

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                   |                                                              |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 16 届亚运会期间广州城区 PM <sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对霾天气的影响 .....             | 陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)                             |
| 北京地区秋季雾霾天 PM <sub>2.5</sub> 污染与气溶胶光学特征分析 .....                    | 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)                              |
| 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 .....                             | 王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424) |
| 杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 .....                                          | 谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)                                 |
| 保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 .....                                     | 李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)                                     |
| 春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 .....                                          | 周变红, 张承中, 王格慧 (448)                                          |
| 华东区域高山背景点 PM <sub>10</sub> 和 PM <sub>2.5</sub> 背景值及污染特征 .....     | 苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)                                           |
| 基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 .....                               | 田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)                                       |
| 积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 .....                                          | 张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)                               |
| 靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 .....                                         | 徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)                                 |
| 正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 .....                                   | 欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)                           |
| 干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 .....                               | 刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)                                           |
| 降尘收集方法对降尘效率的影响 .....                                              | 张正偲, 董治宝 (499)                                               |
| 海河流域水生生态功能一级二级分区 .....                                            | 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)                                |
| 长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 .....                                      | 时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)                                     |
| 内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 .....                                      | 黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)                         |
| 溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 .....                           | 邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)                                     |
| 自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 .....                             | 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)                            |
| 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 .....                                      | 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)                                      |
| 高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 .....                                           | 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)                         |
| 城市雨水径流水质演变过程监测与分析 .....                                           | 董雯, 李怀恩, 李家科 (561)                                           |
| 复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 .....                                      | 任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)                   |
| 给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 .....                                       | 郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)                             |
| 1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 .....                                       | 李三华, 张奇亚 (583)                                               |
| 水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响 .....                                     | 姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)                              |
| TiO <sub>2</sub> 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 .....                          | 张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)                                  |
| 皮革废水有机污染物生物降解特性研究 .....                                           | 王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)                                       |
| 链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 .....                               | 谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)                                          |
| 一种负载型生物载体的制备及性能研究 .....                                           | 杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)                          |
| 基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 ( <i>Chlorella pyrenoidosa</i> ) 培养研究 .....      | 嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)                                     |
| 温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 .....                                       | 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)                                 |
| 天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH <sub>4</sub> 的影响 .....                    | 姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)                                 |
| 蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 .....                         | 青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)                                           |
| 基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 .....                                     | 钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)                        |
| 区域地下水污染风险评价方法研究 .....                                             | 杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)                                 |
| 地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 .....                                         | 王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)                            |
| 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 .....                                        | 朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)                                           |
| 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 .....                                         | 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)                        |
| 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 .....                               | 张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)                                      |
| 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 .....                                         | 罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)                              |
| 外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 .....                        | 郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)                                |
| 某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 .....                                    | 潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)                                   |
| 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 .....                                     | 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)                                       |
| 天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 .....                                        | 姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)                         |
| 沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 .....                                    | 吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)                                  |
| 动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 .....                                             | 姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)                           |
| 氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 .....                                         | 王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)                            |
| 2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 .....                                       | 倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)                                   |
| 嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 .....                                        | 厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)                                   |
| 固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 .....                                       | 唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)                              |
| 16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 .....                               | 刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)                                |
| 氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 .....                               | 刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)                                   |
| 筒青霉 ( <i>Penicillium simplicissimum</i> ) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 ..... | 沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)                     |
| 石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 .....                                        | 杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)                                      |
| 土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 .....                                  | 王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)                                |
| 生活垃圾填埋过程含水率变化研究 .....                                             | 李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)                            |
| 动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 .....                                          | 吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)                                      |

# 长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究

时志强<sup>1</sup>, 张运林<sup>1\*</sup>, 王明珠<sup>1, 2</sup>, 刘笑菡<sup>1, 2</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于2007年9月底和10月初在湖北武汉东湖、梁子湖、洪湖以及2010年4月在昆山市傀儡湖进行的水下光场测定数据, 分析了4个湖泊漫射衰减系数变化特征及其主导因素。在东湖和傀儡湖各站点水体主要光学因子变化不大, 梁子湖和洪湖由于具有草型和藻型湖区, 所以各因子在不同点位变化较大。通过对透明度和各光衰减因子的回归分析可知, 无机颗粒物是影响东湖和傀儡湖透明度的主要因子, 而梁子湖和洪湖透明度则受无机和有机颗粒物的共同制约。4个湖泊的光谱漫射衰减系数最低值均出现在580 nm处, 在675 nm处各点均具有相应的叶绿素a的特征吸收峰, 在叶绿素a浓度较低站点衰减峰相对不明显。东湖平均真光层深度小于湖体平均深度, 在目前的光场条件下沉水植物很难生长, 而在梁子湖、洪湖和傀儡湖其真光层深度均超过了水深, 为沉水植物的生长提供了良好的水下光环境。对PAR衰减与各衰减因子进行回归分析发现, 在东湖、傀儡湖主导PAR衰减的是无机颗粒物, 梁子湖和洪湖PAR衰减受到无机颗粒物、有机颗粒物和叶绿素a的共同作用。颗粒物特征波长750 nm处的光束衰减系数与PAR漫射衰减系数存在显著正相关, 说明颗粒物散射显著贡献水下光辐射漫射衰减。研究结果有助于指导浅水湖泊水下光场条件改善和沉水植物恢复。

**关键词:** 漫射衰减系数; 透明度; 真光层深度; 散射系数; 长江中下游浅水湖泊

**中图分类号:** X122 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)02-0517-08

## Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River

SHI Zhi-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Yun-lin<sup>1</sup>, WANG Ming-zhu<sup>1, 2</sup>, LIU Xiao-han<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the underwater irradiance profile measurement and water samples collection in September, October 2007 in Lake Donghu, Lake Liangzi and Lake Honghu, and in April in 2010 in Lake Kuileihu, the diffuse attenuation coefficient and the dominant attenuation factors were analyzed. The ranges of diffuse attenuation coefficient and total suspended solid (TSS), organic suspended solid (OSS), inorganic suspended solid (ISS), chlorophyll a (Chla), and dissolved organic carbon (DOC) concentrations varied less in Lake Donghu and Lake Kuileihu than in Lake Liangzi and Lake Honghu. The regression analysis showed that ISS was the dominant affecting factor of transparency in Lake Donghu and Lake Kuileihu, but ISS and OSS jointly controlled the variation of transparency in Lake Liangzi and Lake Honghu. The diffuse attenuation coefficient minima occurred near 580 nm. At around 675 nm, the diffuse attenuation coefficient peak was due to phytoplankton absorption, especially at sites with high pigment concentration. The euphotic depth was less than the mean water depth in Lake Donghu, suggesting that the submerged aquatic vegetation (SAV) can not grow in the present underwater light climate. However, the euphotic depth was larger than the mean water depth in other three lakes showing that the underwater light climate can meet the light requirements for the growth of SAV. The regression analysis showed that ISS was the dominant affecting factor of PAR attenuation in Lake Donghu and Lake Kuileihu, but ISS, OSS and Chla jointly controlled PAR attenuation in Lake Liangzi and Lake Honghu. The significant correlation between the beam attenuation coefficient at 750 nm and PAR diffuse attenuation coefficient showed that the particles scattering significantly contributed to underwater irradiance attenuation.

