

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.025

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.025

周旋,张艳军,王建芳,等.煤矿区复垦土壤磷有效性对解磷菌肥的响应[J].水土保持学报,2026,40(2):318-328.

ZHOU Xuan, ZHANG Yanjun, WANG Jianfang, et al. Responses of phosphorus availability in reclaimed soil of coal mining areas to phosphate-solubilizing bacteria fertilizer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 318-328.

煤矿区复垦土壤磷有效性对解磷菌肥的响应

周旋,张艳军,王建芳,焦金钺,安晓虎,张杰,郝鲜俊,刘玉林,孟会生

(山西农业大学资源环境学院,山西太谷030801)

摘要: [目的] 比较复垦3a土壤配施解磷菌肥与未配施解磷菌肥对外源磷素吸附解吸特性的影响,研究配施解磷菌肥对复垦土壤磷吸附解吸特性、磷形态和土壤理化性质的作用,为提高磷肥的利用率、快速提升矿区复垦土壤生产力提供理论依据。[方法] 在山西省晋中市榆次区乌金山镇采矿陷区复垦试验基地进行试验,共设置7个处理小区,分别为不施肥(CK)、单施化肥(CF)、化肥配施解磷菌肥(CFP)、单施有机肥(M)、有机肥配施解磷菌肥(MP)、化肥有机肥(MCF)和化肥有机肥配施解磷菌肥(MCFP)。采集各处理下土样进行磷吸附动力学试验,计算出最大吸附量、最大缓冲容量、吸附饱和度和最大解吸量和解吸率,并分析土壤磷形态和理化性质与磷吸附解吸之间的关系。[结果] 配施解磷菌肥较相应未配施解磷菌肥处理降低土壤磷吸附量,增加土壤磷解吸量。其中,MP处理的土壤磷最大解吸量和解吸率最高,分别比其他处理增加32.87%~276.90%和38.76%~386.91%。配施解磷菌肥的土壤活性态磷和中活性态磷含量分别提高2.69%~7.29%和3.64%~8.96%,而稳定态磷含量降低2.14%~2.29%。与相应未配施解磷菌肥的土壤相比,配施解磷菌肥的土壤中有机质、有效磷和全磷含量均有所提高,但铝的水合氧化物和氢氧化物、交换性钙含量分别显著降低12.96%~15.71%和10.53%~12.45%。冗余分析表明,活性态磷是未配施解磷菌肥和配施解磷菌肥处理下磷吸附解吸特征参数的主要共同影响因子,其解释率分别为16.80%和77.20%。[结论] 配施解磷菌肥抑制土壤磷的吸附,促进土壤磷的解吸,从而提升外源磷的利用效率,削弱交换性钙对磷吸附解吸过程的调控作用,提高土壤有效磷含量,同时显著提高土壤团聚体稳定性和玉米产量。其中,有机肥配施解磷菌肥对复垦土壤磷有效性的提升效果最显著。

关键词: 解磷菌肥;复垦土壤;磷吸附解吸;有效磷;土壤理化性质;土壤团聚体稳定性

中图分类号:S154.2;S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2026)02-0318-11

Responses of Phosphorus Availability in Reclaimed Soil of Coal Mining Areas to Phosphate-Solubilizing Bacteria Fertilizer

ZHOU Xuan, ZHANG Yanjun, WANG Jianfang, JIAO Jincheng, AN Xiaohu,
ZHANG Jie, HAO Xianjun, LIU Yulin, MENG Huisheng

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

Abstract: [Objective] This study compares the effects of applying phosphate-solubilizing bacteria fertilizer (PSBF) and not applying it on the adsorption and desorption characteristics of exogenous phosphorus in 3-year reclaimed soil. It investigates the effects of PSBF applications on the phosphorus adsorption and desorption characteristics, phosphorus forms, and physicochemical properties, aiming to provide a theoretical basis for improving phosphorus fertilizer use efficiency and rapidly enhancing the productivity of reclaimed mine soils. [Methods] The experiment was carried out in the reclamation experimental base of the mining subsidence area in Wujinshan Town, Yuci District, Jinzhong City, Shanxi Province. Seven treatment plots were set up: no fertilizer (CK), chemical fertilizer alone (CF), chemical fertilizer combined with PSBF (CFP), organic fertilizer alone

收稿日期:2025-09-27

修回日期:2025-10-21

录用日期:2025-10-30

网络首发日期(www.cnki.net):2025-12-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41907215, U1710255-3);山西农业大学科技创新基金项目(2017ZZ08)

第一作者:周旋(2000—),女,硕士研究生,主要从事矿区土壤复垦与微生物多样性研究。E-mail:jane6898@126.com

通信作者:孟会生(1977—),男,博士,副教授,主要从事矿区土壤复垦与微生物多样性研究。E-mail:huishengmeng@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

(M), organic fertilizer combined with PSBF (MP), chemical fertilizer combined with organic fertilizer (MCF), and chemical fertilizer and organic fertilizer combined with PSBF (MCFP). Soil samples from each treatment were collected for phosphorus adsorption kinetics experiments. The maximum adsorption capacity, maximum buffering capacity, adsorption saturation, maximum desorption amount, and desorption rate were calculated. The relationships between soil phosphorus forms, soil physicochemical properties, and the amounts of phosphorus adsorption and desorption were analyzed. [Results] The treatments with PSBF reduced soil phosphorus adsorption amount and increased soil phosphorus desorption amount compared with the corresponding treatments without PSBF. The MP treatment exhibited the highest maximum desorption amount and desorption rate of soil phosphorus, increasing by 32.87% – 276.90% and 38.76% – 386.91%, respectively, compared to other treatments. With the PSBF application, the contents of soil active phosphorus and moderately active phosphorus increased by 2.69% – 7.29% and 3.64% – 8.96%, respectively, while the content of stable phosphorus decreased by 2.14% – 2.29%. Compared with soils without PSBF, soils treated with PSBF had higher organic matter, available phosphorus, and total phosphorus contents, but the contents of aluminum hydrated oxides/hydroxides and exchangeable calcium decreased significantly by 12.96% – 15.71% and 10.53% – 12.45%, respectively. Redundancy analysis (RDA) showed that active phosphorus was the main common influencing factor of phosphorus adsorption-desorption characteristics in the treatments without and with PSBF, and the explanation rates were 16.80% and 77.20%, respectively. [Conclusion] The PSBF application inhibits soil phosphorus adsorption and promotes phosphorus desorption, thereby improving the utilization efficiency of exogenous phosphorus. It weakens the regulatory effect of exchangeable calcium on phosphorus adsorption-desorption processes, increases soil available phosphorus, and significantly improves soil aggregate stability and maize yield. Among all treatments, organic fertilizer combined with PSBF shows the greatest improvement in phosphorus availability in reclaimed soil.

