

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.008

水动力作用下泥沙对磷的吸附特征

吉飞^{1,2},李志伟^{1,2},赵汗青^{1,2}

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098;
2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘要: 为了研究水动力作用下泥沙对磷的吸附规律,在加长型环形水槽中进行不同流速、初始磷质量浓度及含沙量条件下泥沙对磷的吸附以及磷在水深方向的分布规律试验。结果表明,加长型环形水槽内试验段流速的垂向分布满足对数规律。溶解性活性磷酸盐质量浓度在水深方向非均匀分布,中部水深处磷质量浓度达到最大值。流速影响下的吸附规律取决于水相磷质量浓度:磷质量浓度较低时,流速越大对应的单位泥沙吸附量越小;磷质量浓度较高时,流速越大对应的吸附量就越大。泥沙质量浓度越小,初始磷质量浓度越大,单位质量泥沙对磷的吸附量越大。一阶、二阶动力学方程能够更好地表征淮河泥沙的吸附行为。伴随着泥沙沉降,水体磷质量浓度先增大、后降低,且在沉降 0.25 h 达到最大值。

关键词: 水动力作用;悬沙;磷;加长型环形水槽;水流流态;吸附-沉降试验;淮河泥沙吸附行为
中图分类号: X522;TV143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)01-0056-07

Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action

JI Fei^{1,2}, LI Zhiwei^{1,2}, ZHAO Hanqing^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the patterns of adsorption of phosphorus by sediment under different hydrodynamic actions, the adsorption of phosphorus and the vertical distribution of phosphorus were investigated through experiments in an elongated annular flume. The effects of velocity, initial phosphorus concentration, and sediment concentration were investigated. The results show that the vertical distribution of velocity in the elongated annular flume matched the logarithm law. The concentration of soluble reactive phosphate was distributed unevenly along the depth, and the maximum value appeared in the middle of the depth. The adsorption pattern of phosphorus under different velocity conditions depends on the mass concentration of soluble phosphorus. The amount of adsorption per unit mass of sediment decreased as the velocity increased when the phosphorus concentration was low, while it increased when the phosphorus concentration was high. The adsorption amount of phosphorus per unit mass of sediment increased as the sediment concentration decreased or the initial phosphorus concentration increased. The first-order and second-order dynamic equations can be used to describe the adsorption behavior of sediment in the Huaihe River. With the deposition of suspended sediment, the phosphorus concentration increased to a maximum at 0.25 h and then decreased.

Key words: hydrodynamic action; suspended sediment; phosphorus; elongated annular flume; water flow regime; ad-

收稿日期: 2016-05-14
基金项目: 国家自然科学基金(51409085, 51239003); 水利部公益性行业科研专项(201501007); 水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)开放研究基金(2015HLG01)
作者简介: 吉飞(1991—),男,江苏宝应人,硕士研究生,主要从事环境泥沙研究。E-mail: feiji@hhu.edu.cn
通信作者: 李志伟,副教授。E-mail: zwli@hhu.edu.cn

sorption-deposition experiment; adsorption behavior of sediment in Huaihe River

泥沙作为天然河流的重要组成因子,其表面的大量活性物质会通过物理、化学和生物作用^[1]等吸附水体中的污染物,影响水体水质。磷是水体富营养化的主要控制性因子^[2,4],其与泥沙颗粒表面具有很强的亲和性^[5]。进入水体中的磷大部分被泥沙颗粒吸附^[6],并随着泥沙颗粒的运动而发生迁移转化^[7]。

