

Ca 在水稻籽粒中的富集及其与其它 7 种元素的关系

陈 刚^{1,2}, 刘爱平², 周卫东³, 孙国荣^{2,*}, 杜 坤², 张 彪²

(1. 扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 扬州大学生物科学与技术学院, 扬州 225009;

3. 扬州大学测试中心, 扬州 225009)

摘要:通过环境扫描电镜结合 X 射线电子探针显微分析技术, 对 21 种不同基因型的水稻籽粒颖壳内、外表面以及颖果表面、糊粉层、近糊粉层和米中部的 Ca 含量进行测定。结果表明, Ca 元素在水稻籽粒不同部位的含量有明显差异, 颖壳内外表面和颖果表面 Ca 含量较高, 近糊粉层和颖果中部含量较低, 在颖果中 Ca 主要富集在糊粉层中; 而且不同基因型水稻籽粒同一部位或不同部位 Ca 的积累量也有较大差异, 这可能是由遗传差异引起的。糊粉层中的 Ca 含量影响着颖壳外表面、颖果表面、近糊粉层和米中部的 Ca 含量。另外, 籽粒不同部位 Ca 含量与 P、Mg、K、Si、Al、Cd 含量之间存在显著或极显著的非线性关系, 与 Pb 含量之间不存在显著的非线性关系。说明 Ca 在水稻籽粒中富集的同时也影响着 P、Mg、K、Si、Al、Cd 等元素的富集。

关键词:水稻籽粒; Ca; X 射线电子探针显微分析; 富集

文章编号: 1000-0933(2007)12-5318-07 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Accumulation of Ca in different genotypes of rice grains and its relationship with other seven elements

CHEN Gang^{1,2}, LIU Ai-Ping², ZHOU Wei-Dong³, SUN Guo-Rong^{2,*}, DU Kun², ZHANG Biao²

1 Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 College of Bioscience and Biotechnology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

3 Testing Center of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5318 ~ 5324.

Abstract: As one of the essential nutrient elements in plant, calcium, accounting for about 2 percent of body weight in rice plant, is the important component in cell wall formation, and participates in the most of metabolism process, such as growth, pollination and fertilization, regulation of enzyme activity, stress resistance, and the signal conduction. However, the precise distribution of calcium, and its relationship with some heavy metals in rice grain are largely unexplored. In the present study, the Ca levels of 21 rice genotypes in 6 different grain parts were determined by environmental scanning electron microscopy combining with X-ray electron probe microanalysis (the inner and outer surface of rice glume, surface of caryopsis, center of caryopsis, near aleuronic layer and aleuronic layer), and its relevancy with the contents of other metals in whole a rice grain, including P, Mg, K, Si, Cd, Al and Pb, were investigated. The results showed that there was remarkable difference in Ca levels among different portions of rice grain, with higher Ca levels in the inner and outer

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30270234, 30770344); 国家 863 重大科技专项资助项目(2007AA021402); 国家自然科学基金重点资助项目(50138010); 扬州大学高层次人才科研启动基金资助项目

收稿日期:2006-09-18; **修订日期:**2007-05-24

作者简介:陈刚(1973 ~), 男, 江苏吴江人, 博士, 主要从事植物生理生态学教学与研究. E-mail: zws1 @ yzu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: grsun @ yzu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by NSF of China (No. 30270234, 30770344), 863 Key Sci-tech Special Program (No. 2007AA021402), Key Program of NSF of China (No. 50138010), Science Foundation of High Level Scholar of Yangzhou University

Received date:2006-09-18; **Accepted date:**2007-05-24

Biography: CHEN Gang, Ph. D., mainly engaged in plant physiology and ecology. E-mail: zws1 @ yzu.edu.cn

surface of rice glume, and the surface of caryopsis, while less Ca amounts in the near aleuronic layer and center of caryopsis, implying that Ca predominantly located in the aleuronic layer for a whole rice caryopsis. Moreover, the considerable differences in Ca level were also existed among the different rice genotypes, with a comparison of the same similar portion of different rice cultivars, suggesting that rice genotypes had a dominant effect on Ca accumulation. Ca content in aleuronic layer was closely related to those in outer surface of rice glume, surface and center of caryopsis and near aleuronic layer of rice grains. In addition, there were significant non-linear correlations between the content of Ca and that of P, Mg, K, Si, Al, Cd in different parts of rice grains, but no significant non-linear correlations existed between the content of Ca and Pb. That was, the Ca accumulation could facilitate the accumulation of P, Mg, K and Si. However, Ca might also enhance Al and Cd accumulation in rice grains, which have potential toxicity to human beings.

