

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.03.003

水体中不可溶沉降型污染物迁移规律研究进展

韩龙喜^{1,2}, 颜芬芬¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 分别对沉降型憎水有机物自入水点至床面的吸附沉降过程、污染物沿床面的迁移扩展过程、沉底污染物向上覆水体的再悬浮释放过程、上覆水体中污染物的迁移(对流扩散、吸附-解吸、自净、挥发及沉降等)过程等 4 个不同阶段的污染物迁移转化特征及数学模拟的研究进展进行了综合评述, 可为突发事故情况下该类污染物进入地表水体后水质风险预报提供基础理论及技术参考。

关键词: 沉降型污染物; 地表水; 迁移过程; 物理模型; 数学模拟

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2015)03-0011-05

Advances of migration patterns of unsolvable sedimentation pollutants in water

HAN Longxi^{1,2}, YAN Fenfen¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: A comprehensive review was made respectively to the research progress of pollutant migration characteristics and mathematical simulation in the following four different stages: the adsorption and settlement process from the entry point to the bed surface of sedimentation hydrophobic organic compounds, the migration and extension process of pollutants along the bed surface, the precipitation pollutants' resuspension and release process to overlying water, the migration process of pollutants in overlying water including convective diffusion, adsorption-desorption, self-purification, volatilization and settlement. The purpose of this study is to provide the basic theory and technological references for water quality risk prediction after such kind of pollutants enter the surface water in accident cases.

Key words: sedimentation pollutant; surface water; migration process; physical model; mathematical simulation

1 研究背景

随着化学工业及其相关产业的迅速发展,我国突发性事故的发生频率不断增大。化学品的事故排放不但造成严重的经济损失,而且对水环境造成严重污染、影响区域供水安全及社会稳定,造成严重的政治影响。2005 年 11 月中石油吉林石化公司双苯厂发生爆炸,约 10 t 苯类物质(苯、硝基苯、苯胺等)流入松花江,造成重大水环境污染事件,污染带在我国境内历时 42 d,沿岸几百万居民的生活受到影

响^[1]。2012 年 12 月 31 日,位于山西长治的天脊煤化工集团股份有限公司发生事故,泄漏 38.7 t 苯胺(难溶于水,密度为 1.20),其中有 8.7 t 苯胺流入浊漳河,致使浊漳河出山西省界的王家庄监测断面苯胺浓度一度达到国家标准限值的 720 倍,污染物顺流而下流入河北、河南境内,对沿线数百万人口的饮水安全造成威胁,最终影响了下游邯郸等地的供水,引发各界广泛关注。除了危险化学品生产企业事故排放外,化学品运输过程如船舶运输、邻水公路运输等的化学品事故泄漏,也是造成水环境污染的重

要潜在风险源^[2]。

危险化学品种类繁多,根据其水溶性特征,可分为可溶于水和难溶于水两大类;按照密度大小,又可分为密度大于水和密度小于水两大类^[2]。水溶性和密度是影响污染物进入天然水体后的迁移转化特征的两大重要物理指标,目前大多水质模拟预报技术主要针对可溶性污染物;而对于难溶于水的憎水性污染物,则又主要局限于密度小于水的飘浮性的石油类污染物^[3],对于密度大于水的憎水性有机物目前研究不足,致使相关技术规范缺少关于对该类污染物的环境影响预测评价方法,如环评导则仅给出了可溶性、石油类污染物技术评价方法。因此,开展密度大于水的憎水有机物在动水环境中的迁移扩散特征的物理试验及数值模拟研究,可以进一步完善不同类型污染物迁移扩散的基本理论、水环境影响预测技术方法,为开展该类污染物的水质预报及风险预警提供基础理论及技术参考。

2 研究进展

沉降型憎水有机物是指“密度大于水、不溶或难溶于水的液态有机物”,有高毒、持久、挥发、亲酯、憎水等特性,属于颇受环境领域关注的持久性有机污染物 (POPs) 的范畴,研究它们在突发水污染事故中的环境行为具有重要意义。目前,主要通过物理模型试验和数学模型模拟两种方法研究污染物进入水体后的迁移、转化规律。

