

# 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) |                                             |

# 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<sup>1</sup>, 李云梅<sup>1\*</sup>, 李瑞云<sup>2</sup>, 吕恒<sup>1</sup>, 檀静<sup>1</sup>, 郭宇龙<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 南京师范大学地理科学学院地理信息系统系, 南京 210046)

**摘要:** 漫衰减系数是水体重要的光学参数, 是水生态系统的重要影响因素。利用 2009 年 4 月和 2010 年 5 月太湖实测数据, 基于光学闭合原理, 首先求解出 490 nm 处水体总的吸收系数  $[a(490)]$  和后向散射系数  $[b_b(490)]$ , 进而研究了其与模拟的环境一号卫星多光谱数据不同波段遥感反射率之间的关系, 在此基础上构建了太湖春季水体  $K_d(490)$  反演的半分析模型并将其应用到环境一号卫星影像上进行了太湖春季水体  $K_d(490)$  的遥感反演。结果表明, ① 基于光学闭合原理, 可以较为准确地求解出  $a(490)$  和  $b_b(490)$ ,  $a(490)$  实测值与求解值的平均相对误差为 17.1%,  $b_b(490)$  与模拟的环境一号卫星第四波段的遥感反射率具有很好的指数关系; ② 本研究所构建的模型具有较好的精度和稳定性, 利用与卫星影像准同步的地面采样点对模型进行验证, 得出模型反演的平均相对误差为 21.6%, 均方根误差为  $1.68 \text{ m}^{-1}$ ; ③ 太湖春季水体  $K_d(490)$  具有较强的空间差异性, 太湖北部和东太湖大部分区域为  $K_d(490)$  的低值区, 太湖西部和南部为  $K_d(490)$  的高值区, 而太湖中部大部分区域介于两者之间。

**关键词:** 漫衰减系数; 半分析模型; 环境一号卫星; 光学闭合; 太湖

中图分类号: X524; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0421-08

## 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<sup>1</sup>, LI Yun-mei<sup>1</sup>, LI Rui-yun<sup>2</sup>, LÜ Heng<sup>1</sup>, TAN Jing<sup>1</sup>, GUO Yu-long<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Department of Geographical Information System, School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Diffuse attenuation coefficient is not only an important optical parameter, but also an important factor of water ecological system. Two datasets measured in April 2009 and May 2010 were firstly used to calculate absorption coefficient  $[a(490)]$  and backscattering coefficient  $[b_b(490)]$  at 490 nm, and then, the relationship between  $b_b(490)$  and simulated remote sensing reflectance at different bands of HJ-1 was studied. The semi-analytical model of  $K_d(490)$  in Lake Taihu in spring was constructed based on this basis, and it was used to estimate  $K_d(490)$  of Lake Taihu via an image of HJ-1 finally. The results show that: ① The values of  $a(490)$  and  $b_b(490)$  can be calculated accurately based on optical closure principle, and the mean absolute percent error (MAPE) of  $a(490)$  between calculated and measured is 17.1%. In addition, the backscattering coefficient at 490 nm  $[b_b(490)]$  exponentially relate with the simulated remote sensing reflectance at the fourth band of HJ-1; ② The semi-analytical model constructed in this study has good accuracy and stability. The MAPE is 21.6% and RMSE is  $1.68 \text{ m}^{-1}$  by comparing inversion result and quasi-synchronous measured data; ③  $K_d(490)$  of Lake Taihu in spring differs a lot in space distribution. The values are relatively smaller in north and east part of Lake Taihu, but larger in west and south part.

**Key words:** diffuse attenuation coefficient; semi-analytical model; HJ-1 satellite; optical closure; Lake Taihu

漫衰减系数 ( $K_d$ ) 是水体中一个十分重要的光学参数, 它决定了水体中的光强和光场结构, 可以反映水体表观光学量和固有光学量随深度变化的情况, 同时与水体的透明度有直接的关系, 与水体中悬浮物、叶绿素、黄色物质的含量和成分密切相关<sup>[1-3]</sup>, 因此  $K_d$  是水生态系统的重要影响因素<sup>[4-6]</sup>。研究表明, 任意波长处的漫衰减系数  $K_d(\lambda)$  与 490 nm 处的漫衰减系数  $[K_d(490)]$  有较好的相

关性<sup>[7,8]</sup>, 而且大多数水色遥感卫星均提供  $K_d(490)$  这一数据产品, 这样从  $K_d(490)$  就可以反演出其他任何波段的漫衰减系数, 从而减少水色遥感中未知

收稿日期: 2011-03-24; 修订日期: 2011-05-09

基金项目: 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项 (E0203/1112/JC01); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20093207110011); 江苏高校优势学科建设工程项目 (1411109012)

作者简介: 刘忠华 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: liuzhonghua1987@yeah.net

\* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

因子的个数,因此对  $K_d(490)$  的研究具有其独特的意义. 在开阔大洋等一类水体中,通常采用2种方法进行  $K_d(490)$  的反演:①基于实测  $K_d(490)$  与离水辐亮度或遥感反射率在蓝绿波段的比值之间的经验关系建立反演模型<sup>[9,10]</sup>;②首先通过遥感反射率反演出叶绿素的浓度,然后以叶绿素浓度作为中间量进而反演出  $K_d(490)$  的大小<sup>[11,12]</sup>. 而在内陆湖泊等浑浊水体中一般通过直接建立  $K_d(490)$  与遥感反射率之间的经验关系进行  $K_d(490)$  的反演<sup>[8,13]</sup>. 上述方法均属于经验算法,缺乏一定的物理意义,并且由于采样数据的不同,反演模型中所使用的波段也存在一定的差别,导致其模型的适用性较差. 为了克服经验算法的局限性,提高沿岸水体  $K_d(490)$  的反演精度, Lee 等<sup>[14-17]</sup> 基于辐射传输模型发展了  $K_d(490)$  反演的半分析算法,然而由于内陆水体的极度浑浊性导致该模型在用于内陆浑浊水体  $K_d(490)$  的反演时仍存在较大的不确定性. Wang 等<sup>[18]</sup> 在 Mueller<sup>[10]</sup> 及 Lee 等<sup>[14]</sup> 提出的半分析模型的基础上,结合 Chesapeake 湾的实测数据,发展了基于 MODIS 反射率数据的  $K_d(490)$  反演模型,并获得了较好的反演结果.

太湖位于长江中下游地区,是我国第三大淡水湖,属于典型的富营养化浅水湖泊,水体较为浑浊. 然而到目前为止,针对太湖水体  $K_d(490)$  反演的半分析模型的研究还相对欠缺,大多数模型均为经验模型,并且难以直接应用到卫星影像上,而 Wang 等<sup>[18]</sup> 所提出的半分析模型直接用于太湖水体  $K_d(490)$  的反演时,其反演结果明显低于实测值,在较大程度上低估了太湖水体的漫衰减系数,因此有必要对太湖水体  $K_d(490)$  反演的半分析模型进行研究和校正,以建立适合于太湖水体  $K_d(490)$  反演的半分析模型.

本研究拟采用太湖春季(2009年4月和2010年5月)实测数据,结合 Lee 等<sup>[14]</sup> 提出的  $K_d(490)$  反演的半分析模型和内陆水体常用的生物光学模型,根据光学闭合原理,首先求解出太湖春季水体的吸收系数和后向散射系数,然后通过研究后向散射系数与模拟的环境一号多光谱数据不同波段遥感反射率之间的关系,构建适用于环境一号卫星多光谱数据  $K_d(490)$  反演的半分析模型,并最终应用到环境一号卫星多光谱影像的反演上,通过反演结果与准同步的实测数据的对比,验证模型的精度和适用性,以期为提高太湖水体漫衰减系数的反演精度和深入研究太湖水体的光学性质提供一定的理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样时间与点位

太湖是我国著名的五大淡水湖之一,位于我国经济发展较快的长江三角洲南缘,水面面积约2338 km<sup>2</sup>,平均水深约为2 m. 分别于2009年4月16~27日(共有53个采样点,其中40个采样点有漫衰减系数数据)和2010年5月11~12日(共有32个采样点,其中21个采样点有漫衰减系数数据)对太湖全湖进行采样,并同步测量水体的固有光学量和表观光学量数据,采样点分布如图1所示.

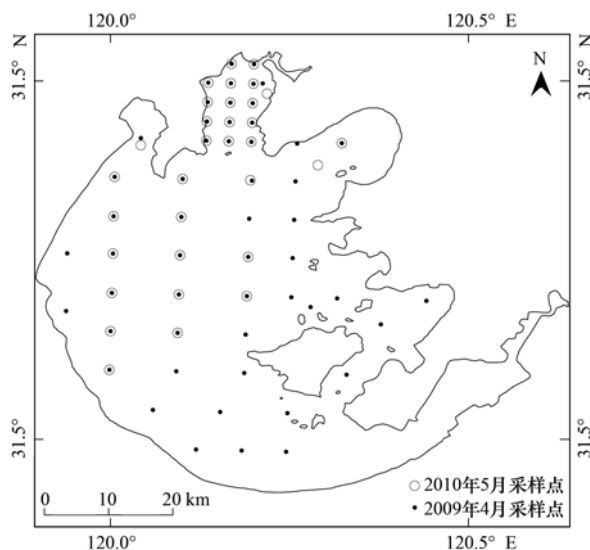


图1 太湖样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of Lake Taihu

### 1.2 数据获取

水体反射光谱的测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其波段范围为350~1050 nm. 为减少水体镜面反射和船体阴影的影响,测量时采用唐军武等<sup>[19]</sup> 提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法. 提取遥感反射率时需要测量的数据包括标准灰板、天空光、水体等的光谱辐亮度信息,每个对象都要采集10条以上的光谱数据,剔除异常光谱数据,剩余数据做均值处理. 遥感反射率提取的具体方法见文献[20].

总悬浮物和非色素颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)进行测定,总悬浮物吸收系数减去非色素颗粒物吸收系数得到色素颗粒物吸收系数;黄色物质(CDOM)吸收系数的测定见文献[21].

水面以下光谱数据采用 Trios 水下光谱仪进行测量,该仪器可同时测量上行辐亮度  $L_u(\lambda, z)$  和下

行辐照度  $E_d(\lambda, z)$ , 波段测量范围为 320 ~ 950 nm, 光谱分辨率 3.3 nm, 可重采样为 1 nm, 测量深度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 和 1.2 m<sup>[22]</sup>.

