

DOI: 10.11766/trxb201703210020

# 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应\*

鲁艳红<sup>1, 2</sup> 廖育林<sup>1, 2</sup> 聂军<sup>1, 2†</sup> 周兴<sup>1, 2</sup> 谢坚<sup>1, 2</sup> 杨曾平<sup>1, 2</sup>

(1 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)

(2 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125)

**摘要** 研究双季稻种植制度下长期不同施肥红壤性水稻土磷素含量及磷素有效性演变特征及其对土壤磷盈亏(磷平衡)的响应,为南方双季稻区红壤性水稻土科学施磷提供依据。以35年长期肥料定位试验为平台,研究不同施肥处理土壤全磷、有效磷及磷活化系数(PAC)的演变规律,计算不同处理土壤-作物系统每年磷素盈亏量及累积磷素盈亏量,探讨土壤全磷、有效磷及PAC与累积磷盈亏量的响应关系。结果表明,不施磷肥的CK和NK处理土壤全磷、有效磷和PAC随试验年限呈持平或下降趋势;不施磷肥仅施猪粪的NK+PM处理土壤全磷呈缓慢上升趋势,有效磷和PAC呈下降趋势;施化学磷肥或化学磷肥配施稻草的NP、NPK、NP+RS和NPK+RS处理土壤全磷在试验前10年上升速率较快,之后25年上升速率变缓或随时间变化不显著,土壤有效磷在试验前5年急剧升高,之后随时间变化速率减缓或基本持平。CK、NK和NK+PM处理35年土壤PAC平均值较试验初始值分别下降33.2%、29.7%和16.6%,NP、NPK、NP+RS和NPK+RS土壤PAC较初始值分别提高66.2%、60.6%、65.6%和52.9%。不施磷肥导致红壤性水稻土磷素亏缺,不施化学磷肥仅施猪粪土壤磷素基本持平,施用化肥磷及化肥磷配施稻草土壤磷素盈余。土壤全磷、有效磷及PAC与土壤磷累积盈亏量均呈极显著正相关关系,土壤每盈余磷100 kg hm<sup>-2</sup>,全磷含量提高0.03 g kg<sup>-1</sup>,有效磷提高1.20 mg kg<sup>-1</sup>,土壤PAC上升0.09%。外源磷投入是影响土壤磷素及磷有效性的重要因素,在本试验条件下,长期不施磷或磷投入不足导致土壤磷亏缺,进而导致土壤磷及磷有效性降低,而化肥磷及有机无机磷配施促进了土壤磷盈余及土壤磷素肥力的提高。

**关键词** 长期肥料试验;磷素演变;磷有效性;磷盈亏;红壤性水稻土

**中图分类号** S143.2; S158.5 **文献标识码** A

磷是植物必需的三大营养元素之一,直接影响作物的产量和品质。近年来随着农业生产中磷肥投入量持续增长,我国农田土壤磷含量呈增长趋势<sup>[1]</sup>,但大多数农田土壤的自然供磷能力仍不能满足作物高产需求。同时,在我国农田系统中土壤磷分布呈现较严重的两极化现象<sup>[2]</sup>,部分农田由于长期过量施磷导致土壤磷素大量累积,甚至有些农田土壤有效磷含量已超过环境临界点,而另外部

分农田则由于长期施磷不足或不施磷肥致使土壤磷库严重亏缺,限制作物生长而导致减产。施用磷肥是水稻增产、稳产的重要农业措施,也对土壤磷库状况及土壤供磷能力产生重要影响<sup>[3]</sup>。外源磷的投入一方面改善了作物对磷的吸收利用,另一方面过量施磷会直接导致磷在土壤中的盈余,当土壤磷积累量超过一定值后,可能通过径流和淋溶进入环境,产生环境污染<sup>[4]</sup>。因此,如何通过合理施磷

\* 国家自然科学基金项目(41401340)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300900; 2017YFD0301504)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41401340) and the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFD0300900, 2017YFD0301504)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: junnie@foxmail.com

作者简介:鲁艳红(1974—),女,湖北武穴人,博士,副研究员,主要从事植物营养与作物高效施肥研究。E-mail: luyan hong6376432@163.com

收稿日期:2017-03-21;收到修改稿日期:2017-05-09;优先数字出版日期(www.cnki.net):2017-07-25

在提高土壤磷素肥力和土壤供磷能力的同时,降低土壤磷环境污染风险,已成为近年来土壤学、农学和环境科学领域研究的热点问题。

红壤性水稻土是我国南方稻区典型的农业土壤类型。红壤区水热资源丰富,双季稻种植面积广,对我国粮食生产乃至整个国民经济的持续发展发挥了重要作用。据报道,尽管近年来我国农田土壤有效磷由于磷肥施用量的不断提高呈稳中有升的态势,但南方红壤和红壤性水稻土缺磷情况仍然较为普遍<sup>[5-6]</sup>,目前南方地区仍有20%的农田严重缺磷,且在低产稻田上表现尤为严重<sup>[7]</sup>,土壤磷素依然是该区域限制作物生长的主要因素之一。施用磷肥能显著改善土壤磷素肥力并提高土壤供磷能力,而土壤全磷和有效磷的消长主要由磷的收支平衡决定<sup>[8]</sup>。土壤供磷不足会导致作物减产,长期过量施用磷肥又会导致土壤磷素积累,当土壤磷积累到一定程度会增加环境风险。因此,了解长期不同施肥模式下土壤磷素肥力及磷有效性的演变及磷盈亏对土壤磷素变化的影响对于解决这一问题具有重要意义。本文以红壤性水稻土双季水稻长期定位施肥试验为平台,研究不施磷肥(CK、NK)、不施化肥磷仅以有机肥源猪粪补充磷素(NK+PM)、施化学磷肥(NP和NPK)及化学磷肥与有机物料稻草配合施用(NP+RS和NPK+RS)等长期不同施肥模式对土壤全磷、有效磷及磷活化系数(PAC)演变特征的影响,明确土壤磷素演变过程和土壤供磷状况,探讨土壤全磷、有效磷及磷活化系数对磷盈亏的响应,以期为红壤性水稻土科学施用磷肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

长期定位施肥试验位于湖南省望城区桐林坳社区(东经112°80',北纬28°37',海拔高度100 m),地处亚热带季风气候区。试验于1981年开始,1981—2015年的年均降雨量为1 385 mm,年均气温17℃,年均无霜期约300 d。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土(粉质轻黏土),土壤分类为普通筒育水耕人为土。试验开始前0~20 cm土壤基本性状为:pH 6.6,有机质34.7 g kg<sup>-1</sup>,全氮2.05 g kg<sup>-1</sup>,碱解氮151.0 mg kg<sup>-1</sup>,全磷0.660 g kg<sup>-1</sup>,有效磷(Olsen P)10.2 mg kg<sup>-1</sup>,全钾14.2 g kg<sup>-1</sup>,

