

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险

刘亚莉^{1,2}, 王继忠^{1,2}, 彭书传^{1,2}, 陈天虎^{1,2}

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学纳米矿物与环境材料实验室, 合肥 230009)

摘要: 近年来, 随着大量使用拟除虫菊酯类杀虫剂, 导致的环境问题已得到广泛关注. 为认识巢湖流域氯菊酯在环境中的赋存状态、迁移转化、环境归趋和生态风险, 本研究结合多介质归趋模型和物种敏感性分布模型(SSD), 模拟了稳态假设下氯菊酯在巢湖生态系统各环境介质中的浓度分布、迁移通量和去除途径, 并通过灵敏性分析和不确定性分析对各输入参数进行了评价. 进一步构建污染物的 SSD 模型, 评价了氯菊酯在稳态条件下的潜在生态风险, 预测了保护系统中 95% 的物种时允许最大年输入量. 结果表明, 氯菊酯在大气相、水体相、沉积物相中的浓度分别为 3.99×10^{-16} 、 5.63×10^{-11} 和 $1.95 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, 沉积物是氯菊酯的最大储库; 大气中的氯菊酯主要以挥发形式进入, 通过空气颗粒物干沉降消减; 水体中的氯菊酯主要以平流输入为主进入, 通过底泥沉降消减; 沉积物中的氯菊酯主要以底泥沉降形式进入, 通过底泥再悬浮和掩埋消减. 此外, SSD 模型预测的 HC_5 浓度为 $0.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 假设稳态下预测的水体浓度远低于该值, 仅对巢湖流域 0.77% 的物种产生影响, 当年输入量低于 78.2 t 的情况下, 巢湖水体中 95% 的物种不会受到氯菊酯的威胁.

关键词: 氯菊酯; 巢湖; 多介质归趋模型; 物种敏感性分布模型; 迁移转化; 生态风险评价

中图分类号: X52; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4644-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201606022

Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake

LIU Ya-li^{1,2}, WANG Ji-zhong^{1,2}, PENG Shu-chuan^{1,2}, CHEN Tian-hu^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Laboratory for Nanomineralogy and Environmental Material, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Environmental pollution caused by synthetic pyrethroid insecticides has received a great deal of attention with the increase in usage recently. To understand the occurrence, environmental processes, fate and ecological impact of permethrin in Chaohu Lake, fugacity based multimedia fate model combining species sensitivities model (SSD) were employed. The concentration distribution, and transfer fluxes were predicted under nonequilibrium steady-state condition, and the effect of input parameter on the outputs was evaluated by sensitive and uncertainty analysis. Furthermore, SSD model of aquatic organisms was constructed for permethrin to assess the potential ecological risk and to determine the maximum annual input amount of permethrin for the purpose of protecting 95% of species. The results showed that the predicted concentrations of permethrin in air, water and sediment were 3.99×10^{-16} , 5.63×10^{-11} , $1.95 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, and sediment was the largest sink. Most permethrin was transported from water to air via volatilization, but elimination from air was mostly by particle dry deposition. Permethrin in water was predominately from advection, and was removed by deposition of suspended particulate matter. Sediment associated permethrin was generally derived from suspended particulate matter deposition, and was eliminated by resuspension and sediment burial. The results of SSD model suggested HC_5 value was at $0.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, which was much higher than the predicted environmental concentration of permethrin in water. Only 0.77% of species was possibly impacted by exposure to permethrin. In order to protect 95% of species in Chaohu Lake, the maximum annual input amount of permethrin should be controlled below $78.2 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$.

Key words: permethrin; Chaohu Lake; multimedia fate model; species sensitivities model; migration and transformation; ecological risk assessment

随着逐渐禁用持久性的有机氯农药和高毒性的有机磷农药, 拟除虫菊酯类农药得到了广泛的生产和使用. 此类化学品是通过改变天然菊酯化学结构而衍生的仿生合成农药. 长期以来, 拟除虫菊酯杀虫剂被认为是高效、低毒和低残留的农药, 能有效地控制害虫, 因此逐渐占据了农药市场的较大份额. 据估算近年来拟除虫菊酯类农药占杀虫剂销售总量比例增加至 20%^[1]. 同时研究表明, 拟除虫菊酯杀虫剂对多种生物的生殖系统和神经系统具有负面影

响^[2-4]. 该类杀虫剂不仅应用于农业生产中, 为了蚊虫控制也作为卫生杀虫剂广泛应用于人口密集的都市区, 随着地表径流和市政废水排放, 都市下游水域是这类污染物的重要汇集区域^[5-7]. 先前研究亦表明, 巢湖流域水生环境中检出大量拟除虫菊酯类

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41390244); 中央高校基本科研业务费专项(2015HGCH0002)

