

引用格式:

邹燕, 刘芳禧, 方畅宇, 郭荟, 陈威, 杨宁俊, 庾振宇, 易镇邪, 雷斌. 全生育期盐胁迫对不同耐盐性水稻品种(系)生长发育的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 8–17.

ZOU Y, LIU F X, FANG C Y, GUO H, CHEN W, YANG N J, YU Z Y, YI Z X, LEI B. Effects of salt stress during the whole growth period on the growth and development of different salt-tolerant rice varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 8–17.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



全生育期盐胁迫对不同耐盐性水稻品种(系)生长发育的影响

邹燕¹, 刘芳禧¹, 方畅宇¹, 郭荟¹, 陈威¹, 杨宁俊¹, 庾振宇¹, 易镇邪^{1*}, 雷斌^{2,3}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南杂交水稻研究中心, 湖南 长沙 410125; 3.国家耐盐碱水稻技术创新中心, 海南 三亚 572000)

摘要: 以4个耐盐水稻品种(系)(R2803、1146S/R2803、R889、1146S/R889)和1个盐敏感水稻品种(香粤农)为试验材料, 设置5种海盐质量分数(0‰、1.5‰、3.0‰、4.5‰、6.0‰)进行水培试验, 比较5个水稻品种(系)生长发育指标的差异。结果表明: 随盐质量分数的增加, 各水稻品种(系)几个生育时期株高、叶龄、群体茎蘖数、叶面积、根系伤流强度、根体积均呈下降趋势, 其中盐敏感水稻品种香粤农的降幅明显大于各耐盐水稻品种(系)的, 4个耐盐水稻品种(系)的降幅从大到小依次为R2803、R889、1146S/R2803、1146S/R889; 随盐质量分数增加, 各水稻品种(系)的有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒质量、单穴产量均呈下降趋势, 且均以盐敏感水稻品种香粤农的降幅最大, 杂交稻品系的降幅小于常规稻的, 在盐质量分数1.5‰~6.0‰条件下, R2803单穴产量的降幅为37.07%~90.96%, 1146S/R889单穴产量降幅为17.14%~75.59%。综合来看, 1146S/R889各生长发育指标、产量及其构成因素在盐胁迫下降幅最小, 耐盐性最强。

关键词: 水稻; 盐胁迫; 全生育期; 生长发育; 产量构成

中图分类号: S511.04

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)01-0008-10

Effects of salt stress during the whole growth period on the growth and development of different salt-tolerant rice varieties

ZOU Yan¹, LIU Fangxi¹, FANG Changyu¹, GUO Hui¹, CHEN Wei¹,

YANG Ningjun¹, YU Zhenyu¹, YI Zhenxie^{1*}, LEI Bin^{2,3}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Hybrid Rice Research Center, Changsha, Hunan 410125, China; 3.National Center of Technology Innovation for Saline-alkali Tolerant Rice, Sanya, Hainan 572000, China)

Abstract: Four salt-tolerant rice varieties(R2803, 1146S/R2803, R889, 1146S/R889) and one salt-sensitive rice variety (Xiangyuenong) were tested under five different salt mass fractions treatments(0‰, 1.5‰, 3.0‰, 4.5‰, 6.0‰) in hydroponic experiments to compare the differences in growth and development indexes. The results showed that as salt mass fraction increased, plant heights, leaf ages, tiller numbers, leaf areas, root bleeding intensities, and root volumes declined in all varieties, with Xiangyuenong experiencing the greatest reduction. Among salt-tolerant varieties, the decline from highest to lowest followed the order: R2803, R889, 1146S/R2803, 1146S/R889. Similarly, effective panicle numbers, grains per panicle, seed setting rates, 1 000-grain weights, and single-hole yields decreased with higher salt levels, with Xiangyuenong showing the largest decline. Hybrid varieties exhibited smaller reductions than conventional ones. At 1.5‰-6.0‰ salt, single-hole yields of R2803 decreased by 37.06%-90.96%, while those of 1146S/R889

收稿日期: 2024-03-03

修回日期: 2024-12-10

基金项目: 湖南省十大技术攻关项目(2024NK1010), 湖南省科学技术厅重大专项(2018NK1010)

作者简介: 邹燕(2000—), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事水稻生理生态研究, zy20612@163.com; *通信作者, 易镇邪, 博士, 教授, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, yizhenxie@126.com

decreased by 17.14%-75.59%. Overall, 1146S/R889 showed the least reduction in growth and development indexes, yield, and yield components under salt stress, indicating the strongest salt tolerance.

Keywords: rice; salt stress; whole growth period; growth and development; yield components

土壤盐渍化是当前农业发展面临的重点问题之一,严重影响作物的生长发育和土地的利用效率^[1-2]。据报道,2050 年全球将有超过一半的耕地呈现盐渍化状态^[3]。目前全球约有 10 亿 hm^2 土地盐渍化,其中盐渍化耕地占总耕地面积的 20%^[4-5]。中国拥有约 1 亿 hm^2 盐渍化耕地^[2,6],其中具有农业发展潜力的盐渍化耕地占中国总耕地面积的 10%以上,约 80% 的盐渍地可开发为耕地种植各类农作物。

水稻(*Oryza sativa* L.)的根系可以吸收盐分,降低土壤表层的盐分,因此被作为改良盐碱地的首选粮食作物^[1,7]。但是,水稻是一种盐敏感型粮食作物,且不同水稻品种的耐盐性存在差异,不同水稻品种在不同生育时期对盐胁迫的耐性也不同^[8-9]。水稻耐盐性可通过植株的形态生长参数进行评价^[5]。有研究^[10]表明,盐胁迫会抑制水稻种子萌发,降低种子发芽率,导致发芽不整齐;同时会抑制水稻苗期生长,导致绿叶面积下降等。还有研究^[11]表明,盐胁迫降低水稻株高,显著降低水稻单株分蘖力,导致分蘖高峰延迟,最终影响有效穗数。以往对水稻耐盐性研究的报道主要集中于不同生育阶段的耐盐性评价,而系统地从小生长发育指标与产量构成因素角度分析不同耐盐性水稻品种全生育期的耐盐性差异的研究鲜见报道。本研究以几个耐盐性不同的水稻品种(品系)为材料,分析不同盐浓度胁迫下不同水稻品种(系)的生长发育及表型变化,旨在揭示不同水稻品种不同生育时期的耐盐性差异,以期为水稻耐盐品种的筛选及其耐盐机制研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

