

胡云峰,王擎运,屠人凤等.长期施肥下旱地红壤剖面磷素的形态变化与累积特征[J].华中农业大学学报,2022,41(2):115-123.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.014

长期施肥下旱地红壤剖面磷素的形态变化与累积特征

胡云峰¹,王擎运¹,屠人凤¹,李霞¹,刘明学¹,李庆阳¹,樊剑波²,赵怀燕¹

1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/长江经济带磷资源高效利用与水环境保护研究中心/安徽农业大学资源环境学院,合肥 230036; 2. 中国科学院南京土壤研究所,南京 210008

摘要 依托长期(1989—)定位试验,田间试验设置5个处理:氮磷钾(NPK)、氮磷钾+花生秸秆(NPK+PS)、氮磷钾+绿肥(NPK+FR)、氮磷钾+腐熟猪粪(NPK+PM)、只施氮钾(CK),研究不同施肥措施对旱地红壤剖面磷素形态变化与累积特征的影响。结果显示:长期施磷肥显著增加红壤中全磷和速效磷的含量,提升土壤磷活化系数(PAC);相关分析表明,中等活性有机磷(MAOP)和无机磷中的磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)与有效磷呈显著相关($P<0.05$)。对照处理土壤中无机磷以闭蓄态(O-P)为主(64.54%),但在不同施肥处理下外源性磷更易以Al-P和Fe-P形式积累,其中NPK+PM处理最为明显(Al-P,CK:6.27%、NPK+PM:27.58%; Fe-P,CK:17.28%、NPK+PM:37.35%)。NPK+PS、NPK+FR处理对土壤中磷素的影响主要集中于耕层,但NPK+PM处理对20 cm以下土层磷含量仍有较大影响,在底层(60~100 cm)土壤中依然有少量有效磷积累。研究表明,磷肥及其与有机肥的配施明显促进了土壤磷素的积累与活化,以猪粪为原料的腐熟粪肥尤为显著。

关键词 旱地红壤;长期施肥;剖面;磷素形态;磷素累积;土壤肥力;土壤磷活化系数

中图分类号 S158.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0115-09

红壤广泛分布于我国南方,具有很大的生产潜力,是我国粮食生产主要土地贮备之一^[1]。由于红壤风化淋溶强烈,脱硅富铁铝化现象严重,对磷素的固定作用强,所以红壤磷素匮乏是限制区域作物产量进一步提高的主要因子^[2]。根据我国第二次土壤调查数据显示,南方酸性土壤的全磷含量低于0.56 g/kg^[3],全磷含量低时有效磷供应常常不足。

磷是土壤的大量元素,也是影响土壤肥力、作物产量的重要养分元素^[4],施用磷肥能显著增加红壤全磷和有效磷含量^[5-6]。但磷肥利用率较低,仅为5%~20%^[7]。研究发现,红壤中化肥配施有机肥在磷素累积和有效性方面比单施化肥更有优势^[8]。土壤磷活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC)可以表征土壤磷素的活化能力,常年施用有机物料可以提高红壤PAC^[9]。不同磷肥用量下耕层土壤(0~20 cm)PAC随着施磷量的增加而增大,但20~40 cm土壤PAC变化并不规律^[10]。土壤中的磷主要以有机

态和无机态存在,有机磷按Bowman-Cole法可分为活性有机磷(active organic phosphorus, AOP)、中等活性有机磷(moderately active organic phosphorus, MAOP)、中稳性有机磷(moderately stable organic phosphorus, MSOP)和高稳性有机磷(highly stable organic phosphorus, HSOP)4种^[11]。酸性土壤无机磷分级一般参考文献[12]方法,可分为磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、闭蓄态磷酸盐(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P)4种形态。有机磷可以转化为有效态磷,是土壤有效磷的主要来源之一^[13];无机磷是植物吸收磷素的主要形态,其有效性对土壤供磷能力有着重要作用^[14]。研究^[9,15]表明,施用有机物料可以显著提高有机磷MAOP、MSOP组分及无机磷Al-P、Fe-P的含量,其含量与土壤有效磷呈显著正相关。在红壤中施用有机肥料时,磷以Ca-P和Al-P积累为主,施用无机磷肥时主要增加Al-P含量,O-P含量则相对稳定^[16]。赵海涛等^[17]研究发现在红壤中施用的磷首先转化为Al-P和Fe-P,然后Al-P继续向Fe-P

收稿日期:2022-01-02

基金项目:国家红壤改良工程技术研究中心开放基金课题(2020NETRCRSI-13);安徽农业大学稳定与引进人才科研项目(yj2018-68);广西中烟工业有限责任公司项目(2021450000340019)

胡云峰, E-mail: yfhu9697@163.com

通信作者: 赵怀燕, E-mail: huaiyanzhao@126.com

转化。在温室栽培条件下,Al-P和Fe-P主要在耕层(0~20 cm)土壤累积,全磷、有效磷和无机磷含量随土层深度的增加而急剧下降^[18]。

磷肥合理施用是解决红壤肥力较低的重要措施,但过量施肥不仅提高成本,还会增加土壤磷流失风险,造成环境污染^[19]。目前,大多数研究仅针对红壤耕层,而对深层土壤研究较少,施肥量对土壤磷素的累积特征缺乏定量研究。本研究依托长期定位试验,通过分析不同施肥方式下磷素在土壤中的含量变化,研究旱地红壤耕层磷素形态差异及剖面累积特征,旨在为科学评价土壤磷的有效性、实现磷素高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验设置于江西省鹰潭市余江县中国科学院红壤生态实验站内(东经116°41′~117°09′,北纬

