

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

Pantoea sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析

刘阁¹, 李云梅^{1,2*}, 吕恒¹, 牟蒙¹, 雷少华¹, 温爽¹, 毕顺¹, 丁潇蕾¹

(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 (Chl-a) 浓度是衡量藻类生物量及评价水体营养状态的重要指标。基于洪泽湖 2016 年 7 月、2016 年 12 月共 49 个实测水质参数与同步光谱数据, 验证了 5 种可应用于 MERIS/OLCI 数据的 Chl-a 遥感估算模型 (包括波段比值模型、三波段模型、FLH 模型、MCI 模型以及 UMOc 模型) 在洪泽湖水域的适用性。结果表明, UMOc 模型是最适用于洪泽湖水域的 Chl-a 浓度估算模型, 其平均相对误差为 32.30%, 低于波段比值模型的 75.17%, 三波段模型的 62.44%, FLH 模型的 45.87% 和 MCI 模型的 56.95%。进而利用 UMOc 模型, 结合 MERIS 数据, 获取了洪泽湖 2002~2012 年 Chl-a 浓度遥感估算产品, 并分析了洪泽湖 Chl-a 浓度的时空变化规律。洪泽湖 Chl-a 浓度具有明显的时空差异性。依据水体像元长时间序列月平均 Chl-a 浓度的差异, 将洪泽湖水体分为了区域 A、区域 B 和区域 C 这 3 种类型。区域 B 和区域 C 水体无明显变化趋势, 区域 A 则显著增加。与气象因子的相关性分析表明, 区域 B 和区域 C 年平均 Chl-a 的波动主要受年降水量的影响, 反映了该 2 个区域 Chl-a 浓度的变化主要受潮流强度的控制, 区域 A 年平均 Chl-a 浓度的变化与年平均风速呈显著负相关性, 风速下降的气候大背景可能会加重这一区域的富营养化程度, 威胁南水北调的水质安全。此外, 在汛期 (7~9 月) 洪泽湖水体 Chl-a 浓度与离淮河口湖口的距离呈显著的正相关关系, 证明了这一时期淮河对洪泽湖藻类浓度具有明显的抑制作用。

关键词: 叶绿素 a; 洪泽湖; 时空变化; MERIS; 气候变化; 淮河

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3645-12 DOI: 10.13227/j.hjks.201702192

Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations

LIU Ge¹, LI Yun-mei^{1,2*}, LÜ Heng¹, MU Meng¹, LEI Shao-hua¹, WEN Shuang¹, BI Shun¹, DING Xiao-lei¹

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

Abstract: Chlorophyll-a (Chl-a) concentrations are usually measured as the proxy of phytoplankton biomass and used to evaluate the trophic status of inland waters. Based on 49 *in situ* samples taken from two measurement campaigns in Lake Hongze in 2016, we evaluate the performance of five Chl-a estimation algorithms (including the band ratio, three-band, FLH algorithm, MCI, and UMOc algorithms). The results showed that the UMOc model was the most suitable model for the estimation of Chl-a in Lake Hongze. The mean relative error (MRE) of UMOc was 32.30%, much lower than the band ratio algorithm (75.17%), three-band algorithm (62.44%), FLH algorithm (45.87%), and MCI algorithm (56.95%). The best-performing UMOc model was applied to the atmospherically corrected 689 MERIS images between 2002-2012 and long time series MERIS Chl-a concentration estimation products were acquired. Between 2002 and 2012, the mean Chl-a concentration in Lake Hongze was 19.560 mg·m⁻³ with substantial spatial and temporal variability. Based on the variability of monthly mean Chl-a concentrations in each pixel, the Lake Hongze waterbody was divided into three water types, Region A, Region B, and Region C. The annual mean Chl-a concentrations of Region B and Region C showed no significant changes, while the concentrations in Region A increased markedly. The analysis of the meteorological factors showed that the fluctuations of the annual mean Chl-a concentrations in Region B and Region C were mainly affected by annual precipitation, suggesting that the Chl-a concentrations of these two regions are dominated by the intensity of the lake flow. The annual mean Chl-a concentrations of Region A showed a strong negative correlation with the annual mean wind speed. The descending trend of the annual wind speed may enhance the eutrophication degree of this region, threatening the safety of the water quality of the South-North Water Transfer Project. The Chl-a concentrations showed a strong positive correlation with the distance from the Huaihe Estuary in the wet season suggesting that the Huaihe River has an obvious inhibitory effect on algal biomass in Lake Hongze during this period.

