

# 粳稻“龙锦 1 号/香软米 1578” F<sub>3</sub> 家系群糙米矿质元素含量变异及相关性分析

孙明茂<sup>1,2</sup> 杨昌仁<sup>3</sup> 李点浩<sup>3</sup> 崔仁守<sup>3</sup> 曹桂兰<sup>1</sup> 李圭星<sup>3</sup> 金弘烈<sup>3</sup> 于元杰<sup>2</sup> 李英泰<sup>3</sup>  
韩龙植<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院作物科学研究所/国家农作物基因资源与基因改良重大科学工程/农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室, 北京 100081; <sup>2</sup>山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; <sup>3</sup>韩国农村振兴厅作物科学院, 韩国水原 441-100; \* 通讯联系人, E-mail: lzhan58@yahoo.com.cn)

## Variation and Correlation Analysis of Mineral Element Contents in Brown Rice of F<sub>3</sub> Lines from japonica Combination “Longjin 1/Xiangruanmi 1578”

SUN Ming mao<sup>1,2</sup>, YANG Chang ihn<sup>3</sup>, LEE Jeom ho<sup>3</sup>, CHOI Im soo<sup>3</sup>, CAO Gui lan<sup>1</sup>, LEE Kyu seong<sup>3</sup>, KIM Hong yeol<sup>3</sup>,  
YU Yuan jie<sup>2</sup>, LEE Young tae<sup>3</sup>, HAN Long zhi<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement, NRCRI/Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; <sup>2</sup>College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai an 271018, China; <sup>3</sup>National Institute of Crop Sciences, Rural Development Administration, Suwon 441-100, Korea; \* Corresponding author, E-mail: lzhan58@yahoo.com.cn)

**Abstract:** The variation and relationships among Fe, Se, Zn, Cu, Mn, Ca, Mg, K, Na and P in brown rice of 196 F<sub>3</sub> lines, which derived from a cross between japonica rice varieties, Longjin 1 and Xiangruanmi 1578, were analysed. The results showed that there were high variation among these mineral element contents in brown rice for F<sub>3</sub> lines. The variation coefficient of Na content was the highest (77.69%), whereas that of Zn content was the lowest (12.04%). The variation coefficient values in brown rice were as follows: Na > Se > Cu > Fe > Mg > Mn > Ca > P > K > Zn. The various mineral element contents were also obviously different, their mean values in brown rice for F<sub>3</sub> lines were as follows: P > K > Mg > Ca > Fe > Mn > Zn > Na > Cu > Se. Moreover, these mineral element contents all followed the normal distribution, indicating they were quantitative traits controlled by multiple genes. Zn was significantly positive correlative with Fe and Cu at 0.01 or 0.05 levels, so were Mn with Mg, Ca, K and P; Ca with Mg, K, Na and P; Mg with K and P; P with K and Na. However, the contents of Fe and Se, Mn and Na, Mg and Na displayed significantly negative correlation at 0.01 or 0.05 levels. Furthermore, Mn, Ca, Mg, K and P correlated much more closely with other mineral element contents than Fe, Se, Cu and Zn did.

**Key words:** rice; mineral element; line; inheritance; variation; correlation

**摘要:** 利用粳稻品种间杂交组合“龙锦 1 号/香软米 1578”的 196 份 F<sub>3</sub> 家系, 对糙米中 Fe、Se、Zn、Cu、Mn、Ca、Mg、K、Na 和 P 等 10 种矿质元素含量的变异及其相关性进行了分析。10 种矿质元素在 F<sub>3</sub> 家系间均有较大的变异, 其中 Na 含量变异最大, Zn 含量变异最小, 变异系数分别为 77.69% 和 12.04%。各矿质元素含量的变异系数大小顺序为 Na > Se > Cu > Fe > Mg > Mn > Ca > P > K > Zn。不同矿质元素含量也有较大的差异, F<sub>3</sub> 家系群各矿质元素含量平均值高低排序为 P > K > Mg > Ca > Fe > Mn > Zn > Na > Cu > Se。糙米中 10 种矿质元素含量在 F<sub>3</sub> 家系群中均表现为正态分布, 为由多基因控制的数量性状。Zn 与 Fe、Cu, Mn 与 Mg、Ca、K、P, Ca 与 Mg、K、Na、P, Mg 与 K、P, P 与 K、Na 含量呈显著或极显著正相关, 而 Fe 与 Se, Mn 与 Na, Mg 与 Na 含量呈显著或极显著负相关。Mn、Ca、Mg、K、P 含量与其他矿质元素含量间的相关关系较 Fe、Se、Cu、Zn 含量与其他矿质元素含量间的相关关系更为密切。

**关键词:** 水稻; 矿质元素; 家系; 遗传; 变异; 相关性

中图分类号: Q945.12; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2008)03-0290-07

Fe、Se、Zn 等矿质元素参与人体一系列新陈代谢过程, 在预防疾病及维持健康方面具有不可替代的重要功能<sup>[1]</sup>, 但矿质元素在体内不能自我合成, 必须从食物中摄取。当前 Fe 缺乏是世界范围内引发残障和死亡的主导因素之一, 影响着约 20 亿人口<sup>[2]</sup>; 严重缺 Se 的国家和地区主要包括中国、俄罗斯、新西兰和非洲<sup>[3]</sup>, 其中中国 2/3 的人口存在不

同程度的 Se 缺乏<sup>[4]</sup>; Zn 缺乏影响着约 20 亿人

收稿日期: 2007-07-02; 修改稿收到日期: 2008-01-07。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD13B01); 作物种质资源保护资助项目[NB06-070401(22-27)-01]; 国家科技基础条件平台资助项目(2005DKA21001-01); 中韩合作项目(2004-2007)。

