

不同有机肥及用量对矿区复垦土壤有效磷含量及供磷特性的影响

张博凯^{1,2}, 郝鲜俊^{1,2}, 高文俊³, 秦璐^{1,2}, 孟会生^{1,2}, 张杰^{1,2}, 洪坚平^{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:为研究有机肥培肥复垦土壤过程中磷的有效性如何变化、不同有机肥在什么施磷水平下能使作物取得最大生产效率以及合理培肥土壤,依托采煤塌陷定位培肥试验基地(山西省孝义市偏城村),在4个磷水平下(0,25,50,100 kg/hm²)研究不同肥料(鸡粪、猪粪、牛粪和化肥)对玉米产量及土壤速效磷含量的动态变化。经过2年的田间试验,结果表明:(1)施用有机肥和化肥均能显著提高玉米籽粒产量,随着施磷量的增加,玉米籽粒产量呈先增加后基本不变的趋势,通过构建2年磷肥效应方程发现,化肥、鸡粪、猪粪和牛粪处理的最佳施磷量范围分别为67.54~83.02,24.91~38.65,26.10~29.26,50.33~58.38 kg/hm²,可见,3种有机肥推荐施磷量均小于化肥处理;(2)玉米吸磷量和磷肥利用率在各施磷水平下均表现为鸡粪>猪粪>牛粪>化肥。玉米吸磷量随施磷水平的增加呈先增后基本不变的趋势,磷肥当季回收率表现为随施磷水平的增加呈下降趋势;(3)连续施肥2年后,不同施肥处理在采煤塌陷区复垦土壤上影响的土壤有效磷深度不同。其中,化肥处理在50,100 kg/hm²磷水平下显著提高0—60 cm土层Olsen-P含量;鸡粪处理在50 kg/hm²磷水平下显著提高0—40 cm土层Olsen-P含量,而100 kg/hm²磷水平下显著提高Olsen-P含量到60 cm土层;猪粪处理在50,100 kg/hm²磷水平下显著提高0—40 cm土层Olsen-P含量;牛粪处理仅对表层Olsen-P含量有影响。总之,不同有机肥处理之间对作物生长和土壤Olsen-P含量的影响均表现为鸡粪>猪粪>牛粪,且不同有机肥对于新复垦土壤的推荐施肥量不同,鸡粪和猪粪的推荐施磷量最少,其次为牛粪处理。

关键词:有机肥;矿区复垦土壤;磷水平;速效磷;玉米

中图分类号:S141.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)02-0271-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.036

Effects of Different Organic Fertilizers and Amounts on Available Phosphorus Content and Phosphorus Supply Characteristics in Coal Mining Reclaimed Soil

ZHANG Bokai^{1,2}, HAO Xianjun^{1,2}, GAO Wenjun³, Qin Lu^{1,2},

MENG Huisheng^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, HONG Jianping^{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: This study aimed to study how phosphorus availability changes during soil reclamation with organic fertilizer and at what level of phosphorus application can different organic fertilizer make crops achieve maximum productivity and enriching the soil reasonable. For these reasons, a two-year experiment was conducted at the coal mining collapse test base (Piancheng Village, Xiaoyi city, Shanxi Province), with setting four fertilization types (chicken manure, pig manure, cow manure and fertilizer) and four phosphorus levels of 0, 25, 50 and 100 kg/hm² (pure phosphorus). The results showed that: (1) Different fertilization treatments could significantly increase the yield of corn grain yield. With the increase of phosphorus application, the corn grain yield increased first and then remained unchanged. Through constructing the two-year phosphorus fertilizer effect equation, it was found that the optimal phosphorus application ranges of chemical fertilizer, chicken manure, pig manure and cow manure treatment were 67.54~83.02, 24.91~38.65, 26.10~29.26 and 50.33~58.38 kg/hm², it can be seen that the optimal phosphorus application of three organic

收稿日期:2020-09-05

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资助项目;山西农业大学科技创新基金项目(2016ZZ14)

第一作者:张博凯(1996—),男,山西临汾人,在读硕士研究生,主要从事土壤学与矿区土壤复垦研究。E-mail:605270238@qq.com

通信作者:郝鲜俊(1976—),女,山西汾阳人,博士,教授,主要从事土壤学与矿区土壤复垦研究。E-mail:haoxianjun660@126.com

fertilizer is less than chemical fertilizer treatment. (2) The phosphorus uptake and apparent use efficiency of phosphate fertilizer of maize showed that chicken manure $\geq$ pig manure $>$ cow manure. The phosphorus uptake of maize increased first and then decreased with the increase of the phosphorus application levels, and the recovery rate of phosphate fertilizer decreased. (3) After continuous fertilization for two years, the depth of soil available P influenced by different fertilization treatments on the reclaimed soil was different. The content of Olsen—P in the 0—60 cm soil layer was significantly increased by the chemical treatment at the dosages of 50 and 100 kg/hm² phosphorus. However, the content of Olsen—P in 0—40 cm soil layer was significantly increased by chicken manure treatment at the dosages of 50 kg/hm² phosphorus, the content of Olsen—P in 0—60 cm soil layer was significantly increased by chicken manure treatment the dosages of 100 kg/hm² phosphorus. The pig manure treatment at the dosages of 50 and 100 kg/hm² phosphorus only significantly increased the content of Olsen—P in the 0—40 cm soil layer, and cow manure treatment only increased the content of Olsen—P in the surface layer. In a word, both the effects of different organic fertilizers on crop growth and soil Olsen—P content showed chicken manure $\geq$ pig manure $>$ cow manure. In addition, the different amounts of phosphorus was recommended to the newly reclaimed soil for different organic fertilizers, among which chicken manure and pig manure were least, followed by cow manure.