Key words: chlorophyll-a; Lake Hongze; spatial-temporal variation; MERIS; Climate Change; Huaihe River

收稿日期: 2017-02-27; 修订日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671340); 国家重点研发计划项目(2017YFB0503902)

作者简介: 刘阁(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: liugers@163.com

* 通信作者, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

叶绿素 a (Chl-a) 浓度是藻类生物量重要指标, 是水质的重要表征参数, 也是我国水环境必须监测的指标^[1]. 湖泊 Chl-a 浓度的调查不仅可以确定水体的营养状态, 为湖泊治理和渔业资源管理提供基础信息, 而且有助于深刻理解和研究湖泊生态系统的生物地球化学循环过程以及其对气候变化的响应等^[2, 3]. 传统的野外采样-实验室分析方法往往只能以点带面研究整体情况, 难以从长时间序列、全空间尺度了解水体藻类生物量的变化趋势及成因. 特别是对太湖、巢湖、洪泽湖等水环境时空异质性较强的水体, 传统调查方法的不足尤为突出. 近 40 年来, 随着遥感技术的发展以及水色卫星的相继发射为快速获得大范围的水体藻类生物量信息提供了可能. 利用遥感技术估算湖泊水体长时间序列的 Chl-a 浓度, 掌握其时空分布与变化特征以及影响因素, 对湖泊生态系统演化研究、环境管理和渔业养殖具有重要的意义.

国内外已经开展了大量的基于遥感数据的内陆水体 Chl-a 浓度时空变化相关研究. Groom 等^[4] 联合使用 SeaWiFS 影像和 MODIS 影像反演了 1997 ~ 2004 年 Cyprus Eddy 附近的 Chl-a 浓度, 并分析了该区域 Chl-a 浓度的季节变化和年变化. Gordoa 等^[5] 利用 MERIS 一类水体产品数据分析了地中海西北部 Catalan 海域 2002 ~ 2005 年 Chl-a 浓度的月度和年度变化. Abdul-Hadi 等^[6] 利用 2003 ~ 2009 年 7 a 的 MODIS 遥感影像估算了 Sabah 岛附近的 Chl-a 浓度, 并分析了该水域 Chl-a 浓度的变化与亚洲季风的关系. Le 等^[7] 构建了 RGCI 算法利用 2002 ~ 2012 年的 MODIS 影像实现了 Tampa 湾的 Chl-a 浓度估算, 其结果表明 Tampa 湾 Chl-a 浓度具有较大的时空差异性并且其浓度受风速和当地洪水排放影响显著. Zhang 等^[8] 构建了基于软分类的太湖水体 Chl-a 浓度遥感反演策略以及创新了矢量边界辅助下的水体自动提取方法, 进而利用 MERIS 数据反演了太湖 2003 ~ 2011 年的 Chl-a 浓度并分析了太湖长时间序列的分布规律以及发展趋势. Feng 等^[9] 构建了 NGRDI 指数, 利用 2003 ~ 2011 年 MERIS 影像实现了鄱阳湖 Chl-a 浓度的遥感估算, 其研究表明这 11 a 中鄱阳湖 Chl-a 浓度并没有显著增加或者减少的趋势. Palmer 等^[10] 基于 2003 ~ 2011 年 MERIS 影像利用 FLH 指数反演得到了 Balaton 湖长时间序列的 Chl-a 浓度产品, 并分析了该湖藻类生物量的物候变化特征. Giittings 等^[11] 利用 SeaWiFS、MODIS、MERIS 融合得到的 OC-Colour 产品影像数据分析了亚丁湾

1997 ~ 2012 年 Chl-a 浓度的时空变化, 其研究结果表明亚丁湾浮游藻类生物量的时空分布与水文物理环境的变化密切相关, 其中最主要的驱动因素是季风的变换.

