

# 土壤追施锌肥对水稻植株锌累积特征影响研究

赵丽<sup>1</sup>, 王张民<sup>1</sup>, 黄阳<sup>1</sup>, 袁林喜<sup>2</sup>, 尹雪斌<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026;

2. 中国科学技术大学苏州研究院生态安全与人体健康实验室, 江苏苏州 215123)

**摘要:**通过田间试验,在水稻(扬育粳2号)分蘖期及灌浆期追施锌肥,探究不同生育时期及锌肥施用水平对水稻成熟期植株吸收和累积锌特征的影响。结果显示:在两个时期施肥后,水稻成熟期各器官锌含量和植株锌累积量均随施肥量增加而增加,锌在各器官的分配比例也随之改变;施肥处理后,营养器官茎中锌含量最高可达到对照组的4.3倍(分蘖期),而糙米锌含量较对照组最大增幅分别为20.9%(分蘖期)和29.7%(灌浆期);相同锌肥水平下,分蘖期施肥植株锌累积量(最高454 μg)均高于灌浆期(最高266.2 μg),而锌收获指数(最大0.194)均低于灌浆期施肥(最大0.336)。总之,土壤追施锌肥可以显著增加水稻植株锌的累积,并一定程度上提高水稻籽粒中锌的含量和累积量;灌浆期较分蘖期追施锌肥更有利于提高水稻籽粒锌水平,是通过土壤追肥方式提高水稻籽粒锌水平的关键时期。

**关键词:**田间试验;土壤追肥;农业锌强化;水稻;锌累积

**中图分类号:**S143.7;Q946.91 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.08.005

**引用格式:** Zhao Li, Wang Zhangmin, Huang Yang, et al. Zinc accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by agronomic biofortification through soil-applied zinc fertilizers[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013,43(8):631-638.

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.

## Zinc accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by agronomic biofortification through soil-applied zinc fertilizers

ZHAO Li<sup>1</sup>, WANG Zhangmin<sup>1</sup>, HUANG Yang<sup>1</sup>, YUAN Linxi<sup>2</sup>, YIN Xuebin<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Suzhou Institute for Advanced Study, USTC, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** A field experiment was designed to explore zinc (Zn) accumulation characteristics in mature paddy rice plants (Japonica rice Yang Yu No. 2) after agronomic Zn biofortification. Zn fertilizers were distributed to the paddy field during the tillering and filling stages. Rice plants were harvested and analyzed in the mature stage. The results show that Zn contents in all organs and Zn accumulation per plant increase with the increasing level of fertilization, while Zn distribution vary with different

**收稿日期:**2013-04-01; **修回日期:**2013-05-02

**基金项目:**国家自然科学基金(40601088),江苏省青年自然科学基金(BK2012202),中科院南京土壤所国家重点实验室开放基金(Y052010020)资助。

**作者简介:**赵丽,女,1986年生,硕士生。研究方向:微量元素与人体健康。E-mail:zhaolily@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:**尹雪斌,博士/副教授。E-mail:xybin@ustc.edu.cn

treatments. The highest Zn content in stems is up to  $(134.9 \pm 20.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which is 4.3 times that of the control group (tillering stage), while Zn contents in brown rice increase by not more than 20.9% and 29.7% for the tillering and filling stage treatments, respectively. Zn accumulation in the tillering stage treatment is significantly higher than that in the filling stage (the maximum accumulation is  $454.0 \mu\text{g}$  for the tillering stage and  $266.2 \mu\text{g}$  for the filling stage). In contrast, Zn harvest index is up to 0.336 for the filling stage, much higher than that of the tillering stage with a maximum of 0.194. Zn biofortification through soil-applied Zn fertilizers can not only significantly increase Zn accumulation of the rice plants but also increase Zn content and Zn mass in grains. Compared to the tillering stage, it is more conducive to improve Zn level in rice grains during the filling stage.

**Key words:** field trials; soil-applied fertilizers; agronomic Zn biofortification; paddy rice; Zn accumulation

## 0 引言

锌是生物体内必需微量营养元素之一,对生命体维持正常的生理功能发挥着不可替代的作用.目前,锌营养缺乏的现象非常普遍,据统计世界上约有三分之一的人口面临缺锌引起的各类营养失衡及疾病的威胁,尤其是在以谷类为主食的国家 and 地区<sup>[1-3]</sup>.水稻是我国最重要的粮食作物之一,全国大约有三分之二的居民以大米作为主食.我国约有 40% 的土壤缺锌,尤其是我国北方及长江中下游平原的石灰性水稻土<sup>[4]</sup>.水稻是锌敏感作物,其生理特征和营养品质很大程度上受到土壤有效锌水平的影响<sup>[5-8]</sup>.普遍偏低的水稻籽粒锌水平远远不能满足人们日常对锌的摄入需求<sup>[9]</sup>.通过有效的措施提高稻米中锌的含量,是一种有效改善人类锌营养状况的方法<sup>[10-13]</sup>.

