

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, 郝敬锋, 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, 徐祎凡, 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, 李俊琦 (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)

ϵ -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, 黄毓, 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, 吴焯, 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, 余乐洵, 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)

五氟酚对 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 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究

张红, 黄家柱*, 李云梅, 徐祎凡, 刘忠华, 徐昕

(南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 南京 210046)

摘要: QAA (quasi-analytical algorithm) 算法基于辐射传输原理, 估算水体后向散射系数, 是目前较为成熟的半分析模型方法. 2009年6月对巢湖水体进行野外实测, 在获得遥感反射率、吸收衰减系数、悬浮物浓度 (c_{TSM}) 等数据的基础上, 构建了巢湖水体 c_{TSM} 的近红外双波段反演模型, 并将 QAA 算法计算得到的后向散射概率作为输入, 以期提高 c_{TSM} 的反演精度. 结果表明, ①对巢湖水体而言, 807 nm 和 834 nm 是构建近红外双波段模型的最佳波段, 807 nm 处的单位散射系数为 $0.411 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 834 nm 处的单位散射系数为 $0.395 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; ②利用 QAA 算法计算得到的巢湖水体的后向散射概率为 0.029, 将该值输入反演模型后, c_{TSM} 的反演精度与输入其他经验值相比得到明显提高, 反演值与实测值的均方根误差 RMSE 和平均相对误差绝对值 MAPE 分别达到 $12.143 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 24.378%; ③在 c_{TSM} 较高的站点 (近似高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 利用近红外双波段模型反演的悬浮物浓度结果更为稳定和可靠.

关键词: 巢湖; 悬浮物浓度; 近红外; QAA 算法; 后向散射概率

中图分类号: X524; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0429-07

Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm

ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, XU Yi-fan, LIU Zhong-hua, XU Xin

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: There has been some effort by using quasi-analytical algorithm (QAA), which is based on radiative transfer theory to calculate backscattering coefficients of waters. A field investigation in Lake Chaohu was carried out in June, 2009, and a dataset including many parameters such as remote sensing reflectance, absorption and attenuation coefficients, concentration of total suspended matter (c_{TSM}), had been obtained. Thereafter, a model for estimating c_{TSM} was built, and in order to improve the accuracy, we employed the QAA algorithm to simulate backscattering ratio of Lake Chaohu. The results show that: ① 807 nm and 834 nm are determined as optimum bands for the Two Near-Infrared Bands Method in Lake Chaohu, and the average specific scattering coefficient of suspended matters at the wavelength of 807 nm and 834 nm is $0.411 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.395 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ respectively; ② The backscattering ratio of Lake Chaohu is 0.029, and better accuracy is achieved by using this value rather than other empirical values. The root mean square error (RMSE) and mean absolute percentage error (MAPE) of the estimated c_{TSM} with calculated backscattering ratio are $12.143 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 24.378%; ③ It is found that stations with high c_{TSM} (nearly greater than $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) can have more stable and reliable estimated results.

Key words: Lake Chaohu; concentration of total suspended matter; near-infrared; quasi-analytical algorithm (QAA); backscattering ratio

总悬浮物是水体中含有的所有悬浮颗粒物质的总称, 包括浮游生物、动植物遗体、浮游植物非色素细胞物质和悬浮泥沙等. 它影响着光在水体中的传播, 从而影响了水体透明度、浑浊度、水色等光学性质和水生生态条件, 最终决定了水体的初级生产力水平, 在水质评价中起到非常重要的作用. 悬浮物的时空分布状况和运动规律的研究还直接关系到正确估算水土流失、航道港口的冲淤变化、近岸水产养殖开发等重要问题^[1]. 因此, 监测水体中的悬浮物浓度 (c_{TSM}) 至关重要, 而悬浮物对水体固有光学特性及水表面反射的影响使得利用遥感监测成为可能.

目前二类水体水质遥感监测有 3 种方法, 即经验方法、半分析方法和分析方法. 近年来, 由于基于

水体生物光学模型的半分析方法具有一定的物理意义和较强的适用性, 正逐渐成为水质遥感关注的焦点. 该方法主要是基于表观光学量和固有光学量、固有光学量和水体组分之间的关系, 模拟水体中的光场分布, 从而反演水质参数. 其中, 后向散射概率 (\tilde{b}_{bp}) 是生物光学模型的重要输入参数, 它的准确与否, 对悬浮物浓度的反演精度具有较大的影响.

