

大田条件下水稻锌营养强化方法探究及效果评估^①

刘琦^{1,2,3}, 王张民^{1,2,3}, 潘斐^{1,2,3}, 袁林喜^{1,2,3}, 尹雪斌^{1,2,3*}

(1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026; 2 中国科学技术大学先进技术研究院功能农业工程中心联合实验室, 合肥 230088; 3 江苏省硒生物工程研究中心, 江苏苏州 215123)

摘要:通过田间试验,在水稻(华粳7号)分蘖期及扬花期进行施锌处理,研究在高施锌水平下水稻各器官锌含量的变化。结果表明,水稻各器官锌含量随施锌量的增加而增加,其中茎的增幅最大,叶次之。茎、叶、穗锌含量最高可分别达到666.7、461.6、185.5 mg/kg。分蘖期施锌最多可使水稻糙米锌含量提高28.7%,而扬花期施锌最多可提高142.6%。由重复试验得出,扬花期施锌可稳定提高糙米锌含量,在水稻锌营养强化能力及稳定性上,扬花期施锌优于分蘖期。通过食用经强化后的大米,居民每日锌膳食摄入量可达到中国营养学会推荐的12.5 mg。本研究结果对通过土施锌肥实现水稻籽粒锌水平的提升及解决我国居民普遍存在的锌营养摄入不足的现状具有理论和实际的指导意义。

关键词:田间试验;土壤追肥;水稻;锌营养强化

中图分类号: S143.7; Q946.91 **文献标识码:** A

锌被誉为“生命的火花”,是植物和动物正常生长发育所必需的微量元素。人体中有80余种酶含有锌,分布在人体所有的器官中^[1]。已有研究证明锌参与核酸和蛋白质的代谢过程,人体缺锌会引起一系列的病变,如孕妇缺锌可能导致胎儿畸形;儿童缺锌会影响生长发育,甚至出现呆小症;成人缺锌会使免疫功能下降^[2-4]。为预防我国居民缺锌症的发生,最新的《中国居民膳食营养素参考摄入量(DRIs)2013》表明,我国成年男性锌的每日推荐摄入量为12.5 mg,女性为7.5 mg。

自1982年我国新疆喀什等地发现缺锌综合症以来,越来越多的观察表明,缺锌症多在以谷类为主食的居民中流行^[5]。我国是个典型的以谷类为主食的国家,约有2/3的居民以大米为主食,平均每人每年消费大米62~190 kg,大米提供了我国居民70%的热量、65%的蛋白质和大部分微量元素(如锌)。我国居民膳食锌主要来源于以大米为主的谷类食物,而近年来谷类食物在人们日常膳食中所占比例呈下降趋势,使得我国成人平均锌摄入量由12.3 mg/d减少到11.5 mg/d^[6-7],低于中国营养学会所推荐的12.5 mg/d,

长此以往,我国居民可能面临锌营养缺乏的潜在威胁。大米作为我国居民的锌营养主要来源,科学家们认为开发富锌水稻可能是改善人类锌营养缺乏的一个有效途径^[8-11]。

生物营养强化是通过基因工程、生物育种、农艺措施等技术手段提高现有农作物中能为人体吸收利用的微量元素的含量,是解决“隐性饥饿”的一种经济而有效的途径。但是由于常规育种耗时长、费用高,而基因工程技术带来的生物安全问题尚有争议,因此,通过合理施用锌肥已成为快速安全有效达到锌营养强化目的的首选方法。

适量施锌可以提高水稻光合作用强度,促进其生长发育^[12],在氮磷钾和有机肥施用充足的情况下增施锌肥,能有效提高土壤中有效锌的含量,改善水稻农艺性状,增加水稻产量^[13-15]。目前施锌肥的方式主要有土施和叶面喷施两种,而土壤施锌被认为是供给作物锌元素最直接有效的方法^[16]。长期施用锌肥不仅可以使锌在土壤中有明显的累积^[17],还可以增加作物根际有效锌的供应,提高作物籽粒中的锌含量,改善其营养状况^[18]。赵丽等^[19]在分蘖期每公顷追施

基金项目:国家青年自然科学基金项目(NNSFC31400091),中国科学技术大学先进技术研究院技术创新项目(2013-1-6)和苏州市基础研究(农业)项目(SYN201306)资助。

* 通讯作者(xbyin@ustc.edu.cn)

