

长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动*

单艳红^{1, 3} 杨林章¹ 沈明星² 王建国¹ 陆长婴² 吴彤东²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏苏州 215155)

(3 国家环境保护总局南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要 稻麦轮作黄泥土施肥试验始于 1980 年, 共布置不施肥、纯化肥、有机肥(猪粪或菜籽饼)、化肥加有机肥、氮肥加秸秆、氮肥加有机肥加秸秆等 14 种处理。2003 年 11 月麦季取土壤样品分析结果表明: (1) 与无肥处理相比, 施磷处理和有机肥处理耕层土壤全磷(TP) 含量皆有显著增加, 并且表现出向下迁移的迹象, 有机肥配施 NPK 化肥处理土壤磷的迁移可达 30 cm 深度, 其余施磷处理均至 25 cm。(2) 大部分施磷处理在表层 0~ 25 cm 内无机磷(FP) 总量发生显著性变化, C_{a7} -P 由于其溶解性强可迁移到 30 cm 以下, A_1 -P、 F_e -P、 O_c -P(闭蓄态磷) 的迁移可达 25 cm, C_{a8} -P 至 20 cm; C_{a10} -P 含量只在有化肥 P 输入的 6 个处理的 0~ 15 cm 耕层土壤中有显著性增加。(3) 土壤有机磷(OP) 含量的变化小于无机磷的变化, 只有无机磷配施有机肥的 3 个处理和仅施 PK 化肥的处理, 其耕层土壤有机磷发生显著性增加。

关键词 水稻土; 磷的垂向迁移; 磷的累积; 磷形态

中图分类号 S147. 2; S153. 6

文献标识码 A

近年来的水体富营养化问题使人们对土壤磷素的关注已超出原来单纯的农学效应, 其环境意义备受重视。因为土壤磷素的流失已成为不可忽视的非点污染源。长期过量施用有机肥和磷化会使表层土壤磷含量显著增加, 从而使土壤磷随径流流失的风险增大, 许多研究者发现径流水中的磷浓度直接和表层土壤的含磷量及施磷量直接相关^[1~4]。表层土壤磷素的富集, 使磷素发生垂向迁移的可能性增大。美国 Elrashidi 等在佛罗里达州 3 处多年柑桔地的试验表明, 长期施肥引起土壤表层磷的富集(主要是 A_1 -P 形态), 在较大的降雨量条件下(平均 1 400 mm a⁻¹), 加上土壤质地为砂质土, 表层富集磷的土壤可迁移到地下水层, 3 个实验点地下水层(深度分别为 210 cm、180 cm、240 cm) 土壤 Mehlich III-P 分别达 P 467、997、37 mg kg⁻¹^[5]。Schwab 等 1989 年研究在粉质粘土草地上连续表层撒施磷化肥(施磷量为 P 40 kg hm⁻² a⁻¹) 40a, 0~ 30 cm 土层速效磷(Bray-P) 高于连续施磷 20 a 后停止施磷的土壤, 0~ 45 cm 土层速效磷高于不施磷处理, 说明无机磷的淋洗在磷的迁移中起着重要的作用^[6]。荷兰 Groenberg 等

研究发现磷饱和的土壤会引起大量磷淋溶到地下水, 其量取决于土壤的磷饱和度、施磷量和地下水深度^[7]。Eghball 等在美国内布拉斯加州的连作玉米地(砂壤土) 施肥试验中, 从 1953 年起连续 40 年施有机肥和化肥(5 个水平的 N+ P 80 kg hm⁻²), 1993 年采土壤剖面样品分析, 结果表明在施磷量相同的情况下, 有机肥中的磷比化肥磷在土壤剖面迁移得更深, 并且能穿透高吸磷量的碳酸钙层, 证明有机肥中磷的迁移和土壤最大磷吸附量无关。施有机肥的土壤中速效磷(碳酸氢钠提取 P) 在土体中迁移更深, 可达 1.5~ 1.8 m 土层, 施化肥的 1.1 m 以下土层已看不出和不施磷处理的差别^[8]。

国外对磷素在土壤中的分布移动研究较早, 有长期施肥试验, 但多集中在旱地。我国有过红壤性水稻土和土长期施肥对土壤磷影响的研究报道^[9~11], 至今还未见太湖地区水稻土长期施肥对磷素分布迁移影响的研究报道。来自农业的磷素流失是太湖流域地表水富营养化的磷源之一, 本研究选择太湖地区有代表性的水稻土, 揭示其在长期不同施肥处理下磷素在土体分布移动的规律, 为制定最

