植物营养与肥料学报 2017, 23(5): 1175–1183 doi: 10.11674/zwyf.16444
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

长期不同施肥下南方黄泥田有效磷对磷盈亏的响应特征

林 诚，王 飞*，李清华，何春梅，张 辉
（福建省农业科学院土壤肥料研究所，福建福州 350013）

摘要:【目的】黄泥田为南方主要中低产田类型之一。通过研究长期施肥条件下南方黄泥田土壤磷素累积盈亏与有效磷的关系，为黄泥田科学施用磷肥提供理论依据。**【方法】**基于连续 33 年水稻长期定位试验，研究了不施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、化肥配施牛粪 (NPKM)、化肥配施秸秆 (NPKS) 四个处理土壤有效磷的变化规律及土壤磷累积盈亏状况，计算有效磷–磷盈亏响应系数。**【结果】**各施肥处理双季稻年份 (1983～2004 年) 土壤有效磷与全磷含量呈年际上升趋势，以 NPKM 增幅最为明显，改为单季稻后 (2005～2015 年) 则呈下降趋势，也以 NPKM 降幅最为明显。试验至 2015 年，NPK、NPKS 处理有效磷含量分别为 9.7 mg/kg、8.7 mg/kg，较试验初期分别下降 8.3 mg/kg、9.3 mg/kg，NPKM 处理与试验初期持平。CK、NPK、NPKM、NPKS 处理的磷素活化系数 (PAC) 总体呈年际下降趋势，其多年平均磷素活化系数值 (PAC) 分别为 2.9%、3.5%、4.7%、4.1%，其中 NPKM 与 NPKS 处理显著高于 NPK 与 CK 处理。除双季稻 NPKS 处理外，不同施肥模式下双季稻与单季稻年份的土壤有效磷增减与土壤累积磷盈亏均呈显著正相关，其中双季稻年份土壤磷素 (P) 每盈余 100 kg/hm^2，NPK、NPKM 处理有效磷分别增加 4.5 mg/kg 与 11.2 mg/kg，而单季稻年份土壤磷素每亏缺 100 kg/hm^2，NPK、NPKM、NPKS 处理有效磷分别减少 14.6 mg/kg、23.9 mg/kg、25.9 mg/kg。双季稻磷肥年施用量 (P) 为 26.2 kg/hm^2 时，土壤磷素呈盈亏持平状态。**【结论】**有机无机肥配施比单施化肥能够显著提高黄泥田土壤有效磷、全磷含量和磷素活化系数，有效磷含量与磷素累积盈亏密切相关，等磷素盈亏量下，有机无机肥配施的有效磷响应系数要高于单施化肥，而磷累积亏缺下，有效磷降幅响应比磷累积盈余下有效磷增幅响应大。

关键词: 长期施肥；黄泥田；有效磷；磷盈亏；磷素活化系数

Response characteristics of Olsen-P to P balance in yellow paddy fields of southern China

LIN Cheng, WANG Fei*, LI Qing-hua, HE Chun-mei, ZHANG Hui
(*Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350013, China*)

Abstract:【Objectives】In order to provide theory for phosphate (P) fertilizer application in the yellow paddy, a study was conducted to research the relationship between P accumulation and its efficiency.**【Methods】**The variation and accumulate of P in paddy fields were studied in a 33 years' long-term experiment. Four fertilizer treatments were setup: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), chemical fertilizer plus cattle manure (NPKM), and chemical fertilizer plus straw (NPKS) and available P–P response coefficient was calculated. **【Results】**The contents of soil available and total P in the CK treatment decreased with the treatment years in both the double-rice and the single-rice systems, and those in the other three treatments increased with the fertilizer treatment years under double-rice system (1983–2004) and decreased in single rice system (2005–2015). Until 2015, the contents of soil available P in the NPK and NPKS treatments were 9.7 mg/kg and 8.7 mg/kg, which were significantly lower than that of initial soil sample in 1983, and decreased by 8.3 mg/kg

收稿日期：2016–11–28 **接受日期**：2017–06–27
基金项目：福建省属公益类科研院所基本科研专项（2015R1022-5，2016R1021-2）；公益性行业（农业）科研专项（201203030）资助。
作者简介：林诚（1981—），男，福建永泰人，助理研究员，主要从事植物营养与肥料研究。E-mail：linchengox@163.com
* 通信作者 E-mail：fjwangfei@163.com

and 9.3 mg/kg, respectively. The available P content in the NPKM treatment was 18.0 mg/kg in 2005, which was in line with initial soil sample. The phosphorous activity coefficients of the CK, NPK, NPKM and NPKS treatments were 2.9%, 3.5%, 4.7% and 4.1% in turn, those in the NPKM and NPKS treatments were significantly higher than that in the NPK treatment. There was a linear relationship between the balance of P and soil available P contents in all the treatments except that in NPKS under double-rice system. Under double-rice system, annual soil P surplus of 100 kg/hm^2 would lead to the increment of soil available P contents of 4.5 and 11.2 mg/kg in the NPK and NPKM treatments, and under single-rice system, annual soil P defect of 100 kg/hm^2 would lead to the decrement of available P content by 14.6, 23.9 and 25.9 mg/kg in the NPK, NPKM and NKPS treatments, respectively. The soil could keep in balance when the amount of P fertilizers was 26.2 kg/hm^2.【**Conclusions**】Available P content is closely related to the balance of soil P. The available P response coefficient of the NPK combined with manure or straw fertilization is higher than that of NPK fertilization under the equivalent phosphorus balance. Acceleration response of available P is higher under phosphorus-deficient conditions than phosphorus-sufficient conditions.

