植物营养与肥料学报 2014,20(3):541 -549
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0304

长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响

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

摘要: 基于福建黄泥田长期定位施肥试验,研究不同施肥对土壤有效磷、全磷演变及磷库组分的影响。结果表明,双季稻年份,各施肥处理土壤有效磷与全磷含量呈年际上升趋势,单季稻年份则呈年际下降趋势,而不施肥(CK)则均呈下降趋势,尤其是有效磷,较试验前土壤下降了64.9%。试验第26年,与CK相比,化肥(NPK)、化肥+牛粪(NPKM)、化肥+秸秆还田(NPKS)处理的土壤总无机磷(TIP)含量增加了46.2%~114.2%、总有机磷(TOP)含量增加了16.0%~41.8%、全磷(TP)含量增幅为29.2%~73.8%,均达到显著差异水平,其中均以NPKM处理增幅最大。与试验前土壤相比,CK处理的土壤无机磷总含量降低,但有机磷总含量增加,其中无机磷以Al-P组分的耗竭速率相对最大,而有机磷以中等稳定性组分增幅相对最大;与CK相比,施肥处理均提高了Al-P与Ca-P在全磷中的比例,而降低了各有机磷组分在全磷中的比例;与试验前土壤相比,各处理总无机磷/总有机磷(TIP/TOP)的比值均呈下降趋势,但施肥的降幅较低,尤其是NPKM处理,TIP/TOP比值与有机质含量呈显著正相关。黄泥田不论施肥与否,土壤中有机磷含量均呈增加的趋势,NPKM处理对提高土壤有效磷、无机磷、有机磷库含量最为明显,但NPKS与NPK处理的无机磷库与有机磷库组分含量无明显差异。拟合方程显示,双季稻栽培模式下土壤有效磷含量为17.56 mg/kg、单季稻栽培模式下有效磷含量为16.94 mg/kg时,作物产量可达最高。

关键词: 长期施肥;有机-无机肥配施;黄泥田;全磷;有效磷;无机磷;有机磷
中图分类号: S153.6+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)03-0541-09

Effects of long term fertilization on phosphorus pools and forms in yellow paddy fields of southern China

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

Abstract: Based on data collected in a long term fertilization experiment in yellow paddy fields in Fujian, effect of different long-term fertilization on soil available phosphorous (AP), total phosphorus (TP) and phosphorus component was studied. The results show that the contents of AP and TP are increased with the age of experiment in the fertilization treatments in the double-rice system and decreased in the single-rice system, while the contents of the no- fertilizer treatment (CK) are decreased in both double and single rice terms, especially the content of AP which is reduced by 64.9%. In the 26th year of the fertilization experiment, compared with CK, the contents of total inorganic P(TIP), total organic P(TOP) and TP are increased markedly ($P < 0.01$) by 46.2% -114.2%, 16.0% -41.8% and 29.2% -73.8% in NPK, NPKM and NPKS, respectively, and the highest growth rate is found in the treatment of NPKM. Compared with the soil before the experiment, the content of soil TIP in the CK treatment is decreased while the content of TOP is increased, and the Al-P component is decreased fast, and the increased rate of moderate stability component is the highest in TOP. The ratios of Al-P and Ca-P to TP in the fertilization treatments are higher than those of CK, while the ratio of organic phosphorus to TP is lower. There is a decline trend of the ratio of TIP to TOP in all experiment treatments, and the ratios in the fertilization treatments are higher than that of CK, especially the treatment of NPKM. In addition, there is a positive correlation between the

收稿日期: 2013-03-08 **接受日期:** 2013-12-17
基金项目: 中央公益性行业(农业)科研专项经费(201203030)项目资助。
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方面的研究。E-mail: linchengox@163.com
* 通信作者 E-mail: fjwangfei@163.net

ratio of TIP to TOP and the content of organic matter ($P < 0.01$). The contents of organic phosphorus in yellow paddy soil have increasing trends with experiment age in both the fertilization treatments and CK. The effect of the NPKM treatment on increasing the contents of AP, inorganic phosphorus and organic phosphorus are the most significant among different treatments, but the differences among the contents of the inorganic phosphorus and organic phosphorus components in the treatments of NPKS and NPK are not significant. Under the cultivation patterns of double and single cropping rice in yellow paddy fields, the highest crop yields are achieved when the contents of available phosphorus are 17.56 mg/kg and 16.94 mg/kg, respectively.

