

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.004

陈利军, 蒋瑀霁, 王浩田, 等. 长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响. 土壤, 2020, 52(3): 451–457.

长期施用有机物料对旱地红壤磷组分及磷素有效性的影响^①

陈利军^{1,2}, 蒋瑀霁^{1*}, 王浩田¹, 赵其国¹, 孙波¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对中亚热带第四纪红黏土发育的红壤旱地, 建立了玉米单作系统等碳量投入有机物料的田间试验, 利用不同的磷分级方法研究了不同有机物料施用对土壤磷组分的影响, 构建了不同磷组分的含量与土壤全磷及有效磷之间的回归方程, 明确了不同磷组分对土壤磷活化系数(PAC)及磷肥(表观和经济)利用率的影响。连续 7 a 的试验结果表明: 施用有机物料可以增加土壤 PAC 和磷肥利用率, 并以秸秆猪粪 9 : 1 配施(NPKS/M)处理效果最佳, 显著高于常规施肥处理(NPK); 施用有机物料显著提升了土壤有机磷含量, 且与土壤有效磷含量显著正相关, 其对土壤 PAC 及磷肥(表观和经济)利用率影响显著。施用有机物料通过影响土壤有机碳、全氮、碱解氮、交换性 K⁺以及交换性 Al³⁺含量影响土壤磷的有效性。

关键词: 红壤; 有机物料; 土壤磷分级; 磷活化系数

中图分类号: S158.9; S154.31 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Application of Organic Materials on Phosphorus Fractions and Availability in Red Soil

CHEN Lijun^{1,2}, JIANG Yuji^{1*}, WANG Haotian¹, ZHAO Qiguo¹, SUN Bo¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A 7-year field experiment was conducted on the dry land of red soil derived from Quaternary red clay in the middle subtropical zone under the same carbon input from organic materials in corn monocropping system, and the effects of different organic material application on soil phosphorus fractions using different phosphorus fraction methods, the correlation between different phosphorus fractions with soil total phosphorus and available phosphorus, and the effects of different phosphorus fractions on soil phosphorus activation coefficient (PAC), the apparent and economic utilization rates of phosphate fertilizer were studied. The results showed that the application of organic materials increased soil PAC and the utilization rates of phosphorous fertilizer, and the best effect was obtained by applying 9 : 1 (NPKS/M) with straw pig manure, which was significantly higher than those of conventional fertilization treatment (NPK). The application of organic materials significantly increased the content of soil organic phosphorus, which was significantly positively correlated with the content of soil available phosphorus, thus, had significant effects on soil PAC and the apparent and economic utilization rates of phosphate fertilizer. In addition, the application of organic materials also affected the availability of soil phosphorus by affecting the contents of soil organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, exchangeable K⁺ and Al³⁺.

Key words: Red soil; Organic material; Soil phosphorus fraction; Phosphorus activation coefficient

近年来, 虽然随着磷肥施用量的不断提高, 我国农田土壤有效磷含量呈稳中有升的趋势, 但是南方红壤缺磷情况仍十分普遍^[1-2]。由于红壤淋溶强烈, 脱硅富铁铝化现象严重, 土壤有机质和养分含量极低,

尤其酸性红壤以可变电荷矿物为主, 对磷素具有强烈的固定作用, 可变电荷矿物表面大量的铝(Al)和铁(Fe)氧化物是参与磷酸根离子固定作用的主要条件^[3-4], 其他表面反应还包括碳酸盐、黏土矿物和土壤有机物

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200300)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112, KFJ-SW-YW032)和国家优秀青年基金项目(41922048)资助。

* 通讯作者(yjjiang@issas.ac.cn)

作者简介: 陈利军(1988—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事土壤微生物生态学研究。E-mail: ljchen@issas.ac.cn

