

DOI: 10.5846/stxb201406031147

赵越, 梁新强, 傅朝栋, 朱思睿, 金熠, 叶玉适. 磷肥输入对稻田土壤剖面胶体磷含量的影响. 生态学报, 2015, 35(24): - .
Zhao Y, Liang X Q, Fu C D, Zhu S R, Jin Y, Ye Y S. Effects of phosphorus addition on soil colloidal phosphorus content in a paddy soil profile. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

磷肥输入对稻田土壤剖面胶体磷含量的影响

赵 越¹, 梁新强^{1,2,*}, 傅朝栋², 朱思睿², 金 熠¹, 叶玉适¹

1 浙江大学环境保护研究所, 杭州 310058

2 浙江省水体污染控制与环境安全技术重点实验室, 杭州 310058

摘要: 磷肥管理与土壤磷素赋存息息相关, 本研究选取杭嘉湖地区典型稻田定位实验, 研究磷肥输入下稻田土壤剖面胶体磷含量的变化, 分析不同施肥管理下胶体磷在土壤中的分布规律。结果表明, (1) 胶体磷是磷素在土壤中赋存的重要形式, 能够占到土壤胶体溶液 ($< 1 \mu\text{m}$) 总磷的 85% 以上, 土壤全磷的 0.1%—2%; (2) 磷肥施用增加了土壤胶体磷含量, 特别是在有机肥处理下 0—5 cm 土壤胶体磷含量达到了 8.0 mg/kg; (3) 随着土壤深度的增加, 胶体磷含量减少, 有机肥输入下对深层土壤胶体磷含量的影响较无机肥明显; (4) 水稻收割后表层土壤胶体磷含量与油菜收割后相比减少明显, 0—5 cm 土壤胶体磷含量减少了 90% 左右, 但有机肥施用下胶体磷含量减少较小; (5) 水稻收割后 30—60 cm 土壤胶体磷含量有所增加, 可能与胶体磷发生的纵向迁移有关。了解磷肥输入对稻田土壤剖面胶体磷含量的影响, 为研究土壤磷素赋存形态及迁移变化提供科学依据, 对有效评估胶体磷的环境风险起到指导作用。

关键词: 磷肥管理; 土壤剖面; 胶体磷

Effects of phosphorus addition on soil colloidal phosphorus content in a paddy soil profile

ZHAO Yue¹, LIANG Xinqiang^{1,2,*}, FU Chaodong², ZHU Sirui², JIN Yi¹, YE Yushi¹

1 Institute of Environmental Science and Technology, Hangzhou 310058, China

2 Key Laboratory of Water Pollution Control and Environmental Security Technology, Hangzhou 310058, China

Abstract: Phosphorus (P) fertilization must be conducted with a clear understanding of P forms and their distribution in the soil profile. Excessive application of P fertilizers could eventually cause P accumulation, especially in the topsoil. P loss from a nutrient-enriched agricultural field can lead to eutrophication of water bodies, which has been a recent global concern. Traditionally, the P obtained after filtering a soil solution by using a 0.45- μm microporous membrane is defined as “particulate” or “dissolved” P species. Compared to the immobile soil matrix, colloidal particles (size, typically, between 1 nm and 1 μm) have larger surfaces and stronger sorption capacities. Colloid-facilitated P transport in agricultural soils has received much attention in recent decades because the binding of P species to colloidal particles can largely enhance its mobility. Therefore, colloidal P is an important contributor of P according to soil particle size fractionation, and it plays a significant role in the distribution, transformation, and variation of P in the soil environment. However, to date, few studies have shown the changes in soil colloidal P under long-term P fertilization. This study was based on long-term field experiments conducted in Hangjiahu Plain. We measured the changes of soil colloidal P contents and analyzed its distribution characteristics in a paddy soil profile, under different fertilization managements. Four P fertilizer treatments were applied: no fertilizer control (CK), low P fertilizer (P1, 26 kg P ha⁻¹), high P fertilizer (P2, 39 kg P ha⁻¹), and