**Key words:** diffuse attenuation coefficient; transparency; euphotic depth; scattering coefficient; the lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River

湖泊水下光照对水生生态系统影响深刻, 不仅影响了浮游藻类、沉水植物的生长、繁殖, 还决定了浮游动物垂直迁移和鱼类的捕食<sup>[1~3]</sup>。吸收效应是由湖水中的水分子、溶解性物质、浮游植物和悬浮颗粒对光的直接吸收产生的; 散射效应主要是由水分子、浮游生物和悬浮颗粒对光的散射使光束偏离原来的路径而造成光能损失, 漫射衰减系数反映

的是两者总效应<sup>[4]</sup>。由于水中有机物、浮游植物和

收稿日期: 2012-04-19; 修订日期: 2012-09-12

基金项目: 江苏省杰出青年科学基金项目(BK2012050); 国家自然科学基金项目(41271355); 中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”重点布局项目(NIGLAS2012135003); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX-07101-010)

作者简介: 时志强(1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为湖泊光学, E-mail: szq19850518@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

无机物本身受温度、溶解氧、营养盐、湖底沉积物及风浪等因素的影响和制约,所以湖水的漫射衰减系数在一定程度上是湖泊水文、化学及生物要素的综合反映<sup>[5]</sup>. 无论是湖泊环境保护还是生态恢复,都必须了解湖泊水体的光学状况及影响因子,并寻求有效的改善水下光照条件的措施.

以往关于湖泊水下光场结构及影响因素的研究往往局限于单个湖泊的长期深入研究<sup>[5-8]</sup>,这有助于加深湖泊生态系统中关键光学过程的理解. 但湖沼学的研究不能仅仅局限于单个湖泊,而应扩展到湖泊地理区域和流域范围,寻找普适性的结果和结论,因此关于同一区域或者不同区域湖泊的比较湖沼学研究日益受到重视<sup>[9, 10]</sup>. 本研究对长江中下游浅水湖泊武汉东湖、梁子湖、洪湖及傀儡湖这 4 个典型湖泊水体光学状况和影响漫射衰减的因子进行了分析和研究,旨在了解这一类型湖泊水体光学状况及影响因子,为类似湖泊的生态修复和环境保护提供基本的水体光学参数.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

武汉东湖是典型的冲积淤积湖,水域面积 33 km<sup>2</sup>,最大深度 4.66 m,平均深度 2.48 m,2000 年成为国家首批 AAAA 级旅游景区. 由于城市化的进程和水产养殖业的发展,东湖已经处于富营养化状态,并向严重富营养化发展,总磷、凯氏氮和生化需氧量等参数超标,是典型的小型浅水藻型湖泊. 梁子湖是湖北省容水量最大的淡水湖之一,湖面面积位居全省第二,是驰名中外的武昌鱼的故乡. 梁子湖东西长 82 km,南北长 22 km,由 316 个湖汊组成,湖面面积 233 km<sup>2</sup>,常年平均水深 3 m. 北有 45 km 长港与长江相通,梁子湖水经长港注入长江. 洪湖是中国第七大淡水湖,湖北省第一大湖. 位于湖北省南部长江与东荆河间的洼地中,东西长 23.4 km,南北宽 20.8 km,湖面面积 413 km<sup>2</sup>,最大深度 6.5 m,平均深度 1.5 m,是典型的浅水湖泊,底质泥沙为主. 东西两侧与长江相通,是鱼类繁殖的良好场所. 目前,洪湖的开阔水域水质明显好转,部分水域水质已由治理前的 III-IV 类上升到 II-III 类,水草覆盖率恢复到 80% 左右. 傀儡湖从阳澄湖引水,水质良好,为昆山市城区唯一饮用水源,为一级保护区和水源保护地. 现有面积 6.73 km<sup>2</sup>,平均水位 2.9 m 左右,平均水深 1.5 m.

### 1.2 采样时间及站位

2007 年 9 月 27 日、10 月 1~3 日,分别在武汉

东湖、梁子湖、洪湖布设 9 个、10 个和 16 个站点进行水下光场测定及水样采集,其中在洪湖只对 12 个点进行了水下光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 及光谱测定 (2、6、9、12 号除外). 2010 年 4 月 22 日,在傀儡湖布设 23 个采样点进行 PAR 测定及水样采集,但只对其中的 12 个点进行了水下光谱测定 (图 1). 尽管 4 个湖泊采样不是在同一个季节,但由于长江中下游湖泊四季分明,春秋季节气候条件及浮游植物生长较为接近,因此湖泊间光学参数具有较好可比性.

### 1.3 采样与测量方法

PAR 的测定选用 Li-cor 192SA 水下光量子仪. 观测期间天空基本上晴朗,分水下 0、0.2、0.5、0.75、1.0、1.2、1.5 m 共 7 层测定 PAR 强度,每层记录 3 个数据,用平均值代替该层数据. 光谱垂直剖面测量选用德国 Trios 公司的 TriOS8180 水下光谱仪,在真光层深度范围内每隔 0.1 m 或 0.2 m 测定一次. 水样采自表层 0.5 m 处,叶绿素 a 的测定采用分光光度法,利用 90% 的酒精萃取,然后在 UV2401 分光光度计上测量光学密度,根据公式计算得到<sup>[11]</sup>. 溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的测定方法是用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤水样,在 1020 型 TOC 仪进行测定. 悬浮物采用称重法测定,透明度用直径为 30 cm 的白色赛克圆盘进行测量.

### 1.4 光束衰减系数及吸收系数测定

纯水之外的光束衰减系数是利用分光光度计直接测量原始水样相当于超纯水的光学密度得到的,为了降低前向散射,使用 4 cm 的比色皿并尽量远离接受窗口在 UV-2401PC 型分光光度计下测定原水样的吸光度,为尽可能降低多次散射部分样品进行稀释以确保样品吸光度低于 1.2. 理论上光束衰减系数可能被轻微低估尤其当出现前向散射峰时,但研究表明这种方法仍然可行,根据式 (1) 计算得到光束衰减系数<sup>[4]</sup>.

$$c_{t-w}(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r \quad (1)$$

式中,  $c_{t-w}(\lambda)$  为  $\lambda$  波长相对于超纯水的光束衰减系数 ( $m^{-1}$ );  $D(\lambda)$  为光学密度;  $r$  为光程路径 (m).

有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 的光谱吸收系数测定采用通过孔径 0.22  $\mu m$  的 Millopore 膜过滤的水样在 UV-2401PC 型分光光度计下在 240~800 nm 波长范围测定吸光度,然后进行计算、校正得到各波长的吸收系数. 颗粒物吸收系数采用定量滤膜法测定,将一

定体积水样用直径 47 mm 的 GF/F 膜过滤膜过滤, 在 UV-2401PC 型分光光度计下测定 350 ~ 800 nm 波长范围滤膜上颗粒物的吸光度, 经放大因子校正

和进一步计算得到总悬浮颗粒物的光谱吸收系数. 总吸收系数为 CDOM、颗粒物及纯水吸收系数的线性相加<sup>[11]</sup>.