作者简介:刘琦(1991—),男,四川内江人,硕士研究生,主要研究方向为微量元素与人体健康。E-mail: lqjsh@mail.ustc.edu.cn

24 kg 锌肥时,水稻糙米中锌含量最高可达 22.0 mg/kg, 相比对照组增加了 20.9%, 在同等锌供应水平下, 水稻中的锌含量主要由水稻品种本身决定^[20], 不同品种的水稻对锌的敏感性也不同^[21]。在低水平锌供应条件下, 锌首先满足生殖器官的生长需要^[22], 而低锌水稻籽粒中的锌含量在高浓度锌供应条件下也能与富锌水稻达到同一水平^[23]。一般而言, 作物对锌的忍耐程度越高, 富锌能力也越强^[24]。锌对水稻的毒害较小, 作为营养元素被水稻吸收后主要积蓄在茎部^[25], 因而水稻能在 $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 施用量为 3 600 kg/hm² 的土壤中正常生长, 且其吸收累积锌量和土壤施锌量呈正相关^[26]。

研究表明, 将糙米加工成精米的过程中, 大米中锌元素会较大程度地流失^[27], 糙米中锌含量甚至可达到精米的 6 倍之多^[28]。基于低施锌量强化的水稻籽粒中锌含量的水平极其依赖于水稻本身的品种, 普通品种水稻在该条件下籽粒中锌含量的提高幅度很有限, 加上大米加工过程中锌营养的流失, 决定了低施锌水平对于居民膳食锌摄入量的提高并不显著。因此通过增大施锌量来提高水稻籽粒锌含量的方式需要予以研究。

基于以上问题, 本研究旨在田间试验条件下, 通过在水稻分蘖期及扬花期土施锌肥, 研究在高施锌水平下, 水稻主要器官及可食用部分锌含量的变化特征, 期望找出效果更佳的施锌量和施锌时期, 为通过传统施肥方式实现水稻锌营养强化提供理论基础, 并研究加工过程对锌流失的影响, 评估其对居民膳食锌摄入量提升的作用。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验地点选在江苏省如皋市丁堰镇, 该地属亚热带湿润气候区, 年平均气温为 15.1 °C, 年均降水量为 1 074 mm。试验区长期实行一年两茬稻-麦轮作种植模式, 试验区土壤基本理化性质参照《土壤农业化学分析方法》^[29]进行分析, 土壤 pH 为 7.6, 有机质含量为 16.6 g/kg, 有效磷含量为 14.5 mg/kg, 速效钾含量为 78.2 mg/kg, 总锌含量为 63.5 mg/kg, 有效锌含量为 1.0 mg/kg。

1.2 试验设计

供试水稻品种为“华粳 7 号”, 试验于 2013 年 5 月至 10 月在如皋市丁堰镇水稻试验田进行。5 月 29 日播种, 6 月 20 日插秧, 秧龄 22 d。锌肥分别于

有效分蘖初期(7 月 10 日)及扬花盛期(8 月 26 日)以根外追施 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的方式添加, 分蘖期时锌肥在施用尿素后均匀撒施于试验田中, 扬花期时锌肥均匀撒施在试验田中。分蘖期设置 5 个处理组 F1、F2、F3、F4、F5, 每公顷分别施用锌肥 60、120、180、240、300 kg(以 Zn 计); 扬花期设置 5 个处理组 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5, 每公顷分别施用锌肥 60、120、180、240、300 kg(以 Zn 计)。处理组外设置一个空白对照组(CK), 该组除不施锌肥外, 其余操作均与施肥处理组相同。试验随机区组排列, 每个小区面积 100 m², 每个处理组 3 次重复。各小区田埂用塑料薄膜进行包裹隔离, 田间栽培管理按大田常规操作进行。本课题组于 2014 年同期在如皋市丁堰镇做了一次重复试验, 组别设置和施锌量与上述相同。(下文中除特别说明外, 所述施锌量数据均为以 Zn 计)

1.3 样品采集及处理

在水稻成熟时(10 月 17 日)进行采样, 采样时在每个小区随机采集水稻植株 20 支作为一个混合样, 每个小区取 3 个平行样, 将所采集植株样品分为茎、叶、穗三部分。以相同方法额外采集两组水稻穗, 其中一组进行脱壳处理获得糙米, 另一组以稻谷形式到大米加工厂进行加工获得精米。将所采集样品反复用清水冲洗, 再用去离子水冲洗后, 于 110 °C 杀青, 60 °C 烘 48 h 至恒重, 籽粒用不锈钢砻谷机进行脱壳, 得到糙米, 各组织用不锈钢粉碎机粉碎, 过 60 目筛, 密封保存, 待进行锌含量检测。

锌含量检测采用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (4:1)混酸-电热板消解, 原子吸收光谱仪(PE Analyst 700)进行测定^[28]。样品检测过程中以植物标样 GBW07603(GSV-2)进行质量控制, 相对标准偏差均小于 5%, 方法回收率 98.8%。