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41271314); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07506-006-03)

收稿日期: 2014-06-03; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liang410@zju.edu.cn

manure treatment (M, 26 kg P ha⁻¹). Soil samples were collected after oilseed rape and rice harvests, and the soil profiles were divided into four layers, 0—5, 5—30, 30—60, and 60—100 cm. Soil total P concentration, mass of soil colloidal particles, and colloidal and truly dissolved P in water extraction were determined. Soil colloidal and truly dissolved P were determined using extraction with water, centrifugation, and ultra-centrifugation at 300,000 × *g* for 2 h to remove the colloids; P concentrations were determined using spectrophotometry based on binding with molybdenum and antimony. The mass of soil colloidal particles and colloidal P was calculated as the difference between non-ultracentrifuged and ultracentrifuged samples. Our results showed that colloidal P occupied at least 85% of the P in a soil colloidal solution and 0.1%—2% of the total P in the soil. P fertilization increased soil colloidal P concentration in all treatments, especially in the 0—5 cm layer in the M treatment, in which colloidal P was 8.0 mg/kg. Furthermore, soil colloidal P decreased with soil depth, except in the 0—5 cm and 5—30 cm layers after rice harvest. Colloidal P decreased significantly in these two layers after rice harvest, which might have resulted from the anoxic conditions during the flooded period of rice production. At 0—5 cm depth, soil colloidal P after rice harvest was 90% lower than that after oilseed rape harvest; the reduction was less for the manure treatment. In general, compared to inorganic P fertilizer treatments, manure treatment had a more significant influence on soil colloidal P content. Colloidal P increased from 5.9% to 18.3% in the 30—60 cm layer after rice harvest compared to that after oilseed rape harvest, mainly because of the vertical transport of colloidal P. Our results provide scientific evidence for the existing P forms within the soil profile and the transformation characteristics of P. Our study also offers guidance for evaluating the environmental risk of varying levels of colloidal P.

Key Words: phosphorus addition; soil profile; colloidal phosphorus

我国不同类型土壤含磷量一般在 0.31—1.72 g/kg,并受到气候条件、地理位置、土壤母质及理化性质、施肥方式等的影响^[1]。磷肥和有机肥的过量施用增加了土壤磷素积累及其环境风险^[2]。土壤胶体是粒径介于 1 nm 至 1 μm 之间的细小颗粒,在土壤环境中广泛存在,对污染物的运移变化具有重要作用^[3-4]。土壤胶体磷是土壤磷素与土壤胶体结合形成的一种细颗粒态磷^[5],有研究表明因受土壤基质空间排阻和静电斥力的作用,胶体磷比磷酸根迁移速度更快,移动性更强^[6-7],对环境的影响不可忽视。Hens 等^[8]的研究证实,耕地土壤溶液中 40%—58%的 MRP(钼酸盐反应性磷)及至少 85%的 MUP(钼酸盐非反应性磷)以胶体态存在。水分散胶体磷是底层土壤潜在可运移性磷的主要组成,是表征农田土壤胶体磷流失潜能的重要指标^[9]。

农田土壤胶体磷的存在、运移与施肥密切相关,施肥能够显著影响耕层土壤磷素的组成,因水文条件变化和土壤胶体运移特征的影响,深层土壤也会受到施肥的影响。有研究发现粪便胶体结合态磷可通过土壤大孔隙优先发生纵向迁移,进而影响土壤磷素组成^[10]。胶体磷是水提取态下土壤胶体溶液磷素的主要组成,占到其 78%—91%左右,在磷肥特别是有机肥施用下,因有机胶体的产生,促进了胶体磷的积累和迁移^[11]。胶体磷作为土壤磷素赋存的重要形态,其迁移不仅影响到农作物对磷素的吸收利用,更因其随农田径流的流失造成了水体富营养化风险,在土壤剖面的运移改变着土壤磷库组成。胶体磷在土壤中的分布、迁移、变化对深入认识磷素的环境行为有重要意义。本文通过研究稻田剖面土壤水提取态胶体磷的分布变化情况,了解胶体磷在土壤中的赋存量及其与磷肥输入的关系,同时结合水稻种植前后的变化,为土壤磷素赋存形态及迁移变化的研究提供科学依据,研究成果对合理评估胶体磷的环境风险具有积极作用。