Key words: long-term fertilization; organic-inorganic fertilizer; yellow paddy field; total phosphorus; available phosphorous; inorganic phosphorus; organic phosphorus

磷是植物必需的大量元素之一,对作物的生长发育、产量品质都有着重要影响[1]。然而磷肥的当季利用率一般只有10%～25%,而75%～90%的磷进入土壤后成为难以被作物吸收利用的固定形态[2-3]。特别是红壤,由于其独特的理化性质使得土壤中磷素很容易被铁、铝等固定,而不易被作物所吸收利用[4]。磷在土壤中以多种化学形态存在,主要分为无机磷和有机磷两大类,不同形态磷的生物有效性不同,其养分循环的过程也存在差异,并影响土壤磷素的有效性[5]。研究表明[6-11],施肥特别是施用磷肥以及和有机肥配合施用不仅增加了土壤总磷库、有机磷库和无机磷库,而且影响着土壤无机和有机形态磷的组成和分布[12-14]。这些研究主要集中在北方黑土、石灰性土壤,而长期施肥对南方红黄壤区水稻土磷库各组分间相互关系的研究尚少见报道。

福建属亚热带气候,温暖湿润,长期受季节性氧化-还原交替过程作用,铁、锰等元素的迁移强度超过地带性土壤,因此其养分迁移、积累和转化具有一定的区域性[15]。黄泥田是广泛分布于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[16]。为此,本文基于26年长期定位肥料试验,研究不同施肥处理对土壤磷库及其形态的影响,以期深入认识黄泥田土壤的磷库演变与施肥的关系,为黄泥田合理施用磷肥提供依据。

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实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。土壤类型为黄泥田,属中低产田。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、有机质含量21.6 g/kg、碱解氮141 mg/kg、全磷0.25 g/kg、有效磷12 mg/kg、有效钾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+全部稻草还田(NPKS)。每处理设3次重复,小区面积12 m^2(3 m×4 m),种植300丛。每处理化肥施用量相同,每季施用化肥为N 103.5 kg/hm^2、P_2O_5 27 kg/hm^2、K_2O 135 kg/hm^2。干牛粪每茬施用量3750 kg/hm^2,稻草施用量为上茬稻草全部还田。氮、钾肥的50%作基肥,50%作分蘖追肥,磷肥全部作基肥施用。氮肥用尿素、磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化钾。试验地1983～2004年种植双季稻,2005年始种植单季稻,水稻品种每3～4年更换一次。1983～2010年际土壤有效磷与全磷含量,用于磷库演变趋势分析,2008年水稻收获后土样用于无机磷、有机磷组分分析。

1.2 分析方法

土壤无机磷的分组采用蒋柏藩-顾益初的土壤无机磷分组方法[17],土壤有机磷分组采用Bowman-Cole土壤有机磷分组方法[18]。全磷用碱熔—钼锑抗比色法,有效磷用Olsen法[19]测定。

磷素吸收量=籽粒产出量×籽粒含磷量+地上部稻草产出量×稻草含磷量

磷素表观盈余=进入土壤中磷的总量-被作物吸收带走的磷的总量(根茬还田及降雨、灌溉输进磷素微量,可忽略,未统计在内)

试验数据采用DPS数据处理系统和Excel进行分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤有效磷、全磷含量的影响

从1983～2010年土壤有效磷年际演变趋势可

以看出(图 1),各施肥处理的土壤有效磷含量均高于 CK 处理,而施肥处理间有效磷含量大小顺序为 NPKM > NPKS > NPK。CK 处理没有磷肥的输入,且每年作物会携出一定量的磷素,因此有效磷含量随着试验年限的增加呈下降趋势,试验至 2010 年 CK 处理土壤有效磷含量降至 3.94 mg/kg,较试验初期下降 64.9%。各施肥处理土壤有效磷含量呈先上升后下降的趋势,试验至 2003 年,NPKM、NPKS、NPK 处理较试验初期增幅达 122.4%、48.5%、14.1%;从 2005 年开始本试验种植制度改为单季稻,各施肥处理有效磷含量呈下降趋势,至 2010 年 NPK 处理有效磷含量降为 6.90 mg/kg,较试验初期下降 36.3%;NPKS 处理有效磷与试验初期相当;NPKM 处理土壤有效磷较试验初期仍有 15.5% 的增幅。

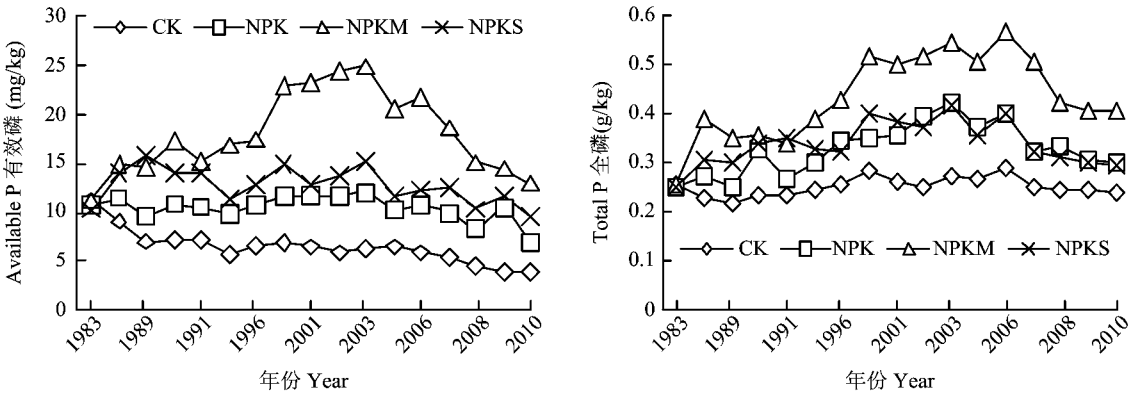

图 1　长期定位施肥土壤有效磷和全磷动态变化

Fig. 1　Dynamics of soil available phosphorus and total phosphorus under the long-term fertilization treatments

