

上覆水磷浓度对沉积物孔隙水中磷垂向分布的影响

肖洋^{1,2,3}, 李一彤³, 张涛涛^{1,2,3}, 沈菲⁴

(1. 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; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 常州市武进区水利局规划建设管理科, 江苏 常州 213000)

摘要: 为探究上覆水磷浓度对沉积物孔隙水中磷垂向分布的影响,通过室内实验,利用薄膜扩散平衡技术(DET)对孔隙水中磷浓度进行测量,分析孔隙水磷浓度的垂向变化规律,并揭示平衡时上覆水磷浓度与孔隙水磷浓度以及上覆水-沉积物界面孔隙水磷浓度的关系。结果表明:上覆水磷浓度越高,则沉积物孔隙水中磷垂向分布达到平衡所需的时间越长,相同垂向位置处孔隙水磷浓度及其浓度梯度越大;孔隙水磷浓度及其浓度梯度随深度增加而降低,表层沉积物孔隙水中磷的扩散作用最强,下层沉积物孔隙水磷浓度受上覆水磷浓度变化影响较小;吸附平衡后,沉积物孔隙水磷浓度和上覆水-沉积物界面孔隙水磷浓度均与上覆水磷浓度呈幂函数关系,而留存在沉积物孔隙水中的磷浓度仅占2.26%~3.80%,上覆水中减少的磷大部分被沉积物吸附。

关键词: 水体富营养化; 上覆水磷浓度; 沉积物; 孔隙水; 磷垂向分布; 吸附

中图分类号:TV213.4; X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0024-05

Effects of phosphorus concentration in overlying water on the vertical distribution of phosphorus in sediment pore water

XIAO Yang^{1,2,3}, LI Yitong³, ZHANG Taotao^{1,2,3}, SHEN Fei⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Planning and Construction Management Division, Changzhou Wujin District Water Resources Bureau, Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to explore the influence of the phosphorus concentration in the overlying water on the vertical distribution of phosphorus in the pore water of the sediments, a series of laboratory experiments were conducted. The phosphorus concentration in the pore water was measured using the technique of diffusive equilibration in thin films (DET), based on which the vertical changes of the phosphorus concentration in the pore water were analyzed, and the relationship between the phosphorus concentration in the overlying water and the phosphorus content in the sediment pore water, as well as the phosphorus concentration in the pore water at the overlying water-sediment interface was investigated. It shows that the greater the phosphorus concentration in the overlying water, the longer it takes for the vertical distribution of phosphorus in the sediment pore water to reach equilibrium, and the greater the concentration of phosphorus in pore water and its concentration gradient at the same vertical position. The phosphorus concentration in pore water and its concentration gradient decrease with the increase of the depth. Phosphorus diffusion in the pore water of surface sediment is the strongest; however, the phosphorus concentration in the overlying water has no significant effect on phosphorus concentration in the pore water of the substratum sediment. After the adsorption reaches equilibrium, the phosphorus concentration in the sediment pore water and in the pore water at the overlying water-sediment interface have a power function relationship with that in the overlying water, and the remaining phosphorus in the sediment pore water only

收稿日期:2020-12-12; 修回日期:2021-04-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402605); 江苏省自然科学基金项目(BK20191299); 高等学校学科创新引智计划项目(B17015)

作者简介:肖洋(1974-),男,贵州铜仁人,博士,教授,主要从事水力学及河流动力学研究。

accounts for 2.26% – 3.80%, because most of the phosphorus in the overlying water is adsorbed by the sediments.

Key words: water eutrophication; phosphorus concentration in overlying water; sediment; pore water; vertical distribution of phosphorus; adsorption

1 研究背景

水体中过量的磷会造成水体富营养化,给水生态安全造成威胁^[1-3]。水体中溶解态磷除赋存在上覆水及悬沙中以及被下层沉积物吸附,还会通过扩散作用进入沉积物孔隙水中^[4]。因此,探究磷在水和沉积物两相间的分配规律,有助于深入理解磷在水体中的迁移转化过程,为水体富营养化的预防和治理提供科学依据。

