

## 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应

张微微<sup>1</sup>, 周怀平<sup>2</sup>, 黄绍敏<sup>3</sup>, 杨军<sup>4</sup>, 刘树堂<sup>5</sup>, 马俊永<sup>6</sup>, 张淑香<sup>1\*</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 山西省农业科学院土壤肥料研究所, 山西太原 030031;  
3 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南郑州 450002; 4 天津市农业资源与环境研究所, 天津 300192;  
5 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 266109; 6 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北衡水 053000)

**摘要:**【目的】磷素易于在土壤中固定, 碱性土壤更甚, 影响着磷肥的肥效和利用效率。研究长期施用磷肥对我国北方碱性土有效磷与磷盈亏的影响, 为碱性土地地区合理施用磷肥提供理论依据。【方法】本研究是基于河北、北京、山东、天津、河南和山西的 6 个冬小麦-夏玉米轮作长期定位施肥试验, 试验周期为 1991—2011 年。所有定位施肥试验均设有不施磷肥 (P0)、单施化学磷肥 (P)、化肥配施秸秆 (P+S)、单施有机肥 (M)、化肥配施有机肥 (P+M) 5 个处理, 施磷方式和施磷量不同。分析了土壤有效磷、作物产量、有机质、pH 随时间的变化特征, 计算了土壤有效磷含量与作物产量、土壤磷盈亏、磷肥利用率的关系, 用冗余分析得出每 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷盈余下土壤有效磷变量 (有效磷效率) 的主要影响因素。【结果】P0 处理土壤磷亏缺为 -357.73~-28.21 kg/hm<sup>2</sup>, 有效磷含量随种植时间延长下降, 下降速率为 0.14 mg/(kg·year), 此处理下作物产量较低, 小麦低于 2000 kg/hm<sup>2</sup>, 玉米低于 4000 kg/hm<sup>2</sup>。4 个施磷肥处理 (P, P+S, M, P+M) 土壤磷表现为盈余, 21 年连续施肥磷总盈余为 23.65~860.93 kg/hm<sup>2</sup>, 磷盈余量顺序为 P+M > P > P+S > M。土壤有效磷含量随种植时间延长上升, 年平均上升速率为 P+M [4.85 mg/(kg·year)] > M [1.87 mg/(kg·year)] > P+S [0.65 mg/(kg·year)] > P [0.63 mg/(kg·year)]。施用磷肥的小麦产量为 3399~7880 kg/hm<sup>2</sup>, 4 个施磷肥处理间差异不明显; 玉米产量为 4186~9176 kg/hm<sup>2</sup>, 以 P+M 处理玉米产量最高, P 处理最低。土壤有效磷含量与作物产量的关系可以用 Mitscherlich 方程模拟 ( $P < 0.01$ ), 小麦和玉米产量随土壤有效磷含量升高而增加, 在土壤有效磷含量分别达到 22.47 和 20.68 mg/kg 后不再增加。小麦 P+S 处理的磷肥利用率最高, 21 年均值为 16.17%; 玉米以 M 处理的磷肥利用率最高, 21 年均值为 16.45%。小麦和玉米磷肥利用率均随土壤有效磷含量的升高而上升, 以 P+S 处理上升最快, P+M 处理上升最慢。5 个处理土壤有效磷含量与磷盈亏均呈现极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关关系。土壤每亏缺 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷下降 0.90 mg/kg; 每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷含量的增量为 M (22.10 mg/kg) > P+M (10.60 mg/kg) > P+S (3.90 mg/kg) > P (2.60 mg/kg)。通过冗余分析发现, 土壤有机质能解释土壤有效磷效率变异的 85.0%, 是土壤有效磷效率的主要影响因素。【结论】碱性土壤上小麦和玉米的磷肥利用率随土壤有效磷含量的增加而提高, 长期化肥配施秸秆提高作物磷肥利用率的效果最佳。土壤有机质是提升土壤累积磷有效性的最主要因素, 因此, 长期单施有机肥或者化肥配施有机肥的土壤有效磷效率较高。长期化肥配施有机肥的潮土有效磷含量较高, 容易造成磷在土壤中的淋洗和固定, 需减少磷肥总施用量并适当提高有机肥的比例, 从而达到农学效益和环境效益的双赢。

**关键词:** 碱性土; 作物产量; 磷肥利用率; 有效磷效率; 有机质; 磷盈亏

## Response of alkaline soil Olsen-P to phosphorous budget under different long-term fertilization treatments

ZHANG Wei-wei<sup>1</sup>, ZHOU Huai-ping<sup>2</sup>, HUANG Shao-min<sup>3</sup>, YANG Jun<sup>4</sup>, LIU Shu-tang<sup>5</sup>,  
MA Jun-yong<sup>6</sup>, ZHANG Shu-xiang<sup>1\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China; 2 Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 3 Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 4 Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin

收稿日期: 2020-07-13 接受日期: 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977103); 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503120)。

联系方式: 张微微 E-mail: zwwkygc@163.com; \* 通信作者 张淑香 E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

300192, China; 5 College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China;

6 Institute of Dry Farming, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000, China )

**Abstract: [ Objectives ]** Phosphorous is easily immobilized in soil, especially in alkaline soil, which is one of the main reasons for the low phosphorous efficiency in crop production. This paper studied the response of soil Olsen-P contents and the P budget under different long-term P fertilization treatments in the alkaline soils of Northern China. **[ Methods ]** The data used in this research were from the long-term experiments located in Hebei, Beijing, Shandong, Tianjin, Henan and Shanxi. All the six experiments were conducted from 1991 to 2011 under winter wheat-summer maize rotation, and in soils of  $\text{pH} > 7$ . The selected treatments included no P input control (P0), chemical P fertilizer (P), chemical P and straw (P+S), pure manure (M), chemical P and manure (P+M). The crop yield was recorded, and soil Olsen-P and organic matter (SOM) contents were determined. The soil P budget was calculated, the relationships of soil Olsen-P with crop yield and soil P budget, and the P use efficiency (PUE) were calculated. The main factors influencing soil Olsen-P efficiency were discussed. **[ Results ]** Without P input (P0), the annual soil P was in deficit of  $-357.73$ – $-28.21$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ , and the soil Olsen-P content kept decreasing with experimental years in rate of  $0.14$   $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{year})$ ; the crop yields were low, with wheat yield lower than  $2000$   $\text{kg}/\text{hm}^2$  and maize yield lower than  $4000$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ . Under the four P fertilization treatments, the soil P were in a surplus of  $23.65$ – $860.93$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ , with the surplus amount in order of  $\text{P+M} > \text{P} > \text{P+S} > \text{M}$ . The soil Olsen-P content increased with experimental years and the annual increase range was in order of  $\text{P+M}$  [ $4.85$   $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{year})$ ]  $>$   $\text{M}$  [ $1.87$   $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{year})$ ]  $>$   $\text{P+S}$  [ $0.65$   $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{year})$ ]  $>$   $\text{P}$  [ $0.63$   $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{year})$ ]. The wheat yield was in a range of  $3399$ – $7880$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ , and there was no obvious difference among the four treatments. The maize yield was in a range of  $4186$ – $9176$   $\text{kg}/\text{hm}^2$ , which was highest under P+M and lowest under P. The wheat and maize yields kept increasing until the soil Olsen-P reached  $22.47$   $\text{mg}/\text{kg}$  for wheat and  $20.68$   $\text{mg}/\text{kg}$  for maize. The P use efficiency (PUE) of wheat was the highest under P+S treatment ( $16.17\%$ ), and that of maize was the highest under M treatment ( $16.45\%$ ). With the increase of soil Olsen-P, the PUE of wheat and maize improved, with the fastest rise under P+S treatment and slowest under P+M treatment. The soil Olsen-P had an extremely and positively significant ( $P < 0.01$ ) relationship with soil P budget. With every  $100$   $\text{kg}/\text{hm}^2$  of P deficit, the soil Olsen-P decreased by  $0.90$   $\text{mg}/\text{kg}$ . And with every  $100$   $\text{kg}/\text{hm}^2$  of P surplus, the soil Olsen-P increased by  $22.10$   $\text{mg}/\text{kg}$  in M,  $10.60$   $\text{mg}/\text{kg}$  in P+M,  $3.90$   $\text{mg}/\text{kg}$  in P+S and  $2.60$   $\text{mg}/\text{kg}$  in P fertilization treatment. Analyzed by RDA method, soil organic matter (SOM) was the main factor influencing soil Olsen-P efficiency, and could explain  $85.0\%$  of soil Olsen-P efficiency variance. **[ Conclusions ]** With the increase of Olsen-P in soil, the PUE of wheat and maize improved, and there was a striking increase of PUE under P+S. Long-term application of M or P+M has effectively increased the efficiency of soil Olsen-P as the increment of SOM. But under P+M, the P use efficiency was low, and the soil P was easily to be leached or immobilized. So, the total rate of P under P+M should be reduced, and the proportion of organic fertilizer should be increased, so as to maximize both agronomic and environmental benefits.

