

紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征

王振华^{1,2,3}, 朱 波¹, 何 敏¹, 周明华^{1,3}, 王 彦¹

(1.中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2.长江科学院流域水环境研究所, 武汉 430010; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:在紫色土集中分布的四川盆地丘陵区,选择不同土地利用方式(林地、水田、旱坡地、村镇)产生的沟渠泥沙为实验材料,采用平衡法研究了紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征。结果表明,泥沙对磷的吸附和解吸过程按速率均分为快、慢、动态平衡 3 个阶段,0~0.75 h 内泥沙对磷的吸附速率与活性铁铝氧化物含量和粘粒含量之间呈显著正相关,较高的 Olsen P 水平和砂粒含量是泥沙磷解吸速率高的重要因素。泥沙磷的吸附量和解吸量与反应时间之间均呈幂函数关系($Q_t = k \cdot t^a$, $0 < a < 1$)。磷吸附量与泥沙中活性铁铝氧化物含量呈极显著正相关。磷解吸量与泥沙中砂粒含量显著正相关,与细颗粒物(粘粒和粉粒)含量呈显著负相关。村镇沟渠泥沙磷的解吸量显著高于其他沟渠泥沙,其释放风险值得重视。本研究结果为川中丘陵区紫色土泥沙磷的释放风险评估提供了科学依据。

关键词:磷;沟渠泥沙;吸附-解吸;动力学;紫色土

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)01-0154-07

Characteristics of Phosphorus Adsorption and Desorption Kinetics of Sediments from Purple Soils

WANG Zhen-hua^{1,2,3}, ZHU Bo¹, HE Min¹, ZHOU Ming-hua^{1,3}, WANG Yan¹

(1.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.Department of Water Environment Research of Watershed, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3.Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ditch sediments were respectively collected from forest, paddy field, dry cropland and residential area in a typical agricultural catchment, where locates in hilly area of purple soil in the central Sichuan Basin. The characteristics of phosphorus(P) adsorption-desorption kinetics of the ditch sediments were studied by the batch equilibrium technique. The P was adsorbed and desorbed on the sediments at different rates. According to the rate, the reaction process of adsorbing-desorbing could be divided into three steps, namely fast, slow and dynamic equilibrium reaction. The rate of phosphorus adsorbing on the sediments in the first 0.75 h was significantly and positively correlated with the content of active iron and aluminum oxides and clay fractions. The high rate of phosphorus desorbing on the sediments could be attributed to the high content of Olsen P and sand particle-size fractions. The amounts of P adsorbed and desorbed from the sediments featured a power function with the reaction time($Q_t = k \cdot t^a$, $0 < a < 1$). The P sorption amount of the sediments was highly and positively correlated with the content of active iron and aluminum oxides. The desorption amount of the sediments was significantly and positively correlated with the content of sand particle-size fractions, but it was significantly and negatively correlated with the content of fine particle-size fractions. The P desorption amount of the sediments from the residential area was significantly higher than that of the sediments from the other fields/areas. The results of this research provide a scientific basis for the risk assessment of P release from the sediments derived from purple soils in hilly area of central Sichuan Basin.

Keywords: phosphorus; ditch sediments; adsorption-desorption; kinetics; purple soil

农业源头的垄沟、沟道、坑塘、沼泽以及村落排

水沟等形成的沟渠系统是农业面污染源与下游水体之间的重要缓冲过渡带,具有灌排和湿地的双重功效^[1]。沟渠泥沙沉积物吸附径流水体中的磷,是沟渠截留磷污染物的重要机理之一。然而沟渠的这种湿地功效并不总是吸附水体中的磷,当沟渠泥沙对磷的吸附逐渐变得饱和时,磷累积引起的释放风险就越来越

收稿日期:2010-07-08

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KSCX2-YW-N-46-11);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02)

作者简介:王振华(1980—),男,河北魏县人,博士研究生,主要从事面源污染机理与控制研究。E-mail:wzh04@163.com

大^[2]。泥沙对磷的吸附-释放过程是控制泥沙-水体界面磷迁移的主要机制^[3-4]。因此,研究沟渠泥沙磷的吸附-解吸动力学,对于控制农业非点源磷素向下游水体迁移具有重要意义。

