

# 黄土高原长期施用磷肥效应研究

李慧成<sup>1</sup>, 郝明德<sup>2</sup>, 何晓燕<sup>2</sup>, 史培<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 农学院, 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:**以黄土高原长期定位试验为基础, 研究施一定量氮肥(90 kg/hm<sup>2</sup>)的前提下, 长期施用磷肥对黄土高原旱作冬小麦的肥料效应。结果表明, 长期施用磷肥的农田施磷仍能显著提高小麦的产量, 增产量达 1 393.75~2 121.00 kg/hm<sup>2</sup>, 增产率为 48.41%~73.67%。本试验中施磷 39.6 kg/hm<sup>2</sup> 时小麦产量达最大值 5 000 kg/hm<sup>2</sup>, 这与小麦成穗数最大时的施肥量结果一致; 产量与施磷量关系用回归方程  $Y = -0.8667X^2 + 82.641X + 3008.4$  ( $R^2 = 0.92$ ) 拟合效果良好; 施磷主要是通过影响小麦成穗数来影响小麦产量, 而对穗粒数和千粒重的促进作用不明显; 施磷还可促进小麦对氮磷钾养分的吸收利用, 提高肥料的肥效和利用率; 施磷过少不能满足作物需求, 小麦产量较低, 施磷过多小麦产量不会随施肥量的增加继续提高, 反而有一定幅度的下降。

**关键词:** 黄土高原; 小麦; 磷肥施用效应

中图分类号: S143.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)增刊-0279-04

## Effect of Long-term P Fertilization on Wheat Yield of Loess Plateau

LI Huicheng<sup>1</sup>, HAO Mingde<sup>2</sup>, HE Xiaoyan<sup>2</sup>, SHI Pei<sup>2</sup>

(1. Agronomy College, Northwestern Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Based on the long-term fertilization experiment of Loess Plateau, the effect of long-term P fertilization on winter wheat yield was studied under certain amount of N fertilizer (90 kg/ha). The results showed that the yield of wheat with P fertilization is still increased obviously in the field with long-term P fertilization. The wheat yield increased by 1 393.75–2 121.00 kg/ha and 48.41%–73.67% higher compared to the control treatment. The wheat yield reached the highest value 5 000 kg/ha in the P treatment of 39.6 kg/ha, which was consistent with the value of P fertilization when the spike number was highest. The relationship between yield and the amount of P fertilizer application fit the regression equation  $Y = -0.8667X^2 + 82.641X + 3008.4$  ( $R^2 = 0.92$ ) well, P fertilizer mainly influenced the yield of wheat by changing spike number per ha, however, its impact on both of grains per spike and 1 000 grains yield was not obvious. The P fertilization can also promote the absorption and utilization of N, P, K in wheat, and improved fertilizer efficiency and fertilizer use efficiency. Too little P fertilizer can not meet the demand of crops and the wheat yield was low, the wheat yield will not continue to raise with the increasing of amount of P fertilizer when excessive amount of P fertilizer was used, on the contrary, certain decrease happened.

**Key words:** Loess Plateau; Winter wheat; Effect of P fertilization

磷是植物生长必需的三大营养元素之一, 磷素施用效应研究对农业生产有重要意义<sup>[1]</sup>。国内外大量研究表明: 合理施用磷肥在提高作物产量<sup>[2-6]</sup>, 改善作物品质<sup>[5,6]</sup>, 增加土壤肥力<sup>[4]</sup>, 提高肥料利用

率<sup>[5]</sup>等方面效果显著。近年来, 由于农田磷肥的长期施用, 磷素开始在土壤中积累富余, 而生产中磷肥施用量仍沿用以前经验标准, 与目前土壤肥力水平和作物需求水平不相适应, 施用量往往大于作物需

收稿日期: 2008-08-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-4243); 国家科技支撑计划(2006BAD05B07); 中国科学院重大项目(KSCX1-YW-09-07)

