

盐胁迫对稻米中矿质元素和抗氧化物质含量的影响

许江环 杨善 王盼盼 郭海峰 周鸿凯*

(广东海洋大学 滨海农业学院, 广东 湛江 524088)

摘要 为探究盐胁迫对水稻糙米中抗氧化物质和矿质元素含量的影响,以‘海红 11’、‘海红 12’、‘建新 99’、‘阳山香稻’、‘香粘 3 号’和‘泰香粘’等 6 个基因型水稻为材料,设置 9 个含有 NaCl 的土壤处理(0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 g/kg),分别测定稻米中抗氧化物质(抗坏血酸、植酸、花青素和总黄酮)和矿质元素(P、Fe、Zn、Mg、Se 和 Mn)的含量,并进行典型相关和典型冗余分析。结果表明:不同 NaCl 浓度处理下,1) 稻米中花青素含量的累积受到基因型和 NaCl 处理相互独立的影响,而 P、Zn、Fe 和 Se 的含量均在互作效应上达到显著相关。2) 在不同的 NaCl 处理中,除 1.5 g/kg 的 NaCl 处理,‘建新 99’稻米中植酸含量均为最低,分别较其他 8 个处理中含量最高的基因型低 72%~92%;除 0.5、1.0 和 3.5 g/kg 的 NaCl 处理,‘海红 12’稻米中抗坏血酸含量均为最高,分别较其他 6 个处理中含量最低的基因型高 105%~566%;‘海红 11’、‘海红 12’和‘建新 99’稻米中总黄酮含量均显著高于其他 3 个基因型。3) 对稻米中矿质元素和抗氧化物质进行典型相关和典型冗余分析。典型相关分析表明稻米中第 I 对典型变量(U_1, V_1)相关系数 λ 为 0.546 ($P < 0.01$),在这一对典型变量中,在一定范围内,随着 Zn 和 Se 含量的降低以及 Fe 含量的增加,稻米中抗坏血酸和植酸的含量呈上升趋势。典型冗余分析结果表明,第 I 对典型变量中抗氧化物质含量的变量组 U_1 对自身含量变异的解释程度为 39.1%,矿质元素含量的变量组 V_1 对自身含量变异的解释程度为 20.2%;同时,抗氧化物质含量的变量组 U_1 解释了矿质元素含量的变量组 V_1 总变异程度的 11.7%,矿质元素含量的变量组 V_1 解释了抗氧化物质含量变量组 U_1 总变异的 6.0%。综上,不同 NaCl 处理下,抗坏血酸和植酸含量在不同基因型稻米中差异显著;除 Mg 外,其他矿质元素含量在不同 NaCl 浓度处理间差异均达显著。在基因型和不同 NaCl 处理的互作效应下,稻米中 Fe 的含量分别与抗坏血酸和植酸含量呈显著正相关,而 Zn 和 Se 的含量分别与抗坏血酸和植酸含量呈显著负相关。

关键词 稻米; 抗氧化物质; 矿质元素; 盐胁迫; 典型相关

中图分类号 S511

文章编号 1007-4333(2022)06-0030-12

文献标志码 A

Effects of salt stress on the contents of mineral elements and antioxidant substances in rice

XU Jianghuan, YANG Shan, WANG Panpan, GUO Haifeng, ZHOU Hongkai*

(College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract In order to investigate the variability of antioxidant substances and mineral elements in brown rice under salt stress, six genotypes of rice, ‘Haihong 11’, ‘Haihong 12’, ‘Jianxin 99’, ‘Yangshanxiangdao’, ‘Xiangzhan 3’ and ‘Taixiangzhan’, were taken as materials. Nine soil treatments with different NaCl content (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 and 4.0 g/kg), were used to determine antioxidant substances (ascorbic acid, phytic acid, anthocyanin and total flavonoids) and mineral elements (P, Fe, Zn, Mg, Se and Mn) in rice. Canonical correlation and canonical redundancy analysis were performed. The results showed that: 1) The accumulation of anthocyanin content in

收稿日期: 2021-06-05

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助(2020B020219004); 广东省普通高校省级重大科研项目(2017KZDXM044); 湛江市科技专项资金(2020A06013)

第一作者: 许江环, 硕士研究生, E-mail: 1823537260@qq.com

通讯作者: 周鸿凯, 研究员, 主要从事耐盐碱水稻研究, E-mail: 897961801@qq.com

rice was affected by the independent interaction between genotype and NaCl treatment, while the contents of P, Zn, Fe and Se were significantly correlated with each other. 2) The phytic acid content of 'Jianxin 99' rice was the lowest among the different NaCl concentrations except for 1.5 g/kg NaCl treatment, which was 72% to 92% lower than that of the genotypes with the highest content in the eight treatments, respectively. Except for the NaCl treatment of 0.5, 1.0 and 3.5 g/kg, the content of ascorbic acid in 'Haihong 12' rice was the highest, which was 105% to 566% higher than that of the genotype rice with the lowest content in the six treatments. 3) The canonical correlation and canonical redundancy analysis were carried out for mineral elements and antioxidant substances in rice. The results of canonical correlation analysis showed that the correlation coefficient of the first pair of canonical variables (U_1, V_1) was 0.546 ($P < 0.01$), and of this pair of typical variables, with the decrease of Zn and Se content and the increase of Fe content, the contents of ascorbic acid and phytic acid in rice tended to increase. The results of canonical redundancy analysis displayed that the first pair of canonical variables explained 39.1% of the variation of antioxidant indexes and 20.2% of the variation of mineral elements, while antioxidant indexes explained 11.7% of the total variation of mineral elements and mineral elements explained 6.0% of the total variation of antioxidant indexes. In conclusion, under different NaCl treatment, the contents of ascorbic acid and phytic acid were significantly different among different genotypes of rice; except Mg, the accumulation of other mineral elements was significantly different between treatments with different NaCl. Under the interaction of genotypes and different NaCl treatments, Fe content was significantly positively correlated with ascorbic acid and phytic acid contents, while Zn and Se contents were significantly negatively correlated with ascorbic acid and phytic acid contents, respectively.

