

# 长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影响

吕真真<sup>1,2</sup>, 刘秀梅<sup>1,2</sup>, 侯红乾<sup>1,2</sup>, 冀建华<sup>1,2</sup>, 蓝贤瑾<sup>1,2</sup>, 冯兆滨<sup>1,2</sup>, 刘益仁<sup>1,2\*</sup>

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200; 2 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200)

**摘要:**【目的】合理的土壤磷素管理对作物生产和环境保护具有重要意义。南方双季稻田土壤磷素特征及磷素吸收信息相对缺乏, 本文利用江西省稻田土壤质量演变定位监测试验为平台, 系统分析长期不同施肥措施下土壤全磷、磷活化系数及水稻磷素吸收量的变化特征和全磷与磷盈亏的响应关系等, 为指导磷肥合理施用提供重要科学依据。【方法】从 1984 年开始在江西省南昌市进行长期定位试验, 设置 8 个处理, 分别为不施肥对照 (CK), PK、NP、NK、NPK、70% 化肥氮+30% 有机肥氮 (70F + 30M)、50% 化肥氮+50% 有机肥氮 (50F + 50M)、30% 化肥氮+70% 有机肥氮 (30F + 70M)。早稻施用纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 量分别为 150、60 和 150 kg/hm<sup>2</sup>, 晚稻分别为 180、60 和 150 kg/hm<sup>2</sup>。早、晚稻施用的氮、磷、钾化肥均分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 有机肥分别为紫云英 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0.30%、0.08%、0.23%) 和腐熟猪粪 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0.45%、0.19%、0.60%)。除 30F + 70M 处理, 其余处理均为等氮磷钾设计。于 1984—2012 年每年早、晚稻收获期采集秸秆和稻谷计产, 并于晚稻收获后, 测定土壤全磷和有效磷含量。分析土壤全磷、磷活化系数 (PAC) 及早、晚稻磷素吸收量随种植年限的变化规律, 研究土壤全磷含量与磷累积盈亏的响应关系。【结果】经 29 年连续试验, NK 处理土壤全磷含量以每年 4.6 mg/kg 的速度下降, 而含磷化肥处理土壤全磷含量升高速率为 3.3~19.4 mg/(kg·a)。有机无机配施处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 升高速率平均为 16.1 mg/(kg·a), 是施 NPK 肥处理的 4.89 倍。施磷土壤全磷含量平均增至 1.07 g/kg (2010—2012 平均值), 较初始值提高了 1.18 倍。不施磷肥处理土壤磷活化系数 (PCA) 由试验初始的 4.24% 下降至 2.5% 左右, 施磷肥处理则均显著升高, 其中有机无机配施处理平均升高至 8.51%, 平均年升高速率是施 NPK 处理的 2.89 倍。早、晚稻磷素吸收量, 施磷肥 (PK、NP 和 NPK) 和化肥配施有机肥处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 均显著高于 CK, 提高幅度分别为 29.9%~124% 和 28.6%~103%, 均衡施肥 (NPK、70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 磷素吸收量显著高于不均衡施肥 (PK 和 NP) 处理, 前者平均分别较后者提高了 38.7% 和 32.9%。早、晚稻产量与磷素吸收量呈极显著线性正相关关系, 每吸收磷 (P) 1 kg, 早稻和晚稻产量分别可提高 115 和 106 kg/hm<sup>2</sup>。不施肥 (CK) 条件下, 土壤全磷变化与累积磷盈亏间无显著相关关系, 施 NK 肥处理土壤中每亏缺磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤全磷含量降低 6.0 mg/kg, 施化学磷肥的 3 个处理, 土壤中每盈余磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 平均提高 9.3 mg/kg, 而 3 个有机-无机配施处理, 土壤中每盈余磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 平均增加 63.3 mg/kg, 是无机磷肥的 6.78 倍。【结论】无论是单施化学磷肥, 还是有机无机配施均有效提高土壤全磷含量及磷活化系数, 且在等磷量投入条件下, 有机无机配施较单施化肥的效果更优。建议减少中国南部红壤性稻田土壤的总磷输入量和提高有机肥施用比例, 以改善粮食生产和保护环境。

**关键词:** 长期施肥; 红壤性水稻土; 磷有效性; 早稻; 晚稻; 磷盈亏; 磷素吸收

## Effects of long-term fertilizations on soil phosphorus and its supply to rice in red paddy soil

LÜ Zhen-zhen<sup>1,2</sup>, LIU Xiu-mei<sup>1,2</sup>, HOU Hong-qian<sup>1,2</sup>, JI Jian-hua<sup>1,2</sup>, LAN Xian-jin<sup>1,2</sup>, FENG Zhao-bin<sup>1,2</sup>, LIU Yi-ren<sup>1,2\*</sup>  
(1 Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China;  
2 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China)

收稿日期: 2018-08-22 接受日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460544); 江西省现代农业科研协同创新专项 (JXXTCX2016003); 江西省农业科学院创新基金 (20162CBS001)。