Key Words: rice grain; calcium; X-ray electron probe microanalysis; accumulation

水稻是我国的主要食粮,其常年种植面积和产量分别占粮食作物的 30% 和 40%^[1],富含蛋白质、脂类、氨基酸等营养物质,以及 P、Mg、K、Ca 等多种矿质元素^[2,3]。我国居民的食物中 70% 的热量,65% 的蛋白质和大部分微量元素来自谷类^[4]。Ca 作为植物营养的必需元素之一,不仅是构成细胞壁的重要组分,而且还参与植物体的一系列生理生化过程,在植物的生长、代谢^[5]、授粉受精^[6]、酶活性调节、抗逆性^[7]、信号传导^[8] 等方面起着重要作用。Ca 也是人体中含量最多的矿物质元素,约为人体重量的 1.5% ~ 2.0%,在组成人体支架、维持神经肌肉功能、血液凝固、与酶有关的代谢过程中发挥极其重要的作用^[9],与人们的健康息息相关。据世界卫生组织(WHO)提出人体需 Ca 推荐标准是:6 个月以下婴儿每日 300 ~ 400mg,7 ~ 12 个月婴儿每日 400mg,1 ~ 3 岁、4 ~ 6 岁、7 ~ 9 岁儿童每日分别需要 500mg、600mg、700mg,10 ~ 18 岁青少年每日 1300mg,19 岁 ~ 绝经期妇女和 25 ~ 65 岁男子每日 1000mg^[9]。人们对日常饮食中的钙利用率很低,只有 25% ~ 30%。因此,以上的推荐量结合我国的传统饮食结构,发现 Ca 的供应量远远不足。当人体出现缺 Ca 的现象时,会影响牙齿的发育,诱发佝偻病、恶性肿瘤、骨质疏松、糖尿病、高血压等疾病^[10]。

尽管 Ca 在植物生长发育中的作用,以及在人体中的作用已有大量报道,但是 Ca 元素在水稻籽粒中的具体分布情况,以及其与一些影响作物生长、危害人体健康的重金属之间的关系如何等问题,尚未见报道。本文以 21 种不同基因型的水稻籽粒为材料,采用环境扫描电子显微镜和 X 射线电子探针的方法,测定了不同基因型的水稻籽粒不同部位 Ca 的相对含量,并分析了其在水稻籽粒中的分配规律、相互关系以及与 P、Mg、K、Si、Cd、Al、Pb 7 种元素相对含量之间的关系。

1 材料与方法

1.1 供试材料

21 种不同基因型水稻种子:扬稻 4 号(常规籼稻)、扬粳 186(常规粳稻)、武粳 14(常规粳稻)、扬辐粳 7 号(常规粳稻)、盐粳 5 号(常规粳稻)、明恢 63(籼稻恢复系)、扬稻 6 号(常规籼稻)、南京 16 号(常规籼稻)、镇粳 241(常规籼稻)、泗稻 10 号(常规粳稻)、淮稻 7 号(常规粳稻)、早丰 9 号(常规粳稻)、粤丰 B(籼稻保持系)、珍汕 97B(籼稻保持系)、粳恢 559(籼稻恢复系)、IR36(常规籼稻)、R6547(籼稻恢复系)、丰优香占(粤丰 A × R6547)(三系杂交稻)、特优 559(三系杂交稻)、汕优 559(三系杂交稻)和两优培九(两系杂交稻),在文中分别相应以 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l、m、n、o、p、

