

高文俊, 张博凯, 郝鲜俊, 许庆方, 吕鉴于, 田超, 畅宝花. 有机肥对塌陷复垦土壤玉米产量和磷生物有效性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (4): 956-962

Gao WJ, Zhang BK, Hao XJ, Xu QF, Lü JY, Tian C, Chang BH. Effect of application with different manures on maize yield and phosphorus availability of reclamation soil in coal mining subsidence areas [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021, 27 (4): 956-962

有机肥对塌陷复垦土壤玉米产量和磷生物有效性的影响

高文俊¹ 张博凯^{2,3} 郝鲜俊^{2,3} 许庆方¹ 吕鉴于^{2,3} 田超¹ 畅宝花¹

¹ 山西农业大学草业学院 太谷 030801

² 山西农业大学资源环境学院 太谷 030801

³ 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心 太谷 030801

摘 要 采煤塌陷土地复垦是补充耕地资源的有效途径之一,然而土壤磷有效性低是限制矿区土地复垦和作物生产的重要因素之一。为了解施用有机肥后矿区复垦土壤中磷的有效性变化,基于作物磷素需求的有机肥施肥模式,进行采煤塌陷复垦土壤(山西省孝义市偏城村)田间试验,分析连续两年施用相同磷量(100 kg/hm²)的鸡粪、猪粪、牛粪和化肥对玉米产量和磷肥利用效率的影响。结果表明:(1)有机肥处理显著提高了玉米的籽粒产量和地上生物量。施肥第一年鸡粪处理增产效果显著高于猪粪和牛粪处理,第二年各施肥处理间差异不显著。玉米产量增加主要是提高了百粒重。(2)各施肥处理0-60 cm土壤剖面有效磷(Olsen-P)含量随土层深度增加呈下降趋势。其中0-20 cm土层有效磷含量鸡粪处理显著高于猪粪和牛粪处理,20-40 cm土层鸡粪和猪粪处理显著高于牛粪处理,40-60 cm土层处理间差异不显著。(3)连续两年施用有机肥及化肥后玉米磷肥利用效率为鸡粪>猪粪≈牛粪≈化肥。施鸡粪处理磷肥回收率最高,2017年和2018年分别为23.97%和26.99%。鸡粪处理农学磷有效性系数最高(1.47),明显高于猪粪处理(1.00)和牛粪处理(0.89)。总之,施用鸡粪显著提高了玉米产量和磷肥利用效率,可作为培肥矿区复垦土壤或与本研究区土壤类型相似的低产农田改良的推荐有机肥。(图4 表5 参31)

关键词 有机肥; 鸡粪; 采煤塌陷复垦土壤; 磷生物有效性; 玉米产量

Effect of application with different manures on maize yield and phosphorus availability of reclamation soil in coal mining subsidence areas

GAO Wenjun¹, ZHANG Bokai^{2,3}, HAO Xianjun^{2,3}, XU Qingfang¹, LÜ Jianyu^{2,3}, TIAN Chao¹ & CHANG Baohua¹

¹ College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

² College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

³ National Experimental Teaching Demonstration Center for Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract Low P availability is one of the major limiting factors for mine land reclamation, which is one of the effective ways to increase cultivated land resources. The mechanism of P availability change is unclear. Therefore, the experiment based on crop P requirement (100 kg/hm²) was conducted to study the effects of applying chicken manure, pig manure, cattle manure, and chemical fertilizer on maize yield, yield component, and P utilization efficiency in coal mining subsidence (located in Piancheng village, Xiaoyi City, Shanxi Province) in two consecutive years. The results showed that (1) maize yield and aboveground biomass were significantly increased by manure application, and the yield increase was mainly owing to the increase in 100-kernel weight of maize. The yield of chicken manure treatment was significantly higher than that of pig manure and cow manure in the first year; however, there was no significant difference in the second year. (2) Olsen-P content gradually declined with the increase in soil depth in the 0-60 cm soil layer; Olsen-P content for chicken manure was significantly higher than that of pig manure and cow manure in the 0-20 cm soil layer; Olsen-P content of chicken manure and pig manure was significantly higher than that of cow manure in the 20-40 cm soil layer; however, there was no significant difference in the 40-60 cm soil layer. (3) The phosphate utilization efficiency is as follows: chicken manure ≥ pig manure ≈ cow manure ≈ chemical fertilizer in two consecutive years. Chicken

收稿日期 Received: 2020-05-30 接受日期 Accepted: 2020-08-10

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和山西农业大学科技创新基金项目(2016ZZ14)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41601327), the Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province, and the Science and Technology Innovation Fund of Shanxi Agriculture University (2016ZZ14)

✉ 通讯作者 Corresponding author (E-mail: haoxianjun660@126.com)

manure treatment had the highest P recovery rate, at 23.97% in 2017 and 26.99% in 2018, and agronomy P availability coefficient (1.47), which was significantly higher than that of pig manure (1.00) and cow manure (0.89). In summary, chicken manure treatment can significantly increase maize yield and P utilization efficiency. This can be used as a recommended fertilization treatment for reclaimed soil in coal mining subsidence or low-yield farmland, similar to the soil type in this experiment.

