

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征

简敏菲^{1,2}, 李玲玉¹, 徐鹏飞¹, 陈朴青³, 熊建秋¹, 周雪玲¹

(1. 江西师范大学生命科学学院, 江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 南昌 330022; 2. 江西师范大学鄱阳湖生态与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 3. 江西师范大学理化测试中心, 南昌 330022)

摘要: 选取流域两岸富含有色金属矿产资源的乐安河及至鄱阳湖段的典型湿地区域, 分别于 2012 年 4 月 (平水期)、8 月 (丰水期)、11 月 (枯水期) 等不同时段采集不同样点底泥、表土、上覆水等环境样品, 监测分析重金属 Cu、Pb、Cd 的含量, 并借助统计分析方法识别乐安河湿地重金属污染的时空分布特征及其来源。结果表明, 乐安河流域各样点的重金属 Cu 含量最高, 且各样点重金属的含量值均表现为 $Cu > Cd > Pb$ 。以丰水期的重金属污染最严重, 平水期次之, 枯水期的重金属污染最轻。重金属 Cu 含量的高值区出现在乐安河上游; 而重金属 Pb 含量的高值区出现在乐安河下游及入湖区域; 重金属 Cd 的高值区出现在乐安河中游。表征重金属 Cu 污染的主成分贡献率为 36.99%, 表征重金属 Cd 的主成分贡献率为 30.12%。底泥 Cu 和上覆水 Cu、河滩表土 Cu 含量具有较强的相关性; 底泥 Cd 和表土 Cd 的含量也表现出强相关性。以上结果反映出水体、底泥和土壤中的 Cu 污染或 Cd 污染的来源具有一致性, 主要来源于矿山开采排放的重金属酸性污水; 而其余组分间的相关性则表现不甚明显, 反映出不同污染物的来源存在一定的差异性。

关键词: 乐安河; 重金属污染; 时空特征; 主成分分析; 污染源

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1759-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.017

Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland

JIAN Min-fei^{1,2}, LI Ling-yu¹, XU Peng-fei¹, CHEN Pu-qing³, XIONG Jian-qiu¹, ZHOU Xue-ling¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Protection and Utilization of Subtropical Plant Resources, College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 3. Centre of Physical and Chemical Inspection, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: Overlying water, sediments, surface soils in the typical wetland areas of Lean River and Poyang Lake which were rich in non-ferrous metal mineral resources on both sides of the river, were chosen for monitoring heavy metals including copper, lead and cadmium of base flow in average season, flood season, and dry season in 2012. Statistical analysis methods were coupled to characterize the spatiotemporal variation of heavy metals pollution and identify the main sources. The results indicated that the concentrations of copper were the highest in all samples of each sampling sites in the Lean River-Poyang Lake wetland. And the content values of copper, lead and cadmium in different samples of different sampling sites also showed that the content values of copper were higher than those of lead, and the content values of lead were also higher than those of cadmium. The results also showed that the heavy metals pollution of copper, lead and cadmium in flood season was the heaviest whereas the heavy metals pollution in dry season was comparatively light. The results of the contents of the three kinds of heavy metals elements in different sampling sites of the watersheds of lean River showed that the contents of copper in the samples from the upstream sampling sites of Lean River were higher than those of other samples from other sites. And the contents of lead in the samples from the downstream sampling sites of Lean River were higher than those of other samples from other sampling sites. The contents of cadmium in the samples from the midstream sampling sites of Lean River were higher than those of other samples from other sites. The first principal component representing copper pollution explained 36.99% of the total variance of water quality. The second principal component concerning representing lead pollution explained 30.12% of the total variance. The correlation analysis results showed that there were significant positive correlations among the contents of copper in sediments and the contents of copper in overlying water. And there was also significant positive correlation between the contents of copper in sediments and the contents of copper in the surface soils. And the correlation analysis showed that

收稿日期: 2013-09-07; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41063003; 41161035); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC13B02); 江西省科技支撑计划项目(20133BBG70005)

作者简介: 简敏菲(1969~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为鄱阳湖湿地生态过程及生态环境评价, E-mail: jianminfei0914@163.com

there were significant positive correlations among the contents of cadmium in sediments and the contents of cadmium in surface soils. The above results reflected that the copper pollution or cadmium sources of water, soil and sediments were consistent, which were mainly from heavy metal acidic waste of mining emissions. The correlations between other components were not very obvious, which reflected the sources of pollutants were different.

