

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)

南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)

南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)

长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)

贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 朱兆洲,李军,王志如(1952)

北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)

北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)

燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)

Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)

办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 李岫雯,曹辉,倪宏刚(1989)

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)

北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)

气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)

深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)

小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 黄莹,李永霞,高甫威,徐民,孙博,王宁,杨健(2046)

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)

三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 张磊,蔚建军,付莉,周川, Douglas G. Haffner(2061)

藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)

巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)

贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)

植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 丁春生,马海龙,傅洋洋,赵世督,李东兵(2116)

三维花状结构 α -FeOOH 协同 H₂O₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)

UV/H₂O₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)

钼掺杂 TiO₂ 光催化降解全氟辛酸 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)

低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)

纳米 Fe₃O₄/CeO₂-H₂O₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)

流变相法制备包覆型 CMC-Fe⁰ 及降解水中 TCE 的研究 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)

Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 祁文智,王凡,王辉,施钦,逢磊,卞兆勇(2168)

锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)

铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)

聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 张奕奕,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)

污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 孙衍卿,孙震,张景来(2210)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)

基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 雍佳君,成小英(2232)

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 王润芳,王琴,张红,齐嵘(2239)

石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)

Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 司友斌,孙林,王卉(2252)

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉沙星的影响 马微,鲍艳宇(2259)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 禄兴丽,廖允成(2266)

城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 李晓燕,张舒婷(2274)

中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)

经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)

生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)

蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)

焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)

《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义

李静^{1,2}, 朱广伟^{1*}, 朱梦圆¹, 龚志军¹, 许海¹, 杨桂军²

(1. 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, 南京 210008; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

摘要: 为探索城市浅水湖泊高有机质含量沉积物中有机质污染特征及其与氮、磷等营养元素的关系, 调查了西湖8个湖区沉积物柱状样不同深度泥层有机质含量及其轻、重组分和氮磷污染特征, 通过与国内相关湖泊有机质组分的比较, 定量刻画了西湖“香灰土”沉积物的有机质特征。结果表明, 西湖沉积物属典型高有机质含量底质, 不同湖区底泥有机质含量平均值为28~251 g·kg⁻¹; 不同湖区沉积物有机质含量差别很大, 引水入口湖区比其他湖区的有机质含量明显偏低; 垂向上, 大多湖区有机质含量随深度增加而增加, 反映出有机质在西湖丰富的沉积历史。有机质轻/重组分离研究表明, 西湖沉积物中轻组有机质含量为0.57~9.17 g·kg⁻¹, 平均占总有机质的2.83%, 重组含量为5.35~347.41 g·kg⁻¹, 平均占总有机质的90%; 与玄武湖、月湖、太湖、白洋淀等浅水湖泊相比, 西湖底泥轻组有机质含量与之相当, 但重组有机质含量明显偏高, 反映出西湖作为历史悠久的城市湖泊, 有机质污染负荷高, 底泥腐殖化程度高。西湖底泥轻组有机质与总磷、总氮显著相关, 而重组有机质含量仅与总氮含量显著相关, 与磷没有相关性, 表明轻组有机质对氮、磷内源释放潜力具有较大的影响。研究表明, 西湖“香灰土”型沉积物有机质含量高、重组有机质比例高, 对内源氮磷释放的缓冲能力强, 在西湖营养盐内源负荷控制及水体富营养化治理中应予以充分考虑。

关键词: 城市湖泊; 富营养化; 轻组有机质; 重组有机质; 内源负荷

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2038-08 DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.06.017

Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in “Incense-Ash” Sediments of West Lake, Hangzhou, China

LI Jing^{1,2}, ZHU Guang-wei^{1*}, ZHU Meng-yuan¹, GONG Zhi-jun¹, XU Hai¹, YANG Gui-jun²

(1. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Environment and Civil Engineering School, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To understand the organic matter pollution characteristic and its relationship with nitrogen, phosphorus and other nutrients in sediments of high organic matter type of urban shallow lakes, the organic matter content, light fraction organic matter (LFOM), heavy fraction organic matter (HFOM), and nitrogen and phosphorus contents were investigated in eight different regions of West Lake, Hangzhou. The results showed that, the organic matter content of the west lake sediment was 28-251 g·kg⁻¹, belonging to typical high organic matter sediment. The difference of organic matter content in different lake sediments was very big. The sediments located at the input site of water diversion engineering had significantly lower organic content than the rest regions. The LFOM content of West Lake sediment ranged 0.57-9.17 g·kg⁻¹, which averagely occupied 2.83% of the total organic matter, and the HFOM content ranged 5.35-347.41 g·kg⁻¹, which occupied more than 90% of the total organic matter. Compared to other shallow lakes located in China, sediments of West Lake had significantly high percentage of HFOM/LFOM ratio. But the HFOM content was obviously on the high side, reflecting the west lake as an urban lake with a long history, as well as high organic matter pollution load and sediment humification degree. Both the content and the ratio of LFOM/HFOM in sediment were related to nitrogen and phosphorus contents in sediment. This suggested that the composition of organic matter in West Lake sediments had potential control ability for the internal loading of N and P of the lake.

