

盐逆境对水稻产量、光合特性及品质的影响

周根友¹ 翟彩娇¹ 邓先亮² 张蛟¹ 张振良¹ 戴其根^{2,*} 崔士友^{1,*}

(¹江苏沿江地区农业科学研究所/南通市耐盐植物公共技术服务平台, 江苏 南通 226541; ²扬州大学 农学院/江苏省现代粮食作物生产协同创新中心, 江苏 扬州 225009; *通讯联系人, E-mail: cuisy198@163.com; qgdai@yzu.edu.cn)

Performance of Yield, Photosynthesis and Grain Quality of japonica Rice Cultivars Under Salinity Stress in Micro-plots

ZHOU Genyou¹, ZHAI Caijiao¹, DENG Xianliang², ZHANG Jiao¹, ZHANG Zhenliang¹, DAI Qigeng^{2,*}, CUI Shiyu^{1,*}

(¹Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences/Nantong Public Technology Service Platform of Salt-tolerant Plants, Nantong 226541, China;

²Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/College of Agronomy, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

*Corresponding author, E-mail: cuisy198@163.cn, qgdai@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】Rice growing is one of the widely utilized technologies for desalting, improving and exploiting tidal flat in Jiangsu coastal beach. The objective is to reveal the effects of salinity stress on rice yield, photosynthetic parameters, grain quality and starch viscosity, providing a reference and laying a theoretical basis for developing rice production in Jiangsu coastal beach. 【Method】Four japonica rice varieties with better salt tolerance, Tongjing 981, Yandao 12, Yandao 10 and Nanjing 5055 were used to investigate the yield and its components, photosynthetic parameters, rice quality and starch viscosity under salinity stress (S_1 , 1.112 dS/m for $EC_{1:5}$) and no salinity stress (S_0 , 0.207 dS/m, control). 【Result】Compared with the control, rice yield decreased significantly under salinity stress, was only 40.5% of that of the control, panicle number per unit area had no significant difference, while grain number per panicle and 1000-grain weight also decreased significantly. The photosynthetic rate and intercellular CO_2 concentration decreased significantly, but stomatal induction and transpiration rate had no significant difference between S_0 and S_1 . The processing quality of rice, together with amylose content decreased significantly, the appearance quality almost remained unchanged, while protein content increased significantly. The peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, breakdown value, consistence value showed no significant changes, the setback value and pasting temperature increased significantly. 【Conclusion】Salinity stress had adverse effects on yield, photosynthetic parameters and grain quality of rice. During the critical period of salt stress on yield and quality, such as booting stage and filling stage, measures should be taken to alleviate salt stress.

Key words: salinity stress; rice variety; yield; photosynthetic parameters; grain quality; starch viscosity

摘 要: 【目的】江苏沿海滩涂种植水稻是促进盐土脱盐改良和开发利用滩涂的主要技术之一, 研究盐逆境对水稻产量、光合特性和稻米品质的影响, 可为发展滩涂种稻提供参考和理论依据。【方法】以耐盐性较好的通梗 981、盐稻 12、盐稻 10 号和南梗 5055 等 4 个粳稻品种为材料, 设置非盐逆境(S_0 , 电导率 0.207 dS/m)和逆境(S_1 , 电导率 1.112 dS/m)2 个处理, 分别测定产量及其构成因素、光合参数、稻米品质和淀粉黏滞特性。【结果】与非盐逆境相比, 盐逆境下水稻产量显著下降, 仅为非逆境的 40.5%, 单位面积穗数差异不显著, 每穗粒数和千粒重显著减少; 光合速率、胞间 CO_2 浓度显著下降, 而气孔导度和蒸腾速率差异不显著; 稻米加工品质显著下降, 外观品质变化不大, 直链淀粉含量显著下降, 蛋白质含量显著增加; 峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值和回复值均未发生显著的变化, 消减值和起始糊化温度显著增高。【结论】盐逆境对水稻产量、光合参数、稻米品质等均有不利的影响, 可在盐逆境对产量、品质影响的关键时期孕穗期和灌浆结实期采取措施缓解盐逆境的危害。

关键词: 盐逆境; 水稻品种; 产量; 光合参数; 稻米品质; 淀粉黏滞性

中图分类号: Q945.78; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)02-0146-09

收稿日期: 2017-06-09; 修改稿收到日期: 2017-07-27。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAD01B03); 江苏省重点研发计划资助项目(现代农业)(BE2015337, BE2016370)。

江苏省沿海滩涂面积占全国沿海滩涂的 1/4 以上^[1], 是非常重要的后备土地资源, 也是江苏省社会经济可持续发展的主要保证。水稻是我国三大粮食作物之一, 其种植面积占粮食作物总面积的 27.1% 左右, 产量占全国粮食年总产量的 34.4%^[2], 因而对保证粮食安全至关重要。开发利用盐碱地发展水稻生产有利于进一步加强我国的粮食生产。

目前在水稻的耐盐机理方面已有较多的研究^[3], 有关滩涂水稻的研究大多数集中在耐盐水稻种质资源或品种的筛选方面^[4-10], 盐分逆境^[11-12]和不同水肥管理^[13]对水稻生长、产量的影响也有涉及, 而对盐逆境对稻米品质的影响方面却少有报道^[14]。本研究选择耐盐性较好、在江苏省种植面积较大的 4 个品种, 利用盐池设施研究盐分逆境对水稻产量和品质的影响, 以期对江苏省滩涂水稻的大面积种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用耐盐性较好的粳稻品种通粳 981(V₁)、盐稻 12(V₂)、盐稻 10 号(V₃)和南粳 5055(V₄)进行试验。盐稻 10 号为迟熟中粳糯稻, 盐稻 12 为迟熟中粳稻, 通粳 981 和南粳 5055 为早熟晚粳。其中, 南粳 5055 含半糯性基因。试验材料经 2013—2014 年滩涂 (1.5~2.0 g/kg) 实地耐盐性鉴定筛选而得, 在产量、品质、熟期等方面存在较大差异。