Key words: long-term fertilization; yellow paddy field; available phosphorous; P balance; PAC

磷是重要的生命元素之一。南方酸性红壤和红壤性水稻土普遍缺磷，是制约作物产量的重要因素[1]。土壤有效磷是土壤磷素养分供应水平的指标，受到农田生态系统中磷素盈亏状况的影响[2]。有研究表明，土壤有效磷及其增量与土壤磷素盈亏状况存在直线相关关系[3]，土壤磷素如果长期处于亏缺状态，有效磷含量不足，则可能限制生产力提升，而长期累积盈余状态，会显著降低土壤中磷素的固持能力[4]，土壤有效磷向水体流失并威胁环境的风险加大[5−6]。但有效磷的变化对土壤磷素盈亏的响应关系因土壤类型、作物种类、施肥方式等不同有明显差异。有研究表明，土壤磷每盈余 100 kg/hm^2，有效磷可提高 2～6 mg/kg[7−8]。展晓莹等[9]通过 21 个土壤监测点研究，发现土壤每 100 kg/hm^2 磷累积，褐土、黑土、紫色土、水稻土有效磷增加分别为 1.12 mg/kg、3.76 mg/kg、2.34 mg/kg 、5.01 mg/kg。Cao 等[10]研究了中国 7 种典型农业土壤，认为每 100 kg/hm^2 磷盈余平均可使土壤有效磷水平提高约 3.1 mg/kg。黄晶等[11]在红壤性水稻土上研究得出不同处理间土壤每累积磷 100 kg/hm^2，有效磷增加 0.4～3.2 mg/kg，而西南黄壤旱地有效磷可增加 5.6～21.4 mg/kg[12]。可见不同区域有效磷对磷累积盈亏的响应差异较大，此外，在双季旱作下有机无机肥配施处理有效磷增量大于单施化肥，而水旱轮作则是单施化肥有效磷增量大于有机无机肥配施[13]。因此明确具体区域与耕作制度下土壤有效磷与磷素盈亏的关系，对指导农田土壤磷素精准培肥及缓解过量施用磷肥具有重要意义。

福建属亚热带季风气候，温暖湿润，雨热同季，长期受季节性氧化—还原交替成土过程作用，其养分迁移、积累和转化具有一定的区域性[14]。黄泥田是广泛分布于福建等南方省份的一种典型渗育型水稻土，占福建省水稻土面积的 30.4%，该水稻土通常因水分供应不足，磷、钾养分缺乏，属中低产水稻田[15]。为此，本研究通过长期定位试验，研究黄泥田经过 33 年不同施肥条件下土壤有效磷和磷盈亏的关系，明确长期不同施肥条件下南方黄泥田磷素的演变过程及土壤磷素供应状况，以期为南方稻田磷素养分高效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在农业部福建耕地保育科学观测试验站肥力长期监测试验田 (闽侯县白沙镇，东经 119°04′10″，北纬 26°13′31″)。成土母质为坡积物，海拔高度 15.4 m。土壤类型为中国土壤分类系统渗育性水稻土亚类的黄泥田土属[14]。试验区年平均温度 19.5℃，年均降水量 1350.9 mm，年日照时数 1812.5 h，无霜期 311 d，≥ 10℃ 的活动积温 6422℃。试验前 (1983 年) 耕层土壤 pH 4.90，有机碳含量 12.5 g/kg，全氮 1.49 g/kg，全磷 0.30 g/kg，全钾 16.20 g/kg，碱解氮 141 mg/kg，有效磷 18 mg/kg，速效钾 41 mg/kg。

试验设 4 个处理：1) 不施肥 (CK)；2) 单施化肥 (NPK)；3) 化肥 + 牛粪 (NPKM)；4) 化肥 + 全部秸秆还田 (NPKS)。每处理设 3 次重复，小区面积 12 m^2 (3 m × 4 m)。每茬施用化肥为 N 103.5 kg/hm^2、P 11.8 kg/hm^2、K 112.5 kg/hm^2。干牛粪每茬施用量 3750 kg/hm^2，秸秆施用量为上茬水稻秸秆全部还田。牛粪

平均养分含量为有机碳 267.5 g/kg、N 15.0 g/kg、P 2.8 g/kg、K 7.4 g/kg，稻草平均养分含量为有机碳 377.3 g/kg、N 8.3 g/kg、P 1.1 g/kg、K 24.0 g/kg；氮、钾肥的 50% 作基肥，50% 作分蘖追肥，磷肥全部作基肥。氮肥用尿素、磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化钾。由于福建省农田耕作制度自上个世纪 90 年代末开始逐渐由双季稻制改为单季稻制，为适应这种生产变化，同时也便于生产管理，试验地自 2005 年起将双季稻改为单季稻，即定位试验 1983～2004 年为双季稻制 (早稻、晚稻)，2005～2015 年改为单季稻制 (中稻)。各稻作生育期如下：早稻 4 月 20 日移栽，7 月 15 日收获；晚稻 7 月 20 日移栽，10 月 30 日收获；单季稻 6 月 30 日移栽，10 月 15 日收获。各处理除施肥外，其他管理措施一致。每茬灌溉水及降雨带入的磷量平均为 1.3 kg/hm^2，各处理具体施磷量见表 1。

表 1　各处理每茬水稻磷素养分平均投入量 (P kg/hm^2)

Table 1　Phosphorus fertilizer application rates of the treatment in every harvest

