

底泥污染物的环境行为研究进展

陈文松, 宁寻安, 李 萍, 尹光彩, 白晓燕

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 综述了底泥主要污染物重金属、营养物质(氮、磷)和难降解有机物向上覆水体释放的机理和影响规律, 并指出该研究领域尚需解决的技术难题。重视对能代表大水体实际情况实验装置的研制开发以及野外观测与室内实验的密切结合、加强沉积物—水体界面之间物质扩散交换过程的机理研究, 建立污染物释放模型; 加强底泥污染物释放的动力学研究。

关键词 底泥; 污染物; 释放机理

中图分类号 :X132 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2007)04-0001-05

Environmental behavior of pollutants in sediments

CHEN Wen-song, NING Xun-an, LI Ping, YIN Guang-cai, BAI Xiao-yan

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract The mechanisms and influence rules of the release of heavy metals, nutrition (phosphorus and nitrogen) and organic compounds that were hard to be degraded in surface water were summarized. The technical difficulties in the field were proposed, i. e., manufacturing experimental instruments for simulating the actual condition of large water bodies, the combination of field survey and laboratorial experiment, the research on mechanisms of material diffusion and exchange between sediment-water interface, the establishment of pollutant release model, and the study on dynamics of pollutants releasing from sediments.

Key words sediment; pollutant; release mechanism

底泥是江河、湖泊、水库和海湾等水体底部长期积存的沉积物, 是水体多相生态系统的重要组成部分, 是环境污染物在广泛空间和长期时间内的聚集处。在一定条件下, 底泥中的污染物(主要包括重金属、营养物质和难降解有机物)会向上覆水体释放, 成为二次污染源, 对水生生态系统构成严重威胁。显然, 底泥中的污染物与其上覆水体之间复杂的界面反应过程, 对水质状况具有决定性影响。因此, 最近 20 多年, 底泥污染物的环境行为一直是国内外环境学者的热门研究课题。本文将总结评述已有的主要研究成果, 并尝试指出其存在的问题以及今后的发展方向, 以期推动该领域的进一步研究。

1 底泥重金属的环境行为

许多研究表明, 重金属从沉积物中释放的机制

主要为: 溶解作用, 离子交换作用, 解吸作用^[1]。

从热力学角度考虑, 重金属在底泥和水体之间存在分配平衡。一旦底泥的浓度过高或水体的浓度较低, 则重金属将从底泥向上覆水体释放, 污染水环境。

沉积物中重金属的释放受多种因素的制约, 重金属在沉积物的赋存形态、环境的 pH 值、氧化还原条件、微生物的活动和水力条件等都是重金属从沉积物释放的影响因素。

重金属的化学活性和生物有效性与其形态密切相关, 不少学者对沉积物中重金属的存在形态提出了自己的分类方法^[2-3], 其中 Tessier 等提出的分类法得到了最广泛的应用, 即把重金属存在形态分为: 阳离子可交换态, 碳酸盐结合态, 水合铁锰氧化物结

合态、硫化物及有机物结合态和矿物碎屑残留态。研究表明,沉积物中重金属的释放能力由强到弱的排序与上述赋存形态的排序一致^[4-5]。

在一般情况下,沉积物中重金属的释放量随着反应体系 pH 值的升高而降低,其原因既有 H⁺ 的竞争吸附作用,也有金属在低 pH 值条件下,致使金属难溶盐类以及络合物的溶解等^[1]。文湘华等^[6]对乐安江沉积物的释放特性的研究表明,pH 值的降低会促进重金属由沉积物向上覆水体的释放。Calmano 等^[7]对 Hamburg 港沉积物的释放实验和魏俊峰等^[8]对广州城市水体沉积物的研究都得出类似的结论。