28°04′~28°37′)。该区域属亚热带季风气候区,年均气温17.8℃,年均降雨量1785 mm,蒸发量1318 mm。地形为丘陵地貌,供试土壤为第四纪粘土发育而来的红壤。

田间试验设置5个不同施肥处理:氮磷钾肥平衡施用(NPK)、氮磷钾肥+花生秸秆(NPK+PS)、氮磷钾肥+绿肥(鲜萝卜菜)(NPK+FR)、氮磷钾肥+腐熟猪粪(NPK+PM)、只施氮钾肥(CK)。试验设置3个重复,随机排列,单个小区面积35 m²。肥料年用量见表1。各处理氮的施用量一致,有机物料占总投入量的30%(以N计算)。试验正式开始于1989年,1995年以前采用花生/油菜轮作,后改为一季花生,冬季休耕处理。试验前耕层土壤(0~20 cm)基本性质为:有机质(OM)6.4 g/kg,全氮(TN)0.34 g/kg,全钾(TK)10.6 g/kg,全磷(TP)0.5 g/kg,碱解氮(AV-N)32.1 mg/kg,速效钾(AV-K)46.7 mg/kg,速效磷(AV-P)3.9 mg/kg,pH为4.70。

表1 施肥处理及施用肥料量

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	鲜猪粪 Pig manure	鲜绿肥 Green manure	风干花生秸秆 Peanut straw
CK	239	—	285	—	—	—
NPK	239	570	285	—	—	—
NPK+PS	168	521	271	—	—	1 883
NPK+FR	168	458	211	—	11 192	—
NPK+PM	168	313	258	5 379	—	—

注:CK:不施磷肥的NK处理;NPK:氮磷钾肥;NPK+PS:氮磷钾肥+花生秸秆;NPK+FR:氮磷钾肥+绿肥种植;NPK+PM:氮磷钾肥+腐熟猪粪,下同。Note:CK: Only nitrogen and potassium fertilizer; NPK: Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer; NPK+PS: Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer+peanut straw; NPK+FR: Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer+green fertilizer planting; NPK+PM: Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer+rotten pig manure, the same as below.

1.2 样品采集

本研究土样于2019年8月采集,每小区采用五点法取0~100 cm土层土样,样品按0~20(0 cm≤土层≤20 cm)、20~40(20 cm<土层≤40 cm)、40~60(40 cm<土层≤60 cm)、60~100(60 cm<土层≤100 cm) cm断层处理,同一层土样混匀按四分法去除多余样品,剩余土样剔除石块、植物残根等杂物,自然风干,过孔径2 mm筛备用。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质测定^[12]:土壤pH测定采用电位法;土壤有机质测定采用外加热-重铬酸钾氧化法;碱解氮测定采用碱解扩散法;土壤有效磷测定采用盐酸-氟化铵法;速效钾测定采用乙酸铵提取法;全氮测定采用凯氏定氮法;土壤全磷测定采用碱熔融-钼锑钒比色法;土壤全钾测定采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法。

参照Bowman等^[20]方法,根据土壤有机磷在不同浓度酸碱溶液中的溶解性进行有机磷组分测定。(1)活性有机磷:0.5 mol/L NaHCO₃(pH 8.5)浸提。(2)中等活性有机磷:1.0 mol/L H₂SO₄和0.5 mol/L NaOH浸提。(3)中稳性有机磷,即富里酸态有机磷,为前述浸提液不能被酸所沉淀的部分。(4)高稳性有机磷,即胡敏酸结合态有机磷,为前述浸提液被酸所沉淀的部分。

参照Chang等^[12]方法,将无机磷分为磷酸铝盐(Al-P)、磷酸铁盐(Fe-P)、闭蓄态磷酸盐(O-P)和磷酸钙盐(Ca-P)。具体步骤如下:称1.00 g风干土样于离心管中,加入50 mL 1.0 mol/L NH₄Cl震荡离心弃去上清液后再次加入0.5 mol/L NH₄F,室温震荡1 h,提取上清液用于测定Al-P;残留土壤采用饱和NaCl溶液清洗2次,加入0.1 mol/L NaOH浸提,并用于Fe-P测定;上述残留土壤再次采用NaCl溶液洗2次,加入

0.3 mol/L 柠檬酸钠和 1.0 g 连二亚硫酸钠进行水浴 (80~90 °C), 搅拌后加入 0.5 mol/L NaOH, 离心后将上清液加入三酸 (硫酸、高氯酸、硝酸) 混合液消煮, 测定 O-P; 最后土样采用 0.5 mol/L H₂SO₄ 浸提, 可测定 Ca-P。

1.4 数据处理

土壤磷活化系数 (phosphorus activation coefficient, PAC) = 土壤有效磷 / 全磷 × 100%^[10]。

数据统计分析采用 SPSS 20.0 软件, 绘图采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理耕层土壤肥力特征

经过长期不同施肥处理, 土壤养分含量有明显变化。土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量总体呈现 NPK+PM > NPK+FR ≈ NPK+PS ≈ NPK > CK。其中, NPK、NPK+PS、NPK+FR 处理间的差异较小, 显著高于 CK 处理, 低于 NPK+PM 处理。NPK、