施用锌肥有效增加了土壤溶液中可利用锌的含量,为作物生长提供了充足的锌源,是增加作物中锌含量最直接的方法<sup>[13]</sup>.研究表明,每公顷根施 10 kg 锌就能有效预防作物锌缺乏症状的发生<sup>[14]</sup>.通过传统的农艺措施包括施肥、土壤改良等方式提高农作物的锌营养水平,即农业锌生物营养强化,是生物营养强化领域的一项重要研究内容<sup>[15]</sup>.目前,国内外对小麦、水稻等作物进行的锌营养强化研究已经取得了不少进展<sup>[13,15-20]</sup>.一项旨在通过传统施肥方式,提高农作物的锌营养水平和人体锌摄入量的国际计划—锌肥强化计划(Harvestzinc Fertilizer Project),已在世界多个地区开展.

在我国,对小麦、水稻等农作物锌营养生理特性研究不在少数,但很多研究结论是基于室内实验或者面积较小的室外试验区得出的<sup>[16,21-24]</sup>.由于室内实验与大田实验条件的差异,很多基于室内实验的研究在大田实验中会呈现不同的效果.农作物在各个生

育时期对不同肥料的需求和利用率不同,水稻施用锌肥主要集中在基肥、分蘖肥和灌浆肥<sup>[25]</sup>.相对于叶面喷施方式,土壤施肥受气候条件影响小,且时效性长,在农业生物营养强化领域具有推广的价值.以锌的农业生物营养强化为目的进行的土壤锌肥效果实验多以基肥形式施用,后期通过根系追施方式施用锌肥的研究比较少<sup>[16-17]</sup>.本文综合以上因素,在大田条件下,通过合理的实验设计和田间管理,系统地研究了在分蘖期和灌浆期两个水稻生长关键时期通过在土壤追施锌肥后,水稻成熟期植株吸收、分布及累积锌的特征,特别是可食用部分锌的累积情况,为通过传统施肥方式实现水稻锌营养强化提供参考.

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

田间试验在江苏省如皋市典型水稻种植区进行.如皋市(北纬  $32^\circ \sim 32^\circ 30'$ ,东经  $120^\circ \sim 120^\circ 50'$ )地处江苏省中部东侧,长江三角洲北翼,属亚热带湿润气候区,四季分明、气候温和、雨水充沛,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》<sup>[26]</sup>进行分析,见表 1.

### 1.2 试验设计与处理

试验于 2012 年 5 月至 10 月在如皋市雪岸镇水稻试验田进行,供试品种为迟熟中粳稻品种“扬育粳 2 号”,为江苏省苏中及宁镇扬丘陵地区推广使用品种.5 月 24 日播种,塑盘育秧,6 月 20 日插秧,秧龄 27 天.插秧前,大田施用复合肥( $\text{N}:\text{P}_2\text{O}:\text{K}_2\text{O} = 2:2:1$ )  $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  作为基肥.根据水稻的生育阶段,分别在分蘖期、孕穗期及灌浆期追施尿素  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ .锌肥分别于有效分蘖初期及灌浆初期以根外追施的方式施用,施用时将锌肥与追施的尿

表 1 试验田基本理化性质 (Mean±SD)

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of the soil in the experiment fields (Mean±SD)

pH	有机质 /(g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 /(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 /(g·kg <sup>-1</sup> )	总锌 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效锌 /(mg·kg <sup>-1</sup> )
7.8±0.5	16.5±3.3	14.7±3.4	76.3±10.5	64.2±6.7	1.1±0.2

【注】采用 S 形布点采集试验区土壤样品 10 个, 每个样品采 5~10 个样点组成一个混合样, 表中数据为 10 个土壤样品理化指标平均值及标准偏差。

素混合均匀后撒施于试验田中。分蘖期设置 3 个处理组 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>: 每公顷分别施用 30, 60 及 120 kg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O; 灌浆初期设置 3 个处理组 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>: 每公顷分别施用 30, 60, 120 kg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O。施肥处理组外设置一个空白对照组(CK), 除不施用锌肥外, 其余操作均等同施肥处理组。实验随机区组排列, 小区面积 100 m<sup>2</sup>, 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。