作者简介: 刘亚莉(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境科学环境影响评价理论与方法, E-mail: 464245475@qq.com

杀虫剂,主要受到上游都市区域各种废水排放影响,而这些拟除虫菊酯类杀虫剂以氯菊酯为首要污染物^[8,9]。虽然拟除虫菊酯杀虫剂毒性比许多传统农药低,但属于高抗性农药,随着使用时间的增加和施用量逐渐增大,其环境中的残留必然会在生物体内富集并影响当地生态健康,进一步通过食物链进入高营养级生物体内,对人体健康造成危害。

污染物进入水生环境后可通过各种环境过程和分子扩散作用进入不同介质中,而赋存形态的不同对当地水生环境危害程度亦不同。要了解污染物对特定水生环境的影响,研究其在系统内的迁移转化及赋存形态是关键。野外监测不同介质中污染物的浓度分布及其因素是最为直接和可靠的方法,但耗时耗力,且一些环境过程难以通过实时监测获取真实数据。因此本研究应用数学模型模拟和预测特定区域污染物的环境行为、过程及赋存状态对于认识污染物的生态健康风险具有重要意义,通过确定污染物的环境阈值及允许最大年输入量,以期为保护研究区域生态健康安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 多介质扩散模型

多介质逸度模型是 Mackay 在 20 世纪 70 年代提出^[11],被广泛用于描述全球或区域环境中有机污染物的行为归趋。其核心思想是采用逸度(fugacity, f)代替化合物在环境介质中的浓度,进而表征该污染物从特定介质中的逃逸趋势或能力, f 以化合物

的分压表示。通过逸度容量 Z 和迁移过程参数 D ,建立污染物在生态系统内各介质间迁移转化的质量平衡方程,求解方程最终得到污染物在各介质相中的浓度、通量和质量。由于逸度模型结构简单,因此广泛应用于研究多介质环境中污染物。Mackay 等^[12]在 20 世纪 80 年代初建立了空气-水以及底泥-水交换(QWASI)模型作为湖泊模型,它是研究水生生态环境中污染物(特别是有机物)行为的有效手段^[13]。模型建立在质量守恒、水体混合均匀的基础之上,其主要目的在于解析和计算化学物质在环境中的变化趋势。在稳态假设条件下,根据质量守恒定律,其环境相输入总量等于输出。依次建立起有确定数值解的代数方程。为了扩大其适用性,不同学者则可以根据研究区域和化合物特性对模型进行改进和修正。

1.1.1 多介质扩散模型框架

本研究采用了 QWASI 逸度模型,将整个区域划分为 3 个主相,即大气、水、沉积物(分别表示为 BA、BW、BS),每个主相中又包括气(A)、固(S)和水(W)等子相,大气相包括气相(A)和气溶胶(Q),水体相包括水相(W)和悬浮颗粒物(S),沉积物相包括固相(S)和水相(W)。各个环境相中化合物的浓度 c ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) 为逸度 f (Pa) 和逸度容量 Z [$\text{mol}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{Pa})^{-1}$] 的乘积,即:

$$c = fZ \quad (1)$$

其中模型内部不同介质及子介质的 Z 值列于表 1 中。

表 1 子介质和介质 Z 值计算¹⁾

Table 1 Calculation of Z value

相	Z	方程	说明
子介质			
气相	Z_A	$Z_A = 1/(RT)$	R 为气体常数 $8.314[\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}]$, T 是热力学温度(K)
气溶胶	Z_Q	$Z_Q = y_{0A}Z_0(\rho_Q/1000)$	y_{0A} 是有机质的质量分数, ρ_Q 是气溶胶的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
水相	Z_W	$Z_W = 1/H$	H 是亨利常数($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
沉积物固相	Z_S	$Z_S = y_{0C}K_{0C}Z_W(\rho_S/1000)$	K_{0C} 为有机碳分配常数($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其中 K_{0C} 通常可以通过辛醇-水分配系数 K_{0W} 进行估算, 即 $K_{0C} = 0.41K_{0W}$, y_{0C} 是悬浮颗粒物中有机碳的质量分数, ρ_S 是固相密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
主介质			
大气相	Z_{BA}	$Z_{BA} = Z_A + 2 \times 10^{-7}Z_Q$	
水相	Z_{BW}	$Z_{BW} = Z_W + 5 \times 10^{-6}Z_S$	
沉积物	Z_{BS}	$Z_{BS} = 0.8Z_S + 0.2Z_W$	

1) 下标 A、Q、W、S 分别表示纯气相、气溶胶相、溶解水相以及沉积物固相; BA、BW 和 BS 分别表示大气、水体和沉积物

污染物在系统内的迁移转化包括了 14 个不同的过程,这些过程可分为平流、相邻介质间的迁移和介质内的各种转化或降解反应。其中平流指污染物随着介质分子携带所做流入流出的平流运动,本