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer	有机物料 Cattle manure	灌溉及降雨 Irrigation and rainfall	合计 Total
CK	0	0	1.3	1.3
NPK	11.8	0	1.3	13.1
NPKM	11.8	10.5	1.3	23.6
NPKS	11.8	3.8 (早、晚稻 Early and late rice)/5.3 (单季稻 Single rice)	1.3	16.9/18.4

1.2　土壤采样与样品分析

每年晚稻或中稻在水稻收获后 (10～11 月份)，取每小区 0—20 cm 耕层土壤，采用多点混合取样方法，风干，研磨，分别过 20 目和 100 目筛，保存于广口瓶中，待测。早稻、晚稻或中稻水稻收获后取各个处理重复小区的水稻籽粒与秸秆鲜样于 105℃ 杀青 15 min，65℃ 烘干 24 h 至恒重，供植株养分含量分析。土壤与植株样品均采用常规分析方法，土壤有效磷用 Olsen 法测定，全磷用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定，植株全磷采用 H_2SO_4–H_2O_2 消煮—钒钼黄比色法[16]。

1.3　数据分析

土壤磷活化系数 (PAC) = [有效磷含量 (mg/kg)]/[全磷含量 (g/kg) × 1000] × 100% ；

土壤有效磷增量 (△Olsen-P, mg/kg) = Pi (mg/kg) – P_0 (mg/kg) (P_i 表示第 i 年土壤有效磷；P_0 表示初始土壤的有效磷)；

作物吸磷量 (kg/hm^2) = 籽粒产量 (kg/hm^2) × 籽粒含磷量 (%) + 秸秆产量 (kg/hm^2) × 秸秆含磷量 (%)；

土壤表观磷年盈亏 (P kg/hm^2) = 每年施入土壤磷素总量 (kg/hm^2) – 每年作物 (籽粒 + 秸秆) 吸磷量 (kg/hm^2)(正值为盈余，负值为亏缺，0 为表观平衡)；

土壤累积磷盈亏 (P kg/hm^2) = ∑[土壤表观磷盈亏 (P kg/hm^2)]；

相对产量 (Yr) = Yi/Ym × 100% 其中 Yr 为籽粒的相对产量；Yi 为每年各处理的籽粒产量；Ym 为每年各处理的最大籽粒产量。

数据处理利用 SPSS 13.0 统计软件进行方差分析与相关分析，不同处理之间差异显著性采用 LSD 法检验。

2　结果与分析

2.1　长期不同施肥下土壤有效磷和全磷的变化趋势

从长期不同施肥下土壤有效磷的年际演变趋势可以看出 (图 1)，CK 处理长期无磷肥的输入 (除了微量的灌溉水与降雨带入)，且每年作物会携出一定量的磷素，因此土壤双季稻制与单季稻制有效磷含量均随年份呈显著直线下降趋势，其中双季稻年份 (1983～2004 年) 年平均下降速率为 0.28 mg/kg，单季稻年份年平均下降速率为 0.39 mg/kg。而施肥各处理 (除 NPKS 外) 双季稻年份有效磷含量呈上升趋势，其中以 NPKM 处理上升速率最大，年上升 1.00 mg/kg，是 NPK 处理的 8.4 倍。2005 年种植模式改制为单季稻后各施肥处理有效磷含量随着试验年限增加呈极显著下降趋势，至 2015 年，NPK、NPKM、NPKS 年下降速率分别为 0.84、1.45、1.08 mg/kg，NPK、NPKS 处理有效磷含量分别从试验初始的 18.0 mg/kg 下降到 9.7、8.7 mg/kg，NPKM 处理有效磷含量与试验初期持平。

