

# 长期施肥对小麦体内各形态磷含量的影响<sup>\*</sup>

田凤娇 汪金舫<sup>\*\*</sup> 陈军平

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘要** 利用长期定位施肥试验,研究了不同施肥处理下小麦体内各种形态磷含量的变化。结果表明:不同施肥处理的小麦籽粒各形态磷含量均明显高于茎秆。籽粒磷脂态磷含量最高,平均为  $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其次为活性有机磷、活性无机磷,未知形态磷含量最少,平均为  $0.348 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。茎秆中活性无机磷含量最高,为  $0.142 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,活性有机磷含量最低,为  $0.034 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。单施有机肥处理小麦茎秆活性有机磷含量显著低于对照及其他处理。除此之外,施磷处理(PK、NP、NPK、OM 和  $1/2\text{OM}+1/2\text{NPK}$ )的小麦体内其他各形态磷含量均高于不施磷处理(CK、NK)。与对照相比,单施有机肥能显著增加小麦籽粒各形态磷、全磷和茎秆活性无机磷、未知形态磷、全磷含量;NP 处理茎秆有机磷(活性有机磷、磷脂磷)含量显著高于其他处理。不同施肥处理下,小麦籽粒中各形态磷含量与籽粒全磷含量间均呈显著正相关。

**关键词** 长期定位施肥 磷形态 小麦 籽粒 茎秆

中图分类号: S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)02-0273-04

## Effect of long-term fertilization on the content of different forms of phosphorus in wheat

TIAN Feng-Jiao, WANG Jin-Fang, CHEN Jun-Ping

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Based on a long-term fertilization experiment, the effect of different fertilizations on the content of different forms of phosphorus in wheat was investigated. The results indicate that under different treatments, the contents of different forms of phosphorus in wheat grain are higher than those in the stem. In wheat grain, lecithoid phosphorus is the highest ( $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), followed by labile organic and inorganic phosphorus; whereas the content of unknown forms of phosphorus is lowest ( $0.348 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). In the stem, the content of labile inorganic phosphorus is highest ( $0.142 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) while that of labile organic phosphorus is lowest ( $0.034 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The content of labile organic phosphorus in wheat stem under organic manure (OM) treatment is significantly lower than in the control treatment. Also the content of the other forms of phosphorus is higher under P (PK, NP, NPK, OM &  $1/2\text{OM} + 1/2\text{NPK}$ ) treatments than under non-P (CK, NK) treatments. Compared with the control treatment, the content of the different phosphorus forms and total phosphorus in wheat grain and labile inorganic P, unknown forms of P and total phosphorus in stems increases significantly under OM treatment. In wheat stem, the content of labile organic phosphorus and lecithoid phosphorus under NP treatment is higher than under other treatments. There is a significant positive correlation between the different forms of phosphorus and total phosphorus content in the grain.

**Key words** Long-term fertilization, Phosphorus form, Wheat, Grain, Stem

(Received July 23, 2008; accepted Oct. 22, 2008)

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素,它既是植物体内许多重要有机化合物的组成成分,又以多种方式参与植物体内各种代谢过程。磷对作物高

产及保持品种的优良特性有重要作用,尤其是形成磷脂的那部分磷,对作物品质有很大影响。目前,关于一些药类植物、保健品中磷脂的作用和含量分析

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40771103)资助

<sup>\*\*</sup> 通讯作者: 汪金舫(1962~),男,汉族,研究员,从事农田土壤养分利用与管理方面的研究。E-mail: jfwang@issas.ac.cn

田凤娇(1981~),女,汉族,硕士,主要从事土壤-植物体系中磷形态方面的研究。E-mail: fjtian2009@sohu.com

收稿日期: 2008-07-23 接受日期: 2008-10-22

已有很多报道<sup>[1-4]</sup>；对一些油类作物籽粒中磷脂的含量与提取也有不少研究<sup>[5,6]</sup>，但对于禾谷类作物体内磷脂态磷的研究却鲜有报道。大量研究证明，在一定范围内，随施磷量增加，作物对磷的吸收量增加<sup>[7-9]</sup>。另外，有研究发现，随施磷量增加，小麦不同生育时期的植株体内无机磷含量明显增加<sup>[10]</sup>。作物体内磷的形态不同，作用也不同，但目前的研究均局限在施磷量对植物体内磷的影响上，且很少涉及植物体内不同形态的磷。因此，本研究以 17 年长期定位施肥试验为基础，探讨不同施肥处理下小麦体内各种形态磷含量的变化，以期为合理施用磷肥，改善作物品质，提高磷肥利用率提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