NPK+PS、NPK+FR 处理 pH 值在 5.10~5.20, 而 NPK+PM 处理 pH 值则为 5.54, 与对照相比高 0.89。对照处理土壤有机质含量为 16.16 g/kg, 与试验前土壤相比提升了 152.5%。NPK、NPK+PS、NPK+FR 和 NPK+PM 处理有机质积累量与 CK 相比分别提升了 21.91%、30.75%、31.93% 和 52.54%。各处理碱解氮在对应处理全氮中占比为 11.52%~14.64%。NPK、NPK+PS、NPK+FR 和 NPK+PM 处理土壤氮素含量与 CK 相比分别提高了 24.39%、39.02%、56.10%、97.56% (全氮) 和 56.12%、70.75%、73.18%、95.13% (碱解氮)。由此可见, 在 NPK+PM 处理下全氮与碱解氮积累特征差异不大, 但在其余肥料处理下, 尤其 NPK+PS、NPK+FR 处理有促进碱解氮积累的趋势。钾素积累特征明显不同, 全钾含量除 NPK+FR 处理比 CK 提高了 40.25%, 其余处理全钾变化较 CK 均不显著。速效钾含量占全钾的 1%~3%, 有效性较低。在不同肥料尤其绿肥处理土壤速效钾含量得到明显改善 (表 2)。

表 2 不同施肥处理下 0~20 cm 耕层红壤基础理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of 0-20 cm surface red soil under different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	养分全量/(g/kg) Total nutrient			速效养分含量/(mg/kg) Available nutrient content		
			TN	TP	TK	AV-N	AV-P	AV-K
CK	4.65c	16.16c	0.41d	0.28c	9.59b	47.83c	4.48d	98.67d
NPK	5.14b	19.70b	0.51c	0.54b	8.53b	74.67b	35.97c	218.00b
NPK+PS	5.19b	21.13b	0.57bc	0.51b	9.01b	81.67b	40.66c	220.00b
NPK+FR	5.20b	21.32b	0.64b	0.54b	13.45a	82.83b	51.40b	234.50a
NPK+PM	5.54a	24.65a	0.81a	1.22a	9.97b	93.33a	473.41a	205.00c

注: 表中同列不同小写字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著。Note: Different lowercase letters in the same column in the table indicate significant differences at the level of $\alpha=0.05$.

对照处理与试验前土壤相比有效磷含量变化不大, 全磷下降接近 50%。在 NPK、NPK+PS、NPK+FR 处理下土壤全磷含量较为稳定, 但明显提高了速效磷的含量。NPK+PM 处理对土壤磷素的影响最为显著, 与 CK 处理相比全磷积累量提升约 336%, 而有效磷积累量提升高达 105 倍。无机磷肥施用量接近的情况下, 猪粪的施用显著改变了土壤中磷的含量及其有效性。

2.2 长期不同施肥处理土壤剖面磷积累特征

图 1A 显示 CK 处理土壤各剖面中全磷含量变化不大, 但在不同施肥处理下磷素出现不同程度积累, 尤其 NPK+PM 处理出现明显积累, 且以耕层积累为主。随着土壤深度的增加, 全磷含量急剧下降。土壤深度从 0~20 cm 到 20~40 cm 全磷含量变化最快, NPK、NPK+PS、NPK+FR 和 NPK+PM 处理全磷含量分别下降了

29.85%、23.86%、28.04% 和 50.09%。40~60 cm 土层中, NPK+PM 处理全磷含量依然显著高于其他各处理, 但 60~100 cm 处各处理全磷含量基本一致, 无明显差异。

土壤剖面有效磷含量 (图 1B) 变化趋势总体与全磷较为一致, 但变化趋势更为明显。在不同施肥处理下 20~40 cm 土壤有效磷含量与 0~20 cm 相比分别下降了 88.08% (NPK)、89.13% (NPK+PS)、90.45% (NPK+FR) 和 87.35% (NPK+PM)。即使在不施磷肥处理下土壤有效磷含量依然下降了 44.42% (CK)。值得注意的是, NPK+PM 处理土壤剖面中有效磷保持了相对较高含量。尽管氮磷钾配合猪粪处理对底层 (60~100 cm) 土壤全磷含量影响不大, 但有效磷含量依然高于其余处理。

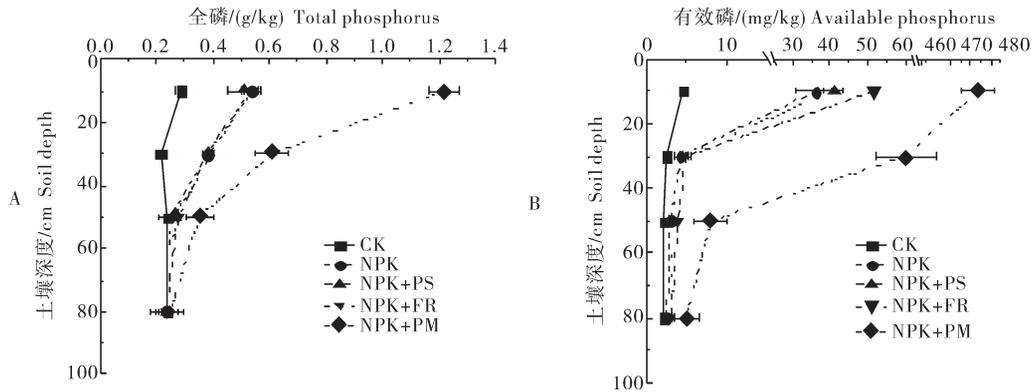


图1 不同施肥处理下各土层全磷(A)和有效磷(B)含量

Fig.1 Contents of total phosphorus (A) and available phosphorus (B) in soil layers under different fertilization treatments

