

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靛, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算

冯驰¹, 金琦¹, 王艳楠¹, 赵丽娜¹, 吕恒^{1, 2*}, 李云梅^{1, 2}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 叶绿素 a 作为水质参数之一, 常用来作为衡量水体富营养化程度的指示标准. 利用从太湖及洞庭湖获取的 326 个实测数据, 基于实测遥感反射率对水体光谱进行光学分类, 结果表明所采集的样点可分为 3 种水体类型. 结合 GOCI 的波段设置, 建立了不同类型水体的叶绿素 a 浓度反演模型. 水体类型一可以利用 490 nm (3 波段) 和 555 nm (4 波段) 来反演, 水体类型二可利用 660 nm (5 波段) 和 443 nm (2 波段), 水体类型三利用 745 nm (7 波段) 和 680 nm (6 波段). 精度分析表明, 分类后的平均相对误差明显下降, 类型一为 38.91%、类型二为 24.19%、类型三为 22.90%; 类型一均方根误差为 $4.87 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、类型二为 $8.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、类型三为 $11.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 分类前后的总体平均相对误差由 49.78% 降低到 29.59%, 总体均方根误差由 $14.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $9.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 分类后反演精度得到了显著提高. 利用 2013 年 5 月 13 日 8 景 GOCI 影像反演了太湖的叶绿素 a 浓度, 结果表明, 2013 年 5 月 13 日太湖叶绿素 a 浓度日变化显著, 高值区主要集中在竺山湾、梅梁湾、贡湖湾, 低值区主要集中在湖心区以及南部区域, 10:00 以后太湖西南部沿岸的叶绿素 a 浓度显著降低. 这种先分类后反演的方法对于二类水体的模型反演精度的提高具有重要作用.

关键词: 水体分类; 叶绿素 a; GOCI 影像; 反演模型; 实时监测

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1557-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.007

Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body

FENG Chi¹, JIN Qi¹, WANG Yan-nan¹, ZHAO Li-na¹, LÜ Heng^{1, 2*}, LI Yun-mei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Chlorophyll-a as one of the important water quality parameters is often used as a measure of the level of water eutrophication. The 326 measured data collected from Lake Taihu and Lake Dongting were classified based on their measured values of remote sensing reflectance spectra using an automatic clustering algorithm-two-step method, and three water types were finally classified. According to the location and width of GOCI satellite bands, the specific algorithm to estimate chlorophyll-a concentration for different water body types was developed. The bands at 490 nm and 555 nm were used for water body type I, while bands at 660 nm and 443 nm were selected for water body type II and bands at 745 nm and 680 nm were applied for water body type III. The accuracy assessment showed that the mean relative error decreased from 49.78% to 38.91%, 24.19% and 22.90% for water body type I, II and III, respectively, while the root mean square error decreased from $14.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $4.87 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $8.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $11.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ for water body type I, II and III, respectively. The overall mean relative error decreased from 49.78% to 29.59% after classification, while the overall root mean square error was reduced from $14.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $9.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ after classification. The retrieval accuracy was significantly improved after classification. The chlorophyll-a concentration in Lake Taihu was retrieved using the GOCI image on May 13, 2013. The results showed that there was a significantly diurnal variation in the concentration of chlorophyll-a on May 13, 2013, and the regions with higher chlorophyll-a concentration were mainly distributed in the Zhushan Bay, Meiliang Bay and Gonghu Bay, while the regions with lower values were mainly located in the centre of the lake and the southern region. The chlorophyll-a concentration reduced significantly after 10:00 in the south-western region of Lake Taihu. This method of retrieving after classification played an important role in improving the model retrieval accuracy of case 2 water.

Key words: water body classification; chlorophyll-a; GOCI image; retrieval model; real-time monitoring

近 20 年来, 内陆湖泊水体富营养化现象日趋严重, 藻类的大量繁殖引发了水质危机. 而叶绿素 a 作为重要的水质参数之一, 其吸收和散射光谱特征是建立遥感反演半经验模型的理论基础^[1, 2]. 国

收稿日期: 2014-11-12; 修订日期: 2014-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171269, 41471282)

作者简介: 冯驰(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水色遥感, E-mail: fengchi9011@163.com

* 通讯联系人, E-mail: HengLu@njnu.edu.cn

外,有研究者采用不同的波段比值分别与遥感数据建立关系,进行了叶绿素 a 浓度的反演^[3~5]; Moses 等^[6]结合 MERIS、MODIS 影像利用三波段模型成功估算出一些内陆湖泊、近岸海域的叶绿素 a 浓度;国内,Wang 等^[7]通过对波段组合取对数或水质参数取对数,结合 TM 影像估算了太湖叶绿素 a 浓度;杜聪等^[8]利用 Hyperion 卫星影像构建三波段模型反演内陆湖水体叶绿素 a 浓度. 在一类水体中,水体光学性质相对简单,而在二类水体中除了考虑叶绿素外,还需要考虑其他水体组分的影响,水体总的光谱特征具有区域性和季节性^[9~12],因此对二类水体进行光学分类具有重要的意义. Shi 等^[13]在基于水体光谱分类的基础上结合 MERIS 影像反演了太湖叶绿素 a 浓度,李渊等^[14]通过对水体分类的方法成功估算了太湖的悬浮物浓度.

