



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202205138 中图分类号 X53 文献标识码 A

王若凡, 田甜, 刘骅, 等. 黄河兰州段消落带表层沉积物对磷的吸附[J]. 环境工程学报, 2023, 17(1): 343-350. [WANG Ruofan, TIAN Tian, LIU Hua, et al. Adsorption characteristics of phosphorus by surface sediments in the fluctuation zone of the Lanzhou section of the Yellow River[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(1): 343-350.]

## 黄河兰州段消落带表层沉积物对磷的吸附

王若凡<sup>✉</sup>, 田甜, 刘骅, 王煜钧, 田开栋, 杨光, 孙鹤洲

兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070

**摘要** 为探究黄河消落带表层沉积物对磷的吸附特征, 基于吸附动力学、吸附热力学及单因子实验, 现场采集黄河(兰州段)消落带表层沉积物进行实验室模拟研究。结果表明: 沉积物对磷的吸附动力学经历快速吸附、慢速吸附、吸附平衡 3 个阶段, 扰动条件下, 在 10 min 内吸附量达到最大吸附量的 85% 以上, 480 min 达到吸附平衡; 沉积物对磷的吸附符合 Langmuir 吸附等温方程, 随着温度的升高最大理论吸附量  $Q_m$  随之增加, 25 °C 时  $Q_m$  达到 119.831 mg·kg<sup>-1</sup>; 单因子实验中, 扰动频率增加对磷的吸附量具有明显的促进作用; pH 为 7~8 时沉积物吸附效果最佳, 偏酸性条件次之, 偏碱性条件下吸附效果较差; 增大上覆水 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 浓度, 吸附量增加, 吸附率整体呈下降趋势。由此可知, 黄河消落带表层沉积物对磷元素具有一定的拦截效应, 河水的扰动能够促进沉积物对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的吸附, 但是水体的 pH 值变化及高浓度陆源污染物均会削弱消落带对磷元素的吸附拦截作用。该研究结果可为黄河上游的水污染防治及消落带的生态管理提供研究依据。

**关键词** 沉积物; 环境因子; 吸附; 热力学; 动力学

河岸带是水陆交接地区, 具有带状外貌特征, 作为水陆信息、能量、物质交换的重要场所, 具有非常重要的生态功能和社会价值<sup>[1-3]</sup>。消落带属于河岸带系统, 是指江河、水库等水体季节性涨落使水-陆衔接地带的土地周期性淹没和露出的干湿交替带, 是水位变动受人为调控的特殊消落带<sup>[4-5]</sup>, 其表层沉积物具有过滤和截留污染物质的作用, 同时对生物栖息也起到了重要的作用<sup>[5-9]</sup>。

2019 年, 甘肃省印发了《甘肃省黄河流域生态保护和高质量发展规划》, 提出构建黄河流域甘肃段“一带一核三基地”的发展格局。“一带”是指黄河干流发展带, 包含甘南、临夏、兰州和白银 4 个市州, 黄河干流长度为 913 km, 占黄河全长的 16.7%。黄河兰州段不仅是黄土高原水土保持区, 也是甘肃中部沿黄河生态环境综合治理区, 以加强工业污染、农业面源污染、生活污染综合治理为重点。随着兰州市城镇化水平的不断提高, 地表水体的污染负荷日益加重。同时人造河堤建设、消落带景观改造、大规模的天然消落带自然生态空间消失, 导致天然消落带生境破碎化严重、水陆联动变差、消落带本身的生态服务功能不断降低。

目前, 消落带的研究主要集中于湖泊、水库、湿地及黄河下游等地区, 黄河上游相关研究较少。消落带对营养元素的去除主要以沉积物颗粒对氮、磷的吸附为主<sup>[10]</sup>。运用的研究方法主要包括吸附动力学<sup>[11]</sup>、吸附热力学<sup>[12-13]</sup>、释放性能<sup>[14]</sup>等。研究表明, 消落带沉积物的吸附作用除了与

收稿日期: 2022-05-25; 录用日期: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51969011); 甘肃省自然科学基金资助项目(21JR1RA242); 甘肃省高等学校创新能力提升项目(2020B-109)

第一作者: 王若凡(1983—), 女, 博士, 副教授, wangruofan@mail.lzjtu.cn; ✉通信作者

本身材质有关,还受到环境温度、水力停留时间、水力扰动、水体 pH 值等要素的影响<sup>[15-16]</sup>。因此,本研究以黄河上游(兰州段)消落带为研究对象,基于吸附动力学实验、吸附热力学实验及单因子实验,探究黄河上游(兰州段)消落带沉积物对磷元素的吸附特征,以及环境要素对沉积物吸附特性的影响,以为黄河上游的水污染治理和磷负荷调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集和制备