目前,国内外已经广泛开展农业源头沟渠(河道)泥沙磷的吸附-解吸动力学研究,但研究结果不尽一致。有研究发现,泥沙(土壤)对磷的吸附动力学过程分为快、慢两个阶段,快速吸附阶段主要是泥沙(土壤)中无定形 Fe、Al 氧化物对磷的化学吸附及粘粒上盐基离子对磷的共价吸附,而慢速吸附阶段,可能由泥沙(土壤)对磷的物理化学吸附和物理吸附所引起^[5]。但也有研究认为,快速过程中主要以物理吸附为主,泥沙沉积物中细颗粒含量越高,磷吸附速率越大^[6]。我国有关沟渠泥沙对磷的吸附-解吸行为的研究主要集中在长江下游农业区^[7-9],长江上游地区研究资料较少,尤其是紫色土丘陵区侵蚀泥沙对磷吸附-解吸行为的研究鲜见报道。

本文拟在紫色土集中分布的川中丘陵区,选择不同土地利用方式产生的沟渠泥沙为试验材料,通过室内模拟试验,探讨紫色土泥沙对磷的吸附-解吸动力学特征,比较不同来源(土地利用方式)泥沙对磷的吸附-解吸动力学差异,旨在揭示泥沙磷的吸附-释放

反应机理,为紫色土丘陵区泥沙磷的释放风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省盐亭县林山乡截流村,简称截流小流域(图1),地理位置:31°16'N,105°28'E,地处嘉陵江一级支流涪江的支流——弥江和湍江的分水岭上,海拔400~600 m,面积约36 hm²。该区属中亚热带湿润季风气候,年平均气温17.3℃,多年平均降雨量826 mm^[10]。土壤为石灰性紫色土,质地为中壤,大都是砂、页、泥岩风化形成的幼年土,结构性差,有机质含量低。植被为桉木(*Alder cremastogyne*)和柏木(*Cypressus funebris*)混交林,主要农作物有水稻、玉米、小麦、甘薯和油菜等。小流域土地利用类型:旱地15.64 hm²,水田3.93 hm²,林地12.14 hm²,其他用地2.93 hm²^[11]。本研究主要依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(简称盐亭试验站)。