水稻成熟期每个小区随机采集水稻成熟植株 30 株作为一个混合样, 每个小区取 3 个平行样。鲜样反复用去离子水冲洗后, 110 °C 杀青, 将植株分为根、茎、叶、剑叶及穗部分, 60 °C 烘干 48 h 恒重后称干重。稻穗分为籽粒及穗轴, 籽粒用不锈钢砵谷机进行脱壳, 分成颖壳及糙米部分。各组织用不锈钢粉碎机粉碎后, 过 60 目筛, 密封, 待进行锌含量测定。锌含量采用 HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> (4:1) 混酸—电热板消解, 原子吸收光谱仪(PE Analyst 700) 进行测定<sup>[26]</sup>。样品检测过程以植物标样 GBW07603(GSV-2) 进行质量控制, 相对标准偏差均小于 5%, 方法回收率 98.7%。

### 1.3 数据分析方法

器官 a 锌累积量(μg) = 器官 a 干重(g) × 器官 a 锌含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

器官 a 锌分配百分比(%) = 器官 a 锌累积量(μg) / Σ(器官 i 锌累积量(μg)) × 100%

锌收获指数 = 籽粒锌累积量(μg) / 植株整体锌累积量(μg)

数据结果进行了平均值和标准差统计, 统计结果通过 Excel 2007 获得, 处理组之间采用 SPSS for Windows 19.0 软件进行 ANOVA(Duncan's 法) 显著性差异检验, 显著性差异水平分别为 0.05 和 0.01。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水稻成熟期植株各器官锌的分布

植物体不同器官元素含量的分布受到基因型和

复杂的外界环境条件的双重影响, 当植物品种确定时, 环境条件变化将可能导致其分布特征发生变化。在分蘖期和灌浆期分别施用锌肥的情况下收获的水稻各器官中的锌含量分析结果见表 2, 可以发现, 对照组水稻器官锌含量高低依次为: 根 > 穗轴 > 颖壳 > 叶 > 剑叶 > 茎秆 > 糙米; 分蘖期施肥处理组为: 根 > 茎 > 穗轴 > 颖壳(剑叶, T<sub>3</sub>) > 剑叶(颖壳, T<sub>3</sub>) > 叶 > 糙米; 灌浆期施肥处理组为: 根 > 颖壳 > 穗轴 > 茎秆 > 叶(> 穗轴, F<sub>3</sub>) > 剑叶 > 糙米。施用锌肥的水稻各器官中锌的含量均高于对照组, 总体上表现为根系含量最高, 且与施肥量呈现明显的正相关(表 3), 但含量未达到对植物有毒害的水平<sup>[12]</sup>。施用锌肥的量和时期不同, 对水稻成熟期植株中锌含量的分布影响也不同。本实验的结果与王晓波等<sup>[28]</sup> 在盆栽实验中得到的成熟时锌在水稻各器官的分布情况基本一致。

由表 2 可见, 分蘖期施肥后, 糙米中锌含量较对照组有一定的提高, 但是提高的幅度有限。其中 T<sub>3</sub> 组糙米锌含量达到 22.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 较对照组提高了 20.9%, 但与其他组之间差异并不显著。灌浆期施肥后, 糙米的锌含量提升同样非常有限, 最高施肥处理组 F<sub>3</sub> 糙米锌含量也仅比对照组提高了 29.7%, 但与锌肥施用量的相关性高于分蘖期处理组(表 3)。Phattarakul 等<sup>[17]</sup> 在世界 5 个不同的国家开展了锌肥对水稻籽粒锌含量效果的实验, 结果表明每公顷基施 50 kg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 水稻糙米锌含量仅平均提高了 2.4%。本实验条件下, 相同施肥量下糙米锌含量增幅明显高于 Phattarakul 等的结果, 但与相关报道中小麦营养强化后糙米锌含量的增幅仍有较大的差距<sup>[13]</sup>。由此可见, 在水稻生育过程中的重要需肥时期如分蘖期、灌浆期等追施锌肥, 对籽粒锌含量的提升效果可能优于基肥。研究表明, 中等锌供给能力土壤中种植的农作物并不会表现出明显缺锌症状, 施用锌肥不一定能显著增加作物籽粒锌的含量<sup>[4]</sup>。本试验地区土壤具有中等锌供给能力(有效锌 1.1 mg·kg<sup>-1</sup>), 这与实验结果糙米中锌含

