

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.013

水动力作用对污染物在河流水沙两相中分配的影响研究进展

肖 洋^{1,2}, 成浩科^{1,2}, 唐洪武^{1,2}, 李志伟^{1,2}

(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. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过总结近年来有关水动力作用对河流中泥沙吸附/释放重金属、磷等污染物影响研究成果, 分析了水流紊动强度和流速对污染物在河流水沙两相中分配的影响规律。当水流紊动强度较低时, 泥沙主要以床沙形式存在, 泥沙对污染物的吸附/释放速率和强度较低; 随着紊动强度增大, 水沙界面切应力随之增大并促使泥沙悬浮, 污染物与悬浮泥沙颗粒接触面积增大, 使得泥沙对污染物的吸附/释放速率和强度显著增加。流速对污染物在水沙两相间分配的影响较为复杂。泥沙静止时, 流速的增大会减小边界层厚度, 增大水体溶解氧含量、氧化还原电位等参数, 并使污染物在水体里的扩散由分子扩散转变为以紊动扩散为主, 增强污染物在水-沙界面的交换通量, 对污染物在水沙两相间的分配产生影响; 随着流速进一步增大, 床沙逐渐起动、悬浮, 此时除上述因素外, 泥沙运动状态、悬浮颗粒间碰撞强度、悬浮物的絮凝等均会对泥沙吸附/释放污染物产生影响, 由于影响因素较多, 作用机制复杂, 目前关于泥沙运动对污染物在水沙两相间分配的影响所得结论仍存在分歧。相应的机理研究及数学模型的建立均做了较大简化。综观当前的研究成果, 水沙运动及其化学生物过程等对污染物在河流水沙两相中的分配作用机理和耗氧有机物、有毒有机物等污染物与泥沙的作用机理是这一领域的未来研究重点。

关键词: 水动力作用; 水流紊动强度; 流速; 泥沙运动; 污染物迁移转化

中图分类号: X522; G353.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)05-0480-09

Review of influence of hydrodynamic action on distribution of pollutants in water and sediment in river

XIAO Yang^{1,2}, CHENG Haoke^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, LI Zhiwei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through a review of recent investigations into the effects of hydrodynamic action on the adsorption/release of pollutants (heavy metals, phosphorus, etc.) by sediments, the influence of water turbulence intensity and velocity on the distribution of pollutants in water and sediment in rivers was analyzed. The results show that, when the turbulence intensity is low, sediments occur in a form close to bed sediment, and the rate and extent of adsorption/release of pollutants by sediments are low. As the turbulence intensity increases, the shear stress at the water-sediment interface increases, sediment suspension is promoted, and the contact area between pollutants and suspended sediment particles increases, leading to a significant increase in the rate and extent of adsorption/release of pollutants by sediments. The effect of the water velocity on the distribution of pollutants in water and sediment is

收稿日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51179055, 51239003); 江苏高校优势学科建设工程项目(SYS1401); 中央高校基本科研业务费专项(2013/B14020362)

作者简介: 肖洋(1974—), 男, 贵州铜仁人, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: sediment_lab@hhu.edu.cn

complex. When the sediment is stationary, with the increase of the velocity, the boundary layer thickness decreases, the dissolved oxygen content in water and redox potential increase, the diffusion of pollutants in the water body changes from molecular diffusion to turbulent diffusion, and the pollutant exchange flux at the water-sediment interface increases. With further increase of the velocity, the bed sediment gradually moves and is suspended. At this moment, the state of sediment movement, intensity of collision between suspended matters, and flocculation of sediments also have effects on the adsorption/release of pollutants by sediments. Because of the extensive factors and the complexity of the functional mechanism, there is a disagreement between results regarding the influence of sediment movement on the adsorption/release of pollutants by sediments reported by different researchers, and simplification is carried out through mechanism studies and establishment of mathematical models. It is pointed out that future studies should focus on the mechanism of the influence of the water and sediment movement as well as chemical and biological processes on the distribution of pollutants in water and sediment in rivers and the interaction of oxygen consumption organics and nocuous organics with sediments.

Key words: hydrodynamic action; water turbulent intensity; velocity; sediment movement; transport and transformation of pollutant

长期以来,很多学者^[1-5]通过室内静态试验研究了泥沙的粒径、理化特性、浓度以及水体污染物浓度、温度、pH、氧化还原电位等因素对泥沙吸附/释放污染物的影响,建立了上述各因素与泥沙吸附/释放污染物特性之间的关系。然而,室内静态试验与天然河流特征有较大差别:室内静态试验一般是在较小的反应器中,通过恒温震荡的方法研究泥沙对污染物的吸附/释放作用,震荡过程中,泥沙可与水体中污染物充分接触,对污染物的吸附/释放速率、总量远大于天然河流^[6];天然河流中,泥沙与污染物之间不是充分接触,在不同的水动力作用下,泥沙运动形式的改变,会影响污染物在水沙两相间的分配特征^[5, 7]。在不同水动力条件下,泥沙的运动形式包括静止、起动、悬浮、沉降等,这个过程中,泥沙对污染物在河流水沙两相中分配的影响主要包括3个部分(图1):(a)污染物在床沙-上覆水界面的扩散、床沙对污染物的吸附和释放过程;(b)悬沙沉降、床沙起动过程中对污染物吸附/释放过程和床沙中孔隙水向上覆水的扩散过程;(c)悬沙对污染物的吸附/释放过程。