1.2 样品采集

选择截流小流域5条源头沟渠,即林地沟渠、水田沟渠、旱地沟渠、村镇沟渠和综合沟渠。沟渠的具体地理分布和基本特征见图1和表1。于2009年4月

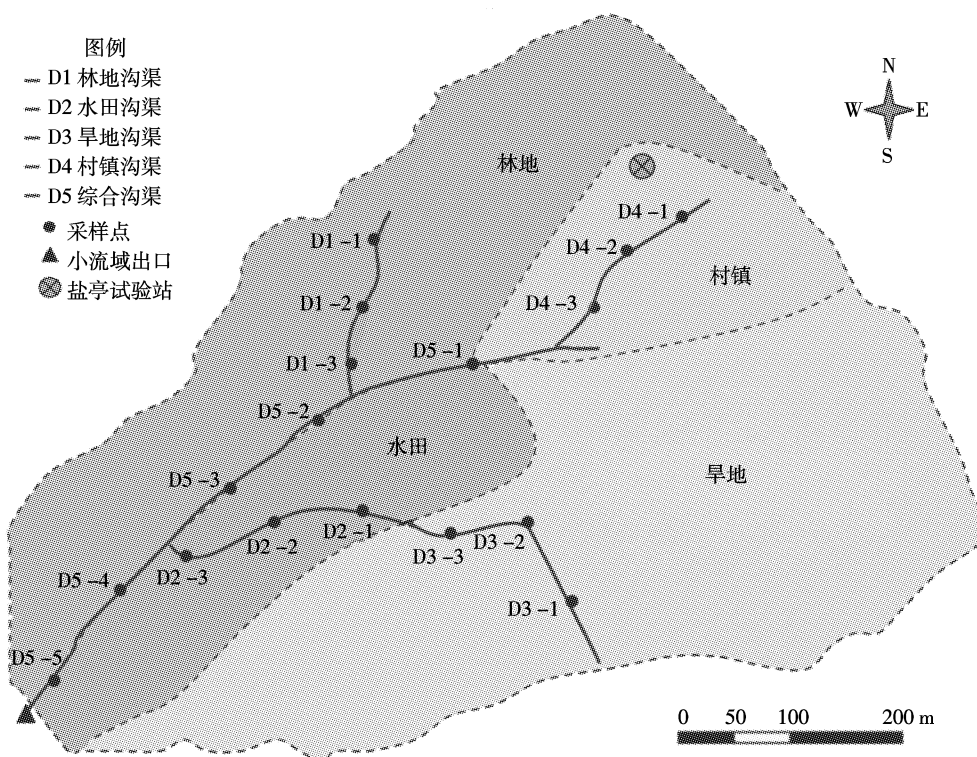


图1 沟渠和采样点分布示意图

Figure 1 Study site and sketch map of sampling location of ditch sediments

和 8 月采集各沟渠的紫色土侵蚀泥沙,分别代表不同来源(林地、水田、旱地、居民点和复合小流域)的泥沙。因此,这些沟渠泥沙分别代表林地、水田、旱地、居民点和复合小流域的泥沙沉积物(表 1)。为了保证采样点能够代表沟渠泥沙的特性,以及满足统计分析的要求,沟渠泥沙采样采用分段采集的方法:除在综合沟渠的沿程采集了 5 个样品外,其他沟渠按沟渠上部、中部和下部采集 3 个样品。每段采样时,根据随机采样原理采集,在沟渠泥沙沉积物表层(0~10 cm)采集多点混合样,以减少误差。样品带回实验室,迅速测定鲜样的有效磷(Olsen P)。然后将泥沙风干,去除杂质,研磨,过 2 mm 筛,装袋备分析用。

1.3 试验方法与测定

1.3.1 泥沙理化性质测定

用 pH 计测定泥沙 pH 值(水土比 2.5:1);根据 Stokes 定律用比重法测定颗粒组成:粘粒 ≤ 0.002 mm, 0.002 mm $<$ 粉粒 ≤ 0.05 mm, 0.05 mm $<$ 砂粒 ≤ 2 mm; 0.2 mol $\cdot$ L $^{-1}$ 草酸-草酸铵缓冲液(pH3.0~3.2)提取和测定活性铁铝氧化物;中和滴定法测 CaCO₃ 含量;重铬酸钾法测有机质含量; 0.5 mol $\cdot$ L $^{-1}$ NaHCO₃(pH 8.5)测 Olsen P;高氯酸消化法测总磷。每个理化指标测 3 次重复,具体测定方法和步骤参见《土壤农业化学分析方法》^[12],测定结果见表 2。

1.3.2 吸附动力学试验

称取过 2 mm 筛的风干沟渠泥沙 0.5 g,置于 50 mL 离心管中。然后加入 5 mg $\cdot$ L $^{-1}$ KH₂PO₄ 溶液 25 mL (0.01 mol $\cdot$ L $^{-1}$ CaCl₂, 水土比 50:1) 和 3 滴氯仿, (25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C 下,分别振荡 0.05、0.08、0.17、0.25、0.50、0.75、1、2、4、8、12、24 h,离心,过滤(0.45 μ m),采用钼锑抗比色法^[20]测定上清液中溶解性活性磷。

1.3.3 解吸动力学试验

操作过程分 3 步。①磷吸附饱和:称取过 2 mm 筛的风干沟渠泥沙 0.5 g,置于 50 mL 离心管中。然后加入 5 mg $\cdot$ L $^{-1}$ KH₂PO₄ 溶液 25 mL (0.01 mol $\cdot$ L $^{-1}$ CaCl₂, 水土比 50:1) 和 3 滴氯仿, (25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C 下,振荡 24 h,离

心,弃去上清液。②漂洗两次:磷吸附饱和后,在离心管中加入 1 mol $\cdot$ L $^{-1}$ NaCl 溶液 25 mL,手动摇散,离心,弃去上清液,相同方法再漂洗一次(目的是去除前面操作中留在离心管的残液,以免影响接下来泥沙磷的解吸过程)。③磷解吸:漂洗后,在离心管中加入 0.01 mol $\cdot$ L $^{-1}$ CaCl₂ 溶液 25 mL(水土比 50:1)和 3 滴氯仿, (25 $\pm$ 1) $^{\circ}$ C 下,分别振荡 0.05、0.10、0.25、0.50、1、2、4、8、12、24 h,离心、过滤及滤液磷浓度测定同上述吸附试验过程。

