

施肥对坡地土壤团聚体与磷素赋存形态的影响^①

翟龙波^{1,2}, 章熙锋¹, 陈靖^{1,3}, 况福虹¹, 唐家良¹

1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756

摘要:紫色土为长江上游农耕区主要土壤, 多分布在山地丘陵区, 其耕层较薄(30~80 cm), 土壤养分质量分数普遍偏低, 作物养分利用率低, 但目前国内外关于团聚体尺度耕作土壤的磷素分异与循环规律的研究较少. 为深入了解紫色土坡耕地长期施肥过程中的磷素养分库容和供应机制, 本研究基于 2002 年开始的长期施肥定位试验, 分析研究了西南紫色土玉米/小麦轮作制度不同施肥方式下土壤团聚体发育特征, 并结合碳、氮转化过程探讨紫色土培肥过程中磷素赋存形态及转化规律. 结果表明: 长期有机无机配合施肥促进大团聚体的形成, 不同施肥平均重量直径(*MWD*)依次为: OMNPK>RSDNPK>NPK>CK; 长期施肥均不同程度提高了各粒径土壤团聚体中有机碳、全氮、全磷、速效磷及各形态无机磷(Ex-P, Al-P, Ca-P, Or-P)质量分数, 其中主要提高了较大团聚体(>2.0, 25~2 mm)中养分质量分数. 无机肥配施粪肥处理提升有机碳和全氮的效果优于无机肥配施秸秆, 而对全磷和速效磷提升效果则相反. 长期有机无机配合施用可有效提高各粒径团聚体中 Ex-P, Al-P, Ca-P 和 Or-P 质量分数, 并促进 Al-P, Ca-P 向大团聚体转移, 提高了土壤对有效磷素的保持能力. 有机质添加处理在提高土壤有机碳和有机磷质量分数的同时, 也对土壤磷素转化、提高磷素有效性具有重要影响.

关键词: 长期施肥试验; 紫色土; 土壤团聚体; 磷素形态

中图分类号: P934; S158.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)07-0105-11

磷素是植物生长所必需的三大营养元素之一, 是土地肥力提升和作物产量增长的重要保障因子^[1]. 相关研究表明, 土壤是植物磷素营养的主要来源, 植物体需要的磷主要来自于土壤磷库中的速效磷^[2]. 土壤中的磷通常分为无机磷与有机磷两大类, 其中植物对土壤磷素的吸收主要以磷酸盐(H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-})为主^[3]. 但进入到土壤中的磷酸盐会快速与土壤中钙、铁、铝等离子结合形成难溶性的磷酸盐沉淀, 或吸附在土壤胶体上降低磷酸盐的生物有效性^[4]. 目前, 农业生产上仍然采用大量施用磷肥以确保作物高产稳产, 因此磷肥大量施用降低了肥料利用率^[5], 同时造成农田土壤磷素大量盈余, 过量施用化学磷肥可以显著增加土壤表层的磷素^[6], 进而导致磷素径流流失^[7-8], 造成了不同程度的面源污染, 对水体健康甚至整个区域生态环境安全构成威胁^[9].

磷素在土壤中的赋存形态与化学行为因土壤类型而异, 因此其植物有效性也不同^[10-11]. 土壤磷素保持和供应能力与磷组分特征密切相关^[12-13], 而团聚体是土壤结构的基本单元, 其分布特征和稳定性可表征土壤磷素库容与赋存形态, 是评价农田管理措施对土壤磷素循环转化过程影响的重要指标^[13]. 土壤全磷与有

① 收稿日期: 2018-02-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200309-7; 2018YFD0200700); 国家科技重大专项项目(2017ZX07101001-02).

作者简介: 翟龙波(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与环境科学研究.

通信作者: 唐家良, 研究员.

机磷质量分数在不同粒级团聚体中具有不同的分布特征,土壤中不同粒级的团聚体对磷表现出了不同的吸附解吸作用^[14],四川盆地紫色土粘粒对磷的吸附量最大,其中含有的铁铝氧化物对磷素吸附贡献较大,石灰性紫色土沙粒中质量分数较高的钙离子可能对磷吸附也有较大贡献^[15].陈恩凤等^[16]通过对黑土和棕壤的研究发现小粒级微团聚体较大粒级团聚体有更高的磷储量;He等^[17]发现可利用性磷在<0.1 mm粒级小团聚体中浓度最低;其他研究者发现土壤沙粒中的磷更容易发生有机磷矿化过程^[18];Jalali等^[19]认为土壤粉粒是控制磷素吸附和可提取性的关键组分.相关研究结果尽管存在不一致的结论,但均认为农业耕作与施肥通过影响土壤颗粒的组成比例与稳定性从而间接影响了不同粒级土壤颗粒的磷质量分数^[20].目前,长期不同施肥对紫色土不同粒级团聚体中磷组分赋存特征的影响尚未有深入的研究,比如团聚体尺度上的碳、氮、磷循环之间的耦合关系还不清晰,在此基础上的农田土壤磷素形态转化及调控机制仍不清晰.因此,本研究利用紫色土丘陵区自2002年开始的长期定位试验地,主要研究目标是:1)确定西南紫色土区不同施肥方式下土壤团聚体发育特征;2)弄清不同施肥方式下团聚体与碳、氮及不同形态磷素赋存特征的关系,从而有助于揭示有机培肥措施如何改善紫色土耕地土壤团聚体结构的机制,为区域土壤养分管理和生态环境保护提供基础理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

紫色土丘陵区位于长江上游,东邻三峡库区,是四川盆地的重要农业区域.该区域属于中亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 826 mm,降雨充沛且主要集中于夏季和秋季,年均气温 17.3 °C,大于 10 °C 积温为 5 000~6 000 °C,无霜期为 297 d.本试验在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(105°27'E, 31°16'N)长期定位试验样地进行,供试土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土,母质为泥岩,质地疏松,孔隙度大,土壤导水率较高且持水力低,土层厚度为 30~80 cm^[8].试验前土壤有机质质量分数 8.57 g/kg,全氮约 0.62 g/kg,全磷 0.64 g/kg,全钾 18.42 g/kg,碱解氮 42.29 mg/kg,有效磷 4.16 mg/kg,速效钾 71.39 mg/kg.