洪泽湖是我国第四大淡水湖, 位于江苏省北部, 淮安、宿迁市境内, 是一个典型的浅水吞吐湖泊. 对于洪泽湖流域来说, 洪泽湖具有调节洪涝干旱、航行运输、纳污净水、渔业养殖和调节气候等功能; 同时也是南水北调东线工程最大的调蓄湖泊和重要的过水通道, 其水质状况与千千万万人的生产生活息息相关^[12]. 因而, 全面认识洪泽湖的水体营养状态和藻类时空变化对于供水安全及深入理解洪泽湖生态系统结果演化具有十分重要的意义^[13]. 目前用于内陆湖泊水体遥感监测的数据主要有 MODIS、Landsat 系列、GOCI 及 MERIS 等卫星影像. 然而, 综合考虑波段设置及时间分辨率等因素, MERIS 是最合适内陆湖泊水体 Chl-a 浓度遥感估算的影像数据, 其波谱范围为 412 ~ 900 nm, 共有 15 个波段, 波谱分辨率变化范围为 7.5 ~ 20 nm^[14, 15]. 自 2002 年发射以来, MERIS 可为洪泽湖水质监测提供超过 10a 的历史观测数据. 2016 年 Sentinel-3A 卫星发射成功, 其搭载的 OLCI 传感器将会继承 MERIS 地球观测的使命. 本研究尝试根据实测水质参数以及同步光谱数据, 探究现有 5 种常用 Chl-a 浓度估算模型在洪泽湖适用性, 用以选取最优 Chl-a 浓度模型; 结合 2002 ~ 2012 年 MERIS 影像数据, 获得近 10 年洪泽湖 Chl-a 浓度遥感估算产品, 分析洪泽湖 Chl-a 浓度的空间分布规律和变化趋势, 以期为洪泽湖富营养化的常规监测与评价提供历史参考.

1 材料与方法

1.1 水质数据采样与分析

分别于 2016 年 7 月、2016 年 12 月对洪泽湖进行 2 次采样, 共采集 49 个样本, 样点分布如图 1 所示. 测量及记录的参数包括样点经纬度信息、遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda)]$ 、Chl-a 浓度、总悬浮物 (TSM) 浓度、无机悬浮物 (ISM) 浓度、水体透明度 (SDD) 等.

1.1.1 遥感反射率

采用 FieldSpec spectroradiometer (Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder, CO, USA) (ASD) 测量遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda)]$. ASD FieldSpec 的波段范围为 350 ~ 1 050 nm, 光谱分辨率为 2 nm. 在采集的过程中, 为了避免水体镜面反射和船体阴影对测量结果的影响, 以更好地提取出反映水体信息

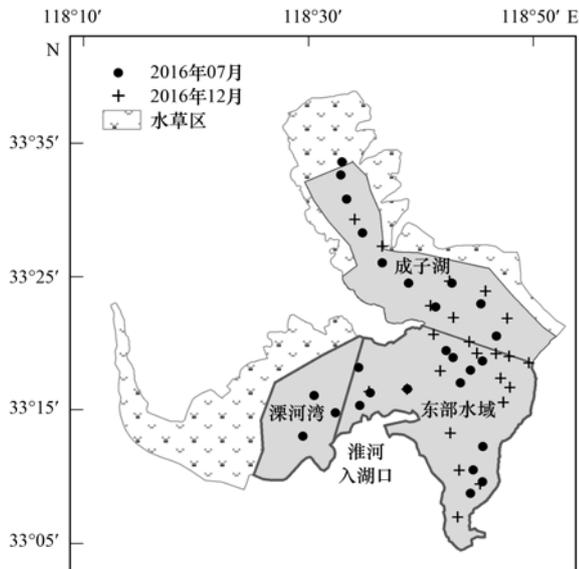


图1 研究区及水质监测点分布示意

Fig. 1 Study area and water sampling sites

的离水辐亮度,测量时采用一定的观测角度进行水体光谱观测. ASD FieldSpec 仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 $90^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$ (背对太阳方向), 仪器与水面法线方向的夹角为 $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$. 天空光也存在反射,必须将这部分信息剔除才能得到更为准确的水体信息,因此在仪器完成面向水体测量后,须将仪器在观测平面内向上旋转特定角度(使得天空光的观测天顶角等于水面测量时的观测角)测量天空光辐射信号. 在测量水体前和测量天空光后,都需要测量灰板(反射率为 30%)的辐亮度信号. 每个采样点那都需要测量 10 条以上的光谱信息. 基于 ASD FieldSpec 的遥感反射率计算过程如下.