* 国家自然科学基金项目(40371073)、中国科学院重大创新方向性项目(KZCX2 413) 资助

作者简介: 单艳红(1967~), 女, 山东人, 博士研究生, 现在国家环保总局南京环境科学研究所工作, 主要从事土地利用管理与农业面源污染防治研究。E-mail: shanyh@nies.org, 电话: 025- 85287074

收稿日期: 2004- 10- 28; 收到修改稿日期: 2005- 03- 15

佳的土壤磷管理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设于江苏太湖地区农业科学研究所的试验区, 位于苏州市相城区望亭镇望虞河北。土壤为该地区面积最大的重壤质黄泥土。试验开始时(1980年麦季) 0~15 cm 耕层土壤有机质含量为 24.2

g kg^{-1} , 全氮含量为 $1\ 430\ \text{mg kg}^{-1}$, 全磷含量 $428\ \text{mg kg}^{-1}$, 速效磷含量 $8.4\ \text{mg kg}^{-1}$, pH6.8。

试验为两因素三重复随机区组设计(表 1)。小区面积为 $20\ \text{m}^2(4\ \text{m} \times 5\ \text{m})$, 小区之间用花岗岩水泥作永久性田埂分隔, 田埂高 15 cm。中间有灌渠通各小区。供试作物除 1993 年夏熟作物为油菜, 2000 年为蚕豆以外, 其余均为稻麦轮作。除 1982 年为三熟制外, 其余均为两熟制。

表 1 试验处理

Table 1 Treatments in the fertilization experiment

化肥区 Fertilizer plots		化肥+ 有机肥区 Fertilizer + manure plots	
处理代号 Code	施肥处理 Fertilizer treatment	处理代号 Code	施肥处理 Fertilizer treatment
C_0	不施肥 No manure and fertilizer	M_0	只施有机肥 Manure
C_N	氮肥 N	M_N	有机肥+ 氮肥 Manure + N
C_{NP}	氮肥+ 磷肥 N+ P	M_{NP}	有机肥+ 氮、磷肥 Manure + N+ P
C_{NK}	氮肥+ 钾肥 N+ K	M_{NK}	有机肥+ 氮、钾肥 Manure + N+ K
C_{PK}	磷肥+ 钾肥 P+ K	M_{PK}	有机肥+ 磷、钾肥 Manure + P+ K
C_{NPK}	氮肥+ 磷肥+ 钾肥 N+ P+ K	M_{NPK}	有机肥+ 氮、磷、钾肥 Manure + N+ P+ K
C_{RN}	氮肥+ 稻草 N+ Straw	M_{RN}	有机肥+ 氮肥+ 稻草 Manure + N+ Straw

各试验处理的肥料用量见表 2。氮肥为尿素(含 N 46.2%), 磷肥为过磷酸钙(含 P 6.1%), 钾肥为氯化钾(含 K 44.0%)和硫酸钾(含 K 41.5%)。有机肥自试验开始至 1996 年为猪粪(平均干物质含量 25.2%, 干基平均含 P $9.5\ \text{g kg}^{-1}$), 1997 年至今为菜籽饼(风

干基平均含 P $10.8\ \text{g kg}^{-1}$)。用于还田的水稻秸秆平均含 P 量 $1.19\ \text{g kg}^{-1}$ 。有机肥、磷肥和 50% 的氮钾肥作基肥, 另 50% 的氮钾肥作追肥。小麦收获后人工翻地(翻耕深度不超过 15 cm), 晒垡, 上水整地后施肥, 再耙匀插秧; 小麦直接在稻茬上施基肥后播种。

表 2 试验肥料用量

Table 2 Fertilization rates of the experiment

肥料种类 Fertilizer	肥料用量 Application rate ($\text{kg hm}^{-2}\ \text{a}^{-1}$)	施用方式 Fertilization pattern
无机氮肥 N fertilizer	150~ 300	基肥追肥各半 Half in basal application and half in split application
无机磷肥 P fertilizer	52.4	基肥 All in basal application
无机钾肥 K fertilizer	125	基肥追肥各半 Half in basal application and half in split application
有机肥 Manure	15 000~ 30 000 ¹⁾	基肥 All in basal application
水稻秸秆 Straw	4 500 ²⁾	基肥 All in basal application

