

# 黄土旱塬冬小麦磷素含量累积动态与磷肥利用效率研究

陈璐<sup>1</sup>, 党廷辉<sup>1,2</sup>, 戚瑞生<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 利用旱作长期定位施肥试验, 研究施用磷肥对冬小麦植株磷素含量的动态变化以及磷肥利用效率的影响。结果表明, 磷肥对冬小麦植株体内含磷量的影响呈 V 型, 冬前期最高, 随着作物生长逐渐降低, 灌浆期达到最小值, 随后又有回升。冬小麦磷素累积主要集中在拔节期—开花期, 和灌浆期—成熟期 2 个阶段进行, 保证这 2 个阶段磷素供应对小麦的良好生长有重要作用。从磷肥利用效率、产量等指标来看, 在施用氮肥 90 kg/hm<sup>2</sup> 的情况下, 磷肥用量应该控制在 45~90 kg/hm<sup>2</sup> 的合理范围内。

**关键词:** 植株磷素含量; 磷素累积量; 磷肥利用率; 磷素收获指数; 肥料磷的效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0190-04

中图分类号: S512.1+1

## Dynamics of Phosphorus Accumulation and Utilization Efficiency of Winter Wheat on Dry Highlands of Loess Plateau

CHEN Lu<sup>1</sup>, DANG Ting-hui<sup>1,2</sup>, QI Rui-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Studies regarding plant phosphorus accumulation and utilization efficiency can provide scientific basis for reasonable application of phosphate. Dynamics of phosphorus content of winter wheat and utilization efficiency of winter wheat was conducted based on the long-term positional fertilization experiment on dry highland of the Loess Plateau. The results show that the phosphorus contents of winter wheat plants with application of phosphate fertilizer presented a V shape curve. Phosphorus contents of winter wheat were high during the early growth period, and decreased with the crop growth, and reached the minimum in the filling stage, and then rebounded in the last stage. Phosphorus of winter wheat accumulated mainly in two stages, i. e., stage of jointing—flowering and stage of filling—mature. Sufficient supply of phosphorus in these two stages could ensure better growth of winter wheat. In terms of phosphorus utilization efficiency, yield and other indicators, phosphate application should be controlled in a reasonable range between 45~90 kg/hm<sup>2</sup> in the scenario of nitrogen application 90 kg/hm<sup>2</sup>.

**Keywords:** plant phosphorus content; phosphorus accumulation; phosphorus utilization efficiency; phosphorus harvest index; efficiency of phosphorus fertilizer

黄土高原地区是我国重要旱作农业区<sup>[1]</sup>, 土壤贫瘠, 水资源严重缺乏, 养分和水分是限制农业发展的主要因素。实践证明, 通过增加肥料投入培肥土壤, 是提高该区粮食单产、实现农业可持续发展的关键措施<sup>[2-3]</sup>。施用磷肥是提高农作物生产的重要措施<sup>[4]</sup>。据联合国粮农组织的统计资料, 2001 年全球磷肥的消费量为  $3.31 \times 10^{10}$  kg, 同年我国磷肥消费量 8.88

$\times 10^9$  kg 占世界总量的 27%, 位居世界第一。但由于磷肥的转化率较低, 导致磷素在土壤中的大量累积。如何通过合理的土壤管理措施, 达到既能高产、培肥土壤, 又能节约资源, 减少环境污染, 是目前发展生态农业的一个重要问题<sup>[5]</sup>。

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一<sup>[6]</sup>, 磷素能提高小麦各生育时期的根系活力, 通过提高开

收稿日期: 2010-12-12

修回日期: 2011-01-20

资助项目: “973” 国家基础研究项目“磷循环过程、有效性机制及其影响因素”(2005CB121102); 中国科学院重要方向项目“旱作农田生态系统水碳氮耦合过程及碳库变化”(KZCX2-YW-424-2)