作者简介: 李慧成(1983-), 男, 内蒙古人, 硕士, 主要从事作物栽培与耕作学研究。

通讯作者: 郝明德(1957-), 男, 陕西华县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤肥力与黄土高原综合治理研究。

求量<sup>[7,8]</sup>,而磷素过多则不利于作物达到较高的产量,降低施肥的效益,影响作物品质<sup>[1]</sup>,对生态环境也会造成一定的影响<sup>[9]</sup>。如何提高磷素的利用率,发挥磷素的有效性是当前研究中的一个重要问题<sup>[10-15]</sup>。长期肥料试验由于长期性、准确性及包含的丰富信息,较常规试验有着无法比拟的优越性,因此对于农业研究有重要的意义<sup>[16-18]</sup>。

目前磷肥施用不当成为农业增产的一个限制因素。本试验就黄土高原无灌溉条件下以长期肥料试验为基础对冬小麦长期施用磷肥的增产效应进行了研究,以期对黄土高原农业生产中磷肥的施用提供一定的依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

长期定位试验开始于1984年,试验地位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村塬地上,本区属典型的黄土高原旱作农业区,年平均降水为578.5 mm,年均气温9.1℃,无霜期171 d,区内黄土堆积深厚,属黄盖粘黑垆土。试验开始时,耕层土壤养分含量为有机质10.5 g/kg,全氮0.57 g/kg,碱解氮37.0 mg/kg,全磷0.659 g/kg,有效磷3.0 mg/kg,速效钾129.3 mg/kg,土壤肥力属中等水平,地下水埋深60 m。为了便于分析,我们采用生育年(生育期+体闲期)概念,即从小麦收获后的体闲期(7-9月)和生育期(10月-次年6月)的降水量划分不同降水年型,与多年平均降雨578.5 mm相比,以降水量增减在10%以内为常态年,以降水量减少在10%以上为干旱年,以降水量增加10%以上为丰水年<sup>[8]</sup>。试验区2005生育年降雨量524.6 mm,因此属降雨量较少的常态年。

### 1.2 试验设计

本试验以磷肥为基本试验因子,在施氮肥90 kg/hm<sup>2</sup>的基础上共设5个处理,施磷量分别为0(对照),19.8,39.6,59.4,79.2 kg/hm<sup>2</sup>。小区面积22.2

m<sup>2</sup>,3次重复,顺序排列。氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,均在播前做基肥一次性施入土中。种植作物为冬小麦长武134,于2004年9月20日播种,2005年6月18日收获,田间管理同大田。

### 1.3 测定项目与方法

2005年小麦收获时进行考种,并按小区测定产量和生物重,取样测定各小区籽粒和茎秆中的氮、磷、钾元素的含量。植株氮磷钾的含量分别用凯氏定氮法、钼蓝比色法、原子吸收光谱法测定。

试验数据采用SAS软件和Microsoft Excel进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施磷对小麦产量的影响

施用磷肥能显著提高小麦的产量,增产量为1 393.75~2 121.00 kg/hm<sup>2</sup>,增产率达48.41%~73.67%;施磷39.6 kg/hm<sup>2</sup>时产量达最大值5 000.00 kg/hm<sup>2</sup>,各施磷处理间产量差异显著;产量随施磷量的增加呈先增加后又开始下降的趋势,当磷肥施用量达一定水平后,磷肥用量的增加将不再促进小麦产量的提高,反而对其有一定的抑制作用。施磷量和产量的关系用回归方程 $Y = -0.8667X^2 + 82.641X + 3008.4$  ( $R^2 = 0.92$ )拟合效果良好,通过方程计算得施磷47.68 kg/hm<sup>2</sup>时小麦产量最大为4 978.38 kg/hm<sup>2</sup>,结果与实际相近,当地生产实践中确定磷肥施用量可参考此方程。