GOCI 作为世界上第一颗旨向海洋水色观测的静止卫星,设计用于提供高频率的影像覆盖,以提高海洋的观测能力. 在海洋研究上,Park 等^[15]曾利用 GOCI 影像使用 OC4 算法获取日本东海区域的叶绿素 a 浓度,并指出关于 GOCI 卫星反演叶绿素 a 浓度的算法尚有待研究;Hu 等^[16]也曾研究信噪比对海洋叶绿素 a 浓度反演精度的影响中使用到 GOCI 影像. 在内陆湖泊研究上,包颖等^[17]曾根据 GOCI 的波段设置提出使用第七与第五波段建立比值模型反演太湖叶绿素 a 浓度;Moon 等^[18]通过降低与溶解有机物相关性大的 GOCI 第一波段及与浮游物质相关性大的第四波段,强化与叶绿素 a 相关性大的 GOCI 第二和第三波段,建立了波段比值模型,进行日本霞浦湖叶绿素 a 浓度反演. 但内陆湖泊光学特征时空差异显著,所建立模型的适用性和稳定性以及实用性有待进一步验证^[19].

因此,针对内陆水体的光学复杂特征,本研究在对光谱数据分类的基础上,探寻不同水体类型下表征叶绿素 a 浓度的敏感波段,建立针对不同类型水体的叶绿素 a 浓度估算模型,从而得到基于 GOCI 影像的内陆湖泊叶绿素 a 浓度估算通用反演模型. 发展基于 GOCI 的高时间分辨率的内陆湖泊叶绿素 a 浓度反演模型,对提高水华暴发的预警与监测能力具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

太湖位于长江三角洲的南缘,是中国五大淡水湖之一,位于长江中下游工业化和城市化迅速发展

的地区,水面面积2 339 km². 平均深度约 1.9 m. 洞庭湖为中国第二大淡水湖,位于湖南省东北部,湖区位于长江中下游荆江南岸,湖区面积4 040 km²,平均水深 6.39 m. 太湖、洞庭湖作为重要的内陆水源地,其水质变化与人类活动关系密切^[20],选择二者作为研究区不但能够提高水体分类时的数据量及分类后类别差异,也能够一定程度上说明本研究所建模型的适用性. 采样点位分布如图 1、图 2 所示.

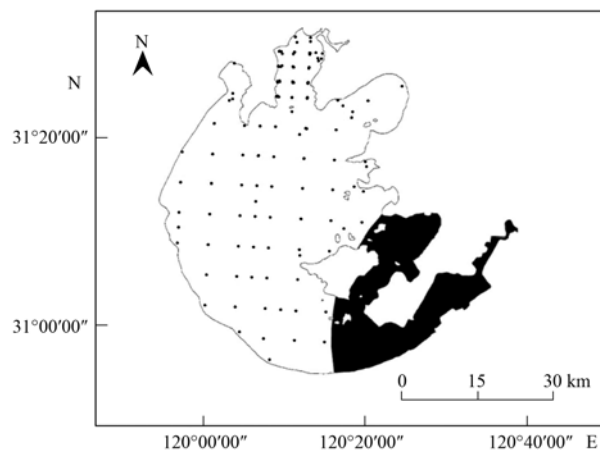


图 1 2006 ~ 2013 年太湖采样点位置分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in Lake Taihu