(1) 计算离水辐亮度 L_w :

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky} \quad (1)$$

式中, L_w 为离水辐亮度, L_{sw} 为水体总辐射亮度,为天空漫散射辐亮度, r 为气-水界面对天空光的反射率,其值受太阳位置、观测几何、风速、风向以及水面粗糙度等的影响. 在上述观测几何条件下,平均水面可取值为 0.022, 风速为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 r 取值为 0.025, 风速在 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时可取值为 0.026 ~ 0.028.

(2) 水面总入射辐照度 $E_d(0^+)$ 可以通过测量标准灰板的反射得到:

$$E_d(0^+) = L_p \times \pi / \rho_p \quad (2)$$

式中, L_p 为标准灰板的辐亮度, ρ_p 为灰板的反射率.

(3) 水体的遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$ 可通过式(3)计算.

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+) \quad (3)$$

1.1.2 Chl-a 浓度测量

Chl-a 浓度测量采用了热乙醇-分光光度计法. 首先利用 47 mm GF/F 滤膜过滤一定体积的水样, 将滤膜对折放入棕色小瓶中, 将棕色小瓶置于冰箱中冷冻 48 h 以上, 冷冻温度控制在 -20 . 冷冻结束后, 在棕色小瓶中加入 90% 浓度的 80 热乙醇, 避光萃取 4 ~ 6 h. 再利用 25 mm GF/F 膜过滤萃取的溶液, 装入比色皿中, 在分光光度计上测量 665 nm 和 750 nm 处的吸光度 (E_{665} 和 E_{750}). 测量完成后取出比色皿, 滴入 1 滴 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}$ 的稀盐酸, 酸化 1 min 后去除脱镁叶绿素, 再次测定 665 nm 和 750 nm 处的吸光度 (A_{665} 和 A_{750}), 进而根据式(4) 计算得到 Chl-a 浓度.

$$\text{Chl-a} = 27.9 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V_B / (V \times \delta) \quad (4)$$

式中, V_B 为乙醇定容体积, V 为水样体积, δ 为比色皿光程.

1.1.3 悬浮物浓度测量

TSM、ISM 和 OSM 浓度根据 GB 11901-89 标准, 采用干燥、烘烧、称重法进行测定. 首先对 $0.45 \mu\text{m}$ GF/F 滤膜进行烧膜处理以去除膜上附有的有机质及水分. 将冷却后的膜进行称重, 将称重好的膜用来过滤水样. 量取一定体积的水样, 利用过滤器进行过滤, 对滤膜进行烘干称重. 利用含有 TSM 的膜的重量减去膜重得到 TSM 的重量, 再利用该质量除以水样的体积, 得到 TSM 浓度. 最后利用 550°C 高温烘烧载有 TSM 的膜, 去除 OSM, 称重得到 ISM 重量, 经计算得到 ISM 和 OSM 浓度.

1.2 气象数据

本研究所用盱眙站气象数据从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 下载得到. 包括月平均温度、月降水量, 月平均风速, 年平均降水量等数据, 时间跨度为 1957 ~ 2015 年.

1.3 MERIS 影像及预处理

2002 ~ 2012 年覆盖洪泽湖区域的 MERIS RR L1A 影像从 GSFC (U. S NASA Goddard Flight Space Center, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) 下载得到. 首先对 MERIS 数据进行筛选, 保留无云、卫星观测角较为理想的数据, 共得到 689 景影像, 影像的时间分布如图 2 所示. 利用 SeaDAS 7.2 对 MERIS L1A 影像数据进行辐射定标、几何校正、大气校正, 其中大气校正采用的算法为 MUMM 模型.

