中国水稻科学 (Chinese J Rice Sci), 2007, 21 (2):185～190
http://www.ricesci.cn; http://www.ricescience.org

氮、磷、锌营养对水稻籽粒植酸含量的影响及与几种矿质元素间的相关性

赵宁春　张其芳　程方民*　周伟军
(浙江大学 农业与生物技术学院 作物科学研究所, 浙江 杭州 310029, *通讯联系人, E-mail: chengfm@zju.edu.cn)

Effects of Nitrogen, Phosphorus and Zinc Supply Levels on Grain Phytic Acid Content and Its Correlation with Several Mineral Nutrients in Rice Grains

ZHAO Ning-chun, ZHANG Qi-fang, CHENG Fang-min*, ZHOU Wei-jun
(Department of Agronomy, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; * *Corresponding author, E-mail: chengfm@zju.edu.cn*)

Abstract: Effects of N, P and Zn treatments during rice developmental stage on grain phytic acid and its association with several mineral nutrients were studied in a hydroponic experiment with four rice cultivars, including indica cultivar Xieqingzao (XQZ) and its low phytic acid mutant (HIPi1), and japonica cultivar Xiushui 110 and its low phytic acid mutant (HIPj1). The results showed that higher N, P and Zn supply generally resulted in lower grain phytic acid content compared to lower N, P and Zn supply at rice developmental stage, although their sensitivities to P and Zn treatments were dependent on genotypes; N, P and Zn supply had a considerable influence on mineral nutrients accumulation in rice grains, with high N and P supply enhancing Fe concentration, but decreasing Cu accumulation in rice grains, respectively. Compared with low Zn supply, relatively lower grain Fe concentration, but more grain K, Mg accumulation could be found for high Zn treatment; Grain phytic acid was positively correlated with K, Mg, Fe and Cu concentrations in rice grains, but negatively with grain Zn concentration among different solution treatments, despite of their statistically significance varying with cultivars. These implied that the micro-nutritional quality could be synchronously improved by low phytic acid mutation, if an appropriate cultivation method was applied to enhance K, Mg, Fe and Zn concentrations in rice grains.

Key words: rice; phytic acid; nitrogen; phosphorus; zinc; mineral nutrition

摘　要：以协青早、秀水 110 及其辐射诱变获得的低植酸突变系 (HIPi1 和 HIPj1) 为材料, 通过水培试验对不同氮、磷、锌浓度处理下水稻籽粒植酸含量差异及与几种矿质元素间的相关性进行了比较分析。高水平氮、磷、锌浓度处理的籽粒植酸含量较同一品种的低氮、磷、锌处理均有所降低, 但在水稻生育期间, 籽粒植酸含量对磷、锌处理浓度变化的敏感性, 则因品种的植酸类型特征而异; 氮、磷浓度增加能分别提高铁或降低铜在籽粒中的积累, 但在高锌处理下, 籽粒铁含量明显降低、而钾和镁的含量等却有所升高; 籽粒植酸含量一般与 K、Mg、Fe、Cu 4 种矿质元素含量呈正相关、与籽粒 Zn 含量呈负相关, 但统计显著水平因品种而异。低植酸突变体籽粒中的 K、Mg、Fe、Zn 等含量虽略有下降, 但可以通过适当的介质营养条件来调节有关矿质营养在水稻籽粒中的积累。

关键词：水稻；植酸；氮；磷；锌；矿质元素
中图分类号：Q945.12；S511.06　　文献标识码：A　　文章编号：1001-7216(2007)02-0185-06

植酸 (Phytic acid, $C_6H_{18}O_{24}P_6$) 又名六磷酸肌醇, 通常占禾谷类作物种子全磷量的 65%以上。它在种子的发育过程中合成, 同蛋白质结合沉积在种子中[1-2]。在 pH 3.0～4.5 的生理条件下, 植酸可以与一些金属营养元素 (如 Fe、Mg、Zn 等) 络合[3-5], 形成不能被人和非反刍动物吸收利用的植酸盐, 进而影响对这些必需矿质营养元素的吸收[5-6]。大量摄食小麦、大豆等植酸含量较高的谷物产品, 被认为是发展中国家人群中普遍存在的铁、锌缺乏病症的主要原因之一[7-8]。同时, 由于植酸磷生物有效性下降引起的动物饲养成本提高和水体富营养化等问题也越来越受到重视[1, 7]。因此, 通过育种、栽培等途径降低作物种子植酸含量, 对于改善作物营养品质和保护环境及资源均具有重要的意义。

