

不同有机肥对矿区复垦土壤磷素累积及淋失风险研究

李媛^{1,2}, 郝鲜俊^{1,2}, 高文俊³, 杨杰^{1,2}, 孟会生^{1,2}, 张杰^{1,2}, 孙大生^{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 山西农业大学草业学院,山西 太谷 030801)

摘要:为探究定位培肥矿区复垦土壤过程中不同有机肥对土壤磷素累积状况及环境流失风险的差异。以山西省孝义市采煤塌陷复垦土壤为研究对象,研究不同有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)和化肥在 4 个施磷水平下(0,25,50,100 kg/hm²)培肥 4 年后对矿区复垦土壤全磷、Olsen—P、Mehlich3—P、CaCl₂—P 以及磷饱和度和(DPS)的影响及其之间的变化关系。结果表明:(1)施用有机肥增加土壤中磷素含量,且施磷量越大,对磷素含量的影响越明显,特别是土壤全磷、Olsen—P 和 Mehlich3—P,并使 CaCl₂—P 呈增加的趋势;与不施磷处理和化肥相比,施用有机肥提高了土壤磷饱和度(DPS);总体来看,不同施肥处理对土壤磷素含量的影响均表现为鸡粪≥猪粪>牛粪>化肥。(2)各施肥处理土壤 Olsen—P 与 Mehlich3—P、Olsen—P 与 CaCl₂—P、Mehlich3—P 与 CaCl₂—P 之间存在显著的线性相关性。(3)与猪粪、牛粪和化肥处理相比,鸡粪处理对矿区复垦土壤磷素流失风险影响最大,当磷饱和度(DPS)≥39.31%,Olsen—P≥26.24 mg/kg、Mehlich3—P≥49.06 mg/kg 时,土壤 CaCl₂—P 含量迅速增加。因此,可将上述指标作为矿区复垦土壤磷素流失的临界值,超过此值,土壤磷素流失风险加大,需要警惕对地表、地下水体的污染。

关键词: 矿区复垦土壤; 有机肥; 磷素累积; 淋失风险

中图分类号: S141.2; S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)02-0344-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.044

Effects of Different Organic Fertilizers on Phosphorus Accumulation and Leaching Risk of Reclaimed Soil in Mining Area

LI Yuan^{1,2}, HAO Xianjun^{1,2}, GAO Wenjun³, YANG Jie^{1,2},

MENG Huisheng^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, SUN Dasheng^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.National Experimental Teaching Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3.College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to explore the difference of phosphorus accumulation and loss risk of different organic fertilizers in the process of reclaiming the soil in the mining area. In this experiment, the reclaimed soil of coal mining collapse in Xiaoyi City, Shanxi Province was taken as the research object, and the effect of different organic fertilizers, including poultry manure, swine manure, cow manure and chemical fertilizer, under 4 P levels (0, 25, 50, 100 kg/hm²) after 4 years in reclaimed soil of mining area on total phosphorus, Olsen—P, Mehlich3—P, CaCl₂—P, and degree of phosphorus saturation (DPS) and the relationship among them were studied. The results showed that: (1) The application of organic fertilizers increased the phosphorus content in the soil, and the greater the amount of phosphorus applied, the more obvious the impact on the phosphorus content, especially the total phosphorus, Olsen—P, Mehlich3—P in the soil, and CaCl₂—P increased; Compared with non-phosphorus treatment and chemical fertilizer, the application of organic fertilizers increased the surface layer (0—20 cm) soil degree of phosphorus saturation (DPS); In general, the effects of different fertilization treatments on the soil phosphorus content showed that poultry manure≥swine manure>cow manure>chemical fertilizer. (2) There was a significant linear correlation between the soil Olsen—P and

收稿日期: 2021-09-18
资助项目: 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项目; 山西农业大学科技创新基金项目(2016ZZ14)
第一作者: 李媛(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事矿区土壤复垦研究。E-mail: 2373885492@qq.com
通信作者: 郝鲜俊(1976—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事矿区土壤复垦研究。E-mail: haoxianjun660@125.com

Mehlich3—P, Olsen—P and CaCl_2 —P, Mehlich3—P and CaCl_2 —P in each fertilization treatment. (3) Compared with swine manure, cow manure and chemical fertilizer treatment, poultry manure treatment had the greatest impact on the risk of phosphorus loss in reclaimed soil. When $\text{DPS} \geq 39.31\%$, Olsen—P ≥ 26.24 mg/kg and Mehlich3—P ≥ 49.06 mg/kg, the content of CaCl_2 —P in soil increased rapidly. Therefore, the above indexs could be used as the critical value of phosphorus loss in reclaimed soil of mining area. If these values exceed, the risk of soil P loss would increase. We need to be vigilant about the pollution of surface and underground water.

Keywords: reclaimed soil; organic fertilizer; phosphorus accumulation; leaching risk

