doi：10.11838/sfsc.1673-6257.19138

不同品种粳稻的锌强化方法研究

范小琴，董思奇，邵宇辉，焉　莉，冯国忠，王　寅，高　强*

（吉林农业大学资源与环境学院 / 吉林省商品粮基地土壤资源可持续利用重点实验室，吉林　长春　130118）

摘　要：通过比较不同锌肥施用方式对不同粳稻品种产量以及稻米锌含量的影响，筛选高效锌水稻品种和最佳锌施用方式。在田间试验条件下，分析 9 个粳稻品种的稻米产量和锌含量对 S（锌肥土施）、SB（锌肥土施结合孕穗期喷施）、SF（锌肥土施结合扬花期喷施）和 SBF（锌肥土施结合孕穗期和扬花期喷施）4 种锌肥施用方式的响应，结果表明，各水稻品种稻米的锌含量在 18.1 ~ 29.3 mg・kg^{-1} 之间，吉洋 1 号、吉农大 809、吉粳 302、吉宏 6 号、长粳 717 和稻花香 2 号为高锌品种，吉农大 899 为中锌品种，平粳 8 号和吉粳 515 为低锌品种。锌肥土施对大多数水稻品种无显著增产作用，不同品种的稻米锌含量在施用锌肥后平均增幅为 18.0%；S、SB、SF 和 SBF 处理的稻米锌含量分别较不施锌处理提高了 8.3%、17.4%、19.5% 和 27.0%，但 3 个喷施处理间的平均锌含量无显著差异。锌肥土施结合叶面喷施能显著提高稻米中的锌含量，不同施用方式的施锌效果因品种而异。选择富锌高产品种，锌肥土施结合适当生育期叶面喷施，可实现增产和稻米锌强化，实现水稻高产优质种植。

关键词：水稻品种；施锌方式；锌含量；锌强化

锌是人体不可缺少的营养元素，对蛋白质代谢、胰岛素生成和免疫功能有重要作用。缺锌严重会影响人的智力、食欲和生殖机能等[1-2]，必须在膳食中加以补充[3]，提高主要粮食作物稻米中的锌含量与生物有效性是较为经济有效且易于推行的办法。水稻作为人类的主要食物，是人体锌的重要来源[4-5]，提高稻米的锌含量对强化人体健康具有重要意义。国际上已经把提高微量元素含量作为作物育种的主要目标之一，并在水稻上已做了相关研究[2, 6]。目前农艺生物强化法是一种应用比较普遍的提升谷物锌含量的方法，效果显著且实用[7]。其中，土壤施锌和叶面喷施比较常用。土壤施锌不仅能显著提高水稻各部位的锌含量和稻米锌累积量[8]，还可以增加水稻产量；与土施锌肥相比，叶面喷施在产量提升上无显著效果，但能使锌素渗透到胚乳和胚中，更有效地提高锌素到稻谷中的运输效率，从而有效改善谷物中的锌含量[9-10]。另外有研究表明，不同水稻基因型在吸收利用锌素方面存在极大差异，不仅表现在不同品种对锌肥施用的反应有影响，而且在植株体内锌素的分配与利用也有明显差异[11]。本研究选取吉林省 9 个优质粳稻品种进行不同锌肥施用方式试验，筛选锌高效利用水稻品种并确定最佳施锌方式，旨在提高吉林省粳稻的锌含量，实现人体锌强化的目标。

收稿日期：2019-03-28；**录用日期：**2019-05-27

基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFD0200101）。

作者简介：范小琴（1992-），女，重庆市人，硕士研究生，研究方向为养分资源管理。E-mail：358943319@qq.com。

通讯作者：高强，E-mail：Gyt199962@163.com。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2017 年 5 ~ 10 月在吉林省吉林市永吉县岔路河镇隆源恒成号合作社水稻种植基地（43.73 °N，125.94 °E）进行，该区域属温带大陆性季风气候区，年均气温 4.9 ℃，有效积温 2 794 ℃，全年日照时数 2 500 ~ 2 800 h，年均降水量 650 ~ 750 mm。供试土壤类型为草甸黑土，其基本理化性状如下：pH 值 5.54，碱解氮（N）105.7 mg・kg^{-1}，有效磷（P）23.7 mg・kg^{-1}，速效钾（K）274.8 mg・kg^{-1}，有机质 29.9 g・kg^{-1}，有效锌（HCl-Zn）0.83 mg・kg^{-1}。