### 1.3 漫衰减系数的计算

太阳光在光学性质均一的水体中传播时遵从指数规律衰减<sup>[23]</sup>:

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{z} \ln \left[ \frac{E_d(z)}{E_d(z_c)} \right] \quad (1)$$

式中,  $K_d(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的漫衰减系数;  $z$  为从参考水层到测量处的深度;  $E_d(z)$  为深度  $z$  处的辐照度;  $E_d(z_c)$  为参考水层深度处的辐照度.

$K_d(\lambda)$  通过对 0.2、0.4、0.6、0.8、1 和 1.2 m 等不同深度水下的辐照度进行指数回归, 回归方程只有当深度数  $> 3$  且  $R^2 \geq 0.97$  时认为是有效值, 否则认为是无效值<sup>[24]</sup>.

### 1.4 环境一号卫星多光谱数据的模拟

环境一号卫星多光谱数据具有 4 个波段, 其波段范围分别为: B1 0.43 ~ 0.52  $\mu\text{m}$ , B2 0.52 ~ 0.6  $\mu\text{m}$ , B3 0.63 ~ 0.69  $\mu\text{m}$ , B4 0.76 ~ 0.9  $\mu\text{m}$ , 通过式 (2) 利用 ASD 实测光谱数据模拟得到环境一号卫星 4 个波段区间的遥感反射率.

$$R_{rs}(Bi) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) R_{rs}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中,  $i$  为 1 ~ 4, 表示环境一号卫星多光谱数据的各个波段,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为各波段的起始波长,  $R_{rs}(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的实测遥感反射率,  $f(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的波谱响应函数.

### 1.5 精度评价

研究中用于评价模型精度的指标为均方根误差 (RMSE) 和平均相对误差 (MAPE), 分别利用式 (3)、(4) 计算得到:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / n} \quad (3)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

式中,  $y_i$ 、 $y'_i$  分别为实测和模型反演的  $K_d(490)$ ,  $n$  为采样点数目.

## 2 基于环境一号卫星多光谱数据的 $K_d(490)$ 半分析反演模型的构建

水体中漫衰减系数的变化主要取决于太阳天顶角的大小以及水体中不同组分 (浮游藻类、悬浮物、

CDOM 等) 的吸收和散射作用, 因此, Lee 等<sup>[14~17]</sup> 基于辐射传输理论模拟了漫衰减系数与太阳天顶角、水体总吸收系数和后向散射系数之间的关系, 提出了  $K_d(\lambda)$  反演的半分析模型, 其表达式可表示为:

$$K_d(\lambda) = (1 + 0.005\theta_0) a(\lambda) + 4.18 \{ 1 - 0.52 \exp[-10.8a(\lambda)] \} b_b(\lambda) \quad (5)$$

式中,  $\theta_0$  为太阳天顶角, 可以通过采样点的经纬度和采样时间计算得出,  $a(\lambda)$  为水体总的吸收系数,  $b_b(\lambda)$  为水体总的后向散射系数.

内陆水体常用的生物光学模型可表示为<sup>[25]</sup>:

$$R(0-)(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (6)$$

式中,  $R(0-)(\lambda)$  为刚好位于水面以下遥感辐照度比;  $f$  是一个与光场有关的参数, 本研究中取值为 0.33<sup>[26]</sup>.

$R(0-)(\lambda)$  可以通过水面以上遥感反射率计算得到, 即:

$$R(0-)(\lambda) = R_{rs}(\lambda) \times \frac{Qn^2}{t(1 - \rho_{aw})} = 3.28R_{rs}(\lambda) \quad (7)$$

式中,  $R_{rs}(\lambda)$  为水面以上遥感反射率;  $Q$  为光场分布参数, 受水体、太阳角度、观测角度的影响而不同, 本研究中取值为 1.7;  $n$  为水体的折射指数, 一般取值为 1.34;  $t$  为气-水界面 Fresnel 透射系数, 取值为 0.98;  $\rho_{aw}$  为气-水表面的辐照度反射率, 取值在 0.04 ~ 0.06 之间, 本研究中取值为 0.05<sup>[26]</sup>.

公式 (5) 中  $K_d(\lambda)$  可以通过水下测量光谱数据推算得出, 而公式 (6) 中  $R(0-)(\lambda)$  可以通过水面以上光谱数据利用公式 (7) 推算得出, 因此公式 (5) 和 (6) 中都只包含 2 个未知参数  $a(\lambda)$  和  $b_b(\lambda)$ . 根据水体光学闭合原理, 在已知  $R_{rs}(\lambda)$  和  $K_d(\lambda)$  的情况下, 通过公式 (5) ~ (7) 即可求解出波长  $\lambda$  处的水体总的吸收系数  $a(\lambda)$  和后向散射系数  $b_b(\lambda)$ . 同理, 490 nm 处水体的总吸收系数  $a(490)$  和后向散射系数  $b_b(490)$  也可以得出. 图 2 给出了利用该方法所求解出的  $a(490)$  与实测  $a(490)$  之间的统计关系, 可以看出利用光学闭合原理所求解出的  $a(490)$  与实测  $a(490)$  非常接近, 绝大部分样点的平均相对误差都在 25% 以下, 54 个样点总的平均相对误差 (MAPE) 为 17.1%, 均方根误差 (RMSE) 为  $0.68\text{m}^{-1}$ , 由此可以说明, 利用该方法可以较为准确地求解出  $a(490)$  的值, 也从一个侧面反映出在缺少实测后向散射系数的情况下, 该方法所求解出的  $b_b(490)$  是合理的.