长期不施磷肥处理下耕层土壤磷的活化系数较低,仅有1.62%(图2)。不同施肥处理(NPK、NPK+PS、NPK+FR)可将土壤磷的活化系数提高至6%~10%,NPK+PM处理下耕层土壤磷的活化系数高达38.91%。土壤剖面磷活化系数变化情况与磷含量变化特征基本相同。20 cm以下,NPK、NPK+PS和NPK+FR处理土壤磷的活化系数均降低在2.0%以下。NPK+PM处理土壤剖面磷的活化系数同样有明显下降趋势,在犁底层(20~40 cm)磷的活化系数约10%,明显高于其余处理(< 2%),在深层(>40 cm)土壤中磷的活化系数为2%~3%,略高于其余处理。

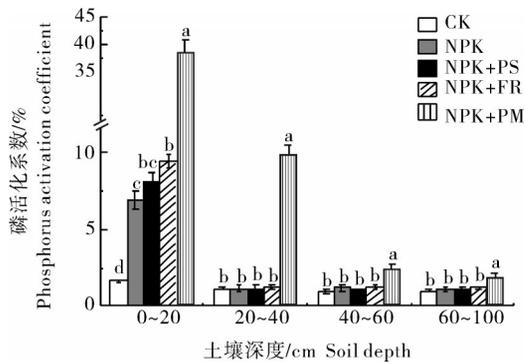


图2 不同施肥处理对各土层PAC影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on PAC in soil layers

2.3 长期不同施肥处理对红壤旱地无机磷形态的影响

CK处理整个土壤剖面中无机磷形态分布特征较为一致。各剖面Al-P平均含量为11.88 mg/kg,占无机磷总量的6.56%。其余形态平均含量分别占全量的14.91%(Fe-P)、66.27%(O-P)和12.26%(Ca-P)。长期不施磷肥处理下,土壤无机磷主要以O-P的形式存在。肥料施用可以改变耕层(0~20

cm)土壤磷的形态,尤其低肥处理下的猪粪施用最为显著。NPK、NPK+PS、NPK+FR处理之间不同形态磷含量差异较小,明显高于CK处理,远远低于NPK+PM处理。表3同样显示在不同施肥处理下Al-P、Fe-P的百分含量随着其绝对含量的增加而明显提高,但O-P和Ca-P则呈现相反的规律。外源性磷易于以Al-P和Fe-P形式积累。NPK+PM与CK处理相比,Al-P、Fe-P绝对含量分别提高了16.74、7.18倍,比例分别上升至27.58%、37.35%;O-P、Ca-P绝对含量分别提高了0.66、1.86倍,但比例下降到26.61%、8.46%。在NPK+PM处理下O-P比例下降高达37.93%(表3)。

土壤剖面不同形态磷绝对含量的变化趋势与全磷和有效磷的变化规律一致。20~40 cm土层不同形态磷的绝对含量均显著下降,尤其Al-P、Fe-P表现的最为明显。深层(>20 cm)土壤中NPK、NPK+PS、NPK+FR处理间的差异较小,Al-P、Fe-P绝对含量略高于CK,并随着土层深度的增加而减少;O-P、Ca-P绝对含量与CK相比则无明显差异。NPK+PM处理在深层土壤中不同形态磷绝对含量同样有明显下降特征,但高于其余处理。其中,40 cm以下土层各处理间的O-P和Ca-P绝对含量差异不明显,但Al-P、Fe-P,尤其Fe-P在NPK+PM处理的底层(60~100 cm)土壤中含量依然明显高于其余处理。深层土壤中不同形态磷的比例变化规律明显不同于耕层土壤。在不同施肥处理下,Al-P、Fe-P百分含量呈现明显下降趋势,O-P、Ca-P比例则随着土层深度的增加明显提高。Al-P、Fe-P和O-P变化较大,Ca-P比例相对较低,且变化较小。在底层(60~100 cm)土壤中各处理间的差异不明显,仅NPK+PM处理下Fe-P的比例显著高于其余处理。

表3 不同施肥处理下各土层红壤无机磷形态含量

Table 3 Inorganic phosphorus form and content of red soil in soil layers under different fertilization treatments