1.4 数据处理

数据结果利用 Excel 软件进行平均值和标准差统计。各处理组之间采用 SPSS 19.0 软件进行 ANOVA (Duncan's 法) 显著性差异检验。

2 结果与分析

2.1 水稻成熟期植株各器官锌分布

本试验条件下, 水稻在分蘖期和扬花期分别经施锌处理后, 生长过程中未观察到任何锌过量导致的不良影响, 与吴金桂等^[26]对水稻具备高耐锌能力的报道一致。各组水稻成熟后各器官中的锌含量如表 1 所示。

表 1 分蘖期和扬花期施锌后水稻成熟期各器官中锌含量(mg/kg)
Table 1 Zinc contents in rice tissues during tilling and flowering stages after zinc fertilization

水稻器官	施肥时期	锌肥施用量(以 Zn 计, kg/hm ²)					
		0	60	120	180	240	300
茎	F	24.3 ± 0.1 E	39.0 ± 1.0 D	77.1 ± 1.4 C	83.7 ± 4.4 B	91.9 ± 2.1 B	126.4 ± 6.0 A
	Y	24.3 ± 0.1 F	260.0 ± 8.3 E	306.3 ± 10.1 D	527.4 ± 9.1 B	457.1 ± 7.8 C	666.7 ± 28.8 A
叶	F	23.6 ± 0.6 E	25.7 ± 1.2 E	31.4 ± 0.5 D	40.8 ± 3.8 C	45.7 ± 0.8 B	53.8 ± 0.7 A
	Y	23.6 ± 0.6 E	149.5 ± 4.6 D	172.9 ± 7.9 D	397.1 ± 25.2 B	228.1 ± 11.8 C	461.6 ± 3.2 A
穗	F	21.4 ± 0.3 C	24.5 ± 0.5 BC	29.0 ± 0.4 B	28.6 ± 1.3 B	28.9 ± 1.3 B	37.8 ± 4.8 A
	Y	21.4 ± 0.3 D	65.5 ± 1.4 C	71.9 ± 4.6 C	120.0 ± 4.8 B	115.1 ± 5.4 B	185.5 ± 10.7 A
糙米	F	24.4 ± 0.5 C	24.6 ± 0.3 C	29.8 ± 1.6 AB	26.3 ± 1.4 BC	31.4 ± 0.8 A	29.6 ± 2.3 AB
	Y	24.4 ± 0.5 D	36.0 ± 0.8 C	41.8 ± 2.1 BC	40.1 ± 1.1 BC	47.9 ± 4.2 B	59.2 ± 5.8 A

注:表中同行数据大写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.01$ 显著水平; 每组样品重复 $n = 3$ 。表中字母 F 代表分蘖期, Y 代表扬花期。

由表 1 可知, 对照组水稻器官锌含量差别不大。在分蘖期施锌后, 随着施锌量的增加, 茎和叶中锌含量随施锌量的增加显著增加。而于分蘖期施锌 60 kg/hm² 时, 穗和糙米中的锌含量相比对照组并无显著增加; 施锌量为 120 和 180 kg/hm² 时, 穗和糙米中锌含量也并不会随施锌量的增加而显著地增加; 但施锌量为 300 kg/hm² 时, 穗中锌含量相比施锌量为 240 kg/hm² 时会再次显著地增加, 而糙米中并没有出现这种现象。水稻在分蘖期经高锌水平处理后, 各器官中锌含量与施锌量有一定的正相关关系, 在本试验条件下, 茎、叶、穗和糙米中锌含量最多分别为施锌量为 300 kg/hm² 处理组的 126.4、53.8、37.8 mg/kg 和施锌量为 240 kg/hm² 处理组的 31.4 mg/kg, 分别达到对照组的 5.2 倍、1.3 倍、1.8 倍、1.3 倍, 且各器官锌含量高低分布呈现为茎>叶>穗>糙米。

与分蘖期施锌相似, 在扬花期施锌后, 茎和叶中锌含量随着施锌量的增加而显著增加; 但施锌量为 120、180、240 kg/hm² 时, 穗和糙米中锌含量并无显著增加, 但进一步增加施锌量至 300 kg/hm² 时, 糙米和穗中锌含量再次出现显著增加。同样地, 水稻在扬花期经高锌水平处理后, 各器官中锌含量与施锌量有一定的正相关关系, 在本试验条件下, 茎、叶、穗、糙米中锌含量最多分别为施锌量为 300 kg/hm² 处理组的 666.7、461.6、185.5、59.2 mg/kg, 分别达到对照组的 27.4 倍、19.6 倍、8.7 倍、2.4 倍, 且各器官锌含量高低分布呈现为茎>叶>穗>糙米。

