

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨圆, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析

段木春, 肖海丰*, 臧淑英

(哈尔滨师范大学地理科学学院, 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: 通过对西大海湖心柱状沉积岩芯有机质(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)、磷形态和粒度指标的测试和分析, 探讨其垂向分布特征及影响因素. 结果表明, 营养盐中 OM、TN 和 TP 的含量分别为 0.633% ~ 2.756%、0.150% ~ 0.429% 和 648.00 ~ 1480.67 mg·kg⁻¹. Ca-P 是 TP 的主要部分, 占 TP 含量 66.04%. 1843 ~ 1970 年间, Ca-P、IP、OM 含量变化较小, Fe/Al-P、OP、TP、TN 含量波动较大; 1970 ~ 1996 年间, Ca-P、IP、TP 含量变化均呈减小趋势, Fe/Al-P、OP、OM 含量不同程度上先减少后增加, TN 波动较大; 1996 ~ 2009 年营养元素含量相对波动较大, Fe/Al-P、OP 和 OM 的平均含量是 3 个阶段中最高的. 西大海湖沉积岩芯营养元素污染来源以工业废水、生活污水和化肥农药的流失为主. 沉积物中 C/N 比值显示有机质主要来源于水生生物. 沉积物粒度组成以黏土和细粉砂为主. 相关性研究表明, Ca-P、IP 与 TP 均呈显著的正相关关系, 表明 Ca-P 对 IP、TP 的增长贡献大.

关键词: 西大海湖; 沉积物; 营养盐; 磷; 氮; 有机质; 粒度

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2472-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.020

Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidahai Lake

DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng*, ZANG Shu-ying

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

Abstract: The organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), the morphological changes of phosphorus and the particle size in columnar sediment core of Xidahai Lake were analyzed, to discuss the vertical distribution characteristics and influencing factors. The results showed that the contents of OM, TN and TP were 0.633% - 2.756%, 0.150% - 0.429% and 648.00 - 1480.67 mg·kg⁻¹ respectively. The contents of Ca-P, IP and OM changed less, the contents of Fe/Al-P, OP, TP and TN fluctuated from 1843 to 1970; The contents of Ca-P, IP and TP tended to decrease, the contents of Fe/Al-P, OP and OM first decreased and then increased to different degree, TN fluctuated largely from 1970 to 1996; The nutrient elements contents showed relatively large fluctuation from 1996 to 2009, the average contents of Fe/Al-P, OP and OM were the highest in the three stages. The sediment core nutrients pollution sources were mainly from industrial wastewater, sewage and the loss of fertilizers of Xidahai Lake. The ratio of C/N in the sediments showed that organic matter was mainly from aquatic organisms. The sediment particle size composition was dominated by clay and fine silt. The correlation studies showed that Ca-P, IP and TP were significantly positively correlated, showing that the contribution of Ca-P to IP and TP growth was large.

Key words: Xidahai Lake; sediment; nutrient salt; phosphorus; nitrogen; organic matter; particle size

沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分, 是氮磷等重要营养元素的储存库. 湖泊沉积物具有连续性好、分辨率高、包含信息丰富等特点, 是记录湖泊流域人类活动变化以及湖泊环境演化的档案^[1]. 氮和磷是湖泊生态系统中的重要营养元素, 也是引起湖泊富营养化的重要因子. 湖水中磷的来源主要为外源输入和内源释放, 当外源输入得到控制时, 蓄积在沉积物中的磷会在一定条件下向水体释放, 再次对水体造成污染^[2]. 磷在沉积物中可以与钙、铁等元素以晶体或无定形的形式结合, 依据其结合强度的不同, 可将沉积物中的磷分为不同形态, 不同形态磷对湖泊污染程度的影响不同, 不同形态磷的释放、迁移能力及生物有效性也不同. 已有研究表明, 沉积物中 Fe-P 的百分含量与湖泊水质污染程度

较一致, 富营养化越严重的区域 Fe-P 的含量越高; 湖泊 pH 值、氧化还原电位等发生变化时, 不同形态磷的释放和迁移不同^[3~5]; 通常认为 Ca-P 难以被生物所利用, Fe/Al-P 较易为生物所利用, OP 部分可被生物利用. 湖泊沉积物中的氮除了流域自然输入外, 人类活动也会对其含量产生影响. 湖泊沉积物中的有机质一般来自生活污水、农业退水和水生生物死亡残骸长期积累^[6,7].

收稿日期: 2014-12-19; 修订日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972115); 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); 哈尔滨师范大学预研项目(11XYG-11)

作者简介: 段木春(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊沉积与环境, E-mail: duanmuchun@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaohai Fengdejia@sina.com

