植物营养与肥料学报 2010,16(3):634-641
Plant Nutrition and Fertilizer Science

湖南稻田土壤有机磷组分的施磷效应、季节变化及生物有效性研究

冯跃华[1,2], 张杨珠[2*], 黄运湘[2]
(1 贵州大学农学院,贵州贵阳 550025; 2 湖南农业大学资源环境学院,湖南长沙 410128)

摘要: 为探明施用磷肥对湖南稻田土壤有机磷组分的影响、有机磷组分的季节变化及其有效性,以湖南省5种不同母质发育的稻田土壤为供试土壤,通过盆栽试验,研究了稻田土壤有机磷组分的施磷效应、在植稻期间的动态变化及其生物有效性。结果表明,施用磷肥可以使土壤中活性有机磷得到较大的增加,而对活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷影响较小。在施磷和不施磷条件下,土壤有机磷的变化主要是中活性有机磷,而其余3种形态有机磷在水稻生长期间几乎保持不变。不管土壤是否施用磷肥,土壤有效磷与有机磷总量总是呈极显著相关,说明土壤有机磷的确是植物可以利用的有效磷源; 在早稻生长期间土壤各形态有机磷的生物有效性的大小顺序为: 中活性有机磷 > 中稳性有机磷 > 高稳性有机磷 > 活性有机磷; 在晚稻生长期间土壤各形态有机磷的生物有效性一般随水稻生育期不同而不同。

关键词: 水稻土; 有机磷组分; 磷肥; 季节变化; 生物有效性
中图分类号: S153.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)03-0634-08

Effects of phosphatezation on organic phosphorus fractions and their seasonal variations and bioavailabilities of paddy soils in Hunan Province

FENG Yue-hua[1,2], ZHANG Yang-zhu[2*], HUANG Yun-xiang[2]
(*1 College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;*
2 College of Resource and Environment Sciences, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Effects of phosphate fertilizer applications on soil organic phosphorus fractions and their seasonal variations and bioavailability were studied using the pot experiments. Five paddy soils derived from different parent materials in Hunan Province were used as test soils for the pot experiment. The results show that soil moderately labile organic phosphorus contents are increased under the P fertilizer application, while the fertilization has less effects soil labile organic phosphorus, moderately resistant organic phosphorus and highly resistant organic phosphorus. Soil organic P variation is mainly caused by the variation of moderately labile organic P under both P - unfertilization and P - fertilization, while the labile organic phosphorus and resistant organic phosphorus are not changed during rice growth and development stages. Available P was closely correlated with organic P in both P - unfertilized and P - fertilized soils, that is to say, the importance of organic P as a source of available P in soil were demonstrated. The bioavailability of soil organic P fractions during the growth periods of early rice in the pot experiment are in order of moderately labile organic P > moderately resistant organic P > highly resistant organic P > labile organic P, while the order for late rice is dependent on the growth and development stages of late rice.

Key words: paddy soil; organic phosphorus fractions; phosphate fertilizer; seasonal variation; bioavailability

收稿日期: 2009-05-17　　**接受日期**: 2009-08-11
基金项目: 贵州省科学技术基金项目[黔科合J字(2007)2069]; 贵州大学人才引进科研基金项目资助。
作者简介: 冯跃华(1969—),男,湖北省仙桃市人,博士,副教授,主要从事水稻栽培生理生态及土壤科学研究。E-mail: fengyuehua2006@126.com
* 通讯作者 E-mail: zhangyangzhu2006@163.com

土壤有机磷是土壤磷素的一个重要组成部分,其经过矿化分解可以转化为无机态磷,供给植物吸收利用[1]。1978 年 Bowman 和 Cole[2]首先提出了有机磷的分组方法,迄今该分组方法仍不失为土壤有机磷分组的较系统的化学鉴别法。该法把土壤有机磷分为活性有机磷、中度活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷 4 个组分。许多学者对土壤有机磷组分的施磷效应、有效性均做了一定的研究,但结果不太一致。王旭东等[3]研究指出,单施磷肥或氮、磷、钾配合施用,并没有增加土壤有机磷含量,有机磷各组分也基本上无变化。鲁如坤等[4]利用 Hedley 体系研究了长期施用磷肥对土壤磷素形态的影响指出,磷肥施用对土壤有机磷形态的影响因土而异,磷肥施入红壤旱地后,对各形态有机磷的影响较小;而施用磷肥对红壤性水稻土和石灰性潮土有机磷组分的影响是前者有机磷形态总含量减少,而后者则相反。Wier 和 Black[5]指出,田间条件下添加无机磷肥,对有机磷总量没有明显的影响或使有机磷含量增加;刘方等[6]对黄壤的研究表明,大田烤烟地和盆栽试验土壤中,长期施用磷肥使土壤有机磷的含量及比例下降。Reddy 等[7]在大豆和小麦轮作的土壤上的研究表明,单施磷肥,能使土壤活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷增加;黄庆海等[8]在红壤水稻土上的研究表明,长期施用磷肥(P 和 NPK),中稳性和中活性有机磷增加,而活性有机磷减少。张亚丽等[9]研究认为,土壤活性和中活性有机磷是小麦的有效磷源;尹金来等[10]研究认为,活性、中活性和中稳性有机磷对黑麦草吸磷总量有一定的间接贡献,其排序为:活性有机磷 > 中活性有机磷 > 中稳性有机磷。以往,涉及稻田土壤有机磷组分施磷效应、有效性研究并不多[11-14]。为此,本研究以湖南省几种不同母质发育的稻田土壤为供试土壤,以水稻为供试作物,研究施用磷肥对湖南稻田土壤有机磷组分的影响、有机磷组分的季节变化及有效性,为评价稻田土壤的供磷能力和制定水稻施磷技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