Keywords manure; chicken manure; reclamation soil in coal mining subsidence area; phosphorus availability; maize yield

我国是世界上最大的煤炭开采国和消费国, 95%煤炭为井工开采方式生产, 由此导致地面塌陷或地表裂缝、裂隙, 造成土壤结构破坏、持水能力降低、土壤养分流失、生态环境恶化等一系列问题。截至2015年全国有110万 hm^2 地面采空塌陷区^[1]。山西为全国煤炭资源大省, 塌陷土地占全国塌陷面积的27.2%, 其中耕地塌陷达1 082 km^2 ^[2-4]。《全国土地利用总体规划》(2006-2020)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, 加快复垦进程, 恢复采煤塌陷土地是补充耕地资源的重要途径。

采煤塌陷区土地通常先进行工程复垦, 而工程复垦后土壤心土层覆于表土层之上, 造成土壤养分贫瘠、“缺氮少磷”问题突出。为快速恢复复垦土壤肥力, 提高作物产量, 当地农户通常施入大量无机磷肥。然而, 石灰性土壤中大部分磷被土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子固定为植物难以利用的非有效态积累于土壤中^[5], 据报道石灰性土壤的磷素当季利用率不足15%, 黄土丘陵的矿区土壤常年干旱少雨, 蒸腾系数极大, 磷素利用率更低^[6], 磷有效性低成为限制矿区复垦进程和作物生长的重要因子^[7]。2015年我国提出化肥农药零增长, 合理利用有机肥提高土壤磷有效性^[8], 减少磷流失风险, 成为农业和环境关注的热点问题。有机肥中磷的有效性与畜禽动物种类和磷素形态有关^[9-10]。Barnett等通过分析猪、家禽、牛和羊粪中磷素形态发现, 不同形态磷组分含量差异较大, 其中无机形态磷占总磷的35%-63%, 酸溶性态磷占8%-53%, 残留磷占11%-41%。李国华通过比较分析不同畜禽粪便中有效磷和全磷含量, 结果表明猪粪、鸡粪、牛粪的总磷含量差异较大, 分别为14.9 g/kg、13.4 g/kg和5.8g/kg, 而且有机肥中有效磷占总磷的比例也不相同(48%、69%、87%)^[11]。张田等研究表明, 连续4年施用不同有机肥后, 土壤表层中速效磷占全磷比例较化肥处理明显增加, 施用猪粪效果最显著^[12]。有机肥施入土壤后对作物的有效性随土壤类型和气候条件而异。Killorn和Lorimor在美国爱荷华州试验表明, 有机肥施用当年有效性为60%-100%^[13], 而在北美其他地区其有效性为40%-100%。通

常根据作物氮素需求确定农业生产中有机肥施用量。然而, 有机肥的N/P为3:1, 而多数作物的最佳吸收N/P是7:1, 以作物需氮量的施肥方式往往造成农田表层土壤磷含量的剧烈上升^[14], 导致非点源磷的潜在流失风险^[15]。为减少农田土壤磷流失风险, 发达国家提出基于作物磷素需求的施肥方式^[16], 这种方式通常是基于有机肥的全磷含量, 而没有考虑不同有机肥中磷的有效性。有机肥中磷在土壤中的有效性如何? 不同有机肥在同一施磷水平下是否影响植物产量和磷的吸收? 目前相关研究报道很少。我国有机肥用量上比较粗放, 而且未充分考虑作物生长所需养分比例及区域土壤养分状况^[17]。矿区新复垦土壤属重构土壤, 有机肥或化肥施用如不合理, 不仅造成肥料利用率低和资源浪费, 而且过量磷素在雨季沿地表裂缝或裂隙淋溶到地下, 导致地表和地下水污染。为此, 我们采用基于作物磷素需求的有机肥施肥模式, 在同一施磷水平下研究鸡粪、猪粪和牛粪对矿区复垦土壤有效磷和植物产量的影响, 旨在评价不同有机肥的磷生物有效性, 为指导当地农民科学合理施用有机肥进行矿区土壤的培肥和低产田土壤改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验区概况 试验地点位于山西省孝义市偏城村采煤塌陷区(37°06'N、111°37'E), 复垦前塌陷深度约1.5-2.5 m, 2016年11月使用厦工50装载机进行混推工程复垦。该区域海拔990 m, 属暖温带大陆性季风气候区, 干燥少雨, 夏季炎热, 年均气温10.1 °C, 有效积温2 500-3 500 °C, 全年无霜期165 d。土壤为褐土, 偏碱, 有机质含量< 0.5%, 有效氮、有效磷和速效钾缺乏。土壤基本理化性质见表1, 降雨量见表2。

1.1.2 供试材料 供试有机肥为腐熟的家畜粪肥, 是目前我国农民经常采用的有机肥类型。腐熟鸡粪、牛粪、猪粪均采

表1 采煤塌陷复垦土壤基本养分状况

Table 1 Basic status of reclamation soil nutrients in the coal mining subsidence area

土层 Soil layers (δ/cm)	pH	有机质 Organic matter ($\text{OM}/\text{g kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{TN}/\text{g kg}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate N ($\text{NN}/\text{mg kg}^{-1}$)	铵态氮 Ammonium N ($\text{AN}/\text{mg kg}^{-1}$)	有效磷 Olsen-P ($\text{OP}/\text{mg kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{AK}/\text{mg kg}^{-1}$)
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5-10月降雨量

Table 2 Precipitation in the test site from May to October

年份 Year	5月 May	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	生育期 Growth period
2017	21.7	78.8	170.5	162.4	10.4	145.2	589.0
2018	71.1	29.6	176.7	37.5	55.8	2.5	373.2