兰州作为黄河唯一穿流而过的省会城市,西起永靖县内的刘家峡水库,东至景泰县内的五佛寺,全长为 358 km,常年平均气温维持在 9.2 °C<sup>[17]</sup>。本研究设置了 8 个采样点(图 1),分别为西固区(西沙大桥)、安宁区和七里河区(深安大桥、银滩黄河大桥、七里河黄河大桥、小西湖黄河大桥)、城关区(兰州黄河大桥、雁滩黄河大桥、黄河大桥),采样点全长 27.7 km,各采样点位于消落带紧邻河水淹没处,离堤岸均有一定距离,附近无明显排污口,在 2021 年 6 月进行集中采样。在沉积物样品采集时,使用柱状采样器,取表层 0~10 cm 的沉积物。每个采样点采集 3 份样品,搅拌均匀,去除其中大体积杂质(如石块、植物枝干等),放入密封袋中,立即带回实验室。取一部分沉积物样品置于阴凉通风处,待自然风干后,研磨过 100 目筛,用密封袋密封储存。将另一部分沉积物样品带回实验室后,装入聚乙烯塑料瓶中,放置于 4 °C 冰箱中,用于后续沉积物指标的测定。

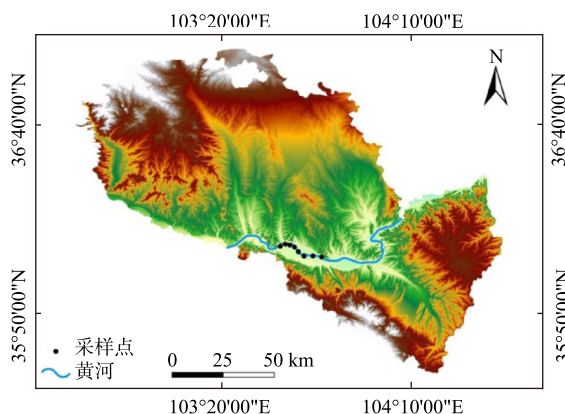


图 1 采样点分布示意图

Fig. 1 Sampling point distribution diagram

### 1.2 实验方法

静置实验。称取  $(8.000 \pm 0.050)$  g 沉积物干样于 150 mL 锥形瓶中,加入  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的磷酸二氢钾 ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 溶液 50 mL,置于  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、转速为  $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒温振荡器中静置,分别在 0.17、0.33、0.5、1.0、1.5、3、5、10、18、24 h 取出,取上清液过  $0.45 \text{ } \mu\text{m}$  滤膜,测其  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量。

吸附动力学实验。称取  $(8.000 \pm 0.050)$  g 沉积物干样于 150 mL 锥形瓶中,加入  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的磷酸二氢钾 ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 溶液 50 mL,置于  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、转速为  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒温振荡器中连续振荡,分别在 0.17、0.33、0.5、1.0、1.5、3、5、10、18、24 h 取出,取上清液过  $0.45 \text{ } \mu\text{m}$  滤膜,测其  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  含量。

吸附热力学实验。称取  $(8.000 \pm 0.050)$  g 沉积物干样于 150 mL 锥形瓶中,加入磷浓度为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液 50 mL,置于  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、转速为  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒温振荡器中振荡,取上清液过  $0.45 \text{ } \mu\text{m}$  滤膜,采用钼蓝比色法<sup>[18]</sup>测定磷含量。采用 IS-RDD3 台式恒温 ( $4 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 振荡器在  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  下使用同样的方法进行实验。

### 1.3 分析方法和数据处理

使用 pH 计调节 pH,使用紫外分光光度法 (752 型) 测定  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 。具体操作步骤见《水和废水监测分析方法 (第 4 版)》。采用准一级动力学模型 (式 (1)) 和准二级动力学模型 (式 (2)) 及 Elovich 模型对吸附动力学数据进行拟合,采用 Langmuir 等温吸附模型 (式 (3)) 和 Freundlich 等温吸附模型 (式 (4)) 对吸附热力学数据进行拟合。模型拟合、绘图使用 OriginPro8.0 软件完成,使用 SPSS 软件进行显著性分析。

$$\ln C_t = a - k_1 t \tag{1}$$

$$\ln q_t = a + k_2 \ln t \tag{2}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m \cdot K_L \cdot C_e} + \frac{1}{q_m} \tag{3}$$

