

DOI: 10.5846/stxb201603170476

郭涛, 张思兰. 不同磷浓度植株残体降解对紫色土磷素有效性的影响. 生态学报, 2017, 37(10): - .

Guo T, Zhang S L. Effect of plant residue degradation on purple soil phosphorus availability. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): - .

不同磷浓度植株残体降解对紫色土磷素有效性的影响

郭 涛^{1,2,*}, 张思兰¹

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716

2 国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地, 重庆 400716

摘要: 植株残体降解可直接或间接地影响土壤磷素的有效性, 为探讨不同磷浓度植株残体降解对紫色土磷分级体系的影响, 结合³¹P 核磁共振分析技术, 选取了 3 种磷浓度不同的植物残体与两种紫色土进行室内模拟培养试验, 得出了以下研究结论: (1) 添加植株残体显著增强了紫色土呼吸强度, 且紫色土分级体系中的活性磷含量均高于对照处理 (2) ³¹P-NMR 分析结果得知, 植株残体的正磷酸盐、磷酸单酯占浓缩液全磷比例的 90% 以上, 高磷植株的正磷酸盐和磷酸单酯含量显著高于中磷和低磷植株, 土壤磷素有效性的变化与植株残体的正磷酸盐和磷酸单酯含量有关; (3) 紫色土分级体系中的活性磷在 0 d 含量最高, 随着培养周期的延长, 土壤磷素有效性会出现降低的趋势; 酸性紫色土的累积呼吸强度、分级体系中活性磷 (Resin-P、NaHCO₃-P) 所占比例均高于中性紫色土, 与土壤钙含量有关。综上所述, 植株残体的磷浓度越高, 更有利于提高土壤磷素的有效性, 本研究结果为农业生产中秸秆还田技术提供了理论参考。

关键词: 植株残体; 紫色土; 正磷酸盐

Effect of plant residue degradation on purple soil phosphorus availability

GUO Tao^{1,2,*}, ZHANG Silan¹

1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2 The National Monitoring Base for Purple Soil Fertility and Fertilizer Efficiency, Chongqing 400716, China

Abstract: Phosphorus (P) is essential for plant growth and crop production and quality. Much information is available on the effects of plant residue quality on rates of decomposition and N mineralization, but fewer studies have evaluated the relationship between residue quality and P release during decomposition. It has been suggested that plant residues may play an important role in this effect due to the P added to soil by residues. However, little is known about the changes in P pools during legume residue decomposition. Residues from *Vicia faba* L. and *Brassica campestris* L. with varying P concentrations were added to two kinds of soil with low available P concentration, and the concentration of various soil P pools were assessed by soil P fractionation on days 0, 14, 28, and 56. In this study, P speciation was determined using solution ³¹P nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy to understand the potential fate of residue P in soils. The results showed that residue addition significantly increased cumulative respiration. The size of the P pools changed over time and was affected by both residue P concentration and soil type. For all plant samples, orthophosphate produced the most intense resonance in each spectrum and was the most abundant P species detected in shoot residue, which appeared to be related to their total P concentrations. For crop residues with higher total P concentrations, the greatest proportion was present as orthophosphate. More than 90% of the phosphorus detected in the plant residue was found to be orthophosphate and phosphate monoester. However, increasing plant concentration of total P did not affect pyrophosphate concentration. Olsen-phosphorus was highest when the experiment began (day 0) but decreased as the experiment progressed. The increase in residual P found in all residues indicated that part of the mineralized P was converted into stable organic and inorganic P, which occurred mainly in the initial phase. These changes were generally more pronounced in high- and medium-P residues

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2010B012); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD05B03); 农业部公益性行业科研专项 (201203030)

收稿日期: 2016-03-17; **网络出版日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guotaosd@swu.edu.cn

than in low-P residues. More Resin-P, $\text{NaHCO}_3\text{-Pt}$, and cumulative respiration was detected in the acid purple soil than in the neutral purple soil, which may be attributed to the high Ca^{2+} concentration in the neutral purple soil. This study demonstrated that changes and transformations in soil P pools over time depend on residue P concentration and soil type, and that they have the potential to be delivered to soil in a form readily available to plants and soil microorganisms.

