

何文丽,张玉烛,魏中伟.海水胁迫下外源硅对优质高产杂交稻产量及生理特性的影响[J].江苏农业科学,2024,52(12):105-114.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.12.014

海水胁迫下外源硅对优质高产杂交稻产量及生理特性的影响

何文丽¹,张玉烛^{1,2,3,4},魏中伟^{2,3,4}

(1. 海南大学,海南海口 570208; 2. 湖南杂交水稻研究中心,湖南长沙 410125;

3. 三亚市国家耐盐碱水稻技术创新中心,海南三亚 572024; 4. 杂交水稻全国重点实验室,湖南长沙 410125)

摘要:盐胁迫是制约水稻生产的主要非生物胁迫因子之一,硅(Si)作为提高植物抗逆性的微量元素之一,在许多作物逆境栽培中报道,但在海水复合盐胁迫下,施用外源硅对水稻耐盐性的影响研究鲜有报道。为探究海水复合盐胁迫下外源硅对优质高产杂交稻产量及生理特性的影响,以优质高产杂交稻 Y 两优 957 和晶两优 534 为研究材料,用天然海水与淡水调配,设置 0.0%、0.3% 和 0.6% 3 种盐浓度,研究海水胁迫下外源硅对优质高产杂交稻产量及生理特性的影响。结果表明,盐胁迫显著降低了水稻产量、产量构成因子数值、干物质量和钾离子含量,显著提高了钠离子、丙二醛含量和抗氧化酶活性。外源硅处理能够减缓盐分胁迫,显著提高了 0.0%、0.3% 浓度海水胁迫下的水稻产量、产量构成因子数值(结实率除外)和除成熟期及晶两优 534 齐穗期穗、Y 两优 957 孕穗期叶片外的各器官钾离子含量,并降低海水胁迫下钠离子含量,改善海水胁迫下水稻的钾、钠离子分配比例;在 0.3% 和 0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理显著提高水稻叶片抗氧化酶活性,显著降低丙二醛含量(Y 两优 957 齐穗期除外)。盐地增施外源硅是缓解水稻盐胁迫、提高产量的一项有效栽培措施。

关键词:水稻;硅肥;盐胁迫;产量;生理特性

中图分类号:S511.01;S511.06

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2024)12-0105-10

我国面临着耕地面积日益减少、水土流失严重、人均耕地不足等多重挑战^[1]。盐碱地作为我国重要的后备耕地资源,具有巨大的开发潜力^[2]。据报道,我国有 234 万 hm^2 沿海滩涂和 1 亿 hm^2 内陆盐碱地,因此,开发利用沿海滩涂和内陆盐碱地对保障我国粮食安全具有重要意义^[3-4]。

水稻(*Oryza sativa* L.)是全球主要的粮食作物之一,其产量的稳定与持续增长对于满足日益增长的粮食需求具有重要的保障作用。水稻是盐碱地改良的重要作物之一^[5],作为一种盐中度敏感作物,与其他作物相比,高盐环境中根系更容易受到离子毒害。前人研究表明,在水稻根际环境中,盐胁迫会通过渗透胁迫和离子胁迫 2 个方面来抑制根系对水和养分的吸收。渗透胁迫主要是土壤中高浓度的盐分降低了土壤水势,使植株吸水困难,抑

制植株生长;离子胁迫则是植株中过量 Na^+ 和 Cl^- 积累,使 K^+ 和磷素等吸收受抑,损害植株蛋白质和酶的功能^[6-7]。此外,盐胁迫会降低水稻叶绿素含量,抑制净光合速率和减少光合同化物积累^[8],造成水稻产量降低^[9]。

硅是植物生长发育过程中重要的营养元素之一,已有大量研究表明硅能够提高盐胁迫下植物的抗逆性^[10]。束良佐等研究表明,硅肥能够提高盐胁迫下玉米的光合速率和干物质量,改善玉米幼苗体内的水分代谢和水分利用率^[11]。外源硅提高了盐胁迫下野生大豆的耐盐性,表现为降低叶片丙二醛和过氧化氢含量,提高叶绿素含量和光合速率^[12]。适量的硅能够降低植株体内丙二醛含量,提高植物抗氧化酶活性^[13],此外,硅还能够提高水稻发芽指标、调节植物体内离子平衡、增加养分吸收量和改善稻米品质等^[14-15]。在盐胁迫对水稻影响的研究上,目前多选用 NaCl 单盐处理^[16],而以海水复合盐进行胁迫的影响研究较少^[17]。同时,在海水复合盐胁迫下施用外源硅对水稻耐盐性的影响研究鲜有报道。因此,本研究用天然海水与淡水调配,研究在海水胁迫下施用外源硅对优质高产杂交稻产

收稿日期:2024-01-09

基金项目:海南省重大科技计划(编号:ZDKJ202001)。

作者简介:何文丽(2000—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事水稻抗逆栽培生理研究。E-mail:hewenli43@163.com。

通信作者:魏中伟,博士,副研究员,主要从事水稻栽培研究。

E-mail:wzw619@126.com。

量及生理特性的影响,以期为硅肥对盐胁迫下栽培调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用 Y 两优 957 及晶两优 534 共 2 个优质高产杂交水稻国审品种,米质均达国家 GB/T 17891—2017《优质稻谷》标准 2 级,所有品种均由湖南杂交水稻研究中心提供。

1.2 试验设计

试验于 2022 年 12 月至 2023 年 5 月在海南省乐东黎族自治县乐一村国家耐盐碱水稻技术创新中心试验基地进行,试验田为冬季闲置水稻田,土壤类型为沙壤土,土壤基本理化性质为 pH 值 7.37,有机质含量 23.99 g/kg,全氮含量 1.56 g/kg,碱解氮含量 213.38 mg/kg,全磷含量 0.87 g/kg,速效磷含量 93.77 mg/kg,全钾含量 12.30 g/kg,速效钾含量 238.50 mg/kg。