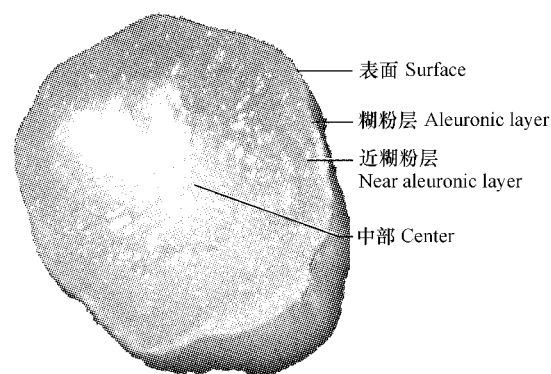


图 1 X 射线电子探针显微分析的部位

Fig. 1 Part of rice for X-ray electron probe microanalysis

q、r、s、t 和 u 表示,由扬州大学农学院遗传育种研究室提供。将颖壳与颖果分离,颖果于中部横断为二。用于测定分析颖壳内、外表面以及颖果表面、糊粉层、近糊粉层和米中部 Ca、Si、Al、Cd、Pb、K、Mg 和 P 元素的相对含量(图 1)。

1.2 环境扫描电镜的观察

直接将未经任何处理的水稻种子用导电银胶粘在样品台上,在荷兰飞利浦公司的 XL-30 型环境扫描电镜下观察与能谱分析。样品室的环境条件为:冷台温度选定 5℃,样品室气压 4 Torr,加速电压 15 kV。

1.3 X 射线电子探针显微分析

上述样品在扫描电子显微镜下观察的同时,进行 X 射线电子探针显微分析。能谱仪为美国 Thermo 公司的 Kevex 能谱仪,加速电压为 20 kV,速流为 0.15 μ A,样品倾角为 0°,样品与探针间的角度为 33°,工作距离为 10.0 mm。对样品进行点分析,测定 Si、Al、Cd、Pb、Ca、K、Mg 和 P 元素的相对含量(以重量百分比,即 weight% 表示)。每种制样分别扫描 5~7 个籽粒^[11]。

1.4 数据统计分析

采用 SigmaPlot 2000 统计软件进行相关分析并作图,图中数据均为 5~7 次重复测定的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同基因型的水稻籽粒不同部位 Ca 含量的差异

从 21 种不同基因型水稻种子不同部位 Ca 含量的变化范围来看,由大到小的顺序为:颖壳内表面(A) > 颖果表面(C) > 颖壳外表面(B) > 糊粉层(F) > 近糊粉层(E) > 米中部(D)(图 2)。说明稻米不同部位 Ca 含量之间存在明显差异。

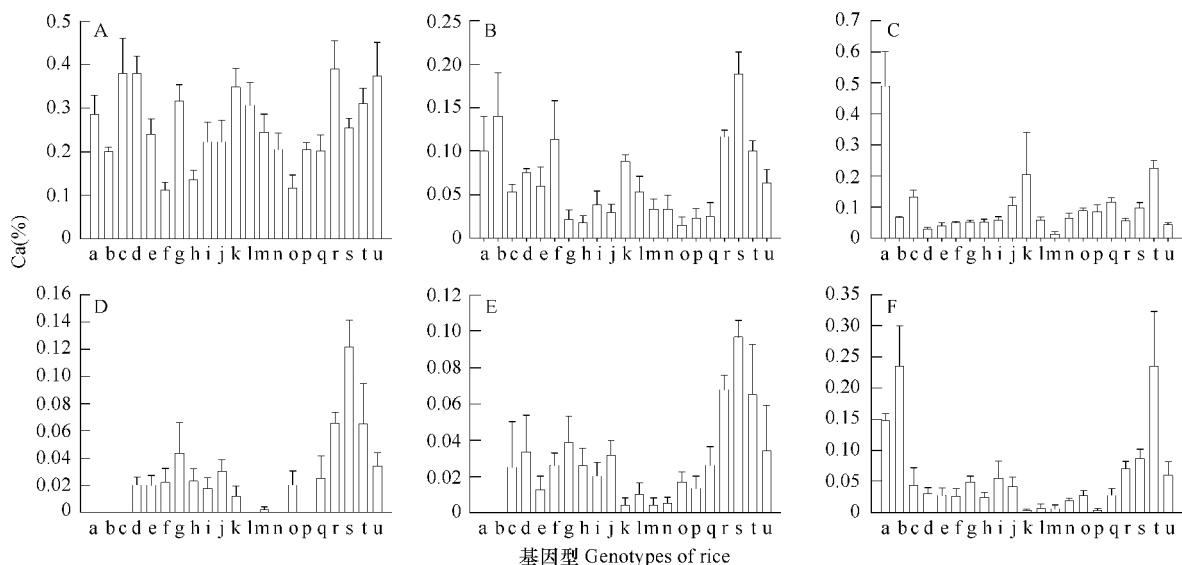


图 2 水稻籽粒不同部位 Ca 元素含量

Fig. 2 The content of Ca in different part of 21 genotype rice grains

A. 颖壳内表面; B. 颖壳外表面; C. 颖果表面; D. 米中部; E. 近糊粉层; F. 糊粉层 A. Inner surface of rice glume; B. Outer surface of rice glume; C. Surface of caryopsis; D. Center of caryopsis; E. Near aleuronic layer; F. Aleuronic layer