1.2　供试材料

供试水稻为吉洋 1 号、吉农大 899、吉农大 809、平粳 8 号、吉粳 515、吉粳 302、吉宏 6 号、长粳 717 和稻花香 2 号，均为当地常用水稻品种；供试肥料为 15-15-15 的复合肥、尿素（46% N）、氯化钾（60% K_2O）、七水硫酸锌（23% Zn）。

1.3　试验设计

每个品种设不施锌肥对照（Zn 0 kg・hm^{-2}，FP）、

土壤施锌（Zn 30 kg·hm^{-2}，S）、土壤施锌（Zn 30 kg·hm^{-2}）+ 孕穗期喷施 0.5% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$（Zn 0.92 kg·hm^{-2}，SB）、土壤施锌（Zn 30 kg·hm^{-2}）+ 扬花期喷施 0.5% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$（Zn 0.92 kg·hm^{-2}，SF）、土壤施锌（Zn 30 kg·hm^{-2}）+ 孕穗期和扬花期各喷施 0.5% $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$（Zn 0.92 kg·hm^{-2}，SBF），共 5 个处理，各处理 3 次重复，小区面积为 35 m^2，密度为 18 万穴·hm^{-2}。所有处理的 N、P_2O_5、K_2O 施用量分别为 165、75、100 kg·hm^{-2}，采用当地习惯进行水分及病虫害管理。锌肥喷施处理分别在水稻的孕穗期（7 月 14 日）和开花期（8 月 6 日）进行，每次喷施量为 800 L·hm^{-2}，喷施时间为晴朗无风的傍晚，喷施时使所有叶片全部湿润但不形成水滴流走，不进行叶面喷施锌肥的处理（FP 和 S）均喷施等量的蒸馏水。同年 9 月 28 日收获。

1.4　测定项目与方法

1.4.1　土壤样品采集及养分测定

在施肥前（4 月 7 日）和收获后（10 月 20 日）采集试验田 0 ~ 20 cm 的表层土壤样品，用以分析土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、锌的有效浓度（HCl 浸提，原子吸收分光光度法测定）。

1.4.2　植株样品采集及养分测定

水稻成熟后，在每个小区采集具有代表性的 3 穴，将植株的地上部分为秸秆、颖壳和稻米 3 部分。样品洗净后于 105℃杀青 30 min，75℃烘至恒重后，谷粒用糙米机（JLG–45）出糙，不锈钢样品粉碎机（DFT–50）粉碎样品。植株不同部位的全锌含量采用 HNO_3–$HClO_4$（4∶1）混合酸消解，原子吸收分光光度计（TAS–990，普析，中国）法测定[12]。标准样品来自中国天津傲然精细化工研究所（GB/T 602–2002）。

1.4.3　水稻产量及构成因素测定

在测产区域选取具有代表性的 3 m^2 收割，并对水稻进行脱粒，测定其重量及含水量，折算水稻产量，同时调查有效穗数、穗粒数、千粒重、结实率等产量构成因素。

1.4.4　数据处理与分析

采用 SPSS 25.0 和 Excel 2016 对试验数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　锌肥施用方式对不同水稻品种的产量及产量构成因素的影响

