

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芻对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价

王薛平¹, 黄星², 毕春娟^{1*}, 贾晋璞¹, 郭雪¹, 陈振楼¹

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 2. 华东师范大学河口海岸科学研究所, 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为了解城市人工湖泊中多氯联苯 (PCBs) 的污染状况, 利用 GC/MS 技术测定了滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 14 种 PCBs 的含量, 并对其分布特征、来源和生态风险进行了探讨与分析。结果表明, 滴水湖及其环湖水系沉积物、周边农田土壤中 $\sum_{14} \text{PCBs}$ 含量分别为 $0.65 \sim 16.41 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (以干重计) 和 $0.47 \sim 1.27 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 总体处于较低污染水平。但环湖水系表层沉积物高于湖区表层及柱样沉积物中 PCBs 含量, 引水过程可能会对湖区造成污染。湖区沉积物中 PCBs 随深度增加而降低, 表明自成湖以来湖区沉积物中 PCBs 有污染加剧的趋势。研究区沉积物、土壤中 PCBs 均以四氯联苯 (Tetra-CBs) 和五氯联苯 (Penta-CBs) 为主, 分别占 $\sum_{14} \text{PCBs}$ 的 20.65% 和 67.12%, 主要特征单体为 PCB105、PCB118 和 PCB77。主成分分析 (PCA) 结果表明, PCBs 主要来源于国产 2 号、1 号 PCB 产品的使用残留、城市固废焚烧及煤、木材的燃烧排放。研究区沉积物及土壤中 12 种类二噁英类多氯联苯 (DL-PCBs) 的毒性当量浓度 (TEQs) 为 $0.01 \sim 79.40 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中环湖水系及湖区表层沉积物有 7 个样点中 DL-PCBs-TEQs 超过了美国 EPA 沉积物质量指导值 (ISQGs), 可能对水生生物产生毒性影响, 应当引起重视。

关键词: 滴水湖; 类二噁英类多氯联苯; 沉积物; 来源; 生态风险

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2121-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.015

Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System

WANG Xue-ping¹, HUANG Xing², BI Chun-juan^{1*}, JIA Jin-pu¹, GUO Xue¹, CHEN Zhen-lou¹

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to investigate the pollution levels of PCBs in urban artificial lake, fourteen PCB congeners in sediments and soils of Dishui Lake and its river system were quantified by GC/MS, and then the distributions, sources and ecological risk of PCBs were discussed. The results showed that the concentrations of $\sum_{14} \text{PCBs}$ in sediments and soils ranged from $0.65 \sim 16.41 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (dry weight, dw) and $0.47 \sim 1.27 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, which were at a low level in general. Higher concentrations of PCBs were found in surface sediments from the river system of Dishui Lake than those in surface and core sediments from Dishui Lake, which indicated that the sediments in Dishui Lake would be polluted by the river system in the process of diversion. The concentrations of PCBs in core sediments decreased with depth, which showed that the sediments of Dishui Lake had been polluted by PCBs since its completion. In all samples, Tetra-CBs and Penta-CBs accounted for 20.65% and 67.12% of $\sum_{14} \text{PCBs}$, respectively, and PCB105, PCB118 and PCB77 were the dominant compounds. The results of source apportionment by principal component analysis (PCA) indicated that PCBs in sediments and soils from Dishui Lake and its river system were influenced by the historical cumulative emissions of 2#, 1# PCBs used in China and municipal solid waste incineration and combustion sources. The toxic equivalents (TEQs) of 12 (DL-PCBs) ranged from $0.01 \sim 79.40 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, and the TEQs in 7 samples of surface sediments from Dishui Lake and its river system were beyond the interim sediments quality guidelines (ISQGs) suggested by USEPA, which would result in potential eco-toxicological risks for aquatic organisms.

Key words: Dishui Lake; dioxin-like polychlorinated biphenyls (DL-PCBs); sediments; source; ecological risk

收稿日期: 2015-12-12; 修订日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271472); 上海市自然科学基金项目 (12ZR1409000); 上海市科委社会发展重点项目 (12231201900)

作者简介: 王薛平 (1984 ~), 男, 博士研究生, 实验师, 主要研究方向为城市水环境安全与风险评价, E-mail: 119613756@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: cjb@geo.ecnu.edu.cn

多氯联苯 (PCBs) 是国际上最关注的首批持久性有机污染物 (POPs) 之一, 具有多达 209 种不同氯代程度的异构体. 其中, 12 种共平面 PCBs (DL-PCBs) 单体具有较高的生物毒性^[1]. PCBs 虽于 20 世纪 70 年代末在全球被禁止开放使用, 但因其具有高残留性、高富集性、环境持久性以及远距离扩散性等特点, 已进入环境中的 PCBs 在相当长的时间内仍会对环境产生影响^[2]. 一般认为, PCBs 在处理和使用过程中会通过挥发进入大气经干沉降和湿沉降作用转入陆地和水体中, 且水体中的 PCBs 主要吸附于悬浮颗粒物和沉积物中^[3]. 除自然迁移扩散之外, 水体改造、清淤、通航等各种人为活动也可能造成 PCBs 的二次污染扩散, 对环境构成新的威胁^[4].

湖泊沉积物是反映湖泊环境变化、沉积历史的重要载体, 也是 POPs 等污染物的源和汇. 近年来, 国内外学者对天然湖泊表层沉积物中 POPs 含量、分布特征及来源等开展了广泛的研究^[5-7], 但对人工湖泊尤其是城市人工湖泊沉积物中 POPs 的研究还较少. 滴水湖是目前全球最大的城市人工湖泊, 面积达 5.56 km², 于 2002 年 6 月开挖于上海市浦东新区南汇东滩. 滴水湖湖水主要由 A、B、C、D、E、F、G 港等环湖水系从大治河引水经随塘河引水干道以及若干河道至湖区^[8] (图 1). 自 2003 年 10 月竣工蓄水以来, 已有不少学者对湖区水质、富营养状况、氮、磷等进行了研究^[9-11], 结果表明滴水湖水环境与人类活动密切相关, 各类污染物已对湖区水质造成不同程度的污染. 梅卫平等^[12]对滴水湖及其水系表层沉积物中 PCB28、52、101、118、138、153 和 PCB180 等 7 种 PCBs 进行了研究, 郭雪等^[13]研究了对滴水湖及其周边地区沉积物、土壤中 16 种美国 EPA 优控的多环芳烃 (PAHs) 的污染特征, 但尚未见对 12 种 DL-PCBs 的报道. 基于此, 本文对滴水湖及其环湖水系表层沉积物、柱样沉积物、潮滩及农田土壤中 14 种 PCBs (含 12 种 DL-PCBs) 的含量空间分布特征、影响因素、污染水平与来源以及 PCBs 可能产生的生态风险进行了研究, 以期对城市人工湖泊的水质改善、污染阻控等提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2013 年 11 月, 在滴水湖湖区布置了 10 个表层沉积物采样点 (S1~10)、4 个沉积物柱样采样点 (柱 1~4), 并在滴水湖引水港 C 港、排水港 A 港及

