

红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点*

郭万伟^{1,2} 肖和艾^{1†} 吴金水¹ 丁龙君^{1,2} 刘守龙¹

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态重点实验室, 长沙 410125)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 为深入探讨红壤磷素有效性的控制机理, 研究了典型红壤旱土和水稻土团聚体中磷的组分与分布特点。结果表明: 旱土和水稻土以粒径 > 0.2 mm 的团聚体为主, 且在该级土壤团聚体中磷素含量较高; 两种土壤 > 0.2 mm 团聚体中吸附态无机磷以 Fe-P 为主, 而 < 0.02 mm 团聚体以 O-P 为主; 水稻土 > 0.2 mm 和 < 0.002 mm 团聚体的各组分有机磷总量亦显著高于旱土对应的团聚体。说明土壤磷的形态分布与团聚体粒级有密切关系, 旱土有效磷含量较低可能与其团聚体游离氧化铁含量较高、且有机磷含量较低有关。

关键词 红壤; 团聚体; 吸附态无机磷; 有机磷

中图分类号 S153.6

文献标识码 A

磷是植物生长所必需的大量营养元素之一。由于土壤矿物对磷素具有吸附和固定作用, 土壤磷素的作物有效性普遍较低^[1]。红壤是广泛分布于我国亚热带地区的主要土壤类型, 其风化程度高, 含有大量的高岭石及铝、铁、锰氧化物胶体矿物, 对磷酸盐的吸附作用强烈, 通常磷肥的当季作物利用率仅为 10%~25%^[2]。随着红壤区作物产量的不断提高, 农业生产对磷肥的依赖性越来越强, 而大量施用磷肥的环境风险已十分突出^[3]。因此, 研究红壤区土壤磷素的贮存状态, 对于深入了解其转化机理与有效性具有重要意义。

土壤磷可分为活性无机磷 (Olsen-P)、吸附态无机磷 (包括 Fe、Al 和 Ca 结合态以及闭蓄态磷)、有机磷和微生物生物量磷等组分, 尽管其有效性存在很大差异, 但各组分磷处于互相转化的动态平衡之中, 对土壤磷素有效性都有直接的影响^[4]。土壤磷的形态与分布状况与土壤团聚体粒径有关, 小团聚体含有较高的活性磷和易矿化的有机磷^[5, 6]。据文倩等^[6]研究, 土壤微生物量磷和有机磷在栗钙土大团聚体 (> 2 mm) 中的含量均高于小团聚体 (< 2 mm), 大团聚体中的中稳定性和稳定性有机磷含量较高, 活性和中活性有机磷含量则在 > 2 mm 或 < 0.5 mm 团聚体中较高。Elliott^[7]研究发现土壤大

团聚体含有更多的有机磷。土壤团聚体及其磷素形态与分布与土壤类型有关。例如, 棕壤 < 10 μm 微团聚体对磷的吸附和保持作用远大于其他粒级, 在土壤保磷方面起着关键作用^[8]。砂姜黑土有机磷主要分布在 < 5 μm 团聚体中, 各组分有机磷含量随团聚体粒径的增大而降低^[9]。黄棕壤 < 50 μm 小团聚体中全磷和有机磷含量较高^[10, 11]。但目前红壤土壤团聚体中磷素的分布还缺乏研究。

本研究选择典型第四纪红土发育的旱土和水稻土, 研究两类土壤水稳定性团聚体的构成, 以及不同粒级团聚体中全磷、Olsen-P、吸附态无机磷和有机磷的含量和分布特征, 以期为深入研究土壤团聚体在磷素转化中的作用提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤

选择湖南桃源盘塘典型第四纪红土发育的旱土和水稻土; 其中旱土原为旱地, 但在近 6a 未耕种, 以避免因施肥对土壤团聚体磷素分布状况的影响, 而水稻土一直维持双季稻管理。

取表层 0~20 cm 土壤样品, 尽量避免挤压以保持土壤原状结构。在室内将样品沿土壤自然结构

* 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-423、KZCX2-YW-408)、国家自然科学基金面上项目 (40571086、40771116) 和国家科技支撑计划项目 (2008BADA7B09) 资助

† 通讯作者, E-mail: haxiao@isa.ac.cn

作者介绍: 郭万伟 (1980~), 男, 硕士研究生, 研究方向土壤与环境生态。E-mail: wwguo613@163.com

收稿日期: 2007-09-25; 收到修改稿日期: 2008-01-05

用手轻轻掰成直径为约 1 cm 小块(尽量避免破坏土壤结构),剔去样品中可见的动植物残体和小石块,自然风干,用于土壤团聚体分级。另取 1 份土样,风

干、研磨并过 2 mm、1 mm、0.25 mm 和 0.149 mm 筛,用于基本性质分析(分析测定方法如本文 1.3 节所述)。供试土壤的基本性质如表 1。

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the soils used

土壤类型 Soil type	黏粒含量 Clay content ($<2\ \mu\text{m}$, %)	pH (H_2O)	pH ($1\ \text{mol L}^{-1}\ \text{KCl}$)	阳离子交换量 CEC (cmol kg^{-1})	阴离子交换量 AEC (cmol kg^{-1})	有机质 OM (mg g^{-1})	全磷 Total P ($\mu\text{g g}^{-1}$)	有效磷 Olsen-P ($\mu\text{g g}^{-1}$)
旱土 Upland	36.4	5.2	4.0	12.4	12.3	15.2	417	3.5
水稻土 Paddy	35.6	5.0	4.1	9.9	11.2	26.3	481	7.2