施磷在促进籽粒产量提高的同时,也增加茎叶的产量,使小麦生物量也明显提高;随施磷量的增加,小麦生物量的变化趋势类似于籽粒产量。

肥料对产量的贡献率=(施肥区产量-无肥区产量)/施肥区产量。肥料对产量的贡献率随施磷量的增加呈先增加后降低的趋势,施磷39.6 kg/hm<sup>2</sup>时施用磷肥对产量的贡献率达到最大值42.42%。适当施磷才是提高肥料对产量贡献率的有效途径。

表1 施磷对小麦产量的影响

Tab. 1 Effect of P fertilizer application on grain yield of winter wheat

处理 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	产量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	0.05显著 水平 Significant level	增产量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Increasing yield	增产率/% Ratio increasing yield	生物量 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Biomass	0.05显著水平 Ratio increasing yield	肥料对产量的 贡献率/% Contribution rate
0	2 879.00	d	-	-	9 402.75	d	-
19.8	4 537.75	b	1 658.75	57.62	12 982.25	a	36.55
39.6	5 000.00	a	2 121.00	73.67	12 982.25	a	42.42
59.4	4 522.50	b	1 643.50	57.09	12 414.00	b	36.34
79.2	4 272.75	c	1 393.75	48.41	11 192.75	c	32.62

### 2.2 施磷对肥料肥效的影响

肥效以施用1 kg N、P化肥增产的小麦产量数表

示。施磷可以提高氮肥的肥效,施氮39.6 kg/hm<sup>2</sup>时氮肥肥效达最大值23.57 kg/kg,施磷量继续增加氮肥肥

效开始下降; 施磷 19.8 kg/hm<sup>2</sup> 时磷肥的肥效最大, 以后随施磷量的增加磷肥肥效逐渐下降。施用适量的磷肥可使氮磷肥的肥效同时达到一个较高的值。

表 2 施磷对肥效的影响

处理 / (kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	氮肥肥效 / (kg/kg) Efficiency of N fertilization	磷肥肥效 / (kg/kg) Efficiency of P fertilization
19.8	18.43	83.78
39.6	23.57	53.56
59.4	18.26	27.67
79.2	15.49	17.60

## 2.3 施磷对小麦产量构成因素的影响

小麦的产量构成因素包括穗数、每穗粒数和粒

表 3 施磷对小麦产量构成因素的影响

处理 / (kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	成穗数 / (万个/hm <sup>2</sup> ) Spike No. per hm <sup>2</sup>	0.05 显著性 Significant level	穗粒数 / 个 Grains per spike	0.05 显著性 Significant level	千粒重 / g 1 000 grains yield	0.05 显著性 Significant level
0	441.89	b	23.23	ab	45.72	a
19.8	551.94	ab	27.33	a	44.59	a
39.6	618.64	a	24.63	ab	44.78	a
59.4	436.89	b	22.07	b	45.40	a
79.2	581.96	ab	21.27	b	45.63	a

## 2.4 施磷对小麦养分吸收量的影响

作物对养分的吸收量是衡量肥料对作物有效性的依据。本试验中各施磷处理的吸氮量、吸磷量、吸钾量都明显高于不施磷, 说明施磷不仅可以提高作物对磷素本身的吸收, 还可以促进作物对氮素、钾素等其他养分的吸收, 改善作物的品质。吸氮量和吸钾量随施磷量的增加呈先增加后降低的趋势, 磷肥施用过多时就会对氮钾的吸收有抑制作用; 吸磷量随施磷量的增加而增加, 适当加大施磷量可以增加

小麦对磷的吸收。

小麦所吸收的氮素和磷素大部分最终积累在籽粒中, 而钾素则大部分积累在茎秆中。随施磷量的增加小麦籽粒同茎秆中氮磷钾积累量的变化趋势基本一致。施磷可以促进籽粒和茎秆中氮磷钾元素的积累, 但施磷过多茎秆中的氮磷元素积累量下降到低于不施磷水平。适当施磷是提高小麦品质的有效途径。

