

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价

张家泉^{1,2}, 田倩¹, 许大毛^{1,2,3}, 占长林^{1,2*}, 刘婷^{1,2}, 姚瑞珍^{1,2}, 刘先利^{1,2}, 肖文胜^{1,2}

(1. 湖北理工学院环境科学与工程学院, 黄石 435003; 2. 矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室, 黄石 435003; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 于2014年4月采集大冶湖表层水和表层沉积物, 用原子吸收分光光度法测定其重金属含量, 并基于健康风险评价模型和潜在生态风险指数法开展表层水和沉积物重金属污染的潜在健康风险和生态风险评价。结果表明, 表层水和沉积物重金属(Ni、Cd、Cu和Pb)含量平均值分别为49.27、2.19、12.18、12.13 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和78.46、77.13、650.13、134.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。富集系数显示, Cd、Cu和Pb均为重度富集, 尤其是Cd累积最为明显。与国内典型湖泊重金属污染相比, 表层水和沉积物中重金属元素含量均相对较高。表层水和沉积物重金属元素均表现为湖湾处含量较高, 中部含量较均匀的分布规律, 其来源主要受多种人为活动污染。环境风险评价显示, 重金属类化学物质通过饮水途径产生健康风险范围为 $9.77\text{E}-08 \sim 1.63\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$, Ni和Cd是水环境健康风险的优先管理对象。沉积物重金属的潜在生态风险高低为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni}$, 其中Cd是生态风险的贡献元素。

关键词: 大冶湖; 表层水; 沉积物; 重金属; 污染特征; 风险评价

中图分类号: X131; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2355-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610160

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake

ZHANG Jia-quan^{1,2}, TIAN Qian¹, XU Da-mao^{1,2,3}, ZHAN Chang-lin^{1,2*}, LIU Ting^{1,2}, YAO Rui-zhen^{1,2}, LIU Xian-li^{1,2}, XIAO Wen-sheng^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control and Remediation, Huangshi 435003, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The surface water and surface sediments were collected from Daye Lake in April 2014. The concentrations of heavy metals were determined by atomic absorption spectroscopy. The pollution potential health risk and ecological risk of heavy metals in water and sediment were assessed by the health risk assessment model and the potential ecological risk index method. The results showed that the concentrations of the heavy metals (Ni, Cd, Cu and Pb) was 49.27 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 2.19 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 12.18 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 12.13 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (water) and 78.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 77.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 650.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 134.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (sediment). Enrichment coefficient indicated that the enrichment of Cd, Cu and Pb was more serious, especially the accumulation of Cd was the most obvious. Compared to typical lakes in China, the contents of heavy metals in water and sediment were relatively high. The spatial pollutant distribution of the heavy metals in water and sediment all presented that the concentrations of the heavy metals were relatively higher in east and west of Daye Lake, relatively more uniform in the middle, and their origins were mainly from human activities. The results of environmental risk indicated that the carcinogens and chemical non-carcinogens health risk values of heavy metals by drinking water pathway were $9.77\text{E}-08 \sim 1.63\text{E}-05 \text{ a}^{-1}$. Therefore, the pollution of Ni and Cd should be the primary control target for environmental health risk management. The descending order of pollution degree of four metals in sediment was $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni}$, and Cd was the main contributor of the potential ecological risk elements.

Key words: Daye Lake; surface water; sediment; heavy metals; pollution characteristics; risk assessment

城市内陆湖泊水体重金属污染问题已受到广泛关注^[1~3], 大多城市湖泊重金属污染的形势已迫在眉睫, 严重制约了城市的社会经济发展和生态环境建设^[4]。重金属是环境中一类具有持久累积性、较强生物毒性及食物链富集的放大效应的典型污染物, 通过多种途径(如废水排放、大气沉降、地表径流等)进入湖泊这类较为封闭的水体后很难被排出, 绝大部分吸附于悬浮物表面或沉降到沉积物中,

并参与湖泊在生态系统中有毒有害污染物进行地球化学行为(迁移、转化、富集、降解等)以及物质循

收稿日期: 2016-10-23; 修订日期: 2017-01-13

基金项目: 湖北理工学院优秀青年科技创新团队资助计划项目(13xtz07); 湖北省科技支撑计划项目(对外科技合作类)(2014BHE0030); 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201725); 国家自然科学基金项目(41603117)

作者简介: 张家泉(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿冶环境污染化学, E-mail: j. zhang@hbpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chl_zhan@126.com

环过程(生物放大或生物富集等),会对人体健康和生态安全造成长期且持久的潜在环境健康和生态风险^[5-7]。有研究表明,湖泊沉积物在 pH 值、氧化还原电位、盐度、温度等水-沉积物界面理化条件改变下会使其束缚的重金属向上覆水中重新释放,成为湖泊水质污染的内源^[8-11]。此外,作为记载湖泊环境演化历史的良好介质,湖泊沉积物的重金属蓄积量不仅反映沉积物对上覆水体影响的持久能力,还全面衡量城市湖泊周边工农业生产活动对湖泊环境质量影响的状况^[12],是水环境安全的敏感指示剂^[13]。因此,开展湖泊重金属污染分布、来源、赋存形态及生态风险研究^[7, 14, 15],能有效判断重金属的人为污染程度,并有助于辨别环境潜在风险源。