近年来,关于湖泊沉积物中营养盐的研究主要集中在:湖泊沉积物中氮(总氮和各形态氮)、磷(总磷和各形态磷)和有机质的时间、空间变化方面^[8-10],沉积物中氮、磷的来源、污染状况和评价的研究^[11],沉积物中氮、磷的吸附和解吸行为的研究^[12],沉积物中氮、磷、有机质的迁移规律、释放风险和生物有效性研究^[13,14],通过野外和室内试验探讨各种环境因素(包括生物因素)对沉积物中氮、磷形态演化的影响^[15],沉积物中氮、磷、有机质之间以及与粒度、重金属等指标间关系的研究^[16],以及磷酸酶对沉积物中磷活性影响的研究等方面^[17]. 已有研究表明,不同湖泊沉积物中营养盐的垂向分布特征有较大差别,主要是由于湖泊环境、湖泊接纳水体水质和湖泊流域环境状况的不同所导致的. 湖泊沉积物营养元素的积累是水体演化历史的真实记录,对其进行分析,可以判断水体的水质状况及其变化过程,进而追踪物质来源,揭示特定水域的环境演变过程及人类活动对环境的影响. 因此,分析湖泊沉积物中营养盐的沉积记录,对了解湖泊流域环境变化、人为污染程度和历史有重要意义. 西大海湖位于大庆市大同区,大同区是农副产品生产基地,1959 年大庆市第一座油田——松基 3 井喷出工业性油流后,揭开了大庆油田的开采序幕,大同区内有大庆输油公司、林源炼油厂、新华发电厂、大庆石油管理局采油七厂等企业,工业污染和农业污染相对比较严重,西大海湖属于闭流区,工业废水、农业退水和屠宰废水等只能排入其中,西大海湖自然净

化能力较弱,故湖泊污染比较严重. 基于此,本文选择西大海湖为研究对象,在西大海湖中心处采集柱状沉积岩芯,分析沉积物中总磷及各形态磷、有机质、总氮的垂向分布特征,以及与沉积物粒度的关系,初步探讨西大海湖流域的沉积环境的演化过程.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西大海湖位于大庆市西南部,系湖沼湿地上的洼地滞水湖泊. 地理位置处于北纬 46°04′~46°09′,东经 124°02′~124°05′. 西大海湖平均水位 142.5 m,湖泊长 8.4 km,最大宽度 3.7 km,平均宽度 3.1 km,面积 26.5 km². 西大海湖最大水深 3.5 m,平均水深 2.3 m,蓄水量 0.61×10⁸ m³. 湖区属温带半湿润气候,年平均气温 3.4℃,1 月平均气温 -10.7℃,7 月平均气温 23.1℃. 多年平均日照时数 2 845 h,年无霜期 142 d,年降水量 420 mm. 湖水依赖湖面降水和南部湖沼小泡群引水补给,为增加水量曾建引水闸一座和 15.5km 长引水渠,属闭流类微咸水湖^[18].

1.2 样品采集与分析

于 2010 年 7 月赴西大海,在湖心(124.593°E,46.0184°N)利用重力采样器采集了未经扰动的柱状沉积岩芯(图 1),岩芯表面水清澈无扰动,现场按 1 cm 间隔进行连续取样,将样品置于密封塑料袋中,带回实验室 4℃ 冷藏,以备分析测定. 本研究磷形态的测定采用欧洲标准测试委员会制定的 SMT

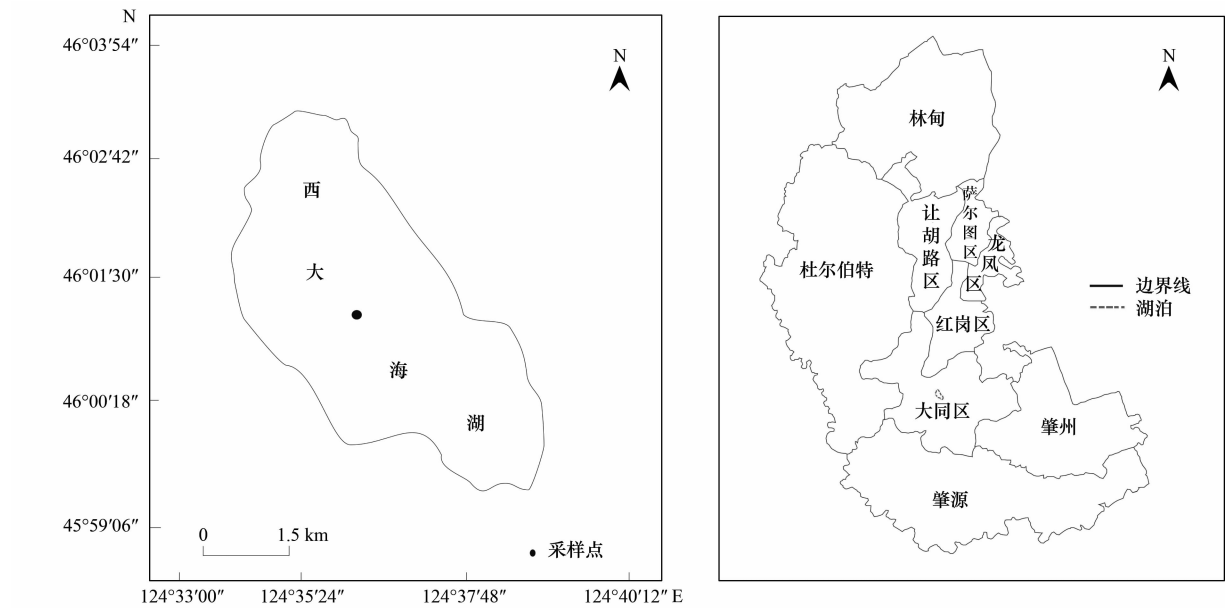


图 1 西大海采样示意

Fig. 1 Sampling site in the Lake Xidaihai

提取方法^[19],测定了总磷、无机磷、有机磷、铁铝结合磷及钙结合磷。样品总氮测定采用重铬酸钾-硫酸消化法。样品有机质的测定采用重铬酸钾容量法。样品粒度指标采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行分析测试。