表 2 分蘖期与灌浆期施肥对水稻成熟期器官锌含量的影响(Mean±SD)(单位:mg·kg<sup>-1</sup>)Tab. 2 Zn concentrations in tissues of mature rice plants by Zn biofortification during tillering stage and filling stage, respectively (Mean±SD) (unit: mg·kg<sup>-1</sup>)

水稻各器官	施肥时期	施肥量(ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)/(kg·hm <sup>-2</sup> )			
		0	30	60	120
糙米	T	18.2±1.0 aA	19.0±1.3 abA	20.6±1.8 abA	22.0±2.3 bA
	F	18.2±1.0 aA	19.6±1.1 aA	20.9±1.5 aAB	23.6±1.8 bB
颖壳	T	31.6±2.4 aA	35.8±4.2 abA	38.6±4.5 abA	44.5±6.2 bA
	F	31.6±0.7 aA	45.0±4.7 aAB	48.4±7.1 aAB	67.4±16.4 bB
穗轴	T	35.1±1.7 aA	40.9±2.6 aAB	50.8±5.1 bB	77.1±6.0 cC
	F	35.1±1.7 aA	37.5±3.8 aA	39.4±4.1 aA	42.7±5.8 aA
剑叶	T	30.0±2.5 aA	31.5±3.1 aA	32.1±5.7 aA	45.2±9.8 bA
	F	30.3±1.0 aA	32.0±3.8 abA	33.7±2.7 abA	36.5±3.2 bA
叶	T	27.5±3.8 aA	31.1±5.4 aA	32.9±2.9 aA	36.8±7.1 aA
	F	27.5±3.8 aA	32.3±3.5 aAB	36.8±5.6 abAB	47.1±10.2 bB
茎	T	31.4±3.3 aA	79.9±8.9 bB	97.3±10.3 bB	134.9±20.9 cC
	F	31.4±3.3 aA	34.4±4.2 aA	39.6±6.7 abA	47.3±9.7 bA
根	T	72.7±9.6 aA	85.6±11.6 aA	126.3±18.2 bB	186.7±17.6 cC
	F	72.7±9.6 aA	76.1±8.2 aA	96.4±16.8 aAB	130.3±20.8 bB

【注】表中数据为每个施肥水平下 3 个重复小区的锌含量平均值及标准偏差;

表中新复极差多重比较(Duncan's)为同一施肥时期同一水稻器官不同锌处理间比较,小写字母表示

$P < 0.05$ ,差异显著,大写字母表示  $P < 0.01$ ,差异极显著;

T 代表分蘖期,文中 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 分别对应表中分蘖期 30、60 及 120 kg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 处理组;

F 代表灌浆期,文中 F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> 分别对应表中灌浆期 30、60 及 120 kg ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 处理组。

表 3 水稻成熟期器官锌含量与不同时期施肥处理的相关关系

Tab. 3 Correlations between Zn concentration in organs of mature rice plants and Zn fertilizer levels

施肥时期	生殖器官糙米颖壳穗轴			营养器官剑叶叶茎根			
	糙米	颖壳	穗轴	剑叶	叶	茎	根
分蘖期	0.724**	0.781**	0.966**	0.726**	0.604*	0.932**	0.956**
灌浆期	0.868**	0.848**	0.631*	0.686*	0.814**	0.750**	0.869**

【注】\*\* 相关性在 0.01 水平显著; \* 相关性在 0.05 水平显著。

量提升有限有一定的相关性。另一方面,锌是植物必需微量元素,植物体自身对其有复杂的调控机制,当外源锌的浓度很高时,植株本身保护性的防御机制将阻止植物体内锌含量过高,尤其是向籽粒等繁殖器官积累<sup>[29-30]</sup>。

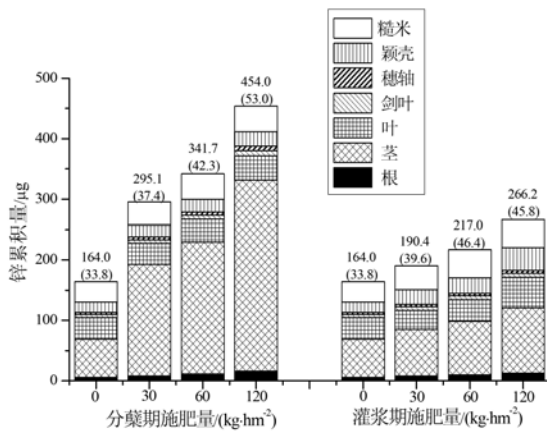
颖壳与糙米规律相似, T<sub>3</sub> 处理组锌含量最高,达到 44.5 mg·kg<sup>-1</sup>,显著高于对照组。穗轴中锌含量表现出对施用锌肥处理最敏感(表 3),各处理组之间均有显著差异,其中 T<sub>2</sub> 与 T<sub>3</sub> 组锌含量达到极显著水平。T<sub>3</sub> 组穗轴锌含量达到 77.1 mg·kg<sup>-1</sup>,是对照组的 2.2 倍。与分蘖期施肥处理不同,灌浆期处理组穗轴锌含量对锌肥的响应最不明