Keywords: phosphate-solubilizing bacteria fertilizer; reclaimed soil; phosphorus adsorption and desorption; available phosphorus; soil physicochemical properties; soil aggregate stability

Received: 2025-09-27

Revised: 2025-10-21

Accepted: 2025-10-30

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

山西省作为我国重要的煤炭资源基地,长期高强度的煤炭开采活动导致大面积土地退化和生态环境破坏,形成大量的废弃煤矿区和塌陷区。山西省近年来煤矿采空区的面积已累计至4 027.19 km²,占全省土地采空区总面积的96.67%,而由此产生的地面塌陷区域也达到1 200.00 km²,进一步加剧人与土地之间的矛盾。采煤塌陷区的土壤再利用成为亟待解决的重大问题,而矿区土地复垦则是增加有效土地利用面积的关键举措。但矿区复垦土壤的有效磷含量极低,成为植被恢复过程中的一个主要难题^[1]。

近年来,微生物复垦技术开始受到越来越多的关注。此项技术利用微生物的代谢活动进行生态修复,通过引入或激活特定功能微生物,不仅能迅速改善矿山废弃地的理化性质,创造出适宜植物生长的土壤环境,而且能加速土壤微生物群落的生物学特性恢复与重建^[2-4]。解磷菌肥作为一种新型生物肥料,其作用原理为解磷微生物通过其生长和代谢过程分泌的酶类,例如,磷酸酶、植酸酶等,能够水解土

壤中被固定的磷,进而将其转化为植物可吸收利用的可溶性磷酸盐。解磷菌肥能够有效激活土壤中被固定的磷,减少对化学磷肥的依赖,在一定程度上避免因过量施用磷肥导致的土壤和水体污染问题^[5]。

大量研究^[6-7]表明,施用有机肥能降低土壤磷的吸附,增强磷的解吸。施肥可以降低土壤对磷的吸附,增加解吸,提高土壤磷有效性,且同磷水平下有机肥效果优于化肥。目前菌肥配施研究涵盖多领域,包括土壤改良、作物生长及微生物群落调控等方面。施用菌肥能提高土壤有机质、速效磷、碱解氮和速效钾等含量。菌肥与有机肥配施可降低土壤N/P比,提高N、P有效性,与秸秆配施可改善盐碱土理化性质,提高团聚体稳定性^[8],且施菌肥大多聚焦于单层面的研究,而从土壤磷吸附解吸特性、磷形态和理化性质等多层面进行研究的相对较少。

本研究选取山西省晋中市榆次区乌金山镇采矿塌陷区复垦试验基地经过3 a复垦的土壤作为研究对象。旨在探索配施解磷菌肥对复垦土壤磷吸附解吸

特性、磷形态及理化性质的影响,阐明煤矿区复垦土壤磷有效性对解磷菌肥的响应规律,以便筛选出一种最适解磷菌发挥效果的施肥模式,为开发适应矿区特殊环境的新型解磷菌肥提供理论依据。研究结果对实现矿区复垦土壤磷素高效利用和生态可持续发展具有重要参考价值。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验设在山西省晋中市榆次区乌金山镇采矿塌陷区复垦试验基地(37°42'19"N, 112°57'19"E)。该地区属于温带大陆性季风气候,年平均气温9.5℃,降水量418~483 mm,年日照时间2 662 h,无霜期158 d。试验地于2022年开始复垦,2024年为土壤复垦第3 a。土壤类型为石灰性褐土,质地为中壤土。2022年复垦前采集0~20 cm的耕层土壤,土壤的pH为8.42,有机质(SOM)3.25 g/kg,全氮(TN)0.22 g/kg,全磷(TP)0.21 g/kg,碱解氮(AN)9.30 mg/kg,有效磷(Olsen-P)2.46 mg/kg,速效钾(AK)67.06 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置处理为不施肥(CK)、单施化肥(CF)、化肥配施解磷菌肥(CFP)、单施有机肥(M)、有机肥配施解磷菌肥(MP)、化肥有机肥(MCF)和化肥有机肥配施解磷菌肥(MCFP),共7个处理,每个处理3次重复,每个小区面积为60 m²(6 m×10 m),各小区间隔50 cm。试验地各处理肥料施用量见表1。

供试菌株为课题组从山西省石灰性土壤中筛选的2株解磷菌W134和W137,2株菌之间不存在拮抗作用,复合菌的解磷量为652.63 mg/L。2株菌采用LB液体培养基先单独培养,培养至对数生长期再与有机肥按一定比例均匀混合制成菌肥,有效活菌数 $\geq 2 \times 10^8$ CFU/g。供试有机肥为完全腐熟的鸡粪(pH 8.26,有机质33.55%,N 1.67%,P₂O₅ 1.23%,K₂O 1.08%),由山西五洲鑫农牧开发有限公司提供。供试化肥为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 52%)。供试作物为玉米,品种“东单1331”,2024年4月中旬播种,10月初收获。

1.3 样品采集与处理

每个小区在收获期随机采集30株玉米用于测定穗粒数、百粒质量并计算产量。在玉米收获后,于试验区采用五点采样法采集各处理0~20 cm的耕层土壤样品,共21份土样。剔除土样中植物残体、石砾等杂质,把每份土样混匀后用四分法弃去多余的土壤,风干过2 mm筛后用于测定各项指标。

表1 试验地各处理的肥料用量

Table 1 Fertilizer application amounts for each treatment in experimental area kg/hm²

处理	尿素	过磷酸钙	硫酸钾	有机肥	解磷菌肥
CK	0	0	0	0	0
CF	653	1 384	374	0	0
CFP	604	1 280	346	0	1 500
M	0	0	0	18 000	0
MP	0	0	0	16 500	1 500
MCF	327	692	187	9 000	0
MCFP	327	692	187	7 500	1 500

1.4 土壤理化性质、磷分级和磷等温吸附解吸的测定

土壤pH以土水比(1:2.5)提取,使用PHS-3E pH计测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮和全磷分别采用凯氏定氮法和钼锑抗比色法测定;碱解氮和速效钾分别采用碱解扩散法和火焰光度法测定;有效磷采用钼蓝比色法测定^[9];矿质元素(铝、铁、钙)形态采用电感耦合高频等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定。土壤体积质量和田间持水量采用环刀法测定,孔隙度采用原状土壤浸润法^[10]测定;团聚体分级采用鲜土干筛法^[11]。土壤磷分级采用改良后的Tiessen连续化学浸提法^[12-13]。

土壤磷等温吸附解吸的测定:称取7份过0.85 mm筛的风干土样1.00 g于50 mL的离心管中。分别加入50 mL浓度为0、10、20、40、60、100、150 mg/L的KH₂PO₄溶液,同时加入3滴甲苯用于抑制微生物活动。在150 r/min且(25±1)℃下恒温振荡培养1 h后静置平衡1 h,然后离心1 min(4 000 r/min),取上清液用钼锑抗比色法测定磷质量分数,土壤磷吸附量为最初加入的不同浓度溶液的磷质量分数与上清液中磷质量分数的差值^[14]。将离心管中的上清液倾倒在干净后,往离心管中加入20 mL饱和NaCl溶液混匀,离心(4 000 r/min)后过滤,重复2次,去除土壤中游离态磷。再向离心管中加入25 mL NaCl溶液(0.01 mol/L)和3滴甲苯,之后采用和磷吸附相同步骤进行磷解吸试验。取上清液用钼锑抗比色法测定磷质量分数,即磷解吸量^[14]。

1.5 计算与数据处理

Langmuir吸附方程^[15]:

$$C/A = 1/(K_A \times A_m) + C/A_m \quad (1)$$

$$MBC = K_A \times A_m \quad (2)$$

$$DPS = Olsen - P/A_m \times 100\% \quad (3)$$

Langmuir解吸方程^[15]:

$$C/B = 1/(K_B \times B_m) + C/B_m \quad (4)$$

$$PDR = B_m / A_m \times 100\% \quad (5)$$

式中: C 为平衡溶液中的磷浓度, mg/L ; A 为土壤磷吸附量, mg/kg ; K_A 为吸附反应常数; A_m 为土壤磷最大吸附量, mg/kg ; B 为土壤磷解吸量, mg/kg ; K_B 为解吸反应常数; B_m 为土壤磷最大解吸量, mg/kg ; MBC 为土壤最大缓冲容量, mg/kg ; DPS 为磷吸附饱和度, %; PDR 为土壤磷解吸率, %。