Key words: Lean River; heavy metals pollution; spatiotemporal characteristics; principal component analysis; pollutant source

河流湿地是连接陆地和湖泊、海洋等水体的纽带,具有独立的生态结构和功能^[1,2],同时也是受人类活动影响最强烈的区域^[3]. 人类在工农业生产、生活中产生的重金属污染物肆意排放进入河流湿地;同时,伴随着重金属污染物的沉降,河流湿地常常成为重金属污染物的汇和源^[4,5]. 重金属污染物的增加会导致河流湿地净化效能降低,环境污染加剧,严重威胁湿地生物的生存等,已逐渐成为环境污染研究领域的热点^[6~8]. 目前,国内外研究者已对河流湿地开展了大量的研究,主要集中在水体和沉积物重金属空间分布规律^[9~12]、污染程度评价^[13~16]、影响因素^[17~19]等各方面,国内对乐安河湿地重金属研究报道中涉及到了乐安河水体及底泥重金属污染状况、重金属空间分布特征以及乐安河湿地重金属来源探析等^[20~23]. 但至今关于对乐安河湿地整体(水体、底泥、河滩表土)在不同水期(平水期、丰水期、枯水期)的时空分布特征及其影响因素的研究尚鲜见报道,相关方面的研究在我国其他河流湿地也不多见.

乐安河湿地流经我国重要的有色金属矿集聚区——德兴铜矿,矿石成分主要为黄铜矿,以 Cu 元素为主,并赋存其他重金属元素 Cd、Pb、Zn 等,并伴生有金、银、钼、铋等稀有金属. 同时乐安河还接纳众多选矿、炼矿等工厂携带重金属离子的废水以及沿岸中小型城市的生活污水. 本研究在以往研究的基础上,分别选取 Cu、Pb、Cd 等毒性相对较强的重金属元素作为监测指标,通过测定乐安河 9 个样点不同水期的水体、底泥、表土中的 Cu、Pb、Cd 等重金属的总量,分析乐安河重金属元素在不同水期的变异情况及其时空分布特征,并利用统计分析的方法进行主成分识别及来源探析,以为乐安河湿地(水体、底泥、表土)重金属污染的防治和决策管理提供一定的基础数据.

1 材料与方法

1.1 样点设置

为了调查乐安河河流湿地的重金属来源和时空分布变化,本研究相继于 2012 年 4 月、8 月和 11 月(分别为鄱阳湖的平水期、丰水期和枯水期),分别

在乐安河-鄱阳湖段共设置 9 个样点,采样点的布设兼顾乐安河上游相应的对照点及其上、中、下游各河段,以及入鄱阳湖口处,采样点均采用 GPS 定位,其中乐安河自上游、经中、下游至鄱阳湖入湖口的各样点分别为:海口镇新桥弃渡口(T1)、上沽口(T2)、下沽口(T3)、香屯水文站(T4)、接渡大桥(T5)、乐平大桥(T6)、清家湾(T7)、胡家厂(T8)、龙口入湖段(T9),样点位置如图 1 所示,乐安河流域水流方向为自东向西方向.

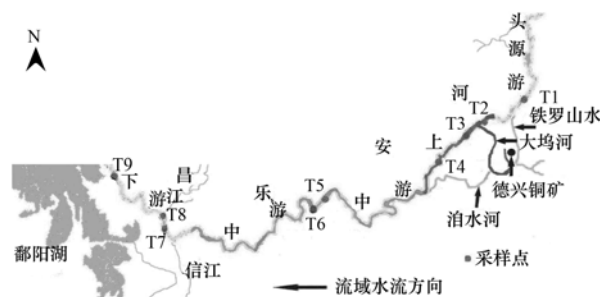


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in the study area

1.2 样品采集与处理

现场采集上覆水、水体表层底泥、河滩表层土壤,每个点采集上覆水 3 份,装入聚乙烯塑料瓶中,用于测定重金属的上覆水加硝酸酸化至 pH < 2. 在每个样点中的 3 个 10 m × 10 m 的标准样方中分别按五点法采集河滩植物根区表土,采用 PVC 管插入表层土壤(10 cm)将表土取出后混合,装入聚乙烯封口袋中,编号、记录;每个样点采用抓取式采样器(Grab sampler)采集对应水体表层 15 cm 以上的底泥,每个样点分别采集 3 份平行样,分别装入聚乙烯封口袋中,编号、记录.

