

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征

白薇扬^{1,2}, 张成^{1,3}, 赵铮¹, 唐振亚¹, 王定勇^{1,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054; 3. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 以三峡库区长寿湖为调查对象, 采用网格法均匀设点采样分析, 并基于 ArcGIS 地统计模块, 研究了长寿湖水体不同形态汞浓度及其空间分布特征. 结果表明, 长寿湖表层水总汞浓度变化范围为 0.50 ~ 3.78 ng·L⁻¹, 平均值为 1.51 ng·L⁻¹; 总甲基汞浓度变化范围为 0.10 ~ 0.75 ng·L⁻¹, 平均值为 0.23 ng·L⁻¹. 表层水体各形态汞的块金效应值分别为总汞 50.65%、溶解态汞 49.80%、颗粒态汞 29.94% 和活性汞 26.95%, 具有中等程度空间自相关性, 表明在空间分布上一方面受水体内在属性的影响, 另一方面也与渔业养殖、工业活动、农业耕种等人为外源输入干扰因素有关. 表层水体溶解态甲基汞块金效应值 3.49%, 小于 25%, 表现很强的空间自相关性, 其分布主要受到水体内在环境因素等的控制. 各采样点水体总甲基汞占总汞的比例均较高, 均达到淡水湖泊和河流中总甲基汞占总汞的质量分数上限值 30%, 暗示长寿湖水体内在环境条件利于汞的甲基化.

关键词: 水体; 汞; 甲基汞; 地统计分析; 长寿湖

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2863-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.018

Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region

BAI Wei-yang^{1,2}, ZHANG Cheng^{1,3}, ZHAO Zheng¹, TANG Zhen-ya¹, WANG Ding-yong^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: An investigation on the concentrations and the spatial distribution characteristics of different species of mercury in the water body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir region was carried out based on the ArcGIS statistics module. The results showed that the concentration of the total mercury in Changshou Lake surface water ranged from 0.50 to 3.78 ng·L⁻¹, with an average of 1.51 ng·L⁻¹; the concentration of the total MeHg (methylmercury) ranged from 0.10 to 0.75 ng·L⁻¹, with an average of 0.23 ng·L⁻¹. The nugget effect value of total mercury in surface water (50.65%), dissolved mercury (49.80%), particulate mercury (29.94%) and the activity mercury (26.95%) were moderate spatial autocorrelation. It indicated that the autocorrelation was impacted by the intrinsic properties of sediments (such as parent materials and rocks, geological mineral and terrain), and on the other hand it was also disturbed by the exogenous input factors (such as aquaculture, industrial activities, farming etc). The nugget effect value of dissolved methylmercury (DMeHg) in Changshou lake surface water (3.49%) was less than 25%, showing significant strong spatial autocorrelation. The distribution was mainly controlled by environmental factors in water. The proportion of total MeHg in total Hg in Changshou Lake water reached 30% which was the maximum ratio of the total MeHg to total Hg in freshwater lakes and rivers. It implied that mercury was easily methylated in the environment of Changshou Lake.

Key words: water body; mercury; methylmercury; ArcGIS statistics; Changshou Lake

汞(Hg)作为一种特殊的有毒元素,对生态环境的影响及其毒性与其存在形态有关^[1]. 其中,甲基汞(MeHg)的毒性最强,能通过血脑屏障和胎盘引起中枢神经系统的永久性损伤和胎儿水俣病. 在水库环境中,水体汞可通过食物链传递和逐级放大,最终富集在高营养级鱼体内,从水体到鱼体汞的生物富集放大系数高达 10⁴ ~ 10⁷[2,3],水产品消费成为人体汞暴露的主要途径. 因此,关注人为频繁活动下水库的各形态汞在水体的空间分布特征,具有重要的现实意义.