氧化还原条件对沉积物中重金属的稳定性影响与其形态组成有关,由铁锰水合氧化物固定的重金属,当环境从氧化型转入还原型后,重金属将会因为铁锰氧化物的还原而释放出来,即氧化环境有利于沉积物中重金属的固定。文湘华等^[9]对乐安江沉积物在不同溶解氧浓度条件下的重金属释放实验表明,Cu、Pb 的释放量随溶解氧浓度的增加而降低。朱广伟等^[10]对运河(杭州段)沉积物中 Cu 和 Zn 的释放规律研究表明,曝气可以有效降低上覆水体中 Cu 和 Zn 的平衡浓度,认为这是由于曝气使沉积物表层的氧化程度增高,铁锰氧化物等无机胶体的数量随之增加,从而提高了对 Cu 和 Zn 的吸附能力。但是,对于由硫化物固定的重金属,氧化还原电位的提高将促使其由固定的重金属的释放,这是因为氧化环境将氧化硫化物。方涛等^[11]研究了曝气对东湖及长江两种不同类型沉积物中重金属释放的影响,结果表明:由于东湖沉积物中硫化物结合态重金属含量高于长江,东湖沉积物的重金属释放量远比长江沉积物高。

微生物引起重金属释放主要是通过下列两条途径来实现:一是微生物的新陈代谢;二是微生物扰动。主要表现在如下三个过程:①分解有机质,降低分子量,产生较易络合金属离子的有机质,促进重金属的迁移转化;②新陈代谢活动使环境条件发生变化,如 pH 值、Eh 值等的变化,从而影响重金属的释放;③微生物的扰动将引起沉积物中间隙水的水力条件,有利于重金属向上覆水体迁移^[12-13]。

此外,洪水、潮汐作用和疏浚工程等自然或人为活动都会引起沉积物—水界面的水力条件的变化,破坏沉积物—水界面原有的平衡,导致重金属向上覆水体的释放^[13]。

2 底泥营养物质的环境行为

营养物质主要是指氮和磷。氮和磷的质量浓度分别超过 0.2 mg/L 和 0.02 mg/L 时,会引起水体的

富营养化,促使藻类大量繁殖,在水面上聚集成大片的水华(湖泊)或赤潮(海洋),当藻类在冬季大量死亡时,水中的 BOD 值猛增,导致水体腐败发臭,恶化环境卫生,危害水产业^[14]。

2.1 氮的释放

沉积物中氮的化学形态包括有机氮和无机氮,无机氮由 NH₃-N、NO₂-N 和 NO₃-N 组成,其中 NH₃-N 是沉积物中无机氮的主要形态,达到无机氮的 96%^[15]。氮的释放取决于氮化合物分解的难易程度,主要与 O₂ 含量、有机质含量、温度、pH 值和扰动情况有关。

好氧和厌氧条件对氮释放速率的影响是最重要的,因而得到了最广泛的研究^[16-20]。研究表明,厌氧条件下,NH₃-N、TN 的释放量大于好氧条件,这是因为好氧条件下,硝化细菌能够进行硝化作用,将水体中大部分氨氮转化为硝态氮,降低了上覆水体氨氮的浓度,而在厌氧条件下,硝化作用消失,反硝化作用发生,结果,底泥释放的氨氮得不到硝化减少。另外,厌氧条件还将可能产生氨化作用,使氨氮进一步增加,因此,为控制底泥向上覆水体释放氨氮和总氮,维持水体较高的溶解氧水平是必要的。袁文权等^[21]还研究了不同供氧方式对水库底泥氮释放的影响,认为对氨氮释放的控制效率的排序为:曝气 > 投加 Ca(OH)₂ > 投加 H₂O₂。

很多实验证实,动力扰动造成的沉积物营养盐的释放要远大于静态释放^[22-25]。但是,已有的研究大多仅限于使用烧杯、锥形瓶等模拟河流、湖体,不能很好地代表水体的实际情况,所得研究成果只能是定性的结论,未能建立底泥污染物释放率与动力扰动之间的定量关系。最近,李一等^[26]应用自己研制的能够较好地模拟太湖湖体实际水流状况的双向环形水槽实验装置,探讨了水动力作用对太湖底泥中营养盐的释放规律,结果表明,底泥中总氮释放率与水体流速呈指数变化关系。当底泥处于“普遍扰动”的状态时,总氮的释放率达到静态释放的 10~20 倍。这一结果也得到了其他研究的证实^[23-27]。底泥不受扰动时,底泥中营养盐的向上释放只能通过自然形成的向上浓度梯度来进行。但当底泥受到扰动而发生悬浮时,则将导致底泥孔隙水中的营养盐的大量释放(孔隙水中的营养盐浓度远高于上层水的营养盐浓度)。

