

# 黄河口典型芦苇湿地土壤磷的吸附动力学特征

白军红, 叶晓飞, 胡星云, 王伟, 张玲

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 以黄河口不同淹水条件的芦苇湿地为研究对象(潮汐淹水湿地、淡水恢复湿地和季节性淹水湿地), 通过吸附模拟实验探讨了不同类型湿地表层土壤对磷的吸附动力学特征及其影响因素, 评估了不同淹水条件下湿地土壤对磷的吸附能力。研究表明: 具有不同水盐条件的芦苇湿地土壤对上覆水体中磷的吸附表现为淡水恢复湿地 > 潮汐淹水湿地 > 季节性淹水湿地, 淡水恢复湿地土壤对磷的吸附量最大; 三类湿地土壤对磷的吸附过程均表现为初期(0~3 h)最快、中期(3~24 h)逐渐减慢、后期(24 h以后)慢而平衡的状态, 但淡水恢复湿地土壤对磷的吸附速率最快, 季节性淹水湿地土壤对磷的吸附速率最慢且存在着时间上的延迟性; 三类湿地土壤的水盐条件和理化性质差异(如pH、盐度、土壤质地、 $Al_0$ 、 $Fe_0$ 和 $Ca_0$ )是导致三类湿地土壤对磷的吸附量和吸附速率存在差异的主要因素; Simple Elovich模型和Power Function模型更适合模拟黄河口芦苇(*Phragmites australis*)湿地土壤对磷的吸附动力学特征。在黄河口退化芦苇湿地实施淡水恢复工程, 能够在一定程度上促进湿地土壤对磷的吸附, 进而降低湿地水体发生富营养化的风险。

**关键词:** 磷; 吸附动力学; 湿地土壤; 芦苇湿地; 黄河口

磷(P)作为湿地重要的营养元素之一, 常常是导致湿地水体富营养化的限制因子<sup>[1]</sup>。作为磷素积累和转化的重要场所, 湿地土壤能够通过吸附大量富集溶解态磷, 实现对磷的有效截留作用, 从而达到净化上覆水体的目的<sup>[2]</sup>。此外, 湿地土壤对磷的解吸过程影响着磷的形态转化和植物对磷的有效吸收<sup>[3]</sup>。因此, 湿地土壤磷的吸附—解吸过程不仅对其相邻水体的富营养化状况有着直接影响, 也对于维持湿地土壤和水体之间的磷含量动态平衡及湿地系统的生产力有着重要意义。

滨海湿地作为主要湿地类型之一, 是咸淡水交汇和共同侵蚀作用而形成的复杂生态系统, 承担着物质的源、汇和转化器功能<sup>[4-5]</sup>, 对毗邻水体的水质保护发挥着重要作用。已有研究证实湿地土壤对上覆水体中磷的吸附解吸过程是控制上覆水体环境质量的主要影响因素之一, 这也成为当前湿地营养元素生物地球化学循环的热点<sup>[6-9]</sup>。黄河口湿地是中国暖温带最大的滨海河口湿地, 高强度的人类活动使得近海水体正面临富营养化威胁。淡水恢复工程的实施显著改变了黄河口湿地的水盐条件, 将会影响湿地生态系统中磷素的迁移转化过程, 进而影响毗邻水体的水质。因此, 研究不同水盐环境下滨海湿地土壤对磷的吸附过程及其影响因素对于滨海湿地水质保护具有重要意义。

目前国内外学者对磷的吸附研究主要集中在河湖沉积物对磷的吸附特征<sup>[10-12]</sup>、吸附动力学<sup>[13-17]</sup>及其影响因素<sup>[18-19]</sup>等方面, 但是关于不同水盐变化条件下滨海湿地土壤磷吸附特

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505906); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018)