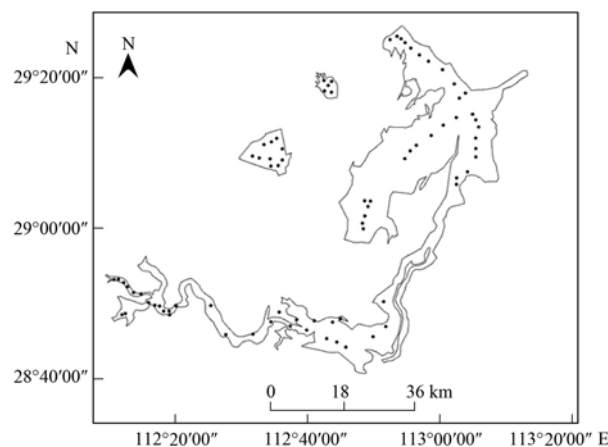


图 2 2013 年洞庭湖采样点位置分布

Fig. 2 Distribution of sampling points in Lake Dongting

1.2 数据采集

实验使用数据为 2006 年 11 月至 2013 年 8 月太湖、洞庭湖共 335 条实测数据,其中太湖数据 284 条,洞庭湖数据 51 条,去除个别明显异常的数据,得到 332 条数据. 野外实测光谱数据采集使用的是由美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD 野外光谱辐射仪 (ASD Field Spec), 其光谱范围为 350 ~ 1 050 nm, 采样间隔为 1.581 9 nm, 光谱分辨率是 3 nm, 有 512 个波段, 视

场角为 3.5°。数据采集方法为二类水体水面以上光谱测量法^[21],同时测定相应的辅助数据(气温、风速、水温、水深等)。将采集的水样放入水样箱中低温保存,带回实验室进行室内实验,以测定各种水质参数,包括叶绿素 a(chlorophyll-a, Chla)浓度,总悬浮物(total suspended matter, TSM)浓度等。

对于 TSM,使用直径为 47 mm,孔径为 0.4 μm 的 GF/F 滤膜过滤水样,滤膜预先用马弗炉在 450℃ 条件下煅烧 4~6 h,过滤后的滤膜再经鼓风箱烘干,使用高精度电子秤称量,减去空白滤膜的重量,测得 TSM 数据。测量 Chla 时,将一定体积的水样通过直径为 47 mm,孔径为 0.4 μm 的 GF/F 滤膜,取滤膜保存在棕色小瓶中冷冻 48 h 至细胞破裂,向棕色小瓶中加入 20 mL 的 85% 的热乙醇水浴 2 min,避光萃取 4~6 h,取萃取液使用分光光度计测量即可,计算方法参考乙醇法提取叶绿素 a^[22]。

1.3 影像数据

GOCI 主要用于实时连续观测海洋环境及渔业信息,每天获取 10 景影像,白天 8 景晚上 2 景,数据幅宽为 2 500 km×2 500 km,空间分辨率为 500 m,波段范围在 0.412~0.865 μm 之间设置有 8 个波段^[23],具体波段设置及观测重点见表 1。GOCI 数据通过官方网站(<http://kosc.kordi.re.kr>)下载,并进行 6S 大气校正处理^[24]。

表 1 GOCI 遥感影像 8 个波段指标

Table 1 Spectral bands of the GOCI remote sensing image			
波段	中心波长/nm	波宽	观测重点
b1	412	20	黄色物质、浊度
b2	443	20	叶绿素吸光最大值
b3	490	20	叶绿素及其他色素
b4	555	20	浊度、浮游物质
b5	660	20	荧光信号、叶绿素、浮游物质
b6	680	20	大气校正、荧光信号
b7	745	10	气溶胶厚度、植被指数
b8	865	40	计算海上水蒸汽量

2 模型的建立与分析

2.1 内陆水体光学特性分类

分类采用两步聚类法,两步聚类采用对数极大似然估计值度量类间距离,并根据施瓦兹贝叶斯准则(BIC)或 Akaike 信息准则(AIC)等指标自动确定最佳聚类个数^[25]。通过该方法将所采集的实测光谱数据使用 SPSS 18.0.0 软件进行自动分类,默认聚类数为 15,聚类准则为 BIC。施瓦茨贝叶斯准则是确定最佳类别数的最重要的指标,反映了聚类结果的复杂性,通常 BIC 会随着聚类数目的增加先减

小后增大,当 BIC 达到最小值时,一般认为聚类结果最为理想。本次分类中,当聚类数为 3 时,BIC 达到最小值且 BIC 变化率达到最大值,因而最终把所有采样点分为 3 类,其中类型一 122 条数据,类型二 156 条数据,类型三 54 条数据。表 2 为分类后不同水体类型的叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度的分布特征,图 3 为分类后 3 种水体类型的平均光谱反射率曲线。从表 2 和图 3 可以看出,3 种水体类型的光谱差异体现了不同水质参数水平,类型一的总悬浮物浓度均值最高,叶绿素 a 浓度均值最低,其平均反射光谱总体反射率在 420~700 nm 范围内保持较高水平,在 675 nm 处的叶绿素 a 吸收峰较弱;类型三叶绿素 a 浓度均值最高,故其平均光谱曲线特征较为突出,即 440 nm 处吸收峰和 550 nm 附近反射峰较为明显,并在 700 nm 附近呈现叶绿素 a 反射所引起的肩峰。类型二的叶绿素 a 均值及总悬浮物均值在类型一和类型三变化范围之内,光谱曲线同时呈现较高的总体反射率和较为明显的叶绿素 a 吸收峰。

