

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                             |                                                           |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····                             | 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)                        |
| 阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····                                | 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)                        |
| 上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····                                     | 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)                    |
| 七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····                                     | 马娟娟, 李真 (2060)                                            |
| 冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····                       | 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)                                      |
| 大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····                                  | 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)                        |
| 深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····                                    | 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)                     |
| 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····                                   | 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)                                      |
| 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····                                  | 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)         |
| 汾河源区不同景观带水文过程研究·····                                        | 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)                                 |
| 北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····                                  | 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)                         |
| 光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····                                  | 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)                                      |
| 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····                                    | 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)                    |
| 基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····                           | 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)                        |
| 镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····                              | 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)                        |
| 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····                               | 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)                                       |
| 湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····                            | 武晓飞, 李大鹏 (2164)                                           |
| 不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····                             | 王尚, 李大鹏 (2171)                                            |
| 池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····                                    | 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)                          |
| 再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····                                 | 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)                                      |
| 低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····                                      | 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)                             |
| 活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····                                       | 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)                                  |
| 准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····                                      | 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)                                 |
| AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····                           | 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)                      |
| 镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····                        | 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)                             |
| 微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····                                   | 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)                  |
| 聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····                                    | 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)                             |
| 丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····                            | 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)                                     |
| 聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····                                      | 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)                    |
| 鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····                             | 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)                   |
| 基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····                        | 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)                        |
| 农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····                                  | 谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)               |
| 渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····                  | 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)                              |
| 基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····                          | 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)                               |
| 对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····                                | 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)                        |
| 基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····                                     | 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)                        |
| 酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····                             | 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)                         |
| 河蚬( <i>Corbicula fluminea</i> )扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响····· | 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)                              |
| 海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····                                    | 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)                         |
| DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····                          | 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)                                    |
| 重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····                                      | 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)                         |
| 1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····                             | 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)                                  |
| 黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····                      | 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349) |
| 黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····                                    | 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)                        |
| 宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····                               | 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)                                   |
| 长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····                           | 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)                          |
| 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····                             | 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)                                  |
| 伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····                              | 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)                        |
| 江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····                                | 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)                             |
| 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····                             | 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)                                 |
| 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····                                    | 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)                             |
| 米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····                                     | 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)              |
| 水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····                         | 刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)                                       |
| 《环境科学》征订启事 (2208)                                           |                                                           |
| 《环境科学》征稿简则 (2400)                                           |                                                           |
| 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)                                 |                                                           |

# 鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟

弓晓峰<sup>1,2</sup>, 向洪锐<sup>1,2</sup>, 陈春丽<sup>1,2\*</sup>, 周文斌<sup>1,2</sup>, 王佳佳<sup>1,2</sup>, 刘春英<sup>2,3</sup>, 曾艳<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330047; 2. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031; 3. 江西财经大学旅游与城市管理学院, 南昌 330032)

**摘要:** 利用 TaPL3 模型模拟研究了鄱阳湖 5 种典型持久性有机污染物 (POPs) 的长距离迁移潜力 (LRTP) 和总持久性 (Pov), 比较了不同污染物特征迁移距离 (CTD) 和 Pov 的大小, 并以  $p$ 、 $p'$ -DDT 为例对关键参数进行了灵敏度分析。结果表明,  $p$ 、 $p'$ -DDT、 $\gamma$ -HCH、HCB、PCP 和 2,3,7,8-TCDD 排放到大气中, 特征迁移距离 ( $CTD_{Air}$ ) 在 432 km (2,3,7,8-TCDD) ~ 86 479 km (HCB) 之间, 总持久性 ( $Pov_{Air}$ ) 在 85.6 d (PCP) ~ 2 231 d (HCB) 之间, 土壤相是 POPs 的主要归宿, 约占 72.0%; 排放到水体中, 特征迁移距离 ( $CTD_{Water}$ ) 在 4 207 km (PCP) ~  $1.19 \times 10^5$  km ( $\gamma$ -HCH) 之间, 总持久性 ( $Pov_{Water}$ ) 在 103 d (PCP) ~ 2 890 d (HCB) 之间, 沉积物相是 POPs 的主要归宿, 约占 52.5%。环境介质中的半衰期和辛醇-水分配系数的对数是影响污染物 CTD 和 Pov 的主要理化性质参数。与同类研究相比, 相关 POPs 在鄱阳湖的  $CTD_{Air}$  处于中间水平, 但  $CTD_{Water}$  偏高, 这与鄱阳湖的水体深度和水体流速这两个对  $CTD_{Water}$  影响显著的参数较其它研究区域高有关。研究结果可为该地区 POPs 的环境过程及环境风险的研究提供科学依据。

**关键词:** 鄱阳湖; TaPL3 模型; 持久性有机污染物; 长距离迁移潜力; 总持久性

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2256-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.030

## Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake

GONG Xiao-feng<sup>1,2</sup>, XIANG Hong-rui<sup>1,2</sup>, CHEN Chun-li<sup>1,2</sup>, ZHOU Wen-bin<sup>1,2</sup>, WANG Jia-jia<sup>1,2</sup>, LIU Chun-ying<sup>2,3</sup>, ZENG Yan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. School of the Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China)

**Abstract:** The long-range transport potential (LRTP) and overall persistence (Pov) of 5 typical persistent organic pollutants (POPs) through air and water in Poyang Lake were estimated by the TaPL3 model. The characteristic travel distance (CTD) and Pov of different POPs were compared. In addition, the key parameters were examined by the sensitivity analysis method using  $p$ ,  $p'$ -DDT as an example. The results showed that the  $CTD_{Air}$  of  $p$ ,  $p'$ -DDT,  $\gamma$ -HCH, HCB, PCP and 2,3,7,8-TCDD ranged from 432 km (2,3,7,8-TCDD) to 86 479 km (HCB), and the value of  $Pov_{Air}$  ranged from 85.6 d (PCP) to 2 231 d (HCB), when POPs were emitted to the atmosphere. Soil phase was the main fate of these typical POPs, and it was about 72.0% percent of the total phase. Meanwhile, the  $CTD_{Water}$  was from 4 207 km (PCP) to  $1.19 \times 10^5$  km ( $\gamma$ -HCH), and  $Pov_{Water}$  was from 103 d (PCP) to 2 890 d (HCB), when POPs were emitted to the water. Sediment phase was the main fate of these typical POPs, and it was about 52.5% percent of the total phase. Half-life in the environment and octanol-water partition coefficient logarithm of POPs were the two main physical-chemical parameters that affected CTD and Pov. When compared with other similar studies in China, the  $CTD_{Air}$  of related POPs in Poyang Lake is in the middle level. While the  $CTD_{Water}$  was a little higher than other areas, which was due to the higher water depth and water flow velocity of Poyang Lake. Therefore, the higher water depth and water flow velocity were two significantly-affected parameters of  $CTD_{Water}$ . The results could provide a scientific basis to studies of environmental process and risks of POPs in Poyang Lake.