作者简介: 陈璐(1984—), 女(汉族), 山西省太原市人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力、养分行为及管理方面研究。E-mail: clcc\_006@163.com。

通信作者: 党廷辉(1964—), 男(汉族), 陕西省户县人, 研究员, 主要从事土壤与植物营养方面的研究。E-mail: dangth@ms.isw.c.ac.cn。

花、灌浆期的群体光合作用, 降低暗呼吸作用和促进灌浆中期的籽粒灌浆速率, 显著提高籽粒产量<sup>[7]</sup>。磷素的作用主要是提高单位面积穗数, 其次是千粒重<sup>[8-10]</sup>。

目前, 人们对小麦氮、磷、钾的营养机理和需肥特性已进行了大量研究<sup>[11-12]</sup>, 但是对黄土旱塬区不同用量磷肥下冬小麦磷素含量和磷肥利用效率的研究还较少。

因此, 如何在保护旱作地区生态环境的同时, 通过合理施肥来增加粮食产量, 提高土壤肥力已成为我国农业可持续发展的重点研究内容。本研究通过长期定位试验, 研究不同磷肥用量下冬小麦磷素含量累积的动态规律和磷肥利用效率等, 为合理施用磷肥提供科学的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验设在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站, 位于北纬 35° 12', 东经 107° 40', 海拔 1 200 m。试验于 1984 年布设, 在肥料试验中选取了 N<sub>90</sub>, N<sub>90</sub> P<sub>45</sub>, N<sub>90</sub> P<sub>90</sub>, N<sub>90</sub> P<sub>135</sub>, N<sub>90</sub> P<sub>180</sub> 共 5 个处理。其中, N<sub>90</sub> 表示施纯氮 90 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>90</sub> 表示施五氧化二磷 90 kg/hm<sup>2</sup>, 其它符号含义依次类推。

试验土壤为黏盖黄黑垆土, 试验前 1984 年耕层 0—20 cm 土壤含有机质 10.4 g/kg, 全氮 0.6 g/kg, 碱解氮 37.0 mg/kg, 速效磷 3.0 mg/kg, 速效钾 129 mg/kg, pH 值 8.3。试验作物为冬小麦, 选用当地主栽品种。每年 9 月中下旬播种, 次年 6 月下旬收获。播种前用农药处理土壤, 防治地下病虫。生长期间管理方式同大田。

供试小麦于 2006 年 9 月 24 日播种, 10 月 3 日出苗, 在冬前期(12 月 23 日)、拔节期(2007 年 4 月 12 日)、开花期(5 月 18 日)、灌浆期(5 月 28 日)和成熟期(6 月 23 日)分别采集植株样品, 105 °C 下杀青 30 min, 60~ 70 °C 下烘干, 粉碎, 保存。采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮后, 用 3721 型分光光度计测定全磷含量, 然后计算作物吸磷量<sup>[13]</sup>。

### 1.2 计算方法

#### (1) 不同生育阶段磷素累积量的计算。

某时期磷累积量= 某时期单位干物质磷含量 × 某时期干物质的累积量

(2) 作物磷累积速率。根据不同生育阶段磷素累积量和该阶段的持续天数计算。即:

某生育阶段磷累积速率= 某生育阶段磷累积量/ 该时期天数

(3) 磷肥利用率。按差减法求得(指作物地上部分), 按以下公式计算:

$$PUE = (A - B) / C \times 100\%$$

式中: PUE——磷肥利用率; A——供磷处理作物吸收磷素养分量; B——对照处理作物吸收磷素养分量; C——磷素供应量。

(4) 肥料磷的农学效率。指施入每 1 kg 磷肥生产籽粒的重量, 它的大小反映了施入土壤中的肥料磷的生产能力。

磷农学效率= (某施磷处理籽粒产量- 不施磷处理籽粒产量) / 施磷量

(5) 肥料磷的生理效率。指进入植株体内的单位磷肥所引起产量的增加量, 它的大小反映了进入植株体内的肥料磷的生产能力。

肥料磷的生理效率= 植株籽粒产量 / 磷素吸收量  
采用 Excel 2003 程序和 SPSS 13.0 统计分析软件对数据进行方差分析处理。

## 2 结果分析

### 2.1 不同磷肥用量对冬小麦各生育期植株含磷量的影响

不同磷肥用量对冬小麦各生育期植株含磷量的影响以冬前期含量为最高, 随后呈下降趋势, 灌浆后期植株含磷量会有所升高(图 1)。冬前期植株含磷量以单施氮肥处理最低, 只有 1.80 g/kg, P<sub>90</sub>N<sub>90</sub> 处理的含磷量最高, 且各处理均与 N<sub>90</sub> 差异达显著水平( $p = 0.013$ ); 在拔节期时各处理植株含磷量开始出现下降, 开花期时继续下降, 到灌浆期时达到最低点, N<sub>90</sub> 下降速率明显低于其它处理; 灌浆后期, 各处理的植株含磷量均有所上升。

纵观整个生育期, 施磷量对冬小麦植株含磷量的影响呈 V 型, 冬前期植株体内含磷量为最高, 随着作物生长逐渐降低, 灌浆期达到最小值, 随后又迅速升高。不同处理冬小麦整个生育期植株含磷量的平均值由低到高的顺序是:

$$N_{90} < P_{45}N_{90} < P_{90}N_{90} < P_{135}N_{90} < P_{180}N_{90}$$

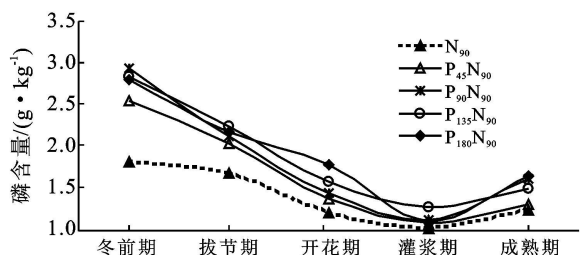


图 1 不同生育时期小麦植株含磷量

## 2.2 磷肥对小麦各生育期植株磷素累积的影响

随着小麦生育期的推进, 植株磷素累积呈现不断上升的趋势, 成熟期植株磷素累积量达到最大值( 详见图 2)。

在整个生育期  $N_{90}$  的植株含磷量最低, 且呈现出随着施磷量的增加, 磷素累积量也随之先增加后下降的趋势, 以  $P_{135}N_{90}$  处理的磷素累积量为最大, 继续增加磷肥用量则会出现磷素累积量下降, 说明在一定范围内磷肥施用, 可以显著地提高作物各生育期的磷素累积量, 超过这个范围, 磷素累积量会随着磷肥用量的增加而逐渐降低, 从而会造成浪费。结合各阶段的植株磷素累积量可以看出, 出苗期—冬前期的累积量较小, 随着冬小麦的生长, 植株磷素累积量会在冬前期—拔节期迅速增加, 到拔节期—开花期阶段施磷处理的累积量开始有所下降, 开花期以后, 各处理的磷素累积量迅速降低, 达到磷素累积量的最小值, 甚至  $P_{180}N_{90}$  处理出现了负累积。各处理在灌浆期—成熟阶段磷素累积量迅猛增加, 几乎全都达到了最大的值, 而这一阶段的累积量占到了全生育期累积量的 28.3%~50.7%。

