

泥沙沉降对水库中磷的空间分布影响

杨通¹, 孙志林¹, 孙立霞², 李宗宇¹, 祝丽丽²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江杭州 310058)

摘要: 磷是水库富营养化的主要影响因子,对泥沙有很强的亲和性。为探究水库中磷的空间分布规律,针对泥沙沉降过程中对磷的吸附影响进行了模拟试验,研究了不同环境因素耦合作用下泥沙沉降对水库中磷分布的影响。此外,基于量纲分析及多元回归法建立了液相磷浓度垂向分布公式。结果表明:泥沙沉降过程中对磷的吸附导致液相磷的垂向分布呈上浓下稀的趋势。泥沙粒径越小、含沙量越高、水深越大,则液相磷元素的浓度梯度越大,垂向分布越不均匀。液相磷垂向分布公式表明,液相磷浓度梯度与含沙量的 $1/4$ 次幂、泥沙粒径的 $-2/3$ 次幂和水深的 $1/3$ 次幂成正比,液相磷浓度最小值与含沙量的 $-1/20$ 次幂、泥沙粒径的 $1/10$ 次幂和水深的 $-1/10$ 次幂成正比。公式计算值与试验数据基本吻合,表明该公式对研究水库磷元素的空间分布有重要参考意义。

关键词: 水库; 泥沙沉降; 泥沙粒径; 液相磷; 垂向分布

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0077-07

Influence of sedimentation on the spatial distribution of phosphorus in reservoirs

YANG Tong¹, SUN Zhilin¹, SUN Lixia², LI Zongyu¹, ZHU Lili²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Phosphorus is the main indicating factor of reservoir eutrophication and has strong affinity to sediment. In order to explore the spatial distribution law of phosphorus in reservoirs, a simulation test on the effect of sedimentation on phosphorus adsorption was carried out under the coupling action of different environmental factors. Besides, the formula for calculating vertical distribution of phosphorus concentration in liquid phase was established based on dimensional analysis and multiple regression method. The results show that the vertical distribution of liquid phase phosphorus tends to be thicker at the top and thinner at the bottom of the reservoir due to phosphorus adsorption during sedimentation. The smaller the particle size, the higher the concentration of sediment and the deeper the water depth, the greater the concentration gradient and the more inhomogeneous the vertical distribution of phosphorus in liquid phase. The vertical distribution formula of liquid phase phosphorus shows that the gradient of liquid phase phosphorus concentration is proportional to $1/4$ power of sediment concentration, $-2/3$ power of sediment particle size and $1/3$ power of water depth, and the minimum value of liquid phase phosphorus concentration is proportional to $-1/20$ power of sediment concentration, $1/10$ power of sediment particle size and $-1/10$ power of water depth. The calculated results are in good agreement with those of the simulation test, indicating that the derived formula is applicable to the study of phosphorus distribution in reservoirs.

Key words: reservoir; sedimentation; sediment particle size; liquid phase phosphorus; vertical distribution

1 研究背景

磷是引起水库富营养化的主要元素^[1],据统计,世界上有 30% ~ 40% 的湖库存在富营养化问

题,其中 25 km² 以上的湖库有 63% 处于富营养化状态^[2]。研究表明泥沙对磷有很强的吸附作用,水库建成后入库水流流速降低,为泥沙沉降提供了水动力条件^[3]。水库泥沙沉降后淤积在水底很难启动,

收稿日期:2022-02-17; 修回日期:2022-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(91647209);浙江大学实验技术研究项目(SJS201907)

作者简介:杨通(1998-),男,河北衡水人,硕士研究生,主要从事泥沙生态及水文水资源研究。

通讯作者:孙志林(1956-),男,浙江慈溪人,博士,教授,博士生导师,从事水沙动力学及河口海岸数值模拟研究。

因此对磷元素的吸附主要是在沉降过程中完成的。水库泥沙通过在沉降过程中对磷元素的吸附,影响库区磷的赋存形态和空间分布规律^[4]。

目前关于水库泥沙对磷元素吸附的研究主要集中在不同环境因素对泥沙吸附解吸磷的影响。相关研究表明泥沙粒径、含沙量、水动力条件以及絮凝程度、反应温度、初始磷浓度等因素均会对泥沙吸附解吸磷产生影响^[5]。泥沙粒径越小、含沙量越高则对磷酸盐的吸附量越大^[6-7]。在水动力条件下,流速与泥沙对磷的吸附量呈正相关关系^[8]。此外泥沙絮凝对磷的吸附和解吸有较为明显的影响,且絮凝强度与磷吸附和解吸能力呈正比^[9-10]。当库水的 pH 值和温度在较低范围内时,泥沙对磷的吸附量随之增大而增加,而在超过某阈值时则开始降低^[11]。目前,对磷分布规律的研究以模型构建和数据分析为主,但相关试验较少^[12]。黄磊等^[13]、徐兴亚等^[14]建立了分相模型模拟河流中的磷迁移过程,发现磷浓度分布与含沙量间存在较好的线性关系。陈铭等^[15]、Tang 等^[16]和任慧芳等^[17]通过对实际河段进行水质分析,得出河段水体含沙量与总磷(TP)含量呈相反的变化规律。