自 1978 年 Campbell 应用地统计学方法研究土壤 pH 和沙砾浓度的空间变异开始^[4],地统计学不断在多种学科间交叉融合与应用,广泛应用于矿区、城市、流域、土壤等地理单元污染物的空间结构特

收稿日期: 2015-02-03; 修订日期: 2015-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430004); 国家自然科学基金项目(41373113, 41173116); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013C155)

作者简介: 白薇扬(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为水污染化学, E-mail: baiwy@cqut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

征分析中,并取得良好的效果^[5-8]. 为此,本文基于 GIS 地统计分析模块,研究了三峡库区典型支流上一个人工活动频繁的水库——长寿湖水体中不同形态汞的浓度及其空间分布特征,通过结果的可视化表达,直观显示了研究区域各形态汞的分布状况,以期为进一步研究汞在水体中的环境化学行为提供了有效手段,也可为水环境汞污染防治提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

长寿湖水库 (E107°14' ~ 107°25', N 29°54' ~ 30°50') 位于重庆西南 130 km, 于 1957 年建成, 是一兼具饮用、养殖、发电、旅游、防洪功能的大型人工湖泊. 水库流域面积 3 248 km², 龙溪河为主要供水河流, 水库水面面积 65 km², 总库容 10.27 × 10⁹ m³, 平均库容 7.48 × 10⁹ m³, 水力停留时间 0.38 a, 最大水深 40 m, 平均水深 15 m. 20 世纪 90 年代, 由于在长寿湖大规模开展网箱、网栏养鱼, 大量投放饲料, 并投放化肥、鸡粪等, 导致水体污染, 水体富营养化严重. 尽管 2004 年 4 月后, 已全面拆除长寿湖的网箱、拦网养殖, 水质已有所改善, 但目前水体仍呈中到富营养化状态^[9].

本次调查于 2013 年 6 月 27 ~ 29 日在长寿湖水库采用网格法选取了 16 个采样点, 采样点布设见图 1. 为分析方便, 将采样点划分为西北区 (W1、W2、W3、W4、S2)、东北区 (W9、W10、W11、S4)、湖心区 (W5、W6、S1、S5)、滞水区 (W7、W8、S3) 4 个区域. 16 个采样点均采集表层水体样品, 其中 S1 ~ S5 采样点从水体表层至湖底垂直深度按 4 m 间隔采集垂直断面水样. 所有水样均测定了总汞 (THg)、溶解态汞 (DHg)、颗粒态汞 (PHg)、活性

汞 (RHg) 和总甲基汞 (TMeHg)、溶解态甲基汞 (DMeHg)、颗粒态甲基汞 (PMeHg) 等形态汞浓度.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 水样采集

用 Nisiki 采样器在布设的 16 个样点采集表层水样, 同时在 S1 ~ S5 样点, 从表层到底层按每 4 m 深度取一个样. 采集的水样一部分注入高硼硅玻璃样品瓶, 用于分析 THg、RHg、TMeHg, 另一部分用 0.45 μm 滤膜 (Millipore) 过滤后注入高硼硅玻璃样品瓶, 用于分析 DHg、DMeHg. 水样放入冷藏样品箱, 运至实验室后存放冰箱中 0 ~ 4℃ 保存, 1 周内完成各形态汞的分析.

1.2.2 水样分析

水样分析参照 USEPA Method 1630 和 Method 1631 进行. 分别取未过滤水样和过滤水样经氯化溴氧化, 氯化亚锡还原, 金管富集-冷原子荧光光谱法 (CVAFS) 测定, 得出水样 THg、DHg 浓度, 将 THg - DHg = PHg. 取未过滤水样直接用氯化亚锡还原, 金管富集-CVAFS 测定, 得出水样 RHg 浓度. 分别取未过滤水样和过滤水样, 采样蒸馏-乙基化-GC-CVAFS 法测定, 分别得出 TMeHg、DMeHg 浓度, 将 TMeHg - DMeHg = PMeHg. 分析过程中的质量控制采用空白试验、平行样控制及加标回收率, 加标回收率为 82% ~ 116%, 并对 5% 的样品进行重复测定, 相对标准偏差 < 8%.

1.2.3 数据处理

数据管理采用 Microsoft Excel (2010), 正态分布检验采用 Origin 8.0 软件, 统计分析采用 SPSS 16.0, 空间分析和克里格插值采用 ArcGIS 9.3 完成.

2 结果与讨论

2.1 表层水体不同形态汞浓度及其空间分布特征

2.1.1 表层水体不同形态汞浓度

长寿湖不同形态汞浓度统计分析如表 1 所示. 表层水总汞浓度变化范围为 0.5 ~ 3.78 ng·L⁻¹, 平均值为 1.51 ng·L⁻¹; 总甲基汞浓度变化范围为 0.1 ~ 0.75 ng·L⁻¹, 平均值为 0.23 ng·L⁻¹. 不同形态汞浓度呈偏正态分布 ($P_{s-w}^* = 0.001$), 经对数转换后符合正态分布 [$P_{s-w}(\ln) = 0.6$].