联系方式: 吕真真 E-mail: lvzhenzhen808@163.com; \* 通信作者 刘益仁 E-mail: jxnclyr@163.com

**Abstract: [ Objectives ]** Rational soil phosphorus (P) management is important to crop production and environment protection. There has been few studies focusing on soil phosphorus and its absorption in double cropping rice in southern China. This paper analyzed soil phosphorus evolution, phosphorus activation coefficient, plant P uptake and P budget based on a long-term paddy soil quality evolution monitor experiment (since 1984) in Jiangxi Province, China to provide important scientific basis for guiding rational application of phosphate fertilizer. **[ Methods ]** The long-term experiment started in 1984 in Nanchang, Jiangxi Province, China. It included eight fertilization treatments with triplicates: no nutrient input (CK), chemical PK, chemical NP, chemical NK, chemical NPK, 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N (70F + 30M), 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N (50F + 50M), and 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N (30F + 70M). The chemical fertilizers were urea, SSP and potash chloride. For early rice, the rates were N 150, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 and K<sub>2</sub>O 150 kg/hm<sup>2</sup>, and those for late rice were N 180, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 and K<sub>2</sub>O 150 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The test organic fertilizers were milk vetch with N 0.30%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.08% and K<sub>2</sub>O 0.23%, and rotten pig manure with N 0.45%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.19% and K<sub>2</sub>O 0.60%, respectively. The application rates of organic manures were based on N equivalent and the deficits of P and K were supplemented by chemical fertilizers, except the supplemental K in 30F+70M treatment exceeded the designed quantity. Growth and grain yields of rice were measured each year (1984–2012), and the P content was analyzed. Soil samples were collected from 0–20 cm layer for soil total-P and Olsen-P determination. The cumulative P budget was discussed. **[ Results ]** After 29 years' experiment, the soil total-P content decreased by 4.6 mg/(kg·a) in chemical NK treatment, while that was increased by 3.3–19.4 mg/(kg·a) in P containing treatments, and was averagely increased by 16.1 mg/(kg·a) in treatments of 70F + 30M, 50F + 50M and 30F + 70M, being 4.89 times of that in NPK treatment. The total P content increased to 1.07 g/kg averagely (mean value of 2010–2012), 1.18 times higher than that of initial value. The soil phosphorus activation coefficient (PAC) decreased from 4.24% to 2.5% in no P treatment, but increased significantly in P containing treatments. The average PAC was increased to 8.51% in three organic-inorganic fertilization treatments, which was 2.89 times of that in NPK treatment. The amounts of phosphorus uptake by both early and late rice plants in fertilizer treatments were significantly higher than those by CK, with increment ranges of 29.9%–124.2% or 28.6%–103.2%, respectively. Phosphorus uptake in balanced fertilization treatments (NPK, 70F + 30M, 50F + 50M and 30F + 70M) were significantly higher than that in unbalanced fertilization treatments (PK and NP), with an average increments of 38.7% and 32.9%, respectively. There was a very significant positive linear correlation between yield and phosphorus uptake both in early and late rice. The early and late rice yields would be increased by 115 kg/hm<sup>2</sup> and 106 kg/hm<sup>2</sup> per kilogram phosphorus uptake, respectively. No significant correlation was observed between total soil P content and cumulative P budget in CK. The total P content would decrease 6 mg/kg for every P deficit of 100 kg/hm<sup>2</sup> in NK. The total soil P content would increase 9.3 mg/kg for every soil P surplus of 100 kg/hm<sup>2</sup> in NP, PK and NPK treatments, and increase 63.3 mg/kg in organic-inorganic fertilizer treatments, being 6.78 times of that of NPK treatment. **[ Conclusions ]** Application of both chemical P and organic fertilizers could effectively increase soil phosphorus storage and availability. Combining application of organic and chemical fertilizers performs better than chemical phosphorus fertilizer alone in the same amount of phosphorus inputs level. Therefore, decreasing the amount of total P input and increasing the organic fertilizer portion should be recommended to improve food production and protect environment in red paddy soil in southern China.

**Key words:** long-term fertilization; red paddy soil; phosphorus availability; early rice; late rice; P budget; P uptake

水稻是世界上最重要的粮食作物之一, 中国是世界上最大的稻米生产国和消费国<sup>[1]</sup>。磷是植物生长

发育所必需的 3 种大量营养元素之一, 主要源于土壤磷库和外源施入的含磷物质。磷在水稻生产中起

重要作用,如促进水稻根系生长发育、增加分蘖、增强抗逆能力、促进早熟、提高产量。自1960年以来,磷肥在促进作物生长和提高产量方面的作用越来越受到重视,改革开放30年以来,我国磷肥用量呈持续增长趋势,平均年增长率高达5.6%<sup>[2]</sup>。随集约化农田磷肥不断施入,土壤磷素含量明显改善,中国不同类型的土壤全磷含量为0.3~1.7 g/kg,有效磷含量为0.1~229 mg/kg,受成土母质和气候条件的影响,我国南方红壤和红壤性水稻土尚存在普遍缺磷现象<sup>[3]</sup>。

土壤磷素缺乏会导致作物减产,但持续集约化施用磷肥会引起土壤中磷的累积,增加土壤磷素流失风险,加剧水体富营养化等环境问题<sup>[4-5]</sup>,因此掌握不同磷肥施用方式下土壤磷素含量、磷活化能力、磷肥利用率、植物对磷吸收等变化特征对指导磷肥合理施用具有重要意义。磷在土壤中累积程度因磷肥种类而异,众多研究表明长期施用化学磷肥或有机肥都能不同程度地提高土壤磷含量,两者配施的作用更显著<sup>[6-9]</sup>。随着化肥施用对土壤健康和环境的负面影响不断涌现,有机肥越来越受到关注<sup>[10]</sup>,2017年中央一号文件的发布使“有机肥替代化肥”成为农资企业关注的焦点。但施用量通常以作物对氮(N)的需求为依据,不同来源的有机肥N:P比不同<sup>[11]</sup>,如粪肥的N:P比较低,易导致过量施用磷,引起土壤磷累积,提高土壤磷迁移率<sup>[4-5]</sup>;秸秆或植物堆肥具有适宜的N:P比,是提高作物产量和磷循环效率的有效途径<sup>[12]</sup>。多种有机肥配合施用对土壤磷特性的影响是一个重要的研究课题。

