

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.04.009

河湖水沙对磷迁移转化的作用研究进展

赵汗青^{1,2}, 唐洪武^{1,2}, 李志伟^{1,2}, 袁赛瑜^{1,2}, 肖洋^{1,2}, 吉飞¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 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, 南京 210098)

摘要: 泥沙颗粒对水体中的磷具有较好的亲和能力, 河湖中的水沙运动可以改变磷的赋存状态并在一定条件下造成水体富营养化等生态环境问题。综合近年研究成果, 目前关于河湖泥沙对磷的迁移转化作用研究存在研究内容局限、作用机理分歧、数学模型不全面等问题, 且多为宏观层面研究。有必要在实验技术创新的基础上探讨水沙微界面吸附, 并结合生态作用完善复杂条件多因子耦合对泥沙迁移转化磷的理论研究。

关键词: 水沙; 富营养化; 水生态作用; 磷迁移转化

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0643-06

Review of effects of flow and sediment on the transport and transformation of phosphorus in rivers and lakes

ZHAO Hanqing^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, LI Zhiwei^{1,2}, YUAN Saiyu^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, JI Fei¹

(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: Phosphorus has strong affinity to react with sediment particles. The motion of flow and sediment can change the occurrence forms of phosphorus that may cause such environmental problems as eutrophication in rivers and lakes under certain conditions. The recent studies were analyzed, which suggested that there are some limitations in the research contents, controversy of mechanism, and incomplete mathematical models for the transport and transformation of phosphorus in rivers and lakes, and previous studies are mainly on the macroscopic level. Further studies should be focused on the exploration of micro adsorption between water and sediment interface on the basis of experimental technology innovation, and theoretic research of phosphorus transport and transformation on the coupling function of multiple factors under complicated conditions.

Key words: flow and sediment; eutrophication; water ecology function; transport and transformation of phosphorus

我国河流湖泊水污染状况严重, 氮磷浓度严重超标造成的水体富营养化等生态环境问题日趋显著。氮具有来源面广的特点, 污染排放以及生物固氮作用均可导致水体较高氮浓度; 磷则主要来源于人为污染。可见, 控制磷浓度是治理水体富营养化的有效途径^[1]。同时, 磷对泥沙颗粒有很强的亲和性^[2], 进入水体的磷大部分以颗粒态的形式吸附于泥沙表面^[3-4], 并伴随水动力及环境条件变化在水沙两相中发生迁移转化。水体突发污染时, 泥沙通过吸附污染物达到净化水质、缓解污染作用; 降水径流作用稀释污染时, 泥沙则将释放污染物并造成水体“二次污染”^[5]。研究水沙特性对磷迁移转化过程的影响, 对于水体富营养化的防护与河流水环境的治理具有重要意义^[6]。本文总结河湖磷的赋存状态, 从泥

沙颗粒特性、水质特性以及水沙运动三个角度概述磷迁移转化的水沙条件, 并对数学预测模型的发展前景进行展望。

1 河湖水体中磷在水沙两相的赋存状态

可溶态与颗粒态是磷的两种常见天然状态。可溶态磷通常以溶解物的形式存在于上覆水、孔隙水以及少量的地下水中, 包括可溶活性态磷以及少量的可溶非活性态磷^[7]。可溶活性态磷指能够与钼酸盐发生反应的溶解态磷, 主要包括正磷酸盐、部分缩合磷酸盐以及少量在酸性条件下不稳定的有机磷^[8], 是生物活性磷的主要来源。颗粒态磷以矿物相或结合泥沙表面微生物的方式存在于粒径大于 0.45 μm 颗粒上^[8], 是河湖系统磷的主要存在形态。少数颗粒态磷在一定

收稿日期: 2014-11-13 修回日期: 2015-06-19 网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.1241.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51239003; 51125034); 国家自然科学基金面上项目(51179055); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51409085)

作者简介: 赵汗青(1991-), 男, 安徽滁州人, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: zhaohq@126.com

通讯作者: 唐洪武(1966-), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事河流动力学方面研究。E-mail: hwtang@hhu.edu.cn

条件下通过生化作用能够转化为藻类可以直接利用的可溶态磷^[9]。

许多学者依据化学存在形态以及来源将沉积物中的磷分为^[8-11]:弱吸附态磷/可交换态磷(Ex-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、有机磷(Org-P)、钙结合态磷(Ca-P)、铝结合态磷(Al-P)以及铁结合态磷(Fe-P)等。其中,Ex-P与小颗粒泥沙表面的氧化物、氢氧化物以及粘土矿物作用形成对外部环境变化具有灵敏反应能力的复杂不稳定结构^[12];Oc-P主要指氧化铁包裹具有较稳定结构的还原性磷酸铁以及磷酸铝,来源于成岩过程中的含磷矿物;Org-P为农业生产以及水生生物代谢产物,通过矿化作用进入水体并被生物吸收^[8];Ca-P为岩石风化以及生物沉积作用产生的颗粒态磷,包括碎屑磷以及自生钙磷两种,难以被生物利用;Al-P、Fe-P来源于工业生产以及生活污水并通过径流作用进入水网,对应含量高低能有效表征水体富营养化程度。已有的研究成果表明,重度污染条件下泥沙中Al-P含量高于Ca-P含量;中度污染条件下,情况则相反^[13-14]。

