



# 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响

王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 李小坤, 丛日环, 鲁剑巍

(华中农业大学微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:**【目的】探究长江流域水旱轮作制度下, 化学磷肥和秸秆还田配施磷肥对作物生产力的贡献, 以及对土壤磷有效性和磷素效率的影响, 为农田土壤磷素管理提供科学依据。【方法】试验于 2014—2018 年在湖北省武汉市华中农业大学进行, 选取定位试验中的 3 个处理, 分别为: (1) 不施磷 (NK); (2) 施磷 (NPK); (3) 施磷配合秸秆还田 (NPK+S)。通过测定作物产量、磷含量及土壤有效磷, 分析作物磷素利用效率, 探讨土壤有效磷变化与磷累积盈亏的响应关系。【结果】与 NK 处理相比, NPK 处理的油菜和水稻平均产量分别提高 530.3% 和 35.9%, 磷积累量分别提高 495.3% 和 98.5%; 与 NPK 处理相比, NPK+S 处理的油菜和水稻平均产量分别提高 19.1% 和 11.0%, 磷积累量分别提高 20.6% 和 11.7%; 油菜产量和磷积累量对磷肥和秸秆的响应优于水稻。秸秆还田条件下, 油菜和水稻的平均磷素农学效率分别提高 6.8% 和 33.9%, 油菜、水稻和周年的磷素累积利用率分别提高 8.6%、17.0% 和 19.8%。秸秆还田对水稻磷素利用率和农学效率的影响更为显著。4 年油菜水稻轮作后, 不施磷处理土壤磷素累积亏缺  $110.2 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ , 有效磷浓度为  $1.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 施磷处理土壤磷素累积盈余  $210.9 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ , 有效磷浓度 ( $4.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 较不施磷处理提高 126.3%; 施磷配合秸秆还田处理土壤磷素累积盈余 ( $222.1 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 较 NPK 处理增加 5.3%, 有效磷浓度 ( $5.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 较 NPK 处理提高 18.6%。秸秆还田显著提高了土壤有效磷浓度, 但土壤磷盈余量没有明显增加。连续秸秆还田和施用化学磷肥条件下, 水稻土每盈余  $100 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的磷, NPK 和 NPKS 处理土壤有效磷分别提高 1.8 和  $2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆还田促进了土壤磷素有效化。【结论】施磷显著增加了油菜、水稻的产量和磷积累量, 提升了土壤磷盈余量和有效磷浓度; 秸秆还田在施磷肥的基础上进一步增加了油菜、水稻的产量和磷积累量, 提高了作物特别是水稻对磷素的利用率和农学效率, 同时能够在避免土壤磷素过量积累的情况下提高土壤有效磷浓度。

**关键词:** 油菜水稻轮作; 秸秆还田; 作物产量; 磷积累量; 磷素效率; 磷表观平衡; 有效磷

## Effect of Continuous Straw Returning on Soil Phosphorus Availability and Crop Phosphorus Utilization Efficiency of Oilseed Rape-Rice Rotation

WANG KunKun, LIAO ShiPeng, REN Tao, LI XiaoKun, CONG RiHuan, LU JianWei

(Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University /Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070)

**Abstract:** 【Objective】By exploring the contribution of chemical phosphorus fertilizer and straw returning combined with phosphorus fertilizer to crop productivity, as well as the effect on soil phosphorus availability and phosphorus efficiency under the

收稿日期: 2019-04-22; 接受日期: 2019-06-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200206)、国家油菜产业技术体系建设专项 (CARS-12)、中央高校基本科研业务费专项资金 (2662017JC010)

联系方式: 王昆昆, E-mail: wangkk@webmail.hzau.edu.cn. 通信作者丛日环, E-mail: congrihuan@webmail.hzau.edu.cn

system of oilseed rape-rice rotation in the Yangtze River, this paper provided a scientific basis for farmland soil phosphorus management. 【Method】 The experiment was conducted at Huazhong Agricultural University in Wuhan, Hubei Province during the period of 2015-2018. Three treatments in the positioning experiment were selected as followed: (1) phosphorus was not applied (NK); (2) phosphorus application (NPK); (3) phosphorus application and straw returning (NPK+S). By measuring crop yield, phosphorus content and soil Olsen-P, the phosphorus use efficiency of crops was analyzed, and the response of soil Olsen-P to P apparent balance was discussed. 【Result】 The average yield of oilseed rape and rice under NPK treatment increased by 530.3% and 35.9%, respectively, and the  $P_2O_5$  accumulation increased by 495.3% and 98.5%, respectively, compared with NK treatment. The average yield of oilseed rape and rice under NPK+S treatment increased by 19.1% and 11.0%, respectively, and the  $P_2O_5$  accumulation increased by 20.6% and 11.7%, respectively, compared with NPK treatment. The response of oilseed rape yield and  $P_2O_5$  accumulation to phosphorus fertilizer and straw was better than that of rice. Under the condition of straw returning, the average agronomic efficiency of oilseed rape and rice increased by 6.8% and 33.9%, respectively, and the accumulative phosphorus use efficiency of oilseed rape, rice and anniversary increased by 8.6%, 17.0% and 19.8%, respectively. The effect of straw returning on phosphorus use efficiency and agricultural efficiency of rice was more significant. After four years of oilseed rape-rice rotation, the accumulated deficit of phosphorus in soil was  $110.2 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{hm}^{-2}$  under NK treatment, and the Olsen-P was  $1.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The accumulated phosphorus surplus of soil under NPK treatment was  $210.9 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the Olsen-P ( $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) was 126.3% higher than that under NK treatment. NPK+S treatment increased the accumulated phosphorus surplus ( $222.1 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) by 5.3%, and the Olsen-P ( $5.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) increased by 18.6% compared with NPK treatment. Straw returning significantly increased the soil Olsen-P, but the soil phosphorus surplus did not increase significantly. Under the condition of continuous straw returning and chemical phosphorus fertilizer application, for every  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  P surplus of paddy soil, soil Olsen-P under NPK and NPKS treatment increased by 1.8 and  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. Straw returning promoted soil phosphorus availability. 【Conclusion】 Phosphorus application significantly increased the yield and  $P_2O_5$  accumulation of oilseed rape and rice, and increased the P surplus and the soil Olsen-P. On the basis of phosphorus application, straw returning further increased the yield and  $P_2O_5$  accumulation of oilseed rape and rice, and improved the use efficiency of phosphorus and agricultural efficiency of crops, especially for rice. At the same time, it could increase the soil Olsen-P while avoiding the excessive accumulation of soil phosphorus.

