

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 ..... 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 ..... 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 ..... 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 ..... 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 ..... 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 ..... 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 ..... 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 ..... 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 ..... 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 ..... 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 ..... 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 ..... 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及p53的诱导效应 ..... 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 ..... 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 ..... 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 ..... 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 ..... 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 ..... 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 ..... 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 ..... 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 ..... 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 ..... 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 ..... 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 ..... 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 ..... 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 ..... 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 ..... 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中PM<sub>2.5</sub>的特征分析 ..... 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 ..... 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>低温催化还原NO性能研究 ..... 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的CO<sub>2</sub>吸收和再生特性 ..... 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 ..... 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 ..... 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 ..... 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 ..... 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 ..... 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 ..... 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 ..... 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施CO<sub>2</sub>对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 ..... 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 ..... 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 ..... 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 ..... 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 ..... 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 ..... 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell生物传感器在Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>冲击活性污泥系统分析中的应用 ..... 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 ..... 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 ..... 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 ..... 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 ..... 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 ..... 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 ..... 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 ..... 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

# 扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别

苏丹, 臧淑英\*, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗

(哈尔滨师范大学黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 选取扎龙湿地南部围湖造田、湖水养殖典型湖泊——南山湖为研究区, 分析 NSH2 沉积岩芯中 Hg、Cd、Pb、Cr、As、Mn、Ag、Cu、Co、Fe 和 Zn 这 11 种重金属元素总量的垂向分布特征, 结合颗粒组成指标, 采用主成分分析的方法, 并辅以<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 测年数据, 研究了自 1829 年以来该湖区沉积物重金属元素污染特征、来源及污染历史. 结果表明: ①近两百年以来沉积物沉积速率经历了由慢到快再到慢的过程, 沉积历史与南山湖流域人类的生产活动和水土保持政策相吻合; ②1957 年以前各元素含量变化趋势平稳, 1957~1985 年间存在小幅波动, 1985 年以后变化明显, 其中 Hg、Cd 和 Ag 含量明显偏高; ③NSH2 沉积岩芯重金属污染来源以生活污水、化肥农药的流失以及煤与汽油等燃料的燃烧为主, 其次是有机质降解、岩石风化和侵蚀, 还存在工业排污源, 贡献率分别为 50.14%、19.90% 和 10.32%. 南山湖重金属污染具有一定的潜在风险, 在当地湖泊湿地污染治理中应予以足够的重视, 此研究可为扎龙湿地湖区生态环境的整治与改善提供基础性的数据资料.

**关键词:** 沉积岩芯; 重金属污染; 人类活动; 南山湖; 来源判别

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1816-07

## Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland

SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, SUN Li, JIA Xiao-dan, LI Miao

(Key Laboratory of Geographical Resources and Environmental Remote Sensing, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

**Abstract:** NSH2 sediment core from Nanshan Lake in the south of Zhalong wetland was studied, which was a typical lake for both empolder and aquaculture. The vertical distributions of heavy metals (Hg, Cd, Pb, Cr, As, Mn, Ag, Cu, Co, Fe and Zn) were investigated. The method of principal component analysis (PCA) was adopted to apportion the sources of heavy metals, and particle size, combined with <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> dating data were used to indicate characteristics, sources and polluted history of heavy metals in lake sediments since 1829. The results showed that: ① the trend of changes in accumulation in the sedimentation was rather slow in the earlier stage, then was fast in the middle stage, and finally slowed down again in the later stage. The history of elements pollution is correspondent with the production of human activities and policies of soil and water conservation of Nanshan Lake; ② the contents of all elements varied smoothly before 1957, and which fluctuated slightly from 1957 to 1985. The contents of Hg, Cd and Ag increased obviously since 1985. The sources of heavy metals determined were mainly from sewage, the loss of fertilizers, and combustion of fuel such as coal and gasoline; ③ natural sources of the degradation of organic matter, rock weathering and erosion, as well as the source of industrial emissions, with the contributions of 50.14%, 19.90% and 10.32%, respectively. High potential risk of heavy metals existed in NSH2 sediment core. Hence, enough attention must be paid to the pollution control of lakes. Therefore, this study can provide basic data for help wetland ecological environment improvement in Zhalong wetland.