1984年建立在潯黄泥田上的双季稻肥料长期定位试验,有机肥采用早稻施紫云英和晚稻施腐熟猪粪的施肥模式,本课题组前期以该长期试验为平台,研究长期不同施肥对土壤质量的影响,结果发现化肥配施有机肥较化肥处理的全磷和有效磷含量均有显著增高<sup>[13]</sup>。但对耕层土壤磷有效性、作物磷吸收效率演变等至今未做系统分析。为此,本文较为系统地研究了29年不同施肥下红壤性水稻田土壤全磷及其与有效磷关系的演变特征、水稻磷素吸收及其与产量的关系、土壤磷盈亏与全磷消长规律的响应关系,对红壤性水稻田磷肥施用具有重要的指导作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于江西省南昌市南昌县(N28°57'、E115°94'),地处中亚热带,海拔高度25 m,年平均

气温17.5℃,≥10℃积温5400℃,年降雨量1600 mm,年蒸发量1800 mm,无霜期约280天。区域内温、光、热资源丰富,适宜大多数农作物生长,本试验基地作物种植采用早稻-晚稻一年两熟的种植制度,具有广泛的区域代表性。

试验基地土壤为第四纪亚红粘土母质发育的中潯黄泥田,试验开始前耕层(0—20 cm)土壤基本理化性质:有机质含量25.6 g/kg、全氮1.36 g/kg、全磷0.49 g/kg、碱解氮81.6 mg/kg、有效磷20.8 mg/kg、速效钾30.5 mg/kg、缓效钾240 mg/kg、阳离子交换量7.54 cmol/kg、pH值6.50、容重1.25 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验始于1984年,共设8个处理,3次重复,随机区组排列,小区面积为33.3 m<sup>2</sup>,小区间以0.50 m深和0.50 m宽的水泥田埂隔开,各小区独立排灌。每年4月中下旬移栽早稻,7月中旬收获;7月下旬移栽晚稻,10月下旬收获。试验处理:1)不施肥(CK);2)磷钾肥(缺氮,PK);3)氮磷肥(缺钾,NP);4)氮钾肥(缺磷,NK);5)氮磷钾平衡施肥(NPK);6)70%化肥氮配施30%有机肥氮(70F+30M);7)50%化肥氮配施50%有机肥氮(50F+50M);8)30%化肥氮配施70%有机肥氮(30F+70M)。

早稻施用纯N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O量分别为150、60和150 kg/hm<sup>2</sup>;晚稻施用纯N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O量分别为180、60和150 kg/hm<sup>2</sup>。早、晚稻施用的氮、磷和钾化肥均分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,有机肥品种分别为紫云英和腐熟猪粪,紫云英N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O含量分别为0.30%、0.08%和0.23%,腐熟猪粪分别为0.45%、0.19%和0.60%。磷肥和有机肥全部作基肥;氮肥50%作基肥,25%作分蘖肥,25%作幼穗分化肥;钾肥全部作追肥,其中50%作分蘖肥,50%作幼穗分化肥。有机肥用量以氮量为基准,磷和钾用化肥补足,仅处理8,中晚稻钾含量超过设计标准。各小区田间管理措施一致。

### 1.3 样品采集与分析

于每年(1984—2012年)早、晚稻收获期各小区分秸秆和稻谷单独收获计产,依据各小区有效分蘖穗数随机选取植株,分为秸秆和稻谷,分别称重、烘干,计算水分含量,并将样品粉碎后测定全磷含量。于每年晚稻收获后,在各小区内采取(0—20 cm)耕层多个样点的土壤混合样品,风干后过筛备用,测定土壤全磷及有效磷含量。

土壤全磷用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$  消煮—钼锑抗比色法测定; 有效磷采用  $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$  浸提—钼锑抗比色法测定; 植株样品含磷量采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消化—钼锑抗比色法测定。

#### 1.4 数据处理与计算

土壤全磷变化量  $\Delta \text{Total P (g/kg)} = P_i \text{ (g/kg)} - P_0 \text{ (g/kg)}$  (式中,  $P_i$  表示第  $i$  年土壤全磷含量;  $P_0$  表示土壤初始全磷含量)

土壤磷活化系数  $\text{PAC (\%)} = \text{Olsen P (mg/kg)} / [\text{全磷 (g/kg)} \times 1000] \times 100$

作物地上部吸磷量  $\text{(kg/hm}^2\text{)} = \text{籽粒产量 (kg/hm}^2\text{)} \times \text{籽粒含磷量 (\%)} + \text{收获移走秸秆产量 (kg/hm}^2\text{)} \times \text{秸秆含磷量 (\%)}$

当季土壤表观磷盈亏  $\text{(kg/hm}^2\text{)} = \text{每年施入土壤磷素总量 (kg/hm}^2\text{)} - \text{作物 (籽粒 + 秸秆) 每年吸磷量 (kg/hm}^2\text{)}$

土壤累积磷盈亏  $\text{(kg/hm}^2\text{)} = \sum \text{当季作物表观磷盈亏}$

应用 Microsoft Excel 2010、SPSS 19.0 及 Sigmaplot12.0 统计软件对数据进行整理分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥下土壤全磷的变化趋势