第一作者简介: 孙明茂(1979-), 男, 硕士研究生。

口<sup>[5]</sup>,在中国一半以上的儿童遭受Zn缺乏<sup>[6]</sup>。造成人体矿质营养失衡的原因有两个:一是不平衡的饮食;二是身体不能充分吸收利用矿质营养<sup>[7]</sup>。第一个原因是由于饮食习惯或食品加工方式引起的矿质元素营养缺乏,换言之就是我们所消费的肉类及谷物中缺乏足够的矿质元素营养<sup>[7]</sup>;第二个原因需要个体通过医疗手段解决。食品强化和生物强化是解决矿质元素营养不平衡的两条重要途径,相对于食品强化,生物强化不仅覆盖面更广,而且具有更高的投入产出比,只需要一次性投入,育成的强化品种就可以源源不断地供给,不再需要额外的支出<sup>[8]</sup>。

水稻是世界一半以上人口的主食,消费量巨大,若籽粒中Fe、Se、Zn等矿质元素含量稍有提高,将对人类营养和健康的改善产生巨大影响。通过生物强化途径可以提高谷物籽粒中的矿质元素含量<sup>[9-11]</sup>,培育高矿质元素含量水稻品种是当前功能性水稻育种的主要目标之一。因此,明确水稻籽粒各矿质元素含量的遗传变异规律,对高矿质元素含量水稻育种具有重要的指导意义。关于水稻籽粒矿质元素含量变异及相关性的研究,至今已有不少报道。Gregorio等<sup>[12]</sup>对8种基因型共1138份种质的Fe和Zn含量进行了分析;曾亚文等<sup>[13]</sup>以653份云南稻种为材料,分析了P、K、Ca、Mg、Mn、Zn、Cu、Fe等8种矿质元素含量与4个品质性状及24个形态性状间的相关性;Riza等<sup>[14]</sup>以种植在两个不同地点和季节(干季、湿季)的10份香稻为材料,研究了稻米Fe含量的环境效应和季节效应。但至今前人对水稻籽粒矿质元素含量的研究,主要集中在以不同类型品种或生态环境为研究对象的籽粒矿质元素含量变异以及矿质元素含量与农艺性状和品质性状间的相关性分析,而以杂交后代群体作为试验材料,研究水稻籽粒中Fe、Se、Zn、Cu、Mn、Ca、Mg、K、Na、P等10种矿质元素的含量变异及各元素之间的相关关系,至今尚未见报道。本文分析了粳稻“龙锦1号/香软米1578”F<sub>3</sub>家系群糙米中10种矿质元素含量的变异规律及其相关性,旨在为高矿质元素含量水稻育种提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料和田间种植

2002年以粳稻品种龙锦1号为母本,香软米1578为父本,配制杂交组合。2003-2004年在北京自然生长环境下经加代繁殖,获得F<sub>3</sub>代196个家

系。试验地选在中国农业科学院作物科学研究所昌平基地水稻试验田,试验地肥力均匀。采用大棚旱育秧,2005年5月10日播种,6月5日插秧,插秧规格26.6 cm × 13.3 cm,单本插秧,2行区,每行移栽20穴,顺序排列,2次重复。N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O分别施用150 kg/hm<sup>2</sup>、135 kg/hm<sup>2</sup>和180 kg/hm<sup>2</sup>。病虫害防治、田间除草和水管理等遵循昌平试验基地常用的栽培管理方法。稻谷成熟后,按家系全部收获,自然风干,贮藏3个月后进行糙米矿质元素含量测定。

### 1.2 矿质元素含量测定

委托中国水稻研究所农业部稻米及制品质量监督检验测试中心测定糙米矿质元素含量。稻谷经砻谷机SY88 TH(塑料胶辊)脱壳获得糙米,以糙米作为矿质元素含量的测定对象。磨粉和过筛:取糙米15 g左右,用飞利浦HR2860磨粉机(不锈钢刀具)粉碎3 min,过80目筛。微波消解(美国CEM公司仪器):称取约0.5 g试样(精确到0.001 g)置于聚四氟乙烯内罐中,加入5 mL硝酸,放置15 min,盖好密封盖,将消化罐放入微波密闭消解系统中,设置微波消解条件为200 W下消解10 min。冷却后,用水定量转移并定容到25 mL,混匀待测。糙米Fe、Mg和Mn含量的测定参照GB/T 5009.90-2003,采用原子吸收分光光度法;Se含量的测定参照GB/T 5009.93-2003,采用氢化物原子荧光光谱法;Zn含量的测定参照GB/T 5009.14-2003,采用原子吸收光谱法;Cu含量的测定参照GB/T 5009.13-2003,采用石墨炉原子法;Ca含量的测定参照GB/T 5009.92-2003,采用原子吸收分光光度法;P含量的测定参照GB/T 5009.87-2003,采用原子吸收分光光度法;K和Na含量的测定参照GB/T 5009.91-2003,采用火焰发射光谱法。测定过程中采用大米粉成分分析标准物质GBW(E)080684、空白实验、相应浓度标准溶液的信号值、平行双样之间的相对标准差、标准曲线的相关系数作为质量控制。从每个家系重复取样3次测定各矿质元素含量,取其平均值为统计单元。其中Fe、Se、Zn、Cu和Mn为人体必需的微量矿质元素,而Ca、Mg、K、Na和P为人体必需的常量矿质元素<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据处理

