

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                                |                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 .....                                                        | 施禅臻, 于兴娜, 周斌, 项磊, 聂皓浩 (4139)                     |
| 秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 .....                                             | 张岩, 张洪海, 杨桂朋 (4146)                              |
| 中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 .....                                                   | 杨毅红, 陶俊, 高健, 李雄, 施展, 韩保新, 谢文彰, 曹军骥 (4152)        |
| 改进的大气 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、CO 在线观测 FTIR 系统 ..... | 夏玲君, 刘立新, 周凌晔, 方双喜, 王红阳, 张振波 (4159)              |
| 长沙市郊大气 CH <sub>4</sub> 浓度变化特征 .....                                            | 刘鲁宁, 王迎红, 徐小娟, 王卫东, 王跃思 (4165)                   |
| 麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 .....                                                           | 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹 (4171)                           |
| 过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 .....                                                        | 杨世迎, 王雷雷, 冯琳玉, 赵腊娟, 石超 (4178)                    |
| 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 .....                                                | 钟佳, 魏源送, 赵振凤, 应梅娟, 周国胜, 熊建军, 刘培财, 葛振, 丁刚强 (4186) |
| 长江口沿岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 .....                                                  | 顾丽军, 杨毅, 刘敏, 聂明华, 李涛, 侯立军 (4195)                 |
| 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 .....                                             | 吕书丛, 张洪, 单保庆, 李立青 (4204)                         |
| 汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 .....                                       | 东口朋宽, 史江红, 张晖, 刘晓薇 (4211)                        |
| 基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 .....                                              | 李凯, 曾凡棠, 房怀阳, 林澍 (4218)                          |
| 合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 .....                                                   | 戴梅红, 李田, 张伟 (4226)                               |
| 微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 .....                                             | 随伟伟, 丁海兵, 杨桂朋, 陆小兰, 李文娟, 孙立群 (4231)              |
| 太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 .....                                                     | 马久远, 王国祥, 李振国, 许宽, 周峰, 张佳 (4240)                 |
| 表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 .....                                                        | 秦晶, 高甫威, 谢慧君 (4251)                              |
| 带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 .....                                                       | 王亚, 张春华, 王淑, 申连玉, 葛滢 (4257)                      |
| 铜改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 .....                                           | 李佳, 林建伟, 詹艳慧 (4266)                              |
| 底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 .....                                                        | 任朝亮, 宋进喜, 杨小刚, 薛健 (4275)                         |
| 铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成: 氯化化和溴化比较 .....                                                | 田川, 郭婷婷, 刘锐平, William Jefferson, 刘会娟, 曲久辉 (4282) |
| 天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 .....                                                    | 徐磊, 俞文正, 梁亮, 王彤 (4290)                           |
| DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 .....                                                  | 丰桂珍, 董秉直 (4295)                                  |
| 零价铁去除废水中的汞 .....                                                               | 周欣, 张进忠, 邱昕凯, 王定勇 (4304)                         |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 .....           | 周红艺, 梁思, 曾思思, 雷双健 (4311)                         |
| 不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 .....                                               | 李政剑, 石宝友, 王东升 (4319)                             |
| 氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 .....                                                 | 郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 方巧, 杨孟娟, 王虹 (4325)                |
| 改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 .....                                                      | 吴艳, 罗汉金, 王侯, 张子龙, 王灿, 王雨微 (4333)                 |
| 经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 .....                                            | 朱健, 吴庆定, 王平, 李科林, 雷明婧, 张伟丽 (4341)                |
| 硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 .....                                                     | 刘妍妍, 龙焰, 尹华, 叶锦韶, 何宝燕, 张娜 (4349)                 |
| 硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 .....                                                         | 张丽, 黄勇, 袁怡, 李祥, 刘福鑫 (4356)                       |
| 硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 .....                                                         | 袁怡, 黄勇, 李祥, 张春蕾, 张丽, 潘杨, 刘福鑫 (4362)              |
| UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 .....                                                  | 赵健慧, 张百惠, 李宁, 王兵, 李永峰 (4370)                     |
| 响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 .....                                                 | 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 孙德智 (4376)                         |
| 高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 .....                                                        | 刘炎, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (4386)                          |
| NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 .....                                            | 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4392)        |
| 近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 .....                                                | 章明奎, 常跃畅 (4399)                                  |
| 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 .....                                                    | 黄春雷, 宋明义, 魏迎春 (4405)                             |
| 黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 .....                                              | 孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 李丽丽, 孙景宽, 孙万龙, 牟晓杰, 王玲玲 (4411)    |
| 崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 .....                                               | 孙阳昭, 王学彤, 张媛, 孙延枫, 李梅, 马中 (4420)                 |
| 福建戴云山土壤有机氯农药残留及空间分布特征 .....                                                    | 瞿程凯, 祁士华, 张莉, 黄焕芳, 张家泉, 张原, 杨丹, 刘红霞, 陈伟 (4427)   |
| 电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 .....                                            | 邵科, 尹文华, 朱国华, 巩宏平, 周欣, 王玲, 刘劲松 (4434)            |
| 外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 .....                                               | 蔡荟梅, 彭传燧, 陈静, 侯如燕, 宛晓春 (4440)                    |
| 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 .....                                                  | 赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 赵文静, 郭江源, 毕娜, 张君 (4447)            |
| 丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 .....                                                 | 李少朋, 毕银丽, 孔维平, 王瑾, 余海洋 (4455)                    |
| 超积累植物垂序商陆 ( <i>Phytolacca americana</i> L.) 吸收锰机制的初步探讨 .....                   | 徐向华, 李仁英, 刘翠英, 施积炎, 林佳 (4460)                    |
| <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 .....                           | 陈艳, 王卉, 司友斌 (4466)                               |
| 基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 .....                                            | 蒋宝, 崔晓勇 (4473)                                   |
| 不同结构有机磷在 (氢) 氧化铝表面的吸附与解吸特征 .....                                               | 柳飞, 张延一, 严玉鹏, 刘凡, 谭文峰, 刘名茗, 冯雄汉 (4482)           |
| 煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 .....                                                     | 熊金钰, 李寒旭, 董众兵, 张颂, 钱宁波, 武成利 (4490)               |
| 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 .....                                                       | 杨新萍, 赵方杰 (4495)                                  |
| 《环境科学》征订启事 (4239)      《环境科学》征稿简则 (4369)      信息 (4225, 4265, 4303, 4375)      |                                                  |

