



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

王琼^{1,2}, 展晓莹^{1,3}, 张淑香¹, 彭畅⁴, 高洪军⁴, 张秀芝⁴, 朱平⁴, GILLES Colinet²

(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, 中国北京 100081; ² Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des deportes 2, 5030 Gembloux, Belgium; ³ 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业清洁流域创新团队/农业部农业环境重点实验室, 中国北京 100081; ⁴ 吉林省农业科学院农业环境与资源研究中心, 中国长春 130033)

摘要:【目的】长期不同施肥处理影响土壤磷库和土壤性质的变化。研究不同施肥处理下黑土磷的吸附解吸特征及其与土壤性质的响应关系, 为黑土合理施用磷肥, 提高磷有效性提供理论依据。【方法】本研究依托于公主岭黑土肥力长期定位试验, 供试作物为玉米。选取不施肥(CK)、施氮、钾肥(NK)、氮磷钾平衡施肥(NPK)、氮磷钾+有机肥(NPKM)4个处理。取1990、2000和2010年的0—20 cm土层的土壤样品, 分析土壤性质, 测定磷的吸附解吸值, 并用Langmuir方程拟合了磷的吸附曲线, 计算磷最大吸附量(Q_{max})、磷吸附常数(K)、最大缓冲容量(MBC)、磷吸附饱和度(DPS)以及土壤易解吸磷(RDP)。【结果】Langmuir吸附等温线方程能很好的拟合土壤吸附磷和相应的平衡溶液磷浓度曲线($R^2=0.93-0.99$)。不同施肥处理磷吸附解吸特征参数具有明显的差异。随试验年限的增加, 不同处理各特征参数变化不尽相同, 与1990年相比, 2010年不施磷处理(CK和NK), Q_{max} 值分别增加了1.83和1.61倍, MBC值分别增加了0.80%和49.40%, DPS值分别降低了92.04%和87.50%, RDP值分别降低了20.00%和82.83%; NPK处理 Q_{max} 和DPS值分别增加了81.39%和90.74%, MBC和RDP值分别降低了79.37%和48.57%; NPKM处理 Q_{max} 和MBC值分别降低了33.35%和78.52%, DPS和RDP值分别增加了11.36倍和1.48倍。施肥21年后, 与CK和NPK处理相比, NPKM处理的 Q_{max} 值降低了64.66%和49.52%, MBC值降低了81.87%和79.56%, DPS值增加了110和3.81倍, RDP值增加了4.36倍和78.57%。NPKM处理显著增加了土壤全磷(Total-P)、有效磷(Olsen-P)、有机质(SOM)和CaCO₃含量, 降低了比表面积, 维持pH、游离铁铝氧化物值不变。冗余分析结果表明: SOM和Total-P是造成磷吸附解吸特征参数差异的主要因素, 分别解释了全部变异的49.5%和18.7% ($P < 0.05$)。【结论】长期有机无机配施可显著增加SOM和土壤中磷素累积, 降低土壤对磷的吸附能力, 增加土壤对磷的解吸, 提高土壤磷的有效性, 但同时显著提高了土壤磷吸附饱和度和, 易引起磷素流失的风险, 对于NPKM处理应考虑有机肥与无机肥的投入量。

关键词: 长期施肥; 黑土; 磷吸附解吸; 土壤性质

Phosphorus Adsorption and Desorption Characteristics and Its Response to Soil Properties of Black Soil Under Long-Term Different Fertilization

WANG Qiong^{1,2}, ZHAN XiaoYing^{1,3}, ZHANG ShuXiang¹, PENG Chang⁴, GAO HongJun⁴,
ZHANG XiuZhi⁴, ZHU Ping⁴, GILLES Colinet²

收稿日期: 2019-07-01; 接受日期: 2019-08-21

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503120)、国家自然科学基金(41471249)

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

¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; ²Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Passage des deportes 2, 5030 Gembloux, Belgium; ³Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture /Agricultural Clean Watershed Research Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ⁴Agricultural Environment and Resources Center, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: 【Objective】Fertilizer is generally added to agricultural soil to meet the needs of crop production, but long-term over fertilization changes soil phosphorus (P) pool and soil properties. This study evaluated the characteristics change of P adsorption and desorption and its response to soil properties under long-term fertilization, to do a favor to provide theoretical basis of rational fertilizer application and improve the P availability of black soil. 【Method】 Four treatments, including no fertilizer (CK), urea and potash sulphate (NK), urea, super-calcium phosphate and potash sulphate (NPK), and NPK plus pig manure (NPKM), were investigated in a 21-year (1989-2010) long-term fertilization experiment at Gongzhuling (Jilin Province) of China. The crop of cropping system was maize. Soil samples were collected in 1990, 2000 and 2010 at 0-20 cm depth to analyze soil properties and to measure soil P adsorption and desorption characteristics. Langmuir equation was used to fit the P adsorption curve, and then the maximum adsorption capacity (Q_{max}), adsorption constant (K), buffering capacity of soil P (MBC), and P sorption saturation (DPS) were calculated according to Langmuir equation. 【Result】 There was a good fitness between the P adsorption curve and Langmuir equation ($R^2=0.93-0.99$, $P<0.01$). There existed difference for P adsorption and desorption characteristic under the four treatments. Over time, compared with initial year, for CK and NK treatments, the Q_{max} value increased by 1.83 and 1.61 times, MBC value increased by 0.80% and 49.40%, DPS value decreased by 92.04% and 87.50%, Readily Desorbable Phosphorus (RDP) value decreased by 20.00% and 82.83%, respectively; for NPK treatment, Q_{max} and DPS value increased by 81.87% and 79.56%, MBC and RDP value decreased by 79.37% and 48.57%, respectively, while under NPKM treatment, the Q_{max} and MBC value decreased by 33.35% and 78.52%, DPS and RDP values increased by 11.36 and 1.48 times, respectively. After 21 years experiments, compared with CK and NPK treatments, the Q_{max} and MBC value of NPKM treatment decreased by 64.66% and 49.52%, 81.87% and 79.56%, respectively; the DPS and RDP value of NPKM treatment increased by 110 and 3.81 times, 4.36 times and 78.57%, respectively. Compared with other treatments, the Total-P, Olsen-P, soil organic matter (SOM) and $CaCO_3$ contents increased and SSA decreased significantly, but the pH, free Fe_2O_3 and Al_2O_3 value kept unchanged under NPKM treatment. RDA test showed that SOM and Total-P were the main factors that explained 49.5% and 18.7% of the total variation ($P<0.05$) which caused the difference of P adsorption desorption characteristic parameters among four treatments. 【Conclusion】 Long-term combination of NPK fertilizers with manures could significantly increase SOM and P accumulation contents, decrease the soil adsorption capacity and increase desorption capacity, and improve P availability in soil, but it significantly increased the DPS value, easily thereby caused the risk of phosphorus loss. Therefore, various management practices and inorganic and organic P fertilizer input amounts should be considered to reduce P losses from this area.