Key words: urban lakes; eutrophication; LFOM; HFOM; internal loading

在我国的各种水环境问题中,最为突出的是湖泊富营养化^[1]。沉积物是湖泊内源营养盐蓄积库和缓冲器,而沉积物中的有机质则是参与营养盐生态系统过程中最为活跃的化学成分之一^[2]。沉积物中的有机质矿化会影响N、P等营养盐的释放^[3]。沉积物中有机质的组成和结构影响着营养盐、污染物

在水生态系统中的吸附/解吸、迁移转化过程,在湖

收稿日期: 2014-11-27; 修订日期: 2015-01-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-007-005); 中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五项目(NIGLAS2012135005)

作者简介: 李静(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水生态修复工程, E-mail: 1032130427@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

泊富营养化及其修复过程中扮演重要角色。

因密度不同,土壤和沉积物中的有机质可分为轻组有机质(LFOM)和重组有机质(HFOM),二者的环境效应不同^[4]。LFOM 主要包括那些新形成、易降解的植物碎屑,一般密度小于 $2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 而 HFOM 主要包括那些吸附在矿质表面或者掩蔽在土壤团聚体里面的难降解有机质^[5]。LFOM 和 HFOM 在氮磷的循环上发挥着不同的作用。LFOM 具有较高的周转速率、相对高的碳氮比和显著较低的相对密度,50% 以上的土壤微生物和酶活性与 LFOM 有关^[6]。LFOM 是无机氮的潜在汇,而 HFOM 是潜在可矿化氮的主要来源,LFOM 中平均有机磷含量是整个土壤有机质的 1.5 倍,远小于碳和氮,因此通常情况下,土壤中 LFOM 的选择性降解也会导致磷在土壤中的净固定^[6~8]。而 HFOM 具有更强的磷固定能力^[6]。

湖泊沉积物中有机质含量和组分特征也会影响沉积物氮、磷的释放,研究沉积物有机质的组分特征对认识湖泊的富营养化机制有重要意义。沉积物净矿化氮量和净矿化磷量要远高于土壤,这是因为沉积物有机氮、磷含量远高于土壤^[6]。沉积物 LFOM 含量与磷释放能力有关,HFOM 含量与氮释放有关^[9~11]。虽然沉积物中 LFOM 的有机碳和 TN 含量占沉积物总有机碳和 TN 含量的比例低于土壤,但对沉积物氮、磷矿化的影响很大^[12~14]。洱海的研究表明,沉积物磷释放潜能随着沉积物中有机质含量的增加而增大,而沉积物磷的最大释放速率及最大释放量均随沉积物中 LFOM 含量的增加而增大^[11,12]。

“香灰土”是浙江、江苏等地民间对高有机质、土质疏松、适宜种植茶树的土壤的一种称谓^[15],明朝有关茶的诗词中已有提及^[16]。杭州西湖底泥有机质含量很高、容易再悬浮^[17],管理部门和当地群

众称其为“香灰土”沉积物。由于城市湖泊沉积物有机质含量可以高于自然湖泊 5 倍以上^[12]，“香灰土”沉积物是杭州西湖等城市湖泊治理中的难点所在。杭州西湖在采取了环湖截污、底泥疏浚及钱塘江引水工程使外污染源得到了较大的控制,但水体营养盐浓度仍然很高^[18,19]。杭州市政府于 1999~2003 年对西湖实施了 1950 年以来的第三次疏浚,尽管底泥有机质含量有所降低,但与其他城市内湖相比,其含量仍然很高^[19]。

本研究通过对杭州西湖不同湖区底泥有机质的轻、重组分特征和底泥氮磷营养盐含量的分析,以及与国内相关富营养化浅水湖泊底泥有机质含量特征的比较,探讨浅水湖泊沉积物有机质在湖泊富营养化及其修复中的作用,以期为我国城市湖泊的生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况

杭州西湖东临杭州市城区,其余三面环山,南北长 3.2 km,东西宽约 2.8 km,面积 6.39 km^2 ,平均水深 2.2 m,水体容量约为 1.429 万 m^3 ,属亚热带季风气候区^[19]。西湖底质是一种有机质含量特别高的湖沼相沉积^[17],入湖河流都是短小的溪涧,主要补水河流有金沙涧、龙泓涧和长桥溪。

1.2 样品采集

在西湖的不同湖湾布设 8 个采样点(如图 1)。样点代表性特征如表 1。利用柱状采样器采集 40 cm 左右的沉积物柱状样,上岸后按照 0~2、2~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30、30~35 cm 分层切割,样品装入封口袋带回实验室。样品经风干、研碎后进行总氮、总磷、有机质含量的测定,选取表层(0~2 cm)、中层(5~10 cm)和底层(25~30 cm)泥样进行有机质的轻组、重组分离。

