植物营养与肥料学报 2008,14(5):880-885
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期定位施肥对碱性紫色土磷素迁移与累积的影响

秦鱼生,涂仕华,孙锡发,冯文强,廖鸣兰
(四川农业科学院土壤肥料研究所,四川成都 610066)

摘要:在25年稻麦轮作长期定位施肥试验点,开展了碱性紫色土水旱轮作种植制度下不同施肥处理土壤剖面全磷、速效磷迁移和累积以及耕层土壤全磷、速效磷随时间的变化规律研究。结果表明,单施无机磷肥土壤磷可迁移至100 cm土层,Olsen-P可迁移至40 cm土层。有机无机磷肥配施不但使土壤磷可迁移至相同深度,且迁移量更大,Olsen-P可迁移至60 cm土层。耕作25年后,施磷处理土壤耕层磷素随时间的变化显著,MNPK处理耕层土壤全磷含量年增长率为0.033 g/kg,Olsen-P的年增长率为2.56 mg/kg。试验表明,连续数年施用足量磷肥后,作物施磷量可根据具体情况酌减,以节约磷肥资源和提高磷肥利用率;施用有机肥促进了磷素从耕层向底层的迁移,是造成土壤磷素迁移的一个重要因素。

关键词:长期定位施肥;碱性紫色土;磷的迁移;磷的累积
中图分类号:S147.2;S158.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2008)05-0880-06

Transfer and accumulation of phosphorus in the calcareous purple soil in a long-term fertilizer experiment

QIN Yu-sheng, TU Shi-hua, SUN Xi-fa, FENG Wen-qiang, LIAO Ming-lan
(*Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China*)

Abstract: Experiments of transport and accumulation of phosphorus in soils was conducted in order to find effective ways to manage and control phosphorus and non-point pollution in crop fields. Different fertilizations were treated in calcareous purple soils in a 25-year rice-wheat rotation field. Factors, such as total phosphours in the soil profile, transport and accumulation of Olsen phosphours (Olsen-P), and patterns change over time, were studied. Results showed in the soil, phosphorus was detected at 100 cm, and Olsen-P was at 40 cm down to the ground. The application of organic or inorganic P not only increase the depth of P detected in the ground, but also the quantity of P measured in the ground. Meanwhile, Olsen-P was also detected at 60 cm down to the ground with the application of organic or inorganic P treatment. After 25 years treatment, the annual accumulation rate in the plough layer was measured as 0.033 g/kg for total P, and 2.56 mg/kg for Olsen-P for the MNPK treatment. The result suggests that P application rates should be reduced accordingly in order to save the amount of phosphate fertilizer used and to increase the efficiency in the crop field.

Key words: long-term fertilizer experiment; calcareous purple soil; phosphorus transfer; phosphorus accumulation

磷在土壤中一般含量较少,并且施入土壤中的磷肥易于被土壤颗粒吸附、吸持,导致磷肥当季利用率较低[1]。自90年代以来,因品种改良而不断提高作物增产潜力,高产和磷肥施用量的逐年增加造成磷素在土壤中的累积[2-3]。有研究表明,累积在土壤中的磷素都能为后季作物吸收利用,但仍有一小部分通过土壤侵蚀、地表径流、壤中流和渗漏等途径向水体迁移,对水体富营养化构成威胁,破坏水生系统的平衡[4-5]。

国外对于长期定位试验中土壤磷素变化的研究

收稿日期:2007-09-06　　接受日期:2008-03-28
基金项目:国家科技支撑计划(2006BAD05B06);四川省"十一五"攻关项目(2006YZGG-28)资助。
作者简介:秦鱼生(1978—),男,重庆合川人,助理研究员,主要从事植物营养与施肥、农田环境保护等方面研究。
Tel:028-84504919, E-mail:shengyuq@sohu.com。