表 2 3 种水体类型的水质参数特征

Table 2 Water quality parameters of three types of water body				
类别	水质参数	最大值	最小值	平均值
类型一	Chla/μg·L ⁻¹	173.38	1.88	14.05
	TSM/mg·L ⁻¹	196.20	3.40	48.94
类型二	Chla/μg·L ⁻¹	219.71	0.55	32.36
	TSM/mg·L ⁻¹	244.90	3.75	35.84
类型三	Chla/μg·L ⁻¹	270.30	14.02	79.64
	TSM/mg·L ⁻¹	132.33	7.00	39.32

将 332 条数据的遥感反射率通过 GOCI 光谱响应函数模拟到 GOCI 的 8 个波段上,如图 4。对于 3 种水体类型而言,模拟后的光谱标准曲线保留了一部分原有特征,类型一仍保持较高的反射率,660 nm 以后反射率骤然下降;类型二在 555 nm 后表现出反射率逐渐下降的趋势;类型三保留了 440 nm 附近的吸收峰,680 nm 以及 700 nm 附近的光谱特征由于 GOCI 700 nm 荧光峰波段的缺少而被平滑化,但 680 nm 与 745 nm 范围内较低的斜率体现了该类水体高叶绿素 a 浓度的特征,这为后文反演模型的建立提供了依据。结合表 2 和图 4 可知,3 种水体类型的叶绿素 a 与总悬浮物浓度比值分别为 0.287、0.903、2.026。类型一表现出以悬浮物主导的水体特征,其总体反射率水平较高造成叶绿素 a 的荧光峰信号被掩盖,故叶绿素 a 的主要特征表现在蓝绿波段。类型二为叶绿素 a 和悬浮物共同主导的水体类型,即在 443 nm 附近表现出吸收峰的同时,660

nm 附近的荧光峰也较为明显,这是由浮游植物的弱吸收以及悬浮颗粒物后向散射共同作用的结果. 类型三则明显表现出叶绿素主导的光谱特征,由于叶绿素荧光峰的存在,680 nm 和 745 nm 之间的斜率较小且光谱变化较为平缓,这与类型一、二存在明显差异.

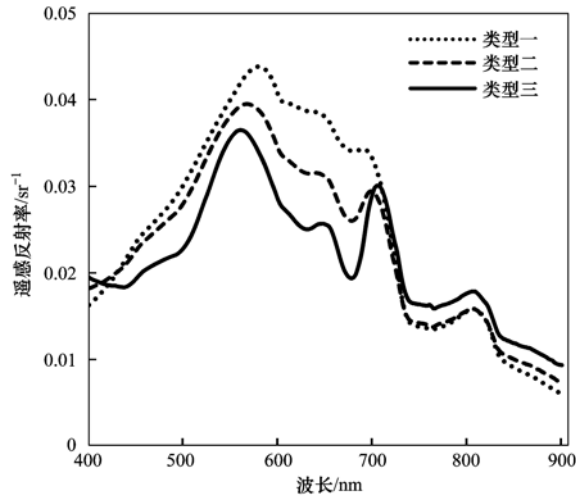


图 3 3 种水体的平均光谱曲线

Fig. 3 Average reflectance spectra of three types of water body

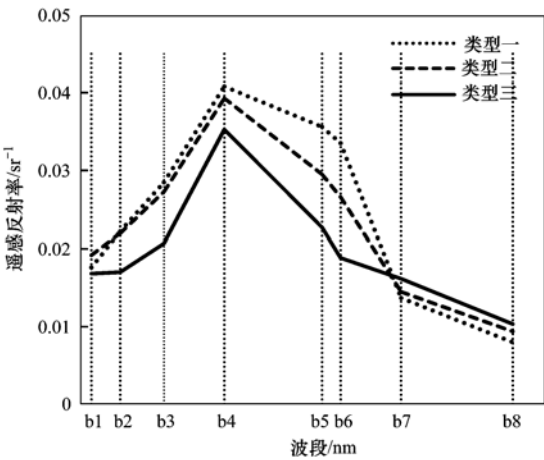


图 4 模拟 GOCI 后 3 种水体类型的平均光谱曲线

Fig. 4 Simulated GOCI reflectance of three types of water body

2.2 模型构建与验证

对于单波段模型,研究所用的光谱数据归一化后的反射率与叶绿素的相关性提高效果不明显;由于 GOCI 的波段设置较少,无法应用三波段模型及四波段对叶绿素 a 的浓度进行反演,因此,选择波段比值建立反演模型. 为评价模型的反演效果,选取相对误差 (ARE)、平均相对误差 (MAPE) 以及均方根误差 (RMSE) 对模型进行评价.