**Key words:** core sediment; heavy metal contamination; human activities; Nanshan Lake; sources identification

重金属污染是水体环境中重要的污染问题. 随着经济迅速发展及人口剧增, 大量的工业、农业废水及生活污水被直接或经由河流排入湖泊、海洋等, 导致水体环境日益恶化<sup>[1]</sup>. 水体沉积物既是重金属污染物的汇, 又是对水质有潜在影响的次生污染源, 重金属污染物一旦进入湖泊水体就会对湖泊生态造成潜在的长期影响<sup>[2]</sup>. 近年来, 国内外对湖泊沉积研究表明<sup>[3-7]</sup>, 湖泊沉积记录的是自然演变和人类活动的混合信息, 具有对环境变化的敏感性, 同时湖泊沉积也记录了流域人类活动的信息以及湖泊生态环境的演变过程, 通过湖泊沉积记录研究, 可以高分辨率地揭示流域环境变化的重要信息. 因而如何从环

境指标中识别人类活动的信息, 区分自然演变和人类活动影响分量, 逐渐成为地学工作者对湖泊沉积研究的重要方向之一. 基于沉积物在水环境中的重要作用, 水体沉积物的重金属污染状况成为检测湖泊重金属污染的重要指标.

扎龙湿地位于黑龙江省西部, 为乌裕尔河下游尾间湖形成的苇草湖沼, 湖泊众多, 由于分布在乌裕尔河流域沿岸的克东、克山、依安、富裕、林甸、泰来

收稿日期: 2011-11-21; 修订日期: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030743); 黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目(2010td10)

作者简介: 苏丹(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊湿地沉积及 3S 技术应用, E-mail: sarah912@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zsy6311@163.com

等城市发展使之成为近 50 年来人类生活、围湖造田、湖泊养殖、工业生产等活动较为集中和相对强烈的地区。扎龙湿地开始面临诸多环境问题,其中生态系统相应发生变化,湿地功能的逐渐下降,湖沼环境污染日益严重,人类健康受到潜在威胁等情况备受关注<sup>[8]</sup>。通过建立年代序列,对湖泊沉积物中的重金属及其相关环境指标的研究,可以清楚地了解历史时期人与自然的相互作用下湖泊沉积生态环境的演变过程,特别是近代高强度的人类活动对湖泊环境所产生的影响。本研究选取位于扎龙湿地南部,用以发展湖泊养殖类的南山湖作为研究区,分析了柱状沉积物中 Hg、Cd、Pb、Cr、As、Mn、Ag、Cu、Co、Fe 和 Zn 这 11 种主要重金属元素总量的统计特征以及垂向分布特征,采用主成分分析的方法,并与颗粒组成指标进行相关性分析,结合  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的测年结果,通过与人类活动记录的对比分析,初步定量分析了自然、人为因素对研究区重金属污染特征、来源及污染历史,以期今后进一步探讨湖泊环境演化过程及其对流域人类活动的响应机制提供基础。

## 1 研究区域概况

南山湖 ( $46^{\circ}48' \sim 46^{\circ}55' \text{N}$ ,  $123^{\circ}52' \sim 123^{\circ}57' \text{E}$ ) 位于泰来县东北的大兴镇东 13 km 处。系乌裕尔河尾间的河迹洼地湖。水位 140.0 m, 面积 43.0 km<sup>2</sup>, 最大水深 2~3 m, 蓄水量  $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。湖区属温带半湿润气候, 年均气温 4.2℃, 1 月平均气温 -17.6℃, 7 月平均气温是 23.4℃。多年平均无霜期 130 d, 年降水量 368.7 mm。河面依赖乌裕尔河和湖面降水补给, 在引嫩济连工程兴建后, 枯水期可通过八一幸福渠引水, 先入南山湖, 而后注入连环泡, 成为半闭流类微咸水湖, 用以发展湖泊养殖类<sup>[9]</sup>。

## 2 样品采集与指标测定方法

### 2.1 样品采集

2010 年 7 月, 利用重力采样器在南山湖湖心区 ( $46^{\circ}51'22'' \text{N}$ ,  $123^{\circ}54'25'' \text{E}$ ) 采集了具有代表性的约 20 cm 的柱状沉积岩芯 NSH2 (图 1)。取芯过程中沉积岩芯保持完好, 悬浮层未受扰动, 界面水清澈透明。沉积物均为灰黑色粉砂质淤泥, 将所得沉积岩芯去掉靠近采样器壁样品后, 野外现场按 0.5 cm 间隔连续切割分样, 获得的 40 个样品立即置于聚乙烯袋中, 密封保存, 混合均匀, 自上而下连续编号, 依次为 1~40 号, 带回实验室内常温风干, 一部分研磨、