1 材料与方 法

1.1 实验地点概况

实验地点选在浙江省嘉兴双桥农场(120°40'E, 30°50'N),地处杭嘉湖平原,属于亚热带季风气候,年均气温 15.7 °C,年降雨量 1200 mm 左右,年均日照在 2000 小时以上,年均无霜期在 230 d 左右。供试土壤为太湖地区典型青紫泥,潜育性水稻土,基本理化性质为:有机质 19.2 g/kg,全氮 2.74 g/kg,全磷 0.47 g/kg,CEC

8.10 cmol/kg, pH 值 6.78。

1.2 实验设计

实验田自 2005 年起实行水稻-油菜轮作,以过磷酸钙作为无机肥,腐熟的猪粪为有机肥(理化性质见表 1),在保证氮肥施用量相同的情况下,设置 4 组磷肥水平:不施磷肥处理 CK;无机磷肥处理 P1,施磷量为 26 kg P hm⁻²;有机肥处理 M,施磷量与 P1 保持相同;无机磷肥处理 P2,施磷量为 39 kg P hm⁻²。每组 3 个平行,共 12 个小区,小区面积为 20 m²(5 m×4 m),呈两行随机分布。磷肥作为基肥一次性采用撒施的方式施入。

1.3 样品采集与测定

油菜、水稻收割后各采集土壤剖面,将剖面土壤分为 4 层,分别是 0—5 cm、5—30 cm、30—60 cm 和 60—100 cm,土壤风干后研磨过 2 mm 筛。土壤全磷测定采用硫酸-高氯酸消解法,具体操作参考鲁如坤《土壤农业化学分析方法》^[12]。土壤中水分散胶体磷参考 Ilg 等^[9]采用的离心方法测定,具体操作如下:(1) 10 g 土壤与 80 mL 去离子水震荡混合 24 h;(2) 提取液在 3,000 g 下离心 10 min,去除粗颗粒;(3) 然后将上清液过 1 μm 生物膜,过膜液体被认为是土壤胶体溶液;(4) 将此溶液在 300,000 g 下超速离心 2 h,去除土壤胶体颗粒;(5) 未超速离心和超速离心的溶液,用酸性过硫酸钾消解后钼蓝比色测定磷浓度,两者之差即为胶体磷浓度^[13]。超速离心溶液经酸性过硫酸钾消解后钼蓝比色得出水提取态真溶解性磷浓度。离心管在离心前后的质量差,可求得土壤胶体释放量^[14]。

表 1 猪粪有机肥的理化性质

Table 1 Properties of pig manure used in the study

类别 Category	pH	含水率 Moisture content /%	有机质 Organic matter /(g/kg)	离子交换容量 Cation exchange capacity /(cmol/kg)	总磷 Total P /(g/kg)	总氮 Total N /(g/kg)	铁含量 Fe /(g/kg)	铝含量 Al /(g/kg)
猪粪 Pig manure	8.3±0.2	63±2.5	695.3±45.7	42.01±6.40	10.7±0.17	36.7±0.37	6.78±0.12	11.57±0.27

1.4 数据处理

利用 Excel 2010、SPSS 18.0 软件对数据进行统计作图,所有数据测定结果均以 3 次重复的平均值表示,方差显著性分析采用 LSD 法,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤全磷剖面分布的影响