1.2 试验设计

盐亭站坡耕地长期施肥定位试验从 2002 年开始,每个小区面积为 24 m²(4 m×6 m),坡度 7°,土层厚度 60 cm,种植制度为冬小麦—夏玉米轮作.本试验选取不施肥处理(CK),常规氮、磷、钾肥配施(NPK),猪厩粪肥配施氮、磷、钾肥(OMNPK),秸秆配施氮、磷、钾肥(RSDNPK)共 4 种处理进行研究,每种处理有 3 个重复.各施肥处理的施氮总量维持在同一水平(表 1),OMNPK 和 RSDNPK 处理所需氮量为无机氮肥占 60%,有机肥占 40%.小麦季氮肥施用量 130 kg/hm²(以纯 N 计),磷肥 90 kg/hm²(以 P₂O₅ 计),钾肥 36 kg/hm²(以 K₂O 计);玉米季施氮肥 150 kg/hm²,磷肥和钾肥同小麦季.

表 1 不同施肥处理的肥料类型与用肥量

生长季	处理	总氮/ (kg·hm ⁻²)	猪厩肥/ (t·hm ⁻²)	秸秆/ (t·hm ⁻²)	化肥/(t·hm ⁻²)		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
冬小麦	CK						
	NPK	130			130	90	36
	OMNPK	130	32.4		78	90	36
	RSDNPK	130		7	78	90	36
夏玉米	CK						
	NPK	150			150	90	36
	OMNPK	150	33.2		90	90	36
	RSDNPK	150		10	90	90	36

施肥方式采用基肥于播种前一次性人工施入, 冬小麦施肥时间为每年 11 月初, 夏玉米为每年 6 月初, 施肥和耕作同步, 冬小麦采取撒施的方式, 夏玉米为穴施, 小区耕作方式为人工耩耕, 深度为 20 cm. 氮、磷、钾肥中氮肥为碳酸氢铵, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾.

1.3 样品采集与分析

2016 年 10 月玉米收获休闲期, 每个小区采用“五点法”取 5 个 0~15 cm 表层土混合为一个土样, 采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体. 将土样(硬质铝盒带回)在室温下风干到土壤塑限时, 用手把大土块沿自然脆弱带扳成不同大小的土壤团聚体, 然后在室温条件下进一步风干. 取过 8 mm 筛的风干土样 100 g, 放入由 2, 0.25, 0.053 mm 构成的套筛上(厚度均匀), 放入蒸馏水至淹没土样 2 cm 位置, 浸泡土样 5 min. 然后以 30 次/min 的速度在蒸馏水中振荡 2 min, 上下振幅为 3 cm, 将各筛上的团聚体分别冲洗到烧杯中, 获得 $>2, 0.25 \sim 2, 0.053 \sim 0.25$ mm 的水稳性团聚体, <0.053 mm 水稳性团聚体含量采用差减法获取(区间取值范围包括前值, 下同). 将各级筛上团聚体组分用去离子水冲洗干净置于烧杯中, 60 °C 下烘干后称质量, 同时将烘干的团聚体磨细, 分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛, 供土壤碳、氮元素及磷素形态分级测定.

土壤有机 C 和全 N 采用元素分析仪测定, 土壤全 P、速效 P 的测定均参考土壤农业化学分析方法^[21], 分别采用酸溶-钼锑抗比色法、碳酸氢钠法(Olsen 法)测定. pH 值采用电位法测定(水土比 2.5:1).

土壤不同形态无机磷测定采用连续提取法^[22-23]进行, 分为交换态磷 Ex-P、铝结合态磷 Al-P、铁结合态磷 Fe-P、闭蓄态磷 O-P、钙结合态磷 Ca-P 和有机磷 Or-P 6 种形态. 先用 1.0 mol/L NH_4Cl (pH 值为 8.0)溶液提取 Ex-P; 再用 0.5 mol/L 的 NH_4F (pH 值为 8.2)溶液提取 Al-P; 0.1 mol/L NaOH 溶液提取 Fe-P; 而后使用 0.3 mol/L 柠檬酸钠溶液和连二亚硫酸对 O-P 进行提取; 最后用 0.5 mol/L (1/2 H_2SO_4)溶液提取 Or-P.

1.4 数据处理

为了比较不同粒级团聚体稳定性, 引用标准化平均当量直径(NMWD):

$$NMWD = \frac{MWD}{r_{\max} - r_{\min}} \quad (1)$$

式中: r_{\max} 为最大初始筛子孔径; r_{\min} 为最小筛子孔径; MWD 为团聚体稳定性, 其计算公式为:

$$MWD = \sum_1^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (2)$$

式中: r_i 为第 i 个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$; m_i 是第 i 个筛子的破碎团聚体质量百分比. 标准化平均当量直径 NMWD 是衡量团聚体稳定性的一个指标, 其值越低, 表示团聚体稳定性越小.

采用 SPSS 进行方差分析和相关分析, 多重比较采用 LSD 检验, 用 Origin 9.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布及稳定性的影响

不同施肥处理下土壤团聚体分布状况如表 2 所示, 不施肥对照组中, 粒径 >2 mm 土壤团聚体最少, 仅占 15.55%, 0.053~0.25 mm 粒级土壤团聚体占 36.02%, 为优势粒级团聚体; 常规施肥 NPK 中, 各粒径土壤团聚体数量分布与 CK 组大致相同; OMNPK 组团聚体含量随粒径增大逐渐增加, 粒径 >2 mm 土壤团聚体占 34.31%; RSDNPK 组中较大粒径($>2, 0.25 \sim 2$ mm)团聚体含量较高, 粒径 <0.053 mm 的土壤团聚体最少, 仅占 16.42%. 不同施肥处理之间, 各粒级土壤团聚体含量表现出不同程度的差异. 与 CK 处理相比, NPK 常规施肥中仅有 0.25~2 mm 土壤团聚体含量提高了 15.76%, 结果有统计学意义($p < 0.05$), 整体而言并没有明显减少小团聚体(0.053~0.25, <0.053 mm)

而促进大团聚体($>2, 0.25\sim 2$ mm)的形成. 与 NPK 处理相比, 有机肥配施化肥 OMNPK 和 RSDNPK 处理 $0.053\sim 0.25$ mm 粒级土壤团聚体含量显著减少($p<0.05$), <0.053 mm 粒级土壤团聚体不同程度减少, 没有统计学意义; 同时, OMNPK 和 RSDNPK 处理大幅提高了 >2 mm 大团聚体含量, 分别为 NPK 处理的 2.28 和 1.86 倍, 差异极有统计学意义($p<0.01$), 其中 OMNPK 处理提升效果最为明显, 与 RSDNPK 处理相比差异极有统计学意义($p<0.01$).

