

磷在褐土不同发生层的吸附解吸特征

霍晓兰¹, 马琳杰^{1, 2}, 李丽君¹, 刘平^{1*}, 惠薇^{1, 2}, 马琦琦^{1, 2}

(1. 山西农业大学资源环境学院 / 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 山西 太原 030031; 2. 山西大学生命科学学院, 山西 太原 030006)

摘要: 为了探究磷在褐土不同发生层土壤的吸附解吸特征及其影响机制, 以山西省典型石灰性褐土耕层、淋溶层、钙积层、黏化层和母质层为研究对象, 通过添加不同浓度磷到土壤发生层, 测定土壤磷的吸附解吸值, 采用 Langmuir 方程拟合各发生层对磷的吸附曲线, 计算相关参数并分析其与土壤性质的相关性。结果表明: (1) 不同发生层土壤磷吸附能力为钙积层 > 黏化层 > 母质层 > 耕层 > 淋溶层, 解吸能力则为淋溶层 > 母质层 > 耕层 > 黏化层 > 钙积层。(2) Langmuir 等温吸附方程能很好地拟合 5 种发生层土壤对磷的吸附曲线 ($R^2=0.9702 \sim 0.9980$)。钙积层最大吸附磷量 (Q_m) 最大, 为 526.32 mg/kg; 黏化层吸附常数 (K) 和最大吸附缓冲容量 (MBC) 最高, 分别为 0.24 和 78.74 mg/kg; 淋溶层 Q_m 为 232.56 mg/kg, K 值为 0.04, MBC 值为 10.37 mg/kg, 且均为最小; 耕层拥有最大的吸附饱和度 (DPS) (4.34%), 存在磷素淋失风险。(3) 黏粒含量与土壤 Q_m 呈显著正相关, 与磷 DPS 呈显著负相关; 磷 DPS 还与有效磷含量呈显著正相关; 有机质含量与土壤吸附结合能呈显著负相关。研究表明, 褐土区不同发生层土壤对磷的吸附解吸特征均不相同, 且各吸附参数与土壤性质的某些指标有明显关系, 耕层磷素淋失风险较大应重点关注。

关键词: 褐土; 发生层; 磷; 吸附解吸; 土壤性质

磷是作物生长发育必须的营养元素之一, 同时也是表征土壤肥力的重要组成因子^[1]。磷肥的施用是提高我国粮食产量中起到了重要作用, 研究表明, 实际生产中磷肥利用率仅为 10% ~ 25%^[2]。土壤对磷的吸附、解吸与土壤中磷的有效性有着紧密联系, 吸附限制植物磷吸收利用, 解吸能使磷从土壤中流失^[3]。通常, 农作物对磷素的获取主要依赖于土壤^[4], 土壤中吸附的磷解吸进入土壤溶液后可被植物直接吸收; 在一定条件下, 土壤胶体吸附的磷可以被部分解吸, 进而起到补充土壤溶液磷的作用^[5]。因此, 通过对土壤磷吸附与解吸特征研究, 深入了解土壤对磷素固定与释放过程影响因素及机制一直是生态环境学研究的热点问题。

研究发现, 影响土壤对养分元素吸附-解吸

特征的主要因素包括土壤有机质、有效磷、质地、pH 等^[6]。不同质地土壤胶体的表面对磷的吸附能力不同, 因而影响土壤溶液中的磷浓度^[7]。另外, 磷被吸附固定是由于土壤液相中部分磷素与胶体表面铁、铝氧化物发生配位交换的结果, 最终会影响到土壤磷素的有效性^[8]。李祖荫等^[9]研究发现, 影响石灰性土壤磷吸附固定的主要因素是黏粒, 而碳酸钙只起次要作用。不同质地潮土磷吸附解吸研究表明, 影响磷吸附的主要因素是土壤有机质、黏粒、粉粒和游离铁氧化物, 而砂粒是影响磷解吸的次要因素。在一定范围内, 吸附态磷与土壤 pH 变化趋势相反, 也就是说, 随着 pH 上升反而减少^[10]。张微微^[11]认为, 调节土壤胶体比表面积和 pH 可实现有机质对磷吸附-解吸的影响。从目前研究来看, 北方土壤该方面的报道相对较少。