1.4 数据处理与分析

动力学试验中,泥沙对磷的吸附量和解吸量(Q_t , mg $\cdot$ kg $^{-1}$)用下式计算:

$$Q_t = \frac{\Delta C_t \cdot V}{W}$$

式中: ΔC_t 为溶液中磷初始浓度和 t 时刻滤液磷浓度之差, mg $\cdot$ L $^{-1}$; V 为溶液体积, mL; W 为泥沙质量, g。

试验数据用 Excel 2003 和 SPSS 12.0 软件进行方差分析、多重比较及相关分析。

2 结果与分析

2.1 泥沙理化性质

表 2 给出了供试沟渠泥沙基本理化性质。泥沙 pH 范围 7.3~8.2,说明泥沙为碱性;砂粒、粉粒和粘粒的含量分别为 22.4%~55.5%、27.5%~48.5%和 17.0%~29.6%;有机质含量 0.5%~4.5%;CaCO₃ 含量 45.1~113.9 g $\cdot$ kg $^{-1}$;草酸铵提取的活性铁铝氧化物含量之和为 21.1~78.2 mmol $\cdot$ kg $^{-1}$;Olsen P 和总磷含量分别为 10.0~44.9 mg $\cdot$ kg $^{-1}$ 和 427.2~717.5 mg $\cdot$ kg $^{-1}$ 。多重比较结果表明,不同沟渠的泥沙理化性质差异明显,这说明几条沟渠的泥沙来源不同。

2.2 泥沙吸附动力学特征

泥沙磷吸附量随时间的动态变化过程如图 2a。不同来源(沟渠)泥沙磷吸附动力学曲线相似,即随反应时间延长,磷吸附量增加,在 8 h 左右接近或达到了吸附平衡。吸附动力学曲线的斜率大小反映了磷吸

表 1 沟渠采样点基本特征

Table 1 Basic features of studied ditches, sampling sites and sediment sources

沟渠样点	沟渠长/m	平均宽/m	土地利用	泥沙来源
林地沟渠 D1	103	0.34	95%柏树林,5%旱坡地	林地
水田沟渠 D2	117	0.46	100%水田	水田
旱地沟渠 D3	153	0.37	98%旱坡地,2%柏树林	旱地
村镇沟渠 D4	95	0.78	90%村镇农户,10%柏树林	居民点
综合沟渠 D5	450	1.45	50%水田,20 旱坡地,10%农户,20%林地	复合小流域

表 2 沟渠泥沙理化性质

Table 2 Physiochemical properties of the ditch sediments

沟渠样点	pH	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	有机质/%	CaCO ₃ /g·kg ⁻¹	(Fe+Al)-ox*/mmol·kg ⁻¹	Olsen P/mg·kg ⁻¹	总磷/mg·kg ⁻¹
D1(n=3)	8.2a	36.0b	41.5a	22.5b	4.5a	113.9a	24.3c	10.0c	427.2c
D2(n=3)	7.2c	22.4c	48.5a	29.1a	2.5b	45.1c	78.2a	16.1c	589.3b
D3(n=3)	7.8b	38.1b	37.7b	24.2b	1.6c	81.1b	21.1c	23.3b	717.5a
D4(n=3)	7.9b	55.5a	27.5c	17.0c	0.5d	89.2b	33.9b	44.9a	486.1c
D5(n=5)	7.4b	26.5c	43.9a	29.6a	2.4b	67.7c	39.7b	30.0b	578.0b

注:*(Fe+Al)-ox 为草酸铵提取的活性(非晶形)铁铝氧化物含量之和;同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

附速率的大小。根据吸附速率的变化规律,沟渠泥沙对磷的吸附过程大体分为 3 个阶段:一是快速吸附阶段,即反应开始后的 0.75 h 内;二是慢速吸附阶段,即 0.75~8 h 之间吸附速率渐慢;三是吸附动态平衡阶段,即在 8 h 后吸附速率和吸附量都很小,接近或到达了吸附平衡,这时有的沟渠泥沙也会出现解吸现象,所以称为吸附动态平衡。