试验采用裂区设计,海水胁迫为主区,硅肥处理为副区。海水胁迫共设置 0.0% (清水)、0.3%、0.6% 3 种盐浓度,外源硅施用量(以 SiO_2 计)设置为 0 (CK) 和 150 kg/hm² (SI)^[18] 共 2 种处理,硅肥为水溶性粉末,主要成分为 $\text{SiO}_2 \geq 80\%$,施用方法为秧苗移栽前 3 d 翻耕耙田时作基肥一次性施入。试验合计 6 种处理,3 次重复,随机区组设计,不同处理间筑埂(40 cm)并用塑料薄膜包裹,以防串水串肥。每小区 50 m²,四周设置 4 行保护行。移栽后先使用淡水灌溉返青,在移栽后 20 d 开始用海水与淡水调配至各处理浓度的盐水灌溉,每 3 d 排水 1 次并重新灌溉,雨天后也排水 1 次并重新灌溉。全生育期保持 5 cm 水层灌溉,收割前 7 d 断水。

2023 年 1 月 10 日播种,秧龄 25 d 人工双本移栽,栽插密度 30 cm × 15 cm,栽插后 3 d 内及时查漏补缺,确保插足基本苗数。施肥量为纯氮量 210 kg/hm², P_2O_5 105 kg/hm², K_2O 210 kg/hm²,氮肥用普通尿素,氮肥施用量按基肥:分蘖肥:穗肥 = 4:3:3。磷肥用钙镁磷肥,作基肥一次性施入。钾肥用氯化钾,50% 用作基肥,50% 在拔节期施入。病虫害防治按一般栽培措施统一进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成 在成熟期,先在各试验小区选择远离边际位置的调查点 3 个,每个调查点连续调查 15 蔸有效穗,调查的 45 蔸有效穗计算平均

有效穗数。然后按平均有效穗数每试验小区取生长一致的 5 蔸为一个样本,测量每穗总粒数、每穗实粒数和千粒重。每个小区选取 200 穴,单打单收,扬净后分别称重,按 13.5% 标准含水量再折算单产。

1.3.2 干物质量 于分蘖期、孕穗期、齐穗期和成熟期各处理每重复取生长一致的植株 5 株,按茎鞘、叶、穗(抽穗后)分离并装袋,置于 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min,在 80 ℃ 烘箱中烘干至恒重,冷却后称重。

1.3.3 钠、钾离子含量 上述干物质称量后研磨成粉末,粉碎过筛后称取 0.5 g 样品,将样品进行消解,然后使用火焰光度计测定钠、钾含量^[13]。

钠(钾)元素含量(mg/g) = 样品钠(钾)元素浓度/稀释倍数/样品质量;钾钠元素比值 = 钾元素含量(mg/g)/钠元素含量(mg/g)。

1.3.4 叶片丙二醛含量和抗氧化酶活性 于分蘖期、孕穗期、齐穗期将各处理的水稻倒二叶剪下后用锡箔纸包住并作好标记,立即放入液氮中淹没保存,充分冷冻后置于 -80 ℃ 超低温冰箱中保存,用于测定叶片丙二醛含量和抗氧化酶活性。测定方法按照北京索莱宝科技有限公司生产的试剂盒操作说明进行^[19]。

1.4 数据处理与统计分析

运用 Excel 2010 软件进行数据整理和计算,运用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,运用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 海水胁迫下外源硅对产量及产量构成因子数值的影响

由表 1 可知,随海水胁迫浓度的增加,外源硅及对照处理下,2 个优质高产杂交稻的产量及产量构成因子数值均显著下降,且总体随海水胁迫浓度的增加下降幅度增大。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均提高了产量及产量构成因子数值,但外源硅较对照提高产量及产量构成因子数值的幅度总体随海水胁迫浓度的增加而下降,较高浓度的海水抑制了外源硅增产效果。在 0.0%、0.3% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的产量、有效穗数、穗粒数、千粒重均显著大于对照。在 0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的以上指标与对照差异不显著。3 种浓度海水胁迫下外源硅处理的结实率与对照差异不显著。

2.2 海水胁迫下外源硅对干物质量的影响

由表 2 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及

表 1 海水胁迫下外源硅对产量及产量构成因子数值的影响

品种	盐处理 (%)	肥处理	有效穗数 (万穗/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (t/hm ²)
Y 两优 957	0.0	SI	322.2Aa	199.1Aa	86.75Aa	26.03Aa	11.52Aa
		CK	288.9Ab	176.2Ab	84.83Aa	25.28Ab	10.38Ab
	0.3	SI	263.0Ba	125.3Ba	71.35Ba	20.73Ba	6.98Ba
		CK	242.0Bb	112.7Bb	68.61Ba	19.53Bb	6.38Bb
	0.6	SI	189.6Ca	85.6Ca	60.23Ca	18.47Ca	3.63Ca
		CK	177.8Ca	78.3Ca	58.08Ca	18.14Ca	3.45Ca
晶两优 534	0.0	SI	337.0Aa	195.5Aa	84.32Aa	26.03Aa	11.92Aa
		CK	297.8Ab	173.7Ab	83.54Aa	25.06Ab	10.70Ab
	0.3	SI	274.1Ba	126.9Ba	75.49Ba	20.31Ba	7.35Ba
		CK	251.9Bb	114.1Bb	70.89Ba	19.33Bb	6.71Bb
	0.6	SI	199.3Ca	86.9Ca	66.14Ca	18.94Ca	3.99Ca
		CK	185.9Ca	79.3Cb	63.76Ca	18.20Ca	3.75Ca

注:同列数据后不同大写字母表示同一品种在相同硅肥处理不同盐浓度下差异显著($P < 0.05$),同列数据后不同小写字母表示同一品种在相同盐浓度不同硅肥处理间差异显著($P < 0.05$)。表 2 同。

对照处理下,2 个优质高产杂交稻在 4 个时期各器官干物质量均显著下降,且总体随海水胁迫浓度的增加下降幅度增大。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均提高了 4 个时期各器官的干物质量,但外源硅较对照提高 4 个时期各器官干物质量的幅度总体随海水胁迫浓度的增加而下降,较高浓度的海水抑制了外源硅增加干物质量的效果。在