基于本研究团队前期在水稻芽期和苗期对 43 个水稻品种(系)进行的耐盐性研究^[12],选择 3 个常规水稻品种(系)R2803、R889、香粤农和 2 个杂交水稻品种(系)1146S/R2803、1146S/R889 为供试材料,其中香粤农为盐敏感水稻品种,R2803、11146S/R2803、R889、1146S/R889 为耐盐水稻品种(系)。所有试验品种(系)均由湖南农业大学水稻育种

团队提供。

1.2 试验设计

试验于 2021 年在湖南农业大学水稻研究所大棚内进行。设置 5 个盐质量分数处理,0‰(CK)、1.5‰、3.0‰、4.5‰、6.0‰,开展营养液(木村营养液)^[13]水培盆栽试验,根据营养液密度和体积计算出各处理所需增施的海盐质量,每 5~7 d 换 1 次营养液。采用 60 cm×40 cm×30 cm 的塑料盆,待秧苗生长到三叶一心时进行移栽。水稻植株利用泡沫板漂浮在液面上,用定植篮和定植棉固定,每盆种植 12 穴,常规稻每穴移栽 4 苗,杂交稻每穴移栽 2 苗,每个品种(系)每个盐质量分数处理 12 盆。

1.3 测定指标及方法

1) 生育时期:记录移栽期、返青期、分蘖盛期、抽穗期、乳熟期、成熟期。

2) 株高与茎蘖动态:移栽后定点每盆 10 穴,每 5 天测定 1 次株高、叶龄和群体茎蘖数,直至茎蘖数不再增加。

3) 叶面积:于分蘖盛期、抽穗期、乳熟期、成熟期每个水稻品种(系)每个处理取 5 穴植株,采用长宽系数法^[14]测定叶面积。

4) 根系伤流强度:于分蘖盛期、抽穗期和乳熟期每个水稻品种(系)每个处理分别重复取样 3 次,每重复取 3 穴植株,采用贴棉吸附法^[15]测定根系伤流强度。

5) 根体积:于抽穗期、乳熟期和成熟期每个水稻品种(系)每个处理分别重复取样 3 次,每重复取 3 穴植株,用清水漂洗至根系无杂质后用吸水纸吸干水分,采用排水法^[16]测定根体积。

6) 产量及产量构成因素:成熟期每个水稻品种(系)每个处理调查 5 蔸水稻,并测定每蔸水稻的有效穗数、每粒穗数、结实率和千粒质量,计算理论产量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据统计;采用 SPSS 22.0 进行显著性统计分析。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对不同水稻品种(系)株高的影响

从表1可以看出,4个生育时期,各水稻品种(系)的株高均随盐质量分数的增加而下降。在1.5‰盐质量分数处理下,R2803和香粤农各生育时期的株高显著低于CK的,而R889、1146S/R889、1146S/R2803各生育时期的株高与CK的差异不显著,R889株高降幅为3.60%~5.65%,1146S/R889的降幅为1.36%~5.00%,1146S/R2803的降幅为2.11%~5.12%。在3‰盐质量分数处理下,与CK相

比,3个常规水稻品种(系)(R2803、R889、香粤农)中,盐敏感水稻品种香粤农各生育时期的株高下降幅度均为最大,R889的降幅最小;2个杂交水稻品种(系)(1146S/R889、1146S/R2803)中,1146S/R889的降幅较小。在4.5‰盐质量分数处理下,与CK相比,常规水稻品种(系)4个生育时期均以R2803和香粤农的株高降幅较大,杂交水稻品种(系)以1146S/R889的降幅较小。在6‰盐质量分数处理下,各品种(系)分蘖盛期株高降幅差异不大,定植45d后,各品种(系)均已死亡,此后各品种(系)间的差异无从考证。

表1 不同盐胁迫处理下5个供试水稻品种(系)的株高

品种(系)	盐质量分数/‰	株高			
		分蘖盛期	抽穗期	乳熟期	成熟期
R2803	0.0	(71.27±4.83)a	(88.84±3.34)a	(99.80±4.83)a	(99.30±5.70)a
	1.5	(62.05±3.04)b	(80.63±5.62)b	(88.40±5.53)b	(91.35±5.74)b
	3.0	(56.94±2.09)c	(71.51±4.84)c	(80.90±3.73)c	(79.81±5.85)c
	4.5	(44.19±1.81)d	(60.44±5.48)d	(66.70±2.90)d	(66.60±4.67)d
	6.0	(35.30±1.92)d			
R889	0.0	(63.77±3.23)a	(80.50±3.76)a	(88.30±3.76)a	(89.77±4.16)a
	1.5	(60.17±1.48)a	(77.60±2.61)a	(84.83±4.69)a	(86.30±5.23)a
	3.0	(53.37±3.59)b	(68.20±2.47)b	(75.30±4.00)b	(77.55±5.01)b
	4.5	(43.97±1.74)c	(59.72±5.65)c	(64.40±4.64)c	(63.20±4.03)c
	6.0	(31.70±2.25)d			
1146S/R889	0.0	(70.42±1.61)a	(95.19±3.55)a	(106.50±3.26)a	(107.80±5.19)a
	1.5	(66.90±3.92)a	(93.90±4.59)a	(104.87±4.33)a	(104.97±4.13)a
	3.0	(59.78±2.24)b	(82.97±4.84)b	(93.40±4.54)b	(95.60±2.22)b
	4.5	(51.93±1.88)c	(72.88±5.48)c	(83.10±4.26)c	(82.20±3.85)c
	6.0	(35.20±2.93)d			
1146S/R2803	0.0	(76.20±3.37)a	(96.78±4.12)a	(112.70±4.06)a	(114.40±6.39)a
	1.5	(72.30±4.19)a	(94.74±4.57)a	(109.49±3.18)a	(110.50±5.78)a
	3.0	(64.10±3.19)b	(82.81±5.16)b	(97.61±2.18)b	(99.70±5.22)b
	4.5	(54.00±2.25)c	(72.50±3.26)c	(82.70±1.10)a	(81.40±4.52)c
	6.0	(39.89±1.21)d			
香粤农	0.0	(64.12±3.57)a	(83.91±4.87)a	(86.90±3.21)a	(86.80±6.08)a
	1.5	(55.30±3.75)b	(75.50±2.71)b	(75.60±4.61)b	(78.00±5.65)b
	3.0	(48.90±3.25)c	(64.80±4.77)c	(68.00±4.69)c	(68.00±4.31)c
	4.5	(38.38±1.30)d	(53.00±5.32)d	(56.10±3.02)d	(56.40±3.70)d
	6.0	(31.61±1.85)d			