2 影响污染物迁移转化的水沙条件

水沙运动导致污染物的对流扩散以及赋存形态的变化,从而影响污染物的迁移转化过程。泥沙颗粒通过持续吸附/解吸污染物来对外界及自身条件的变化发生响应,最终影响污染物的时空分布特征。泥沙对污染物吸附是通过发生在固-液界面复杂的物理化学及生物作用产生的^[15],其实质是污染物在水、沙两相间的分配过程。影响污染物迁移转化的水沙条件主要包括泥沙颗粒特性、水质特性以及水沙运动等。

2.1 泥沙颗粒特性对水沙两相间污染物转化作用的影响

泥沙颗粒的物理特性以及化学特性均对污染物的吸附作用产生影响。物理特性包括泥沙的表面特性(比表面积、表面微形貌)、粒径等表征泥沙物理性状的参数。泥沙比表面积不但决定物理吸附强弱^[16],也通过影响活性成分含量而对化学吸附作用产生一定影响^[17]。方红卫等^[18]对比吸附前后泥沙形貌,发现各污染物对应分布在泥沙表面不同位置,磷元素主要集中在泥沙颗粒表面的鞍部、凹地和凸起部位。粒径与比表面积之间存在一定的负指数关系,不同粒径泥沙之间的吸附性能也存在差异。金相灿等^[19]比较四种粒径范围内泥沙吸附磷实验,发现细颗粒泥沙的吸附能力、吸附速度均比粗颗粒大。非均匀沙中细颗粒含量越高对应磷酸盐的吸附量也相对越大^[20]。各学者对粒径影响吸附的原因进行分析:禹雪中等^[17]认为细沙活性成分含量较高,对污染物的吸附能力较强;申禹等^[21]则基于生物膜吸附污染物理论,认为细沙表面生物膜作用对磷的吸附影响较粗沙作用大。不同粒径泥沙对应不同的污染物吸附能力。然而,现阶段研究表明,混合沙样对污染物吸附过程中不同粒径泥沙之间不存在对污染物的竞争吸附作用:黄岁樑^[22-23]指出不同粒径泥沙在重金属吸附过程中互不影响;House等^[24]假设非均匀沙之间无竞争吸附作用并建立混合沙吸附磷公式。目前,非均匀沙吸附磷的实验研究较少,不同级配对磷的迁移转化是否存在竞争及其竞争机制和规律都有待明确。

化学特性参数包括泥沙矿物组成与有机质含量等。矿物组成影响泥沙吸附的机制包括以下几种^[25]:(1)铁锰对磷的吸附沉淀作用;(2)镁、铁、钙、铝等形成的络合物与磷酸根的结合作用;(3)磷与碳酸盐的结合作用。House等^[26]认为无机磷会与碳酸钙通过晶格作用发生协同沉降。Lopez等^[27]证实泥沙对磷的吸附能力与其中钙、铁、铝等元素的含量相关性,王振华等^[28]进一步证实泥沙对磷的吸附速度及吸附量与无定形铁铝氧化物含量呈显著的正相关性。有机质通过与金属水合氧化物的化学作用以及粘附架桥作用聚集在泥沙颗粒表面^[29],对泥沙颗粒表面微观形貌以及微生物的代谢作用产生影响,而且有机质矿化过程对氧化还原电位以及pH等均会产生影响。张斌亮等^[30]以及刘敏等^[31]分别研究淡水湖泊与河口区域表层沉积物对磷的吸附,发现泥沙饱和吸附量与颗粒有机质含量之间存在一定的正相关性。

2.2 水质特性对水沙两相间污染物转化作用的影响

水质特性因素包括:pH值、温度、盐度、溶解氧、污染物浓度以及泥沙浓度等。pH改变水体磷的存在形态以及泥沙颗粒表面理化性质^[32],具体表现为:低pH时泥沙颗粒表现为正电性,高pH时表现为负电性^[33]。王晓蓉等^[34]发现太湖沉积物对磷的释放量与pH变化之间呈“U”形关系,pH处于4~8时对应沉积物最小解吸量,与黄敏的结论一致^[35]。刘敏等^[31]则认为在pH处于7~8时长江河口泥沙对磷的吸附量较小。郭长城等^[36]提出由强酸向强碱环境变化时,泥沙对污染物由吸附向解吸过程转变。有分析认为^[36],不同含钙量的实验材料导致了pH对吸附的影响表现出不同的变化规律。温度升高改变了泥沙表面电荷、磷的形态以及泥沙对磷的物理吸附强度^[25],并影响微生物对磷酸盐的矿化作用。王晓蓉等^[34]发现40℃条件下湖泊沉积物释放磷的量大于10℃条件。Wildung等^[37]发现沉积物在10℃释放磷的量只占23℃释放量的70%。盐度对吸附的影响具有双面性:增大盐度导致溶液中离子作用强度变大,促进对磷的吸附;伴随增加的阴离子在泥沙表面发生与磷酸根离子的竞争吸附作用,反而降低吸附作用。盐度为6左右对应泥沙的最大吸附量^[38]。