研究中污染物在水体中的平流通量 T ($\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$) 可定义为: $T = cQ$ 表示, c 为污染物平流输入的浓度 ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), Q 是径流量 ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)。相邻介质间迁移过程包括了大气-水 (D_{BA-BW} 和 D_{BW-BA}) 和水-沉积

物(D_{BW-BS} 和 D_{BS-BW}),其中 D_{BA-BW} 是指污染物从大气向水体迁移,包括雨溶解(D_M)、干沉降(D_Q)、湿沉降(D_C)和水体吸收(D_V); D_{BW-BA} 为污染物从水体向大气迁移,主要为挥发(D_E); D_{BW-BB} 为污染物从水体向沉积物中迁移,包括颗粒物沉降(D_D)、水-沉积物界面扩散(D_T); D_{BS-BW} 是指污染物从沉积物向水体迁移,包括了沉积物再悬浮(D_R)和分子界面扩散(D_F).降解反应包括水解、光解、化学降解、微生物降解等多种降解形式,本研究中假设这些反应可用一级反应速率常数表征,则反应通量可表达为:

物降解等多种降解形式,本研究中假设这些反应可用一级反应速率常数表征,则反应通量可表达为:

$$G_i = k_i c_i V_i = k_i V_i Z_i f_i = D_i f_i$$

式中, V_i 是特定环境介质*i*体积(m^3), c_i 是在该介质中的浓度($mol \cdot m^{-3}$), k_i 是反应速率常数(h^{-1}), D_i 是降解速率($mol \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}$). D 值定义和计算过程可参考文献[11, 14~16].本模型中具体的环境过程如图1所示.

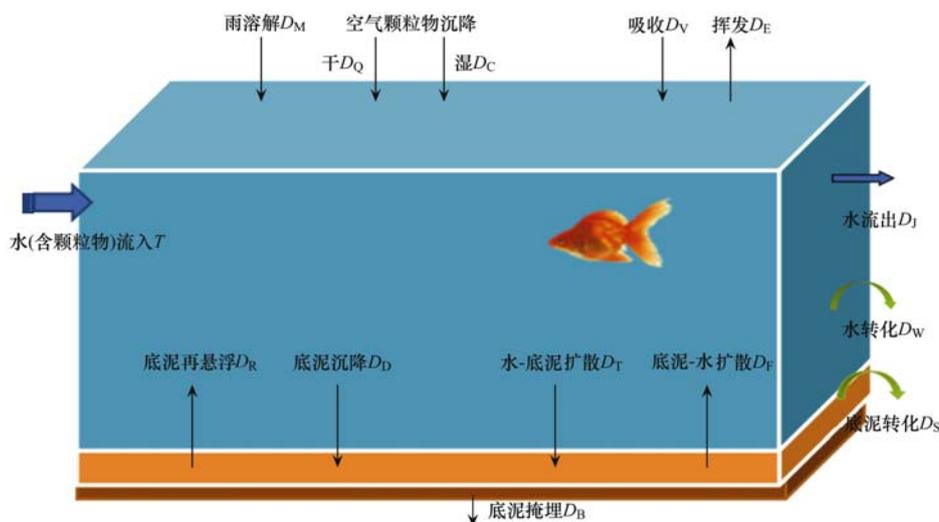


图1 研究区域特征概念示意

Fig. 1 Model framework of the study area

假定污染物在系统中稳态存在,模型的输入输出质量平衡方程可表达如下.

大气中氯菊酯的质量平衡为:

$$f_w D_E = f_A (D_M + D_Q + D_C + D_V) \quad (2)$$

水体中污染物的质量平衡为:

$$T + f_A (D_V + D_Q + D_C + D_M) + f_S (D_R + D_F) = f_w (D_E + D_W + D_J + D_D + D_T) \quad (3)$$

沉积物的质量平衡为:

$$f_w (D_D + D_T) = f_S (D_R + D_F + D_S + D_B) \quad (4)$$

表2 氯菊酯的理化性质参数

Table 2 Physic-chemical properties parameters of permethrin

化合物	摩尔质量 M / $g \cdot mol^{-1}$	摩尔体积 V_p / $m^3 \cdot mol^{-1}$	密度 ρ / $g \cdot cm^{-3}$	溶解度 S / $mg \cdot L^{-1}$	蒸气压 P_s / Pa
氯菊酯	391	3.29×10^4	1.19	3.00×10^{-2}	7.00×10^{-5}

1.1.3 模型计算与验证

以参数均值为输入数据,采用 Matlab R2014a 对输入输出质量平衡方程进行模型运算求解,经过计算得出氯菊酯在大气相、水体相、沉积物相中的浓度和迁移通量.

