

粳稻种质资源产量性状和籽粒矿质营养品质综合评价

杜怀东¹, 刘晓刚^{1,2}, 刘 阳¹, 王纪元¹, 宋佳伟¹, 孙志勇¹,
马 伟¹, 陈思怡¹, 杨小丽¹, 田 蕾¹, 李培富¹

(¹宁夏大学农学院/宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室, 银川 750021; ²宁夏润丰种业有限公司, 银川 750001)

摘要: 水稻的产量和矿质营养品质都是培育高产优质水稻新品种的关键因素。评价和筛选高产优质水稻种质, 可为水稻新品种选育提供优异亲本或中间材料。通过测定 139 份粳稻种质资源 8 个产量相关性状(株高、穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、千粒重、单穗粒重、结实率和着粒密度)和 6 个籽粒矿质营养品质相关性状(锌含量、铁含量、钙含量、镁含量、铜含量和锰含量), 利用相关性分析和主成分分析等多元统计学方法, 综合评价粳稻种质产量和矿质营养品质。结果表明: 株高、穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、单穗粒重相互之间均呈极显著正相关, 矿质元素含量彼此之间呈不同程度的正相关, 籽粒锌和镁含量与单穗粒重分别呈显著和极显著负相关。产量性状和矿质营养品质性状的主成分分析均提取到 3 个主成分, 累计贡献率分别为 78.432% 和 71.697%, 从中筛选到了 4 个产量关键性状和 5 个矿质营养品质关键性状。结合产量和矿质营养品质综合性评价结果, 共筛选到 Hungarian No.1 和 杜 10-815 两份高产且矿质元素含量较高的种质。聚类分析结果显示, 139 份种质可划分为 4 个类群。类群 I 仅包含 2 份高矿质营养含量种质; 类群 II 包含有 41 份种质, 其锌含量相对较高, 但产量性状较差; 类群 III 和 IV 分别有 69 份和 27 份种质, 其产量性状表现较好, 但类群 III 的矿质营养含量相对较低, 而类群 IV 的锰含量和钙含量相对较高。本研究结果可为高产优质水稻新品种选育提供理论依据和优异种质。

关键词: 粳稻; 种质; 产量; 矿质营养; 综合性评价

Comprehensive Evaluation of Yield Traits and Seed Mineral Nutrient Quality of *Japonica* Rice Germplasm Resources

DU Huaidong¹, LIU Xiaogang^{1,2}, LIU Yang¹, WANG Jiyuan¹, SONG Jiawei¹, SUN Zhiyong¹,
MA Wei¹, CHEN Siyi¹, YANG Xiaoli¹, TIAN Lei¹, LI Peifu¹

(¹College of Agriculture, Ningxia University/Key Laboratory of Modern Molecular Breeding for Dominant and Characteristic Crops in Ningxia, Yinchuan 750021; ²Ningxia Runfeng Seed Industry Co., Ltd, Yinchuan 750001)

Abstract: The yield and seed mineral nutrient quality are essential factors in breeding of rice varieties. Identification of rice germplasm resources with high yield and high quality can provide elite parents or intermediate lines in breeding. This study measured eight yield-related traits (plant height, spike length, grain number per panicle, filled grain number per panicle, thousand kernels weight, grain weight per panicle, seed setting rate and grain density) and six mineral nutrient quality-related traits (zinc, iron, calcium, magnesium, copper and manganese content) in 139 *japonica* rice germplasm accessions, followed by the correlation analysis and principal component analysis (PCA). The plant height, spike length, grain number per panicle, filled grain number per panicle and grain weight per panicle were positively correlated (highly significant), and the content of mineral nutrient was positively correlated with each other in different degrees. The content of Zn and Mg was significantly and negatively correlated with grain weight per panicle. PCA using either eight or six indicators

收稿日期: 2023-02-20 修回日期: 2023-03-09 网络出版日期: 2023-04-06

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230220001>

第一作者研究方向为水稻功能品质遗传育种, E-mail: huaidongdu@126.com

通信作者: 李培富, 研究方向为水稻遗传育种, E-mail: peifuli@163.com

基金项目: 宁夏农业育种专项(2018NYYZ0302); 宁夏自然科学基金优秀青年项目(2022AAC05011)

Foundation projects: Agricultural Breeding Program of Ningxia (2018NYYZ0302); Natural Science Foundation of Ningxia Outstanding Youth Project(2022AAC05011)

suggested three principal components (PCs), respectively, with the cumulative contribution rate of 78.432% and 71.697%, respectively. Four yield key indicators and five mineral nutrient quality key indicators were selected based on the loadings of these indicators in CII-3. Two germplasm accessions with high yield and high content of mineral nutrient, namely, Hungarian No.1 and Mu 10-815, were identified by combining the results of comprehensive evaluation of yield and mineral nutritional quality. The cluster analysis suggested four groups within this collection, including Group-I that contained only two germplasms with very high mineral nutrient content, Group-II that contained 41 germplasms with relatively high Zn content but poor yield traits. Group-III and IV with 69 and 27 germplasms respectively, exhibited superior yield traits. Group-III, however, had relatively low mineral nutrient content, whereas Group-IV had relatively high amounts of Mn and Ca content. Collectively, this study can provide theoretical basis and excellent germplasm for the selection and breeding of new high yield and high quality rice varieties.

Key words: *japonica* rice; germplasm; yield; mineral nutrition; comprehensive evaluation

水稻是世界上最主要的粮食作物之一,是亚洲人膳食中能量和矿物质营养的主要来源^[1-2]。随着世界人口的不断增长,耕地面积的不断减少,提高作物产量和矿物质元素含量便成了解决粮食危机最好的方法。水稻产量是一个复杂的数量性状,穗数、穗粒数、千粒重是水稻产量构成的主要因素^[3-5]。同时株高、穗长、单穗粒重也与产量密切相关^[6-7]。布哈丽且木·阿不力孜等^[8]使用主成分分析法对新疆稻区 16 份主栽水稻品种的 9 个产量和品质性状进行综合性评价,筛选出 3 份优质丰产的水稻品种。陈越等^[9]测定了云南省 881 份水稻种质资源的 12 个农艺性状,通过 Shannon-Wiener 多样性指数和相关性分析,以及参试种质的聚类分析,明确了云南水稻种质的多样性与亲缘关系;结合主成分分析与隶属函数法计算综合评价 *D* 值,筛选出 3 份优异的水稻亲本资源或中间材料。潘晓雪等^[10]则以 106 份水稻种质为研究对象,连续两年测定 12 个农艺性状,共筛选出 9 份大穗型品种、4 份高单株产量品种和 10 份籽粒细长型品种。

然而,一味地追求水稻高产则容易造成水稻矿物质营养缺乏的问题^[11]。矿物质营养的缺乏容易导致隐性饥饿,使人体出现生长发育缓慢、免疫系统功能紊乱、血糖升高、贫血等疾病^[11-12]。例如锌是人体必需的一种微量元素,是许多酶、转录因子和细胞因子的辅助因子^[13-14],缺锌会导致糖尿病、高血压、儿童发育迟缓、器官缺陷等疾病^[15-17]。铁则是血红蛋白和血红蛋白的主要组成成分^[17-18],缺铁会导致贫血和心力衰竭^[19-20]。缺钙会导致骨质疏松、佝偻病^[21];缺镁则会导致凝血功能障碍^[22];缺铜也会导致贫血、脊髓病等^[23-24]。因此,通过饮食摄入必需的矿物质营养对人体的健康发育和疾病预防都至关重

要。生物强化可以增加水稻中矿物质营养含量,是解决隐性饥饿人群营养缺乏最便宜和可持续性的最佳方案^[25-26]。Wissuwa 等^[27]通过研究不同含锌量土壤上的水稻品种籽粒锌含量,发现天然土壤中锌含量、水稻基因型和施肥量均会影响籽粒锌浓度,但是同一栽培水平条件下水稻籽粒的锌含量主要由基因型决定。Anuradha 等^[28]研究表明野生稻是高铁和高锌的良好来源,并从 126 份水稻中筛选出 2 个高铁高锌的野生种质和一些锌铁含量较高的品种。Jiang 等^[29]的研究表明糙米中矿物质营养含量显著高于精米,并筛选出 10 个矿物质含量较丰富的水稻品种。