Key Words: plant residue; purple soil; orthophosphate

作物秸秆还田后,植物残体直接影响到土壤有机质以及氮(N)、磷(P)、钾(K)等元素的累积和转化。植株残体在土壤微生物的作用下,释放出C、N、P、K元素及各种中微量元素供作物吸利用,是秸秆还田技术培肥土壤地力的关键环节^[1]。植物残体降解包括一系列复杂的生物化学过程,这一过程可通过某些机制直接或间接地影响土壤磷素的有效性^[2],例如植株残体中有机磷、无机磷和有机酸的释放^[3],增加土壤有效磷含量。另外也能改善土壤持水能力和湿度,促进植物根系生长,增强植物对土壤磷素的吸收;增加土壤微聚体体积,使土壤表面积和P吸附位点数量减少^[4],降低土壤的磷素固定值;残体降解过程中微生物也可固定无机磷^[5],转化为微生物磷,防止磷素被土壤吸附固定;还可在短期内增加土壤的pH值^[6],提高磷素的有效性。由此可见,植物残体降解在土壤磷素循环中具有重要的意义,研究植株残体降解对土壤磷素有效性的影响能为改善秸秆还田技术提供理论参考。

目前秸秆还田过程中养分释放和循环研究主要集中在C、N、P、K的总量释放方面^[7-9],而有关植株残体降解过程中土壤磷素分级体系的变化情况尚不清楚,特别是对不同土壤类型的对比研究也鲜有报道。因此,本文采用室内培养方法,结合³¹P核磁共振分析技术和土壤有机无机磷兼顾的分级方法探讨不同磷浓度植株残体降解对紫色土磷素形态变化的影响,为紫色土区秸秆还田技术改进提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验采用酸性和中性两种紫色土进行研究。

酸性紫色土采自重庆市江津区的“黄庄现代粮油科技示范园区”,该示范区于2010年12月正式启动建设,位于江津区永兴镇黄庄村,是江津区粮食生产历史核心区,地理位置为 $106^{\circ}11'22''\text{E}$, $29^{\circ}03'\text{N}$,海拔270 m,年平均气温 18.2°C ,全年降水1034.7 mm,日照1207.9 h,为亚热带季风气候;土壤为沙溪庙组紫色母岩经水耕熟化发育而成的水稻土,土壤养分特征为呈酸性,有机质全氮含量高,有效磷缺乏,常规农业种植制度为一季稻田(只种一季中稻,冬季闲置)。

中性紫色土采于重庆市北碚区西南大学教学农场内的“国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地”,地理位置为 $106^{\circ}26'\text{E}$, $30^{\circ}26'\text{N}$,海拔220 m,年平均气温 18.4°C ,全年降水1105.5 mm,日照1276.7 h,为亚热带季风气候,土壤是由侏罗纪沙溪庙组紫色泥、页岩发育而成的紫色土(类),属于中性紫色土亚类、灰棕紫泥土属,约占紫色土类面积的40%,本试验采集的中性紫色土没有进行耕种,属于长期休闲处理。

土样采集于2013年10月水稻收割后,用“S”型布点法采集,土样风干后过2 mm筛保存备用,其基本化学性质见表1。开展培养试验前,将土壤水分含量保持在70%的持水能力下,预培养14天,以增强土壤的微生物活性,也使土壤的理化性质均一化。

1.2 供试植株

采集西南大学试验田的蚕豆(*Vicia faba* L.)和油菜(*Brassica campestris* L.)植株,将茎冲洗干净后于 105°C 下杀青30 min,在 60°C 恒温条件下烘干,磨细过0.25 mm筛后保存备用,其中高磷植株磷含量为1.72 g/kg,中磷植株磷含量为0.91 g/kg,低磷植株磷含量为0.33 g/kg,随着磷含量的降低,植株C/N和C/P逐渐升高,基本性质见表2。

表 1 供试土样基本理化性质

Table 1 Basic agrochemical properties of experimental soil

土壤类型 Soil type	pH	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	交换性 Ca ²⁺ Exchangeable Ca/ (cmol/kg)	交换 Mg ²⁺ Exchangeable Mg/ (cmol/kg)
酸性紫色土 Acid purple soil	4.46	1.45	0.51	5.12	84	19.64	4.34	1.39
中性紫色土 Neutral purple soil	6.7	1.21	0.45	4.08	74	20.67	13.83	1.4

表 2 植株残体基本性质

Table 2 The basic characteristics of experimental plant residues

磷浓度 P content	植株类型 Plant species	植株部位 Plant parts	生长期 Growth period	P/ (g/kg)	N/ (g/kg)	C/ (g/kg)	C/N	C/P
高磷 High P content	油菜	茎	开花期	1.72	20.49	366.50	17.89	212.50
中磷 Medium P content	蚕豆	茎	成熟期	0.91	16.52	407.51	24.67	448.91
低磷 Low P content	油菜	茎	成熟期	0.33	10.17	396.10	38.94	1198.42

