

长期施磷黑土中磷的吸附-解吸特征及其影响因素

王琼^{1,2}, 陈延华^{1,3}, 张乃于¹, 秦贞涵¹, 金玉文^{1,4}, 朱平⁵, 彭畅⁵,
Colinet Gilles², 张淑香^{1*}

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 TERRA, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Gembloux 5030, Belgium; 3 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097; 4 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 5 吉林省农业科学院农业环境与资源研究中心, 吉林长春 130033)

摘要: 【目的】比较长期不施磷与施磷黑土对外源磷的吸附-解吸特征, 为黑土区磷素管理提供理论基础。【方法】供试黑土长期定位试验位于吉林省公主岭市, 始于 1990 年。2018 年选择其中不施肥 (CK), 施氮钾肥 (NK), 施氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾+有机肥 (NPK+M) 4 个处理小区, 采集 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层的土壤样品, 分析了土壤理化性质, 采用恒温平衡法测定了土壤磷的吸附-解吸特征, 并由此计算得到磷最大吸附量 (Q_m)、吸附亲和力常数 (K_d)、最大缓冲容量 (MBC)、磷吸附饱和度 (DPS)、最大解吸量 (D_r) 和解吸率 (D_r)。【结果】随着平衡溶液中磷浓度的增加, 磷的吸附量与解吸量均呈先快速增加后逐渐趋于平衡的过程。与不施磷处理 (CK 和 NK) 土壤相比, 施磷处理 (NPK、NPK+M) 减少了磷的吸附量, 增加了磷的解吸量。与不施磷处理相比, 施磷处理在 0—60 cm 剖面上的 Q_m 和 MBC 值分别降低了 4.94%~63.46% 和 15.90%~75.18%, D_r 值增加了 8.52%~474.0%, 以 NPK+M 处理变化量最大。施磷处理比不施磷处理在 0—60 cm 土壤剖面上全磷和有机质含量分别增加了 34.40%~145.5% 和 12.77%~50.07%, 游离态铁铝氧化物 (Fe_d+Al_d) 含量降低了 5.14%~11.35%。冗余分析表明, 不施磷处理土壤的有机质、 Fe_d+Al_d 和全磷, 以及施磷处理中的 Fe_d+Al_d 、络合态铁铝氧化物 (Fe_p+Al_p)、pH 和有机质是影响磷吸附解吸特征参数的主要土壤因子, 分别解释了不施磷和施磷处理全部变异的 77.59% 和 90.62%。土壤有效磷 (Olsen-P) 与磷吸附饱和度 (DPS) 相关关系表明, 所研究的黑土 DPS 环境界限值为 8% 左右, NPK+M 处理中 3 个土层的 $DPS_{M,P}$ 值 (由 Mehlich-3 浸提的磷、铁和铝计算) 为 7.77%~25.96%, $DPS_{O,P}$ 值 (由 Olsen-P 和 Q_m 计算) 为 17.24%~24.75%, 均高于此环境界限值, 具有磷素流失的风险。【结论】长期施磷降低了黑土对外源磷的吸附量, 增加了磷解吸量。长期不施磷肥, 土壤对磷的吸附和解吸主要受有机质、游离态铁铝氧化物的影响。而长期施肥, 特别是有机肥与化肥配合处理, 土壤中游离态和络合态铁铝氧化物、有机质及 pH 是影响磷吸附解吸特征的主要因素。

关键词: 黑土; 长期施肥; 磷吸附-解吸; 磷流失

Phosphorus adsorption and desorption characteristics as affected by long-term phosphorus application in black soil

WANG Qiong^{1,2}, CHEN Yan-hua^{1,3}, ZHANG Nai-yu¹, QIN Zhen-han¹, JIN Yu-wen^{1,4},
ZHU Ping⁵, PENG Chang⁵, Colinet Gilles², ZHANG Shu-xiang^{1*}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 TERRA, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Gembloux, 5030, Belgium; 3 Institute of Plant Nutrition, Resources and Environment, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4 College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 5 Agricultural Environment and Resources Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

收稿日期: 2022-03-28 接受日期: 2022-06-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1500205); 国家自然科学基金项目 (41977103)。

联系方式: 王琼 E-mail: wqcaas@gmail.com; * 通信作者 张淑香 E-mail: zhangshuxiang@caas.cn

Abstract: [Objectives] Comparison of P adsorption-desorption characteristics in long-term soil treated with and without P fertilizer can provide a theoretical basis for P management in black soils. **[Methods]** The long-term field trial on black soil started in 1990 in Gongzhuling City, Jilin Province. The four treatments were no fertilizer (CK treatment), nitrogen (N) and potassium (K) fertilizers (NK treatment), NPK fertilizers (NPK treatment), and NPK + manure (NPK+M treatment). We analyzed soil physicochemical properties. Soil P adsorption-desorption characteristic parameters [maximum adsorption capacity (Q_m), adsorption constant (K_o), maximum soil P buffering capacity (MBC), degree of P sorption saturation (DPS), maximum desorption capacity (D_m), and desorption ratio (D_i)] in different soil layers were determined using isothermal adsorption and desorption experiment. **[Results]** The adsorbed and desorbed P increased initially and stabilized with increasing P concentration in the equilibrium solution. Compared to the untreated soil, the adsorbed P decreased, and desorbed P increased in the soil treated with P fertilizers. Compared to the untreated soil, Q_m and MBC decreased by 4.94%–63.46% and 15.90%–75.18%, while D_i increased by 8.52%–474.0% in the 0–60 cm soil profile. Notably, the most significant changes were recorded in the NPK+M treatment. The long-term P input increased total P and soil organic matter (SOM) by 34.40%–145.5% and 12.77%–50.07%, decreased the free iron and aluminum oxide (Fe_d+Al_d) by 5.14%–11.35% in different soil layers compared to the soil without P fertilizer. SOM, Fe_d+Al_d , and total P in the soil without P fertilizer ($P<0.05$), as well as Fe_d+Al_d , organic-bound iron and alumina oxide (Fe_p+Al_p), pH, and SOM in the soil with P fertilizers were the main factors influencing the differences in the characteristic parameters of P adsorption and desorption. The main factors explained 77.59% and 90.62% of the total variation in the soil without P and with P fertilizers, respectively. The correlation between Olsen-P and DPS showed that the DPS threshold value for environmental purposes was about 8%. The DPS_{M-P} (calculated by Mehlich-3 extractable P, Fe, and Al) and DPS_{O-P} (calculated by Olsen-P and Q_m) ranged from 7.77% to 25.96% and 17.24% to 24.75%, respectively, in 0–60 cm soil profile in NPK+M treatment, which far exceeded the threshold, increasing the risk of P loss. **[Conclusions]** Our research suggests that long-term exogenous P input decreases adsorbed P and increases desorbed P, respectively. SOM and Fe_d+Al_d are the main drivers of P adsorption and desorption characteristics in soil without P fertilizer. In the soil treated with combined P fertilizer, especially NPK fertilizers and manures, Fe_d+Al_d , Fe_p+Al_p , SOM, and pH were the main factors affecting the P adsorption and desorption characteristics.

Key words: black soil; long-term fertilization; phosphorus adsorption-desorption; phosphorus loss potential

磷是植物生长的必需营养元素,影响着作物的产量与品质^[1]。我国有的农田因长期过量施肥造成磷素大量累积,造成磷流失,引起水环境富营养化等问题^[2]。也有农田长期不施或很少施磷肥,土壤磷素严重亏缺,制约了作物产量^[3]。土壤的磷供应量和土壤的缓冲能力^[4-5]及磷的吸附也常常用于环境磷评估^[6-7]。因此,了解磷吸附-解吸特征对提高磷素有效性和评估环境磷流失风险至关重要。

磷的吸附等温曲线常用来研究土壤对磷的吸附-解吸特征^[8]。最常用的 Langmuir 方程中的一系列参数,如最大吸附量(Q_m)、最大解吸量(D_m)、最大缓冲容量(MBC)等,常用来评估土壤磷素的移动能力,评价土壤磷流失风险。土壤中的磷水平对磷的吸附解吸特征有直接的影响^[9]。在低磷条件下,土壤磷吸附位点数量较多,磷吸附结合能较强,土壤磷