**Key words:** alkaline soil; crop yield; phosphorus use efficiency; soil Olsen-P efficiency; soil organic matter; phosphorus budget

磷是农作物营养的三要素之一，它既是作物体内许多重要有机化合物(核酸、核苷酸、磷脂、核蛋白、ATP 酶等)的组成成分，又能以多种方式参与作物体内的生理过程(如光合作用、分解作用、养分运输与能量转化等)，并且在改善作物品质、提高作物产量和抗逆性等方面具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。大多数农田

土壤的自然供磷能力往往不能满足作物生长发育及高产对磷的需求<sup>[4-5]</sup>，因此农业生产实践中通过施用磷肥提高土壤磷库容量和有效磷含量<sup>[6-8]</sup>，从而提高作物产量<sup>[9]</sup>。然而，施入土壤中的大部分磷素会与土壤矿物(铁铝氧化物、碳酸钙)、粘粒或有机质结合转化为非有效态磷<sup>[10-11]</sup>，磷肥的当季利用率只有

5%~25%<sup>[8,12]</sup>。长期过量施用磷肥会导致磷在土壤中大量累积, 使土壤有效磷含量超过作物生长的农学阈值和环境安全的环境阈值, 造成有限的高质量磷矿资源的浪费和水体富营养化等污染<sup>[13-14]</sup>。因此, 分析并掌握土壤磷素演变特征与规律, 对合理施用磷肥和作物稳产增产有重要的指导作用。

国内外大量长期定位试验表明, 土壤磷盈亏(磷输入-磷输出)是影响土壤有效磷含量的主要因素, 二者呈现显著直线正相关关系<sup>[15-23]</sup>, 不同土壤每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 土壤有效磷含量提高 1~6 mg/kg<sup>[15]</sup>。英国温带酸性土壤<sup>[16]</sup>的长期施肥研究表明, 每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 土壤有效磷含量增加 6 mg/kg。法国西南部<sup>[7]</sup>经过连续 17 年长期施肥试验, 弱碱性砂壤土每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 土壤有效磷升高 3.3 mg/kg。我国黑土<sup>[17]</sup>的长期施肥试验表明, 哈尔滨黑土每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 土壤有效磷升高 6.5 mg/kg。不同地区土壤每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 有效磷含量的变化量即土壤有效磷效率, 受到环境因素、种植制度和土壤性质等的影响<sup>[15,18-19]</sup>。同一土壤不同施肥方式下, 土壤有效磷效率也存在很大差异<sup>[20-21]</sup>。一些省份的长期定位试验发现, 化肥配施有机肥处理下土壤有效磷效率高于单施化学磷肥处理。例如山西寿阳褐土<sup>[22]</sup>每盈余 100 kg/hm<sup>2</sup> 磷, 化肥配施有机肥处理下土壤有效磷升高 1.70~4.72 mg/kg, 而单施化学磷肥处理下土壤有效磷升高 1.04~2.13 mg/kg。天津潮土的长期定位试验结果<sup>[23]</sup>表明, 氮肥配施有机肥处理下(NM)土壤有效磷效率(2.40 mg/kg)要高于化肥(NPK)处理(1.75 mg/kg)。这些试验都说明, 同一土壤去除了环境因素和种植制度等的影响, 土壤性质可能是影响土壤有效磷效率的决定因素<sup>[24-26]</sup>。并且配施有机肥后土壤有机质含量升高, 是化肥配施有机肥处理与单施化学磷肥处理土壤有效磷效率产生差异的主要因素。

华北地区是我国重要的粮食产区, 耕地面积占全国的 17.9%, 粮食产量占全国的 23%, 小麦(51%)和玉米(40%)是华北地区粮食生产的主体<sup>[27]</sup>。河南和山东两省的粮食产量位居全国第二和第三, 是我国重要的产粮大省<sup>[28]</sup>, 这些地区土壤类型主要为碱性潮土和褐土, 其碳酸钙和粘粒含量较高, 有机质含量较低, 对土壤磷的固定能力较强, 因此土壤有效磷含量总体偏低<sup>[29-30]</sup>。农田长期定位试验是土壤肥力研究的重要平台, 很多省份都有关于土壤磷的研究, 但是缺少碱性土不同施肥方式下土壤有效磷效率变化特征的规律总结和统一研究, 并且缺乏土壤有效

磷效率与土壤有机质含量关系的定量研究。因此, 研究长期不同施肥模式下我国北方碱性土磷素演变特征(有效磷、磷盈亏及二者关系)、作物产量及其磷肥利用率, 有助于探明不同施肥模式下土壤磷素的活化规律, 对于指导碱性土地区合理施用磷肥、提高土壤累积磷利用率具有十分重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本研究长期定位试验点分别位于河北省辛集市马兰农场(东经 115°11'28.18"、北纬 37°59'22.93"), 北京市昌平区(东经 116°15'23"、北纬 40°13'22"), 山东省农业科学院试验农场(东经 117°00'、北纬 36°40'), 天津市农业科学院试验基地新区(东经 116°57'、北纬 39°25'), 河南省现代农业试验基地(原阳, 东经 113°40'42"、北纬 34°47'55"), 山西省寿阳县宗艾村(东经 113°06'37.8"、北纬 37°58'22.0")。监测时间为 1991—2011 年种植方式为冬小麦-夏玉米轮作。监测点耕层(0—20 cm)土壤初始化学性质见表 1。

### 1.2 试验设计与方法

选择长期定位试验中的 5 个处理进行调查和研究, 包括: 不施磷肥对照(P0)、单施化学磷肥(P)、化肥配施秸秆(P+S)、单施有机肥(M)、化肥配施有机肥(P+M)。氮肥用尿素, 磷肥用普通过磷酸钙, 钾肥用硫酸钾、氯化钾, 秸秆为玉米秸秆, 有机肥以猪粪、牛粪为主。各年度依据土壤和天气状况播种, 小麦播种时间为 10 月中旬, 玉米为 6 月上旬。施肥时间为播种前一天, 小麦季施肥后深耕一次, 玉米季免耕。试验过程中记录施肥种类、数量、作物产量以及管理措施等信息, 各处理施肥量如表 2 所示。各监测点每季作物收获后分别采集不同处理的植物样品, 风干后用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化, 钼锑抗比色法测定含磷量。土壤样品采集在每年秋季作物收获后, 按“S”型采集 0—20 cm 土壤样品并混合, 室内风干, 用常规方法测定土壤 pH、有机质和 Olsen-P 含量<sup>[31]</sup>。