培育低植酸的作物品种是提高微量营养元素生物有效性的一条有效途径[8]。近 10 年来, 国内外已先后通过诱变等手段获得了大麦、玉米、水稻和大豆等作物的低植酸突变体[7, 9-11]。这些低植酸突变体材料依其表型分为两类: *lpa1* 和 *lpa2*[6, 12]。相对其野生型亲本, *lpa1* 类突变体种子植酸含量降低 50%～95%, 无机磷含量相应增加, 但总磷含量

收稿日期：2006-07-27；修改稿收到日期：2006-12-01。
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (30471020)。
第一作者简介：赵宁春 (1980—), 女, 博士研究生。

基本不变;*lpa2* 类突变体的总磷含量也基本不变,但在其植酸含量下降 30%～50%的同时,无机磷和其他形态的多磷酸肌醇 (如三磷酸肌醇、四磷酸肌醇和五磷酸肌醇等) 均有所增加[7, 12]。在国内,浙江大学吴殿星等[13]利用^{60}Co γ 辐照分别从协青早和秀水 110 等品种中获得了 *lpa1* 型低植酸突变体。但是,这些低植酸突变体材料的环境生态特征及其与有关矿质营养元素间的积累关系,目前尚不清楚。为此,本研究以该突变体为材料,通过盆栽水培试验对其籽粒中植酸含量的环境变化及其与 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 7 种矿质元素含量间的相关性做了比较分析,旨在了解植酸含量的变化是否会对水稻籽粒中有关矿质营养元素的积累产生"附带"的影响效应,为进一步开展低植酸水稻品种的选育和水稻营养品质方面的栽培措施研究提供相关理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2005 年在浙江大学华家池校区农场智能温室进行。供试水稻材料为:籼稻品种协青早及其低植酸突变系 (HIPi1)、粳稻品种秀水 110 及其低植酸突变系 (HIPj1)。其中,HIPi1 和 HIPj1 分别是通过对协青早和秀水 110 进行^{60}Co γ 射线辐照处理 (辐射剂量为 300 Gy,剂量率 0.8 Gy/min),并经多代选择获得的性状稳定的低植酸突变体材料,由浙江大学原子核农业科学研究所吴殿星先生提供。

1.2 试验设计

试验处理采用盆栽水培方式进行。2005 年 5 月 6 日将供试水稻材料种子经浸种消毒 3 d 后播种,田间湿润育秧,4 周后选取 3～4 叶期生长均匀的健壮秧苗,单株移植到装有 3 L 培养液的 4 L 水培盆中,每盆 3 株。水培营养液参照国际水稻研究所的水培完全营养液配方[14],分别通过改变该配方营养液中的 NH_4NO_3、NaH_2PO_4 和 $ZnSO_4$ 浓度,设置低氮 (40.02 mg/L) 和高氮 (80.04 mg/L)、低磷 (99.82 mg/L) 和高磷 (149.74 mg/L)、低锌 (57.51 mg/L) 和高锌 (287.56 mg/L) 3 组处理。每个处理设 3 个重复。每 3～4 d 更换一次营养液,直至水稻成熟、收获籽粒样品。

需要说明的是,在上述有关试验处理中,当培养介质中的氮 (或磷、锌) 浓度变化时,其他两种矿质元素则保持原配方中的推荐浓度,以明确单因素条件下的处理浓度效应。

1.3 测定项目及方法

籽粒样品风干 1 个月后,去壳、磨粉、并过 0.15 mm 筛,利用糙米米粉进行植酸和矿质元素含量测定,试验数据的统计分析采用 SPSS10.0 统计分析软件进行。