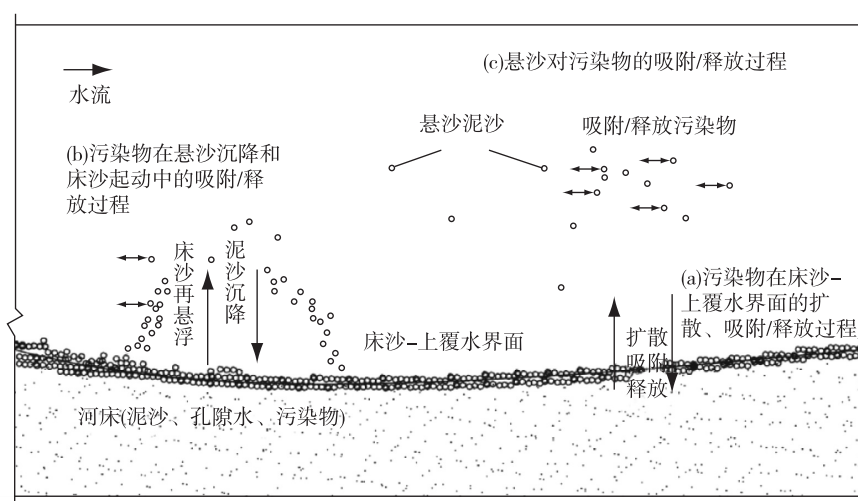


图1 河流污染物在水沙两相迁移转化过程示意图^[8]

Fig. 1 Transport and transformation processes of pollutants in water and sediment^[8]

本文在总结水流紊动、流速等因素对污染物在水沙两相间分配的影响试验研究进展基础上,讨论了相应机理和数学模型,并对将来的研究方向进行展望,以期揭示水动力对污染物在河流中迁移转化规律的影响。目前研究中的污染物多选用营养盐(磷)和重金属,而对一般有机污染物和有毒有机污染物等方面的研究较少,故本文分析中侧重于磷及重金属污染物。

1 水动力作用对污染物在水沙两相间分配的影响试验研究

天然河流中,水流的流动状态一般为紊流,水体的紊动强度和流速影响着泥沙的运动形式及其对污染物的吸附/释放规律。

1.1 紊动强度对污染物在水沙两相间分配的影响

研究者多采用谐振式紊动模拟装置(图 2)形成均匀紊流,研究不同紊动强度下泥沙吸附/释放污染物规律。如黄岁梁等^[6,9]利用谐振式紊动模拟装置研究了不同紊动强度下泥沙对重金属的吸附特性,发现在低紊动强度下,泥沙以底泥形式存在,对污染物吸附速率很小;高紊动强度下,水沙界面切应力增大,污染物与泥沙接触面积、几率增大,吸附速率、吸附量以及达到吸附平衡的时间均显著增大。倪晋仁等^[10]通过相同的装置得到了相似的结论,认为紊动会破坏高含沙悬浮液的絮凝结构,使宾汉剪切应力减少,促进粗颗粒沉降和底部泥沙浓度增加,进而促进泥沙的吸附作用。王鹏等^[11]发现紊动强度对吸附的影响仅在快吸附阶段较为明显,在快吸附阶段,紊动强度的增大会增加苯胺与沉积物的接触面积,使沉积物对苯胺的吸附量增大;在慢吸附阶段,泥沙对苯胺的吸附主要为化学吸附,水动力条件的影响并不明显。在谐振式紊动模拟装置内紊动强度较大,水相污染物的垂直浓度分布较为均匀^[12],泥沙可与污染物进行充分接触,与真实河流环境存在较大差异。

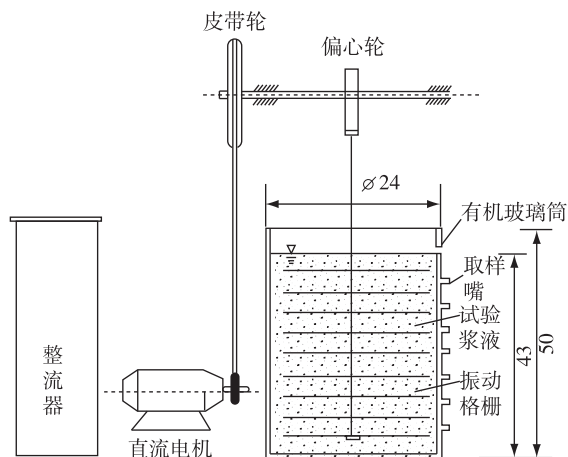


图 2 谐振式紊动模拟装置^[9](单位:cm)

Fig. 2 Resonance-type turbulence simulation equipment (units: cm)