对磷素的固定^[5]。因此,红壤中磷素的有效性较低,磷肥的作物利用率极其低下,如何提高红壤中磷素有效性对于红壤区农业可持续发展具有重要的现实意义。

土壤中磷的形态直接决定了磷的生物有效性^[6-7]。有效磷是土壤中可被植物吸收利用磷组分的总和,一般采用碳酸氢钠溶液提取的 Olsen-P 表征。Olsen-P 主要包括土壤中全部水溶性磷、部分吸附态磷、部分有机磷和少量沉淀态磷。但是单一的碳酸氢钠溶液提取法对土壤中有效磷的评估可能并不准确,因为其无法准确地测量土壤中有效磷含量^[8]。土壤有效磷含量的测定通常是通过一定的含有中度酸性或碱性物质的提取剂来增强土壤磷组分的释放,例如 Olsen 和 Bray 方法^[9-10],这些方法主要测定土壤中以最容易溶解或解吸形式存在的磷。对土壤磷进行分级可作为探讨不同磷组分对有效磷贡献的一种方法。酸性土壤中无机磷分级一般采用 Chang-Jackson 方法,可分为磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸钙盐(Ca-P, Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P)和闭蓄态磷酸盐(O-P)4 个组分^[11]。然而,由于土壤磷的化合物组成较为复杂^[12],单一提取方法对磷素分级存在诸多弊端^[13]。利用 Deluca 等^[14]开发的基于土壤磷素生物有效性的分级方法可以充分反映磷素的生物学利用难易程度。对磷进行生物有效性分级主要考虑以植物和微生物分泌有机酸等活化的磷表征磷组分,其较好地模拟了土壤-植物-根系过程,有效地反映了各形态磷的生物有效性。由于磷与土壤中的有机和无机成分具有极强的相互作用、研究者对磷形态的认识不够全面、有机磷和稳定无机磷的转化率的不明确,以及作物从土壤获取磷策略和能力的不同,导致土壤中潜在可利用磷的确定和测量存在很大的不确定性。

一般来说,土壤有机磷各组分的含量可以通过施用有机肥来增加,但其各组分增加的幅度主要受土壤类型和有机肥的种类等因素的综合影响。研究表明,有机肥的施用能提高活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷等组分的含量^[15],施用猪粪、紫云英、稻草等有机肥能显著提高有机磷各组分的含量^[16]。此外,磷素的有效性还会受到碳磷比(C/P)的影响^[17]。

本研究针对南方红壤区磷肥、磷素有效性低等问题,基于江西鹰潭长期等碳投入有机物料试验平台,探究了不同有机物料施用对土壤磷组分和磷素有效性的影响、不同磷素分级方法能否客观科学地反映不同磷组分在土壤中的真实存在状况和磷素分级方法在红壤中的适用性,本研究将对揭示土壤磷素状况及其转化具有深刻意义。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本概况

田间试验于 2010 年设置在江西省鹰潭市中国科学院红壤生态实验站(116°55'E, 28°13'N),试验区属中亚热带季风气候,年均温 17.8℃,年均降水量 1 795 mm。田间试验小区面积为 100 m²(5 m × 20 m)。供试土壤为第四纪红黏土发育的红壤(黏化湿润富铁土),原始植被为稀疏马尾松林。红壤养分和有机质含量低,强酸性,阳离子交换量(CEC)低。试验前表层土壤(0~20 cm)基本性质为:有机碳 2.52 g/kg,全氮 0.40 g/kg,全磷 0.23 g/kg,全钾 11.95 g/kg,速效氮 38.30 mg/kg,有效磷 0.76 mg/kg,速效钾 47.58 mg/kg,缓效钾 135.38 mg/kg,CEC 12.12 cmol/kg, pH 4.73。

1.2 试验处理

试验共设置 6 种施肥处理:①空白(Ref),不施肥,不种作物;②对照(CK):不施肥,只种植作物;③施用化肥(NPK):施用常规氮磷钾化肥;④秸秆还田(NPKS):施氮磷钾化肥,秸秆还田;⑤秸秆-猪粪配施(NPKS/M):施氮磷钾化肥,秸秆:猪粪按 9:1 的碳投入配比施用;⑥秸秆生物质炭(NPKBC):施氮磷钾化肥和生物质炭。除 Ref 处理外,其他处理均为玉米单作,供试玉米品种为苏玉 20。每个处理重复 3 次,采用随机区组排列。生物质炭利用风干玉米秸秆在生物炭炉中厌氧闷烧法获得。有机物料施用处理(NPKS、NPKSM、NPKB)中碳输入量均为 1 000 kg/hm²。除了空白(Ref)和对照(CK)处理,其他处理化肥施用量均为:尿素(N 150 kg/hm²)、钙镁磷肥(P₂O₅ 75 kg/hm²)、氯化钾(K₂O 60 kg/hm²),所有肥料作基肥播种前一次施入。