1.2 试验设计

盐池设施采用钢筋混凝土建造, 池内长 5 m、内宽 1.8 m、深 1 m。其中 5 个池设置盐分梯度(0、1.5、3.0、4.5 和 6.0 g/kg)。本研究使用其中的 2 个池, 理论含盐量分别为 0 和 3 g/kg。试验采用二因素裂区设计, 主区为盐分, 设 2 个处理, NaCl 含量分别为 0 g/kg(S₀)、3 g/kg(S₁), 副区为品种(V₁~V₄)。供试材料经催芽后于 2015 年 5 月 20 日播种, 苗床期管理同常规。30 d 苗龄后于 6 月 20 日移栽于盐池。行株距为 25 cm×15 cm, 每穴栽 3 苗, 每池移栽 20 行, 单行小区, 共设 5 个重复, 其中 1 个重复供取样及光合作用相关参数的测定, 4 个重复供测产。区组随机排列。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 土壤盐分含量测定

采集的土壤样品室内自然风干、磨碎、过 1 mm 筛备用。取风干土样 10 g, 以土水比 1:5 的比例浸提土壤, 搅拌 3 次, 每次 3 min, 静置 30 min 后,

取上清液测定土壤浸提液电导率 EC_{1:5}。

1.3.2 光合性状的测定

在水稻抽穗后的晴朗天气下, 每个小区选取 3 株有代表性的植株于上午 9:00—11:00, 采用 ECA-PB0402 光合测定仪(北京益康农科技发展有限公司)测定水稻剑叶中部的光合参数, 即光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度。测定时光强为(1100±60) μmol/cm² S, 温度为(25±1)℃, 空气中 CO₂ 浓度为(270±10) μmol/mol。

1.3.3 产量性状的测定

完熟期各小区选取连续的 5 穴测定有效穗数, 其中, 接近平均穗数的 3 穴水稻进行考种, 测定每穗实粒数、千粒重。小区实收测产。

1.3.4 品质性状的测定

水稻收获脱粒、晒干, 室内贮藏 3 个月后, 用 NP-4350 型风选机风选, 参照中华人民共和国国家标准《GB/T17891—1999 优质稻谷》测定糙米率、精米率、整精米率、长宽比、垩白米率、垩白度等。采用近红外谷物分析仪(Infrared 1241 Grain Analyzer, 瑞典 Foss Tecator 公司)测定精米的蛋白质含量和直链淀粉含量。

稻米淀粉黏滞特性采用 Super 3 型 RVA(Rapid Viscosity Analyzer, 澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司)快速测定淀粉谱黏滞特性, 用 TCW(Thermal Cycle for Windows)配套软件进行分析。按照美国谷物化学家协会(AACC)规程(1995—61—02)和澳大利亚皇家化学会(RACI)标准方法, 当米粉含水量为 12% 时, 样品量为 3.0000 g, 蒸馏水为 25.0000 g。在搅拌过程中, 罐内温度变化如下: 50℃ 下保持 1 min, 以 11.84℃/min 的速度上升到 95℃(3.8 min)并保持 2.5 min, 再以 11.84℃/min 的速度下降到 50℃ 并保持 1.4 min。搅拌器的转动速度在起始 10 s 内为 960 r/min, 之后保持在 160 r/min。RVA 谱特征值包括峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值(峰值黏度—热浆黏度)、消减值(最终黏度—峰值黏度)、回复值(最终黏度—热浆黏度)和起始糊化温度等, 前 6 个特征值的单位是 mPa·s。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行试验数据处理和分析, 采用 Duncan 新复极差法(LSR)进行处理间显著性检验, 显著水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 盐逆境对水稻产量及其构成因素的影响

试验前取土样测定的非盐逆境微区和盐逆境

表 1 盐逆境与非盐逆境下水稻产量及其构成因子的表现

Table 1. Effects of salt stress on yield and its components of four japonica varieties.

盐逆境	品种	产量	单位面积穗数	每穗粒数	千粒重
Salt stress	Variety	Grain yield/(kg m ⁻²)	Effective panicle number per m ²	Grain number per panicle	1000-grain weight/g
S ₀	V ₁	1.316±0.153 a	275.1±26.7 b	165.4±8.6 a	28.9±0.6 a
	V ₂	1.127±0.135 a	343.3±15.1 a	128.4±10.6 b	25.1±0.2 b
	V ₃	1.188±0.314 a	340.3±12.0 a	126.2±12.8 b	24.8±0.3 b
	V ₄	0.931±0.083 b	332.7±10.3 a	108.1±7.2 b	25.8±0.1 b
	平均 Average	1.140	322.8	132.0	26.2
S ₁	V ₁	0.523±0.126 a	281.2±12.9 c	76.0±9.1 a	25.1±.5 a
	V ₂	0.481±0.099 a	327.7±14.0 a	62.6±11.0 a	22.7±2.4 b
	V ₃	0.401±0.068 a	319.7±4.6 ab	61.8±9.4 a	20.3±0.2 c
	V ₄	0.443±0.037 a	305.7±7.6 b	68.6±5.4 a	21.2±0.8 bc
平均 Average		0.462	308.6	67.2	22.3
变异来源 Source of variation					
F 值	S	103.90**	7.39	293.06**	62.90**
F value	V	5.01**	31.35**	23.08**	33.69**
	S×V	2.87	2.40	11.61**	2.64