1.2 流速对污染物在水沙两相间分配的影响

流速对污染物在水沙两相间分配的影响比较复杂。

当床沙未起动时,流速的增加会增强水沙界面的扰动,促进上覆水与孔隙水的交换,同时会改变水体的物理化学环境,如:水体溶解氧浓度、氧化还原电位、边界层厚度等,对污染物在水沙两相间的分配产生影响。随着流速的增大,泥沙受到的水流剪切力作用增大,发生起动、悬浮、沉降,使污染物在水体中的迁移转化过程更加复杂。

1.2.1 床沙静止时流速对污染物在水沙两相间分配的影响

当床沙静止时,污染物主要通过扩散、吸附、解吸作用在河流水沙中迁移转化。李斌等^[13]研究底泥污染物释放特性发现,在床沙静止不动时,床沙中污染物的释放以界面释放为主,释放量较小,释放时间长。黄廷林等^[14]利用直水槽(图 3)研究了不同流速下镉的释放规律,在静水中,泥沙中的重金属释放过程由 Fick 扩散控制;在动水条件下,随着水流速度的提高(泥沙没有运动),上覆水中的紊动扩散起主要作用,扩散强度

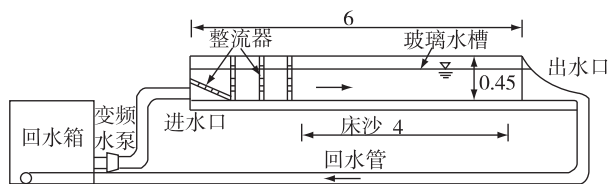


图 3 循环直水槽示意图^[8](单位:m)

Fig. 3 Sketch of experimental straight flume (units: m)

大幅增加,使表层泥沙中重金属释放,也增大了表层下泥沙孔隙水中重金属的扩散动力——孔隙水和上覆水之间重金属的浓度梯度,表层下部泥沙中重金属的释放强度也相应提高。House 等^[15-16]对不同流速下床沙对磷的吸附过程进行了研究,认为水槽中流速的增大会使水沙界面边界层变薄,增大床沙对磷的吸附量。Barlow 等^[17]对黏性床沙吸附磷的研究中发现流速及水深与磷的吸附量之间并无显著关系,认为在实验室水槽规模下水深及水流流速的改变都不足以引起泥沙对磷吸附量的改变,但文中采用连续试验的方法,在后续试验中,随着泥沙表面吸附磷的增多,泥沙颗粒的吸附能力降低,试验结果同时受到流速和泥沙表面含磷饱和度的影响,不能简单归结为流速对泥沙吸附磷无显著影响。与室内的水槽试验相比,实际河流并不是一个循环系统,流速对泥沙吸附/释放污染物的影响还表现在影响了上覆水体与床沙的接触时间,当水流流速较大时会加速污染物在水体中的传输,减小上覆水体与床沙的接触时间,造成床沙对磷吸附量的减小;减小水流流速则有利于增加水体和床沙的接触范围和时间,增加固着生物的生长速率,进而增加污染物的吸附及颗

粒态污染物的沉降^[5]。

1.2.2 泥沙运动对污染物在水沙两相中分配的影响

随着流速的增大,泥沙的运动形式发生变化,床沙再悬浮过程及悬沙的沉降过程使污染物在水体中的迁移转化过程更加复杂。Kalnejais 等^[18]认为床沙再悬浮过程中污染物的释放包含床沙中液相污染物的释放(即孔隙水的释放)、床沙中固相污染物的释放和再悬浮泥沙的释放3个过程;通过螺旋桨的旋转使床沙悬浮,对床沙悬浮过程中污染物的释放进行研究,发现在临界切应力以下,床沙未悬浮,重金属的释放程度较小,随着切应力的增大,大于临界切应力时,泥沙悬浮,上覆水体中重金属的浓度随之增大。Cantwell 等^[19-20]则认为相对于切应力,泥沙的物理、化学特性在重金属释放过程中的作用更加重要。

王沛芳等^[21]利用循环直水槽研究了不同流速下重金属在沉积物-孔隙水-上覆水之间的迁移规律,发现流速的增加能促进重金属的释放,主要原因是孔隙水中的重金属浓度远大于上覆水中的浓度,沉积物的再悬浮使上覆水中重金属浓度增加。黄廷林等^[14]发现随着流速进一步增大,重金属的释放浓度大幅度提高,这部分释放不仅包括悬移质、推移质泥沙中重金属的释放,还包括静止状态的底部表层及底部以下泥沙中重金属的释放。张坤等^[22]对床沙中 COD_{Cr} 释放率随水流流速的变化规律进行研究,也得到了 COD_{Cr} 的释放量随着流速增大而增大的结论。

黄建枝等^[23]利用环形水槽(图4)研究了床沙再悬浮过程中上覆水中溶解态的 Ni、Cu、Pb 的浓度,发现随着流速的增加,上覆水中重金属浓度上升,认为这是由于:(a)床沙再悬浮过程中重金属由稳定态向可交换态转换;(b)随着流速的增加,颗粒间碰撞的几率增大,使得松散结合的重金属更容易从悬浮颗粒上解吸下来;(c)上覆水中胶体颗粒组分增大,而这部分胶体颗粒所携带的重金属含量仍被视为溶解性部分,导致计算的重金属释放量增大。