随着时代的发展和人民生活水平的提高,我国水稻育种经历了矮化育种、杂种优势利用和超级稻培育 3 次飞跃,育种目标从高产到高抗、优质和高产并重,育种理念实现了从高产优质逐步提升为少投入、多产出、环境友好的转变^[30]。尽管科学家们已经在水稻产量和矿物质营养品质上进行了大量研究,但是由于水稻的产量和矿物质元素含量是一对矛盾的性状,在种质筛选和育种中如何协调二者之间的关系仍是一个难题。因此,本研究利用相关性分析、主成分分析、聚类分析等多元统计学方法,对 139 份粳稻种质资源的产量相关性性状和籽粒矿物质营养含量进行综合评价,以期筛选出高产高矿物质营养含量的种质,解析协调产量和矿物质营养品质关系的关键因素,为培育高产优质水稻新品种提供亲本或中间材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

139 份粳稻种质资源(表 1)分别在 2020 和 2021

年种植于宁夏大学教学实验农场(106°15'E, 38°14'N), 4月中旬播种, 5月上旬插秧, 每份种质种植 2 行, 行长 1.2 m, 行距 0.26 m, 株距 0.1 m, 水稻田间管理同大田栽培技术一致。

表 1 139 份粳稻种质资源名称、来源、类型

Table 1 Names, origin and types of 139 Japonica rice germplasm accessions

编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin
1	通禾 899	改良种	中国吉林	33	980172	改良种	中国北京	65	盐粳 218	改良种	中国辽宁
2	京香 2 号	改良种	中国北京	34	云村稻	地方种	朝鲜	66	2014-14	改良种	中国新疆
3	Cigalon	地方种	法国	35	京引 58	改良种	日本	67	新稻 10 号	改良种	中国新疆
4	中作 59	改良种	中国北京	36	降糖稻	改良种	中国吉林	68	阿稻 29	改良种	中国新疆
5	831	改良种	中国北京	37	小粒糯	改良种	中国吉林	69	沈农 1304	改良种	中国辽宁
6	水原 55 号	改良种	韩国	38	长白 9 号	改良种	中国吉林	70	花粳 22	改良种	中国辽宁
7	花系 N9	改良种	中国北京	39	长选 09-119	改良种	中国吉林	71	黑交 06-213	改良种	中国黑龙江
8	241	改良种	中国辽宁	40	通粘 1 号	改良种	中国吉林	72	龙粳香 1 号	改良种	中国黑龙江
9	Bertone	地方种	葡萄牙	41	E7	改良种	中国吉林	73	宁粳 16 号	改良种	中国宁夏
10	农林 22	改良种	日本	42	F7	改良种	中国吉林	74	秋田小町	改良种	日本
11	Farry	地方种	法国	43	龙粳 25	改良种	中国黑龙江	75	吉 08-47	改良种	中国吉林
12	Galhardo	地方种	葡萄牙	44	松 820	改良种	中国黑龙江	76	宁粳 50 号	改良种	中国宁夏
13	星光	改良种	日本	45	龙洋 1 号	改良种	中国黑龙江	77	鉴 1335	改良种	中国宁夏
14	宁恢 1 号	改良种	中国江苏	46	牡 10-815	改良种	中国黑龙江	78	鉴 1344	改良种	中国宁夏
15	Taichengsen16	地方种	中国北京	47	垦选 2012-16	改良种	中国黑龙江	79	08GM38	改良种	中国新疆
16	辽开 79	改良种	中国辽宁	48	松 08-378	改良种	中国黑龙江	80	鉴 1345	改良种	中国宁夏
17	Gostima	地方种	阿尔巴尼亚	49	牡 12-1782	改良种	中国黑龙江	81	鉴 1350	改良种	中国宁夏
18	823349	改良种	中国江苏	50	北粳 1202	改良种	中国辽宁	82	2012-441	改良种	中国宁夏
19	中作 75	改良种	中国北京	51	龙生 03011	改良种	中国黑龙江	83	2013-30	改良种	中国宁夏
20	Hitomehore	地方种	日本	52	超级稻-3	改良种	中国吉林	84	中造 804-1	改良种	中国北京
21	ユガネマサリ	地方种	日本	53	长粒-4	改良种	中国吉林	85	159-1	改良种	中国山西
22	Hungarian No.1	地方种	澳大利亚	54	常规稻-1	改良种	中国吉林	86	六粳 2 号	改良种	中国贵州
23	Banat2951	地方种	澳大利亚	55	早生光头	地方种	日本	87	毕粳 42 号	改良种	中国贵州
24	新竹 4 号	改良种	中国台湾	56	Muthomate	地方种	日本	88	13-1044	改良种	中国宁夏
25	415-1	改良种	中国江苏	57	Daniela	地方种	巴西	89	2012QX-18	改良种	中国宁夏
26	738-10	改良种	中国江苏	58	凤玉	地方种	日本	90	宁资 629	改良种	中国宁夏
27	汤 K	地方种	日本	59	Hrborio Cyauco	地方种	南斯拉夫	91	08X1271	改良种	中国宁夏
28	200070	改良种	中国吉林	60	东北小粒种	地方种	中国黑龙江	92	京宁 4 号	改良种	中国宁夏
29	抚 105	改良种	中国辽宁	61	吉大 6 号	改良种	中国吉林	93	节 15	改良种	中国宁夏
30	丰优 520	改良种	中国吉林	62	秋岭	改良种	中国安徽	94	京宁 10 号	改良种	中国宁夏
31	Calrose	地方种	美国	63	Kele(34979)	地方种	孟加拉	95	宁大 15149	改良种	中国宁夏
32	L03075	改良种	中国吉林	64	大黑	地方种	日本	96	富源 4 号	改良种	中国宁夏

表1(续)

编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	名称 Name	类型 Type	来源 Origin
97	宁粳51号	改良种	中国宁夏	112	隆优649	改良种	中国天津	127	S3-11	改良种	中国吉林
98	花东稻	改良种	韩国	113	晋10077	改良种	中国山西	128	珍珠稻	地方种	中国吉林
99	奥羽392	改良种	日本	114	松辽13-2115	改良种	中国吉林	129	通院515	改良种	中国吉林
100	奥羽394	改良种	日本	115	中作12672	改良种	中国北京	130	松粳3号	改良种	中国黑龙江
101	里歌	地方种	日本	116	京宁29	改良种	中国宁夏	131	龙粳807	改良种	中国黑龙江
102	舞姬	改良种	日本	117	松辽1508	改良种	中国吉林	132	松峰899	改良种	中国吉林
103	中遗804-1号	改良种	中国北京	118	花128	改良种	中国宁夏	133	宏科59	改良种	中国吉林
104	山形86	地方种	日本	119	宁粳53号	改良种	中国宁夏	134	延粳28	改良种	中国吉林
105	新云峰稻	地方种	韩国	120	花132	改良种	中国宁夏	135	吉宏6	改良种	中国吉林
106	平北30号	改良种	朝鲜	121	中科8043	改良种	中国北京	136	吉优1769	改良种	中国吉林
107	咸南23号	改良种	朝鲜	122	铁10A7	改良种	中国辽宁	137	吉农大888	改良种	中国吉林
108	镜城8号	改良种	朝鲜	123	S2-3	改良种	中国吉林	138	通禾867	改良种	中国吉林
109	关东15	改良种	日本	124	S2-4	改良种	中国吉林	139	盐城268	改良种	中国江苏
110	东稻4号	改良种	中国吉林	125	S2-14	改良种	中国吉林				
111	春阳	改良种	日本	126	S3-4	改良种	中国吉林				

1.2 试验方法

1.2.1 水稻产量相关性状测定 对139份种质资源的株高、穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、千粒重、单穗粒重进行测定,并计算结实率和着粒密度。考种性状统计标准参照《水稻品种实验田间记载及室内考种项目与标准》^[31]。

$$\text{结实率}(\%) = \frac{\text{每穗实粒数}}{\text{每穗总粒数}} \times 100\%$$

$$\text{着粒密度}(\text{粒}/\text{cm}) = \frac{\text{每穗总粒数}}{\text{穗长}}$$

1.2.2 水稻籽粒矿质营养含量测定 使用原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定水稻籽粒中矿物质元素含量^[32],将水稻籽粒于80℃烘干水分,使用砗谷机(东孚久恒JDMZ 100)将水稻籽粒磨成糙米,粉碎机(飞穗JFSD-70)将糙米碾碎成糙米粉。称取1g左右(精确至0.0001g)的糙米粉置于锥形瓶中,加入约10mL混合酸($V_{\text{硝酸}}:V_{\text{高氯酸}}=5:1$)加盖漏斗后浸泡过夜,在电热板(格丹纳HT-400)上加热(120℃ 0.5h,180℃ 2h,220℃至产生大量白烟),待白烟消散,溶液呈无色或淡黄色后停止加热,将消煮液定容至25mL,过滤、稀释。通过稀释1000mg/kg标准溶液制备校准标准溶液,使用原子吸收分光光度计测定水稻籽粒中矿物质含量。

