

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

深圳地区全氟辛烷磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究

崔晓宇¹, 张鸿^{2*}, 罗骥³, 张若冰⁴

(1. 深圳大学生命科学学院, 深圳 518060; 2. 深圳大学物理科学与技术学院, 深圳 518060; 3. 大连大学物理科学与技术学院, 大连 116622; 4. Brandeis University, Waltham, MA 02453, US)

摘要: 为探究全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)在深圳地区的环境多介质迁移和归趋行为, 本研究利用 Level III 逸度模型, 通过输入 PFOS 的物理化学性质参数和深圳地区环境参数, 首先模拟计算了深圳地区大气、水体、土壤和沉积物中 PFOS 的含量并用实测数据进行验证, 其次基于 PFOS 在各相间的迁移通量分析确定了其主要的迁移途径及归趋行为, 最后对模型的输入参数和输出结果分别进行了灵敏度和不确定度分析。结果表明, 大气、水体、土壤和沉积物中的 PFOS 模拟含量分别为 $1.4 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $7.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.39 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 和实测结果较吻合。气相到土相、土相到水相和气相到水相的迁移量分别占 PFOS 相间总迁移量的 32%、32% 和 5.8%, 是 PFOS 相间的主要迁移途径, 而 PFOS 随水体迁出是其从区域环境迁出的主要途径。大气和水体的平流输入速率、温度、PFOS 的水溶性和降雨, 以及土壤和沉积物的密度是影响模型输出结果的关键参数。不确定度分析结果则表明 PFOS 含量在水体中的变异系数最小而在土壤中的最大, 这可能是由土壤易于变化的有机碳含量造成的。

关键词: 全氟辛烷磺酸; 逸度模型; 环境介质; 迁移和归趋; 灵敏度分析; 不确定度分析; 深圳

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3001-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.022

Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region

CUI Xiao-yu¹, ZHANG Hong^{2*}, LUO Ji³, ZHANG Ruo-bing⁴

(1. College of Life Sciences, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. College of Physics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Physics Science and Technology, Dalian University, Dalian 116622, China; 4. Brandeis University, Waltham, MA 02453, US)

Abstract: To study the transfer and fate of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Shenzhen region, a level III fugacity model was used to simulate and calculate the concentrations of PFOS in local air, water, soil and sediment. Physical and chemical parameters of PFOS and environmental parameters of Shenzhen were entered into the model. The simulated concentrations were compared with actual measurements to validate the model, and then analyzed based on the transfer flux of PFOS between media to identify the main transfer route. The input parameters and output results of the model underwent sensitivity analysis and uncertainty analysis, respectively. The simulated concentrations of PFOS in air, water, soil and sediment were $1.4 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$, $7.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.39 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.11 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, in good agreement with the actual measurements. The transfer from air to soil, soil to water and air to water were the main PFOS transfer routes between media, accounting for 32%, 32%, 5.8% of total transfer, respectively. The transfer through water was the major PFOS outlet from a region. The advective input of air and water, temperature, PFOS solubility, precipitation and density of soil and sediment were the key parameters affecting the model output. Uncertainty analysis showed that the coefficient of variation of PFOS concentrations reached the minimum in water and the maximum in soil, which may be caused by the highly changeable content of organic carbon in soil.

Key words: perfluorooctane sulfonate; fugacity model; environmental media; transfer and fate; sensitivity analysis; uncertainty analysis; Shenzhen

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)是分子中与碳原子连接的氢都被氟取代的一类持久性有机污染物。全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)是最常见的全氟化合物^[1], 同时也是很多全氟化合物在环境中的最终代谢产物^[2]。PFOS 被广泛应用在纺织、造纸、装修、地毯、灭火泡沫等工业和商业领域^[3]。2009 年, PFOS 被正式

列入持久性有机污染物黑名单。近年来, PFOS 在大气^[4]、水体^[5]等环境介质中被不断检出, 研究显示, 本地点源排放和随流体迁入都会造成 PFOS 污染。

收稿日期: 2016-01-12; 修订日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11275130)

作者简介: 崔晓宇(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全氟化合物的环境行为, E-mail: stillfancy@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangh@szu.edu.cn

当前,国外关于 PFOS 在环境中行为的研究主要集中在城市污水处理厂和垃圾填埋场中的污水、周围空气、堆放污泥的土壤和地表水中 PFOS 的迁移^[6-8],而国内关于 PFOS 在介质间迁移的研究则相对较少. 由于 PFOS 在环境中会发生介质间的迁移,随流体迁入(如风、河流)、迁出和降解等过程,所以要想解决 PFOS 带来的污染问题,对其归趋行为的研究显得十分重要.