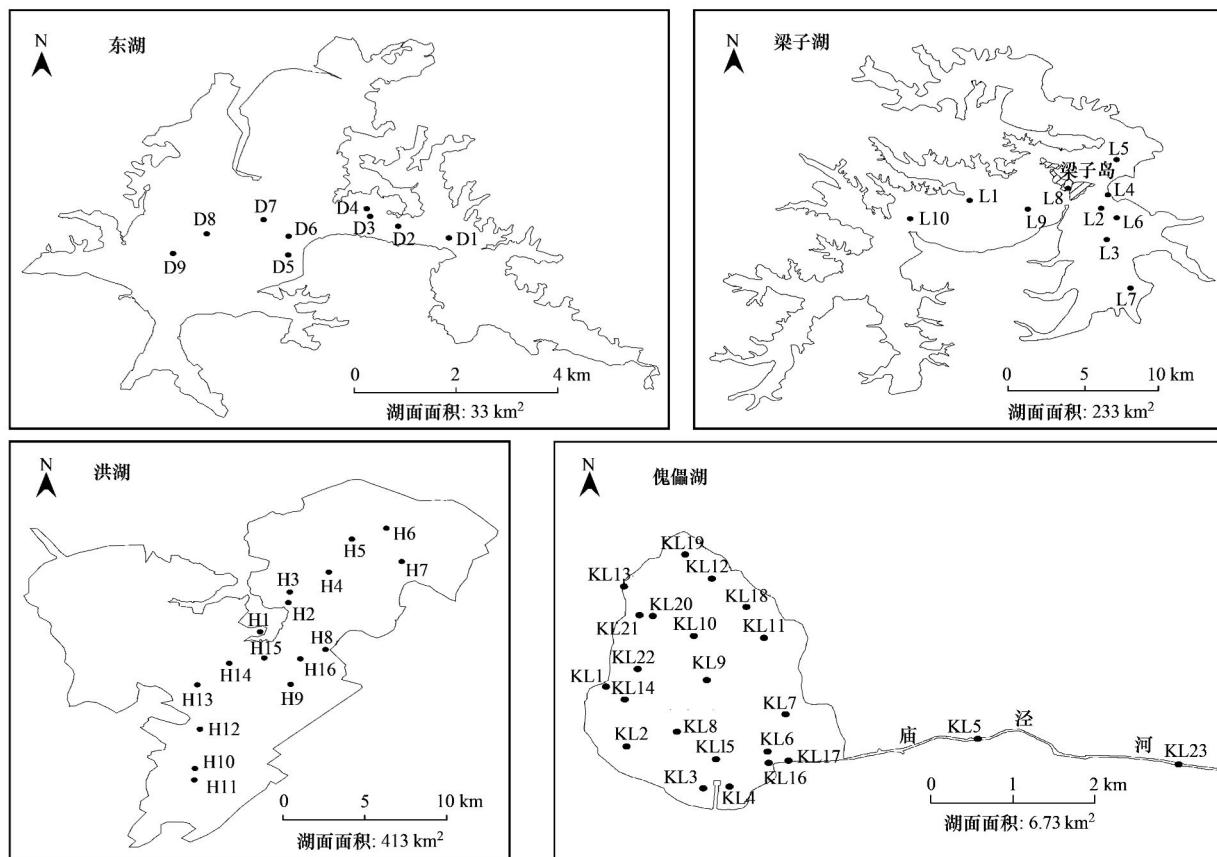


图 1 东湖、梁子湖、洪湖和傀儡湖这 4 个湖泊采样站点示意

Fig. 1 Location of sampling stations in Lake Donghu, Lake Liangzihu, Lake Honghu and Lake Kuileihu

### 1.5 漫射衰减系数、真光层深度计算

对于垂直上光学性质均一的水体, 水下辐照度衰减遵循指数衰减规律<sup>[4]</sup>:

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{z} \ln \frac{E_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, 0^-)} \quad (2)$$

式中,  $K_d(\lambda)$  为漫射衰减系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $z$  为从湖面到测量处的深度 (m),  $E_d(\lambda, z)$ 、 $E_d(\lambda, 0^-)$  分别为  $z$  深度以及恰好水面下处辐照度强度.  $K_d(\lambda)$  值通过对不同深度水下辐照度强度进行指数回归后得到, 回归效果只有当  $R^2 \geq 0.95$ , 深度数  $N \geq 5$  时, 其  $K_d(\lambda)$  值才被接受, 否则视为无效值. PAR 的漫射衰减计算跟式(2)一样, 通过对不同深度处 PAR 强度进行指数拟合后得到. 真光层深度是指水柱净初级生产力为零的深度, 代表生物光合层的厚度, 一般将水体表面辐照度 1% 处的深度视为真光层深度. 因此 PAR 真光层深度可由下式计算得到:

$$Z_{eu}(\text{PAR}) = 4.605/K_d(\text{PAR}) \quad (3)$$

式中,  $Z_{eu}(\text{PAR})$  为真光层深度 (m),  $K_d(\text{PAR})$  为漫射衰减系数 ( $\text{m}^{-1}$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 4 个湖泊水体光学因子状况

表 1 给出了 4 个湖泊测得的影响漫射衰减的基本光学参数. 从中可见, 东湖由于是典型的市内小型浅水湖泊且富营养化较为严重, 透明度的平均值明显低于梁子湖、洪湖和傀儡湖, 影响漫射衰减系数的主要光学因子 (叶绿素 a 和总悬浮物) 明显高于梁子湖、洪湖和傀儡湖. 梁子湖、洪湖和傀儡湖相对东湖水质较好, 由表 1 中各参数变异系数可知, 由于梁子湖和洪湖面积较大, 部分沉水植物较多的草型区域和藻型区域存在明显差别, 因此各水下光学指标变化较大; 东湖和傀儡湖由于是小型湖泊, 所以各指标变异系数均较小, 湖区整体水下光场变化不大.