在同等施锌水平下, 分别于分蘖期和扬花期施锌对水稻各器官锌含量的影响是不尽相同的, 表 2 为扬花期、分蘖期施锌后水稻各器官锌含量比值。

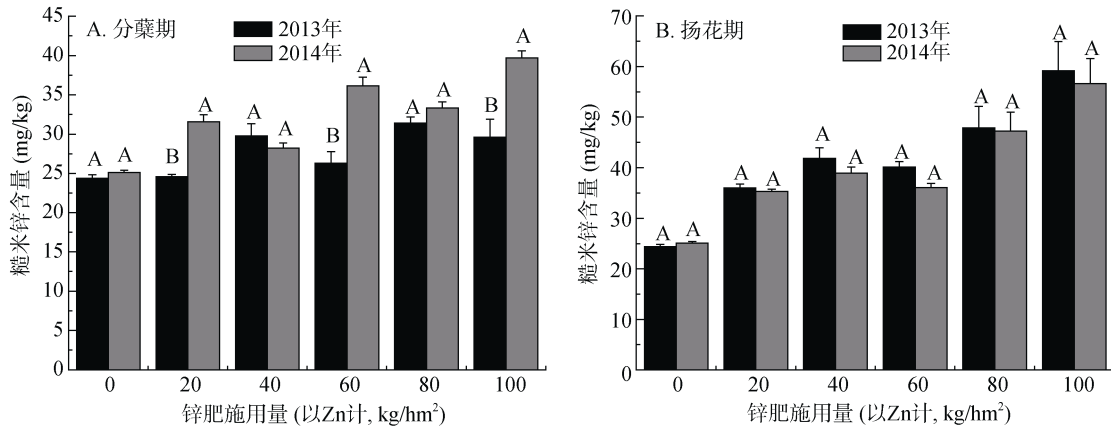
表 2 扬花期、分蘖期施锌后水稻各器官锌含量比值
Table 2 Zinc contents ratio in rice tissues after zinc fertilization during flowering stages and tilling stages, respectively

施锌量(以 Zn 计)(kg/hm ²)	茎	叶	穗	糙米
60	6.7	5.8	2.7	1.5
120	4.0	5.5	2.5	1.4
180	6.3	9.7	4.2	1.5
240	5.0	5.0	4.0	1.5
300	5.3	8.6	4.9	2.0

由表 2 可知, 在同等施锌水平下, 相比于分蘖期施锌, 扬花期施锌能更显著地提高水稻各器官的锌含量, 其中以茎和叶两器官最为明显, 最高可分别提高 6.7 倍和 9.7 倍。当施锌量为 60 kg/hm² 和 120 kg/hm² 时, 扬花期施锌处理组的水稻穗中锌含量为分蘖期施锌处理组的 2.5 倍左右; 当进一步增加施锌量时, 这一数字可稳定在 4~5 之间。当施锌量为 180~240 kg/hm² 时, 扬花期施锌处理组的水稻糙米中锌含量约为分蘖期施锌处理组的 1.5 倍, 当进一步增加施锌量时, 该比值增大。由此可初步判断, 就水稻器官锌含量增加幅度而言, 扬花期是更好的施锌处理时期, 且在同等施锌水平下, 经扬花期施锌处理后, 水稻糙米中锌含量约是分蘖期施锌处理后的 1.4~2.0 倍。

本研究小组于 2014 年在江苏省如皋市丁堰镇设计了一次重复试验, 两次试验地点相邻, 田间土壤理化性质及天气条件相当, 试验布设及样品处理方法相同, 最终收获糙米锌含量结果如图 1 所示。

由图 1 可知, 两次试验对照组水稻中糙米锌含量相当, 且随着施锌量的增加, 糙米中锌含量变化趋势相似。同样的, 在同一施锌水平下, 扬花期水稻糙米锌含量显著高于分蘖组。而新复极差多重比较结果显示,



(图中大写字母不同表示同一处理不同年份间差异达 $P < 0.01$ 显著水平；每组样品重复 $n = 3$)

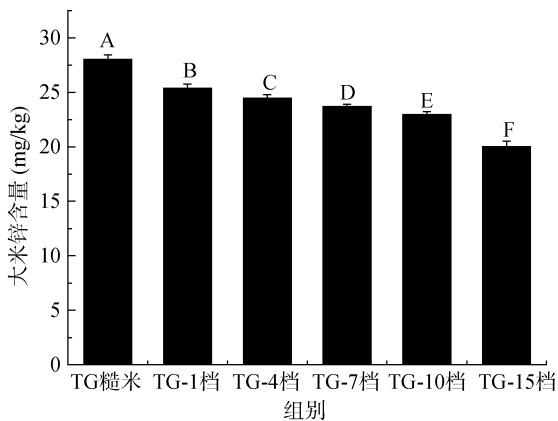
图 1 分蘖期及扬花期施锌对糙米锌含量影响的稳定性

Fig. 1 Stability of zinc contents in unpolished rice after zinc fertilization during tilling and flowering stage, respectively

