广东农业科学　　2022，49（10）：62-70
Guangdong Agricultural Sciences　　DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2022.10.007

樊红柱，秦鱼生，郭松，陈庆瑞．长期施肥下不同肥力紫色水稻土氮磷活化能力［J］．广东农业科学，2022，49（10）：62-70.

长期施肥下不同肥力紫色水稻土氮磷活化能力

樊红柱，秦鱼生，郭　松，陈庆瑞
（四川省农业科学院农业资源与环境研究所，四川 成都　610066）

摘　要：【目的】探讨长期施肥下紫色水稻土氮、磷养分活化能力及其与 pH 和有机碳的量化关系，为土壤培肥提供参考。【方法】选取连续 36 年不施肥的低肥力（LF）、氮磷钾平衡施肥的中肥力（MF）和有机无机配施的高肥力（HF）处理，研究不同肥力土壤氮磷养分含量及其活化度的演变特征，分析土壤 pH、有机碳与氮磷活化度的关系。【结果】MF 和 HF 土壤的作物产量显著高于 LF 土壤。LF 土壤全氮、全磷含量基本稳定，碱解氮含量显著增加而有效磷含量略有降低，MF 和 HF 土壤全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量均呈极显著增加趋势；LF、MF、HF 土壤全氮含量年增加量分别为 5.5、14.2、17.0 mg/kg，碱解氮年增量为 0.40、1.05、1.32 mg/kg，全磷年增量为 0.8、17.1、18.0 mg/kg，有效磷年增量为 -0.03、2.05、1.85 mg/kg。MF 和 HF 土壤氮磷活化度比 LF 土壤提高 8.15%~428.77%；氮活化度与 pH 和有机碳不存在线性关系，磷活化度与 pH 呈极显著负相关，与有机碳呈显著正相关。年施 N 240 kg/hm²、P_2O_5 120 kg/hm²，氮含量于 13 年后、磷含量于 9 年后达到饱和。【结论】氮磷钾平衡施肥或有机无机肥配施是提升西南丘陵区水稻土氮磷养分含量及其活化能力的重要措施。

关键词：长期施肥；水稻土；养分活化度；氮磷

中图分类号：S158.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004-874X（2022）10-0062-09

Effects of Long-term Fertilization on Soil Nitrogen and Phosphorus Activation in Purple Paddy Soil with Different Fertility

FAN Hongzhu, QIN Yusheng, GUO Song, CHEN Qingrui
（*Institute of Agricultural Resources and Environment, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu* 610066，*China*）

Abstract:【Objective】The study was carried out to reveal the impact of long-term fertilization on the capacities of soil nitrogen (N) and phosphorus (P) activation, and their correlations with pH and soil organic carbon (SOC) in purple paddy soil with different fertility, with a view to providing references for soil fertilization.【Method】Based on a 36-year different fertilization experiment of purple soil, different fertilization treatments including no fertilization (LF), balanced chemical nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer (MF), and chemical N, P and K fertilizer plus organic fertilizer (HF) were set. Dynamics of soil total and available N and P contents, and nutrient activation rates under different fertility were measured, and relationships between soil pH, SOC and nutrient activation rates were analyzed.【Result】Crop yields under MF and HF were significantly higher than those under LF. The contents of total N and P had no significant changes, available N content efficiently improved, while available P slightly decreased under LF treatment. However, total and available N and P contents significantly increased under MF and HF treatments. There were variation in promotion of N and P content under different fertility paddy soil. For example Under LF, MF, and HF treatments, the annual increase rates of total N contents

收稿日期：2022-07-01
基金项目：国家重点研发计划项目（2016YFE0112700，2016YFD0300900）；中国 - 欧盟国际合作项目（iSQAPER 635750）；四川省农业科学院青年领军人才项目（2020LJRC005）
作者简介：樊红柱（1978—），男，博士，副研究员，研究方向为土壤培肥与改良，E-mail：hongzhufan@126.com

were 5.5, 14.2, and 17.0 mg/kg, 0.40, 1.05, and 1.32 mg/kg for available N, 0.8, 17.1, and 18.0 mg/kg for total P, and −0.03, 2.05, and 1.85 mg/kg for available P, respectively. Compared with the LF treatment, N activation rates under MF and HF treatments increased from 8.15% to 428.77%. There was no significant linear relationship between N activation rate and pH or SOC. A significant negative correlation was observed between P activation rate and pH, while there was a significant positive linear correlation between P activation rate and SOC. If the annual application amount of N was 240 kg/hm^2 and amount of P_2O_5 was 120 kg/hm^2, the purple soil was N-saturated after 13 years and it was P-saturated after 9 years. 【Conclusion】In the purple paddy soil regions of Southwest China, balanced fertilization with N, P and K or application of chemical fertilizer with organic fertilizer could promote soil N and P contents and activation rates.

Key words: long-term fertilization; paddy soil; nutrient activation rate; nitrogen and phosphorus