Keywords rice; antioxidant substance; mineral elements; salt stress; canonical correlation

水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为世界上种植范围最为广泛的粮食作物之一, 已成为养活了世界一半以上人口的主粮^[1]。全世界盐碱地的面积为 9.54 亿 hm^2 , 其中我国的盐碱地约 1 亿 hm^2 , 并且还在逐年增加^[2]。在全球粮食危机的背景下, 盐碱地作为生产粮食的重要土地潜在资源, 可在保障国家粮食安全方面发挥重要作用, 合理利用滨海盐碱滩涂等进行耐盐碱水稻良好品质性状的选育和栽培是提高粮食总产量和品质的有效途径。

盐胁迫下, 水稻植株体内产生大量的活性氧 (Reactive oxide species, ROS) 会造成细胞膜脂质过氧化和生物活性大分子的损伤, 导致其光合作用等受到抑制, 引起成穗数不足; 开花后更是加快了植株衰老进程, 让光合产物无法在短时间内得到有效的累积, 轻者致使植株生长受限和产量降低, 重者甚至死亡^[3-4]。稻米中的植酸 (Phytic acid, IP6)、抗坏血酸 (Ascorbic acid, AsA)、花青素 (Anthocyanins, AnC) 和总黄酮 (Total flavonoids, TF) 是良好的抗氧化物质。AnC 的邻位羟基与自由基反应生成稳定的半醌式结构, 在降低氧化损伤和清除自由基方面的能力比其他天然抗氧化物质更强^[5-8]。IP6 可以通过自身携带的负电荷磷酸盐基团与金属离子螯合来减缓重金属毒害, 还可以通过供氢来破坏过氧化物, 中断其形成醛、酮等产物^[9-12]。TF 与 AnC 在改善人体记忆、抗癌、抗肿瘤和抗衰老等功能上发挥

着重要作用^[13-14]。AsA 可清除植物 PS I 在供电子过程中由超氧阴离子在铁-超氧化物歧化酶复合体的催化下产生的 H_2O_2 , 或作为抗坏血酸过氧化物酶的底物来清除自由基, 或作为羟化酶的辅助因子、PS II 的电子传递中间体、细胞信号转导途径中的调控元件来参与调节植物的生长发育^[15-18]。矿质元素也可参与植株抗氧化过程, 在抗氧化和清除 ROS 能力上, 锌优于硒, 但是由于硒在植株体内存在形态的多样性, 如硒酸盐、亚硒酸盐、硒蛋白和硒代氨基酸及其衍生物等^[19]。富硒水稻中含有的硒蛋白水解物可以通过抑制重金属诱导的促凋亡来保护细胞免受重金属毒害^[20]。还有研究表明硒显著促进了紫色马铃薯中花青素、锌和铁的累积^[21]。缺铁会降低植株中抗氧化酶的活性, 导致活性氧的累积, 使得植株受到氧化损伤, 而抗坏血酸除了自身作为抗氧化物质外, 也可以通过促进植株对铁的吸收来增加抗氧化酶的活性, 从而提高植株的抗氧化能力^[22]。

植物组织内花青素等抗氧化物质含量研究已在马铃薯^[23]、葡萄^[24]和刺五加果^[25]等作物上开展, 而 NaCl 胁迫对稻米中抗氧化物质 (AsA、IP6、AnC 和 TF) 和矿质元素含量影响的研究鲜见报道。本试验设置 9 个含有 NaCl 的土壤处理, 分别测定 6 个不同基因型稻米中抗氧化物质与矿质元素含量, 旨在探究 NaCl 胁迫对水稻糙米中抗氧化物质与矿质元

素含量的影响,以期为功能型水稻种植与盐渍地改良利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻种质由广东海洋大学滨海农业学院提供,‘海红 11’(‘HH 11’)、‘海红 12’(‘HH 12’)和‘建新 99’(‘JX 99’)均为耐盐粳型红米水稻,‘阳山香稻’(YSXD)、“香粘 3 号”(‘XZ 3’)和‘泰香粘’(‘TXZ’)均为盐敏感粳型白米水稻。本试验于 2017-09-12—2017-12-04 种植在广东海洋大学农业生物技术研究所试验基地内。

1.2 试验方法

选用当年收获的粒大饱满、表面没有病斑的成熟水稻种子各 10 g,用 10% 的 H_2O_2 在培养皿中浸泡 0.5 h 消毒,用蒸馏水冲洗 2 min 后,平铺在放有育苗专用纸的培养皿中,并放置于 30 °C 恒温培养箱中催芽 42 h,期间每隔 8 h 清洗并换水,用清水培育至三叶一心。每个试验桶(规格:口径 30 cm,高 35 cm)装入过筛后风干、混和均匀的土壤 10 kg,设置 9 个含有 NaCl 的土壤处理:0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 g/kg。随机区组试验设计,3 次重复,每组 54 桶,共 162 桶。每桶施 4 g 复合肥作基肥与桶内土壤和 NaCl 搅拌均匀,加水待盐度稳定后,选取约三叶一心期的幼苗移栽到桶内,6 棵/桶。为了保持土壤湿润,每桶均设置标有相同刻度 2 cm 的竖插牌,每天早晚观察桶内水层,根据缺水情况补水至相同刻度,并且使用土壤含盐量测试仪(Az8371,台湾衡欣科技股份有限公司)测定桶内土壤盐分状况,保证土壤盐分和电导率稳定^[26]。

1.3 稻米指标的测定

2017 年 12 月 4 日,将成熟的水稻收割装入网袋,并晒干脱壳,将得到的糙米分别进行抗氧化物质和矿质元素含量的测定。植酸(Y_2)、花青素(Y_3)、总黄酮(Y_4)和硒(Se, X_5)分别参照赵仁勇^[27]、莫巍^[28]、刘江(白鸟)^[29]和袁建等^[30]的方法进行测定;抗坏血酸(Y_1)采用 2,4-二硝基苯肼比色法进行测定^[31],磷(P, X_1)、锌(Zn, X_2)、铁(Fe, X_3)、镁(Mg, X_4)和锰(Mn, X_6)参考鲍士旦等^[32]的方法进行测定。只在‘HH 11’、‘HH 12’和‘JX 99’中测得花青素的含量,而其他 3 个基因型稻米属于白米,花青素含量极低^[33],故不进行测定。

1.4 数据分析

运用 Excel 2010 进行数据整理,利用 SPSS 23.0 对数据进行方差分析以及简单效应分析,Duncan 法显著性分析($P < 0.05$),典型相关分析和典型冗余分析。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对不同基因型稻米中抗氧化物质和矿质元素含量的方差分析和简单效应分析