0.0% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官干物质量均显著大于对照;在 0.3% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的部分时期各器官干物质量显著大于对照;在 0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的仅 Y 两优 957 齐穗期叶片和晶两优 534 分蘖期叶片干物质量与对照差异显著,其余 4 个时期各器官干物质量与对照差异均不显著。

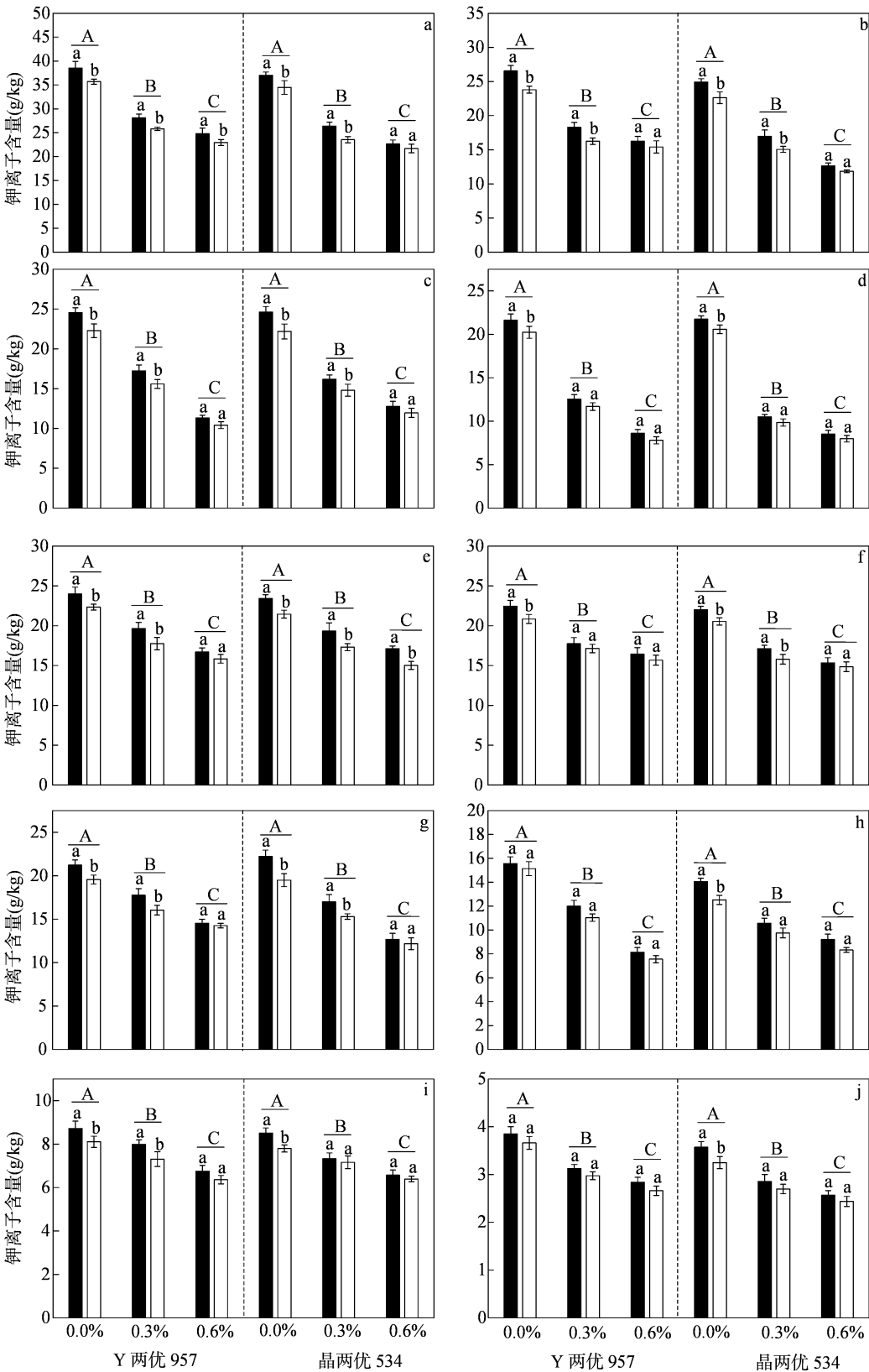
表 2 海水胁迫下外源硅对干物质量的影响

品 种	盐 处理 (%)	肥 处理	干物质量(g/m ²)									
			分蘖期		孕穗期		齐穗期			成熟期		
			茎	叶	茎	叶	茎	叶	穗	茎	叶	穗
Y 两优 957	0.0	SI	230.7Aa	134.9Aa	736.3Aa	318.2Aa	828.5Aa	324.4Aa	316.3Aa	503.1Aa	228.7Aa	1 097.1Aa
		CK	208.2Ab	118.8Ab	638.0Ab	272.8Ab	730.4Ab	287.2Ab	270.2Ab	466.4Ab	202.4Ab	979.7Ab
	0.3	SI	170.1Ba	96.3Ba	440.0Ba	165.1Ba	606.6Ba	175.3Ba	150.2Ba	433.6Ba	141.8Ba	484.7Ba
		CK	150.7Ba	85.6Ba	386.4Ba	148.4Bb	546.2Bb	153.0Bb	131.7Ba	416.8Ba	130.9Ba	442.2Bb
	0.6	SI	79.2Ca	49.8Ca	315.4Ca	123.2Ca	429.1Ca	133.5Ca	107.8Ca	356.0Ca	108.2Ca	244.7Ca
		CK	76.0Ca	45.4Ca	271.6Ca	111.9Ca	388.1Ca	118.8Cb	94.7Ca	328.5Ca	98.4Ca	225.8Ca
晶两优 534	0.0	SI	242.7Aa	145.2Aa	764.1Aa	334.4Aa	877.0Aa	339.5Aa	314.9Aa	557.7Aa	221.6Aa	1 155.7Aa
		CK	211.2Ab	127.6Ab	661.5Ab	282.3Ab	787.6Ab	307.3Ab	275.3Ab	508.9Ab	195.4Aa	1 032.5Ab
	0.3	SI	177.3Ba	95.3Ba	457.6Ba	195.1Ba	630.7Ba	206.9Ba	165.2Ba	519.6Ba	141.0Ba	577.7Ba
		CK	159.7Bb	85.9Ba	395.7Bb	168.7Ba	574.7Bb	187.1Bb	144.5Bb	454.2Bb	126.7Ba	523.3Bb
	0.6	SI	90.9Ca	49.1Ca	344.9Ca	129.0Ca	448.7Ca	147.4Ca	108.5Ca	418.4Ca	109.7Ca	256.7Ca
		CK	78.8Ca	44.0Cb	310.3Ca	118.9Ca	423.9Ca	135.8Ca	98.3Ca	384.3Ca	99.3Ca	236.4Ca