Key words: long-term fertilization; black soil; P adsorption and desorption; soil properties

0 引言

【研究意义】磷作为植物生长的必需营养元素之一，是限制作物生长与农业生产的重要养分^[1-2]。在我国农田土壤中，由于土壤对磷的吸附和固定能力较强，土壤磷有效性低，作物对磷肥的利用率较低，当季利用率仅为 10%—25%^[3-4]，需要向土壤中大量施入磷肥。而长期过量施用磷肥和其他磷矿资源造成磷素在土壤中累积^[5-7]，增加了磷素流失和水体富营养化的风险^[8]。因此，如何降低土壤对磷的吸附固定，提高磷的有效性和磷肥利用率一直是土壤磷素研究领域的热

点问题^[9]。【前人研究进展】磷等温吸附解吸曲线是描述磷吸附解吸特征常用的手段^[9]，一般常用 Langmuir 方程描述土壤磷的吸附行为，从而描述土壤的固磷情况^[10-11]。评价参数包括磷的最大吸附量 (Q_{max})、磷吸附常数 (K)、磷最大缓冲容量 (MBC) 和磷吸附饱和度 (DPS)^[12-13]，磷解吸是一个相对于吸附的相反过程，对评估土壤磷有效性有重要意义，与土壤吸附的磷再利用有关^[14]。土壤组分是影响磷吸附解吸的主要因素^[3,15]，从 20 世纪 50 年代开始，国内外学者已从多方面对土壤磷的吸附解吸特征开展了研究，例如 ZHANG 等^[16]通过研究长期施肥后 5 种不

同质地的潮土磷吸附解吸特征,发现黏粒、粉粒、有机质和游离的铁氧化物是影响磷吸附的主要因素,砂粒是影响磷解吸的主要因素。DEBICKA 等^[17]也证明了在砂质土壤中有有机质是影响磷吸附解吸的最重要因素,土壤 pH、钙等都是影响磷吸附解吸的主要因素^[18-19]。但前期研究大多只是通过简单相关分析比较了吸附解吸特征参数与土壤性质之间的关系^[20-21]。而不同施肥处理也同样改变土壤对磷的吸附解析特征,从而影响磷的有效性^[10,22]。赵庆雷、JIAO、杨芳等^[23-25]在不同土壤中发现,和单施化肥相比,长期单施有机肥可显著降低红壤 0—20 cm 土层的 Q_{\max} 、K 和 MBC 值,提高该土层的磷累积解吸量和累积解吸率,有机无机配施后,这种效果更为突出;但也有相反结果,长期在水稻土上施用有机肥比单施化肥增加了非晶态 Fe 和 Al 的含量,增加了磷的 Q_{\max} 值^[26],目前关于长期不同施肥处理对磷吸附解吸影响的研究大多只单纯比较了不同施磷肥用量后各处理磷吸附解吸特征参数的差异^[9,12],对产生这种结果的原因研究较少。土壤组分的变化受长期施肥的影响,不同耕层土壤,长期有机无机配施处理后的土壤较单施化肥处理的土壤 pH 高 0.30—0.53 个单位,减缓土壤酸化速率^[27],更显著增加土壤有效磷和全磷含量^[28]。长期单施化肥可缓慢降低黑土有机质含量,而有机无机配施显著增加土壤有机质含量,不同地区年上升幅度为 24%—68%^[29],而长期不同施肥改变了土壤性质,从而影响了土壤磷吸附解析特征参数。此外,应用冗余分析等统计方法定量化研究土壤性质对特征参数的影响目前还较少。【本研究切入点】东北黑土区是我国的主要粮食产区,在国家粮食安全战略中发挥着重大作用^[30]。目前关于长期不同施肥后对黑土磷吸附-解吸的演变过程尚不清楚,定量化分析土壤性质影响磷吸附解吸特征的主要因素和机理探讨研究较少。【拟解决的关键问题】长期施肥试验为评估农业可持续管理体系提供了很好的平台^[30]。本研究选取公主岭市长期定位试验(1990 年开始),研究了长期试验不同施肥处理和典型试验年份耕层土壤的磷吸附解吸的演变特征,采用相关分析和冗余分析探讨土壤性质对黑土磷吸附解吸特征的影响,以期优化黑土施肥模式,提高磷有效性和磷肥利用率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

长期试验在中层黑土土壤肥力和肥料效益长期监

测站实施,该监测站位于吉林省公主岭市(124°48'34"E, 43°30'23"N, 建于 1989 年)。土壤类型是中层典型黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物。试验区基础土壤耕层(0—20 cm)的基本性质为:有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为:22.80、1.40、0.61 和 18.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷和速效钾含量分别为 11.79 和 158 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重为 1.19 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,pH 7.60。该监测站属于温带大陆性季风气候区,四季分明,试验期间年均降水量为 590.7 mm,主要集中在 4—9 月作物生长季,年均温为 4—5℃,年积温 2 800℃。

1.2 试验设计

选取 3 个典型历史年份(1990、2000 和 2010 年),4 个施肥处理:不施肥对照(CK);施氮、钾肥处理(NK);平衡施氮、磷、钾肥处理(NPK);氮磷钾+有机肥处理(NPKM)。每个试验小区面积为 400 m^2 ,随机排列,不设重复,采用多点取样法采集土壤样品。供试作物为玉米,一年一季。玉米品种在 1990—1993 年为丹育 13,1994—1996 年为吉单 222,1997—2005 年为吉单 209,2005—2010 年为郑单 958,于 4 月末播种,9 月末收获。化肥氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾,所有施氮处理的氮肥用量相同,氮磷钾和有机肥处理中有机肥为猪粪,其中 C、N、P 和 K 养分的含量状况根据中国有机肥养分志(1999)计算,年施用量约为 23 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (磷含量约为 0.18%),各处理具体数量见表 1。

表 1 不同处理无机、有机肥用量 ($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
Table 1 Amount of inorganic and organic fertilizer dosage in each treatment

处理 Treatment	无机肥 Inorganic $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	猪粪 Pig manure	
		用量 Dosage ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	$\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}$ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	0-0-0	-	-
NK	165-0-68	-	-
NPK	165-36-68	-	-
NPKM	50-36-68	23-30	115-39-77

1.3 土壤样品采集与分析

玉米收获后的 3—10 d,采用“S”形布点采集 0—20 cm 土层 5—7 点土壤样品,充分混匀,风干后进行分析和测定。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量,用 Olsen 法测定有效磷含量,土壤 pH 采用电位法(1:2.5 土:水),用二硫酸钠-柠檬酸钠-

碳酸氢钠 (DCB) 浸提, 并用 ICP-AES 测定游离铁铝氧化物, CaCO_3 含量采用容量滴定法^[31], 土壤比表面积采用氮气吸附法^[32]。

1.4 磷等温吸附试验

磷的等温吸附试验^[9, 26]: 称取过 20 目筛孔的风干土样 1.00 g 于 50 mL 离心管中, 分别加入以 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl (pH=7) 配制的不同磷含量梯度的溶液 25 mL, 其含磷 (P) 量分别为 0、10、20、40、80、160 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 每管加入 3 滴甲苯 (抑制微生物的活动), 25°C 恒温振荡 1 h, 振荡速率为 150 r/min (25 ± 2) $^\circ\text{C}$, 然后在 24°C 恒温培养箱中平衡 24 h, 在 4 000 r/min 离心 10 min, 用钼蓝比色法测定上清液中的磷含量即为平衡溶液中磷的浓度。土壤磷的吸附量为添加的溶液中的磷浓度与平衡液中磷的浓度之差。根据所得结果, 以平衡液中的磷浓度为横坐标, 土壤吸附的磷浓度为纵坐标画图, 此为磷的等温吸附曲线, 并用 Langmuir 方程进行拟合。