B、D、E、F、G 港等环湖水系共布置了 8 个采样点 (HS1、C1、A1、B1、D1、E1、F1、G1). 此外, 为对比研究滴水湖与周边环境中 PCBs 的差异, 在滴水湖周边农田、南汇潮滩分别设置了农田土壤样点 4 个 (NT1~4)、潮滩沉积物样点 2 个 (NH1~2), 具体样点位置见图 1. 表层沉积物 (0~2 cm) 用箱式底泥采样器采集 (HYDRO-BIOS, Germany), 柱样沉积物用 Kajak 柱状采泥器 (KC-Denmark, Denmark) 采集. 其中, 柱样 1 采集深度为 14 cm, 分作 5 层; 柱样 2 采集深度为 5 cm, 分作 2 层; 柱样 3 采集深度为 18 cm, 分为 6 层; 柱样 4 采集深度为 11 cm, 分作 4 层. 采集后的样品装入聚乙烯袋内, 带回实验室在 4℃ 下冷藏待冷冻干燥.

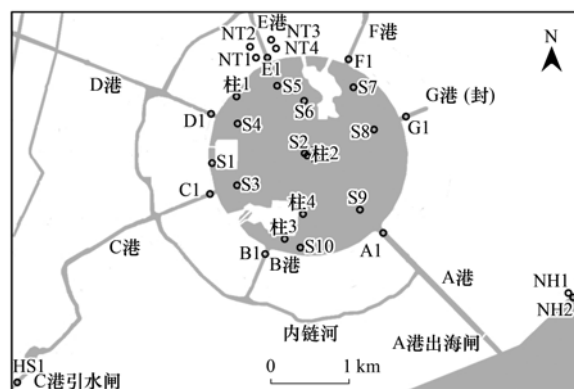


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品前处理

样品经冷冻干燥 (CHRIST, Germany), 研磨后过 60 目不锈钢筛, 混匀待下一步处理.

称取 5 g 沉积物样, 然后混同 2 g 硅藻土、2 g 无水硫酸钠、少量铜粉及适量石英砂装入 34 mL 萃取池, 使用 ASE300 加速溶剂萃取仪 (Dionex, USA) 对沉积物中 PCBs 组分进行萃取^[14]. 萃取条件为: 丙酮和二氯甲烷 (体积比 1:1), 加热温度 100℃, 萃取压力 1500 psi, 静态萃取循环 4 次, 氮气吹扫收集提取液时间为 60 s. 萃取液经 DryVap 自动定量浓缩仪 (Horizon, USA) 浓缩后, 过石英砂/硅胶 (12 cm)/氧化铝 (6 cm)/无水硫酸钠 (1 cm) 层析柱 (内径为 1 cm) 净化, 用 70 mL 二氯甲烷和正己烷 (体积比 3:7) 混合液洗脱、收集 PCBs 组分. 洗脱液经自动定量浓缩仪浓缩, 溶剂转换为正己烷后准确定量至 0.9 mL, 加入 0.1 mL 十氯联苯 (浓度为 0.5 mg·L⁻¹) 内标物 (Supelco, USA), 待测.

实验用丙酮、甲醇、二氯甲烷、正己烷等有机溶剂均为农残级 (Merck, Germany). 前处理过程中

用到的石英砂、氧化铝、硅胶、硅藻土、无水硫酸钠、铜粉等为分析纯(国药)。其中,硅胶在使用前先后用甲醇、二氯甲烷各提取 24 h,再于 180℃活化 12 h,冷却至室温时加入其重量 3% 的超纯水摇匀备用;硅藻土、石英砂、无水硫酸钠、中性氧化铝使用前于马弗炉中 450℃烘烤 4 h;铜粉经 10% 硝酸溶液去除表面氧化物,用超纯水洗去残留酸,再用丙酮清洗,氮吹干燥。

1.3 仪器分析

样品中 PCBs 由配备 CTC Combi PAL 自动进样器的气质联用仪(GC, Agilent 7890A, USA; MSD, Agilent 5975C, USA)测定。PCBs 标样(O2Si, USA)包含 14 种 PCBs,分别为 PCB77、81、105、114、118、123、126、156、157、167、169、170、180 和 PCB189。

色谱、质谱条件参考马召辉等^[15]设置如下。

色谱柱选择 HP-5MS (30 m × 250 μm × 0.25 μm) 石英毛细管色谱柱;进样方式不分流进样,进样量为 1 μL;载气为 He 气;进样口温度为 300℃;色谱柱升温程序为 150℃ 保持 3 min, 10℃·min⁻¹ 升温至 300℃, 保持 2 min。

四级杆温度为 150℃;离子源温度 280℃;传输线温度为 280℃;电离电压 70 eV;全扫描范围(SCAN)为 50 ~ 500 *m/z*;选择离子扫描(SIM)分别为:PCB77、81 的主要选择离子(*m/z*)为 292、290、294;PCB105、114、118、123、126 的主要选择离子(*m/z*)为 326、328、324;PCB156、157、167、169 的主要选择离子(*m/z*)为 360、362、364;PCB170、180、189 的主要选择离子为(*m/z*)为 394、396、398。

沉积物、土壤中有机碳含量采用重铬酸钾容量法(GB/T 50123-1999)测定。沉积物的粒径经六偏磷酸钠化学分散,超声处理后用激光粒度仪(LS13320, USA)测定。

1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

每 7 个样品增加 1 个实验空白(实验空白未检出目标化合物)、1 个基质加标以及 1 个空白加标样。基质加标样均连续测定 3 次,测得各 PCB 单体浓度相对标准偏差(RSD)在 8.3% ~ 13.1% 间。基质加标样各 PCB 单体回收率在 65.3% ~ 76.7%,空白加标样各 PCB 单体回收率在 74.1% ~ 81.8% 之间,回收率符合 EPA 1668A 要求。在 SCAN 模式下确定各 PCB 单体的出峰顺序及保留时间,在 SIM 模式下根据 PCB 单体的保留时间及特征离子(*m/z*)采

