

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                   |                                             |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究 .....                     | 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)                |
| 基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究 .....                  | 罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)                     |
| 湿地水环境健康评价方法及案例分析 .....                            | 李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)                 |
| 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 .....                    | 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)                     |
| 漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别 .....                      | 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)               |
| 黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用 .....                         | 安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)               |
| 沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响 .....                    | 李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)                       |
| 沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响 .....                     | 王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)          |
| 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 .....                       | 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)                |
| 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究 .....                     | 张文斌, 余辉 (399)                               |
| 降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析 .....                    | 彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)           |
| 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 .....                   | 刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412) |
| 基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 $K_d$ (490) 估算及其遥感反演 .....    | 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)            |
| 基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究 .....                       | 张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)            |
| 好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化 .....                             | 李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)                 |
| 邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响 .....                      | 别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)                    |
| Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 .....                | 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)                         |
| 羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究 .....                        | 白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)                |
| 天然菱铁矿改性及强化除砷研究 .....                              | 赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)                       |
| 零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究 .....                           | 廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)                          |
| 水体中氧氟沙星的光化学降解研究 .....                             | 邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)                          |
| 阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究 .....                           | 季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)                  |
| 吡啶在紫外光辐射下的生物降解 .....                              | 方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)                          |
| 蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化 .....                          | 朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)                    |
| $\epsilon$ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究 .....            | 曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)                  |
| 丝状菌污泥致密过程的强化条件研究 .....                            | 李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)                     |
| 亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究 .....                         | 罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)  |
| 我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究 .....                        | 李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)                  |
| 北京市 $PM_{10}$ 自动监测网络优化研究 .....                    | 齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)                           |
| 道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究 .....                       | 徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)                           |
| $Fe^{II}$ (EDTA) 络合协同 RDB 去除 $NO$ 废气效能及过程分析 ..... | 陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)                 |
| UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响 .....                  | 宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)                     |
| 干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性 .....                   | 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)                     |
| 九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究 .....                | 郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)                |
| 秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 $CH_4$ 通量特征及影响因素研究 .....            | 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)     |
| 我国典型非木浆造纸二噁英排放研究 .....                            | 王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)           |
| 典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布 .....                  | 邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)          |
| 电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征 .....                       | 王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)  |
| 北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险 .....                   | 彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)               |
| 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价 .....                      | 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)          |
| 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 .....                     | 尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)               |
| 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价 .....                   | 王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)                      |
| 超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析 .....                   | 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)      |
| 大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究 .....                   | 赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)      |
| 不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究 .....                    | 尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)                      |
| 应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测 .....                     | 朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)            |
| 软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化 .....                     | 王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)                  |
| 固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素 .....             | 洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)           |
| 五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究 .....                   | 金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)                 |
| 建筑陶瓷碳计量与优化模型研究 .....                              | 彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)                |
| 《环境科学》征订启事 (447)                                  | 《环境科学》征稿简则 (475)                            |
| 信息 (524, 586, 605, 624)                           |                                             |

# 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

刘笑菡<sup>1,2</sup>, 冯龙庆<sup>1</sup>, 张运林<sup>1\*</sup>, 赵林林<sup>1,3</sup>, 朱梦圆<sup>1,2</sup>, 时志强<sup>1,3</sup>, 殷燕<sup>1,2</sup>, 丁艳青<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. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 基于2010年7月底至8月初对太湖藻型湖区梅梁湾沿岸带水域不同风速条件下水下光场的原位连续高频观测, 通过对水下辐照度、光束衰减系数、吸收系数、相关理化参数及气象水文参数的测定与分析, 揭示了该区域水体的生物光学特性变化及其与水动力过程的关系。结果表明, 总颗粒物吸收系数  $a_p(440)$ 、非色素颗粒物吸收系数  $a_d(440)$ 、浮游植物吸收系数  $a_{ph}(440)$  及有色可溶性有机物吸收系数  $a_{CDOM}(440)$  在小风 ( $30\text{ min}$  内平均风速  $< 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、中风 ( $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} < \text{风速} < 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和大风 (风速  $> 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 作用下分别为  $3.97$ 、 $3.97$ 、 $6.58\text{ m}^{-1}$ ;  $1.69$ 、 $2.17$ 、 $4.20\text{ m}^{-1}$ ;  $2.28$ 、 $1.80$ 、 $1.33\text{ m}^{-1}$ ;  $1.05$ 、 $1.04$ 、 $1.08\text{ m}^{-1}$ , 其中变幅最大的为非色素颗粒物, CDOM 吸收系数在不同风速条件下差别不大。水体各组分在 PAR 波段积分值的贡献率的变化规律为: 小风速下浮游植物吸收系数的贡献最大 (达  $42.5\%$ ), 随着风速的增大, CDOM、浮游植物、纯水吸收系数的贡献率均有降低的趋势, 而非色素颗粒物的贡献率则显著增大, 分别为  $33.0\%$ 、 $41.7\%$ 、 $52.0\%$ 。PAR 漫射衰减系数与  $10\text{ min}$  平均风速呈显著线性相关, 风速引起的沉积物再悬浮对 PAR 漫射衰减系数的影响显著, 从小风到大风, PAR 漫射衰减系数增加了  $80.0\%$ , 对应真光层深度降低了  $42.2\%$ 。PAR 漫射衰减系数、 $750\text{ nm}$  波长处的光束衰减系数、总悬浮物浓度与风速、波高、波切应力均存在显著正相关, 其中又以 PAR 漫射衰减系数的相关性最为显著。高频观测结果揭示了浅水湖泊藻型湖区水动力过程通过引起沉积物再悬浮、浮游植物的混合及迁移显著改变水体生物光学特性短期变化。

**关键词:** 浅水湖泊; 水动力; 漫射衰减系数; 吸收系数; 总悬浮物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0412-09

## Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake

LIU Xiao-han<sup>1,2</sup>, FENG Long-qing<sup>1</sup>, ZHANG Yun-lin<sup>1</sup>, ZHAO Lin-lin<sup>1,3</sup>, ZHU Meng-yuan<sup>1,2</sup>, SHI Zhi-qiang<sup>1,3</sup>, YIN Yan<sup>1,2</sup>, DING Yan-qing<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. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** An *in situ* field high-frequency bio-optical measurement was carried out in the littoral region in Meiliang Bay of Lake Taihu, a large shallow lake of China from 24 July to 1 August in 2010. The underwater irradiance, beam attenuation coefficient and absorption coefficient, the related physical-chemical and meteorological parameters were measured and analyzed, in order to determine the relationship between water bio-optical properties and wind waves process. The absorption coefficients of particles  $a_p(440)$ , non-phytoplankton  $a_d(440)$ , phytoplankton  $a_{ph}(440)$  and chromophoric dissolved organic matter (CDOM)  $a_{CDOM}(440)$  were  $3.97$ ,  $3.97$ ,  $6.58\text{ m}^{-1}$ ;  $1.69$ ,  $2.17$ ,  $4.20\text{ m}^{-1}$ ;  $2.28$ ,  $1.80$ ,  $1.33\text{ m}^{-1}$ ;  $1.05$ ,  $1.04$ ,  $1.08\text{ m}^{-1}$  with the corresponding 30-minute average wind speed of  $< 3$ ,  $3-5$  and  $> 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  under small, middle and large wind and waves, respectively. Phytoplankton particles contributed the most to total absorption coefficient integrated over a range of photosynthetically active radiation (PAR) ( $400-700\text{ nm}$ ) with a value of  $42.5\%$  during small wind waves. With the increase of wind speed, the relative contributions of phytoplankton, CDOM and pure water decreased but the relative contribution of non-phytoplankton significantly increased with the values of  $33.0\%$ ,  $41.7\%$  and  $52.0\%$  during small, middle and large wind waves, respectively. A significantly positive linear relationship was found between PAR diffuse attenuation coefficients and the mean wind speed within 10 minutes. Sediment resuspension caused by wind waves had a significant effect on PAR diffuse attenuation coefficient. From small wind waves to large wind waves, PAR diffuse attenuation increased  $80.0\%$  but the euphotic depth decreased  $42.2\%$ . Significant linear relationships were found between PAR diffuse attenuation coefficient, the