表 4 施磷对小麦养分吸收量的影响

处理 / (kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	氮 / (kg/hm <sup>2</sup> ) N			磷 / (kg/hm <sup>2</sup> ) P			钾 / (kg/hm <sup>2</sup> ) K		
	籽粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total	籽粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total	籽粒 Grain	茎秆 Straw	总量 Total
0	52.80	30.14	82.94	7.31	2.69	10.00	9.27	65.89	75.16
19.8	80.50	43.91	124.41	11.30	3.63	14.93	14.07	79.55	93.61
39.6	78.65	27.38	106.03	12.30	2.49	14.79	15.25	79.10	94.35
59.4	62.59	22.10	84.69	13.07	2.54	15.61	14.65	75.68	90.33
79.2	67.89	24.29	92.18	14.14	3.06	17.20	14.19	70.45	84.63

## 2.5 施磷对肥料利用率的影响

养分间的交互作用对于提高施肥的效益有重要意义。本试验可以看出磷肥的施用可以明显促进氮肥的吸收, 施磷处理吸氮量较对照增加 1.75~41.47 kg/hm<sup>2</sup>, 氮肥的利用率较对照提高 1.84%~46.08%, 施磷 19.8 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥的利用率最大, 较对照提高了 46.08%; 随着施磷量的不断增加, 氮肥的

吸收量和利用率呈下降趋势; 随施磷量的增加作物吸收的磷素虽不断增加, 但由于施用磷肥的量过大, 磷肥的利用率不断下降, 造成土壤磷素的大量积累, 本试验中磷肥的利用率随施磷量的增加从 24.90% 下降到 9.09%, 下降了 15.81%。施磷同时促进小麦对钾素的吸收利用。施用适量磷肥, 合理利用肥料间的交互作用就可以达到少投入高效益的目的。

表 5 施磷对肥料利用率的影响

Tab. 5 Apparent efficiency of P fertilization per year of wheat

处理 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	吸氮较对照增加 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Increased N uptake	氮肥利用率提 高/% Increased efficiency of N	吸磷较对照增加 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Increased P uptake	磷肥利用率提 高/% Increased efficiency of P	吸钾较对照增加 /(kg/hm <sup>2</sup> ) Increased K uptake
0	-	-	-	-	-
19.8	41.47	46.08	4.93	24.90	18.45
39.6	23.09	25.65	4.79	12.10	19.19
59.4	1.75	1.94	5.61	9.45	15.17
79.2	9.24	10.27	7.20	9.09	9.47

2.6 施磷对小麦收获指数的影响

收获指数是指籽粒中的养分吸收量与植株地上部分养分吸收总量间的比值,表征作物吸收的养分向籽粒中运转的情况。施磷后,小麦的氮磷钾收获指数比不施磷均有明显提高,施磷后氮收获指数平均为 71.61%,较对照分别提高 7.95%,磷收获指数平均为 81.20%,较对照分别提高 8.07%,钾收获指数平均为 16.04%,较对照分别提高 3.71%,说明磷肥的施用促进小麦植株的养分向籽粒转移;其中氮磷的收获指数均随施磷量的增加呈先增加后降低的趋势,适当施磷能有效提高小麦收获指数;施磷 39.6 和 59.4 kg/hm<sup>2</sup> 时,小麦氮、磷收获指数分别达到最大值 74.18%, 83.72%;钾收获指数随施磷量增加呈一直上升的趋势,表明磷肥对于钾素在作物中的转移利用有明显的促进作用。

表 6 施磷对小麦收获指数的影响

Tab. 6 Effect of P fertilization treatment on N, P, K harvest index of wheat

处理/(kg/hm <sup>2</sup> ) Treatments	harvest index of wheat			%
	N	P	K	
0	63.66	73.12	12.33	
19.8	64.70	75.68	15.03	
39.6	74.18	83.16	16.16	
59.4	73.91	83.72	16.22	
79.2	73.65	82.22	16.76	
均值 Average	71.61	81.20	16.04	