2.3 海水胁迫下外源硅对钾离子含量的影响

由图 1 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及对照处理下,2 个优质高产杂交稻在 4 个时期各器

官钾离子含量均显著下降。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均提高了 4 个时期各器官的钾离子含量,但外源硅较对照提高 4 个时期各器官



a、b、c、d—茎鞘，e、f、g、h—叶片，i、j—穗，a、e—分蘖期，b、f—孕穗期，c、g、i—齐穗期，d、h、j—成熟期，图2、图3同。不同大写字母表示同一品种在不同盐浓度下差异显著($P<0.05$)，不同小写字母表示同一盐处理不同硅肥处理间差异显著($P<0.05$)，下同

■ 硅肥处理 □ 对照

图1 海水胁迫下外源硅对钾离子含量的影响

钾离子量的幅度总体随海水胁迫浓度的增加而下降,较高浓度的海水抑制了外源硅增加钾离子含量的效果。在 0.0% 浓度海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钾离子含量显著大于对照(两优 957 成熟期叶、穗除外);在 0.3% 浓度海水胁迫下,外源硅处理除成熟期及晶两优 534 齐穗期穗、Y 两优 957 孕穗期叶片外 3 个时期各器官钾离子含量显著大于对照;0.6% 浓度海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钾离子含量与对照差异不显著(分蘖期 Y 两优 957 茎鞘和晶两优 534 叶片除外)。

2.4 海水胁迫下外源硅对钠离子含量的影响

由图 2 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及对照处理下,2 个优质高产杂交稻在 4 个时期各器官钠离子含量均显著上升。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均降低了 4 个时期各器官的钠离子含量,但外源硅较对照降低 4 个时期各器官钠离子量的幅度随海水胁迫浓度从 0.3% 增加到 0.6% 而下降,较高浓度的海水抑制了外源硅降低钠离子含量的效果。在 0.0% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钠离子含量与对照差异不显著;在 0.3% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钠离子含量多显著小于对照;0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的晶两优 534 齐穗期茎鞘和 2 水稻品种成熟期茎鞘的钠离子含量显著小于对照,叶片在 4 个时期的钠离子含量均显著小于对照,穗部的钠离子含量仅晶两优 534 成熟期与对照差异显著。

2.5 海水胁迫下外源硅对钾钠比值的影响

由图 3 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及对照处理下,2 个优质高产杂交稻的 4 个时期茎鞘和叶片钾钠比均显著下降。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均提高了 4 个时期各器官的钾钠比,但外源硅较对照提高 4 个时期各器官钾钠比的幅度总体随海水胁迫浓度的增加而下降,较高浓度的海水抑制了外源硅增加钾钠比值的效果。在 0.0% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钾钠比均显著大于对照;在 0.3% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的仅 Y 两优 957 分蘖期叶片、晶两优 534 孕穗期叶片和晶两优 534 齐穗期穗部钾钠比显著大于对照;0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 4 个时期各器官钾钠比与对照差异不显著。

2.6 海水胁迫下外源硅对叶片丙二醛的影响

由图 4 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及

对照处理下,2 个优质高产杂交稻的 3 个时期叶片丙二醛含量均显著上升。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均降低了 3 个时期叶片丙二醛含量。在 0.0% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 3 个时期叶片丙二醛含量与对照差异不显著。在 0.3%、0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 3 个时期叶片丙二醛含量均显著小于对照(Y 两优 957 齐穗期除外)。

2.7 海水胁迫下外源硅对叶片抗氧化酶活性的影响

由图 5 可知,随海水胁迫浓度的提高,外源硅及对照处理下,2 个优质高产杂交稻的 3 个时期叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均显著上升。在相同海水胁迫浓度下,外源硅处理较对照均提高了 3 个时期叶片 SOD、POD 和 CAT 活性。在 0.0% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 3 个时期叶片 SOD、POD 和 CAT 活性与对照仅部分时期差异显著。在 0.3%、0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理的 3 个时期叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均显著大于对照。

3 讨论

3.1 海水胁迫下外源硅对水稻产量及干物质的影响

盐胁迫抑制了水稻植株各器官的生长,造成水稻减产甚至死亡^[20-21]。盐胁迫对水稻产量影响的研究存在一些差异,周根友等的研究表明,盐胁迫严重影响了水稻的每穗粒数和粒重,这是导致水稻减产的主要原因^[22-23],而胡博文等的研究表明,盐胁迫下水稻群体穗数、每穗粒数、结实率和粒重均降低^[24]。本研究中,随着海水胁迫浓度的提高,2 个优质高产杂交稻品种在外源硅及对照处理下的产量及产量构成因子数值均显著下降,且总体随海水浓度的增加下降幅度增大,与前人研究结果^[25-26]一致。韦海敏等研究发现,施用硅肥促进水稻植株养分吸收,干物质量和产量差异更加显著^[27];龚金龙等研究发现,在有效分蘖期追施硅肥,有效穗数和每穗粒数差异最为显著,增加结实率和千粒重则在抽穗期追施硅肥优于其他时期^[28]。而在海水胁迫下,本研究发现硅肥能缓解盐分胁迫,施用硅肥后较对照提高了产量及产量构成因子数值,其中在 0.0% 和 0.3% 浓度的海水处理下,外源硅处理与对照的产量、有效穗数、穗粒数、千粒重均达到显著差异,在 0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理与对照

