

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型

郭宇龙¹, 李云梅^{1,2*}, 李渊³, 吕恒¹, 刘阁¹, 王旭东¹, 张思敏¹

(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. 南京师范大学江苏省碳氮循环过程与污染控制重点实验室, 南京 210023; 3. 浙江工商大学旅游与城市管理学院, 杭州 310018)

摘要: 以标准三波段算法为基础, 构建了适用于 GOCI 影像数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型. 并以三峡水库、巢湖、洞庭湖和太湖水体的 289 组实测叶绿素 a 浓度以及光谱数据作为基础, 模拟了 GOCI 影像和 MERIS 影像波段, 率定了模型参数, 并与 MERIS 三波段算法和目前常用的 GOCI 波段比值算法进行了对比分析, 最终用 GOCI 影像数据进行了独立数据验证. 结果表明: ①对目前的数据集, 680 nm 处和 660 nm 处的色素颗粒物吸收系数具有相对固定的比例关系, 比值为 1.351; ② GOCI 三波段模型在模型率定中, 得到与 MERIS 三波段模型近似的效果, 线性拟合的决定系数为 0.809, 略低于 MERIS 三波段模型的 0.820, 但明显优于 GOCI 比值模型 (0.450), 有效避免了 GOCI 波段比值模型中在叶绿素 a 浓度低值区出现的“扩散”现象, 体现出较好的普适性; ③通过验证数据集中平均相对误差和均方根误差两个误差指标的对比, 发现 GOCI 三波段模型误差表现与建模数据一致, 与 MERIS 数据接近, 明显优于 GOCI 波段比值模型; ④通过 GOCI 影像的同步验证, 发现 GOCI 波段比值算法会对太湖叶绿素 a 浓度产生明显的低估, 且难以体现叶绿素 a 浓度空间变异. GOCI 三波段算法效果相对较好. 相比于目前常用的波段比值算法, GOCI 三波段算法具有更高的稳定性和精度, 有较强的应用潜力.

关键词: GOCI; 内陆二类水体; 叶绿素 a 浓度; 三波段

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3175-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.008

A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery

GUO Yu-long¹, LI Yun-mei^{1,2*}, LI Yuan³, LÜ Heng¹, LIU Ge¹, WANG Xu-dong¹, ZHANG Si-min¹

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Carbon and Nitrogen Cycle Processes and Pollution Control, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. School of Tourism and City Management, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A GOCI-based three band model is proposed for chlorophyll-a concentration estimation based on the classical three band model. The model was built based on 289 in-situ measured chlorophyll-a concentration and hyperspectral spectrums-simulated GOCI spectrums, and was compared with MERIS-based three band model and GOCI band ratio model. At last, the model was validated using several GOCI images and an independent in-situ sampling dataset. The results showed that: ① For the current dataset, the ratio of a_{ph} (680) and a_{ph} (660) was relatively stable. ② The GOCI-based three band algorithm had a similar performance with MERIS-based three band algorithm in the modeling dataset. The R^2 value of the GOCI-based three band model was 0.809, which was a little lower than that of the MERIS-based three band model ($R^2 = 0.820$), but was obviously higher than that of GOCI band ratio model ($R^2 = 0.450$). ③ The performance of GOCI-based three band model in the validation dataset was similar with that in the modeling dataset, which was close to that of the MERIS-based three band model, and significantly better than that of GOCI band ratio model. ④ The GOCI image data validation indicated that GOCI band ratio model would clearly underestimate chlorophyll-a concentration in Taihu Lake. The spatial difference of chlorophyll-a concentration that yielded by the band ratio model was not clear. Compared with the widely used band ratio algorithm, the GOCI-based three band algorithm has higher stability, better accuracy, and stronger potential in application.

Key words: GOCI; inland case 2 water; chlorophyll-a concentration; three band model

近年来,受人类活动影响,内陆二类水体呈现不同程度的富营养化状态,严重影响了人类正常的生产生活^[1]. 叶绿素 a 浓度可以反映水中藻类物质含量,成为衡量湖泊富营养化的一个重要参数^[2,3]. 国内外学者对复杂浑浊水体叶绿素 a 浓度反演已经展开了许多有价值的研究. 在具有代表性的 3 种算法^[4]:经验算法、半经验算法及分析算法中,经验算法虽然形式简单,易于实现,但由于其物理基础薄弱,因此难以形成具有普适意义的模型,且精度一般

较低^[5];分析模型具有坚实的物理基础,理论上一旦建立,即具有一定普适性^[6~8],但其生物光学参数十分复杂,往往需要大量实验数据才能有效率定,不易实现;半经验算法一般通过机理模型,或者水体

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271343); 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(05-Y30B02-9001-13/15-6)

作者简介: 郭宇龙(1988~),男,博士研究生,主要研究方向为水环境遥感, E-mail: gyl.18@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

反射率光谱特征,构建叶绿素 a 浓度的敏感指数,进而通过最小二乘拟合进行模型构建^[9~13]. 由于其模型形式简单,精度较高,又有较好的可解释性,成为应用较多的一种模型形式.

随着卫星遥感技术的不断发展,一些模型被成功应用于具有不同特性的卫星影像,实现了对内陆浑浊水体的遥感监测. 不同的卫星影像具有不同的特性和优势,如利用空间分辨率较高的 TM 数据^[14, 15]、HJ 1-CCD 数据^[16, 17]和 RapidEye 数据^[18]等构建估算模型,可以对叶绿素 a 浓度的空间细节信息进行更好的监测;利用光谱信息较丰富的 Hyperion 数据^[19]、HICO 数据^[20]和 MERIS 数据^[21, 22],可以应用更加精确的半分析模型(如三波段算法^[11, 12],以及据此发展而来的多种改进算法^[13, 23, 24]),实现叶绿素 a 浓度更加精准的观测;由于内陆水体光学特性复杂,变化快,卫星影像的时间分辨率也逐渐成为研究内陆二类水体叶绿素 a 浓度高低变化,藻类生消周期的重要因素^[25].

GOCI 作为世界上第一颗海洋水色观测静止卫星,其一天 8 次成像的时间分辨率为水体遥感动态

监测提供了良好的契机. 其 500 m 的空间分辨率和平均 20 nm 的波宽,可以较好地捕捉水体的空间、光谱特征. 然而由于其波段设置的缺陷,无法应用精度较高的三波段模型. 目前内陆二类水体叶绿素 a 浓度的 GOCI 估算模型,多为波段比值模型^[26, 27],受建模数据集影响较大,精度难以保证. 针对 GOCI 数据的高精度叶绿素 a 浓度估算模型有待研究^[28].

因此,本研究基于 Dall'Olmo 等提出的标准三波段模型^[11, 12],提出适用于 GOCI 影像数据的三波段算法,旨在拓展三波段算法的适用范围,提高 GOCI 数据在内陆二类水体中的叶绿素 a 浓度估算精度.

1 材料与数据

1.1 数据获取

本研究使用的野外实测数据采集自三峡水库、巢湖、洞庭湖和太湖. 包括三峡水库 2009 年 8 月 1 期数据,巢湖 2009 年 6 月 1 期数据,洞庭湖 2013 年 8 月 1 期数据,太湖 2009 年 4 月、2010 年 8 月、2011 年 8 月、2013 年 5 月和 2013 年 8 月 5 期数据. 共采集得到 284 组样本. 采样点分布如图 1 所示.

