

四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征

王彦^{1,2}, 张进忠¹, 王振华², 李太魁², 贺春风¹, 朱波^{2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:研究了四川盆地丘陵区典型水田和旱地土壤对磷的吸附与解吸特征,并讨论了吸附-解吸参数与土壤基本理化性质的关系。结果表明,不同 pH 的农田土壤对磷的吸附和解吸均存在显著差异,土壤对磷的吸附能力表现为中性土壤>酸性土壤>石灰性土壤,中性有利于土壤吸附磷;水稻土对磷的最大吸附容量(Q_m)和最大缓冲容量(MBC)高于紫色土,而临界平衡磷浓度(EPC_0)和解吸率(b)低于紫色土。农田土壤对磷的吸附与解吸参数还受土壤理化性质的影响, Q_m 和 MBC 与有机质含量、无定形铁(Fe_{ox})含量呈极显著正相关($P<0.01, n=6$);吸附常数(K)与有机磷含量呈显著负相关($P<0.05, n=6$); EPC_0 与土壤 pH、 $CaCO_3$ 含量呈显著负相关,与有机磷含量呈显著正相关($P<0.05, n=6$); b 与 Fe_{ox} 含量呈显著负相关($P<0.05, n=6$)。

关键词:紫色土;水稻土;磷;吸附-解吸

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2068-07

Adsorption and Desorption Characteristics of Phosphorus on Cropland Soils in the Hilly Area of Sichuan Basin, China

WANG Yan^{1,2}, ZHANG Jin-zhong¹, WANG Zhen-hua², LI Tai-kui², HE Chun-feng¹, ZHU Bo^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Adsorption and desorption characteristics of cropland soils at different pH in the hilly area of Sichuan Basin to phosphorus were studied, and the effect of soil physicochemical properties on adsorption and desorption parameters was discussed. The results showed that the adsorption characteristics of the tested soil to phosphorus could be well described by Langmuir, Freundlich, and Temkin equations. Adsorption and desorption of the cropland soils at different pH to phosphorus indicated significant differences. The adsorption capacity showed an order of neutral, acidic and calcareous for the purple soil and paddy soil from high to low, and neutral soil was beneficial to phosphorus adsorption. The Maximum adsorption capacity (Q_m) and maximum buffer capacity (MBC) of the paddy soil to phosphorus were higher than that of the purple soil, while the equilibrium concentration of phosphorus at zero sorption (EPC_0) and desorption rate (b) in an inverse order. The adsorption and desorption parameters were influenced by the physicochemical properties of soil. Q_m and MBC showed a positive relationship with the contents of organic matter and Fe_{ox} ($P<0.01, n=6$), while b showed a negative relationship with the content of Fe_{ox} ($P<0.05, n=6$) significantly. Adsorption constant (K) showed a negative relationship with the content of organic phosphate ($P<0.05, n=6$) significantly. EPC_0 showed negative relationship with pH and $CaCO_3$ content ($P<0.05, n=6$) while a positive relationship with the content of organic phosphate ($P<0.05, n=6$) significantly. Therefore, the suitable countermeasures should be put forward for phosphorus managements in farmland, e.g., promote the activation of phosphorus for the paddy soil and control the usage of phosphorus fertilizers for the purple soil.

Keywords: purple soil; paddy soil; phosphorus; adsorption and desorption

收稿日期: 2011-02-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-YW-N-46-11); 国家支撑计划项目(2008BAD98B05)

作者简介: 王彦(1985—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事环境污染化学方向的研究。E-mail: wangyan0431@sina.com

* 通讯作者: 朱波 E-mail: bzhu@imde.ac.cn

磷是作物生长必需的大量营养元素之一,施用磷肥是提高农作物产量的重要措施,但其不合理施用也带来了大量的环境问题,由此引起的农田土壤磷流失已成为水体富营养化的重要原因^[1-3]。紫色土是在亚热带湿润季风气候条件下由紫色砂页岩发育而成的岩性土,处于中国地势第二、三阶梯的过渡地带,集中分布在四川盆地低山丘陵区 and 三峡库区,面积达 16 多万 km²^[4]。该区域气候适宜、土壤矿质养分丰富,是西南地区农业生产的中心^[5-6]。然而,区域农田土壤的频繁耕作和不合理的管理使得非点源磷素流失严重,已经影响到三峡库区的水环境质量,因此加强紫色土区域农田土壤的磷素管理显得尤其重要。