处理 Treatment	Al-P		Fe-P		O-P		Ca-P		
	含量/ (mg/kg) Content	比例/% Percentage	含量/ (mg/kg) Content	比例/% Percentage	含量/ (mg/kg) Content	比例/% Percentage	含量/ (mg/kg) Content	比例/% Percentage	
0~20 cm	CK	12.55c	6.27	34.58d	17.28	129.15c	64.54	23.84d	11.91
	NPK	32.39b	10.20	104.93c	33.04	147.20b	46.36	33.03c	10.40
	NPK+PS	31.67b	9.43	123.48b	36.77	143.48b	42.73	37.18b	11.07
	NPK+FR	33.67b	9.85	133.39b	39.03	141.55bc	41.42	33.14c	9.70
	NPK+PM	222.59a	27.58	301.46a	37.35	214.78a	26.61	68.24a	8.46
20~40 cm	CK	10.66c	6.15	25.49b	14.71	114.73b	66.20	22.42a	12.94
	NPK	11.90b	6.50	35.68b	19.48	109.44b	59.75	26.14a	14.27
	NPK+PS	11.78bc	6.25	35.24b	18.69	116.23b	61.66	25.26a	13.40
	NPK+FR	12.72b	6.72	35.40b	18.71	115.59b	61.09	25.48a	13.47
	NPK+PM	25.32a	7.42	150.96a	44.23	136.90a	40.11	28.11a	8.24
40~60 cm	CK	13.96b	7.54	25.16c	13.59	124.85a	67.42	21.22b	11.46
	NPK	12.61bc	6.78	31.03b	16.70	118.60a	63.81	23.62ab	12.71
	NPK+PS	13.41bc	6.88	32.08b	16.46	124.12a	63.69	25.26ab	12.96
	NPK+FR	11.23c	5.76	33.41b	17.15	125.42a	64.39	24.72ab	12.69
	NPK+PM	18.11a	8.25	51.42a	23.44	123.60a	56.34	26.25a	11.96
60~100 cm	CK	10.36b	6.28	23.17c	14.05	110.40b	66.94	21.00b	12.73
	NPK	11.92b	6.66	31.03b	17.34	110.20b	61.58	25.81a	14.42
	NPK+PS	11.86b	6.40	26.87bc	14.51	123.99a	66.97	22.42ab	12.11
	NPK+FR	11.40b	6.38	27.92bc	15.63	118.15ab	66.12	21.22b	11.87
	NPK+PM	14.89a	7.76	38.68a	20.16	114.78b	59.83	23.51ab	12.26

注:表中同列相同土层不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。Note: Different lowercase letters in the same soil layer in the same column indicate significant differences at the level of $\alpha=0.05$.

2.4 长期不同施肥处理对红壤旱地有机磷形态的影响

图3显示土壤中有机磷组分含量由高到低总体表现为MAOP>MSOP>HSOP>AOP。单施氮钾肥(CK)的耕层(0~20 cm)土壤AOP、MAOP、MSOP和HSOP含量分别为10.71、104.08、100.03和9.91 mg/kg。其余处理与CK相比,MAOP和HSOP含量均有不同程度的提高,而AOP含量显著下降;NPK+PM处理MAOP和MSOP含量提升最为显著,分别提高了196.15%和22.20%。随着土壤深度的增加,有机磷各组分呈现下降趋势,以MAOP、MSOP最为显著。0~20 cm土层,各施磷肥处理仍对有机磷组分有较大影响;40 cm以下土层除猪粪处理外,其余处理对有机磷组分含量没有明显影响。

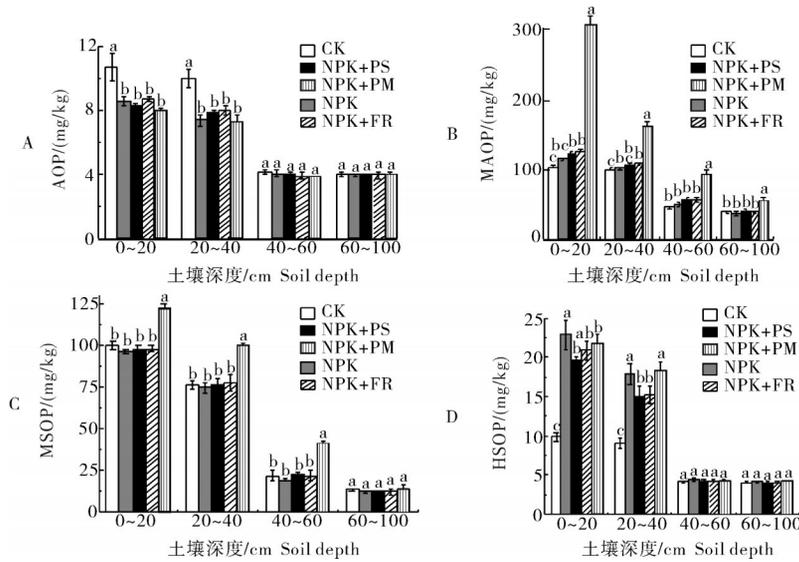
2.5 不同磷组分与土壤全磷、有效磷的相关性分析

将不同磷组分与土壤全磷及有效磷含量分别进行拟合,发现不同磷组分与土壤全磷及有效磷含量呈线性相关。土壤有机磷含量与有效磷呈显著相

关,无机磷含量与全磷及有效磷均呈显著相关。有机磷中AOP和HSOP与土壤全磷含量具有相关性,MAOP与有效磷相关性显著。无机磷中Al-P与全磷含量呈极显著相关、与有效磷含量显著相关,Fe-P则与全磷呈显著相关、与有效磷呈极显著相关,O-P和Ca-P与全磷及有效磷含量均不显著(表4)。

3 讨论

红壤中的磷易于固定、活性较低,导致肥力较低^[21],是限制红壤生产力的重要因素。本研究发现长期不施磷肥处理耕层及耕层以下土壤磷含量分布特征较为一致。土壤中全磷的含量约为0.28 g/kg,但有效磷的含量不足5.00 mg/kg,磷的活化系数不足2.5%。长期施用无机磷肥土壤中磷素的活化系数也不超过8%。土壤磷素活化系数(PAC)可以表征土壤全磷与有效磷之间的转化难易程度。当土壤PAC越高时,有效磷所占土壤全磷的比例越大,磷素的有效性也就越高。当PAC小于2.0%时,表明总磷不易转化为有效磷^[22]。由于化肥的大量投入易于



AOP: 活性有机磷 Active organic phosphorus; MAOP: 中等活性有机磷 Moderately active organic phosphorus; MSOP: 中稳性有机磷 Moderately stable organic phosphorus; HSOP: 高稳性有机磷 Highly stable organic phosphorus; 下同。The same as below.

