

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM_{2.5}的源贡献分析..... 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)

华北地区乡村站点(曲周)夏季PM_{2.5}中二次无机组分的生成机制与来源解析 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)

成都市大气PM_{2.5}中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)

不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)

北京地区大气消光特征及参数化研究 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商细彬, 曹阳, 张君 (3603)

太湖湖表反照率时空特征及影响因子 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)

基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)

河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤孔隙水溶解性甲烷时空特征 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)

石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)

长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)

湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 李邵龙, 陈道毅 (3683)

城市道路径流的排污特征 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)

杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)

海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)

天然有机物和电解质对水中C₆₀凝聚行为的影响 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)

微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)

倒置A²/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)

高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)

驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)

连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)

FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)

污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 刘吉宝, 李亚明, 吕镗, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)

大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)

三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)

坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)

不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)

菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)

生物传感细胞ADP1_pWHlux在水环境急性毒性检测中的应用 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)

虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)

纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)

黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用 陈亚楠, 袁玲 (3892)

发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)

COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)

养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)

土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)

《环境科学》征订启事 (3553) 《环境科学》征稿简则 (3589) 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)

基于 GOCI 影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演

王珊珊^{1,2}, 李云梅^{1,2,3*}, 王桥⁴, 吕恒^{1,2}

(1. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 3. 南京师范大学江苏省碳氮循环过程与污染控制重点实验室, 南京 210023; 4. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 漫衰减系数是水体光学中的一个重要参数. 采用 2006~2009 年的太湖野外实测数据, 分析了太湖水体漫衰减系数光谱特性及其影响因子, 在此基础上, 结合 GOCI 传感器数据, 分别构建漫衰减系数经验模型和半分析模型, 寻找适合 GOCI 影像的太湖漫衰减系数反演模型, 并分析太湖水体漫衰减系数的时空变化特征. 结果表明: ①太湖水体漫衰减系数主要受非色素颗粒物吸收主导, 以 GOCI 第 4、5、7 波段构建的多元线性模型反演漫衰减系数, 效果最好; ②太湖水体漫衰减系数值域主要分布在 $0 \sim 15 \text{ m}^{-1}$, 大体可以分为 3 个等级, 低值区: $0 \sim 4 \text{ m}^{-1}$, 中值区: $4 \sim 8 \text{ m}^{-1}$, 高值区: $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$, 部分高值区高于 15 m^{-1} ; ③太湖水体漫衰减系数存在一定时空差异性, 从空间上来说, 太湖水体漫衰减系数呈现一定的梯度性, 从东部到西部逐渐变高; 从时间上来说, 早上太湖漫衰减系数相对较高, 从上午到下午, 大体上呈现逐渐降低的趋势.

关键词: 遥感; 漫衰减系数; 反演模型; GOCI 影像; 太湖

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3620-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.010

Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images

WANG Shan-shan^{1,2}, LI Yun-mei^{1,2,3*}, WANG Qiao⁴, LÜ Heng^{1,2}

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 2. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Carbon and Nitrogen Cycle Processes and Pollution Control, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: Diffuse attenuation coefficient (K_d) is an important parameter in water body optics. The spectral characteristics of K_d in Lake Taihu and its impact factors were analyzed using the in situ measured data from 2006-2009. Then, empirical models and semi-analysis models were built based on the GOCI data to estimate K_d , in order to find a suitable retrieval model for GOCI and analyze the spatial and temporal variations of diffuse attenuation coefficient in Lake Taihu. The result indicates that: ① The main impact factor of diffuse attenuation coefficient at 490 nm is the non-algal particles absorption coefficient, and the combination model with GOCI bands 4, 5 and 7, namely the near infrared band, the red band and the green band, has the highest precision for the inversion of $K_d(490)$; ② the range of K_d of Lake Taihu distributes between 0 to 15 m^{-1} , and that can be divided into three levels generally, i. e., the range of the low value between $0 \sim 4 \text{ m}^{-1}$, the range of the medium value between $4 \sim 8 \text{ m}^{-1}$, and the range of the high value between $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$. While, occasionally, some values are higher than 15 m^{-1} ; ③ the K_d of Lake Taihu distributes with notable spatial and temporal difference. At the view of spatial distribution, the K_d values get higher from the east to the west of Lake Taihu; from the perspective of time, the K_d is relatively high in the morning and then shows a tendency of gradually reduce with the time.

Key words: remote sensing; diffuse attenuation coefficient; retrieval mode; GOCI images; Lake Taihu

漫衰减系数是水体表观光学量和固有光学量随深度变化的反映, 直接决定着水中的光强和光场结构, 可用于真光层深度的计算, 是水生态系统的重要因素. 国内外已有众多学者对漫衰减系数的特性及其与水体组分的吸收、散射之间的关系进行了大量研究^[1~11], 不同区域、不同时间水体的漫衰减系数呈现着一定的空间差异性和时间差异性, 研究水体的漫衰减系数有助于了解水体的光学特性、光学类型及其对水生态系统的影响.

漫衰减系数遥感反演方法主要分为经验方法和半分析方法, Austin 等^[12]和 Mueller 等^[13]针对大洋

一类水体, 分别基于 CZCS 和 SeaWiFS 传感器提出了漫衰减系数蓝绿比值反演算法; Morel^[14]根据一类水体的光学特性, 以叶绿素浓度作为中间量获取叶绿素浓度反演得到漫衰减系数; 王晓梅等^[15]针对黄东海二类水体光学特性, 利用 490、550、670 nm 处遥感反射比的波段组合建立漫衰减系数反

收稿日期: 2015-01-20; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271343); 江苏高校优势学科建设工程项目(164320H101)

作者简介: 王珊珊(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体光学特性, E-mail: wshanshan1110@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yunmei2009@gmail.com

演经验算法; 崔廷伟等^[16]利用渤海生物光学数据集建立了基于遥感反射率的漫衰减系数 $K_d(490)$ 反演经验模型, 并以 ENVISAT MERIS 数据为例进行了模型的示范应用; 乐成峰等^[17]通过分析 2007 年秋季太湖漫衰减系数特性及影响因子, 构建漫衰减系数反演模型, 发现利用 $R_{rs}(550)$ 、 $R_{rs}(675)$ 、 $R_{rs}(731)$ 进行多元线性回归的效果好于单波段 $R_{rs}(731)$ 算法; 金鑫等^[18]根据 2009 年 6 月巢湖实测数据发现利用 591、702、842 nm 处的遥感反射率进行多元线性回归反演得到的 $K_d(490)$ 效果较好; 吴婷婷等^[19]根据黄东海及珠江口附近海域 17 个航次的实测水下光谱剖面数据, 建立了基于水体遥感反射比光谱数据与 490 nm 波段水体漫衰减系数 $K_d(490)$ 的遥感反演算法; Shi 等^[20]分析了太湖水体有效光合辐射衰减系数 $K_d(\text{PAR})$ 的影响因子, 基于 MERIS 影像数据反演了 $K_d(\text{PAR})$, 分析了太湖 $K_d(\text{PAR})$ 的季节性与空间性变化; 陈雨等^[21]分析了冬季长江口邻近海域漫衰减系数光谱特征、 $K_d(490)$ 的空间分布及影响因子, 建立了该研究区域新的冬季漫衰减系数反演模型, 并建立了研究区域内 $K_d(490)$ 与有效光合辐射衰减系数 $K_d(\text{PAR})$ 的关系。

Lee 等^[22-24]基于生物光学模型, 建立了漫衰减系数半分析算法, Doron 等^[25]尝试进行半分析算法的简化, 假定颗粒后向散射仅存在弱的光谱依赖性, 利用 490 nm 和 709 nm 处的辐照度反射率反演 $a(490)$ 和 $b_b(490)$, 再借助 Lee 等建立的半分析模型来实现漫衰减系数的反演; Wang 等^[26]对 Lee 的算法进行进一步改进, 对清洁水体和浑浊水体采用不同算法, 加入权重, 将新算法应用到了沿岸浑浊水体的漫衰减系数反演中; 刘忠华等^[27]基于光学闭合原理, 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遥感反演。

