

刘露,杨新鑫,张丽梅,等. 磷锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 156-165.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.017

磷锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响

刘露, 杨新鑫, 张丽梅, 严玉鹏, 叶祥盛, 徐芳森, 蔡红梅

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心, 武汉 430070

摘要 为指导生产实践中合理施用磷肥和锌肥、提高肥料利用率,以常规粳稻日本晴和籼型杂交稻广两优35为研究材料,设置不同磷和锌水平交互处理的大田小区试验,分析各生育期水稻的生物量、成熟期产量及构成因素及各部位磷、锌、氮和钾的含量、累积量和分配比例,阐述了水稻磷锌互作的效应及其生理机制。结果显示,不同水平的磷与锌配施对水稻的生长和产量形成以及养分的吸收分配具有协同效应或是拮抗效应,不同水稻品种表现出不同的磷锌互作效应。在中磷(80 kg/hm²)、低磷(40 kg/hm²)水平下,增施锌肥对水稻的生物量和产量具有促进效应,但在高磷(120 kg/hm²)水平下,增施锌肥反而降低水稻生物量。磷锌配施下,千粒重和结实率的提高是产量提高的主要原因。结果表明,适宜水平的磷锌配施不仅提高了植株中磷和锌的含量和累积量,促进磷和锌向生长中心分配,同时还提高了氮和钾的含量和累积量,促进氮向生长中心分配。

关键词 水稻; 磷锌配施; 磷锌互作; 养分吸收; 分配; 产量; 肥料利用率; 协同增效

中图分类号 S 147.34; S 511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0156-10

磷和锌都是植物生长发育过程中的必需营养元素,在植物生命活动中不可或缺。磷是植物体内蛋白质、核酸和磷脂等生物大分子的组成成分,不仅可以通过ATP参与能量代谢,还能以蛋白质磷酸化方式参与多种信号转导^[1]。锌是植物体内多种酶的组成成分,参与植物蛋白质代谢、光合作用、呼吸作用和生长素合成等多种生化进程^[2]。

在土壤溶液中,磷与锌之间存在着强烈的拮抗效应。游离的PO₄³⁻可以和Zn²⁺发生化学反应生成难溶性化合物从而降低磷和锌的生物有效性,难以被植物根系吸收。过量施用磷肥会增加酸性土壤的负电荷,使得Zn²⁺更易被土壤胶体吸附,降低锌的有效性^[3]。土壤中不同形态的磷对锌有效性的影响不同。HPO₄²⁻会通过改变土壤对锌的吸附方式降低锌的有效性,H₂PO₄⁻则会减少土壤对锌的吸附而提高锌的有效性^[4]。土壤温度也会影响磷和锌的生物有效性。温度较低时,土壤中磷的移动性差,植物响应缺磷信号使根系分泌有机酸,活化根际土壤中难溶性磷的同时也提高了锌的有效性^[5]。

磷与锌的相互作用也发生在植物体内,相关研

究表明,锌缺乏会导致植物出现磷中毒现象^[6]。对田间种植的小麦进行磷锌配施的研究结果显示,磷肥施用量的增加会显著抑制锌从根向地上部的转运,而叶面喷施锌肥则会提高叶片中的锌含量^[7]。但是,随着植物吸收磷的增加,当植物生长速率超过锌积累速率时,也会产生一定的“稀释效应”,表现为地上部的锌含量显著降低^[8]。此外,菌根真菌也会影响磷与锌的相互作用。菌根通过增加植物根系表面积提高植物对磷的吸收,同时截获更多的锌,避免了磷锌拮抗作用而出现高磷诱导缺锌的现象^[9]。

同时,也有研究报道显示,植物中磷和锌除了存在拮抗作用以外,适宜的磷锌配比也可能对植物产生协同效应。作物中磷和锌的相互作用到底如何,拮抗作用和协同作用是否共存,在不同的生长环境下和不同的作物品种中是否存在差异,其生理机制是什么,目前仍然知之甚少。因此,本研究以常规粳稻品种日本晴和籼型杂交水稻品种广两优35为对比研究材料,分析12种不同的磷锌配施处理对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响,以期探明不同水稻品种中磷和锌的互作效应及其是否存在差异性,

收稿日期: 2020-09-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0200108)

刘露, E-mail: 1021137847@qq.com

通信作者: 蔡红梅, E-mail: caihongmei@mail.hzau.edu.cn

并阐述其生理机制,为生产实践中合理施用磷肥和锌肥、提高肥料利用率、改善居民锌营养提供理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料种植

本课题组在2016—2017年开展了2 a的大田小区试验,供试材料为籼型杂交水稻品种广两优35和常规粳稻品种日本晴,广两优35生育期为140 d左右,日本晴生育期为90 d左右,试验地点位于湖北省武汉市华中农业大学试验基地(114.3°E, 30.5°N)。试验前采集土壤样品,自然风干后过孔径0.85 mm筛,测定土壤基本理化性质。试验基地土壤pH值为6.9,有机质含量为11.26 g/kg,全氮含量为2.11 g/kg,碱解氮含量为141.75 mg/kg,速效磷含量为5.51 mg/kg,速效钾含量为152.96 mg/kg,有效锌含量为1.39 mg/kg。

试验设3个因子,包括4个磷水平、3个锌水平和2个水稻品种,采用3因素随机区组设计种植水稻,并设置3个生物学重复,试验田外围1 m宽种植水稻保护行。每个试验小区面积为50 m²,水稻单株种植,株行距为20 cm × 25 cm。试验所用肥料种类及用量分别为:氮肥(尿素,含N 46.4%)施用量(N)为160 kg/hm²,钾肥(氯化钾,含K₂O 60%)施用量(K₂O)为120 kg/hm²,磷肥(过磷酸钙,含P₂O₅ 12%)施用量(P₂O₅)分别为0、40、80、120 kg/hm²,锌肥(硫酸锌)施用量(ZnSO₄ · 7H₂O)分别为0、15、30 kg/hm²。除氮肥按照4:3:3施用基-蘖-穗肥外,磷肥、钾肥和锌肥均在水稻种植前以基肥方式一次施用于土壤后翻耕。在水稻移栽之前3 d,分别将基施氮肥、磷肥、钾肥和锌肥均匀撒施于稻田后进行翻耕、灌水、打田。待水稻生长至分蘖期和抽穗期,对氮肥进行均匀撒施追肥。

