

不同有机肥对矿区复垦土壤磷素矿化特征研究

吕鉴于^{1,2}, 高文俊³, 郝鲜俊^{1,2*}, 张若扬^{1,2}, 张博凯^{1,2}, 薛玉晨^{1,2}

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2.山西农业大学 农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801; 3.山西农业大学 动物科技学院, 山西 太谷 030801)

摘 要:【目的】探究不同有机肥对采煤塌陷复垦土壤磷素的矿化特征。【方法】采用室内培养试验, 以不施肥处理为空白处理(CK), 研究了施用 3 种有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)对矿区复垦土壤速效磷的动态变化, 并综合其矿化过程中的磷酸酶活性及磷转化强度, 分析了不同有机肥对矿区复垦土壤磷生物有效性的影响。【结果】①在整个室内恒温培养过程中, 各施肥处理的速效磷量均随培养时间延长呈下降趋势, 不同培养时期速效磷量大致呈现出: 鸡粪>猪粪>牛粪>化肥>CK。培养结束时(105 d), 鸡粪、猪粪和牛粪处理较化肥处理显著提高了土壤速效磷量(18.56%~37.09%); 鸡粪处理较猪粪和牛粪处理速效磷量显著提高了 11.93%~15.62%, 而猪粪和牛粪处理间差异不显著; ②在整个室内恒温培养过程中, 拟二阶动力学模型能较好地反映各施肥处理速效磷释放过程, 其次为 Elovich 模型和幂函数模型, 而粒内扩散模型拟合效果较差。③在整个培养时期施有机肥处理的磷酸酶活性显著高于化肥处理, 提高幅度为 39.14%~120.70%。④培养前期(0~14 d), 猪粪处理与化肥处理对土壤有机磷转化强度影响较大, 二者间差异不显著, 且猪粪处理较牛粪、鸡粪处理能显著提高有机磷转化强度, 分别提高了 41.51%和 86.52%; 在培养中后期(42~105 d)各施肥处理的有机磷转化强度差异均不显著。【结论】施用有机肥能促进矿区复垦土壤磷素矿化, 其中鸡粪较猪粪和牛粪对提高土壤有效磷量作用更为明显。

关 键 词: 有机肥; 磷素矿化; 矿区复垦; 土壤; 化肥

中图分类号: S141.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019461

吕鉴于, 高文俊, 郝鲜俊, 等. 不同有机肥对矿区复垦土壤磷素矿化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 59-67.
LYU Jianyu, GAO Wenjun, HAO Xianjun, et al. Study of Phosphorus Mineralization Characteristics in a Mine Reclaimed Soil under Different Organic Fertilizers [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 59-67.

0 引 言

山西作为中国的能源大省, 煤炭资源极其丰富, 是我国规模较大的煤田开采区之一。然而, 在煤炭资源大规模地开采过程中极易造成地表破坏, 其中最典型的就是地表塌陷。截至 2010 年, 山西约有 1/2 的地下采空区发生了地面塌陷^[1], 导致耕地面积减少、肥力下降、作物减产等一系列问题。《全国土地利用总体规划(2006—2020 年)》明确提出, “守住 18 亿亩耕地红线, 土地整理复垦开发全面推进”。为此, 对山西省的采煤塌陷区进行复垦就很有必要。然而在土壤复垦过程中, 由于机械碾压和扰动, 使土壤的层次、结构发生变化, 导致土壤中微生物活性下

降、有机质量减少, 进而使得土壤养分缺乏^[2], 其中磷素缺乏是限制矿区复垦进程和作物生长的关键因子之一^[3-4]。

为提高土壤磷素肥力和作物产量, 农户在农业生产中通常是施入大量无机磷肥^[5]。然而, 磷矿作为一种不可再生且无法替代的矿产资源, 正随着全球日益增长的人口对粮食需求量的增加而面临磷矿资源耗竭的危机^[6], 且长期施用无机磷肥会使累积在土壤中的磷素随降水迁移淋溶到地下进而污染地下水^[7], 在磷矿资源损失、磷素利用率低等问题存在的同时, 也严重威胁到人类饮用水质的安全。为保证农业可持续发展, 2017 年农业部印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》提出, “全国畜禽粪污综合利用率达到 75%以上, 华北平原区域遵循粪污全量收集还田利用”。与此同时, 随着我国畜牧业集约化发展, 仅在 2008 年我国畜禽粪便产出量高达 30 亿 t, 其中以猪粪、鸡粪、牛粪和羊粪为主, 占其总量的 90%以上^[8]。将畜禽粪便(有机肥)归还农田, 尤其

收稿日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601327); 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目; 山西农业大学科技创新基金(2016ZZ14)

作者简介: 吕鉴于(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤学与矿区土壤复垦方面研究。E-mail: 814911581@qq.com

通信作者: 郝鲜俊(1976-), 女, 教授, 主要从事土壤学与矿区土壤复垦方面研究。E-mail: haoxianjun660@126.com

在采煤塌陷复垦土壤上,既能提高作物产量,还能有效培肥低产农田。然而,如何合理施用有机肥以提高作物生产和土壤肥力?有机肥与化学磷肥在土壤中如何矿化,它们在土壤中的矿化强度是否相同,这些都是尚不明确的科学问题。