每类数据中,按叶绿素 a 浓度从大到小排序,每

3 个数据中,取第 3 个作为验证数据,不参与模型建立,因此参与建模的数据为 250 条,模型验证的数据为 76 条. 为了对比分类对叶绿素 a 模型反演精度的影响,同时利用未分类的数据进行叶绿素 a 浓度的建模与精度验证. 在波段选择上,对样点叶绿素 a 浓度及波段反射率比值取自然对数,根据以上两者之间的相关性进行波段迭代,选择相关性最高的波段比值模型作为最佳迭代波段.

由表 3 可得,对于未分类数据叶绿素 a 模型反演的最佳波段为第七和第六波段,决定系数为 0.463 6. 分类后的模型中,类型一的最佳波段为第四和第三波段;类型二的最佳波段为是第五和第二波段;类型三的最佳波段为第七和第六波段. 如表 4 所示,分类后的平均相对误差分别为 38.91%、24.19%、22.90%,均方根误差分别为 4.87、8.13、11.66 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,分类前后的总体平均相对误差由 49.78% 降低到 29.59%,总体均方根误差由 14.10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 9.29 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 分类前后相同样点的总体精度可对比图 5 及图 6. 由图 6 可以看出,类型一能够较好地估测小于 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的叶绿素 a 浓度,但对大于 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度存在普遍的低估现象;类型二对于 30 ~ 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度区间能够较好地估测,但对小于 20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的区间存在高估现象;而类型三在浓度区间 60 ~ 80 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 可进行较好的估测,每种反演模型的适用性与该水体类型的叶绿素 a 浓度特征存在密切关系.

表 3 不同类型水体及未分类数据的叶绿素 a 反演模型

Table 3 Chlorophyll-a retrieval models and the determination coefficients of different types of water body and the unclassified data

类型	拟合趋势线 ¹⁾	x	决定系数 (R^2)
类型一	$y = 12.024x - 1.8907$	$\ln(b4/b3)$	0.7385
类型二	$y = 5.3026x + 1.5389$	$\ln(b5/b2)$	0.7318
类型三	$y = 1.7626x + 4.6148$	$\ln(b7/b6)$	0.6748
未分类	$y = 2.1485x + 4.4343$	$\ln(b7/b6)$	0.4636

1) x : 取自然对数的波段比值; y : 取自然对数的叶绿素 a 浓度

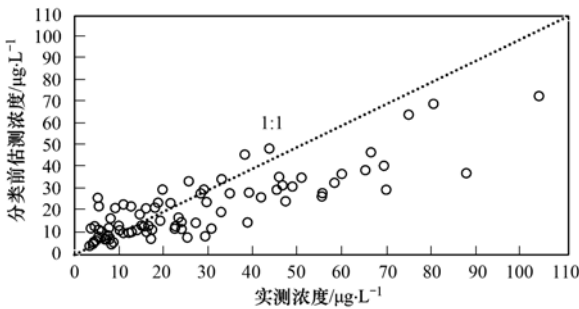


图 5 分类前建模精度验证

Fig. 5 Verification of modeling accuracy before classification

表 4 分类前后模型精度的验证

Table 4 Verification of model accuracy before and after classification				
类型	相对误差 (ARE)/%	平均相对误差 (RMSE)/%	均方根误差 (MAPE)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
类型一	Min	0.51	38.91	
	Max	94.59		
类型二	Min	0.53	24.19	
	Max	76.35		
类型三	Min	1.58	22.90	
	Max	49.52		
分类前	Min	1.15	49.78	
	Max	434.66		
分类后	Min	0.51	29.59	
	Max	94.59		

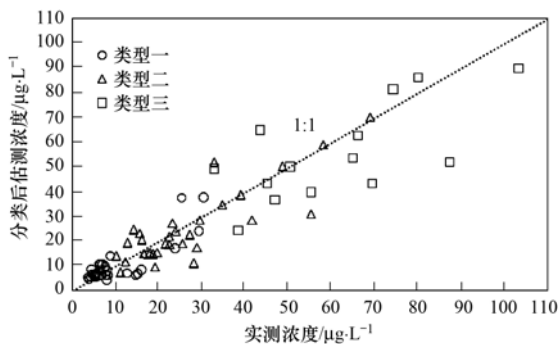


图 6 分类后建模精度验证
Fig. 6 Verification of modeling accuracy after classification

3 基于 GOCI 影像的太湖叶绿素 a 浓度反演

3.1 大气校正

研究使用经过几何校正和辐射校正的 GOCI 的 LIB 影像产品,无需进行辐射亮度的转换,可直接进行大气校正。影像大气校正模型为 6S 模型,模型中需要输入以下参数:遥感器类型、成像年月日和经纬度、气溶胶浓度及类型、辐射条件、观测波段和海拔高度、地表覆盖类型和反射率等。此次大气校正的气溶胶光学厚度为野外实测值。根据太湖地理位置以及成像时间,确定气溶胶模式为中纬度夏季。Wang 等^[26]的研究表明太湖地区为弱吸收型气溶胶,因而校正时气溶胶类型选择为大陆型气溶胶。6S 模型输出的是大气校正参数 x_a 、 x_b 、 x_c ,可以根据这 3 个参数计算得到大气校正后的反射率。如公式(1)、(2)所示。