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

综上所述,各水稻品种(系)各时期的株高均随盐质量分数的增加而下降,盐敏感水稻品种株高的降幅大于耐盐品种(系)的;从株高降幅来看,杂交稻品系的耐盐性强于常规稻品种(系)的,杂交稻品系中以1146S/R889的耐盐性较强,常规稻品种(系)中以R889

的耐盐性较强。

2.2 盐胁迫对不同水稻品种(系)叶龄的影响

由表2可见,各水稻品种(系)的叶龄随盐胁迫浓度增加而降低。1.5‰盐浓度处理下,与CK相比,

4 个耐盐品种(系)的叶龄无显著差异, R2803、R889、1146S/R889、1146S/R2803 的降幅分别为 1.78%~2.35%、1.46%~2.56%、1.18%~1.66%、1.04%~2.12%, 香粤农的降幅为 4.14%~4.82%, 大于各耐盐水稻品种(系)的。综合各时期的叶龄来看, 5 个品种(系)中, 1146S/R889 的叶龄下降幅度最小。在 3‰盐质量分数处理下, 盐敏感水稻品种香粤农的叶龄降幅大于各耐盐水稻品种(系)的, 2 个杂交水稻品种(系)的叶龄降幅均低于常规水稻品种(系)的, 而常规水稻品种(系)中, R2803 的降幅略大于 R889 的。在 4.5‰

盐浓度处理下, 盐敏感水稻品种香粤农的叶龄降幅高于耐盐水稻品种(系)的, 在分蘖盛期、抽穗期、乳熟期和成熟期分别下降了 16.53%、17.94%、25.32%和 24.61%; 耐盐品种(系)中, 1146S/R889 的叶龄降幅最小, 在分蘖盛期、抽穗期、乳熟期和成熟期分别下降了 11.70%、11.23%、16.97%、13.83%。6‰盐质量分数下, 盐敏感水稻品种香粤农分蘖盛期的叶龄低于耐盐水稻品种(系)的, 由于盐质量分数过高, 各水稻品种(系)均于八叶一心后死亡。

表 2 不同盐胁迫处理下 5 个供试水稻品种(系)的叶龄

Table 2 Leaf ages of five tested rice varieties under different salt stress treatments

品种(系)	盐质量分数/‰	叶龄			
		分蘖盛期	抽穗期	乳熟期	成熟期
R2803	0.0	(10.63±0.33)a	(14.10±0.45)a	(17.41±0.59)a	(17.30±0.54)a
	1.5	(10.38±0.47)a	(13.81±0.53)a	(17.10±0.39)a	(16.98±0.39)a
	3.0	(9.59±0.27)b	(12.90±0.75)b	(14.84±0.74)b	(15.50±0.37)b
	4.5	(9.18±0.36)b	(12.17±0.60)c	(13.50±0.36)c	(14.30±0.44)c
	6.0	(8.49±0.20)c			
R889	0.0	(10.17±0.32)a	(14.33±0.60)a	(16.32±0.47)a	(17.17±0.45)a
	1.5	(9.91±0.23)a	(14.07±0.32)a	(16.06±0.54)a	(16.92±0.30)a
	3.0	(9.21±0.24)a	(13.18±0.57)b	(13.99±0.30)b	(15.48±0.53)b
	4.5	(8.90±0.38)b	(12.56±0.71)c	(12.94±0.41)c	(14.27±0.54)c
	6.0	(8.43±0.23)b			
1146S/R889	0.0	(10.26±0.34)a	(14.61±0.30)a	(16.97±0.40)a	(17.72±0.39)a
	1.5	(10.09±0.35)a	(14.40±0.41)a	(16.77±0.47)a	(17.50±0.50)a
	3.0	(9.40±0.39)b	(13.54±0.34)b	(15.01±0.49)b	(16.50±0.37)b
	4.5	(9.06±0.42)b	(12.97±0.80)c	(14.09±0.34)c	(15.27±0.44)c
	6.0	(8.63±0.12)c			
1146S/R2803	0.0	(10.40±0.32)a	(14.10±0.41)a	(18.06±0.50)a	(17.26±0.53)a
	1.5	(10.18±0.40)a	(13.86±0.34)a	(17.78±0.42)a	(17.08±0.47)a
	3.0	(9.48±0.27)b	(13.04±0.65)b	(15.60±0.76)b	(15.70±0.48)b
	4.5	(9.22±0.38)b	(12.45±0.72)c	(14.77±0.32)c	(14.80±0.46)c
	6.0	(8.73±0.12)c			
香粤农	0.0	(10.59±0.25)a	(13.77±0.62)a	(15.80±0.54)a	(16.70±0.42)a
	1.5	(10.08±0.41)a	(13.20±0.41)a	(15.13±0.55)a	(15.93±0.50)a
	3.0	(9.30±0.32)b	(12.30±0.64)b	(12.48±0.51)b	(13.50±0.48)b
	4.5	(8.84±0.37)c	(11.30±0.82)c	(11.80±0.68)c	(12.59±0.46)d
	6.0	(8.17±0.12)d			

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

可见, 各水稻品种(系)各时期的叶龄均随盐质量分数的增加而下降, 盐敏感水稻品种叶龄的降幅大于耐盐品种(系)的; 从叶龄降幅来看, 杂交稻品种(系)的耐盐性强于常规稻品种(系)的, 杂交稻品种(系)中以 1146S/R889 的耐盐性较强, 常规稻品种(系)中 R889 的耐盐性稍强。