盆栽土壤分别为采自醴陵市紫色板页岩风化物发育的紫泥田,醴陵市由河流沉积物发育的河沙泥,湘阴县由河湖沉积物发育的潮沙泥,长沙县由板页岩风化物发育的黄泥田和湖南农业大学试验基地由第四纪红土发育的红黄泥。供试早稻品种为常规稻湘早籼 24 号,晚稻品种为威优 198。供试土壤基本性状见表 1。

表 1　供试土壤的基本情况和基本性质

Table 1　Some basic properties of the tested soils

土壤 Soils	成土母质 Parent material	采样地点 Sites	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	有机磷 Organic P (mg/kg)
PCS	WPPS	醴陵 Liling	5.72	58.8	3.22	439.5	6.0	263.1
ASS	RD	醴陵 Liling	5.61	32.2	2.07	569.3	15.0	228.3
NAS	RLMD	湘阴 Xiangying	5.52	34.8	1.78	457.6	9.9	186.2
YCS	WPSS	长沙 Changsha	5.32	30.2	2.19	349.4	5.8	165.1
RYS	QRC	长沙 Changsha	5.96	17.2	1.22	508.2	22.7	154.1

注(Note):PCS—紫泥田 Purple clayey soil; ASS—河沙泥 Alluvial sandy soil; NAS—潮沙泥 Newly alluvial sandy soil; YCS—黄泥田 Yellow clayey soil; RYS—红黄泥 Reddish yellow soil. 下同 The same symbols are used for other tables and figures.

WPPS—紫色板岩风化物 Weathering product of purple slate; RD—河流沉积物 River deposit; RLMD—河湖沉积物 River and lake mixed deposit; WPSS—板页岩风化物 Weathering product of slate and shale; QRC—第四纪红色粘土 Quaternary red clay.

1.2　试验方法

试验于 1999 年在湖南农业大学试验基地进行。试验用盆钵为直径 18.5 cm、高 20 cm 的瓷钵。每盆装土 5 kg,供试土壤分别为紫泥田(PCS)、河沙泥(ASS)、潮沙泥(NAS)、黄泥田(YCS)、红黄泥(RYS)。试验设 2 种处理:不施磷肥(-P);施磷肥(+P),早稻和晚稻各施用 1 次,施用量均为 P_2O_5 0.2 g/kg。氮、钾肥的用量所有处理相同,N、K_2O 均为 0.3 g/kg 作基肥一次施入。氮、磷和钾肥分别采用尿素、过磷酸钙和氯化钾。各处理重复 12 次,随机排列。其中 3 次重复供不移栽水稻取样用,3 次重复供最高分蘖期采样用,3 次重复供齐穗期采样用,3 次重复供收

获时测产用。早稻试验取样日期为4月28日(移栽前),5月23日(最高分蘖期),6月22日(齐穗期),7月22日(成熟期);晚稻试验取样日期为7月24日(移栽前),8月18日(最高分蘖期),9月16日(齐穗期),11月1日(成熟期),在每个取样日期分别同时取土样和植株样品。

1.3 测定项目与方法

有机磷形态分组:用Bowman和Cole方法[2]。该分级体系采用具有不同溶解特性和提取能力的提取剂,按一定顺序提取土壤有机磷,将土壤有机磷分为活性有机磷(LOP,被0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提的有机磷);中活性有机磷(MLOP,由溶于1.0 mol/L H_2SO_4 的有机磷和溶于0.5 mol/L NaOH的无机磷组成);中稳性有机磷(MROP,富里酸磷)和高稳性有机磷(HROP,胡敏酸磷)4个部分。

采用土壤农业化学常规分析方法[15]:土壤有机质用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法,土壤有效磷用Olsen法,土壤全磷用 H_2SO_4-$HClO_4$ 法,土壤有机磷总量用灼烧—保温测定法,植株全磷用 H_2SO_4-H_2O_2 消化法测定。

所有试验数据采用SAS9.0进行分析。

2 结果与分析

2.1 磷肥施用对土壤各形态有机磷的影响

2.1.1 磷肥施用对土壤活性有机磷的影响 由图1可知,无论早稻、晚稻,土壤活性有机磷在施磷后,有升有降,但变幅均较小。如紫泥田在不施磷时,早稻移栽前、最高分蘖期、齐穗期和成熟期的土壤活性有机磷含量分别为10.4、6.2、6.1、7.6 mg/kg,施磷后,早稻相应生育期的土壤活性有机磷含量分别为3.9、6.4、7.2、7.0 mg/kg,其中移栽前和成熟期在施磷后土壤活性有机磷分别比不施磷减少了62.5%、7.9%,而最高分蘖期、齐穗期则分别增加了3.2%、18.0%。