山西省在煤炭开采的过程中造成地表大面积塌陷,塌陷面积达到 10.1 万 hm^2 ^[1],然而,全省只有 2% 的复垦率^[2]。2021 年中共中央明确进一步提出要强化耕地数量保护,持续推进工矿废弃地土地整理复垦开发^[3]。因此,对采煤塌陷区土地进行复垦是保护耕地的重要举措。采煤塌陷区复垦土壤在复垦进程中由于机械扰动使得原有土壤剖面上下错位,心底土上翻裸露,属于重构土壤。裸露的耕层土壤养分含量极低,尤其是土壤有效磷,这是限制矿区土壤复垦进程的重要因素之一^[4]。为了恢复土壤肥力以提高作物产量,当地农民经常施入大量无机磷肥^[5],当季农田磷肥利用率不足 25%^[6],大部分磷被石灰性土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子固定。富集在土壤中的磷素在降雨时沿地裂缝、裂隙流入地下水,加剧了淋溶风险,在黄土丘陵区,降水不均匀,主要集中在每年 7—9 月,丘陵矿区地块有一定坡度,夏季暴雨容易产生地表径流加剧地表和地下水的污染,这成为威胁矿区生态环境的重要因素之一。同时,磷矿资源作为不可再生资源将在 50~225 年内因人口对粮食需要的增加而面临枯竭的危机,而有机肥具有产量大、来源广的特点,日益成为代替化肥补充土壤磷素的重要来源^[7]。2020 年农业部进一步提出实现畜禽粪便还田力度及基本资源化利用目标^[8]。据统计^[9-10],我国每年的禽畜粪便排放量已达到 38 亿 t 以上,相当于 240 万 t 磷肥,而畜禽粪便利用率却不足 60%,因此畜禽粪便还田不仅可以促进畜禽粪便的综合利用,而且对于实现代替化肥或化肥减量的目标具有重要意义。已有研究^[11-12]表明,有机肥中的有机质含量高、养分全面、肥效长,施用有机肥可以改善土壤结构和肥力,提高磷酸酶活性,进而促进土壤磷素有效性的增加,将畜禽粪便施入低产农田,特别是采煤塌陷复垦土壤对于提高有效磷含量,全面提升土壤肥力等方面具有重要作用。

施用粪肥不仅可以增加土壤磷素累积,其分泌的有机酸与土壤中的磷酸根离子竞争吸附点位,从而减少土壤对磷素的固定^[13-14];同时有机肥能够提高土壤中的微生物活性,直接影响磷素循环与转化过程,进而促进磷的有效性增加^[15]。施用有机肥除了增加土

壤对磷素的解吸,提高土壤中磷素含量及磷饱和度,也加大土壤磷素的流失风险。朱晓晖等^[16]通过田间试验发现,在潮土中施用牛粪所造成的农田磷素流失风险要显著高于鸡粪和猪粪;肖辉等^[17]对设施土壤磷素流失风险进行了研究,高量的鸡粪和猪粪更容易引发磷素流失风险;王敏锋等^[18]在设施菜田上通过田间试验发现,不同用量粪肥对土壤各磷素形态的影响不同,土壤有效磷、水溶性磷及磷饱和度影响与有机肥用量呈正相关。可见,土地利用方式、有机肥施用量等差异的影响,导致不同有机肥的淋失风险也不尽相同。前人关于土壤磷素淋失的研究主要集中在农业高水肥管理下的长期施肥农田土壤,对于矿区复垦的研究主要集中在培肥土壤、提高作物产量方面,伴随有机肥或化肥施用过程所引发的环境问题却鲜有报道。关于有机肥的施用,欧美国家从以往基于作物氮素需求向作物磷素需求转变,而磷素需求是根据有机肥中的全磷含量计算,没有考虑不同有机肥中磷的有效性^[19-20]。影响有机肥中磷的有效性因素较多,如畜禽粪便种类、形态、日粮组成及堆肥方式等^[21]。国内有机肥在用量上比较粗放,没有考虑土地承载量和作物的养分需求。那么在相同磷水平下,有机肥与化肥及不同有机肥之间在定位培肥复垦土壤过程中对土壤磷素累积与流失潜力是否相同?据 Wang 等^[22]对加拿大安大略省农田土壤磷素流失风险研究表明,土壤 Olsen—P 和 CaCl_2 —P 之间不是简单的线性关系,而是符合分段线性函数,即存在一个“突变点”(change-point),当 Olsen—P 超过 56.5 mg/kg,土壤磷素流失潜能加大。而不同有机肥对矿区复垦土壤 Olsen—P 和 CaCl_2 —P 之间影响关系的如何?两者之间是否存在突变点?所有这些问题均是复垦土壤培肥过程中尚不明确的科学问题。为此,本研究以矿区复垦土壤为研究对象,研究 3 种有机肥(鸡粪、猪粪和牛粪)和化肥在不同施磷水平下(0, 25, 50, 100 kg/hm²)定位培肥 4 年,对矿区复垦土壤 Olsen—P、Mehlich3—P(农学磷指标)和 CaCl_2 —P、DPS(磷饱和度)的影响以及其之间的相关关系,以此来评估矿区复垦土壤磷素淋失潜能,为科学合理利用有机肥培肥

矿区复垦土壤减小矿区土壤磷素的潜在淋失风险提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于山西省孝义市偏城村(37°06′N,111°37′E)。该区属于暖温带大陆性季风气候区,春季回温快且少雨多风,夏季雨热同期,降雨集中在 7—9 月,年均降水量仅 472 mm,年均气温 10.1 ℃,年均日照时间 2 392.4 h,无霜期可达 178 天,≥10 ℃有效积温为 2 500~3 900 ℃,土壤类型为褐土。试验区于 2016 年进行复垦,复垦

当年土壤(0—20 cm)基本理化性质为:pH 8.34,有机质、全氮含量分别为 5.45,0.15 g/kg,硝态氮、铵态氮、速效磷含量分别为 7.86,6.94,4.34 mg/kg。

1.2 供试材料

供试有机肥为腐熟鸡粪、猪粪和牛粪,2017—2018 年采自偏城村养殖场;2019—2020 年取自山西农业大学动科院牧站风干的有机肥,供试有机肥基本理化性质见表 1。