从 21 种不同基因型稻米不同部位 Ca 含量比较来看,颖壳内表面 Ca 的平均含量以 r 最高,而 f 最低(图 2A);颖壳外表面 Ca 的平均含量以 s 最高而 o 最低(图 2B);颖果表面 Ca 的平均含量以 a 最高,而 m 最低(图 2C);米中部 Ca 平均含量以 s 最高,a、b、c、l、n、p,6 种基因型的米中部未检测到 Ca 元素(图 2D);近糊粉层 Ca 的平均含量以 s 最高,a、b,2 种基因型的近糊粉层中未检测到 Ca 元素(图 2E);糊粉层 Ca 的平均含量以 b 和 t 最高而 p 最低(图 2F)。说明不同基因型的稻米对 Ca 的富集量存在遗传差异,这种差异体现在不同种子同一部位的 Ca 含量及其在不同部位之间分布特征上。

2.2 水稻籽粒不同部位 Ca 含量之间的关系

水稻籽粒糊粉层部位的 Ca 含量与颖壳外表面和颖果表面 Ca 含量之间存在显著或极显著的非线性关系,而与颖壳内表面不存在显著的非线性关系(图 3),说明水稻颖壳外表面和颖果表面的 Ca 含量对籽粒糊粉层部位的 Ca 含量有影响。

水稻籽粒糊粉层部位的 Ca 含量与米中部和近糊粉层的 Ca 含量之间存在极显著的非线性关系(图 4),且糊粉层部位的 Ca 含量与颖果中心 Ca 含量的相关系数($r^2 = 0.8466$)很接近于其与近糊粉层 Ca 含量的相关系数($r^2 = 0.8459$),说明颖果中心和近糊粉层 Ca 含量与糊粉层的关系非常密切,糊粉层部位的 Ca 含量影响着米中部和近糊粉层的 Ca 含量。

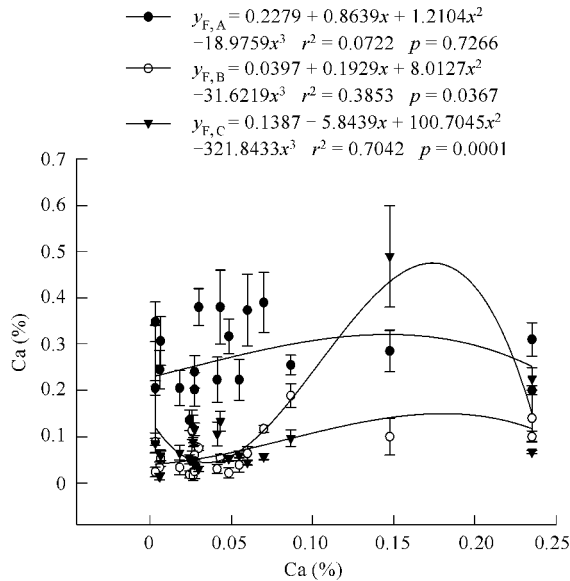


图 3 21 种基因型水稻籽粒糊粉层 Ca 含量与颖壳内表面、外表面和颖果表面 Ca 含量之间的关系

Fig. 3 Relationship between the content of Ca in aleuronic layer (F) and that in inner surface (A) and outer surface (B) of glume, and surface of caryopsis (C) of 21 genotype rice grains