$$\lg q = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_e \tag{4}$$

式中： $k_1$  为准一级速率常数； $C_t$  为  $t$  时刻吸附溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平衡质量浓度； $a$  为准一级动力学常数； $t$  为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  接触填料的时间； $q_t$  为接触时间  $t$  时的吸附量； $k_2$  为准二级速率常数； $a$  为准二级动力学常数； $t$  为  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  接触填料的时间； $q$  为沉积物对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的吸附量； $q_m$  为沉积物对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的饱和吸附量； $C_e$  为吸附平衡后滤液中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度； $K_L$  为 Langmuir 吸附特征常数； $q$  为沉积物对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的吸附量； $K_F$  为 Freundlich 亲和系数； $n$  为 Freundlich 特征常数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物颗粒对磷的吸附动力学特性

在静置和扰动 ( $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 条件下研究黄河天然消落带对磷的吸附动力学过程。由图 2 可以看出，在 2 种条件下，吸附量均呈现先快速再慢速增长的变化趋势，最后达到吸附动态平衡。这一过程包含了液膜扩散过程、颗粒内扩散过程和平衡过程。

采用准一级动力学模型、准二级动力学模型、Elovich 方程对反应动力学的数据进行拟合(表 1)。可以看出，准二级动力学模型能够更好地反映出黄河消落带沉积物的吸附过程，说明消落带沉积物对磷的吸附是非均相扩散过程和多重吸附机理的复合作用<sup>[19]</sup>，即对磷的吸附

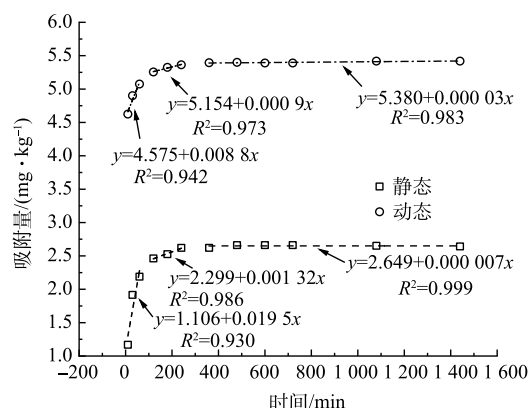


图 2 沉积物对磷的吸附动力学过程

Fig. 2 Adsorption kinetics process of phosphorus onto the sediments

表 1 吸附动力学拟合特征值

Table 1 Fitting eigenvalues of adsorption kinetics

实验条件	准一级动力学模型			准二级动力学模型			Elovich方程		
	$k_1$	$q_1$	$R^2$	$k_2$	$q_2$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
扰动	0.132	5.375	0.372	0.115	5.402	0.822	4.755	0.097	0.778
静置	0.463	2.592	0.936	0.023	2.710	0.996	0.944	0.270	0.813

包含外部扩散、液膜扩散、表面吸附及颗粒内扩散等过程。比较扰动和静置 2 种条件下沉积物颗粒的吸附反应速率常数  $k_2$  值，可以看出，静置条件下的反应速率常数  $k_2$  值平均值 ( $0.023 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$ ) 小于扰动条件下 ( $0.115 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$ )。此外，由反应数值分析结果可以看出，在扰动下，10 min 内吸附量达到最大吸附量的 85% 以上，480 min 后，达到吸附平衡，理论吸附量最大值达到  $5.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在静置条件下，60 min 吸附平衡量达到最大吸附量的 80% 以上，240 min 达到吸附平衡，吸附量最大值达到了  $2.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此，扰动不仅会加速吸附平衡，且最大平衡吸附量为静置下的 2.034 倍。可以推断，随着雨季的到来，黄河丰水期也逐渐到来，水位上涨，水力掀沙

对消落带的吸附能力具有促进作用,陆源的磷素能够更为有效地通过吸附作用被拦截在消落带表层沉积物中。

## 2.2 沉积物颗粒对磷的吸附热力学特性

本研究模拟了3种环境温度对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附作用的影响。由消落带沉积物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等温吸附实验可知,环境温度升高,沉积物的吸附量整体呈上升趋势(图3)。