植酸含量的测定参照 Miller 等[15]的方法进行。提取试剂为 0.2 mol/L HCl,植酸提取液中加入水合氯化铁溶液 (0.8 g $FeCl_3$ 溶于 1000 mL 0.2 mol/L HCl) 形成 Fe phytate 沉淀,之后用 10 mL 1.5 mol/L NaOH 溶解,并依次加入 1 mL 9%柠檬酸三钠、1%氢醌和 2 mL 的 0.4%邻菲啰啉,定容后加入 5 mL 的 0.05%邻二氮杂菲和 0.2% P-对苯二酚,于 35℃下反应 2 h 后在 510 nm 处比色。测定结果按以下公式计算:植酸含量 = A_{510} × 8.42/样品量 × 100%。米粉中 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 7 种矿质元素含量的测定采用原子吸收光谱法[16]。称取 0.5000 g 样品,移入 30 mL 坩埚中,置于马弗炉中 550℃下灰化 10 h,冷却后加入 5 mL 1∶1 (体积比) HNO_3 使之充分溶解,用去离子水稀释至 25 mL,过滤后,用 PEAA-6300 型原子吸收仪测定 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 含量。

2 结果与分析

2.1 不同处理水平下水稻籽粒中的植酸含量差异

由图 1 可见,水稻籽粒中的植酸含量与介质中的氮、磷、锌浓度有关。与低氮处理相比,高氮处理下水稻籽粒中的植酸含量明显降低 (图 1-A)。就 4 个供试材料而言,两个低植酸突变体材料 (HIPi1 和 HIPj1) 在不同氮浓度条件下的植酸含量差异幅度略大于其对照品种协青早和秀水 110 (图 1-A)。说明高氮水平对于降低水稻籽粒中的植酸积累是有利的,低植酸突变体水稻材料籽粒中的植酸含量对介质中的氮浓度变化更为敏感。

磷、锌浓度对籽粒植酸含量的影响与氮浓度变化所引起的差异趋势相似,即高浓度条件下水稻籽粒中的植酸含量有所降低 (图 1-B, C)。4 个供试材料中,协青早及其低植酸突变体 (HIPi1) 在不同磷、锌浓度下的植酸含量差异幅度要大于秀水 110 和 HIPj1,对磷、锌的处理浓度变化较敏感。值得一提的是,协青早的低植酸突变体 HIPi1 在高磷条件下的植酸含量甚至略高于其对照亲本,可能与 HIPi1 对环境生态效应更为敏感有关。