图 1 显示, 对照 CK 处理在连续 29 年不施肥种

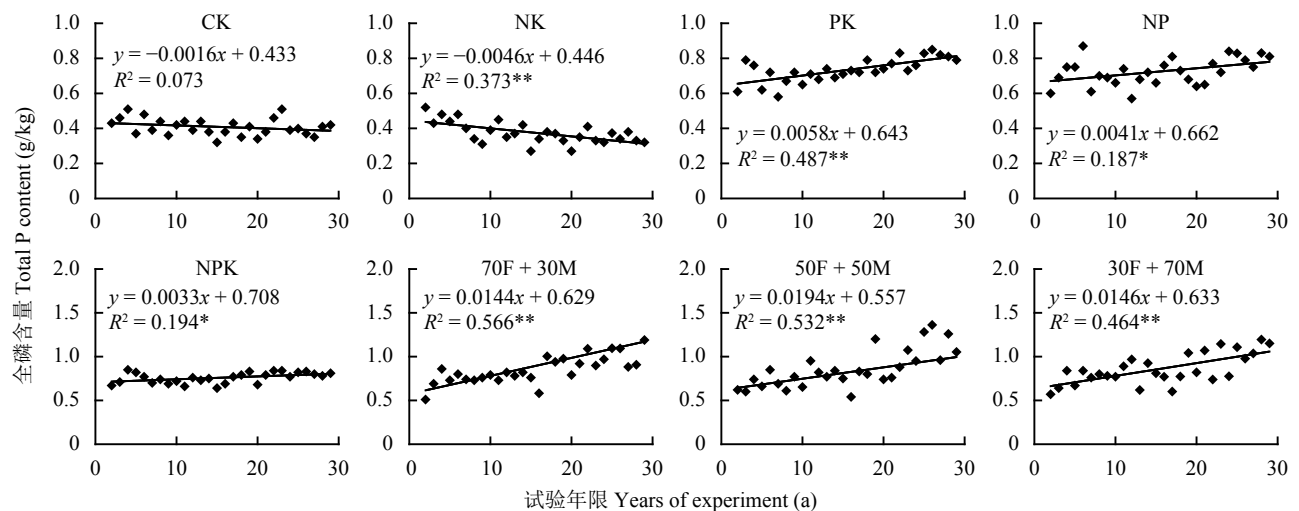


图 1 长期施肥条件下红壤性水稻田全磷含量 (1985—2012)

Fig. 1 Total P content in red paddy soil under long-term fertilization

[注 (Note): 70F+30M—施 70% 化肥氮+30% 有机肥氮 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N; 50F+50M—施 50% 化肥氮+50% 有机肥氮 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N; 30F+70M—施 30% 化肥氮+70% 有机肥氮 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .]

植条件下, 土壤全磷含量波动范围较小, 与种植年限的相关性不显著; NK 处理, 在长期缺磷连续种植下, 土壤全磷含量呈直线下降趋势, 与种植年限呈极显著负相关, 连续种植 29 年后, 土壤全磷含量 (2010—2012 年平均值) 下降至  $0.34 \text{ g/kg}$ , 较试验初始值下降了 30%, 下降速率为  $4.6 \text{ mg/(kg}\cdot\text{a)}$ 。连续 29 年施用磷肥, 土壤全磷含量与种植年限均表现为极显著或显著正相关关系, 土壤全磷含量整体呈上升趋势。

连续 29 年施磷后, 施用化学磷肥的 PK、NP 和 NPK3 个处理, 土壤全磷含量分别上升至  $0.81$ 、 $0.80$  和  $0.80 \text{ g/kg}$ , 比试验初始值分别升高了 65%、63% 和 63%, 升高速率分别为  $5.8$ 、 $4.1$  和  $3.3 \text{ mg/(kg}\cdot\text{a)}$ 。有机无机配施处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M), 土壤全磷含量分别增至  $0.99$ 、 $1.09$  和  $1.13 \text{ g/kg}$ , 其平均值比试验初始值升高了 1.18 倍, 升高速率分别为  $14.4$ 、 $19.4$  和  $14.6 \text{ mg/(kg}\cdot\text{a)}$ , 其平均升高速率为  $16.1 \text{ mg/(kg}\cdot\text{a)}$ , 是 NPK 处理的 4.89 倍。

### 2.2 长期施肥下土壤磷活化能力变化

CK 和 NK 处理的土壤磷活化系数 (Phosphorus activation coefficient, PAC) 随种植年限的延长呈先缓慢上升后逐渐下降的趋势 (图 2), 由试验开始时的 4.24% 分别下降到 2012 年 (2010—2012 平均值) 的 2.52% 和 2.55%。施无机磷肥处理 (PK、NP 和 NPK) 的 PAC 随种植年限延长而提高, 且 NP 和