过 100 目筛后待重金属元素含量测定, 另一部分用于粒度等理化指标的测定。

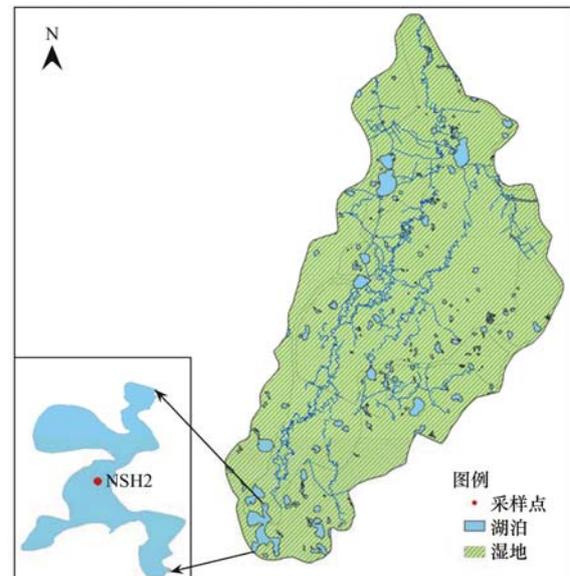


图 1 南山湖采样点位置示意

Fig. 1 Sediments sampling site of Nanshan Lake

### 2.2 样品指标测定

重金属总量分析采用 CEM MARS 微波消解, 利用美国 Agilent 7500cx 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定, 实验过程中为保证实测误差值最小, 除使用电子级硝酸 (进口) 外, 其余试剂均为优级纯, 所用的水均为 Mili-Q 制超纯水, 标准采用美国 Agilent 随机标准溶液 (Environmental Calibration Standard), 并以 5% 稀硝酸进行空白分析 (扣除超纯水本底), 质控样误差不超过 5%。粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪测定, 样品平行分析误差 < 5%。沉积岩芯的沉积年代建立采用  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  测试  $\gamma$  分析方法, 由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室分析完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 沉积岩芯 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 年代序列的建立及沉积速率变化

湖泊沉积速率的确定有助于了解湖泊沉积过程及其与人类活动的关系。 $^{210}\text{Pb}$  是一种半衰期为 22.3 年、自然界中广泛存在的天然放射性核素, 大量文献研究表明  $^{210}\text{Pb}$  在测定近百年来地质年龄上已获得成功<sup>[10-16]</sup>, 对示踪百年时间尺度上的流域侵蚀速率、湖泊沉积速率及其耦合关系等具有重要价值<sup>[1]</sup>。本研究沉积年代的建立采用  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  测定沉积速率, 推算出不同层段沉积物的沉积年龄, 结果表明

NSH2 岩芯代表了扎龙湿地南山湖中心湖区自 1829 ~ 2009 年近两百年来沉积历史。

由图 2(a) 可知,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度随深度大致呈指数衰减趋势, 它所存在的异常波动可能在一定程度上与人类活动以及沉积速率的变化有关. 同时考虑到南山湖沉积物堆积速率随年代而变化, 用常量初始含量模式 (CIC), 根据最小二乘法求得  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度 ( $X$ ) 与深度 ( $Y$ ) 的关系为  $Y = 40.9201 - 5.95405 \ln(X)$ ,  $r = 0.83124$ , 以此计算出整个沉积岩芯的平均沉积速率为  $0.18 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$  [14]. NSH2 采样时间为 2010 年 7 月, 把沉积岩芯的最上层年代定为 2009 年, 结合平均沉积速率通过外推法推出沉积岩芯的最底层年代为 1829 年, 并算出 NSH2 各层段的沉积速率及沉积年龄, 结果见表 1、图 2(b) 和 2(c). 根据

计算结果可以看出, 虽然在过去近两百年来某些层沉积速率的变化较复杂, 但随着年代的增加南山湖沉积物总体上经历了一个沉积速率从慢到快再到慢的变化过程, 初步推测, 南山湖的沉积速率变化与人类活动存在着一定的关系 [15]. 其中, 1957 年之前 NSH2 岩芯沉积速率呈缓慢的上升趋势, 并维持在较低值的范围内, 说明沉积物很少受到人类活动的影响 [16]; 在 1957 ~ 1985 年间沉积速率最大, 达到  $0.240 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 由于处于农业迅速发展、工业起步的时期, 加以各种治理和管理措施较差等因素这一阶段成为人为活动强烈干扰阶段; 1985 年至今, 随着治理和管理措施的不断加强, 对生态环境的重视程度的不断提高, 这种境况已经有所改善, 因此沉积速率有所减小 [17].