1.3 数据统计与分析

使用Excel 2019整理数据,利用SPSS 26.0对产量相关性状和矿质营养品质性状进行数据统计和主成分分析,参照耿雷跃等^[33]计算139份粳稻种质产量与矿质营养品质各主成分隶属函数值、权重和综合评价(D)并进行排名,利用R 4.2.2、TBtools和Origin 2023分别进行相关性、聚类分析和差异显著性绘图。

2 结果与分析

2.1 粳稻种质产量相关性状与矿质营养含量统计分析

分析139份粳稻种质资源的8个产量相关性状和水稻籽粒的6个矿质营养品质相关性状(表2)。结果显示,产量相关性状平均变异系数为22.42%,其中单穗粒重的变异系数最大,达32.01%,株高和千粒重的变异系数相对较小,为14.00%和14.01%。矿质营养品质相关性状平均变异系数为21.77%,其中钙元素含量变异系数最大,达30.26%,镁元素含量的变异系数最小,仅为8.11%。表明139份粳稻种质资源的产量和品质性状变异丰富,具有丰富的遗传基础,可利用多元统计学评价方法筛选优良种质资源。

表2 粳稻种质资源产量相关性状和矿质营养含量的参数统计

Table 2 Statistical parameters of yield-related traits and mineral nutrient content of japonica rice germplasm

性状 Traits	范围 Range	平均值 Mean	中值 Median	标准差 SD	变异系数(%) CV
株高(cm)PH	36.73~111.23	83.44	84.23	11.73	14.00
穗长(cm)SL	10.20~23.27	17.10	17.07	2.69	15.74
每穗总粒数 GNP	57.40~212.77	108.75	106.70	32.08	29.49
每穗实粒数 FGNP	69.61~120.70	69.61	68.33	20.49	29.43
千粒重(g)TKW	12.60~37.10	26.34	26.10	3.69	14.01
单穗粒重(g)GWP	0.33~3.29	1.85	1.82	0.59	32.01
结实率(%)SSR	25.57~93.19	64.67	0.67	12.70	19.64
着粒密度(粒/cm)GD	3.17~10.74	6.31	6.06	1.58	25.01
锌含量(mg/kg)Zn	11.58~38.67	19.45	18.67	4.06	20.87
铁含量(mg/kg)Fe	1.13~19.08	10.35	10.17	2.69	25.95
铜含量(mg/kg)Cu	1.25~4.67	2.83	144.34	0.69	24.50
锰含量(mg/kg)Mn	11.25~37.53	23.26	22.59	4.87	20.93
镁含量(mg/kg)Mg	922.51~1491.67	1123.27	2.83	91.14	8.11
钙含量(mg/kg)Ca	34.86~265.61	148.13	146.67	44.82	30.26

PH: Plant height; SL: Spike length; GNP: Grain number per panicle; FGNP: Filled grain number per panicle; TKW: Thousand kernels weight; GWP: Grain weight per panicle; SSR: Seed setting rate; GD: Grain density; Zn: Zn content; Fe: Fe content; Ca: Ca content; Mn: Mn content; Cu: Cu content; Mg: Mg content; The same as below

2.2 粳稻种质产量相关性状和矿质营养品质性状的相关性分析

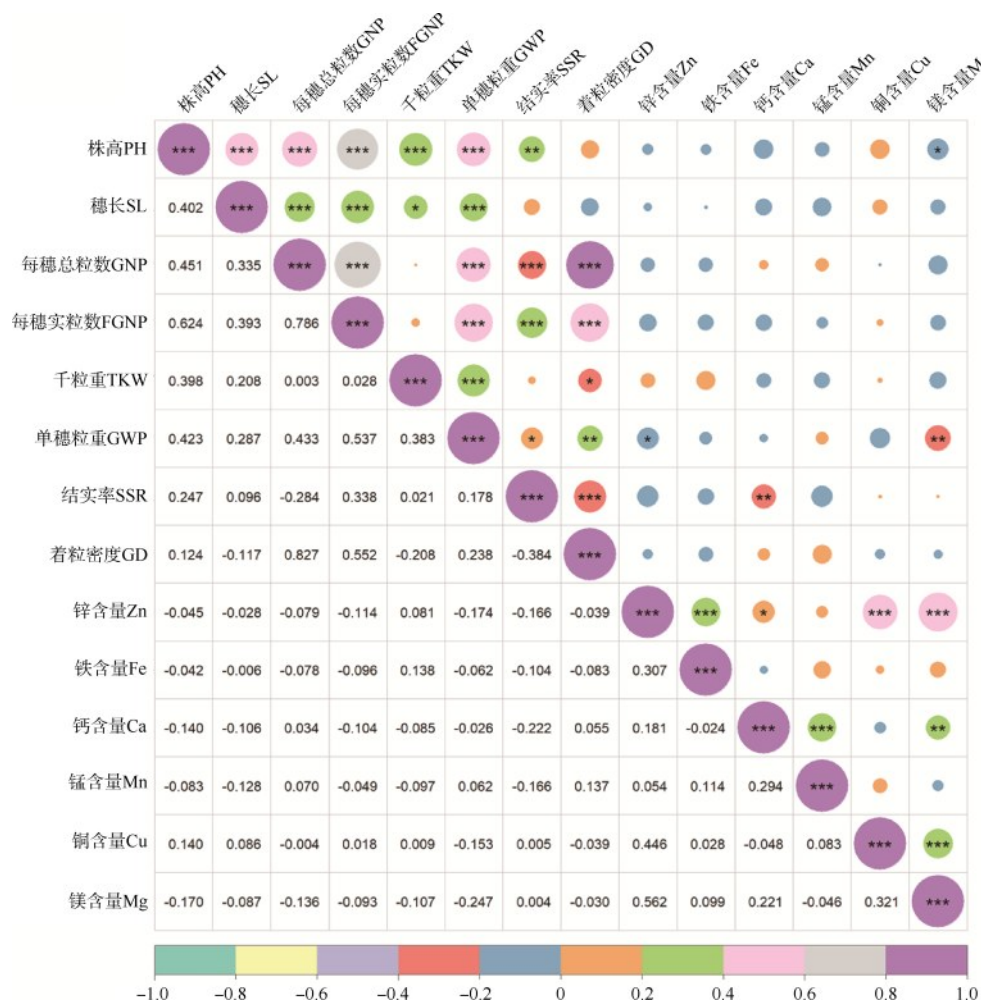
8个产量相关性状和6个矿质营养品质性状的相关性分析结果表明(图1),8个产量相关性状中株高、穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、单穗粒重相互之间均呈极显著正相关($P<0.001$);每穗总粒数、每穗实粒数与着粒密度三者之间相互呈极显著正相关($P<0.001$);结实率与每穗总粒数极显著负相关($P<0.001$),但与每穗实粒数表现为极显著正相关($P<0.001$)。在6个矿质营养品质性状中锌含量与铁含量、铜含量、镁含量均呈极显著正相关($P<0.001$),与钙含量显著正相关($P<0.05$),钙含量则与锰含量和镁含量极显著正相关($P<0.001$, $P<0.01$),铜含量也与镁含量极显著正相关($P<0.001$)。在8个产量性状与6个矿质营养品质性状中水稻籽粒锌含量与单穗粒重显著负相关($P<0.05$),钙含量与结实率极显著负相关($P<0.01$),镁含量与单穗粒重呈极显著负相关($P<0.01$)。表明在139份粳稻种质资源中部分产量和矿质营养品质性状之间存在复杂的相关关系。

2.3 粳稻种质产量相关性状和矿质营养品质性状的主成分分析

对8个产量相关性状进行主成分分析(表3),共

提取了3个主成分,对表型变异解释的累计贡献率达到78.432%。其中,第1主成分的贡献率为40.840%,特征值为3.267,主要包含株高、每穗总粒数、每穗实粒数3个作用因子。第2、3主成分的贡献率分别为23.801%和13.791%,特征值均大于1.1,其中,第2主成分中着粒密度的载荷较高,为-0.760,是该主成分的主要作用因子。综合3个主成分所携带的信息,可用株高、每穗总粒数、每穗实粒数和着粒密度4个性状来概括8个产量相关性状的大部分信息。