对于我国典型内陆二类水体太湖, 目前漫衰减系数相关研究大多是基于地面野外实测数据, 使用遥感影像进行大面积、动态的太湖漫衰减系数的研究还相对较少。另外, 由于大多数卫星传感器时间分辨率的限制, 对漫衰减系数变化的研究多是季节性变化特征, 无法做到更小的时间尺度上。GOCI 数据可提供 08:00 ~ 15:00 以 1 h 为间隔的 8 景影像, 具有较高的时间分辨率, 基于 GOCI 影像构建太湖漫衰减系数反演模型, 可以分析太湖漫衰减系数的日变化特征, 结合其空间变化特

征可以更加系统地揭示太湖水体漫衰减系数及水下光场的时空变化规律, 这对太湖水质与水生态系统的监测有重要意义, 并且可为 GOCI 数据监测水环境参数提供参考。

本研究采用多年的太湖野外实测数据, 结合 GOCI 的波段参数, 分别构建漫衰减系数经验模型和半分析模型, 寻找适合 GOCI 影像的太湖漫衰减系数反演模型, 并将模型应用于 GOCI 影像, 分析太湖水体漫衰减系数的时空变化特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖位于长江三角洲的南缘, 是中国五大淡水湖之一, 太湖湖泊面积 2 427.8 km², 水域面积为 2 338.1 km², 湖岸线全长 393.2 km, 平均水深 1.9 m。太湖是典型的内陆二类水体, 光学特性复杂, 水体漫衰减系数存在着空间差异性和时间差异性。

1.2 数据获取与预处理

本研究采用了地面实测数据和 GOCI 影像数据, 其中, 地面实验数据选自课题组 2006 ~ 2009 年的野外实测数据(覆盖全湖), 去除异常点, 有效数据一共 112 个, 用于建模的数据为 77 个, 用于验证的数据为 35 个。星地同步验证数据选自 2013 年 5 月 14 日、2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 24 日的地面实测漫衰减系数数据, 2013 年 5 月 14 日采样时间分别为 11:00 ~ 15:00 每小时各 1 个, 2014 年 8 月 5 日采样时间分别为 09:00 点 2 个、11:00 点 2 个、12:00 ~ 14:00 每小时各 1 个, 2014 年 10 月 24 日采样时间分别为 10:00、12:00、13:00 各 1 个。GOCI 影像数据选用 2013 年 5 月 14 日、2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 28 日这 3 d 的影像。

地面观测的数据包括水面遥感反射率、水体漫衰减系数等表观光学参数, 水体组分吸收系数、后向散射系数等固有光学参数, 叶绿素浓度、悬浮颗粒物浓度等水质参数信息, 以及透明度、风速风向、水温等辅助数据。

1.2.1 水体光谱数据的获取

水体光谱数据采用美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD Field Spec Pro 便携式光谱辐射计测量, 仪器波段范围为 350 ~ 1 050 nm, 光谱分辨率为 2 nm。选择水面平静, 天空晴朗时测量。具体测量按照唐军武等^[28]提出的关于内陆二类水体水面以上光谱测量的方法进行测量, 并最终计算出水面遥感反射率参数。

1.2.2 水体固有光学参数测定

总颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)测定^[29],用直径为 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 mL 水样,在紫外分光光度计下测量滤膜上颗粒物的吸光度,用湿润程度相同的空白滤膜作为参比,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,总颗粒物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 按下式计算得到:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} D_s(\lambda) \quad (1)$$

式中, $D_s(\lambda)$ 为校正后的总颗粒物吸光度; V 为被过滤水样的体积; S 为滤膜上总颗粒物的有效面积。

非藻类颗粒物吸收系数的测量方法为用一定体积的次氯酸钠漂白水样中的藻类,漂白 15 min 后用上述同样的方法测定非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 。根据水体中各类物质吸收光谱的线性叠加原理,总颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物的吸收系数即为浮游藻类的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 。

CDOM 吸收系数的测定采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤过颗粒物之后的水样,然后将 CDOM 水样放进比色皿中,用紫外分光光度计测定其吸光度,采样间隔为 1 nm,然后根据 Bricaud 等^[30]的方法进行散射效应的校正,计算得到 $a_g(\lambda)$ 。

$$a(\lambda') = 2.303D(\lambda)/r \quad (2)$$

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(570)\lambda/750 \quad (3)$$

式中, $D(\lambda)$ 为吸光度; r 为光程路径(m); $a(\lambda')$ 为波长 λ 未校正的吸收系数(m^{-1}); $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1})。

总悬浮颗粒物的后向散射系数通过 Wetlabs 公司生产的散射仪(ECO-BB9)测得^[31]。ECO-BB9 共有 9 个光谱通道,分别是 412、440、488、510、532、595、660、676 和 715 nm,测量精度为 0.005 m^{-1} 。由于 ECO-BB9 利用的是微球散射体,由散射引起的衰减部分,使用 Scale factor(由 Wetlabs 公司提供)校正成为水体总体散射函数,接着要对总体散射函数进行吸收校正,如式(4):

$$\beta(\lambda) = \beta(\lambda)^* \exp(0.0391a) \quad (4)$$

式中, $\beta(\lambda)$ 是吸收校正后的总体散射函数; $\beta(\lambda)^*$ 是吸收校正前的总体散射函数; a 是相应波段的吸收系数(由 AC-S 测得)。由校正后得到的总体散射函数,减掉纯水的体散射函数,就可获得总悬浮颗粒物的体散射函数 $\beta_p(\lambda)$; 根据式(5)得到总悬浮颗粒物的后向散射系数 $b_{bp}(\lambda)$ 。

$$\beta_{bp}(\lambda) = 2 \times \pi \times X \times \beta_p(\lambda) \quad (5)$$

($X = 1.1$, 误差为 4%)

1.2.3 叶绿素和颗粒物浓度测定

叶绿素浓度测量采用陈宇炜等^[32]提出的浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”进行测量,总颗粒物、有机颗粒物、无机颗粒物浓度的测量采用灼烧称重法。

1.2.4 漫衰减系数的测量

水面以下光谱数据采用德国 TriOS 公司生产的 TriOS 水下光谱仪测量,该仪器由 3 个探头组成,可以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,光谱分辨率为 3.3 nm,可重采样至 1 nm。测量方法采用剖面测量法,测量深度分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1、1.2 m,数据采集的时间间隔为 5 s,不同深度采集 10 条光谱数据,去除异常值,其余取平均值。通常在船的向阳一侧采集数据,测量时用撑杆将仪器伸出船沿 1.5 m 左右,尽量减少船体阴影的影响。

太阳光在光学性质均一的水体中传播时遵循指数规律衰减^[33]:

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{z} \ln \left[\frac{E_d(\lambda, z)}{E_d(\lambda, z_c)} \right] \quad (6)$$

式中, $K_d(\lambda)$ 为波长 λ 处的漫衰减系数; z 为从参考水层到测量处的深度; $E_d(\lambda, z)$ 为深度 z 处的辐照度; $E_d(\lambda, z_c)$ 为参考水层深度处的辐照度。由于 0 m 处的测量值受到环境的影响较大,因此本次研究选择 0.2 m 作为参考水层。通过对 0.2、0.4、0.6、0.8、1、1.2 m 等不同深度水下的辐照度进行指数回归从而求出,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。

1.2.5 GOCI 影像的获取

GOCI 为韩国发射的静止海洋观测卫星成像仪,由 ASTRIUM 公司生产,发射时间为 2011 年 4 月,具有可见光到近红外 8 个波段,空间分辨率为 500 m,其最突出的特点,是可提供从 08:00 ~ 15:00 每小时的遥感影像。GOCI 传感器参数设置如表 1 所示。

本次研究选用了具有同步实测漫衰减系数的 GOCI 影像,分别为 2013 年 5 月 14 日和 2014 年 8 月 5 日的每天 8 景影像,以及 2014 年 10 月 24 日的 6 景影像。

1.3 精度评价

分别采用平均相对误差 MAPE 和均方根误差 RMSE 两个指标对模型精度进行评价,各指标由公式(7)、(8)求得。

表 1 GOCI 传感器参数设置

Table 1 Parameters of GOCI sensor

波段	1	2	3	4	5	6	7	8
中心波长/nm	412	443	490	555	660	680	745	865
波宽/nm	20	20	20	20	20	10	20	40
最大海洋辐亮度/ $W \cdot m^{-2} \cdot nm \cdot sr$	150.0	145.8	115.5	85.2	58.3	46.2	3.0	23.4