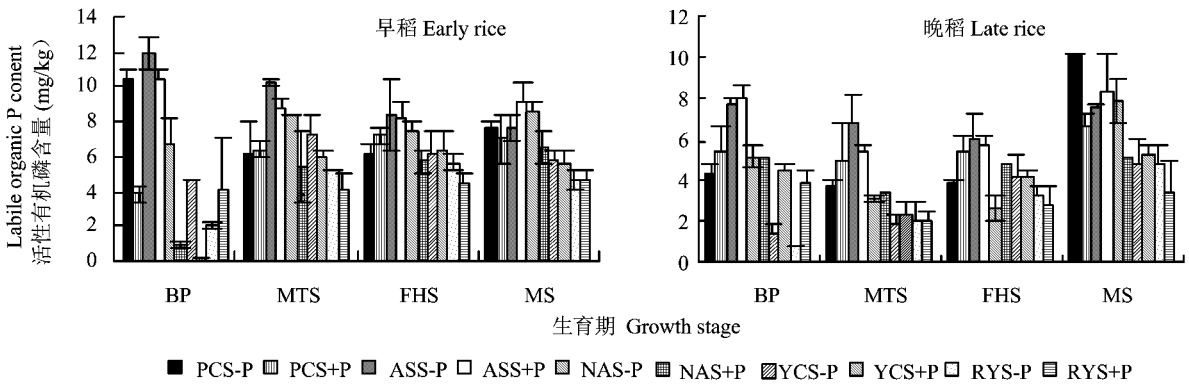

图1 磷肥施用对土壤活性有机磷的影响

Fig.1 Effects of P fertilization on soil labile organic P

[注(Note):BP—移栽前 Before transplanting;MTS—最高分蘖期 Maximum tillering stage;FHS—齐穗期 Fill heading stage;MS—成熟期 Mature stage. 下同 The same symbols was used for other tables and figures.]

2.1.2 磷肥施用对土壤中活性有机磷的影响 表2看出,除河沙泥土壤在早稻移栽前、齐穗期、成熟期,红黄泥土壤在早稻成熟期、晚稻移栽前,施磷后中活性有机磷有所减少外,其余土壤在水稻生长期间,中活性有机磷均有不同程度的增加。如黄泥田在不施磷时,早稻移栽前、最高分蘖期、齐穗期、成熟期的中活有机磷含量分别为98.7、108.3、100.0、109.3 mg/kg,施磷后,早稻相应生育期的中活性有机磷含量分别增加到128.1、153.3、125.2、118.9 mg/kg,比不施磷分别增加了29.8%、41.7%、25.2%、8.8%。

2.1.3 磷肥施用对土壤中稳性有机磷的影响 图2可知,对早稻土壤而言,除黄泥田,红黄泥在移栽前中稳性有机磷在施磷后有所增加外,其余土壤在施磷后对中稳性有机磷影响很小。对晚稻土壤而言,除紫泥田、潮沙泥成熟期,黄泥田最高分蘖期中稳性有机磷在施磷后有所增加和黄泥田移栽前中稳性有机磷有所减少外,其余土壤在施磷后对中稳性有机磷影响均很小。

2.1.4 磷肥施用对土壤高稳性有机磷的影响 磷肥施用对高稳性有机磷有一定影响,但除少数几种土壤在不同水稻生长时期(紫泥田、河沙泥、潮沙泥土壤最高在分蘖期,河沙泥、黄泥田、红黄泥土壤在齐穗期,河沙泥土壤在成熟期)在施磷后影响很大外,其余的一般影响很小(表3)。

表 2　磷肥施用对早、晚稻不同生育期土壤中活性有机磷含量的影响(mg/kg)

Table 2　Effects of P fertilization on soil moderately labile organic P

土壤 Soil	处理 Treat.	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
		移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
PCS	– P	83.0 ± 0.5 a	85.5 ± 1.7 a	63.2 ± 9.0 b	79.9 ± 10.9 a	55.2 ± 5.4 b	81.5 ± 1.7 a	82.2 ± 0.6 b	102.0 ± 5.1 a
	+ P	122.4 ± 14.8 a	143.6 ± 14.7 a	184.8 ± 9.6 a	105.4 ± 20.6 a	127.0 ± 1.8 a	125.6 ± 28.6 a	217.9 ± 26.3 a	121.6 ± 1.5 a
ASS	– P	162.1 ± 16.4 a	197.4 ± 3.2 a	190.7 ± 4.5 a	192.4 ± 13.6 a	129.2 ± 24.6 a	244.3 ± 25.9 a	124.3 ± 24.2 a	136.9 ± 13.3 a
	+ P	141.7 ± 5.0 a	217.3 ± 24.1 a	161.1 ± 19.4 a	154.8 ± 42.1 a	225.7 ± 9.8 a	342.2 ± 12.2 a	268.0 ± 30.6 a	166.1 ± 45.7 a
NAS	– P	87.9 ± 0.6 a	97.5 ± 2.5 a	68.2 ± 7.4 a	113.5 ± 23.5 a	67.9 ± 0.4 b	99.3 ± 3.5 a	92.8 ± 3.1 a	72.7 ± 20.0 b
	+ P	113.3 ± 0.7 b	125.2 ± 6.9 a	165.8 ± 46.5 a	129.2 ± 23.1 a	235.3 ± 1.4 a	233.4 ± 31.7 a	155.2 ± 21.8 a	259.8 ± 19.1 a
YCS	– P	98.7 ± 0.6 a	108.3 ± 4.6 a	100.0 ± 10.3 a	109.3 ± 9.3 a	115.9 ± 23.1 a	119.2 ± 0.9 b	110.8 ± 2.9 a	91.4 ± 1.8 a
	+ P	128.1 ± 6.3 a	153.4 ± 12.1 a	125.2 ± 2.6 a	118.9 ± 8.9 a	253.8 ± 30.4 a	210.8 ± 7.9 a	157.2 ± 9.8 a	140.2 ± 23.6 a
RYS	– P	165.6 ± 7.5 a	177.8 ± 14.5 b	212.7 ± 4.5 a	217.9 ± 5.2 a	273.3 ± 1.1 a	124.3 ± 8.9 a	178.0 ± 27.9 a	164.4 ± 1.5 a
	+ P	213.1 ± 25.0 a	268.4 ± 1.3 a	218.1 ± 38.9 a	171.4 ± 19.6 a	258.9 ± 27.7 a	278.5 ± 2.9 a	226.3 ± 20.0 a	256.1 ± 27.6 a

