均显著提高了叶片 T_r (图 3-C, D)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 T_r 在 VT+7 d 时分别提高 9.49%、15.88%、8.12%和 14.29%、15.10%、20.00%; 叶片 T_r 在 R3 期分别提高 30.33%、27.10%、27.16%和 17.94%、22.91%、26.07%。2022 年趋势不明显, 但整体表现为 VT-Si>V12-Si>V9-Si。

2.3.3 气孔导度(G_s) 与对照相比, 不同时期喷施硅制剂显著提高叶片 G_s (图 3-E, F)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理

叶片 G_s 在 VT+7 d 时分别提高 22.76%、22.56%、10.84%和 16.31%、18.67%、18.61%; 叶片 G_s 在 R3 期分别提高 18.86%、21.40%、37.38%和 16.24%、16.88%、19.17%。整体表现为 VT-Si>V12-Si>V9-Si。

2.3.4 胞间 CO_2 浓度(C_i) 随生育进程推进, 叶片 C_i 逐渐降低, 与对照相比, 不同时期喷施硅制剂显著提高叶片 C_i (图 3-G, H)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 C_i 在 VT+7 d 时分别提高 5.65%、11.09%、12.90%和 9.39%、11.12%、12.64%; 叶片 C_i 在 R3 期分别提高 12.70%、15.59%、19.79%和 11.81%、12.29%、19.52%。2 年数据表明, VT 期喷施硅制剂效果最好。

2.4 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶片抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

2.4.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性 不同时期叶面喷施硅制剂后提高了叶片 SOD 活性, 但只有 2022 年 VT+7 d 时 V12-Si 处理、R3 期 V9-Si 处理和 2023 年 VT-Si 处理达到显著水平(图 4-A, B)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 SOD 活性在 VT+7 d 时分别提高 12.33%、21.19%、18.38%和 11.02%、13.67%、20.44%; 叶片 SOD 活性在 R3 期分别提高 25.68%、22.53%、16.12%和 7.72%、8.78%、15.31%。

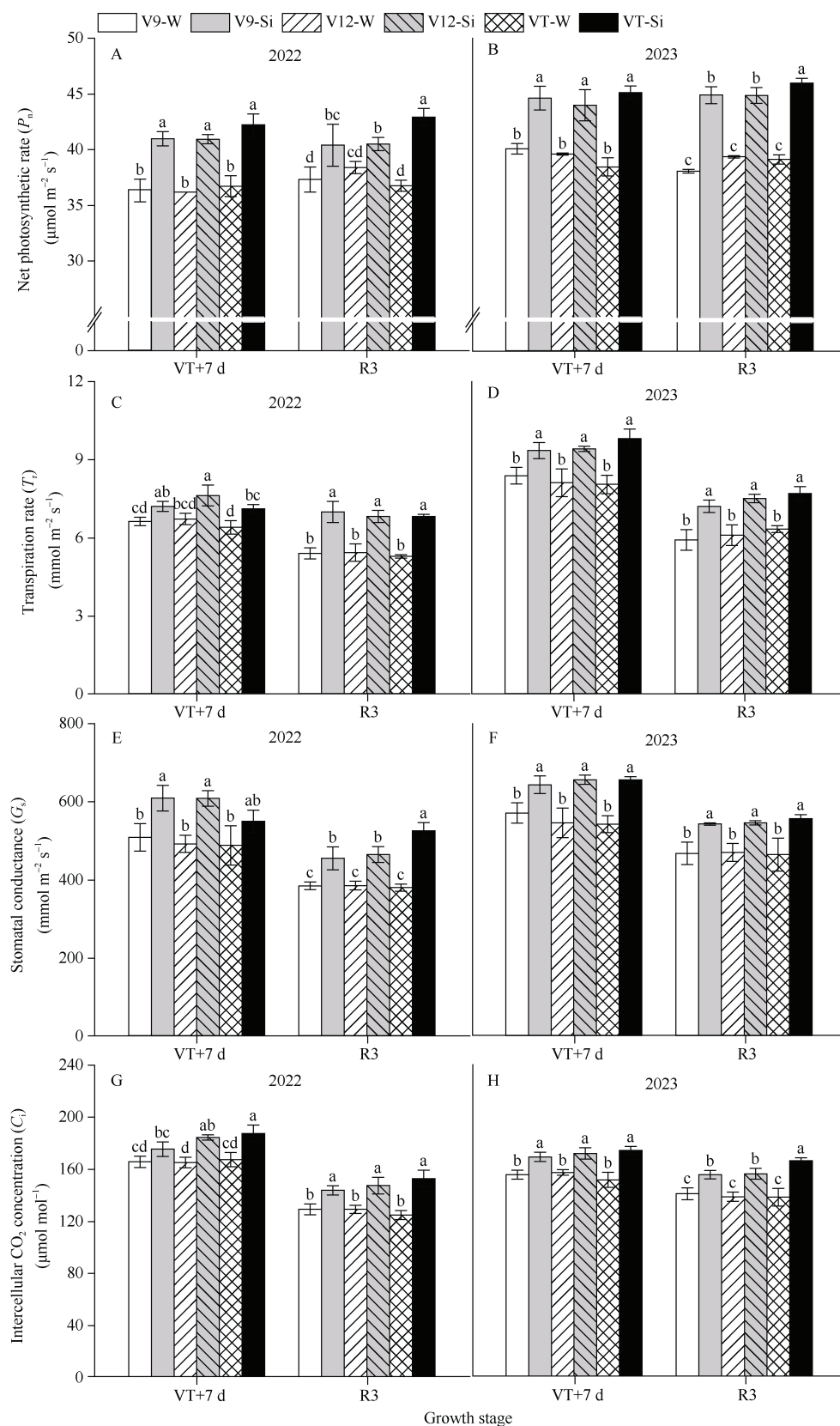


图 3 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米气体交换参数的影响

Fig. 3 Effects of foliar silicon sprays on gas exchange parameters of summer maize in coastal saline-alkali soil