1.5 磷等温解吸试验

吸附试验结束后应立即进行磷的解吸试验。吸取 20 mL 饱和 NaCl 溶液加入吸附试验后的保留有土样的离心管中, 洗涤两次, 以除去游离态磷, 然后加入不含磷的 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液 25 mL, 同时加入 3 滴甲苯以抑制微生物生长, 25°C 下振荡 1 h, 恒温箱中平衡 24 h, 于 4 000 r/min 下离心 10 min, 采用钼蓝比色法测定上清液中的磷即为解吸磷。

1.6 计算方法

(1) Langmuir 方程: $C/Q=1/(K\times Q_{\max})+C/Q_{\max}$
C 为平衡溶液中的磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q 为土壤磷的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); Q_{\max} 为磷最大吸附量; K 为吸附亲和力和常数。

根据 Langmuir 等温吸附方程得到的一系列参数, 计算以下指标:

(2) 土壤最大缓冲容量 (MBC, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 是 Q_{\max} 和 K 两个因子的综合参数, $\text{MBC} = K\times Q_{\max}$;

(3) 磷吸附饱和度 (DPS, %) ^[33] 是土壤有效磷与最大吸附量之间的比例关系。 $\text{DPS} = \text{Olsen-P} / Q_{\max} \times 100\%$;

(4) 磷解吸率 = 土壤解吸磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) / 吸附磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) $\times 100\%$ 。

1.7 数据分析

所有的数据均采用平均值。采用 SPSS 20 对数据进行差异分析, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 检验, 比较不同施肥处理和不同年份磷吸附解

吸特征参数和土壤性质的差异 ($P < 0.05$), 并通过 Pearson 相关分析, 确定了土壤磷吸附参数与土壤性质的关系, 采用 Canoco 5 进行 RDA 分析。用 Sigmaplot 12.0 和 Origin9.0 进行绘图。

2 结果

2.1 长期不同施肥处理对黑土磷吸附特征的影响

如图 1 所示, 不同施肥处理磷等温吸附曲线较为一致, 整体上土壤磷的吸附量随磷平衡浓度增加呈先快速上升再缓慢增加的趋势。当土壤平衡磷浓度小于 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 各条等温线的斜率最大, 土壤对磷的吸附量表现出较快的增长速率, 随着平衡液磷浓度的增加, 磷吸附曲线变化平缓, 各条等温线的斜率均有不同程度的下降。不同年限各处理土壤对磷的吸附量在添加相同的磷浓度下有很大的差异。1990 年, 土壤对磷的吸附量顺序为 NK 处理 > NPKM 处理 > NPK 处理 > CK 处理, 但随年限的增加, CK 和 NK 处理的吸附量呈增加的趋势, NPK 处理吸附量变化不明显, NPKM 处理吸附呈减少趋势。2000 年和 2010 年, 土壤对磷的吸附量顺序为 NK 处理 > CK 处理 > NPK 处理 > NPKM 处理。

为了更好地量化不同施肥处理土壤中吸附磷的变化, 采用 Langmuir 吸附等温曲线模型拟合了 3 个年份不同处理土壤吸附磷和相应的平衡溶液磷浓度 (表 2) 的关系, 拟合度均达到了极显著水平 ($R^2=0.93\text{—}0.99$), 并用 Langmuir 参数计算了磷的吸附特征值。

Q_{\max} 反映了土壤胶体吸附点位的多少, 可用来表征土壤磷库容量, 当土壤中磷含量达到一定程度时, 土壤才可向作物提供养分^[34]。CK、NK 和 NPK 处理的土壤磷的最大吸附量 (Q_{\max}) 随时间均呈逐渐增加的趋势, 2010 年较 1990 年分别显著增加了 183%、161% 和 81%。而 NPKM 处理的 Q_{\max} 值则随施肥年限呈下降的趋势, 2010 年较 1990 年降低了 33.35%。施肥 21 年后, NPKM 处理 Q_{\max} 值分别比 CK, NK 和 NPK 处理显著降低了 64.66%、75.31% 和 49.52%。

K 表示土壤胶体与磷酸根离子亲和力的高低, 反映了土壤吸附磷的能级^[35]。K 值越大, 表明该吸附反应的程度越强, 生成物越稳定, 供磷强度越弱^[20]。当 $K > 0$ 时, 表明土壤磷的吸附反应是在常温下自发进行的。本试验 K 值为 0.01—0.49, 说明各处理的吸附反应在常温下均能自发进行, 但各处理的 K 值随试验年限的增加无规律性变化, 各处理之间 K 值差异不显著。

MBC 综合反映土壤吸磷强度和容量因素的参数^[34],

是判断土壤供磷特性的指标^[23, 36], MBC 值越大, 表明土壤贮存磷的能力越大^[9], 磷损失的风险就越小。随试验年限的增加, 各处理 MBC 值变化趋势不尽相同, CK 和 NK 处理 MBC 值整体保持稳定, NPK 和 NPKM 处理 MBC 值整体呈降低的趋势, 2010 年分别较 1990 年降低 79.37%和 78.52%。2010 年, NPKM 处理 MBC 值最低, 为 2.35 mg·kg⁻¹, 比 CK 和 NPK 处理分别降低了 81.87%和 79.56%。

DPS 反应土壤吸附磷位点的饱和状况, 评价农田

土壤磷素流失风险的指标, DPS 越大, 土壤固相的磷越容易解吸进入液相, 土壤对磷的吸附能力越低, 土壤中含有更高的溶解态磷^[33], 土壤磷淋失的风险也越大, 一般将 DPS 值为 25%作为判定土壤磷素流失的临界值^[37]。随着试验年限的增加, CK 和 NK 处理 DPS 值呈降低趋势, 2010 年较 1990 年显著降低 92.04%和 87.50%。施磷肥处理的 DPS 值呈增加的趋势, 2010 年, NPK 和 NPKM 处理较 1990 年分别显著增加 0.91 和 11.36 倍, 较同年份 CK 和 NPK 处理显著增加 110 和 3.81 倍。