速效钾62.3 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验共设9个处理,本文采用其中的7个处理,即:(1)不施肥(CK);(2)施化学氮、钾肥(NK);(3)化学氮、钾肥配施猪粪(NK+PM);(4)施化学氮、磷肥(NP);(5)化学氮、磷肥配施稻草(NP+RS);(6)施化学氮、磷、钾肥(NPK);(7)化学氮、磷、钾肥配施稻草(NPK+RS)。小区采用随机区组设计,3次重复,每个小区面积66.7 m<sup>2</sup>。为避免灌溉水串灌和处理之间的交叉污染,各小区之间用30 cm宽的水泥埂隔开,区组之间排水沟宽度为50 cm。供试早稻品种为常规水稻品种,晚稻为常规水稻品种或杂交水稻组合,水稻品种每5年更换一次。早稻于4月底移栽,7月中旬收获;晚稻于7月下旬移栽,10月下旬收获。秧苗生长期为30~35 d,早稻每穴栽插4~5株秧苗,晚稻每穴栽插1~2株秧苗,株行距20 cm×20 cm。N、P和K化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。在1981—2015年期间,氮肥按早稻N 150 kg hm<sup>-2</sup>和晚稻N 180 kg hm<sup>-2</sup>施入;磷肥按早、晚稻每季P 38.7 kg hm<sup>-2</sup>施入;钾肥按早、晚稻每季K 99.6 kg hm<sup>-2</sup>施入;稻草按每年4.2 t hm<sup>-2</sup>(干基,含N 38.2 kg hm<sup>-2</sup>,P 5.5 kg hm<sup>-2</sup>,K 79.4 kg hm<sup>-2</sup>,早晚稻各施一半)施入,猪粪按每年30 t hm<sup>-2</sup>(腐熟猪粪,含N 91.5 kg hm<sup>-2</sup>,P 39.4 kg hm<sup>-2</sup>,K 49.1 kg hm<sup>-2</sup>,早晚稻各施一半)施入。稻草在耕田时施入,并充分混入土壤;磷、钾肥和猪粪在插秧前1 d撒施;氮肥分2次施,70%于插秧前1 d作基肥施入,余下30%作分蘖肥在插秧后7~15 d施入。各处理具体施肥量见表1。水稻收获前10 d排水晒田,冬季休闲,不进行灌溉和栽培作物。其他田间管理措施与当地农民大田管理相同。

### 1.3 样品采集与测定方法

每年早晚稻成熟期各小区分别测产,采集植株样用于考种和磷养分测定。每年晚稻收获后采集耕层0~20 cm土样,用于测定全磷和有效磷含量。植株全磷采用钼锑抗比色法测定<sup>[9]</sup>,土壤全磷采用碱熔—钼锑抗比色法测定<sup>[10]</sup>,有效磷采用Olsen法测定<sup>[9]</sup>。

### 1.4 数据计算与处理

土壤磷活化系数(P activation coefficient, PAC,%)=有效磷(mg kg<sup>-1</sup>)/[全磷(g kg<sup>-1</sup>)

表1 1981—2015年每年养分投入量

**Table 1** Total annual inputs of N, P and K nutrients in the long-term field experiment from 1981 to 2015 (kg hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	早稻季 Early rice		晚稻季 Late rice		全年总养分 投入 Annual total nutrient input (N-P-K)
	化肥 Chemical fertilizer (N-P-K)	有机物料 Organic material (N-P-K)	化肥 Chemical fertilizer (N-P-K)	有机物料 Organic material (N-P-K)	
CK	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0	0-0-0
NK	150-0-99.6	0-0-0	180-0-99.6	0-0-0	330-0-199.2
NK+PM	150-0-99.6	45.8-19.7-24.5	180-0-99.6	45.8-19.7-24.5	421.6-39.4-248.2
NP	150-39.6-0	0-0-0	180-39.6-0	0-0-0	330-79.2-0
NP+RS	150-39.6-0	19.1-2.7-39.7	180-39.6-0	19.1-2.7-39.7	368.2-84.7-79.4
NPK	150-39.6-99.6	0-0-0	180-39.6-99.6	0-0-0	330-79.2-199.2
NPK+RS	150-39.6-99.6	19.1-2.7-39.7	180-39.6-99.6	19.1-2.7-39.7	368.2-84.7-278.6

× 1000] × 100%

作物吸磷量 (kg hm<sup>-2</sup>) = [ 籽粒产量 (kg hm<sup>-2</sup>) × 籽粒含磷量 (%) + 秸秆产量 (kg hm<sup>-2</sup>) × 秸秆含磷量 (%) ] / 100

当季土壤表观磷盈亏 (kg hm<sup>-2</sup>) = 每年施入土壤磷素总量 (kg hm<sup>-2</sup>) - 每年作物 (籽粒+秸秆) 吸磷量 (kg hm<sup>-2</sup>)

土壤累积磷盈亏 (kg hm<sup>-2</sup>) = Σ [ 当季作物表观磷盈亏 ]

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 7.5 等数据处理系统。

## 2 结果

### 2.1 长期不同施肥下土壤全磷的演变特征

长期不同施肥红壤性水稻土全磷含量变化如图1所示。35年间不施任何肥料的CK处理土壤全磷随试验年限呈缓慢下降趋势 ( $p < 0.01$ )，下降速率为  $0.0029 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ；不施磷肥的NK处理土壤全磷年际间波动较大，总体上与试验年限的相关性不显著 ( $p > 0.05$ )；不施化肥磷仅施猪粪的NK+PM处理土壤全磷随试验年限呈缓慢上升趋势 ( $p < 0.01$ )，上升速率为  $0.0015 \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。施化肥磷和化肥磷配施稻草的NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤全磷均随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$  或  $p < 0.05$ )，且单施化肥处理上升速率高于相应的化肥磷配施稻草处理。

将NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤全磷

随时间变化按试验前10年和后25年两个时段进行分析 (表2)，该4个处理前10年土壤全磷均随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$ )，且有机无机配施处理上升速率高于相应的单施化肥处理；之后25年NP、NP+RS和NPK处理土壤全磷随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$ )，但上升速率变缓，而NPK+RS处理土壤全磷随年限变化不显著 ( $p > 0.05$ )。

从35年平均值看，各处理土壤全磷NPK+RS > NP+RS > NP > NPK > NK+PM > NK > CK。CK、NK和NK+PM处理土壤全磷平均值分别为0.561、0.564和0.635 g kg<sup>-1</sup>，较初始值分别降低15.0%、14.5%和3.8%。NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤全磷平均值分别为0.953、0.957、0.925和0.963 g kg<sup>-1</sup>，较1981年初始值分别提高44.4%、45.1%、40.1%和45.9%。说明在本试验条件下，长期施用化肥磷或化肥磷与稻草配施有利于提高土壤全磷，且化肥磷配施稻草提高效果高于相应的单施化肥处理。

### 2.2 长期不同施肥下土壤有效磷的演变特征

长期不同施肥处理土壤有效磷演变特征存在明显差异 (图2)。35年间，CK、NK和NK+PM处理土壤有效磷随试验年限呈下降趋势 ( $p < 0.01$ )，年均下降速率分别为0.1967、0.1181和0.0817 mg kg<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>。NP和NP+RS处理土壤有效磷随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$ )，其中NP+RS处理土壤有效磷上升速率 ( $0.3299 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) 高于NP处理 ( $0.1983 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )。NPK和NPK+RS处理土壤有效磷从总体上看与试验年限相关性不显著