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Es_i - O_i}{O_i} \right| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Es_i - O_i)^2} \quad (8)$$

式中, n 是样点数目, Es_i 和 O_i 分别是第 i 个样点的模型估算值和实测值。

1.4 漫衰减系数反演经验模型构建

水体漫衰减系数和遥感反射率都属于表观光学特性,二者都随着水体吸收系数、散射系数等固有光学特性和光照条件的变化而变化,因此二者之间存在一定的函数关系。由于 GOCI 影像较新,目前没有针对 GOCI 影像的比较成熟的漫衰减系数反演模型,因此本研究参考前人的研究成果,结合已有方法,针对 GOCI 数据传感器波段参数,并结合漫衰减系数的敏感波段,分别构建单波段模型、波段比值模型和不同形式波段组合模型共 15 个经验模型,模型构建如表 2 所示。

模型 1 为相关性最高的第 7 波段构建的单波段模型,模型 2~6 为波段比值模型,其中模型 2、3 为蓝绿波段比值模型,多用于大洋一类水体的漫衰减系数反演,模型 4~6 是对比值算法用于二类水体的改进,由于内陆二类水体水质较为浑浊,悬浮物含量较高,是水体表观光学特性的重要影响因子,而长波波段可以很好地突出悬浮物的特征信息,因此引入 GOCI 传感器 5、6、7 波段分别与第 4 波段构建适合内陆二类水体的比值模型。模型 7~15 分别为不同形式的波段组合模型,模型 7 为蓝绿波段比值与近红外、绿波段比值的组合模型,模型 8 为蓝绿波段比值和近红外、绿波段加值的组合模型,模型 9 为绿波段、近红外波段差值和近红外、绿波段比值的组合模型,模型 10 为近红外、绿波段加值和近红外、绿波段比值的组合模型,模型 11 为绿波段、近红外波段差值和近红外、绿波段加值的组合模型,模型 12 为蓝绿波段比值和绿波段、近红外波段差值的组合模型,模型 13 为蓝绿波段比值和近红外、绿波段加值以及近红外、绿波段比值的组合模型,模型 14 为蓝绿波段比值和绿波段、近红外波段差值以及近红外、绿波段比值的组合模型,模型 15 为

表 2 漫衰减系数反演经验模型统计

Table 2 Statistics of the empirical models for K_d inversion

编号	经验模型
1	$K_d(490) = a(R_{745}) + b$
2	$K_d(490) = a(R_{443}/R_{555}) + b$
3	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b$
4	$K_d(490) = a(R_{660}/R_{555}) + b$
5	$K_d(490) = a(R_{680}/R_{555}) + b$
6	$K_d(490) = a(R_{745}/R_{555}) + b$
7	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b(R_{745}/R_{555}) + c$
8	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b(R_{745} + R_{555}) + c$
9	$K_d(490) = a(R_{555} - R_{745}) + b(R_{745}/R_{555}) + c$
10	$K_d(490) = a(R_{745} + R_{555}) + b(R_{745}/R_{555}) + c$
11	$K_d(490) = a(R_{555} - R_{745}) + b(R_{745} + R_{555}) + c$
12	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b(R_{555} - R_{745}) + c$
13	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b(R_{745} + R_{555}) + c(R_{745}/R_{555}) + d$
14	$K_d(490) = a(R_{490}/R_{555}) + b(R_{555} - R_{745}) + c(R_{745}/R_{555}) + d$
15	$K_d(490) = a(R_{745}) + b(R_{660}) + c(R_{555}) + d$

近红外波段、红波段和绿波段的组合模型。

1.5 漫衰减系数反演半分析模型构建

半分析方法是基于辐射传输理论,基于固有光学量和表观光学量之间的关系,构建漫衰减系数反演模型。半分析模型从机理的角度出发,其选择的波段具有普适性的意义,可以一定程度上克服季节性、区域性的差异,因此半分析模型对于漫衰减系数的获取具有重要的意义。

1.5.1 QAA-半分析模型

Lee 等^[24]基于辐射传输模型,建立了漫衰减系数与太阳天顶角,水体吸收系数和后向散射系数的关系,构建了漫衰减系数反演的半分析模型,表达式如下:

$$K_d(\lambda) = (1 + 0.005\theta_0)a(\lambda) + 4.18 \{1 - 0.52 \exp[-10.8a(\lambda)]\} b_b(\lambda) \quad (9)$$

式中, $K_d(\lambda)$ 为漫衰减系数 (m^{-1}), θ_0 为太阳天顶角,可以通过样点的采样时间和采样点位的经纬度计算求得, $a(\lambda)$ 、 $b_b(\lambda)$ 分别为水体总的吸收系数和后向散射系数 (m^{-1})。因此,要求得 490 nm 处的漫衰减系数,需要计算出 490 nm 处的吸收系数和后向散射系数。

根据 Gordon 等^[34]的研究,固有光学量和遥感反射率存在如下关系:

$$r_{rs}(\lambda) = g_0 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} + g_1 \left[\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right]^2 \quad (10)$$

式中, g_0 、 g_1 为常数, $a(\lambda)$ 、 $b_b(\lambda)$ 分别为水体总吸收系数和后向散射系数。

基于上述关系式 Lee 提出了 QAA 算法^[22], 该算法主要思路是首先选择一个参考波长 λ_0 , 该波长

处吸收系数通过经验模型可以较为准确地计算出来 (通常选择 555 nm), 根据上述公式 (10) 计算出参考波长处的后向散射系数 $b_b(\lambda_0)$, 然后根据经验模型得到后向散射系数 $b_b(\lambda)$, 再根据公式 (10) 计算得到 $a(\lambda)$, 将吸收系数和后向散射系数代入公式 (9) 最终得出漫衰减系数。表 3 为 QAA 算法计算流程。

表 3 QAA 算法计算流程

Table 3 Steps of the QAA algorithm

步骤	物理量	公式	方法
0	r_{rs}	$= R_{rs} / (0.52 + 1.7R_{rs})$	半分析
1	$u(\lambda)$	$= \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4g_1 r_{rs}(\lambda)}}{2g_1}$	半分析
2	$a(555)$	$= 0.596 + 0.0277 \left[\exp \left(4.4204 \times \frac{r_{rs}(660)}{r_{rs}(555)} \right) \right]$	经验
3	$b_{bp}(555)$	$= \frac{u(555)a(555)}{1 - u(555)} - b_{bw}(555)$	半分析
4	Y	$= 2.2 \left[1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \times \frac{r_{rs}(440)}{r_{rs}(555)} \right) \right]$	经验
5	$b_{bp}(\lambda)$	$= b_{bp}(555) \left(\frac{555}{\lambda} \right)^Y$	半分析
6	$a(\lambda)$	$= \frac{[1 - u(\lambda)] [b_{bp}(\lambda) + b_{bw}(\lambda)]}{u(\lambda)}$	半分析

1.5.2 Doron-半分析模型

Doron 等^[25] 研究表明, 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的反射率呈很好的线性关系。分析 GOCI 传感器各波段反射率与 490 nm 处的后向散射系数的相关性得出, 第 7 波段的遥感反射率与之相关性最好, 因此 $b_b(490)$ 可由 $R_{rs}(745)$ 反演得到 (图 1), 其表达式如下所示:

$$b_b(490) = 8.014 2R_{rs}(745) + 0.265 5 \quad (11)$$

结合公式 (10) 和公式 (11) 即可求得 490 nm 处的吸收系数 $a(490)$, 再结合公式 (9) 即可得到 490 nm 处的漫衰减系数。

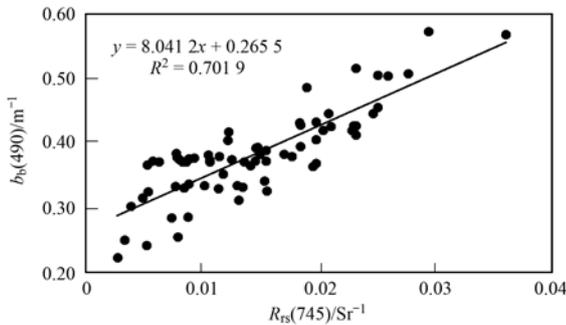


图 1 $b_b(490)$ 与 $R_{rs}(745)$ 的拟合结果

Fig. 1 Fitting results between $b_b(490)$ and $R_{rs}(745)$

2 结果与分析

2.1 漫衰减系数特性及影响因子分析

分析太湖水体漫衰减系数光谱曲线 (图 2) 可以看出, 除了少数样点漫衰减系数出现波动外, 漫衰减系数在 400 ~ 550 nm 之间随着波长的增加呈现指数衰减规律, 在 550 nm 附近出现拐点, 550 ~ 650 nm 之间漫衰减系数随波长增加变化不大, 少数样点有些许波动, 其余样点几乎没有产生变化, 光谱曲线较