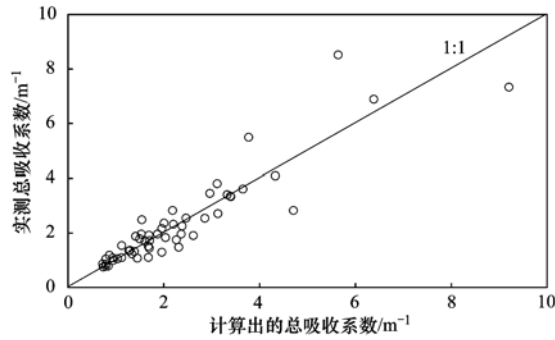


图2 490 nm 处计算出的吸收系数与实测吸收系数的比较

Fig. 2 Comparison of absorption coefficient at 490 nm between calculated and measured

Doron 等<sup>[27]</sup>研究认为,490 nm 处的后向散射系数  $b_b(490)$  与 709 nm 处刚好位于水面以下遥感辐照度比  $R(709)$  具有很好的线性关系, Wang 等<sup>[18]</sup>的研究也表明,  $b_b(490)$  与红或近红外波段的反射率具有很好的关系. 基于上述思想, 本研究中首先建立  $b_b(490)$  与模拟的环境一号卫星多光谱数据第四波段的遥感反射率之间的关系, 其结果如图 3 所示. 可以看出, 太湖春季水体中  $b_b(490)$  与环境一号卫星第四波段的遥感反射率  $[R_{rs}(B4)]$  之间具有很好的指数关系, 这与 Wang 等<sup>[18]</sup> 及 Doron 等<sup>[27]</sup> 的研究结果有所差别, 其原因可能是由于其研究区内水体组分的浓度及其组成与太湖存在一定的差异. 因此,  $b_b(490)$  可以由  $R_{rs}(B4)$  进行表示, 其表达式如公式 (8):

$$b_b(490) = 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] \quad (R^2 = 0.8461, N = 54) \quad (8)$$

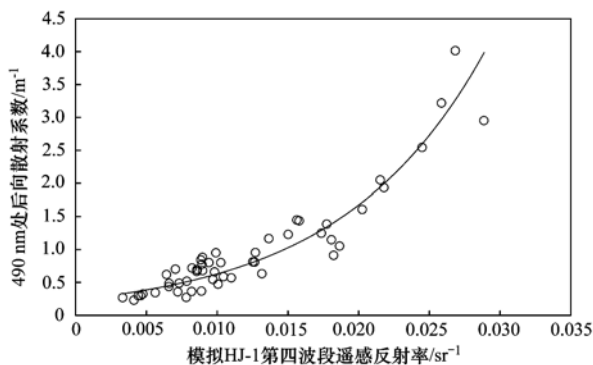


图3 模拟的环境一号卫星第四波段遥感反射率与  $b_b(490)$  的统计关系

Fig. 3 Relationship between  $R_{rs}(B4)$  and  $b_b(490)$

将公式 (8) 带入公式 (6) 中, 可以进一步求得  $a(490)$  与遥感反射率之间的关系, 其表达式可写

为:

$$a(490) = \left[ \frac{1}{9.94R_{rs}(490)} - 1 \right] \times 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] \quad (9)$$

由于环境一号卫星多光谱数据的波段范围较宽, 无法直接得出  $R_{rs}(490)$  的取值, 因此要建立适用于环境一号卫星多光谱数据的  $K_d(490)$  反演模型, 还需要进一步研究  $R_{rs}(490)$  与模拟的环境一号卫星多光谱数据不同波段遥感反射率之间的相关关系. 通过分析,  $R_{rs}(490)$  与模拟的环境一号卫星第一波段的遥感反射率具有非常好的线性关系 (图 4), 因此,  $R_{rs}(490)$  可进一步改写为:

$$R_{rs}(490) = 1.0074R_{rs}(B1) \quad (R^2 = 0.9994, N = 54) \quad (10)$$

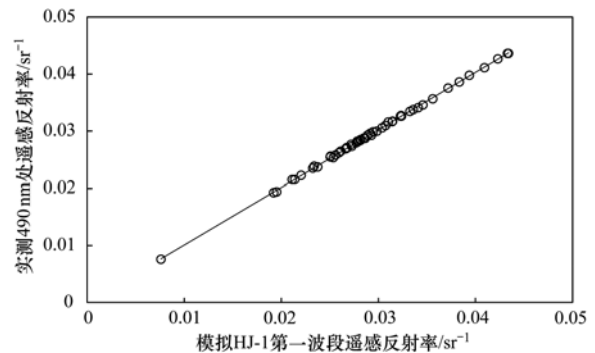


图4 模拟的环境一号卫星第一波段遥感反射率与  $R_{rs}(490)$  的统计关系

Fig. 4 Relationship between  $R_{rs}(B1)$  and  $R_{rs}(490)$

将公式 (10) 带入公式 (9), 则  $a(490)$  可由环境一号卫星第一波段和第四波段的遥感反射率计算得出, 其表达式如下:

$$a(490) = \left[ \frac{1}{10.0136R_{rs}(B1)} - 1 \right] \times 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] \quad (11)$$