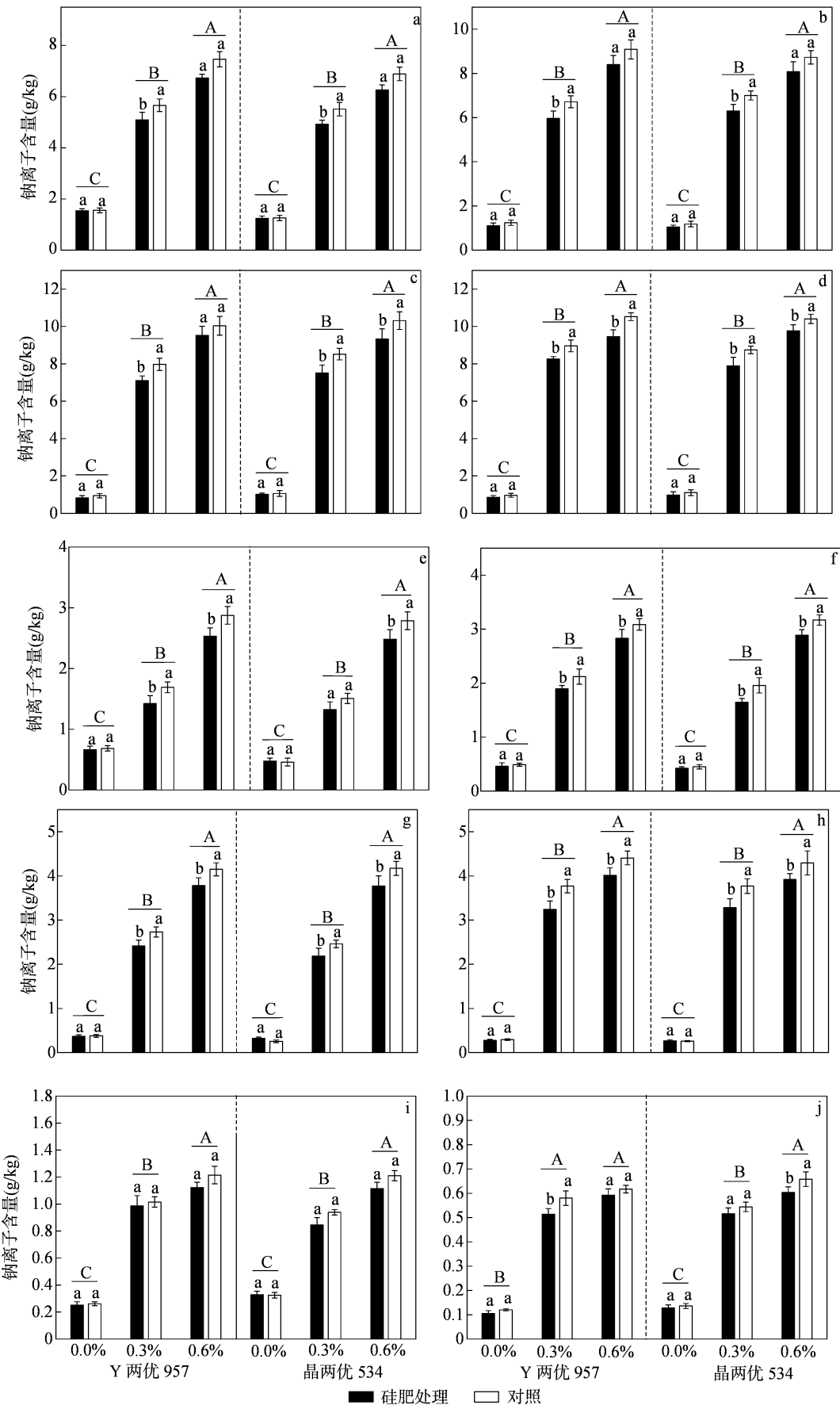


图2 海水胁迫下外源硅对钠离子含量的影响

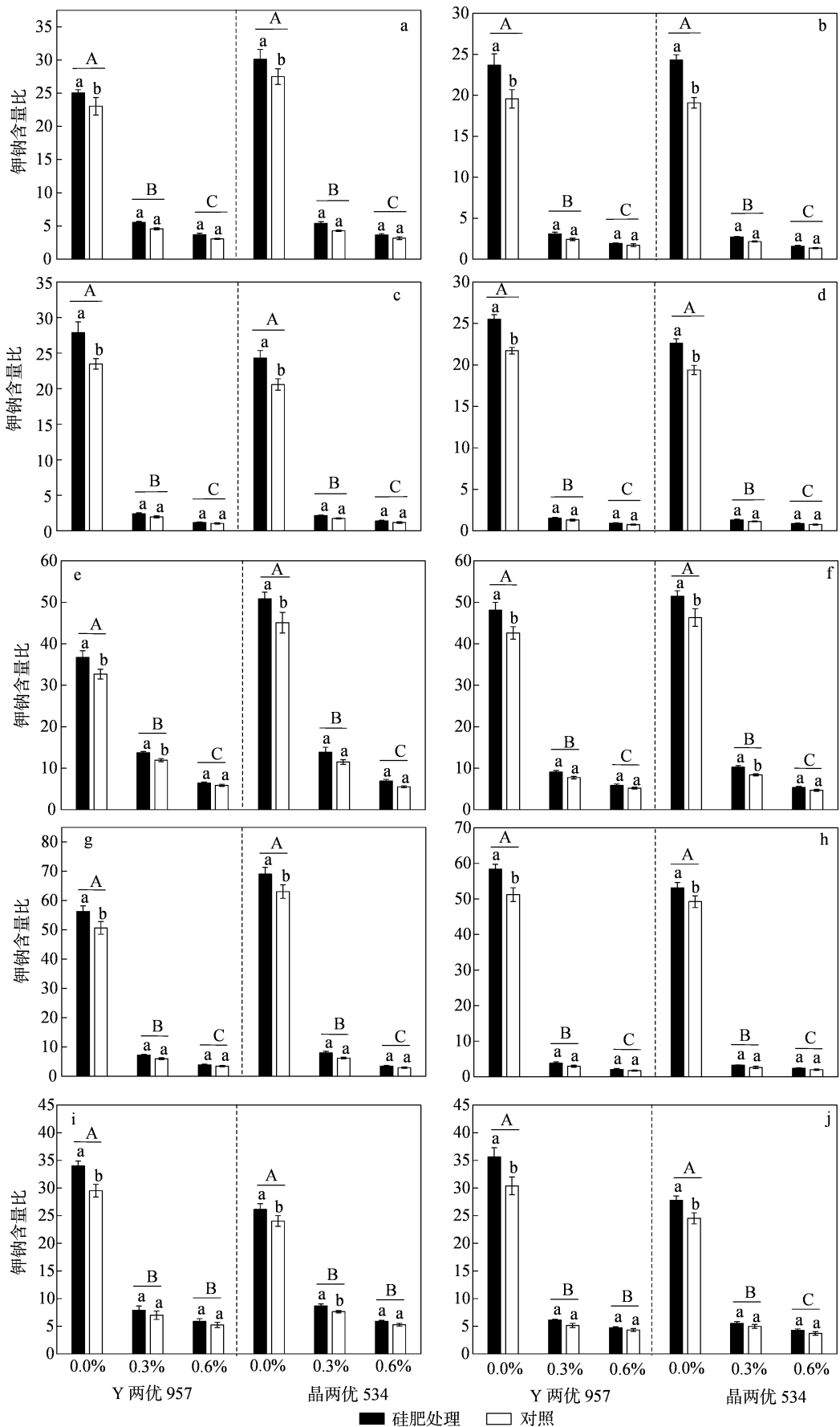