图 1 显示,CK 处理全磷含量年际变化呈缓慢下降趋势,试验至 2010 年全磷含量降为 0.24 g/kg,较试验初期下降了 5.92%;试验至 2003 年,NPKM、NPKS、NPK 处理较试验初期增幅达 114.2%、67.8%、68.3%,种植制度改变使得土壤全磷变化趋势与有效磷相似,改种植单季稻后施肥处理土壤全磷呈下降趋势。至 2010 年,NPKM、NPKS、NPK 处理全磷含量分别为 0.40、0.30、0.32 g/kg,较试验初期增幅达 59.4%、22.1%、25.9%。

2.2　长期施肥对土壤无机磷、有机磷组分含量的影响

表 1 表明,定位试验第 26 年 CK 处理无机磷含量的大小顺序为 O-P > Fe-P > Al-P > Ca-P,各施肥处理无机磷含量大小顺序为 Fe-P > O-P > Ca-P > Al-P,说明在南方黄泥田中无机磷组分以 Fe-P、O-P 为主。CK 处理由于无磷肥的输入,各形态无机磷含量较初始值均下降,Fe-P、Al-P、Ca-P、O-P 组分降幅分别达 30.0%、43.8%、13.6%、25.9%,说明 CK 处理 Al-P 组分耗竭相对最快,而施肥处理各无机磷组分较初始值均增加。与 CK 相比,施肥处理的土壤 Fe-P、Al-P、Ca-P、O-P 含量增幅分别为 28.6%～102.6%、52.8%～158.5%、161.4%～226.5%、11.5%～68.9%,无机磷总量增幅为 46.2%～114.2%,均达到显著差异水平。NPKM 处理无机磷各形态(除 Ca-P 外)含量及无机磷总量均显著高于 NPKS、NPK 处理,NPKS、NPK 处理各形态无机磷含量差异则不显著。

从施肥对有机磷库的影响来看,各处理有机磷含量大小顺序为 MLOP > MSOP > LOP > HSOP,说明在南方黄泥田中有机磷组分以 MLOP、MSOP 形态为主。与 CK 相比,施肥处理 LOP、MLOP、MSOP、HSOP 增幅分别为 8.9%～50.6%、9.1%～32.5%、24.7%～32.8%、8.8%～32.4%,有机磷总量增幅为 15.7%～41.8%,其中,各施肥处理的 MSOP 含量与总有机磷含量显著高于 CK。从不同施肥处理来看,NPKM 处理除 HSOP 组分外,其余各组分含量均显著高于 NPK 处理,其 MLOP 与 MSOP 组分也显著高于 NPKS,而 NPKS、NPK 处理各有机磷组分含量无显著差异。另外,从表 1 中还可看出,与试验前土壤相比,不论施肥与否,经过 25 年后,有机磷总量及各组分含量均有所提高,有机磷总量增幅 32.0%～87.1%,有机磷组分中以 MSOP 增幅最大。

表1 长期施肥下无机和有机磷各组分含量(mg/kg)

Table 1 The contents of inorganic P and organic P and their various forms under the long-term fertilization

处理 Treatment	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	LOP	MLOP	MSOP	HSOP	TIP	TOP	TP
BE	57.0	28.1	16.9	56.0	16.8	53.3	29.5	7.7	158.0	107.3	265.3
CK	39.9 cC	15.8 cC	14.6 bB	41.5 cB	16.8 bB	70.1 bB	44.5 cC	10.2 aA	111.8 cC	141.6 cC	253.4 cC
NPK	52.8 bB	29.6 bB	38.2 aAB	53.4 bAB	18.3 bAB	78.4 bB	55.5 bB	12.0 aA	174.0 bB	164.2 bB	338.2 bB
NPKM	80.9 aA	40.8 aA	47.7 aA	70.0 aA	25.3 aA	92.9 aA	69.1 aA	13.5 aA	239.5 aA	200.8 aA	440.3 aA
NPKS	51.4 bB	24.1 bBC	41.8 aA	46.2 bcB	20.8 abAB	76.5 bB	55.5 bB	11.1 aA	163.5 bB	163.9 bB	327.4 bB

注(Note): BE—试验前 Before experiment; LOP—活性有机磷 Labile organic phosphorous; MLOP—中等活性有机磷 Moderately labile organic phosphorous; MSOP—中等稳定性有机磷 Moderately stable organic phosphorous; HSOP—高稳定性有机磷 Highly stable organic phosphorous; TIP—无机磷总量 Total content of inorganic phosphorous; TOP—有机磷总量 Total organic phosphorous; TP—全磷 The content of total phosphorous. 不同小、大写字母分别表示处理间差异达5%和1%显著水平 Different small and capital letters between the treatments mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