表3 供试有机肥基本理化性状

Table 3 Basic physical and chemical properties of the tested manures

年份 Year	有机肥 Manure	pH	全氮 Total N (N/%)	全磷 Total P (P ₂ O ₅ /%)	全钾 Total K (K ₂ O/%)	含水量 Moisture content (P/%)	有机质 Organic matter (OM/g kg ⁻¹)
2017	鸡粪 Chicken manure	8.19	2.83	2.15	2.24	45.21	246.32
	猪粪 Pig manure	8.15	2.75	3.67	0.99	63.80	187.54
	牛粪 Cattle manure	8.07	2.48	4.89	1.22	52.92	156.10
2018	鸡粪 Chicken manure	8.10	1.16	0.75	1.05	52.92	218.21
	猪粪 Pig manure	8.16	2.15	1.19	0.96	63.80	178.87
	牛粪 Cattle manure	7.98	0.62	0.50	0.27	45.20	155.56

自偏城村养殖场。基本理化性质见表3。

供试化肥氮、磷、钾肥分别为尿素(含N 46.4%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 16%)和硫酸钾(含K₂O 52%)；供试玉米为承德裕丰种业有限公司生产的玉米品种承950，属于春播中晚熟玉米品种，株型紧凑，具有良好的抗旱性和抗病性。

1.2 试验设计

1.2.1 试验设计 采用随机区组设计，包括3个有机肥处理(鸡粪、猪粪和牛粪)和1个化肥处理，以不施磷肥(施氮肥和钾肥)作为对照，每个处理3次重复。有机肥和化肥处理在100 kg/hm²的磷水平下施用，为保证磷以外的大量元素供应充足，对照和各处理的氮、钾肥施用量分别为有效氮200 kg/hm²和K₂O 100 kg/hm² [18-19]，若氮肥和钾肥养分不足，用化肥补到同一水平。共有15个试验小区，每个小区为2 m × 5 m，小区间距0.5 m。种植密度6万株/hm²，株距28 cm，行距为50 cm，玉米生长期进行常规田间管理。

1.2.2 样品采集 植物样品采集：在2017年10月6日和2018年10月6日玉米成熟后，全部小区刈割测产，每个小区再随机取4株玉米植株切短，在105 ℃下杀青30 min，70-75 ℃烘至恒重，粉碎、过筛和测定。玉米穗带回实验室考种。

土壤样品采集：分别于2017年10月和2018年10月进行土壤样品采集。按照“S”采样法，每个小区分别在0-20 cm、20-40 cm、40-60 cm的土壤深度采集，每个土样采集8-10个样点混匀成一个土样，风干、过筛和养分测定。

1.3 测定指标与方法

土壤样本：土壤有机质用重铬酸钾容量法—外加热法 [20]，土壤容重用环刀法 [20]，土壤全氮用半微量凯氏法 [20]，土壤有效磷(Olsen-P)含量用0.5 mol/L NaHCO₃浸提、钼锑抗比色法 [20]，土壤中全钾含量用NaOH熔融、火焰光度计 [20]。

植物样本：植株中磷采用H₂SO₄-H₂O₂消煮、钒钼黄比色法 [20]。

作物吸磷量=籽粒产量×籽粒含磷量+秸秆产量×秸秆

含磷量 [21]

磷肥当季回收率(PRE)=(施磷肥处理作物当季吸磷量-不施磷肥处理作物当季吸磷量/作物施磷量×100% [21]

农学磷有效性系数=(施有机肥处理下一定土层含磷量+有机肥处理的作物吸磷量)/(施化肥处理下一定土层含磷量+化肥处理下作物吸磷量) [22]

施有机肥或化肥处理下土层含磷量=10⁴×土层深度×土壤容重×土壤有效磷浓度×10⁻⁶ [22]

其中，作物吸磷量、籽粒/秸秆产量、作物施磷量、土层含磷量单位为kg/hm²，籽粒/秸秆含磷量、回收率单位为%，土层深度单位为m，土壤容重单位为kg/m³，土壤中磷浓度单位为mg/kg。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010软件进行数据处理，用SPSS 25.0软件进行数据统计和分析。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥处理对玉米籽粒产量及其构成的影响

磷是农作物生长所必需的营养元素，参与植物的光合作用、呼吸作用及许多重要化合物的生物合成。从表4可以看出，不施磷肥的对照处理产量最低，第一年(2017)和第二年(2018)分别为8.96 t/hm²和8.90 t/hm²。连续两年施用化肥、鸡粪、猪粪和牛粪处理籽粒产量均显著高于对照，第一年产量比对照分别增加了49.55%、39.06%、36.83%和16.85%。与化肥处理相比，鸡粪和猪粪处理对籽粒产量没有显著影响。第二年施用化肥、鸡粪、猪粪和牛粪处理籽粒产量比对照分别提高了35.73%、42.58%、36.29%和34.16%，而各施肥处理间差异均不显著。

通过产量构成发现，施用有机肥显著提高了玉米百粒重，而对行粒数、穗行数和穗粒数影响不显著。第一年和第二年百

表4 不同有机肥对矿区玉米籽粒产量及产量构成的影响(N=3)

Table 4 Effects of different manure applications on grain yield and component of maize in the coal mining subsidence reclamation soil (N=3)