不同字母表示品种间差异显著($P<0.05$); *, **分别表示差异达显著或极显著水平($n=3$, 新复极差法)。S₀—含盐量 0g/kg; S₁—含盐量 3g/kg; V₁—通梗 981; V₂—盐梗 12; V₃—盐稻 10 号; V₄—南梗 5055。下同。

Different lowercase letters indicate statistical significance($P<0.05$) among various cultivars. *, **denote significant difference at 0.01 probability level($n=3$, NMRM). S₀, No salinity stress, 0g/kg; S₁, Salinity stress, 3g/kg; V₁, Tongjing 981; V₂, Yanjing 12; V₃, Yandao 10; V₄, Nanjing 5055. The same as below.

微区电导率 EC_{1:5} 分别为 0.207 和 1.112 dS/m, 接近预先设置的盐分标准。盐逆境(S₁)和非盐逆境(S₀)下的水稻产量及其构成因素列于表 1, 结果表明, 盐逆境下水稻产量显著下降, 仅为非盐逆境的 40.5%; 产量构成因素方面, 单位面积穗数略有下降, 差异接近显著水平; 单穗粒数和千粒重则表现为显著下降, 其中单穗粒数降幅达 49.1%, 为减产的主导因素。就不同条件下各品种的表现而言, 非盐逆境下通梗 981、盐稻 12 和盐稻 10 号的籽粒产量显著高于南梗 5055, 而在盐逆境下 4 个品种间的产量差异均未达显著水平。如用盐逆境下产量与非盐逆境下产量之比表征品种的耐盐性, 则 4 个品种耐盐性的排序为南梗 5055(0.479)> 盐稻 12(0.424)> 通梗 981(0.405)> 盐稻 10 号(0.343), 其中南梗 5055 与盐稻 10 号差异达显著水平($P<0.05$)。就单位面积穗数而言, 在非盐逆境下, 盐稻 12 和盐稻 10 号显著高于南梗 5055 和通梗 981, 通梗 981 最低; 在盐逆境下, 盐稻 12、盐稻 10 号和南梗 5055 较高, 相互间差异不显著, 显著高于通梗 981。每穗粒数在非盐逆境下以通梗 981 最高, 达每穗 165.4 粒, 显著高于其他 3 个品种; 其他 3 个品种差异不显著, 南梗 5055 最低; 在盐逆境下 4 个品种间差异均不显著, 通梗 981 较高, 盐稻 10 号较低。在非盐逆境下通梗 981 千粒重最高, 达 28.9 g, 显著高于其他 3 个品种; 其他 3 个品种差异不显著, 盐稻 10 号最低;

盐逆境下也是通梗 981 最高, 为 25.1 g, 显著高于其他 3 个品种; 盐稻 12 次之, 显著高于南梗 5055 和盐稻 10 号; 盐稻 10 号最低, 与南梗 5055 差异不显著。

2.2 盐逆境对光合特性的影响

灌浆期测定剑叶的光合参数, 发现光合效率和胞间 CO₂ 浓度在盐逆境下均显著下降, 而气孔导度、蒸腾速率盐逆境与非盐逆境下的差异均未达显著水平(表 2)。其中, 光合速率下降 35.5%, 胞间 CO₂ 浓度下降 27.3%。无论是盐逆境还是非盐逆境 4 个光合特征参数在 4 个品种间的差异均未达到显著水平, 说明光合参数受环境的影响很大。

2.3 盐逆境对稻米主要品质性状的影响

除外观品质(长宽比、垩白米率和垩白度)外, 盐逆境对稻米主要品质性状均存在显著的影响(表 3)。与非逆境相比, 盐逆境下加工品质中的糙米率、精米率和整精米率均显著下降。盐逆境对直链淀粉含量具有明显的作用, 盐逆境下的直链淀粉含量较非逆境下的直链淀粉含量显著下降; 而蛋白质含量正好相反, 盐逆境促进稻米蛋白质的积累, 差异达显著水平。

就品种而言, 加工品质方面以通梗 981 相对较差, 在非盐逆境下, 糙米率显著低于盐稻 10 号, 与盐稻 12、南梗 5055 差异不显著, 精米率显著低于其他品种, 整精米率与其他品种差异不显著; 在盐逆

表 2 盐逆境对水稻光合特性的影响

Table 2. Influence of salt stress on photosynthetic characteristics of the four japonica varieties.

盐逆境	品种	光合速率	气孔导度	胞间 CO ₂ 浓度	蒸腾速率
Salt stress	Variety	Photosynthetic rate /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance /($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	CO ₂ concentration /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Evaporation rate /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
S ₀	V ₁	28.3±0.8 a	11.5±9.2 a	361.0±20.4 a	1.2±1.0 a
	V ₂	29.5±2.5 a	19.7±8.7 a	345.3±91.6 a	1.9±0.8 a
	V ₃	27.2±2.0 a	23.3±20.4 a	364.0±27.3 a	2.4±2.1 a
	V ₄	29.7±5.2 a	27.2±21.4 a	355.7±40.2 a	2.8±2.1 a
平均 Average		28.7	20.4	356.5	2.1
S ₁	V ₁	18.6±4.1 a	25.5±11.6 a	272.5±21.0 a	2.9±1.3 a
	V ₂	19.3±5.3 a	40.1±33.1 a	271.8±35.4 a	4.5±3.4 a
	V ₃	20.6±3.3 a	44.7±28.1 a	222.6±29.8 a	4.7±2.9 a
	V ₄	16.6±4.6 a	29.1±214.0 a	270.4±27.0 a	3.0±1.3 a
平均 Average		18.8	34.8	259.3	3.8
变异来源 Source of variation					
F 值	S	168.78**	2.92	46.10**	3.99
F value	V	0.14	0.87	0.52	0.81
	S×V	0.78	0.40	1.12	0.57

表3 盐逆境对水稻主要米质指标的影响

Table 3. Effects of salt stress on the main grain quality of the four japonica rice varieties.