2.3 盐胁迫对不同水稻品种(系)群体茎蘖数的影响

由表 3 可知, 各品种(系)的茎蘖数随盐质量分数的增大而下降。与 CK 相比, 在 1.5‰盐质量分数处理下, 香粤农各时期的茎蘖数降幅最大, 杂交稻品种(系)各时期的茎蘖数的降幅均小于常规稻品种

(系)的; 4 个耐盐品种(系)中, 降幅最小的是 1146S/R889, 在分蘖盛期、抽穗期、乳熟期和成熟期分别下降了 10.67%、9.13%、10.66%和 9.98%; 降幅最大的是 R2803, 在分蘖盛期、抽穗期、乳熟期和成熟期分别下降了 16.17%、15.09%、20.12%、20.47%。3.0‰盐质量分数处理下, 香粤农的茎蘖数降幅最大, 在分蘖盛期、抽穗期、乳熟期和成熟期分别下降了 52.10%、47.92%、50.61%和 56.98%; 耐盐品种(系)中, 1146S/R889 各生育时期的茎蘖数

降幅较小, R2803 的降幅最大。在 4.5‰盐质量分数处理下, 茎蘖数降幅最大的是香粤农, 杂交稻品系各生育时期茎蘖数的降幅小于常规水稻品种(系)的, 其中 1146S/R889 的降幅最小。在 6‰盐质量分数处理下, 由于盐质量分数过高, 基本不发生分蘖, 且生长不久后全部死亡, 盐敏感水稻品种香粤农植株死亡最早亦最快, 其他 4 个品种(系)的死亡时期和速度无明显差异。

表 3 不同盐胁迫处理下 5 个供试水稻品种(系)的每穴茎蘖数

Table 3 Number of shoot tillers in five tested rice varieties under different salt stresses treatments

品种(系)	盐质量分数/%	每穴茎蘖数			
		分蘖盛期	抽穗期	乳熟期	成熟期
R2803	0.0	(14.90±2.33)a	(15.90±2.55)a	(16.90±2.46)a	(17.10±2.70)a
	1.5	(12.49±2.18)b	(13.50±1.69)b	(13.50±1.74)b	(13.60±1.27)b
	3.0	(7.70±1.73)c	(9.90±2.11)c	(10.10±1.17)c	(10.20±1.15)c
	4.5	(5.80±1.00)d	(5.40±0.53)d	(5.50±0.88)d	(5.30±1.05)d
	6.0	(3.30±0.54)e			
R889	0.0	(15.44±2.40)a	(16.44±2.79)a	(20.78±2.35)a	(21.20±2.75)a
	1.5	(13.20±2.64)b	(14.50±1.50)b	(17.20±1.27)b	(17.70±1.27)b
	3.0	(9.10±1.07)c	(12.10±1.83)c	(13.90±1.72)c	(13.70±1.39)c
	4.5	(6.70±1.44)d	(7.40±0.83)d	(8.10±0.83)d	(8.20±0.71)d
	6.0	(4.00±0.58)e			
1146S/R889	0.0	(12.56±2.74)a	(14.67±2.24)a	(18.67±2.44)a	(19.44±2.40)a
	1.5	(11.22±1.39)a	(13.33±2.12)a	(16.68±1.29)b	(17.50±1.33)b
	3.0	(8.30±1.27)b	(11.30±1.36)b	(13.50±1.81)c	(13.60±1.00)c
	4.5	(6.30±1.00)c	(7.30±0.62)c	(8.20±0.97)d	(8.40±0.87)d
	6.0	(2.70±0.21)d			
1146S/R2803	0.0	(11.70±2.44)a	(14.50±2.56)a	(17.30±2.38)a	(17.60±2.64)a
	1.5	(10.10±1.83)a	(12.90±2.24)a	(14.90±1.58)b	(14.97±1.20)b
	3.0	(8.20±0.98)b	(10.90±1.01)b	(11.90±1.05)c	(11.90±1.00)c
	4.5	(5.70±1.32)c	(6.20±0.72)c	(7.30±0.67)d	(7.30±0.71)d
	6.0	(2.30±0.19)d			
香粤农	0.0	(11.90±2.58)a	(14.40±1.73)a	(16.40±2.55)a	(16.50±2.12)a
	1.5	(9.59±1.94)b	(10.90±1.99)b	(12.10±1.36)b	(11.90±1.20)b
	3.0	(5.70±1.59)c	(7.50±1.46)c	(8.10±1.71)c	(7.10±1.09)c
	4.5	(4.50±1.21)d	(4.80±0.50)d	(3.60±0.88)d	
	6.0	(3.00±0.37)e			

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

可见, 各水稻品种(系)各时期的茎蘖数(穗数)均随盐质量分数的增加而下降, 盐敏感水稻品种茎蘖数的降幅大于耐盐品种(系)的; 从茎蘖数的降幅来看, 杂交稻品系的耐盐性强于常规稻品种(系)的, 杂交稻品系中 1146S/R889 的耐盐性较强, 常规稻品种(系)中 R889 的耐盐性较强。

2.4 盐胁迫对不同水稻品种(系)各生育时期叶面积的影响

由表 4 可知, 各品种(系)各时期的叶面积随盐质量分数的增加而下降。1.5‰盐质量分数处理下, 各品种(系)分蘖盛期的叶面积与 CK 的无显著差异; 抽穗期 R2803 与香粤农的下降显著, 其余 3 个品种

(系)下降不显著;乳熟期和成熟期,与 CK 比较,各品种(系)的叶面积均显著下降,杂交稻品系的降幅相对较小,1146S/R889 的降幅小于 1146S/R2803 的。3‰、4.5‰和 6.0‰盐质量分数处理下,与 CK 比较,各品种(系)的叶面积均显著降低,其中,香粤农的叶面积降幅最大,杂交稻品系的叶面积降幅

小于常规稻品种(系)的,杂交稻与常规稻品种(系)中分别以 1146S/R889 和 R889 的降幅较小。综合来看,各品种(系)各时期的叶面积总体上随盐质量分数的增加而下降,但耐盐性品种(系)的降幅较小,耐盐水稻品种(系)中以 1146S/R889 的耐盐性较强。