水稻糙米10种矿质元素含量在F<sub>3</sub>家系群的分布按(最大值-最小值)/N为分布间距,用Excel作柱形图,并统计各分布间距中的家系数。Fe、Se、Zn等10种矿质元素含量的变异和相关分析,采用

Statistix 8 统计分析, 利用 SAS 做正态分布检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 亲本及 F<sub>3</sub> 家系群糙米矿质元素含量变异

从表 1 可见, 亲本龙锦 1 号和香软米 1578 在 Fe、Se 和 Cu 含量上有较明显的差异, 而其余矿质元素含量差异不明显。F<sub>3</sub> 家系群糙米中 Ca、Mg、K 和 P 含量相对较高, 而 Fe、Se、Zn、Cu、Mn 和 Na 含量相对较低。糙米中各矿质元素含量的高低与人体对这些元素的相对需求量大小基本一致 (Na 除外)。F<sub>3</sub> 家系群各矿质元素含量的平均值高低排序为 P > K > Mg > Ca > Fe > Mn > Zn > Na > Cu > Se。各矿质元素含量的变异均较大, 变异系数均超过 12%, 其中 Na 含量变异系数最大, 为 77.69%, 而 Zn 含量的变异系数最小, 为 12.04%。各矿质元素含量的变异系数大小顺序为 Na > Se > Cu > Fe > Mg > Mn > Ca > P > K > Zn。F<sub>3</sub> 家系群 Fe、Se 和 Cu 含量的平均值接近于两亲本的中间值; Zn、Mn、Mg 和 K 含量的平均值偏向于低亲值; Ca 和 P 含量的平均值偏向于高亲值; 而 Na 含量的平均值明显大于两个亲本。

### 2.2 糙米矿质元素含量的 F<sub>3</sub> 家系频数分布

图 1 是糙米中各矿质元素含量的 F<sub>3</sub> 家系频数分布。各矿质元素的含量均呈现连续分布。正态分布检验表明, 籽粒中 Fe、Se、Zn、Cu、Mn、Ca、Mg、K、Na 和 P 含量的 *D* 值 (最大偏差值) 分别为 0.0731、0.1354、0.1042、0.0457、0.0358、0.0363、0.0572、0.0501、0.2021 和 0.0640 均小于 *D* 临界值 1.3581 ( $n=195$ 、 $\alpha=0.05$ ; 为显著水平), 这 10 种矿质元

素的含量均符合正态分布, 因而认为上述元素含量是由多基因控制的数量性状。由图 1 可见, Fe 和 Se 含量介于两亲本之间; Mn、Mg 和 K 含量超低亲分离明显, 具有一定的杂种劣势; 而 Ca 和 P 含量超高亲分离明显, 具有一定的杂种优势。

### 2.3 糙米矿质元素含量间相关分析

在 F<sub>3</sub> 家系群水稻糙米 10 种矿质元素含量组成的 45 对性状间相关关系中, 17 对性状间达显著或极显著相关。由表 2 可见, 水稻糙米所含人体必需的微量矿质元素除 Fe 与 Se 含量呈显著负相关外, Fe 与 Zn、Zn 与 Cu 含量呈极显著或显著正相关; 人体必需的常量矿质元素除 Mg 与 Na 含量呈极显著负相关外, Ca 与 Mg、K、Na、P 含量, Mg 与 K、P 含量, P 与 K、Na 含量均呈显著或极显著正相关; 人体必需的微量矿质元素与常量矿质元素, 即 Mn 与 Mg、Ca、K、P 含量呈极显著正相关, Mn 与 Na 含量呈极显著负相关。说明水稻糙米所含人体必需的常量矿质元素含量间的相关性最高, 常量与微量矿质元素含量间的相关性次之, 微量矿质元素含量间的相关性最低, 并且微量与常量矿质元素含量间的相关主要表现在 Mn 与常量矿质元素含量的相关。水稻糙米 Se 含量除与 Fe 含量呈显著负相关外, 与其他矿质元素含量的相关不显著; Cu 含量除与 Zn 含量呈显著正相关外, 与其他矿质元素含量的相关不显著。说明糙米 Fe 含量较高的材料一般表现为较低的 Se 含量和较高的 Zn 含量; 糙米 Cu 含量较高的材料一般富含 Zn; 糙米 Mn 含量较高的材料一般表现为较高的 Mg、Ca、K、P 含量和较低的 Na 含量; 糙米 Ca 含量较高的材料一般富含 Mg、K、Na 和

表 1 水稻亲本及 F<sub>3</sub> 家系群糙米矿质元素含量

Table 1. Mineral element contents in brown rice of parents and F<sub>3</sub> lines.

矿质元素含量 Mineral element content	亲本 Parent		F <sub>3</sub> 家系群 F <sub>3</sub> line				
	龙锦 1 号 Longjin 1	香软米 1578 Xiangruanmi 1578	平均值 Mean	标准差 SD	变异范围 Range of variation	变异系数 CV/%	最大值/最小值 Max/Min
Fe/(mg·kg <sup>-1</sup> )	27.8	57.5	35.1	8.59	13.5~64.5	24.49	4.78
Se/(μg·kg <sup>-1</sup> )	80.0	10.0	47.9	32.42	3.0~270.0	67.69	90.00
Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	19.6	20.7	19.4	2.34	14.8~40.3	12.04	2.72
Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.9	6.0	4.5	2.31	0.5~12.9	51.44	25.80
Mn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	31.7	29.2	26.8	4.27	16.5~36.7	15.91	2.22
Ca/(mg·kg <sup>-1</sup> )	155.1	140.4	164.6	25.64	106.3~242.2	15.58	2.28
Mg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1184.5	1173.5	938.4	158.94	518.0~1429.5	16.94	2.76
K/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1446.5	1368.0	1298.7	185.56	708.0~1795.0	14.29	2.54
Na/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.0	2.8	5.0	3.91	0.1~15.7	77.69	157.00
P/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3457.5	3192.5	3483.1	499.31	1936.0~4948.5	14.34	2.56