水稻种植前后土壤全磷的变化情况(见图 1)显示,磷的输入促进了磷素在表层土壤的集聚。油菜收割后在 CK 处理下,0—5 cm 土壤全磷含量为 0.58 g/kg,而 P1、M、P2 处理较 CK 处理分别高出 48.2%、56.1%、73.7%。表层以下土壤,除 M 和 P2 处理下 5—30 cm 土壤全磷明显增加外,磷肥施用对全磷含量没有影响。从水稻收割后土壤磷素的累积变化情况看,只有 0—5 cm 和 5—30 cm 土壤全磷与油菜收割后相比发生了变化。除 CK 处理下全磷减少外, P1、M、P2 处理下 0—5 cm 土壤全磷分别较油菜收割后提高了 2.9%、7.4%、6.1%,5—30 cm 土壤全磷分别较油菜收割后提高 4.7%、8.0%、3.9%。

施肥对土壤磷含量的影响主要体现在 0—5 cm 和 5—30 cm 的土壤。随着施肥量的增加,土壤累积磷量也逐渐加大。由于植物的吸收利用,CK 处理的磷素处于“负亏”状态。长期过量施肥容易造成土壤磷素积累,增加磷素流失风险^[15]。油菜收割后相比无机肥 P1 处理, P2 处理下表层土壤全磷增量明显。因为是撒施磷肥,水稻收割后施肥处理下的 0—5 cm 土壤全磷较油菜收割后显著提高,而 5—30 cm 土壤全磷含量的增加表明在水稻淹水过程中磷素存在一定程度的下移。各施肥处理间 30 cm 以下的土壤,全磷含量并无显著性差异($P < 0.05$),这说明土壤磷素下移程度有限,施肥对深层土壤的磷含量影响小。有研究表明长期施用有机肥容易造成磷素在土壤累积^[16]。有机肥对磷素在土壤中的累积效应要高于无机磷肥处理,一方面可能是由

于作物吸收主要是无机磷,有机肥富含有机磷,有机磷能够在土壤中集聚下来^[17],另一方面有机肥富含有机质,有机质可以通过竞争土壤矿物固磷点位而提高土壤磷素的活性,更易于发生迁移^[18]。

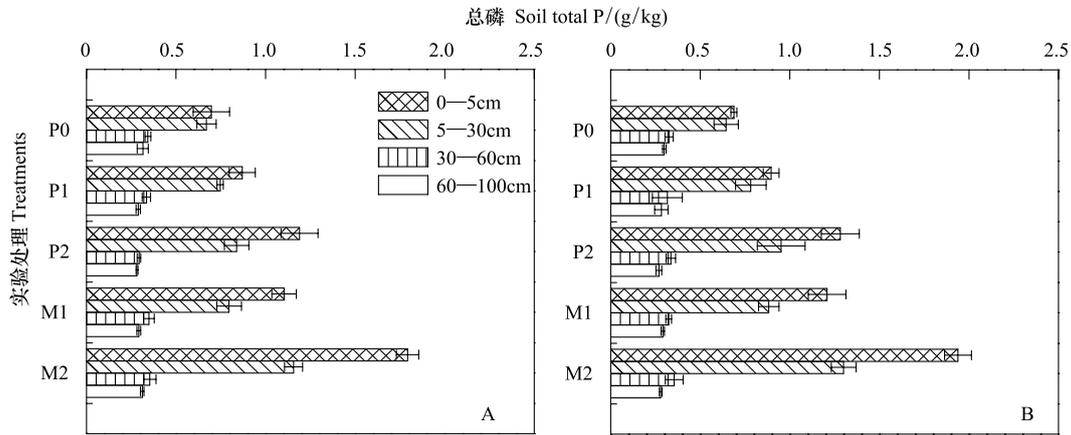


图 1 不同施肥处理土壤剖面全磷含量,其中(A)为 2013 年 5 月油菜收割后,(B)为 2013 年 11 月水稻收割后

Fig. 1 The total P of soil profile in different fertilizer treatments, the date of (A) was May 2013 after oilseed rape harvest and the date of (B) was November 2013 after rice harvest