1.2 指标测定

分别在苗期(广两优35秧龄为45 d,日本晴秧龄为30 d)、分蘖期(广两优35秧龄为75 d,日本晴秧龄为50 d)、抽穗期(广两优35秧龄为110 d,日本晴秧龄为70 d)和成熟期(广两优35秧龄为140 d,日本晴秧龄为90 d)在各小区随机选取长势较一致的水稻植株30株,70℃烘干至恒质量后称质量。其中,将成熟期收获的各水稻植株主分蘖各部位分离,包括:穗、茎、叶鞘、老叶和新叶共5个部位,

70℃烘干至恒质量后称质量,测定各样品中氮、磷、钾和锌的含量,并收获水稻种子,考察产量、有效穗数、每穗粒数、千粒重及结实率。

参照文献[10]测定上述样品中氮、磷、钾和锌的含量并计算其累积量和分配比例。其中,氮和磷含量利用流动注射分析仪(FIAstar 5000, Sweden)进行测定,钾含量利用火焰分光光度计进行测定,锌含量利用WFX-ID型原子吸收分光光度计进行测定。

1.3 数据处理

采用SPSS PASW Statistics 18.0软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 磷锌配施对水稻生长和产量的影响

由表1可见,在苗期,施用锌肥对广两优35地上部干质量没有显著影响,但是却降低了日本晴的地上部干质量。在分蘖期、抽穗期和成熟期,中磷(80 kg/hm²)、低磷(40 kg/hm²)和不施磷肥(0 kg/hm²)水平下,增施15 kg/hm²锌肥可以促进2个水稻品种地上部干质量的积累;而在高磷(120 kg/hm²)水平下,施锌则抑制地上部干质量的积累。可见,在中磷(80 kg/hm²)和低磷(40 kg/hm²)水平下,施锌对水稻地上部干质量的积累具有一定的促进作用,且施用15 kg/hm²锌肥比施用30 kg/hm²锌肥更加适宜;施用120 kg/hm²磷肥水平下,施锌对水稻地上部干质量的积累开始具有抑制作用。

由表1可见,在不施磷肥(0 kg/hm²)和低磷(40 kg/hm²)水平下,施用锌肥提高了广两优35的产量,在施用15 kg/hm²锌肥比施用30 kg/hm²的效果更加明显,与不施锌肥相比,由于水稻千粒重和结实率的增加而使产量分别增加了38.4%和6.8%。在高磷(120 kg/hm²)和中磷(80 kg/hm²)水平下,随着锌肥施用量的增加,广两优35产量也随之逐渐增加,在施用30 kg/hm²锌肥时,产量达到最高值,分别增加了24.9%和43.9%。在不施磷(0 kg/hm²)条件下,施锌肥15 kg/hm²使日本晴的产量增加了24.4%,在高磷(120 kg/hm²)、中磷(80 kg/hm²)和低磷(40 kg/hm²)水平下,施用锌肥反而会降低千粒重和结实率使产量降低;但在高磷(120 kg/hm²)水平下,施锌30 kg/hm²使结实率增加而提高产量。

表 1 磷锌配施下各生育期广两优 35 和日本晴地上部的干质量及水稻产量
 Table 1 Shoot dry weight, yield and its components of rice of Guangliangyou 35 and Nipponbare
 at different growth stages under combined application of phosphorus and zinc

品种 Varieties	磷水平/ (kg/hm ²) P ₂ O ₅ level	锌水平/ (kg/hm ²) Zn level	单株地上部干质量/g Shoot dry weight per plant				水稻产量及构成因素 Yield and its components of rice			
			苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	千粒重/g 1 000- grain weight	结实率/% Seed setting rate	单株产量/g Yield per plant	理论产量/ (kg/hm ²) Theoretical yield
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	1.18± 0.07c	28.57± 1.34def	70.11± 1.02d	109.64± 6.50e	23.36± 0.30abcd	0.80± 0.05c	44.12± 4.47c	6 353.86± 643.22c
		15	1.16± 0.05c	25.06± 1.02gh	78.85± 0.97c	120.19± 4.98de	27.25± 1.93ab	0.85± 0.03a	61.08± 1.07b	8 795.52± 154.10b
		30	0.99± 0.02c	27.66± 2.75ef	68.65± 2.05d	117.13± 9.92e	26.29± 0.09abcd	0.80± 0.02ab	58.94± 11.31b	8 487.75± 1 629.23b
		0	1.23± 0.08bc	27.93± 0.97ef	76.34± 1.99c	161.49± 9.64bc	23.93± 0.33abcd	0.79± 0.04c	55.57± 8.17bc	8 001.41± 1 176.70bc
	40	15	1.17± 0.17c	32.44± 0.79bc	89.51± 2.49b	123.77± 0.71de	27.45± 1.04a	0.87± 0.00a	59.36± 14.45b	8 547.32± 2 081.10b
		30	1.08± 0.09c	23.64± 0.84h	68.01± 0.35d	128.47± 8.29d	24.72± 0.18d	0.74± 0.02bc	55.87± 4.96bc	8 044.85± 714.14bc
		0	1.53± 0.26a	30.16± 1.26cde	76.40± 3.47c	172.96± 5.49b	27.21± 1.77abc	0.82± 0.01a	65.51± 7.02b	9 434± 1 010.91b
		15	1.51± 0.21ab	37.81± 0.32a	93.44± 0.95b	132.97± 0.98d	25.67± 0.58bcd	0.79± 0.06ab	62.18± 2.50b	8 953.88± 359.79b
	80	30	1.46± 0.14ab	31.09± 1.73bcd	103.50± 4.21a	195.25± 10.71a	26.42± 0.64abc	0.83± 0.09ab	81.88± 12.12a	11 790.4± 1 745.90a
		0	1.47± 0.11ab	32.30± 1.62bc	102.99± 1.16a	169.63± 11.67bc	26.63± 1.06cd	0.76± 0.01a	60.1± 2.09b	8 654.48± 301.36b
		15	1.16± 0.15c	27.31± 2.12fg	105.03± 3.05a	155.80± 5.35c	27.55± 1.00ab	0.84± 0.04a	68.29± 5.58b	9 834.05± 803.52b
		30	1.49± 0.28ab	33.16± 0.95b	107.04± 0.27a	187.94± 3.81a	26.17± 0.58ab	0.86± 0.01ab	86.48± 1.28a	12 452.98± 183.60a
日本晴 Nipponbare	0	0	1.11± 0.10bc	21.92± 0.93cde	62.97± 0.90g	72.05± 5.12f	20.55± 0.84c	0.75± 0.10a	27.69± 1.12cd	3 987.84± 161.41cd
		15	0.86± 0.05d	22.10± 0.55cd	78.26± 1.26de	89.20± 4.12cd	21.45± 0.85bc	0.71± 0.06ab	34.45± 0.82ab	4 960.8± 118.08ab
		30	0.88± 0.07cd	18.01± 0.44h	65.49± 1.07g	86.75± 5.00de	22.05± 0.68abc	0.69± 0.03ab	31.71± 0.75abc	4 566.24± 108.01abc
		0	1.25± 0.09ab	21.48± 0.12de	72.75± 0.93f	85.81± 1.99de	21.17± 0.85bc	0.71± 0.06ab	32.73± 0.53ab	4 713.12± 76.32ab
	40	15	1.17± 0.23ab	25.59± 0.66a	73.86± 1.06ef	79.05± 5.64ef	20.75± 0.83c	0.58± 0.11bc	31.83± 2.02abc	4 584.00± 290.16abc
		30	1.10± 0.06bc	20.83± 0.44ef	70.59± 2.70f	87.46± 0.97de	21.56± 0.34bc	0.59± 0.06bc	25.47± 0.86d	3 667.68± 123.84d
		0	1.09± 0.12bc	18.64± 0.32h	76.94± 1.99de	111.58± 4.39b	22.33± 0.57ab	0.69± 0.09ab	36.01± 1.96a	5 185.92± 281.52a
		15	1.06± 0.15abc	19.89± 0.27fg	88.21± 0.80bc	87.06± 1.58de	20.64± 1.01c	0.71± 0.05ab	31.17± 4.83bc	4 488.00± 695.83bc
	80	30	1.02± 0.02abc	18.93± 0.79gh	91.96± 5.12b	96.59± 0.71c	23.12± 0.21a	0.65± 0.02abc	34.19± 3.17ab	4 922.88± 456.42ab
		0	1.34± 0.20a	24.01± 0.14b	89.51± 0.28bc	123.97± 7.18a	21.3± 1.59bc	0.62± 0.07abc	32.23± 1.10ab	4 640.64± 157.68ab
		15	1.09± 0.10bc	19.09± 1.01gh	100.17± 2.23a	87.33± 1.30de	20.67± 0.38c	0.53± 0.13c	26.31± 1.78d	3 788.16± 256.77d
		30	1.13± 0.04ab	22.90± 1.10c	86.87± 3.74c	105.66± 11.24b	21.81± 0.56abc	0.68± 0.10abc	35± 3.93ab	5 040.48± 565.20ab