【研究意义】水稻是我国三大粮食作物之一，全国 60% 以上的人口以稻米为主食，持续稳定地发展水稻生产对保障国家粮食安全起着重要作用[1-2]。土壤是水稻赖以生长的物质基础，受土壤自身性质及人为不合理垦殖的影响，我国稻田土壤存在肥力差异大、肥料利用率低、水稻产量不稳等问题[3-4]，从而严重制约水稻生产潜力的发挥，因此提升稻田土壤质量对水稻可持续发展意义重大。【前人研究进展】水稻生产中合理施肥可以在很大程度上改善土壤肥力状况和作物产量。我国东北稻区试验表明，控释氮肥侧条施用减少了氮素淋溶、延迟了氮浓度峰值出现时间，在确保水稻不减产条件下，施用控释肥比常规氮肥用量减少 10%~20%，氮肥表观利用率提高 5.23%，氮肥农学效率提高 6.48 kg/kg[5]。我国长江中下游稻区红壤性水稻土不施肥土壤有效磷年下降速率为 0.35 mg/kg，单施化学磷肥和化学磷肥配施有机肥土壤有效磷年增加速率分别为 0.83、1.48 mg/kg，且后者处理比单施化肥或单施有机肥能够显著提高土壤有效磷、全磷和磷素活化效率[6]。红壤性稻田冬季种植绿肥能显著提高土壤抗物理退化、土壤养分供应和贮藏、抗生物化学退化和保持作物生产力的功能，且不同绿肥品种对土壤培肥效果不同[7]。长期非均衡的 PK、NP、NK 施肥导致土壤质量退化，土壤缺磷和缺钾限制了水稻生产力；长期施用石灰对水稻土质量的提升效果不明显，氮磷钾化肥配施有机肥是提升南方红壤性水稻土质量的最佳措施[8]。胡诚等[9]研究发现，化肥配合有机肥施用能够显著提高稻谷产量，且大大提高黄棕壤性水稻土耕层有效磷含量，但对其它土层影响不明显，同时提高 0~40 cm 土层速效钾含量。樊红柱等[10]基于我国西南稻区紫色水稻土长期试验研究指出，不施磷肥，土壤磷素常年处于亏缺状态，施磷则呈现盈余，且有机无机磷肥配施，磷盈余量大于单施有机肥或单施无机磷肥；单施无机磷肥、有机磷肥和有机无机磷肥配施，土壤有效磷含量年增加量分别为 1.13、0.032、1.17 mg/kg；施用无机磷肥土壤磷素可迁移至 60~80 cm 土层，施用有机磷肥或有机无机磷肥配施，土壤磷素可迁移至 100 cm 以下，随着磷肥施用年限持续，土壤磷素迁移深度和迁移量将会更大[11]。黄继川等[12]对我国华南稻区水稻土质量进行评价，发现土壤有机质、全氮、碱解氮和速效磷均呈上升趋势，而土壤有效钾含量呈下降趋势，建议在水稻生产中重视有机肥的投入，尤其要注重钾肥的施用比例。广西赤红壤稻田连续施肥 10 年，土壤有机质含量年均增加 0.25 g/kg，全氮含量年均增加 0.035 g/kg，不施化学磷肥，土壤全磷和有效磷含量基本稳定，施用化学磷肥，土壤全磷和有效磷含量呈逐年增加趋势，不施化学钾肥，土壤全钾含量基本保持不变，而速效钾含量呈现下降趋势，在施用有机肥基础上增施氮磷钾化肥是不断培肥土壤的有效措施之一[13]。【本研究切入点】各种类型土壤的质量提升对施肥的响应程度不同，引起土壤养分库容和活化能力也不同。紫色水稻土是我国西南稻区重要的一种土壤资源，目前对不同肥力紫色水稻土养分演变特征及其氮磷活化能力的差异研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究以紫色水稻土 36 年肥料定位试验为平台，研究不同肥力稻田土壤氮磷养分及其活化能力的时间演变特征，明确土壤 pH、有机碳与氮磷活化度的量化关系，为该区稻田土壤培肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

长期肥料定位试验位于四川省遂宁市船山区四川省农业科学院农业资源与环境研究所野外试验站内（30°34′25.46″N、105°37′25.63″E），该区属于亚热带湿润季风气候，年均气温 17.4℃，年降雨量 930 mm，无霜期约 337 d，年日照时数 1 227 h。供试土壤为钙质紫色水稻土，为侏罗系遂宁组砂页岩母质发育的红棕紫泥田，土壤质地为粘土。长期试验从 1982 年开始，初始时耕层土壤基本性质为：pH 8.6，有机质含量 15.9 g/kg，全氮（N）、全磷（P）、全钾（K）含量分别为 1.09、0.60、22.32 g/kg，速效氮（N）、有效磷（P_2O_5）、速效钾（K_2O）含量分别为 66、3.9、108 mg/kg，该土壤钾素丰富、磷素不足。

1.2 试验方法

试验设低肥力田块（LF，不施任何肥料）、中肥力田块（MF，氮磷钾平衡施肥）、高肥力田块（HF，氮磷钾配施有机肥）3 个处理，每个处理 3 次重复，随机区组排列，小区面积 13.4 m²，各小区间用离地面 20 cm 高的水泥板隔开。种植方式为水稻—小麦一年两熟模式。水稻和小麦品种为当地主栽品种。MF 处理肥料用量分别为 N 240 kg/hm²、P_2O_5 120 kg/hm² 和 K_2O 120 kg/hm²，HF 处理在 MF 处理基础上增施新鲜猪粪（含水率约 83%，干物质含 C 388 g/kg、N 26.6 g/kg、P_2O_5 21.2 g/kg、K_2O 6.6 g/kg）30 000 kg/hm²。水稻季和小麦施肥量相同，为上述施肥量的一半；所有磷肥和有机肥作基肥施用，其中水稻季 60% 氮肥、50% 钾肥作基肥，剩余肥料作分蘖肥施用；小麦季 30% 氮肥、50% 钾肥作基肥，其余肥料作拔节肥施用；肥料种类为尿素、磷酸二铵、氯化钾及新鲜猪粪。试验小区田间管理措施同普通大田。

1.3 样品测定与分析

水稻收获后的 10~11 月采集每个处理 0~20 cm 混合土壤样品，室内风干，磨细过筛，装瓶保存待分析。土壤样品养分含量采用常规方法测定[14]：pH 采用 pH 计法，有机碳含量测定采用 K_2CrO_7–H_2SO_4 氧化法，全氮含量测定采用半微量开氏法，全磷和全钾含量测定采用 NaOH 熔融法，碱解氮含量测定采用扩散法，有效磷含量测定采用 $NaHCO_3$ 浸提 – 钼锑抗比色法，速效钾含量测定采用 NH_4OAc 浸提 – 火焰光度计法。受土壤保存能力和经费的限制，本研究中历年的土壤氮磷含量数据存在部分缺失，因此土壤氮磷的演变图中试验年限横坐标存在差别。土壤磷活化度用有效磷含量占全磷含量的百分数表示[6,15]，同理计算氮活化度。