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971215); 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

作者简介: 张红 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质遥感, E-mail: zhanghong1987@hotmail.com

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

但是,由于二类水体的光学性质较为复杂,其后向散射概率具有很大的差异,如 Petzold^[2]认为圣地亚哥海湾浑浊水体的后向散射概率为 0.019,沿海海域水体为 0.013; Whitlock 等^[3]对浑浊水体研究后将其后向散射概率取值为 0.059; Aas 等^[4]认为颗粒物的后向散射概率与颗粒物的大小有关,范围在 0.017 ~ 0.029 之间,上限为 0.5; Boss 等^[5]对新泽西海岸水体研究的结果范围为 0.005 ~ 0.035; Loisel 等^[6]对东英吉利海峡等水域的研究结果范围为 0.002 ~ 0.042; 孙德勇等^[7]根据太湖水体的实测数据计算得到的后向散射概率在 0.002 ~ 0.031 之间,均值为 0.011 ± 0.006 ; 马荣华等^[8]以太湖为研究区域,利用优化算法计算出太湖水体在 400 ~ 700 nm 范围内的后向散射概率均值为 0.030 ± 0.015 ; 而李俊生^[9]认为 2006 年 1 月太湖水体的后向散射概率为 0.052. 此外,很多学者在反演二类水体的 c_{TSM} 时,对后向散射概率的取值也各不相同,如 Doxaran^[10]、Binding^[11] 和李婉晖^[12] 等采用了 Petzold^[2] 的研究结果 0.019 作为输入; Zhang 等^[13] 在反演太湖悬浮物浓度时采用了文献 [9] 中的 0.052 作为太湖水体后向散射概率; 而李云梅等^[14] 则直接根据前人的研究结果数值范围 (0.030 ~ 0.050), 选取 0.030 作为太湖水体后向散射概率.

由上可知,前人对后向散射概率的取值存在显著差异,即使对同一水体而言,取值也不一致,这一现状极大地影响了生物光学模型反演 c_{TSM} 的准确性. 本研究利用 2009 年 6 月巢湖水体的野外采样数据,在分析其光学特性的基础上,选择 2 个近红外波段构建近红外双波段模型,并利用目前较为成熟的 QAA (quasi-analytical algorithm) 算法计算出巢湖的后向散射概率作为输入,以期为巢湖的光学特性研究提供数据参考以及提高悬浮物浓度的反演精度.

1 材料与方法

1.1 采样时间与点位

巢湖位于安徽省中部,长江流域下游左岸,在东经 $117^{\circ}16'54'' \sim 117^{\circ}51'46''$,北纬 $31^{\circ}25'28'' \sim 31^{\circ}43'28''$ 之间,是我国著名的五大淡水湖之一^[15]. 其形态呈鸟巢状,东西长 54.5 km,南北平均宽 15.1 km,平均水深 2.4 m,总悬浮物浓度较高. 近年来,随着沿湖经济的发展,工、农业及生活污水的排放,导致巢湖水体污染日益严重,已直接影响到人们正常的生产与生活^[16].

2009 年 6 月对巢湖全湖进行野外实验,实测的

参数包括水面以上的遥感反射率 R_{rs} 、水体的吸收衰减系数、总悬浮物、无机悬浮物和有机悬浮物浓度等. 本研究所采集的 32 个样点分布如图 1 所示,在测量水体光学特性参数的同时,采集水样放入冷藏箱,并于当日送回实验室进行室内分析.