在研究化合物的环境行为方面,有学者提出的基于逸度理论的方法得到了较为广泛地应用^[9],如 Macleod 等^[10]运用基于逸度方法建立的模型模拟了北美地区毒杀芬在多介质间的迁移和归趋,并计算了毒杀芬在大气、水体、土壤和沉积物中的残留情况;田慧等^[11]利用逸度模型模拟了典型多溴联苯醚在广州地区各环境相的浓度分布;董继元等^[12]则运用三级逸度模型计算了苯并[a]芘在兰州地区环境相间的迁移通量和浓度分布,取得了较好的结果. 深圳作为我国改革开放以来发展最快的城市,经济高度发展的同时也造成了一定的 PFOS 污染,主要来源是城市西部汽车、电子、塑胶等的工业排放和东莞 PFOS 随大气的输入^[13]. 深圳地区河流和土壤中的 PFOS 含量和国内其它城市相比污染程度较高^[14]. 本文以深圳地区为研究区域,利用 Level III 逸度模型对广泛存在于环境中的 PFOS 进行多介质迁移和归趋行为模拟,通过阐明 PFOS 在各相间的迁移过程,以期为 PFOS 的污染防治和暴露风险评估提供理论支持,同时也为典型污染物在宏观区域不同环境相中含量的预测和分析提供思路和方法.

1 材料与方法

1.1 研究区域

选择中国经济发达,同时各环境介质 PFOS 监测数据较全面的深圳为研究区域. 深圳位于我国华南地区,地处珠江三角洲东岸,毗邻香港,全市常住人口约1 800万. 深圳所处纬度较低,属于亚热带海洋性气候,夏季盛行东南风,冬季盛行东北风,气候温和,全年平均气温 22.4℃,雨量充足,年降雨量为 1 933 mm. 深圳地区大小河流约有 160 多条,其中流域面积大于 100 km² 的河流有深圳河、龙岗河、茅洲河、坪山河和观澜河.

1.2 研究方法

1.2.1 模型概况

在多介质逸度模型的基础上^[9],结合深圳地区

的气候条件和地理因素构建了 PFOS 的多介质迁移归趋模型. 选取了大气、水体、土壤和沉积物这 4 个环境相,综合考虑了 PFOS 在邻相间的扩散、溶解、干湿沉降、地表径流、流体平流等过程. 根据稳态假设,各相的质量平衡表达式如下.

$$\text{大气: } E_A + G_A c_A + f_W D_{WA} + f_S D_{SA} = f_A (D_{AW} + D_{AS} + D_{R(A)} + D_{A(A)})$$

$$\text{水体: } E_W + G_W c_W + f_A D_{AW} + f_S D_{SW} + f_{Sed} D_{SedW} = f_W (D_{WA} + D_{WSed} + D_{R(W)} + D_{A(W)})$$

$$\text{土壤: } E_S + f_A D_{AS} = f_S (D_{SA} + D_{SW} + D_{R(S)} + D_{A(S)})$$

$$\text{沉积物: } E_{Sed} + f_W D_{WSed} = f_{Sed} (D_{SedW} + D_{R(Sed)} + D_{A(Sed)})$$

式中,下标 A、W、S、Sed 分别代表大气、水体、土壤、沉积物,以下用 i 和 j 分别指代 A、W、S、Sed. E_i 表示介质 i 中 PFOS 的排放速率 ($\text{mol} \cdot \text{h}^{-1}$); G_i 表示介质 i (大气和水体) 的平流输入速率 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); c_i 表示介质 i 中 PFOS 的浓度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$); f_i 表示介质 i 中 PFOS 的逸度 (Pa); D_{ij} 表示 PFOS 从介质 i 到介质 j 的相间迁移速率 [$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$]; $D_{R(i)}$ 表示介质 i 中 PFOS 的降解速率 [$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$]; $D_{A(i)}$ 表示介质 i 中 PFOS 的平流输出速率 [$\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$].