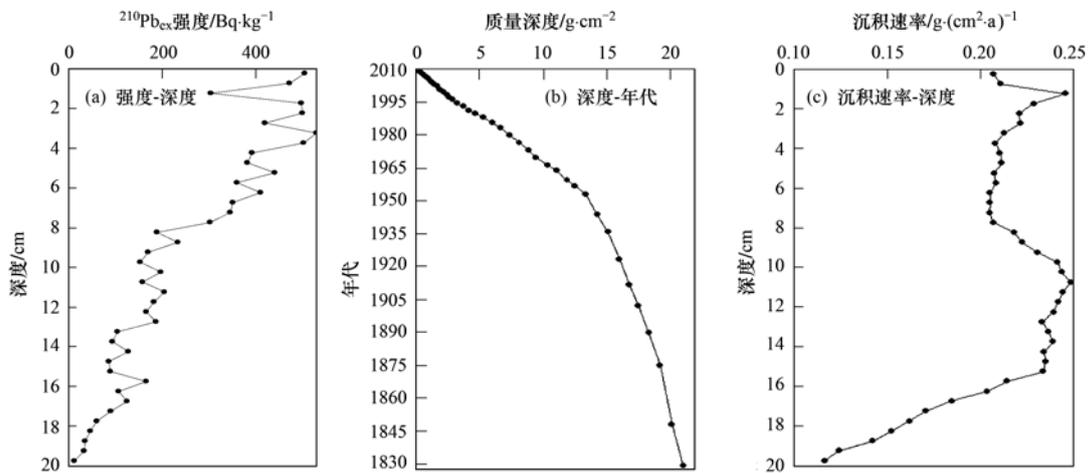


图 2  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  测年指标和沉积速率垂向图

Fig. 2 Result of the vertical  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dating indexes in NSH2 core

表 1 NSH2 沉积岩芯沉积速率

Table 1 Sedimentation rate in NSH2 core

沉积物段/cm	沉积年份/a	平均沉积速率/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$
15.0 ~ 20.0	1829 ~ 1957	0.176
10.5 ~ 15.0	1957 ~ 1985	0.240
0 ~ 10.5	1985 ~ 2009	0.216

表 2 柱状沉积物主要重金属含量统计特征 ( $n = 40$ )/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 2 Character of concentration main heavy metals

项目名称	in core sediments ( $n = 40$ )/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$				
	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数
Hg	0.06	1.24	0.27	0.26	0.96
Ag	0.19	0.86	0.45	0.20	0.44
Cd	0.13	0.49	0.25	0.99	0.04
As	69.78	107.08	88.86	8.85	0.11
Co	1.90	2.61	2.17	0.19	0.09
Cu	3.79	5.43	4.31	2.37	0.55
Pb	18.12	27.75	21.45	2.58	0.12
Zn	10.46	18.62	12.80	1.79	0.13
Cr	15.12	28.43	19.59	2.58	0.13
Mn	178.65	278.75	210.18	23.56	0.11
Fe	7960	11315	9484	789.53	0.08

### 3.2 沉积岩芯重金属污染特征

#### 3.2.1 沉积岩芯重金属元素统计特征

表 2 为 NSH2 沉积岩芯 11 种主要重金属元素总量统计特征结果. 从表中得知, Hg、Cd、Pb、Cr、As、Mn、Ag、Cu、Co、Fe 和 Zn 这 11 种重金属元素平均含量分别为 0.27、0.25、21.45、19.59、88.86、210.18、0.45、4.31、2.17、9485 和 12.80  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 从变异系数看, Hg 的变异性最大, 变异系数平均为 0.96; Cu 和 Ag 的变异情况也比较突出, 变异系数达到 0.55 和 0.44; 比较而言, Co、Fe 和 Cd 的变异

相对较小, 均小于 0.1, 其中 Cd 最小, 为 0.04. 11 种重金属元素的变异程度顺序为:  $\text{Hg} > \text{Cu} > \text{Ag} > \text{Zn} = \text{Cr} > \text{Pb} > \text{As} = \text{Mn} > \text{Co} > \text{Fe} > \text{Cd}$ . Hg、Cu 和 Ag 元素

的含量显现出较大的垂直异质特征,明显不同于其余 8 种重金属元素,其含量可能与外界人为因素的影响密切相关.由此表明南山湖沉积物可能受到重金属污染,尤其上述 3 种生物毒性显著的重金属元素的污染,其含量的增加,意味着湖区居民生活环境的恶化<sup>[18,19]</sup>,存在一定的潜在生态风险.

### 3.2.2 沉积岩芯重金属垂直分布特征

湖泊湿地沉积物重金属元素总量的垂向分布可以看作各元素的沉积记录,就岩芯整体元素含量变化情况而言在不同阶段具有不同的地球化学行为,结合测年结果可以明确湖泊大致的污染情况.