表 1 4 个湖泊基本光学参数<sup>1)</sup>

Table 1 Basic optical parameters of the four lakes

| 位置  | 项目   | SD/m      | $a_{\text{CDOM}}(350)/\text{m}^{-1}$ | Chla/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ | TSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | ISS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | OSS/TSS/%   | $K_d(\text{PAR})/\text{m}^{-1}$ |
|-----|------|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 东湖  | 范围   | 0.56~0.82 | 2.84~4.18                            | 17.82~29.19                           | 13.80~23.76                        | 5.20~15.16                         | 35.80~62.30 | 1.65~2.97                       |
|     | 均值   | 0.69±0.11 | 3.23±0.40                            | 23.08±3.44                            | 18.72±4.20                         | 10.13±3.81                         | 47.5±9.22   | 2.29±0.48                       |
|     | 变异系数 | 0.16      | 0.12                                 | 0.15                                  | 0.22                               | 0.38                               | 0.19        | 0.21                            |
| 梁子湖 | 范围   | 0.46~2.78 | 1.28~2.44                            | 2.42~41.96                            | 2.83~26.85                         | 0.33~18.68                         | 28.20~88.50 | 0.8~3.49                        |
|     | 均值   | 1.23±0.87 | 1.92±0.36                            | 22.96±16.43                           | 12.41±9.26                         | 5.66±6.24                          | 67.5±21.1   | 1.91±1.06                       |
|     | 变异系数 | 0.70      | 0.18                                 | 0.72                                  | 0.75                               | 1.10                               | 0.31        | 0.56                            |
| 洪湖  | 范围   | 0.45~2.00 | 3.46~10.27                           | 2.32~53.07                            | 2.24~25.66                         | 0.52~16.06                         | 35.9~88.6   | 0.55~3.85                       |
|     | 均值   | 1.11±0.57 | 4.43±1.64                            | 18.27±16.53                           | 10.98±8.18                         | 5.46±5.74                          | 62.2±20.1   | 2.33±1.20                       |
|     | 变异系数 | 0.55      | 0.37                                 | 0.91                                  | 0.75                               | 1.05                               | 0.32        | 0.52                            |
| 傀儡湖 | 范围   | 0.75~1.35 | 3.18~5.08                            | 4.73~20.36                            | 9.50~23.13                         | 6.60~18.87                         | 11.56~32.32 | 1.38~2.82                       |
|     | 均值   | 0.92±0.16 | 4.22±0.56                            | 7.98±3.27                             | 15.06±3.92                         | 11.47±3.36                         | 24.38±4.94  | 1.86±0.36                       |
|     | 变异系数 | 0.17      | 0.13                                 | 0.41                                  | 0.26                               | 0.29                               | 0.20        | 0.19                            |

1) SD:透明度,  $a_{\text{CDOM}}(350)$ :350 nm 处 CDOM 吸收系数, Chla、TSS、ISS、OSS:叶绿素 a、总悬浮物、无机悬浮物、有机悬浮物浓度,  $K_d(\text{PAR})$ : PAR 漫射衰减系数

对各因子进行回归性分析,由于洪湖的 H9、H12 和 H13 点位清澈见底,透明度不能代表该点位真正的透明度,在回归分析时将其剔除.由表 2 知,在东湖和傀儡湖透明度与总悬浮物、无机颗粒物呈显著性正相关,其中又以与无机颗粒物相关性最高,而与有机颗粒物、叶绿素 a、溶解性有机碳则无显著相关性,这与张运林等<sup>[12]</sup>2005 年在太湖梅梁湾的研究结果一致.在东湖和傀儡湖悬浮颗粒物是影响水体透明度的主导因素,主要是因为东湖、傀儡湖与梅梁湾一样,悬浮颗粒物均含量较高(表 2),且无机悬浮颗粒物所占比例相对较大,分别为 52.5% 和 75.62%,这个结果也与 Havens<sup>[13]</sup>在大型浅水湖泊 Okeechobee 湖对透明度与无机颗粒物、叶绿素 a 进行的回归分析的结果一致,无机颗粒物对光的衰

减发挥的作用最大.与东湖不同的是,尽管傀儡湖悬浮颗粒物也是主导透明度的主要光学因子,但是由表 1 知傀儡湖悬浮颗粒物含量低于东湖,并且有机颗粒物所占比例低于东湖,说明傀儡湖并没有富营养化,这也是傀儡湖虽然悬浮颗粒物高水质依然相对较好的原因.洪湖和梁子湖透明度与总悬浮颗粒物、无机颗粒物、有机颗粒物和叶绿素 a 均具有较好的相关性,在梁子湖,透明度与叶绿素 a 的相关性甚至好与总悬浮颗粒物的.这主要是因为,在梁子湖和洪湖,由于水质状况较好,湖底有大量的沉水植物生长,在一定程度上抑制了底泥的再悬浮,从而控制了水体中无机颗粒物的量.由表 1 中有机悬浮颗粒物在总悬浮颗粒物所占的比例也可以发现,梁子湖和洪湖的有机悬浮颗粒物所占的比例远大于东湖

表 2 4 个湖泊主要光学因子间 Person 相关系数矩阵<sup>1)</sup>

Table 2 Person correlation coefficient matrix of optical factors in the four lakes

| 武汉东湖 |        |        |        |        |        |      | 梁子湖    |       |        |        |        |      |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--------|-------|--------|--------|--------|------|
|      | SD     | DOC    | Chla   | TSS    | OSS    | ISS  | SD     | DOC   | Chla   | TSS    | OSS    | ISS  |
| SD   | 1.00   |        |        |        |        |      | 1.00   |       |        |        |        |      |
| DOC  | 0.24   | 1.00   |        |        |        |      | 0.44   | 1.00  |        |        |        |      |
| Chla | 0.56   | 0.56   | 1.00   |        |        |      | 0.93** | 0.37  | 1.00   |        |        |      |
| TSS  | 0.84** | 0.12   | 0.5    | 1.00   |        |      | 0.82** | 0.62* | 0.86** | 1.00   |        |      |
| OSS  | 0.38   | 0.77** | 0.81** | 0.49   | 1.00   |      | 0.80** | 0.73  | 0.85** | 0.87** | 1.00   |      |
| ISS  | 0.82** | -0.07  | 0.33   | 0.97** | 0.28   | 1.00 | 0.72** | 0.48  | 0.76** | 0.96** | 0.69** | 1.00 |
| 洪湖   |        |        |        |        |        |      | 傀儡湖    |       |        |        |        |      |
|      | SD     | DOC    | Chla   | TSS    | OSS    | ISS  | SD     | DOC   | Chla   | TSS    | OSS    | ISS  |
| SD   | 1.00   |        |        |        |        |      | 1.00   |       |        |        |        |      |
| DOC  | 0.19   | 1.00   |        |        |        |      | -0.13  | 1.00  |        |        |        |      |
| Chla | 0.79** | 0.21   | 1.00   |        |        |      | 0.13   | 0.17  | 1.00   |        |        |      |
| TSS  | 0.86** | 0.22   | 0.88** | 1.00   |        |      | 0.86** | -0.13 | 0.40   | 1.00   |        |      |
| OSS  | 0.83** | 0.11   | 0.91** | 0.93** | 1.00   |      | 0.32   | 0.15  | 0.71** | 0.65*  | 1.00   |      |
| ISS  | 0.83** | 0.25   | 0.84** | 0.99** | 0.86** | 1.00 | 0.91** | -0.20 | 0.25   | 0.97** | 0.46   | 1.00 |

1) \*\* 表示  $P < 0.001$ ; \* 表示  $P < 0.05$

和傀儡湖,浮游藻类在很大程度上也影响光的漫射衰减,所以透明度与有机悬浮颗粒物、无机悬浮颗粒物和叶绿素 a 均具有较好的相关性. 由表 2 还可以发现,叶绿素 a 在 4 个湖泊与有机悬浮颗粒物均具有较好的相关性,而叶绿素 a 与无机颗粒物的相关性,在东湖和傀儡湖不明显,但在梁子湖和洪湖,两者则具有明显的相关性,这主要是因为东湖和傀儡湖无机悬浮颗粒物除了来源于浮游植物的降解外,还有一部分是来源于外源的输入和底泥的再悬浮,而在梁子湖和洪湖,有机悬浮颗粒物主要来源于浮游藻类的降解.