化肥氮磷钾分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 52%)。

表 1 供试有机肥基本理化性质

年份	有机肥	pH	全氮(N)/%	全磷 (P ₂ O ₅)/%	全钾 (K ₂ O)/%	含水量/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)
2017	鸡粪	8.19	2.83	2.15	2.24	45.21	246.32
	猪粪	8.15	2.75	3.67	0.99	63.80	187.54
	牛粪	8.07	2.48	4.89	1.22	52.92	156.10
2018	鸡粪	8.10	1.16	0.75	1.05	52.92	218.21
	猪粪	8.16	2.15	1.19	0.96	63.80	178.87
	牛粪	7.98	0.62	0.50	0.27	45.20	155.56
2019	鸡粪	8.02	2.10	2.33	0.74	1.97	219.26
	猪粪	8.12	1.35	2.10	0.85	4.94	156.43
	牛粪	7.93	1.28	0.62	0.78	6.78	134.23
2020	鸡粪	8.00	1.44	1.59	0.94	6.45	202.45
	猪粪	8.09	0.79	1.62	1.24	3.67	150.86
	牛粪	7.85	0.44	0.74	1.43	4.22	140.38

1.3 试验设计

试验区经工程复垦后,于 2017 年在山西省孝义市偏城村的采煤塌陷复垦地进行定位培肥试验,到 2020 年已复垦 4 年。试验设置 3 种有机肥:鸡粪、猪粪和牛粪,分别以 PM、SM 和 CM 表示,化肥以 CF 表示,以不施磷肥为空白处理(CK)。同时设置 3 种施磷水平:(1)25 kg/hm² (PM25、SM25、CM25 和 CF25);(2)50 kg/hm² (PM50、SM50、CM50 和 CF50);(3)100 kg/hm² (PM100、SM100、CM100 和 CF100),共 13 个处理,3 次重复,共 39 个小区,每个小区面积 30 m² (5 m×6 m),随机区组排列。为保证除磷以外其他大量元素供应充足,本研究所有处理在 200 kg/hm² 有效 N、100 kg/hm² K 下施用,其中鸡粪、猪粪、牛粪有机肥氮素有效性分别为 37%,29%,20%^[23-25]。如果氮钾养分不足,分别用尿素和硫酸钾补齐。氮、磷、钾肥和各种有机肥均在玉米春播前一次施入,各处理施用量见表 2。

1.4 样品采集与测定方法

1.4.1 土样采集 本试验自 2017 年开始定位培肥,培肥 4 年后,于 2020 年 10 月初采集玉米收获后 0—20 cm 土样,每个小区按“S”形采集 5 个样点,混匀后

装入自封袋,带回实验室风干、过筛备用。

表 2 不同处理施肥类型及各养分施用量

单位:kg/hm²

处理	施肥类型	施磷水平	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	不施磷肥	0	200	0	100
CF25	化肥	25	200	25	100
CF50	化肥	50	200	50	100
CF100	化肥	100	200	100	100
PM25	鸡粪	25	200	25	100
PM50	鸡粪	50	200	50	100
PM100	鸡粪	100	200	100	100
SM25	猪粪	25	200	25	100
SM50	猪粪	50	200	50	100
SM100	猪粪	100	200	100	100
CM25	牛粪	25	200	25	100
CM50	牛粪	50	200	50	100
CM100	牛粪	100	200	100	100

1.4.2 测定方法 本试验测定方法参见《土壤农化分析》^[26]。土壤全磷(TP)采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定;土壤速效磷(Olsen—P)采用 pH 8.5、0.5 mol/L NaHCO₃溶液浸提(水土比为 20:1,振荡 30 min),浸提液用钼锑抗比色法进行比色测

定;土壤水溶性磷($\text{CaCl}_2\text{—P}$)采用 0.01 mol/L CaCl_2 溶液浸提(水土比为 10 : 1,振荡 30 min),浸提液用钼锑抗比色法进行比色测定;土壤有效磷(Mehlich3—P):称取风干土样 5 g,加入 50 ml Mehlich3 浸提剂(0.2 mol/L $\text{CH}_3\text{COOH} + 0.25\text{ mol/L NH}_4\text{NO}_3 + 0.015\text{ mol/L NH}_4\text{F} + 0.013\text{ mol/L HNO}_3 + 0.001\text{ mol/L EDTA}$)浸提,振荡 5 min,过滤,钼锑抗比色法测定;有效钙、镁浸提后,采用原子吸收分光光度法测定。

1.5 土壤磷饱和度

土壤磷饱和度(degree of phosphorus saturation, DPS)是指土壤胶体上已吸附磷的数量占土壤磷总吸附容量的百分数。土壤中磷的吸附量依赖于土壤自身的特性(如有机质、黏粒含量及无定形铁铝氧化物等),而在石灰性土壤中, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是影响吸附解吸的关键因素,故土壤磷饱和度计算公式为:

$$\text{DPS}_{(\text{Ca}+\text{Mg})\text{M}_3} = \text{P}_{\text{M}_3} / (\text{Ca}_{\text{M}_3} + \text{Mg}_{\text{M}_3}) \times 100\%$$

式中: P_{M_3} 、 Ca_{M_3} 、 Mg_{M_3} 分别为 Mehlich3 浸提剂提取的 P、Ca、Mg 的浓度(mmol/L)。

1.6 数据处理与分析

运用 SPSS 17.0 软件对数据进行方差分析,LSD 进行多重比较($P < 0.05$);用 Excel 2010 软件进行数据整理、制图,在 $P < 0.05$ 时分别以定位培肥 4 年土壤 Olsen—P、Mehlich3—P 和 DPS 为横坐标, $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 为纵坐标,采用分段线性模型计算矿区复垦土壤磷素流失的“突变点”。