不同学者对比了pH、温度、盐度对水沙之间污染物转化强度的影响。李敏等^[20]认为温度对河口泥沙吸附动力学过程以及平衡吸附量的影响并不显著,对应作用强度为:pH大于温度、盐度。高丽等^[38]总结了影响湿地泥沙吸附磷的因素,认为温度、盐度大于pH。上述实验结果存在差别,可能是由于不同区域泥沙的理化性质不同所致,因为湿地泥沙粒径大、有机质含量高、微生物作用显著,温度、盐度影响明显;河口区泥沙有机质含量相对较低,受pH变化影响显著的钙盐吸附成为泥沙吸附磷的主要作用^[36,39]。

相对于上述三种因素,关于溶解氧、污染物浓度以及泥沙浓度影响的研究基本达到共识。溶解氧通过改变泥沙矿物组成以及泥沙表面生化过程来影响污染物的吸附。张丽萍等^[40]发现厌氧条件能够促进颗粒态磷向可溶态磷的转化。王晓蓉等^[34]证实厌氧条件下底泥对磷的最大释放量高于好氧条件,并使得Org-P向无机磷转化。这与其他学者^[8-9]的结论存在一定程度的相似性。磷浓度增大导致水沙

界面浓度梯度增加,含沙量增大导致泥沙表面活性吸附位点的增加,并最终引起显著的污染物吸附现象。黄文典^[5]在吸附总量随含沙量增大而增大的基础上,指出吸附过程中存在“泥沙吸附效应”,即单位泥沙吸附量随含沙量增大而减小;徐明德等^[1]进一步揭示了单位泥沙吸附量与含沙量之间呈现指数下降的关系。

2.3 水沙运动对污染物迁移转化的影响

水流可促进水相磷的迁移扩散并影响不同形态磷之间的转化。表征水流作用强度的因素有流速和紊动强度,流速的增大可以促进溶解态磷的扩散^[41]。朱红伟等^[42]认为流速增加降低了水沉积物界面边界层厚度并促进磷的释放。House等^[43]通过床沙吸附磷实验证明了流速与边界层厚度之间的反比关系。然而,Barlow等^[44]基于8组实验数据的协方差分析结果,认为流速对污染物吸附没有显著影响。唐洪武等人^[45]认为实验过程中不同的水流条件(流量)可造成不同结论:低流速条件下,边界层作用控制污染物在水沙两相间分配;随着流量增大,水流紊动取代边界层在污染物吸附过程中的主导作用。紊动作用既直接影响泥沙对污染物的吸附作用,又通过改变泥沙运动状态、污染物扩散规律以及孔隙水与上覆水的交换对磷的迁移转化进行间接影响。赵文谦^[46]等通过实验证明紊动作用是表层污染物向下扩散的主要动力。夏波等^[47]证明紊动能够促进孔隙水与上覆水之间磷的交换。黄廷林等^[48]证实紊动作用能够促进河流底部沉积物对污染物的释放。周孝德等^[49]基于水流携沙力公式,建立了污染物释放浓度与水流雷诺数之间的指数关系式。

泥沙运动携带颗粒态磷进行空间迁移,加大与上覆水中溶解磷相互转化的机会。根据相对粗细及来源不同,可以把泥沙可分为床沙质与冲泻质^[50]。冲泻质以悬沙形式存在于河流中,并在一定水流条件下与床沙进行交换。悬沙吸附污染物协同沉降能够净化水质^[51],而床沙再悬浮将释放磷元素,从而造成水体污染^[41],且水体磷的增加速度与再悬浮强度之间存在一定的正相关性^[52]。郑西来等^[53]将造成底泥再悬浮的因素分为水动力扰动、生物扰动以及人为扰动,其中水动力扰动是再悬浮的主要驱动力。Reddy等^[54]与Sndergaard等^[55]分别通过现场以及室内实验,指出再悬浮过程向上覆水释放营养盐强度是扩散作用的数十倍。Wan等^[56]则具体描述了再悬浮导致磷在水沙间的重新分配过程:泥沙再悬浮导致吸附态磷向可溶态磷的转化,水体污染物浓度持续增加并达到峰值;同时,水体磷浓度增加导致床沙对污染物的进一步吸附作用,发生可溶态磷向吸附态的转化。两种形态磷通过相互转化,使得污染物在水沙之间达到新的动态分配平衡。

3 水沙迁移转化污染物的数学模型

污染物迁移转化模型的发展经历三个阶段,即传统的泥沙吸附模型、结合水力学和泥沙运动理论的污染物迁移转化模型,以及研究水沙微界面吸附的格子 Boltamann 模型。