盐逆境	品种	糙米率	精米率	整精米率	长宽比	垩白米率	垩白度	蛋白质含量	直链淀粉含量
Salt stress	Variety	Brown rice /%	Total milled rice /%	Head rice /%	Ratio of length to width	Chalky grain rate/%	Chalkiness degree/%	Protein content /%	Amylose content /%
S ₀	V ₁	84.35±0.38 b	72.24±0.68 c	62.55±5.26 a	1.74±0.03 a	30.10±1.89 c	9.53±0.66 b	8.64±0.37 b	14.25±0.70 a
	V ₂	84.26±0.17 b	75.40±0.38 b	67.71±6.18 a	1.71±0.01 a	19.76±1.75 d	5.40±0.14 c	10.04±0.08 a	14.99±0.60 a
	V ₃	85.76±0.42 a	77.24±0.66 a	67.73±1.64 a	1.62±0.03 b	100.00±0.00 a	60.31±0.97 a	8.56±0.09 b	1.90±0.96 c
	V ₄	84.64±0.19 ab	75.41±0.43 b	62.06±5.66 a	1.49±0.02 c	48.35±3.55 b	12.69±1.17 b	9.75±0.09 a	8.94±0.39 b
平均 Average		84.75	75.07	54.38	16.40	49.55	21.95	9.24	10.02
S ₁	V ₁	83.64±0.75 a	73.55±1.09 b	42.09±2.36 b	1.72±0.06 a	17.81±2.78 c	5.56±1.28 c	10.05±0.54 c	11.62±1.24 a
	V ₂	83.95±0.92 a	75.51±1.14 a	63.28±3.05 a	1.65±0.04 b	17.41±3.41 c	3.70±0.58 c	11.20±0.22 b	12.85±0.26 a
	V ₃	83.27±0.76 a	74.37±0.83 ab	56.88±5.90 a	1.61±0.03 b	100.00±0.00 a	69.74±0.72 a	12.45±0.66 a	2.31±0.78 c
	V ₄	83.91±0.25 a	74.51±0.75 ab	55.27±3.64 a	1.51±0.04 c	72.59±7.54 b	17.33±6.26 b	10.97±0.22 b	7.85±0.70 b
平均 Average		83.69	74.49	54.38	16.20	51.95	24.08	11.17	8.66
变异来源 Source of variation									
F 值	S	58.86**	12.91*	95.11**	1.70	2.33	4.20	199.06**	42.94**
F value	V	1.16	17.86**	11.87**	59.53**	1227.52**	1310.12**	26.96**	357.43**
	S×V	5.31**	8.23**	4.64*	2.04	51.78**	15.24**	33.99**	5.55**

境下糙米率与其他品种差异不显著, 精米率显著低于盐稻12, 与盐稻10号、南粳5055差异不显著, 而整精米率显著低于其他3个品种。外观品质方面以盐稻12较好, 通粳981次之, 南粳5055和盐稻10号较差。盐逆境对垩白米率、垩白度的影响因品种不同而存在差异, 盐逆境下通粳981和盐稻12的垩白米率和垩白度较非盐逆境下降, 差异达显著或接近显著水平; 而南粳5055和盐稻10号则表现为增加, 差异达显著或接近显著水平。通粳981和盐稻12的直链淀粉含量较高, 两者的差异在非盐逆境和盐逆

境下均不显著, 但显著高于含半糯性基因的南粳5055和糯稻品种盐稻10号。就蛋白质含量而言, 通粳981在非盐逆境下与盐逆境下均为最低, 非盐逆境下以盐稻12和南粳5055较高, 盐逆境下以盐稻10号最高, 显著高于其他3个品种。

2.4 盐逆境对稻米淀粉 RVA 谱特征的影响

现有的研究表明稻米淀粉RVA谱特征值与稻米蒸煮食味品质密切相关, 米饭质地好的优质稻米一般表现为峰值黏度高、崩解值大、消减值小。本研究中, 与非盐逆境相比, 盐逆境条件下峰值黏度、

表4 盐逆境对稻米淀粉黏滞特性的影响

Table 4. Influences of salt stress on RVA profile characteristics of four japonica rice genotypes.

