

农业废弃物对黑土有机磷形态长期动态影响

李蕴慧, 吴景贵, 赵欣宇, 王 维, 陈 旭

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 针对农业废弃物在土壤中腐解时间较长, 探究增施不同种类农业废弃物对黑土土壤各形态有机磷影响的长期动态变化规律, 开展 5 a 盆栽试验并根据 Bowman-Cole 法测定有机磷形态。试验设置 5 个处理, 分别为: 增施猪粪、秸秆、树叶、菌渣和单施化肥。结果表明: 与单施化肥相比, 增施猪粪可大幅提高土壤活性有机磷(L-OP)含量, 5 a 时仍显著高于单施化肥; 增施秸秆和树叶分别于 3 a 和 2 a 后出现最高值。增施猪粪、秸秆和菌渣后土壤中中等活性有机磷(ML-OP)含量显著增加; 猪粪处理 ML-OP 含量逐年降低, 其余处理逐年上升。增施农业废弃物均可显著增加土壤中稳态有机磷(MR-OP)含量, 总体呈逐年降低趋势; 增施秸秆 5 a 内 MR-OP 含量始终最高。增施农业废弃物对土壤高稳态有机磷(HR-OP)含量的降低作用一般在 2~3 a 后开始显现, 5 a 后 HR-OP 含量均低于单施化肥。增施猪粪可大幅提高活性较强的有机磷形态且影响时间最长; 增施秸秆和菌渣变化趋势相似, 增施秸秆更趋向于增加 L-OP 和 MR-OP 含量, 增施菌渣更趋向于增加 HR-OP 含量; 增施树叶降低 HR-OP 含量能力最强, 但对其余有机磷形态影响较小。施用农业废弃物均可不同程度活化稳态有机磷, 单施化肥处理促使中稳态有机磷向高稳态有机磷转化。

关键词: 农业废弃物; 黑土; 有机磷; 有机磷形态

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0260-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.043

Dynamic Changes of Organic Phosphorus Forms Applied Different Agricultural Waste Materials in Black Soil

LI Yunhui, WU Jinggui, ZHAO Xinyu, WANG Wei, CHEN Xu

(College of Resources and Environment Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: Decomposition of agriculture waste materials in the soil need a long time. In this paper, a five years pot experiment combined Bowman-Cole sequential extraction to determine organic phosphorous fractionations with application four kinds of agricultural waste materials to explore the long-term dynamic change law of the forms of organic phosphorus in black soil. The treatments included pig manure (PM), maize straw (MS), leaf manure (LM), mushroom dreg (MD) and chemical fertilizer only (NPK). The results showed that compared with applying chemical fertilizer only, concentration of labile organic P (L-OP) of PM treatment was significantly higher and continually reduced in 5 years, concentration of MS and LM treatments achieved the highest levels after 3 years, 2 years respectively. Application of pig manure, maize straw and mushroom dreg increased concentration of soil moderately labile organic P (ML-OP). The concentration of ML-OP continue decreased in 5 years after application of pig manure, while other treatments increased. The concentration of soil moderately resistant organic P (MR-OP) significantly increased but decreased year by year after applying agricultural waste materials, including straw treatment which was always higher than the rest. Soil highly resistant organic P (HR-OP) began to decrease from 2 years or 3 years after application of agricultural waste materials. Applied pig manure significantly improved the active organic phosphorus forms for long time, leaves could decrease the content of HR-OP and fewer influence on the rest of the forms, maize straw and mushroom dreg had the similar trends, maize straw tended to increase the L-OP and MR-OP but mushroom dreg tended to increase the HR-OP content. Application agricultural waste materials could activate steady-state organic phosphorus in different extents. But apply chemical fertilizer only promoted MR-OP transform into HR-OP.

