

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, 李奇锋, 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 F_{rex} 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 (*Corbicula fluminea*) 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 刘晓焯, 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)

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^{1,2}, 高丽荣^{2*}, 田益玲¹, 朱帅², 张芹²

(1. 河北农业大学食品科技学院, 保定 071000; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 多氯联苯(PCBs)具有高毒性和生物蓄积性,是列入公约优先控制的持久性有机污染物之一。多氯联苯在水生食物链中蓄积,同时人类食用鱼肉会对人体健康产生一定影响。近渤海地区具有焚烧、钢铁冶炼及水泥等 PCBs 非故意潜在排放源,而对此区域 PCBs 产生的环境污染及造成的人体健康效应的研究较少。本研究利用高分辨气相色谱/高分辨质谱(HRGC/HRMS)首次对近渤海地区 10 种不同鱼类中的二噁英类多氯联苯(dl-PCBs)和指示性 PCBs 进行了分析。12 种 dl-PCBs 的含量(以湿重计)为 28.9 ~ 1 067.6 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 PCB-118 和 PCB-105 是主要贡献单体,贡献率分别是 41% ~ 56% 和 15% ~ 21%。指示性 PCBs 的浓度范围是 185.5 ~ 8 371.7 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$,其中 PCB-153 和 PCB-138 是主要的贡献单体,贡献率分别是 27% 和 22%。与国内外其他海域的研究相比,近渤海区海水鱼中 PCBs 残留量处于较低水平,对人体产生健康风险比较小。

关键词: 指示性多氯联苯; 二噁英类多氯联苯; 不同海水鱼类; 渤海区域; 风险评价

中图分类号: X56; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2281-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.033

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^{1,2}, GAO Li-rong², TIAN Yi-ling¹, ZHU Shuai², ZHANG Qin²

(1. College of Food Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Polychlorinated biphenyls (PCBs) are highly lipophilic compounds with high metabolic persistence and toxicity. PCBs tend to accumulate in the aquatic food chain and make fish a source of various environmental toxicants to humans. Industries in the Bohai Bay include iron and steel smelting, cement manufacturing and waste incineration, which are potential emission sources of PCBs. In this study, risks and potential effects of PCBs in the Bohai Bay were assessed. Twelve dioxin-like polychlorinated biphenyls (dl-PCBs) and seven indicator PCBs in marine fish samples were analyzed by High Resolution Gas Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry (HRGC/HRMS). The concentrations of dl-PCBs in marine fishes ranged from 28.9 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ to 1 067.6 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ wet weight. The concentrations of indicator PCBs were between 185.5 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ and 8 371.7 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ wet weight. PCB-118 and PCB-105 were the major congeners of the dl-PCBs congeners, which contributed 41% - 56% and 15% - 21%, respectively. The predominant indicator PCBs were PCB-153 and PCB-138, which contributed 27% and 22%, respectively. The concentrations of dl-PCBs and indicator PCBs were relatively low as compared with those in other studies.

Key words: indicator PCBs; dl-PCBs; different marine fishes; Bohai Bay; risk assessment

多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)是一类人工合成的氯代芳烃类化合物,因具有环境持久性、生物蓄积性、远距离迁移性及生物毒性^[1]等特点,给人体健康和生态系统造成了潜在的威胁。2001 年 5 月被联合国环境规划署列入优先控制的 12 种持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)名单^[2]。鱼和鱼产品由于大量地被食用及其体内含有较高的 dl-PCBs 已经受到环境学者和公众的普遍关注。目前已有一些鱼体中发现 PCBs 的报道^[3,4],主要针对于鲑鱼、鲤鱼、鳊鱼等。例如, Binelli 等^[5]对北意大利 Lake Iseo 中的鲈鱼和梭鱼进行了报道,发现鱼体内 PCBs 的污染水平

TEQ 值(以湿重计,下同)分别为 0.33 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 0.32 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Bocio 等^[6]对西班牙加泰罗尼亚市售的海水鱼进行了研究,不同鱼类体内 PCBs 的 TEQ 含量为 0.03 ~ 4.15 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Wei 等^[7]对中国珠江三角洲的海水鱼进行研究,发现珠江流域不同海水鱼体内 PCBs 的 TEQ 含量为 0.065 ~ 4.123 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。PCBs 在不同鱼类体内的含量不同表明,这与鱼的品