采用 Excel 2010 和 DPS 统计软件进行数据整理和分析，利用线性方程拟合土壤氮磷及其活化度与施肥时间的关系以及 pH、有机碳与氮磷活化度的关系。

2 结果与分析

2.1 不同肥力处理水稻和小麦产量变化

由图 1 可知，不同肥力处理水稻和小麦产量差异较大。随试验年限延续，LF 土壤水稻产量呈缓慢增加趋势，年水稻产量增加 36.12 kg/hm²，而 MF 和 HF 土壤水稻产量则降低，年水稻产量分别下降 4.58、4.33 kg/hm²；但 MF 和 HF 土壤多年水稻平均产量分别为 7 100、7 461 kg/hm²，

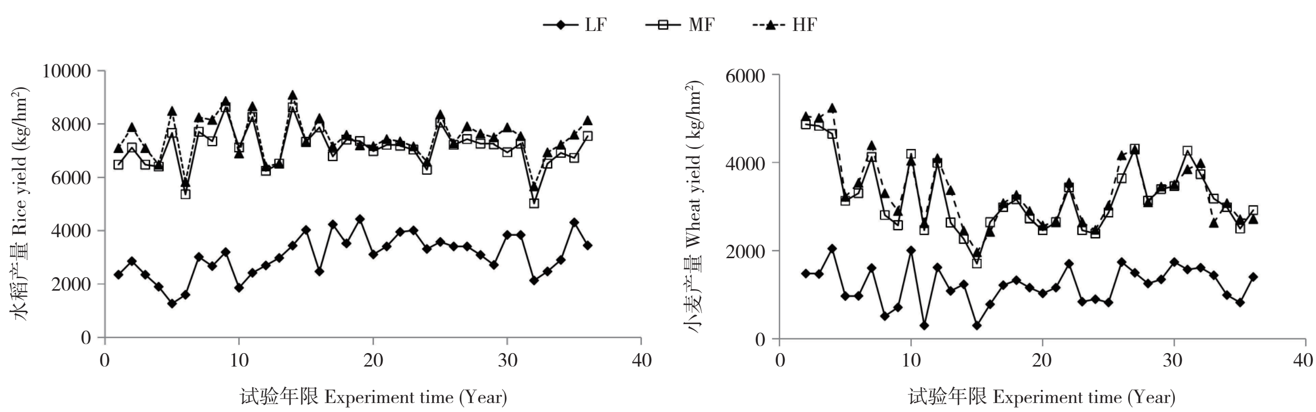

图 1 不同肥力处理水稻和小麦产量动态变化

Fig.1 Dynamic change of rice and wheat yields under different fertility conditions

比 LF 土壤（水稻产量 3 065 kg/hm²）分别提高 131.64%、143.43%。试验年限延长对不同处理小麦产量的影响规律与水稻相似；MF 和 HF 土壤多年小麦平均产量为 3 224、3 349 kg/hm²，比 LF 土壤（小麦产量 1 222 kg/hm²）分别增加 163.83%、174.06%，可见，培肥土壤有利于作物增产。

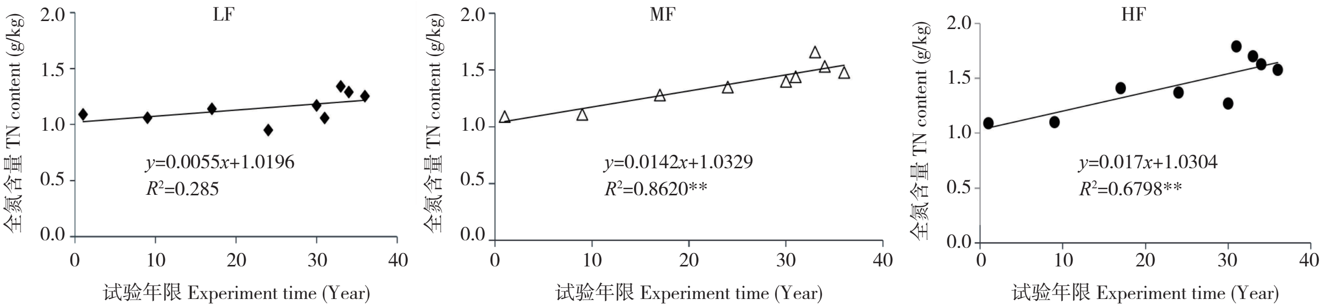

图 2　不同肥力土壤全氮含量动态变化

Fig. 2　Dynamic change of total N (TN) contents under different fertility soils

2.2　不同肥力土壤全氮和碱解氮的时间演变

由图 2 可知，不同肥力稻田土壤全氮含量对施肥时间的响应存在一定差异。连续施肥 36 年，低肥力（LF）稻田土壤全氮含量随施肥时间的延续呈增加趋势，但没有达到显著差异，说明不施肥没有显著改善土壤中全氮含量，所以低肥力稻田土壤全氮含量基本保持稳定；而中肥力（MF）和高肥力（HF）稻田土壤全氮含量随施肥时间的延长表现出极显著增加趋势。3 种肥力稻田土壤全氮含量年增加量分别为 0.0055、0.0142、0.0170 g/kg。当施肥 36 年时，3 种肥力稻田土壤全氮含量分别为 1.25、1.48、1.58 g/kg，其中 MF、HF 处理比 LF 处理增加 18.4%、26.4%；比试验开始时土壤全氮（1.09 g/kg）分别提高 14.68%、35.78% 和 44.95%。说明 MF 和 HF 处理稻田比 LF 处理稻田具有更高的全氮含量。