# 崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究

孙阳昭<sup>1,3</sup>, 王学彤<sup>2\*</sup>, 张媛<sup>2</sup>, 孙延枫<sup>2</sup>, 李梅<sup>2</sup>, 马中<sup>1</sup>

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 3. 环境保护部对外合作中心, 北京 100035)

**摘要:** 用 GC-ECNI-MS 测定了崇明岛土壤中 24 种中链氯化石蜡 (MCCPs) 同类物组的含量. 目的是了解该地区土壤中 MCCPs 的污染水平、空间分布、组成特征和来源. 结果表明 MCCPs 在崇明岛土壤中普遍存在, 浓度范围为  $2.56 \sim 96.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 中值为  $7.32 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . 聚类分析将所有样品分为两类. 大多数土壤样品 MCCPs 以  $\text{C}_{14}$ -MCCPs 和  $\text{C}_{15}$ -MCCPs 为主要碳同类物组, 分别占 29.8% 和 28.9%;  $\text{Cl}_5$ -MCCPs 和  $\text{Cl}_6$ -MCCPs 为主要氯同类物组, 分别占 29.9% 和 23.3%; 个别样品中,  $\text{C}_{14}$ -MCCPs 是主要碳同类物组, 占 68.5%, 与 CP-52 的组成相似. 大气沉降和土壤-大气交换可能是崇明岛土壤中 MCCPs 主要来源, 个别点可能受到污水处理厂污泥或其他不明污染源的污染. MCCPs 与 TOC 之间没有显著统计相关性. 因子分析表明 4 种 MCCPs 的碳同类物组具有相似的来源. 与国内外其它研究相比, 崇明岛土壤中 MCCPs 处于较低水平.

**关键词:** 崇明岛; 土壤; 中链氯化石蜡 (MCCPs); 组成; 来源

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4420-07

## Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island

SUN Yang-zhao<sup>1,3</sup>, WANG Xue-tong<sup>2</sup>, ZHANG Yuan<sup>2</sup>, SUN Yan-feng<sup>2</sup>, LI Mei<sup>2</sup>, MA Zhong<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100035, China)

**Abstract:** In order to understand the contents, spatial distribution and sources of medium-chain chlorinated paraffins (MCCPs) in the soils from Chongming Island, the concentrations of MCCPs in 27 soil samples were analyzed by GC-ECNI-MS. The total concentrations of MCCPs ( $\sum \text{MCCPs}$ ) in all samples ranged from  $2.56 \sim 96.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , with a median of  $7.32 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . All soil samples were classified into two categories by cluster analysis.  $\text{C}_{14}$ -MCCPs and  $\text{C}_{15}$ -MCCPs, and  $\text{Cl}_5$ -MCCPs and  $\text{Cl}_6$ -MCCPs were the most predominant carbon and chlorine congener groups in most of the samples, accounting for 29.8% and 28.9%, and 29.9% and 23.3%, respectively.  $\text{C}_{14}$ -MCCPs were the most predominant carbon congener groups in some samples, accounting for 68.5%, which was similar to that of CP-52. Atmospheric deposition and soil-air exchange were the major sources of MCCPs for soils in Chongming. Soils at a few sites were probably contaminated by sewage sludge from sewage treatment plants (STPs) or other unidentified source. No significant correlations were observed between MCCPs and TOC. The correlation analysis also showed significant correlation among the carbon congener groups of MCCPs, which suggested that MCCP congener groups might have been derived from similar sources. Compared to other studies at home and abroad, the MCCPs concentrations in the present study were at a lower level.

**Key words:** Chongming Island; soils; medium-chain chlorinated paraffins (MCCPs); composition; source

工业氯化石蜡按碳链长度不同分为短链 ( $\text{C}_{10 \sim 13}$ , SCCPs)、中链 ( $\text{C}_{14 \sim 17}$ , MCCPs) 和长链 ( $\text{C}_{18 \sim 30}$ , LCCPs) 3 类, 其氯含量通常为 30% ~ 70%. 氯化石蜡在工业上主要用作橡胶、塑料和油漆的阻燃剂, 涂料、密封剂和粘合剂的增塑剂, 金属加工液的极压添加剂以及皮革加工中的加脂剂等. 我国氯化石蜡的主要产品有: 氯化石蜡-42 (CP-42)、氯化石蜡-52 (CP-52)、氯化石蜡-70 (CP-70), 其中 CP-52 产量最大, 占氯化石蜡总产量的 80% 以上<sup>[1]</sup>. 我国的氯化石蜡产品没有区分碳链的长短, 主要依赖于工厂所能得到的原料<sup>[2]</sup>.

短链氯化石蜡已被确认为具有持久性、生物蓄

积性、远距离环境迁移能力和生态毒性等持久性有机污染物 (POPs) 特性<sup>[3,4]</sup>, 被 IARC 列为 2B 类致癌物<sup>[5]</sup>, 并有可能列入 POPs 公约受控物质. 辛醇-水分配系数 ( $K_{ow}$ ) 是衡量物质生物富集和放大的重要参数. 一般而言,  $\lg K_{ow}$  在 5 以上的有机物即被认为可以通过食物链富集放大. 实验测得 MCCPs 的  $\lg K_{ow}$  值为  $5.52 \sim 8.21$ <sup>[6]</sup>. 北美安大略湖和密歇根

收稿日期: 2013-05-21; 修订日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40830744); 上海市重点学科项目 (S30109)

作者简介: 孙阳昭 (1971 ~), 男, 博士, 主要研究方向为环境化学和环境经济学, E-mail: sun\_yangzhao@mepfeco.org.cn