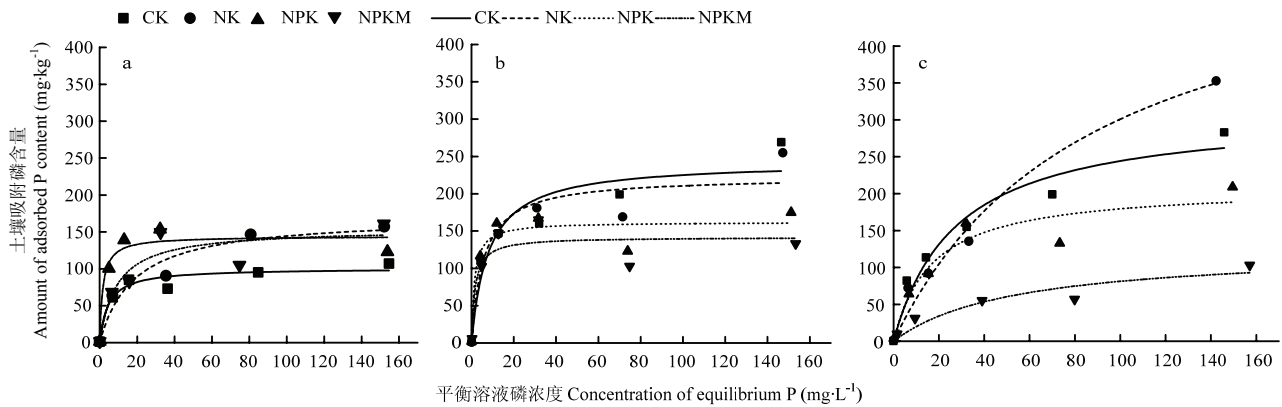


图 1 长期施肥下黑土不同施肥处理磷吸附等温线 (a) 1990 年, (b) 2000 年, (c) 2010 年

Fig. 1 Phosphate isothermal adsorption curves of different treatments in black soils under long-term fertilization. (a) 1990, (b) 2000, (c) 2010

表 2 长期不同施肥处理土壤吸附特征参数

Table 2 Phosphorus sorption characteristics of different treatments in black soils under long-term fertilization

年份 Year	处理 Treatment	Langmuir 曲线方程 Langmuir equation	相关系数 R^2	最大吸附量 Maximum adsorption capacity (Q_{max}) (mg·kg ⁻¹)	吸附亲和力常数 Adsorption constant K	最大缓冲容量 Max buffering capacity of soil P (MBC) (mg·kg ⁻¹)	吸附饱和度 Phosphorus sorption saturation (DPS) (%)
1990	CK	$C/Q=0.0091Q+0.0778$	0.9905	109.96	0.12	12.85	9.71a
	NK	$C/Q=0.0058Q+0.0913$	0.9796	170.71	0.06	10.95	6.16a
	NPK	$C/Q=0.0083Q+0.0179$	0.9778	120.34	0.46	55.75	8.86a
	NPKM	$C/Q=0.0060Q+0.0914$	0.9300	165.34	0.07	10.94	6.58a
2000	CK	$C/Q=0.0035Q+0.0558$	0.9732	283.45	0.06	17.91	1.17b
	NK	$C/Q=0.0038Q+0.0533$	0.9520	259.47	0.07	18.77	2.05b
	NPK	$C/Q=0.0058Q+0.0371$	0.9611	171.50	0.16	26.94	12.59ab
	NPKM	$C/Q=0.0770Q+0.0198$	0.9751	130.01	0.39	50.42	55.62a
2010	CK	$C/Q=0.0032Q+0.0799$	0.9821	311.82a	0.04	12.96a	0.73c
	NK	$C/Q=0.0024Q+0.0600$	0.9985	446.23a	0.04	16.36a	0.77c
	NPK	$C/Q=0.0046Q+0.0917$	0.9533	218.29ab	0.05	11.5a	16.90b
	NPKM	$C/Q=0.0050Q+0.5000$	0.9425	110.19b	0.01	2.35b	81.33a
P value			**	*	NS	*	*

*表示在 0.05 水平显著, **表示在 0.01 水平显著。下同

* Means significant difference at 5% level ($P<0.05$), ** means significant difference at 1% level ($P<0.01$). The same as bellow

2.2 长期不同施肥处理对黑土磷解吸特征的影响

土壤磷的解吸率是指土壤磷解吸量占土壤磷吸附量的百分比。解吸率的大小表征土壤的供磷能力，其值越大，土壤供磷能力越强，植物可吸收利用的磷含量也越多，反之亦然^[38]。由图 2 可知，整体上 3 个试

验年份中，不同施肥处理土壤磷的解吸率变化趋势较为一致，随添加磷浓度的增加呈先快速降低，再逐渐平缓的趋势。此外，随着试验年限的增加，CK 和 NK 处理土壤磷解析率呈降低趋势，NPK 处理解析率趋势变化不明显，NPKM 处理磷解析率呈增加趋势。

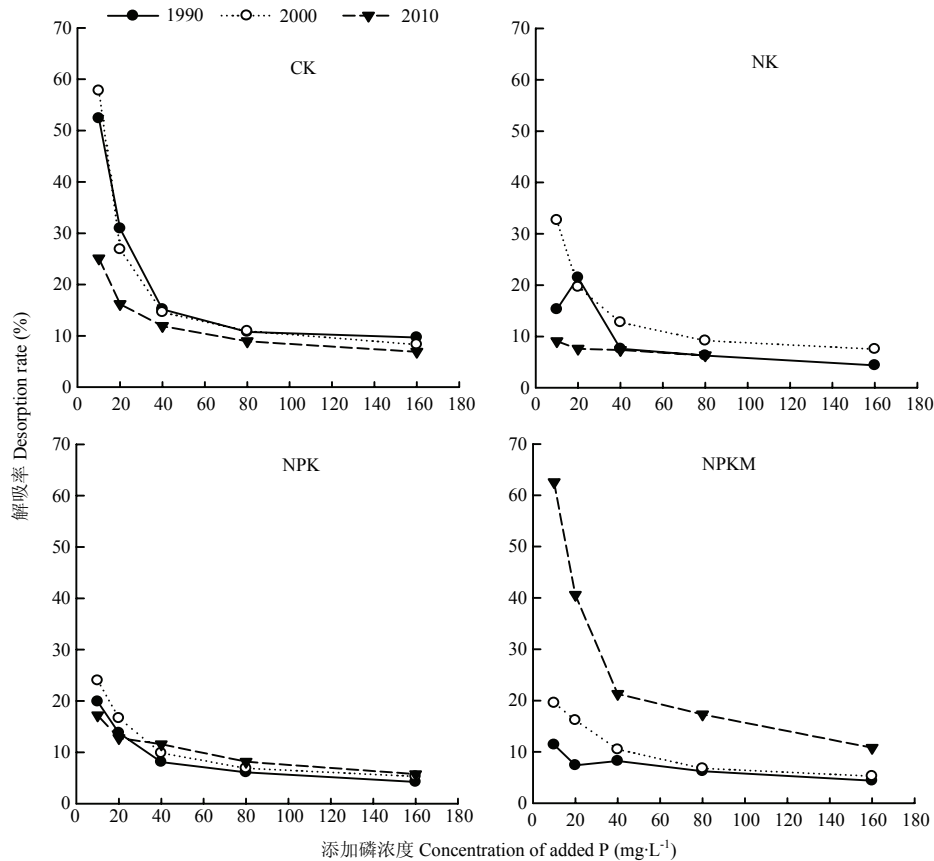


图 2 长期不同施肥年份和处理土壤磷解吸率的变化特征

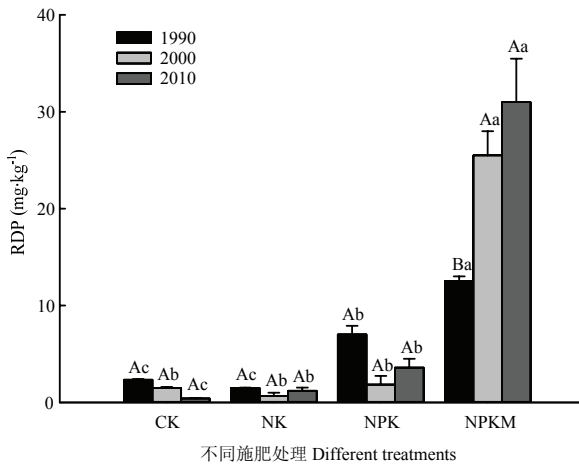
Fig. 2 Changes in desorption rate of different treatments in black soils under long-term fertilization