以高能吸附为主,具有较高的 Q_m 和 MBC 值及较低的 D_m 。随着磷投入的不断增加,高能吸附位点逐渐饱和,磷的吸附转为低能吸附,土壤 Q_m 和 MBC 显著降低, D_m 值则显著增加^[10-12]。此外,土壤有机质、pH、金属氧化物、土壤黏粒含量等,也影响着土壤磷的吸附-解吸^[13-14]。粘粒和粉粒的增加可以促进土壤对磷的吸附^[12,15]。陈波浪等^[16]分析了不同质地的棉田土壤,发现土壤的最大缓冲容量和吸附量均随粘粒含量的增加而增大。Abdala 等^[17]在对巴西高度风化土壤研究中指出,无定形铁铝氧化物通过提供额外的磷吸附位点,以抵消有机质对磷吸附的抑制作用。因此,探明磷吸附解吸特征变化的影响因素对降低土壤对磷的吸附、提高磷的有效性具有重要意义。目前的研究均是基于将不同的处理综合作为一个整体,探讨土壤性质对磷吸附解吸特征的影

响^[11-12, 18]。然而, 土壤不施磷与施磷吸附解吸特征对土壤性质的响应及其机制是完全不同的, 目前关于这方面的研究较少。土壤对磷的吸附解吸影响了磷素的移动性, 磷吸附饱和度 (DPS) 综合考虑了土壤磷素水平和磷固持能力, 常用来评估磷素的迁移和淋溶损失^[19-22]。当土壤的 DPS 值小于其环境界限时, 土壤中的磷素易被土壤颗粒吸附而成为结合态的磷从而被土壤固定, 减少磷在土壤中的移动; 当由于长期磷肥的投入, 土壤中磷的吸附位点逐渐达到饱和, DPS 超过其环境界限值时, 土壤对磷的固持能力降低, 易引起磷素的淋失而造成水体污染^[23-24]。因此研究土壤剖面的磷吸附-解吸特征以及确定土壤的 DPS 环境界限值, 对减少磷素流失风险具有重要研究意义。

东北黑土是我国最主要的粮食主产区和商品粮基地之一, 具有土壤肥力高、结构好等特点。然而, 近些年由于不合理的磷肥投入和磷素管理使得该地区磷素含量差异很大, 一些区域磷素大量累积, 甚至出现了磷素流失现象。了解不同施肥状态下黑土不同土层磷的吸附-解吸特征, 对于预测黑土磷的长期累积和释放动态、提高磷的有效性, 降低磷流失风险至关重要。本研究依托黑土长期定位试验, 基于试验不同施肥处理, 探讨土壤在长期 (29 年) 不施磷与施磷后磷的吸附解吸特征, 定量解释不同诱因与这些特征之间的关系, 并确定黑土磷吸附饱和度值, 以期在黑土地地区提高磷有效性及减少农业面源污染提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验是在中国农业科学院中层黑土土壤肥力和肥料效益长期监测站 (吉林省公主岭市: 124°48'34"E, 43°30'23"N) 进行的, 该监测站建于 1989 年, 试验始于 1990 年。该地区土壤为中层典型黑土, 土壤成土母质为第四纪黄土状沉积物。该监测站属于温带大陆性季风气候区, 四季分明, 年均

温为 4℃~5℃, 年均降水量为 590.7 mm, 作物生长季主要集中在 4—9 月, 年积温为 2800℃。

1.2 试验设计

于 2018 年选择黑土长期定位试验中的 4 个不同处理不同土层 (0—20、20—40 和 40—60 cm) 土壤样品。试验处理分别为: 不施肥对照 (CK); 施氮、钾肥 (NK); 施氮、磷、钾肥 (NPK); 氮磷钾+有机肥处理 (NPK+M)。NK 和 NPK 处理中的氮 (尿素) 和钾 (硫酸钾) 用量分别为 N 165 kg/hm²、K 68 kg/hm², P 处理中的磷 (磷酸二铵) 用量为 P 36 kg/hm²。NPK+M 处理中氮、磷和钾来自化肥的量分别为 N 50 kg/hm²、P 36 kg/hm² 和 K 68 kg/hm², 来自有机肥 (牛粪) 的量分别为 N 115 kg/hm²、P 39 kg/hm² 和 K 77 kg/hm²。有机肥作为底肥, 磷、钾化肥以及 1/3 的氮肥作为底肥, 其余 2/3 的氮肥于拔节前追施在表土 10 cm 处。试验不设重复处理, 每个试验小区随机排列, 面积约 400 m² (57.18 m×7 m), 多点取样弥补试验无重复的缺陷。春玉米连作是主要的种植方式, 于 4 月末播种, 9 月末收获。试验区按常规方式进行统一的田间管理, 在 2018 年玉米秋收后, 将试验地沿其长边三等分, 并将其设置为 3 个重复小区, 用“S”形取样方法采集每个重复的土壤样品, 混匀、风干和过筛后对土壤样品进行分析测定。土壤的基础理化性质详见表 1。

1.3 土壤样品分析

有机质采用重铬酸钾外加加热法测定, 全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消化, 钼锑抗比色法测定。有效磷采用两种分析方法测定, 一种是 Olsen-P 采用 NaHCO₃ 提取, 钼锑抗比色法测定; 另一种是用 Mehlich-3 溶液 (0.2 mol/L CH₃COOH+0.25 mol/L NH₄NO₃+0.015 mol/L NH₄F+0.013 mol/L HNO₃+0.001 mol/L EDTA) 浸提, 并用 ICP-AES 测定^[25], 其测定的有效态养分含量分别记为 M3-Ca、M3-Mg、M3-Fe、M3-Al 和 M3-P。pH 以土水比 (1:2.5) 提取, 电位法测定。游离态铁铝氧化物 (Fe_d, Al_d) 以 Na₂S₂O₄-Na₃C₆H₅O₇-NaHCO₃ (DCB) 浸提, 无定形态铁铝氧化

表 1 黑土长期定位试验土壤的基础理化性质

Table 1 Physiochemical properties of black soil at the establishment of a long-term experiment

土层 (cm) Soil depth	pH	容重 (g/cm ³) Bulk density	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K	有效磷 (mg/kg) Olsen-P	速效钾 (mg/kg) Available K
0—20	7.6	1.19	20.00	1.34	0.61	16.36	11.80	190
20—40	7.5	1.27	14.40	1.02	0.59	14.94	6.77	181
40—60	7.5	1.33	6.30	0.58	0.44	15.94	3.14	185

物(Fe_o, Al_o)用0.2 mol/L草酸铵缓冲液(pH=3)浸提,络合态铁铝氧化物(Fe_p, Al_p)用0.1 mol/L焦磷酸钠溶液(pH=8.5)浸提,用电感耦合高频等离子体发射光谱法(ICP-AES)进行测定^[26]。土壤比表面积采用氮气吸附法测定^[26]。

1.4 磷等温吸附-解吸试验

首先,配置含KH₂PO₄浓度为0、5、10、20、40、80、120 mg/L的系列溶液,每份溶液中加入3滴甲苯以抑制微生物活动,用0.01 mol/L NaCl调节溶液pH=7。称取过0.85 mm筛的风干土样1.00 g于50 mL离心管中,分别加入以上溶液25 mL,在150 r/min、25℃下恒温震荡培养1 h,再静置平衡1 h,然后离心10 min(4000 r/min),上清液中的磷含量用钼锑抗比色法测定。初始所添加的不同溶液中磷含量与平衡后对应的上清液磷含量的差值即为土壤吸附磷量。离心管中的土壤加入20 mL饱和NaCl溶液混匀、离心(4000 r/min)、过滤,重复两次,以此去除掉土样中游离的磷酸盐。然后在试管中加入0.01 mol/L NaCl溶液25 mL,同时加入3滴甲苯,振荡、平衡、离心并测定上清液浓度(同吸附试验)。溶液中的磷浓度为磷解吸量^[27]。

1.5 计算方法

Langmuir 吸附方程^[28]:

$$C/Q = 1/(K_Q \times Q_m) + C/Q_m$$

式中,C为平衡溶液磷浓度(mg/L);Q为土壤磷吸附量(mg/kg);Q_m为土壤磷最大吸附量;K_Q为土壤吸附亲和力常数;土壤最大缓冲容量(maximum buffer capacity, MBC, mg/kg)是Q_m和K_Q两个因子的综合参数, $MBC = K_Q \times Q_m$ 。

Langmuir 解吸方程^[29]:

$$C/D = 1/(K_D \times D_m) + C/D_m$$

式中,C为平衡溶液磷浓度(mg/L);D为土壤磷解吸量(mg/kg);D_m为土壤磷最大解吸量(mg/kg);K_D为土壤磷解吸亲和力常数;解吸率(D_r)是D_m与Q_m的比值。