由表 1 可见，不同水稻品种间产量差异极显著，有效穗数、穗粒数、千粒重和结实率的差异极显著；施用锌肥只对吉洋 1 号、吉粳 302 和稻花香 2 号的产量有影响，主要体现在有效穗数和结实率的增加上，但不同施锌方式在不同品种间的增产效果不同。吉洋 1 在 SB 和 SF 处理中产量分别为 9 212 和 9 137 kg·hm^{-2}，显著高于 FP 处理，增产率分别为 9.6% 和 8.7%，SF 处理中有效穗数增加显著，S 和 SBF 处理无显著增产效果；吉粳 302 在 SF 处理中的产量为 9 897 kg·hm^{-2}，显著高于 FP、S 处理，SB 和 SBF 处理显著高于 FP 处理，与 S 处理无显著差异，3 个喷施处理中穗粒数显著下降，结实率显著上升；稻花香 2 号在 SF 和 SBF 处理中的产量分别为 8 228 和 8 119 kg·hm^{-2}，显著高于 FP，增产率分别为 8.7% 和 7.3%，而 S 和 SB 处理中产量无显著提升，3 个喷施处理中穗粒数下降，SF 处理中穗粒数显著高于 FP，在 4 个施用锌肥的处理中结实率显著提高；其余品种在不同施锌方式中产量无显著差异。

表 1　施锌方式对不同品种水稻的产量及产量构成因素的影响

品种	处理	产量（kg·hm^{-2}）	有效穗数（×10^4·hm^{-2}）	穗粒数	千粒重（g）	结实率（%）	增产率（%）
吉洋 1 号	FP	8 406b	301.3b	100.6a	24.7a	94.7a	—
	S	8 962ab	316.7ab	112.6a	25.6a	94.8a	6.6
	SB	9 212a	322.1ab	118.3a	25.9a	94.3a	9.6
	SF	9 137a	340.1a	115.9a	25.9a	95.5a	8.7
	SBF	8 745ab	328.6ab	104.9a	26.4a	96.8a	4.0
	平均值	8 893B	321.8D	110.5BCD	25.7A	95.2A	7.2
吉农大 899	FP	9 196a	346.6b	106.4ab	18.9a	87.5b	—
	S	9 336a	358.2ab	115.0a	19.7a	91.9a	1.5
	SB	9 480a	388.7ab	120.0a	20.4a	93.3a	3.1
	SF	9 600a	408.1a	115.4a	19.8a	92.7a	4.4
	SBF	9 224a	364.4ab	121.9a	20.8a	93.4a	0.3
	平均值	9 367A	373.2B	115.7D	19.9D	91.8B	2.3