1.4 MERIS Chl-a 浓度估算算法

本研究共选取了 5 种 Chl-a 浓度估算算法, 利用

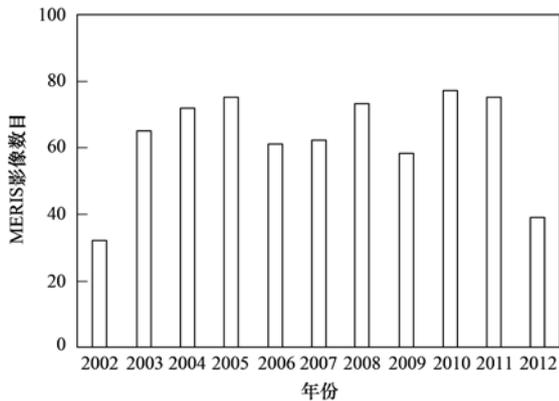


图2 洪泽湖2002~2012年每年可用MERIS影像数目

Fig. 2 MERIS images in Lake Hongze between 2002 and 2012

基于野外实测数据模拟的MERIS光谱数据分别验证了其在洪泽湖的适用性. 5种Chl-a估算算法如下.

1.4.1 波段比值算法

波段比值(BR)算法的表达式为 $R_{rs}(\lambda_2)/R_{rs}(\lambda_1)$. 该算法应用于MERIS数据时,一般 λ_1 使用665 nm, λ_2 使用709 nm. 该算法基于3种假设:①在 λ_1 处藻类吸收在水体组分吸收中占主导地位,即 $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_d(\lambda_1) + a_{CDOM}(\lambda_1)$; ② λ_1 和 λ_2 处水体总后向散射可以认为近似相等,即 $b_b(\lambda_1) \approx b_b(\lambda_2)$; ③ λ_2 处水体总吸收由纯水主导,即 $a_w(\lambda_2) \gg a_d(\lambda_2) + a_{CDOM}(\lambda_2) + b_b(\lambda_2)$ ^[16]. BR算法简单使用,在轻度浑浊的二类水体中得到了广泛的应用^[17].

1.4.2 三波段算法

Dall'Olmo等^[18]认为对于浑浊二类水体,悬浮物及CDOM在红和近红外波段的吸收无法忽略,因此构建了三波段(TBA)算法用于浑浊二类水体Chl-a的估算. TBA算法的表示式为 $[R_{rs}(\lambda_1)^{-1} - R_{rs}(\lambda_2)^{-1}] \times R_{rs}(\lambda_3)$. 该算法应用于MERIS数据时,一般 λ_1 使用665 nm, λ_2 使用709 nm, λ_3 使用709 nm. TBA算法的建立基于以下3个假设的基础上:① λ_1 位于Chl-a吸收峰附近且 λ_1 和 λ_2 处悬浮物和黄色物质吸收系数近似相等,即 $a_{ph}(\lambda_1) \gg a_{ph}(\lambda_2)$, $a_d(\lambda_1) \approx a_d(\lambda_2)$ 和 $a_{CDOM}(\lambda_1) \approx a_{CDOM}(\lambda_2)$; ② λ_3 处纯水吸收居于主导地位,其他水体组分的吸收可以忽略不计,即 $a_w(\lambda_3) \gg a_d(\lambda_3) + a_{CDOM}(\lambda_3) + b_b(\lambda_3)$; ③3个波段处的总后向散射系数近似相等,即 $b_b(\lambda_1) \approx b_b(\lambda_2) \approx b_b(\lambda_3)$. TBA算法能够部分去除非色素物质的吸收信号,在轻度、中度浑浊的二类水体中都得到了广泛的应用^[17, 19].

1.4.3 FLH算法和MCI算法

FLH算法和MCI算法都为基线算法. 该类算法

的表达式为 $R_{rs}(\lambda_2) - R_{rs}(\lambda_1) + [R_{rs}(\lambda_1) - R_{rs}(\lambda_3)](\lambda_2 - \lambda_1)/(\lambda_3 - \lambda_1)$. 其原理都为首先把 λ_1 和 λ_3 的遥感反射率的连线作为基线,再建立 λ_2 处的遥感反射率与该基线的距离和Chl-a的关系,从而实现Chl-a估算的目的. FLH算法应用于MERIS数据时,一般使用665 nm, λ_2 使用681 nm, λ_3 使用709 nm. MCI算法应用于MERIS数据时,一般 λ_1 使用681 nm, λ_2 使用709 nm, λ_3 使用754 nm.