注(Note):差异显著性分析分别在每种土壤施磷和不施磷条件下进行 The difference significant analysis was conducted on the condition of the P – unfertilized and P – fertilized treatments for every soil, respectively. 同一列不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同 Means in a row followed by the same letters are not significant at 0.05 level. The same symbol was used for Table 3 and Table 4.

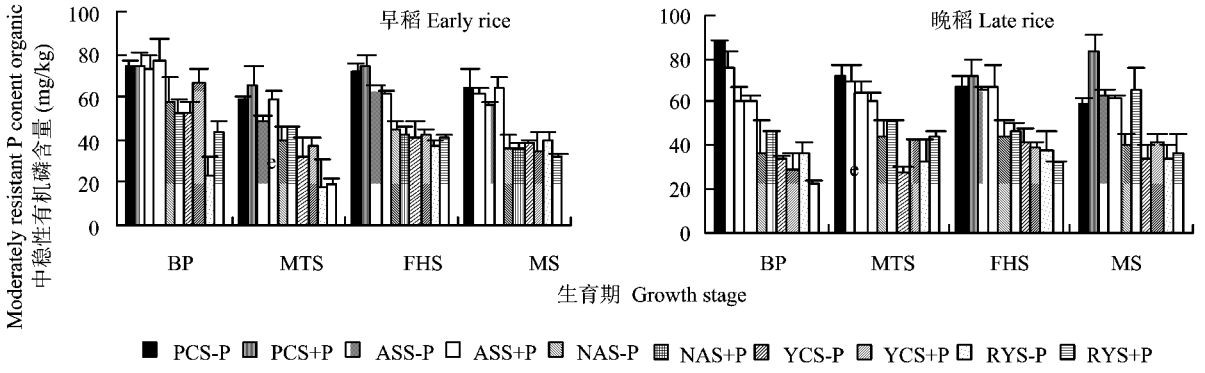

图 2　磷肥施用对土壤中稳性有机磷的影响

Fig.2　Effects of P fertilization on soil moderately resistant organics P content

表 3　磷肥施用对早、晚稻不同生育期土壤高稳性有机磷含量的影响(mg/kg)

Table 3　Effects of P fertilization on soil highly resistant labile organic P

土壤 Soil	处理 Treat.	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
		移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
PCS	– P	39.9 ± 4.5 a	55.7 ± 7.3 a	46.6 ± 0.5 a	47.3 ± 6.0 a	30.7 ± 8.5 a	34.3 ± 17.3 a	26.3 ± 16.9 a	41.8 ± 0.1 a
	+ P	40.0 ± 3.5 a	28.7 ± 6.1 a	39.2 ± 6.1 a	59.0 ± 13.6 a	34.1 ± 5.6 a	44.6 ± 17.3 a	33.3 ± 9.0 a	75.6 ± 29.8 a
ASS	– P	26.6 ± 1.6 a	32.3 ± 0.5 a	47.8 ± 9.7 a	50.2 ± 14.0 a	30.3 ± 0.4 a	29.6 ± 0.01 a	36.6 ± 1.5 a	32.1 ± 3.8 a
	+ P	25.7 ± 11.5 a	10.6 ± 0.5 b	46.8 ± 0.5 a	27.2 ± 7.1 a	31.9 ± 1.0 a	22.9 ± 4.8 a	20.0 ± 14.6 a	46.4 ± 22.0 a
NAS	– P	15.8 ± 14.1 a	23.3 ± 3.0 a	50.3 ± 5.0 a	44.9 ± 8.6 a	43.9 ± 22.0 a	26.8 ± 3.8 a	22.7 ± 8.0 a	44.2 ± 2.4 a
	+ P	25.4 ± 7.6 a	8.9 ± 1.0 b	40.8 ± 0.6 a	40.3 ± 1.1 a	34.7 ± 9.6 a	7.5 ± 2.1 b	7.8 ± 5.5 a	1.9 ± 13.7 b
YCS	– P	26.9 ± 5.0 a	28.0 ± 14.9 a	46.8 ± 2.4 a	30.3 ± 3.0 a	39.8 ± 0.5 a	31.8 ± 6.6 a	11.7 ± 0.8 a	38.0 ± 16.6 a
	+ P	11.3 ± 9.5 a	15.1 ± 3.2 a	33.2 ± 2.0 a	25.7 ± 11.6 a	39.6 ± 13.2 a	21.1 ± 8.8 a	24.5 ± 5.1 a	25.8 ± 10.3 a
RYS	– P	25.0 ± 7.5 a	15.9 ± 17.4 a	18.2 ± 2.6 b	1.0 ± 1.0 b	20.3 ± 5.1 a	11.8 ± 10.0 a	10.0 ± 1.7 a	13.0 ± 27.8 a
	+ P	14.6 ± 2.0 a	11.8 ± 2.1 b	75.1 ± 8.6 a	3.6 ± 0.5 a	22.1 ± 0.5 a	8.1 ± 0.1 a	2.4 ± 0.01 b	16.5 ± 3.0 a