研究土壤对磷的吸附与解吸特征对于控制农业非点源磷素流失、保护受纳水体的环境安全都具有重要意义。目前,已在不同区域开展了水稻和棉田等利用类型土壤对磷的吸附-解吸特征研究^[7-10],发现土壤对磷的吸附-解吸特征与其有效磷、有机质、CaCO₃、粘粒含量和活性 Fe/Al 含量等理化性质密切相关,不同类型的土壤因其理化性质的差异而各具特殊性^[11-13]。尽管如此,四川盆地丘陵区主要农田土壤(水田、旱地)对磷的吸附和解吸有何特点?土壤性质特别是酸碱性对磷的吸附与解吸有何影响?目前研究还不够深入,有必要进行深入的研究。

四川盆地丘陵区农田利用主要包括旱地和水田,旱地土壤以紫色土为主,水田土壤为水稻土。根据土壤的酸碱度差异,紫色土包括酸性、中性和石灰性紫色土,水田亦有酸碱性之分。酸性土主要分布在盆地南部的浅丘地带,中性土主要分布在盆地东部的平行岭谷区,石灰性土主要分布在盆地中部的深丘地区。土壤的酸碱性直接影响土壤 CaCO₃ 和活性 Fe/Al 的含量,进而影响土壤对磷的吸持和保留特性。研究该区域不同 pH 的水田、旱地土壤对磷的吸附与解吸特征,可以为合理施用磷肥、提高磷肥利用率、控制农田土壤磷素流失和缓解水体富营养化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自四川省乐山市五通桥区新云乡、绵阳市盐亭县林山乡和重庆市北碚区槽上乡(以下分别简称为新云乡、林山乡和槽上乡)的不同酸碱度紫色土典型分布区,采样时间为 2009 年 4 月。土壤采样地点、利用方式及基本性质见表 1。旱地土壤均为紫色土坡耕地,小麦-玉米轮作;水田土壤为水旱轮作稻田,主要为水稻-小麦或水稻-油菜轮作。用常规方法测定土壤理化性质,pH 采用电位法测定;有效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 溶液浸提,钼锑抗还原光度法测定;全磷用酸溶-钼锑抗还原光度法测定;有机磷用灼烧法间接测定;全氮用凯氏定氮法测定;有机质用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 稀释热法测定;CaCO₃ 含量用酸碱滴定法测定;无定形 Fe、Al 氧化物(Fe_{ox}、Al_{ox})用 0.2 mol·L⁻¹ 草酸-草酸铵缓冲液(pH 3.0~3.2)提取测定;颗粒组成根据 Stokes 定律用比重计法测定:粘粒≤0.002 mm,0.002 mm<粉粒≤0.05 mm,0.05 mm<砂粒≤2 mm。具体测定方法和步骤参见《土壤农业化学分析方法》^[14]。

采自新云乡、林山乡和槽上乡的旱地土壤分别为酸性紫色土、石灰性紫色土和中性紫色土,各点位土壤全氮含量相近,全磷含量差异较明显,其中槽上乡中性紫色土的全磷含量最高(2.20 g·kg⁻¹),分别为新云乡、林山乡紫色土的 3.08 倍和 11.73 倍。Fe_{ox} 含量为石灰性<酸性<中性,Al_{ox} 含量为石灰性<中性<酸性,各点位水田土壤的 Fe_{ox}、Al_{ox} 含量均高于旱地土壤。各点位土壤砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 24%~49%、32%~55%和 18%~21%。

1.2 研究方法

1.2.1 等温吸附实验

称取 1.500 g 经风干、研碎、过 0.25 mm 筛的土壤样品于 9 只 50 mm 离心管中,分别加入 30 mL 含磷量

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Some physicochemical properties of the tested soils

编号 采样	地点	利用 方式	pH	土壤 类型	CaCO ₃ / g·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	全磷/ g·kg ⁻¹	Fe _{ox} / g·kg ⁻¹	Al _{ox} / g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	有机磷/ mg·kg ⁻¹	砂粒/ %	粉粒/ %	粘粒/ %
S1	新云乡	旱地	5.3	酸性紫色土	0	20.6	1.5	0.7	1.13	1.33	87.2	345.0	38	42	20
S2	新云乡	水田	5.4	酸性水稻土	0	24.5	1.4	0.5	2.08	2.83	11.3	222.5	49	32	19
S3	槽上乡	旱地	6.5	中性紫色土	16.4	18.7	1.1	2.2	1.41	0.19	24.4	265.0	48	34	18
S4	槽上乡	水田	6.7	中性水稻土	24.7	47.8	2.2	1.2	2.62	0.41	23.9	220.0	41	38	21
S5	林山乡	旱地	8.3	石灰性紫色土	58.4	12.0	1.0	0.2	0.72	0.07	9.8	93.8	29	50	21
S6	林山乡	水田	8.3	石灰性水稻土	62.0	17.7	1.2	0.6	1.52	0.12	15.5	136.3	24	55	21