处理同图 1。VT+7 d 和 R3 分别代表抽雄期处理后 7 d 和乳熟期。图中不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 1. VT+7 d and R3 represent 7 days after treatment of the tasseling stage and milking stage, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$.

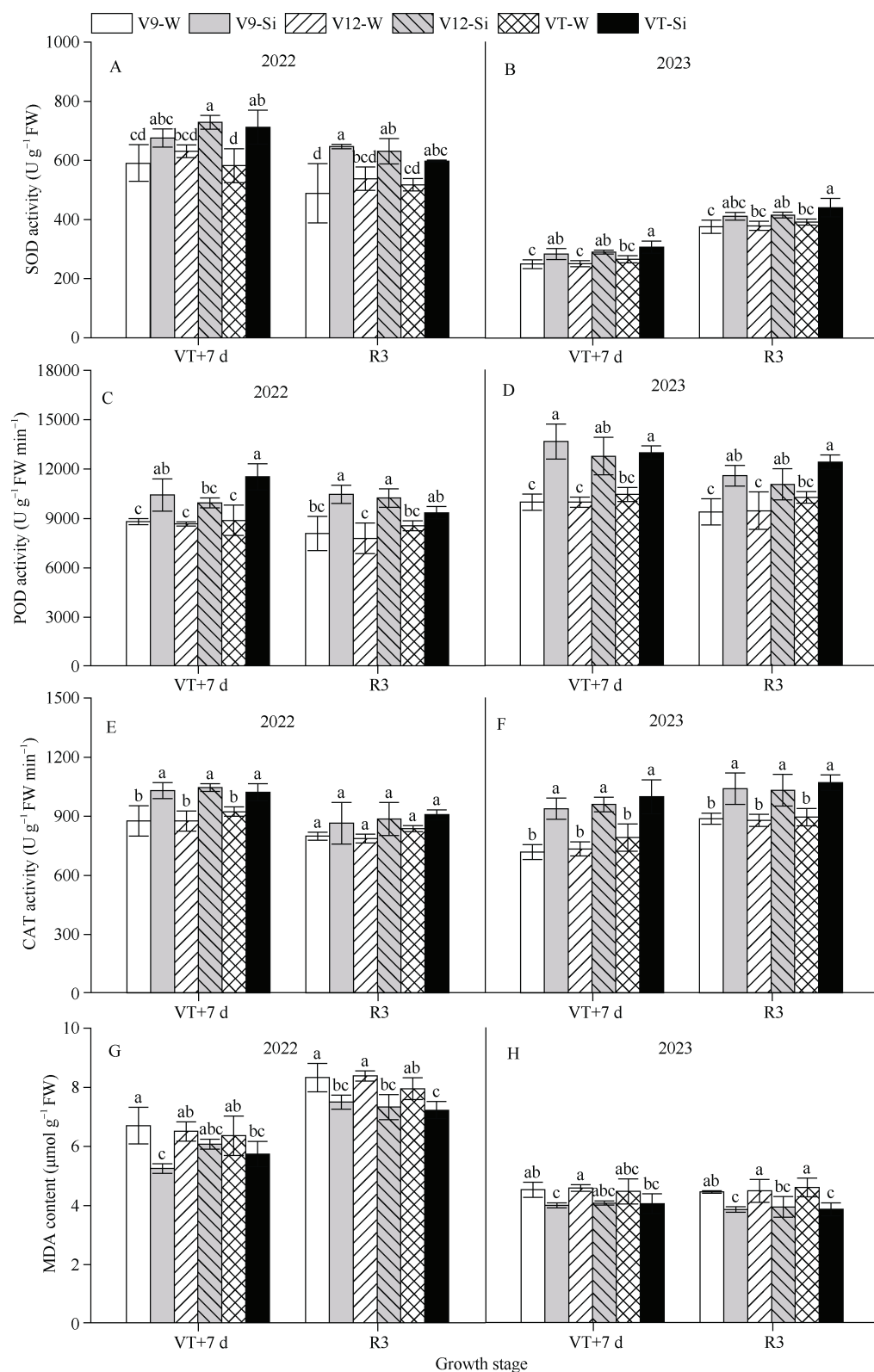


图 4 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of foliar silicon sprays on SOD, POD, CAT activity, and MDA content of summer maize in coastal saline-alkali soil 处理同图 1。VT+7 d 和 R3 分别代表抽雄期处理后 7 d 和乳熟期。图中不同小写字母表示不同处理间在 0.05 概率水平差异显著。 Treatments are the same as those given in Fig. 1. VT+7 d and R3 represent 7 days after treatment of the tasseling stage and milking stage, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at $P < 0.05$.