Keywords: agricultural waste material; black soil; organic phosphorus; organic phosphorus form

现代常规农业大量施用化肥会对环境带来诸多负面影响,有机农田管理包含用禽畜粪便及其他农业废弃物代替化肥来为作物提供养分。与单施化肥相比,化肥与有机肥配施可显著增加土壤微生物数量^[1]、改善生物学特性、改善土壤质量、保持和提高农田生产力^[2]。有机磷是土壤磷库的重要组成部分,增施农业废弃物可活化活性较低形态的有机磷,其包含的更复杂的有机化合物随有机物腐解缓慢分解释放养分,对土壤活性较大磷形态的影响可达 2 年以上^[3]。但是,不同种类农业废弃物对土壤中磷形态的转化规律还没有被完全了解,这极大制约了有机肥的精准施肥。增施不同种类、不同处理的农业废弃物对土壤各形态磷影响不同,其在土壤中转化规律也不尽相同,同时作物或轮作作物对土壤磷素的吸收—还田过程使各形态磷间的转化过程更加复杂^[4-5]。故此为满足不同作物需磷量,并降低磷素流失风险,排除干扰因素,单纯对有机肥中磷素周转及迁移规律的研究是必不可少的。

关于有机磷的研究多为短期培养试验或长期连续施用同种农业废弃物,多种植物轮作下磷的变化,以解释土壤磷素短期内运移或长期施肥对土壤磷素及作物的影响,但因受到连续多年农业废弃物转化、不同作物根际、作物输出与根部还田等因素的综合影响,同时受轮作植物、有机肥处理方式、耕作方式、提取方法等不同因素影响,使其研究结果差别很大^[6-10]。因此,对于有机废弃物腐解过程中在土壤中长期的变化规律不能完全阐明。本文通过连续 5 a 盆栽试验,旨在探究单次施入不同种类农业废弃物后对土壤磷组分的长期影响及差异,为旱地的合理施用有机肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与材料

试验于 2010 年 5 月布置在吉林农业大学培养场网室。供试土壤为黑土,采自吉林农业大学试验田基地。土壤基本化学性质为:pH 6.7,有机质含量 20.20 g/kg,碱解氮含量 85.57 mg/kg,全氮含量 1.09 g/kg,速效钾含量 91.8 mg/kg,有效磷含量 35.45 mg/kg,全磷含量 0.67 g/kg。供试农业废弃物为猪粪、秸秆、菌渣和树叶。猪粪、秸秆和菌渣均采自吉林农业大学培养基地,树叶选用杨树叶,各废弃物基本理化性质见表 1。

表 1 供试农业废弃物基本化学性质

供试物料	pH	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)
猪粪	7.63	368.91	21.18	25.97	8.22
树叶	6.14	371.06	9.91	1.02	4.05
秸秆	6.42	493.42	8.33	1.12	12.34
菌渣	6.07	362.44	5.31	1.08	9.98

1.2 试验设计

试验为盆栽试验,共 5 个处理:猪粪(PM)、秸秆(MS)、树叶(LM)、菌渣(MD)、化肥(NPK),每个处理 3 次重复。农业废弃物风干后磨细过 1 mm 筛并测定含水量。将风干土 14 kg(换算成烘干土 11.47 kg)和农业废弃物(占烘干土重的 1.5%,只在第 1 年施用)混匀装入试验盆中。各盆均施入化肥(只在第 1 年施用),包括尿素(含 N 46%)10 g/盆,磷酸二铵(含 P₂O₅ 46%,N 18%)5 g/盆,氯化钾(K₂O 60%)7 g/盆。

试验盆为高 40 cm、直径 30 cm 的专用试验盆钵体,盆底无出水孔,盆体置于小区试验土池中,进入土层深度为 10 cm 左右。定期测定含水量后计算浇水量,使土壤含水量保持在约 60%,管理时间为 2010—2015 年,每年 5 月 1 日至 10 月 30 日,冬季将盆栽用塑料薄膜覆盖,防止水分流失、积雪融化后对土壤水分的影响。采样时间为试验开始后每年 5 月,连续采样 5 a,样品风干后瓶装密封,避光保存。