为 0、2、4、8、12、18、26、36 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液(用 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液配制),加入氯仿 2 滴,以抑制微生物活性。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温振荡 24 h, 振速 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 平衡后离心,过 0.45 μm 滤膜,测定平衡液中的溶解性活性磷(SRP)含量,通过差减法计算土壤对磷的吸附量,每个处理做 3 次重复。

1.2.2 等温解吸实验

吸附实验结束后,用 95% 的酒精清洗土样中游离的磷酸盐,再分别加入 25 mL 0.01 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液,振荡 24 h 后,离心、过滤,测定解吸液中的 SRP 含量,计算磷的解吸量,每个处理做 3 次重复。

1.3 吸附解吸参数的计算

描述磷在土壤表面的吸附行为,最常用的模型是 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程,本文用于计算磷在供试土壤表面的吸附与解吸参数。

Langmuir 吸附模型:

$$C/Q = C/Q_m + 1/(K_1 Q_m) \quad (1)$$

式中: C 为吸附平衡液中的磷浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为泥沙对磷的平衡吸附量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Q_m 为泥沙对磷的最大吸附量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K_1 为与吸附结合能有关的常数($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$); $K_1 Q_m$ 为最大缓冲容量(MBC)。

Freundlich 吸附模型:

$$\lg Q = \lg K_2 + 1/n \lg C \quad (2)$$

式中: K_2 为表示土壤吸附容量的参数($\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$); n 为与吸附强度有关的参数。

Temkin 吸附模型:

$$Q = a + K_3 \lg C \quad (3)$$

式中: a 和 K_3 为与温度和吸附质有关的常数。

临界平衡磷浓度(EPC_0)为用 Q 对 C 作图,曲线与 X 轴的交点。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤对磷的等温吸附特征

2.1.1 紫色土对磷的等温吸附特征

图 1 为旱地土壤对磷的等温吸附曲线。可以看出不同酸度的紫色土对磷的等温吸附趋势相似,大致分为 3 个阶段:在磷浓度较低时,紫色土对磷的等温吸附曲线斜率较大,吸附速率较快,可能此时土壤中无定形铁铝对磷的化学吸附和粘粒上盐基离子对磷的共价吸附占主导地位;磷浓度较高时,曲线趋于平缓,吸附量增加较慢,可能由土壤对磷的物理化学吸附和物理吸附所引起^[15-16];磷浓度继续上升,土壤对磷的吸附接近或达到平衡,此时石灰性和酸性紫色土出现部分解吸。

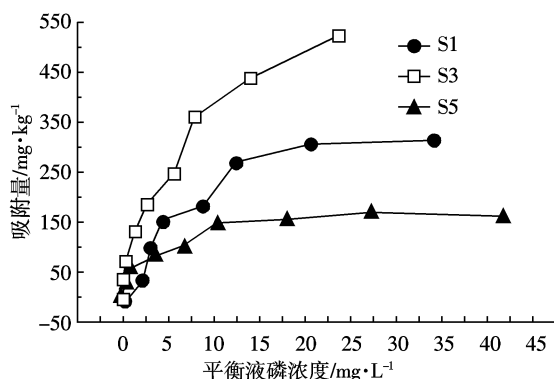


图 1 紫色土对磷的等温吸附

Figure 1 Isothermal adsorption of phosphorus on the purple soil

石灰性紫色土的等温吸附曲线较平缓,土壤对磷的吸附速率较慢,在平衡液磷浓度较低时即达到吸附平衡(图 1);中性紫色土的等温吸附曲线较陡,土壤对磷的吸附速率较快,达到平衡时的磷浓度高(图 1);酸性紫色土介于两者之间(图 1)。由 F 检验结果得出,不同 pH 的紫色土对磷的吸附量存在显著性差异($P < 0.05, n = 9$)。