作者简介: 白军红(1976-), 男, 河北无极人, 教授, 研究方向为湿地生态修复。E-mail: junhongbai@163.com

征方面的研究目前还不多见<sup>[20]</sup>。鉴于此,本研究选择黄河口不同水盐条件下的湿地土壤为研究对象,开展磷的吸附动力学模拟实验,探究不同水盐条件下滨海湿地土壤对磷的吸附特征,不仅可为黄河口湿地水质保护提供理论依据,也可为滨海湿地生态系统的保护和管理提供科学指导。

1 研究方法与数据来源

1.1 供试样品

2012年4月选择黄河口三种不同水盐条件下的湿地(潮汐淹水湿地、淡水恢复湿地和季节性淹水湿地)进行样品采集,在各湿地中选择三个样地,按照5点采样法采集0~10 cm表层土壤样品进行混合,每个样地共计采集3个混合样品。采集土壤样品装袋、带回实验室自然风干2~3周,风干土壤样品经剔除植物残体、石块后,研磨过100目筛,之后保存于自封袋中标号备用。

各类型湿地表层土壤的相关理化性质见表1<sup>[20]</sup>。其中,pH和电导率(EC)分别采用pH计和电导率仪进行测定;土壤可交换态重金属(Fe<sub>0</sub>、Al<sub>0</sub>)采用0.175 mol·L<sup>-1</sup>草酸铵(pH=3.0)溶液浸提;可交换态钙(Ca<sub>0</sub>)采用1.0 mol·L<sup>-1</sup>乙酸铵(pH=8.5)溶液浸提,然后使用ICP-AES电感耦合等离子体光谱仪进行测定<sup>[21]</sup>。

表1 黄河口不同水盐条件下湿地土壤样品的理化性质

Table 1 Selected physical and chemical properties of wetland soils with different flooding and salt conditions in the Yellow River Estuary

采样点	pH	EC /(ms·cm <sup>-1</sup> )	Clay /%	Silt /%	Sand /%	Al <sub>0</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Fe <sub>0</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	Ca <sub>0</sub> /(10 <sup>3</sup> mg·kg <sup>-1</sup> )
TW	8.78	2.89	6.60	49.53	43.87	464.08	1141.38	23.78
	±0.08	±0.48	±0.05	±2.65	±2.65	±25.40	±17.92	±2.23
FW	8.25	1.75	4.79	59.11	36.09	564.58	2294.10	18.49
	±0.09	±0.29	±1.19	±2.24	±3.43	±49.80	±46.15	±2.42
SW	8.90	0.50	1.86	32.26	65.88	498.47	1212.51	31.03
	±0.05	±0.01	±0.66	±1.73	±2.39	±21.80	±35.50	±1.49

注: TW为潮汐淹水湿地; FW为淡水恢复湿地; SW为季节性淹水湿地,下同。

1.2 吸附动力学实验

1.2.1 实验设计

称取各湿地的过100目筛的风干土壤2.0 g于50 mL的具塞离心管中,加入3.0 mg·L<sup>-1</sup>的KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>溶液30 mL,并向各离心管中滴加2滴0.1%的氯仿作为抑菌剂。在25℃±1℃下恒温振荡,转速为170 r·min<sup>-1</sup>,分别震荡1/6 h、1/2 h、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h、24 h、48 h后,在5000 r·min<sup>-1</sup>的条件下离心5 min,分离得到上清液。以上实验分别做3个平行实验,相对偏差<5%。

1.2.2 检测指标

用钼锑抗比色法对上清液中的磷酸盐溶液进行比色测定,并根据标准工作曲线求得上清液中的磷酸盐浓度<sup>[22]</sup>。

1.2.3 数据计算

根据吸附前后上清液中磷酸盐的浓度差,扣除空白,计算磷的吸附量,确定达到平

衡的时间, 结果为3次平行实验的平均值。土壤对磷吸附量的计算公式如下:

$$Q = (C_0 - C_e) \times V / W \quad (1)$$

式中:  $Q$  为吸附量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $C_0$  为初始质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $C_e$  为平衡质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $V$  为加入样品中的溶液体积 (30 mL);  $W$  为土壤干重 (g)。