2.2 施肥对土壤剖面胶体释放量的影响

土壤胶体释放量随土壤深度的增加,呈现增大趋势(见表 2 和表 3),且水稻种植前后发生了显著变化。油菜收割后,施用有机肥增加了 0—5 cm 和 5—30 cm 的土壤胶体释放量,与其它处理相比达到了显著性差异 ($P < 0.05$),而 30 cm 以下土壤未出现差异。水稻淹水处理使 0—5 cm 和 5—30 cm 的土壤胶体释放量减小,而 30 cm 以下的土壤胶体释放量有所增加。水稻收割后,有机肥处理下 5—30 cm 和 30—60 cm 的土壤胶体释放量增加,无机肥和不施肥处理间并没有差异。

表 2 油菜收割后不同施肥处理土壤胶体释放量 (g/kg)

Table 2 The mass of soil colloidal particles in different fertilizer treatments after oilseed rape harvest

土壤剖面 Soil profile	CK	P1	M	P2
0—5 cm	0.58 ± 0.06b	0.63 ± 0.06ab	0.72 ± 0.05a	0.62 ± 0.03ab
5—30 cm	1.96 ± 0.21b	2.03 ± 0.09ab	2.48 ± 0.16a	2.19 ± 0.31ab
30—60 cm	3.92 ± 0.07a	4.10 ± 0.44a	3.94 ± 0.02a	4.15 ± 0.48a
60—100 cm	5.43 ± 0.13a	5.35 ± 0.16a	5.40 ± 0.16a	5.36 ± 0.28a

同一行中不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

表 3 水稻收割后不同施肥处理土壤胶体释放量 (g/kg)

Table 3 The mass of soil colloidal particles in different fertilizer treatments after rice harvest

土壤剖面 Soil profile	CK	P1	M	P2
0—5 cm	0.15 ± 0.01a	0.14 ± 0.04a	0.12 ± 0.03a	0.11 ± 0.07a
5—30 cm	0.80 ± 0.07b	0.81 ± 0.02b	1.05 ± 0.05a	0.87 ± 0.02b
30—60 cm	5.34 ± 0.05ab	4.99 ± 0.19b	5.67 ± 0.25a	5.09 ± 0.06b
60—100 cm	6.17 ± 0.16a	6.03 ± 0.02a	6.34 ± 0.11a	6.21 ± 0.21a

同一行中不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

从表 2 和表 3 可以看出,土壤胶体释放量受到土壤深度影响,并随土壤深度的增加而增加,这与 Zang 等^[11]的研究一致。同时,施肥也对土壤胶体的释放产生影响,主要是有机肥处理下有增加的趋势,这可能是由于有机肥释放有机胶体的原因所致^[19]。水稻收割后 0—5 cm 和 5—30 cm 土壤胶体释放量明显减少,说明受淹水条件下土壤基质的活化、有机碳矿化^[20]等过程影响,土壤胶体活化迁移流失。30 cm 以下土壤胶体释

放量的增加,则说明在水稻淹水过程中土壤胶体有可能随土壤优势流发生下移现象。因土壤胶体受多种因素的影响,深层土壤理化性质(pH 值、电导率、氧化还原点位等)的变化,也可能是引起土壤胶体释放量变化的原因。

2.3 施肥对土壤胶体磷剖面分布的影响

油菜收割后不同施肥处理土壤剖面胶体磷含量显示(见图 2),土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)中磷素主要以胶体磷形式存在,胶体磷占到了土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)磷素的 86.5%—92.7%,占到了土壤全磷的 0.6%—1.8%,且随土壤深度的增加胶体磷含量逐渐减少。相比 CK 处理,施肥处理增加了 0—5 cm 和 5—30 cm 土壤胶体磷含量。0—5 cm 的土壤,CK、P1、M、P2 各处理胶体磷含量分别为 5.3、6.7、8.0、6.9 mg/kg,占土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)总磷的 86.5%、88.0%、90.1%、88.8%,占土壤全磷的 0.9%、0.8%、0.7%、0.6%。5—30 cm 土壤,P1、M、P2 处理胶体磷含量较 CK 处理分别提高了 26.1%、39.0%、27.1%。有机肥处理下,胶体磷含量与无机肥处理相比达到了显著性差异($P < 0.05$)。施肥对 30 cm 以下土壤胶体磷含量没有产生影响。