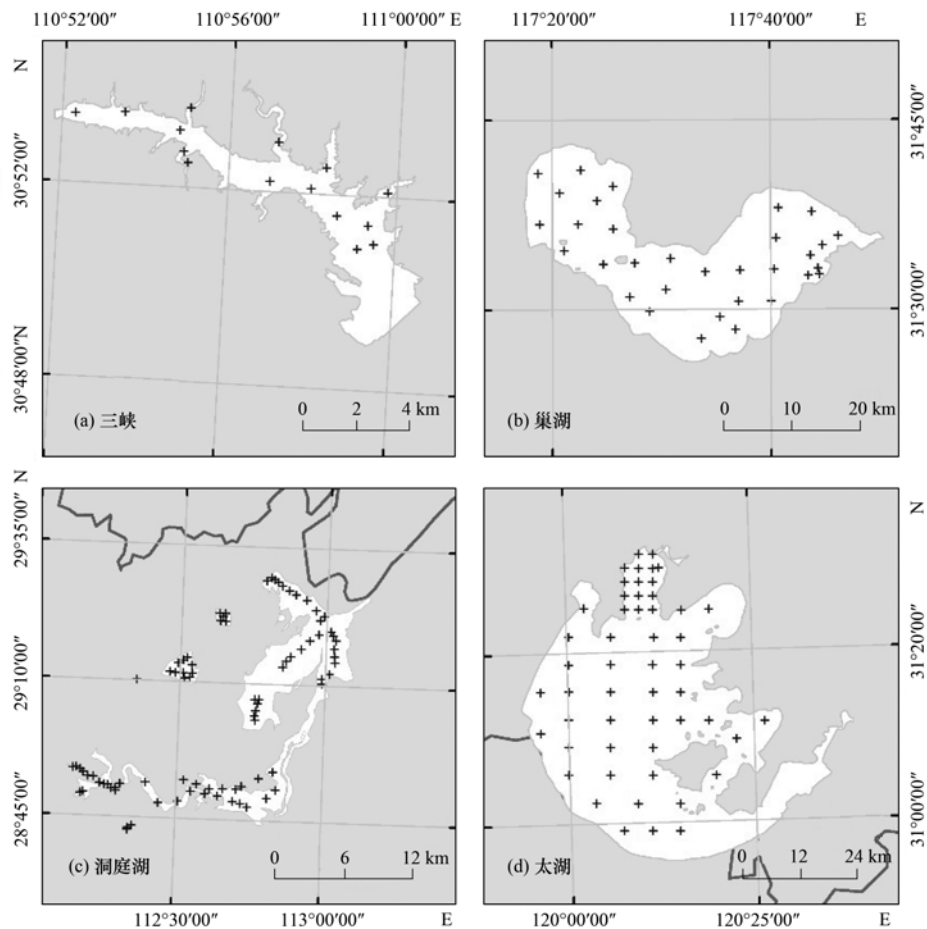


图 1 研究区示意

Fig. 1 Distribution of study areas and sampling stations

野外实验中对每个采样点进行了水体遥感反射率的测量,同时采集表层水样放入冷藏箱,并于当日送回实验室进行叶绿素 a 浓度及悬浮物浓度分析. 水体反射光谱的测量采用美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其波段范围为 350~1 050 nm. 为减少水体镜面反射和船体自身阴影的影像,测量时采用唐军武等提出的内陆二类水体水面以上光谱测量的方法. 具体方法见文献[29]. 叶绿素 a 浓度的测定采用热乙醇法测量,即对采集的水样进行抽滤、研磨、离心、定容后在分光光度计上分析得出该样点的叶绿素 a 浓度. 悬浮物浓度采用常规的干燥、烘烧、称重法

(GB/T 11901-1989)测定. 数据统计信息如表 1 所示. 其中统计了各期数据采集的地点、样本数量,以及 c_{Chla} 和 c_s 的均值、方差、最大最小值. 从中可以看出:首先,数据集样本覆盖范围较大,适合建模分析. 另外,三峡水库水质相对较好,叶绿素 a 浓度较低,太湖 2009 年 4 月叶绿素 a 浓度也较低. 除此之外,太湖 8 月样本和洞庭湖样本叶绿素 a 浓度动态范围较大;从悬浮物浓度来看,三峡水库悬浮物浓度最高,其次为 2009 年 4 月太湖地区,其余日期的样本集动态范围和值域比较接近. 其中 2013 年 5 月的太湖数据用于 GOCI 影像的独立验证,不参与建模.

表 1 各个数据集采样点信息统计

Table 1 Statistical information of different datasets								
获取时间	2009-04	2009-06	2009-08	2010-08	2011-08	2013-05	2013-08	2013-08
获取地点	太湖	巢湖	三峡	太湖	太湖	太湖	太湖	洞庭湖
点数	49	31	18	31	30	10	25	95
$E(c_{\text{Chla}})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	13.494	62.432	4.608	31.281	29.073	17.027	58.050	31.130
$\delta(c_{\text{Chla}})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	14.804	43.166	5.906	25.155	8.190	7.639	45.516	30.125
$\max(c_{\text{Chla}})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	79.796	192.882	18.860	110.592	52.109	34.317	229.303	124.248
$\min(c_{\text{Chla}})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.975	23.815	0.039	2.745	14.046	5.122	3.720	1.860
$E(c_s)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	71.419	43.612	64.930	50.711	49.696	36.907	71.153	29.948
$\delta(c_s)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	59.156	17.078	64.787	29.782	23.316	15.623	50.930	22.843
$\max(c_s)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	244.900	83.933	253.000	132.333	109.266	79.200	215.750	101.000
$\min(c_s)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.400	15.700	3.750	9.133	18.800	19.200	5.600	1.000

1)表中 E 代表均值, δ 代表标准差

除了野外实测数据,本研究另外使用了 2013 年 5 月 13 日的 GOCI 影像数据,用于模型的验证. 影像的几何校正通过自带的经纬度网格,在 ENVI 软件中进行校正. 大气校正使用 6S 模型(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum)进行校正^[30, 31].

1.2 GOCI 三波段模型的构建

Dall’Olmo 等^[11, 12]提出了一种三波段概念模型来反演内陆水体的叶绿素 a 浓度,如式(1)所示.

$$\text{Chla} \propto [R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \quad (1)$$

该模型以生物光学模型为基础,与传统经验模型相比,有更严谨的推导和清晰的物理含义;同时,模型中不涉及任何固有光学参数,因此比生物光学模型更容易应用和推广. 因此该模型在一些内陆湖泊和海湾中得到了广泛的应用^[21, 22, 32, 33]. 其推导过程如下.