用Langmuir和Freundlich方程拟合消落带沉积物颗粒对磷的等温吸附过程(表2)。可以看出2种拟合方程的拟合系数均达到显著水平。Langmuir方程是基于吸附质均匀且吸附为单分子层吸附假设,随着温度的升高,最大理论吸附量随之升高。 $K_L$ 代表吸附体系中吸附质与污染物之间的固持能力,其值越高,代表固持能力越强,解析能力越弱。 $K_L Q_m$ 的大小反映了固液体系中填料吸附溶质缓冲能力的强弱<sup>[20]</sup>,其值越大,表示缓冲能力越强,随着温度升高,沉积物颗粒对磷去除的稳定性也随之增强。由表2可知, $Q_m$ 与 $K_L$ 均随温度升高而增大。这表明随着温度的升高,消落带沉积物对磷的吸附效率呈上升趋势,吸附质与污染物之间的固持能力增强,沉积物颗粒对磷去除效应的稳定性也随之增强。在Freundlich模型的拟合结果中, $1/n$ 为0.5~1,表明研究区域消落带沉积物对磷的吸附能力较强,且随着温度的升高吸附能力也不断增强。

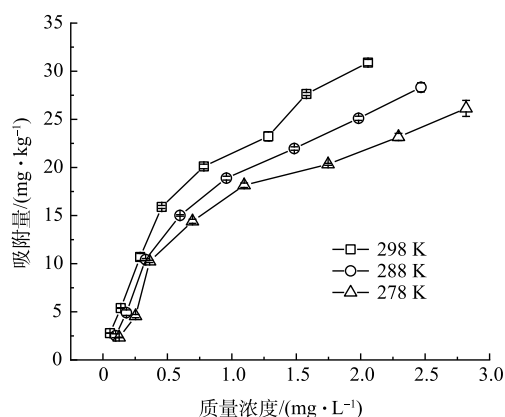


图3 沉积物对磷的吸附热力学过程

Fig. 3 Adsorption thermodynamic process of phosphorus by the sediments

表2 吸附热力学拟合特征值

Table 2 Eigenvalues of adsorption thermodynamic fitting

温度/ ℃	Langmuir方程					Freundlich方程			
	直线方程	$Q_m$	$K_L$	$R^2$	$K_L \cdot Q_m$	直线方程	$n$	$\lg K_F$	$R^2$
5	$y = 0.284x + 0.014$	71.877	0.049	0.999	3.52	$y = 0.848x + 0.779$	1.267	0.779	0.991
15	$y = 0.173x + 0.011$	92.999	0.062	0.998	5.77	$y = 0.825x + 0.762$	1.212	0.762	0.995
25	$y = 0.103x + 0.008$	119.831	0.081	0.997	9.71	$y = 0.789x + 0.758$	1.179	0.758	0.998

## 2.3 环境因子对沉积物颗粒磷吸附的作用

1) 扰动因子。研究沉积物在不同水力扰动作用下的吸附特性。从相同质量沉积物吸附过程来看(图4),随着扰动频率增加,吸附过程均由快速吸附阶段到慢速吸附阶段最终达到平衡阶段,平衡时间均为720 min。扰动频率的增加能够明显促进沉积物吸附量的提升,但对吸附平衡时间的影响不大。扰动频率与去除率呈正相关性(图5),在转速为0~150  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,沉积物对磷的去除率具有线性相关性。孙晓杰等<sup>[21]</sup>对黄河甘宁蒙表层沉积物对磷吸附中也证实了这一点,沉积物对磷的吸附随扰动频率的增加而增大。

在消落带中,吸附体系中的消落带沉积物

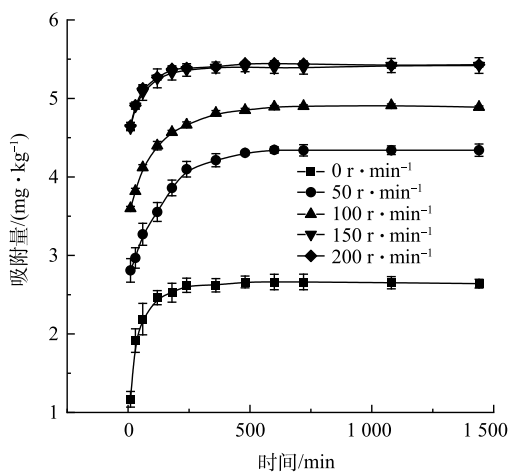


图4 扰动对沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附量的影响

Fig. 4 Effect of disturbance on the adsorption amount of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  onto the sediments