将公式 (8) 和 (11) 反带回公式 (5) 中, 则可以得到基于环境一号卫星多光谱数据  $K_d(490)$  反演的半分析模型, 即:

$$K_d(490) = (1 + 0.005\theta_0) \left[ \frac{1}{10.0136R_{rs}(B1)} - 1 \right] \times 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] + 4.18 \left\{ 1 - 0.52 \exp \left[ -10.8 \left[ \frac{1}{10.0136R_{rs}(B1)} - 1 \right] \times 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] \right] \right\} \times 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)] \quad (12)$$

式中,  $\theta_0$  为卫星影像获取时的太阳天顶角,  $R_{rs}(B1)$  和  $R_{rs}(B4)$  分别为环境一号卫星多光谱数据第一波段和第四波段的遥感反射率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 太湖春季水体漫衰减系数光谱特征

图 5 给出了太湖春季水体 54 个采样点 400 ~ 900 nm 范围内漫衰减系数光谱曲线, 可以看出, 太湖春季水体漫衰减系数具有相对一致的光谱特征, 除个别样点在 400 ~ 500 nm 范围内漫衰减系数出现波动外, 大部分样点的漫衰减系数在 400 ~ 550 nm 之间随波长的增加呈现出指数衰减的趋势, 并在 550 nm 附近出现拐点; 550 ~ 650 nm 之间漫衰减系数随波长变化不大, 几乎没有产生任何变化, 其光谱曲线在这一波段范围内较为平缓; 部分样点在 675 nm 附近由于叶绿素 a 的吸收出现一小的峰值; 675 nm 以后, 漫衰减系数呈现出下降的趋势, 且在 710 nm 附近出现极小值; 而在 710 ~ 900 nm 波段范围内漫衰减系数呈现出与纯水吸收相似的光谱特征。

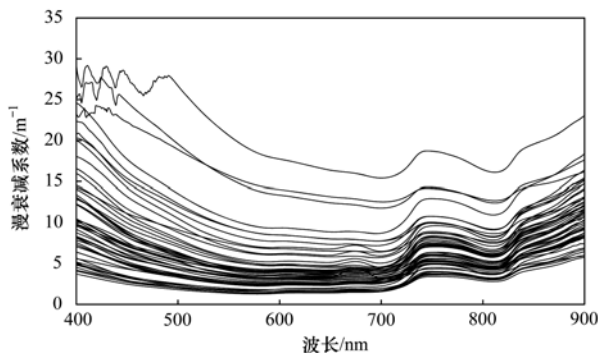


图 5 太湖春季水体漫衰减系数光谱曲线

Fig. 5 Spectral curves of diffuse attenuation coefficient in Lake Taihu in spring

太湖春季水体漫衰减系数光谱特征主要受水体中不同组分(浮游藻类、悬浮物、CDOM 等)的共同影响, 研究表明<sup>[21]</sup>, 悬浮物和 CDOM 具有相似的吸收光谱特征, 都是随波长的增加呈指数形式衰减, 在蓝光波段都具有强烈的吸收, 从而导致太湖春季水体 400 ~ 500 nm 范围内漫衰减系数明显大于其他波段, 并且呈现出指数衰减的光谱特征; 浮游藻类在 440 nm 和 675 nm 附近都有明显的吸收峰, 但由于本研究中所使用的是太湖春季采样数据, 叶绿素浓度相对较低, 因此大部分样点的漫衰减系数在 440 和 675 nm 附近并未出现明显的峰值; 710 ~ 900 nm 范围内浮游藻类、悬浮物和 CDOM 的吸收均较小,

漫衰减系数的变化主要由纯水的吸收主导, 因此在这一波段范围内呈现出与纯水吸收光谱类似的光谱特征。

从数值上看, 太湖春季水体漫衰减系数较大, 并且不同采样点之间具有较大的差异。在蓝光波段 440 nm 处漫衰减系数最大值为  $27.29 \text{ m}^{-1}$ , 最小值为  $2.70 \text{ m}^{-1}$ , 平均值为  $(9.06 \pm 5.56) \text{ m}^{-1}$ ; 在绿光波段 532 nm 处漫衰减系数在  $1.50 \sim 22.48 \text{ m}^{-1}$  之间变化, 其平均值为  $(5.36 \pm 4.06) \text{ m}^{-1}$ ; 在红光波段 675 nm 处, 漫衰减系数的变化范围为  $1.49 \sim 15.97 \text{ m}^{-1}$ , 平均值为  $(4.50 \pm 2.87) \text{ m}^{-1}$ ; 不同样点处  $K_d(490)$  变化也较大, 其最大值为  $27.89 \text{ m}^{-1}$ , 最小值为  $1.93 \text{ m}^{-1}$ , 平均值为  $(6.85 \pm 4.96) \text{ m}^{-1}$ 。