平均重量直径(MWD)是衡量团聚体稳定性的一个指标, 能全面反映土壤的团聚状况, 其值越高, 表示团聚体稳定性越大, 团聚状况越好. 不同施肥处理下 MWD 差异有统计学意义(表 2), 与 CK 相比, 长期施肥使 MWD 值有一定的升高, 其中 NPK 处理 MWD 值高于 CK, 但差异无统计学意义($p>0.05$). OMNPK 和 RSDNPK 处理 MWD 值分别为 1.05 mm 和 1.00 mm, 明显高于 CK 处理和 NPK 处理, 并且差异极有统计学意义($p<0.01$). 本研究结果表明, 长期添加猪厩肥和秸秆等外源有机物料可显著降低土壤微团聚体形成, 促进大团聚体形成, 改善土壤的物理结构, 其中添加猪厩肥配施氮磷钾效果略优于作物秸秆配施氮磷钾.

表 2 不同施肥处理土壤水稳性团聚体分布

处理	团聚体相对含量/%				MWD/ mm
	>2 mm	$0.25\sim 2$ mm	$0.053\sim 0.25$ mm	<0.053 mm	
CK	15.55Cc	24.42Bb	36.02Aa	24.02Ab	0.73B
NPK	15.04Cd	28.27Ac	34.73Aa	21.96ABb	0.76B
OMNPK	34.31Aa	22.76Bb	23.80Bb	19.13ABb	1.05A
RSDNPK	27.92Ba	28.70Aa	26.87Ba	16.41Bb	1.00A

注: 表中列出的值为平均值; 同一列不同大写字母表示同一团聚体粒级不同施肥处理之间差异有统计学意义($p<0.05$), 同一行不同小写字母表示同一施肥处理不同团聚体粒级之间差异有统计学意义($p<0.05$).

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体养分质量分数的影响

2.2.1 不同施肥处理对土壤团聚体有机碳质量分数的影响

不同粒径团聚体中有机碳质量分数随团聚体增大而逐渐增加(图 1), 并与平均重量直径(MWD)的正相关有统计学意义($p<0.05$). CK 处理中, $0.25\sim 2$ mm 粒级团聚体中土壤有机碳质量分数最高, $0.053\sim 0.25$ 粒级有机碳质量分数最低; 其余 3 种施肥方式下, $0.25\sim 2$ mm 粒级团聚体中土壤有机碳质量分数均达到最高, >2 mm 团聚体中的土壤有机碳次之, <0.053 mm 粒级团聚体中土壤有机碳质量分数均最低. 总体而言, 较大粒径团聚体($>2, 0.25\sim 2$ mm)中有机碳质量分数明显高于微团聚体($0.053\sim 0.25, <0.053$ mm), 除 CK 处理外, 两者差异均极有统计学意义($p<0.01$).

同一粒级不同施肥处理之间, 土壤团聚体中有机碳质量分数总体变化趋势为: RSDNPK $>$ OMNPK $>$ NPK $>$ CK(图 1). >2 mm 粒级各施肥方式之间团聚体中有机碳质量分数差异均极有统计学意义($p<0.01$), $0.25\sim 2$ mm 粒级团聚体中有机碳质量分数, RSDNPK 和 OMNPK 相对于 NPK, CK 处理以及 NPK 与 CK 处理之间差异均极有统计学意义($p<0.01$), RSDNPK 和 OMNPK 处理之间差异无统计学意义, $0.053\sim 0.25$ mm 粒级团聚体中有机碳质量分数在各施肥处理之间的差异性与 $0.25\sim 2$ mm 粒级相同, <0.053 mm 粒级团聚体中有机碳质量分数, RSDNPK 和 OMNPK 相对于 NPK, CK 处理均极有

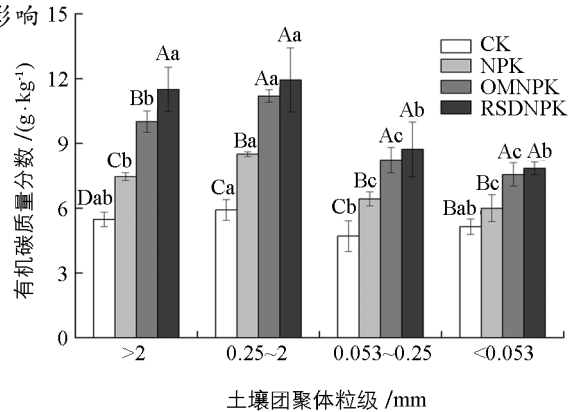


图 1 不同施肥处理土壤团聚体中有机碳质量分数

统计学意义 ($p < 0.01$), RSDNPK 和 OMNPK 处理以及 NPK 与 CK 处理之间均无统计学意义. 进一步研究发现, 随着土壤团聚体粒径变小, 4 种施肥处理之间有机碳质量分数的差异性也逐渐降低, 说明施肥处理促进土壤大团聚体及其有机碳库形成的效果更明显.