综合国内外现有研究成果,对于大量沉降型憎水有机物在地表水体中的迁移转化过程的研究,总体上可概括为 4 个过程^[4-6],分别为污染物自入水点至床面的吸附沉降过程、污染物沉底后沿床面的迁移扩展迁移、沉底污染物向上覆水体的再悬浮释放过程、上覆水体中污染物的迁移(对流扩散、吸附-解吸、自净、挥发及沉降)过程(图 1)。

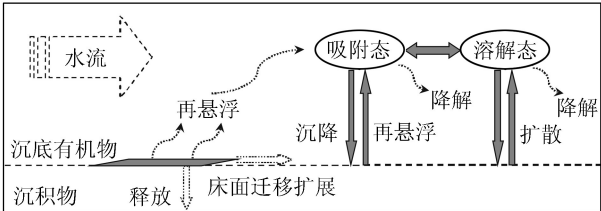


图 1 沉降型憎水有机物在地表水体中的迁移转化过程示意图

2.1 污染物自入水点至床面的吸附沉降过程

事故泄漏产生的大量沉降型憎水有机物排入水体后,由于密度大于水,会在有效重力(扣除浮力)作用下发生沉降。在水体中的沉降时间、沉降位置及沉到水底时的分布面积与有机物本身的物化性

质、水动力条件、水深、环境水体中悬浮颗粒物特性等因素密切相关,如一定数量的硝基苯瞬时排放进入静止水体后,会以黄绿色油状物沉入水底^[7-8]。李连峰^[9]研究船载难溶沉降型化学品在海洋中的沉降扩散行为,认为影响风险排放污染物的沉降过程的主要因素是化学品的初始容重以及粒径,此类化学品一般初始容重较小,入海后与周围海水发生大量掺混,形成所谓的云团。由于云团的沉降速度较凝聚块的沉降速度要慢,所以水深对液态模式云团的沉降过程影响较大。

陈协明^[10]认为,下沉过程中的部分有机物会被环境水体中的悬浮颗粒吸附,然后与较大的悬浮颗粒一起沉降,并且下沉过程中同时溶解,下沉速度取决于其密度,一般为 0.2 m/s。其以海洋中沉降型微溶化学品泄漏事故作为研究对象,认为“液体颗粒入水后其主体在水中迅速下降,形成了充分成长的向下射流。由于化学品颗粒物粒径都比较小,容易形成絮凝,建立了由粒子动量方程、云团质量方程、云团动量方程构成的方程组,研究分析污染物自入水点至床面的吸附沉降过程,发现液滴沉降过程中与周围海水发生掺混,沉降射流的体积不断扩大,当水深达到 50 m 左右时,沉降射流触底时的体积可达到入水前体积的 50 到 100 倍”。王琛^[11]也认为液团自身的沉降是沉降型化学品在水体中的主要运动过程之一,“沉降过程完成后,大部分小液滴将堆积在碰撞点附近,也有一部分在底浪的作用下沉降在离碰撞点较远的区域”。

郭宏伟^[12]和 Chevreuil^[13]针对非事故排放的憎水有机物,认为其进入水体后主要吸附于悬浮颗粒物中,且大部分随颗粒物的下沉而分配到沉积物有机质中。

张连丰^[14]认为,沉降型憎水液体物一旦泄漏入海水,在下沉过程中会受到湍流作用,类似油团的物质会逐渐分裂变碎,随着水流边漂移、边下沉。许多物质微团也可能在积聚中形成较大的物质团。下沉和漂移的最终地点可由水体的流速、沉降速度、水深粗略估算。

2.2 污染物沉底后沿床面的迁移扩展过程

硝基苯属于持久性有毒物质,在水中具有极高的稳定性。由于其密度大于水,进入水体的硝基苯会沉入水底,长时间保持不变。松花江水污染事故发生后,高峰期水流带走的硝基苯数量约为 44 t,还有约 50 ~ 100 t 左右的硝基苯沉淀在松花江江底^[15],后期不断随水流向下游迁移,或通过水流的紊动效应,再悬浮进入水体。宋晓旭等^[16]认为污染物从水体中沉积到沉积物中,逐渐富集,在一定条件