较多。Elrashidi 等[6]研究表明,长期施肥引起土壤表层磷的累积,且可迁移到地下水层;Kao 与 Blanchar[7]报道了 82 年长期施有机肥和磷肥的粉壤土农田磷淋失深度超过 100 cm,全磷和速效磷在底层土中的累积量显著高于不施磷的土壤。Eghball 等[8]通过连续 40 年施用有机无机磷肥试验,发现有机磷比无机磷在土壤剖面中迁移得更深,有机磷的迁移与土壤最大磷吸附量无关;Koopmans 等[9]认为,有机磷矿化在表层土中生成的正磷酸盐促进了磷在土壤剖面中向下迁移。但是,这些研究多以草地、旱地居多,几乎没有关于水旱轮作条件下稻田的研究。国内关于红壤性水稻土、潮土等土壤长期施肥土壤磷素变化的研究有较多的报道[10-11],而至今未见针对碱性紫色土的土壤磷素变化研究报道。本研究利用四川盆地遂宁组碱性紫色土上的长期定位施肥试验,对水旱轮作种植不同施肥措施下碱性紫色土磷素迁移与累积规律进行了分析与总结,为磷素养分资源的科学管理提供了依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验设在位于四川省遂宁市中区联盟乡四川省农业科学院土壤肥料研究所的紫色土长期定位施肥观测实验点。供试土壤为遂宁组母质发育的碱性紫色土—红棕紫泥,质地为重壤。试验开始时(1981 年春)的耕层土壤(0—20 cm)有机质含量为 15.9 g/kg,全氮 1.09 g/kg,全磷 1.35 g/kg,全钾 26.9 g/kg,速效氮 66.3 mg/kg,速效磷 3.90 mg/kg,速效钾 130 mg/kg,缓效钾 699 mg/kg。

试验采用随机区组设计,试验共设 8 个处理:不施肥(CK),氮肥(N),氮、磷肥(NP),氮、磷、钾肥(NPK),有机肥(M),有机肥 + 氮肥(M +N),有机肥 + 氮、磷肥(M +NP),有机肥 + 氮、磷、钾(M +NPK),重复 4 次,小区面积 13.3 m^2。小区之间用水泥板在试验开始前进行永久性分隔,水泥板离地高度 20 cm。每一区组设有独立灌、排渠,可控制每个试验小区的排、灌。试验为水稻—小麦水旱轮作,一年两作。水稻移栽前进行人工翻耕,灌水、整地后施基肥。小麦采用免耕种植,直接在稻茬上打窝,施基肥后播种。水稻和小麦秸秆收获后都被移走。各试验处理每年的有机无机肥料用量为:氮肥 N 120、磷肥 P_2O_5 60、钾肥 K_2O 60、有机肥 15000 kg/(hm^2·a)。无机肥料中氮肥为尿素(含 N 46.3%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12.0%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60.0%);有机肥为农家猪粪,其全氮含量 2.0～2.2 g/kg,全磷 1.5～2.0 g/kg,全钾 0.9～1.0 g/kg。有机肥、磷肥作基肥一次施用,水稻季 60%氮肥、50%钾肥作基肥,40%氮肥和 50%的钾肥作分蘖肥施用;小麦季 30%氮肥、50%钾肥作基肥,70%氮肥和 50%钾肥作拔节肥施用。

1.2　土样采集与测定

试验土壤取样都在水稻收获后进行,0—100 cm 剖面平均分 5 层采取土样,每层 20 cm。2006 年 9 月取剖面样,每个小区用外径 20 mm 土钻取 5 个点,每层土样混合均匀,带回实验室风干,拣去根茬、动物残体等,研磨后分别过 2 mm 和 0.15 mm 筛,分析测定不同施肥处理不同层次土壤全磷和速效磷含量。全磷用 Na_2CO_3 熔融法,速效磷用 Olsen 法,磷的测定用钼锑抗比色法[12]。