本文设计了泥沙沉降过程对磷吸附的影响试验,研究沉降过程中含沙量、泥沙粒径和水深等环境因子对磷吸附以及磷元素在空间分布的影响。通过量纲分析及多元回归法建立液相磷浓度垂向分布公式,探究不同环境因素影响下磷的空间分布规律,研究成果对于解决磷元素在水生生态环境下的迁移转化问题具有重要的实际意义,且能够为水库中磷元素的控制、水库水质的改善以及水华等生态环境灾害的预防提供参考^[18]。

2 试验材料与方法

2.1 试验样品

试验中所用泥沙采样于天然库区,现场采集后在试验室远红外干燥箱中进行烘干处理。用 150、170、200、300、600 目筛网在振筛机上进行振动筛分,筛分成 D_1 (0.023 ~ 0.048 mm)、 D_2 (0.048 ~ 0.075 mm)、 D_3 (0.075 ~ 0.090 mm)、 D_4 (0.090 ~ 0.106 mm) 4 种粒径组分。

因沙样会混合着一些有机质,表面也会被氮、磷、重金属等元素包裹。为尽量去除沙样表面附着的无机物、腐殖质和金属离子,消除这些因素对试验结果的影响,需要对泥沙进行清洗。试验采用还原剂稀盐酸、氧化剂双氧水以及蒸馏水清洗沙样,清洗

步骤如下:(1)将各组分沙样混入稀盐酸中清洗,静置后弃去上清液;(2)加入过氧化氢溶液清洗,静置后弃去上清液;(3)重复(1)、(2)步骤 2~3 次,直到不产生气泡,最后加入蒸馏水清洗,静置后弃去上清液;(4)将过滤后的沙样放入远红外干燥箱中进行烘干处理,获得试验所用泥沙。

2.2 试验装置

试验装置是由 4 段长度为 1.5 m 的亚克力管相接组成,总长为 6.0 m。底部用圆形亚克力板封堵,每段亚克力管之间用螺丝钉和法兰连接,便于拆卸。管壁设置 8 个取样孔,用来取不同垂向位置的水样。该试验装置可以用于模拟水库大水深环境,使试验模拟环境更接近实际情况。试验装置及管壁取样孔距底部距离(取样孔高度)如图 1 和表 1 所示。因泥沙沉降在装置底部,越靠近底部的液相磷浓度变化值越大,故底部相邻取样孔的间隔较小。 $1^\#$ 、 $2^\#$ 取样孔间距为 0.2 m, $2^\#$ ~ $7^\#$ 取样孔间距为 1.0 m, $7^\#$ 、 $8^\#$ 取样孔间距为 0.6 m。

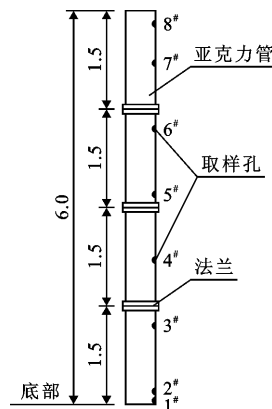


图1 试验装置示意图(单位:m)

表1 各取样孔编号及位置

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
高度/m	0	0.2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2	5.8

2.3 试验方法

试验采用控制变量法,每次改变泥沙粒径、含沙量、水深等影响因素中的一种,其余因素保持不变,研究这些因素对泥沙吸附磷及磷元素垂向分布的影响。试验泥沙取自澜沧江下游的景洪水库库区,烘干后筛分为 D_1 ~ D_4 4 种不同粒径组分。将 D_1 、 D_2 以及 D_1 、 D_3 按照 1:1 比例混合,得到 $D_1 + D_2$ 、 $D_1 + D_3$ 2 种不同粒径组分,共得到 0.023 ~ 0.106 mm 范围内 6 种不同梯度的粒径组分。参照天然情况下水库入流含沙量以及库区泥沙粒径情况,设计了不同

水深条件下的含沙量和粒径共 16 种工况组合,工况条件如表 2 所示。

表 2 试验工况条件

工况	泥沙粒径组	含沙量/(g·L ⁻¹)	水深/m
1	D ₂	0.5	6.0
2	D ₂	1.0	6.0
3	D ₂	2.0	6.0
4	D ₂	3.0	6.0
5	D ₂	4.0	6.0
6	D ₂	6.0	6.0
7	D ₁	1.0	6.0
8	D ₁ + D ₂	1.0	6.0
9	D ₁ + D ₃	1.0	6.0
10	D ₃	1.0	6.0
11	D ₄	1.0	6.0
12	D ₂	1.0	5.0
13	D ₂	1.0	4.5
14	D ₂	1.0	4.0
15	D ₂	1.0	3.5
16	D ₂	1.0	3.0