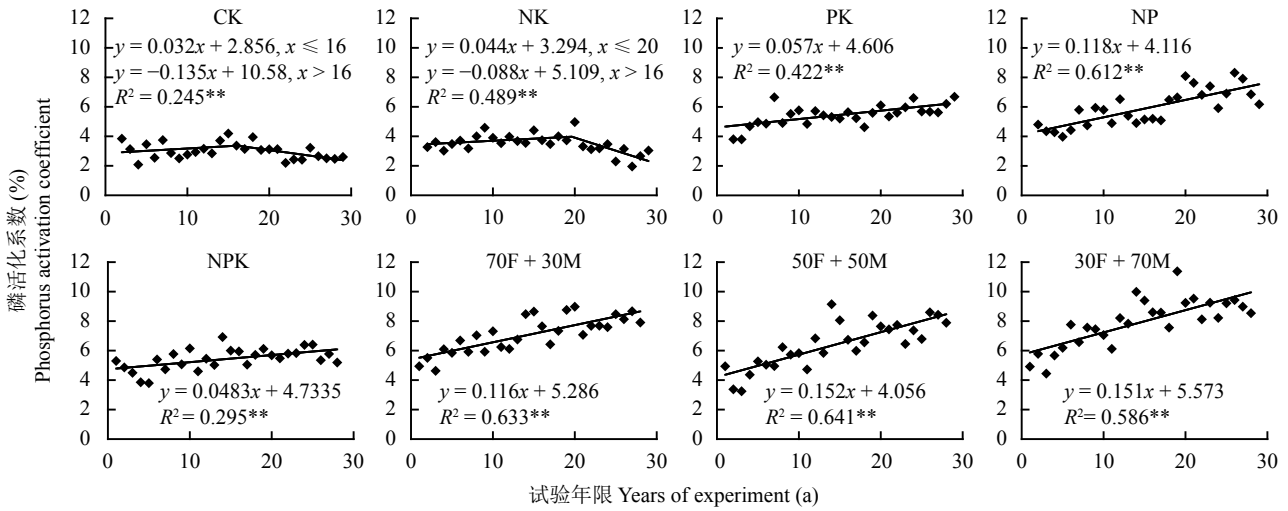


图 2 长期施肥条件下红壤性水稻田土壤磷活化系数 (1985—2012)

Fig. 2 Phosphorus activation coefficient (PAC) in red paddy soil under long-term fertilization

[注 (Note) : 70F+30M—施 70% 化肥氮+30% 有机肥氮 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N; 50F+50M—施 50% 化肥氮+50% 有机肥氮 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N; 30F+70M—施 30% 化肥氮+70% 有机肥氮 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N. \*\*— $P < 0.01$ .]

PK 处理上升速率高于 NPK 处理, 较试验初始值分别提高了 45.8%、57.8% 和 22.4%。有机无机肥配施处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M), PAC 随种植年限延长而逐渐升高, 分别升至 8.24%、8.31% 和 8.98%, 50F + 50M 和 30F + 70M 处理每年升高的速率较 70F + 30M 处理分别提高了 31.0% 和 30.1%。有机无机肥配施的 PAC 平均年升高速率是 NPK 处理的 2.89 倍。

### 2.3 作物磷素吸收特征及其与作物产量的关系

早晚稻吸磷量在不同施肥措施下的演变特征具有显著差异 (表 1)。各处理的早晚稻吸磷量均随种植年限延长产生波动。比较 29 年早晚稻平均吸磷量, 施化肥处理 (PK、NP 和 NPK) 和化肥配施有机肥处理 (70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 均显著高于对照, 提高幅度分别为 29.9%~124.2% 和 28.6%~103.2%。NK 处理的早晚稻吸磷量分别是 CK 的

表 1 长期不同施肥作物磷素吸收量 (P kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Phosphorus absorption by rice under long-term fertilization

处理 Treatment	1984—1988		1989—1993		1994—1998		1999—2003		2004—2008		2009—2012		1984—2012	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	19.8	20.2	17.1	24.0	21.2	27.6	22.6	27.4	23.0	23.0	16.5	23.8	21.1 d	25.2 e
PK	24.8	25.9	23.3	30.2	30.2	33.8	25.8	36.3	28.4	27.7	27.1	32.2	27.4 c	32.4 d
NP	35.1	32.6	32.8	34.7	37.4	35.4	32.5	36.6	33.1	35.9	33.1	34.4	35.8 b	35.2 cd
NK	42.5	37.7	39.3	39.3	41.4	41.8	31.9	38.1	43.3	37.3	28.1	42.2	37.3 b	39.6 c
NPK	49.0	42.4	46.7	45.9	46.8	46.8	43.2	42.3	38.5	39.4	45.8	51.7	47.2 a	45.5 b
70F + 30M	46.0	44.0	48.5	46.3	47.5	49.6	42.9	48.3	52.3	54.2	48.1	51.1	47.3 a	47.7 ab
50F + 50M	42.8	38.7	43.0	42.6	46.0	42.9	40.2	46.0	51.5	45.4	45.6	51.8	44.3 a	45.5 b
30F + 70M	46.9	43.7	47.2	49.7	46.5	52.9	42.1	52.8	48.6	52.0	47.6	54.2	47.1 a	51.2 a

注 (Note) : 70F+30M—施 70% 化肥氮+30% 有机肥氮 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N; 50F+50M—施 50% 化肥氮+50% 有机肥氮 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N; 30F+70M—施 30% 化肥氮+70% 有机肥氮 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N. 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ , LSD 法检验), 表中数据是年吸收量平均值 The date followed by different letters indicate significant difference among different treatments ( $P < 0.05$ , LSD test) and the data in the table were the average annual absorption.

1.77 和 1.57 倍。4 个均衡施肥处理 (NPK、70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M) 中, 30F + 70M 处理的晚稻吸磷量较 NPK 和 50F + 50M 处理显著提高, NPK、70F + 30M 和 50F + 50M 3 个处理间差异不显著, 但均显著高于不均衡施肥处理 PK 和 NP, 平均分别较后两者提高了 38.7% 和 32.9%。

从早稻和晚稻产量 (表 2) 与磷素吸收关系的变化趋势可以看出, 作物产量与磷素吸收量呈极显著线性正相关关系 (图 3)。早稻产量与磷素吸收量的回归方程为  $y = 114.83x + 543.92$  ( $R^2 = 0.931$ ,  $n = 232$ ,  $P < 0.01$ ), 晚稻为  $y = 106.41x + 1172.7$  ( $R^2 = 0.898$ ,  $n = 232$ ,  $P < 0.01$ )。根据回归方程计算结果, 在江西南昌红壤性双季稻田上, 每吸收 1 kg 磷 (P), 能分别提