根据水体生物光学模型,水体的光谱反射率与总吸收系数 $[a(\lambda)]$ 和总后向散射系数 $[b_b(\lambda)]$ 之间存在以下定量关系:

$$R(\lambda) \propto K \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (2)$$

式中, K 可以视为一个不受波长 λ 影响的参数,仅依赖于水体光场的几何分布. 对于二类水体而言,水体的吸收系数包括纯水的吸收(a_w),色素颗粒物的吸收(a_{ph}),非色素颗粒物的吸收(a_d),和有色可溶性有机物(CDOM)的吸收(a_{CDOM}):

$$a = a_w + a_{\text{ph}} + a_d + a_{\text{CDOM}} \quad (3)$$

由于叶绿素 a 浓度与色素颗粒物吸收系数成正比,即 $\text{Chla} \propto a_{\text{ph}}$,因此只要将 a_{ph} 从 a 中剥离出来,使得式(2)的右侧只保留 a_{ph} 和常数,就可以反演出叶绿素 a 的浓度. 为了实现该目的,算法首先选取两个波段 λ_1 和 λ_2 ,计算其反射率倒数之差,得到:

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \left[\frac{a(\lambda_1)}{b_b(\lambda_1)} - \frac{a(\lambda_2)}{b_b(\lambda_2)} \right] \quad (4)$$

若 λ_1 和 λ_2 的后向散射系数接近,即 $b_b(\lambda_1) \approx b_b(\lambda_2)$,则式(4)可以简化为:

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \frac{a(\lambda_1) - a(\lambda_2)}{b_b} \quad (5)$$

在标准三波段算法中,要求 $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$, 同时两个波段处无机悬浮物与黄质的吸收系数之和接近, 即 $a_d(\lambda_1) + a_{CDOM}(\lambda_1) \approx a_d(\lambda_2) + a_{CDOM}(\lambda_2)$, 即可去除二者影响. 满足上述条件后, 式(5)可以简化为:

$$R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2) \propto \frac{1}{K} \frac{a_{ph}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)}{b_b} \quad (6)$$

进而, 为了去除 b_b 和 K 的影响, 选取第三个波段 λ_3 , 使得 λ_3 上水体的 a_{ph} 、 a_d 和 a_{CDOM} 的吸收系数接近 0, 即 $a_{ph}(\lambda_3) + a_d(\lambda_3) + a_{CDOM}(\lambda_3) \approx 0$, 此时 $a(\lambda_3) \approx a_w(\lambda_3)$, 同时满足 $a(\lambda_3) \gg b_b(\lambda_3) \approx b_b$, 此时式(2)可以表示为:

$$R(\lambda_3) \propto K \frac{b_b(\lambda_3)}{a(\lambda_3) + b_b(\lambda_3)} \approx K \frac{b_b}{a_w(\lambda_3)} \propto K \times b_b \quad (7)$$

联立式(6)、式(7), 即可分离出 a_{ph} :

$$[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)] \times R(\lambda_3) \propto a_{ph}(\lambda_1) \quad (8)$$

根据标准三波段模型原理, λ_1 应位于 a_{ph} 峰值, λ_2 与 λ_1 位置接近, 且 $\lambda_2 \geq 700$ nm, λ_3 位于近红外波段, $\lambda_3 \geq 730$ nm. 然而, 满足标准三波段算法 3 个波段设置的传感器较少, 如图 2 所示, 高光谱数据, 如 Hyperion, 在 3 个波长范围都有较多波段设置, 可以满足需求; 而多光谱数据中, 目前只有 MERIS 可以满足标准三波段模型的波段设置. GOCI 数据均缺少 λ_2 处的波段设置, 因此理论上无法使用标准三波段模型. 为了便于讨论, 这里用 3 个波段处的中心波长来表达该模型, 即可将式(8)表达为:

$$[R^{-1}(680) - R^{-1}(710)] \times R(745) \propto a_{ph}(680) \quad (9)$$

然而根据文献[32, 34, 35]的研究, 临近波段

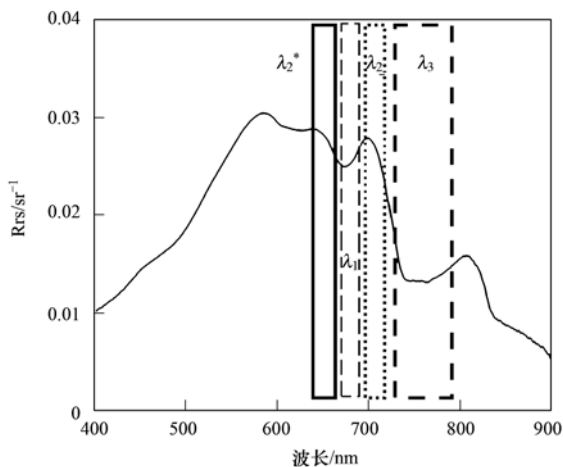


图 2 三波段模型波段需求

Fig. 2 Spectrum requirements of the three band models

之间的吸收系数具有一定的比例关系. 可以用下式表示:

$$\varepsilon_a(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{a(\lambda_1)}{a(\lambda_2)} \quad (10)$$

从 GOCI 数据的波段设置发现, B5 中心波长位于 660 nm 附近, 与 B6(680 nm) 比较接近, 又由于非色素颗粒与 CDOM 在长波波段的吸收系数相对固定, 因此认为以下关系式成立:

$$a_{ph}(680) = \varepsilon_{a_{ph}}(680, 660) \times a_{ph}(660) \quad (11)$$

于是, 可将标准三波段算法中的 λ_2 从 710 nm 左右替换为 660 nm 左右, 这时式(6)可以转换成:

$$R^{-1}(680) - R^{-1}(660) \propto \frac{1}{K} \cdot \frac{[\varepsilon_{a_{ph}}(680, 660) - 1] \times a_{ph}(660) + a_w(680) - a_w(660)}{b_b} \quad (12)$$

之后联立式(7)和式(12), 若 $\varepsilon_{a_{ph}}(680, 660)$ 为定值, 即可得到:

$$[R^{-1}(680) - R^{-1}(660)] \times R(745) \propto a_{ph}(680) \propto \text{Chla} \quad (13)$$

式(13)即适用于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型.

与标准三波段模型相比, 本研究提出的三波段模型利用 a_{ph} 波段间的固定斜率, 更改了 λ_2 的位置 (如图 2 中 λ_2^* 所示), 使三波段模型能够应用于 GOCI 影像数据.

1.3 大气校正

本研究中的 GOCI 数据利用 6s 模型 (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 进行大气校正. 其中模型输入的卫星、太阳几何角度, 均获取自影像本身; 气溶胶光学厚度采用太湖站 AERONET 站点的实测值作为输入.

1.4 模型的评价

为了更加全面地评价本研究提出的模型, 本研究首先利用 GOCI 和 MERIS 的波段响应函数, 将地面实测高光谱数据模拟成为 GOCI 数据和 MERIS 数据, 进而基于 MERIS 三波段因子 $[(1/B681 - 1/B708) \times B753]^{[21]}$ 、GOCI 三波段因子和 GOCI 比值算法 $(B745/B680)^{[26, 27]}$ 分别估算叶绿素 a 浓度并进行对比分析. 估算模型通过常用的统计拟合方法获取. 3 个模型均采用现行拟合方式获取.