肥料长期定位试验设在中国科学院封丘农业生态实验站，土壤为轻壤质黄潮土。试验始于 1989 年秋，采用小麦-玉米 1 年 2 熟轮作制。试验开始前耕层土壤(0~20 cm)理化性质为全氮 0.445 g·kg<sup>-1</sup>，全磷 0.5 g·kg<sup>-1</sup>，有机磷 22.35 mg·kg<sup>-1</sup>，pH 8.65。

试验设 CK(对照，不施肥)、NK、PK、NP、NPK、OM(有机肥)和 1/2OM+1/2NPK 7 个处理，4 次重复。小区面积 47.5 m<sup>2</sup>，分 4 个区组，随机排列。肥料品种氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为硫酸钾，有机肥以粉碎的麦秆为主。NK、NP、NPK 和 1/2OM+1/2NPK 处理均施基肥和追肥；PK 处理因不施氮肥，磷、钾肥只作基肥，不施追肥；OM 处理全季肥料作基肥一次施入。试验以等 N 量为标准，计算各处理肥料施用量；有机肥每季施用量约 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> (以鲜重计)，配施适量的大豆饼和棉仁饼，以提高有机肥含氮量，施用前分析 N、P、K 养分含量，P、K 不足部分用 P、K 化肥补足到等量(表 1)<sup>[11]</sup>。

表 1 试验田肥料用量

Tab. 1 Fertilizer rates of experiment plots kg·hm<sup>-2</sup>

施肥时期 Fertilization time	氮肥(N) N fertilizer	磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) P fertilizer	钾肥(K <sub>2</sub> O) K fertilizer
基肥 Base fertilizer	90	75	150
追肥 Dressing fertilizer	60	0	0

### 1.2 分析方法

于小麦成熟期，在各小区按“S”型路线多点采集 20 株代表性植株样品，将籽粒和茎秆分开。籽粒风干、粉碎并过 0.5~1 mm 筛，备用。茎秆于 105 杀青 30 min，75 烘至恒重，粉碎，存于广口瓶中，备用。全磷测定采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化法<sup>[12]</sup>；活性无机磷测定采用 Olsen 法<sup>[12]</sup>；活性有机磷测定采用 Bowman-Cole 分组方法<sup>[13]</sup>；磷脂磷测定采用 GB/T

5537 - 85 植物油脂检验磷脂测定法；植物未知形态磷为植物全磷减去植物活性无机磷、活性有机磷和磷脂磷的差值。数据处理采用 SPSS11.5 统计软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦体内活性无机磷含量的变化

由表 2 可知，小麦籽粒活性无机磷平均含量为 0.389 g·kg<sup>-1</sup>，低于磷脂磷和活性有机磷。不同施肥处理中，OM 处理的小麦籽粒活性无机磷含量最高，为 0.454 g·kg<sup>-1</sup>，与 CK 及其他施肥处理间差异显著，其他施肥处理及 CK 间差异均不显著。说明施用有机肥能促进籽粒中活性无机磷的积累。

小麦茎秆中活性无机磷平均含量为 0.142 g·kg<sup>-1</sup>，明显低于同处理的籽粒活性无机磷含量。不同施肥处理中，OM 处理的小麦茎秆活性无机磷含量最高，其次为 PK 处理。统计结果表明，OM 和 PK 处理的茎秆活性无机磷含量均显著高于 CK 和其他施肥处理，其余施肥处理及 CK 间差异不显著。

### 2.2 小麦体内活性有机磷含量的变化

小麦籽粒中活性有机磷平均含量为 1.060 g·kg<sup>-1</sup>，仅次于磷脂磷(表 2)。统计结果表明，6 种施肥处理的籽粒活性有机磷含量均与 CK 间差异显著，无机肥处理间及其与有机肥处理(OM 和 1/2OM+1/2NPK)间差异显著。说明施肥处理对小麦籽粒活性有机磷影响较明显。所有施磷处理的小麦籽粒活性有机磷含量均显著高于 CK。说明无论是施有机肥还是施无机磷肥，对小麦籽粒中活性有机磷的积累都有促进作用。NK 处理籽粒活性有机磷显著低于 CK。