磷吸附饱和度(DPS, %)^[29-30]:

$$DPS_{O-P} = Olsen - P / (Olsen - P + Q_m) \times 100\%$$

$$DPS_{M-P} = (M3 - P/31) / (M3 - Fe/56 + M3 - Al/27) \times 100\%$$

式中,Olsen-P为土壤有效磷;Q_m为土壤磷最大吸附量;M3-P、M3-Fe、M3-Al由Mehlich 3浸提测定(mg/kg),见1.3部分。

1.6 数据分析

采用SPSS 20软件对数据进行分析,采用单因

素方差分析(ANOVA)和Duncan检验,比较不同施肥处理不同土层磷吸附解吸特征参数以及土壤性质的差异($P < 0.05$);采用配对样本T检验的方法比较同一土层不施磷与施磷处理土壤性质的差异。用R语言中的“psych”包进行土壤性质与磷吸附解吸特征之间的Pearson相关分析,用“vegan”包进行冗余分析(RDA),以确定不施磷肥与施磷肥处理影响土壤磷吸附解吸特征的主要土壤因素。用Origin 9.0进行磷吸附解吸特征与土壤性质的绘图。

2 结果与分析

2.1 不施磷与施磷条件下不同土层黑土磷的吸附-解吸特征

2.1.1 磷吸附与解吸曲线 由图1可知,土壤磷吸附量与解吸量随平衡溶液磷浓度的升高呈先快速上升再缓慢增加的趋势。平衡溶液磷浓度为0~20 mg/L时,土壤磷吸附量和解吸量随平衡溶液磷浓度的增加迅速增加,继续提高平衡溶液磷浓度,磷吸附-解吸曲线逐渐变缓。同一土层中,土壤对磷的吸附量顺序整体表现为CK>NK>NPK>NPK+M,CK和NK处理土壤的磷吸附量远远高于NPK和NPK+M处理,且同一处理土壤对磷的吸附量随土层的加深而降低(图1a~c)相反,同一土层土壤的磷解吸量顺序为:NPK+M>NPK>NK>CK,施磷处理的磷解吸量高于不施磷处理,在0—20 cm土层中差异更大(图1d~f)。

2.1.2 磷吸附-解吸方程及特征参数 Langmuir方程计算的不同处理的磷吸附、解吸等温曲线,其决定系数R²分别为0.8368~0.9969和0.8215~0.9955,达到极显著水平,具有统计学意义(表2)。

磷最大吸附量(Q_m)反映了单位重量土壤中磷吸附位点的数量,可用于评价土壤对磷的吸附能力^[31-32]。黑土的Q_m值范围为192.31~815.85 mg/kg。同一土层中,与CK和NK处理相比,NPK和NPK+M处理的Q_m值降低了4.94%~63.46%;NPK+M处理0—20和20—40 cm的Q_m值降低幅度大于NPK处理,比NPK处理分别降低了27.54%和31.82%。随土层的加深,各处理土壤Q_m值均降低,40—60 cm的Q_m值比0—20 cm降低了35.49%~73.17%。K_Q反映了土壤对磷的亲和力,其值的高低代表了土壤对磷的吸附力强弱^[4]。与CK和NK处理相比,NPK和NPK+M处理的K_Q值在0—20和20—40 cm土层分别降低了33.33%~66.67%和

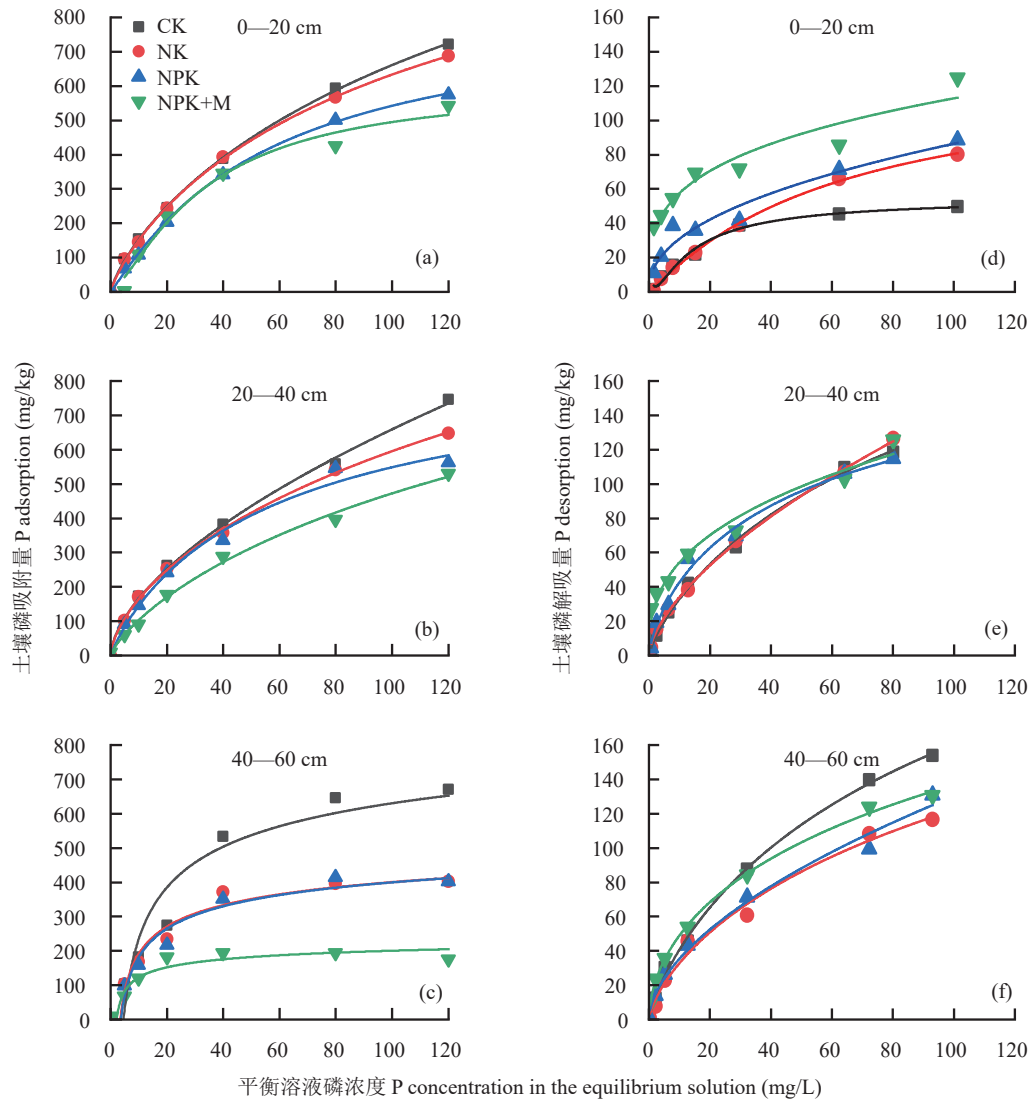


图 1 长期不施磷与施磷处理黑土 0—60 cm 土层磷吸附-解吸等温线

Fig. 1 Phosphate isothermal adsorption and desorption curves of black soil treated with and without P fertilizers in 0—60 cm profile

注: CK—不施肥对照; NK—只施氮钾化肥; NPK—施氮磷钾化肥; NPK+M—施氮磷钾化肥和有机肥。

Note: CK—No fertilizer input; NK—Applying N and K fertilizer; NPK—Applying NPK fertilizer; NPK+M—Applying NPK and manure.

14.29%~42.86%。NPK+M 处理的下降幅度又大于 NPK 处理, 0—20、20—40、40—60 cm 土层分别比 NPK 处理降低了 50.00%、33.33% 和 18.52%。土壤最大缓冲容量(MBC)值是结合了 Q_m 和 K 的综合参数, MBC 值越高, 被土壤吸附的磷越多^[33]。相较 CK 和 NK 处理, NPK 和 NPK+M 处理的 MBC 值在 0—60 cm 剖面降低了 15.90%~75.18%, 3 个土层 NPK+M 处理的 MBC 值均低于 NPK 处理, 比 NPK 处理低了 12.39%~52.58%。土壤磷吸附饱和度(DPS)是基于土壤磷吸附位点的饱和度, 决定土壤磷释放强度和土壤磷容量^[20-22], 一般用来表征土壤固磷能力以及磷素流失的风险^[34-36]。DPS 越高, 土壤对磷

的固定能力越弱, 磷被淋洗流失的风险越大。以土壤 M3-P 和 Olsen-P 计算的 DPS_{M-P} 和 DPS_{O-P} 的范围值分别为 0.12%~25.96% 和 0.49%~24.75%, 均随着磷添加浓度的增加而显著增加。0—60 cm 土层上, NPK+M 处理的 DPS_{M-P} 和 DPS_{O-P} 值最高, 分别比 NPK 处理增加了 1.97~4.92 和 2.60~5.43 倍。随着土层加深, DPS_{M-P} 值呈降低趋势, 40—60 cm 土层不同处理 DPS_{M-P} 值比 0—20 cm 土层降低了 49.30%~70.08% (表 2)。