从区域分布看, 湖心区 THg、TMeHg 浓度不仅高于另外 3 个区域, 同时, 该区域水体不同形态汞浓度的空间变异系数 (CV) 均大于 65%, 属于强变异性. 变异系数反映各采样点之间的平均变异程度,

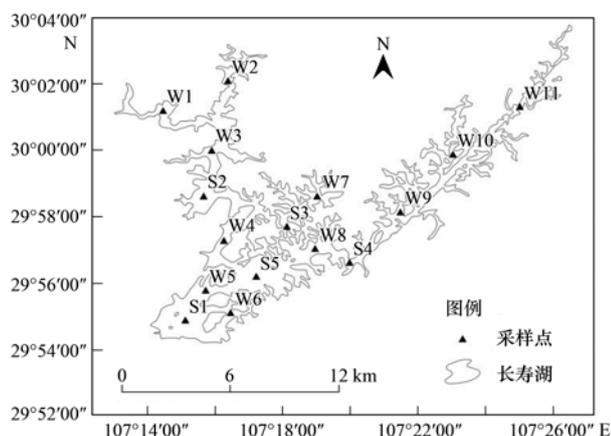


图 1 重庆长寿湖水库采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Changshou Lake

已有报道表明,由于湖泊不同地理区域受流域人为活动影响不同,汞浓度分布在区域上表现出较大的差异性^[9~11]. 长寿湖湖心区表层水体各形态汞的空间分布极不均匀,离散性相对较大. 其原因一是湖心深水区曾高密度网箱肥水养鱼,1997~2002 年间投放

过鸡粪、化肥高达9 000~15 000 t^[11],水体污染较为严重,残存的受污染的底泥仍对水体有影响;另一方面,湖心区处于库区两条主要支流的交汇处,受流域内工业废水和农业面源污染的双重影响,也是该区域各形态汞,特别是 MeHg 相对较高的主要原因.

表 1 长寿湖表层水体不同形态汞浓度及其分布

Table 1 Concentration and distribution of different Hg forms in surface water body of Changshou Lake

采样区域	汞形态	最小值/ng·L ⁻¹	最大值/ng·L ⁻¹	均值/ng·L ⁻¹	变异系数/%	标准差
西北区 (n=4)	THg	0.57	3.78	1.54	71.43	1.10
	DHg	0.12	2.54	1.09	85.32	0.93
	PHg	0.31	1.24	0.61	68.85	0.42
	RHg	0.23	0.54	0.36	36.11	0.13
	TMeHg	0.11	0.35	0.23	39.13	0.09
	DMeHg	0.09	0.18	0.13	38.46	0.05
	PMeHg	0.02	0.19	0.11	72.73	0.08
东北区 (n=4)	THg	0.50	2.69	1.48	60.81	0.90
	DHg	0.28	1.58	0.73	80.82	0.59
	PHg	0.14	1.15	0.75	62.67	0.47
	RHg	0.17	0.97	0.45	77.78	0.35
	TMeHg	0.11	0.27	0.17	41.18	0.07
	DMeHg	0.05	0.15	0.09	55.56	0.05
	PMeHg	0.04	0.13	0.09	44.43	0.04
湖心区 (n=5)	THg	0.81	3.11	1.65	66.06	1.09
	DHg	0.24	1.77	0.84	73.81	0.62
	PHg	0.12	1.47	0.80	71.25	0.57
	RHg	0.09	0.60	0.26	76.92	0.20
	TMeHg	0.10	0.75	0.27	77.78	0.21
	DMeHg	0.05	0.39	0.14	78.57	0.11
	PMeHg	0.05	0.36	0.13	92.31	0.12
滞水区 (n=3)	THg	0.70	1.7	1.28	40.63	0.52
	DHg	0.33	0.84	0.53	50.94	0.27
	PHg	0.29	1.12	0.75	56.00	0.42
	RHg	0.14	0.38	0.23	52.17	0.12
	TMeHg	0.19	0.23	0.21	9.52	0.02
	DMeHg	0.09	0.13	0.12	16.67	0.02
	PMeHg	0.06	0.11	0.09	33.33	0.03

2.1.2 表层水体不同形态汞空间分布特征

在 ArcGIS 9.3 地统计分析模块中,采用克里格插值法对研究区表层水体中各形态汞浓度进行插值,并绘制 THg、DHg、PHg、RHg 和 TMeHg、DMeHg、PMeHg 等 7 种形态汞浓度空间分布图,如图 2 所示.