小麦茎秆活性有机磷含量明显低于籽粒。不同施肥处理中只有 OM 处理活性有机磷含量低于 CK；NP 处理活性有机磷含量最高，为 0.052 g·kg<sup>-1</sup>；PK 处理次之；这 3 种处理与 CK 间差异显著，其他处理间及其与 CK 间差异均不显著。上述结果说明 NP 处理对促进小麦茎秆中活性有机磷的积累有显著效果，而单施有机肥则可能有利于茎秆中活性有机磷向籽粒中转运或者转化成稳定性有机磷。

### 2.3 小麦体内磷脂磷含量的变化

小麦体内磷脂磷的含量因部位不同而有很大差异。不同施肥处理中，籽粒磷脂磷含量均明显高于茎秆(表 2)。从表 2 可以看出，6 种施肥处理中，除 NK 和 NPK 处理外，其他处理的小麦籽粒磷脂磷含量均高于 CK，其中 OM 处理最高，为 1.49 g·kg<sup>-1</sup>，比对照 CK 增加 35.5%。统计结果表明，6 种施肥处理的小麦籽粒磷脂磷含量只有 OM 处理与 CK 差异达显著水平，其他处理间及其与 CK 间差异均不显著。说明施有机肥有利于小麦籽粒中磷脂磷的积累。

表 2 不同施肥处理小麦体内各种形态磷的含量  
Tab. 2 Contents of different forms-P in wheat under different fertilization treatments g · kg<sup>-1</sup>

处理 Treatment	活性无机磷 Labile inorganic-P		活性有机磷 Labile organic-P		磷脂磷 Lecithoid -P		未知形态的磷 Unkown forms-P		全磷 Total-P	
	籽粒 Grain	茎秆 Stem	籽粒 Grain	茎秆 Stem	籽粒 Grain	茎秆 Stem	籽粒 Grain	茎秆 Stem	籽粒 Grain	茎秆 Stem
CK	0.378b	0.100c	0.814e	0.027c	1.10bc	0.077bc	0.221d	0.047b	2.51de	0.252d
NK	0.373b	0.099c	0.699f	0.036bc	1.07c	0.073c	0.231d	0.062ab	2.37e	0.270d
PK	0.370b	0.201b	1.431a	0.041b	1.27ab	0.043bc	0.655a	0.082ab	3.73a	0.368b
NP	0.402b	0.129c	1.040c	0.052a	1.22bc	0.146a	0.122d	0.044b	2.79c	0.372b
NPK	0.367b	0.107c	0.911d	0.032bc	1.03c	0.073bc	0.275c	0.106a	2.58d	0.318c
OM	0.454a	0.236a	1.290b	0.017d	1.49a	0.090bc	0.508b	0.089a	3.74a	0.432a
1/2OM+1/2NPK	0.380b	0.124c	1.235b	0.033bc	1.15bc	0.121b	0.423c	0.070ab	3.19b	0.349bc
平均值 Mean	0.389	0.142	1.060	0.034	1.19	0.089	0.348	0.072	2.99	0.337

表中同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。Figures in one column followed by different letters are significantly different at 5% level.

小麦茎秆磷脂磷的含量明显低于籽粒, 平均值为  $0.089 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。各施肥处理中, NP 处理的小麦茎秆磷脂磷含量最高, 与 CK 差异显著, 其他处理间及其与 CK 间差异基本不显著。研究结果表明, 施有机肥茎秆磷脂磷含量并不比施无机磷肥高, 说明施有机肥对增加茎秆中磷脂磷含量无显著效果。

2.4 小麦体内未知形态磷含量的变化

从表 2 的数据结果分析可知, 小麦籽粒中未知形态磷的含量明显高于茎秆中的含量。6 种施肥处理中, 除 NK、NP 处理外, 其他 4 种施肥处理小麦籽粒中未知形态磷含量均高于 CK, 且与 CK 间差异显著。不同施肥处理中, PK 处理未知形态磷含量最高( $0.655 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 其次为 OM 处理。

6 种施肥处理中, 只有 NPK 和 OM 处理小麦茎秆未知形态磷含量与 CK 间差异显著, 其他处理与 CK 间差异不显著。说明无机肥配施或单施有机肥可促进小麦茎秆中未知形态磷的积累。