$>0.25 \text{ mm}$ 团聚体质量分数 ($R_{0.25}$)、土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 和土壤团聚体几何平均直径 (GMD) 的计算公式为^[16]:

$$R_{0.25} = \frac{W_{i>0.25}}{W_i} \times 100\% \quad (6)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (7)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \times \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (8)$$

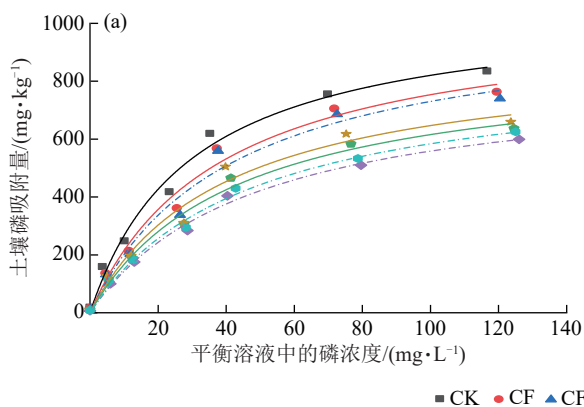
式中: $W_{i>0.25}$ 表示 $>0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体质量之和, g ; W_i 表示所有粒径团聚体质量之和, g ; n 为团聚体粒级数; W_i 为 i 级团聚体百分含量, %; X_i 为 i 级团聚体的平均直径, mm 。

试验结果采用 SPSS 23.0 软件对数据进行正态性分布检验、单因素方差分析、多重比较和 Duncan 检验, 以比较不同施肥处理下土壤磷吸附解吸特征参数及土壤性质的差异 ($p < 0.05$), 并通过 Pearson 相关分析, 确定土壤磷吸附参数与土壤性质的关系, 用 Origin 2024 软件进行磷吸附解吸特征与土壤性质的绘图。使用 Canoco5 软件进行冗余分析 (RDA); 使用 R 语言和 Smart PLS 软件建立偏最小二乘法回归结构方程模型 (PLS-SEM)。

2 结果与分析

2.1 配施解磷菌肥对土壤磷素吸附解吸特性的影响

2.1.1 土壤磷素吸附与解吸曲线



照处理 (CK) 下的土壤对磷的吸附量最大, 可达到 835.28 mg/kg ; 单施化肥及化肥配施解磷菌肥处理 (CF、CFP) 下的土壤吸磷量相对较高, 但与 CK 处理相比显著降低, CF 和 CFP 处理分别降低 8.62% 和 11.37% 。单施有机肥、有机肥配施解磷菌肥、化肥有机肥和化肥有机肥配施解磷菌肥处理 (M、MP、MCF 和 MCFP) 显著降低土壤吸磷量, 较 CF 处理分别降低 23.78% 、 28.26% 、 21.03% 和 25.16% 。在单施化肥、单施有机肥和化肥有机肥的基础上配施解磷菌肥与相应未配施解磷菌肥的处理相比, 显著降低土壤吸磷量, 分别降低 3.02% 、 5.88% 和 5.24% 。说明有机肥配施解磷菌肥和化肥有机肥配施解磷菌肥对复垦 3 a 的矿区土壤吸磷量的影响程度较为明显, 尤其是有机肥配施解磷菌肥。

土壤中磷的解吸过程被视作土壤对吸附态磷的再利用过程, 该过程可提升土壤磷的有效性。以土壤磷吸附量作为横坐标, 以土壤磷解吸量作为纵坐标, 得到不同施肥处理复垦 3 a 的土壤磷吸附量与解吸量的关系曲线 (图 1b)。由图 1b 可知, 各处理下的土壤磷解吸量均随着土壤磷吸附量的增加而增加。与未配施解磷菌肥处理 (CF、M、MCF) 相比, 配施解磷菌肥处理 (CFP、MP、MCFP) 的磷解吸量均有显著增加, 且在磷添加量为 $0 \sim 100 \text{ mg/L}$ 内随着土壤磷吸附量的增加而越来越显著。各处理下土壤磷解吸量的大小依次为 $MP > MCFP > M > MCF > CFP > CF > CK$ 。

2.1.2 磷素吸附解吸方程及特征参数 为更好探究不同施肥处理下复垦 3 a 土壤的磷吸附解吸特征, 运用 Langmuir 等温吸附解吸方程, 对各施肥处理组的土壤磷吸附解吸量与对应的平衡溶液磷浓度数据进行拟合分析。由表 2 可知, 所有处理组的吸附解吸方程拟合效果较好, 拟合度 (R^2) 分别为 $0.95 \sim 0.99$ 和 $0.88 \sim 0.99$, 均达到显著水平。

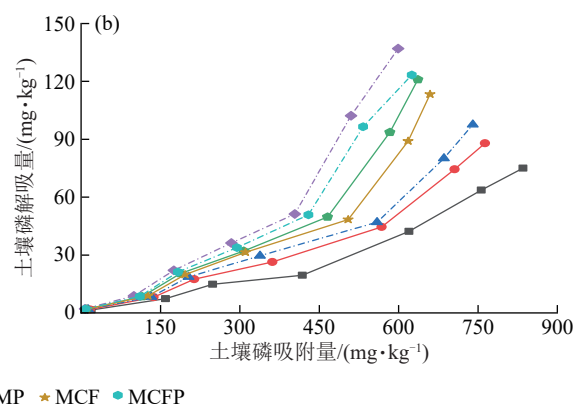


图 1 不同施肥处理的复垦土壤对磷吸附的等温曲线及吸附量与解吸量的关系

Fig. 1 Isotherms of phosphorus adsorption and relationship between adsorption and desorption of reclaimed soil under different fertilization treatments

土壤磷吸附常数(K_A)反映土壤对磷的吸附亲和力, K_A 的高低代表土壤对磷的吸附力强弱。CFP、MP和MCFP处理较相应未配施解磷菌肥处理, K_A 分别降低7.41%、12.50%和12.00%,表明配施解磷菌肥可以减弱土壤对磷的吸附力。各施肥处理的土壤磷最大吸附量(A_m)和土壤磷最大缓冲容量(MBC)

与CK处理相比,均呈显著降低,且配施解磷菌肥处理比相应未配施解磷菌肥处理的 A_m 和MBC呈降低趋势。土壤磷吸附饱和度(DPS)越高,表明土壤对磷的固定能力越弱,同时磷素发生淋洗流失的风险也越大。与M和MCF处理相比,MP和MCFP处理显著增加DPS值,分别增加20.36%和14.60%。

表 2 不同施肥处理下矿区复垦土壤磷吸附解吸特征参数

Table 2 Characteristic parameters of phosphorus adsorption and desorption of reclaimed soil in mining areas under different fertilization treatments