由表 1 和表 2 可知,NaCl 胁迫下稻米中除了 AnC 和 Mg 外,其他抗氧化物质和矿质元素的含量均在基因型和 NaCl 处理间的互作效应达到显著水平。稻米中 AnC 的含量在基因型和 NaCl 处理间均达到极显著差异,说明 AnC 在稻米中的累积是受到基因型和 NaCl 胁迫的相互独立作用的影响。稻米中 Mg 含量在基因型和 NaCl 处理间差异均不显著,说明稻米中 Mg 含量的累积均不受基因型和 NaCl 处理的显著影响。

由表 3 和表 4 可知,每个 NaCl 处理中,AsA、IP6、TF、Zn、Fe 和 Se 的含量在不同基因型稻米间差异均极显著。在 0、0.5 和 2.5 g/kg 的 NaCl 处理下,不同基因型稻米间 P 的含量无显著差异。在 0 和 1.5 g/kg 的 NaCl 处理中,不同基因型稻米间 Mn 含量差异显著,在‘HH 11’和‘JX 99’中,稻米中 Mn 含量在不同的 NaCl 处理间均具有显著差异。‘YSXD’、‘TXZ’和‘XZ 3’稻米中 TF 含量分别在不同 NaCl 处理间差异均不显著。

2.2 NaCl 胁迫对稻米中抗氧化物质含量的影响

由表 5 可知,AsA、IP6、TF 和 AnC 含量在不同基因型稻米间差异显著。除 0.5、1.0 和 3.5 g/kg NaCl 处理中‘HH 12’的 AsA 含量低于‘XZ 3’和‘HH 11’外,在其他 NaCl 处理中都是最高的。‘JX 99’稻米中 IP6 含量除了在 1.5 g/kg 的 NaCl 处理高于‘TXZ’,在其他 NaCl 处理中均显著低于其他基因型稻米。‘HH 11’、‘HH 12’和‘JX 99’中 TF 含量均显著高于其他 3 个基因型。‘JX 99’和‘XZ 3’的稻米中 TF 的含量随着 NaCl 浓度的增加而呈上升趋势;‘HH 11’和‘HH 12’的稻米中 TF 含量分别在 3.5 和 2.5 g/kg NaCl 处理达到最大值;而‘YSXD’和‘TXZ’的稻米中 TF 含量最大值分别在 0.5 和 1.5 g/kg NaCl 处理中。随着 NaCl 浓度的增加,‘JX 99’的稻米中 AnC 含量呈上升趋势;‘HH 11’和‘HH 12’的稻米中 AnC 累积含量达到最大值分别在 2.5 和 3.0 g/kg NaCl 处理中。

表 1 NaCl 胁迫下稻米中抗氧化物质的方差分析
Table 1 Analysis of variance of antioxidant substances in rice under NaCl stress

变异来源 Source of variation	抗坏血酸 Ascorbic acid		植酸 Phytic acid		花青素 Anthocyanins		总黄酮 Total flavonoids	
	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F
基因型 Genotype	463.81	3 644.41**	20.68	246.97**	44.15	5.19**	600.76	2 314.89**
处理 Treatment	79.64	625.78**	2.54	30.34**	99.60	11.71**	5.89	22.68**
基因型×处理 Genotype × Treatment	44.99	353.55**	3.26	38.92**	14.48	1.70	2.53	9.75**
误差 Error	0.13		0.08		8.51		0.26	

注：“*”在 0.05 水平下显著，“**”在 0.01 水平下显著。下同。

Note: “*” represent significant at the level of 0.05, and “**” represent significant at the level of 0.01. The same below.

表 2 NaCl 胁迫下稻米中矿物质元素的方差分析
Table 2 Analysis of variance of mineral elements in rice under NaCl stress

变异来源 Source of variation	P		Zn		Fe		Mg		Se		Mn	
	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	
基因型 Genotype	0.64	6.73**	7.17	133.58**	0.54	10.71**	1.09	1.70	75.28	64.14**	0.51	1.16
处理 Treatment	0.53	5.56**	6.31	117.60**	1.78	35.29**	0.73	1.14	40.40	34.42**	1.90	4.31**
基因型×处理 Genotype × Treatment	0.39	4.04**	2.74	51.08**	1.33	26.32**	0.66	1.03	15.63	13.32**	0.83	1.90**
误差 Error	0.10		0.05		0.05		0.64		1.17		0.44	

表3 NaCl胁迫下稻米中抗氧化物质的简单效应

Table 3 Simple effects of antioxidant substances in rice under NaCl stress

变量效应 Effect of variable	抗坏血酸 Ascorbic acid		植酸 Phytic acid		总黄酮 Total flavonoids	
	均方	F	均方	F	均方	F
	Mean square		Mean square		Mean square	
GWT(0)	57.27	450.04**	6.21	74.20**	40.97	157.88**
GWT(0.5)	126.71	995.62**	5.25	62.76**	44.03	169.67**
GWT(1.0)	180.85	1 421.08**	6.98	83.38**	55.43	213.60**
GWT(1.5)	240.82	1 892.30**	3.54	42.32**	60.20	231.98**
GWT(2.0)	31.04	243.88**	6.36	76.00**	71.92	277.12**
GWT(2.5)	26.80	210.59**	6.55	78.22**	79.12	304.88**
GWT(3.0)	45.52	357.66**	5.19	61.95**	81.45	313.84**
GWT(3.5)	38.18	299.96**	4.33	51.67**	93.91	361.86**
GWT(4.0)	76.57	601.69**	2.33	27.86**	93.95	362.03**
TWG(HH11)	28.23	221.79**	1.03	12.33**	6.63	25.56**
TWG(HH12)	90.78	713.31**	2.55	30.50**	4.65	17.90**
TWG(JX99)	24.00	188.62**	0.67	7.98**	6.55	25.23**
TWG(YSXD)	20.77	163.20**	7.15	85.46**	0.41	1.59
TWG(TXZ)	12.03	94.54**	3.57	42.64**	0.16	0.61
TWG(XZ3)	128.80	1 012.08**	3.85	46.04**	0.13	0.52

注:GWT表示土壤中NaCl含量;TWG表示稻基因型。下同。

Note: GWT indicates NaCl content in soil; TWG indicates rice genotype. The same below.