2.2.2 不同施肥处理对土壤团聚体全 N 与 C/N 比的影响

图 2 表明紫色土坡耕地不同施肥处理土壤团聚体中全 N 质量分数变化趋势与有机碳质量分数变化趋势大致相同, 土壤全 N 主要集中存在于较大粒径团聚体 ($>2, 0.25 \sim 2$ mm) 中. 通过比较不同处理对团聚体全 N 质量分数的影响可知, 长期施肥组各粒级团聚体中全氮质量分数均显著高于对照组 ($p < 0.05$); 与 NPK 常规施肥相比, OMNPK 和 RSDNPK 处理增加了各个粒径团聚体中全 N 质量分数, 但主要提高了较大粒径团聚体 ($>2, 0.25 \sim 2$ mm) 全 N 质量分数, 对 <0.053 mm 粒级团聚体中全 N 质量分数提升效果最差. 由图 3 可知, 相较于 CK 和 NPK 处理, 有机肥配施无机化肥 C/N 较高, 这是由于有机肥中携带大量有机碳所致. 比较不同粒级间 C/N 发现, 除了 CK 处理, 其余 3 种施肥处理均大致表现出随粒级减小 C/N 降低的趋势, 说明新鲜有机物质及半分解的有机物可能主要存在于大团聚体中.

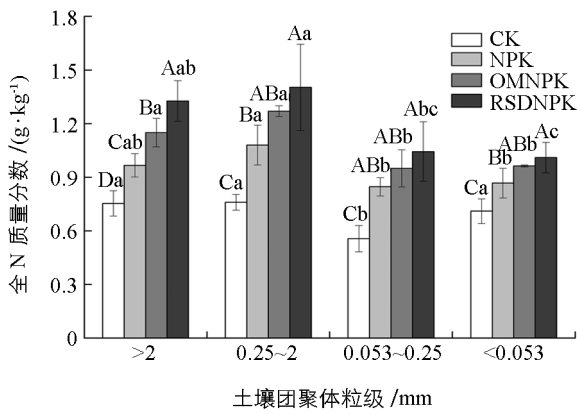


图 2 不同施肥处理土壤团聚体中全 N 质量分数

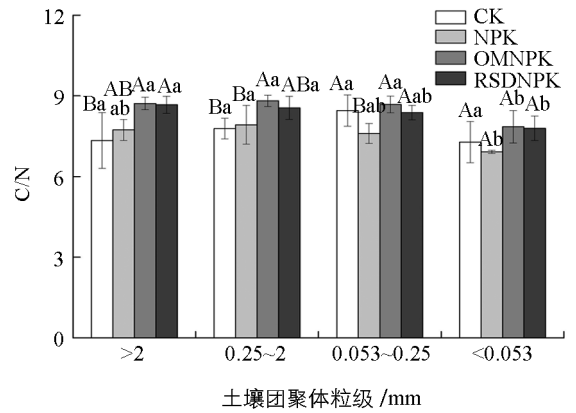


图 3 不同施肥处理土壤团聚体中 C/N

2.2.3 不同施肥处理对土壤团聚体全 P 与速效 P 质量分数的影响

由图 4 可知, CK 处理下 $0.25 \sim 2, <0.053$ mm 粒级的团聚体中全 P 质量分数最高, 与 $0.053 \sim 0.25$ mm 差异有统计学意义 ($p < 0.05$), 整体而言 CK 处理下各粒级团聚体中全 P 质量分数变化不大, 变异系数只有 5.9%. 在 NPK, OMNPK 和 RSDNPK 3 种施肥处理中, 团聚体全 P 质量分数在 $0.25 \sim 2$ mm 粒级达到最大, 从大到小变化趋势依次为: $0.25 \sim 2, >2, 0.053 \sim 0.25, <0.053$ mm; 结果表明, 无论是单施化肥还是化肥配施有机肥, 全 P 主要倾向于存贮于大团聚体中. 对比不同施肥处理下团聚体中全 P 质量分数发现, OMNPK 处理下各粒级团聚体中全 P 质量分数高于 NPK 处理, 其中除 $0.25 \sim 2$ mm 差异无统计学意义外, 其余 3 个粒级两者差异均极有统计学意义 ($p < 0.01$); RSDNPK 处理与 NPK 处理各粒级团聚体全 P 质量分数几乎相同, 差异均无统计学意义.

由图 5 可知, CK 处理下各粒径团聚体中速效 P 质量分数无明显变化, 各粒级之间不存在明显差异; 对于 NPK 处理而言, <0.053 mm 粒级的团聚体中速效磷质量分数最高, 与其他 3 个粒径差异均有统计学意义 ($p < 0.05$); OMNPK 处理中速效磷主要存在于 $0.25 \sim 2$ mm 和 >2 mm 两个粒级的团聚体中, 而 RSDNPK 处理中 $0.25 \sim 2$ mm 和 $0.053 \sim 0.25$ mm 两个粒级的团聚体速效磷质量分数相对较高, <0.053 mm 粒级最低. 与 NPK 处理相比, OMNPK 处理中各粒级团聚体速效磷质量分数均较高, 除 <0.053 mm 粒级, 其余 3 个粒径两者差异性均极有统计学意义 ($p < 0.01$), 结果表明添加粪肥增加了土壤中速效磷质量分数, 其中主要提高了较大团聚体中 ($>2, 0.25 \sim 2$ mm) 速效磷的质量分数水平. 相较于 NPK 处理, RSDNPK 处理中 $>2, 0.25 \sim 2, 0.053 \sim 0.25$ mm 粒级团聚体中速效磷质量分数差异无统