对6个矿质营养品质相关性状进行主成分分析(表4),结果显示,提取到的3个主成分对功能品质性状的表型变异解释累计贡献率达到71.697%。其中第1主成分的贡献率为33.817%,特征值为2.029,锌含量和镁含量的载荷较高,分别为0.871和0.769,是第1主成分的主要作用因子;第2主成分的贡献率为20.865%,特征值为1.252,钙元素和锰元素含量的载荷相对较高,是该主成分的主要作用因子。第3主成分的贡献率为17.016%,特征值为1.021,在该主成分中铁元素含量为主要作用因子。综合3个主成分所携带的信息,在3个主成分中,铜元素含量的载荷均较低。因此选择锌、铁、钙、镁和锰元素含量5个性状来概括矿质营养品质的大部分信息。



左下角为相关系数；右上角不同颜色圆圈表示相关性大小；*表示显著相关($P < 0.05$)；**表示极显著相关($P < 0.01$)；***表示极显著相关($P < 0.001$)；下同

The correlation coefficient is shown in the lower left corner, and the different colored circles in the upper right corner indicate the correlation size; * represent a significant correlation ($P < 0.05$); ** represent a very significant correlation ($P < 0.01$) and *** represent a very significant correlation ($P < 0.001$); The same as below

图1 14个表型性状的相关系数矩阵

Fig. 1 Correlation coefficient matrix of 14 phenotypic traits

表3 粳稻种质资源产量相关性状的成分分析

Table 3 Principal component analysis of yield-related traits of japonica rice germplasm

性状 Traits	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3
株高PH	0.728	0.387	-0.038
穗长SL	0.500	0.382	-0.110
每穗总粒数GNP	0.872	-0.452	-0.061
每穗实粒数FGNP	0.912	-0.003	0.360
千粒重TKW	0.250	0.555	-0.684
单穗粒重GWP	0.692	0.253	-0.137
结实率SSR	0.086	0.675	0.685
着粒密度GD	0.589	-0.760	0.024
特征值Eigenvalue	3.267	1.904	1.103
贡献率(%)Contribution	40.840	23.801	13.791
累计贡献率(%)Cumulative contribution	40.840	64.641	78.432

表4 粳稻种质资源矿质营养的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of mineral nutrient of japonica rice germplasm

性状 Traits	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分3 PC3
锌含量 Zn	0.871	-0.127	0.064
铁含量 Fe	0.365	0.034	0.877
钙含量 Ca	0.337	0.730	-0.342
锰含量 Mn	0.198	0.769	0.190
铜含量 Cu	0.627	-0.297	-0.140
镁含量 Mg	0.769	-0.148	-0.274
特征值 Eigenvalue	2.029	1.252	1.021
贡献率(%) Contribution	33.817	20.865	17.016
累计贡献率(%) Cumulative contribution	33.817	54.682	71.697

2.4 粳稻种质产量相关性状与品质性状的综合评价

为评价 139 份粳稻种质资源产量和矿质营养品质含量的高低,分别计算产量和矿质营养品质主成分的隶属函数值、权重和综合评价值(D),并对 139 份粳稻种质进行排名。产量综合性评价结果显示(表5),编号为 125 号的 S2-14 的综合性评价值 D_{yi} 最高,为 0.755;编号为 60 的东北小粒种综合性评价值 D_{yi} 最低,为 0.108。综合性评价值 D_{yi} 的 1~10 名分别为 S2-14、牡 10-815、镜城 8 号、松 08-378、宁粳 51 号、Hungarian No.1、鉴 1345、春阳、花东稻和 Galhardo;综合性评价值 D_{yi} 的 130~139 名分别为 2014-14、823349、中作 59、新稻 10 号、Hrborio Cyauco、花梗 22、长粒-4、里歌、Banat2951 和东北小粒种。

矿质营养综合评价结果显示(表5),编号为 22

号的 Hungarian No.1 的综合评价排名第一,为 0.719;编号为 131 的龙粳 807 综合性评价值 D_{mn} 最低,为 0.113。综合性评价值 D_{mn} 的前 10 名分别为 Hungarian No.1、东北小粒种、Gostima、花 128、黑交 06-213、823349、中作 59、Banat2951、E7 和盐粳 218;综合性评价值 D_{mn} 的后 10 名分别为关东 15、东稻 4 号、Taichengsen16、S2-4、奥羽 392、咸南 23 号、里歌、241、中遗 804-1 号和龙粳 807。

同时考虑种质资源的产量性状和矿质营养品质性状的综合评价结果,共筛选到 2 份富含矿质营养且产量较高的种质,分别为 Hungarian No.1 和牡 10-815。这两份种质在 139 份种质产量性状和矿质营养品质的综合评价排名中,均位居前 20 名,可用作高产、高矿物质育种的亲本种质或中间材料。

表5 139 份粳稻种质资源综合评价 D 值和排名Table 5 D values, comprehensive ranking of 139 Japonica rice germplasm accessions

编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality		编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality	
		D_{yi} 值 D_{yi} value	排名 Ranking	D_{mn} 值 D_{mn} value	排名 Ranking			D_{yi} 值 D_{yi} value	排名 Ranking	D_{mn} 值 D_{mn} value	排名 Ranking
1	通禾 899	0.576	49	0.524	11	8	241	0.581	47	0.235	137
2	京香 2 号	0.582	45	0.494	17	9	Bertone	0.533	71	0.449	32
3	Cigalon	0.606	37	0.430	42	10	农林 22	0.580	48	0.286	124
4	中作 59	0.360	132	0.537	7	11	Farry	0.371	126	0.479	18
5	831	0.679	11	0.402	63	12	Galhardo	0.684	10	0.357	86
6	水原 55 号	0.543	66	0.336	105	13	星光	0.548	63	0.350	93
7	花系 N9	0.440	111	0.454	28	14	宁恢 1 号	0.564	59	0.385	71

表5 (续)

编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality		编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality	
		D_{yi} 值 D_{yi} value	排名 Ranking	D_{mn} 值 D_{mn} value	排名 Ranking			D_{yi} 值 D_{yi} value	排名 Ranking	D_{mn} 值 D_{mn} value	排名 Ranking
15	Taichengsen16	0.546	64	0.266	132	47	垦选2012-16	0.421	116	0.457	24
16	辽开79	0.625	28	0.275	129	48	松08-378	0.740	4	0.414	54
17	Gostima	0.394	121	0.639	3	49	牡12-1782	0.399	118	0.451	31
18	823349	0.360	131	0.538	6	50	北粳1202	0.452	106	0.345	98
19	中作75	0.398	120	0.461	23	51	龙生03011	0.431	112	0.440	39
20	Hitomehore	0.380	124	0.321	109	52	超级稻-3	0.453	105	0.354	89
21	ユガネマサリ	0.386	122	0.319	110	53	长粒-4	0.249	136	0.385	72
22	Hungarian No.1	0.710	6	0.719	1	54	常规稻-1	0.558	62	0.404	61
23	Banat2951	0.212	138	0.534	8	55	早生光头	0.448	109	0.375	74
24	新竹4号	0.544	65	0.342	101	56	Muthhomate	0.451	107	0.280	126
25	415-1	0.543	67	0.422	48	57	Daniela	0.472	91	0.293	122
26	738-10	0.422	115	0.446	34	58	凤玉	0.464	95	0.332	106
27	汤K	0.493	86	0.456	26	59	Hrborio Cyauco	0.310	134	0.452	29
28	200070	0.425	113	0.403	62	60	东北小粒种	0.108	139	0.702	2
29	抚105	0.526	73	0.466	21	61	吉大6号	0.424	114	0.349	94
30	丰优520	0.583	44	0.503	15	62	秋岭	0.378	125	0.449	33
31	Calrose	0.612	33	0.440	38	63	Kele(34979)	0.596	39	0.417	50
32	L03075	0.584	42	0.344	99	64	大黑	0.363	129	0.366	80
33	980172	0.454	104	0.421	49	65	盐粳218	0.458	99	0.534	10
34	云村稻	0.533	70	0.425	46	66	2014-14	0.363	130	0.475	19
35	京引58	0.460	97	0.355	88	67	新稻10号	0.338	133	0.514	13
36	降糖稻	0.643	23	0.514	14	68	阿稻29	0.480	90	0.436	41
37	小粒糯	0.489	88	0.428	43	69	沈农1304	0.466	93	0.369	78
38	长白9号	0.572	51	0.346	96	70	花粳22	0.261	135	0.387	70
39	长选09-119	0.504	82	0.385	73	71	黑交06-213	0.365	128	0.568	5
40	通粘1号	0.650	20	0.365	82	72	龙粳香1号	0.482	89	0.426	44
41	E7	0.461	96	0.534	9	73	宁粳16号	0.504	81	0.402	64
42	F7	0.650	21	0.441	37	74	秋田小町	0.633	25	0.410	59
43	龙粳25	0.469	92	0.301	119	75	吉08-47	0.520	75	0.413	56
44	松820	0.659	18	0.310	113	76	宁粳50号	0.625	27	0.279	127
45	龙洋1号	0.618	30	0.346	97	77	鉴1335	0.586	41	0.437	40
46	牡10-815	0.745	2	0.466	20	78	鉴1344	0.613	32	0.456	25