土壤易解吸磷 (RDP, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[39]是指在吸附试验过程中加入的含磷浓度为 0 的 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液，由土壤固相进入液相的那部分磷，代表土壤中易溶态磷，一定条件下会淋失，造成水体污染^[39]。由图 3 可知，CK、NK 和 NPK 处理土壤 RDP 含量均随试验年限增加呈逐渐降低的趋势，与 1990 年比，2010 年各处理 RDP 含量分别降低了 82.83%、20.00%和 48.57%，NPKM 处理 RDP 含量随试验年限呈增加的趋势，比 1990 年增加了 1.48 倍。不同施肥处理相比，各年限均以 NPKM 处理 RDP 含量最高，均显著优于其他处理，施肥 21 年后，NPKM 处理 RDP 含量比 CK 和 NK 处理分别增加了 4.36 倍和 7.33 倍，比 NPK 处

理增加了 78.57%。

2.3 长期不同施肥处理对黑土土壤性质的影响

表 3 列出了不同施肥处理土壤理化指标 3 个年限 (1990, 2000 和 2010) 的均值。结果显示，全磷 (Total-P)、有效磷 (Olsen-P) 和有机质 (SOM) 均以 NPKM 处理含量最高，分别为 0.94 、 0.08 和 $29.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，显著高于其他处理 (CK、NK、NPK)，分别较 CK 处理显著增加了 69.60%、14 倍和 38.62%，较 NPK 处理显著增加了 56.53%、2.56 倍和 23.17%。比表面积 (SSA) 值以 CK 处理 SSA 最大，为 $19.82\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ，以 NPKM 处理最小，为 $6.25\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ，较 CK 处理显著降低 68.46%。游离铁铝氧化物 (Free Fe_2O_3 和 Al_2O_3)



方柱上大写字母表示同一处理年份间差异显著, 小写字母表示同一年份处理间差异显著 ($P < 0.05$)
 Different capital letters above the bars indicate significantly difference among the different fertilizing years at the same treatment, and the lowercase letter indicated the difference among the different treatments at the same year ($P < 0.05$)

图 3 长期不同施肥年份和处理的黑土易解吸磷变化特征
 Fig. 3 Readily desorbable phosphorus (RDP) of different treatments in black soils under long-term fertilization

含量各处理之间无显著差异。CK 和 NPKM 处理的碳酸钙 (CaCO_3) 含量和 pH 无差异, 但均显著高于 NK 和 NPK 处理。

2.4 长期不同施肥处理黑土磷吸附-解吸特征参数对土壤性质的响应

为了深入了解土壤性质对磷吸附行为的影响, 我们研究了土壤性质与磷吸附-解吸参数的相关性, 同时将磷吸附解吸特征设为自变量, 土壤性质设为应变量进行冗余分析, 由于 DPS 是有效磷与 Q_{\max} 计算结果所得的, 我们未将其进行冗余分析。由相关分析可知 (表 4), SOM 和 Total-P 均与 Q_{\max} 呈显著负相关 ($R^2 =$

-0.749^* 和 -0.634^*), 与 DPS 和 RDP 呈显著正相关 ($R^2=0.752-0.877^*$)。SSA 与 Q_{\max} 呈显著正相关 ($R^2=0.624^*$), 与 RDP 呈极显著负相关 ($R^2=-0.744^{**}$), CaCO_3 与 RDP 呈显著正相关 ($R^2=0.658^*$), K 值与 MBC 值之间、DPS 与 RDP 之间均呈极显著正相关 ($R^2=0.969^{**}$, $R^2=0.913^{**}$)。土壤性质之间也具有相关性, Total-P 与 SOM、 CaCO_3 之间呈显著正相关 ($R^2=0.678^*$ 和 0.581^*), 与 SSA 之间存在显著负相关 ($R^2=-0.656^*$), pH 与 CaCO_3 之间具有极显著正相关性 ($R^2=0.719^{**}$), Free Fe_2O_3 和 Al_2O_3 之间存在极显著正相关 ($R^2=0.954^{**}$)。

冗余分析结果表明 (图 4), 土壤性质能解释磷

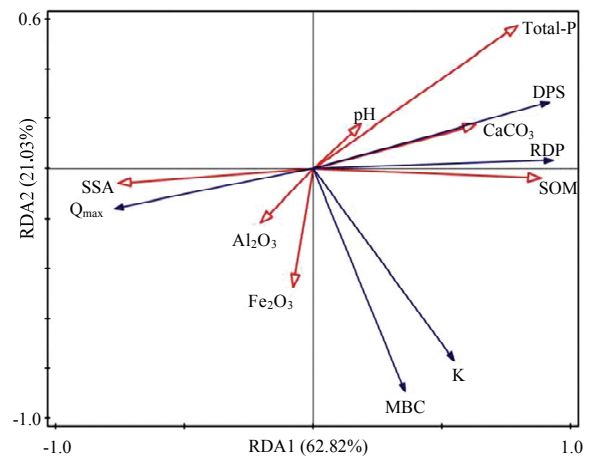


图 4 长期不同施肥处理黑土性质与磷吸附解吸特征参数的 RDA 分析
 Fig. 4 RDA showing the relationships between the soil properties and sorption-desorption parameters of different treatments in black soils under long-term fertilization

表 3 长期不同施肥处理对黑土性质的影响

Table 3 Mean values of soil properties of different treatments in black soils under long-term fertilization

指标 Parameter	CK	NK	NPK	NPKM	P 值 P value
全磷 Total-P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.56±0.0536b	0.56±0.1037b	0.60±0.0448b	0.94±0.2153a	*
有效磷 Olsen-P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5.42±0.6431c	6.35±0.1641c	22.99±2.5584b	81.95±4.0825a	*
有机质 SOM ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	21.58±1.6196b	23.77±2.4263b	24.28±2.4191b	29.91±3.2205a	*
酸碱度 pH	7.42±0.0504a	6.63±0.1667b	6.38±0.1938b	7.25±0.0764a	*
比表面积 SSA ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	19.82±0.8184a	15.76±2.7509a	17.06±2.8656a	6.25±0.7227b	*
游离氧化铁 Free Fe_2O_3 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	8.66±0.8741	8.74±1.0689	8.55±0.7679	8.02±1.0075	NS
游离氧化铝 Free Al_2O_3 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2.00±0.1927	1.97±0.2463	1.94±0.1550	1.80±0.1898	NS
碳酸钙 CaCO_3 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	16.35±0.9500a	13.40±0.9000b	13.90±0.3000b	17.80±0.3000a	*