收稿日期: 2013-10-30; 修订日期: 2013-11-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZXX-YW-JS406); 国家自然科学基金项目(21007084)

作者简介: 王莎莎(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为 POPs 污染特征, E-mail: wsshpl216@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaolr@cees.ac.cn

种及其在食物链中的位置、代谢特点、生活习性和海域受污染程度有关,而已有的报道对有限的几种鱼类中 PCBs 进行了研究,尚不能满足健康风险等评估的要求。

近渤海地区^[8]拥有焚烧、钢铁冶炼及水泥生产等 PCBs 的潜在排放源,这些排放源通过大气沉降等途径进入水环境中进而对水生生物产生影响。鱼类是水环境中良好的生物指示物^[9],可用来阐明水体中 PCBs 的污染现状和分布。因此,为评估我国近渤海区 PCBs 的污染程度和分布特征,以及食用鱼类可能对人类健康产生的不利影响,本研究在近渤海湾海域采集了 10 种不同的鱼类,对指示性 PCBs 和 dl-PCBs 进行了分析,以此评估该海区 PCBs 的污染情况,并对其造成的健康风险进行初探,以期更好地保障食品安全和人体健康。

1 材料与方法

1.1 仪器

高分辨气相色谱/高分辨质谱仪 (Agilent 6890GC-Waters Micromass Auto-Spec Ultima, USA), 加速溶剂萃取仪 (Dionex ASE 350, USA), 氮吹浓缩仪 (Organomation Associates, USA), 旋转蒸发器 (Heidolph, Germany), 层析柱 (酸性硅胶柱, 复合硅胶柱, 碱性氧化铝柱)。

1.2 标准品与有机溶剂

EPA1668B 方法中的标准溶液购自美国 Cambridge Isotope Laboratories Inc. 二氯甲烷 (农残级), 正己烷 (农残级), 无水甲醇 (分析纯), 丙酮 (农残纯), 均购自美国 Fisher 公司。柱层层析硅胶 (试剂纯, 100 ~ 200 目, 青岛海洋化工厂), 碱性氧化铝 (100 ~ 200 目, 上海五四化学试剂厂), 硝酸银 (分析纯), 浓硫酸 (优级纯), 无水硫酸钠 (优级纯) 均为北京北化精细化学品有限责任公司生产。

1.3 样品的采集

在天津塘沽采集市售的 10 种海水鱼 [带鱼 (*Trichiurus lepturus*), 马口鱼 (*Opsariichthys bidens*), 马鲛 (*Scomberomorus niphonius*), 虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*), 鲶鱼 (*Silurus asotus*), 日本真鲈 (*Lateolabrax japonicus*), 比目鱼 (*Paralichthys olivaceus*), 黄鱼 (*Pseudosciaena polyactis*), 多宝鱼 (*Panalichthys lethostigma*), 刺鱼 (*Microcanthus strigatus*)], 采完后冰浴运输至实验室放入 -20℃ 冰柜保存, 实验前取出化冻, 取鱼肉 (不包含鱼皮) 匀浆后, 冷冻干燥。样品详细信息见表 1。

表 1 采集的鱼样信息

Table 1 Information collected for fish samples			
样品	数量	体重/g	体长/cm
带鱼	3	490 ~ 510	50 ~ 60
马口鱼	5	286 ~ 300	15 ~ 20
马鲛	5	265 ~ 305	20 ~ 25
虹鳟	3	505 ~ 515	30 ~ 35
鲶鱼	8	180 ~ 200	20 ~ 25
日本真鲈	3	490 ~ 500	25 ~ 30
比目鱼	5	260 ~ 310	15 ~ 20
黄鱼	10	90 ~ 103	10 ~ 15
多宝鱼	3	650 ~ 675	15 ~ 20
刺鱼	10	81.5 ~ 102	10 ~ 15