收稿日期: 2011-03-19; 修订日期: 2011-04-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-QN312); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07101-013); 国家自然科学基金项目 (40971252, 40825004, 40730529); 江苏省自然科学基金项目 (BK2009336)

作者简介: 刘笑菡 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水光学及溶解性有机物生物地球化学循环, E-mail: liuxiaohan7763@163.com

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

beam attenuation coefficients at 750 nm, total suspended solid concentration and wind speed, wave height, wave shear stress, in which the correlation between PAR attenuation coefficients and meteorological hydrology factors was most significant. High-frequency bio-optical measurement showed that hydrodynamic process significantly affected the short-term variation of bio-optical properties in algal-dominated lake region of shallow lake through sediment resuspension, mixing and migration of phytoplankton.

**Key words:** shallow lakes; hydrodynamic; diffuse attenuation coefficient; absorption coefficient; total suspended solid

浅水湖泊由于水浅很容易受风浪以及船舶航行等引起的水动力作用,水动力对浅水湖泊生态系统的影响是多方面的<sup>[1]</sup>:①影响到底泥营养盐的释放和内源负荷的大小<sup>[2]</sup>;②改变水土界面的氧化还原环境使微生物发生变化,从而影响有机物的降解和矿化<sup>[3]</sup>;③决定蓝藻的下沉、上浮、垂直迁移,进而控制蓝藻水华的时空分布和迁移堆积<sup>[4, 5]</sup>;④影响水下光照分布及光场结构<sup>[6, 7]</sup>. 而在这众多影响中最直观的影响就是风浪搅动容易引起沉积物再悬浮,降低水体透明度、增加光衰减,进而影响湖泊初级生产力和沉水植物空间分布<sup>[8, 9]</sup>. 浅水湖泊往往表现出草型清澈型以及藻型浑浊型 2 种完全不同类型的湖泊生态系统类型<sup>[10]</sup>,而水动力过程对这 2 种类型生态系统中水下光场的影响会存在明显差异.

大型浅水湖泊具有复杂的水动力过程,开展水动力对大湖生态环境的影响研究逐渐得到重视,如在伊利湖(Lake Erie)国际野外研究计划中就非常关注水动力对湖泊生态环境的影响机制(<http://www.glerl.noaa.gov/ifyle/>). 太湖也是典型的大型浅水湖泊,面积为 2 338 km<sup>2</sup>,其最大水深不足 3 m,平均水深仅为 1.89 m,具有草、藻型不同生态系统类型<sup>[11]</sup>. 在北部的梅梁湾等藻型湖区及大太湖开敞水域,当风速超过 5 ~ 6 m·s<sup>-1</sup> 临界风速时,在风浪作用下底泥就会发生大幅度再悬浮,影响吸收、散射等水体生物光学特性,进而改变水下光场结构<sup>[6, 12]</sup>. 而在草型湖区的胥口湾等东南部湖湾夏季

沉水植被大量生长时,野外的采样和调查发现即便风速很大时,风浪也不会引起明显的沉积物再悬浮降低水下光照和透明度,湖泊水动力的光学效应并不明显<sup>[13]</sup>.

尽管近年来在太湖开展了一些风浪作用下沉积物悬浮、营养盐释放、光场及初级生产力变化的观测研究<sup>[2, 6, 8, 9, 12]</sup>,但对于连续风浪作用下湖泊水动力过程对水体光学活性物质浓度、固有及表观光学特性的影响机制仍缺乏比较系统的研究. 本研究以富营养化、水华频繁暴发的梅梁湾为区域,通过选取典型风浪过程开展连续高频观测,获得不同风浪条件下水体光学活性物质浓度、固有及表观光学特性参数数据,分析风速、波浪、切应力等气象水文要素与水体生物光学特性之间的内在联系,有望进一步深化认识水动力扰动对水体生物光学特性、湖泊生态过程的影响机制.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间与点位

野外原位观测地点位于太湖湖泊生态系统研究站栈桥顶端,距离岸边 240 m,受岸边带的影响较小,基本上能反映开敞水域环境特征,采样点位置见图 1. 实验观测时间为 2010-07-24 ~ 2010-08-01,共计 9 d,观测期间无阴雨天气,观测点处水深约为 2.3 m. 观测点布设有微气象观测站及水质连续高频监测探头,能获得气温、水温、pH、溶氧、风速风向每

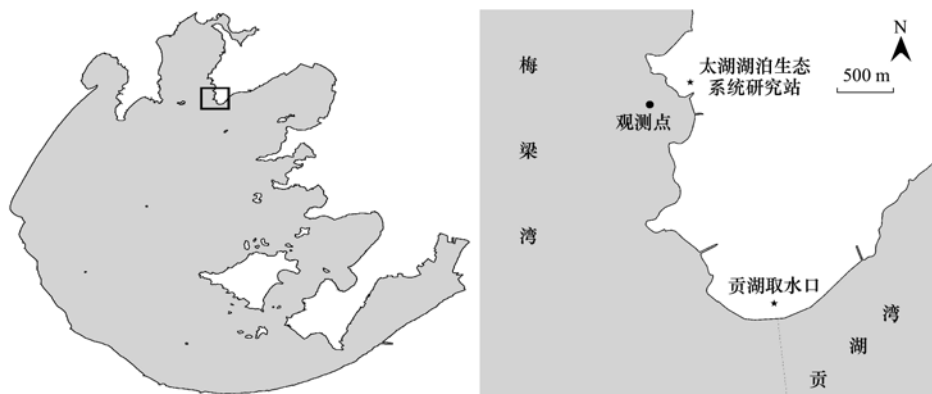


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of sampling site in Lake Taihu

10 min 连续高频在线监测数据.

## 1.2 水样的采集与保存

每天分别在 09:00 和 17:00 分水下 0.2、1.2、2.0 m 3 层进行水样采集,通过对在线风速风向数据进行实时观察,若发现风速变化较大则进行加密采样(具体采样时间与频率见表 1). 样品采集后即送实验室进行过滤处理,然后冷藏保存,所有样品分析在 3 d 内完成.

## 1.3 水下光强测定

光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 总量的测定选用通用的美国 LI-COR 公司生产的 Li-cor 192SA 水下光量子仪,测定向下辐照度. 观测期间天空晴朗无云,按水下 0、0.2、0.5、0.75、1、1.5、2 m 共 7 层测定 PAR 强度,每层记录 3 个数据,求平均值. 一般于每天的 09:00、12:00、14:00、17:00 进行 4 次测定,当风速较大进行加密水样采集时也同步进行水下 PAR 分层测定.