显,而 F<sub>3</sub> 的糙米和颖壳中锌的含量较其他处理组有了显著的提升,与锌肥施用量之间的相关性高于分蘖期施肥处理(表 3)。颖壳锌含量最高达到 67.4 mg·kg<sup>-1</sup>,是对照组的 2.1 倍。本实验中穗轴和颖壳锌含量的提升明显高于糙米的现象,与姜雯等<sup>[31]</sup>在早稻上的研究结果一致。锌从穗轴颖壳等部位向籽粒转运过程中存在的限制性机制,可能是影响水稻籽粒锌富集程度的重要因素之一<sup>[9]</sup>。植物生理学分子水平的研究也指出,许多农作物可食用部分锌的含量受到诸多限制因素的影响,这些因素包括锌离子跨膜运输载体、迁移及储存等多个方面<sup>[29]</sup>。

水稻成熟期营养器官锌含量与施肥量呈正相关,不同施肥时期效果存在差异(表 2,表 3)。分蘖期施肥,根和茎中锌的含量受锌肥施用量影响显著,各处理水平下均显著高于对照组。其中  $F_3$  茎和根锌含量达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),分别为对照组的 4.3 倍和 2.6 倍。灌浆期施肥处理时,各器官中锌的含量也随施肥量增加而增加,但其对锌肥施用量的响应程度小于分蘖期施肥组(表 3),除  $F_3$  根系锌含量较其他施肥水平达到显著水平外,其他各器官组间差异较小。

### 2.2 施用锌肥对水稻成熟期各器官锌累积量的影响

如图 1 所示,各个时期锌肥处理组水稻累积锌的绝对量均明显高于对照组,并随着施肥量的增加而不断升高。分蘖期和灌浆期施肥,水稻植株锌最高累积量分别达到对照组的 2.8 倍和 1.6 倍。相同锌肥施用量下,分蘖期各个施肥组水稻锌累积量均高于灌浆期施肥处理组,这与水稻生长期中持续从土壤中吸收锌,并将其储存在茎、叶等营养器官有关<sup>[12,32]</sup>。灌浆期施肥后,水稻植株吸收的锌的时间短,吸收进入植株的量少,更多的锌保留在农田土壤系统中。因此,生育早期施用锌肥能更多地增加水稻植株整体锌累积量。



柱形图顶端数字为植株累积锌的绝对质量, 括号里为糙米中累积锌的质量

表中各器官锌的累积量为按照每个样本实际茎蘖数平均后的结果

图 1 不同生育期施用锌肥对水稻植株锌累积量的影响

Fig. 1 Zn accumulation in rice plants at different biofortification stages

本实验条件下,可食用部分糙米中锌的累积与植株整体呈现不同的趋势。虽然灌浆期施肥组整体锌累积量低于分蘖期处理组,但其糙米锌绝对累积量却高于分蘖肥处理组 ( $F_3$  除外)。分蘖肥处理组糙

米锌累积量随着施肥量增加线性增加,  $T_3$  组糙米锌累积量达到  $53.0 \mu\text{g}$ 。灌浆期施肥处理组在  $F_2$  组出现峰值,锌累积量达到  $46.4 \mu\text{g}$ ,之后在  $F_3$  组减少为  $45.8 \mu\text{g}$ ,表现出随施肥量增加而减少的趋势。由此可见,在籽粒填充的关键时期追施锌肥有利于水稻籽粒锌的累积,但有一定的限度。