表 5 (续)

编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality		编号 No.	名称 Name	产量性状 Yield traits		矿质营养品质 Mineral nutrient quality	
		D_{yi} 值	排名	D_{mn} 值	排名			D_{yi} 值	排名	D_{mn} 值	排名
		D_{yi} value	Ranking	D_{mn} value	Ranking			D_{yi} value	Ranking	D_{mn} value	Ranking
79	08GM38	0.624	29	0.359	84	110	东稻4号	0.676	13	0.270	131
80	鉴1345	0.699	7	0.306	116	111	春阳	0.691	8	0.305	117
81	鉴1350	0.636	24	0.308	114	112	隆优649	0.543	68	0.297	120
82	2012-441	0.615	31	0.374	75	113	晋10077	0.594	40	0.390	67
83	2013-30	0.649	22	0.445	35	114	松辽13-2115	0.570	53	0.365	81
84	中造804-1	0.631	26	0.340	102	115	中作12672	0.519	76	0.349	95
85	159-1	0.444	110	0.411	58	116	京宁29	0.567	55	0.355	87
86	六粳2号	0.495	85	0.519	12	117	松辽1508	0.509	78	0.354	90
87	毕粳42号	0.607	34	0.357	85	118	花128	0.455	102	0.622	4
88	13-1044	0.667	16	0.354	91	119	宁粳53号	0.607	35	0.425	45
89	2012QX-18	0.678	12	0.455	27	120	花132	0.562	61	0.409	60
90	宁资629	0.673	14	0.451	30	121	中科8043	0.604	38	0.318	111
91	08X1271	0.567	54	0.416	51	122	铁10A7	0.506	80	0.306	115
92	京宁4号	0.492	87	0.411	57	123	S2-3	0.455	103	0.353	92
93	节15	0.451	108	0.416	52	124	S2-4	0.566	57	0.257	133
94	京宁10号	0.581	46	0.424	47	125	S2-14	0.755	1	0.275	128
95	宁大15149	0.563	60	0.389	69	126	S3-4	0.535	69	0.414	55
96	富源4号	0.659	17	0.329	107	127	S3-11	0.513	77	0.390	66
97	宁粳51号	0.711	5	0.371	77	128	珍珠稻	0.458	100	0.326	108
98	花东稻	0.685	9	0.464	22	129	通院515	0.653	19	0.389	68
99	奥羽392	0.566	58	0.253	134	130	松粳3号	0.456	101	0.339	104
100	奥羽394	0.368	127	0.442	36	131	龙粳807	0.502	83	0.113	139
101	里歌	0.226	137	0.236	136	132	松峰899	0.606	36	0.415	53
102	舞姬	0.506	79	0.401	65	133	宏科59	0.669	15	0.361	83
103	中遗804-1号	0.497	84	0.219	138	134	延粳28	0.583	43	0.303	118
104	山形86	0.520	74	0.497	16	135	吉宏6	0.412	117	0.314	112
105	新云峰稻	0.381	123	0.343	100	136	吉优1769	0.398	119	0.280	125
106	平北30号	0.567	56	0.340	103	137	吉农大888	0.459	98	0.292	123
107	咸南23号	0.570	52	0.248	135	138	通禾867	0.574	50	0.373	76
108	镜城8号	0.742	3	0.367	79	139	盐城268	0.464	94	0.297	121
109	关东15	0.528	72	0.270	130						

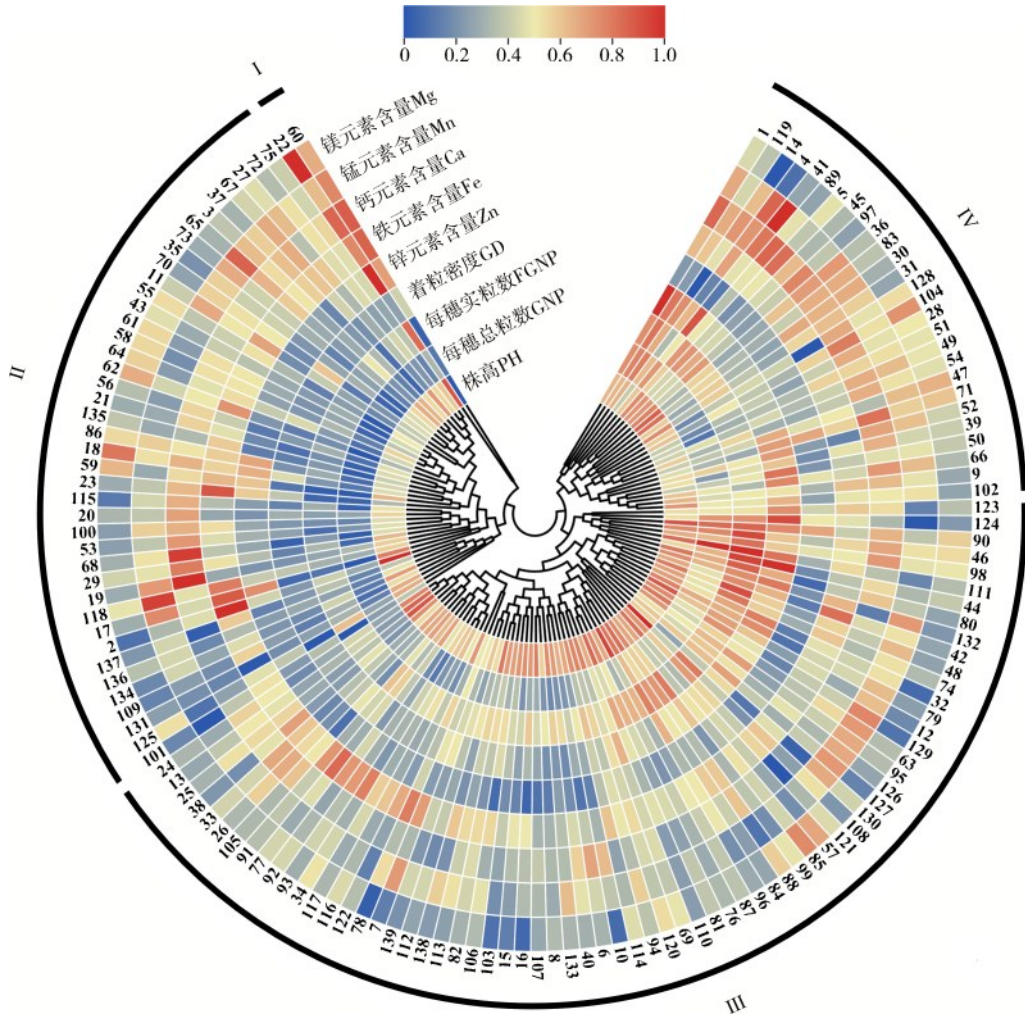
D_{yi} 值表示产量性状的综合评价 D 值, D_{mn} 值表示矿质营养性状的综合评价 D 值

D_{yi} value indicates the combined evaluation D value for yield traits, and D_{mn} value indicates the combined evaluation D value for mineral nutrient traits

2.5 粳稻种质资源产量和矿质营养品质相关性状的聚类分析

利用主成分分析得到的4个产量相关重要性状和5个矿质营养品质重要性状进行聚类分析。结果表明139份粳稻种质资源可划分为4大族群(图2)。其中族群I仅包含有2份种质,分别为 Hungarian No.1 和东北小粒种,这两个种质是矿质营养品质综

合评价的前2名,矿质营养含量最高。族群II包含有41份种质,该族群的锌含量相对较高,但是产量相关性状表现较差。族群III是种质数量最大的族群,共有69份种质,族群IV则有27份种质。族群III和IV产量性状均表现较好,但族群III的矿质营养含量相对较低,而族群IV的锰含量和钙含量相对较高。