试验流程如下:

第 1 步:向试验装置中加入初始磷浓度为 0.6 mg/L 的含磷水溶液,直至到达标定水位。试验用水由磷酸二氢钾溶于蒸馏水中获得,在试验室中配制好后倒入试验装置中,使得溶液充分均匀混合,保证在初始时刻试验装置内不同垂向位置处的磷浓度相同。

第 2 步:将称量好的特定粒径的泥沙倒入试验装置中,在吸附开始后间隔 1 h 取样,直至达到吸附平衡。

第 3 步:取样后用孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜将水样中的泥沙滤出,得到用于检测磷浓度的水样。

第 4 步:将过滤后的水样加入过硫化钾放入高压蒸汽锅中消解,用钼酸铵分光光度法检测液相磷浓度。

3 公式推导

图 2 为在不同含沙量、泥沙粒径、水深试验工况条件下,对液相磷垂向分布的线性拟合结果。图 2 纵坐标 h 为空间任一位置距离底部的距离,即高度。横坐标为高度 h 处的液相磷浓度。图 2(a) ~ 2(c) 中 $R_1^2 \sim R_6^2$ 分别为从左到右 6 条拟合直线的拟合度。

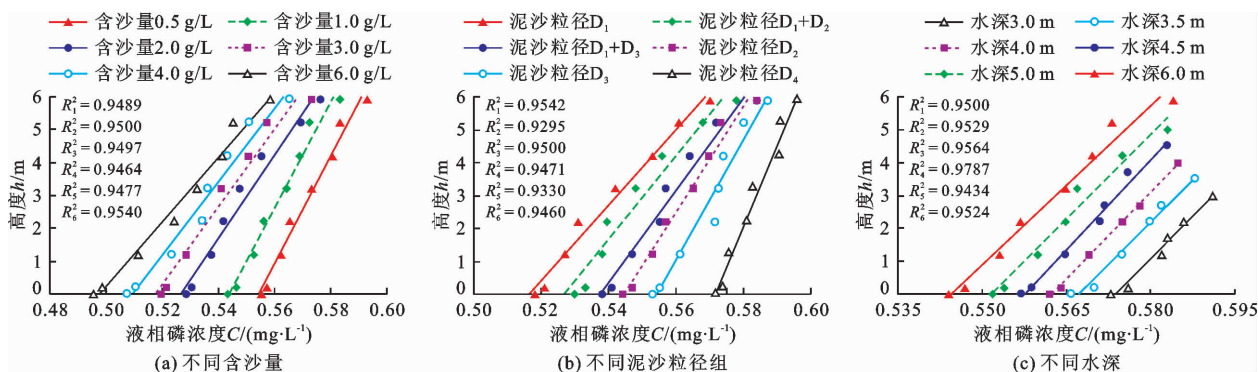


图 2 各试验工况条件下液相磷垂向分布线性拟合

由图 2 可知在各试验工况条件下,液相磷垂向分布线性拟合度 R^2 均大于 0.92,说明一次函数能够较好地拟合液相磷浓度 C 与高度 h 的关系。当 $h = 0$ 时, $C = C_{\min}$ 。故液相磷浓度随水深变化公式可表示为: $C = kh + C_{\min}$ 。令 $k = \lambda C_0 / H_0$, $C_{\min} = \eta C_0$,可得液相磷浓度随水深变化公式为:

$$C = \frac{\lambda C_0}{H_0} h + \eta C_0 \quad (1)$$

式中: C 为高度 h 处的液相磷浓度, mg/L; h 为距底部高度, m; C_0 为初始磷浓度, mg/L; H_0 为水深, m; λ 、 η 均为无量纲系数。

泥沙对磷吸附问题涉及多种因素,目前无法采用理论推导解决。可通过量纲分析的方法将多种变量进行组合,得出无量纲经验方程。熊文华等^[19]基

于量纲分析建立了小流域洪峰流量推算公式;韩海骞等^[20]通过量纲分析及多元回归法,确立了在潮流影响下桥墩局部冲刷的计算公式。本文采用量纲分析法,用相关物理量来表示无量纲系数 λ 和 η 。 λ 、 η 的值主要取决于泥沙参数、水动力条件、时间因素等,经过初步分析得出:

$$F(\lambda, \eta, \rho, S, D_{50}, \omega, \nu, H_0, T_0) = 0 \quad (2)$$

选取 ν 、 ρ 作为基本变量,用基本变量表示其他无量纲变量,由量纲和谐原则可得:

$$F\left(\lambda, \frac{S}{\rho}, \frac{D_{50}\omega}{\nu}, \frac{H}{\omega T_0}\right) = 0 \quad (3)$$

$$F\left(\eta, \frac{S}{\rho}, \frac{D_{50}\omega}{\nu}, \frac{H}{\omega T_0}\right) = 0 \quad (4)$$