沉积物有机质含量已被认为对界面氮的行为有很大影响,研究表明,大量易降解有机质有助于氮的释放。因为大量有机质降解过程需要消耗氧,使沉积物处于缺氧或厌氧状态,此时有机质中的氮多经生物作用转化成 NH₄⁺,从而增大 NH₄⁺ 的释

放^[28-29]。张丽萍等^[25]的研究认为,有机质多,微生物因能得到充足的碳源而持续增长,大量微生物的分解作用将使底泥中的有机氮转为氨氮而加剧向上覆水体的释放。吴群河等^[20]的研究说明底泥有机质含量的增加将加剧氮的释放。

温度和 pH 值也都会对氮的释放产生影响。温度升高,既加强了底泥间隙水中的氮向上覆水体扩散的能力,也提高了底栖生物的活性,加大了生物扰动,从而使释放量增加^[18]。范成新等^[29]对太湖沉积物—水界面氮的释放的研究表明,氮释放量随温度的升高而增加。付春平等^[30]对三峡库区底泥氮释放与 pH 值的关系研究表明,总氮释放量随 pH 值增大而减少。

2.2 磷的释放

从底泥中磷的稳定性和释放的可能性角度考虑,国内外对磷的形态分类目前比较流行的是把总磷分为无机磷、有机磷和残渣磷,无机磷又分为铝磷、铁磷和钙磷。

许多研究表明,沉积物中磷的释放受到多种环境因子的影响,其中最主要的是水中溶解氧、pH 值、温度、生物以及水体的扰动等^[1]。

一般认为,好氧能促进磷的吸附,而厌氧则加速沉积物中磷的释放,因为好氧时,容易发生 $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ 化学反应,生成的 Fe^{3+} 易与磷酸盐形成不溶的磷酸铁,从而抑制磷的释放;另外,氢氧化铁胶体也会吸附水中的游离性磷^[31]。厌氧时,有助于 $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$ 转化,使与铁结合或被吸附的磷酸盐释放出来^[32-33]。

沉积物磷释放量与 pH 值呈“U”型曲线相关,即 pH 值在中性范围时释磷量最小,在酸性条件下能促进磷的释放,碱性条件下较大幅度地提高磷的释放量^[34-35]。研究认为,pH 值较低时,沉积物释磷以溶解作用为主;而在高 pH 值时,以离子交换为主,即 OH^- 与被束缚的磷酸盐阴离子产生竞争吸附,导致释磷量增多^[36-37]。

温度升高将促进沉积物磷的释放。随着环境温度的升高,沉积物中的微生物活性增强,提高了生物扰动作用和沉积物有机物的矿化速率,促进有机磷向无机磷转化,不溶性磷向可溶性磷转化,从而促进沉积物中磷的释放^[38]。此外,随着生物活动的增加,间隙水耗氧速率加快,水体中的溶解氧减少,使水体环境由氧化状态向还原状态转化,有利于 Fe^{3+} 的还原,加速沉积物中铁结合态磷的释放^[39]。

扰动是影响沉积物—水界面反应的重要物理因素,扰动条件下的底泥磷释放量远大于静态条件下的释放量,因为扰动使表层沉积物再悬浮,增加了沉

积物颗粒的反应界面,同时也加速了沉积物间隙水中磷的扩散,从而增加磷的释放。然而,扰动(水动力条件)对磷释放的影响仅是有限的短期效应,当沉积物受扰动向水体释放磷达到一定程度后,可能进入一种磷释放“枯竭”状态,此时,沉积物和悬浮体与水体之间的磷达到了一种动态平衡^[23,26,40]。另外,扰动虽然增加了水体内的溶解氧,不利于沉积物中磷的释放,但这和底泥与水之间的混合交换造成的释磷效果相比,已显得不太重要了^[41]。