1.2 土壤团聚体分离

采用湿筛法和吸管法^[12](根据试验要求略作修改)分离 5 个粒级的团聚体。具体操作步骤为:每次称取风干土样 50.00 g,在 25℃ 水中浸泡 10 min 后依次通过 2 mm 和 0.2 mm 的筛,分别获得 $>2\ \text{mm}$ 和 $2\sim0.2\ \text{mm}$ 团聚体;再用吸管法分离出 $0.2\sim0.02\ \text{mm}$ 、 $0.02\sim0.002\ \text{mm}$ 和 $<0.002\ \text{mm}$ 团聚体。收集所获得的各粒级团聚体(每个粒级至少 20 g),在 50℃ 下烘干至恒重。

1.3 分析方法

土壤团聚体组成在上述分离后直接测定(105℃ 下烘干至恒重)。

土壤及团聚体的黏粒含量采用吸管法^[12]测定。土壤有机质含量测定采用重铬酸盐氧化法^[13],土壤阳离子交换量测定采用乙酸铵交换法^[12]、阴离子交换量测定采用 Mehlich 法^[14];土壤 pH 采用 1:2.5 土水比浸提,用酸度计(Mettler-toledo320)测定。

土壤团聚体游离氧化铁和氧化铝含量采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠(DCB)在 80℃ 水浴中浸提-提铁灵联合比色法^[14]测定。土壤和团聚体全磷含量采用 NaOH 熔融法^[12]测定。土壤团聚体无机磷分级采用 Chang-Jackson 法^[15,16]。具体操作步骤是先用 $1.0\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NH}_4\text{Cl}$ 提取团聚体水溶性磷;再分别用 $0.5\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NH}_4\text{F}$ 提取 Al-P, $0.1\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NaOH}$ 提取 Fe-P, $0.3\ \text{mol L}^{-1}$ 柠檬酸钠和连二亚硫酸钠提取 O-P, $0.5\ \text{mol L}^{-1}\ \text{H}_2\text{SO}_4$ 提取 Ca-P。土壤和团聚体有效磷含量的测定采用 Olsen 法^[12],土壤团聚体有机磷分级采用 Bowman-Cole 法^[17]。其具体操作是先用 $0.5\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NaHCO}_3$ 提取活性有机磷,再分别用 $1\ \text{mol L}^{-1}\ \text{H}_2\text{SO}_4$ 提取中活性有机磷, $0.5\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NaOH}$ 提取稳定性有机磷,最后将 $0.5\ \text{mol L}^{-1}\ \text{NaOH}$ 提取液的 pH 调为 1.0~1.5,从其上清液中得到中稳定性有机磷,以上各组分有机磷含

量为提取液消化前后的磷含量之差。上述提取液中磷含量采用 Murphy 等^[18]方法显色、比色(UV8500-II 型分光光度计)测定。

数据均为 3 次重复的平均值,以烘干土壤或团聚体量计。采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行数据处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体构成及其主要成分

供试旱土和水稻土团聚体 5 个粒级中 $>2\ \text{mm}$ 粒级分别占 23.4% 和 28.7%, $2\sim0.2\ \text{mm}$ 粒级分别占 48.5% 和 36.8%, $0.2\sim0.02\ \text{mm}$ 粒级分别占 9.0% 和 15.0%, $0.02\sim0.002\ \text{mm}$ 粒级分别占 17.9% 和 16.8%, 而 $<0.002\ \text{mm}$ 粒级的比例很小,分别为 1.3% 和 2.6% (图 1a)。可见,两种土壤中均以 $2\sim0.2\ \text{mm}$ 粒级的团聚体所占比例最高,且旱土较水稻土高 11.7% ($p < 0.01$);但旱土 $>2\ \text{mm}$ 粒级的大团聚体和 $0.2\sim0.02\ \text{mm}$ 粒级的中、小团聚体的比例较水稻土低,而 $0.02\ \text{mm}$ 以下粒级的小团聚体的比例两者基本相当。