2　结果与分析

2.1　长期定位施肥土壤剖面全磷含量的空间变化

土壤全磷在一定程度上反映土壤供磷的潜力。不同施肥处理经过 25 年 50 季轮作种植后,0—100 cm 土壤剖面全磷含量变化(图 1)看出,施磷肥处理 0—100 cm 土壤剖面的土壤全磷含量明显高于不施磷肥处理。施磷处理(NP、NPK、M、MN、MNP、MNPK)剖面全磷平均含量为 5.16 g/kg,比平均含量仅为 3.11 g/kg 的 2 个不施磷处理(CK、N)增加了 65.9%,磷肥的施用显著提高了土壤磷的累积。其中,MNPK 处理剖面土壤全磷含量最高,比 NPK 处理多 2.11 g/kg,较 CK 处理增加 3.80 g/kg;MNP 处理剖面全磷总含量较 NP 处理高 1.76 g/kg,较 CK 处理增加 2.95 g/kg。不同施肥处理土壤剖面全磷含量依次为:MNPK > MNP > MN > NPK > NP > M > CK > N。

图 1 还看出,不同施肥处理土壤剖面全磷含量分布特征有所差异。没有施用磷肥的 CK、N 处理 0—20 cm 层全磷含量占整个剖面含量的比例都超过 34.0%,整个剖面层随着深度的增加,土壤全磷的含量逐渐降低,80—100 cm 层土壤全磷含量都最低。施用化学磷肥的 NP、NPK 处理全磷的分布特征与不施磷肥的 CK、N 处理相似,0—40 cm 土层的全磷含量所占的比例都超过 50.0%,上层高于下层;0—80 cm 土层全磷含量随深度的增加而降低,以 60—80 cm 土层最低。施用有机肥或有机无机肥配施的 M、MN、MNP 和 MNPK 处理与不施有机肥的 4 个处理差异较大,以 40—60 cm 土层全磷含量最低,而 60—100 cm 土层全磷绝对含量和占整个剖面层

的相对比例均明显提高。25年不施磷肥,碱性紫色土全磷分布仍能保持其"上高下低"的典型分布特征。外源磷肥长期不断的投入,特别是有机磷肥的投入,促进了表土层累积的磷垂直向下迁移,使底层磷素的含量增加。本试验中施磷处理的全磷剖面分布特征与杨学云等在□土上的研究结果相似[13]。但紫色土发育时间较短,土层浅薄,因此其中间的低含量层通常在40—80 cm层,较□土的中间层100 cm浅。有机肥与化学肥料配施的MNP、MNPK处理0—20 cm土壤全磷含量比仅施用化学肥料的NP和NPK处理增加了0.19 g/kg。这在某种程度上说明有机磷肥与无机磷肥的配合投入比单纯无机磷肥的投入更能提高表层土壤磷的累积量。

所有处理20—40 cm土层全磷含量都仅次于0—20 cm,CK处理20—40 cm土层全磷含量较N处理高0.26 g/kg,这可能是因为N处理的作物生长状况要好于CK处理,其根系密度更大,从20—40 cm土层吸收了更多的磷养分;另一方面也说明小麦—水稻轮作种植中在没有外源磷投入的情况下,单施氮肥与不施肥相比,作物多吸收的那一部分磷营养主要来自于亚表土层(20—40 cm)。6个施磷处理的20—40 cm全磷含量仍然高于不施磷处理(CK、N),但增长幅度要小于表土层,磷肥的投入同样造成亚表土层(20—40 cm)土壤磷的累积。40—60 cm土层全磷平均含量在5个剖面层次中最低,其平均含量仅0.60 g/kg;各处理间全磷含量的变化最小,极差值为0.60 g/kg。CK、N、NP、NPK处理60—100 cm土层的全磷含量与其在40—60 cm土层含量相比变化很小;但M、MN、MNP、MNPK处理60—100 cm土层含量与其在40—60 cm土层含量相比增加明显,平均增长0.5倍以上。只投入无机磷肥的NP、NPK处理与CK处理相比,60—100 cm土层全磷含量平均增加0.27 g/kg。有机磷与无机磷肥配合施用的MNP、MNPK处理与CK处理相比,60—100 cm土层全磷含量平均增加量达到0.79 g/kg,比NP、NPK处理的平均高0.52 g/kg。Kao和Blanchar[7]认为,长期施有机肥和化学磷肥,粉壤土农田磷淋失深度超过100 cm;Eghball等[8]报道,有机磷比无机磷在土壤剖面迁移得更深;单艳红等[14]报道,在太湖地区的重壤黄泥水稻土上,23年配施有机无机磷肥土壤磷垂直迁移可达30 cm,单施无机磷肥可迁移25 cm。本试验中,25年有机无机磷配施处理、单施无机磷肥处理和单施有机磷处理土壤磷的垂直迁移深度都可达100 cm以上,但有机无机磷配施处理土壤磷向下迁移的量远比单施无机磷肥处理大得多,有机磷肥的施用促进了磷素由表层向底层迁移。