籽粒中植酸含量差异来源的方差分析结果表明

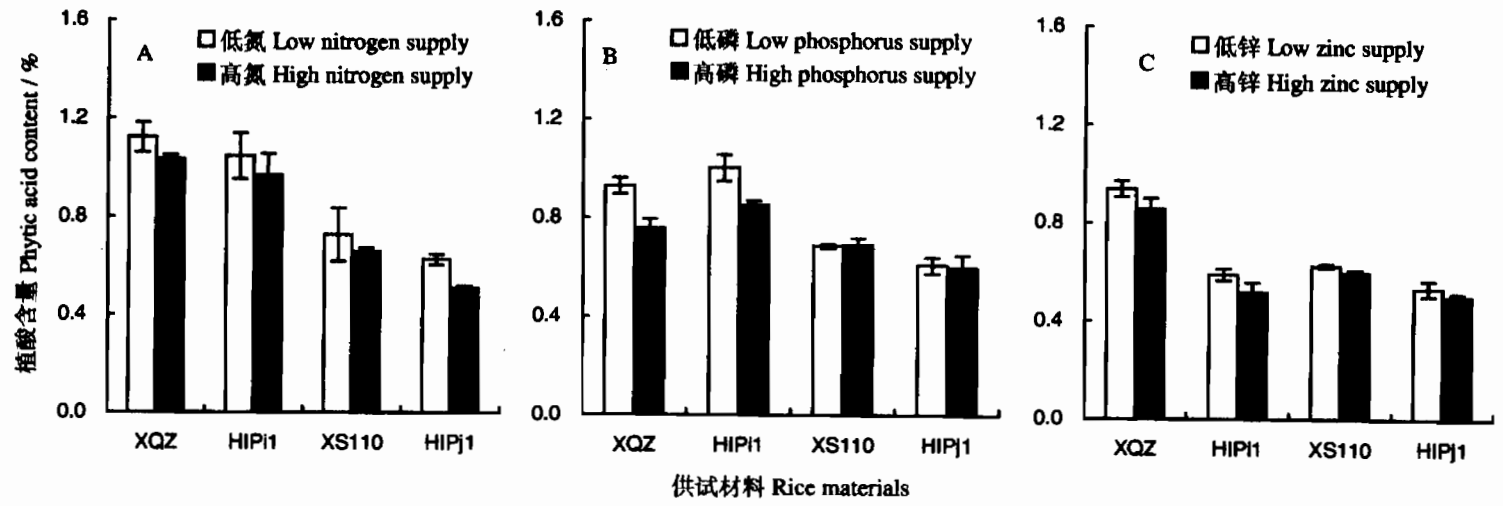


图 1 氮、磷、锌处理对水稻籽粒植酸含量的影响

Fig. 1. Effects of nitrogen, phosphorus, zinc applied level on phytic acid content in rice grains.

XQZ—协青早；XS110—秀水 110。

XQZ, Xieqingzao; XS110, Xiushui 110. HIPi1, Low phytic acid mutant from Xieqingzao; HIPj1, Low phytic acid mutant from Xiushui 110.

(表 1)，品种、处理对籽粒中植酸含量的影响均达显著水平，其中品种间的 F 值最大，处理间的 F 值次之，而品种与元素间的互作效应只有在磷处理下达到了显著水平。

2.2 不同处理水平下水稻籽粒中的主要矿质元素含量差异

不同处理水平下水稻籽粒样品中 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 7 种矿质元素含量差异如表 2 所示。在高氮处理下，水稻籽粒中的 Mn 和 Fe 含量较同一材料的低氮处理普遍有所增高、Cu 含量显著降低，而 K、Mg、Na 、Zn 4 种矿质元素在不同氮处理水平下的差异趋势变化随基因型而异。其中，Na 含量的基因型间差异趋势较明显，协青早及其低植酸突变体材料(HIPi1) 的 Na 含量在高氮处理下有明显上升，而秀水 110 及其低植酸突变体材料(HIPj1) 则相反，其籽粒 Na 含量在高氮处理下反而显著下降。

介质中磷浓度的提升能显著降低 Zn、Fe 和 Cu 等矿质元素在水稻籽粒中的积累量，而 K、Mg 等矿质元素的积累量与磷处理间的关系则不显著。对两个低植酸突变体材料(HIPi1 和 HIPj1)而言，籽粒中 Na 和 Mn 含量分别呈现出较为明显的升高或下降趋势。

锌处理浓度增加能显著提高 K、Mg、Zn 等矿质营养元素在水稻籽粒中的积累，但籽粒中的 Fe 和 Cu 含量却随着锌处理浓度增加有所降低。与水稻生育期间的氮、磷处理相比，供试材料在不同锌浓度处理下的矿质营养元素含量变化未表现出明显的基因型间差异。

2.3 不同处理水平下水稻籽粒中植酸与矿质元素积累间的相关性分析

对不同处理水平下水稻籽粒中植酸与 7 种矿质元素含量间的相关分析结果表明(表3)，籽粒植酸

表 1 不同氮、磷、锌处理对水稻籽粒植酸含量影响的方差分析

Table 1. Variance analysis of effect of nitrogen, phosphorus, potassium levels on phytic acid content in rice grains.

变异来源 Source of variance	自由度 *Df*			离均差平方和 *SS*			均方 *MS*			*F* 值 *F* value		
	N	P	Zn	N	P	Zn	N	P	Zn	N	P	Zn
基因型 Genotype	3	3	3	1.095	0.392	0.541	0.365	0.131	0.180	88.360*	100.019*	216.451*
处理 Treatment	1	1	1	0.046	0.041	0.018	0.046	0.041	0.018	11.142*	31.361*	21.735*
互作 Interaction	3	3	3	0.002	0.038	0.003	0.001	0.013	0.001	0.161	9.768*	1.363
误差 Error	16	16	16	0.066	0.021	0.013	0.004	0.001	0.001			
总变异 Total	23	23	23	1.209	0.492	0.575						

* 表示在 0.05 水平上差异显著。

* Significant at the 0.05 level.