从图 2 可见,长寿湖表层水体各形态汞浓度空间变化均较大. THg、DHg 和 RHg 的分布较近似,其浓度较高的区域位于长寿湖湖心区、西北区和东北区. THg 浓度从东北方向至西南方向呈逐渐升高趋势; THg、PHg 的低值大多分布在滞水区,这可能与滞水区位于水库深处,人为活动较少,湖汊、内湾众多,水力交换时间较长有关. TMeHg 和 DMeHg 分

布相类似,湖心区和西北区浓度较高. 水体 TMeHg 从西北方向至东北方向呈逐渐降低趋势,从北往南呈逐渐增高趋势.

从区域范围来看,湖心区各形态汞浓度明显高于其他区域,该区域位于水库中部,北部岛屿分布成片果园,西部和南部岛屿旅游业发达. 根据罗真富等^[12]对长寿湖沿岸土壤重金属浓度生态风险评价进行的调查显示,沿岸土壤汞潜在生态危害系数 E_i^i 高达 94.21,属于较强潜在生态危害,其中高值土壤潜在生态危害系数 E_i^i 主要集中在湖心区流域. 其次,西北区位于水库西北部,接受左侧经垫江县和梁平县的龙溪河来水. 河两岸分布长寿化工厂、村落以及大片果园,工业废水、生活污水以及农业面源污