注:不同小写字母表示广两优 35 或日本晴在不同磷锌处理下达到显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters indicate the significant difference of Guangliangyou 35 or Nipponbare under different P-Zn treatments ($P < 0.05$). The same as below.

2.2 磷锌配施对水稻磷吸收分配的影响

由表 2 可见,在不施磷(0 kg/hm²)和低磷(40 kg/hm²)水平下,广两优 35 新叶和穗中的磷含量均随锌肥的增施而增加,但是茎、叶鞘和老叶中的磷含量随锌肥的增施逐渐降低;可见,低磷水平下,施锌促进了磷从老叶、叶鞘和茎中向新叶和穗中转移。在中磷(80 kg/hm²)和高磷(120 kg/hm²)水平下,施锌提高了广两优 35 各部位的磷含量,除了茎以

外,新叶、老叶、叶鞘和穗中的磷含量均随锌肥的增施而增加。磷锌交互处理下,日本晴各部位磷含量的变化没有明显的规律。

在中、低磷水平下,广两优 35 主分蘖的磷积累总量随锌肥的增施有所提高,但是日本晴则不同,主分蘖的磷积累总量随锌肥的增施呈下降趋势,但没有达到显著性差异(图 1A)。在低磷(40 kg/hm²)水平下,施用锌肥提高了 2 个水稻品种茎

表 2 磷锌配施下水稻成熟期各组织部位的磷含量

Table 2 P content in different tissues of rice at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