土壤无机磷、有机磷总量与土壤有效磷拟合方程发现(图2),二者与有效磷均呈极显著线性相关,说明黄泥田无机磷、有机磷库均是有效磷的"源",随着土壤无机磷、有机磷库的增加,土壤磷素有效性也相应提高。

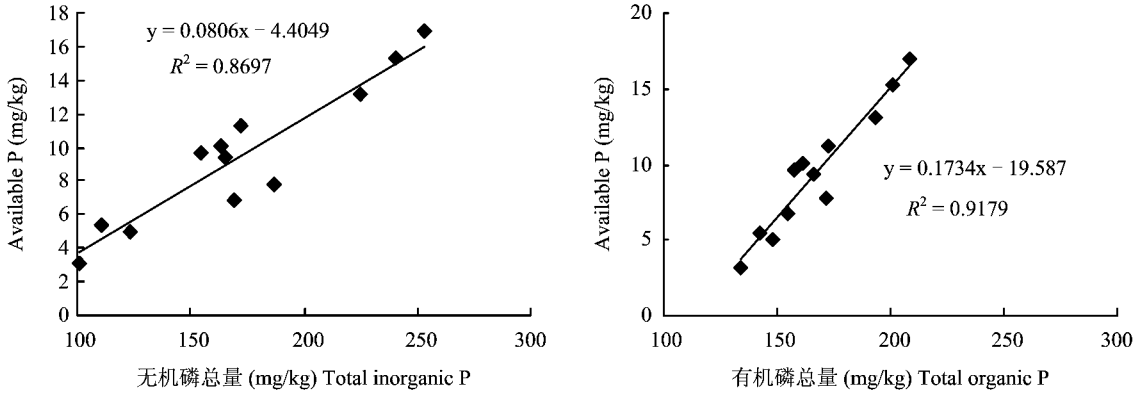

图2 土壤有效磷含量与无机磷总量和有机磷总量的关系

Fig. 2 Correlations between the content of soil available phosphorus and the contents of total inorganic phosphorous and total organic phosphorous

2.3 长期施肥土壤无机磷、有机磷在全磷中的比例

从各形态磷占土壤全磷的比例(表2)来看,与试验前土壤相比,CK处理的各无机磷比例均下降,有机磷各组分比例均上升,而各施肥处理Fe-P、Al-P、O-P的比例均下降,但Ca-P比例上升,而MLOP、MSOP、HSOP有机磷比例上升,综合来看,各处理无机磷相对量由试验前的59.6%下降为44.1%~54.4%,有机磷比重由40.4%提高为45.6%~55.9%;从不同施肥处理来看,与CK相比,各施肥处理均降低了土壤O-P比例,提高了Al-P、Ca-P无机磷的比重,但施肥均降低了各有机磷组分在全磷中的比例。

2.4 长期施肥对土壤无机磷/有机磷(TIP/TOP)比值的影响

TIP/TOP比值可反映土壤磷库中无机、有机磷库的相对消耗或累积速度[8]。经过25年的试验后(图3),CK、NPK、NPKM、NPKS处理TIP/TOP值由试验初期的1.47分别降为0.78、1.06、1.19、1.00,CK处理下降幅度最大,是因为有机磷总量提高而无机磷总量降低,而施肥处理TIP/TOP降低可能是因为有机磷含量与无机磷含量均同步提高,但

表 2　各级磷素含量占全磷量的比例(%)

Table 2　Percentages of the contents of different P fractions in the total P

处理 Treatment	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	LOP	MLOP	MSOP	HSOP	TIP	TOP
BE	21.49	10.59	6.37	21.11	6.33	20.09	11.12	2.90	59.6	40.4
CK	15.76	6.23	5.77	16.36	6.62	27.66	17.57	4.03	44.1	55.9
NPK	15.61	8.76	11.30	15.78	5.41	23.19	16.41	3.55	51.4	48.6
NPKM	18.37	9.27	10.84	15.91	5.76	21.11	15.69	3.05	54.4	45.6
NPKS	15.69	7.37	12.76	14.12	6.34	23.37	16.95	3.40	49.9	50.1

注(Note):BE—试验前 Before experiment;LOP—活性有机磷 Labile organic phosphorous;MLOP—中等活性有机磷 Moderately labile organic phosphorous;MSOP—中等稳定性有机磷 Moderately stable organic phosphorous;HSOP—高稳定性有机磷 Highly stable organic phosphorous;TIP—无机磷总量 Total inorganic phosphorous;TOP—有机磷总量 Total organic phosphorous.