本文研究区 9 个样点中在每个水期共采集河滩表土 27 份,水体底泥 27 份,上覆水 27 份,带回实验室分别进行预处理后再重复测试. 所有水样在分析处理前均保存于 4℃ 的冰箱内,每份样品重复测试 3 次. 每份河滩土壤和水体底泥分别在室温下经自然风干,去除石块、植物残体等异物,置于烘箱内烘干至恒重,用研钵研磨后过 60 目的尼龙筛,分别缩分处理后置于聚乙烯封口袋中存放备用.

1.3 重金属消解处理与测定

应用上海新仪 MDS-8G 型多通量密闭微波化学工作站消解水样和预处理过的土壤、底泥备用样品. 水样采用 HNO_3 消解体系^[24], 土壤和底泥样采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2\text{O}_2$ 的三酸消解体系^[25], 并按等温梯度设置控制条件进行消解, 消解结束冷却后过滤并用超纯水 (Nico, LT-RF20) 定容. 所有样品分别重复 3 次作平行样消解处理后, 采用美国 Varian 公司的 AA-240Z 型原子石墨炉分光光度计测定样品中重金属元素 Cu、Pb、Cd 的含量. 所用试剂均为优级纯. 土壤底质重金属分析测试过程中均用 GSS-3 标准土样进行全程质量控制并对样品进行多次重复测试^[26]. 其测定结果如表 1.

表 1 微波消解土壤底质标准物质样品的测定结果/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Results of soil standard material samples determined by microwave-digestion methods/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cu	Pb	Cd
测定值	12.01	24.69	0.059
GSS-3 认定值与不确定值	11.4 ± 1.1	26 ± 3	0.06 ± 0.009

由表 1 可以看出, 标准物质样品测定结果均在认定值范围内, 重金属元素 Cu、Cd、Pb 的相对标准偏差分别为: 3.89%、1.90%、2.57%, 表明本研究

所用的消解方法具有较高的准确度和精确度.

1.4 水土环境中重金属时空分布特征的分析方法

根据各采样点水土环境中重金属元素 Cu、Pb、Cd 的测定值, 分析乐安河段水土环境中的重金属含量水平及其分布规律特征. 利用软件 SPSS 18.0 对水土环境中重金属元素 Cu、Pb、Cd 进行 Pearson 相关性分析, 利用主成分分析法分析主要重金属污染物.

2 结果与分析

2.1 重金属累积特征值分析

本研究调查乐安河 3 个水期上覆水中的 Cu 和 Pb 的含量差异 (水体中的 Cd 含量未检出)、表土、底泥样品重金属 Cu、Pb、Cd 的含量差异, 以 3 个水期的重金属含量平均值作为各样点重金属的总量值. 统计分析结果表明, 各样点上覆水和表土之间含量差异最大的均是重金属 Cu 含量, 底泥中重金属 Cu 的差异也很大, 说明 Cu 在乐安河河段受人为干扰较强烈; 水土环境中差异最小的均是重金属 Pb; 3 种元素含量的变异程度均表现为 $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb}$, 反映出乐安河水土环境中 Cu、Pb、Cd 含量变化程度的大小, 见表 2.

表 2 乐安河湿地重金属 Cu、Pb、Cd 含量的统计特征值

Table 2 Descriptive statistics of Cu, Pb and Cd contents in the Wetland of Lean River

元素	性质	样点数	最小值	最大值	中值	平均值	标准差	变异系数	鄱阳湖土壤底质背景值 ^[27]
$\text{Cu}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	上覆水 ¹⁾	9	0.01	0.15	0.06	0.06	0.04	0.58	
$\text{Pb}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		9	0.005	0.05	0.04	0.04	0.01	0.36	
$\text{Cu}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	底泥	9	13.69	671.31	162.44	194.36	205.50	1.06	4.75
$\text{Pb}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		9	3.36	19.96	8.01	10.52	6.40	0.61	12.5
$\text{Cd}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		9	0.03	3.86	1.16	1.63	1.17	0.72	0.75
$\text{Cu}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	表土	9	34.57	722.13	192.83	226.04	232.32	1.03	4.75
$\text{Pb}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		9	4.72	21.72	7.58	9.37	5.16	0.55	12.5
$\text{Cd}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		9	0.42	5.17	1.65	1.94	1.58	0.81	0.75

由表 2 可见, 乐安河底泥中的重金属 Cu 和 Cd 含量均高于鄱阳湖土壤底质的背景值, 分别为背景值的 40.9 倍和 2.17 倍, 表土中重金属 Cu 和 Cd 的含量也高于背景值, 分别为背景值的 40.6 倍和 2.59 倍, 且底泥和表土中平均值均大于中值, 表明土壤 Cu、Cd 具有明显的累积效应. Pb 含量的平均值低于其背景值, 底泥和表土中的 Pb 含量高于背景值的样点分别占总样点的 33.3% 和 22.2%, 说明外源 Pb 进入乐安河的量较少.