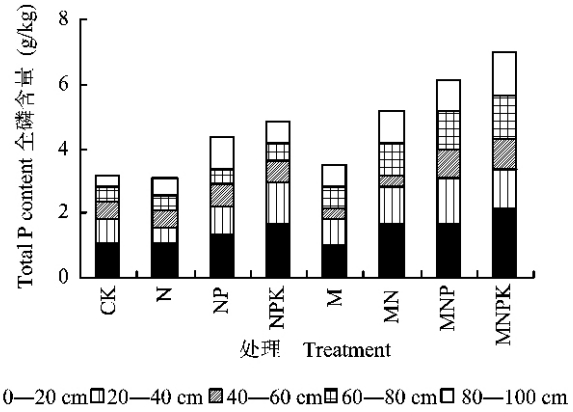

图1 不同施肥处理土壤剖面(0—100 cm)全磷含量

Fig.1 Total P content at different soil depths(0–100 cm) as affected by different treatments

2.2 长期定位施肥土壤剖面速效磷含量的空间变化

不同施肥处理经过25年50季的耕作后0—100 cm土壤剖面速效磷含量分布状况(图2)看出,无论是单施无机磷、有机磷还是有机无机磷配合施用都增加了土壤剖面速效磷的总含量。有机无机磷肥配施对提高土壤速效磷含量的作用最大,MNP处理在所有处理中速效磷总含量最高,与CK处理相比提高了87.32 mg/kg;MNPK处理,提高了82.44 mg/kg;NPK处理比CK提高了71.84 mg/kg。单施有机肥处理,剖面土壤速效磷含量的增加最少。

不施无机磷处理(CK、N、M、MN)60—100 cm土层速效磷含量都占整个剖面速效磷总量的60%以

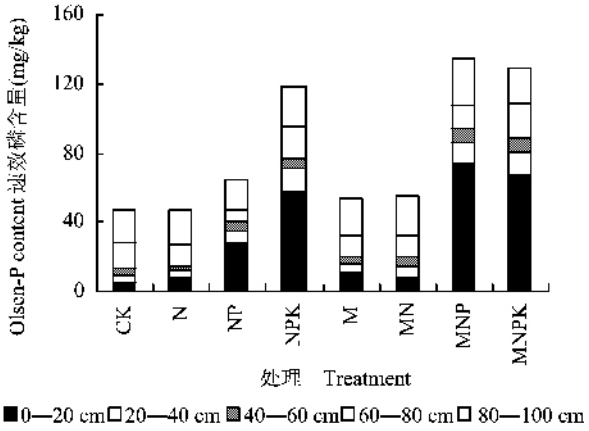

图2 不同施肥处理土壤剖面(0—100 cm)速效磷含量

Fig.2 Olsen-P content at soil different depths (0–100 cm) as affected by different treatments