1.3 样品采集和分析方法

土壤样品为 2017 年玉米收获后采集,各小区按 S 型采集 8 个样点的表层(0~20 cm)土壤样品,混合均匀后用四分法取 600 g 土样,风干后用于测定土壤理化性质。土壤全氮采用凯氏消煮法测定,全磷采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法测定,全钾采用原子吸收分光光度法测定,速效氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定,速效钾采用原子吸收分光光度法测定,有机质采用重铬酸钾氧化法测定, pH 采用电位计法测定,CEC 采用乙酸铵交换法测定,土壤交换性盐基离子和交换性铝离子采用乙酸铵浸提原子吸收光谱法测定,土壤有机磷含量采用灼烧法测定^[18]。土壤中无机磷分级一般采用 Chang-Jackson 方法,分为磷酸铁盐(Fe-P)、磷酸

钙盐(Ca-P, Ca₂-P、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P)和闭蓄态磷酸盐(O-P)3个(由于磷酸铝盐几乎检测不到,故不分)组分^[11]。生物有效性分级:①0.01 mol/L CaCl₂溶液提取的水溶性磷(H₂O-P),能够模拟直接被根系截留、扩散和吸收的磷;②10 mmol/L 柠檬酸(Citrate)溶液提取态磷(Citrate-P),能够模拟被有机酸活化释放的磷;③1 mol/L HCl提取的磷(HCl-P),能够模拟质子活化的土壤最大潜力磷库^[17]。

1.4 数据分析方法

磷活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC)=土壤有效磷/全磷×100%;磷肥表观利用率=(施肥处理生物量含磷总量-对照处理生物量含磷总量)/施肥总量×100%;磷肥经济利用率=(施肥处理籽粒含磷总量-对照处理籽粒含磷总量)/施肥总量×100%。

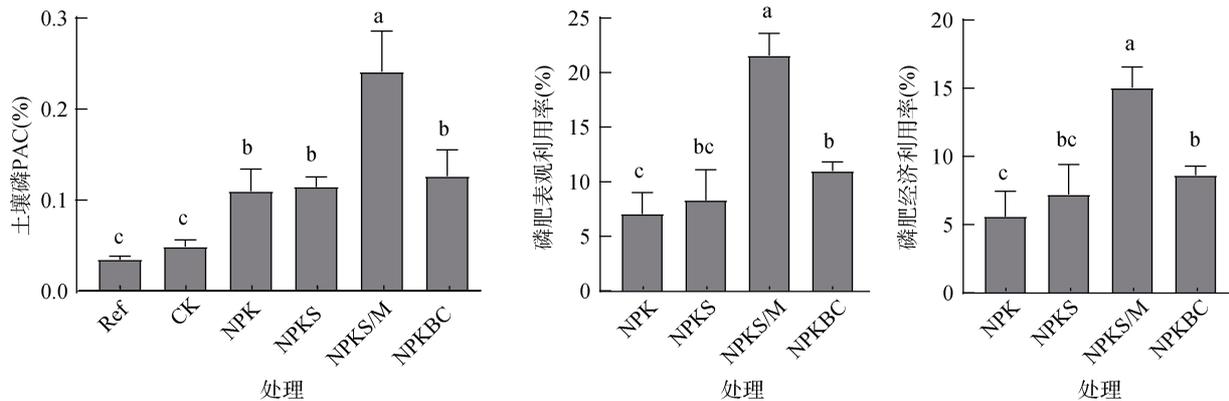
数据差异显著性分析用方差分析法(ANOVA)和Tukey法($P < 0.05$);相关分析采用皮尔逊相关系数法;随机森林分析采用R语言randomForest程序包计算,并分别rfUtilities和rfPermute程序包检验模型

和每个变量的P值。

2 研究结果

2.1 不同施肥处理土壤磷活化系数

土壤PAC表征土壤磷素的活化能力,即全磷向有效磷转化的难易程度。土壤PAC越高,有效磷在全磷中的比例越大,磷素有效性也就越高。有机物料施用7a后土壤PAC增高,其中NPKS/M处理显著高于NPK处理($P < 0.01$),PAC上升了1.19倍(图1)。土壤PAC大小依次为NPKS/M > NPKBC > NPKS > NPK > CK > Ref。施碳处理与NPK处理相比,磷肥表观利用率和经济利用率分别上升了1.24%~14.49%和1.61%~9.42%。各处理磷肥表观利用率和经济利用率的高低依次为NPKS/M > NPKBC > NPKS > NPK,且NPKS/M和NPKBC处理磷肥表观利用率和经济利用率均显著高于NPK处理,NPKS/M处理磷素表观利用率和经济利用率分别为NPK处理的3.05倍和2.68倍,NPKBC分别为NPK的1.55倍和1.53倍。