两次试验中,在扬花期施锌时水稻糙米中锌含量之间并无显著差异,而在分蘖期施锌时水稻糙米中锌含量出现了不同程度的差异性。说明相比分蘖期施锌,于扬花期施锌不仅更有利于糙米中锌的累积,同时稳定性更好,因此通过在扬花期施锌以提高糙米中锌含量的方式优于分蘖期施锌。

2.2 加工精度对大米锌含量的影响

本研究选择了一款东风井关牌碾米机,该碾米机共有 15 个手动调节档位 1 ~ 15,随着档位数字的增加,经加工后的水稻籽粒碾减率会增加。本研究通过 5 个档位对收获的富锌水稻进行加工,期望得到富锌大米经不同精度加工后的锌含量变化特征,其结果如图 2 所示。



(图中大写字母不同表示不同加工精度组间差异达 $P < 0.01$ 显著水平；每组样品重复 $n = 3$)

图 2 不同加工精度对大米锌含量的影响

Fig. 2 Zinc contents in rice under different processing accuracies

本次所选富锌大米为前述试验中经施锌强化后的大米,图 2 中横坐标档位表示精加工程度,数字越

大表示精度越高,碾减率越高。其中经 1 档和 4 档加工后的大米仍保留着部分糙米特征,口感粗糙,色泽泛黄,不适宜直接食用;经 7 档和 10 档加工后的大米已达到精米水平,色泽和口感可达到人们要求,可直接食用,而当地市售大米多经 7 档或 10 档加工。由图 2 可知,该组水稻糙米中锌含量为 28.0 mg/kg,经 1 档加工后锌含量为 25.4 mg/kg,下降了 9.3%;经 7 档加工后锌含量为 23.7 mg/kg,相比糙米下降了 15.4%;而经 15 档加工后其锌含量为 20.0 mg/kg,相比糙米下降了 28.6%。由此可知,随着加工精度的提高,大米中保留的锌含量会显著降低。

3 讨论

3.1 不同施锌量对水稻各器官锌含量的影响

水稻对土壤中锌的吸收与土壤中锌浓度有关,水稻根细胞吸收锌有两个过程,即分泌根系分泌物将土壤中的锌离子活化,再通过转运蛋白将锌离子转运进入细胞^[30]。进入水稻体内的锌会通过木质部的运输、韧皮部的再转运及韧皮部的装载等过程分布到水稻的各个器官中^[31]。水稻各器官中的锌含量均与土壤中的锌浓度有关,而在不影响水稻正常生长的前提下施用不同量的锌肥必然会对水稻各器官中的锌含量产生不同的影响。

赵丽等^[19]研究了在较低施锌水平下,水稻中的锌含量分布特点,其对照组中水稻锌含量分布表现为叶>茎>糙米,而在水稻生长过程中的分蘖期和灌浆期施用一定量的外源锌后水稻锌含量分布表现为茎>叶>糙米。而在本试验条件下,对照组中水稻锌含量分布表现为糙米>茎>叶,在分蘖期和扬花期施锌后水稻锌含量分布表现为茎>叶>糙米,与上述结果类

似。赵丽等^[19]试验地土壤特征与本试验相似,且采样时间极为接近,但施用锌肥的量有较大差距(赵丽等最高施锌量为 8 kg/hm²),通过二者结果的对比可能可以发现较大跨度的施锌量对水稻各器官锌含量分布的影响特征。

当分蘖期施锌达到 6 kg/hm² 时,水稻中的锌分布即表现为茎>叶>糙米^[19];赵丽等^[19]于分蘖期施锌 24 kg/hm² 时,茎、叶、糙米中锌含量分别可达到 134.9、36.8、22.0 mg/kg,分别为对照组的 4.3 倍、1.3 倍、1.2 倍;而在本试验条件下,施锌 300 kg/hm² 时,该数据分别为 126.4、53.8、29.6 mg/kg,分别是对照组的 5.2 倍、1.3 倍、1.3 倍。当于扬花期施锌时,水稻中锌分布同样表现为茎>叶>糙米,但赵丽等^[19]于扬花期施锌 24 kg/hm² 时,茎、叶、糙米中锌含量分别为 47.3、47.1、23.6 mg/kg,分别为对照组的 1.5 倍、1.7 倍、1.3 倍,而在本试验条件下,施锌 300 kg/hm² 时,该数据分别为 666.7、461.6、59.2 mg/kg,为对照组的 27.4 倍、19.6 倍、2.4 倍。由此可知,在分蘖期施锌时,增加施锌量对于水稻各器官中锌含量的增加并无显著作用,而在扬花期施锌时,增加施锌量对于水稻茎和叶中的锌含量增加有极大的促进作用,但是对于糙米中的锌含量增加的促进作用有限。研究表明,在较低水平锌供应条件下,水稻中的锌首先满足生殖器官的生长需要,而随着施锌量的增加,锌则在代谢活性相对较弱的营养器官(如茎和叶)中积累^[22],且向在中等供锌能力土壤中种植的农作物供给外源锌不一定能显著增加作物籽粒中的锌含量^[32]。因而一味地增加施锌量并不一定能显著地提高水稻各器官中的锌含量,但在适当的水稻生长时期增加施锌量可在一定程度上显著提高水稻各器官中的锌含量。