为了使模型值域范围一致, 先将数据按照叶绿素 a 浓度大小排序, 再顺序抽取数据, 最后得到 186 组建模数据, 83 组验证数据. 另外有 10 个样点用于

实测 GOCI 影像的验证。

模型验证中,估算精度评价指标分别选取常用的平均相对误差 (MAPE) 和均方根误差 (RMSE)。表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 / n} \quad (14)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (15)$$

式中, y_i 和 y'_i 分别代表实测和估算得到的叶绿素 a 浓度, n 代表样本数量。

2 结果与分析

2.1 遥感反射率特征

7 期数据的遥感反射率曲线及各个波段与实测叶绿素 a 浓度的相关系数如图 3 所示。首先,7 期数据都体现出较复杂的光学特性:400 ~ 500 nm 由于叶绿素、类胡萝卜素及可溶性有机物的强吸收作用,使得遥感反射率在该范围内相对较低;550 ~

580 nm 范围内出现一反射峰,主要是由于叶绿素和胡萝卜素在该波段范围内吸收较弱以及细胞的散射作用形成的;630 nm 处由于藻蓝蛋白的吸收而形成一个小的反射谷;675 nm 附近由于叶绿素 a 的强吸收而形成一个明显的谷值;700 nm 附近由于叶绿素 a 的反射而形成一个明显的反射峰,该峰值是判断水体中是否含有藻类叶绿素的重要依据^[36];700 nm 后由于水的吸收变强导致遥感反射率迅速减小,至 730 nm 左右出现一个拐点,此后遥感反射率光谱变化比较平缓,直到 808 nm 附近出现一个小的反射峰,该反射峰主要由于悬浮物的后向散射作用形成;808 nm 后遥感反射率继续减小,到 900 nm 之后反射率光谱出现较大噪声,信噪比急剧下降,一般不参与定量遥感反演。同时,可以发现各期数据的相关系数曲线有较大差异。由于叶绿素 a 浓度较低,2009 年 4 月太湖数据集中,各个波段与叶绿素 a 浓度的相关性都较低(图 3),相关系数集中在 -0.3 左右;而在叶绿素 a 浓度更低的三峡水库,710 nm 左

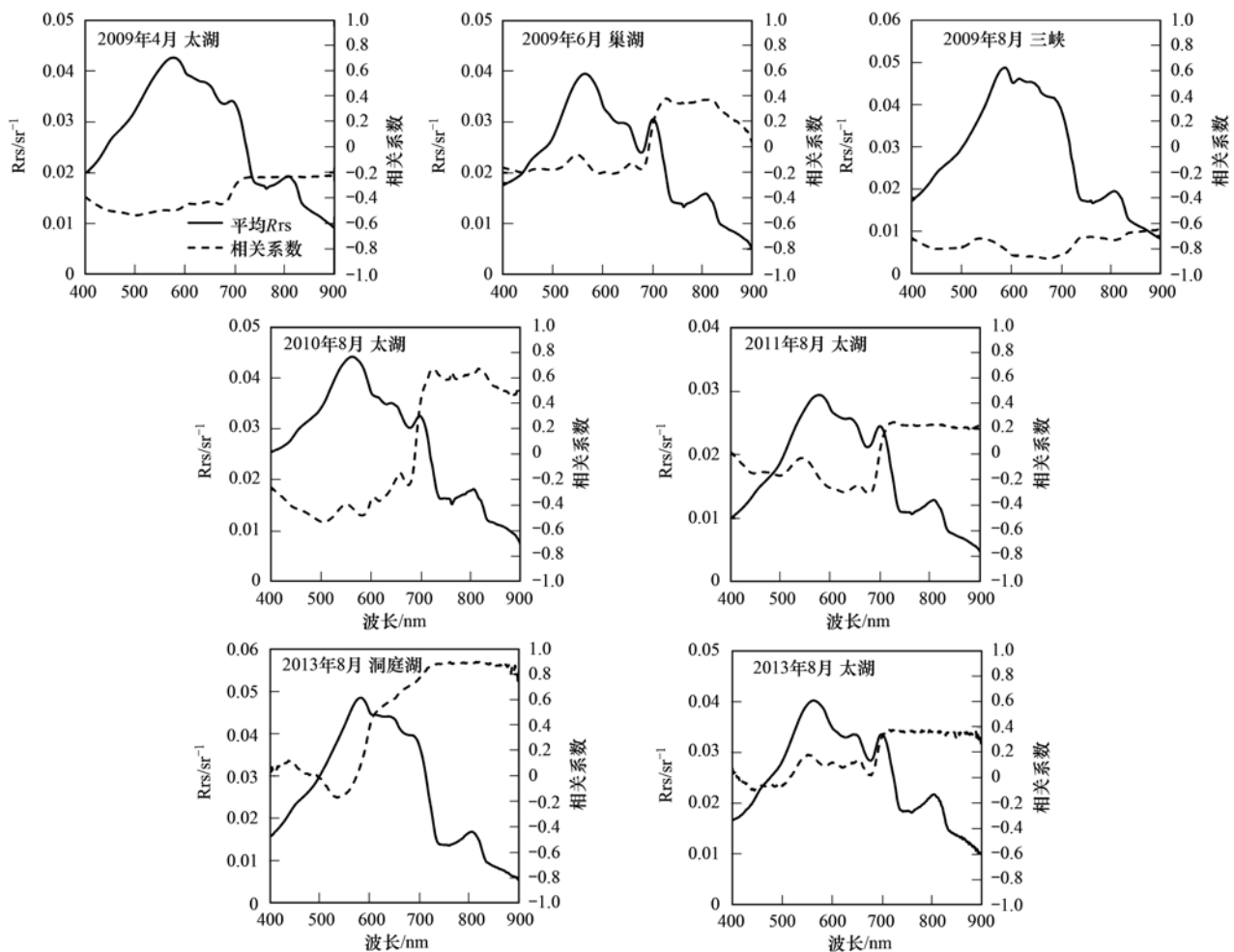


图3 7 个数据集的遥感反射率数据及各个波段与叶绿素 a 浓度的相关系数

Fig. 3 Rrs spectrums of 7 datasets and their correlation coefficients with chlorophyll-a concentrations

右几乎没有荧光峰信息,叶绿素 a 浓度敏感波段移动到 600 nm 左右,与其余数据集有较大差异;相关性最高的数据集是 2013 年 8 月洞庭湖数据集,在 700 nm 左右,遥感反射率与叶绿素 a 浓度相关系数达到 0.8 左右,并在长波段持续保持在较高水平;其余太湖 8 月数据集的相关性曲线体现出较为统一的特征,高相关系数都出现在近红外波段,在 710 nm 左右有一个小峰值. 与刘忠华^[18]的研究结论相似.

总的来看,7 个数据集体现出比较复杂的光学性质,仅从相关系数确立统计模型,缺乏有力的支撑.

2.2 色素颗粒物吸收系数斜率

所有采样点的色素颗粒物吸收系数曲线如图 4 所示. 色素颗粒物吸收系数在 440 nm 出现一个峰值,该峰值由叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 c、类胡萝卜素和其它辅助色素共同引起的. 480 nm 附近,由于 β 胡萝卜素的吸收作用,吸收系数呈现肩状;550 nm 附近由于各种色素在绿光波段的弱吸收使得吸收系数在该处出现一极小值;550 nm 之后吸收系数逐渐增大,至 625 nm 附近由于藻蓝蛋白色素的吸收而出现一个小的峰值(仅部分吸收系数曲线值较高的样点体现出该特征);最后,在 675 nm 附近存在明显的吸收峰,该峰值主要归因于叶绿素 a 的吸收作用^[18, 37, 38];在 700 nm 之后,色素颗粒物吸收作用明显减弱,吸收系数曲线急速下降,趋近于 0.