不同肥力稻田土壤碱解氮含量对施肥时期的响应特征明显与全氮不同（图 3）。LF、MF 和 HF 土壤中碱解氮含量均表现出随施肥年限的延续呈极显著增加的趋势。连续施肥 36 年，3 种不同肥力水平稻田土壤碱解氮含量分别为 74.66、91.08、106.15 mg/kg，分别比试验开始时土壤碱解氮（66.30 mg/kg）增加 12.61%、37.38% 和 60.11%，且 HF 土壤碱解氮含量最高，分别比 LF、MF 土壤提高 42.18%、16.55%。3 种肥力稻田土壤碱解氮含量年增加量分别为 0.3983、1.0456、1.3182 mg/kg。当土壤中氮素含量足够高时，继续施用氮肥土壤中碱解氮含量几乎不再增加，年施 N 240 kg/hm² 时紫色水稻土连续施肥 13 年土壤中含有足够的氮素，此后 MF 和 HF 稻田土壤碱解氮含量平均为 102.69、110.30 mg/kg。

2.3　不同肥力土壤全磷和有效磷的时间演变

由图 4 可知，不同肥力稻田土壤全磷随施肥时期呈现不同的演变趋势。LF 稻田土壤全磷含量随施肥时间的变化基本稳定，而 MF 或 HF 稻田土壤全磷含量随施肥年限的延续均呈极显著增加趋势。LF、MF、HF 3 种肥力土壤全磷含量年变化量分别为 0.0008、0.0171、0.018 g/kg，MF 和

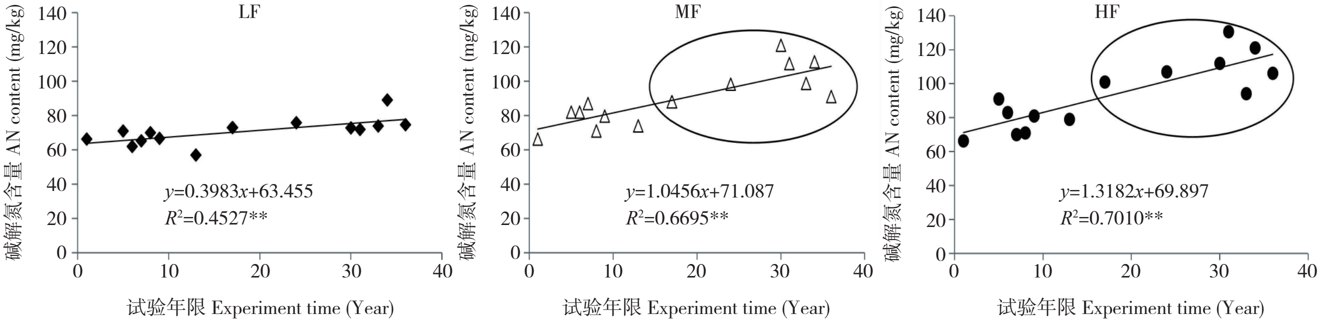

图 3　不同肥力土壤碱解氮含量动态变化

Fig. 3　Dynamic change of available N (AN) contents under different fertility soils

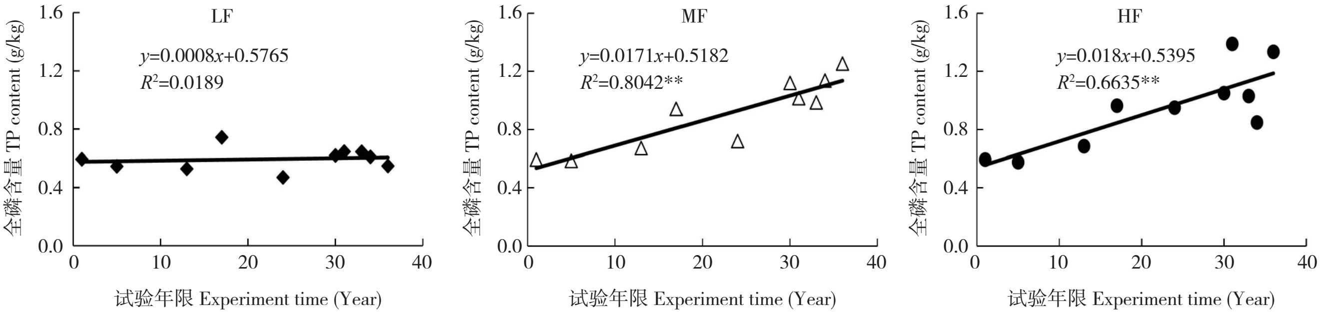

图 4　不同肥力土壤全磷含量动态变化
Fig. 4　Dynamic change of total P (TP) contents under different fertility soils

HF 稻田土壤全磷含量年变化量比较接近，且两者约为 LF 稻田的 20 多倍。连续施肥 36 年，LF、MF、HF 稻田土壤全磷含量分别为 0.55、1.25 和 1.33 g/kg，HF 稻田土壤全磷含量分别比 LF、MF 稻田土壤增加 141.82%、6.40%；与试验开始土壤全磷含量（0.59 g/kg）相比，LF 稻田土壤全磷含量降低 6.78%，而 MF 和 HF 稻田土壤全磷含量分别提高 111.87% 和 125.42%。说明 MF 和 HF 稻田比 LF 稻田具有更高的全磷含量。