大冶湖流域作为我国典型的有色金属冶炼行业基地之一,地处长江中下游多金属成矿带,位于冶金走廊腹地-湖北省大冶市东南部。近年来,大冶湖重金属污染问题已成为人们关注的焦点。因此,本文以湖北省中型浅水湖泊大冶湖为研究对象,基于表层水和沉积物典型重金属元素 Ni、Cd、Pb 和 Cu 的污染特征;采用水环境健康风险评估模型和潜在生态风险指数法,定量评估湖泊重金属污染环境风险,以甄别湖泊水环境发生“二次污染”优先控制的潜在风险源;旨在为政府部门后续开展沉积物清淤规模化工程、流域生态风险管理以及环大冶湖生态新区建设提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2014 年 4 月,在实地采样过程中,结合水文条件、湖泊形状、周边工业布局、排污口分布及支流汇水等实际情况,运用 GPS 对采样点进行定位导航,选取 11 个典型采样点,采样点位置如图 1 所示。采样方法使用多点混合法(同一采样点采集 5~6 个平行样,现场混匀为 1 个样品),每个样点区的范围约为 4 m×4 m。表层水(水下约 50 cm)采集使用 500 mL 聚乙烯塑料瓶,取样前,对采样瓶预先用王水浸泡并用蒸馏水清洗;取样时,用表层水润洗 3~4 次。沉积物样品使用重力抓斗采泥器采集沉积物表层 0~10 cm(去除垃圾杂物),置于聚乙烯袋中现场混匀。所有样品采集完后,密封并记录编号、取样位置,立即运回实验室,低温保存。

1.2 样品处理、分析及质量控制

水样带回实验室后,通过“王水+双氧水”加热浓缩,经过滤并测其重金属含量。沉积物样品置于

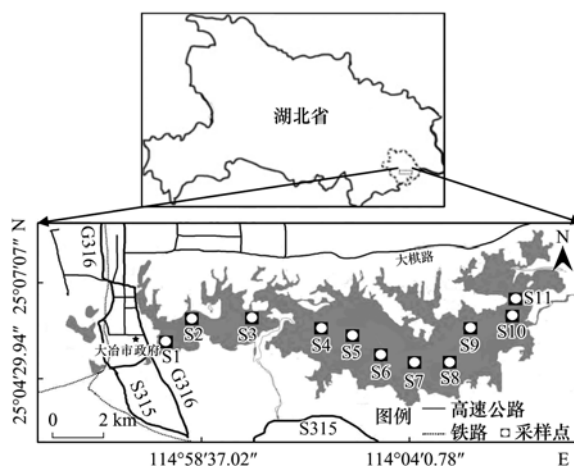


图 1 采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites

通风处自然风干后,经碾碎、剔除杂质、研磨、筛分等前期处理操作,用传统的封闭式混合酸($\text{HCl-HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$)法高温消解后,使用火焰原子吸收分光光度计(美国 Varian AA240)测定样品中重金属污染元素 Ni、Cd、Cu 和 Pb。在实验过程中供试试剂均为优级纯,所用器皿均用王水浸泡 24 h 以上。同时,质量保证采用三平行样和加标回收法;其中,样品分析数据的标准偏差(RSD)均在 10% 以内;对国家土壤成分分析标准物质(GSS-3、GSS-5)进行回收率分析时,各元素回收率在 86%~115% 之间。所有数据均基于 Excel 2013、SPSS 22.0 和 Origin 9.0 等软件进行统计分析。

1.3 环境风险评价

1.3.1 水环境健康风险评价

水环境中重金属等毒性物质对人体主要产生致癌效应和非致癌效应的健康风险,依据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)共同编制的全面评价化学物质致癌性可靠程度的分类系统可知,本研究中 Cd 为化学致癌物, Ni、Cu 和 Pb 为非化学致癌物。重金属人体暴露途径主要有直接接触、摄入水体中的食物和直接饮用等,其中饮用途径被认为是对敏感人群健康造成威胁最直接和最主要的暴露途径^[16, 17]。目前,水环境健康风险评价多以 1983 年美国科学院(US NAS)编制的危害鉴定、剂量毒性评估、暴露评价以及风险表征四步法程序为范式^[18]。本研究采用美国环境保护署(US EPA)推荐的水环境健康风险评价模型,主要考虑通过饮用途具有致癌效应和非致癌效应的重金属类物质分别进入成人和儿童体内所致的致癌和非致癌健康风险^[19],计算公式分别为(1)和(2)式^[20-22]。

$$R_c = [1 - \exp(-D_i \times Q_i)] / 76.5 \quad (1)$$

$$R_n = \left(\frac{D_i}{RfD_i} \times 10^{-6} \right) / 76.5 \quad (2)$$

式中, R_c 为化学致癌物质通过饮用水途径产生的年平均健康风险 (a^{-1}); R_n 为非致癌物质通过饮用水途径产生的年平均健康风险 (a^{-1}); D_i ($D_i = A_i \times c_i / BW$) 为毒性物质 i 通过饮用途径的单位体重日均暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; A_i 为平均饮水量 ($L \cdot d^{-1}$); 儿童每日平均饮水为 $0.7 L \cdot d^{-1}$; 成人每日平均饮水量为 $1.0 L \cdot d^{-1}$; c_i 为水体中各污染物质的实测浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); BW 为人均体重 (kg); 儿童人均体重为 $15.9 kg$, 成人人均体重为 $56.8 kg$ ^[23]; Q_i 为化学致癌物质 i 通过饮用水途径产生的致癌强度系数 [$kg \cdot (d \cdot mg)^{-1}$]; Cd 的强度系数 (Q_i) 为 $6.1 kg \cdot (d \cdot mg)^{-1}$ ^[21]; 76.5 指黄石市“十二五”期间人均期望寿命 (a)^[24]; RfD_i 为非致癌物质 i 通过饮用水途径摄入的参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; Ni 、 Cu 和 Pb 的参考剂量 (RfD_i) 分别为 $2.0E-03$ 、 $5.0E-03$ 和 $1.4E-03 mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$ ^[21].