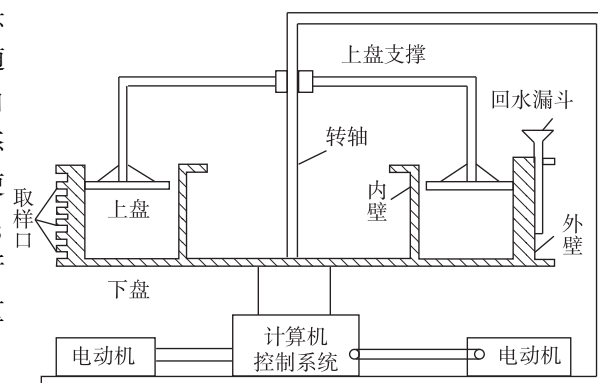


图4 环形水槽示意图^[24]

Fig. 4 Sketch of annular flume^[24]

Zhang 等^[24]、朱红伟等^[8, 25]对床沙再悬浮过程中孔隙水的作用进行分析发现,对于非吸附性污染物,孔隙水的释放占主要作用,对于吸附性的磷,释放分为2个部分:再悬浮初始阶段,孔隙水中液相磷的释放起主导作用,持续悬浮阶段,释放主要来自于悬浮颗粒上固相磷的释放。朱红伟等^[25]2013年的研究中出现了不同的现象,在持续悬浮阶段,总磷释放通量出现波动,认为这是由再悬浮颗粒的吸附及悬浮物的絮凝沉降造成的。

朱广伟等^[26]也发现在由波浪引起的泥沙悬浮过程中,水体中总磷浓度有较明显的增高,而溶解性活性磷(SRP)的浓度在开始阶段显著增高,在后期受以下2个因素的影响:(a)波浪的掀沙作用增加了水体悬浮泥沙的数量,加剧了水体中悬浮颗粒的运动和颗粒与颗粒、颗粒与离子间的碰撞,增大了水体无机和有机胶体颗粒对溶解性盐类的吸附作用;(b)水体氧含量随着波浪强度的增大而增大,使得沉积物再悬浮带入水体的还原性铁、锰等离子转化成具有较强离子吸附能力的氧化铁、氧化锰,水体中的可溶性活性磷又下降到掀沙前的水平。毕春娟等^[27]通过泥沙再悬浮过程中上覆水中 Cd、Pb、Cr 的分配系数研究,认为再悬浮过程中, Cd、Pb、Cr 的迁移转化过程包括:生物膜上吸附重金属的解吸释放、孔隙水中溶解态重金属的直接再悬浮和扩散释放、沉积物中硫化物结合态重金属的氧化释放、上覆水中悬浮颗粒对重金属的吸附以及沉淀等过程。彭进平等^[28]测量了不同流速下水体中总磷的变化情况,发现随水体流速的增大,水体中总磷的质量浓度变化分为下降期、上升期和突增期3个阶段,出现这种情况的原因是,低流速下悬浮颗粒的絮凝沉降造成水体中总磷减小,随着流速的增大,沉积物颗粒少量悬浮,总磷浓度随之升高,随着流速继续增大,沉积物普遍运动,总磷浓度出现突增,在此过程中,可溶性活性磷的浓度随着流速的增大持续增加,说明沉积物中的磷持续向上覆水体释放。Wan 等^[29]通过环形水槽研究了在水流突然扩张情况下磷的释放行为,流速对床沙中磷向上覆水体释放的影响过程中存在一个 7~15 cm/s 的临界速度,在临界速度以下,随着流速的增大,上覆水中溶解态总磷浓度增大,而在临界速度以上,由于扩张段的存在,流态更为复杂,流速不是磷释放的决定性因素,不规则的水流条件会减弱甚至阻碍磷的释放过程。

现场试验是获得污染物分布最真实、最有效的途径,同时现场试验中影响因素更多,泥沙、水体、生物等因素都会对试验结果产生影响。Chen 等^[30]对台湾东北部 Daiyujay 河洪水过程中河流水体中总磷浓度进行取样测量,发现当洪峰来临时,水体中总磷浓度突增,洪峰过后,总磷浓度先是快速降低,然后缓慢降至背景浓度。Zhang 等^[31]将采集泥沙放到聚氯乙烯托盘内置于香港 Crooked Island 的海岸,以模拟海洋环境下,沉积物中非离子性疏水有机化合物的释放过程,结果发现,污染物在现场试验中的释放速率是室内模拟试验结果的 10~100 倍,作者认为这是由于室内试验中水的交换和冲洗效果对污染物的释放影响低于现场试验。Berg 等^[32]和 Groote 等^[33]研究了清淤过程中泥沙的再悬浮情况对重金属在水沙两相间分配的影响,发现在泥沙再悬浮过程中,悬浮颗粒中重金属的含量显著增加,而溶解态的重金属浓度并无显著增加,认为在泥沙再悬浮过程中,水体氧化还原条件发生改变,泥沙颗粒表面的金属硫化物氧化形成铁锰氧化物/氢氧化物,造成重金属污染物重新被吸附在泥沙颗粒上,同时藻类等对污染物的吸附也使得污染物向液相转化的增量受限。