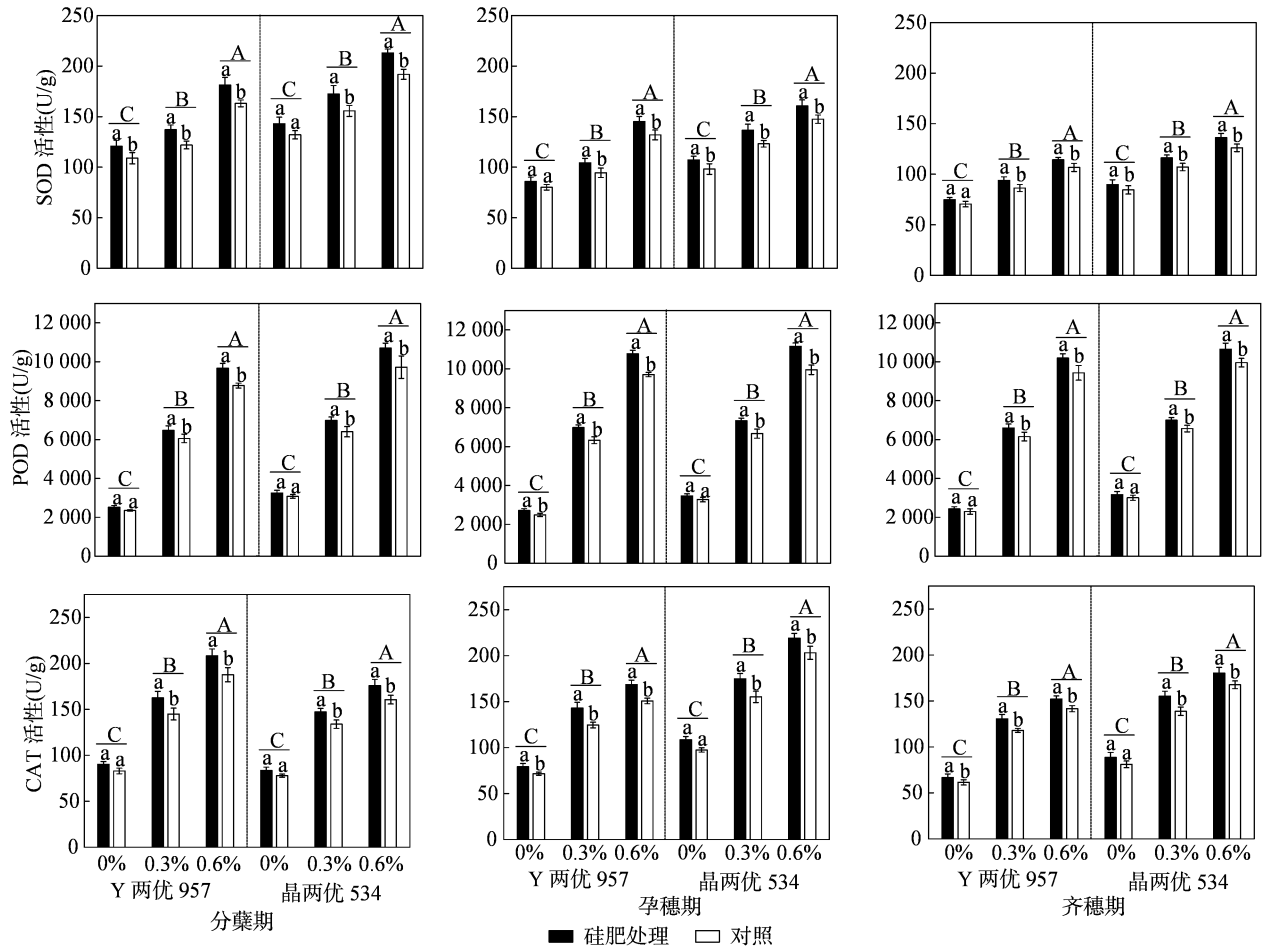
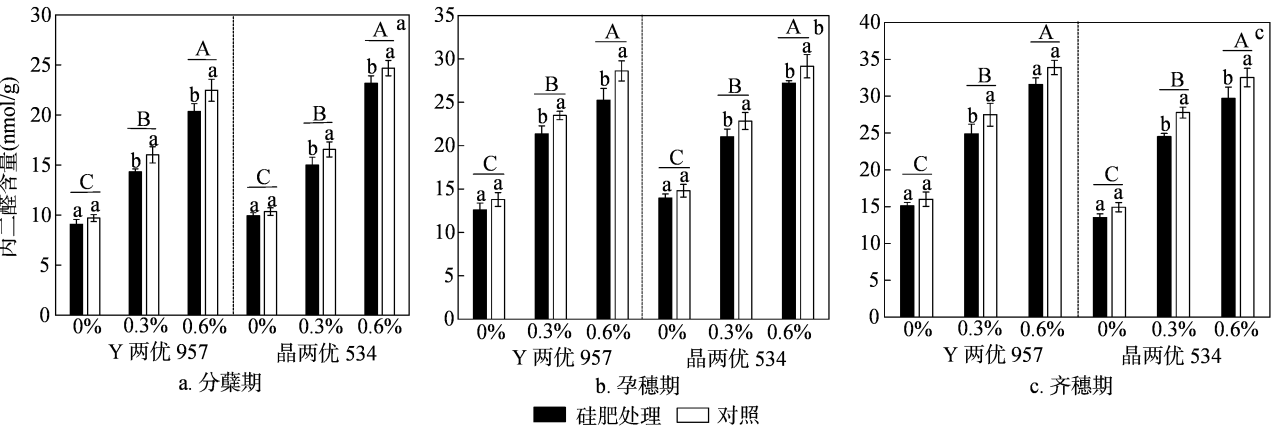