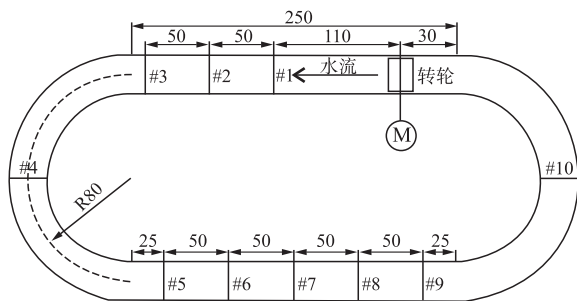
关于泥沙对磷的吸附效应,国内外已有大量研究。如 Wang 等^[8]通过研究泥沙粒径、化学成分等对磷吸附的影响,发现泥沙对磷的吸附量随着泥沙粒径的减小而增大。张斌亮等^[9]研究了长江下游湖泊表层沉积物对磷的吸附过程,认为泥沙的饱和吸附量随颗粒中有机质含量的增加而增大,与泥沙颗粒比表面积、活性铁、活性铝含量之间存在一定的正相关性。黄文典^[10]通过悬沙吸附磷试验,发现单位质量泥沙对磷的吸附量随初始磷质量浓度增大而增大,随含沙量的增大而减小。郭长城等^[11]通过研究长江泥沙,发现在强酸条件下泥沙对磷的吸附现象显著,随着 pH 增加,吸附现象逐渐减弱。王晓蓉等^[12]通过对比 10℃ 与 40℃ 条件下湖泊沉积物释放磷含量,发现温度越高时磷的释放量越大。李一平等^[13]试验模拟不同流速条件下太湖底泥的起动,发现上覆水总磷质量浓度在不同起动流速间发生较大跳跃。然而,这些研究主要通过室内静水试验,或者通过震荡、搅拌等手段研究泥沙的吸附解吸特性^[14-16],并不能有效模拟天然河流中水流形态、紊动特性以及泥沙输移等因素对磷迁移转化过程的影响^[17]。

笔者在加长型环形水槽中模拟天然河流中的水流流态,研究悬浮泥沙在动水条件下对磷的吸附特性,重点研究加长型环形水槽中的水流流态,磷质量浓度的垂向分布,以及不同流速、不同初始磷质量浓度和泥沙质量浓度条件下的悬沙吸附过程。

1 试验方案

1.1 试验水槽

在 PVC 板制成的加长型环形水槽中研究悬沙对磷的吸附作用(见图 1)。水槽周长 10 m,宽 0.3 m,深 0.43 m。水槽由直道和弯道段 2 部分构成,弯道中心线的半径为 0.8 m。距离弯道一侧 0.3 m 位置处设有直径为 0.2 m 的圆盘形转轮。转轮表面附着一定高度的断齿,并在外接电机 M 驱动下拨动上层水体,形成整个水槽范围内的水流运动。



(a) 水槽示意图(单位:cm)



(b) 转轮结构

图 1 加长型环形水槽及转轮结构

Fig. 1 Schematic diagram of elongated annular flume and plexiglas gear

试验过程中,恒定水槽中水深 $H = 20$ cm。为分析流场空间分布,沿水槽轴线方向布置 10 个测量断面(#1—#10),利用声学多普勒流速仪(ADV)及旋桨流速仪测量各断面的流速分布。结果表明,#8 断面的流速沿水深满足对数分布规律,且能够较好地表征不同电机转速条件下对应水槽 10 个断面的平均流速分布。通过测量#8 断面 0.6H 处水体磷酸盐质量浓度的变化,反映水槽系统中泥沙吸附磷的整体趋势。各试验工况下水平流速 v 沿水深 h 的分布如图 2 所示(其中 U 为断面平均流速)。

1.2 试验方法

本文研究不同磷污染物质量浓度 c_0 、悬沙质量浓度 S_0 以及水平流速 U 条件下悬沙对磷的吸附作用规律。试验开始之前,缓慢调整并稳定电机转速使水槽内水流达到设计流速,然后加入一定量的试验泥沙。水沙作用稳定后,沿水槽轴线方向均匀加入设定质量浓度的磷酸二氢钾(KH_2PO_4)溶液,并开始试验。试验过程中,在#8 断面中轴线水深 $h = 12$ cm 的位置处进行取样,取样时间 $t = 10$ min、20 min、30 min、45 min、1 h、