表 1 西湖采样点基本概况

Table 1 Description of the sampling sites at West Lake

采样湖区	编号	地理坐标	水深/m	自然概况
小南湖	XH1	30.139 47°N, 120.082 74°E	1.7	引水入口区
茅家埠	XH3	30.145 39°N, 120.074 45°E	1.5	新开湖区,引水入口区
西里湖	XH4	30.147 12°N, 120.078 79°E	2.2	沉积历史长
外湖南	XH5	30.142 30°N, 120.084 28°E	1.8	沉积历史长
外湖中	XH6	30.148 77°N, 120.087 53°E	2.0	沉积历史长,2000 年疏浚过
外湖北	XH7	30.153 59°N, 120.089 42°E	1.5	沉积历史长,2000 年疏浚过
北里湖	XH8	30.154 93°N, 120.085 34°E	1.6	相对封闭,引水死角,未疏浚
岳湖	XH9	30.150 89°N, 120.078 38°E	0.8	引水入口区,底质改造过

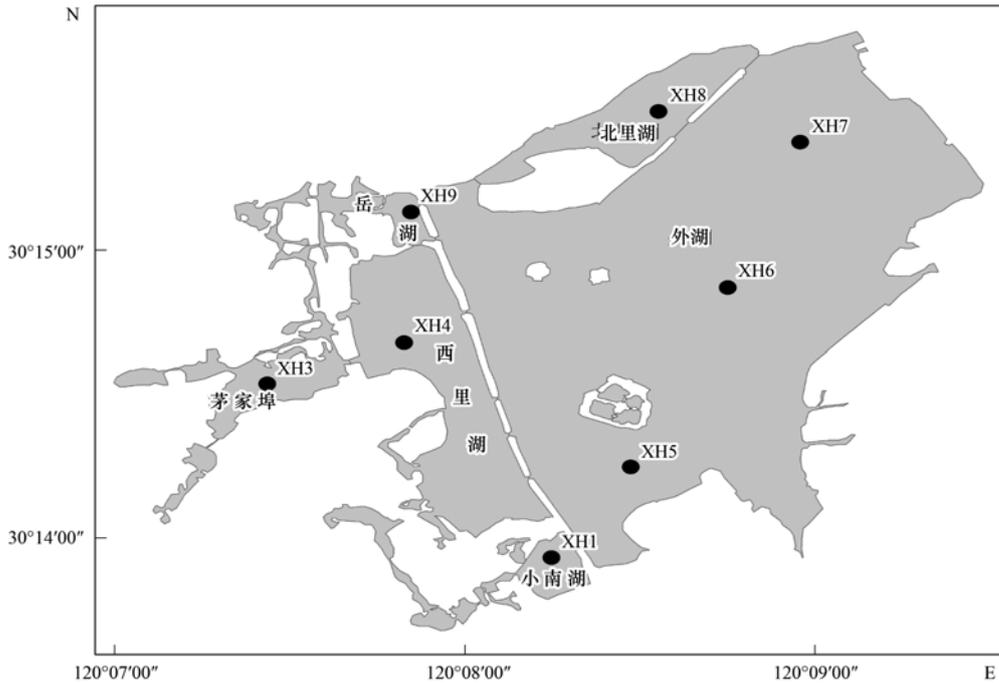


图1 西湖沉积物采样点位置示意

Fig. 1 Location of the sediment sampling sites at West Lake

1.3 分析方法

沉积物含水率测定采用 105℃ 烘干法. 沉积物风干、研碎样品中总氮、总磷的测定采用碱性过硫酸钾消解、分光光度法^[20]. 沉积物有机质总量 (OM) 的测定采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[21].

LFOM 和 HFOM 均采用比重分离法测定^[22]. 称取 1 g 过 20 目筛风干样品于 50 mL 已称重的离心管中, 加入 20 mL 比重为 1.7 的 NaI 溶液, 超声波分离 10 min, 4 200 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 将悬浮物经 GF/A 滤膜 (马弗炉 450℃ 烧 4 h) 过滤收集 LFOM. 再往离心管中加入 10 ~ 20 mL NaI 溶液, 按同样步骤分离、离心和收集 LFOM (重复 2 ~ 3 次). 将收集的 LFOM 用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液淋洗 (共约 200 mL), 再用蒸馏水淋洗至无 Cl⁻ 反应 (用 AgNO₃ 溶液检验, 白色絮状沉淀). 将 LFOM 连同滤膜, 60℃ 下烘干 (24 h), 称重, 重铬酸钾外加热法测定其有机质含量, 获得 LFOM 含量. 沉积于离心管底的 HFOM 测定时, 加入 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂, 充分搅拌后离心 10 min, 倒掉上清液后重复 3 次至无 I⁻ 反应 (用 AgNO₃ 溶液检验, 黄色絮状沉淀), 再以蒸馏水离心 1 次, 将离心管于 60℃ 下烘干 (24 h), 称重, 重铬酸钾外加热法测定其有机质含量, 即 HFOM 含量.