在大于黏粒粒径($<0.002\ \text{mm}$)的团聚体中,旱土 $>2\ \text{mm}$ 和 $2\sim0.2\ \text{mm}$ 团聚体的黏粒含量基本相当(分别为 30.2% 和 32.2%),但较其土壤黏粒含量(36.4%;表 1)低 4~6 个百分点($p < 0.01$;图 1b);而水稻土中这 2 个粒级团聚体的黏粒含量基本相同(分别为 33.0% 和 33.6%),与土壤黏粒含量(35.6%;表 1)接近。旱土和水稻土 $0.2\sim0.02\ \text{mm}$ 粒级团聚体的黏粒含量均很低,分别为 8.0% 和 8.7%, $0.02\sim0.002\ \text{mm}$ 粒级团聚体的黏粒含量也均低于土壤黏粒含量,分别为 23.8% 和 17.9%。

旱土中 $>2\ \text{mm}$ 、 $2\sim0.2\ \text{mm}$ 和 $0.02\sim0.002\ \text{mm}$ 3 个粒级团聚体的游离氧化铁含量范围为 31~34

mg g^{-1} , 而 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级中的游离氧化铁含量较低, 仅为 9.7 mg g^{-1} , 但 $<0.002 \text{ mm}$ 粒级中的游离氧化铁含量高达 63.2 mg g^{-1} (图 2a)。水稻土 $>2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 和 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 3 个粒级团聚体的游离氧化铁含量也较接近, 约为 19 mg g^{-1} , 显著低于旱土相同粒级团聚体的游离氧化铁含量。水稻土中 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级中的游离氧化铁含量与旱土同粒级相当, 但 $<0.002 \text{ mm}$ 粒级中的游离氧化铁

含量仅为旱土该粒级的 $1/2$ (32.0 mg g^{-1}) (图 2a)。

旱土和水稻土 $>2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 和 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 4 个粒级团聚体的游离氧化铝含量均很低, 其中 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级低于 1.0 mg g^{-1} , 其他 3 个粒级均在 $1.5 \sim 2.2 \text{ mg g}^{-1}$ 范围内 (图 2b)。两种土壤 $<0.002 \text{ mm}$ 粒级团聚体的游离氧化铝含量较前 4 个粒级有大幅度提高, 分别为 5.7 和 5.3 mg g^{-1} 。

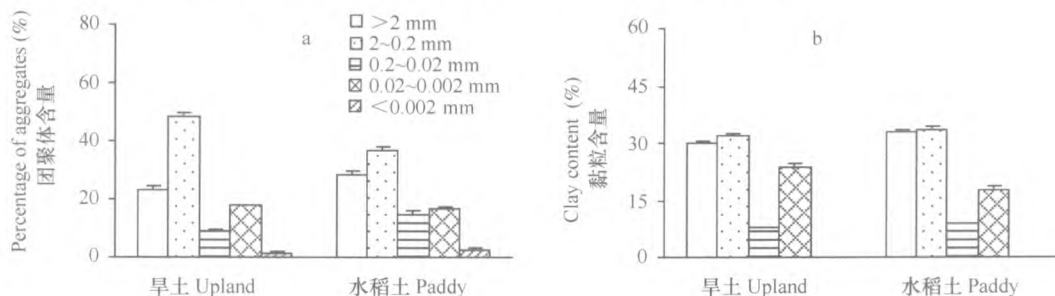


图 1 旱土和水稻土团聚体的分布(a)和粒径大于 0.002 mm 团聚体的黏粒含量(b)

Fig. 1 Distribution of aggregates (a) and clay content of aggregates $>0.002 \text{ mm}$ (b) in the upland and paddy soils

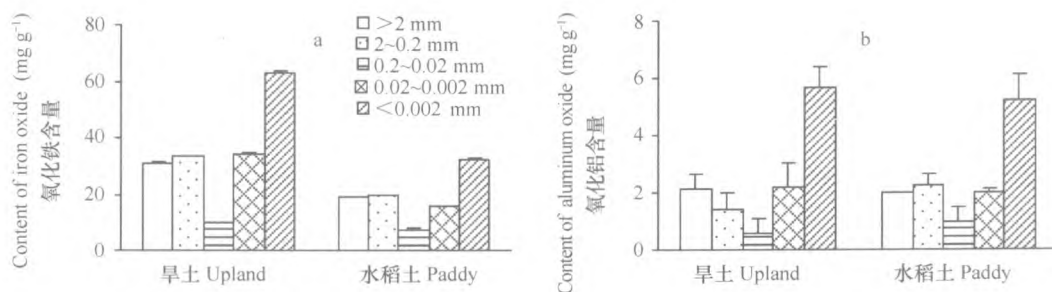


图 2 旱土和水稻土团聚体游离氧化铁(a)和氧化铝(b)的分布

Fig. 2 Distribution of free iron oxide (a) and free aluminum oxide (b) in aggregates of the upland and paddy soils