## 2.2 4 个湖泊光谱衰减特征分析

由图 2 可知,4 个湖泊各站点 400 ~ 700 nm 光谱衰减系数在不同湖泊、同一湖泊不同湖区既有相似处,又存在很大差异,在东湖各点位光谱衰减谱型较为一致,梁子湖和洪湖则变化较大. 整体上来说,光谱衰减系数随着波长的增加大致呈下降趋势,在蓝光波段各站点衰减系数均较大,且大于绿光、红光. 这主要是由于非藻类颗粒物和 CDOM 在短波部分的强烈吸收所致,因为非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收系数从短波到长波大致按指数规律下降. 光谱衰减系数的最小值出现位置由图 2 可以看出,各点位最小值均出现在 580 nm 左右的绿光波段,除了非藻类颗粒物的影响外,CDOM 和纯水本身对光的衰减占重要份额,而 CDOM 对光的衰减主要集中在

550 nm 以下的短波部分,纯水对光的吸收则主要集中在 600 nm 以上的红光波段,如纯水在 580 nm 和 700 nm 波长处的吸收系数分别为  $0.108 \text{ m}^{-1}$  和  $0.65 \text{ m}^{-1}$ ,相差非常大,从而使得最低衰减系数出现在 580 nm 左右的绿光波段. 总体上来说,浅水湖泊紫、蓝光衰减最强烈,红、绿光衰减最弱. 另外,从图 2 还可发现,在东湖各点 675 nm 处出现浮游植物吸收造成的衰减峰值,说明在整个湖区叶绿素 a 比较高. 梁子湖和洪湖各点在 675 nm 处也都有相对的叶绿素 a 衰减峰值,在梁子湖的 1、8、9 和 10 号点,洪湖的 6 号和 9 ~ 13 号点叶绿素 a 浓度较低,在图 2 中这部分点在 675 nm 处叶绿素 a 特征衰减峰不明显. 傀儡湖叶绿素 a 浓度较另外 3 个湖泊要低,各点在 675 nm 处的特征衰减峰并不是特别明显. 由于受无机颗粒物和 CDOM 衰减的影响,各点在 440 nm 处叶绿素 a 的特征吸收峰均表现不明显. 另外东湖和傀儡湖水体面积相对较小,各点之间衰减光谱的差异不大,衰减光谱分布在一个相对狭窄的范围内. 在长江中下游浅水湖泊获得的漫射衰减特征完全不同于贫营养湖泊<sup>[14]</sup>,但与其他地区富营养浅水湖泊的研究结果非常类似<sup>[7,9,15]</sup>. 当然笔者也注意到本项研究采样集中在秋、春季,而由于湖泊周围流域入湖径流以及藻类生长的影响,其它季节水下辐照度的漫射衰减可能会有些许差异,如夏季浮游植物浓度较高时 675 nm 附近的衰减峰就会比较明显,而在洪水季