2 结果与讨论

2.1 含水率及其剖面变化

沉积物的含水率如图 2 所示. 从中可知, 沉积物的含水率在 27% ~ 88% 之间变化. 8 个不同湖区沉积物的含水率不同, 其中茅家埠和岳湖沉积物的平均含水率较低, 分别为 54% 和 43%, 因为这两个区域属“西湖西进”及“印象西湖”工程改造区, 茅家埠成湖时间约 10 年, 又是引水入口区, 水体透明度高, 浮游藻类相对少, 沉积慢; 而岳湖因“印象西湖”工程实施, 对底泥进行了疏浚, 并进行了部分覆土改造, 底质相对较硬.

外湖南、北里湖和西里湖沉积物的平均含水率较高, 分别为 84%、80% 和 75% (图 2), 与这些湖区的湖相沉积历史长、淤积厚度大有关.

垂直方向, 岳湖和茅家埠两个沉积历史短的区域沉积物含水率随着深度增加很快速地下降, 说明底泥淤积的历史短, 厚度小. 而其余湖区底泥含水率随深度增加的下降低趋势并不明显, 反映了西湖长期沼泽化形成的深厚淤泥层问题.

2.2 氮、磷含量及分布

沉积物中 TP 和 TN 含量能指示湖泊历史上的富营养化程度. 西湖 8 个湖区沉积物总氮如图 2 所示. 与国内相关富营养化湖泊相比^[10,23], 西湖沉积

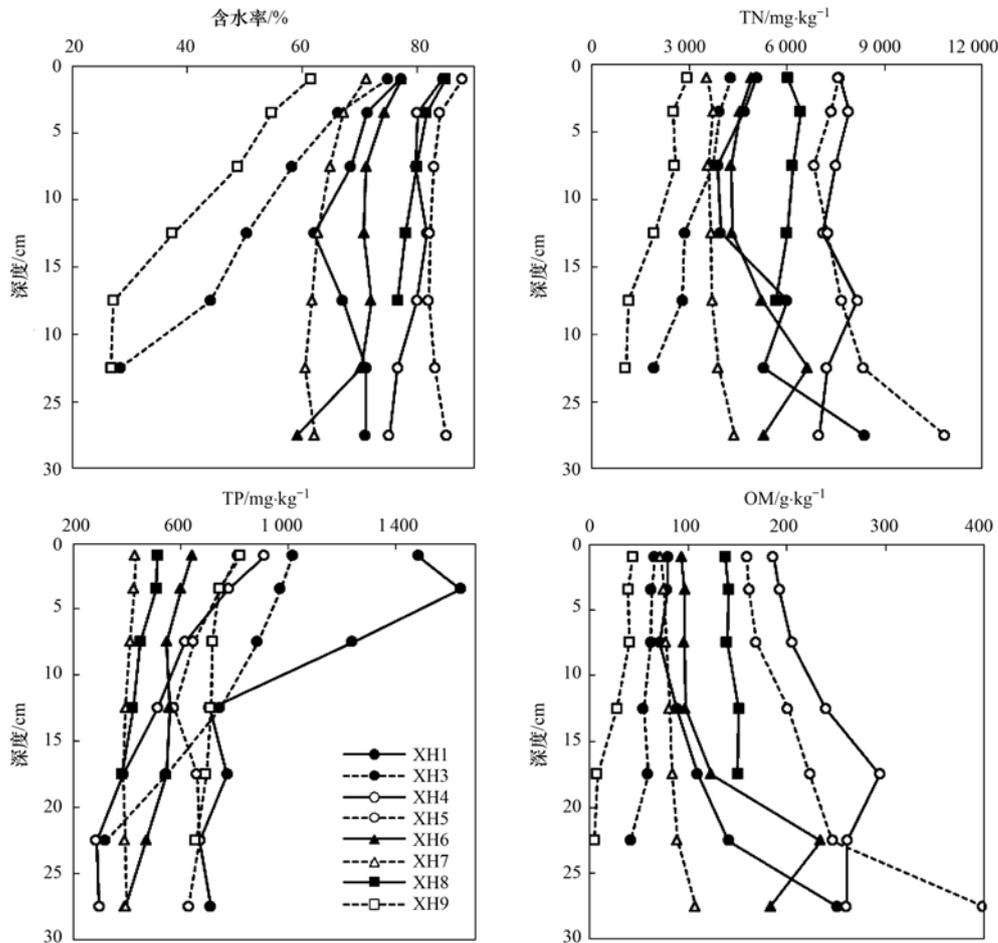


图2 西湖沉积物含水率、总氮、总磷、有机质含量的垂直变化

Fig. 2 Vertical profile of water content, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and organic matter (OM) content in sediment cores of West Lake

物的总氮含量非常高,各层底泥中氮含量在 $1\ 064 \sim 11\ 921\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化,平均值为 $5\ 259\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中外湖南和西里湖的沉积物总氮含量较高,垂向平均分别为 $8\ 465\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6\ 986\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,北里湖沉积物氮含量也比较高,垂向平均值为 $6\ 057\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,岳湖沉积物总氮含量最低,垂向平均值仅为 $2\ 036\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.茅家埠沉积物氮污染也比相对较轻,垂向平均值为 $3\ 256\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

垂向上,沉积物中TN含量并未出现一般湖泊表现出的随深度增加而快速下降的特征,而是总体下降趋势不明显,8个点位中有5个点位表现出下层高于上层的特征.这一方面表明在2003年疏浚之后,近年来西湖氮污染有明显下降,另一方面也反映出西湖沉积物氮污染的复杂性,如此大量的氮蓄积在西湖底泥中,对西湖的水质影响必然很大.