2.2 土壤团聚体中磷素的分布

旱土 $>2 \text{ mm}$ 和 $<0.002 \text{ mm}$ 粒级团聚体的全磷含量分别为 512 和 $470 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 显著高于土壤全磷含量 ($417 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$); $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 和 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 粒级团聚体的全磷含量分别为 421 和 $412 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 与土壤全磷含量接近; 而 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级团聚体的全磷含量仅为 $133 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ (图 3a)。水稻土则以 $<0.002 \text{ mm}$ 粒级团聚体的全磷含量最高 (约为 $530 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$), $>2 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 粒级团聚体全磷含量 (分别为 473 和 $486 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$) 与土壤全磷含量 ($481 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$) 接近; 而 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 和 $0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$ 粒级团聚体的全磷含量分别为 402 和 $196 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 显著低于土壤全磷含量 (图 3a)。

两种供试土壤 $>2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 和 $0.2 \sim$

0.02 mm 3 个粒级团聚体的有效磷 (Olsen-P) 含量, 旱土为 $5.3 \sim 1.6 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 水稻土为 $6.6 \sim 3.9 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ (图 3b)。但粒级更小的团聚体 ($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ 和 $<0.002 \text{ mm}$) 的有效磷反而较高, 旱土 $<0.002 \text{ mm}$ 团聚体的有效磷为 $9.6 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 水稻土为 $15.2 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 。

旱土吸附态无机磷 (包括 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P) 总量以大 ($>2 \text{ mm}$) 和小 ($<0.002 \text{ mm}$) 团聚体较高, 分别约为 $220 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 和 $250 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 中等 ($0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$) 团聚体较低, 其余 2 个粒级 ($2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 和 $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$) 居于中等水平, 分别约为 $140 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 和 $160 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ (图 4)。旱土 $>2 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 0.2 \text{ mm}$ 团聚体中的吸附态无机磷以 Fe-P 的比例最大, 约占 40%, O-P 的比例分别约为 25% 和 35%,

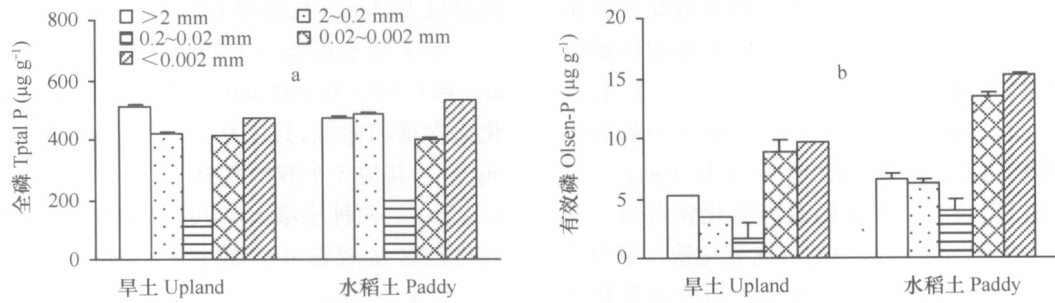


图3 旱土和水稻土团聚体中全磷(a)和 Olsen-P(b)的分布

Fig. 3 Distribution of total P (a) and Olsen-P (b) in aggregates of the upland and paddy soils

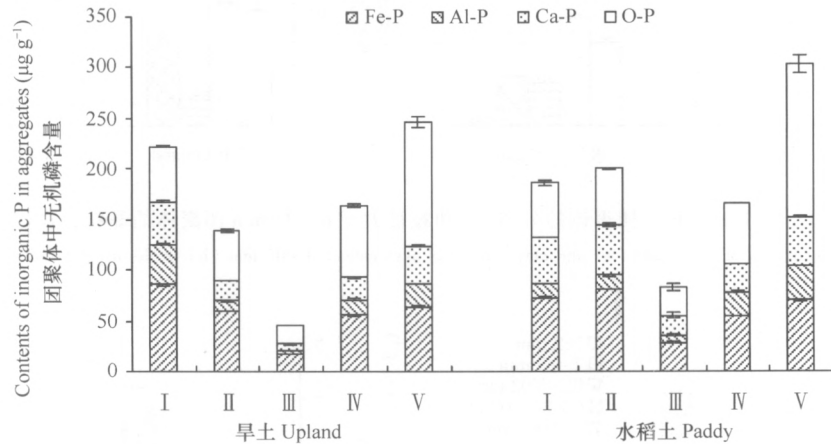


图4 旱土和水稻土团聚体中吸附态无机磷的分布

(I、II、III、IV、V依次为>2 mm、2~0.2 mm、0.2~0.02 mm、0.02~0.002 mm、<0.002 mm团聚体)

Fig. 4 Distribution of adsorbed inorganic-P in aggregates of the upland and paddy soils (I, II, III, IV and V represent >2 mm, 2~0.2 mm, 0.2~0.02 mm, 0.02~0.002 mm and <0.002 mm aggregate, respectively)