$$y = x_a \times L_i - x_b \tag{1}$$

$$\rho = y / (1 + x_c \times y) \tag{2}$$

式中, L_i 为 i 波段辐射亮度, ρ 为校正后反射率。

为了检验大气校正的效果,采用实测 R_{rs} 数据的 9 个点位模拟 GOCI 波段与相对应大气校正后 GOCI 影像上 9 个点位数据进行分析。通过分析发现,经 6 s 大气校正后的遥感影像 R_{rs} 值与实测 R_{rs}

值较为接近,各个波段的平均相对误差分别为 13.2%、8.66%、6.67%、15.17%、13.7%、12.99%、10.9%、13.89%,均小于 16%,其中,最小值为 6.7%,最大值为 15.17%。此结果说明实测 R_{rs} 与经大气校正后的 GOCI 影像 R_{rs} 较为接近,证明 GOCI 影像经过 6S 大气校正处理后,能够满足叶绿素 a 浓度反演的要求。

3.2 水体类型判别及浓度反演

实现基于 GOCI 影像的水体叶绿素 a 浓度遥感反演,其关键是确定 GOCI 影像上每个像元的类别归属,进而针对所属类型采用相应的叶绿素 a 浓度遥感估算模型,在判定之前,需确定每种类型水体的标准光谱曲线,以不同类型水体各自的标准光谱曲线为基础,对像元进行分类。本研究参照安斌等^[27]提出的方法,采用光谱角(SAM)结合欧式距离的匹配方法对 GOCI 影像进行光谱匹配,实现 GOCI 影像的光学分类,该方法的具体表达式如下:

$$G = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \right) \tag{3}$$

式中, G 为最终指标值, x 为 GOCI 影像光谱, y 为标准 GOCI 光谱, $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$ 代表 GOCI 影像光谱与标准光谱之间的欧式距离, $\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \right)$ 代表 GOCI 影像光谱与标准

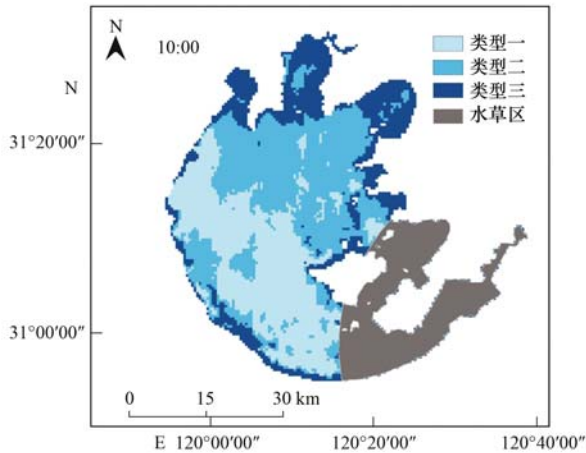


图 7 2013 年 5 月 13 日 10:00 水体类型分布示意
Fig. 7 Distribution of water body types of Lake Taihu at 10:00 on May 13, 2013