**Key words:** oilseed rape-rice rotation; straw returning; crop yield;  $P_2O_5$  accumulation; phosphorus efficiency; P apparent balance; Olsen-P

## 0 引言

【研究意义】磷肥的施用改善了作物对磷的吸收利用,同时也增加了土壤磷库储量和土壤供磷能力,是保证作物增产、稳产的重要农业举措<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着单位面积磷肥用量的不断增加,我国农田系统土壤磷含量呈增长趋势。然而由于气候因素、地形和种植制度的差异,不同区域土壤磷分布严重不平衡<sup>[3]</sup>,LI 等<sup>[4]</sup>研究了我国土壤有效磷的历史变化,其含量 26 年总体上提高了  $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而长江流域的土壤有效磷仅增加了  $7.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。长江流域降雨量较大,存在径流损失,造成农田土壤有效磷含量低,水体富营养化<sup>[5-6]</sup>,导致长江口水域活性磷酸盐超标<sup>[7]</sup>。土壤磷素过量积累会增加环境污染风险<sup>[8]</sup>,土壤磷素亏缺则限制作物生长而导致减产。因此如何通过合理施磷在提高作物产量和土壤磷活化能力的同时,避免土壤磷素过量积累而造成的环境污染风险,已成为近年来农业和环境科学领域研究的热点问题。【前人研究进展】

秸秆还田已成为当前农业生产中的一项重要措施。多个长期定位试验研究结果表明,连续秸秆还田能够提高作物产量和土壤磷库容量<sup>[9-11]</sup>。黄欣欣等<sup>[12]</sup>长期研究结果表明,当土壤输入磷量高于作物输出磷量时,秸秆还田对无机磷总量和 Olsen-P 含量分别显著增加 34.4%和 56.5%。赵小军等<sup>[13]</sup>研究发现,土壤速效磷的增加主要是由于秸秆还田促进了其他形态的磷转化而来,在 0—15 cm 土层中,速效磷增加 27%。秸秆还田能改善土壤理化性状,增加土壤有机碳含量,提高土壤养分库容,增加土壤中微生物数量和磷酸酶活性<sup>[14-16]</sup>,进而活化土壤中稳活性和非活性形态磷素,减少土壤矿物对磷的固定,促进土壤磷循环;也可以减少因侵蚀、径流或淋溶而造成的磷损失,使土壤磷素更多的被作物吸收利用,进而提高作物磷肥利用率<sup>[17-20]</sup>。水旱轮作是长江流域最具代表性和分布最广泛的耕作制度,其季节性的干湿交替导致土壤氧化与还原过程交替进行,影响着土壤无机磷和有机磷的有效性<sup>[5,21]</sup>。【本研究切入点】以上研

究多从单一方面关注秸秆还田对作物产量或土壤磷素转化的影响,然而从多年连续跟踪试验来看,连续秸秆还田对土壤磷素活化的持续能力和对作物磷素累积利用效率的研究仍十分不足。【拟解决的关键问题】本研究选择严重缺磷的土壤开展油菜-水稻共 4 年 8 季的轮作体系定位试验研究,拟分析当前推荐磷肥用量下作物增产效果以及周年秸秆还田配施磷肥对油菜-水稻轮作系统作物产量持续性、土壤供磷持续力以及磷素盈亏对土壤磷素有效性变化的影响,探讨油菜-水稻轮作条件下秸秆还田对当前磷素利用率及土壤磷有效性的效果,以期为长江流域油菜-水稻轮作的磷肥施用和秸秆资源利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

定位试验于 2014 年 10 月至 2018 年 10 月在华中农业大学校内试验基地 (30°28'10"N, 114°21'21"E) 进行。供试土壤为水稻土,耕层 (0—20 cm) 土壤基础理化性质为: pH 7.0, 有机质 5.4 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.5 g·kg<sup>-1</sup>,

有效磷 1.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 109.6 mg·kg<sup>-1</sup>。

1.2 试验设计

本文选取定位试验中的 3 个处理,分别为: (1) 不施磷 (NK); (2) 施磷 (NPK); (3) 施磷配合秸秆还田 (NPK+S)。油菜季各处理化学肥料用量为: N 180 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>、硼砂 15 kg·hm<sup>-2</sup>; 氮肥按照 60%基肥+20%提苗肥+20%越冬肥施用,磷、钾和硼肥均一次性基施。水稻季各处理化学肥料用量为: N 165 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 75 kg·hm<sup>-2</sup>; 氮肥按照 60%基肥+20%分蘖肥+20%穗肥施用,磷、钾均一次性基施。肥料品种分别为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾 (含 K<sub>2</sub>O 60%) 和硼砂 (含 B 11%)。油菜季的秸秆 (稻草) 采用覆盖还田的方式,水稻季的秸秆 (油菜秆) 采用翻压还田的方式,还田量均为 6 000 kg·hm<sup>-2</sup>。各处理具体施肥量见表 1。试验采用随机区组排列,3 次重复,小区面积 29.7 m<sup>2</sup>。供试油菜品种为华油杂 9 号,移栽密度为 7 500 株/667m<sup>2</sup>,水稻品种为广两优 1618,移栽密度为 16 000 兜/667m<sup>2</sup>。病虫草害等其他田间管理措施同常规。

表 1 2014—2018 每年养分投入量  
Table 1 Total annual inputs of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O nutrients from 2014 to 2018 (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	油菜季 Oilseed rape		水稻季 Rice	
	化肥 Chemical fertilizer (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	秸秆 Straw (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	化肥 Chemical fertilizer (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	秸秆 Straw (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)
NK	180-0-75	0-0-0	165-0-75	0-0-0
NPK	180-60-75	0-0-0	165-60-75	0-0-0
NPK+S	180-60-75	61.8-8.9-187.5	165-60-75	20.2-3.4-151.1

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品 每季作物收获后采用多点采样法采集 0—20 cm 耕层土壤,拣出杂草和碎石,按照“四分法”取 1 kg 带回试验室于阴凉、通风处风干,并用木槌磨细过 0.85 mm 筛后,置于干燥处保存。土壤基础理化性质按常规方法测定,具体为: pH 按照水土比 2.5 : 1, 电位法测定; 有机质用外加热-重铬酸钾容量法测定; 全氮用半微量开氏定氮法测定,标准酸滴定; 有效磷用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾用 1 mol·L<sup>-1</sup> 的 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定<sup>[22]</sup>。