下,吸附到沉积物相的有机物又会发生各种转化,重新进入到水中,通过反复的沉降-悬浮过程迁移到很远的地方。

张连丰^[14]研究海水中突发排放的四氯化碳(密度 1.597)迁移规律,认为沉降于海底的四氯化碳是“迁移、扩散多种运动形式的组合”,其“迁移轨迹根据上覆水体运动速度计算”,污染团随水流迁移的同时,伴随连续扩散,“当扩展达到最大半径时,污染团变成了碎片,进入碎片状态的物质通过再悬浮进入上覆水,或被海底的植被及沉积物吸附、固定^[17]”。

于晓菲等^[18]以松花江硝基苯污染事故为例,应用非稳态多介质环境模型研究事故发生后硝基苯在大气、水、土壤和沉积物中的浓度变化和迁移量,结果表明,研究时段内事发河段“沉降于河底的硝基苯除向水中悬浮释放一定数量外,其余大部分随水流对流至下一断面”。

2.3 沉底污染物向上覆水体的再悬浮释放过程

综合国内外研究现状,关于沉积物中有机物向水体释放规律的研究较为充分,而对突发事件后沉积于床面的污染物再悬浮特征研究很少。在水体环境中,沉积物-水界面的污染物迁移过程中,水动力作用是影响水体沉积物中污染物释放的重要因素。水流和风浪能够在沉积界面产生剪切力作用,大于临界值的剪切力将导致沉积物发生再悬浮^[19]。大量研究验证了行船密度和行船的速率对于沉积物的再悬浮都有着巨大的影响, Garrad^[20] 和 Nedohin 等^[21] 监测、分析了机动船扰动下沉积物中污染物的释放,发现水体中的磷元素显著增加。秦伯强等^[22] 研究发现,当太湖湖面风速达到 4 m/s 时,湖床表面剪切力强度达到 0.4 dyne/cm² 的时,太湖沉积物将发生颗粒物再悬浮,再悬浮量随风速增强而增大。对美国 Hudson 河沉积物 PCBs 释放模拟研究表明^[23],在 2 dyne/cm² 剪切力连续作用 3 d 后,沉积物 PCBs 释放通量可以百倍于静止状态下释放通量。在沉积物再悬浮研究中,诸如 Annular Flume 或 Shaker 等装置被用来模拟水体中较低剪切力作用下的表层底泥再悬浮,而 Sedflume 等试验装置则被用来模拟分析较高剪切力作用的底泥再悬浮^[24-26]。还有一类研究方法是针对污染物在大尺度时间及空间区域的归趋研究,1979 年,加拿大学者 Donald Mackay^[27] 首次提出了化学品多介质环境迁移的逸度方法。国内环境多介质归趋研究开始于 2001 年,研究区域涵盖海河、黄河、辽河、珠江、长江和松花江流域,但多集中于使用不具有空间分辨率的大尺度逸度模型,该类方法无法直接应用于河流沉积物与水环境

的污染物交换^[28],更无法应用于沉积在床面的污染物的再悬浮动态变化过程的定量化描述。

李连峰^[9]针对事故排放后沉积于床面污染物再悬浮过程,采用“扬起系数(经验取值选取为遗留物质的 5%)”计算再悬浮通量。

2.4 上覆水体中污染物迁移过程

上覆水体中憎水有机物的迁移扩散过程包括水体中污染物与颗粒物间的相互作用、污染物随流、扩散、水-气界面的挥发、沉积物-水界面的沉降及再悬浮、污染物降解等几个方面的内容。

李杏茹等^[29]研究了黄河中下游小浪底—花园口—高村河段 10 种硝基苯类有机污染物的质量,结果表明,硝基苯类有机物在河水、沉积物和悬浮颗粒物中的大体分布趋势为悬浮颗粒物大于沉积物大于河水。Nishikawa 等^[30]调查分析了国外某天然河流中硝基苯在河水、沉积物、鱼类中的分布。