用内标法对 PCBs 进行定量分析,经回收率校正确定目标化合物浓度。14 种 PCB 单体的方法检出限为 0.001 ~ 0.008 ng·g⁻¹。

1.5 数据处理与分析

数据的处理与分析均在 SPSS 19.0 (SPSS Inc, USA)中完成。其中,利用双变量相关分析(Pearson 法)对 $\sum_{14}$ PCBs、TOC、沉积物粒径等之间的相关性进行了分析;利用 Kolmogorov-Smirnov 法(K-S 检验)对各 PCB 单体数据进行了检验,结果显示各 PCB 单体数据符合正态分布;利用主成分分析(PCA)对研究区 PCBs 来源进行了解析,数据集(未检出值以 0 计)的 KMO 值为 0.691 (Sig. = 0.000)。

2 结果与讨论

2.1 PCBs 浓度水平与空间分布

从表 1 中可以看出,滴水湖环湖水系、湖区表层及柱样沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 含量范围分别为 3.10 ~ 16.41、1.87 ~ 3.91 和 0.65 ~ 4.91 ng·g⁻¹,远低于梅卫平等^[12]对滴水湖引水河道(1.86 ~ 2254.50 ng·g⁻¹)和湖区表层沉积物中 7 种 PCBs (ND ~ 228.62 ng·g⁻¹)的报道。滴水湖周边农田土壤中 $\sum_{14}$ PCBs 含量范围为 0.47 ~ 1.27 ng·g⁻¹,而南汇潮滩沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 含量范围为 1.62 ~ 2.06 ng·g⁻¹。与国内外其他研究相比,滴水湖湖区沉积物中 PCBs 含量低于太湖^[16]、南四湖^[17]、意大利 Venice 泻湖^[5]沉积物中 PCBs 含量水平;滴水湖环湖水系表层沉积物与韩国汉江沉积物中 PCBs 含量相当(0.04 ~ 4.53 ng·g⁻¹)^[18],低于珠江河口^[19]和闽江河口^[20]沉积物中 PCBs 水平,但高于苏南城市河流表层沉积物中 PCBs 含量^[21];南汇潮滩沉积物中 PCBs 含量低于杨毅等^[22]对长江口潮滩沉积物中 PCBs 的研究(0.19 ~ 18.95 ng·g⁻¹);滴水湖周边农田土壤中 PCBs 含量与上海市农村及郊区农田土壤(0.18 ~ 1.01 ng·g⁻¹)^[23]、长江三角洲典型农业土壤(0.554 ~ 1.17 ng·g⁻¹)^[24]、黄河三角洲农业土壤(0.109 ~ 2.15 ng·g⁻¹)^[25]中 PCBs 含量相当^[25],但低于上海市城区土壤中 PCBs 含量^[23]。

从图 2 中可以看出,滴水湖环湖水系表层沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 均值远高于湖区表层、柱样沉积物以及农田土壤、潮滩沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 均值。此外,自海事大学 C 港引水闸(HS1)到引水河道 C 港入湖口(C1),经湖区到排水河道 A 港(A1),其

表 1 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 PCBs 含量、TEQ 值¹⁾

IUPAC 编号	环湖水系		湖区表层		湖区柱样		农田土壤		南汇潮滩	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
PCB77	1.20	0.69 ~ 1.91	0.66	ND ~ 1.12	0.65	ND ~ 1.17	0.07	ND ~ 0.16	0.21	0.13 ~ 0.29
PCB81	0.18	0.07 ~ 0.45	0.05	ND ~ 0.15	0.02	ND ~ 0.06	0.02	ND ~ 0.05	0.03	0.01 ~ 0.04
PCB105	2.09	0.91 ~ 5.72	1.08	0.77 ~ 1.45	0.88	0.24 ~ 1.57	0.41	0.21 ~ 0.57	0.80	0.67 ~ 0.92
PCB114	0.24	0.05 ~ 0.67	0.08	ND ~ 0.23	0.04	ND ~ 0.08	0.03	0.01 ~ 0.05	0.10	0.04 ~ 0.16
PCB118	1.58	0.78 ~ 4.02	0.94	0.11 ~ 1.27	0.89	0.11 ~ 1.45	0.27	0.11 ~ 0.44	0.62	0.52 ~ 0.73
PCB123	0.13	ND ~ 0.86	0.02	ND ~ 0.09	0.01	ND ~ 0.09	<0.01	ND ~ 0.02	0.01	ND ~ 0.02
PCB126	0.12	ND ~ 0.77	0.02	ND ~ 0.10	ND	ND	<0.01	ND ~ 0.01	0.01	ND ~ 0.01
PCB156	0.20	0 ~ 0.42	0.05	ND ~ 0.23	0.18	ND ~ 0.59	0.03	ND ~ 0.11	0.03	ND ~ 0.06
PCB157	0.09	ND ~ 0.37	0.04	ND ~ 0.34	<0.01	ND ~ 0.05	<0.01	ND ~ 0.01	ND	ND
PCB167	0.14	ND ~ 0.79	<0.01	ND ~ 0.02	<0.01	ND ~ 0.07	<0.01	ND ~ 0.01	ND	ND
PCB169	0.02	ND ~ 0.06	ND	ND	<0.01	ND ~ 0.05	ND	ND	ND	ND
PCB170	0.09	ND ~ 0.58	0.04	ND ~ 0.41	0.01	ND ~ 0.09	<0.01	ND ~ 0.01	ND	ND
PCB180	0.26	0.16 ~ 0.45	0.08	ND ~ 0.28	0.21	0.05 ~ 0.31	0.02	ND ~ 0.03	0.03	0.03 ~ 0.03
PCB189	0.05	ND ~ 0.11	0.02	ND ~ 0.07	0.03	ND ~ 0.08	ND	ND	0.01	ND ~ 0.01
∑ PCBs	6.39	3.1 ~ 16.4	3.08	1.87 ~ 3.99	2.93	0.65 ~ 4.91	0.87	0.47 ~ 1.27	1.84	1.62 ~ 2.06
∑ DL-PCBs	6.04	2.83 ~ 15.93	2.96	1.87 ~ 3.91	2.71	0.43 ~ 4.59	0.85	0.44 ~ 1.27	1.81	1.59 ~ 2.03
WHO-TEQs	13.04	0.17 ~ 79.4	2.03	0.13 ~ 10.02	0.22	0.02 ~ 1.70	0.31	0.01 ~ 1.14	0.68	0.07 ~ 1.28