Keywords: organic fertilizer; mine reclamation of soil; phosphorus concentration; available phosphorus; corn

我国煤炭生产消费量位居世界第一,长期对煤炭资源的粗放式开采与利用,导致了严重的生态破坏与环境污染问题^[1],尤其是煤炭开采过程中的地表塌陷问题。据统计^[2],我国每采万吨煤炭土地沉陷面积为 0.1~0.3 hm²,截止 2014 年底我国煤炭生产量超过 670 亿 t,塌陷面积达 110 hm²,到 2020 年采煤塌陷区面积预计达到 150 hm²。《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”。因此,恢复采煤塌陷区土地是补充耕地的重要措施之一。

黄土丘陵区塌陷土地整治过程中通常采用混推复垦方式,但这往往造成上下土层错位翻动,土壤结构破坏,且塌陷土壤裂缝裂隙较大,容易造成养分向底层流失,致使土壤耕层肥力减退,尤其是土壤有效磷含量极低(仅有 1.87 mg/kg)^[3],从而限制作物生长,导致作物品质变差。为快速提高采煤塌陷区土壤磷素含量,促进作物生产,当地农民经常施用大量化学磷肥,然而由于石灰性土壤固磷作用强烈,普通农田磷肥当季利用率也仅有 10%~25%^[4],而矿区常年干旱少雨,蒸腾作用强烈,加剧了石灰性土壤磷素的固定,所以黄土丘陵区的石灰性土壤磷肥当季利用率比普通农田土壤更低,不仅造成资源浪费,同时由于裂缝较大,土壤磷素更容易向下迁移,从而导致污染地下水和地表水。随着我国规模化畜禽养殖业的发展,畜禽粪便排放量急剧增加。据统计,2007 年我国畜禽粪便产量达 26.43 亿 t,相当于同期化肥使用量的 0.50~0.91 倍,到 2020 年我国畜禽粪便产生量将达 41 亿 t^[5]。因此,畜禽粪便的合理处置是我国迫切需要解决的另一个重要问题。利用畜禽粪便培肥低产农田,尤其是采煤塌陷区新复垦土

壤,不仅能促进作物生长,还能有效提高土壤养分含量,改善土壤结构,对采煤塌陷区土壤生态建设、保护耕地面积总量具有重要意义。

目前,很多国内外学者研究表明有机肥对作物和土壤磷有效性的影响与有机肥的类型和施磷水平有关。如邱吟霜等^[6]在灰钙土上研究表明,生物有机肥、羊粪、牛粪对改善土壤肥力、提高玉米产量的顺序为生物有机肥 $>$ 牛粪 $>$ 羊粪;陈闯^[7]通过田间试验研究表明,鸡粪、牛粪与化肥相比玉米籽粒产量分别提高 2.50% 和 6.00%;朱晓晖等^[8]在砂质潮土上通过田间试验发现,不同有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)对土壤 Olsen—P 的影响不同,对土壤中有效磷和水溶性磷含量的影响与有机肥中有效磷含量成正比;Colomb 等^[9]在黏土上通过设置 4 个磷肥用量(0, 17.5, 35, 70 kg/hm²)研究表明,土壤有效磷含量、玉米对磷的吸收量和吸收速率在 35 kg/hm² 时达到最高,之后不再随磷肥用量增加而提高,表明在土壤施肥过程中,作物的施磷量并不是越高越好,而是有一个最佳施磷量。以往的研究大多在一般农田土壤,且有机肥在用量上比较粗放,没有考虑作物生长对磷素的需求,以及区域土壤的养分承载量。对于黄土丘陵区的新复垦土壤,现有的研究多集中于不同培肥方式对土壤磷素含量变化的研究。然而,不同有机肥在培肥过程中磷素有效性如何变化,不同有机肥分别在什么施磷水平下既可以取得最大的生产效率,又不造成养分资源浪费引起非点源磷的潜在流失风险等问题尚不清楚。为此,本试验依托山西省孝义市偏城村采煤塌陷区试验基地,研究鸡粪、猪粪和牛粪在不同施磷水平下对复垦土壤供磷能力和作物产量的影响,为科学合理施

用有机肥进行矿区复垦土壤培肥熟化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于山西省孝义市偏城村采煤塌陷区(37°06'N,111°37'E),海拔 990 m。2016 年 11 月采用平整土地工程技术措施进行工程复垦,土壤复垦前塌

陷深度约为 1.5~2.5 m,截止 2018 年已复垦 2 年。该区域属暖温带大陆性季风气候,春季回温较快,干燥少雨,夏季炎热,雨量集中,年平均为气温 10.1 ℃,有效积温为 2 500~3 500 ℃,全年无霜期为 165 天,年平均降水量为 474 mm。供试土壤为黄棕壤,质地为壤质黏土,各土层基本理化性质见表 1,2 年降雨量见表 2。

表 1 试验地土壤基本理化性质

土层 深度/cm	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—20	8.43	5.45	0.15	7.86	6.94	4.34	85.88
20—40	8.67	4.98	0.11	7.46	5.45	4.02	69.43
40—60	8.59	4.03	0.07	5.49	5.01	3.89	60.54

表 2 试验地 5—9 月降雨量 单位:mm

年份	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	生育期
2017	21.7	78.8	170.5	162.4	10.4	443.8
2018	71.1	29.6	176.7	37.5	55.8	370.7