对于进入上覆水体中的憎水有机物的对流扩散,现有研究成果采用与可溶性污染物相同的数学方法,认为其迁移扩散满足对流扩散方程。

对于憎水有机物在水体中的吸附与解吸,学者们过去开展了广泛深入的研究,提出了各种理论、模型和经验公式来分析、模拟这一过程所表现的现象和规律,已基本达成共识^[31-33]。对于有机物-颗粒物之间相互作用的机理问题,人们主要在两个方面做了大量的工作:一是从有机污染物自身物理化学性质出发研究有机物在溶解态与吸附态间的分配系数与其在水中溶解度和辛醇-水分配系数之间的关系;二是从水体颗粒物的角度研究它们的组成与结构对吸附的影响^[34-35]。刘婷^[36]通过半动态实验考察了颗粒物对硝基苯的吸附特性,表明吸附符合一级动力学过程,吸附速率常数强烈依赖于搅拌强度。Chao 等^[37]初步证明悬浮颗粒物对硝基苯的吸附能力比较强,在浊度比较高的河流中,硝基苯被悬沙所吸附并随着悬沙迁移是硝基苯在此类河流中迁移转化的一个重要组成部分,而水面挥发相对比例较小。赵岚^[38]研究了长江口泥沙含量、水温、盐度、pH 值、吸附时间等因子对泥沙吸附微量硝基苯的影响,发现细颗粒泥沙对微量硝基苯的吸附等温线符合 Henry 公式和 GilesC 型吸附等温线模型。

迟杰等^[39]利用稳态非平衡逸度模型计算了 pc-DDT 在海河干流沉积物-水界面间的迁移和分布。研究表明,生物降解速率常数、污染物在悬浮颗粒物-水间分配系数以及水体颗粒物沉降通量是影响 pc-DDT 在沉积物-水间迁移过程的主要因素。聂湘平等^[40]利用微宇宙模拟水生态系统对多氯联苯在水体环境中的行为,发现瞬时排放进入水体中的多氯

联苯立即向底泥、悬浮颗粒物、水草等各介质分配,经过 2 d 左右后就已达到平衡状态。

陈刚等^[41]和 Zepp 等^[42]采用实验室模拟装置研究了温度、挥发和光照等环境因素对硝基苯在上覆水中的迁移转化的影响规律,结果表明,影响程度从大到小依次为温度、挥发和光照。

目前对于颗粒态沉降型憎水有机物的沉降规律的研究文献相对较少,李连峰^[9]针对事故排放污染物的沉降过程,采用“静水环境下粒子沉降公式”计算沉速,并据此计算沉降通量。

2.5 水体中污染物的迁移扩散转化过程的数值模拟

目前,沉降型憎水污染物迁移扩散转化过程的物理机理研究显得相对不足,所以制约了其数学模拟方法及模型的研究。

张连丰^[14]认为,对于灾难性破裂情形,尽管液体泄漏并非真正瞬间完成,但从扩散建模的观点来看,灾难性破裂持续时间可以忽略不计,假设液体瞬间泄漏,将数学模型中的源强概化为瞬时源。Jurado 等^[43]首次通过建立耦合的垂向一维水动力-污染物模型分析了紊动扩散对持久性有机污染物垂向分布的影响。彭虹等^[44]以北方某江段突发硝基苯污染事件为研究对象,建立了一维水流和硝基苯迁移转化模型,考虑了硝基苯光降解、挥发、吸附与沉积等因子,根据上边界(事故断面)实测浓度变化过程,预测分析了事故发生地河流下游硝基苯浓度的时、空分布情况。Wang 等^[45]以某突发事件为例,建立了考虑包括污染物再悬浮等影响的断面平均的一维水质模型,分析了浓度沿流程及随时间的变化。

3 结 语

综合国内外研究现状,关于海洋、地表水中憎水沉降型有机物的迁移转化特征目前已开展了一系列相关研究。但总体上针对事故排放后憎水沉降型污染物的迁移转化研究比较薄弱;且研究对象主要针对海洋水体,对河流等地表水体的事故排放沉降憎水有机物的迁移规律的研究深度、广度则明显不足。总体可概括为以下几点:

- a. 沉降型憎水有机物自入水至沉降于床面的物理过程研究仅见于海洋水体,关于入水后的迁移过程及其在床面空间分布的定量化研究相对欠缺。同时,因地表水的水深及其他水动力特征与海洋水体有所差异,现有研究成果无法应用于地表水体。
- b. 污染物沉底后沿床面的迁移扩展迁移研究仅见于海洋水体,且多为定性研究或简单的定量模拟(如采用上覆水体流速,估算其空间位移)。对憎水有机物从河床(或海床)沉积物向上覆水体的释