1.2.2 模型输入参数

模型的输入参数包括两类. 一类为 PFOS 的物理化学性质参数^[15] (表 1)、深圳地区的环境参数^[16-18]和模型的介质迁移参数^[9,19,20] (表 2); 另一类为深圳地区 PFOS 的排放与平流输入参数,其中包括模型中大气平流 PFOS 输入浓度^[21] (基于深圳年主导风向为东北风^[17],采用深圳上风向空气中的 PFOS 浓度)、水体平流输入浓度^[22] (参考珠江流域水体中的 PFOS 浓度)、珠三角 PFOS 的年单位平方公里排放速率^[23]和深圳污水处理厂 PFOS 排放速率^[22]等 (表 3).

表 1 PFOS 的主要物理化学性质参数^[15]

Table 1 Main physical and chemical parameters of PFOS

参数	数值	参数	数值
摩尔质量/ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	538	溶解度/ $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	9.65×10^{-4}
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	400	空气中半衰期/h	2.66×10^5
蒸气压/Pa	3.31×10^{-4}	水体中半衰期/h	5.50×10^6
$\lg K_{AW}$	-6.85	土壤中半衰期/h	1.00×10^8
$\lg K_{OW}$	4.13	沉积物中半衰期/h	1.70×10^7
$\lg K_{OA}$	11.7		

1.2.3 输入参数灵敏度分析

参考田慧等^[11]的灵敏度分析方法,对除常数外

的所有输入参数(X)和模型的原始输出值(Y)进行了灵敏度分析. 对参数 X ,取 $0.9X$ 和 $1.1X$ 代入模型,分别得到结果 $Y_{0.9}$ 和 $Y_{1.1}$,依据 $C_s = (Y_{1.1} - Y_{0.9}) / (0.2Y)$ 进行灵敏度计算,其中 C_s 为灵敏度系数.

表 2 深圳地区环境参数和模型的介质迁移参数

Table 2 Environmental parameters of Shenzhen and medium transport parameters of the model					
参数	数值	文献	参数	数值	文献
环境温度/℃	25	[9]	土壤密度/kg·L ⁻¹	2.6	[9]
大气面积/m ²	1.2 × 10 ⁹	[16]	沉积物密度/kg·L ⁻¹	1.5	[9]
水体面积/m ²	1.8 × 10 ⁸	[16]	有机碳分配系数	3.7 × 10 ²	[20]
大气高度/m	2.0 × 10 ³	[9]	清除率	2.0 × 10 ⁵	[9]
水体深度/m	1.0	[9]	气溶胶的体积分数	3.0 × 10 ⁻¹¹	[9]
土壤厚度/m	1.0 × 10 ⁻¹	[9]	沉积物沉降速率/m·h ⁻¹	1.6 × 10 ⁻⁶	[19]
沉积物厚度/m	1.0 × 10 ⁻²	[9]	沉积物再悬浮速率/m·h ⁻¹	1.1 × 10 ⁻⁸	[9]
平均风速/m·h ⁻¹	7.6 × 10 ³	[17]	沉积物掩埋速率/m·h ⁻¹	3.4 × 10 ⁻⁸	[9]
降水速率/m·h ⁻¹	2.0 × 10 ⁻⁴	[17]	干沉降速度/m·h ⁻¹	11	[9]
水流速度/m·h ⁻¹	3.7 × 10 ³	[18]	土壤中扩散路径长度/m	5.0 × 10 ⁻²	[9]
气相侧气-水界面传质系数/m·h ⁻¹	3.0	[9]	来自于土壤的水的径流速率/m·h ⁻¹	3.9 × 10 ⁻⁵	[9]
水相侧气-水界面传质系数/m·h ⁻¹	3.0 × 10 ⁻²	[9]	来自于土壤的固体的径流速率/m·h ⁻¹	2.3 × 10 ⁻⁸	[9]
气相侧气-土界面传质系数/m·h ⁻¹	1.0	[9]	水从沉积物向地下水的过滤速率/m·h ⁻¹	3.9 × 10 ⁻⁵	[9]
空气中分子扩散系数/m ² ·h ⁻¹	4.0 × 10 ⁻²	[9]	沉积物中扩散路径长度/m	5.0 × 10 ⁻³	[9]
水中分子扩散系数/m ² ·h ⁻¹	4.0 × 10 ⁻⁶	[9]	水相侧沉积物-水界面传质系数/m·h ⁻¹	1.0 × 10 ⁻²	[9]