表 2 不同氮、磷、锌处理对水稻籽粒中 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 含量的影响

Table 2. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium applied level on K, Mg, Na, Zn, Mn, Fe, Cu concentrations in rice grains. μg/g

供试材料和处理 Material and treatment	钾 K	镁 Mg	钠 Na	锌 Zn	锰 Mn	铁 Fe	铜 Cu
协青早 Xieqingzao							
低氮 Low nitrogen	1446.9±27.0 b	842.5±53.2 b	526.3±39.8 b	28.73±0.30 a	44.99±1.63 b	8.03±0.07 b	5.14±0.08 a
高氮 High nitrogen	1612.0±25.1 a	929.5±13.5 a	626.3±18.4 a	23.58±0.51 b	57.11±0.87 a	8.47±0.17 a	4.74±0.39 a
低磷 Low phosphorus	892.1±35.6 b	790.5±28.3 a	585.9±22.3 a	28.73±1.41 a	59.98±0.30 a	8.51±0.36 a	5.21±0.14 a
高磷 High phosphorus	1021.2±36.0 a	800.0±31.2 a	513.4±13.0 b	23.59±2.68 b	51.74±0.51 b	7.03±0.42 b	4.58±0.27 b
低锌 Low zinc	1363.2±3.7 b	885.0±22.5 a	671.5±14.2 a	26.27±0.88 b	50.45±0.58 a	8.52±0.41 a	4.79±0.18 a
高锌 High zinc	1434.4±19.9 a	637.3±17.6 b	507.4±5.2 b	28.19±0.89 a	38.28±0.58 b	7.53±0.39 b	4.29±0.18 b
HIPi1							
低氮 Low nitrogen	1412.1±18.3 a	751.3±16.1 b	484.0±7.1 b	21.99±0.71 b	40.37±1.67 b	8.05±0.17 b	5.27±0.31 a
高氮 High nitrogen	1201.1±24.7 b	938.3±21.5 a	539.0±32.5 a	24.37±0.28 a	47.83±0.95 a	8.67±0.27 a	4.58±0.27 b
低磷 Low phosphorus	1396.1±29.5 a	786.5±20.8 b	529.1±24.5 b	24.26±0.99 a	40.40±0.61 a	9.46±0.17 a	4.89±0.22 a
高磷 High phosphorus	1175.5±42.5 b	833.0±9.4 a	617.2±12.6 a	20.70±1.61 b	34.43±0.78 b	8.44±0.29 b	4.12±0.23 b
低锌 Low zinc	1049.5±42.0 b	791.8±16.9 a	419.7±6.7 b	16.95±1.64 b	41.77±0.36 a	9.62±0.30 a	5.00±0.09 a
高锌 High zinc	1441.5±38.2 a	813.5±33.8 a	632.9±23.4 a	30.25±1.06 a	36.72±0.41 b	7.59±0.22 b	3.22±0.19 b
秀水 110 Xiushui 110							
低氮 Low nitrogen	1275.9±28.4 a	763.8±13.3 b	389.1±11.5 a	21.37±0.94 b	26.92±12.51 b	6.56±0.24 b	5.12±0.40 a
高氮 High nitrogen	1013.8±24.3 b	845.8±22.4 a	314.0±13.1 b	26.55±0.53 a	34.47±1.13 a	7.46±0.18 a	4.59±0.07 b
低磷 Low phosphorus	1100.6±71.7 b	833.3±10.6 b	441.2±25.2 b	23.31±17.18 a	27.84±0.20 b	6.65±0.75 a	5.69±0.09 a
高磷 High phosphorus	1318.9±51.8 a	974.3±49.9 a	590.9±10.4 a	21.51±0.99 b	35.07±0.56 a	5.42±0.23 b	3.52±0.39 b
低锌 Low zinc	1006.8±8.4 b	717.8±26.8 b	493.3±26.8 b	26.35±0.53 b	16.38±0.70 b	3.89±0.19 a	3.87±0.46 a
高锌 High zinc	1158.1±43.8 a	818.8±14.1 a	717.8±38.0 a	33.67±0.99 a	18.37±0.49 a	2.76±0.17 b	2.75±0.09 b
HIPj1							
低氮 Low nitrogen	1147.9±67.5 a	751.5±26.7 a	477.2±13.4 a	18.87±0.63 b	20.30±1.41 b	6.13±0.11 b	5.25±0.10 a
高氮 High nitrogen	1018.9±30.8 b	715.5±51.8 a	428.9±12.9 b	20.74±0.42 a	32.60±0.59 a	6.81±0.24 a	4.12±0.15 b
低磷 Low phosphorus	1159.9±38.0 b	968.5±39.8 a	349.3±23.1 b	25.28±1.71 a	27.12±0.91 b	6.50±0.18 a	4.42±0.65 a
高磷 High phosphorus	1430.6±8.6 a	865.5±34.7 b	468.2±14.7 a	22.30±2.17 a	34.98±0.84 a	5.10±0.15 b	2.69±0.42 b
低锌 Low zinc	1076.7±75.0 b	839.3±41.2 b	438.8±5.0 b	28.93±0.95 b	26.62±0.26 b	4.26±0.26 a	3.65±0.23 a
高锌 High zinc	1240.3±19.8 a	918.5±40.3 a	588.7±14.3 a	33.80±0.49 a	33.93±0.38 a	4.10±0.15 a	2.64±0.49 b