1.2 供试材料

供试有机肥为腐熟鸡粪、牛粪和猪粪,采自偏城村养殖场,其基本理化性质见表 3。供试化肥氮、磷、钾分别为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)、硫酸钾(含 K₂O 52%);供试玉米品种为“承 950”,购自承德裕丰种业有限公司。

表 3 供试有机肥基本理化性质

年份	有机肥	pH	全氮 N/%	磷 P/%	全钾 K ₂ O/%	含水量/ %	有机质/ (g·kg ⁻¹)
2017	鸡粪	8.19	2.83	0.94	2.24	54.25	246.32
	猪粪	8.15	2.75	1.60	0.99	56.35	187.54
	牛粪	8.07	2.48	2.64	1.22	62.60	156.10
2018	鸡粪	8.10	1.16	0.33	1.05	52.92	218.21
	猪粪	8.16	2.15	0.52	0.96	63.80	178.87
	牛粪	7.98	0.62	0.22	0.27	45.20	155.56

1.3 试验设计

本试验于 2017 年和 2018 年进行 2 年的定位培肥,2017 年 5 月 4 日播种,10 月 6 日收获,2018 年 5 月 1 日播种,10 月 1 日收获。试验设置 3 种有机肥(鸡粪、猪粪、牛粪)和化肥,分别在 25,50,100 kg/hm²的磷水平下施用(以纯 P 计),以不施磷肥施氮钾肥处理作为空白对照(CK),共 13 个处理。化肥处理 3 个施磷水平分别表示为 CF25、CF50、CF100;鸡粪处理 3 个施磷水平分别表示为 CHM25、CHM50、CHM100;猪粪处理 3 个施磷水平分别表示为 PM25、PM50、PM100;牛粪处理 3 个施磷水平分别表示为 CM25、CM50、CM100。为了保证除磷以外的其他大量元素供应充足,各施肥处理的氮、钾肥用量分别为 200 kg/hm²纯氮和 100 kg/hm² K₂O,每个小区等养分处理。有机肥施用量根据每年所用肥料的养分分析结果,以全磷含量为标准折算。各有机肥处

理做基肥播前一次性撒施。若有机肥处理氮、钾养分不足,用化肥补齐。各施肥处理施用量见表 4。

各处理重复 3 次,共 39 个小区,随机区组排列。小区面积为 2 m×5 m(10 m²),各小区之间有宽 50 cm 的地垄。每年 5 月初采用免耕施肥播种机播种,种植密度为 6 万株/hm²,株距为 33 cm,行距为 50 cm,玉米生长期间栽培管理措施参照当地大田,全年旱作不灌溉。

表 4 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	K
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
CHM25	鸡粪	25	200	25	

分析》^[10]:土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;植株中磷含量采用 H₂SO₂—H₂O₂ 消煮,钒钼黄比色法测定;玉米产量的测定:将采集的玉米样品带回实验室,进行考种。地上部秸秆在 105 ℃下杀青 30 min,70~75 ℃烘至恒重,然后粉碎、过筛、测定。

1.5 计算公式

(1)作物吸磷量(kg/hm²)=籽粒产量(kg/hm²)×籽粒含磷量(%) + 秸秆产量(kg/hm²)×秸秆含磷量(%)[^{11]}

(2)磷肥当季回收率(PRE)(%)=(施磷肥处理作物当季吸磷量(kg/hm²) - 不施磷肥处理作物当季吸磷量(kg/hm²))/作物施磷量(kg/hm²)×100%

1.6 数据处理

运用 Excel 2010 进行整理、制图,通过对定位培肥 2 年的不同施肥类型和玉米籽粒产量分别拟合,构建回归模型;运用 SPSS 软件对不同施肥类型在不同磷水平下玉米籽粒产量、吸磷量、磷肥利用率、各土层有效磷含量进行双因素方差分析,采用 LSD 法,设置 α=0.05 为显著水平。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对玉米籽粒产量的影响

方差分析显示,施肥类型、磷水平及其二者的交互作用对玉米籽粒产量均有显著影响(表 5)。施肥处理较不施磷肥处理显著提高玉米籽粒产量,但提高

幅度取决于施肥类型、施磷水平及施肥年份(图 1)。不同施肥类型对玉米籽粒产量的提高表现为化肥≥鸡粪≥猪粪>牛粪,化肥、鸡粪、猪粪和牛粪较 CK 分别提高 41.36%~44.88%,39.59%~43.68%,38.02%~38.82%,29.05%~33.38%。各施肥类型均表现为随着施磷水平的提高呈先增加后基本保持不变的趋势。具体来看,化肥中 CF25 和 CF50 处理差异不显著,CF50 和 CF100 处理差异也不显著,而 CF100 处理第 1 年与 CF25 处理相比显著提高 14.59%,第 2 年与 CF25 处理差异不显著。鸡粪有机肥中 CHM50 处理玉米籽粒产量最高,2 年平均籽粒产量达 13.14 t/hm²,第 1 年与 CHM25 处理相比显著提高 14.05%,第 2 年与 CHM25 处理差异不显著。猪粪有机肥中 PM25、PM50、PM100 处理间差异不显著。牛粪有机肥与鸡粪趋势一致,CM50 处理玉米籽粒产量最高,平均籽粒产量达 12.04 t/hm²,第 1 年与 CM100 处理相比显著提高 13.67%,第 2 年 CM50 处理与 CM25 处理相比显著提高 18.90%,说明不同施肥处理推荐施磷量不同。