为了对模型结果进行验证,分析模型的可靠性

和准确性,将模拟结果与实际测得的浓度进行比较,由于实测值数据有限,并且环境的复杂性和可变性会导致模型的参数发生不同的变化,因此对模型进行了必要的灵敏度分析和不确定分析.本研究利用水晶球 Crystal Ball 软件,对参数的灵敏度分析采用多因子同时变化的方法,观察各变量在一定范围内

1.1.2 模型参数

模型预测中需要收集模型输入和验证两组数据.其中输入参数用于模型计算,包括氯菊酯的物理化学性质(见表2),环境属性参数(见表3),污染物的环境迁移参数(见表4)等40多个参数数据,这些参数是根据文献[17, 18]确定的;验证数据用于模型验证,为巢湖水体或沉积物中的实测值^[19].

($\pm 10\%$) 的变化对结果的影响, 以此确定关键参数. 假设输入参数均符合正态分布, 然后对预测结果定义, 最后将模型重复计算 10 000 次, 系统通过数据处理得出灵敏度分析报告. 运用蒙特卡罗方法对模型进行不确定性分析, 将已产生的关键参数随机序列输入模型, 重复运算 10 000 次得到模型的不确定信息.

表 3 环境属性参数

Table 3 Values of environmental parameters

参数	符号	单位	均值
当地平均气温	T	K	2.93×10^2
大气高度	H_A	m	1.00×10^3
水相面积	Area	m^2	7.58×10^8
水相深度	H_W	m	2.69
沉积物深度	H_S	m	1.00×10^{-1}
大气相颗粒物体积分数	V_Q	—	8.36×10^{-11}
水相颗粒物的体积分数	V_W	—	1.60×10^{-5}
沉积物固相的体积分数	V_{SQ}	—	3.00×10^{-1}
沉积物水相的体积分数	V_{SO}	—	7.00×10^{-1}
大气相有机碳含量	γ_{OA}	%	2.00×10^1
水相中有机碳含量	γ_{OW}	%	8.77×10^{-2}
沉积物中有机碳含量	γ_{OC}	%	5.27×10^{-2}
气溶胶密度	ρ_Q	$kg \cdot m^{-3}$	1.50×10^3
水相密度	ρ_W	$kg \cdot m^{-3}$	2.50×10^3
沉积物密度	ρ_S	$kg \cdot m^{-3}$	2.76×10^3
流入径流量	Q_I	$m^3 \cdot h^{-1}$	5.35×10^5
流出径流量	Q_J	$m^3 \cdot h^{-1}$	6.46×10^5
平流流入浓度	c_W	$mol \cdot m^{-3}$	9.69×10^{-7}

表 4 氯菊酯的环境迁移参数

Table 4 Environment transportation parameters of permethrin

参数	符号	单位	均值
亨利常数	H_{20}	$Pa \cdot m^3 \cdot mol^{-1}$	1.42×10^{-1}
吸附系数	K_{OC}	—	8.20×10^6
辛醇/水分配系数	K_{OW}	—	2.00×10^7
空气中分子扩散系数	B_A	$m^2 \cdot h^{-1}$	2.49×10^{-2}
水中分子扩散系数	B_H	$m^2 \cdot h^{-1}$	2.86×10^{-6}
底泥中分子扩散系数	B_S	$m^2 \cdot h^{-1}$	1.43×10^{-5}
气/水界面气侧传输系数	K_{AW}	$m \cdot h^{-1}$	7.11
气/水界面水侧传输系数	K_{WA}	$m \cdot h^{-1}$	2.08×10^{-3}
水/底泥界面水侧传输系数	K_{WS}	$m \cdot h^{-1}$	1.00×10^{-2}
水/底泥界面底泥侧传输系数	K_{SW}	$m \cdot h^{-1}$	5.39×10^{-6}
降雨速率	U_M	$m \cdot h^{-1}$	1.20×10^{-4}
净化比率	Q	—	2.00×10^3
水转化速率常数	K_W	h^{-1}	1.00×10^{-4}
底泥转化速率常数	K_S	h^{-1}	1.00×10^{-5}
底泥再悬浮速率	U_R	$m \cdot h^{-1}$	2.92×10^{-5}

1.2 SSD 模型

1.2.1 SSD 模型的框架

为了研究氯菊酯对水生生物的影响程度, 利用 SSD 模型进行生态风险评价, 以急性或者慢性毒理数据为基础, 构建 SSD 曲线, 计算出水体中氯菊酯

的 5% 危害浓度即 HC_5 , 以及允许最大年输入量. 本研究主要通过以下步骤构建和应用 SSD 模型预测生态风险: ①收集整理数据; ②绘制浓度-效应关系曲线, 并拟合曲线方程; ③根据拟合曲线和多介质扩散模型中预测的环境浓度, 进一步预测氯菊酯对巢湖水生生态系统的影响物种比例 (SSD 正向用法) 以及为达到保护研究区域绝大部分物种 (95%) 的生存安全, 推测 HC_5 浓度和允许最大年输入量 (SSD 反向用法).