不同肥力稻田土壤有效磷含量的时间变化趋势呈现明显差异（图 5）。LF 稻田土壤有效磷含量随施肥时间呈直线下降趋势，拟合方程为 $y=-0.0328x+5.441$，土壤有效磷含量年下降 0.0328 mg/kg；MF 和 HF 稻田土壤有效磷含量均随施肥时间呈极显著增加趋势，拟合方程为 $y=2.0491x-6.6182$ 和 $y=1.8511x-1.4715$，有效磷含量年增加量分别为 2.0491、1.8511 mg/kg。连续施肥 9 年，MF 和 HF 稻田土壤有效磷含量不同年份间差异较小，平均含量分别为 6.50、8.47 mg/kg，9 年后两个处理不同年份间土壤有效磷含量差异较小，平均值分别为 48.60、49.85 mg/kg，说明连续施肥 9 年紫色水稻土有效磷含量已足够高，继续施肥土壤中有效磷含量增加较小。经过 36 年种植，LF、MF、HF 3 种肥力土壤有效磷含量分别为 2.85、93.38、82.13 mg/kg，MF 和 HF 处理比 LF 处理增加 3176.49% 和 2781.75%，LF、MF、HF 处理较试验开始时土壤有效磷含量（3.90 mg/kg）增加 −26.92%、2294.36% 和 2005.90%。表明 MF 和 HF 稻田土壤有效磷含量远远高于 LF 稻田，存在磷素环境风险。

2.4　不同肥力土壤氮、磷活化度的时间演变

从图 6 可以看出，不同肥力紫色水稻土氮素活化度均随试验时间的延长呈升高趋势，但差异均没有达到显著水平，氮素活化度年变化速率在 0.002%~0.0139%，说明不同肥力稻田施肥年限对土壤中氮素活化能力影响较小。LF、MF、HF 稻田多年平均氮素活化度分别为 6.46%、7.01% 和 7.14%，前者明显低于后两者，但后两者差异不显著；比试验开始时的氮素活化度（6.08%）分别提高 6.25%、15.30% 和 17.43%，表明 MF 和 HF 处理能够明显提高土壤氮素活化度。土壤磷素活化度随时间变化规律与氮素活化度的结果不同。连续施肥 36 年，不施磷肥的 LF 土壤磷素

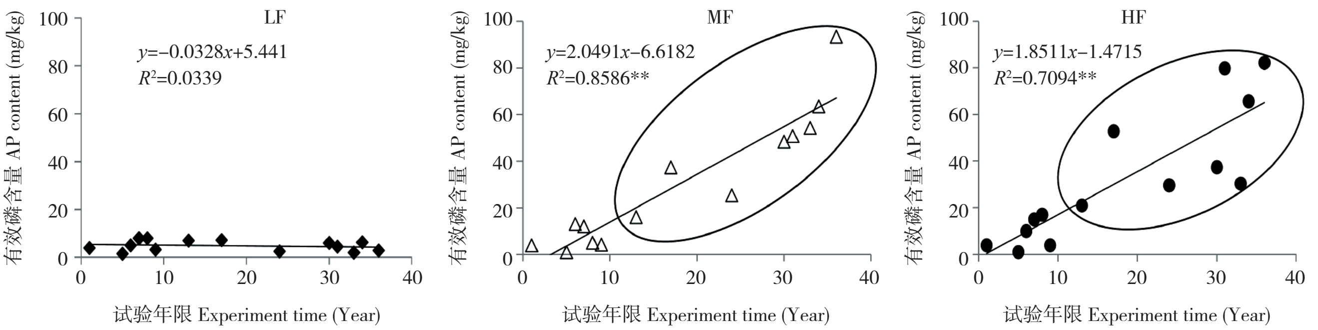

图 5　不同肥力土壤有效磷含量动态变化
Fig. 5　Dynamic change of available P (AP) contents under different fertility soils

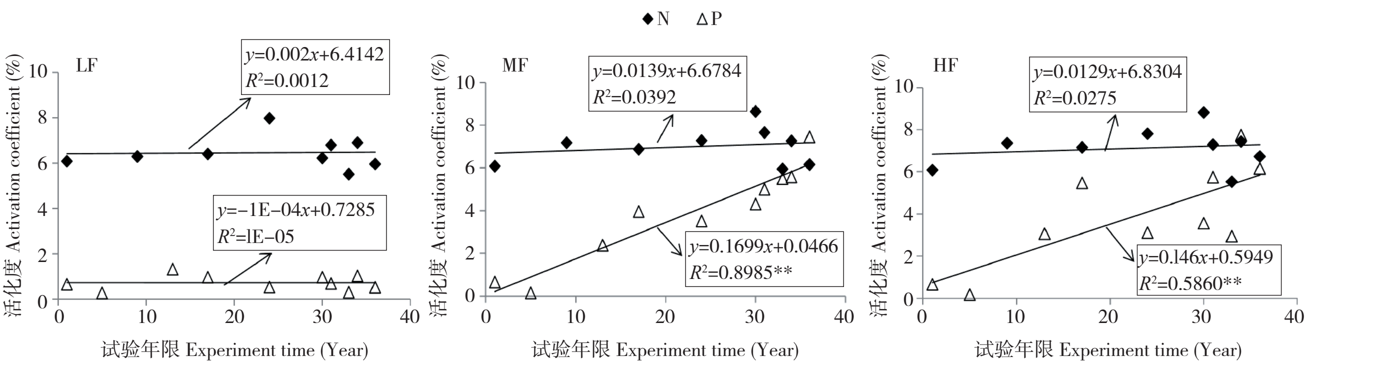

图 6　不同肥力土壤氮、磷活化度动态变化

Fig. 6　Dynamic change of N and P activation coefficients under different fertility soils

活化度基本保持不变，但略有下降趋势。施用磷肥的 MF 和 HF 土壤磷素活化度随施肥年限延长呈现出极显著增加的趋势，磷素活化度年增加速率分别为 0.1699%、0.1460%。连续施肥 36 年，LF、MF 和 HF 土壤磷素活化度分别为 0.73%、3.85% 和 3.86%，后两者差异不大但明显高于前者，分别比试验开始时的活化度（0.66%）提高 10.61%、483.33% 和 484.85%。说明施用磷肥显著增加土壤磷素活化能力。