应用不同的吸附动力学模型对实验数据进行拟合, 得出相应的吸附动力学方程及吸附特征。采用的动力学模型主要有: 一级动力学模型、二级动力学模型、Simple Elovich 模型、Power Function 模型和 Langmuir 模型<sup>[23]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 不同类型湿地土壤对磷的吸附动力学曲线

黄河口不同类型湿地土壤对磷的吸附动力学曲线见图1。结果显示, 黄河口三种类型湿地土壤对上覆水体中磷的吸附具有相似的吸附规律, 即在吸附作用开始初期, 土壤对磷的吸附量随时间的延长迅速增长, 但是随着吸附时间的进一步延长, 土壤对上覆水体中磷的吸附能力逐渐降低并逐渐达到土水界面之间磷含量的动态平衡状态。主要原因是土壤表面的配位体交换位点逐渐饱和。在吸附作用开始后土壤表面

配位体交换位点附近大量的无机磷酸根离子迅速进行配位交换, 实现土壤对磷的吸附, 而随着土壤表面配位体交换位点的逐渐饱和, 土壤对磷的吸附也逐渐降低。Bhatti 等<sup>[24]</sup>和赵海洋等<sup>[18]</sup>也通过实验证明土壤颗粒对磷素的吸附作用主要以配位体交换吸附为主。

由图1可见, 黄河口不同淹水条件的湿地土壤对磷的吸附量之间均存在一定差异。总体而言, 在整个吸附作用过程中, 湿地土壤对磷的吸附量表现为: 淡水恢复湿地土壤 > 潮汐淹水湿地土壤 > 季节性淹水湿地土壤, 这可能有以下几个方面的原因。一是与不同淹水条件下湿地土壤的质地有关。Mallikarjun 等<sup>[11]</sup>通过研究不同类型土壤对磷吸附特征的影响, 结果发现土壤黏粒和粉粒含量的高低是决定土壤对磷吸附能力强弱的重要指标之一。土壤黏粒和粉粒含量越高, 土壤颗粒的比表面积就越大, 对土壤磷素的吸附量也越大。杨宏伟等<sup>[25]</sup>对黄河颗粒物对磷酸盐的吸附特征研究也表明高土壤粘粒和粉粒利于磷的吸附。本研究中, 三类湿地土壤黏粒和粉粒含量高低表现为淡水恢复湿地 > 潮汐淹水湿地土壤 > 季节性淹水湿地土壤 (表1), 与三类湿地土壤对磷的吸附量差异一致。二是与土壤的 pH 值有关<sup>[20]</sup>, 相关研究表明, pH 值的升高会增加土壤表面负电荷量, 产生静电排斥作用从而降低对磷酸根的吸附量<sup>[26]</sup>。本文中三种湿地的 pH 值表现为季节性淹水湿地 > 潮汐淹水湿地 > 淡水恢复湿地, 因此季节性淹水湿地的磷吸附量最小, 淡水恢复湿地的磷吸附量最大。三是与土壤的盐度有关。盐分是影响滨海河口湿地土壤磷吸附

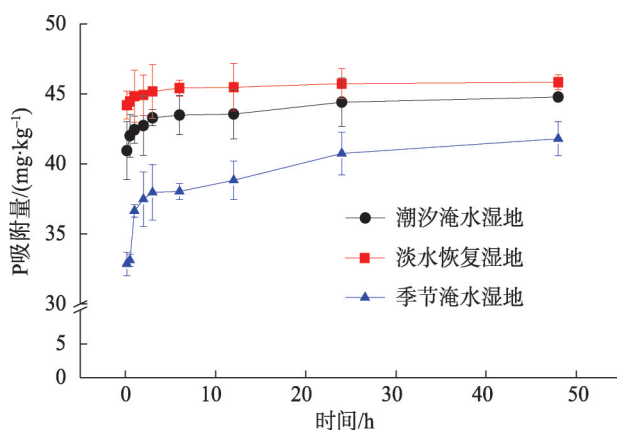


图1 不同类型湿地土壤对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的吸附动力学曲线

Fig. 1 Kinetic curves of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  adsorption on different wetland soils