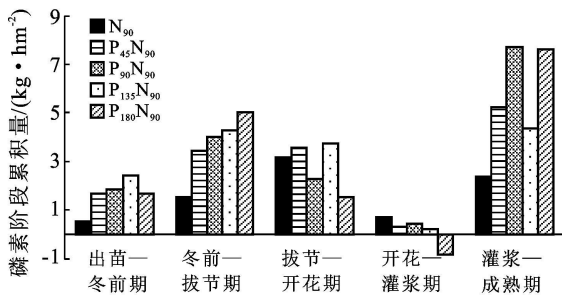


图 2 冬小麦不同生育阶段磷素累积

从磷素累积速率上来看( 图 3), 各处理在拔节期以前的累积速率都较小, 拔节期—开花期阶段累积速率开始增大, 然后在开花期—灌浆期又会有一个迅速的下降的过程, 其中  $P_{180}N_{90}$  的下降速度最快, 且达到最低值, 呈负增长趋势, 说明磷肥施用量并不是越多越好, 适量的配合施用才能达到磷肥的高效利用; 开花期之后, 磷素累积速率明显大幅度增大, 并在成熟期达到了最大值, 以  $P_{90}N_{90}$ ,  $P_{180}N_{90}$  的磷素累积量最高, 累积速率最大。由此可以看出, 植株体内的磷素累积主要集中在拔节期—开花期阶段和灌浆期—成熟阶段, 要想保证小麦的良好生长状况, 就应该保证这两个阶段作物磷素供应充足。

## 2.3 磷肥不同用量对磷肥利用率、肥料磷生理效率及产量的影响

磷肥利用率是指地上部植株从所施磷肥中吸收的磷素占施磷量的百分数, 它的大小反映了作物对施

入土壤中的磷肥的利用程度。作物的养分吸收利用率是估算农田养分移出量的重要参数<sup>[14]</sup>。

从表 1 可以看出, 磷肥利用率随着磷肥用量的增加而降低, 磷肥施用量为  $45 \text{ kg/hm}^2$  时磷肥利用率达到最高 29.73%,  $P_{90}N_{90}$  次之, 随着磷肥的施用量的继续增加, 磷肥利用率逐渐降低。

磷肥的农学效率以  $P_{45}N_{90}$  为最高, 达到  $39.02 \text{ kg/kgP}$ ,  $P_{90}N_{90}$  次之, 磷肥最大施用量  $P_{180}N_{90}$  处理最低, 仅为  $0.90 \text{ kg/kgP}$ 。磷肥的生理效率也以  $P_{45}N_{90}$  最高, 达到  $134.39 \text{ kg/kgP}$ ,  $P_{90}N_{90}$  次之,  $P_{180}N_{90}$  最低, 仅为  $11.62 \text{ kg/kgP}$ 。不同处理籽粒产量也以  $P_{45}N_{90}$  最高, 磷肥超过  $90 \text{ kg/hm}^2$  产量开始下降。

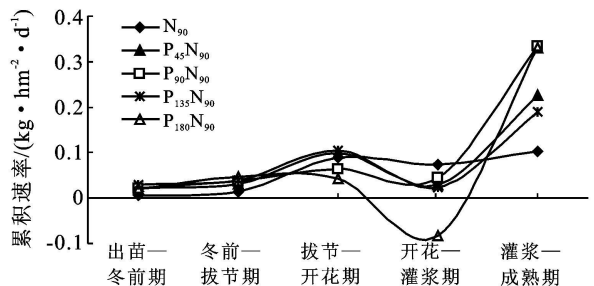


图 3 冬小麦不同生育阶段磷素累积速率

表 1 的结果显示, 磷肥利用率、肥料磷农学效率和肥料磷的生理效率均随着磷肥用量的增加而不断下降, 且各处理间达到了显著水平, 说明磷肥用量可以影响冬小麦生理状况。

$P_{45}N_{90}$  处理的磷肥利用率、肥料磷效率最高, 也就是说施氮量相同, 施磷量为  $45 \text{ kg/hm}^2$  时磷肥利用率和肥料磷效率达到最高水平。当磷肥用量超过  $90 \text{ kg/hm}^2$  后, 不但磷肥利用率降低, 而且产量开始下降, 说明磷肥并不是施用量越高越好, 磷肥施用过多不仅降低了利用率, 而且会造成浪费。