将所有样点每个波段的色素颗粒物吸收系数,与 680 nm 处进行相关分析,结果如图 4 所示. 从中可以看出,相关系数从 400 nm 开始,随波长增加,开

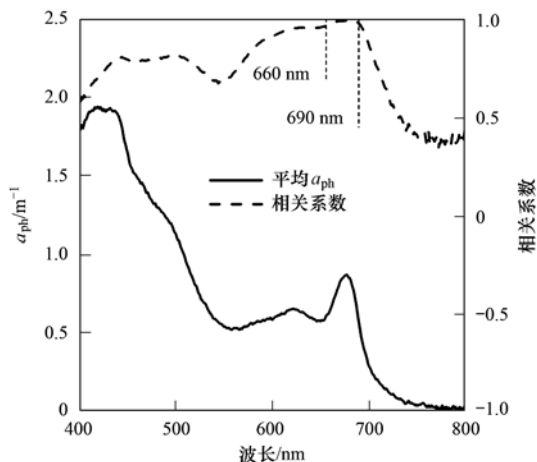


图 4 所有样点各个波段处的色素颗粒物吸收系数及与 680 nm 吸收系数的相关性

Fig. 4 The a_{ph} spectrums of all sampling stations and their correlation coefficients with $a_{ph}(680)$

始从 0.6 左右逐步增加;至 500 nm 左右,收到色素弱吸收的影响,相关系数开始下降,直至 550 nm 达到谷值,接近 0.6;之后逐步升高,在 660 ~ 690 nm 之间达到最大,相关系数均在 0.9 以上;随着波长进一步增加,色素吸收作用迅速减弱,相关系数曲线也开始急剧下降,到 780 nm 左右达到最低点. 由此可见, $a_{ph}(660)$ 与 $a_{ph}(680)$ 之间相关性极高.

基于以上结果,绘制了所有样点 $a_{ph}(660)$ 与 $a_{ph}(680)$ 的散点图,如图 5 所示. 从中可以看出,在截距为 0 的情况下,660 nm 与 680 nm 处的色素颗粒物吸收系数的线性决定系数达到 0.967. 因此可以认为,在本研究中, $\varepsilon_{a_{ph}}(680,660) = 1.351$. GOCI 三波段模型假设合理.

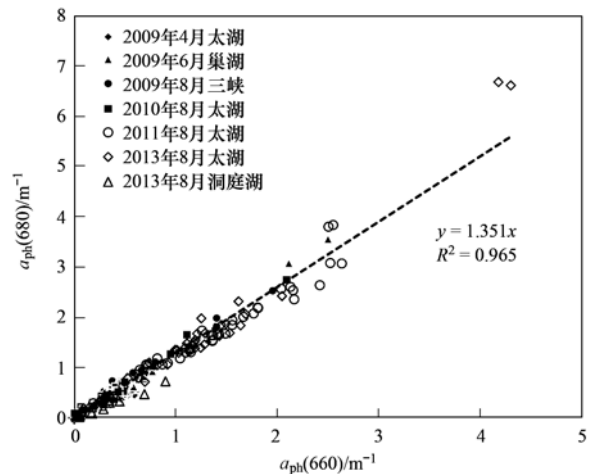


图 5 $a_{ph}(660)$ 与 $a_{ph}(680)$ 的统计关系

Fig. 5 Statistical relationship between $a_{ph}(660)$ and $a_{ph}(680)$

2.3 模型的构建及评价

为了体现 GOCI 三波段算法的精度,将其与标准 MERIS 三波段算法和 GOCI 波段比值算法进行对比. 3 个算法的建模数据如图 6 所示. 从中可见,从整体来看,GOCI 三波段模型散点与 MERIS 三波段模型较为接近,二者拟合效果均较理想. 其中 GOCI 三波段模型线性决定系数为 0.809,略低于 MERIS 三波段模型的 0.820,但相对于 GOCI 比值算法($R^2 = 0.450$)有显著提高.

对于 GOCI 比值模型而言,最明显的离群值出现在叶绿素 a 浓度低值区,如图 6(c) 中虚框区域所示,在该区域中,叶绿素 a 浓度变化很小,集中在 $0 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,而比值模型自变量动态范围很大,涵盖了 0.2 ~ 0.8 左右的自变量范围,大于模型整体自变量范围的一半. 在模型应用时难免造成大量高估. 这主要是因为模型依赖两个波段的比值,

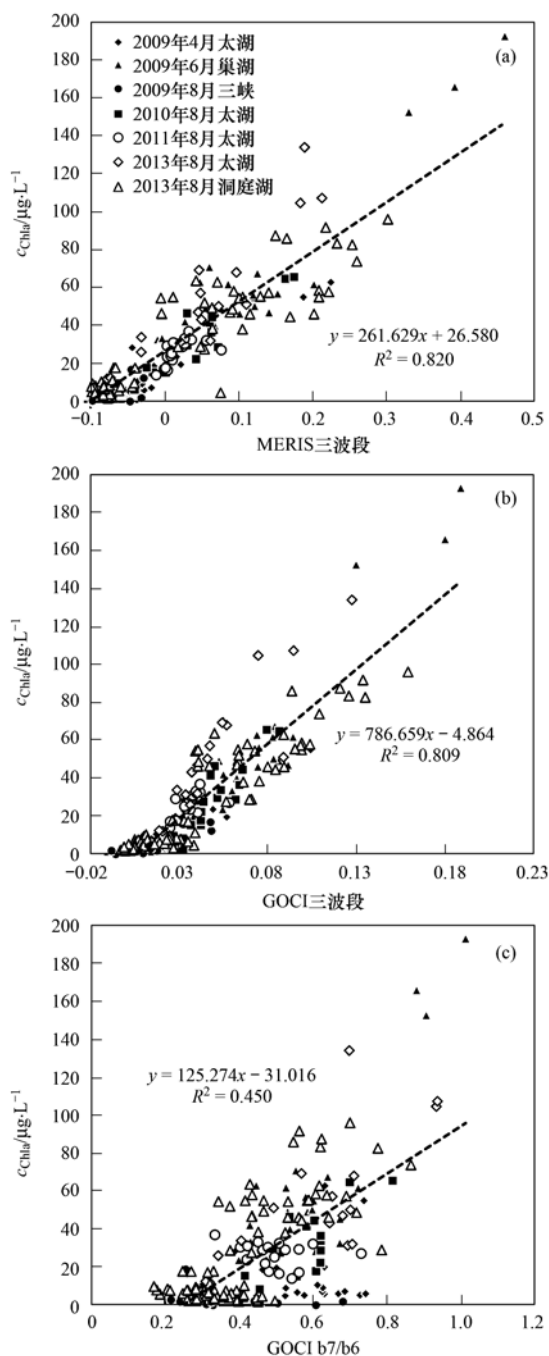


图6 模型散点图

Fig. 6 Scatter plots of different models

且两个波段波长距离比较远的情况下,难以有效去除后向散射的影响,进而影响自变量对叶绿素 a 浓度的解释. 从另外一个角度来看,低值区多数点位属于 2009 年 4 月太湖数据集和 2009 年 8 月三峡水库数据集,图 3 表明这两期数据的反射率信息与叶绿素 a 浓度正相关性很低,其中三峡水库各个波段都与叶绿素 a 浓度呈负相关关系,这也在一定程度上解释了构建模型时的异常情况;从统计意义上来看,三峡水库的数据与其余样区数据体

现出相反的特征,因此难以用统一的模型对其进行表达.