1) “ND”表示未检出; WHO-TEQs 据 Van den Berg 等^[26]计算; PCBs 含量单位为 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, TEQ 值单位为 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$

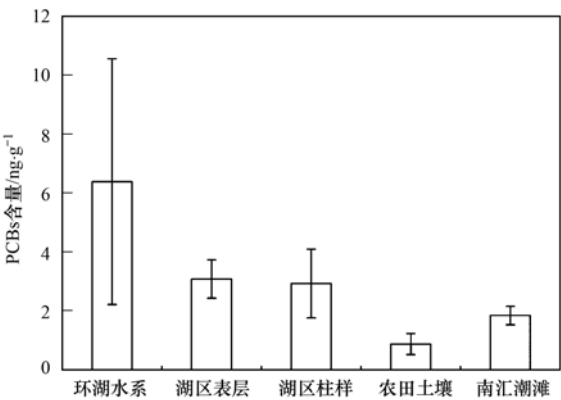


图 2 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 $\sum_{14}$ PCBs 分布

Fig. 2 Distribution of $\sum_{14}$ PCBs in sediments and soils from Dishui Lake and its river system

$\sum_{14}$ PCBs 含量依次为 HS1 ($16.41 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > C1 ($5.64 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > A 港 ($3.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 湖区 ($2.71 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 与梅卫平等研究结论相似^[12], 表明滴水湖环湖水系周边地区较为密集的人为活动已对湖区及其周边水体环境造成了不利影响^[8]. 从图 3 可见, 滴水湖湖区表层沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 分布存在一定的空间差异, 最高值出现在 E 港入湖口近 1 号游艇码头的 S5, 除 S3 和 S8 外, 其他近环湖水系入湖区点位中 $\sum_{14}$ PCBs 均较高, 而湖心区 (S2) 的 $\sum_{14}$ PCBs 最小. 湖区表层沉积物中 PCBs 大体呈现

出自近环湖水系入湖区往湖心区域逐渐降低的趋势, 其原因可能是由于表层沉积物易受滴水湖水系环流等水文因素的影响^[27], 环湖水系等外源颗粒物的输入对湖区表层沉积物中 PCBs 的分布影响较大.

滴水湖柱样沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 的空间分布见

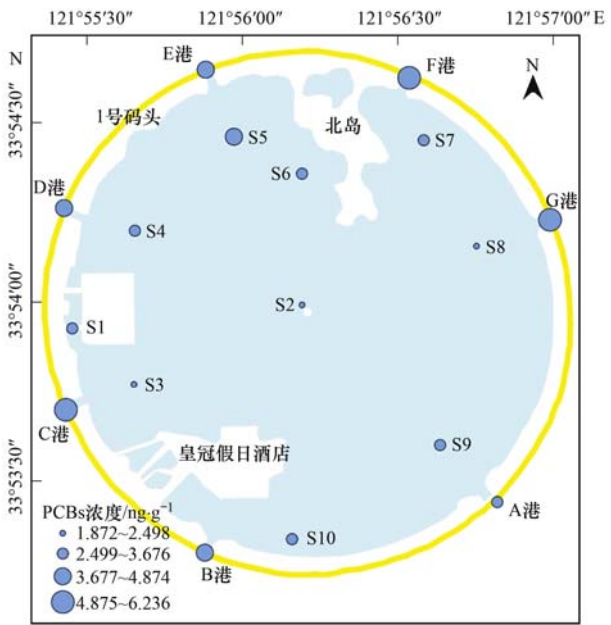


图 3 滴水湖表层沉积物中 $\sum_{14}$ PCBs 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of $\sum_{14}$ PCBs in surface sediments from Dishui Lake

图4. 从不同区域柱样看,湖心位置的柱样2中 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 均值明显低于位于皇冠假日酒店附近的柱样3、柱样4以及1号码头附近的柱样1[图4(a)],且各柱样表层与底层沉积物中 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 差异较大.滴水湖各柱样底层 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 含量范围为 $0.67 \sim 2.50 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,均值为 $1.68 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,与南汇潮滩表层沉积物 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 含量非常接近.由于滴水

湖是在潮滩上开挖的,故其底层 PCBs 反映的是原潮滩底质中 PCBs 含量水平.从图4(b)可见,滴水湖 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 及 $4 \sim 7 \text{ cm}$ 深度柱样沉积物中 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 差异较大,且随着深度增加, $\sum_{14}\text{PCBs}$ 呈现出逐渐减少的趋势,与南四湖柱样沉积物中 PCBs 垂直分布规律类似^[17].这说明滴水湖虽然成湖年代较短,但其沉积物中 PCBs 已呈现出污染加剧的趋势.

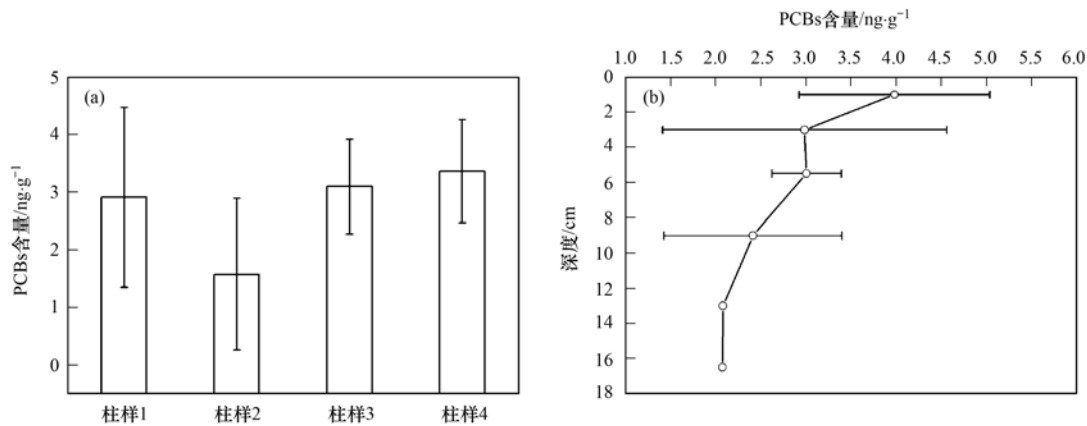


图4 滴水湖柱样沉积物中 $\sum_{14}\text{PCBs}$ 分布

Fig. 4 Distribution of $\sum_{14}\text{PCBs}$ in the core sediments of Dishui Lake