图 2 显示，从全磷变化来看，CK 处理表现为双季稻制下，全磷含量保持平稳水平，到单季稻制后呈显著下降趋势，试验至 2015 年 CK 处理全磷含量

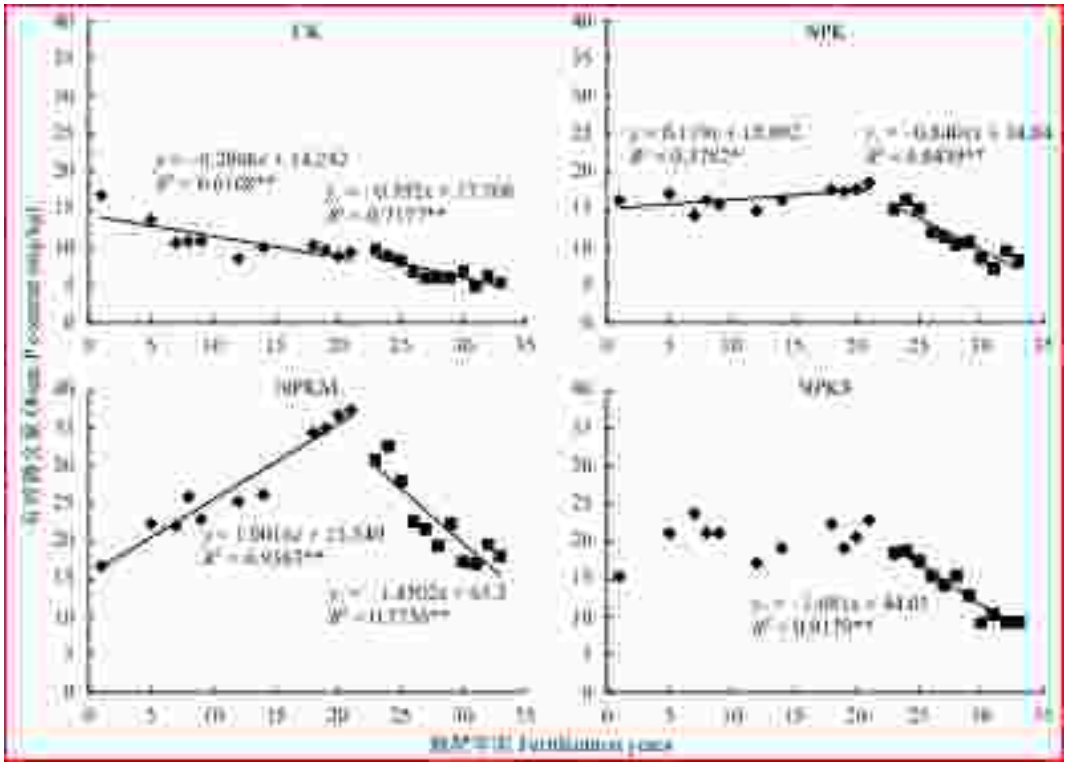


图 1 土壤有效磷随施肥年限的动态变化

Fig. 1 Dynamics of soil Olsen-P content with fertilization years under different treatments

[注（Note）：y—双季稻 Double cropping rice; y_1—单季稻 Single cropping rice.]

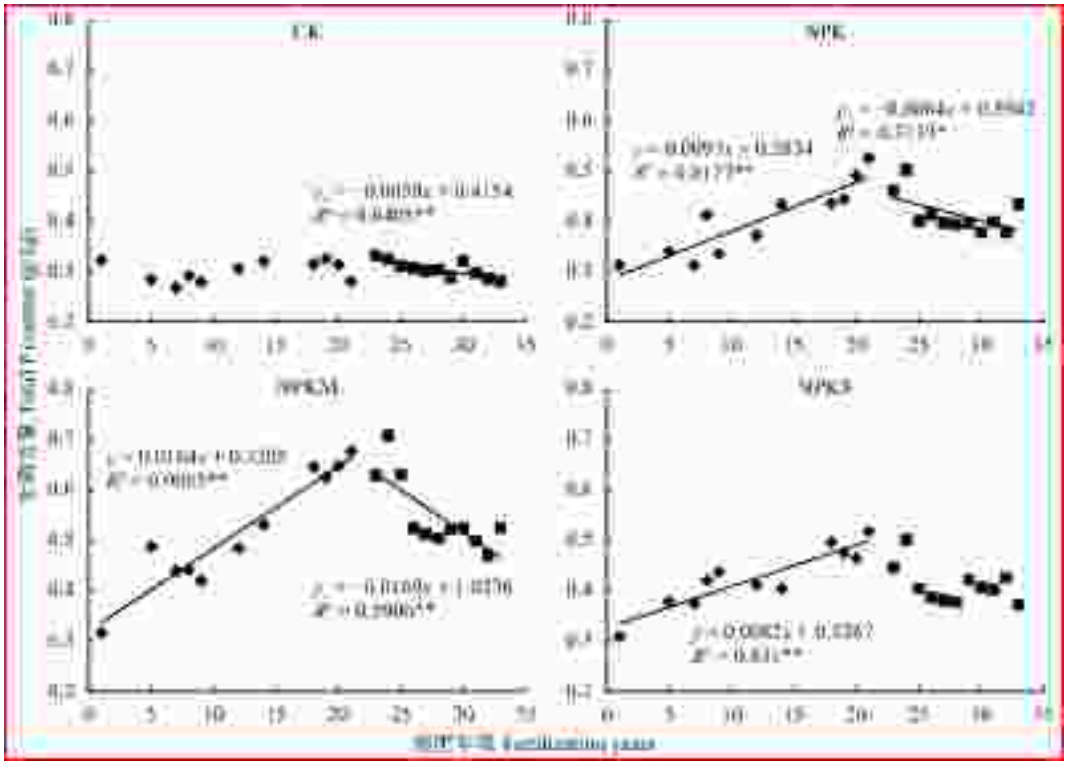


图 2 土壤全磷随施肥年限的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil total P with fertilization years under different treatments

[注（Note）：y—双季稻 Double cropping rice; y_1—单季稻 Single cropping rice.]

较试验初期下降 0.04 g/kg。各施肥处理土壤全磷含量年际变化趋势与有效磷一致，在双季稻制下，NPK、NPKM、NPKS 处理土壤全磷年上升速率分别为 0.01、0.02、0.01 g/kg，单季稻下 NPK 与 NPKM 处理全磷含量每年降幅为 0.01 g/kg 与 0.02 g/kg。值得一提的是，虽然在单季稻制下施肥处理土壤全磷呈下降趋势，但试验至 2015 年，NPK、NPKM、NPKS 处理土壤全磷较试验前仍分别增加 0.13、0.21、0.06 g/kg，其中 NPKM 处理土壤全磷历年平均值显著高于 NPK、NPKS ($P < 0.01$)，NPK、NPKS 处理间则无显著差异。

2.2　长期不同施肥对土壤 PAC 值的影响

磷素活化系数 (PAC) 反映磷有效化程度。CK、NPK、NPKS 处理的磷素活化系数 (PAC) 无论是双季稻还是单季稻均随年际呈显著下降趋势，NPKM 处理在双季稻制时 PAC 呈上升趋势，到单季稻制后也呈显著下降趋势。CK、NPK、NPKM、NPKS 四个处理的多年平均 PAC 值分别为 2.9%、3.5%、4.7%、4.1%，其中施肥处理 PAC 值显著高于 CK，NPKM 与 NPKS 处理的 PAC 值也显著高于 NPK 处理。从下降速率来看，NPKM 处理年下降速率最小，说明化肥配施牛粪可减缓土壤磷素活性的降低 (图 3)。