1.3.2 植株样品 每季作物成熟期收获前在各小区取地上部植株样,网袋悬挂风干脱粒后分别统计茎秆、

籽粒、角壳的生物量,各部分样品于 60℃ 烘干后磨细用于全磷测定。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 联合消煮,流动注射分析仪 (AA3, 德国 SEAL) 测定植株全磷含量。产量以各小区实际收获产量计产。

1.4 数据处理与分析

磷积累量 (phosphorus accumulation, kg·hm<sup>-2</sup>) = 籽粒生物量×籽粒磷含量+角壳生物量×角壳磷含量+秸秆生物量×秸秆磷含量;

磷素平均农学效率 (average agronomic efficiency of phosphorus, kg·kg<sup>-1</sup>) = (施磷处理四季作物产量-不施磷处理四季作物产量)/四季作物施磷量;

磷素累积利用率 (accumulated use efficiency of phosphorus, %) = (施磷处理四季作物磷积累量-不施

磷处理四季作物磷积累量)/四季作物施磷量 $\times 100\%$ ;

土壤磷表观平衡 (apparent phosphorus balance in soil,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) = 施磷量 - 作物磷积累量;

施磷量 (phosphorus input,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) = 化肥磷 + 秸秆磷;

土壤有效磷变化量 (change in soil Olsen-P,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) = 周年轮作后土壤有效磷含量 - 基础土壤有效磷含量。

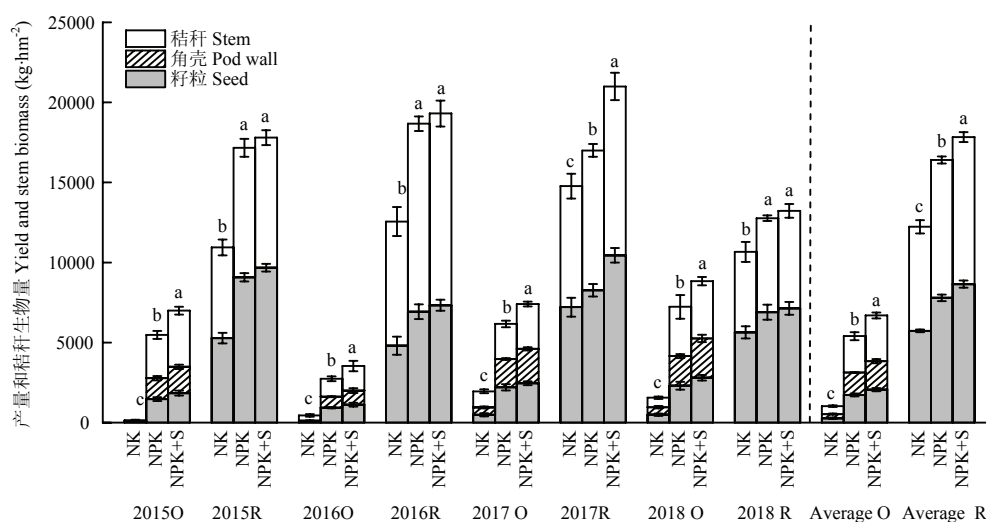
利用 Excel 2016 软件进行数据处理, Origin 2017 软件制图, SPSS 20 进行统计分析, 最小显著法 (LSD) 检验试验数据的差异显著性水平 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果

### 2.1 作物产量和生物量

油菜稻轮作体系 4 年作物产量和生物量如图 1 所示。NK 处理的油菜籽粒产量, 角壳和秸秆生物量四

季均值分别为 274、256 和 497  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 水稻籽粒产量和秸秆生物量四季均值分别为 5 731 和 6 502  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。NPK 处理的油菜籽粒产量, 角壳和秸秆生物量四季均值分别为 1 727、1 402 和 2 273  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 较 NK 处理分别提高 530.3%、447.7% 和 357.3%; 水稻籽粒产量和秸秆生物量四季均值分别为 7 792 和 8 609  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 较 NK 处理分别提高 35.9% 和 32.4%。施磷对油菜的增长率大于水稻, 表明油菜对磷肥的响应更为敏感。秸秆还田显著提高油菜水稻轮作体系作物产量和生物量。NPK+S 处理的油菜籽粒产量, 角壳和秸秆生物量较 NPK 处理分别提高 19.1%、27.1% 和 25.6%; NPK+S 处理的水稻籽粒产量和秸秆生物量较 NPK 处理分别提高 11.0% 和 6.7%。以 4 个油菜水稻轮作周期和不同处理为因素对油菜和水稻籽粒产量进行双因素方差分析, 发现时间、处理及其交互作用与油菜和水稻籽粒产量均有极显著相关性 ( $P < 0.001$ , 表 2)。



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同

Different small letters indicate significant difference among treatment within a season at  $P < 0.05$ . The same as below

图 1 2015–2018 年不同施磷处理下油菜 (O)–水稻 (R) 轮作体系作物产量和生物量

Fig. 1 Yield and biomass of oilseed rape-rice rotation system under different P treatments during the period of 2015-2018

### 2.2 作物磷积累量

由图 2 可知, 施磷显著提高了作物磷积累量, 且 NPK+S 处理显著高于 NPK 和 NK 处理。NK 处理的油菜和水稻磷积累量四季均值分别为 3.1 和 25.0  $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 。NPK 处理的油菜和水稻磷积累量四季均值分别为 18.2 和 49.5  $\text{kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ , 较 NK 处理分别提高 495.3% 和 98.5%, 油菜磷积累量对磷肥的响应大于

水稻。NPK+S 处理的油菜和水稻磷积累量四季均值分别为 21.9 和 55.4  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 较 NPK 处理分别提高 20.6% 和 11.7%, 秸秆还田在油菜季的增长率大于水稻季。以 4 个油菜水稻轮作周期和不同处理为因素对作物磷积累量进行双因素方差分析, 发现时间和处理与油菜、水稻和周年磷积累量均有极显著相关性 ( $P < 0.001$ , 表 2); 其交互作用与油菜、水稻和周年磷积累量的

关系分别为极显著相关性 ( $P<0.001$ )、无显著相关性和显著相关性 ( $P<0.05$ , 表 2)。

2.3 作物磷素利用效率

4 年油菜水稻轮作试验表明, 作物磷素平均农学效率和磷素累积利用率均表现为 NPK+S 处理大于 NPK 处理 (图 3-A, 3-B)。与 NPK 处理相比, NPK+S