吸附速率和吸附量的差异主要与紫色土 pH 和 Fe_{ox} 、 Al_{ox} 含量有关。中性紫色土对磷的吸附量高于酸性紫色土,可能由于土壤 pH 较高,土壤内羟基聚合物较多,交换性铝更易水解,对磷的吸持能力较强,吸附速率也较快。当 pH 继续升高,土壤表面正电荷减少,负电荷增加,由于静电排斥的作用,将降低土壤对磷的吸附量,而且随 pH 升高, CaCO_3 含量增加,对土壤磷吸附起重要作用的无定型 Fe、Al 氧化物不断减少,因此石灰性紫色土的磷吸附量较低^[13]。这与王光火等^[17]研究红壤吸附磷的结果类似,说明中性有利于紫色土对磷的吸附。

2.1.2 水稻土对磷的等温吸附特征

图 2 为水稻土对磷的等温吸附曲线。水田土壤对

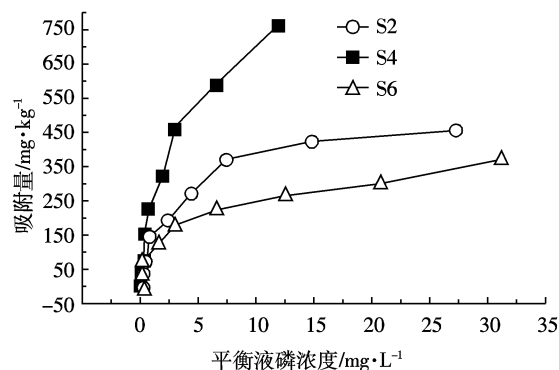


图 2 水稻土对磷的等温吸附

Figure 2 Isothermal adsorption of phosphorus on the paddy soils

磷的吸附同样由快速吸附、慢速吸附和吸附达动态平衡 3 个阶段组成,其吸附速率顺序为石灰性<酸性<中性。中性水稻土达到平衡时磷浓度最高,酸性次之,石灰性最低。 F 检验结果表明,不同 pH 水稻土对磷的吸附量存在显著性差异($P<0.05, n=9$)。造成吸附速率和吸附量的差异同样主要与 pH 和 Fe_{ox} 、 Al_{ox} 含量不同有关。中性水稻土中羟基聚合物较多,静电排斥作用较小,有利于对磷的吸附。

从图 1 和 2 可以看出,各个采样点的水稻土对磷的吸附速率均高于紫色土,这主要是土壤中不同的有机质和 Fe_{ox} 、 Al_{ox} 含量造成的。水稻土大多由当地的紫色土经人工耕作形成,长期淹水, E_h 为负值,各种好气微生物作用在还原状态下受到明显抑制,有机质分解速率显著减慢,水稻土中积累了大量的有机质,它们更易与无定形 Fe 、 Al 氧化物发生作用,形成有机-无机复合体,间接作用于磷的吸附,导致水稻土对磷的吸附能力高于紫色土。这与王振华等^[8]发现不同来源紫色土泥沙沉积物对磷的吸附结果一致,水田沟渠泥沙的平衡吸附量最大。

2.2 农田土壤对磷的等温吸附方程

为了更好地描述供试土壤对磷的吸持特征,揭示土壤胶体表面吸附量与溶液平衡浓度之间的关系,采用 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 方程 3 种常用吸附模型拟合实验结果,获得了如表 2 所示的等温吸附参数。结果表明,3 个等温吸附方程均能较好地描述供试土壤对磷的等温吸附特征,决定系数(R^2)在 0.846~0.998 之间。

Temkin 方程是在化学吸附的基础上推导而来,可以较好地反映供试土壤对磷的等温吸附特征。研究表明在 $0\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷浓度范围内,供试土壤对磷的化学吸附占主导地位,这与陈波浪等^[10]的研究结果一致。

Freundlich 方程中的吸附常数 K 在一定程度上反映了土壤吸附磷的能级,可以用来衡量吸附反应的自发程度。 K 为正值,说明反应在常温下能自发进行,且 K 越大反应的自发程度越强,生成物越稳定,对磷的吸附能力越强,而供磷能力就越弱。水稻土的 K 值大于紫色土,说明水稻土对磷的吸附能力较强。