放过程研究较多,但相关成果无法应用于事故发生后大量集中沉积在床面的污染物的再悬浮动态变化过程的定量化描述,有采用“扬起系数”计算再悬浮通量的研究报道,但该系数为经验系数,再悬浮速率应与有机物的密度、黏滞性及上浮水动力有关,经验系数法显然失之过粗。

c. 对憎水有机物在水体中的吸附与解析、生物活性和降解、生物毒性、沉降特征,学者们已提出了各种理论、模型和经验公式,基本达成共识,并应用于指导环境污染治理、环境修复技术。但突发事故水体中的沉降型憎水有机物具有高浓度的特征,一方面其沉降速率与泥沙及其他悬浮物浓度有关,同时其吸附-解吸特征不同于常态,目前缺乏对高浓度下的吸附-解吸及考虑与泥沙等悬浮物运动特征耦合影响的有机物沉降规律研究。

d. 事故后水体中污染物的迁移转化的数学模拟应该是自污染物入水后上述各个过程的综合的、系统的定量化模拟,由于目前对相关物理机理的研究不足,目前的数学模拟方法一方面缺乏对整个迁移转化过程的系统耦合;同时模拟方法对沉降型憎水有机物的密度、溶解性、泥沙三维分布特征及由此导致对污染物迁移、扩散、吸附-解吸、转化特征的影响研究不足。

参考文献:

[1] 金子,冯吉平,张蕾,等. 突发性水环境污染事故监测及对策[J]. 东北水利水电,2007,25(1):56-57. (JIN Zi, FENG Jiping, ZHANG Lei, et al. The monitoring and countermeasures of sudden water pollution accidents[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2007, 25(1):56-57. (in Chinese))

[2] 刘洪喜. 水污染事故频发的原因与对策[J]. 环境保护与循环经济,2009,29(5):55-57. (LIU Hongxi. The causes and countermeasures of water pollution accidents-prone [J]. Environmental Protection and Circular Economy,2009,29(5):55-57. (in Chinese))

[3] 韩龙喜,张琳,金文龙,等. 基于油粒子模型的水库水质应急预案[J]. 河海大学学报:自然科学版,2013,41(2):120-124. (HAN Longxi, ZHAGN Lin, JIN Wenlong, et al. Water quality emergency warning in reservoirs based on oil particle model [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2013,41(2):120-124. (in Chinese))

[4] SANDY A L, GUO J, MISKEWITZ R J, et al. Mass transfer coefficients for volatilization of polychlorinated biphenyls from the Hudson River, New York measured using micrometeorological approaches[J]. Chemosphere,2013, 90(5):1637-1643.