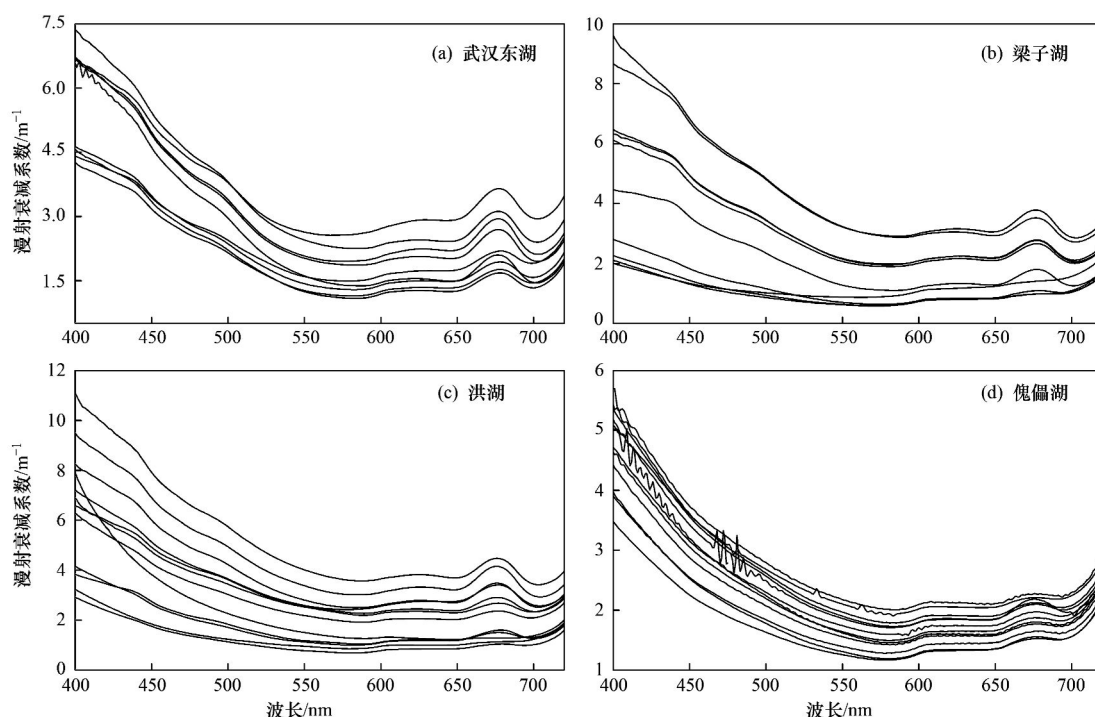


图 2 4 个湖泊光谱漫射衰减系数

Fig. 2 Spectral diffuse attenuation coefficients in the four lakes

节入湖河流带来大量泥沙入湖则一些站点在短波蓝光衰减会明显增加,这些均需要在后面的研究中进一步补充完善。

### 2.3 漫射衰减系数、真光层深度变化规律

4 个湖泊 PAR 衰减系数的变化范围分别为东湖 1.65 ~ 2.97  $\text{m}^{-1}$  (均值为 2.29  $\text{m}^{-1} \pm 0.48 \text{ m}^{-1}$ )、梁子湖 0.8 ~ 3.49  $\text{m}^{-1}$  (均值为 1.91  $\text{m}^{-1} \pm 1.06 \text{ m}^{-1}$ )、洪湖 0.55 ~ 3.85  $\text{m}^{-1}$  (均值为 2.33  $\text{m}^{-1} \pm 1.20 \text{ m}^{-1}$ )、傀儡湖 1.38 ~ 2.82  $\text{m}^{-1}$  (均值为 1.86  $\text{m}^{-1} \pm 0.36 \text{ m}^{-1}$ ) ; 对应的真光层深度分别为东湖 1.55 ~ 2.97 m (均值为 2.09 m  $\pm 0.44 \text{ m}$ )、梁子湖 0.80 ~ 3.49 m (均值为 3.27 m  $\pm 1.79 \text{ m}$ )、洪湖 0.55 ~ 3.85 m (均值为 2.77 m  $\pm 2.05 \text{ m}$ )、傀儡湖 1.63 ~ 3.34 m (均值为 2.56 m  $\pm 0.45 \text{ m}$ )。漫衰减系数直接决定了水体中的光强和光谱分布,从而成为水生态系统的重要影响因素,当水体中漫射衰减系数较大时,可能导致沉水植物由于没有足够的光照进行光合作用而死亡和衰退,导致水体生态系统类型的转化<sup>[8]</sup>。东湖平均水深为 2.5 m,而平均真光层深度仅为 2.09 m,湖泊浮游植物的初级生产力基本上来自于水下 2.0 m 厚的水层,而 2 m 以下的沉水植物由于无法获取足够的太阳光进行光合作用,而

面临死亡,并且在沉水植物生长的夏季由于水温升高浮游植物浓度更会偏高,沉水植物更加面临水下光照不足而无法生长。富营养化过程中真光层深度低于水深造成沉水植被消退是富营养化较为严重的湖泊的共同特点。梁子湖、洪湖和傀儡湖平均水深分别为 3.0、1.5 和 1.5 m,对应的平均真光层深度为 3.27、2.77 和 2.56 m,真光层深度均大于水深,能够保证底层浮游植物和沉水植物的生长,而实际情况也是这 3 个湖泊有较大面积的沉水植物分布。所以,对于沉水植物消退的富营养化浅水湖泊要进行湖泊水环境的生态恢复,水下光场的改善和优化是非常重要的。而对有沉水植物分布的湖泊,控制氮磷营养盐的输入,维护良好的水下光场条件进而保护沉水植物生长也是非常必要的,否则就会出现湖泊生态系统类型从清澈草型生态系统向浑浊藻型生态系统的稳态转换<sup>[3,16]</sup>。

为探讨不同湖泊影响 PAR 漫射衰减的主导因子,对观测期间向下 PAR 衰减系数与悬浮物浓度、有机颗粒物、无机颗粒物、溶解性有机碳、叶绿素 a 浓度进行线性拟合,表 3 给出存在显著线性相关的回归式。从中可知,在东湖和傀儡湖 PAR 衰减系数与悬浮颗粒物有较好的相关性,其中又与无机颗粒

表 3 PAR 漫射衰减系数与光衰减因子显著性线性回归<sup>1)</sup>

Table 3 Significant linear relationships between PAR diffuse attenuation coefficient and light attenuation factors

| 湖泊               | 关系式                                                                                        | $R^2$ | $P$          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|
| 武汉东湖 ( $N=9$ )   | $K_d(\text{PAR}) = 0.105\text{TSS} + 0.314$                                                | 0.868 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.112\text{ISS} + 1.153$                                                | 0.806 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.117\text{TSS} - 0.352\text{Chla} + 0.017a_{\text{CDOM}}(350) + 0.837$ | 0.959 | $\leq 0.001$ |
| 梁子湖 ( $N=10$ )   | $K_d(\text{PAR}) = 0.114\text{TSS} + 0.489$                                                | 0.992 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.162\text{ISS} + 0.989$                                                | 0.904 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.245\text{OSS} + 0.257$                                                | 0.758 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.057\text{Chla} + 0.631$                                               | 0.728 | $\leq 0.01$  |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.11\text{TSS} - 0.213\text{Chla} + 0.007a_{\text{CDOM}}(350) + 0.777$  | 0.998 | $\leq 0.001$ |
| 洪湖 ( $N=12$ )    | $K_d(\text{PAR}) = 0.139\text{TSS} + 0.483$                                                | 0.891 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.188\text{ISS} + 1.026$                                                | 0.849 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.426\text{OSS} - 0.368$                                                | 0.803 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.063\text{Chla} + 0.925$                                               | 0.789 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.057\text{TSS} - 1.266\text{Chla} + 0.047a_{\text{CDOM}}(350) + 5.59$  | 0.947 | $\leq 0.001$ |
| 傀儡湖 ( $N=20$ )   | $K_d(\text{PAR}) = 0.08\text{TSS} + 0.66$                                                  | 0.75  | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.097\text{ISS} + 0.75$                                                 | 0.81  | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.083\text{TSS} - 0.071\text{Chla} - 0.013a_{\text{CDOM}}(350) + 1.0$   | 0.878 | $\leq 0.001$ |
| 4 个湖泊 ( $N=51$ ) | $K_d(\text{PAR}) = 0.108\text{TSS} + 0.457$                                                | 0.774 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.188\text{ISS} + 1.026$                                                | 0.528 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.426\text{OSS} - 0.368$                                                | 0.492 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.063\text{Chla} + 0.925$                                               | 0.568 | $\leq 0.001$ |
|                  | $K_d(\text{PAR}) = 0.061\text{TSS} + 0.087\text{Chla} + 0.031a_{\text{CDOM}}(350) + 0.355$ | 0.901 | $\leq 0.001$ |

1)  $K_d(\text{PAR})$ : PAR 衰减系数 ( $\text{m}^{-1}$ ), TSS: 总悬浮物浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), ISS: 无机颗粒物浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), OSS: 有机颗粒物浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), Chla: 叶绿素 a 浓度 ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $a_{\text{CDOM}}(350)$ : 有色可溶性有机物在 350 nm 处的吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ ),  $R^2$ : 相关系数,  $N$ : 样本容量,  $P$ : 显著性水平

物的相关性最好,与有机颗粒物、溶解性有机碳、叶绿素 a 的相关性较差,可知在东湖和傀儡湖无机颗粒物的主导了 PAR 衰减,这与 Philips 等<sup>[17]</sup>在 Okeechobee 湖多泥的软底也发现一年四季 PAR 衰减系数与悬浮物浓度均存在显著性正相关,而与叶绿素 a 浓度的相关性不显著相一致,这主要是因为东湖富营养化严重,没有沉水植物适宜生长的光环境,底泥易发生再悬浮,使水体中无机颗粒物含量较高;傀儡湖虽然并没有富营养化,并且有沉水植物适宜的水下光场,但作为水源地,进行过多次清淤,只在沿岸区和湖心区有少量沉水植物生长<sup>[18]</sup>,所以在湖体中无机悬浮颗粒物含量仍较高,悬浮物较高增加了对光的衰减,掩盖了叶绿素 a、溶解性有机物对光的衰减.通过表 3 可发现,与东湖和傀儡湖不同,在梁子湖和洪湖 PAR 衰减与无机颗粒物、有机颗粒物、叶绿素 a 均具有显著的相关性,这与国外一些研究者的研究结果是一致的<sup>[19,20]</sup>,这主要是因为这两个浅水湖泊,有适于沉水植物生长的水下光场环境,湖区内有大量的沉水植物生长<sup>[21,22]</sup>,这些沉水植物很好地控制了底泥的在悬浮,从而减少了水体中无机颗粒物的量.在这两个湖泊有机颗粒物与叶绿素 a 有较好的相关性,说明有机颗粒物中大部分为浮游植物颗粒物与其降解残体,因此在这两个湖泊 PAR 衰减的主导因素是无机颗粒物和浮游植物.

