

黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性 及土壤肥力的影响

张少民¹, 郝明德², 柳燕兰¹

(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] 为了明确长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性和土壤肥力的影响, 通过 21 年的黄土高原旱地长期定位肥料试验, 测定了冬小麦每株有效小穗数、穗粒数、成穗数、千粒重和干物质质量以及植株和土壤中的氮、磷养分含量。结果表明, 合理施用磷肥 ($45 \sim 135 \text{ kg/hm}^2$) 能提高冬小麦穗粒数和千粒重, 并能显著提高每株有效小穗数、成穗数和冬小麦抽穗期后干物质累积量, 继而显著提高产量, 其中当磷肥施用量为 135 kg/hm^2 时, 产量最高, 为 $2\,869.0 \text{ kg/hm}^2$, 但磷肥施用量过大 (达到 180 kg/hm^2) 时, 成穗数和抽穗期后干物质累积量显著降低, 导致产量显著下降; 冬小麦的氮素累积动态呈先增加后下降的趋势, 增施磷肥能增加冬小麦吸氮量, 但到成熟时, 冬小麦地上部分出现氮素损失, 损失量达 $13.4\% \sim 44.2\%$; 长期施用磷肥能增加土壤有机质和氮素含量, 并显著提高土壤磷素含量, 其中全磷含量增加 $10.7\% \sim 64.5\%$, 速效磷含量增加 $234.6\% \sim 667.3\%$ 。长期合理施用磷肥, 能提高冬小麦产量、吸氮量以及土壤中有有机质和氮磷养分含量。

[关键词] 黄土区; 冬小麦; 磷肥施用量; 土壤肥力

[中图分类号] S512.1⁺10.62

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)07-0159-05

Effects of long-term application of P fertilizer on the yield of winter wheat and characteristic of N absorption and soil fertility in dry-land of Loess Plateau

ZHANG Shao-ming¹, HAO Ming-de², LIU Yan-lan¹

(1 College of Resources Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract : An experiment of 21-year-long-term application of P fertilizer was carried out to study the effects on the yield of winter wheat, characteristic of N absorption and soil fertility in dry-land Loess Plateau. The avail spikelets per spike, grains per spike, spike no. per hm^2 , 1 000 grains yield and the dry matter accumulation of winter wheat were measured, as did the total N, P in both plants and soil. The results showed that the grains per spike and 1 000 grains yield increased, especially the avail spikelets per spike, spike no. per hm^2 and the dry matter accumulation during the period from jointing to filling increased significantly with the application of P fertilizer, so the yield of winter wheat increased significantly. The yield of treatment P_3 ($135 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$) was higher than that of other treatments, which was $2\,869.0 \text{ kg/hm}^2$. But the yield of treatment P_4 ($180 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$) decreased significantly, because of spike no. per hm^2 and the dry matter accumulation during the period from jointing to filling decreasing significantly. The amount

* [收稿日期] 2006-05-18

[基金项目] 国家“973”计划项目 (2005CB121101); 中科院农业项目 (kzcxl-yw-N-15-04); 中科院知识创新方向性项目 (kzcxl-yw-424-3)

[作者简介] 张少民 (1979 -), 男, 陕西城固人, 在读硕士, 主要从事植物营养与生态环境研究。

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

of N accumulation of winter wheat increased during the period from jointing to filling, but decreased by 13.4 % - 44.2 % after filling. It increased the amount of N absorption with application of P fertilizer. Long-term application of P fertilizer increased soil organic matter and soil N, especially increased soil P significantly. The total P and available P of soil increased by 10.7 % - 64.5 % and 234.6 % - 667.3 % respectively. The yield and amount of N absorption of winter wheat were increased with long-term application of P fertilizer (45 - 135 kg P_2O_5 /hm²).

Key words: Loess Plateau; winter wheat; phosphate fertilizer application; soil fertility