表 3 深圳地区 PFOS 的排放速率和平流输入浓度

Table 3 PFOS emission rates and import concentrations of advection in Shenzhen			
PFOS 输入参数	文献数据	文献	换算数据 ¹⁾
总排放速率	1.3 g·(km ² ·a) ⁻¹	[23]	3.2 × 10 ⁻⁴ mol·h ⁻¹
水体排放速率	0.68 kg·a ⁻¹	[22]	1.4 × 10 ⁻⁴ mol·h ⁻¹
大气排放速率 ²⁾	—		1.8 × 10 ⁻⁴ mol·h ⁻¹
水体平流输入浓度	6.7 ng·L ⁻¹	[22]	1.2 × 10 ⁻⁸ mol·m ⁻³
大气平流输入浓度	2.9 pg·m ⁻³	[21]	5.4 × 10 ⁻¹⁵ mol·m ⁻³

1) 换算数据由文献数据计算或转换单位得到; 2) 大气排放速率 = 总排放速率 - 水体排放速率

1.2.4 PFOS 含量不确定度分析

基于蒙特卡罗方法对模型输出的 PFOS 含量进行不确定度分析. 对灵敏度绝对值大于 0.02 的参数在合理的范围内随机取值,程序重复运行10 000 次,探讨结果的不确定度. 本研究程序运算过程在内嵌了 Crystal Ball 的 Excel 中进行.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

模拟输出结果显示,PFOS 在大气、水体、土壤和沉积物中的含量分别为 1.4 pg·m⁻³、7.0 ng·L⁻¹、0.39 μg·kg⁻¹和 0.11 μg·kg⁻¹. 为验证模型的有效性,将模型计算含量分别与文献[14,22 ~ 24]实测含量进行比较(图 1). 一般认为,模拟和实测数据的差值在 1 个对数单位内即可认为模型可靠. 由图 1 可见,PFOS 在土壤中的模拟含量和实测含量吻合度最高,在大气、水体和沉积物中的差值也都在合理范围内. 其中,PFOS 在大气中的模拟浓

度比实测值低 0.34 个对数单位,可能的原因是模型采用珠三角的 PFOS 排放速率对深圳地区 PFOS 总排放进行估算,但深圳作为珠三角的经济腹地,人口密度和工业发展程度高于其它地区,加之区域 PFOS 的排放和人口规模以及当地工业水平相关^[25 ~ 27],所以模型对深圳地区 PFOS 排放速率估算偏低,致大气中的 PFOS 模拟浓度偏低. 水体中 PFOS 的模拟值比实测浓度低 0.42 个对数单位,可能原因是模型在估算水体 PFOS 排放时以污水处理厂为依据,没有考虑涉氟工厂可能存在的偷漏排问题,低估了水体中 PFOS 总排放,致模拟值偏低. 在沉积物中,PFOS 含量的模拟值比实测值低 0.91 个对数单位,这是因为深圳河流沉积物中 Cu、Cr 等重金属元素污染严重^[28],而 PFOS 在沉积物上的吸附行为会随着这些重金属元素含量的增加而增强^[29],故沉积物中的模拟含量要低于实测含量.