1.4 样品预处理

1.4.1 样品提取及脂肪含量测定

对鱼样品中目标物的提取采用加速溶剂萃取法 (ASE350, Dionex, USA)。称取 10.0 g 左右干燥后的样品置于烧杯中, 与 1/3 ~ 1/4 比例的硅藻土充分混合, 加入 1 ng ¹³C 标记的 PCBs 混合标准溶液平衡至少 2 h 之后, 转入底部垫有滤膜的提取筒中。提取溶剂为正己烷: 二氯甲烷 (1: 1, 体积比), 温度为 120℃, 压力 1 500 psi, 静态提取时间 10 min, 循环提取次数 3 次。溶剂淋洗体积为 70% 萃取池体积, 氮气吹扫时间为 120 s。

样品提取液转入到已经称重 m_0 的鸡心瓶内然后旋转蒸发至溶液呈稠状, 静置 24 h 称量至恒重后记录质量 m_1 , 利用失重法计算脂肪含量。

1.4.2 样品的净化

经过加速溶剂提取的样品依次通过酸性硅胶柱和复合硅胶柱净化, 利用碱性氧化铝柱分离得到 PCBs 组分, 将所得样品浓缩后, 转入进样瓶, 加入 PCBs 内标, 封装待测^[10]。

1.5 样品的 HRGC/HRMS 分析

气相色谱条件: 色谱柱为 DB-5MS (60 m × 250 μm × 0.25 μm); 无分流进样, 进样量为 1 μL; 载气 (氦气) 流速为 1 mL · min⁻¹; 程序升温: 初始温度为 80℃ 保持 3 min, 以 15℃ · min⁻¹ 升到 150℃, 然后以 2.5℃ · min⁻¹ 升到 270℃ 并保持 3 min, 以 15℃ · min⁻¹ 升到 330℃ 并保持 13 min。

质谱条件: 电离方式为电子轰击源 (EI), 电子能量为 38 eV; 测定的质谱调谐参数为: 分辨率 ≥ 10 000; 源温度为 270℃; 采集方式为电压选择离子检测模式 (VSIR)。

1.6 样品的质量控制/质量保证

样品提取、净化、分析过程中严格按照美国国家环保署 EPA1668B 的方法对样品进行质量控制。

每组实验包括 5 个样品和一个程序空白^[11, 12], 每个样品用 HRGC/HRMS 仪器检测前均加入¹³C 标记的回收标, PCBs 标准物的回收率为 42% ~ 134%, 满足 EPA1668B 的要求。

2 结果与讨论

2.1 12 种 dl-PCBs 的分析

由表 2 可以看出, 12 种 dl-PCBs 化合物在不同鱼中的污染水平相差很大。12 种 dl-PCBs 在不同鱼中总浓度(湿重计, 下同)在 28.9 ~ 1067.6 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中以刺鱼中 dl-PCBs 总浓度最高, 为 1067.6 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 浓度最低的是鲶鱼, 为 28.9 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

毒性当量 (TEQ) 用来评价共平面多氯联苯对人

体健康产生的潜在效应, 依据 2005 年 WHO 颁布的 PCBs 国际当量因子^[13] (TEF) 计算 TEQ 值, 毒性效应最大的是刺鱼, TEQ 为 0.49 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 以鲶鱼中毒性最低, TEQ 为 0.04 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。珠江三角洲^[7] 内不同海水鱼中 PCBs 的 TEQ 在 0.07 ~ 4.12 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中黄鱼的 TEQ 为 2.27 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。韩国釜山^[14] 不同海水鱼中 PCBs 的 TEQ 在 0.02 ~ 4.16 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中马鲛体内毒性残留较高。与珠江三角洲领域和釜山海域的海水鱼相比, 天津塘沽海水鱼的毒性浓度较低。欧盟制定的食品中二噁英的限量 TEQ 为 4 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 二噁英和 PCBs 之和的限量 TEQ 为 8 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 天津塘沽中市售的 10 种海水鱼的 PCBs 的 TEQ (最大值) 均未超过该标准^[15]。

表 2 不同海鱼中的 12 种 dl-PCBs 含量及其脂肪含量¹⁾

Table 2 Concentrations of 12 dioxin-like polychlorinated biphenyls and the lipid content in different species of marine fishes