沉积物对水体中磷的吸附过程会对磷在水和沉积物两相间的分配产生直接影响^[4-5]。已有研究表明,水体含沙量、上覆水磷浓度、水动力条件和温度、pH 等环境因素均会对沉积物吸附磷的过程造成影响^[4-8],而在稳定的环境条件下,上覆水磷浓度是影响沉积物吸附磷的主要因素^[7]。前人研究发现,随着上覆水初始磷浓度的升高,单位质量泥沙的平衡吸附量增大^[6-8],而其单位质量泥沙的平衡吸附量的增大速率随吸附时长的增加而逐渐减小^[9-15]。有学者进一步探索发现,泥沙对磷的吸附量占初始磷的比重随着初始磷浓度的增大而逐渐降低^[2,16]。然而,以往研究大多通过室内实验关注沉积物对上覆水中磷的总吸附过程,很少考虑磷在沉积物孔隙水中的垂向分布,这限制了对磷在上覆水-沉积物间分配规律的深入理解。因此,有必要对不同上覆水磷浓度下沉积物孔隙水中磷垂向分布规律作进一步研究。

本文将基于薄膜扩散平衡技术,通过室内实验探究上覆水磷浓度对沉积物孔隙水中磷垂向分布的影响,研究成果对明晰磷在上覆水-沉积物中的迁移转化和分配规律具有一定的科学意义。

2 材料与方法

2.1 样品采集

沉积物样品取自淮河流域吴家渡水文站附近,采样遵循受外部扰动(河床冲刷、水生植物、外源污染物等)较小的原则。使用小型箱式分层底泥采样器采集床面表层 15 cm 深度的沉积物,剔除杂物,静置使上层悬沙全部沉淀,用虹吸法去除上层清水。取出样品,置于恒温干燥箱 40 °C 烘干。干燥后用玻璃棒碾碎,过 1 mm 筛,继续研磨至全部通过筛网。利用去离子水对样品进行脱磷处理并烘干、碾压、研

磨,保存于干燥阴凉处。

2.2 实验设计

2.2.1 实验装置 实验在圆形玻璃容器(容量为 3 L,内径为 12.4 cm)中进行,并在实验过程中通过旋桨搅拌使上覆水中磷浓度分布保持均匀。旋桨转速设置较小,不会导致底部沉积物悬浮,因此旋桨扰动对实验影响较小^[17]。实验装置示意图见图 1(a)。

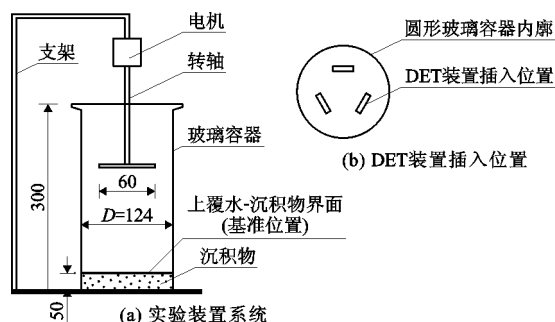


图1 实验装置及 DET 装置插入位置示意图(单位:mm)

2.2.2 实验溶剂配置 称取 0.219 7 g 干燥的 KH_2PO_4 (化学纯),加入蒸馏水配制磷含量为 50 mg/L 的溶液,调节溶液的 pH 值为 7 ± 0.1 。若室内实验选取上覆水磷浓度过小,扩散系数较小,不能精确测量孔隙水中的磷垂向分布,故参考前人研究^[6,9,13],分别量取 50、100、150、200、250 mL 定容至 2.5 L,配制成磷浓度 C 为 1、2、3、4、5 mg/L 的上覆水溶液。配制完成后置于阴凉处备用。