对于垂直方向上光学性质相对均一水体,水下辐照度随水深衰减遵循如下指数衰减规律<sup>[14]</sup>:

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

式中,  $K_d(\text{PAR})$  为向下辐照度漫射衰减系数,  $E_d(\text{PAR}, 0^-)$  和  $E_d(\text{PAR}, z)$  分别为恰好水面下及  $z$  深度处向下辐照度.  $K_d(\text{PAR})$  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  $r \geq 0.90$ , 深度数  $n \geq 3$  时,其  $K_d(\text{PAR})$  值才被接受,否则视为无效值.

## 1.4 光束衰减系数及吸收系数测定

除纯水之外的光束衰减系数  $c_{t-w}(\lambda)$  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-2450PC 型分光光度计下测定原水样的吸光度. 同时,为尽可能降低多次散射,对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<sup>[15, 16]</sup>,根据式(2)计算得到光束衰减系数<sup>[14]</sup>.

$$c_{t-w}(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r \quad (2)$$

式中,  $c_{t-w}(\lambda)$  为  $\lambda$  波长相对于超纯水的光束衰减系数 ( $\text{m}^{-1}$ );  $D(\lambda)$  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  $\mu\text{m}$  的 Millipore 膜过滤的水样,于 UV-2450PC 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<sup>[6, 16]</sup>.

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 25 mm 的 GF/F 膜过滤膜过滤,在 UV-2450PC 型分光光度计下用 ISR-240A 型积分球测定滤膜上颗粒物在 350 ~ 800 nm 波长范围的吸光度,经放大因子校正和进一步计算后得到总悬浮颗粒物的光谱吸收系数. 然后用次氯酸钠溶液浸泡样品滤膜 15 min 左右以漂白样品滤膜上的色素,按与总颗粒物吸收系数同样的方法测定计算沉积在滤膜上的非色素颗粒物的吸收系数. 由于浮游颗粒物的吸收是非色素颗粒物和浮游植物色素吸收的简单线性叠加,因而由总悬浮颗粒物的光谱吸收系数减去非色素的光谱吸收系数就得到浮游植物的光谱吸收系数<sup>[6, 16]</sup>.

## 1.5 其它参数测定

叶绿素 a (chlorophyll a, Chla) 的测定采用分光光度法,用 90% 的热乙醇萃取,在 UV-2450PC 型分光光度计下测定 665、750 nm 处吸光度,从而计算得到其浓度<sup>[6, 16]</sup>. 溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的测定是用 GF/F 玻璃纤维膜过滤水样后,用岛津 TOC-V CPN 仪通过高温燃烧法进行测定. 总悬浮物、无机物和有机颗粒物浓度采用灼烧称重法测定. 风速、气温、波浪数据来自距观测点 100 m 的全球湖泊生态观测网络 (GLEON) 站点 Vaisala WXT520 自动气象站,其中风速、气温数据采集频率 10 min 一次,波浪数据采集频率为 30 min 一次,计算得到波高、波周期、波切应力<sup>[2]</sup>. 风浪过程划分是:30 min 内平均风速  $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为小风浪,风速在  $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为中风浪,风速  $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  为大风浪.

## 2 结果与讨论

### 2.1 气象水文参数连续变化过程

观测期间的气温、风速、波高及其所产生的波切应力连续变化过程如图 2 所示,从图 2 可以看出,7 月 28 日和 29 日为典型的小风期 (风速  $< 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 7 月 24 日为典型的中风期 ( $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < \text{风速} < 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 7 月 25 日和 26 日为典型的大风期 (风速  $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); 同时于 7 月 30 日午时左右经历了一次短暂的大风扰动过程 (风速达 10 m 以上,持续时间约为 1 h), 风速、波高及波切应力均表现为最高值. 有研究表明,在太湖这类大型浅水湖泊湖体中,当一场大风过后,在 2 h 以内绝大部分的悬浮颗粒能够沉降下来. 然而,对于一些小颗粒悬浮物来说,其

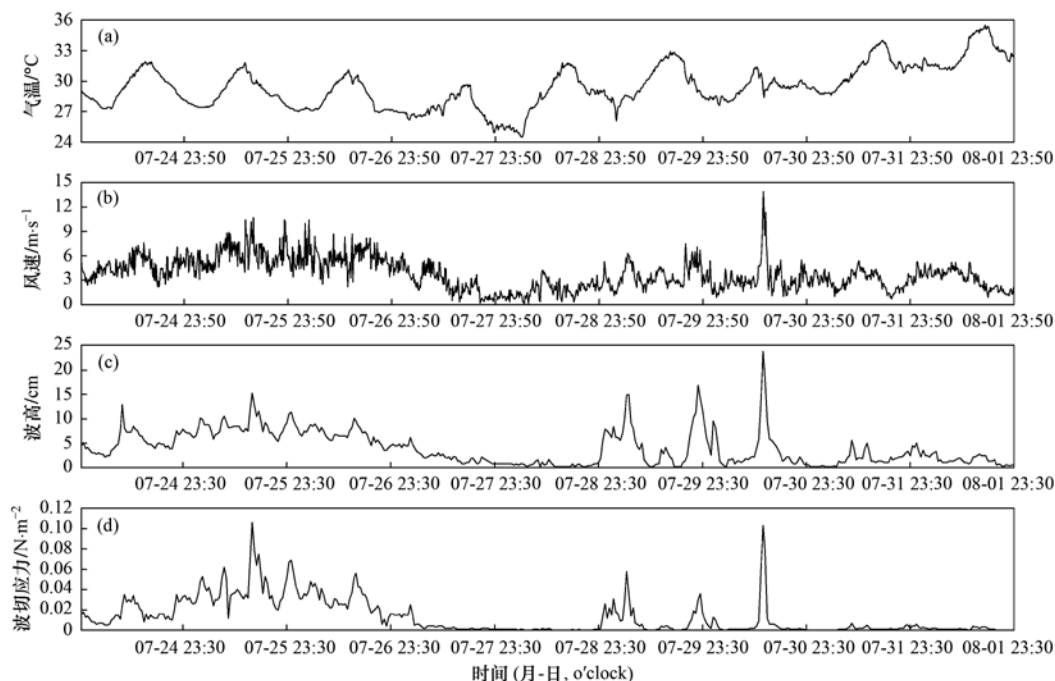


图2 采样期间气温、风速、波高及其所产生的波切应力连续变化过程

Fig. 2 Time series of air temperature, wind speed, wave height and wave shear strength during the sampling period

沉降速度则较慢,要完全沉降至湖底需要几小时、十几小时,甚至几十小时以上<sup>[17]</sup>.故为了避免由于短暂大风过后悬浮物未及时沉降带来的分析误差,本研究在对风速与其它各指标的分析中剔除了7月31日的数据.

