

# 氮磷配施对旱地小麦产量和吸肥特性的影响

王旭刚<sup>1</sup>, 郝明德<sup>2</sup>, 李建民<sup>1</sup>, 张春霞<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学 资源与环境学院, 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]** 以已进行18年的小麦连作肥料定位试验为基础,研究了长期施用氮肥和磷肥对小麦的增产效应及对小麦吸收氮磷养分的影响。结果表明:(1)单施氮肥90 kg/hm<sup>2</sup>和180 kg/hm<sup>2</sup>时,小麦的增产率分别为198.42%和122.14%,小麦籽粒的氮含量分别比不施肥增加33.3%和35.9%;单施磷肥无明显的增产作用;氮磷配施对小麦有明显的增产作用,不同氮磷配施处理的增产率为267.84%~472.88%。(2)秸秆氮含量与氮肥施用量间的正相关关系显著,与磷肥施用量的相关性不显著,而秸秆磷含量与氮肥和磷肥施用量相关性均不显著;籽粒氮含量、磷含量与氮肥、磷肥施用量的相关性均不显著。(3)当氮肥施用量小于125.25 kg/hm<sup>2</sup>时,氮收获指数随氮肥施用量的增加而增加,适量施磷氮收获指数增加,当磷肥施用量为26.30 kg/hm<sup>2</sup>时,氮收获指数达61.22%,之后随磷肥施用量增加,氮收获指数基本保持不变;氮肥和磷肥的施用量分别为131.76和63.59 kg/hm<sup>2</sup>时,最大磷收获指数为64.75%。

**[关键词]** 旱地小麦; 氮磷配施; 小麦产量; 吸肥特性

**[中图分类号]** S512.1<sup>+</sup>06.2

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2007)02-0138-05

## Effects of fertilizer N, P on wheat yield and nutrients uptake characters in dryland of Loess Plateau

WANG Xu-gang<sup>1</sup>, HAO Ming-de<sup>2</sup>, LI Jian-min<sup>1</sup>, ZHANG Chun-xia<sup>2</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, 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:** Based on a long-term experiment of applying N and P fertilizer for 18 years, effects of long-term fertilization on wheat yield and N and P uptake were studied. Result showed that, fertilizer N increased wheat yield clearly, the yield increased by 198.42% and 122.14% with 90 kg/hm<sup>2</sup> and 180 kg/hm<sup>2</sup> respectively, but the yield showed no significant increase with P fertilizer applied only. N and P applied together could increase the yield from 267.84% to 472.88%. Under the conditions, N content of wheat stem was of significant relationship with N applied amount, and no prominence relationship with P applied amount; P content of wheat stem and N or P content of wheat seed were not significantly affected by fertilizer N or P applied. The N Harvest Index increased with N applied amount growing until 125.25 kg/hm<sup>2</sup>, when P applied was 26.30 kg/hm<sup>2</sup> amount, it could reach 61.22%; P Harvest Index could reach 64.75% when P and N applied amount were 131.76 kg/hm<sup>2</sup> and 63.59 kg/hm<sup>2</sup> respectively.