有机肥的磷素有效性不仅受有机肥本身理化性质(如有机肥类型、磷素形态、含水率、pH 值、C/N、C/P 等)的影响,施入土壤后还受到土壤性状(如土壤类型、pH 值、土壤磷本底值、C/P、温度和湿度等)的影响^[9-10]。杨蕊等^[11]通过室内恒温(25 ℃)培养试验发现在典型红壤中猪粪磷的矿化速率显著高于鸡粪,而赵明等^[12]试验表明,室内恒温(30 ℃)培养 120 d 后,壤质潮棕壤中牛粪处理速效磷释放量显著高于猪粪和鸡粪处理,可见,由于土壤类型、有机肥类型及理化性质和培养温度等差异的影响,导致不同有机肥的矿化过程不尽相同。

土壤酶是土壤物质循环和能量流动的重要参与者,其酶活性能反映土壤中多种生物化学过程的相对强度,相比土壤理化性状,其活性大小既反映着土壤营养物质的储量,也体现着土壤中生物化学反应的方向和强度^[13]。Azeez 等^[14]试验发现,C/P 较高的有机肥,在其矿化过程中土壤微生物及土壤酶活性会更强。目前,关于不同有机肥的磷素矿化研究多集中在南方红壤、东北黑土等稻田区,而对黄土丘陵区采煤塌陷复垦土壤研究较少,仅有的研究多数是在室内恒温培养条件或大田培肥种植模式下,采用不同有机肥以等质量或等比例(有机肥质量/土壤质量)的传统农户施肥投入量来进行分析^[15-16],并没有考虑有机肥所含的全磷量,即不明确在统一施磷水平下不同有机肥的

磷素矿化强度及其磷素有效性是否相同。为此,本试验在统一磷水平下,研究鸡粪、牛粪、猪粪和化肥对复垦土壤磷素矿化及土壤相关酶活性的影响,以针对不同有机肥进行科学合理施肥,从而为复垦土壤的培肥改造和作物增产提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

供试土样采自山西省孝义市偏城村采煤塌陷区,试验土壤为黄棕壤,质地为壤质黏土,为采煤塌陷区施用有机肥复垦 2 a 土壤(前期未种植作物)。试验区地处北纬 37°06′、东经 111°37′,海拔 990 m,属暖温带大陆性季风气候区,春季温度回升较快,风大雨少,夏季多雨,雨量集中,年平均气温 10.1 ℃,有效积温 2 500~3 500 ℃,年平均降雨量 474 mm,全年无霜期 165 d,年平均蒸发量为 1 866.9 mm。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

指标 Index	全氮 Total N/ (g kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P/ (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg kg ⁻¹)	pH 值	有机质 Organic matter/(g kg ⁻¹)
土壤 Soil	7.30	22.28	114.63	8.01	7.62

1.2 供试材料

3 种试供有机肥分别为腐熟风干的鸡粪、猪粪和牛粪,均采自山西农业大学牧站禽畜养殖场。无机磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)。3 种有机肥基本性状如表 2 所示。

表 2 供试有机肥基本性状

Table 2 Basic physical and chemical properties of tested manures

有机肥 Manures	全氮 Total N/ (g kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g kg ⁻¹)	速效磷 Olsen-P/ (mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g kg ⁻¹)	pH 值	含水率 Moisture content/%
鸡粪 Chicken manure	8.40	16.40	7.50	5 902.27	271.21	8.23	12.4
猪粪 Pig manure	15.40	14.30	8.30	7 256.54	158.97	8.19	9.61
牛粪 Cattle manure	4.60	6.00	1.10	4 862.13	156.36	8.12	15.55

1.3 样品采集与处理

供试土样采自山西省孝义市偏城村采煤塌陷区,用棋盘采样法采集 8~10 个样点的 0~20 cm 表层土混成一个土样,共 20 kg,带回实验室,风干、磨碎后过 2 mm 筛备用。

供试猪粪、鸡粪、牛粪样品风干粉碎过 2 mm 筛备用。

1.4 土样预处理和试验设计

试验始于 2018 年 9 月 30 日,进行 105 d 的培养,到 2019 年 1 月 13 日结束。试验采用室内恒温培养法。试验设 5 个处理,鸡粪、猪粪、牛粪与化肥在 100 mg/kg 的统一全磷量水平下施用,以不施磷肥作为对照(CK),3 次重复。称取供试土壤 15 份,每份 500 g,装入 1 L 棕色玻璃瓶中,用称质量法加入蒸馏水使之达到饱和持水率的 50%,并用保鲜膜封口,放入 25 ℃恒温培养箱中预培养 7 d,使水分均匀分布于土壤中,

以消除培养初期水分对磷素矿化过程的影响。7 d 后按照设置的施肥水平,准确称取供试有机肥和化肥将其均匀混入已预培养 7 d 后的土壤中,同时加入蒸馏水使之达到饱和和持水量的 45%。在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下恒温培养,定期(每周 1 次)取出瓶子通气,并用称质量补水法调节土壤含水率。从培养之日起,分别于培养当天(0 d)和 7、14、21、28、42、56、70、105 d 时取样,进行速效磷量、磷酸酶活性及磷转化强度的测定。每次采样后,继续培养直到 105 d,培养结束。

1.5 测定方法

采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质;半微量开氏法测定土壤全氮;碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷;醋酸铵浸提-火焰光度计法测定土壤有效钾^[17];磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性^[18]。