除此以外,影响沉积物磷释放的因素还有磷的赋存形态、沉积物有机质含量、生物活性等。高丽等^[42]对滇池沉积物不同形态磷释放的研究表明,可还原态磷(BD-P)是厌氧条件下磷释放的主要形态,碱性条件下金属氧化物结合态磷(NaOH-P)对沉积物磷释放的贡献最大。金相灿等^[43]对太湖沉积物不同形态磷的释放研究认为:碱性条件下,促进 NaOH-P 的释放;酸性条件下,促进 HCl-P 的释放。朱广伟等^[44]的研究表明,沉积物总磷含量并不能决定沉积物的磷释放能力,有机污染较重河段的沉积物磷释放能力显著高于总磷含量较高但以重金属污染为主的河段的沉积物。微生物活动加快溶解氧的消耗,同时把有机态磷转化、分解成无机态磷,把不溶性磷转化成可溶性磷,从而促进沉积物中磷的释放^[45]。

3 底泥有机物的环境行为

解岳等^[46]、曹军等^[47]对沉积物中有机物释放过程的研究发现:沉积物是一种由黏土颗粒和大分子有机物构成的松散复合体,其中,水以重力水、毛管水两种形式存在于复合体中,沉积物中可溶性有机物以不同形式存在于这一复杂结构的不同部位。有机物的释放包括解吸扩散和降解两个过程,一开始,沉积物体系中固液相之间尚未达到平衡,沉积物中的可溶性有机物解吸进入毛管水中,进而由毛管水中扩散到重力水中,再由重力水中通过扩散作用进入上覆水体。当固液相之间的可溶性有机物浓度达到平衡后,这时有有机物的释放以微生物降解作用为主,即首先通过微生物将非可溶性有机物降解为可溶性有机物,再通过解吸、扩散作用进入上覆水体。

影响有机污染物在沉积物上吸附/解吸的因素非常复杂,研究表明,有机污染物自身的理化性质、沉积物的结构和物理化学性质以及温度、水力扰动、pH 值等外界因素都将影响底泥有机物向上覆水体的释放^[48]。

陈于望^[49]以动态平衡法研究了厦门西港沉积物释放有机物规律,发现沉积物释放有机物随着沉

积物有机质含量的升高而增加,而水体溶解氧浓度的降低将促进有机物的释放。应时理等^[50]、林元烧等^[51]分别对宁波邻近海域沉积物和厦门同安湾沉积物释放有机物的研究表明,沉积物有机物的释放量与沉积物有机物的含量成正比。白晓慧等^[52]对城市河道污染沉积物的释放试验发现:提高河道溶解氧可有效抑制沉积物中有机物的释放。林滨等^[53]、解岳等^[54]的研究表明:水流速度、温度的升高都将促进沉积物中有机物的释放。

不少学者还开展了沉积物释放有机物的动力学研究^[46-48, 55],得出了相应的释放方程,定量地描述了流速、温度、沉积物结构特征等参数对沉积物有机物释放的影响,较好地阐明了有机物释放的微观机理。

4 结 语

综上所述,沉积物中污染物的释放是一个受多因素综合作用的复杂过程,虽然国内外学者已经做了大量的调查研究工作,但多数研究仅仅停留在描述性的定性阶段,沉积物与水体之间复杂的物质交换过程尚有许多问题需要进一步探讨和完善:

a. 重视对能代表大水体实际情况实验装置的研制开发以及野外观测与室内实验的密切结合,以保证研究结果具有现实指导意义;

b. 加强沉积物—水体界面之间物质扩散交换过程的机理研究,揭示沉积物中污染物的释放规律,建立污染物释放模型;

c. 加强底泥污染物释放的动力学研究,为底泥污染源的控制和管理提供依据。

参考文献:

[1] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 208-214.