1.3.2 生态风险评价

采用瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出潜在生态风险指数法 (potential ecological risk index, RI)^[25] 来评价大冶湖表层沉积物中重金属生态风险, 该方法基于沉积学原理, 综合考虑了多种影响因素 (重金属含量、毒性水平、水体对金属污染的敏感性及多元素协同作用等), 被国内外学者广泛用于评价沉积物中重金属的生态危害程度^[26, 27]. 根据这一方法, 计算公式为 (3) 式^[25].

$$RI = \sum_{j=1}^n E_r^i = \sum_{j=1}^n T_r^i \cdot C_r^i \quad (3)$$

式中, RI 为潜在生态危害指数; E_r^i 为单个重金属的潜在生态危害系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数; Ni 、

Cd 、 Cu 和 Pb 毒性系数 T_r^i 分别为 5.0 、 30.0 、 5.0 、 5.0 ^[25]; C_r^i 为重金属的富集系数 ($C_r^i = C_s^i / C_n^i$); C_s^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为计算所需的参照值, 本研究以长江沉积物化学元素背景值作为参比值; Ni 、 Cd 、 Cu 、 Pb 的参比值分别为 33.00 、 0.25 、 35.00 、 $27.00 mg \cdot kg^{-1}$ ^[28].

2 结果与讨论

2.1 重金属污染水平

大冶湖表层水和沉积物中 4 种重金属元素 (Ni 、 Cd 、 Pb 和 Cu) 的污染水平如图 2 所示. 从中可以看出, 表层水中重金属含量平均值排序为 $Ni (49.27 \mu g \cdot L^{-1}) > Cu (12.18 \mu g \cdot L^{-1}) > Pb (12.13 \mu g \cdot L^{-1}) > Cd (2.19 \mu g \cdot L^{-1})$; 以平均含量与大冶城市内湖 (三里七湖、尹家湖和红星湖) 相比均有明显的差异^[29], 主要是该湖泊与大冶市其他城市湖泊重金属外源输入差异所导致. 沉积物中重金属污染顺序为 $Cu (650.13 mg \cdot kg^{-1}) > Pb > (134.22 mg \cdot kg^{-1}) > Ni (78.46 mg \cdot kg^{-1}) > Cd (77.13 mg \cdot kg^{-1})$, 与大冶大港河水系沉积物中相应的重金属元素含量对比发现^[30], Ni 和 Cd 的平均含量甚高, 主要原因可能是大冶湖流域长期工业活动 (矿山开采、有色金属冶炼、造纸、电池制造和电镀等行业) 和农业活动 (化肥施用、畜禽粪便及养殖饲料) 以及其他人类活动造成多种外源输入对其污染的贡献.

采用重金属实测值与工业化以前长江系沉积物中重金属的平均含量^[28] 的比值即富集系数 (EF) 来判断沉积物中重金属元素的富集程度及人为影响状况. 各采样点重金属的富集系数如图 3 所示. 沉积物中各重金属富集系数大小顺序为 $Cd (308.51) > Cu (18.58) > Pb (4.97) > Ni (2.38)$. 已有研究指出^[30], 若 EF 大于 3, 属于严重污染等级. 除所有采

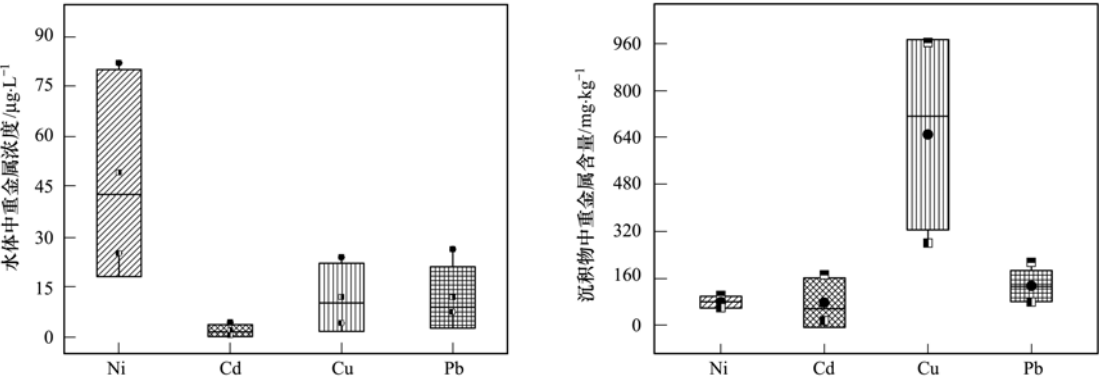


图 2 大冶湖表层水和沉积物中重金属含量
Fig. 2 Contents of heavy metals in surface water and sediment in Daye Lake

样点中 Ni 的 EF 值小于 3 和 S3 点位中 Pb 的 EF 值 (2.94) 接近 3 外,各采样点沉积物中重金属的 EF 值均大于 3,存在重度富集现象;尤其是 Cd 累积最为典型,其 EF 值介于 60.88 ~ 688.76,在研究区沉积物中的含量变化范围为 15.22 ~ 172.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

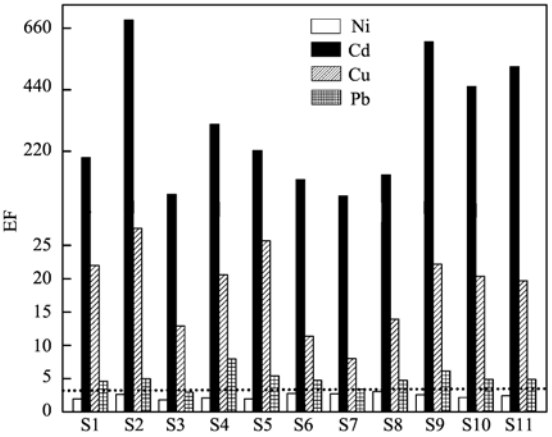


图3 沉积物重金属富集系数
Fig. 3 Enrichment factors (EF) of heavy metals in sediment

表 1 大冶湖表层水和沉积物中重金属含量与其他湖泊的比较¹⁾

湖泊 元素	表层水/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$				沉积物/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
	Ni	Cd	Cu	Pb	Ni	Cd	Cu	Pb
大冶湖	49.27	2.19	12.18	12.13	78.46	77.13	650.13	134.22
梁子湖 ^[32]	7.7	—	50.7	0.9	34.4	—	63.9	40.4
洞庭湖 ^[33]	—	ND	ND	ND	—	7.48	49.9	18.82
红枫湖 ^[34]	—	0.11	1.24	4.63	—	1.5	90	43.5