处理	Langmuir 吸附方程	R^2	Langmuir 解吸方程	R^2	K_A	$A_m/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MBC/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	DPS/%	$B_m/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	PDR/%
CK	$C/A=0.028+$ $0.001C$	0.98**	$C/B=0.660+$ $0.007C$	0.96**	$0.033\pm$ $0.003a$	$1\ 067.93\pm$ $38.21a$	$35.52\pm$ $2.05a$	$0.28\pm$ $0.01f$	$137.73\pm$ $4.98e$	$12.91\pm$ $0.81e$
CF	$C/A=0.037+$ $0.001C$	0.97**	$C/B=0.634+$ $0.006C$	0.98**	$0.027\pm$ $0.008ab$	$1\ 055.96\pm$ $139.14b$	$27.51\pm$ $4.78b$	$1.06\pm$ $0.03e$	$176.00\pm$ $17.72de$	$16.71\pm$ $0.54d$
CFP	$C/A=0.040+$ $0.001C$	0.95**	$C/B=0.620+$ $0.005C$	0.99**	$0.025\pm$ $0.004b$	$1\ 033.15\pm$ $35.53ab$	$25.27\pm$ $4.19bc$	$1.12\pm$ $0.03e$	$206.81\pm$ $9.59d$	$20.02\pm$ $0.85d$
M	$C/A=0.048+$ $0.001C$	0.98**	$C/B=0.674+$ $0.003C$	0.88**	$0.024\pm$ $0.004b$	$878.46\pm$ $73.81c$	$20.42\pm$ $1.45cde$	$1.67\pm$ $0.09b$	$371.20\pm$ $43.77b$	$42.18\pm$ $1.73b$
MP	$C/A=0.058+$ $0.001C$	0.99**	$C/B=0.666+$ $0.002C$	0.99**	$0.021\pm$ $0.003b$	$827.56\pm$ $77.54c$	$17.52\pm$ $1.56e$	$2.01\pm$ $0.03a$	$519.11\pm$ $32.37a$	$62.86\pm$ $2.50a$
MCF	$C/A=0.044+$ $0.001C$	0.96**	$C/B=0.658+$ $0.003C$	0.99**	$0.025\pm$ $0.002ab$	$902.44\pm$ $22.39bc$	$22.86\pm$ $1.24bcd$	$1.37\pm$ $0.01d$	$300.29\pm$ $14.31c$	$33.28\pm$ $1.49c$
MCFP	$C/A=0.055+$ $0.001C$	0.99**	$C/B=0.673+$ $0.003C$	0.99**	$0.022\pm$ $0.005b$	$861.01\pm$ $96.51c$	$18.79\pm$ $1.96de$	$1.57\pm$ $0.03c$	$390.68\pm$ $60.24b$	$45.30\pm$ $4.10b$

注: K_A 为土壤磷吸附常数; A_m 为土壤磷最大吸附量;MBC为土壤磷最大缓冲容量;DPS为土壤磷吸附饱和度; B_m 为土壤磷最大解吸量;PDR为土壤磷解吸率;表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

配施解磷菌肥的土壤磷最大解吸量(B_m)和解吸率(PDR)均高于相应未配施解磷菌肥处理,其中有机肥配施解磷菌肥的提高效果最显著。MP处理的 B_m 和PDR最高,分别比其他处理的 B_m 和PDR增加32.87%~276.90%和38.76%~386.91%。

2.2 配施解磷菌肥对玉米产量和复垦土壤磷形态的影响

由表3可知,与CK处理相比,施肥处理下玉米穗粒数、百粒质量及产量分别显著增加66.41%~111.63%、17.45%~26.46%和127.93%~154.73%。配施解磷菌肥显著提高玉米穗粒数和产量。CFP、MP和MCFP处理较相应未配施解磷菌肥处理的玉米穗粒数和产量分别提高21.12%~25.09%和5.49%~9.33%,其中MP较M处理的提高最显著。

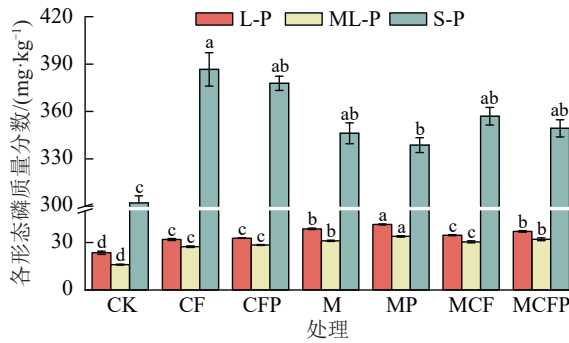
由图2可知,与CK处理相比,其他施肥处理均显著提高复垦土壤活性态磷(L-P)、中活性态磷(ML-P)和稳定态磷(S-P)质量分数,分别提高35.77%~76.34%、71.29%~111.74%和12.10%~27.97%。配施解磷菌肥比相应未配施处理的L-P和ML-P质量分数分别提高2.69%~7.29%和3.64%~8.96%,其中MP较M处理提高最显著。解磷菌肥的施用与相应未

施用解磷菌肥处理相比,S-P质量分数降低2.14%~2.29%。在MP处理下的L-P和ML-P质量分数最高,显著高于其他处理。MP较CFP处理,L-P质量分数显著提高26.48%,ML-P质量分数显著提高19.27%;较MCFP处理,L-P质量分数显著提高12.01%,ML-P质量分数显著提高5.60%。在除CK处理外的其他施肥处理中,MP处理下的S-P质量分数最低。表明有机肥配施解磷菌肥可以显著提高L-P和ML-P质量分恩施,而显著降低S-P质量分数。MP处理可减少土壤磷素的化学固定,提高磷的有效性。

表 3 不同施肥处理对玉米产量的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on maize yield

处理	穗粒数/粒	百粒质量/g	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	$277.19\pm 9.45d$	$26.30\pm 0.66c$	$3\ 138.45\pm 118.67d$
CF	$461.26\pm 13.85c$	$30.89\pm 0.47b$	$7\ 153.34\pm 196.27c$
CFP	$558.70\pm 4.09b$	$32.49\pm 0.49a$	$7\ 546.32\pm 233.91bc$
M	$468.96\pm 4.21c$	$31.05\pm 0.71b$	$7\ 312.29\pm 290.55bc$
MP	$586.63\pm 11.08a$	$33.26\pm 0.89a$	$7\ 994.69\pm 275.86a$
MCF	$467.24\pm 14.61c$	$30.93\pm 0.68b$	$7\ 215.41\pm 272.75bc$
MCFP	$577.73\pm 20.59ab$	$32.93\pm 0.57a$	$7\ 670.30\pm 263.89ab$



注:L-P为活性态磷;ML-P为中活性态磷;S-P为稳定态磷。相同磷形态不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 不同施肥处理下复垦土壤各形态磷质量分数

Fig. 2 Contents of phosphorus with different forms in reclaimed soil under different fertilization treatments

2.3 配施解磷菌肥对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响

由表 4 可知,与 CK 处理相比,施肥处理显著提高土壤田间持水量(FC)、孔隙度(SP)、有机质(SOM)、全磷(TP)和有效磷(Olsen-P)质量分数,分别提高 7.10%~24.04%、9.65%~22.05%、31.46%~194.56%、13.51%~24.32% 和 219.38%~300.39%。配施解磷

菌肥较未配施解磷菌肥处理均降低水溶态铝(Al_w)、铝的水合氧化物和氢氧化物(Al_{oh})质量分数,其中 CFP 较 CF 处理和 MP 较 M 处理的 Al_w 质量分数显著降低 50.00% 和 42.98%;CFP、MP 和 MCFP 处理分别比 CF、M 和 MCF 处理的 Al_{oh} 质量分数分别降低 13.43%、15.71% 和 12.96%。与 CK 处理相比,施肥处理显著降低土壤中的 Fe_d 、 Fe_o 、 Ca_w 和 Ca_{ex} 质量分数。MCFP 较 MCF 处理下的 Fe_d 质量分数显著降低 28.08%。CFP 较 CF 处理、MP 较 M 处理和 MCFP 较 MCF 处理的 Ca_{ex} 质量分数降低效果显著,分别降低 12.45%、10.55% 和 10.53%。

$R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 常被用于评估土壤团聚体的稳定性。与 CK 处理相比,M、MP、MCF 和 MCFP 处理均显著提高 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD($p < 0.05$),增幅分别为 4.09%~9.96%、9.30%~20.16% 和 13.86%~33.66%,其中 MP 处理的 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 增幅最大。CF 和 CFP 处理的 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 与 CK 处理间无显著差异。 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 总体表现为 MP>MCFP>M>MCF>CFP>CF>CK(表 5)。