**Key words:** Poyang Lake; TaPL3 model; POPs; long-range transport potential (LRTP); overall persistence (Pov)

POPs 具有高持久性和半挥发性等特征, 可通过“全球蒸馏效应”实现远距离迁移, 从而引发全球范围的环境问题<sup>[1]</sup>。因此, 研究 POPs 长距离迁移潜力 (long-range transport potential, LRTP) 和总持久性 (overall persistence, Pov) 对评估其生态及健康风险具有现实意义, 同时对区域 POPs 污染削减与控制具有指导作用。

鄱阳湖流域几乎汇集了江西省内的各种污染物, 其中包括农业生产过程中所使用的各种农药, 尤

其是 20 世纪 80 年代前后被广泛使用的滴滴涕 (DDTs)、六六六 (HCHs)、六氯苯 (HCB) 等 POPs<sup>[2]</sup>。刘小真等<sup>[2]</sup>的研究表明, 鄱阳湖底泥中

收稿日期: 2013-09-30; 修订日期: 2013-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261097, 21067008); 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室 (南昌大学) 开放基金项目 (SKLURE2008-1-4); 南昌大学分析测试基金项目 (2008ZX07209-010)

作者简介: 弓晓峰 (1962~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为环境污染与风险评价, E-mail: xfgong@ncu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: hnclichen@163.com

DDTs 以  $p, p'$ -DDD( $p, p'$ -DDT 的主要代谢产物)含量最高,达到  $19.2 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; HCHs 农药中主要残留的是  $\gamma$ -HCH,为  $2.485 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,低于长江三角洲地区城市污泥中的  $5.69 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; HCB 的含量达  $15.925 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,高于无锡市农田土壤样品的  $7.290 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 同时,鄱阳湖区是血吸虫的病疫区,五氯酚(PCP)的钠盐——五氯酚钠(PCP-Na)作为高效、廉价的杀螺剂被大量使用,并一直沿用至今. 郑星泉等<sup>[3]</sup>的调查显示,鄱阳湖血吸虫施药区环境介质中 PCP 含量均显著高于对照区,其中地表水、土壤中的 PCP 浓度分别为  $0.071 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.58 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,并且在动、植物及人体内均存在 PCP 残留检出. 此外,PCP 还是环境污染物二噁英(TCDDs)的来源之一,其成品及生产过程产生的废渣中都含有一定量的 TCDDs,可能给环境带来二次污染<sup>[4]</sup>. TCDDs 中以 2,3,7,8-TCDD 的半衰期最长,对环境污染潜在风险最高,江西省土壤中 2,3,7,8-TCDD 含量在  $1.6 \times 10^{-11} \sim 43.9 \times 10^{-11} \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,但低于美国环境保护署(EPA)推荐的土壤中允许的浓度  $1 \times 10^{-9} \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>[3]</sup>.

本研究以鄱阳湖为研究区域,选取了区域内 5 种典型的 POPs,包括  $p, p'$ -DDT、 $\gamma$ -HCH、HCB、PCP 和 2,3,7,8-TCDD,利用 TaPL3 模型 (Version 3.00) 对 5 种 POPs 在大气及水体中的 LRTP 及 Pov 进行了模拟,并对模型灵敏度进行了分析. 模拟结果对了解污染物在鄱阳湖的环境过程及环境风险都具有一定的理论与实际指导意义,以期为深入研究以鄱阳湖区为代表的我国中部中亚热带季风气候类型地区相关 POPs 的环境行为提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

鄱阳湖位于江西省北部、长江南岸,介于北纬  $28^{\circ}22' \sim 29^{\circ}45'$ ,东经  $115^{\circ}47' \sim 116^{\circ}45'$ ,其承纳江西省内赣、抚、信、饶、修五大河流的来水,是我国最大的吞吐性淡水湖. 鄱阳湖属中亚热带季风型气候,年均气温在  $16.2 \sim 19.7^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量为  $1341 \sim 11939 \text{mm}$ ,平均风速约  $14.1 \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,全年风向以偏北风为主,冬季多北风,夏季多南风. 研究中所涉及的区域是指以鄱阳湖为主体,及其所辐射的包括南昌、九江、景德镇及鹰潭等地、市的相关地区.

### 1.2 模型简介

TaPL3.0 模型是以逸度概念为基础,基于三级

稳态多介质逸度模型(Level III),由加拿大 TRENT 大学开发,专用于估算化学物质的 LRTP 及 Pov. 模型假设污染源连续稳定地向大气或水体中排放污染物,排放强度为  $1000 \text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . 与 Level III 逸度模型相比,TaPL3.0 模型未考虑通过大气、水体的水平输入或输出及沉积物的掩埋<sup>[5]</sup>. 其研究的流域环境相包含 5 个主相:大气、水体、土壤、沉积物及植被相,各个主相中又含有若干子相,如大气中包括气相和气溶胶,水体中包括水、悬浮物和生物子相. 该模型输出结果主要有 LRTP、Pov 及污染物在各相中的百分含量,此外还包括逸度( $f$ )、逸度容量( $Z$ )及相间迁移通量( $D$ )等.

CTD 指由于环境相的降解和向固定相迁移导致污染物浓度降低至其初始浓度的  $1/e$  时该物质迁移的距离,在 TaPL3.0 模型中通常以 CTD 对污染物的 LRTP 进行表征. 其中,CTD 可通过下式计算得到<sup>[5]</sup>:

$$\text{CTD}_{\text{Air}} = U_{\text{A}}M_{\text{A}}/(N_{\text{RA}} + N_{\text{AS}}) \quad (1)$$

式中,CTD<sub>Air</sub>:大气中特征迁移距离,km;  $U_{\text{A}}$ :空气流速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $M_{\text{A}}$ :空气中污染物的总量,kg;  $N_{\text{RA}}$ :污染物在空气中的反应速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\text{AS}}$ :净沉降速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$\text{CTD}_{\text{Water}} = U_{\text{W}}M_{\text{W}}/(N_{\text{RW}} + N_{\text{WS}} + N_{\text{WA}}) \quad (2)$$

式中,CTD<sub>Water</sub>:水体中特征迁移距离,km;  $U_{\text{W}}$ :水体流速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $M_{\text{W}}$ :水体中污染物的总量,kg;  $N_{\text{RW}}$ :污染物在水体中的反应速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\text{WS}}$ :水体向沉积物的净迁移速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\text{WA}}$ :水体向空气的净迁移速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

POPs 在环境中很难降解,因而比一般的污染物对环境造成的危害更大. Pov 是排放到环境中的污染物对人体健康和生态影响的一个重要的表征,可作为系统中污染物全部消解所需时间. 假设环境系统是稳态的,即单位时间内污染物的输入等于输出, Pov 可通过下式计算得到:

$$\text{Pov} = M/N_{\text{RT}} = M/N_{\text{R}} \quad (3)$$

式中, Pov:化合物的总持久性,h;  $M$ :污染物总量,kg;  $N_{\text{RT}}$ :单位时间总损失量,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $N_{\text{R}}$ :反应速率,  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 1.3 模型参数识别

对于在各个环境相中均有分配的第 1 类化学物质<sup>[6]</sup>,TaPL3 模型共需输入 64 项参数,其中包括 18 项化学物质的物理化学参数及 46 项环境参数. 物理化学参数取值主要摘自国外相关数据手册和文

献,环境参数则摘自历年鄱阳湖的监测数据、资料及参考文献. 模型参数尽量收集多个数据,在对同类数据进行分析筛选后,选取有代表性的数值. 主要参数取值及数据来源见表 1、表 2.