2.5 全磷含量的变化

从表 2 可知, 不同施肥处理的小麦籽粒全磷含量明显高于茎秆。除 NK 处理外, 5 种施肥处理小麦籽粒全磷含量均较 CK 高, 其中, OM 处理全磷含量最高, 为  $3.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比 CK 增加 49.0%。统计结果显示, 除 NK、NPK 处理外, 其他施肥处理小麦籽粒全磷含量均与 CK 间差异显著。这说明施肥处理同样影响小麦籽粒中全磷的含量。除 PK 处理外, 有机肥处理籽粒全磷含量均较无机肥处理高。

小麦茎秆中全磷含量变化与籽粒基本相同。从表 2 可以看出, 除 NK 处理外, 其他施肥处理小麦茎秆全磷含量均显著高于 CK。不同施肥处理中, OM 处理茎秆全磷含量最高, 为  $0.432 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与其他处理间差异显著。说明施磷可以增加茎秆中全磷含量, 施有机肥效果更好。这与前人研究结果一致<sup>[14]</sup>。

2.6 小麦体内各形态磷含量间的关系

对不同施肥处理下小麦体内各形态磷含量之间的相关分析表明(表 3), 小麦籽粒中磷脂磷、活性有机磷、未知形态磷与籽粒全磷呈极显著正相关, 活性无机磷与籽粒全磷呈显著正相关。籽粒中磷脂磷与其他 3 种形态磷之间均有相关性。但在茎秆中, 只有活性无机磷与全磷之间达显著正相关, 其他形态磷间及与全磷间均无相关性。

3 讨论与结论

植物体内的磷因存在部位不同, 其形态和含量亦不同。本研究发现, 在小麦成熟期, 植株体内的磷大部分集中在籽粒部分。籽粒全磷的含量占植株体内总磷量的 90%左右。这是因为小麦开花后籽粒成为主要的磷库, 成熟期籽粒中的磷可占地上部总磷含量的 90%, 因此导致茎秆中各形态磷含量降低<sup>[15]</sup>。不同施肥处理下, 各形态磷在籽粒中的含量均明显高于茎秆,说明其在各部位的积累量与施肥方式无关。本研究还发现, 小麦籽粒中磷脂磷含量最高, 而茎秆中活性无机磷含量最高。这可能是由于小麦成熟期, 生殖器官中的磷大部分以有机态贮存起来, 以供给种子的生理需求, 而该期茎秆中的磷要供给生殖器官的需要, 故以可移动的无机磷为主。相关分析表明, 小麦籽粒各形态磷与全磷间显著相关, 说明不同施肥处理下, 小麦籽粒中各形态磷的变化与其全磷的变化一致。籽粒磷脂磷与其他 3 种形态磷显著相关, 说明在作物籽粒磷的整个循环过程中, 磷脂磷与其他形态磷之间存在一个动态平衡过程, 它们之间存在着一定程度的相互影响和制约, 以维持作物生理所需。

施肥对作物生长、产量和品质均有重要影响。本研究表明, 施肥方式还影响着作物体内各形态磷

表 3 小麦体内各形态磷含量之间的相关性  
Tab. 3 Correlation between different forms-P contents in wheat

		全磷 Total-P	磷脂磷 Lecithoid-P	活性有机磷 Labile organic-P	活性无机磷 Labile inorganic-P	未知形态磷 Unkown forms-P
籽粒 Grain	磷脂磷 Lecithoid-P	0.729**				
	活性有机磷 Labile organic-P	0.928**	0.542*			
	活性无机磷 Labile inorganic-P	0.470*	0.480*	0.310		
	未知形态磷 Unkown forms-P	0.896**	0.595**	0.850**	0.296	
茎秆 Stem	磷脂磷 Lecithoid-P	0.329				
	活性有机磷 Labile organic-P	-0.040	-0.368			
	活性无机磷 Labile inorganic-P	0.819**	0.390	-0.266		
	未知形态磷 Unkown forms-P	0.211	-0.296	0.527*	-0.181	

\*表示 0.05 水平显著, \*\*表示 0.01 水平显著。\* and \*\* mean that correlations are significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