3.2 不同施锌时期对水稻各器官锌含量的影响特征

在水稻生长的关键时期施加一定量的锌肥可在一定程度上增加水稻茎、叶、穗中的锌含量,且锌含量的增加与施锌量呈现一种正相关关系。Phattarakul 等^[33]在水稻田中每公顷基施 50 kg ZnSO₄·7H₂O 发现,水稻糙米中锌含量可提高 2.4%;而赵丽等^[19]在水稻分蘖期和灌浆期内追施等量 ZnSO₄·7H₂O 时,水稻糙米中锌含量增加幅度高于 Phattarakul 等的结果,说明在分蘖期和灌浆期施锌相比基施锌肥更有利于水稻糙米中锌的累积。在高供锌水平下,水稻植株地上部分的锌含量可提高近 16 倍之多,糙米锌含量也能比对照组提高 58.6% 之多^[34]。而在本试验条件下,当扬花期施锌 300 kg/hm² 时,水稻茎中锌含量可提高 26.3 倍,糙米中锌含量也比对照组增加了 142.6%,同时,是分蘖期施用等量锌的 5.3 倍和 2.0 倍。

水稻根部主要以离子态形式吸收土壤中的锌,而锌离子在进入植株内部后需经历木质部运输、韧皮部运输、韧皮部卸载等过程进入籽粒中储存,而韧皮部的卸载过程被认为是籽粒锌积累受限制的重要瓶颈^[23]。在低供锌水平条件下,锌首先满足生殖器官的生长需要,此时锌可通过韧皮部从老叶向新生组织转运,并且在缺锌情况下转运量远大于高锌条件下的运输,该过程中,韧皮部的锌必须被木质部周围的活细胞从“源”组织(如茎等)运输到“库”组织中(如种子)^[23,35];当锌过量时会对植株产生毒害作用,造成细胞超微结构破坏,同时会影响植物生理功能,对植物造成遗传毒害等^[36],在植株锌含量超过自身所需时,植物体内的 CDF 转运蛋白家族可将过量的锌转运出细胞,或将其进行区域化隔离至细胞壁和液泡中,避免其进入细胞质,起到保护细胞的作用^[37-38],因而在高供锌水平条件下,锌会优先在代谢活性较弱的营养器官(如茎、叶等)中积累^[22]。由此可知,水稻植株对于自身的锌含量具有一套复杂的调控机制,以保证植株的正常生长发育。

由于水稻对自身锌含量的调节是需要一定时间过程的,因此在不同时期添加外源锌对于植株中锌含量会产生不同的影响,这可能是造成在同等施锌水平下,施锌时期相对越接近成熟期,水稻各器官锌含量,特别是籽粒中的锌含量越高的原因。在研究富锌水稻突变体和普通水稻品种在不同锌水平处理下的籽粒锌含量时发现,富锌水稻在低水平锌供应时就能在籽粒中富集较多的锌,但后期的锌供应不足对其影响较大,而普通水稻在高浓度锌供应条件下其籽粒锌含量也能达到富锌水稻的水平^[23]。由此可知,对于水稻而言,其籽粒中锌含量与生长后期的锌供应水平有一定的关系,而在水稻生长前期施锌,如基肥和分蘖期施锌,对于水稻各器官的锌含量影响有限,且受水稻自身调控机制和可能的外界条件改变的影响较大。就本研究条件而言,在更接近成熟期的扬花期施锌的试验组中的水稻各器官中锌含量均显著高于分蘖期施用等量锌的试验组,且扬花组水稻最终收获籽粒中锌含量的稳定性显著强于分蘖组。因此,扬花期是最佳的施锌时期。

3.3 加工方法对稻米锌含量的影响

我国居民膳食锌摄入主要来源于米面及其制品,其中大米占 33.7%^[7]。近年来,人们对于大米的口感和外观要求越来越高,使得大米的加工程度越来越精细,导致营养素含量丰富的皮层和米胚在加工过程中被不同程度地破坏,进而造成营养素的严重损失。对云南农业大学提供的 208 份水稻的研究表明,糙米锌含量平