续表

品种	处理	产量（kg·hm^{-2}）	有效穗数（×10^4·hm^{-2}）	穗粒数	千粒重（g）	结实率（%）	增产率（%）
吉农大 809	FP	8 868a	342.0b	111.7ab	20.7a	88.6b	—
	S	9 200a	358.2b	118.3a	21.4a	94.3a	3.8
	SB	9 331a	371.4a	122.4a	22.0a	93.9a	5.2
	SF	9 425a	388.5a	126.3a	21.7a	95.4a	6.3
	SBF	9 080a	382.9a	125.5a	21.3a	96.4a	2.4
	平均值	9 181AB	368.7B	120.8ABC	21.4C	93.7AB	4.4
平粳 8 号	FP	8 032a	336.3b	135.26ab	20.9a	84.5ab	—
	S	8 460a	341.2ab	140.25ab	21.8a	85.8ab	5.3
	SB	8 311a	346.7ab	153.36a	21.0a	91.1a	3.5
	SF	8 666a	354.3a	142.44ab	21.8a	89.2a	7.9
	SBF	8 141a	342.7ab	139.62ab	22.1a	86.5ab	1.4
	平均值	8 322C	344.2C	142.2A	21.5C	87.4C	4.5
吉粳 515	FP	9 059a	348.8b	118.9b	21.9a	95.7a	—
	S	9 359a	368.2a	125.5ab	22.6a	90.2ab	3.3
	SB	9 576a	380.1a	137.1a	22.5a	94.5a	5.7
	SF	9 750a	382.6a	141.4a	22.5a	94.2a	7.6
	SBF	9 434a	378.3a	130.6ab	23.0a	88.9ab	4.1
	平均值	9 436A	371.7B	130.7ABC	22.5B	92.7AB	5.2
吉粳 302	FP	8 927c	313.7a	125.5ab	20.5a	91.8b	—
	S	9 325bc	321.1a	136.3a	21.4a	92.5b	4.5
	SB	9 543ab	322.0a	115.1b	21.6a	95.6a	6.9
	SF	9 897a	314.9a	119.5b	22.0a	96.6a	10.9
	SBF	9 493ab	332.5a	116.4b	22.3a	95.8a	3.9
	平均值	9 437A	320.8D	122.5ABC	21.6C	94.5AB	6.5
吉宏 6 号	FP	8 195a	382.4ab	97.6b	21.5a	94.9a	—
	S	8 295a	396.1ab	108.7ab	21.1a	95.4a	1.2
	SB	8 462a	384.6ab	115.7a	21.7a	95.3a	3.3
	SF	8 540a	396.2ab	109.7ab	21.9a	95.4a	4.2
	SBF	8 493a	412.5a	117.1a	20.8a	88.6b	3.6
	平均值	8 397C	394.4A	109.8BCD	21.4C	93.9AB	3.1
长粳 717	FP	8 763a	302.8b	118.4c	19.4a	93.5a	—
	S	9 050a	322.3ab	132.3b	19.1a	92.3a	3.3
	SB	9 187a	330.8a	141.2ab	19.6a	94.0a	4.8
	SF	9 501a	320.7ab	148.8a	20.6a	94.6a	8.4
	SBF	9 231a	332.8a	143.4ab	20.1a	93.1a	5.3
	平均值	9 147AB	322.0D	136.8AB	19.8D	93.5AB	5.5
稻花香 2 号	FP	7 568b	374.1b	108.5ab	25.1a	82.2b	—
	S	7 872ab	401.3ab	117.4a	26.0a	86.1a	4.0
	SB	8 014ab	399.0ab	99.5b	26.7a	85.8a	5.9
	SF	8 228a	419.6a	88.6b	26.4a	86.7a	8.7
	SBF	8 119a	404.5ab	101.9b	25.3a	86.0a	7.3
	平均值	7 960D	399.8A	103.2CD	25.9A	85.3C	6.5
变异来源							
品种		***	***	***	***	**	
施肥方式		***	*	NS	NS	*	
品种 × 施肥方式		NS	NS	NS	NS	NS	

注：数据后不同小写字母表示不同施锌方式在 5% 水平上差异显著，不同大写字母表示不同品种在 5% 水平上差异显著。NS：无显著差异（P>0.05）。* 差异显著 P<0.05，** 差异极显著 P<0.01，*** 差异极显著 P<0.001。