表 1 污染物理化性质参数<sup>1)</sup>

| Table 1 Physicochemical parameter of pollutants |                                 |                                   |                                    |                                   |                                    |                                    |
|-------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 参数                                              | 单位                              | $p, p'$ -DDT                      | $\gamma$ -HCH                      | HCB                               | PCP                                | 2,3,7,8-TCDD                       |
| 摩尔质量                                            | $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  | 354.5 <sup>[7]</sup>              | 290.83 <sup>[5]</sup>              | 284.79 <sup>[7]</sup>             | 266.34 <sup>[7]</sup>              | 322 <sup>[5]</sup>                 |
| 数据测定温度                                          | $^{\circ}\text{C}$              | 25                                | 25                                 | 25                                | 25                                 | 25                                 |
| 大气中的半衰期                                         | h                               | 500 <sup>[8]</sup>                | 1 040 <sup>[5]</sup>               | 7 350 <sup>[5]</sup>              | 550 <sup>[7]</sup>                 | 241 <sup>[11]</sup>                |
| 水中的半衰期                                          | h                               | 8 000 <sup>[7]</sup>              | 17 000 <sup>[5]</sup>              | 55 000 <sup>[5]</sup>             | 550 <sup>[7]</sup>                 | 550 <sup>[5]</sup>                 |
| 土壤中的半衰期                                         | h                               | 25 000 <sup>[8]</sup>             | 17 000 <sup>[5]</sup>              | 55 000 <sup>[5]</sup>             | 1 700 <sup>[7]</sup>               | 17 000 <sup>[5]</sup>              |
| 沉积物中的半衰期                                        | h                               | 20 000 <sup>[7]</sup>             | 55 000 <sup>[5]</sup>              | 55 000 <sup>[5]</sup>             | 5 500 <sup>[7]</sup>               | 55 000 <sup>[5]</sup>              |
| 植被中的半衰期                                         | h                               | 250 <sup>a</sup>                  | 520 <sup>a</sup>                   | 3 675 <sup>a</sup>                | 275 <sup>a</sup>                   | 148 <sup>[11]</sup>                |
| 大气中降解的活化能                                       | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 10 <sup>b</sup>                   | 10 <sup>b</sup>                    | 10 <sup>b</sup>                   | 10 <sup>b</sup>                    | 10 <sup>b</sup>                    |
| 水中降解的活化能                                        | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                    |
| 土壤中降解的活化能                                       | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                    |
| 沉积物中降解的活化能                                      | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                   | 30 <sup>b</sup>                    | 30 <sup>b</sup>                    |
| 植被中降解的活化能                                       | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 10 <sup>b</sup>                   | 10 <sup>b</sup>                    | 10 <sup>b</sup>                   | 10 <sup>b</sup>                    | 10 <sup>b</sup>                    |
| 水溶解度                                            | $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$    | $5.5\times10^{-3}$ <sup>[7]</sup> | 7.3 <sup>[5]</sup>                 | $5.0\times10^{-3}$ <sup>[5]</sup> | 14 <sup>[7]</sup>                  | $1.93\times10^{-5}$ <sup>[5]</sup> |
| 饱和蒸气压                                           | Pa                              | $2.5\times10^{-5}$ <sup>[7]</sup> | $5.60\times10^{-3}$ <sup>[7]</sup> | $2.3\times10^{-3}$ <sup>[5]</sup> | $4.15\times10^{-3}$ <sup>[7]</sup> | $2.0\times10^{-7}$ <sup>[5]</sup>  |
| 辛醇-水分配系数的对数                                     | 无量纲                             | 5.6 <sup>[7]</sup>                | 3.78 <sup>[10]</sup>               | 5.47 <sup>[7]</sup>               | 5.05 <sup>[7]</sup>                | 6.8 <sup>[5]</sup>                 |
| 熔点                                              | $^{\circ}\text{C}$              | 108.5 <sup>[7]</sup>              | 112.5 <sup>[7]</sup>               | 230 <sup>[5]</sup>                | 174 <sup>[7]</sup>                 | 305 <sup>[5]</sup>                 |
| 辛醇-水分配的焓变                                       | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | -11.19 <sup>[9]</sup>             | -22.23 <sup>[9]</sup>              | -16.87 <sup>[9]</sup>             | -20 <sup>b</sup>                   | -18.22 <sup>[9]</sup>              |
| 气-水分配的焓变                                        | $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ | 76.94 <sup>[9]</sup>              | 43.15 <sup>[9]</sup>               | 46.35 <sup>[9]</sup>              | 55 <sup>b</sup>                    | 74.44 <sup>[9]</sup>               |