1.5 h、2 h、3 h、⋯、13 h、22 h、23 h、24 h。每次取 3 个平行样品(各 5 mL),并取均值代表对应时刻的磷质量浓度。取样结束后,立即采用 0.45 μm 的微孔滤膜真空抽滤以进行水沙分离,避免样品中泥沙对磷的进一步吸附,并采用紫外-可见分光光度计测量水体活性溶解态磷质量浓度。为进一步分析磷的空间分布状况,在试验开始 5 h 后测量#8 断面水深 $h=5$ cm、8 cm、12 cm、14 cm、18 cm 处水体磷质量浓度的变化。试验结束后,关闭电机,并测量#8 断面水深 $h=12$ cm 位置处在 15 min、30 min、45 min、1 h、1.5 h、2 h 的水体磷质量浓度以探讨泥沙沉降对磷的影响。整个过程中水槽系统内不存在磷的流入或流出,每一时刻取样 15 mL,共取样 300 mL,水槽总水量 600 L,取样量仅占总水量的 0.05%,故取样对试验结果的影响可以忽略。根据磷的质量守恒,可以通过水体磷质量浓度的变化间接反映泥沙对磷的吸附量^[18]。设计磷初始质量浓度 $c_0=0.5$ mg/L、1 mg/L、2 mg/L、3 mg/L、5 mg/L,含沙量(悬沙质量浓度) $S_0=0.5$ g/L、1 g/L、1.5 g/L、2 g/L,试验过程中控制水温为 (21 ± 2) °C,pH 为 6.5~7。

2 结果分析

2.1 直道段流速分布

图 3 给出了 $U=51.5$ cm/s 时水槽直道段不同断面中心线流速沿水深方向的变化特征。受到水槽边壁阻力以及弯道水流作用的影响,#6—#7 断面在距床面 2 cm 处流速有一个极大值,其他水深处流速沿水深可以较好地吻合对数分布公式。直道段中部断面#6—#8 流速垂线分布规律近似,说明直道段流速分布变化不大,可较好地模拟天然条件下河道中的水流状态。

2.2 磷质量浓度的垂向变化规律

试验水槽内流场分布不均匀,且悬沙质量浓度沿水深分布不均匀,流速及泥沙的不均匀分布会对磷的空间分布造成一定的影响。笔者测量吸附平衡状态下#8 断面不同水深处磷质量浓度以及悬沙质量浓度,分析磷在水深方向的分布规律。由图 4(a)可见,磷的垂向分布存在一定的不均匀性,但相对变化量并不十分显著(<0.01 mg/L)。可见,水槽系统内的水体运动对于

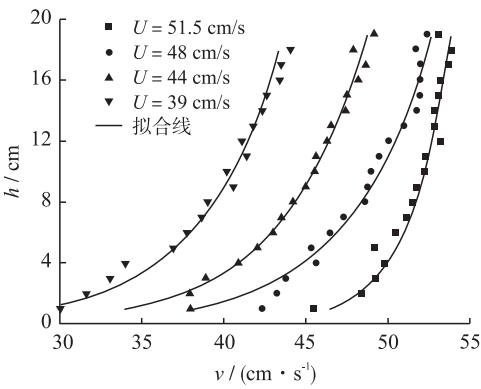


图 2 #8 断面中轴线位置流速垂向分布特征
Fig. 2 Vertical distribution of flow velocity along centerline at cross-section #8

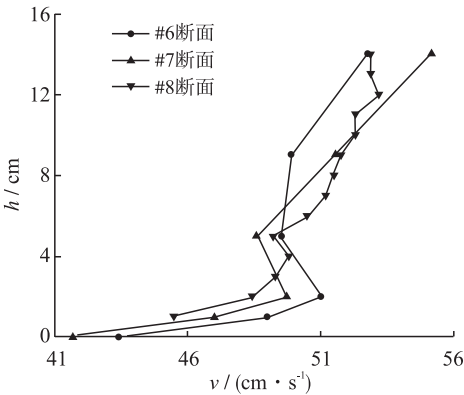


图 3 $U=51.5$ cm/s 时不同断面中心线上流速沿水深分布
Fig. 3 Distribution of flow velocity along depth at centerlines of different cross-sections ($U=51.5$ cm/s)