\* 通讯联系人, E-mail: wangxt0323@126.com

湖食物链中鲑鱼对 MCCPs 的生物富集因子 (lgBAFs) 为 6.3 ~ 6.8, 证明 MCCPs 具有生物蓄积性, 并能通过食物链生物放大<sup>[7]</sup>. 虽然目前还没有数据证明 MCCPs 对人类具有致癌性, 但现有的数据比较表明 MCCPs 与 SCCPs 物理化学性质和毒理学性质相似<sup>[8]</sup>. 目前, 关于土壤中 MCCPs 的研究数据还非常有限. MCCPs 有稳定的物理化学性质, 在环境中难以降解. 环境中的 MCCPs 主要来源于人类活动, 可以通过大气沉降、地表径流、城市和工业废水、污泥施肥、氯化石蜡生产和使用过程中的泄漏等途径进入土壤. 四室三级逸度模型计算表明: MCCPs 分别直接排放到空气、水和土壤中, 最终分别有 99.6%、55.5% 和 99.7% 的 MCCPs 分配到土壤中<sup>[9]</sup>, 土壤是 MCCPs 重要的蓄积库. 土壤中的氯化石蜡 (CPs) 可以通过挥发和地表径流进入到大气和水体中, 也可以被动植物吸收, 产生二次污染. MCCPs 在空气<sup>[10,11]</sup>、室内灰尘<sup>[10,12]</sup>、水<sup>[13]</sup>、沉积物<sup>[14]</sup>、土壤<sup>[12]</sup> 和生物体<sup>[7, 15]</sup> 等介质中广泛存在. 我国是氯化石蜡的最大生产国, 由于氯化石蜡的大量生产和使用所导致的土壤 MCCPs 污染值得关注.

崇明岛地处长江口, 为国家级生态示范区、自然保护区和鸟类保护区, 人类活动以生态农业和旅游业为主. 崇明岛的环境质量状况一直备受关注, 目前已有一些该地区土壤中的持久性有机物如 OCPs<sup>[16]</sup>、PCBs<sup>[17]</sup>、PBBEs<sup>[18]</sup>、HBCDs<sup>[19]</sup> 和 SCCPs<sup>[20]</sup> 等的报道, 然而关于崇明岛环境介质中 MCCPs 的研究尚未见报道. 因此, 本研究选取崇明岛表层土壤为研究对象, 通过对土壤中的 MCCPs 的污染水平、空间分布和组成特征的分析, 以期为该地区的土壤环境管理和污染控制提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2010 年 4 月在崇明岛采集 27 个表层土壤样品 (0 ~ 20 cm), 各采样点的分布如图 1 所示. 采样前先去除地表砾石及动植物残体. 每个样品在 100 m × 100 m 的范围内, 分别取 4 ~ 5 份等量的表层土壤, 将这些土壤均匀混合, 作为该样点的代表性样品. 土壤样品分别采自农田 (F1 ~ F18), 路边 (R1 ~ R6) 和树林 (W1 ~ W3). 采集的样品带回实验室风干、研磨、过 60 目筛, 最后贮存在棕色磨口瓶中, 密封、低温避光保存.

### 1.2 标准物质与材料

实验所用丙酮、二氯甲烷、正己烷和异辛烷均为分析纯 (上海国药集团), 使用前采用全玻璃蒸馏系统二次蒸馏, 并经色谱检验无干扰峰. 硅胶 (100 ~ 200 目) 和中性氧化铝 (100 ~ 200 目) 依次用丙酮、二氯甲烷、正己烷抽提后在 130℃ 下活化 16 h. 硅胶经酸化处理 (44 g 浓硫酸/100 g 硅胶), 氧化铝加入 6% 的超纯水去活化, 充分振荡至无结块, 密封保存在干燥器中, 平衡 24 h. 无水硫酸钠 (分析纯), 于马弗炉中 450℃ 灼烧 6 h, 冷却后存于干燥器中备用. 玻璃层析柱 (带聚四氟乙烯旋塞) 为 30 cm × 1 cm ID, 所有玻璃仪器均用铬酸洗液浸泡 12 h, 然后用自来水和去离子水冲洗, 最后用丙酮清洗, 在 120℃ 下烘干.

MCCPs 标准样品: 3 种不同氯含量的 MCCPs 混合物标准样品购自 Dr. Ehrenstorfer (Augsberg, Germany), 其氯含量分别为 42%、52% 和 57%, MCCPs 含量为 100 ng·μL<sup>-1</sup>, 溶解在环己烷中. 由氯含量为 42% 和 52%, 按 1:1 (体积比) 混合得到氯含量为 47% 的 MCCPs 混合物标准样品; 由氯含量为 52% 和 57%, 按 1:1 (体积比) 混合得到氯含量为 54.5% 的 MCCPs 混合物标准样品. 分别取一定量不同氯含量的 MCCPs 标准溶液, 用异辛烷稀释定容, 配成 25 mg·L<sup>-1</sup> 的标准储备液, 低温冷藏保存. 采用 <sup>13</sup>C<sub>10</sub>-反式氯丹和 <sup>13</sup>C<sub>6</sub>-六氯苯 (Cambridge Isotope Laboratories, USA) 分别作为回收率内标和进样内标, 用异辛烷配制成 60 μg·L<sup>-1</sup> 的提取内标和进样内标溶液, 低温冷藏保存.

### 1.3 样品前处理

准确称取 10 g 土壤样品, 与 10 g 无水硫酸钠研磨均匀, 加入 6 ng 的 <sup>13</sup>C<sub>10</sub>-反式氯丹作为回收率内标, 用丙酮和正己烷混合溶剂 (体积比为 1:1) 索氏提取 24 h. 提取前加入新鲜活化铜片. 提取液用 K-D 浓缩装置浓缩并将溶剂置换为正己烷, 浓缩至约 1 mL. 将浓缩后的提取液加入到硅胶氧化铝复合柱分离净化. 用二氯甲烷湿法装柱, 依次装入 6 g 的酸化硅胶, 6 g 的氧化铝、2 cm 高度的无水硫酸钠, 依次用 25 mL 的二氯甲烷和 30 mL 的正己烷淋洗层析柱. 样品上柱后, 先用 30 mL 的正己烷淋洗, 弃去该洗脱液, 再用 60 mL 二氯甲烷/正己烷混合液 (体积比为 1:1) 洗脱 MCCPs, 收集洗脱液, 将收集的洗脱液用旋转蒸发仪浓缩并转换溶剂为正己烷, 浓缩至近干, 加入 0.1 mL <sup>13</sup>C<sub>6</sub>-HCB 溶液, 用涡旋振荡器轻轻振摇后, 低温冷藏保存, 待 GC-ECNI-MS 分析.