2.4 吸收、散射对漫射衰减贡献分析

在内陆水体,由于颗粒物含量较高,所以较海洋水体,散射系数也要大得多<sup>[23~25]</sup>.由前面分析也可

知,在 4 个湖泊中对漫射衰减影响较大的因素是悬浮颗粒物,悬浮颗粒物主要通过吸收和散射影响水下辐照度衰减.利用分光光度法可测得样品的总光束衰减系数,结合纯水、总颗粒物吸收系数和 CDOM 吸收系数可得到颗粒物的散射系数.由数据分析可知,散射系数从短波到长波呈指数衰减. Marcel 等<sup>[26]</sup>采用将 10 mm 比色皿置于 150 mm 积分球内测定的方法,对藻类、非藻类有机颗粒、无机颗粒等不同类型的颗粒的直接测量结果表明,颗粒物在 750 nm 处附近的颗粒物的吸收系数几乎为 0,可以忽略,因此可以用 750 nm 处光束衰减系数近似表征水体中颗粒物的散射系数<sup>[27]</sup>.用 750 nm 处光束衰减系数、440~700 nm 的平均吸收系数  $\alpha$ (PAR) 与光合有效辐射衰减系数  $K_d$ (PAR) 做相关性分析,从而探寻吸收和散射对漫射衰减的贡献.表 4 可以发现,东湖和洪湖  $K_d$ (PAR) 与 750 nm 处光束衰减系数的相关性要明显好于吸收的,说明在这两个湖泊中颗粒物散射对光束衰减起着主导的作用,而梁子湖和傀儡湖吸收和光束衰减系数与  $K_d$ (PAR) 均具有相对较好的相关性,说明在傀儡湖和梁子湖散射和吸收对漫射衰减贡献均等.表 4 的 4 个湖泊散射和吸收与漫射衰减回归性分析结果显示,散射对漫射衰减的影响总的看来是要大于吸收的,因此可以知,在长江中下游浅水湖泊中散射对湖泊漫射衰减起着决定性的作用.在阿根廷类似的浅水湖泊中,Pérez 等<sup>[9]</sup>用浊度近似代替散射系数跟 PAR 漫射衰减系数进行线性回归发现两者存在极显著正相关,也反映了颗粒物散射对 PAR 漫射衰减起主导作用.

表 4 吸收、散射系数与漫射衰减系数显著性线性回归<sup>1)</sup>

| Table 4 Significant linear relationships between absorption coefficient, scattering coefficient and diffuse attenuation coefficient |                                                     |       |              |                                               |       |              |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|--------------|-----------------------------------------------|-------|--------------|--|
| 湖泊                                                                                                                                  | 关系式                                                 | $R^2$ | $P$          | 关系式                                           | $R^2$ | $P$          |  |
| 东湖 (N=9)                                                                                                                            | $\alpha(\text{PAR}) = 0.123K_d(\text{PAR}) + 0.623$ | 0.391 | $= 0.298$    | $c_{t-w}(750) = 1.900K_d(\text{PAR}) + 0.262$ | 0.636 | $\leq 0.001$ |  |
| 梁子湖 (N=10)                                                                                                                          | $\alpha(\text{PAR}) = 0.392K_d(\text{PAR}) + 0.001$ | 0.928 | $\leq 0.001$ | $c_{t-w}(750) = 2.597K_d(\text{PAR}) - 1.320$ | 0.965 | $\leq 0.001$ |  |
| 洪湖 (N=12)                                                                                                                           | $\alpha(\text{PAR}) = 0.118K_d(\text{PAR}) + 0.549$ | 0.445 | $= 0.147$    | $c_{t-w}(750) = 2.597K_d(\text{PAR}) - 1.486$ | 0.910 | $\leq 0.001$ |  |
| 傀儡湖 (N=20)                                                                                                                          | $\alpha(\text{PAR}) = 0.221K_d(\text{PAR}) + 0.423$ | 0.650 | $\leq 0.05$  | $c_{t-w}(750) = 1.150K_d(\text{PAR}) + 1.031$ | 0.540 | $\leq 0.05$  |  |
| 4 个湖泊 (N=51)                                                                                                                        | $\alpha(\text{PAR}) = 0.210K_d(\text{PAR}) + 0.394$ | 0.642 | $\leq 0.001$ | $c_{t-w}(750) = 2.588K_d(\text{PAR}) - 0.825$ | 0.756 | $\leq 0.001$ |  |

1) 式中,  $c_{t-w}(750)$ : 750 nm 处光束衰减系数( $\text{m}^{-1}$ ),  $K_d(\text{PAR})$ : PAR 衰减系数( $\text{m}^{-1}$ ),  $\alpha(\text{PAR})$ : 颗粒物和 CDOM 吸收系数之和在 440~700 nm 的平均吸收系数( $\text{m}^{-1}$ ),  $R^2$ : 相关系数, N: 样本容量, P: 显著性水平

3 结论

(1) 武汉东湖和傀儡湖各光学因子变化不大, 梁子湖和洪湖由于具有草型和藻型湖区各因子变化较大. 无机颗粒物是影响东湖和傀儡湖透明度和 PAR 漫射衰减的主要原因, 而梁子湖和洪湖透明度和 PAR 漫射衰减则受无机、有机颗粒物及叶绿素 a

浓度的共同制约.  
(2) 武汉东湖 PAR 真光层深度低于水深, 无法满足沉水植物生长所需水下光场条件, 傀儡湖、梁子湖和洪湖水下光环境较好, 可以充分利用这一有利条件, 用沉水植物进行湖泊生态系统的保护和改善.  
(3) 4 个湖泊光谱漫射衰减系数最低值均出现

在 580 nm 处,在 675 nm 处均具有相应的叶绿素 a 的特征吸收峰,其中东湖表现最明显,但在叶绿素 a 浓度较低站点衰减峰相对不明显。

(4)750 nm 处的光束衰减系数、PAR 平均吸收系数和 PAR 漫射衰减系数相关分析结果显示,在不同湖泊主导衰减的因素有所不同,但就长江中下游湖泊而言,散射对漫射衰减的影响是非常显著的。