同类物	马鲛	比目鱼	刺鱼	带鱼	多宝鱼	虹鳟	黄鱼	日本真鲈	马口鱼	鲶鱼
CB-77	4.4	8.5	22.7	4.0	30.1	2.5	18.7	7.3	21.7	3.5
CB-81	1.6	1.2	4.7	1.3	0.3	0.5	3.4	0.8	9.2	0.4
CB-105	13.6	26.8	226.6	29.9	38.1	12.5	65.2	14.3	60.4	6.1
CB-114	2.2	2.7	16.2	4.2	5.9	0.9	6.6	1.2	6.9	0.6
CB-118	33.2	63.9	583.1	80.1	113.6	39.5	149.5	34.7	141.9	11.9
CB-123	7.0	12.6	72.1	10.2	25.8	6.1	30.6	5.1	32.3	2.1
CB-126	0.9	1.1	4.2	2.0	3.7	0.5	1.2	0.5	2.1	0.3
CB-156	5.4	7.2	80.4	19.7	16.1	4.3	25.0	4.1	33.9	1.8
CB-157	1.8	3.2	20.0	5.0	5.1	1.4	7.9	1.1	9.9	0.7
CB-167	2.7	4.5	27.5	6.9	7.2	2.2	7.7	1.8	10.6	0.5
CB-169	0.2	0.7	1.2	0.9	0.9	0.1	6.6	0.2	1.3	0.2
CB-189	1.5	2.8	8.9	7.9	3.6	0.6	5.0	1.0	8.9	0.8
WHO-TEQ	0.10	0.14	0.49	0.23	0.41	0.06	0.33	0.06	0.26	0.04
脂肪含量/%	0.49	1.01	8.74	2.78	4.14	1.71	8.07	3.17	9.86	0.73

1) dl-PCBs 含量单位: $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

2.2 7 种指示性 PCBs 的含量水平

由表 3 可以看出, 7 种指示性的 PCBs 在不同鱼中污染水平差别很大。7 种指示性 PCBs 在不同鱼中总浓度在 185.5 ~ 8 371.7 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中以 PCBs 总浓度最大的是刺鱼, 为 8 371.7 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$, 鲶鱼中总 PCBs 浓度最低, 为 185.5

$\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而我国的卫生标准^[16] 仅仅针对指示性 PCBs 制定了限量标准, 规定 PCBs 以 PCB-28、52、101、118、138、153、180 总和计, 小于 2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中, PCB-138 和 PCB-153 均应小于 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17]。本研究发现, 所检样品均远低于我国的卫生限量标准。

表 3 不同海鱼中 7 种指示性 PCBs 的含量/ $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 3 Concentrations of 7 indicator polychlorinated biphenyls in different species of marine fishes/ $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

同类物	马鲛	比目鱼	刺鱼	带鱼	多宝鱼	虹鳟	黄鱼	日本真鲈	马口鱼	鲶鱼
CB-28	136.2	253.5	770.7	126.0	328.5	272.6	261.2	82.6	237.5	59.7
CB-52	59.8	654.8	1 205.3	64.3	180.0	45.6	147.2	34.0	214.7	13.8
CB-101	106.1	175.9	1 505.3	101.8	246.4	88.1	245.2	63.2	1 316.1	15.2
CB-118	33.2	63.9	583.1	80.1	113.6	39.5	149.5	34.7	141.9	11.9
CB-138	126.3	179.3	1 930.9	234.0	225.1	115.5	468.2	99.1	1 481.2	32.1
CB-153	153.0	261.6	2 365.1	261.8	281.0	141.5	495.6	115.2	1 693.9	43.9
CB-180	43.4	61.2	11.3	97.0	47.6	40.3	139.2	31.0	460.2	8.9
\sum 7CBs	658.0	1 650.2	8 371.7	965.0	1 422.2	743.1	1 906.1	459.8	5 545.5	185.5

2.3 污染特征指纹分析

由图 1 可知, PCBs 各同系物在不同鱼类体内的浓度变化趋势大致相同. 12 种 dl-PCBs 化合物同系物污染的特征峰主要以 PCB-118 为主, 达到 dl-PCBs 同系物总浓度的 41% ~ 56%, 均值是 47%. 其次 PCB-105、123、156、77 也是主要的 dl-PCBs 同系物, 贡献率的均值分别是 19%、8.0%、7.8%、4.8%, 这可能与附近存在垃圾焚烧厂, 钢铁冶炼厂