表 4 不同盐胁迫处理 5 个供试水稻品种(系)的单株叶面积

品种(系)	盐质量 分数/%	单株叶面积			
		分蘖盛期	抽穗期	乳熟期	成熟期
R2803	0.0	(548.92±25.24)a	(2 253.45±99.56)a	(1 633.42±513.88)a	(2 046.77±219.81)a
	1.5	(564.47±73.13)a	(1 851.20±479.95)b	(1 340.07±131.16)b	(1 162.28±25.24)b
	3.0	(362.24±27.76)b	(1 006.72±350.07)c	(517.80±13.88)c	(746.70±216.34)c
	4.5	(244.47±23.41)c	(497.80±71.29)d	(295.57±25.24)c	(522.25±65.44)c
	6.0	(115.56±23.40)d			
R889	0.0	(495.58±44.39)a	(2 422.34±495.17)a	(2 060.10±445.59)a	(3 135.71±264.78)a
	1.5	(444.47±44.39)a	(2 457.90±34.21)a	(1 771.20±492.16)b	(2 580.13±124.91)b
	3.0	(355.57±35.06)b	(1 271.17±186.20)b	(1 275.62±152.08)c	(755.59±267.71)c
	4.5	(262.24±16.78)b	(848.93±84.42)c	(297.79±42.34)d	(602.25±40.74)d
	6.0	(120.01±13.33)d			
1146S/R889	0.0	(564.47±63.01)a	(2 755.69±500.97)a	(3 475.73±330.29)a	(3 746.85±267.43)a
	1.5	(526.69±46.67)a	(2 637.91±289.79)ab	(3 073.49±767.46)b	(3 386.84±30.55)b
	3.0	(382.24±10.18)b	(2 031.21±298.48)b	(1 782.31±256.17)c	(2 335.67±523.53)c
	4.5	(295.57±13.88)b	(984.49±84.42)c	(428.91±83.89)d	(1 091.17±234.90)d
	6.0	(124.45±25.24)c			
1146S/R2803	0.0	(551.14±64.06)a	(2 633.47±493.22)a	(2 951.26±381.26)a	(3 315.72±79.54)a
	1.5	(495.58±53.47)a	(2 533.46±158.75)a	(2 622.35±381.85)b	(1 888.98±75.82)b
	3.0	(373.35±30.55)b	(1 720.09±410.28)b	(1 402.29±288.64)c	(1 620.08±295.39)b
	4.5	(288.90±21.43)b	(997.83±189.55)c	(393.35±98.21)d	(937.82±94.36)c
	6.0	(126.67±6.67)c			
香粤农	0.0	(586.70±30.55)a	(1 484.52±229.05)a	(1 515.63±314.15)a	(1 993.43±304.72)a
	1.5	(493.36±20.00)a	(1 291.18±19.25)b	(1 277.84±43.38)b	(1 580.08±100.01)b
	3.0	(313.35±30.55)b	(844.49±200.71)c	(491.14±13.88)c	(586.70±94.52)c
	4.5	(211.12±27.76)c	(400.02±64.29)d	(277.79±19.25)c	
	6.0	(106.67±13.33)d			

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.5 盐胁迫对不同水稻品种(系)根系伤流强度的影响

由表 5 可知,各水稻品种(系)各时期的根系伤流强度均随盐质量分数的增大而下降,与 CK 比较,均下降显著,但各品种(系)的降幅有差异。1.5‰盐质量分数处理下,分蘖盛期香粤农的降幅最大,其次是 R2803 的,1146S/R889 的降幅最小;抽穗期

R2803 与 1146S/R2803 的降幅较大,1146S/R889 的降幅最小;乳熟期香粤农的降幅最大,R2803 与 1146S/R2803 的降幅相对较小。3.0‰盐质量分数处理下,分蘖盛期 1146S/R2803 的降幅相对较大,其余品种(系)的差异不大;抽穗期 1146S/R2803 的降幅较大,1146S/R889 的降幅最小;乳熟期香粤农的降幅最大,R2803 与 1146S/R2803 的降幅相对较小。

4.5‰盐质量分数处理下,分蘖盛期 1146S/R2803 的降幅相对较小,其余品种(系)的差异不大;抽穗期各品种(系)的降幅为 91.90%~94.12%,品种(系)间的差异不大;乳熟期香粤农的降幅最大,其余品种(系)间的差异不大(80.00%~83.62%)。大体上各水

稻品种(系)各时期的根系伤流强度随盐质量分数的增大而下降,且耐盐品种(系)的降幅小于盐敏感品种的,4个耐盐水稻品种(系)中 1146S/R889 在 1.5‰~3.0‰盐质量分数处理下根系伤流强度降幅较小。

表 5 不同盐胁迫处理 5 个供试水稻品种(系)的单株根系伤流强度

Table 5 Root bleeding intensities of 5 tested rice varieties under different salt stress treatments		单株根系伤流强度			g/h
品种(系)	盐质量分数/‰	单株根系伤流强度			
		分蘖盛期	抽穗期	乳熟期	
R2803	0.0	(0.52±0.05)a	(0.68±0.01)a	(0.71±0.07)a	
	1.5	(0.14±0.03)b	(0.20±0.02)b	(0.44±0.12)b	
	3.0	(0.06±0.01)c	(0.10±0.02)c	(0.26±0.04)c	
	4.5	(0.05±0.02)c	(0.04±0.01)c	(0.13±0.01)d	
R889	0.0	(0.65±0.04)a	(0.74±0.01)a	(0.75±0.10)a	
	1.5	(0.20±0.05)b	(0.24±0.02)b	(0.34±0.09)b	
	3.0	(0.07±0.00)c	(0.11±0.02)c	(0.23±0.06)c	
	4.5	(0.02±0.01)c	(0.05±0.00)c	(0.15±0.01)c	
1146S/R889	0.0	(0.62±0.01)a	(0.74±0.06)a	(1.16±0.06)a	
	1.5	(0.21±0.02)b	(0.34±0.03)b	(0.56±0.07)b	
	3.0	(0.08±0.00)c	(0.16±0.02)c	(0.32±0.05)c	
	4.5	(0.03±0.01)c	(0.05±0.01)d	(0.19±0.02)c	
1146S/R2803	0.0	(0.52±0.06)a	(0.74±0.08)a	(1.15±0.06)a	
	1.5	(0.16±0.02)b	(0.26±0.02)b	(0.66±0.06)b	
	3.0	(0.04±0.01)c	(0.17±0.02)c	(0.38±0.02)c	
	4.5	(0.02±0.01)c	(0.06±0.00)c	(0.19±0.03)d	
香粤农	0.0	(0.59±0.02)a	(0.65±0.09)a	(0.67±0.07)a	
	1.5	(0.13±0.02)b	(0.24±0.02)b	(0.11±0.00)b	
	3.0	(0.06±0.01)c	(0.12±0.01)c	(0.03±0.00)b	
	4.5	(0.04±0.01)c	(0.04±0.00)d	(0.02±0.00)b	