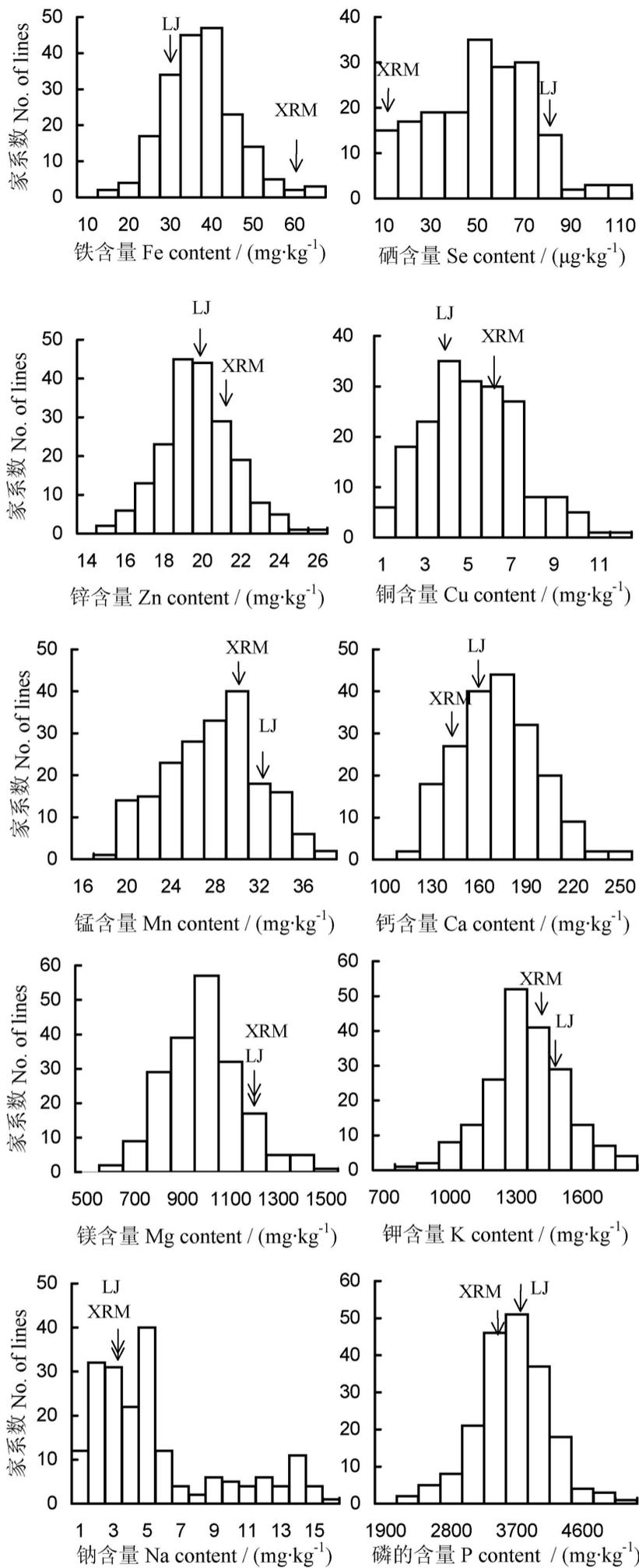


图1 龙锦1号/香软米1578 F<sub>3</sub>家系群水稻糙米 Fe、Se、Zn、Cu、Mn、Ca、Mg、K、Na 和 P 含量的频数分布

Fig.1 Distribution of Fe, Se, Zn, Cu, Mn, Ca, Mg, K, Na and P contents in brown rice of F<sub>3</sub> lines derived from Longjin 1/Xiangruanmi 1578.

LJ - 龙锦1号; XRM - 香软米1578.

LJ, Longjin 1; XRM, Xiangruanmi 1578.

### 3 讨论

#### 3.1 水稻籽粒矿质元素含量的变异

水稻籽粒矿质元素含量是与人类饮食健康有密切相关的重要指标,在水稻基因型间存在显著差异<sup>[16-17]</sup>。Gregorio 等<sup>[12]</sup>对 1138 份水稻种质的研究表明,糙米 Fe 含量在 6.3~24.4 mg/kg,平均值为 12.2 mg/kg,锌含量在 15.3~58.4 mg/kg,平均值为 25.4 mg/kg。蒋彬<sup>[18]</sup>对国内 239 份水稻品种的分析结果表明,精米 Fe、Zn、Cu 和 Mn 含量的变异系数分别为 43.99%、41.20%、52.67% 和 29.67%。张名位等<sup>[19]</sup>对 6 份黑米和 1 份白香米水稻品种的研究表明,糙米 Fe、Zn、Mn 和 P 含量的变异系数分别为 11.99%、20.68%、15.12% 和 7.29%。Liang 等<sup>[20]</sup>对 56 份国内主产区水稻品种的分析表明,糙米 Fe 含量在 9~45 mg/kg, Zn 含量在 13~39 mg/kg。Pintasen 等<sup>[21]</sup>对 66 份水稻种质的研究结果表明,糙米 Fe 含量在 7.5~14.4 mg/kg。Prom-u-thai 等<sup>[22]</sup>研究报告,不同遗传背景水稻品种的糙米 Fe 含量在 10~20 mg/kg,精米在 3~11 mg/kg。蒋彬<sup>[23]</sup>对国内 239 份水稻品种的研究结果表明,精米中 Se 含量变幅为 1.15~43.84 μg/kg,平均值为 18.34 μg/kg,变异系数为 38.0%。Jiang 等<sup>[24]</sup>对 274 个水稻品种的研究结果表明,各矿质元素含量的平均值顺序为 K > Mg > Ca > Zn > Na > Mn > Cu > Fe。