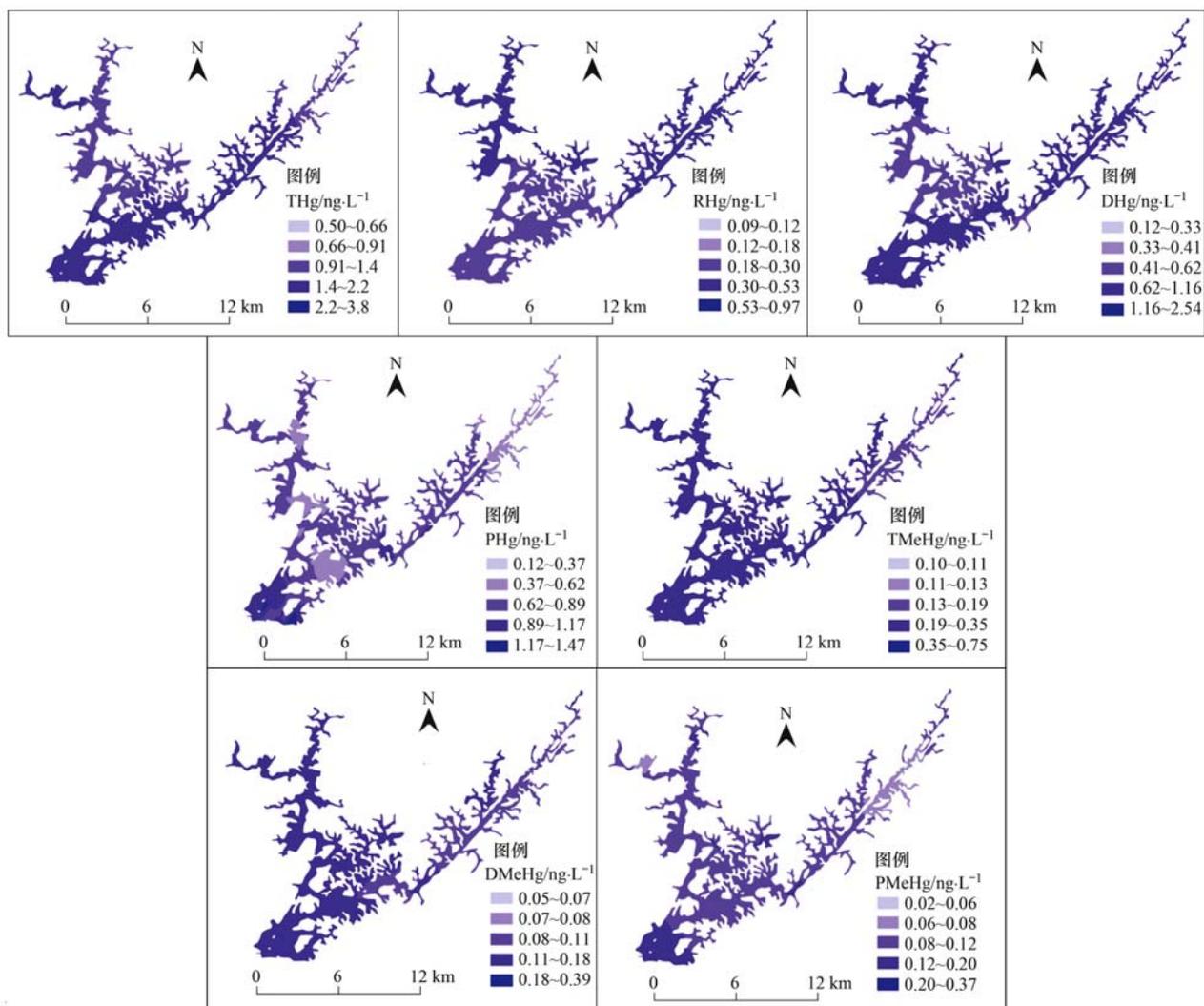


图 2 长寿湖水体中各形态汞的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of different Hg forms in water of Changshou Lake

染所带入的外源性污染物可能导致是各形态汞相对较高的主要原因。

半变异函数是地统计分析的特有函数,把统计相关系数的大小作为一个距离的函数,是地理学相近相似定理的定量量化^[13]。块金值(C_0)为测量误差和小于最小采样尺度的非连续性变异引起的值,属于随机性误差;基台值($C_0 + C$)表示系统内总变异,是随机性变异和结构性变异之和。块金效应 $C_0 / (C_0 + C)$ 表示随机因素块金值(C_0)引起的变异占系统总变异($C_0 + C$)的比值,反映了空间变异影响因素中区域因素(自然因素)和非区域因素(人为因素)的作用^[13]。

长寿湖表层水体 THg、DHg、PHg、RHg 和 TMeHg 的块金效应值分别为 50.65%、49.80%、29.94%、26.95% 和 26.97% (表 2),均在 25% ~ 75% 之间,具有中等程度空间自相关性,表明在空间

分布上一方面受沉积物等内在属性的影响,另一方面也与养殖业、工业活动、农业耕种等人为外源输入干扰因素有关^[14,15]。DMeHg 块金效应值仅为 3.49%,小于 25%,表现很强的空间自相关性,说明其主要产生于水库水体内部,其分布受到水体内在环境因素(如水体温度、pH、营养状态、沉积物厌氧/好氧条件)等控制。而 PMeHg 的块金效应值高达 82.28%,大于 75%,空间的自相关性很弱,表明 PMeHg 受人为活动影响较大,受外在因子控制,其分布与流域地表径流带入的外源输入有关^[16]。

已有的研究发现,重庆长寿湖周边地区土壤汞 ($0.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 富集较为严重,超过了土壤质量一级标准 ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17-20]。该流域农业活动密集,且土壤蓄水能力弱,坡耕地受径流冲刷严重^[21]。这些研究结果也间接地证明了长寿湖水体颗粒态汞分布受人为活动影响较大。

表 2 长寿湖水体汞的半变异函数参数

类型	模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金效应 $[C_0 / (C_0 + C)]\%$	有效变程/m
THg	指数	0.136	0.269	50.65	174
DHgg	球型	0.237	0.476	49.80	56
PHg	高斯	0.132	0.442	29.94	27
RHg	指数	0.087	0.323	26.95	174
TMeHg	指数	0.059	0.220	26.97	174
DMeHg	球型	0.010	0.277	3.49	174
PMeHg	指数	0.247	0.300	82.28	174

2.2 长寿湖水体不同形态汞的垂直分布特征

在长寿湖选取的 5 个垂直断面测得水体各形态汞分布特征如图 3 所示. 水体 THg、DHg、PHg 和

RHg 的垂直变化范围分别为 0.46 ~ 2.27、0.12 ~ 1.09、0.07 ~ 1.49 和 0.08 ~ 0.87 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 各区域水体 THg、DHg、PHg 在垂直方向呈现不同程度的