2 污染物在河流水沙两相中分配模型研究

动水条件下,污染物与泥沙的相互作用除受泥沙颗粒特性、水环境物理化学条件等因素影响之外,还受水动力条件、泥沙运动的影响。由于影响因素众多,作用复杂,同时由于观测手段的限制,定量获得各种因素的贡献量的难度较大,因此对其过程的数学描述做了较大的简化。

2.1 分配系数法

分配系数法是水质模型中常用的描述污染物在水沙两相中分配的方法,反映了达到吸附平衡时,污染物在固液两相中的分配比。水质模型一般分为整体模型和分相模型。整体模型假定推移质和底泥对重金属的吸附/解吸符合平衡状态,如美国环境保护署开发的水质模型 WASP^[34]中,假定重金属污染物的分配系数随时间和空间的变化而变化,但具体如何确定分配系数的大小,WASP 模型没有很好的建议。分相模型将污染物的迁移转化分为水相、悬移相和底泥相,如高兴斋等^[35]、禹雪中等^[36]、余常昭^[37]在研究河流中重金属迁移转化规律的过程中,引用平衡关系 $C_w = K_b S_b$ 表达污染物在悬浮相和水相之间的分配关系,其中, C_w 为液相污染物浓度, S_b 为固相污染物浓度, K_b 为分配系数,在底泥传质中也采用了相同的方法。然而,在不同的水流条件下,泥沙对污染物的吸附/释放速率存在差异。在泥沙的起动、悬浮、沉降、再悬浮等过程中,会加剧床沙中污染物与水体的交换强度,悬浮作用(悬浮+扩散)造成的上覆水氨氮浓度增加可以达到单纯由扩散产生的浓度的数十倍^[38],同时,在底泥的再悬浮过程中,底泥孔隙水中污染物的释放对水体污染的贡献也不可忽视。这些因素在上述模型中并没有考虑,故分配系数法不能完整地描述泥沙在污染物迁移转化过程中的作用。

2.2 吸附/释放动力学模型

吸附/释放动力学模型最初用于描述静态试验中泥沙对污染物的吸附/释放过程。黄岁梁等^[39]、何用等^[40]、褚君达等^[41]认为河流中泥沙对污染物的吸附/释放行为与室内静态试验并无显著区别,在他们改进的水质模型中使用了 Langmuir 动力学方程、Freundlich 动力学方程参数对水质模型进行优化。

Elovich 方程是一个半经验公式,最初应用于土壤及矿物吸附反应的动力学研究,它认为吸附速率随着吸附量的增加呈指数减小,在静态试验中获得了较好的拟合效果。House^[15-16]、Barlow 等^[17]利用 Elovich 方程对磷在水-床沙中的分配进行分析发现,Elovich 方程对试验结果的拟合效果比边界层方程和扩散方程好。然而这些动力学方程的参数通常是通过拟合实测数据进行拟合获得,水动力参数对吸附/释放的影响无法获得。

也有学者研究了紊动特性对泥沙吸附/释放污染物的影响,如周孝德等^[42]认为水流紊动强度对重金属释放动力学过程的影响是通过某一固定时刻重金属释放强度的影响来体现的,而水流紊动强度并不随时间而变化,仅取决于水力条件;他通过室内水槽试验,利用量纲分析法建立了重金属释放强度 C_t 与水流紊动强度之间的相关关系 $C_t = KRe^{1.3}$,其中 C_t 为 t 时刻的释放浓度, K 为释放动力学参数,由静态的解吸动力学试验得到, Re 为雷诺数。

2.3 边界层模型

停滞边界层理论最初由 Berner^[43]提出,他认为在水沙界面存在一个停滞边界层。在停滞边界层内,磷

通过扩散作用在水-沙之间迁移,边界层的厚度与水流流速呈线性负相关关系,水流流速越大,边界层的厚度越小,对磷扩散的阻碍越小,床沙对磷的吸附量越大。该模型^[16]的形式如下:

$$C(t) = C_0 e^{-kt} + \alpha(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

其中

$$k = \frac{D_0}{zd}$$

式中: $C(t)$ —— t 时刻上覆水中污染物浓度; C_0 ——污染物初始浓度; α ——污染物平衡浓度; D_0 ——扩散常数; d ——平均水深; z ——停滞边界层厚度,可通过水槽试验来确定。