由 Langmuir 方程可以获得土壤对磷的最大吸附量(Q_m),用以反映土壤磷库的大小。只有当磷库达到一定容量时,土壤才可能向作物提供养分; Q_m 还被用于评价磷释放的风险, Q_m 越大,环境风险越小。研究发现酸性、中性、石灰性土壤的 Q_m 均为水稻土>紫色土,且水稻土的 Q_m 为紫色土的 1.37~2.15 倍。对于水稻土或紫色土,均呈现中性土壤>酸性土壤>石灰性土壤的规律,中性水稻土的 Q_m 分别是酸性水稻土和石灰性水稻土的 1.73 倍和 2.36 倍;中性紫色土的 Q_m 分别是酸性紫色土石灰性紫色土的 1.53 倍和 3.29 倍。由此可见,土壤酸碱性差异导致水稻土、紫色土的 Q_m 明显不同。

MBC 是 Q_m 与 K 的乘积,通常称为土壤最大缓冲容量或土壤对磷的吸持特性值,综合反映了土壤吸持磷的强度和容量,是判断土壤供磷特性的一项综合指标。当土壤的供磷强度相近时, MBC 值大者,其有效磷贮量多,土壤向作物提供的有效磷就多;当土壤间的吸附磷量相近时, MBC 值大者,其吸附的磷所处能态较低,吸附的磷较易被作物吸收利用,因而其供磷强度就较小。供试土壤的最大缓冲容量表现为水稻土>紫色土,中性土壤>酸性土壤>石灰性土壤,这与 Q_m 的顺序一致。

EPC_0 是临界平衡磷浓度,为吸附等温线的关键点,与土壤的吸附特征关系密切。当水体磷浓度小于沉积物的 EPC_0 值时,吸附量为负值,沉积物向水体释放磷,表现为磷的“源”;反之,吸附量为正值,表现为

表 2 不同土壤对磷的等温吸附参数

Table 2 Isothermal adsorption parameters of phosphorus on the tested soils

土壤类型	Langmuir 方程 $C/Q=C/(K_1+Q_m)$					Freundlich 方程 $\lg Q=\lg K_2+1/n\lg C$			Temkin 方程 $Q=a+K_3\lg C$		
	Q_m	K_1	MBC	EPC_0	R^2	K_2	$1/n$	R^2	a	K_3	R^2
酸性紫色土(S1)	384.62	0.15	59.17	0.33	0.968	49.61	0.57	0.846	71.42	52.73	0.846
中性紫色土(S3)	588.24	0.23	135.14	0.19	0.951	110.01	0.52	0.991	155.28	93.95	0.896
石灰性紫色土(S5)	178.57	0.39	69.44	0.14	0.991	55.13	0.35	0.932	60.81	31.22	0.944
酸性水稻土(S2)	526.32	0.28	147.06	0.22	0.998	107.17	0.53	0.923	148.03	95.44	0.979
中性水稻土(S4)	909.09	0.37	333.33	0.12	0.960	205.21	0.60	0.946	305.84	146.24	0.924
石灰性水稻土(S6)	384.62	0.34	131.58	0.07	0.971	108.87	0.36	0.932	141.22	54.02	0.937

注: $MBC=Q_m\cdot K_1; n=9; R_{0.05}=0.602; R_{0.01}=0.735$ 。

磷的“汇”。由于供试土壤的 EPC_0 为酸性土壤>中性土壤>石灰性土壤,同点位紫色土高于水稻土,酸性紫色土的 EPC_0 最大,说明降雨或淹水后土壤中的磷更易向水环境中释放,表现为磷的“源”。

2.3 农田土壤的解磷特征

通常认为解吸是吸附的逆过程,具有比吸附更为重要的现实意义。解吸不仅关系到被吸附磷的再利用,以提高土壤中磷的生物有效性,而且与土壤向水体释放磷和增加水体的富营养化风险有关。解吸率越小,向环境中释放的风险越小,反之释放风险越大。

随着加入磷浓度的升高,解吸量和解吸率(解吸量与吸附量的比值)均呈升高趋势(图 3 和图 4)。与吸附等温线明显不同的是土壤对磷的解吸等温曲线没有达到平衡,这是因为土壤对磷的保持量趋于饱和,但随着加入磷浓度的升高,仍有少量磷被吸附,这部分磷最终也将被解吸出来。由 F 检验得出,不同 pH 的紫色土和水稻土对磷的解吸量均存在显著性差异($P<0.05,n=9$),解吸率表现为石灰性土壤>酸性土壤 $\geq$ 中性土壤;不同 pH 的同一点位土壤,紫色土的解吸率高于水稻土。