2 结果与分析

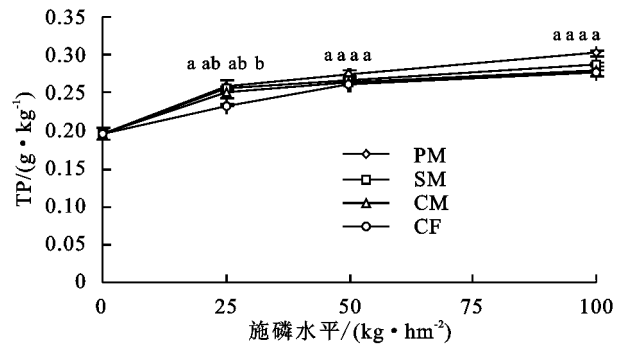
2.1 不同有机肥对矿区复垦土壤全磷含量的影响

不施磷肥(CK)处理土壤全磷含量为 0.20 g/kg;与 CK 处理相比,施磷显著提高土壤全磷含量(图 1)。施磷量 25 kg/hm²时,与化肥处理相比,鸡粪处理土壤全磷含量显著提高 10.69%,猪粪和牛粪与化肥处理之间无显著差异;而 3 种有机肥处理之间差异不显著。施磷量 $\geq 50\text{ kg/hm}^2$ 时,各施肥处理之间土壤全磷含量无显著差异。不同施肥处理对土壤全磷含量的影响总体表现为鸡粪 $\geq$ 猪粪 $\geq$ 牛粪 $\geq$ 化肥。

2.2 不同有机肥对矿区复垦土壤 Olsen—P 和 Mehlich3—P 的影响

不同施肥处理土壤 Olsen—P 含量表现出随施磷量的增加而迅速增加的趋势(图 2a)。不施磷肥(CK)处理土壤 Olsen—P 含量为 2.52 mg/kg;与 CK 处理相比,施磷处理土壤 Olsen—P 含量显著提高 2.87~10.66 倍,各施磷量之间差异显著。施磷 25 kg/hm²时,各施肥处理土壤 Olsen—P 含量无显著差异。施磷量为 50 kg/hm²时,与化肥处理相比,鸡粪

处理和猪粪处理分别显著提高 117.01% 和 56.71%,牛粪处理与化肥处理无显著差异;鸡粪处理与猪粪和牛粪处理差异显著,而猪粪与牛粪处理之间无显著差异。施磷 100 kg/hm²时,鸡粪处理土壤 Olsen—P 含量最高,为 29.61 mg/kg,各施肥处理差异不显著。



注:不同小写字母表示同一施磷量下不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理土壤全磷含量变化特征

各施肥处理对土壤 Mehlich3—P 的影响与 Olsen—P 的影响一致,也是随土壤施磷量的增加而增加(图 2b)。CK 处理土壤 Mehlich3—P 含量为 7.94 mg/kg;与 CK 处理相比,施肥对土壤 Mehlich3—P 含量显著提高 24.49%~340.65%。施磷量 $\leq 50\text{ kg/hm}^2$ 时,与化肥处理相比,鸡粪处理、猪粪处理分别显著提高 87.98% 和 38.92%,而牛粪与化肥处理差异不显著;3 种有机肥之间土壤 Mehlich3—P 含量差异显著。施磷量超过 50 kg/hm²时,与化肥处理相比,鸡粪、猪粪和牛粪处理分别显著提高 215.61%, 214.29% 和 46.74%;鸡粪与猪粪处理差异不显著,与牛粪处理差异显著。

2.3 不同有机肥对矿区复垦土壤对 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 和 DPS 的影响

由图 3a 可知,当施磷量 $\leq 50\text{ kg/hm}^2$ 时, $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 含量增加缓慢,各施肥处理之间无显著差异。施磷量超过 50 kg/hm²时 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 含量急剧上升,鸡粪处理土壤 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 含量最高,为 0.17 mg/kg;与化肥处理相比,鸡粪、猪粪和牛粪处理分别显著提高 112.50%, 50.00% 和 19.28%;3 种有机肥之间差异显著。

由图 3b 可知,DPS 与 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 变化趋势一致,随土壤施磷量的增加均呈现上升趋势。施磷量 $\leq 50\text{ kg/hm}^2$ 时,鸡粪、猪粪处理较化肥处理相比显著提高 57.76% 和 21.01%,牛粪与化肥处理之间无显著差异;鸡粪与猪粪处理、牛粪处理差异显著,而猪粪与牛粪处理之间无显著差异。施磷量 $> 50\text{ kg/hm}^2$ 时,与化肥处理相比,鸡粪、猪粪和牛粪处理分别显著提高 2.63, 2.71, 1.31 倍,牛粪处理与化肥处理之间无显著差异;鸡粪处理与牛粪处理差异显著,与猪粪处理相比无显著差异。