为确定西大海湖沉积物的年代序列,对西大海湖柱状沉积岩芯进行放射性核素¹³⁷Cs和²¹⁰Pb的测试。¹³⁷Cs和²¹⁰Pb的测试分析采用美国 EG&G Ortec 公司生产的高纯锗井型探测器与由 Ortec919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16K 多道分析器组成的 γ 谱分析系统。¹³⁷Cs和²²⁶Ra标准样品由中国原子能研究院提供,²¹⁰Pb标准样品由英国利物浦大学提供。本测试由中国科学院南京地理与湖泊研究所完成。

2 结果与分析

2.1 沉积岩芯年代序列的建立

天然放射性铅同位素²¹⁰Pb是²³⁸U系列中²²⁶Ra衰变中间产物²²²Rn的 α 衰变子体,半衰期为 22.3 a,沉积物中过剩的²¹⁰Pb 呈现出有规律的衰变过程,也可作为计年的标尺^[20]。¹³⁷Cs是核爆炸产生的人工放射性核元素,物理半衰期为 30.174 a,沉积物垂直剖面蓄积峰位置可作为时间标记^[21,22]。本研究采用²¹⁰Pb确定沉积年代,以¹³⁷Cs为辅助。由图 2 可知沉积物中²¹⁰Pb_{ex}强度波动较大,总体上随深度呈线性增加。测年结果表明:西大海湖柱状沉积岩芯代表了从 1843 ~ 2009 年共 167 a 的沉积过程。依据西大海湖沉积速率的变化特征,可以将整个沉积过程划分为 3 个

阶段:1843 ~ 1970 年 (34.5 ~ 24.5 cm)、1970 ~ 1996 年 (24.5 ~ 15.5 cm) 和 1996 ~ 2009 年 (15.5 ~ 0.5 cm)。1843 ~ 1970 年 (34.5 ~ 24.5 cm) 为沉积速率快速增加阶段,沉积速率从 0.108 g·(cm²·a)⁻¹ 增大到 0.235 g·(cm²·a)⁻¹。满清统治者长期对东北地区实行封禁政策,严禁居民越界垦殖,进入 19 世纪,黄河下游广大地区连年遭灾,成千上万的破产农民不顾禁令,源源流入东北,至 1840 年东北地区总人口已突破 300 万人^[23]。于是在 1860 年满清朝廷正式废除禁令,汉人相继北上移居黑龙江地区,推测由此西大海湖流域土壤侵蚀开始增强,湖泊沉积速率开始增加;1906 年开始放荒开垦,村屯逐渐增多,人烟逐渐密集,从而引起西大海湖流域土壤侵蚀的加剧和湖泊沉积速率的不断增加;1914 年定出“东西三里三,南北二里二”的大同镇城基,并设有酿酒作坊、药店等^[24],这使西大海湖流域的土壤侵蚀持续加剧;1959 年大庆市发现第一座油田后,揭开了大庆油田的开采序幕,伴随着大规模的工业农业活动和城镇建设,西大海湖流域的土壤侵蚀加剧,使沉积速率加大。1970 ~ 1996 年,西大海湖沉积速率的变化由增速变缓到速率较稳定阶段。1972 年在西大海湖附近建立了新华发电厂,加大了湖泊流域土壤侵蚀强度,1991 ~ 1996 年沉积速率变化曲线较稳定;1996 ~ 2009 年,西大海湖沉积速率总体趋于缓慢减小。在 2002 年大庆市对草原实行分区休牧制度,对天然草场、人工草场、林地、沙丘实施严格禁牧,大庆市还启动了退耕还林、还草工程。到 2007

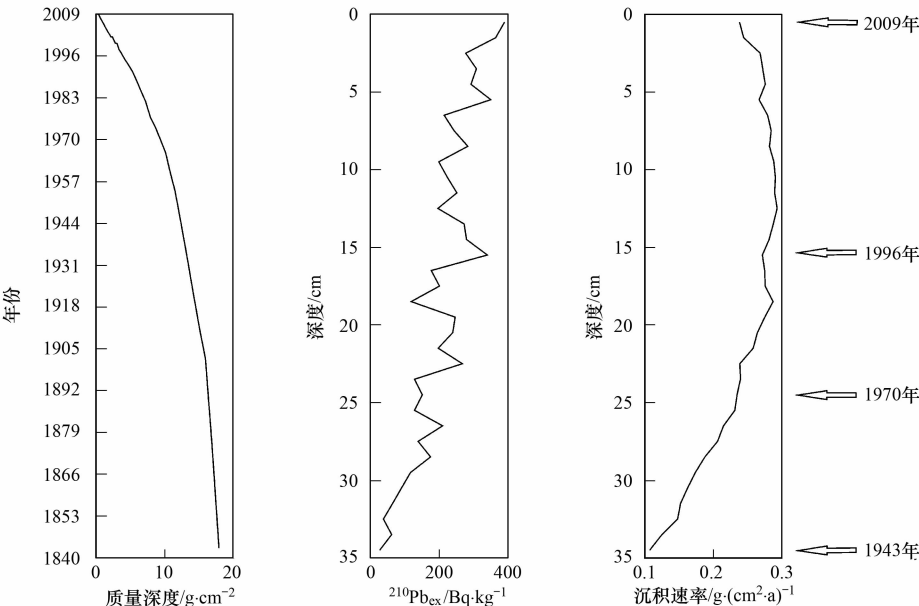


图 2 ²¹⁰Pb_{ex}强度、质量深度和沉积速率垂直剖面

Fig. 2 Vertical profile of strength, quality depth, deposition rate of ²¹⁰Pb_{ex} in Xidai Lake