处理的油菜和水稻磷素平均农学效率分别提高 6.8% 和 33.9%; 与 NPK 处理相比, NPK+S 处理的油菜、水稻和周年磷素累积利用率分别提高 8.6%、17.0%和 19.8%。结果表明, 在磷水平较低的土壤上进行秸秆还田, 可显著提高作物特别是水稻对土壤磷素的吸收利用。

表 2 时间和施磷处理对作物产量、磷积累量以及土壤有效磷浓度的交互作用

项目	油菜产量	水稻产量	油菜磷积累量	水稻磷积累量	周年磷积累量	土壤有效磷浓度
Project	Oilseed rape yield	Rice yield	P accumulation in oilseed rape	P accumulation in rice	Annual P accumulation	Soil Olsen-P
年份	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
Year	(146.4)	(63.2)	(169.5)	(35.8)	(86.7)	(30.5)
处理	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$
Treatment	(604.3)	(152.5)	(401.7)	(285.8)	(494.4)	(145.5)
年份×处理	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P=0.218$	$P=0.012$	$P<0.001$
Year × Treatment	(13.5)	(10.9)	(18.9)	(1.5)	(3.5)	(7.3)

括号内为多重方差分析所得  $F$  值 The  $F$  value obtained by multivariate analysis of variance in parentheses

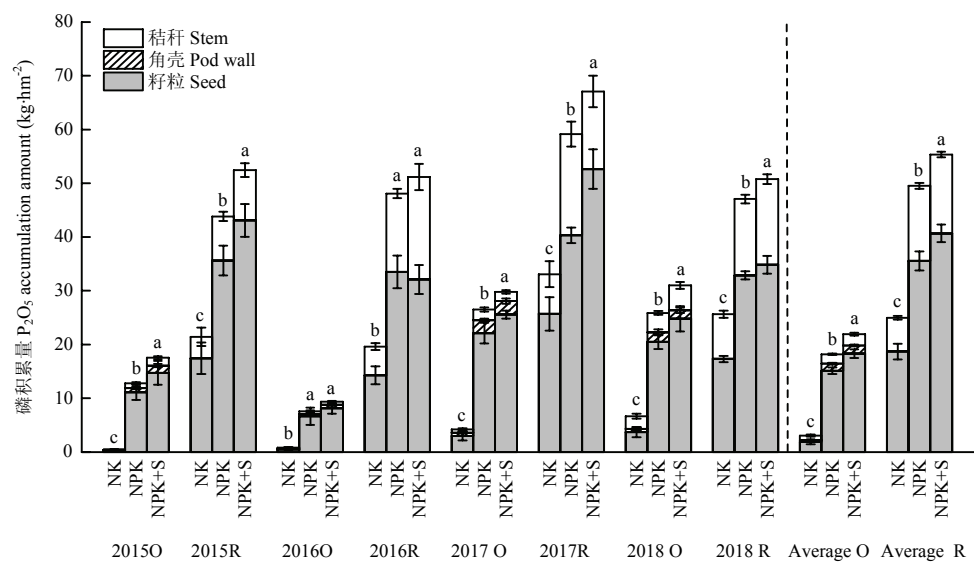


图 2 2015–2018 年不同施磷处理下油菜 (O)–水稻 (R) 轮作体系作物吸收的磷

Fig. 2  $P_2O_5$  accumulation of oilseed rape-rice rotation system under different P treatments during the period of 2015-2018

2.4 轮作体系周年土壤磷平衡

4 年油菜水稻轮作中 NK 处理的土壤磷均为消耗状态, 年度磷平衡表现为 2015 ( $-21.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 2016 ( $-20.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 2017 ( $-36.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 2018 ( $-31.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 轮作后两年的土壤磷亏缺量高于前两年 (图 4); NPK 和 NPK+S 处理的磷平衡均为盈余状态, NPK 处理年度磷盈余量表现为 2015 年

( $63.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 2016 年 ( $64.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 高于 2017 年 ( $34.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 2018 年 ( $47.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ); NPK+S 处理的年度磷平衡与 NPK 处理变化趋势一致。与 NPK 处理相比, NPK+S 处理的年均磷盈余量增长 5.3%。结果表明, 磷肥的施用使土壤磷平衡由亏缺转为盈余状态, 秸秆还田不会进一步造成土壤磷过量盈余。

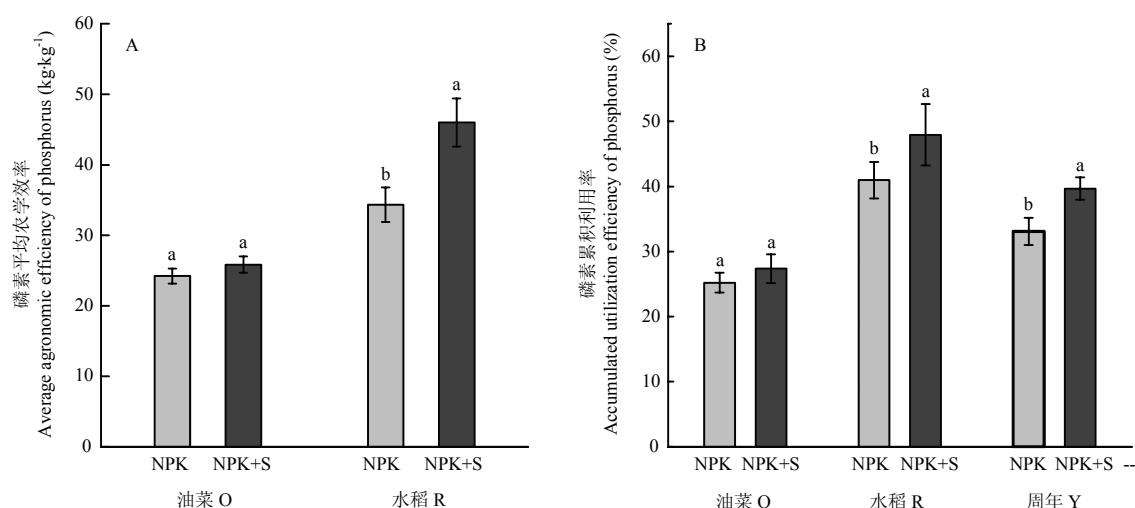


图3 2015-2018年不同施磷处理下油菜(O)-水稻(R)轮作体系作物磷素平均农学效率和磷素累积利用率

Fig. 3 Average phosphorus agronomic efficiency and accumulated phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation system under different P treatments during the period of 2015-2018