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (m/t hm ⁻²)	穗行数 Rows per ear	行粒数 Kernel numbers per row	穗粒数 Kernel numbers per ear	百粒重 100-kernel weight (m/g)
2017	对照 CK	8.96c	16.00ab	34.50a	552.00a	28.55c
	化肥 Chemical fertilizer	13.40a	15.00b	43.33a	647.00a	36.04a
	鸡粪 Chicken manure	12.46a	17.33a	34.00a	586.00a	34.28a
	猪粪 Pig manure	12.26ab	16.66ab	36.16a	596.33a	31.04b
	牛粪 Cattle manure	10.47bc	16.66ab	35.00a	595.50a	29.82bc
2018	对照 CK	8.90b	15.50a	43.50a	672.33ab	23.59b
	化肥 Chemical fertilizer	12.08a	16.00a	40.50a	643.33b	31.29a
	鸡粪 Chicken manure	12.69a	15.83a	45.00a	712.16a	29.72a
	猪粪 Pig manure	12.13a	15.50a	43.16a	663.16ab	30.56a
	牛粪 Cattle manure	11.94a	16.50a	38.33a	634.50b	31.41a

同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

Values with different letters in a column are significant among different treatments at the 5% level.

粒重比对照组分别提高8.70%-26.20%和25.98%-33.14%。

2.2 不同有机肥处理对玉米地上部生物量的影响

作物生物量的积累与土壤养分和肥料种类密切相关。施肥处理对玉米地上部生物量的影响与籽粒产量的影响一致(图1)。与对照相比,连续两年施用化肥、鸡粪和猪粪处理均显著提高了玉米地上生物量,分别提高了25.30%-28.70%(施肥一年)和26.56%-38.74%(施肥两年)。施牛粪处理与对照相比,第一年生物量差异不显著,第二年显著提高了34.03%。连续两年不同施肥处理对玉米地上部生物量的影响趋势为化肥 $\geq$ 鸡粪 $\approx$ 猪粪 $\geq$ 牛粪 $\geq$ 对照。

2.3 不同有机肥处理对玉米吸磷量的影响

作物吸磷量为籽粒吸磷量与秸秆吸磷量的总和,是反映磷肥利用效率的重要指标。与对照相比,各施肥处理均显著提高玉米吸磷量,第一年和第二年分别提高了110.3%-252.14%和31.54%-95.90%,随着施肥年限增加吸磷量提高幅度有降低趋势(图2)。有机肥处理中鸡粪处理的玉米吸磷量最高,施肥第一年和第二年较猪粪、牛粪和化肥处理分别提高了35.19%-66.94%和45.57%-49.11%。连续两年施肥处理对玉米吸磷量的影响趋势为鸡粪 $>$ 猪粪 $\approx$ 牛粪 $\approx$ 化肥 $>$ 对照处理。

2.4 不同有机肥处理对玉米收获后0-60 cm土壤剖面有效磷含量的影响

各施肥处理在0-60 cm土壤剖面中有效磷含量随土壤深度增加呈下降趋势,随施肥年限的增加磷素累积量相应增加

(表5)。3种有机肥处理在0-20 cm、20-40 cm和40-60 cm土层有效磷含量均表现为鸡粪 $\geq$ 猪粪 $\geq$ 牛粪处理,表明鸡粪处理对提高土壤磷水平效果最优。其中,在施肥第一年,鸡粪对提高土壤有效磷的效果与化肥相当,而第二年施用鸡粪的效果甚至高于化肥处理;猪粪与牛粪处理对土壤3个剖面(0-20 cm、20-40 cm和40-60 cm)磷水平的影响在第一年没有显著差异;而第二年猪粪处理较牛粪处理显著提高了0-20 cm土层有效磷含量,提高了50.06%。

2.5 不同有机肥处理对磷肥当季回收率的影响

连续两年施肥处理对磷肥当季回收率的影响一致,均为鸡粪 $>$ 猪粪 $\geq$ 牛粪 $\geq$ 化肥处理,即鸡粪处理的当季回收率最高,显著高于化肥处理;而猪粪和牛粪处理与化肥处理的当季回收率差异不显著(图3)。其中,第一年鸡粪处理较化肥处理提高了170.80%;第二年鸡粪处理较化肥处理提高了186.51%。

2.6 有机肥处理的农学磷有效性系数

有机肥的农学磷系数是基于同一施磷水平下有机肥对作物磷素吸收和地力提升效果与化肥的权重计算,如果有有机肥的农学磷系数大于1.0,说明有机肥的效应优于化肥,小于1.0则表明次于化肥。该指标兼顾了作物吸收和土壤磷水平的提高,反映了有机肥对土壤-作物系统的综合效应。施入土壤的磷肥主要累积在0-20 cm的表层土壤,所以不同有机肥的农学磷有效性系数只考虑累积在表层土壤的有效磷含量和作物吸磷量。鸡粪的农学磷有效性系数为1.47,猪粪为1.00,牛粪为