2.4.2 过氧化物酶(POD)活性 不同时期叶面喷施硅制剂后提高了叶片 POD 活性(图 4-C, D)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 POD 活性在 VT+7 d 时分别提高 18.80%、13.33%、31.49%和 35.02%、26.20%、28.36%; 叶片 POD 活性在 R3 期分别提高 28.69%、25.98%、14.99%和 19.53%、14.09%、28.06%。

2.4.3 过氧化氢酶(CAT)活性 除 2022 年 R3 期外, 不同时期叶面喷施硅制剂后均显著提高叶片 CAT 活性(图 4-E, F)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 CAT 活性在 VT+7d 时分别提高 15.66%、17.35%、14.74%和 25.69%、28.45%、33.82%; 2023 年叶片 CAT 活性在 R3 期分别提高 17.24%、16.30%、20.70%。

2.4.4 丙二醛(MDA)含量 不同时期叶面喷施硅制剂后降低叶片 MDA 含量(图 4-G, H)。与对照相比, 2022 年和 2023 年 V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理叶片 MDA 含量在 VT+7d 时分别降低 19.69%、6.93%、12.05%和 11.79%、9.98%、10.52%; 叶片

MDA 含量在 R3 期分别降低 8.81%、10.88%、12.14%和 14.64%、12.70%、14.49%。但只有 2022 年 VT+7 d 时 V9-Si 处理、R3 期 VT-Si 处理和 2023 年 R3 期 V9-Si 和 VT-Si 处理, MDA 含量降低达到显著水平。

2.5 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米单株干物质积累量的影响

如图 5 所示, 随着生育进程的推进, 单株干物质积累量呈逐渐上升趋势; 喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米单株干物质积累量的提高具有极显著影响, 而不同时期之间以及硅制剂与时期交互对单株干物质积累量无显著影响。不同时期叶面喷施硅制剂显著提高单株干物质积累量。2022 年和 2023 年, V9、V12 期喷施硅制剂处理在 VT+7 d 时, 单株干物质积累量分别较对照增加了 12.49%、13.41%和 13.55%、14.43%; V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理在 R3 期, 单株干物质积累量分别增加了 12.02%、10.47%、8.99%和 12.25%、11.70%、11.22%; 在 R6 期, 单株干物质积累量分别增加了 8.66%、9.10%、9.59%和 8.27%、8.65%、9.75%。

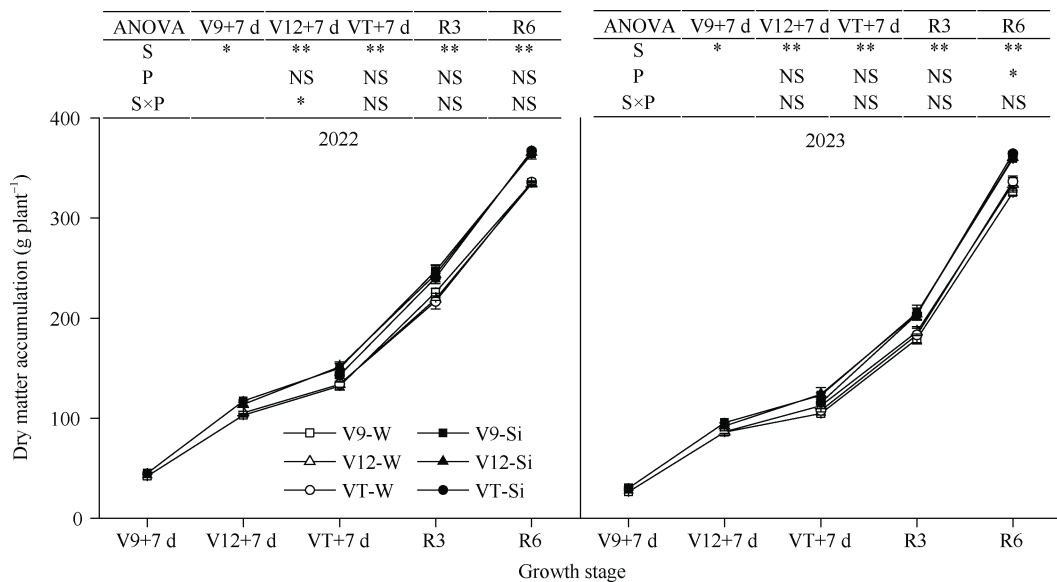


图 5 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米单株干物质积累量的影响

Fig. 5 Effects of foliar spraying of silicon on dry matter accumulation per plant of summer maize in coastal saline-alkali soil 处理同图 1。V9+7 d、V12+7 d、VT+7 d、R3 和 R6 分别代表小喇叭口期处理后 7 d、大喇叭口期处理后 7 d、抽雄期处理后 7 d、乳熟期和成熟期。S: 硅制剂; P: 喷施时期。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Fig. 1. V9+7 d, V12+7 d, VT+7 d, R3, and R6 represent 7 days after treatment of the 9-leaf stage, 7 days after treatment of the 12-leaf stage, 7 days after treatment of the tasseling stage, milking stage and maturity stage, respectively. S: silicon; P: spraying stage. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significance.