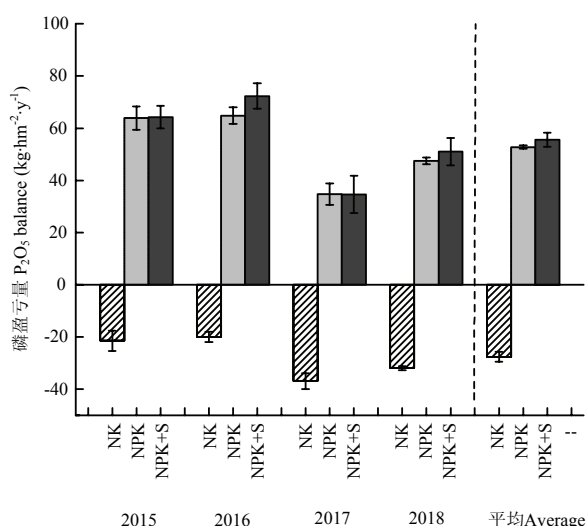


图4 2015-2018年不同施磷处理下油菜(O)-水稻(R)轮作体系周年土壤磷平衡

Fig. 4 Annual soil  $P_2O_5$  balance in oilseed rape-rice rotation system under different P treatments during the period of 2015-2018

## 2.5 土壤有效磷

不同处理的土壤有效磷浓度始终表现为 NPK+S 处理>NPK 处理>NK 处理(图5)。NK 处理土壤有效磷浓度变化在  $1.6\text{--}2.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 水稻季和油菜季平均速效磷浓度分别为  $2.0$  和  $1.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 水稻季

平均速效磷浓度明显高于油菜季。NPK 和 NPK+S 处理土壤有效磷浓度均随种植季节的延长逐渐升高, 在 2016 年油菜季开始显著高于 NK 处理, 至 2018 年水稻季, 土壤有效磷浓度较初始值分别提高  $3.0$  和  $3.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 NPK 处理相比, NPK+S 处理的土壤有效磷浓度在 2018 年油菜季开始有显著性提高。4 年油菜水稻轮作后, NK、NPK 和 NPK+S 处理土壤有效磷浓度分别为  $1.9$ 、 $4.3$  和  $5.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与 NK 处理相比, NPK 处理有效磷浓度增加  $126.3\%$ ; 与 NPK 处理相比, NPK+S 处理有效磷浓度增加  $18.6\%$ 。以 4 个油菜水稻轮作周期和不同处理为因素对土壤有效磷浓度进行双因素方差分析, 发现时间、处理及其交互作用与土壤有效磷浓度均有极显著相关性 ( $P<0.001$ , 表 2)。

## 2.6 油菜水稻轮作体系土壤有效磷对磷盈亏的响应

图 6 为土壤有效磷变化与表观磷累积盈亏的关系。随轮作年限的延长, 不施磷(NK)处理土壤磷累积亏缺量逐渐增加, 有效磷浓度无明显变化; 施磷(NPK、NPK+S)处理土壤磷累积盈余量逐年增加, 有效磷浓度逐步提高。结果表明, 土壤有效磷浓度变化与土壤磷累积盈亏呈极显著正相关; 在化学磷肥处理上, 每  $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的磷盈余使土壤有效磷浓度提高  $1.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6-A); 在秸秆还田配施化学磷肥处理上, 每  $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的磷盈余使土壤有效磷浓度提高  $2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6-B)。表明秸秆还田能促进土壤磷有效化。



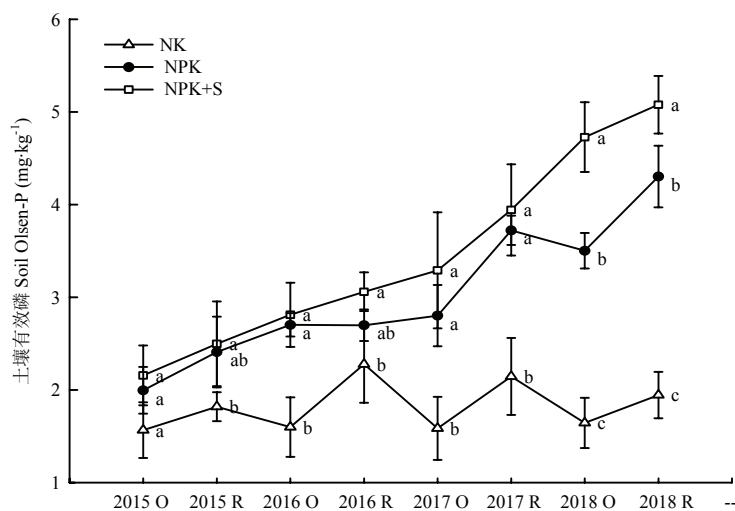
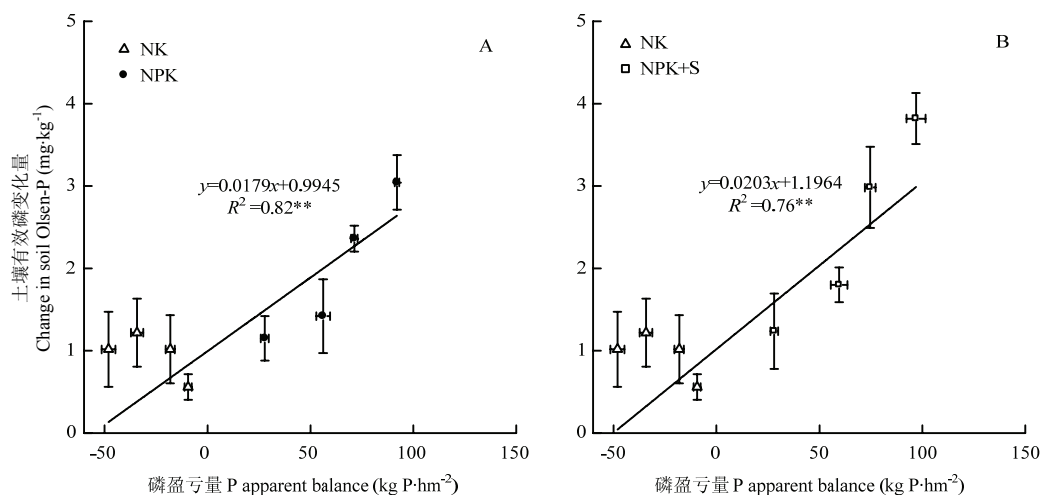