同一列数据后带不同字母者表示在 0.05 水平上差异显著 (同一品种、同一元素类型间比较)。

Within a column, data followed by the different letters are significantly different ($P<0.05$) among different hydroponic concentrations for the same rice material and element.

表 3 水稻籽粒中植酸含量与 K、Mg、Na、Zn、Mn、Fe、Cu 矿质元素含量间的相关系数

Table 3 Coefficients of correlation between grain phytic acid (PA) content and several mineral elements contents (K, Mg, Na, Zn, Mn, Fe and Cu) for different treatments.

供试材料 Rice material	植酸与 K PA vs K	植酸与 Zn PA vs Zn	植酸与 Na PA vs Na	植酸与 Mn PA vs Mn	植酸与 Mg PA Mg	植酸与 Fe PA vs Fe	植酸与 Cu PA vs Cu
协青早 Xieqingzao	0.537*	−0.313	0.268	0.062	0.431	0.553*	0.468
HIPi1	0.207	−0.149	−0.157	0.283	0.085	0.102	0.615**
秀水 110 Xiushui 110	0.456	−0.771**	−0.468	0.501*	0.224	0.648**	0.637**
HIPj1	0.215	−0.435	−0.293	−0.517*	0.077	0.337	0.474*

采用所有处理平均数进行相关分析; *, ** 分别表示在 0.01 和 0.05 水平上显著。

Average of all treatments in tests is adopted; *, ** Significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

含量与 K、Mg、Fe、Cu 4 种矿质元素含量呈正相关, 与籽粒 Zn 含量呈负相关, 但显著水平却因基因型而异。此外, 植酸含量与 Na 和 Mn 两种矿质元素间的相关关系较复杂, 不同基因型间的规律性不甚明显。由于水稻籽粒中的植酸通常是以与 K、Mg、Fe、Zn 等矿质元素形成植酸盐的形式而储存的, 据此推测, 水稻籽粒中植酸盐的化学组分也可能会随水稻生长发育期间的环境营养条件而有所改变, 且不同矿质元素植酸盐的相对含量的差异变化与水稻基因型有关。

3 讨论

关于作物籽粒中植酸含量的遗传和环境影响效应研究, 近年来国内外已不乏报道[15, 17-21]。现已基本明确, 遗传因素和环境生态条件均对作物籽粒中植酸含量具有重要影响[7, 21]。Miller 等[15] 对 4 个燕麦品种的多年多播期试验结果表明, 燕麦种子植酸含量在品种、年份间的差异均达显著水平, 而地