### 2.3 施用锌肥对水稻成熟期各器官锌分配百分比的影响

施用锌肥对水稻成熟期各器官锌分配百分比产生了一定的影响,且施肥时期不同影响效果也不同。水稻成熟期植株中锌分配情况如图 2 所示,对照组:茎 > 叶 > 糙米 > 颖壳 > 根 > 剑叶 > 穗轴; 锌肥施用组:茎 > 糙米 > 叶 > 颖壳 > 根 > 剑叶 > 穗轴。分蘖期施肥处理后,茎中锌的累积比例明显上升,根部锌累积比例略有上升,这说明在足量锌供给条件下水稻生长早期吸收的锌更多储存在植株的营养器官。灌浆期施肥组器官锌的分配比例受施肥水平影响较小,但根、颖壳和糙米中锌的分配百分比明显高于对照组和分蘖期施肥组,表现出一定的两端富集效应。这表明灌浆期施用锌肥可能促进了水稻根系吸收更多的锌并直接向籽粒部位的运输<sup>[33]</sup>。从锌的农业生物营养强化角度来看,灌浆期施用锌肥比分蘖期施用锌肥更利于提高水稻籽粒锌水平。 $F_1, F_2$  组糙米锌累积比例略高于对照组,  $F_3$  组糙米锌累积比例出现明显降低。水稻生育早期与晚期施锌肥植株锌分配百分比的不同变化,一定程度上证明了水稻吸收的锌在植株内再分配机制的存在<sup>[27]</sup>。

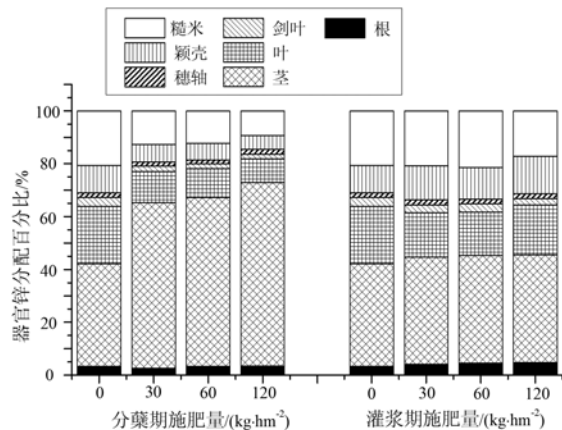


图 2 不同时期施肥处理后水稻成熟期植株各器官锌分配百分比

Fig. 2 Zinc percentages in rice plants at different biofortification stages

#### 2.4 不同时期锌肥处理对水稻锌收获指数的影响

锌收获指数指作物籽粒中锌的累积量占植株锌累积总量的比值,反映了水稻吸收的锌向籽粒部位分配的情况. 在本实验条件下,水稻锌收获指数同时受到施肥量和施肥时期的影响,如图 3 所示. 分蘖期施肥所有处理组的锌收获指数均明显低于对照组,并且随着施肥量的增加而减小,最高( $T_3$ )和最低( $T_1$ )锌收获指数分别为 0.194 和 0.146;与分蘖期施肥处理不同,灌浆期施肥处理组的锌收获指数均高于对照组,且与锌肥施用量表现出非线性关系, $F_1$  处理组最高为 0.336, $F_2, F_3$  处理组出现随施肥量增加而减小的趋势,但与  $F_1$  组差异不显著,更宽谱范围的趋势仍有待进一步研究.

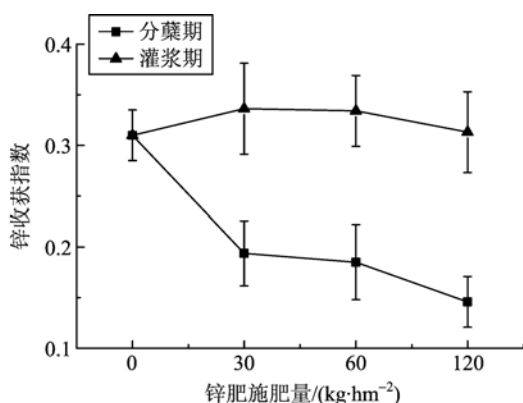


图 3 水稻成熟期锌收获指数

Fig. 3 Zinc harvest index of mature rice plant

Palmgren 等<sup>[34]</sup>通过大麦和小麦籽粒锌富集机理的研究,证明谷物籽粒中的锌主要有两个来源,一个是作物根系直接从土壤中吸收的锌,另外一个是在灌浆期叶片中储存的锌再活化后转移到籽粒中的锌,这两个生理过程也是限制谷物籽粒锌水平的重要环节. Stomph 等<sup>[33]</sup>讨论了水稻与小麦、大麦等作物籽粒富集锌机制的差异并指出,从根部向茎部运输以及叶片再分配都不是限制锌向水稻籽粒积累的主要因素,籽粒形成期根系吸收的锌直接运输到籽粒中和茎、穗轴等器官的再分配过程才是关键. 分蘖期处于水稻的营养生长阶段,水稻根系吸收的锌转运到地上部分后,在各营养器官中分配并累积. 由于分蘖期施肥组早期植株营养器官锌累积量较大,且随施肥水平上升明显增加,锌收获指数明显小于对照组并随施肥量增加逐渐减小. 分蘖期锌收获指数较小,也可能与锌肥有效性随施肥时间延长而降低,根系吸收并直接向籽粒运输的锌减少有关.