图5 2015—2018年不同施磷处理下油菜(O)–水稻(R)轮作体系土壤有效磷浓度

Fig. 5 Soil Olsen-P in oilseed rape-rice rotation system under different P treatments during the period of 2015-2018



图中\*\*表示线性方程的显著性达到  $P < 0.01$  \*\* indicate the significant correlation at  $P < 0.01$

图6 油菜(O)–水稻(R)轮作体系土壤有效磷对磷盈亏的响应关系

Fig. 6 Response of soil Olsen-P to P apparent balance at oilseed rape-rice rotation system

### 3 讨论

#### 3.1 作物对磷肥和秸秆还田的响应

4年田间试验结果表明,油菜产量和磷积累量对磷肥和秸秆的响应优于水稻,其原因为水旱轮作农田种植水稻时,淹水状态下土壤pH向中性趋进,而土壤磷的有效性在pH中性范围内最高<sup>[23-24]</sup>,淹水后土壤处于还原条件,Fe-P、Al-P和一些闭蓄态磷因铁、

锰等氧化物被还原而释放出在氧化条件下处于无效态的磷,增加了土壤磷的有效性 with 扩散能力<sup>[25]</sup>,从而缓解磷限制。油菜种植于旱季,土壤磷素固定潜力大且难以活化,作物生长受磷水平限制作用较大,造成施磷与不施磷和有无秸秆还田处理间油菜产量和磷积累量差异较大。水稻季不施磷处理产量和磷积累量能达到较高水平,而油菜季不施磷处理产量和磷积累量极低,导致秸秆还田对水稻磷素利用率和农学效率的影

响更为显著。

### 3.2 磷肥与秸秆还田对土壤磷变化的影响

土壤有效磷是表征土壤的供磷水平, 施用磷肥是提升土壤有效磷的主要途径<sup>[26]</sup>。土壤磷库变化因投入磷肥的种类和数量的不同而存在差异。多数研究认为长期不施磷肥会由于作物吸收带走土壤部分磷素, 导致磷亏缺进而引起土壤有效磷含量下降<sup>[27-28]</sup>, 但也有学者认为长期不施磷肥土壤有效磷基本不发生变化, 甚至略有提高<sup>[29]</sup>, 分析认为可能是降雨和灌溉水中的磷进入土壤所致。本研究连续 4 年不施磷处理 (NK) 土壤磷平衡表现为磷亏缺, 主要原因是在没有外源磷投入条件下, 土壤磷素被油菜和水稻吸收带出导致土壤磷处于持续消耗状态, 而土壤有效磷在年际间基本持平, 原因可能是土壤有效磷含量处于极低水平, 土壤有效磷处于消耗状态时, 作物吸收利用的磷素主要来自于非活性磷库的补充<sup>[30-31]</sup>, 即中稳性和稳性磷向活性磷转化。

大量研究表明, 合理施用化学磷肥或化学磷肥与有机肥配施均能增加土壤磷盈余和有效磷浓度<sup>[32-33]</sup>。本研究连续 4 年施磷处理 (NPK、NPK+S) 土壤表现为磷盈余, 周年磷盈余量在 24.3—42.3 kg·hm<sup>-2</sup> 之间, 土壤有效磷较初始值分别提高 3.0 和 3.8 mg·kg<sup>-1</sup>, 可见磷肥的投入可以有效增加土壤磷库储量并且提高土壤有效磷浓度。长江中上游多点试验结果显示, 长期施磷后各试验点土壤磷年均盈余在 6—44 kg·hm<sup>-2</sup> 之间, 土壤有效磷年均增加量在 1.0—1.5 mg·kg<sup>-1</sup> 之间<sup>[34]</sup>。土壤有效磷含量的变化状况可能与土壤磷初始值有关, 在本试验中, 初始土壤有效磷含量仅为 1.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 属于严重缺磷土壤<sup>[35]</sup>, 施用磷肥对于提高土壤有效磷显示了一定的效应。长江流域土壤磷目前处于快速积累期, 当磷积累到一定程度出现饱和状态后, 其向外的输出量会迅速上升<sup>[36]</sup>, 大量的磷输出会造成严重的环境污染。在土壤磷管理中, 控制化学磷肥的大量投入是减少输入的主要方式, 应更多的依靠内部循环来提高磷利用率<sup>[5]</sup>, 而秸秆还田可有效促进土壤磷循环利用<sup>[16-17]</sup>。本研究在施用磷肥的基础上进行秸秆还田, 土壤磷盈余量无明显增加, 土壤有效磷进一步增加, 其增长幅度随种植季节的延长而增大, 至 2018 年油菜季达到显著性差异, 第一, 是由于其磷投入量相对更大, 秸秆中含有一定量的磷, 其年度磷投入总量比化学磷肥高出 4.6%—16.0%。第二, 可能是由于长期秸秆还田的投入带入大量有机物料促进土壤有机质积累, 土壤有机质可以促进活性形态磷的积累,