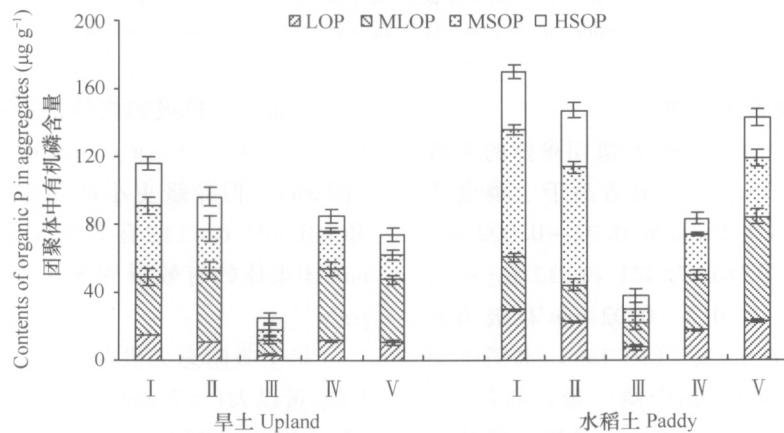


图5 旱土和水稻土团聚体有机磷的分布

(I、II、III、IV、V依次为>2 mm、2~0.2 mm、0.2~0.02 mm、0.02~0.002 mm、<0.002 mm团聚体; LOP:活性有机磷, MLOP:中活性有机磷, MSOP:中稳定性有机磷, HSOP:高稳定性有机磷)

Fig. 5 Distribution of organic-P in aggregates of the upland and paddy soils (I, II, III, IV and V represent >2 mm, 2~0.2 mm, 0.2~0.02 mm, 0.02~0.002 mm and <0.002 mm aggregate, respectively)

Al-P 和 Ca-P 的比例较低(约为 10%~20%);而 0.02 mm 以下团聚体则以 O-P 的比例最高(分别 45% 和 50%)。

与旱土团聚体比较,水稻土 >2 mm 团聚体的吸附态无机磷总量降低了 $36 \mu\text{g g}^{-1}$, 0.02~0.002 mm 团聚体的吸附态无机磷总量基本相当,其余 3 个粒级(2~0.2 mm、0.2~0.02 mm 和 <0.002 mm)团聚体的吸附态无机磷总量均有显著增加(增幅为 37~60 $\mu\text{g g}^{-1}$)(图 4)。水稻土团聚体中各种吸附态无机磷所占的比例变化趋势与旱土团聚体基本相同。

旱土较大(>0.2 mm)团聚体中的有机磷(包括活性、中活性、中稳定性和高稳定性有机磷)总量超过 100 $\mu\text{g g}^{-1}$,中等(0.2~0.02 mm)团聚体却只有 25 $\mu\text{g g}^{-1}$,粒径 <0.02 mm 团聚体上升至 70~80 $\mu\text{g g}^{-1}$ (图 5)。有机磷分组结果表明,在 5 个粒级团聚体中大部分(约 60%~70%)有机磷出现在中活性和中稳定性有机磷组分,而活性有机磷和高稳定性有机磷的比例较低,分别为 10%~15% 和 15%~20%。

与旱土团聚体比较,水稻土 0.2~0.02 mm 和 0.02~0.002 mm 团聚体的有机磷总量基本相当,其余 3 个粒级(>2 mm、2~0.2 mm 和 <0.002 mm)团聚体的有机磷总量均显著增加(增幅为 50~70 $\mu\text{g g}^{-1}$)(图 5)。除水稻土团聚体的活性有机磷所占的比例约为 15%~20% 外,中活性和中稳定性有机磷以及高稳定性有机磷的比例变化与旱土团聚体基本相同。

3 讨 论

土壤团聚体形成的主要影响因子包括土壤母质、气候条件以及土地利用、耕作管理和施肥方式等。已有研究表明,耕作能显著地降低土壤水稳定性大团聚体(>0.25 mm)的含量,而提高水稳定性小粒级团聚体的含量^[19]。本研究中供试水稻土与旱土比较,2~0.2 mm 团聚体的含量下降,而 0.2~0.02 mm 团聚体含量增加,但水稻土中 >2 mm 团聚体的含量高于旱土。这可能与水稻土种植作物和施入有机肥(稻草)以及土壤有机质含量较高有关。

由于红壤富含游离氧化铁铝,对磷素具有强烈的固定作用,土壤磷素不仅可被铁铝氧化物和黏粒矿物表面所吸附,而且还可与铁铝形成难溶性磷酸盐,导致土壤磷素有效性降低^[20]。供试旱土和水稻土 0.2~0.02 mm 和 0.02~0.002 mm 团聚体黏粒