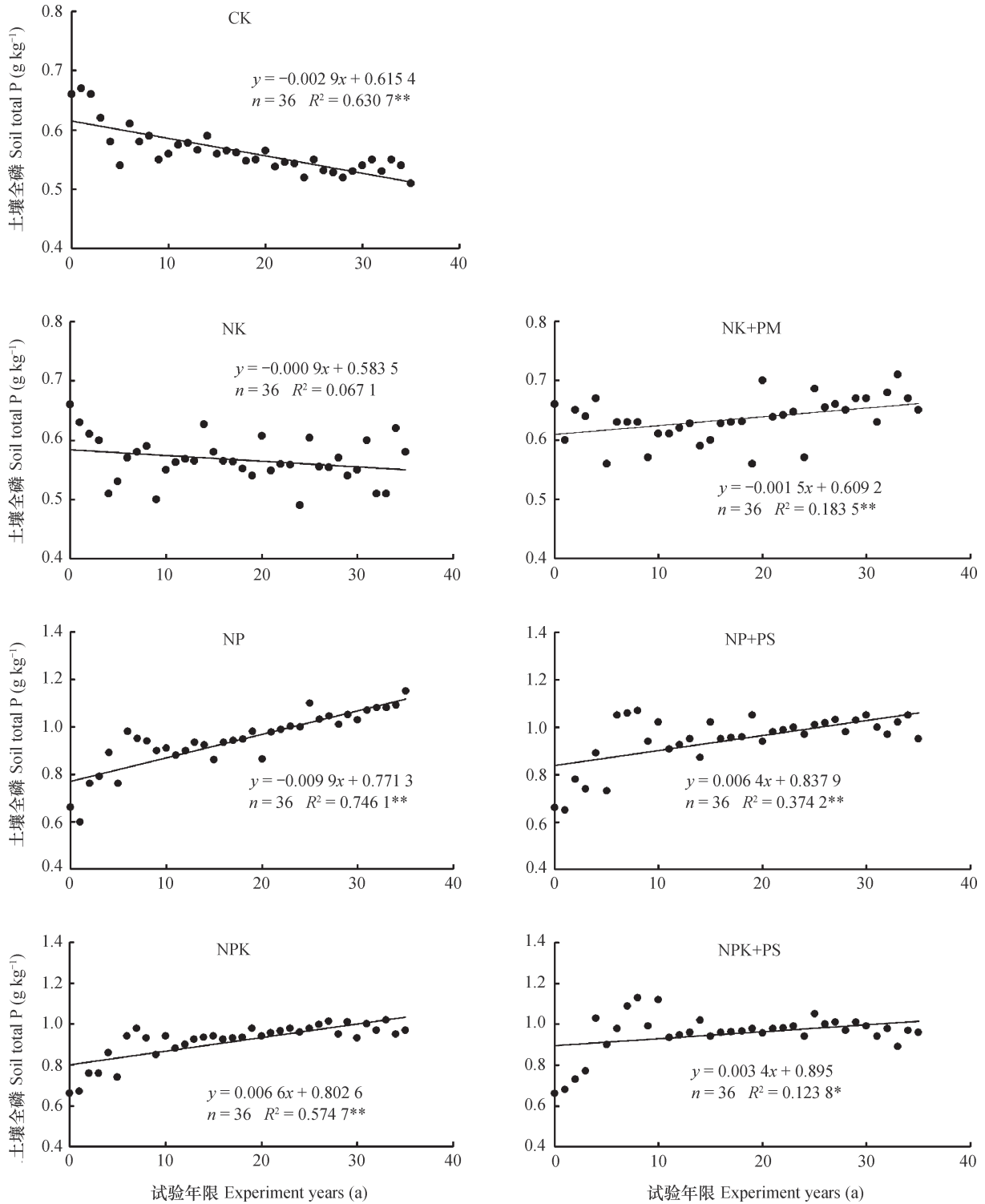


图1 长期不同施肥下土壤全磷含量的变化趋势

Fig. 1 Variation of contents of soil total phosphorus in the long-term field experiment relative to treatment

( $p > 0.05$ )。

将NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤有效磷随时间变化按试验前5年和试验后30年两个时间段进行分析(表3), NP、NP+RS、NPK和

NPK+RS处理前5年土壤有效磷含量均随试验年限呈上升趋势( $p < 0.01$ 或 $p < 0.05$ ); 试验后30年NP和NP+RS处理土壤有效磷含量随试验年限仍呈上升趋势( $p < 0.01$ ), 但上升速率变缓, 而NPK和

表2 不同时段土壤全磷 (y) 与试验年限 (x) 的关系模型

**Table 2** Regression model for relationship between content of soil total phosphorus and age of the experiment

处理 Treatment	时段 Experimental years	拟合模型 Fitting model	显著性检验 Significance testing
NP	1981—1990	$y=0.0309x+0.6455$	$R^2=0.669\ 0^{**}$ , $n=11$
	1991—2015	$y=0.0097x+0.8689$	$R^2=0.815\ 9^{**}$ , $n=25$
NP+RS	1981—1990	$y=0.0421x+0.6193$	$R^2=0.712\ 9^{**}$ , $n=11$
	1991—2015	$y=0.0037x+0.9355$	$R^2=0.338\ 6^{**}$ , $n=25$
NPK	1981—1990	$y=0.0286x+0.6545$	$R^2=0.692\ 5^{**}$ , $n=11$
	1991—2015	$y=0.0033x+0.9145$	$R^2=0.338\ 6^{**}$ , $n=25$
NPK+RS	1981—1990	$y=0.0485x+0.6256$	$R^2=0.813\ 0^{**}$ , $n=11$
	1991—2015	$y=0.0003x+0.9682$	$R^2=0.003\ 5$ , $n=25$

注：\*\*表示在1%水平相关性显著，\*表示在5%水平相关性显著 Note: \*\* and \* mean significant difference at the 1% and 5% level, respectively

表3 不同时段土壤有效磷 (y) 与试验年限 (x) 的关系模型

**Table 3** Regression model for relationship between content of soil available phosphorus and age of the experiment

处理 Treatment	时段 Experimental years	拟合模型 Fitting model	显著性检验 Significance testing
NP	1981—1985	$y=2.7686x+12.395$	$R^2=0.868\ 6^{**}$ , $n=6$
	1986—2015	$y=0.0997x+23.302$	$R^2=0.521\ 6^{**}$ , $n=30$
NP+RS	1981—1985	$y=3.0543x+9.1476$	$R^2=0.948\ 9^{**}$ , $n=6$
	1986—2015	$y=0.1873x+22.847$	$R^2=0.430\ 8^{**}$ , $n=30$
NPK	1981—1985	$y=2.9086x+13.262$	$R^2=0.746\ 2^*$ , $n=6$
	1986—2015	$y=-0.0372x+23.419$	$R^2=0.092\ 2$ , $n=30$
NPK+RS	1981—1985	$y=3x+13.233$	$R^2=0.785\ 0^{**}$ , $n=6$
	1986—2015	$y=-0.059x+23.477$	$R^2=0.207\ 4^*$ , $n=30$

NPK+RS处理土壤有效磷随年限变化不显著或呈缓慢下降趋势。

从35年平均值来看, CK、NK和NK+PM处理土壤有效磷分别为5.9、6.1和8.2 mg kg<sup>-1</sup>, 较初始值分别降低42.2%、40.2%和19.6%, 表明长期连续不施磷肥导致土壤有效磷下降; NK+PM处理按照本试验设计的猪粪施用量虽然能够补充一定量的磷素, 但其土壤全磷和有效磷均降低, 表明该处理磷投入不足以维持土壤磷素肥力。NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤有效磷平均值分别为24.3、24.7、22.8和22.6 mg kg<sup>-1</sup>, 较初始值分别提高138.4%、141.7%、123.6%和121.6%, 表明在本试验条件下长期施用化肥磷或化肥磷与稻草配施提高了土壤有效磷。

### 2.3 长期不同施肥下土壤磷活化系数的演变特征

磷活化系数 (PAC) 表征土壤磷活化能力, 即全磷向有效磷转化的难易程度。长期不同施肥下土壤PAC随时间的演变特征如图3所示, 35年间, CK、NK和NK+PM处理土壤PAC均随试验年限呈下降趋势 ( $p < 0.01$ ), 下降速率分别为0.0285% a<sup>-1</sup>、0.0187% a<sup>-1</sup>和0.0158% a<sup>-1</sup>, CK处理下降最快, NK处理其次。从总体上看, NP和NPK+RS处理土壤PAC随试验年限无显著变化 ( $p > 0.05$ ), NP+RS处理PAC随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$ ), NPK处理土壤PAC随试验年限呈下降趋势 ( $p < 0.05$ )。

将NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤PAC随时间变化按试验前5年和试验后30年两个时段