#### 3.2 基于环境一号卫星多光谱数据太湖 $K_d(490)$ 遥感反演

##### 3.2.1 遥感影像大气校正

在可见光范围内, 水色遥感传感器所接收到的信号中, 有 80% ~ 90% 的信息是由大气贡献的, 而水体的信息不足总信息的 10%, 因此为了更精确地估算水体的遥感反射率, 以提高水质参数的反演精度, 必须有效地去除大气的影[28]。从总的辐亮度中获取离水辐亮度的过程称为大气校正, 这是遥感数据处理中极为关键的一步。在开阔大洋等清洁水体的大气校正算法中, 通常假设近红外波段的离水辐亮度为零, 然而这一假设在水体光学性质较为复杂的沿岸或内陆浑浊水体中却不成立<sup>[29]</sup>。为解决这一问题, 不同学者针对不同的传感器提出了不同的大气校正算法, 如 Wang 等<sup>[30]</sup>提出的 MODIS 二类水体大气校正算法, Ruddick 等<sup>[29]</sup>提出的针对 SeaWiFS 数据的大气校正算法, Antoine 等<sup>[28]</sup>提出的 MERIS 二类水体大气校正算法等, 然而上述算法对于环境一号卫星多光谱数据却不适用。基于辐射传输理论的 6S 模型被认为是二类水体大气校正的一种有效的算法, 而该方法需要输入卫星过境时的大气参数和气溶胶参数等数据, 在缺少实测数据的情况下, 通常采用标准的大气剖面数据进行替代, 然而由于大气和气溶胶参数随时间变化非常大从而使得卫星过境时的实时大气剖面数据与标准的大气剖面数据有很大差异, 因此会对大气校正结果造成较大误差<sup>[31]</sup>。

基于上述分析, 本研究中采用文献[32]中所使用的较为简单有效地大气校正算法, 该算法首先选取与卫星过境时间最为接近的样点实测反射率数据作为无大气影响的真值, 然后将由卫星数据得到的



大气顶层反射率与实测反射率的差值作为大气的贡献值,在假设卫星数据获取瞬间太湖上空大气状况一致的情况下,将遥感影像中每个像元减去大气的贡献值,得到无大气影响的反射率图像,再进一步获得各像元的遥感反射率.该算法的表达式如下:

$$R_{TOA}(\lambda)_{HJ-1} - R_{TOA}(\lambda)_{field} = AC(\lambda) \quad (13)$$

$$R_{TOA}(\lambda)_{HJ-1} = \frac{\pi L_{TOA}(\lambda)}{F_0(\lambda) \cos(\theta_0)} \quad (14)$$

式中, $R_{TOA}(\lambda)_{HJ-1}$ 为环境一号卫星数据大气顶层反射率,可由公式(14)计算得到; $R_{TOA}(\lambda)_{field}$ 为实测反射率,可由实测遥感反射率求得; $AC(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 处大气贡献值; $L_{TOA}(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 处的大气顶层辐亮度; $F_0(\lambda)$ 为波长 $\lambda$ 处的大气层外太阳辐照度; $\theta_0$ 为卫星过境时的太阳天顶角.

本研究中用于模型验证的环境一号卫星多光谱数据获取时间为2009年4月21日10:39,通过对当天采样点时间的观察,发现13号样点的测量时间(10:50)与其最为接近,因此将13号点实测反射率数据作为无大气影响的真值,对遥感影像进行大气校正.基于该方法得到的环境一号卫星不同波段处的大气贡献值统计如表1所示.

3.2.2 太湖春季水体  $K_d(490)$  遥感反演

表 1 环境一号卫星不同波段大气贡献值统计

Table 1 Statistics of atmosphere contribution at different bands of HJ-1

| 反射率                        | 第一波段    | 第二波段    | 第三波段    | 第四波段    |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| $R_{TOA}(\lambda)_{HJ-1}$  | 0.147 5 | 0.133 9 | 0.119 5 | 0.079 7 |
| $R_{TOA}(\lambda)_{field}$ | 0.090 0 | 0.123 5 | 0.098 3 | 0.039 9 |
| 大气贡献值                      | 0.057 5 | 0.010 4 | 0.021 2 | 0.039 8 |

将公式(12)带入经大气校正后的环境一号卫星多光谱遥感影像中,得到2009年4月21日太湖 $K_d(490)$ 空间分布图(图6).从图6中可以看出,太湖春季水体 $K_d(490)$ 数值相对较大且具有较强的空间差异性, $K_d(490)$ 相对较小的区域主要分布在太湖北部部分地区(梅梁湾西部、竺山湾南部和贡湖湾中部)和东太湖大部分地区,该区域内 $K_d(490)$ 均在 $5\text{ m}^{-1}$ 以下,其原因可能是这些区域悬浮物浓度相对于其他地区要低,而太湖水体的漫衰减系数主要受悬浮物的吸收和散射影响,因此其 $K_d(490)$ 也相对较低;太湖中部大部分区域 $K_d(490)$ 介于 $5\sim7\text{ m}^{-1}$ 之间,而靠近中心的小部分区域 $K_d(490)$ 高于周围区域,其值达到 $7\sim9\text{ m}^{-1}$ ;太湖西部和太湖南部是 $K_d(490)$ 较大的区域,其值基本上都在 $9\text{ m}^{-1}$ 以上,相比之下,太湖南部 $K_d(490)$ 更大,特别是太湖南部沿岸地区, $K_d(490)$ 的值高达 $13\text{ m}^{-1}$ 以上.