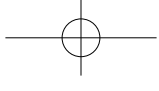
褐土区既是我国农业主产区, 又是山西省的主要耕作土壤。褐土发育于富含石灰的成土母质上, 土层深厚^[12]。发育完整的褐土发生层包括耕层、淋溶层、钙积层、黏化层和母质层。耕层和淋溶层有机质较为丰富, 多具团粒结构, 土质疏松; 钙积层土质大多为粉黏壤土或砂质黏土, 具有 <100 mm

收稿日期: 2024-03-25; 录用日期: 2024-06-03

基金项目: 山西农业大学科技创新提升工程 (CXGC2023029); 山西省重点研发计划项目 (202102140601010-3); 科技基础资源调查专项 (2021FY100501); 山西农业大学横向科技项目 (2023HX07); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800105-5)。

作者简介: 霍晓兰 (1977-), 副研究员, 硕士, 主要从事农业面源污染与植物营养研究。E-mail: xiaolan125@sina.com。

通讯作者: 刘平, E-mail: lp709@163.com。



的白色碳酸钙质结核结构体表面,且具有极强的石灰反应;黏化层为粉砂质黏土,有 20% ~ 80% 的黏粒胶膜和 <20 mm 的白色碳酸钙质结核的结构体表面,无石灰反应;土体最下部为母质层,没有明显成土作用,由不同程度地质沉积物和岩石风化物构成^[13]。由于褐土包气带不同发生层土壤理化性质不同,致使土壤对磷吸附解吸过程也应有差异。鉴于此,本研究以山西省典型石灰性褐土 5 个发生层(耕层、淋溶层、钙积层、黏化层和母质层)为研究对象,研究不同发生层土壤对磷吸附、解吸特征规律性变化,以期为褐土区磷淋溶阻控机制提供科学参考,降低农业面源污染风险,实现土壤的可持续利用。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为石灰性褐土,采自山西省晋城市泽州县高都镇东顿村(35°36'51" N, 112°56'18" E)。供试土壤的采样点位于山西省晋东南黄土丘陵塬上,属暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔 780 m,年均降水量为 618.3 mm,年平均气温为 10 ~ 11℃,夏季降水量占全年的 60%。该土地一直用作耕地,种植作物为玉米(*Zea mays*)。根据土壤发生层段,采集耕层、淋溶层、钙积层、黏化层和母质层,各层土壤避光自然风干,磨碎过 2 mm 筛备用。供试土壤基本性质如表 1 所示。

表 1 石灰性褐土不同土壤发生层理化性质

土壤发生层	阳离子交换量 (cmol/kg)	碳酸钙 (g/kg)	机械组成 (g/kg)			pH	有机质 (g/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)
			砂粒 (0.02 ~ 2 mm)	粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)				
耕层	38.04	33.58	64.97	22.41	12.62	7.63	30.60	1.23	12.40
淋溶层	29.02	49.85	69.11	5.96	24.93	7.78	25.77	0.64	2.00
钙积层	33.70	38.38	49.71	7.98	42.31	7.97	6.28	1.28	1.20
黏化层	16.30	22.82	39.68	20.33	39.99	7.53	0.85	0.44	1.20
母质层	20.54	26.09	35.56	20.24	44.20	7.68	1.57	0.36	2.80

1.2 试验方法 - 吸附解吸试验^[14]

称取各层风干土样 2.5 g 于 50 mL 离心管中,分别加入磷量为 0、20、40、60、80、120、160、200 mg/L 的溶液 25 mL,每个处理设 3 次重复;为抑制微生物生长,每个离心管中加入 2 滴苯酚,在 25℃ 恒温、振荡速率为 220 r/min 条件下振荡 1 h,随后在 25℃ 恒温培养箱中平衡 24 h;平衡完成后在离心机中以 3000 r/min 离心 10 min,吸取上清液,测定其中磷含量,此含量即为平衡溶液中的磷浓度,添加溶液磷浓度与平衡溶液磷浓度之差为土壤对磷的吸附量。根据所得结果,以平衡液磷浓度为横坐标,土壤吸附磷浓度为纵坐标作图,即为磷的等温吸附曲线,并以 Langmuir 方程进行拟合。