1) “—”表示该重金属元素未有文献报道;“ND”表示未检出

2.3 重金属空间分布特征

大冶湖表层水和沉积物中重金属元素 (Ni、Cd、Cu 和 Pb) 的空间分布分别见图 4 和图 5。从图 4 来看,在大冶湖流域周边工农业活动频繁、水土流失严重、环保设施建设相对滞后以及有明显空间差异的污染外源 (Ni、Cd、Pb 和 Cu 等) 输入等背景因素的影响下,研究区域内表层水和沉积物重金属含量空间分布均具有明显的区域差异性。表层水中重金属含量的变化范围依次为 25.27 ~ 82.09、0.81 ~ 4.63、4.44 ~ 24.12、7.7 ~ 26.52 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Ni、Cd、Cu、Pb),其平均含量均低于地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) III 类水质浓度限值;说明随着城市工业布局规划、产业结构调整及生态环境建设等举措的推进,水质得到明显好转。沉积物中 Ni、Cd、Cu 和 Pb 的含量变化范围分别为 59.75 ~ 101.10、15.22 ~ 172.19、281.01 ~ 964.58、79.32 ~ 214.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其平均含量分别是长江系沉积物重金属元素背景值的 2.38、308.51、18.58、4.97 倍。表层

是最主要的污染贡献元素,表明大冶湖沉积物 Cd 重度污染除受大冶湖流域内过度施用农药和化肥等农业活动输入影响外,很大程度上受有色金属冶炼、化肥使用及矿山开采等活动废水排放的影响。

2.2 与其他湖泊的重金属污染比较

据黄石市 2015 年统计年鉴显示^[31],大冶湖流域周边黑色金属、有色金属等矿冶活动发达,有 345 家企业排放废水,重点源 115 家,易造成大冶湖 Ni、Cd、Pb 和 Cu 等多种重金属元素复合污染风险。与国内其他湖泊水体和沉积物的研究报道相比 (表 1),除大冶湖表层水中 Cu 的含量低于梁子湖外,表层水和沉积物中 4 种重金属元素含量均高于国内其他湖泊,尤其是沉积物中 Cu 和 Pb 的含量分别是洞庭湖相应重金属元素含量的 13.03 倍和 10.31 倍。说明研究区域重金属含量明显受到各种人为活动污染的影响,应高度重视其潜在污染环境风险对人体健康及生态安全构成现实威胁的可能性。

水中 Ni、Cd 和 Pb 在 S1 点位的含量最高,而其最低含量均分布于 S7 点位;沉积物中 Cd 和 Cd 的含量在 S2 点位中最高,而 S7 点位中 Cd 和 Cu 的含量最低。原因在于,大冶湖湖湾区域 (S1 和 S2) 经济活动活跃,受人为污染的影响较大;中部 (S7) 水流平缓、水流搬运能力较弱、环境条件较稳定,重金属污染很大程度上取决于湖泊沉积物内源的再次释放。

重金属 (Ni、Cd、Pb 和 Cu) 元素污染分布特征表现为:大冶湖表层水和沉积物中重金属元素污染主要分布在市政污水和工业废水排污口较集中的湖湾区域,而中部重金属污染总体趋势一致;究其原因,大冶湖湖湾 (S1、S2 和 S11) 周边分散着多家大型国有高污染矿冶企业以及大量“五小” (小选矿、小洗矿、小冶炼、小红砖、小化工) 企业。此外,大冶湖流域植被覆盖率低,山体裸露,地质灾害时有发生,水域面积不断缩小,人口数量不断增加,同样也会直接导致大冶湖湖湾处重金属污染更为严重。由于大冶湖是半封闭的水体,流动性及与其他水体交