2.6 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米产量及产量构成因素的影响

如表 2 所示, 不同年份产量及产量构成因素均有极显著差异, 喷施硅制剂通过显著提高穗粒数和

千粒重进而提高产量, 不同时期喷施硅制剂对穗粒数有极显著影响, 对千粒重没有影响。2022 年籽粒产量变化范围为 9.66~11.02 t hm⁻², 2023 年籽粒产量变化范围为 8.75~9.78 t hm⁻²。不同时期叶面喷施硅

制剂显著提高盐碱地夏玉米产量, 2 年结果均表现为 VT-Si>V12-Si>V9-Si; 各处理的单位面积穗数无显著差异, 叶面喷施硅制剂主要是通过增加穗粒数和千粒重提高产量。2023 年单位面积穗数较 2022 年有所增加, 但穗粒数和千粒重降低; 与对照相比,

2022 年和 2023 年, V9、V12、VT 期喷施硅制剂处理穗粒数在分别提高 5.21%、6.24%、7.68%和 4.24%、5.38%、7.18%; 千粒重分别提高 4.40%、4.60%、3.68%和 2.49%、2.48%、3.20%; 产量分别提高 7.24%、10.47%、12.94%和 6.23%、7.99%、11.25%。

表 2 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effects of foliar silicon sprays on yield and yield components of summer maize in coastal saline-alkali soil

年份 Year	处理 Treatment	单位面积穗数 Ears ($\times 10^4$ ear hm^{-2})	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield (t hm^{-2})
2022	V9-W	6.22 a	543.69 c	337.89 c	9.72 c
	V9-Si	6.11 a	570.05 b	353.26 ab	10.46 b
	V12-W	6.22 a	537.58 c	339.83 c	9.66 c
	V12-Si	6.22 a	575.64 ab	353.93 a	10.77 ab
	VT-W	6.33 a	544.23 c	337.39 c	9.88 c
	VT-Si	6.33 a	583.42 a	350.81 b	11.02 a
2023	V9-W	6.56 a	508.06 c	311.29 b	8.81 c
	V9-Si	6.52 a	528.47 b	318.95 a	9.34 b
	V12-W	6.59 a	506.77 c	310.20 b	8.81 c
	V12-Si	6.56 a	534.23 b	318.91 a	9.49 ab
	VT-W	6.52 a	506.04 c	312.11 b	8.75 c
	VT-Si	6.59 a	543.37 a	321.17 a	9.78 a

方差分析 ANOVA

年份 Year (Y)	**	**	**	**
硅制剂 Silicon (S)	NS	**	**	**
喷施时期 Spraying stage (P)	NS	**	NS	*
Y×S	NS	**	**	NS
Y×P	NS	NS	NS	NS
S×P	NS	**	NS	*
Y×S×P	NS	NS	**	NS

处理同图 1。同列标以不同小写字母表示在 0.05 概率水平差异显著。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Fig. 1. Different lowercase letters within the same column indicate significance at the 0.05 probability level. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significance.

2.7 叶面喷施硅制剂后各指标间的关系

对 2 年数据进行相关性分析, MDA 含量与产量呈显著负相关关系, 抗氧化酶活性、气体交换参数、叶绿素含量、叶面积指数、干物质积累量、穗粒数和千粒重与产量呈显著正相关关系, 单位面积穗数与产量无显著相关性(图 6)。

3 讨论

3.1 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米叶片抗氧化酶活性、MDA 含量和光合特性的影响

在正常条件下, 植物细胞内 ROS 和抗氧化酶含量之间会保持平衡, 即氧化还原平衡^[24]; MDA 作为膜脂过氧化物在盐胁迫下产生并积累, 其含量间接

表示细胞膜的损伤程度^[25]。植物遭遇盐胁迫后, 大量钠离子进入植物体内, 离子稳态受到干扰会产生大量的 ROS, MDA 含量会显著增加, 导致严重氧化应激, 造成细胞膜损伤^[26-28]; 叶片细胞结构发生显著的变化, 还会使叶绿素合成受阻, 叶面积指数降低, 叶绿素含量显著降低, 抑制光合作用, 养分吸收积累受到限制^[3,29-30]。

前人研究发现, 硅的施用可以增加抗氧化酶在植物体内的含量, 减少 ROS 过度积累, 降低膜脂过氧化程度, 保护植物细胞免受氧化损伤^[31], 增强盐胁迫下作物的抗氧化防御能力以提高抗逆性^[32-33]。在本试验条件下, 3 个不同时期叶面喷施硅制剂, 均显著提高了叶片 SOD、POD、CAT 活性, 降低了