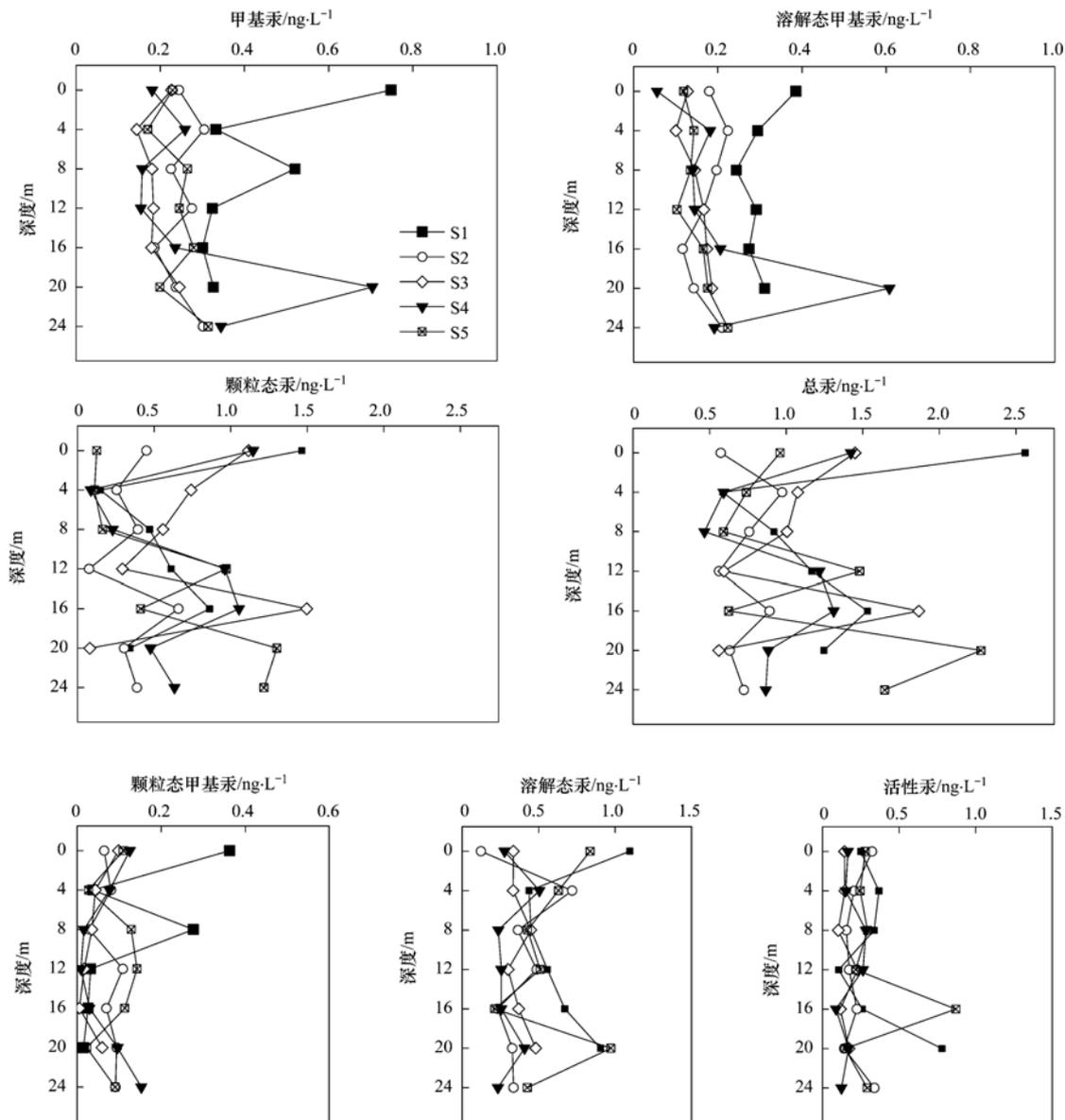


图 3 长寿湖水体各形态汞垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of different Hg forms in water of Changshou Lake

波动. 在各区域采样点随着水体深度增加, 颗粒物逐渐沉降造成 THg、PHg 逐渐降低, 随之可能由于水流本身扰动 THg、PHg 出现不同程度跃增, 在接近水库底部又重新趋于稳定的现象.