**Key words:** dryland wheat; nitrogen application combined with phosphorus; wheat yield; N and P uptake character

黄土高原是我国人口、资源、环境矛盾集中的区域之一。解决好粮食生产与生态环境之间的关系是

该区域社会经济可持续发展的关键<sup>[1]</sup>。在黄土高原增加化肥投入,是一项提高粮食单产的重要措施<sup>[2]</sup>。

**[收稿日期]** 2006-01-16

**[基金项目]** 国家“973”重点基础研究发展计划项目(2005CB121101);中国科学院知识创新方向性项目(KZCX2-yw-424-3);中国科学院农业发展项目(KZCX1-yw-N-15-04)

**[作者简介]** 王旭刚(1978-),男,河南南阳人,在读博士,主要从事土壤肥力与生态环境建设研究。

**[通讯作者]** 郝明德(1957-),男,研究员,博士生导师,从事土壤肥力与黄土高原综合治理研究。

化肥的大量施用提高了小麦的产量, 改善了小麦品质, 其中氮肥对小麦产量和品质影响显著, 对小麦产量的贡献率为20.69%, 对小麦蛋白质含量的贡献率为0.01%<sup>[3-6]</sup>。但大量施用化肥也带来了一些潜在的环境问题。长期施用氮肥导致土壤深层NO<sub>3</sub>-N大量累积, 而且氮肥用量越大, NO<sub>3</sub>-N淋溶量愈大<sup>[7]</sup>。氮肥的大量施用还可以加剧氮素的氨挥发损失。研究表明, 通过氨挥发损失的N量可达施入N量的9%~42%, 碳酸氢铵N素的损失率为49%~66%, 尿素N素的损失率为29%~40%<sup>[8-10]</sup>。此外, 过量施用氮肥能降低磷的生物有效性<sup>[11]</sup>。

由于黄土区土壤磷素的供给能力普遍较低, 所以磷肥的增产效益显著<sup>[12]</sup>。长期施用磷肥, 土壤总磷库及无机磷库均有不同程度的增加<sup>[13-15]</sup>; 而籽粒磷吸收量和磷肥施用量之间无明显相关性<sup>[16]</sup>。磷在土壤中易被固定而转化为植物难以利用的难溶性磷, 因而磷肥的当季利用率较低, 磷肥的过量施用不仅使小麦生产的投入较高, 而且固定在土壤中的磷可能造成环境污染<sup>[17]</sup>。长期施用磷肥会降低土壤对磷素的吸持, 使土壤磷有效性降低, 从而使磷素流失的可能性增加<sup>[18-20]</sup>, 农业生产的投入成本增大。适量的磷素供给可促进作物对氮素的吸收转化, 减少作物的氨挥发和N<sub>2</sub>O排放<sup>[10, 21]</sup>。

本研究在长期肥料定位试验基础上, 研究氮、磷肥配施对小麦产量及养分吸收量的影响, 以期对旱地小麦平衡施肥提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况<sup>[6, 22]</sup>

本试验布设在陕西省长武县十里铺塬面上, 海

拔1200 m, 多年平均降水548.4 mm (1984~2002年), 年均气温9.1℃, 无霜期171 d, 属暖温带半湿润大陆性季风气候。土壤为粘盖黑垆土, 全剖面土质均匀疏松, 通透性好, 肥力中等。1984年试验开始时, 耕层土壤有机质含量为10.5 g/kg, 全氮含量为0.77 g/kg, 碱解氮含量为37.0 mg/kg, 有效磷含量为2.2 mg/kg, 速效钾含量为123.9 mg/kg。

### 1.2 材 料

小麦品种为长武134, 由陕西长武县农技中心提供; 氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙。

### 1.3 试验设计

在长期定位肥料试验基础上, 本试验以氮肥、磷肥为基本因子, 每因子各设3个水平, 共计9个处理(表1)。每处理重复3次, 小区随机排列, 小区面积为22.2 m<sup>2</sup>。肥料在播前撒施并深翻入土中。小麦播种量为225 kg/hm<sup>2</sup>, 9月下旬播种, 翌年6月下旬收获。小麦田间管理同大田小麦。

本试验是长期定位肥料试验的第19年(2002~2003年), 各处理土壤基本养分含量见表2。

表1 氮、磷肥配施试验设计

处理 Treatment	N/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	P/ (kg · hm <sup>-2</sup> )
1(CK)	0	0
2	0	39.3
3	0	78.6
4	90	0
5	90	39.3
6	90	78.6
7	180	0
8	180	39.3
9	180	78.6