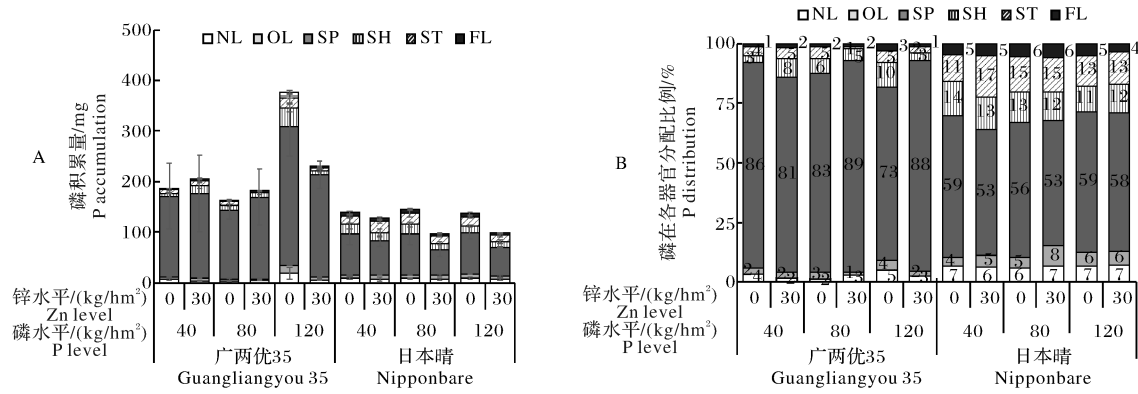
品种 Varieties	磷水平/ (kg/hm ²) P ₂ O ₅ level	锌水平/ (kg/hm ²) Zn level	磷含量/(mg/g) P content				
			新叶 New leaves	老叶 Old leaves	茎 Stem	叶鞘 Sheath	穗 Spikelet
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	0.58±0.02cd	0.72±0.04abc	0.94±0.00a	0.76±0.16a	2.45±0.18abc
		15	0.70±0.14bc	0.55±0.01bcd	0.50±0.11cde	0.65±0.19ab	2.47±0.17abc
		30	0.78±0.15bc	0.58±0.18bcd	0.46±0.07de	0.49±0.09bc	2.56±0.04abc
	40	0	0.77±0.12bc	0.89±0.12a	0.58±0.08de	0.66±0.07ab	2.40±0.06bc
		15	0.90±0.08ab	0.56±0.06bcd	0.61±0.05bc	0.63±0.09abc	2.34±0.30c
		30	0.91±0.12ab	0.59±0.16bcd	0.52±0.04cde	0.57±0.02abc	2.50±0.34abc
	80	0	0.32±0.15e	0.28±0.07e	0.46±0.04de	0.40±0.09c	2.17±0.12c
		15	0.29±0.04e	0.31±0.09e	0.41±0.04e	0.47±0.15bc	2.38±0.12bc
		30	0.77±0.03bc	0.40±0.10de	0.47±0.07de	0.51±0.06bc	2.45±0.31abc
	120	0	0.71±0.07bc	0.54±0.15bc	0.71±0.05b	0.57±0.10abc	2.85±0.35ab
		15	0.44±0.20de	0.53±0.05cd	0.72±0.12b	0.52±0.02bc	2.83±0.29ab
		30	1.02±0.09a	0.76±0.04ab	0.61±0.03bc	0.70±0.19ab	2.89±0.35a
日本晴 Nipponbare	0	0	1.13±0.03ab	1.14±0.16ab	0.70±0.08b	0.91±0.24bcd	2.93±0.40a
		15	0.79±0.21c	0.94±0.19ab	0.83±0.26b	0.87±0.11cd	2.38±0.55abc
		30	0.92±0.01abc	1.07±0.22ab	0.61±0.02b	0.67±0.12d	2.34±0.45bc
	40	0	0.91±0.20abc	0.93±0.16ab	0.64±0.11b	0.85±0.12cd	2.15±0.16c
		15	1.08±0.16abc	0.93±0.39ab	0.55±0.08b	0.81±0.16cd	2.40±0.05abc
		30	1.09±0.02abc	0.93±0.19ab	0.62±0.05b	0.79±0.06d	2.11±0.18c
	80	0	0.88±0.13bc	0.87±0.02ab	0.59±0.07b	0.86±0.23cd	2.28±0.26bc
		15	1.15±0.22ab	1.18±0.20a	0.68±0.19b	0.62±0.16d	2.35±0.03abc
		30	1.21±0.13a	1.02±0.22ab	0.91±0.14b	0.79±0.07d	2.44±0.1abc
	120	0	0.98±0.15abc	0.72±0.23b	2.14±0.41a	1.22±0.18d	2.82±0.18ab
		15	0.97±0.11abc	0.98±0.12ab	0.83±0.16b	1.12±0.17abc	2.33±0.14bc
		30	1.11±0.26ab	0.88±0.03ab	0.79±0.32b	1.17±0.16ab	2.61±0.39abc

中磷的分配比例;在中磷(80 kg/hm²)和高磷(120 kg/hm²)水平下,施锌提高了广两优 35 穗中磷的分配比例(图 1B)。

2.3 磷锌配施对水稻锌吸收分配的影响

在各锌肥水平下,磷肥的施用提高了广两优 35 各部位的锌含量;在施用 40 kg/hm² 磷肥时,各部位锌含量达到最高;但随磷肥施用增多,锌含量呈下降趋势。在施用 80 kg/hm² 磷肥不施锌肥、施用 40 kg/hm² 磷肥与 15 kg/hm² 锌肥、不施磷肥施用 30 kg/hm² 锌肥时,日本晴各部位的锌含量显著高于其他处理(表 3)。

锌在水稻植株中的累积与磷的累积不同,施磷能够促进锌在植株中的累积量(图 2A)。不同磷水平下,锌的分配比例在两水稻品种中存在显著差异。在广两优 35 中,随着磷肥施用量的增加,锌在穗中的分配比例下降,而在新叶和老叶中的分配比例增加,说明施磷会抑制广两优 35 中锌从叶片向穗中分配;而在日本晴中,随着磷肥施用量的增加,锌在穗和叶鞘中的分配比例增加,但是在新叶、老叶和茎中的分配比例降低,说明施磷会促进日本晴中锌从叶片和茎向叶鞘和穗中转移(图 2B)。



NL:新叶; OL:老叶; SP:穗; SH:叶鞘; ST:茎; FL:旗叶。下同。NL: New leaves; OL: Old leaves; SP: Spikelets; SH: Sheath; ST: Stem; FL: Flag leaves. The same as below.

图 1 磷锌配施下成熟期广两优 35 和日本晴的磷积累量(A)和磷在各部位的分配比例(B)

Fig.1 P accumulation (A) and distribution (B) of Guangliangyou 35 and Nipponbare at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

表 3 磷锌配施下水稻成熟期各组织部位的锌含量

Table 3 Zn concentration in different tissues of rice at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