盐逆境	品种	峰值黏度	热浆黏度	最终黏度	崩解值	消减值	回复值	起始糊化温度
Salt stress	Variety	Peak viscosity	Trough viscosity	Final viscosity	Breakdown	Setback	Consistence	Pasting temperature
		/(mPa s)	/(mPa s)	/(mPa s)	/(mPa s)	/(mPa s)	/(mPa s)	/°C
S ₀	V ₁	3583.1±262.0 a	1575.4±126.9 b	2745.7±153.5 b	2007.7±143.0 a	-837.4±126.5 bc	1170.4±28.9 b	78.4±0.0 a
	V ₂	3126.5±120.2 b	1849.0±98.9 a	3129.4±105.6 a	1277.5±62.0 b	2.9±46.6 a	1280.4±17.1 a	73.1±0.7 a
	V ₃	1473.3±362.5 d	383.9±135.7 d	506.1±218.5 d	1089.4±344.1 b	-969.6±320.8 c	122.2±91.0 d	69.1±0.6 a
	V ₄	2603.6±117.6 c	1352.5±54.7 c	1979.4±72.9 c	1251.1±89.5 b	-624.3±89.1 b	626.9±28.2 c	71.5±0.4 a
	平均 Average	2696.6	1290.2	2090.1	1406.4	-608.1	800.0	73.0
S ₁	V ₁	3563.5±295.9 a	1818.5±136.6 b	2008.3±124.9 b	1745.0±171.5 a	-555.2±184.3 b	1189.7±13.6 b	79.8±0.4 a
	V ₂	3153.0±30.5 b	2045.7±84.6 a	3297.0±73.1 a	1107.3±59.8 b	144.0±47.9 a	1251.3±12.0 a	86.0±0.3 a
	V ₃	1306.0±42.9 d	499.7±49.6 d	672.0±51.4 d	806.2±18.5 c	-634.0±18.9 b	172.2±3.8 d	70.1±0.4 b
	V ₄	2689.7±6.2 c	1415.5±37.7 c	2121.7±30.8 c	1254.2±42.2 b	-547.7±48.2 b	706.2±9.9 c	72.8±0.5 b
	平均 Average	2678.1	1444.8	2024.7	1228.2	-398.2	829.8	77.2
变异来源 Source of variation								
F 值	S	0.03	7.51	7.95	7.00	12.56*	8.89	345.31**
F value	V	241.52**	427.54**	940.67**	59.42**	61.07**	1627.48**	1099.22**
	S×V	0.79	1.60	0.49	1.62	1.43	3.25*	379.68**

热浆黏度、最终黏度、崩解值、回复值均未发生显著的变化(表4),而消减值、起始糊化温度则显著增加。这些结果表明,盐逆境对稻米蒸煮食味品质存在一定程度的不利影响。

就品种而言,无论是盐逆境还是非盐逆境,盐稻12由于其具有相对较低的崩解值和较高的消减值,稻米蒸煮食味品质一般。盐稻10号为糯稻品种,直链淀粉含量低,在盐逆境和非盐逆境下消减值均为最低,不过崩解值也较其他品种低。通粳981的峰值黏度和崩解值在盐逆境和非盐逆境下均最大,显著高于其他品种,消减值较低,显著低于盐稻12,与盐稻10号、南粳5055无显著差异。因此,该品种的蒸煮食味品质较好。南粳5055的消减值在盐逆境和非盐逆境下均最低,在盐逆境下与盐稻10号、通粳981间无显著差异,在非盐逆境下高于通粳981和盐稻10号,但与通粳981无显著差异,与盐稻10号差异达显著水平;崩解值均显著低于通粳981,与盐稻12间差异不显著。

2.5 直链淀粉、蛋白质含量与稻米淀粉 RVA 谱特征的关系

已有的研究认为稻米的直链淀粉含量是影响稻米蒸煮和食味品质的主要因子^[14-16],而蛋白质含量是重要的营养品质性状,但过高的蛋白质含量往往与不利的食味品质关联^[17]。相关分析表明在非盐逆境下直链淀粉含量与蛋白质含量正相关但相关不显著($r=0.438$, $P>0.05$),而在盐逆境下两者为极显著负相关($r=-0.728$, $P<0.01$)。

直链淀粉、蛋白质含量与稻米淀粉RVA谱特征间的相关分析结果列于表5。在非盐逆境下,直链淀粉含量与峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和回复值间极显著正相关,与崩解值、消减值间显著正相关,与起始糊化温度间微弱负相关;而在盐逆境下,直链淀粉含量与RVA谱特征值间均为显著或极显著正相关。就蛋白质含量而言,在非盐逆境下与热浆黏度、最终黏度和消减值间为显著或极显著正相关,与其他4个特征值间存在一定程度的正或负相关,但相关不显著;在盐逆境下与峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值和回复值均为极显著的负相关,与消减值间无相关,与起始糊化温度间为微弱的负相关。因此,盐逆境改变了蛋白质含量与稻米淀粉RVA谱特征值间的相关性,其中与峰值黏度、崩解值间的负相关对稻米蒸煮和食味品质产生不利的影响。

3 讨论

盐逆境对作物影响的研究大量集中在产量方面,对作物的光合生理以及品质方面也有一些涉及。有关盐逆境对作物品质的影响,园艺作物研究得较多^[18],水稻等大田作物研究得较少。本研究选用产量、品质、熟期差异较大的4个粳稻品种,利用盐池设施研究了盐逆境对水稻产量、光合参数以及稻米品质的影响,结果表明盐逆境对所研究的大多数性状均有不利的影响。

表 5 盐逆境与非盐逆境下直链淀粉、蛋白质含量与稻米淀粉 RVA 谱特征的相关
Table 5. Relationships of amylose content and protein content with RVA profile characteristics under salt stress and normal conditions.