1.3 试验设计

将以上 3 种供试植株残体以 20 g/kg 的比率添加到土壤中,与土样充分混匀,标准对照是土壤中不加植物残体,但要以同样的方式将土壤混匀。称取混匀的土样 35 g 于 500 mL 的广口瓶中,水分含量保持为田间持水量的 70%,在 28 °C 黑暗条件下,分 0(添加残留物 3 小时后),14、28、56 d 培养,每个处理和培养时间设置 4 个重复。在培养期间,通过重量法测定土壤湿度,以保证土壤的含水量。培养结束后测采用 Tiessen 磷分级法对土壤进行磷素分级测定,同时测定 14 d 培养过程中的累积呼吸强度,以确定植株残体之间分解率的差异(添加植株残体后的前两周,呼吸速率最高,各处理的分解速率差异最明显);为了进一步明确植株残体属性对土壤磷素有效性的影响,对植株残体进行³¹P 核磁共振技术分析。

1.4 样品分析

植株残体分级测定采用³¹P-NMR 技术^[10]分析。称取 2.0 g 植株样,按照 M(植株样):V(提取剂)=1:20 的比例,加入 40 mL NaOH-EDTA 浸提剂,振荡提取 16 h,在 1400 g 条件下离心 10 min,取 20 mL 上清液于离心管中,利用液氮速冻后冻干保存备用,取离心管中的冻干粉未溶解于 2 mL 的碱液和重水中,离心后取澄清样品,上机测定,套管系统的 a=0.246。

土壤磷分级参照 Tiessen 磷分级法^[11]测定,依次采用树脂膜、0.5 mol/L NaHCO₃、0.1 mol/L NaOH、1 mol/L HCl、浓 HCl 提取,将土壤磷分成则将土壤磷素分为树脂交换磷(Resin-P)、NaHCO₃提取磷(NaHCO₃-Pt)、NaOH 提取磷(NaOH-Pt)、稀盐酸提取磷(D.HCl-Pi)、浓盐酸提取磷(C.HCl-Pt)和残留态磷(Residual-P)。Resin-P、D.HCl-Pi 采用钼蓝比色法直接测定,NaHCO₃-Pt、NaOH-Pt、C.HCl-Pt 采用过硫酸铵消解-钼蓝比色法测定,Residual-P 采用过氧化氢消解-钼蓝比色法测定。

土壤呼吸强度采用碱液吸收滴定法^[12]测定。培养过程中,密封广口瓶的橡皮塞下悬挂一塑料杯,杯中加入 3 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液以吸收土壤呼吸释放的 CO₂。塑料杯及杯中 NaOH 溶液在培养实验开始后的前 4 天每天更换,第 4 天后每两天更换一次。吸收了 CO₂的 NaOH 溶液用 0.1 mol/L HCl 溶液准确滴定,同时做空白,用滴定消耗 HCl 溶液量计算土壤 CO₂释放量。

2 结果与分析

2.1 植株残体³¹P-NMR 分析

采用³¹P-NMR 分析法对 3 种植株残体的 NaOH-EDTA 萃取浓缩液进行了定量分析,图 1 是不同植株残体

的磷组分柱状分布图,从上到下依次是焦磷酸盐、磷酸二酯、磷酸单酯、正磷酸盐。由图 1 可以看出,NaOH-EDTA 萃取浓缩液中绝大部分是正磷酸盐,高磷、中磷、低磷植株的正磷酸盐分别为 66.30、33.10、11.16 mg/kg,分别占浓缩液 TP 的比例分别为 71.89%、71.38%、66.80%;其次是磷酸单酯的比例较高,高磷、中磷、低磷植株的磷酸单酯分别为 24.60、10.41、4.61 mg/kg,分别占浓缩液 TP 的比例分别为 26.68%、22.32%、27.61%;高磷植株的正磷酸盐和磷酸单酯含量显著高于中低磷植株,正磷酸盐分别是中低磷植株的 2.3 和 5.94 倍,磷酸单酯分别是中低磷植株的 2.36 和 5.34 倍;3 种磷浓度植株残体的磷酸二酯和焦磷酸盐含量均较低,高磷植株的磷酸二酯含量为 0.82 mg/kg,焦磷酸盐含量为 0.50 mg/kg,中磷、低磷植株的磷酸二酯含量分别为 2.94、0.93 mg/kg,焦磷酸盐均未检测出。