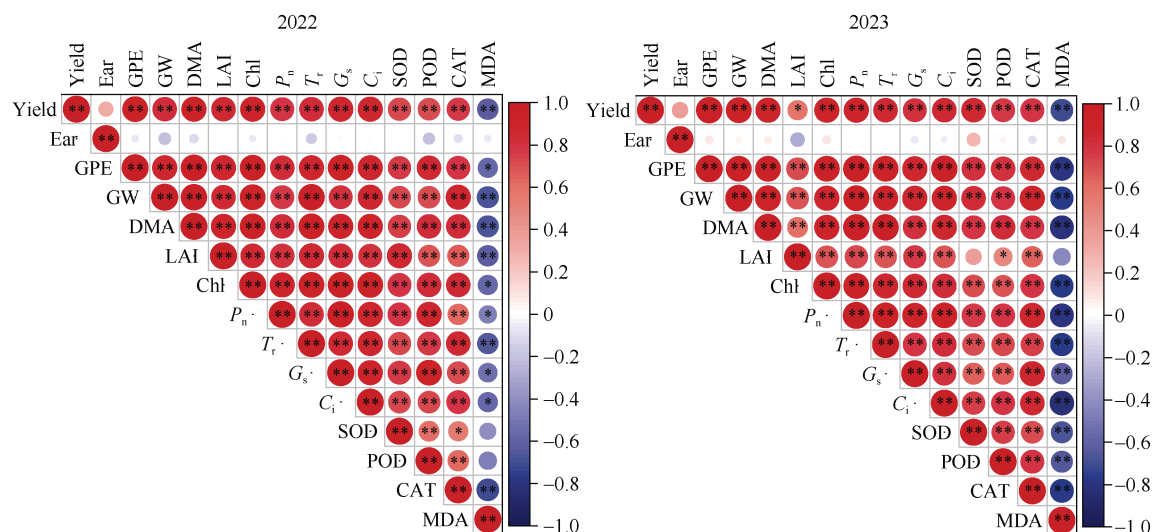


图 6 叶面喷施硅制剂后产量与各指标间的相关性

Fig. 6 Correlation between yield and indexes after foliar application of silicon

Yield: 产量; Ear: 单位面积穗数; GPE: 穗粒数; GW: 千粒重; DMA: 干物质积累量; Chl: 叶绿素含量。P_n: 净光合速率; T_r: 蒸腾速率; G_s: 气孔导度; C_i: 胞间 CO₂ 浓度; SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶; CAT: 过氧化氢酶; MDA: 丙二醛。*: P < 0.05; **: P < 0.01。Yield: grain yield; Ear: number of spikes per unit area; GPE: grains per ear; GW: 1000-grain weight; DMA: dry matter accumulation; Chl: chlorophyll content. P_n: photosynthetic rate; T_r: evaporation rate; G_s: stomatal conductance; C_i: intercellular carbon dioxide concentration; SOD: superoxide dismutase; POD: peroxidase; CAT: catalase; MDA: malondialdehyde. *: P < 0.05; **: P < 0.01.

MDA 含量, 维持 ROS 的平衡, 缓解盐胁迫下膜系统的损伤, 提高了滨海盐碱地夏玉米叶片的抗氧化能力。施硅后抗氧化酶活性提高和 MDA 含量的显著降低, 可能是由于 Na⁺ 吸收减少, 质膜稳定性提高, 修复了植物受损结构。硅的施用有助于延缓叶片氧化损伤, 维持植物细胞稳定, 提高叶面积指数, 改善叶绿体结构和功能, 缓解盐胁迫下光合器官损伤和光合色素的降解^[34-35], 以维持植物较高的气孔导度和蒸腾速率, 增加 CO₂ 同化效率, 保障光合作用的正常进行^[18,36]。本试验结果表明, 与对照相比, 叶面喷施硅制剂会显著增加盐碱地夏玉米叶面积指数、叶绿素含量, 提高蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度及净光合速率, 为生物量积累以及产量的提升奠定了基础。

3 个不同时期叶面喷施硅制剂对叶片抗氧化酶活性、MDA 含量和光合特性均产生影响, 但不同时期喷施在生育期内效果略有不同, V9 和 V12 期喷施硅制剂, 能缓解滨海盐碱地夏玉米营养生长期氧化损伤, 促进叶面积和叶绿素含量的提升, 但因喷施时期较早, 导致在生殖生长期较 VT 期叶面喷施硅制剂相比, 抗氧化酶活性略有降低、MDA 含量增加、光合速率降低; 而 VT 期叶面喷施硅制剂, 对于生殖生长期盐胁迫的缓解效应更加显著, 还能延缓叶片衰老及叶绿素含量的降解, 促进光合作用能力的提高。

3.2 叶面喷施硅制剂对滨海盐碱地夏玉米干物质积累量、产量及产量构成因素的影响

玉米植株干物质积累量是产量形成的基础, 叶片光合作用是植株干物质积累及产量形成的重要生理过程^[37-38]。盐碱地土壤理化性质差、养分释放缓慢, 植物体内大量盐离子积累对植物细胞造成严重损伤, 导致光合作用减弱, 必需营养元素吸收受阻, 影响了干物质生产能力, 制约了产量因子的稳定和提高^[39]。玉米是盐敏感作物, 盐胁迫会引起植物体渗透胁迫、离子毒害、氧化损伤, 生理功能紊乱, 代谢活动减弱, 玉米生长受到抑制, 造成减产甚至死亡^[40]。大量研究表明, 硅肥的施用可以促进玉米、水稻等禾本科作物生长, 提高干物质积累能力, 促进果穗发育, 增加穗粒数、千粒重, 增加产量^[41-42]。硅在盐胁迫条件下, 通过缓解盐分对植物的负面影响, 提高干物质生产能力, 促进植物生长和产量形成^[43-44]。本试验结果表明, 盐碱地夏玉米叶面喷施硅制剂显著提高单株干物质积累量, 为产量的形成提供保障, 这可能是由于硅制剂的使用, 提高了叶片 SOD、POD 和 CAT 的活性, 降低了 MDA 含量, 维持了 ROS 代谢平衡, 缓解了生物膜系统损伤, 进而增加了叶面积指数和叶绿素含量, 提高叶片光合速率; 还通过增加植物体内硅含量, 促进对必需营养元素的吸收, 从而提高生物量积累^[45]; Kalyani 等^[46]