高早稻和晚稻产量的 114.8 和 106.4 kg/hm<sup>2</sup>。

## 2.4 全磷与磷盈亏的响应关系

CK 处理土壤全磷变化与累积磷平衡间无显著相关关系 (图 4); NK 处理土壤全磷含量随种植年限延长呈现降低趋势, 土壤全磷变化量与磷素亏缺显著相关, 土壤中每亏缺磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤全磷含量降低 6 mg/kg; 施化学磷肥的 3 个处理 (NP、PK、NPK), 土壤全磷增量与磷盈余呈现显著或极显著正相关, 土壤中每盈余磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤全磷分别提高 10、8 和 10 mg/kg, 平均提高 9.3 mg/kg。70F + 30M、50F + 50M 和 30F + 70M 处理, 土壤中每盈余磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤全磷平均增加 63.3 mg/kg, 是施无机磷肥处理平均值的 6.78 倍。

表 2 长期不同施肥早晚稻籽粒产量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Rice yield (early rice and late rice) under long-term fertilization

处理 Treatment	1984—1988		1989—1993		1994—1998		1999—2003		2004—2008		2009—2012		1984—2012	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	2936	3281	2371	3842	3083	4224	3167	4383	4091	4314	2418	3708	3032	3967
PK	3258	3740	2962	4264	3821	4718	3644	5050	4585	5134	3545	4470	3639	4566
NP	4820	4632	4118	4830	4888	4914	4057	4907	5565	5136	4491	4749	4662	4865
NK	5630	5370	5011	5746	5239	5986	4036	5327	4953	5475	3850	5544	4819	5576
NPK	5868	5636	5348	5836	5484	6065	5128	5667	6218	5618	5675	6150	5618	5818
70F + 30M	5976	6012	5778	6111	6055	6481	5382	6191	6506	6321	6125	6666	5965	6284
50F + 50M	5906	5648	5387	6100	5845	6392	5294	6161	6486	6377	6242	6608	5847	6201
30F + 70M	6091	5744	5667	6352	6009	6603	5534	6320	6932	6615	6303	6839	6082	6397

注 (Note): 70F+30M—施 70% 化肥氮+30% 有机肥氮 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N; 50F+50M—施 50% 化肥氮+50% 有机肥氮 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N; 30F+70M—施 30% 化肥氮+70% 有机肥氮 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N.

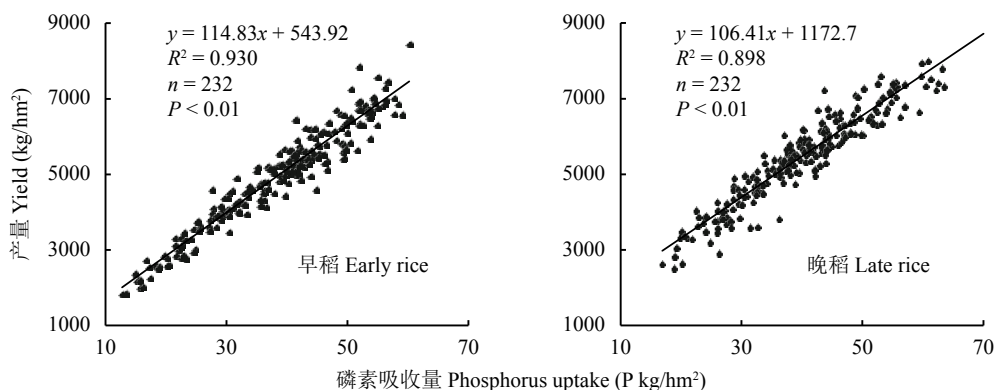


图 3 早稻及晚稻产量与作物磷素吸收量的关系

Fig. 3 Relationship between rice (early rice and late rice) yield and phosphorus uptake

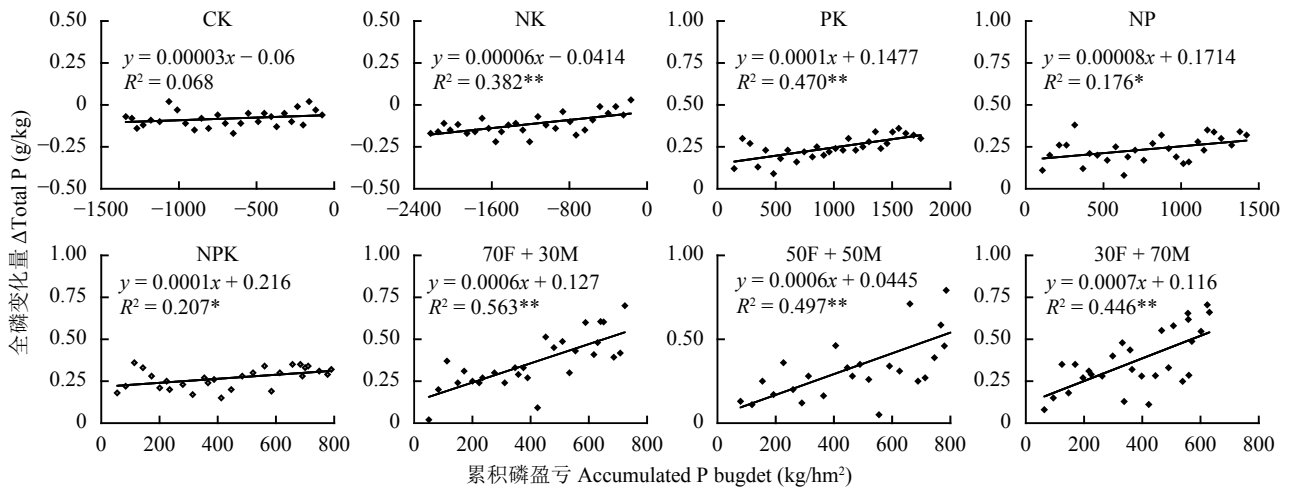


图4 土壤全磷变化与累积磷盈亏的关系

Fig. 4 Relationship between accumulated phosphorus budget and total P

[注 (Note): 70F+30M—施 70% 化肥氮+30% 有机氮 70% mineral N plus 30% organic fertilizer N; 50F+50M—施 50% 化肥氮+50% 有机氮 50% mineral N plus 50% organic fertilizer N; 30F+70M—施 30% 化肥氮+70% 有机氮 30% mineral N plus 70% organic fertilizer N. \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .]