表 4 不同施肥处理对复垦土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of different fertilization treatments on physicochemical properties of reclaimed soil

处理	BD/ (g·cm ⁻³)	FC/%	SP/%	pH	SOM/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	Al_w / (mg·kg ⁻¹)	Al_{oh} / (mg·kg ⁻¹)	Fe_d / (mg·kg ⁻¹)	Fe_o / (mg·kg ⁻¹)	Ca_w / (g·kg ⁻¹)	Ca_{ex} / (g·kg ⁻¹)
CK	1.55±0.06a	25.37±1.12c	41.64±2.08c	8.54±0.05a	5.15±0.11f	0.37±0.02c	2.58±0.35c	1.34±0.11a	903.85±23.53a	726.95±37.38a	9.40±0.79a	0.16±0.01a	24.95±0.76a
CF	1.44±0.04b	27.17±1.31bc	45.66±1.64b	8.48±0.06ab	6.77±0.43e	0.46±0.03ab	8.24±0.17b	1.02±0.08b	901.21±46.90a	590.38±43.00b	8.80±0.60ab	0.15±0.01ab	20.96±0.04b
CFP	1.42±0.10b	27.83±1.10b	46.29±3.72b	8.43±0.05bc	9.03±0.17c	0.46±0.03a	8.68±0.45b	0.51±0.02c	780.15±48.96bc	527.11±52.31bc	8.25±0.15bc	0.14±0.0ab	18.35±0.35d
M	1.35±0.04bc	30.23±1.06a	49.06±1.36ab	8.42±0.06bc	12.76±0.05b	0.42±0.01b	9.26±0.84ab	1.14±0.12b	891.21±17.88a	457.13±70.11cd	7.52±0.37cd	0.15±0.0ab	20.19±0.34c
MP	1.30±0.04c	31.47±0.57a	50.82±1.53a	8.36±0.06c	15.17±0.48a	0.43±0.01ab	10.33±0.86a	0.65±0.06c	751.21±30.89c	395.70±63.00d	7.03±0.16d	0.14±0.01b	18.06±0.24d
MCF	1.37±0.06bc	29.73±1.31a	48.43±2.08ab	8.46±0.01abc	7.43±0.38d	0.43±0.01ab	9.19±0.28ab	1.10±0.10b	827.47±26.30b	575.42±91.17b	8.69±0.86ab	0.15±0.01ab	20.42±0.16bc
MCFP	1.31±0.04c	31.20±0.92a	50.69±1.33a	8.44±0.06bc	8.64±0.35c	0.44±0.02ab	9.98±1.00a	0.98±0.08b	720.19±31.73c	413.83±65.64cd	7.93±0.50abc	0.14±0.02b	18.27±0.15d

注:BD为体积质量;FC为田间持水量;SP为孔隙度;SOM为有机质;TP为全磷;Olsen-P为有效磷; Al_w 为水溶态铝; Al_{oh} 为铝的水合氧化物和氢氧化物; Fe_d 为游离铁; Fe_o 为活性铁; Ca_w 为水溶态钙; Ca_{ex} 为交换性钙。

表 5 不同施肥处理对复垦土壤团聚体稳定性的影响

Table 5 Effects of different fertilization treatments on soil aggregate stability of reclaimed soil

处理	$R_{0.25}/\%$	平均重量直径 (MWD)/mm	几何平均直径 (GMD)/mm
CK	84.61±1.93cd	1.29±0.04d	1.01±0.05c
CF	84.17±2.22d	1.32±0.03d	1.02±0.05c
CFP	87.21±2.41bc	1.36±0.08cd	1.10±0.09bc
M	89.33±2.83b	1.44±0.08b	1.19±0.11b
MP	93.04±2.55a	1.55±0.06a	1.35±0.09a
MCF	88.07±2.35b	1.41±0.06bc	1.15±0.08b
MCFP	89.99±2.11b	1.44±0.08bc	1.20±0.09b

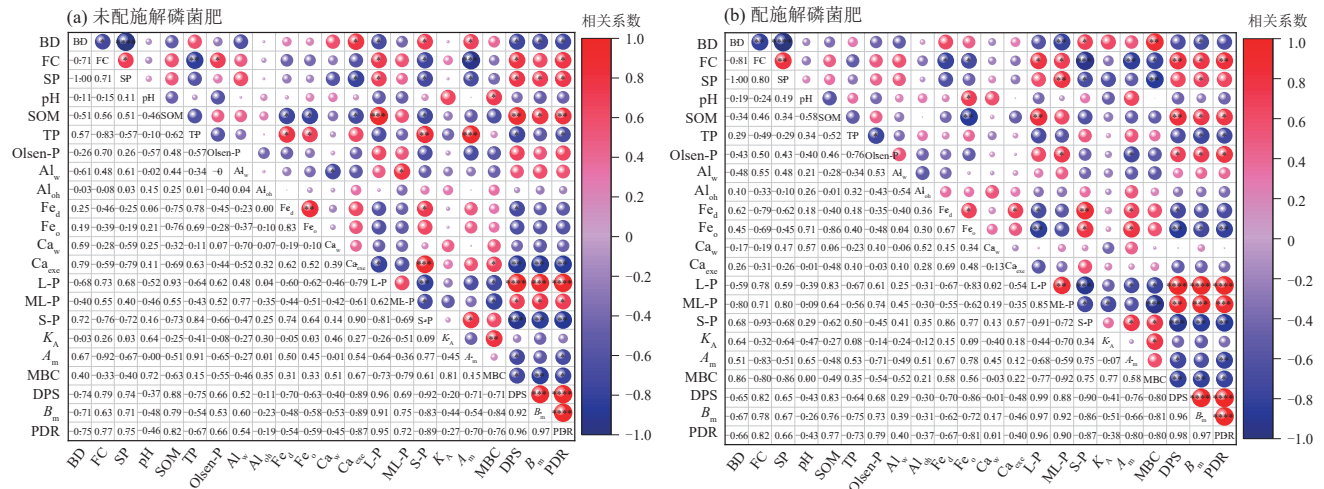
2.4 土壤理化性质和磷形态与磷吸附解吸特征参数的关系

在未配施解磷菌肥处理中,土壤体积质量(BD)、全磷(TN)和稳定态磷(S-P)与土壤磷最大吸附量(A_m)呈显著正相关($p < 0.05$),且与土壤磷吸附饱和度(DPS)、磷最大解吸量(B_m)和磷解吸率(PDR)均呈负相关;土壤田间持水量(FC)、孔隙度(SP)和有机质(SOM)与 A_m 呈显著负相关,与 DPS、 B_m 和 PDR 均呈显著正相关;pH 与土壤磷最大缓冲容量(MBC)呈显著正相关($p < 0.05$);游离铁

(Fe_d)与DPS为显著负相关;交换性钙(Ca_{ex})与MBC呈显著正相关($p < 0.05$),且与DPS、 B_m 和PDR均呈极显著负相关($p < 0.01$)。活性态磷(L-P)和中活性态磷(ML-P)均与MBC呈显著负相关,且与DPS、 B_m 和PDR均呈显著正相关($p < 0.05$) (图3a)。

由图3b可知,配施解磷菌肥处理的土壤理化性质和磷形态主要对 A_m 、MBC、DPS、 B_m 和PDR影响显著。FC、SOM、Olsen-P、L-P和ML-P均与DPS、