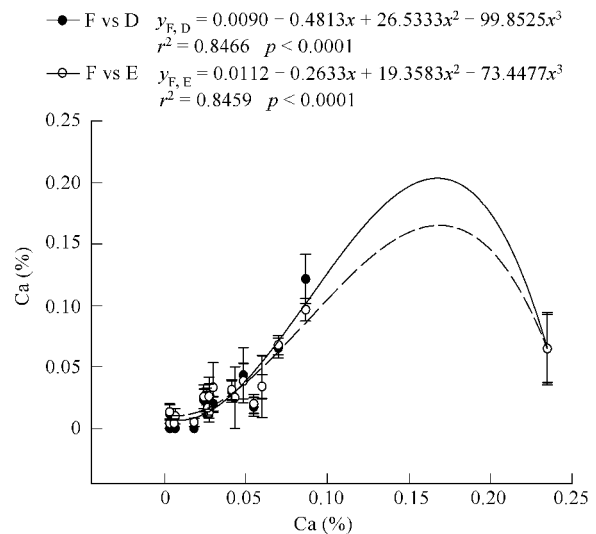


图 4 21 种基因型的水稻籽粒糊粉层 Ca 含量与米中部、近糊粉层 Ca 相对含量之间的关系

Fig. 4 Relationship between the content of Ca in aleuronic layer (F) and that in center of caryopsis (D) and near aleuronic layer (E) of 21 genotype rice grains

2.3 水稻籽粒不同部位 Ca 含量和 Al、Cd、Pb 含量之间的关系

21 种不同基因型稻米之间不同部位 Ca 含量与 Al、Cd 含量之间大都存在显著与极显著的非线性关系,与 Pb 含量之间均不存在显著关系。在颖壳的内表面中,其 Ca 含量与 Al、Cd 含量之间均不存在显著的非线性关系(表 1);而在颖壳外表面中的 Ca 含量与 Al、Cd 含量之间存在显著的非线性关系,而且 Al 含量随着 Ca 含量的增加而增加($y = 0.0690 + 9.6849x - 108.2641x^2 + 388.1340x^3$),同时 Ca 含量与 Al 含量的相关系数大于其与 Cd 含量的相关系数(表 1),说明在水稻颖壳外表面中,Al 含量与 Ca 含量关系更密切。水稻颖果表面的 Ca 含量与 Al、Cd 含量之间存在显著或极显著的非线性关系;而米中部的 Ca 含量与 Al、Cd 含量之间均存在极显著的非线性关系,并且 Al、Cd 含量随着 Ca 含量的增加而明显增加(相应的拟合曲线方程分别为 $y_{Ca,Al} = 0.0401 + 2.0190x - 21.8271x^2 + 122.6724x^3$; $y_{Ca,Cd} = 0.0081 + 1.3081x + 8.1158x^2 - 55.4206x^3$)。在近糊粉层中,Ca 的含量与 Al、Cd 含量之间存在极显著的非线性关系,并且 Al、Cd 的含量随着 Ca 含量的增加而增加($y_{Ca,Al} = 0.0396 + 2.0869x - 1.3337x^2 - 82.1527x^3$; $y_{Ca,Cd} = -0.0089 + 3.7507x - 40.3590x^2 + 201.6359x^3$);在糊粉层中,Ca 的含量与 Al、Cd 含量之间也存在极显著的非线性关系(表 1)。另外还可以看出,在颖果表面、米中部、近糊粉层以及糊粉层中的 Ca 含量与 Al 含量的相关系数均小于其与 Cd 含量的相关系数,说明在这些部位中 Cd 含量与 Ca 含量的关系更为密切。

2.4 水稻籽粒不同部位 Ca 含量与 P、Mg、Si、K 含量之间的关系

不同基因型的水稻籽粒在颖壳内表面中,其 Ca 含量与 P、Mg、Si、K 含量之间均不存在显著的非线性关系(表 1);而在颖壳外表面中,其 Ca 含量与 P、Mg 含量之间存在显著或极显著的非线性关系,并且颖壳外表面的 Ca 含量与 P 含量的相关系数远远小于其与 Mg 含量的相关系数(表 1),说明在水稻颖壳外表面,Ca 含量影响着 P、Mg 含量,而且与 Mg 含量关系更密切。而在颖果表面,其 Ca 含量与 P 含量之间存在极显著的非线性关系(表 1),同时 P 含量随 Ca 含量的增加而明显增加($y = 0.0618 + 0.4061x + 0.8801x^2 - 2.1500x^3$),说明在颖果表面 Ca 含量对 P 的富集有促进作用。