传统的泥沙吸附模型如 Henry、Langmuir 及 Freundlich 模型等源于固体吸附气体理论^[57],并经证明适用于描述泥沙吸附污染物过程。Lopez 等^[21]发现 Langmuir 模型能够较

好地拟合泥沙的平衡吸附量。李敏等^[58]认为 Langmuir 模型适宜描述细泥沙对磷的吸附,粗沙吸附模型则倾向于指数形式。黄文典^[5]基于悬沙吸附磷实验,认为 Langmuir 模型以及 Freundlich 模型均能较好描述泥沙的平衡吸附关系。通过对传统吸附模型进行数学推导,人们还建立了诸如混合吸附模型^[24]、分相模型^[59]等用于复杂情况的污染物吸附模式。

污染物的迁移转化模型是在泥沙吸附模型的基础上,综合水沙运动理论以及水动力、水质条件变化引起污染物在水沙两相的分配而建立的。常用的迁移转化模型包括:单相模型、分相模型、混合模型三种^[60]。单相模型假设泥沙吸附污染物含量与水相可溶态磷之间满足经典的吸附方程,并针对水相可溶态污染物浓度的变化建立相应的时空分布关系式^[61]。分相模型^[62]结合泥沙的冲淤以及污染物、泥沙的质量守恒,分别描述溶解态与颗粒态污染物的迁移。混合模型^[63]将水相可溶态与颗粒态磷作为整体,通过适当简化研究水相磷浓度的变化过程。传统的污染物迁移转化模型仅考虑床面以上污染物含量的时空变化,对沉积物表层以下一定范围内地下水、孔隙水污染物的变化并未进行分析,研究具有明显的局限性。Kynghyun Kim^[64]以及李剑超^[65]提出的整体模型基于泥沙运动力学相关理论,并结合各因素对磷浓度变化的影响,具有理论性强、考虑全面的优点。

微观吸附是研究泥沙宏观迁移转化污染物的基础,对于从根本上分析相关影响因素以及作用机理具有重要意义。然而,现阶段的微观研究理论往往依据宏观吸附现象并结合相关的数学统计方法进行推导得出,直接面向微界面的吸附研究不充分。利用格子 Boltamann 方法模拟不同污染物在水沙界面分配可能是未来研究微界面吸附的新方法。格子 Boltzmann 方法(Lattice Boltzmann Method,简称 LBM)同时具有微观本质与介观特点,能够从微观角度模拟颗粒物的运动,在研究界面动力学和复杂边界下的流动特性时具有独特优势^[66]。近年来,利用 LBM 模拟颗粒的沉降悬浮以及颗粒之间相互作用等方面已经取得了一定的成果。Nguyen 和 Ladd^[67]引入润滑(Lubrication)理论,成功地模拟了相互接触颗粒的沉降;吴锤结等^[68]结合固体颗粒的牛顿力学研究二维不规则形状悬浮颗粒的运动;张金凤等^[69]从微观角度模拟了不同密度絮团和单颗粒静水沉降过程,并进一步研究絮团和颗粒相对运动轨迹和碰撞效率^[70]。通过耦合水动力学方程与泥沙输运方程,利用多孔介质模型以及不规则颗粒物的沉降悬浮分别研究磷在床沙与悬沙界面的交换、分配、迁移等微观动力学过程可能是泥沙输移污染物研究的一种新思路。

4 展望

目前,围绕磷在水沙之间的赋存状态以及不同因素对各形态磷之间相互转化的影响,已经开展了大量研究,并建立了系统的泥沙迁移转化磷的数学模型。但是,受到研究方法限制以及问题复杂性的影响,机理研究不透彻、结论存在较多分歧、部分影响因素没有引起重视、模型建立不全面等问题有待进一步系统深入研究。笔者认为以下几个方面可能是今后研究的重点。

(1) 不同矿物组成对泥沙吸附磷的影响。围绕矿物质对

泥沙吸附/解吸污染物之间存在一定的定性研究,如何量化不同矿物质对吸附的影响以及相应机理,将是一个重要的方向。

(2) 依据粒径组成判断河流泥沙的环境效应。通过分析河流泥沙的粒径级配判断其对污染物作用强度,并对不同河流的泥沙环境效应进行评价与预测。

(3) 结合生物学原理研究磷的垂向分布。揭示泥沙浓度、水温、光照强度、溶氧量以及有机物含量等生物生长因子导致磷在水深方向的非均匀分布,关系到水体磷的运输、分配、分解和转化等过程。

(4) 河口区域磷的分布。包括:淡盐水交互作用对磷分布的影响,河流入海过程流场剧烈变化的影响,涨落潮过程中流向变化的影响。

(5) 复杂边界下泥沙对污染物的作用。目前的研究多围绕顺直平整河道条件下简单的一维水沙运动展开,很少结合天然河流复杂平面形态(游荡、分叉、弯曲河道)以及起伏床面形貌(浅滩、深槽、植物覆盖等)对泥沙迁移转化磷的影响进行研究。