2.3　长期不同施肥下土壤磷盈亏

从图 4 可以看出，CK 处理由于没有磷素的输入，土壤磷素处于持续亏损状态，经过 33 年连续种植作物，CK 处理累积磷 (P) 亏缺为 361.0 kg/hm^2，NPK、NPKM、NPKS 处理在双季稻制下磷素表现为盈余，从 1983 到 2004 年，磷累积分别达到 60.5、182.4、95.3 kg/hm^2，改为单季稻后，由于单季稻磷肥年投入量小于作物磷素的携出量，各处理土壤累积磷呈耗竭趋势，试验至 2015 年，NPK、NPKM、NPKS 处理土壤磷素累积量分别降至 5.5、130.9、57.1 kg/hm^2。

2.4　长期不同施肥下土壤有效磷变化对土壤磷素累积盈亏的响应

图 5 显示了不同处理双季稻及单季稻年份土壤有效磷变化量与磷素累积盈亏量的关系。相关分析表明，除双季稻 NPKS 处理外，不同处理土壤有效磷的增减与磷的盈亏均呈显著正相关。由回归方程斜率可知，NPK、NPKM 处理在双季稻制下土壤中每累积磷 (P) 100 kg/hm^2，土壤中有效磷含量分别提高 4.5 mg/kg 与 11.2 mg/kg，而单季稻土壤磷素每年均处于亏缺状态，由回归方程斜率可知，土壤中磷每亏缺 100 kg/hm^2，NPK、NPKM、NPKS 处理土壤中有效磷含量分别下降 14.6、23.9、25.9 mg/kg，说

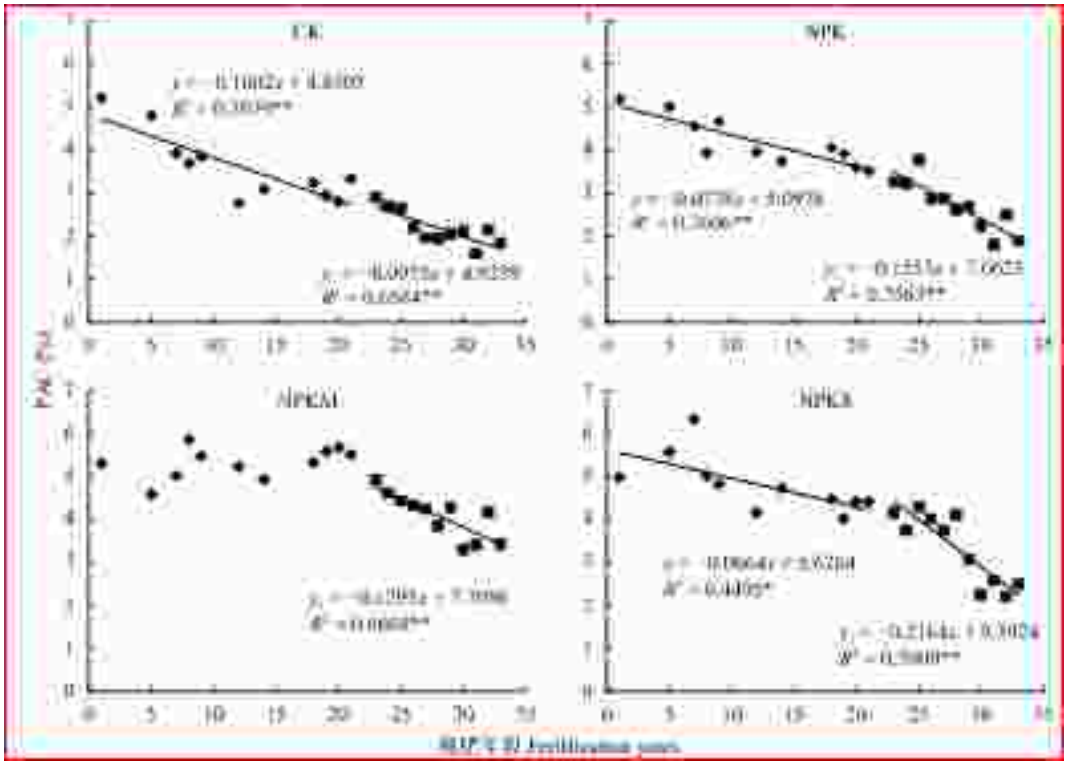


图 3　各处理土壤磷素活化系数 (PAC) 值随施肥年限的变化

Fig. 3　Dynamics of phosphorous activity coefficient (PAC) with fertilization years under different treatments

[注（Note）：y—双季稻 Double cropping rice; y_l—单季稻 Single cropping rice.]