行为的重要影响因素<sup>[20]</sup>。Sundareshwar 等<sup>[27]</sup>发现在不同盐分梯度下沉积物盐分含量越高越不利于其对上覆水体中磷素的吸附, 然而 Claudette 等<sup>[28]</sup>研究发现在低盐度条件下, 盐度的增加有利于磷的吸附; 但是当盐度超过某一阈值后, 盐度的增加反而会抑制磷的吸附。本研究中潮汐淹水湿地、淡水恢复湿地和季节性淹水湿地表层土壤盐分含量分别为  $1.3568\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.8282\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.2178\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 即潮汐淹水湿地土壤盐分含量 > 淡水恢复湿地 > 季节性淹水湿地, 较低的盐分促进了淡水恢复湿地土壤对磷的吸附作用, 而较高的盐分则抑制了潮汐淹水湿地土壤对磷的吸附。四是与可交换态铝、铁及钙 ( $\text{Al}_0$ ,  $\text{Fe}_0$  和  $\text{Ca}_0$ ) 的含量有关。由于土壤中可交换态  $\text{Al}_0$ 、 $\text{Fe}_0$  能与磷素通过复杂的表面络合反应而被吸附在铝硅酸盐粘土表面, 且  $\text{Al}_0$ 、 $\text{Fe}_0$  含量的增加能为磷酸盐的吸附提供更多的吸附位点<sup>[29]</sup>, 而  $\text{Ca}_0$  则与磷的固定呈负相关<sup>[30]</sup>。在本研究中, 淡水恢复湿地土壤  $\text{Al}_0$ 、 $\text{Fe}_0$  含量显著高于潮汐淹水湿地和季节性淹水湿地 (表 1), 这导致淡水恢复湿地土壤磷吸附量显著大于潮汐淹水湿地和季节性淹水湿地; 而  $\text{Ca}_0$  含量则表现为淡水恢复湿地明显低于潮汐淹水湿地和季节性淹水湿地 (表 1), 故更加有利于淡水恢复湿地土壤对磷的固定。由此可见, 不同淹水条件湿地土壤环境因素 (质地、水盐、pH 和可交换态铁、铝、钙含量) 的改变是影响土壤对磷吸附能力的主要因素, 这也表明在滨海湿地土壤进行人工淡水恢复工程能够在一定程度上增强湿地土壤对磷的吸附能力。

2.2 不同类型湿地土壤磷的吸附速率变化

表 2 显示了不同吸附时间段单位时间内土壤对磷的吸附量的大小, 即平均吸附速率。黄河口三种不同淹水条件下湿地土壤对上覆水体中磷的吸附呈现先快后慢的吸附规律。总体上, 黄河口湿地土壤对磷的吸附作用可分为快吸附、慢吸附和平衡吸附三个阶段, 其中快吸附阶段主要发生在 0~3 h 之内, 3 h 之后土壤对磷的吸附则进入慢吸附阶段, 24 h 之后土壤对磷的吸附基本达到平衡状态。这与石晓勇等<sup>[31]</sup>对黄河口磷酸盐的吸附解吸研究的结果一致, 其他相关研究也得到相似结论<sup>[10,15,32]</sup>, 只是在快吸附阶段的时长存在差异。

表 2 不同类型滨海湿地土壤在不同取样时段对磷的平均吸附速率

Table 2 The adsorption rates of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  on different coastal wetland soils in different sampling periods