## 2.2 水体理化指标

表1列出了观测期间与光衰减有关的理化参数.总悬浮物、叶绿素a、溶解性有机碳、浊度的变化范围分别为27.77~163.17 mg·L<sup>-1</sup> (均值为47.49 mg·L<sup>-1</sup> ± 6.34 mg·L<sup>-1</sup>)、11.44~65.82 μg·L<sup>-1</sup> (31.34 μg·L<sup>-1</sup> ± 5.04 μg·L<sup>-1</sup>)、3.55~4.14 mg·L<sup>-1</sup> (3.91 mg·L<sup>-1</sup> ± 0.04 mg·L<sup>-1</sup>)、24.47~114.7 NTU (42.94 NTU ± 4.58 NTU).总悬浮颗粒物浓度略高于太湖多年平均值34.32 mg·L<sup>-1</sup>,与1997年梅梁湖区总悬浮颗粒物的全年均值(47.55 ± 16.70) mg·L<sup>-1</sup>极为接近,其中有机颗粒物比例明显低于全湖多年平均值<sup>[18]</sup>.连续9 d的不同风浪观测期间,总悬浮物与叶绿素a的观测值变幅均较大,说明风浪过程对沉积物再悬浮以及浮游植物的混合、迁移堆积过程的影响均是显而易见的.如7月30日14:00大风速度作用下的悬浮物浓度高达163.17 mg·L<sup>-1</sup>,是7月28日09:00 (27.77 mg·L<sup>-1</sup>)的5.88倍,叶绿素a的最高值也是其最低值的5.75倍之多,而反映溶解性有机物的指标溶解

性有机碳在观测期间的变幅则要小得多,最大值只有最小值的1.17倍.

## 2.3 水体固有光学特性

图3给出了观测期间不同风速条件下各种光衰减组分的吸收系数,小风、中风和大风作用下总颗粒物、非色素颗粒物、浮游植物以及有色可溶性有机物在440 nm波长下的吸收系数分别为3.97、3.97、6.58 m<sup>-1</sup>; 1.69、2.17、4.20 m<sup>-1</sup>; 2.28、1.80、1.33 m<sup>-1</sup>; 1.05、1.04、1.08 m<sup>-1</sup>.各衰减因子中,变幅最大的是非色素颗粒物,大风是小风下的2.49倍;其次是浮游植物,大风下浮游植物的吸收系数较小风下减少了41.7%;有色可溶性有机物的吸收则变化很小.值得注意的是,小风下和中风速下的总颗粒物吸收系数相似,小风速下浮游植物堆积产生较高的吸收系数,而中风速下底泥悬浮会使非色素颗粒物吸收系数显著增加,而伴随的是表层浮游植物被搅匀带到底层水体或迁移到其它区域,使得浮游植物的吸收系数明显下降,这个现象可从图3(b)和3(c)的曲线中明显看出.

从图3(a)和3(b)中还可看出,总颗粒物与非色素颗粒物吸收曲线大体一致,浮游植物在675 nm处的吸收峰较为明显,而440 nm处的吸收峰只在小风下有所体现,大风和中风下则淹没在非色素颗粒物的吸收曲线中.图3(b)为不同风速下非色素颗粒

表 1 各采样时间与光衰减有关的理化参数<sup>1)</sup>

Table 1 Physical and chemical parameters related to light attenuation of sampling points

| 日期    | 时间    | $W$<br>/ $m \cdot s^{-1}$ | TSS<br>/ $mg \cdot L^{-1}$ | ISS<br>/ $mg \cdot L^{-1}$ | OSS<br>/ $mg \cdot L^{-1}$ | Chla<br>/ $\mu g \cdot L^{-1}$ | DOC<br>/ $mg \cdot L^{-1}$ | Tur<br>/ $NTU$     |
|-------|-------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 07-24 | 09:00 | 4.20                      | $43.42 \pm 4.34$           | $35.20 \pm 3.12$           | $8.22 \pm 1.32$            | $11.44 \pm 1.75$               | $4.05 \pm 0.06$            | $37.33 \pm 2.24$   |
|       | 17:00 | 4.50                      | $29.40 \pm 0.40$           | $21.93 \pm 0.53$           | $7.47 \pm 0.30$            | $12.41 \pm 0.67$               | $3.89 \pm 0.04$            | $27.00 \pm 2.27$   |
| 07-25 | 09:00 | 7.43                      | $47.18 \pm 1.23$           | $38.44 \pm 1.21$           | $8.74 \pm 0.38$            | $12.56 \pm 0.85$               | $4.10 \pm 0.05$            | $37.83 \pm 4.64$   |
|       | 17:00 | 8.33                      | $61.31 \pm 1.75$           | $50.84 \pm 1.84$           | $10.47 \pm 0.10$           | $12.80 \pm 0.33$               | $4.05 \pm 0.12$            | $52.90 \pm 3.58$   |
| 07-26 | 09:00 | 5.33                      | $52.13 \pm 1.01$           | $43.00 \pm 0.34$           | $9.13 \pm 0.71$            | $15.65 \pm 0.42$               | $4.14 \pm 0.09$            | $45.57 \pm 3.15$   |
|       | 17:00 | 6.83                      | $65.51 \pm 3.62$           | $55.40 \pm 2.98$           | $10.11 \pm 0.68$           | $14.66 \pm 0.74$               | $4.06 \pm 0.03$            | $49.53 \pm 5.33$   |
| 07-27 | 09:00 | 4.30                      | $38.30 \pm 0.78$           | $30.52 \pm 0.67$           | $7.78 \pm 0.13$            | $12.21 \pm 1.30$               | $4.13 \pm 0.10$            | $33.70 \pm 1.27$   |
|       | 17:00 | 1.83                      | $33.73 \pm 0.91$           | $26.47 \pm 0.96$           | $7.27 \pm 0.25$            | $12.12 \pm 0.14$               | $3.95 \pm 0.05$            | $26.83 \pm 2.18$   |
| 07-28 | 09:00 | 2.23                      | $27.77 \pm 0.99$           | $20.78 \pm 0.93$           | $6.98 \pm 0.24$            | $12.40 \pm 0.59$               | $4.08 \pm 0.08$            | $24.90 \pm 1.97$   |
|       | 17:00 | 1.93                      | $32.30 \pm 0.94$           | $16.12 \pm 0.17$           | $16.18 \pm 0.79$           | $40.44 \pm 1.16$               | $3.79 \pm 0.12$            | $24.47 \pm 5.55$   |
| 07-29 | 09:00 | 3.87                      | $29.95 \pm 0.17$           | $21.25 \pm 0.22$           | $8.70 \pm 0.35$            | $16.86 \pm 0.23$               | $3.81 \pm 0.10$            | $31.10 \pm 6.90$   |
|       | 17:00 | 2.83                      | $40.02 \pm 0.22$           | $16.78 \pm 0.21$           | $23.23 \pm 0.14$           | $58.5 \pm 11.04$               | $3.81 \pm 0.03$            | $30.80 \pm 3.08$   |
| 07-30 | 09:00 | 3.10                      | $44.73 \pm 2.90$           | $24.64 \pm 0.41$           | $20.09 \pm 3.27$           | $61.63 \pm 3.50$               | $3.84 \pm 0.11$            | $42.80 \pm 4.55$   |
|       | 13:00 | 4.73                      | $43.07 \pm 0.37$           | $21.04 \pm 0.20$           | $22.02 \pm 0.19$           | $59.91 \pm 26.1$               | $3.79 \pm 0.06$            | $52.93 \pm 19.91$  |
|       | 14:00 | 11.7                      | $163.17 \pm 4.54$          | $138.93 \pm 4.50$          | $24.24 \pm 0.46$           | $60.53 \pm 2.73$               | $3.55 \pm 0.06$            | $114.70 \pm 11.86$ |
| 07-31 | 09:00 | 2.93                      | $48.67 \pm 0.49$           | $34.56 \pm 0.64$           | $14.11 \pm 0.66$           | $40.82 \pm 6.02$               | $3.83 \pm 0.08$            | $44.70 \pm 5.17$   |
|       | 14:00 | 3.37                      | $51.49 \pm 0.52$           | $27.27 \pm 0.14$           | $24.22 \pm 0.39$           | $55.62 \pm 14.49$              | $3.78 \pm 0.06$            | $50.90 \pm 7.01$   |
|       | 17:00 | 3.40                      | $47.42 \pm 0.56$           | $22.71 \pm 0.15$           | $24.71 \pm 0.42$           | $65.82 \pm 4.84$               | $3.87 \pm 0.08$            | $49.73 \pm 6.55$   |
| 08-01 | 09:00 | 4.40                      | $40.69 \pm 1.66$           | $29.07 \pm 0.84$           | $11.62 \pm 0.83$           | $19.16 \pm 2.36$               | $3.74 \pm 0.04$            | $38.13 \pm 1.02$   |