品种 Varieties	锌水平/ (kg/hm ²) Zn level	磷水平/ (kg/hm ²) P level	锌含量/(μg/g) Zn content				
			新叶 New leaves	老叶 Old leaves	茎 Stem	叶鞘 Sheath	穗 Spikelet
广两优 35 Guangliangyou 35	0	0	12.53±3.16e	17.36±0.50ab	16.57±0.55e	16.11±0.06ef	8.21±0.41c
		40	19.45±1.38abc	18.08±2.89ab	25.05±0.07ab	18.27±1.00def	20.69±0.92a
		80	18.59±5.25abcd	20.26±0.41ab	24.67±0.26ab	21.34±0.07cdef	15.49±1.42b
		120	16.82±2.78bcde	14.19±2.87b	18.46±0.74bcde	13.41±1.47e	16.60±0.84b
	15	0	21.97±0.40a	25.46±14.40ab	21.14±3.19abcd	23.26±10.57bcde	18.29±0.20ab
		40	19.42±0.50abc	30.44±15.91a	25.74±1.57a	40.06±0.56a	16.09±3.73b
		80	18.63±0.29abcd	19.74±0.60ab	24.16±4.90abc	28.16±0.15bc	16.40±1.34b
		120	20.54±0.29ab	18.49±0.59ab	20.53±8.90abcde	15.72±0.26ef	16.94±0.29b
	30	0	14.54±0.31de	28.28±2.90ab	17.89±4.12cde	27.02±0.66bcd	18.7±2.48ab
		40	16.44±0.13bcde	19.75±0.22ab	23.88±2.26abcd	32.20±4.21ab	17.05±2.56b
		80	15.28±1.51cde	21.57±3.78ab	17.56±0.87de	23.63±0.08bcde	15.97±0.64b
		120	16.10±0.23bcde	16.84±1.78ab	16.68±1.62e	20.05±0.57cdef	21.37±2.44a
日本晴 Nipponbare	0	0	11.58±2.15bcde	9.63±1.15cd	26.77±7.37abc	10.37±2.45c	20.17±1.12a
		40	9.03±0.61cdef	11.88±5.23c	18.09±0.00bcd	14.28±6.73c	10.95±4.95bc
		80	16.88±5.19bc	12.55±2.31c	23.63±0.45abcd	16.04±8.85c	15.79±7.20abc
		120	6.92±1.201ef	5.00±0.20d	28.04±7.53abc	15.81±8.48c	15.78±0.64abc
	15	0	7.31±0.24def	12.80±5.81cd	32.94±0.70a	24.96±0.43ab	18.48±2.18ab
		40	4.33±0.13f	18.88±1.55b	36.31±10.82a	17.68±0.04bc	22.04±4.00a
		80	7.56±0.20def	11.30±0.01cd	31.28±6.95ab	10.69±0.51c	10.88±5.93bc
		120	5.29±0.27f	12.20±7.34c	27.57±6.51abc	13.44±5.85c	23.20±4.32a
	30	0	22.20±0.10a	6.55±2.11cd	35.71±10.58a	13.42±3.85c	19.24±3.47ab
		40	15.57±0.77b	12.04±1.57c	11.82±0.32a	11.68±3.31c	22.46±5.89a
		80	12.97±7.36bcd	8.69±1.30cd	15.45±7.49cd	8.11±1.90c	9.28±1.12c
		120	11.38±0.87bcde	35.21±3.20b	29.52±2.88abc	27.23±0.22a	15.29±3.64abc

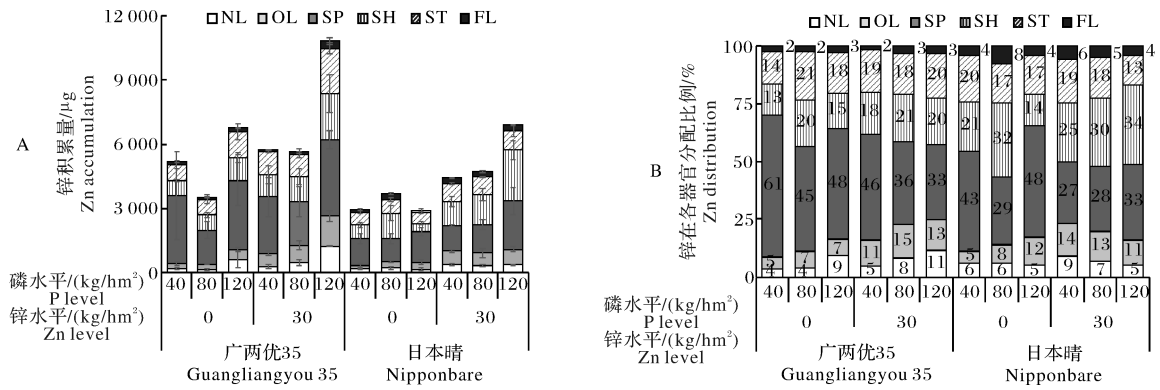


图 2 磷锌配施下成熟期广两优 35 和日本晴的锌积累量(A)和锌在各部位的分配比例(B)
Fig.2 Zn accumulation (A) and distribution (B) of Guangliangyou 35 and Nipponbare at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

2.4 磷锌配施对水稻氮和钾吸收分配的影响

由表 4 可见,在不施锌肥的条件下,随着磷肥施用的增加,广两优 35 各部位氮含量和钾含量显著增加;日本晴各部位的钾含量与广两优 35 相似,会随着磷肥施用的增加而升高,但是其氮含量却与广两优 35 相反,它随着磷肥施用的增加反而降低。但是,在施用 30 kg/hm² 锌肥时,磷肥施用水平的变化对 2 个水稻品种各部位的氮含量和钾含量不能产生显著的影响。可见,在外界低锌水平下,磷与氮和钾之间也会产生显著的互作效应,但是,外界高水平锌的供应却会消除这种磷与氮、钾之间的互作效应。

由图 3 可见,广两优 35 氮、钾积累量显著高于

日本晴,随着磷水平的提高,广两优 35 各部位的氮、钾积累量逐渐增加,而日本晴的氮、钾积累量则表现平稳,受磷肥施用量的影响不大。中、低磷(40 kg/hm²、80 kg/hm²)水平下,施用锌肥可以提高广两优 35 的氮、钾积累量;而在高磷(120 kg/hm²)水平下,施用锌肥对广两优 35 的氮、钾积累量产生抑制作用。氮、钾在各组织部位中的分配比例如图 3B 和图 3D 所示。在广两优 35 中,施用 30 kg/hm² 锌肥会显著提高氮在穗中的分配比例,但是锌肥的施用对日本晴穗中氮的分配比例却没有显著影响;同时,磷肥与锌肥的配合施用对钾在水稻植株中的分配没有显著影响。

表 4 磷锌配施下水稻成熟期各组织部位的氮和钾含量

Table 4 N and K concentrations in different tissues of rice at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