[2] GIBBS R J. Transport phase of transition metals in the Amazon and Yukon river[J]. Geology Society of American Bullion, 1977, 88(6): 829-843.

[3] TESSIER A, CABELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal[J]. Analysis Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.

[4] 黄廷林. 渭河沉积物中重金属释放的粒度效应[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(4): 381-385.

[5] 陈静生. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 57-65.

[6] 文湘华, HERBERT E A. 乐安江沉积物酸碱特性及其对重金属释放特性的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(6): 510-515.

[7] CALMANO W, HONG J, FORSTNER U. Binding and mobilization of heavy metal in contaminated sediment affected

by the pH and redox potential[J]. Water Science and Technology, 1993, 28(8-9): 223-235.

[8] 魏俊峰, 吴大清, 彭金莲, 等. 污染沉积物中重金属的释放及其动力学[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 127-130.

[9] 文湘华, HERBERT E A. 乐安江沉积物酸可挥发硫化物含量及溶解氧对重金属释放特性的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(4): 32-34.

[10] 朱广伟, 陈英旭, 田光明. 运河(杭州段)沉积物中 Cu 和 Zn 的释放特征[J]. 环境化学, 2002, 23(5): 436-442.

[11] 方涛, 肖邦定, 张晓华, 等. 曝气对两种不同类型沉积物中重金属释放的影响[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 355-359.

[12] 陈宗团, 徐立, 洪华生. 河口沉积物—水界面重金属生物地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 1997, 12(5): 434-439.

[13] CLINE J T, UPCHURCH S B. Mode of heavy metal migration in the upper strata of lake sediments[J]. Proc 16th Conf Great Lakes Research. Int Assoc Great Lakes Res, 1973: 349-356.

[14] 张希衡. 水污染控制工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 8-9.

[15] 何清溪, 张穗, 方正信, 等. 大亚湾沉积物中氮和磷的地球化学形态分配特征[J]. 热带海洋, 1992, 11(2): 38-44.

[16] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物—水界面氮磷交换的影响[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 337-342.

[17] 贾晓珊, 徐昕荣, 李适宇, 等. 珠江流域河网底泥的氮磷污染特征及释放机理[J]. 中山大学学报, 2005, 44(2): 107-110.

[18] 陈永红, 陈军, 王娟, 等. 淮河(淮南段)底泥内源氮磷释放的模拟实验研究[J]. 土壤学报, 2005, 44(2): 344-347.

[19] 胡雪峰, 高效江, 陈振楼. 上海市郊河流底泥氮磷释放规律的初步研究[J]. 上海环境科学, 2001, 20(2): 66-70.

[20] 吴群河, 曾学云, 黄钥. 河流底泥中 DO 和有机质对三氮释放的影响[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 34-39.

[21] 袁文权, 张锡辉, 张丽萍. 不同供氧方式对水库底泥氮磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 28-34.

[22] CARRICK H J, ALDRIDGE F J, SCHELSKE C L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake[J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(10): 1179-1192.

[23] SONDERGAARD M, KRISTENSEN P, JEPPESEN E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind exposed Lake Arreso Denmark[J]. Hydrobiology, 1992, 228(1): 91-99.

[24] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1822-1831.

[25] 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.