1) 每个样点数据均为 3 层采样数据的平均值(下同); W: 采样前半小时平均风速, TSS: 总悬浮物, ISS: 无机悬浮物, OSS: 有机悬浮物, Chla: 叶绿素 a, DOC: 溶解性有机碳, Tur: 浊度

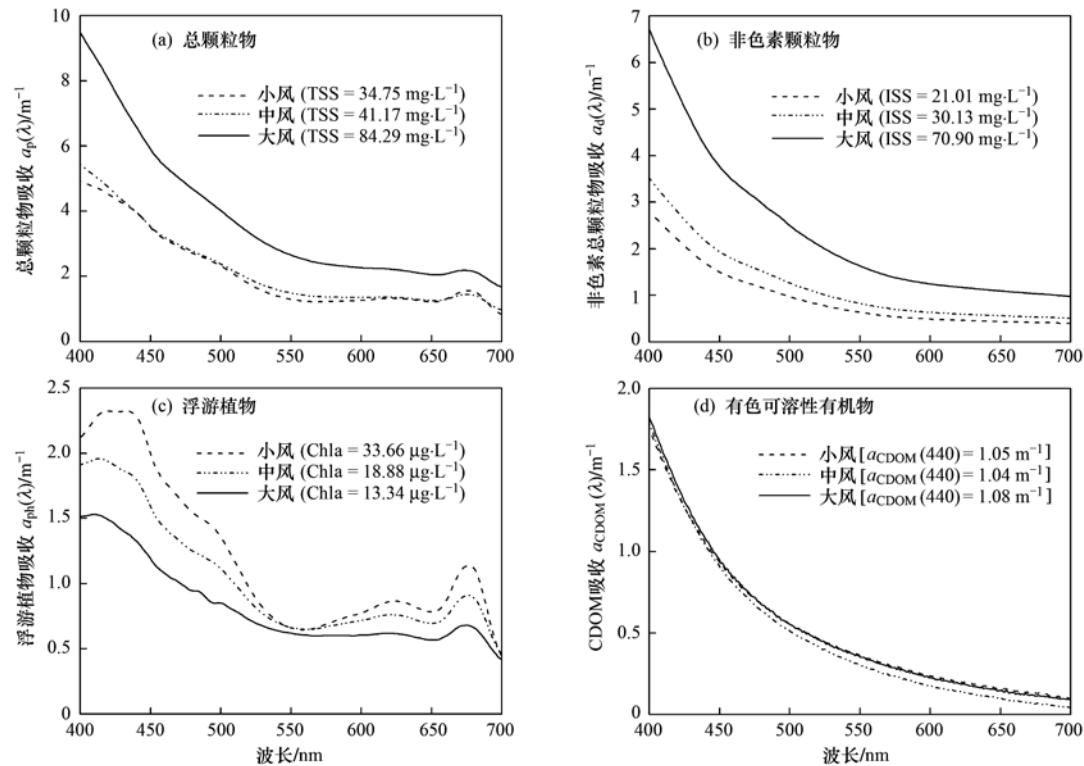


图 3 不同风速条件下总颗粒物  $a_p(\lambda)$ 、非色素颗粒物  $a_d(\lambda)$ 、浮游植物  $a_{ph}(\lambda)$  和有色可溶性有机物  $a_{CDOM}(\lambda)$  吸收系数变化

Fig. 3 Spectral absorption coefficients of total particles  $a_p(\lambda)$ , non-phytoplankton particles  $a_d(\lambda)$ , phytoplankton  $a_{ph}(\lambda)$  and chromophoric dissolved organic matter  $a_{CDOM}(\lambda)$  under three different wind and waves

的吸收曲线,其中中、小风下吸收系数相差很小,但大风下则显著大于中、小风,因此可以得到,底泥悬浮对中、小风扰动响应程度相似,都较低;当风速增加到一临界风速时,风浪对底泥悬浮影响强烈.从浮游植物吸收曲线图 3(c)上可以看出,小风下 440 nm、675 nm 处的吸收峰极为明显,且曲线显著高于其他两种风速条件,这是由于夏季太湖优势种主要以微囊藻为主,而微囊藻具有伪空泡,能够自行调节浮力改变其在水柱中的位置,静风和小风条件下易于漂浮在水表面.不同风速条件下 CDOM 吸收的差别不大[图 3(d)],大风情况下稍微有所增加,说明

风浪引起的沉积物再悬浮造成孔隙水中 CDOM 向水柱的释放非常有限.

表 2 给出了不同风速条件下水体各组分在 400 ~ 700 nm 积分值与贡献率.由表 2 可以看出大风下总吸收系数 > 中风吸收系数 > 小风吸收系数.其中,大风下 CDOM 对总吸收的贡献率最小;非色素颗粒物贡献率随风速增大而增大,分别为 33.0%、41.7%、52.0%;浮游植物贡献率则随风速增大而减小,依次为 42.5%、35.9%、32.1%.纯水对 PAR 波段漫射衰减的贡献值很小,在 3.9% 到 6.0% 之间.