的质量不同，受水力扰动的影响也不同。随着消落带沉积物质量增加，其对磷的吸附量整体呈增长趋势。在沉积物投加量为 0~5 g 时，沉积物质量与磷的吸附量呈明显正比关系，水力扰动频率的增加对吸附量的增长具有明显的促进作用。这可能是因为扰动促进了沉积物颗粒的悬浮，水体中无机颗粒物质(铁/锰氧化物胶体和具有羟基的黏土矿物)含量增加，对磷的专属性吸附增强，细小颗粒物的聚集和凝聚作用增强，悬浮的沉积物颗粒吸附磷后发生沉降的概率增大；系统内溶解氧含量增大，沉积物中还原性物质和小分子有机物被氧化，高能吸附位点增多<sup>[22-23]</sup>。而沉积物投加质量在 5~9 g 时，去除率增速整体变缓，当投加质量达到 10 g 时，吸附量开始出现负增长。这可能是因为随着沉积物质量的增大，颗粒间聚合能力增强，单位沉积物可利用的吸附点位减少，吸附能力下降(图 6)，同时颗粒间的碰撞也增加了磷释放至上覆水的概率。

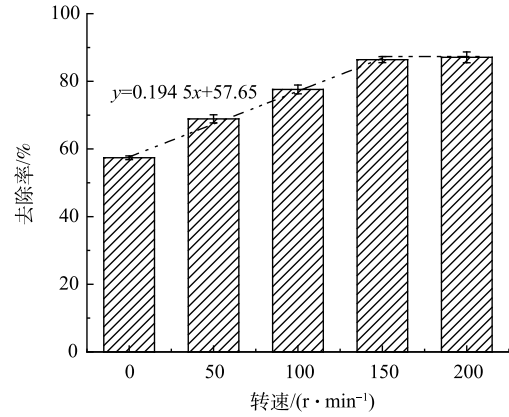


图 5 扰动对沉积物 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率的影响

Fig. 5 Effect of disturbance on the removal rate of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P by the sediments