在泥沙未起动静况下,House、Barlow 利用式(1)得到了较好的拟合效果,但在有悬沙存在时,悬沙的沉降和再悬浮过程将对试验结果产生影响。

2.4 抛物线扩散模型及扩散方程

抛物线扩散模型及扩散方程都可用来描述污染物在水沙界面的交换通量,这2个理论均认为造成污染物在上覆水-床沙间的迁移过程的驱动力为上覆水-床沙中污染物的浓度差,遵循扩散理论,其形式为

$$C(t) = C_0 A e^{-k_1 t} \quad (2)$$

抛物线扩散方程由 Cooke^[44]提出,形式如下:

$$C(t) = \beta + R t^{1/2} \quad (3)$$

式中: β 、 R 、 A 、 k_1 ——经验系数。

House 等^[16]通过水槽试验发现,水流的流速越大,抛物线速率常数越大,床沙对磷的吸附量越大。张坤等^[22]利用扩散方程得到了动态水流条件下底泥污染物中 COD_{cr} 的释放强度与时间的拟合关系:

$$C = 1.06 C_0 e^{-0.06t} \quad (4)$$

抛物线扩散模型及扩散方程主要通过上覆水体中污染物浓度变化,描述污染物在水沙界面的通量变化过程,悬沙对污染物的吸附/释放作用,表层床沙的吸附/释放作用对污染物在上覆水-床沙中分配的影响在这2个方程中均通过经验系数表示。

2.5 三重区模型

含氧量的大小对泥沙吸附/解吸污染物的行为有非常重要的影响。House 等^[45]于2002年提出了三重区模型用来描述污染物在水-沙界面及在床沙中的迁移规律,即污染物在进入床沙时,先进入边界层,此过程可用边界层模型进行描述,之后为床沙层,根据含氧量的区别,分为有氧层和无氧层两层,两层中泥沙对污染物的吸附/释放参数存在区别。有氧层中,使用分配系数 K_b 进行表征,无氧层中污染物在颗粒态和溶解态的分配使用修正的分配系数 K_b/f (f 为大于1的参数,表明泥沙在厌氧条件下的吸附量相对于有氧条件下的衰减程度)进行描述。该模型提供了一种可预测床沙中污染物垂向分配的方法,动力学因素的影响体现在边界层厚度的改变。2012年提出的磷质量守恒模型^[46]中也将床沙层分为有氧层和无氧层,污染物在有氧层和无氧层中的分配系数分别使用不同的参数进行描述,而泥沙运动、水流条件、风速等因素对于分配系数的影响在该模型中并未考虑。

3 结 语

水动力作用是影响污染物在河流水沙两相中分配的重要因素,水流紊动强度、流速等水动力因素会通过改变水体物理化学环境和泥沙运动状态对污染物在水体中的迁移转化过程产生影响。由于影响泥沙对污染物的吸附/释放作用的因素较多,目前关于不同流速对污染物在水沙两相间的分配影响以释放研究为主,吸附研究相对较少,且结论仍存在分歧。同时对水动力作用影响污染物在水沙两相间分配的机理研究不够深入,理论体系不够完善,常用的理论及数学模型均做了较大简化。因此,笔者认为今后的研究可从以下几点着手:

a. 影响污染物在河流水沙中分配的因素较多,已有的研究多局限于试验现象的描述,没有很好地建立与水动力因素、泥沙运动指标的定量关系,有待建立污染物在水沙中分配规律与水流流速、水流紊动强度、悬沙浓度、推移质输沙率、悬移质输沙率、床面形态等之间的关系,为水质模型提供合理的假设。

b. 污染物在水沙两相间的分配包含扩散、沉降、吸附、解吸、化学反应、降解作用、生物活动等多种作用的复杂过程,确定各种作用在污染物迁移转化过程中的相对贡献,对于揭示污染物在水体中的迁移转化过程

具有十分重要的意义。

c. 目前常用的简单的、单一的数学模型对于描述现象具有一定的价值,但难以真实描述污染物在水沙两相间分配的内在机理,数学模型还需在对污染物在水沙两相分配现象和机理的认识发展的基础上,着重加以改进。