有关^[18]. 对于毒性当量^[19]的浓度, 贡献单体主要以 PCB-126 为主, 其次是 PCB-169, 其中 PCB-126 对总 PCBs 的 WHO-TEQ 贡献率达到 80% 以上, PCB-169 对总 PCBs 的 WHO-TEQ 贡献率为 10% 左右. 这与张建清等^[17]所报道的 PCB-126 作为最优势的毒性当量贡献单体结果一致. 毒性当量的特征分析表明, 基于 PCB-126 的毒性当量因子较大, 成为最主要的毒性当量贡献单体.

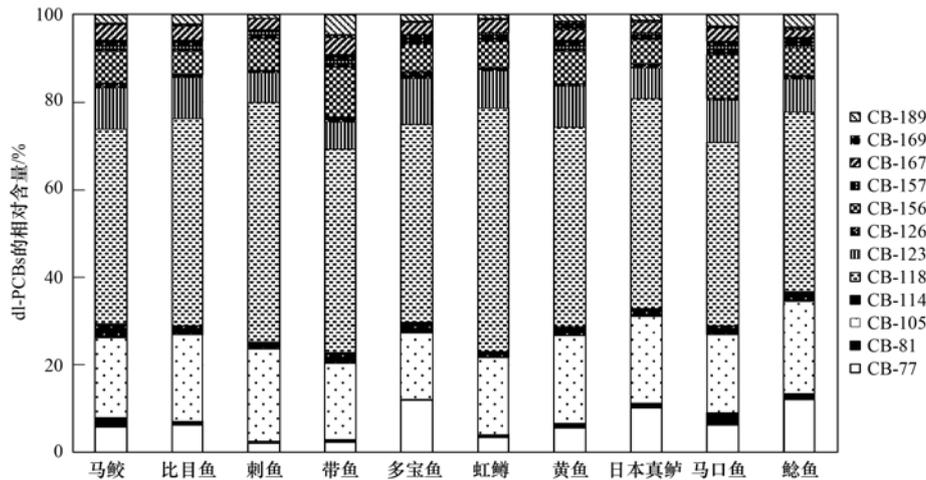


图 1 dl-PCBs 在不同海鱼中的特征分布

Fig. 1 Congener profiles of dl-PCBs in different marine fishes

图 2 所示, 所检测的 7 种指示性 PCBs 中, PCB-153 含量最高, 均值是 $581.3 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次是 PCB-138, 均值是 $489.2 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 对于总的指示性 PCBs 的贡献率分别是 27% 和 22%. PCB-138 和 PCB-153 是主要的贡献单体, 这与大多数文献报道结果相似^[20~23]. 深圳市疾控中心报道的 PCB-28 在鱼类中是主要的污染同系物^[17, 24], 其污染源可能与变压器

油的泄漏有关. 本研究中指示性 PCBs 的特征分析表明, 这可能与焚烧、钢铁冶炼等热工业过程相关^[18].

2.4 人体健康风险评价

WHO 设定的人体 PCBs 每日耐受量 (tolerable daily intake, TDI) 和美国 EPA 推荐的 PCBs 参考剂量 (reference dose, RfD) 均为 $20 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[25],