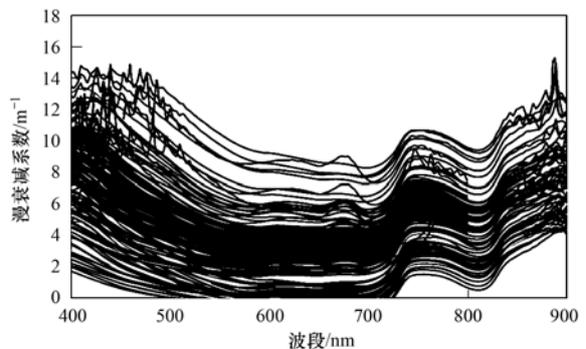


图 2 太湖水体漫衰减系数光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of the diffuse attenuation coefficient of Lake Taihu

为稳定,部分样点在 675 nm 附近由于叶绿素的吸收出现小的峰值,675 nm 之后漫衰减系数呈现下降的趋势,并且在 700 nm 附近出现极小值,700~900 nm 范围内漫衰减系数呈现出与纯水吸收相似的特征,这是因为在此波段范围内,浮游植物、悬浮物和 CDOM 的吸收系数都很小,光的衰减主要由纯水的吸收导致。

分析 490 nm 处的色素吸收系数、非色素吸收系数、CDOM 吸收系数以及后向散射系数对 K_d (490) 的贡献率(图 3)可以得出,非色素颗粒物的吸收对漫衰减系数的贡献率最大,非色素颗粒物占主导影响的样点数超过 80%,并且非色素颗粒物吸收的贡献率远远高于其他影响因子,所有样点中非

色素颗粒物吸收贡献率最高为 85%,贡献均值为 54%;其次为色素颗粒物的吸收,色素颗粒物的吸收对于接近一半的样点来说是影响太湖漫衰减系数的第二主导因子,所有样点中色素颗粒物吸收贡献率最高为 80%,贡献均值为 23%,非色素颗粒物吸收的贡献率与色素颗粒物吸收的贡献率大体上呈现相反的关系,这主要与有机悬浮物浓度和无机悬浮物浓度在总悬浮物浓度中所占百分比有关;后向散射与 CDOM 吸收的贡献率相对较小,其中后向散射的贡献率大体上高于 CDOM 吸收的贡献率,并且部分样点后向散射的贡献位居第二,所有样点中后向散射贡献率最高为 34%,贡献均值为 15%,CDOM 吸收贡献率最高为 27%,贡献均值为 8%。

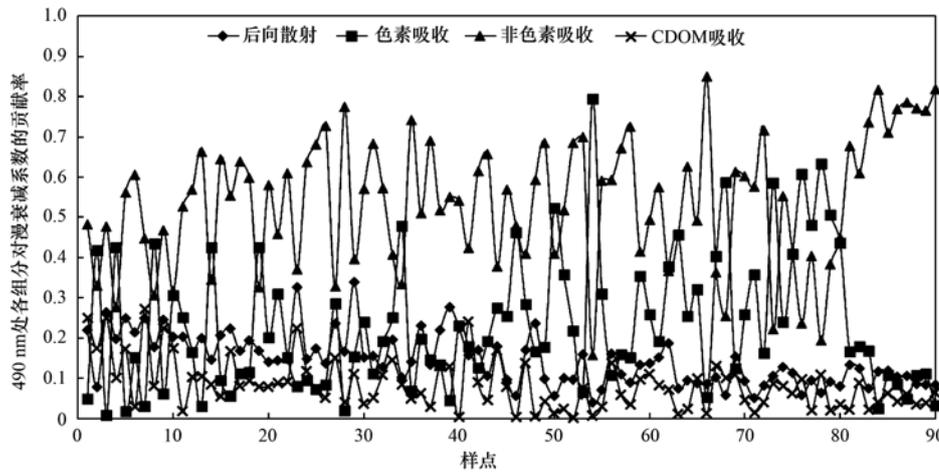


图 3 490nm 处太湖水体各衰减因子对漫衰减系数的贡献率

Fig. 3 Contributions of the attenuation factors to K_d at 490nm in Lake Taihu

2.2 模型精度评价

2.2.1 经验模型精度评价

通过对本研究建立的 15 个经验模型的验证结果进行误差统计分析(表 4)可以看出,单波段模型的精度较差,拟合结果 R^2 为 0.419,验证结果平均相对误差和均方根误差分别为 46.4% 和 2.124。基于蓝绿波段比值构建的模型 2、3 拟合结果和验证结果都很差, R^2 在 0.1 以下,平均相对误差和均方根误差也较高,分别高于 60% 和 2.9,这说明适合于大洋一类水体的蓝绿波段比值模型并不适用于太湖这样的典型内陆二类水体。红绿波段比值模型 4、5 的拟合结果和验证结果较蓝绿波段比值模型有些许提高,但是结果仍然较差,当比值模型的长波段选择第七波段近红外波段后,模型 6 的精度有较大的提高,其中拟合结果 R^2 为 0.685,验证结果平均相对误差和均方根误差分别为 39.2% 和 1.825,说明

近红外波段可以较好地反应水体悬浮物的特征信息。模型 7~14 是基于蓝绿波段比值、近红外波段和绿波段比值、绿波段和近红外波段的加减运算而构建的不同组合模型,可以看出包含蓝绿波段比值的组合模型精度相对较差,而包含近红外波段和绿波段比值的组合模型精度相对较好,其中精度最高的是模型 14,拟合结果 R^2 为 0.728,验证结果平均相对误差和均方根误差分别为 37.8% 和 1.832。模型 15 为绿波段、红波段和近红外波段的多元线性组合模型,模型拟合结果 R^2 为 0.737,验证结果平均相对误差和均方根误差分别为 28.6% 和 1.495。总的来说,经验模型中模型 15 的反演效果最好。

2.2.2 半分析模型精度评价

通过对漫衰减系数反演半分析模型验证结果进行误差统计(表 5),可以看出,基于反演得到的固有光学量构建的半分析模型的验证结果相对较差,模型

1 和模型 2 验证结果平均相对误差分别为 61.6% 和 41.5%,均方根误差分别为 2.168 和 2.959,基于实测

固有光学量构建的半分析模型的验证精度较高,平均相对误差和均方根误差分别为 34.5% 和 1.559.

表 4 经验模型验证结果误差统计

Table 4 Error statistics of validation results for empirical models

编号	经验模型	R^2	MAPE/%	RMSE
1	$K_d(490) = 308.59R_{745} + 0.3556$	0.419	46.4	2.124
2	$K_d(490) = 8.6787(R_{443}/R_{555}) + 0.0285$	0.04	71.4	2.969
3	$K_d(490) = 4.8432(R_{490}/R_{555}) + 1.4442$	0.01	68.7	2.916
4	$K_d(490) = 20.594(R_{660}/R_{555}) - 11.35$	0.449	78.6	5.11
5	$K_d(490) = 16.939(R_{680}/R_{555}) - 7.329$	0.413	80.6	5.166
6	$K_d(490) = 21.781(R_{745}/R_{555}) - 2.9624$	0.685	39.2	1.825
7	$K_d(490) = 4.988(R_{490}/R_{555}) + 21.791(R_{745}/R_{555}) - 6.476$	0.696	39.3	1.756
8	$K_d(490) = -1.224(R_{490}/R_{555}) + 73.662(R_{745} + R_{555}) + 1.752$	0.127	62.8	2.658
9	$K_d(490) = -63.323(R_{555} - R_{745}) + 20.402(R_{745}/R_{555}) - 0.895$	0.702	38.1	1.933
10	$K_d(490) = -28.517(R_{745} + R_{555}) + 23.825(R_{745}/R_{555}) - 2.157$	0.699	38.6	1.948
11	$K_d(490) = -399.422(R_{555} - R_{745}) + 168.061(R_{745} + R_{555}) + 5.699$	0.676	35.9	1.839
12	$K_d(490) = 13.303(R_{490}/R_{555}) - 236.723(R_{555} - R_{745}) + 1.368$	0.252	54.2	2.559
13	$K_d(490) = 8.787(R_{490}/R_{555}) - 46.816(R_{745} + R_{555}) + 25.153(R_{745}/R_{555}) - 7.894$	0.727	38.5	1.856
14	$K_d(490) = 8.312(R_{490}/R_{555}) - 93.4(R_{555} - R_{745}) + 19.763(R_{745}/R_{555}) - 5.769$	0.728	37.8	1.832
15	$K_d(490) = 436.581R_{745} + 290.84R_{660} - 448.66R_{555} + 6.970$	0.737	28.6	1.495