图中编号同表1编号

The numbers in the figure are the same as those in table 1

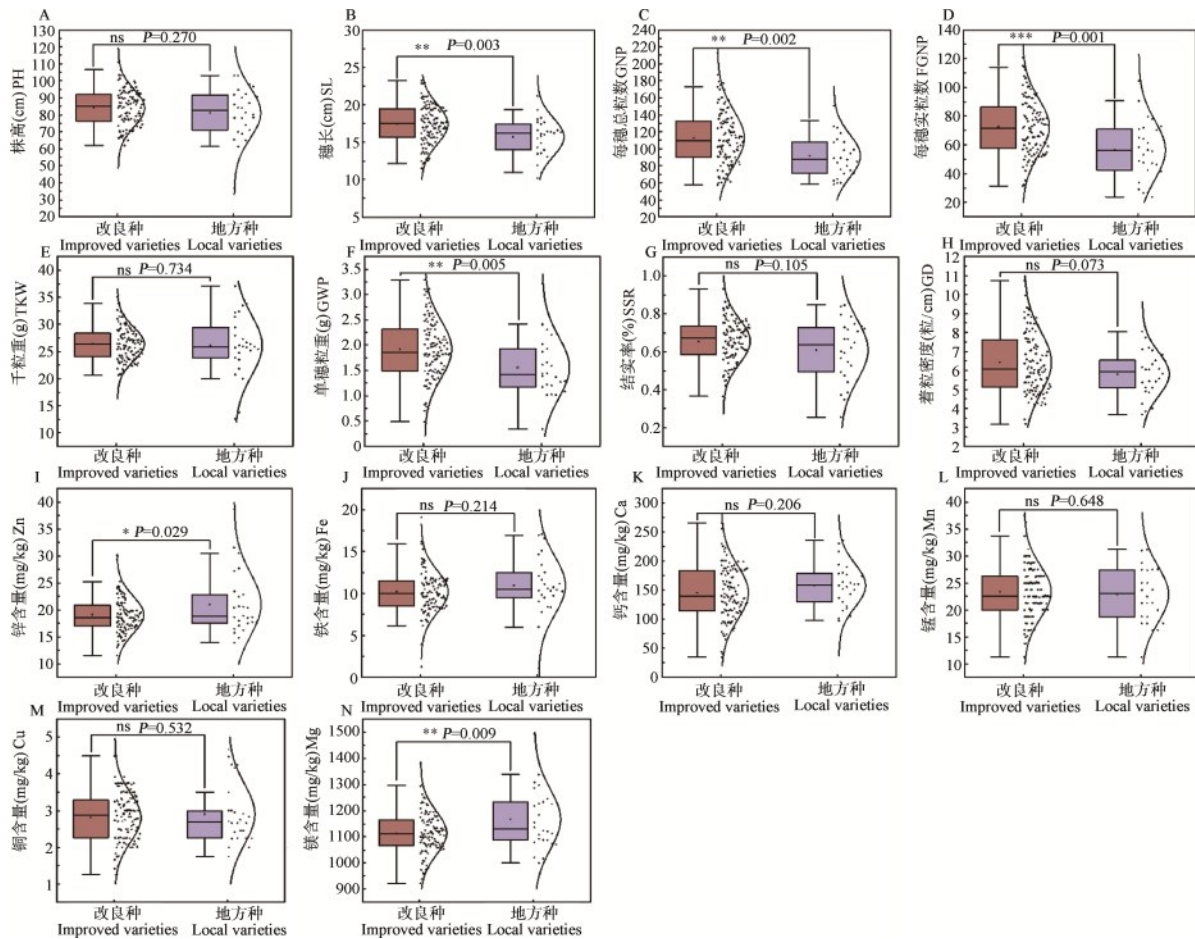
图2 139份粳稻种质资源聚类分析结果

Fig. 2 Cluster analysis results of 139 japonica rice germplasm accessions

2.6 不同种质类型产量和矿质营养品质的差异显著性分析

139份粳稻种质中包含了114份改良种和25份地方种,对两种类型种质的8个产量性状和6个矿质营养品质性状进行差异显著性分析(图3)。结果显示,在产量性状方面,改良种的穗长、每穗总粒

数、每穗实粒数、单穗粒重均极显著高于地方种,株高、千粒重、结实率和着粒密度4个性状在两类种质间差异未达到显著水平。矿质营养含量方面,地方种的锌元素和镁含量则分别显著和极显著高于改良种,另外4个矿质营养元素在两类种质间差异未达到显著水平。



种质左侧为箱线图; 右侧为正态分布图; ns表示无显著性

The germplasm is plotted as a box line on the left and a normal distribution on the right; ns represent no significant

图3 不同种质类型产量和矿质营养品质的差异显著性分析

Fig. 3 Significance analysis of differences in yield and mineral nutrient quality of different germplasm types

3 讨论

3.1 水稻产量性状和籽粒矿质营养含量关键性状的筛选

水稻产量和籽粒矿质营养品质关键性状的筛选是水稻品种综合评价的基础。陈越等^[9]认为二次枝梗数、一次枝梗数、每穗总粒数、谷粒长、千粒重、穗长和谷粒宽是评价水稻植株农艺性状的重要性状。徐清宇等^[34]研究发现钙、镁、钠、镍、铜、砷、锰、磷、锌、钾和铁元素是评价稻米矿质元素含量的重要性状。雷振山等^[35]则认为株高、穗长、分蘖数、千粒重、结实率、钾、铜、铁、硒、锌、镁和钙含量是评价稻米农艺性状和矿质元素的重要性状。本研究对139份粳稻种质资源的8个产量相关性状和6个籽粒矿质元素含量分别进行主成分分析,通过提取载荷量较高的性状,筛选到株高、每穗总粒数、每穗实粒数、着粒密度4个产量相关的关键性状以及籽粒锌、铁、钙、锰、镁元素含量5个矿质营养品质的关键

性状,该结果与前人的研究相似。

3.2 水稻产量性状和籽粒矿质营养品质之间的矛盾与平衡

水稻的产量和籽粒矿质营养品质通常表现为负相关关系。曾亚文等^[36]认为钙含量、镁含量和锰含量均与株高极显著负相关;Anandan等^[37]的研究发现籽粒产量与矿质营养含量呈负相关。本研究发现了与Anandan等^[37]类似的结果,单穗粒重同样与锌含量和镁含量呈显著或极显著负相关,结实率与钙含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。为平衡水稻产量性状和籽粒矿质营养品质之间的矛盾,可以结合水稻产量和籽粒矿质营养品质综合性评价结果,利用籽粒高矿质营养含量的种质作为亲本,产量较高且米质较好的改良品种作为轮回亲本,回交构建渗入系,结合分子标记辅助选择等手段,筛选籽粒矿质营养含量和产量相对较高,且米质优良的高代回交品系。例如Hungarian No.1和东北小粒种都具有籽粒矿质营养含量较高的优点,但是Hungarian No.1

株高较高、易倒伏、落粒,且米质较差;而东北小粒种则是具有株高极矮、产量极低、米质较差的缺点。这些种质均可以作为供体亲本,以产量较高和米质较好的改良种(如S2-14)作为轮回亲本,通过多代回交,在后代中筛选高产优质的品系。

3.3 不同种质类型水稻籽粒矿质营养和产量性状的差异

以往的改良稻育种大多以产量为第一育种目标,易造成籽粒高矿质营养含量在内的众多优良性状丢失,表现为改良种的矿质营养元素含量通常低于野生稻和地方种。Anandan等^[37]通过研究不同基因型水稻的矿质营养含量,发现地方品种中铁、锌的含量显著高于改良品种。文建成等^[38]通过测定296份水稻材料的矿质元素含量,发现杂草稻的锌、铁元素含量显著高于粳稻品系和云南常规粳稻推广品种。Ishikawa等^[39]和Fuller等^[40]总结了野生稻到栽培稻的驯化过程,表明了随着水稻驯化过程的进行水稻籽粒的宽度和厚度逐渐增加。在本研究中,113份改良种的籽粒锌和镁元素含量显著低于地方种,而其4个产量相关性状(穗长、每穗总粒数、每穗实粒数和单穗粒重)均极显著高于地方种($P < 0.01$)。这种差异性在东北小粒种中表现得尤为明显,其矿质元素综合性评价排名居于第二,但是其产量综合性评价却位列最后一名。地方种在驯化过程中是介于野生稻和改良品种的中间类型,在遗传多样性、抗逆性和矿质营养品质方面与改良品种相比优势明显。改良种的产量性状显著高于地方种与水稻驯化过程中的人工选择是密不可分的^[39]。由于育种目标往往是有益于人类需要的特性,在水稻品种选育过程中,育种家针对水稻的落粒性、株高、株型、穗型、产量构成因素(穗数、每穗粒数和千粒重)等性状进行定向选择,使育成品种的产量不断提高,逐渐超越了地方种^[41-42]。