降低非活性磷素占总磷的比重<sup>[37]</sup>。因此, 秸秆还田显著提高土壤有效磷浓度即提高了磷活性, 同时避免土壤磷素过量积累。

### 3.3 秸秆还田对土壤磷素有效化的影响

土壤磷盈亏是有效磷变化的根本原因<sup>[38]</sup>, 探究土壤磷素盈亏的变化特征、量化土壤有效磷与磷盈亏的关系, 对于农田磷素养分管理和合理施磷意义重大。SHEN 等<sup>[39]</sup>认为土壤磷盈亏与有效磷变化存在必然联系, 磷肥的长期施用导致农田土壤磷盈余, 而不施磷导致土壤磷亏缺<sup>[40]</sup>。TANG 等<sup>[41]</sup>通过长期试验研究得出, 在中国湖南、新疆、陕西等五个地区土壤每盈余 100 kg·hm<sup>-2</sup> 的 P, 土壤有效磷提高 2.3—5.7 mg·kg<sup>-1</sup>。本研究表明, 土壤有效磷浓度变化与土壤磷累积盈亏呈极显著正相关; 土壤磷亏缺状态下, 有效磷浓度总体持平; 在化学磷肥处理和秸秆还田配施化学磷肥处理上, 水稻土每盈余 100 kg·hm<sup>-2</sup> 的 P, 土壤有效磷分别提高 1.8 和 2.0 mg·kg<sup>-1</sup>。秸秆还田在不造成土壤磷素大量盈余的情况下进一步提高土壤有效磷浓度, 同时也促进了作物对土壤磷素的吸收利用, 原因可能是秸秆碳活化了土壤磷库<sup>[42]</sup>, 促进了土壤磷素有效化。研究表明, 秸秆还田可提土壤微生物数量和微生物生物量 C、N、P 含量<sup>[14, 43]</sup>, 而土壤微生物数量增加又进一步提高了包括磷酸酶在内的分泌物数量<sup>[44]</sup>, 磷酸酶加快有机磷向无机磷转化的速度, 从而促进作物对无机磷的吸收<sup>[45]</sup>。赵庆雷等<sup>[46]</sup>研究发现, 秸秆还田配施磷肥提高了 Ca<sub>2</sub>-P、Fe-P 等活性较高的无机磷的含量, 降低了 Ca<sub>10</sub>-P 等活性较低的无机磷含量, 促进了土壤无机磷活化。因此, 秸秆还田在促进农作物生产和提高土壤供磷能力方面具有重要作用, 土壤有效磷的提升需要长期的培肥, 秸秆还田在进一步提高土壤有效磷浓度的同时, 可有效避免因磷肥的过量施用而造成的资源浪费和环境污染风险。

## 4 结论

4.1 秸秆还田能显著提高油菜、水稻的产量和磷积累量, 4 年平均产量分别提高 19.1% 和 11.0%, 平均磷积累量分别提高 20.6% 和 11.7%。秸秆还田显著提高了水稻磷素的农学效率和利用率。

4.2 4 年油菜水稻轮作后, 不施磷处理土壤磷处于亏缺状态, 有效磷浓度总体持平; 施磷处理土壤磷转为盈余状态, 有效磷浓度较不施磷处理提高 126.3%; 秸秆还田较不还田处理土壤磷盈余量无明显增加, 有效磷浓度显著提高 18.6%。与化学磷肥处理相比, 秸秆



还田配施化学磷肥处理的水稻土每盈余  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的 P, 土壤有效磷增加量提高 13.4%, 秸秆还田促进了土壤磷素有效化。

## References

- [1] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 徐明岗. 我国典型农田长期施磷土壤肥力变化与研究展望. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1389-1393.  
ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, XU M G. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1389-1393. (in Chinese)
- [2] WANG Y, ZHAO X, GUO Z, JIA Z J, WANG S Q, DING K. Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181: 127-135.
- [3] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 岳现录, 雷秋良. 我国农田磷养分平衡研究进展. 中国生态农业学报, 2015(1): 1-8.  
JI H J, ZHANG H Z, ZHANG W L, YUE X L, LEI Q L. Research progress on cropland phosphorus balance in China. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2015(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] LI H, HUANG G, MENG Q, MA L, YUAN L, WANG F, ZHANG W, CUI Z, SHEN J, CHEN X, JIANG R, ZHANG F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review. *Plant and Soil*, 2011, 349(1-2): 157-167.
- [5] FENG Y W, REN G Y, LIU Z Y, WU J D, ZHANG L. Rainfall and runoff trends in the upper Yangtze River. *Resources Science*, 2013, 35(6): 1268-1276.
- [6] 吕阳. 水旱轮作体系的磷平衡与土壤磷有效化过程研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.  
LV Y. Phosphorus balance in paddy-upland rotation system and processes of increasing soil phosphorus availability[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社 2016.  
National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese)
- [8] WANG Y, ZHAO X, WANG L, ZHAO P H, ZHU W B, WANG S Q. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China. *Field Crops Research*, 2016, 198: 32-39.
- [9] 沈浦. 长期施磷下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.  
SHEN P. Evolution characteristics and mechanisms of soil available phosphorus in typical croplands under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [10] 高静. 长期施磷下我国典型农田土壤磷库与作物磷肥效率的演变特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.  
GAO J. Evolution characteristics of soil phosphorus pool and efficiency of phosphorus fertilization in typical cropland of China under long-term fertilizations[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- [11] LIU P P, ZHOU Y, FU G X, GAO X, ZHANG P, ZHANG L, WANG J F. Effects of fertilization on crop yield and soil phosphorus availability based on the returning straw. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, (5): 27-33.
- [12] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 张伟, 曹彩云, 郭丽. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响. 土壤学报, 2016, 53(3): 779-789.  
HUANG X X, LIAO W H, LIU J L, ZHANG W, CAO C Y, GUO L. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in fluvo-aquic soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 779-789. (in Chinese)
- [13] 赵小军, 李志洪, 刘龙, 崔婷婷. 种还分离模式下玉米秸秆还田对土壤磷有效性及其有机磷形态的影响. 水土保持学报, 2017(1): 246-250.  
ZHAO X J, LI Z H, LIU L, CUI T T. Effects of maize straw returning on soil phosphorus availability and organic phosphorus forms under the mode of planting and returning. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017(1): 246-250. (in Chinese)
- [14] 董亮, 田慎重, 王学君, 孙泽强, 郑东峰, 刘盛林, 董晓霞, 郭洪海, 罗加法. 秸秆还田对土壤养分及土壤微生物数量的影响. 中国农学通报, 2017, 33(11): 77-80.  
DONG L, TIAN S Z, WANG X J, SUN Z Q, ZHENG D F, LIU S L, DONG X X, GUO H H, LUO J F. Effect of straw turnover on soil nutrients and soil microbial population. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(11): 77-80. (in Chinese)
- [15] SHENG H J, NIU D, SUN G Y, SUN K W, ZHU X K. Research progress of effect of direct straw returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities. *Hans Journal of Soil Science*, 2016, 4(2): 19-26.
- [16] DAMON P M, BOWDEN B, ROSE T, RENGEL Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 127-137.
- [17] SIDDIQUE M T, ROBINSON J S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environment Quality*, 2003, 32(3): 1114.

