

长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响

赵荣芳, 邹春琴*, 张福锁

(农业部植物营养学重点开放实验室; 教育部土壤-植物相互作用重点实验室;
中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 以中国农业大学昌平试验站长期定位试验为基础, 研究了长期施用磷肥对冬小麦根际磷锌有效性及其对作物磷锌营养的影响。结果表明, 长期施用磷肥 [P_2O_5 , 135 kg/($hm^2 \cdot a$)] 导致土壤有效磷含量逐年提高; 对根际和非根际土壤有效锌含量没有显著影响, 但是根际土壤有效锌含量显著高于非根际土壤; 长期施用磷肥冬小麦抽穗期植株锌含量显著低于不施磷处理; 无论拔节期和抽穗期, 植株含磷量和植株磷锌比 (P/Zn) 都随着施磷量的增加而显著增加。长期施用磷肥处理 (P1 和 P2) 在显著提高了冬小麦子粒含磷量的同时, 显著降低了其含锌量; 冬小麦子粒磷锌比 (P/Zn) 随着施磷量的增加也显著增加, 子粒含磷量与含锌量呈极显著的负线性相关关系。

关键词: 磷肥管理; 磷营养; 锌营养; 冬小麦

中图分类号: S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2007)03-0368-05

Effects of long-term P fertilization on P and Zn availability in winter wheat rhizosphere and their nutrition

ZHAO Rong-fang, ZOU Chun-qin, ZHANG Fu-suo

(Key Laboratory of Plant Nutrition, MOA; Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, MOE; College of Resource and Environment, CAU, Beijing, 100094)

Abstract: The effects of long-term P application on the available P and Zn in rhizosphere soil, P and Zn concentration in grain of winter wheat were studied on the 20 years long-term experiment station in Beijing. The main results were as follows: soil Olsen-P concentration significantly increased with long-term high P fertilization [P_2O_5 135 kg/($ha \cdot a$)]. DT-PA-Zn concentration in rhizosphere was significant higher than that in bulk soil. P concentration in shoot of winter wheat both at shooting stage and heading stage was apparently improved with increasing P application rates. Whereas, Zn concentration in shoot of winter wheat treated with long-term P fertilization was significantly lower than that of no P supply at heading stage. The P/Zn ratio in winter wheat plant was significantly enhanced with increasing P application rate both at shooting stage and heading stage. Compared with no P treatment, P_2O_5 67.5 and 135 kg/($ha \cdot a$) application significantly increased P concentration and decreased Zn concentration in grain of winter wheat. As the results observed, P/Zn ratio in winter wheat grain was significantly increased. A significantly negative relationship between P and Zn concentration in winter wheat grain was observed.

Key words: phosphorus fertilization; phosphorus; zinc; winter wheat

20 世纪 80 年代初进行的全国第二次土壤普查的结果表明, 我国华北地区土壤普遍缺磷^[1]。因此,

在随即开展的配方施肥工作中, 氮磷配合施用成为华北平原冬小麦—夏玉米轮作体系作物高产最重要

收稿日期: 2006-03-06 修改稿收到日期: 2006-05-15

基金项目: 农业部 948 重大国际合作项目(2003-Z53)资助。

作者简介: 赵荣芳(1969—), 女, 河北省三河市人, 博士, 主要从事养分资源优化管理研究。Tel: 010-62733317, Email: zhaorf@126.com

* 通讯作者 Tel: 010-62733539, Email: zcq0206@cau.edu.cn

的措施。20 多年来,经过连续的施用磷肥,华北平原粮田土壤有效磷普遍上升^[2-4]。

锌是人体生长发育必需的微量元素之一,人体缺锌会引起许多疾病^[5]。近年来的研究表明,缺锌症多在以谷类食品为主食的居民中流行^[6],发展中国家问题更加突出^[7],如我国大约有 30%~60% 的儿童缺锌^[8]。因此,如何提高作物特别是禾谷类作物子粒中微量元素含量及其生物有效性,改善人体微量元素营养,已成为全世界植物营养学家、农学家、人体营养家等关注的热点。