[5] LIU R, LIU H, WAN D, et al. Characterization of the

- Songhua River sediments and evaluation of their adsorption behavior for nitrobenzene [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(7): 796-802.
- [6] STEINBERG L J, RECKHOW K H, WOLPERT R L. Characterization of parameters in mechanistic models: a case study of a PCB fate and transport model [J]. *Ecological Modelling*, 1997, 97(1/2): 35-46.
- [7] PRIYA M H, MADRAS G. Photocatalytic degradation of nitrobenzenes with combustion synthesized nano-TiO₂ [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2006, 178(1): 1-7.
- [8] 李俊生, 徐靖, 罗建武, 等. 硝基苯环境效应的研究综述 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 368-373. (LI Junsheng, XU Jing, LUO Jianwu, et al. A review on the research of environmental effects of nitrobenzene [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 368-373. (in Chinese))
- [9] 李连峰. 船载散装难溶保守液体化学品泄漏扩散研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [10] 陈协明. 沉降型化学品海上泄漏事故应急决策支持系统的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [11] 王琛. 突发化学品排放事件在平原河网中的风险场预警模拟技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [12] 郭宏伟. 多氯联苯在水中迁移转化研究进展 [J]. *气象与环境学报*, 2009, 25(4): 48-53. (GUO Hongwei. Advance in transportation and transformation of PCBs in water [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, 25(4): 48-53. (in Chinese))
- [13] CHEVREUIL M, BLANCHARD M, TEIL M J, et al. Polychlorobiphenyl behaviour in the water/sediment system of the Seine River, France [J]. *Water Research*, 1998, 32(4): 1204-1212.
- [14] 张连丰. 散装液体化学品海上泄漏事故应急决策系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2003.
- [15] 韩洪军, 薛梅. 松花江硝基苯污染带迁移的规律研究 [EB/OL]. [2005-12-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200512-696>.
- [16] 宋晓旭, 王祖伟, 胡晓芳. 多介质中持久性有机污染物研究进展 [J]. *北方环境*, 2012(4): 135-139. (SONG Xiaoxu, WANG Zuwei, HU Xiaofang. Research progress of persistent organic pollutants in different media [J]. *Northern Environment*, 2012(4): 135-139. (in Chinese))
- [17] DEL VENTO S, DACHS J. Prediction of uptake dynamics of persistent organic pollutants by bacteria and phytoplankton [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, 21(10): 2099-2107.
- [18] 于晓菲, 陈景文, 乔显亮. 非稳态多介质环境模型在突发性环境污染事故环境影响预测中的应用: 以松花江硝基苯污染事故为例 [C]//中国环境科学学会: 中国环境科学学会学术年会优秀论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [19] 戴国华, 刘新会. 影响沉积物-水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究 [J]. *环境化学*, 2011, 30(1): 224-230. (DAI Guohua, LIU Xinhui. Factors affecting the migration of persistent organic pollutants across the sediment-water interface of aquatic environment [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1): 224-230. (in Chinese))
- [20] GARRAD P N, HEY R D. Boat traffic, sediment resuspension and turbidity in a Broadland River [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 95(3/4): 289-297.
- [21] NEDOHIN D N, ELEFSINIOTIS P. The effects of motorboats on water quality in shallow lakes [J]. *Toxicol Environ*, 1997, 61(1/4): 127-133.
- [22] 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. (QIN Boqian, HU Weiping, GAO Guan, et al. Dynamic mechanism of sediment resuspension and conceptual model of endogenous release [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17): 1822-1831. (in Chinese))
- [23] SCHNEIDER A R, PORTER E T, BAKER J E. Polychlorinated biphenyl release from resuspended hudson river sediment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(4): 1097-1103.
- [24] Mc NEIL J, TAYLOR C, LICK W. Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 122(6): 316.
- [25] ROBERTS J, JEPSEN R. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(12): 1261.
- [26] LICK W, Mc NEIL J. Effects of sediment bulk properties on erosion rates [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 266(1/3): 41-48.
- [27] MACKAY D. Finding fugacity feasible [J]. *Environmental Science and Technology*, 1979, 13(10): 1218-1223.
- [28] 刘世杰, 吕永龙, 史雅娟. 持久性有机污染物环境多介质空间分异模型研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(2): 129-137. (LIU Shijie, LU Yonglong, SHI Yajuan. Advances in spatially explicit environmental multimedia fate models of POPs [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(2): 129-137. (in Chinese))
- [29] 李杏茹, 何孟常, 孙艳, 等. 硝基苯类化合物在黄河小浪底至高村河段水体中的分布特征 [J]. *环境科学*, 2006, 27(3): 513-518. (LI Xingru, HE Mengchang, SUN Yan, et al. Distribution of nitrobenzenes in the yellow river from xiaolangdi to gaocun reach [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(3): 513-518. (in Chinese))
- [30] NISHIKAWA Y, OKUMURA T. Determination of nitrobenzenes in river water, sediment and fish samples by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1995, 312(1): 45-55.

(下转第 32 页)