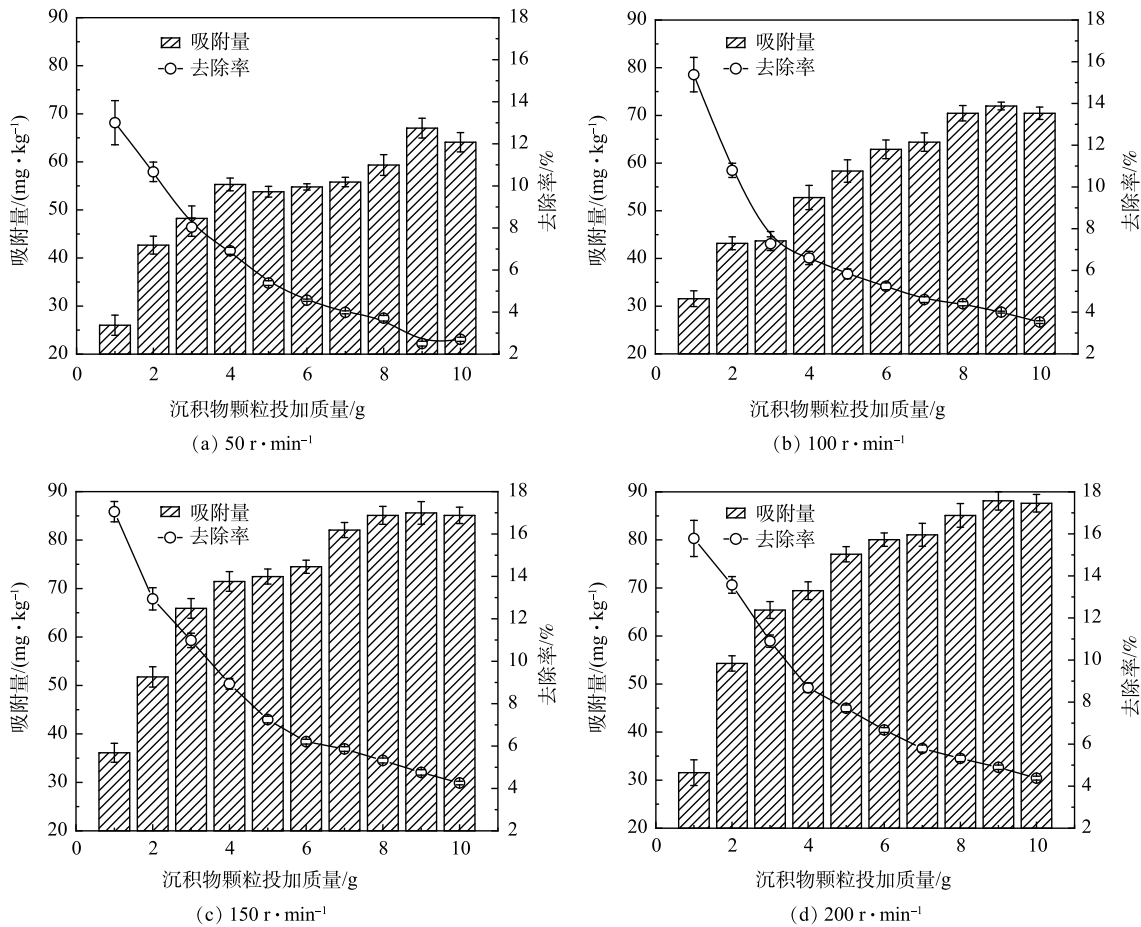


图 6 投加质量对沉积物 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率的影响

Fig. 6 Effect of dosing mass on the removal rate of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P by the sediments

同一扰动下,随着沉积物厚度的增加,去除率整体提升,但单位质量沉积物的吸附量不断减少。这表明扰动对于沉积物的吸附作用有限,主要通过掀沙的吸附作用和浅表沉积物的吸附作用达到吸附目的。

2) pH对沉积物吸附的影响。上覆水酸碱度也会影响沉积物磷吸附行为<sup>[24-25]</sup>。由图7可以看出,在不同pH条件下,吸附效果具有较为相似的特征,即沉积物在中性条件下吸附效果最好,偏酸性条件次之,偏碱性条件吸附效果最差。这主要是因为沉积物固定的磷主要是以正磷酸盐形式存在,间隙水富含 $\text{HPO}_4^{2-}$ 和 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,当 $\text{pH}<7.2$ 时, $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 含量增多,从而表现出吸附磷的能力增强。当pH增大、溶液偏碱性时,溶液中 $\text{OH}^-$ 离子会与磷酸根离子存在竞争,导致吸附量减少<sup>[26]</sup>。

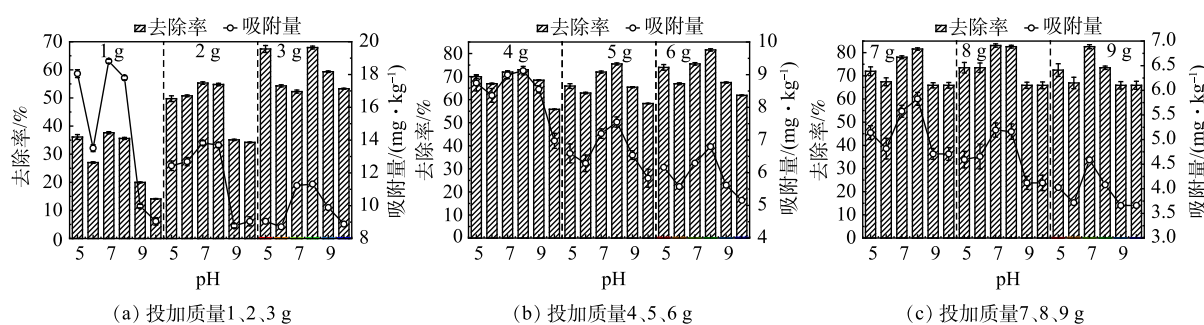


图7 pH对沉积物中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率的影响

Fig. 7 Effect of pH on the removal rate of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  by the sediments

沉积物投加量在不同pH条件下的磷吸附特征如图8所示。低投加量下(水土比较高),pH对单位质量沉积物的吸附量有较大影响,pH为7~8时沉积物吸附效果最佳。随着沉积物投加量的增加,pH对沉积物吸附的影响变小。综合分析,本研究认为,pH值在高投加量下或低水土比下,对沉积物磷吸附行为的影响不大。

3) 以不同浓度 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 作为控制上覆水中磷酸盐浓度梯度的溶质来探究上覆水浓度对沉积物吸附 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的影响。由图9可知,当质量浓度为1、3、5、7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的最大吸附量分别为5.45、16.67、27.35、38.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。线性拟合方程为 $y = 0.542x + 0.065$ , $R^2$ 为0.999,说明沉积物吸附量与磷酸盐浓度呈正相关性。