### 1.3 数据处理方法与公式

当季土壤表观磷盈亏(P, kg/hm<sup>2</sup>) = 当季磷肥施入总量 - 当季作物(籽粒 + 秸秆)吸磷量;

土壤累积磷盈亏(P, kg/hm<sup>2</sup>) = ∑当季土壤表观磷盈亏;

磷肥利用率(phosphorus use efficiency, %) = [施

表 1 碱性土地区长期定位试验地点土壤类型及基础理化性状  
Table 1 The soil types and basic physiochemical properties in experimental sites

试验地点 Experimental site	土壤类型 Soil type	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Olsen-P
河北 Hebei	褐土 Cinnamon soil	8.20	8.70	0.95	0.97	69.70	12.60
北京 Beijing	潮土 Fluvo-aquic soil	8.20	12.20	0.64	0.69	49.70	4.60
山东 Shandong	潮土 Fluvo-aquic soil	7.10	4.10	0.50	0.46	45.30	15.00
天津 Tianjin	潮土 Fluvo-aquic soil	8.10	18.90	1.06	1.59	75.10	16.60
河南 Henan	潮土 Fluvo-aquic soil	8.30	11.60	1.01	0.65	76.60	6.50
山西 Shanxi	褐土 Cinnamon Soil	8.30	12.40	1.05	0.17	106.40	15.30

表 2 碱性土地区长期定位试验各处理磷年施入量 [ $P_2O_5$  kg/( $hm^2 \cdot year$ )]  
Table 2 Annual  $P_2O_5$  input in each treatment of the long-term experiments on alkaline soils

试验地点 Experimental site	P0	P	P+S	M	P+M
河北 Hebei	0	180.0	182.3	—	—
北京 Beijing	0	150.0	155.9	—	262.5
山东 Shandong	0	180.0	—	120.0	—
天津 Tianjin	0	142.5	—	177.6	—
河南 Henan	0	176.5	185.8	—	216.5
山西 Shanxi	0	140.9	—	117.6	157.9

注 (Note): “—” 表示无此施肥处理 Represents no such treatment.

磷处理作物地上部分吸磷量-不施磷处理作物地上部分吸磷量]/施磷量  $\times 100$ <sup>[32]</sup>。

碱性土地区不同施肥处理各指标的数值为此处理下 6 个长期定位点的中值。所有数据的整理用 Excel 2010 完成, 作图用 Simoplot 12.5, 冗余 (RDA) 分析在 Canoco 5 中运行。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥土壤有效磷的变化特征

长期不同施肥方式下, 土壤有效磷含量的变化特征存在很大差别 (图 1)。不施磷肥条件下 (P0), 土壤有效磷含量很低, 低于 6 mg/kg, 且随种植时间延长极显著下降 ( $P < 0.01$ ), 下降速率为 0.14 mg/(kg·year)。施用不同种类磷肥后, 土壤有效磷含量均随试验时间延长极显著上升 ( $P < 0.01$ ), 但不同施肥处理土壤有效磷含量随施肥时间延长上升的速率差异很大, 大小顺序为: P+M [4.85 mg/(kg·year)] > M [1.87 mg/(kg·year)] > P+S [0.65 mg/(kg·year)] > P [0.63 mg/(kg·year)]。施肥 21 年后, 土壤有效磷含量在单施化肥处理 (P) 和化肥配施秸秆处理 (P+S) 下低于 40 mg/kg, 单施有机肥 (M) 处理为 30~100

mg/kg, 化肥配施有机肥处理 (P+M) 为 20~140 mg/kg。施肥后期, M 和 P+M 处理土壤有效磷含量非常高, 范围为 100~140 mg/kg。

### 2.2 长期不同施肥处理作物产量与土壤有效磷含量的关系

由 5 个长期定位试验小麦和玉米产量的变化 (图 2) 可知, 不施磷肥条件下 (P0), 小麦产量低于 2000 kg/ $hm^2$ , 玉米产量低于 4000 kg/ $hm^2$ , 两种作物的产量均随种植时间延长呈现降低趋势。施用不同种类磷肥后, 小麦和玉米产量均随试验年限延长而上升, 小麦产量范围为 3399~7880 kg/ $hm^2$ , 玉米产量范围为 4186~9176 kg/ $hm^2$ 。P、P+S、P+M 3 个处理小麦产量大小和变化趋势大体一致, 而 M 处理下小麦产量的波动性较大, 在试验的 3~5 和 11~15 年, M 处理下小麦产量高于其它 3 个处理, 在其它年份则等于或低于其它处理。对于玉米来说, 施肥 5 年之后 P 处理下产量显著低于其它 3 个施肥处理; P+M 处理下玉米产量高于其它 3 个处理, 尤其在施肥 5~10 年期间; P 和 P+S 两个处理玉米产量大小和变化趋势大体一致。