淀粉 RVA 谱特征 RVA profile characteristics	非盐逆境 Normal condition		盐逆境 Salt stress	
	直链淀粉含量 Amylose content	蛋白质含量 Protein content	直链淀粉含量 Amylose content	蛋白质含量 Protein content
峰值黏度 Peak viscosity	0.917**	0.264	0.929**	-0.866**
热浆黏度 Trough viscosity	0.954**	0.615*	0.972**	-0.724**
最终黏度 Final viscosity	0.980**	0.535*	0.982**	-0.733**
崩解值 Breakdown	0.540*	-0.330	0.640*	-0.897**
消减值 Setback	0.611*	0.809**	0.623*	-0.022
回复值 Consistence	0.984**	0.423	0.982**	-0.728**
起始糊化温度 Pasting temperature	-0.172	-0.468	0.903**	-0.464

水稻产量是产量构成因素共同作用的结果, 取决于光合物质生产能力以及同化物的运转和分配。李红宇等^[19]研究表明, 在混合盐碱胁迫下, 产量的下降与穗数和穗重均有关, 其中穗重的下降是主要原因。杨福等^[20]认为盐碱环境对水稻单位面积的有效穗数影响不大, 但每穗实粒数减少, 千粒重下降, 从而降低了水稻的产量。也有研究表明盐碱胁迫下水稻减产主要是由于每穴穗数和千粒重下降^[21]。本研究结果表明, 盐逆境下单位面积穗数变化不大, 而每穗粒数和千粒重显著下降, 其中每穗粒数对减产起主导作用。这与前人的研究^[19-20]基本一致。由此可以推测盐逆境对水稻产量的影响主要发生在孕穗期, 这一时期主要影响每穗粒数; 其次发生在灌浆期, 此时主要影响千粒重。

提高水稻光合生产力和光能利用率是提高水稻产量的根本途径, 环境因素也对水稻同化物的光合生产产生影响。已有的研究均认为盐逆境对水稻光合特性存在显著的影响。刘晓龙等^[22]利用耐盐(九稻13号)和盐敏感(吉粳83号)的2个粳稻品种, 研究了盐胁迫对孕穗初期水稻叶片光合气体交换参数的影响, 结果表明盐胁迫使耐盐和盐敏水稻品种的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、表观叶肉导度(AMC)均显著下降, 耐盐品种的胞间 CO_2 浓度(C_i)在各浓度盐胁迫下差异均未达到显著水平, 盐敏感品种在低盐浓度(40 mmol/L)胁迫下 C_i 变化不显著, 在高盐浓度(80 mmol/L和120 mmol/L)下 C_i 显著下降。王仁雷等^[23]利用耐盐(Pokkali)和盐敏感(Petal)的2个籼稻品种, 研究盐胁迫对水稻光合特性的影响, 随着NaCl胁迫时间和浓度的增加, 供试品种的 P_n 下降, G_s 减小, C_i 先降低后升高, 而气孔限制值(L_s)则相反。盐胁迫下水稻净光合速率降低的原因, 短时间内以

气孔限制因素为主, 长时间时以非气孔限制因素为主。徐晨等^[24]利用2个耐盐(九稻13号、长白9号)、2个盐敏感(吉粳88号、吉农大19号)粳稻品种, 研究盐胁迫对水稻光合特性等性状的影响。盐胁迫条件下, 水稻叶片的 P_n 、 G_s 、蒸腾速率(T_r)和AMC均呈不同程度的下降趋势。盐胁迫条件下, 耐盐水稻品种和盐敏感型水稻品种的 C_i 变化并不明显, L_s 均较低, 品种间差异也不显著, 而AMC显著下降, 由此推测盐胁迫条件下 P_n 的下降并非因为气孔的限制, 而与RuBPCase活性的下降有关。本研究表明盐逆境下 P_n 和 C_i 显著下降, 而 G_s 和 T_r 未检测到显著的变化。原因可能是前人的研究^[22-24]是利用营养液水培, 而本研究是利用盐池设施土培。

盐碱逆境对稻米加工品质的影响方面, Desamero等^[25]对来自盐逆境(Bicol和Cagayan)和非盐逆境(Nueva Ecija)生长的19个水稻基因型的稻米品质进行了分析比较, 结果表明来自Cagayan的糙米率、精米率和整精米率高于Nueva Ecija; 而Bicol的糙米率与Nueva Ecija相当, 但精米率和整精米率显著高于后者。而Surekha等^[26]利用耐性不同的19个水稻基因型研究了盐、碱逆境对水稻品质的影响, 认为整精米率在盐逆境下下降, 不受碱逆境的影响。本研究结果表明, 与非盐逆境相比, 盐逆境下糙米率、精米率和整精米率均显著下降, 这与Desamero等^[25]的结果不同, 而与Surekha等^[26]的类似。

对稻米外观品质的影响方面, Desamero 等^[25]认为盐逆境下的垩白米率高于非盐逆境, Surekha等^[26]认为耐盐基因型的籽粒长宽比即使在低盐低碱下也显著下降, 半耐基因型在高盐下才显著降低, 盐敏感基因型对研究所涉及的逆境均无显著响应。本研究结果与此有些不同, 盐逆境对籽粒长宽比无

显著影响,而对垩白米率、垩白度的影响因品种不同而存在差异,盐稻10号和南粳5055盐逆境下的垩白米率或垩白度高于非盐逆境,而通粳981和盐稻12恰好相反。

直链淀粉含量和蛋白质含量与稻米蒸煮和食味品质密切相关^[14-17]。Desamero等^[25]认为盐逆境降低了直链淀粉含量。Surekha等^[26]的研究结果表明,耐盐和半耐盐基因型的直链淀粉即使在低盐低碱下也显著下降,而盐敏感基因型仅在高盐条件下下降。李红宇等^[19]认为盐碱胁迫下蛋白质含量显著增加。余为仆^[27]认为低浓度盐胁迫对稻米品质的影响较小,但较高浓度的盐分胁迫条件下稻米品质劣化明显。土壤盐分含量在0.9 g/kg以上时,盐胁迫处理显著降低稻米的直链淀粉含量,提高蛋白质含量。其他环境胁迫(高温、干旱)研究也获得了类似的结果。高焕晔等^[27]认为灌浆结实期高温、干旱及其复合胁迫均会导致稻米直链淀粉含量下降和蛋白质含量增加,且复合胁迫的效应均超过单一胁迫的效应。张桂莲等^[28]也认为花后高温胁迫条件下,直链淀粉含量降低,蛋白质含量增加。本研究结果表明盐逆境减少了稻米直链淀粉含量的同时显著增加了蛋白质含量,进而对稻米的蒸煮和食味品质产生不利的影响。