年时,森林面积达到 21.7 万 hm^2 ,森林覆盖率达到 10.2%,草原面积达到 68.9 万 hm^2 ,绿化覆盖面积达到 20 181 hm^2 ,比 1996 年绿化覆盖面积增加了 15 108 hm^2 ^[25]. 以上措施使西大海湖流域的植被覆盖率增加,生态环境得到改善,因而湖泊流域土壤侵蚀强度有所减弱,从而使湖泊沉积速率稍有减少.

2.2 沉积岩芯营养元素沉积记录

在西大海湖整个沉积过程中(图 3),钙结合态磷(Ca-P)含量在 347.69 ~ 1 039.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 736.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 IP 含量 75.08%,占 TP 含量 66.04%. Ca-P 是沉积物磷主要存在形式. 铁铝结合态磷(Fe/Al-P)含量变化在 94.86 ~ 266.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 184.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占

TP 含量 16.52%. 无机磷(IP)含量在 566.81 ~ 1 158.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 980.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 含量的 87.96%. 有机磷(OP)含量变化于 41.40 ~ 212.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 114.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 含量 10.26%. 总磷(TP)含量变化范围为 648.00 ~ 1 480.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 1 115.01 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 总氮(TN)含量变化于 0.150% ~ 0.429%,均值为 0.270%. 有机质(OM)含量变化于 0.633% ~ 2.756%,均值为 1.637%. 碳氮比(C/N)变化于 1.804 ~ 7.163,均值为 3.730, 17.14% 的样品 C/N > 5. 已有研究显示,湖泊沉积物中 C/N 在某种程度上可反映有机质来源,不同生物种类有着不同的 C/N. 水生生物的 C/N 值为 2.8 ~ 3.4,浮