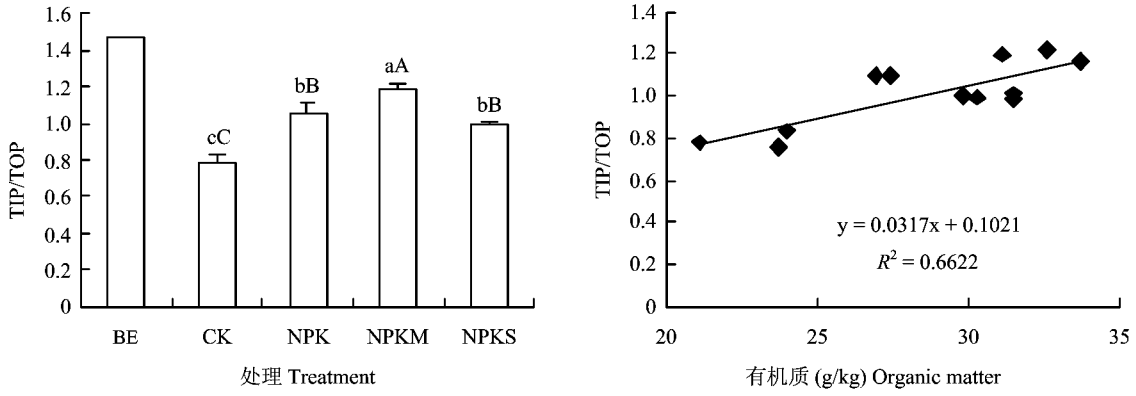

图 3　长期施肥土壤无机磷/有机磷的比值及其与土壤有机质的关系

Fig. 3　The ratio of TIP to TOP of soils under long-term repeated different fertilizers and the relationship between the ratio of TIP to TOP and the content of soil organic matter

[注(Note):BE—试验前 Before experiment;TIP—无机磷总量 Total inorganic phosphorous;TOP—有机磷总量 Total organic phosphorous. 柱上不同小、大写字母分别表示处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant difference among different treatments at the 0.05 level.]

无机磷含量增加的幅度较有机磷增加的幅度小。进一步分析表明,TIP/TOP 比值与土壤有机质呈极显著的正相关,说明土壤有机质含量的变化可直接影响土壤无机磷、有机磷的相对消耗累积比。

2.5　土壤有效磷含量与作物产量间的相关性

将土壤有效磷与水稻产量拟合发现(图 4),无论是双季稻还是单季稻,水稻产量与土壤有效磷含量均可拟合一元二次方程,且差异达极显著水平。从拟合方程中可知,土壤有效磷含量为 17.56 mg/kg时,晚稻产量达最高值,有效磷含量为 16.94 mg/kg时,单季稻产量达最高值。说明在南方黄泥田上,随着土壤磷素水平的提高,产量可呈增加趋势,但并非磷素水平越高,产量就越高。因此合理的磷肥施用是作物高产的一个重要因素。

3　讨论与结论

3.1　黄泥田土壤磷素表观平衡

由表 3 可知,当种植制度改为单季稻后,各施肥处理在 2008 年的磷素表观盈余量均为亏缺,其中以 NPKM 亏缺量最大。由于缺乏双季稻年份植株养分数据,无法从土壤磷素盈余量来分析双季稻年份土壤磷素盈亏情况。但从籽粒产量的变化来看(表 4),2005 年试验地改种单季稻后,施肥区每年肥料投入量仅相当于双季稻年份的一半,但单季稻年份的产量(2005 ~ 2010 年)却相当于双季稻年份(1984 年与 1995 年的平均值)的 72.2% ~ 88.0%,

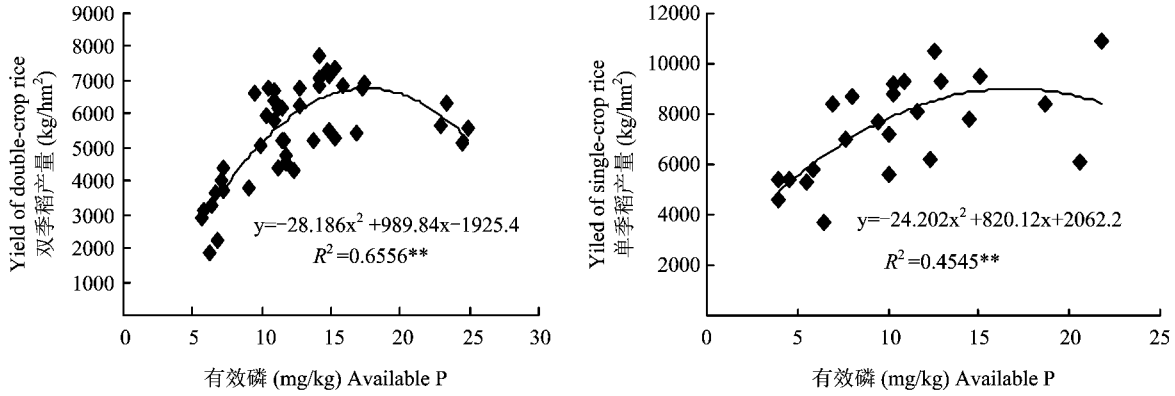

图4 土壤有效磷含量与作物产量的相关性

Fig. 4 Correlations between the contents of soil available P and the grain yields

表3 土壤磷素(P_2O_5)表观平衡(2008年)