光谱之间的光谱角匹配程度. 结合图 4 的 3 种水体类型的标准曲线,以太湖 2013 年 5 月 13 日 10:00

GOCI 影像为例计算得到水体类型分布图(图 7),类型一主要分布在湖心以南区域,类型三则主要分布

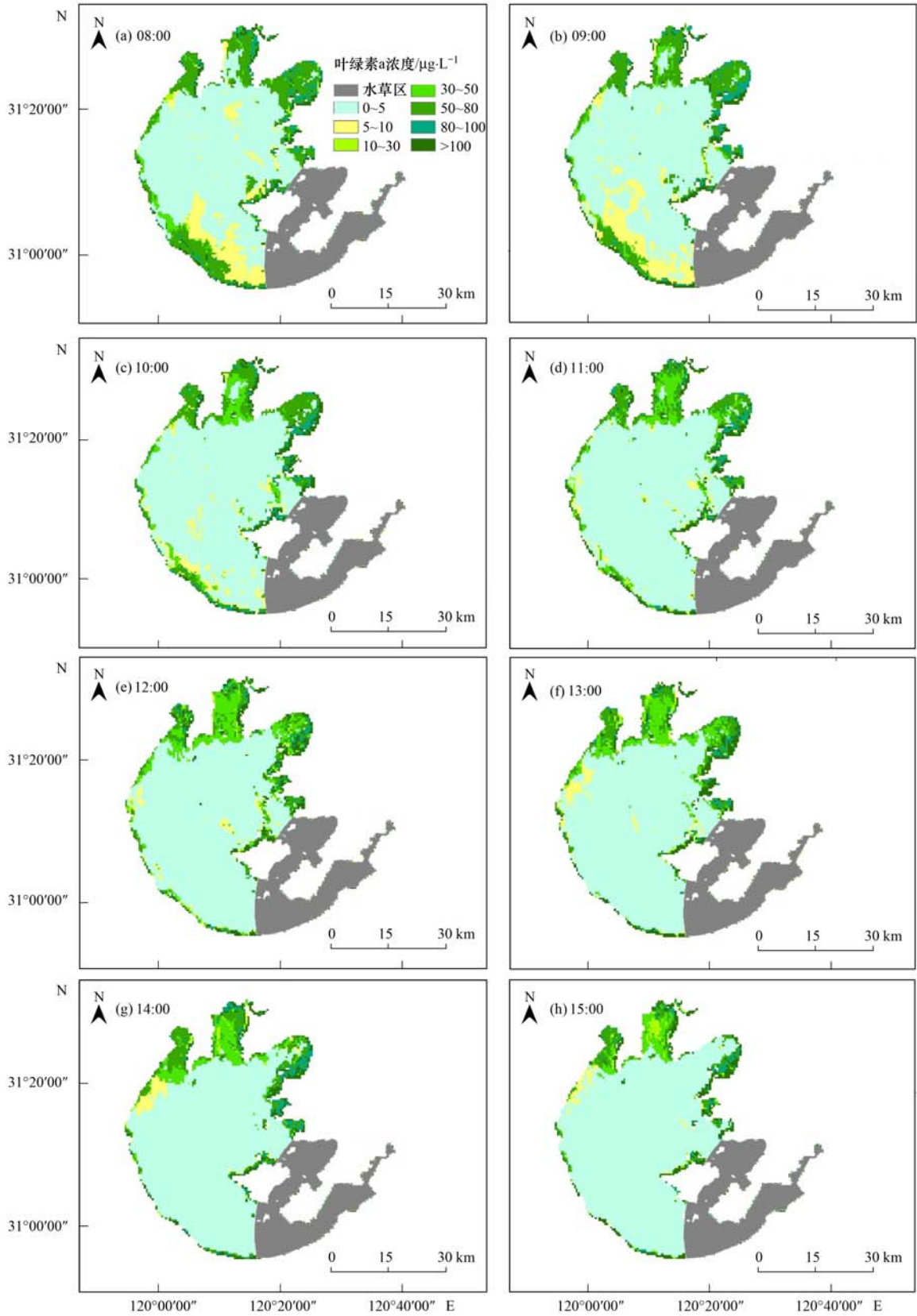


图 8 2013 年 5 月 13 日 GOCI 不同时刻影像太湖叶绿素 a 浓度变化分布示意

Fig. 8 Variation distribution of Chla concentration of Lake Taihu in the GOCI images acquired at different time on May 13, 2013

在沿岸及梅梁湾、贡湖湾、竺山湾区域,类型二作为过渡水体类型,分布在前两者之间的区域。

本研究采用 2014 年 5 月 13 日的 GOCI 8 景太湖图像,进行叶绿素 a 浓度的日变化监测,如图 8。太湖整体而言,竺山湾、梅梁湾、贡湖湾的叶绿素 a 平均浓度较全湖偏高,湖心以及太湖西部、南部水域叶绿素 a 浓度较低;对于浓度较高的区域,09:00 梅梁湾叶绿素 a 浓度达到 $80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,部分沿岸区域达到 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,下午浓度逐渐降低;小梅口和新塘港在 08:00 浓度达到 $50 \sim 80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,10:00 以后浓度则大幅度下降,根据太湖历史天气,2014 年 5 月 13 日风向为东南风-南风,风力在 3~4 级,这就可以解释小梅口和新塘港下午叶绿素 a 浓度大幅度下降以及湖心区域有小范围叶绿素 a 浓度增高的缘由。同样的,当天的南风使贡湖湾叶绿素 a 浓度逐渐减小。