土壤有效磷含量与小麦和玉米产量的关系可以

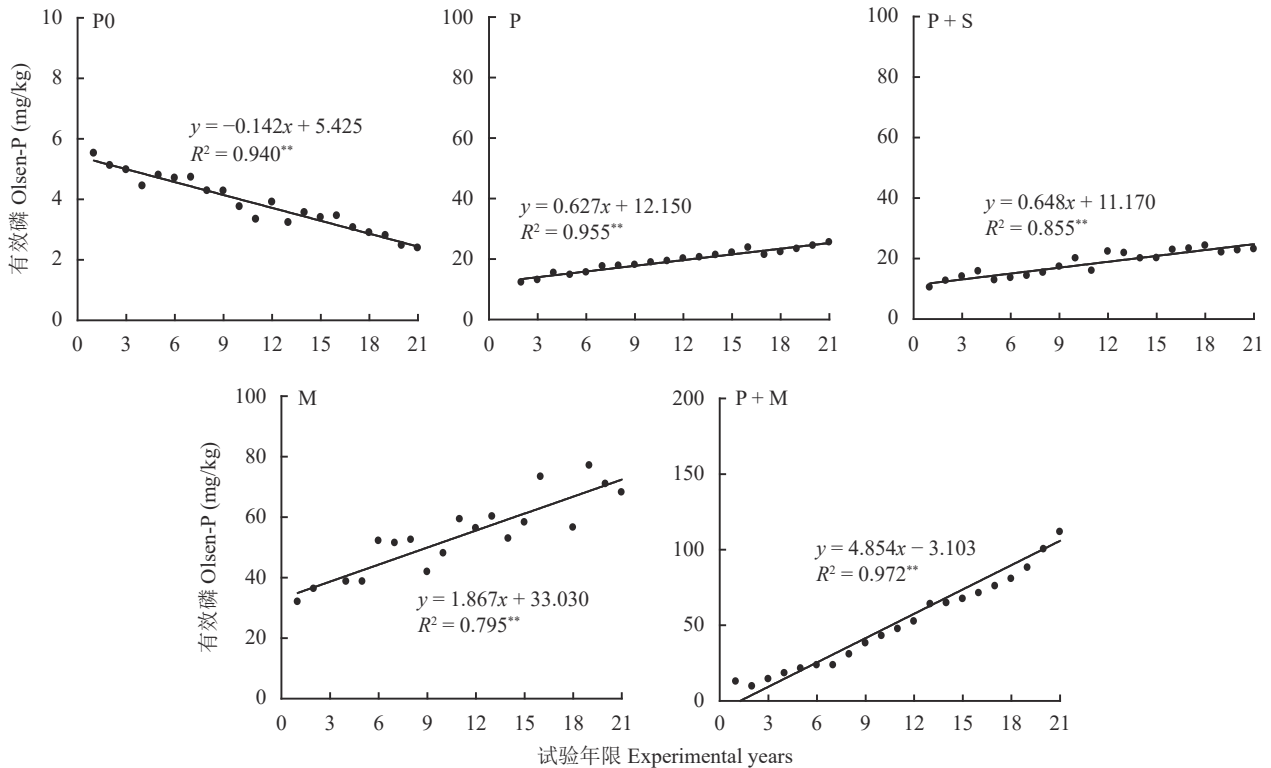


图 1 各处理土壤有效磷含量的演变特征

Fig. 1 Changes of soil Olsen-P contents in response to P treatments

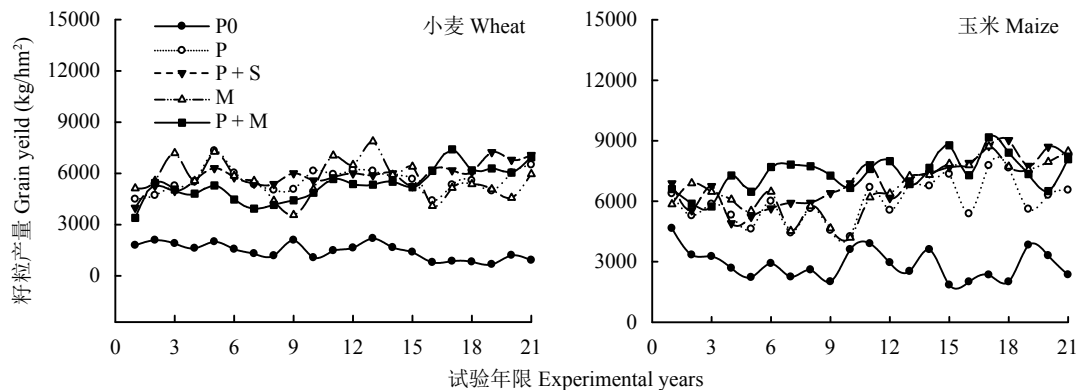


图 2 各处理小麦和玉米籽粒产量的变化趋势

Fig. 2 Dynamics of wheat and maize grain yields in response to P treatments

用 Mitscherlich 方程模拟 (图 3), 且均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。随着土壤有效磷含量的升高, 小麦和玉米产量先快速上升然后趋于逐渐平稳。计算结果表明, 小麦产量达到最大值的 90% 时, 土壤有效磷含量为 22.47 mg/kg; 玉米产量达到最大值的 90% 时, 土壤有效磷含量为 20.68 mg/kg。

### 2.3 长期不同施肥处理磷肥利用率与土壤有效磷含量的关系

长期不同施肥处理小麦和玉米的磷肥利用率 (phosphorus use efficiency, PUE) 动态变化见图 4。

P、P+S、M 和 P+M 4 个施磷处理 21 年间小麦的磷肥利用率均值分别为 13.29%、16.17%、13.03% 和 9.25%, P+M 处理的磷肥利用率显著低于其它 3 个处理 ( $P < 0.05$ )。P+S 处理的磷肥利用率随着试验年限的增加而稳定提升, 从试验的第 12 年起, P+S 处理的磷肥利用率显著高于其它 3 个处理 ( $P < 0.05$ )。4 个施磷肥处理 P、P+S、M 和 P+M 21 年间玉米的磷肥利用率均值分别为 10.47%、12.67%、16.45% 和 8.88%, 以单施有机肥 M 处理下最高, P+M 处理下最低。

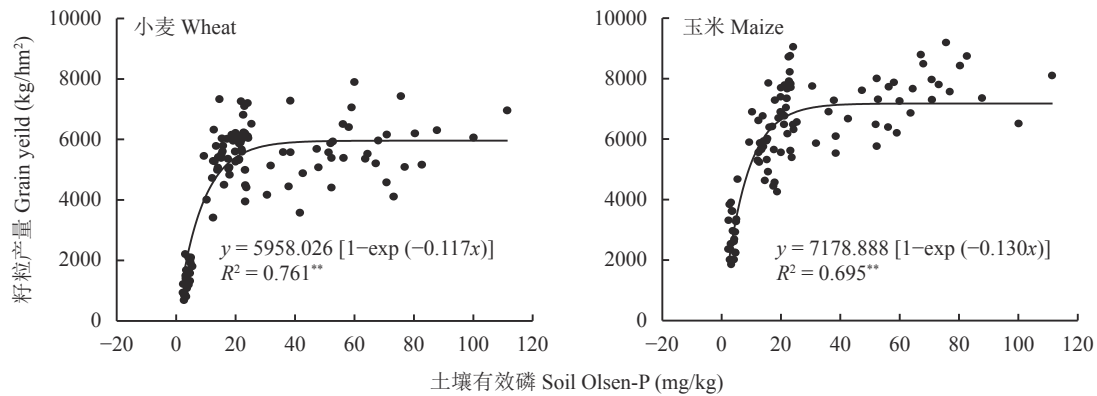


图3 碱性土壤有效磷含量与小麦和玉米产量的关系

Fig. 3 Relationships between soil Olsen-P contents and yields of wheat and maize on alkaline soil

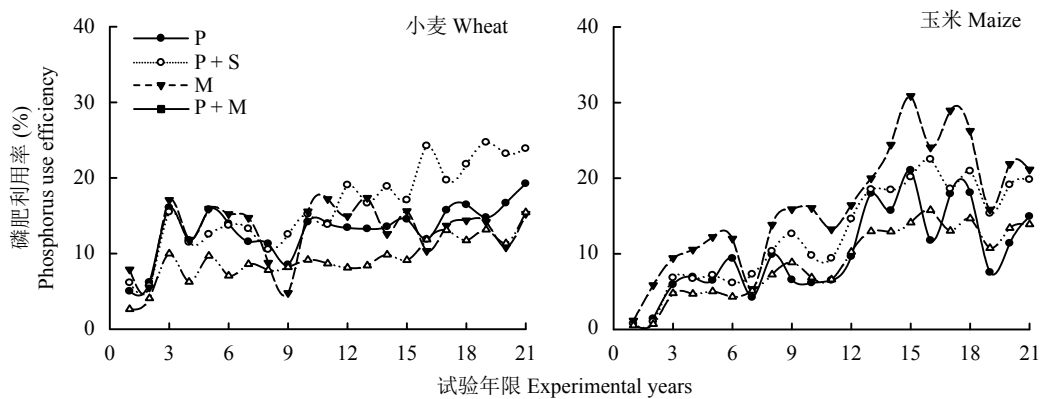


图4 各施肥处理小麦和玉米磷肥利用率随试验年限的变化规律

Fig. 4 Dynamics of phosphorous use efficiency of wheat and maize with experimental years under different fertilization treatments

由图5可以看出,施用磷肥后,除玉米M处理外,小麦和玉米的磷肥利用率随土壤有效磷含量的升高显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )上升,上升速率大小顺序为 $P+S > P > M > P+M$ 。玉米磷肥利用率随土壤有效磷含量增加的幅度大于小麦。