Table 3 Apparent balance of P in soil

处理 Treat.	磷素投入 (kg/hm^2) Source of P input		籽粒携出 Grain uptake			稻草携出 Straw uptake			磷素表观平衡 P apparent balance (kg/hm^2)
	化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Manure	产量 Yield (kg/hm^2)	含磷量 P content (g/kg)	磷吸收量 P uptake (kg/hm^2)	产量 Yield (kg/hm^2)	含磷量 P content (g/kg)	磷吸收量 P uptake (kg/hm^2)	
CK	0	0	5356.8 ± 383.8 cC	5.11 bB	27.4	2808.3 ± 151.3 cC	1.90 cB	5.3	-32.7
NPK	27.0	0	8716.9 ± 200.4 bB	5.50 bAB	48.0	4928.9 ± 182.8 bB	1.89 cB	9.3	-30.3
NPKM	27.0	33.0	9492.2 ± 297.8 aA	7.52 aA	71.4	5675.1 ± 226.6 aA	4.08 aA	23.2	-34.5
NPKS	27.0	13.4	9175.4 ± 177.9 aAB	6.35 abAB	58.3	5504.1 ± 115.3 aA	2.55 bB	14.0	-31.9

注(Note):不同小、大写字母分别表示处理间差异达5%和1%显著水平 Different small and capital letters between the treatments mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

表4 单季稻年份与双季稻年份产量对比

Table 4 Yields of rice under single cropping term and double cropping term

处理 Treatment	双季稻年平均产量(kg/hm^2) Average annual yield of double-crop rice (1984～2003)	单季稻年平均产量(kg/hm^2) Average annual yield of single-crop rice (2005～2010)	单季稻产量/双季稻产量(%) The yield of single cropping/ double cropping of rice
CK	5723.1 ± 1329.2 cC	5035.9 ± 747.5 cC	88.0
NPK	10701.8 ± 1503.5 bB	7706.8 ± 1229.7 bB	72.0
NPKM	11996.6 ± 1340.2 aA	8680.6 ± 1536.9 aA	72.4
NPKS	11671.4 ± 1391.3 aA	8429.6 ± 1305.4 aA	72.2

注(Note):双季稻年平均产量为每年两季产量之和 The average annual yield of double-crop rice is the sum of the production of two quarters in a year.

即单季稻年份外源肥料输入少,而产量输出相对较高,养分亏缺明显,这可能也是单季稻年份有效磷与全磷含量持续下降的原因。

3.2　土壤无机磷、有机磷库及其组分演变

本研究结果表明,在南方黄泥田水稻土上施肥均可增加土壤有效磷、土壤无机磷、有机磷组分含量,扩大磷库含量,其中以 NPKM 处理提高效果最为显著,此结果与黑土、潮土、红壤上的变化一致[9,12-13]。水稻吸收的磷主要来自于 Fe-P、Al-P[20],在南方黄泥田上,与施氮磷钾(NPK)处理相比,长期施用氮磷钾和有机肥(NPKM)处理可显著提高土壤 Olsen-P、Fe-P、Al-P 含量,其中 Fe-P、Al-P 含量较 NPK 处理增加 53.2%、37.8%,主要原因是:一方面增施有机物料直接增加了土壤磷素的投入量,可提高土壤有机磷含量,并通过矿化作用可释放出无机磷[21];另一方面可能是牛粪施入土壤后腐解产生的有机酸类物质可溶解、吸附土壤中的磷酸盐,释放出土壤中磷酸钙、磷酸铝(铁)中的磷酸根离子,有机酸根离子及有机质提供的阴离子与磷酸根离子竞争土壤吸附位点,从而减少土壤对磷的固定[22]。

从有机磷组分来看,NPKM 处理土壤活性有机磷和中等活性有机磷均高于 NPKS 处理,这可能与牛粪与秸秆的有机磷组分差异有关,由于牛粪中 4 种有机磷组分含量为中等活性有机磷 > 活性有机磷 > 中等稳性有机磷 > 高稳性有机磷[23],而稻草中则以中等活性和中等稳定性有机磷为主[24],说明牛粪中有机磷的活性大于秸秆中的,进而施肥后也影响到土壤有机磷组分的活性。

本研究同时表明,与试验前土壤相比,CK 处理无机磷总量呈下降趋势,而施肥各处理呈升高趋势,但不论施肥与否,土壤有机磷总量均有明显提高的趋势。可能的原因是,长期不施肥仍可保持一定的生物产量[24],使土壤中有一定的根茬残留,其中的有机磷转化进入了土壤有机磷库,而不施肥条件下,由于微生物活性降低,土壤磷酸酶随之下降[16],一定程度上限制了有机磷库向无机磷库的转变。而对各施肥处理而言,不同施肥均显著提高了水稻产量[25],每年根茬、秸秆还田量相应增加,另外施入粪肥有机物料有机磷含量较高,也一定程度上补充了土壤有机磷库。