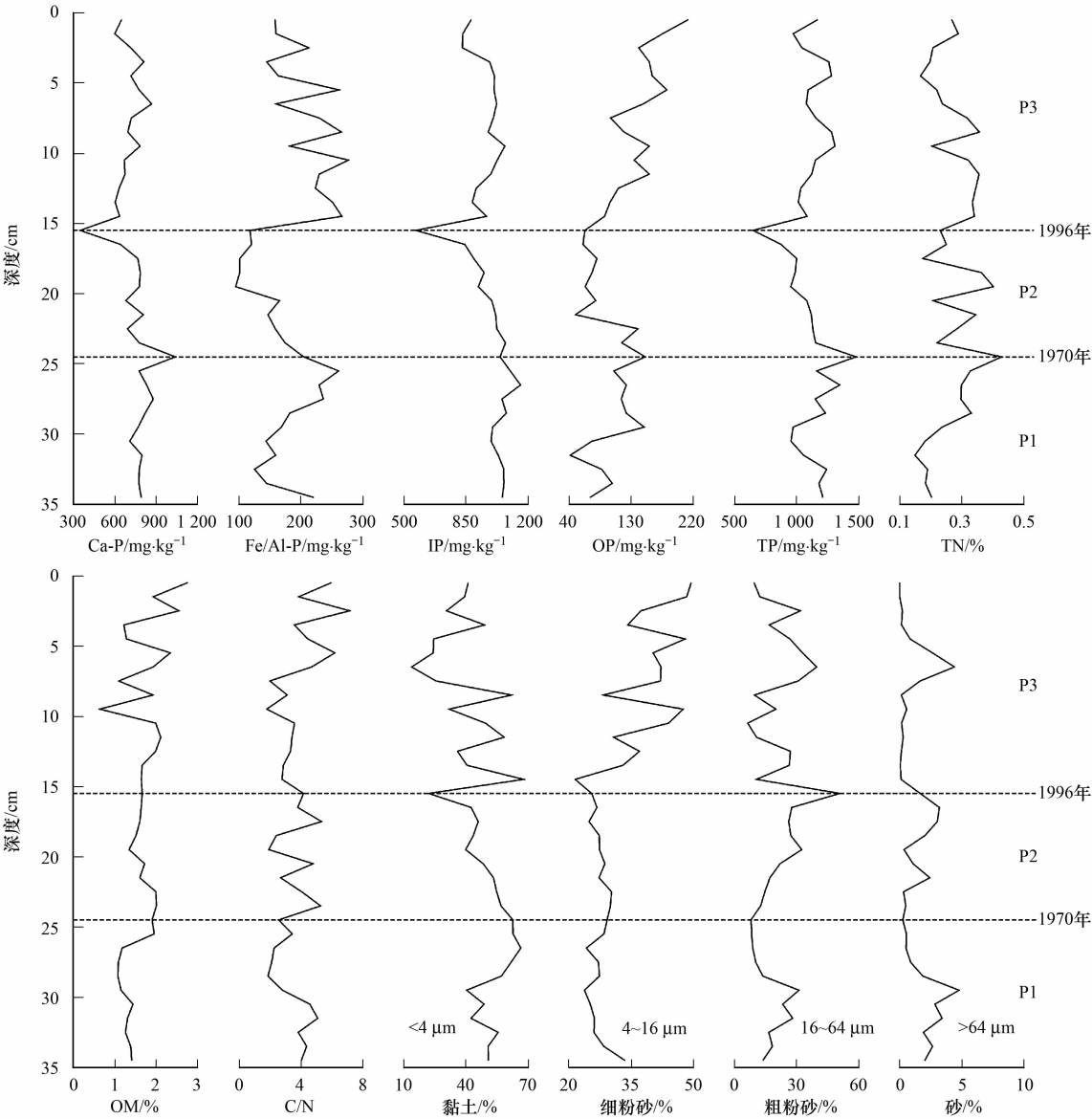


图 3 西大海沉积物营养盐及粒度垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of nutrients of sediment and particle size of Xidaihai Lake

游动植物 C/N 平均值为 6~13,藻类为 5~14,高等植物 C/N 值为 14~23^[26]. 推测西大海湖岩芯沉积物中的有机质主要来源于水生生物,部分来源于藻类和浮游动植物.

西大海湖柱状沉积岩芯粒度组成的划分按照 Udden-Wentworth 的分级标准分为黏土 (<4 μm)、细粉砂 (4~16 μm)、粗粉砂 (16~64 μm) 和砂 (>64 μm)^[27]. 西大海湖沉积岩芯中黏土、细粉砂、粗粉砂和砂的含量分别为 13.649%~67.824%、21.417%~49.488%、6.380%~51.041% 和 0~4.784%, 平均值分别为 45.724%、32.288%、20.638% 和 1.349%; 西大海湖沉积岩芯各粒级含量大小的排序为:黏土>细粉砂>粗粉砂>砂. 西大海湖沉积岩芯组成以黏土和细粉砂为主.

根据西大海湖沉积物各指标的整体演化特点,可以将西大海湖沉积物的整体演化过程划分为 3 个阶段,以下分别进行阐述.

P1 阶段 34.5~24.5 cm (1843~1970 年),此阶段中 Ca-P、Fe/Al-P、IP、OP 和 TP 含量变化范围分别为 708.18~1 039.67、125.28~261.19、991.87~1 158.22、41.40~149.03 和 955.38~1 480.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 814.73、188.80、1 058.34、103.63 和 1 181.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ca-P 垂向波动较小,在 30.5~24.5 cm 间含量整体趋于增加; Fe/Al-P 含量波动较大,在 34.5~32.5 cm 间趋于减小,32.5~25.5 cm 间含量增加,25.5~24.5 cm 含量减少; IP 变化较稳定; OP 垂向变化波动较大,在 34.5~33.5 cm 含量增加,33.5~31.5 cm 含量减少,在 31.5 cm 处为整个柱状岩芯的最小值,在 31.5~29.5 cm 含量增加较多,29.5~24.5 cm 含量曲线较稳定; TP 含量在 34.5~29.5 cm 趋于减少,29.5~24.5 cm 趋于增加. TN 含量为 0.149%~0.429%, 平均值为 0.257%, TN 含量在 34.5~31.5 cm 稍有减少,在 31.5~24.5 cm 大幅度增加; OM 含量为 1.073%~1.953%, 平均值为 1.376%, 在 34.5~26.5 cm OM 含量曲线较稳定,26.5~25.5 cm OM 含量增加较多. 岩芯粒级组成以 <4 μm 粒级为主,占 54.514%, <4 μm 粒级含量在 34.5~29.5 cm 趋于减少,在 29.5~24.5 cm 整体趋于增加; 4~16 μm 粒级含量曲线与 <4 μm 粒级含量曲线的变化有一定的相似性,只是变化幅度较小,而 16~64 μm 和 >64 μm 粒级含量曲线的变化趋势与 <4 μm 粒级含量曲线相反,在 34.5~29.5 cm 整体趋于增加,在 29.5~24.5 cm 整体趋于减少; 此阶

段中 <4 μm 粒级含量曲线与 Fe/Al-P、OP、TP 和 TN 曲线的变化趋势较相似. C/N 的变化范围为 1.9~5.1, 平均值为 3.4.

P2 阶段 24.5~15.5 cm (1970~1996 年),此阶段中 Ca-P、Fe/Al-P、IP、OP 和 TP 含量的变化范围分别为 347.69~1 039.67、94.86~204.75、566.81~1 073.03、49.40~150.53 和 648.00~1 480.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其平均值分别为 731.27、138.74、933.13、87.34 和 1 043.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 该阶段 Ca-P 和 TP 含量都趋于减少,并且均是向上从整个沉积岩芯的最大值减小到最小值; IP 含量变化整体趋于减少; Fe/Al-P 在 24.5~19.5 cm 整体趋于减少,19.5~15.5 cm 稍有增加; OP 含量在 24.5~21.5 cm 整体趋于减少,在 21.5 cm 到顶部含量整体趋于增加. TN 含量为 0.174%~0.429%, 平均值为 0.290%, 曲线波动较大,整体趋于减少; OM 含量为 1.345%~2.006%, 平均值为 1.699%, 在 24.5~19.5 cm 趋于减少,在 19.5~15.5 cm OM 含量稍有增加. 岩芯粒级组成以 <4 μm 粒级为主,占 45.222%. <4 μm 与 4~16 μm 粒级含量整体趋于减少,16~64 μm 含量大幅度增加,>64 μm 粒级含量曲线波动较大. C/N 的变化范围为 2.4~5.3, 平均值为 3.7.