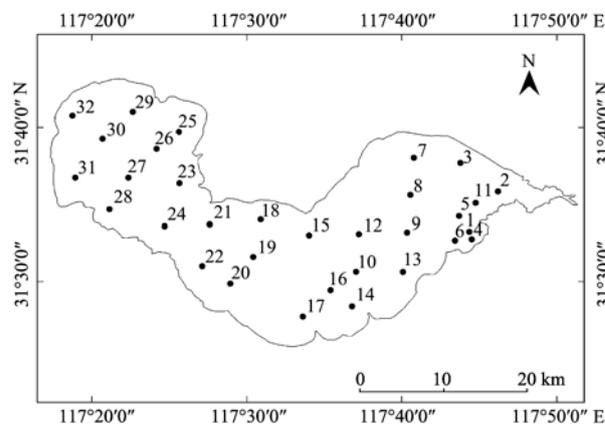


图 1 2009 年 6 月巢湖采样站点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of 32 samples in Lake Chaohu

1.2 水质参数的测定

分别利用 ASD FieldSpec HandHeld (ASD 公司生产) 和 AC-S (Wetlabs 公司生产) 获得水面以上的遥感反射率 R_{rs} 和水体的吸收衰减系数,具体测量方法和数据处理流程可分别参见文献 [7, 17] 的研究,在此不予赘述.

总悬浮物、无机悬浮物和有机悬浮物浓度的测量采用 GB 11901-89 烘干称重法.

1.3 悬浮物浓度反演的近红外双波段模型的构建

1975 年 Gordon 等^[18] 提出了一种生物光学模型,在水表面下的反射率和水体的吸收系数、后向散射系数之间建立一种等量关系,见式 (1).

$$R(0^-) = f \frac{b_b}{a + b_b} \quad (1)$$

式中, $R(0^-)$ 是刚好处于水表面以下的辐照度比, f 是一个有关波长、固有光学属性、太阳天顶角、气溶胶光学厚度和水表面粗糙度的复杂函数, b_b 是水体的总后向散射系数, a 是水体的总吸收系数.

在近红外波段,浮游藻类、非藻类颗粒物、黄质的吸收相对于纯水的强吸收可以忽略不计^[13, 19, 20],纯水的后向散射也趋向于零,因此,此时吸收仅需考虑纯水部分,后向散射仅需考虑颗粒物部分,进而得式 (2).

$$R(0^-) = f \frac{b_{b,TSM}}{a_w + b_{b,TSM}} \quad (2)$$

式中, $b_{b,TSM}$ 是颗粒物的后向散射系数, a_w 是纯水的

吸收系数. $R(0^-)$ 与遥感反射比 R_{rs} 之间存在一定的转换关系, 如式(3)所示.

$$R(0^-)(\lambda) = \frac{Q \times n^2}{t_{(w,a)} \times t_{(a,w)}} \times R_{rs}(\lambda) \quad (3)$$

式中, Q 是光场分布参数, n 是水的折射指数, $t_{(w,a)}$ 是水-气界面透射系数, $t_{(a,w)}$ 是气-水界面透射系数. 结合式(2)和式(3), 得式(4),

$$\frac{Q \times n^2}{t_{(w,a)} \times t_{(a,w)}} \times R_{rs}(\lambda) = f \frac{\tilde{b}_{bp} \times b'_p(\lambda) \times c_{TSM}}{a_w + \tilde{b}_{bp} \times b'_p(\lambda) \times c_{TSM}} \quad (4)$$

式中, $b'_p(\lambda)$ 是波长 λ 处的单位散射系数. 基于式(4), 选取 2 个近红外波段 λ_1 和 λ_2 进行相除, 即可得到如式(5)所示的悬浮物浓度的近红外双波段反演模型.

$$c_{TSM} = \frac{R_{rs}(\lambda_1) b'_p(\lambda_2) a_w(\lambda_1) - R_{rs}(\lambda_2) b'_p(\lambda_1) a_w(\lambda_2)}{b'_p(\lambda_1) b'_p(\lambda_2) \tilde{b}_{bp} [R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1)]} \quad (5)$$

从式(5)也可以看出, 后向散射概率 \tilde{b}_{bp} 的取值将直接影响悬浮物浓度的最终反演结果.