灌浆期处于水稻生长的中后期,植株整体吸收的锌绝对量相对较少,但锌收获指数却较高. 这表明水稻灌浆期根系仍能从土壤吸收锌,并向地上部分转运,但吸收的锌不再显著地向营养器官分配,而是倾向于直接向籽粒运输,增加籽粒部位的分配比例. 在该时期较高的锌收获指数也进一步证明,在本实验条件下灌浆期施肥更有利于水稻可食用部分锌的累积,灌浆期可能是农业锌生物营养强化研究的关键时期之一.

### 3 结论

本实验条件下,通过土壤追施锌肥增加了水稻各器官中锌的含量、植株锌累积量,改变了锌在各器官中分配的比例和锌收获指数. 各器官锌含量和累积量均随施肥量增加而增加,根、茎、颖壳和穗轴等器官对锌肥施用量的响应较糙米灵敏,最高锌含量可以达到对照组器官的 2.6, 4.3, 2.1 和 2.2 倍,而糙米锌含量最高为  $23.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (灌浆期  $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  施肥组),较对照组提高 29.7%. 由此可见,在大田条件下,通过传统土壤追施锌肥的方式可以显著增加水稻植株锌的累积,并一定程度上提高了水稻籽粒中锌的含量和累积量,但是提高幅度仍相对较小,进一步提高籽粒锌含量的方法仍有待深入的研究.

施肥时期不同对水稻累积特征也有不同的影响. 分蘖期施肥组水稻植株锌累积量为  $164.0\sim 454.0 \mu\text{g}$ ,明显高于灌浆期处理组的  $164.0\sim 266.2 \mu\text{g}$ ,但灌浆期处理组糙米锌含量、累积量和锌收获指数整体高于分蘖期,较多的锌在籽粒部分累积. 灌浆期施肥更有利于锌向水稻可食用部分的累积. 因此,水稻灌浆期可能是通过土壤追施锌肥方式提高籽粒锌水平的关键时期.

与育种和基因工程等方式相比,农业生物营养强化具有时间短、成本低廉、操作便捷、对生态系统威胁较小等优点,因此在育种及基因工程等方式的生物营养强化技术尚不完善的时期,推行农业生物营养强化技术对存在营养缺乏问题的国家和地区具有现实意义. 本研究为我国锌的农业生物营养强化研究提供了新的实例,为通过土壤施肥来实现水稻籽粒锌水平的提升提供了理论参考,对全民锌营养补充具有实际的指导意义.