上。由于没有磷肥的投入或者投入量不够,而小麦、水稻的根系最多只能达到 0—60 cm 深度,为了满足作物生长的需要,上部土层的土壤速效磷因得不到外源速效养分的补充而一直处于耗竭状态,虽然全磷含量比底部土壤高,但大部分的磷为固定态磷,因此,CK、N、M、MN 处理 0—60 cm 土层土壤速效磷含量非常低。另一方面,所有处理 60—100 cm 土层速效磷含量具有或多或少的类似性,说明土壤深层的速效磷含量处于相对稳定状态,受施肥、作物生长和降水淋洗的影响较小或变化缓慢。同时,这也是该土壤深层水分运动不明显的表征。有无机磷投入的处理(NP、NPK、MNP、MNPK)剖面土壤速效磷含量分布特征与全磷相似,40—60 cm 中间层最低,0—40 cm 和 60—100 cm 层相对较高,这可能与这 4 个处理的磷库一直处于盈余状态有关[15]。

施用无机磷肥或者有机无机磷肥配合的处理显著增加了土壤 0—20 cm 土层速效磷的含量。以 MNP 处理含量最高,较 CK 处理提高了近 12 倍;其次为 MNPK 处理,提高了约 11 倍;NPK 处理提高了 9 倍。单施无机磷肥的 NP、NPK 处理与 CK 处理相比,20—40 cm 土层速效磷含量增长明显,但 40 cm 以下土层土壤速效磷含量的差异不大。有机无机磷肥配施的 MNP、MNPK 处理与 CK 处理相比,20—40 cm 土层速效磷含量提高 2.4 倍,40—60 cm 土层提高约 1 倍,60 cm 以下土层速效磷含量也略有提高,但差异非常小,说明有机肥能促进土壤速效磷从表土层向下层土壤缓慢移动。在土壤质地较轻的土壤中,这种磷的向下迁移行为可能会加速土壤磷库的亏损,同时导致地下水的磷富集。□土施用无机磷肥速效磷可迁移至 60 cm 土层,有机无机磷肥配施土壤速效磷可迁移至 100 cm 以下土层。本试验中,25 年施用无机磷肥处理土壤速效磷可迁移至 40 cm 土层,有机无机磷肥配合施用处理可迁移至 60 cm 土层。

2.3　长期定位施肥耕层土壤全磷含量随时间的变化

25 年中不同施肥处理耕层全磷含量变化随着耕作年限的延长差异明显。长期没有无机磷肥投入的 CK、N、M、MN 处理全磷含量表现为"不断降低",而长期有无机磷肥投入的 NP、NPK、MNP 和 MNPK 处理则表现为"逐渐增加";25 年后全磷含量最高的 MNPK 处理与最低的 M 处理间相差达 1.17 g/kg。这说明随着耕作年限的延长,作物收获不断从土壤中带走磷素,施磷与不施磷对土壤磷的盈亏影响加剧。这从另一侧面解释了"试验前期施磷效果不显著,而试验后期施磷极显著增产"[15]的原因。因为土壤磷库具有很好的缓冲性能,试验地随着土壤磷库的不断亏损,缓冲能力不断降低,一旦含磷量低于作物需求临界值,减产成为必然。25 年间没有磷肥投入的 CK、N 处理和只有有机磷肥投入的 M 处理,全磷含量不断降低,CK 处理平均每年下降 0.011 g/kg,N、M 处理平均每年下降约 0.012 g/kg;MNPK 处理全磷提高幅度为平均每年增长 0.033 g/kg,MNP 处理每年增长 0.021 g/kg。充足的磷肥施用使土壤全磷随着年限的增长而积累(图 3)。