2.2　锌肥施用方式对不同品种稻米锌含量的影响

根据 GB/T 5009.14 和 NY 861-2004 标准，所有品种稻米锌含量都低于 50 mg・kg^{-1}，属于正常范围。由表 2 可见，各水稻品种间稻米的锌含量差异显著。各水稻品种稻米的锌含量在 18.1 ~ 29.3 mg・kg^{-1} 之间；吉洋 1 号、吉农大 809、吉粳 302、吉宏 6 号、长粳 717 和稻花香 2 号的最高锌含量在 27.4 ~ 29.3 mg・kg^{-1} 之间，为高锌品种；吉农大 899 最高锌含量为 26.7 mg・kg^{-1}，为中锌品种；平粳 8 号和吉粳 515 最高锌含量分别为 23.6 和 22.7 mg・kg^{-1}，为低锌品种。在不施锌条件下，吉农大 899、平粳 8 号和吉粳 515 的锌含量较低，分别为 18.7、18.1 和 19.0 mg・kg^{-1}；吉宏 6 号最高，锌含量为 25.4 mg・kg^{-1}。锌肥叶面喷施能显著提高稻米中的锌含量，锌肥土施结合孕穗期和扬花期能使所有品种的稻米锌含量达到最高。吉农大 809、平粳 8 号和吉粳 515 在 3 个喷施处理（SB、SF、SBF）中的稻米锌含量无明显差异，吉粳 302 和稻花香 2 号在扬花期进行锌肥叶面喷施（SF）的稻米锌含量显著高于孕穗期喷施（SB），两个时期均喷施对进一步提升其锌含量无显著作用；吉洋 1 号和长粳 717 在孕穗期和扬花期进行锌肥叶面喷施（SBF）的锌含量达到最高。在所有处理中，吉洋 1 号的锌含量最高，为 29.3 mg・kg^{-1}；不同品种的稻米锌含量在施用锌后平均增幅为 18.0%；S、SB、SF 和 SBF 4 种锌肥施用方式的稻米锌含量较不施锌处理分别提高了 8.3%、17.4%、19.5% 和 27.0%；其中，吉宏 6 号的平均增幅为 5.3%，能在低锌条件下保持较高的锌吸收能力，属于耐低锌品种；吉粳 515、吉粳 302、长粳 717 和稻花香 2 号为 10% ~ 15%，锌强化能力一般；吉洋 1 号、吉农大 899、吉农大 809 和平粳 8 号为 21.1% ~ 29.3%，在不施锌条件下，稻米锌含量较低，当补充外源锌营养后，锌离子活度对其影响较大，稻米锌含量大幅度提升，为锌敏感品种。

表 2　锌肥施用方式对不同品种稻米锌含量的影响

品种	锌含量（mg・kg^{-1}）						锌含量增加率（%）				
	FP	S	SB	SF	SBF	平均值	S	SB	SF	SBF	平均值
吉洋 1 号	20.8cC	25.4aB	25.9bcB	26.8aAB	29.3aA	25.4a	22.1	24.9	24.0	40.9	28.0
吉农大 899	18.7dC	22.7bcB	24.0cdeB	23.6bcB	26.7bA	23.1abc	21.1	28.1	25.9	42.2	29.3
吉农大 809	21.7cB	23.8abB	26.5abA	26.2abA	28.6abA	25.4a	9.6	22.4	20.8	31.9	21.2
平粳 8 号	18.1dC	20.9cdB	22.3eAB	23.6bcA	23.5cA	21.7bc	15.4	22.9	30.1	29.3	24.4
吉粳 515	19.0dB	20.1dAB	22.7deA	22.1cA	21.9cA	21.1c	5.6	19.4	16.2	15.3	14.1
吉粳 302	23.7abC	23.3abC	25.0bcdB	27.8aA	28.0abA	25.6a	-1.5	5.7	17.6	18.4	10.1
吉宏 6 号	25.4aB	24.5abB	28.5aA	26.0abB	28.2abA	26.5a	-3.7	12.0	2.0	11.0	5.3
长粳 717	22.2bcC	22.3bcC	25.6bcB	25.6abB	28.3abA	24.8ab	0.8	15.4	15.6	27.6	14.9
稻花香 2 号	21.7cB	22.8bcB	22.9deB	26.8aA	27.4abA	24.3abc	4.9	5.6	23.2	26.2	15.0
平均值	21.3C	22.9BC	24.8AB	25.3A	26.9A	24.24	8.3	17.4	19.5	27.0	18.0