1.3 测定方法

土壤总磷测定采用 H₂SO₄—HClO₃ 消化法钼蓝比色法。土壤有机磷总量为 4 种形态有机磷含量之和。土壤有机磷分级测定采用 Bowman—Cole 法有机磷形态分级测定方法^[11]:依次用 NaHCO₃ 溶液(0.5 mol/L)、H₂SO₄ 溶液(1.0 mol/L)、NaOH 溶液(0.5 mol/L)浸提,浸提液经过滤后用钼锑抗法测定滤液中无机磷含量,并移取 10 ml 浸提液用 H₂SO₄—HClO₃ 消化并用钼蓝比色法测定提取液中总磷含量,得到活性有机磷(L-OP)、中等活性有机磷(ML-OP)、中稳性有机磷(MR-OP)和高稳性有机磷(HR-OP)4 种形态有机磷含量。

1.4 数据分析

数据分析采用 Excel 2013 软件整理,采用 SPSS 22.0 进行相关性分析,采用 DPS 软件变异系数分析以及 Duncan 新复极差法 5% 水平差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤活性有机磷含量动态变化

由图 1 可知,增施猪粪 L-OP 逐年下降,增施秸秆、树叶分别于第 3 年和第 2 年达到最高值,增施菌渣和单施化肥土壤 L-OP 无显著变化。各处理 L-OP 平均含量猪粪>秸秆>树叶=菌渣=NPK。猪粪处理 L-OP 形态含量从 47.37 mg/kg 逐年降至 37.46 mg/kg,较 NPK 增量从 92.67%逐年降至 9.96%,差异性均显著。秸秆处理 L-OP 含量先升高后降低,于第 3 年出现最大值 34.19 mg/kg,较 NPK 处理增加了 26.01%。树叶处理有机磷含量随施肥时间先升高后降低,在第 2 年达最高值为 32.74 mg/kg,高于

同年 NPK 处理 21.41%，差异显著，其余各年与 NPK 处理无显著差异。施入菌渣后土壤 L-OP 含量随时间变化不大，且与 NPK 处理无显著差异。说明猪粪可长期提供 L-OP，其余农业废弃物于第 1 年结束时虽不能明显提高土壤 L-OP 含量，但树叶、秸秆可能有潜在的供磷能力。

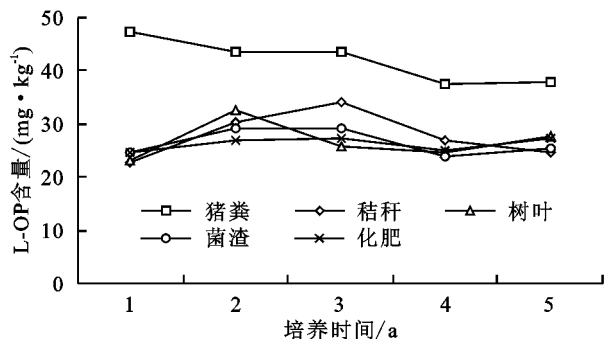


图 1 不同农业废弃物对黑土 L-OP 含量的影响

2.2 土壤中等活性有机磷含量动态变化

增施猪粪土壤 ML-OP 含量呈逐年降低趋势，其余处理总体逐年升高(图 2)。各处理 ML-OP 平均含量猪粪>秸秆>菌渣>树叶=NPK。猪粪处理 ML-OP 含量从 160.48 mg/kg 逐年降至 123.68 mg/kg，增量从 76.90%逐年降至 20.54%，差异均显著。秸秆处理 ML-OP 含量从 79.34 mg/kg 逐年上升至 117.86 mg/kg，与 NPK 相比，增施秸秆后第 1 年降低了 ML-OP 的含量，其增量为-12.54%；第 3 年时其增量最大，增量为 16.27%，差异均显著。树叶处理 ML-OP 含量总体呈上升趋势，从 89.44 mg/kg 升至 110.12 mg/kg，与同年 NPK 相比，各年含量均无显著性差异。与 NPK 相比，菌渣处理 ML-OP 含量除第 1 年存在显著差异，增量为 16.30%外，其余各年份均无显著差异。

可见施入猪粪可显著增加土壤 ML-OP 含量，且其含量逐年降低，施入其它农业废弃物不能显著改变土壤 ML-OP，在不种植作物的条件下，土壤 ML-OP 会逐年累积升高，施入秸秆可缓慢加速这一过程。