d. 河流中的污染物种类繁多,目前的研究多集中在重金属及富营养化元素(氮磷)等与泥沙有较强亲和力的元素上,对耗氧有机物、有毒有机物等污染物的研究较少。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] ZHOU Aimin, TANG Hongxiao, WANG Dongsheng. Phosphorus adsorption on natural sediments: modeling and effects of pH and sediment composition[J]. Water Research, 2005, 39(7): 1245-1254.
- [3] 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 and Waste Water, 2006, 22(9): 10-13. (in Chinese))
- [4] 冯海艳, 李文霞, 杨忠芳, 等. 上覆水溶解氧水平对苏州城市河道底泥吸附/释放磷影响的研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 227-234. (FENG Haiyan, LI Wenxia, YANG Zhongfang, et al. Influence of dissolved oxygen in overlying water on releasing/absorption of phosphorus from sediments from Suzhou river, east China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 227-234. (in Chinese))
- [5] WITHERS P, JARVIE H P. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: a review[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1): 379-395.
- [6] HUANG Suiliang, NG Chiuon, GUO Qizhong. Experimental investigation of the effect of flow turbulence and sediment transport patterns on the adsorption of cadmium ions onto sediment particles[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(6): 696-703.
- [7] HOUSE W A, DENISON F H. Phosphorus dynamics in a lowland river[J]. Water Research, 1998, 32(6): 1819-1830.
- [8] 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, 2011, 26(5): 631-641. (in Chinese))
- [9] 黄岁梁. 谐振式紊动模拟装置解吸重金属试验及数学模拟[J]. 环境科学研究, 1995(3): 7-12. (HUANG Suiliang. Desorption of sediment and its mathematical model in harmonic vibration device for simulating turbulence [J]. Research of Environmental Sciences, 1995(3): 7-12. (in Chinese))
- [10] 倪晋仁, 杨军, 邓宝山. 高含沙紊动系统中影响泥沙和铜垂向分布的关键因素分析[J]. 环境科学学报, 2001(1): 1-6. (NI Jinren, YANG Jun, DENG Baoshan. Controlling factors on sediment-copper vertical distribution in hyper-concentrated turbulent system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001(1): 1-6. (in Chinese))
- [11] 王鹏, 冯燕, 蔡赞杰. 水动力条件对太湖底泥吸附苯胺性能的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 117-123. (WANG Peng, FENG Yan, CAI Yunjie. Aniline adsorption properties on Taihu Lake sediment under different hydrodynamic conditions [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(5): 117-123. (in Chinese))
- [12] 杨军, 倪晋仁, 邓宝山. 高含沙紊动系统中泥沙铜的相互作用及其垂向浓度分布[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 90-93. (YANG Jun, NI Jinren, DENG Baoshan. Sediment-copper interaction and vertical distribution in hyper-concentrated turbulent system[J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 90-93. (in Chinese))
- [13] 李彬, 张坤, 钟宝昌, 等. 底泥污染物释放水动力特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(2): 126-133. (LI Bin, ZHANG Kun, ZHONG Baochang, et al. An experimental study on release of pollutants from sediment under hydrodynamic conditions [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(2): 126-133. (in Chinese))
- [14] 黄廷林, 周孝德. 渭河沉积物中重金属释放的动态实验研究[J]. 水利学报, 1994, 25(11): 52-58. (HUANG Tinglin, ZHOU Xiaode. Experimental research on heavy metal release from sediment in Weihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(11): 52-58. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] HOUSE W A, DENISON F H, SMITH J T, et al. An investigation of the effects of water velocity on inorganic phosphorus influx