1.4.4 UMOc算法

Liu等^[20]构建了一种新的Chl-a浓度分析模型(UMOC模型). 该模型从本质是对三波段模型的改进,与三波段模型不同的是UMOC模型使用了一种Chl-a吸收峰附近非色素碎屑物质(即非色素颗粒物与黄色物质之和)吸收信号去除方法以及一种用于去除水体总后向散射信号的近红外波段合理位置判定方法. UMOc模型能够有效减少非色素碎屑物质吸收信号的干扰,可以合理地选择用于去除水体总后向散射信号的近红外波段位置,是一种具有较强普适性的算法. 根据MERIS的波段设置特点,UMOC模型应用于MERIS数据时, λ_1 选择为665 nm, λ_2 选择为560 nm, λ_3 选择为709 nm, λ_4 有两个波段可供选择,分别为709 nm(λ_4^1)和754 nm(λ_4^2). 当使用560 nm和709 nm去除665 nm处非色素碎屑物质吸收信号时,固定的比例系数 η 为0.2. 剩余参数中,各个波段的纯水吸收系数参照Pope等^[21]给出的结果,665 nm处Chl-a比吸收系数 $[a_{Chl-a}^*(665)]$ 取值为Gurlin等^[17]和Gons等^[22]给出的相应值的平均值. 基于MERIS/OLCI数据的UMOC模型具体参数化过程,如表1所示.

2 结果与分析

2.1 不同Chl-a浓度估算算法在洪泽湖的适用性评价

由于本研究没有Chl-a星地同步数据,因此只使用了模拟MERIS数据对以上5种模型准确性和稳定性进行评价. 现有的研究表明BR、TBA、FLH和MCI等4种算法在不同水体,模型的参数不同^[23]. 本研究根据实测数据确定此4类算法在洪泽湖的模型参数. 将野外实测数据分为两部分,分别用于模型的校准与验证. BR、TBA、FLH和MCI算法的参数化方程分别如式(5)~(8)所示.

$$BR = R_{rs}(709)/R_{rs}(754) \quad (5)$$

$$TBA = [R_{rs}(665)^{-1} - R_{rs}(709)^{-1}] \times R_{rs}(754) \quad (6)$$

$$FLH = R_{rs}(681) - R_{rs}(665) + [R_{rs}(665) - R_{rs}(709)](681 - 665)/(709 - 665) \quad (7)$$

$$MCI = R_{rs}(709) - R_{rs}(681) + [R_{rs}(681) - R_{rs}(754)](709 - 681)/(754 - 681) \quad (8)$$

UMOC 模型作为分析模型,不需要进行本地参数化. 从图 3 可知, BR、TBA、FLH 和 MCI 的光谱指数与实测 Chl-a 之间都具有较强的相关性, 决定系数 R^2 分别为 0.88、0.91、0.93、0.92. 为了进一步

探究以上模型在低值区 ($Chl-a < 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 的稳定性, 本研究也统计了以上的光谱指数在低值区与实测 Chl-a 浓度的相关性, R^2 分别为 0.11、0.25、0.50、0.19, 说明以上 4 种模型都不合适低 Chl-a 浓度的估算.

图 4 为 5 种模型的 Chl-a 估算结果. BR 模型与 TBA 模型的精度最差, 其平均相对误差 (MRE) 分别为 75.17% 和 62.44%, 其次为 MCI 模型的