本研究结果表明, F<sub>3</sub> 家系间糙米 Fe 含量的变异范围和平均值远大于前人研究报告<sup>[12, 20-22]</sup>;糙米中 Zn 含量的变异范围和平均值小于 Gregorio 等<sup>[12]</sup>报道,但大于 Liang 等<sup>[20]</sup>报道;糙米 Fe、Mn 的变异系数小于蒋彬<sup>[18]</sup>对精米的研究报道<sup>[18]</sup>,但大于张名位等<sup>[19]</sup>对糙米的研究报道;糙米 Cu 含量的变异系数与蒋彬<sup>[18]</sup>对精米的研究结果相近;P 含量的变异系数大于张名位等<sup>[19]</sup>的研究报道,但 Zn 含量的变异系数小于蒋彬<sup>[18]</sup>对精米和糙米的研究结果。糙米 Se 含量的变异范围、平均值和变异系数均大于蒋彬<sup>[23]</sup>对精米的检测结果。糙米 K、Mg、Ca、Zn、Na 和 Cu 含量的平均值的高低顺序与 Jiang 等<sup>[24]</sup>对精米的研究结果一致,而 Fe、Mn 的相对含量高于 Jiang 等<sup>[24]</sup>对精米的研究结果。以上分析表明,粳稻“龙锦1号/香软米1578”杂交组合 F<sub>3</sub> 家系群中 Fe、Se、Cu、Mn 和 P 等矿质元素含量存在丰富的变异,从中筛选高矿质元素含量的家系具有可行性。

P;糙米 Mg 含量较高的材料一般表现为较高的 K、P 含量和较低的 Na 含量;糙米 P 含量较高的材料一般富含 K、Na。

表 2 龙锦 1 号/香软米 1578 F<sub>3</sub> 家系群糙米各矿质元素含量间的相关系数Table 2 . Correlation coefficients among 10 mineral element contents in brown rice of F<sub>3</sub> lines derived from Longjin 1/Xiangruanmi 1578 .

矿质元素含量 Mineral element content	Se	Zn	Cu	Mn	Ca	Mg	K	Na	P
Fe	-0.1667*	0.2836**	0.0577	0.0218	0.0039	0.1042	0.0664	-0.0046	-0.0012
Se		-0.0184	-0.0032	-0.0138	0.1547	-0.0067	0.0207	0.1143	0.1002
Zn			0.1952*	0.0799	0.0042	0.1089	0.0996	0.0793	0.0548
Cu				0.1409	0.0601	0.1323	0.0732	-0.1120	0.0999
Mn					0.5696**	0.7642**	0.6792**	-0.3386**	0.5844**
Ca						0.3972**	0.6796**	0.2622**	0.7016**
Mg							0.8057**	-0.3549**	0.7249**
K								0.0594	0.9127**
Na									0.1571*

\* , \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 的显著性水平。

\* , \*\* Significant at 0.05 and 0.01 probability levels , respectively .

### 3.2 水稻籽粒矿质元素含量的遗传

Graham<sup>[11]</sup> 报道 , Fe 含量存在加性及非加性效应 , 狭义遗传力为 43% , 广义遗传力为 88% ; 籽粒 Fe 含量具有较高的一般配合力 , 同时具有特殊配合力 ; 环境效应小于遗传效应。赖来展等<sup>[25]</sup> 认为 , 糙米 Fe、Zn、Mn 和 P 含量的一般配合力效应、特殊配合力效应和反交效应都达显著或极显著水平 ; Zn 和 P 含量的遗传符合加性显性模型 , Fe 和 Mn 含量除受加性、显性作用外 , 还存在上位性效应 ; 这 4 种矿质元素含量的遗传均表现超显性 ; P 含量的遗传力较高 , Fe、Zn 和 Mn 含量的广义遗传力较高 , 狭义遗传力较低。张名位等<sup>[19]</sup> 研究表明 , 糙米 Fe、Zn 和 Mn 含量主要受种子直接效应作用 , P 含量则受种子直接加性、母体加性和显性效应的共同作用。Tin<sup>[26]</sup> 研究发现 , 水稻籽粒 Fe 含量在一定程度上受上位基因作用和环境因素的影响。Gregorio 等<sup>[27-28]</sup> 研究表明 , 水稻籽粒 Fe 含量符合复杂的遗传模型 , 主要表现为加性和显性效应 , 环境效应比较小 , 狭义遗传力明显低于广义遗传力 , 并且非加性基因效应起着重要的作用。本研究表明 , F<sub>3</sub> 家系群糙米中 Fe、Se、Zn、Cu、Mn、Ca、Mg、K、Na 和 P 等 10 种矿质元素含量均表现为正态分布 , 为由多基因控制的数量性状。同时 , Fe、Se 和 Cu 含量的平均值接近两亲本的中间值 ; Zn、Mn、Mg 和 K 含量的平均值倾向于低亲值 ; Ca 和 P 含量的平均值倾向于高亲值 , 而 Na 含量的平均值明显大于两个亲本。因此 , 在亲本选配时 , 针对 Zn、Mn、Mg 和 K 含量应着重提高低亲值 ; 针对 Fe、Se 和 Cu 含量应选用 2 个高亲值亲本 ; 针对 Ca、P 和 Na 含量应着重提高高亲值 , 以提高目标性状的筛选效率。