1) 大部分用量为 $15\ 000\sim 22\ 500\ \text{kg hm}^{-2}\ \text{a}^{-1}$ Manure application rates ranged in $15\ 000\sim 22\ 500\ \text{kg hm}^{-2}\ \text{a}^{-1}$; 2) 风干重 Air dried weight

1.2 土壤样品采集与测定

土壤样品采集时间为 2003 年 12 月 15~19 日, 当季小麦种植品种为苏 0131, 播种时间为 2003 年 11 月 5 日, 施用基肥时间为 2003 年 11 月 3 日, 当季每个试验小区已施尿素 $300\ \text{g}$ (相当于 N $69.3\ \text{kg hm}^{-2}$)、过磷酸钙 $850\ \text{g}$ (相当于 P $26.2\ \text{kg hm}^{-2}$)、

氯化钾 $123\ \text{g}$ (相当于 K $27.1\ \text{kg hm}^{-2}$)、干稻草 $4.5\ \text{kg}$ (相当于 P $2.68\ \text{kg hm}^{-2}$)、菜籽饼 $2.5\ \text{kg}$ (相当于 P $13.5\ \text{kg hm}^{-2}$)。为了尽量少干扰土层, 每个小区用外径 19 mm 土钻取 4~5 个点。每个取样点耕层 0~15 cm 采集一个土壤样品, 耕层以下每 5 cm 采集一个样品, 直至 100 cm 地下水水位。测定项目包括土壤速效磷、全磷、有机磷、无机磷总量及其不同形态。

土壤全磷(TP)、无机磷(FP)和有机磷(O-P)的测定用 H_2SO_4-NaOH 浸提法,土壤速效磷用碳酸氢钠提取法(Olsen法),无机磷各形态用中性土壤无机磷形态分级方法连续提取,磷的测定用钼锑抗比色法^[12]。

2 结果与讨论

2.1 施肥对土壤剖面全磷、速效磷(Olsen P)含量的影响

不同处理经过23年的耕种,土壤耕层0~15 cm的全磷含量发生了很大的变异。首先,4种无磷处理(C_{NK} 、 C_{RN} 、 C_N 、 C_0)由于长期土壤磷的输出大于输入,表层全磷含量由试验初始的 $P 428 mg kg^{-1}$ 下降至 $P 300 mg kg^{-1}$ 左右,4种处理之间无显著差异。因本文重点讨论施肥对土壤磷素变化的影响,故除保留 C_0 作对照外,其余4个无磷处理的数据未列出。 M_{NPK} 、

M_{NP} 、 M_{PK} 等3种处理由于既有化肥磷又有有机磷肥输入,表层全磷含量显著增加,达 $P 1 500 mg kg^{-1}$ 左右,其他几种单施化肥磷或单施有机肥的处理表层全磷含量比 C_0 皆有显著增加(表3)。与对照 C_0 相比,有化肥磷或有机肥投入的处理在0~25 cm土层土壤全磷含量皆显著增加,而在25~30 cm土层,只有 M_{NPK} 处理的土壤全磷含量显著高于 C_0 ,其他施磷处理与 C_0 比较无显著差异,说明表层施的磷肥经过20多年的耕种,磷素可向下迁移至25 cm深处。

由于氮是限制生物量的主要营养元素,所以 C_{PK} 处理中由作物带走的P比 C_{NPK} 、 C_{NP} 少而残留于土壤的多,因而在0~15 cm土层, M_{PK} 与 C_{PK} 的TP含量差距小于 M_{NP} 与 C_{NP} 及 M_{NPK} 与 C_{NPK} 的差距。同样原因,无肥处理 C_0 有效养分严重缺乏,生物量很低,而 M_0 处理中的有机肥的营养成分较为全面而使生物量大增从而带走较多的磷,从而 M_0 与 C_0 表层土壤中的TP含量差距较小。

表3 不同处理不同深度的土壤全磷、速效磷(Olsen P)含量¹⁾

Table 3 Effects of different treatments on total phosphorus (TP) and Olsen P distribution with depth ($mg kg^{-1}$)