磷最大解吸量 D_m 定义为磷吸附位点饱和时的可解吸量, 反映了可提供给土壤溶液中最大磷含量。 D_r 反映了磷的解吸程度, D_r 值越高, 磷的解吸能力

表 2 不施磷与施磷处理黑土各土层磷的吸附-解吸方程及特征参数
Table 2 Phosphate adsorption and desorption equations and parameters of black soil with and without P application in three soil depths

土层 (cm)	处理	吸附方程	R ²	解吸方程	R ²	Q _m (mg/kg)	K _d (L/mg)	MBC (L/kg)	DPS _{M,P} (%)	DPS _{O,P} (%)	D _m (mg/kg)	D _t (%)
Soil depth	Treatment	C/Q=0.0013C+0.0218		C/D=C/D _m +1/(K _d ×Q _m)								
0—20	CK	C/Q=0.0012C+0.0195	0.9466**	C/D=0.0303C+0.2813	0.9651**	815.85±46.62Aa	0.06±0.006Ba	51.41±4.15Ba	0.24±0.04Ac	0.49±0.19Ac	35.48±2.59Cc	4.34±0.06Cc
	NK	C/Q=0.0013C+0.0217	0.9675**	C/D=0.0142C+0.3411	0.9295**	753.97±39.68Aa	0.06±0.010Ba	45.98±4.97Ba	0.69±0.22Ac	0.88±0.18Ac	72.86±1.26Cb	9.73±0.64Cb
	NPK	C/Q=0.0014C+0.0521	0.9798**	C/D=0.0107C+0.1446	0.9249**	716.73±29.63Aa	0.04±0.001Cb	19.19±8.31Cb	6.76±0.46Ab	6.87±1.13Ab	92.66±8.16Cb	13.02±1.45Cb
	NPK+M	C/Q=0.0020C+0.0521	0.8368**	C/D=0.0059C+0.1260	0.8215**	519.35±23.17Ab	0.02±0.001Cc	12.76±1.25Cc	25.96±1.70Aa	24.75±2.48Aa	128.22±8.61Ba	24.91±2.76Ba
施磷效果 P fertilization effect												
20—40	CK	C/Q=0.0013C+0.0187	0.9446**	C/D=0.0080C+0.1068	0.9182**	769.23±18.31Aa	0.07±0.008Ba	53.48±1.70Ba	0.21±0.02Ab	0.50±0.21Ab	121.89±1.93Bab	16.24±0.19Bb
	NK	C/Q=0.0014C+0.0201	0.9660**	C/D=0.0087C+0.0856	0.8938**	714.29±14.47Aa	0.07±0.006Ba	49.75±2.16Bb	0.41±0.03Ab	0.92±0.26Ab	115.95±5.72Bb	16.67±0.63Bb
	NPK	C/Q=0.0015C+0.0239	0.9657**	C/D=0.0079C+0.0845	0.9955**	666.67±3.43Aa	0.06±0.006Ba	41.84±0.42Bb	3.32±0.31Bb	2.68±0.44Bb	120.79±3.47Bab	18.09±0.76Bb
	NPK+M	C/Q=0.0022C+0.0123	0.9581**	C/D=0.0070C+0.0970	0.9462**	454.54±9.54Ab	0.04±0.003Bb	19.84±0.54Bc	19.66±4.90Aa	17.24±3.29Aa	134.78±4.91Aba	24.29±0.77Ba
施磷效果 P fertilization effect												
40—60	CK	C/Q=0.0013C+0.0123	0.9866**	C/D=0.0057C+0.0806	0.9947**	526.32±5.68Ba	0.19±0.009Aa	98.04±4.18Aa	0.12±0.02Bc	0.51±0.14Ac	165.53±5.01Aa	30.95±1.19Ac
	NK	C/Q=0.0023C+0.0128	0.9969**	C/D=0.0061C+0.1599	0.9807**	434.78±4.39Ba	0.18±0.004Aa	78.13±1.83Aa	0.25±0.05Ac	0.83±0.07Ac	152.95±5.83Aa	35.38±0.57Ac
	NPK	C/Q=0.0038C+0.0149	0.8454**	C/D=0.0060C+0.1425	0.9280**	192.31±9.19Bb	0.27±0.003Aa	52.36±1.84Ab	2.61±0.49Bb	5.62±0.68Ab	162.14±4.36Aa	48.38±0.83Ab
	NPK+M	C/Q=0.0049C+0.0218	0.9855**	C/D=0.0063C+0.1111	0.9733**	204.08±3.56Bb	0.22±0.007Aa	45.87±1.35Ac	7.77±0.95Ba	23.19±1.50Aa	157.97±6.99Aa	80.25±3.83Aa
施磷效果 P fertilization effect												

注: Q_m—磷最大吸附量; K_d—磷吸附亲和常数; MBC—磷解吸亲和常数; D_m—磷的最大缓冲容量; D_t—磷的解吸率; D_m—以Mehlich-3浸提的磷、铁、铝计算的吸附饱和度; DPS_{O,P}—以Olsen-P和Q_m计算的吸附饱和度和; D_t—磷解吸率。数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著, *—P<0.05, **—P<0.01, NS—差异不显著。
 Note: Q_m—Maximum P adsorption capacity; K_d—P adsorption constant; MBC—P maximum buffering capacity; D_m—P maximum desorption capacity; K_d—P desorption constant; DPS_{M,P}—Degree of P sorption saturation calculated with Mehlich-3 extracted P, Fe and Al; DPS_{O,P}—Degree of P sorption saturation calculated with Olsen-P and D_m; D_t—The P desorption ratio. Data followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments in the same soil depth, and followed by different uppercase letters indicate significant difference among soil depths of the same treatment (P<0.05). P fertilization effect is defined as the T-test between the average value of NPK and NPK+M and that of CK and NK treatment. *—P<0.05; **—P<0.01; NS—No significant difference.

越强^[4, 28]。D_m 与 Q_m 随施磷量变化呈相反的趋势, 在 0—20 cm 土层中, 施磷处理的 D_m 值高于不施磷处理, 以 NPK+M 处理 D_m 值最高, 其 D_m 值比其他处理增加了 38.38%~261.40%。施磷肥处理比不施磷处理增加了 0—60 cm 剖面的 D_r 值, 增加率为 8.52%~