通过构建 2 年磷肥效应方程发现,化肥、鸡粪、猪粪和牛粪处理的最佳施磷量范围分别为 67.54~83.02,24.91~38.65,26.10~29.26,50.33~58.38 kg/hm²,玉米 2 年平均理论最高产量分别为 13.76,12.81,12.56,12.26 t/hm²(表 6)。

表 5 不同施肥处理对矿区复垦土壤各指标的双因素方差分析

年份	统计指标	磷水平		施肥类型		磷水平×施肥类型	
		F 值	p	F 值	p	F 值	p
2017	籽粒产量	12.76	<0.001	11.34	<0.001	4.93	0.002
	作物吸磷量	8.39	<0.001	23.38	<0.001	9.31	<0.001
	磷肥当季回收率	21.22	<0.001	156.17	<0.001	3.72	0.015
	土壤速效磷含量(0—20 cm)	15.31	<0.001	18.04	<0.001	5.74	0.001
	土壤速效磷含量(20—40 cm)	8.41	<0.001	7.15	0.003	2.78	0.030
	土壤速效磷含量(40—60 cm)	2.07	ns	2.84	ns	1.70	ns
	籽粒产量	13.22	<0.001	22.68	<0.001	9.39	<0.001
2018	作物吸磷量	28.36	<0.001	10.85	<0.001	4.86	0.001
	磷肥当季回收率	30.69	<0.001	191.32	<0.001	4.70	0.006
	土壤速效磷含量(0—20 cm)	62.51	<0.001	112.18	<0.001	12.32	<0.001
	土壤速效磷含量(20—40 cm)	4.38	0.013	13.84	<0.001	0.96	ns
	土壤速效磷含量(40—60 cm)	0.25	ns	1.74	ns	1.13	ns

注:p<0.05 表示差异显著;ns 表示无显著差异。

2.2 不同施肥处理对玉米吸磷量的影响

施肥类型、施磷浓度以及二者的交互作用对玉米吸磷量均有显著影响(表 5)。施肥处理较不施磷肥处理显著提高玉米籽粒产量,但提高幅度取决于施肥类型、施磷水平及施肥年限(图 2)。不同施肥处理对玉米吸磷量的提高幅度表现为鸡粪≥猪粪≥牛粪≥化肥。其中,鸡粪处理在 25 kg/hm²磷水平与等磷水

平下化肥、猪粪和牛粪处理差异不显著,但其值高于其他 3 种处理;鸡粪处理在 50,100 kg/hm²显著高于等磷水平下化肥和牛粪处理,与猪粪处理差异不显著。4 种施肥处理随磷水平提高呈先增加后基本不变的趋势(2017 年牛粪处理除外)。4 种施肥处理在各施磷水平玉米吸磷量均显著高于 CK。化肥在各施磷水平差异均不显著。鸡粪、猪粪有机肥在 50

kg/hm²磷水平玉米吸磷量最高,与 25 kg/hm²磷水平相比显著提高;而 100 kg/hm²磷水平与 50 kg/hm²磷水平差异不显著。牛粪有机肥在 25,50 kg/hm²磷水

平玉米吸磷量差异不显著,第 1 年 PM100 处理与 PM50 处理相比玉米吸磷量差显著降低 47.77%,第 2 年 PM100 处理与 PM50 处理差异不显著。