土壤磷转化强度的测定:在土壤中加入一定量的有机磷化合物(卵磷脂)或难溶性无机磷(磷灰石),在 30°C 恒温培养 21 d,用比色法测定释放出的有效磷量。根据培养后有效磷量占培养基全磷量的百分数作为磷素转化强度的大小^[19]。

采用拟二阶、Elovich、粒内扩散和幂函数等动力学模型来研究施用不同有机肥对土壤速效磷的释放动力学方程^[20-23]。

$$\text{拟二阶动力学模型: } \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right)t,$$

$$\text{Elovich 模型: } q_t = A + K \ln t,$$

$$\text{粒内扩散模型: } q_t = c + k_{id} t^{0.5},$$

$$\text{幂函数模型: } \ln q_t = \ln b + k_f (\ln t),$$

式中: q_t 为 t 时刻释放的速效磷量 (mg/kg); k_2 为拟二阶动力学模型速率常数; q_e 为平衡释放能力; A 为初始吸附量; K 为速率常数; b 为速率常数; k_f 为速率系数值; k_{id} 为表观扩散速率常数; c 为扩散常数。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据处理和作图;试验数据利用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 新复极差法进行多重比较 ($P < 0.05$),并对速效磷量、磷酸酶活性和磷转化强度之间进行 Pearson 相关性分析;土壤速效磷释放动力学参数利用 Origin 2018 进行数据拟合得出。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥处理下复垦土壤速效磷量变化特征

施用有机肥后矿区复垦土壤速效磷量动态变化见图 1。由图 1 可知,在 0~105 d 培养周期内,各施肥处理速效磷量动态变化大致分为 4 个阶段,短期下

降阶段(0~7 d)、短期上升阶段(7~14 d)、长期下降阶段(14~42 d)以及稳定阶段(42~105 d)。不同施肥处理各培养阶段土壤速效磷量均显著高于 CK,而各施肥处理间存在较大差异。

在整个培养时期,鸡粪处理对土壤速效磷量影响最大,培养 0 d 时,鸡粪处理较猪粪和牛粪处理速效磷量显著提高了 9.74%~11.26%,而猪粪与牛粪处理间差异不显著;鸡粪、猪粪和牛粪处理与化肥处理相比,土壤速效磷量分别提高了 35.32% ($P < 0.05$)、23.30% ($P < 0.05$) 和 21.62% ($P < 0.05$)。随培养时间延长,到培养 7~42 d 时土壤速效磷量整体上呈下降趋势,各施肥处理间速效磷量表现为:鸡粪>猪粪>牛粪>化肥处理,四者间均存在显著差异。在 42~105 d 培养期间,各处理土壤速效磷量趋于稳定,各施肥处理速效磷量在 29.41~40.32 mg/kg 之间,其中鸡粪处理土壤速效磷量最高,为 40.32 mg/kg ,各处理与培养初期(0 d)趋势一致,均呈现出鸡粪>猪粪~牛粪>化肥处理,其中猪粪与牛粪处理间差异不显著,其余处理与上述 2 处理间均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

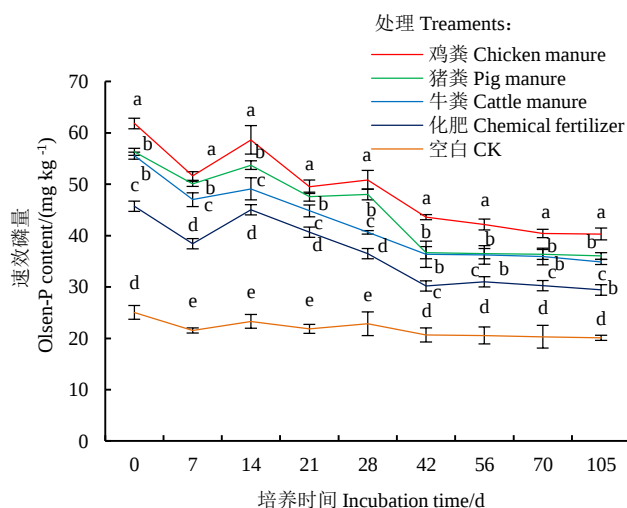


图 1 不同施肥处理速效磷的变化特征

Fig.1 Olsen-p content dynamics characteristics under different treatments

2.2 不同有机肥处理复垦土壤速效磷释放动力学参数

采用拟二阶动力学模型、Elovich 模型、粒内扩散模型和幂函数模型对土壤速效磷释放过程进行拟合,结果由表 3 所示。由表 3 可知,4 种模型均能描述速效磷释放过程,根据拟合系数 (R^2) 发现,拟二阶动力学模型 ($R^2=0.999\sim0.995$) 拟合效果最佳,其次为 Elovich 模型 ($R^2=0.828\sim0.402$) 和幂函数模型 ($R^2=0.817\sim0.390$),而粒内扩散模型 ($R^2=0.714\sim0.557$) 拟合效果最差。