处理代号 Treatment code	TP				Olsen P			
	0~15 cm	15~20 cm	20~25 cm	25~30 cm	0~15 cm	15~20 cm	20~25 cm	25~30 cm
M_{NP}	1 592a	584ab	444bc	401cd	54. 2ab	15. 5ab	6. 6b	5. 4ab
M_{NPK}	1 487a	552bc	504a	462a	51. 3b	9. 0c	8. 5a	6. 0a
M_{PK}	1 472a	461de	424bc	439ab	60. 3a	11. 6bc	5. 1bcd	4. 5abc
C_{PK}	910b	534c	415c	392cd	31. 3c	12. 6bc	5. 2bcd	4. 2bcd
C_{NPK}	691c	433e	411c	424bc	25. 4cd	8. 7c	3. 1ef	4. 1bcd
M_0	679c	503cd	413c	397cd	23. 1de	11. 9bc	4. 7cde	3. 8bcd
C_{NP}	632c	615a	405c	427bc	23. 0de	17. 6a	4. 3cde	6. 1a
M_{RN}	629c	538bc	459b	417bc	16. 9ef	10. 4c	4. 5cde	4. 5abc
M_N	620c	483d	444bc	404bcd	18. 3ef	9. 5c	6. 0c	3. 7bcd
M_{NK}	587c	455de	441bc	394cd	11. 9f	9. 3c	4. 2de	4. 1bcd
C_0	317d	316f	365d	410bcd	2. 3g	2. 4d	3. 1ef	3. 8bcd

1) 同一列中相同字母表示均值间无显著差异($p < 0.05$, 下同) Means in a column followed by the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ (same below); 限于篇幅,表中只列出无肥对照 C_0 和有磷输入的处理的数据,处理间无显著差异的下层土壤数据未列出(下同) The data of treatments with no P input except for C_0 and of subsoil with no significant difference among treatments are not listed in column owing to shortage of space (same below)

有磷肥投入的处理土壤耕层0~15 cm和15~20 cm土层的Olsen P皆有显著增加,耕层Olsen P增加最多的仍是同时施用化肥磷和有机肥的三个处理, M_{PK} 由于同时施用了磷化肥和有机肥,再加上氮素缺乏对生物量的限制,使耕层土壤Olsen P增加量最大,比试验初始的 $8.4 mg kg^{-1}$ 增加了6倍多。增量最少的 M_{NK} 也比试验初始增加了 $P 3.5 mg kg^{-1}$ 。耕层土壤Olsen P占TP的比例也比试验初始(2.0%)有所增加,大部分在3.4%左右,最高的 M_{PK}

达4.1%。不施磷肥的处理耕层土壤速效磷含量下降很多,由试验初始的 $8.4 mg kg^{-1}$ 降至 $2.4 mg kg^{-1}$,平均每年下降 $0.26 mg kg^{-1}$, C_0 耕层速效磷的比例降为0.7%。不同处理耕层以下Olsen P的含量差距逐渐缩小,在20~25 cm土层只有 M_{PK} 、 M_{NP} 、 M_{NPK} 、 C_{PK} 和 M_N 五个处理Olsen P含量显著高于 C_0 ,其他处理和 C_0 无显著差异。至25~30 cm土层只有 M_{NPK} 和 M_N 的Olsen P含量显著高于 C_0 ,其他处理与 C_0 皆无显著差异,说明大部分处理磷素从耕层

向下迁移了 10 cm,这与全磷的方差分析结果是一致的(表3)。没有磷肥投入的处理与 C_0 在 0~30 cm 土层 $O_{\text{ser}}P$ 含量皆无显著性差异。

本试验中土壤 TP 和 $O_{\text{ser}}P$ 垂向迁移深度小于土壤质地和施磷量皆近似的土试验结果^[11],土经 12 年的定位施肥试验,使土壤剖面 TP 和 $O_{\text{ser}}P$ 发生显著变化的深度可达 100 cm。与 19 年的红壤性水稻土的试验结果近似^[9]。据此可以推断磷素淋失主要是通过大孔隙优势流,干湿交替比一直淹水易形成大孔隙,在灌溉和降雨时更易造成磷素的淋失。

2.2 施肥对土壤剖面无机磷、有机磷含量的影响

与 C_0 相比,各个施磷(有机肥或化肥磷)处理其耕层 0~15 cm 土层 FP 均有显著增加,无磷肥输入的处理和 C_0 没有显著差异;耕层 FP 占 TP 的大部分(61.5%~85.0%)。不同处理土壤的无机磷含量随土壤深度的增加其差距逐渐变小。 C_{NPK} 和 C_0 在 15~20 cm 土层无机磷含量已无显著差异,这可能是由于氮磷钾三种营养成分协调供应,没有施用有机肥,无机磷肥只显著增加了耕层的无机磷含量。其他有磷肥输入的处理在 15~20 cm 土层土壤的无机磷皆有显著性提高。20~25 cm 土层只有 M_{NPK} 、 M_{NP} 、 M_{RN} 、 M_{N} 的无机磷显著高于 C_0 ,其他处理和 C_0 差异不显著或低于 C_0 (表4)。到 25~30 cm 土层,所有施磷处理的无机磷含量和 C_0 处理皆无显著差异,说明在试验条件下,无机磷的垂向迁移最深可达 25 cm。 C_{NK} 处理在 25~30 cm 土层无机磷(245 mg kg^{-1})显著低于 C_0 (335 mg kg^{-1}),这可能是由于在耕层缺磷的情况下,氮钾肥的施用促进作物吸收土壤深层次的无机磷。