注：不同小写字母表示同一施锌条件下不同品种间差异显著；不同大写字母表示同一品种下不同施锌方式间差异显著。

3　讨论

本试验结果表明，与不施锌肥对照相比，仅锌肥土施对水稻产量的提升并没有显著作用，吉洋 1 号、吉粳 302 和稻花香在锌肥土施结合孕穗期或扬花期叶面喷施时产量提升显著，主要表现为有效穗数和结实率的增加上，而在锌肥土施充足的基础上，喷施锌肥对吉粳 302 以外的品种的产量无进一步提升作用，这与郭九信等[8]、Naik 等[13]、Phattarakul 等[14]、黄炳成等[15]、王孝忠等[16]、郭九信等[17]、Pandey 等[18]、杨秀霞等[19]的研究类似。由于本试验地块属于锌肥有效区（有效态锌含量 0.5 ~ 1.0 mg・kg^{-1}）[20]，水稻潜在缺锌而无缺锌症状，不同水稻品种对锌的敏感程度不一，土壤中施入充足锌肥后，锌不再是作物生长的限制因子[7]，再进行叶面喷施，对水稻的增产效果不显著，但叶面喷施与锌肥土施相比能够更有效地提高水稻籽粒的锌含量[17]。因此，在关注锌肥对水稻产量的影响之外，还需研究不同锌肥施用方式对籽粒锌含量的影响。

本试验发现，在不施用锌肥的条件下，稻米的锌含量为 18.1 ~ 25.4 mg・kg^{-1}。根据 WHO 和 FAO

的建议，人体每日膳食摄入量为 12 ~ 15 mg，结合中国营养学会推荐日大米摄入量（300 ~ 500 g）可得出大米的锌含量为 24 ~ 50 mg · kg^{-1}，方能满足人体锌需要量[21]。因此不施锌条件下，只有吉宏 6 号能达到其标准，而其他品种只能通过施锌来实现稻米的锌强化以达到建议摄入标准。本试验结果表明，同一水稻品种在不同的锌肥施用方式下，富锌效果不同，在与不施锌肥对照相比，锌肥土施结合孕穗期或扬花期叶面喷施能显著提高稻米的锌含量，两次喷施后锌含量最高，而锌肥土施条件下只有部分品种稻米的锌含量达到显著提高。大量研究发现叶面喷施锌肥对于水稻锌含量的提升效果高于锌肥土施[22-26]，这与锌在土壤中的有效性以及其在植物中的转运能力有关。锌从土壤到稻米的转运是一个复杂的长距离运输过程，$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 进入土壤后与土壤成分反应，部分被钝化无效。Zn^{2+} 被根部吸收，再通过木质部进入贮藏组织、叶片，然后通过韧皮部进入稻谷，Zn^{2+} 的转移与速度受韧皮部汁液的 pH 值浓度、螯合过程等影响[27-28]；叶面喷施则减少了植物体中锌往稻米的转运距离，直接从叶片向稻米、茎秆，甚至是向根部进行转移，进而大大地提高了锌肥施用的生物有效性[17]。比较不同品种施锌后籽粒锌浓度的变化发现，不同品种在锌肥施用后锌浓度的增加幅度存在显著差异，这与不同品种对锌的吸收能力以及再转运能力有关[29-30]。本试验通过分析还发现稻米的锌强化程度与稻米锌含量呈负相关，在不施锌情况下的锌含量与施锌后锌含量为显著负相关关系，说明稻米本身锌含量是影响其强化程度的原因之一，与前人研究结果一致[31-33]。

4　结论

在本试验条件下，锌肥土施对大多数水稻品种的增产效果不明显，锌肥土施结合叶面喷施能显著提高稻米中的锌含量，而不同时期的喷施效果以及施用方式的选择因品种而异。吉洋 1 号、吉粳 302 和稻花香 2 号适宜在扬花期或孕穗和扬花期进行叶面喷施，吉宏 6 号适宜在孕穗期或孕穗期和扬花期进行叶面喷施，其余品种选择任意一种喷施方式即可。吉洋 1 号稻米锌含量最高，吉农大 809 的锌强化程度最高。综上所述，选择富锌高产品种，锌肥土施结合适当生育期叶面喷施，可促进增产和锌吸收，实现水稻高产优质种植。

参考文献：

[1] 万吉丽，王人民，孟杰，等. 锌离子活度对水稻锌积累与分配的影响［J］. 核农学报，2010，24（4）：821-828.

[2] 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.

[3] 梅忠，王治学，梅沙，等. 高锌水稻研究进展［J］. 核农学报，2016，30（8）：1515-1523.