表 3 不同施肥处理速效磷释放动力学参数

Table 3 Kinetics parameters of Olsen-P release from different treatments

处理 Treatments	拟二阶动力学模型 Pseudo-Second order			Elovich 模型 Elovich			粒内扩散模 Parabolic			幂函数模型 Power function		
	R^2	q_e	k^2	R^2	A	K	R^2	k_{id}	c	R^2	k_f	b
鸡粪 Chicken manure	0.996	3.308	39.274	0.678	68.685	-6.236	0.698	-0.396	56.332	0.651	-0.125	72.363
猪粪 Pig manure	0.995	3.567	34.749	0.743	68.438	-7.334	0.714	-0.419	52.578	0.719	-0.161	74.599
牛粪 Cattle manure	0.997	2.965	34.19	0.828	60.728	-5.822	0.681	-0.363	49.199	0.817	-0.138	65.155
化肥 Chemical fertilizer	0.996	3.521	28.671	0.617	53.6753	-5.354	0.665	-0.321	42.478	0.586	-0.143	57.266
CK	0.999	1.513	19.908	0.402	24.645	-0.941	0.557	-0.076	23.260	0.390	-0.042	24.181

2.3 不同有机肥处理对复垦土壤磷酸酶活性的影响

磷酸酶作为一种水解酶存在于土壤中,使土壤有机磷转变为能够让植物吸收的无机磷,并且磷酸酶活性的高低可以用来诊断植物磷素的缺乏^[18]。由表 4 可知,在整个培养阶段与 CK 相比,化肥处理对磷酸酶活性的影响差异不显著,然而施用不同有机肥较化肥处理均能显著增加磷酸酶活性,但增加幅度与有机肥种类和培养阶段的不同而不同。

在培养初期(0 d),鸡粪处理的磷酸酶活性最高,较猪粪和牛粪处理磷酸酶活性分别提高了 27.15% ($P<0.05$) 和 52.37% ($P<0.05$);鸡粪、猪粪和牛粪

处理与化肥处理相比,磷酸酶活性分别提高了 120.06% ($P<0.05$)、52.37% ($P<0.05$) 和 27.15% ($P<0.05$)。在培养中期(14 d)磷酸酶活性与培养初期(0 d)趋势一致,仍为鸡粪处理最高,其与猪粪处理磷酸酶活性差异不显著;鸡粪与牛粪和化肥处理相比,磷酸酶活性分别提高了 31.07% ($P<0.05$) 和 78.09% ($P<0.05$),而牛粪与化肥处理间差异不显著。在培养后期(42~105 d),土壤磷酸酶活性大小均为:鸡粪~牛粪~猪粪>化肥~CK,各有机肥处理间差异均不显著,但其较化肥处理显著提高了磷酸酶活性,提高 49.40%~64.27%。

表 4 不同施肥处理磷酸酶活性变化特征

Table 4 Dynamics characteristics of phosphatase activity under different treatments

mg/(g d)

处理 Treatments	培养时间 Incubation time/d			
	0	14	42	105
鸡粪 Chicken manure	42.10±4.108a	31.47±2.659a	31.25±2.631a	30.26±1.709a
猪粪 Pig manure	33.11±2.333b	30.04±3.952ab	29.60±6.908a	26.42±2.239a
牛粪 Cattle manure	27.63±1.831c	24.01±4.351bc	28.72±1.155a	27.52±1.554a
化肥 Chemical fertilizer	19.08±1.740d	17.67±4.150cd	18.64±2.836b	18.42±0.328b
CK	18.64±1.057d	16.99±2.490d	16.77±0.328b	16.33±0.684b

2.4 不同有机肥处理对复垦土壤中磷转化强度的影响

施用有机肥对矿区复垦土壤有机磷转化强度动态变化见图 2,由图 2 可知,各处理有机磷转化强度变化趋势大致分为前期(0~14 d)快速下降,中期(14~42 d)缓慢回升,后期(42~105 d)缓慢下降 3 个阶段。

在培养初期(0 d),猪粪与化肥处理对有机磷转化强度的影响最高,二者差异不显著;猪粪处理较牛粪、鸡粪处理显著提高有机磷转化强度,分别提高了 41.51% ($P<0.05$) 和 86.52% ($P<0.05$),差异显著。在培养中期(14 d),各处理间有机磷转化强度均不存在显著差异。在培养后期(42 d),施用猪粪、牛粪和化肥处理有机磷转化强度最高,三者间差异不显著,但均显著高于鸡粪处理,提高了 14.34%~44.78%。培养末期(105 d),各处理有机磷转化强度与培养中期(14 d)趋于一致,均无显著差异。

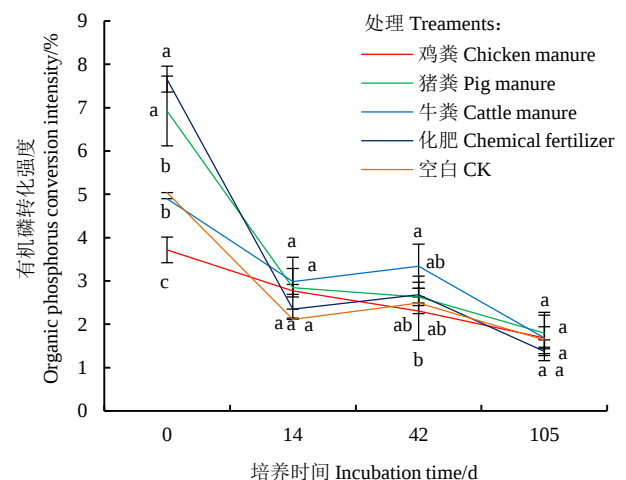


图 2 不同施肥处理土壤有机磷转化强度

Fig. 2 Soil organic phosphorus conversion intensity of different manure application