2.1.5 磷肥施用对土壤有机磷总量的影响 表 4 看出,除河沙泥土壤在早稻移栽前、齐穗期、成熟期,红黄泥土壤在早稻成熟期、晚稻移栽前,施磷后有机磷总量有所减少外,其余土壤在水稻生长期间,有机磷总量均有不同程度的增加。如潮沙泥在不施磷时,早稻移栽前、最高分蘖期、齐穗期、成熟期的有机磷总量分别为 168.2、167.4、170.6、203.4 mg/kg,施磷后,早稻相应生育期的有机磷总量分别增加到 191.7、186.0、254.4、210.3 mg/kg,比不施磷分别增加了 14.0%、11.1%、49.1%、3.4%。

表 4 磷肥施用对早、晚稻不同生育期土壤有机磷总量的影响(mg/kg)

Table 4 Effects of P fertilization on soil total organic P

土壤 Soil	处理 Treat.	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
		移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS	移栽前 BP	最高分蘖期 MTS	齐穗期 FHS	成熟期 MS
PCS	-P	207.9±1.8 a	206.8±10.5 a	187.1±3.3 b	198.9±13.6 a	179.4±13.3 b	195.0±13.3 a	180.1±12.3 b	213.3±7.2 a
	+P	240.7±12.8 a	244.2±12.4 a	305.5±9.3 a	233.4±7.7 a	242.0±5.2 a	245.8±20.6 a	329.3±27.5 a	287.1±21.6 a
ASS	-P	273.2±7.3 a	289.2±1.3 a	311.8±7.3 a	307.0±2.0 a	227.4±31.4 a	344.7±32.8 a	232.3±22.5 a	239.8±19.1 a
	+P	254.0±4.1 a	295.9±19.5 a	277.4±18.4 a	255.6±38.4 a	326.2±9.3 a	431.5±4.3 a	361.8±35.7 a	282.4±67.7 a
NAS	-P	168.1±4.6 b	168.5±1.7 a	170.8±8.0 a	203.3±27.2 a	153.1±5.3 b	173.2±0.9 a	161.9±2.6 a	159.6±16.5 b
	+P	191.7±0.4 a	186.0±10.0 a	254.6±41.9 a	211.7±24.1 a	296.6±11.1 a	297.5±34.4 a	214.3±22.3 a	332.1±14.9 a
YCS	-P	183.3±0.6 b	175.7±9.2 a	193.7±3.3 a	183.7±5.5 a	191.7±25.1 a	180.1±1.0 b	168.5±9.9 a	168.6±12.6 a
	+P	206.4±3.5 a	211.7±19.0 a	206.8±3.1 a	184.9±7.2 a	326.7±25.0 a	277.6±0.2 a	225.1±12.0 a	187.5±18.1 a
RYS	-P	215.3±5.7 a	217.4±9.9 b	261.7±5.5 a	247.8±8.2 a	331.0±1.8 a	171.8±9.4 b	229.7±21.5 a	215.5±18.9 a
	+P	275.6±24.6 a	303.8±0.2 a	338.6±30.8 a	211.5±21.7 a	306.9±29.7 a	332.8±5.0 a	265.3±21.6 a	313.0±17.2 a

2.2 土壤各形态有机磷的动态变化规律

图 3 可知,紫泥田、河沙泥、潮沙泥、黄泥田和红黄泥 5 种土壤中活性有机磷,中稳性有机磷,高稳性有机磷在水稻整个生育过程中,变化均很小,几乎保持常数。

中活性有机磷,对没有施用磷肥的土壤而言,其含量在水稻生长期间,因土壤的不同,变幅有差异。依变幅的大小,可以把中活性有机磷含量的变化模式分为两类:一类为土壤中活性有机磷含量在水稻的整个生育期间基本保持不变,如黄泥田、紫泥田的中活性有机磷变化就属于这样的模式,其中黄泥田中活性有机磷含量在 91.9~119.1 mg/kg 之间变化,最大变幅仅为 27.2 mg/kg;另一类为土壤中活性有机磷含量在水稻整个生育期间,有一定大小的变化,如河沙泥、潮沙泥和红黄泥就属于这样的模式,其中河沙泥中活性有机磷含量在 124.3~244.2 mg/kg 之间变化,变幅达 119.9 mg/kg。说明在不施磷肥的条件下,河沙泥、潮沙泥、红黄泥的中活性有机磷含量在整个水稻生育期间仍有一定的变化。