2.2 土壤累积呼吸强度的差异

在适宜的温度和水分条件下,土壤微生物的新陈代谢活动会产生 CO_2 ,当在土壤中添加植株残体时,植株残体会在微生物的作用下发生降解作用,土壤呼吸作用同时也会增强,添加植株残体后的前两周,微生物活动最强烈,因此本试验测定了 14 d 的土壤累积呼吸强度,以明确不同植株残体在前 14 d 的分解速率差异。由图 2 可以看出,添加植株残体后,两种紫色土的累积呼吸强度均显著高于对照处理,且高磷处理的累积呼吸强度显著高于中低磷处理,两种紫色土高磷处理累积呼吸强度均达到 $1.30 \text{ mg CO}_2\text{-C/g 土}$,其中酸性紫色土高磷处理分别是中低磷处理的 1.13 和 1.74 倍,中性紫色土高磷处理分别是中低磷处理的 1.28 和 2.59 倍;与中性紫色土相比,酸性紫色土的中磷和低磷处理累积呼吸强度较高,分别是中性紫色土的 1.13 和 1.5 倍。

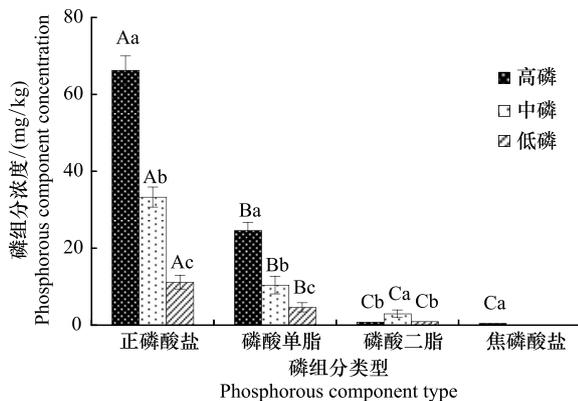


图 1 植株残体的 ^{31}P -NMR 分析

Fig.1 ^{31}P -NMR analysis of plant residues

不同大写字母表示同一种磷浓度植株残体不同磷形态间的差异显著,不同小写字母表示同一种磷形态在不同磷浓度植株残体间的差异显著 ($P < 0.05, n = 3$)

2.3 土壤 Olsen-P 随培养周期的变化

Olsen-P 是表征土壤磷素有效性的重要指标,表 3 列举了两种紫色土添加植株残体后 Olsen-P 随培养时间的变化情况。由表 3 可以看出,随着培养周期的延长,所有处理的土壤 Olsen-P 含量均呈现降低趋势,两种紫色土的高磷和中磷处理在 0 d(添加残留物 3 小时后)时 Olsen-P 含量均显著高于 14、28、56 d,培养 14 d 以后 Olsen-P 含量变化趋势不明显,说明添加植株残体对土壤磷素具有短期的激发效应。在相同的培养时间内,添加植株残体后,两种紫色土的高磷处理 Olsen-P 含量均显著高于对照处理,中磷和低磷处理的 Olsen-P 含量与对照差异不显著,各培养周期的土壤 Olsen-P 含量大小顺序为高磷>中磷>低磷,与各植株残体的 NaOH-EDTA 萃取浓缩液中的正磷酸盐分布相呼应,说明植株磷形态在植株降解过程中对土壤 Olsen-P 的变化有重要影响。将两种紫色土进行对比分析可以看出,酸性紫色土在各培养周期和不同磷浓度处理中的 Olsen-P 均高于中性紫色土,这与两种土壤的有效磷本底值对比是一致的。

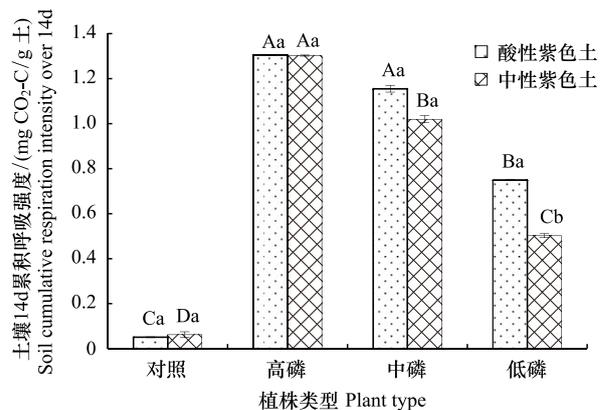


图 2 不同处理 14 d 的土壤累积呼吸强度

Fig.2 Soil cumulative respiration intensity over 14 days of different treatments

不同大写字母表示同一种土壤不同植株残体处理间累积呼吸强度的差异显著,不同小写字母表示同一种植株残体处理不同土壤类型间累积呼吸强度的差异显著 ($P < 0.05, n = 3$)

表 3 土壤 Olsen-P 随培养时间的变化情况 (mg/kg)