TMeHg、DMeHg 和 PMeHg 的变化范围分别为 0.14 ~ 0.75、0.05 ~ 0.60 和 0.01 ~ 0.36 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 除西北区以外, 各区域水体 TMeHg、DMeHg、PMeHg 垂直变化较小. 西北区入水龙溪河流域人为农业和工业活动频繁, 径流带入的甲基汞负荷随之增加^[22~24]; 同时, 该区域甲基汞又受到水体环境因素的影响, 因此, 在剖面上出现先降低后升高的变化趋势.

2.3 长寿湖水体中 DMeHg/MeHg、MeHg/THg 比值

DMeHg/MeHg、MeHg/THg 比值(质量分数)的高低可间接反映水体汞的甲基化能力^[25,26]. 一般而言, 淡水湖泊和河流中 MeHg 占 THg 的比例范围为 10% ~ 30%^[27]. 本次调查得出长寿湖垂直断面 DMeHg/MeHg、MeHg/THg 的比值如表 3 所示.

表 3 长寿湖水体中 DMeHg/MeHg 和 MeHg/THg 比值

Table 3 Ratios of DMeHg/MeHg and MeHg/THg in Changshou lake			
采样点	水深/m	DMeHg/MeHg/%	MeHg/THg/%
S2(西北区)	0	73.54	42.69
	4	87.16	31.28
	8	60.47	29.76
	12	62.46	49.02
	16	60.27	20.90
	20	69.75	37.58
平均值		69.60	36.00
S3(滞水区)	0	56.50	15.64
	4	69.71	13.42
	8	80.47	17.93
	12	90.74	31.03
	16	96.78	29.62
	20	75.69	43.83
平均值		78.30	25.20
S4(东北区)	0	30.73	12.71
	4	70.20	43.83
	8	89.52	33.71
	12	94.02	12.67
	16	87.43	17.99
	20	86.34	79.69
平均值		73.42	34.00
S5(湖心区)	0	52.02	23.85
	4	84.02	23.02
	8	51.28	44.74
	12	41.97	16.59
	16	59.34	33.82
	20	88.56	8.75
平均值		64.05	25.00

由表 3 可见, 长寿湖水体中 DMeHg 占 MeHg 比例较高, 各区域平均值均在 60% 以上. 这与蒋红梅^[28]在乌江渡水库发现其水体 MeHg 是以 PMeHg 为主的研究结果不同. 乌江渡水库初级生产力水平较低, 因此, 汞的甲基化率也相对较低, 水体中 MeHg 的主要来源是随地表径流入库的相对富含 MeHg 的颗粒物^[28]. 而长寿湖水库已运行 50 余年, 曾肥水养鱼多年, 投放了大量的有机物质及 N、P 养分, 水库初级生产力水平较高, 有机质的降解消耗水中大量氧气, 使得水库底部形成厌氧环境, 同时, 水体微生物内源代谢活动强烈^[29], 在这两种因素的共同作用下, 利于 MeHg 的生成.

而长寿湖各区水样的 MeHg/THg 平均比值在 25.00% ~ 36.00%, 均接近淡水湖泊和河流中总甲基汞占总汞的比例范围的上限值 30%, 而多个断面水样 MeHg/THg 比值超过 30%, 最高达 79.69%, 这暗示长寿湖水体内在环境条件利于汞的甲基化.

3 结论

(1) 长寿湖表层水总汞浓度变化范围为 0.5 ~ 3.78 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 1.51 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 总甲基汞浓度变化范围为 0.1 ~ 0.75 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 0.23 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) 表层水体各形态汞的块金效应值分别为总汞 50.65%、溶解态汞 49.80%、颗粒态汞 29.94% 和活性汞 26.95%, 表明各形态汞的分布, 一方面受沉积物等内在属性的影响, 另一方面也与外源输入有关; 溶解态甲基汞主要来源于水库水体内部汞的甲基化; 而颗粒态甲基汞则主要来源于流域地表径流带入的外源输入.

(3) 长寿湖水体 MeHg 占 THg 的比例总体较高, 而 DMeHg 占 MeHg 的比例绝大部分均在 50% 以上. 这一结果暗示长寿湖水体内在环境条件利于汞的甲基化.