农业生产中的施肥措施在很大程度上会直接或间接影响植物的微量元素营养和子粒中微量元素的含量。研究表明,大量施用磷肥会降低土壤中有效锌的含量,同时也会引起作物体内锌含量下降^[9-11]。但是以前很少有人关注子粒中锌的变化,以及子粒中磷/锌的比例。事实上,子粒中的锌主要以植酸盐的形式存在,因此,P/Zn 比例越高,其锌的生物有效性就可能越低^[12]。因此,以中国农业大学 20 年的长期定位试验为基础,研究长期施用磷肥对土壤中锌和磷有效性的影响,进而对植物磷、锌营养,特别是小麦子粒中锌的含量以及 P/Zn 比例的影响,以期对华北平原粮田持续大量施用磷肥且用量逐年增加对土壤、环境、作物品质的影响进行评价,为高产、优质(人体健康)、资源高效、环境保护等多重目标并重的磷素资源优化管理提供理论依据。

1 材料与方 法

试验于 2000—2001 年度在中国农业大学北京昌平试验站长期肥料定位试验地块(冬小麦-夏玉米一春玉米轮作,取样为冬小麦生长季)进行。长期定位试验始于 1984 年,试验前 0—20 cm 土层土壤养分含量为:土壤有机质 13.1 g/kg,全 N 7.1 g/kg, Olsen-P 6.1 mg/kg, NH₄OAc-K 114 mg/kg, 缓效 K 584 mg/kg。试验区采用裂区设计。主处理两个: M(化肥与有机肥配施)和 F(单施化肥),每个主处理下共设 10 个副处理,由 3 × 3 + 1 设计构成,即: N0P0、N1P0、N2P0、N0P1、N1P1、N2P1、N0P2、N1P2、N2P2、N2P2K。本研究从中选取 FN1P0、FN1P1、FN1P2 3 个处理,即磷肥用量为 P₂O₅ 0、67.5、135 kg/hm²,施 N 135 kg/hm²,不施有机肥,此 3 个处理简称为 P0、P1、P2。分别于冬小麦拔节期和抽穗期取冬小麦植株地上部分,同时采用“抖土法”取根际土壤样品,用土钻取 0—30 cm 非根际土壤样品;于冬小麦收获期取冬小麦子粒样品。根际和非根际土壤样品用于测定土

壤有效磷和 DTPA 锌含量;植株和子粒样品测定磷和锌含量。

土壤有效磷: Olsen-P 法;土壤有效锌: DTPA 浸提-原子吸收分光光度法;植株和子粒磷和锌含量: 干灰化法-ICP 测定。

2 结果分析

2.1 长期施用磷肥对土壤有效磷含量的影响

和长期试验开始前(Olsen-P 6.1 mg/kg)相比,随着试验时间延长,不施磷肥处理(P0)土壤有效磷含量略有下降,施 P₂O₅ 67.5 kg/hm² 处理(P1)有效磷含量略有升高,施用 P₂O₅ 135 kg/hm² (P2)土壤有效磷含量显著增高,到 2001 年冬小麦收获后,土壤有效磷含量已高达 16 mg/kg。磷素平衡计算结果表明,从 1984 年试验开始到 1997 年度冬小麦季结束时,P0、P1、P2 三个施磷水平下的磷素平衡结果分别为 P - 189 kg/hm²、- 23 kg/hm² 和 346 kg/hm²。由此可见,高量施磷处理(P2)使土壤大量磷素赢余,导致土壤有效磷含量显著提高。

已有的调查资料表明,华北平原小麦-玉米轮作体系的磷肥用量普遍较高,例如山东省惠民县磷肥施用量平均为 P₂O₅ 214 kg/(hm²·a)^[13],河北省辛集市磷肥施用量平均为 P₂O₅ 174 kg/(hm²·a)^[14],都大大高于本试验中的 P2 水平,由此可以推断华北平原农田土壤有效磷含量的上升可能更快。

2.2 长期施用磷肥对冬小麦根际和非根际土壤有效磷和有效锌含量的影响

表 1 看出,P0、P1、P2 三个磷肥水平下拔节期根际土壤有效磷含量分别为 4.94、9.59、21.00 mg/kg,非根际土壤分别为 2.97、6.86、21.78 mg/kg;抽穗期根际土壤有效磷含量分别为 2.66、6.79、17.80 mg/kg,非根际土壤分别为 1.99、5.99、16.17 mg/kg。无论拔节期和抽穗期,随着施磷量的增加,土壤有效磷含量显著增加,P2 处理由于长期施用高量磷肥,根际和非根际土壤有效磷含量均大幅提高;P0 和 P1 水平下,拔节期根际土壤有效磷含量显著高于非根际土壤,P2 水平下二者无显著差异,而在抽穗期三个磷肥水平下根际与非根际有效磷之间均无明显差异。这可能是因为不施磷或施低量磷时,拔节期土壤温度较低,土壤溶液中磷的扩散速度较慢,土壤有效磷含量较低,作物在缺磷条件下根系分泌有机酸,使根际土壤酸化,提高土壤磷的有效性^[15],从而使根际土壤有效磷含量显著高于非根际土壤。