不同基因型的水稻籽粒在颖果中部其 Ca 含量与 P、Mg、K 含量之间存在极显著的非线性关系,而与 Si 之间不存在显著的非线性关系(表 1)。并且颖果中部的 Ca 含量与 P 含量的相关系数略小于其与 Mg 含量的相关系数,而大大小于其与 K 含量的相关系数,说明在颖果中部 Ca 含量影响着 P、Mg、K 含量,而且与 K 含量关系更密切。

表 1 21 种基因型水稻籽粒不同部位 Ca 含量与 Al、Cd、Pb、P、Mg、Si、K 含量之间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients of the content of Ca and that of Al, Cd, Pb, P, Mg, Si, K in different part of 21 genotype rice grains

元素 Element	颖壳内表面 Inner surface of rice glume	颖壳外表面 Outer surface of rice glume	颖果表面 Surface of caryopsis	米中部 Center of caryopsis	近糊粉层 Near aleuronic layer	糊粉层 Aleuronic layer
Al	0.3990	0.6391 *	0.6163 *	0.8386 **	0.8218 **	0.9274 **
Cd	0.3959	0.6009 *	0.9448 **	0.9435 **	0.9376 **	0.9842 **
Pb	0.4740	0.4727	0.5468	0.5127	0.3470	0.2130
Si	0.4819	0.3686	0.3686	0.5280	0.6752 *	0.7336 **
K	0.2840	0.3696	0.5252	0.9197 **	0.8970 **	0.8038 **
Mg	0.2522	0.7778 **	0.4297	0.7673 **	0.5344	0.9106 **
P	0.2413	0.6197 *	0.8001 **	0.7501 **	0.4503	0.8553 **

()表示 Ca 含量和其它元素含量之间显著(或极显著)相关 * and ** indicate correlation between the content of Ca and other elements, significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ respectively

在水稻籽粒的近糊粉层,其 Ca 含量与 Si、K 含量之间存在显著或极显著的非线性关系(表 1),说明在近糊粉层 Ca 含量影响着 Si、K 含量,尤其与 K 含量关系密切。而在糊粉层其 Ca 含量与 P、Mg、K、Si 含量之间均存在极显著的非线性关系(表 1),并且糊粉层的 Ca 含量与 Mg 含量的相关系数最大,说明在水稻籽粒的糊粉层 Ca 含量影响着 P、Mg、K、Si 含量,而且与 Mg 含量关系更密切。

3 讨论

本研究结果表明,Ca 在水稻籽粒各个部位均有分布,且各个部位含量差异较大,其中,颖壳内外表面和颖果表面 Ca 含量较高,近糊粉层和颖果中部含量较低;而且不同基因型水稻籽粒同一部位或不同部位 Ca 的积累量也有较大差异,这可能是由遗传差异引起的(因为供试验的 21 个不同基因型稻米均生产于扬州大学同一试验田,可以看作其土壤和水中即环境中的 Ca 对 21 种基因型水稻种子 Ca 富集的影响相对均等)。对颖果(糙米)来说,糊粉层中的 Ca 含量要比其他部位高得多(图 2)。糊粉层是胚乳的表层细胞停止分裂后转化而来的^[12],进入颖果的灌浆物质必须首先经过糊粉层后才能进入内胚乳^[13]。松田^[14]用电镜观察了糊粉层的结构,指出糊粉层具有转移和积累养分的功能。王忠等^[15]认为糊粉层的形成除本身的分化外,还可能与积累矿质和脂类等灌浆“废物”有关,在贮藏物质进入内胚乳时,非贮藏性物质如 Ca 等矿质元素、脂肪酸和部分氨基酸等被滞留在糊粉层中。Ogawa 等^[2]、Tanaka 等^[3]用 X 射线显微分析法测定了颖果中矿质元素的分布,结果表明糊粉层细胞中富集 P、K、Ca、Mg 等矿质元素,主要存在于植酸钙镁颗粒(糊粉粒)中^[16]。此外,糊粉层细胞中还残留有大量的蛋白质、脂类和维生素等,因而具有较高的营养保健价值和其他综合利用价值^[17~19]。

本研究发现,水稻籽粒糊粉层中的 Ca 含量与颖壳外表面、颖果表面、近糊粉层和颖果中心的 Ca 含量(图 3 和图 4)有密切关系,同时和水稻籽粒中的 P、Mg、K、Si 的含量也密切相关(表 1)。P、Mg、K、Si 也是维持生