1.2.2 数据的筛选和模型的构建

从美国环保署 (EPA) 的 EPAECOTOX 数据库 (<http://cfpub.epa.gov/ecotox/>) 获取氯菊酯对淡水水生生物的急性或慢性数据, 检索过程中主要通过化合物、暴露时间以及暴露方式等标准进行选择, 对于同一物种的不同数据取几何均值. 最终获得 8 个物种的慢性数据和 74 个物种急性数据, 共 82 个毒理数据, 包括藻类 (5 个)、鱼类 (31 个)、两栖动物 (8 个)、甲壳类 (10 个)、昆虫和蜘蛛类 (21 个)、软体动物 (5 个) 及其它无脊椎动物 (2 个). 尽管慢性毒性数据能更好地体现生物对于环境污染物的暴露情况, 由于慢性数据有限, 本研究将收集的急性数据通过急慢性比 (ACR = 11.4) 转化为慢性数据^[18]. 在建立 SSD 曲线时, 以物种毒理数据浓度值为横坐标, 以其对应的累计概率为纵坐标, 利用 Matlab 选择不同的曲线形式 (包括 Reweibull、Gaussian 和 Burr III) 获得拟合参数, 并根据拟合效果选取最优拟合曲线构建 SSD 模型方程.

1.2.3 多介质扩散模型结合 SSD 模型预测研究区域氯菊酯生态风险

通过多介质扩散模型预测水体中氯菊酯的环境浓度, 根据这一预测浓度计算出氯菊酯残留导致巢湖流域水生环境中潜在物种影响比例 (PAF). 为了确保流域水生生态安全, 以 HC_5 为环境阈值, 结合多介质扩散模型反推流域内年允许最大年输入量.

2 结果与讨论

2.1 不同介质中氯菊酯分布

经过模型计算, 氯菊酯在大气相、水体相、沉积物相中的浓度分别为 3.99×10^{-16} 、 5.63×10^{-11} 和 $1.95 \times 10^{-5} mol \cdot m^{-3}$, 即 $3.99 \times 10^{-7} ng \cdot m^{-3}$ 、 $2.20 \times 10^{-2} ng \cdot L^{-1}$ 和 $6.43 ng \cdot g^{-1}$, 同时氯菊酯在大气、水体和沉积物这 3 个主介质中的总量分别为 $3.02 \times 10^{-4} mol$ 、 $1.15 \times 10^{-1} mol$ 和 $1.48 \times 10^3 mol$. 这些数据显示, 氯菊酯在环境中达到稳态后主要分

布在沉积物相,因此沉积物相是氯菊酯的最大储库. 由于氯菊酯具有较强的疏水性和低挥发性,因此达到稳态后,主要富集在底部沉积物中,约占总输入量的75%,而赋存在大气和水体中的氯菊酯量低于总输入量的1%. 先前对水体中氯菊酯浓度的研究相对较少^[20],尤其巢湖流域. 巢湖流域沉积物中菊酯类农药的含量范围是 $0.02 \sim 301.1 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其中氯菊酯的算术均值为 $21.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,几何平均值 $1.71 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[21, 22],对比预测的沉积物浓度($6.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)二者较为吻合. 存在的偏差主要原因可能在于本研究仅根据一年的平流输入总量来预测不同环境介质中氯菊酯的浓度和赋存,而未考虑累积效应,同时周围农业区域的地表径流和土壤侵蚀等过程亦是流域内氯菊酯的一个重要来源,而本研究中并未考虑这些面源污染的输入贡献.

2.2 环境迁移通量和主要迁移过程

氯菊酯在环境相间的迁移过程如图2. 大气中的氯菊酯主要是通过颗粒物干沉降($1.20 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)过程进入到水体,水体中的氯菊酯又通过挥发($1.47 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)形式进入到大气. 水体中的氯菊酯主要以平流输入($5.19 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)形式进入,进入水体中通过底泥沉降($9.52 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)和水转化($1.15 \times 10^{-5} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)消减. 而沉积物中的氯菊酯主要来源于底泥沉降($9.52 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$),再通过底泥再悬浮($4.33 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)和掩埋消减($5.04 \times 10^{-1} \text{ mol}\cdot\text{h}^{-1}$)去除. 数据表明:氯菊酯在环境中主要以颗粒物形态存在并进一步进行迁移转化. 可能由于氯菊酯的饱和蒸气压较低,容易通过大气沉降从空气中去除,并且氯菊酯具有很强的疏水性($K_{ow} = 2.00 \times 10^7$),因此溶解在水体中较易迁移或降解,氯菊酯会牢固吸附在细小的有机颗粒物上,造成沉积物中氯菊酯富集.