## 1.4 样品分析

所用仪器为 Agilent 6890N 气相色谱-5975 质谱联用仪 (Agilent, USA). 色谱条件: DB-5HT (J&W, 15 m × 0.25 mm × 0.1 μm) 毛细管色谱柱; 载气: 氮气, 纯度 > 99.999%, 流速 1.2 mL·min<sup>-1</sup>; 进样口温度: 260℃; 进样方式: 不分流进样, 进样量 1 μL; 程序升温条件: 初始温度 80℃, 保持 1 min; 以 10℃·min<sup>-1</sup> 升至 270℃后, 保持 10 min. 离子源温度: 200℃; 四级杆温度: 100℃; 接口温度: 280℃. MCCPs 扫描离子分 2 组, 分别为 C<sub>14</sub> 和 C<sub>16</sub>, C<sub>15</sub> 和 C<sub>17</sub>, 因此, 每个样品进样 2 次<sup>[21]</sup>. MCCPs 的扫描离子参照 Reth 等<sup>[22]</sup> 的报道, 24 个碎片离子对应的 MCCPs 同类物组分别为 C<sub>14</sub>H<sub>25</sub>Cl<sub>5</sub> ~ C<sub>14</sub>H<sub>20</sub>Cl<sub>10</sub>、C<sub>15</sub>H<sub>27</sub>Cl<sub>5</sub> ~ C<sub>15</sub>H<sub>22</sub>Cl<sub>10</sub>、C<sub>16</sub>H<sub>29</sub>Cl<sub>5</sub> ~ C<sub>16</sub>H<sub>24</sub>Cl<sub>10</sub> 和 C<sub>17</sub>H<sub>31</sub>Cl<sub>5</sub> ~ C<sub>17</sub>H<sub>26</sub>Cl<sub>10</sub>.

MCCPs 定量方法采用 Reth 等<sup>[23]</sup> 的方法: 首先对 5 个氯含量不同的 MCCPs 标准液进行分析, 计算各标准溶液中 MCCPs 总响应因子和由 GC-ECNI-MS 测定的氯含量, 并对二者进行线性回归, 然后用回归方程定量计算实际样品中 MCCPs 的含量.

土壤总有机碳 (TOC) 测定: 风干并过筛后的土壤样品用 10% 的 HCl 去除无机碳, 然后用氧化-还原滴定法测定土壤 TOC 含量.

## 1.5 质量保证及质量控制

为保证分析数据的准确可靠, 对样品分析的整个流程采取质量保证和质量控制措施. 样品均加入回收率内标, 若回收率在 70% ~ 130% 的范围之内

则符合要求. 以 <sup>13</sup>C<sub>10</sub>-反式氯丹作回收率内标, <sup>13</sup>C<sub>6</sub>-六氯苯作进样内标. MCCPs 的基质加标回收率 ( $n = 7$ ) 为 79% ~ 105% 之间; <sup>13</sup>C<sub>10</sub>-反式氯丹的回收率为 91% ~ 101%. 每 12 个样品增加一个实验室空白和一个平行样品. 平行样品的相对百分差 (RPD) < 15%. 以 3 倍信噪比作为方法的检测限 (MDLs), MCCPs 的方法检测限为 0.08 ~ 0.32 ng·g<sup>-1</sup>. 所有结果均以干重表示. 同时, 实验过程中还包括了方法空白、加标空白和溶剂空白. 结果显示, 空白实验中无待测目标化合物检出或是低于检测限, 不影响实际样品的测定.

## 1.6 统计分析

数据分析采用 Statistica 8.0 统计软件和 MapInfo Professional 10.0 制图软件.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中 MCCPs 的污染水平及分布特征

图 1 为崇明岛土壤中 MCCPs 空间分布. 在崇明岛 27 个土壤样品中, MCCPs 在各采样点均有检出. 各样品中 MCCPs 氯含量为 51.2% ~ 54.5%, 平均值为 52.6%. MCCPs 总含量 ( $\sum$  MCCPs) 为 2.56 ~ 96.4 ng·g<sup>-1</sup>, 中值为 7.32 ng·g<sup>-1</sup>. 各样品中 MCCPs 含量呈正偏态分布 (偏度和峰度分别为 2.86 和 7.40), 3 个离群值为 96.4、83.2 和 52.0 ng·g<sup>-1</sup>, 分别位于农田 (F13)、路边 (R5) 和树林 (W2). 去除离群值后, 其余各采样点的 MCCPs 含量为 2.56 ~ 16.7 ng·g<sup>-1</sup>. 均值为 7.84 ng·g<sup>-1</sup>. 在

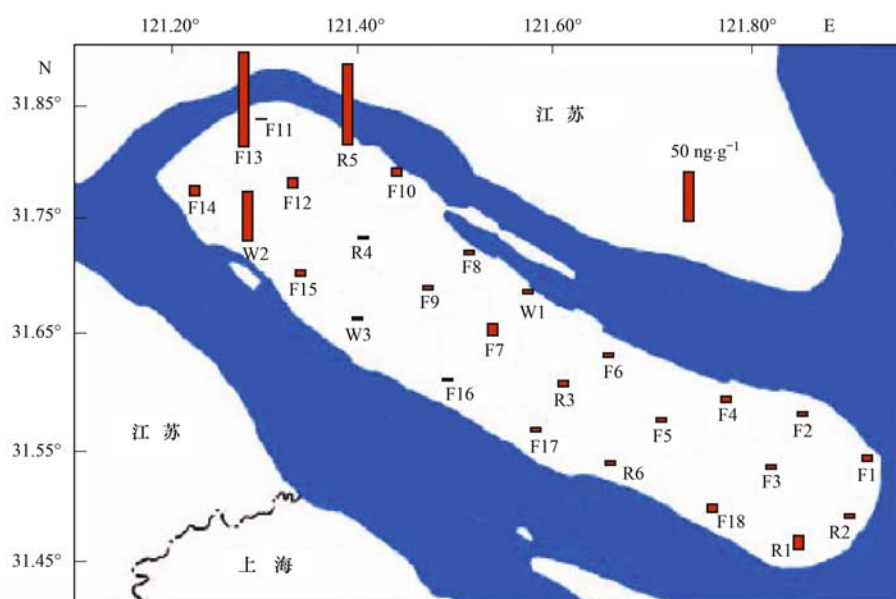


图 1 崇明岛土壤中 MCCPs 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of MCCPs in soils from Chongming

所分析的 24 种同类物组中, 检出率最低的是  $C_{16}H_{24}Cl_{10}$  和  $C_{17}H_{26}Cl_{10}$ , 分别为 14.8% 和 48.1%, 其次是  $C_{16}H_{25}Cl_9$ 、 $C_{17}H_{27}Cl_9$ 、 $C_{17}H_{28}Cl_8$  和  $C_{16}H_{26}Cl_8$ , 分别为 63.0%、70.4%、74.1% 和 77.8%, 其余 18 种碳链较短、氯含量较低的同类物组在各采样点均有检出. CPs 的物理化学性质是由碳链长度和氯含量决定的, 碳链越短和氯含量越低, 其挥发性越高, 越易于进行远距离传输. 崇明岛主要以农业和旅游业为主, 因此, 大气沉降和土壤-大气交换可能是崇明岛土壤中 MCCPs 来源之一, 个别点可能受到污水处理厂污泥或其他不明污染源的污染.