施用有机肥对矿区复垦土壤无机磷转化强度动态变化见图 3。由图 3 可以发现,在整个培养过程中,无机磷转化强度的动态变化呈现出前期(0~14 d)上升幅度不明显,后期(42~105 d)下降幅度较明显的动态变化,但在整个周期内处理间均无显著差异。

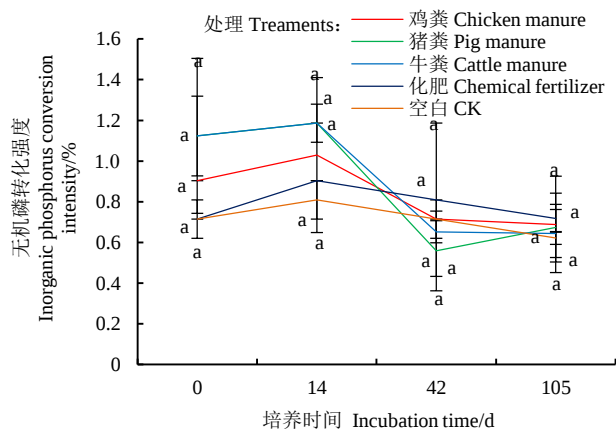


图 3 不同施肥处理土壤无机磷转化强度

Fig. 3 Soil inorganic phosphorus conversion intensity of different manure application

2.5 速效磷量与磷酸酶活性及磷转化强度的 Pearson 相关系数

通过相关分析发现(表 5),各有机肥处理速效磷量与有机、无机磷转化强度均存在极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.720~0.926,而化肥与 CK 速效磷量与有机磷转化强度呈显著正相关($P<0.05$)。但磷酸酶活性仅与鸡粪处理下速效磷量及有机磷转化强度存在显著正相关($P<0.05$),其余处理磷酸酶活性与磷转化强度相关性均不显著。

3 讨论

3.1 不同有机肥处理对复垦土壤速效磷量变化的影响

本试验通过室内恒温培养 3 种有机肥及化肥对土壤速效磷量动态变化研究发现,各处理速效磷量随培养时间推移呈现出短期下降阶段(0~7 d)、短期上升阶段(7~14 d)、长期下降阶段(14~42 d)以及稳定阶段(42~105 d)的趋势,这与 Kouno 等^[26]、赵晶晶等^[27]和战厚强等^[28]的研究一致。这可能是由于有机肥带入其腐熟过程中矿化的部分无机磷使得土壤速效磷量较高,随培养时间延长,土壤微生物固持作用以及土壤本身的吸附固定作用导致土壤速效磷量呈下降趋势,到培养后期,速效磷量处于矿化释放和吸附固定的动态平衡之中,有机磷矿化速率将趋于稳定^[26-28]。

整个培养时期,磷素矿化过程中 3 种有机肥总体矿化速率表现出鸡粪>猪粪>牛粪处理,这与杨蕊等^[11]的研究不一致。杨蕊等^[11]通过在室内恒温(25℃)培养条件下对施入猪粪和鸡粪的红壤连续培养 105 d

后发现猪粪处理的磷矿化速率(41.6%)大于鸡粪(37.8%)。一方面可能是由于杨蕊试验和本试验所用有机肥的性质不同造成的,杨蕊试验的猪粪中速效磷占全磷的比例和 C/P(49.45%和 57.90)比鸡粪高(35.58%和 36.60),而本试验供试猪粪中速效磷占全磷的比例和 C/P(44.24%和 9.59)不及鸡粪(41.27%和 6.45)所导致的;另一方面可能是由于供试土壤的类型不同(黄棕壤 VS 红壤),据报道土壤中的黏粒、砂粒及陪伴离子显著影响磷在土壤中的赋存形态,影响磷在土壤的吸附-沉淀、溶解-固定^[29-30]。通过对整个培养阶段土壤速效磷与土壤酶活性动态变化发现,各处理速效磷量与土壤磷酸酶活性随时间推移大致呈下降趋势,进一步对速效磷量与磷酸酶活性进行相关性分析发现(表 5),其中鸡粪处理与磷酸酶活性呈显著正相关关系($P<0.05$),其余各处理差异均不显著($P>0.05$),这说明各处理土壤速效磷量的差异可能是由于不同有机肥类型及理化性质的差异引起土壤磷酸酶活性的变化^[31]。

3.2 不同有机肥处理下复垦土壤速效磷释放动力学参数

本试验通过采用拟二阶动力学模型、Elovich 模型、粒内扩散模型和幂函数模型对土壤速效磷释放过程进行拟合得出,各施肥处理下拟二阶动力学模型($R^2=0.999\sim0.995$)拟合效果最好。由于拟二阶动力学模型是基于假定吸附速率受化学吸附机理控制的,包括吸附剂与吸附质之间的电子共用或电子转移而建立的^[32-33],因此本试验中复垦土壤对速效磷的吸附过程为化学吸附,其中拟二阶动力学模型中释放速率常数(K_2)依次为鸡粪>猪粪>牛粪处理,这一结果与为期 105 d 磷素矿化过程中 3 种有机肥总体矿化速率表现一致,可见,不同有机肥施入矿区复垦土壤后其矿化过程中磷素释放存在差异。