磷的解吸试验在吸附试验结束后立即进行。将上述离心管中上清液弃去,保留管中土样,将此土样用 20 mL 饱和氯化钾溶液洗涤 2 次,用于去除土样中的游离态磷。随后将不含磷溶液 25 mL 0.01 mol/L 的氯化钾加入此土样中,加入 2 滴苯酚,目的是抑制微生物生长;在 25℃ 恒温、振荡速率为 220 r/min 的条件下振荡 1 h 后,于 25℃ 恒温培养箱中平衡 24 h,

之后以 3000 r/min 在离心机中离心 10 min,吸取上清液,测定其中的磷含量,此值即为磷解吸量。

1.3 理化分析及方法

采用乙酸钠 - 火焰光度法测阳离子交换量;容量滴定法测碳酸钙含量;吸管法测土壤机械组成;玻璃电极法测 pH;重铬酸钾容量法 - 外加热法测有机质含量;NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法测全磷含量;0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法(鲍士旦)测有效磷含量。

1.4 数据处理

利用 Langmuir 方程对等温吸附试验拟合,方程为:

$$C/Q=1/(Q_m K)+C/Q_m \quad (1)$$

式中, C 表示溶液中磷浓度 (mg/L); Q 表示土壤磷吸附量 (mg/kg); Q_m 表示最大吸附磷量; K 表示与吸附能相关的常数。

根据 Langmuir 等温吸附方程计算可得下列相关参数:

$$MBC=K \times Q_m \quad (2)$$

$$DPS(\%) = \text{土壤有效 } P/Q_m \times 100 \quad (3)$$

解吸率 (%) = 解吸磷量 (mg/kg) / 吸附磷量 (mg/kg) × 100 (4)

式中, MBC 表示土壤对磷的最大吸附缓冲容量 (mg/kg); DPS 表示土壤对磷的吸附饱和度 (%)。

采用 Excel 2007 进行试验数据整理、分析和做图, 使用 SPSS 20.0 进行统计分析 (Pearson 相关性分析和单因素方差分析)。

2 结果与分析

2.1 不同发生层土壤的等温吸附曲线

图 1 表明, 不同发生层土壤对磷的吸附曲线较为一致, 均表现为先快速升高而后缓慢增加, 各发生层对磷的吸附有较大差别。吸附曲线显示, 各发生层对磷的吸附明显分为两个阶段: 快速吸附阶段和慢速吸附阶段。加入磷浓度较低时, 吸附量快速增加, 曲线上升快而陡, 吸附速率明显较高, 表现为强烈吸附。吸附曲线在磷浓度达到 40 mg/L 后, 开始出现较明显的减缓趋势, 此时吸附磷量为钙积

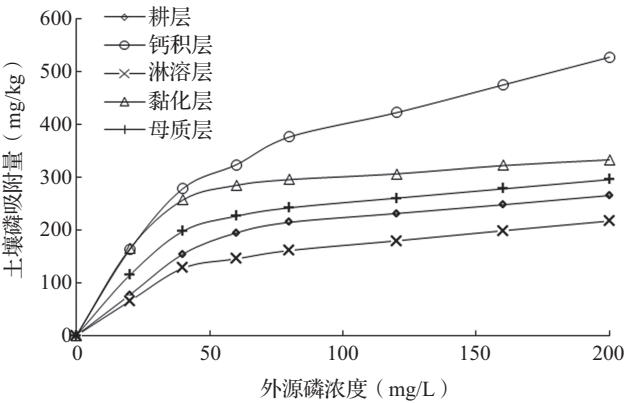


图 1 不同发生层土壤磷等温吸附曲线

层 > 黏化层 > 母质层 > 耕层 > 淋溶层, 随外源磷浓度升高, 土壤对磷的吸附也随之增加, 但吸附速率明显降低, 曲线逐渐趋于平缓, 此时表现为土壤磷的慢速吸附阶段。