- [8] 环办[2012]101 号 生态县、生态市、生态省建设指标 [S].
 - [9] 罗亚蒙,顾文选. 宜居城市科学评价标准 [R]. 北京: 中华人民共和国建设部科学技术司,2007.
 - [10] 张俊艳,韩文秀. 城市水安全问题及其对策探讨[J]. 北京科技大学学报, 2005(2):78-82. (ZHANG Junyan, HAN Wenxiu. The discuss about problems and countermeasures of urban water security [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2005(2): 78-82. (in Chinese))
 - [11] 韩宇平,阮本清,解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学,2003(4):37-42. (HAN Yuping, YUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. Resources Science, 2003(4): 37-42 (in Chinese))
- (收稿日期:2014 -04 -22 编辑:彭桃英)
- +++++
- (上接第 15 页)
- [31] 舒月红,吴宏海,黄小仁,等. CBs 在沉积物上的吸附-解吸行为[J]. 地球化学,2009,38(2):153-158. (SHU Yuehong, WU Honghai, HUANG Xiaoren, et al. Sorption-desorption behavior of chlorobenzenes in sediments [J]. Geochimica, 2009, 38(2): 153-158. (in Chinese))
 - [32] 陈迪云,彭燕. 憎水有机物在水/土壤、沉积物体系中吸附与解吸[J]. 化工时刊,2001,15(4):11-15. (CHEN Diyun, PENG Yan. Sorption and desorption of hydrophobic organic compounds on water/soil, sediment system [J]. Chemical Industry Times, 2001, 15(4): 11-15. (in Chinese))
 - [33] YONG R, BAOSHAN X, RAO P S C, et al. Importance of adsorption (hole-filling) mechanism for hydrophobic organic contaminants on an aquifer kerogen isolate [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(16): 4340-4348.
 - [34] 孟庆昱,储少岗,徐晓白. 多氯联苯的环境吸附行为研究进展[J]. 科学通报,2000,45(15):1572-1583. (MENG Qinyu, CHU Shaogang, XU Xiaobai. Advances in PCBs environmental adsorption behavior [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(15): 1572-1583. (in Chinese))
 - [35] 张娇,张龙军. 有机物在河口区迁移转化机理研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2008,38(3):489-494, 394. (ZHANG Jiao, ZHANG Longjun. Research progress on the transfer and transformation of organic matters in estuaries [J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(3): 489-494, 394. (in Chinese))
 - [36] 刘婷. 硝基苯在河水中气-液-固相间迁移规律研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
 - [37] CHAO K P, ONG S K. Water-to-air mass ratnsfer of VOCs: laboratory-scale air sparging system [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124(11): 1054.
 - [38] 赵岚. 硝基苯污染物在河污混合过程中的迁移转化行为研究 [D]. 上海:华东师范大学,2004.
 - [39] 迟杰,张玄. DDTs 在海河干流市区段沉积物/水间迁移行为研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2376-2380. (CHI Jie, ZHANG Xuan. DDTs transport between sediment and water in the mainstream of Haihe River in the urban area [J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2376-2380. (in Chinese))
 - [40] 聂湘平,魏泰莉,蓝崇钰. 多氯联苯在模拟水生态系统中的分布、积累与迁移动态研究[J]. 水生生物学报, 2004, 28(5): 478-483. (NIE Xiangping, WEI Taili, LANG Chongyu. Distribution, accumulation and transfer dynamics of PCB1254 in a simulated micro-cosmos system [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(5): 478-483. (in Chinese))
 - [41] 陈刚,金相灿,姜霞,等. 水流模拟断面中硝基苯的迁移转化规律[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 78-84. (CHEN Gang, JIN Xiangcan, JIANG Xi, et al. Research of nitrobenzene's translocation and transformation rule in simulative section of stream [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 78-84. (in Chinese))
 - [42] ZEPP R G, BRAUN A M, HOIGNE J, et al. Photoproduction of hydrated electrons from natural organic solutes in aquatic environments [J]. Environmental Science and Technology, 1987, 21(5): 485-490.
 - [43] JURADO E, ZALDÍVAR J-M, MARINOV D, et al. Fate of persistent organic pollutants in the water column: does turbulent mixing matter? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54(4): 441-451.
 - [44] 彭虹,齐迪,张万顺. 河流环境中硝基苯的归趋模型研究[J]. 人民长江, 2011, 42(24): 81-84, 88. (PENG Hong, QI Di, ZHANG Wangshun. Study of fate model of nitrobenzene in rivers [J]. Yangtze River, 2011, 42(24): 81-84, 88. (in Chinese))
 - [45] WANG C, FENG Y, ZHAO S, et al. A dynamic contaminant fate model of organic compound: a case study of nitrobenzene pollution in Songhua River, China [J]. Chemosphere, 2012, 88(1): 69-76.
- (收稿日期:2014 -07 -25 编辑:高渭文)