从 MERIS 三波段模型的散点图[图 6(b)]来看,新波段的引入能够有效避免 GOCI 波段比值模型中的问题,消除后向散射的影响,使自变量对叶绿素 a 浓度的解释能力显著提高. 图 6(c)中在叶绿素 a 浓度低值区自变量出现的“扩散”现象得到有效抑制.

GOCI 三波段模型效果与 MERIS 十分接近,表明模型中对 λ_2 波段位置的修改是有效且成功的. 但其效果略差于 MERIS 三波段模型. 因为相对于 MERIS 三波段模型, GOCI 三波段模型的假设会带来更显著的误差;从图 4 可以看出, α_{ph} 在大于 710 nm 波长之后,几乎为零(红色均值曲线);而图 5 表明,虽然所有样点吸收系数的线性相关性极高,仍有一些数据体现出斜率的微弱差异(如太湖 2011 年 5 月数据),这种差异会最终体现在模型的构建中.

3 个模型的叶绿素 a 浓度估算误差如表 2 所示. 其中将 MAPE 分为叶绿素 a 浓度高值区和低值区两个部分,以便于分析误差分布. 总体上,模型误差与建模精度有较好的一致性: MERIS 三波段模型误差最小, GOCI 三波段模型误差略大, GOCI 比值模型误差最大. 从 MAPE($c_{Chla} < 10$)来看, 3 个模型效果都较差,这是受叶绿素 a 浓度测量误差与模型适用范围^[39]的影响,但仍然可以看出, GOCI 三波段模型的误差与 MERIS 三波段模型接近,都明显优于 GOCI 比值算法. 从 MAPE($c_{Chla} \geq 10$)来看, GOCI 比值模型误差为 0.426, GOCI 三波段模型为 0.325,提高了 23% 左右,相对于 MERIS 三波段模型的 0.265, GOCI 三波段模型高了 18% 左右. 从 RMSE 来看, GOCI 比值模型误差为 $19.138 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, GOCI 三波段模型为 $16.308 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,降低了 14% 左右,相对于 MERIS 三波段模型的 $15.171 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, GOCI 三波段模型高了 6% 左右.

综上所述, GOCI 三波段模型可以得到与 MERIS 三波段模型接近的效果,无论从建模的确定性还是验证误差的大小,均明显优于目前广泛使用的 GOCI 波段比值算法.

2.4 GOCI 影像验证及应用

2.4.1 大气校正精度

将 2013 年 5 月 13 日的八景 GOCI 影像大气校正的结果,与 10 个地面实测点的光谱数据进行对比. 每个采样点都与时间上最邻近的图像进行对比,结果如表 3 所示.

表 2 模型误差

Table 2 Model errors

模型	自变量	表达式	MAPE ($c_{\text{Chla}} < 10$)	MAPE ($c_{\text{Chla}} \geq 10$)	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
GOCI 三波段	$(1/\text{B680}-1/\text{B660}) \times \text{B745}$	$y = 786.659x - 4.864$	1.668	0.325	16.308
MERIS 三波段	$(1/\text{B681}-1/\text{B708}) \times \text{B753}$	$y = 261.629x - 26.580$	1.560	0.265	15.171
GOCI 比值	$\text{B745}/\text{B680}$	$y = 125.274x - 31.016$	2.409	0.426	19.138

表 3 大气校正误差

Table 3 Atmospheric correction errors

波段	MAPE	RMSE/ sr^{-1}
B412	0.423	8.030×10^{-3}
B443	0.239	6.146×10^{-3}
B490	0.127	4.436×10^{-3}
B555	0.127	5.550×10^{-3}
B660	0.140	4.393×10^{-3}
B680	0.133	3.862×10^{-3}
B745	0.238	2.528×10^{-3}
B865	0.301	1.677×10^{-3}
平均	0.216	4.578×10^{-3}

从表 3 可以看出,大气校正效果整体较好,其中 B412 波段误差较高,MAPE 达到 0.423, RMSE 为 $8.030 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$,其余波段误差均较低. 本研究中涉及到的 B660、B680 和 B745 这 3 个波段的 MAPE 都在 0.3 以下, RMSE 都在 $5 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$ 以下,精度较高.

2.4.2 影像估算精度

将 GOCI 三波段模型和波段比值模型分别应用于 2013 年 5 月 13 日获取的 8 景 GOCI 影像,计算太湖叶绿素 a 浓度,并将与采样点时间最接近的影像估算得到的叶绿素 a 浓度,与实测叶绿素 a 浓度进行对比. 结果如图 7 所示,可以看出, GOCI 三波段算法较为均匀的分布在 1:1 线附近,而 GOCI 波段比值算法有较明显的低估现象. 通过精度指标的计算,发现 GOCI 三波段算法的 MAPE 和 RMSE 分别为 0.380 和 $6.092 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而 GOCI 波段比值算法则分别为 0.423 和 $9.070 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 实测数据验证表明 GOCI 三波段算法具有更高的精度.

由于每天 8 景影像中,两种算法得到的结果差别类似,因此仅列举出 11:00 的影像进行说明,结果如图 8 所示. 其中图 8(a)为太湖地区 2013 年 5 月 13 日的 GOCI 标准假彩色合成图像,图 8(b)为 GOCI 三波段估算结,图 8(c)为 GOCI 三波段估算结果,图 8(d)为三波段算法估算结果与波段比值算法估算结果的比值. 从假彩色合成图像中可以看到太湖北部,竺山湾、梅梁湾、贡湖湾北部水体以及

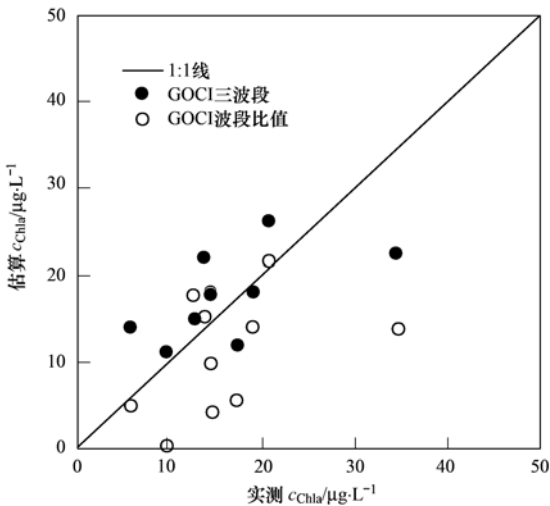


图 7 GOCI 三波段模型和比值模型的影像验证结果

Fig. 7 GOCI image validation result of the three band model and band ratio model

部分沿岸水体影像偏红. 从 GOCI 三波段估算结果和 GOCI 波段比值估算结果中,可以看出叶绿素 a 浓度高值区都集中在竺山湾、梅梁湾和贡湖湾水域中. 两种算法在高值区的结果较接近,但 GOCI 波段比值算法在低值区,即湖心区至南部沿岸区域间的大面积水体中,得到的结果较为集中,空间变化不明显. 而 GOCI 三波段算法得到的结果空间差异显著增大. 为了更直观地观察两种算法的差异,对生产得到的叶绿素 a 浓度影像进行比值计算, GOCI 三波段叶绿素 a 浓度与波段比值叶绿素 a 浓度的比值结果如图 8(d)所示. 可见,在竺山湾、梅梁湾以及贡湖湾,叶绿素 a 浓度较高的水体中,两种算法结果较为接近,在湖心区大面积水域, GOCI 比值算法得到的结果明显低于 GOCI 三波段算法,在湖区西湖最为明显,二者差异达到 5 倍以上. 结合图 7 的估算结果,认为 GOCI 波段比值算法在该期影像的应用中,对太湖大面积水域的叶绿素 a 浓度产生严重低估, GOCI 三波段算法的结果更可信,适用性更强.