2.3 NaCl胁迫下稻米中抗氧化物质与矿质元素含量的典型相关分析和典型冗余分析

对稻米中矿质元素和抗氧化物质的含量进行典型相关分析,结果表明第Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ对典型相关变量无统计学意义,见表6。第Ⅰ对典型相关变量(U_1 , V_1)系数为 $\lambda=0.546(P<0.01)$,其表达式为:

$$U_1 = -0.068X_1 - 0.623X_2 + 0.376X_3 + 0.067X_4 - 0.617X_5 + 0.025X_6$$

$$V_1 = 0.419Y_1 + 0.720Y_2 - 0.157Y_3 - 0.174Y_4$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 和 X_6 分别为稻米中P、Zn、Fe、Mg、Se和Mn的含量; Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 分别表示AsA、IP6、AnC和TF的含量。在这一对典型变量(U_1 , V_1)构成中, U_1 以 X_2 (Zn)、 X_3 (Fe)和 X_5 (Se)的权重系数较大, V_1 以 Y_1 (AsA)和 Y_2 (IP6)的权重系数较大。这一线性组合说明,在一定范围内,随着稻米中Zn和Se含量的降低,Fe含量的上升,稻米中AsA和IP6含量呈上升趋势。

由表7可知,第Ⅰ对典型变量解释了抗氧化物

质指标自身变异的39.1%以及矿质元素指标自身变异的20.2%。冗余指数表明,抗氧化物质的第Ⅰ对典型变量能解释矿质元素指标总变异的11.7%,而矿质元素则解释了抗氧化物质总变异的6.0%。

3 讨论

3.1 稻米抗氧化物质含量在不同基因型和NaCl处理间的差异

在NaCl胁迫下,育种工作者若能合理利用不同基因型稻米中抗氧化物质和矿质元素含量表现出来的差异,则可为选育耐盐性强的水稻品种和盐碱地改良利用提供参考。AsA作为双加氧酶的辅酶可以调节铁蛋白介导的铁吸收和释放,参与抗氧化过程^[34]。周小华等^[35]研究发现,AsA通过调控抗氧化酶活性,提高渗透调节物质和抗氧化物质含量来降低 H_2O_2 的累积,从而缓解铝胁迫下水稻质膜的过氧化程度,增强水稻的抗铝性能。张启雷等^[36]报道用甲基紫精和高光诱导的光氧化胁迫处理的水

表 4 NaCl 胁迫下稻米中矿质元素含量的简单效应

Table 4 Simple effects of mineral elements content in rice under NaCl stress

变量效应 Effect of variable	P			Zn			Fe			Se			Mn		
	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	均方 Mean square	F	
GWT(0)	0.19	2.01	6.43	119.84**	2.18	43.25**	0	11.22**	1.21	2.75*					
GWT(0.5)	0.10	1.08	4.10	76.37**	0.74	14.71**	0	11.70**	0.35	0.79					
GWT(1.0)	0.61	6.38**	4.45	82.98**	1.89	37.49**	0	21.01**	0.30	0.68					
GWT(1.5)	0.31	3.22**	2.98	55.50**	0.41	8.10**	0	14.02**	2.54	5.79**					
GWT(2.0)	0.60	6.30**	2.05	38.30**	1.24	24.56**	0	20.08**	0.19	0.44					
GWT(2.5)	0.20	2.09	2.61	48.74**	0.79	15.58**	0	8.19**	0.81	1.84					
GWT(3.0)	0.37	3.92**	2.14	39.84**	0.88	17.48**	0.01	43.73**	0.11	0.26					
GWT(3.5)	1.10	11.56**	2.88	53.71**	0.62	12.30**	0	7.43**	0.79	1.80					
GWT(4.0)	0.24	2.51*	1.44	26.93**	2.41	47.78**	0	33.28**	0.87	1.98					
TWG(HH11)	0.47	4.93**	3.29	61.29**	2.55	50.54**	0	28.87**	2.25	5.12**					
TWG(HH12)	0.34	3.61**	3.21	59.79**	2.13	42.16**	0	12.39**	0.38	0.87					
TWG(JX99)	0.20	2.15*	4.21	78.45**	1.05	20.77**	0	32.35**	1.14	2.59*					
TWG(YSXD)	1.02	10.77**	2.85	53.11**	0.52	10.24**	0	12.70**	0.74	1.67					
TWG(TXZ)	0.22	2.28*	2.28	42.48**	1.43	28.46**	0	9.42**	0.72	1.64					
TWG(XZ3)	0.19	2.04*	4.18	77.88**	0.74	14.70**	0	5.27**	0.83	1.89					

表5 NaCl胁迫下6个基因型稻米中抗氧化物质的含量

Table 5 Content of antioxidative substances in six rice genotypes under NaCl stress