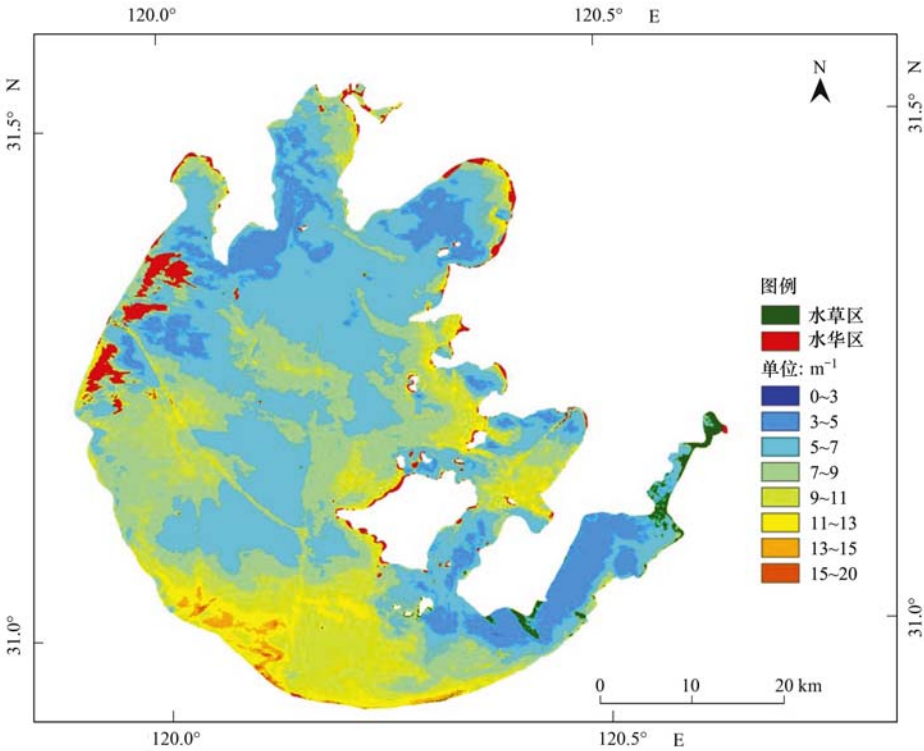


图 6 太湖  $K_d(490)$  空间分布示意

Fig.6 Spatial distribution of  $K_d(490)$  in Lake Taihu



### 3.3 模型的评价和验证

为了验证和评价第2节中所建立的太湖春季水体  $K_d(490)$  半分析反演模型的精度及其适用性, 本研究中将2009年4月21日太湖实测数据与遥感反演结果进行对比. 通过对当天实测数据的观察, 可以看出, 当天共有9个准同步样点的数据可以与遥感反演结果进行匹配, 因此, 本研究中采用这9个准同步的样点对模型进行验证, 其结果如图7所示. 可以看出, 所有验证样点的模型反演值与实测值基本上都分布在1:1线的周围, 大部分样点实测值与半分析模型反演值之间的相对误差较小, 基本上都在25%以下, 并且距离卫星过境时间较近的样点, 其相对误差较小, 而距离过境时间较远的样点, 其相对误差较大, 这主要是由于水体是不断变化的, 随时间的变化, 水体的生物光学特性与卫星过境时相比产生了一定的变化. 所有9个验证样点的平均相对误差为21.6%, 均方根误差为  $1.68 \text{ m}^{-1}$ . 崔廷伟等<sup>[33]</sup>基于MERIS数据的波段设置, 构建了渤海近岸水体  $K_d(490)$  反演的经验模型, 该模型反演结果的平均相对误差为18.4%, 略高于本研究中所构建的模型, 但其模型直接利用地面实测数据进行验证, 而本研究中采用准同步的遥感影像数据对模型进行验证, 因而不可避免地受到时间、空间等多方面的影响, 给验证样本数据带来更大的误差; 徐祎凡等<sup>[13]</sup>基于环境一号卫星多光谱数据构建了三峡库区  $K_d(490)$  反演的经验模型并用卫星数据对模型进行了验证, 其模型的反演误差为28.38%, 要低于本研究中所构建的模型, 此外, 上述模型均为经验模型, 缺乏一定的物理意义. 因此, 从总体上看, 本研究中所构建的基于环境一号卫星多光谱数据的太湖春季水体  $K_d(490)$  半分析反演模型具有较好的精度、稳定性和适用性, 并且具有一定的物理意义, 能够满足水质参数反演精度的要求.