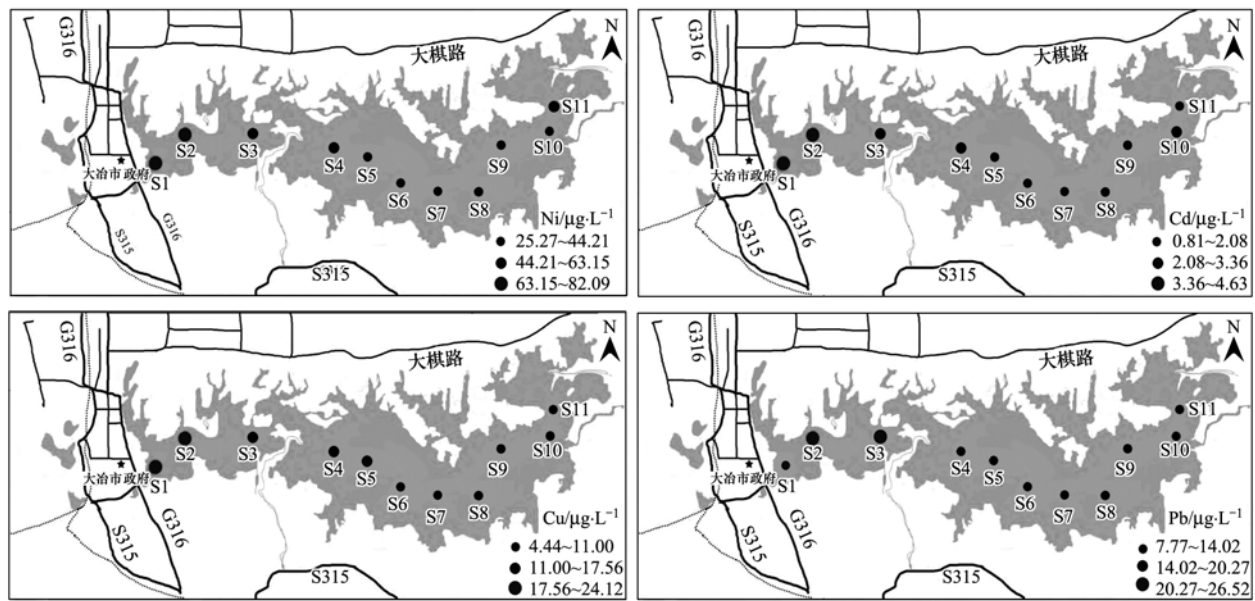


图4 大冶湖表层水中各重金属元素空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals contents in surface water of Daye Lake

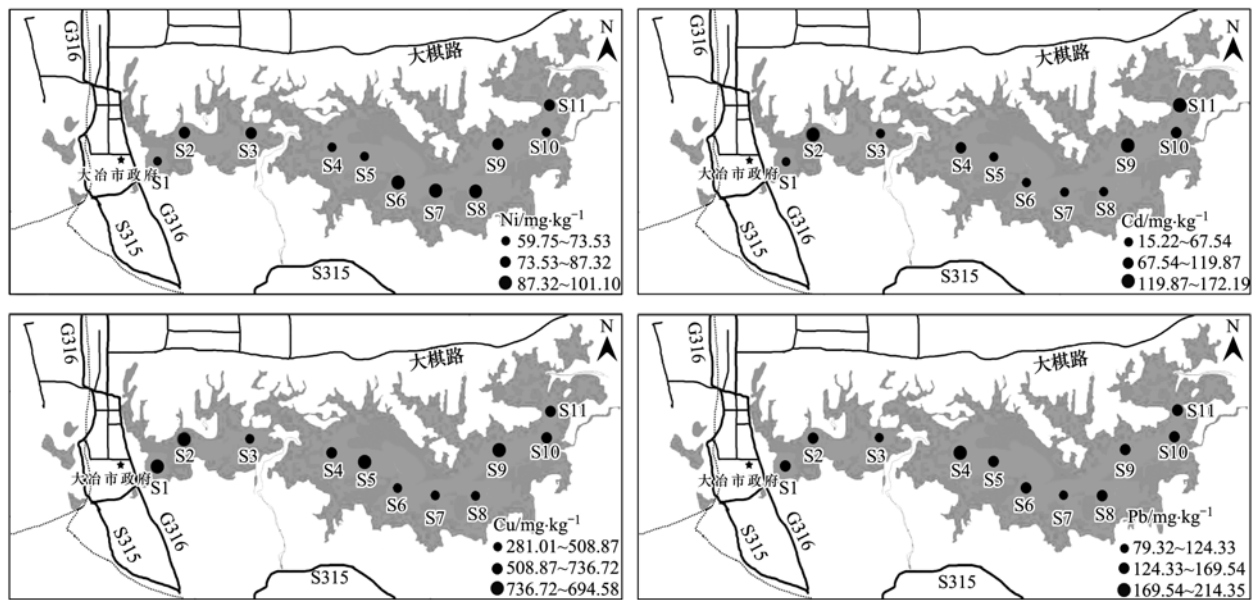


图5 大冶湖沉积物中各重金属元素空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of heavy metal contents in sediments of Daye Lake

换能力低;大量重金属污染物主要以悬浮物的形式,通过各种途径进入湖泊水体后,随着水流的搬运以及重力沉降作用,最终迁移至湖泊沉积物中,导致大冶湖中部水体重金属分布较均匀.

2.4 重金属元素相关性及来源分析

本研究使用 SPSS 22.0 统计分析软件对大冶湖表层水和沉积物中重金属元素(Ni、Cd、Cu 和 Pb)含量进行 Pearson 相关系数、主成分及其成分矩阵等多元统计分析,结果如表 2 所示.

重金属元素含量之间显著的相关性是推测它们

是否具有相同的来源或地球化学过程的重要依据^[35]. 相关性分析结果表明(表 2),水体中除重金属组合 Cd-Pb(0.671)呈显著相关($P < 0.05$)外, Ni-Cd(0.934)、Ni-Cu(0.933)、Ni-Pb(0.817)、Cd-Cu(0.968)和 Cu-Pb(0.740)之间均呈极显著相关($P < 0.01$);说明大冶湖表层水中重金属污染同源的可能性大. 沉积物中, Cd-Cu(0.732)之间呈显著相关($P < 0.05$),其余重金属组合(Ni-Cd、Ni-Cu、Ni-Pb、Cd-Cu 和 Cu-Pb)的相关性均较差;从沉积物重金属的富集特征可知,沉积物中重金属的来源差

异较大,主要受大冶湖流域内工农业生产活动、城镇工业废水和生活污水混合排放以及交通运输污染等各种人为污染的影响。

经 KMO 检验(0.673)和 Bartlett 球度检验($P < 0.001$)表明,总体样本(Ni、Cd、Cu 和 Pb 元素含量)适宜进行主成分分析. 判别环境介质(水体、土壤、大气降尘、沉积物等)中重金属来源的最有效方法是主成分分析(PCA)法^[6, 36, 37]. 主成分分析结果表明(表 2),水体和沉积物中 4 种重金属元素(Ni、Cd、Cu 和 Pb)分别辨识出特征值均大于 1 的 2 个主成分,分别为 98.054% 和 81.495%,完全代表总变量的绝大部分信息;且旋转后的累积方差贡献率均无明显变化,也满足主成分分析原则. 从旋转后主成分因子载荷量(表 2)可以看出,主成分 1(PC1)分别反映了水体和沉积物中重金属元素 61.697% 和 51.378% 的组成信息,对重金属来源起决定性的作用. 水体中 Ni(0.81)-Cd(0.94)-Cu(0.89)和沉积物中 Cd(0.89)-Cu(0.87)-Pb(0.76)之间的距离较近,说明了水体和沉积物中这 3 种重金属