所有处理中只有 M_{NP} 、 M_{PK} 、 M_{NPK} 和 C_{PK} 的耕层土壤有机磷含量显著增加(表4),前三个处理是由于既有化肥磷又有有机肥施入,除被作物吸收的部分外,有剩余有机磷,这和旱地土壤试验的结果是一致的^[13];而 C_{PK} 可能是由于缺少氮素限制了作物的生长,从而使土壤中的磷素出现了剩余,经过多年的积累使耕层有机磷显著增加。其他处理的耕层有机磷含量没有显著性差异。耕层以下各处理有机磷含量也未表现出显著性变化。这也证明无机磷的淋洗在磷的迁移中起着重要的作用^[6]。

2.3 施肥对土壤剖面不同形态无机磷含量的影响

2.3.1 施肥对土壤剖面 Ca_2P 、 Ca_8P 和 $Ca_{10}P$ 含量的影响

有磷处理耕层 0~20 cm 土层 Ca_2P 含量比 C_0 显著增加,无磷处理 Ca_2P 含量和 C_0 无显著性

差异。20~25 cm 土层只有 M_{PK} 、 M_{NP} 、 M_{NPK} 、 C_{PK} 和 M_{N} 高于 C_0 ,这一点同 $O_{\text{ser}}P$ 。至 25~30 cm 土层, M_{PK} 、 M_{NP} 、 M_{NPK} 、 M_0 、 C_{NP} 和 M_{NK} 的 Ca_2P 含量仍高于 C_0 (表5)。证明 Ca_2P 可迁移至 30 cm 以下土层,这是由于 Ca_2P 溶解性较强的缘故。并且施有机肥的处理 Ca_2P 在土壤剖面下迁移较深,可能是因为有机肥中的有机酸对钙的络合作用,使施入的磷或矿化的有机磷难以向难溶的 Ca_8P 、 $Ca_{10}P$ 转化。

表4 不同处理不同深度的土壤无机磷和有机磷含量
Table 4 Effects of different treatments on inorganic phosphorus (FP) and organic phosphorus (OP) distribution with depth (mg kg^{-1})

处理代号 Treatment code	FP			OP
	0~15 cm	15~20 cm	20~25 cm	0~15 cm
M_{NK}	1155a	436abc	362a	332b
M_{PK}	1103a	341de	286de	369b
M_{NP}	1064a	487a	359a	528a
C_{PK}	669b	432abc	310bcd	242c
C_{NPK}	581bc	300ef	295cd	110d
C_{NP}	537bcd	467ab	336abc	95d
M_0	527bcd	400cd	283de	152d
M_{RN}	501cd	425bc	368a	128d
M_{N}	477cd	379cd	352ab	143d
M_{NK}	420d	356de	307cd	167cd
C_0	195e	260fg	292cd	122d

有磷处理 0~20 cm 土层的 Ca_8P 含量皆有显著性增加,耕层增加量更大,三个同时施用化肥磷和有机肥的处理 Ca_8P 增加量平均为 C_0 的 10 倍。20~25 cm 土层只有 M_{NPK} 的 Ca_8P 含量显著高于 C_0 (表5),其他处理和 C_0 无显著性差异。至 25~30 cm 土层,所有处理之间的 Ca_8P 含量皆无显著性差异,显然, Ca_8P 较 Ca_2P 惰性更大,在土壤剖面迁移距离小于 Ca_2P 。

$Ca_{10}P$ 是无机磷组分中变化最小的,有化肥磷施入的 6 个处理耕层土壤 $Ca_{10}P$ 含量显著增加(表5),单施有机肥的和施含磷肥料的处理表层土壤 $Ca_{10}P$ 含量皆无显著性变化。只有 C_{NP} 处理 15~20 cm 土层 $Ca_{10}P$ 含量显著高于 C_0 ,可能是由于土壤缺乏钾素,限制了作物对磷素的吸收,使残留土壤的磷素较多而转化为 $Ca_{10}P$ 。至 20~25 cm 深度,各处理间土壤 $Ca_{10}P$ 含量皆无显著差异。 $Ca_{10}P$ 的转化积累结果表明,残余无机磷肥比有机肥更易转化为 $Ca_{10}P$,因而有效性保持的时间较短,这是有机肥肥效较为长久的原因之一。