3.4 提高水稻籽粒矿质营养的途径

生物强化是指利用多种新技术使植物在其可食用范围内积累更高浓度的有益营养元素^[43],包括农艺生物强化、常规育种和遗传修饰生物强化^[11]。在农艺生物强化方面,施加锌肥不但可以提高籽粒中的锌含量,也可以提高产量,实现一举多得^[44-45]。在常规育种方面,文建成等^[46]通过分析208份滇型杂交粳稻(杂交稻、恢复系和保持系)锌、铁含量,发现恢复系的锌含量显著高于保持系,少数的杂交组合锌或铁的含量有明显的超亲现象。还可以通过遗传修饰等手段实现生物强化, Lee等^[47-48]分别构建了

OsZIP8 (*LOC_Os07g12890*)和*OsIRT1* (*LOC_Os03g46470*)的过表达株系,发现*OsZIP8*转基因植株地上部和成熟种子中锌含量降低,根中锌含量增加,与野生型相比株高较矮;*OsIRT1*转基因植株在生殖期比野生型矮且分蘖少,从而导致产量降低,但其成熟种子中锌、铁含量显著增加。因此,综合以上方法,可利用*OsIRT1*转基因植株与高产的改良品种杂交,结合田间水肥管理,培育双优的品种。另外,籽粒中存在的植酸易与二价金属离子结合形成络合物,会抑制矿物质的吸收和转化,导致运输到籽粒中矿物质的生物有效性降低^[49-50]。因此,在育种过程中降低植酸含量,也是增加籽粒中矿物质含量的有效方法。

参考文献

- [1] Ji Z J, Zeng Y X, Liang Y, Qian Q, Yang C D. Proteomic dissection of the rice-*Fusarium fujikuroi* interaction and the correlation between the proteome and transcriptome under disease stress. *BMC Genomics*, 2019, 20(1): 91
- [2] Su S, Hong J, Chen X F, Zhang C Q, Chen M J, Luo Z J, Chang S W, Bai S X, Liang W Q, Liu X Q, Zhang D B. Gibberellins orchestrate panicle architecture mediated by DELLA-KNOX signalling in rice. *Plant Biotechnology Journal*, 2021, 19(11): 2304-2318
- [3] Qi P, Lin Y S, Song X J, Shen J B, Huang W, Shan J X, Zhu M Z, Jiang L W, Gao J P, Lin H X. The novel quantitative trait locus *GL3.1* controls rice grain size and yield by regulating Cyclin-T1; 3. *Cell Research*, 2012, 22(12): 1666-1680
- [4] Yang X F, Zhao X L, Dai Z Y, Ma F L, Miao X X, Shi Z Y. *OsmiR396*/growth regulating factor modulate rice grain size through direct regulation of embryo-specific miR408. *Plant Physiology*, 2021, 186(1): 519-533
- [5] Zhang Z Y, Li J J, Tang Z S, Sun X M, Zhang H L, Yu J P, Yao G X, Li G L, Guo H F, Li J L, Wu H M, Huang H G, Xu Y W, Yin Z G, Qi Y H, Huang R F, Yang W C, Li Z C. *Gnp4/LAX2*, a RAWUL protein, interferes with the *OsIAA3-OsARF25* interaction to regulate grain length via the auxin signaling pathway in rice. *Journal of Experimental Botany*, 2018, 69(20): 4723-4737
- [6] Zhang Y X, Yu C S, Lin J Z, Liu J, Liu B, Wang J, Huang A B, Li H Y, Zhao T. *OsMPHI* regulates plant height and improves grain yield in rice. *PLoS ONE*, 2017, 12(7): e0180825
- [7] Ghaleb M A A, Li C, Shahid M Q, Yu H, Liang J H, Chen R X, Wu J W, Liu X D. Heterosis analysis and underlying molecular regulatory mechanism in a wide-compatible neotetraploid rice line with long panicles. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 83
- [8] 布哈丽且木·阿不力孜, 袁杰, 朱小霞, 张燕红, 陈长青, 赵志强, 贾春平, 文孝荣, 康民泰, 唐福森, 王奉斌. 新疆稻区

- 优质丰产水稻品种筛选与评价. 新疆农业科学, 2020, 57(11): 2108-2117
- Buhaliqiemu A, Yuan J, Zhu X X, Zhang Y H, Chen C Q, Zhao Z Q, Jia C P, Wen X R, Kang M T, Tang F S, Wang F B. Screening and evaluation of high-quality and high-yield rice varieties in Xinjiang rice zone. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(11): 2108-2117
- [9] 陈越, 丁明亮, 张敦宇, 付坚, 钟巧芳, 肖素勤, 柯学, 程在全. 云南水稻种质资源农艺性状表型多样性分析及综合评价. 南方农业学报, 2019, 50(9): 1922-1930
- Chen Y, Ding M L, Zhang D Y, Fu J, Zhong Q F, Xiao S Q, Ke X, Cheng Z Q. Phenotypic diversity analysis and comprehensive evaluation of agronomic characters of rice germplasm resources in Yunnan province. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(9): 1922-1930
- [10] 潘晓雪, 胡明瑜, 王忠伟, 吴红, 雷开荣. 不同水稻种质资源重要农艺性状与发芽期耐寒性鉴定研究. 作物杂志, 2021, 200(1): 47-53
- Pan X X, Hu M Y, Wang Z W, Wu H, Lei K R. Evaluation of agronomic traits and cold tolerance at germination stage in rice (*Oryza sativa* L.) germplasms. Crops, 2021, 200(1): 47-53
- [11] Kong D, Khan S A, Wu H L, Liu Y, Ling H Q. Biofortification of iron and zinc in rice and wheat. Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(6): 1157-1167
- [12] Frontela C, Scarino M L, Ferruzza S, Ros G, Martínez C. Effect of dephytinization on bioavailability of iron, calcium and zinc from infant cereals assessed in the Caco-2 cell model. World Journal of Gastroenterology, 2009, 15(16): 1977-1984
- [13] Kim Y J, Jo Y, Lee Y H, Park K, Park H K, Choi S Y. Zn²⁺ stimulates salivary secretions via metabotropic zinc receptor ZnR/GPR39 in human salivary gland cells. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17648
- [14] Shimizu S, Tei R, Okamura M, Takao N, Nakamura Y, Oguma H, Maruyama T, Takashima H, Abe M. Prevalence of zinc deficiency in Japanese patients on peritoneal dialysis: Comparative study in patients on hemodialysis. Nutrients, 2020, 12(3): 764
- [15] Blair M W, Izquierdo P, Astudillo C, Grusak M A. A legume biofortification quandary: Variability and genetic control of seed coat micronutrient accumulation in common beans. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 275
- [16] Williams C R, Mistry M, Cherian A M, Williams J M, Naraine M K, Ellis C L, Mallick R, Mistry A C, Gooch J L, Ko B, Cai H, Hoover R S. Zinc deficiency induces hypertension by promoting renal Na⁺ reabsorption. American Journal of Physiology-Renal Physiology, 2019, 316(4): F646-F653
- [17] Berezovsky B, Bájecný M, Frýdlová J, Gurieva I, Rogalsky D W, Přikryl P, Pospíšil V, Nečas E, Vokurka M, Krijt J. Effect of erythropoietin on the expression of murine transferrin receptor 2. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(15): 8209
- [18] Kautz L, Jung G, Valore E V, Rivella S, Nemeth E, Ganz T. Identification of erythroferrone as an erythroid regulator of iron metabolism. Nature Genetics, 2014, 46(7): 678-684
- [19] Percy L, Mansour D, Fraser I. Iron deficiency and iron deficiency anaemia in women. Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology, 2017, 40: 55-67
- [20] Kang C K, Pope M, Lang C C, Kalra P R. Iron deficiency in heart failure: Efficacy and safety of intravenous iron therapy. Cardiovascular Therapeutics, 2017, 35(6): e12301
- [21] Meng F Y, Fan L N, Sun L, Yu Q L, Wang M Q, Sun C H. Serum biomarkers of the calcium-deficient rats identified by metabolomics based on UPLC/Q-TOF MS/MS. Nutrition & Metabolism, 2020, 17(1): 99
- [22] Cheng Z C, Huang X Y, Muse F M, Xia L F, Zhan Z X, Lin X D, Cao Y G, Han Z. Low serum magnesium levels are associated with hemorrhagic transformation after thrombolysis in acute ischemic stroke. Frontiers in Neurology, 2020, 11: 962
- [23] Lizaola-Mayo B C, Dickson R C, Lam-Himlin D M, Chascsa D M. Exogenous copper exposure causing clinical Wilson disease in a patient with copper deficiency. BMC Gastroenterology, 2021, 21(1): 278
- [24] Li X M, Dong S J, Su X O. Copper and other heavy metals in grapes: A pilot study tracing influential factors and evaluating potential risks in China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 17407
- [25] Connorton J M, Balk J. Iron biofortification of staple crops: Lessons and challenges in plant genetics. Plant and Cell Physiology, 2019, 60(7): 1447-1456
- [26] Palanog A D, Calayugan M I C, Descalsota-Empleo G I, Amparado A, Inabangan-Asilo M A, Arocena E C, Cruz P C S, Borromeo T H, Lalusin A, Hernandez J E, Acuin C, Reinke R, Swamy B P M. Zinc and iron nutrition status in the Philippines population and local soils. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 81
- [27] Wissuwa M, Ismail A M, Graham R D. Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization. Plant and Soil, 2008, 306(1-2): 37-48
- [28] Anuradha K, Agarwal S, Batchu I A K, Babu P A, Swamy B P M, Longvah T, Sarla N. Evaluating rice germplasm for iron and zinc concentration in brown rice and seed dimensions. Journal of Phytology, 2012, 4(1): 19-25
- [29] Jiang S L, Wu J G, Thang N B, Feng Y, Yang X E, Shi C H. Genotypic variation of mineral elements contents in rice (*Oryza sativa* L.). European Food Research and Technology, 2008, 228(1): 115-122
- [30] 吴比, 胡伟, 邢永忠. 中国水稻遗传育种历程与展望. 遗传, 2018, 40(10): 841-857
- Wu B, Hu W, Xing Y Z. The history and prospect of rice genetic breeding in China. Hereditas, 2018, 40(10): 841-857
- [31] 陈家润. 水稻品种试验田间记载及室内考种项目与标准. 华中农业科学, 1957(2): 146-148, 79
- Chen J R. Field records of rice variety trials and indoor seed testing projects and standards. Huazhong Agricultural