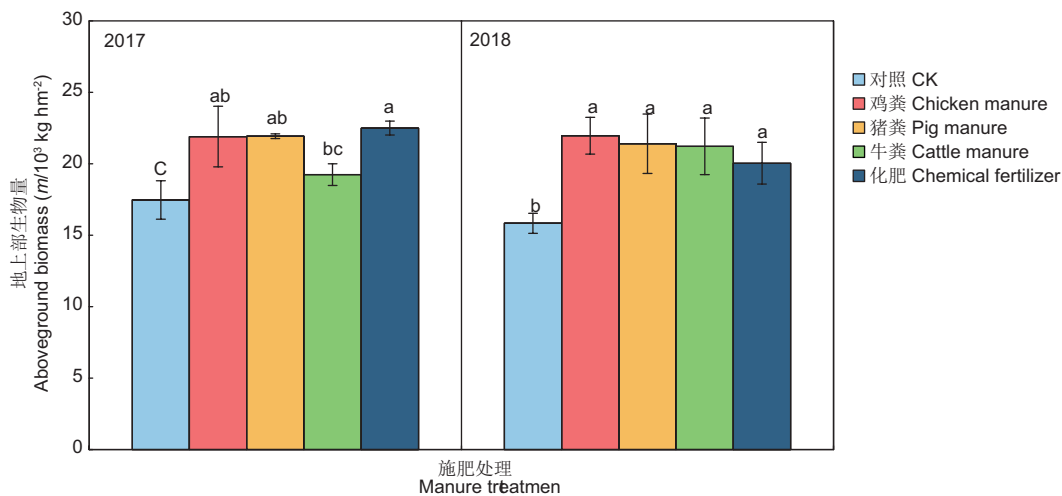


图1 不同施肥处理对矿区玉米地上部生物量的影响 ($N = 3$)。图中不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

Fig. 1 Effects of different manure applications on aboveground biomass of maize in the coal mining subsidence reclamation soil ($N = 3$). Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.

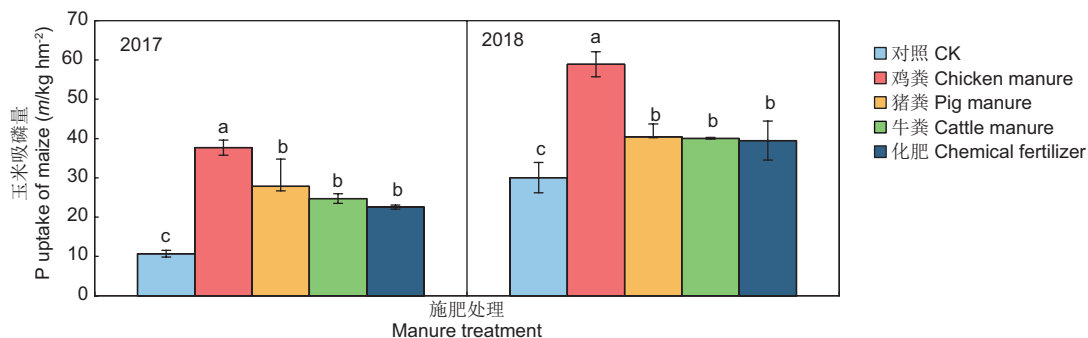


图2 不同有机肥处理对玉米吸磷量的影响 ($N = 3$)。图上不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

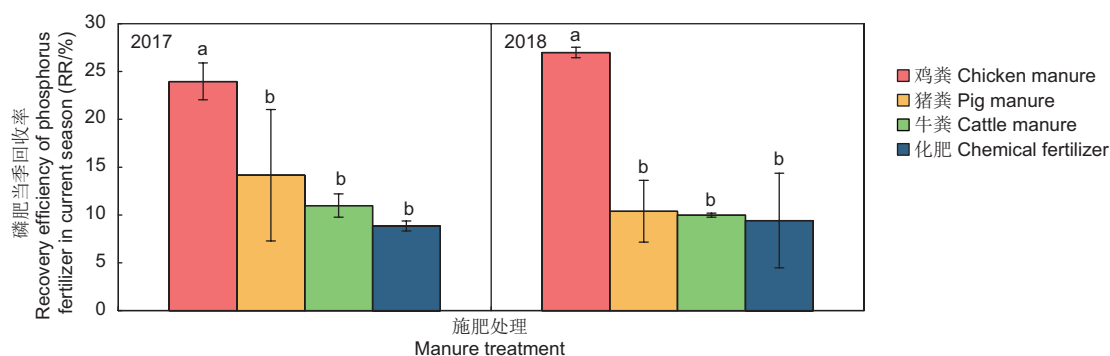
Fig. 2 Effects of different manure applications on P uptake of maize ($N = 3$). Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.

表5 施用有机肥对作物收获后0-60 cm土壤剖面有效磷含量的影响 ($N = 3$)Table 5 Effects of different manure applications on Olsen-P content in soil profile of 0-60 cm after crop harvest ($N = 3$)

处理 Treatment	有效磷含量 Olsen-P content ($\text{OP}/\text{mg kg}^{-1}$)					
	2017			2018		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
对照 CK	$3.74 \pm 0.21\text{b}$	$3.10 \pm 0.32\text{c}$	$2.73 \pm 1.10\text{c}$	$3.34 \pm 0.22\text{d}$	$2.07 \pm 1.12\text{b}$	$3.08 \pm 0.80\text{a}$
鸡粪 Chicken manure	$9.44 \pm 0.80\text{a}$	$4.31 \pm 1.19\text{ab}$	$3.06 \pm 0.96\text{b}$	$18.70 \pm 1.02\text{a}$	$5.95 \pm 1.50\text{a}$	$4.35 \pm 0.48\text{a}$
猪粪 Pig manure	$3.68 \pm 0.66\text{b}$	$3.46 \pm 0.56\text{bc}$	$2.85 \pm 0.28\text{bc}$	$11.15 \pm 1.14\text{b}$	$5.63 \pm 0.36\text{a}$	$4.14 \pm 1.99\text{a}$
牛粪 Cattle manure	$3.49 \pm 0.93\text{b}$	$3.03 \pm 1.48\text{c}$	$1.93 \pm 0.14\text{c}$	$7.43 \pm 3.80\text{c}$	$3.71 \pm 0.97\text{ab}$	$3.29 \pm 0.80\text{a}$
化肥 Chemical fertilizer	$10.76 \pm 0.80\text{a}$	$5.39 \pm 0.60\text{a}$	$4.386 \pm 0.72\text{a}$	$11.79 \pm 0.00\text{b}$	$5.73 \pm 1.38\text{a}$	$3.93 \pm 0.66\text{a}$