参考文献:

- [1] Lindqvist O, Johansson K, Bringmark L, *et al.* Mercury in the Swedish environment-recent research on causes, consequences and corrective methods [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, **55**(1-2): xi-261.
- [2] Todorova S G, Driscoll C T, Effler S W, *et al.* Changes in the long-term supply of mercury species to the upper mixed waters of a recovering lake [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **185**: 314-321.
- [3] Sullivan K A, Mason R P. The concentration and distribution of mercury in Lake Michigan [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **213**(1-3): 213-228.

- [4] Campbell J B. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, **42**(3): 460-464.
- [5] 任伯帆, 刘斌全, 马宏璞, 等. 锰矿区雨水径流中重金属含量及污染水平的空间结构特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1730-1737.
- [6] 刘玉通, 方振东, 杨琴, 等. 基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1725-1730.
- [7] 曹尧东, 孙波, 宗良纲, 等. 丘陵红壤重金属复合污染的空间变异分析[J]. 土壤, 2005, **37**(2): 140-146.
- [8] 李俊祥, 王玉洁, 宋永昌, 等. 基于 GIS 的上海市河道及其水污染空间特征分析[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 632-635.
- [9] Cossa D, Sanjuan J, Noel J. Mercury transport in the waters of the Strait of Dover[J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, **28**(6): 385-388.
- [10] Gray J E, Fey D L, Holmes C W, *et al.* Historical deposition and fluxes of mercury in Narraguinnep Reservoir, southwestern Colorado, USA[J]. Applied Geochemistry, 2005, **20**(1): 207-220.
- [11] 车建成. 践行科学发展 推进渔业与碧水双赢——长寿湖渔业发展对水环境影响 30 年浅析[J]. 三峡环境与生态, 2013, **35**(增刊): 60-61.
- [12] 罗真富, 谭德军, 谢洪斌, 等. 重庆长寿湖周边地区土壤重金属污染评价[J]. 湖北农业科学, 2012, **51**(1): 30-34.
- [13] 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(4): 363-370.
- [14] Hall B D, St Louis V L, Rolffhus K R, *et al.* Impact of reservoir creation on the biogeochemical cycling of methyl mercury and total mercury in boreal upland forests[J]. Ecosystems, 2005, **8**(3): 248-266.
- [15] Nguyen H L, Leermakers M, Kurunczi S, *et al.* Mercury distribution and speciation in Lake Balaton, Hungary [J]. Science of the Total Environment, 2005, **340**(1-3): 231-246.
- [16] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4095-4102.
- [17] 王业春, 雷波, 杨三明, 等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 612-617.
- [18] 张雷, 秦延文, 赵艳明, 等. 三峡澎溪河回水区消落带岸边土壤重金属污染分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3021-3029.
- [19] 储立民, 常超, 谢宗强, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(1): 192-196.
- [20] 谢小进, 康建成, 闫国东, 等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1110-1117.
- [21] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 等. 三峡库区消落区水体-沉积物重金属迁移转化特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3481-3487.
- [22] Wang Q, Feng X B, Yang Y F, *et al.* Spatial and temporal variations of total and methylmercury concentrations in plankton from a mercury-contaminated and eutrophic reservoir in Guizhou Province, China [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2011, **30**(12): 2739-2747.
- [23] Gray J E, Hines M E. Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA [J]. Chemical Geology, 2009, **258**(3-4): 157-167.
- [24] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [25] 冉祥滨, 于志刚, 陈洪涛, 等. 三峡水库蓄水至 135 m 后坝前及香溪河水域溶解无机汞分布特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1175-1179.
- [26] 赵健. 长江口滨岸潮滩汞的环境地球化学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [27] Feng X B, Bai W Y, Shang L H, *et al.* Mercury speciation and distribution in Aha Reservoir which was contaminated by coalmining activities in Guiyang, Guizhou, China[J]. Applied Geochemistry, 2011, **26**(2): 213-221.
- [28] 蒋红梅. 水库对乌江河流汞生物地球化学循环的影响[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.
- [29] Yan H Y, Feng X B, Shang L H, *et al.* The variations of mercury in sediment profiles from a historically mercury contaminated reservoir, Guizhou province, China[J]. Science of the Total Environment, 2008, **407**(1): 497-506.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行