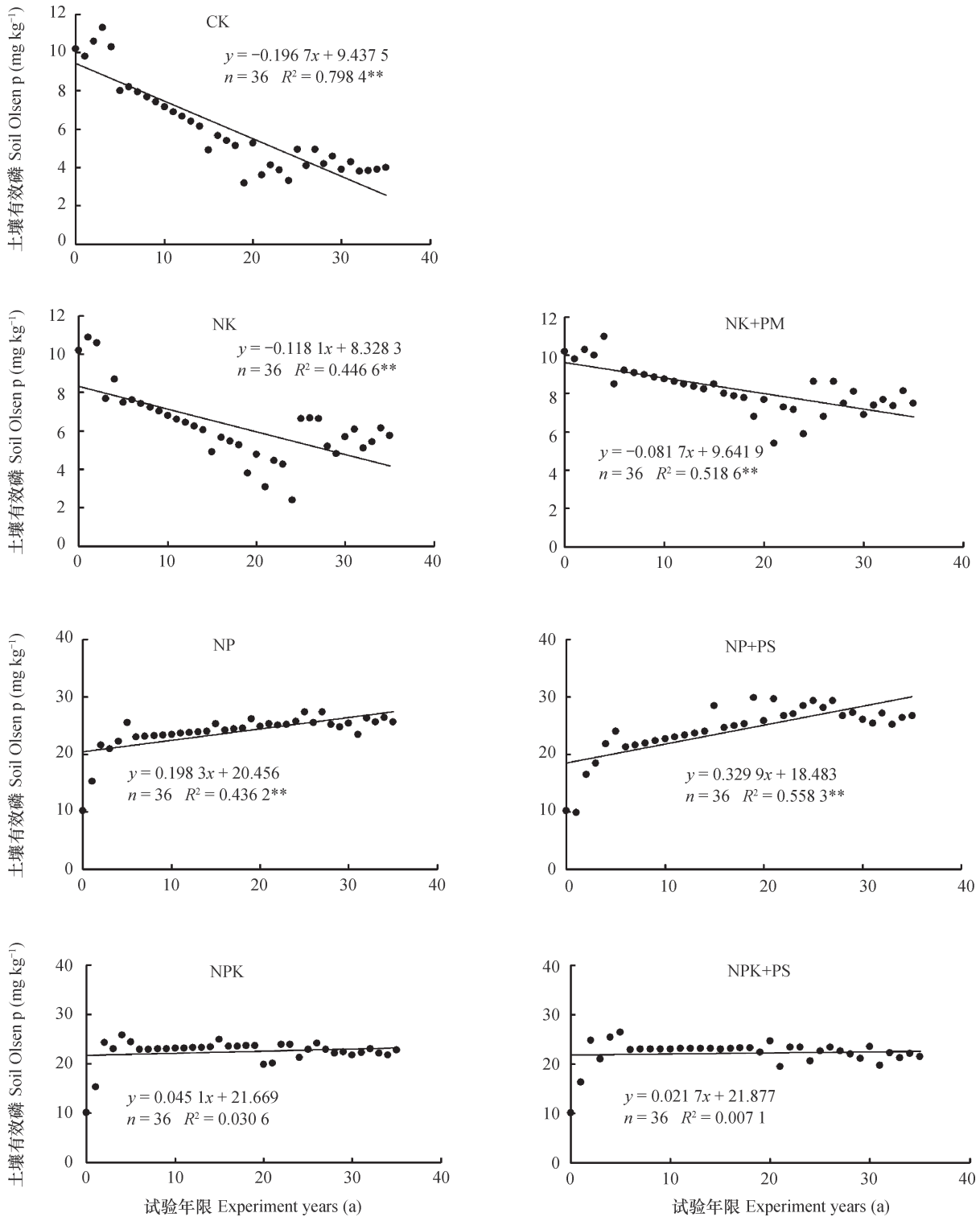


图2 长期不同施肥下土壤有效磷含量的变化趋势

Fig. 2 Variation of contents of soil available phosphorus in the long-term field experiment relative to treatment

进行分析 (表4), 发现前5年NP、NP+RS和NPK处理土壤PAC随试验年限呈上升趋势 ( $p < 0.01$  或  $p < 0.05$ ), 之后30年NP和NPK处理呈缓慢下降趋势 ( $p < 0.01$  或  $p < 0.05$ ), NP+RS处理呈缓慢上

升趋势 ( $p < 0.01$ ); 而NPK+RS处理无论在试验前5年和之后30年土壤PAC均随试验年限变化不显著 ( $p > 0.05$ , 表4中未列出)。进一步将NPK+RS处理土壤PAC随时间变化按试验前2年和试验后33

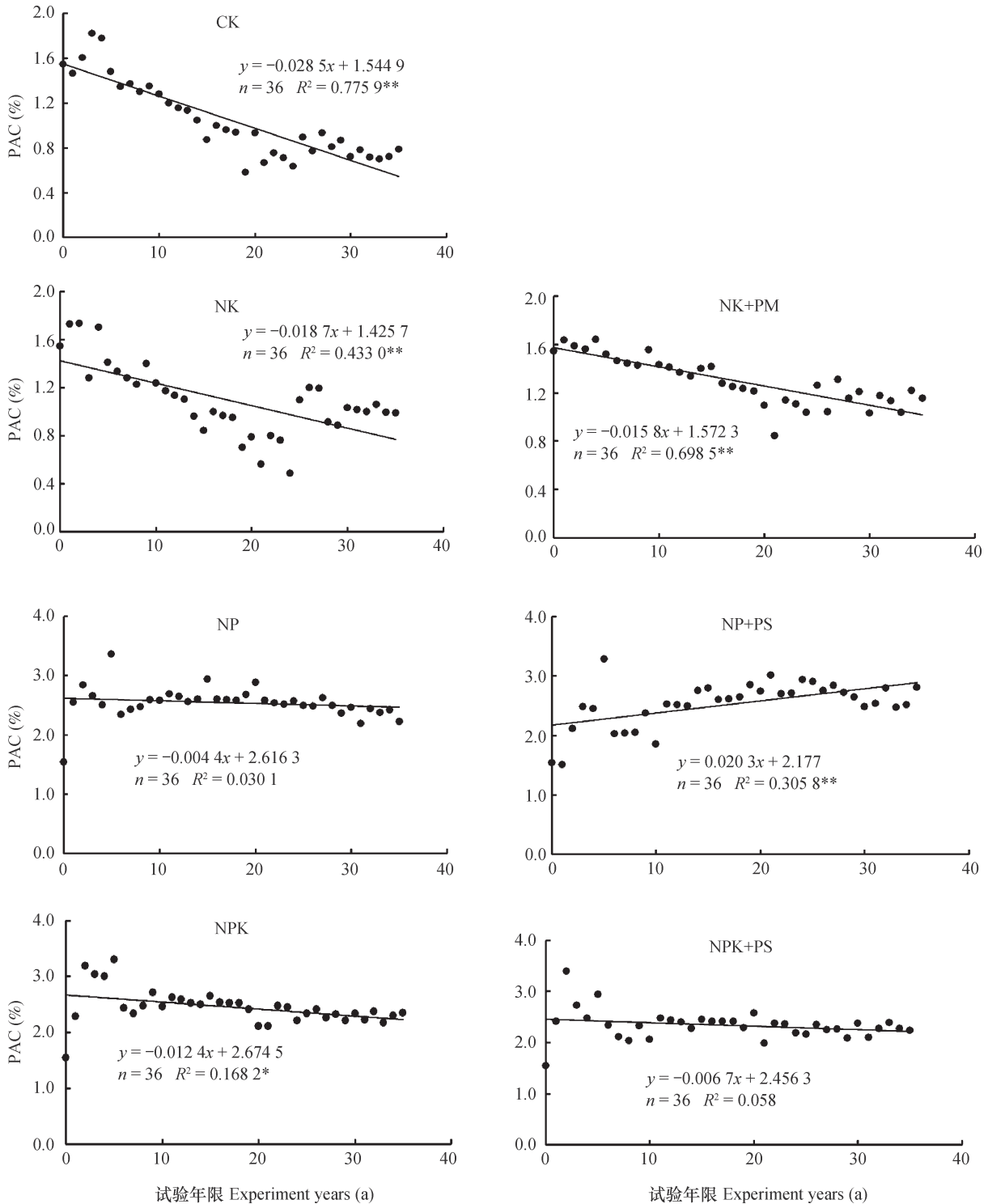


图3 长期不同施肥下土壤磷活化系数的变化趋势

Fig. 3 Variation of soil phosphorus activation coefficient (PAC) in the long-term field experiment relative to treatment