(6) 悬沙、床沙共存体系对磷的吸附。包括:悬沙、床沙对磷的吸附机理;流速、紊动对吸附的影响;污染物在悬沙与床沙之间的分配。

(7) 水沙微界面吸附污染物机理。根据吸附总量建立的水沙界面宏观吸附理论过于笼统,有必要从微观尺度分析吸附解吸的不同步性以及泥沙表面生物膜作用等对动态吸附以及污染物迁移转化的影响,探索微界面吸附机理并建立统一的污染物吸附规律。

参考文献(References):

- [1] 徐明德, 韦鹤平, 李敏, 等. 长江口泥沙与沉积物对磷酸盐的吸附和解吸研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(1): 48-50, 54. (XU Ming-de, WEI He-ping, LI Ming, et al. A study on the sorption and desorption of phosphate by sediments in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(1): 48-50, 54. (in Chinese))
- [2] Adhityan A, Wang H. Sorption isotherms and kinetics of sediment phosphorus in a tropical reservoir[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, 126(11): 993-998.
- [3] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866. (QIN Bo-qiang, YANG Liu-yan, CHEN Fei-zhou, et al. mechanisms and control technique of lake eutrophication and application[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866. (in Chinese))
- [4] Withers P J A, Jarvie H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1-3): 379-395.
- [5] 黄文典. 河流悬浮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. (HUANG Wen-dian. Experimental study on the influence of suspended sediment on pollutant sorption and the biodegradation in rivers[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005 (in Chinese))
- [6] 黄岁梁, WAI O W H. 水环境污染物质迁移转化研究与泥沙运动[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 205-211. (HUANG Sui-liang, WAI O W H. Pollutant transport transformation in aquatic environment and sediment motion[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(3): 205-211. (in Chinese))
- [7] Evas D J, Johns P J. Physical chemical controls on phosphorus cycling in two lowland streams Part I: the water column[J]. Science of the Total Environment, 2004, 329: 145-163.
- [8] 吴怡, 邓天龙, 徐青, 等. 水环境中磷的赋存形态及其分析方法研究进展[J]. 岩矿测试, 2010, 29(5): 557-564. (WU Yi, DENG Tian-long, XU Qing, et al. Research progress on speciation analysis of phosphorus in aquatic environment[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(5): 557-564. (in Chinese))
- [9] 郑爱榕, 沈海维, 李文权, 等. 沉积物中磷的存在形态及其生物可利用性研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 49-57. (ZHEN Ai-rong, SHEN Hai-wei, LI Wen-quan. Study of chemical forms of phosphorus and their bioavailability[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 49-57. (in Chinese))
- [10] 周帆琦, 沙茜, 张维昊, 等. 武汉东湖和南湖沉积物中磷形态分布特征与相关分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 401-409. (ZHOU Fan-qi, SHA Qian, ZHANG Wei-hao, et al. Distribution and correlation analysis of phosphorus fractions in the sediments from the Lake Nanhu and Lake Donghu in Wuhan[J]. Journal of Lake Science, 2014, 26(3): 401-409. (in Chinese))
- [11] Zhang B, Fang F, Guo J S, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption release characteristics relevant to the soil composition of water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 153-159.
- [12] 李军, 刘丛强, 王仕禄, 等. 太湖五里湖表层沉积物中不同形态磷的分布特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(4): 405-410. (LI Jun, LIU Cong-qiang, WANG Shi-lu, et al. Distribution characteristics of different forms of phosphorus in surficial sediments from Wuli, Taihu Lake, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(4): 405-410. (in Chinese))
- [13] Lijklema L, Koelmans A, Portielje R. Water quality impacts of sediment pollution and the role of early diagnosis[J]. Water Science & Technology, 1993, 28(7): 1-12
- [14] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediment: Lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. Chemosphere, 2002, 46(6): 1147-1155.
- [15] 黄敏, 周富春. 泥沙对营养物质吸附与释放研究进展分析[J]. 水科学与工程技术, 2008(5): 49-52. (HUANG Min, ZHOU Fu-chun. Analysis on releasing and adsorption to the nutrients by sediment[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008(5): 49-52. (in Chinese))
- [16] 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 Dong-po, 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))
- [17] 禹雪中, 廖文根, 吕平毓. 三峡库区泥沙对主要污染物作用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (YU Xue-zhong, LIAO Wen-geng, LYU Ping-yu. Investigation of pollutants reactions to sediments from the Three Gorges Reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [18] 方红卫, 陈明洪, 陈志和. 环境泥沙的表面特性与模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (FANG Hong-wei, CHEN Ming-hong,