表2 2002年供试土壤基本养分含量

Table 2 Basic nutrient characters of soil in 2002

处理 Treatment	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> ) O. M.	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Total N	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) A available N	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Total P	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) A available P	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> ) A available K
1	7.504	0.73	37.094	0.67	7.151	176.205
2	7.278	0.75	35.533	0.92	41.724	171.685
3	7.421	0.73	40.282	1.12	61.378	171.685
4	7.888	0.88	43.840	0.66	6.429	175.450
5	8.252	0.85	46.046	0.77	24.082	140.060
6	8.138	0.83	48.590	1.07	46.939	129.515
7	8.143	0.87	44.774	0.66	5.204	119.725
8	8.662	0.85	47.640	0.89	21.531	116.715
9	8.472	0.81	52.116	1.05	47.449	135.955

### 1.4 测定项目与方法<sup>[23]</sup>

籽粒和秸秆的氮、磷含量, 采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消化, 分别用开氏定氮法和钼蓝比色法测定。

### 1.5 数据处理

氮(磷)肥效/(kg · kg<sup>-1</sup> · hm<sup>-2</sup>) = (施氮(磷)肥区产量 - 无氮(磷)肥区产量)/(氮(磷)肥施用

量),

氮(磷)吸收量/(kg·hm<sup>-2</sup>)= 籽粒氮(磷)含量 × 籽粒产量+ 秸秆氮(磷)含量 × 秸秆产量,

氮(磷)收获指数/% = (籽粒氮(磷)含量 × 籽粒产量)/(籽粒氮(磷)含量 × 籽粒产量+ 秸秆氮(磷)含量 × 秸秆产量) × 100%。

采用 SAS 软件和 Microsoft Excel 进行数据的统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮磷配施对小麦籽粒产量的影响

由表3可知,与不施氮肥处理相比,施用氮肥均

能显著的提高小麦的籽粒产量( $P < 0.05$ ),但随着氮肥施用量增至一定程度后,其增产作用与施肥量不同步,产投比降低。单施磷肥时的小麦籽粒产量较对照(838.0 kg/hm<sup>2</sup>)均降低219.2 kg/hm<sup>2</sup>。氮磷配施增产效果显著,其中在氮肥施用量相同时,小麦籽粒产量随着磷肥施用量的增加而增加;当磷肥施用量相同时,小麦籽粒产量则随氮肥施用量的增加而增加。单施氮肥时,氮肥施用量高的处理小麦籽粒产量低于氮肥施用量低的处理。氮磷配施时,当氮肥施用量相同时,磷肥施用量39.3 kg/hm<sup>2</sup>与78.6 kg/hm<sup>2</sup>处理间的籽粒产量差异均不显著( $P > 0.05$ )。

表3 氮磷配施对小麦籽粒产量的影响

Table 3 Effects of fertilizer on yield of wheat

处理 Treatment	籽粒产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield of grain	增产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) Increasing yield	增产率/% Ratio of increasing yield	氮肥肥效/ (kg·kg <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Fertilizer N efficiency	磷肥肥效/ (kg·kg <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Fertilizer P efficiency	氮磷交互/ (kg·hm <sup>-2</sup> ) Interaction of fertilize N and P
1	838.0 e					
2	681.8 e	- 219.2	- 18.64		- 2.44	
3	681.8 e	- 219.2	- 18.64		- 1.22	
4	2500.8 c	1662.8	198.42	18.48		
5	3082.5 b	2244.5	267.84	22.58	5.41	368.95
6	3181.0 b	2343.0	279.60	23.12	3.33	418.20
7	1861.5 d	1023.5	122.14	5.69		
8	4730.5 a	3892.5	460.90	14.09	34.51	1512.6
9	4800.8 a	3962.75	472.88	14.28	17.70	1547.6

注:同列数据后字母相同者表示差异不显著( $P > 0.05$ ),字母不同者表示差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: Means with the same letter are not significantly difference ( $P > 0.05$ ), different letter are significant difference ( $P < 0.05$ ). The following table is same