同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平。

Values with different letters in a column are significant among different treatments at the 5% level.

图3 不同有机肥施用对玉米磷肥当季回收率的影响 ($N = 3$)。图上不同字母表示处理间差异达5%显著水平。Fig. 3 Effect of different manure applications on recovery rate of P ($N = 3$). Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% levels.

0.89, 而且鸡粪的农学磷有效性系数显著高于猪粪和牛粪处理 (图4)。

3 讨论

3.1 不同有机肥处理对塌陷土壤玉米产量及其构成的影响

本研究中塌陷土壤复垦后有效磷含量较低, 仅为4.34 mg/kg, 属于极低水平, 影响了作物对磷的吸收, 从而造成空白处理的玉米籽粒产量 (分别为8.96 t/hm²和8.90 t/hm²) 和生物量均较低。施用化肥和不同有机肥均显著提高了玉米的籽粒产量, 并且不同处理对玉米产量与吸磷量的影响趋势一致, 均为化肥>鸡粪>猪粪>牛粪>空白处理。本研究中不同施肥处理的有效氮 (200 kg/hm²) 和钾 (100 kg/hm²) 均在同一水平施用, 且满足作物生长, 因此, 不同有机肥对玉米产量

的差异可能是由于有机肥中磷的有效性不同, 从而影响作物对磷的吸收。王晓慧和张立花的研究表明玉米吸磷量和籽粒产量之间呈极显著正相关关系^[23-24]。本试验中供试的3种有机肥中, 鸡粪处理的玉米产量和吸磷量最高, 说明鸡粪的磷生物有效性较高, 这一结果与严正娟的结论一致, 严正娟研究表明鸡粪磷的生物有效性高与所含活性有机磷组分 (H₂O-Po和NaHCO₃-Po) 占全磷的比例较高 (40.00%) 有关, 而猪粪与牛粪仅为33.10%和28.1%, 并且这部分活性磷在施入土壤后极易矿化^[25]。另外, 玉米产量的变化也与年季降雨量有关, 2018年玉米生育期降雨量为373.2 mm, 明显低于2017年的589.0 mm, 导致2018年施用化肥和猪粪处理的玉米产量低于2017年的处理 (2018年的化肥处理较2017年降低了6.70%, 猪粪处理降低了1.1%), 而2018年的牛粪处理和鸡粪处理玉米产量较上年 (2017年) 增加了14%和1.85%, 其原因可能与有机肥有效缓解干旱造成的玉米减产和维持玉米产量的稳定有关。从产量构成看, 连续两年施肥处理对玉米籽粒产量的提高, 主要是增加了玉米的百粒重, 而对行粒数、穗行数和穗粒数没有影响。

3.2 不同有机肥处理对0-60 cm土壤剖面有效磷含量的影响

施肥不仅提高玉米产量和生物量, 还提高土壤有效磷含量, 不同肥料种类对不同土层有效磷含量的影响有所差异^[26]。施肥第一年, 鸡粪和化肥明显提高了0-60 cm土层有效磷含量, 而猪粪和牛粪的提升效果不明显。在矿区新复垦土壤施用鸡粪和化肥一年就显著提高了0-60 cm土层有效磷含量, 这一结果与一般农田土壤^[8, 27]不同。由于磷在土壤中移动性较差, 所以施用有机肥在短期内 (3-5年) 不会引起土壤剖面尤其是20 cm以下土层的有效磷含量提高。本研究结果与普通农田结

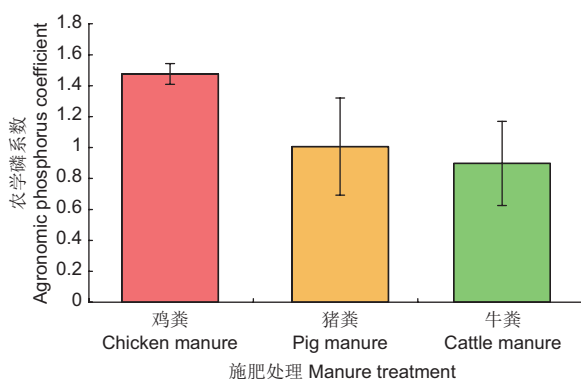


图4 不同有机肥处理农学磷系数。

Fig. 4 Agronomic phosphorus coefficient of different manures.