- [18] SOLTANGHEISI A, RODRIGUES M, COELHO M J A, GASPERINI A M, SARTOR L R, PAVINATO P S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179: 20-28.
- [19] MALTAIS-LANDRY G, FROSSARD E. Similar phosphorus transfer from cover crop residues and water-soluble mineral fertilizer to soils and a subsequent crop. *Plant Soil*, 2015, 393 (1/2): 193-205.
- [20] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 王小晶, 吕慧峰, 陈怡. 定位施磷对紫色菜园土磷素状况的影响. *生态学报*, 2012, 32(8): 2539-2549.
- SUN Q Q, WANG Z Y, ZHAO H, WANG X J, LV H F, CHEN Y. Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2539-2549. (in Chinese)
- [21] SURIYAGODA L D B, RYAN M H, RENTON M, LAMBERS M. Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: A meta-analysis. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 143-200.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed.* Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [23] DAKORA F D, PHILLIPS D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 35-47.
- [24] 朱昌锋. 淹水对土壤磷有效性影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- ZHU C F. Effects of flooding on the availability of phosphorus in soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2008. (in Chinese)
- [25] 刘凡, 介晓磊, 贺纪正, 周代华, 徐凤琳, 李学垣. 不同 pH 条件下针铁矿表面磷的配位形式及转化特点. *土壤学报*, 1997, 34(4): 367-374.
- LIU F, JIE X L, HE J Z, ZHOU D H, XU F L, LI X Y. Coordination forms and transformations of phosphate adsorbed by goethite surface on different pH. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 367-374. (in Chinese)
- [26] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
- WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268. (in Chinese)
- [27] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 高菊生. 长期施磷下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1132-1141.
- HUANG J, ZHANG Y Z, XU M G, GAO J S. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1132-1141. (in Chinese)
- [28] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 樊廷录, 张会民. 长期施磷条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4008-4015.
- PEI R N, YANG S M, XU M G, FAN T L, ZHANG H M. Response of Olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 4008-4015. (in Chinese)
- [29] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 柳开楼, 余喜初, 徐小林, 周利军, 胡惠文, 王赛莲. 长期不同施磷模式红壤性水稻土磷素变化. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1521-1528.
- YE H C, LI D M, HUANG Q H, LIU K L, YU X C, XU X L, ZHOU L J, HU H W, WANG S L. Variation of soil phosphorus under long-term fertilization in red paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1521-1528. (in Chinese)
- [30] AULAKH M S, KABBA B S, BADDESHA H S, BAHU G S, GILL M P S. Crop yields and phosphorus fertilizer transformations after 25 years of applications to a subtropical soil under groundnut-based cropping systems. *Field Crops Research*, 2003, 83(3): 283-296.
- [31] DAKORA F D, PHILLIPS D A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 2002, 245(1): 35-47.
- [32] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 徐江兵, 樊剑波. 长期施磷对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1240-1250.
- WANG J W, WANG Y L, YAO Y, XU J B, FAN J B. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1240-1250. (in Chinese)
- [33] XIAO R, BAI J H, GAO H F, HUANG L B, DENG W. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient. *Catena*, 2012, 98: 96-103.
- [34] 黄晶. 基于几个长期定位试验的长江上、中游水稻土磷素肥力与磷肥肥效的演变规律[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- HUANG J. Evolution of soil phosphorus fertility and phosphate fertilizer efficiency of paddy soils in the upper and middle reaches of the Yangtze River based on several stationary experiments[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [35] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8.
- LU R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-8. (in Chinese)
- [36] POWERS S M, BRUULSEMA T W, BURT T P, CHAN N L, ELSER J J, HAYGARTH P M, HOWDEN N J K, JARVIE H P, LYU Y,

- PETERSON H M, SHARPLEY A N, SHEN J B, WORRALL F, ZHANG F S. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in three river basins. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5): 353-356.
- [37] 毛霞丽. 长期施磷下稻麦轮作土壤有机碳稳定性及磷形态的变化特征研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- MAO X L. Effect of long-term fertilizer application on soil organic carbon stability and phosphorus fractions in a rice-wheat rotation[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015. (in Chinese)
- [38] 展晓莹, 任意, 张淑香, 康日峰. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728-4737.
- ZHAN X Y, REN Y, ZHANG S X, KANG R F. Changes in Olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in the main types of soil in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4728-4737. (in Chinese)
- [39] SHEN P, XU M G, ZHANG H M, YANG X Y, HUANG S M, ZHANG S X, HE X H. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers. *Catena*, 2014, 118: 20-27.
- [40] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 张夫道, 徐明岗, 介晓磊. 长期施磷对潮土土壤磷素利用与积累的影响. 中国农业科学, 2006, 39(1): 102-108.
- HUANG S M, BAO D J, HUANGFU X R, ZHANG F D, XU M G, JIE X L. Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1): 102-108. (in Chinese)
- [41] TANG X, LI J M, MA Y B, HAO X Y, LI X Y. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat-maize cropping systems with various soil and climate conditions. *Field Crops Research*, 2008, 108(3): 231-237.
- [42] JING Z W, CHEN R R, WEI S P, FENG Y Z, ZHANG J B, LIN X G. Response and feedback of C mineralization to P availability driven by soil microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 111-120.
- [43] 吕盛, 王子芳, 高明, 黄容, 田冬. 秸秆不同还田方式对紫色土微生物量碳、氮、磷及可溶性有机质的影响. 水土保持学报, 2017(5): 269-275.
- LÜ S, WANG Z F, GAO M, HUANG R, TIAN D. Effects of different straw returning methods on soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and soluble organic matter in purple soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017(5): 269-275. (in Chinese)
- [44] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 马春梅, 龚振平, 董守坤, 张钦文. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响. 作物杂志, 2015(2): 78-83.
- ZHAN H Q, YAN S S, WANG J R, MA C M, GONG Z P, DONG S K, ZHANG Q W. Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil. *Chinese Journal of Crops*, 2015(2): 78-83. (in Chinese)
- [45] PANT H K, WARMAN P R. Enzymatic hydrolysis of soil organic phosphorus by immobilized phosphatases. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(4): 306-311.
- [46] 赵庆雷, 信彩云, 王瑜, 王佳, 刘奇华, 李景岭, 马加清. 稻麦轮作区连续秸秆还田和施肥条件下砂姜黑土无机磷分布特征. 草业学报, 2018, 27(12): 61-71.
- ZHAO Q L, XIN C Y, WANG Y, WANG J, LIU Q H, LI J L, MA J Q. Characteristics of inorganic phosphorus in lime concretion black soil under continuous straw-return and fertilization in a rice-wheat rotation area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12): 61-71. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)