P3 阶段 15.5~0.5 cm (1996~2009 年),此阶段中 Ca-P、Fe/Al-P、IP、OP 和 TP 含量变化范围分别为 347.69~867.05、118.88~266.46、566.81~1 070.02、62.66~212.70 和 648.00~1 282.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其平均值分别为 680.41、206.62、935.21、137.86 和 1 107.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Fe/Al-P 的平均值为 3 个阶段中最高的, Fe/Al-P 含量在 15.5~14.5 cm 大幅度增加,14.5 cm 至表层垂向波动较大,整体趋于减少; 该阶段 OP 含量曲线波动较大,向上整体趋于增加,并在表层出现整个岩芯 OP 含量最大值; Ca-P、IP、TP 含量曲线垂向波动相似,自下而上都是先增加后减少, Ca-P 含量在 15.5~6.5 cm 增加,6.5 cm 至表层减少; IP、TP 含量在 15.5~9.5 cm 增加,9.5 cm 至表层减少. TN 含量为 0.167~0.357%, 平均值为 0.274%, 含量曲线波动较大; OM 含量为 0.633%~2.756%, 平均值为 1.795%, OM 含量曲线在 15.5~9.5 cm 较稳定,9.5 cm 至表层波动幅度较大,整体呈增加趋势,并在表层出现整个沉积岩芯的最大值. 岩芯粒级组成以 4~16 μm 和 <4 μm 粒级含量为主,4~16 μm 和 <4 μm 粒级含量的平均值分别为 38.930% 和

38.472%。 <4 μm 和 4 ~ 16 μm 粒级含量曲线波动较大,但 4 ~ 16 μm 粒级含量整体趋于增加。 16 ~ 64 μm 和 >64 μm 粒级曲线变化相似,只是 16 ~ 64 μm 粒级含量曲线变化幅度较大。 C/N 的变化范围为 1.8 ~ 7.2,平均值为 3.9。

3 讨论

3.1 西大海湖沉积物营养盐之间及营养盐和粒度的相关关系

本研究采用 SPSS 对西大海湖沉积物中总磷、各形态磷、总氮、有机质与粒度指标间进行相关分析,相关分析结果见表 1。 从中可知:Ca-P 与 IP、IP

与 TP、Ca-P 与 TP 均在 0.01 水平上呈明显正相关关系(相关系数为 0.755、0.761、0.680),表明 Ca-P 的增长对 IP 增长贡献大,IP 的增长对 TP 增长贡献大。 Fe/Al-P 与 TP 在 0.05 水平上呈现正相关关系(相关系数为 0.378),说明 Fe/Al-P 对 TP 的蓄积起到一定作用。 OP 与 OM 在 0.05 水平上呈正相关关系(相关系数为 0.365),表明 OM 是影响 OP 累积的一个因素。 Ca-P、Fe/Al-P 与 16 ~ 64 μm 粒级含量在 0.05 水平上呈负相关关系(相关系数为 0.337 和 0.418),IP、TP 与 16 ~ 64 μm 粒级含量在 0.01 水平上呈负相关关系(相关系数为 0.569 和 0.669),说明粗颗粒物不利于营养元素的吸附。

表 1 西大海沉积物营养盐与粒度之间相关关系¹⁾

Table 1 Correlations of nutrients of sediment and particle size of Xidahai Lake

	Ca-P	Fe/Al-P	IP	OP	TP	TN	OM
Ca-P	1	0.031	0.755 **	0.107	0.680 **	0.090	-0.258
Fe/Al-P	0.031	1	0.308	0.307	0.378 *	0.332	0.230
IP	0.755 **	0.308	1	0.108	0.761 **	0.013	-0.333
OP	0.107	0.307	0.108	1	0.406 *	0.025	0.365 *
TP	0.680 **	0.378 *	0.761 **	0.406 *	1	0.126	-0.152
TN	0.090	0.332	0.013	0.025	0.126	1	0.167
OM	-0.258	0.230	-0.333	0.365 *	-0.152	0.167	1
<4 μm	0.303	0.258	0.471 **	-0.157	0.428 *	0.353 *	-0.072
4 ~ 16 μm	-0.109	0.172	-0.070	0.663 **	0.197	-0.118	0.261
16 ~ 64 μm	-0.337 *	-0.418 *	-0.569 **	-0.264	-0.669 **	-0.313	-0.073
>64 μm	0.191	-0.403 *	0.060	-0.324	-0.328	-0.443 **	-0.273