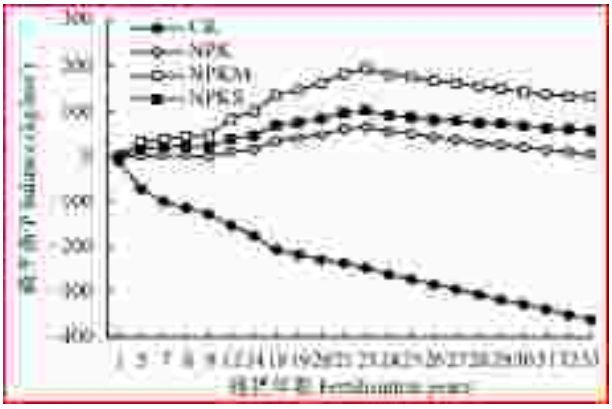


图 4 不同施肥处理土壤累积磷盈亏 (1983～2015)

Fig. 4 P balance of different fertilization treatments during 1983 to 2015

明等量磷素盈亏量下，有机无机肥配施的有效磷响应系数 (斜率绝对值) 要高于单施化肥，而同一施肥处理磷亏缺下有效磷降幅响应要比磷盈余下有效磷增幅大。

2.5 土壤磷盈亏对磷肥用量的响应

图 6 显示，双季稻中土壤每年磷累积盈亏量与磷肥施用量呈极显著正相关，说明磷肥用量越大，土壤磷盈余量越高。从回归方程可以得出，黄泥田在双季稻制下，磷肥 (P) 年施用量为 26.2 kg/hm^2，土壤磷素可以持平，超过此用量土壤磷素可以得到累积。在单季稻制下，各处理每年磷表观平衡处于亏缺，因此无法计算单季稻下的磷肥盈亏平衡点。

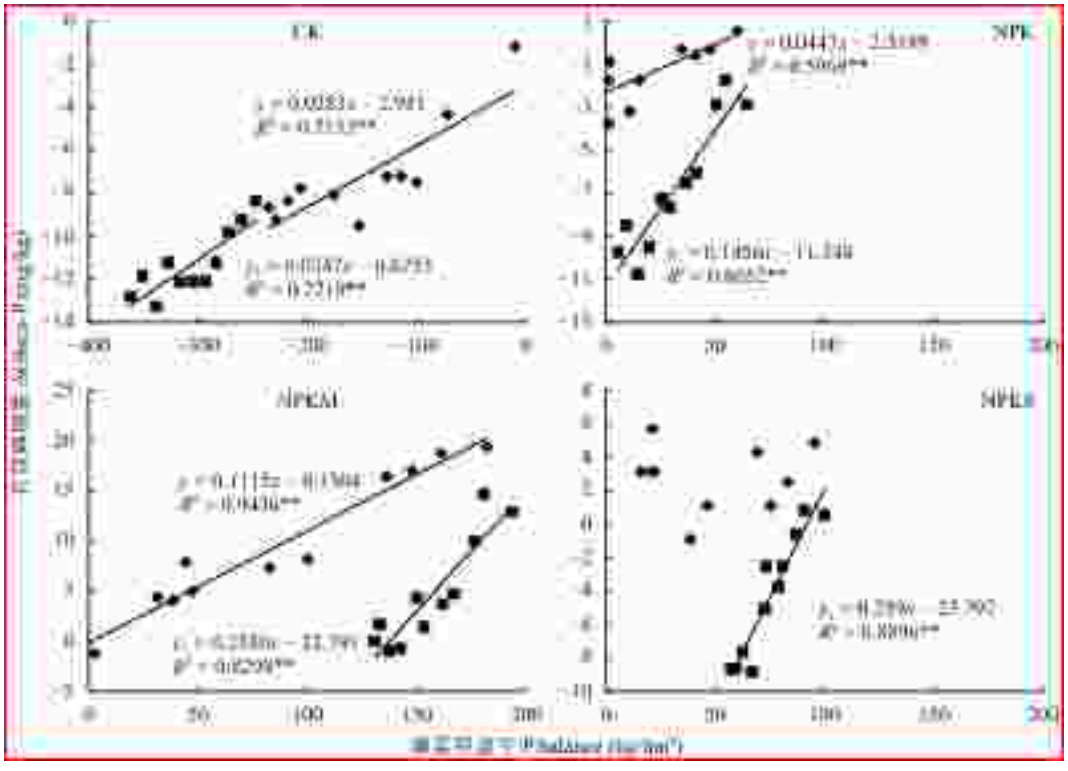


图 5 不同处理土壤有效磷变化与磷累积盈亏量的关系 (1983～2015)

Fig. 5 Correlations between soil available P change and P balance of different treatments from 1983 to 2015

[注（Note）：y—双季稻 Double cropping rice; y_1—单季稻 Single cropping rice.]

3 讨论

3.1 不同施肥模式与耕作制度改变对黄泥田有效磷与全磷的影响

通过对 33 年黄泥田长期定位试验数据分析得出，长期不施肥，在连续种植作物情况下通过籽粒和秸秆携出磷素，导致土壤磷素持续亏缺，随着磷素亏缺量的不断增加，土壤有效磷和全磷含量也随着降低，其中有效磷双、单季稻均呈显著线性下降。施用磷肥可提高土壤有效磷、全磷含量，但是不同施肥处理提高幅度不一致，并受到耕作制度的影响。在双季稻制下，各施肥处理均表观盈余，土壤有效磷、全磷的年增长速率表现为 NPKM 最高，NPK 和 NPKS 处理相当。改为单季稻后，土壤磷素年输入减半，但单季稻作物产量可占到双季稻年产量的 72%～88%[17]，土壤磷素表观平衡处于亏缺。虽然 NPKM 处理每年磷肥投入量较 NPK、NPKS 处理