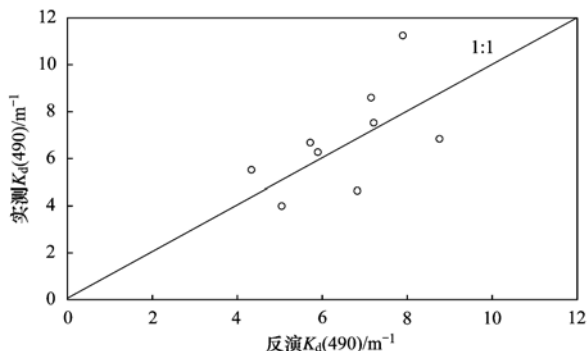


图7 实测与模型反演  $K_d(490)$  的比较

Fig. 7 Comparison of  $K_d(490)$  between inversed and measured

### 4 结论

(1) 基于光学闭合原理, 在已知  $K_d(490)$  和  $R_{rs}(490)$  的情况下, 可以较为精确地求解出490 nm处水体总的吸收系数  $[a(490)]$  和后向散射系数  $[b_b(490)]$ ,  $a(490)$  实测值与求解值的平均相对误差(MAPE)为17.1%, 均方根误差(RMSE)为  $0.68 \text{ m}^{-1}$ .  $b_b(490)$  与模拟的环境一号卫星第四波段的遥感反射率具有很好的指数关系, 其关系式可表达为  $b_b(490) = 0.2366 \exp[97.814R_{rs}(B4)]$ .

(2) 太湖春季水体漫衰减系数具有相对一致的光谱特征, 400 ~ 550 nm 之间随波长的增加呈指数形式衰减, 550 ~ 650 nm 之间的变化不大, 而在710 ~ 900 nm 之间呈现出与纯水吸收特征相似的光谱曲线特征.

(3) 本研究中所构建的太湖春季水体  $K_d(490)$  反演的半分析模型具有较高的精度和稳定性, 利用与卫星影像准同步地面采样点对模型进行验证, 得出模型反演的平均相对误差为21.6%, 均方根误差为  $1.68 \text{ m}^{-1}$ .

(4) 从空间分布上看, 太湖春季水体  $K_d(490)$  具有较大的空间差异性, 太湖北部部分地区和东太湖大部分区域  $K_d(490)$  相对较小, 太湖西部和南部区域为  $K_d(490)$  的高值区, 而太湖中部大部分区域  $K_d(490)$  的值则介于两者之间.

### 参考文献:

- [1] Morel A Y, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(4): 709-722.
- [2] 宁修仁, 史君贤, 蔡显明, 等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应 [J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 96-106.
- [3] 胡好国, 袁业立, 万振文. 海浪混合参数化的渤海、黄海、东海水动力环境数值模拟 [J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 19-32.
- [4] Simpson J J, Dickey T D. Alternative parameterizations of downward irradiance and their dynamical significance [J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(6): 876-886.
- [5] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semi-analytical model [J]. Applied Optics, 1998, 37(27): 6329-6338.
- [6] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization [J]. Applied Optics, 1999, 38(18): 3831-3843.
- [7] Austin R W, Petzold T J. Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters [J]. Optical

- Engineering, 1986, **25**(3): 471-479.
- [8] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖水体漫射衰减系数的光学特性及其遥感反演模型 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 337-343.
- [9] Austin R W, Petzold T J. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the coastal zone color scanner [A]. In: Gower J F R, (ed.). Oceanography from Space [M]. New York: Plenum Press, 1981. 239-256.
- [10] Mueller J L. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient,  $K(490)$ , using water-leaving radiances at 490 and 555 nm, Chapter 3 of SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3 [M]. Greenbelt M D: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 24-27.
- [11] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters) [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**(C9): 10749-10768.
- [12] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, **106**(C4): 7163-7180.
- [13] 徐伟凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价 [J]. 环境科学学报, 2011, **31**(1): 81-93.
- [14] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiple quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. Applied Optics, 2002, **41**(27): 5755-5772.
- [15] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, *et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**: C02017.
- [16] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**: C02016.
- [17] Lee Z P, Weideman A, Kindle J, *et al.* Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**: C03009.
- [18] Wang M H, Son S, Harding L W Jr. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, **114**: C10011.
- [19] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [20] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999.
- [21] Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Parameterization of water component absorption in an inland eutrophic lake and its seasonal variability: a case study in Lake Taihu [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, **30**(13): 3549-3571.
- [22] 黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖水体漫射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.
- [23] Huovinen P S, Penttilä H, Soimasuo M R. Spectral attenuation of solar ultraviolet radiation in humic lakes in Central Finland [J]. Chemosphere, 2003, **51**(3): 205-214.
- [24] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征 [J]. 水科学进展, 2003, **14**(4): 447-453.
- [25] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Amsterdam, Netherlands: Vrije University, 1993.
- [26] 李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测 [J]. 海洋与湖沼, 2006, **37**(2): 171-177.
- [27] Doron M, Babin M, Mangin A, *et al.* Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**: C06003.
- [28] Antoine D, Morel A. A multiple scattering algorithm for atmospheric correction of remotely sensed ocean colour (MERIS instrument): principle and implementation for atmospheres carrying various aerosols including absorbing ones [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, **20**(9): 1875-1916.
- [29] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters [J]. Applied Optics, 2000, **39**(6): 897-912.
- [30] Wang M H, Shi W. The NIR-SWIR combined atmospheric correction approach for MODIS ocean color data processing [J]. Optics Express, 2007, **15**(24): 15722-15733.
- [31] 潘德炉, 马荣华. 湖泊水质遥感的几个关键问题 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 139-144.
- [32] Freitas F H. Spectral merging of MODIS/MERIS ocean colour data to improve monitoring of coastal water processes [D]. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2009.
- [33] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海近岸水体漫射衰减系数  $K_d(490)$  遥感反演模型 [J]. 遥感学报, 2009, **13**(3): 418-422.

## 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