#### 2.4 长期不同施肥土壤磷盈亏及其与土壤有效磷含量的关系

连续21年不同施肥处理土壤磷累积盈亏状况见图6,正值代表土壤磷盈余,负值代表土壤磷亏缺。不施磷肥处理(P0)土壤磷素一直处于亏缺状态,且亏缺量随着种植时间延长逐渐增大,在21年间的范围为 $-357.73 \sim -28.21 \text{ kg/hm}^2$ ,土壤磷的亏缺速率为 $15.57 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{year})$ 。4个施磷肥处理的土壤磷均为盈余,以M处理盈余量最低,为 $36.23 \sim 233.8 \text{ kg/hm}^2$ ,P与P+S处理前15年土壤磷素累积盈余量差异很小,分别为 $34.21 \sim 379.26$ 和 $23.65 \sim 340.23 \text{ kg/hm}^2$ ,而连续施肥15~21年,P+S处理土壤磷盈余量下降。P+M土壤磷素盈余量最高,范围为 $53.23 \sim$

$860.93 \text{ kg/hm}^2$ 。

土壤每盈余或亏缺 $100 \text{ kg/hm}^2$ 磷对应的土壤有效磷的变化量为土壤有效磷效率<sup>[9]</sup>。由图7所示,土壤有效磷含量与土壤磷盈亏呈现极显著直线正相关关系( $P < 0.01$ ),土壤每亏缺 $100 \text{ kg/hm}^2$ 磷,土壤有效磷下降 $0.90 \text{ mg/kg}$ ;土壤每盈余 $100 \text{ mg/hm}^2$ 磷,不同施磷肥处理土壤有效磷的增加量不同,增加量由高至低为 $M (22.10 \text{ mg/kg}) > P+M (10.60 \text{ mg/kg}) > P+S (3.90 \text{ mg/kg}) > P (2.60 \text{ mg/kg})$ 。

#### 2.5 长期不同施肥土壤有效磷效率的影响因素

以磷肥施用量、土壤有机质(SOM)、全氮、pH、碱解氮含量作为影响因素进行冗余(RDA)分析,对土壤有效磷效率变异的解释率为85.0%;施磷量和pH对土壤有效磷效率的解释率分别为7.0%和3.0%,速效钾、全氮和碱解氮对有效磷效率几乎没有影响(表3)。因此,土壤有机质含量是影响不同施肥处理土壤有效磷效率的主要因素。

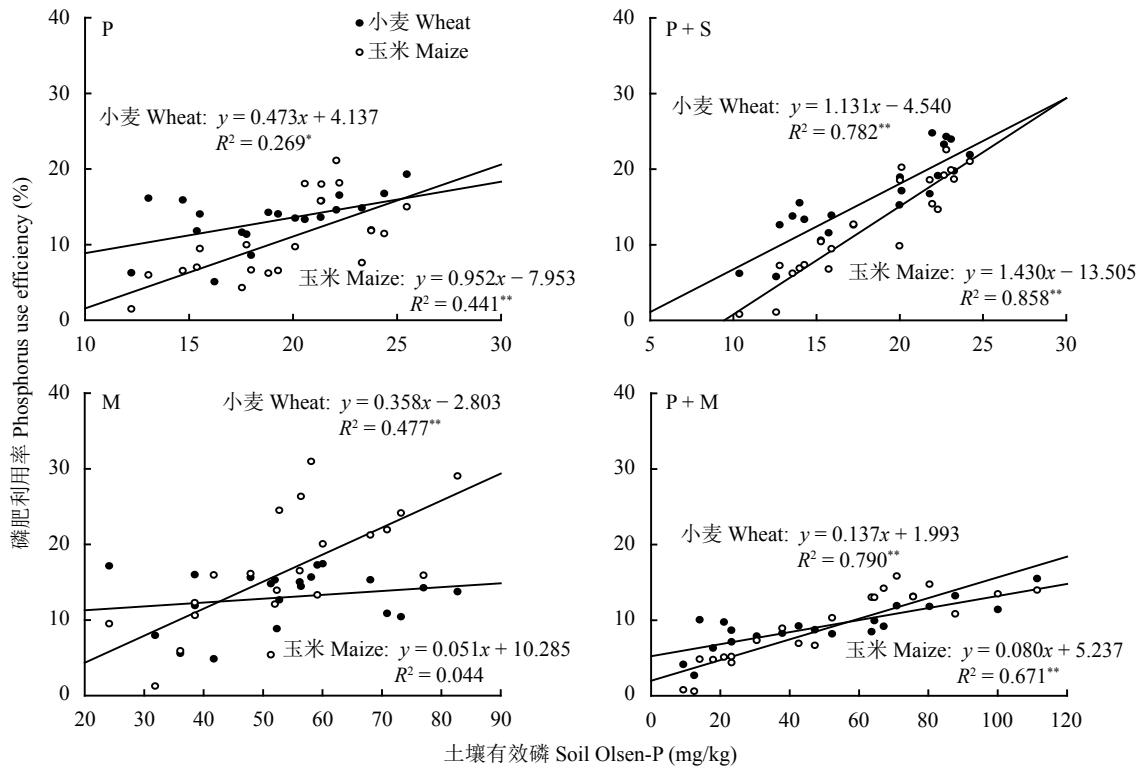


图 5 不同施肥处理小麦和玉米磷肥利用率与土壤有效磷含量的关系

Fig. 5 Response of phosphorous use efficiency of wheat and maize to soil Olsen-P content under different fertilization treatments

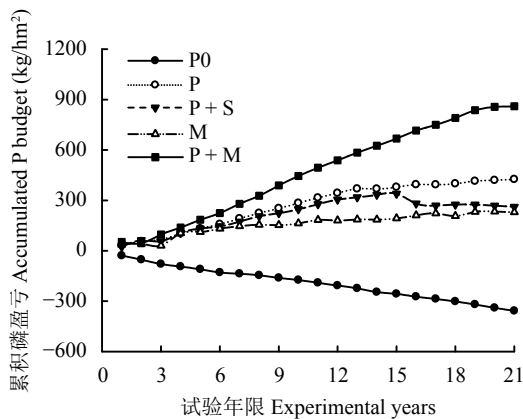


图 6 各处理土壤累积磷盈亏变化趋势

Fig. 6 Change in soil accumulated P budget under different treatments

### 3 讨论

#### 3.1 长期施肥对土壤磷素累积和作物产量的影响

旱地农田生态系统中, 灌溉、降水等其他来源和随径流流失的磷素极少<sup>[33-34]</sup>, 土壤磷素的盈亏主要取决于磷肥投入和作物携出<sup>[21-23]</sup>。磷肥施用不足会导致土壤肥力和作物产量下降, 例如西藏和内蒙古等

地区, 由于磷肥投入不足, 粮食生产潜力较低<sup>[35]</sup>。本试验碱性土地区连续 21 年不施磷肥处理下连续种植小麦、玉米, 由于作物生长一直吸收土壤磷素, 土壤磷素一直处于亏缺状态, 且亏缺量逐年增加, 土壤有效磷含量和作物产量逐年降低。当在农田中施用磷肥并且磷肥投入量高于作物携出量时, 土壤磷素便会盈余。单从本试验的施肥量看, 化肥配施有机肥处理 (P+M) 磷肥投入量远远高于其它 3 种施肥方式, 但是小麦和玉米的产量并没有显著升高, 说明仅仅增加磷肥的投入对作物增产的效果不大, 还会造成磷素在土壤中大量累积, 引起磷肥资源的浪费。单施有机肥处理 (M) 下磷肥的投入量与单施化学磷肥 (P) 差别不大, 但磷素累积量要低于 P 处理, 说明单施有机肥下作物对磷素的吸收量高于单施化学磷肥处理。土壤有效磷 (Olsen-P) 含量直接反映了可供当季作物吸收利用的磷素水平, 是评价土壤供磷水平的重要指标<sup>[36]</sup>。不施磷肥处理下土壤有效磷含量较低 (< 5 mg/kg), 并且随种植时间延长呈现下降趋势。施入不同种类磷肥后, 土壤有效磷水平显著升高 (> 10 mg/kg)。裴瑞娜等<sup>[20]</sup>对黄土高原旱作农区黑垆土的研究发现, 施用磷肥能提高土壤有效磷含