由图 3 可以看出,NSH2 岩芯各重金属元素中,Co、Cu 整体含量相对稳定,As 元素含量自下而

上总体上呈现先增后减的趋势,其余 8 种元素都呈现出不同程度的增加.通过综合分析各元素含量的垂向变化,NSH2 岩芯重金属沉积记录可划分为 3 个阶段,1957 年(岩芯深度 15 cm)之前各元素含量变化趋势均相对平稳;1957~1985 年间(岩芯深度 10.5~15 cm)Co、Cu、Cd、Mn 和 Cr 含量存在小幅波动,As 元素含量增加,其他元素含量变化稳定;1985 年以来(岩芯深度 10.5 cm)Zn、Ag、Cd、Mn、Pb 和 Hg 元素含量呈上升趋势,尤以 Hg、Cd 和 Ag 上升幅度最为明显,其含量最高值分别是 1985 年以前相应含量均值的 2.54, 1.74 和 1.53 倍,由此表明在 1985~2009 年这一阶段存在不同程度的 Hg、Cd 和 Ag 元素的污染.

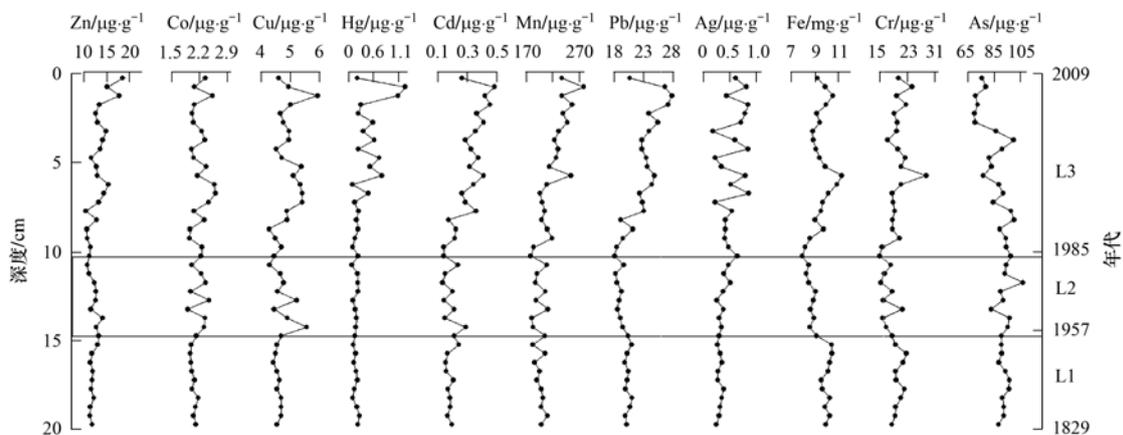


图 3 沉积物重金属元素含量垂向图

Fig. 3 Concentrations of heavy metal elements of the core sediments in different depths and ages

### 3.3 沉积岩芯重金属污染来源判别

#### 3.3.1 重金属元素含量与粒度组分相关性分析

已有研究认为,湖泊沉积物中重金属元素含量在自然状态下与沉积物中黏土或粉砂含量成正相关,人为污染可改变某些重金属含量与粒度的相关性<sup>[20]</sup>.对比 NSH2 岩芯重金属元素含量与粒度组分

相关分析结果,Cd、Ag、Cu 和 Co 这 4 种元素与黏土( $<4 \mu\text{m}$ )及细粉砂( $<16 \mu\text{m}$ )等细颗粒含量有较好的正相关性,尤其以 Cu 的相关性为最高,Co 次之,Cu 和 Co 与黏土的相关性分别是 0.469 和 0.416 ( $P < 0.01, n = 40$ ),与细粉砂的相关性分别是 0.489 和 0.434 ( $P < 0.01, n = 40$ ),说明这 4 种元素倾向于

表 3 NSH2 岩芯重金属元素同粒度组分 Pearson 相关关系<sup>1)</sup> ( $n = 40$ )

Table 3 Matrix of Pearson between heavy metals and particle size of the NSH2 core ( $n = 40$ )