2.2 重金属污染物的季节性特征分析

乐安河 2012 年平水期、丰水期、枯水期等 3 个不同水期水土环境中重金属 Cu、Pb、Cd 的含量时

空变化特征如图 2 所示.

由图 2 看出, 3 个水期水体底泥中 Cu 的平均含量值表现出: 丰水期 > 枯水期 > 平水期, 最大值出现在丰水期, 最小值出现在平水期, 其中枯水期含量变化相对于平水期和丰水期含量变化较小. 而底泥中 Pb 的平均含量表现出: 平水期 > 枯水期 > 丰水期, 最大值出现在平水期, 最小值出现在丰水期, 枯水期含量变化最小. 底泥中 Cd 的平均含量则表现出: 丰水期 > 枯水期 > 平水期, 最大值出现在丰水期. 各水期含量差异均较大, 枯水期相对较小.

另一方面, 3 个水期河滩表层土壤中 Cu 的平均含量表现出: 丰水期 > 平水期 > 枯水期, 丰水期含量

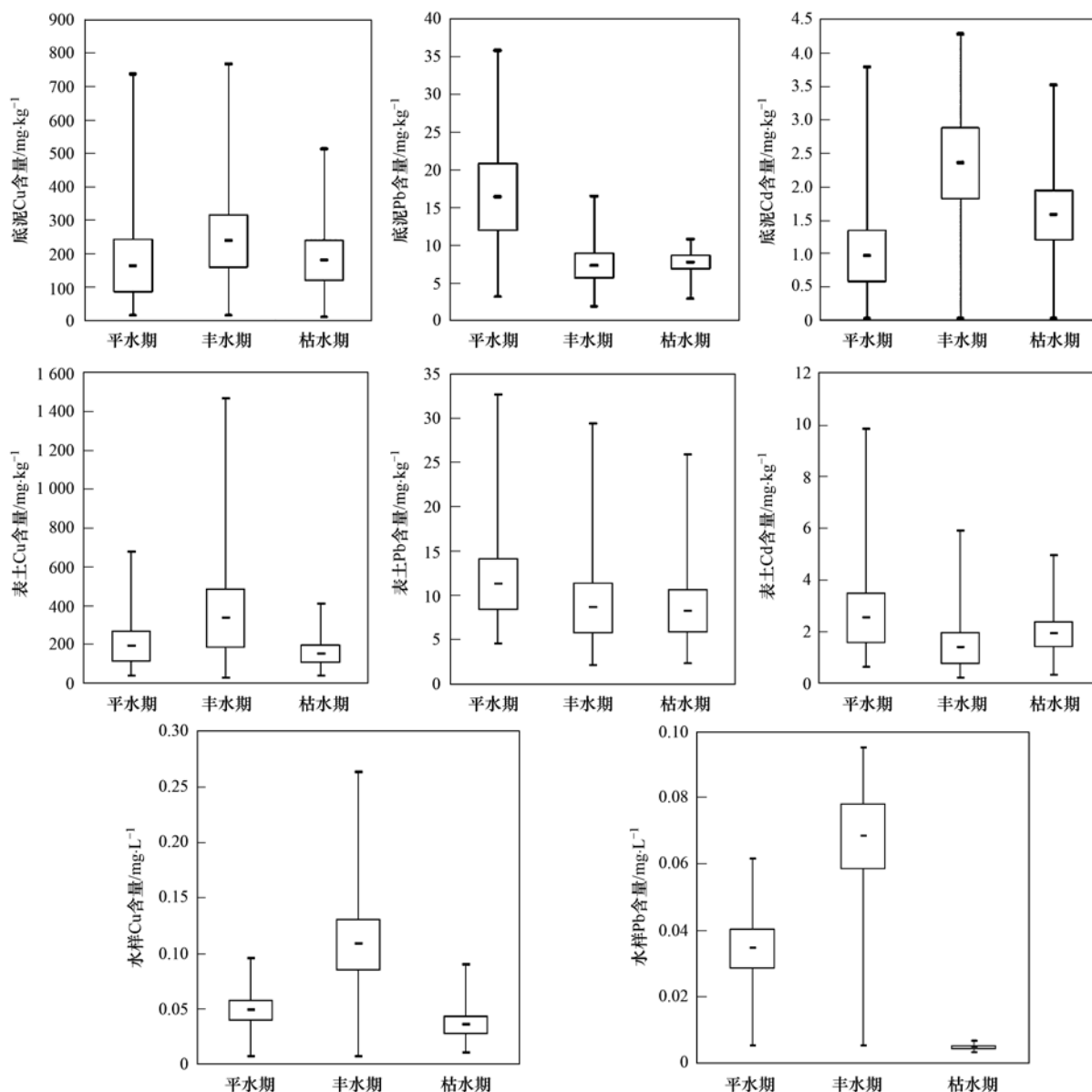


图2 乐安河湿地重金属指标时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of heavy metal concentrations in the Wetland of Lean River

最大,枯水期含量最小,枯水期含量差异最小.而不同水期表土中的 Pb 平均含量则表现出,平水期 > 丰水期 > 枯水期,最大值出现在平水期,最小值出现在枯水期,三者差异均相对较大.表土中 Cd 的平均含量则表现为:平水期 > 枯水期 > 丰水期,最大值出现在平水期,最小值出现在丰水期,枯水期含量差异相对较小.

从图2中还可看出,上覆水中 Cu 和 Pb 的平均含量均为:丰水期 > 平水期 > 枯水期,Cu 和 Pb 的含量最大值均出现在丰水期,丰水期含量差异最大,在平水期和枯水期的 Cu 含量差异大致相当,而枯水期的 Pb 含量差异最小.

以上总体结果表明,乐安河水土环境中丰水期的重金属污染最严重,平水期次之,枯水期重金属污染相对最轻.

2.3 重金属流域分析

以乐安河流域各样点水体底泥、河滩表土、水体等各类样品在不同水期中的重金属 Cu、Pb、Cd 等含量的平均值数据为依据,绘制流域内各采样点水、土、底泥各样品中重金属含量的分布差异如图3.

图3结果表明,流域各区域水体底泥的重金属分布特征表现为重金属 Cu 含量的高值区在乐安河的上游区域,重金属 Pb 含量的高值区在乐安河的下游及鄱阳湖入湖段,重金属 Cd 含量的高值区在乐