均为 23.0 mg/kg,而精米的锌含量平均为 18.8 mg/kg^[39]。元盛敏等^[27]通过对大米进行不同程度的精度加工发现,随着碾减率的提高,大米中锌含量逐渐减少。

在本研究条件下,用第 7 档加工大米时,已基本满足人们对于大米口感和色泽的需求,经加工后的富锌大米锌含量为 23.7 mg/kg,对照组大米经 7 档加工后其锌含量为 17.9 mg/kg,即经强化后的大米在该加工精度下锌含量相对对照组提高了 32.8%。我国居民平均每标准人(标准人即体重 60 kg 从事轻体力劳动的成年男子)日膳食锌摄入量为 11.3 mg^[7],而我国居民膳食中的锌有 33.7% 来自于大米,即平均每标准人日通过大米摄入锌 3.8 mg,若所食大米为前述富锌大米,锌摄入量将会达到 5.0 mg,这便意味着,在不改变膳食结构的前提下,居民通过食用该种锌强化后的大米其锌摄入量将增加 1.2 mg,达到 12.5 mg。而《中国居民膳食营养素参考摄入量》(2013 版)中成年男子的每日锌推荐摄入量即为 12.5 mg,可见通过食用该种富锌大米能有效地提高我国居民膳食锌摄入量。由前文论述可知,在本试验条件下,于扬花期每公顷施锌 60 kg,可使水稻糙米锌含量达到 36.0 mg/kg,精米锌含量达到 23.7 mg/kg。

中国土壤环境质量标准中将农业用地中的总锌含量分为 3 个等级:第一级为环境背景值(100 mg)、第二级为筛选值(300 mg)、第三级为整治值(500 mg),本研究对收获后土壤中锌含量进行了检测,其锌含量能达到中国土壤环境质量标准的二级标准,并不会造成生态环境问题^[40]。

4 结论

水稻植株中的锌含量随施锌量的增加而显著增加,于扬花期施锌更能显著地增加植株中锌含量,其中茎中锌含量增加最显著,当施锌量为 300 kg/hm²时,水稻茎中锌含量最多可达到 666.7 mg/kg,为对照组的 27.4 倍,糙米中锌含量最高可达到 59.2 mg/kg,是对照组糙米的 2.4 倍。且扬花期施锌对水稻植株锌含量的提高具有更好的稳定性,因此以土施硫酸锌的方式提高水稻锌营养水平而言,扬花期是最佳的施锌时期。

大米中的锌含量随加工精度增加而显著减少,在本研究条件下,精米中锌含量最多可损失 28.6%。通过扬花期施锌 60 kg/hm²,并以本研究所用仪器的第 7 档加工大米可使我国居民每日膳食锌摄入量达到《中国居民膳食营养素参考摄入量》(2013 版)中推荐的 12.5 mg,对解决我国居民普遍存在的锌营养摄入不足的现状具有一定的理论和实际指导意义。

参考文献:

- [1] 陈文强. 微量元素锌与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2006, 23(4): 62-65
- [2] 陈学存. 人体锌缺乏研究进展[J]. 国外医学: 卫生学分册, 1992, 19(3): 161-164
- [3] 胡正文. 锌缺乏对人体健康危害的研究[C]. 微量元素研究与进展学术交流会, 2001
- [4] 刘哲华. 锌对人体健康影响的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2000, 17(4): 72-73
- [5] 徐晓燕, 杨肖娥. 锌从土壤向食物链的迁移[J]. 广东微量元素科学, 1996, 3(7): 21-29
- [6] 张继国, 张兵, 王惠君, 等. 1989—2009 年中国九省区膳食营养素摄入状况及变化趋势(七)18-49 岁成年居民膳食锌的摄入状况及变化趋势[J]. 营养学报, 2012, 34(2): 111-113
- [7] 王志宏, 翟凤英, 何宇纳, 等. 中国居民膳食锌元素的摄入状况及变化趋势[J]. 卫生研究, 2006, 35(4): 485-486
- [8] 张永鑫, 王人民, 孙晓梅, 等. 富锌水稻——改善人类锌营养的新途径[J]. 上海农业学报, 2005, 21(4): 120-123
- [9] Broadley M R, White P J, Hammond J P, et al. Zinc in plants[J]. New Phytologist, 2007, 173(4): 677-702
- [10] Cakmak I. Biofortification of cereal grains with zinc through fertilizer strategy[J]. Annals of Nutrition and Metabolism, 2009, 55: 377-377
- [11] Cakmak I, Hoffland E. Zinc for the improvement of crop production and human health[J]. Plant and Soil, 2012, 361(1/2): 1-2
- [12] 孙桂芳, 杜明, 慕永红, 等. 水稻锌素营养研究进展[J]. 现代化农业, 2013(3): 20-22
- [13] 谭军, 刘晓颖, 李强, 等. 文山烟土壤有效锌含量及其影响因素研究[J]. 土壤, 2017, 49(4): 719-724
- [14] 宋科, 姚政, 徐四新, 等. 锌肥对崇明水稻的增产效果研究[J]. 上海农业学报, 2011, 27(2): 63-66
- [15] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 998-1004
- [16] 陆欣春, 田霄鸿, 杨习文, 等. 氮锌配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1202-1213
- [17] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1386-1393
- [18] Cakmak I, Erdal I. Phytic acid-zinc molar ratios in wheat grains grown in Turkey[J]. Micronutr. Agric., 1996, 2: 7-18
- [19] 赵丽, 王张民, 黄阳, 等. 土壤追施锌肥对水稻植株锌累积特征影响研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(8): 631-638
- [20] 张名位, 彭仲明. 特种稻米中微量元素铁、锌、锰含量的配合力和稳定性分析[J]. 中国水稻科学, 1996, 10(4): 201-206
- [21] 陈光财. 水稻耐低锌与籽粒富锌基因型农艺性状和生理特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003
- [22] 万吉丽. 锌在水稻体内运输, 分配及积累的生理机制及基因型差异[D]. 杭州: 浙江大学, 2010