- [26] 李一平 逢勇 向军. 太湖水质时空分布特征及内源释放规律研究[J]. 环境科学学报 2005 25(3) 300-306.
- [27] 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(9) 361-371.
- [28] BILLEN G. A budget of nitrogen recycling in North Sea sediments off the Belgain coast[J]. Estuar Coast Mar Sci , 1978 ,7(2) :127-146.
- [29] 范成新 张路 秦伯强 等. 太湖沉积物—水界面生源要素迁移机制及定量化[J]. 湖泊科学 2004 ,16(1) :10-20.
- [30] 付春平 钟成华 邓春光. pH 与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验[J]. 重庆大学学报 :自然科学版 ,2004 ,27(10) :125-127.
- [31] GOMEZ E , DURILLON C. Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons : pH , O₂ and loading influence[J]. Water Research ,1999 ,33(10) 2437-2447.
- [32] PANT H K , REDDY K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. Environ Qual 2001 30(10) :1474-1480.
- [33] INGALL E , JAHNKE R. Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters[J]. Geochimica et Cosmochimica acta ,1994 ,58(11) 2571-2575.
- [34] 王晓蓉. 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.
- [35] HENNING S J , FREDE O A. Importance of temperature , nitrate and PH for phosphorus release from aerobic sediments of four shallow eutrophic lakes[J]. Limnology Oceanography , 1992 27(3) :557-589.
- [36] De Montigny C , PRAIRIE Y. The relative importance of biological and chemical processes in the release of phosphorus from a highly organic sediment[J]. Hydrobiology ,1993 ,253(2) :141-150.
- [37] BOSTROM B , JANSSON M. Phosphorus release from lake sediment[J]. Arch Hydrobiol ,1982 ,18(1) 55-59.
- [38] ECKERT W , NISHN A , PARPAROVA R. Factors regulating the flux of phosphate at the sediment water interface of a subtropical calcareous lake : A simulation study with intact sediment cores[J]. Water , Air & Soil Pollution ,1997 ,99(1-4) 401-409.
- [39] GONSIORCZYK T , CASPER P. Variations of phosphorus release from sediments in stratified lakes[J]. Water , Air & Soil Pollution ,1997 99(1-4) 427-434.
- [40] 张路 范成新 秦伯强 等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学 2001 ,13(1) 36-42.
- [41] 吴根福. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学 ,1998 ,18(2) :107-110.
- [42] 高丽 杨浩 周健民 等. 滇池沉积物磷的释放以及不同形态磷的贡献[J]. 农业环境科学学报 ,2004 23(4) :731-734.
- [43] 金相灿 王圣瑞 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学 2004 24(6) :707-711.
- [44] 朱广伟 陈英旭 周根娣 等. 运河(杭州段)沉积物磷释放的模拟试验[J]. 湖泊科学 2002 ,14(4) 343-349.
- [45] GACHTER R , MEYER J. Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments[J]. Limnol Oceanogr ,1988 ,33(6) :1542-1558.
- [46] 解岳 黄廷林 薛爽. 水体沉积物中石油类污染物释放的动力学过程实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报 , 2005 37(4) :459-462.
- [47] 曹军 陶澍. 土壤与沉积物中天然有机物释放过程的动力学研究[J]. 环境科学学报 ,1999 ,19(3) 297-302.
- [48] 王连生. 有机污染化学[M]. 北京 :高等教育出版社 , 2004 46-56.
- [49] 陈于望. 港湾沉积物释放有机物的研究[J]. 海洋环境科学 ,1993 ,12(1) 6-9.
- [50] 时应理 熊健 廖先贵. 宁波及其邻近海域沉积物释放耗氧有机物(COD)的初步研究[J]. 东海海洋 ,1996 ,14(2) :59-63.
- [51] 林元烧 郑雪红 郑爱榕 等. 厦门同安湾需氧有机物的去除和释放能量估算[J]. 厦门大学学报 :自然科学版 , 2002 41(3) 340-345.
- [52] 白晓慧 杨万东 陈华林 等. 城市内河沉积物对水体污染修复的影响研究[J]. 环境科学学报 ,2002 22(5) 562-565.
- [53] 林滨 陶澍 刘晓航. 土壤与沉积物中水溶性有机物释放动力学研究[J]. 环境科学学报 ,1997 ,17(1) 8-13.
- [54] 解岳 黄廷林 王志盈 等. 河流沉积物中石油类污染物吸附与释放规律的实验研究[J]. 环境工程 ,2000 ,18(3) 59-61.
- [55] 梁涛 陶澍 刘广君 等. 伊春河河水水溶性腐殖酸内源释放模型[J]. 环境科学学报 ,1997 ,17(2) :136-140.

(收稿日期 2006-06-08 编辑 傅伟群)