种 Varieties	部位 Tissues	磷水平/ (kg/hm ²) P level	氮含量/(mg/g) N content		钾含量/(mg/g) K content	
			Zn 0 kg/hm ²	Zn 30 kg/hm ²	Zn 0 kg/hm ²	Zn 30 kg/hm ²
			广两优 35 GuangliangYou 35			
广两优 35 GuangliangYou 35	新叶 New leaves	40	18.06±2.40b	15.16±2.11b	18.17±0.88b	22.12±1.90a
		80	15.14±2.73b	16.28±0.91b	21.66±1.17a	23.97±0.77a
		120	24.05±1.71a	16.98±1.31b	22.01±2.93a	24.19±1.13a
	老叶 Old leaves	40	13.28±2.68ab	13.59±0.52ab	25.39±0.62b	27.67±1.30ab
		80	11.65±3.29b	9.72±1.62b	27.55±0.59ab	27.35±3.09ab
		120	17.28±3.16a	13.11±0.70ab	26.05±1.75b	29.88±1.53a
	穗 Spikelet	40	12.92±0.82c	15.27±0.07a	3.03±0.38c	4.03±0.78b
		80	13.36±0.54bc	14.28±0.51ab	3.70±0.14bc	4.00±0.41b
		120	14.18±0.39ab	15.26±0.76a	5.30±0.05a	4.02±0.12b
叶鞘 Sheath	40	7.66±0.90bc	7.46±1.18bc	30.41±1.68ab	27.69±0.48bc	
	80	8.26±0.50b	6.26±0.23c	27.05±1.40c	29.28±0.07bc	
	120	10.27±0.93a	7.63±0.35bc	32.76±2.78a	32.67±0.57a	
茎 Stem	40	6.53±0.99ab	5.27±1.46ab	32.16±0.48b	39.00±0.52b	
	80	6.51±1.62ab	4.89±0.40b	53.26±4.25a	52.29±2.69a	
	120	6.89±1.10ab	7.26±0.43a	59.07±11.74a	62.74±4.37a	
剑叶 Flag leaves	40	17.45±0.70b	18.54±2.37b	13.46±0.46b	16.01±1.04a	
	80	17.29±2.01b	15.43±0.70b	14.64±0.54ab	16.43±0.65a	
	120	28.37±0.76a	16.53±0.57b	15.56±0.54a	16.52±1.54a	

续表 4 Continued Table 4

品种 Varieties	部位 Tissues	磷水平/ (kg/hm ²) P level	氮含量/(mg/g) N content		钾含量/(mg/g) K content	
			Zn 0 kg/hm ²	Zn 30 kg/hm ²	Zn 0 kg/hm ²	Zn 30 kg/hm ²
新叶 New leaves	40	40	24.61±0.70a	22.18±1.21b	16.27±0.24c	20.00±1.76ab
		80	22.17±0.20b	25.44±0.34a	18.79±0.43b	21.39±0.26a
		120	21.65±1.02b	24.46±1.66a	18.82±0.64b	20.72±0.03ab
	老叶 Old leaves	40	22.10±0.75a	19.47±1.23ab	15.39±2.44c	20.31±0.93a
		80	17.96±0.54b	20.91±1.53ab	17.14±1.33bc	19.53±0.64ab
		120	18.93±3.04b	19.25±0.71ab	18.64±0.51ab	21.22±1.88a
日本晴 Nipponbare	穗 Spikelet	40	13.18±1.08a	13.32±1.26a	2.91±0.55c	3.76±0.29a
		80	13.29±0.06a	12.24±0.59a	3.38±0.43ab	3.54±0.19ab
		120	12.83±0.32a	12.18±0.16a	3.99±0.27a	3.36±0.05ab
	叶鞘 Sheath	40	10.08±0.37a	9.65±0.22ab	15.40±1.37d	24.7±0.30a
		80	9.24±0.49ab	9.99±0.67a	16.78±0.57cd	18.58±0.02bc
		120	8.55±0.38b	9.55±0.87ab	17.31±1.10cd	19.84±1.82b
茎 Stem	40	8.53±0.24a	8.25±0.25a	22.24±1.52b	23.52±0.57ab	
	80	7.79±0.99a	8.99±0.92a	21.95±2.45b	26.01±0.03a	
	120	7.07±0.94a	6.44±2.70a	24.57±0.86ab	24.31±0.29ab	
剑叶 Flag leaves	40	24.58±0.50a	24.38±0.78a	11.36±0.74e	15.35±1.12ab	
	80	22.94±1.21a	24.73±0.05a	13.49±0.54cd	16.84±1.13a	
	120	19.74±0.77a	22.21±0.43a	12.74±0.39de	14.77±1.09bc	

注:不同的小写字母表示同一水稻部位在不同磷锌处理下相比达到显著水平($P<0.05$)。Note: The different letters indicated the significant difference ($P<0.05$) of one rice tissue under different P-Zn treatments.