表 3 列出了不同来源泥沙在 3 个反应阶段对磷的平均吸附速率。可以看出,不同来源泥沙对磷的吸附速率差异显著,特别是在 0~0.75 h 内,水田沟渠(D2)泥沙对磷的吸附速率最快,其余依次为综合沟

表 3 泥沙对磷的平均吸附速率

Table 3 Average rate of phosphorus adsorption on the ditch sediments

沟渠样点	吸附速率/mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹		
	0~0.75 h	0.75~8 h	8~24 h
D1(n=3)	10.05d	2.02c	0.33a
D2(n=3)	21.67a	3.72a	0.28ab
D3(n=3)	17.60b	1.86c	0.33a
D4(n=3)	15.04c	2.79b	0.27b
D5(n=5)	18.67b	3.80a	0.22c

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

渠(D5)、旱地沟渠(D3)、村镇沟渠(D4)和林地沟渠(D1)。

2.3 泥沙解吸动力学特征

泥沙磷解吸量与时间的关系如图 2b。总体来看,泥沙磷的解吸量随反应时间而增加。但不同来源泥沙接近磷解吸平衡的时间差异很大,D1 和 D2 的泥沙在 8 h 时接近解吸平衡,而 D3、D4 和 D5 在 12 h 左右才开始接近平衡。

解吸动力学曲线的斜率大小反映了磷解吸速率的快慢。根据解吸动力学曲线的斜率变化特点(图 2b),将沟渠泥沙磷解吸过程划分为 3 个阶段,一是快速解吸阶段,即 0~2 h 内;二是慢速解吸阶段,即 2~8 h 或 2~12 h 内;三是解吸动态平衡阶段,即 8 h 或 12 h 以后。

表 4 给出了泥沙在不同反应阶段的平均解吸速率。总体来看,解吸速率在 3 个反应阶段差异明显,快速阶段的解吸速率分别是慢速阶段、动态平衡阶段的 10~20 倍和 60~100 倍。泥沙磷在快速阶段的解吸量占了平衡解吸量的 60%~79%。

2.4 泥沙对磷的吸附-解吸动力学拟合方程

将泥沙磷吸附量和解吸量与反应时间进行拟合,得到反应动力学拟合方程,拟合效果均达到了极显著水平(表 5)。由表 5 可知,泥沙对磷的吸附和解吸动

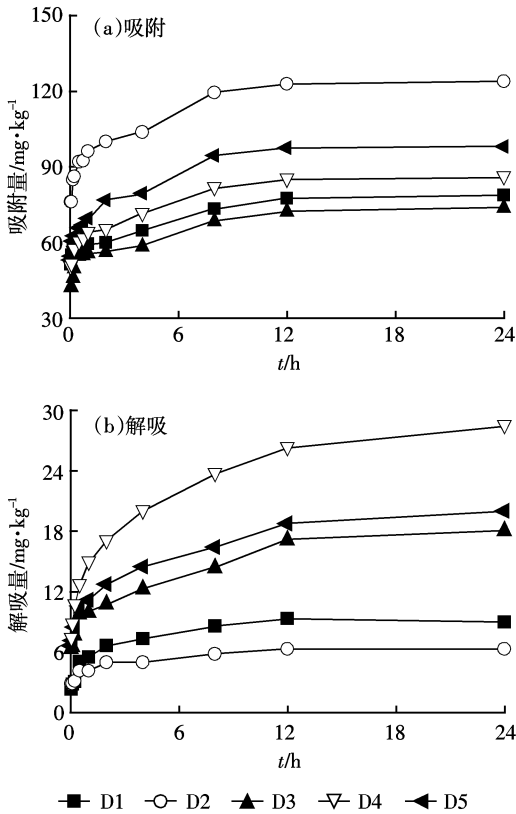


图 2 泥沙对磷的吸附、解吸动力学曲线

Figure 2 Kinetics curves of phosphorus adsorption(a) and desorption(b) on the ditch sediments

表 4 泥沙磷的平均解吸速率

Table 4 Average rate of phosphorus desorption on the ditch sediments

沟渠样点	解吸速率/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$		
	0~2 h	2~8 h	8~24 h
D1($n=3$)	3.33d	0.32c	0.03c
D2($n=3$)	2.50d	0.14d	0.03c
	<2 h	2~12 h	12~24 h
D3($n=3$)	5.43c	0.63b	0.08b
D4($n=3$)	8.50a	0.93a	0.18a
D5($n=5$)	6.38b	0.60b	0.10b