1) a 模型默认为大气中的半衰期的 0.5 倍; b 模型默认值

表 2 鄱阳湖主要环境参数<sup>1)</sup>

| Table 2 Environmental parameters in Poyang Lake |                               |                                     |                |                                |                                     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 参数                                              | 单位                            | 取值                                  | 参数             | 单位                             | 取值                                  |
| 环境温度                                            | $^{\circ}\text{C}$            | 18.0 <sup>[12]</sup>                | 植被的密度          | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  | 1 000 <sup>[13]</sup>               |
| 大气面积                                            | $\text{m}^2$                  | $3.21\times10^{10}$                 | 水相中固体有机碳       | $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$   | 0.2 <sup>c</sup>                    |
| 大气高度                                            | m                             | 1 000 <sup>[13]</sup>               | 土壤中固体有机碳含量     | $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$   | $1.2\times10^{-2}$ <sup>[17]</sup>  |
| 水体面积                                            | $\text{m}^2$                  | $3.21\times10^9$ <sup>[12]</sup>    | 沉积物中固体有机碳含量    | $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$   | $2.2\times10^{-2}$ <sup>[18]</sup>  |
| 水体深度                                            | m                             | 6.4 <sup>[12]</sup>                 | 鱼类的脂肪含量        | $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$   | 0.02 <sup>[19]</sup>                |
| 土壤深度                                            | m                             | 0.1 <sup>[13]</sup>                 | 植被的脂肪含量        | $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$   | 0.01 <sup>c</sup>                   |
| 沉积物厚度                                           | m                             | 0.03 <sup>[13]</sup>                | 生物质量           | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  | 1.0 <sup>c</sup>                    |
| 植被占土壤总面积的比例                                     | 无量纲                           | 0.31 <sup>[14]</sup>                | 叶面面积指数         | $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ | 3.0 <sup>c</sup>                    |
| 风速                                              | $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 14.1 <sup>[15]</sup>                | 气侧气/水质量迁移系数    | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 3 <sup>c</sup>                      |
| 水体流速                                            | $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 4.68 <sup>[15]</sup>                | 水侧气/水质量迁移系数    | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 0.03 <sup>c</sup>                   |
| 气相中固体的体积分数                                      | 无量纲                           | $2.0\times10^{-11}$ <sup>[13]</sup> | 降水速率           | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $1.87\times10^{-4}$                 |
| 水相中固体的体积分数                                      | 无量纲                           | $4.56\times10^{-6}$                 | 气溶胶干沉降速率       | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 10.8 <sup>[13]</sup>                |
| 水相中鱼类的体积分数                                      | 无量纲                           | $1.1\times10^{-5}$                  | 土壤中气相扩散质量迁移系数  | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 0.02 <sup>c</sup>                   |
| 土壤中气子相的体积分数                                     | 无量纲                           | 0.2 <sup>[16]</sup>                 | 土壤中水相扩散质量迁移系数  | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $1.0\times10^{-5}$ <sup>c</sup>     |
| 土壤中水子相的体积分数                                     | 无量纲                           | 0.3 <sup>[16]</sup>                 | 土壤/大气边界层质量迁移系数 | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 1 <sup>c</sup>                      |
| 土壤中固子相的体积分数                                     | 无量纲                           | 0.5 <sup>[16]</sup>                 | 沉积物中水相扩散质量迁移系数 | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 0.01 <sup>c</sup>                   |
| 沉积物中水子相的体积分数                                    | 无量纲                           | 0.7 <sup>[13]</sup>                 | 沉积物沉降速率        | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $1.9\times10^{-7}$ <sup>[15]</sup>  |
| 沉积物中固子相的体积分数                                    | 无量纲                           | 0.3 <sup>[13]</sup>                 | 沉积物再悬浮速率       | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $2.85\times10^{-6}$ <sup>[15]</sup> |
| 气相中固体的密度                                        | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 2 000 <sup>[13]</sup>               | 土壤水流失速率        | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $3.9\times10^{-5}$ <sup>[13]</sup>  |
| 水相中固体的密度                                        | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 1 028                               | 土壤固体流失速率       | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | $2.3\times10^{-8}$ <sup>[13]</sup>  |
| 水相中鱼类的密度                                        | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 1 234                               | 叶面/大气边界层质量迁移系数 | $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$   | 9 <sup>c</sup>                      |
| 土壤中固体的密度                                        | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 2 400 <sup>[13]</sup>               | 清洗速率           | 无量纲                            | $2.0\times10^5$ <sup>[13]</sup>     |
| 沉积物中固体的密度                                       | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 1 500 <sup>[13]</sup>               | 植被所截雨水比例       | 无量纲                            | 0.1 <sup>c</sup>                    |

1) c 模型默认值

表 2 中,鄱阳湖水域面积约为  $3.21\times10^9\text{m}^2$ ,相应的空气面积取为水域面积的 10 倍,水相中固体体积分数、水相中固体的密度分别为  $4.56\times10^{-6}$ 、 $1\,028\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  由鄱阳湖平均悬浮物量  $47\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[20]</sup>

算得,水相中鱼类体积分数、水相中固体的密度为  $1.1 \times 10^{-5}$ 、 $1\,234\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  由湖区平均鱼产量  $198\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[12]</sup> 算得,降水速率  $1.87 \times 10^{-4}\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  由鄱阳湖年降雨量平均  $1\,640\text{ mm}$ <sup>[12]</sup> 算得。

2 模型结果

将最终确定的各个参数输入 TaPL3 模型中,模型模拟结果显示,在大气中, $p, p'$ -DDT、 $\gamma$ -HCH、HCB、PCP 和 2,3,7,8-TCDD 的  $\text{CTD}_{\text{Air}}$  分别为 576、2 774、86 479、759 和 432 km,  $\text{Pov}_{\text{Air}}$  分别为 1 567、1 152、2 231、85.6 和 954 d; 在水体中的  $\text{CTD}_{\text{Water}}$  分别为 18 163、 $1.19 \times 10^5$ 、51 881、4 207 和 4 288 km,  $\text{Pov}_{\text{Water}}$  分别为 1 361、1 393、2 980、103 和 497 d, 如表 3。

表 3 POPs 通过大气和水体的 CTD 和 Pov

Table 3 CTD and Pov of POPs through air and water

| POPs          | $\text{CTD}_{\text{Air}}$<br>/km | $\text{CTD}_{\text{Water}}$<br>/km | $\text{Pov}_{\text{Air}}$<br>/d | $\text{Pov}_{\text{Water}}$<br>/d |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| $p, p'$ -DDT  | 576                              | 18 163                             | 1 567                           | 1 361                             |
| $\gamma$ -HCH | 2 774                            | $1.19 \times 10^5$                 | 1 152                           | 1 393                             |
| HCB           | 86 479                           | 51 881                             | 2 231                           | 2 890                             |
| PCP           | 759                              | 4 207                              | 85.6                            | 103                               |
| 2,3,7,8-TCDD  | 432                              | 4 288                              | 954                             | 497                               |

5 种 POPs 在各主相中的分布见图 1。当 POPs 排放到大气中,土壤相是其主归宿,37.9% (HCB) ~95.4% (2,3,7,8-TCDD),平均 72.0%; 沉积物相、水相次之,分别为 3.93% (2,3,7,8-TCDD) ~39.3% (HCB),平均 20.4% 和 0.360% (2,3,7,8-TCDD) ~40.5% ( $\gamma$ -HCH),平均 11.3%; POPs 在大气相和植被相中的分布较少。当 POPs 排放到水体中,沉积物相是 POPs 的主要归宿,10.8% ( $\gamma$ -HCH) ~83.7% (2,3,7,8-TCDD),平均 52.5%; 水相、土壤相含量次之,分别为 7.67% (2,3,7,8-TCDD) ~75.9% ( $\gamma$ -HCH),平均 29.6% 和 0.460% (PCP) ~40.5% ( $p, p'$ -DDT),平均 16.6%; POPs 在大气相和植被相中分布也均较少。

3 分析与讨论

3.1 CTD 分析

在大气中,POPs 的 LRTP 主要受大气沉降和大气降解两个过程的影响<sup>[21,22]</sup>。5 种污染物的  $\text{CTD}_{\text{Air}}$  排序为 2,3,7,8-TCDD <  $p, p'$ -DDT < PCP <  $\gamma$ -HCH < HCB, 大气中的半衰期长的 POPs 有着更高的  $\text{CTD}_{\text{Air}}$ 。相较于其它的 POPs 而言,半衰期较短的污染物 2,3,7,8-TCDD 在大气中降解反应速率更快,