水稻收割后不同施肥处理土壤剖面胶体磷含量则显示(见图 3),0—5 cm 和 5—30 cm 土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)中磷素组成发生了显著变化,胶体磷含量减少。0—5 cm 的土壤,CK、P1、M、P2 各处理胶体磷含量分别为 0.63、0.6、1.0、0.72 mg/kg,仅为水稻种植前 0—5 cm 土壤胶体磷的 9.0%—12.5%,占到了土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)总磷的 26.9%—36.2%,水提取态真溶解性磷成为了土壤胶体溶液磷素主要组成部分。5—30 cm 土壤胶体磷含量相比 0—5 cm 增多,不同施肥处理之间并无显著性差异。30 cm 以下的土壤胶体磷仍是土壤胶体溶液磷素的主要组成,均占到土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)总磷的 90%以上。施肥对胶体

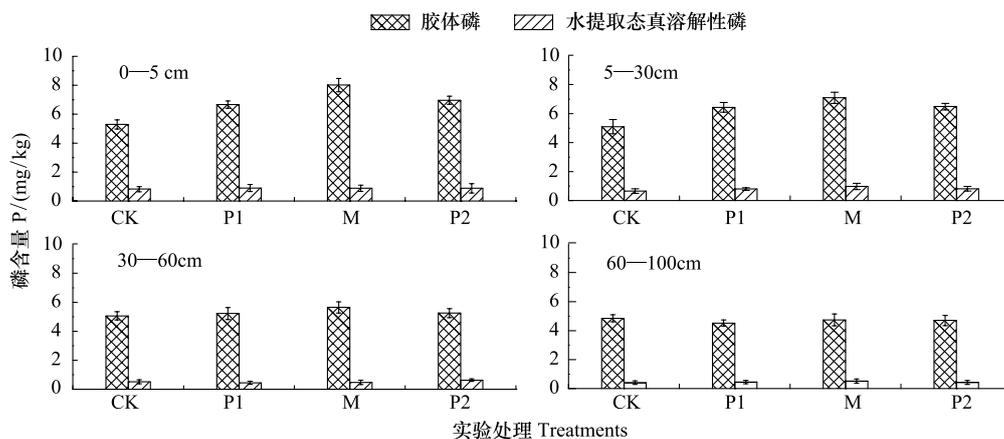


图 2 油菜收割后不同施肥处理土壤剖面胶体磷含量

Fig. 2 The contents of colloidal phosphorus of soil profile in different fertilizer treatments after oilseed rape harvest

磷含量的影响表现在 30—60 cm 土壤中,有机肥处理下增量较大,与其它处理相比达到显著性差异($P < 0.05$),无机肥处理下胶体磷含量与不施肥处理相比也具有显著性差异($P < 0.05$)。但不同处理间 60—100 cm 土壤胶体磷含量没有差异。

油菜收割后土壤胶体磷是土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)总磷的主要形态(见图 3),占到了 85%以上。植物吸收利用主要是溶解态的磷,在溶解态磷和土壤固定的磷之间,胶体磷可能起到连接架桥的作用。磷素在土壤中易被固定,同时提取态的土壤胶体具有一定的吸附性能,所以水提取态下的真溶解性磷含量较少。Ilg 等^[9]对水溶剂提取下农田土壤磷有效性进行研究,发现土壤水提液中胶体磷含量明显高于真溶解态磷,与我们的研究一致,这表明胶体磷是土壤活性磷的主要组成部分。因胶体特殊的迁移性,胶体磷在磷素迁移转化中起到重要作用。

从油菜收割后土壤剖面胶体磷含量的变化可以看出,随着土壤深度的增加,胶体磷含量减少。水稻收割后土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)的总磷含量发生显著变化,0—5 cm 和 5—30 cm 土壤胶体溶液磷含量减少,主要在