3.3　长期施肥对土壤无机磷、有机磷相互转化的影响

土壤无机磷/有机磷比值与土壤有机质含量显著相关,二者的动态转化受有机质的影响较大。稻田微生物对磷的固持作用主要取决于土壤微生物本身的生物量大小,微生物的生长繁殖离不开土壤有机碳和大量新鲜碳源,稻田有机碳归还量较大是维持较高微生物量的重要因子之一[26]。长期不施肥条件下,土壤有机质含量相对施肥处理显著降低[25],在低有机质条件下土壤微生物活性较弱[27],微生物趋于以土壤有效磷为磷源,形成磷的生物固持。而 NPK 处理,特别是在 NPK 的基础上增施有机物料土壤有机质含量显著提高,当有机质含量增加到一定程度后,土壤微生物活性增强,微生物分泌的磷酸酶将植物盐、磷脂等有机磷化物水解转化为简单的无机化合物为植物吸收利用[28]。在定位试验的第 26 年,本研究发现在南方黄泥田上不同施肥处理土壤 TIP/TOP 值总体呈下降趋势,表明此条件下有机磷增加幅度要高于无机磷,土壤趋向有机磷的合成,但 NPKM 处理的 TIP/TOP 值最高,说明该施肥模式土壤磷素相对矿化程度高于其他模式,这也意味着配施牛粪对土壤无机磷组分增加贡献较大,进而进一步提高土壤有效磷含量。因此,对南方黄泥田而言,土壤缺磷普遍,有机质含量在南方水田类型中也相对较低,在此类农田上施用磷肥,配合施用畜禽类有机肥是提高土壤磷素有效性的有效途径。

3.4　不同有机物料配施对土壤磷库的影响

从本研究结果可以看出,NPKS 处理无机磷与有机磷库各组分含量和 NPK 处理基本相似,即与 NPK 相比,秸秆还田对土壤磷库总量与组分形态影响并不明显,这与化肥配施牛粪明显提高无机磷库、有机磷库及总磷含量明显不同。这除了牛粪带入的磷素总量明显高于秸秆外,可能还与二者有机物料组分差异有关。有研究表明,有机物料磷含量和碳/磷比(C/P)对水溶态磷的含量起关键作用[29],当 C/P 大于 200 时,其在腐解过程中不仅不能释放有效磷,而且还要从土壤中吸收有效磷,从而降低土壤有效磷水平[30],当 C/P 小于 200 时才会有磷的净释放。在本试验中虽然两种有机无机肥配施模式均有外源磷素输入,但配施牛粪中磷输入量高于秸秆(表 3),且牛粪的 C/P 比为 59.5,而稻秆 C/P 为 227.3,因此相对秸秆还田来说,增施牛粪对于土壤中的磷素贡献(包括总磷量与有效性磷)大于秸秆还田。但我们不能认为秸秆还田没有优越性,从土壤有效性磷演变来看,NPKS 处理的土壤有效磷仍然高于 NPK 处理,另外,由于秸秆的输入可带入部分磷素,并提高土壤有机质含量,改善土壤结构,促

进根系生长,从而增加作物根系对土壤磷素的吸收利用,提高作物产量。但在秸秆还田过程中,应考虑到 C/N、C/P 过大的问题,在化肥的施用时应注意调节 C/N 和 C/P 所需的额外用量。同时应该指出,与 NPK 处理相比,增加秸秆后水稻产量显著增加,吸收的磷量也显著增加,此时,两个处理土壤的磷平衡状况类似,即秸秆还田带入的磷量基本上由作物增产携出,这也反映出秸秆磷的有效性较高。综上说明,配施牛粪的磷带入总量与有效性均高于秸秆,而相对 NPK 而言,配施秸秆处理的磷素同样得到高效利用,但对土壤磷库增量贡献不大。

另有研究认为,施用畜禽粪便虽然可减少土壤对磷的固定,但会促进可溶性磷酸根向土壤深层迁移,造成土壤磷素的流失[31],而秸秆和化学磷肥配施可降低土壤磷素流失[32],所以秸秆就地还田的配施方式仍然是有机无机肥配施的重要模式之一。但化肥配施秸秆、化肥配施牛粪最佳施用量及最佳还田方式还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] 郑春荣,陈怀满,周东美,等. 土壤中积累态磷的化学耗竭[J]. 应用生态学报,2002,13(5):559-563.
Zheng C R, Chen H M, Zhou D M *et al*. Chemical depletion of cumulative phosphorus in soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 559-563.

[2] 刘建玲,张福锁,杨奋翻. 北方耕地和蔬菜保护地土壤磷素状况研究[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):179-186.
Liu J L, Zhang F S, Yang F H. Fractions of phosphorus in cultivated and vegetable soils in northern china [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 179-186.

[3] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 248-256.

[4] 曾希柏,李菊梅,徐明岗,等. 红壤旱地的肥力现状及施肥和利用方式的影响[J]. 土壤通报,2006,37 (3):434-437.
Zeng X B, Li J M, Xu M G *et al*. Fertility of red upland soil and effects of fertilization and utilization on its fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37 (3): 434-43.

[5] 秦胜金,刘景双,王国平,等. 三江平原湿地土壤磷形态转化动态[J]. 生态学报,2007,27 (9):3844 - 3851.
Qin S J, Liu J S, Wang G P *et al*. Seasonal changes of soil phosphorus fractions under Calamagrostis angustifolia wetlands in Sanjiang Plain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3844-3851.