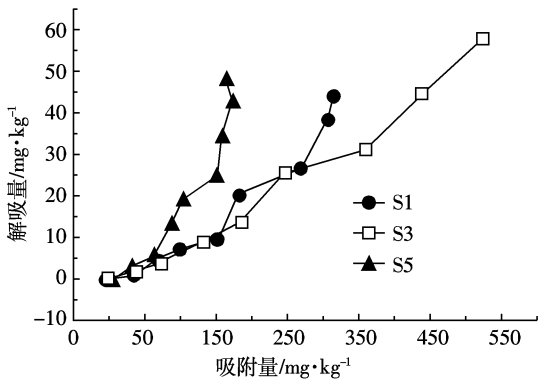


图 3 紫色土对磷的等温解吸曲线
Figure 3 Isothermal desorption of phosphorus from the purple soil

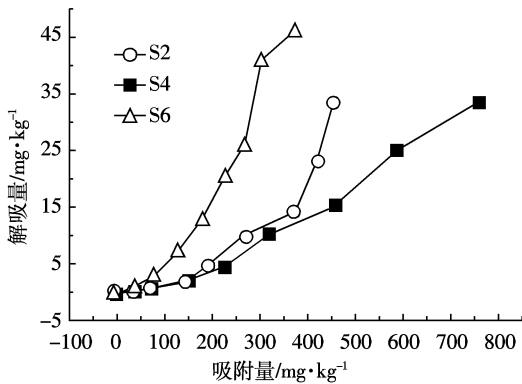


图 4 水稻土对磷的等温解吸曲线
Figure 4 Isothermal desorption of phosphorus from the paddy soil

解吸量和解吸率的差异主要与土壤的 pH 和 Fe_{ox} 、 Al_{ox} 含量有关。中性土壤对磷的吸持能力强,酸性或石灰性土壤由于缺少羟基聚合物或具有较强的静电排斥作用,对磷的吸持能力减弱,解吸量增加,解吸率增大。水稻土中有机质含量高,易与无定形 Fe 、 Al 氧化物作用而形成有机-无机复合体,本研究中水田土壤的吸附-解吸实验均是在风干后进行的,水稻土干燥后对磷的吸持能力可能增强。

用方程 $y=a+bx$ 拟合解吸量与吸附量的关系如表 3 所示。可以看出,6 种供试土壤的解吸量与吸附量均呈显著正相关。斜率 b 为解吸率,表示单位吸附量中的解吸量。 b 值越大,土壤对外源磷的缓冲能力越差。由此可见,两种土壤的缓冲能力均表现为中性土壤>酸性土壤>石灰性土壤;对于同一点位,水稻土的缓冲能力均高于紫色土。综合分析得出,中性水稻土对磷的吸附量最大,解吸量最小,缓冲能力最强;石灰性紫色土对土壤的磷吸附量最低,解吸量却较大,说明其缓冲能力较弱,吸附的磷更易向环境中释放。

表 3 土壤中磷解吸量与吸附量的相关关系
Table 3 Relationship between the desorption capacity and adsorption capacity of phosphorus

供试土壤	$y=a+bx$		
	a	b	R^2
酸性紫色土(S1)	-5.37	0.14	0.941
中性紫色土(S3)	-4.82	0.11	0.982
石灰性紫色土(S5)	-7.65	0.26	0.816
酸性水稻土(S2)	-6.05	0.07	0.874
中性水稻土(S4)	-4.11	0.05	0.978
石灰性水稻土(S6)	-8.57	0.14	0.946

注: $n=9$; $R_{0.05}=0.602$; $R_{0.01}=0.735$ 。

2.4 土壤性质对吸附与解吸参数的影响

除土壤酸度外,土壤对磷的吸附与解吸参数还受其他理化性质的影响,结果见表 4。可以看出,有机质对供试土壤的吸磷能力有重要影响, Q_m 和 MBC 与有机质含量呈极显著正相关,相关系数分别达到 0.917 和 0.938($P<0.01,n=6$)。这可能是土壤有机质与无定形 Fe 、 Al 氧化物形成了有机-无机复合体,有利于对磷的吸附,与很多报道的结果一致^[13,19-20]。

Fe_{ox} 含量对供试土壤的吸附-解吸作用影响较大。从表 4 可以看出, Q_m 、 MBC 与土壤 Fe_{ox} 含量呈显著的正相关关系($R=0.914,0.913,n=6$), b 与 Fe_{ox} 含量呈显著的负相关关系($R=-0.900,n=6$)。结果表明, Fe_{ox} 含量与土壤的吸磷能力关系密切, Fe_{ox} 容易与 PO_4^{3-} 形成难溶的 $FePO_4$ 沉淀,进而影响土壤对磷的吸