Table 3 Variations of Olsen-P of experimental soil at different incubation time

土壤类型 Soil type	培养时间 Incubation time	高磷 High P content	中磷 Medium P content	低磷 Low P content	对照 Control
酸性紫色土 Acid purple soil	0 d	18.19 Aa	12.15 Ab	7.89 Ac	4.71 Ad
	14 d	13.92 Ba	6.38 Bb	5.09 Bb	4.84 Ab
	28 d	13.12 Ba	6.19 Bb	5.11 Bb	4.48 Ab
	56 d	13.15 Ba	6.41 Bb	4.67 Bb	4.54 Ab
中性紫色土 Neutral purple soil	0 d	16.96 Aa	6.68 Ab	4.2 Abc	3.26 Ac
	14 d	11.68 Ba	4.48 Bb	3.52 Ab	3.07 Ab
	28 d	10.81 Ba	4.38 Bbc	2.98 Ac	2.7 Ac
	56 d	10.78 Ba	4.41 Bb	3.47 Ab	2.7 Ab

不同大写字母表示同一类土壤同一种磷浓度植株残体不同培养时间处理间的差异显著,不同小写字母表示同一类型土壤同一培养时间不同磷浓度植株残体处理间的差异显著 ($P < 0.05, n = 4$)

2.4 土壤磷素分级情况

为了进一步探讨添加植株残体对紫色土磷素有效性的影响,本研究采用 Tiessen 磷分级法对两种紫色土进行了磷素分级测定,将磷素分为 Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pt}$ 、 NaOH-Pt 、 D.HCl-Pi 、 C.HCl-Pt 和 Residual-P,其中 Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pt}$ 代表活性磷, NaOH-Pt 代表中活性磷, D.HCl-Pi 、 C.HCl-Pt 和 Residual-P 代表非活性磷,表 4 和表 5 分别列举了酸性和中性紫色土在不同培养期的磷素分级情况。

在相同的培养周期内,与对照处理相比,添加植株残体的酸性和中性紫色土活性磷 (Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pt}$)、中活性磷 (NaOH-Pt) 和非活性磷 (D.HCl-Pi 、 C.HCl-Pt 、Residual-P) 均有不同程度的增加,且高磷处理的活性磷和中活性磷显著高于中低磷处理,但 3 种磷浓度处理间的非活性磷差异不明显,由此说明添加植株残体对增强紫色土磷素有效性的作用明显,且植株磷含量越高,越能增强土壤磷素有效性。

表 4 酸性紫色土在不同培养期的磷素分级情况 (mg/kg)

Table 4 The acidic purple soil phosphorus fractionation at different incubation time

培养周期 Incubation time	植株类型 Plant type	Resin-P	$\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$	NaOH-Pt	D.HCl-Pi	C.HCl-P_i	Residual-P
0 d	高磷 H-P	21.17 Aa	39.67 Aa	93.32 Ad	17.57 Aa	61.50 Bc	84.38 Aa
	中磷 M-P	8.66 Ba	28.39 Ba	90.49 Aa	15.90 Ab	65.34 Aa	85.42 Aa
	低磷 L-P	7.29 Ba	24.01 Ca	63.97 Bc	18.20 Aa	61.50 Bb	83.68 Ab
	对照 Control	4.47 Ca	24.01 Ca	56.28 Cd	16.95 Aa	62.54 Ba	76.39 Bb
14 d	高磷 H-P	15.74 Ab	34.66 Ab	109.31 Ab	17.15 Aa	68.48 Aa	87.50 Aa
	中磷 M-P	6.67 Ba	29.85 Ba	83.81 Cb	15.27 Bb	64.64 Aa	84.72 Aa
	低磷 L-P	4.12 Bb	24.84 Ca	72.67 Db	14.23 Bb	67.09 Aa	89.93 Aa
	对照 Control	4.47 Ba	24.84 Ca	89.07 Ba	14.44 Ba	56.95 Bb	77.78 Bb
28 d	高磷 H-P	17.46 Ab	38.41 Aa	100.61 Ac	20.08 Aa	68.06 Aa	85.76 Aa
	中磷 M-P	8.32 Ba	30.48 Ba	91.70 Ba	16.53 Bab	63.54 Ba	87.85 Aa
	低磷 L-P	6.05 Bbc	24.22 Ca	79.96 Ca	19.04 Ba	63.54 Bb	87.15 Aa
	对照 Control	4.81 Ca	25.89 Ca	72.06 Dc	16.53 Ba	61.46 Ba	85.76 Aa
56 d	高磷 H-P	16.15 Ab	35.07 Ab	119.43 Aa	18.20 Aa	64.93 Ab	85.42 Aa
	中磷 M-P	8.25 Ba	28.81 Ba	68.22 Cc	19.25 Aa	64.58 Aa	81.60 Bb
	低磷 L-P	5.70 Bbc	21.50 Ca	64.17 Dc	16.74 Aab	64.58 Aab	81.94 Bb
	对照 Control	5.29 Ba	23.80 Ca	80.77 Bb	18.20 Aa	59.38 Bb	86.11 Aa