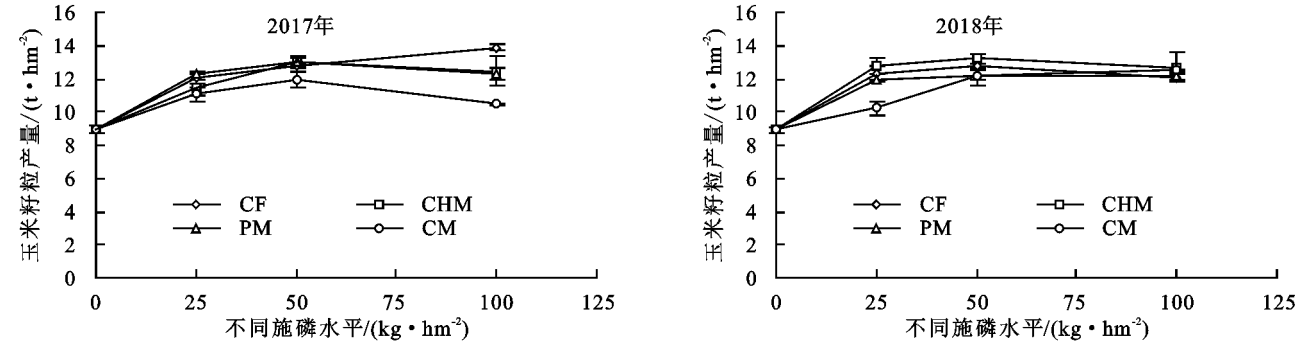


图 1 3 种有机肥和化肥在不同施磷水平对玉米籽粒产量的影响

表 6 不同施肥类型磷肥效应方程及最佳施磷量

年份	施肥处理	回归方程	R^2	最佳施磷量/ (kg · hm ⁻²)	理论最高产量/ (t · hm ⁻²)
2017	化肥	$y = -0.6929x^2 + 115.05x + 9221.50$	0.94 **	83.02	13.99
	鸡粪	$y = 0.100x + 8.964 (0 < x < 38.65), y = 12.83 (x \geq 38.65)$	0.96 **	38.65	12.83
	猪粪	$y = 0.143x + 8.964 (0 < x < 26.10), y = 12.70 (x \geq 26.10)$	0.94 **	26.10	12.70
	牛粪	$y = -0.8973x^2 + 104.78x + 8971.0$	0.99 *	58.38	12.03
2018	化肥	$y = -0.9611x^2 + 129.84x + 9137.8$	0.95 **	67.54	13.52
	鸡粪	$y = 0.156x + 8.901 (0 < x < 24.91), y = 12.79 (x \geq 24.91)$	0.93 **	24.91	12.79
	猪粪	$y = 0.120x + 8.901 (0 < x < 29.26), y = 12.41 (x \geq 29.26)$	0.93 **	29.26	12.41
	牛粪	$y = 0.075x + 8.717 (0 < x < 50.33), y = 12.49 (x \geq 50.33)$	0.96 **	50.33	12.49

注: * 表示该回归方程差异显著; ** 表示该回归方程差异极显著。

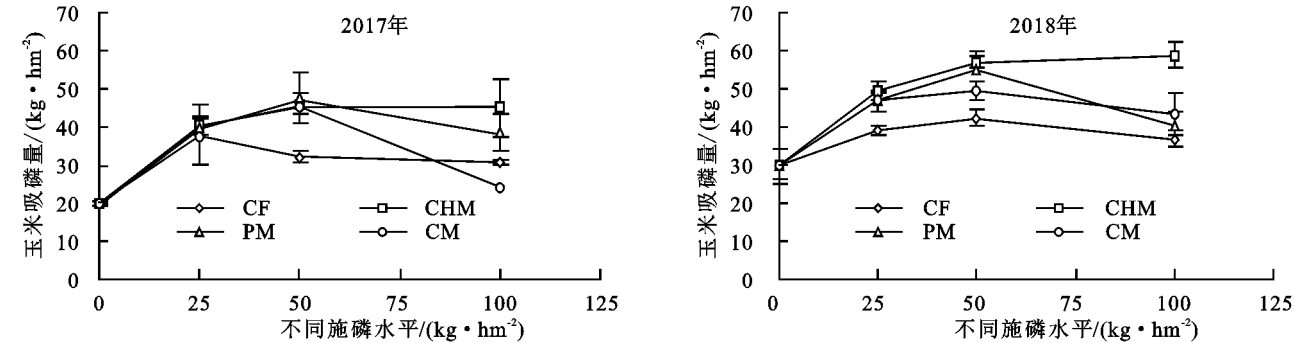


图 2 3 种有机肥和化肥在不同施磷水平对玉米吸磷量的影响

2.3 不同施肥处理对磷肥当季回收率的影响

施肥类型和磷水平及二者的交互作用对玉米磷肥当季回收率(PRE)均有显著影响(表 5)。通过 2 年的定位培肥试验,各施肥处理磷肥当季回收率在 25 kg/hm²磷水平下最高,显著高于 50,100 kg/hm²磷水平(图 3)。与化肥处理相比,施用有机肥均能提高磷肥当季回收率,不同施肥处理的磷肥当季回收率为鸡粪≥猪粪≥牛粪>化肥。

2.4 不同施肥处理对土壤剖面 Olsen—P 含量的影响

施肥处理主要提高表层土壤(0—20 cm) Olsen—P 含量,且随着土层深度的增加而下降。施肥类型、磷水平及二者的交互作用对 0—20,20—40 cm 土层 Olsen—P 含量均有显著影响;40—60 cm 土层,

施肥类型、磷水平及二者的交互作用均没有显著影响(表 5)。

施肥处理提高土壤 Olsen—P 含量,但不同的磷肥类型、施磷水平及施肥年限对土壤 Olsen—P 含量提高幅度不同。各施肥处理对土壤 Olsen—P 含量提高幅度表现为鸡粪≥猪粪≥化肥≥牛粪。随着施肥年限的增加,等磷量下有机肥处理对土壤表层 Olsen—P 含量的提高速度大于化肥处理,鸡粪、猪粪和牛粪处理较第 1 年分别增加 1.76~3.03 倍(PM25 处理除外),而化肥处理在各磷水平第 2 年基本没有增加。另外,随着施肥年限的增加,各施肥处理影响更深层土壤 Olsen—P 含量(表 7)。具体来看,第 1 年(2017 年)施肥,化肥中 CF50、CF100 处理与 CK 相

比,显著提高 0—40 cm 土层 Olsen—P 含量,其中 0—20 cm 土层分别提高 57.41%,157.66%;20—40 cm 土层分别提高 39.35%,73.87%。鸡粪有机肥中

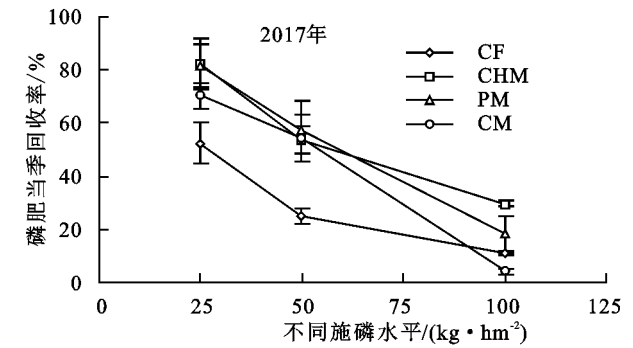
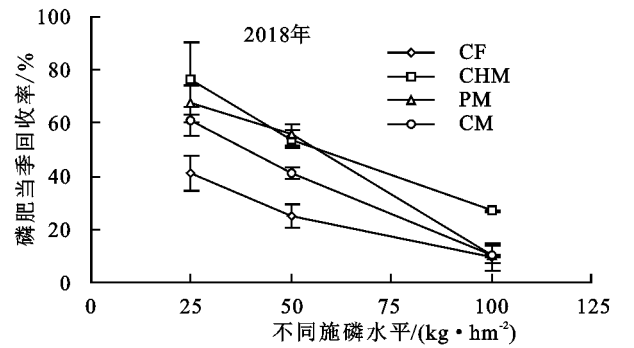