B_m 和PDR呈显著正相关,TP、 Fe_o 和S-P与 B_m 和PDR呈显著负相关, Fe_d 、 Fe_o 和S-P均与DPS呈显著负相关($p < 0.05$)。FC、Olsen-P与 A_m 为显著负相关,而 Fe_d 、 Fe_o 和S-P均与 A_m 为显著正相关($p < 0.05$)。BD与MBC呈显著正相关,与 B_m 呈显著负相关($p < 0.05$);FC和SP与MBC呈显著负相关($p < 0.05$)。结合图3,配施解磷菌肥后, Ca_{ex} 与DPS、 B_m 和PDR之间的负相关显著性降低,表明解磷菌肥削弱 Ca_{ex} 对磷吸附解吸过程的调控作用。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$; ****表示 $p < 0.0001$ 。

图 3 未施菌肥与施菌肥处理复垦土壤理化性质与磷吸附解吸特征参数的关系

Fig. 3 Relationship between physicochemical properties and phosphorus adsorption and desorption characteristic parameters of reclaimed soil without and with bacteria fertilizer application

冗余分析(RDA)结果表明,土壤理化性质可以解释未配施解磷菌肥和配施解磷菌肥处理下的前2轴各自占土壤磷吸附解吸特征参数变异的84.96%和94.73%(图4)。显著影响未配施解磷菌肥土壤磷吸附解吸特征参数的因子为FC(68.20%)和L-P(16.80%);L-P、 Ca_w 和Olsen-P则分别解释配施解磷

菌肥土壤磷吸附解吸特征参数的77.20%、9.60%和7.90%的变化。其余的土壤理化性质对未配施解磷菌肥和配施解磷菌肥处理下的土壤磷吸附解吸特征参数的影响均不显著。L-P是显著影响未配施解磷菌肥(16.80%)和配施解磷菌肥处理(77.20%)下土壤磷吸附解吸特征参数的共同因子($p < 0.05$)。

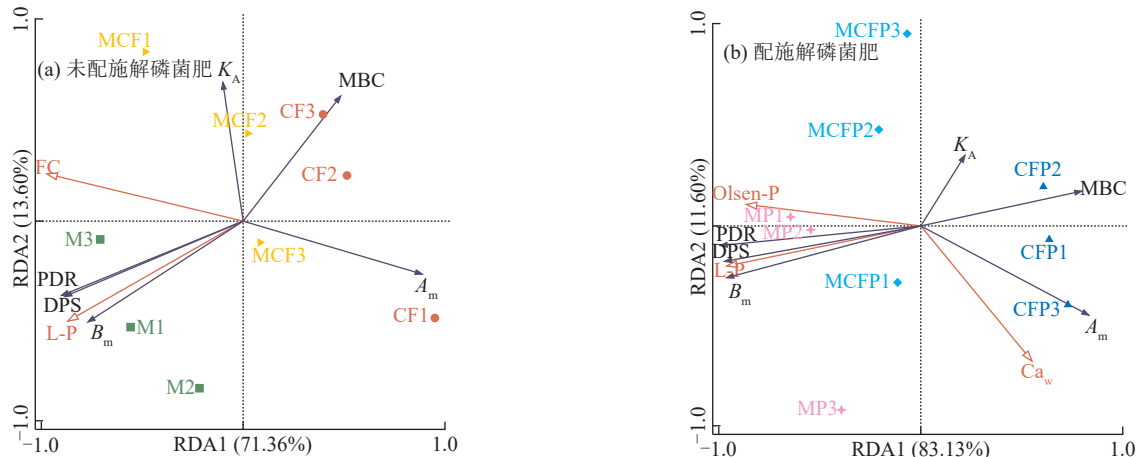


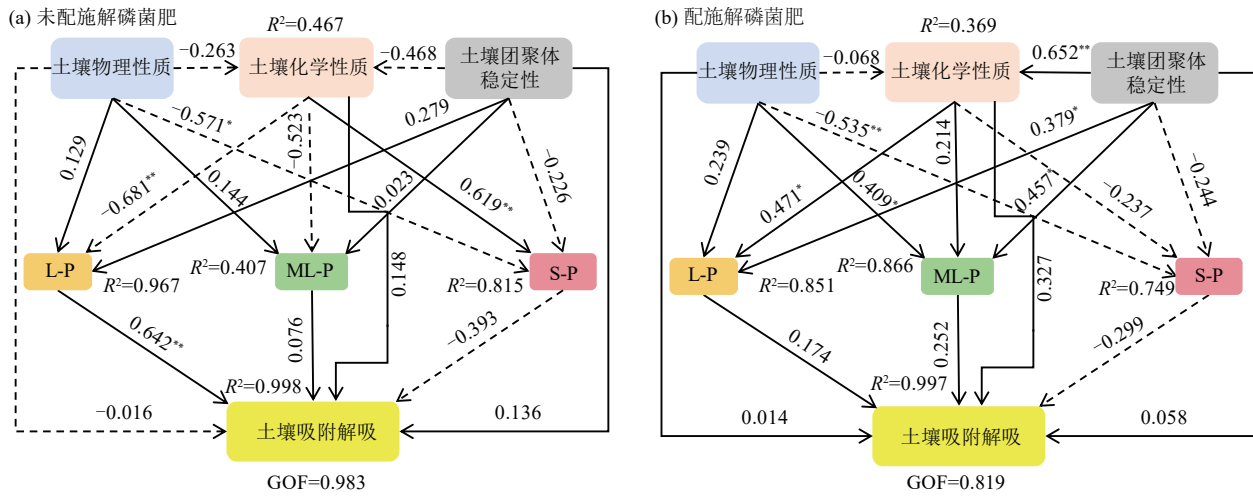
图 4 未施菌肥与施菌肥处理复垦土壤理化性质对磷吸附解吸特征参数的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of phosphorus adsorption and desorption characteristic parameters of reclaimed soil influenced by physicochemical properties without and with bacteria fertilizer application

2.5 土壤理化性质、团聚体稳定性、各形态磷及磷吸附解吸的结构方程模型

通过偏最小二乘法回归结构方程模型(PLS-SEM)分析未配施解磷菌肥和配施解磷菌肥处理对土壤理化性质、团聚体稳定性、各形态磷及磷吸附解吸之间的影响路径(图 5)。2 个模型的拟合度较高,未配施解磷菌肥处理下土壤化学性质、L-P、ML-P、S-P 和磷吸附解吸的方差解释比例分别为

46.70%、96.70%、40.70%、81.50% 和 99.80%,配施解磷菌肥处理下土壤化学性质、L-P、ML-P、S-P 和磷吸附解吸的方差解释比例分别为 36.90%、85.10%、86.60%、74.90% 和 99.70%。表明与未配施解磷菌肥相比,配施解磷菌肥显著提高土壤团聚体稳定性对土壤化学性质、L-P 和 ML-P 的直接影响,也显著提高土壤化学性质对 L-P 的直接影响,但削弱 L-P 对磷吸附解吸的直接影响。



注:实线和虚线分别表示正负关系;箭头上面的数字表示标准化后的路径系数;指标附近的 R² 值表示变量的方差解释比例;*表示 p<0.05; **表示 p<0.01。

图 5 未施菌肥与施菌肥处理土壤理化性质、团聚体稳定性、各形态磷及磷吸附解吸的结构方程模型

Fig. 5 Structural equation models of soil physicochemical properties, soil aggregate stability, phosphorus forms, and phosphorus adsorption and desorption without and with bacteria fertilizer application

3 讨论

3.1 配施解磷菌肥对复垦土壤磷素吸附解吸和玉米产量的影响

土壤中的磷素通常处于吸附与解吸的动态平衡状态,以满足植物对磷素的需求。由图 1a 可知,土壤吸磷量的大小排序为 CK>CF>CFP>MCF>M>MCFP>MP,可能是施用解磷菌肥减少土壤磷的吸附位点,且在施用有机肥下配施效果最佳^[17]。各处理下的土壤磷解吸量均随着土壤磷吸附量的增加而增加,可能是土壤对磷的结合能随着土壤平衡溶液中的磷浓度的增加而逐渐降低,导致土壤吸附的磷易被解吸,磷的解吸量也随之增加^[18]。此现象在张静雯等^[19]的研究中得到验证,在灰漠土和砖红壤中,不同处理的磷解吸量均表现出随平衡溶液磷浓度增加而增加的趋势。