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

力学模式均为幂函数方程($Q_t=k\cdot t^a,0<a<1$)。

用表 5 所列的参数计算磷的吸附量和解吸量,计算值与实测值之间的 Pearson 相关系数分别为 $r=0.99$ ($P<0.01,n=60$)和 $r=0.98$ ($P<0.01,n=45$)。此外,将计算出的吸附量和解吸量与反应时间进行拟合,得到磷的吸附-解吸动力学拟合曲线。图 3 以水田沟渠泥沙为例(其他几条沟渠泥沙的分析结果与水田沟渠泥沙相似),给出磷的吸附-解吸动力学拟合曲线及实测曲线,可以看出拟合曲线与实测曲线基本吻合。

3 讨论

本研究中,不同来源(沟渠)泥沙理化性质差异明显,表明泥沙理化性质受周围土地利用方式影响显著。沟渠 D4 的泥沙主要来源于集镇,由于集镇不透水地面(如水泥路面等)居多,从集镇冲刷下来的物质多为石砾或砂粒,所以村镇沟渠泥沙中粘粒、粉粒和有机质含量都较低。同时,由于受居民点排放的磷浓度超高的生活、生产污水的影响,村镇沟渠泥沙吸

表 5 泥沙磷吸附、解吸动力学拟合方程

Table 5 Curve-fit equation of phosphorus adsorbing and desorbing on the ditch sediments

沟渠样点	吸附方程	R^2	解吸方程	R^2
D1($n=3$)	$Q_t=62.2t^{0.07}$	0.89**	$Q_t=5.1t^{0.24}$	0.95**
D2($n=3$)	$Q_t=96.5t^{0.08}$	0.98**	$Q_t=4.3t^{0.14}$	0.96**
D3($n=3$)	$Q_t=55.5t^{0.09}$	0.96**	$Q_t=10.3t^{0.18}$	0.98**
D4($n=3$)	$Q_t=64.5t^{0.09}$	0.97**	$Q_t=14.6t^{0.22}$	0.99**
D5($n=5$)	$Q_t=71.6t^{0.11}$	0.98**	$Q_t=11.3t^{0.19}$	0.99**

注: Q_t 为磷吸附量或解吸量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; t 为反应时间,h;** 显著水平 $P<0.01$ 。

附大量水体中溶解性磷,因此其泥沙中 Olsen P 含量较高。林地土壤受人为活动影响较少,相对风化较慢, CaCO_3 含量较高,但枯枝落叶腐烂分解后,在土壤中形成大量腐殖质,因此林地沟渠(D1)泥沙中 CaCO_3 和有机质含量都较高。水田在长期淹水和农作栽培条件下,土壤脱钙作用强烈,因此水田沟渠(D2)泥沙中 CaCO_3 含量较低。此外,有研究表明,长期淹水(还原条件)有利于活性(非晶形)铁铝氧化物存在,落干(氧化条件)则促进非晶形铁铝氧化物向结晶态转化^[13-14]。本研究中,水田沟渠(D2)常年处于淹水中,而其他沟渠处于一定的干湿交替条件下,尤其林地沟渠(D1)和旱地沟渠(D3)只在降雨径流产生时才被淹水,因此水田沟渠(D2)泥沙中活性铁铝氧化物含量最高,林地沟渠(D1)和旱地沟渠(D3)泥沙中活性铁铝氧化物含量最低。

泥沙对磷的吸附速率与泥沙理化性质密切相关。研究表明,0~0.75 h 内泥沙对磷的吸附速率与草酸铵提取的活性铁铝氧化物含量之间呈显著正相关 ($r=0.84, P<0.05$),说明在快速吸附阶段主要是无定形铁铝氧化