[4] Fitzgerald M A，Mccouch S R，Hall R D . Not just a grain of rice：the quest for quality［J］. Trends in Plant Science，2009，14（3）：133-139.

[5] Depar N，Rajpar I，Memon M Y，et al. Mineral nutrient densities in some domestic and exotic rice genotypes［J］. Pakistan Journal of Agriculture Agricultural Engineering Veterinary Sciences，2011，27：134-142.

[6] 胡学玉，李学垣，谢振翅. 富锌植物——植物营养遗传资源研究的新视点［J］. 湖北农业科学，1999，（6）：31-34.

[7] Cakmak I . Enrichment of cereal grains with zinc：Agronomic or genetic biofortification?［J］. Plant and Soil，2008，302（1-2）：1-17.

[8] 郭九信，隋标，商庆银，等. 氮锌互作对水稻产量及稻米氮、锌含量的影响［J］. 植物营养与肥料学报，2012，18（6）：1336-1342.

[9] Jaksomsak P，Tuiwong P，Rerkasem B，et al. The impact of foliar applied zinc fertilizer on zinc and phytate accumulation in dorsal and ventral grain sections of four Thai rice varieties with different grain zinc［J］. Journal of Cereal Science，2018，79：6-12.

[10] 梁群，韦慕贤，莫春丽，等. 不同锌肥用量对水稻生长、产量及经济效益的影响［J］. 吉林农业，2016，（1）：84-85.

[11] 王人民，杨肖娥. 不同锌离子活度对水稻养分吸收的影响及其基因型差异［J］. 作物学报，2001，27（5）：566-574.

[12] 郭九信，廖文强，凌宁，等. 氮锌配施对小麦产量及氮锌含量的影响［J］. 南京农业大学学报，2013，36（2）：77-82.

[13] Naik S K，Das D K. Relative performance of chelated zinc and zinc sulphate for lowland rice（*Oryza sativa* L.）［J］. Nutrient Cycling in Agroecosystems，2008，81（3）：219-227.

[14] Phattarakul N，Rerkasem B，Li L J，et al. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries［J］. Plant & Soil，2012，361（1-2）：131-141.

[15] 黄炳成，陈培党. 锌肥肥效对水稻生长的影响［J］. 现代农业科技，2015，（4）：23-26.

[16] 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，（4）：998-1004.

[17] 郭九信，廖文强，孙玉明，等. 锌肥施用方法对水稻产量及稻米氮锌含量的影响［J］. 中国水稻科学，2014，28（2）：185-192.

[18] Pandey N，Gupta B，Pathak G C. Foliar application of Zn at flowering stage improves plant's performance，yield and yield attributes of black gram［J］. Indian Journal of Experimental