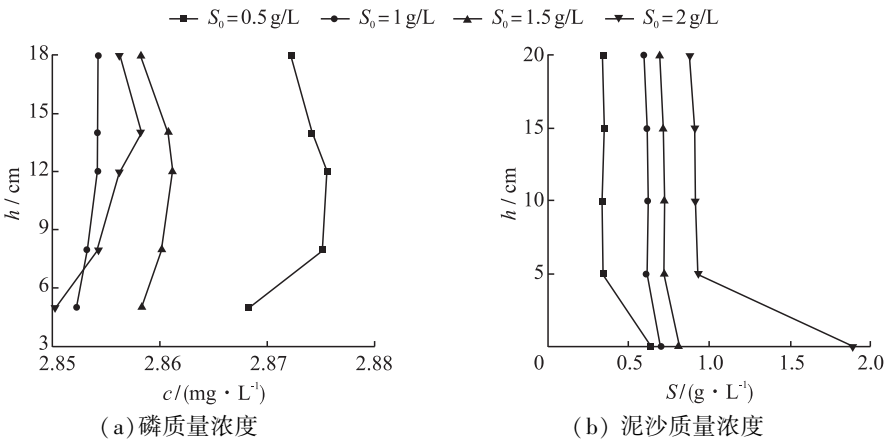


图 4 $U=39$ cm/s、 $c_0=3$ mg/L 时不同含沙量条件下#8 断面水体磷质量浓度 c 和泥沙质量浓度 S 垂向分布
Fig. 4 Vertical distribution of phosphorus and sediment concentrations under different conditions at cross-section #8 ($U=39$ cm/s and $c_0=3$ mg/L)

促进磷酸盐的垂向均匀分布具有一定影响。进一步分析可知,水体磷质量浓度的最大值出现在中部水深处,且最大值出现的位置会随着泥沙质量浓度的增大而向水面方向发生移动。图4(b)给出泥沙质量浓度沿水深的分布情况,在环形水槽直道段:上部水体混掺均匀,表现为水面部分泥沙质量浓度略小于水体中部泥沙质量浓度;下部水体泥沙质量浓度沿水深呈增大趋势显著,在水槽底部达到最大值。

分析认为,水流通过影响泥沙与磷之间的相互作用可能是造成磷质量浓度不均匀分布的重要原因。水流紊动强度以及泥沙浓度沿水深方向变化显著:水槽底部水体含沙量高,水流紊动强度大(见图5,其中 n 为断面测点与水槽内侧距离),泥沙对磷的吸附量大,导致水体磷质量浓度降低;上部水体含沙量相对较小,水流通过泥沙环境效应对磷质量浓度的影响并不显著^[18],但上部水体流速大,导致泥沙对磷的吸附量增大,水体磷质量浓度降低。最终上部水体和下部水体吸附量较大,水体磷质量浓度低,而中部水体磷质量浓度表现为较大值。由于悬沙的存在对于水流紊动具有一定的抑制作用^[19],随着悬沙质量浓度的增大,水流紊动强度减弱,水槽底部高浓度泥沙层的厚度也逐渐增加,是造成最大磷质量浓度所处位置发生相对上移的主要原因。

2.3 动力学吸附过程分析及拟合

泥沙对磷的动力学吸附过程可分为以下3个阶段:0~1 h 的快速吸附阶段,此时泥沙的吸附效率较高,可以达到平衡吸附量的80%左右;1 h 之后至泥沙达到吸附平衡之前的过程为缓慢吸附阶段,该过程持续3~4 h,其对应的磷吸附量约为20%;之后是吸附平衡阶段,其对应的单位泥沙磷吸附量不随时间增加,仅在某一均值附近小范围波动。

试验过程中,研究平衡状态时采用单位质量泥沙对磷的吸附量 N_e 来分析泥沙的吸附规律。取沉降6 h 后不同时刻泥沙磷质量浓度的均值为对应条件下的 N_e 值^[20]。由表1可知,液相磷质量浓度较低时($c \leq 1 \text{ mg/L}$),流速越大 N_e 越小;液相磷质量浓度较高时,流速越大 N_e 越大。分析认为,流速越大,水沙界面边界层厚度越小,导致水沙界面产生较大的浓度梯度,泥沙对磷的吸附能力增强。当磷质量浓度较低时,由于水沙界面浓度梯度较小,流速对吸附速率的影响较小,泥沙对磷的吸附能力减弱。

对比表1不同工况 N_e 值的大小,可以发现泥沙质量浓度和初始磷质量浓度对吸附的影响。初始磷质量浓度同为3 mg/L,泥沙质量浓度分别为1 g/L、1.5 g/L、2 g/L 时,在水流流速相同的情况下, N_e 随着泥沙质量浓度的增大而减小。虽然泥沙质量浓度增大会提供更多的有效吸附位,但是由于泥沙之间存在竞争吸附,导致 N_e 反而减小。泥沙质量浓度同为1 g/L,初始磷质量浓度分别为0.5 mg/L、1 mg/L、3 mg/L 时,在水流流速相同的情况下, N_e 随着初始磷质量浓度的增大而增大^[21]。