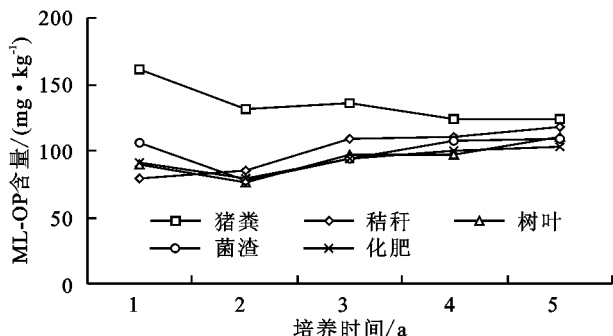


图 2 不同农业废弃物对黑土 ML-OP 含量的影响

2.3 土壤中稳性有机磷含量的动态变化

由图 3 可知，增施不同农业废弃物土壤 MR-OP 含量总体呈逐年降低趋势。各处理 MR-OP 平均含量秸秆

>猪粪>树叶=菌渣>NPK。单施化肥有机磷由第 1 年 77.23 mg/kg 降低至第 2 年 65.55 mg/kg 后保持稳定。猪粪处理 MR-OP 由 93.39 mg/kg 逐年下降至 80.18 mg/kg，处理年份间差异显著。施入猪粪前 3 a 有机磷含量增量平均达到 26.4%，显著高于 NPK 处理。第 4 年起有机磷含量与树叶、菌渣处理无显著差异。秸秆处理各年土壤 MR-OP 含量均最高，差异显著。其含量由 106.27 mg/kg 逐渐下降至 89.99 mg/kg，相较同年 NPK 处理，第 2 年含量增量最大为 51.77%，其余年份增量均在 34%以上。树叶处理有机磷含量平均值为 78.68 mg/kg。菌渣处理有机磷含量变化趋势与树叶处理相似，平均值为 78.57 mg/kg。树叶和菌渣处理含量变化均较平稳，但均显著高于 NPK 处理。增施农业废弃物土壤 MR-OP 含量始终高于单施化肥，其中以增施秸秆效果最显著。施入农业废弃物土壤 MR-OP 含量前 3 a 持续降低，且下降速率几乎相同，单施化肥土壤 MR-OP 含量随施肥时间变化不大。

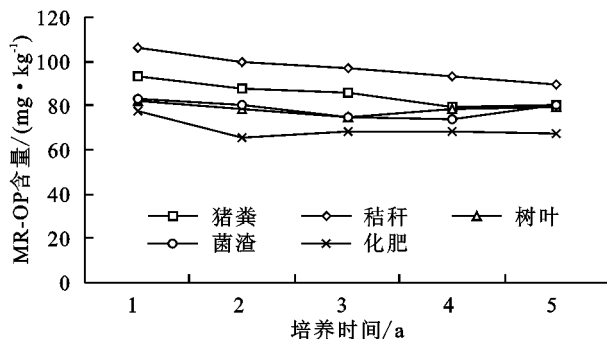


图 3 不同农业废弃物对黑土 MR-OP 含量的影响

2.4 土壤高稳性有机磷含量动态变化

图 4 为土壤 HR-OP 变化动态，可见其含量受施肥影响较大，施用不同农业废弃物 HR-OP 含量变化趋势各异。各处理有机磷 5 a 平均含量猪粪>菌渣>NPK>秸秆>树叶。单施化肥有机磷含量于第 2 年从 17.48 mg/kg 升高至 33.39 mg/kg 后保持稳定。增施猪粪前 4 a 有机磷含量变化较小，与 38.9~44.3 mg/kg 间浮动，仅在第 5 年显著下降。秸秆与菌渣处理 HR-OP 含量均先增高后降低，并于第 3 年出现最大值，分别为 47.53 mg/kg 和 28.93 mg/kg。增施树叶可显著降低 HR-OP 含量，其有机磷含量先升高后降低，第 2 年小幅上升至 29.23 mg/kg 后第 3 年显著降低至 13.35 mg/kg，并维持在 8 mg/kg 左右。