- Chen Zhi he. The surface characteristics and the model of environmental sediment [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [19] 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 五里湖和贡湖不同粒径沉积物吸附磷实验研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 6-10. (JIN Xiang can, WANG Sheng rui, ZHAO Hai chao, et al. Study on the phosphate sorption of different particle size fractions in the sediments from Wuli Lake and Gonghu Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(Sup): 6-10. (in Chinese))
- [20] 李敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 长江口、杭州湾水域沉积物对磷吸附行为的研究[J]. 海洋学报(中文版), 2004, 26(1): 132-136. (LI Min, WEI He ping, WANG Guang qian, et al. Study on adsorption behavior of phosphate by sediments from the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(1): 132-136. (in Chinese))
- [21] 申禹, 李玲. 附着生物膜的泥沙颗粒对磷的吸附特性研究[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 495-499. (SHEN Yu, LI Ling. Study on phosphorus adsorption to the sand attached with surface coatings[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 495-499. (in Chinese))
- [22] 黄岁梁. 泥沙解吸重金属污染物动力学模式研究[J]. 地理学报, 1995, 50(6): 497-505. (HUANG Sui liang. A study on heavy metal pollutant desorption by sediment with different grain sizes[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(6): 497-505. (in Chinese))
- [23] 黄岁梁. 泥沙运动在重金属污染物迁移转化中的作用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1993. (HUANG Sui liang. Study on the effect of sediment motion on transport transformation of heavy metal pollutants[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1993. (in Chinese))
- [24] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments[J]. Water Research, 2000, 34(4): 1187-1200.
- [25] 刘花. 东昌湖沉积物有机质对磷吸附解吸行为的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. (LIU Hua. The research of the effect of the organic matter in sediments of Dongchang Lake on phosphorus adsorption and desorption behavior[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese))
- [26] House W A, Denison F H, Armitage P D. Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed sediment[J]. Water Research, 1995, 29(3): 767-779.
- [27] Lopez P, Luch X, Vidal M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic Islands (Spain) related to their composition[J]. Coastal and Shelf Science, 1996, 42: 185-196.
- [28] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附解吸动力学特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 154-160. (WANG Zhen hua, ZHU Bo, HE Min, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple soils[J]. Journal of Agro Environment Science, 2011, 30(1): 154-160. (in Chinese))
- [29] 陈明洪, 方红卫, 陈志和. 泥沙颗粒表面磷吸附分布的实验研究[J]. 泥沙研究, 2009(4): 51-57. (CHEN Ming hong, FANG Hong wei, CHEN Zhi he. Experiment of phosphorus distribution on sediment surface[J]. Journal of Sediment Research, 2009(4): 51-57. (in Chinese))
- [30] 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 Bin liang, ZHANG Yu, YANG Min, et al. Characteristics of phosphorus sorption on surface sediments in three shallow lakes in the Yangtze River Basin[J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2004, 24(4): 595-600. (in Chinese))
- [31] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 397-406. (LIU Min, HOU Li jun, XU Shi yuan, et al. Phosphorus adsorption characteristics of tidal flat surface sediments and its environmental effect from the Yangtze Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(4): 397-406. (in Chinese))
- [32] 崔双超, 丁爱中, 潘成忠, 等. 泥沙质量浓度和 pH 对不同粒径泥沙吸附磷影响研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(5): 582-586. (CUI Shuang chao, DING Ai zhong, PAN Cheng zhou, et al. Effect of sediment mass concentration and pH on phosphorus adsorption at different sediment size[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2012, 48(5): 582-586. (in Chinese))
- [33] 王家生. 河流泥沙运动物理化学过程初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (WANG Jia sheng. The study of physicochemical process of sediment movement in river[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [34] 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 Xiao rong, HU A Zhao zhe, 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))
- [35] 黄敏. 泥沙对总磷的吸附与释放研究及总磷含量预测[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009. (HUANG Min. Study on sediments adsorbing and releasing phosphorus and phosphorus prediction[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [36] 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 Chang cheng, WANG Guo xiang, YU Guo hua. Study on adsorption of phosphorus in eutrophied water body by natural sediment[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(9): 10-13. (in Chinese))
- [37] Wilung R E, Schmidt R L. Phosphorus Release From Lake Sediments[Z]. National Environmental Research Center, 1973.
- [38] 高丽, 史衍玺, 孙卫明, 等. 荣成天鹅湖湿地沉积物对磷的吸附特征及影响因子分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 162-166, 204. (GAO Li, SHI Yan xi, SUN Wei ming, et al. Phosphorus adsorption characteristics of sediment and its influencing factors in Rongcheng Swan Lake wetland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 162-166. (in Chinese))
- [39] 赵宏宾, 刘莲生, 张正斌. 海水中碳酸盐在固体粒子上阴离子交换作用——海水中磷酸盐-固体粒子相互作用的 V 形交换律-pH 曲线[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(3): 294-302. (ZHAO Hong bin, LIU Lian sheng, ZHANG Zheng bin. Anion ex-