(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)

图1 不同处理施用7a后土壤PAC及磷肥表观利用率和经济利用率

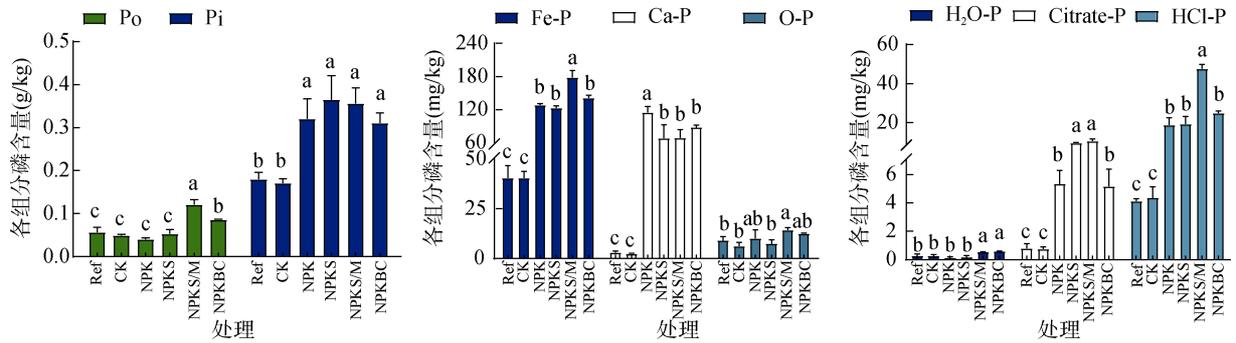
Fig. 1 Soil PACs, apparent and economic utilization rates of phosphorus fertilizer after 7 years under different treatments

2.2 不同施肥处理土壤磷分级

施用有机物料显著提升了土壤有机磷的含量,但对无机磷的含量无显著影响(图2)。土壤有机磷占全磷的11.10%~25.32%,施用有机物料后提高了0.003~0.07 g/kg,其中NPKS/M和NPKBC处理显著高于NPK处理,土壤有机磷含量增幅分别为132.1%和5.6%。将土壤中的无机磷进行分级(因本试验土样中Al-P含量极为低下,故将土壤无机磷分为Fe-P、Ca-P和O-P3类)发现,试验土壤中Fe-P含量最高,占土壤无机磷总量的50.65%~82.55%;其次为Ca-P,占4.71%~45.31%;O-P含量最低,占3.72%~17.20%。

对Fe-P而言,除NPKS/M处理显著高于NPK处理外,其他施用有机物料处理与NPK处理差异不显著。施用有机物料会导致红壤中的Ca-P含量显著下降($P < 0.05$),但对O-P影响并不显著($P > 0.05$)。

为探讨不同的磷组分对土壤有效磷的贡献,根据磷的利用难易程度可对土壤有效磷进行分级。根据不同提取剂,可将土壤中的有效磷分为极易利用磷(水溶态磷, H₂O-P)、缺磷情况下容易利用磷(柠檬酸提取,模拟根系分泌物活化磷, Citrate-P)以及极度缺磷情况下可利用磷(盐酸提取态, HCl-P)。施用有机物料土壤中H₂O-P和Citrate-P分别上升了0.05~



(图中 Po 为有机磷; Pi 为无机磷)

图 2 有机物料施用对不同分级方法土壤磷素含量组成的影响

Fig. 2 Effects of organic material application on soil phosphorus contents by different fraction methods

0.43 mg/kg 和 0.16 ~ 5.21 mg/kg, 土壤中 H₂O-P 含量依次为 NPK < NPKS < CK < Ref < NPKS/M < NPKBC, 其中 NPKS/M 和 NPKBC 处理显著高于 NPK 处理。土壤中 Citrate-P 含量则为 CK < Ref < NPK < NPKBC < NPKS < NPKS/M, 其中 NPKS/M 和 NPKS 处理显著高于 NPK 处理。HCl-P 含量则只有 NPKS/M 处理显著高于 NPK 处理。