每年水体中氯菊酯通过挥发作用进入大气的量为 0.13 mol ,约占总输入量的 0.003% ,同时挥发进入大气后的氯菊酯近 81% 以干沉降再次进入水体. 因此进入水体中的氯菊酯难以通过挥发作用从水体中消除. 另外进入水体中的氯菊酯主要以颗粒物沉降作用进入底部沉积物,约是水体平流输入总量的 1.8 倍,但沉降后的污染物近 45% 通过颗粒物再悬浮进入水体,从而在水体-沉积物间迁移交换. 由于大量氯菊酯以颗粒物形式沉降于沉积物,污染物在水体-沉积物间的分子扩散作用主要表现为从沉积物向水体迁移,净年扩散量为 6.7 mol ,而仅有 0.007% 的氯菊酯通过平流作用流出巢湖水体,主要

原因在于裕溪大坝建造,致使巢湖成为了半封闭湖泊,导致了污染物在水体内富集,难以输出,进一步影响了生态系统的自净能力^[23]. 尽管氯菊酯在水体中的转化速率大于在沉积物中的转化速率,但污染物在沉积物中的转化总量远远大于在水体中的转化总量,主要解释原因为沉积物中污染物的储量远远大于水体,因此总转化量亦大于水体.

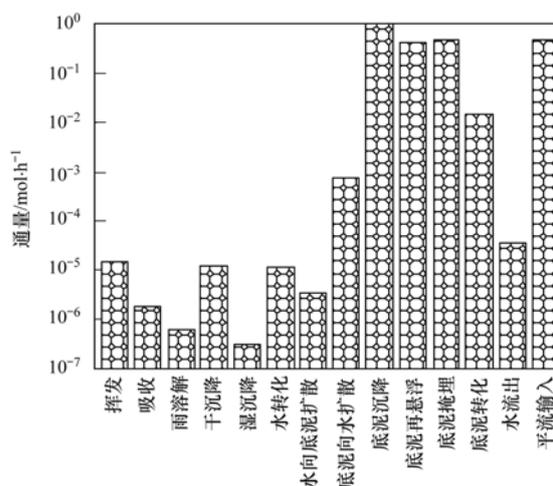


图2 氯菊酯在巢湖环境中的迁移通量

Fig. 2 Transfer fluxes of permethrin in the environmental multimedia of Chaohu Lake

2.3 灵敏度分析和不确定性分析

本研究对40个输入参数灵敏度分析结果表明:影响大气相中氯菊酯浓度的参数主要有气温,灵敏度系数分别为 -24% ,主要因为气温控制着氯菊酯在水-大气中的分子扩散;影响水体相中氯菊酯浓度的参数主要有平流输入浓度、径流量和水体面积,灵敏度系数分别为 16.1% 、 16.5% 、 -15.5% ;影响沉积物相中氯菊酯浓度的参数主要为底泥掩埋速率,灵敏度系数分别为 -23.2% ,由此可见,这些参数是影响污染物在环境中浓度的关键因素.

通过蒙特卡罗不确定性分析显示大气、水体和沉积物中氯菊酯浓度均符合正态分布,90%的置信度区间(5%~95%)内,大气、水体和沉积物中氯菊酯浓度分布为 $1.17 \times 10^{-7} \sim 1.96 \times 10^{-6} \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $7.79 \times 10^{-3} \sim 6.16 \times 10^{-2} \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.02 \sim 1.34 \times 10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值浓度则分别为 $3.99 \times 10^{-7} \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.20 \times 10^{-2} \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (图3).

3 生态风险评价

通过对数据的整理,根据不同的模型拟合构建SSD,结果发现使用Burr III模型拟合曲线重合度最好,相关系数 $R^2 = 0.99$,残差平方和SSE为 0.06 ;

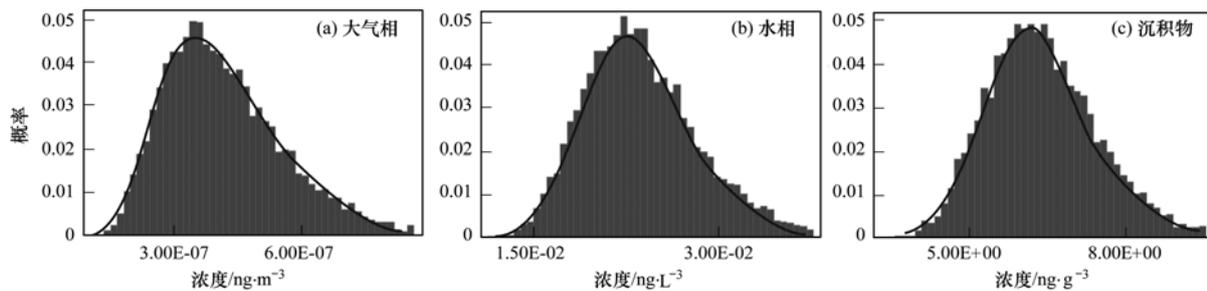


图3 氯菊酯在巢湖大气、水体和沉积物中的模拟预测浓度频数分布

Fig. 3 Frequency distribution of permethrin simulated in air, water and sediment of Chaohu Lake