图 3 3 种有机肥和化肥在不同施磷水平对磷肥当季回收率的影响

施肥第 2 年,化肥中 CF50、CF100 处理显著提高 0—60 cm 土层 Olsen—P 含量,其中 0—20 cm 分别提高 91.02%和 252.99%;20—40 cm 分别提高 94.69%和 138.16%;40—60 cm 分别提高 64.58%和 58.67%。鸡粪有机肥中 CHM50 处理在 0—20,20—40 cm 土层 Olsen—P 含量与 CK 相比分别显著提高 329.34%和 136.23%;CHM100 处理显著提高 0—60 cm 土层 Olsen—P 含量,其中在 0—20,20—40,40—60 cm 土层分

CHM100 处理土壤表层(0—20 cm)Olsen—P 含量与 CK 相比显著提高 125.84%,其他各处理与 CK 相比差异不显著。



别提高 459.88%,187.44%和 60.89%。猪粪有机肥中 PM50、PM100 处理 0—40 cm 土层 Olsen—P 含量较 CK 有明显提高,其中,0—20 cm 土层分别提高 119.46%和 234.13%;20—40 cm 土层分别提高 110.63%和 161.84%。牛粪有机肥中 CM25、CM50 处理 Olsen—P 含量与 CK 相比差异不显著,CM100 处理土壤表层(0—20 cm)Olsen—P 含量与 CK 相比显著提高 119.46%,在 20—60 cm 土层差异不显著。

表 7 3 种有机肥和化肥在不同施磷水平对不同土层深度 Olsen—P 含量的影响 单位:mg/kg

处理	2017 年			2018 年		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	4.18±0.65b	3.10±0.33c	2.85±1.06a	3.34±0.23d	2.07±1.13e	2.71±0.68b
CF25	5.16±0.15b	2.81±0.64c	1.83±0.58a	4.99±1.29cd	3.19±0.90cde	3.40±0.23ab
CF50	6.58±1.23b	4.32±0.30b	2.24±0.00a	6.38±0.63c	4.03±0.49bcd	4.46±0.90a
CF100	10.77±0.80a	5.39±0.61a	2.95±1.21a	11.79±0.00b	4.93±0.22ab	4.30±0.22a
CHM25	3.09±0.00b	3.10±0.75c	2.38±0.31a	7.54±4.34cd	2.87±0.00cde	3.02±0.68ab
CHM50	5.49±0.92b	2.82±0.00c	2.65±0.20a	14.34±0.96b	4.89±0.49ab	3.71±0.66ab
CHM100	9.44±0.80a	4.32±1.20bc	3.60±0.96a	18.70±1.02a	5.95±1.51a	4.36±0.49a
PM25	3.09±0.87b	3.25±1.22bc	2.52±0.42a	6.48±4.35d	3.18±0.32cde	4.57±1.33ab
PM50	3.60±0.83b	3.17±0.66bc	3.26±0.58a	7.33±1.91c	4.36±0.49bc	4.14±0.96ab
PM100	3.68±0.66b	3.46±0.57bc	3.88±1.78a	11.16±1.15b	5.42±0.00ab	4.14±1.99ab
CM25	3.24±0.67b	2.49±0.15c	2.86±0.29a	3.98±0.22d	2.71±0.23de	3.72±1.02b
CM50	3.31±0.22b	2.71±0.76c	2.75±0.43a	5.84±0.49cd	3.19±0.00cde	4.30±0.22b
CM100	3.49±0.93b	3.03±1.49bc	2.65±1.24a	7.33±2.40c	4.14±0.90cde	3.29±0.80b

注:表中数据为平均值±标准差;不同字母表示不同施肥处理在同一土层不同磷水平下差异显著($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同处理对玉米生长及供磷特性的影响

本试验供试土壤磷本底值较低,仅为 4.34 mg/kg,属于极低水平^[3],影响了籽粒和作物对磷的吸收,从而导致空白处理(不施磷肥施氮钾肥)玉米产量较低(2017 年和 2018 年玉米产量分别是 8.96,8.90 t/hm²)。本试验中化肥处理对玉米籽粒产量与鸡粪和猪粪处理差异不显著,但是显著高于牛粪处理,这与李燕青等^[12]在盐化潮土上的研究结果一致。李燕青等^[12]在冬小麦—夏玉米轮作系统下研究表明,鸡

粪和猪粪处理的玉米产量未与化肥处理表现出显著性差异,但牛粪处理的玉米产量显著低于化肥处理。本试验中化肥处理的玉米吸磷量和磷肥当季回收率显著低于 3

大(分别为 36.22% 和 34.61%),但均高于牛粪处理(13.54%);宋佳明等^[14]通过 5 年田间定位试验研究表明,施入鸡粪和猪粪处理较牛粪处理相比显著增加活性、中活性和中稳性有机磷的含量,且活性和中活性有机磷对作物吸磷总量直接贡献较大。另一方面,可能与鸡粪和猪粪中无机磷含量占全磷的比例高有关。邓佳等^[15]通过磷形态分级方法研究表明猪粪和牛粪中无机磷占全磷的比例分别为 87.33% 和 53.19%。