### 3 讨论

#### 3.1 施肥模式对土壤全磷含量的影响

土壤全磷表征土壤中磷的总储量,是土壤潜在的肥力指标。本研究结果显示,配施有机肥处理与纯化肥处理相比,耕层土壤全磷含量平均提高了 57.5%,这说明在等磷量投入条件下,配施一定比例的有机肥较纯化肥在提升南方红壤性水稻土磷库的容量上效果更优。王伯仁等<sup>[4]</sup>在红壤旱地上的研究表明,在化学磷肥基础上施用有机肥,16年后土壤全磷含量较施用化学磷肥提高了 1.20 倍。黄晶等<sup>[6]</sup>研究发现化学磷肥和有机肥配施比单施化肥或有机肥能够显著提高红壤性水稻土全磷含量。仲子文等<sup>[15]</sup>在潮土上研究发现,连续 33 年单施化学磷肥或有机肥,土壤磷库有所减小,而无机磷肥与有机肥配施后土壤磷库稳定,同样证实了化学磷肥配施有机肥更能有效地提高土壤磷含量。本研究发现有机肥配施化肥处理与纯化肥处理相比,作物带走的磷量差异不显著,但在等磷量投入条件下,有机肥配施化肥更有利于提高土壤总磷,从磷平衡的角度考虑,可能是有机肥配施化肥情况下降低了土壤磷素流失,本试验有机肥种类为猪粪和紫云英,两种不同种类有机肥联合施用对红壤性双季稻田总磷流失的影响及其机理有待进一步研究。刘红江等<sup>[16]</sup>发现,配施 25% 和 50% 有机肥(猪粪)较纯化肥的磷流失量和流失率未显著增加;丁炳红<sup>[17]</sup>在研究有机物料还田对稻田氮磷损失时发现紫云英还田及紫云英+商品有机肥

较化肥处理能够有效降低农田磷流失。

#### 3.2 施肥模式对土壤全磷转化能力的影响

有效磷与全磷比值作为土壤磷素活化系数,可以表征全磷与有效磷的变异状况<sup>[18-19]</sup>,表征土壤磷养分的供应能力。多数研究表明,长期无磷投入种植,引起土壤磷活化系数(PAC)下降<sup>[7,20]</sup>。本研究中,连续 29 年无磷投入,PAC 降至 2.5% 左右,接近 2%;有研究表明土壤磷素的 PAC 低于 2.0% 时,全磷转化率低,速效磷容量和供给强度小<sup>[21]</sup>;但也有研究证实 PAC 在不施磷肥下徘徊在 1% 以下且呈缓慢上升趋势<sup>[8]</sup>。本研究中所有施磷肥处理,PAC 均显著升高,不同肥料配比处理的升高幅度不同,有机肥和化学磷肥配施显著高于化肥处理。这与黄晶等<sup>[6]</sup>及鲁艳红等<sup>[7]</sup>在红壤性水稻土上的研究结果一致。有机肥本身含有有机酸、腐殖质酸等,且在降解过程中也会产生这些物质,与土壤中的钙、铁、铝等形成稳定的配合物,减少这些离子对磷的固定强度进而促进磷的活化,提高磷的有效性。

#### 3.3 作物磷素吸收对不同施肥模式的响应

长期不施磷肥时,作物的磷素吸收量反映了土壤自然供磷能力。在双季稻种植模式中,不施磷时(CK 和 NK)作物吸收的磷素主要来源于土壤中矿质磷和含磷有机质的矿化以及随降水、降尘、灌溉水、种苗等带入的磷。NK 处理早晚稻吸磷量显著高于 CK,主要由于氮、钾肥的施用促进了作物生长,致使生物量较大的原因。早、晚稻吸磷量年季间呈

现波动, 主要是因为作物磷素吸收量的主控因素是作物产量, 而早晚稻产量易受品种、气象、栽培管理等影响而产生年季间差异。已有研究表明在化肥基础上增施有机肥显著提高作物吸磷量<sup>[2]</sup>, 本研究中在等磷量投入情况下, 30% 及 50% 有机肥替代较纯化肥处理未能显著提高水稻磷素吸收量, 但 70% 有机肥替代提高了晚稻磷素吸收量, 作物磷素总吸收量的主要影响因素是籽粒和秸秆产量, 配施 70% 有机肥处理随种植年限延长, 有机肥矿化释放的养分逐渐增加和土壤质量提高, 籽粒产量及地上部生物量大幅增加, 致使作物带走的磷量升高。

### 3.4 土壤磷平衡对土壤全磷的响应

土壤全磷含量是巨大的磷库, 其含量高低可表征磷库容量的大小, 作物吸收的磷量与土壤全磷含量相比只是很小的部分, 因此土壤全磷含量越高, 则全磷下降幅度越少, 植物吸收带走的磷量越多。本研究中土壤磷素盈亏取决于磷肥施用量及作物吸收磷量, 在不施肥条件下, 土壤磷素长期处于亏缺状态, 早晚稻产量受气温、降雨等因素的影响程度显著大于土壤磷素, 而气候年际间差异较大, 致使土壤全磷变化与累积磷亏缺之间不存在相关关系。外源磷的长期大量投入是土壤磷盈余发生的主要原因, 本研究中所有长期施用磷肥条件下农田土壤磷的收支均为盈余状态, 且全磷增量与磷累积盈余量呈直线相关, 土壤中同样每盈余磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 配施有机肥处理的土壤全磷增量却显著高于纯化肥处理, 配施有机肥处理的土壤每累积磷 100 kg/hm<sup>2</sup>, 土壤中全磷含量提高 0.6~0.7 g/kg, 而纯化肥处理仅提高 0.1 g/kg, 即长期有机无机配施较施用纯化肥更能促进土壤全磷累积, 王伯仁等及杨军等也获得了类似的结论<sup>[14, 23]</sup>。