2.2 不同发生层土壤磷吸附特征

5 种发生层土壤对磷的吸附特性用 Langmuir 方程拟合, 其拟合度均达到显著水平 ($R^2=0.9702 \sim 0.9980$)。因此, 该方程能够很好表征土壤中磷素在固相、液相间的迁移转化, 并且相关吸附参数能够反映土壤的吸附特征 (表 2)。

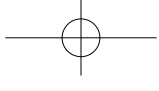
最大吸附磷量 (Q_m) 反映了土壤单位重量磷的吸附位点和磷库大小, 被广泛用于评价土壤对磷的吸附能力^[15]。表 2 显示, 5 种发生层土壤 Q_m 为钙积层 > 黏化层 > 母质层 > 耕层 > 淋溶层。不同发生层的 Q_m 差异显著, 钙积层 Q_m 为 526.32 mg/kg, 是淋溶层的 2.3 倍, 耕层的 1.8 倍, 表明钙积层土壤具有最大的磷库容量, 黏化层次之。通过对表 3 简单相关性分析, 研究了 5 种发生层 Q_m 与土壤性质间的关系。结果显示, 各层 Q_m 与黏粒含量呈显著正相关; 与土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量、碳酸钙含量均无明显相关性。

吸附常数 (K) 是描述土壤对磷亲和力的重要参数之一, K 值越高, 说明土壤对磷的吸附越强, 且随着磷供给减弱, 土壤容易发生自发吸附现象^[14]。试验结果显示, K 值: 黏化层 > 母质层 ≈ 钙积层 > 耕层 ≈ 淋溶层, 黏化层吸附常数 K 值达 0.24, 耕层和淋溶层分别仅为 0.05 和 0.04, 且差异显著, 这一结果说明, 黏化层土壤对磷的吸附能力最强, 耕层、淋溶层土壤的吸附能力最弱。从表 3 相关性分析可以看出, K 值与土壤有机质含

表 2 不同发生层土壤的 Langmuir 等温吸附方程及主要参数

土壤发生层	Langmuir 曲线方程	拟合度 R^2 ($n=24$)	最大吸附磷量 (mg/kg)	吸附 常数	最大吸附缓冲容量 (mg/kg)	吸附饱和度 (%)
耕层	$C/Q=0.0035C+0.0655$	0.9773	285.71d	0.05c	15.27d	4.34a
淋溶层	$C/Q=0.0043C+0.0964$	0.9702	232.56e	0.04c	10.37d	0.86b
钙积层	$C/Q=0.0019C+0.0215$	0.9809	526.32a	0.09b	46.51b	0.23d
黏化层	$C/Q=0.0030C+0.0127$	0.9980	333.33b	0.24a	78.74a	0.36c
母质层	$C/Q=0.0033C+0.0348$	0.9924	303.03c	0.09b	28.74c	0.92b

注: 同列不同小写字母表示不同土壤发生层间差异显著 ($P<0.05$)。



量呈显著负相关；与其余指标间均无明显相关性。由此可见，土壤有机质含量的高低是影响 K 值大小的重要因素。

最大吸附缓冲容量 (MBC) 是 Q_m 和 K 结合的综合参数, MBC 值越高, 磷的吸附越多^[15]。试验数据显示, MBC 值为黏化层 > 钙积层 > 母质层 > 耕层 ≈ 淋溶

层, 这与上述 Q_m 和 K 值大小顺序基本一致, 表明这 3 个参数可较好地表征土壤吸附磷的特性。黏化层 MBC 值高达 78.74 mg/kg, 耕层和淋溶层 MBC 值分别仅为 15.27 和 10.37 mg/kg, 且差异显著。从表 3 相关性分析可以看出, MBC 值与土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量、碳酸钙含量、黏粒含量均无明显相关性。