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

3.2 西大海湖营养元素演化

西大海湖沉积物中营养元素的垂向变化很好地反映了流域内人类活动对湖泊的污染历程。 在西大海湖沉积岩芯中,TP 含量比巢湖^[28](929.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和洪泽湖^[29](538.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)TP 含量高,略低于太湖北部梅梁湾^[30](1 809 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),太湖北部是整个太湖污染最严重的区域,其底泥的污染程度也最高,西大海湖 TP 具有一定的潜在污染风险。 Ca-P 主要来源于碎屑岩、自生磷灰石和难溶性的磷酸钙矿物,是沉积物中的惰性磷组分,通常认为其难以被生物所利用^[31]。 西大海湖 Ca-P 含量较高,这与其周围地质环境有关,大庆市的成土母质大部分是更新世末期沉积的黄土状亚黏土(Q3),土层深,土壤以黑钙土和草甸土为主,黑钙土中全磷的含量最高为 0.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,草甸土中的全磷含量也在 0.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上^[32]。 IP 主要是沉积过程中吸附在沉积物上的溶解态磷酸盐与水体中部分金属离子结合后以不同形态存在的磷^[33]。 Fe/Al-P 是指通过物理化学作用被 Fe、Al 和 Mn 的氧化物及其氢氧化

物所结合包裹的磷。 Fe/Al-P 具有很高的活性,是较易释放而为生物所利用的磷。 Fe /Al-P 的含量主要受外源磷输入的影响,来源主要为生活污水、工业废水和部分农业面源流失的磷^[34,35],Fe/Al-P 含量垂向波动较大。 OP 可以通过有机质的矿化进而释放到水体中,部分可被生物利用。 OP 主要来源于农业面源输入^[36]。 OP 和 Fe/Al-P 是磷形态中活性组分,其含量能真正反映沉积物的内源释放能力^[37]。 西大海湖 OP 和 Fe/Al-P 含量占 TP 含量的 26.78%,已经成为了西大海湖的潜在内污染源。

P1 阶段中 Fe/Al-P 在 32.5 ~ 25.5 cm (1902 ~ 1966 年)、OP 在 31.5 ~ 29.5 cm (1911 ~ 1934 年)含量迅速增加,主要是由于该地区从 1906 年开始放荒招垦^[24],原始草原植被被大量破坏,耕种农作物,之后人类活动逐渐增多,市内的工商店铺已经发展到一百五六十家。 四五十年代起,居民生活污水随意排放,一些进入湖泊中;从 60 年代开始,工业废水污染越来越严重,化工、机械、纺织等行业排放的废水不做净化处理直接排放^[38],使得沉积物中 Fe/

Al-P、TN 在 31.5 ~ 24.5 cm (1911 ~ 1970 年) 含量增多. 大庆油田从 1959 年开始采油,使用的是早期注水采油方法,这种方法会产生大量含油废水,直接排放到地面^[39],对环境造成较大的污染和危害,也是使 Fe/Al-P 含量增加的原因. 该区是农业区,农药和化肥的大量使用也导致 OP、TN 含量增加.

P2 阶段中,Ca-P、IP、TP 含量的变化在很大程度上受 <4 μm 粒径含量减少的影响,细颗粒含量减小,粗颗粒含量增加,不利于营养元素的吸附. Fe/Al-P 在 19.5 ~ 15.5 cm (1988 ~ 1996 年) 和 OP 在 21.5 cm 到表层 (1982 ~ 2009 年) 含量均有增加趋势,主要由于工业排污量、生活废水量、农业中农药的使用量呈增加趋势,到 1995 年,工业废水排放量达 6 990 万 t^[40],1996 年,农药使用量增长为 742 t^[25],工业排污量和农药的使用量增加导致 OP 和 Fe/Al-P 含量增加. 七八十年代含磷洗衣粉的使用也导致 OP 含量增加.

P3 阶段中,Fe/Al-P、OP 和 OM 的平均含量是 3 个阶段中最高的,说明该阶段受人类活动影响较大,随着区域经济的发展,该地区已建有石油化工 (如大庆石油化工总产、林源炼油厂)、橡胶、印刷、食品、木器、农机修造等工厂,工业废水量越来越多,并且主要以油类为主,有机物含量一般较高. 此外,还有电镀废水、印染污水、屠宰污水及其生活污水也逐渐增多,使其 Fe/Al-P 和 OM 平均含量最高;据大庆市统计年鉴 (2008 年) 记载,1996 ~ 2007 年间,化肥施用量为 19.68 万 t·a⁻¹,其中磷肥施用量为 5.25 万 t·a⁻¹,农药使用量呈增加趋势,为 974 t·a⁻¹. 农药化肥的大量使用,也使得该阶段 OP 含量呈增加趋势,导致湖泊污染加重.

4 结 论

(1)西大海湖柱状沉积物沉积速率在 1843 ~ 2009 年间经历了从快速增加到增速变缓再到缓慢减小的变化过程,初步推测西大海湖沉积速率的变化与其流域的人类活动密切相关.

(2)西大海湖沉积物营养盐指标的垂向变化很好地反映了自然和人类活动共同影响下湖泊营养环境的演化过程. 1843 ~ 1970 年伴随着人类活动由微弱到逐渐增强,工业废水、农业退水和生活污水逐渐增多,导致 Fe/Al-P、OP、TP 和 TN 的含量在上部出现不同程度上的增加;1970 ~ 1996 年由于受输入湖泊物质组成中细颗粒物减少的影响,Ca-P、IP、TP 含量趋于减少. 受工业、生活污水增多和农业面

源污染的影响,Fe/Al-P、OP、OM 含量在上部出现增加. 1996 ~ 2009 年西大海湖营养指标的演化受人类活动影响较大,Fe/Al-P、OP 和 OM 的平均含量为 3 个阶段中最高值.