Biology，2013，51（7）：548-555.
[19] 杨秀霞，燕辉，陈仁辉，等. 硅锌硼配施对红壤区双季稻产量和群体发育特征的影响［J］. 中国土壤与肥料，2016，（6）：121-128.
[20] 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.
[21] 赵洪璋. 碧蚂一号小麦选育经过［J］. 西北农学院学报，1956，（1）：16-24.
[22] Randhawa N S，Fao R E，Meelu O P. Balanced fertilisation in relation to soil productivity and crop quality［C］//FAI-FAO seminar on optimistic agricultural production under limited availability of fertilizers Proc. New Delhi：Fertiliser Association of India，1975. 415-419.
[23] Sinha M K，Dhillon S K，Dhillon K S . Zinc chelate reactions in alkaline soils［J］. Soil Research，1977，15：103-113.
[24] Takkar P N，Walker C D. The distribution and correction of zinc deficiency［M］//Zinc in soils and plants. Dordrecht：Springer，1993. 151-165.
[25] Farooq M，Ullah A，Rehman A，et al. Application of zinc improves the productivity and biofortification of fine grain aromatic rice grown in dry seeded and puddled transplanted production systems［J］. Field Crops Research，2018，216：53-62.
[26] 王晨，刘朝，马婧，等. 叶面喷施氨基酸锌复合物对水稻产量性状和锌吸收的影响［J］. 中国土壤与肥料，2017，（4）：118-123.
[27] Pottier M，Masclaux-Daubresse C，Yoshimoto K，et al. Autophagy as a possible mechanism for micronutrient remobilization from leaves to seeds［J］. Frontiers in Plant Science，2014，5（1）：11.
[28] Impa S M，Johnson-Beebout S E. Mitigating zinc deficiency and achieving high grain Zn in rice through integration of soil chemistry and plant physiology research［J］. Plant and Soil，2012，361（1-2）：3-41.
[29] Sperotto R A. Zn/Fe remobilization from vegetative tissues to rice seeds：should I stay or should I go? Ask Zn/Fe supply!［J］. Frontiers in Plant Science，2013，4：464.
[30] Mabesa R L，Impa S M，Grewal D，et al. Contrasting grain-Zn response of biofortification rice（*Oryza sativa* L.）breeding lines to foliar Zn application［J］. Field Crops Research，2013，149：223-233.
[31] Hegelund J N，Pedas P，Søren Husted，et al. Zinc fluxes into developing barley grains：use of stable Zn isotopes to separate root uptake from remobilization in plants with contrasting Zn status［J］. Plant and Soil，2012，361（1-2）：241-250.
[32] Saha S，Mandal B，Hazra G C，et al. Can agronomic biofortification of zinc be benign for iron in cereals?［J］. Journal of Cereal Science，2015，65：186-191.
[33] Saha B，Saha S，Hazra G C，et al. Impact of zinc application methods on zinc concentration and zinc-use efficiency of popularly grown rice（Oryza sativa）cultivars［J］. Indian Journal of Agronomy，2015，60（3）：34-45.

Study on the method of zinc augmentation in different cultivars of japonica rice

FAN Xiao-qin，DONG Si-qi，SHAO Yu-hui，YAN Li，FENG Guo-zhong，WANG Yin，GAO Qiang*（College of Resource and Environmental Sciences，Jilin Agricultural University/Key Laboratory of Sustainable Utilization of Soil Resources in The Commodity Grain Bases of Jilin Province，Changchun Jilin 130118）

Abstract： In this experiment，the effects of different zinc fertilizer application methods on the yield of different japonica rice cultivars and zinc content in rice were compared to select high-efficiency zinc rice cultivars and optimal zinc application methods. Under the field experiment condition，the response of rice yield and grain zinc content of 9 japonica rice cultivars were analyzed for S（zinc fertilizer soil application），SB（zinc fertilizer soil application combined with foliar spraying at booting stage），SF（zinc fertilizer soil application combined with foliar spraying at flowering stage）and SBF（zinc fertilizer soil application combined with foliar spraying at both booting stage and flowering stage）. The zinc content of grain in each rice cultivar ranged from 18.1 to 29.3 mg・kg^{-1}. Jiyang No.1，Ji Nongda 809，Jijing 302，Jihong No.6，Changjing 717 and Daohuaxiang No.2 were high-zinc cultivars. Ji Nongda 899 was a medium-zinc cultivar，Pingjing 8 and Jijing 515 were low-zinc cultivars. Zinc fertilizer application had no significant effect on increasing yield of most rice cultivars. The zinc content of different cultivars of rice increased averagely by 18.0% after application of zinc fertilizer；the zinc contents of rice for S，SB，SF and SBF increased by 8.3%，17.4%，19.5 % and 27.0% respectively. However，there was no significant difference in the average zinc content among the three spraying treatments. The application of zinc fertilizer soil application combined with foliar application could significantly increase the zinc content in rice，and the zinc application effect and the choice of application method vary from cultivars to cultivars . The high-yield and zinc augmentation can be achieved by selecting zinc-rich and high-yield cultivars to apply zinc fertilizer at the appropriate growth stages.

Key words： rice cultivars；zinc application method；zinc content；zinc augmentation