表 3 土壤吸附磷参数与土壤基本性质的关系 (n=24)

吸附参数	pH	有机质含量	阳离子交换量	<0.002 mm 黏粒	碳酸钙含量	有效磷含量	全磷含量
最大吸附磷量	0.635	-0.485	-0.185	0.953*	-0.803	-0.326	-0.571
吸附常数	-0.516	-0.904*	-0.750	0.869	-0.715	-0.423	-0.677
最大吸附缓冲容量	-0.263	-0.766	-0.620	0.825	-0.650	-0.496	-0.773
吸附饱和度	-0.328	0.737	0.617	-0.894*	0.008	0.997*	0.719

注: * 表示相关显著 ($P<0.05$)。

吸附饱和度 (DPS) 是反映土壤吸附位点饱和状况和磷素淋溶风险的重要指标, 其值越高, 吸附磷量越少, 解吸磷量增多^[16]。在本试验中, 5 种发生层 DPS 值为: 耕层 > 母质层 ≈ 淋溶层 > 黏化层 > 钙积层, 耕层 DPS 值可达 4.34%, 较其他 4 个发生层差异显著。通过相关性分析结果可知, DPS 值与黏粒含量呈显著负相关, 与有效磷含量呈显著正相关; 但与其余指标间均无明显相关性。

2.3 不同发生层吸附磷的解吸特征

土壤磷的解吸是吸附的逆过程, 与磷的再利用和有效性有关。由图 2 可以看出, 在一定条件下, 部分吸附磷能被解吸下来, 随土壤吸附磷量的增加, 5 种发生层土壤的解吸磷量也呈增加趋势。表 4 表明, 各发生层土壤磷吸附量和解吸量间表现为极显著正相关, 相关系数为 0.881 ~ 0.965。由

表 4 不同发生层土壤吸附磷量与解吸磷量的关系

相关系数	耕层	钙积层	淋溶层	黏化层	母质层
R	0.951**	0.895**	0.965**	0.881**	0.918**

注: ** 表示相关极显著 ($P<0.01$)。

于各发生层土壤理化性质不同, 其吸附磷能力也不同, 因而土壤解吸磷的能力势必有较大差异。图 2 中显示, 在磷吸附量相同时, 淋溶层磷解吸量最大, 钙积层解吸量最小; 各发生层磷吸附量较低时, 其解吸量增长较慢, 随着吸附量的增加, 解吸量增长速度变快。

土壤解吸磷率是解吸磷量与吸附磷量的比值, 是反映土壤供磷能力的指标之一, 解吸率越大表明磷的解吸量越大, 土壤供磷能力较强。由图 3 可以看出, 各发生层土壤对磷解吸率的变化趋