3.3 不同施肥处理下土壤酶活性及磷转化强度对复垦土壤速效磷量的影响

本试验发现,在整个培养期间,磷酸酶活性整体上呈:鸡粪>猪粪>牛粪>化肥处理,这可能是由于有机肥处理较化肥处理含有丰富的酶,促使土壤酶活性增强,另一方面能为土壤酶营造良好的反应环境(充足的底物、适宜水分、pH 值等)^[31]。鸡粪处理磷酸酶活性高于猪粪和牛粪处理,这可能是与有机肥中有机质量有关,本试验供试鸡粪有机质量高于猪粪和牛粪,有机质可提供微生物生长所需丰富的碳源和营养物质,进而影响土壤磷酸酶活性的大小。孟娜等^[34]研究发现,在潮褐土中施用有机肥和磷肥,土壤磷酸酶活性和有机质之间存在显著正相关关系($R^2=0.611$),这是由于有机质可提供微生物生长所需

丰富的碳源和营养物质,进而影响土壤磷酸酶活性的大小。赵小蓉等^[35]研究发现,在石灰性土壤中施用有机肥和化学磷肥后碱性磷酸酶活性与速效磷量均呈显著正相关关系,这一结果与本试验发现鸡粪处理下磷酸酶活性与速效磷量显著正相关(表5)相似,说明土壤磷酸酶活性大小可能是影响化肥处理与各有机肥处理间速效磷量变化的原因。

磷转化强度可以表现出微生物作用于土壤的含磷有机物和难溶无机磷化合物释放出有效磷的量,其反映微生物对土壤磷素向有效态转化的强度^[36]。本试

验通过相关分析发现,各有机肥处理有机磷转化强度和速效磷量间呈极显著正相关关系($P<0.01$),说明有机肥所含的有机磷转化速度可能会决定速效磷量的变化。由于磷酸酶在土壤磷素循环中对有机磷向活性态磷转化有重要作用^[37],并且孟娜等^[34]研究表明:在潮褐土中施用有机肥和磷肥,土壤磷酸酶活性与土壤有机磷呈极显著正相关关系($R^2=0.741$)。综上所述,整个培养期间各处理速效磷量的差异可能是由于有机肥理化性状的不同导致土壤磷酸酶活性的差异进而影响有机磷转化强度的差异所引起的。

表5 速效磷量、磷酸酶及磷转化强度的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between Olsen-p content phosphatase activity and phosphatase activity

处理 Treatments	项目 Item	速效磷量 Olsen-p content	磷酸酶活性 Phosphatase activity	有机磷转化强度/Organic phosphatase activity	无机磷转化强度/Inorganic phosphatase activity
鸡粪 Chicken manure	速效磷量 Olsen-p content	1			
	磷酸酶活性 Phosphatase activity	0.650*	1		
	有机磷转化强度 Organic phosphatase activity	0.827**	0.692*	1	
	无机磷转化强度 Inorganic phosphatase activity	0.739**	0.563	0.527	1
猪粪 Pig manure	速效磷量 Olsen-p content	1			
	磷酸酶活性 Phosphatase activity	0.46	1		
	有机磷转化强度 Organic phosphatase activity	0.720**	0.475	1	
	无机磷转化强度 Inorganic phosphatase activity	0.926**	0.381	0.528	1
牛粪 Cattle manure	速效磷量 Olsen-p content	1			
	磷酸酶活性 Phosphatase activity	-0.315	1		
	有机磷转化强度 Organic phosphatase activity	0.751**	0.074	1	
	无机磷转化强度 Inorganic phosphatase activity	0.794**	-0.251	0.506	1
化肥 Chemical fertilizer	速效磷量 Olsen-p content	1			
	磷酸酶活性 Phosphatase activity	-0.075	1		
	有机磷转化强度 Organic phosphatase activity	0.634*	0.139	1	
	无机磷转化强度 Inorganic phosphatase activity	-0.087	-0.035	-0.149	1
CK	速效磷量 Olsen-p content	1			
	磷酸酶活性 Phosphatase activity	0.508	1		
	有机磷转化强度 Organic phosphatase activity	0.778**	0.574	1	
	无机磷转化强度 Inorganic phosphatase activity	0.515	0.453	0.092	1

注 **表示0.01水平显著相关; *表示0.05水平显著相关。

Note **Significant 0.01 level; * Significant 0.05 level.

4 结 论

本试验采用 3 种有机肥（鸡粪、牛粪和猪粪）以及化肥通过室内培养 105 d 后发现，在整个磷素矿化过程中，各处理速效磷量随时间推移整体上呈下降趋势，且各处理速效磷释放过程以拟二阶动力学模型为最优（ $R^2=0.999\sim 0.995$ ），磷酸酶活性呈鸡粪>猪粪>牛粪处理，有机磷转化强度呈猪粪>牛粪>鸡粪，由于磷酸酶活性、有机磷转化强度与速效磷量间均存在显著的正相关关系，故整体上各处理速效磷量均呈现出鸡粪处理>猪粪>牛粪处理的规律。