其次为 Reweibull 模型, 相关系数 $R^2 = 0.98$, 残差平方和 SSE 为 0.07; Gaussian 模型拟合效果最差, 回归系数 R^2 为 0.95, 且 SSE 为 0.33. Burr III 型分布是一种灵活的分布函数, 对物种敏感性数据拟合特性较好, 在澳大利亚和新西兰的环境风险评价和环境质量标准制定中被推荐使用^[9], 因此本研究中采用 Burr III 型拟合氯菊酯的物种敏感度分布曲线, Burr III 型函数的参数方程为:

$$Y = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{b}{X}\right)^c\right]^k} \quad (4)$$

通过拟合, 式中得到参数 $b = 0.36$, $c = 0.55$, $k = 0.91$, 计算出 $HC_5 = 0.97 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 先前赵晨等^[21]通过构建氯菊酯的 SSD 模型, 并给出的 HC_5 为 $3.69 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 Crommentuijin 等^[24]给出的水体中氯菊酯最大允许浓度 (maximum permissible concentration) 为 $0.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 不同学者研究获得的阈值不同主要由于在模型构建时选取的毒性数据数量和类型上存在一定差异性. 一般认为 SSD 模型构建时尽量满足 8 个不同类群的至少 10 个慢性毒理数据, 但实际研究中难以获取足够的慢性毒理数据. 另外非本土物种是否能够代替本土物种亦存在一定争议^[25], 同一物种在不同地区的毒理数据呈现差异性^[26], 导致不同学者在构建 SSD 模型时存在一定的不确定性, 同时急性-慢性数据的转化以及模型的选择均会为预测结果带来不确定性^[24].

通过多介质扩散模型预测的巢湖水体中氯菊酯浓度 ($2.20 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 小于 HC_5 , PAF 为 0.77%, 即可造成该区域 0.77% 的物种受到影响. 由此可见在假设条件下, 氯菊酯对巢湖生态系统的影响较小. 随着有机磷及其它高毒农药的逐渐禁用, 拟除虫菊酯类杀虫剂使用量将逐步增加, 为了加强流域水质管理, 确保当地的水生生态安全, 本研究假设巢湖水体中氯菊酯环境浓度达到 HC_5 时, 通过

多介质模型反向推导, 得到巢湖流域年允许最大输入量. 结果显示: 在年输入量低于 78.2 t 的情况下, 巢湖水体中 95% 的物种不会受到氯菊酯的威胁, 因此建议适当地控制当地氯菊酯的使用和排放, 确保低于允许的最大年输入量, 以此来保护当地水生生态系统安全.

4 结论

(1) 氯菊酯在大气相、水体相、沉积物相中的浓度分别为 3.99×10^{-16} 、 5.63×10^{-11} 和 $1.95 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$, 沉积物相是氯菊酯的最大储库.

(2) 大气中的氯菊酯主要以挥发形式进入, 则主要通过干沉降消减; 水体中主要以平流输入为主进入, 通过底泥沉降和水转化消减; 沉积物中氯菊酯主要以悬浮颗粒物沉降形式进入, 通过底泥再悬浮和掩埋消减.

(3) 影响大气相中氯菊酯浓度的参数主要有气温; 影响水体相中氯菊酯浓度的参数主要有水流入浓度、净流量和底泥沉降速率; 影响沉积物相中氯菊酯浓度的参数主要有底泥掩埋速率.

(4) 在年输入量低于 78.2 t 的情况下, 巢湖水体中 95% 的物种不会受到氯菊酯的威胁.

参考文献:

- [1] 赵李娜, 赖子尼, 李秀丽, 等. 珠江河口沉积物中拟除虫菊酯类农药污染及毒性评价[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1408-1413.
Zhao L N, Lai Z N, Li X L, et al. Contamination and toxicity evaluation of pyrethroids in sediments of the Pearl River Estuary [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(8): 1408-1413.
- [2] Feo M L, Corcellas C, Barata C, et al. Organic carbon content effects on bioavailability of pyrethroid insecticides and validation of Solid Phase Extraction with Poly (2, 6-diphenyl-p-phenylene oxide) Polymer by *Daphnia magna* toxicity tests[J]. Science of the Total Environment, 2013, 442: 497-502.
- [3] Van Geest J L, Burrige L E, Kidd K A. Toxicity of two pyrethroid-based anti-sea lice pesticides, AlphaMax® and