的含量。已有研究证明, 施有机肥可以增加作物全磷的含量<sup>[16]</sup>, 本研究证明单施有机肥不但可以提高小麦体内全磷的含量, 还可以促进小麦籽粒中各形态磷的含量。这可能是由于施用有机肥明显增加了土壤磷酸酶活性和作物根系活力<sup>[17,18]</sup>, 提高了土壤磷的有效性, 促进了小麦对磷的吸收。由于磷脂磷对作物品质有很大影响, 建议尽量多施有机肥, 以提高作物品质。本研究还发现, 有机肥处理反而阻碍了小麦茎秆中活性有机磷的积累, 产生这种现象的机制尚不清楚, 需进一步研究。有机无机配施(1/2OM+1/2NPK)是公认的合理施肥方式, 但本文发现, 其只对小麦全磷、未知态磷及籽粒活性有机磷有较显著的促进作用。这说明有机无机配施对小麦体内磷的形态影响效果不如单施有机肥明显。

4 种无机肥处理(NK、PK、NP、NPK)对小麦体内磷形态的影响没有有机肥处理明显。这是因为单施无机肥土壤磷的有效性较低, 而施有机肥或有机无机配施则可以提高土壤中有效磷的含量, 有利于小麦籽粒中磷的积累。由于土壤本身富钾、缺磷, 因此 NK 处理下, 小麦体内各形态磷的含量均低于其他施肥处理, 大都与 CK 间无显著差异, 籽粒活性有机磷甚至显著低于 CK, 这可能与过量施钾有关。PK 处理下, 籽粒全磷、活性有机磷、未知态磷均高于其他无机肥处理, 这是由于土壤中严重缺氮, 作物生长很差, 大量的磷被作物奢侈吸收, 积压在籽粒和茎秆中, 所以 PK 处理的磷含量较高。基于土壤富钾、缺磷、缺氮的特点来说, NP 处理是较合理的施肥方式。研究发现, 与 CK 及其他处理比, NP 处理小麦茎秆有机磷(活性有机磷、磷脂磷)显著增加, 而 NPK 处理则无明显优势。说明在该富钾土壤上, 可以减少或不施钾肥以避免浪费。

参考文献

[1] 许益民, 任仁安. 赤、北首乌中磷脂成分的分析[J]. 药物分

析杂志, 1990, 10(2): 105-107  
[2] 惠民权, 张琰, 傅经国. HPLC-ELSD 法测定磷脂的纯度和含量[J]. 药物分析杂志, 2006, 26(12): 1826-1828  
[3] 王立新, 吴启南, 吴德康, 等. 钼蓝比色法测定不同产地合子草中总磷脂的含量[J]. 中国野生植物资源, 2001, 20(3): 50-51  
[4] 梁惠花, 刘晓河, 张利民. 坝上油菜蜂花粉中磷脂的含量测定[J]. 中成药, 2003, 25(6): 504-505  
[5] 王苏闽. 植物油中磷脂含量的比色法测定[J]. 粮油食品科技, 2002, 10(3): 39-40  
[6] 刘必融. 植物磷脂的提取[J]. 生物学杂志, 2000, 17(6): 6-7  
[7] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 628  
[8] 武际, 郭熙盛, 王文军, 等. 磷钾肥配合施用对玉米产量及养分吸收的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 147-150  
[9] 何园球, 李成亮, 王兴祥, 等. 土壤水分含量和施磷量对旱作水稻磷素吸收的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 628-634  
[10] 徐关印, 刘保明, 韩宝坤, 等. 不同供磷水平对小麦植株蔗糖含量和农艺性状的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(3): 219-221  
[11] 顾益初, 钦绳武. 长期施用磷肥条件下潮土中磷素的积累、形态转化和有效性[J]. 土壤, 1997 (1): 13-17  
[12] 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: 312-314, 172-175, 179-180  
[13] Bowman R. A., Cole C.V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Sci., 1978, 125: 95-101  
[14] 赵荣芳, 邹春琴, 张福锁. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 368-372  
[15] Batten G. D., Wardlaw I. F. Redistribution of <sup>32</sup>P and <sup>14</sup>C from the flag leaf during grain development in wheat[J]. Aust. J. Plant physiol., 1987, 14: 267-275  
[16] 周焱, 罗安程. 有机肥处理对小麦根系生长、活力和磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(3): 243-248  
[17] Luo A. C., Sun X. Effect of organic manure on the biological activities associated with insoluble phosphorus release in a blue purple paddy soil[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1994, 25(13/14): 2513-2522  
[18] 罗安程, 章永松, 孙羲, 等. 有机肥对大麦根系生理代谢和磷吸收的影响[J]. 西北农业学报, 1996, 5(3): 9-12