式中: S 为含沙量, kg/L; ρ 为泥沙密度, kg/m³; D_{50}

为泥沙的中值粒径, m ; ω 为泥沙沉速, m/s ; ν 为运动黏滞系数, m^2/s ; T_0 为吸附平衡时长, s 。 S/ρ 为单位水体中泥沙的体积占比; $D_{50}\omega/\nu$ 为沙粒雷诺数; $H_0/(\omega T_0)$ 为沉降过程时长与吸附平衡时长的比值。

故无量纲系数 λ 、 η 可表示为:

$$\lambda = a_0 \left(\frac{S}{\rho} \right)^{a_1} \cdot \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right)^{a_2} \cdot \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right)^{a_3} \quad (5)$$

$$\eta = b_0 \left(\frac{S}{\rho} \right)^{b_1} \cdot \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right)^{b_2} \cdot \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right)^{b_3} \quad (6)$$

式中: a_0 、 b_0 为无量纲系数, a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为无量纲指数。

4 结果分析与讨论

4.1 不同环境因子条件下液相磷垂向分布规律

为探究不同环境因子条件下液相磷垂向分布规律,在表 1 所列的各工况条件下量测了不同高度处的液相磷浓度,绘制出不同含沙量、泥沙粒径和水深条件下液相磷浓度垂向分布图,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在无泥沙的工况下,磷元素沿垂向均匀分布,液相磷浓度均为初始浓度 0.6 mg/L 。在改变环境因子的工况条件下,不同高度液相磷浓度均小于初始浓度,且垂向分布不均匀,呈现上浓下稀的分布规律,即液相磷浓度最大值出现在水面,最小值出现在水底。这是因为泥沙对磷元素有很强的吸附作用,自然界中的磷有两种存在形式,一部分以固相形态吸附于泥沙颗粒表面,一部分以液相形态溶解在水中^[21]。李静^[22]在对河流磷形态研究中指出,多泥沙河流水体中 90% 的磷是以固相的形式吸附在泥沙表面。在泥沙沉降过程中,由于吸附作用的存在使空间中的磷由液相向固相转化,因此在空间任一点处液相磷浓度小于初始浓度,从而导致液相磷浓度垂向分布不均匀。

图 3 显示,液相磷浓度最小值出现在 $h = 0$ 处,这是因为沉降过程中泥沙在空间中分布不均,越靠近底部含沙量越高,泥沙沉降速度越慢,对磷的吸附量越大。张濛元^[23]在研究三峡库区泥沙对磷吸附的试验中发现,水溶液中磷吸附量随含沙量的升高而增大。因此,含沙量越高的位置的液相磷浓度越小。陈铭等^[15]对 2000–2019 年黄河主要水文站实测水体含沙量 TP 浓度进行了协同研究,也得出了相似的结论,其研究结果显示下游河道水体含沙量同 TP 浓度呈相反的变化规律,即由于泥沙对 TP 的吸附作用,悬沙浓度越高的位置,其水中 TP 浓度越低。上述研究从侧面验证了本文的试验结果。

4.2 泥沙沉降过程中环境因子对磷吸附量的影响

由图 3 可知,各试验工况条件下不同高度 h 处的液相磷浓度及吸附量均有所不同。对图 3 中液相磷分布沿垂向进行积分,可得到空间液相磷浓度及吸附量的平均值。不同含沙量、泥沙粒径、水深试验工况条件下,液相磷平均浓度及吸附量结果如图 4 所示。

图 4(a)表明,试验工况的含沙量越高,则泥沙对液相磷的吸附量越大,液相磷的浓度越低。肖洋等^[24]对淮中游泥沙进行的磷吸附和解吸规律试验也得到了相似结果,即磷吸附量随含沙量的升高而升高。这是因为吸附是一种表面反应,含沙量越大,则泥沙的总表面积就相应越大,可供磷吸附的位置越多,水中磷被泥沙表面吸附的概率越高,泥沙的吸附总量相应也会增大。当含沙量为 0.5 mg/L 时,磷平均吸附量为 0.024 mg/L ,液相磷平均浓度为 0.576 mg/L ;当含沙量为 6.0 mg/L 时,磷平均吸附量增大到 0.069 mg/L ,液相磷平均浓度降低为 0.530 mg/L ,含沙量增大 12 倍,则磷吸附量增加近 3 倍,可见含沙量变化和磷吸附量的变化之间并不是简单的倍数关系。产生这种现象有两种可能,一是含沙量增加使得泥沙颗粒之间的碰撞概率增加,因此使得磷从泥沙颗粒表面解析出来的概率和速率也相应增加,二是含沙量增大的同时也增加了泥沙颗粒的聚合,从而减小了吸附磷的表面积。