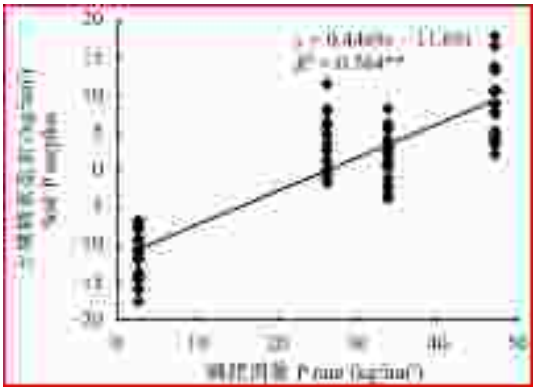


图 6　黄泥田双季稻土壤磷年盈余对磷肥施用量的响应

Fig. 6　Response of annual P surplus to phosphorus application rate of double-crop rice in yellow paddy fields

高，但由于养分输出高，NPK、NPKS 、NPKM 各处理的磷素年均表观平衡分别为–4.36、–5.55、–3.82 kg/hm^2，因此 NPKM 处理磷素养分亏缺量大于 NPK、NPKS 处理，有效磷、全磷含量随年份下降速率最高。

3.2　长期施肥对土壤 PAC 值的影响

用有效磷与全磷之比作为土壤磷素活化系数 (PAC)，以表征土壤磷素的有效化程度。以往对不同类型的土壤研究表明，不施磷肥处理土壤 PAC 值随着试验年限增加呈下降趋势，而无论单施化肥或有机无机肥配施土壤 PAC 值随着试验年限增加呈上升趋势，且有机无机肥配施 PAC 值显著高于单施化肥[13]。从本研究结果来看，不同处理 PAC 多年均值大小为 NPKM > NPKS > NPK > CK，与已有研究结果相一致，主要是由于长期施肥下特别是有机无机肥配施一方面可提高农田土壤有机质含量[18–19]，有机质能够减少磷在土壤中的固定，且有机质中有机酸能够置换出部分被胶体吸附的 $H_2PO_4^-$ 和 HPO_4^{2-}，有机质含量高的土壤，微生物活化元素的能力也较强，从而使土壤矿化的有效磷含量和比例增大[20–21]，故有机无机肥配施 PAC 值高于单施化肥。但从黄泥田施肥 PAC 值变化趋势来看，除双季稻 NPKM 处理外，其余处理无论是在双季稻还是单季稻 PAC 值均呈年际显著下降趋势，双季稻以 CK 降幅最大，单季稻以 NPKS 降幅最大。造成施肥处理 PAC 值下降原因可能与土壤性质有关。在酸性土壤中，Fe^{2+} 会转化成无定形的 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 氢氧化物的共沉淀，这种混合物比三价氢氧化铁具有更大的表面积和更多的磷吸附位点，增强了对磷的固持能力[22]，从而降低土壤磷素有效性。另外，红壤铁铝氧化物对磷酸根离子的吸附量随 pH 值升高而增大，且吸附的磷从物理吸附态向化学吸附态转变从而使磷逐渐失去有效性，但达到最大吸附值后，随 pH 值升高，磷酸根离子吸附量反而降低[23]。王光火等[24]研究表明，红壤在 pH 5 左右吸附磷量最高，吸附的磷最难解吸，本试验点在经过 33 年的长期试验后，各处理土壤 pH 与试验初期无明显变化，均保持在 5.0 左右，这可能是造成土壤 PAC 值下降的一个原因。从研究结果也可看出，虽然 NPKM 处理没有明显改善土壤酸度，但可有效缓解土壤 PAC 值下降。此外，有研究表明，当有机物料的 C/P ≥ 300 时，其在土壤分解过程中，会出现有效磷的净固持，降低其含量[25]。各处理每年均留有约 20 cm 秸秆及根系还田量，秸秆的 C/P 较高，可能会引起土壤有效磷的生物固定，降低土壤磷素有效性，特别是 NPKS 处理，秸秆的大量还田，导致在磷素缺乏情况下 (单季稻制) PAC 值下降幅度最大。

3.3　施肥对有效磷与磷盈亏响应关系的影响

以往长期定位试验表明，土壤有效磷的变化与磷盈亏呈正相关关系，土壤每累积 100 kg/hm^2 磷，单施化学磷肥处理土壤有效磷含量平均提高 2.6～21.2 mg/kg，有机肥配施化学磷肥处理有效磷含量平均提高 0.56～41.3 mg/kg[26–27]。本研究在双季稻制下，土壤每累积 P 100 kg/hm^2，NPK、NPKM 处理土壤有效磷含量可分别提高 4.5 mg/kg 与 11.2 mg/kg，说明在双季稻制下南方黄泥田化肥配施牛粪模式对土壤有效磷的提高效率高于单施化肥。这可能与酸性土壤有机无机肥配施下有机肥的加入减缓了有效磷被铁铝固定有关。种植制度改为单季稻后，各处理的施磷量不能满足作物对磷的吸收[17]，土壤的累积磷盈亏量呈下降趋势。回归分析表明 (图 5)，土壤每亏缺 P 100 kg/hm^2，NPK、NPKM、NPKS 处理土壤有效磷含量分别下降 14.6、23.9、25.9 mg/kg。从中可见，单季稻制下有机无机肥配施的土壤有效磷对磷素亏缺的响应系数 (斜率绝对值) 较单施化肥高，其可能原因是有机无机肥配施模式中有机物料投入为牛粪和秸秆，而牛粪和秸秆中有机磷可占到全磷的一半左右[28]，同样亏缺条件下，有机磷矿化过程可能是微生物与作物竞争，微生物对磷暂时固定而消耗了更多的土壤有效磷[29]，导致有效磷降幅较单施化肥大。从本研究也可看出，磷亏缺下有效磷降幅响应比磷盈余下有效磷增幅要大，故黄泥田生产上应注重磷素施用的平衡，过量的磷肥施用产生磷素累积盈余而导致磷素流失风险，而磷肥施用不足产生磷素累积亏缺，可导致有效磷降幅较大而成为生产的限制因子。