与氮的情况不同,西湖底泥中磷的含量并不是突出的高(图2).8个样点55个分层沉积物样品的

磷平均含量为 $630\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.与之相比,长江中下游地区22个湖泊底泥总提取态磷含量为 $885\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [24].底泥磷含量的最大值为 $1\ 641\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (小南湖次表层底泥),最低值为 $267\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (西里湖最底层底泥).泥柱平均来看,由高到低的顺序为小南湖($1\ 033\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、茅家埠($748\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、岳湖($724\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、外湖南($660\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、外湖中($538\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、西里湖($507\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、外湖北($456\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、北里湖($401\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

特别值得关注的是,水质较差的北里湖、外湖北总体磷含量反而较低,而水质最好的小南湖表层磷含量却是最高.小南湖沉积物总磷平均含量为 $1\ 033\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值出现在 $3 \sim 5\ \text{cm}$,为 $1\ 641\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.北里湖、外湖北、外湖中等点位的磷含量相对较低,说明西湖的水体透明度、营养盐含量等并不完全受底泥因素的影响,还可能受换水状况、扰动状况、渔业状况、水生植被状

况等的影响. 小南湖表层磷的高值非常值得关注, 可能该区域存在一定强度的磷污染源, 如周边的园林绿化或者观赏鱼区污染等. 小南湖换水周期很快, 周边既有大量的园林绿地, 也有“花港观鱼”水系大量的鲤鱼存在, 都可能对表层底泥磷富集产生影响. 而茅家埠也是换水量仅次于小南湖的湖区, 周边也有大量园林绿地. 但具体原因仍需进一步调查.

2.3 有机质含量及分布

沉积物的有机质总量高低是内源污染的一个重要指标. 西湖 8 个湖区沉积物有机质如图 2 所示. 与过去调查反映的情况一样^[17], 西湖沉积物的有机质含量仍较高, 总体上有机质含量在 28 ~ 251 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间变化, 8 个湖区沉积物泥柱平均有机质含量由高到低依次为: 外湖南 (251 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、西里湖 (215 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、北里湖 (144 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、外湖中 (132 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、小南湖 (117 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、外湖北 (87 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、茅家埠 (58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、岳湖 (28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

与一般湖泊表层有机质高、下层低的规律不同的是, 西湖底泥普遍存在底泥有机质含量随深

度增加而增加的现象, 如小南湖、北里湖、外湖南、外湖中、外湖北和西里湖 (图 2). 这种规律可能与西湖底泥大量有机质积累历史长、多次疏浚的情况有关. 特别是 1999 ~ 2003 年的再次疏浚, 使表层有机质含量明显下降, 但对历史遗存的高有机质含量底泥并未彻底清除. 这也说明大规模疏浚也很难改变西湖这种一千多年来城市湖泊长期有机质淤积形成高腐殖质底质的格局. 与李震宇 1995 年的调查相比^[17], 小南湖、西里湖的有机污染甚至还有所加剧, 表明西湖底泥有机污染控制的难度很大.

2.4 有机质轻、重组分特征

西湖 8 个湖区沉积物 (每个湖区选取表层、中层和底层进行分析) 轻组和重组有机质含量如表 2 所示. 无论是 LFOM, 还是 HFOM, 与沉积物总有机碳的关系都比较密切, 其皮尔逊相关系数分别为 0.73 和 0.94 ($P=0.001, n=24$). 相比较而言, 重组有机质与总有机质的关系更密切, 二者的总量也比较接近. 轻组有机质可以代表新鲜有机质部分, 因数量级小, 波动大, 相关系数略低一些.

表 2 西湖 8 个湖区沉积物轻组和重组有机质含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Contents of LFOM and HFOM in eight sediment cores of West Lake/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

样点 ¹⁾	LFOM (0~2 cm)	LFOM (5~10 cm)	LFOM (底层) ¹⁾	LFOM 平均	HFOM (0~2 cm)	HFOM (5~10 cm)	HFOM (底层)	HFOM 平均
XH1	4.59	4.13	4.69	4.47	71.51	67.56	129.61	89.56
XH3	1.61	2.63	2.75	2.33	61.98	59.88	39.83	53.90
XH4	1.45	3.79	0.57	1.94	172.48	194.13	82.43	149.68
XH5	1.26	2.75	9.17	4.39	89.12	166.63	347.41	201.05
XH6	1.37	1.95	2.52	1.95	144.43	92.41	176.87	137.90
XH7	1.15	1.03	1.72	1.30	69.96	77.90	95.74	81.20
XH8	1.03	1.49	1.38	1.30	126.93	134.40	143.07	134.80
XH9	1.37	0.92	0.92	1.07	39.71	36.59	5.35	27.22