474.0%, 每个土层均以 NPK+M 处理 D_r 值最高, 比 NPK 处理显著增加了 34.27%~91.32% (表 2)。

2.2 土壤性质

由图 2 可知, 在 3 个土层中, 与不施磷处理 (CK 和 NK) 相比, 施磷处理 (NPK 和 NPK+M) 的全磷和

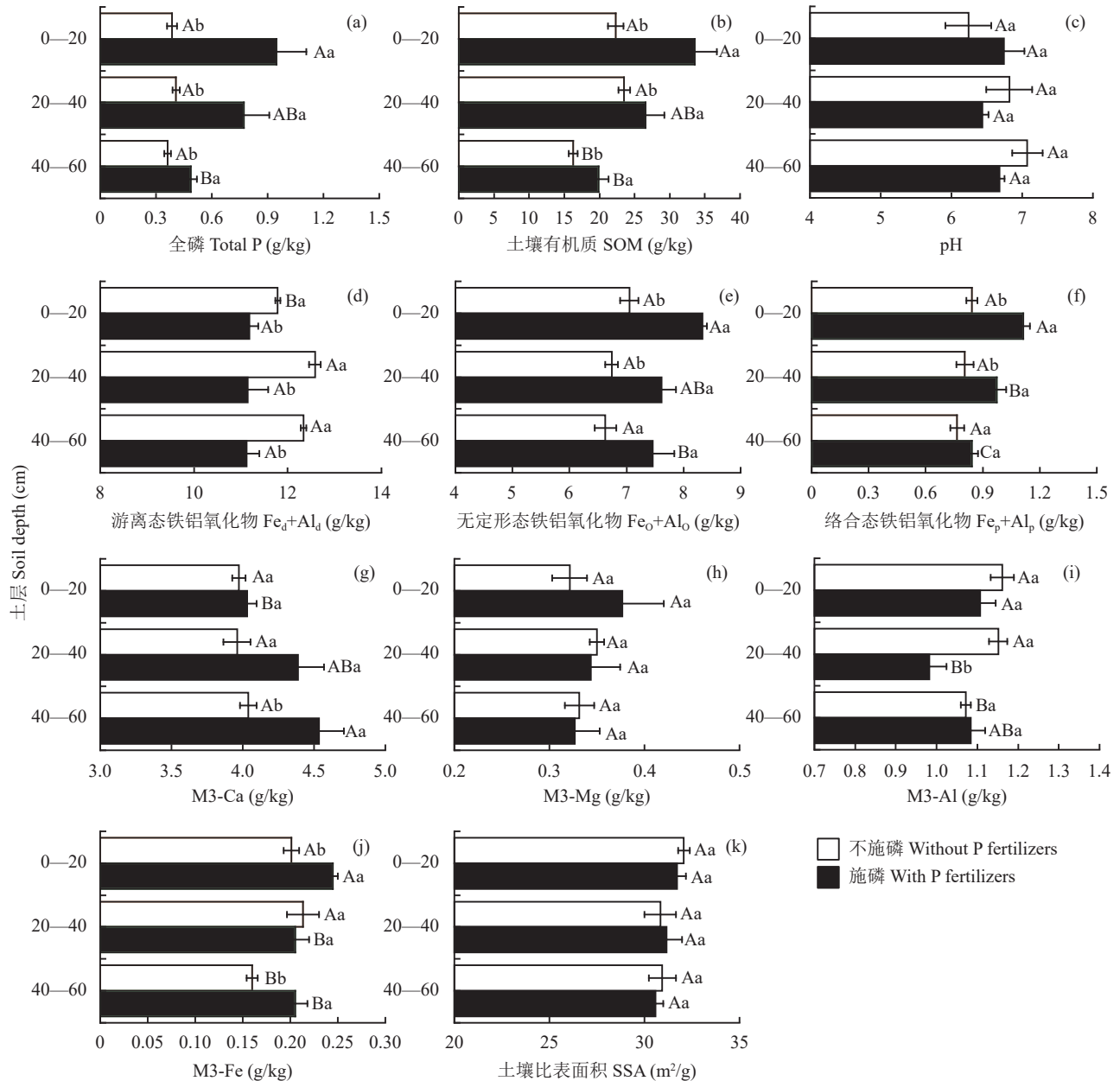


图 2 不施磷与施磷处理下不同土层黑土性质

Fig. 2 Soil properties with and without P application at three soil depths in black soil

注: 统计分析数据为不施磷 (CK 与 NK) 和施磷 (NPK 与 NPK+M) 处理平均值。M3-Ca、M3-Mg、M3-Fe 和 M3-Al 指由 Mehlich-3 溶液浸提的钙、镁、铁和铝离子。柱旁不同大写字母表示同一处理不同土层中差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The data for statistics is the average of CK and NK, and that of NPK and NPK+M; SOM—Soil organic matter; Fe_e + Al_d is the sum of free iron (Fe) and aluminum (Al) oxide; Fe_o + Al_o is the sum of amorphous Fe and Al oxides; Fe_p + Al_p is the sum of humus complex Fe and Al oxides; M3-Ca, M3-Mg, M3-Fe and M3-Al are the Ca, Mg, Fe and Al extracted by Mehlich-3 solution, respectively. SSA—Soil specific surface area. Different uppercase letters beside the bars indicate significant difference among soil depths of the same treatment, and lowercase letters indicate significant difference among treatments in the same soil depth ($P < 0.05$).

土壤有机质 (SOM) 含量分别增加了 34.40%~145.5% 和 12.77%~50.07%, Fe_d+Al_d 的含量降低了 5.14%~11.35% ($P<0.05$)。在 0—40 cm 土层中, 施磷处理的 Fe_o+Al_o 和 Fe_p+Al_p 含量分别比不施磷处理增加了 13.06%~18.22% 和 20.66%~32.15%。同时, 施磷处理比不施磷处理显著增加了 M3-Fe 在 0—20 和 40—60 cm 土层中, M3-Ca 在 40—60 cm 土层中的含量。对于不施磷处理, SOM、M3-Al 和 M3-Fe 含量在 40—60 cm 土层中比 0—20 cm 土层中分别降低了 27.10%、7.71% 和 20.50%, Fe_d+Al_d 含量增加了 4.70% ($P<0.05$)。施磷处理的全磷、SOM、 Fe_o+Al_o 、 Fe_p+Al_p 、M3-Al 和 M3-Fe 含量在 40—60 cm 土层中分别比 0—20 cm 土层中降低了 48.51%、40.60%、10.52%、24.40%、2.11% 和 16.33%, M3-Ca 含量增加了 12.53% ($P<0.05$)。

2.3 土壤性质与磷吸附-解吸特征参数的关系

由图 3a 可知, 在不施磷肥处理中, 全磷 (Total P) 与吸附饱和度 ($DPS_{o,p}$) 值呈显著负相关, 与磷最大吸附量 (Q_m) 呈显著正相关; 土壤有机质 (SOM)、M3-Al 和 M3-Fe 均与 Q_m 呈显著正相关关系, 与磷吸附亲和力常数 (K_Q)、磷最大缓冲容量 (MBC) 和磷解吸率 (D_i) 呈显著负相关关系; pH 与 $DPS_{m,p}$ 和 $DPS_{o,p}$ 值均表现出显著的负相关关系; Fe_p+Al_p 与 Fe_o+Al_o 均与 $DPS_{m,p}$ 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。SOM 与 M3-Fe 为显著正相关, Fe_d+Al_d 与 Fe_o+Al_o 为显著负相关关系 ($P<0.05$), Fe_p+Al_p 与 pH 呈极显著负相关, 与 M3-Fe 呈极显著正相关 ($P<0.01$)。冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 结果表明: 土壤性质能解释不施磷处理磷吸附解吸特征参数变异的 77.59%。其中, SOM、 Fe_d+Al_d 和 Total P 是主要因素, 其解释率分别为 36.73%、16.55% 和 13.38% ($P<0.05$) (图 4a)。

由图 3b 可知, 在施磷肥处理下, 土壤性质主要对 $DPS_{m,p}$ 、 $DPS_{o,p}$ 和 MBC 有显著影响。全磷、SOM、 Fe_p+Al_p 、pH 和 M3-Mg 均与 $DPS_{m,p}$ 和 $DPS_{o,p}$ 表现出显著正相关关系, 与 MBC 表现出显著负相关关系, 此外, Fe_p+Al_p 与 K_Q 、 D_m 和 D_i 呈显著负相关关系 ($P<0.05$); Fe_o+Al_o 与 $DPS_{m,p}$ 和 $DPS_{o,p}$ 呈显著正相关关系 ($P<0.05$); Fe_d+Al_d 、M3-Ca 与 $DPS_{m,p}$ 和 $DPS_{o,p}$ 呈极显著负相关关系 ($P<0.01$)。Total P 与 SOM 之间具有极显著的正相关关系, 且均与 Fe_d+Al_d 、M3-Ca 呈显著负相关关系, 与 Fe_o+Al_o 、 Fe_p+Al_p 、pH 和 M3-Mg 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。 Fe_d+Al_d 与 Fe_p+Al_p 、M3-Mg 呈显著负相关, 与 M3-

Ca、M3-Fe 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。 Fe_o+Al_o 与 Fe_p+Al_p 之间具有极显著的正相关关系, 且均与 M3-Ca 呈显著负相关关系, 与 M3-Mg 呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。RDA 结果表明: 土壤性质能解释施磷处理磷吸附解吸特征参数变异的 90.62%, 其中, Fe_d+Al_d 、 Fe_p+Al_p 、pH 和 SOM 是主要影响因素, 分别解释了 33.94%、28.57%、5.89% 和 3.28% ($P<0.05$) (图 4b)。

3 讨论

3.1 黑土不施磷与施磷条件下的吸附-解吸特征

由图 1 可知, 不同处理磷的吸附量均呈先快速上升, 再逐渐趋于平缓的趋势。这与刘彦伶等^[10]在黄壤、Yang 等^[28]在黑土、Zhang 等^[12]在潮土等的研究结果相似。出现这种现象的原因可能是, 土壤对磷的吸附过程是一个多阶段的动力学过程, 受到固相的吸附能力和停留时间的影响^[37]。在土壤平衡溶液磷浓度较低的情况下, 化学吸附主导吸附过程, 离子交换和配位交换是其吸附率高的主要机制^[38]。而在平衡磷浓度较高的情况下, 随着土壤中磷可利用的吸附位点逐渐饱和, 溶液中的磷以较慢的物理-化学吸附形式被土壤固定^[4, 38]。不同处理中磷的解吸量要远低于土壤对磷的吸附量, 这说明吸附在土壤中的磷素可以在一定程度上发生解吸反应重新释放到土壤溶液中去^[28]。随着土壤平衡溶液中磷浓度的增加, 土壤磷解吸量呈增加的趋势 (图 1)。可能的原因是在平衡溶液磷浓度低的情况下, 磷吸附在土壤胶体高键能位点上, 具有较高的结合力, 而随着土壤平衡溶液中磷浓度的增加, 土壤对磷的结合能逐渐降低, 吸附于土壤的磷容易被解吸, 磷的解吸量逐渐增加^[39]。