2.2 多介质迁移和归趋行为

PFOS 的多介质迁移通量见图 2. PFOS 在环境

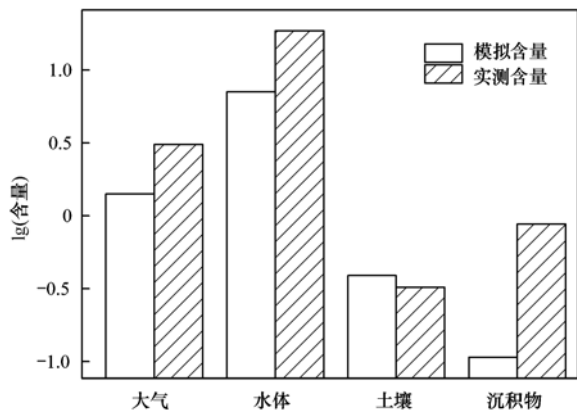


图1 PFOS 模拟含量和实测含量比较

Fig. 1 Comparison of calculated and measured concentrations of PFOS

相间的主要迁移过程包括气相向土相的迁移($33.6 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$)、土相向水相的迁移($33.5 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$)和气相向水相的迁移($6.03 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$),分别占相间总迁移通量($104 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$)的32%、32%和5.8%,这与深圳干湿沉降速率较大有关. 深圳地处东南沿海,风速较大,大气稳定度低^[30],由于大气颗粒物的干沉降速度和大气稳定度呈负相关^[31],故附着在颗粒物上的PFOS的干沉降速度较大. 此外,深圳全年雨量充沛,湿沉降作用强,土壤中的PFOS可随地表径流和地下径流进入水相,因此气相中的PFOS通过干湿沉降进入水、土相,以及土壤中的PFOS通过径流进入水相是PFOS在相间迁移的主要途径.

而就PFOS在区域间的迁移而言,PFOS随水相的平流输出速率($1020 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$)要远高于随气相的平流输出速率($35.6 \text{ mol} \cdot \text{a}^{-1}$),这说明深圳地区PFOS的迁出途径主要是随河流迁出,这也是深圳近岸海域如深圳湾、大鹏湾、大亚湾等PFOS的污染源. 同样,大气平流输出的PFOS也将会对深圳的下风向地区造成一定的污染.

2.3 灵敏度分析

对模型的输入参数进行灵敏度分析,其中 $|C_s| > 0.02$ 的输入参数分析结果示于图3. $C_s > 0$ 的参数对模型的输出结果有正影响,反之则有负影响.

气相和水相中对PFOS浓度影响最大的参数分别是大气和水体的平流输入值[图3(a)和3(b)],这表明周边环境尤其是上风口和河流上游地区的污染对深圳地区的影响显著. 在水相中,除水体平流输入外的其它参数对PFOS浓度的影响很小[图3(b)],表明在水体平流输入不变的条件下水相中PFOS浓度变化甚微. 温度、水溶性和降雨对气相

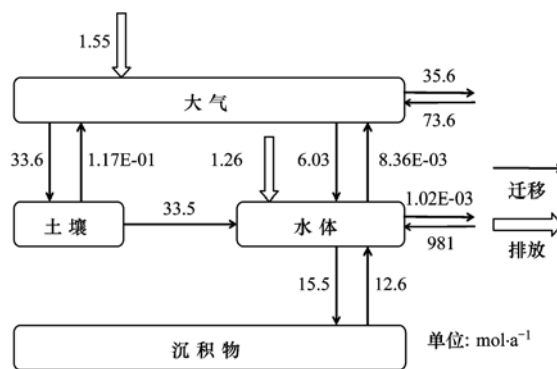


图2 PFOS 迁移通量示意

Fig. 2 Transfer flux of PFOS

中PFOS的浓度有负影响,但对水相和土相则有正影响[图3(b)、3(c)],原因是随着温度的升高,气相中的PFOS在气-水界面、气-土界面的扩散作用会增强,而降雨量增大,大气中PFOS的湿沉降也会增强,这就导致气相中的PFOS减少而进入水相和土相. 土壤和沉积物的密度对其富集PFOS有较大的正影响[图3(c)和3(d)],原因是土壤和沉积物中粉粒和黏粒等成分随着密度的增大而增多,致使其中有机碳含量(f_{oc})也随之增大^[32,33],而土壤、沉积物对PFOS的吸附作用与 f_{oc} 呈显著正相关^[34,35],因此固相的密度对其吸附PFOS的能力有正影响. 此外,大气和水体的平流输入分别对土壤和沉积物中的PFOS含量有正影响. 相较沉积物,对土壤中PFOS含量有影响的参数较多[图3(c)],这是由于土壤中PFOS的输入途径(大气中PFOS的扩散、干湿沉降等)和输出途径(土壤径流、地表径流等)要多于沉积物,而这些途径与多种因素有关,故影响土壤中PFOS含量的参数也较多.