1.4 散射系数光谱曲线的拟合、单位散射系数和后向散射概率的计算

Morel^[21] 对非吸收性颗粒物的散射光谱特征进行分析, 认为散射系数和波长之间呈现乘幂关系, 并构建了非吸收性的颗粒物的散射系数参数化模型, 见式(6).

$$b_p(\lambda) = b_p(\lambda_0) \left[\frac{\lambda}{\lambda_0} \right]^Y \quad (6)$$

式中, $b_p(\lambda)$ 为波长 λ 处的散射系数, λ_0 为参考波段, 一般取 532 nm, Y 是幂函数的指数. 单位散射系数和后向散射概率可由式(7)和式(8)计算.

$$b'_p(\lambda) = b_p(\lambda) / c_{TSM} \quad (7)$$

$$\tilde{b}_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda) / b_p(\lambda) \quad (8)$$

式中, $b'_p(\lambda)$ 、 $\tilde{b}_{bp}(\lambda)$ 和 $b_{bp}(\lambda)$ 分别为颗粒物在波长 λ 处的单位散射系数, 后向散射概率和后向散射系数.

QAA 算法是 Lee 等^[22] 在 2002 年提出的一种计算水体后向散射系数的方法, 它利用辐射传输方程的近似解构建遥感反射率与水体中各水色因子固有光学特性之间的关系模型. 考虑到原 QAA 算法在计算过程中存在若干针对特定研究区域的经验公式, 本研究采用乐成峰等^[23] 在计算太湖水体后向散射系数时的算法, 具体步骤见表 1.

表 1 文献[23]中的 QAA 算法的具体步骤¹⁾

Table 1 Steps of quasi-analytical algorithm according to reference [23]

步骤	变量	公式	方法
0	r_{rs}	$= R_{rs} / (0.52 + 1.7R_{rs})$	半分析方法
1	$u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$	$= \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2g_1}$	半分析方法
2	$a(715)$	$= a_w(715)$	分析模型
3	$b_{bp}(715)$	$= \frac{u(715)a(715)}{1 - u(715)} - b_{bw}(715)$	分析模型
4	Y	0 ~ 3 之间变化	逐步迭代
5	$b_{bp}(\lambda)$	$= b_{bp}(715) \left(\frac{715}{\lambda} \right)^Y$	半分析方法
6	$a(\lambda)$	$= \frac{[1 - u(\lambda)][b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)]}{u(\lambda)}$	分析模型

1) b_{bw} 为纯水的后向散射系数

2 结果与分析

2.1 巢湖水体光学特性

2.1.1 遥感反射率光谱特性

图 2 是巢湖水体的遥感反射率光谱曲线(25 号站点光谱异常, 已删除). 由于 400 nm 以下和 900 nm 以上的反射光谱的噪声非常大, 所以本研究中的波段分析范围为 400 ~ 900 nm.

从图 2 可看出巢湖水体呈现出典型的内陆水体

光学特性. 在 400 ~ 500 nm 范围内, 由于叶绿素、类胡萝卜素以及溶解性有机物质的吸收作用明显, 反射率较低; 440 nm 和 490 nm 附近呈现肩状, 分别是由叶绿素和类胡萝卜素的吸收引起的; 560 ~ 580 nm 范围的最大反射峰是由藻类色素的弱吸收和无机悬浮物、浮游植物细胞壁的散射共同作用而形成的; 620 ~ 630 nm 附近的反射率较低, 出现谷值或呈肩状, 这是受巢湖水体中藻蓝蛋白的吸收作用影响; 680 nm 附近是叶绿素 a 的吸收峰, 因此在该处出现

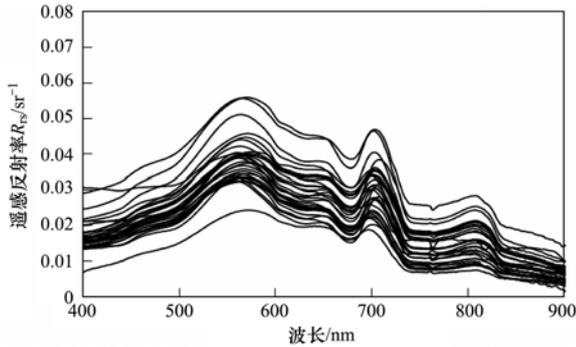


图2 巢湖水体的实测遥感反射率光谱曲线(除25号站点外)

Fig. 2 Remote sensing reflectance measured in Lake Chaohu(except No.25 station)