P0、P1、P2 三个磷肥水平下,拔节期根际土壤有

效锌含量分别为 0.47、0.39、0.52 mg/kg, 非根际土壤分别为 0.33、0.29、0.42 mg/kg; 抽穗期根际土壤有效锌含量分别为 0.39、0.41、0.47 mg/kg, 非根际土壤分别为 0.25、0.29、0.29 mg/kg。无论拔节期和抽穗期, 施用磷肥对抽穗期根际和非根际土壤有效锌含量没有显著影响, 而施用高量磷肥的处理 (P2) 拔节期根际和非根际土壤有效锌含量有提高趋势; 两个生育时期中根际土壤有效锌含量均显著高于非根际土壤。

表 1 长期施用磷肥对冬小麦根际和非根际土壤有效磷与有效锌含量的影响

Table 1 The effect of long-term P application on Olsen-P, DTPA-Zn concentration in soil at shooting and heading stage of winter wheat

磷水平 P rate	土壤 Soil	有效 P Olsen P (P mg/kg)	有效 Zn DTPA-Zn (Zn mg/kg)
拔节期 Shooting stage			
P0	RS	4.94 d	0.47 ab
	BS	2.97 e	0.33 de
P1	RS	9.59 b	0.39 cd
	BS	6.86 c	0.29 e
P2	RS	21.00 a	0.52 a
	BS	21.78 a	0.42 bc
变异来源 Factors			
磷肥 P		**	**
土壤 Soil		*	ns
P × Soil		*	ns
抽穗期 Heading stage			
P0	RS	2.66 cd	0.39 b
	BS	1.99 d	0.25 c
P1	RS	6.79 b	0.41 ab
	BS	5.99 bc	0.29 c
P2	RS	17.80 a	0.47 a
	BS	16.17 a	0.29 c
变异来源 Factors			
磷肥 P		** ns	
土壤 Soil		**	**
P × Soil		ns	ns

注 (Note): RS—根际土 Rhizosphere soil; BS—非根际土 Bulk soil; *, ** 和 ns 分别表示差异达 5%、1% 和无差异 Mean significant at 5%, 1% and no significant, respectively. 不同字母表示差异达 5% 显著水平 Different letters mean significant at 5% level; 下同 The same symbol is used for other tables.

2.3 长期施用磷肥对冬小麦拔节期和抽穗期植株磷和锌含量的影响

表 2 表明, P0、P1、P2 三个磷肥水平下冬小麦植

株拔节期含磷量分别为 1.16、2.08、2.94 g/kg, 而抽穗期含磷量分别为 1.06、1.46、1.91 g/kg; 无论拔节期和抽穗期植株, 都随着施磷量的增加植株含磷量显著增加。P0、P1、P2 三个磷肥水平下冬小麦植株拔节期含锌量分别为 19.6、16.2、18.3 mg/kg; 抽穗期含锌量分别为 17.9、11.1、12.0 mg/kg; 无论拔节期还是抽穗期, 植株磷锌比 (P/Zn) 都随着施磷量的增加而显著增加; 而且在相同施磷水平条件下, 植株中 P/Zn 比均基本保持一致。

表 2 长期施用磷肥对冬小麦拔节期和抽穗期植株磷和锌含量的影响

Table 2 Effect of long-term P application rates on P and Zn concentration in shoot of winter wheat at shooting and heading stages

磷水平 P rates	磷含量 P concentration (P g/kg)	锌含量 Zn concentration (Zn mg/kg)	磷锌比 P/Zn ratio
拔节期 Shooting stage			
P0	1.16 c	19.6 a	59
P1	2.08 b	16.2 b	128
P2	2.94 a	18.3 a	160
抽穗期 Heading stage			
P0	1.06 c	17.9 a	59
P1	1.46 b	11.1 b	131
P2	1.91 a	12.0 b	158

2.4 长期施用磷肥对冬小麦子粒磷和锌含量的影响

表 3 看出, 和 P0 处理相比, P1 和 P2 处理显著提高了收获期冬小麦子粒磷含量, 而 P1 和 P2 处理间差异不显著。长期施用磷肥显著降低了收获期子粒锌的含量, 和 P0 处理相比, P1 和 P2 处理小麦子粒的含锌量分别降低了 26.5% 和 33.3%; 而且冬小麦子粒磷锌比 (P/Zn) 随着施磷量的增加而显著增加, 冬小麦收获期子粒含磷量与含锌量呈极显著的负相关 ($r = -0.99^{**}$)。