2.4 不确定度分析

不确定度分析结果(图4)显示,PFOS在大气、水体、土壤和沉积物中的含量范围分别为 $0.04 \sim 3.6 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $4.5 \sim 9.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 0.85 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0 \sim 0.17 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数分别为0.33、0.10、0.49和0.38. 水体的变异系数最小而土壤的变异系数最大,可能的原因是土壤的一些理化性质(如黏土矿物类型、密度、pH值等)和其环境条件(气候因子、大气成分、植被等)的均一性差且变化较复杂,这些性质和环境因素会对土壤有机碳的蓄积、分解、输入和分布造成影响^[32],进而使不同区域土壤对PFOS吸附能力的差异增大,故土壤中PFOS含量的相对离散程度也较大. 相比之下水体的性质则较稳定,PFOS含量的离散程度也较小.

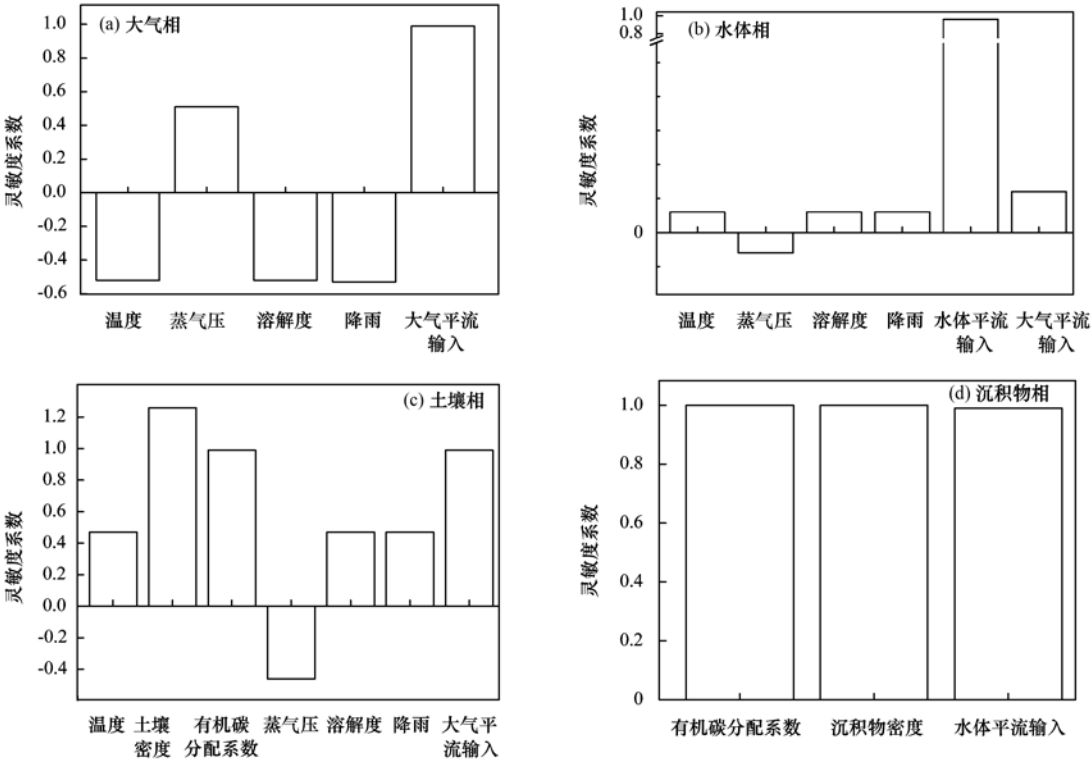


图 3 PFOS 在不同环境介质中含量的灵敏度分析

Fig. 3 Sensitivity analysis of PFOS concentration in different environmental media