点间的效应不显著；但 Liu 等[20] 对 72 个粳稻品种的多点区域试验结果显示，环境生态因素所引起的植酸含量变异甚至大于品种间差异。据 Buerkert 等[21-22] 报道，土壤磷营养水平对粟、玉米、油菜等作物种子中的植酸含量有显著影响，土壤磷营养水平的增加会导致作物种子植酸含量提升。Raboy 等[23] 以大豆为试验材料的研究结果也证实，磷对大豆种子中的植酸积累表现出一定的调节作用，但是其影响程度和调节表现则因品种类型而异。本研究的试验结果表明，供试基因型和水培溶液中氮、磷、锌的处理浓度差异对水稻籽粒中植酸含量的影响效应均达显著水平。这与前人有关研究结果一致[17-23]。但在本研究结果中，基因型效应的 F 值明显大于水稻生育期间的环境处理效应，与 Liu 等[20] 的多点区域试验结论正好相反，且两者的互作效应方差也相对较小。笔者认为，这一现象是由不同试验的供试材料差别引起的。在本研究中，由于两个低植酸突变体材料（HIPi1 和 HIPj1）及其对照亲本（协青早和秀水 110）间的植酸含量差异较大，因而基因型效应的作用就更明显。值得一提的是，在本研究的水培条件下，高磷浓度处理的植酸含量均较同一材料的低磷浓度处理有所降低（图 1-B）。但据 Miller 等[15, 23] 报道，土壤磷营养水平与玉米、小麦等作物种子中的植酸含量呈正相关。该研究结论与本研究结果间的差异，究竟是由于土培与水培条件下的磷形态背景差别所导致的，还是因作物类型或品种间的差别等因素所引起的，尚有待进一步探讨。

Raboy 等[17] 报道，大豆种子中的植酸、总磷含量与 K、Mg 和 Ca 等矿质元素含量之间均存在着极显著正相关。Boyd 等[24] 对玉米籽粒不同部位（胚、胚乳等）的植酸含量与 Zn、Fe、Mn、Cu、Ca、Mg、K 7 种矿质元素含量差异的研究结果表明，植酸在玉米籽粒中的分布与上述 7 种矿质元素含量间也存在着密切的联系。此外，Kleese 等[18] 也分别以菜豆和小麦等为材料，分析了品种间植酸与多种矿质营养元素含量间的相关性，并得出了与 Raboy 等相近的研究结论，即种子植酸含量与 K、Mg、Mn、Zn 等矿质元素含量间存在着显著的正相关。据此，一些学者提出，在作物育种工作中，在降低植酸含量以提高 Fe、Zn 等微量元素生物利用有效性的同时，也可能会减少 Fe、Zn、Ca 等营养成分在种子中的总含量；相反，在提高种子中 Fe、Zn、Ca 等元素含量以改善作物营养品质的同时，往往也可能导致植酸这一抗营养物质含量的增加[3, 8, 17-18]。在本研究的试验材料中，两个低植酸突变体（HIPi1 和 HIPj1）与对照亲本（协青早和秀水 110）相比，其籽粒中的 K、Mg、Na、Zn、Fe 等矿质元素含量也呈现出一定程度的降低趋向，但在不同环境生态条件下的表现则有所差异（表 1）。对特定材料而言，不同水培处理下籽粒植酸含量与 K、Mg、Fe、Cu 4 种矿质元素含量一般呈正相关、与籽粒 Zn 含量呈负相关，但统计显著水平却因供试材料而异（表 2）。例如，HIPi1 等在高氮处理下的籽粒植酸含量虽有明显降低，但其籽粒中的 Mg、Zn、Fe 等元素含量却呈明显上升趋势（表 2）。由此可见，水稻营养品质的改良工作中，在开展低植酸水稻品种选育的同时，通过适当的栽培方式来调控其微量营养元素在籽粒中的积累，对于全面改善水稻的营养品质有着重要意义。

谢辞：浙江大学原子核农业科学研究所吴殿星研究员为本试验提供两低植酸突变体（HIPi1 和 HIPj1）种子材料，特此感谢。

参考文献：

[1] Lott J N A, Ockenden I, Raboy V, et al. Phytic acid and phosphorus in crop seeds and fruits: A global estimate. *Seed Sci Res*, 2000, 10: 11-33.