2.2 TOC 和粒径特征对 PCBs 分布的影响

由表2可以看出,滴水湖及其环湖水系不同沉积物、土壤中 TOC 含量为 $8.79 \sim 29.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,农田土壤中 TOC 含量均值最高而湖区表层沉积物中 TOC 含量均值最低,且不同样品中 TOC 含量差异较大,最大值位于海事大学引水港(HS1),而湖心(S2)与北岛西侧(S6)点位相近且相对最低.在 $0 \sim 7 \text{ cm}$ 深度柱样沉积物中,TOC 含量随深度增加而增加,而在 7 cm 以下,TOC 则随着深度的增加而减小[图5(a)].滴水湖表层、柱样沉积物中砂粒含量($>63 \mu\text{m}$)高于粉粒含量($4 \sim 63 \mu\text{m}$),而环湖水系表层沉积物、农田土壤中粉粒含量高于砂粒含量.南汇潮滩沉积物粉粒、砂粒含量较为接近,为粉砂质,与计娜等^[28]研究结论相符.农田土壤、滴水湖环湖水系表层沉积物中黏粒含量($<63 \mu\text{m}$)含量要高于湖区和潮滩沉积物,且湖区与潮滩沉积物中黏粒含量均值接近.除湖心柱样(柱样2)各层次沉积物均为砂粒外,其他柱样 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 沉积物以粉粒为主,且不同柱样间平均粒径差异较大,自 7 cm 深度以下,各柱样沉积物砂粒含量逐渐增大,底层均为砂粒[图5(b)].

沉积物、土壤中 TOC 含量与其黏粒、粉粒%存

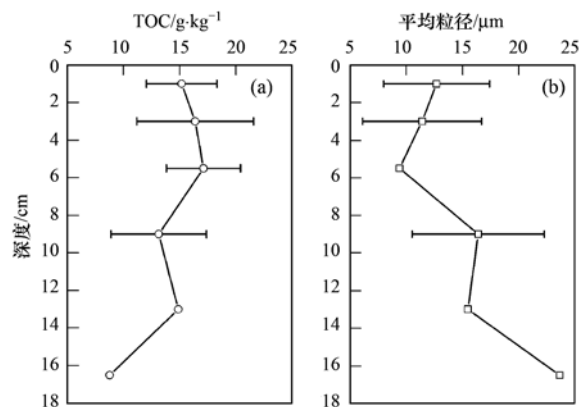


图5 滴水湖柱样沉积物粒径及 TOC 垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of grain size and TOC in the core sediments of Dishui Lake

在极显著正相关关系,且与黏粒含量的相关系数更大,而与砂粒含量以及平均粒径呈极显著负相关关系(表3).这表明粒径组成对研究区沉积物、土壤中 TOC 含量影响较大,TOC 主要吸附于粉粒和黏粒组分上.对比图5中柱样沉积物中 TOC 与平均粒径的垂直分布可以看出,TOC 与平均粒径随深度变化规律明显相反,这与 De Falco 等^[29]对意大利 Cabras 泻湖柱样沉积物 TOC 与粒径分布规律相似.

表 2 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 TOC 含量与粒径组成

指标	环湖水系		湖区表层		湖区柱样		农田土壤		南汇潮滩	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
TOC/g·kg ⁻¹	17.98	14.16 ~ 27.82	13.41	8.88 ~ 18.37	14.82	8.79 ~ 20.95	24.44	16.55 ~ 29.91	22.19	20.96 ~ 23.42
黏粒/%	15.16	6.06 ~ 22.1	9.47	5.21 ~ 18.8	9.56	2.9 ~ 23.6	14.89	14.1 ~ 16.1	9.94	4.77 ~ 15.1
粉粒/%	54.39	30.19 ~ 65.95	39.49	19 ~ 61.1	43.34	13.8 ~ 72.69	54.02	49.89 ~ 60.69	45.57	25.93 ~ 65.2
砂粒/%	30.45	13.86 ~ 63.85	51.04	22.3 ~ 74.1	47.11	12.1 ~ 83.3	31.1	25.07 ~ 35.2	44.5	19.7 ~ 69.3
平均粒径/μm	24.75	10.1 ~ 56.21	44.42	17.76 ~ 65.25	43.97	8.14 ~ 93.3	26.04	20.74 ~ 29.78	38.54	15.86 ~ 61.21

沉积物中 PCBs 的吸附影响机制复杂,其主要影响因素有沉积物颗粒大小、有机碳含量、水动力条件变化和水环境因子变化^[30]. 由表 3 可见,滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 $\sum_{14}$ PCBs 与 TOC 含量之间不存在显著的相关关系,但与沉积物的组

成存在一定的相关性. 具体表现为 $\sum_{14}$ PCBs 与沉积物中黏粒、粉粒含量极显著正相关关系,而与平均粒径及砂粒含量成显著的负相关关系. 这表明颗粒组成对 PCBs 在滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中的富集起到了主导作用^[31].

表 3 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤特性 PCBs 之间的相关性矩阵¹⁾

Table 3 Correlations among TOC, grain diameters and PCBs of the sediments and soils from Dishui Lake and its river system						
	$\sum_{14}$ PCBs	TOC	黏粒	粉粒	砂粒	平均粒径
$\sum_{14}$ PCBs	1					
TOC	0.241	1				
黏粒	0.337 *	0.556 **	1			
粉粒	0.333 *	0.533 **	0.744 **	1		
砂粒	-0.352 *	-0.567 **	-0.852 **	-0.984 **	1	
平均粒径	-0.356 *	-0.566 **	-0.842 **	-0.961 **	0.979 **	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.3 PCBs 组分特征与源解析

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 14 种 PCBs 中四氯联苯(Tetra-CBs)、五氯联苯(Penta-CBs)、六氯联苯(Hexa-CBs)和七氯联苯为主

(Hepta-CBs) 组分比例分别为 20.65%、67.12%、4.97% 和 12.91%,以 Tetra-CBs、Penta-CBs 为主,主要的特征单体为 PCB105、PCB118 和 PCB77(图 6). 从图 6 还可以看出,环湖水系与湖区表层沉积