表 2 各风速条件各组分吸收系数 PAR 波段积分值及贡献率

Table 2 Values and relative contributions of absorption coefficients of pure water, phytoplankton, detritus, CDOM to total adsorption coefficient integrated over the range of PAR

| 项目  | 单位/ $\text{m}^{-1}$ |                   |       |                 |       |      | 单位/%    |                     |         |                   |         |  |
|-----|---------------------|-------------------|-------|-----------------|-------|------|---------|---------------------|---------|-------------------|---------|--|
|     | $a_w$               | $a_{\text{CDOM}}$ | $a_d$ | $a_{\text{ph}}$ | $a_p$ | $a$  | $a_w/a$ | $a_{\text{CDOM}}/a$ | $a_d/a$ | $a_{\text{ph}}/a$ | $a_p/a$ |  |
| 小风速 | 0.17                | 0.52              | 0.93  | 1.20            | 2.13  | 2.82 | 6.0     | 18.5                | 33.0    | 42.5              | 75.5    |  |
| 中风速 | 0.17                | 0.47              | 1.19  | 1.03            | 2.22  | 2.86 | 5.9     | 16.5                | 41.7    | 35.9              | 77.6    |  |
| 大风速 | 0.17                | 0.52              | 2.24  | 1.38            | 3.62  | 4.31 | 3.9     | 12.0                | 52.0    | 32.1              | 84.1    |  |

2.4 水体表观光学特性

从 7 月 24 日 ~ 8 月 1 日期间共进行了 40 次水下 PAR 的观测,不同风速条件观测到的次数分别为 20 次(小风速)、15 次(中风速)和 5 次(大风速). PAR 漫射衰减系数观测值范围为 2.45 ~ 10.42  $\text{m}^{-1}$  (均值为 4.57  $\text{m}^{-1} \pm 0.26 \text{ m}^{-1}$ ),相应的真光层深度为 0.44 ~ 1.88 m(均值为 1.11  $\text{m} \pm 0.05 \text{ m}$ ),这与太湖以前的观测以及世界上许多浅水湖泊的研究结果较为相近<sup>[19~24]</sup>.如 1999 年在与本研究相同的水域观测到 PAR 全年真光层深度均值为 1.98  $\text{m} \pm 0.41 \text{ m}$ <sup>[23]</sup>,1993 ~ 2003 年间该区域真光层深度年均值为 1.41  $\text{m} \pm 0.43 \text{ m}$  (1.21 ~ 1.81  $\text{m}$ )<sup>[24]</sup>.本研究观测结果真光层深度偏小一方面可能是由于此次观测集中在一个风浪过程中,大风作用下真光层深度会明显降低,另一方面可能是由于夏季观测点藻华比较严重,也部分降低了真光层深度.

风浪对 PAR 漫射衰减的影响是显著的,小风速条件下的 PAR 漫射衰减系数变幅为 2.45 ~ 3.90  $\text{m}^{-1}$  (均值 3.20  $\text{m}^{-1} \pm 0.20 \text{ m}^{-1}$ ),中风速 3.02 ~ 6.78  $\text{m}^{-1}$  (均值 4.24  $\text{m}^{-1} \pm 0.26 \text{ m}^{-1}$ ),大风速 4.13 ~ 10.42  $\text{m}^{-1}$  (均值 5.76  $\text{m}^{-1} \pm 1.18 \text{ m}^{-1}$ );对应真光层深度为 1.18 ~ 1.88 m(均值 1.47  $\text{m} \pm 0.10 \text{ m}$ ),1.05 ~ 1.52 m(均值 1.23  $\text{m} \pm 0.07 \text{ m}$ ),0.44 ~ 1.12 m(均值 0.85  $\text{m} \pm 0.14 \text{ m}$ ).从小风速到大风速,PAR 漫射衰减系数增加了 80.0%,对应真光层深度降低了 42.2%.

表 3 中给出了 PAR 漫射衰减系数及各光衰减因子间的线性相关分析的相关性系数, $K_d(\text{PAR})$  与 ISS 的相关性十分显著,反映了太湖中无机颗粒物对光衰减的重要影响. OSS 与叶绿素 a 也具有很强的相关性,表明太湖中浮游植物的繁殖是其水体中有机物的主要来源.  $a_{\text{CDOM}}(355)$  与 DOC 之间同样相关性较好. CDOM 是溶解性有机物库的重要组成部分,所以 CDOM 吸收与 DOC 均反映了水中的溶解性有机物,已有研究证实 CDOM 吸收与 DOC 浓度在短波部分存在显著性正相关关系<sup>[25, 26]</sup>.

式(3)为  $K_d(\text{PAR})$  与各个光衰减因子的多元线性回归式.运用后退逐步回归法逐步剔除与因变量相关性较差的因素得到回归式(4),先后被剔除的变量顺序为: Chla 和  $a_{\text{CDOM}}(355)$ .从式(4)中可以看出,  $K_d(\text{PAR})$  的衰减主要受制于有机和无机颗粒物的浓度,且相关性水平极显著.

$$K_d(\text{PAR}) = 0.056\text{ISS} + 0.037\text{OSS} + 0.09\text{Chla} + 0.225a_{\text{CDOM}}(355) + 0.586$$

$$(r^2 = 0.967, n = 19, P \leq 0.0001)$$

(3)

$$K_d(\text{PAR}) = 0.055\text{ISS} + 0.058\text{OSS} + 1.434$$

$$(r^2 = 0.966, n = 19, P \leq 0.0001)$$

(4)

2.5 水动力过程与生物光学特性间关系

由于能量从风到达水体进而扰动底泥是一个较为缓慢的过程,因而风浪对于湖泊水体各项指标的影响具有一定的迟滞效应.为了确定风浪能量传递

表 3 PAR 漫射衰减系数及各光衰减因子间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients among PAR diffuse attenuation and different optical attenuation factors

|                  | $K_d$ (PAR) | ISS    | OSS       | Chla      | DOC     | $a_{CDOM}$ (355) |
|------------------|-------------|--------|-----------|-----------|---------|------------------|
| $K_d$ (PAR)      | 1.000       | —      | —         | —         | —       | —                |
| ISS              | 0.954 **    | 1.000  | —         | —         | —       | —                |
| OSS              | 0.411       | 0.189  | 1.000     | —         | —       | —                |
| Chla             | 0.341       | 0.115  | 0.975 **  | 1.000     | —       | —                |
| DOC              | -0.425      | -0.285 | -0.696 ** | -0.696 ** | 1.000   | —                |
| $a_{CDOM}$ (355) | -0.092      | 0.017  | -0.561    | -0.612    | 0.667 * | 1.000            |

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ ,  $K_d$  (PAR): PAR 漫射衰减系数, ISS: 无机悬浮物, OSS: 有机悬浮物, Chla: 叶绿素 a, DOC: 溶解性有机碳,  $a_{CDOM}$  (355): CDOM 在 355 nm 处吸收系数

过程的大概时间范围,本研究收集了采样前 60 min 之内的风速瞬时数据(每 10 min 一个),对不同时段的风速取均值以代表该时段的平均风速.通过对采样前不同时段平均风速与 PAR 漫射衰减系数、悬浮物浓度的相关性的分析[图 4(a)],结果显示采样前 10 min 的平均风速与 PAR 漫射衰减系数、悬浮物浓度的

相关性最为显著,分别达到 0.805 和 0.751.因此以下对风速和其它各项理化及光学指标的探讨均以采样前 10 min 的平均风速为准.图 4(b)给出了 PAR 漫射衰减系数与 10 min 平均风速的线性关系,从中可以看出,在包括(实线)和不包括(虚线)圆圈中最大点的情况下,两者均呈现显著的线性关系.