年两个时段进行分析，发现该处理试验前2年土壤PAC随年限急剧上升，之后33年呈缓慢下降趋势。

从35年平均值看，土壤PAC值NP > NP+RS > NPK > NPK+RS > NK+PM > NK > CK。CK、NK和NK+PM处理土壤PAC值均低于2%（分别

为1.03%、1.09%和1.29%），较初始值1.55%均降低，表明这三个处理土壤全磷较难转化为有效磷<sup>[11]</sup>；NP、NP+RS、NPK和NPK+RS土壤PAC平均值分别为2.57%、2.56%、2.48%和2.36%，均大于2%，较初始值有较大幅度的提高，说明施用化

表4 不同时段土壤磷活化系数 (y) 与试验年限 (x) 的关系模型

**Table 4** Regression model for relationship between soil phosphorus activation coefficient (PAC) and age of the experiment

处理 Treatment	时段 Experimental years	拟合模型 Fitting model	显著性检验 Significance testing
NP	1981—1985	$y=0.2495x+1.9524$	$R^2=0.6216^*$ , $n=6$
	1986—2015	$y=-0.0078x+2.6526$	$R^2=0.1868^*$ , $n=30$
NP+RS	1981—1985	$y=0.3402x+1.3815$	$R^2=0.9058^{**}$ , $n=6$
	1986—2015	$y=0.018x+2.3128$	$R^2=0.3112^{**}$ , $n=30$
NPK	1981—1985	$y=0.3091x+1.9567$	$R^2=0.7185^{**}$ , $n=6$
	1986—2015	$y=-0.0108x+2.5697$	$R^2=0.3677^{**}$ , $n=30$
NPK+RS	1981—1985	$y=0.9259x+1.5256$	$R^2=0.9986^{**}$ , $n=3$
	1986—2015	$y=-0.0072x+2.4529$	$R^2=0.1301^*$ , $n=33$

肥磷或化肥磷与稻草配施有利于提高土壤全磷转化为有效磷的效率。

2.4 长期不同施肥下土壤磷素盈亏状况

试验期间35年不施磷肥的CK和NK处理每年当季土壤表观磷一直呈亏缺状态 (图4), 其年均磷亏缺量分别为18.0 和23.3 kg hm<sup>-2</sup>; 不施化肥磷仅施猪粪的NK+PM处理在试验前7年每年当季土壤磷均亏缺, 第8年至第22年每年均略有盈余, 第23年至第35年除少数年份外大部分年份略有亏缺, 以35

年平均值计算土壤表观磷盈亏为基本持平。NP、NP+RS、NPK和NPK+RS每年当季土壤表观磷均呈盈余状态; 单施化学磷肥的NP和NPK处理当季土壤磷盈余值的平均值分别为38.9和29.1 kg hm<sup>-2</sup>, 相应的化学磷肥配施稻草的NP+RS和NPK+RS处理当季土壤磷盈余值的平均值分别为40.9和34.4 kg hm<sup>-2</sup>, 表明施用化肥磷促进了土壤表观磷盈余, 而化肥磷配施稻草进一步提高了土壤表观磷盈余量。

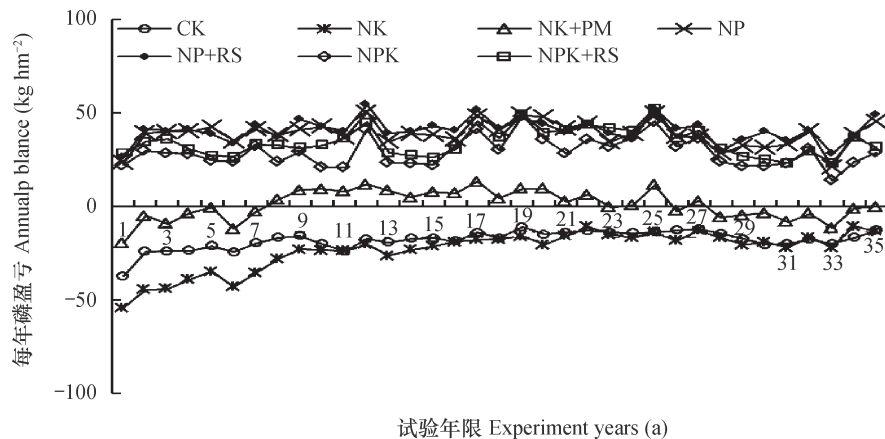


图4 1981—2015年各处理当季土壤表观磷盈亏

Fig. 4 Budgeting of soil phosphorus relative to treatment each year from 1981 to 2015

35年试验期间未施磷肥的CK和NK处理土壤累积磷一直处于亏缺状态 (图5), 且亏缺量随种植时间延长而增加, 其中CK处理土壤磷亏缺量少于NK处理, 可能是因为CK处理不施任何肥料限制了作物生长和养分吸收, 尤其是在试验的前期阶段, 作物从土壤携出磷量低于NK处理的原因。NK+PM

处理土壤累积磷基本处于持平状态, 从表观平衡角度看, 该处理作物带出土壤系统的磷素量与通过猪粪投入土壤的磷素量基本相当, 但结合土壤全磷和有效磷均较初始值明显降低, 因此从维持和提高土壤磷素肥力的角度考虑认为该处理磷素投入是不足的。单施化学磷肥的NP、NPK处理及化肥磷与稻



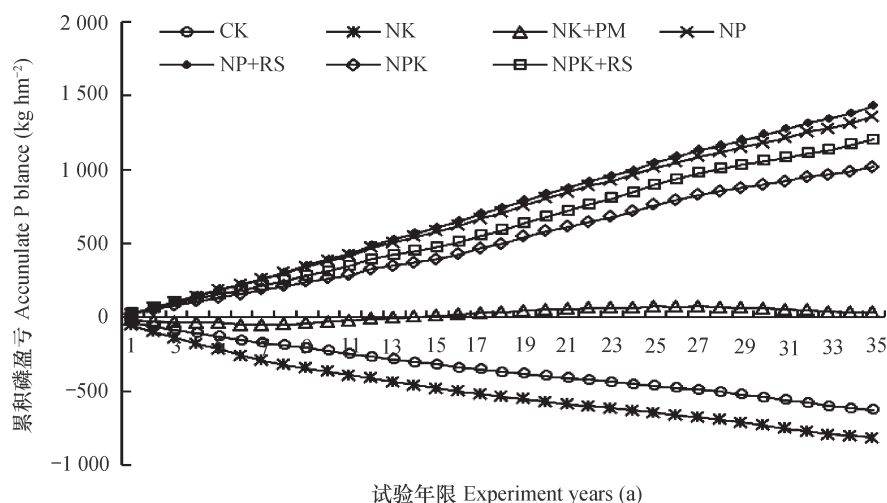


图5 1981—2015年各处理土壤累积磷盈亏

Fig. 5 Budgeting of soil accumulation phosphorus relative to treatment each year from 1981 to 2015

草配施的NP+RS、NPK+RS处理土壤累积磷一直处于盈余状态，且随种植时间延长盈余值增加，2015年NP、NPK、NP+RS和NPK+RS处理土壤累积磷盈余值分别为1 362、1 019、1 432和1 204 kg hm<sup>-2</sup>，表明本试验条件下单施化肥磷土壤累积磷处于盈余状态，而化肥磷与稻草配施进一步提高了土壤累积磷盈余值。

### 2.5 土壤磷及磷有效性对土壤磷素盈亏的响应特征

对土壤全磷、有效磷及PAC与磷素累积盈亏量进行相关分析（图6），发现土壤全磷、有效磷和PAC与土壤耕层累积磷盈亏值均呈极显著相关关系（ $p < 0.01$ ），表明土壤磷素肥力及土壤磷素有效性与土壤表观磷盈亏密切相关。将试验所有处理历年土壤全磷（有效磷、PAC）（ $y$ ）与累积磷盈亏值（ $x$ ）进行线性拟合，斜率代表每盈亏单位数量磷素相应的土壤全磷（有效磷、PAC）消耗量，结果表明红壤性水稻土每盈余P 100 kg hm<sup>-2</sup>，全磷浓度提高0.03 g kg<sup>-1</sup>，土壤有效磷提高1.20 mg kg<sup>-1</sup>，土壤磷活化系数PAC上升0.09%。