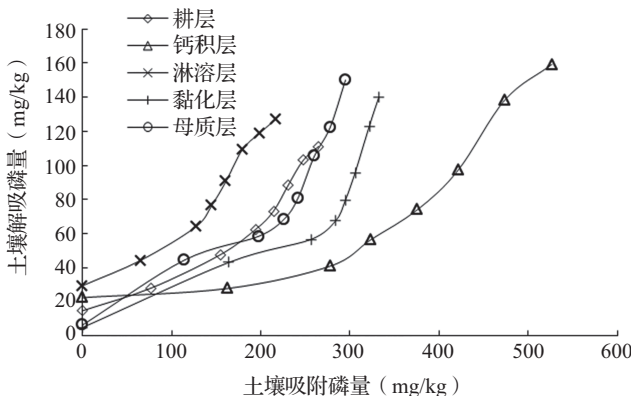


图 2 不同发生层土壤磷吸附量与解吸量关系

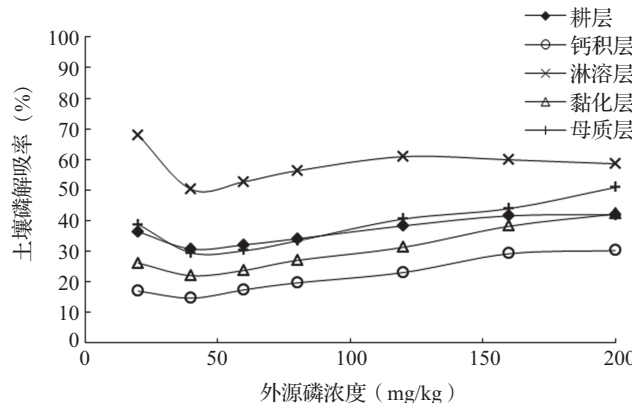
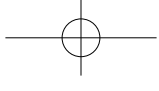


图 3 不同发生层土壤磷解吸率的变化特征



势基本一致,随平衡液中磷的浓度提高,其解吸率呈先降低后逐渐升高的趋势。试验结果显示,不同发生层土壤解吸率表现为淋溶层>母质层>耕层>黏化层>钙积层,且淋溶层显著高于其他层。

3 讨论

本研究中,Langmuir等温吸附方程对石灰性褐土5个不同发生层土壤磷吸附特征有很好的拟合性,决定系数在0.9702~0.9980之间,均达到显著水平。不同发生层土壤对磷吸附趋势基本相同,但吸附能力相差很大,说明即使是同一类型土壤,但因土壤质地和外界环境不同,土壤对磷吸附固定能力有很大差异^[17]。正如本研究中5种发生层土壤因其质地不同,对磷吸附解吸能力不同。等温吸附曲线表明,提高平衡液中外源磷浓度,土壤吸附磷量也随之不断提高。各发生层土壤对磷吸附分为两个阶段:快速吸附阶段、慢速吸附阶段^[18]。在外源磷浓度小于40 mg/L时,曲线上升快且陡,此时为快速吸附磷阶段;此阶段,磷在土壤中可以和铁铝矿物发生化学吸附,与黏粒上盐基离子发生共价吸附,从而加快土壤对磷的吸附固定^[19];当外源磷浓度达到40 mg/L时,曲线出现拐点,斜率明显下降,土壤吸附磷的速度明显减慢,土壤对磷吸附能力开始下降;随着外源磷浓度持续增加,土壤吸磷量增加缓慢,曲线趋于平缓,此阶段为土壤磷吸附慢速阶段,此阶段主要以物理吸附为主,土壤对磷的吸附主要发生在多聚铝合物崩裂产生的位点上^[8]。这与简燕等^[3]研究结果类似,由此可推测在高磷浓度环境下,土壤对磷的吸附达到饱和,吸附曲线将逐渐趋于平直。

本研究中,5种发生层土壤 Q_m 最低仅为232.56 mg/kg(淋溶层),最高可达526.32 mg/kg(钙积层),且 Q_m 与黏粒含量呈显著正相关。这与夏瑶等^[20]研究结果相符,可能是由于黏粒决定土壤吸附位点数量,黏粒含量越高,磷吸附位点越多,吸附能力越强;反之,黏粒含量降低可减少土壤可吸附磷的位点,致使被吸附的磷发生解吸,进入到土壤中^[1]。本试验中,黏化层K值为0.24,在5个发生层中对磷的吸附能力最强,与土壤有机质含量呈现显著负相关。到目前为止,许多研究表明,土壤有机质对土壤磷的吸附解吸有较大影响,其含

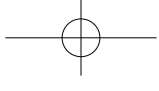
量越高,土壤对磷的吸附能力越弱,解吸能力就越强。主要原因有两方面:一是土壤在有机质腐解时会产生有机酸根离子,该阴离子与土壤溶液中磷酸根产生竞争吸附,减少土壤对磷的吸附;其次土壤有机质分解产物可与土壤表面结合位点发生吸附反应,或与金属氧化物反应形成络合物,导致吸附位点减少,降低土壤对磷的吸附^[21]。二是土壤有机质的凝胶特性可有效降低土壤胶体对磷的物理化学吸附,导致土壤表面吸附的磷易被解吸进入土壤溶液中^[1, 22]。耕层DPS值为4.34%,显著高于其他4层,且DPS值与黏粒含量呈显著负相关,燕慧等^[23]相关研究也验证了这一关系。除此之外,其他研究发现,DPS值还与有机质、全磷和碳酸钙呈显著正相关^[24]。