2.3 不同磷分级与土壤有效磷的关系

分别对不同分级方法所得到的磷组分与土壤有效磷和全磷进行拟合, 探究不同的磷组分与土壤有效磷和全磷含量的关系, 结果发现土壤中磷素组分与全磷及有效磷含量呈线性相关(表 1)。土壤有机磷含量

与有效磷含量显著正相关($R^2=0.327, P<0.05$), 无机磷含量与土壤全磷及有效磷均极显著相关(R^2 分别为 0.867 和 0.516, $P<0.001$)。无机磷中 Fe-P 含量与土壤全磷和有效磷含量相关性极强(R^2 分别为 0.855 和 0.755, $P<0.001$), Ca-P 含量与土壤全磷含量相关性极显著($R^2=0.414, P<0.01$), 但与有效磷含量相关性并不显著, O-P 含量则与全磷及有效磷含量相关性均不显著。土壤中 Citrate-P 和 HCl-P 含量与全磷(R^2 分别为 0.831 和 0.794)及有效磷(R^2 分别为 0.641 和 0.869)含量均显著正相关($P<0.001$), H₂O-P 含量则只与有效磷含量显著正相关($R^2=0.230, P<0.05$)。

表 1 土壤不同磷组分与全磷及有效磷含量的回归方程

Table 1 Regression equation of different phosphorus fractions, soil total phosphorus and available phosphorus

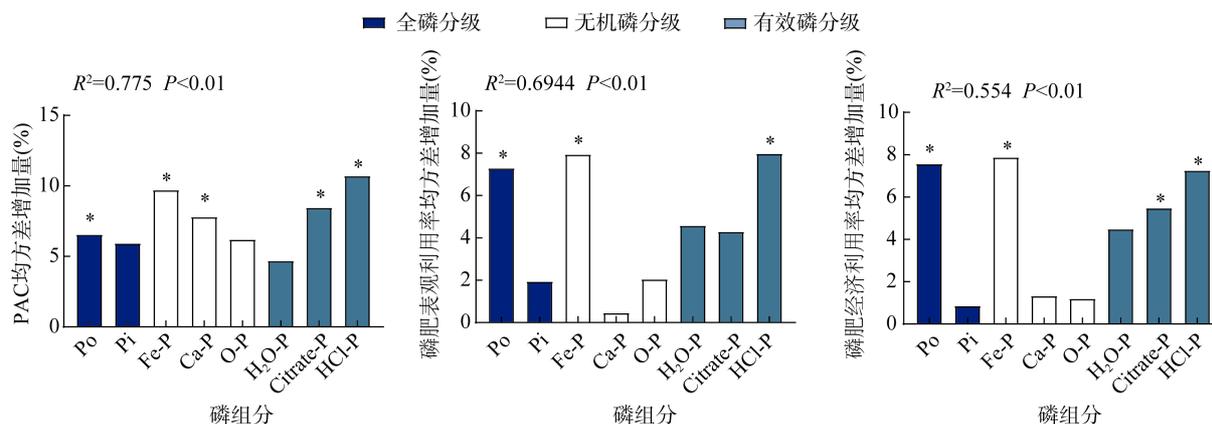
磷指标	磷组分	回归方程	R^2	P 值
AP	Po	$y=0.055x-0.151$	0.327	0.013
	Pi	$y=0.031x-4.09$	0.516	0.0008
	H ₂ O-P	$y=9.43x+1.51$	0.230	0.044
	Citrate-P	$y=0.730x+0.716$	0.641	<0.0001
	HCl-P	$y=0.227x+0.132$	0.869	<0.0001
	Fe-P	$y=0.061x-1.91$	0.755	<0.0001
	Ca-P	$y=0.035x+2.50$	0.191	0.0701
	O-P	$y=0.476x+0.002$	0.212	0.0546
TP	Po	$y=0.393x+0.331$	0.036	0.4486
	Pi	$y=0.859x+0.122$	0.867	<0.0001
	H ₂ O-P	$y=154.8x+0.315$	0.133	0.136
	Citrate-P	$y=17.95x+0.270$	0.831	<0.0001
	HCl-P	$y=4.68x+0.273$	0.794	<0.0001
	Fe-P	$y=1.39x+0.217$	0.855	<0.0001
	Ca-P	$y=1.12x+0.298$	0.414	0.0039
	O-P	$y=9.95x+0.269$	0.199	0.0636