重金属	$<4 \mu\text{m}$	$4 \sim 16 \mu\text{m}$	$16 \sim 32 \mu\text{m}$	$32 \sim 64 \mu\text{m}$	$64 \sim 100 \mu\text{m}$	$>100 \mu\text{m}$
Hg	-0.037	0.111	0.326 *	0.181	0.088	-0.151
Pb	0.330 *	0.394 *	0.550 **	0.557 **	0.317 *	-0.570 **
Cd	0.379 *	0.443 **	0.602 **	0.608 **	0.367 *	-0.639 **
Ag	0.451 **	0.474 **	0.589 **	0.524 **	0.334 *	-0.646 **
As	-0.248	-0.309	-0.423 **	-0.436 **	-0.247	0.441 **
Zn	0.091	0.216	0.345 *	0.323 *	0.143	-0.285
Cu	0.469 **	0.489 **	0.464 **	0.199	-0.014	-0.474 **
Cr	-0.121	-0.030	0.124	0.230	0.067	-0.039
Mn	0.104	0.213	0.419 **	0.567 **	0.440 **	-0.432 **
Fe	0.032	0.108	0.167	0.039	-0.196	-0.043
Co	0.416 **	0.434 **	0.337 *	0.032	-0.065	-0.360 *

1) \* 表示 0.05 水平上显著相关, \*\* 表示 0.01 水平上极显著相关

在细颗粒物中富集.同时,通过元素间相关分析可以看出 Cu 与 Co 在 0.01 水平上呈极显著相关( $r = 0.783, n = 40$ ),表明两者具有相似的来源,由此可以判别 Cu、Co 元素主要为自然沉积.

### 3.3.2 沉积岩芯重金属主成分分析

对重金属元素含量进行主成分分析,可以定量了解沉积岩芯中不同来源的重金属在该元素含量中占据的份额<sup>[21]</sup>.如表 4,通过分析提取的 3 个主要成分共占据了重金属含量样本信息量的 80.36%.第一主成分 PC1 的贡献率为 50.14%,表现为 Pb、Cd、Ag 和 Mn 有极高的正载荷,As 呈现较高的负载荷.已有研究表明沉积物中的 As 和 Cd 含量与生活排污和化肥农药的流失严重有着密切联系,南山湖位于农业区,因此 PC1 是种植业日益扩展产生的生活排污和化肥农药流失来源;除此之外,煤与汽油等燃料的燃烧也是 Pb、Mn 污染的一个重要来源.第二主成分 PC2 的贡献率为 19.90%,Zn、Cu 和 Co 为代表元素.由于 Co、Cu 属自然来源,因此能够认定 PC2 为自然来源,基本没有受到人类污染.PC3 的贡献率为 10.32%,反映了 Cr、Fe 的富集程度.随着污水处理厂处理水量的增加以废水残渣形式存在的 Cr 的不断得到积累,现代工业排放所带来的各种铁化合物通过大气降尘、污水扩散,以不同赋存状态富集在南山湖表层沉积物中并不断沉降,所以 PC3 主要表征了工业生产对沉积物中污染物的影响.同时,Hg 元素受 PC1 与 PC3 的共同支配,说明 Hg 元素来源于生活排污和化肥农药流失以及工业生产等.

表 4 主成分分析结果

Table 4 Result of factor analysis

项目	PC1(50.14%)	PC2(19.90%)	PC3(10.32%)
Cd	0.939	0.185	0.199
Mn	0.868	-0.081	0.265
Ag	0.855	0.389	0.133
Pb	0.840	0.292	0.362
Co	-0.081	0.938	-0.167
Cu	0.309	0.869	0.052
Zn	0.204	0.690	0.236
Fe	0.120	0.169	0.916
Cr	0.388	-0.237	0.816
Hg	0.481	0.207	0.453
As	-0.804	-0.032	-0.095

## 4 讨论

通过对南山湖 NSH2 岩芯重金属元素的分析,结合粒度、沉积速率与沉积年代序列,结果表明重金属元素沉积表现出特有的阶段性特征,分别为 L1 (1829 ~ 1957 年)自然沉积阶段、L2 (1957 ~ 1985

年)人类活动初期阶段和 L3 (1985 ~ 2009 年)人类活动增强阶段(图 3).

L1 为自然沉积阶段,沉积岩芯中重金属元素含量变化维持相对稳定的状态,与细颗粒物变化基本一致,与砂砾呈相反趋势.1957 年之前流域人类活动以农业为主,人类的活动强度较小,沉积物平均沉积速率较低,呈现缓慢上升的趋势.表明沉积物来源较稳定,为自然条件下的湖相沉积,较少受人为污染的影响.