表 5 半分析模型验证结果误差统计

Table 5 Error statistics of validation results for semi-analytical models

编号	半分析模型	MAPE/%	RMSE
1	QAA-半分析模型	61.6	2.168
2	Doron-半分析模型	41.5	2.959
3	实测 IOPs-半分析模型	34.5	1.559

半分析模型有较为清晰的理论基础,一定程度上可以克服区域性和季节性的差异,但其反演精度很大程度上依赖于固有光学量的反演精度.从 QAA 模型反演固有光学量的反演值与实测值的对比分析中(图 4)可以看出, $a(490)$ 的反演值变化区间较窄,低值区的反演结果较好,但是无法预测出吸收系数的高值区域, $b_b(490)$ 的反演结果显示反演值普遍出现高估现象,只有少数样点的反演结果相对较好,值域变化较大.

分析基于 Doron 方法反演固有光学量的验证结

果(图 5), $a(490)$ 的反演值普遍低估,特别是高值区,无法体现出值域变化情况, $b_b(490)$ 的反演结果较好,模型反演值和实测值非常接近.

综上所述,固有光学量的反演均出现了较大的误差,这是导致本研究中半分析模型反演效果不好的主要原因.

2.3 GOCI 影像反演结果分析

根据上述的研究结果,以经验模型 15 作为太湖漫衰减系数反演最优模型,进行基于 GOCI 影像的太湖水体漫衰减系数反演. GOCI 数据获取时间为 2013 年 5 月 14 日、2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 24 日.

2.3.1 GOCI 影像大气校正结果分析

本研究中采用目前较为常用的 6S 模型算法进行 GOCI 影像的大气校正,并选择有相应地面同步实测点的影像对大气校正结果进行精度验证.

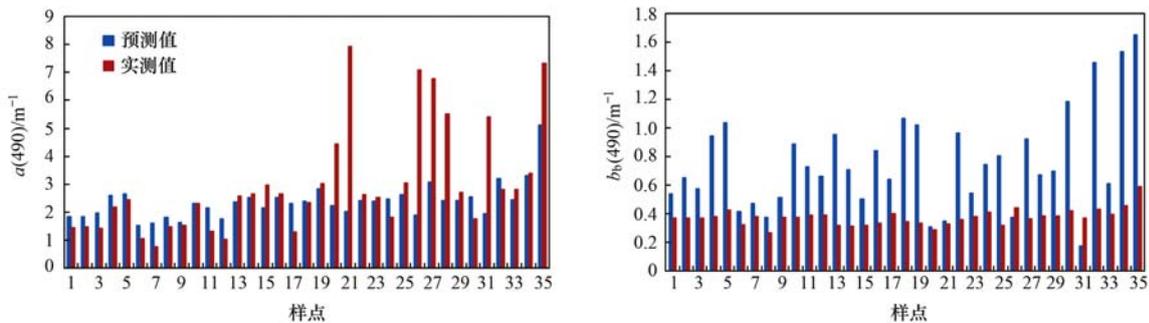


图 4 基于 QAA 模型的 IOPs 反演结果与实测值对比图

Fig. 4 Comparison between retrieval of IOPs by QAA model and in situ observed IOPs

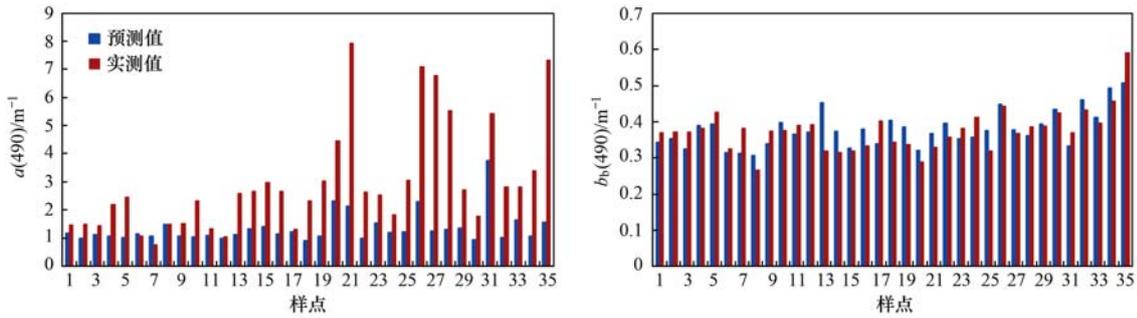


图 5 基于 Doron 方法的 IOPs 反演结果与实测值对比图

Fig. 5 Comparison between retrieval of IOPs by Doron model and in situ observed IOPs

漫衰减系数反演模型 15 用到的 GOCI 波段为第 4、5、7 波段,表 6 为 2013 年 5 月 14 日 GOCI 影像第 4、5、7 波段的大气校正结果误差统计表,可以看出对于这 3 个波段,大气校正效果最好的是 10:00 的影像,其平均相对误差和均方根误差分别只有 9.33% 和 0.001 9,除了 14:00 的影像外,其余的影像大气校正结果都比较好,分析同步实测点的位置发现 14:00 的影像其地面同步实测点所处位置有薄云覆盖,这导致了各波段 6S 大气校正值相对于实测值出现偏高现象。

表 6 2013 年 5 月 14 日 GOCI 影像 6S 大气校正结果误差统计

Table 6 Error statistics of 6S atmospheric correction results for GOCI on 14th May, 2013

影像时间	MAPE/%	RMSE
09:00	18.28	0.006 7
10:00	9.33	0.001 9
11:00	13.47	0.002 6
12:00	12.30	0.002 5
13:00	22.16	0.004 5
14:00	79.05	0.014 7

对比 2014 年 8 月 5 日、10 月 24 日的大气校正结果,都得到了相似的结果,说明 6S 算法适用于该研究区域。

2.3.2 基于 GOCI 影像的漫衰减系数反演结果分析

表 7 为 2013 年 5 月 14 日、2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 24 日 GOCI 影像反演精度验证结果,总体来说漫衰减系数反演效果较好,2013 年 5 月 14 日的反演结果平均相对误差和均方根误差分别为 10.2% 和 0.584,验证精度较高,其次为 2014 年 10 月 24 日的反演结果,平均相对误差和均方根误差分别为 10.6% 和 0.937,2014 年 8 月 5 日的反演结果平均相对误差和均方根误差分别为 17.4% 和 1.021,相对另外两天的影像反演结果来说误差相对较大,这是因为 2014 年 8 月 5 日的部分影像其地面

同步实测点对应的位置有云覆盖,影响了大气校正效果和最终的反演结果。

对比分析基于 GOCI 影像的模型验证结果与基于实测数据的模型验证结果发现,基于 GOCI 影像的模型反演精度高于基于实测数据的反演精度. 由于模型的验证精度与模型自变量的取值范围有关,地面验证数据由于较大的数据量以及较大的时间差异,不同波段遥感反射率值域范围较大,相对来说会增加模型的误差,而 GOCI 影像的验证数据较少,自变量取值范围较小,模型的验证精度较高。

表 7 GOCI 影像漫衰减系数反演精度验证

Table 7 Accuracy verification of $K_d(490)$ inversion results based on GOCI images

影像日期	MAPE/%	RMSE
2013-05-14	10.2	0.584
2014-08-05	17.4	1.021
2014-10-24	10.6	0.937