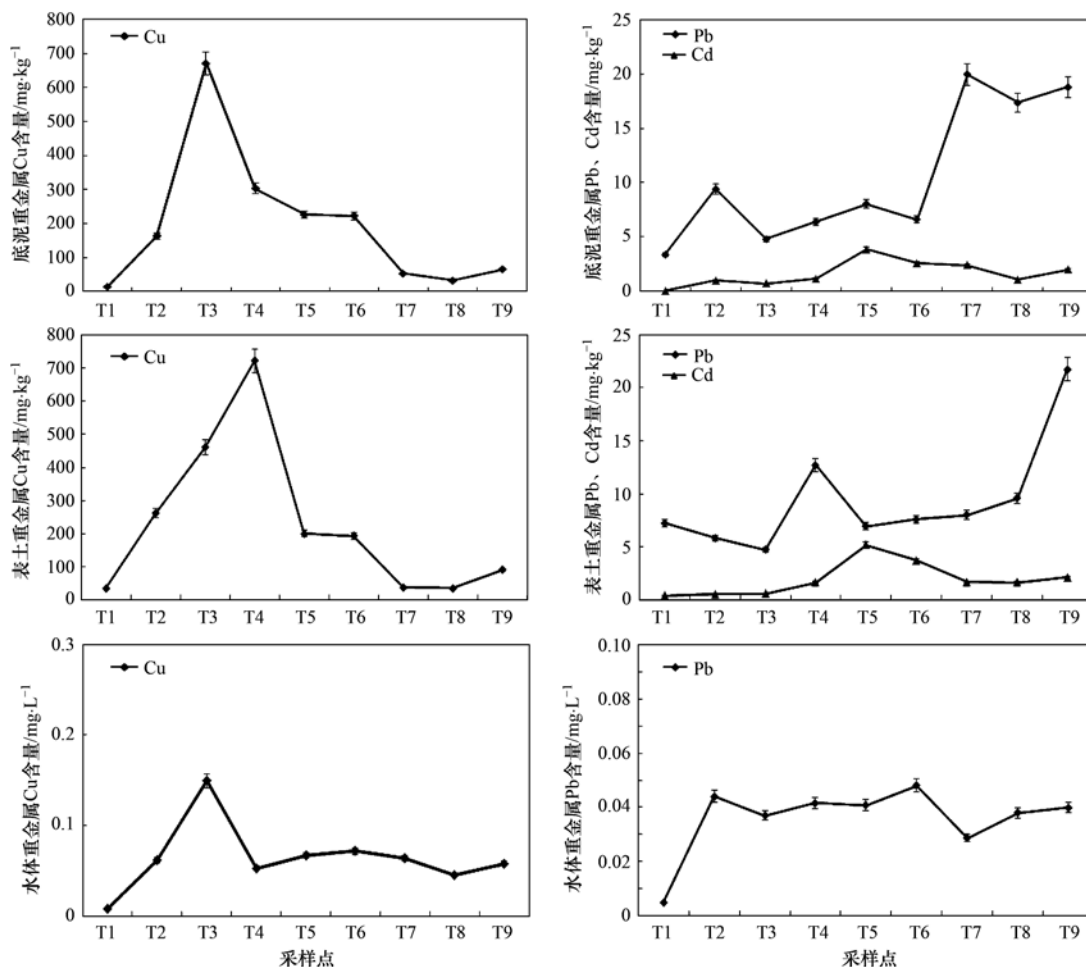


图3 乐安河湿地重金属分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of heavy metals concentrations in the Wetland of Lean River

安河中游. 底泥重金属 Cu 含量由源头 T1 到上游 T3 逐渐升高,在 T3 处达到最高值 $671.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 随乐安河流域向中、下游方向, Cu 含量迅速降低,至中游 T5、T6 时稳定在 $200 \sim 300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,再随河流流向逐渐降低,至下游 T7、T8 及入湖口处 T9 达到相对稳定值 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右. 水体底泥重金属 Pb 含量在源头 T1、上游 T2、T3、T4 和中游 T5、T6 的含量差异不大,而至下游 T7、T8 及入湖口 T9 含量显著高于其余各样点. 底泥重金属 Cd 含量从上游到中游 T5 时有明显的增加,到 T5 时达到最大值 $3.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而后逐渐降低到下游及入湖段达到稳定.

从图 3 还可看出,各区域表土中的重金属分布特征表现为重金属 Cu 含量的高值区在乐安河上游,重金属 Cd 的高值区在乐安河中游. 重金属 Cu 含量自源头 T1 到上游 T4 逐渐升高,在 T4 时达到最高值 $722.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,之后向中、下游方向逐渐降低. 重金属 Pb 含量无明显的变化趋势,仅在样点