- to a sediment[J].*Environmental Pollution*, 1995, 89(3): 263-271.
- [17] 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): 3420-3430.
- [18] KALNEJAIS L H, MARTIN W R, BOTHNER M H. The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension[J].*Marine Chemistry*, 2010, 121(1): 224-235.
- [19] CANTWELL M G, BURGESS R M, KING J W. Resuspension of contaminated field and formulated reference sediments part I: Evaluation of metal release under controlled laboratory conditions[J].*Chemosphere*, 2008, 73(11): 1824-1831.
- [20] CANTWELL M G, BURGESS R M, KESTER D R. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension[J].*Environmental Science & Technology*, 2002, 36(24): 5328-5334.
- [21] 王沛芳,胡燕,王超,等. 动水条件下重金属在沉积物水之间的迁移规律[J].*土木建筑与环境工程*, 2012(3): 151-158. (WANG Peifang, HU Yan, WANG Chao, et al. Analysis on mobility of heavy metals between sediment-water under different hydrodynamic conditions[J].*Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2012(3): 151-158. (in Chinese))
- [22] 张坤,李彬,王道增. 动态水流条件下河流底泥污染物(COD_{Cr})释放研究[J].*环境科学学报*, 2010(5): 985-989. (ZHANG Kun, Li Bin, WANG Daozeng. Contaminant (COD_{Cr}) release from river bottom sediments under flow conditions[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010(5): 985-989. (in Chinese))
- [23] 黄建枝,葛小鹏,杨晓芳,等. 利用环流槽研究再悬浮条件下凉水河底泥沉积物中重金属的迁移与分布[J].*科学通报*. 2012, 57(21): 2015-2021. (HUANG Jianzhi, GE Xiaopeng, YANG Xiaofang, et al. Remobilization of heavy metals during the resuspension of Liangshui River sediments using an annular flume[J].*Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(21): 2015-2021. (in Chinese))
- [24] ZHANG Kun, CHENG Pengda, ZHONG Baochang, et al. Total phosphorus release from bottom sediments in flowing water[J].*Journal of Hydrodynamics: Ser B*, 2012, 24(4): 589-594.
- [25] 朱红伟,蒋基安,程鹏达,等. 泥沙污染物启动再悬浮释放机理[J].*水科学进展*, 2013, 24(4): 537-542. (ZHU Hongwei, JIANG Ji'an, CHENG Pengda, et al. Mechanism of pollutant release due to sediment re-suspension[J].*Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 537-542. (in Chinese))
- [26] 朱广伟,秦伯强,张路,等. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验[J].*湖泊科学*, 2005, 17(1): 61-68. (ZHU Guangwei, QIN Boqiang, ZHANG Lu, et al. Wave effects on nutrient release of sediments from lake Taihu by flume experiments[J].*Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 61-68. (in Chinese))
- [27] 毕春娟,陈振楼,李猛,等. 再悬浮作用下长江口近岸沉积物中Cd、Pb和Cr的迁移与释放[J].*环境科学*, 2011(9): 2512-2521. (BI Chunjuan, CHEN Zhenlou, LI Meng, et al. Transport and release of Cd, Pb and Cr from the Yangtze estuarine sediments during sediment resuspension event[J].*Environmental Science*, 2011(9): 2512-2521. (in Chinese))
- [28] 彭进平,逢勇,李一平,等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响[J].*生态环境*, 2003(4): 388-392. (PENG Jinping, PENG Yong, LI Yiping, et al. Effects of hydrodynamic conditions on mass concentration of phosphorus[J].*Ecology and Environment*, 2003(4): 388-392. (in Chinese))
- [29] 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.
- [30] CHEN Y, LIU J, KUO J, et al. Estimation of phosphorus flux in rivers during flooding[J].*Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(7): 5653-5672.
- [31] ZHANG Y, WU R S, HONG H S, et al. Field study on desorption rates of polynuclear aromatic hydrocarbons from contaminated marine sediment[J].*Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(10): 2431-2435.
- [32] van den BERG G A, MEIJERS G G, van der Heijdt L M, et al. Dredging-related mobilisation of trace metals: a case study in the Netherlands[J].*Water Research*, 2001, 35(8): 1979-1986.
- [33] de Groote J, DUMON G, VANGHELUWE M, et al. Environmental monitoring of dredging operations in the Belgian nearshore zone[J].*Terra et Aqua*, 1998(70): 19-25.
- [34] AMBROSE R B, WOOL T A, CONNOLLY J P, et al. WASP4, a hydrodynamic and water-quality model-model theory, user's manual, and programmer's guide[R]. Athens: United States Environmental Protection Agency, 1988.
- [35] 高兴斋,周佩清,黄双双,等. 河流重金属迁移模型的沉降与再悬浮系数研究[J].*环境科学研究*, 1986(1): 33-41. (GAO Xingzhai, ZHOU Peiqing, HUANG Shuangshuang, et al. Coefficients of settlement and resuspension in heavy metals migration model[J].*Research of Environmental Sciences*, 1986(1): 33-41. (in Chinese))
- [36] 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))
- [37] 余常昭. 水环境中污染物扩散输移原理与水质模型[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [38] REDDY K R, FISHER M M, IVANOFF D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake [J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(2): 363-371.
- [39] 黄岁梁, 万兆惠, 张朝阳. 冲积河流重金属污染物迁移转化数学模型研究[J]. 水利学报, 1995, 26(1): 47-56. (HUANG Suiliang, WAN Zhaohui, ZHANG Chaoyang. Study on the mathematical model of heavy metal pollutants transport-transformation in fluvial rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(1): 47-56. (in Chinese))
- [40] 何用, 李义天. 重金属迁移转化模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(5): 576-583. (HE Yong, LI Yitian. Study of the model of heavy metal pollutants transport[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 576-583. (in Chinese))
- [41] 褚君达, 徐惠慈. 河流底泥冲刷沉降对水质影响的研究[J]. 水利学报, 1994, 25(11): 42-47. (CHU Junda, XU Huici. Research on the effects of river sediment scouring sedimentation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(11): 42-47. (in Chinese))
- [42] 周孝德, 黄廷林. 河流底流中重金属释放的水流紊动效应[J]. 水利学报, 1994, 25(11): 22-25. (ZHOU Xiaode, HUANG Tinglin. Effect of water turbulence on the release of heavy metals in bottom stream[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(11): 22-25. (in Chinese))
- [43] BERNER R A. Early diagenesis: a theoretical approach[M]. Princeton: Princeton University Press, 1980.
- [44] COOKE I J. A kinetic approach to the description of soil phosphate status[J]. Journal of Soil Science, 1966, 17(1): 56-64.
- [45] HOUSE W A, DENISON F H. Exchange of inorganic phosphate between river waters and bed-sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(20): 4295-4301.
- [46] CHOMAT C J, WESTPHAL K S. Enhanced understanding of sediment phosphorus dynamics in river systems with a simple supplemental mass balance tool[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 139(1): 34-43.

· 简讯 ·

第五届全国水工抗震防灾学术交流会将在宜昌市举行

第五届全国水工抗震防灾学术交流会将于2015年11月6—8日在湖北省宜昌市举行。会议主办单位为中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会, 承办单位为三峡大学、水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心、湖北省水力发电工程学会, 协办单位为河海大学、清华大学、大连理工大学等。

本次水工抗震防灾学术会议议题如下: 水工建筑物抗震设计、分析理论; 地震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估及修复加固; 水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定; 水库引发地震、地震预测和预警; 水电工程抗震措施、抗震安全评价体系; 水工结构工程振动、爆炸与冲击等关键科学技术问题。

会议电子文件请浏览网站: www.meeting.edu.cn

(本刊编辑部供稿)