## 3 讨论

### 3.1 长期不同施肥对土壤磷演变特征的影响

土壤全磷和有效磷分别表征土壤供磷潜力和供磷水平，除与土壤自身理化性质和自然因素有关外，施肥也是重要的影响因素<sup>[12]</sup>。外源磷投入是提升土壤全磷和有效磷的关键技术，但土壤磷库变化因投入磷肥的种类、施用时间、施用方式及投入

量的不同而存在差异。多数研究认为长期连续不施磷肥会由于作物吸收带走磷素，导致磷素亏缺进而引起土壤全磷和有效磷含量下降<sup>[13-14]</sup>，但也有学者认为长期不施磷肥土壤全磷和有效磷基本不发生变化，甚至略有提高。如叶会财等<sup>[15]</sup>通过32年长期试验研究发现连续不施任何肥料红壤性水稻土全磷基本持平，有效磷略有增加，长期只施氮钾肥不施磷肥土壤有效磷基本持平，分析认为可能是由于降雨及灌溉水中的磷补充了作物携出磷素的原因所致。在本研究中35年长期不施磷的CK和NK处理土壤有效磷随试验年限推移呈下降趋势，CK处理土壤全磷随试验年限也呈下降趋势。不施磷导致土壤磷降低的主要原因可能是在没有外源磷投入条件下，磷素被作物吸收携出导致土壤磷处于持续消耗状态有关，这也与大多数研究结果一致<sup>[13-14]</sup>。同时，本试验中观察到NK处理土壤全磷35年平均较初始值降低15.0%，也表明仅施氮钾不施磷肥导致了土壤全磷的降低，但由于年际间波动较大，总体上随试验年限变化并不显著，其原因有待进一步研究。

黄晶等<sup>[13]</sup>研究表明长期施用化肥磷或化肥磷与有机肥配施土壤全磷和有效磷随试验年限显著上升，不施化肥磷仅施有机肥牛粪（M和NKM处理）土壤全磷和有效磷也呈上升趋势，但上升速率缓慢。在本试验中，长期不施化肥磷只施猪粪的NK+PM处理土壤全磷随试验年限呈缓慢上升趋势，有效磷随试验年限呈缓慢下降趋势。分析NK+PM处理磷素平衡发现该处理投入的磷素和作

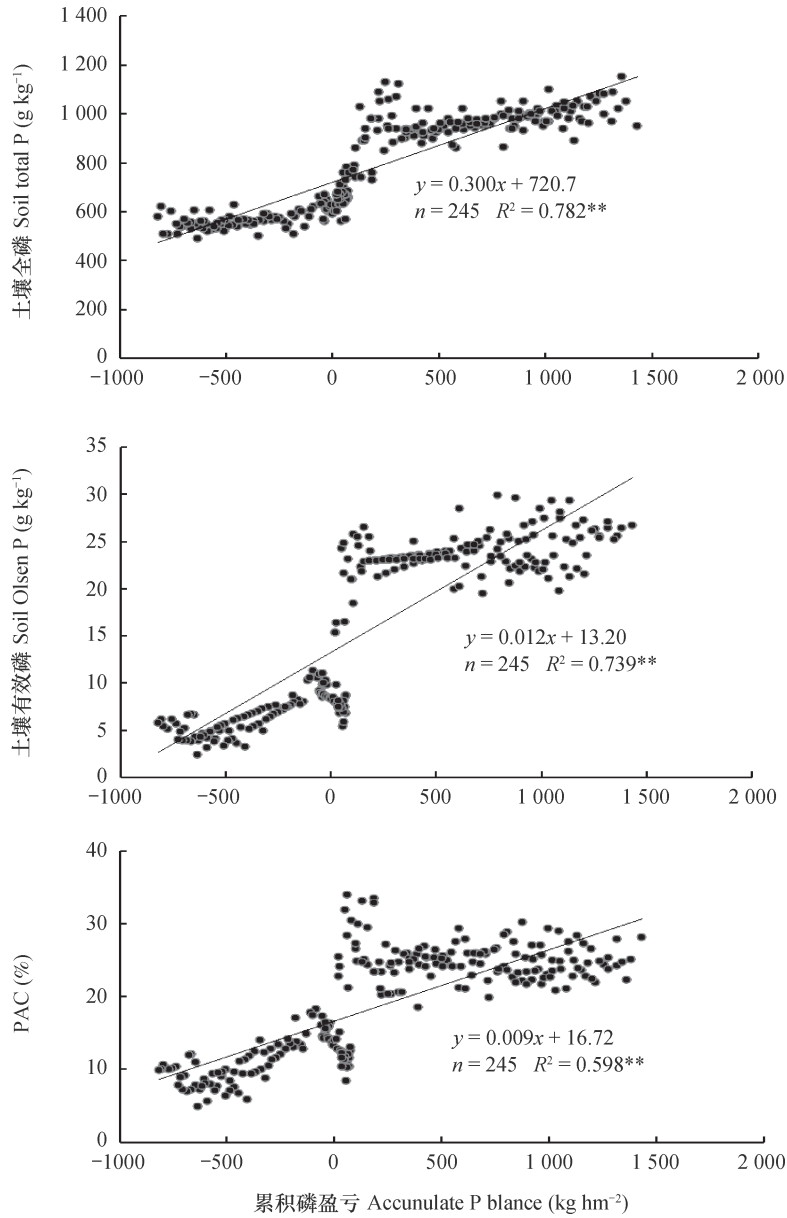


图6 土壤磷及磷有效性与土壤累积磷盈亏的关系

Fig. 6 Relationship of content and availability of soil phosphorus with phosphorus balance

物携出的磷素基本持平，而黄晶等<sup>[13]</sup>研究中M和NKM处理土壤磷平衡表现为盈余，这可能表明土壤全磷及有效磷的变化与磷素投入量和携出量之间的平衡关系紧密，虽然有机肥（猪粪）投入补充了因作物收获携出土壤的磷素，在表观平衡中也达到基本持平状态，但如果要维持土壤有效磷水平，仅仅保持磷素表观平衡是不足的，可能还需要一定量的磷素盈余才能维持或提高土壤有效磷，这一结果可能也说明在评价施磷量是否足够时，不仅要从事物-土壤磷素表观平衡角度考虑，还需同时从土壤磷素肥力变化的结果综合考虑。

大量研究表明合理施用化肥磷或化肥磷与有机肥配施均能提高土壤磷素含量<sup>[16-18]</sup>。本试验长期施化肥磷（NP、NPK）及化肥磷配施稻草（NP+RS、NPK+RS）土壤全磷及有效磷较初始值均有大幅度提高，35年全磷平均值较初始值提高40.1%~45.9%，有效磷平均值较初始值提高121.6%~141.7%；在试验前10年NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理的土壤全磷随试验年限快速增长，之后上升速率变缓或无显著变化；NP、NP+RS、NPK和NPK+RS处理土壤有效磷在试验前5年随试验年限呈快速上升趋势，之后NP和NP+RS

处理随试验年限上升速率变缓，NPK处理随时间变化不显著，NPK+RS处理随时间缓慢下降，这表明在施用一定量磷肥条件下土壤磷在试验前期会快速提高，其中全磷约在1~10年内达到高值，有效磷约在1~5年内达到高值，之后继续按这一用量施磷，土壤有效磷含量在较长年限内变化较缓慢或无显著变化。这可能与土壤本身质地及土壤磷初始值有关，在本试验中，土壤初始有效磷含量为 $10.2 \text{ mg kg}^{-1}$ ，略高于土壤缺磷临界值<sup>[19]</sup>，施化肥磷或化肥磷与有机肥配施对于提高土壤全磷和有效磷在试验前期显示了较强的效应，而之后当土壤全磷和有效磷提高到一定程度后，再施磷其变化速率变缓或无明显变化。尤其是NPK和NPK+RS处理，由于作物产量较高，从土壤携出的磷素量也较高，导致其磷素盈余量低于NP和NP+RS处理，因而从整个试验期间看土壤有效磷随试验年限变化并不显著。