4 结论

(1)本研究在实测数据的基础上将水体分为三类,分别为以悬浮物主导(类型一)、悬浮物叶绿素共同主导(类型二)以及叶绿素主导(类型三)水体。根据不同水体的光谱特征以及 GOCI 影像的波段设置,选择不同的波段比值建立最适宜该类水体的叶绿素反演模型,依次为 490 nm 和 555 nm、660 nm 和 443 nm、745 nm 和 680 nm。分类前后的总体平均相对误差由 49.78% 降低到 29.59%,总体均方根误差由 $14.10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $9.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)实验证明,分类后再反演的方法能够显著提高水质参数的反演精度。以 GOCI 影像为依托的太湖叶绿素 a 浓度日变化幅度明显,且变化趋势与实际浓度范围相符合,说明实时监测太湖藻类生长及水藻暴发是可以进行的,这为利用 GOCI 卫星进行中国内陆湖水体富营养化及蓝藻暴发的监测提供了依据。

(3)对于内容复杂的内陆水体而言,简单的对所有水体应用同一叶绿素 a 浓度反演模型必然会造成很大的估算误差,利用具有差异性的光谱曲线进行聚类,可以得到光谱特征相似的水体类型,对不同水质类型的水体参数进行分析并发现其差异性,从而建立相对应的反演模型,其反演精度得到了显著提高。因此针对光学特征复杂且时空变异较大的内陆水体,采用分类反演的方法是提高叶绿素 a 反演精度的有效途径。

参考文献:

[1] 李渊,李云梅,吕恒,等. 基于数据同化的太湖叶绿素多模

型协同反演[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3389-3396.

- [2] 吕恒, 江南, 罗澈葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 A 浓度定量反演[J]. 地理科学, 2006, **26**(4): 472-476.
- [3] Fraser R N. Hyper-spectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(8): 1579-1589.
- [4] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, **14**(7): 1269-1295.
- [5] Lathrop R G, Lillesand T M. Use of thematic mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1986, **52**(5): 671-680.
- [6] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges [J]. Environmental Research Letters, 2009, **4**(4): 045005.
- [7] Wang X J, Ma T. Application of remote sensing techniques in monitoring and assessing the water quality of Taihu Lake [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, **67**(6): 863-870.
- [8] 杜聪, 王世新, 周艺, 等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三段法反演太湖叶绿素 a 浓度[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2904-2910.
- [9] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000, **4**(1): 41-45.
- [10] 周琳, 马荣华, 段洪涛, 等. 浑浊 II 类水体叶绿素 a 浓度遥感反演(I): 模型的选择[J]. 红外与毫米波学报, 2011, **30**(6): 531-536.
- [11] 张亭禄, 施英妮. 一种划分 I 类水体和 II 类水体的方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, **35**(5): 849-853.
- [12] 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.
- [13] Shi K, Li Y M, Li L, et al. Remote chlorophyll-a estimates for inland waters based on a cluster-based classification[J]. Science of the Total Environment, 2013, **444**: 1-15.
- [14] 李渊, 李云梅, 施坤, 等. 基于光谱分类的总悬浮物浓度估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(10): 2721-2726.
- [15] Park K A, Woo H J, Ryu J H. Spatial scales of mesoscale eddies from GOCI Chlorophyll-a concentration images in the East/Japan Sea[J]. Ocean Science Journal, 2012, **47**(3): 347-358.
- [16] Hu C M, Feng L, Lee Z P. Evaluation of GOCI sensitivity for At-Sensor radiance and GDPS-Retrieved chlorophyll-a products [J]. Ocean Science Journal, 2012, **47**(3): 279-285.
- [17] 包颖, 田庆久, 孙绍杰. 基于 GOCI 和 MODIS 数据的太湖水体叶绿素 a 浓度反演研究[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>, 2014.
- [18] Moon J E, Ahn Y H, Ryu J H, et al. Development of ocean environmental algorithms for Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2010, **26**(2): 189-207.

- [19] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景[J]. 地球科学进展, 2002, **17**(3): 363-370.
- [20] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 145-152.
- [21] 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.
- [22] 张丽彬, 王启山, 徐新惠, 等. 乙醇法测定浮游植物叶绿素 a 含量的讨论[J]. 中国环境监测, 2008, **24**(6): 9-10.
- [23] 金惠淑, 鱼京善, 孙文超, 等. 基于 GOCI 遥感数据的湖泊富营养化监测研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, **49**(2-3): 271-274.
- [24] 阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, **40**(4): 611-618.
- [25] 汪存友, 余嘉元. SPSS 两阶聚类法如何自动确定聚类数[J]. 中国卫生统计, 2010, **27**(2): 202-203.
- [26] Wang M H, Shi W, Tang J W. Water property monitoring and assessment for China's inland Lake Taihu from MODIS-Aqua measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(3): 841-854.
- [27] 安斌, 陈书海, 严卫东. SAM 法在多光谱图像分类中的应用[J]. 中国体视学与图像分析, 2005, **10**(1): 55-60.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行