磷是小麦生长发育所必需的大量营养元素之一,参与组成植物体内许多重要的化合物,是植物体生长代谢过程所不可缺少的,小麦所利用的磷素,主要来源于土壤。我国北方旱地土壤的全磷含量一般较高,而速效磷含量却不高^[1],施用磷肥是提高小麦产量的重要措施。关于磷肥对小麦产量的影响和磷肥利用率的研究,前人已有较多报道^[2-5],而关于黄土高原地区不同磷肥施用量对冬小麦产量及吸氮特性的研究较少。本研究通过定位肥料试验,探讨了长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性和土壤肥力的影响,以期当地冬小麦合理施肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期施肥定位试验位于黄土高原中南部的陕西省长武县十里铺村塬地上,塬面平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄盖粘黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好,肥力中等。试验地海拔 1 200 m,多年平均降水 578.5 mm,年均气温 9.1 ℃, 10 ℃积温 3 029 ℃,无霜期 171 d,属暖温带半湿润大陆性季风气候。1984 年布设试验时耕层土壤有机质含量为 10.5 g/kg,全氮含量为 0.57 g/kg,碱解氮含量为 37.0 mg/kg,全磷含量为 0.659 g/kg,有效磷含量为 2.0 mg/kg,速效钾含量为 129.3 mg/kg, pH 8.3。试验地土壤养分含量、地貌特征在黄土高原沟壑区有一定代表性。

1.2 试验设计

试验从 1984 年开始连续种植冬小麦,并一直按试验设计施用磷肥。本试验以磷肥为基本供试因子,设 CK、P₁、P₂、P₃ 和 P₄ 5 个处理,施磷量(按 P_2O_5 计)分别为 0, 45, 90, 135 和 180 kg/hm²;氮肥基施, N 用量为 90 kg/hm²。试验小区面积 22.2 m²,每处理 3 次重复,顺序排列。2004 年小麦播种期为 09-20,收获期为翌年 06-18。氮肥用尿素,磷肥用过磷酸钙,肥料在播种前一次性施入,田间管理同大田。

1.3 测定项目

分别于小麦拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期和成熟期采集植物样品,测定其产量、干物质质量和氮、磷养分含量,同时测定每株有效小穗数、穗粒数、成穗数和千粒重。产量为收获时小区籽粒重;干物质质量用加热干燥法(105 ℃杀青 0.5 h, 60 ~ 70 ℃烘至恒重)测定;分解后的籽实和秸秆经风干、粗粉碎、混匀后取样装瓶保存,分析前再细粉碎,植物样品中氮含量采用开氏定氮法测定,磷含量采用钼兰比色法测定。

采集收获时各处理 0 ~ 20 cm 土层 3 个重复的混合样,自然风干,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用以测定土壤中养分含量,其中土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,全氮含量采用开氏定氮法测定,全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定,速效氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定^[6]。

2 结果与分析

2.1 施用磷肥对冬小麦干物质累积量的影响

干物质累积是冬小麦经济产量形成的基础,以抽穗期为界,将冬小麦干物质生产分为前期和后期,抽穗期前(包括抽穗期)生产的干物质大多以结构物质的形态固定下来,主要用来建造营养器官和穗器官,抽穗期后生产的干物质大多用来建造和充实籽粒。因此,要求抽穗期前、后干物质生产具有合理结构,以保持库源平衡^[7-8]。由表 1 可知,在抽穗期前,与对照相比, P₁ 处理的冬小麦干物质累积量无明显变化, P₂、P₃ 和 P₄ 处理的累积量分别比对照增加 30.0 %, 13.9 % 和 95.9 %。抽穗期后磷处理的干物质累积量显著增加,与对照相比, P₁、P₂、P₃ 和 P₄ 处理分别增加了 241.1 %, 180.0 %, 248.0 % 和 85.3 %;与 P₃ 处理相比, P₄ 处理的干物质累积量显著下降,下降了 1 894.0 kg/hm²。P₁、P₂ 和 P₃ 处理抽穗期前、后干物质累积量比例为 0.68 ~ 1.1, 后期干物质累积量较高,可保证有足够的干物质向籽粒

运输,从而为籽粒充实提供了较高的物质来源,有利于提高经济产量。而 P₄ 处理抽穗期前、后干物质累积量比例为 2.4 : 1,表明施磷量过大(180 kg/hm²),冬小麦前期干物质累积量大而后期干物质累积量小,影响了后期的生殖生长,物质生产结构不合理。由此可知,合理的磷肥施用量(45 ~ 135 kg/hm²)能显著提高冬小麦抽穗期后的干物质累积量,从而为获得高产提供物质保障。

表 1 施用磷肥对冬小麦干物质积累量的影响

| Table 1 Effect of P fertilizer application on dry matter accumulation of winter wheat kg/hm ² | | | |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| 处理 Treatments | 出苗期-抽穗期 From seedling to earing | 灌浆期-成熟期 From filling to maturation | 合计 Total |
| CK | 2 727.6 a | 1 163.7 a | 3 891.9 a |
| P ₁ | 2 664.0 a | 3 969.0 d | 6 533.0 b |
| P ₂ | 3 546.0 c | 3 328.0 c | 6 874.0 c |
| P ₃ | 3 108.0 b | 4 050.0 d | 7 158.0 d |
| P ₄ | 5 342.8 d | 2 156.0 b | 7 498.8 e |

注:同列数据后标相同字母者表示差异不显著($P>0.05$),标不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Notes: Same letters in each column indicate in significant difference ($P>0.05$), different letters indicate significant difference ($P<0.05$). The following table is the same.