### 2.2 氮肥和磷肥施用量与小麦籽粒产量的关系

本研究回归分析表明,小麦籽粒产量(Y)与氮肥施用量(X<sub>1</sub>)、磷肥施用量(X<sub>2</sub>)的关系符合方程:  
 $Y = 95.778 + 30.200X_1 + 14.759X_2 - 0.889X_1^2 + 0.701X_1X_2 - 0.722X_2^2$ 。其中一次项、二次项和交叉项均达到极显著水平,常数项达到0.1显著水平。回归方程的离回归标准误差为55.668 kg/hm<sup>2</sup>。对回归方程求偏导可得:

$$y_1 = 30.200 - 1.778X_1 + 0.701X_2 \quad (1)$$

$$y_2 = 14.759 - 1.444X_2 + 0.701X_1 \quad (2)$$

令y<sub>1</sub>和y<sub>2</sub>均等于0,可以得出Y在X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>响应面上有最大值时的X<sub>1</sub>,X<sub>2</sub>值。经计算可知,当X<sub>1</sub>=194.9 kg/hm<sup>2</sup>,X<sub>2</sub>=76.1 kg/hm<sup>2</sup>,在当年生产条件下可以得到的最大理论籽粒产量(4800.8 kg/hm<sup>2</sup>)。

令y<sub>1</sub>和y<sub>2</sub>分别等于单位氮肥和磷肥的价格与单位产量价格的比值,可以得出获得最高经济效益

的最佳施肥量。根据最长时段及最近的肥料价格(尿素1.4元/kg、过磷酸钙0.4元/kg)和小麦价格(1元/kg),可以得出当年获得最高经济效益的最佳施肥量,即氮肥施用量为172.7 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用量为64.7 kg/hm<sup>2</sup>。

### 2.3 氮磷配施对小麦地上部氮含量和磷含量的影响

由表4可知,秸秆氮含量随着氮肥施用量的增加而增加,且与氮肥施用量间相关性达显著水平( $P < 0.05$ ),但与磷肥施用量间相关性不显著。秸秆磷含量基本不随氮肥和磷肥施用量的变化而变化,秸秆磷含量与氮肥和磷肥施用量相关性均不显著。

由表4还可知,籽粒氮含量总体上随氮肥施用量的增加而增加,随磷肥施用量的增加而减少,籽粒氮含量与氮肥和磷肥施用量的相关性均不显著。籽粒磷含量随氮肥施用量的增加基本呈减少趋势,随磷肥施用量的增加而增加,但籽粒磷含量与氮肥和磷肥施用量的相关性均不显著。出现上述现象的原

因可能有: 一是氮肥与磷肥间配比不合适, 肥料间有竞争作用; 二是随着氮肥施用量的增加, 小麦产量随

之增加, 而小麦地上部磷含量增加的幅度较小。

表4 氮磷配施对小麦吸肥特性的影响

Table 4 Effects of fertilizer application on contents of N、P and absorbing amount of N、P of wheat

处理 Treat- ment	氮含量/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Content of N		磷含量/ (g · kg <sup>-1</sup> ) Content of P		氮吸收量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) Absorbing amount of fertilizer N			磷吸收量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) Absorbing amount of fertilizer P			收获指数/% Harvest index	
	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	总量 Gross	籽粒 Grain	秸秆 Stalk	总量 Gross	氮 N	磷 P
1	19.2 d	5.8 ef	3.6 e	0.9 a	16.08 g	30.46 g	46.54 f	3.03 f	4.54 f	7.57 fg	52.79	40.03
2	19.5 d	5.6 f	4.0 c	0.7 c	13.28 g	20.06 h	33.34 g	2.72 f	2.99 g	5.71 h	39.83	47.64
3	18.5 e	6.0 e	4.5 a	0.9 a	12.62 g	22.34 h	34.96 g	3.09 f	3.33 fg	6.42 gh	36.08	48.13
4	25.6 b	5.8 ef	3.1 g	0.7 c	63.94 d	45.087	109.03de	7.85 d	6.72 de	14.57 d	58.64	53.88
5	22.9 c	7.6 d	3.9 d	0.7 c	70.57 c	49.65 d	120.21 c	11.78 c	7.40 cd	19.18 c	58.70	61.42
6	18.5 e	8.6 c	3.9cd	0.8 b	60.50 e	53.88 c	114.38 d	12.50 c	8.03 c	20.53 c	52.89	60.89
7	26.1 a	8.9 c	2.9 h	0.7 c	48.62 f	39.79 e	88.41 e	5.40 e	5.93 e	11.33 e	54.99	47.66
8	25.3 b	9.2 b	3.5 f	0.7 c	119.69 a	69.64 b	189.32 a	16.51 b	10.38 b	26.89 b	63.22	61.40
9	19.2 d	9.8 a	4.1 b	0.8 b	91.95 b	79.71 a	171.65 b	19.73 a	11.88 a	31.61 a	53.57	62.43