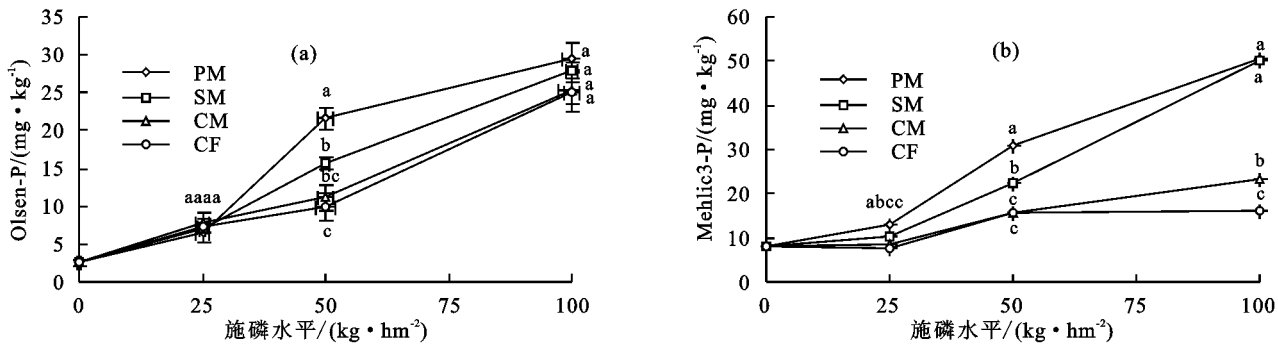


图 2 不同有机肥对土壤 Olsen-P 和 Mehlic3-P 的影响

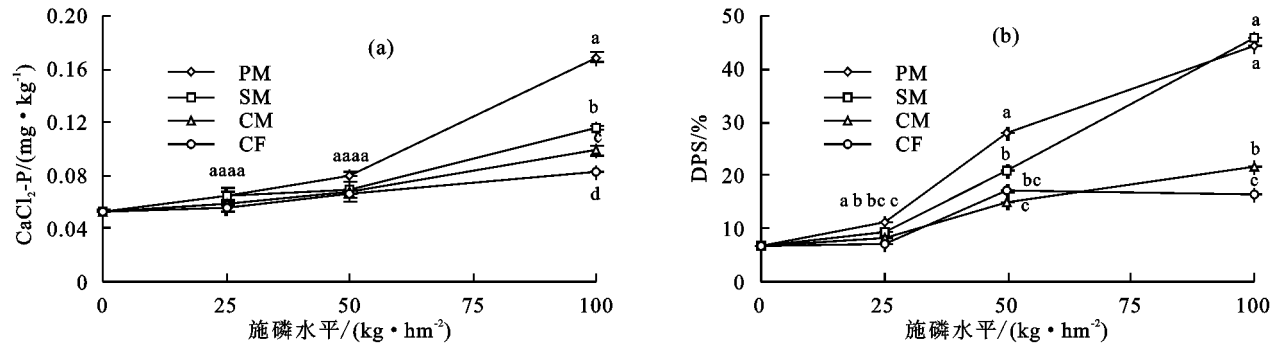


图 3 不同有机肥对土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 DPS 的影响

2.4 3 种浸提磷之间的相关性分析

由表 3 可知,各施肥处理土壤 3 种浸提磷之间存在显著的线性关系。鸡粪和猪粪处理土壤 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间存在 1 个突变点(图 4a),突变点时的 Olsen-P 含量为 26.24 mg/kg,对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量为 0.12 mg/kg,当土壤 Olsen-P $\geq$ 26.24 mg/kg, Olsen-P 每增加 1 mg/kg, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 以 4.09 倍的速率增加;此外,鸡粪处理土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 随 Mehlic3-P 的增加也存在 1 个突变点(图 4b),突变点时

的 Mehlic3-P 含量为 49.06 mg/kg,当 Mehlic3-P $\geq$ 49.06 mg/kg 时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 随 Mehlic3-P 含量的增加速率是突变点以前的 9 倍;猪粪处理 Mehlic3-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间尚未出现磷素流失的环境阈值。牛粪和化肥处理 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Mehlic3-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间存在显著的线性关系,但较鸡粪和猪粪处理相比累积程度较低,表明施用牛粪和化肥过程中,随着 Olsen-P 和 Mehlic3-P 的累积,也促进土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的提高,增加土壤磷素的流失潜能。

表 3 不同施肥处理 3 种浸提磷之间的相关性分析

处理	项目	方程	相关性	样品数
鸡粪	Olsen-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0030x+0.0380$	0.739**	12
	Mehlic3-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0020x+0.0290$	0.794**	
	Olsen-P(x), Mehlic3-P(y)	$y=1.4580x+3.5753$	0.976**	
猪粪	Olsen-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0040x+0.0310$	0.891**	12
	Mehlic3-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0020x+0.0310$	0.932**	
	Olsen-P(x), Mehlic3-P(y)	$y=1.6820x+0.2630$	0.972**	
牛粪	Olsen-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0020x+0.0459$	0.956**	12
	Mehlic3-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0027x+0.0326$	0.843**	
	Olsen-P(x), Mehlic3-P(y)	$y=0.6079x+6.0927$	0.918**	
化肥	Olsen-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0012x+0.0508$	0.768**	12
	Mehlic3-P(x), $\text{CaCl}_2\text{-P}(y)$	$y=0.0020x+0.0420$	0.429*	
	Olsen-P(x), Mehlic3-P(y)	$y=0.3408x+7.9892$	0.703*	

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

2.5 土壤 DPS 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的相关性及流失风险分析

土壤磷饱和度(DPS)是表征土壤磷素流失潜能的指标之一。在鸡粪处理中,DPS 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间

存在 1 个突变点(图 5),当 DPS 超过 39.31%, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量随 DPS 增加的速率是突变点以前的 5.92 倍,表明 DPS 超过 39.31% 时, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量迅速增加,土壤磷素的流失风险也大大提高。猪粪、牛

粪和化肥处理,DPS 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间也存在极显著的正相关关系,进一步表明,施用有机肥和化肥提高