图3 海水胁迫下外源硅对钾钠比值的影响



的以上指标数值差异不显著。而结实率在 3 种浓度的海水处理下外源硅处理与对照差异均不显著。

盐胁迫对水稻生理和生长产生多方面的影响，随生长阶段和胁迫的严重程度而变化^[29]。在营养生长阶段受到盐胁迫表现为抑制水稻植株生长、降低干物质积累、减少有效分蘖等，生殖生长期受到盐胁迫表现为花期推迟、幼穗分化进程减慢、颖花

量减少和结实率降低，严重影响产量和品质^[30]。硅可以增加水稻根系活力，促进物质积累，改善盐胁迫对水稻植株的抑制作用^[31]。本研究发现，水稻各器官干物质质量均随着海水胁迫浓度增加呈下降趋势，外源硅促进水稻植株生长，增加了水稻各器官干物质质量，缓解盐胁迫对水稻的危害，表明外源硅增强水稻植株对盐胁迫的耐受性，改善盐胁迫下水

稻植株的生长具有重要作用。

3.2 海水胁迫下外源硅对水稻离子胁迫的影响

研究表明,在钾离子缺乏的情况下,低浓度的钠离子对植物的生长有益,钠离子可以在植物中少量替代钾离子的功能^[32]。但是在外界环境钠离子浓度过高时,植物吸收过量的钠离子后会在植物中引起离子毒害,干扰植物正常的生长代谢^[33]。本研究发现,盐胁迫降低水稻各生育期钾离子含量,增加钠离子含量,且钾离子含量随着水稻生育进程推进而降低,钠离子呈相反趋势,从而随着水稻生育进程推进钾钠比也逐渐下降。前人研究表明盐胁迫下较高的钾/钠含量比被认为是植物耐盐的核心指标^[34]。已有研究表明,硅通过调节钠离子的吸收、运输和分配,增强对钠离子的区隔,缓解盐胁迫导致的离子失衡^[35]。硅还可以通过促进盐胁迫下水稻钾吸收、钠外排以及与钠区隔化相关基因的表达,缓解盐胁迫造成的离子毒害^[13]。本研究发现外源硅能够降低各器官钠离子含量,同时提高钾离子含量以维持较高的钾/钠含量比,从而缓解盐胁迫下钠离子毒害。本研究还发现,外源硅在 0.0%、0.3% 浓度的海水胁迫下钾离子含量增幅较大,而在 0.6% 浓度的海水胁迫下增幅较小,说明外源硅在低浓度的海水处理下对离子调控效果优于高浓度的海水处理。

3.3 海水胁迫下外源硅对水稻叶片生理活性的影响

盐胁迫下水稻植株受到离子毒害作用,导致水稻植株体内丙二醛大量积累,最终导致水稻植株生长发育受到抑制^[36]。丙二醛是过氧化反应的积累产物,其反映出氧自由基对细胞膜的损伤程度,丙二醛含量是判断细胞遭受胁迫程度大小的常用指标^[37]。硅肥能够缓解盐胁迫引起的丙二醛积累,这与前人的研究结果^[38]一致,本研究还发现外源硅在 0.3% 浓度的海水处理下对丙二醛积累的缓解效果优于 0.0%、0.6% 浓度的海水处理。植物体内的活性氧清除系统 POD、CAT 和 SOD 等随着盐胁迫的增大而大量积累,所以盐胁迫下水稻叶片中的抗逆酶活性高于正常土壤下生长的水稻^[39],本研究发现,在相同浓度海水胁迫下,外源硅处理较对照均提高了叶片的抗氧化酶活性,从而缓解氧化胁迫对植株的伤害。此外,本研究还发现,外源硅处理与对照的 SOD 和 CAT 活性在 0.3% 浓度的海水处理下增幅最大,而 POD 活性在 0.6% 浓度的海水处理下

增幅最大。本研究表明,外源硅能够增加水稻在盐胁迫下的抗氧化酶活性,减轻盐胁迫造成的氧化损伤,提高水稻的耐盐性。

4 结论

本试验结果表明,盐胁迫显著干扰水稻体内钾钠离子平衡和抑制干物质积累,造成产量下降。外源硅处理能够减缓盐分胁迫,显著提高了 0.0%、0.3% 浓度海水胁迫下的水稻产量、产量构成因子数值(结实率除外)和除成熟期及晶两优 534 齐穗期穗、Y 两优 957 孕穗期叶片外的各器官钾离子含量,并降低海水胁迫下钠离子含量,改善海水胁迫下水稻的钾、钠离子分配比例;在 0.3%、0.6% 浓度的海水胁迫下,外源硅处理显著提高了水稻叶片抗氧化酶活性,显著降低丙二醛含量(Y 两优 957 齐穗期除外)。综上所述,盐地增施外源硅是缓解水稻盐胁迫,提高产量的一项有效栽培措施。