有关盐逆境对稻米淀粉RVA谱特征值的影响方面目前报道不多。余为仆^[27]的研究结果表明,土壤盐分含量在0.9 g/kg以上时,盐胁迫处理的崩解值和最高黏度较低,消减值较高。本研究结果与此类似,与非盐逆境相比,盐逆境显著提高了消减值,但最高黏度、崩解值等RVA谱特征值没有显著变化。

本研究表明盐逆境对水稻产量、品质的大多数性状均产生不利的影响,可在孕穗期和灌浆结实期等关键影响期采取措施缓解盐逆境的危害程度。已有研究表明植物生长调节物质如赤霉素^[30]、多胺^[31]等在水稻等作物应答盐胁迫等非生物逆境中具有一定的作用,探讨人为施用这些物质对水稻耐盐性以及产量和稻米品质的影响具有重要的意义。

参考文献:

[1] 崔士友, 张蛟蛟. 碳管理: 盐土治理的一种新思路. 农学报, 2015, 5(12): 44-50.

- Cui S Y, Zhang J J. Carbon management: A new approach to the governance of saline soils. *J Agric*, 2015, 5(12): 44-50. (in Chinese with English abstract)
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)
- [3] Horie T, Karahara I, Katsuhara M. Salinity tolerance mechanisms in glycophytes: An overview with the central focus on rice plants. *Rice*, 2012, 5(1): 11.
- [4] Zeng L, Shannon M C, Grieve C M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters. *Euphytica*, 2002, 127(2): 235-245.
- [5] Zeng L, Poss J A, Wilson C, Ase D, Gregorio G B, Grieve C M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by physiological characters. *Euphytica*, 2003, 129(3): 281-292.
- [6] Heenan D P, Lewin L G, McCaffery D W. Salinity tolerance in rice varieties at different growth stages. *Australian J Exp Agric*, 1988, 28(3): 343-349.
- [7] Xie J H, Zapataarias F J, Shen M, Afza R. Salinity tolerant performance and genetic diversity of four rice varieties. *Euphytica*, 2000, 116(2): 105-110.
- [8] 杨福, 梁正伟, 王志春. 水稻耐盐碱鉴定标准评价及建议与展望. 植物遗传资源学报, 2011, 12(4): 625-628.
- Yang F, Liang Z W, Wang Z C. Evaluation, suggestion and prospect on identification standards of saline-alkali tolerance in rice. *J Plant Genetic Resour*, 2011, 12(4): 625-628. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈志德, 仲维功, 杨杰, 黄转运. 水稻新种质资源的耐盐性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2004, 5(4): 351-355.
- Chen Z D, Chong W G, Yang J, Huang Z Y. Evaluation of salt tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) germplasm. *J Plant Genet Resour*, 2004, 5(4): 351-355. (in Chinese with English abstract)
- [10] 方先文, 汤陵华, 王艳平. 耐盐水稻种质资源的筛选. 植物遗传资源学报, 2004, 5(3): 295-298.
- Fang X W, Tang L H, Wang Y P. Selection on rice germplasm tolerant to salt stress. *J Plant Genet Resour*, 2004, 5(3): 295-298. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zeng L H, Shannon M C. Effects of salinity on grain yield and yield components of rice at different seeding densities. *Agron J*, 2000, 92(3): 418-423.
- [12] Zeng L H, Shannon M C. Salinity effects on seedling growth and yield components of rice. *Crop Sci*, 2000, 40(4): 996-1003.