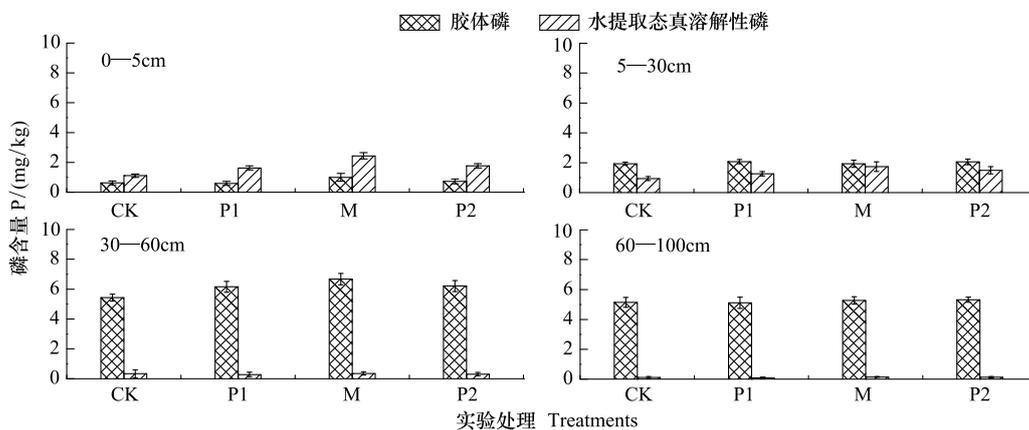


图3 水稻收割后不同施肥处理土壤剖面胶体磷含量

Fig. 3 The contents of colloidal phosphorus of soil profile in different fertilizer treatments after rice harvest

于胶体磷的减少,水提取态真溶解性磷反而增加。这可能在于三个方面;一是水稻植株生长需吸收利用了大量磷素,胶体磷作为磷源,因解吸作用可以提供溶解性的磷;二是因为土壤淹水处理下显著降低了土壤氧化还原电位,进而导致土壤胶体与土壤基质间结合的铁膜被还原溶解,促发了土壤胶体或者胶体磷的径流流失^[7];三是从土壤胶体释放量的变化看,水稻收割后5—30 cm和30—60 cm的土壤胶体释放量增加,这说明可能出现了胶体的下移,进而胶体磷也发生迁移。但由于胶体磷受多种环境因素影响,水稻淹水改变下层土壤的pH值、电导率等理化因素,进而改变土壤胶体的释放影响胶体磷含量。

施肥对土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)磷素组成产生影响,增加了胶体磷含量。有机肥对土壤胶体磷的影响较无机肥处理更明显,有机肥处理下30 cm以上的土壤以及水稻收割后30—60 cm的土壤,胶体磷含量与其它处理相比均具有显著性差异,这可能是因为有有机肥释放有机胶体所致^[19]。土壤胶体释放量的变化,则进一步说明了有机肥的作用。王月立等^[21]的研究证实施用有机肥更易于磷素向下迁移。而土壤大孔隙是粪便胶体结合态磷发生纵向迁移的重要通道^[10]。从水稻种植前后剖面土壤胶体磷含量变化来看,水稻收割后30 cm以下土壤胶体磷较油菜收割后增加了5.9%—18.3%,且30 cm以上的土壤胶体磷含量减少,这说明了胶体磷可能存在的下移趋势,且施用有机肥能够促进这一趋势。

3 结论

长期施肥试验下土壤剖面磷素分布结果表明:施肥对土壤磷含量的影响主要集中在0—5 cm和5—30 cm的土壤。土壤胶体释放量受到土壤深度影响,并随土壤深度的增加而增加。稻田剖面土壤胶体磷含量约占土壤全磷的0.1%—2.0%,是磷素在土壤中赋存的重要形式,占到了土壤胶体溶液($< 1 \mu\text{m}$)总磷的85%以上。磷肥施用能够增加土壤胶体磷含量,有机肥对胶体磷的影响较无机肥显著。水稻收割后,表层土壤胶体磷含量显著减少。施有机肥、水旱轮作有助于保持土壤表层胶体磷库的水平。水稻种植前后剖面土壤胶体释放量和胶体磷含量的变化,特别是在有机肥处理下30—60 cm的土壤,表明了胶体磷可能存在的纵向迁移。