含量较低,可能与这两个粒级团聚体含有较多的砂粒有关。马毅杰等^[21]研究表明红壤中游离氧化铁多集中于较细的颗粒(如黏粒)中,土壤游离氧化铁含量与土壤黏粒含量之间具有极显著正相关,发现红壤水稻土由于受到灌溉和有机肥施用的共同影响,游离氧化铁含量明显降低。本研究结果表明,供试水稻土和旱土各粒级团聚体中不仅游离氧化铁含量与黏粒含量具有极显著的正相关关系($p < 0.01$),而且游离氧化铝含量与黏粒含量也呈极显著正相关关系($p < 0.01$)(图 6)。供试水稻土与旱土比较,各粒级团聚体的游离氧化铁含量明显降低(图 2a),但游离氧化铝含量没有明显差异(图 2b)。这说明稻田耕作管理方式下土壤游离氧化铁含量降低,而对游离氧化铝含量的影响不大。

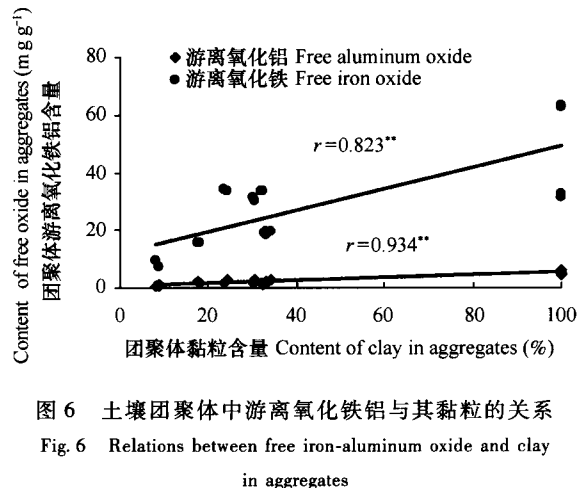


图 6 土壤团聚体中游离氧化铁铝与其黏粒的关系
Fig. 6 Relations between free iron-aluminum oxide and clay in aggregates

Makarov 等^[22]研究表明土壤团聚体(1~0.25、0.25~0.05、0.05~0.005、0.005~0.001 和 <0.001 mm)全磷含量随粒径的减小而增加,顾益初等^[23]发现土壤全磷含量在黏粒中相对较高。本研究中,供试水稻土 <0.002 mm 团聚体的全磷含量最高,而旱土以 >2 mm 团聚体的全磷含量最高,两种土壤 >0.2 mm 和 <0.002 mm 团聚体的全磷含量差异较小,这可能与这些粒级的团聚体黏粒含量和游离氧化铁含量较高有关。供试水稻土和旱土只有 0.2~0.02 mm、0.02~0.002 mm 和 <0.002 mm 3 个粒级团聚体的全磷含量随团聚体粒径的减小而增加。两种土壤各粒级团聚体的全磷含量与黏粒含量呈极显著的正相关关系($p < 0.01$),这说明黏粒对土壤团聚体中磷素具有富集作用。

磷肥和有机肥的施用可提高土壤磷素的有效性^[24]。Gupta 等^[25]发现土壤小团聚体含有更多的有效磷。本研究供试水稻土各粒级团聚体的

Olsen-P 含量明显高于旱土,但两者均以 <0.002 mm 团聚体的含量最高,该粒级团聚体的游离氧化铁铝含量明显高于其他粒级,游离氧化铁铝对磷素的强烈吸附作用可能导致 Olsen-P 在该粒级团聚体中富集。虽然供试土壤 <0.002 mm 团聚体的 Olsen-P 含量较高,但由于其在团聚体中所占的比例很小(仅 2%),因此该粒级团聚体在红壤土壤有效磷转化中的作用亦可能较小。

黄敏等^[26]研究表明水旱轮作红壤稻田土壤中吸附态无机磷以闭蓄态磷(O-P)和 Fe-P 为主, Ca-P 和 Al-P 含量较低。本研究供试水稻土和旱土各粒级团聚体中吸附态无机磷也以 Fe-P 和 O-P 为主, Ca-P 和 Al-P 的含量相对较低(图 4),与黄敏等^[26]研究的红壤中吸附态无机磷的分布具有相同的特征。本研究供试旱土 >2 mm 与 $2\sim0.2$ mm 团聚体的 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 含量差异较水稻土大(图 4),这可能是由于稻田施肥和耕作等措施对这两个粒级团聚体中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的迁移和转化的影响而导致其含量差异变小。两种土壤中 >2 mm 与 $2\sim0.2$ mm 团聚体 O-P 含量差异基本相同,这可能与 O-P 很难转化有关。供试水稻土 $2\sim0.2$ mm 团聚体的 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 含量均高于旱土,而旱土 >2 mm 团聚体的 Al-P 含量明显高于水稻土。这说明稻田耕作管理方式使土壤中 $2\sim0.2$ mm 团聚体的 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 含量均有提高,而 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 又是植物潜在的有效磷源,对土壤有效磷有较大贡献。这与上述水稻土中 $2\sim0.2$ mm 团聚体的 Olsen-P 含量高于旱土中是相吻合的。