1) XH1 ~ XH9 这 8 个泥柱底层对应的泥层深度分别为 25 ~ 30、20 ~ 25、30 ~ 35、30 ~ 35、25 ~ 30、30 ~ 35、15 ~ 20、20 ~ 25 cm 深度泥层

由表 2 数据可知: 西湖湖区沉积物 LFOM 含量在 0.57 ~ 9.17 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化, 平均占总有机质含量的 2.83%. 点位泥柱平均值从大到小依次为小南湖、外湖南、茅家埠、外湖中、西里湖、北里湖、外湖北、岳湖. LFOM 样点泥柱平均值在总有机质中所占比例为 0.95% ~ 4.76%, 大小依次为小南湖 (4.76%)、茅家埠 (4.14%)、岳湖 (3.78%)、外湖南 (2.14%)、外湖北 (1.57%)、外湖中 (1.39%)、西里湖 (1.28%)、北里湖 (0.95%).

HFOM 有机质含量总体占总有机质含量的 90%, 最高为 347.41 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 出现在外湖南泥柱的底层, 该泥柱的总有机质含量也是 8 个点位中最高的. 而最低值仅为 5.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 出现在岳湖的底层

泥中, 该层底泥总有机碳也很低, 应该已经采到该点的底层生土层.

从垂向上看, 总体上表层的 LFOM 高一些, 而下层 HFOM 高一些. 但规律不是特别明显, 有些反常的情况, 如 XH5 下层 LFOM 非常高, 而 XH9 下层 HFOM 非常低. 这是因为有机质轻重组分测定时泥层没有连续, 底层属性与其他层的差别可能较大.

2.5 有机质组分与氮、磷的关系

无论是 LFOM, 还是 HFOM, 均与沉积物总氮含量关系密切 (图 3). 这说明沉积物中的有机质积累与氮的积累密切相关, 有机氮是沉积物中总氮的主要成分. 相比较而言, HFOM 与总氮的相关性更好, 皮尔逊相关系数为 0.89 ($P < 0.001, n = 24$), 而

LFOM 与总氮的相关系数为 0.64 ($P = 0.001, n = 24$). 这表明重组有机质可能含有较多的有机氮, 是沉积物氮的一种重要赋存形式. 而轻组有机质也含有较多的易矿化的氮. 据杨春霞等^[6] 实验研究, 轻组有机质的矿化分解有利于底泥氮的释放, 轻组有机质去除后氮的矿化释放能力可以下降 15% ~ 40%^[6]. 这相对于 LFOM 占总有机质的比例而言, 贡献很大.

总体上, 磷与 LFOM 及 HFOM 的关系明显较氮与二者的关系差, 表明沉积物中磷的积累受到的影响因素更多, 有机质吸附态或者有机磷只是底泥蓄

积磷中的一部分. 与氮不同, 磷与 LFOM 的相关关系明显好于与 HFOM 的(图 3). 磷与 LFOM 的皮尔逊相关系数为 0.25 ($P = 0.24, n = 24$). 而剔除了 XH5 下层 LFOM 异常高值后 (LFOM = $9.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 相关系数为 0.51 ($P = 0.01, n = 23$), 达到显著相关. 而总磷与 HFOM 的相关系数为 -0.20 ($P = 0.34, n = 24$), 剔除异常高值后为 -0.20 ($P = 0.37, n = 23$), 仍不显著. 这说明有机质对沉积物中磷的控制主要体现与轻组有机质. 杨春霞等^[6] 的实验研究表明, 剔除了 LFOM 后, 底泥磷的释放量下降了 50% ~ 74%, 显示出极大的决定作用.