### 3.2 长期不同施肥对土壤磷活化效率的影响

土壤磷活化系数PAC是有效磷占全磷的比值，反映了土壤磷素的有效化程度<sup>[20-21]</sup>，即土壤全磷向有效磷转化的程度，其值越高，表明全磷向有效磷转化得越多，值越低，表明土壤的固磷能力越强。该概念最初由我国学者李学敏和张劲苗<sup>[22]</sup>提出，目前已被国内外学者广泛使用，大多数研究者认为施磷肥能够提高土壤磷素活化效率，而化肥磷与有机肥配施更显著增加了土壤有效磷和磷活化系数<sup>[23-24]</sup>。黄晶等<sup>[13]</sup>研究表明长期不施磷肥导致土壤PAC值下降，而长期施磷（化肥磷或有机肥磷）及化肥磷与有机肥配施均促进了土壤PAC值提高。土壤PAC的变化与外源磷投入量密切相关，外源磷肥施入量越大，土壤有效磷和磷活化系数增加越多<sup>[25-26]</sup>，这可能与土壤高能吸附位点被施入的磷所占据，降低土壤对磷的固定强度进而促进土壤磷活化有关<sup>[25]</sup>。本试验中，从35年平均值看，CK、NK和NK+PM处理土壤PAC值分别为1.03%、1.09%和1.29%，较初始值均有较大程度降低，这说明不施磷或投入外源磷不足会导致土壤PAC降低，可能主要是在无外源磷投入或外源磷投入不足条件下，作物生长从土壤中持续吸收磷素并通过收获带出土壤，作物吸收的磷主要由土壤有效磷供应，导致了土壤磷库中有效磷部分持续降低，而土壤磷库中非有效部分相对降低较少，因而土壤PAC降低。NP、NPK、NP+RS和NPK+RS处

理土壤PAC在试验35年期间平均值分别为2.57%、2.48%、2.56%和2.36%，较初始值均有较大幅度提高，与前人关于施化肥磷及化肥磷与有机肥配施能增加土壤磷活化系数的研究结论一致<sup>[13, 23-24]</sup>。从试验期间土壤PAC演变规律看，试验前5年NP、NP+RS和NPK土壤PAC值随时间快速上升，之后随时间变化速率减缓。NPK+RS处理在试验前5年和后30年随时间变化趋势均未达到显著水平，但分析发现其土壤PAC在试验前2年内急剧上升，之后33年随时间呈下降趋势，但下降速率非常缓慢。NP、NP+RS和NPK三处理土壤PAC达到高值的时间与土壤有效磷的变化基本一致（约为5年），NPK+RS处理土壤PAC在试验前2年即达到高值，可能与该处理产量较其他处理高、作物利用携出的磷素更多（数据未在文中列出）及土壤磷素固定等有关。

### 3.3 土壤磷平衡对土壤磷及磷有效性变化的影响

农田生态系统磷盈亏是土壤有效磷水平消长的根本原因<sup>[8]</sup>，探究农田磷素盈亏的变化特征、量化土壤磷与磷盈亏的关系，对于农田磷素养分管理和合理施磷有重要意义。研究者认为磷盈亏与土壤有效磷的变化存在必然联系<sup>[27]</sup>，外源磷的长期大量投入是土壤磷盈余发生的主要原因，长期施用磷肥条件下农田土壤磷的收支为盈余状态，而长期不施肥导致土壤磷亏缺<sup>[28]</sup>。盈余的磷在土壤中累积，提高了磷的容量和强度，从而增加土壤有效磷，而在亏缺条件下，土壤中磷素损失，有效磷随之下降。土壤有效磷变化量与土壤磷盈亏呈显著线性相关关系<sup>[29]</sup>。鲁如坤等<sup>[30]</sup>研究结果显示在红壤性水稻土和潮土上每盈余 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ ，土壤有效磷提高约 $6.3 \text{ mg kg}^{-1}$ 。Cao等<sup>[31]</sup>在8个不同长期试验点研究发现施用化学磷肥每盈余 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ 土壤有效磷增加 $1.6 \sim 5.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ，每亏缺 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ 土壤有效磷相应下降 $1.6 \sim 5.7 \text{ mg kg}^{-1}$ 。Tang等<sup>[32]</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 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ ，土壤有效磷提高 $2.3 \sim 5.7 \text{ mg kg}^{-1}$ 。本试验的研究结果表明红壤性水稻土每盈余 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ ，土壤全磷提高 $0.03 \text{ g kg}^{-1}$ ，有效磷提高 $1.20 \text{ mg kg}^{-1}$ ，土壤PAC提高0.09%。不同施肥模式下或不同类型土壤上，单位磷素盈余量产生的土壤有效磷提高量有所差异，如裴瑞娜等<sup>[14]</sup>对黑垆土长期试验的研究表明，每盈余 $P 100 \text{ kg hm}^{-2}$ ，土壤有效磷在施用化学磷肥、

单施有机肥和有机无机肥配施下分别增加3.8、0.3和0.5 mg k<sup>-1</sup>, 这表明不同施肥处理土壤盈余等量磷素下土壤有效磷的改变量并不相同。在本试验中仅研究了红壤性水稻土全磷、有效磷及土壤磷活化系数对磷盈亏的响应关系, 而在不同施肥措施下土壤磷、有效磷及土壤磷活化系数对磷盈亏的响应关系的差异性及其影响机制还需进一步研究。

## 4 结 论

外源磷投入是影响土壤磷素及磷有效性的重要因素。长期不施磷或磷投入不足导致土壤全磷、有效磷及磷活化系数降低, 施化肥磷或化肥磷与稻草配施促进土壤全磷、有效磷及磷活化系数的提高。施化肥磷或化肥磷配施稻草土壤全磷、有效磷及磷活化系数在试验前期快速上升, 之后随时间变化趋势变缓或基本持平。长期不施磷肥导致土壤磷素亏缺, 不施磷肥仅施猪粪土壤磷素基本持平, 施化肥磷及化肥磷配施稻草土壤磷素盈余。土壤全磷、有效磷及磷活化系数的变化与土壤磷盈亏密切相关, 每盈余P 100 kg hm<sup>-2</sup>, 土壤全磷含量提高0.03 g kg<sup>-1</sup>, 有效磷提高1.20 mg kg<sup>-1</sup>, 土壤PAC上升0.09%。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 曹宁, 张玉斌, 陈新平. 中国农田土壤磷平衡现状及驱动因子分析. 中国农学通报, 2009, 25 ( 13 ): 220—225  
Cao N, Zhang Y B, Chen X P. Spatial-temporal change of phosphorus balance and the driving factors for agroecosystems in China ( In Chinese ). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25 ( 13 ): 220—225
- [ 2 ] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展. 中国生态农业学报, 2015, 23 ( 1 ): 1—8  
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China ( In Chinese ). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23 ( 1 ): 1—8
- [ 3 ] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥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, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition ( In Chinese ). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21 ( 6 ): 1389—1393
- [ 4 ] 朱文彬, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究. 农业环境科学学报, 2016, 35 ( 6 ): 1129—1135  
Zhu W B, Wang Y, Wang S Q, et al. Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice-wheat rotation field in Taihu Lake region of southeast China ( In Chinese ). Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35 ( 6 ): 1129—1135
- [ 5 ] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2013, 33 ( 24 ): 7615—7622  
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problem in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 ( 24 ): 7615—7622
- [ 6 ] 孙波, 张桃林, 赵其国. 南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价. 土壤, 1995, 27 ( 3 ): 119—128  
Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. The comprehensive evaluation of soil nutrient barren about red soil in hilly region in South China ( In Chinese ). Soils, 1995, 27 ( 3 ): 119—128
- [ 7 ] 曲均峰, 戴建军, 徐明岗, 等. 长期施肥对土壤磷素影响研究进展. 热带农业科学, 2009, 29 ( 3 ): 75—80  
Qu J F, Dai J J, Xu M G, et al. Advances on effects of long-term fertilization on soil phosphorus ( In Chinese ). Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2009, 29 ( 3 ): 75—80
- [ 8 ] 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. 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 ( In Chinese ). Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48 ( 23 ): 4728—4737
- [ 9 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry ( In Chinese ). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [ 10 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis ( In Chinese ). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [ 11 ] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究. 中国土壤与肥料, 2011 ( 6 ): 76—82