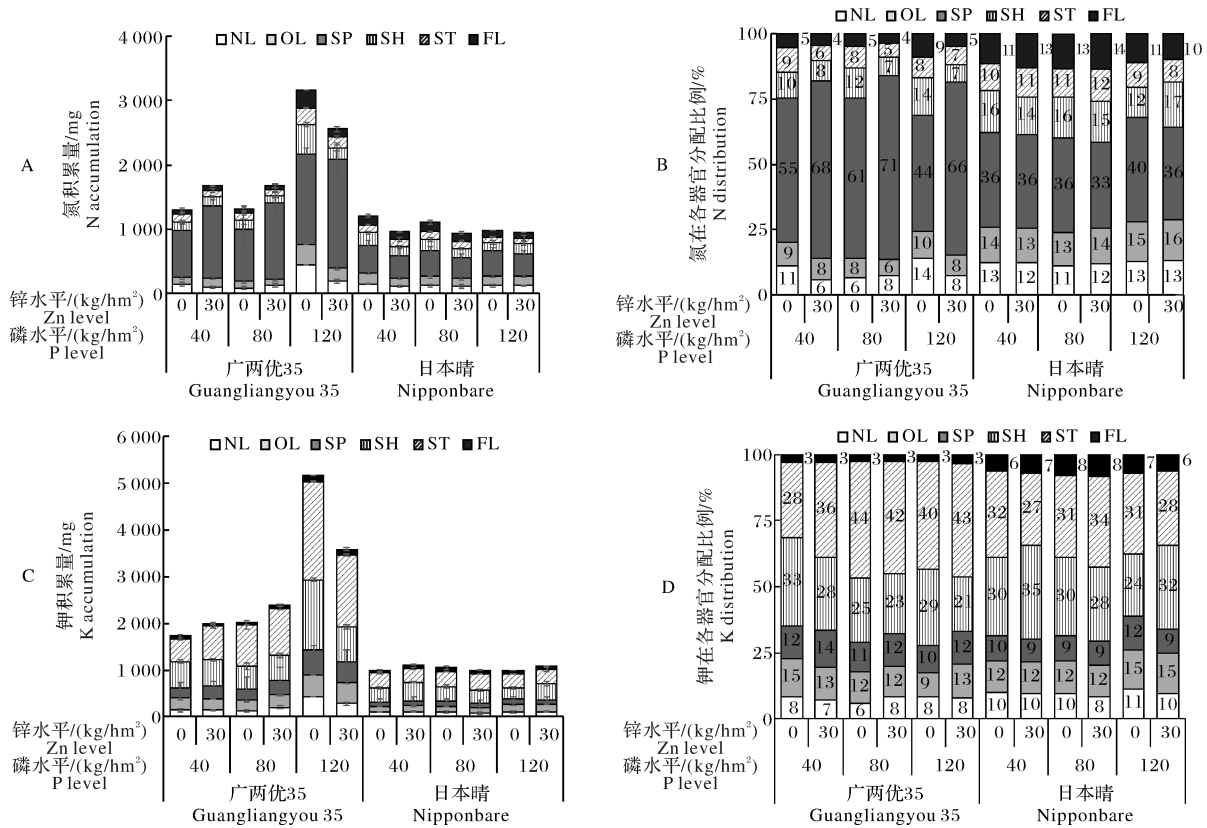


图 3 磷锌配施下成熟期广两优 35 和日本晴的氮、钾积累量(A,C)和氮、钾在各部位的分配比例(B,D)

Fig.3 N,K accumulation (A,C) and distribution (B,D) of Guangliangyou 35 and Nipponbare at mature stage under combined application of phosphorus and zinc

3 讨 论

随着对植物单一养分作用机制研究的逐步深入,近年来矿质养分间相互作用的研究开始受到植物营养学家和作物育种家的关注和重视;相关研究表明养分间的相互作用是影响作物养分高效利用及产量、品质形成的一个重要因素。

相关研究表明,过量的磷与锌配比在不同作物中会表现出拮抗效应。施用过量的磷肥会显著降低土壤中有效锌的含量,从而降低小麦对锌的吸收以及锌向地上部的转运和积累,显著降低小麦籽粒中锌的含量和生物有效性^[6,11]。无论是在苗期,还是拔节期或抽穗期,施用磷肥会显著降低小麦地上部的锌含量,且随着施磷水平的提高,其抑制效果更加显著^[12]。在烟草中的研究结果也显示,施用磷显著抑制烟草对锌的吸收^[13]。但在玉米的营养液试验结果中发现,玉米根系中的锌含量会随着供磷水平的提高而显著增加,但是地上部的锌含量变化不显著,最终导致供磷降低了锌向地上部的运输效率^[14]。此外,在小麦和玉米中的研究结果显示,施用锌肥会显著抑制磷从根向地上部的转运,且供磷水平越高,锌对磷转运的抑制幅度越大^[15]。

本研究分析了 12 种不同的磷锌配比处理下粳型杂交水稻品种广两优 35 和常规粳稻品种日本晴的生物量和产量以及对磷、锌和氮、钾的吸收分配,结果表明不同水平的磷肥与锌肥配施对水稻的生长和产量形成以及养分的吸收分配可能具有协同效应或是拮抗效应。在中、低磷水平下,增施锌肥可以提高水稻的地上部生物量,提高植株中氮和钾的积累量;但在高磷水平下,增施锌肥反而降低地上部生物量,降低植株中氮和钾的积累量,且施用 15 kg/hm² 的锌肥比施用 30 kg/hm² 的锌肥对生物量的促进效应更佳。相关研究也表明,小麦磷与锌存在的拮抗作用只发生在小麦生长的特定生育时期。在苗期、拔节期和成熟期,施磷会显著降低小麦地上部的锌含量,同时,施锌也会降低小麦地上部的磷含量;但是,在抽穗期和灌浆期,施锌反而会提高小麦地上部的磷含量,表现出磷与锌之间的协同效应^[11]。同时,适宜的磷锌配比还可以提高小麦籽粒中磷和锌的含量^[16]。在水稻的研究中也发现,适宜地增施磷肥可以提高稻米中锌的生物有效性以及生物可利用

总量,而过量施用磷肥或者不施磷肥均会降低稻米中锌的生物有效性和生物可利用总量^[17]。

本研究结果发现,磷锌配施不仅显著影响了水稻植株中磷和锌的含量、累积量以及分配比例,同时对氮和钾的含量、累积量以及分配比例也产生了显著的影响。在中、低磷条件下,虽然施锌降低了日本晴对磷和氮的积累,但是提高了广两优 35 新叶和穗中的磷含量,还显著提高了植株中的氮含量和钾含量,促进了氮和磷从叶片向穗中的分配,有利于产量的提高。增施磷肥会快速促进水稻植株的生长和生物量的积累,当植株生长速率超过养分积累速率时,容易对植株体内的养分形成“稀释效应”而降低养分含量^[8]。本研究中增施磷肥显著降低了植株体内的锌含量,但是由于生物量的增加,锌积累量显著增加,同时氮和钾的积累量也显著增加。氮、磷、钾是植物生长发育所需的大量营养元素,也是农业生产实践中的“肥料三要素”,对作物产量形成至关重要。磷锌配施对水稻植株中氮、磷、钾吸收和分配的影响直接决定了水稻产量,本研究中施锌促进氮和磷从叶片向穗中分配是水稻产量提升的主要原因之一。

本研究的结果同时表明,不同水稻品种表现出不同的磷锌互作效应。在低磷水平下,配施 15 kg/hm² 的锌肥提高了广两优 35 的千粒重和结实率,进而提高籽粒产量;而在中、高磷水平下,配施 30 kg/hm² 的锌肥提高了广两优 35 的穗数和每穗粒数,进而提高籽粒产量。不施磷肥条件下配施 15 kg/hm² 的锌肥,或者高磷水平下配施 30 kg/hm² 的锌肥可以提高日本晴的产量;但是在中、低磷水平下,配施锌肥反而降低了日本晴的产量。增施锌肥提高了广两优 35 各部位中磷的含量和累积量以及钾在穗中的分配比例,但在日本晴中,施锌对磷含量和累积量、钾在穗中的分配比例均没有显著影响。施磷会抑制广两优 35 中的锌向穗中分配,但是会促进日本晴中的锌向穗中分配。在莴苣的研究中同样发现了类似的研究结果,由于不同品种莴苣对磷和锌的需求不同,磷与锌之间的关系在不同品种莴苣中也存在着显著差异^[18]。比如,在 Kordaat 莴苣品种中,根和地上部中的磷含量和锌含量之间均无显著相关性;但是对 Paris Island Cos 莴苣品种,无论是在根中还是地上部,磷含量和锌含量均存在显著