不同大写字母表示同一形态磷同一培养周期内不同磷浓度植株残体处理间的差异显著,不同小写字母表示同一形态磷同一磷浓度植株残体不同培养周期处理间的差异显著 ($P < 0.05, n = 4$); Resin-P-树脂交换磷、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pt}$ - NaHCO_3 提取磷、 NaOH-Pt - NaOH 提取磷、 D.HCl-Pi -稀盐酸提取磷、 C.HCl-Pt -浓盐酸提取磷、Residual-P-残留态磷

表 5 中性紫色土在不同培养期的磷素分级情况 (mg/kg)

Table 5 The neutral purple soil phosphorus fractionation at different incubation time

培养周期 Incubation time	植株类型 Plant type	Resin-P	NaHCO ₃ -P _t	NaOH-P _t	D.HCl-P _i	C.HCl-P _t	Residual-P
0 d	高磷 H-P	13.76 Ab	41.17 Aa	69.93 Aa	253.65 Ab	70.31 Ab	60.44 Bb
	中磷 M-P	10.84 ABa	26.04 Ba	57.95 Bb	250.17 Ab	62.33 BCc	55.82 Cb
	低磷 L-P	7.58 Ba	25.41 Ba	57.95 Bb	255.73 Ab	65.10 Bc	64.36 Ac
	对照 Control	10.84 ABa	21.63 Cb	46.19 Cb	252.26 Ab	59.20 Cc	60.80 Bb
14 d	高磷 H-P	16.75 Aa	28.35 Ab	71.68 Aa	251.91 ABb	69.27 Ab	60.80 Bb
	中磷 M-P	6.33 Bb	30.24 Aa	68.63 ABa	253.30 Ab	67.19 ABb	68.28 Aa
	低磷 L-P	8.41 Ba	27.30 Aa	66.88 Ba	247.05 Bb	70.83 Ab	59.73 Bd
	对照 Control	7.02 Bb	26.67 Aa	51.85 Ca	246.01 Bb	65.45 Bb	62.22 Bb
28 d	高磷 H-P	17.92 Aa	23.67 Ac	54.66 Ab	281.57 Aa	79.83 Aa	74.13 Aa
	中磷 M-P	8.48 Bab	19.29 Bb	47.54 Bc	269.77 Ba	69.73 Bb	72.43 Aa
	低磷 L-P	7.16 Ba	18.24 Bb	40.86 Cd	274.98 Ba	80.18 Aa	69.05 ABb
	对照 Control	6.33 Bb	16.15 Bc	43.45 BCb	270.12 Ba	70.08 Ba	66.68 Ba
56 d	高磷 H-P	17.23 Aa	25.55 Abc	57.46 Ab	280.53 Aa	78.44 Aa	74.80 Ba
	中磷 M-P	9.66 Ba	17.20 Bb	50.13 Ac	273.94 Ba	77.05 Aa	72.10 Ba
	低磷 L-P	6.12 Ba	17.82 Bb	47.54 Ac	270.12 BCa	72.52 ABb	80.56 Aa
	对照 Control	7.23 Bb	17.61 Bc	39.35 Bc	265.95 Ca	70.43 Ba	63.97 Cb

不同大写字母表示同一形态磷同一培养周期内不同磷浓度植株残体处理间的差异显著,不同小写字母表示同一形态磷同一磷浓度植株残体不同培养周期处理间的差异显著 ($P < 0.05, n = 4$)

同一磷浓度植株残体处理,随着培养周期的延长,紫色土中不同形态磷浓度变化趋势不同。在 0—14 d 内,两种紫色土均呈现活性磷降低,中活性磷升高的趋势;在 14—28 d 内,酸性紫色土出现了活性磷升高的趋势,而中性紫色土的活性磷持续降低;在 28—56 d 内,酸性紫色土的活性和中活性磷持续降低,非活性磷趋于稳定,而中性紫色土的活性、中活性和非活性磷均趋于稳定,变化幅度不明显。由此可以看出,两种紫色土在添加植株残体后的变化趋势不一致,且随着培养周期的延长,紫色土中的磷可能会相互转化,秸秆还田过程中应在活性磷含量较高的阶段种植农作物,提高土壤磷素的利用率。