T4、T9 处出现峰值. 其中应特别指出表土重金属 Pb 含量在样点 T1 处明显大于其下游的 T2、T3,可能是由于重金属 Pb 含量低,而源头 T1 附近有采砂船的扰动,导致表土重金属 Pb 含量增大,同时源头段水流较为湍急,重金属 Pb 不易沉降在底泥中,因此表现为在样点 T1 表土重金属 Pb 含量明显大于 T2、T3,底泥重金属 Pb 含量与整个河段比较含量较小. 重金属 Cd 含量自上游 T3 处开始逐渐上升,至中游 T5 时达到最大值 $5.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,之后向中、下游方向逐渐降低,在下游及入湖口达到相对稳定值 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右.

图 3 中关于整个流域各段水体中重金属的分布特征表现为:沿流域方向各样点水体中的重金属 Cu 含量分布呈现出非均一性. 其中最上游的 T1 样点重金属 Cu 含量较低,从 T1 ~ T3 样点的水体 Cu 含量逐渐上升,在 T3 时达到最大,为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 之后沿水流方向水体重金属 Cu 逐渐降低,到上游 T4 后,中下游区域重金属 Cu 含量差异不大. 各样

点除上游源头样点 T1 水体中的重金属 Pb 含量较小外,沿水流方向其余各河段水体中的重金属 Pb 含量较为稳定,无明显的差异。

综合分析水土环境中产生上述结果的主要原因:水体底泥中的重金属 Cu 和 Cd 是长期积累的结果,其来源主要是长期受点源污染的影响,而重金属 Pb 含量沿流域水流方向变化则可能是因为下游及入湖段的水流速度减缓,水体中的重金属 Pb 较多沉积于这一河段。河滩表土由于存在周期性的水淹和裸露交替,同时直接受人类活动的影响和水淹的双重影响,表土中的重金属 Cu 在上游出现高值区主要是受大坞河的铜矿酸性废水汇入所致。同理,样点 T3 水体中重金属 Cu 含量相比于其余各样点含量较高的原因也是由于样点 T3 处于乐安河受纳大坞河汇入的铜矿酸性废水后的最邻近区域,大坞河的铜矿酸性重金属废水直接对乐安河邻近水体造成了污染;而各样点水体中的重金属 Pb 含量表现出相对稳定的原因则可能是流域两岸没有突出的 Pb 污染源。