注: 表中 AP 为土壤有效磷; TP 为土壤全磷; Po 为土壤有机磷; Pi 为土壤无机磷。

2.4 土壤组分对磷活化系数和磷素利用率的影响

随机森林模型预测结果显示(图 3), Po、Fe-P、Ca-P、Citrate-P 以及 HCl-P 是土壤 PAC 的主要决定因素($P<0.05$)。当分别去除 Po、Fe-P、Ca-P、Citrate-P 以及 HCl-P 的预测值时, 土壤 PAC 的均方差分别增加 5.91%、9.71%、7.80%、8.46% 和 10.70%。Po、

Fe-P 以及 HCl-P 对土壤磷素表观利用率(去掉其预测值, 均方差分别增加了 7.28%、7.94% 和 7.98%, $P<0.05$)和经济利用率(去掉其预测值, 均方差分别增加了 7.56%、7.88% 和 7.25%, $P<0.05$)的影响均达显著水平, 此外 Citrate-P 对磷素的经济利用率的影响也较显著(去掉其预测值, 均方差增加 5.48%, $P<0.05$)。

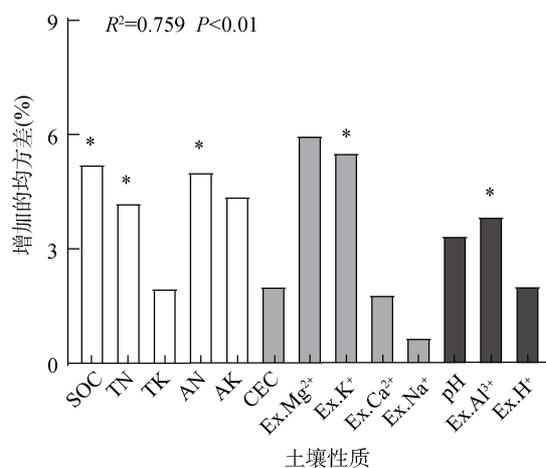


(图中*表示剔除横坐标对应因子预测对象均方差增加量在 $P<0.05$ 水平显著, 下同)

图 3 土壤磷组分对 PAC、磷素表观利用率和经济利用率的影响

Fig. 3 Effects of soil phosphorus fractions on soil PACs, apparent and economic utilization rates of phosphorus fertilizer

进一步通过构建随机森林模型, 分析土壤环境因子对土壤 PAC 的影响(图 4), 发现当分别去除土壤有机碳、全氮和速效氮的预测值时, 土壤 PAC 的均方差分别增加了 5.21%、4.20% 和 5.02%; 去掉交换性 K^+ , 均方差增加了 5.52%; 去掉交换性 Al^{3+} , 均方差增加了 3.85%。



(图中 SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮; TK: 土壤全钾; AN: 土壤速效氮; AK: 土壤速效钾; CEC: 阳离子交换量; Ex.Mg²⁺、Ex.K⁺、Ex.Ca²⁺和 Ex.Na⁺分别表示交换性镁、钾、钙和钠; Ex.Al³⁺和 H⁺分别表示交换性铝和氢)

图 4 随机森林模型分析土壤其他理化性质对土壤 PAC 的影响

Fig. 4 Effects of soil other physiochemical properties on soil PAC based on Random Forest model

3 讨论

全磷和有效磷是衡量土壤供磷潜力和供磷活力的两个重要指标, 有效磷与全磷含量之比则为土壤磷素活化系数(PAC), PAC 直观地反映了磷素的有效化潜力^[19-20], 其比例越高, 则表明全磷转化成有效磷能力越大, 其比例越低, 表示土壤固定磷的能力越强。本研究中, 施肥处理土壤 PAC 显著高于 Ref 和 CK 处理, 与 NPK 处理相比施用有机物料也会提高土壤 PAC, 其中 NPKS/M 处理显著高于 NPK 处理($P < 0.01$)。大部分研究认为施用磷肥能够显著提高土壤 PAC, 而化肥磷配施有机物料对土壤有效磷和 PAC 的增加更显著^[21-22]。在酸性红壤中这种效应更加明显, 已有研究认为长期不施磷土壤 PAC 值呈下降趋势, 而长期施磷(无机或有机磷肥)及无机磷肥与有机肥配施均促进了土壤 PAC 增高^[23]。土壤 PAC 一方面与磷素投入量相关, 磷肥输入量越大, 土壤有效磷和 PAC 上升越多, 这可能是由于土壤矿物表面的吸附位点被施入的磷占据, 降低了矿物对磷的固定强度从而促进磷的活化^[24]; 另一方面, 施用有机物料会影响土壤磷素的活化, 有机物腐解过程中产生的小分子有机酸等物质能够减少无机磷的固定, 并活化土壤无机磷, 增加有效性磷^[25-26], 此外, 有机质还可以与土壤矿物形成有机无机复合体, 包裹土壤矿物表面的吸