2.5　土壤氮磷活化度与 pH、有机碳的量化关系

由图 7 可知，紫色水稻土氮磷活化度与土壤 pH、有机碳含量的相互关系存在较大差异，氮素活化度与 pH、有机碳含量差异均没有达到显著水平，说明改变土壤 pH 和有机碳含量不能提高或降低土壤氮素活化能力。然而，土壤磷素活化度则随着 pH 值的增加呈极显著降低变化，而随土壤有机碳含量的增加而呈极显著增加的趋势，二者负相关关系线性拟合方程为：$y=-6.64281x+56.28$（$R^2=0.342$，$P<0.01$），二者正相关关系方程为：$y=1.3512x-10.926$（$R^2=0.626$，$P<0.01$）。表明降低土壤 pH 或增加有机碳含量可显著提高紫色水稻土磷素活化能力，从而有效保障土壤的磷素供给水平以及满足作物吸磷需求。

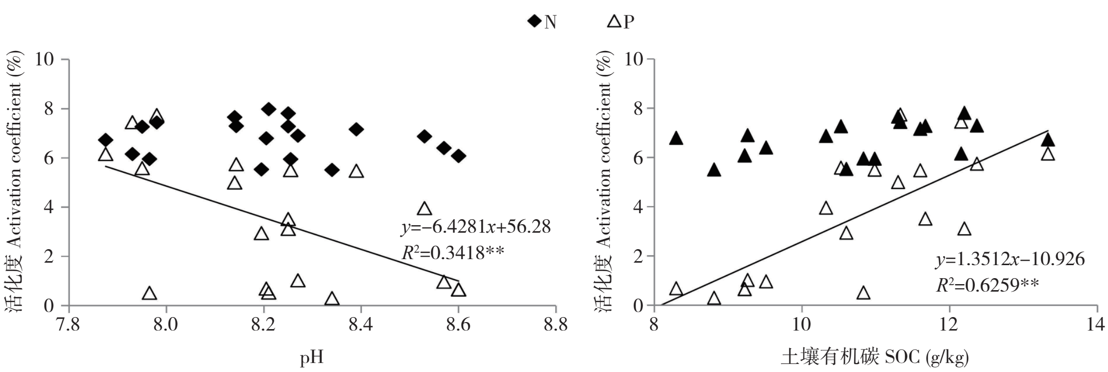

图 7　土壤 pH、有机碳与氮磷活化度的相互关系

Fig. 7　Relationship between pH, soil organic carbon (SOC) and activation coefficients of N and P

3　讨论

水旱轮作是我国长江中上游主要的耕作模式，由于土壤肥力的差异和不合理施肥管理，造成该区农田产能不稳定，本研究发现中肥力和高肥力土壤产能差异不大，水稻产量在 7 100 ~7 461 kg/hm²、小麦产量在 3 224~3 349 kg/hm² 范围变化，依次分别比低肥力土壤水稻产量增加 131.64%~143.43%、小麦产量提高 163.83%~174.06%，说明培肥土壤有利于增加作物产量，这与陈轩敬等[16]研究结果一致。长期肥料定位试验由于其结果的可靠性、延续性和检验性更科学成为目前研究施肥对土壤肥力影响常用和可靠的方法[17–18]。本研究发现紫色水稻土连续施肥 36 年内，低肥力稻田土壤全氮、全磷含量相对稳定，碱解氮随施肥时间的延续呈显著增加，而有效磷含量稍有下降趋势，说明低产稻田土壤氮磷含量相对稳定。这与黄晶等[6]和柳开楼等[19]在红壤稻田与旱地上的研究结果一致。

土壤碱解氮含量增加的原因可能是河流灌溉水带入部分养分，尤其是氮素养分。然而，无论中肥力和高肥力稻田土壤全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量均随施肥时间的延长表现出极显著增加的趋势，低肥力、中肥力和高肥力稻田土壤全氮含量年增加量分别为 0.0055、0.0142、0.0170 g/kg，碱解氮年增加量为 0.3983、1.0456、1.3182 mg/kg，全磷年增加量为 0.0008、0.0171、0.018 g/kg，有效磷年增加量为 –0.0328、2.0491、1.8511 mg/kg，说明土壤养分增加量对不同肥力稻田的响应程度不同，表现为中肥力和高肥力稻田土壤养分年增加量高于低肥力稻田。然而，连续施肥 36 年中肥力和高肥力稻田土壤氮磷含量年增加量差异较小；通过阶段分析发现，在施肥 1~13 年间，中肥力和高肥力稻田土壤碱解氮含量不同年份间差异较小，多年平均含量非常接近分别为 77.43、77.33 mg/kg，连续施肥 13 年后各处理不同年份间碱解氮含量变化也不大，且其碱解氮含量比连续施肥 13 年前急速增加，平均值分别为 102.69、110.30 mg/kg；中肥力和高肥力稻田土壤有效磷含量也可分两个阶段，连续施肥 1~9 年间两个处理各自不同年份间有效磷含量差异较小，多年平均为 6.50、8.47 mg/kg，连续施肥 9 年后各处理不同年份间有效磷含量变化也不大，且明显高于连续施肥 9 年前，平均值分别为 48.60、49.85 mg/kg；说明土壤养分足够高时，过量施肥对土壤肥力提升空间是有限的，这与国内外多数研究结果一致[16, 20–21]；也表明在本试验施肥水平下紫色水稻土氮磷施肥转折点的时间分别为连续施肥 13 年和 9 年，即施用氮肥 13 年后土壤中含有足够的氮素养分，施磷肥 9 年后土壤中含有足够高的磷素养分。