本试验各施肥处理对玉米籽粒产量和磷素吸收表现为随着磷水平的提高呈先增加后基本保持不变的趋势,各施肥处理在 50, 100 kg/hm² 磷水平(相当于 P₂O₅ 量 112.5, 225 kg/hm²)对玉米籽粒产量没有显著差异,这与赵靛等^[16]和王芳媛^[17]研究结果相似。赵靛等^[16]在北疆灰漠土(土壤磷本底值为 18.3 mg/kg)经过 2 年田间定位试验表明,在 75 kg/hm² 磷水平玉米产量最高,而随着施磷量的增加,在 150, 300 kg/hm² 施磷量下玉米籽粒产量没有显著提高。王芳媛^[17]在东北黑土(土壤磷本底值为 33.94 mg/kg)研究表明,在 80.7, 161.4 kg/hm² 磷水平玉米籽粒产量没有显著差异。因此施磷量并不是越高越好,而是有一个最佳施磷量。而对于矿区新复垦土壤(土壤磷本底值为 4.34 mg/kg),不仅是满足作物生长和培肥土壤,同时也要考虑重构土壤特征及不同施肥处理在土壤剖面 Olsen—P 的残留。通过构建磷肥效应方程发现,化肥、鸡粪、猪粪和牛粪的最佳施磷量范围分别为 67.54~83.02, 24.91~38.65, 26.10~29.26, 50.33~58.38 kg/hm²,可见,3 种有机肥处理推荐施磷量均小于化肥处理。这是由于有机肥改善了土壤理化性质^[18],以及微生物的活动调节了磷的供应,更符合作物的需求规律^[19],与化肥处理相比更有利于玉米的吸收利用,因此有机肥处理的推荐施磷量小于化肥处理。3 种有机肥中,鸡粪和猪粪最佳施磷量小于牛粪处理,这可能与有机肥性质有关。严正娟^[20]研究认为,鸡和猪是非反刍动物,消化道短,消化功能较弱,因而鸡粪和猪粪有效养分含量较高;牛属反刍动物,消化能力强,牛粪养分含量较低,所以鸡粪和猪粪处理提供给土壤的磷素较牛粪更多,因此鸡粪和猪粪处理推荐施磷量小。

除施肥类型和施磷水平影响玉米籽粒产量外,种植年份也影响玉米籽粒产量和吸磷量。本试验中牛粪处理 2017 年玉米籽粒产量和吸磷量表现为随着磷水平的提高呈先增后减的趋势,这可能与牛粪性质、气候因素有关。本试验中玉米生育期(5—9 月)2017 年降雨量(443.8 mm)高于 2018 年降雨量(370.7 mm)。另外,牛粪磷素含量较低,且质地细密,含水分较多,分解慢,发热量低,因此牛粪处理在 100 kg/

hm² 磷水平下牛粪施入量大,带入大量的有机质,从而使有机碳含量过高,影响了玉米根系吸收磷素养分以及磷的转运过程,导致玉米籽粒产量下降。本试验中,各施肥处理 2018 年玉米吸磷量均高于 2017 年,这可能是由于随着施肥年限的增加,土壤 Olsen—P 含量也不断提高,从而提高磷的吸收。

3.2 不同处理对土壤 Olsen—P 含量的影响

本试验中,施肥第 1 年化肥处理对土壤 Olsen—P 含量的提高最大,其次为鸡粪,而随着施肥年限的增加,施肥第 2 年有机肥处理对土壤 Olsen—P 含量的提高超过化肥处理。这可能是由于随着施肥年限的增加,施入有机肥使土壤中的有机质含量增加。Kurnain^[21]研究认为,有机质的加入可与磷竞争土壤中的吸附位,减缓土壤基质对磷的吸附作用,提高土壤有效磷含量。随着施肥年限的增加,有机肥料中的有机磷在土壤中的矿化分解也促进速效磷含量的提高,增强磷肥的有效性。不同有机肥之间对表层土壤(0—20 cm)Olsen—P 含量的影响与玉米吸磷量和磷肥当季回收率一致,表现为鸡粪≥猪粪≥牛粪。

各施肥处理土壤 Olsen—P 含量均表现为随着施磷水平的提高呈增加趋势,这与肖辉等^[22]研究结果相似。本试验中化肥处理对 20—60 cm 土层 Olsen—P 含量有显著影响,这一结果与一般农田土壤不同^[23-24]。由于磷在土壤中移动性较差,施肥在短期内(3~5 年)不会引起农田土壤剖面尤其是 20 cm 以下土层的 Olsen—P 含量提高,而本研究结果可能与重构土壤结构和矿区特殊立地条件有关。矿区重构土壤结构尚不稳定,且黄土丘陵区常年干旱少雨,地表裂缝、裂隙较多,施入的磷肥容易沿着土壤裂缝、裂隙向下迁移,从而造成土壤剖面 Olsen—P 含量较高。本试验中 3 种有机肥处理对 20—60 cm 土层 Olsen—P 含量的影响均比化肥处理小,这与 Brock 等^[25]研究结果相似。Brock 等^[25]通过土柱试验认为,化肥与有机肥相比更容易造成磷的淋溶和渗漏,其原因可能与施有机肥会堵住土壤大孔隙有关。另外,黄土丘陵区重构土壤,团粒结构差,而且微生物区系少,有机肥的施入,促进土壤微生物的生长、繁殖,影响伴随粒子组成(Ca²⁺、Mg²⁺、Fe³⁺、Al³⁺),同时调节土壤中 P 的吸收和转运,而且有机质的加入可能增加土壤团粒结构,促进玉米的定植和生长,与化肥处理相比更有利于玉米中磷的吸收,所以有机肥处理对 20—60 cm 土层 Olsen—P 含量的影响均比化肥处理小。不同有机肥处理及磷水平对土壤 Olsen—P 含量影响不同,经过 2 年定位培肥试验后,鸡粪和猪粪处理在 50, 100 kg/hm² 磷水平较牛粪处理显著影响 20—40 cm 土壤 Olsen—P 含量,甚至鸡粪处理在 100 kg/hm² 磷水平显