计学意义,而 <0.053 mm 粒径中速效磷质量分数明显低于 NPK 处理($p<0.01$),这与该处理土壤团聚体中碳、氮养分赋存规律明显不一致。

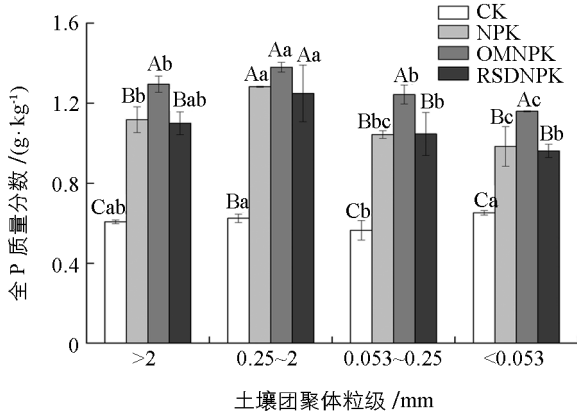


图 4 不同施肥处理土壤团聚体中全 P 质量分数

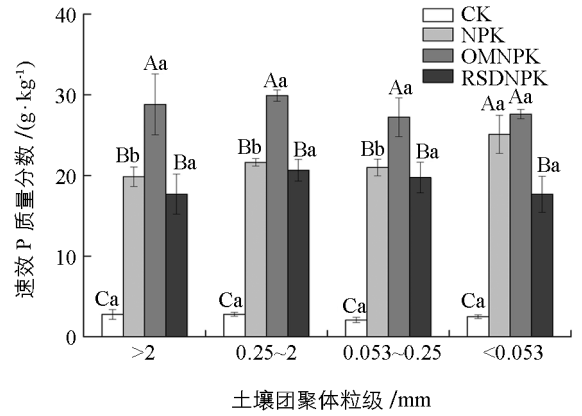


图 5 不同施肥处理土壤团聚体中速效 P 质量分数

2.3 不同施肥处理对土壤团聚体中 P 分级赋存形态的影响

进一步分析(表 3)表明,CK 处理中 Ex-P 主要分布于较大粒径团聚体中($>2, 0.25\sim 2$ mm), <0.053 mm 粒径团聚体中 Ex-P 质量分数最少,其中 $0.25\sim 2$ mm 粒径团聚体中的 Ex-P 与 <0.053 mm 粒径团聚体差异有统计学意义;而 NPK 和 RSDNPK 处理中,各粒径 Ex-P 质量分数相较于 CK 处理大幅增加,尤其是 $>2, 0.25\sim 2$ mm 两个粒径,这 3 种处理下 Ex-P 团聚体分布从大到小皆表现为: $0.25\sim 2, >2, 0.053\sim 0.25, <0.053$ mm. 研究结果表明 Ex-P 主要分布于较大粒径团聚体($>2, 0.25\sim 2$ mm),其中 $0.25\sim 2$ mm 粒径团聚体中 Ex-P 质量分数最高,施肥可有效提高各粒径土壤团聚体 Ex-P 质量分数,秸秆配施无机肥效果更佳。

表 3 不同施肥处理不同粒径团聚体中 P 素形态质量分数

处理	团聚体粒径/mm	Ex-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	Or-P
CK	>2	5.6 ± 0.6 Bab	7.7 ± 0.8 Ab	14.0 ± 0.5 Ca	405.8 ± 11.5 Cb	14.6 ± 1.9 Bb	71.8 ± 2.9 Ca
	$0.25\sim 2$	6.6 ± 0.3 Ba	7.7 ± 1.9 Ab	12.5 ± 2.2 Dab	411.2 ± 16.4 Bb	10.0 ± 1.0 Bc	70.6 ± 1.7 Da
	$0.053\sim 0.25$	4.8 ± 1.5 Bab	9.5 ± 0.4 Aab	15.5 ± 4.3 Da	388.6 ± 23.6 Cb	4.5 ± 0.4 Cd	71.4 ± 8.2 Ca
	<0.053	4.0 ± 1.3 Bb	10.0 ± 1.1 Aa	9.3 ± 1.0 Cb	464.7 ± 17.5 Ca	30.3 ± 3.0 Ba	77.7 ± 5.6 Ca
NPK	>2	9.5 ± 0.4 Aab	0.0 ± 0.0 Ca	100.3 ± 0.0 Bb	685.6 ± 0.9 ABb	1.6 ± 0.1 Cc	77.4 ± 0.6 Cc
	$0.25\sim 2$	11.4 ± 2.4 Aa	0.0 ± 0.0 Ca	136.8 ± 17.9 Ba	810.2 ± 29.1 Aa	1.3 ± 0.1 Cc	109.8 ± 1.1 Ba
	$0.053\sim 0.25$	7.8 ± 1.9 Ab	0.0 ± 0.0 Ca	94.6 ± 3.8 Bbc	674.0 ± 12.2 Ab	12.5 ± 1.0 Bb	106.8 ± 6.4 Ba
	<0.053	7.0 ± 1.7 ABb	0.0 ± 0.0 Ca	74.9 ± 13.2 Bc	625.7 ± 3.0 Bc	63.5 ± 2.0 Aa	94.6 ± 2.6 Bb
OMNPK	>2	3.4 ± 2.1 Ba	0.0 ± 0.0 Ca	205.8 ± 21.4 Aa	714.1 ± 32.0 Ab	0.0 ± 0.0 Ca	116.7 ± 8.6 Ab
	$0.25\sim 2$	4.5 ± 0.6 Ba	0.0 ± 0.0 Ca	203.4 ± 1.7 Aa	816.5 ± 1.0 Aa	0.0 ± 0.0 Ca	128.5 ± 2.0 Aa
	$0.053\sim 0.25$	5.0 ± 1.9 Ba	0.0 ± 0.0 Ca	212.7 ± 10.1 Aa	673.7 ± 25.8 Ac	0.0 ± 0.0 Ca	117.9 ± 3.2 Ab
	<0.053	3.8 ± 0.7 Ba	0.0 ± 0.0 Ca	153.7 ± 2.4 Ab	681.6 ± 1.0 Abc	0.0 ± 0.0 Ca	116.8 ± 2.9 Ab
RSDNPK	>2	11.5 ± 2.9 Aab	5.5 ± 0.6 Ba	33.6 ± 3.1 Cb	658.9 ± 10.5 Bb	17.5 ± 1.2 Ac	91.2 ± 0.0 Ba
	$0.25\sim 2$	13.1 ± 1.4 Aa	4.8 ± 0.3 Bab	69.2 ± 8.5 Ca	787.1 ± 2.3 Aa	19.9 ± 2.0 Ac	93.6 ± 3.0 Ca
	$0.053\sim 0.25$	9.9 ± 0.7 Ab	3.9 ± 0.5 Bc	63.7 ± 7.4 Ca	607.8 ± 3.0 Bc	40.4 ± 5.6 Aa	64.9 ± 2.0 Cc
	<0.053	8.8 ± 0.5 Ab	4.4 ± 0.1 Bb	21.3 ± 5.8 Cb	614.2 ± 10.2 Bc	27.8 ± 0.4 Bb	71.1 ± 3.7 Cb