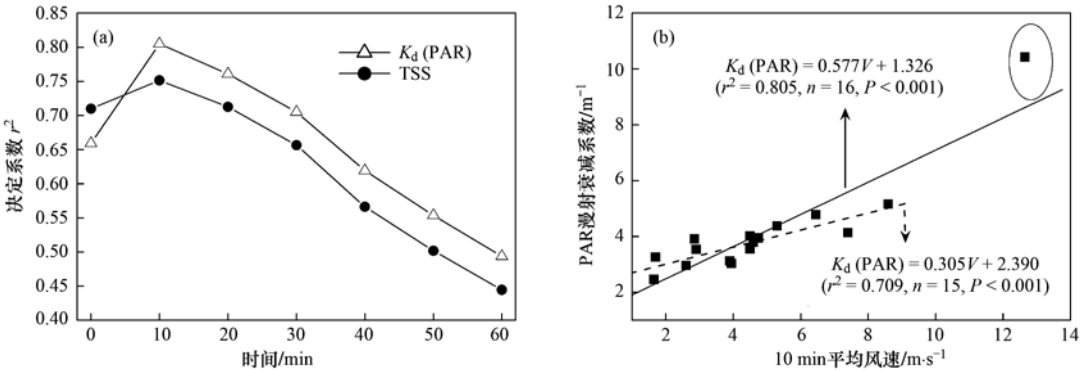


图 4 采样前各时段平均风速与悬浮物浓度、PAR 漫射衰减系数相关性系数曲线和 PAR 漫射衰减系数与 10 min 平均风速关系

Fig. 4 Correlation coefficients between total suspended solid, PAR diffuse attenuation coefficient, and the linear model between PAR diffuse attenuation coefficient and the 10-minute antecedent mean wind speed

总体上,PAR 漫射衰减系数与风速、波高、切应力等气象水文因子的相关性最为显著,而 750 nm 波长处的光束衰减系数和总悬浮物浓度对气象水文因子的响应程度略小(表 4).这是由于 PAR 漫射衰减系数反映的非色素颗粒物、浮游植物、CDOM 和纯水 4 种光学活性物质对 PAR 吸收、散射和衰减的综合效应,而悬浮物浓度和 750 nm 光束衰减反映的只是颗粒物的增加程度.事实上风浪作用除了大幅度增加非色素颗粒物外,还会改变浮游植物和 CDOM 在水柱垂直方向的分布.同时,这三者均与气象水文因子具有较好的相关性,从侧面反映了颗粒物悬浮是对水体光化学性质的重要影响因素.总悬浮物、750 nm 波长处的光束衰减系数以及 PAR 漫射衰减系数与风速的相关性最为显著,相关性系数均在 0.75 以

上.相比之下,三者与波高以及波切应力的相关性则较小.风作用于水体形成波浪产生切应力,引起沉积物再悬浮及水柱中光学组份的混合,因此理论上应该是波高、切应力与悬浮物浓度、PAR 漫射衰减及光束衰减的相关性会更好些.出现以上结果的主要原因可能是由于波浪数据记录频率过低造成的,风速数据自动采集的间隔为 10 min,而波浪数据则为 30 min 采集一个,很难与实验时间完全对应.因此,在以后的实验中可以考虑加大波浪数据采集频率,将有助于更精确揭示风浪与水体生物光学特性间的内在关系.

在一些浅水湖泊及海湾开展的短期高频观测、长期监测、遥感反演及数值模拟均显示风浪引起的沉积物再悬浮能显著改变水体内光学活性物质浓度

表 4 气象水文因子与悬浮物、光束衰减系数以及 PAR 漫射衰减系数的相关式<sup>1)</sup>

Table 4 Linear models between total suspended solid (TSS), beam attenuation coefficient [ $c_{t-w}(750)$ ], PAR diffuse attenuation coefficient [ $K_d(\text{PAR})$ ] and wind speed, wave height, wave shear stress

| 项目                | 气象水文因子                             | 相关式                                                      | $r^2$ | $n$ | $P$    |
|-------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------|-----|--------|
| TSS               | 风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   | $\text{TSS}=9.893(\pm 1.521)v+1.127(\pm 8.522)$          | 0.751 | 16  | <0.001 |
|                   | 波高/cm                              | $\text{TSS}=4.553(\pm 1.066)H_s+23.560(\pm 8.194)$       | 0.566 | 16  | <0.001 |
|                   | 波切应力/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ | $\text{TSS}=769.754(\pm 221.289)T_w+31.742(\pm 7.960)$   | 0.463 | 16  | <0.005 |
| $c_{t-w}(750)$    | 风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   | $c_{t-w}(750)=2.310(\pm 0.328)v+2.139(\pm 1.840)$        | 0.779 | 16  | <0.001 |
|                   | 波高/cm                              | $c_{t-w}(750)=1.029(\pm 0.249)H_s+7.571(\pm 1.913)$      | 0.549 | 16  | <0.001 |
|                   | 波切应力/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ | $c_{t-w}(750)=179.618(\pm 49.920)T_w+9.287(\pm 1.796)$   | 0.480 | 16  | <0.005 |
| $K_d(\text{PAR})$ | 风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   | $K_d(\text{PAR})=0.577(\pm 0.076)v+1.326(\pm 0.0425)$    | 0.805 | 16  | <0.001 |
|                   | 波高/cm                              | $K_d(\text{PAR})=0.267(\pm 0.570)H_s+2.625(\pm 0.436)$   | 0.613 | 16  | <0.001 |
|                   | 波切应力/ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ | $K_d(\text{PAR})=45.405(\pm 11.923)T_w+3.097(\pm 0.429)$ | 0.509 | 16  | <0.005 |

1) 分析中剔除了 7 月 31 日 3 个采样时段的数据;  $v$ 、 $H_s$ 、 $T_w$  分别为 10 min 平均风速、波高和波切应力

和水体生物光学特性<sup>[27~29]</sup>. 在太湖早期的研究中也发现,30 min 平均风速与 PAR 漫射衰减系数之间的具有较好的相关性关系<sup>[6]</sup>. 可见风浪引起的水体扰动,是引起水体中 PAR 漫射衰减显著增大的重要原因,这与太湖“大”而“浅”造成的复杂水动力过程是分不开的. 水体中植物的生长受制于真光层深度的大小,而目前太湖水生植物的分布格局基本上与悬浮物浓度、透明度、真光层深度相一致<sup>[9]</sup>. 由于真光层深度主要受制于悬浮物浓度,悬浮物浓度很大程度上受水动力过程的控制<sup>[1, 11, 24]</sup>. 因而,在岸边及湖湾营养盐等其它生境条件改善的情况下,采取必要的工程措施(如消浪工程等)以降低风浪扰动对水体真光层深度的影响是太湖进行生态恢复、重建沉水植被为主草型生态系统的必要前提.

3 结论

(1) 利用高频水文气象及生物光学观测数据,本研究揭示了风浪引起的沉积物再悬浮、浮游植物的混合迁移对水体生物光学特性短期变化的影响. 高频观测能弥补日均观测在时间上的不连续,帮助人们更好地理解太湖这种高度变化水体的生物光学特性动态变化规律.

(2) 风浪引起的沉积物再悬浮对颗粒物吸收以及 PAR 漫射衰减的影响显著. 由于搅动混合,浮游植物吸收系数随风速增大而减小,CDOM 吸收变化不明显,风浪主要增加非色素颗粒物吸收和散射. 小风、中风、大风作用下非色素颗粒物吸收对总吸收的贡献率分别为 33.0%、41.7%、52.0%,而从小风到大风,PAR 漫射衰减系数增加了 80.0%,对应真光层深度降低了 42.2%.