在不施磷处理中, 与 CK 处理相比, NK 处理的磷吸附量和最大吸附量有所降低 (图 1)。而 Q_m 与 Total P、SOM、M3-Fe 和 M3-Al 均为显著正相关关系 (图 3a)。前期研究表明, NK 处理较 CK 处理显著降低了 SOM 的含量, 对 Total P、M3-Fe 和 M3-Al 影响较小^[40], SOM 作为影响磷吸附-解吸的一个重要因素, 其含量的降低是造成 NK 处理磷最大吸附量降低的可能原因^[4, 28]。此外, 由图 1 和表 2 可知, 与 0—20 cm 土层相比, 不施磷处理在 40—60 cm 土层中的磷吸附量和磷最大吸附量均显著降低。这可能的原因是 SOM、M3-Fe 和 M3-Al 等的含量降低^[40], 减少了磷的吸附位点, 从而降低了土壤对磷的吸

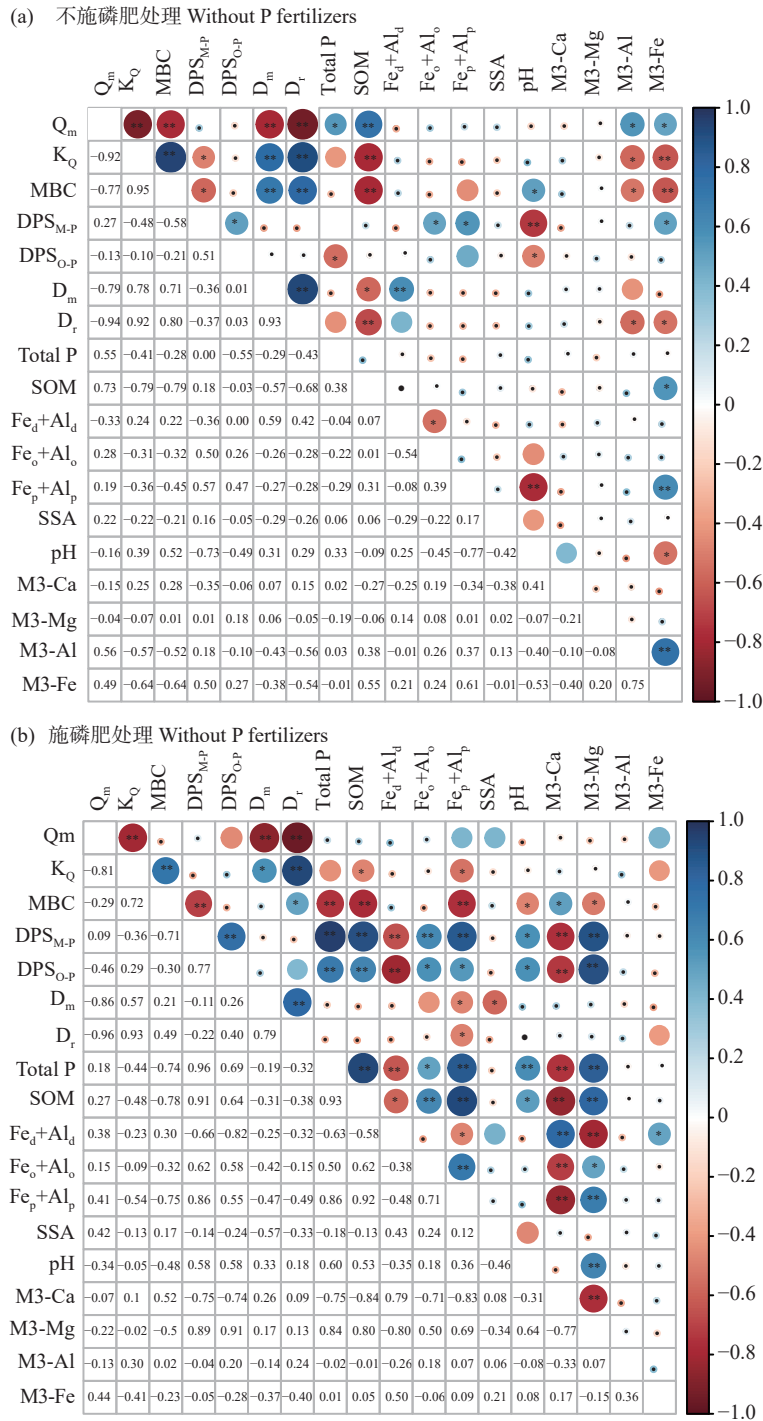


图 3 不施磷与施磷处理黑土性质指标与磷吸附-解吸特征参数的关系

Fig. 3 The relationship between soil property indexes and P adsorption and desorption parameters of black soil treated with and without P fertilizers

注: Q_m —磷最大吸附量; K_Q —磷吸附亲和力常数; MBC—磷的最大缓冲容量; DPS_{M-P} —以 Mehlich-3 浸提的磷、铁、铝计算的吸附饱和度; DPS_{O-P} —以 Olsen-P 和 Q_m 计算的吸附饱和度; D_m —磷的最大解吸量; D_r —磷解吸率。SOM—土壤有机质; Fe_d+Al_d —游离态铁铝氧化物; Fe_o+Al_o —无定形铁铝氧化物; Fe_p+Al_p —络合态铁铝氧化物; SSA—土壤比表面积; M3-Ca、M3-Mg、M3-Fe 和 M3-Al 指由 Mehlich-3 溶液浸提的钙、镁、铁和铝离子。

Note: Q_m —Maximum P adsorption capacity; K_Q —P adsorption constant; MBC—P maximum buffering capacity; DPS_{M-P} —Degree of P sorption saturation calculated with Mehlich-3 extracted P, Fe and Al; DPS_{O-P} —Degree of P sorption saturation calculated with Olsen-P and Q_m ; D_m —P maximum desorption capacity; D_r —The P desorption ratio. SOM—Soil organic matter; $Fe_d + Al_d$ is the sum of free iron (Fe) and aluminum (Al) oxide; $Fe_o + Al_o$ is the sum of amorphous Fe and Al oxides; $Fe_p + Al_p$ is the sum of humus complex Fe and Al oxides; SSA—Soil specific surface area. M3-Ca, M3-Mg, M3-Fe and M3-Al are the Ca, Mg, Fe and Al extracted by Mehlich-3 solution, respectively.

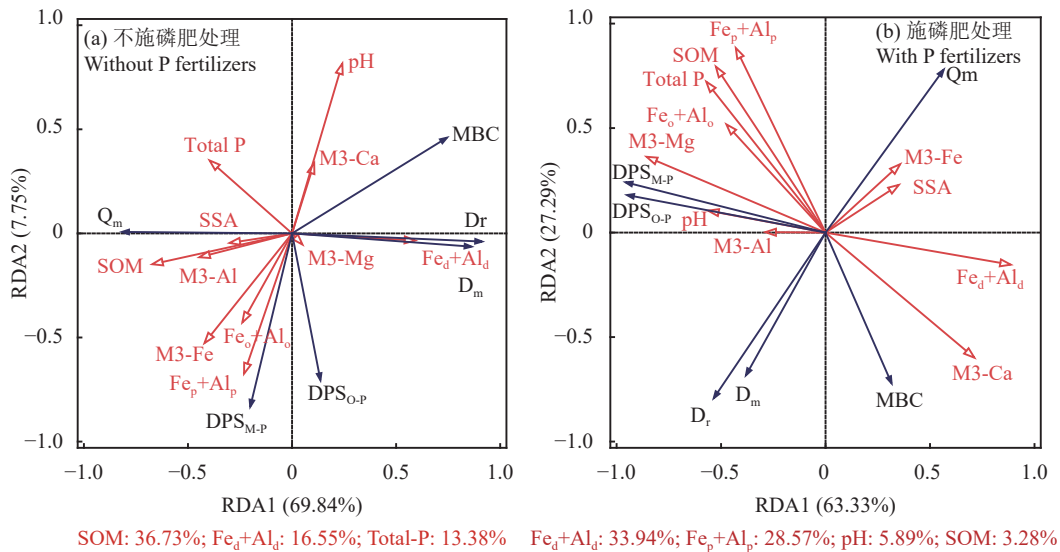


图 4 不施磷与施磷处理黑土性质指标对磷吸附-解吸特征参数的影响

Fig. 4 Effects of soil property indexes on P adsorption and desorption parameters of black soil treated with and without P fertilizers