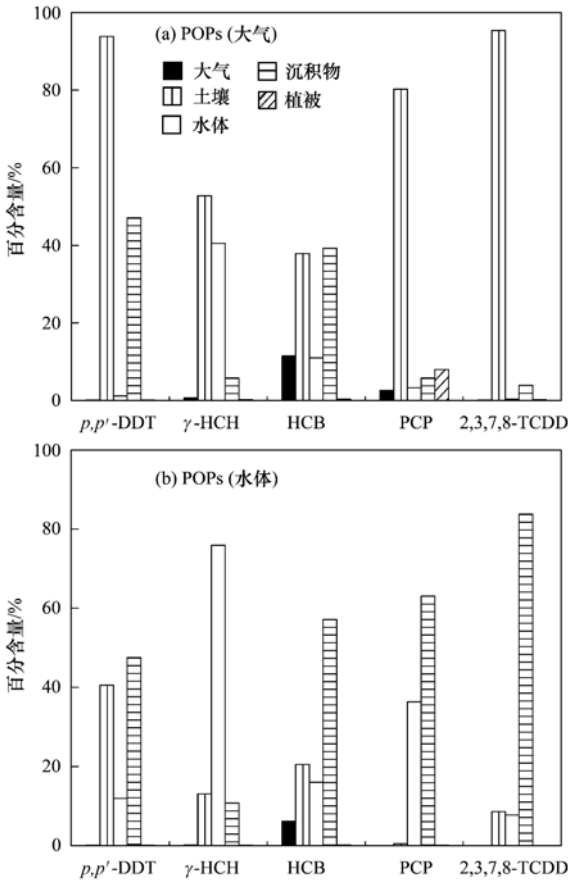


图 1 POPs 在各主相中的百分含量  
Fig. 1 Percentages of POPs in the main phases

降低了其在大气中的迁移距离; $p, p'$ -DDT 与 PCP 在大气中的半衰期较为接近,其  $\text{CTD}_{\text{Air}}$  小于 PCP,究其原因, $p, p'$ -DDT 由于饱和蒸气压较低,即挥发性较弱,容易通过大气沉降从空气中去除,影响了其大气迁移距离。5 种 POPs 中 HCB 在大气中的半衰期最长且挥发性最强,受大气沉降和降解反应的影响相对较小,故  $\text{CTD}_{\text{Air}}$  最大。在水体中,POPs 的 LRTP 主要由水体降解、水-大气挥发及水-沉积物迁移等 3 个过程共同决定<sup>[18,19]</sup>。5 种污染物的  $\text{CTD}_{\text{Water}}$  排序为  $\text{PCP} \approx 2,3,7,8\text{-TCDD} < p, p'\text{-DDT} < \text{HCB} < \gamma\text{-HCH}$ , 污染物辛醇-水分配系数的对数和水中的半衰期对  $\text{CTD}_{\text{Water}}$  影响较为显著。相对于污染物  $\gamma$ -HCH 而言,辛醇-水分配系数的对数较高且水中半衰期较短的 POPs,如 2,3,7,8-TCDD、PCP 的亲水性较低,在水体中降解反应速率快;此外,由于 PCP 挥发性较强,更易于向气相中迁移,这些因素都不利于其在水体中的长距离迁移。因此,辛醇-水分配系数的对数较低且水中的半衰期较长的 POPs 的  $\text{CTD}_{\text{Water}}$  相对更高。

鄱阳湖为中亚热带季风气候,冬季多北风,夏季

多南风. 模拟计算结果显示, 5 种 POPs 中 2,3,7,8-TCDD 的  $CTD_{Air}$  小于 450 km, 只可能对处于鄱阳湖下风向的部分区域造成污染, 而其它 4 种 POPs 的  $CTD_{Air}$  均大于 500 km, 对在冬季处于其下风向的地区如福建、广东、省内部分区域及夏季处于其下风向的湖北、安徽、河南等地区相关 POPs 浓度有贡献. 鄱阳湖承接赣江、抚河、信江、饶河、修水五大水系, 湖水流经九江后汇入长江, 长江九江段全长约 196.55 km, 5 种 POPs 的  $CTD_{Water}$  均大于 4 000 km, 因而 5 种 POPs 可能对长江下游地区造成污染.

### 3.2 Pov 分析

大气中, 污染物的  $Pov_{Air}$  排序为  $PCP < 2,3,7,8-TCDD < \gamma-HCH < p, p'-DDT < HCB$ ; 水体中, 污染物的  $Pov_{Water}$  排序为  $PCP < 2,3,7,8-TCDD < p, p'-DDT \approx \gamma-HCH < HCB$ , 环境介质中的半衰期和辛醇-水分配系数的对数是影响污染物 Pov 的主要参数. 其中, 环境介质中半衰期较短的 POPs, 如 PCP 排放到大气或水体后, 由于相间迁移量较小, 且其在

环境相中的降解反应速率较快, 以降解去除过程为主, 因而 Pov 较低; 相反, 半衰期较长的污染物, 如 HCB 辛醇-水分配系数的对数也较低, 排放到大气或水体后, 在环境相中的降解反应速率较慢, 很大一部分会迁移至土壤或沉积物中, 而其在土壤或沉积物中的半衰期比空气或水体中要慢得多, 故 Pov 较高.

### 3.3 模型灵敏度分析

以  $p, p'-DDT$  为例, 对模型中所需输入的 64 个参数, 除摩尔质量、数据测定温度可作为常数外, 对剩余 62 个参数进行了灵敏度分析. 参照 Mongan 等<sup>[23]</sup> 提出的算法, 灵敏度系数 ( $C_s$ ) 的算法如下:

$$C_s = (Y_{1.1} - Y_{0.9}) / (0.2Y_{1.0}) \quad (4)$$

式中,  $Y_{1.1}$ 、 $Y_{0.9}$ 、 $Y_{1.0}$  分别为参数取均值的 1.1、0.9 和 1.0 倍时的模型输出结果. 为更充分地体现各参数 (尤其是环境参数) 对模型结果的影响, 本研究以灵敏度系数  $C_s > 0.15$  为筛选标准, 对模型的关键参数进行识别. 结果如图 2 所示, 各代码所代表的参数如表 4.