表 4 供试土壤对磷的吸附和解吸参数与其基本理化性质的相关性(R)

Table 4 Relationships between adsorption-desorption parameters of phosphorus and physicochemical properties of the tested soils												
参数	pH	有效磷	有机磷	全磷	全氮	有机质	Fe _{ox}	Al _{ox}	CaCO ₃	砂粒	粉粒	粘粒
<i>Q_m</i>	-0.361	-0.054	0.357	0.579	0.823*	0.917**	0.914**	0.069	-0.400	0.555	-0.595	-0.147
<i>K</i>	0.764	-0.791	-0.901*	-0.349	0.032	0.194	0.200	-0.394	0.755	-0.466	0.428	0.630
<i>MBC</i>	-0.037	-0.298	-0.011	0.329	0.813*	0.938**	0.913**	-0.083	-0.067	0.273	-0.328	0.187
<i>EPC₀</i>	-0.830*	0.792	0.820*	0.039	0.058	-0.137	-0.228	0.570	-0.814*	0.492	-0.480	-0.465
<i>b</i>	0.605	-0.050	-0.513	-0.454	-0.743	-0.767	-0.900*	-0.433	0.612	-0.645	0.667	0.341

注: *表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$)。

附。这与邢友华等^[21]发现东平湖表层沉积物的吸磷能力受 Fe_{ox} 含量影响的结果一致。

有机磷含量对四川盆地丘陵区农田土壤的释磷能力起重要影响。*K* 与土壤有机磷含量呈显著负相关关系($R=-0.901, n=6$), 说明土壤有机磷含量在一定程度上影响土壤吸附磷的能级, 有机磷含量越高, 对磷的吸附能力越弱; *EPC₀* 与有机磷含量显著正相关($R=-0.901, n=6$), 有机磷含量越高, 向水体环境中释放的风险越高。这主要由于土壤中的有机磷不稳定, 容易向环境水体释放, 与郭胜利等^[11]的研究结果一致。供试土壤有机磷含量与有机质含量无显著相关性, 可能是由于采样点的施肥方式和施肥量不同造成的。

EPC₀ 与土壤的 pH、CaCO₃ 含量呈显著负相关, 这是由于不同吸附基质对磷的吸附能量不同。pH 升高, CaCO₃ 含量增加, 将会与土壤中的有机-无机复合体竞争吸附磷。通常 CaCO₃ 吸附磷的结合能量低、易解吸, 而有机-无机复合体吸附磷的结合能量高、不易解吸^[13]。

采用主成分分析法分析土壤理化性质对吸附与解吸参数的影响, 获得结果如表 5 所示。可以看出, 第一、第二主成分的累积贡献率达到 93.69%, 故提取前两个主成分进行分析。第一主成分主要与土壤酸碱度有关, 第二主成分主要与土壤有机物含量有关。pH、CaCO₃ 对第一主成分的贡献率较大, 而 CaCO₃ 含量与 pH 密切相关, 说明 pH 对土壤的吸磷和解磷作用具

有重要影响。

研究表明, 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸存在显著差异, 应区别对待。水稻土长期淹水, 有机质含量较高, *Q_m* 和 *MBC* 较大, 磷的解吸率较低, 可以在一定程度上起到吸持和截留磷的作用; 同时水稻土大都处于低洼位置, 接受上坡位置紫色土流失的泥沙和磷素, 其较高的磷吸附能力对于控制磷的释放具有重要意义。但是, 在相同的施肥条件下, 水稻土向作物提供的有效活性磷降低, 应当采取措施促进土壤磷的活化, 以满足作物生长的需要。旱地土壤尤其是石灰性紫色土的 *Q_m* 和 *MBC* 较小, 磷的解吸率较高, 土壤吸附的磷较容易释放, 是潜在的磷释放源, 应当注意合理施肥, 以减少磷肥的流失和淋失, 防止过量磷进入水体。

3 结论

(1) 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附由快速吸附、慢速吸附和吸附达动态平衡 3 个阶段组成, 土壤对磷的化学吸附占主导地位。