除秸秆处理外，增施农业废弃物第 1 年均显著提高 HR-OP 含量，但第 5 年时其含量均低于 NPK 处理。施入农业废弃物可能不同程度活化 HR-OP，以树叶效果最为明显，其次为秸秆。菌渣为秸秆培育食用菌后废弃物，两者变化趋势一致，但增施菌渣 HR-OP 含量始终 2 倍于秸秆。

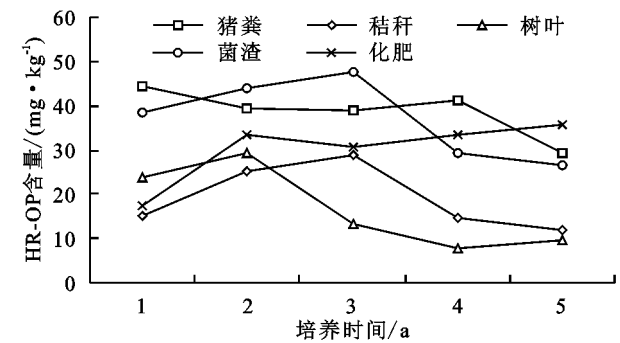


图 4 不同农业废弃物对黑土 HR-OP 含量的影响

2.5 土壤有机磷总量动态变化

表 2 为不同处理总磷(P_t)含量和有机磷总量(P_o)相

表 2 不同农业废弃物对黑土总磷含量及有机磷百分含量的影响

处理	指标	培养时间/a					平均值
		1	2	3	4	5	
猪粪 PM	总磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1131.72a	1129.75a	1082.87b	1084.02b	1086.54b	1102.98
	有机磷/总磷/%	30.53	26.80	28.07	26.04	24.97	25.01
秸秆 MS	总磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	777.85a	787.58a	779.10a	775.26a	788.95a	781.75
	有机磷/总磷/%	28.68	30.43	34.46	31.64	31.01	33.84
树叶 LM	总磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	781.24ab	790.21a	774.08abc	756.99c	761.83bc	752.40
	有机磷/总磷/%	27.97	27.37	26.73	27.52	29.75	27.87
菌渣 DM	总磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	792.68a	797.33a	794.34a	793.41a	795.36a	794.62
	有机磷/总磷/%	31.75	29.07	30.82	29.55	30.39	30.32
化肥 NPK	总磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	718.01b	747.15a	757.39a	745.69	754.19a	744.49
	有机磷/总磷/%	29.25	27.39	29.04	30.52	30.84	31.86

注:同一行中不同小写字母表示各处理间差异显著($p<0.05$)。

2.6 施用不同农业废弃物土壤有机磷形态间转化

为分析施入不同农业废弃物后对土壤各有机磷形态间的转化产生的影响,本文进一步对各处理不同有机磷形态含量进行相关性分析(表 3)。根据土壤有机磷各形态含量相关性分析结果和各形态有机磷含量增减综合分析,树叶处理 HR-OP 可能向 ML-OP 转化;菌渣处理 HR-OP 和 L-OP 均可能向 ML-OP 转化;秸秆处理 MR-OP 可能向 ML-OP 转化,NPK 处理 MR-OP 可能向 HR-OP 转化。由此可看出,施用农业废弃物均可不同程度的活化稳定态有机磷。

3 讨论

土壤活性有机磷和中等活性有机磷属于较易矿化被植物吸收利用的磷形态,与有效磷有较好的相关性^[12],中稳性和高稳性有机磷则较难矿化。但施入有机肥可促使有机磷矿化,并可促使稳定性有机磷向活性有机磷转化^[13]。农业废弃物腐解速率受土壤湿度、温度、物料粒径等因素影响,张红等^[14]研究发现,秸秆第 1 年腐解率约为 50%,且昼夜温差大的地区腐解率更低。Audette 等^[3]根据动力学方程得出鸡粪堆肥的半衰期约为 380 d。由此推测,当腐解时间、本身理化性质和供磷能力均不同的外源有机磷参与土壤磷素循环时,会对土壤磷形态间相互转化产生长期不同影响。