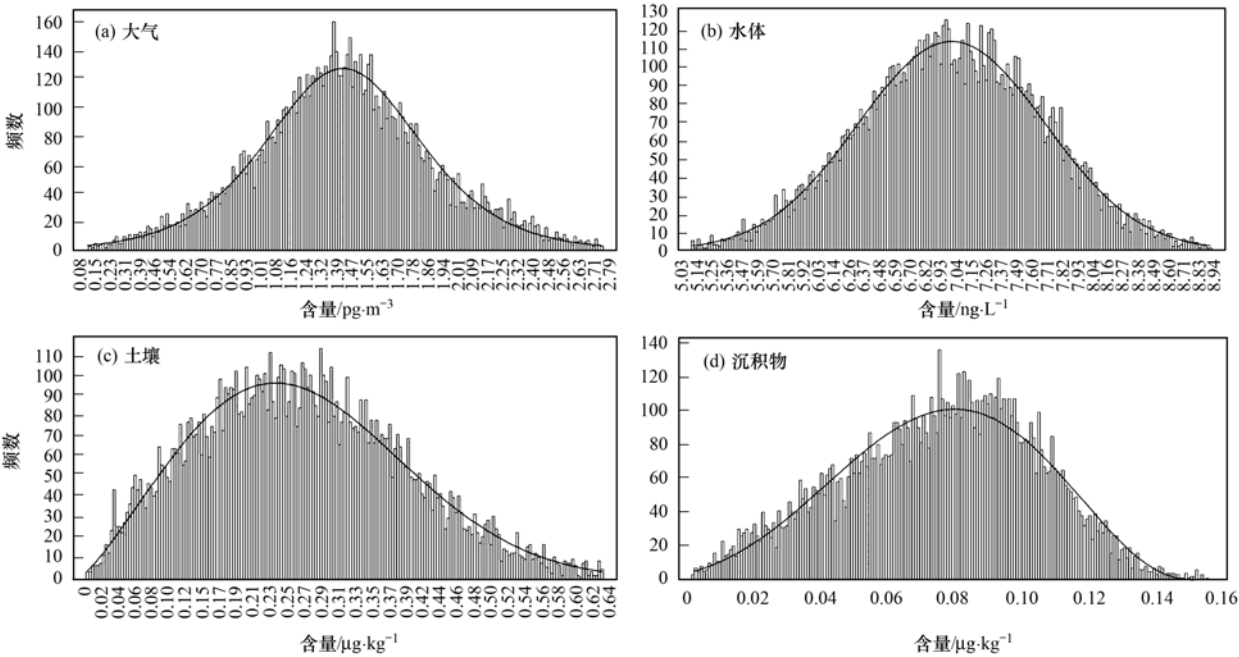


图 4 PFOS 在各相中的模拟含量频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of PFOS concentrations in different environmental media

3 结论

运用 Level III 多介质逸度模型较好地模拟了深圳地区大气、水体、土壤和沉积物这 4 种环境相中 PFOS 的含量及迁移过程,结果表明深圳地区 PFOS

的归趋行为主要是随水体平流迁出,或经干湿沉降、径流等途径进行相间迁移. 大气和水体的平流输入对各环境相 PFOS 含量有较大的影响,而温度、水溶解性和降雨对气、水、土三相 PFOS 含量有影响,固相密度对固相 PFOS 含量影响较大. PFOS 含量在土

壤中的变异系数最大而在水体中最小,这主要受介质性质和环境条件影响。

参考文献:

- [1] Park S, Lee L S, Medina V F, *et al.* Heat-activated persulfate oxidation of PFOA, 6:2 fluorotelomer sulfonate, and PFOS under conditions suitable for in-situ groundwater remediation [J]. *Chemosphere*, 2016, **145**: 376-383.
- [2] 刘晓晖, 胡宏, 李双月, 等. 全氟辛烷磺酸神经发育毒性机制研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(5): 643-649.
- [3] Salgado R, López-Doval S, Pereiro N, *et al.* Perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure could modify the dopaminergic system in several limbic brain regions[J]. *Toxicology Letters*, 2015, **240**(1): 226-235.
- [4] Chaemfa C, Barber J L, Huber S, *et al.* Screening for PFOS and PFOA in European air using passive samplers[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, **12**(5): 1100-1109.
- [5] Ololade I A. Spatial distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in major rivers in southwest Nigeria[J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2014, **96**(9): 1356-1365.
- [6] Benskin J P, Li B, Ikononou M G, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances in landfill leachate: patterns, time trends, and sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(21): 11532-11540.
- [7] Ahrens L, Shoeib M, Harner T, *et al.* Wastewater treatment plant and landfills as sources of polyfluoroalkyl compounds to the atmosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 8098-8105.
- [8] Sepulvado J G, Blaine A C, Hundal L S, *et al.* Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 8106-8112.
- [9] 唐纳德·麦凯著, 黄国兰, 陈春江, 孔庆宁, 等译. 环境多介质模型逸度方法[M]. (第二版). 北京: 化学工业出版社, 2007. 117-119.
- [10] MacLeod M, Woodfine D, Brimacombe J, *et al.* A dynamic mass budget for toxaphene in North America [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, **21**(8): 1628-1637.
- [11] 田慧, 郭强, 毛潇萱, 等. 广州地区典型多溴联苯醚迁移和归趋行为模拟[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 758-765.
- [12] 董继元, 王式功, 高宏, 等. 兰州地区苯并(a)芘的环境多介质迁移和归趋模拟[J]. *生态环境*, 2009, **17**(6): 2150-2153.
- [13] 张鸿, 赵亮, 何龙, 等. 不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2698-2704.
- [14] 刘宝林. 珠江三角洲环境区域中全氟化合物的环境行为研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015. 22-23.
- [15] 刘世杰. 环渤海地区持久性有机污染物空间多介质迁移模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. 37-38.
- [16] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴 2014[M]. 深圳: 中国统计出版社, 2015.
- [17] 深圳市气象局. 深圳市气候公报 2014 [EB/OL]. <http://www.szmb.gov.cn/article/QiHouYeWu/qhgcyg/qhgh/2015/01/07/54aced3a59ebb.html>, 2015-01-07.
- [18] 深圳市水务局. 深圳河流概况[EB/OL]. http://www.szwrb.gov.cn/cn/zwgk_single_list.asp?id=26305&m=1&lm=27&lid=. 2015.
- [19] 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 等. 近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4276-4283.
- [20] Steinle-Darling E, Reinhard M. Nanofiltration for trace organic contaminant removal: structure, solution, and membrane fouling effects on the rejection of perfluorochemicals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(14): 5292-5297.
- [21] Liu B L, Zhang H, Yao D, *et al.* Perfluorinated compounds (PFCs) in the atmosphere of Shenzhen, China: spatial distribution, sources and health risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2015, **138**: 511-518.
- [22] 王鑫璇. 全氟化合物在深圳水环境中的含量水平及其分布特征研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
- [23] Xie S W, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Estimation of PFOS emission from domestic sources in the eastern coastal region of China[J]. *Environment International*, 2013, **59**: 336-343.
- [24] 刘晓湾, 赵亮, 张鸿, 等. 深圳市表层土中氟化物组成及分布[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(02): 499-505.
- [25] Pistocchi A, Loos R. A map of European emissions and concentrations of PFOS and PFOA[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9237-9244.
- [26] Murakami M, Imamura E, Shinohara H, *et al.* Occurrence and sources of perfluorinated surfactants in rivers in Japan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(17): 6566-6572.
- [27] 陈春丽, 王铁宇, 吕永龙, 等. 河流及污水处理厂全氟化合物排放估算[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1073-1080.
- [28] 戴纪翠, 高晓薇, 倪晋仁, 等. 深圳河流沉积物中重金属累积特征及污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(4): 170-175.
- [29] 余忆玄. 铜、铬对 PFOS 在沉积物上吸附行为的影响规律研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [30] 徐大海, 俎铁林. 我国大气稳定度频率的分布[J]. *环境科学学报*, 1983, **3**(1): 52-61.
- [31] 洪钟祥, 周乐义, 沈剑青, 等. 气溶胶粒子干沉降速度的测量[J]. *大气科学*, 1987, **11**(2): 138-144.
- [32] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(1): 99-105.
- [33] 赵兴敏, 赵兰坡, 郭欣欣, 等. 水体沉积物与岸边土壤颗粒组成及有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(6): 304-308.
- [34] 贾成霞, 潘纲, 陈灏. 全氟辛烷磺酸盐在天然水体沉积物中的吸附-解吸行为[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1611-1617.
- [35] 马立新, 陈吉平, 倪余文, 等. 土壤柱液相色谱多级吸附法测定污染物的土壤有机碳吸附常数[J]. *色谱*, 2004, **22**(5): 555-557.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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