2.2.3 实验步骤 在圆形玻璃容器中加入 750 g 沉积物样品和 300 mL 蒸馏水,搅拌均匀,使沉积物初始含水率为 40%,静置 10 h,此时沉积物深度为 5 cm;以虹吸法缓缓加入配置好的相应浓度的上覆水溶液 2 L,溶液加入完毕的时刻记为 $t = 0$,使旋桨式搅拌器保持转速为 150 r/min;每隔一定时间(0.5 ~ 12 h,采样数 = 11)取 3 个平行样(各 5 mL),立即使用 0.45 μm 微孔滤膜过滤,采用钼锑抗分光光度法^[18]测定水体中可溶性活性磷(soluble reactive phosphorus, SRP)浓度,根据水样中磷的质量补充相应体积的备用上覆水磷溶液;在 $t = 48$ h 时刻,关闭旋桨式搅拌器,由于前人在实验过程中利用柱状采样器采集会对沉积物、孔隙水产生扰动,且采用的切片、分层等方法分辨率较低^[19-21],而薄膜扩散平衡技术(diffusive equilibration in thin films, DET)可更

好解决上述问题^[22-23],故在 3 个孔隙水磷浓度测量点(3 个测量点分别位于将沉积物表面 3 等分的 3 条半径的中点)分别插入 DET 装置,其插入位置示意图见图 1(b),平衡 48 h 后取出,上覆水-沉积物界面向下每隔 2 mm 取切片段测量 SRP 浓度,即垂向的孔隙水磷浓度^[16,24]。

3 结果与分析

3.1 上覆水磷浓度变化规律

不同初始磷浓度条件下上覆水中 SRP 浓度随时间变化的过程如图 2 所示。由图 2 可以看出,上覆水中 SRP 浓度随时间不断降低,在 0~12 h 内,上覆水 SRP 浓度处于快速下降阶段,这可能是由于沉积物对磷的吸附和磷的扩散作用显著且以吸附作用为主,这与黄文典^[6]在研究中发现初始阶段水相磷浓度迅速减小的规律一致。由图 2 可知,上覆水初始磷浓度 C 较大时,上覆水中 SRP 浓度规律性变化较明显,与前人研究^[6,9,13]类似。当 C 较小时,上覆水中的磷 24 h 即可接近于平衡状态,此后上覆水 SRP 浓度变化较小,而当 C 较大时,24 h 后上覆水 SRP 浓度仍继续降低,但降低速率减小。这是因为上覆水中减少的 SRP 大部分通过扩散作用进入沉

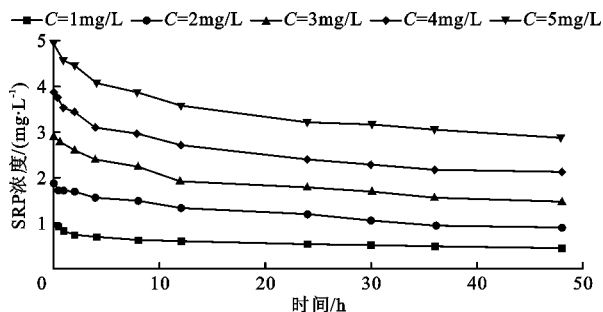


图 2 不同初始磷浓度条件下上覆水中 SRP 浓度随时间变化过程

3.2 孔隙水磷浓度垂向分布

孔隙水为赋存于沉积物颗粒孔隙间的水,基准位置(即上覆水-沉积物界面,见图 1(a))的孔隙水磷浓度为其下垂向 0~2 mm 切片段浓度值,最深可获得 40 mm 位置的孔隙水磷浓度。为方便分析,将基准位置以下垂向距离 0~10、10~20、20~30 和 30~40 mm 分别记为位置 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 。本文将各组实验在同一垂向位置所取的 3 次平行实验平均值作为该位置的孔隙水磷浓度, K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 位置磷浓度梯度为该位置的平均磷浓度梯度。

不同初始磷浓度条件下孔隙水磷浓度垂向分布

积物孔隙水中,沉积物对孔隙水中 SRP 的吸附促进了磷的扩散, C 越大,孔隙水中磷浓度梯度越大,增加了磷在孔隙水中扩散的深度及所需的平衡时间。黄利东等^[13]的研究也得到了类似的结论,但黄文典^[6]认为水相磷浓度达到平衡的时间随初始磷浓度变化的规律不明显。原因可能是后者选取的 C 值(0.6、1.4 和 1.8 mg/L)相差较小,导致差异不显著。在各个初始磷浓度下,48 h 之后上覆水 SRP 浓度变化较小,因此认为在 $t = 48$ h 时刻基本达到平衡状态。