谷值; 700 nm 附近的反射峰与叶绿素的浓度密切相关,是由浮游植物色素的荧光效应引起的;在 700 nm 以后,纯水吸收迅速增大,近红外波段处的反射主要依赖于总颗粒物的散射,对藻类色素的反应不敏感,在该范围内出现 2 个特征波段,分别是 807 nm 处的极大值和 834 nm 处的拐点。

2.1.2 巢湖水体散射系数特性分析

巢湖水体散射系数的光谱形态较为单一,各站点水体的散射系数光谱曲线类似于一条随波长增大而减小的倾斜直线,但是在 675 nm 附近,散射系数出现微小的凹陷,这主要是受到有机颗粒物强吸收的影响。黄昌春^[24]、孙德勇^[25]和施坤^[26]等分别对太湖、巢湖和滇池水体的散射特性研究时也发现了这一现象,其中,在滇池水体中表现得尤为明显。图 3 是巢湖各站点的颗粒物散射光谱曲线图(4 号站点缺失散射数据)。分别以蓝、绿、红光波段范围的代表波长 440、532 和 676 nm 为例,定量分析散射系数的变化。蓝光 $b_p(440)$ 的变化范围为 $10.656 \sim 59.296 \text{ m}^{-1}$,平均值为 $(32.568 \pm 13.654) \text{ m}^{-1}$;绿光 $b_p(532)$ 的变化范围为 $10.636 \sim 55.233 \text{ m}^{-1}$,平均值为 $(29.054 \pm 12.424) \text{ m}^{-1}$;红光 $b_p(676)$ 的变化范围为 $9.030 \sim 45.612 \text{ m}^{-1}$,平均值为 $(23.260 \pm 10.325) \text{ m}^{-1}$ 。

2.1.3 后向散射概率的确定

目前,众多研究者普遍认为,不同湖泊水体、同一湖泊不同的湖区、同一湖区不同的季相,水体物质组分和固有光学特性的空间分异很大,生物光学模型参数具有区域性的特点,不能统一参数化^[27]。因此,本研究在反演悬浮物浓度时,没有直接采用后向散射概率的经验值,而是尝试利用 QAA 算法计算出巢湖水体的后向散射概率作为模型输入。具体方法

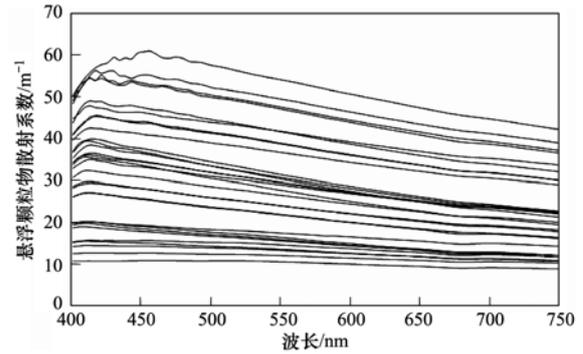


图3 巢湖水体的实测总颗粒物散射光谱曲线(除4号站点外)

Fig. 3 Scattering coefficient spectrum of TSM in Lake Chaohu(except No.4 station)

如下:首先利用 QAA 算法得到巢湖水体在参考波长处的后向散射系数 $b_{bp}(715)$,然后结合实测散射数据和式(8),计算得到 715 nm 处的后向散射概率为 0.029。

虽然有部分学者提出后向散射概率具有波长依赖性,但众多前人的研究中都认为其在各波长处是十分相近的,如文献[13, 28~33]。同时,Whitmire 等^[34]发现虽然各波段后向散射概率之间存在差异,但是波段间的差异远小于估算过程中引入的误差,从而得出后向散射概率与波长无关的结论。周雯等^[35]对大亚湾水体后向散射概率光谱分析后也表明,虽然不同波段间的最大相对变化约为 15%,但是进一步考虑到仪器间的测量定标及由单个角度估算后向散射系数的方法可能带入的误差 10%~20%,大亚湾水体的后向散射概率是否存在波段依赖性有待进一步研究。

基于上述分析,本研究直接采用 715 nm 处的后向散射概率 0.029 作为近红外双波段模型中的输入,在简化水体后向散射概率计算过程的同时,也避免了在确定指数 Y 值过程中的误差引入。