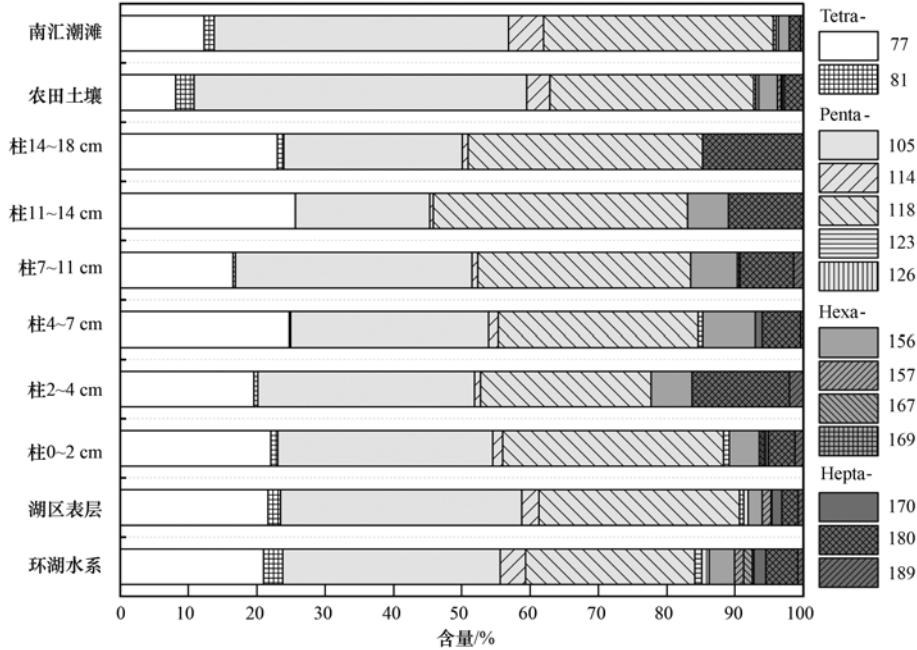


图 6 滴水湖及其周边地区沉积物、土壤中 PCB 单体组成特征

Fig. 6 PCB congener patterns in sediments and soils from Dishui Lake and its river system

物中单体组成特征相似度较高,而与农田土壤、南汇潮滩差异较大,进一步说明环湖水系沉积物中 PCBs 可能是湖区沉积物中 PCBs 主要输入源. 较高的 Penta-CBs 含量表明,国产 2 号 PCB 产品的使用残留可能是滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤 PCBs 重要的来源. 但国产 1 号 PCB 产品中也曾检测出一定含量比的 PCB77、105、118、123 和 PCB126,且有报道认为环境中 PCB118、105、126 还与环境木材燃烧、焚烧炉烟气以及再生金属冶炼、电子垃圾拆解等工业活动排放有关^[32~40]. 因此,本研究利用主成分分析法(PCA)对研究区 PCBs 来源进行了进一步解析.

通过 PCA 法共提取出了 3 个特征值大于 1 的主成分,其方差贡献率分别为 42.70%、18.88% 和 16.13%,累积方差为 77.71%. 在主成分 1 上,旋转因子载荷较高(>0.7)的单体依次为 PCB123、126、167、105、118 和 PCB114,在图 7 中可划为一组,表明其来源具有一致性. 由于主成分 1 上特征单体较多,其中 PCB105 占国产 2 号 PCB 产品中 $\sum_{14} \text{PCBs}$ 的 94.85%,城市固废焚烧(municipal solid waste incineration, MSW)^[40]、煤燃烧(housecoal burning, CB)及木材燃烧(hardwood burning, WB)^[36]排放的 PCB118 占 $\sum_{14} \text{PCBs}$ 的 40.36%~40.48%,故推测主成分 1 反映的是国产 2 号 PCB 工业品使用残留与燃烧源的复合影响. 在主成分 2 上,PCB77、156 及 PCB180 旋转因子载荷较高(>0.7),其来源具有相似性,在图 7 中可划为一组. 由于 PCB77 占国产 1 号 PCB 产品中 $\sum_{14} \text{PCBs}$ 达 80.84%,故国产 1 号 PCB 工业品的使用残留可解释为主成分 2 的来源. 而在主成分 3 上,PCB169、157 和 PCB170 的因子载荷较高(>0.7),因 PCB169 为再生金属冶炼排放的主要贡献单体,故推测主成分 3 反映的是再生金属冶炼排放来源^[37].

从不同样品中 PCBs 的主成分得分上来看,滴水湖环湖水系、湖区表层、柱样及南汇潮滩沉积物多数样点与 Aroclor 1242(A1242,组分与国产 1 号 PCB 产品相似)、Aroclor 1254(A1254,组分与国产 2 号 PCB 产品相似)^[38]和 CB、MSW、WB 等来源在主成分得分图中分布较为接近(见图 8),表明这些样品中 PCBs 主要受国产 1 号 PCB、2 号 PCB 工业品的使用残留、城市固废焚烧及燃煤排放的复合影响. 而 C 港引水闸(HS1)、D 港入湖口(D1)、近排水港 A 港(S9)这 3 个点位样品主成分得分与其他

样点差异较大,且在图 8 中距离各类排放源较远,故其可能存在点源污染. 综上,研究区沉积物、土壤中 PCBs 主要为国产 1 号、2 号 PCB 产品的残留累积、城市固废焚烧与煤、木材等燃烧排放,但不同点位各排放源的污染贡献存在一定差异,还待进一步解析.

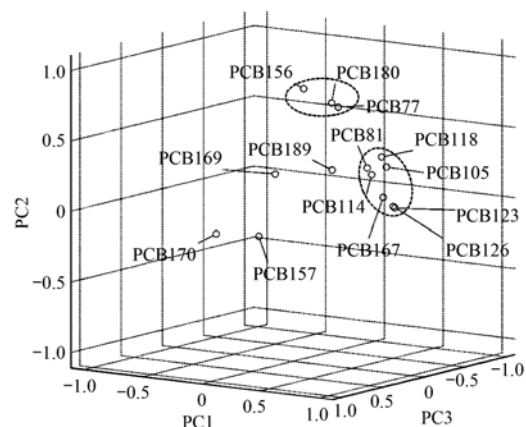


图 7 主成分分析提取的 14 种 PCBs 在旋转空间中的成分

Fig. 7 Plots in rotation matrix elements of 14 PCBs by principal component analysis(PCA)