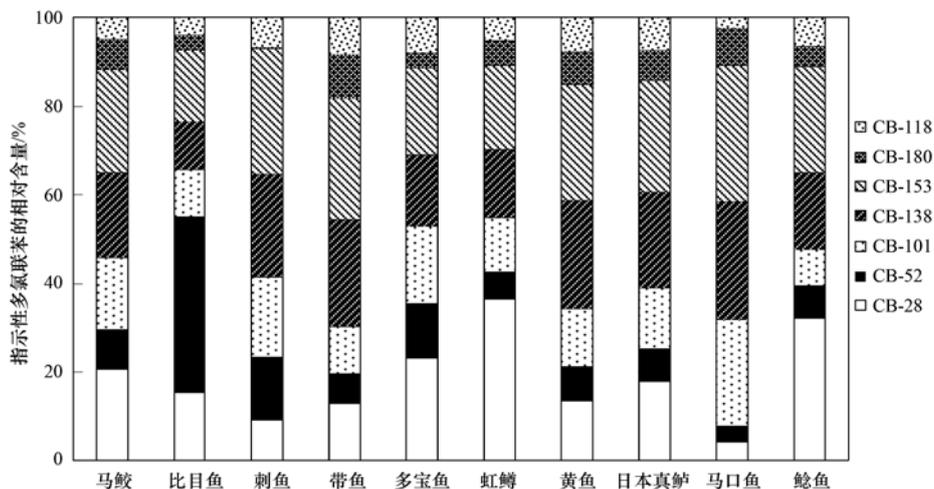


图 2 7 种指示性 PCBs 在不同海水鱼中的特征分布

Fig. 2 Congener profiles of seven indicator PCBs in different marine fishes

2002 年世界粮农卫生组织针对二噁英及其 dl-PCBs 的可容许摄入量标准^[7]为每月 $70 \text{ pg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。依据中国居民膳食指南^[26]中每天应该摄食鱼虾类至少 50 g 的消费量进行估算,国内一般按照 60 kg 来作为标准体重^[25],则居民每天从海鱼中摄入的 PCBs 暴露量均值是 $1\,960.22 \text{ pg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于 WHO 设定的 TDI 值和 EPA 推荐 RfD 值。另外居民每天从海鱼中摄食的 dl-PCBs 的 TEQ 均值是 $0.18 \text{ pg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每月从海鱼中摄食的 dl-PCBs 的 TEQ 均值是 $5.4 \text{ pg}\cdot\text{kg}^{-1}$,据此,我国居民从海鱼中摄入 PCBs 的含量低于世界粮农组织的限量标准。类似地,有报道利用有毒化学物质暴露极限(MOE)和致癌风险指数(R_i)对人体进行暴露风险评估。Watanabe 等^[27]将 $R_i \leq 10^{-4}$ 作为可接受的致癌风险,MOE ≤ 1 作为可以接受的暴露风险。本研究中鱼样 PCBs 的 MOE 值是 8.17×10^{-6} , R_i 为 3.3×10^{-9} ,MOE 和 R_i 均在可接受的健康风险范围内,由此引起的健康风险比较小。

3 结论

(1)对渤海湾海区不同鱼类中 dl-PCBs 和指示性 PCBs 研究结果表明,不同鱼类中 PCBs 含量不同,总体来说近渤海地区不同鱼类中 PCBs 处于较低的含量水平。

(2)不同鱼类中指示性 PCBs 和 dl-PCBs 分布大致相同,dl-PCBs 主要是 PCB-118 和 PCB-105,指示性 PCBs 主要是 PCB-153 和 PCB-138。

(3)通过对人体健康进行风险评价发现,近渤海地区海鱼中 PCBs 对人体产生的健康风险比较小。

参考文献:

- [1] 胡海瑛,陶澍,卢晓霞,等. 估算多氯联苯在鱼体内生物富集因子的分子连接性指数模型 [J]. 环境科学, 2000, **21**(4): 16-21.
- [2] 蒋友胜,张建清,周健,等. 鱼体中二噁英、多氯联苯和多溴联苯醚的污染分析 [J]. 中国卫生检验杂志, 2010, **20**(7): 1631-1635.
- [3] Baeyens W, Leermakers M, Elskens M, *et al.* PCBs and PCDD/Fs in fish and fish products and their impact on the human body burden in Belgium [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **52**(4): 563-571.
- [4] Stachel B, Christoph E H, Gotz R, *et al.* Dioxins and dioxin-like PCBs in different fish from the river Elbe and its tributaries, Germany [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **148**(1-2): 199-209.
- [5] Binelli A, Provini A. Risk for human health of some POPs due to fish from Lake Iseo [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, **58**(1): 139-145.
- [6] Bocio A, Domingo J L, Falc G, *et al.* Concentrations of PCDD/PCDFs and PCBs in fish and seafood from the Catalan (Spain) market: estimated human intake [J]. Environment International, 2007, **33**(2): 170-175.
- [7] Wei X, Leung K S, Wong M H, *et al.* Assessment of risk of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in marine and freshwater fish in Pearl River Delta, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **63**(5-12): 166-171.
- [8] Zhao X, Zheng M, Liang L, *et al.* Assessment of PCBs and PCDD/Fs along the Chinese Bohai Sea coastline using mollusks as bioindicators [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2005, **49**(2): 178-185.
- [9] Fiedler H. Results for PCDDs/PCDFs and dl-PCBs in the first round of the biennial global interlaboratory assessment on persistent organic pollutants [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2013, **46**: 98-109.
- [10] Li C, Zheng M H, Zhang B, *et al.* Long-term persistence of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in air, soil and sediment around an abandoned pentachlorophenol factory in China [J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 138-143.
- [11] Van Ael E, Covaci A, Blust R, *et al.* Persistent organic pollutants in the Scheldt estuary: Environmental distribution and bioaccumulation [J]. Environment International, 2012, **48**(1): 17-27.
- [12] Zacs D, Bartkevics V, Viksna A. Content of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls in fish from Latvian lakes [J]. Chemosphere, 2013, **91**(2): 179-186.
- [13] Cariou R, Marchand P, Vénisseau A, *et al.* Prediction of the PCDD/F and dl-PCB 2005-WHO-TEQ content based on the contribution of six congeners: Toward a new screening approach for fish samples [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(3): 941-947.
- [14] Moon H B, Ok G. Dietary intake of PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs, due to the consumption of various marine organisms from Korea [J]. Chemosphere, 2006, **62**(7): 1142-1152.
- [15] Szlinder-Richert J, Barska I, Usydus Z, *et al.* Investigation of PCDD/Fs and dl-PCBs in fish from the southern Baltic Sea during the 2002-2006 period [J]. Chemosphere, 2009, **74**(11): 1509-1515.
- [16] GB 2733-2005. 鲜、冻动物性水产品卫生标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [17] 张建清,蒋友胜,周健,等. 深圳市市售食品中二噁英、多氯联苯污染现状研究 [J]. 华南预防医学, 2009, **35**(6): 4-8.
- [18] Choi S D, Baek S Y, Chang Y S. Atmospheric levels and distribution of dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the vicinity of an iron and steel making plant [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(10): 2479-2488.
- [19] Van Den Berg M, Birnbaum L, Bosveld A T, *et al.* Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for

- humans and wildlife [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1998, **106**(12): 775-792.
- [20] Schmid P, Kohler M, Gujer E, *et al.* Persistent organic pollutants, brominated flame retardants and synthetic musks in fish from remote alpine lakes in Switzerland [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(9): S16-S21.
- [21] 陈蓉芳, 彭少杰, 田明胜, 等. 市售海水产品中指示性多氯联苯污染及膳食暴露情况 [J]. *上海预防医学杂志*, 2009, **21**(7): 333-335.
- [22] Yang N Q, Matsuda M, Kawano M, *et al.* PCBs and organochlorine pesticides (OCPs) in edible fish and shellfish from China [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(8): 1342-1352.
- [23] Nakata H, Hirakawa Y, Kawazoe M, *et al.* Concentrations and compositions of organochlorine contaminants in sediments, soils, crustaceans, fishes and birds collected from Lake Tai, Hangzhou Bay and Shanghai city region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **133**(3): 415-429.
- [24] Rawn D F K, Forsyth D S, Ryan J J, *et al.* PCB, PCDD and PCDF residues in fin and non-fin fish products from the Canadian retail market 2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **359**(1-3): 101-110.
- [25] Jiang Q T, Lee T K M, Chen K, *et al.* Human health risk assessment of organochlorines associated with fish consumption in a coastal city in China [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(1): 155-165.
- [26] 葛可佑, 杨晓光, 程义勇. 平衡膳食 合理营养 促进健康——解读《中国居民膳食指南(2007)》[J]. *中国食物与营养*, 2008, (5): 58-61.
- [27] Watanabe K H, Desimone F W, Thiyagarajah A, *et al.* Fish tissue quality in the lower Mississippi River and health risks from fish consumption [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **302**(1-3): 109-126.

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 Qiyi 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 Flex	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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行