取样时段/h	平均吸附速率/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )		
	TW	FW	SW
0~0.5	84.00	88.89	66.24
0.5~1	0.87	0.78	7.04
1~2	0.30	0.08	0.84
2~3	0.55	0.25	0.48
3~6	0.06	0.08	0.02
6~12	0.01	0.01	0.13
12~24	0.07	0.02	0.16
24~48	0.02	0.00	0.04

在吸附作用开始 0.5 h 内, 在三类湿地中淡水恢复湿地土壤对磷的平均吸附速率最大, 达到  $88.89\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 潮汐淹水湿地土壤对磷的平均吸附速率为  $84.00\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 而季节性淹水湿地土壤对磷的平均吸附速率为  $66.24\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。淡水恢复湿地土壤对磷的吸附作用明显强于潮汐淹水湿地土壤和季节性淹水湿地土壤对磷的吸附作用, 这主要与湿地土壤质地有关。淡水恢复湿地土壤的黏粒和粉粒含量最高, 其对磷的吸附速率最快, 相反季节性淹水湿地土壤的砂粒含量最高, 吸附力最差, 导致对磷的吸附速率最小 (表 1)。但是吸附作用开始 0.5 h 后, 淡水恢复湿地土壤和潮汐淹水湿地土壤



对磷的吸附作用差异不明显。这是由于二者在 0.5 h 之内对磷的吸附量已经达到近饱和状态（表 2），因此在 0.5 h 以后的磷吸附量较小且差异不大。而在吸附作用开始后 0.5~1.0 h 内，季节性淹水湿地土壤对磷的平均吸附速率为  $7.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，明显大于淡水恢复湿地土壤（ $0.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ）和潮汐淹水湿地土壤对磷的平均吸附速率（ $0.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ）。与淡水恢复湿地和潮汐淹水湿地相比，季节淹水湿地土壤对磷的吸附较慢。这是由于季节性淹水湿地的土壤砂粒含量较高（表 1），对磷的吸附能力也较弱，因此吸附速率也相对较慢。

2.3 不同类型湿地土壤磷吸附动力学模型模拟

运用吸附动力学模型对实验数据进行拟合是研究吸附机理的重要手段之一<sup>[17]</sup>。目前，已有大量描述溶液吸附动力学过程的模型，包括一级动力学模型、二级动力学模型、Elovich 模型、Power Function 模型、Langmuir 模型等<sup>[16,30,33]</sup>。本研究采用不同模型对实验数据进行模拟得到不同的模拟结果，具体模拟参数见表 3。由表 3 可知，Simple Elovich 模型（ $Q=a+b\times\ln t$ ）和 Power Function 模型（ $C=a\times t^b$ ）相对其他模型更适合于黄河口湿地土壤对磷的吸附动力学过程进行模拟；当上覆水体中磷素的初始浓度为  $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时，黄河口湿地土壤对磷的吸附动力学过程较为复杂。Wang 等<sup>[34]</sup>和 Fekri 等<sup>[14]</sup>对不同初始浓度和不同类型土壤磷吸附动力学研究也表明 Simple Elovich 模型是此浓度下描述吸附动力学的最佳模型。

表 3 不同类型滨海湿地土壤磷素吸附动力学模型参数

Table 3 Kinetic model parameters of phosphate adsorption on different coastal wetland soils

吸附动力学模型	参数	TW	FW	SW
一级动力学	<i>a</i>	0.2510	0.1086	0.6987
	<i>b</i>	0.0360	0.1634	0.0279
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.7365	0.8334	0.7097
二级动力学	<i>a</i>	0.2727	0.1242	0.7410
	<i>b</i>	0.0815	0.3743	0.0552
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.8266	0.9446	0.7815
Simple Elovich model	<i>a</i>	42.3183	44.7556	35.6305
	<i>b</i>	0.6369	0.3003	1.5787
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.9747	0.9799	0.9355
Power Function model	<i>a</i>	42.3112	44.7541	35.5838
	<i>b</i>	0.0148	0.0067	0.0420
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.9730	0.9790	0.9312
Langmuir model	<i>a</i>	3378.8946	8392.5474	927.0680
	<i>b</i>	77.3634	184.9350	23.7179
	<i>R</i> <sup>2</sup>	0.7129	0.6679	0.6670