土壤氮磷活化度是反映土壤氮磷养分供应能力的重要指标[6,19,22]。3 种肥力稻田没有显著影响土壤氮活化度，高肥力、中肥力和低肥力稻田土壤氮活化度变化范围分别为 5.53%~8.82%、5.95%~8.64% 和 5.51%~7.98%，多年平均值分别为 7.14%、7.01% 和 6.46%，分别比试验开始时提高 17.43%、15.30% 和 6.25%。与氮活化度不同，低肥力稻田土壤磷活化度基本保持不变，而中肥力和高肥力稻田土壤磷活化度随施肥年限延长均呈极显著增加趋势，高肥力、中肥力和低肥力稻田土壤磷活化度值分别为 3.86%、3.85% 和 0.73%，比试验开始时增加 484.85%、483.33% 和 10.61%。说明高肥力和中肥力稻田能够明显提高土壤氮磷活化能力，保障养分充足供应。土壤环境因子 pH 和有机碳均没有显著影响氮活化度；磷活化度与 pH 值呈极显著负相关，而与有机碳含量呈极显著正相关；说明降低土壤 pH 或增加有机碳可显著提高土壤磷活化能力，这与柳开楼等[19]在我国南方红壤和 Zhan 等[22]在我国东北黑土上的研究结果一致。土壤中的氮素容易被作物吸收利用或者通过淋溶和地表径流等方式损失[23–24]，被认为土壤中较活跃的营养元素，所以氮活化度与 pH 和有机碳含量差异不显著；而磷在土壤中移动性差、容易被固定，磷肥当季利用率较低一般为 10%~25%[25]，没有被作物吸收利用的大量磷素累积到土壤中，当施入有机肥或降低土壤 pH 时，增加了土壤生物群落多样性和微生物活性从而活化被土壤吸附的磷素[26–28]，引起随 pH 降低或有机碳含量增加土壤磷活化度提高。土壤氮磷活化度与 pH 和有机碳的作用机制还需进一步试验。

4 结论

低肥力稻田土壤全氮、全磷含量对施肥时期响应不显著，碱解氮含量随施肥年限的延长呈极显著增加，而有效磷含量则有所下降。无论中肥力或高肥力稻田土壤全氮、碱解氮、全磷和有效磷含量均随施肥时间的增长而呈极显著增加趋势。土壤氮磷养分年增加速率对不同肥力水平土壤的响应程度差异较大，中肥力和高肥力稻田土壤氮磷含量增加速率高于低肥力稻田，而前两者之间差异较小。当年施 N 240 kg/hm^2、P_2O_5 120 kg/hm^2 时，紫色水稻土氮磷含量足够高的施肥持续年限分别为 13 年与 9 年。土壤 pH、有机碳对氮活化度无显著影响，土壤磷活化度与 pH 呈极显著负相关，而与有机碳呈极显著正相关。氮磷钾平衡施肥或有机无机肥料配施是西南丘陵区稻田土壤培肥的重要措施。

参考文献（References）：

[1] CHEN Q, HE A B, WANG W Q, PENG S B, HUANG J L, CUI K H, NIE L X. Comparisons of regeneration rate and yields performance between inbred and hybrid rice cultivars in a direct seeding rice–ratoon rice system in central China[J]. *Field Crops Research*, 2018,223:164–170. DOI:10.1016/j.fcr.2018.04.010.

[2] 杨秉臻，田冕，金涛，陆建飞.1978—2015年长江经济带水稻生产时空变化特征分析[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，2018,39(3):63-69. DOI:10.16872/j.cnki.1671-4652.2018.03.012.
YANG B Z, TIAN M, JIN T, LU J F. Spatiotemporal variation characteristics of rice production in Yangze River economic belt from 1978 to 2015[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2018,39(3):63-69. DOI:10.16872/j.cnki.1671-4652.2018.03.012.

[3] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 孟远夺, 董燕, 李荣, 马义兵. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017,54(5):1047-1056. DOI:10.11766/trxb201703180633.
YANG F, XU Y, CUI Y, MENG Y D, DONG Y, LI R, MA Y B. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2017, 54(5):1047-1056. DOI:10.11766/trxb201703180633.

[4] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017,49(6):1067-1077. DOI:10.13758/j.cnki.tr.2017.06.001.
YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China[J]. *Soils*, 2017,49(6):1067-1077. DOI:10.13758/j.cnki.tr.2017.06.001.

[5] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 张爱平, 李友宏, 洪瑜, 杨正礼. 控释氮肥侧条施用对东北地区水稻产量和氮肥损失的影响[J]. 水土保持学报, 2018,32(2): 252-256. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.037.
LIU R L, WANG F, WANG K J, ZHANG A P, LI Y H, HONG Y, YANG Z L. Effects of side strip application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2):252-256. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.037.

[6] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 高菊生. 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. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.06.009.
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[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(6):1132-1141. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.06.009.

[7] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 郑圣先, 高菊生, 谢坚, 廖育林. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 水土保持学报, 2011,25(3):92-97,102. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2011.03.046.
YANG Z P, XU M G, NIE J, ZHENG S X, GAO J S, XIE J, LIAO Y L. Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and its comprehensive evaluation under double-rice cropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,25(3):92-97,102. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2011.03.046.

[8] 聂军, 杨曾平, 郑圣先, 廖育林, 谢坚, 向艳文. 长期施肥对双季稻区红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 应用生态学报, 2010,21(6):1453-1460. DOI:10.13287/j.1001-9332.2010.0213.
NIE J, YANG Z P, ZHENG S X, LIAO Y L, XIE J, XIANG Y W. Effects of long-term fertilization on redish paddy soil quality and it sevalution natypical[J]. *Chinese Journal of Applied Ecolog*, 2010,21(6):1453-1460. DOI:10.13287/j.1001-9332.2010.0213.

[9] 胡诚, 宋家咏, 李晶, 刘春清, 陶小蛾, 陈云峰, 乔艳, 刘东海, 李双来. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2012,21(4):673-676. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.04.018.
HU C, SONG J Y, LI J, LIU C Q, TAO X E, CHEN Y F, QIAO Y, LIU D H, LI S L. Profile distribution of soil available phosphorus and available potassium concentrations and crop grain yields in long-term fertilization experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012,21(4):673-676. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.04.018.