物体正常生理代谢所必需的矿质元素,在机体的代谢过程中发挥重要的作用。因此,稻米中 Ca 相对含量的提高能够影响糊粉层及其他部位 P、Mg、K、Si 的含量,也就影响了稻米的营养价值。

矿质元素在水稻中积累的同时,非必需的一些重金属元素也易在水稻中富集而进入食物链,使重金属元素最终富集于人体中^[20],对人体健康产生潜在的威胁。如稻米中 Ca 和 Zn 含量具有极显著的正相关关系^[21],Ca 离子通道和运铁载体参与 Cd 的运输^[22]。本研究结果也表明,Ca 在水稻籽粒中的富集与 Al、Cd 等重金属的富集呈显著或极显著的非线性关系,且 Al、Cd 的含量大多随着 Ca 含量的增加而增加,说明 Ca 在水稻籽粒中积累的同时,也促进了 Al、Cd 在籽粒中尤其是糊粉层中的积累。而 Pb 在水稻籽粒中的富集虽与 Ca 的富集没有显著关系,但其在籽粒中特别是糊粉层中的富集也是不容忽视的(表 1)。因此,在强调提高稻米中 Ca 含量的同时,也存在稻米中重金属含量增加的风险。但是稻米中 Al、Cd、Pb 等重金属元素和 Ca 元素相似,主要富集在糊粉层中,在近糊粉层和米粒的中部积累较少^[23]。这也说明重金属元素同灌浆物质一样,在进入内胚乳前必须被糊粉层所“过滤”,可以大大降低胚乳内部的重金属积累量。因此,糊粉层是籽粒阻挡重金属积累的一道重要屏障。由此似乎可以推断,在强调糊粉层高营养价值的同时也必须要考虑其重金属的潜在危害。但从营养学角度看,足量的钙可以降低人体对食物中 Al、Cd、Pb 等重金属元素的吸收率,而在缺钙的条件下,人体对有关重金属元素的吸收率会上升^[24,25]。因此,尽管 Al、Cd 等重金属在稻米中的富集会随着稻米中 Ca 元素含量提高而增加,但并不一定会增加重金属在人体中积累的风险。只有当钙摄入量不足时,食用稻米中的重金属元素才会相对较多地富集于人体中^[20,26],这在受重金属污染严重的地区,应引起重视。

References:

- [1] Ma Z Y, Wu Y C. Contribution of rice genetic improvement to yield increase in China. *Chinese J Rice Sci*, 2000, 14(2): 112—114.
- [2] Ogawa M, Tanaka K, Kasai Z. Accumulation of phosphorus, magnesium and potassium in developing rice grains: followed by electron microprobe X-ray analysis focusing on the aleurone layer. *Plant and Cell Physiol*, 1979, 20:19—27.
- [3] Tanaka K, Ogawa M, Kasai Z. The rice scutellum II. A comparison of scutellar and aleurone by electron-energy-dispersive X-ray analysis. *Cereal Chem*, 1997, 54: 684—689.
- [4] Qiu L C. Exploitation and utilization of better quality germplasm resources for increasing human health. In: *Annual Report of CNRRI*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1992. 1—4.
- [5] Mu Y H. The role of calcium in fruit and vegetable physiology. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1995, 7(6): 499—501.
- [6] Dumas C, Gaude T. Fertilization in plants: Is calcium a key player? *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 2006, 17: 244—253.
- [7] Jiang T H, Zhan X H, Xu Y C, *et al.* Roles of calcium in stress tolerance of plants and its ecological significance. *Chinese J Appl Ecol*, 2005, 16(5): 971—976.
- [8] Bush D S. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1995, 46: 95—122.
- [9] WHO. Vitamin and mineral requirements in human nutrition. 2nd ed. Geneva: World Health Organization, 2004, 69—83.
- [10] Power M L, Heaney R P, Kalkwarf H J, *et al.* The role of calcium in health and disease. *Am J Obstet Gynecol*, 1999, 181(6):1560—1569.
- [11] Wei C X, Wang J B, Chen Y F, *et al.* Epicuticular wax of leaf epidermis: a functional structure for salt excretion in a halophyte *Puccinellia tenuiflora*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2451—2456.
- [12] 星川清亲. 米の胚乳发育に関する组织形态学的研究,第4报,糊粉层の分化と发育について. *日作纪*, 1967, 36: 216—220.
- [13] Wang Z, Li W F, Gu Y J, *et al.* Development of rice endosperm and the pathway of nutrients entering the endosperm. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(5): 520—527.
- [14] 松田智明. 登熟期の水稲子房における,糊粉細胞の微細構造と运输、蓄积機構について. *日作纪*, 1984, 53(别号1): 144.
- [15] Wang Z, Gu Y J, Li W F, *et al.* Formation of rice aleurone layer and its changes during germination. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 1998, 1(1): 19—24.
- [16] Tanaka K, Yushida T, Asada K, *et al.* Subcellular particles isolated from aleurone of rice seeds. *Arch Biochem Biophys*, 1973, 155: 136—143.
- [17] Qiu W F. Functional effects and nutritional characters of rice bran. *J Nanjing Univ Econ*, 1996, (2): 70—73.
- [18] Jariwalla R J. Rice-bran products: phytonutrients with potential applications in preventive and clinical medicine. *Drugs Exp Clin Res*, 2001, 27(1): 17—26.
- [19] Amissah J G N, Ellis W O, Odoro I, *et al.* Nutrient composition of bran from new rice varieties under study in Ghana. *Food Control*, 2003, 14:

21—24.

- [20] Priest N D, Talbot R J, Newton D, *et al.* Uptake by man of aluminium in a public water supply. *Human Exp Toxicol*, 1998, 17: 296—301.
- [21] Liu X H, Sun C Q, Wang X K. Studies on the content of four elements Fe, Zn, Ca, and Se in rice varieties from various area of China. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 1995, 21(2): 138—142.
- [22] Cohen C K, Fox T C, Garvin D F, *et al.* The role of iron deficiency stress responses in stimulating heavy metal transport in plants. *Plant Physiol*, 1998, 116: 1063—1072.
- [23] Chen Y F, Zhou W D, Liu A P, *et al.* Determination of heavy metal in different parts of rice grains. *J Chin Electr Microsc Soc*, 2006, 25: 253—254.
- [24] Jin F. Effect of low calcium level on lead absorption. *Occupation and Health*, 2000, 16(6): 8—9.
- [25] Philip G R, Rufus L C. Marginal nutritional status of zinc, iron, and calcium increases cadmium retention in the duodenum and other organs of rats fed rice-based diets. *Environmental Research*, 2004, 96: 311—322.
- [26] Zhu K C. Study on non-polluted rice and its metal toxicology. *Progress in Natural Science*, 1994, 4(1): 91—97.

参考文献:

- [1] 马忠玉, 吴永常. 我国水稻品种遗传改进在增产中的贡献分析. *中国水稻科学*, 2000, 14(2): 112~114.
- [4] 裴凌沧. 优良种质资源的开发利用, 促进人类健康. 见: 中国水稻研究所年报. 北京: 中国农业科技出版社, 1992. 1~4.
- [5] 牟咏花. 钙的生理功能及在果蔬生理中的重要性. *浙江农业学报*, 1995, 7(6): 499~501.
- [7] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 971~976.
- [11] 韦存虚, 王建波, 陈义芳, 等. 盐生植物星星草叶表皮具有泌盐功能的蜡质层. *生态学报*, 2004, 24(11): 2451~2456.
- [13] 王忠, 李卫芳, 顾蕴洁, 等. 水稻胚乳的发育及其养分输入的途径. *作物学报*, 1995, 21(5): 520~527.
- [15] 王忠, 顾蕴洁, 李卫芳, 等. 水稻糊粉层的形成及其在萌发过程中的变化. *扬州大学学报(自然科学版)*, 1998, 1(1): 19~24.
- [17] 邱伟芬. 米糠的功能作用和营养特性. *南京经济学院学报*, 1996, (2): 70~73.
- [21] 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.
- [23] 陈义芳, 周卫东, 刘爱平, 等. 水稻籽粒不同部位重金属含量的测定. *电子显微学报*, 2006, 25: 253~254.
- [24] 金锋. 低钙水平对铅吸收的影响. *职业与健康*, 2000, 16(6): 8~9.
- [26] 朱克纯. 无公害水稻研究与金属毒理学效应. *自然科学进展*, 1994, 4(1): 91~97.