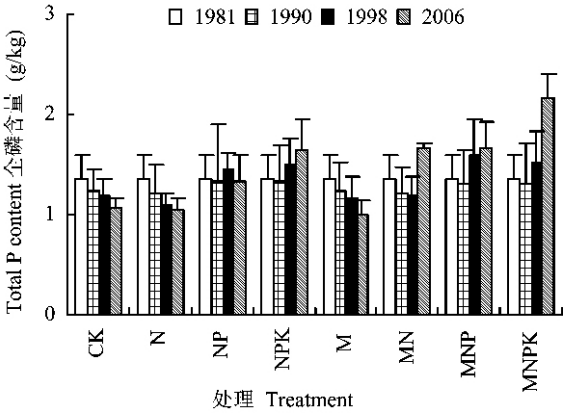

图 3　不同施肥处理耕层土壤(0—20 cm)全磷含量

Fig.3　Total P content in the plough layer (0–20 cm) as affected by different treatments

2.4　长期定位施肥耕层土壤速效磷含量随时间的变化

不同施肥处理 25 年耕作中不同时期的耕层土壤速效磷变化(图 4)看出,长期没有无机磷肥投入的 CK、N、M、MN 处理则变化不大。土壤不同形态磷素间存在一种动态平衡关系,在没有磷肥施入的情况下,因其他形态的磷素的转化维持了土壤速效磷水平;同时,由于试验田养分地处丘陵区谷地的中部,其灌溉水必须经过其他农田,使灌溉水中会带入一部分磷养分,这可能是不施无机磷土壤速效磷含量变化不大的原因。施用磷肥的处理,特别是有机无机磷肥的配合施用对促进土壤速效磷的累积作用尤为明显。MNP 处理土壤速效磷含量增长幅度最大,平均每年增长 2.79 mg/kg;MNPK 处理平均每年增长 2.56 mg/kg;而 NPK 处理平均每年增长 2.16 mg/kg;NP 处理平均每年增长 1.80 mg/kg。Laboski 等[16]研究表明,有机肥的施用能通过有机酸的增加来降低土壤对外源磷的吸附作用,增加磷的活性,这

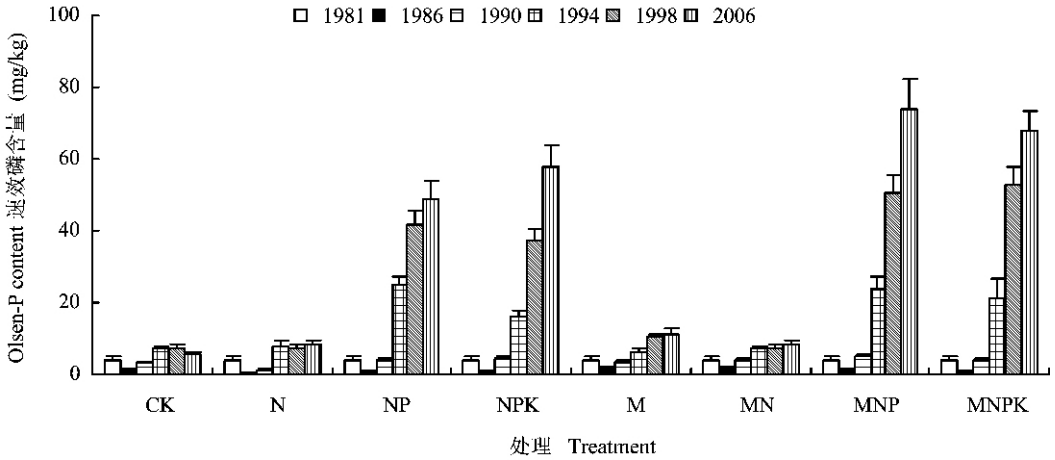

图4 不同施肥处理耕层土壤(0—20 cm)速效磷含量

Fig.4 Olsen-P content in the plough layer (0–20 cm) as affected by different treatments

可能是有机无机磷肥配施比单施无机磷肥更能促进土壤全磷与速效磷累积的原因。

3 结论

1) 碱性紫色土长期连续过量施用磷肥造成0—100 cm土体磷素的累积,以表层累积量最多;有机无机磷肥配合施用比单施无机磷肥更能促进土壤磷素的累积。

2)有机无机磷肥的大量施用造成土壤磷素在土壤剖面向下迁移。25年耕作后,单施无机磷肥或者有机无机磷肥配合施用处理的土壤磷的累积深度都超过100 cm;有机无机磷肥配施土壤磷的向下迁移量远高于单施无机磷肥,其迁移深度比单施无机磷肥深约20 cm。