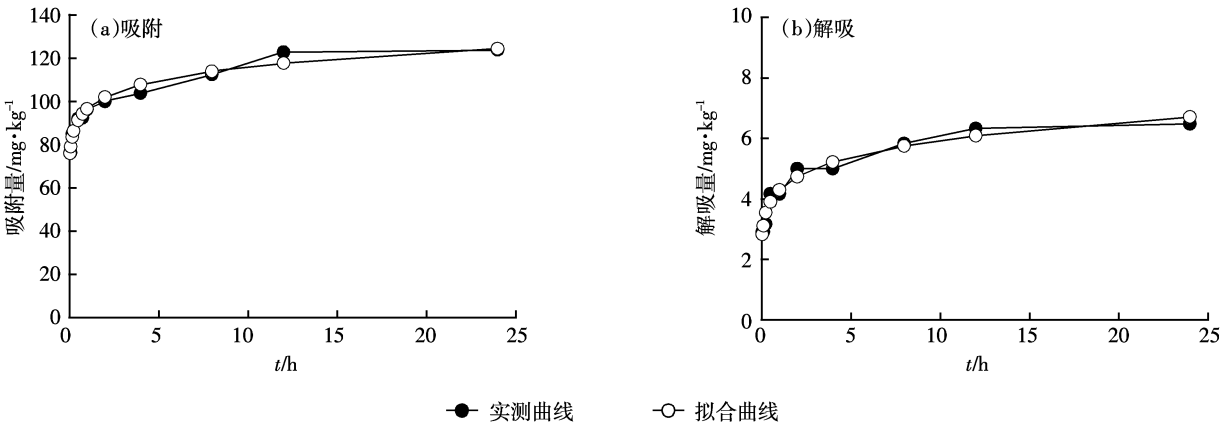


图 3 泥沙对磷的吸附、解吸动力学拟合曲线与实测曲线(以水田沟渠泥沙为例)

Figure 3 The measured and fitting kinetic curves of phosphorus adsorption(a) and desorption(b) on the ditch sediment in paddy field

物对磷的吸附,其含量越高,吸附速率就越大。此外,0~0.75 h内磷的吸附速率还与泥沙粘粒呈显著正相关($r=0.66, P<0.05$),这可能因为活性铁铝氧化物主要分布在粘粒上^[5],粘粒通过活性铁铝氧化物吸附磷。

尽管不同来源泥沙磷吸附量随时间变化规律基本一致,但达到吸附平衡时,不同来源泥沙磷吸附量差异显著,供试泥沙磷吸附量的大小顺序为D2>D5>D4>D1>D3(图2a)。这种平衡吸附量差异与泥沙理化性质有密切关系(表2),相关分析表明,磷的平衡吸附量与草酸铵提取的活性铁铝氧化物呈极显著正相关($r=0.98, P<0.01$),这说明高含量的活性铁铝氧化物是水田沟渠泥沙具有较高平衡吸附量的一个重要原因。

不同来源泥沙的磷解吸速率差异显著。其中,村镇沟渠(D4)泥沙磷的平均解吸率最高,这可能与较高的 Olsen P 水平和较高的砂粒含量有关(表2)。因为 Olsen P 代表了有效磷的数量^[6],这部分磷主要是可溶解态或易释放态磷, Olsen P 含量高时就会在短时间内大量释放出来,故解吸速率较高。另有研究报告,与粘粒相比,砂粒中的磷更易释放出来^[5],本研究发现,0~2 h内的解吸速率与泥沙砂粒含量呈显著正相关($r=0.72, P<0.05$)。可见,砂粒含量高也是磷解吸速率较高的一个重要原因。

达到解吸平衡时,不同来源泥沙的磷解吸量存在明显差异,供试泥沙磷解吸量的大小顺序为D4>D5>D3>D1>D2(图2b)。泥沙磷解吸量与泥沙中砂粒含量显著正相关($r=0.71, P<0.05$),与细颗粒物质(粘粒和粉粒)含量呈显著负相关($r=-0.66, P<0.05$),说明泥沙中细颗粒物质吸附的磷不易释放,而砂粒吸附的磷易释放。单位质量的泥沙磷解吸量越大,意味着其环境风险就越大。上述结果表明,村镇沟渠(D4)泥沙磷释放风险最大,林地沟渠(D1)和水田沟渠(D2)泥沙磷释放风险最小,综合沟渠(D5)和旱地沟渠(D3)泥沙磷释放风险介于之间。