表 4 黑土性质与磷吸附解吸特征参数的相关性

Table 4 The relationship between soil properties and sorption-desorption parameters

	SOM	SSA	pH	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	Total-P	Q _{max}	K	MBC	DPS
SSA	-0.592										
pH	-0.040	-0.129									
Al ₂ O ₃	-0.041	-0.181	-0.159								
Fe ₂ O ₃	0.077	-0.218	-0.248	0.954**							
CaCO ₃	0.353	-0.541	0.719**	-0.134	-0.150						
Total-P	0.678*	-0.656*	0.222	-0.198	-0.251	0.581*					
Q _{max}	-0.749*	0.624*	0.018	-0.401	-0.401	-0.408	-0.634*				
K	0.508	-0.351	-0.144	0.273	0.378	0.005	0.019	-0.447			
MBC	0.376	-0.230	-0.199	0.217	0.346	-0.095	-0.145	-0.248	0.969**		
DPS	0.815**	-0.565	0.197	-0.463	-0.400	0.568*	0.877**	-0.511	0.146	0.042	
RDP	0.760*	-0.744**	0.306	-0.343	-0.249	0.658*	0.752**	-0.499	0.342	0.250	0.913**

吸附解析特征参数全部变异的 83.85%，第一冗余因子 (RDA1) 能解释 62.82%，主要与 SOM、Total-P、SSA 和 CaCO₃ 指标有关；第二冗余因子 (RDA2) 能解释全部变异的 21.03%，主要与 Free Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 有关。根据交互式向前选择方法分析表明，SOM 和 Total-P 是造成磷吸附解吸特征参数差异的主要因素，分别解释了全部变异的 49.5%和 18.7% ($P < 0.05$)，根据各环境因子解释率大小顺序，由高到低依次为：SOM，Total-P，Free Fe₂O₃，Free Al₂O₃，pH，CaCO₃ 和 SSA。

3 讨论

3.1 不同施肥处理的土壤磷吸附与解吸特征

本研究中，在添加相同磷浓度下，施磷和不施磷处理黑土对磷的吸附量和解吸率具有很大的差异 (图 1 和图 2)。不施磷处理 (CK 和 NK) 表现出较大的 Q_{max}，较小的 DPS 值和 RDP 值 (表 2 和图 3)，对磷的吸附能力较强，解吸能力较弱，增施磷肥后，尤其是有机无机配施后，土壤磷的吸附量降低，土壤对磷的吸附能力减弱，解吸能力增强，表现为较小的 Q_{max} 值，较大的 DPS 值和 RDP 值 (表 2 和图 3)，这与王斌等^[9]在灰漠土中不施肥处理 (CK) 能增加磷的吸附量，化学磷肥配施有机肥处理 (NPKM) 可降低磷的吸附量，增加磷的解吸率研究结果相似，但是在南方泥田土和红壤中，施入有机肥增加了磷的最大吸附量，得到相反的结果，这可能是由于南方和北方土壤质地 (黏粒、粉粒、砂粒)、土壤 pH、铁铝氧化物等含量差异较大^[11, 40]，造成的土壤性质不同。

3.2 土壤性质与磷吸附解吸特征的响应关系

研究表明，不同磷肥用量和不同土壤性质 (如土壤质地、pH、铁铝氧化物、有机质等) 土壤磷的吸附解吸特征均有显著性差异^[5, 40-41]。长期定位试验进行了 21 年，各处理之间 Olsen-P 和 Total-P 含量差异较大，极差值分别达到了 187 mg·kg⁻¹ 和 0.89 g·kg⁻¹，不同施肥处理引起的土壤磷素养分盈亏差异较大^[42]，土壤中磷的吸附解吸也随着发生不同的变化。CK 和 NK 处理由于无磷素输入，而又长期有生物量输出，土壤磷素处于持续耗竭的状态，有机质含量较低，对土壤表面电荷影响较小，土壤比表面积相比有机质含量较高的土壤较大 (表 3)，而土壤铁铝氧化物含量无显著变化，因此其在等温吸附试验中表现出极大的磷素吸附量、Q_{max} 值和 MBC 值，而又因其有效磷含量低，磷素最大吸附量又最高，决定了 CK 和 NK 处理具有极小的 DPS 值，随着试验年限的增加也出现了降低的趋势。随试验年限的增加，NPK 处理土壤影响了土壤中磷形态含量，增加了有效磷浓度^[43]，但对土壤的比表面积影响较小 (表 3)，虽然磷的吸附量变化不明显，但增加了土壤磷最大吸附量和有效磷量，使得土壤 DPS 值略有增加。

NPKM 处理比单施化肥处理 (NPK) 土壤 Q_{max}，K 和 MBC 值均显著降低，DPS 和 RDP 含量均显著增加。且随着试验年限的增加，NPKM 处理的 Q_{max}，K 和 MBC 值呈减小趋势，DPS 和 RDP 含量均呈增加趋势，土壤易解吸磷含量也明显增加^[44]，这与张海涛等^[45]研究低磷 (0) 和较高磷 (150 mg·kg⁻¹) 土壤施加有机肥后，土壤 RDP 含量显著增加结果一致。许多研究表

明, 有机无机配施处理显著增加了黑土全磷和有效磷含量, 土壤磷素为盈余状态^[42], 土壤磷的高能吸附位点饱和。此外, 有机无机配施处理也显著增加了土壤有机质的含量^[46], 其值为 23.48—33.45 g·kg⁻¹, 浓度较高。RDA 结果分析表明, 有机质是影响磷吸附解吸的最主要因素, 这可能是有机质的施入影响土壤表面磷吸附位点, 有机质在腐解过程中产生了有机酸根离子, 与土壤溶液磷酸根存在竞争吸附, 减弱了土壤对磷的吸附, 增加了磷的解吸量^[47], 有机质分解的产物可被吸附到土壤表面的结合位点, 或者与金属氧化物反应, 形成络合物, 导致吸附位点减少, 减少土壤对磷的吸附^[48-49], 此外有机质的施入影响了土壤胶体面电荷性质, 降低了土壤的比表面积 (表 3)^[50], 减少了土壤表面吸附位点, 使磷的吸附转向低能态为主^[12], 另一方面, 土壤有机质具有明显的凝胶特点, 以胶膜的形式包被在氧化铁铝, 碳酸钙等无机胶体表面形成有机无机复合体从而降低了土壤胶体对磷的吸附, 增加了土壤溶液中的磷含量^[51]。但林诚等^[52]提出了配施有机肥的土壤 Q_{\max} 值高于单施化肥, 这可能是其研究的南方黄泥田土, 配施有机肥后土壤有机质在分解过程中, 溶解了土壤中的结晶态铁铝, 提高了铁铝的活化度, 增加了游离和无定形铁铝氧化物含量, 增强了土壤对磷的吸附^[53], 而本研究中有有机无机配施处理后土壤中游离的铁铝氧化物含量并无显著增加, 对磷的吸附影响不显著。