图 4(b)表明,试验工况的泥沙粒径越小,则泥沙对液相磷的吸附量越大,液相磷浓度越低。这是由于泥沙的粒径越小,泥沙的比表面积越大,从而具有更大的吸附空间。张翼^[25]的试验结果也验证了这一规律,即在试验泥沙粒径范围内,泥沙粒径越大,对磷的平衡吸附量越小,达到吸附平衡时刻所需时间越长。

图 4(c)表明,试验工况的水深越大,则泥沙对液相磷的吸附量越大,液相磷浓度越低。当水深为 3.0 m 时,磷平均吸附量为 0.016 mg/L ,当水深升高到 6.0 m 时,磷平均吸附量增大到 0.038 mg/L 。因为水深越大,沉降所需时间越长,则有更多的液相磷被泥沙吸附,从而使水中液相磷浓度越低。

4.3 泥沙沉降过程中环境因子对液相磷垂向分布的影响

由图 3 可知,含沙量、泥沙粒径、水深等条件的变化不仅会影响液相磷的吸附量,还会影响液相磷的垂向分布,主要体现在对液相磷浓度垂向梯度的影响。液相磷浓度梯度表达式为 $k = \partial C / \partial h$,表示

液相磷浓度 C 随高度 h 的变化率。液相磷浓度梯度越大,则液相磷垂向分布越不均匀,垂向分布曲线斜率越陡;液相磷浓度梯度越小,则垂向分布曲线斜率越平缓。图5为不同工况条件下液相磷浓度梯度随含沙量、泥沙粒径和水深的变化曲线。

由图5(a)、5(b)可知,在试验工况条件下,含沙量越大、泥沙粒径越小,则液相磷浓度梯度越大,液相磷在空间中的分布越不均匀。当含沙量为 0.5 mg/L 时,液相磷浓度梯度为 5.4 mg/m^4 ;当含沙量为 6.0 mg/L 时,液相磷浓度梯度增大到 9.8 mg/m^4 。当泥沙粒径组为 D_1 时,液相磷浓度梯度为 9.6 mg/m^4 ;当泥沙粒径组为 D_4 时,液相磷浓度梯度降低为 4.5 mg/m^4 。这是因为在试验时长范围内,绝大部分泥沙颗粒均会沉降到水底,而含沙量越高,粒径越小,沉降到水底的泥沙吸附磷的量就越多,上方水体液相磷浓度与下方水体液相磷浓度的

差值就越大,液相磷浓度梯度就越大。

由图5(c)可知,在试验工况范围内水深越大,则液相磷浓度梯度越大。Barlow 等^[26]在实验室循环水槽的实验中发现,小水深情况下的流速和水深对泥沙的吸附作用没有明显影响。吉飞等^[27]在环形水槽中进行泥沙对磷的吸附试验也表明,在 0.2 m 水深条件下的液相磷垂向分布存在一定的不均匀性,但水面和水底液相磷浓度相对变化量并不显著。本研究6种不同水深工况下的试验数据显示, 3.0 m 水深工况的液相磷浓度梯度最小,只有 4.5 mg/m^4 。随着水深增大,液相磷浓度梯度随之增大, 6.0 m 水深工况下的液相磷浓度梯度增加至 6.3 mg/m^4 。