(3)西大海湖营养元素中 Ca-P 是沉积物磷主要存在形式. 相关分析结果显示,Ca-P 对 IP、TP 的增长贡献大.

参考文献:

[1] 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.

[2] Fang T, Liu J T, Xiao B D, *et al.* Mobilization potential of heavy metals: A comparison between river and lake sediments [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2005, 161(1-4): 209-225.

[3] 王世亮,王志刚,王萍,等. 大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征 [J]. 环境科学,2009, 30(12): 3494-3501.

[4] 刘涛,胡志新,杨柳燕,等. 江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 [J]. 环境科学,2012, 33(9): 3057-3063.

[5] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 [J]. 环境科学,2014, 35(3): 951-957.

[6] 谭镇. 广东城市湖泊沉积物营养盐垂直变化特征研究 [D]. 广州:暨南大学,2006.

[7] 李文朝. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积 [J]. 中国环境科学,1997, 17(5): 418-421.

[8] 史静,昀晓静,张乃明,等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素 [J]. 中国环境科学,2013, 33(10): 1808-1813.

[9] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征 [J]. 环境科学研究,2013, 26(3): 235-242.

[10] 陈海龙,袁旭音,王欢,等. 苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 [J]. 环境科学,2015, 36(2): 464-470.

[11] 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 [J]. 环境科学,2015, 36(2): 471-480.

[12] 金晓丹,吴昊,陈志明,等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 [J]. 环境科学,2015, 36(2): 448-456.

[13] 李如忠,李峰,周爱佳,等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 [J]. 环境科学,2012, 33(5): 1503-1510.

[14] 赵亚丽. 洱海表层沉积物可溶性有机氮特征及其生物有效性研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院,2013.

[15] 步青云. 浅水湖泊溶解氧变化对沉积物磷、氮的影响 [D]. 北京:中国环境科学研究院,2006.

[16] 袁和忠,沈吉,刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析 [J]. 环境科学,2011, 32(3): 649-657.

[17] 李文华,邵学新,吴明,等. 杭州湾潮滩湿地土壤碱性磷酸酶活性分布及其与磷形态的关系 [J]. 环境科学学报,2013, 33(12): 3341-3349.

[18] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京:科学出版社,1998. 504-506.

[19] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2001, **3**(1): 121-125.

[20] 李苗, 臧淑英, 张策, 等. 那什那泡沉积物氮磷有机质污染特征及评价[J]. 地理科学, 2013, **33**(12): 1531-1536.

[21] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新. 西太湖沉积物污染的地球化学记录及对比研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(1): 102-107.

[22] 万国江. ¹³⁷Cs及²¹⁰Pb_{ex}方法湖泊沉积计年研究新进展[J]. 地球科学进展, 1995, **10**(2): 188-192.

[23] 中国人口迁移[EB/OL]. http://baike.baidu.com/link?url=Pzxu16Ng9IKa89bqpCKTicFXXeeTYfyq_sDmQyLoUs9_ZFWzHn5F_kaypeqOfTq8iH2PGhVkJ0Ix-5hdHFXkdv_K, 2014-12-19.

[24] 大庆市地方志编纂委员会办公室. 大庆市志[M]. 南京: 南京出版社, 1988. 51.

[25] 大庆市统计局. 大庆统计年鉴——2008[R]. 大庆: 大庆市统计局, 2008.

[26] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 393-398.

[27] 王凡, 臧淑英, 肖海丰. 东大海柱状沉积物营养盐沉积记录[J]. 环境工程, 2014, **31**(3): 22-25, 82.

[28] 刘恩峰, 杜臣昌, 羊向东, 等. 巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3024-3030.

[29] 张文斌, 余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 399-406.

[30] 李江, 金相灿, 姜霞, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 64-69.

[31] 章婷曦, 王晓蓉, 金相灿. 太湖不同营养水平湖区沉积物中磷形态的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1207-1213.

[32] 张杰. 大庆地区土壤理化性质及盐碱化特征评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.

[33] Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, *et al.* Geochemical forms of phosphorus in sediments of three large, shallow lakes of China [J]. Pedosphere, 2006, **16**(6): 726-734.

[34] Ruban V, López-sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent words [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 2001, **370**(2-3): 224-228.

[35] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.

[36] 张宪伟, 潘纲, 陈灏, 等. 黄河沉积物磷形态沿程分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 191-198.

[37] 徐德星, 秦延文, 张雷, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1337-1344.

[38] 安达市地方志办公室. 安达县志[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1992. 538-539.

[39] 黑龙江省地方志编纂委员会. 黑龙江省志[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2003. 28.

[40] 大庆市统计局. 大庆统计年鉴——1996[R]. 北京: 中国统计出版社, 1996. 64.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaile, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编：欧阳自远
副主编：赵景柱 郝吉明 田 刚
编 委：（按姓氏笔画排序）

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976 年 8 月创刊)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《 环 境 科 学 》 编 辑 委 员 会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行