2.4.3 叶绿素 a 浓度时空变化

利用 GOCI 三波段模型,基于 2013 年 5 月 13 日太湖 8 景 GOCI 影像,得到 2013 年 5 月 13 日太湖叶

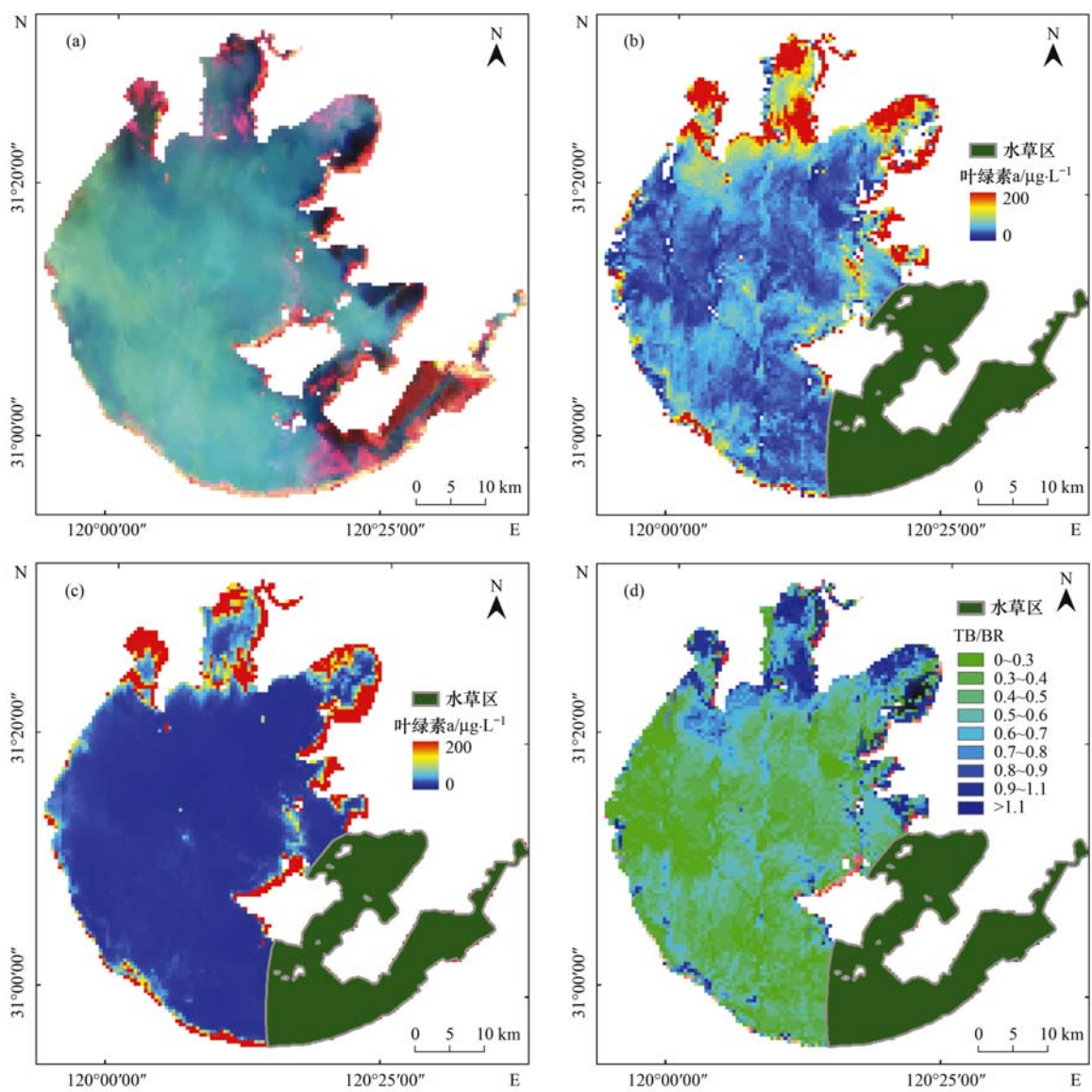


图 8 GOCI 影像叶绿素 a 浓度估算结果

Fig. 8 Chlorophyll-a concentration maps that yielded by GOCI image data

叶绿素 a 浓度时空分布情况,如图 9 所示.从中可以看出:整体上,太湖叶绿素 a 浓度在 2013 年 5 月 13 日当天,呈现逐渐增加的趋势,湖心区叶绿素 a 浓度从 08:00 的 $5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,逐渐升高到 15:00 的 $20\sim40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.其中 08:00~11:00 之间的升高趋势更明显.与此同时,太湖北部梅梁湾、贡湖湾沿岸湖区的叶绿素 a 浓度也有逐渐增加的趋势,高值区(叶绿素 a 浓度 $>100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)面积有所增长.但南部沿岸湖区的高值区面积却明显减少.这是由于受东南风影响,南部沿岸湖区聚集的藻类被驱散,而更多的藻类向梅梁湾、竺山湾湖区聚集.

3 结论

(1)680 nm 色素颗粒物吸收系数与 660~690

nm 波段间的色素颗粒物吸收系数相关性极高,且 680 nm 色素颗粒物吸收系数与 660 nm 色素颗粒物吸收系数比值固定.

(2)适用于 GOCI 数据的三波段模型无论从建模数据集还是验证数据集来看,都与 MERIS 三波段模型效果接近,明显优于 GOCI 波段比值模型.

(3)新建立的模型克服了 GOCI 影像波段设置的劣势,为高时间分辨率、高精度的内陆湖泊水体叶绿素 a 浓度监测提供技术支持.

(4)GOCI 影像的独立验证结果表明,GOCI 波段比值算法会对太湖叶绿素 a 浓度低值区造成显著的低估现象,GOCI 三波段算法得到的结果更可信.