2.4 乐安河主成分识别及重金属相关性

采用主成分分析计算,结果表明前 2 个主成分反映了 67.11% 的变量信息,贡献率分别为 36.99% 和 30.12%,特征值分别为 2.96 和 2.41,对这 2 个主成分进行分析可反映出全部数据的大部分信息,见表 3。

表 3 主成分负荷矩阵

重金属	主成分	
	1	2
上覆水 Cu	0.81	0.23
上覆水 Pb	0.41	0.73
底泥 Cu	0.97	0.01
底泥 Pb	-0.62	0.37
底泥 Cd	-0.08	0.93
表土 Cu	0.79	-0.03
表土 Pb	-0.44	0.28
表土 Cd	-0.04	0.87
特征根	2.96	2.41
方差百分比/%	36.99	30.12
累计百分比/%	36.99	67.11

由表 3 可知,第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 36.99%,负荷值最高的几个指标分别为底泥 Cu、上覆水 Cu、表土 Cu,分别为 0.97、0.81、0.79(本研究中以绝对值 >0.7 判定负荷值较高^[28]),说明水土环境中的 Cu 含量的变化是乐安河水土环境变化的主要影响因子。第二主成分的贡献率为 30.12%,其负荷值最高的几个参数是底泥 Cd、表土 Cd、上覆水 Pb,分别为 0.93、0.87、0.73,说明乐安河水土环境中重金属 Cd 是仅次于 Cu 的主要污染物。

同时,针对乐安河流域水体、表土、底泥等环境中各种重金属之间的相关性进行统计,结果如表 4 所示,显示各重金属含量间具有较强的相关性。

表 4 乐安河湿地水土环境中重金属含量相关矩阵¹⁾

Table 4 Correlation of heavy metals contents in the water-soil environment of the wetland of Lean River

	底泥 Cu	底泥 Pb	底泥 Cd	表土 Cu	表土 Pb	表土 Cd	上覆水 Cu	上覆水 Pb
底泥 Cu	1							
底泥 Pb	-0.527	1						
底泥 Cd	-0.073	0.269	1					
表土 Cu	0.715 *	-0.51	-0.155	1				
表土 Pb	-0.345	0.513	0.095	-0.051	1			
表土 Cd	-0.06	0.043	0.924 **	-0.099	0.079	1		
上覆水 Cu	0.884 **	-0.138	0.114	0.424	-0.266	0.003	1	
上覆水 Pb	0.341	0.156	0.482	0.388	0.147	0.442	0.472	1

1) * 表示显著性水平在 0.05, ** 表示显著性水平在 0.01

从表 4 可以看出,水体底泥中的 Cu 含量与河滩表土中的 Cu 含量($r=0.715, P<0.05$)、上覆水体中 Cu 含量间($r=0.884, P<0.01$)具有显著或极显著的相关性。可以推测底泥和上覆水体、河滩表土中的重金属 Cu 污染物的来源均具有相似性,结合重金属 Cu 在受纳大坞河的铜矿重金属酸性污水后的变化,说明乐安河水土环境中重金属 Cu 主要来源于铜矿排放的重金属酸性废水及乐安河沿岸的选

矿、炼矿等工厂排放的废水。而上覆水重金属 Cu 与河滩表土中的重金属 Cu 无显著相关性($P>0.05$),说明河滩表土受到河流水体周期性淹没和人类活动的双重影响。从表 4 也能看出水体底泥中的 Cd 与河滩表土中的 Cd 也具有极显著相关性($r=0.924, P<0.01$),可推测其重金属 Cd 均具有相同的来源,结合乐安河水体底泥 Cd 和河滩表土中 Cd 的流域分布,反映出重金属 Cd 主要是来源于乐

安河沿岸的一些化工企业。

3 结论

(1) 乐安河湿地各样点的重金属 Cu 含量的变化差异最大,3 种重金属元素含量的差异程度均表现为 Cu > Cd > Pb。底泥和表土的重金属 Cu、Cd 均高于鄱阳湖土壤底质背景值,具有明显的累积效应。