图6为不同流速条件下,各个方程对动力学吸附过程的拟合结果($c_0 = 3 \text{ mg/L}$, $S_0 = 1 \text{ g/L}$,其中 n_i 为 t 时刻单位泥沙对磷的吸附量)。由图6可知,抛物线方程拟合效果最差,无法准确描述磷吸附量的变化情况,拟合相关系数 R^2 平均值约为0.86(0.8302~0.9058)。抛物线方程低估了快吸附阶段的吸附量,但高估了平衡阶段的吸附量。Elovich 方程能较好地估计平衡阶段吸附量,但对快吸附阶段吸附量略有高估,且低估了缓慢吸附阶段的吸附量,拟合相关系数 R^2 平均值约为0.96(0.9605~0.9653)。一阶动力学方程以及二阶

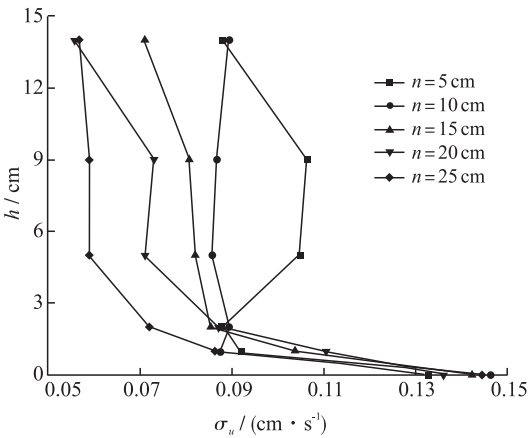


图5 $U=39 \text{ cm/s}$ 时#8 断面不同位置水流紊动强度 σ_u 垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of turbulence intensity σ_u at different measuring points at cross-section #8 ($U=39 \text{ cm/s}$)

表1 不同条件下的 N_e 值

Table 1 N_e values under different conditions			mg/g
工 况	N_e		
	$U=51.5\text{ cm/s}$	$U=48\text{ cm/s}$	$U=44\text{ cm/s}$
$c_0=0.5\text{ mg/L}, S=1\text{ g/L}$	0.061 4	0.062 0	0.066 2
$c_0=1\text{ mg/L}, S=1\text{ g/L}$	0.069 7	0.078 7	0.081 7
$c_0=3\text{ mg/L}, S=1\text{ g/L}$	0.112 0	0.102 4	0.088 5
$c_0=3\text{ mg/L}, S=1.5\text{ g/L}$	0.090 7	0.078 3	0.065 0
$c_0=3\text{ mg/L}, S=2\text{ g/L}$	0.070 2	0.062 9	0.054 0
$c_0=5\text{ mg/L}, S=1\text{ g/L}$	0.127 0	0.110 1	0.105 2

动力学方程均能较好地表现达到吸附平衡状态之前单位泥沙对污染物吸附量随时间的变化关系^[22],拟合相关系数多数大于 0.97(见表 2)。结合图 6 和表 2 可以发现,一阶、二阶动力学方程能够更好地表征淮河泥沙吸附行为。