与未配施解磷菌肥处理相比,配施解磷菌肥可提高土壤磷的再利用率,增加土壤有效磷质量分数(图 1b)。MP 处理的 A_m 最低,而 B_m 最高,而 MCFP 处理的效果次于 MP 处理。说明相同肥料氮磷钾养分比下,当有机肥施用量达到一定标准时配施解磷

菌肥的土壤磷抑制吸附而促解吸效果优于化肥有机肥配施解磷菌肥(表 2)。主要归因于解磷微生物在分解植物残体的过程中产生的胡敏酸和富里酸等物质,这些物质能够与钙、铝和铁形成稳定的可溶性复合物^[20],有效地降低土壤中无机胶体对磷的吸附能力,使得原本吸附在土壤无机胶体表面的磷更易于解吸进入土壤溶液中^[21]。本研究中,配施解磷菌肥可提高复垦土壤玉米产量,其中有机肥配施解磷菌肥的增产效果最佳。可能是因为配施解磷菌肥显著提高土壤有效磷含量,尤其是 MP 处理,满足玉米各生育期对磷素的需求,进而提高玉米产量。

3.2 土壤理化性质、磷形态对磷吸附解吸的影响

磷吸附解吸特征参数与土壤的理化性质密切相关。相关研究^[22]表明,土壤的 pH、有机质质量分数、田间持水量、金属氧化物质量分数等均显著影响磷的吸附解吸。本研究中未配施解磷菌肥处理下的 FC 和 L-P 与磷吸附解吸特征参数显著相关,而配施解磷菌肥处理下的 L-P、Ca_w 和 Olsen-P 均与磷吸附解吸特征参数显著相关(图 4)。配施解磷菌肥可显著提高土壤有效磷质量分数,而 Olsen-P 与

DPS、 B_m 和PDR呈显著正相关,且与 A_m 呈显著负相关,其原因是土壤有效磷的增加能够提升土壤对磷的吸附饱和度,同时减少土壤对磷的固定,进而促进磷的解吸。由冗余分析发现,配施解磷菌肥处理较未配施解磷菌肥处理显著提高L-P对磷吸附解吸特征参数的解释率,说明解磷菌肥的配施提高L-P对磷吸附解吸特征参数的影响。

本研究中,配施解磷菌肥处理较未配施解磷菌肥处理显著降低 Al_w 、 Al_{oh} 、 Ca_{exc} 质量分数,减少土壤磷的固定,增加土壤有效磷质量分数。有研究^[23]表明,影响土壤磷吸附和解吸的主要金属元素有铝、铁和钙。配施解磷菌肥处理削弱 Ca_{exc} 对磷吸附解吸过程的调控作用,是因为解磷菌肥可通过分泌有机酸与 Ca_{exc} 络合、改变土壤微环境pH、促进微生物对磷的转化等机制,提高磷的有效性。而 Ca_{exc} 在近中性或碱性条件下易与磷酸根形成 $Ca_3(PO_4)_2$ 或 $CaHPO_4$,MP处理减少此类沉淀的生成,减少磷的固定,可能是因为有有机肥与解磷菌的协同作用的结果。有机肥中含有大量有机质,有机质与磷竞争吸附占据 $CaCO_3$ 表面位点,减少磷酸根的专性吸附;解磷菌则直接溶解已形成的Ca-P沉淀,释放磷酸根。石灰性土壤中铝活性通常较低,但少量无定形铝氧化物仍可吸附磷,MP处理可能是通过有机络合钝化铝,进一步降低铝对磷的固定作用^[24]。活性态磷化学活性高,在土壤中易参与各种反应。在MP和MCFP处理下的PDR值较高,MP处理下的PDR值高达62.86%(表2),活性态磷比例显著升高(图2),表明配施解磷菌肥主要促进土壤活性态磷的解吸。S-P在CK处理中占比最高,对应表2中最高 A_m (1 067.93 mg/kg),表明稳定态磷与土壤对磷的强吸附能力相关。有机肥处理(M、MP)显著提高L-P比例,降低 A_m ,MP处理下的 A_m 仅827.56 mg/kg。通过增加L-P降低 A_m ,反映磷从固定态向有效态转化,说明有机质分解结合微生物活动可以有效减少磷的固定。

MP处理的DPS和PDR值均为最高,分别为2.01%和62.86%,且该处理下的L-P显著增加,说明土壤的吸附饱和度越高越容易释放磷。通过配施解磷菌肥将S-P转化为L-P,降低 A_m ,提高DPS和PDR。在土壤磷形态中,稳定态磷主导吸附固定,而活性态磷驱动解吸。有机肥与解磷菌通过改变磷形态分配,显著优化磷的吸附解吸平衡,提高土壤磷的有效性,为植物提供更多可吸收利用的磷源。

3.3 磷吸附解吸对土壤理化性质、团聚体稳定性和各形态磷的响应

吸附态磷的解吸是植物吸收磷的主要来源,而解吸过程的强度和速率直接影响土壤磷的有效性^[25]。本研究中的配施解磷菌肥显著提高土壤团聚体稳定性,且土壤磷解吸量也得到提高,说明配施解磷菌肥既可以提高团聚体稳定性,又实现磷的高效解吸。可能是解磷菌肥在提高土壤团聚体稳定性和磷有效性方面具有协同作用。一方面,解磷菌肥通过促进胶结物质的形成和提高有机质质量分数,增强土壤团聚体的稳定性,与郁宁等^[26]研究结果一致;另一方面,解磷菌肥通过分泌有机酸和磷酸酶,减少土壤对磷的吸附,提高磷的解吸量和有效性,与孟会生等^[27]的研究结果一致。

由2个偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)可知,配施磷菌肥的团聚体稳定性可以直接正向影响L-P和ML-P含量,与郭万伟等^[28]的研究结果一致。未配施解磷菌肥处理下土壤化学性质直接反向影响L-P含量,而配施解磷菌肥处理下土壤化学性质直接正向影响L-P,且影响均显著。配施解磷菌肥较未配施会削弱L-P对磷吸附解吸的直接正向影响,可能是因为解磷菌肥通过改变土壤磷的形态、降低土壤对磷的吸附能力、促进磷的迁移和释放、改变土壤微生物群落及影响土壤理化性质等多种机制,从而降低L-P对磷吸附解吸的直接正向影响。

4 结论

1)配施解磷菌肥可通过抑制土壤磷吸附、促进磷解吸,从而提升外源磷利用效率。

2)配施解磷菌肥可削弱交换性钙对磷吸附解吸过程的调控作用,提高土壤有效磷质量分数。其中,有机肥配施解磷菌肥对复垦土壤有效磷质量分数的提升效果最佳。

3)配施解磷菌肥可显著提高土壤团聚体稳定性,且能促进土壤中磷的解吸,尤其是活性态磷的解吸,为玉米生长营造更有利的磷素环境,进而提高玉米产量。

参考文献:

[1] 张博凯,郝鲜俊,高文俊,等.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[J].水土保持学报,2021,35(2):271-278.