随着上覆水中磷酸盐浓度的增加,单位沉积物吸附量增加,吸附率整体呈下降趋势。这是因

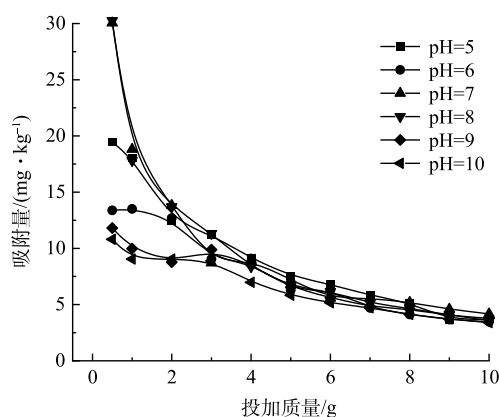


图8 不同投加质量在不同pH下的吸附量

Fig. 8 Adsorption capacity at different pH with different dosage masses of the sediments

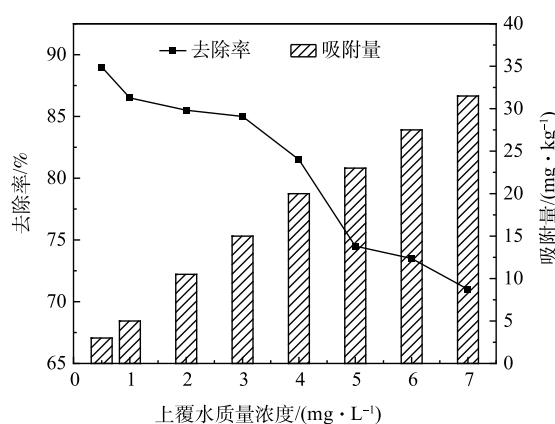


图9 上覆水质量浓度对沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率的影响

Fig. 9 Effect of overlying water mass concentration on the removal rate of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  by the sediments

为: 一方面随着磷酸盐浓度的增加, 离子之间的聚集作用增强, 单位沉积物可吸附离子量增加, 使得沉积物吸附量增加, 同时随着  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  浓度的增大,  $\text{K}^+$  浓度升高, 沉积物颗粒表面的负电荷降低, 颗粒表面的双电层被进一步压缩, 对磷的吸附能力增强<sup>[27]</sup>, 吸附量增加; 另一方面, 由于磷的整体浓度增加, 吸附后所剩下的  $\text{PO}_4^{3-}$  也增多, 沉积物对磷去除率整体呈下降趋势。

### 3 结论

1) 沉积物对磷的吸附等温曲线符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程, 计算得出的沉积物对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的吸附量随着温度的升高而升高, 25 °C 时最大吸附量  $Q_m$  可达到  $119.831 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 Freundlich 等温方程中,  $1/n$  介于 0.5~1, 表明研究区域消落带沉积物对磷的吸附能力较强, 且随着温度的升高, 吸附能力也不断增强。

2) 在单因子分析中, 吸附过程由快速吸附阶段到慢速吸附阶段, 最终达到平衡阶段, 扰动频率的增加对磷的吸附量具有明显的促进作用; 同一扰动频率下, 随着沉积物厚度(质量)的增加, 去除率整体提升, 但沉积物吸附作用有限, 单位质量沉积物的吸附量不断减少。

3) 在 pH 为中性条件下, 沉积物吸附效果最好, 偏酸性条件次之, 偏碱性条件下吸附效果较差; 上覆水污染物浓度增大, 单位沉积物吸附量增加, 吸附率整体呈下降趋势。