对比分析两种紫色土的磷素分级体系,酸性紫色土不同形态磷所占比例顺序为 Residual-P > NaOH-P_t > C.HCl-P_t > NaHCO₃-P_t > D.HCl-P_i > Resin-P, 比例范围依次为 25.18%—32.96%、23.39%—32.21%、19.14%—25.99%、8.44%—12.49%、5.15%—7.11%、1.51%—6.67%;中性紫色土不同形态磷所占比例顺序为 D.HCl-P_i > C.HCl-P_t > Residual-P > NaOH-P_t > NaHCO₃-P_t > Resin-P, 比例范围依次为 49.81%—57.25%、13.13%—16.35%、11.87%—16.28%、8.33%—14.37%、3.42%—8.08%、1.24%—3.37%。由此看出,酸性和中性紫色土的磷素分级体系大不相同,且酸性紫色土的活性磷 (Resin-P、NaHCO₃-P_t) 所占比例高于中性紫色土,这与土壤的养分含量和土壤结构有关。

3 讨论

3.1 植株残体属性对土壤磷素有效性的影响

研究结果表明,在紫色土中添加植株残体后,高磷处理的 14 d 土壤累积呼吸强度、磷素分级体系中的活性磷均显著高于对照处理,且高磷处理的增强效应高于中低磷处理;在中低磷处理中,土壤中的分级体系中活性磷与对照处理没有显著差异,且在 14 d 和 56 d 时,中性和酸性紫色土低磷处理的活性磷 (Resin-P、NaHCO₃-P_t) 甚至低于对照处理,说明在秸秆还田技术中植株残体磷浓度是改变土壤磷素有效性的一个限制因素,但植株磷在土壤中固定和分解的临界浓度在本研究中未能体现出来,还需进一步研究。White 的研究指出植株磷在土壤中固定和分解的临界浓度为 2.4 g/kg^[13],当植株磷浓度大于 2.4 g/kg 时可以增加土壤活性磷含量,低

于 2.4 g/kg 时则会被土壤固定转化成有效性较低的有机和无机磷,而本研究中的最高植株残体磷浓度仅为 1.72 g/kg,同样有增强土壤磷素有效性的作用,因此本研究进一步延伸至植株磷形态的³¹P 核磁共振(NMR)分析。

本试验³¹P-NMR 分析检测出了植株残体中的正磷酸盐、磷酸单酯、磷酸二酯和焦磷酸盐,正磷酸盐是活性磷,磷酸单酯、磷酸二酯是非常重要的有机磷,虽然其本身活性较低,却是植株残体磷释放的潜在源,其矿化过程会产生活性磷酸盐^[14-15],焦磷酸盐是高聚磷化合物,活性极低;研究结果指出,植株磷含量越高,正磷酸盐和磷酸单酯含量越高,当植株残体在土壤中降解是更容易转化为活性磷,增强土壤的磷素有效性,与研究中活性磷随植株残体磷含量的升高而增加的趋势相呼应,说明添加在土壤中的植株磷形态是影响土壤磷素有效性的重要因子,同时也说明³¹P-NMR 分析技术能较好的反应植株残体的供磷潜力。

3.2 培养周期对土壤磷素有效性的影响

本研究结果表明酸性紫色土中的活性磷(Resin-P、NaHCO₃-Pt)和中性紫色土中的活性磷(NaHCO₃-Pt)和中活性磷(NaOH-Pt)随着培养周期的延长含量逐渐降低,而两种紫色土的非活性磷(D.HCl-Pi、C.HCl-Pt、Residual-P)均随着培养周期的延长含量逐渐升高,说明随着培养周期的延长,土壤磷素有效性会出现降低的趋势,这与土壤微生物的代谢活性和土壤的交换吸附作用有关。植株残体在土壤中的降解主要通过微生物的代谢活动完成,而微生物中的 C、N、P 含量是有限的^[16],在适宜的水分和温度条件下向土壤添加植株残体,增加了土壤环境的 C、N、P 含量,短时间内使土壤微生物代谢所需的养分增加,代谢活动急剧增强,不仅使微生物菌群扩大,也促使植株残体得到有效的分解,植株有机磷经微生物作用转化为无机磷,进而使土壤磷素有效性增加^[17]。但随着时间的延长,微生物活性逐渐减弱,矿化而来的无机磷在纯培养条件下也被土壤胶体吸附,导致土壤磷素有效性逐渐降低。这一研究结果为农业生产中秸秆还田的堆肥周期提供了理论参考。