对施用磷肥的土壤而言,中活性有机磷含量在水稻整个生育期间均有一定大小的变化,并且土壤不同,中活性有机磷的变化也不一致。对紫泥田而言,无论早稻或晚稻,中活性有机磷含量均在齐穗期达到最高值;河沙泥,中活性有机磷含量在晚稻最高分蘖期达到最高值,尔后又下降;潮沙泥的中活性有机磷含量在晚稻成熟期达到最高值,并且中活性有机磷的变化呈现“锯齿状”,说明中活性有机磷的矿化和形成总是不断进行的;黄泥田,中活性有机磷含量在晚稻移栽前达到最高值,尔后又下降;而红黄泥的中活性有机磷变化情况和河沙泥类似。由 5 种土壤在施磷肥后中活性有机磷的变化可知,中活性有机磷总是处在不断变动中,并不因为磷肥的加入而对它的形成和矿化有阻抑作用。

2.3 土壤各形态有机磷的生物有效性

2.3.1 土壤有机磷总量与有效磷之间的关系 对不施磷处理和施磷处理分别进行了土壤有效磷和土壤有机磷总量之间的相关分析,结果表明,在土壤不施磷条件下,有效磷(Y)与有机磷总量(X)的回归方程为:

$y = 0.07x - 3.1996 (r = 0.4893^{**}, n = 40)$。

施磷条件下,有效磷(Y)与有机磷总量(X)的回归方程为:

$y = 0.114x - 6.5654 (r = 0.5857^{**}, n = 40)$。

说明在施磷与不施磷条件下,土壤有效磷与有机磷总量之间呈极显著的相关关系。因此,不管土壤是否施用磷肥,土壤有机磷总是植物可以利用的有效磷源。

2.3.2 水稻生长期间土壤各形态有机磷的生物有

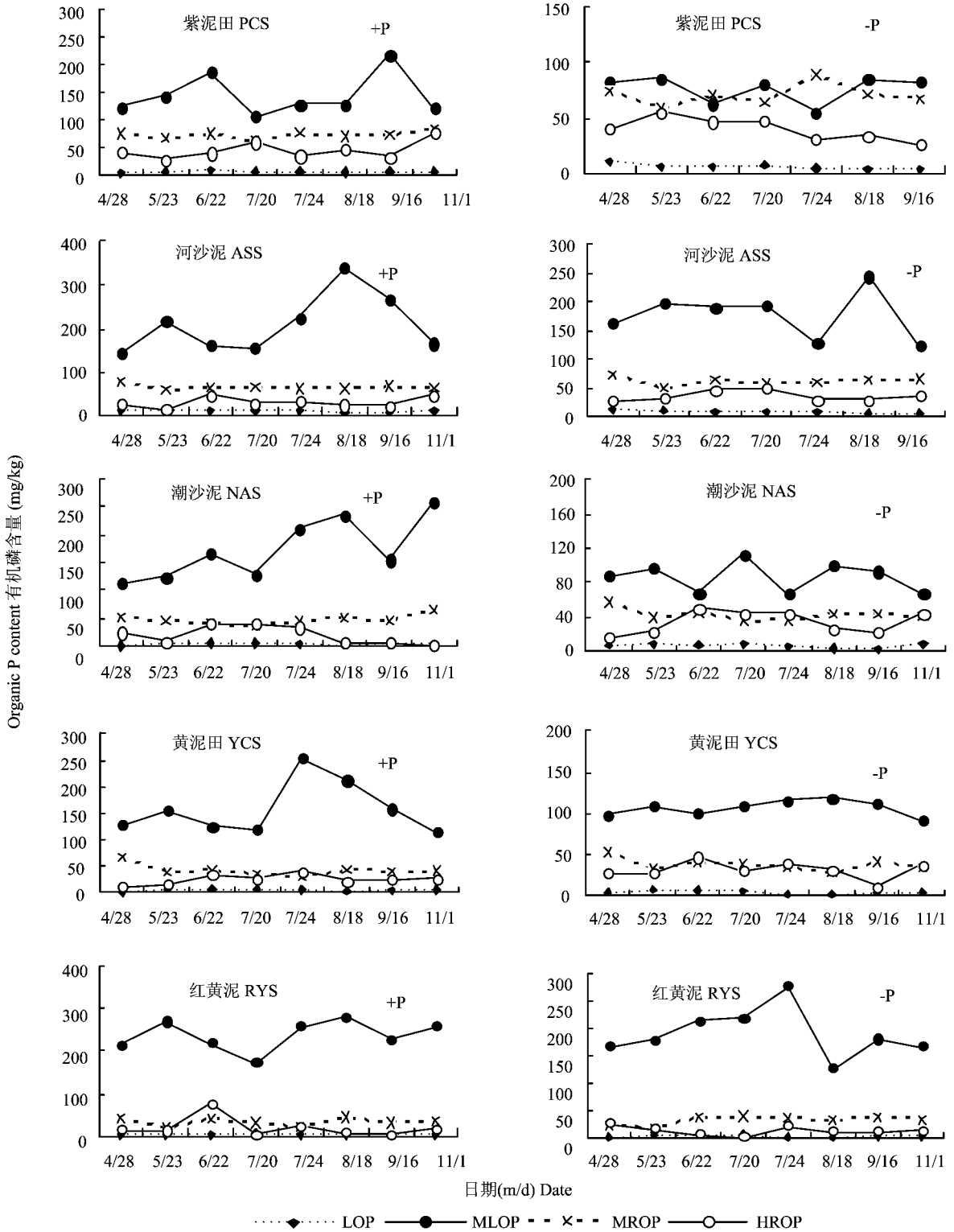

图 3　水稻生长期间土壤各形态有机磷含量的季节性变化

Fig.3　Seasonal changes of the contents of soil various organic P fractions during the growth period of double cropping rices