ZHANG B K, HAO X J, GAO W J, et al. Effects of different organic fertilizers and amounts on available phosphorus content and phosphorus supply characteristics in

- coal mining reclaimed soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 271-278.
- [2] 王东丽, 郑笑影, 刘阳, 等. 微生物菌剂协同有机肥对矿区复垦植物生长与养分的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(8): 1928-1935.
- WANG D L, ZHENG X Y, LIU Y, et al. Effects of organic fertilizer application combined with bacterial agent on the growth and nutrient contents of reclaimed plants in mining area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(8): 1928-1935.
- [3] 尚妍萌, 张杰, 孟会生, 等. 不同施肥处理下采煤矿区复垦土壤微生物功能多样性与共现性特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(2): 386-394.
- SHANG Y M, ZHANG J, MENG H S, et al. Soil microbial functional diversity and co-occurrence under different fertilization treatments in a reclaimed coal mining area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(2): 386-394.
- [4] 王宇峰, 孟会生, 李廷亮, 等. 培肥措施对复垦土壤微生物碳氮代谢功能多样性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24): 81-90.
- WANG Y F, MENG H S, LI T L, et al. Effects of fertilization regime on the functional diversity of microbial carbon and nitrogen metabolism in reclaimed soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24): 81-90.
- [5] 王勇乾, 胡瑞文, 周清明, 等. 解磷细菌肥对烤烟磷素吸收和磷肥利用率的影响[J]. *中国烟草科学*, 2020, 41(4): 7-12.
- WANG Y Q, HU R W, ZHOU Q M, et al. Effects of phosphate-resolving bacterial fertilizer on phosphorus absorption and phosphorus fertilizer utilization rate of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2020, 41(4): 7-12.
- [6] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期不同施肥处理黑土磷的吸附-解吸特征及对土壤性质的响应[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(21): 3866-3877.
- WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics and its response to soil properties of black soil under long-term different fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3866-3877.
- [7] 孙晓东, 高文俊, 郝鲜俊, 等. 不同有机肥对煤矿复垦土壤磷吸附解吸特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 677-689.
- SUN X D, GAO W J, HAO X J, et al. Effects of different manures on phosphorus adsorption and desorption of a reclaimed mining soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 677-689.
- [8] 郑笑影, 王东丽, 赵晓亮, 等. 菌剂配施有机肥下植物-土壤-微生物生态化学计量特征及内稳性: 以内蒙矿区排土场中药复垦模式为例[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 352-362.
- ZHENG X Y, WANG D L, ZHAO X L, et al. Ecostoi-chiometric characteristics and internal stability of plant-soil-microbial ecosystem under organic fertilizer application with fungicides: An example of traditional Chinese medicine reclamation model in a mining site in Inner Mongolia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 352-362.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-109.
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-109.
- [10] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 22-37.
- CHENG D J, ZHANG Y L. *Guidance of soil physics experiment* [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2012: 22-37.
- [11] GARTZIA-BENGOETXEA N, GONZÁLEZ-ARIAS A, MERINO A, et al. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1674-1683.
- [12] TIESSSEN H, MOIR J O. Characterization of available P by sequential extraction [M]. Boca Raton: CRC Press, 1993: 75-86.
- [13] WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. A five-year P fertilization pot trial for wheat only in a rice-wheat rotation of Chinese paddy soil: Interaction of P availability and microorganism [J]. *Plant and Soil*, 2016, 399(1): 305-318.
- [14] KOVAR J, PIERZYNSKI G. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters [M]. Blacksburg: Virginia Tech University, 2009: 33-37.
- [15] 龚振平, 杜婷婷, 闫超, 等. 玉米秸秆还田及施磷量对黑土磷吸附与解吸特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 161-169.
- GONG Z P, DU T T, YAN C, et al. Effects of corn straw returning and phosphorus application rate on phosphorus adsorption and desorption characteristics of black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 161-169.
- [16] MOORE T R, DE SOUZA W, KOPRIVNJAK J F. Controls on the sorption of dissolved organic carbon by soils [J]. *Soil Science*, 1992, 154(2): 120-129.

- [17] 郭昕宇,赵巍,吴春艳,等.有机无机肥配施增加土壤团聚体中芳香碳比例和土壤养分有效性[J].植物营养与肥料学报,2025,31(6):1095-1108.
GUO X Y, ZHAO W, WU C Y, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers improves nutrient availability through high carbonyl carbon in soil aggregates[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(6):1095-1108.
- [18] 钱多,范昊明,周丽丽,等.冻融作用对棕壤磷素吸附-解吸特性的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):279-283.
QIAN D, FAN H M, ZHOU L L, et al. Effects of freeze-thaw cycles on phosphorus adsorption and desorption characteristic in brown earth[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2):279-283.
- [19] 张静雯,迟海龙,吴胜彪,等.聚磷酸盐在灰漠土和砖红壤中吸附-解吸附特性研究[J].中国土壤与肥料,2024(7):101-107.
ZHANG J W, CHI H L, WU S B, et al. Study on adsorption-desorption characteristics of polyphosphate in gray desert soil and latosol soil[J].Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7):101-107.
- [20] COLLAVINO M M, SANBERRO P A, MROGIN-SKI L A, et al. Comparison of *in vitro* solubilization activity of diverse phosphate-solubilizing bacteria native to acid soil and their ability to promote *Phaseolus vulgaris* growth[J].Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(7):727-738.
- [21] 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.
LIU Y L, LI Y, ZHANG M, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus adsorption and desorption characters in yellow soil[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(3):450-459.
- [22] 王琼,陈延华,张乃于,等.长期施磷黑土中磷的吸附-解吸特征及其影响因素[J].植物营养与肥料学报,2022,28(9):1569-1581.
WANG Q, CHEN Y H, ZHANG N Y, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics as affected by long-term phosphorus application in black soil[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(9):1569-1581.
- [23] 何振立,朱祖祥,袁可能,等.土壤对磷的吸持特性及其与土壤供磷指标之间的关系[J].土壤学报,1988,25(4):397-404.
HE Z L, ZHU Z X, YUAN K N, et al. Potential phosphate sorptivity value from Langmuir equation and its application for phosphate fertilizer recommendation[J].Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(4):397-404.
- [24] 夏立忠, ANDERSON R.长期施用牛粪条件下草原土壤磷的等温吸附与解吸动力学[J].土壤,2000,32(3):160-164.
XIA L Z, ANDERSON R. Isothermal adsorption and desorption kinetics of phosphorus in grassland soil under long-term application of cow dung[J].Soils, 2000, 32(3):160-164.
- [25] 霍晓兰,马琳杰,李丽君,等.磷在褐土不同发生层的吸附解吸特征[J].中国土壤与肥料,2024(12):52-58.
HUO X L, MA L J, LI L J, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption in different soil pedogenic horizons of cinnamon soil region[J].Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(12):52-58.
- [26] 郁宁,马任甜,寇太记,等.基于不同方法评价玉米-花生垄作间作和施磷对土壤团聚体稳定性的影响[J].植物营养与肥料学报,2024,30(11):2053-2062.
YU N, MA R T, KOU T J, et al. Effects of maize-peanut ridge intercropping and phosphorus application on soil aggregate stability assessed by different methods[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(11):2053-2062.
- [27] 孟会生,洪坚平,吴文丽,等.配施解磷菌肥对采煤塌陷区复垦土壤磷有效性的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(4):357-363.
MENG H S, HONG J P, WU W L, et al. Effect of amendment of biomanure of phosphate-solubilizing bacteria on soil phosphorus availability in reclaimed farmland in coal mining subsidence area[J].Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(4):357-363.
- [28] 郭万伟,肖和艾,吴金水,等.红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点[J].土壤学报,2009,46(1):85-92.
GUO W W, XIAO H A, WU J S, et al. Distribution of phosphorus in water-stable aggregates in upland and paddy red earths[J].Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(1):85-92.