但从环境保护方面考虑, 土壤中的磷素若长期处于盈余状态, 将增加土壤磷素向水体流失的风险, 从而威胁环境。故在配施有机肥的施肥管理中, 应控制有机肥携带磷素投入量, 或减少化学磷肥用量。

## 4 结论

在江西红壤性双季稻田上, 连续 29 年不施磷肥, 土壤磷一直处于亏缺状态, 施氮、钾肥而不施磷肥下, 土壤全磷含量随种植年限延长而持续下降。无论是单施化学磷肥, 还是有机无机肥配施均有效提高土壤全磷含量, 且在等磷量投入条件下,

有机无机肥配施较单施化肥的效果更优。长期无磷投入种植, 土壤磷活化系数下降至约 2.5%, 土壤全磷很难向有效磷进行转化, 施磷均有效提高磷活化系数, 有机无机肥配施提升速率显著高于纯化肥处理。综合考虑作物产量及生态环境, 建议采用有机无机肥配施的施肥模式, 并在施常规化学磷肥用量的基础上适当减少化学磷肥投入量, 具体减少量有待进一步研究。

### 参 考 文 献:

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3-8.
- [2] 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, 2011.  
Statistics Bureau of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [3] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. *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[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268.
- [4] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, et al. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 216-228.
- [5] Xiao Y, Wang D J, Zhang H L, et al. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 175: 47-53.
- [6] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1132-1141.  
Huang J, Zhang Y Z, Xu M G, et al. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1132-1141.
- [7] 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.
- [8] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 等. 长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1521-1528.  
Ye H C, Li D M, Huang Q H, et al. Variation of soil phosphorus under long-term fertilization in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1521-1528.
- [9] Hua K K, Zhang W J, Guo Z B, et al. Evaluating crop response and environmental impact of the accumulation of phosphorus due to long-term manuring of vertisol soil in northern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 219: 101-110.
- [10] Mahajan A, Bhagat R M, Gupta R D. Integrated nutrient management in sustainable rice-wheat cropping system for food security in



- India[J]. Saarc Journal of Agriculture, 2008, 6(2): 149–163.
- [11] Pizzeghello D, Berti A, Nardi S, *et al.* Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1–2): 58–66.
- [12] Nest T V, Vandecasteele B, Ruyschaert G, *et al.* Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 309–317.
- [13] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 904–913.  
Lü Z Z, Wu X D, Hou H Q, *et al.* Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 904–913.
- [14] 王伯仁, 李冬初, 黄晶. 红壤长期肥料定位试验中土壤磷素肥力的演变[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 96–101.  
Wang B R, Li D C, Huang J. Development of P-fertility in long-term fertilizer experiment on red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 96–101.
- [15] 仲子文, 孙翠平, 张英鹏, 等. 长期定位施肥对山东潮土有效磷及磷库演变规律的影响[J]. *山东农业科学*, 2017, (12): 59–67.  
Zhong Z W, Sun C P, Zhang Y P, *et al.* Effects of long-term located fertilization on evolution of available phosphorus and phosphorus pool in Shandong fluvo-aquic soil[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, (12): 59–67.
- [16] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 405–412.  
Liu H J, Chen Y W, Sun G F, *et al.* Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutrient loss with surface runoff[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2): 405–412.
- [17] 丁炳红. 紫云英等有机物料还田对稻田氮磷损失及重金属活性的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学硕士学位论文, 2012.  
Ding B H. The effect of Chinese milk vetch and other organic materials application on the loss of nitrogen and phosphorus and the activity of heavy metals in paddy soil[D]. Hangzhou: MS Thesis of Zhejiang A&F University, 2012.
- [18] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安. 两种磷肥对棉田土壤磷素有效性及吸收分配的影响[J]. *新疆农业大学学报*, 2009, 32(4): 17–21.  
Chen L B, Sheng J D, Zhang P A. Effect of two types of phosphates on phosphorus efficiency and phosphorus absorption and distribution in cotton field[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(4): 17–21.
- [19] 于丹, 张克强, 王风, 等. 天津黄潮土剖面磷素分布特征及其影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 518–521.  
Yu D, Zhang K Q, Wang F, *et al.* Distribution characteristics of phosphorus and its influencing factors in profile of the yellow moist soil in Tianjin city[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 518–521.
- [20] 王淑英, 樊廷录, 丁宁平, 等. 长期施肥下旱地黑垆土土壤磷素和磷肥效率的演变特征[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(7): 1038–1047.  
Wang S Y, Fan T L, Ding N P, *et al.* Change characteristics of soil phosphorus and phosphorus fertilizer efficiency in Loessial soil in dryland under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(7): 1038–1047.
- [21] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 259–260.  
Li X M, Zhang J M. Phosphorus status in Hebei fluvo-aquic soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 259–260.
- [22] Pratap, Bhattacharyya, Amaresh, *et al.* Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availability, fractionation, adsorption-desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice[J]. *Then Crop Journal*, 2015, 3(5): 387–395.
- [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.