2.4 氮磷配施对小麦吸肥特性的影响

2.4.1 对小麦氮、磷吸收量的影响 由表4可知, 与单施氮肥和单施磷肥相比, 氮磷配施可显著提高小麦地上部的氮吸收量, 减少养分损失。单施氮肥时, 随着氮肥施用量的增加, 小麦地上部的氮吸收量先由46.54 kg/hm<sup>2</sup>增加到109.03 kg/hm<sup>2</sup>, 后随氮肥施用量的增加稍有降低(88.41 kg/hm<sup>2</sup>); 小麦地上部的磷吸收量由7.57 kg/hm<sup>2</sup>增至14.57 kg/hm<sup>2</sup>后降到11.33 kg/hm<sup>2</sup>。由此可知, 肥料的施用量在超过最大施肥量(获得最大产量时的施肥量)后, 作物地上部分携带走的养分总量不再增加, 反而呈下降趋势, 过多的养分则残留在土壤中。单施磷肥时, 随着磷肥施用量从39.3 kg/hm<sup>2</sup>增加到78.6 kg/hm<sup>2</sup>, 小麦地上部的氮吸收量和磷吸收量分别增加了1.62和0.71 kg/hm<sup>2</sup>, 均显著小于对照, 磷养分损失随着磷肥施用量的增加而增加。因此, 磷肥施用量39.3 kg/hm<sup>2</sup>和78.6 kg/hm<sup>2</sup>基本超出小麦生长所需, 可以减少磷肥施用量。

从表4还可以看出, 小麦地上部平均磷吸收量随氮肥和磷肥施用量的增加而增加。但统计分析发现, 小麦地上部磷吸收量与氮肥和磷肥施用量的相关性均不显著。

2.4.2 对小麦经济利用指数(收获指数)的影响 养分经济利用指数(收获指数)是指籽粒中的养分含量与养分吸收量的比值<sup>[24]</sup>, 说明了作物所吸收的养分向籽粒转移的情况。由表4可知, 单施磷肥时, 氮收获指数随磷肥施用量的增加而降低, 在磷肥施用量为39.3 kg/hm<sup>2</sup>和78.6 kg/hm<sup>2</sup>时分别较对照降低了24.55%和31.65%; 磷收获指数随磷肥施用量

增加而增大, 说明单施磷肥降低了冬小麦对氮肥的吸收利用, 提高了对磷肥的吸收利用。

经计算可知, 氮收获指数(Y<sub>1</sub>)与氮肥施用量(X<sub>1</sub>)和磷肥施用量(X<sub>2</sub>)的回归方程为

$$Y_1 = 49.89 + 0.19X_1 - 0.075X_2 - 0.0008X_1^2 + 0.0011X_1X_2 - 0.0016X_2^2 \quad (3)$$

由该方程计算可知, 当氮肥施用量小于125.25 kg/hm<sup>2</sup>时, 氮收获指数随氮肥施用量的增加而增加, 适量施磷可促进小麦对氮肥的吸收利用, 促进氮磷养分向籽粒移动; 当氮肥施用量大于125.25 kg/hm<sup>2</sup>时, 氮收获指数随磷肥施用量的增加而总体上呈下降趋势, 当磷肥施用量为26.30 kg/hm<sup>2</sup>时, 氮收获指数达61.22%, 之后随磷肥施用量的增加氮收获指数基本保持不变。