参考文献:

- [1] 李 彬,王志春,孙志高,等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158.
- [2] 凌启鸿. 盐碱地种稻有关问题的讨论[J]. 中国稻米,2018,24(4):1-2.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [4] 王才林,张亚东,赵 凌,等. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. 中国稻米,2019,25(1):1-6.
- [5] 颜佳倩,顾逸彪,薛张逸,等. 耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应差异及其机制[J]. 作物学报,2022,48(6):1463-1475.
- [6] Zhang J F. Salinity affects the proteomics of rice roots and leaves[J]. Proteomics,2014,14(15):1711-1712.
- [7] Munns R, Gilliham M. Salinity tolerance of crops; what is the cost?[J]. New Phytologist,2015,208(3):668-673.
- [8] Ashraf M, Athar H R, Harris P J C, et al. Some prospective strategies for improving crop salt tolerance [M]//Advances in agronomy. Amsterdam; Elsevier,2008:45-110.
- [9] Gregorio G B, Senadhira D, Mendoza R D, et al. Progress in breeding for salinity tolerance and associated abiotic stresses in rice[J]. Field Crops Research,2002,76(2/3):91-101.
- [10] 徐呈祥,刘兆普,刘友良. 硅在植物中的生理功能[J]. 植物生理学通讯,2004,40(6):753-757.
- [11] 束良佐,刘英慧. 硅对盐胁迫下玉米幼苗生长的影响[J]. 农业环境保护,2001,20(1):38-40.
- [12] 王丽燕. 硅对野生大豆幼苗耐盐性的影响及其机制研究[J]. 大豆科学,2013,32(5):659-663.
- [13] 闫国超,樊小平,谭 礼,等. 盐胁迫下添加外源硅提高水稻抗氧化酶活性与钠钾平衡相关基因表达[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):1935-1943.

- [14] Sanglard L M V P, Detmann K C, Martins S C V, et al. The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 123: 22–36.
- [15] 张文强, 黄益宗, 招礼军, 等. 盐胁迫下外源硅对硅突变体与野生型水稻种子萌发的影响[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(6): 867–873.
- [16] 彭江涛, 候新坡, 兰 涛, 等. 水稻苗期耐盐性基因 SST 分子标记的筛选与应用[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2017, 46(2): 166–171.
- [17] 孙现军, 姜奇彦, 胡 正, 等. 水稻资源全生育期耐盐性鉴定筛选[J]. *作物学报*, 2019, 45(11): 1656–1663.
- [18] 郭 荟, 屠乃美, 马国柱, 等. 硅肥对双季水稻生长发育及产量的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35(6): 549–554.
- [19] Wang Y N, Liang C Z, Meng Z G, et al. Leveraging *Atriplex hortensis* choline monooxygenase to improve chilling tolerance in cotton[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 162: 364–373.
- [20] 郑英杰. 盐胁迫对水稻的影响及水稻耐盐育种研究[J]. *北方水稻*, 2013, 43(5): 71–74, 80.
- [21] 林 兵, 赵步洪. 水稻耐盐碱生理机制与遗传改良的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(16): 37–43, 238.
- [22] 周根友, 翟彩娇, 邓先亮, 等. 盐逆境对水稻产量、光合特性及品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(2): 146–154.
- [23] 韦还和, 张徐彬, 葛佳琳, 等. 盐胁迫对水稻颖花形成及籽粒充实的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(12): 2471–2480.
- [24] 胡博文, 谷娇娇, 贾 琰, 等. 盐胁迫对寒地粳稻籽粒淀粉形成积累及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(1): 115–123.
- [25] 韦还和, 葛佳琳, 张徐彬, 等. 盐胁迫下粳稻品种南粳 9108 分蘖特性及其与群体生产力的关系[J]. *作物学报*, 2020, 46(8): 1238–1247.
- [26] Gay F, Maraval I, Roques S, et al. Effect of salinity on yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in the grains of three fragrant rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in Camargue (France) [J]. *Field Crops Research*, 2010, 117(1): 154–160.
- [27] 韦海敏, 陶伟科, 周 燕, 等. 硅素穗肥优化滨海盐碱地水稻矿物质元素吸收分配提高耐盐性[J]. *作物学报*, 2023, 49(5): 1339–1349.
- [28] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1475–1488.
- [29] 刘梦霜, 郭海峰, 陈观秀, 等. 不同水稻品种对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(2): 326–336.
- [30] Khan M A, Abdullah Z. Salinity – sodicity induced changes in reproductive physiology of rice (*Oryza sativa*) under dense soil conditions[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(2): 145–157.
- [31] Shi Y, Wang Y C, Flowers T J, et al. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 170(9): 847–853.
- [32] Kronzucker H J, Coskun D, Schulze L M, et al. Sodium as nutrient and toxicant[J]. *Plant and Soil*, 2013, 369(1/2): 1–23.
- [33] Hasegawa P M. Sodium (Na^+) homeostasis and salt tolerance of plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 19–31.
- [34] Flowers T J, Colmer T D. Plant salt tolerance; adaptations in halophytes[J]. *Annals of Botany*, 2015, 115(3): 327–331.
- [35] Zhu Y X, Gong H J, Yin J L. Role of silicon in mediating salt tolerance in plants; a review[J]. *Plants*, 2019, 8(6): 147.
- [36] 张徐彬, 陈 熙, 葛佳琳, 等. 盐–旱复合胁迫对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 43(2): 29–35.
- [37] Moradi F, Ismail A M. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ROS – scavenging systems to salt stress during seedling and reproductive stages in rice[J]. *Annals of Botany*, 2007, 99(6): 1161–1173.
- [38] Ashraf M, Rahmatullah, Afzal M, et al. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt – sensitive and salt – tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 381–391.
- [39] 徐春莹, 张亚玲, 王 丹, 等. 盐碱胁迫对不同水稻品种抗逆和抗癌性相关酶的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(4): 44–46.