已有研究表明,土壤活性有机磷、中稳定性有机磷和总有机磷含量随土壤肥力的提高而增加,土壤小团聚体含有较多活性较高的有机磷^[25],大团聚体的总有机磷含量高于小团聚体的^[7],但也有研究表明土壤大团聚体的活性和中活性有机磷含量也较高^[27]。本研究中,水稻土中各粒级团聚体的活性和中稳定性有机磷含量高于旱土中;除 $0.02\sim0.002$ 粒级团聚体外,水稻土各粒级团聚体总有机磷含量均高于旱土对应粒级的团聚体(图 5)。两种土壤 >0.2 mm 和 <0.02 mm 团聚体的活性有机磷和中活性有机磷含量较高, >2 mm 和 $2\sim0.2$ mm 团聚体的中稳定性有机磷和高稳定性有机磷明显高于其他粒级团聚体。供试土壤 >2 mm 和 $2\sim0.2$ mm 大团聚体的结构疏松、通气良好,较 <0.02 mm 小团聚体更适合于土壤微生物的生长,有利于团聚体中有机磷的转化;且供试土壤以 $2\sim0.2$ mm 团聚

体为主(占 40% 左右),因此该粒级团聚体在土壤有机磷的转化上也具有重要的作用。

4 结 论

红壤旱土和水稻土以 $2\sim0.2$ mm 团聚体含量最高,各对应粒级团聚体的黏粒和游离氧化铝含量接近,但水稻土各粒级团聚体中游离氧化铁含量均明显低于旱土中相应的粒级团聚体。水稻土各粒级团聚体的 Olsen-P 含量高于旱土相应的粒级团聚体。两类土壤各粒级团聚体的吸附态无机磷均以 Fe-P 和 O-P 为主, Ca-P 和 Al-P 含量相对较低;Fe-P、Al-P 和 Ca-P 在 >0.02 mm 团聚体中含量较高,而 O-P 则以 <0.002 mm 团聚体较高;各组分有机磷也主要分布于 >0.2 mm 团聚体中。本研究结果说明土壤磷的形态分布与团聚体粒级有密切关系,旱土有效态磷(Olsen-P)含量较低的原因可能与其团聚体游离氧化铁含量较高、且有机磷含量较低有关。

参 考 文 献

- [1] 李庆逵主编. 中国红壤. 北京: 科学出版社, 1983. 145 ~ 148. Li Q K. ed. Red Soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1983. 145 ~ 148
- [2] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用. 土壤学报, 1998, 35(1): 104 ~ 111. Zhang B G, Li G T. Roles of soil organisms on the enhance of plant availability of soil phosphorus (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 104 ~ 111
- [3] 高阳俊, 张乃明. 施用磷肥对环境的影响探讨. 中国农学通报, 2003, 19(6): 162 ~ 165. Gao Y J, Zhang N M. Studying on the influence of phosphorus fertilizer on environment (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2003, 19(6): 162 ~ 165
- [4] He Z L, Zhu J. Microbial utilization and transformation of phosphate adsorbed by variable charge minerals. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30: 917 ~ 923
- [5] Rubek G H, Guggengerger G, Zech W, et al. Organic phosphorus in soil size separates characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance and resin extraction. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 1 123 ~ 1 132
- [6] 文倩, 赵小蓉, 张书美, 等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征. 中国农业科学, 2005, 38(2): 327 ~ 332. Wen Q, Zhao X R, Zhang S M, et al. Distribution characteristics of microbial biomass phosphorus in different soil aggregates in semi-arid area (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 327 ~ 332
- [7] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 627 ~ 633