上覆水中 SRP 减少量为上覆水中磷的变化量,而上覆水中磷的变化量与上覆水初始磷含量的比值为上覆水中 SRP 的变化率。图 3 给出了不同初始磷浓度条件下上覆水中 SRP 变化率随时间的变化过程。由图 3 可知,在实验浓度范围内, C 越大,SRP 的变化率越小。当 $C = 1$ mg/L,平衡时上覆水中磷的变化量为 1.028 mg;当 $C = 5$ mg/L,平衡时上覆水中磷的变化量为 4.071 mg。这表明 C 越大,平衡时上覆水中磷的变化量越大,但 C 较大时,沉积物对磷的吸附量占水体磷总量的比重却降低,这是由于沉积物的吸附点位有限,饱和吸附量存在阈值^[16],这与韩超^[2]的实验结论相符。

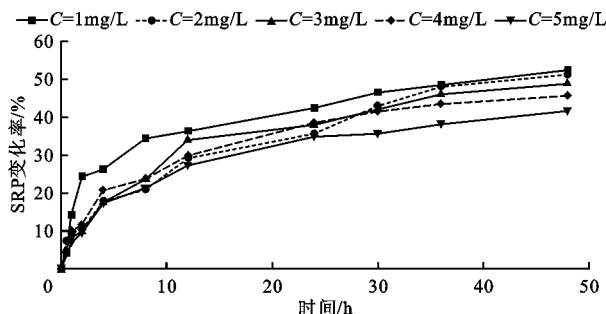


图 3 不同初始磷浓度条件下上覆水中 SRP 变化率随时间变化过程

见图 4。由图 4 可知,不同初始磷浓度条件下孔隙水中磷在垂直方向的浓度分布随深度增加呈减小趋势,且深度越大,孔隙水磷浓度梯度越小,这是由于随深度增加,磷扩散到孔隙水中受到的阻力增加^[25],且磷扩散的速度比下层沉积物吸附磷的速度小,导致孔隙水磷浓度梯度降低并趋于 0。然而,有研究表明^[21,26],沉积物孔隙水中磷浓度随深度增加呈先增加后减小的趋势,这主要是由于本实验采用的沉积物进行了脱磷处理,未考虑沉积物本身赋存的磷的影响,而前人研究直接采用现场的沉积物。在同一垂向位置的孔隙水磷浓度随 C 的增大呈上

升趋势,这主要是由于上覆水磷浓度增大,扩散到沉积物孔隙水中的磷也随之增多,即孔隙水磷浓度增大。同时可以看出, C 越大,相同垂向位置处孔隙水磷浓度梯度越大,当垂向深度增加到一定值时, C 对孔隙水磷浓度及其浓度梯度影响较小,这是因为垂向深度增大到一定值时,孔隙水磷浓度及其浓度梯度均较小,故初始磷浓度变化对其影响甚微。