磷在土壤中的解吸通常被认为是吸附的反向过程,由于土壤中固定磷会被循环再利用和被释放的磷能够引起一系列环境问题,所以研究土壤中磷解吸比吸附更为重要^[21]。被土壤吸附的磷只有部分能够解吸下来,因而磷解吸过程也具有解吸滞后的特性^[25]。图2表明,当磷吸附量增加时,磷的解吸量也会相应增加。其原因可能是:当磷吸附量低时,大部分被土壤所固定的磷只有极少数被解吸出来,而当达到一定吸附磷浓度时,多余的磷被解吸出来^[3]。当外源磷浓度较低时,磷解吸率较高。10 mg/kg外源磷浓度下,本研究淋溶层磷解吸率高达60%以上,王琼等^[25]发现有机无机配施处理黑土磷解吸率约达62%,匡恩俊等^[19]研究的黑土层磷解吸率也约达70%。其他研究者发现,吸附磷弱的土壤相对解吸率较高,K值越小解吸率越大^[26],这与本研究结果一致。在农业生产中,施磷量过高且条件适合的情况下,盈余的磷会随水向下发生淋失,对环境产生潜在负效应,进而影响环境质量。

4 结论

(1) 5种发生层土壤吸附磷量为钙积层>黏化层>母质层>耕层>淋溶层,解吸率为淋溶层>母质层>耕层>黏化层>钙积层。钙积层土壤对磷的解吸率最低,固磷能力最强;淋溶层土壤的解吸率最高,解吸能力最强。

(2) 5种发生层土壤磷的等温吸附曲线均能与Langmuir等温吸附方程很好拟合($R^2=0.9702 \sim$

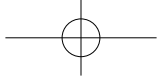


0.9980)。钙积层土壤的磷库最大,为 526.32 mg/kg;黏化层土壤的吸附结合能和缓冲容量最大,而淋溶层土壤具有最小的磷库、吸附结合能和缓冲容量;耕层土壤拥有最大的吸附饱和度,存在磷素淋失风险。

(3) 褐土区不同发生层土壤对磷的吸附解吸特征与土壤性质存在显著的相关关系,黏粒含量与土壤最大吸附磷量呈显著正相关,与磷吸附饱和度呈显著负相关;磷吸附饱和度还与有效磷呈显著正相关;有机质含量则与土壤吸附结合能呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 展晓莹,任意,张淑香,等. 中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4728-4737.
- [3] 简燕,朱坚,彭华,等. 不同类型水稻土对氮磷养分的吸附解吸特征研究[J]. 湖南农业科学, 2020(6): 24-30.
- [4] 刘娟,包立,张乃明,等. 我国4种土壤磷素淋溶流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 64-70.
- [5] Li L, Liang X Q, Ye Y S, et al. Effects of repeated swine manure applications on legacy phosphorus and phosphomonoesterase activities in a paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 51(2): 167-181.
- [6] 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.
- [7] 宋春丽,樊剑波,何园球,等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3) 607-611.
- [8] 张鑫,谷会岩,陈祥伟. 择伐干扰对小兴安岭阔叶红松林土壤磷吸附解吸的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 11-17.
- [9] 李祖荫,吕家珑. 碳酸钙和物理性粘粒固磷特性的研究[J]. 土壤, 1995, 27(6): 304-310.
- [10] 孙桂芳,金继运,石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011(2): 1-9.
- [11] 张微微. 长期不同施肥下潮土有效磷对磷盈亏的响应关系及差异机制[D]. 北京:中国农业科学院, 2020.
- [12] 郭胜利,张树兰,党廷辉,等. 褐土区农田土壤氮磷淋溶特征及其管理措施[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 163-175.
- [13] 马琳杰,霍晓兰,靳东升,等. 褐土区氮磷在土壤发生层中淋溶的差异性[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 197-207.
- [14] 邹慧芳,李丽君,刘平,等. 山西省不同地区褐土对磷素的吸附特征[J]. 山西农业科学, 2019, 47(8): 1399-1404, 1410.
- [15] 黄容,高明,廖燕妮. 不同生物质灰渣对磷的吸附解吸动力学特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 156-160.
- [16] 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.
- [17] 宋春,徐敏,赵伟,等. 不同土地利用方式下紫色土磷有效性及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 85-89, 95.
- [18] 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.
- [19] 匡恩俊,刘峰,朱迟. 不同改土物料对白浆土磷吸附解吸的影响[J]. 土壤, 2009, 41(5): 772-776.
- [20] 夏瑶,娄运生,杨超光,等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002(11): 1369-1374.
- [21] 徐敏,宋春,毛璐,等. 不同土地利用方式下紫色土磷吸附-解吸动力学特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 39-44.
- [22] Yan X, Wang D, Zhang H, et al. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil[J]. Agric Ecosyst Environ, 2013, 175: 47-53.
- [23] 燕慧,罗建新,李宏图,等. 湖南主要植烟土壤对磷的吸附与解吸潜力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 115-119.
- [24] Zou P, Fu J R, Cao Z H. Chronosequence of paddy soils and phosphorus sorption-desorption properties[J]. Journal of Soils & Sediments[J]. 2011, 11(2): 249-259.
- [25] 王琼,展晓莹,张淑香,等. 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1679-1688.
- [26] 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.