注：*R*<sup>2</sup>表示拟合优度。

3 结论

（1）不同水盐条件下黄河口滨海湿地土壤环境（如 pH、盐度、土壤质地、Al<sub>0</sub>、Fe<sub>0</sub>和 Ca<sub>0</sub>）存在明显差异，导致湿地土壤对磷的吸附量表现为淡水恢复湿地 > 潮汐淹水湿地

> 季节性淹水湿地,表明淡水恢复促进了湿地土壤对磷的吸附。

(2) 尽管不同水盐条件下湿地表层土壤对磷的吸附动力学过程均呈现出3个相似的阶段,即快吸附阶段(0~3 h)、慢吸附阶段(3~24 h)和平衡吸附阶段(24~48 h),但各湿地土壤对磷的吸附量和吸附速率存在差异。淡水恢复湿地土壤对磷的吸附量最大且吸附速率最快,而季节淹水湿地土壤对磷的吸附量最小且速率最慢。因此,淡水输入将有利于湿地土壤对磷养分的截留。

(3) 当上覆水体中磷素的初始浓度为 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,黄河口湿地土壤对磷的动力学吸附曲线适合用Simple Elovich模型和Power Function模型进行描述,利用该模型可评估和预测黄河口不同水盐条件下土壤对磷的吸附状况。

(4) 总而言之,在黄河口退化湿地中实施淡水恢复工程,一定程度上能够通过改变湿地土壤的环境因素(主要是水盐条件)来促进湿地土壤对磷的吸附,增加湿地土壤对磷的截留量,从而能够降低滨海湿地水体发生富营养化的风险。

### 参考文献(References):

- [1] HOFFMANN C C, HEIBERG L, AUDET J, et al. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 75-87.
- [2] 陈安磊,王凯荣,谢小立,等.不同施肥模式下稻田土壤微生物生物量磷对土壤有机碳和磷素变化的响应.应用生态学报,2007,18(12): 2733-2738. [CHEN A L, WANG K R, XIE X L, et al. Responses of microbial P to the changes of organic C and P in paddy soil under different fertilization systems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2733-2738.]
- [3] 郑莲琴,和树庄.滇池流域不同土地利用方式土壤磷解吸研究.中国生态农业学报,2012,20(7): 855-860. [ZHENG L Q, HE S Z. Soil P desorption in different land use types in Dianchi Lake Watershed. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(7): 855-860.]
- [4] 王红丽,李艳丽,张文佳,等.湿地土壤在湿地环境功能中的角色与作用.环境科学与技术,2008,(9): 62-66. [WANG H L, LI Y L, ZHANG W Q, et al. Role of wetland soil in wetland environmental function. *Environmental Science and Technology*, 2008, (9): 62-66.]
- [5] SUN Z G, SUN W G, TONG C, et al. China's coastal wetlands: Conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. *Environment International*, 2015, 79: 25-41.
- [6] 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.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. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 303-307.]
- [7] 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.中国农学通报,2013,29(12): 115-119. [YAN H, LUO J X, LI H T, et al. Study on the potential of phosphorus adsorption and desorption in main tobacco-planted soils in Hunan province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 115-119.]
- [8] CHAKRABORTY D, NAIR V D, HARRIS W G. Compositional differences between alaquods and paleudults affecting phosphorus sorption-desorption behavior. *Soil Science*, 2012, 177(3): 188-197.
- [9] ANDRADE F V, MENDONCA E S, SILVA I R. Organic acids and diffusive flux of organic and inorganic phosphorus in sandy-loam and clayey latosols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(7): 1211-1223.
- [10] 马钦.黄河中下游沉积物中磷形态分布及其对磷的吸附特征研究.呼和浩特:内蒙古师范大学,2010. [MA Q. The researches on distributions of phosphorus forms and adsorptions characteristics of phosphorus on sediments from middle and lower reaches of the Yellow River. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2010.]
- [11] MALLIKARJUN S D, MISE D S R. A study of phosphate adsorption characteristics on different soils. *Journal of Engineering*, 2012, 2(7): 13-23.
- [12] 廖日红,牛颖,李垒,等.北运河中游沉积物对磷的吸附特性研究.环境科学与管理,2013,38(4): 57-62. [LIAO R H, NIU Y, LI L, et al. Characteristics of phosphorus sorption on sediments in middle reach of north canal river watershed.