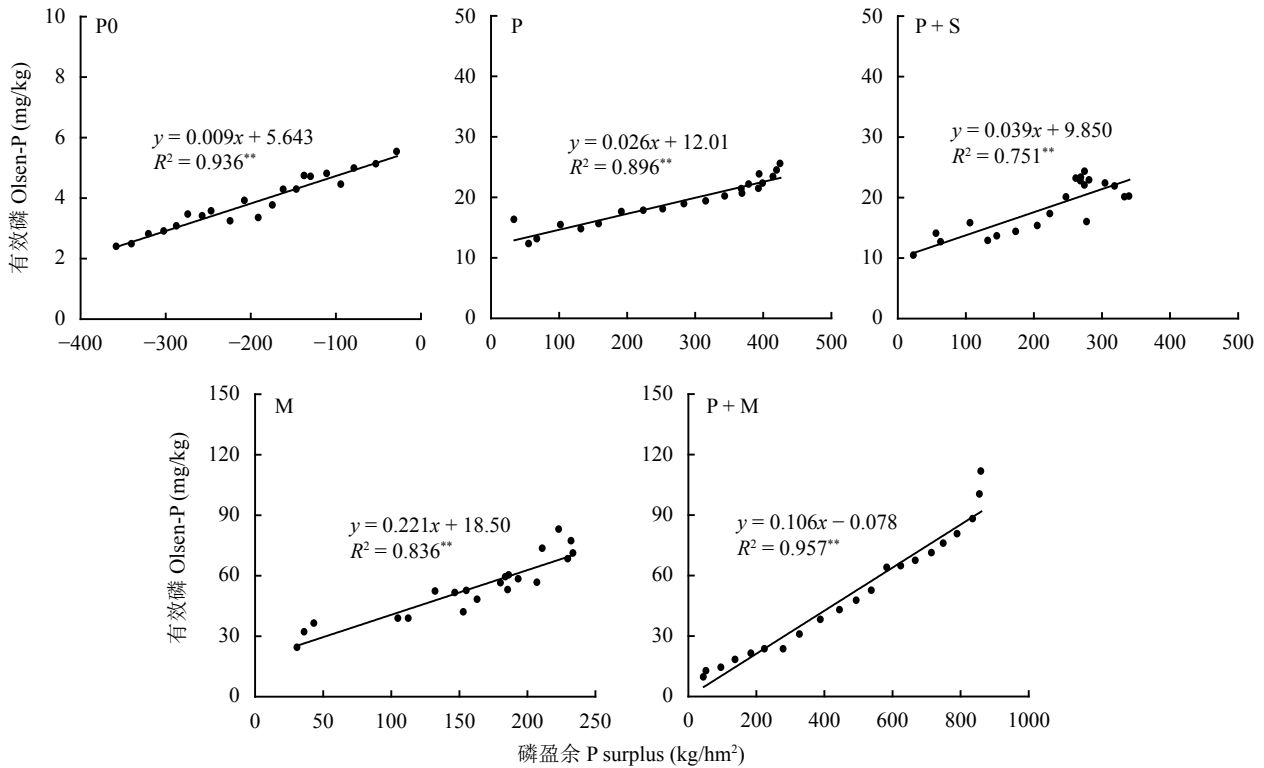


图7 各处理土壤有效磷含量与累积磷盈亏的关系

Fig. 7 Relationship between Olsen-P and accumulated budget of soil P under different treatments

表3 施磷量和土壤性质对土壤有效磷效率的解释率

Table 3 The explanation rate of soil Olsen-P efficiency by P application rate and soil properties

指标 Index	解释率 (%) Explanation rate	P 值 P-value
有机质 Organic matter	85.0	0.002
施磷量 P application rate	7.0	0.004
pH	3.0	0.030
速效钾 Available K	1.0	0.144
全氮 Total N	0.3	0.374
碱解氮 Available N	0.1	0.688

量, 不同施肥处理提高土壤有效磷的大小顺序为化肥配施有机肥 > 单施化肥 > 单施有机肥, 单施有机肥对活性较高的  $Ca_2$ -P 提高并不显著, 而施入土壤的化学磷肥除被植物吸收利用外, 大部分以有效性较高的  $Ca_2$ -P、 $Ca_8$ -P 和 Al-P 累积于土壤, 所以单施化肥对土壤磷的活化效率高于单施有机肥<sup>[37]</sup>。本试验地区碱性土单施有机肥下土壤有效磷的上升速率高于单施化学磷肥, 这是因为有机磷肥的矿化作用需要一定的水热条件, 黑垆土试验区的年均降雨为 540 mm, 本试验地区年均降雨量在 800~1600 mm,

因此本试验地区有机肥的矿化速率高于黄土高原区。

当土壤有效磷含量较低时, 作物产量随有效磷含量增加显著提高; 当土壤有效磷升高到某一水平时, 有效磷含量继续增加对作物产量的提高作用不明显<sup>[38-39]</sup>。这个土壤有效磷的临界值被定义为作物的农学阈值, 不同土壤不同作物的农学阈值不同, 一般来说红壤的农学阈值高于潮土、黑土, 并且小麦的农学阈值高于玉米<sup>[40-41]</sup>。农学阈值一般由作物相对产量和土壤有效磷含量计算得出, 本研究由于选取的施肥处理作物产量差异不大, 因此计算出来的相对产量大多数较高, 不适合模拟农学阈值。但是我们模拟了碱性土地地区不同施肥方式下土壤有效磷含量与作物产量的关系后发现, 作物产量随土壤有效磷含量升高呈先上升后下降的变化趋势, 且小麦和玉米产量变化的转折点分别为土壤有效磷含量 22.47 和 20.68 mg/kg。单施化肥 (P) 和化肥配施秸秆 (P+S) 处理长期施肥 15 年之后, 土壤有效磷含量达到作物产量转折点的有效磷含量, 且土壤有效磷在长期施肥 21 年后仍低于 40 mg/kg (环境阈值), 说明长期磷肥施用量 ( $P_2O_5$ ) 126.48~133.78 mg/kg 基本能够满足该地区作物的磷肥需求。单施有机肥 (M) 和化肥配施有机肥 (P+M) 处理施肥 10 年后, 土壤有



效磷含量超过环境阈值, 2001 年以后土壤有效磷含量高达 47.45~111.52 mg/kg。但是这两种处理下的作物产量却没有显著高于 P、P+S 处理, 并且土壤有效磷含量过高容易引起农业面源污染。金欣等<sup>[42]</sup>的研究结果与本研究类似, 尽管化肥配施有机肥显著提高了土壤有机质含量, 改善了土壤物理性质, 但是与只施用化学氮磷钾肥相比, 化肥配施有机肥并没有表现出更高的产量优势<sup>[43]</sup>。所以仅仅增加施肥量并不能显著提高作物产量, 因此要减少单施有机肥、化肥配施有机肥两个处理下的施磷量。