(2) 乐安河水、土环境中 3 个不同水期的重金属污染状况,以丰水期的重金属污染最严重,平水期次之,枯水期的重金属污染相对最轻微。

(3) 不同样点的重金属 Cu 含量的高值区出现在乐安河受纳矿区重金属酸性废水后的邻近区域样点;重金属 Pb 的高值区出现在乐安河下游及入湖区域;重金属 Cd 高值区出现在乐安河的中游,上游和下游重金属 Cd 含量均较小。

(4) 乐安河湿地污染物主成分识别结果表明,乐安河水土环境中重金属 Cu 是最主要的污染物,Cd 是仅次于 Cu 的主要污染物。相关性结果表明,水、底泥和表土重金属 Cu 污染的主要来源是人类矿山开采活动排放的重金属酸性废水;而底泥 Cd 和表土 Cd 的来源也具有一定的相似性,主要受乐安河流域两岸的工业活动所致。各样品中的铅含量与其它指标间的相关性表现不明显,反映出乐安河流域铅污染的来源不同于其他污染物。

参考文献:

- [1] 程志,郭亮华,王东清,等. 我国湿地植物多样性研究进展[J]. 湿地科学与管理, 2010, **6**(2): 53-56.
- [2] Talaue-McManus L, Smith S V, Buddemeier R W, *et al.* Biophysical and socio-economic assessments of the coastal zone; the LOICZ approach [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2003, **46**(3-4): 323-333.
- [3] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world [J]. *Nature*, 2005, **435**(7046): 1179-1186.
- [4] 徐勇,马绍赛,陈聚法,等. 大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(6): 1209-1216.
- [5] Rees J G, Ridgway J, Knox R W O B, *et al.* Sediment-borne contaminants in rivers discharging into the Humber estuary, UK [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, **37**(3-7): 316-329.
- [6] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(1): 79-84.
- [7] Olivares-Rieumont S, De la Rosa D, Lima L, *et al.* Assessment of heavy metal levels in Almendares River sediments-Havana City, Cuba[J]. *Water Research*, 2005, **39**(16): 3945-3953.
- [8] 孟红明,张振克. 石梁河水库沉积物中重金属的累积污染研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(3): 44-50.
- [9] Audry S, Schäfer J, Blanc G, *et al.* Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France) [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(3): 413-426.
- [10] Segura R, Arancibia V, Zúñiga C, *et al.* Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, **91**(1-3): 71-80.
- [11] 黄金良,黄亚玲,李青生,等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1098-1107.
- [12] 李祥平,齐剑英,王春霖,等. 云浮 T1 污染区水体重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1321-1328.
- [13] 李雅娟,杨世伦,侯立军,等. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2368-2375.
- [14] 张雷,秦延文,郑丙辉,等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 108-115.
- [15] 杭小帅,王火焰,周健民. 电镀厂下水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2736-2742.
- [16] 程岩,刘月,李富祥,等. 鸭绿江口及毗邻浅海沉积物重金属富集特征与潜在生态风险比较[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(5): 516-525.
- [17] 田成秀,李文明,郑长远. 河流重金属研究进展[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2011, **27**(4): 25-28.
- [18] Wyżga B, Ciszewski D. Hydraulic controls on the entrapment of heavy metal-polluted sediments on a floodplain of variable width, the upper Vistula River, southern Poland [J]. *Geomorphology*, 2010, **117**(3-4): 272-286.
- [19] 毕春鹃,陈振楼,许世远. 上海白龙港排污口附近潮滩沉积物中重金属总量及其化学形态分析[J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(4): 1-5.
- [20] 万金保,闫伟伟,谢婷. 鄱阳湖流域乐安河重金属污染水平[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 421-427.
- [21] 何宗健,袁胜林. 乐安江流域重金属的来源与分布探析[J]. 广东化工, 2006, **36**(7): 139-141.
- [22] 简敏菲,游海,倪才英. 鄱阳湖饶河入湖段底泥中重金属的污染特性[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2005, **29**(4): 363-366.
- [23] 万金保,王建永,吴丹. 乐安河沉积物重金属污染现状评价[J]. 环境科学与技术, 2008, **3**(11): 130-133.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] 简敏菲,徐鹏飞,熊建秋,等. 乐安河-鄱阳湖段湿地表土重金属污染风险及水生植物群落多样性评价[J]. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(4): 415-421.
- [26] 马婷,赵大勇,曾巾,等. 南京主要湖泊表层沉积物中重金属污染潜在生态风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(6): 37-42.
- [27] 鄱阳湖研究编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [28] Simeonov V, Stratis J A, Samara C, *et al.* Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4119-4124.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行