NPKM 处理因其较大的有效磷含量和较低的 Q_{\max} 值, 其 DPS 值显著高于其他处理, 2010 年 DPS 值为 81%, 显著高于临界值, 易造成土壤磷素流失。分析其与土壤性质之间的关系, 发现 DPS 值与 SOM、Total-P 呈显著正相关, 之前研究也验证了这一关系^[54]。本研究中 DPS 值与 CaCO_3 含量呈显著正相关, 本试验中, 由于土壤 pH 维持在中性水平, 土壤 CaCO_3 含量较高, 土壤中 Ca-P 含量较高^[43], CASSON 等^[18]对施加牛粪的 5 种土壤磷吸附饱和度进行了深入研究, 表明 Ca-P 含量的变化影响了 DPS 临界值的判定, 也验证了本文结果, 说明 CaCO_3 也是土壤 DPS 值一个重要因素。

4 结论

长期施肥条件下黑土磷等温吸附方程的研究表明, Langmuir 方程能较好地描述黑土对磷的吸附, 长期施肥对磷的吸附解吸具有重要的影响, 改变了土壤磷的吸附和解吸能力。有机无机配施处理 (NPKM) 后土壤全磷、有效磷、有机质含量增加, 土壤比表面

积减小, 这些变化降低了土壤对磷的吸附能力, 增强了土壤对磷的解吸能力, 表现为最大吸附量 (Q_{\max})、吸附系数 (K) 和磷缓冲容量 (MBC) 的降低, 磷吸附饱和度 (DPS) 和易解吸磷 (RDP) 的增加。有机无机配施不单直接影响土壤磷的转化, 还通过影响 CaCO_3 含量、有机质含量, 以及改变土壤比表面积等土壤性质间接影响土壤磷的吸附解吸过程, 影响土壤中磷的转化。冗余分析表明, 有机质是影响土壤磷吸附解吸最主要因素。此外, 长期有机无机配施处理显著提高了土壤磷吸附饱和度, 远远超过了 25% 的临界值, 易造成磷素流失的风险。

References

- [1] GRANT C, BITTMAN S, MONTREAL M, PLENCHETTE C, MOREL C. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, 2005, 85(1): 3-14.
- [2] KONG X B, LAI R, LI B G, LIU H B, LI K J, FENG G L, ZHANG Q P, ZHANG B B. Fertilizer intensification and its impacts in China's HHH Plains. *Advances in Agronomy*, 2014, 125: 135-169.
- [3] QUESADA C A, LLOYD J, ANDERSON L O, FYLLAS N M, SCHWARZ M, CZIMCZIK C I. Soils of Amazonia with particular reference to the rain for sites. *Biogeosciences*, 2011, 6: 1415-1440.
- [4] TILMAN D. Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(11): 5995-6000.
- [5] YAN X, WANG D J, ZHANG H L, ZHANG G, WEI Z Q. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 175: 47-53.
- [6] SHARPLEY A, JARVIE H P, BUDA A, MAY L, SPEARS B, KLEINMAN P. Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environment Quality*, 2013, 42(5): 1308-1326.
- [7] POWERS S M, BRUULSEMA T W, BURT T P, CHAN N L, ELSER J J, HAYGARTH P M, HOWDEN N J K, JARVIE H P, PETERSON H M, SHARPLEY A N, SHEN J B, WORRALL F, ZHANG F S, LYU Y, SHARPLEY A N. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in three river basins. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5): 353-356.
- [8] JALALI M, KARAMNEJAD L. Phosphorus leaching in a calcareous soil treated with plant residues and inorganic fertilizer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(2): 220-228.

- [9] 王斌, 刘骅, 李耀辉, 马兴旺, 王西和, 马义兵. 长期施肥条件下灰漠土磷的吸附与解吸特征. *土壤学报*, 2013, 50(4): 726-733.
WANG B, LIU H, LI Y H, MA X W, WANG X H, MA Y B. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of gray desert soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 726-733. (in Chinese)
- [10] YAN Z J, CHEN S, DARI B, SIHI D, CHEN Q. Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil. *Geoderma*, 2018, 322: 163-171.
- [11] FAN B Q, WANG J, FENTON O, DALY K, EZZATI G, CHEN Q. Strategic differences in phosphorus stabilization by alum and dolomite amendments in calcareous and red soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(5): 4842-4854.
- [12] 夏文建, 梁国庆, 周卫, 汪洪, 王秀斌, 孙静文. 长期施肥条件下石灰性潮土磷的吸附解吸特征. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 431-438.
XIA W J, LIANG G Q, ZHOU W, WANG H, WANG X B, SUN J W. Adsorption and desorption characteristics of soil phosphorus in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 2008, 14(3): 431-438. (in Chinese)
- [13] 李仁英, 邱译萱, 刘春艳, 王艳玲, 黄利东. 硅对水稻土磷吸附—解吸行为的影响. *土壤通报*, 2013, 44(5): 1134-1139.
LI R Y, QIU Y X, LIU C Y, WANG Y L, HUANG L D. Adsorption-desorption behaviors of phosphorus under different silicon concentrations in paddy soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(5): 1134-1139. (in Chinese)
- [14] GUEDES R S, MELO L C A, VERGÜTZ L, RODRÍGUEZ-VILA A, COVELO E F, FERNANDES A R. Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments. *Soil and Tillage Research*, 2016, 162: 46-54.
- [15] FANG H, CUI Z, HE G, HUANG L, CHEN M. Phosphorus adsorption onto clay minerals and iron oxide with consideration of heterogeneous particle morphology. *Science of the Total Environment*, 2017, 605-606: 357-367.
- [16] ZHANG Y, HUANG S, GUO D, ZHANG S, SONG X, YUE K, ZHANG K, BAO D. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvo-aquic soils under long-term fertilization. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1306-1318.
- [17] DEBICKA M, KOCOWICZ A, WEBER J, JAMROZ E. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 62(6): 840-855.
- [18] CASSON J P, BENNETT D R, NOLAN S C, OLSON B M, ONTKEAN G R. Degree of phosphorus saturation thresholds in manure-amended soils of Alberta. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(6): 2212.
- [19] 吕珊兰, 杨熙仁, 康新茸. 土壤对磷的吸附与解吸及需磷量探讨. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(3/4): 29-35.
LÜ S L, YANG X R, KANG X R. Study on the adsorption and desorption of phosphorus in soils and phosphorus requirement. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(3/4): 29-35. (in Chinese)
- [20] 陈波浪, 盛建东, 蒋平安, 刘永刚. 不同质地棉田土壤对磷吸附与解吸研究. *土壤通报*, 2010, 41(2): 303-307.
CHEN B L, SHENG J D, JIANG P A, LIU Y G. Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soil textures. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 303-307. (in Chinese)
- [21] WANG R, GUO S L, LI N N, LI R J, ZHANG Y J, JIANG J S, WANG Z Q, LIU Q F, WU D F, SUN Q Q, DU L L, ZHAO M. Phosphorus Accumulation and sorption in calcareous soil under long-term fertilization. *PLoS ONE*, 2015, 10(8): e0135160.
- [22] 陈欣. 长期施用有机肥对黑土磷素形态及有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
CHEN X. Effect of long-term application of organic manure on phosphorus characteristics and availability in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [23] 赵庆雷, 王凯荣, 谢小立. 长期有机物循环对红壤稻田土壤磷吸附和解吸特性的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 355-362.
ZHAO Q L, WANG K R, XIE X L. Effects of organic nutrient recycling on phosphorus adsorption desorption characteristics in a reddish paddy rice system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 355-362. (in Chinese)
- [24] JIAO Y, WHALEN J K, HENDERSHOT W H. Phosphate sorption and release in a sandy-loam soil as influenced by fertilizer sources. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 118-124.
- [25] 杨芳, 何园球, 李成亮, 王艳玲, 林天. 不同施肥条件下旱地红壤磷素固定及影响因素的研究. *土壤学报*, 2006, 43(2): 267-272.
YANG F, HE Y Q, LI C L, WANG Y L, LIN T. Effect of fertilization on phosphorus fixation in upland red soil and its affecting factors. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 267-272. (in Chinese)
- [26] YAN X, WEI Z Q, HONG Q Q, LU Z H, WU J F. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. *Geoderma*, 2017, 295: 80-85.
- [27] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 吕家珑, 周宝库, 彭畅, 石孝均, 黄庆海, 王伯仁. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1109-1116.
MENG H Q, LIU J, XU M G, LÜ J L, ZHOU B K, PENG C, SHI X J,