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.6 盐胁迫对不同水稻品种(系)根体积的影响

从表 6 可以看出,随生育进程的推进,各品种(系)的根体积呈下降趋势。随盐质量分数的增加,5个水稻品种(系)的根体积均呈显著下降趋势,但各品种(系)的降幅有差异。1.5‰盐质量分数处理下,抽穗期香粤农的降幅最大,1146S/R889 的其次,其余品种(系)的差异不大;乳熟期香粤农的降幅最大,其后依次是 1146S/R889、R2803、1146S/R2803、R889 的最小;成熟期香粤农的降幅最大,1146S/R2803 与 R889 的最小。3.0‰盐质量分数处

理下,抽穗期香粤农的降幅最大,1146S/R2803 与 R2803 的降幅较小;乳熟期香粤农的降幅最大,1146S/R889 与 1146S/R2803 的较小;成熟期香粤农和 R2803 的降幅较大,1146S/R889 与 1146S/R2803 的较小。4.5‰盐质量分数处理下,3个时期香粤农的降幅均最大,1146S/R889 与 1146S/R2803 的较小。可见,各水稻品种(系)各时期的根体积均随盐质量分数的增大而显著下降,且耐盐品种(系)的降幅小于盐敏感品种的,杂交稻品种(系)在较高盐质量分数处理下的降幅小于常规稻品种(系)的。

表 6 不同盐胁迫处理 5 个供试水稻品种(系)的根体积

Table 6 Root volume of 5 tested rice varieties under different salt stress treatments mL

品种(系)	盐质量分数/‰	根体积		
		抽穗期	乳熟期	成熟期
R2803	0.0	(36.33±3.08)a	(29.00±2.67)a	(25.33±2.19)a
	1.5	(31.00±1.73)b	(21.00±2.08)b	(19.00±0.38)b
	3.0	(22.67±2.31)c	(18.00±1.20)b	(9.33±0.23)c
	4.5	(11.00±1.15)d	(7.00±0.88)c	(6.33±0.58)d
R889	0.0	(41.00±3.61)a	(34.00±2.61)a	(29.00±2.04)a
	1.5	(34.33±2.33)b	(31.33±2.33)a	(24.33±1.76)b
	3.0	(22.33±1.45)c	(20.67±2.40)b	(16.33±0.45)c
	4.5	(12.67±1.04)d	(10.00±0.58)c	(9.00±0.15)d
1146S/R889	0.0	(44.33±3.33)a	(42.67±2.58)a	(36.33±2.17)a
	1.5	(34.67±1.82)b	(29.00±2.46)b	(27.33±1.46)b
	3.0	(27.00±2.60)c	(23.00±1.45)c	(22.33±1.33)c
	4.5	(20.00±1.15)d	(18.00±0.45)d	(16.00±0.76)d
1146S/R2803	0.0	(41.33±3.70)a	(36.00±2.42)a	(34.33±2.10)a
	1.5	(35.00±2.00)b	(30.67±2.51)b	(28.33±1.96)b
	3.0	(29.67±1.75)c	(26.33±1.33)c	(23.33±1.53)c
	4.5	(18.00±1.15)d	(14.67±1.45)d	(13.67±0.89)d
香粤农	0.0	(34.00±2.33)a	(26.33±2.40)a	(22.67±1.58)a
	1.5	(26.00±1.67)b	(15.33±1.33)b	(14.67±0.45)b
	3.0	(17.00±1.00)c	(9.00±0.73)c	(7.26±0.15)c
	4.5	(9.67±0.88)d	(3.67±0.88)d	(3.47±0.33)d

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.7 盐胁迫对不同耐性水稻品种(系)理论产量的影响

由表 7 可知, 各品种(系)有效穗数均随盐质量

分数的增加而下降, 但各品种(系)的降幅有明显差异, 1.5‰盐质量分数下香粤农、R889、R2803、1146S/R2803、1146S/R889 的降幅依次降低; 3‰盐

表 7 不同盐胁迫处理 5 个供试水稻品种(系)的产量及其产量构成因素

Table 7 Yield and its constituent factors of five tested rice varieties under different salt stress treatments