由此可以看出, 在施用氮肥  $90 \text{ kg/hm}^2$  的情况下, 黄土旱塬区磷肥合理施用量应为  $45\sim 90 \text{ kg/hm}^2$ 。

表 1 不同磷肥水平对磷肥利用率和肥料磷效率的影响

处理	磷肥利用率 PU E/ %	肥料磷农 学效率	肥料磷生 理效率	籽粒产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
$N_{90}$	—	—	—	2 741
$P_{45}N_{90}$	12.98c	39.02d	134.39b	3 507
$P_{90}N_{90}$	8.79b	19.51c	125.27b	3 507
$P_{135}N_{90}$	4.91a	9.63b	85.60a	3 308
$P_{180}N_{90}$	3.67a	0.90a	11.62a	2 811

注: 同列数据后不同小写字母表示 5% 或 1% 显著水平。

## 3 结论

黄土区土壤磷素的供给能力普遍较低, 磷肥的增产效益显著<sup>[15]</sup>, 但通过长期的磷肥投入, 明显提高土

壤磷含量<sup>[4,5,15]</sup>。此外,依据本研究的结果,土壤磷肥对冬小麦生长前期的作用最为显著。冬小麦植株对磷素累积主要集中在拔节—成熟期,但在开花—灌浆期间植株体内的磷素含量会出现负增长。在此时期磷素主要用于增加籽实饱满度,在小麦籽粒中积累较多<sup>[14]</sup>,因此植株中磷素含量会明显降低,有力证明增施磷肥,可以提高土壤中速效磷的浓度,有利于植株叶片对磷素的吸收转化并向籽粒中输送,增加籽粒中磷素的积累,有利于粒重的增加和蛋白质含量的提高<sup>[7-10]</sup>,有利于植株对磷素的吸收转化<sup>[16]</sup>。然而从磷肥利用效率、产量等指标看,在施用氮肥 90 kg/hm<sup>2</sup> 的情况下,磷肥用量并非越多越好,应该控制在 45~90 kg/hm<sup>2</sup> 的合理范围。当磷肥用量超过 90 kg/hm<sup>2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 时,磷肥利用率的下降明显,而且造成资源浪费。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈伦寿. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984: 7-10.
- [2] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞, 等. 黄土区长期定位培肥试验对土壤肥力的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 37-39.
- [3] 郝明德, 姚振镐, 韩贵杰, 等. 渭北旱塬地区粮食作物优化施肥模式的研究[C] // 李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究. 陕西 西安: 科学技术文献出版社, 1991.
- [4] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 33-39.
- [5] 来璐, 郝明德, 彭令发. 黄土旱塬长期施肥条件下土壤磷素变化及管理[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 68-70.
- [6] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. P 肥施入土壤后的变化进程及对 P 淋失的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 80-83.
- [7] 岳寿松, 于振文. 磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J]. 山东农业科学, 1994 (1): 13-15.
- [8] 徐强. 不同时期缺磷、供磷对小麦产量形成和器官建成的影响[J]. 山东农业科学, 1987(2): 14-18.
- [9] 徐强. 冬小麦追施磷肥适宜时期的研究[J]. 山东农业科学, 1987(5): 6-9.
- [10] 区沃恒, 焦志勇, 傅显华. 小麦的磷素营养[J]. 中国农业科学, 1978(3): 49-54.
- [11] 韩燕来, 介晓磊, 谭金芳, 等. 超高产冬小麦氮磷钾吸收、分配与运转规律的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 908-915.
- [12] 胡田田, 刘翠英, 李岗, 等. 施肥对土壤供肥和冬小麦养分吸收及其产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(3): 36-41.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 243-244.
- [14] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 230-235.
- [15] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 1989: 286-297.
- [16] 李建奇. 氮、磷营养对黄土高原旱地玉米产量、品质的影响机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1042-1047.