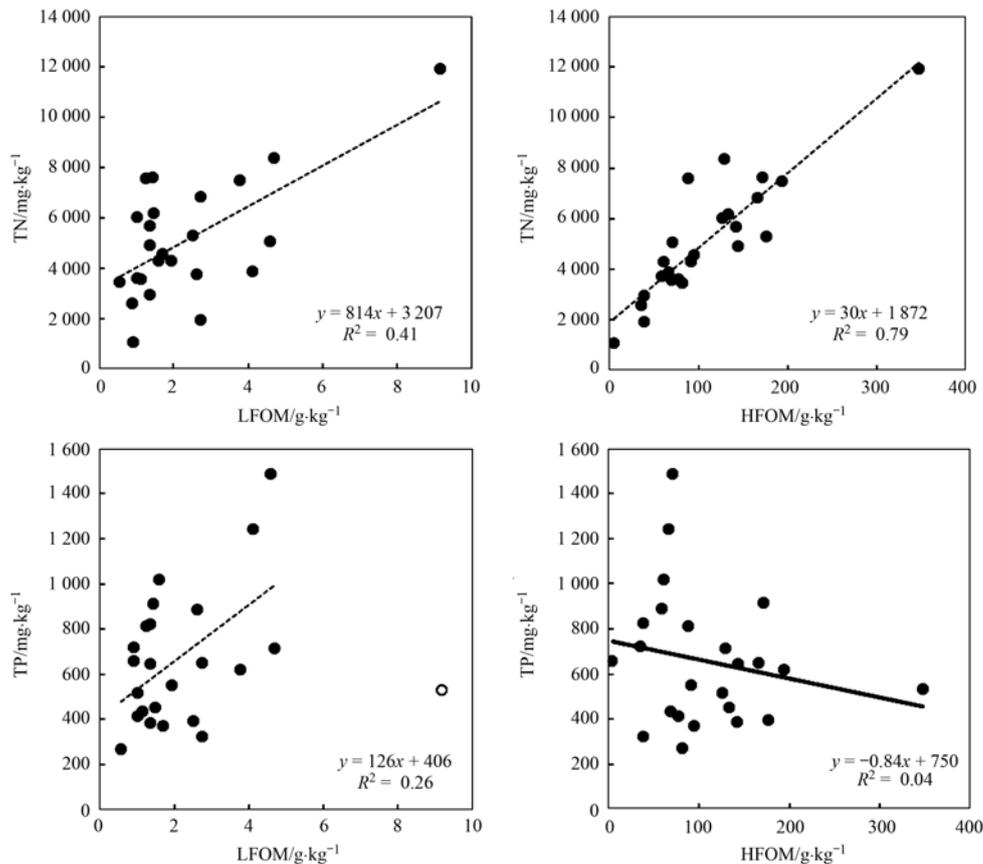


图 3 西湖沉积物氮、磷含量与 LFOM 及 HFOM 的关系

Fig. 3 Relationship between nitrogen and phosphorus contents and LFOM and HFOM contents in sediments of West Lake

2.6 西湖有机质与其他湖泊的对比

西湖是一个历史悠久的城市浅水湖泊. 尽管历史上疏浚不断, 但是大多数疏浚都是在湖泊面临沼泽化或者污染不能忍受的条件下实施的, 所以西湖底泥的有机质积累量非常高^[17]. 这是西湖底泥具备“香灰土”特质的前提.

与长江中下游湖泊、洱海、太湖、白洋淀、南四湖, 以及西辽河底泥的有机质含量、轻重组有机质含量相比^[9,10,12,25], 西湖的有机质含量、

HFOM 含量均是最高的(图 4). 从图 4 可以看出, 水体的水力停留时间等水文交换能力对底泥有机质含量有很大的控制能力. 西辽河、鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖等过水型湖泊底泥有机质含量都比较低, 而白洋淀、南四湖、洱海等相对缺水地区湖泊的有机质含量偏高, 沼泽化的可能性较大. 玄武湖、月湖、西湖等城市湖泊总体有机质含量更高, 总有机质含量介于 $58.7 \sim 136.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值显著高于其余非城市

湖泊(平均值为 $28.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

HFOM 因代表了有机质中的主要部分,其含量特征与有机质含量一致. 而 LFOM 的含量则不同,与总有机质含量、HFOM 的含量关系不大(图 4)。

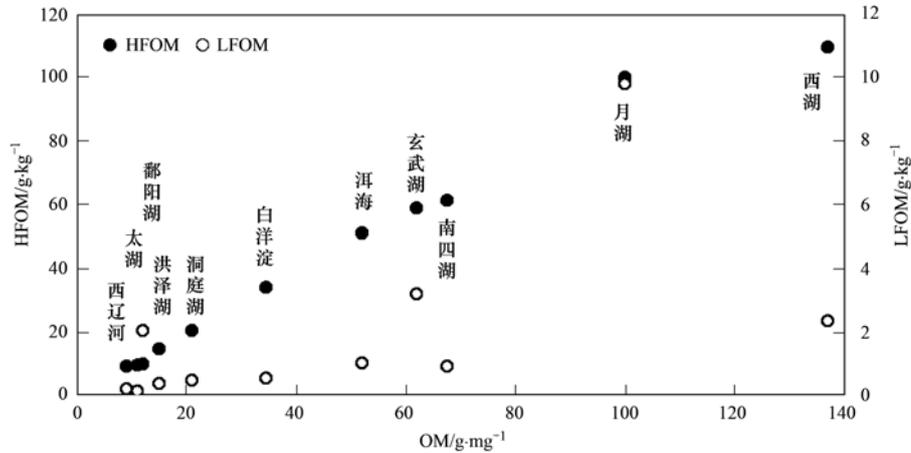


图 4 西湖底泥有机质及其组分含量与相关水体的对比

Fig. 4 Comparison of organic matter fractions of sediment from West Lake with related water bodies in China