图 2 为各采样点以及农田、路边和树林土壤样品中 MCCPs 的含量箱线图. 农田、路边和树林样品中 MCCPs 中值依次为 7.62、6.69 和 6.31  $ng \cdot g^{-1}$ , 3 种土壤中 MCCPs 污染程度相近. 崇明岛土壤中 MCCPs 与 SCCPs ( $0.42 \sim 420 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 中值 9.6  $ng \cdot g^{-1}$ )<sup>[20]</sup> 的含量相近.

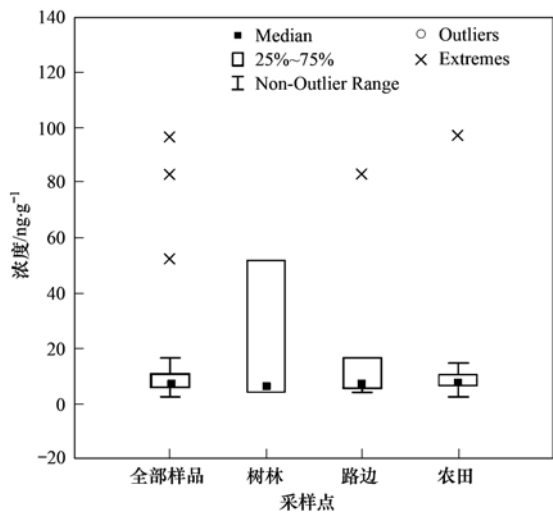


图 2 崇明岛土壤中 MCCPs 浓度箱图  
Fig. 2 Box-and-whisker plot of MCCP concentrations in soils in Chongming

目前国内外关于土壤中 MCCPs 的数据还很少. 崇明岛土壤中 MCCPs 低于珠江三角洲土壤中 MCCPs ( $2.1 \sim 1\,530 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 平均值  $59.3 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ )<sup>[14]</sup>. Yuan 等<sup>[24]</sup>测得东南地区电子垃圾拆解区土壤 SCCPs 和 MCCPs 总量为  $1\,095 \sim 4\,985 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 平均值  $2\,909 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 对照区  $1\,031 \sim 1\,579 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 平均值  $1\,210 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 背景区  $203 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ . Stevens 等<sup>[25]</sup>测得英国未受工业废水污染的农村集水区污泥中 SCCPs 和 MCCPs 总量为  $590 \text{ } \mu g \cdot g^{-1}$ , 反映了当地土壤 SCCPs 和 MCCPs 的污染水平. Iozza 等<sup>[26]</sup>测得 Alps 地区(包括奥地利、德国、意大利、斯洛文尼亚和瑞士)腐殖

土中 SCCPs 和 MCCPs 总量为  $7 \sim 199 \text{ } ng \cdot g^{-1}$  (均值  $50 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ ). 崇明土壤中 SCCPs 与 MCCPs 总量为  $6.72 \sim 427 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ , 平均值  $77.6 \text{ } ng \cdot g^{-1}$  (中值  $16.5 \text{ } ng \cdot g^{-1}$ ), 远低于东南地区电子垃圾拆解区、对照区和背景区土壤和英国农村集水区污泥的污染水平, 与 Alps 地区腐殖土中的污染水平相近. 与国内外研究相比, 崇明土壤中 MCCPs 污染处于较低水平, 但个别采样点含量较高.

2.2 MCCPs 组成特征

表 1 为崇明岛土壤中 MCCPs 碳同类物组和氯同类物组相对组成. 主要碳同类物组为  $C_{14}$ -和  $C_{15}$ -MCCPs, 分别占 15.9% ~ 76.0% (均值为 34.1%) 和 9.9% ~ 39.1% (均值为 27.1%);  $C_{16}$ -和  $C_{17}$ -MCCPs 含量较低, 分别为 5.43% ~ 27.9% (均值为 18.4%) 和 4.54% ~ 29.4% (均值为 20.5%). 主要氯同类物组为  $Cl_5$ -和  $Cl_6$ -MCCPs, 分别占 17.8% ~ 37.7% (均值为 29.2%) 和 16.4% ~ 28.6% (均值为 23.3%).  $Cl_9$ -MCCPs 和  $Cl_{10}$ -MCCPs 相对含量最低, 平均值分别为 9.27% 和 4.73%. 显然, 短链、低氯代 MCCPs 是崇明岛土壤中 MCCPs 的主要同类物组.

表 1 崇明岛土壤中 MCCPs 碳同类物组和氯同类物组相对含量  
Table 1 Relative content of carbon-and chlorine-congener groups of MCCPs in soils from Chongming

| 项目        | 最小值  | 最大值  | 平均值  | 中值   |
|-----------|------|------|------|------|
| 碳同类物组     |      |      |      |      |
| $C_{14}$  | 15.9 | 76.0 | 34.1 | 32.0 |
| $C_{15}$  | 9.90 | 39.1 | 27.1 | 28.2 |
| $C_{16}$  | 5.43 | 27.9 | 18.4 | 19.3 |
| $C_{17}$  | 4.54 | 29.4 | 20.5 | 21.4 |
| 氯同类物组     |      |      |      |      |
| $Cl_5$    | 17.8 | 37.7 | 29.2 | 30.1 |
| $Cl_6$    | 16.4 | 28.5 | 23.3 | 23.1 |
| $Cl_7$    | 15.3 | 30.0 | 19.6 | 18.9 |
| $Cl_8$    | 5.30 | 22.3 | 14.0 | 13.9 |
| $Cl_9$    | 2.84 | 19.2 | 9.27 | 8.82 |
| $Cl_{10}$ | 1.83 | 11.7 | 4.73 | 4.55 |

为进一步阐明崇明岛土壤中 MCCPs 碳同类物和氯同类物的组成特征, 采用聚类分析法对 MCCPs 的组成特征进行分类考察. 聚类分析采用平方欧氏距离 (Squared Euclidean Distance) 和离差平方和法 (Ward's Method). 图 3 为 27 个土壤样品的聚类结果. 27 个样品分为两大类, 分别包括 24 和 3 个样品.