3.3 不同土壤类型对土壤磷素有效性的影响

在本研究中,中性和酸性紫色土虽然都是低磷土,但添加相同的植株残体后,磷素有效性发生了不同的变化。在每个培养阶段,所有磷浓度处理中酸性紫色土的活性磷(Resin-P、NaHCO₃-Pt)、中活性磷(NaOH-Pt)含量均高于中性紫色土。两种土壤的磷素分级体系也有显著的差异,中性紫色土中 D.HCl-Pi 所占的比例最高,范围达到 50.04%—57.42%,而酸性紫色土中 D.HCl-Pi 所占的比例范围仅有 5.40%—7.04%;酸性紫色土中 NaOH-P 所占的比例范围是 23.39%—34.02%,而中性紫色土中 NaOH-P 所占的比例范围仅有 8.49%—14.44%。D.HCl-Pi 是 1 mol/L 的稀 HCl 提取的磷,有效性较低,与无机磷分级系统中 Ca-P 相呼应^[11],而中性紫色土中的 Ca²⁺含量是酸性紫色土的 3.19 倍,所以中性紫色土的 D.HCl-Pi 显著高于酸性紫色土。NaOH-P 是 0.1 mol/L NaOH 提取的磷,与无机磷分级系统中 Fe-P 和 Al-P 相呼应^[11],酸性紫色土中的 Fe-P 和 Al-P 理应高于中性紫色土,所以酸性紫色土的 NaOH-P 高于中性紫色土。中性和酸性紫色土的这些差异均与土壤的理化性质和微生物群落结构相关,微生物群落对磷素的分解和吸收能力以及产生的分解产物会有所不同,可以通过改变土壤的吸附容量来间接影响土壤磷素有效性的变化^[18],在此基础上可进一步采用分子研究法对土壤的微生物群落进行研究。

4 结论

³¹P-NMR 技术能够有效的定量评估植物秸秆的磷组成。添加植物秸秆能够有效的提高紫色土中的活性磷含量,但随着培养周期的延长,土壤磷素有效性会出现降低的趋势,且在 pH 不同的两种紫色土中变化趋势不同,可能与土壤的土壤钙含量有关。

参考文献(References):

- [1] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008, 180: 269-271.
- [2] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, Blamey F P C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review.

- Australian Journal of Soil Research, 2005, 43(2): 189-202.
- [3] Bolan N S, Naidu R, Mahimairaja S, Baskaran S. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(4): 311-319.
- [4] Wang X, Yost R S, Linquist B A. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(1): 139-146.
- [5] Chen G C, He Z L, Huang C Y. Microbial biomass phosphorus and its significance in predicting phosphorus availability in red soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(5/6): 655-667.
- [6] Mokolobate M S, Haynes R J. A glasshouse evaluation of the comparative effects of organic amendments, lime and phosphate on alleviation of Al toxicity and P deficiency in an Oxisol. *The Journal of Agricultural Science*, 2003, 140(4): 409-417.
- [7] 武际, 郭熙盛, 王允青, 许征宇, 鲁剑巍. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征. *中国农业科学*, 2011, 44(16): 3351-3360.
- [8] Ha K V, Marschner P, Bünemann E K. Dynamics of C, N, P and microbial community composition in particulate soil organic matter during residue decomposition. *Plant and Soil*, 2008, 303(1/2): 253-264.
- [9] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 于学胜, 项金霞. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3): 297-302.
- [10] Noack S R, McLaughlin M J, Smernik R J, McBeath T M, Armstrong R D. Crop residue phosphorus: speciation and potential bio-availability. *Plant and Soil*, 2012, 359(1/2): 375-385.
- [11] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction//Carter M R, ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 1993: 75-86.
- [12] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, Schomberg H H, Hons F M. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 613-623.
- [13] White R E, Ayoub A T. Decomposition of plant residues of variable C/P ratio and the effect on soil phosphate availability. *Plant and Soil*, 1983, 74(2): 163-173.
- [14] Bai X L, Ding S M, Fan C X, Liu T, Shi D, Zhang L. Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9): 2507-2513.
- [15] 范成新, 张路. 太湖-沉积物污染与修复原理. 北京: 科学出版社, 2009: 17-18.
- [16] Hoyle F C, Murphy D V, Brookes P C. Microbial response to the addition of glucose in low-fertility soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(4): 571-579.
- [17] Damon P M, Bowden B, Rose T, Rengel Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 127-137.
- [18] Maltais-Landry G, Frossard E. Similar phosphorus transfer from cover crop residues and water-soluble mineral fertilizer to soils and a subsequent crop. *Plant and Soil*, 2015, 393(1/2): 193-205.