效性　在确定土壤各形态有机磷的生物有效性时,可以采用通径系数这一指标,它可以描述土壤各形态有机磷的直接作用。

对水稻吸磷量与土壤各形态有机磷之间进行通径分析(表 5)可看出,在早稻各生育时期,除成熟期外,在早稻最高分蘖期和齐穗期,各形态有机磷对吸磷量的直接通径系数大小顺序为: MLOP > MROP > HROP > LOP。直接通径系数愈大,说明此种形态有

表5 土壤有机磷各组分对吸磷量的直接通径系数和间接通径系数

Table 5 Path coefficients of organic P fractions to P-absorbed amount in soil of early rice

生育期 Growth stage	通径系数 Path coefficient	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
		LOP	MLOP	MROP	HROP	LOP	MLOP	MROP	HROP
最高分蘖期 MTS	LOP	0.0983△	-0.0754	0.2510	0.0238	-1.1487△	0.1403	0.8224	-0.0045
	MLOP	-0.0090	0.8193△	-0.1810	-0.0573	-0.3834	0.4203△	0.0332	0.0122
	MROP	0.0460	-0.2766	0.5362△	0.0467	-0.9395	0.0139	1.0055△	-0.0096
	HROP	0.0210	-0.4212	0.2247	0.1115△	-0.2449	-0.2459	0.4615	-0.0209△
齐穗期 FHS	LOP	-0.1529△	-0.0692	0.1413	-0.0046	-0.0054△	0.1292	-0.1608	0.0778
	MLOP	0.0233	0.4553△	-0.0214	-0.0103	-0.0015	0.4558△	-0.0182	-0.0275
	MROP	-0.0873	-0.0393	0.2475△	0.0163	-0.0041	0.0391	-0.2116△	0.1003
	HROP	0.0072	-0.0476	0.0408	0.0988△	-0.0032	-0.0946	-0.1604	0.1323△
成熟期 MS	LOP	0.6198△	-0.2040	-0.3908	0.0215	0.3290△	-0.3195	-0.2033	0.1448
	MLOP	-0.1974	0.6405△	0.0956	-0.0200	-0.1815	0.5791△	-0.0057	-0.1769
	MROP	0.3901	-0.0986	-0.6209△	0.0176	0.1652	0.0081	-0.4048△	0.1535
	HROP	0.4059	-0.3896	-0.3337	0.0328△	0.1682	-0.3618	-0.2195	0.2832△

注(Note):"△"表示直接通径系数,其余为间接通径系数 Denotes direct path coefficients, other denote indirect path coefficients. LOP—活性有机磷 Labile organic P; MLOP—中活性有机磷 Moderately labile organic P; MROP—中稳性有机磷 Moderately resistant organic P; HROP—高稳性有机磷 Highly resistant organic P.

机磷对水稻的生物有效性愈大。所以,在早稻生长期间土壤各形态有机磷中,中活性有机磷的生物有效性最大,其次分别是中稳性有机磷,高稳性有机磷,活性有机磷。

表5还看出,在晚稻各生育时期,除晚稻最高分蘖期外,也以中活性有机磷对吸磷量的直接通径系数最大,晚稻最高分蘖期则以中稳性有机磷对吸磷量的直接通径系数最大,这可能与此时期正处于气温最高时期,促进了中稳性有机磷的矿化分解,从而提高了其生物有效性。其中,最高分蘖期 LOP 和 HROP 对吸磷量的直接通径系数、齐穗期 LOP 和 MROP 对吸磷量的直接通径系数以及成熟期 MROP 对吸磷量的直接通径系数均为负值,说明在上述时期这些形态的有机磷对水稻吸磷量有负面作用。

综上所述,在各形态有机磷中,均以中活性有机磷的生物有效性最大,因其量大且易于矿化分解,是土壤有机磷的重要来源。

3 讨论

关于施用磷肥对有机磷组分的影响,许多报道的结论不太一致。王旭东等[3]研究指出,与对照相比,单施磷肥,并没有增加土壤有机磷含量,而且有机磷各形态也基本无变化;Zhang 等[11]认为施用磷肥,可以增加土壤各形态有机磷含量,土壤的无机磷和有机质水平愈低,则施用磷肥的增加作用愈强。鲁如坤等[4]认为,红壤性水稻土施用磷肥,可使有机磷形态总含量减少;而赵吴琼等[16]则认为,不施磷肥处理土壤有机磷组分有下降趋势,施磷肥处理可以提高有机磷各组分的含量。本研究表明,施用磷肥后,可使土壤各形态有机磷总量增加,有机磷总量的增加主要是由于土壤中活性有机磷含量的增加所致,而对其余3种有机磷形态则变化很小。施用磷肥后土壤有机磷含量的增加可能是由于磷肥刺激了微生物的活性,产生了微生物的固定,而使土壤有机磷含量有所上升。

在施磷与不施磷条件下,土壤中的有机磷的变化主要来自于中活性有机磷,而其它3种形态有机磷在水稻生育期内几乎保持不变。说明土壤活性有机磷、稳定性有机磷与中活性有机磷之间存在着一个动力学平衡,并且这个平衡由有效磷水平控制,当土壤有效磷水平低于某一特定值时,活性有机磷就会矿化为有效磷,而中活性有机磷可以作为库源来补充活性有机磷,使活性有机磷维持常数[17]。