图 4 为 2 类土壤样品中 MCCPs 的平均相对组成. 第一类的 24 个样品中,  $C_{14}$ -MCCPs 和  $C_{15}$ -

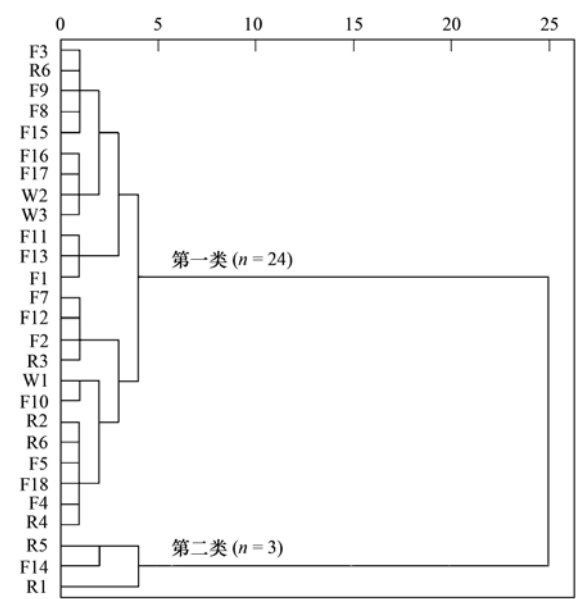


图 3 崇明岛土壤样品的谱系聚类图

Fig. 3 Hierarchical dendrogram for soil samples in Chongming

MCCPs 是主要的碳同类物组, 相对含量分别为 29.8% 和 28.9%, 而  $C_{16}$ -MCCPs 和  $C_{17}$ -MCCPs 均值分别为 19.4% 和 21.9%.  $Cl_5$ -MCCPs 和  $Cl_6$ -MCCPs 是主要的氯同类物组, 相对含量分别为 29.9% 和 23.3%. 第二类的 3 个样品中,  $C_{14}$ -MCCPs 是主要碳同类物组, 占 68.5%, 而其余 3 种碳同类物组仅占 31.5%, 与 CP-52 的组成相似<sup>[24]</sup>. 氯同类物组中,  $Cl_7$ -、 $Cl_5$ -和  $Cl_6$ -MCCPs 含量较高, 分别为 26.4%、23.5% 和 23.3%.

2.3 崇明岛土壤 MCCPs 与 TOC 的相关性

土壤有机碳是影响 POPs 在土壤分布重要的因素之一. 样品中 TOC 含量为 2.7% ~ 6.6%, 均值为 3.7%<sup>[20]</sup>. 表 2 为崇明岛土壤中 MCCPs 与 TOC 之间的相关性系数. 对 27 个土壤样品中各同类物组及  $\sum$  MCCPs 和 TOC 的相关性分析表明, 土壤  $\sum$  MCCPs 及其同类物组与 TOC 无显著统计相关性

表 2 崇明岛土壤中 MCCPs 与 TOC 之间的相关性<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficient matrix of MCCPs and TOC in soils from Chongming

|              | TOC    | $C_{14}$ | $C_{15}$ | $C_{16}$ | $C_{17}$ |
|--------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| $C_{14}$     | -0.200 |          |          |          |          |
| $C_{15}$     | -0.088 | 0.515 ** |          |          |          |
| $C_{16}$     | 0.014  | 0.648 ** | 0.933 ** |          |          |
| $C_{17}$     | -0.011 | 0.414 *  | 0.969 ** | 0.947 ** |          |
| $\sum$ MCCPs | -0.125 | 0.849 ** | 0.882 ** | 0.942 ** | 0.831 ** |