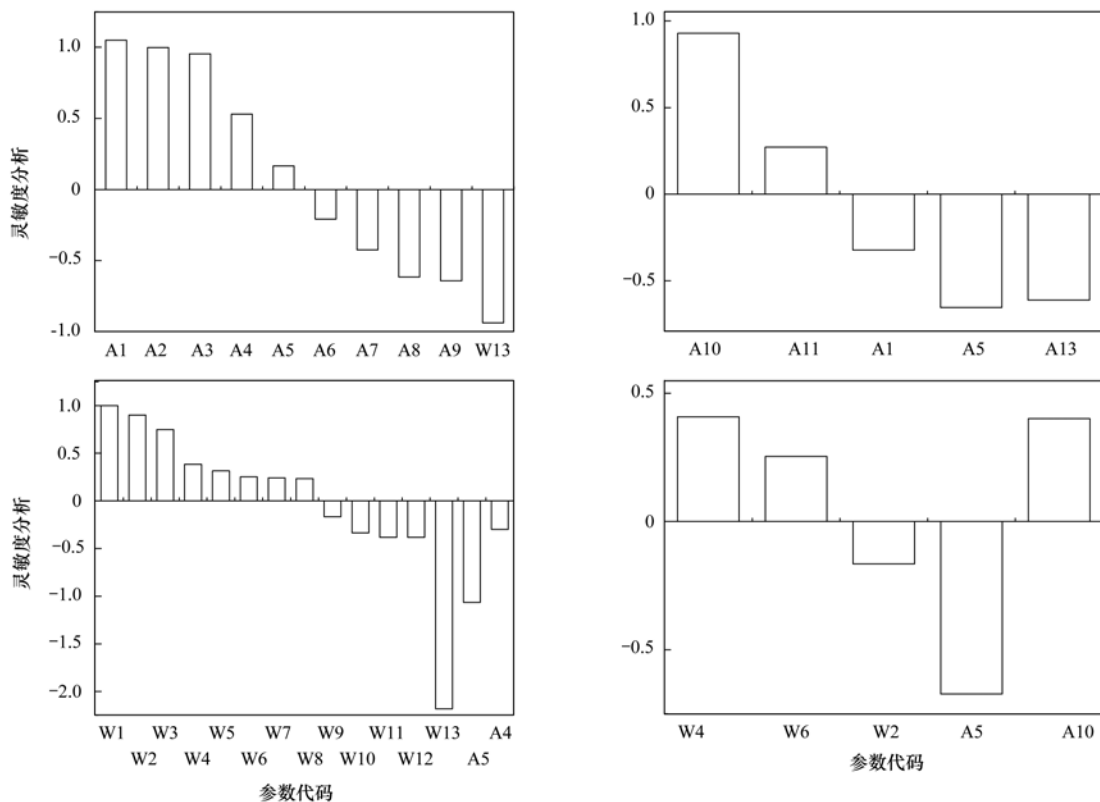


图 2 通过大气和水体的 CTD 和 Pov 的关键参数的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity of key parameters of CTD and Pov for POPs through air and water

### 3.4 不确定性分析

运用蒙特卡罗方法对模型进行了不确定性分析, 以  $p, p'-DDT$  为例, 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. 模型输出结果分布情况如图 3 所示. 模型输出的 CTD、Pov 值均符合正态分布规律. 其中, 通过大气的 CTD 和 Pov 值比水体的输出结果更为稳定且集中, 水体中输出结果的离散程度较高, 不确定性

表 4 灵敏度分析中参数的代码及其意义

| Table 4 Codes and definitions of parameters for sensitivity analysis |                  |
|----------------------------------------------------------------------|------------------|
| 代码 意义                                                                | 代码 意义            |
| A1 熔点                                                                | W2 沉积物中水子相的体积分数  |
| A2 风速                                                                | W3 水体深度          |
| A3 大气高度                                                              | W4 沉积物中的半衰期      |
| A4 饱和蒸气压                                                             | W5 水溶解度          |
| A5 环境温度                                                              | W6 水中的半衰期        |
| A6 气溶胶干沉降速率                                                          | W7 沉积物再悬浮速率      |
| A7 气相中固体的体积分数                                                        | W8 气-水分配的焓变      |
| A8 清洗速率                                                              | W9 沉积物沉降速率       |
| A9 降水速率                                                              | W10 气侧气/水质量迁移系数  |
| A10 土壤中的半衰期                                                          | W11 沉积物中固子相的体积分数 |
| A11 土壤中降解的活化能                                                        | W12 沉积物厚度        |
| W1 水体流速                                                              | W13 辛醇-水分配系数的对数  |

相对较大,这主要与关键参数的不确定性和不同参数间灵敏度的相对平衡情况有关. CTD 和 Pov 输出结果的统计指标见表 5, 其中, CTD<sub>Air</sub> 的范围为 506. 87 ~ 671. 47 km, CTD<sub>Water</sub> 的范围为 17 345. 57 ~ 18 946. 15 km, Pov<sub>Air</sub> 的范围为 1 554. 11 ~ 1 579. 05 d, Pov<sub>Water</sub> 的范围为 1 337. 99 ~ 1 385. 05 d.

表 5 CTD 和 Pov 输出结果的不确定性

| Table 5 Uncertainty of CTD and Pov |            |            |            |         |
|------------------------------------|------------|------------|------------|---------|
| 统计参数                               | 均值         | 最大值        | 最小值        | 标准差     |
| CTD <sub>Air</sub> /km             | 576. 48    | 671. 47    | 506. 87    | 22. 17  |
| CTD <sub>Water</sub> /km           | 18 162. 90 | 18 946. 15 | 17 345. 57 | 199. 08 |
| Pov <sub>Air</sub> /d              | 1 566. 96  | 1 579. 05  | 1 554. 11  | 3. 45   |
| Pov <sub>Water</sub> /d            | 1 361. 05  | 1 385. 05  | 1 337. 99  | 6. 67   |