土壤中各种形态有机磷的生物有效性,一直是许多学者探讨的问题。Bowman 和 Cole 认为[1],这4种形态的有效性的大小顺序为:活性有机磷 > 中活性有机磷 > 中稳性有机磷 > 高稳性有机磷,这是相同数量的各形态有机磷有效性的大小顺序。但是这4种有机磷形态在土壤中的数量并不总是相同的,存在量上的差别,所以,4种有机磷形态的生物有效性的大小顺序并非总是如上所述的顺序。本研究从水稻生长的不同时期来考虑各种形态有机磷的生物

有效性,发现早稻生长期间土壤各形态有机磷的生物有效性的大小顺序为:中活性有机磷 > 中稳性有机磷 > 高稳性有机磷 > 活性有机磷;而晚稻生长期间土壤各形态有机磷的生物有效性一般随水稻生育期不同而不同。不同形态有机磷对早、晚稻有效性的影响是不同的。早稻有一致的规律,而晚稻随生育期的不同,有不同的变化规律,这可能是因为早稻和晚稻的生长环境的不同所导致的。

本研究还表明,不管土壤是否施用磷肥,土壤有效磷与有机磷总量总是呈极显著相关,表明土壤有机磷是植物可以利用的有效磷源。

参 考 文 献:

[1] Bowman R A, Cole C V. Transformation of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by $NaHCO_3$ – extraction[J]. Soil Sci ., 1978, 125: 49–54.

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

[3] 王旭东,张一平,李祖荫. 有机磷在Ⅱ土中组成变异的研究[J]. 土壤肥料, 1997, (5): 16–18.
Wang X D, Zhang Y P, Li Z Y. Studies on changes of fractionation of organic phosphorus in lou soil[J]. Soils Fert., 1997, (5): 16–18.

[4] 鲁如坤,时正元,铁承梁.土壤积累态磷研究 Ⅲ.几种典型土壤中积累态磷的形态特征及其有效性[J]. 土壤, 1997, 29(2): 57–60.
Lu R K, Shi Z Y, Tie C L. Studies on cumulative phosphorus in soils Ⅲ. The fraction properties of cumulative phosphorus and their availability in kinds of typical soils [J]. Soils, 1997, 29(2): 57–60.

[5] Wier D R, Black C A. Mineralization of organic phosphorus in soils as affected by addition of inorganic phosphorus[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1968, 32: 51–55.

[6] 刘方,黄昌勇,何腾兵,等. 长期施磷对黄壤旱地磷库变化及地表径流中磷浓度的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 196–200.
Liu F, Huang D Y, He T B, Qian X G *et al*. Dynamics of upland field P pool under a long-term application of fertilizer P in yellow soil area and their effects on P concentration in runoff[J].Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(2): 196–200.

[7] Reddy D D, Rao A S, Takkar P N. Effects of repeated manure and fertilizer phosphorus additions on soil phosphorus dynamics under a soybean – wheat rotation[J]. Biol. Fert. Soils, 1999, 28: 150–155.

[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 forms of organic phosphorus in paddy soil derived from red earth[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(1): 63–66.

[9] 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. Effects of organic manure on soil organic phosphorus fractions and their bio-availability[J]. J. Nanjing Agric. Univ., 1998, 21(3): 59–63.

[10] 尹金来,沈其荣,周春霖,等. 猪粪和磷肥对石灰性土壤有机磷组分及有效性的影响[J]. 土壤学报,2001,38(3): 295–299.
Yin J L, Shen Q R, Zhou C L *et al*. Effects of pig slurry and phosphatic fertilizer on organic phosphorus fractions and their availablities [J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(3): 295–299.

[11] Zhang Y S, Ni W Z, Sun X. Influence of organic manure on organic phosphorus fraction in soils[J]. Pedosphere, 1993, 3(4): 361–369

[12] 冯跃华,张杨珠,黄运湘,周清. 湖南省主要类型水稻土有机磷形态分级研究[J]. 湖南农业大学学报,2001,27(1): 24–28.
Feng Y H, Zhang Y Z, Huang Y X, Zhou Q. Fractionation of organic phosphorus forms in major types of paddy soils in hunan province [J]. J. Hunan Agric. Univ., 2001, 27(1): 24–28.

[13] 贺铁,李世俊. Bowman-Cole 土壤有机磷分组法的探讨[J]. 土壤学报,1987,24(2): 152–159.
He T, Li S J. On the fractionation of organic phosphorus in soil by Bowman-cole's method[J]. Acta Pedol. Sin., 1987, 24(2): 152–159.

[14] 熊恒多,李世俊,范业宽. 酸性水稻土有机磷分组法的探讨[J]. 土壤学报,1993,30(4): 390–399.
Xiong H D,Li S J,Fan Y K. On the fractionation of organic phosphorus in acid paddy soil[J]. Acta Pedol. Sin., 1993, 30(4): 390–399.

[15] 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. 146–185.
Lu R K. Analysis method of soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 146–185.

[16] 赵吴琼,李菊梅,徐明岗,周连仁. 长期不同施肥下灰漠土有机磷组分的变化[J]. 生态环境,2007,16(2): 569–572.
Zhao W Q, Li J M, Xu M G, Zhou L R. Changes of organic phosphorus components in grey desert soil under long-term different fertilization[J]. Ecol. Environ., 2007, 16(2): 569–572.

[17] Sharpley A N, Smith S J. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 905–911.