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

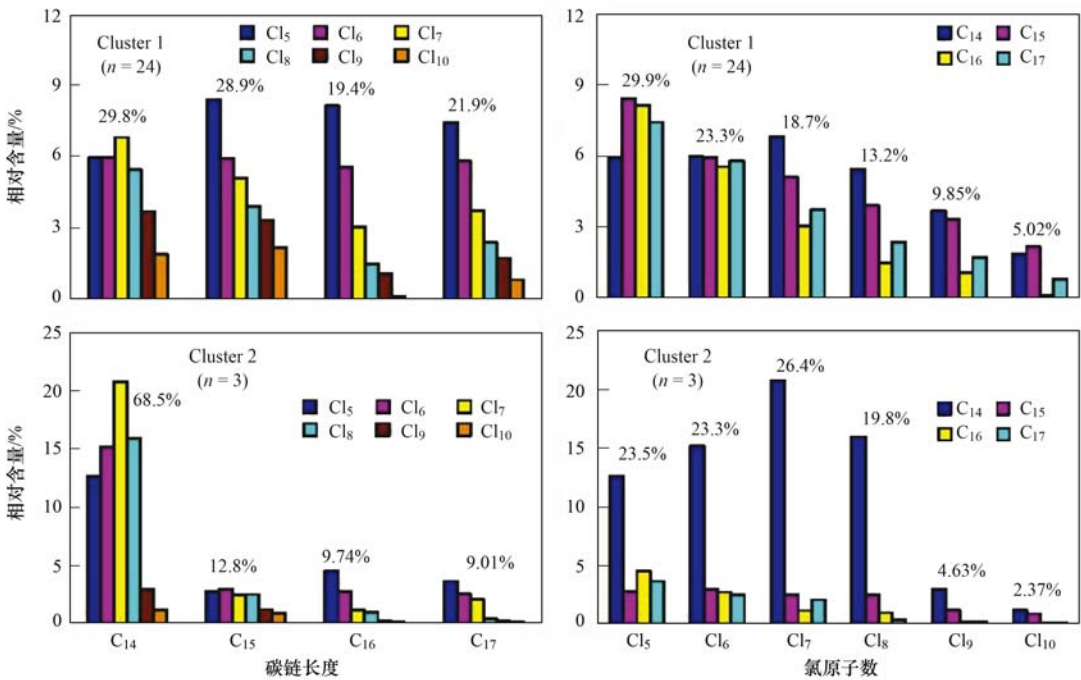


图 4 崇明岛 2 类土壤样品中 MCCPs 的相对组成

Fig. 4 Relative compositions of MCCPs homologues in soils from Chongming

( $P > 0.3$ ), 这可能是由于 MCCPs 在土壤中的吸附尚未达到平衡状态<sup>[27]</sup>, 也可能是由于土壤来源和耕作方式不同所致. MCCPs 各同类物组之间存在显著性相关( $P < 0.01$ ), 表明 MCCPs 各同类物组具有相似的来源.

### 3 崇明岛土壤中 MCCPs 的来源分析

因子分析是研究环境污染源的常用统计分析方法. 为了进一步研究崇明岛不同采样点氯化石蜡的来源, 采用主成分提取法和方差最大正交旋转法, 结合前期的研究结果<sup>[20]</sup>, 对 27 个样品中 SCCPs 和 MCCPs 的 8 种碳同类物组进行 R 型因子分析. 取特征值大于 1, 得到 3 个主因子. 图 5 为崇明岛土壤中 SCCPs 和 MCCPs 碳同类物组的因子载荷图. 3 个主因子的方差贡献率分别为 43.7%、33.2% 和 14.0%, 累计方差贡献率为 90.9%.  $C_{14}$ -、 $C_{15}$ -、 $C_{16}$ -和  $C_{17}$ -MCCPs 在第一因子上有较高的正载荷, 表明 MCCP 的 4 种碳同类物组来源相似, 与相关性分析的结果一致.  $C_{10}$ -和  $C_{12}$ -SCCPs 在第二因子上有较高的正载荷, 表明这两种 SCCPs 碳同类物组的来源相似.  $C_{11}$ -和  $C_{13}$ -SCCPs 在第三因子上有较高的负载荷, 表明这两种 SCCPs 碳同类物组的来源相似. 从主成分的因子载荷分布可以看出, 崇明岛土壤中 SCCPs 和 MCCPs 可能具有不同的来源.

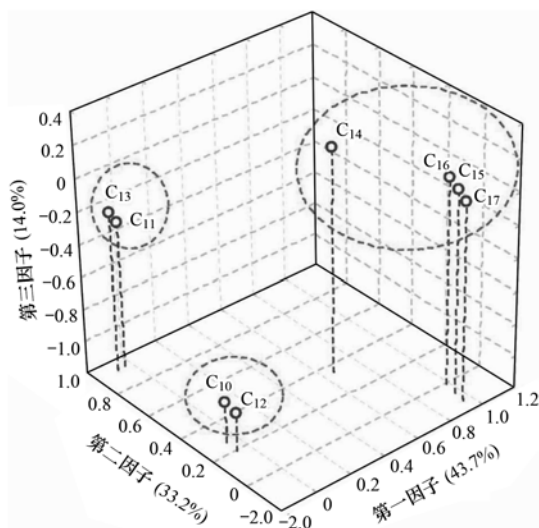


图 5 崇明岛土壤中 SCCPs 和 MCCPs 碳同类物组的因子载荷

Fig. 5 Factor loading plot for carbon-congeners of SCCPs and MCCPs in soils from Chongming

### 4 结论

(1) MCCPs 在崇明岛土壤普遍存在, 浓度范围为  $2.56 \sim 96.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 中值为  $7.32 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . 与其

它研究区域相比, 崇明岛土壤中 MCCPs 处于较低水平, 但个别点浓度较高, 应引起重视.

(2) 崇明岛土壤中 MCCPs 以  $C_{14}$ -MCCPs 和  $C_{15}$ -MCCPs 为主要碳同类物组,  $Cl_5$ -MCCPs 和  $Cl_6$ -MCCPs 为主要氯同类物组, 即短链、低氯代 MCCPs 是崇明岛土壤中 MCCPs 的主要同类物组.

(3) 大气沉降和土壤-大气交换可能是崇明岛土壤中 MCCPs 的主要来源, 但个别采样点可能受到污水处理厂污泥或其他不明污染源的污染.

(4) 因子分析表明 4 种 MCCPs 碳同类物组具有相似的来源, 与 SCCPs 的来源可能不同.

#### 参考文献:

- [1] 全宜昌, 胡建信, 刘建国, 等. 中国短链氯化石蜡的履约形势和初步评估[A]. 见: 持久性有机污染物论坛暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C]. 2008. 251-252.
- [2] 王亚韩, 蔡亚岐, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2010, 40(2): 99-123.
- [3] ECB. European Union risk assessment report, vol 4: alkanes,  $C_{10-13}$ , chloro- [EB/OL]. [http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/risk\\_assessment/REPORT/sccpreport010.pdf](http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/risk_assessment/REPORT/sccpreport010.pdf), 2013-05-10.
- [4] ECB. European Union risk assessment report, vol 81: alkanes,  $C_{10-13}$ , chloro-, updated version 2008 [EB/OL]. <http://echa.europa.eu/documents/10162/c157d3ab-0ba7-4915-8f30-96427de56f84>, 2013-05-10.
- [5] IARC (International Agency for Research on Cancer), 1990. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. 48. Some flame retardants and textile chemicals, and exposures in the textile manufacturing industry [EB/OL]. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol48/mono48.pdf>, 2013-05-10.
- [6] Renberg L, Sundström G, Sundh-Nygård K. Partition coefficients of organic chemicals derived from reversed phase thin layer chromatography: evaluation of methods and application on phosphate esters, polychlorinated paraffins and some PCB-substitutes[J]. Chemosphere, 1980, 9(11): 683-691.
- [7] Houde M, Muir D C, Tomy G T, et al. Bioaccumulation and trophic magnification of short-and medium-chain chlorinated paraffins in food webs from Lake Ontario and Lake Michigan[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(10): 3893-3899.
- [8] ECB. European Union risk assessment report. Alkanes,  $C_{14-17}$ , chloro. Part II-human health [EB/OL]. <http://bookshop.europa.eu/en/european-union-risk-assessment-report-pbLBNA25202/>, 2013-05-10.
- [9] ECB. European Union risk assessment report, vol. 58. Alkanes,  $C_{14-17}$ , chloro (MCCP). Part I-environment [EB/OL]. <http://echa.europa.eu/documents/10162/584faee8-d13a-41dd-8b33->