3)耕作25年间,随着年限的延长,单施无机磷肥的土壤全磷和速效磷含量都快速增长,而没有无机磷肥投入的土壤全磷含量降低明显,土壤速效磷含量变化不大。有机无机磷肥配合施用土壤全磷和速效磷含量的增长速度都比单施无机磷肥快。

参考文献:

[1] S.L.蒂斯代尔,W.L. 纳尔逊 J.D. 毕滕(金继运,刘荣乐,等译). 土壤肥力与肥料[M]. 北京:中国农业科技出版社,1998.163–192.
Tisdale S L, Nelson W L, Beaton D(Jin J Y, Liu R L *et al* trans). Soil fertility and fertilizers[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press, 1998. 163–192.

[2] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费 II.磷肥消费和需求[J]. 土壤, 2004, 36(2): 113–116.
Lu R K. Phosphorus resources and phosphate fertilizer production and consumption of China Ⅱ. Phosphate fertilizer consumption and predicted demand[J]. Soils, 2004, 36(2): 113–116.

[3] 赵海涛,封克,汪晓丽,盛海君. 连续施磷条件下渗育性水稻土无机磷土层分布及移动特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 33–38.
Zhao H T, Feng K, Wang X L, Sheng H J. Distribution and movability of inorganic phosphorous on the percogenic paddy soil under continuously phosphorous fertilizer application[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(1): 33–38.

[4] Chambers B J, Gawood T W D, Unwin R. Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England and Wales[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 145–150.

[5] Butler J S, Coale F *et al*. Phosphorus leaching in manure amended atlantic coastal plain soils[J]. J. Environ. Qual., 2005, 34: 370–381.

[6] 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[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 2001, 32(19/20): 3099–3119.

[7] Kao C W, Blanchar R W. Distribution and chemistry of phosphorus in Albaqualf soil after 82 years of phosphate fertilization[J]. J. Environ Qual., 1973, 2: 237–240.

[8] Eghball B, Binford G D, Dival D B. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application [J]. J. Environ. Qual., 1996, 25: 1339–1343.

[9] 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]. J. Environ. Qual., 2007, 36: 305–315.

[10] 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[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 290–293.

Huang Q H，Li C G，Lai T *et al*. Effects of long-term fertilzation on accumulation and forms of phosphorus in paddy soil derived from red earth[J]. Soil Environ. Sci.，2000，9(4)：290-293.

[11] 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]. Sci. Agric. Sin.，2006，39(1)：102-108.

[12] 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，1999. 170-181.

Lu R K. Methods of soil and agriculture chemical analysis[M]. Beijing：China Agricultural Scientech Press，1999. 170-181.

[13] 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[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(3)：250-254.

Yang X Y，Li S X，Brookes P C. Phosporus distribution and leaching in loessial soil profile with long-term fertilization under irrigation and rainfed condition[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.，2004，10(3)：250-254.

[14] 单艳红，杨林章，沈明星，等. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动[J]. 土壤学报，2005，42(6)：970-976.

Shan Y H，Yang L Z，Shen M X *et al*. Accumulation and downward transport of phosphorus in paddy soil in long-term fertilization experiments[J]. Acta Pedol. Sin.，2005，42(6)：970-976.

[15] 徐明岗，梁国庆，张夫道，等. 中国土壤肥力演变[M]. 北京：中国农业科技出版社，2006. 145-147.

Xu M G，Liang G Q，Zhang F D *et al*. China soil fertility evolution [M]. Beijing：China Agricutural Scientech Press，2006. 145-147.

[16] Laboski C A M，Lamb J A. Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.，2003，67：544-554.