### 3.3 水稻籽粒矿质元素含量间相关性

Abilgos 等<sup>[29]</sup> 和廖江林等<sup>[30]</sup> 研究表明 , 精米中 Fe 与 Zn 含量呈显著正相关 ; 蒋彬<sup>[23]</sup> 研究表明 , 精米中 Se 与 Fe、Cu、Mn 含量的相关性不显著 , 但与 Zn 含量呈显著正相关 ; 刘宪虎等<sup>[31]</sup> 研究认为 , 糙米中 Zn 与 Ca 含量呈极显著正相关 ; Jiang 等<sup>[24]</sup> 研究指出 , Na 与 Ca、Mg、Fe , Mg 与 K、Ca、Mn , Zn 与 Ca、Mg , Mn 与 K、Ca、Mg、Fe、Zn 含量间呈极显著正相关 ; Fe 与 K、Ca、Mg、Zn , Cu 与 Zn、Mn 含量呈显著正相关 , 但 Cu 与 K、Mg 含量呈显著负相关 ; Cheng 等<sup>[17]</sup> 研究认为 , Fe 与 Zn 含量存在极显著正相关 ; 曾亚文等<sup>[13]</sup> 研究表明 , P 与 K、Ca、Mg、Cu、Mn , K 与 Mg、Cu、Mn , Ca 与 Mg、Fe、Zn、Mn , Mg 与 Fe、Cu、Mn , Fe 与 Mn , Cu 与 Zn、Mn 含量呈极显著正相关 ; Fe 与 Zn 含量呈显著正相关。

本研究结果表明 , F<sub>3</sub> 家系糙米中 Fe 与 Zn 含量呈极显著正相关 , 这与对水稻精米<sup>[24, 30]</sup> 或糙米<sup>[13, 17]</sup> 的研究结果一致 ; Zn 与 Cu 含量 , Ca 与 Mg 含量 , Mg 与 K 含量 , Mn 与 Ca、Mg、K 含量呈极显著或显著正相关 , 这与对水稻精米<sup>[24]</sup> 或糙米<sup>[13]</sup> 的研究结果一致 ; Ca 与 Na 含量呈极显著正相关 , 这与对水稻精米<sup>[24]</sup> 的研究结果一致 ; P 与 K、Ca、Mg、Mn 含量呈极显著正相关 , 这与对水稻糙米的检测结果一致<sup>[13]</sup>。但本研究中糙米 Mg 与 Na 含量呈极显著负相关 , 这与对水稻精米的研究结果相反<sup>[24]</sup>。此外 , 本研究结果表明 , 糙米中 Ca 与 Mg、K、Na、P , Mg 与 K、P , P 与 K、Na , Mn 与 Mg、Ca、K、P 含量呈极显著正相关。前人研究采用的试验材料几乎均为水稻品种 , 而本研究采用的试验材料是在实际水稻育种中常利用的杂交低世代 F<sub>3</sub> 家

系群,因此,本试验结果对杂交低世代个体或家系选育等具有重要的指导意义。

### 3.4 人体必需矿质元素与污染矿质元素间相关性

维持人体健康所必需的微量元素除 Fe、Zn、Se、Cu、Mn 外,还包括 Co、I、Cr、Ni、V、F、Mo、Si、Sn 等<sup>[32]</sup>。而 As、Cd、Pb、Hg 等是当前农业生产上重要的污染元素,对人体健康危害极大。蒋彬<sup>[23]</sup>研究表明,精米中 Se 含量与 Cr、Ni、Co、Mo、As 的相关性极显著,但 As 含量为 7.09~27.51 μg/kg,远小于 700 μg/kg 的国家食品卫生标准;Cheng 等<sup>[17]</sup>利用 9 个不同水稻品种的 2 年 6 点试验研究表明,Zn 与 As 含量存在极显著正相关,Zn 与 Ni 含量存在显著负相关;Milena 等<sup>[33]</sup>对 Hg 高污染区的水稻研究表明,籽粒 Hg 与 Se 含量不存在相关性;李正文等<sup>[34]</sup>研究表明,不同水稻品种对同一土壤中 Cd、Cu、Se 的吸收及其在籽粒中的积累存在显著的差异,不同品种籽粒对 Cu 和 Cd 的吸收积累有同步的趋势,高 Se 品种显示出抑制 Cu 和 Cd 积累的倾向。

水稻籽粒矿质元素含量间存在不同的相关关系,这与各矿质元素离子在吸收及运转过程中对同一吸收位点、运转子的竞争性作用或同一吸收位点、运转子对不同矿质元素离子的协同吸收、运输有关。例如,As 和 P 对水稻根外植体的同一吸收位点及根质膜的同一运转子存在竞争性关系<sup>[35-36]</sup>;土壤中 As 的生物利用率明显受 Fe 的理化性质影响,氢氧化铁或氧化铁对土壤中的 As 有高的吸附亲和力<sup>[37-38]</sup>;Liu 等<sup>[39]</sup>研究表明,水稻根表面形成的铁膜(中期缺磷处理)能够吸附 As,从而抑制它从根到茎的转运,同时 As 能够显著降低 Fe 在根和茎中的含量及稍微降低 P 在茎中的含量。水稻 IRT1 转运子不仅能够转运 Fe,而且能够转运 Mn、Zn、Cd 等<sup>[40]</sup>。P 型腺苷三磷酸酶是跨膜金属转运蛋白,对维持植物体内矿质元素平衡起着重要的作用。水稻苗期半定量 RT-PCR 分析显示 P 型腺苷三磷酸酶基因 *OsHMA9* 表达受高含量 Cu、Zn、Cd 诱导,突变体分析证实 *OsHMA9* 对 Cu、Zn 和 Pb 在细胞的转运起重要的作用<sup>[41]</sup>。拟南芥 P 型腺苷三磷酸酶 4 基因 *AtHMA4* 在 Zn 转运过程有重要的作用,在根部表达量最高,同时它的表达受根部 Zn 和 Mn 含量上调控制,但受 Cd 含量下调控制<sup>[42]</sup>。