表5 不同处理不同深度的土壤 Ca_7 P、 Ca_8 P 和 Ca_{10} P 含量Table 5 Effects of different treatments on Ca_7 P, Ca_8 P and Ca_{10} P distribution with depth ($mg\ kg^{-1}$)

处理代号 Treatment code	Ca_7 P				Ca_8 P			Ca_{10} P
	0~ 15 cm	15~ 20 cm	20~ 25 cm	25~ 30 cm	0~ 15 cm	15~ 20 cm	20~ 25 cm	0~ 15 cm
M_{IK}	47. 7a	12. 1abc	6. 6bc	8. 4ab	21. 1a	2. 9bcd	1. 7ab	135a
M_{NP}	42. 5b	15. 7ab	7. 6b	7. 2bcd	19. 3ab	4. 7a	1. 7ab	143a
M_{NIK}	39. 1b	16. 3ab	9. 7a	7. 6abc	18. 0b	3. 9ab	2. 9a	122ab
C_{PK}	26. 6c	11. 1bc	7. 4b	5. 1fgh	8. 4c	3. 4bc	1. 8ab	117ab
C_{NPK}	19. 5d	8. 9c	5. 2de	5. 1fgh	7. 2cd	2. 2de	1. 3b	118ab
M_0	16. 7de	16. 7a	6. 1bcd	8. 8a	5. 2de	3. 6abc	1. 5b	88c
C_{NP}	16. 0def	11. 6abc	6. 0bcd	6. 0def	6. 1cde	3. 6abc	1. 4b	122ab
M_N	15. 2ef	13. 6abc	6. 5bc	5. 1fgh	5. 2de	2. 8bcd	1. 4b	97bc
M_{RN}	13. 3ef	10. 2c	5. 6bcd	5. 6efg	4. 7e	2. 9bcd	1. 3b	98bc
M_{NK}	12. 6f	9. 7c	5. 6bcd	6. 7cde	4. 4e	2. 6cd	0. 9b	82c
C_0	2. 4g	2. 9d	4. 1def	4. 2ghi	1. 8f	1. 2ef	0. 9b	83c

2.3.2 施肥对土壤剖面 Al P、 Fe P 和 Oc P(闭蓄态磷)含量的影响 有磷处理 0~ 20 cm 土层的 Al P 含量比 C_0 皆有显著性增加。和其他无机磷成分不同的是, Al P 并非在耕层含量最高, 而是在 15~ 20 cm 亚表层含量最高, 尤其是同时施化肥磷和有机肥的处理增量最大, 这可能是由于 Al^{3+} 和有机物形成溶解性较大的有机络合物, 随雨水或灌溉水向下层迁移, Al P 的富集层有可能随时间的推移继续向下迁移, 这有待以后进一步研究。大部分施磷处理在 20~ 25 cm 土层 Al P 仍有显著性增加(表 6), 但增量较小($< 10\ mg\ kg^{-1}$)。25~ 30 cm 土层所有处理 Al P 含量和 C_0 皆无显著性差异。无磷处理所有土层的 Al P 含量和 C_0 无显著性差异。

有磷处理 0~ 25 cm 土层的 Fe P 含量皆有显

著性增加, 尤其在 0~ 15 cm 耕层增量最大(表 6), 占无机磷总量(单独测定值)的 37%~ 54%, 施有机肥的处理 Fe P 增加更多, 到 25~ 30 cm 土层, 所有处理 Fe P 含量和 C_0 间皆无显著性差异, 但施磷肥的处理 Fe P 含量显著高于只施化学氮、钾肥的处理 C_{NK} 。

相对于 C_0 , 有磷处理使 0~ 25 cm 土层的 Oc P 含量显著增加, 增量最大的是同时施用化肥磷和有机肥的三个处理, 无磷处理 Oc P 含量和 C_0 无显著性差异。25~ 30 cm 土层只有 M_{NP} 的 Oc P 显著高于 C_0 (表 6), 也就是说, 如果磷的投入大于作物的吸收, 或缺氮少钾的处理由于氮钾对生物量的限制从而减少了作物对磷的吸收, 致使剩余的磷部分转化为对作物无效的闭蓄态磷。