果不一致的主要原因,可能与重构土壤结构和矿区特殊立地条件有关。黄土丘陵区常年干旱少雨,矿区重构土壤结构尚不稳定,且地表裂缝、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(0-60 cm土层)有效磷含量较高。随着施肥年限增加,猪粪和牛粪施入土壤中的有效磷含量增加,0-20 cm土壤中的有效磷累积量显著提高,但牛粪处理显著低于其他有机肥处理,这可能与不同有机肥中磷的矿化及养分释放速率有关^[28]。有研究指出,非反当动物粪肥(鸡粪、猪粪)具有更易矿化分解的特征,导致其可以很快释放活性磷,而反当动物粪肥(牛粪)释放速度较慢^[25]。

3.3 不同有机肥处理对磷肥利用效率的影响

本研究中连续两年施用3种有机肥及化肥对磷肥当季回收率的影响一致,均表现为鸡粪 $\geq$ 猪粪 $\approx$ 牛粪 $\approx$ 化肥,即鸡粪处理的当季磷回收率最高,其原因与鸡粪中活性有机磷占全磷比例较高有关^[29](见3.1讨论)。另外,有机肥的施入可能减少了土壤对磷的固定^[30],从而增加土壤磷的供应和贮备,进而提高了土壤剖面有效磷的含量。3种有机肥的农学磷系数大小关系为鸡粪(1.47)高于猪粪(1.00)和牛粪(0.89),这一结果说明在矿区的新复垦土壤上,鸡粪的农学磷系数高于化肥,而猪粪与化肥相当,牛粪的农学磷系数则低于化肥。同时这个结果可以较好地解释3种有机肥对矿区新复垦土壤玉米产量和吸磷量的影响。本研究中猪粪的农学磷系数(1.00)与Hao等人在加拿大石灰性土壤中经过8年的玉米-大豆轮作生产计算

的猪粪农学磷系数相近(液体猪粪、固体猪粪和复合发酵态猪粪的农学磷系数分别为0.99、1.08和0.87,平均为0.98)^[31]。磷肥的当季回收率反映作物对当季磷肥的吸收利用效果,而有机肥的农学磷系数不仅考虑当季作物对磷的吸收,而且综合了土壤磷水平的提高,并通过与化肥的权重进行了量化^[28]。因此,有机肥的农学磷系数对高产高效作物生产和土壤培肥意义更大,尤其是指导农民进行矿区新复垦土壤的培肥改造。

4 结论

在采煤塌陷区,有效磷含量低是限制矿区土壤玉米生产和土壤复垦的重要限制因子。施用鸡粪、猪粪和牛粪3种有机肥,玉米产量、地上生物量、吸磷量、磷当季回收率、土壤剖面有效磷含量和农学磷有效性系数均有不同程度的提高。其中,施用鸡粪的玉米产量、地上生物量、土壤有效磷含量提升效果最为显著。鸡粪的农学磷有效性系数(1.47)显著优于化肥,而猪粪(1.00)与化肥相当,牛粪(0.89)则低于化肥。本研究中供试有机肥为腐熟的家畜粪肥,是目前我国农民经常采用的有机肥类型,研究结果可为指导当地农民科学合理施用有机肥进行矿区土壤培肥和低产田土壤改良提供理论依据。土壤有效磷含量与土壤中不同活性磷组分(活性磷组分、中稳性磷组分、稳定性磷组分)密切相关,为深入理解施用不同有机肥对采煤塌陷区土壤磷转化的机理,未来还应针对不同磷素形态及组分与土壤有效磷之间相关性进行系统分析。

参考文献 [References]

- 1 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 [Liang HL. Effective approaches in comprehensive treatment of coal mining subsidence [J]. *Coal Eng*, 2015, 47 (12): 71-73]
- 2 王赋. 山西省煤炭工业发展十二五规划中长期评估报告[R]. 太原: 山西省发展和改革委员会, 2013 [Wang F. Medium and long term assessment report on the development of Shanxi coal industry of 12th Five-Year Plan [R]. Taiyuan: Shanxi development and Reform Commission, 2013]
- 3 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J]. 资源·产业, 2005 (2): 18-24 [Bian ZF. Research on the recultivation and ecological reconstruction in coal mining area in China [J]. *Resour Ind*, 2005 (2): 18-24]
- 4 李新举, 胡振琪, 李晶, 张雯雯, 刘宁. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007 (6): 276-280 [Li XJ, Hu ZQ, Li J, Zhang WW, Liu N. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2007 (6): 276-280]
- 5 Malik MA, Marschner P, Khan KS. Addition of organic and inorganic P sources to soil – effects on P pools and microorganisms [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 49: 106-113
- 6 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (1): 260-268 [Wang YZ, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24 (1): 260-268]
- 7 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): 66-68 [Tong J, Liu LZ, Wu XH. Research on technical measures for land reclamation engineering in low diving bit coal mine area [J]. *Mine Surv*, 2008 (4): 66-68]
- 8 栗丽, 李廷亮, 孟会生, 谢英荷, 洪坚平. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤养分及微生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (6): 1156-1160 [Li L, Li TL, Meng HS, Xie YH, Hong JP. Effects of combined application of microbial agents and fertilizers on soil nutrients and microbial characteristics in reclaimed soil [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, 22 (6): 1156-1160]
- 9 Barnett GM. Manure P fractionation [J]. *Bioresour Technol*, 1994, 49 (2): 149-155
- 10 Sharpley A, Moyer B. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall [J]. *J Environ Quality*, 2000, 29 (6): 2053
- 11 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 GH. Phosphorus fractions in animal manure and soil phosphorus management in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015]
- 12 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯. 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 T, Xu H, Ru SH, Su DC. Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers [J]. *Environ Sci*, 2017, 38 (12): 5247-5255]
- 13 Newton GL, Bernard JK, Hubbard RK, Allison JR, Lowrance RR, Gascho GJ, Gates RN, Vellidis G. Managing manure nutrients through multi-crop forage production [J]. *J Dairy Sci*, 2003, 86 (6):