抗氧化物质 Antioxidant substances	土壤中 NaCl 含量/(g/kg) NaCl content in soil									
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
基因型 Genotype										
抗坏血酸/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	HH 11	9.70±0.62 c	15.73±0.48 c	17.77±0.28 b	15.08±0.64 c	13.93±0.16 b	9.70±0.31 d	9.87±0.23 d	16.20±0.31 a	13.76±0.27 b
	HH 12	20.90±0.40 a	18.81±0.63 b	17.27±0.31 b	31.32±0.24 a	15.73±0.18 a	13.89±0.23 a	15.73±0.22 a	12.69±0.26 b	18.76±0.37 a
	JX 99	11.50±0.30 b	5.90±0.19 e	7.05±0.31 c	12.22±0.28 d	7.69±0.24 e	5.38±0.16 e	3.84±0.19 f	7.26±0.27 e	5.21±0.29 f
	YSXD	10.77±0.63 b	11.88±0.29 d	7.31±0.17 c	4.70±0.25 e	8.63±0.24 d	10.89±0.17 c	11.79±0.22 b	7.60±0.26 de	5.94±0.17 e
	TXZ	9.83±0.22 c	12.52±0.30 d	5.64±0.23 d	11.84±0.32 d	9.14±0.38 d	10.81±0.43 c	8.72±0.15 e	9.06±0.36 c	10.09±0.26 d
	XZ 3	9.87±0.34 c	24.87±0.68 a	24.79±0.83 a	18.67±0.33 b	10.04±0.43 c	12.99±0.31 b	10.60±0.43 c	8.01±0.38 d	11.07±0.43 c
植酸/ (mg/kg)	HH 11	2.65±0.42 b	3.40±0.23 c	2.00±0.22 c	2.23±0.22 bc	2.29±0.17 b	2.20±0.22 b	3.40±0.32 b	3.46±0.33 b	3.00±0.23 b
	HH 12	1.52±0.26 d	2.20±0.14 d	3.79±0.57 b	2.49±0.35 b	3.91±0.18 a	3.75±0.28 a	4.24±0.23 a	2.97±0.23 bc	2.59±0.44 bc
	JX 99	0.93±0.12 e	1.13±0.08 e	0.64±0.07 d	1.94±0.28 bc	0.32±0.03 e	0.58±0.05 d	0.71±0.08 c	0.61±0.03 d	1.06±0.10 d
	YSXD	4.60±0.47 a	4.89±0.57 a	2.00±0.13 c	2.39±0.39 bc	1.25±0.26 d	0.77±0.06 d	4.34±0.56 a	4.18±0.40 a	3.75±0.24 a
	TXZ	4.08±0.20 a	3.98±0.20 b	4.57±0.45 a	1.91±0.18 bc	3.95±0.40 a	1.35±0.14 c	3.41±0.32 b	2.63±0.37 c	2.68±0.30 bc
	XZ 3	2.10±0.11 c	3.14±0.32 c	1.13±0.19 d	4.79±0.30 a	1.78±0.08 c	3.98±0.21 a	3.36±0.47 b	2.65±0.26 c	2.42±0.25 c
总黄酮/ (g/kg)	HH 11	8.36±0.74 a	8.59±0.43 a	8.92±0.58 b	9.51±0.55 b	9.76±0.26 b	10.2±1.16 b	11.26±1.04 a	12.41±0.56 a	12.06±0.69 a
	HH 12	8.49±0.91 a	9.12±0.83 b	10.77±0.63 a	11.05±0.88 a	12.08±0.50 a	12.28±0.89 a	11.18±0.28 a	11.05±0.95 b	10.32±0.82 b
	JX 99	7.77±0.41 a	8.09±0.25 ab	8.32±0.64 b	8.71±0.51 b	9.33±0.28 b	9.92±0.72 b	10.49±0.75 a	11.22±0.72 b	12.01±0.92 a
	YSXD	1.79±0.06 b	2.06±0.22 c	1.83±0.13 c	1.75±0.18 cd	1.61±0.11 c	1.47±0.29 c	1.38±0.10 b	1.10±0.21 c	0.90±0.03 c
	TXZ	1.63±0.11 b	1.78±0.08 cd	1.91±0.13 c	2.16±0.21 c	1.82±0.15 c	1.69±0.15 c	1.52±0.08 b	1.47±0.07 c	1.44±0.10 c
	XZ 3	1.05±0.06 b	1.13±0.18 d	1.19±0.15 c	1.23±0.18 d	1.42±0.03 c	1.47±0.19 c	1.53±0.16 b	1.58±0.14 c	1.62±0.03 c
花青素/ (mg/kg)	HH 11	0.22±0.02 b	0.25±0.04 ab	0.29±0.02 a	0.32±0.01 a	0.33±0.03 a	0.37±0.03 a	0.34±0.03 a	0.33±0.03 a	0.29±0.03 b
	HH 12	0.23±0.02 b	0.23±0.03 b	0.25±0.03 b	0.29±0.02 a	0.30±0.02 ab	0.32±0.03 b	0.32±0.03 a	0.30±0.02 b	0.29±0.03 b
	JX 99	0.26±0.03 a	0.28±0.03 a	0.29±0.02 a	0.29±0.06 a	0.29±0.02 b	0.30±0.02 b	0.32±0.03 a	0.34±0.03 a	0.35±0.04 a

表 6 NaCl 胁迫下稻米抗氧化物质和矿质元素含量之间的显著性检验

Table 6 Significance test of antioxidant substances and mineral elements contents in rice under NaCl stress

4 对典型变量的编号 Four pairs of canonical variable numbers	典型相关系数(λ) Correlations	特征值 eigenvalue	Wilks 统计量 Wilk's	F	显著性 Significance
I	0.546 **	0.426	0.555	1.906	0.008
II	0.360	0.149	0.791	1.174	0.294
III	0.265	0.076	0.909	0.891	0.526
IV	0.149	0.023	0.978	0.560	0.643

表 7 NaCl 胁迫下稻米抗氧化物质和矿质元素含量的典型冗余分析

Table 7 Canonical redundancy analysis of antioxidant substances and mineral elements contents in rice under NaCl stress

4 对典型变量的编号 Four pairs of canonical variable numbers	抗氧化物质 Antioxidant substances		矿质元素 Mineral elements	
	组内 Within groups	组间 Between groups	组内 Within groups	组间 Between groups
	I	0.391	0.117	0.202
II	0.221	0.029	0.215	0.028
III	0.200	0.014	0.150	0.011
IV	0.188	0.004	0.144	0.003

稻叶片中, AsA 含量高的抗坏血酸合成关键酶 *GLDH* 基因超表达株系‘GO-2’比干涉株系‘GI-2’具有更强的抗氧化胁迫能力, 从而说明了内源 AsA 能显著增强水稻抗氧化能力。本试验中, 在 9 个 NaCl 处理中, 稻米中 AsA 含量在 6 个基因型水稻中表现出极显著差异, 主要表现为在各个 NaCl 处理中, ‘HH 12’的 AsA 含量比同一处理下含量最低的基因型稻米分别高 115%、219%、206%、566%、105%、158%、310%、75% 和 260%, 所以‘HH 12’可作为选育高 AsA 含量的种质资源。

IP6 具有很强的抗氧化能力和螯合能力^[37]。但也有研究表明, 籽粒抗氧化水平与籽粒活力呈正相关, 与植酸含量无相关关系^[38]。稻米中 IP6 长期被人们看作抗营养物质, 对稻米中 Zn、Fe 等矿质元素含量和生物有效性产生负面影响, 高 IP6 含量的稻米容易使长期食用的人群产生“隐形饥饿”的隐患^[39]。本试验中, 在 9 个 NaCl 浓度处理后, ‘JX 99’稻米中 IP6 含量分别比同一 NaCl 处理下含量最高

的基因型稻米低 80%、77%、86%、59%、92%、85%、84%、85% 和 72%, 所以在选育低 IP6 含量的种质资源中‘JX99’相对于其他基因型水稻更好。