### 3.2 长期施肥土壤有效磷与磷盈亏的响应关系及磷肥高效利用

农田土壤有效磷含量的变化主要取决于农田土壤磷平衡的盈余或亏缺。国内外不同的长期定位试验点均发现, 土壤有效磷含量与磷盈亏呈现显著直线正相关关系<sup>[44-45]</sup>。且不同气候条件、土壤类型、施肥方式和耕作制度下, 土壤每盈亏 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷的变化量不同。哈尔滨地区黑土每累积 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 不同施肥处理下土壤有效磷增加 4.80~7.75 mg/kg<sup>[17]</sup>; 天津潮土<sup>[23]</sup>每累积 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 不同施肥处理下土壤有效磷含量增加 1.19~3.59 mg/kg; 而湖南望城区红壤性水稻土每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷提高 1.2 mg/kg<sup>[46]</sup>。土壤有效磷含量随土壤累积磷的变化代表着土壤累积磷的活化能力<sup>[19]</sup>。一般来说, 有机质含量较高的土壤(黑土)累积磷的活化速率高于有机质含量较低的土壤(潮土、红壤等)。并且化肥配施有机肥和单施有机肥处理, 土壤累积磷的活化速率高于单施化学磷肥和化肥配施秸秆处理<sup>[47]</sup>。本试验不同施用磷肥处理下, 每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷升高的大小顺序为单施有机肥 > 化肥配施有机肥 > 化肥配施秸秆 > 单施化学磷肥, 通过冗余分析发现土壤有机质含量与土壤有效磷效率呈现极显著正相关关系, 与对黑土的研究结果<sup>[17]</sup>类似。单施有机肥或配施有机肥能显著提高土壤累积磷活化速率的机制, 一方面是由于有机肥中含有大量的植物可利用态磷; 有机肥中的有机质含量较高, 在一定的水热条件下可以矿化产生作物可利用磷<sup>[48-49]</sup>; 有机质在分解过程中生成的腐殖酸和小分子有机酸, 能与磷酸根竞争土壤颗粒的吸附位点或者在土壤矿物表面形成保护膜, 降低其对磷的吸附<sup>[50-51]</sup>; 有机酸也会引起 pH 降低, 提高土壤磷的吸附容量<sup>[52]</sup>, 提高土壤有效磷效率。

磷肥的高效利用是当前农业施肥中重点关注的

问题<sup>[53-54]</sup>。磷肥的投入不仅会被当年作物吸收利用, 并且会累积在土壤中, 残留的磷对作物生长产生影响<sup>[55]</sup>。本试验中, 小麦和玉米磷肥利用率在化肥配施有机肥处理下最低, 在化肥配施秸秆处理和单施有机肥处理下较高。随着施磷量的增加, 磷肥利用率呈下降趋势<sup>[56]</sup>, 说明过量施用磷肥不会提高作物对磷肥的利用效率。小麦和玉米在 P+M 处理下磷肥利用率随土壤有效磷含量升高上升速率最小, 并且此处理下土壤累积磷量最高, 施肥后期高达 900 kg/hm<sup>2</sup>, 造成了磷肥资源的浪费, 所以研究区现阶段 P+M 处理磷肥的总施用量和有机无机肥的比例不合理。化肥配施秸秆和单施有机肥处理土壤磷肥利用率随土壤有效磷含量升高上升速率较快, 并且土壤磷的累积量不高(低于 300 kg/hm<sup>2</sup>), 但是秸秆、有机肥中磷含量低于化学磷肥, 施用等量的磷需要的有机肥量很大, 因此在实际生产实践中有机肥需要搭配化学磷肥施用。提高有机肥在化肥配施有机肥中的比例能够提高土壤累积磷的活化速率, 例如江西南昌的试验发现土壤每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 无机有机肥比例为 3:7 时有效磷的提高量(11.40 mg/kg)要高于无机有机肥比例为 7:3 时有效磷的增量(7.41 mg/kg)<sup>[57]</sup>。本试验碱性土在实际施肥实践中, 化肥配施有机肥处理下有机无机肥的比例大约在 2:1 左右, 因此在生产实践中, 应该降低 P+M 处理总的磷肥施用量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 使之维持在单施有机肥和化肥配施秸秆水平[P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 126.48~167.81 kg/(hm<sup>2</sup>·year)], 并且提高有机肥的配施比例, 可以达到提高土壤累积磷的活化速率、提高磷肥利用率的目的。

## 4 结论

在碱性土壤上, 土壤磷盈余与有效磷含量呈现极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。土壤每盈余 P 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤有效磷增加量在单施有机肥处理下为 22.10 mg/kg, 磷肥配施有机肥处理为 10.60 mg/kg, 磷肥配合秸秆处理为 3.90 mg/kg, 单施磷肥处理仅为 2.60 mg/kg。

有机质含量是影响土壤有效磷效率的主要因素。施肥 20 年后, 单施有机肥和化肥配施有机肥处理下土壤有效磷效率较高, 土壤有效磷含量后期能达到 100~140 mg/kg, 单施化学磷肥和化肥配施秸秆的处理土壤有效磷含量不会超过 40 mg/kg 的环境阈值。

本试验土壤条件下, 小麦、玉米产量达到最大

值的 90% 时土壤有效磷含量分别为 22.47 和 20.68 mg/kg。磷肥利用率随着土壤有效磷含量的增加而增加, 以化肥配施秸秆处理提高小麦磷肥利用率的效果最佳, 化肥配施有机肥处理的磷肥利用率最低。化肥配施有机肥处理下容易造成磷的固定和淋洗损失, 因此, 需要适当减少此处理下的磷肥投入总量, 提高有机磷肥的施用比例。

**致谢:** 感谢山西省农业科学院土壤肥料研究所、河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所、天津市农业资源与环境研究所、青岛农业大学资源与环境学院、河北省农林科学院旱作农业研究所各长期定位试验站的科研人员对作物和土壤样品的采集。