污染来源相同的可能性较大,是通过共沉淀或吸附富集在沉积物中,与重金属元素相关性分析结果一致. 大冶湖表层水和沉积物中 Cd 和 Cu 在同一主成分上均具有较高载荷,表明大冶湖尺度(local scale)上受到人为污染的影响^[38, 39]. 结合大冶湖流域周边的空间工业布局,Cd 和 Cu 为大冶湖的特征污染物,其外源供给主要是其周边分布的冶炼厂、造纸厂、矿厂、矿山排放的工业废水(包括冶金、选矿和洗矿等)、经地表径流汇入大量被关停的“五小”污染企业废弃地中重金属污染物、农药与化肥的大量使用以及畜禽粪便和养殖饲料. 因此,认为 PC1(主成分 1)代表着周边工农业生产活动的人为污染. 值得注意的是,主成分 2(PC2)上均具有高正载荷的是水体中 Pb 和沉积物中 Ni,分别揭示了水体和沉积物中总变量的 36.357% 和 30.117%,一般 Ni 源于金属冶炼废水的排放^[40]. 此外,尽管无铅汽油的推广使用,但沉积物 Pb 污染的来源主要是机动车数量的增加、汽车轮胎磨损及发动机润滑油的燃烧^[41]. 因此,认为 PC2 代表着工业废水和交通运输污染.

表 2 表层水和沉积物中重金属含量的相关系数、主成分及成分矩阵¹⁾

Table 2 Correlation coefficients, principal component analysis and component matrix of heavy metals contents in the surface water and sediment

介质	元素	初始因子载荷		旋转后因子载荷(最大方差)		重金属含量的相关系数(Pearson)			
		主成分 1	主成分 2	主成分 1	主成分 2	Ni	Cd	Cu	Pb
表层水	Ni	0.98	-0.01	0.81	0.56	1	0.934**	0.933**	0.817**
	Cd	0.96	-0.26	0.94	0.33		1	0.968**	0.671*
	Cu	0.97	-0.17	0.89	0.43			1	0.740**
	Pb	0.85	0.52	0.39	0.92				1
	特征值	3.54	0.38	2.47	1.45				
	累积贡献率/%	88.553	98.054	61.697	98.054				
沉积物	Ni	-0.02	0.99	-0.02	0.99	1	0.09	-0.34	-0.05
	Cd	0.89	0.14	0.89	0.14		1	0.732*	0.45
	Cu	0.87	-0.36	0.87	-0.36			1	0.53
	Pb	0.76	-0.02	0.76	-0.02				1
	特征值	2.18	1.82	2.13	1.13				
	累积贡献率/%	54.442	81.495	51.378	81.495				

1) **表示在 0.1 水平(双侧)上显著相关(极显著相关);*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关(显著相关);同列黑体数字表示所对应的金属元素属于相同主成分

2.5 健康风险评价

基于水环境健康风险评价模型及参数,计算出大冶湖水体中化学致癌物(Cd)和非致癌物(Ni、Cu 和 Pb)通过饮用途径所致的个人年健康风险,结果见表 3.

从表 3 可以看出,重金属类化学物质通过饮水途径产生健康风险范围为 $3.91\text{E}-08 \sim 1.63\text{E}-05\text{a}^{-1}$ (儿童)、 $1.56\text{E}-08 \sim 6.50\text{E}-06\text{a}^{-1}$ (成人),说明人群中儿童更易遭受重金属暴露的健康风险. 化学致癌物(Cd)通过饮水途径所致健康风险范围

为 $2.84\text{E}-06 \sim 1.63\text{E}-05\text{a}^{-1}$ (儿童)、 $1.13\text{E}-06 \sim 6.50\text{E}-06\text{a}^{-1}$ (成人). 其中,S1、S2 和 S3 点位的 Cd 通过饮水途径对儿童所致致癌风险均与国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平($5.0\text{E}-05\text{a}^{-1}$)^[19]处于同一数量级. 非致癌物通过饮水途径对暴露人群(成人和儿童)所致的健康风险范围分别为 $2.22\text{E}-07 \sim 181\text{E}-06\text{a}^{-1}$ (Ni)、 $1.56\text{E}-08 \sim 2.12\text{E}-07\text{a}^{-1}$ (Cu)和 $9.77\text{E}-08 \sim 8.34\text{E}-07\text{a}^{-1}$ (Pb),其健康风险均低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平. 结

合重金属元素的空间污染分布,S1 点位的重金属类化学物(Ni、Cd 和 Cu)的潜在健康风险概率较大,而 S7 点位的低剂量的重金属暴露风险较低. 非化学致癌物通过饮用途径对成人和儿童所致的非致癌风险平均值排序为 $Ni > Pb > Cu$,说明大冶湖水体重金属类非致癌化学物质所致的健康风险主要是 Ni,应该作为水环境风险管理的优先控制对象. 从表 4 也可以看出,大冶湖各点位重金属类非致癌化学物通过饮水途径所致总非致癌风险均低于

国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平($5.0E-05a^{-1}$),但均高于瑞典环保局、荷兰建设和环境部以及英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平($1.0E-06a^{-1}$). 从表 3 中还可以看出,化学致癌物对暴露人群健康风险远高于非致癌物,这与国内的相关报道结果一致^[42~44]. 因此,大冶湖水环境健康风险主要为重金属类化学物的致癌风险,Cd 应作为流域健康风险管理对策制定的优先考虑对象.