### 参 考 文 献

- [1] 汤家喜, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(8): 1514-1520.
- [2] STOCKAN J A, LANGAN S J, YOUNG M R. Investigating riparian margins for vegetation patterns and plant environment relationships in Northeast Scotland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41: 364-372.
- [3] 曹宏杰, 焉志远, 杨帆, 等. 河岸缓冲带对氮磷污染消减机理及其影响因素研究进展[J]. *国土与自然资源研究*, 2018, 40(3): 46-50.
- [4] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 等. 三峡库区消落带植被重建[J]. *植物学通报*, 2005, 22(5): 3-12.
- [5] 孙金伟, 许文盛. 河岸植被缓冲带生态功能及其过滤机理的研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 40-44.
- [6] 段亮, 宋永会, 张临绒, 等. 辽河保护区消落带生态恢复技术研究[J]. *环境工程技术学报*, 2014, 4(1): 8-12.
- [7] 朱蒋洁, 曾艳, 陈敬安, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. *四川环境*, 2014, 33(3): 153-161.
- [8] 许尔琪, 张红旗. 中国核心生态空间的现状、变化及其保护研究[J]. *资源学*, 2015, 37(7): 1322-1331.
- [9] CHENG J, LI Y J, BO Z, et al. Comparison of quartz sand anthracite shale and biological ceramsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2): 466-477.
- [10] 蓝巧娟. 三峡库区消落带沉积物典型重金属迁移转化机理研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2019.
- [11] 陈立鹏. 黄河内蒙古段沉积物对磷的吸附行为及微生物多样性分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2017.
- [12] 王晓丽, 郭博书. 黄河沉积物对磷酸盐吸附的固体浓度效应研究[J]. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2010, 35(1): 55-58.
- [13] 王晓丽, 潘纲, 包华影, 等. 黄河中下游沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. *环境科学*, 2008, 33(8): 2137-2142.
- [14] 王晓青, 李哲, 吕平毓, 等. 三峡库区悬移质泥沙对磷污染物的吸附解吸特性[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(1): 31-36.
- [15] 郭晨辉, 刘利军, 孙晓杰, 等. 黄河甘宁蒙段表层沉积物中磷的释放风险评估[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(4): 486-491.
- [16] 顾艳林, 宝冬润, 侯磊, 等. 洱海河口湿地沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(10): 2358-2368.
- [17] 田慧. 黄河兰州段水生生态系统多环芳烃污染特征及其生态风险[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[J]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] 封玉. 棉花秸秆生物炭的制备和改性及其对PPCPs类污染物的吸附探究[D]. 济南: 山东师范大学, 2019.
- [20] 蒋煜峰, 刘兰兰, 原陇苗, 等. 秸秆焚烧物对黄土吸附五氯酚的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1826-1836.
- [21] 孙晓杰, 舒航, 刘云江, 等. 环境因子对黄河甘宁蒙段表层沉积物中磷吸附-解吸的影响[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 51-60.
- [22] 范成新, 周易勇, 吴庆龙, 等. 湖泊沉积物界面过程与效应[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] 李红, 高增文, 秦志新, 等. 分层小水库沉积物-水界面热交换时空变化特征[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 63-69.
- [24] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 951-957.
- [25] 张斌亮, 张昱, 杨敏, 等. 长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 595-600.

- [26] 金晓丹. 水体和表层沉积物不同形态磷分布及其迁移转化[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [27] 李敏, 倪晋仁, 王光谦, 等. 环境因素对长江口水域沉积物吸附磷酸盐的影响研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(1): 19-25.

(责任编辑: 郑晓梅, 曲娜)

## Adsorption characteristics of phosphorus by surface sediments in the fluctuation zone of the Lanzhou section of the Yellow River

WANG Ruofan\*, TIAN Tian, LIU Hua, WANG Yujun, TIAN Kaidong, YANG Guang, SUN Hezhou

School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

\*Corresponding author, wangruofan@mail.lzjtu.cn

**Abstract** In order to explore the adsorption characteristics of phosphorus by surface sediments in the fluctuation zone of the Yellow River, based on adsorption kinetics, adsorption thermodynamics and single-factor experiments, the surface sediments of the Yellow River (Lanzhou section) in the fluctuation zone were collected on site for laboratory simulation study. The results showed that the adsorption kinetics of phosphorus onto the sediments contained 3 stages: rapid adsorption, slow adsorption and adsorption equilibrium, and under the disturbance conditions, the adsorption capacity could reach higher than 85% of the maximum adsorption capacity within 10 min, and arrived adsorption equilibrium in 480 min. The adsorption of phosphorus by the sediments conformed to the Langmuir adsorption isothermal equation, and the maximum theoretical adsorption capacity  $Q_m$  increased with the increase of temperature, and  $Q_m$  reached  $119.831 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . In the single-factor experiment, the increase of disturbance frequency had a significant promoting effect on the adsorption capacity of phosphorus. When the pH was 7~8, the adsorption effect of the sediments was the best, followed by acidic conditions, and the adsorption effect was poor under alkaline conditions. When the concentration of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  in the overlying water increased, the adsorption capacity increased, and the adsorption rate showed a downward trend as a whole. Thus, the surface sediments in the fluctuation zone of the Yellow River had a certain interception effect on phosphorus, and the disturbance of river water could promote the adsorption of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  by the sediments, but the pH change of water and the high concentration of land-based pollutants could weaken the adsorption and interception of phosphorus in the fluctuation zone. The results of this study can provide a research basis for the prevention and control of water pollution in the upper reaches of the Yellow River and the ecological management of the fluctuation zone.

**Keywords** sediment; environmental factors; adsorption; thermodynamics; kinetics