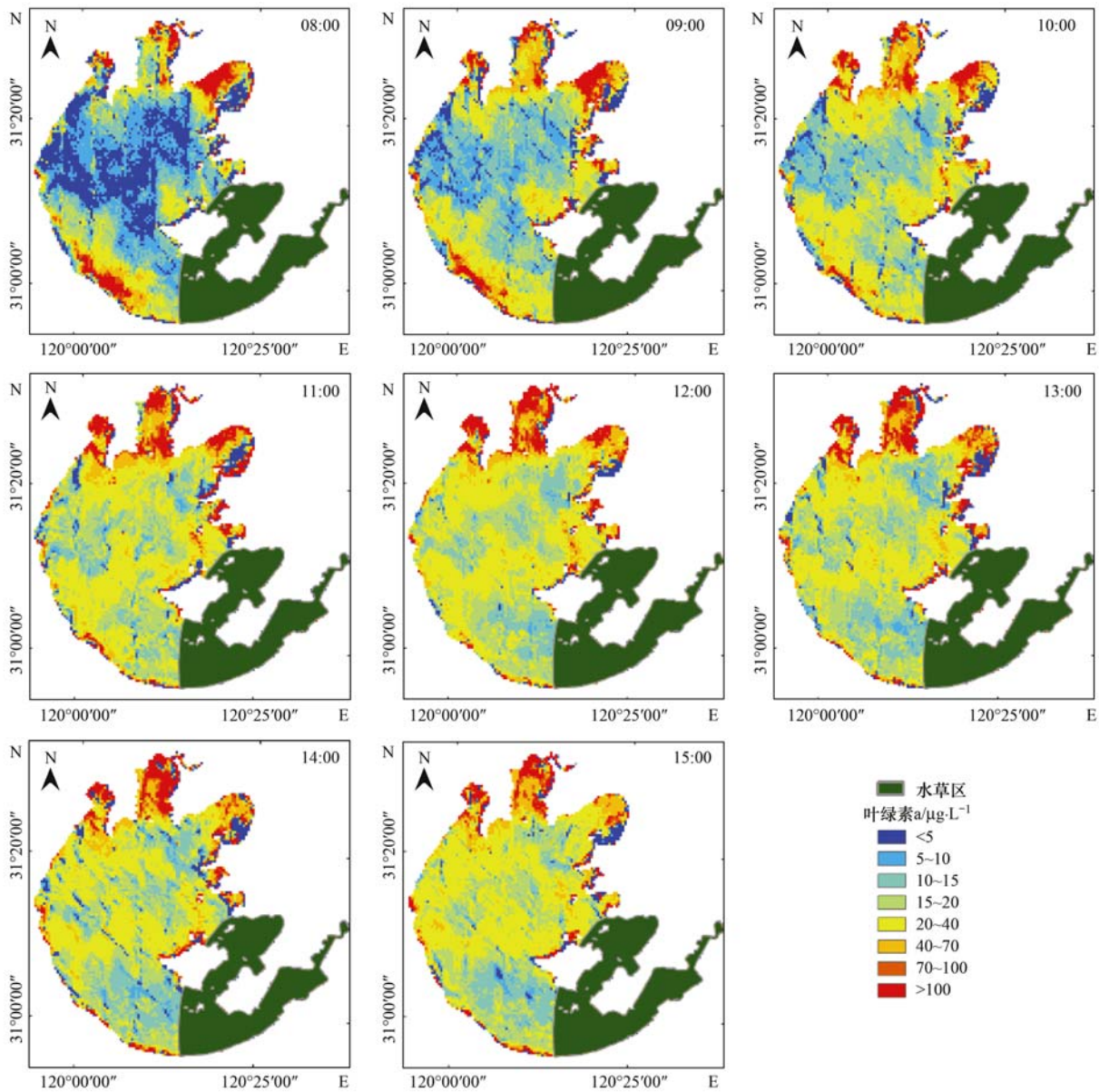


图9 2013年5月13日太湖叶绿素a浓度分布

Fig. 9 The c_{Chla} distribution at May 13, 2013 of Taihu Lake

参考文献:

[1] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 湖泊富营养化状态的地面高光谱遥感评价[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1770-1775.

[2] 徐伟凡, 李云梅, 王桥, 等. 基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 81-93.

[3] 金相灿, 屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[4] 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.

[5] Odermatt D, Gitelson A, Brando V E, et al. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 116-126.

[6] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. 遥感学报, 2006, 10(2): 169-175.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 周冠华, 柳钦火, 马荣华, 等. 基于半分析模型的波段最优化组合反演混浊太湖水体叶绿素a[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 152-159.

[10] 杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化的太湖水体叶绿素a浓度模型反演[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(5): 597-603.

- [11] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 412-422.
- [12] Dall'Olmo G, Gitelson A A. Effect of bio-optical parameter variability and uncertainties in reflectance measurements on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: modeling results[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(15): 3577-3592.
- [13] Le C F, Li Y M, Zha Y, *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(6): 1175-1182.
- [14] Härmä P, Vepsäläinen J, Hannonen T, *et al.* Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3): 107-121.
- [15] 马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(2): 97-103.
- [16] 周正, 何连, 刘良明. 基于 HJ-1A/B CCD 数据的东湖叶绿素 a 浓度反演可行性研究[J]. *测绘通报*, 2011, (3): 11-14.
- [17] 陈静, 吴传庆, 王颖, 等. 基于环境一号卫星 CCD 数据的巢湖叶绿素 a 的动态监测[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(1): 116-119.
- [18] 刘忠华. 基于高分数据的太湖重点污染入湖河流叶绿素 a 浓度遥感反演[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- [19] 杜聪, 王世新, 周艺, 等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2904-2910.
- [20] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, *et al.* HICO-Based NIR-Red models for estimating chlorophyll-a concentration in productive coastal waters[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(6): 1111-1115.
- [21] 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.
- [22] Li Y M, Wang Q, Wu C Q, *et al.* Estimation of chlorophyll a concentration using NIR/red bands of MERIS and classification procedure in inland turbid water[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(3): 988-997.
- [23] Yang W, Matsushita B, Chen J, *et al.* An enhanced three-band index for estimating chlorophyll-a in turbid case-II waters: case studies of Lake Kasumigaura, Japan, and Lake Dianchi, China[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **7**(4): 655-659.
- [24] Duan H T, Ma R H, Zhang Y Z, *et al.* A new three-band algorithm for estimating chlorophyll concentrations in turbid inland lakes[J]. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**(4): 044009.
- [25] 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.
- [26] 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>, 2014-1-14.
- [27] 孙绍杰. 基于 GOCI 的太湖水体叶绿素 a 浓度估算及其昼变化特征分析. 南京: 南京大学, 2013.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Huang C C, Zou J, Li Y M, *et al.* Assessment of NIR-red algorithms for observation of chlorophyll-a in highly turbid inland waters in China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **93**: 29-39.
- [31] 李渊. 基于数据同化的太湖叶绿素遥感估算与预测[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [32] 黄昌春. 顾及颗粒物垂直分布的太湖水体组分生物光学模型反演研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [33] Shen F, Zhou Y X, Li D J, *et al.* Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) estimation of chlorophyll-a concentration in the turbid sediment-laden waters of the Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(17-18): 4635-4650.
- [34] Smyth T J, Moore G F, Hirata T, *et al.* Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: description, implementation, and performance assessment: erratum[J]. *Applied Optics*. 2006, **46**(3): 429-430.
- [35] Chen J, Cui T W, Qiu Z F, *et al.* A three-band semi-analytical model for deriving total suspended sediment concentration from HJ-1A/CCD data in turbid coastal waters[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **93**: 1-13.
- [36] 焦红波, 查勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(2): 242-248.
- [37] Haardt H, Maske H. Specific in vivo absorption coefficient of chlorophyll a at 675 nm[J]. *Limnology and Oceanography*, 1987, **32**(3): 608-619.
- [38] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[D]. Amsterdam: Vrije Universiteit, 1993.
- [39] Moore T S, Dowell M D, Bradt S, *et al.* An optical water type framework for selecting and blending retrievals from bio-optical algorithms in lakes and coastal waters[J]. *Remote sensing of Environment*, 2014, **143**: 97-111.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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