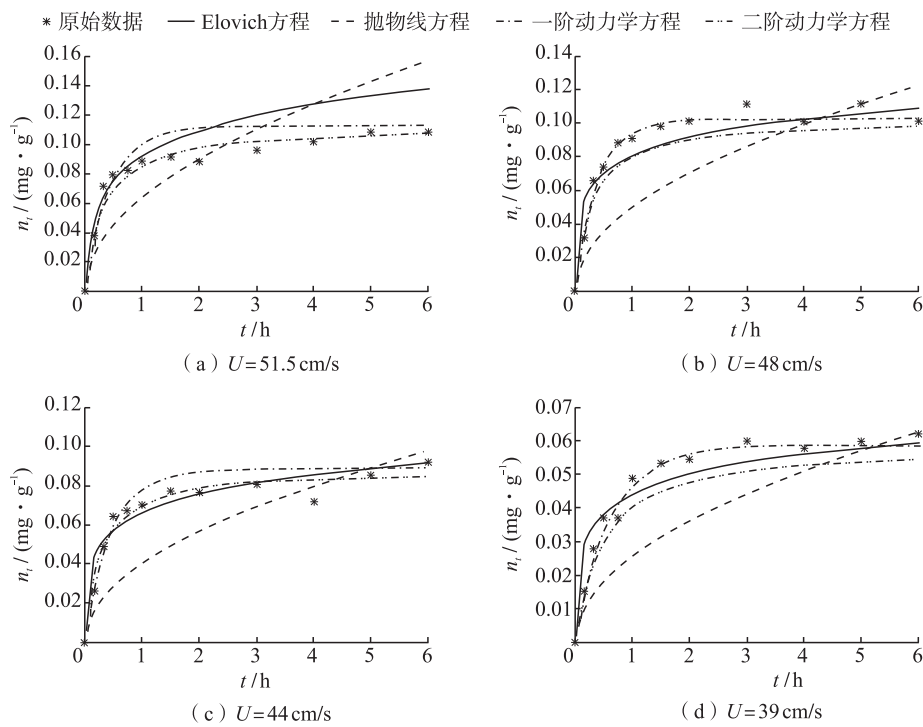


图 6 不同流速对应动态吸附过程拟合结果对比

Fig. 6 Comparison of fitted results of different dynamic sorption equations under different velocity conditions

表 2 悬沙对磷吸附过程拟合参数对比									
Table 2 Comparison of fitted parameters of different equations describing processes of adsorption of phosphorus by sediment									
U/(cm·s ⁻¹)	Elovich 方程			抛物线方程		一阶动力学方程		二阶动力学方程	
	a	b	R ²	R ₂	R ²	K ₁	R ²	K ₂	R ²
51.5	0.9	39	0.965 3	0.064 0	0.852 8	2.3	0.970 4	30	0.983 5
48	2.2	55	0.960 5	0.050 0	0.830 2	2.6	0.991 1	36	0.987 8
44	2.6	58	0.962 9	0.040 0	0.848 4	2.2	0.976 7	43	0.981 2
39	1.5	117	0.963 2	0.025 6	0.905 8	1.6	0.896 1	51	0.991 0

注:a、b、R₂、K₁、K₂为方程拟合参数。

2.4 悬沙沉降对吸附的影响

吸附试验结束后,关闭电机,水流逐渐停止运动,悬沙颗粒开始缓慢沉降。本文研究泥沙沉降对应水体磷质量浓度的变化。由图 7 可知(横坐标时间 t 从关闭电机开始计时),伴随泥沙沉降,水体磷质量浓度 c 与水体相对平衡时的磷质量浓度 c_{eq} 的差值先增加、后降低,且在沉降 0.75~1 h 左右水体磷质量浓度降低至悬沙沉降前水体磷质量浓度范围,意味着悬沙沉降过程对应发生泥沙颗粒向水体释放磷以及对磷的“二次吸附”2 个阶段作用,并最终造成水体磷质量浓度显著降低。其中,悬沙解吸磷的过程持续约 0.25 h。

图 7(a)为相同泥沙、液相磷质量浓度在不同流速试验条件下,关闭电机后水体磷酸盐质量浓度的变化过程。试验结果表明,当环境因子保持不变时,不同原始流速条件对应泥沙沉降过程造成水体磷质量浓度的变化规律基本一致,说明沉降试验具有一定的可重复性。图 7(b)进一步分析不同悬沙质量浓度对“泥沙沉降-水体磷质量浓度变化”过程的影响,结果表明含沙量越大对应泥沙解吸以及“二次吸附”作用也相对越强,说明不同含沙量水体在泥沙沉降过程中表现出不同程度的液相磷质量浓度变化,且变化的剧烈程度随含沙量的增大而增大。