注:同列数据后的不同大写字母表示同一粒径不同施肥处理之间差异有统计学意义($p<0.05$),不同小写字母表示同一施肥处理不同粒径之间差异有统计学意义($p<0.05$)。

CK 处理下 Fe-P 集中分布在较小粒径团聚体中($0.053 \sim 0.25$, <0.053 mm), <0.053 mm 粒径团聚体中 Fe-P 质量分数最多, 与 $>2, 0.25 \sim 2$ mm 粒径团聚体中 Fe-P 质量分数差异有统计学意义($p < 0.05$); NPK 处理和 OMNPK 处理中, Fe-P 质量分数极低, 未达检测限度; 相较于 CK 处理, RSDNPK (秸秆配施无机肥)处理 Fe-P 主要分布于较大粒径团聚体中($>2, 0.25 \sim 2$ mm), 同时各粒径 Fe-P 质量分数都有所降低.

4 种施肥处理下 Al-P 在各粒径团聚体中的分布规律相似, 主要存在于 $>2, 0.25 \sim 2$, 和 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒级团聚体中, <0.053 mm 粒径团聚体中 Al-P 质量分数最少. 长期施肥后各粒径团聚体中 Al-P 质量分数大幅提高, 其中 NPK 和 OMNPK 处理下各粒径团聚体中 Al-P 质量分数增幅最大, 与 CK 处理差异性均极有统计学意义($p < 0.01$), 同时 OMNPK 处理与 NPK 处理中各粒径团聚体中 Al-P 质量分数差异均极有统计学意义($p < 0.01$). 研究表明, Al-P 集中分布在较大粒径团聚体中, $0.053 \sim 0.25$ mm 粒级团聚体中也大量包含 Al-P; 施肥处理可显著提高各粒径团聚体中 Al-P 质量分数, 无机肥配施有机粪肥的提升效果最为明显.

对于 Ca-P 而言, CK 处理中 $>2, 0.25 \sim 2$ 和 $0.053 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体中 Ca-P 质量分数相近, 差异无统计学意义, <0.053 mm 粒径团聚体中 Ca-P 质量分数最大, 且与其他 3 个粒径差异性均极有统计学意义($p < 0.01$); 相较于不施肥处理, 施肥处理下各粒径团聚体 Ca-P 质量分数均大幅增加, $0.25 \sim 2$ mm 粒径团聚体中 Ca-P 质量分数最高, 增幅最大. 研究发现, 施肥处理更有利于 Ca-P 向较大团聚体转移, 其中无机配施有机粪肥效果最为显著.

CK 处理下的 O-P 质量分数在团聚体中的分布规律从大到小依次为: $<0.053, >2, 0.25 \sim 2, 0.053 \sim 0.25$ mm, 且相互之间差异有统计学意义, 与 CK 处理相似, NPK 处理中 O-P 主要存在于较小粒径团聚体中($0.053 \sim 0.25, <0.053$ mm), <0.053 mm 粒径团聚体中 O-P 质量分数最高. 与前两个处理相比, RSDNPK 处理中, $0.053 \sim 0.25$ mm 粒径团聚体中 O-P 质量分数最高, >2 mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 粒径团聚体中 O-P 质量分数大幅增加, <0.053 mm 粒径团聚体中 O-P 质量分数相对减少. 结果表明, 常规施肥对 O-P 由小粒径向大粒径团聚体转移作用不大, 无机肥配施秸秆可有效促进 O-P 由小粒径向大粒径团聚体转移.

CK 处理下的 Or-P 在各粒径团聚体中的分布较为均一, 相互之间差异无统计学意义. NPK 处理下 $0.25 \sim 2, 0.053 \sim 0.25$ 和 <0.053 mm 粒径团聚体中 Or-P 较高, 与 >2 mm 差异有统计学意义($p < 0.05$), 同时相较于 CK 处理这 3 个粒径团聚体 Or-P 明显增加. 与单施无机肥相比, OMNPK 处理进一步增加了各个粒径团聚体中 Or-P 质量分数($p < 0.05$), 其中, $0.25 \sim 2$ mm 粒径团聚体中 Or-P 质量分数最高. RSDNPK 处理中 Or-P 主要分布于较大粒径团聚体中($>2, 0.25 \sim 2$ mm).

经过多年施肥后, 各个施肥处理不同形态无机磷比例发生了变化. 4 种施肥处理下, 各个粒径团聚体中无机磷均以 Ca-P 为主, 占无机磷比例为 $66.75\% \sim 82.16\%$. 比较各粒径团聚体中无机磷组分相对质量分数发现, CK 处理下的各粒径团聚体中 Ca-P 和 Or-P 比例较大; 相较于不施肥处理, 各形态磷比例变化最大的是 Al-P. 从大到小的 4 个粒径团聚体中, NPK 处理和 OMNPK 处理下 Al-P 比例分别增加 8.18% 和 17.1% , 10.38% 和 15.24% , 7.42% 和 17.93% , 7.08% 和 14.1% . RSDNPK 处理下 Al-P 比例增加幅度较小.

2.4 土壤各形态磷与土壤性质之间的相关关系分析

表 4 显示了土壤各形态磷与土壤其他性质的相关性分析结果, 可以看出各形态磷及其与土壤其他指

标之间存在相关关系. 有机碳与 Ex-P, Al-P, Ca-P, Or-P 正相关性有统计学意义; 土壤速效 P 与 Al-P、Ca-P、Or-P、土壤有机碳正相关性极有统计学意义; 另一方面, Fe-P 则与有机碳和速效 P 负相关性均有统计学意义, 与 Fe-P 检出率较低有关. Ex-P 作为土壤速效磷的组成部分, 与速效磷不存在相关关系.