4.4 计算值与试验结果对比

本研究设计了16种工况48组试验,为减小误差每组进行3次重复试验取平均值,测得48组不同泥沙粒径、含沙量和水深条件下的液相磷垂向分布曲线。

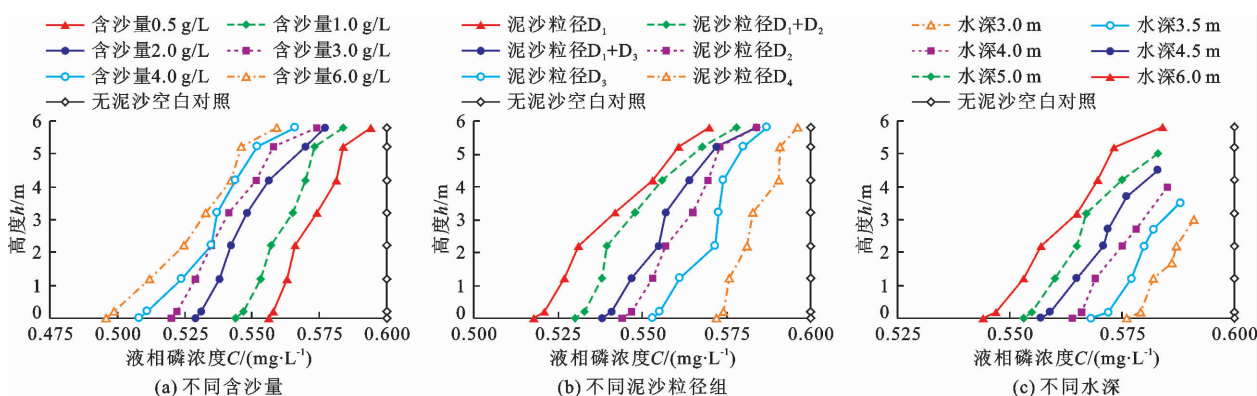


图3 各试验工况条件下液相磷垂向分布试验值

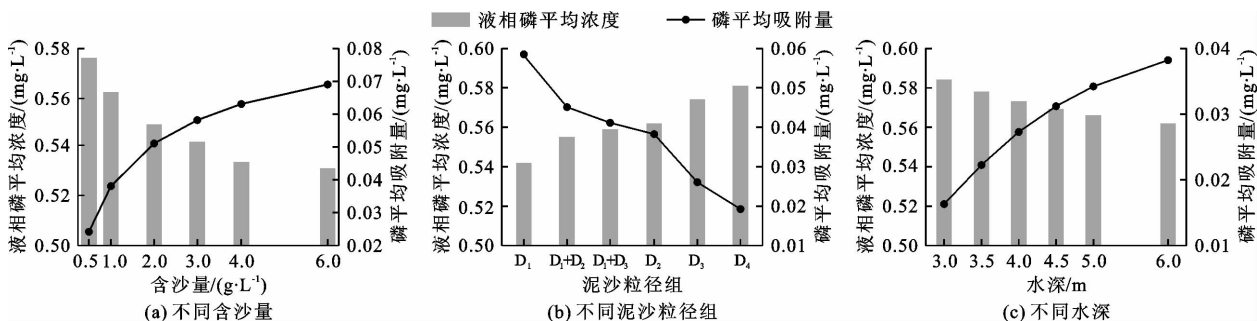


图4 各试验工况条件下液相磷平均浓度及吸附量

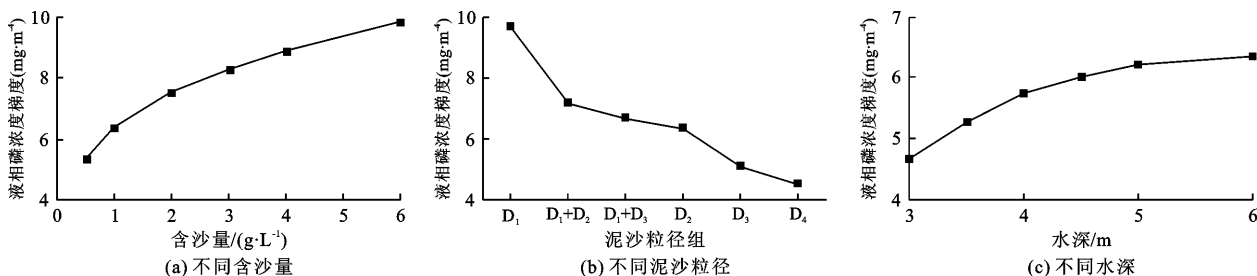


图5 各试验工况条件下液相磷浓度梯度变化曲线

用不同条件下测得的液相磷垂向分布数据对公式(5)、(6)无量纲系数 λ 、 η 进行参数率定,为了方便分析其相关性,将公式(5)、(6)等号两边取对数,可得:

$$\ln \lambda = \ln a_0 + a_1 \ln \left(\frac{S}{\rho} \right) + a_2 \ln \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right) + a_3 \ln \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right) \quad (7)$$

$$\ln \eta = \ln b_0 + b_1 \ln \left(\frac{S}{\rho} \right) + b_2 \ln \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right) + b_3 \ln \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right) \quad (8)$$

分别计算 $\ln \lambda$ 、 $\ln \eta$ 、 $\ln (S/\rho)$ 、 $\ln [(D_{50}\omega)/\nu]$ 、 $\ln [H_0/(\omega T_0)]$ 数据系列,通过多元回归分析率定系数,得到各系数值为: $a_0 = 8.410$, $a_1 = 1/4$, $a_2 = 2/3$, $a_3 = 4/3$, $b_0 = 0.662$, $b_1 = -1/20$, $b_2 = -1/30$, $b_3 = -1/10$ 。因此液相磷浓度随水深变化公式即公式(1)中的无量纲系数 λ 、 η 表达式为:

$$\lambda = 8.410 \times \left(\frac{S}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (9)$$

$$\eta = 0.662 \times \left(\frac{S}{\rho} \right)^{-\frac{1}{20}} \cdot \left(\frac{D_{50}\omega}{\nu} \right)^{-\frac{1}{30}} \cdot \left(\frac{H_0}{\omega T_0} \right)^{-\frac{1}{10}} \quad (10)$$