2243-2252

- 14 习斌, 翟丽梅, 刘申, 刘宏斌, 杨波, 任天志. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21** (2): 326-335 [Xi B, Zhai LM, Liu S, Liu HB, Yang B, Ren TZ. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, **21** (2): 326-335]
- 15 刘晓永, 王秀斌, 李书田. 中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38** (11): 2594-2608 [Liu XY, Wang XB, Li ST. Phosphorus loading rates from livestock and poultry faeces, and environmental evaluation in China [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2019, **38** (11): 2594-2608]
- 16 韩晓飞, 谢德体, 高明, 王子芳, 陈晨, 祁乐. 紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化[J]. 水土保持学报, 2016, **30** (6): 207-213 [Han XF, Xie DT, Gao M, Wang ZF, Chen C, Qi L. Effect of reduced phosphorus fertilizer combining organic fertilizers and phosphorus dynamics changes in purple soil [J]. *J Soil Water Conserv*, 2016, **30** (6): 207-213]
- 17 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014 [Jia W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014]
- 18 刘志恒, 徐开未, 王科, 解晋, 王佳锐, 赵亚妮, 陈远学. 不同施氮量对玉米产量及各器官养分积累的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, **44** (5): 573-579 [Liu ZH, Xu KW, Wang K, Xie J, Wang JR, Zhao YN, Chen YX. Effect of different nitrogen applications on maize yield and nutrient accumulation in different organs [J]. *J Zhejiang Univ (Sci-B)*, 2018, **44** (5): 573-579]
- 19 何萍, 徐新朋, 仇少君, 赵士诚. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20** (6): 1387-1394 [He P, Xu XP, Qiu SJ, Zhao SC. Yield response and economic analysis of fertilizer application in maize grown in North China [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, **20** (6): 1387-1394]
- 20 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000 [Bao SD. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000]
- 21 吴启华, 刘晓斌, 张淑香, 尹彩侠, 李桂花, 谢佳贵. 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 [Wu QH, Liu XB, Zhang SX, Yi CX, Li GH, Xie JG. Application of 80% of routine phosphorus rate to keep high yield and P efficiency of maize and P balance in soil [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, **22** (6): 1468-1476]
- 22 Hao XJ, Zhang TQ, Tan CS, Welacky T, Wang YT, Lawrence D, Hong JP. Crop yield and phosphorus uptake as affected by phosphorus-based swine manure application under long-term corn-soybean rotation [J]. *Nut Cycl Agroecosys*, 2015, **103** (2): 217-228
- 23 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 刘双利, 吕艳杰, 刘春光, 王永军, 王立春. 我国北方40个高产春玉米品种的磷素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21** (3): 580-589 [Wang XH, Cao YJ, Wei WW, Liu SL, Lv YJ, Liu CG, Wang YJ, Wang LC. Phosphorus utilization characteristics of forty spring maize hybrids with high-yielding potential in north of China [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, **21** (3): 580-589]
- 24 张立花. 施磷对小麦玉米轮作磷营养的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013 [Zhang LH. Effect of phosphorus on wheat, maize rotation phosphorus nutrition [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013]
- 25 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 [Yan ZJ. Effects of manure application on the form and mobility of soil phosphorus in vegetable greenhouse [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015]
- 26 高静. 长期施肥下我国典型农田土壤磷库与作物磷肥效率的演变特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009 [Gao J. Evolution characteristics of soil phosphorus pool and efficiency of phosphorus fertilizer in typical cropland of China under long-term fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009]
- 27 胡诚, 宋家咏, 李晶, 刘春清, 陶小娥, 陈云峰, 乔艳, 刘东海, 李双来. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21** (4): 673-676 [Hu C, Song JY, Li J, Liu CQ, Tao XE, Chen YF, Qiao Y, Liu DH, Li SL. Profile distribution of soil available phosphorus and available potassium concentrations and crop grain yields in long-term fertilization experiment [J]. *Ecol Environ Sci*, 2012, **21** (4): 673-676]
- 28 黄晶, 张淑香, 石孝均, 黄庆海, 聂军, 徐明岗, 张会民. 长期不同施肥模式下南方典型农田磷肥回收率变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24** (6): 1630-1639 [Hang J, Zhang SX, Shi XJ, Huang QH, Nie J, Xu MG, Zhang H. Change of phosphorus recovery efficiency under long-term fertilization in typical farmland in southern China [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2018, **24** (6): 1630-1639]
- 29 Sharpley AN, Smith SJ. Mineralization and leaching of phosphorus from soil incubated with surface-applied and incorporated crop residue [J]. *J Environ Qual*, 1989, **18** (1): 101
- 30 Bandyopadhyay KK, Misra AK, Ghosh PK, Hati KM. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean [J]. *Soil Tillage Res*, 2010, **110**: 125-135
- 31 Hao XJ, Zhang TQ, Wang YT, Tan CS, Qi ZM, Welacky T, Hong JP. Soil test phosphorus and phosphorus availability of swine manures with long-term application [J]. *J Agron*, 2018, **10** (5): 1943-1950