矿区复垦土壤磷饱和度,增加了土壤磷素向环境流失的可能性。

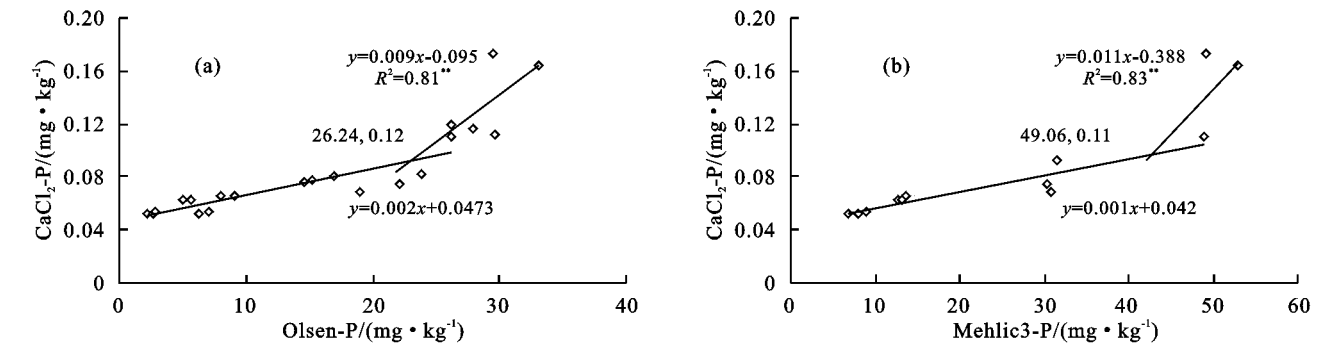
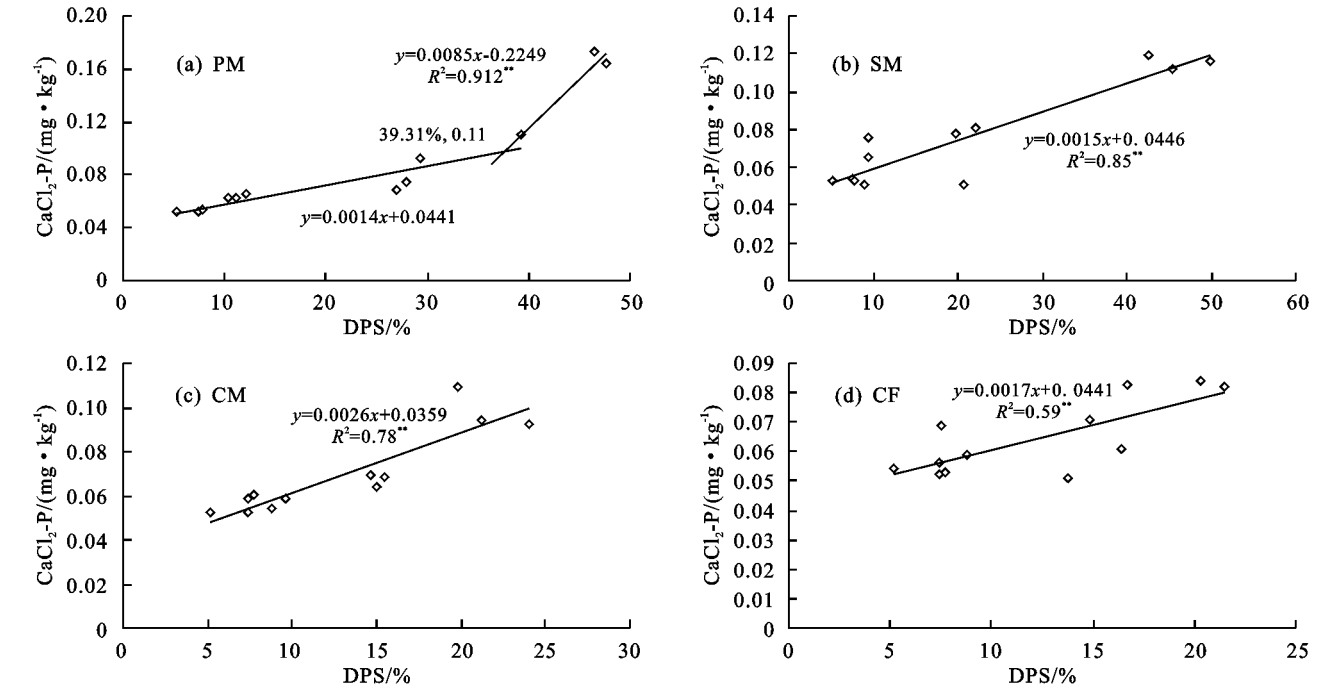


图4 矿区复垦鸡粪处理土壤有效磷(Olsen—P 和 Mehlich3—P)和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系



注: * * 表示极显著相关($P<0.01$);PM、SM、PM 和 CF 分别为鸡粪、猪粪、牛粪和化肥处理。

图5 不同有机肥土壤 DPS 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的相关性

3 讨论

3.1 施肥对矿区复垦土壤磷素累积的影响

本试验研究表明,随施磷水平的增加,施用有机肥和化肥提高了土壤全磷(TP)含量,这与陈欣^[27]研究结果基本一致,单施化肥或有机肥均能提高土壤全磷含量,增加土壤全磷库容。而3种有机肥相比,鸡粪处理土壤全磷含量高于猪粪和牛粪。施用有机肥和化肥也显著增加土壤中有效磷含量(Olsen—P 和 Mehlich3—P)。本试验研究发现,经过4年定位培肥试验,空白处理(不施磷肥施氮钾肥)有效磷含量仅为2.52 mg/kg,低于本试验复垦初期土壤磷素本底值(4.34 mg/kg),这与4年的作物生产吸收了土壤磷素而没有外来磷源补充有关,从而耗竭了土壤地力。此外,本研究进一步表明,在施磷量低于50 kg/hm²时,各处理间土壤有效磷含量(Olsen—P 和 Mehlich3—