水稻籽粒各矿质元素含量间的关系不仅受复杂的矿质元素吸收、转运机制控制,而且还受分配机制控制。Liu 等<sup>[43]</sup>研究表明,水稻抽穗期和成熟期根

中 Cd<sup>2+</sup> 与 Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 分别存在正相关关系,抽穗期和成熟期叶中 Cd<sup>2+</sup> 与 Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 分别存在正相关关系,抽穗期叶中 Cd<sup>2+</sup> 和 Mn<sup>2+</sup> 存在负相关关系,成熟期叶中 Cd<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 存在正相关关系。由此看出,Cd<sup>2+</sup> 与 Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 在水稻根和叶中存在协同吸收和累积,这与 Bughio 等<sup>[40]</sup>和 Le 等<sup>[41]</sup>的研究结果一致;Cd<sup>2+</sup> 与 Mn<sup>2+</sup> 在根中存在协同吸收或转运,但可能由于代谢或分配机制不同,导致 Cd<sup>2+</sup> 与 Mn<sup>2+</sup> 在抽穗期叶中存在负相关关系。进一步分析表明,尽管 Cd 在水稻根和茎中显示高的积累,但在糙米中有相当低的积累<sup>[42]</sup>。而 Cheng 等<sup>[17]</sup>利用 9 个不同水稻品种进行 2 年 6 点试验结果表明,糙米中未检测到 Cd 与 Cr、As、Ni、Pb、Fe、Zn 之间存在显著性相关关系。说明在今后研究中,除要继续加强矿质元素的吸收和转运机制研究外,还要着重加强有关矿质元素的代谢和分配机制研究。

上述研究结果表明,人体必需矿质元素含量间的正相关性,将有助于聚合 2 种以上矿质元素。但由于 Cd、As、Pb 等污染元素可能与部分必需矿质元素含量间存在正相关性(如 Se 与 As、Zn 与 As),这就启示我们培育高矿质元素含量水稻品种时,一定要考虑 Cd、As、Pb 等污染元素在稻米中的实际含量,尽可能发掘污染元素含量低,但人体必需矿质元素含量高的优异水稻种质,以实现高矿质元素含量水稻育种的目标。

### 参考文献:

- [1] WHO/FAO. Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition. 2<sup>nd</sup> edn. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2004: 59-338.
- [2] Zimmermann M B, Hurrell R F. Nutritional iron deficiency. *Lancet*, 2007, 370(9586): 511-520.
- [3] Caribbean Food and Nutrition Institute. Selenium, Nutrition and Health. [2007-06-29]. [http://www.paho.org/English/CFNI/Nyamnews/Sept1\\_205.htm](http://www.paho.org/English/CFNI/Nyamnews/Sept1_205.htm), 2005.
- [4] 唐新欣. 硒摄入不足——中国人健康的“软肋”. *医药世界*, 2004, 10: 19.
- [5] Ananda S P. Zinc deficiency. *BMJ*, 2003, 326: 409-410.
- [6] Yang X E, Chen W R, Feng Y. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study. *Environ Geochem Health*, 2007, 29: 413-428.
- [7] RawFoodExplained. Minerals. [2007-06-29]. <http://www.rawfoodexplained.com/index.html>, 2007.
- [8] CIAT/IFPRI. Biofortified crops for improved human nutrition. [2007-06-29]. <http://www.cgiar.org/pdf/biofortifica>