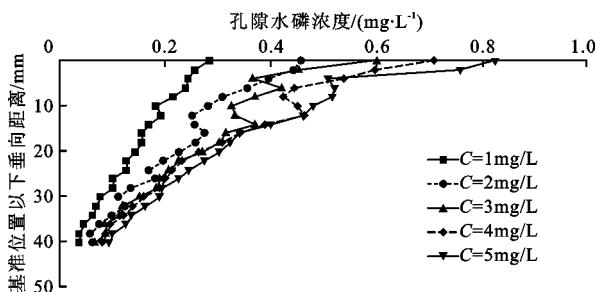


图4 不同初始磷浓度条件下孔隙水磷浓度的垂向分布

图5为不同初始磷浓度条件下相同垂直向位置孔隙水磷浓度梯度变化。由图5可知, K_1 、 K_2 位置的孔隙水磷浓度梯度随 C 增加均呈增大趋势,且 K_1 位置孔隙水磷浓度梯度最大,表明表层沉积物孔隙水中磷扩散作用最强。这是由于随着 C 的增加,上覆水-沉积物间磷浓度梯度增大,促进了孔隙水中磷的扩散作用^[27]。而当 C 增大时, K_3 、 K_4 位置孔隙水磷浓度梯度变化幅度较小,且大部分在 $0.01 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{mm})$ 附近波动,这表明下层沉积物孔隙水磷浓度受 C 影响较小。当 $C = 1 \text{ mg/L}$ 时, K_4 位置孔隙水磷浓度梯度为 $0.004 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{mm})$,与 K_1 位置孔隙水磷浓度梯度相比,减小了 $0.006 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{mm})$,降幅达到60%;而当 $C = 5 \text{ mg/L}$ 时, K_4 位置孔隙水磷浓度梯度为 $0.009 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{mm})$,与 K_1 位置孔隙水磷浓度梯度相比,减小了 $0.028 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{mm})$,降幅达到76%。故 C 越大,孔隙水磷浓度垂向上变化越显著。

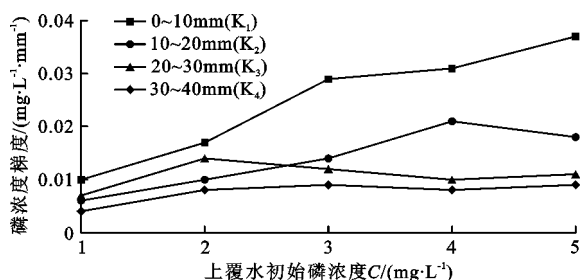


图5 不同初始磷浓度条件下相同垂直向位置孔隙水磷浓度梯度变化

在基准位置(上覆水-沉积物界面)处,孔隙水磷浓度与平衡时上覆水磷浓度的关系曲线见图6。由图6可以看出,两者之间呈幂函数关系,即上覆

水-沉积物界面孔隙水磷浓度随平衡时上覆水磷浓度增大逐渐增大,但增大的速率逐渐减小。

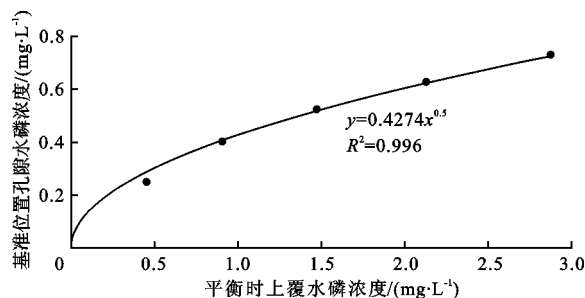


图6 基准位置孔隙水磷浓度与平衡时上覆水磷浓度的关系曲线

3.3 孔隙水磷含量变化规律

上覆水中的磷通过吸附和扩散作用进入沉积物,而扩散到沉积物的磷一部分被下层沉积物吸附,另一部分存在于沉积物孔隙水中。由于本实验中最深可测量距沉积物最底部 1 cm 以上范围的孔隙水磷浓度,且由图4可知,在 $t = 48 \text{ h}$ 时刻(平衡时),不同初始磷浓度下,垂向 40 mm 位置处的孔隙水磷浓度都很小,相应浓度梯度也较小,因此,假设 $42 \sim 50 \text{ mm}$ 位置的孔隙水磷浓度与 40 mm 位置的孔隙水磷浓度相同。则平衡时的沉积物孔隙水磷含量可通过以下公式进行计算:

$$m' = \sum_{i=1}^n \frac{C_i m \omega}{n \rho_w} \quad (1)$$

式中: m' 为平衡时测得的沉积物孔隙水磷含量, mg ; C_i 为 $(2i) \text{ mm}$ 位置处的沉积物孔隙水磷浓度, mg/L ; m 为沉积物质量, mg ; ω 为沉积物含水率; ρ_w 为水的密度, 10^6 mg/L ; n 为沉积物分层数。

通过公式(1)计算得到不同初始磷浓度条件下平衡时沉积物孔隙水磷含量。不同初始磷浓度条件下平衡时孔隙水磷含量与上覆水磷浓度的关系曲线见图7。考虑到 $C = 0$ 时,平衡时孔隙水磷含量为0,故采用过原点的曲线进行拟合。