4 结论

南方黄泥田年磷投入量应不低于26.2 kg/hm^{2}才能维持土壤有效磷与全磷含量的基本平衡略有盈余。增施磷肥可以提高黄泥田土壤有效磷、全磷含量，有机无机肥配施模式土壤磷素活化系数(PAC)显著高于单施化肥。除双季稻NPKS处理外，黄泥田土壤有效磷增减与土壤累积磷盈亏量呈显著正相关关系。在土壤磷盈余状况下，土壤磷素(P)每盈余100 kg/hm^2，NPK、NPKM处理有效磷分别增加4.5 mg/kg与11.2 mg/kg，而在土壤磷素亏缺状况下，每亏缺100 kg/hm^2，NPK、NPKM、NPKS处理有效磷分别减少14.6、23.9、25.9 mg/kg。等量的磷素盈亏量下，有机无机肥配施的有效磷增减量要高于单施化肥。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] Shen P, Xu M G, Zhang H M, *et al*. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers[J]. Catena, 2014, 118: 20–27.

[3] Sanginga N, Lyasse O, Singh B B. Phosphorus use efficiency and nitrogen balance of cowpea breeding lines in a low P soil of the derived savanna zone in West Africa[J]. Plant and Soil, 2000, 220: 119–128.

[4] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C, *et al*. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J]. Advances in Environmental Research, 2001, 5: 13–21.

[5] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agroecosystems in China[J]. Pedosphere, 2005, 15(3): 347–355.

[6] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1009–1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, *et al*. Evaluation and countermeasures of nonpoint pollution in agriculture of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1009–1017.

[7] 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.

[8] Tang X, Li J M, Ma Y B, *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: 231–237.

[9] 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.

[10] Cao N, Chen X, Cui Z, Zhang F S. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94: 161–170.

[11] 黄晶, 张扬珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤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.

[12] 李渝, 刘彦伶, 张雅蓉, 等. 长期施肥条件下西南黄壤旱地有效磷对磷盈亏的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2321–2328.
Li Y, Liu Y L, Zhang Y R, *et al*. Response of Olsen-P to P balance in yellow soil upland of southwestern China under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2321–2328.

[13] 沈浦. 长期施肥下典型农田土壤有效磷的演变特征及机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2014.
Shen P. Evolution characteristics and mechanisms of soil available phosphorus in typical croplands under long-term fertilization[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.

[14] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991: 178–186.
Soil Common Investigation Department in Fujian. Fujian soil [M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1991: 178–186.

[15] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 24–27.
Lin C, Wang F, Li Q H, *et al*. Effects of different fertilizer application strategies on nutrients and enzymatic activities in yellow clayey soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009, (6): 24–27.

[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[17] 林诚, 王飞, 何春梅, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 541–549.
Lin C, Wang F, He C M, *et al*. Effects of long-term fertilization on phosphorus pools and forms in yellow paddy fields of southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 541–549.

[18] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1447–1454.
Wang F, Li Q H, Lin C, *et al*. Effect of different fertilization modes on topsoil carbon sequestration and productivity in yellow paddy field of southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1447–1454.

[19] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1431–1438.

Cai A D, Zhang W J, Shen X R, *et al*. Soil carbon sequestration efficiency of different particle-size fractions after long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1431–1438.

[20] Wang Y, He Y, Zhang H, *et al*. Phosphate mobilization by citric, tartaric and oxalic acids in a clay loam ultisol[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72: 1363–1368.

[21] Yusran F H. The relationship between phosphate adsorption and soil organic carbon from organic matter addition[J]. Journal of Tropical Soils, 2010, 15: 1–10.

[22] Jugsujinda A, Krairapanond A, Patrick W H. Influence of extractable iron, aluminium, and manganese on P-sorption in flooded acid sulfate soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 20: 118–124.

[23] 李杰,石元亮,陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763–768.
Li J, Shi Y L, Chen Z W. Research on phosphorus in southern red soils of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 763–768.

[24] 王光火. 红壤在不同pH下对磷的吸附和解吸作用[J]. 土壤通报, 1989, 20(2): 70–72.
Wang G H. Adsorption and desorption of phosphorus in red soil on the condition of different pH[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1989, 20(2): 70–72.

[25] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 104–111.
Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorous[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 104–111.

[26] Wang B, Li J M, Ren Y, *et al*. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat-maize rotation production areas of China[J]. Field Crops Research, 2015, 178: 42–48.

[27] 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 Aricultura Sinica, 2010, 43(19): 4008–4015.

[28] 赵晶晶,郭颖,陈欣, 等. 有机物料对土壤有机磷组分及其矿化进程的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 740–744.
Zhao J J, Guo Y, Chen X, *et al*. Influences of organic materials on organic phosphorus fractions and mineralization processes in soils[J]. Soils, 2006, 38(6): 740–744.

[29] 姜一, 步凡, 张超, 等. 土壤有机磷矿化研究进展[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2014, 38(3): 160–166.
Jiang Y, Bu F, Zhang C, *et al*. Research advance on soil organic phosphorus mineralization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(3): 160–166.