- [13] 朱萍, 王华, 夏伟, 顾艾节, 汤梅林, 周士良. 微酸性有机肥用量对滩涂土壤理化性状及水稻产量的影响. 上海农业学报, 2015(6): 101-103.
Zhu P, Wang H, Xia W, Gu A J, Tang M L, Zhou S L. Effects of acidulous organic fertilizer rates on both beach soil physicochemical properties and rice yield. *Acta Agric Shanghai*, 2015(6): 101-103. (in Chinese with English abstract)
- [14] Julino B O. The chemical basis of rice grain quality // Chemical aspect of rice grain quality. Manila: IRRI, 1979: 69-90.
- [15] 张文绪, 汤圣祥. 我国水稻品种蒸煮品质的初步研究. 中国农业科学, 1981, 14(6): 1-4.
Zhang W X, Tang S X. A preliminary study on the cooking qualities of chine rice varieties (*O. sativa* L.). *Sci Agric Sin*, 1981, 14(6): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈能, 罗玉坤, 朱智伟, 张伯平, 郑有川, 谢黎虹. 优质食用稻米品质的理化指标与食味相关性研究. 中国水稻科学, 1997, 11(2): 70-76.
Chen N, Luo Y K, Zhu Z W, Zhang B P, Zheng Y C, Xie L H. Correlation between eating quality and physico-chemical properties of high grain quality rice. *Chin J Rice Sci*, 1997, 11(2): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张欣, 施利利, 丁得亮, 王松文, 崔晶. 74 份优质粳稻品种的理化特征和食味特性研究. 食品科技, 2010, (9): 178-181.
Zhang X, Shi L L, Ding D L, Wang S W, Cui J. Study on physicochemical properties and palatability characteristics of 74 high-quality rice varieties. *Food Sci & Technol*, 2010, (9): 178-181. (in Chinese with English abstract)
- [18] 崔世友, 张蛟蛟. 盐分逆境对园艺作物品质的影响. 农学学报, 2014, (12): 60-62.
Cui S Y, Zhang J J. Effects of salt stress on the quality of horticultural crops. *J Agric*, 2014 (12): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李红宇, 潘世驹, 钱永德, 马艳, 司洋, 高尚, 郑桂萍, 姜玉伟, 周健. 混合盐碱胁迫对寒地水稻产量和品质的影响. 南方农业学报, 2015, 46(12): 2100-2105.
Li H Y, Pan S J, Qian Y D, Ma Y, Si Y, Gao S, Zheng J P, Jiang Y W, Zhou J. Effects of saline-alkali stress on yield and quality of rice in cold region. *J South Agric*, 2015, 46(12): 2100-2105. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杨福, 梁正伟, 王志春, 张军, 陈渊. 水稻耐盐碱品种(系)筛选试验与省区域试验产量性状的比较. 吉林农业大学学报, 2007, 29(6): 596-600.
Yang F, Liang Z W, Wang Z C, Zhang J, Chen Y. Comparison of yield characters between screening test of saline-alkali tolerant rice varieties and regional experiment. *J Jilin Agric Univ*, 2007, 29(6): 596-600. (in Chinese with English abstract)
- [21] 步金宝, 赵宏伟, 刘化龙, 王敬国, 兴旺. 盐碱胁迫对寒地粳稻产量形成机理的研究. 农业现代化研究, 2012, 33(4): 485-488.
Bu J B, Zhao H W, Liu H L, Wang J G, Xing W. Study on yield formation mechanism of salinity and alkalinity stress in *japonica* rice of cold region. *Res Agric Modern*, 2012, 33(4): 485-488. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘晓龙, 徐晨, 徐克章, 崔菁菁, 安久海, 凌凤楼, 张治安, 武志海. 盐胁迫对水稻叶片光合作用和叶绿素荧光特性的影响. 作物杂志, 2014, (2): 88-92.
Liu X L, Xu C, Xu K Z, Cui J J, An J H, Ling F L, Zhang Z A, Wu Z H. Effects on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of rice under salt stress. *Crops*, 2014, (2): 88-92. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王仁雷, 华春, 刘友良. 盐胁迫对水稻光合特性的影响. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 11-14.
Wang R L, Hua C, Liu Y L. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics in rice. *J Nanjing Agri Univ*, 2002, 25(4): 11-14. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐晨, 凌凤楼, 徐克章, 武志海, 刘晓龙, 安久海, 赵兰坡. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 280-286.
Xu C, Ling F L, Xu K Z, Wu Z H, Liu X L, An J H, Zhao L P. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(3): 280-286. (in Chinese with English abstract)
- [25] Desamero N V, Romero M V, Aquino D V, Tibayan P A, Guloy M B, Valdez R E, Ablaza M J C, Dimaano Y A, Chico M V, Cardenas C C, Orbon C A, Cavite O V. Rice grain quality as affected by salt stress. *Philipp J Crop Sci*, 2003, 28(S1): 70-70.
- [26] Surekha Rao P, Mishra B, Gupta S R. Effects of soil salinity and alkalinity on grain quality of tolerant, semi-tolerant and sensitive rice genotypes. *Rice Sci*, 2013, 20(4): 284-291.
- [27] 余为仆. 秸秆还田条件下盐胁迫对水稻产量与品质形成的影响. 扬州: 扬州大学. 2014.
Yu W P. Effect of salt stress associated with straw returning on yield and quality of rice. Yangzhou:

- Yangzhou University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [28] 高焕晔, 王三根, 宗学凤, 腾中华, 赵芳明, 刘照. 灌浆结实期高温干旱复合胁迫对稻米直链淀粉及蛋白质含量的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 40-47.
- Gao H Y, Wang S G, Zong X F, Teng Z H, Zhao F M, Liu Z. Effects of combined high temperature and drought stress on amylose and protein contents at rice grain-filling stage. *Chin J Eco-Agric*, 2012, 20(1): 40-47. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张桂莲, 廖斌, 李博, 蔡志欢. 花后高温对稻米品质及胚乳淀粉粒结构的影响. *中国农学通报*, 2016, 32(9): 10-14.
- Zhang G L, Liao B, Li B, Cai Z H. Effect of high temperature after anthesis on rice quality and starch granule structure of endosperm. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, 20(1): 40-47. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨东雷, 董伟欣, 张迎迎, 何祖华. 赤霉素调节植物对非生物逆境的耐性. *中国科学: 生命科学*, 2013, 43: 1119-1126.
- Yang D L, Dong W X, Zhang Y Y, He Z H. Gibberellins modulates abiotic stress tolerance in plant. *Sci Sin Vitae*, 2013, 43: 1119-1126.
- [31] 王静超, 王志琴. 多胺在水稻产量形成与响应逆境中的作用. *安徽农业科学*, 2012, 40(8): 4473-4477.
- Wang J C, Wang Z Q. Functions of polyamines in the rice yield formation and response to stress. *J Anhui Agric Sci*, 2012, 40(8): 4473-4477.