表 2 不同施磷处理下的小麦产量及其构成因素

| Table 2 Grain yield and yield composition of winter wheat under different P application treatments | | | | | |
|--|--------------------------------------|-------------------------|---|-----------------------------|--|
| 处理 Treatments | 每株有效小穗 Avail. spikelets per spike | 穗粒数 Grains per spike | 成穗数/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Spike No. Per hm ² | 千粒重/g 1 000 grains yield | 产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield |
| CK | 9.4 b | 14.2 a | 289.2 b | 46.6 a | 1 077.8 d |
| P ₁ | 10.3 a | 15.9 a | 398.8 a | 47.4 a | 2 216.3 c |
| P ₂ | 11.8 a | 18.6 a | 434.8 a | 49.7 a | 2 300.0 c |
| P ₃ | 11.6 a | 18.0 a | 454.0 a | 49.9 a | 2 869.0 a |
| P ₄ | 11.5 a | 18.3 a | 420.0 a | 48.9 a | 2 371.0 b |

2.3 施用磷肥对冬小麦吸收氮素营养的影响

2.3.1 吸氮强度 由图 1 可以看出,冬小麦生育期内不同磷处理的吸氮强度均呈单峰曲线变化,其中出苗期至孕穗期不同处理的吸氮强度均较低,为 0.11 ~ 0.68 kg/(hm² · d);孕穗期后冬小麦进入旺盛生长阶段,各处理的吸氮强度迅速增大,CK、P₁、P₂ 和 P₄ 处理的吸氮强度均在抽穗期达到峰值,其中 P₄ 处理的吸氮强度最大,为 5.89 kg/(hm² · d);抽穗期至灌浆期,CK、P₁、P₂ 和 P₄ 处理的吸氮强度均呈下降趋势,P₃ 处理的吸氮强度仍在增大,于灌浆期达到峰值;灌浆期至成熟期,冬小麦的吸氮强度均呈下降趋势,且各处理的吸氮强度均为负值,即冬小麦体内累积的氮素减少。

2.2 施用磷肥对冬小麦经济性状的影响

表 2 表明,在施用氮肥的基础上配合施用磷肥,能显著提高冬小麦的每株有效小穗数。P₁、P₂、P₃ 和 P₄ 处理的有效小穗数分别较对照增加了 9.6%, 25.5%, 23.4% 和 22.3%。磷对小麦的幼穗分化有促进作用,充足的磷营养可使幼穗分化时间延长,每株有效小穗数增多。小麦的穗粒数、成穗数和千粒重是构成小麦产量的主要因素。由表 2 还可看出,穗粒数、成穗数和千粒重随着磷肥施用量的增加总体上呈增加趋势。P₁、P₂、P₃ 和 P₄ 处理的穗粒数和千粒重与对照相比差异均不显著,而成穗数显著高于对照。产量随着磷肥用量的增加总体上呈增加趋势,其中当磷肥施用量为 135 kg/hm² 时,产量最高,达 2 869.0 kg/hm²,显著高于其他处理。P₄ 处理施磷量虽然增加,但产量却显著低于 P₃ 处理。

由此可知,合理施用磷肥能显著提高冬小麦产量,而当磷肥的施用量过大时,产量反而下降。这可能是因为大量施用磷肥导致冬小麦前期生长旺盛,大量吸收养分用于建造营养器官,增加了无效生育,从而影响了小麦生殖器官的发育,使产量显著下降。

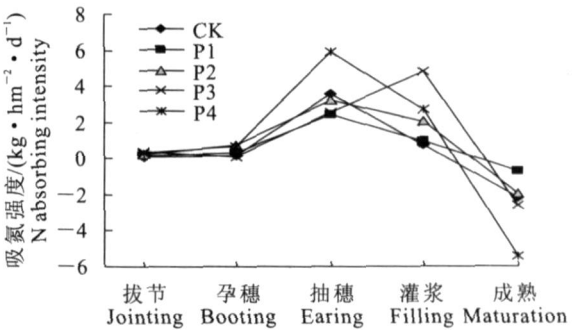


图 1 施用磷肥对冬小麦不同生育期吸氮强度的影响
Fig.1 Effect of P fertilizer application on absorbing intensity of N in different growth stages