由于水体后向散射概率主要受到颗粒物组分和粒径的影响,颗粒物粒径越小,受无机颗粒物的影响越大,其后向散射概率就越高。因此,从理论上讲,本研究的后向散射概率 0.029 同样适用于颗粒物的组分、粒径与巢湖类似的水体。2009 年 6 月,巢湖水体的悬浮颗粒物主要来源于入湖水流中所挟带的悬沙,湖盆本身所形成的泥沙一般来说为量不大,其中,无机颗粒物是悬浮颗粒物的主导成分,约占 66.652%。然而遗憾的是,此次实验未能获得悬浮颗粒物的粒径数据。

2.2 近红外双波段模型的反演结果与比较

反演模型的波段选择需要考虑巢湖水体近红外波段处的遥感反射率特征,经比较后认为,816、807 和 834 nm 是 3 个比较有代表性的波段,其中,816 nm 与悬浮物浓度的相关性最好,807 nm 是近红外波段的一处反射峰,834 nm 是继该反射峰之后的一处拐点.本研究从 3 个方面进行最佳反演波段的筛选:①利用上述 3 个波段处的相邻波段进行反演,如 806 nm 和 807 nm、807 nm 和 808 nm 等;②在上述 3 个波段(包括其相邻波段)间任选 2 个波段进行反演,如 806 ~ 808 nm 的任一波段和 815 ~ 817 nm 的任一波段、806 ~ 808 nm 的任一波段和 833 ~ 835 nm 的任一波段;③利用上述 3 个波段将近红外范围分割为 4 个区间,任选区内或区间的 2 个波段组合进行反演.结果显示,利用相邻波段进行反演的效果最差,而利用特征波段 807 nm 和 834 nm 进行反演的效果最好,这与文献[13]中反演波段的选择具有一定的相似性,但不同于 Zhang 等^[13]采用的两大特征波段 814 nm 和 828 nm.利用特征波段反演效果最好的原因与式(5)的数学形式有关,它的准确计算是以 2 个波段间的相关性最小为前提的,而特征波段的差异是由所研究区域以及季节的不同而造成的.

在上述工作的基础上,根据式(6)计算出巢湖水体散射光谱曲线的指数 Y 值范围为 $-1.02 \sim -1.59$ (其中,20 ~ 24 号站点的幂函数拟合效果较差,故剔除),根据式(7)计算出 $b'_p(807)$ 的平均值为 $0.411 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, $b'_p(834)$ 的平均值为 $0.395 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,继而利用式(5)反演出各个站点的悬浮物浓度.

图 4 是巢湖水体的悬浮物浓度实测值与估算值的散点图.从图 4 中可看出,实测悬浮物浓度低于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的站点的反演效果不甚理想,尤其是 27 号站点与 28 号站点,远偏于图中的 1:1 直线.这是因为在悬浮物浓度过低的水体中,近红外波段处的遥感反射率信噪比过低,达不到反演要求. Zhang 等^[13]对太湖水体悬浮物浓度的反演研究也表明该类算法只能应用在悬浮物浓度较高的二类水体中,该研究中绝大部分太湖站点的悬浮物浓度实测值高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.同时,笔者发现,在本次剔除的站点中,除了缺失散射数据的 4 号站点和遥感反射率曲线出现异常的 25 号站点外,散射光谱曲线拟合效果较差的 20 ~ 24 号站点的悬浮物浓度范围均在 $21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.初步分析后认为这 5 个站点的散射系数出现异常也与其较低的悬浮物浓度有关,因为过低的悬浮物浓度对应着较小的水体散射值,更易受

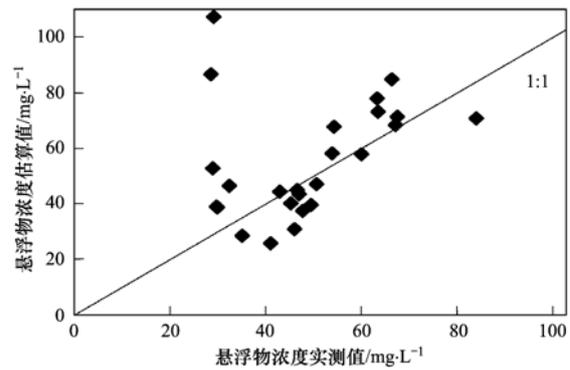


图 4 c_{TSM} 实测值和模型估算值散点图

Fig. 4 Comparison of estimated c_{TSM} and in-situ measured c_{TSM}

到仪器的系统误差或者其他一些随机误差的影响,从而导致散射系数曲线无法很好地拟合.