参考文献 (References):

- [1] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268.
- [2] 刘建玲, 廖文华, 张作新, 张海涛, 王新军, 孟娜. 磷肥和有机肥的产量效应与土壤积累磷的环境风险评价. 中国农业科学, 2007, 40(5): 959-965.
- [3] 熊毅. 土壤胶体的组成及复合. 土壤通报, 1979, (5): 1-8, 28-28.
- [4] Yu C R, Gao B, Carpena R M, Tian Y, Wu L, Perez-Ovilla O. A laboratory study of colloid and solute transport in surface runoff on saturated soil. Journal of Hydrology, 2011, 402(1/2): 159-164.
- [5] Kretzschmar, R, Sticher H. Transport of humic-coated iron oxide colloids in a sandy soil: Influence of Ca^{2+} and trace metals. Environmental Science

- & Technology, 1997, 31(12): 3497-3504.
- [6] Klitzke S, Lang F, Kaupenjohann M. Increasing pH releases colloidal lead in a highly contaminated forest soil. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(2): 265-273.
- [7] Henderson R, Kabengi N, Mantripragada N, Cabrere M, Hassan S. Anoxia-induced release of colloid and nanoparticle-bound phosphorus in grassland soils. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 11727-11734.
- [8] Hens M, Merckx R. The role of colloidal particles in the speciation and analysis of "dissolved" phosphorus. *Water Research*, 2002, 36(6): 1483-1492.
- [9] Ilg K, Siemens J, Kaupenjohann M. Colloidal and dissolved phosphorus in sandy soils as affected by phosphorus saturation. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 926-935.
- [10] McGechan M B. SW-Soil and Water: Effects of timing of slurry spreading on leaching of soluble and particulate inorganic phosphorus explored using the MACRO model. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(2): 237-252.
- [11] Zang L, Tian G M, Liang X Q, He M M, Bao Q B, Yao J H. Profile distributions of dissolved and colloidal phosphorus as affected by degree of phosphorus saturation in paddy soil. *Pedosphere*, 2013, 23(1): 128-136.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [13] Liang X Q, Liu J, Chen Y X, Li H, Ye Y S, Nie Z Y, Su M M, Xu Z H. Effect of pH on the release of soil colloidal phosphorus. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(8): 1548-1556.
- [14] Siemens J, Ilg K, Pagel H, Kaupenjohann M. Is colloid-facilitated phosphorus leaching triggered by phosphorus accumulation in sandy soils?. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(6): 2100-2107.
- [15] 单艳红, 杨林章, 沈明星, 王建国, 陆长缨, 吴彤东. 长期不同施肥处理水稻土磷素在剖面的分布与移动. *土壤学报*, 2005, 42(6): 970-976.
- [16] Garg A K, Aulakh M S. Effect of long-term fertilizer management and crop rotations on accumulation and downward movement of phosphorus in semi-arid subtropical irrigated soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(7): 848-864.
- [17] 王建国, 杨林章, 单艳红, 沈明星, 路长缨. 长期施肥条件下水稻土磷素分布特征及对水环境的污染风险. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 82-92.
- [18] Guppy C N, Menzies N W, Blamey F P C, Moody P W. Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soils?. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5): 1405-1411.
- [19] Zang L, Tian G M, Liang X Q, Liu J Z, Peng G Q. Effect of water-dispersible colloids in manure on the transport of dissolved and colloidal phosphorus through soil column. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(30): 6369-6376.
- [20] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 方海兰. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1944-1950.
- [21] 王月立, 张翠翠, 马强, 周桦, 徐永刚, 姜春明, 宇万太. 不同施肥处理对潮棕壤磷素累积与剖面分布的影响. *土壤学报*, 2013, 50(4): 761-768.