- HUANG Q H, WANG B R. Evolution of pH topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1109-1116. (in Chinese)
- [28] 李中阳, 徐明岗, 李菊梅, 李林, 高静. 长期施用化肥有机肥下我国典型土壤无机磷的变化特征. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1434-1439.
- LI Z Y, XU M G, LI J M, LI L, GAO J. Changes of inorganic phosphorus in typical soils of China under long-term combined application of chemical and organic fertilizer. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(6): 1434-1439. (in Chinese)
- [29] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 徐明岗. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1389-1393.
- ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, XU M G. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1389-1393. (in Chinese)
- [30] BHATTACHARYYA P, NAYAK A K, SHAHID M, TRIPATHI R, MOHANTY S, KUMAR A, RAJA R, PANDA B B, LAI B, GAUTAM P, SWAIN C K, ROY K S, DASH P K. Effects of 42-year long-term fertilizer management on soil phosphorus availability, fractionation, adsorption-desorption isotherm and plant uptake in flooded tropical rice. *The Crop Journal*, 2015, 3(5): 387-395.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 18, 638.
- LU R K. *Soil Agrochemistry Analysis Protocols*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999: 18, 638. (in Chinese)
- [32] 张坤. 基于氮气吸附试验的黄土比表面积研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- ZHANG K. Research of the specific surface area of loess based on nitrogen adsorption method[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [33] 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. *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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(6): 1303-1310. (in Chinese)
- [34] 张迪, 魏自民, 李淑芹, 王世平, 许景钢. 生物有机肥对土壤中磷的吸附和解吸特性的影响. *东北农业大学学报*, 2005, 36(5): 571-575.
- ZHANG D, WEI Z M, LI S Q, WANG S P, XU J G. Effect of bio-organic fertilizers on phosphorus adsorption-desorption. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2005, 36(5): 571-575. (in Chinese)
- [35] 王讲利, 凌慧娟, 孙建光, 桂贞, 刘骅, 李玉芳, 赵秉强, 张夫道. 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. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 82-86.
- WANG J L, LING H J, SUN J G, GUI Z, LIU H, LI Y F, ZHAO B Q, ZHANG F D. Study of long-term fertilization in gray desert soil. I The effect of fertilization on crop yields, fertilizer and water efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl.): 82-86. (in Chinese)
- [36] 夏瑶, 姜运生, 杨超光, 梁永超. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1369-1374.
- XIA Y, LOU Y S, YANG C G, LIANG Y C. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in paddy soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1369-1374. (in Chinese)
- [37] SCHOUMANS O F, GROENENDIJK P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1): 111-116.
- [38] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(3): 547-561.
- [39] 吴启华. 长期不同施肥下三种土壤磷素有效性和磷肥利用率的差异机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- WU Q H. Mechanisms of difference in phosphorus availability and fertilizer P use efficiency in three soils under long-term fertilizations[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences 2018. (in Chinese)
- [40] JALALI M, JALALI M. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1080-1093.
- [41] PIZZEGHELLO D, BERTI A, NARDI S, MORARI F. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 216-228.
- [42] 展晓莹. 长期不同施肥模式黑土有效磷与磷盈亏响应关系差异的机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- ZHAN X Y. Relationship between available phosphorus and phosphorus balance and its mechanism under different long-term fertilizations in black soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [43] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 彭畅, 高洪军, 张秀芝, 朱平, Colinet Gilles. 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1679-1688.
- WANG Q, ZHAN X Y, ZHANG S X, PENG C, GAO H J, ZHANG X Z, ZHU P, COLINET G. Increment of soil phosphorus pool and

- activation coefficient through long-term combination of NPK fertilizers with manures in black soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1679-1688. (in Chinese)
- [44] SIDDIQUE M T, ROBINSON J S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 1114-21.
- [45] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 张作新, 郝小雨. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 284-290.
- ZHANG H T, LIU J L, LIAO W H, ZHANG Z X, HAO X Y. Effect of phosphorus fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 284-290. (in Chinese)
- [46] WU Q H, ZHANG S X, ZHU P, HUANG S M, WANG B R, ZHAO L P, XU M G. Characterizing differences in the phosphorus activation coefficient of three typical cropland soils and the influencing factors under long-term fertilization. *PLoS ONE*, 2017, 12(5): e0176437.
- [47] WANDRUSZKA R V. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical Transactions*, 2006: 1-8.
- [48] GUPPY C N, MENZIES N W, MOODY P W, BLAMEY F P C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Soil Research*, 2005, 43(2): 189-202.
- [49] De BOLLE S. Phosphate saturation and phosphate leaching of acidic sandy soils in Flanders: Analysis and mitigation options[D]. Ghent University, 2013.
- [50] KAISER K, GUGGENBERGER G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 711-725.
- [51] 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, 2004.
- WANG Y L. Study on the forms of phosphorus and characteristics of adsorption-desorption of the corn belt phaeozem in Jilin[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [52] 林诚, 王飞, 林新坚, 李清华, 何春梅, 李昱. 长期施肥对南方黄泥田土壤磷吸附与解吸的影响. *福建农业学报*, 2011, 26(6): 1034-1038.
- LIN C, WANG F, LIN X J, LI Q H, HE C M, LI Y. The effect of phosphorus adsorption and desorption of long-term fertilization on south yellow clayey soil. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(6): 1034-1038. (in Chinese)
- [53] 张杨珠, 袁正平, 肖永兰, 蒋健容, 钟绶苓. 红壤性水稻土与耕型红壤对磷的吸持特性的研究. *湖南农学院学报*, 1989, 15(2): 12-19.
- ZHANG Y Z, YUAN Z P, XIAO Y L, JIANG J R, ZHONG S L. A study of the phosphorus retention characteristics of paddy soil and arable red earth developed from the quaternary red clay. *Journal of Hunan Agricultural College*, 1989, 15(2): 12-19. (in Chinese)
- [54] ZOU P, FU J R, CAO Z H. Chronosequence of paddy soils and phosphorus sorption-desorption properties. *Journal of Soils & Sediments*, 2011, 11(2): 249-259.

(责任编辑 李云霞)