在夏玉米生长期喷施叶面硅肥, 结果发现提高了夏玉米的穗长、穗粗, 降低了作物秃尖长, 使穗粒数和千粒重提高。本试验中叶面喷施硅制剂显著增加盐碱地夏玉米的产量, 主要是通过增加穗粒数与千粒重实现产量的提升, 对单位面积穗数无显著影响; 2年产量数据均表现为 VT-Si>V12-Si>V9-Si 处理。

4 结论

本试验表明, 叶面喷施硅制剂一定程度上缓解了滨海盐碱地夏玉米所受到的盐胁迫, 叶片抗氧化酶活性提高, MDA 含量降低, 维持 ROS 代谢平衡, 降低膜脂过氧化程度; 叶面积指数、叶绿素含量均显著升高, 保障光合作用正常进行, 干物质生产性能提高。叶面喷施硅制剂主要是通过增加穗粒数和千粒重增加产量。从抗氧化酶活性、MDA 含量、光合特性以及产量提升综合来看, VT 期喷施硅制剂效果最佳。

References

- [1] 刘绍熹, 刘帅. 我国玉米进出口市场势力的变化分析. 玉米科学, 2022, 30(2): 183–190.
Liu S X, Liu S. Analysis of the changes in the power of China's maize import and export market. *J Maize Sci*, 2022, 30(2): 183–190 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈印军, 易小燕, 方琳娜, 杨瑞珍. 中国耕地资源与粮食增产潜力分析. 中国农业科学, 2016, 49: 1117–1131.
Chen Y J, Yi X Y, Fang L N, Yang R Z. Analysis of cultivated land and grain production potential in China. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 1117–1131 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王佳珍, 刘倩, 高娅妮, 柳旭. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展. 生态学报, 2017, 37: 5565–5577.
Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, Liu X. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 5565–5577 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. 地理学报, 2011, 66: 673–684.
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, Chen Z G. Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geograph Sin*, 2011, 66: 673–684 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨久涛, 孙红滨, 王桂峰, 汪丽, 邢晓飞, 杨武杰. 山东盐碱地农业综合开发利用现状与展望. 中国农业综合开发, 2023, (6): 7–12.
Yang J T, Sun H B, Wang G F, Wang L, Xing X F, Yang W J. Current situation and prospect of comprehensive agricultural development and utilization of saline-alkali land in Shandong. *Agric Compr Dev China*, 2023, (6): 7–12 (in Chinese).
- [6] 闫晓宇, 郭文君, 秦都林, 王双磊, 聂建军, 赵娜, 祁杰, 宋宪亮, 毛丽丽, 孙学振. 滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响. 作物学报, 2022, 48: 1235–1247.
Yan X Y, Guo W J, Qin D L, Wang S L, Nie J J, Zhao N, Qi J, Song X L, Mao L L, Sun X Z. Effects of cotton stubble return and subsoiling on dry matter accumulation, nutrient uptake, and yield of cotton in coastal saline-alkali soil. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1235–1247 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李健, 王逸茹, 张凌霄, 孙明昊, 秦阳, 郑军. 玉米 *ZmCIPK24-2* 基因在盐胁迫应答中的功能研究. 作物学报, 2020, 46: 1351–1358.
Li J, Wang Y R, Zhang L X, Sun M H, Qin Y, Zheng J. Functional analysis of *ZmCIPK24-2* gene from maize in response to salt stress. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1351–1358 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陆安桥, 张峰举, 许兴, 王学琴, 姚姗. 盐胁迫对湖南稷子苗期生长及生理特性的影响. 草业学报, 2021, 30(5): 84–93.
Lu A Q, Zhang F J, Xu X, Wang X Q, Yao S. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Echinochloa frumentacea* seedlings. *Acta Pratac Sin*, 2021, 30(5): 84–93 (in Chinese with English abstract).
- [9] Nazdar L, Tehranifara A, Nezami A. Physiological and anatomical responses of calendula (*Calendula officinalis* L.) cultivars to heat-stress duration. *J Hortic Sci Biotechnol*, 2019, 94: 400–411.
- [10] 辛承松, 董合忠, 唐薇, 张冬梅, 罗振, 李维江. 滨海盐渍土抗虫棉养分吸收和干物质积累特点. 作物学报, 2008, 11: 2033–2040.
Xin C S, Dong H Z, Tang W, Zhang D M, Luo Z, Li W J. Characteristics of nutrient assimilation and dry matter accumulation of *Bt* cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in coastal saline soil. *Acta Agron Sin*, 2008, 11: 2033–2040 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张楠, 闫国超, 叶木军, 樊小平, 肖卓熙, 陈好, 彭苗, 梁永超. 野生型水稻及其低硅突变体中植硅体和植硅体碳的含量与分布特征. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 45–54.
Zhang N, Yan G C, Ye M J, Fan X P, Xiao Z X, Chen H, Peng M, Liang Y C. The contents and distributions of phytolith and phytolith-occluded carbon in different rice genotypes. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25: 45–54 (in Chinese with English abstract).
- [12] 朱永兴, 夏雨晨, 刘乐承, 尹军良, 马东方. 外源硅对植物抗盐性影响的研究进展. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 498–509.
Zhu Y X, Xia Y C, Liu L C, Yin J L, Ma D F. Beneficial effects of silicon on salt tolerance in plants. *J Plant Nutr Fert*, 2019, 25: 498–509 (in Chinese with English abstract).
- [13] Sharma J, Verma S, Sharma A. Importance of silicon in combating a variety of stresses in plants: a review. *J Appl Nat Sci*, 2022, 14: 607–630.
- [14] 林翰志, 陈涛, 蒋少军, 周洋, 黄祖率, 肖贤明, 徐文彬, 晏波. 活性硅缓解植物重金属胁迫及其生物学机制研究进展. 生态科学, 2022, 41(5): 243–251.
Lin H Z, Chen T, Jiang S J, Zhou Y, Huang Z S, Xiao X M, Xu W B, Yan B. Research progress on biological mechanism of active silicon alleviating heavy metal stress in plants. *Ecol Sci*, 2022, 41(5): 243–251 (in Chinese with English abstract).
- [15] Ma J F, Naoki Y. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci*, 2006, 11: 392–397.
- [16] Zia A, Hegazy H S, Hassan N S, Naguib D M, AbdelHaliem M E. Biochemical responses of wheat to silicon application under salinity. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2021, 184: 255–262.