图3 不同施肥处理下各土层有机磷组分含量

Fig.3 Content of organic phosphorus components in soil layers under different fertilization treatments

表4 不同磷组分与全磷及有效磷关系的回归方程

Table 4 Regression equation for the relationship between phosphorus fractions and total phosphorus and available phosphorus

磷指标 Phosphorus index	磷组分 Phosphorus component	回归方程 Regression equation	R ²	P
TP	P _o	y=0.096x+197.870	0.760	0.084
	P _i	y=0.520x+55.277	0.917	0.028
	AOP	y=-0.0087x+13.130	0.903	0.033
	MAOP	y=0.069x+84.943	0.561	0.159
	MSOP	y=0.0105x+103.070	0.609	0.140
	HSOP	y=0.0463x-3.2717	0.956	0.015
	Al-P	y=0.0804x-10.065	0.987	0.004
	Fe-P	y=0.3457x-62.215	0.867	0.045
	O-P	y=0.0604x+112.180	0.854	0.050
	Ca-P	y=0.0408x+12.734	0.691	0.109
AV-P	P _o	y=0.6328x+221.710	0.966	0.011
	P _i	y=3.2342x+191.660	0.938	0.021
	AOP	y=-0.0504x+10.726	0.754	0.086
	MAOP	y=0.4787x+101.270	0.870	0.044
	MSOP	y=-0.0503x+99.832	0.182	0.326
	HSOP	y=0.2549x+9.8904	0.682	0.112
	Al-P	y=0.4807x+11.6450	0.896	0.035
	Fe-P	y=2.194x+26.4120	0.975	0.008
	O-P	y=0.3164x+129.860	0.497	0.185
	Ca-P	y=0.2431x+23.743	0.631	0.132

注 Note: P_o: 有机磷 Organic phosphorus; P_i: 无机磷 Inorganic phosphorus; R²: 相关系数 Correlation coefficient; P: P < 0.05 显著相关 P < 0.05 was significant correlation.

造成土壤酸化、板结,带来土壤属性障碍因子的进一步加剧,红壤区域通常适当降低化肥施用,增加有机物料的投入。外源性有机物料输入对土壤磷的影响与物料腐化状态有关^[23]。绿肥与秸秆通常易于腐化,而腐熟猪粪中含有的大量腐熟质及可溶性有机碳对磷的活化有较大促进作用^[24]。本试验发现花生秸秆和绿肥对土壤磷累积的影响与长期化肥的投入相比差异不显著,但有提高土壤磷活化度的趋势。以猪粪为主的养殖废弃物的投入则造成土壤磷的大量积累,并显著提高了磷的活化度,高达38.91%。因此,长期有机、无机肥配施可以增加土壤磷素含量累积,促进全磷向有效磷转化,提高土壤PAC。其中NPK+PM处理效果最明显,显著高于NPK处理。

长期施用无机肥主要提升土壤无机磷,有机肥主要提升有机磷^[25]。相关分析表明,土壤有机磷与有效磷含量呈显著相关,土壤无机磷与全磷及有效磷含量均呈显著相关。本研究发现,70%化肥和不同有机物料配施,与单施NPK处理相比,NPK+PS、NPK+FR处理土壤无机磷和有机磷含量没有明显提高。无机磷形态中,所有施磷肥处理Al-P、Fe-P均显著提升,NPK+PM处理对Al-P、Fe-P含量变化最为显著。外源性磷更易于形成Fe-P和Al-P,Fe-P积累明显高于Al-P,Al-P、Fe-P与有效磷分别呈显著、极显著相关,构成了土壤有效磷的主要来源。有机与无机化肥的配施更易于提高磷的有效性,尤其畜

禽养殖废弃物的大量施用显著提高了土壤磷的有效性。O-P也是土壤磷的主要形态,但性质稳定,只有在大量外源性磷输入的情况下才有可能发生较为明显的积累;酸性土壤钙镁等碱基阳离子的含量较低,制约了Ca-P的蓄存能力^[26-27]。在不同施肥处理中,红壤有机磷组分中MAOP比例最高,其次为MSOP,再次为HSOP,AOP最低。通过有机磷组分与有效磷相关性分析得出:有机磷组分中MAOP与有效磷显著相关,说明旱地红壤中等活性有机磷与土壤有效磷含量密切相关,是土壤有效磷的主要来源。

研究表明,红壤中的磷素总体较为稳定,迁移能力较弱。尽管秸秆还田、绿肥的种植活化了土壤中的磷素,但影响主要集中于耕层。耕层以下土壤磷含量及其形态与不施磷肥的对照处理相比,没有太大差异^[28]。值得注意的是腐熟猪粪大量施用对土壤剖面磷积累及其形态变化有较大影响。尽管在20~40 cm土层中全磷、有效磷含量急剧下降,但依然维持了相对较高的活化度,即使在底层(60~100 cm)中有效磷仍有相对较高的含量。腐熟猪粪施用下,磷素在土壤剖面有明显的迁移特征。这是由于腐熟猪粪含有大量的有机质,有机质富含的磷元素远远超过土壤对磷的最大吸附量,使得磷元素顺着土壤孔隙进一步向下层迁移^[29];同时腐熟猪粪中含有大量土壤微生物,土壤微生物可以将不溶性磷转化为可溶性磷,增大磷素向土壤深层的迁移能力^[30]。本研究发现,NPK+PM处理下土壤剖面中Fe-P、Al-P,尤其Fe-P变化特征与有效磷的变化较为一致,这也与上文中外源性磷更易于形成Fe-P的结果一致。综上,NPK、NPK+PS和NPK+FR处理活化了土壤中的磷素,但影响主要集中于耕层。NPK+PM处理对土壤剖面磷积累有较大影响。