表 4 土壤各形态磷及其与速效磷、有机碳相关系数

Item	Ex-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	Or-P	有机质
Fe-P	-0.029						
Al-P	-0.248	-0.811**					
Ca-P	0.329*	-0.788**	0.706**				
O-P	0.259	0.192	-0.480**	-0.202			
Or-P	-0.238	-0.725**	0.876**	0.707**	-0.430**		
有机碳	0.419**	-0.353*	0.449**	0.747**	-0.19	0.456**	
速效 P	0.085	-0.899**	0.829**	0.867**	-0.111	0.762**	0.624**

注: * 表明 0.05 水平(双侧)上相关性有统计学意义; ** 表明 0.01 水平(双侧)上相关性极有统计学意义.

3 讨 论

本研究中长期施肥可使团聚体平均重量直径 *MWD* 值增加, 有机肥配施无机肥增加更明显, 有机碳质量分数与团聚体平均重量直径(*MWD*)正相关性有统计学意义($p < 0.05$), 表明长达 15 年的长期施肥试验明显改变了各粒级土壤团聚体的相对质量分数, 长期有机无机配合施肥可显著促进大团聚体形成. 这与李辉信等^[24]在研究中施用有机肥特别是有机肥和无机肥配施有利于增加 1~3 mm 团聚体质量分数的结果相一致. 这是因为有机物料的添加在土壤有机质、土壤微生物等方面改善了土壤中各种胶结物质的性质和数量, 从而提升了土壤团聚化作用^[24-26]. 众多研究表明, 有机物料添加可显著提升土壤有机碳质量分数^[27-28]. 李辉信等^[24]的研究结果指出从团聚体粒径 > 3 mm 至 0.05~0.25 mm, 团聚体粒径越细, 有机碳质量分数越高, 而 < 0.05 mm 团聚体中有机碳质量分数低于其他粒径土壤团聚体. Mikha 等^[29]的研究结果与本研究结果一致, 以 0.25~2 mm 团聚体有机碳质量分数最高. 总体而言, 较大粒径团聚体($> 2, 0.25 \sim 2$ mm)中有机碳的质量分数明显高于微团聚体(0.053~0.25, < 0.053 mm), 除 CK 处理外, 差异均极有统计学意义($p < 0.01$). 不同粒径土壤团聚体中有机碳质量分数一定程度表征了土壤有机质平衡与矿化速率^[30]. 本研究中 3 种长期施肥处理均表现出 C/N 随粒级减小而降低的趋势, 说明新增有机物质及半分解的有机物主要存在于大团聚体中, 这与微团聚体有机碳比大团聚体中有机碳更快老化的结论相符合^[31].

本研究结果表明: 同碳、氮养分相同, 无论是单施化肥还是化肥配施有机肥, 全 P 主要存贮于大团聚体中. 长期施肥增加了各个粒径团聚体中 Ca-P, 0.25~2 mm 粒径团聚体中 Ca-P 增幅最大, 这说明长期施肥处理更有利于 Ca-P 向较大团聚体转移, 其中无机配施有机粪肥效果最佳; 无机肥配施秸秆同时也可有效促进 O-P 由小粒径向大粒径团聚体转移, 但这种闭蓄态磷的迁移并不能为提高土壤有效态磷做出贡献. 本研究中土壤速效磷与 Al-P, Ca-P, Or-P 和土壤有机碳相关性极有统计学意义, 说明紫色土旱地中 Al-P 是土壤有效磷源; 表 3 表明长期施肥明显增加了 Al-P 在土壤总磷的比例, 有效提高了土壤有效磷质量分数, 其中无机配施有机粪肥效果最为明显, 该处理各粒级团聚体速效 P 的提升主要来自于 Al-P 和 Or-P 的贡献(图 5, 表 3); 而有机质添加使得有机磷质量分数提升(表 4), 有机磷虽然不能成为

土壤直接磷源,但和有机质一样为土壤磷素有效化提供理化环境^[12-13]. Fe-P 则与速效 P 表现为负相关关系,说明紫色土旱地土壤中 Fe-P 有效性极差. Ex-P 作为土壤速效磷的组成部分,与速效磷却不存在相关关系,原因可能是由于 Ex-P 质量分数极低且在不同施肥处理下和不同粒径团聚体中变化幅度不大.

本研究中土壤有机质与 Al-P、Ca-P 和有机磷相关性均有统计学意义(表 4),说明有机质提升可为土壤直接或间接提供有效磷源^[22-23]. 除 Ca-P 外,占土壤全磷较高比例的有机磷可以在土壤微生物及磷酸酶的作用下酶解释放出可利用态磷,被认为是可供植物利用的潜在磷素来源,对土壤肥力和植物营养也起着重要作用^[12]. 这充分说明了土壤有机质对土壤磷素有效化的促进作用,有机质添加在提高土壤有机碳和有机磷质量分数的同时,也对土壤磷素转化、提高磷素有效性具有重要影响.

4 结 论

本研究通过长期定位试验和不同粒径团聚体养分赋存形态的综合分析表明:长期有机无机配合施肥显著促进紫色土坡耕地土壤大团聚体形成并降低土壤微团聚体质量分数. 长期施肥均不同程度提高了各粒径土壤团聚体中有机碳、全氮、全磷和速效磷质量分数,无机配施有机肥效果最为明显. 有机碳、全氮、全磷、各形态磷素主要分布于较大团聚体中($>2,0.25\sim 2\text{ mm}$),长期有机无机配合施用可有效提高各个粒径团聚体中 Ex-P、Al-P、Ca-P 和 Or-P 质量分数,并促进 Al-P、Ca-P 向大团聚体转移,提高了土壤对有效磷素的保持,其中无机肥配施粪肥效果最佳. 无机肥配施秸秆处理提升有机碳和全氮的效果优于无机肥配施粪肥,而对全磷和速效磷提升效果则相反. 总体而言,无机配施有机肥更有利于土壤肥力的保持. 有机质添加处理在提高土壤有机碳和有机磷质量分数的同时,也对土壤磷素转化、提高磷素有效性具有重要影响.