根据悬沙吸附的试验结论,试验对应条件下单位泥沙的平衡吸附量随流速减小而降低。关闭电机后水流流速逐渐减弱,泥沙发生解吸作用,水体磷质量浓度增加。笔者认为,泥沙对磷的“二次吸附”可能是由于沉降过程发生颗粒之间的絮凝作用。流速降低导致悬沙颗粒大范围沉降,而且泥沙颗粒粒径较小($d_{10}=3.3\text{ }\mu\text{m}$, $d_{50}=22.72\text{ }\mu\text{m}$),在沉降过程中颗粒之间接触、碰撞并发生絮凝作用,形成松散的结构,构成更多的吸附位置^[23],泥沙对磷吸附能力显著增强,显示出沉降0.25 h之后水体磷质量浓度降低。

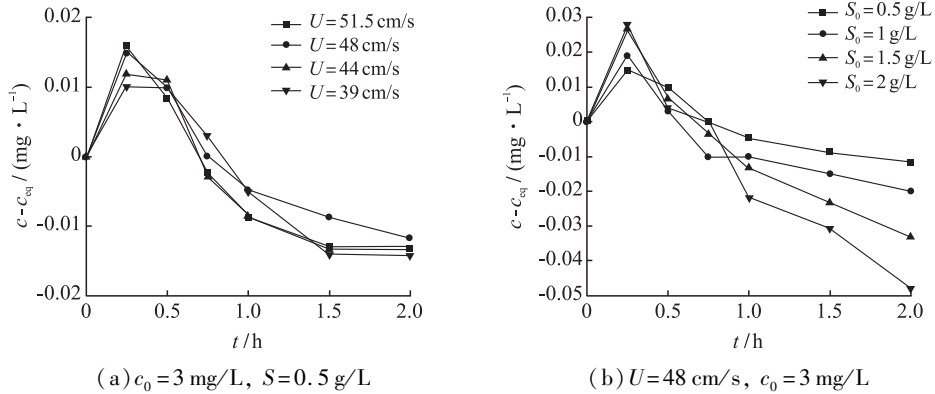


图7 关闭电机后泥沙沉降导致水体磷质量浓度的变化

Fig. 7 Change of phosphorus mass concentration caused by deposition of sediment after motor was turned off

3 结 论

- a. 水体磷质量浓度沿水深方向分布不均匀,但相对变化量较小。磷质量浓度在水深中部达到最大值,且对应位置随着含沙量的增大而存在向水面移动的趋势。
- b. 液相磷质量浓度较低时,水槽中水流流速越大对应的磷吸附量越小;液相磷质量浓度较高时,水槽中水流流速越大对应的磷吸附量越大。泥沙质量浓度越小,初始磷质量浓度越大,单位质量泥沙对磷的吸附量越大。一阶、二阶动力学方程能够更好地表征淮河泥沙的吸附行为。
- c. 伴随泥沙沉降,泥沙对液相磷作用经历了悬沙解吸磷以及絮凝作用对磷的“二次吸附”2个阶段,对应磷质量浓度先增大、后降低,且在沉降0.25 h时水体磷质量浓度达到最大值。
- d. 受试验条件以及观测手段限制,未能进一步探讨磷在水槽弯道的空间分布以及弯道对泥沙迁移转化磷的影响,对泥沙沉降过程的研究也仅仅提出初步的探索性结论。未来的研究应当围绕上述方面展开,并进行深入的分析与讨论。

参考文献:

[1] 孙东坡,李彬,童彤,等. 河流泥沙的环境效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6):51-55. (SUN Dongpo, LI Bin, TONG Tong, et al. Analysis on environmental effect of river sediment[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6):51-55. (in Chinese))

[2] 钟成华. 三峡库区水体富营养化研究[D]. 成都:四川大学, 2004.

[3] LUND J W G. Phosphorus and the eutrophication problem[J]. Nature, 1974, 249:797.

[4] LEE G F. Role of phosphorus in eutrophication and diffuse source control[J]. Water Research, 1973, 7(1/2):111-128.

[5] APPAN A, WANG Hong. Sorption isotherms and kinetics of sediment phosphorus in a tropical reservoir [J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 26(11): 993-998.

[6] WITHERS P J A, JARVIE H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: areview[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1/2/3):379-395.

[7] 单保庆,尹澄清,于静,等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1):7-12. (SHAN Baoqing, YIN Chengqing, YU Jing, et al. Study on phosphorus transport in the surface layer of soil with rainfall simulation method[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(1):7-12. (in Chinese))

[8] WANG Shengrui, JIN Xiangcan, BU Qingyun, et al. Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 128(2/3):95-105.