- [8] 汪景宽, 张继宏, 王雷, 等. 棕壤不同粒级微团聚体中磷素的保持与供应. 土壤通报, 2001, 32(3): 113 ~ 115. Wang J K, Zhang J H, Wang L, *et al.* Phosphorus retention and supply in microaggregates of brown earth (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(3): 113 ~ 115
- [9] 孙华, 熊德祥. 鲁南砂姜黑土及其有机无机复合体的有机磷研究. 土壤通报, 1998, 29(2): 61 ~ 64. Sun H, Xiong D X. Study on dark soil and its organic P in organic and inorganic compound in southern Shandong (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29(2): 61 ~ 64
- [10] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. 中国农业科学, 2000, 33(5): 65 ~ 71. Xu Y C, Shen Q R. Influence of long-term application of manure on the contents and distribution of organic C, total N and P in soil particle-sizes (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(5): 65 ~ 71
- [11] 徐阳春, 沈其荣, 菲泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响. 土壤学报, 2003, 40(4): 593 ~ 598. Xu Y C, Shen Q R, Mao Z S. Influence of long-term application of fertilization on the contents and distribution of forms of organic P in soil and soil particle-sizes (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 593 ~ 598
- [12] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 97 ~ 101, 105 ~ 107, 170 ~ 174, 481 ~ 490, 514 ~ 522. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 97 ~ 101, 105 ~ 107, 170 ~ 174, 481 ~ 490, 514 ~ 522
- [13] Kalembsa S J, Jenkinson D S. A comparative study of titrimetric and gravimetric methods for the determination of organic carbon in soil. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1973, 24: 1 085 ~ 1 090
- [14] 熊毅, 等主编. 土壤胶体(第二册). 北京: 科学出版社, 1985. 249 ~ 280, 400 ~ 402. Xiong Y *et al.* eds. Soil Colloid, Part 2 (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 249 ~ 280, 400 ~ 402
- [15] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus in soils. Soil Science, 1957, 84: 133 ~ 144
- [16] Peterson G W, Corey R B. A modify Chang Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30: 563 ~ 565
- [17] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Science, 1978, 125: 95 ~ 101
- [18] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analysis Chemistry Acta, 1962, 27: 31 ~ 36
- [19] Adesodun J K, Adeyemi E F, Oyegoke C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses. Soil Tillage Research, 2007, 92: 190 ~ 197
- [20] 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究. 土壤学报, 2003, 40(6): 908 ~ 914. Li S T, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Characteristics of fixation and release of phosphorus in three soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 908 ~ 914
- [21] 马毅杰, 陈家坊. 我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能. 土壤, 1998, 30(1): 1 ~ 6. Ma Y J, Chen J F. Forms, characteristics and functions of iron oxides in red soils of China (In Chinese). Soils, 1998, 30(1): 1 ~ 6
- [22] Makrov M I, Haumaier L, Zech W, *et al.* Organic phosphorus compounds in particle-size fractions of mountain soils in the northwestern Caucasus. Geoderma, 2004, 118: 101 ~ 114
- [23] 顾益初, 蒋柏藩, 鲁如坤. 风化对土壤粒级中磷素形态及其有效性的影响. 土壤学报, 1984, 21(2): 134 ~ 143. Gu Y C, Jiang B F, Lu R K. Effect of weathering on the transformation and availability of phosphorus in different fractions of phosphorus in different fractions of particle size of main soils of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(2): 134 ~ 143
- [24] Damodar Reddy D, Subba Rao A, Takkar P N. Effects of repeated manure and fertilizer phosphorus additions on soil phosphorus dynamics under a soybean-wheat rotation. Biology and Fertility of Soils, 1999, 28: 150 ~ 155
- [25] Gupta V V S R, Germida J J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size class as affected by cultivation. Soil Biology and Biochemistry, 1988, 20: 777 ~ 786
- [26] 黄敏, 肖和艾, 黄巧云, 等. 有机物料对水旱轮作红壤磷素微生物转化的影响. 土壤学报, 2004, 41(4): 584 ~ 589. Huang M, Xiao H A, Huang Q Y, *et al.* Effect of amendment of organic materials on transformation of P in red-earth soil under flood-drought cultivation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 584 ~ 589
- [27] Chen C R, Condron L M, Davis M R, *et al.* Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 487 ~ 499

DISTRIBUTION OF PHOSPHORUS IN WATER-STABLE AGGREGATES IN UPLAND AND PADDY RED EARTHS

Guo Wanwei^{1,2} Xiao Heai^{1†} Wu Jinshui¹ Ding Longjun^{1,2} Liu Shoulong¹

(1 Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract For better understanding the mechanism regulating availability of phosphorus (P) in red earth, a study was carried out to investigate P fractions (Olsen-P; absorbed inorganic-P fractionated in Fe-P, Al-P, Ca-P, and O-P, and organic-P fractionated in labile, moderately labile, moderately stable and highly stable organic-P) in aggregates (> 2 mm, 2 ~ 0.2 mm, 0.2 ~ 0.02 mm, 0.02 ~ 0.002 mm, < 0.002 mm) of upland and paddy red earths. Results indicate that in the upland soil about 72% of the aggregates were > 0.2 mm, while in the paddy soil 67.5% were. In the two soils, inorganic P in aggregates > 0.2 mm was dominated by Fe-P, but in aggregates < 0.02 mm by O-P, while organic P in aggregates > 0.2 mm and < 0.002 mm in the paddy soil was much higher than that in the upland soil. In conclusion, the distribution of P in the soils of red earth was closely associated to particle size fractions of their aggregates, and the lower availability of P in the upland soil (P 3.9 mg g⁻¹, Olsen-P) as compared to the paddy soil (P 7.9 mg g⁻¹, Olsen-P) was presumably attributed to higher free-Fe and lower organic-P in its aggregates.

Key words Red soils; Aggregates; Adsorbed inorganic phosphorus; Organic phosphorus