图 6 为 GOCI 影像反演得到的 2013 年 5 月 14 日太湖水体漫衰减系数空间分布,可以看出太湖水体漫衰减系数呈现出一定的梯度变化. 早上 08:00 太湖东部水体漫衰减系数明显低于西部水体,东部水体漫衰减系数值域分布在 4 ~ 8 m^{-1} ,中部及西部水体漫衰减系数值域分布在 8 ~ 15 m^{-1} ,09:00 在贡湖湾东部近岸水体出现了漫衰减系数相对低值区,值域分布在 0 ~ 4 m^{-1} ,中值区由太湖东部逐渐向中部扩散,面积增大,值域依然保持在 4 ~ 8 m^{-1} ,高值区的面积减小,西北部靠近竺山湾的部分水体以及西部高值区内的小部分水体漫衰减系数值域降至 4 ~ 8 m^{-1} ,10:00 ~ 13:00,贡湖湾低值区面积逐渐向西北部扩大,基本上占据了整个贡湖湾,太湖东部及东南部分水体也出现低值区并且随着时间的推移面积逐渐扩大,同样,中值区面积逐渐向太湖西北部扩大,占据了大部分太湖水域,高值区面积逐渐

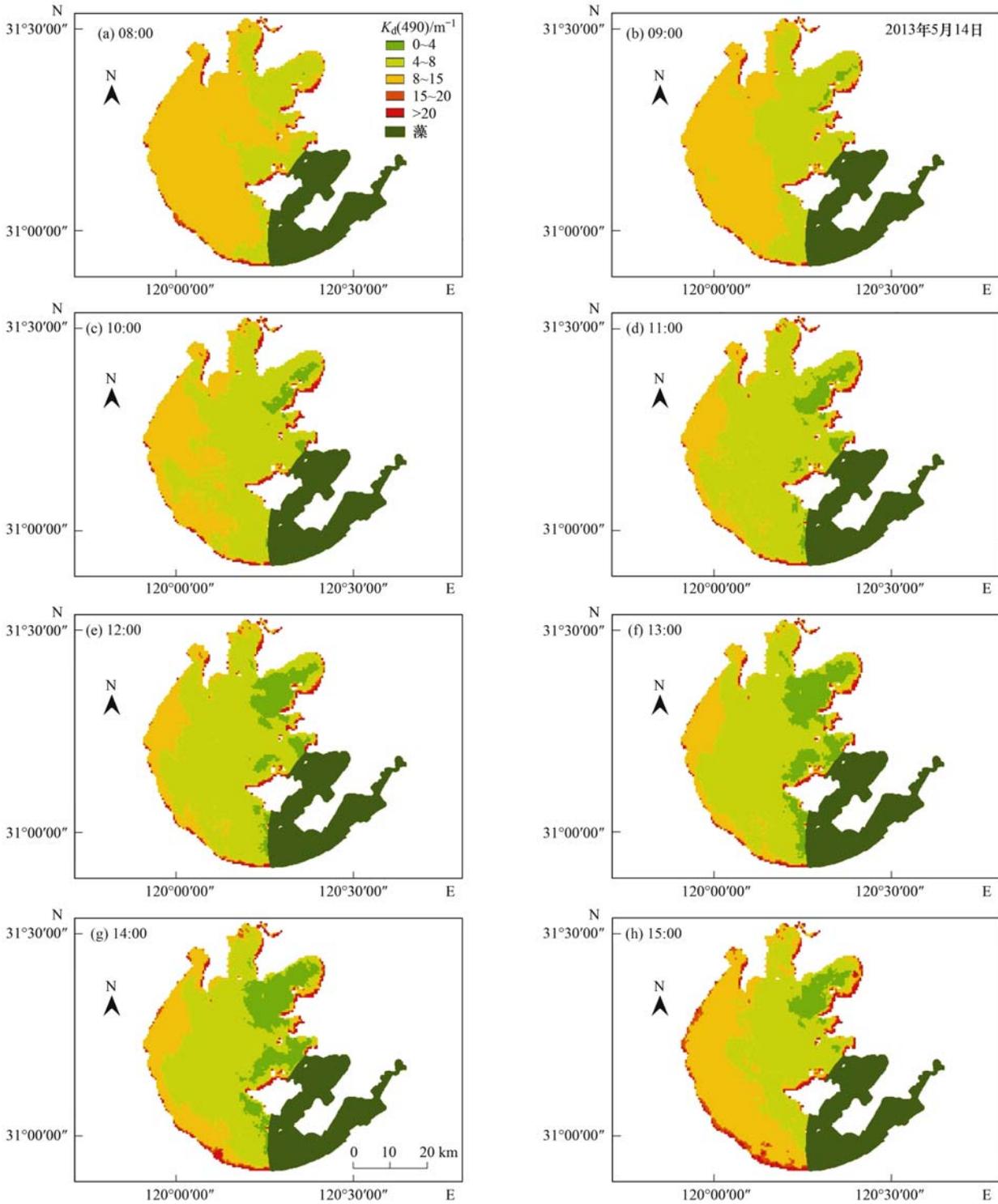


图 6 2013 年 5 月 14 日太湖水体漫衰减系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of diffuse attenuation coefficient of Lake Taihu on 14th May, 2013

减小,到 13:00 高值区主要集中在太湖西南沿岸,西北部陈东港入湖河流入口处以及竺山湾和梅梁湾小部分近岸水域,14:00 开始,低值区开始消散,到 15:00 低值区只集中在贡湖湾及其附近小部分水域,中值区也逐渐减小,高值区面积从太湖西部向东逐

渐扩大. 总体来说,2013 年 5 月 14 日太湖水体漫衰减系数空间上呈现出东部低于西部的趋势,时间上从 08:00 ~ 13:00,漫衰减系数自东向西逐渐减小,13:00 之后自西向东逐渐增大. 分析当天的气象情况,当天以东风东南风为主,这会使水体表层的悬浮

物质逐渐向西漂移,从而使东部水体较为清洁,下午 13:00 之后风速逐渐减小,水体表层悬浮物质又逐渐向东扩散,导致漫衰减系数高值区的面积向东扩大,这说明风速、风向等气象因子在一定程度上影响着太湖漫衰减系数一日内的空间分布. 此外,太

湖西部水体漫衰减系数高于东部水体漫衰减系数的原因主要是太湖西部河流多为入湖河流,并且太湖西部工业较为发达,河流携带工业废水与生活污水进入太湖,湖水富营养化程度较高,而太湖东部大部分河流为出湖河流,并且水质较好,因此太湖东部的