将磷收获指数(Y<sub>2</sub>)与氮肥施用量(X<sub>1</sub>)、磷肥施用量(X<sub>2</sub>)进行回归分析, 可得

$$Y_2 = 40.40 + 0.215X_1 - 0.321X_2 - 0.0009X_1^2 + 0.0005X_1X_2 - 0.003X_2^2 \quad (4)$$

由式(4)可知, 磷收获指数与氮肥施用量关系达到极显著水平(P < 0.01), 与磷肥施用量关系达显著水平(P < 0.05), 氮肥和磷肥的施用量分别为131.76和63.59 kg/hm<sup>2</sup>时, 磷收获指数最大, 为64.75%。

3 结 论

1) 单施氮肥、氮磷配施均能显著提高小麦的籽粒产量, 但随着氮肥施用量增至一定程度后, 其增产作用与施肥量不同步; 小麦获得最大产量的氮肥和磷肥施用量分别为194.9和76.1 kg/hm<sup>2</sup>, 小麦获得

最大经济效益的氮肥和磷肥施用量分别为 172.7 和 64.7 kg/hm<sup>2</sup>。

2) 本试验条件下, 秸秆氮含量与氮肥施用量关系显著, 与磷肥施用量关系不显著; 秸秆磷含量与氮肥和磷肥施用量之间关系不显著。籽粒氮含量和磷含量与氮肥和磷肥施用量关系均不显著。

3) 在本试验条件下, 氮肥施用量小于 125.25 kg/hm<sup>2</sup> 时, 氮收获指数随氮肥施用量的增加而增加, 当磷肥施用量为 26.30 kg/hm<sup>2</sup> 时, 氮收获指数达 61.22%, 之后随磷肥施用量的增加氮收获指数基本保持不变。氮肥和磷肥的施用量分别为 131.76 和 63.59 kg/hm<sup>2</sup> 时, 磷收获指数最大, 为 64.75%。

### [参考文献]

- [1] 上官周平. 黄土高原粮食生产与可持续发展研究[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1999.
- [2] 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[M]//李玉山, 苏陕民. 长武王东沟高效生态经济系统综合研究. 西安: 科学技术文献出版社, 1991: 9.
- [3] 杨延兵, 高荣岐, 尹燕秤, 等. 氮素与品种对小麦产量和品质性状的效应[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 78-81.
- [4] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 长期定位施肥对小麦籽粒产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2004, 24(3): 76-78.
- [5] 林琪, 侯立白, 韩伟. 不同肥力土壤下氮肥施用量对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 561-567.
- [6] 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.
- [7] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 施肥对半干旱地区小麦产量、NO<sub>3</sub>-N 累积和水分平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 754-760.
- [8] 蔡贵信. 氮挥发[M]//朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 171-196.
- [9] Cai G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China [J]. Nutrition Cycle in Agroecosystem, 2000, 57: 67-73.
- [10] 王旭刚, 郝明德, 陈磊, 等. 长期施肥条件下小麦农田氮挥发损失的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 22-28.
- [11] 于飞, 周健民, 王火焰, 等. 不同形态氮肥对磷肥生物有效性的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 371-374.
- [12] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1989: 286-297.
- [13] 陈欣, 宇方太, 沈善敏. 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 II: 土壤有效磷及土壤无机磷组成[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 81-87.
- [14] 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.
- [15] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 I: 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360-364.
- [16] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143-147.
- [17] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 49-53; 433-443.
- [18] Omenick J M, A bernathy A R, M ale L M. Stream nutrient levels and proximity of agricultural and forest land to streams: some relationships [J]. Soil Water Conservation 1981, 36: 227-231.
- [19] 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.
- [20] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 7-12.
- [21] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540-543.
- [22] 党廷辉, 高长青, 彭琳, 等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 61-64.
- [23] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京: 农业出版社, 1996: 213-218.
- [24] 罗远培, 李韵珠. 根土系统与作物水氮资源利用效率[M]. 北京: 农业出版社, 1996.