L2 为人类活动初期阶段,20 世纪 50 年代末至 80 年代初流域内的大量植被砍伐以及农田面积增大,从而加剧了土地翻动,这是导致此阶段南山湖沉积速率从慢到快变化的重要原因之一,其次可能是受水流冲刷的波动.沉积物中重金属 Zn、Pb 和 Hg 元素含量延续了上一阶段稳定的变化,其他 8 种元素存在不同程度的波动.其中,As、Ag 元素含量增加,Fe、Cr 元素含量减少,Co、Cu、Cd 和 Mn 元素含量存在小幅波动.这种变化与人类活动的扰动、气候变化等外界环境变化的影响有关.八一幸福运河中第二条引嫩工程 1957 年开工兴建至 1959 年竣工是导致沉积物中砂砾含量急剧增加的主要原因,在此之后由于流量过小,加上连续几年干旱,1979 年几乎全部干涸,南山湖也受到干旱严重威胁<sup>[22-24]</sup>,粒度相应表现为细颗粒物含量急剧下降.沉积物中粗颗粒物含量可以指示低水位时期的干旱气候.由此,该研究区这一阶段可能出现过大范围的湖水干涸现象,后存在大规模的河径流的冲刷导致湖岸沉积物的搬运,带入了大量的砂砾,这一推测基本得到了证实,同时,农业生产中使用的农药、化肥经水流冲刷随砂砾排放到南山湖中,致使形成 As、Ag 元素污染,存在一定的潜在生态风险.

L3 为人类活动增强阶段,南山湖沉积速率从快变慢,这可能是由于采取多种水土保持的措施,如退耕还林等在一定程度上使南山湖流域内的地表物质扰动得到了控制.各元素变化趋势较 L2 阶段波动大,Hg、Cd 和 Ag 这 3 种元素含量在此阶段存在明显的上升趋势,Cr、Fe 元素含量之间具有很强的相关性,而 Fe、Mn 二者为共生关系,在前面的主成分分析中,已经得出 Cr、Fe 是工业生产的主要污染物,因此,Cr、Fe、Mn 元素来源一致.说明这一阶段为经济迅速发展时期,南山湖周边除农业生产、湖水养殖外,工业生产也得到了迅速发展.随着科学技术的不断发展,随着治理和管理措施的不断加强,对湖泊湿地生态环境的重视程度的不断提高,在 2006 年之后

Hg、Cd、Mn 和 Pb 这 4 种元素含量有所减少. 但在扎龙湖泊湿地污染治理中, 应对南山湖沉积物中仍存在一定潜在生态风险的重金属元素威胁予以足够的重视, 采取适当的方法对这种威胁予以消除或者降低, 如在南山湖种植过程中要努力控制化肥和农药的流失, 加强对生活、工业生产排污的监测等, 以确保湖泊水环境、渔业生产养殖环境及周围居民的身体健康安全.

## 5 结论

(1) NSH2 柱状沉积物自 1829 ~ 2009 年以来经历了从慢到快再到慢的沉积过程, 初步推测, 沉积速率的这种变化趋势与南山湖流域人类的生产活动和水土保持政策相吻合.

(2) NSH2 样品中 11 种重金属元素的平均变异程度表现为:  $Hg > Cu > Ag > Zn = Cr > Pb > As = Mn > Co > Fe > Cd$ . 其中, Hg、Cu 和 Ag 元素的含量显现出较大的垂直异质特征, 其垂直分布变异性与外界人为因素的影响密切相关, 其近表层含量的增加, 意味着湖区居民生活环境的恶化. 各重金属元素含量垂直分布特征表明, 在 1957 年之前变化趋势平稳, 1957 年至 1985 年间存在小幅波动, 1985 年以后, 生物毒性显著的元素 Hg、Cd 和 Ag 含量明显升高. 说明 NSH2 沉积物已经受到了如 Hg、Cd 和 Ag 重金属污染, 具有较高的潜在风险, 在当地环境治理中应予以足够的重视.

(3) 主成分分析判别出沉积物中的重金属元素主要有 3 大来源, 分别是生活污水, 农业退水与化石燃料燃烧, 自然来源以及工业排污, 它们的贡献率分别为 50.14%、19.90% 和 10.32%. 此结果反映了南山湖围湖造田、湖泊养殖的区域生态环境. NSH2 重金属污染特征、来源及污染历史与南山湖流域经济发展阶段相吻合, 此研究可为扎龙湿地湖区生态环境的整治与改善提供基础性的数据资料.

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室协助完成沉积物年代测定, 作者在此表示衷心的感谢.