表6 不同处理不同深度的土壤 Al P、 Fe P 和 Oc P 含量Table 6 Effects of different treatments on Al P, Fe P and Oc P distribution with depth ($mg\ kg^{-1}$)

处理代号 Treatment code	Al P			Fe P			Oc P			
	0~ 15 cm	15~ 20 cm	20~ 25 cm	0~ 15 cm	15~ 20 cm	20~ 25 cm	0~ 15 cm	15~ 20 cm	20~ 25 cm	25~ 30 cm
M_{IK}	36. 9a	109. 1a	8. 7bc	595a	116b	82cd	28. 1ab	198ab	198ab	172bcd
M_{NP}	27. 3b	93. 4b	12. 2a	553b	162a	90bc	29. 4a	224a	224a	207a
C_{NP}	23. 6bc	27. 3cd	6. 6cd	189e	157a	83cd	23. 7bc	19. 1ab	192ab	124f
M_{NIK}	22. 5bcd	87. 9b	12. 9a	54b	144ab	113a	27. 9ab	189abc	189abc	157cdef
M_0	19. 7cde	29. 7d	7. 6bc	211d	132ab	76de	24. 7abc	222a	222a	149def
C_{PK}	19. 5cde	47. 1c	9. 4b	266c	140ab	84cd	25. 2abc	21. 3ab	21. 3ab	142def
M_N	17. 1def	25. 0de	7. 4bc	203de	117b	94b	21. 4c	18. 1abc	18. 1abc	172bcd
M_{RN}	15. 3efg	21. 3de	9. 2bc	202de	137ab	108a	23. 1bc	19. 9ab	19. 9ab	198ab
M_{NK}	11. 9fg	20. 8de	7. 7bc	160f	115b	82cd	23. 8bc	19. 9ab	19. 9ab	164cde
C_{NPK}	11. 5g	19. 9e	7. 5bc	215d	90c	70e	22. 1c	17. 5bc	17. 5bc	132ef
C_0	4. 1h	4. 7f	4. 7de	41g	56cd	58f	14. 6d	14. 9cd	14. 9cd	171bed

3 结 论

长期过量施用含磷肥料, 引起 0~ 15 cm 耕层土壤磷素的累积, 并且表现出磷在剖面垂向的迁移。大多数有磷处理磷素的迁移可达到 25 cm 深度, 只有 M_{NPK} 处理磷素的迁移可达到 30 cm 土层。磷素含量变化较大的是化肥磷配施有机肥的处理, 或是只施化肥磷未施氮钾肥的处理, 前者是由于施入磷量超过作物吸收量, 后者是由于养分供应不协调, 限制了作物对磷素的吸收, 从而造成磷素在土壤中的剩余积累。

大部分施磷处理土壤 25 cm 深处无机磷总量存在显著性变化, 其中 Ca_2P 由于其溶解性强可迁移到 30 cm 以下, AlP 、 FeP 、 OcP 的迁移深度可达 25 cm, Ca_8P 迁移至 20 cm, $Ca_{10}P$ 是无机磷中变化最小的, 有化肥磷施入的 6 个处理土壤表层 $Ca_{10}P$ 存在显著性增加, 单施有机肥的和不施磷肥的处理 $Ca_{10}P$ 皆无显著性变化。

土壤剖面有机磷的变化要比无机磷小, 只有磷素供应相对于作物需求过剩的情况下耕层土壤有机磷发生显著性增加, 其他处理的耕层及所有处理的 15 cm 深度以下土层皆无显著性变化。

总体上看, 由于试验土壤质地较为粘重, 磷在剖面的移动是比较缓慢的, 还不足以影响到地下水的质量。但过量地施用磷肥(如试验剂量下的磷化肥和有机肥配施), 或养分不协调地施肥(如单施磷钾肥), 一方面不能带来作物产量的增加, 而且由于多余的磷素转化为作物不能吸收利用的 OcP 和 $Ca_{10}P$ 造成肥料的浪费, 增加了农业成本; 另一方面, 土壤表层磷素含量的急剧增加, 增加了磷素随径流流失的风险, 也加大了磷的淋溶渗漏趋势, 对周围水体的质量构成威胁。

参 考 文 献

[1] Romkens J M, Nelson D W. Phosphorus relationships in runoff from fertilized soils. *J. Environ. Qual.*, 1974, 3: 10~ 13
 [2] Shapley A N, Smith S J, Menzel R G. Phosphorus criteria and water quality management for agricultural watersheds. *Reserv. Mgmt.*,