- change of phosphate on solid particles in seawater—V-shaped E%-pH curves of phosphate exchange on solid particles in seawater[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28(3): 294-302. (in Chinese).
- [40] 张丽萍, 袁文权, 张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(2): 22-26. (ZHANG Liping, YUAN Wenquan, ZHANG Xihui. Kinetics of pollutants release from sediments[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2): 22-26. (in Chinese)).
- [41] 李一平, 逢勇, 陈克森, 等. 水动力作用下太湖底泥起动规律研究[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 Taihu lake[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(6): 770-774. (in Chinese)).
- [42] 朱红伟, 张坤, 钟宝昌, 等. 泥沙颗粒和孔隙水在底泥再悬浮污染物释放中的作用[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2011, 26(5): 631-641. (ZHU Hongwei, ZHANG Kun, ZHONG Baochang, et al. Effects of particles and pore water in release of pollutants due to sediment resuspension[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics (A)*, 2011, 26(5): 631-641. (in Chinese)).
- [43] House W A, Denison F H, Smith J, et al. An investigation of the effects of water velocity on inorganic phosphorus influx to sediment[J]. *Environmental Pollution*, 1995, 89(3): 263-271.
- [44] Barlow K, Nash D, Grayson R. Investigation phosphorus interaction with bed sediments in a fluvial environment using a recirculating flume and intact soil cores. *Water Research*, 2004, 38: 3420-3430.
- [45] 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: 139-147. (in Chinese)).
- [46] 赵文谦, 黄勤生, 罗麟, 等. 含油废水向水下扩散的实验研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 1995, 10(6): 679-684. (ZHAO Wenqian, HUANG Qingsheng, LUO Lin, et al. Experimental study on diffusion of oiled wastewater under water surface[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics (A)*, 1995, 10(6): 679-684. (in Chinese)).
- [47] 夏波, 张庆河, 蒋昌波, 等. 水体紊动作用下湖泊泥沙解吸释放磷的实验研究[J]. *泥沙研究*, 2014(1): 74-80. (XIA Bo, ZHANG Qinghe, JIANG Changbo, et al. Experiment investigation of effect of flow turbulence on phosphorus release from lake sediment[J]. *Sediment Research*, 2014(1): 74-80. (in Chinese)).
- [48] 黄廷林, 周孝德, 沈晋. 渭河沉积物中重金属释放的动态实验研究[J]. *水利学报*, 1994, 11: 52-58. (HUANG Tinglin, ZHOU Xiaode, SHEN Jin. Study on heavy metal desorption of sediment in Weihe river[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 11: 52-58. (in Chinese)).
- [49] 周孝德, 黄廷林, 唐允吉. 河流底流中重金属释放的水流紊动效应[J]. *水利学报*, 1994, 11: 22-25, 30. (ZHOU Xiaode, HUANG Tinglin, TANG Yujiji. The turbulence effect of flows on heavy metal desorption in lake sediment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 11: 22-25, 30. (in Chinese)).
- [50] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (QIAN Ning, WAN Zhaohui. *Sediment transport mechanisms* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)).
- [51] 郭长城, 喻国华, 王国祥. 河流泥沙对污染河水中污染物的吸附特性研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1151-1155. (GUO Changcheng, YU Guohua, WANG Guoxiang. Adsorption properties of sediment to pollutants of contaminated river water[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6): 1151-1155. (in Chinese)).
- [52] 王鹏, 王胜艳, 郝少盼, 等. 模拟扰动条件下太湖沉积物的再悬浮特征[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 399-404. (WANG Peng, WANG Shengyan, HAO Shaopan, et al. Characteristics of sediment resuspension in Taihu lake under simulative disturbing conditions[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 399-404. (in Chinese)).
- [53] 郑西来, 张俊杰, 陈蕾. 再悬浮条件下沉积物内源磷迁移转化机制研究进展[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 287-295. (ZHENG Xilai, ZHANG Jurjie, CHEN Lei. Advances in the study of migration and transformation mechanisms of endogenous phosphorus via sediment resuspension[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 287-295. (in Chinese)).
- [54] Reddy K R, Fisher M M, Ivaoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(2): 363-371.
- [55] Sondergaard Martin, Kristensen Peter, Jeppesen Erik. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind exposed Lake Arreso, Denmark [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228: 91-99.
- [56] Wan J, Wang Z, Yuan H Z. Characteristics of phosphorus fractionated from the sediment resuspension in abrupt expansion flow experiments [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(10): 1519-1526.
- [57] 禹雪中, 钟德钰, 李锦绣, 等. 水环境中泥沙作用研究进展及分析[J]. *泥沙研究*, 2004(6): 75-81. (YU Xuezhong, ZHONG Deyu, LI Jirxiu, et al. Review of studies on sediment in water environment[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(6): 75-81. (in Chinese)).
- [58] 李敏, 王光谦, 倪晋仁, 等. 长江口沉积物对磷酸盐吸附的等温模型[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(9): 1206-1208, 1212. (LI Min, WANG Guangqian, NI Jinren, et al. Adsorption isotherm model of phosphate by suspended sediments from Changjiang Estuary[J]. *Journal of Tsinghua University: Sci & Tech*, 2005, 45(9): 1206-1208, 1212. (in Chinese)).
- [59] 方红卫, 陈明洪, 陈志和. 泥沙颗粒污染前后表面孔隙力学特征分析研究[J]. *中国科学 G 辑*, 2008, 38(6): 714-720. (FANG Hongwei, CHEN Minghong, CHEN Zhihe. Research on mechanical characteristics of surface porosities of polluted sediment particles[J]. *Science in China (Series G)*, 2008, 38(6): 714-720. (in Chinese)).
- [60] 钟德钰, 禹雪中, 丁赞. 挟沙水流中石油类污染物输移转化的数值模拟[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 24-29. (ZHONG Deyu, YU Xuezhong, DING Yun. Simulation of petroleum hydrocarbons transported by sediment flows[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 24-29. (in Chinese)).
- [61] 黄廷林, 任磊. 多沙河流中石油类污染物迁移的一维数学模型(0-解吸模型)[J]. *水利学报*, 2004(10): 125-128. (HUANG