孙玲等^[40]和陈萍萍等^[41]等研究表明, 有色稻稻米的总抗氧化能力和羟自由基清除能力与花色苷和类黄酮含量之间均呈极显著正相关, 且有色稻的种皮颜色越深, 其抗氧化作用越强。本试验中, ‘HH 11’、‘HH 12’和‘JX 99’3 个基因型红米中 TF 含量显著高于其他 3 个白米基因型籼稻。‘JX 99’的稻米中 AnC 含量随着 NaCl 处理浓度的增加而增加, 相对于‘HH 11’和‘HH 12’更具有缓解 NaCl 胁迫伤害的潜能。

3.2 NaCl 胁迫下稻米中抗氧化物质和矿质元素含量的变化

抗氧化物质和矿质元素之间存在错综复杂的关联性。已有研究发现, 外源高 P 处理可能对水稻穗部的 Zn、Fe 等矿质元素的转运和累积有一定程度的“阻碍”效应, 会诱发稻米中 Zn 含量的降低及其

生物有效性的下降,甚至出现“高磷促进缺锌”现象^[42-43]。Iwai等^[44]的研究表明在水稻种子发育的过程中,从源器官转运过来的P会直接转化为IP6并迅速在糊粉层细胞中累积,而Zn与IP6的结合松散,多分布在糊粉层至内胚乳中。Persson等^[45]通过测定大麦籽粒中的Fe、Zn、P和S的形态,提出Zn主要与多肽结合,而Fe主要与IP6结合。孙鹏尧等^[46]试验结果表明,降低AnC的稳定性有两种情形,一是Fe³⁺会与花青素类物质形成络合物,二是高含量的AsA会被Fe³⁺氧化产生H₂O₂从而破坏AnC的稳定性。在土壤低P情况下,P抑制了植株对Se的吸收,而在高P条件下,P促进植株对Se的吸收^[47]。Pu等^[48]研究表明对于大多数有色稻、有色小麦和有色马铃薯等作物而言,有色品种比同一作物的白色品种有更高的Se和AnC含量的累积,在有色品种中高含量的Se都有高含量的AnC,且Se含量的累积会随着作物成熟阶段着色逐步加深而增加。本研究结果表明,在一定范围内,随着稻米中Zn和Se含量的降低,Fe含量的上升,稻米中AsA和IP6含量呈上升趋势。这一结果可能是因为NaCl胁迫下,水稻稻米成熟的过程中,从“源”运来的P快速转化为IP6,使得IP6含量增加,同时由于Fe含量在稻米中的增加,一部分Fe会被IP6螯合,还有一部分Fe²⁺会在受胁迫后被产生的部分活性氧(ROS)氧化成Fe³⁺^[49],此时稻米中高含量的AsA也会被Fe³⁺氧化生成H₂O₂^[46]等产物,在新形成的Fe³⁺和氧自由基的作用下,稻米中AnC的稳定性被破坏,导致AnC含量的下降,从而引起了稻米中Se含量的降低,而稻米中Zn含量的下降可能是受到P的“阻碍”效应^[43]。

4 结论

在9个不同NaCl处理(0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5和4.0 g/kg)下,6个基因型稻米中花青素的含量受到基因型和NaCl处理间相互独立作用的影响;抗坏血酸和植酸含量在不同基因型稻米中差异显著;P、Zn、Fe和Se的含量在互作效应上均达到显著差异,而稻米中Mg含量的累积在基因型和NaCl处理间均无显著影响。除Mg外,P、Zn、Fe、Se和Mn的含量在不同NaCl浓度处理间均差异显著。在基因型和不同NaCl处理的互作效应下,稻米中Fe的含量分别与抗坏血酸和植酸含量呈显著正相关,而Zn和Se的含量分别与抗坏血酸

和植酸含量呈显著负相关。

参考文献 References

- [1] Tang D, Cheng Z K. From basic research to molecular breeding-Chinese scientists play a central role in boosting world rice production[J]. *Genomics Proteomics Bioinformatics*, 2018, 16(6): 389-392
- [2] 王才林, 张亚东, 赵凌, 路凯, 朱镇, 陈涛, 赵庆勇, 姚姝, 周丽慧, 赵春芳, 梁文化, 孙明法, 严国红. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. *中国稻米*, 2019, 25(1): 1-6
Wang C L, Zhang Y D, Zhao L, Lu K, Zhu Z, Chen T, Zhao Q Y, Yao S, Zhou L H, Zhao C F, Liang W H, Sun M F, Yan G H. Research status, problems and suggestions on salt-alkali tolerant rice[J]. *China Rice*, 2019, 25(1): 1-6 (in Chinese)
- [3] 孙思淼, 常伟, 宋福强. 丛枝菌根真菌提高盐胁迫植物抗氧化机制的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3589-3596
Sun S M, Chang W, Song F Q. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi improve the oxidative stress to the host plants under salt stress: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3589-3596 (in Chinese)
- [4] 韦还和, 张徐彬, 葛佳琳, 陈熙, 孟天瑶, 杨洋, 熊飞, 陈英龙, 戴其根. 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
Wei H H, Zhang X B, Ge J L, Chen X, Meng T Y, Yang Y, Xiong F, Chen Y L, Dai Q G. Effects of salinity stress on spikelets formation and grains filling in rice (*Oryza sativa* L)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(12): 2471-2480 (in Chinese)
- [5] Rufert C E, Kulling S E. Antioxidant activity of isoflavones and their major metabolites using different in vitro assays[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(8): 2926-2931
- [6] Fedenko V S, Shemet S A, Landi M. UV-vis spectroscopy and colorimetric models for detecting anthocyanin-metal complexes in plants: An overview of in vitro and in vivo techniques[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2017, 212: 13-28
- [7] Chen X Q, Nagao N, Itani T, Irifune K. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2783-2788
- [8] Zhang Y, Butelli E, Martin C. Engineering anthocyanin biosynthesis in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2014, 19: 81-90