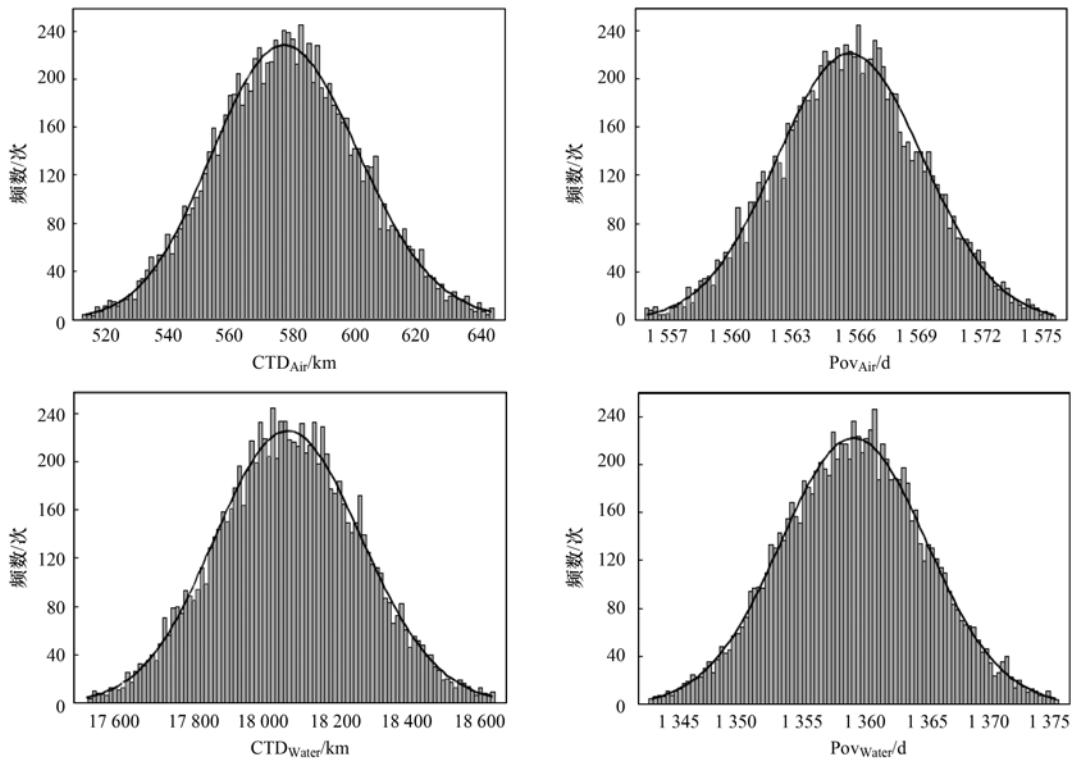


图 3 通过大气和水体的 CTD 和 Pov 的分布情况

Fig. 3 Distribution of CTD and Pov in air and water

4 讨论

如表 6, 本研究中涉及的  $p$ ,  $p'$ -DDT、 $\gamma$ -HCH、HCB 和 2,3,7,8-TCDD 这 4 种 POPs 在鄱阳湖大气中的 CTD<sub>Air</sub> 处于中间水平, 432 km (2,3,7,8-TCDD) ~ 86 479 km (HCB). 灵敏度分析表明, 环境参数中风速和大气高度对 CTD<sub>Air</sub> 影响最为显著. 在大气高度取值相同的条件下, 鄱阳湖的平均风速为 14. 1 km·h<sup>-1</sup>, 高于南京地区<sup>[25]</sup> 的 9. 00 km·h<sup>-1</sup> 和兰州地区<sup>[26]</sup> 的 2. 88 km·h<sup>-1</sup>, 故 CTD<sub>Air</sub> 高于两地. Beyer

等<sup>[5]</sup> 计算出 POPs 在 EQC 标准环境下通过大气的 CTD<sub>Air</sub> 总体高于其它地区. 分析原因, 主要是由于 Beyer 等<sup>[5]</sup> 的研究系统未将植被相包括在内, 植被相对污染物的过滤及降解作用, 使得引入植被相后 CTD<sub>Air</sub> 会显著下降. 王宣同等<sup>[24]</sup> 计算出  $p$ ,  $p'$ -DDT 在天津地区的 CTD<sub>Air</sub> 为 579. 10 km, 与本研究结果比较接近. 究其原因, 灵敏度较高的环境参数, 如风速、大气高度、清洗速率、降水速率及气相中固体的体积分数等的取值上, 鄱阳湖和天津地区的环境参数基本可以相互抵消, 因此导致两者通过大气的

CTD<sub>Air</sub>相近.

POPs 在鄱阳湖水体中的 CTD<sub>Water</sub> 偏高, 4 288 km (2, 3, 7, 8-TCDD) ~ 1. 19 × 10<sup>5</sup> km (γ-HCH). 灵敏度分析中, 水体深度和 水体流速对 CTD<sub>Water</sub> 影响显著, 鄱阳湖取值分别为 6. 4 m、4. 68 km·h<sup>-1</sup>, 大体上高于其它研究区域, 故 CTD<sub>Water</sub> 较

高. 刘国金等<sup>[15]</sup> 计算出 *p*, *p'*-DDT 在鄱阳湖流域的 CTD<sub>Air</sub> 和 CTD<sub>Water</sub> 分别为 503. 5 km 和 37 881. 2 km, 与本研究结果的 576 km 和 18 163 km 不同, 主要是因为作者对污染物的理化性质和鄱阳湖环境参数重新进行了统计和整理, 对个别参数取值的不同造成了模型结果的差异.

表 6 不同地区通过大气和水体的 CTD 值

Table 6 CTD values in air and water of different regions

| POPs                      | 研究区域     | CTD <sub>Air</sub> /km  | CTD <sub>Water</sub> /km | 文献   |
|---------------------------|----------|-------------------------|--------------------------|------|
| <i>p</i> , <i>p'</i> -DDT | EQC 标准环境 | 830                     | 3 300                    | [5]  |
|                           | 天津地区     | 579. 10                 | 2 254. 10                | [24] |
|                           | 鄱阳湖流域    | 503. 5                  | 3 7881. 2                | [15] |
|                           | 南京地区     | 255                     | 7 877                    | [25] |
|                           | 本研究      | 576                     | 18 163                   |      |
| γ-HCH                     | EQC 标准环境 | 5 200                   | 67 000                   | [5]  |
|                           | 兰州地区     | 934                     | 1. 19 × 10 <sup>5</sup>  | [26] |
|                           | 南京地区     | 1 858                   | 91 558                   | [25] |
|                           | 本研究      | 2 774                   | 1. 19 × 10 <sup>5</sup>  |      |
| HCB                       | EQC 标准环境 | 1. 10 × 10 <sup>5</sup> | 2 600                    | [5]  |
|                           | 兰州地区     | 13 307                  | 16 658                   | [26] |
|                           | 南京地区     | 21 104                  | 19 056                   | [25] |
|                           | 本研究      | 86 479                  | 51 881                   |      |
| 2, 3, 7, 8-TCDD           | EQC 标准环境 | 810                     | 1 300                    | [5]  |
|                           | 多介质环境    | 600                     | —                        | [11] |
|                           | 兰州地区     | 126                     | 6 633                    | [26] |
|                           | 北京地区     | 714                     | 1 232                    | [22] |
|                           | 本研究      | 432                     | 4 288                    |      |

5 结论

(1) 鄱阳湖 *p*, *p'*-DDT、γ-HCH、HCB、PCP 和 2, 3, 7, 8-TCDD 大气中的 CTD<sub>Air</sub> 在 432 km (2, 3, 7, 8-TCDD) ~ 86 479 km (HCB) 之间, Pov<sub>Air</sub> 在 85. 6 d (PCP) ~ 2 231 d (HCB) 之间, 土壤相是 POPs 的主要归宿; 水体中的 CTD<sub>Water</sub> 在 4 207 km (PCP) ~ 1. 19 × 10<sup>5</sup> km (γ-HCH) 之间, Pov<sub>Water</sub> 在 103 d (PCP) ~ 2 890 d (HCB) 之间, 沉积物相是 POPs 的主要归宿. 环境介质中的半衰期和辛醇-水分配系数的对数是影响污染物 CTD 和 Pov 的主要理化性质参数. 5 种 POPs 的 CTD<sub>Water</sub> 均大于 4 000 km, 可能对长江下游地区造成污染.

(2) 灵敏度分析结果显示, 影响 *p*, *p'*-DDT 的 CTD<sub>Air</sub> 的关键参数是风速、熔点等 10 个参数, 影响 Pov<sub>Air</sub> 的是环境温度、土壤中的半衰期等 5 个参数, 影响 CTD<sub>Water</sub> 的是环境温度、水体流速和辛醇-水分配系数的对数等 15 个参数, 影响 Pov<sub>Water</sub> 的是环境温度、沉积物中的半衰期等 5 个参数.