表 3 水体中化学致癌物和非化学致癌物通过饮用途径所致的个人年健康风险/a⁻¹

Table 3 Health risk caused by carcinogens and chemical non-carcinogens by drinking water pathway in water/a ⁻¹										
项目	化学致癌物 Cd		非化学致癌物						总和	
			Ni		Cu		Pb			
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
最小值	1.13E-06	2.84E-06	2.22E-07	5.56E-07	1.56E-08	3.91E-08	9.77E-08	2.44E-07	1.48E-06	3.70E-06
最大值	6.50E-06	1.63E-05	7.23E-07	1.81E-06	8.49E-08	2.12E-07	3.34E-07	8.34E-07	7.48E-06	1.87E-05
平均值	3.08E-06	7.70E-06	4.34E-07	1.08E-06	4.29E-08	1.07E-07	1.52E-07	3.81E-07	3.71E-06	9.27E-06

2.6 生态风险评价

大冶湖沉积物重金属的潜在生态风险评价结果见表 4. 从中并结合 Hakanson 潜在生态危害分级^[10]可知,从潜在生态危害系数(E_i^i)来看,各元素的 E_i^i 均值大小顺序为 Cd (9 235.27) > Cu(92.88) > Pb(24.86) > Ni(11.89). 由表 4 知,Ni 在所有采样点的 E_i^i 变化范围为 9.05 ~ 15.32,其生态风险均处于轻微水平;而对 Cd 元素而言,Cd 在全部采样点的含量均远高于其长江系沉积物重金属背景值,且毒性响应系数高,其生态风险均处于极强水平;表明重金属元素 Cd 在沉积物中累积效应最为典型,是生态风险的主要贡献者,与沉积物重金属富集系数法评价结果一致,可能受大冶湖流域内矿山尾矿经

雨水冲刷、工业废水及生活污水排放等外源 Cd 经地表径流进入水体的影响;同时,Cd 易被水体悬浮物或沉积物所吸附、络合或共同沉淀,从而在沉积物中逐步富集,应引起高度重视,以防发生更严重污染. Cu 除在大冶湖中部(S3、S6、S7、S8)采样点处于中等风险水平外,其余样点均达到较强生态风险;Pb 的 E_i^i 最大值为 39.69,处于轻微风险水平. 大冶湖沉积物的综合生态风险指数(RI)介于1 897.14 ~ 20 838.67,总体处于极强风险水平,主要集中在大冶湖西部和东部的入湖口附近,与其重金属元素污染分布特征大致相同. 重金属 Cd 在潜在生态危害中所占的贡献率高达 98.62%;该研究区域内沉积物 Cd 的生态风险应引起重视.

表 4 沉积物中重金属潜在生态风险

Table 4 Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in sediments

项目	E_i^i				RI
	Ni	Cd	Cu	Pb	
最小值	9.05	1 826.40	40.14	14.69	1 897.14
最大值	15.32	20 662.80	137.80	39.69	20 838.67
平均值	11.89	9 255.27	92.88	24.86	9 384.89
对 RI 贡献率/%	0.13	98.62	0.99	0.26	100.00

3 结论

(1)大冶湖表层水和沉积物重金属含量平均值排序分别为 $Ni > Cu > Pb > Cd$ 和 $Cu > Pb > Ni > Cd$,富集系数显示,沉积物中各重金属富集系数从大到小为 $Cd > Cu > Pb > Ni$;其中,Cd 富集程度表现最明显;湖泊重金属的含量空间分布及其污染分布均存在明显的区域差异.

(2)相关性分析及主成分分析结果表明,流域内工农业生产活动是 Cd 和 Cu 来源的主导影响因素,Ni 与工业废水排放密切相关,交通运输污染是 Pb 的主要来源.

(3)环境风险评价结果表明,最大环境风险贡献来自于 Cd,应作为风险管理的重点对象. 其次,Ni 是水环境中对暴露人群构成的非致癌健康风险最大,其健康风险范围为 $2.22E-07 \sim 181E-$

$06a^{-1}$,但低于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受风险水平($5.0E-05a^{-1}$);而沉积物中Cu的潜在风险较高,也应引起足够的重视。

参考文献:

- [1] 王丹, 孟鑫, 张洪, 等. 梁子湖沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 1901-1909.
Wang D, Meng X, Zhang H, *et al.* Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Liangzi Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(6): 1901-1909.
- [2] 李永霞, 黄莹, 高甫威, 等. 娄山河表层沉积物重金属赋存形态及风险评价[J]. 环境化学, 2016, **35**(2): 393-402.
Li Y X, Huang Y, Gao F W, *et al.* Speciation and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the Loushan River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(2): 393-402.
- [3] Yin H B, Cai Y J, Duan H T, *et al.* Use of DGT and conventional methods to predict sediment metal bioavailability to a field inhabitant freshwater snail (*Bellamya aeruginosa*) from Chinese eutrophic lakes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **264**: 184-194.
- [4] 李玉斌, 冯流, 刘征涛, 等. 中国主要淡水湖泊沉积物中重金属生态风险研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(2): 200-205.
Li Y B, Feng L, Liu Z T, *et al.* Ecological risk assessment of sediment heavy metals in main lakes of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(2): 200-205.
- [5] 敖亮, 雷波, 王业春, 等. 三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 179-185.
Ao L, Lei B, Wang Y C, *et al.* Sediment risk assessment and heavy metal source analysis in typical country water level fluctuated zone (WLFZ) of the Three Gorges[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 179-185.
- [6] 张彦, 卢学强, 刘红磊, 等. 渤海湾天津段表层沉积物重金属分布特征及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(6): 608-614.
Zhang Y, Lu X Q, Liu H L, *et al.* Distribution characteristics and source identification of heavy metals in surface sediments of Bohai Bay near Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(6): 608-614.
- [7] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 563-569.
Fang M, Wu Y J, Liu H, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(2): 563-569.
- [8] Stead-Dexter K, Ward N J. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **334-335**: 271-277.
- [9] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, **35**(1): 189-198.
Xu Y Z, Liu J J, Cheng Y X, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(1): 189-198.
- [10] 黄莹, 李永霞, 高甫威, 等. 小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2046-2053.
Huang Y, Li Y X, Gao F W, *et al.* Speciation and risk assessment of heavy metals in surface sediments from the heavily polluted area of Xiaqing River [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2046-2053.
- [11] 刘宪斌, 刘新蕾, 李厦, 等. 贵州草海表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(1): 325-332.
Liu X B, Liu X L, Li X, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments from Caohai Lake, Guizhou [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(1): 325-332.
- [12] Vallee B L, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 1972, **41**(10): 91-128.
- [13] Rognrud S, Fjeld E. Trace element contamination of Norwegian Lake sediments [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001, **30**(1): 11-19.
- [14] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1842-1848.
Chen C X, Jiang X, Zhan Y Z, *et al.* Speciation distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [15] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.
Yu H, Zhang W B, Yu J P. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 437-444.
- [16] Smith A H, Hopenhayn-Rich C, Bates M N, *et al.* Cancer risks from arsenic in drinking water [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1992, **97**: 259-267.
- [17] Kerger B D, Paustenbach D J, Corbett G E, *et al.* Absorption and elimination of trivalent and hexavalent chromium in humans following ingestion of a bolus dose in drinking water [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1996, **141**(1): 145-158.
- [18] EPA/540/1-89/002 Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) [S].
- [19] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(8): 2133-2139.
Zhang L, Qi S H, Qu C K, *et al.* Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2133-2139.
- [20] 符刚, 曾强, 赵亮, 等. 基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4553-4560.
Fu G, Zeng Q, Zhao L, *et al.* Health risk assessment of drinking water quality in Tianjin based on GIS [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4553-4560.
- [21] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2011, **31**(3): 547-553.
Li X P, Qi J Y, Chen Y H. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2011, **31**(3): 547-553.

- [22] 王若师, 许秋瑾, 张炯, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River Basin[J]. Environmental Science, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [23] HJ 25.3-2014 污染场地风险评估技术导则[S].
- HJ 25.3-2014 Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites[S].
- [24] 黄石市人民政府. 关于黄石市经济社会发展第十二个五年规划主要目标和措施的报告[R]. 黄石: 黄石市政府, 2007.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] 李珊珊, 单保庆, 张洪. 浠阳河河系表层沉积物重金属污染特征及其风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2277-2284.
- Li S S, Shan B Q, Zhang H. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediments of Fuyang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2277-2284.
- [27] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 490-496.
- Zhang Z Y, Abuduwalli J, Jiang F Q. Sources, pollution statue and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Aibi Lake, Northwest China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 490-496.
- [28] 迟清华, 焉明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Chi Q H, Yan M C. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [29] 毛欣, 陈旭, 李长安, 等. 大冶市城市湖泊表层水体中重金属的分布特征及其来源[J]. 安全与环境工程, 2013, **20**(5): 33-37, 84.
- Mao X, Chen X, Li C A, *et al.* Distribution of heavy metal elements in surface water from three lakes in Daye City [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, **20**(5): 33-37, 84.
- [30] 贺跃, 胡艳华, 王秋潇, 等. 大冶大港河水系沉积物中重金属来源分析[J]. 地球化学, 2011, **40**(3): 258-265.
- He Y, Hu Y H, Wang Q X, *et al.* Analysis on the source of heavy metals in the Dagang River, Daye County, Hubei Province [J]. Geochimica, 2011, **40**(3): 258-265.
- [31] 黄石市统计局. 黄石统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [32] 刘晖, 张昭, 李伟. 梁子湖水体和底泥中微量元素及重金属的空间分布格局及污染评价[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(S1): 105-111.
- Liu H, Zhang Y, Li W. Assessment and spatial patterns of trace elements and heavy metals from water body and sediments in the Liangzi Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(S1): 105-111.
- [33] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 44-51.
- Guo J, Li L Q, Huang D Z, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(1): 44-51.
- [34] 田林锋, 胡继伟, 秦樊鑫, 等. 重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 481-489.
- Tian L F, Hu J W, Qin F X, *et al.* Distribution of heavy metal elements in the water body from Lake Hongfeng [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(3): 481-489.
- [35] Zaharescu D G, Hooda P S, Soler A P, *et al.* Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Resposmuso, Central Pyrenees [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(11): 3546-3553.
- [36] Zhang Z Y, Abuduwalli J, Jiang F Q. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Analytical Letters, 2013, **46**(13): 2122-2131.
- [37] 方文稳, 张丽, 叶生霞, 等. 安庆市降尘重金属的污染评价与健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- Fang W W, Zhang L, Ye S X, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Anqing [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3795-3803.
- [38] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
- [39] Cai L M, Xu Z C, Ren M Z, *et al.* Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **78**: 2-8.
- [40] Manno E, Varrica D, Dongarrà G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(30): 5929-5941.
- [41] 李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2607-2613.
- Li L, Wang Y L, Jiang M, *et al.* Analysis of the source, potential biological toxicity of heavy metals in the surface sediments from shellfish culture mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2607-2613.
- [42] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 74-79.
- Ni B, Wang H B, Li X D, *et al.* Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(1): 74-79.
- [43] 王勇泽, 李诚, 孙树青, 等. 黄河三门峡段水环境健康风险评价[J]. 水资源保护, 2007, **23**(1): 28-30, 70.
- Wang Y Z, Li C, Sun S Q, *et al.* Water environmental health risk assessment for the Sanmenxia reach of the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2007, **23**(1): 28-30, 70.
- [44] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1177-1184.
- Li Y L, Liu J L. Health risk assessment on heavy metal pollution in the water environment of Luan River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(6): 1177-1184.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)