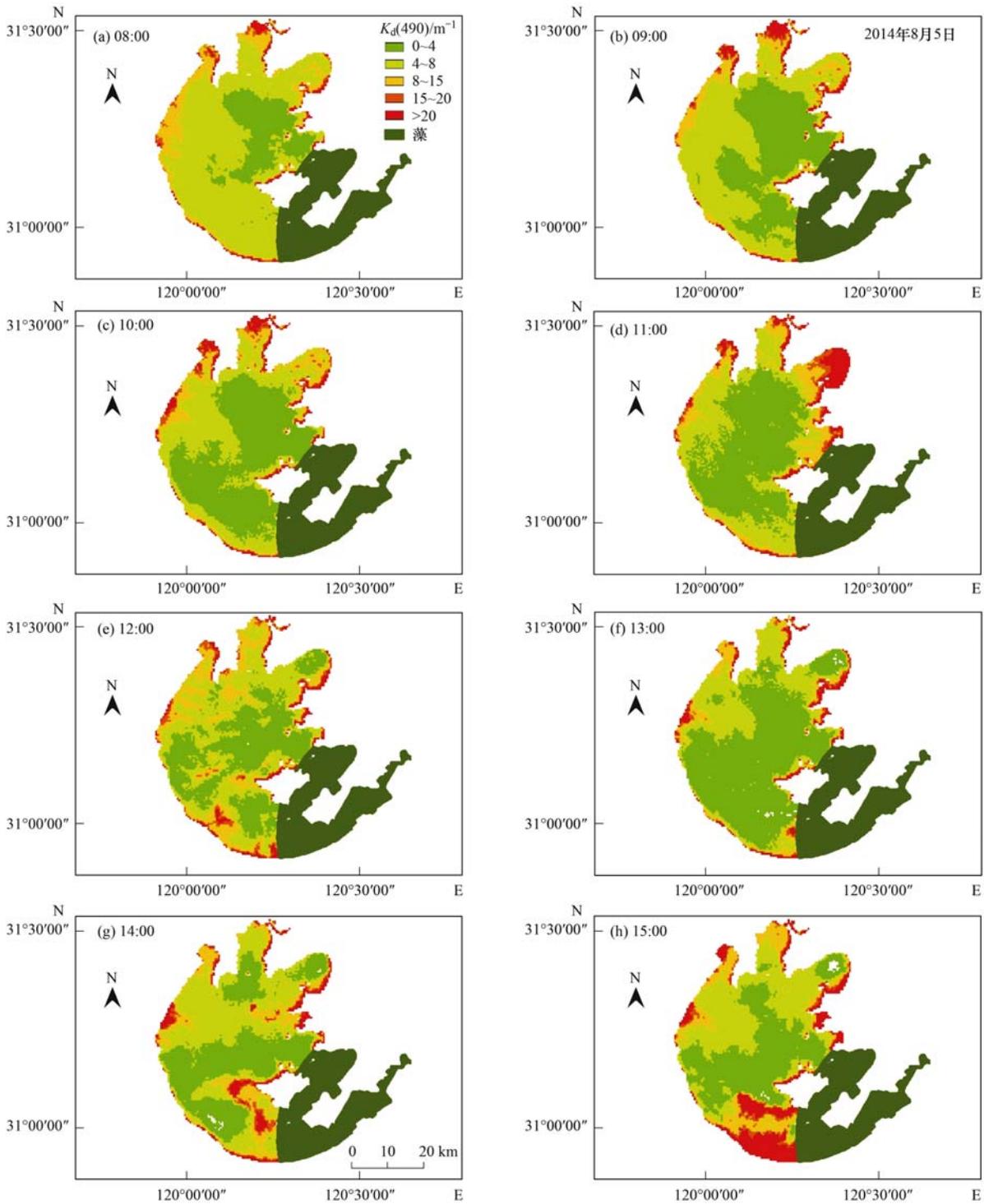


图7 2014年8月5日太湖水体漫衰减系数空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of diffuse attenuation coefficient of Lake Taihu on 5th August, 2014

水体比西部水体清澈,另外,太湖边界出现异常高值的原因主要是混合像元包含了陆地的信息,影响了漫衰减系数的反演结果.

图7为GOCI影像反演得到的2014年8月5日太湖水体漫衰减系数空间分布图,可以看出,08:00太湖水体漫衰减系数主要分布在4~8 m⁻¹,在东部以及中部湖心区的部分水域,漫衰减系数较小,值域在0~4 m⁻¹,在太湖北部的竺山湾、梅梁湾和贡湖湾部分水域以及西部入湖河流陈东港入口处附近的水域漫衰减系数较大,值域分布在8~15 m⁻¹,竺山湾和梅梁湾北部出口处漫衰减系数超过20 m⁻¹,09:00~11:00,太湖漫衰减系数逐渐降低,低值区面积逐渐向西部扩大,出现湖心区的漫衰减系数高于沿岸水体漫衰减系数的现象,高值区的面积变化不大,值域主要分布在8~15 m⁻¹,仍是集中在太湖西

北部以及3个湖湾处,在陈东港入口处以及竺山湾和梅梁湾近岸水体的漫衰减系数高值区超过20 m⁻¹,11:00的影像因为太湖东部有云覆盖导致了贡湖湾以及东部部分水域漫衰减系数出现异常高值,12:00~15:00,太湖北部的漫衰减系数逐渐变大,低值区面积逐渐减小,集中在太湖中部以及贡湖湾,相对高值区仍然集中在太湖西北部并且面积变化不大,12:00的影像太湖西部有薄云覆盖,对反演结果产生一定影响,导致12:00太湖漫衰减系数空间分布呈斑驳状,14:00和15:00的影像太湖南部有云层覆盖,也是南部水体漫衰减系数出现异常高值的原因.总体来说,2014年8月5日太湖水体漫衰减系数呈现湖心区高于近岸区,西北部高于东南部的趋势,这是因为太湖西部的污染要高于东部,并且当天的风向主要是东南风,但是由于风速较小

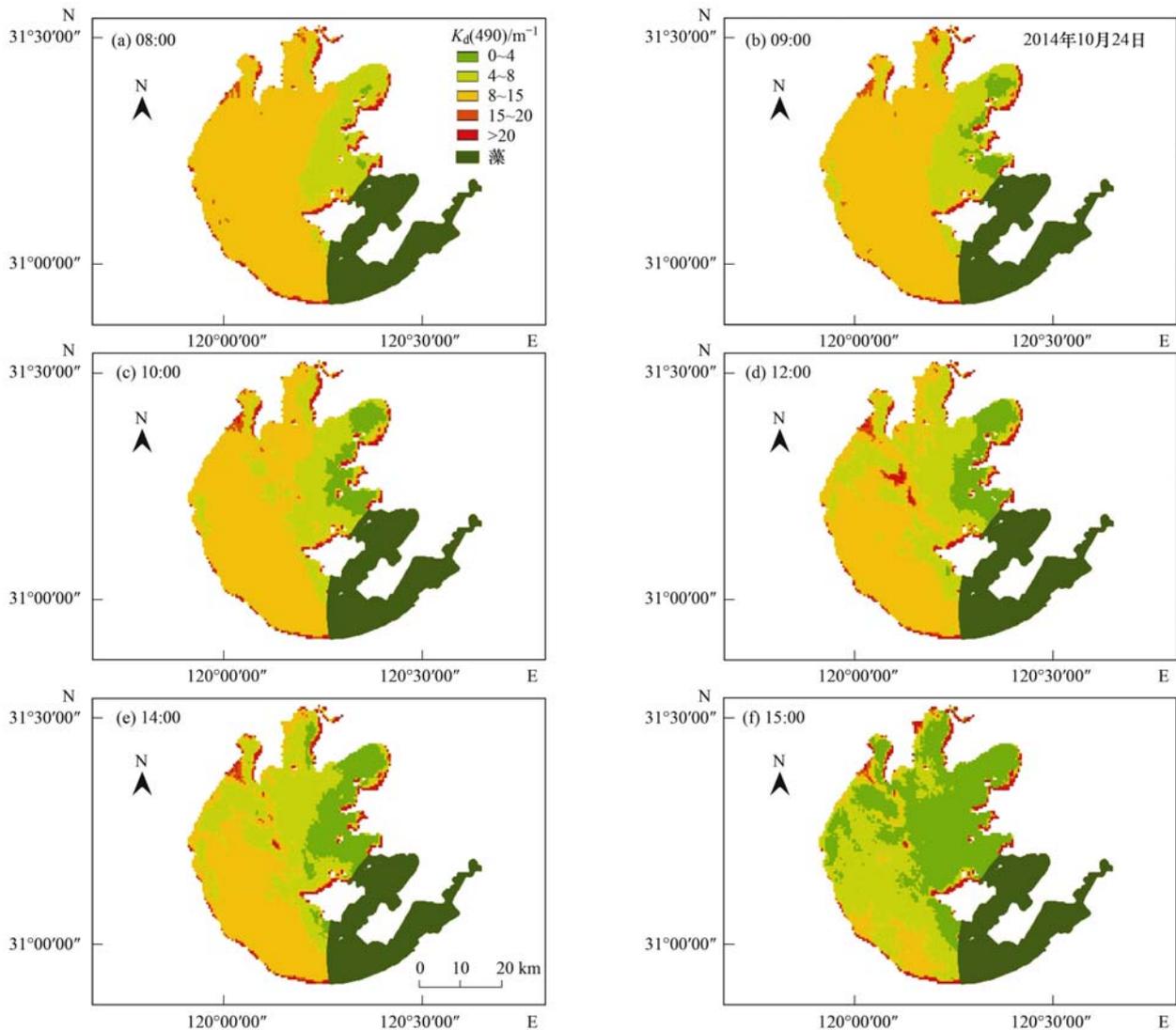


图8 2014年10月24日太湖水体漫衰减系数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of diffuse attenuation coefficient of Lake Taihu on 24th October, 2014