- [23] 廖海兵. 籽粒富锌水稻锌运输和分布特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011
- [24] 宁运旺, 张永春, 汪吉东, 等. 土壤-植物-人类系统中锌与富锌农产品的开发[J]. 江苏农业科学, 2009(3): 1-4
- [25] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湘北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 410-420
- [26] 吴金桂, 李正明. 施锌量与作物奢侈吸收的应用研究[J]. 土壤肥料, 1991(1): 25-29
- [27] 亓盛敏, 任晨刚, 谢天. 不同碾减率大米微量元素含量变化[J]. 粮食工程, 2015(1): 41-43
- [28] 赵强. 我国主要农作物微量元素含量状况分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2006
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [30] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 根系分泌物生态学研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 57-62, 28
- [31] 虞银江, 廖海兵, 陈文荣, 等. 水稻吸收、运输锌及其籽粒富集锌的机制[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 365-372
- [32] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37
- [33] Phattarakul N, Rerkasem B, Li L, et al. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries[J]. Plant and Soil, 2012, 361(1/2): 131-141
- [34] 李志刚, 叶正钱, 方云英, 等. 供锌水平对水稻生长和锌积累和分配的影响[J]. 中国水稻科学, 2003, 17(1): 61-66
- [35] 韦燕燕. 水稻籽粒中锌生物有效性及调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2012
- [36] 龚红梅, 李卫国. 锌对植物的毒害及机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29): 14009-14015
- [37] 龚红梅, 沈野. 植物对重金属锌耐性机理的研究进展[J]. 西北植物学报, 2010, 30(3): 633-644
- [38] 郎明林, 张玉秀, 柴团耀. 植物重金属超富集机理研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 2021-2030
- [39] 文建成, 张忠林, 金寿林, 等. 滇型杂交粳稻及其亲本稻米铁、锌元素含量的分析[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1182-1187
- [40] Wang Z M, Liu Q, Pan F, et al. Effects of increasing rates of zinc fertilization on phytic acid and phytic acid/zinc molar ratio in zinc bio-fortified wheat[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 58-64

Effect Evaluation on Method of Zinc Biofortification for Rice in Paddy Field

LIU Qi^{1,2,3}, WANG Zhangmin^{1,2,3}, PAN Fei^{1,2,3}, YUAN Linxi^{1,2,3}, YIN Xuebin^{1,2,3*}

(1 University of Science and Technology of China, School of Earth and Space Sciences, Hefei 230026, China; 2 Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China; 3 Jiangsu Bio-Engineering Research Centre of Selenium, Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: A field experiment was conducted to characterize zinc distribution in rice during the tilling and the flowering stages under a high level of zinc fertilization. The results showed that zinc contents in rice tissues were positively correlated with the amount of zinc fertilization. Compared with CK, zinc contents in stems, leaves, and spikes reached up to 666.7, 461.6 and 185.5 mg/kg, increased by 27.4, 19.6 and 8.7 times, respectively; zinc contents increased by up to 28.7% and 142.6% in unpolished rice after zinc fertilization during the tilling and the flowering stages, respectively. A conducted duplicate test confirmed that it is better and more reliable to increase zinc content in rice by zinc fertilization during the flowering stage. By consuming the biofortified rice, daily intake of zinc by Chinese citizens can reach up to 12.5 mg standard recommended by Chinese Nutrition Society. This study provided theoretical and practical references to fortify zinc in rice grain via zinc fertilization and then improved the deficiency of daily zinc intake.

Key words: Field experiment; Soil-applied fertilizer; Rice; Zinc biofortification