### 参 考 文 献:

- [1] 陆景陵, 张福锁, 曹一平. 植物营养学(上)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.  
Lu J L, Zhang F S, Cao Y P. Plant nutrition (Part 1)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001.
- [2] Childers D L, Corman J, Edwards M, Elser J. Sustainability challenges of phosphorus and food: Solutions from closing the human phosphorus cycle[J]. *Bioscience*, 2011, 61(2): 117–124.
- [3] Hawkesford M, Horst W, Kichey T, *et al.* Marschner's mineral nutrition of higher plants phosphorus (3rd Edition)[M]. London, UK: Academic Press, 2012.
- [4] Balemi T, Negisho K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review[J]. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 2012, 12(3): 547–562.
- [5] Withers P J A, van Dijk K C, Neset T S. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe[J]. *Ambio*, 2015, 44(2): 193–206.
- [6] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4–7.  
Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4–7.
- [7] Messiga A J, Ziadi N, Plénet D, *et al.* Long-term changes in soil phosphorus status related to P budgets under maize monoculture and mineral P fertilization[J]. *Soil Use and Management*, 2010, 26(3): 354–364.
- [8] Rowe H, Withers P J A, Baas P, *et al.* Integrating legacy soil phosphorus into sustainable nutrient management strategies for future food, bioenergy and water security[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 104(3): 393–412.
- [9] 郭胜利, 周印东, 张文菊, 等. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 16–22.  
Guo S L, Zhou Y D, Zhang W J, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizer on food production and soil quality attributes[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 16–22.
- [10] Syers J K, Johnston A E, Curtin D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information[M]. Rome, FAO Inter-Departmental Working Group, 2008.
- [11] Macdonald G K, Bennett E M, Potter P A, *et al.* Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(7): 3086–3091.
- [12] 朱兆良. 肥料与农业和环境[J]. 大自然探索, 1998, (4): 2–4.  
Zhu Z L. Fertilizers, agriculture and the environment[J]. *Explosion of Nature*, 1998, (4): 2–4.
- [13] Johnston A E, Poulton P R. The role of phosphorus in crop production and soil fertility-150 years of field experiments at Rothamsted, United-Kindom[A]. Schultz J J. Phosphate Fertilizers and the Environment[M]. USA, Muscle Shoals: IFDC, 1992, 45–63.
- [14] Aulakh M S, Garg A K, Kabba B S. Phosphorus accumulation, leaching and residual effects on crop yields from long-term application in the subtropics[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23: 417–427.
- [15] Cao N, Chen X, Cui Z, *et al.* Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94: 161–170.
- [16] Shepherd M A, Withers P J. Applications of poultry litter and triple superphosphate fertilizer to a sandy soil: Effects on soil phosphorus status and profile distribution[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 233–242.
- [17] Zhan X, Zhang L, Zhou B, *et al.* Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in black soils under different long term fertilization patterns[J]. *PLoS ONE*, 2015, 7: e0131713.
- [18] Tang X, Li J, Ma Y, *et al.* Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat–maize cropping systems with various soil and climate conditions[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(3): 231–237.
- [19] 展晓莹, 任意, 张淑香, 等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4728–4737.  
Zhan X Y, Ren Y, Zhang S X, *et al.* Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4728–4737.
- [20] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 等. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4008–4015.  
Pei R N, Yang S M, Xu M G, *et al.* Response of Olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 4008–4015.
- [21] Zhang W W, Zhan X Y, Zhang S X, *et al.* Response of soil Olsen-P to P budget under different long-term fertilization treatments in a fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(3): 667–676.
- [22] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥褐土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1529–1535.  
Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, *et al.* Response of Olsen-P to P balance in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1529–1535.

- [23] 杨军, 高伟, 任顺荣. 长期施肥条件下潮土土壤磷素对磷盈亏的响应[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4738–4747.  
Yang J, Gao W, Ren S R. Response of soil phosphorus to P balance under long-term fertilization in fluvo-aquic soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4738–4747.
- [24] MacDonald G K, Bennett E M, Taranu Z E. The influence of time, soil characteristics, and land-use history on soil phosphorus legacies: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1904–1917.
- [25] Sánchez-Alcalá I, del Campillo M C, Barrón V, Torrent J. The Olsen P/solution P relationship as affected by soil properties[J]. *Soil Use & Management*, 2014, 30(4): 454–462.
- [26] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566–567: 1080–1093.
- [27] 黄峰, 杜太生, 王素芬, 等. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(5): 28–37.  
Hang F, Du T S, Wang S F, *et al.* Current situation and future security of agricultural water resources in North China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 28–37.
- [28] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.  
National Bureau of Statistics of China. *Statistical yearbook of China* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [29] 李庆远, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1988. 52–60.  
Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. The fertilizer problem in the sustainable development of Chinese agriculture[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1988. 52–60.
- [30] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.  
National Soil Census Office. *China soil* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998.
- [31] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.  
Lu R K. *Methods of soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [32] Xia H Y, Wang Z G, Zhao J H, *et al.* Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 53–64.
- [33] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出和平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.  
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [34] Wang X, Feng A, Wang Q, *et al.* Spatial variability of the nutrient balance and related NPSP risk analysis for agroecosystems in China in 2010[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 193: 42–52.
- [35] 曾希柏, 陈同斌, 林忠辉, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 539–546.  
Zeng X B, Chen T B, Lin Z H, *et al.* Grain productivity and its potential as related to fertilizer consumption among different counties of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 539–546.
- [36] 胡霁堂. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.  
Hu A T. *Plant nutrition (II)*[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1995.
- [37] 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. II. 土壤Olsen-P及各形态无机磷的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 365–368.  
Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation. II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365–368.
- [38] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, *et al.* Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36 year experiment in southern France[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(2): 154–165.
- [39] Johnston A E, Poulton P R, White R P. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam[J]. *Soil Use & Management*, 2013, 29(1): 12–21.
- [40] 李冬初, 王伯仁, 黄晶, 等. 长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(21): 3830–3841.  
Li D C, Wang B R, Huang J, *et al.* Change of phosphorus in red soil and its effect to grain yield under long-term different fertilizations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3830–3841.
- [41] 孙翠平, 张英鹏, 罗加法, 等. 长期施肥对山东潮土磷盈亏及农学阈值的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(5): 185–191.  
Sun C P, Zhang Y P, Luo J F, *et al.* Effect of long-term fertilization on phosphorus (P) balance and critical value of soil Olsen-P in fluvo-aquic soil of Shandong Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(5): 185–191.
- [42] 金欣, 姚珊, Batbayar J, 等. 冬小麦-夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1660–1671.  
Jin X, Yao S, Batbayar J, *et al.* Response of wheat yield and soil phosphorus fraction to long-term fertilization under rainfed winter wheat summer fallow cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1660–1671.
- [43] Yang X Y, Li P R, Zhang S L. Long-term fertilization effects on soil organic carbon, physical properties, and wheat yield of a loess soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(5): 775–784.
- [44] Johnston A E. *Soil and plant phosphate*[M]. Pairs: International Fertilizer Industry Association Press, 2000. 27–29.
- [45] 张淑香, 徐明岗. 土壤磷素演变与高效利用[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(21): 3828–3829.  
Zhang S X, Xu M G. Change of soil phosphorus and its efficient utilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3828–3829.
- [46] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及其对磷盈亏的响应[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1471–1485.  
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Evolution of soil phosphorus in reddish paddy soil under long-term fertilization varying in formulation and its response to P balance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1471–1485.
- [47] Zhang W, Wang Q, Wu Q, Zhang S, *et al.* The response of soil Olsen-P to the P budgets of three typical cropland soil types under

- long-term fertilization[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(3): e0230178.
- [48] Chu H, Lin X, Fujii T, *et al.* Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(11): 2971–2976.
- [49] Li L, Liang X, Ye Y, *et al.* Effects of repeated swine manure applications on legacy phosphorus and phosphomonoesterase activities in a paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 51(2): 167–181.
- [50] Dou Z, Ramberg C F, Toth J D, *et al.* Phosphorus speciation and sorption–desorption characteristics in heavily manured soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 93–101.
- [51] Meng C, Liu H, Wang Y, *et al.* Response of regional agricultural soil phosphorus status to net anthropogenic phosphorus input (NAPI) determined by soil pH value and organic matter content in subtropical China[J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 487–494.
- [52] Arai Y, Sparks D L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: A multiscale approach[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 94(6): 135–179.
- [53] Vance C P, UhdeStone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource [J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423–447.
- [54] Thornton M K, Novy R G, Stark J C. Improving phosphorus use efficiency in the future[J]. *American Journal of Potato Research*, 2014, 91(2): 175–179.
- [55] Rubæk G H, Kristensen K, Olesen S E, *et al.* Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark[J]. *Geoderma*, 2013, 209–210: 241–250.
- [56] 蒯飞阳, 杜艾芳, 许秀春, 等. 华北地区夏玉米生产中磷素利用特征研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(7): 11–15.  
Lin F Y, Du A F, Xu X C, *et al.* Phosphorous utilization during summer maize production in north China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(7): 11–15.
- [57] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.  
Xu M G, Zhang W J, Huang S M. Fertility evolution in Chinese[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015.