致谢:感谢刘明亮在武汉东湖、梁子湖、洪湖以及张路在傀儡湖野外采样中给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J]. 水科学进展, 2004, **15**(5): 615-620.
- [2] Schelske C L, Lowe E F, Kenney W F, *et al.* How anthropogenic darkening of lake apopka induced benthic light limitation and forced the shift from macrophyte to phytoplankton dominance[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(3): 1201-1212.
- [3] Kessler K, Lockwood R S, Williamson C E, *et al.* Vertical distribution of zooplankton in subalpine and alpine lakes: ultraviolet radiation, fish predation, and the transparency-gradient hypothesis[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(6): 2374-2382.
- [4] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [5] 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 等. 浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 412-420.
- [6] Zhang Y L, Liu X H, Yin Y, *et al.* A simple optical model to estimate diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in an extremely turbid lake from surface reflectance[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20482-20493.
- [7] 金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1581-1590.
- [8] 黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖水体漫衰减系数特征及其对水生态环境影响分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 348-355.
- [9] Pérez G L, Torremorell A, Bustingorry J, *et al.* Optical characteristics of shallow lakes from the Pampa and Patagonia regions of Argentina[J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, **40**(1): 30-39.
- [10] Gareis J A L, Lesack L F W, Bothwell M L. Attenuation of in situ UV radiation in Mackenzie Delta lakes with varying dissolved organic matter compositions [J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**: W09516, doi: 10.1029/2009WR008747.
- [11] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [12] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 不同风浪条件下太湖梅梁湾光合有效辐射的衰减[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(6): 1133-1137.
- [13] Havens K E. Submerged aquatic vegetation correlations with depth and light attenuating materials in a shallow subtropical lake [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **493**(1-3): 173-186.
- [14] Belzile C, Vincent W F, Howard-Williams C, *et al.* Relationships between spectral optical properties and optically active substances in a clear oligotrophic lake [J]. *Water Resources Research*, 2004, **40**: W12512, doi: 10.1029/2004WR003090.
- [15] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J]. 海洋与湖沼, 2004, **35**(3): 209-213.
- [16] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, *et al.* Catastrophic shifts in ecosystems[J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 591-596.
- [17] Philips E J, Aldridge F J, Schelske C L, *et al.* Relationships between light availability, chlorophyll a, and tripton in a large, shallow subtropical lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(2): 416-421.
- [18] 熊晶, 谢志才, 张君倩, 等. 傀儡湖大型底栖动物群落与水质评价[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(Z1): 132-137.
- [19] Rae R, Howard-Williams C, Hawes I, *et al.* Penetration of solar ultraviolet radiation into New Zealand lakes: influence of dissolved organic carbon and catchments vegetation [J]. *Limnology*, 2001, **2**(2): 79-89.
- [20] Paavel B, Arst H, Reinart A. Variability of bio-optical parameters in two North-European large lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2008, **599**(1): 201-211.
- [21] 葛继稳, 蔡庆华, 刘建康, 等. 梁子湖湿地植物多样性现状与评价[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(5): 451-456.
- [22] 王学雷, 厉恩华, 余璟, 等. 生态恢复前后洪湖水生植被景观各向异性动态变化研究[J]. 湿地科学, 2010, **8**(2): 105-109.
- [23] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2688-2694.
- [24] 施坤, 李云梅, 吕恒, 等. 太湖水体颗粒物散射的剖面分布及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 598-605.
- [25] Marcel B, Morel A, Fournier-Sicre V, *et al.* Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(2): 843-859.
- [26] Marcel B, Stramski D. Light absorption by aquatic particles in the near-infrared spectral region [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(3): 911-915.
- [27] Zhang Y L, Yin Y, Zhang E L, *et al.* Spectral attenuation of ultraviolet and visible radiation in lakes in the Yunnan Plateau, and the middle and lower reaches of the Yangtze River, China [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2011, **10**(4): 469-482.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                             |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Characterization of Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Hazy Weather During 16 <sup>th</sup> Asian Games in Guangzhou .....                        | TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> ( 409 )                 |
| PM <sub>2.5</sub> Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area .....                                              | ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> ( 416 )           |
| Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China .....                                                        | WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> ( 424 )      |
| Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou .....                                                                             | XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> ( 434 )            |
| Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City .....                                              | LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> ( 441 )       |
| Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival .....                                                                  | ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui ( 448 )               |
| Characteristics of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Concentrations in Mountain Background Region of East China .....                                                  | SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun ( 455 )                            |
| Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose .....                                                        | TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 462 )             |
| Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control .....                                                | ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> ( 468 )           |
| Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique .....                                                 | XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> ( 476 )      |
| Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake .....                                         | OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> ( 484 )                |
| Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City .....                                                         | LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan ( 494 )                          |
| Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency .....                                                                                                 | ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao ( 499 )                                |
| Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China .....                                                                                       | SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> ( 509 )         |
| Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River .....                             | SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> ( 517 )   |
| Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body .....                                                           | HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i> ( 525 )   |
| Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate ..... | QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> ( 532 )   |
| Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland .....                                 | ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> ( 540 )       |
| Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin .....                                                         | ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> ( 547 )         |
| Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River .....                                                                                    | CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> ( 555 )            |
| Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area .....                                                                           | DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke ( 561 )                              |
| Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage .....                                                | REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> ( 570 )                  |
| Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis .....                                                         | ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> ( 576 )          |
| Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium .....                                                                                   | LI San-hua, ZHANG Qi-ya ( 583 )                                      |
| Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities .....                                                                 | YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 589 )           |
| Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO <sub>2</sub> Photocatalytic Combined Technologies .....                                                                 | ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> ( 596 )        |
| Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater .....                                                                                  | WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> ( 604 )              |
| Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645 .....                                                                           | XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping ( 611 )                       |
| Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline .....                                                                                          | YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> ( 616 )          |
| Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization .....                                                               | JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 622 )        |
| Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content .....                                                                    | CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> ( 629 )     |
| Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter .....                              | YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> ( 635 )           |
| Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products .....                                           | QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen ( 642 )                        |
| Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model .....                                                                                          | ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> ( 647 )       |
| Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution .....                                                                                                 | YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> ( 653 )        |
| Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application .....                                                                        | WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> ( 662 )   |
| Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain .....                                                        | ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei ( 668 )                         |
| Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization .....                                                                       | LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> ( 676 )            |
| Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return .....                                                         | ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> ( 685 )        |
| Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations .....                                                                                 | LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> ( 692 )              |
| Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis .....                                                                                  | ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> ( 698 ) |
| Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise .....                                                                                   | PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> ( 705 )                |
| Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant .....                                              | LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> ( 712 )           |
| Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin .....                                                                                       | YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> ( 718 )            |
| Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments .....                                                                               | WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> ( 724 )         |
| Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds .....                                                                                             | YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> ( 732 )   |
| Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field .....                                                                                                                      | WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> ( 740 )     |
| Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity .....                                                                             | NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> ( 746 )               |
| Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6 .....                                                                                 | LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> ( 753 )                   |
| Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection .....                                                                                                 | TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> ( 760 )                 |
| Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method .....                   | LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 767 )   |
| Assessment of the Effect of Influent NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process .....   | LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> ( 773 )               |
| Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes .....                                                     | SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> ( 781 )       |
| Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil .....                                                                               | YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> ( 789 )          |
| Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters .....                                                        | WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> ( 795 )    |
| Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill .....                                                                                                                | LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> ( 804 )              |
| Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms .....                                                                                       | WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> ( 810 )           |

# 《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行