[6] Yang C M, Yang L Z, Lee J H. Organic phosphorus fractions in organically amended paddy soils in continuously and intermittently flooded conditions[J]. Journal of Environment Quality, 2006, 35 (4): 1142-1150.

[7] 王伯仁,李东初,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.

[8] 黄庆海,赖涛,吴强,等. 长期施肥对红壤性水稻土有机磷组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(1):63-66.
Huang Q H, Lai T, Wu Q *et al*. Effect of long-term fertilization on the forms organic phosphorus in paddy soil derived from red earth [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(1): 63-66.

[9] 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[J]. 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[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(1): 102-108.

[10] Darilek J L, Huang B, Li D C. Effect of l and use conversion from rice paddies to vegetable fields on soil phosphorus fractions [J]. Pedosphere, 2010, 20 (2): 137-145.

[11] Vu D T, Tang C, Arm strong R D. Changes an d availability of P fraction s following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate[J]. Plant and Soil, 2008, 304 (1): 21-33.

[12] 周宝库,张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11 (2):143-147.
Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 143-147.

[13] 卢志红,嵇素霞,张美良,等. 长期定位施肥对水稻土磷素形态影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1065-1071.
Lu Z H, Ji S X, Zhang M L *et al*. Influence of long-term localized fertilization on phosphorus forms in paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 (5): 1065-1071.

[14] 谢林花,吕家珑,张一平,等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响. Ⅱ无机磷和有机磷[J]. 应用生态学报,2004,15 (5):790-794.
Xie L H, Lü J L, Zhang Y P *et al*. Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil Ⅱ. Inorganic and organic phosphorus[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 15(5): 790-794.

[15] 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.

[16] 林诚,王飞,李清华,等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活

性及的影响[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.

[17] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.
Gu Y C, Jiang B F. Measurement method of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. Soils, 1990, 22(2): 101-102.

[18] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125: 95-101.

[19] 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 Technology Press, 2000.

[20] Magid J. Vegetation effects on phosphorous fractions in set-aside soils[J]. Plant and Soil, 1993, 149: 111-119.

[21] 向万胜, 黄敏, 李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 663-670.
Xiang W S, Huang M, Li X Y. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 663-670.

[22] 刘建玲, 张凤华. 土壤磷素化学行为及影响因素研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 36-45.
Liu J L, Zhang F H. The progress of phosphorous transfrmation in soil and its influencing factors[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(3): 36-45.

[23] 李和生, 王林权, 赵春生. 小麦根际磷酸酶活性与有机磷之关系[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(2): 47-50.
Li H S, Wang L Q, Zhao C S. Relationship between phosphatase activity and organic phosphorus in wheat rhizosphere[J]. Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-Occidentalis, 1997, 25(2): 47-50.

[24] 张亚丽, 沈其荣, 曹翠玉. 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(3): 59-63.
Zhang Y L, Shen Q R, Cao C Y. Effect of organic manure on soil organic phosphorus fractions and their bio-availability[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1998, 21(3): 59-63.

[25] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 283-290.
Wang F, Lin C, Li Q H *et al*. Effects of long-term fertilization on rice grain qualities and soil fertility factors in yellow paddy fields of southern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 283-290.

[26] 陈安磊, 王荣凯, 谢小立. 施肥制度与养分循环对稻田土壤微生物生物量碳氮磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1094-1099.
Chen A L, Wang K R, Xie X L. Effect of fertilization systems and nutrient recycling on microbial biomass C、N and P in a reddish paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6): 1094-1099.

[27] 陈安磊, 王凯荣, 谢小立, 等. 不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2733-2738.
Chen A L, Wang K R, Xie X L *et al*. Responses of microbial biomass P to the changes of organic C and P in paddy soils under different fertilization systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2733-2738.

[28] Molla M A Z, Chowdhury A A, Islam A *et al*. Microbial mineralization of organic phosphate in soil[J]. Plant and Soil, 1984, 78: 393-399.

[29] 尹逊霄, 华珞, 张振贤, 等. 土壤中磷素的有效性及其循环转化机制研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 95-101.
Yin X X, Hua L, Zhang Z X *et al*. Study on the effectiveness of phosphorus and mechanism of its circle in soil[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2005, 26(3): 95-101.

[30] 王艳玲, 何园球, 周晓冬. 两种培肥途径下红壤磷素储供能力的动态变化[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 639-643.
Wang Y L, He Y Q, Zhou X D. Dynamic changes of phosphorus fertility supply and reserves in red soils under two fertilization approaches[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 639-643.

[31] Koopmans G F, Chardon W J, McDowell R W. Phosphorus movement and speciation in a sandy soil profile after long-term animal manure applications[J]. Journal of Environment Quality 2007, 36: 305-315.

[32] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 434-439.
Li X P, Shi X J. Dynamic characteristics of phosphorus in purple paddy soil and Its environmental impact[J]. Environment Science, 2008, 29(2): 434-439.