表 3 长期大量施用磷肥对冬小麦子粒磷和锌含量的影响

Table 3 Effect of long-term P application on P and Zn concentration in grain of winter wheat

磷水平 P rates	全磷 (g/kg) Total P	全锌 (mg/kg) Total Zn	磷锌比 P/Zn ratio
P0	2.29 b	39.4 a	58
P1	2.89 a	28.9 b	100
P2	3.10 a	22.3 c	139

3 讨论

施肥是影响冬小麦子粒营养品质的重要因素之一。有研究表明,随着氮、磷、钾投入水平的提高,小麦子粒中 Zn 含量显著降低^[16]。本研究结果也表明,长期大量施用磷肥虽未对土壤有效锌含量产生显著影响(表 1),但显著降低了植物体内和子粒锌含量。无论是拔节期还是抽穗期植株,随着施磷量增加植株含磷量显著增加,锌含量则显著下降(表 2)。小麦子粒含锌量显著降低(表 3),其原因可能是在氮水平一定的条件下,长期施用中量和高量磷肥,作物产量显著提高^[17],从而导致植物体内锌的“稀释效应”。此外,小麦子粒中磷、锌含量呈显著负相关,说明磷可能在某种程度上抑制了锌的运输,尤其是对体内锌向子粒中的运输,但相关机理还不清楚,这方面的研究还有待于进一步深入。

小麦是我国膳食结构中主要的谷类作物之一,随着人民生活水平的提高,小麦品质特别是营养品质已愈来愈被人们所关注。小麦子粒中微量元素的含量直接或间接影响子粒的营养品质和加工品质及食品安全性。本研究结果中,施 P_2O_5 135 kg/hm² (P2)水平下,小麦子粒锌含量为 22.3 mg/kg,在以小麦面粉为主要膳食的地区,按每人每天食用 0.5 kg 面粉计算,则每日从面粉中摄入的锌的量仅为 11.1 mg。资料表明,我国小麦子粒含锌量平均为 29.8 mg/kg^[18],与本试验中 P1 水平下的小麦子粒锌含量(28.9 mg/kg)相当,若按此含锌量计算,每人每天从面粉中摄入的锌量为 14.9 mg,所以如果食用 P2 处理的小麦面粉,每人每天至少少摄入了 3.8 mg 锌。另外,子粒中锌的生物有效性也十分重要。磷主要以植酸形式储存在谷物子粒中,植酸锌的生物有效性较低,不易被人体吸收^[12],且锌和植酸结合能使锌的有效性降低到不足子粒中总锌量的 3%^[19],所以通常把子粒中植酸和锌的分子比(植酸/Zn)作为食物中锌的生物有效性的指标,通常植酸和锌比值大于 20 时引起缺锌^[20]。子粒植酸含量多少决定于磷的吸收、转运和土壤磷的生物有效性,所以植酸和锌的分子比决定于土壤磷素状况。研究表明,施磷可增加谷子子粒的植酸浓度 25%~29%,降低锌浓度 6%~11%,使植酸/Zn 增加到近 30,因为大量施磷增加产量导致磷的大量吸收而引起锌浓度降低^[10]。本研究结果也表明,与不施磷肥的处理相比,冬小麦子粒 P/Zn 随着施磷量的增加而显著增加(表 2 和表 3),磷主要以植酸形式储存在谷物子粒

中,由此可以推断冬小麦子粒中植酸和锌的分子比也显著增加,从而显著降低了锌的生物有效性。

综上所述,由于大量施用磷肥而显著降低了冬小麦子粒锌的含量和生物有效性,而华北平原农业生产中小麦的施磷量还普遍高于本研究设计的 P2 处理,因此由于长期大量施磷造成小麦子粒含锌量和生物有效性下降进而可能导致的人体健康问题不容忽视。这就要求我们对磷肥进行优化管理,这样,既能节约大量的磷素资源,同时又能保持和提高冬小麦微量元素锌的含量,从而提高其营养品质,改善人体健康。

参 考 文 献:

- [1] 席承藩. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Xi C F. Soil in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.
- [2] 沈汉. 从农田土壤养分的 10 年演变看北京市今后施肥方向与策略[J]. 北京农业科学, 1996, 14(3): 1-3.
Shen H. Forecasting the way and strategy of fertilization in the future from the soil nutrient change of the last ten years in Beijing [J]. Beijing Agric. Sci., 1996, 14(3): 1-3.
- [3] 张有山. 北京农田土壤养分肥力提高及培肥措施的研究[J]. 土壤通报, 1996, 27(3): 107-110.
Zhang Y S. Study on the method of enhancing the agricultural soil fertility in Beijing [J]. Chin. J. Soil Sci., 1996, 27(3): 107-110.
- [4] 刘宝存, 孙明德, 吴静. 北京郊区粮田土壤养分与施肥[J]. 北京农业科学, 1999, 17(6): 30-34.
Liu B C, Sun M D, Wu J. The soil nutrient and fertilization in agricultural field of Beijing suburb [J]. Beijing Agric. Sci., 1999, 17(6): 30-34.
- [5] 钟炳南. 微量元素与食物链研究的重点和方向[J]. 广东微量元素科学, 1995, 2(10): 37-43.
Zhong B N. The focal point and direction of trace elements and food chain research [J]. Guangdong Trace Elem. Sci., 1995, 2(10): 37-43.
- [6] 徐晓燕, 杨肖娥, 杨玉爱. 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.
Xu X Y, Yang X E, Yang Y A. Transfer of zinc from soils to food chain [J]. Guangdong Trace Elem. Sci., 1996, 3(7): 21-29.
- [7] Welch R M, Graham R D. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs productive, sustainable, nutritious [J]. Field Crops Res., 1999, 60: 1-10.
- [8] 兰晓霞. 锌缺乏与婴幼儿健康[J]. 国外医学(妇幼保健分册), 2003, 14(1): 49-51.
Lan X X. Zinc deficiency and baby health [J]. Foreign Med. Sci. (Sec. Matern. Child Health). 2003, 14(1): 49-51.
- [9] Olsen S R. Micronutrient interactions[A]. In: Mordvedt J J, Giordano P M, Lindsay W L. Micronutrients in Agriculture[M]. Madison, WI: Soil Science Society of America Inc. Publisher, 1972.
- [10] Buerkert A, Haake C, Ruckwied H, Marschner H. Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in the Sahel[J].

- Field Crops Res., 1998, 57: 223-325.
- [11] 廉鸿志, 张璐, 宇万太, 沈善敏. 大剂量磷肥对作物微量元素营养的影响[J]. 土壤通报, 1993, 24(1): 27-29.
Lian H Z, Zhang L, Yu W T, Shen S M. The effect of high dose P fertilizer on micro-elements nutrient of crops [J]. China J. Soil Sci., 1993, 24 (1): 27-29.
- [12] Lonnerdal B. Dietary factors influencing zinc absorption [J]. J. Nutr., 2000, 130: 1378-1383.
- [13] 崔振岭. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理——从田块到区域尺度[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2005.
Cui Z L. Optimization of the nitrogen fertilizer management for a winter wheat-summer maize rotation system in the north China plain-from field to regional scale[D]. Beijing: Ph. D. Dissertation, China Agricultural University, 2005.
- [14] Chen X. Optimization of the N fertilizer management of a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain[D]. Stuttgart: Ph. D. Dissertation, University of Hohenheim, Germany. 2003.
- [15] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
Lu J L. Plant nutrition[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.
- [16] 张睿, 郭月霞, 南春芹. 不同施肥水平下小麦子粒中部分微量元素含量的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(1): 125-129.
Zhang R, Guo Y X, Nan C Q. Study on trace elements of wheat grain in different fertilizer treatments [J]. Acta Bot. Boreali-Occident. Sin., 2004, 24(1): 125-129.
- [17] 王兴仁, 李洁茹, 苏德纯, 等. 北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(5): 43-49.
Wang X R, Li J R, Su D C *et al.* Management of phosphorus fertilizer in long-term rotation cropping in calcareous meadow soil in Beijing [J]. J. China Agric. Univ., 1999, 4(5): 43-49.
- [18] 王夔. 生命科学中的微量元素(第二版)[M]. 北京: 中国计量出版社, 1996.
Wang K. Micro-elements in life science (Second edition)[M]. Beijing: China Metrology Publishing House., 1996.
- [19] Bosscher D, Lu Z L, Janssens G *et al.* In vitro availability of zinc from infant foods with increasing phytic acid contents [J]. Br. J. Nutr., 2001, 86: 241-247.
- [20] 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 Res., 1999, 60: 175-188.