- [9] 高延芬, 徐虹, 宋焕禄. 植酸及其生理活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 368-371, 376
Gao Y F, Xu H, Song H L. Research progress of phytic acid and its bioactivities [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(1): 368-376 (in Chinese)
- [10] 陈诗豪, 李正阳, 陈佳露, 张元卿, 魏育明, 郑有良, 蒲至恩. 品种与栽培条件对小麦籽粒生物活性物质含量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1756-1763
Chen S H, Li Z Y, Chen J L, Zhang Y Q, Wei Y M, Zheng Y L, Pu Z E. Effect of varieties and cultivation conditions on the bioactive substance contents of wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(11): 1756-1763 (in Chinese)
- [11] 张卫星, 孙成效, 闵捷, 段彬伍, 朱智伟. 水稻生育中后期使用外源植酸对产量和米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(6): 603-609
Zhang W X, Sun C X, Min J, Duan B W, Zhu Z W. Effect of exogenous phytic acid application on rice grain yield and quality during mid and late growth stage[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(6): 603-609(in Chinese)
- [12] Karmakar A, Bhattacharya S, Sengupta S, Ali N. RNAi-mediated silencing of itpk gene reduces phytic acid content, alters transcripts of phytic acid biosynthetic genes, and modulates mineral distribution in rice seeds[J]. *Rice Science*, 2020, 27(4): 315-328
- [13] 贺丹霞, 陆辉, 刘惠娟, 张平平. 大麦籽粒及其炮制品中总黄酮含量分析[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(3): 118-120
He D X, Lu H, Liu H J, Zhang P P. Analysis on total flavonoids content in grain of *Hordeum vulgare* and its processed products [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2013, 22(3): 118-120 (in Chinese)
- [14] 胡家坤, 谢文英, 陈升位, 王楠, 杨映宝, 王乐. 25个大麦地方品种籽粒总黄酮和花色苷的含量差异[J]. 云南农业大学学报:自然科学版, 2015, 30(4): 522-527
Hu J K, Xie W Y, Chen S W, Wang N, Yang Y B, Wang L. The Content Difference of Total Flavonoids and Anthocyanin from the Grains of 25 Local Barley Varieties[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science Edition*, 2015, 30(4): 522-527 (in Chinese)
- [15] Gallie DR. The role of L-ascorbic acid recycling in responding to environmental stress and in promoting plant growth[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 64(2): 433-443
- [16] Boubakri H, Gargouri M, Mliki A, Brini F, Chong J L, Jbara M. Vitamins for enhancing plant resistance[J]. *Planta*, 2016, 244(3): 529-543
- [17] 郭新波, 唐岳立, 孙小芬, 唐克轩. 高等植物维生素 C 和维生素 E 代谢调控[J]. 植物生理学报, 2011, 47(8): 731-744
Guo X B, Tang Y L, Sun X F, Tang K X. Metabolic regulation of vitamins C and E in higher plants [J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, 47(8): 731-744 (in Chinese)
- [18] Gest N, Gautier H, Stevens R. Ascorbate as seen through plant evolution; the rise of a successful molecule[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 64(1): 33-53
- [19] Rahman M M, Hossain K F B, Banik S, Sikder M T, Akter M, Bondad S E C, Rahaman M S, Hosokawa T, Saito T, Kurasaki M. Selenium and zinc protections against metal-(oids)-induced toxicity and disease manifestations: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 146-163
- [20] Fang Y, Xu Z, Shi Y, Pei F, Yang W J, Ma N, Kimatu B M, Liu K L, Qiu W F, Hu Q H. Protection mechanism of Se-containing protein hydrolysates from Se-enriched rice on Pb²⁺-induced apoptosis in PC12 and RAW_{264.7} cells [J]. *Food Chemistry*, 2017, 219: 391-398
- [21] 姚兰, 雷灿, 艾训儒. 富硒紫色马铃薯多酚类组成及主要微量元素分析[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(9): 1-5
Yao L, Lei C, Ai X R. Phenolic Composition and Beneficial Trace Minerals of Selenium Enriched Purple Potatoes[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(9): 1-5 (in Chinese)
- [22] Saini R K, Nile S H, Keum Y S. Food science and technology for management of iron deficiency in humans: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 53: 13-22
- [23] Saar-Reismaa P, Kotkas K, Rosenberg V, Kulp M, Kuhtinskaja M, Vaher M. Analysis of total phenols, sugars, and mineral elements in colored tubers of *Solanum tuberosum* L[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1862
- [24] 谭伟, 李晓梅, 董志刚, 谭敏, 茹慧玲, 唐晓萍. 不同浓度 NaCl 对‘达米娜’葡萄影响的主成分分析[J] 农学学报, 2017, 7(9): 42-47
Tan W, Li X M, Dong Z G, Tan M, Ru H L, Tang X P. Principal component analysis of the effect of different NaCl concentrations on ‘Tamina’ grape seedlings [J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(9): 42-47 (in Chinese)
- [25] 沈宇, 赵宏博, 赵宏, 王宇亮, 王朝兴. 超滤法分离刺五加果多糖及其抗氧化活性的研究[J]. 黑龙江医药科学, 2020, 43(5): 8-11
Shen Y, Zhao H B, Zhao H, Wang Y L, Wang C X. Study on separation of acanthopanax polysaccharide and its antioxidant activity by ultrafiltration [J]. *Heilongjiang Medicine and Pharmacy*, 2020, 43(5): 8-11 (in Chinese)
- [26] 王旭明, 赵夏夏, 周鸿凯, 陈景阳, 莫俊杰, 谢平, 叶昌辉. NaCl 胁迫对不同耐盐性水稻某些生理特性和光合特性的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 882-890
Wang X M, Zhao X X, Zhou H K, Chen J Y, Mo J J, Xie P, Ye C H. Effects of NaCl stress on some physiological and