参考文献 References

- [1] 熊翱宇,程谅.长期施肥对南方红壤碳库管理指数的影响[J].水土保持研究,2021,28(1):73-79.XIONG A Y,CHENG L.Effects of long-term fertilization on carbon management index of krasnozems in South China[J].Research of soil and water conservation,2021,28(1):73-79(in Chinese with English abstract).
- [2] 王蕾,王艳玲,李欢,等.长期施肥下红壤旱地磷素有效性影响因子的冗余分析[J].中国土壤与肥料,2021(1):17-25.WANG L,WANG Y L,LI H,et al.Redundancy analysis of influencing factors of phosphorus availability in red soil upland under long-term fertilization[J].Soil and fertilizer sciences in China,2021(1):17-25(in Chinese with English abstract).
- [3] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998:901-918.National Soil Survey Office.Chinese soil[M].Beijing:China Agricultural Press,1998:901-918(in Chinese).
- [4] 周龙,苏丽珍,王思睿,等.间作对红壤磷素吸附解吸平衡效应的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(11):1867-1878.ZHOU L,SU L Z,WANG S R,et al.Effect of intercropping on balancing effect of absorption and desorption characteristics of phosphorus in red soil[J].Chinese journal of eco-agriculture,2021,29(11):1867-1878(in Chinese with English abstract).
- [5] 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.HUANG J,ZHANG Y Z,XU M G,et al.Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term fertilization[J].Scientia agricultura sinica,2016,49(6):1132-1141(in Chinese with English abstract).
- [6] 夏文建,冀建华,刘佳,等.长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1876-1886.XIA W J,JI J H,LIU J,et al.Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil[J].Chinese journal of eco-agriculture,2018,26(12):1876-1886(in Chinese with English abstract).
- [7] ARIF M,ILYAS M,RIAZ M,et al.Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers,maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil[J].Field crops research,2017,214:25-37.
- [8] 李冬初,王伯仁,黄晶,等.长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J].中国农业科学,2019,52(21):3830-3841.LI D C,WANG B R,HUANG J,et al.Change of phosphorus in red soil and its effect to grain yield under long-term different fertilizations[J].Scientia agricultura sinica,2019,52(21):3830-3841(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈利军,蒋瑀弄,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[J].土壤,2020,52(3):451-457.CHEN L J,JIANG Y J,WANG H T,et al.Effects of long-term application of organic materials on phosphorus fractions and availability in red soil[J].Soils,2020,52(3):451-457(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈波浪,戴婷婷,盛建东,等.施磷对新疆棉田土壤磷素有效性的影响[J].中国土壤与肥料,2013(4):21-25.CHEN B L,DAI T T,SHENG J D,et al.Effect of applying different rates of phosphoric fertilizer on soil phosphorus efficiency in southern Xinjiang[J].Soil and fertilizer sciences in China,2013(4):21-25(in Chinese with English abstract).
- [11] 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,2000:146-195.LU R K.Analytical methods for soil and agrochemistry[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2000:146-195(in Chinese).
- [12] CHANG S C,JACKSON M L.Solubility product of iron phosphate[J].Soil science society of America journal,1957,21(3):265-269.
- [13] 刘娜,马旭东,慕君,等.不同类型有机物料的有机磷组成及生物有效性[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):440-449.LIU