以下在剔除远偏于 1:1 直线的 27 号站点和 28 号站点的基础上,以另外 2 种 \bar{b}_{bp} 经验值作为输入进行巢湖悬浮物浓度的反演,进而比较其精度.第一种取值选择 Petzold^[2]的研究结果 0.019,此数据被认为是浑浊水体最为有效的数据,第二种取值选择李俊生^[9]对太湖水体的研究结果 0.052,选择该数据是由于太湖与巢湖具有相近的地理位置和相似的光学特性.同时值得注意的是,此次选择的 2 种经验值的跨度(0.019 ~ 0.052)基本上覆盖了目前对于二类水体后向散射概率的取值范围.精度评价指标选用均方根误差 RMSE 和平均相对误差绝对值 MAPE,具体的精度比较结果见图 5 和表 2.

从图 5 可发现,利用 QAA 方法计算得到的后向散射概率 0.029 所对应的悬浮物浓度反演效果最好,而采用经验值 0.019 所对应的悬浮物反演值普遍高于实测值,相反,采用经验值 0.052 所对应的悬浮物反演值则又普遍低于实测值.表 2 给出了 3 种后向散射概率值所对应的悬浮物浓度反演精度,进一步说明了当后向散射概率采用了本研究的 0.029,悬浮物浓度的反演误差 RMSE 和 MAPE 均得到大幅下降,分别为 $12.143 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 24.378% .

表 2 不同后向散射概率取值的 c_{TSM} 反演精度比较

Table 2 Comparison of estimated accuracy using different backscattering ratio value

后向散射概率	数值来源	悬浮物浓度反演误差	
		RMSE/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	MAPE/%
0.019	经验值	22.307	41.409
0.052	经验值	26.892	51.057
0.029	本研究	12.143	24.378

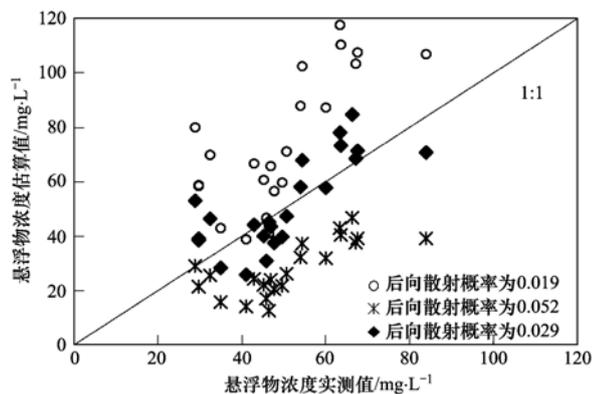


图 5 不同后向散射概率取值的 c_{TSM} 反演结果散点图

Fig. 5 Scatter plot of measured and estimated c_{TSM} with different backscattering ratio value

3 结论

(1) 对于巢湖水体而言, 807 nm 和 834 nm 是遥感反射率曲线在近红外波段处的特征波段, 也是构建近红外双波段模型的最佳波段。

(2) 由于二类水体光学特性的复杂性, 在利用机理模型反演悬浮物浓度时, 根据水体的光学特性选择合适的后向散射概率, 有利于提高悬浮物浓度的反演精度。本研究中利用 QAA 算法计算得到的巢湖水体后向散射概率为 0.029, 相比其他经验值, 该值所对应的悬浮物浓度反演精度更高, RMSE、MAPE 明显降低, 分别为 $12.143 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 24.378% 。

(3) 本研究的反演算法适用于悬浮物浓度较高的二类水体, 此次巢湖站点的悬浮物浓度实测值大部分高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而保证了近红外波段处较高的遥感反射率信噪比。