由图7可以看出,不同初始磷浓度条件下平衡时孔隙水磷含量与上覆水磷浓度呈幂函数关系,即平衡时孔隙水磷含量随上覆水磷浓度增大而增大,增大速率逐渐减小。这说明上覆水磷浓度越高,扩散到沉积物孔隙水的磷含量越高,其磷含量增幅逐渐减小,沉积物孔隙水磷浓度增幅也逐渐减小。这主要与沉积物的可吸附点位有关,随上覆水磷浓度增高,沉积物的可吸附点位减少,沉积物中吸附的磷含量增幅减小,抑制了磷从上覆水向孔隙水的扩散作用,从而使沉积物孔隙水磷浓度增幅减小^[16,27]。

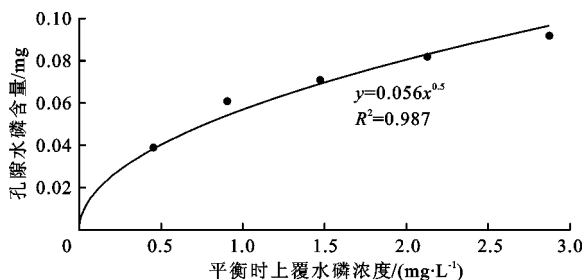


图7 平衡时孔隙水磷含量与上覆水磷浓度的关系曲线

实验结果表明,当 $C = 1 \text{ mg/L}$ 时,平衡时孔隙水磷含量为 0.039 mg ;当 C 提高 5 倍至 5 mg/L 时,平衡时孔隙水磷含量为 0.092 mg ,是 $C = 1 \text{ mg/L}$ 平衡时孔隙水磷含量的 2.36 倍。而当 $C = 1, 5 \text{ mg/L}$ 时,上覆水中磷的去除量分别为 $1.028, 4.071 \text{ mg}$,故得到平衡时孔隙水磷含量仅占上覆水中磷去除量的 $2.26\% \sim 3.80\%$,可见孔隙水中磷含量相对较低,大部分的磷被下层沉积物吸附。

4 结 论

本文通过室内实验,探究了上覆水磷浓度对沉积物孔隙水中磷垂向分布的影响,得出主要结论如下:

(1) 上覆水初始磷浓度越高,沉积物孔隙水中磷垂向分布达到平衡所需的时间越长,SRP 的变化率越低。同一垂向位置孔隙水磷浓度及其浓度梯度随上覆水初始磷浓度增大而增大。

(2) 上覆水初始磷浓度一定时,孔隙水磷浓度及其浓度梯度随深度增加而降低。表层沉积物孔隙水中磷的扩散作用最强,下层沉积物孔隙水磷浓度受上覆水初始磷浓度变化影响较小。

(3) 吸附平衡后,沉积物中孔隙水磷含量和上覆水-沉积物界面孔隙水磷浓度均与上覆水磷浓度呈幂函数关系。平衡时孔隙水磷含量仅占上覆水磷去除量的 $2.26\% \sim 3.80\%$,即大部分磷被沉积物吸附。

参考文献:

- [1] 刘红岩,陈文龙,张大伟,等.富营养化湖塘底泥氮磷吸附—解吸模拟研究[J].广西水利水电,2019,4(6):51-54.
- [2] 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.
- [3] WAN Jun, WANG Ze, LI Zhijie, et al. Critical velocity in phosphorus exchange processes across the sediment-water interface[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(10): 1966-1971.
- [4] 肖洋,成浩科,唐洪武,等.水动力作用对污染物在河流泥沙两相中分配的影响研究进展[J].河海大学学报

(自然科学版),2015,43(5):480-488.