品种(系)	盐质量分数/‰	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量/g	单穴理论产量/g
R2803	0.0	(12.60±2.30)a	(95.52±14.08)a	(0.82±0.11)a	(18.72±2.28)a	(18.48±2.25)a
	1.5	(10.98±1.03)b	(82.04±10.89)b	(0.76±0.07)ab	(16.99±4.10)bc	(11.63±1.37)b
	3.0	(7.58±0.48)c	(68.24±11.30)c	(0.65±0.06)b	(15.23±2.30)c	(5.20±0.75)c
	4.5	(4.83±0.60)d	(47.79±17.59)d	(0.52±0.02)c	(13.93±1.81)c	(1.67±0.43)d
R889	0.0	(13.33±1.21)a	(98.81±9.67)a	(0.84±0.03)a	(22.44±3.37)a	(24.83±3.42)a
	1.5	(11.14±1.69)b	(88.42±15.18)b	(0.79±0.04)ab	(21.45±3.37)a	(16.54±1.20)b
	3.0	(8.24±1.17)c	(70.68±13.91)c	(0.70±0.02)b	(19.47±1.89)b	(7.94±1.74)c
	4.5	(5.83±0.89)d	(52.13±15.33)d	(0.59±0.04)c	(18.16±1.19)b	(3.26±0.44)d
1146S/R889	0.0	(14.00±2.03)a	(109.12±16.17)a	(0.88±0.05)a	(22.22±2.49)a	(29.87±3.68)a
	1.5	(13.40±1.79)ab	(96.90±12.89)b	(0.87±0.07)a	(21.91±2.45)ab	(24.75±4.04)a
	3.0	(11.42±1.25)b	(81.53±16.62)c	(0.80±0.04)a	(20.73±1.84)ab	(15.44±1.76)b
	4.5	(7.50±0.89)c	(71.67±16.67)d	(0.68±0.01)b	(19.94±4.40)b	(7.29±0.45)c
1146S/R2803	0.0	(13.75±1.60)a	(102.22±19.17)a	(0.88±0.13)a	(19.08±2.65)a	(23.60±2.57)a
	1.5	(12.13±1.79)a	(94.31±18.38)b	(0.83±0.11)ab	(18.02±2.96)b	(17.11±1.72)a
	3.0	(10.17±0.33)b	(81.31±15.71)c	(0.78±0.07)b	(16.49±7.84)c	(10.64±1.57)b
	4.5	(6.75±0.58)c	(69.05±15.95)d	(0.63±0.03)c	(15.15±3.30)d	(4.45±0.51)c
香粤农	0.0	(12.30±1.58)a	(88.32±9.99)a	(0.85±0.12)a	(19.51±3.21)a	(19.48±2.89)a
	1.5	(9.00±1.66)b	(66.39±7.23)b	(0.76±0.05)b	(17.95±3.83)ab	(8.72±1.17)b
	3.0	(6.75±0.92)c	(45.05±11.22)c	(0.62±0.11)c	(16.12±7.25)b	(3.04±0.38)c

同列不同小写字母表示同一品种(系)不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$); 4.5‰盐质量分数下香粤农未能正常成熟, 故无数据。

质量分数下香粳农、R2803、R889、1146S/R2803、1146S/R889 的降幅依次降低; 4.5‰盐质量分数下 R2803、R889、1146S/R2803、1146S/R889 的降幅依次降低。各品种(系)的每穗粒数均随盐质量分数的增加而下降, 但各品种(系)的降幅有差异, 1.5‰盐质量分数下香粳农、R2803、1146S/R889、R889、1146S/R2803 的降幅依次降低, 3‰盐质量分数下香粳农、R2803、R889、1146S/R889、1146S/R2803 的降幅依次降低; 4.5‰盐质量分数下 R2803、R889、1146S/R889、1146S/R2803 的降幅依次降低。各品种(系)的结实率均随盐质量分数的增加而下降, 各品种(系)的降幅有差异, 几种盐质量分数下, 香粳农、R2803、R889、1146S/R2803、1146S/R889 的降幅依次降低。各品种(系)的千粒质量均随盐质量分数的增加而下降, 但品种(系)间的降幅有明显差异, 1.5‰盐质量分数下香粳农、R2803、1146S/R2803、R889、1146S/R889 的降幅依次降低, 3.0‰盐质量分数下 R2803、香粳农、1146S/R2803、R889、1146S/R889 的降幅依次降低; 4.5‰盐质量分数下 R2803、1146S/R2803、R889、1146S/R889 的降幅依次降低。

各品种(系)的单穴理论产量均随盐质量分数的增加而下降, 各品种(系)的降幅有明显差异, 3种盐质量分数下, 香粳农、R2803、R889、1146S/R2803、1146S/R889 的降幅依次降低, 其中 R2803 的单穴理论产量的降幅为 37.07%~90.96%, 而 1146S/R889 单株理论产量降幅为 17.14%~75.59%。

综上所述, 随盐质量分数的增加, 各水稻品种(系)的有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒质量、单穴理论产量均呈下降趋势, 且均以盐敏感水稻品种(系)香粳农的降幅最大, 各品种(系)中 1146S/R889 的理论产量及部分产量构成因素在盐胁迫下降幅最小。

3 结论与讨论

水稻是对盐中度敏感的作物, 但不同类型的品种对盐胁迫的响应程度不同, 且在不同生育时期对盐胁迫的响应也不同^[17]。在盐胁迫条件下, 水稻的组织生长及器官分化减慢, 生长发育受到阻碍, 导致其生育期延长, 产量下降甚至死亡, 而且随着盐浓度的升高, 水稻被抑制现象也更加明显^[10, 18-19]。本研

究发现, 在盐胁迫条件下, 不同耐性水稻品种(系)的株高、叶龄、茎蘖数、叶面积、根系伤流强度、根体积、产量及产量构成因素均受到不同程度的抑制, 且品种(系)间存在明显差异。总体而言, 杂交水稻品种(系)的表现优于常规水稻品种(系)。

程广有等^[20]指出盐胁迫可导致水稻的株高降低, 有效分蘖数减少。张瑞珍^[21]、梁正伟等^[11]认为在盐胁迫条件下水稻的分蘖高峰明显推迟或不出现分蘖高峰, 分蘖数亦会减少。本研究中, 在盐胁迫下, 盐敏感品种香粳农的茎蘖数降幅最大, 耐盐水稻品种 1146S/R889 的茎蘖数整体上降幅最低。周玲艳等^[22]、惠菲等^[23]发现 NaCl 胁迫可导致水稻的叶面积指数显著下降。孙现军等^[24]发现水稻在低浓度盐胁迫下虽然呈盐害表现, 但能够维持正常生长, 而在重度盐胁迫下叶片及茎秆逐渐干枯, 甚至整株死亡。本试验结果表明, 盐胁迫抑制了水稻的株高、叶龄和群体茎蘖数, 各指标均随着盐质量分数的升高呈现逐渐下降的趋势。在 1.5‰盐浓度处理下, 1146S/R889 株高、叶龄的下降幅度均较低, 分别为 1.36%~5.00%和 1.18%~1.66%, 茎蘖数的降幅也最小, R2803 这几个生长指标的下降幅度是耐盐品种(系)中最大的。可见, 盐胁迫对于不同耐性水稻品种(系)的生长表型存在明显的抑制作用, 且随着盐质量分数的升高其抑制效果也越明显。