附位点,从而降低矿物对磷素的固定作用。本研究中磷肥表观利用率及经济利用率变化趋势与 PAC 基本一致,土壤磷活化能力增强,植物吸收利用的磷素增加,故利用率上升。

研究表明,长期施用无机磷肥或有机肥均可提升土壤有机磷和无机磷含量,化肥主要提高无机磷,有机肥则以提高有机磷为主^[27]。本研究中长期施肥处理土壤无机磷总量显著升高,但与 NPK 处理相比,施用有机物料土壤无机磷含量并未显著上升,甚至 NPKS/M 和 NPKBC 处理还稍有下降,这有可能是因为随着生物量上升,作物带走的磷量增加所致。施用有机物料增加了土壤有机磷含量, NPKS/M 和 NPKBC 处理土壤有机磷含量显著高于 NPK 处理,且有机磷含量与有效磷含量显著正相关,对 PAC、磷素表观利用率和经济利用率的影响均显著;虽然土壤无机磷含量与全磷和有效磷的含量的相关性均高于有机磷,但其对 PAC、磷素表观利用率和经济利用率的影响均不显著。这有可能是因为有机物料施用多年后,土壤有机磷总量增加,且主要是增加了土壤中活性有机磷含量^[28]。

本研究还发现,施肥处理土壤中 Fe-P 和 Ca-P 的含量显著高于不施肥的 Ref 和 CK 处理,且有机物料施用会进一步增加 Fe-P 的含量,其中 NPKS/M 和 NPKBC 处理土壤 Fe-P 含量显著高于 NPK 处理;施用有机物料显著降低 Ca-P 含量。土壤 Fe-P 与土壤全磷、有效磷含量显著正相关,对 PAC 及磷素(表观及经济)利用率影响显著;Ca-P 则只与全磷含量显著相关,且只对 PAC 影响显著。在氧化土中 Fe-P 的含量较高, Ca-P 含量低于 Fe-P,氧化土中 Ca 缺乏,因为强烈的脱硅化作用通过去除土壤中二氧化硅和碱性离子,形成更多的酸,大多数可溶的 Ca-P 都转化为 Fe-P 和 Al-P^[29]。值得注意的是,本研究土壤样品中 Ca-P 含量也比较高,这可能是由于施用的无机磷肥为钙镁磷肥所致。

同时,本研究通过生物有效性分级法证明了 3 种不同提取效率溶液(CaCl₂、Citrate 和 HCl)提取的磷都在一定范围与 Olsen-P 含量正相关,每种溶液提取的磷都与一定程度可利用的磷对应:①CaCl₂ 溶液提取的水溶性磷 H₂O-P,是直接被根系和丛枝菌根吸收的磷^[30];②Citrate 提取的磷,是根系和根外菌根中释放出有机酸可活化的磷^[31];③HCl 提取的磷,是根尖和外生菌根释放 H⁺ 可活化的磷^[31]。施用有机物料土壤中柠檬酸盐和 HCl 可提取的磷含量上升,且 NPKS 和 NPKS/M 处理显著高于 NPK 处理,反映了

土壤中植物可利用磷累积增加,植物吸收带走的磷可以通过施肥得到补充,且有机物料施用可以促进这种形式的补充^[32]。柠檬酸和 HCl 提取磷与土壤全磷、有效磷含量显著正相关,且对 PAC 和磷素利用率影响显著,Citrate-P 代表磷高效植物可利用态磷,HCl-P 代表植物根尖释放质子可活化的磷总量,这两种磷对土壤中磷的持续供应具有重要意义^[5,33-36]。

4 结论

1)连续 7 a 施用有机物料提高了土壤 PAC 和磷肥利用率,且以 NPKS/M 处理效果最佳,显著高于 NPK 处理;其次为 NPKBC 处理,磷肥利用率显著高于 NPK 处理。

2)施用有机物料显著提高了土壤有机磷、Fe-P、Citrate-P 及 HCl-P 的含量,这些组分均与土壤有效磷含量显著正相关,并对土壤 PAC 影响显著。

3)土壤有机碳、全氮、速效氮、交换性 K⁺ 以及交换性 Al³⁺ 含量对土壤 PAC 的影响显著,施用有机物料主要是通过改变这些土壤因子,提高磷素有效性。

参考文献:

- [1] 孙波,张桃林,赵其国.南方红壤丘陵区土壤养分贫瘠化的综合评价[J].土壤,1995,27(3):119-128.
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [3] Walbridge M R, Richardson C J, Swank W T. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus subcycles in two southern Appalachian forest soils[J]. Biogeochemistry, 1991, 13(1): 61-85.
- [4] Horta M D C, Torrent J. Phosphorus desorption kinetics in relation to phosphorus forms and sorption properties of Portuguese acid soils[J]. Soil Science, 2007, 172(8): 631-638.
- [5] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review[J]. Plant and Soil, 2001, 237: 173-195.
- [6] 雷宏军,刘鑫,朱端卫.酸性土壤磷分级新方法建立与生物学评价[J].土壤学报,2007,44(5):860-866.
- [7] 蔡观,胡亚军,王婷婷,等.基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J].环境科学,2017,38(4):1606-1612.
- [8] McKenzie R H, Bremer E. Relationship of soil phosphorus fractions to phosphorus soil tests and fertilizer response[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2003, 83(4): 443-449.
- [9] Olsen S R, Sommers L E. Phosphorus[M]//Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph No.9. 2nd ed. Madison, WI.: ASASSA, 1982: 403-430.
- [10] Tiessen H, Moir J O. Characterization of available P by sequential extraction[M]//Carter M R. Soil sampling and

- methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, FL, 1993: 823.
- [11] Chang S C, Jackson M L. Solubility product of iron phosphate[J]. Soil Science Society of America Journal, 1957, 21(3): 265–269.
- [12] McLaren T I, Smernik R J, McLaughlin M J, et al. Complex forms of soil organic phosphorus—A major component of soil phosphorus[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(22): 13238–13245.
- [13] 冯跃华, 张杨珠. 土壤有机磷分级研究进展[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(3): 259–264.
- [14] Deluca T H, Glanville H C, Harris M, et al. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 88: 110–119.
- [15] Zhang Y S. Influence of organic manure on organic phosphorus fraction in soils[J]. Pedosphere, 1993, 3(4): 361–369.
- [16] 张亚丽, 沈其荣. 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(3): 59–63.
- [17] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189–2194.
- [18] 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.
- [19] 唐晓乐, 李兆君, 马岩, 等. 低温条件下黄腐酸和有机肥活化黑土磷素机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 893–899.
- [20] Shen P, He X H, Xu M G, et al. Soil organic carbon accumulation increases percentage of soil Olsen-P to total P at two 15-year mono-cropping systems in Northern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 597–603.
- [21] Chen C R, Condron L M, Xu Z H. Impacts of grassland afforestation with coniferous trees on soil phosphorus dynamics and associated microbial processes: A review[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(3/4): 396–409.
- [22] Xiao R, Bai J H, Gao H F, et al. Spatial distribution of phosphorus in marsh soils of a typical land/inland water ecotone along a hydrological gradient[J]. Catena, 2012, 98: 96–103.
- [23] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1132–1141.
- [24] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 245–248.
- [25] 莫淑勋, 钱菊芳, 钱承梁. 猪粪等有机肥料中磷素养分循环再利用的研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(3): 309–316.
- [26] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 138–147.
- [27] Motavalli P, Miles R. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36(1): 35–42.
- [28] Sharpley A N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 905–911.
- [29] Hsu P H. Aluminium oxides and oxyhydroxids[M]//Dixon J B, Weed S B. Minerals in soil environments. Madison: Soil Science Society of America, 1977: 99–144.
- [30] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition[J]. Plant and Soil, 2003, 256(1): 231–241.
- [31] Jones D L, Darrah P R. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 1994, 166(2): 247–257.
- [32] Römheld V, Müller C, Marschner H. Localization and capacity of proton pumps in roots of intact sunflower plants[J]. Plant Physiology, 1984, 76(3): 603–606.
- [33] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471–1485.
- [34] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1240–1250.
- [35] 王玉书, 刘海, 黄建国. Cd²⁺对无机磷细菌生长及溶磷作用的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 211–216.
- [36] 王丹, 赵学强, 郑春丽, 等. 两种根际促生菌在不同氮磷条件下对油菜生长和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1078–1083.