(3) 与同类研究相比, 相关 POPs 在鄱阳湖的

CTD<sub>Air</sub> 处于中间水平, 但 CTD<sub>Water</sub> 偏高, 这与鄱阳湖的水体深度和 水体流速这两个对 CTD<sub>Water</sub> 影响显著的参数较其它研究区域高有关.

参考文献:

[ 1 ] Wania F, Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants [ J ]. Environmental Science and Technology, 1996, **30** ( 9 ): 390A-396A.

[ 2 ] 刘小真, 周文斌, 魏洽, 等. 鄱阳湖区海会镇洲滩底泥有机氯农药污染研究 [ J ]. 环境与健康杂志, 2008, **25** ( 5 ): 385-388.

[ 3 ] 郑星泉, 冯亚萍, 江夕夫, 等. 血吸虫病流行地区五氯酚的环境污染、人体接触量及健康影响的研究 [ J ]. 卫生研究, 1997, **26** ( 1 ): 24-29.

[ 4 ] Campbell L M, Muir D C G, Whittle D M, *et al.* Hydroxylated PCBs and other chlorinated phenolic compounds in lake trout (*Salvelinus namaycush*) blood plasma from the Great Lakes region [ J ]. Environmental Science and Technology, 2003, **37** ( 9 ): 1720-1725.

[ 5 ] Beyer A, Mackay D, Matthies M, *et al.* Assessing long-range transport potential of persistent organic pollutants [ J ]. Environmental Science and Technology, 2000, **34** ( 4 ): 699-703.

[ 6 ] Mackay D, Di Guardo A, Paterson S, *et al.* Evaluating the environmental fate of a variety of types of chemicals using the

- EQC model [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1996, **15**(9): 1627-1637.
- [7] Mackay D, Shiu W Y, Ma K C, *et al.* Handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [8] 李全林. 应用多介质逸度模型研究天津、太湖地区 DDTs 环境归宿[D]. 北京: 北京大学, 2004. 36, 49.
- [9] Beyer A, Wania F, Gouin T, *et al.* Selecting internally consistent physicochemical properties of organic compounds [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, **21**(5): 941-953.
- [10] 李军. 珠江三角洲有机氯农药污染的区域地球化学研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2005. 14-15.
- [11] Bennett D H, McKone T E, Matthies M, *et al.* General formulation of characteristic travel distance for semivolatile organic chemicals in a multimedia environment [J]. *Environmental Science and Technology*, 1998, **32**(24): 4023-4030.
- [12] 周文斌, 万金保, 郑博福, 等. 江西“五河一湖”生态环境保护与资源综合利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 6-10, 79.
- [13] 唐纳德·麦凯. 环境多介质模型-逸度方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 37-46.
- [14] 彭映辉, 简永兴, 李仁东, 等. 3S 技术在鄱阳湖洲滩植被研究中的应用[J]. *中南林学院学报*, 2003, **23**(1): 11-14.
- [15] 刘国金, 王志辉, 马召坤, 等. 多介质逸度模型研究鄱阳湖流域  $p$ ,  $p'$ -DDT[J]. *江西科学*, 2007, **25**(2): 141-146.
- [16] Mackay D, Papadopoulos D, Taylor N J. Cyclopentadienone oxime dimers as precursors to cyclone equivalents [J]. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1992, **4**: 325-327.
- [17] 张全军, 于秀波, 钱建鑫, 等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J]. *生态学报*, 2012, **32**(12): 3656-3669.
- [18] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(增刊): 24-29.
- [19] 张明, 陶其辉, 肖秀兰, 等. 鄱阳湖黄颡鱼含肉率及肌肉营养分析[J]. *江西农业学报*, 2001, **13**(3): 39-42.
- [20] 胡春华, 周文斌, 卢林. 基于 GIS 平台的鄱阳湖采砂区域规划研究[J]. *人民长江*, 2011, **42**(4): 8-11, 46.
- [21] 丁中原, 方利江, 吴有方, 等. 兰州地区 16 种多环芳烃的长距离迁移潜力和总持久性模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(4): 916-924.
- [22] 齐丽, 李楠, 任玥, 等. 北京地区典型二噁英(PCDDs)及多氯联苯(PCBs)的长距离传输潜力——基于 TaPL3 模型的应用研究[J]. *环境化学*, 2013, **32**(7): 1149-1157.
- [23] Morgan M G, Henrion M, Small M. Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1990. 172-216.
- [24] 王宣同, 唐孝炎, 胡建信. 利用 TaPL3 模型计算  $p$ ,  $p'$ -DDT 在天津地区的长距离传输潜力[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(4): 491-496.
- [25] 方利江, 吴有方, 丁中原, 等. 南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2330-2334.
- [26] 任婷, 马祥林, 杨志群, 等. 兰州地区典型有机污染物长距离迁移及其总持久性模拟[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(1): 62-67.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....                                                      | LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031) |
| Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....                                                                            | MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)        |
| Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....                                                                             | BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)     |
| Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region .....                                                                                                   | MA Juan-juan, LI Zhen (2060)                                          |
| Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....     | SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)                     |
| Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....                           | XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)          |
| Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....                                                                          | WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)              |
| Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....                                                                           | SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)                     |
| Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....                                                                 | TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)           |
| Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....                                                                        | YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)        |
| Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....                             | GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)              |
| Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....                                         | ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)                         |
| Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....                                                                 | CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)         |
| Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....                                   | LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)               |
| Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....                               | ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)              |
| Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....                                                  | YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)                           |
| Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....                                                          | WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)                                        |
| Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....         | WANG Shang, LI Da-peng (2171)                                         |
| Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....                                                                              | LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)           |
| Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....                                                                                                       | WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)                     |
| Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....                                                                                     | ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)       |
| Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....                                                             | LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)         |
| Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....                                                                                 | LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)          |
| AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....                                                                      | TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)            |
| Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....                                                       | YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)            |
| Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....                                                                         | LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)             |
| Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....                                                                                   | TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)         |
| Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....                                                           | SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)                     |
| Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....                                                         | ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)             |
| Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....                                                                                             | GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)    |
| Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....                                                         | LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)              |
| Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....                                                                 | TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)               |
| Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....  | WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)         |
| Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex .....                                                                | ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)                  |
| Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....                                                         | ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)       |
| Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....                                                                                             | ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)            |
| Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....                                                        | LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)              |
| Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....     | WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)                |
| Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....                                                                                    | TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)                 |
| Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....                                                                            | WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)               |
| Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....                                                | TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)                |
| Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....                                              | WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)          |
| Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato ..... | JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)               |
| Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....                                                                                   | LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)            |
| Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China ..... | JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)                |
| Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....                | ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)              |
| Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....                                                          | CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)        |
| Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....                                                     | ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)      |
| Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....              | ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)       |
| Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....                               | OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)         |
| Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....                                                                                   | ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)      |
| Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....                                                              | WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)           |
| Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....                        | LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)                          |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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   | 中国国际图书贸易总公司<br>(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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人