[10] 樊红柱, 陈庆瑞, 郭松, 陈琨, 秦鱼生, 涂仕华. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018,24(1):154-162. DOI:10.11674/zwyf.17141.
FAN H Z, CHEN Q R, GUO S, CHEN K, QIN Y S, TU S H. Phosphorus balance and availability in a purple paddy soil under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018,24(1):154-162. DOI:10.11674/zwyf.17141.

[11] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 陈琨, 涂仕华. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. 中国农业科学, 2016,49(8):1520-1529. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.08.009.
FAN H Z, CHEN Q R, QIN Y S, CHEN K, TU S H. Characteristics of phosphorus accumulation and movement in a calcareous purple paddy soil profile as affected by long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1520-1529. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2016.08.009.

[12] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 于俊红, 林志军, 吴雪娜, 杨林香, 崔金娟. 广东省水稻土有机质和氮、磷、钾肥力调查[J]. 广东农业科学, 2014,41(6):70-73. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2014.06.010.
HUANG J C, PENG Z P, XU P Z, YU J H, LIN Z J, WU X N, YANG L X, CUI J J. Investigation on organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium of paddy soil in Guangdong province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014(6): 70-73. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2014.06.010.

[13] HUANG J S, XIE R L, ZENG Y, ZHOU L Q, QU H P, ZHU X H, TAN H W. Effects of long-term fertilization on fertility of lateritic red loam paddy[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017,18(8):1437-1442. DOI:10.16175/j.cnki.1009-4229.2017.08.019.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981.
BAO S D. Analytucal methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1981.

[15] 吕真真, 刘秀梅, 侯红乾, 冀建华, 蓝贤瑾, 冯兆滨, 刘益仁. 长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019,25(8):1316-1324. DOI:10.11674/zwyf.18340.
LYU Z Z, LIU X M, HOU H Q, JI J H, LAN X J, FENG Z B, LIU Y R. Effects of long-term fertilizations on soil phosphorus and its supply to rice in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019,25(8):1316-1324. DOI:10.11674/zwyf.18340.

[16] 陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 张珍珍, 张跃强, 石孝均. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. 农业工程学报, 2016,32(S1):139-144. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.020.
CHEN X J, ZHAO Y N, CHAI G Q, ZHANG Z Z, ZHANG Y Q, SHI X J. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(S1):139-144. DOI:10.11975/

j.issn.1002-6819.2016.z1.020.

[17] THAKUR A, SHARMA R P, SANKHYAN N K, KUMAR R. Maize grain quality as influenced by 46 years' continuous application of fertilizers, farmyard manure (FYM), and lime in an alfisol of North-western Himalayas[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 52(1):1-12. DOI:10.1080/00103624.2020.1854289.

[18] 其力莫格, 常瑞雪, 张新梅, 陈清. 培养条件下添加有机废弃物对土壤氮磷养分有效性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018,23(11):124-132. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2018.11.13. QILI M G, CHANG R X, ZHANG X M, CHEN Q. Effect of organic wastes incorporation on soil nitrogen and phosphorus availability under incubating condition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018,23(11):124-132. DOI:10.11841/j.issn.1007-4333.2018.11.13.

[19] NAAB J B, MAHAMA G Y, KOO J, JONES J W, BOOTE K J. Nitrogen and phosphorus fertilization with crop residue retention enhances crop productivity, soil organic carbon, and total soil nitrogen concentrations in sandy-loam soils in Ghana[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015,102: 33-43. DOI:10.1007/s10705-015-9675-8.

[20] CAI A, XU M, WANG B, ZHANG W, LIANG G, HOU E, LUO Y. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,189:168-175. DOI:10.1016/j.still.2018.12.022.

[21] ZHAN X Y, ZHANG L, ZHOU B K, ZHU P, ZHANG S X, XU M G. Changes in olsen phosphorus concentration and its response to phosphorus balance in black soils under different long-term fertilization patterns[J]. *PLoS ONE*,2015,10(7): e0131713. DOI:10.1371/journal.pone.0131713.

[22] DING B, ZHANG H, LUO W, SUN S, CHENG F, LI Z. Nitrogen loss through denitrification, anammox and Feammox in a paddy soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2021,773:145601. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145601.

[23] MEHNAZ K R, KEITEL C, DIJKSTRA F A. Phosphorus availability and plants alter soil nitrogen retention and loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,671: 786-794. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.03.422.

[24] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志,2010(1):12-14. DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2010.01.001. CHENG M F, HE P, JIN J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops[J]. *Crops*, 2010(1):12-14. DOI:10.16035/j.issn.1001-7283.2010.01.001.

[25] CMMAB C, MNBA B, TB D, JMP B. Phosphorus sorption and availability in an andosol after a decade of organic or mineral fertilizer applications: Importance of pH and organic carbon modifications in soil as compared to phosphorus accumulation[J]. *Chemosphere*, 2020, 239:124709. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.124709.

[26] MA Q X, WEN Y, MA J Z, MACDONALD A, HILL P W, CHADWICK D R, WU L H, JONES D L. Long-term farmyard manure application affects soil organic phosphorus cycling: A combined metagenomic and 33P/14C labelling approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020:107959. DOI:10.1016/j.soilbio.2020.107959.

[27] YANG X Y, CHEN X W, GUO E H, YANG X T. Path analysis of phosphorus activation capacity as induced by low-molecular-weight organic acids in a black soil of Northeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19:840-847. DOI:10.1007/s11368-018-2034-z.

[28] 黄巧义, 黄旭, 唐拴虎, 杜建军, 张木, 李苹, 付弘婷. 广州市郊稻田氮肥减施的产量和氮肥利用效率分析[J]. 广东农业科学, 2020,47(9):66-72. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2020.09.009. HUANG Q Y, HUANG X, TANG S H, DU J J, ZHANG M, LI P, FU H T. Effects of reducing nitrogen application on yield and nitrogen utilization efficiency of paddy field in suburb of Guangzhou[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020,47(9):66-72. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2020.09.009.

（责任编辑　白雪娜）