P)无显著差异;而施磷量超过50 kg/hm²时,有机肥处理对土壤有效磷(Olsen—P 和 Mehlich3—P)含量的提高优于化肥。相较于化肥而言,有机肥本身含有一部分磷施入土壤后提高土壤中磷素含量,同时施用有机肥可以增加微生物活性和磷酸酶活性,加速有机磷的转化,从而提高磷素有效性,提高土壤的供磷强度^[14,28]。此外,3种有机肥对矿区复垦土壤磷素影响均表现为鸡粪≥猪粪>牛粪,这表明鸡粪和猪粪对矿区新复垦土壤磷素的有效性高于牛粪。造成这种差异的原因:一方面可能与有机肥本身的C/P不同有关。吕鉴于等^[11]对矿区复垦土壤磷素矿化研究表明,鸡粪和猪粪处理C/P分别为6.54和9.59,均低于牛粪处理(15.12),而较低C/P的有机肥更易矿化分解,导致鸡粪和猪粪产生的有效磷含量要高于牛粪处理。另一方面,可能与鸡粪和猪粪有机质含量高有关。刘彦伶等^[29]对黄壤磷素吸附—解吸特性研究表

明,有机质增加可以减少土壤对磷素的吸附位点,促进土壤磷素解吸,提高土壤中有效磷含量。本试验中鸡粪和猪粪较牛粪相比有机质含量较高,施入土壤后可以增加土壤中的有机质含量,而且有机质分解产生的有机酸减少土壤对磷素的吸附固定,溶解土壤中的难溶性磷化合物,增加其对土壤磷素的解吸能力,从而提高土壤中各磷素形态的有效性。 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 作为植物可直接吸收利用的部分,其含量随施磷量的增加而增加,在低磷量土壤中,施用有机肥主要补充土壤中有效磷和全磷含量,而对 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 增加幅度较小;在高磷水平下(100 kg/hm^2),随着土壤有效磷累积, $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 含量也快速增加,尤其是有机肥处理。土壤有效磷含量与 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 存在显著的线性相关性,表明 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 随有效磷含量的增加而增加,这在一定程度上也加大土壤磷素的淋失风险。

3.2 施肥对土壤磷素流失风险的影响

土壤有效磷 (Olsen—P 和 Mehlich3—P) 与 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 之间不是简单的线性关系,而是符合分段线性模型,两者之间存在 1 个突变点^[20]。本试验研究得出,矿区复垦土壤产生磷素淋失的临界点时土壤 Olsen—P 为 26.24 mg/kg 、Mehlich3—P 49.06 mg/kg ,其对应的 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 为 0.12 mg/kg 。但不同土壤类型磷素淋失临界值差异很大。常会庆等^[30]利用盆栽试验初步确定,石灰性土壤产生磷素淋失的环境阈值为 28.57 mg/kg ;申艳等^[31]通过长期定位试验研究表明,潮土区土壤磷素淋失临界值为 30.2 mg/kg ;汪玉等^[32]研究发现,土壤有效磷含量超过 30 mg/kg 时,太湖流域水稻土土壤磷素流失风险大大增加。以上研究结果均高于本研究成果,其原因一方面可能是由于矿区重构土壤结构尚不稳定,地表裂隙较多,且黄土丘陵区降水集中,施入的有机肥沿裂缝向下迁移,较一般农田土壤相比易引发磷素流失风险;另一方面,与本研究供试土壤 pH 偏高(8.43)有关。赵小蓉等^[33]对我国 23 种土壤磷素临界值研究表明,土壤 pH 与土壤磷素淋失阈值呈现抛物线关系,pH >6 时,pH 越高土壤产生淋失的点越低。同时,本研究得出,在矿区复垦土壤上施入有机肥所产生的淋失的风险高于化肥。这可能是由于化肥增加了土壤中的无机磷组分,这些施入土壤中的无机磷易被土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子固定,形成磷酸盐沉淀,降低磷素的有效性。而有机肥主要增加有机磷含量,尤其是活性有机磷含量,这部分磷在土壤中移动性更强,极易引发磷素的流失风险;同时,有机肥分解产生的有机酸可以溶解部分碳酸钙,促进被碳酸钙吸收的磷的

释放,提高磷素的有效性,间接增加有机肥的淋溶风险^[18]。此外,3 种有机肥磷素淋失风险的差异性(鸡粪 $\geq$ 猪粪 $>$ 牛粪)可能与有机肥中的磷素形态有关。鸡粪和猪粪中易溶态的无机磷和有机磷含量均高于牛粪,而易溶态有机磷包括核酸、磷酸酯类和单脂磷等,这部分有机磷吸附较弱,移动性强,易被酶解为无机磷,因此,鸡粪和猪粪较牛粪相比会存在更多的环境风险^[28]。

本试验研究结果表明,通过 4 年田间定位培肥得到矿区复垦土壤磷素产生淋失风险时的 DPS 为 39.31%。王经纬等^[34]认为,旱地红壤的 DPS 超过 28.6%,会增大土壤磷素流失潜能与淋失风险;薛巧云^[35]认为,可将 DPS 28.1%作为我国中性至石灰性土壤磷素淋失的环境阈值,前人研究结果与本研究成果基本一致,因此可将 DPS 39.31%作为矿区复垦土壤淋失阈值。同时也表明施用有机肥可以降低土壤对磷素的吸附固定作用,活化了土壤中的磷素,提高土壤磷饱和度和,从而加大磷素淋失风险。同时注意有机肥施用量,调整相应的施肥措施,减少因磷素流失所引起的环境污染问题。