### 参考文献:

- [ 1 ] 刘恩峰. 长江中下游典型湖泊沉积物地球化学特征及人类活动响应——以太湖、太白湖为例 [D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005. 1-2.
- [ 2 ] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险 [J]. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 61-68.
- [ 3 ] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 307-313.
- [ 4 ] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展 [J]. 科学通报, 1999, **44**(6): 579-587.
- [ 5 ] 祝云龙, 姜加虎. 湖泊湿地沉积物重金属污染的研究现状与进展 [J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(22): 11902-11905, 11928.
- [ 6 ] Haworth E Y, Lund J W. Lake sediments and environmental history [M]. Leicester: Leicester University Press, 1984. 11-68.
- [ 7 ] Taylor D W. Aspects of freshwater mollusc ecological biogeography [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1988, **62**(1-4): 511-576.
- [ 8 ] Yin Z Q, Qin X G, Liu J Q, *et al.* Formation background of the Zhalong wetland and its eco-environmental significance [J]. Progress in Geography, 2006, **25**(3): 32-38.
- [ 9 ] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 510.
- [ 10 ] 姚书春, 薛滨, 李世杰, 等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 569-573.
- [ 11 ] 李春梅, 王红亚. 贵州省西南部麦岗水库沉积物的<sup>137</sup>Cs和<sup>210</sup>Pb测年与沉积速率研究 [J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 215-219.
- [ 12 ] Simms A D, Woodroffe C, Jones B G, *et al.* Use of <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs to simultaneously constrain ages and sources of post-dam sediments in the Cordeaux reservoir, Sydney, Australia [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, **99**(7): 1111-1120.
- [ 13 ] 万国江. 现代沉积的<sup>210</sup>Pb计年 [J]. 第四纪研究, 1997, **17**(3): 230-239.
- [ 14 ] 叶崇开. <sup>137</sup>Cs法和<sup>210</sup>Pb法对比研究鄱阳湖近代沉积速率 [J]. 沉积学报, 1991, **9**(1): 106-114.
- [ 15 ] Wan G J, Santschi P H, Sturm M, *et al.* Natural (<sup>210</sup>Pb, <sup>7</sup>Be) and fallout (<sup>137</sup>Cs, <sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu, <sup>90</sup>Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland [J]. Chemical Geology, 1987, **63**(3-4): 181-196.
- [ 16 ] 胥思勤, 万国江. 云南省程海现代沉积物中<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb的分布及计年研究 [J]. 地质地球化学, 2001, **29**(1): 28-31.
- [ 17 ] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 人类活动影响下的胶州湾近百年环境演变的沉积记录 [J]. 地质学报, 2006, **80**(11): 1170-1178.
- [ 18 ] 吴艳宏, 刘恩峰, 邴海健, 等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2010, **40**(6): 751-757.
- [ 19 ] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖沉积物重金属和营养盐变化特征及污染历史 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(增刊 II): 73-80.
- [ 20 ] 林琳, 吴敬禄. 太湖梅梁湾沉积岩芯元素地球化学记录的多元统计分析 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 76-82.
- [ 21 ] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1377-1383.

- [22] 黑龙江人民出版社编纂委员会. 杜尔伯特蒙古族自治县志 [M]. 黑龙江: 黑龙江人民出版社, 1996. 221-224.
- [23] 黑龙江人民出版社编纂委员会. 黑龙江省志第十一卷水产志 [M]. 黑龙江: 黑龙江人民出版社, 1996. 153-154.
- [24] 泰来县志地方志办公室编委会. 泰来县志 [M]. 黑龙江: 黑龙江人民出版社, 1992. 56-57.
- [25] 刘伟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(3): 538-543.
- [26] 李云海, 陈坚, 黄财宾, 等. 泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价 [J]. 环境科学, 2010, 31(4): 931-938.
- [27] 卢少勇, 焦伟, 金相灿, 等. 环太湖河流沉积物重金属污染及其稳定度分析 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2311-2314.
- [28] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾天津段潮间带沉积物柱状样重金属污染特征 [J]. 环境科学, 2006, 27(2): 267-273.
- [29] 朱立平, 陈玲, 李炳元, 等. 西昆仑山南红山湖沉积反映的过去 150 年湖区环境变化 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(7): 601-607.
- [30] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价 [J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2405-2412.

## 关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

## CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China .....	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China .....	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed .....	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline .....	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone .....	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River .....	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland .....	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China .....	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea .....	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current .....	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System .....	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu .....	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow ( <i>Gobiocypris rarus</i> ) .....	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish ( <i>Brachydanio rerio</i> ) .....	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter .....	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM .....	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions .....	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater .....	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process .....	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process .....	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor .....	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters .....	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment .....	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition .....	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability .....	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City .....	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in the Suburb of Shenzhen .....	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission .....	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO <sub>2</sub> Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt .....	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil .....	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows .....	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers .....	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production .....	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil .....	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain .....	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings .....	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake .....	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi .....	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO <sub>2</sub> Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant .....	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis .....	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR .....	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil .....	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City .....	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose .....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor .....	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples .....	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma .....	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis .....	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill .....	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate .....	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis .....	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis .....	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

# 《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行