3 个城市湖泊相比,杭州西湖有机质含量尤其高,即便是在大规模疏浚之后,现存的底泥及下层底泥中有机质含量仍很高^[19]. 作为一个有一千多年历史积淀的城市湖泊,西湖流域一致得到较好的保护,少有大量无机颗粒物冲刷入湖,而流域植被繁茂,植物凋落物多,有机质来源丰富,以及大量莲、藕等水生植物凋落物沉积到湖底,使得杭州西湖具有悠久的高有机质污染负荷历史. 经历了千年的降解与沉淀,形成西湖独特的有机质含量高、重组有机质比例高、底泥总体密度轻、营养盐含量高特征的“香灰土”特质. 西湖“香灰土”的存在,为西湖富营养化控制、水质改善都增加了难度. 无论是在湖泊富营养化治理的技术选择上,还是在考量底泥的污染贡献上,城市湖泊都有其特殊性. 简单的疏浚很难改变西湖“香灰土”的基本特征,需要进一步实施底泥改性技术、生态系统调控技术等其他相关措施,以达到水质明显改善的目标。

3 结论

(1) 杭州西湖“香灰土”沉积物具有有机质含量高、氮含量高、磷含量较高的特征,有机质与氮污染之间关系密切. 与长江中下游等相关湖泊对比,西湖沉积物中有机质含量及氮含量都非常高。

(2) 西湖沉积物中重组有机质平均占总有机质的 90%, 总含量平均为 $109.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高为 $347.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在国内报道的相关湖泊中也是最高

月湖、玄武湖、鄱阳湖及西湖的含量相对较高. 由于 LFOM 在底泥氮、磷污染释放上的特殊作用,这种高 LFOM 底泥具有更强的氮磷释放潜力,对湖泊富营养化生态修复的阻碍能力更强。

的. 重组有机质含量与氮含量显著相关,与磷相关性差. 轻组有机质含量在 $0.57 \sim 9.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化,平均占总有机质含量的 2.83%,与国内相关湖泊相比不算高,低于玄武湖、月湖等城市湖泊. 轻组有机质含量与磷存在显著相关,与氮的关系也很密切,表明对西湖内源氮、磷释放上具有重要的作用。

(3) 与其他城市湖泊相比,西湖轻组有机质平均含量较低,腐殖化程度高,更难分解,西湖这种高有机质含量、高度腐殖化、高营养盐含量的“香灰土”底质为水体营养水平控制增加了难度。

致谢:感谢杭州西湖水域管理处在野外工作中的帮助,感谢施坤、李枫、薛静琛在野外采样和实验中的帮助。

参考文献:

- [1] 陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析[J]. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 438-443.
- [2] 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.
- [3] 金相灿, 王圣瑞, 姜霞. 湖泊水-沉积物界面三相结构模式的初步研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(S1): 1-5.
- [4] 王晶, 解宏图, 朱平, 等. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(6): 109-112.
- [5] 包桂奇, 倪进治, 魏然, 等. 土壤不同有机质组分对菲的吸附特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 861-867.
- [6] 杨春霞, 王圣瑞, 金相灿, 等. 轻组有机质对太湖沉积物氮、

- 磷矿化的影响[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1001-1007.
- [7] 朱利中, 徐霞, 胡松, 等. 西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理[J]. 环境科学, 2000, **21**(2): 28-31.
- [8] 陈颖, 袁旭音. 河口湿地沉积物中腐殖酸含量对外源重金属分布的影响研究[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 185-189.
- [9] 赵莹, 成杰民, 鲁成秀. 不同生态类型富营养化湖泊沉积物中有机质赋存形态[J]. 环境化学, 2012, **31**(3): 302-307.
- [10] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 243-249.
- [11] 赵海超, 王圣瑞, 张莉, 等. 有机质含量及其组分对洱海沉积物磷吸附-释放影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2346-2354.
- [12] 易文利, 王圣瑞, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖沉积物中有机质及其组分的赋存特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, **36**(5): 141-148.
- [13] Dell'Anno A, Incera M, Mei M L. Mesoscale variability of organic matter composition in NW Adriatic sediments [J]. *Chemistry and Ecology*, 2003, **19**(1): 33-45.
- [14] Joseph M M, Kumar C S R, Kumar T R G, *et al.* Biogeochemistry of surficial sediments in the intertidal systems of a tropical environment [J]. *Chemistry and Ecology*, 2008, **24**(4): 247-258.
- [15] 董百丽, 秦伯强, 龚志军, 等. 三种沉积物改良措施比较及其对苦草生长的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(12): 2726-2731.
- [16] 钱时霖, 钱胜昔. 龙井茶诗话[J]. 中国茶叶, 2013, (1): 36-39.
- [17] 李震宇, 朱荫涓. 西湖沉积物有机质特征[J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 122-126.
- [18] Nixdorf B, Deneke R. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient loads [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **342-343**: 269-284.
- [19] 吴芝瑛, 虞左明, 盛海燕, 等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 277-284.
- [20] 钱君龙, 府灵敏. 用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷[J]. 环境科学, 1987, **8**(1): 81-84.
- [21] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 121-134.
- [22] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(6): 1799-1806.
- [23] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 37-43.
- [24] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 381-388.
- [25] 王而力, 王嗣淇. 西辽河沉积物有机组分对磷的吸附影响[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 687-694.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shevanelia oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smeectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人