- Jia X Y, Li J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011 (6): 76—82
- [ 12 ] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响移速. *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 factor (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (1): 260—268
- [ 13 ] 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. *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 (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (6): 1132—1141
- [ 14 ] 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. *中国农业科学*, 2010, 43 (6): 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 (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (6): 4008—4015
- [ 15 ] 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. *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 (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (6): 1521—1528
- [ 16 ] 杨学云, 孙本华, 古巧珍, 等. 长期施肥对壤土磷素状况的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4): 837—842
- Yang X Y, Sun B H, Gu Q Z, et al. The effects of long term fertilization on soil phosphorus status in manural soessial soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (4): 837—842
- [ 17 ] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 等. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征. *土壤通报*, 2010, 41 (6): 1434—1439
- Li Z Y, Xu M G, Li J M, et al. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (6): 1434—1439
- [ 18 ] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析. *土壤学报*, 2010, 47 (5): 880—887
- Wang Y L, He Y Q, Wu H S, et al. Environmental risk analysis of accumulated phosphorus in red soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (5): 880—887
- [ 19 ] 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 (In Chinese). *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18 (1): 4—8
- [ 20 ] 唐晓乐, 李兆君, 马岩, 等. 低温条件下黄腐酸和有机肥活化黑土磷素机制. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (4): 893—899
- Tang X L, Li Z J, Ma Y, et al. Mechanism of fulvic acid-and organic manure-mediated phosphorus mobilization in black soil at low temperature (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (4): 893—899
- [ 21 ] Shen P, He X H, Xu M G, et al. Soil organic carbon accumulation increases percentage of soil Olsen P to total P at two 15-year mono-cropping systems in northern China. *Journal of Intergrative Agriculture*, 2014, 13 (3): 597—603
- [ 22 ] 李学敏, 张劲苗. 河北潮土磷素状态的研究. *土壤通报*, 1994, 25 (6): 259—260
- Li X M, Zhang J M. Distribution of soil phosphate in Hebei Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25 (6): 259—260
- [ 23 ] Chen C R, Condon L M, Xu Z H. Impact of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial process: A review. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (3): 396—409
- [ 24 ] Xiao R, Bai J H, Gao H F, et al. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient. *Catena*, 2012, 98: 96—103
- [ 25 ] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响. *中国农学通报*, 2008, 24 (7): 245—248
- Zhang Y P, Chen Q, Li Y, et al. Effect of phosphorus levels on form and bioavailability of inorganic P in plough payer of cinnamon soil in Shandong Province (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24 (7): 245—248
- [ 26 ] 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. *新疆农业大学学报*, 2009, 32 (4): 17—21

- Chen B L, Sheng J D, Jiang P A. Effect of two types of phosphates on phosphorus efficiency and phosphorus absorption and distribution in cotton field (In Chinese). *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32 (4): 17—21
- [27] 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 organia fertilizers. *Catena*, 2014, 118: 20—27
- [28] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣, 等. 长期施肥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, et al. Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (1): 102—108
- [29] Johnston A E. *Soil and plant phosphate*. Paris: International Fertilizer Industry Association Press, 2000: 27—29
- [30] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 V. 农田养分平衡和土壤有效磷、钾消长规律. *土壤通报*, 1996, 27 (6): 241—242
- Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycle and budget in agroecosystem in China V. Law of nutrient equilibrium and the gain and loss of available P and K in arable area (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27 (6): 241—242
- [31] Cao N, Chen X P, Cui Z L, et al. Change in soil available phosphorus in relation to the phosphorus budget in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94: 161—170
- [32] 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. *Field Crops Research*, 2008, 108 (3): 231—237

## Evolution of Soil Phosphorus in Reddish Paddy Soil under Long-term Fertilization Varying in Formulation and Its Response to P Balance

LU Yanhong<sup>1, 2</sup> LIAO Yulin<sup>1, 2</sup> NIE Jun<sup>1, 2†</sup> ZHOU Xing<sup>1, 2</sup> XIE Jian<sup>1, 2</sup> YANG Zengping<sup>1, 2</sup>

(1 *Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China*)

(2 *Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture of China, Changsha 410125, China*)

**Abstract** 【Objective】 This study aimed to explore characteristics of the evolution of content and availability of soil phosphorus and their responses to phosphorus accumulation or loss (P balance) in reddish paddy soil under long-term fertilization varying in formulation under the double rice cropping system, in an attempt to provide theoretical bases for scientific application of phosphorus fertilizer in the double rice cropping areas of South China. 【Method】 Based on a 35-year long-term fertilization field experiment, researches were carried out on the evolution rules of soil total P, available P and soil P activation coefficient (PAC) in reddish paddy soil as affected by fertilization varying in formulation and history, calculations done of gain or loss of soil P each year and cumulative gain or loss of soil P in the long-term fertilization field experiment varying in formulation, and discussions made of relationships between soil total P, Olsen P, soil PAC and cumulative P balance. 【Result】 Results show that soil total phosphorus, soil Olsen phosphorus and soil PAC in CK and Treatment NK (No phosphorus fertilizer applied) remained unchanged or displayed downward trends with the experiment going on. Soil total phosphorus in Treatment NK+PM (N and K fertilizer plus pig manure) exhibited a slow rising trend with the experiment going on, while soil Olsen phosphorus and PAC in the treatment did a downward trend. Soil total phosphorus in treatments NP, NPK, NP+RS and NPK+RS (chemical phosphorus fertilizer or plus rice straw) soared during the first ten years of the experiment, but the trend gradually leveled off during the 25 years that followed. Soil Olsen phosphorus in the above-listed-treatments rose sharply to high value in content during the first one to five

years of the experiment, and then the rising trend began to level off with the years passing on. Soil PAC fell drastically in the treatments of no or low phosphorus input, but it ascended in the treatments applied with chemical phosphorus fertilizer or plus organic manure. Compared with the initial background value of the experiment field, soil PAC decreased by 33.2%, 29.7% and 16.6%, respectively in Treatments CK, NK and NK+PM, but increased by 66.2%, 60.6%, 65.6% and 52.9%, respectively in Treatments NP, NPK, NP+RS and NPK+RS. Treatment CK (No fertilization) led to soil phosphorus deficiency, while Treatment PM (applying only pig manure) nearly sustained P balance, and Treatments NP, NPK, NP+RS and NPK+RS resulted in apparent surplus of soil phosphorus. Phosphorus balance was very significantly related to soil total phosphorus, soil Olsen phosphorus and soil PAC. With an average surplus of 100 kg phosphorus per hectare, soil total phosphorus increased by  $0.03 \text{ g kg}^{-1}$ , and Olsen phosphorus by  $1.20 \text{ mg kg}^{-1}$  and PAC by 0.09%. **【Conclusion】** Extraneous phosphorus inputs are the important factors that affect soil phosphorus and soil phosphorus availability. Long-term no phosphorus input and insufficient phosphorus input leads to soil phosphorus deficiency and hence reduction of soil phosphorus content and soil phosphorus availability. Applying chemical phosphorus fertilizer or chemical phosphorus fertilizer plus organic fertilizer promotes soil phosphorus accumulation and improves soil phosphorus fertility.

**Key words** Long-term fertilizer experiment; Soil phosphorus evolution; P availability; P balance; Reddish paddy soil

(责任编辑：卢 萍)