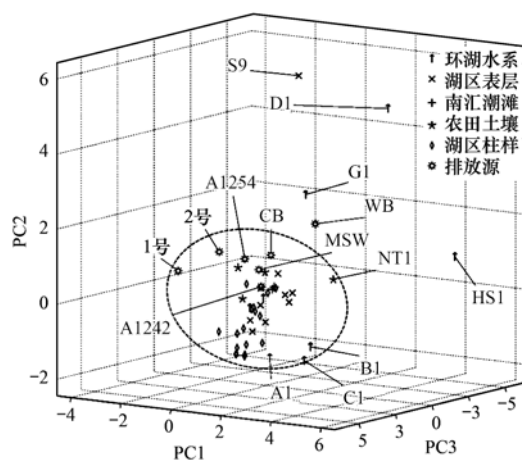


图 8 不同样品及排放源中 PCBs 的主成分得分

Fig. 8 PCA score plots of PCBs in different samples and emission sources

2.4 PCBs 生态风险评价

采用 PCBs 的 2,3,7,8-TCDD TEQs 来评估研究区沉积物、土壤中 DL-PCBs 的暴露对人类或水生生态系统造成的风险. 毒性当量浓度通过单体 PCB 浓度与修正后的(WHO,2005)毒性当量因子(TEFs)的乘积计算得到^[26],结果如表 1 及图 9 所示. 可以看出,滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 DL-PCBs-TEQs 为 0.01~79.40 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$,均值为 3.39 $\text{pg}\cdot\text{g}^{-1}$,其含量大小依次为环湖水系>湖区表层>

南汇潮滩 > 农田土壤 > 湖区柱样. 与国内外研究相比,滴水湖环湖水系、湖区沉积物中 DL-PCBs-TEQs 低于印度 Yamuna 河^[41]、天津大沽排水河^[42]、南排污河^[43],但高于太湖^[44]、黄河^[45]、广东东江^[46]、长三角苏南城市群^[21]及 Victoria 湖^[47]等.

参考美国 EPA 提出的基于 2,3,7,8-TCDD 的二噁英类沉积物质量指导值 (ISQGs, $2.5 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和“对敏感物种产生高风险的指导值”(high risk to sensitive species, HR, $25 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$) 可以看出^[48] (图 9): 除 C 港引水闸 (HS1) 点位外,其他点位中 DL-PCBs-TEQs 均未超过 HR 限值; 共有 7 个点位的 DL-PCBs-TEQs 超过了 ISQGs 限值, 占有样点的 17%, 均分布在滴水湖环湖水系和湖区表层沉积物中. 总体而言,滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中 DL-PCBs 的生态风险水平较低,但环湖水系及湖区表层沉积物一定程度上受到了二噁英类 POPs 污染,具有一定的生态风险,可能对水生生物产生毒性影响,且引水港 C 港沉积物中 TEQs 相对较高,可能会对湖区水体造成污染.

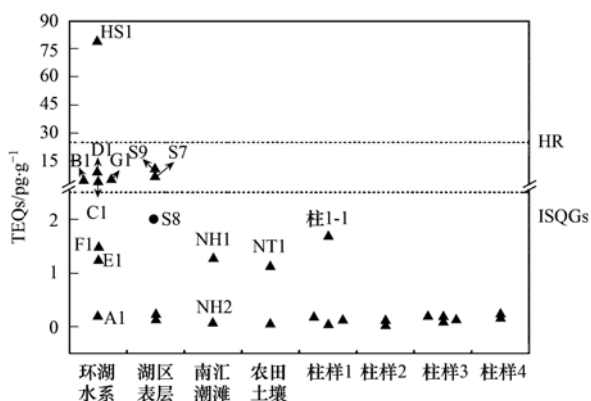


图 9 滴水湖及环湖水系沉积物、土壤中 DL-PCBs 的 TEQs 含量分布

Fig. 9 TEQs of DL-PCBs in the sediments and soils from Dishui Lake and its river system

3 结论

(1) 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤、潮滩沉积物中 14 种 PCBs 含量为 $0.47 \sim 16.41 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 处于较低污染水平. 湖区表层沉积物中 PCBs 大体呈现出自近环湖水系入湖区往湖心区域逐渐降低的趋势,而柱样沉积物中 PCBs 含量随深度的增加而减少. 自成湖以来,湖区沉积物中 PCBs 有污染加剧的趋势.

(2) 滴水湖环湖水系表层沉积物、农田土壤以粉粒为主,而湖区表层、柱样沉积物以砂粒为主,南汇潮滩沉积物则为粉沙质. 沉积物、土壤中 TOC 主

要吸附于粉粒和黏粒组分上,且黏粒、粉粒组分对 PCBs 的富集起主导作用.

(3) 研究区沉积物、土壤中 14 种 PCBs 均以 Penta-CBs 和 Tetra-CBs 为主, PCB105、PCB118 和 PCB77 为主要贡献单体,主要来源于国产 2 号、1 号 PCB 产品的残留累积、城市固废燃烧及煤、木材的燃烧排放,部分样点可能存在点源污染.

(4) 研究区沉积物、土壤中 PCBs 的生态风险水平较低,但环湖水系及湖区部分区域表层沉积物受二噁英类 POPs 污染较为严重,可能对水生生物产生毒性影响,应当引起重视.

致谢: 本研究野外采样工作得到了上海市港城滴水湖建设管理有限公司饶应福、顾佩弟等的支持,样品测试分析得到了华东师范大学陶征楷、诸葛祥真、张焕焕、刘超及倪玮怡等的帮助,在此一并表示感谢.

参考文献:

- [1] Babut M, Miegé C, Villeneuve B, *et al.* Correlations between dioxin-like and indicators PCBs: potential consequences for environmental studies involving fish or sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(12): 3451-3456.
- [2] Breivik K, Sweetman A, Pacyna J M, *et al.* Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners—a mass balance approach: 1. Global production and consumption [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **290**(1-3): 181-198.
- [3] Samara F, Tsai C W, Aga D S. Determination of potential sources of PCBs and PBDEs in sediments of the Niagara River [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(3): 489-497.
- [4] Dachs J, Lohmann R, Ockenden W A, *et al.* Oceanic biogeochemical controls on global dynamics of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(20): 4229-4237.
- [5] Moret I, Piazza R, Benedetti M, *et al.* Determination of polychlorobiphenyls in Venice Lagoon sediments [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(4-7): 559-565.
- [6] 袁旭音, 王禹, 孙成, 等. 太湖底泥中多氯联苯的特征与环境效应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 272-276.
- [7] Yun X Y, Yang Y Y, Liu M X, *et al.* Concentrations and risk assessment of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in surface sediments from the East Lake, China [J]. *Ecotoxicology*, 2015, **24**(1): 172-180.
- [8] 徐建官. 滴水湖水水质现状及保护初探 [J]. *环境监测管理与技术*, 2010, **22**(1): 64-70.
- [9] 田华, 刘水芹, 方伟, 等. 人工湖泊滴水湖水水质演变趋势及富营养化分析 [J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(6): 26-31.
- [10] 诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征 [J]. *环境科学*, 2014, **34**(4): 1531-1539.
- [11] 倪玮怡, 毕春娟, 王薛平, 等. 上海临港新城滴水湖生态系