4 结 论

(1)施用有机肥能够有效补充土壤中的磷素含量,随施磷水平的提高,土壤中磷素含量的增加越明显,促进磷素在土壤中的累积,提高土壤磷饱和度。各施肥处理对土壤磷素累积的影响总体表现为鸡粪 $\geq$ 猪粪 $>$ 牛粪 $>$ 化肥。

(2)本试验通过分段线性模型确定矿区复垦土壤磷素流失的环境阈值,当 Olsen—P $\geq 26.24\text{ mg/kg}$ 、Mehlich3—P $\geq 49.06\text{ mg/kg}$ 或 DPS $\geq 39.31\%$ 时,土壤磷素流失潜能加大,且施磷量越高,淋失风险越大。应加强有机肥的科学施用,特别是鸡粪和猪粪有机肥的施用,警惕磷素流失对地表、地下水体造成污染。

参考文献:

- [1] 曹寒冰,谢钧宇,王楚涵,等.不同施肥措施对旱地采煤塌陷区复垦土壤结构及玉米品质的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):251-257.
- [2] 山西省统计局.山西统计年鉴.2010[M].北京:中国统计出版社,2010.
- [3] 黄奇帆.伟大复兴的关键阶段:学习《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》的认识和体会[J].人民论坛,2021(15):6-10.
- [4] 陈倩,刘善江,白杨,等.山西矿区复垦土壤中解磷细菌的筛选及鉴定[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1505-1516.
- [5] 杨振兴,周怀平,解文艳,等.长期施肥褐土不同磷组分

- 对磷素盈余的响应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):924-933.
- [6] 王柏寒,黄绍敏,郭斗斗,等.长期定位施肥下潮土磷素盈亏及对无机磷的影响[J].中国农业科学,2019,52(21):3842-3851.
- [7] 刘一明.强化监管切实提高畜禽养殖粪污资源化利用水平:两部委解读《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》[J].中国食品,2020(15):20-22.
- [8] 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.
- [9] 武淑霞,刘宏斌,黄宏坤,等.我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J].中国工程科学,2018,20(5):103-111.
- [10] 吴浩玮,孙小洪,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176.
- [11] 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.
- [12] 戴佩彬.模拟条件下磷肥配施有机肥对土壤磷素转化迁移及水稻吸收利用的影响[D].杭州:浙江大学,2016.
- [13] 严正娟,陈硕,周怀平,等.施用粪肥对农田土壤磷素累积和饱和度增加速率的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1110-1118.
- [14] 李清华.畜禽有机肥磷的形态、养分矿化及流失潜力评价研究进展[J].安徽农学通报,2013,19(3):73-75.
- [15] 刘彦伶,李渝,张艳,等.长期施用磷肥和有机肥黄壤微生物量磷特征[J].中国农业科学,2021,54(6):1188-1198.
- [16] 朱晓晖,杜晓玉,张维理.有机肥种类对土壤有效磷累积量的影响及其流失风险[J].中国土壤与肥料,2013(5):14-18.
- [17] 肖辉,潘洁,程文娟,等.不同有机肥对设施土壤有效磷累积与淋溶的影响[J].土壤通报,2012,43(5):1195-1200.
- [18] 王敏锋,严正娟,陈硕,等.施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(7):1351-1359.
- [19] Hao X J, Zhang T Q, Chin S T, et al. Crop yield and phosphorus uptake as affected by phosphorus-based swine manure application under long-term corn-soybean rotation[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015,103(2):217-228.
- [20] Wang Y T, Zhang T Q, O'Halloran I P, et al. Agro-economic and environmental soil phosphorus tests for predicting potential phosphorus loss from Ontario soils [J].Geoderma,2015,241/242:51-58.
- [21] 严正娟.施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D].北京:中国农业大学,2015.
- [22] Wang Y T, Zhang T Q, O'Halloran I P, et al. Soil tests as risk indicators for leaching of dissolved phosphorus from agricultural Soils in Ontario[J].Soil Science Society of America Journal,2012,76(1):220-229.
- [23] Cordovil C M D S, Cobral F C, Coutinho J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops [J].Bioresource Technology, 2007,55(3):153-158.
- [24] 李玲玲,李书田.猪粪氮素有效性与替代化肥氮当量研究[J].中国土壤与肥料,2011(5):60-64.
- [25] 周博.日光温室栽培下有机肥氮素供应特性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [26] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1987:182-231.
- [27] 陈欣.长期施用有机肥对黑土磷素形态及有效性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [28] 邢璐.不同粪肥的施用对土壤磷素转化与迁移的影响[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [29] 刘彦伶,李渝,张萌,等.长期不同施肥对黄壤磷素吸附-解吸特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):450-459.
- [30] 常会庆,吴杰,王启震,等.石灰性土壤添加污泥后土壤的肥力特征及磷素淋失临界值[J].农业工程学报,2020,36(6):231-238.
- [31] 申艳,段英华,黄绍敏,等.潮土 $\text{CaCl}_2\text{—P}$ 含量对磷肥施用的响应及其淋失风险分析[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1689-1696.
- [32] 汪玉,袁佳慧,陈浩,等.太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J/OL].土壤学报:1-11[2021-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210809.1259.004.html>.
- [33] 赵小蓉,钟晓英,李贵桐,等.我国 23 个土壤磷素淋失风险评估Ⅱ.淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系[J].生态学报,2006,26(9):3011-3017.
- [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] 薛巧云.农艺措施和环境条件对土壤磷素转化和淋失的影响及其机理研究[D].杭州:浙江大学,2013.