- Excis[®], to a marine amphipod in aqueous and sediment exposures[J]. *Aquaculture*, 2014, **434**: 233-240.
- [4] Wheelock C E, Miller J L, Miller M J, *et al.* Influence of container adsorption upon observed pyrethroid toxicity to *Ceriodaphnia dubia* and *Hyalella azteca*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, **74**(1): 47-52.
- [5] Li H Z, Mehler W T, Lydy M J, *et al.* Occurrence and distribution of sediment-associated insecticides in urban waterways in the Pearl River Delta, China[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(10): 1373-1379.
- [6] Trimble A J, Weston D P, Belden J B, *et al.* Identification and evaluation of pyrethroid insecticide mixtures in urban sediments[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, **28**(8): 1687-1695.
- [7] Hintzen E P, Lydy M J, Belden J B. Occurrence and potential toxicity of pyrethroids and other insecticides in bed sediments of urban streams in central Texas[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 110-116.
- [8] Wang J Z, Li H Z, You J. Distribution and toxicity of current-use insecticides in sediment of a lake receiving waters from areas in transition to urbanization[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 128-133.
- [9] Wang J Z, Bai Y S, Wu Y T, *et al.* Occurrence, compositional distribution, and toxicity assessment of pyrethroid insecticides in sediments from the fluvial systems of Chaohu Lake, Eastern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 10406-10414.
- [10] 吴连喜. 巢湖流域30年土地利用变化及其驱动力研究[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(6): 1293-1298.
Wu L X. Study of LUCC and its driving forces in Chaohu Lake basin during the past 30 years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, **42**(6): 1293-1298.
- [11] Mackay D. Finding fugacity feasible[J]. *Environmental Science & Technology*, 1979, **13**(10): 1218-1223.
- [12] Mackay D, M Joy, S Paterson. A quantitative water, air, sediment interaction (QWASI) fugacity model for describing the fate of chemicals in lakes[J]. *Chemosphere*, 1983, **12**(7-8): 981-997.
- [13] Mackay D. *Multimedia environmental models: the fugacity approach* (2nd ed.)[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001, 55-233.
- [14] 王策. 松花江典型有机污染物动态数值模型构建与模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Wang C. Development of dynamic numerical models and simulation for typical organic pollutants in Songhua River[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] Mackay D. *Multimedia environmental models: the fugacity approach*[M]. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1991.
- [16] Mackay D, Paterson S. Evaluating the multimedia fate of organic chemicals: a level III fugacity model[J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, **25**(3): 427-436.
- [17] 龚得春. 梁滩河流域拟除虫菊酯农药多介质残留和环境行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
Gong D C. Pyrethroids pesticides residues and their behavior in a multimedium environment of Liangtan river basin [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [18] Kong X Z, He W, Qin N, *et al.* Modeling the multimedia fate dynamics of γ -hexachlorocyclohexane in a large Chinese lake[J]. *Ecological Indicators*, 2014, **41**: 65-74.
- [19] 刘飞虎, 张硕. 南淝河水体中有机磷和菊酯类农药风险评价[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2014, **37**(12): 1499-1504.
Liu F H, Zhang S. Ecological risk of organophosphorous and synthetic pyrethroid pesticides in water from Nanfeihe River[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2014, **37**(12): 1499-1504.
- [20] Weston D P, You J, Lydy M J. Distribution and toxicity of sediment-associated pesticides in agriculture-dominated water bodies of California's Central Valley [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(10): 2752-2759.
- [21] 赵晨, 彭书传, 陈天虎, 等. 巢湖流域和太湖流域沉积物中苯氯菊酯和高效氰戊菊酯的生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1080-1091.
Zhao C, Peng S C, Chen T H, *et al.* Ecological risk assessment of sediment-associated permethrin and esfenvalerate in Chaohu Lake and Taihu Lake watersheds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1080-1091.
- [22] Weston D P, Lydy M J. Urban and agricultural sources of pyrethroid insecticides to the Sacramento-San Joaquin Delta of California[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(5): 1833-1840.
- [23] Shang G P, Shang J C. Causes and control countermeasures of eutrophication in Chaohu Lake, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2005, **15**(4): 348-354.
- [24] Crommentuijn T, Sijm D, de Bruijn J, *et al.* Maximum permissible and negligible concentrations for some organic substances and pesticides [J]. *Journal of Environmental Management*, 2000, **58**(4): 297-312.
- [25] Xu F L, Li Y L, Wang Y, *et al.* Key issues for the development and application of the species sensitivity distribution (SSD) model for ecological risk assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **54**: 227-237.
- [26] Maltby L, Blake N, Brock T C M, *et al.* Insecticide species sensitivity distributions: Importance of test species selection and relevance to aquatic ecosystems[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, **24**(2): 379-388.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行