(2) 土壤酸度显著影响其吸磷和解磷能力, 中性有利于土壤对磷的吸附。吸附量的顺序为中性土壤>酸性土壤>石灰性土壤, 解吸量的顺序恰好相反。

(3) 水稻土的有机质和 Fe_{ox} 含量对其吸磷和解磷能力具有显著影响, 表现出较高的 *Q_m*、*MBC* 和较低的解吸率。

参考文献:

[1] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-7.
LU Ru-kun. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphorus and Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-7.
[2] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
QUAN Wei-min, YAN Li-jiao. Effects of agricultural non-point pollution on eutrofication and its control measures[J]. *Acta Ecologica Sinica*,

Table 5 Matrix of correlation coefficient using principal component analysis		
参数	主成分	
	1	2
pH	-0.820	0.545
CaCO ₃	-0.822	0.542
有机质	0.777	0.615
全氮	0.808	0.523
Fe _{ox}	0.742	0.573
有机磷	0.746	-0.582

- 2002, 22(3):291-299.
- [3] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000(4):188-193.
- SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Phosphorus losses from farmlands and water body eutrophication[J]. *Soil Science*, 2000(4): 188-193.
- [4] Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Measurement of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73:1419-1426.
- [5] 朱 波, 陈 实, 游 祥, 等. 紫色土退化旱地的恢复与重建[J]. 土壤学报, 2002, 39(5):743-749.
- ZHU Bo, CHEN Shi, YOU Xiang, et al. Soil fertility restoration on de-graded upland of purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 743-749.
- [6] 朱 波, 汪 涛, 徐泰平, 等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. 山地学报, 2006, 24(5):601-606.
- ZHU Bo, WANG Tao, XU Tai-ping, et al. Non-point-source nitrogen movement and its environmental effects in a small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(5):601-606.
- [7] 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, 35(11):1369-1374.
- XIA Yao, LOU Yun-sheng, YANG Chao-guang, et al. Characteristics of phosphate adsorption and desorption in paddy soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11):1369-1374.
- [8] 孟庆华, 李根英. 山东主要土类有机质及其与供磷特性的关系[J]. 土壤通报, 2007, 38(1):25-28.
- MENG Qing-hua, LI Gen-ying. Soil organic matter as related to P releasing properties in different types of soil in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1):25-28.
- [9] 谢学俭, 陈晶中, 汤莉莉, 等. 三种水稻土对磷的吸附解吸特性[J]. 土壤通报, 2008, 39(3):597-601.
- XIE Xue-jian, CHEN Jing-zhong, TANG Li-li, et al. P adsorption and desorption of three paddy soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):597-601.
- [10] 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 Bo-lang, SHENG Jian-dong, JIANG Ping-an, et al. Study on characteristics of phosphorus adsorption and desorption of cotton field with different soils textures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2):303-307.
- [11] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 33-39.
- GUO Sheng-li, DANG Ting-hui, LIU Shou-zan, et al. Changes in characterization of phosphorus sorption in relation to its forms and soil organic carbon[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 33-39.
- [12] Harrell D L, Wang J J. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils[J]. *Soil Science*, 2006, 171:39-51.
- [13] Li M, Hou Y L, Zhu B. Phosphorus sorption-desorption by purple soils of China in relation to their properties[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:182-189.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] Brennan R F, Bolland M D A, Jeffery R C, et al. Phosphorus adsorption by a range of Western Australian soils related to soil properties[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25:2785-2795.
- [16] 曹志洪, 李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3):218-226.
- CAO Zhi-hong, LI Qing-kui. Phosphorus adsorption and desorption in Loessial soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(3):218-226.
- [17] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因[J]. 土壤学报, 1991, 28(1):1-6.
- WANG Guang-huo, ZHU Zu-xiang. The effect of pH on phosphate sorption in soils and its possible mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1):1-6.
- [18] 王振华, 朱 波, 何 敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):154-160.
- WANG Zhen-hua, ZHU Bo, HE Min, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):154-160.
- [19] Axt J R, Walbridge M R. Phosphate removal capacity of palustrine forested wetlands and adjacent uplands in Virginia[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63:1019-1031.
- [20] Zhang H, Schroder J L, Fuhrman J K, et al. Path and multiple regression analyses of phosphorus sorption capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69:96-106.
- [21] 邢友华, 董 洁, 李晓晨, 等. 东平湖表层沉积物中磷的吸附容量及潜在释放风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):746-751.
- XING You-hua, DONG Jie, LI Xiao-chen, et al. Phosphorus sorption capacity of the surficial sediment in the Dongping Lake and risk assessment of potential phosphorus release[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):746-751.