2.3.2 氮素积累动态 表 3 表明,冬小麦生育期内不同磷处理的氮素累积量总体上呈先增加后减小的

趋势。出苗期至孕穗期冬小麦生长缓慢,不同处理的氮素累积量增加缓慢;孕穗期以后冬小麦进入旺盛生长阶段,吸氮量随之迅速增加,CK、P₁、P₂、P₃和 P₄ 处理在孕穗期至抽穗期的吸氮量分别占各处理氮素最大累积量的 62.7%,46.1%,38.0%,24.7%和 47.5%,其中 CK、P₁、P₂、P₄ 处理的吸氮量在抽穗期达到最大,而 P₃ 处理的吸氮量在灌浆期达到最大,抽穗期至灌浆期氮素累积量占其氮素最大累积量的 46.8%;在灌浆期,不同处理的氮素累积量均达到最大,当磷肥施用量达到 90 kg/hm² 以上时,能增加 50.0%~119.5%的氮素累积量,且氮

素累积量随磷肥施用量的增加而增大;成熟期时,各处理氮素累积量明显减少,且前期吸氮愈多,后期绝对损失量愈大,与灌浆期相比,损失量达 13.4%~44.2%,这与李生秀等^[9]、田霄鸿^[10]、胡田田等^[11]和 Daigger 等^[12]的研究结果一致。由此可知,在施用氮肥的基础上配施磷肥,没有改变冬小麦氮素累积的先增加后减小趋势,但当磷肥施用量达到 90 kg/hm² 以上时,增加了不同处理的氮素累积量,在灌浆期能增加 50.0%~119.5%的氮素累积量,这为增加小麦籽粒蛋白质含量提供了物质保障。

表 3 施用磷肥对冬小麦不同生育期氮素累积量的影响

| Table 3 Effect of P fertilizer application on N accumulation of winter wheat in different growth stages kg/hm ² | | | | | |
|--|-----------------|----------------|---------------|----------------|-------------------|
| 处理 Treatments | 拔节期 Jointing | 孕穗期 Booting | 抽穗期 Earing | 灌浆期 Filling | 成熟期 Maturation |
| CK | 19.1 | 20.9 | 74.1 | 84.8 | 51.9 |
| P ₁ | 24.2 | 28.4 | 64.5 | 78.3 | 67.8 |
| P ₂ | 36.4 | 47.7 | 96.0 | 127.1 | 97.5 |
| P ₃ | 42.2 | 43.6 | 81.4 | 153.1 | 113.3 |
| P ₄ | 47.4 | 57.6 | 146.0 | 186.1 | 103.8 |

2.4 长期施用磷肥对土壤养分含量的影响

2.4.1 土壤有机质 土壤有机质是植物矿质营养和有机营养的源泉,也是形成土壤结构的重要因素,其影响着土壤的保肥性、保水性、缓冲性、耕性和通气状况等^[13],所以有机质含量的变化直接反映了土

壤肥力的高低。表 4 表明,与对照相比,在施氮的基础上,施用磷肥能增加土壤有机质含量,增加幅度为 1.8%~12.2%,但有机质含量并不随磷肥施用量的增加而增大,这可能是与施用氮、磷肥的比例有关,其原因有待进一步研究。

表 4 长期施用磷肥对土壤养分含量的影响

| Table 4 Effect of long-term P fertilizer application on soil nutrient content | | | | | |
|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 处理 Treatments | 有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter | 全氮/(g·kg ⁻¹) Total N | 全磷/(g·kg ⁻¹) Total P | 碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkali hydro. N | 速效磷/(mg·kg ⁻¹) Avail. P |
| CK | 12.50 | 0.796 | 0.690 | 48.96 | 7.35 |
| P ₁ | 14.03 | 0.800 | 0.764 | 52.64 | 24.59 |
| P ₂ | 12.73 | 0.813 | 0.827 | 52.09 | 39.46 |
| P ₃ | 13.29 | 0.837 | 0.982 | 57.06 | 35.87 |
| P ₄ | 13.19 | 0.835 | 1.135 | 51.54 | 56.40 |