- N, MA X D, MU J, et al. The composition of organic phosphorus and bioavailability of different organic materials [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2021, 27(3): 440-449 (in Chinese with English abstract).
- [14] GUO S L, DANG T H, HAO M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 248-256.
- [15] 郭大勇, 袁玉玉, 曾祥, 等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 243-249. GUO D Y, YUAN Y Y, ZENG X, et al. Effect of phosphorus fertilizer on maize growth and inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil [J]. Journal of soil and water conservation, 2021, 35(4): 243-249 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响 [J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 254-259. WANG B R, XU M G, WEN S L. The effect of long term fertilizer application on phosphorus in red upland soil [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2007, 23(3): 254-259 (in Chinese with English abstract).
- [17] 赵海涛, 封克, 汪晓丽, 等. 磷在不同土壤和无机磷组分间的转化研究 [J]. 扬州大学学报, 2006, 27(3): 50-55. ZHAO H T, FENG K, WANG X L, et al. Effects of phosphorus fertilizer on different inorganic phosphorus fractions in soils [J]. Journal of Yanzhou University, 2006, 27(3): 50-55 (in Chinese with English abstract).
- [18] 余海英, 李廷轩, 张树金, 等. 温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 956-962. YU H Y, LI T X, ZHANG S J, et al. The accumulation and migration of inorganic phosphorus fractions in soils under greenhouse cultivation [J]. Scientia agricultura sinica, 2011, 44(5): 956-962 (in Chinese with English abstract).
- [19] GONG H Q, MENG F L, WANG G H, et al. Toward the sustainable use of mineral phosphorus fertilizers for crop production in China: from primary resource demand to final agricultural use [J/OL]. Science of the total environment, 2022, 804: 150183 [2022-01-02]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150183>.
- [20] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil science, 1978, 125(2): 95-101.
- [21] 房福力, 姚志鹏, 林伟, 等. 柠檬酸对温室土壤磷有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1166-1173. FANG F L, YAO Z P, LIN W, et al. Effects of citric acid on phosphorus availability for soil in greenhouse field [J]. Journal of agro-environment science, 2015, 34(6): 1166-1173 (in Chinese with English abstract).
- [22] 别婧雅, 杜伟, 孙本华, 等. 吉林省春玉米种植区土壤磷库特征及磷素淋失风险评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 123-130, 140. BIE J Y, DU W, SUN B H, et al. Characteristics of soil phosphorus pool and risk assessment of phosphorus leaching in spring maize planting area of Jilin [J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition), 2020, 48(7): 123-130, 140 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘国群, 章明奎, 严建立. 施用高量有机物料对新垦耕地红壤有机碳积累及性态的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(1): 101-107. LIU G Q, ZHANG M K, YAN J L. Effects of applying high amount of organic materials on the accumulation and properties of organic carbon in newly cultivated red soil [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(1): 101-107 (in Chinese with English abstract).
- [24] 慕君, 马旭东, 张丹丹, 等. 有机肥与化肥配施下土壤氮组分变化与氮素利用率研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 107-113. MU J, MA X D, ZHANG D D, et al. Study on nitrogen composition variation and nitrogen use efficiency under combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer [J]. Agricultural research in the arid areas, 2021, 39(5): 107-113 (in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
- [26] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况 [J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 763-768. LI J, SHI Y L, CHEN Z W. Research on phosphorus in southern red soils of in China [J]. Chinese journal of soil science, 2011, 42(3): 763-768 (in Chinese with English abstract).
- [27] 史静, 张誉方, 张乃明, 等. 长期施磷对山原红壤磷库组成及有效性的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 351-359. SHI J, ZHANG Y F, ZHANG N M, et al. Effects of long-term fertilization on forms and availability of phosphorus in mountain red soil [J]. Acta pedologica sinica, 2014, 51(2): 351-359 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈凤, 王晓双, 甘国渝, 等. 长期施用磷肥对稻-油轮作土壤磷组分及微生物多样性的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 168-178. CHEN F, WANG X S, GAN G Y, et al. Effects of long-term application of phosphorus fertilizer on soil phosphorus fractions and microbial diversity in rice-rapeseed rotation [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 168-178 (in Chinese with English abstract).
- [29] 金熠. 增施猪粪及猪粪生物炭对稻田土壤磷素迁移转化的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 25-26. JIN Y. Impact of swine manure and swine-manure-derived biochar on migration and transformation of phosphorus in rice paddy fields [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 25-26 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李蕴慧. 增施有机物料黑土磷素形态转化规律研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2017: 37-39. LI Y H. The changes of phosphorus fractions in black soil applied organic materials [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017: 37-39 (in Chinese with English abstract).

Morphological changes and accumulation characteristics of phosphorus in dry land of red soil profile under long-term fertilization

HU Yunfeng¹, WANG Qingyun¹, TU Renfeng¹, LI Xia¹, LIU Mingxue¹,
LI Qingyang¹, FAN Jianbo², ZHAO Huaiyan¹

1. *Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Research Centre of Phosphorous Highly Efficient Utilization and Water Environment Protection along the Yangtze River Economic Zone, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;*

2. *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*

Abstract Based on long-term (1989—) location experiment, the effects of different fertilization measures on morphological changes and accumulation characteristics of phosphorus in dry land of red soil profile were studied. Five treatments including nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer plus peanut straw (NPK+PS), nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer plus green manure (NPK+FR) and nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer plus pig manure (NPK+PM), and only nitrogen and potassium fertilizer (CK) were set up in the field experiment. The results showed that long-term application of phosphorus fertilizer significantly increased the contents of total phosphorus and available phosphorus in red soil and increased the soil phosphorus activation coefficient (PAC). The results of the correlation analyses showed that medium active organic phosphorus (MAOP), aluminum phosphate (Al-P) and iron phosphate (Fe-P) in inorganic phosphorus were significantly correlated with available phosphorus ($P < 0.05$). In the control treatment, the soil inorganic phosphorus was mainly in closed storage (O-P) (64.54%). But under different fertilization treatments, exogenous phosphorus was easier to accumulate in aluminum phosphorus (Al-P) and iron phosphorus (Fe-P), especially in NPK+PM treatment (Al-P, CK: 6.27%, NPK+PM: 27.58%; Fe-P, CK: 17.28%, NPK+PM: 37.35%). The effects of NPK+PS and NPK+FR treatments on phosphorus in soil were mainly concentrated in the plough layer, but NPK+PM treatment still had a great impact on the phosphorus content in the soil layer below 20 cm. There was still a small amount of available phosphorus accumulation in the bottom layer (60-100 cm). Phosphorus fertilizer and its combined application with organic fertilizer significantly promoted the accumulation and activation of soil phosphorus, especially the decomposed manure with pig manure as raw material.

Keywords dry land of red soil; long term fertilization; profile; morphology of phosphorus; phosphorus accumulation; soil fertility; coefficient of soil phosphorus activation

(责任编辑:陆文昌)