- Sciences, 1957(2): 146-148, 79
- [32] Zhang J, Chen K, Pang Y L, Naveed S A, Zhao X Q, Wang X Q, Wang Y, Dingkuhn M, Pasuquin J, Li Z K, Xu J L. QTL mapping and candidate gene analysis of ferrous iron and zinc toxicity tolerance at seedling stage in rice by genome-wide association study. *BMC Genomics*, 2017, 18(1): 828
- [33] 耿雷跃, 马小定, 崔迪, 张启星, 韩冰, 韩龙植. 水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法研究. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(2): 267-275
Geng L Y, Ma X D, Cui D, Zhang Q X, Han B, Han L Z. Identification and evaluation method for saline tolerance in rice during the whole growth stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(2): 267-275
- [34] 徐清宇, 余静, 朱大伟, 郑小龙, 孟令起, 朱智伟, 邵雅芳. 基于主成分分析和聚类分析的不同水稻品种营养成分评价研究. *中国稻米*, 2022, 28(6): 1-8
Xu Q Y, Yu J, Zhu D W, Zheng X L, Meng L Q, Zhu Z W, Shao Y F. Nutritional quality evaluation of different rice varieties based on principal component analysis and cluster analysis. *China Rice*, 2022, 28(6): 1-8
- [35] 雷振山, 武浩, 卫云飞, 周强, 刘娟, 刘秋员, 季新, 王付娟. 豫南稻区特种稻主要农艺性状及矿质元素含量分析. *河南农业大学学报*, 2021, 55(2): 243-249, 256
Lei Z S, Wu H, Wei Y F, Zhou Q, Liu J, Liu Q Y, Ji X, Wang F J. Analysis of main agronomic traits and contents of mineral elements for special rice in Southern Henan. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(2): 243-249, 256
- [36] 曾亚文, 申时全, 汪禄祥, 刘家富, 普晓英, 杜娟. 云南稻种矿质元素含量与形态及品质性状的关系. *中国水稻科学*, 2005, 19(2): 127-131
Zeng Y W, Shen S Q, Wang L X, Liu J F, Pu X Y, Du J. Relationship between morphological and quality traits and mineral element content in Yunnan rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(2): 127-131
- [37] Anandan A, Rajiv G, Eswaran R, Prakash M. Genotypic variation and relationships between quality traits and trace elements in traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Journal of Food Science*, 2011, 76(4): H122-H130
- [38] 文建成, 张忠林, 汤利, 李少明, 陈丽娟, 谭学林. 杂草稻和粳稻品系稻米铁锌矿质元素含量差异分析. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2010, 31(1): 55-59
Wen J C, Zhang Z L, Tang L, Li S M, Chen L J, Tan X L. Genetic variation of grain Fe and Zn concentrations in weedy rice and *Japonica* rice accessions. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2010, 31(1): 55-59
- [39] Ishikawa R, Castillo C C, Fuller D Q. Genetic evaluation of domestication-related traits in rice: Implications for the archaeobotany of rice origins. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2020, 12(8): 197
- [40] Fuller D Q, Denham T, Arroyo-Kalin M, Lucas L, Stevens C J, Qin L, Allaby R G, Purugganan M D. Convergent evolution and parallelism in plant domestication revealed by an expanding archaeological record. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(17): 6147-6152
- [41] Wu Y Z, Zhao S S, Li X R, Zhang B S, Jiang L Y, Tang Y Y, Zhao J, Ma X, Cai H W, Sun C Q, Tan L B. Deletions linked to *PROG1* gene participate in plant architecture domestication in Asian and African rice. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4157
- [42] Zhang J C, Zhang D J, Fan Y W, Li C C, Xu P K, Li W, Sun Q, Huang X D, Zhang C Y, Wu L Y, Yang H Z, Wang S Y, Su X M, Li X X, Song Y Y, Wu M E, Lian X M, Li Y B. The identification of grain size genes by RapMap reveals directional selection during rice domestication. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5673
- [43] Prahara S, Skalicky M, Maitra S, Bhadra P, Shankar T, Brestic M, Hejnak V, Vachova P, Hossain A. Zinc biofortification in food crops could alleviate the zinc malnutrition in human health. *Molecules*, 2021, 26(12): 3509
- [44] Chen X P, Zhang Y Q, Tong Y P, Xue Y F, Liu D Y, Zhang W, Deng Y, Meng Q F, Yue S C, Yan P, Cui Z L, Shi X J, Guo S W, Sun Y X, Ye Y L, Wang Z H, Jia L L, Ma W Q, He M R, Zhang X Y, Kou C L, Li Y T, Tan D S, Cakmak I, Zhang F S, Zou C Q. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7016
- [45] 陈川峰, 张天斌, 黎训淳, 阮林梅, 杜前进. 三亚天涯区南红农场水稻锌肥肥效试验. *热带农业科学*, 2022, 42(10): 6-9
Chen C F, Zhang T B, Li X Z, Ruan L M, Du Q J. Effect of zinc fertilizer on rice in nanhong farm of Tianya district in Sanya city. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2022, 42(10): 6-9
- [46] 文建成, 张忠林, 金寿林, 汤利, 徐津, 谭学林. 滇型杂交粳稻及其亲本稻米铁、锌元素含量的分析. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1182-1187
Wen J C, Zhang Z L, Jin S L, Tang L, Xu J, Tan X L. Iron and zinc contents in *Japonica* hybrid rice based on CMS-D1 system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1182-1187
- [47] Lee S, Kim S A, Lee J, Guerinot M L, An G. Zinc Deficiency-inducible *OsZIP8* encodes a plasma membrane-localized zinc transporter in Rice. *Molecules and Cells*, 2010, 29(6): 551-558
- [48] Lee S, An G. Over-expression of *OsIRT1* leads to increased iron and zinc accumulations in rice. *Plant, Cell & Environment*, 2009, 32(4): 408-416
- [49] Akinsola O T, Alamu E O, Otegbayo B O, Menkir A, Maziya-Dixon B. Nutritional properties of *ogi* powder and sensory perception of *ogi* porridge made from synthetic provitamin: A maize genotype. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 685004
- [50] 苏达, 吴良泉, Søren KRasmussen, 周庐建, 程方民. 低植酸水稻种质资源筛选、遗传生理调控与环境生态适应性研究进展. *中国水稻科学*, 2019, 33(2): 95-107
Su D, Wu L Q, KRasmussen S, Zhou L J, Cheng F M. Research advances on the low phytic acid rice breeding and their genetic physiological regulation and environmental adaptability. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(2): 95-107