参考文献:

- [1] DJODJIC F, BERGSTRÖM L, GRANT C. Phosphorus Management in Balanced Agricultural Systems [J]. *Soil Use and Management*, 2008, 21(1): 94-101.
- [2] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4-8.
- [3] QUIQUAMPOIX H, MOUSAIN D. Enzymatic Hydrolysis of Organic Phosphorus [C] // *Organic phosphorus in the environment*. Wallingford: CABI, 2005: 89-112.
- [4] GARG S, BAHL G S. Phosphorus Availability to Maize as Influenced by Organic Manures and Fertilizer P Associated Phosphatase Activity in Soils [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5773-5777.
- [5] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [6] 李学平,石孝均. 长期不均衡施肥对紫色土肥力质量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 27-32.
- [7] 韩晓飞,高明,谢德体,等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应 [J]. *环境科学*, 2016, 37(7): 2770-2778.
- [8] 周明华,朱波,汪涛,等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响 [J]. *水利学报*, 2010, 41(11): 1374-1381.
- [9] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化 [J]. *土壤*, 2000, 32(4): 188-193.
- [10] 孙桂芳,金继运,石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 1-9.
- [11] SHARMA R, BELL R W, WONG M T F. Phosphorus Forms in Soil Solution and Leachate of Contrasting Soil Profiles and Their Implications for P Mobility [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 854-862.
- [12] 魏 锴. 土壤及团聚体中磷组分与磷酸酶活性间关系对不同耕作方式的响应 [D]. 北京:中国科学院大学,2014.

- [13] GARLAND G, BÜNEMANN E K, OBERSON A, et al. Phosphorus Cycling within Soil Aggregate Fractions of a Highly Weathered Tropical Soil: A Conceptual Model [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 91-98.
- [14] LINQUIST B A, SINGLETON P W, YOST R S, et al. Aggregate Size Effects on the Sorption and Release of Phosphorus in an Ultisol [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(1): 160.
- [15] LI M, HOU Y L, ZHU B. Phosphorus Sorption - Desorption by Purple Soils of China in Relation to Their Properties [J]. *Soil Research*, 2007, 45(3): 182.
- [16] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义 [J]. *土壤学报*, 1994, 31(1): 18-25.
- [17] HE Z L, WILSON M J, CAMPBELL C O, et al. Distribution of Phosphorus in Soil Aggregate Fractions and Its Significance with Regard to Phosphorus Transport in Agricultural Runoff [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 83(1/2): 69-84.
- [18] WYNGAARD N, CABRERA M L, JAROSCH K A, et al. Phosphorus in the Coarse Soil Fraction is Related to Soil Organic Phosphorus Mineralization Measured by Isotopic Dilution [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 96: 107-118.
- [19] JALALI M, JALALI M. Relation between Various Soil Phosphorus Extraction Methods and Sorption Parameters in Calcareous Soils with Different Texture [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1080-1093.
- [20] ØGAARD A F. Effect of Phosphorus Fertilization on the Concentration of Total and Algal-Available Phosphorus in Different Particle-Size Fractions in Norwegian Agricultural Soils [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section b - Soil and Plant Science*, 1996, 46(1): 24-29.
- [21] 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.
- [22] 朱广伟, 秦伯强, 高 光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 381-388.
- [23] RUTTENBERG K C. Development of a Sequential Extraction Method for Different Forms of Phosphorus in Marine Sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [24] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 422-429.
- [25] 彭新华, 张 斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响 [J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [26] 仇建飞, 窦 森, 邵 晨, 等. 添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 781-787.
- [27] 周鑫斌, 苏婷婷, 许安定, 等. 改良材料对新整理烟田土壤结构改良效应研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(5): 31-36.
- [28] 高阿祥, 周鑫斌, 徐 宸, 等. 土壤调理剂对新整理烟田土壤结构改良效应研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 41(7): 171-176.
- [29] MIKHA M M, RICE C W. Tillage and Manure Effects on Soil and Aggregate-Associated Carbon and Nitrogen [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809.
- [30] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响 [J]. *生态学杂志*, 2001, 20(2): 16-19.
- [31] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Dynamics of Soil Organic Matter Associated with Particle-Size Fractions of Water-Stable Aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595-605.

Effects of Fertilization on Soil Aggregates and Phosphorus Fractions of Sloping Upland of Purple Soil

ZHAI Long-bo^{1,2}, ZHANG Xi-feng¹,
CHEN Jing^{1,3}, TANG Jia-liang¹

1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: Purple soil is a major soil type in the agricultural areas in the upper reaches of the Yangtze river. It is distributed mainly in mountainous and hilly regions, with a rather shallow tillage layer (30–80 cm) and relatively low nutrient contents. Plant nutrient use efficiency is low on it. But there are few studies on the phosphorus cycling at aggregate level for agricultural soils. In order to have a better understanding of the effects of long-term fertilization on soil phosphorus stock and fractions, this study utilized the long-term fertilization experiment with an intensive wheat-maize cropping system to investigate the soil aggregate distribution, phosphorus fractions and possible transformation pathways in comparison with carbon and nitrogen at aggregate levels through four fertilization treatments: no fertilizer (CK), mineral fertilizers (NPK), pig manure with mineral fertilizers (OMNPK) and crop straw residue with mineral fertilizers (RSDNPK). Soil samples from 0–20 cm soil layer were separated into four soil aggregations: large macroaggregates (>2 mm), small macroaggregates (0.25–2 mm), microaggregates (<0.25 mm) and slit-clay microaggregates (<0.053 mm), using the wet sieving method. The results showed that organic fertilizers combined with inorganic fertilization promoted the formation of larger aggregates, with the mean weight diameter (MWD) order of OMNPK>RSDNPK>NPK>CK. Long-term fertilizer application increased, in different degrees, the contents of TN, TP, available P and other P fractions (Ex-P, Al-P, Ca-P and Or-P) in soil aggregates, especially in the larger ones (>2 mm and 0.25–2 mm) and promoted the shift of Al-P and Ca-P to the larger aggregates, thus improving the retention of available P in the soil. Compared with RSDNPK, the treatment OMNPK had better performance in enhancing SOC and TN, while the opposite was true for TP and available P. The addition of organic matter elevated the contents of soil organic carbon (SOC) and soil organic phosphorus, promoted the transformation of soil phosphorus and improved phosphorus availability.

Key words: long-term fertilization experiment; purple soil; soil aggregate; phosphorus form