紫色土泥沙磷的吸附量和解吸量与反应时间均呈幂函数方程($Q_t = k \cdot t^a, 0 < a < 1$),意味着磷的吸附量或解吸量会随着反应时间而呈增加趋势,同时,各拟合方程的幂(即 a)大于0而小于1,表明泥沙磷的吸附速率或解吸速率(通过方程求导)将随着反应时间而逐渐减小,这与动力学实测曲线得到的结果是一致的。此外,由于拟合曲线和实测曲线基本吻合(图3),因此,用幂函数方程($Q_t = k \cdot t^a, 0 < a < 1$)对沟渠泥沙磷吸附或解吸动力学过程进行描述和模拟是可行的。

4 结论

(1)紫色土泥沙磷的吸附和解吸过程均可分为快、慢、动态平衡3个阶段;磷吸附量和解吸量随反应时间而增加,均可用幂函数方程($Q_t = k \cdot t^a, 0 < a < 1$)进行描述。

(2)0~0.75 h内泥沙对磷的吸附速率与活性铁铝氧化物含量和粘粒含量之间呈显著正相关。不同来源(沟渠)泥沙对磷的平均吸附速率存在显著差异,特别是在0~0.75 h内,水田沟渠泥沙对磷的吸附速率最快,其余依次为综合沟渠、旱地沟渠、村镇沟渠和林地沟渠。

(3)较高的 Olsen P 水平和砂粒含量是泥沙磷解吸速率高的重要因素。不同来源(沟渠)泥沙磷的平均解吸速率差异显著,村镇沟渠泥沙磷的平均解吸率最快,其余依次为综合沟渠、旱地沟渠、林地沟渠和水田沟渠。

(4)磷吸附量与泥沙中活性铁铝氧化物含量呈极显著正相关;磷解吸量与泥沙中砂粒含量显著正相关,与细颗粒物质(粘粒和粉粒)含量呈显著负相关。不同来源(沟渠)泥沙对磷的吸附量和解吸量差异显著。村镇沟渠泥沙磷解吸量最高,其释放风险较高,值得重视。

参考文献:

- [1] Needelman B A, Kleinman P J A. Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: An overview[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62(4): 171-179.
- [2] Nguyen L, Sukias J. Phosphorus fractions and retention in drainage ditch sediments receiving surface runoff and subsurface drainage from agricultural catchments in the North Island, New Zealand[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 92: 49-69.
- [3] Sharpley A N, Krogstad T, Kleinman P J A, et al. Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source phosphorus control[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 62: 197-206.
- [4] Luo Zhuanxi, Zhu Bo, Tang Jialiang, et al. Phosphorus retention capacity of agricultural headwater ditch sediments under alkaline condition in purple soils area, China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 57-64.
- [5] 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.
- [6] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. *地理学报*, 2002, 57(4): 397-406.
LIU Min, HOU Li-jun, XU Shi-yuan, et al. Phosphate adsorption characteristics of tidal flat surface sediments and its environmental effect

- from the Yangtze estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4):397-406.
- [7] 姜翠玲, 崔广柏, 范晓秋, 等. 沟渠湿地对农业非点源污染物的净化能力研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(2):125-128.
- JIANG Cui-ling, CUI Guang-bo, FAN Xiao-qiu, et al. Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(2):125-128.
- [8] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(11):1371-1374.
- YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11):1371-1374.
- [9] 翟丽华, 刘鸿亮, 席北斗, 等. 农业源头沟渠沉积物氮磷吸附特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1359-1363.
- ZHAI Li-hua, LIU Hong-liang, XI Bei-dou, et al. Property of nitrogen and phosphate adsorption on sediments in headwater ditches[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1359-1363.
- [10] Zhu Bo, Wang Tang, Kuang Fuhong, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the Central Sichuan Basin, China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73:1419-1426.
- [11] 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.
- [12] 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 Ru-kun. Analytical method of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [13] Sah R N, Mikkelsen D S. Sorption and bioavailability of phosphorus during the drainage period of flooded-drained soils[J]. *Plant Soil*, 1986, 92:265-278.
- [14] Sah R N, Mikkelsen D S, Hafez A A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils: III. Phosphorus description and availability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53:1729-1732.
- [15] Li Mei, Hou Yanlin, Zhu Bo. Phosphorus sorption-desorption by purple soils of China in relation to their properties[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45:182-189.
- [16] Kuo S. Phosphorus. In: methods of soil analysis. 1996. In: Sparks D L (ed). Soil Science Society of America, Madison, WI 5:869.