水稻地上部生长状况及生物量与根系紧密相关。植物的根系是吸收水分和养分的重要器官, 其形态与地上部植株的生长发育、产量形成均有密切的相关性^[25-27]。前人^[28]研究发现, 盐胁迫下水稻的根体积会随着盐浓度的增加而下降, 耐盐水稻品种的根系受到的影响较盐敏感品种更为明显^[29]。本研究发现, 盐胁迫降低了不同耐性水稻品种(系)根的伤流量和体积, 且盐敏感品种香粳农的下降趋势明显大于各耐盐水稻品种(系)的, 4个耐盐品种(系)中, 1146S/R889 的耐盐性最强。

本研究发现, 随着盐质量分数的增加, 不同耐盐性水稻品种(系)的有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒质量均呈下降趋势, 而盐敏感型水稻品种香粳农的产量构成因素的下降幅度大于各耐盐水稻品种(系)的。在 1.5‰低盐胁迫处理下, 与 CK 相比, 1146S/R889 的有效穗数、结实率、千粒质量是耐盐水稻品种(系)中降幅最小的, 说明其受盐胁迫的影

响较小,表现出了较强的耐盐性。在 1.5‰~4.5‰盐浓度胁迫下,与对照相比,各水稻品种(系)的各项产量构成因素的下降幅度不同,其中下降最明显的是单穴理论产量;杂交水稻品种(系)(1146S/R889、1146S/R2803)的单穴理论产量的下降幅度小于常规水稻品种(系)(R889、R2803)的,R2803 的单穴理论产量的降幅最大,1146S/R889 的单株理论产量的降幅最小,在 1.5‰~4.5‰盐浓度处理下降幅为 17.14%~75.59%。

综合来看,1146S/R889 各生长发育指标、产量及其构成因素在盐胁迫下降幅最小,耐盐性最强。

参考文献:

- [1] 周振玲,林兵,周群,等.耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应及其生理机制[J].中国水稻科学,2023,37(2):153-165.
- [2] 袁隆平.耐盐碱水稻遗传与栽培学[M].济南:山东科学技术出版社,2022.
- [3] KOYRO H W. Special issue on learning from extremophytes: xerophytes and halophytes[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2014, 26(12): 1-2.
- [4] 王彩芬,刘冬成,马晓玲.水稻耐盐基因 *SKCI* 特异性 CAPS 标记的开发与验证[J].分子植物育种,2015,13(11):2437-2440.
- [5] 颜佳倩.盐胁迫下耐盐性不同水稻品种的农艺与生理特性[D].扬州:扬州大学,2022.
- [6] 刘凯,朱静雯,宛柏杰,等.水稻耐盐性分子遗传研究进展[J].植物遗传资源学报,2021,22(4):881-889.
- [7] QIN H, LI Y X, HUANG R F. Advances and challenges in the breeding of salt-tolerant rice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(21): 8385.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 董海凤,王义霞,孙运杰.水稻盐胁迫的研究进展[J].生物灾害科学,2012(4):439-442.
- [11] 梁正伟,杨福,王志春,等.盐碱胁迫对水稻主要生育性状的影响[J].生态环境,2004,13(1):43-46.
- [12] 魏征,邹燕,陈澎军,等.不同类型水稻芽期的耐盐性差异[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(3):254-261.
- [13] 蒋小欢.再生稻镉积累分配特性及其品种和节位间差异[D].长沙:湖南农业大学,2021.
- [14] 张洪程,郭保卫,陈厚存,等.水稻有序摆、抛栽的生理生态特征及超高产形成机制[J].中国农业科学,2013,46(3):463-475.
- [15] 黄锦文,吴珈谊,陈鸿飞,等.头季稻氮肥运筹对再生稻根际机能及产量的影响[J].中国水稻科学,2021,35(4):383-395.
- [16] 杨经略,卢永兴,裴兰英.春小麦初生根与生长发育关系的研究[J].华北农学报,1988,3(3):13-18.
- [17] 荆培培.水稻品种耐盐性及其生理特征的研究[D].扬州:扬州大学,2018.
- [18] 刘晓龙,徐晨,徐克章,等.盐胁迫对水稻叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].作物杂志,2014(2):88-92.
- [19] 冷春旭,郑福余,赵北平,等.水稻耐碱性研究进展[J].生物技术通报,2020,36(11):103-111.
- [20] 程广有,许文会,黄永秀.植物耐盐碱性的研究(一):水稻耐盐性与耐碱性相关分析[J].吉林林学院学报,1996(4):214-217.
- [21] 张瑞珍.盐碱胁迫对水稻生理及产量的影响[D].长春:吉林农业大学,2003.
- [22] 周玲艳,谢琦,秦华明,等. NaCl 处理对不同水稻品种生长和生理特性的影响[J].广东农业科学,2012,39(2):18-20.
- [23] 惠菲,梁启全,於丽华,等. NaCl 和 KCl 胁迫对甜菜幼苗生长的影响[J].中国糖料,2012,34(3):30-32.
- [24] 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.
- [25] FITTER A. Characteristics and functions of root systems[M]//WAISEL Y, ESHEL A, KAFKAFI U. Plant Roots, the Hidden Half. New York: Marcel Dekker Inc., 2002: 15-32.
- [26] FITTER A H. Roots as dynamic systems: the developmental ecology of roots and root systems[M]//PRESS M C, SCHOLLS J D, BARKER M G. Plant Physiological Ecology. London: Wiley-Blackwell Scientific, 1999: 115-131.
- [27] INUKAI Y, ASHIKARI M, KITANO H. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice[J]. Plant and Cell Physiology, 2004, 45: 17.
- [28] 陈晨,龚海青,张敬智,等.水稻根系形态与氮素吸收累积的相关性分析[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):333-341.
- [29] 顾逸彪,颜佳倩,薛张逸,等.耐盐性不同水稻品种根系对盐胁迫的响应差异及其机理研究[J].作物杂志,2023(2):67-76.

责任编辑:毛友纯

英文编辑:柳正