的负相关关系^[18]。可见,在生产实践中,需要根据不同的作物品种与土壤肥力水平,选择适宜的磷肥与锌肥配比施用,才能发挥磷与锌的协同增效效应。

参考文献 References

- [1] POIRIER Y, BUCHER M. Phosphate transport and homeostasis in Arabidopsis [J/OL]. The Arabidopsis book, 2002, 1: e0024[2020-09-02]. <https://doi.org/10.1199/tab.0024>.
- [2] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London: Academic Press, 2012.
- [3] 涂从, 郑春荣, 陈怀满. 土壤-植物系统中重金属与养分元素交互作用 [J]. 中国环境科学, 1997, 17(6): 526-529. TU C, ZHENG C R, CHEN H M. Interaction of heavy metals and nutrient elements in soil-plant system [J]. Chinese environmental science, 1997, 17(6): 526-529 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李鼎新, 党廷辉. 在 MAP 和 DAP 体系中土壤锌吸附的初步研究 [J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 24-31. LI D X, DANG T H. A preliminary study on adsorption of zinc by soil in MAP and DAP systems [J]. Acta sinica, 1991, 28(1): 24-31 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陆景陵. 植物营养学: 上册 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. LU J L. Plant nutrition: Volume 1. [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003 (in Chinese).
- [6] MARSCHNER P. Mineral nutrition of higher plants [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2013.
- [7] ZHANG Y Q, DENG Y, CHEN R Y, et al. The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application [J]. Plant and soil, 2012, 361(1/2): 143-152.
- [8] LI H Y, ZHU Y G, SMITH S E, et al. Phosphorus-zinc interactions in two barley cultivars differing in phosphorus and zinc efficiencies [J]. Journal of plant nutrition, 2003, 26(5): 1085-1099.
- [9] SHARMA A K, SRIVASTAVA P C, JOHRI B N. Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere [M]. USA: Lewis Publishers, 1994.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000 (in Chinese).
- [11] 陆欣春. 潜在缺锌土壤上土施锌肥对冬小麦锌营养品质及土壤锌形态转化的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012. LU X C. Effects of zinc applying on zinc nutritional quality of winter wheat and transformation of soil zinc morphology in the potential zinc-deficient soil [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [12] 买文选, 田霄鸿, 陆欣春, 等. 磷锌肥配施对冬小麦籽粒锌生物有效性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1243-1249. MAI W X, TIAN X H, LU X C, et al. Effects of combined application of phosphorus and zinc on the bioavailability of zinc in winter wheat grains [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2011, 19(6): 1243-1249 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张拯研. 磷锌互作对烟株磷锌吸收和抗花叶病的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008. ZHANG Z Y. Interaction of phosphorus and zinc on the absorption of phosphorus and zinc in tobacco plants and resistance to mosaic disease [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张富仓, 康绍忠, 龚道枝, 等. 不同磷浓度对玉米生长及磷、锌吸收的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 903-906. ZHANG F C, KANG S Z, GONG D Z, et al. Effect of different phosphorus concentrations on the growth and the absorption of phosphorus and zinc in maize [J]. Journal of applied ecology, 2005, 16(5): 903-906 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑绍建, 杨志敏, 胡霁堂. 玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 150-155. ZHENG S J, YANG Z M, HU A T. Studies of phosphorus and zinc nutrition and the interaction in maize and wheat cells [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 1999, 5(2): 150-155 (in Chinese with English abstract).
- [16] YANG X W, TIAN X H, LU X C, et al. Impacts of phosphorus and zinc levels on phosphorus and zinc nutrition and phytic acid concentration in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of the science of food & agriculture, 2011, 91(13): 2322-2328.
- [17] 韦燕燕. 水稻籽粒中锌生物有效性与调控机制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. WEI Y Y. Bioavailability and regulation mechanism of zinc in rice grains [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [18] BOUAIN N, KISKO M, ROUACHED A, et al. Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of Pi transport [J/OL]. Biomed research international, 2014: 548254 [2020-09-02]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/548254>.

Effects of combined application of phosphorus and zinc fertilizer on growth, yield, nutrient absorption and distribution of rice

LIU Lu, YANG Xinxin, ZHANG Limei, YAN Yupeng, YE Xiangsheng, XU Fangsen, CAI Hongmei

*Microelement Research Center/College of Resources and Environment,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

Abstract Phosphorus (P) and zinc (Zn) are both essential elements for plant growth and development. There are strong relationships between different nutrients that changing one or more nutrients in the growth medium affects the concentrations of many other nutrients in plants. Phosphorus in the form of Pi can affect the mobility and bioavailability of many metal elements including iron, manganese, copper, and Zn. Early studies performed in various crop species indicate that there is a negative relationship between Pi and Zn accumulation in plants. In this study, Guangliangyou 35 (an *indica* hybrid rice cultivar) and Nipponbare (a conventional *japonica* rice cultivar) were treated with combined application of three Zn levels and four P levels in field trials. The effects of combinations of P and Zn on the growth, yield, and the nutrient utilization of rice were investigated. We analyzed the shoot dry weight at different growth stages, the yield and its components at mature stage, the concentration, accumulations and distributions of P, Zn, N and K in different organs and tissues. Results showed that the combined application of P and Zn fertilizers had synergistic effect or antagonistic effect on the rice biomass, yield, the nutrient absorption and distribution. Under the middle and low P levels, the proper application of Zn increased the biomass and yield of rice. Under the high P level, the application of Zn decreased the biomass. For different cultivars, the proper application of Zn increased the rice yield under different P levels. The significant increase of 1 000-grain weight and fertility determined the increase of yield under the combined application of P and Zn fertilizers. The properly combined application of P and Zn fertilizers increased the concentrations of P and Zn in rice plant and promoted the distribution of P and Zn to the productive organ. In addition, the properly combined application of P and Zn fertilizers increased the concentrations of nitrogen (N) and potassium (K) in rice plant, and promoted the distribution of N to the productive organ, which is one of the main physiological mechanisms of increasing rice yield under the combined application of P and Zn fertilizers.

Keywords rice; combined application of phosphorus and zinc fertilizer; phosphorus-zinc interaction; nutrient absorption; distribution; yield; utilization rate of fertilizer; synergistic interaction

(责任编辑:赵琳琳)