- Environmental Science and Management, 2013, 38(4): 57-62.]
- [13] 李北罡, 马钦, 刘培怡. 黄河中下游沉积物对磷酸盐的吸附动力学研究. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1901-1905. [LI B G, MA Q, LIU P Y. Adsorption kinetics of phosphate onto sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1901-1905.]
- [14] FEKRI M, GORGIN N, SADEGH L. Phosphorus desorption kinetics in two calcareous soils amended with P fertilizer and organic matter. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(3): 721-729.
- [15] WANG X Y, ZHANG L P, ZHANG H S, et al. Kinetics of phosphorous sorption by sediment in a subtropical reservoir. Asian Journal of Chemistry, 2012, 24(1): 121-125.
- [16] 李娜, 韩立思, 吴正超, 等. 长期定位施肥对棕壤钾素吸附解吸动力学特征的影响. 中国农业科学, 2012, 45(21): 4396-4402. [LI N, HAN L S, WU Z Z, et al. Kinetics of K+Adsorption and desorption of brown soil under long-term fertilization. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(21): 4396-4402.]
- [17] 高丽, 侯金枝, 宋鹏鹏. 天鹅湖沉积物对磷的吸附动力学及等温吸附特征. 土壤, 2013, 45(1): 67-72. [GAO L, HOU J Z, SONG P P. Characteristics of adsorption kinetics and isotherms of phosphate on sediments in Swan Lake. Soils, 2013, 45(1): 67-72.]
- [18] 赵海洋, 王国平, 刘景双, 等. 三江平原湿地土壤磷的吸附与解吸研究. 生态环境, 2006, 15(5): 930-935. [ZHAO H Y, WANG G P, LIU J S, et al. Phosphorus sorption/desorption characteristics of wetland soils in Sanjiang Plain. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 930-935.]
- [19] 周驰, 李阳, 曹秀云, 等. 风干和淹水过程对巢湖流域土壤和沉积物磷吸附行为的影响. 长江流域资源与环境, 2012, 21(s2): 10-17. [ZHOU C, LI Y, CAO X Y, et al. Effect of air-drying and flooding on phosphorus sorption behavior of soils and sediments along the aquatic-terrestrial ecotone of Lake Chaohu. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(s2): 10-17.]
- [20] BAI J H, YE X F, JIA J, et al. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. Chemosphere, 2017, (188): 677-688.
- [21] NORRIS M, TITSHALL L W. The distribution of inherent phosphorus in fifteen water treatment residues from South Africa. Water Sa, 2012, 38(5): 715-720.
- [22] 鲁如坤. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000. [LU R K. Methods of Soil Agrochemical Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.]
- [23] SHIRVANI M, KHALILI B, MOHAGHEGH P, et al. Land-Use Conversion effects on phosphate sorption characteristics in soils of forest and rangeland sites from Zagros Area, Western Iran. Arid Land Research and Management, 2010, 24(3): 223-237.
- [24] BHATTI J S, COMERFORD N B, JOHNSTON C T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a spodic horizon. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(4): 1089-1095.
- [25] 杨宏伟, 郭博书, 郇朝鲁, 等. 黄河入河沙漠颗粒物对磷酸盐的吸附特征. 环境科学, 2010, 31(8): 1890-1896. [YANG H W, GUO B S, TAI C L M, et al. Phosphate adsorption characteristics on the desert particulates of inflow Yellow River. Environmental Science, 2010, 31(8): 1890-1896.]
- [26] 王光火. 红壤在不同 pH 下对磷的吸附和解吸作用. 土壤通报, 1989, (2): 70-71. [WANG G H. Phosphorus adsorption and desorption in red soil at different pH. Chinese Journal of Soil Science, 1989, (2): 70-71.]
- [27] SUNDARESHWAR P V, MORRIS J T. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient. Limnology and Oceanography, 1999, 44(7): 1693-1701.
- [28] CLAUDETTE S, PHILIPPE V C, PIERRE R. Surface complexation effects on phosphate adsorption to ferric iron oxyhydroxides along pH and salinity gradients in estuaries and coastal aquifers. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(14): 3431-3445.
- [29] WANG L, YE M, LI Q, et al. Phosphorus speciation in wetland sediments of Zhujiang (Pearl) River Estuary, China. Chinese Geographical Science, 2013, 23(5): 574-583.
- [30] WANG S R, JIN X C, ZHAO H C, et al. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 297(1-3): 154-162.