注: Q_m —磷最大吸附量; MBC—磷的最大缓冲容量; DPS_{M-P} —以 Mehlich-3 浸提的磷、铁、铝计算的吸附饱和度; DPS_{O-P} —以 Olsen-P 和 Q_m 计算的吸附饱和度; D_m —磷的最大解吸量; D_r —磷解吸率。Total P—全磷; SOM—土壤有机质; $Fe_d + Al_d$ —游离态铁铝氧化物; $Fe_o + Al_o$ —无定形态铁铝氧化物; $Fe_p + Al_p$ —络合态铁铝氧化物; SSA—土壤比表面积; M3-Ca、M3-Mg、M3-Fe 和 M3-Al 指由 Mehlich-3 溶液浸提的钙、镁、铁和铝离子。

Note: Q_m —Maximum P adsorption capacity; MBC—P maximum buffering capacity; DPS_{M-P} —Degree of P sorption saturation calculated with Mehlich-3 extracted P, Fe and Al; DPS_{O-P} —Degree of P sorption saturation calculated with Olsen-P and Q_m ; D_m —P maximum desorption capacity; D_r —The P desorption ratio. SOM—Soil organic matter; $Fe_d + Al_d$ is the sum of free iron (Fe) and aluminum (Al) oxide; $Fe_o + Al_o$ is the sum of amorphous Fe and Al oxides; $Fe_p + Al_p$ is the sum of humus complex Fe and Al oxides; SSA—Soil specific surface area. M3-Ca, M3-Mg, M3-Fe and M3-Al are the Ca, Mg, Fe and Al extracted by Mehlich-3 solution, respectively.

附。同一土层中, 与不施磷肥相比, 施磷肥处理显著降低了磷吸附量、 Q_m 、 K_0 和 MBC, 增加了磷的解吸量 (D_m) 和 D_r 值 (表 2), 这与王斌等^[41]在灰漠土、Yan 等^[18]在潮土的研究结果相似, 这说明长期磷肥投入降低了土壤对磷素的吸附力, 增加了土壤中磷的解吸能力, 提高了土壤磷的有效性。然而, 刘彦伶等^[10]在黄壤上研究指出, 施用化学磷肥增加了土壤磷素的吸附位点和吸附结合能, 林诚等^[42]在黄泥田土壤中研究发现, 与不施磷和单施化肥处理相比, 化肥配施牛粪显著增加了磷的最大吸附量, 提高了土壤中磷的吸附点位数, 这说明磷的吸附解吸的影响因素是多方面的, 其影响机理需要深入研究。

3.2 黑土不施磷与施磷条件下土壤性质对磷吸附-解吸特征的影响

土壤的有机质、金属氧化物和磷素水平等是磷吸附-解吸特征的重要影响因素^[11-12, 28, 43]。在本研究中, 不施磷肥处理中有机质与 Q_m 呈显著正相关关系, 与 D_m 为负相关 (图 3a)。这与 Yang 等^[28]在黑土上通过培养试验得出的结果相似, 低磷情况下, 有

机质的增加显著提高了 Q_m 值, 降低了 D_m 值。这表明, 在磷亏缺情况下, 有机质含量的升高增加了磷素的吸附位点, 土壤的储磷能力增加^[44]。可能的原因是, 有机质自身是一种固磷基质, 有机质可通过溶解等作用增强铁铝氧化物的活性, 从而提高土壤对磷的吸附量^[45-46]。本研究结果也表明在不施磷处理中, 有机质与 M3-Fe 有显著正相关关系, 从而验证了这一观点。与不施磷肥相比, 施磷处理降低了 Q_m , 增加了 D_m 和 D_r 值。这说明长期磷投入可以降低土壤对磷的吸附, 增加磷的解吸能力, 提高磷的利用率^[28]。RDA 结果表明, 在施磷处理中, $Fe_d + Al_d$ 和 $Fe_p + Al_p$ 是影响磷吸附解吸特征的主要因素, 其次为 pH 和 SOM (图 4b)。Kang 等^[47]通过通径分析发现, 虽然有机质与 Q_m 呈极显著相关, 但并没有对 Q_m 起直接影响, 而主要是通过影响铁铝氧化物对 Q_m 起间接作用, 说明土壤有机质对磷吸附解吸作用的影响, 主要通过铁铝氧化物的作用。本研究中, 施磷肥处理较不施磷肥处理显著降低了 $Fe_d + Al_d$ 含量, 增加了 $Fe_p + Al_p$ 含量, 降低了土壤胶体对磷的物理化

学吸附潜能, 增加了磷的解吸能力^[48-49]。

3.3 黑土磷素管理

研究结果表明, 施磷肥处理可显著降低土壤对磷的吸附能力, 增加磷解吸能力, 提高土壤磷的有效性, 但这同时容易增加环境污染的风险^[50]。一般把磷吸附饱和度 (degree of P sorption saturation, DPS) 值=25%, 定义为磷流失的临界值^[51]。然而不同土壤上, 临界值 DPS 值具有差异, 如在红壤上 DPS 值超过 8%, 黄壤上 DPS 值超过 10%, 均能引起磷流失的风险^[10, 52-53]。本研究中用两种方法计算得出土壤 DPS 值 (图 5), 并将其与土壤 Olsen-P 进行线性关系拟合 ($P < 0.01$), 两种方法拟合效果均达到显著水平, $R^2 = 0.7888$ (DPS_{O-P}) 和 0.9756 (DPS_{M-P})。通过前期研究确定的黑土磷素的流失临界值为 50.64 mg/kg ^[40], 计算得出当土壤达到磷流失临界值时, DPS_{O-P} 和 DPS_{M-P} 分别为 8.82% 和 7.48%。故本研究认为当黑土 DPS 值在 8% 左右时, 土壤磷存在高度流失风险。DPS 值受 Olsen-P、 Q_m 和铁铝氧化物的影响, 而施肥是产

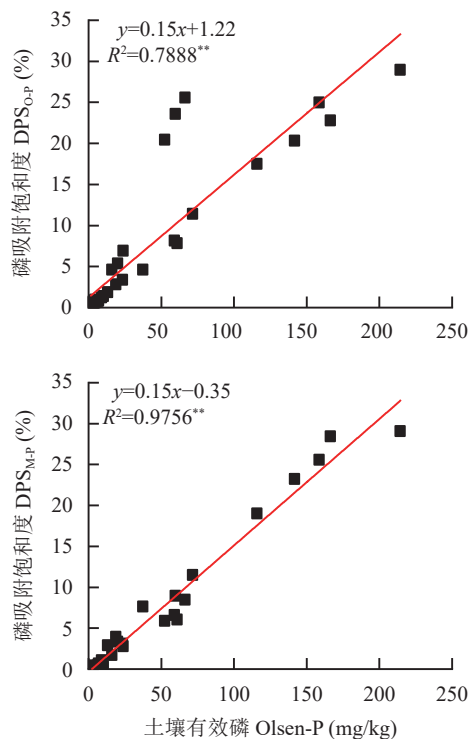


图 5 磷吸附饱和度 (DPS_{O-P} 和 DPS_{M-P}) 与土壤有效磷 (Olsen-P) 的相关关系

Fig. 5 The relationship of the degree of P sorption saturation (DPS_{O-P} , DPS_{M-P}) with Olsen-P of soil

注: DPS_{M-P} 和 DPS_{O-P} 分别指由 Mehlich-3 浸提的磷和 Olsen-P 计算的磷吸附饱和度。

Note: DPS_{M-P} and DPS_{O-P} refer to the degree of P sorption saturation calculated by Mehlich-3 extractable P and Olsen-P, respectively.