(3) PAR 漫射衰减系数受风速、波高、波切应力等气象水文因子的影响最大,750nm 波长处的光束衰

减系数和总悬浮物对气象水文因子的响应程度略小.

参考文献:

[1] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 445-455.

[2] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1822-1831.

[3] 孙战平, 朱广伟, 秦伯强, 等. 风浪扰动对太湖水体中胶体态痕量金属含量的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 662-666.

[4] Wu X D, Kong F X. Effects of light and wind speed on the vertical distribution of *Microcystis aeruginosa* colonies of different sizes during a summer bloom[J]. International Review of Hydrobiology, 2009, 94(3): 258-266.

[5] 白晓华, 胡维平, 胡志新, 等. 2004 年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 57-60.

[6] Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, et al. Effect of sediment resuspension on underwater light field in shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: a case study in Longgan Lake and Taihu Lake[J]. Science in China: Series D Earth Sciences, 2006, 49(Supp I): 114-125.

[7] Frenette J J, Arts M T, Morin J, et al. Hydrodynamic control of the underwater light climate in fluvial Lac Saint-Pierre[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(6): 2632-2645.

[8] 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.

[9] Zhang Y L, Zhang B, Ma R H, et al. Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 2007, 170(1): 11-19.

[10] Scheffer M. Ecology of shallow lakes[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.

[11] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[12] 罗淑葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6): 491-496.

- [13] 张运林. 湖泊光学研究进展及其展望 [J]. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 483-497.
- [14] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [15] Simis S G H, Tijdens M, Hoogveld H L, *et al.* Optical changes associated with cyanobacterial bloom termination by viral lysis [J]. Journal of Plankton Research, 2005, **27**(9): 937-949.
- [16] 张运林, 秦伯强. 基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演 [J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2439-2444.
- [17] 向军, 逢勇, 李一平, 等. 浅水湖泊水体中不同颗粒悬浮物静沉降规律研究 [J]. 水科学进展, 2008, **19**(1): 111-114.
- [18] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.
- [19] Pierson D C, Markensten H, Strömbeck N. Long and short term variations in suspended particulate material: the influence on light available to the phytoplankton community [J]. Hydrobiologia, 2003, **494**(1-3): 299-304.
- [20] James W F, Best E P, Barko J W. Sediment resuspension and light attenuation in Peoria Lake; can macrophytes improve water quality in this shallow system? [J]. Hydrobiologia, 2004, **515**(1-3): 193-201.
- [21] Schallenberg M, Burns C W. Effects of sediment resuspension on phytoplankton production: teasing apart the influences of light, nutrients and algal entrainment [J]. Freshwater Biology, 2004, **49**(2): 143-159.
- [22] Pérez G L, Torremorell A, Bustingorry J, *et al.* Optical characteristics of shallow lakes from the Pampa and Patagonia regions of Argentina [J]. Limnological-Ecology and Management of Inland Waters, 2010, **40**(1): 30-39.
- [23] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾沿岸带水体生物学与光学特性 [J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 444-460.
- [24] 张运林, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, **36**(3): 287-296.
- [25] Laurion I, Ventura M, Catalan J, *et al.* Attenuation of ultraviolet radiation in mountain lakes: factors controlling the among-and within-lake variability [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(6): 1274-1288.
- [26] 张运林, 秦伯强, 马荣华, 等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性 [J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 142-147.
- [27] Chen Z Q, Hu C M, Muller-Karger F E, *et al.* Short-term variability of suspended sediment and phytoplankton in Tampa Bay, Florida: Observations from a coastal oceanographic tower and ocean color satellites [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, **89**(1): 62-72.
- [28] Paavel B, Arst H, Reinart A. Variability of bio-optical parameters in two North-European large lakes [J]. Hydrobiologia, 2008, **599**(1): 201-211.
- [29] Lawson S E, Wiberg P L, McGlathery K J, *et al.* Wind-driven sediment suspension controls light availability in a shallow coastal lagoon [J]. Estuaries and Coasts, 2007, **30**(1): 102-112.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                              |                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....                                                                     | ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> ( 337 )        |
| Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk .....                                                   | LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> ( 342 )        |
| A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health .....                                                                                     | LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> ( 346 )       |
| Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ... | SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 352 ) |
| Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin .....                                         | XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> ( 359 )     |
| Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta .....                                                 | AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> ( 370 )     |
| Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids .....                                                       | LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> ( 379 )              |
| Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period .....                                | WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> ( 385 )     |
| Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China .....       | LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> ( 393 )  |
| Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze .....                                                        | ZHANG Wen-bin, YU Hui ( 399 )                                       |
| Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution .....                                   | PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> ( 407 )           |
| Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake .....                                               | LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 412 )  |
| Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model .....           | LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> ( 421 )        |
| Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm .....                                                               | ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> ( 429 )        |
| Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands .....                                                                                 | LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 436 )          |
| Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species .....                                                        | BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> ( 442 )     |
| Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae .....                                                                                | CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo ( 448 )                      |
| Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals .....                                                      | BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> ( 454 )    |
| Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic .....                                                                                    | ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> ( 459 )              |
| Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron .....                                                                                  | LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi ( 469 )                          |
| Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution .....                                                                                             | SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai ( 476 )                    |
| Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution .....                                                                                               | JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> ( 481 )              |
| Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation .....                                                                                                        | FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming ( 488 )                   |
| Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....                                               | ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> ( 495 )    |
| Biosorption of Chromium( VI ) by Waste Biomass of $\epsilon$ -Poly-L-lysine Fermentation .....                                                               | CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> ( 499 )             |
| Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge .....                                                                       | LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> ( 505 )             |
| Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge .....                                                        | LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> ( 511 )  |
| Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China .....                                                                    | LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> ( 518 )                 |
| Optimization of PM <sub>10</sub> Monitoring Network in Beijing .....                                                                                         | QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong ( 525 )                            |
| Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon .....                                                                                           | XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi ( 532 )                               |
| Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe <sup>II</sup> (EDTA) .....              | CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> ( 539 )            |
| Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China .....                                         | SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> ( 545 )   |
| Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley .....                 | TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> ( 551 )           |
| Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It .....                         | GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> ( 558 )         |
| Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn .....                                                    | JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> ( 565 ) |
| Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China .....                                                                                     | WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> ( 574 )    |
| Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area .....   | QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> ( 580 )       |
| Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area .....                                                          | WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> ( 587 )     |
| Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing .....                          | PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 592 )         |
| Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai .....                                                 | LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> ( 599 )     |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China .....                                        | SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> ( 606 )  |
| Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir .....   | WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> ( 612 )          |
| Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....                                                       | YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> ( 618 )             |
| Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir .....                    | ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> ( 625 )        |
| Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil .....                     | YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> ( 633 )           |
| Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe .....                                        | ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> ( 640 )                 |
| Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid .....                                               | WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> ( 647 )         |
| Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography .....                 | HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> ( 652 )           |
| Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells .....                                                                              | JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> ( 658 )        |
| Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry .....                                                                   | PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> ( 665 )        |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

|         |                                                                                                                                                                    |                  |    |                                                                                                                                                                                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                              | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                            |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                      | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                            |
| 协 办     | (以参加先后为序)<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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行