致谢: 感谢参加巢湖实验的所有人员在数据获取过程中的辛勤工作, 感谢乐成峰博士在论文写作及修改中给予的帮助以及指导。

参考文献:

- [1] 光洁, 韦玉春, 黄家柱, 等. 分季节的太湖悬浮物遥感估测模型研究 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 241-249.
- [2] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972. 373-383.
- [3] Whitlock C H, Pool L R, Usry J W, et al. Comparison of reflectance with backscatter and absorption parameters for turbid waters [J]. Applied Optics, 1981, **20**(3): 517-522.
- [4] Aas E, Høkedal J, Sørensen K. Spectral backscattering coefficient in coastal waters [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, **26**(2): 331-343.
- [5] Boss E, Pegau W S, Lee M, et al. Particulate backscattering

ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**: CO1014, doi: 10.1029/2002JC001514, 2004.

- [6] Loisel H, Mériaux X, Berthon J F, et al. Investigation of the optical backscattering to scattering ratio of marine particles in relation to their biogeochemical composition in the eastern English Channel and southern North Sea [J]. Limnology and Oceanography, 2007, **52**(2): 739-752.
- [7] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物浓度关系模型 [J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2688-2694.
- [8] 马荣华, 宋庆君, 李国砚, 等. 太湖水体的后向散射概率 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 375-379.
- [9] 李俊生. 高光谱遥感反演内陆水质参数分析方法研究—以太湖为例 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.
- [10] Doxaran D, Froidefond J, Lavender S, et al. Spectral signature of highly turbid waters; application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, **81**(1): 149-161.
- [11] Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, **94**(3): 373-383.
- [12] 李婉晖, 徐涵秋. 基于生物光学模型的二类水体光学活性物质估算: 以晋江下游河段为例 [J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1008-1015.
- [13] Zhang B, Li J, Shen Q, et al. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **145**(1-3): 339-347.
- [14] 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.
- [15] 周先传, 徐升. 巢湖蓝藻水华遥感监测初探 [J]. 中国环境监测, 2010, **26**(3): 36-39.
- [16] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价 [J]. 环境科学研究, 2004, **17**(6): 22-26.
- [17] 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.
- [18] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. Applied Optics, 1975, **14**(2): 417-427.
- [19] 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(10): 2273-2277.
- [20] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. Remote sensing of Environment, 2004, **89**(3): 361-368.
- [21] Morel A. Diffusion de la lumière par les eaux de mer, resultants expérimentaux et approche théorique [J]. Agard Lecture Series, 1973, **61**: 3. 1. 1-3. 1. 76.

- [22] Lee Z P, Carder K L, Amone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755-5772.
- [23] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖水体后向散射特性模拟 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(5): 707-713.
- [24] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 太湖水体秋季散射特性及其相关因素分析 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 594-602.
- [25] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体散射和后向散射特性研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1428-1434.
- [26] 施坤, 李云梅, 朱利, 等. 滇池水体总悬浮物散射系数参数化模型 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(7): 1479-1484.
- [27] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 143-158.
- [28] Twardowski M S, Boss E, Macdonald J B, *et al.* A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(C7): 14129-14142.
- [29] Ladner S D, Amone R A, Gould R W, *et al.* Variability in the backscattering to scattering and F/Q ratios observed in natural waters [A]. In: *Spie Ocean Optics XVI* [C]. Santa Fe, New Mexico: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002.
- [30] Gould R W Jr, Amone R A, Martinolich P M. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(12): 2377-2383.
- [31] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(5): 173-177.
- [32] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究 [J]. *海洋学报*, 2006, **28**(4): 56-63.
- [33] 刘炜, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究 [J]. *海洋技术*, 2007, **26**(2): 42-46.
- [34] Whitmire A L, Boss E, Corles T J, *et al.* Spectral variability of the particulate backscattering ratio [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(11): 7019-7031.
- [35] 周雯, 曹文熙, 杨跃忠, 等. 大亚湾水体后向散射比率的光谱变化 [J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 39-45.

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 ϵ -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 ₁₀ 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 ^{II} (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>Proocentrum 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@reeces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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 (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