施入猪粪可增加土壤有机磷总量与徐春阳等^[15]研究

对百分含量(P_o/P_t)。总磷平均含量猪粪>秸秆>菌渣>化肥>树叶,且随施肥时间变化较小,说明试验受磷输出或淋失影响较小。猪粪、秸秆、树叶、菌渣和 NPK 处理 P_o/P_t 值分别为 25.0%,33.8%,27.9%,30.3%,31.9%。猪粪有机磷总量与总磷含量均最高,但 P_o/P_t 猪粪所占比例最低,且逐年降低,说明猪粪中的磷主要以无机磷形式存在,同时施入猪粪后可能长期促使土壤有机磷相无机磷形态转化。秸秆处理总磷含量较低但有机磷含量较多,施入秸秆后前 3 年无机磷可能向有机磷转化,其有机磷总量与 P_o/P_t 值在第 3 年最高。树叶、菌渣和 NPK 处理对有机磷总量影响不大,5 a 内含量无显著差异。

结论相同,但与其无机磷向有机磷发生转化的推论相反。由此推测,有机磷总量的提高可能是由于连续向土壤中施用有机肥累加的结果。施入猪粪可使土壤有机磷持续向无机磷转化,施入秸秆后前 3 年可促使土壤无机磷向有机磷转化。这可能是施入两种农业废弃物后对 C/P 和 N/P 影响不同,影响了微生物的矿化和生物固定。

表 3 施入农业废弃物土壤有机磷各形态相对含量相关性分析

处理	指标	L-OP	ML-OP	MR-OP	HR-OP
猪粪	L-OP	1			
	ML-OP	0.69**	1		
	MR-OP	0.42	0.70**	1	
	HR-OP	0.53*	0.50*	0.16	1
秸秆	L-OP	1			
	ML-OP	0.2	1		
	MR-OP	-0.15	-0.79**	1	
	HR-OP	0.80**	-0.16	0.09	1
树叶	L-OP	1			
	ML-OP	-0.16	1		
	MR-OP	-0.26	0.21	1	
	HR-OP	0.31	-0.80**	-0.28	1
菌渣	L-OP	1			
	ML-OP	-0.65**	1		
	MR-OP	-0.01	-0.02	1	
	HR-OP	0.55*	-0.69**	-0.11	1
化肥	L-OP	1			
	ML-OP	0.04	1		
	MR-OP	-0.13	0.16	1	
	HR-OP	0.18	-0.42	-0.90**	1

注:*表示不同处理间差异显著($p<0.05$);**表示不同处理间差异极显著($p<0.01$)。

猪粪中磷含量较高,增施猪粪后可显著提高土壤 L-OP 和 ML-OP 含量,对 MR-OP 和 HR-OP 有机磷影响较小,但同样增加了两者含量。说明猪粪不但含 P 量高,可提供大量易于植物吸收利用的活性、中等活性有机磷,且肥效要比其余木本、草本类农业废弃物肥效长。与猪粪相比,增施秸秆可显著提高 MR-OP 和 HR-OP 含量,但第 1 年影响较小,其效果在施肥第 2 年才开始表现出来的,这可能与秸秆腐解需较长时间和有机磷形态间的相互转化有关。施入菌渣后各形态有机磷含量变化趋势大致与秸秆处理相同,但其提供易于作物吸收利用的形态磷能力不足,增加土壤 L-OP 和 MR-OP 的能力弱于秸秆,其增强土壤 HR-OP 的能力 2 倍于秸秆,这可能是菌渣经培育食用菌后大部分 L-OP 被作物吸收利用且部分磷转化为稳定态有机磷。可见相同农业废弃物经不同处理后农业废弃物自身磷素形态发生改变很大,对土壤磷形态也产生不同影响。菌渣作为有机肥,其残效可能较大。施入树叶后对土壤各项有机磷含量影响均较小,但可降低土

壤有机磷含量,促进土壤有机磷向无机磷转化。

施用农业废弃物均可不同程度的活化稳定态有机磷。这可能由于施入农业废弃物后提高土壤酶活性,提高细菌、微生物数量,使稳定态有机磷发生活化^[16]。在所有处理 MR-OP、HR-OP 和 L-OP 间均呈较高的正相关关系,验证了有机肥中的磷可直接转化为 L-OP 和 HR-OP^[17]。猪粪处理中几种有机磷形态相关性均呈正相关,各形态有机磷含量和有机磷总量均逐年减少。这可能由于施入猪粪可提高土壤微生物数量^[18],微生物对有机磷的活化及矿化作用占主导。