- Ting lin, REN Lei. One dimension mathematical model for oil pollution transport in silt laden stream(II): Desorption model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(10): 125-128. (in Chinese)
- [62] 禹雪中, 杨志峰, 钟德钰, 等. 河流泥沙与污染物相互作用数学模型[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 10-15. (YU Xuezhong, YANG Zhifeng, ZHONG Deyu, et al. Numerical model for interaction between sediment and pollutant in river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 10-15. (in Chinese))
- [63] 何用, 李义天, 郜会彩, 等. 泥沙污染水质模型研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 12-17. (HE Yong, LI Yitian, GAO Huicai, et al. Research on sediment pollution water quality model[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Sciences, 2004, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [64] Kyungyun K. Modeling phosphorus transport in a river under unsteady flow conditions[D]. Champaign Urbana: University of Illinois at Urbair Champaign graduate College, 2005.
- [65] 李剑超. 河湖底泥有机污染物迁移转化规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2002. (LI Jianchao. Study on organic contaminant transport and transform in bottom sediment of water system [D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [66] Chen H, Kandasamy S, Orszag S, et al. Extended Boltzmann kinetic equation for turbulent flows [J]. Science, 2003, 301(5633): 633-636.
- [67] Nguyen N Q, Ladd A J C. Lubrication corrections for lattice Boltzmann simulations of particle suspensions [J]. Physical Review E, 2002, 66(4): 046708.
- [68] 吴锤结, 周菊光. 悬浮颗粒运动的格子 Boltzmann 数值模拟[J]. 力学学报, 2004, 36(2): 151-162. (WU Chuijie, ZHOU Jirguang. Numerical simulations of suspended motion of irregular shaped particles via the lattice Boltzmann method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(2): 151-162. (in Chinese))
- [69] 张金凤, 张庆河. 黏性泥沙不等速沉降絮凝的格子 Boltzmann 模拟[J]. 水利学报, 2009(4): 385-390. (ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe. Lattice Boltzmann simulation for flocculation of cohesive sediment due to differential settling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009(4): 385-390. (in Chinese))
- [70] 张金凤, 张庆河. 絮团与颗粒不等速沉降碰撞研究[J]. 泥沙研究, 2012(1): 32-36. (ZHANG Jinfeng, ZHANG Qinghe. Study of particle cluster aggregation in differential settling[J]. Journal of Sediment Research, 2012(1): 32-36. (in Chinese))
- [11] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1-10. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 1-10. (in Chinese))
- [12] 严明疆, 王金哲, 李德龙, 等. 年降水量变化条件下农灌引水与开采对地下水位影响[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 27-30. (YAN Mingjiang, WANG Jizhe, LI Delong, et al. Impact of diversion water and pumpage for agriculture influenced by precipitation on groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 27-30. (in Chinese))
- [13] 刘中培, 张光辉, 严明疆, 等. 石家庄平原区粮食施肥增产对地下水开采量演变影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 111-115. (LIU Zhongpei, ZHANG Guanghui, YAN Mingjiang, et al. Impact of fertilization and high grain production on groundwater exploitation in Shijiazhuang Plain[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2012, 20(1): 111-115. (in Chinese))
- [14] TIMOTHY R. G, MAKOTO T, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405: 532-560.
- [15] WANG Lifu, YUE Lirui, TANG Zerun, et al. Influence of Climate Change and Agricultural Development on Groundwater level in Shiyang River Basin[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 121-128. (in Chinese)
- [16] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12. (LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6-12. (in Chinese))
- [17] 李新波, 孙宏勇, 张喜英, 等. 太行山山前平原区蒸散量与作物灌溉需水量的分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 26-30. (LI Xinbo, SUN Hongyong, ZHANG Xiying, et al. Analysis of irrigation demands and evapotranspiration in piedmont of Taihang Mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 26-30 (in Chinese))

(上接第 625 页)