- biochemical indices and photosynthetic physiology characteristics of rice cultivars with different salt tolerance[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(5): 882-890 (in Chinese)
- [27] 赵仁勇, 毕艳兰, 朱永义. 糙米及其制品中植酸含量的测定方法[J]. *粮食与饲料工业*, 2002(1): 44-45
- Zhao R Y, Bi Y L, Zhu Y Y. A method for determining phytic acid in cereals and their products[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2002(1): 44-45 (in Chinese)
- [28] 莫巍. 彩叶树种叶片中花青素含量的测定及动态分析[J]. *新疆农业科学*, 2007, 44(S2): 138-140
- Mo W. Determination and dynamic analysis of anthocyanin content in leaves of colored-leaf species [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(S2): 138-140 (in Chinese)
- [29] 刘江(台鸟), 周荣琪. 竹叶提取物总黄酮含量测定方法的改进[J]. *食品科技*, 2005, 30(7): 76-79
- Liu J C, Zhou R Q. Improved measurement for general flavone of bamboo leaves extract [J]. *Food Science and Technology*, 2005, 30(7): 76-79 (in Chinese)
- [30] 袁建, 蒋旭玲, 石嘉悻, 刘婷婷, 吴建苏. 微波消解: 原子荧光分光光度法测定稻米中硒含量[J]. *粮食与油脂*, 2012, 25(12): 27-30
- Yuan J, Jiang X L, Shi J Y, Liu T T, Wu J S. Determination of selenium content in rice by HG-AFS[J]. *Cereals & Oils*, 2012, 25(12): 27-30 (in Chinese)
- [31] 黄伟坤. 食品分析与检验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1989
- Huang W K. *Food Analysis and Inspection* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1989 (in Chinese)
- [32] 胞士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese)
- [33] Chen X Q, Nagao N, Itani T, Irifune K. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2783-2788
- [34] Zancani M, Peresson C, Patui S, Tubaro F, Vianello A, Macri F. Mitochondrial ferritin distribution among plant organs and its involvement in ascorbate-mediated iron uptake and release[J]. *Plant Science*, 2007, 173(2): 182-189
- [35] 周小华, 李昆志, 赵峥, 张小玲, 程霞, 冯庆. 外源抗坏血酸对水稻抗铝生理指标的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(3): 769-776
- Zhou X H, Li K Z, Zhao Z, Zhang X L, Cheng X, Feng Q. Effects of exogenous ascorbic acid on physiological indexes in rice under aluminum stress[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 769-776 (in Chinese)
- [36] 张启雷, 高辉, 彭长连. 内源抗坏血酸对水稻叶片抗氧化胁迫的影响[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 48(6): 25-29
- Zhang Q L, Gao H, Peng C L. Effects of endogenous ascorbic acid on resisting oxidative stress of rice[J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 48(6): 25-29 (in Chinese)
- [37] 沙如意, 崔艳丽, 王少林, 毛建卫, Krystyna Malinska. 植酸/植酸钠在食品工业上的应用研究进展[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(6): 293-309
- Sha R Y, Cui Y L, Wang S L, Mao J W, Malinska K. Application advances of phytic acid/sodium phytate in food industry[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(6): 293-309 (in Chinese)
- [38] 袁凤杰, 竹龙鸣, 郁晓敏, 傅旭军, 杨清华, 金杭霞, 吕晓男. 大豆低植酸突变体籽粒的抗氧化性分析[J]. *核农学报*, 2020, 34(12): 2629-2637
- Yuan F J, Zhu L M, Yu X M, Fu X J, Yang Q H, Jin H X, Lv X N. Anti-oxidation analysis on soybean seeds of low phytic acid mutants [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(12): 2629-2637 (in Chinese)
- [39] 郭怡璠, 杨淑萍, 张宏纪, 刘文林, 孙岩, 刘东军, 耿宏伟. 低植酸作物育种研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2015(7): 158-161
- Guo Y F, Yang S P, Zhang H J, Liu W L, Sun Y, Liu D J, Geng H W. Research Advances of Low Phytic Acid Crop Breeding[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(7): 158-161 (in Chinese)
- [40] 孙玲, 陈俊秋, 张名位, 池建伟, 魏振承. 稻米种皮颜色与其生物抗氧化性的关系[J]. *中国粮油学报*, 2002, 17(4): 25-27
- Sun L, Chen J Q, Zhang M W, Chi J W, Wei Z C. Relation between epidermis colour of rice and its antioxidant [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2002, 17(4): 25-27 (in Chinese)
- [41] 陈萍萍, 游月华, 戴展峰, 彭玉林, 黄水明. 有色稻抗氧化作用及其与花色苷和类黄酮含量的关系[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(2): 83-87
- Chen P P, You Y H, Dai Z F, Peng Y L, Huang S M. Antioxidation and its correlations with anthocyanin and flavonoid contents of colored rice [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(2): 83-87 (in Chinese)
- [42] 苏达, 王复标, 雷炳婷, 王珏, 潘刚, 程方民. 外源磷处理对水稻籽粒植酸含量及相关代谢基因表达的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(2): 159-166
- Su D, Wang F B, Lei B T, Wang J, Pan G, Cheng F M. The response of phytic acid and its expression profiles in rice (*Oryza sativa* L) grain as induced by phosphorus supply[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(2): 159-166 (in

- Chinese)
- [43] 李延, 徐照本, 李小菊. 水稻施磷对锌吸收的影响及磷锌指标探讨[J]. 浙江农业科学, 1992, 33(2): 77-79
Li Y, Xu Z B, Li X J. Effects of phosphorus application on zinc uptake and phosphorus and zinc indices in rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1992, 33 (2): 77-79 (in Chinese)
- [44] Iwai T, Takahashi M, Oda K, Terada Y, Yoshida K T. Dynamic changes in the distribution of minerals in relation to phytic acid accumulation during rice seed development[J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 2007-2014
- [45] Persson D P, Hansen T H, Laursen K H, Schjoerring J K, Husted S. Simultaneous iron, zinc, sulfur and phosphorus speciation analysis of barley grain tissues using SEC-ICP-MS and IP-ICP-MS [J]. *Metallomics: Integrated Biometal Science*, 2009, 1(5): 418-426
- [46] 孙鹏尧, 周芳宁, 李喜层, 曹燕华, 袁素辉, 牟德华. 紫甘薯饮料中花青素的稳定性研究[J]. 食品工程, 2014(3): 28-32
Sun P Y, Zhou F N, Li X C, Cao Y H, Yuan S H, Mou D H. Study on the stability of anthocyanin in purple sweet potato beverage[J]. *Food Engineering*, 2014(3): 28-32 (in Chinese)
- [47] 张帆, 张璐, 管玉兵, 李泽鸿. 植物硒的生理功能[C]//2010中国艾滋病防治高端论坛论文集. 香港: 香港新闻出版社, 2010
Zhang F, Zhang L, Guano Y B, Li Z H. Physiological function of plant selenium[C]. In: Proceedings of 2010 China AIDS prevention and control forum. Hong Kong: Hong Kong News Press Publisher, 2010 (in Chinese)
- [48] Pu Z E, Wei G H, Liu Z H, Chen L, Guo H, Li Y, Li Y, Dai S F, Wang J R, Li W, Jiang Q T, Wei Y M, Zheng Y L. Selenium and anthocyanins share the same transcription factors *R2R3MYB* and *bHLH* in wheat[J]. *Food Chemistry*, [2021-01-22]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129699>
- [49] Oke F, Aslim B. Biological potentials and cytotoxicity of various extracts from endemic *Origanum minutiflorum* O Schwarz & P H Davis[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(6): 1728-1733

责任编辑: 吕晓梅