Characteristics of phosphorus adsorption and desorption in different soil pedogenic horizons of cinnamon soil region

HUO Xiao-lan¹, MA Lin-jie^{1, 2}, LI Li-jun¹, LIU Ping^{1*}, HUI Wei^{1, 2}, MA Qi-qi^{1, 2} (1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University/Provincial Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan Shanxi 030031; 2. Faculty of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006)

Abstract: The isotherm adsorption and desorption test using the typical pedogenic horizons of cinnamon soil (cultivation horizon, leaching horizon, calcic horizon, argic horizon, and parent material) of Shanxi Province as the research object was adopted. The adsorption and desorption characteristics of soil phosphorus in different pedogenic horizons were studied through the adsorption and desorption values of phosphorus, the fitting curve of Langmuir equation and the correlation between the relevant parameters and soil properties. The results showed that: (1) Phosphorus adsorption capacity of different soil pedogenic horizons was calcic horizon>argic horizon>parent material>cultivation horizon>leaching horizon, and desorption capacity was leaching horizon>parent material>cultivation horizon>argic horizon>calcic horizon. The calcic horizon had the highest phosphorus fixation capacity and the lowest desorption rate. The desorption capacity and desorption rate of the leaching horizon were the highest. (2) There was a good fitness between the phosphorus adsorption curve and Langmuir equation ($R^2=0.9702-0.9980$). The maximum phosphorus adsorption amount (Q_m) of calcic horizon was 526.32 mg/kg. The adsorption constant (K) and maximum adsorption buffer capacity (MBC) values of the argic horizon were 0.24 and 78.74 mg/kg, respectively. The Q_m , K and MBC values of the leaching horizon were 232.56 mg/kg, 0.04 and 10.37 mg/kg, and they were all the minimum. The cultivation horizon had the highest adsorption saturation (DPS) (4.34%), so it was at risk of phosphorus leaching. (3) The clay content was significantly positively correlated with the Q_m and negatively correlated with the phosphorus DPS . The phosphorus DPS was significantly positively correlated with available phosphorus. The organic matter content was negatively correlated with soil adsorption binding energy. The results showed that characteristics of phosphorus adsorption and desorption in different soil pedogenic horizons of cinnamon soil region were different, and had obvious relationship with soil properties. The leaching risk of phosphorus in cultivation horizon was higher, and more attention should be paid to it.

Key words: cinnamon soil; pedogenic horizons; phosphorus; adsorption and desorption; soil properties