($1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右),所以随着时间的流逝,漫衰减系数变化并没有明显的规律性,主要体现在低值区与中值区面积的变化,另外由于 2014 年 8 月 5 日的 GOCI 影像部分区域受到云层的影响较大,漫衰减系数反演结果出现一些异常值,一定程度上影响了对太湖水体漫衰减系数空间分布日变化特征的分析。

图 8 为 GOCI 影像反演得到的 2014 年 10 月 24 日太湖水体漫衰减系数空间分布,可以看出太湖水体漫衰减系数空间分布及其变化呈现出一定的规律性,08:00 太湖水体漫衰减系数呈现出东部低于西部的趋势,太湖东部以及梅梁湾东部沿岸水体的漫衰减系数值域分布在 $0 \sim 8 \text{ m}^{-1}$,东部近岸小部分水体的漫衰减系数出现相对低值区,值域为 $0 \sim 4 \text{ m}^{-1}$,太湖中部及西部大部分水体的漫衰减系数都相对较高,值域分布在 $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,竺山湾西南部部分近岸水体的漫衰减系数高达 $15 \sim 20 \text{ m}^{-1}$,09:00 之后太湖东部的低值区和中值区面积逐渐向西部扩大,高值区面积逐渐减小,到 15:00 漫衰减系数高值区只集中在太湖西南部以及西北部部分水域,值域仍为 $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,15:00 低值区和中值区已经覆盖了大部分太湖水域,低值区主要分布在东部以及西北部部分水体,中值区主要分布在西南部和西北部部分水体。此外,12:00 太湖西北部靠近湖心区的部分水体出现异常高值区,之后逐渐消散,观察 GOCI 12:00 的影像发现该水域发生了水华,这影响了光线在水中的传输,之后水华逐渐消失,加上东南风的作用,水体逐渐变清,漫衰减系数逐渐减小。总体来说,2014 年 10 月 24 日太湖水体漫衰减系数同样呈现出西部高于东部的趋势,由于风向以东南风为主,风速平均 3 级左右,随着时间的流逝,漫衰减系数大体上呈现从东南向西北逐渐减小的趋势。

综合以上对于不同月份太湖水体漫衰减系数空间分布及其日变化特征分析的结果,总体来说太湖水体漫衰减系数值域主要分布在 $0 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,大体可以分为 3 个等级,低值区值域分布在 $0 \sim 4 \text{ m}^{-1}$,中值区值域分布在 $4 \sim 8 \text{ m}^{-1}$,高值区主要分布在 $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,部分高值区高于 15 m^{-1} 。

另外,太湖水体漫衰减系数存在一定的时空差异性。从空间上来说,太湖水体漫衰减系数呈现一定的梯度性,从东部到西部逐渐变高,呈现西部高于东部的趋势。这主要有以下 3 点原因:一是与太湖入湖河流和出湖河流的分布有关,太湖的入湖河流大多分布于西部以及西南部,如漕桥河、陈东港这两条太湖主要纳污河流,都分布在太湖的西南部,而

太湖东部多为出湖河流,并且水质较好;二是太湖西部的工业较为发达,工业废水随着入湖河流进入太湖,加重了太湖西部的污染;三是太湖盛行东南风,风速较大时,会将水体表层的悬浮物向西吹散,使得太湖东部水体变清。从时间上来说,本研究的 3 期数据相比,2014 年 8 月 5 日的漫衰减系数整体上低于 2013 年 5 月 14 日和 2014 年 10 月 24 日的漫衰减系数,不同季节的日变化呈现出相似的规律性,即早上太湖漫衰减系数相对较高,随着时间的流逝,大体上呈现逐渐降低的趋势,其空间变化主要受到风速、风向等气象因子的影响,同时也受到河流不同时间段的排污量以及水华暴发与消散的影响。

3 结论

(1)太湖水体漫衰减系数主要受非色素颗粒物吸收主导,以 GOCI 第 4、5、7 波段构建的多元线性模型为适合于 GOCI 影像的太湖漫衰减系数反演最优模型,其精度较高,并且普适性较好。

(2)太湖水体漫衰减系数值域主要分布在 $0 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,大体可以分为 3 个等级,低值区值域分布在 $0 \sim 4 \text{ m}^{-1}$,中值区值域分布在 $4 \sim 8 \text{ m}^{-1}$,高值区主要分布在 $8 \sim 15 \text{ m}^{-1}$,部分高值区高于 15 m^{-1} 。

(3)太湖水体漫衰减系数存在一定时空差异性,从空间上来说,太湖水体漫衰减系数呈现一定的梯度性,从东部到西部逐渐变高,呈现西部高于东部的趋势;从时间上来说,早上太湖漫衰减系数相对较高,随着时间的变化,大体上呈现逐渐降低的趋势,其空间变化主要受到风速、风向等气象因子的影响,同时也受到河流不同时间段的排污量以及水华暴发与消散的影响。

参考文献:

- [1] Gallegos C L, Correll D L, Pierce J W. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(7): 1486-1502.
- [2] Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, **43**(4): 433-447.
- [3] Morel A, Loisel H. Apparent optical properties of oceanic water: dependence on the molecular scattering contribution[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(21): 4765-4776.
- [4] Phillips G, Bramwell A, Pitt J, et al. Practical application of 25 years' research into the management of shallow lakes[A]. In: Harper D J M, Brierley B, Ferguson A J D, et al (eds.). *The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management* [M].

- Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999. 61-76.
- [5] 姜雨薇, 赵巧华, 孙德勇, 等. 太湖水体上行漫射衰减系数的变化特征研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 164-172.
- [6] 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.
- [7] 张运林, 朱广伟, 吴生才, 等. 巢湖秋冬季水体生物光学特性对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(5): 949-953.
- [8] 金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体漫衰减系数特性及其影响因子分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1581-1590.
- [9] 时志强, 张运林, 殷燕, 等. 博斯腾湖夏季水下光场特征分析及影响因素探讨[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2969-2977.
- [10] 时志强, 张运林, 王明珠, 等. 长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 517-524.
- [11] 黄昌春, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖梅梁湾漫衰减系数季节性差异及其主导因素[J]. 生态学报, 2009, **29**(6): 3295-3306.
- [12] Austin R W, Petzold T J. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the Coastal Zone Color Scanner [A]. In: Austin R W, Petzold T J (eds). Oceanography from Space [M]. US: Springer, 1981. 239-256.
- [13] Mueller J L. SeaWiFS postlaunch technical report series: SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, part 3 [R]. Goddard Space Flight Center; National Aeronautics and Space Administration, 2000. 24-27.
- [14] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters) [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**(C9): 10749-10768.
- [15] 王晓梅, 唐军武, 丁静, 等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究[J]. 海洋学报, 2005, **27**(5): 38-45.
- [16] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海近岸水体漫衰减系数 $K_d(490)$ 遥感反演模型[J]. 遥感学报, 2009, **13**(3): 417-422.
- [17] 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.
- [18] 金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 巢湖水体漫衰减系数空间差异及其遥感反演[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(2): 230-238.
- [19] 吴婷婷, 丘仲锋, 何宜军, 等. 黄东海及珠江口附近海域水体漫衰减系数反演[J]. 光学学报, 2013, **33**(7): 0701001.
- [20] Shi K, Zhang Y L, Liu X H, *et al.* Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **140**: 365-377.
- [21] 陈雨, 沈芳. 长江口邻近海域冬季漫衰减系数及其遥感反演[J]. 海洋湖沼通报, 2014, (4): 27-34.
- [22] Lee Z P, Carder K L, Arnone 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] 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**(C2): C02017.
- [24] 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**(C2): C02016.
- [25] 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**(C6): C06003.
- [26] Wang M H, Son S H, 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**(C10): C10011.
- [27] 刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 等. 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[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 421-428.
- [28] 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.
- [29] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) [J]. SPIE Proceedings, 1990, **1302**: 137-149.
- [30] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. Limnology and Oceanography, 1981, **26**(1): 43-53.
- [31] Moore C, Barnard A, Hankins D. Scattering meter (BB9) user's guide, revision A[M]. America: WET Labs Inc, 2005. 2-13.
- [32] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.
- [33] 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.
- [34] 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.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O- <i>MBR</i> Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	Ji Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人