根据岗恰洛夫公式,球体沉降运动状态处于层流

区(泥沙粒径 $d < 0.15 \text{ mm}$)时泥沙的沉速公式为:

$$\omega = \frac{1}{24} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{gd^2}{\nu} \quad (11)$$

式中: ω 为泥沙沉降速度, m/s; γ 为水的容重, N/m^3 ; γ_s 为泥沙容重, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; d 为泥沙粒径, m; ν 为运动黏滞系数, m^2/s 。

将公式(11)分别代入公式(9)、(10)中,可得 $\lambda \propto S^{1/4} D_{50}^{-1/2} H_0^{4/3}$; $\eta \propto S^{1/20} D_{50}^{1/10} H_0^{-1/10}$ 。故液相磷浓度梯度 $\lambda C_0/H_0$ 与含沙量的 $1/4$ 次幂、泥沙粒径的 $-2/3$ 次幂和水深的 $1/3$ 次幂成正比。液相磷浓度最小值 ηC_0 与含沙量的 $-1/20$ 次幂、泥沙粒径的 $1/10$ 次幂、和水深的 $-1/10$ 次幂成正比。

为验证公式的拟合效果,将液相磷垂向分布公式的计算值与不同试验工况条件下测得的液相磷垂向分布数据进行对比,并用拟合度 R^2 来表征公式对试验值的拟合精度,结果如图6所示,图6中 R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 分别为从上到下3条拟合直线的拟合度。

由图6可知,在试验工况条件下,液相磷垂向分布公式的计算值与试验值基本吻合,垂向分布公式的拟合度 R^2 均大于0.9,表明采用液相磷浓度垂向分布公式计算出的不同高度的液相磷浓度是准确的。

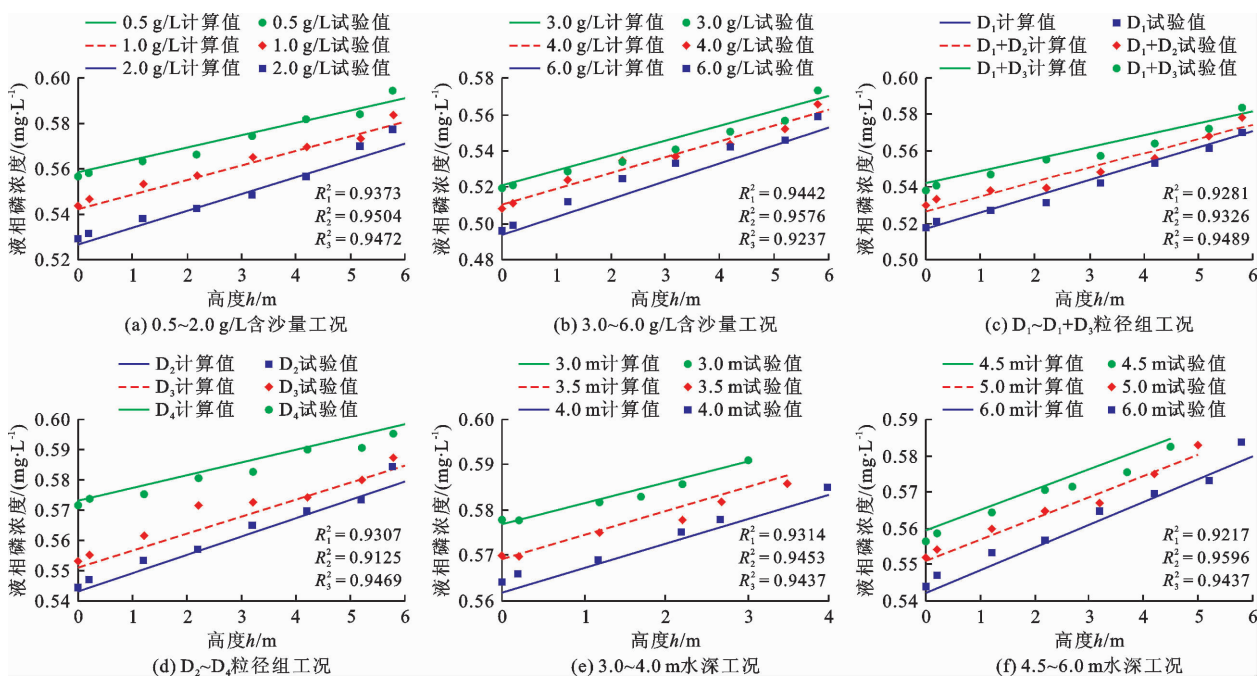


图6 各试验工况条件下液相磷垂向浓度计算值与试验值比较

5 结论

本文开展了泥沙沉降过程对磷吸附的试验,分析了含沙量、泥沙粒径和水深等环境因子对泥沙吸附磷

及磷元素作用的影响,并通过量纲分析及多元回归法建立了液相磷浓度垂向分布公式,得到如下结论:

(1) 泥沙在沉降过程中对磷有吸附作用,且吸附作用改变了磷元素的空间分布,使得液相磷垂向分布

不均匀。液相磷浓度垂向分布呈现上浓下稀的趋势,最小值出现在水底,最大值出现在水面。

(2)含沙量、泥沙粒径及水深等因素会影响磷元素的吸附量以及垂向分布。试验结果表明,泥沙粒径越粗,含沙量越低,水深越小,则液相磷浓度梯度越小,垂向分布越均匀。液相磷浓度平均值与含沙量、水深呈负相关,与泥沙粒径呈正相关。

(3)基于量纲分析导出了液相磷浓度与垂向位置的无量纲关系,用多元线性回归方法率定了关系式的系数和指数,建立了液相磷浓度垂向分布公式。公式表明液相磷浓度与垂向高度呈线性相关关系。液相磷浓度梯度与含沙量的 $1/4$ 次幂、泥沙粒径的 $-2/3$ 次幂和水深的 $1/3$ 次幂成正比。公式计算值与试验数据基本吻合,表明推导的液相磷浓度垂向分布公式对研究水库磷元素的空间分布有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 齐德轩,马巍,党承华,等.三峡水库支流库湾营养源解析及水体富营养化调控对策研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(3):318-328.
- [2] WANG Shenglei, LI Junsheng, ZHANG Bing, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 217: 444-460.
- [3] 方海涛.三峡水库香溪河库湾泥沙沉积过程及其氮赋存特征[D].宜昌:三峡大学,2020.
- [4] 姚玲爱,赵学敏,马千里,等.台风强降雨输入水源水库的泥沙沉降模拟分析[J].生态环境学报,2018,27(10):1900-1907.
- [5] 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.
- [6] 廖春玲.瑶湖不同粒径沉积物氮磷赋存形态及其吸附特征与水体营养状况之间的关系[D].南昌:华东交通大学,2017.
- [7] MENG Jia, YAO Qingzhen, YU Zhigang. Particulate phosphorus speciation and phosphate adsorption characteristics associated with sediment grain size[J]. Ecological Engineering, 2014, 70: 140-145.
- [8] 韩超.流动水体中泥沙特性对磷分布的影响[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [9] 黎铮.紊动条件下泥沙纵向分布及氮氮吸附释放特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [10] 李迪,陈垚,张彩,等.细颗粒泥沙絮凝对泥沙内源磷迁移转化的影响[J].环境科学与技术,2020,43(3):66-73.
- [11] BAI Junhong, YE Xiaofei, JIA Jia, 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[J]. Chemosphere, 2017, 188: 677-688.
- [12] 李旺,祖波,李振亮,等.泥沙对磷的吸附及解吸研究进展[J].环境保护科学,2018,44(4):49-53.
- [13] 黄磊,方红卫,王靖宇,等.河流泥沙磷迁移过程的数学模型研究[J].水利学报,2014,45(4):394-402.
- [14] 徐兴亚,方红卫,黄磊,等.基于数据同化校正参数的河流磷迁移估计研究[J].水利学报,2017,48(2):157-167.
- [15] 陈铭,王雨春,欧阳威,等.黄河泥沙含量对磷迁移过程的影响研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(4):508-516.
- [16] TANG Xianqiang, WU Min, DAI Xichang, et al. Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions[J]. Ecological Engineering, 2014, 64: 276-284.
- [17] 任慧芳,孙冰,付晓涛.黄河呼和浩特段典型多泥沙水体中泥沙含量对总磷浓度的影响[J].环境与发展,2019,31(12):172-173.
- [18] 余晓,李国强,诸葛亦斯,等.潘家口水库氮与磷营养盐的时空变化及滞留效应分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(6):469-478.
- [19] 熊文华,孙立霞,李诚,等.澜沧江与怒江流域洪峰流量公式推求[J].人民长江,2020,51(11):82-86.
- [20] 韩海骞,熊绍隆,孙志林.潮流作用下桥墩局部冲刷深度计算公式的建立与验证[J].泥沙研究,2016(1):9-13.
- [21] 李旺,祖波,李振亮,等.泥沙对磷的吸附及解吸研究进展[J].环境保护科学,2018,44(4):49-53.
- [22] 李静.多泥沙河流磷形态研究[J].黑龙江环境通报,2021,34(2):6-7.
- [23] 张濛元.三峡库区泥沙对磷的吸附解吸特性研究[D].北京:中央民族大学,2017.
- [24] 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.
- [25] 张翼.三峡库区汛期悬浮泥沙与磷的关系研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [26] BARLOW K, NASH D, GRAYSON R. Investigating phosphorus interactions with bed sediments in a fluvial environment using a recirculating flume and intact soil cores[J]. Water Research, 2004, 38(14-15): 3420-3430.
- [27] 吉飞,李志伟,赵汗青.水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):56-62.