3 讨论

施用磷肥小麦的籽粒产量和生物量都显著提高。通过建立拟合方程后计算得施磷量 47.68 kg/hm<sup>2</sup>时小麦产量达最大值 4 978.38 kg/hm<sup>2</sup>,适当施磷才能获得小麦高产。施用磷肥可显著提高小麦的分蘖数和成穗数,但施磷过多无效分蘖过多,无效消耗加大,抑制成穗数的提高。施磷 39.6 kg/hm<sup>2</sup> 时的成穗数最大,这与产量结果一致。施用磷肥对于穗粒数的提高也有一定的促进作用但对千粒重的影响作用不很明显。因此施用适量的磷肥以达到较高的成穗数是提高小麦产量的关键。施用磷肥可促进养分间的交互作用,施磷可明显促进小麦对氮肥的

吸收,提高了氮肥的肥效、肥料对产量的贡献率及肥料的利用率。施磷 19.8 kg/hm<sup>2</sup> 时氮肥的肥效最大,施磷 39.6 kg/hm<sup>2</sup> 时氮肥的利用率和肥料对产量的贡献率最大。综合施磷 19.8 kg/hm<sup>2</sup> 时磷肥的肥效最大,施磷 19.8~ 39.6 kg/hm<sup>2</sup>,此时肥料的效益、利用率和小麦的产量均达到较理想的水平。施磷肥可明显促进小麦对氮磷钾三大元素的吸收利用。本试验证明不仅植株的氮磷钾吸收量增加,其收获指数也得到大幅度提高,小麦的营养品质得到改善。

参考文献:

[1] 孙 羲,郭 鹏.植物营养与肥料[M].北京:中国农业出版社,1991:74-99.  
 [2] 吴梅菊,刘荣根.磷肥对小麦分蘖动态和产量的影响[J].江苏农业科学,1998,1:48-49.  
 [3] 杜承林,祝 斌,陈小琴,等.高产小麦对磷的需求与磷肥合理施用研究[J].土壤,1998,5:239-242.  
 [4] 张少民,郝明德,柳燕兰.黄土区长期实用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J].西北农林科技大学学报,2007,35(7):160-163.  
 [5] 孙慧敏,于振文,颜 红,等.不同土壤肥力条件下施磷量对小麦产量、品质和磷肥利用率的影响[J].山东农业科学,2006,3:45-47.  
 [6] 王旭东,于振文.施磷对小麦产量和品质的影响[J].山东农业科学,2003,6:35-36.  
 [7] 王旭光,郝明德,李建民.王东沟小流域土壤养分变化研究[J].水土保持研究,2003,10(1):82-84.  
 [8] 郝明德,王旭刚,党廷辉,等.黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析[J].作物学报,2004,30(11):1108-1112.  
 [9] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策I.21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,34:1008-1017.  
 [10] 陈伦寿.应正确看待化肥利用率[J].磷肥与复肥,1996(4):4-7.  
 [11] 朱兆良.肥料与农业和环境[J].大自然探索,1998,17(4):25-28.  
 [12] Zhu Y G, Howes N K, Smith S E. Phosphorus uptake and utilization efficiencies of different wheat cultivars based a sand culture screening system[J]. Pedosphere, 2002, 12: 329-337.  
 [13] Siddique M T, Robinson J S. Differences in phosphorus retention and release in soils amended with animal manures and sewage sludge[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1421-1428.  
 [14] 林 葆,艾 卫.磷肥后效及利用率的定位试验[J].土壤肥料,1995(6):1-5.  
 [15] 程传敏,曹翠玉.干湿交替过程中石灰土壤无机磷的转化及有效性[J].土壤学报,1997,34:282-291.  
 [16] 沈善敏.长期土壤肥力试验的科学价值[J].植物营养与肥料学报,1995(3):1-9.  
 [17] 张凤华,贾 可,刘建玲,等.土壤磷的动态积累及土壤有效磷的产量效应[J].华北农学报,2008,23(1):168-172.  
 [18] 冯 伟,周晓芬,杨军芳.设施蔬菜土壤积累态磷、钾养分的有效利用研究[J].华北农学报,2008,23(增刊):193-196.