生这种变化的最直接因素。因此, 在调节黑土磷素供应和降低磷流失风险时, 合理的磷投入和有机无机肥配比应深入考虑。

4 结论

长期施磷降低了黑土磷的最大吸附量 (Q_m) 和磷缓冲容量 (MBC), 从而降低了对磷的吸附, 增加最大解吸量 (D_m), 促进了土壤磷的解吸, 进而提高了外源磷的有效性。有机肥与化肥配合施用提高磷肥有效性的效果显著高于单施化肥。依据 RDA 结果, 不施磷条件下, 土壤中有机质、游离态铁铝氧化物和全磷是影响磷吸附解吸特征参数的主要因素, 施磷条件下, 土壤中的游离态和络合态铁铝氧化物、pH 和有机质是影响磷吸附解吸特征参数的主要因素。

参考文献:

- [1] Liu S, Meng J, Jiang L, *et al.* Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 116: 12–22.
- [2] Van der Salm C, Middelkoop J, Ehlert P, *et al.* Changes in soil phosphorus pools of grasslands following 17 yrs of balanced application of manure and fertilizer[J]. *Soil Use & Management*, 2017, 33(1): 2–12.
- [3] 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 Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260–268.
- [4] Wang L, Liang T. Effects of exogenous rare earth elements on phosphorus adsorption and desorption in different types of soils[J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 148–155.
- [5] Lair G, Zehetner F, Khan Z, Gerzabek M. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River[J]. *Geoderma*, 2009, 149: 39–44.
- [6] McDowell R, Sharpley A, Withers P. Indicator to predict the movement of phosphorus from soil to subsurface flow[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(7): 1505–1509.
- [7] Laboski C, Lamb J. Impact of manure application on soil phosphorus sorption characteristics and subsequent water quality implications[J]. *Soil Science*, 2004, 169(6): 440–448.
- [8] 夏文建, 梁国庆, 周卫, 等. 长期施肥条件下石灰性潮土磷的吸附解吸特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 431–438.
Xia W J, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Adsorption and desorption characteristics of soil phosphorus in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(3): 431–438.
- [9] 夏海勇, 王凯荣. 有机质含量对石灰性黄潮土和砂姜黑土磷吸附-解吸特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1303–1310.

- Xia H Y, Wang K R. Effects of soil organic matter on characteristics of phosphorus adsorption and desorption in calcareous yellow fluvo-aquic soil and lime concretion black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(6): 1303–1310.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang Y, Huang S, Guo D, *et al.* Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvo-aquic soils under long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1306–1318.
- [13] 杨燕玲. 农田土壤对磷的吸附和解吸特性研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(1): 4–5, 16.
- Yang Y L. Advances in phosphorus adsorption and desorption of farmland soils[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2019, 47(1): 4–5, 16.
- [14] 徐秋桐, 张莉, 章明奎. 不同有机废弃物对土壤磷吸附能力及有效性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 236–244.
- Xu Q T, Zhang L, Zhang M K. Effects of different organic wastes on phosphorus sorption capacity and availability in soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 236–244.
- [15] Nwoke O, Vanlauwe B, Diels J, *et al.* Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 100: 285–294.
- [16] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 等. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 303–307.
- Chen B L, Sheng J D, Jiang P A, *et al.* Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 303–307.
- [17] Abdala, Belchior D, Silva D, *et al.* Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2015, 119 (1): 504–514.
- [18] Yan Z, Chen S, Dari B, *et al.* Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 163–171.
- [19] Sharpley A, Brye K, Burke, J, *et al.* Can soil phosphorus sorption saturation estimate future potential legacy phosphorus sources?[J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2020, 3(1): 1–10.
- [20] Dari B, Nair V, Sharpley A, *et al.* Consistency of the threshold phosphorus saturation ratio across a wide geographic range of acid soils[J]. *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 2018, 1(1): 1–8.
- [21] Kleinman P, Sharpley A. Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 1825–1839.
- [22] Breeuwsma A, Silva S. Phosphorus fertilization and environmental effects in the Netherlands and the Po Region (Italy). Agriculture Research Department Report 57. Wageningen, the Netherlands: Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil, and Water Research. 1992.
- [23] Dou Z, Ramberg C, Toth J, *et al.* Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 93–101.
- [24] Liu J, Liao Z, Zhang H, *et al.* Effect of phosphate fertilizer and manure on crop yield, soil P accumulation, and the environmental risk assessment[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(9): 1107–1114.
- [25] Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant[M]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 15: 1409–1416.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Analytical method of soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [27] Kovar J, Pierzynski G. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters[M]. Blacksburg: Virginia Tech University, 2009, 33–37.
- [28] Yang X, Chen X, Yang X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 85–91.
- [29] 王嗣洪, 王而力. 西辽河流域不同土地利用结构沙土磷解吸特征[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(7): 756–762.
- Wang S Q, Wang E L. Desorption characteristics of phosphorus from different used sandy soil in western Liao River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(7): 756–762.
- [30] Jalali M, Jalali M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566–567: 1080–1093.
- [31] Yan X, Wang D, Zhang H, *et al.* Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 175: 47–53.
- [32] Hiradate S, Uchida N. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(5): 665–675.
- [33] 王讲利, 凌慧娟, 孙建光, 等. 灰漠土长期定位施肥试验研究. I 施肥对作物产量、肥料效益及水效益影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(S): 82–86.
- Wang J L, Ling H J, Sun J G, *et al.* Study of long-term fertilization in gray desert soil. I The effect of fertilization on crop yields, fertilizer and water efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(S): 82–86.
- [34] Nair V, Sollenberger L, Harris W, *et al.* Mining of soil legacy phosphorus without jeopardizing crop yield[J]. *Agrosystems*,

- Geosciences and Environment, 2020, 3: e20024.
- [35] Sharpley A. Advances in understanding the environmental effects of phosphorus fertilization[A]. Rengel Z. Achieving sustainable crop nutrition[M]. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, 2020, 115–152.
- [36] Vadas P, Kleinman P, Sharpley A, *et al.* Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: A single extraction coefficient for water quality modeling[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(2): 572–580.
- [37] Bhadha J, Daroub S, Lang T. Effect of kinetic control, soil: solution ratio, electrolyte cation, and others, on equilibrium phosphorus concentration[J]. *Geoderma*, 2012, 173–174: 209–214.
- [38] Lai D, Lam K. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 735–743.
- [39] 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.
- [40] Wang Q, Qin Z, Zhang W, *et al.* Effect of long-term fertilization on phosphorus fractions in different soil layers and their quantitative relationships with soil properties[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(9): 2–15.
- [41] 王斌, 刘骅, 李耀辉, 等. 长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 726–733.
- Wang B, Liu H, Li Y H, *et al.* Phosphorus adsorption and desorption characteristics of gray desert soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 726–733.
- [42] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, 26(6): 1034–1038.
- Lin C, Wang F, Lin X J, *et al.* The effect of phosphorus adsorption and desorption of long-term fertilization on south yellow clayey soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(6): 1034–1038.
- [43] Sun T, Deng L, Fei K, *et al.* Characteristics of phosphorus adsorption and desorption in erosive weathered granite area and effects of soil properties[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(23): 28780–28793.
- [44] Zhou Q, Zhu Y. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area, China[J]. *Geoderma*, 2003, 115 (1–2): 45–54.
- [45] Mamo M, Gupta S, Rosen C, *et al.* Phosphorus leaching at cold temperatures as affected by wastewater application and soil phosphorus levels[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(4): 1243–1250.
- [46] 胡红青, 徐凤琳, 李学垣. 幕阜山土壤粘粒复合体的固相组成与磷的吸附及解吸[J]. *华中农业大学学报*, 1993, 12(1): 31–39.
- Hu H Q, Xu F L, Li X Y. Effects of Mufu Mountain soil clay constituents on phosphate adsorption and desorption[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1993, 12(1): 31–39.
- [47] Kang J, Hesterberg D, Osmond D. Soil organic matter effects on phosphorus sorption: A path analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(2): 360–366.
- [48] 甘海华, 徐盛荣. 红壤及其有机无机复合体对磷的吸附与解吸规律探讨[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 264–266.
- Gan H H, Xu S R. Study on P adsorption-desorption characteristics of red soil and its organo-mineral complexes[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 264–266.
- [49] 夏立忠, Roy A. 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, (3): 160–164.
- Xia L Z, Roy A. Kinetics of soil phosphorus adsorption-desorption under long-term fertilization of cattle manure in grassland[J]. *Soils*, 2000, (3): 160–164.
- [50] 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: 浙江大学博士学位论文, 2013.
- Xue Q Y. Effects of agronomic measures and environmental factors on soil phosphorus transformation and loss and corresponding mechanism[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2013.
- [51] Schoumans O, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 111–116.
- [52] 王艳玲. 吉林玉米带黑土磷素形态及吸附-解吸特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2004.
- Wang Y L. Study on the forms of phosphorus and characteristics of adsorption-desorption of the corn belt phaeozem in Jilin [D]. Changchun: MS Thesis of Jilin Agricultural University, 2004.
- [53] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 37–40.
- Liu F, Huang C Y, He T B, *et al.* Phosphorus loss by runoff in various dryland from yellow soil and its affecting factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(2): 37–40.