- 959ad1a81171, 2013-05-10.
- [10] Fridén U E, McLachlan M S, Berger U. Chlorinated paraffins in indoor air and dust: concentrations, congener patterns, and human exposure[J]. *Environment International*, 2011, **37**(7): 1169-1174.
- [11] Wang Y, Li J, Cheng Z N, *et al.* Short-and medium-chain chlorinated paraffins in air and soil of subtropical terrestrial environment in the Pearl River Delta, south China: distribution, composition, atmospheric deposition fluxes, and environmental fate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(6): 2679-2687.
- [12] Hilger B, Fromme H, Völkel W, *et al.* Occurrence of chlorinated paraffins in house dust samples from Bavaria, Germany[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **175**: 16-21.
- [13] Coelhan M. Levels of chlorinated paraffins in water[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2010, **38**(5-6): 452-456.
- [14] Chen M Y, Luo X J, Zhang, X L, *et al.* Chlorinated paraffins in sediments from the Pearl River Delta, south China: spatial and temporal distributions and implication for processes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(23): 9936-9943.
- [15] Reth M, Ciric A, Christensen G N, *et al.* Short-and medium-chain chlorinated paraffins in biota from the European Arctic-differences in homologue group patterns[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(1): 252-260.
- [16] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海崇明岛农田土壤中有氯农药残留特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2456-2461.
- [17] 周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海崇明岛农田土壤中多氯联苯的残留特征 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 116-120.
- [18] Duan Y P, Meng X Z, Yang C, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in background surface soils from the Yangtze River Delta (YRD), China: occurrence, sources, and inventory [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17**(4): 948-956.
- [19] Meng X Z, Duan Y P, Yang C, *et al.* Occurrence, sources, and inventory of hexabromocyclododecanes (HBCDs) in soils from Chongming Island, the Yangtze River Delta (YRD) [J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(5): 725-731.
- [20] Wang X T, Zhang Y, Miao Y, *et al.* Short-chain chlorinated paraffins (SCCPs) in surface soil from a background area in China: occurrence, distribution, and congener profiles [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(7): 4742-4749.
- [21] Zeng L X, Wang T H, Han W Y, *et al.* Spatial and vertical distribution of short chain chlorinated paraffins in soils from wastewater irrigated farmlands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(6): 2100-2106.
- [22] Reth M, Oehme M. Limitations of low resolution mass spectrometry in the electron capture negative ionization mode for the analysis of short-and medium-chain chlorinated paraffins[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2004, **378**(7): 1741-1747.
- [23] Reth M, Zencak Z, Oehme M. New quantification procedure for the analysis of chlorinated paraffins using electron capture negative ionization mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1081**(2): 225-231.
- [24] Yuan B, Wang Y W, Fu J J, *et al.* Evaluation of the pollution levels of short chain chlorinated paraffins in soil collected from an E-waste dismantling area in China [J]. *Organohalogen Compound*, 2009, **71**: 3106-3108.
- [25] Stevens J L, Northcott G L, Stern G A, *et al.* PAHs, PCBs, PCNs, organochlorine pesticides, synthetic musks and polychlorinated *n*-alkanes in UK sewage sludge: survey results and implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(3): 462-467.
- [26] Iozza S, Schmid P, Oehme M, *et al.* Altitude profiles of total chlorinated paraffins in humus and spruce needles from the Alps (MONARPOP) [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(12): 3225-3231.
- [27] Zeng L X, Wang T, Wang P, *et al.* Distribution and trophic transfer of short chain chlorinated paraffins in an aquatic ecosystem receiving effluents from a sewage treatment plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(13): 5529-5535.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                               |                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing .....                                                                         | SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)              |
| Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn .....                                   | ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)                        |
| Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China .....                                                    | YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)                  |
| Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR .....                                                                           | XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)           |
| Distribution of CH <sub>4</sub> in the Suburb of Changsha City, China .....                                                                                   | LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)        |
| Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke .....                                                                                      | LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)                     |
| Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution .....                                                                         | YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)         |
| Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost .....                               | ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)         |
| Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem .....                                          | GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)                      |
| Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin .....                       | ..... LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)     |
| Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province .....                               | Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211) |
| Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model .....                                       | LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)            |
| Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method .....                                                           | DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)                                |
| Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area .....                                         | SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)        |
| Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu .....                | ..... MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)   |
| Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland .....                                                                                 | QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)                               |
| Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i> .....                                                      | WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)                |
| Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River ..... | ..... LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)                        |
| Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River .....                                                        | REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)      |
| Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination .....    | ..... TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)    |
| Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Flocs Formed .....                                                     | XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)                |
| DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes .....                                                                                 | FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)                                    |
| Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron .....                                                                                                         | ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)           |
| Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Stabilized Nanoscale Pd/Fe .....                                     | ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)               |
| Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes .....                          | LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)                     |
| Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent .....                                | ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)       |
| Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater .....                                                                   | WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)                    |
| Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems .....                                         | ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)                |
| Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse .....                                                                          | LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)                   |
| Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions .....                                                                           | ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)                    |
| Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction .....                                                                                         | YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)                    |
| Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH .....                                                                                  | ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)            |
| Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation .....                               | LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)                 |
| Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i> .....                                                                              | LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)               |
| Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow .....                                                      | LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)              |
| Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years .....                                       | ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)                                 |
| Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors .....                                     | HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)                     |
| Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary .....                                  | SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)        |
| Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island .....                                                     | SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)         |
| Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China .....                                           | QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)               |
| Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites .....                                                                          | SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)                |
| Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil .....                                                       | CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)            |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks .....                                       | ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)               |
| Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas .....                                                        | LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)           |
| Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L. ....                                                | XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)          |
| Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 .....                                                                            | CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)                                  |
| Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China .....                                                      | JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)                                        |
| Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides .....                                    | LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)               |
| Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction .....                                                         | XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)         |
| A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants .....                                                               | YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)                                    |

# 《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)

2013年11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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