- [17] 龚金龙, 张洪程, 龙厚元, 胡雅杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 水稻中硅的营养功能及生理机制的研究进展. 植物生理学报, 2012, 48: 1–10.
Gong J L, Zhang H C, Long H Y, Hu Y J, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Progress in research of nutrition functions and physiological mechanisms of silicon in rice. *J Plant Physiol*, 2012, 48: 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [18] Neera G, Purnima B. Silicon nutrition and mycorrhizal inoculations improve growth, nutrient status, K^+/Na^+ ratio and yield of *Cicer arietinum* L. genotypes under salinity stress. *Plant Growth Regul*, 2016, 78: 371–387.
- [19] Naguib M D, Abdalla H. Metabolic status during germination of nano silica primed *Zea mays* seeds under salinity stress. *J Crop Sci Biotechnol*, 2019, 22: 415–423.
- [20] Alzahrani Y, Alpaslan K, Hesham F A, Sebnem K, Mostafa M R. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium. *Ecotox Environ Safe*, 2018, 154: 187–196.
- [21] Liang Y, Urano D, Liao K L, Hedrick T L, Gao Y, Jones A M. A nondestructive method to estimate the chlorophyll content of *Arabidopsis* seedlings. *Plant Methods*, 2017, 13: 26.
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. pp 164–167, 184, 258–260.
Li H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000. pp 164–167, 184, 258–260 (in Chinese).
- [23] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 孙谷畴, 郭俊彦. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系. 植物学报, 1984, 26: 605–615.
Lin Z F, Li S S, Lin G Z, Sun G H, Guo J Y. Relationship between senescence and superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in rice leaves. *Acta Bot Sin*, 1984, 26: 605–615 (in Chinese).
- [24] Pedro G C, Luigi D F, Alvina G, Mirza H, Munir O, Volkan A, Maria T L. Oxidative stress and antioxidant metabolism under adverse environmental conditions: a review. *Bot Rev*, 2020, 87: 1–46.
- [25] Morton M J L, Awlia M, Altamimi N, Saade S, Pailles Y, Negrão S, Tester M. Salt stress under the scalpel-dissecting the genetics of salt tolerance. *Plant J*, 2019, 97: 148–163.
- [26] 雷新慧, 万晨茜, 陶金才, 冷佳俊, 吴怡欣, 王家乐, 王鹏科, 杨清华, 冯佰利, 高金锋. 褪黑素与 2,4-表油菜素内酯浸种对盐胁迫下荞麦发芽与幼苗生长的促进效应. 作物学报, 2022, 48: 1210–1221.
Lei X H, Wan C Q, Tao J C, Leng J J, Wu Y X, Wang J L, Wang P K, Yang Q H, Feng B L, Gao J F. Effects of soaking seeds with MT and EBR on germination and seedling growth in buckwheat under salt stress. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1210–1221 (in Chinese with English abstract).
- [27] Ferchichi S, Hessini K, Dell A E, Amelia L D, Woodrow P, Ciarmiello L F, Fuggi A, Carillo P. *Hordeum vulgare* and *hordeum maritimum* respond to extended salinity stress displaying different temporal accumulation pattern of metabolites. *Funct Plant Biol*, 2018, 45: 1096–1109.
- [28] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 王晔, 彭真, 段留生. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应. 作物学报, 2020, 46: 1810–1816.
Li R Z, Jin Q, Li Z H, Wang Y, Peng Z, Duan L S. Salicylic acid improved salinity tolerance of *Glycyrrhiza uralensis* fisch during seed germination and seedling growth stages. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1810–1816 (in Chinese with English abstract).
- [29] Kumara K, Ampitiyawatta D A, Padmaperuma A. Alleviation of salt-induced adverse effects on gas exchange, photosynthetic pigments content and chloroplast ultrastructure in *Gerbera jamesonii* L. by exogenous salicylic acid application. *Asian J Res Agric For*, 2021, 7: 1–13.
- [30] 周晓瑾, 黄海霞, 张君霞, 马步东, 陆刚, 齐建伟, 张婷, 朱珠. 盐胁迫对裸果木幼苗光合特性的影响. 草业学报, 2022, 32(2): 75–83.
Zhou X J, Huang H X, Zhang J X, Ma B D, Lu G, Qi J W, Zhang T, Zhu Z. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics of *Gymnocarpus przewalskii* seedlings. *Acta Pratac Sin*, 2022, 32(2): 75–83 (in Chinese with English abstract).
- [31] Shen Z H, Pu X Z, Wang S M, Dong X X, Cheng X J, Cheng M X. Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant Na^+ uptake. *Sci Rep*, 2022, 12: 5089.
- [32] Sun Y K, Xu J Q, Miao X Y, Lin X S, Liu W Z, Ren H Y. Effects of exogenous silicon on maize seed germination and seedling growth. *Sci Rep*, 2021, 11: 1014.
- [33] Ali A, Basra S M A, Iqbal J, Hussain S, Subhani M N, Sarwar M, Haji A. Silicon mediated biochemical changes in wheat under salinized and non salinized solution cultures. *Afr J Biotechnol*, 2012, 11: 606–615.
- [34] Yin L N, Wang S W, Li J Y, Kiyoshi T, Mariko O. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of sorghum bicolor. *Acta Physiol Plant*, 2013, 35: 3099–3107.
- [35] Rana M, Mark T. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol*, 2008, 59: 651–681.
- [36] Liu P, Yin L N, Wang S W, Zhang M J, Deng X P, Zhang S Q, Kiyoshi T. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Environ Exp Bot*, 2015, 111: 42–51.
- [37] 张振博, 贾春兰, 任佰朝, 刘鹏, 赵斌, 张吉旺. 氮磷施肥对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响. 作物学报, 2023, 49: 1616–1629.
Zhang Z B, Jia C L, Ren B Z, Liu P, Zhao B, Zhang J W. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1616–1629 (in Chinese with English abstract).
- [38] 李向岭, 赵明, 李从锋, 葛均筑, 侯海鹏, 李琦, 侯立白. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立. 作物学报, 2010, 36: 2143–2153.
Li X L, Zhao M, Li C F, Ge J Z, Hou H P, Li Q, Hou L B. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 2143–2153 (in Chinese with English abstract).
- [39] 张乃丹, 宋付朋, 张喜琦, 左世福, 王文杰. 速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮能力及小麦产量的影响. 水土保持学报, 2020, 34(6): 337–344.