- tion .pdf , 2002 .
- [9] Welch R M , Graham R D . Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective . *J Exp Bot* , 2004 , 55(396) : 353-364 .
- [10] Lucca P , Hurrell R , Potrykus I . Fighting iron deficiency anemia with iron rich rice . *J Am Coll Nutr* , 2002 , 21(3 Suppl .) : 184S-190S .
- [11] Graham R D . Biofortification : A global challenge program . *IRRN* , 2003 , 28(1) : 4-8 .
- [12] Gregorio G B . Progress in breeding for trace minerals in staple crops . *J Nutr* , 2002 , 132(3) : 500S-502S .
- [13] 曾亚文 , 申时全 , 汪禄祥 , 等 . 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 .
- [14] Riza G A R , Rosaly V M , Shaila S P , et al . Grain quality and iron density of Philippine rice cultivars // Proceedings for the 4th International Crop Science Congress , Brisbane , Australia : 26 Sep - 1 Oct 2004 . Gosford , Australia : The Regional Institute Ltd , 2004 . [2007-06-29] . <http://www.cropscience.org.au/icsc2004> .
- [15] Jablonski E , Sobczak M . Mineral elements in diet of pregnant and breast feeding women : . Micro minerals : Iron , zinc , copper , selenium , iodine , fluorine , manganese , molybdenum , chromium . *Przegl Lek* , 2007 , 64(3) : 170-174 .
- [16] 孙明茂 , 洪夏铁 , 李圭星 , 等 . 水稻籽粒微量元素含量的遗传研究进展 . *中国农业科学* , 2006 , 39(10) : 1947-1955 .
- [17] Cheng W D , Zhang G P , Yao H G , et al . Genotypic and environmental variation in cadmium , chromium , arsenic , nickel , and lead concentration in rice grains . *J Zhejiang Univ Sci : B* , 2006 , 7(7) : 565-571 .
- [18] 蒋彬 . 精米中微量元素铁铜锰锌的含量差异 . *昭通师范高等专科学校学报* , 2002 , 24(2) : 45-48 .
- [19] 张名位 , 杜应琼 , 彭仲明 , 等 . 黑米中矿质元素铁、锌、锰、磷含量的遗传效应研究 . *遗传学报* , 2000 , 27(9) : 792-799 .
- [20] Liang J F , Han B Z , Han L Z , et al . Iron , zinc and phytic acid content of selected rice varieties from China . *J Sci Food Agric* , 2007 , 87(3) : 504-510 .
- [21] Pintasen S , Promuthai C , Jamjod S , et al . Variation of grain iron content in a local upland rice germplasm from the village of Huai Tee Cha in northern Thailand . *Euphytica* , 2007 , 158 : 27-34 .
- [22] Promuthai C , Fukai S , Godwin I D , et al . Genotypic variation of iron partitioning in rice grain . *J Sci Food Agric* , 2007 , 87(11) : 2049-2054 .
- [23] 蒋彬 . 水稻富硒基因型品种遴选 . *陕西师范大学学报 : 自然科学版* , 2002 , 30(Suppl .) : 152-156 .
- [24] Jiang S L , Wu J G , Feng Y , et al . Correlation analysis of mineral element contents and quality traits in milled rice (*Oryza sativa* L .) . *J Agric Food Chem* , 2007 , 55(23) : 9608-9613 .
- [25] 赖来展 , 张名位 , 彭仲明 , 等 . 黑米稻种质资源的评价与利用研究 . *作物品种资源* , 1994(增刊) : 58-64 .
- [26] Tin H . Inheritance of Grain Iron Density in Rice (*Oryza sativa* L .) . PhD thesis : Los Banos , Laguna : UPLB , 2000 : 1-90 .
- [27] Gregorio G B , Senadhira D , Htut T , Graham R D . Improving iron and zinc value of rice for human nutrition . *Agric & Develop* , 1999 , 23 : 68-81 .
- [28] Gregorio G B , Senadhira D , Htut T , Graham R D . Breeding for trace mineral density in rice . *Food Nutr Bull* , 2000 , 21 : 382-386 .
- [29] Abilgos R G , Manaois R V , Corpuz E Z , et al . Breeding for iron dense rice in the Philippines . *Philippine J Crop Sci* , 2002 , 27(Suppl . 1) : 79 .
- [30] 廖江林 , 黄友生 , 黄国庆 , 等 . 改良爪哇稻米粒中铁与锌元素含量的测定和分析 . *西南农业大学学报* , 2006 , 28(6) : 913-916 .
- [31] 刘宪虎 , 孙传清 , 王象坤 . 我国不同地区稻种资源的铁、锌、钙、硒四种元素的含量初析 . *北京农业大学学报* , 1995 , 21(2) : 138-142 .
- [32] 郑建仙 . 功能性食品 . 第2卷 . 北京 : 中国轻工业出版社 , 1999 : 355-428 .
- [33] Milena H , Natasa N , Vesna F , et al . Total mercury , methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou , China . *Sci Total Environ* , 2003 , 304 : 231-256 .
- [34] 李正文 , 张艳玲 , 潘根兴 , 等 . 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险 . *环境科学* , 2003 , 24(3) : 112-115 .
- [35] Meharg A A , Macnair M R . Suppression of the high affinity phosphate uptake system - A mechanism of arsenate tolerance on *Holcus lanatus* L . *J Exp Bot* , 1992 , 43 : 519-524 .
- [36] Meharg A A , Hartley Whitaker J . Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and non resistant plant species . *New Phytol* , 2002 , 154 : 29-43 .
- [37] Belzile N , Tessier A . Interactions between arsenic and iron oxyhydroxides in lacustrine sediments . *Geochimica & Cosmochimica Acta* , 1990 , 54 : 103-109 .
- [38] Jain A , Raven K P , Loeppert R H . Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite : Surface charge reduction and net OH<sup>-</sup> release stoichiometry . *Environ Sci Technol* , 1999 , 33 : 1179-1184 .
- [39] Liu W J , Zhu Y G , Smith F A , et al . Do phosphorus nutrition and iron plaque alter arsenate (As) uptake by rice seedlings in hydroponic culture ? *New Phytol* , 2004 , 162 : 481-488 .
- [40] Bughio N , Yamaguchi H , Nishizawa N K , et al . Cloning an iron regulated metal transporter from rice . *J Exp Bot* , 2002 , 53(374) : 1677-1682 .
- [41] Lee S , Kim Y Y , Lee Y S , et al . Rice P<sub>1B</sub> type heavy metal ATPase , OsHMA9 , is a metal efflux protein . *Plant Physiol* , 2007 , 145(3) : 831-842 .
- [42] Mills R F , Krijger G C , Baccarini P J , et al . Functional expression of AtHMA4 , a P<sub>1B</sub> type ATPase of the Zn/Co/Cd/Pb subclass . *Plant J* , 2003 35 : 164-176 .
- [43] Liu J G , Liang J S , Li K Q , et al . Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress . *Chemosphere* , 2003 , 52 : 1467-1473 .