[2] Yoshida K T, Wada T, Koyama H, et al. Temporal and aptial patterns of the transcript of myo-inositol-1-phosphate synthase and phytin-containing particles during seed developing in rice. *Plant Physiol*, 1999, 119: 65-72.

[3] Ekholm P, Virki L, Ylinen M, et al. The effect of phytic acid and some natural chelating agents on the solubility of mineral elements in oat bran. *Food Chem*, 2003, 80: 165-170.

[4] 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 Cell Physiol*, 1979, 20: 19-27.

[5] Erdman J W. Bioavailability of trace minerals from cereals and legumens. *Cereal Chem*, 1981, 58: 21-26.

[6] 赵建军，许泽永，方小平. 作物低植酸育种研究进展. 中国粮油学报，2003, 25(2): 94-98.

[7] Raboy V. Seeds for a better future: 'Low phytate' grains help to overcome malnutrition and reduce pollution. *Trends Plant Sci*, 2001, 6: 458-462.

[8] Mage J A. Phytate: Its chemistry, occurrence, food interaction, nutritional significance, and methods of analysis. *J Agric & Food Chem*, 1982, 30: 1-9.

[9] James W R, Premachandra G S. Isolation of high seed inorganic P, low-phytate soybean mutants. *Crop Sci*, 2000, 40: 1601-1605.

[10] Larson S R, Rutger J N, Young K A, et al. Isolation and genetic mapping of a non-lethal rice low phytic acid mutation. *Crop Sci*, 2000, 40: 1397-1405.

[11] Oltmans S E, Fehr W R, Welke G A, et al. Agronomic and seed traits of soybean lines with low phytate phosphorus. *Crop Sci*, 2005, 45: 593-598.
[12] Henrik B P, Lisbeth D S, Preben B H. Engineering crop plants: Getting a handle on phosphate. *Trends Plant Sci*, 2002, 7: 118-124.
[13] 王玉华, 任学良, 刘庆龙, 等. 水稻高无机磷突变体的筛选和培育技术研究. 中国水稻科学, 2005, 19(1): 47-51.
[14] 毛达如. 植物营养研究法. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 14-16.
[15] Miller G A, Youngs V L, Oplinger E S. Environmental and cultivar effects on oat phytic acid concentration. *Cereal Chem*, 1980, 57: 189-191.
[16] 张家泉, 彭建新, 杨淑顺. 杂交水稻协优 46 耐盐能力的初步研究. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 183-185.
[17] Raboy V, Dickinson D B, Below F E. Variation in seed total phosphorus, phytic acid, zinc, calcium, magnesium, and protein among lines of *Glycine max* and *G. soja*. *Crop Sci*, 1984, 24: 431-434.
[18] Kleese R A, Rasmusson D C, Smith L H. Genetic and environmental variation in mineral elements accumulation and barley, wheat, and soybeans. *Crop Sci*, 1968, 8: 591-593.
[19] Feil B, Fossati D. Phytic acid in triticale grains as affected by cultivar and environment. *Crop Sci*, 1997, 37: 916-921.
[20] Liu Z H, Cheng F M, Zhang G P. Grain phytic acid content in japonica rice as affected by cultivar and environment and its relation to protein content. *Food Chem*, 2005, 89(1): 49-52.
[21] Buerkert A, Haake C, Ruckwied M, et al. Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in the Sahel. *Field Crops Res*, 1998, 57: 223-235.
[22] Lickfett T, Mattaus B, Velascol M, et al. Seed yield and phytate concentration in the seeds of two oilseed rape cultivars as affected by different phosphorus supply. *Eur J Agron*, 1999, 11: 293-299.
[23] Raboy V, Dickinson D B. Effect of phosphorus and zinc nutrition on soybean seed phytic acid and zinc. *Plant Physiol*, 1984, 75: 1094-1098.
[24] Boyd L, Ana R, Samuel R. Distribution of phytate and nutritionally important elements among the morphological components of cereal grains. *J Agric & Food Chem*, 1972, 20: 718-721.