- 统健康评价[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2426-2433.
- [12] 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊, 等. 滴水湖水系表层沉积物中多氯联苯残留与风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 2086-2092.
- [13] 郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 等. 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2664-2671.
- [14] 赵士燕, 崔兆杰. 加速溶剂萃取-气相色谱法测定土壤中的类二噁英多氯联苯[J]. 化工环保, 2006, **26**(6): 518-521.
- [15] 马召辉, 金军, 王英, 等. GC-NCI-MS 法测定底泥中类二噁英多氯联苯[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(10): 123-126.
- [16] 陈燕燕, 尹颖, 王晓蓉, 等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评价[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(2): 118-124.
- [17] 李红莉, 李国刚, 杨帆, 等. 南四湖沉积物中有机氯农药和多氯联苯垂直分布特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1590-1594.
- [18] Kim K S, Lee S C, Kim K H, *et al.* Survey on organochlorine pesticides, PCDD/Fs, dioxin-like PCBs and HCB in sediments from the Han river, Korea[J]. Chemosphere, 2009, **75**(5): 580-587.
- [19] 聂湘平, 蓝崇钰, 栾天罡, 等. 珠江广州段水体、沉积物及底栖生物中的多氯联苯[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(5): 417-421.
- [20] Zhang Z L, Hong H S, Zhou J L, *et al.* Fate and assessment of persistent organic pollutants in water and sediment from Minjiang River Estuary, Southeast China[J]. Chemosphere, 2003, **52**(9): 1423-1430.
- [21] 张炅, 陈社军, 李楠, 等. 苏南城市群河流表层沉积物中二噁英和共平面多氯联苯的浓度水平、来源和生态风险[J]. 环境化学, 2014, **33**(9): 1445-1455.
- [22] 杨毅, 刘敏, 许世远, 等. 长江口潮滩表层沉积物中 PCBs 和 OCPs 的分布[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 215-219.
- [23] 蒋煜峰. 上海地区土壤中持久性有机污染物污染特征、分布及来源初步研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [24] 安琼, 董元华, 王辉, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤中多氯联苯残留状况[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 528-532.
- [25] 刘静, 崔兆杰, 范国兰, 等. 现代黄河三角洲土壤中多氯联苯来源解析研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2771-2776.
- [26] van den Berg M, Birnbaum L S, Denison M, *et al.* The 2005 World Health Organization re-evaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for Dioxins and Dioxin-like compounds[J]. Toxicology Sciences, 2006, **93**(2): 223-241.
- [27] 曹慧江, 杨芸, 朱建荣. 滴水湖夏季环流的三维数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2006, (4): 78-83, 90.
- [28] 计娜, 程和琴, 杨忠勇, 等. 近 30 年来长江口岸滩沉积物与地貌演变特征[J]. 地理学报, 2013, **68**(7): 945-954.
- [29] De Falco G, Magni P, Teräsuvuori L M H, *et al.* Sediment grain size and organic carbon distribution in the Cabras lagoon (Sardinia, western Mediterranean)[J]. Chemistry and Ecology, 2004, **20**(S1): 367-377.
- [30] 戴国华, 刘新会. 影响沉积物-水界面持久性有机污染物迁移行为的因素研究[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 224-230.
- [31] 郭宏伟. 多氯联苯在水体中迁移转化研究进展[J]. 气象与环境学报, 2009, **25**(4): 48-53.
- [32] Denys S, Gombert D, Tack K. Combined approaches to determine the impact of wood fire on PCDD/F and PCB contamination of the environment: A case study [J]. Chemosphere, 2012, **88**(7): 806-812.
- [33] Die Q Q, Nie Z Q, Liu F, *et al.* Seasonal variations in atmospheric concentrations and gas-particle partitioning of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs around industrial sites in Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **119**: 220-227.
- [34] 孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 等. 焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2515-2519.
- [35] 邵科, 尹文华, 朱国华, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4434-4439.
- [36] Lee R G M, Coleman P, Jones J L, *et al.* Emission factors and importance of PCDD/Fs, PCBs, PCNs, PAHs and PM₁₀ from the domestic burning of coal and wood in the U. K. [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(6): 1436-1447.
- [37] Liu G R, Zheng M H, Jiang X X, *et al.* Insights into the emission reductions of multiple unintentional persistent organic pollutants from industrial activities [J]. Chemosphere, 2016, **144**: 420-424.
- [38] Jiang K, Li L J, Chen Y D, *et al.* Determination of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in Chinese commercial PCBs and emissions from a testing PCB incinerator[J]. Chemosphere, 1997, **34**(5-7): 941-950.
- [39] 吴水平, 印红玲, 刘碧莲, 等. 废弃电容器封存点及旧工业场地多氯联苯的污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3277-3283.
- [40] Ishikawa Y, Noma Y, Mori Y, *et al.* Congener profiles of PCB and a proposed new set of indicator congeners[J]. Chemosphere, 2007, **67**(9): 1838-1851.
- [41] Kumar B, Kuamr S, Sharma C S. Ecotoxicological risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in bank sediments from along the Yamuna River in Delhi, India[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2013, **19**(6): 1477-1487.
- [42] Liu H X, Zhang Q H, Wang Y W, *et al.* Occurrence of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans and biphenyls pollution in sediments from the Haihe River and Dagu Drainage River in Tianjin City, China[J]. Chemosphere, 2007, **68**(9): 1772-1778.
- [43] Hu J Y, Wan Y, Shao B, *et al.* Occurrence of trace organic contaminants in Bohai Bay and its adjacent Nanpauw River, North China[J]. Marine Chemistry, 2005, **95**(1-2): 1-13.
- [44] 马召辉, 金军, 元学奎, 等. 太湖沉积物中多氯联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1136-1141.

- [45] 李光耀, 金军, 何畅, 等. 黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3358-3364.
- [46] Ren M, Peng P A, Chen D Y, *et al.* Patterns and sources of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs in surface sediments from the East River, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(1): 473-478.
- [47] Omwoma S, Lalah J O, Virani M, *et al.* Dioxin-like PCBs and PCDD/Fs in surface sediments near the shore of Winam Gulf, Lake Victoria[J]. Chemosphere, 2015, **118**: 143-147.
- [48] Cook P M, Erickson R J, Spehar R L, *et al.* Interim report on data and methods for assessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin risks to aquatic life and associated wildlife[R]. EPA/600/R-93/055. Duluth, MN: Office of Research and Development, 1993. 1-167.

欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2016 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行