著提高 40—60 cm 土层 Olsen—P 含量,深层土壤 Olsen—P 含量的提高容易引起土壤磷素流失,增加环境风险,因此在鸡粪和猪粪处理要注意磷肥使用量,在 25~50 kg/hm² 磷水平较适宜。

4 结论

(1)本试验中各施肥处理均显著提高玉米籽粒产量和磷的吸收,不同施肥处理玉米籽粒产量表现为化肥≥鸡粪≥猪粪>牛粪,连续 2 年玉米吸磷量及磷肥表观利用率均表现为鸡粪≥猪粪≥牛粪≥化肥。连续 2 年各施肥处理玉米吸磷量均表现为随磷水平的增加呈先增加后基本不变的趋势,磷肥当季回收率表现为随磷水平的增加呈下降趋势。通过构建磷肥效应方程,鸡粪、猪粪、牛粪和化肥处理最佳施磷量范围分别为 24.91~38.65,26.10~29.26,50.33~58.38,67.54~83.02 kg/hm²。在最佳施磷量时,化肥处理磷肥当季回收率达 15%~20%,鸡粪和猪粪处理达 65%~80%,牛粪处理在 40%左右。

(2)施肥处理对土壤 Olsen—P 含量提高幅度表现为鸡粪≥猪粪≥化肥≥牛粪。各施肥处理土壤有效磷含量均表现为随施磷水平的提高呈增加趋势,且随着施磷水平的增加影响更深层土壤 Olsen—P 含量。

总之,不同有机肥之间对作物生长和土壤 Olsen—P 含量的影响均表现为鸡粪≥猪粪>牛粪,且不同有机肥对于新复垦土壤的推荐施肥量不同,鸡粪和猪粪的推荐施磷量最少,其次为牛粪处理。

参考文献:

- [1] 卞正富,雷少刚,金丹,等.矿区土地修复的几个基本问题[J].煤炭学报,2018,43(1):190-197.
- [2] 梁海林.采煤塌陷区综合治理的有效措施[J].煤炭工程,2015,47(12):71-73.
- [3] 王颖,冯仲科.平朔矿区开采受损及治理区土壤养分特征对比分析[J].水土保持通报,2019,39(1):91-97.
- [4] 杨丽娟,李天来,周崇峻.塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J].水土保持学报,2009,23(5):205-208.
- [5] 陆文聪,马永喜,薛巧云.集约化畜禽养殖废弃物处理与资源化利用:来自北京顺义区农村的政策启示[J].农业现代化研究,2010,31(4):488-491.
- [6] 邱吟霜,王霜娜,李培富,等.不同种类有机肥及用量对当季旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(6):182-189.
- [7] 陈闯.不同有机肥及其混施对土壤微生物学特性及玉米产量的影响[D].长春:吉林农业大学,2015.
- [8] 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.
- [9] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(2):154-165.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,1987:182-231.
- [11] 吴启华,刘晓斌,张淑香,等.施用常规磷水平 80%可实现玉米高产、磷素高效利用和土壤磷平衡[J].植物营养与肥料学报,2016,22(6):1468-1476.
- [12] 李燕青,温延臣,林治安,等.不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(11):1835-1846.
- [13] 孙羲,章永松.有机肥料和土壤中的有机磷对水稻的营养效果[J].土壤学报,1992,29(4):365-369.
- [14] 宋佳明,蔡红光,张秀芝,等.施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响[J].吉林农业大学学报,2019,42(6):707-712.
- [15] 邓佳,胡梦坤,赵秀兰,等.不同有机物料中的磷形态特征研究[J].环境科学,2015,32(3):1098-1104.
- [16] 赵靓,侯振安,李水仙,等.磷肥用量对土壤速效磷及玉米产量和养分吸收的影响[J].玉米科学,2014,22(2):123-128.
- [17] 王芳媛.施磷水平对松嫩平原连作玉米产量及土壤磷组分的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [18] 吴萍萍,李录久,耿言安,等.耕作与施肥措施对江淮地区白土理化性质及水稻产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):245-250.
- [19] 孟会生.配施菌肥对不同复垦年限土壤微生物多样性及磷有效性的影响[D].山西 晋中:山西农业大学,2015.
- [20] 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.
- [21] Kurnain A. Inhibition of phosphorus adsorption to goethite and acid soil by prganic matter[J]. International Journal of Soil Science, 2016, 11(3):87-93.
- [22] 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.
- [23] 李大明,柳开楼,叶会财,等.长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):633-640.
- [24] 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.
- [25] Brock E H, Ketterings Q M, Kleinman P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(3):269-281.