2.4.2 土壤全氮和碱解氮 由表 4 可知,土壤全氮和碱解氮含量随着磷肥施用量的增加呈增加趋势,其中 P₃ 处理的全氮和碱解氮含量均最大,分别较对照增加了 5.2%和 16.5%;而与 P₃ 处理相比,P₄ 处理的全氮和碱解氮含量却降低,这可能是因为磷肥的施用量过大,作物吸收带走的氮素较多所致。

2.4.3 土壤全磷和速效磷 由表 4 可知,长期施用磷肥能显著增加土壤磷素含量,其中土壤全磷含量增加了 10.7%~64.5%,速效磷含量增加了 234.6%~667.3%,而 P₃ 处理的速效磷含量较 P₂ 处理下降了 3.59 mg/kg。

3 讨论

岳寿松等^[14]研究认为,在缺磷土壤(含速效磷

5~10 mg/kg)上施用磷肥能显著提高小麦产量,主要是提高了单位面积的穗数和千粒重,并能显著提高小麦花后物质生产能力。姜宗庆等^[15]的试验证明,适当增施磷肥,能提高粒重、每穗粒数和穗数,施磷对产量构成因子均有影响。本试验研究表明,在施用氮肥的基础上合理配施磷肥,一是能显著提高冬小麦抽穗期后的干物质累积量,且干物质累积量随着磷肥用量增加而增加;二是能提高冬小麦的小穗数、穗粒数、成穗数和千粒重,继而提高小麦产量,这与前人研究结果基本一致。但磷肥用量过大(达到 180 kg/hm² 时)会引起冬小麦前期营养生长旺盛,干物质积累量过大(占 72.1%),而后期积累量小(占 28.8%),从而影响冬小麦的生殖生长,小

穗数、成穗数和千粒重均有所下降,最终导致产量显著下降。

不同施磷处理的氮素累积量在灌浆期均达到最大,氮素累积量基本随着磷肥施用量的增加而增大。到成熟时对照和4个施磷处理均发生氮素损失。施磷处理的地上部分氮素的损失可达13.4%~44.2%,且磷肥施用量愈高,前期吸氮愈多,后期损失量愈大。大量研究表明,植物生长过程中存在着氮素损失,这是植物的一种生理现象^[9-10,12]。植物的氮素损失有以下2种途径:一是通过吐水、根部分泌及衰老器官的自然脱落等损失^[12,16];另一种途径是在生长后期,植物以气态氮的形式向空气中逸失氮素^[17]。在施用氮肥的基础上合理配施磷肥能增加土壤养分含量,尤其是能显著提高土壤磷素含量。

[参考文献]

- [1] 李生秀. 提高旱地土壤氮肥利用效率的途径和对策[J]. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 56-75.
- [2] 高聚林, 刘克礼, 张永平, 等. 春小麦磷素吸收、积累与分配规律的研究[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(3): 107-112.
- [3] 杨胜利, 马玉霞, 冯荣成, 等. 磷肥用量对强筋和弱筋小麦产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2004(7): 55-57.
- [4] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 等. 施磷量对小麦品质和产量及氮素利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 135-138.
- [5] 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.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [7] 李朝霞, 赵世杰, 孟庆伟, 等. 高粒叶比小麦群体生理基础研究进展[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(4): 79-83.
- [8] 李志勇, 陈建军, 陈明灿. 不同水肥条件下冬小麦的干物质积累、产量及水氮利用效率[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 80-83.
- [9] 李生秀, 常青, 何琳. 植物体氮素的挥发损失: 植物收获期地上部分氮素减少与土壤、作物和肥料供应的关系[J]. 西北农业大学学报, 1992, 20(增刊): 7-11.
- [10] 田宵鸿. 小麦和玉米生长过程中氨态氮素的挥发损失[D]. 陕西杨凌: 西北农业大学, 1992.
- [11] 胡田田, 李岗, 韩思明. 旱地冬小麦吸收氮、磷的营养特征[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 826-830.
- [12] Daigger L A, Sander D H, Peterson G A. Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation[J]. Agron J, 1976, 68: 815-818.
- [13] 吕树鸣, 霍兴祥, 罗皓. 长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 耕作与栽培, 2004(3): 3-5.
- [14] 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.
- [15] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对不同类型专用小麦产量和品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 113-116.
- [16] Egera A T, AWSM van. Exudation of ninhydrinpositive compounds by pear-seedling roots: A study of the sites of exudation and of the composition of the exudates[J]. Plant Soil, 1975, 42: 37-47.
- [17] Farquhar G D, Wetselaar R, Firthp M. Ammonia volatilization from senescing leaves of maize[J]. Science, 1979, 203: 1257-1258.