- [9] 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. (ZHANG Binliang, ZHANG Yu, YANG Min, et al. Characteristics of phosphorus sorption on surface sediments in three shallow lakes in the Yangtze River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(4): 595-600. (in Chinese))
- [10] 黄文典. 河流悬移质对污染物吸附及生物降解影响实验研究[D]. 成都:四川大学, 2005.
- [11] 郭长城,王国祥,喻国华. 天然泥沙对富营养化水体中磷的吸附特性研究[J]. 中国给水排水,2006, 22(9): 10-13. (GUO Changcheng, WANG Guoxiang, YU Guohua. Study on adsorption of phosphorus in eutrophied water body by natural sediment[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(9): 10-13. (in Chinese))
- [12] 王晓蓉,华兆哲,徐菱,等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学,1996, 15(1): 15-19. (WANG Xiaorong, HUA Zhaozhe, XU Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. Environmental Chemistry, 1996, 15(1): 15-19. (in Chinese))
- [13] 李一平,逢勇,陈克森,等. 水动力作用下太湖底泥起动用规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(6):770-774. (LI Yiping, PANG Yong, CHEN Kesen, et al. study on the starting principles of sediment by water force in Taihulake[J]. Advances in Water Science,2004, 15(6):770-774. (in Chinese))
- [14] LEOTE C, EPPING E, CAPPELLEN P V. phosphate sorption from seawater solutions: particle concentration effect[J]. Marine Chemistry, 2013, 148(2):52-62.
- [15] PANT H K, REDDY K R. Potential internal loading of phosphorus in a wetland constructed in agricultural land[J]. Water Research, 2003, 37(5):965-972.
- [16] WHITE J S, BAYLEY S E, CURTIS P J. Sediment storage of phosphorus in a northern prairie wetland receiving municipal and agro-industrial wastewater[J]. Ecological Engineering, 1999, 14(1/2):127-138.
- [17] 唐洪武,袁赛瑜,肖洋. 河流泥沙运动对污染物迁移转化效应研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(1):139-147. (TANG Hongwu, YUAN Saiyu, XIAO Yang. Effects of flow and sediment on the transport and transformation of pollutants in rivers: a review[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1):139-147. (in Chinese))
- [18] 徐华,夏云峰,陈中,等. 崩破波作用下粉沙悬浮运动特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 2012(5):58-64. (XU Hua, XIA Yunfeng, CHEN Zhong, et al. Experimental study of silt suspension movement under spilling waves[J]. Journal of Sediment Research, 2012(5):58-64. (in Chinese))
- [19] 王道增,周旭,朱红伟,等. 再悬浮底泥污染物在水体中的分层释放特征[J]. 水动力学研究与进展,2014, 29(5): 592-598. (WANG Daozeng, ZHOU Xu, ZHU Hongwei, et al. Stratified release characteristics of sediments contaminants during re-suspension in water column[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(5): 592-598. (in Chinese))
- [20] 周家俞,刘亚辉,吴门伍,等. 泥沙粒径与水流紊动关系试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(5):679-684. (ZHOU Jiayu, LIU Yahui, WU Menwu, et al. Experimental study of the relationship of turbulence intensity and sediment particles size[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(5):679-684. (in Chinese))
- [21] 肖洋,余维维,成浩科,等. 淮河中游泥沙对磷吸附/解吸规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4):307-312. (XIAO Yang, YU Weiwei, CHENG Haoke, et al. Phosphorusadsorption and desorption behavior of sediment in midstream of HuaiheRiver[J]. Journal of HohaiUniversity(Natural Sciences), 2015, 43(4):307-312. (in Chinese))
- [22] 赵汗青,唐洪武,李志伟,等. 河湖泥沙对磷迁移转化的作用研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4):643-649. (ZHAO Hanqing, TANG Hongwu, LI Zhiwei, et al. Review of effects of flow and sediment on the transport and transformation of phosphorus in rivers and lakes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(4):643-649. (in Chinese))
- [23] LI Tao, WANG Dongsheng, ZHANG Bin, et al. Characterization of the phosphate adsorption and morphology of sediment particles under simulative disturbing conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3):1624-1630.