1986, 2: 177~ 182

- [3] Pote D H, Daniel T C, Nichols D J, *et al.* Seasonal and soil drying effects on runoff phosphorus relationships to soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63(4): 1 006~ 1 012
 [4] Austin N R, Prendergast J B, Collins M D. Phosphorus losses in irrigation runoff from fertilized pasture. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 63~ 68
 [5] Elrashidi M A, Alva A K, Huang Y F, *et al.* Accumulation and downward transport of phosphorus in Florida soils and relationship to water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(19/20): 3 099~ 3 119
 [6] Schwab A P, Kulyingyong S. Changes in phosphate activities and availability indexes with depth after 40 years of fertilization. *Soil Science*, 1989, 147(3): 179~ 186
 [7] van der Molen D T, Brecuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 4~ 11
 [8] Eghball B, Binford G D, David D B. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long term manure and fertilizer application. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 1 339~ 1 343
 [9] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛, 等. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 290~ 293. Huang Q H, Li C G, Lai T, *et al.* Effects of long term fertilization on accumulation and forms of phosphorus in paddy soil derived from red earth (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(4): 290~ 293
 [10] 鲁如坤, 时正元, 赖庆旺. 红壤长期施肥养分的下移特征. *土壤*, 2000, 32(1): 27~ 29. Lu R K, Shi Z Y, Lai Q W. Vertical movement of nutrients in red soil after long term fertilization (In Chinese). *Soils*, 2000, 32(1): 27~ 29
 [11] 杨学云, 李生秀, Brookes P C. 灌溉与旱作条件下长期施肥土剖面磷的分布和移动. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 250~ 254. Yang X Y, Li S X, Brookes P C. Phosphorus distribution and leaching in loessial soil profile with long term fertilization under irrigation and rainfed condition (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 250~ 254
 [12] 鲁如坤编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 170~ 181. Lu R K. ed. *Methods of Soil and Agriculture Chemical Analysis (In Chinese)*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999. 170~ 181
 [13] 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响. *土壤学报*, 1993, 30(4): 443~ 446. Zhou G Y, Yan L X. Effects of long term application of fertilizers on soil phosphorus morphology and transformation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4): 443~ 446

ACCUMULATION AND DOWNWARD TRANSPORT OF PHOSPHORUS IN PADDY SOIL IN LONG TERM FERTILIZATION EXPERIMENTS

Shan Yanhong^{1,3} Yang Linzhang¹ Shen Mingxing² Wang Jianguo¹ Lu Changying² Wu Tongdong²

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Institute of Taihu Agriculture Science, Suzhou, Jiangsu 215155, China)

(3 Nanjing Institute of Environmental Science, State Environmental Protection Administration of China, Nanjing 210042, China)

Abstract Objectives of the study were to explore forms, quantities and distribution of soil phosphorus in profile of paddy soil as affected by different fertilization patterns in a long-term experiment under a rice-wheat (or rape) cropping system, and to evaluate potential effects of transformation and downward transport of phosphorus on environment. The experiment that has been carrying on since 1980 on a permeable paddy soil (huang ni tu), is designed to have 14 treatments with 3 replicates. Soil samples were collected from the top soil (0~ 15 cm) and then layers 5 cm apart till 1 m in depth in November 2002. Significant P accumulation was found at the depth of 25 cm for all P treatments but Treatment M_{NPK} (Manure+ fertilizer N+ fertilizer P+ fertilizer K) where it was detected at the depth of 30 cm. Inorganic P (F-P) concentrations increased significantly in the soil layer of 0~ 25 cm for most P treatments. Ca₂-P moved beneath 30 cm in soil depth, Al-P, Fe-P and Occluded-P (Oc-P) to 25 cm in depth, and Ca₈-P to 20 cm in depth. Ca₁₀-P contents increased significantly only in treatments with fertilizer P application, showing manure P keeps available longer than fertilizer P. Changes in O-P were smaller than F-P in range. Merely in the plots with manure plus fertilizer P or with fertilizer P and K, the organic P (O-P) concentration in the top soils (0~ 15 cm) increased significantly. Long term of P application exceeding P removal by crops were not economical because more inactive Oc-P and Ca₁₀-P accumulated, and led to P accumulation in the top soil and hence the potential of P loss via surface runoff and leaching that would threaten the quality of surface water and groundwater.

Key words Accumulation of P; Downward transport of P; Rice-wheat rotation; Sequential P fractions