- [5] 乔政皓,刘辉利,王 俊,等.桂林会仙湿地表层沉积物对磷的吸附特征[J].桂林理工大学学报,2020,40(3):587-596.
- [6] 黄文典.河流悬移质对污染物吸附及生物降解影响试验研究[D].成都:四川大学,2005.
- [7] 陈野,李青云,曹慧群.河流泥沙吸附磷的研究现状与展望[J].长江科学院院报,2014,31(5):12-16.
- [8] 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.
- [9] XIAO Yang, ZHU Xiaolian, CHENG Haoke, et al. Characteristics of phosphorus adsorption by sediment mineral matrices with different particle sizes[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3): 262-271.
- [10] 王 蓉,黄天寅,吴 玮.典型城市河道氮、磷自净能力影响因素[J].湖泊科学,2016,28(1):105-113.
- [11] ZHU Hongwei, WANG Daozeng, CHENG Pengda, et al. Effects of sediment physical properties on the phosphorus release in aquatic environment[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2015, 58(2): 1-8.
- [12] 辜 昊.球溪河各水期沉积物磷形态分布及吸附释放特征研究[D].成都:成都理工大学,2019.
- [13] 黄利东,柴如山,宗晓波,等.不同初始磷浓度下湖泊沉积物对磷吸附的动力学特征[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,38(1):81-90.
- [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] 唐敏俐,李青云,曹慧群.长江中下游磷元素垂向分布研究及展望[C]//中国水利学会.中国水利学会 2016 学术年会论文集(上册).南京:河海大学出版社,2016.
- [16] LI Zhiwei, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Factors influencing phosphorus adsorption onto sediment in a dynamic environment[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 10: 1-11.
- [17] 张洪梅,刘 鑫,邓建才,等.太湖沉积物再悬浮对水体中磷形态和浓度时空差异性影响[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2251-2257.
- [18] 汪敬忠,刘 卓,魏 浩,等.白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J].环境科学,2020,41(1):224-231.
- [19] YANG Wanqing, XIAO Han, LI Ye, et al. Vertical distribution and release characteristics of phosphorus forms in the sediments from the river inflow area of Dianchi Lake, China[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2018, 30(1): 14-22.
- [20] 郑足红,陈 刚.春晖湖沉积物中磷形态的垂直分布特征[J].湖北工程学院学报,2019,39(6):42-49.

(下转第 37 页)

- nal of Hydrology, 1983, 63(1-2): 31-49.
- [15] SUDICKY E A. A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: Spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process[J]. Water Resources Research, 1986, 22(13): 2069-2082.
- [16] 张孟丹,余钟波,谷黄河,等. 无定河流域降水量空间插值方法比较研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 30-37+99.
- [17] 束龙仓,许杨,吴佩鹏. 基于 MODFLOW 参数不确定性的地下水水流数值模拟方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1803-1809.
- [18] 冯波,陈明涛,岳冬冬,等. 基于两种插值算法的三维地质建模对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 1200-1208.
- [19] CHRISTOPHER J R, TERRI S H, JOHN E M. Evaluation of groundwater levels in the Arapahoe aquifer using spatiotemporal regression Kriging [J]. Water Resources Research, 2019, 55(4): 2820-2837.
- [20] FEYEN L, CAERS J. Quantifying geological uncertainty for flow and transport modeling in multi-model heterogeneous formations[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(6): 912-929.
- [21] 申升. 基于贝叶斯理论的地下水溶质运移的不确定性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.

(上接第28页)

- [21] 刘霞. 沱江水环境中磷赋存形态及其垂向分布研究[D]. 天津:天津科技大学, 2018.
- [22] 时丹,丁士明,许笛,等. 利用薄膜扩散平衡技术分析沉积物间隙水溶解态反应性磷[J]. 湖泊科学, 2009, 21(6): 768-774.
- [23] DAVISON W, GRIME G W, MORGAN J A W, et al. Distribution of dissolved iron in sediment pore waters at submillimetre resolution[J]. Nature, 1991, 352: 323-325.
- [24] HUANG Jianyin, FRANKLIN H, TEASDALE P R, et al. Comparison of DET, DGT and conventional porewater extractions for determining nutrient profiles and cycling in stream sediments[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2019, 21(12): 2128-2140.
- [25] 胡洁蕴,李淑芹,宋歌,等. 北京市北运河沉积物对氮、磷的吸附/解吸动力学特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(3): 650-659.
- [26] 徐青,刘霞,余晓平,等. 沱江沉积物-水界面磷形态垂向分布及时空变化特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(6): 668-680.
- [27] 李松贵,向速林,张旭,等. 小型浅水湖泊表层沉积物对磷的吸附特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 61-66+73.