- Zhang N D, Song F P, Zhang X Q, Zuo S F, Wang W J. Effect of available and slow-released nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on soil nitrogen supply capacity and wheat yield in coastal saline soil. *Res Soil Water Conserv*, 2020, 34(6): 337–344 (in Chinese with English abstract).
- [40] 王茂莹, 王慧桥, 司庆臣, 张倩, 朱营营, 董元杰. 不同浓度外源-氧化氮对盐胁迫下小麦幼苗生理特性的影响. *土壤通报*, 2019, 50: 1426–1433.
- Wang M Y, Wang H Q, Si Q C, Zhang Q, Zhu Y Y, Dong Y J. Effects of exogenous nitric-oxide at different concentrations on physiological characteristics of wheat seedlings under salt stress. *Chin J Soil Sci*, 2019, 50: 1426–1433 (in Chinese with English abstract).
- [41] 韦海敏, 陶伟科, 周燕, 闫飞宇, 李伟玮, 丁艳锋, 刘正辉, 李刚华. 硅素穗肥优化滨海盐碱地水稻矿质元素吸收分配提高耐盐性. *作物学报*, 2023, 49: 1339–1349.
- Wei H M, Tao W K, Zhou Y, Yan F Y, Li W W, Ding Y F, Liu Z H, Li G H. Panicle silicon fertilizer optimizes the absorption and distribution of mineral elements in rice (*Oryza sativa* L.) in coastal saline-alkali soil to improve salt tolerance. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 1339–1349 (in Chinese with English abstract).
- [42] 王力, 孙影, 张洪程, 魏海燕, 朱大伟, 朱盈, 徐栋, 霍中洋. 不同时期施用锌硅肥对优良食味粳稻产量和品质的影响. *作物学报*, 2017, 43: 885–898.
- Wang L, Sun Y, Zhang H C, Wei H Y, Zhu D W, Zhu Y, Xu D, Huo Z Y. Effect of Zn and Si fertilizers applied at different stages on yield and quality of *japonica* rice with good eating quality. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 885–898 (in Chinese with English abstract).
- [43] Coskun D, Deshmukh R, Sonah H, Menzies J G, Reynolds O, Ma J F, Kronzucker H J, Bélanger R R. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytol*, 2019, 221: 67–85.
- [44] Yan G C, Miroslav N, Ye M J, Xiao Z X, Liang Y C. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *J Integr Agric*, 2018, 17: 2138–2150.
- [45] Vahideh R, Movahhedi D M, Balouchi H, Yadavi A, Hamidian M. Silicon can improve nutrient uptake and performance of black cumin under drought and salinity stresses. *Commun Soil Sci Plan*, 2023, 54: 297–310.
- [46] Kalyani M, Biswarup M, Prateek K. Effect of zinc and foliar application of silicon on growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Int J Plant Soil Sci*, 2023, 35: 141–146.