参考文献：

- [1] 胡振琪. 山西省煤矿区土地复垦与生态重建的机遇和挑战[J]. 山西农业科学, 2010, 38(1): 42-45, 64.
HU Zhenqi. Opportunities and challenges in land reclamation and ecological restoration in Shanxi coal mining areas[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(1): 42-45, 64.
- [2] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280.
LI Xinju, HU Zhenqi, LI Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 276-280.
- [3] 刘飞, 陆林. 采煤塌陷区的生态恢复研究进展[J]. 自然资源学报, 2009, 24(4): 612-620.
LIU Fei, LU Lin. Progress in the study of ecological restoration of coal mining subsidence areas[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(4): 612-620.
- [4] 童洁, 刘立忠, 吴新恒. 低潜水位煤矿区土地复垦工程技术措施研究[J]. 矿山测量, 2008(4): 67-69.
TONG Jie, LIU Lizong, WU Xinheng. Research on technical measures for land reclamation engineering in low diving bit coal mine area[J]. Mine Survey, 2008(4): 67-69.
- [5] 陆梅, 孙敏, 高志强, 等. 不同施磷水平对旱地小麦产量及其构成要素的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 13-19.
LU Mei, SUN Min, GAO Zhiqiang, et al. Impact of different phosphorus application levels on yield and grain traits of winter wheat in drylands[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(7): 13-19.
- [6] 方慈. 基于水热处理的养猪粪污磷素转化、结晶与资源化利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
FANG Ci. The research of phosphorus transformation, crystallization and utilization from swine wastes based on hydrothermal treatment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [7] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 等. 不同类型肥料对东北地区稻田氮磷损失和水稻产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 63-68.
LIU Ruliang, WANG Fang, WANG Kaijun, et al. Effects of fertilizers on nitrogen and phosphorus leaching and yield of rice in northeast China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 63-68.
- [8] LI G H, VAN ITTERSUM M K, LEFFELAAR P A, et al. A multi-level analysis of China's phosphorus flows to identify options for improved management in agriculture[J]. Agricultural Systems, 2016, 144: 87-100.
- [9] 李国华. 我国畜禽粪便磷组分与土壤磷养分资源管理策略[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
LI Guohua. Phosphorus fractions in animal manure and soil phosphorus management in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [10] SÅNDERUP M J, EGEMOSE S, HOFFANN C C, et al. Modeling phosphorus removal in wet ponds with filter zones containing sand or crushed concrete[J]. Ecological Engineering, 2014, 66: 52-62.
- [11] 杨蕊, 李裕元, 魏红安, 等. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 600-607.
YANG Rui, LI Yuyuan, WEI Hong'an, et al. Study on the nitrogen and phosphorus mineralization of livestock and chicken manure in red soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 600-607.
- [12] 赵明, 陈雪辉, 赵征宇, 等. 鸡粪等有机肥料的养分释放及对土壤有效铜、锌、铁、锰含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 47-50.
ZHAO Ming, CHEN Xuehui, ZHAO Zhengyu, et al. Releasing of N, P and K of organic fertilizers and their effects on the contents of available Cu, Zn, Fe and Mn in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 47-50.
- [13] 赵凯超, 刘淑慧, 卢垚杰, 等. 不同耕作方式对土壤酶活性、含水率和紫花苜蓿生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 21-27.
ZHAO Kaichao, LIU Shuhui, LU Yangjie, et al. Impact of different tillage methods on soil enzyme activities and water content of alfalfa[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 21-27.
- [14] AZEEZ J O, VAN AVERBEKE W. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(14): 5 645-5 651.
- [15] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 东北黑土有机磷的矿化过程研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1 858-1 861.
ZHAO Shaohua, YU Wantai, ZHANG Lu, et al. Research on mineralization process of organic phosphorus in black soil in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1 858-1 861.
- [16] 黄敏, 肖和艾, 黄巧云, 等. 有机物料对水旱轮作红壤磷素微生物转化的影响[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 584-589.
HUANG Min, XIAO Heai, HUANG Qiaoyun, et al. Effect of amendment of organic materials on transformation of p in red earth soil under flood drought cultivation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 584-589.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 2000.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