L-OP 和 ML-OP 属于活性高易被转化为植物吸收形态的磷,种植作物时该种活性较高的磷形态变异性较大^[19]。对各形态有机磷含量进行变异系数分析(表 4)发现,L-OP 和 ML-OP 的变异系数均较小,说明形态间的转化并不是影响活性较强有机磷形态含量的主要因素。HR-OP 变异系数均较大,根据有机磷形态间的相关性分析,高稳性有机磷向其它形态间的转化可能是影响高稳性有机磷的主要因素。

表 4 施入农业废弃物土壤有机磷各形态含量变异分析

处理	指标	L-OP	ML-OP	MR-OP	HR-OP
猪粪 PM	有机磷含量/(mg·kg ⁻¹)	42.00±4.79	135.22±14.71	85.25±5.85	38.69±5.74
	变异系数	0.11	0.11	0.07	0.15
秸秆 MS	有机磷含量/(mg·kg ⁻¹)	27.76±4.73	100.26±16.28	97.03±6.25	19.19±7.10
	变异系数	0.17	0.16	0.06	0.37
树叶 LM	有机磷含量/(mg·kg ⁻¹)	26.72±4.14	93.81±12.56	78.68±3.23	16.79±8.83
	变异系数	0.15	0.13	0.04	0.53
菌渣 MD	有机磷含量/(mg·kg ⁻¹)	26.39±3.71	98.82±12.92	78.57±4.01	37.14±8.62
	变异系数	0.12	0.13	0.05	0.23
化肥 NPK	有机磷含量/(mg·kg ⁻¹)	26.20±1.59	93.26±10.16	69.30±4.96	30.20±7.23
	变异系数	0.06	0.11	0.07	0.24

注:表中有机磷含量数值为平均值±标准差。

4 结论

(1)施入不同农业废弃物后土壤有机磷总磷平均含量猪粪>秸秆>菌渣>树叶>NPK。增施猪粪有机磷总量逐年降低;增施秸秆有机磷总量于第 3 年最高;树叶、菌渣对有机磷总量影响不大。

(2)猪粪、秸秆和树叶均可显著增加土壤 L-OP 含量,最高值分别出现在第 1 年、第 3 年和第 2 年,猪粪处理至第 5 年时仍显著高于其余处理。除猪粪外,其余所有处理(包括 NPK 处理)ML-OP 含量逐年上升,增施猪粪、秸秆和菌渣可显著增加其含量,最高值分别出现在第 1 年、第 3 年和第 1 年。

(3)增施农业废弃物均可显著增加 MR-OP 含量,具体表现为秸秆>猪粪>树叶=菌渣,整体呈逐年降低趋势。增施农业废弃物第 1 年后均增加了 HR-OP,但第 5 年时各处理含量均低于单施化肥处理,单施化肥促使 HR-OP 积累。

(4)施用农业废弃物均可不同程度的活化稳定态有机磷,单施化肥促使 MR-OP 向 HR-OP 转化。施

入猪粪可长期促使有机磷向无机磷转化,施入秸秆前 3 年促使有机磷向无机磷转化。菌渣为秸秆相关废弃物,两者各形态有机磷变化趋势相近,但各形态含量差异很大。HR-OP 向其他形态间的转化可能是影响 HR-OP 含量的主要因素。

参考文献:

[1] 李秀英,赵秉强,李絮花,等.不同施肥制度对土壤微生物的影响及其土壤肥力的关系[J].中国农业科学,2005,38(8):1591-1599.

[2] 苑亚茹.不同土地利用与施肥管理对黑土团聚体中有机碳的影响[D].北京:中国科学院大学,2013:82-93.

[3] Audette Y,O'Halloran I P,Voroney R P. Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil[J]. Geoderma,2016,62(1):119-124.

[4] Vanden-Nest T,Ruysschaert G,Vandecasteele B,et al. P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status [J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2015,202(4):56-67.