#### 参考文献 (References)

- [1] Prasad A S. Discovery and importance of zinc in

- human-nutrition [J]. Federation Proceedings, 1984, 43(13):2 829-2 834.
- [ 2 ] Cakmak I. Zinc crops 2007: Improving crop production and human health [J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2):1-2.
- [ 3 ] Cakmak I, Kalayci M, Ekiz H, et al. Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project [J]. Field Crops Research, 1999, 60(1/2):175-188.
- [ 4 ] Liu Zheng. Regulations of concentration and distribution of zinc in soils of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(1):30-37.  
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.
- [ 5 ] Forno D A, Yoshida S, Asher C J. Zinc-deficiency in rice: 1. Soil factors associated with deficiency [J]. Plant and Soil, 1975, 42(3):537-550.
- [ 6 ] Wissuwa M, Ismail A M, Yanagihara S. Effects of zinc deficiency on rice growth and genetic factors contributing to tolerance [J]. Plant Physiology, 2006, 142(2):731-741.
- [ 7 ] Obata H, Shimoyama A, Umabayashi M. Effect of shading on zinc deficiency symptoms in rice plant [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1997, 43 ( 4 ): 933-936.
- [ 8 ] Moore P A, Patrick W H. Effect of zinc-deficiency on alcohol-dehydrogenase activity and nutrient-uptake in rice [J]. Agronomy Journal, 1988, 80 ( 6 ): 882-885.
- [ 9 ] Jiang W, Struik P C, van Keulen H, et al. Does increased zinc uptake enhance grain zinc mass concentration in rice? [J]. Annals of Applied Biology, 2008, 153(1):135-147.
- [10] Zhang Yongxin, Wang Renmin, Sun Xiaomei, et al. Zinc-dense rice: A new approach to improve human zinc nutrition [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2005, 21(4):127-130.  
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): 127-130.
- [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] Broadley M R, White P J, Hammond J P, et al. Zinc in plants [J]. New Phytologist, 2007, 173 ( 4 ): 677-702.
- [13] Cakmak I. Biofortification of cereal grains with zinc through fertilizer strategy [J]. Annals of Nutrition and Metabolism, 2009, 55:377-377.
- [14] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(5):537-548.
- [15] Hotz C. The potential to improve zinc status through biofortification of staple food crops with zinc [J]. Food and Nutrition Bulletin, 2009, 30 ( 1 ): 172-178.
- [16] Zhang Y Q, Sun Y X, Ye Y L, et al. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China [J]. Field Crops Research, 2012, 125:1-7.
- [17] Phattarakul N, Rerkasem B, Li L J, et al. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries [J]. Plant and Soil, 2012, 361(1/2):131-141.
- [18] Wei Y Y, Shohag M J I, Yang X E. Biofortification and bioavailability of rice grain zinc as affected by different forms of foliar zinc fertilization [J]. Plos One, 2012, 7(9):e45428; doi:10.1371/journal.pone.0045428
- [19] Cvitanič C, Przybyłowicz W J, Mesjasz-Przybyłowicz J, et al. Micro-PIXE investigation of bean seeds to assist micronutrient biofortification [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2011, 269(20):2 297-2 302.
- [20] Yang X E, Chen W R, Feng Y. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(5):413-428.
- [21] Wang Jianbo, Lin Qi, Zhang Hongsheng, et al. Effects of Zn application at different stages on grain Zn accumulation in aerobic rice [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2010, 226(2):45-48.  
王健波,林琪,张洪生,等. 不同时期施锌对旱稻籽粒锌积累的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, 226(2): 45-48.
- [22] Li Zhigang, Ye Zhengqian, Fang Yunying, et al. Effects of zinc on plant grown and zinc partitioning in rice plant [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(1):62-67.  
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):62-67.
- [23] Cao Yuxian, Tian Xiaohong, Yang Xiyu, et al. Effects of soil and foliar applications of Zn on winter wheat grain Zn concentration and bioavailability [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6):1 394-1 401.  
曹玉贤,田霄鸿,杨习文,等. 土施和喷施锌肥对冬小

- 麦子粒锌含量及生物有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6):1 394-1 401.
- [24] Liao Haibing. The Physiological characteristics of zinc transportation and distribution in high zinc density rice (*Oriza Sativa*L.) [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2011.  
廖海兵. 籽粒富锌水稻锌运输和分布特征研究 [D]. 金华:浙江师范大学, 2011.
- [25] Jin Lingna, Jiang Wen, Zhao Ming, et al. Effects of Zn on plant grown and Zn distribution at seedling stage in aerobic rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006(3):40-43.  
金灵娜,姜雯,赵明,等. 锌肥对旱稻苗期锌吸收分配和干物质积累的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2006(3): 40-43.
- [26] 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.
- [27] Jiang W, Struik P C, Lingna J, et al. Uptake and distribution of root-applied or foliar-applied Zn-65 after flowering in aerobic rice [J]. Annals of Applied Biology, 2007, 150(3):383-391.
- [28] Song Xiaobo, Song Fengbin, Zhu Xiancan. Effect of fertilizer amount on dynamic change characteristic of soil nitrogen under film hole irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2):30-32.  
王晓波,宋凤斌,朱先灿. 锌在水稻各生育时期不同器官的分布规律 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 30-32.
- [29] White P J, Broadley M R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops [J]. Frontiers in plant science, 2011, 2:80.
- [30] Pearson J N, Rengel Z, Jenner C F, et al. Manipulation of xylem transport affects Zn and Mn transport into developing wheat grains of cultured ears [J]. Physiologia Plantarum, 1996, 98(2):229-234.
- [31] Jiang Wen. Physiology and modeling of zinc uptake Partitioning and accumulation in aerobic rice [D]. Beijing:China Agriculture University, 2005.  
姜雯. 旱稻锌吸收分配与积累及其模型的构建[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
- [32] Gao X P, Zou C Q, Zhang F S, et al. Tolerance to zinc deficiency in rice correlates with zinc uptake and translocation [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 253-261.
- [33] Stomph T J, Jiang W, Struik P C. Zinc biofortification of cereals: Rice differs from wheat and barley [J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(3):123-124.
- [34] Palmgren M G, Clemens S, Williams L E, et al. Zinc biofortification of cereals: Problems and solutions [J]. Trends in Plant Science, 2008, 13(9): 464-473.