- [31] 石晓勇, 史致丽. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨. 海洋与湖沼, 1999, 30(2): 192-198. [SHI X Y, SHI Z L. Phosphate buffer mechanisms in the Yellow River Estuary. Oceanologia et limnologia sinica, 1999, 30(2): 192-198.]
- [32] ZAMPARAS M, DELIGIANNAKIS Y, ZACHARIAS I. Phosphate adsorption from natural waters and evaluation of sediment capping using modified clays. Desalination and Water Treatment, 2013, 51(13-15): 2895-2902.
- [33] SHIRVANI M, KHALILI B, MOHAGHEGH P, et al. Land-use conversion effects on phosphate sorption characteristics in soils of forest and rangeland sites from Zagros Area, western Iran. Arid Land Research and Management, 2010, 24 (3): 223-237.
- [34] WANG Y, SHEN ZY, NIU J F, et al. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(1): 92-98.

## Adsorption kinetics of phosphorus on typical wetland soils with *Phragmites australis* in the Yellow River Estuary

BAI Jun-hong, YE Xiao-fei, HU Xing-yun, WANG Wei, ZHANG Ling

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** *Phragmites australis* wetlands affected by different flooding conditions (TW: tidal flooding wetlands; FW: fresh water restoration wetland; SW: seasonal flooding wetlands) were selected in the Yellow River Estuary to analyze the adsorption kinetics characteristics and influencing factors of phosphorus on surface wetland soils. Our results suggested that the adsorption of phosphorus in the overlying water on reed wetland soils with different water and salt conditions showed an order of FW>TW>SW, which indicated that the phosphorus adsorption capacity of FW soils was the largest. The phosphorus adsorption of soils from these three types of wetlands exhibited the fastest initial stage (0-3 h), and then gradual slowing (3-24 h), after that a slow and balanced state (after 24 h). However, the FW soils had the fastest absorption rate to phosphorus, while the SW soils showed the slowest absorption rate. The difference in water and salt conditions and physicochemical properties of wetland soils (such as pH, salinity, soil texture, Al<sub>0</sub>, Fe<sub>0</sub> and Ca<sub>0</sub>) were the main factors leading to differences in phosphorus adsorption amount and rate among the three types of wetland soils. The Simple Elovich model and the Power Function model were more suitable to simulate the dynamic characteristics of phosphorus adsorption by *Phragmites australis* wetland soils in the Yellow River Estuary. The freshwater restoration project of degraded wetlands in the Yellow River Estuary can promote the adsorption of phosphorus on wetland soils to a certain extent, and thus reduce the eutrophic risk of the overlying water of coastal wetlands.

**Keywords:** phosphorus; sorption kinetics; wetland soils; *Phragmites australis*; Yellow River Estuary