- GUAN Songyin. Soil Enzyme and Its Research Methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986.
- [19] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- LIN Xiangui. Principles and methods of soil microbiology research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [20] AHMAD M, LEE S S, OH S E, et al. Modeling adsorption kinetics of trichloroethylene onto biochars derived from soybean stover and peanut shell wastes[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8 364-8 373.
- [21] ALMAROAI Y A, USMAN A R A, AHMAD M, et al. Role of chelating agents on release kinetics of metals and their uptake by maize from chromated copper arsenate-contaminated soil[J]. Environmental Technology, 2013, 34(6): 747-755.
- [22] [22] JALALI M, ZINLI N A M. Kinetics of phosphorus release from calcareous soils under different land use in Iran[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(1): 38-46.
- [23] SPARKS D L, JARDINE P M. Comparison of kinetic equations to describe potassium-calcium exchange in pure and in mixed systems[J]. Soil Science, 1984, 138(2): 115-122.
- [24] REBOREDA R, CACADOR I. Enzymatic activity in the rhizosphere of *Spartina maritima*: Potential contribution for phytoremediation of metals[J]. Marine Environmental Research, 2008, 65(1): 77-84.
- [25] FORMAN R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [26] KOUNO K, WU J, BROOKES P C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(5): 617-622.
- [27] 赵晶晶, 郭颖, 陈欣, 等. 有机物料对土壤有机磷组分及其矿化进程的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 740-744.
- ZHAO Jingjing, GUO Ying, CHEN Xin, et al. Influences of organic materials on organic phosphorus fractions and mineralization processes in soils[J]. Soils, 2006, 38(6): 740-744.
- [28] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 作物杂志, 2015(2): 78-83.
- ZHAN Houqiang, YAN Shuangshuang, WANG Jiarui, et al. Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil[J]. Crops, 2015(2): 78-83.
- [29] 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): 1 240-1 250.
- WANG Jingwei, WANG Yanling, YAO Yi, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1 240-1 250.
- [30] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5247-5255.
- ZHANG Tian, XU Hao, RU Shuhua, et al. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers[J]. Environmental Science, 2017, 38(12): 5247-5255.
- [31] 林天, 何园球, 李成亮, 等. 红壤旱地中土壤酶对长期施肥的响应[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 682-686.
- LIN Tian, HE Yuanqiu, LI Chengliang, et al. Response of soil enzymes to long-term fertilization in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 682-686.
- [32] AHMAD M, AHMAD M, EL-NAGGAR A H, et al. Aging effects of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil[J]. Pedosphere, 2018, 28(6): 873-883.
- [33] 温婧, 朱元骏, 殷宪强, 等. 砒砂岩对 Pb(II) 的吸附特性研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(10): 2 491-2 499.
- WEN Jing, ZHU Yuanjun, YIN Xianqiang, et al. Pb(II) adsorption property of Pisha sandstone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(10): 2 491-2 499.
- [34] 孟娜, 廖文华, 贾可, 等. 磷肥、有机肥对土壤有机磷及磷酸酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2006, 29(4): 57-59.
- MENG Na, LIAO Wenhua, JIA Ke, et al. Effect of phosphorus fertilizer and organic manure on organic phosphorus content and the activity of phosphatase in soils[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2006, 29(4): 57-59.
- [35] 赵小蓉, 林启美, 孙焱鑫, 等. 细菌解磷能力测定方法的研究[J]. 微生物学通报, 2001, 28(1): 1-4.
- ZHAO Xiaorong, LIN Qimei, SUN Yanxin, et al. The methods for quantifying capacity of bacteria in dissolving p compounds[J]. Microbiology, 2001, 28(1): 1-4.
- [36] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 544-554.
- LIANG Lu, MA Chen, ZHANG Ran, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(4): 544-554.
- [37] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 564-570.
- YANG Wanqin, WANG Kaiyun. Advances on soil enzymology[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(5): 564-570.
- [38] 周驰, 宋春雷, 陈玺, 等. 有机磷在调节土壤磷素保持与释放过程中的作用[J]. 土壤, 2013, 45(1): 60-66.
- ZHOU Chi, SONG Chunlei, CHEN Xi, et al. Roles of organic phosphorus in modifying phosphorus sorption and release in soils[J]. Soils, 2013, 45(1): 60-66.

Study of Phosphorus Mineralization Characteristics in a Mine Reclaimed Soil under Different Organic Fertilizers

LYU Jianyu^{1,2}, GAO Wenjun³, HAO Xianjun^{1, 2*}, ZHANG Ruoyang^{1, 2}, ZHANG Bokai^{1, 2}, XUE Yuchen^{1, 2}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. National Experimental Teaching

Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

3.College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: **【Objective】** The objective of this research is to explore the phosphorus mineralization characteristics on reclaimed soil by different organic fertilizers in coal mining subsidence areas. **【Method】** The laboratory incubation experiment was conducted to study the dynamic changes of soil available phosphorus after applying three kinds of organic fertilizers (chicken manure, pig manure, cattle manure), including no fertilizer treatment as CK and chemical fertilizer treatment as control, while combined the phosphatase activity and phosphorus inversion intensity in phosphorus mineralization process, thereby clarify the effects of different organic fertilizers on phosphorus bioavailability. **【Result】** ①In whole indoor constant temperature incubated process, the content of available phosphorus in each fertilizer treatment presented decreasing trend with incubated time, but the content of available phosphorus in different incubated period varied with different treatments, with a sequence of chicken manure > pig manure ≥ cattle manure > chemical fertilizer > CK. At the end of incubation (105 d), chicken manure treatment, pig manure treatment and cattle manure treatment significantly increased the content of soil available phosphorus (18.56%~37.09%), compared with chemical fertilizer treatment. Compared with pig manure treatment and cattle manure treatment, the content of available phosphorus of chicken manure treatment significantly increased by 11.93%~15.62%, but there was no significant difference between pig manure treatment and cattle manure treatment. ②In whole incubated process, the equations of pseudo-second order could better describe the kinetics of the available phosphorus release process in each fertilizer treatment, followed by Elovich equation and power function equation, whereas the parabolic equation had a poor fitting effect. ③In whole incubation, the phosphatase activity of organic fertilizer treatments was significantly higher than that of chemical fertilizer treatment, which increased by 39.14%~120.70%. ④During the earlier stage of incubation (0~14 d), pig manure treatment and chemical fertilizer treatment had lager effects on soil organic phosphorus inversion intensity, but there was no significant difference between pig manure treatment and chemical fertilizer treatment. Compared with chicken manure treatment and cattle manure treatment, soil organic phosphorus inversion intensity of pig manure treatment significantly increased by 41.51% and 86.52% respectively. In the middle and late period of incubation (42~105 d), there was no significant difference among different fertilizer treatments. **【Conclusion】** The application of organic fertilizers could accelerate the phosphorus mineralization in the reclaimed soil. Among three kinds of organic fertilizer, chicken manure had a better effect on improving the content of soil available phosphorus than that of pig manure and cattle manure.

Key words: organic fertilizers; phosphorus mineralization; mine reclaimed soil

责任编辑：白芳芳