表 1 基于 MERIS 数据的 UMOC 模型参数化

Table 1 Parametrization of UMOC model applied to MERIS data

计算参数	计算公式	计算说明
$b_b(\lambda)$	$\frac{a_w(\lambda_4) \times 0.68 \times R_{rs}(\lambda_4^2)}{0.082 - 0.68 \times R_{rs}(\lambda_4^2)}$	$\lambda_4^2 = 754 \text{ nm}$
λ_4	$\xi = \frac{a_w(\lambda_4^1)}{a_w(\lambda_4^2)}$	$\lambda_4^1 = 709 \text{ nm}$
	假如: $\frac{R_{rs}(\lambda_4^2)}{R_{rs}(\lambda_4^1)} \leq \xi$, 则 $\lambda_4 = \lambda_4^1$; 假如: $\frac{R_{rs}(\lambda_4^2)}{R_{rs}(\lambda_4^1)} > \xi$, 则 $\lambda_4 = \lambda_4^2$	$\lambda_4^2 = 754 \text{ nm}$
UMOC Indices	$\left[\frac{1}{R_{rs}(\lambda_1)} - \frac{\eta}{R_{rs}(\lambda_2)} - \frac{(1-\eta)}{R_{rs}(\lambda_3)} \right] R_{rs}(\lambda_4)$	$\lambda_1 = 665 \text{ nm}$ $\lambda_2 = 560 \text{ nm}$ $\lambda_3 = 709 \text{ nm}$ $\eta = 0.2$
$a_{Chl-a}(\lambda_1)$	UMOC Indices $\times [a_w(\lambda_4) + b_b(\lambda)] - a_w(\lambda_1) + \eta a_w(\lambda_2) + (1-\eta) a_w(\lambda_3)$	$a_w(\lambda_1) = 0.429 \text{ m}^{-1}$ $a_w(\lambda_2) = 0.0619 \text{ m}^{-1}$ $a_w(\lambda_3) = 0.8396 \text{ m}^{-1}$ $a_w(\lambda_4) = 2.7615 \text{ m}^{-1}$
Chl-a	$a_{Chl-a}(\lambda_1) / a_{Chl-a}^z(\lambda_1)$	$a_{Chl-a}^z(\lambda_1) = 0.0138 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$

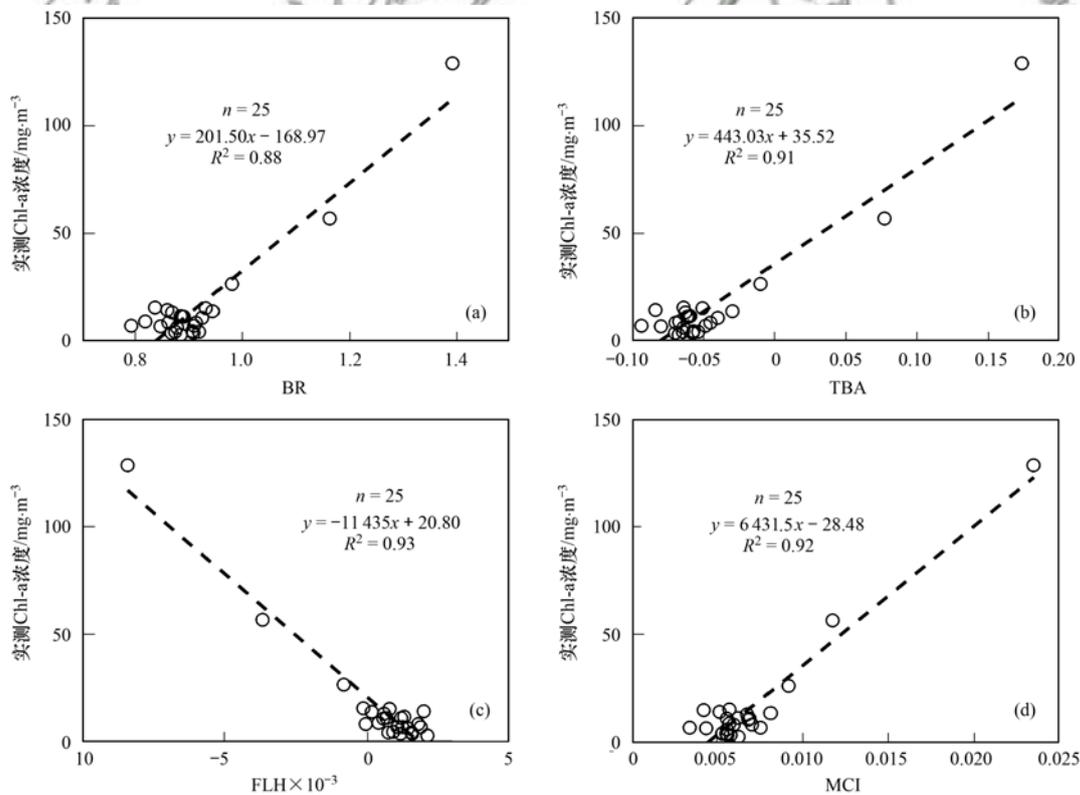


图 3 4 种经典模型光谱指数与实测 Chl-a 浓度的散点图

Fig. 3 Indices of the models versus Chl-a concentrations

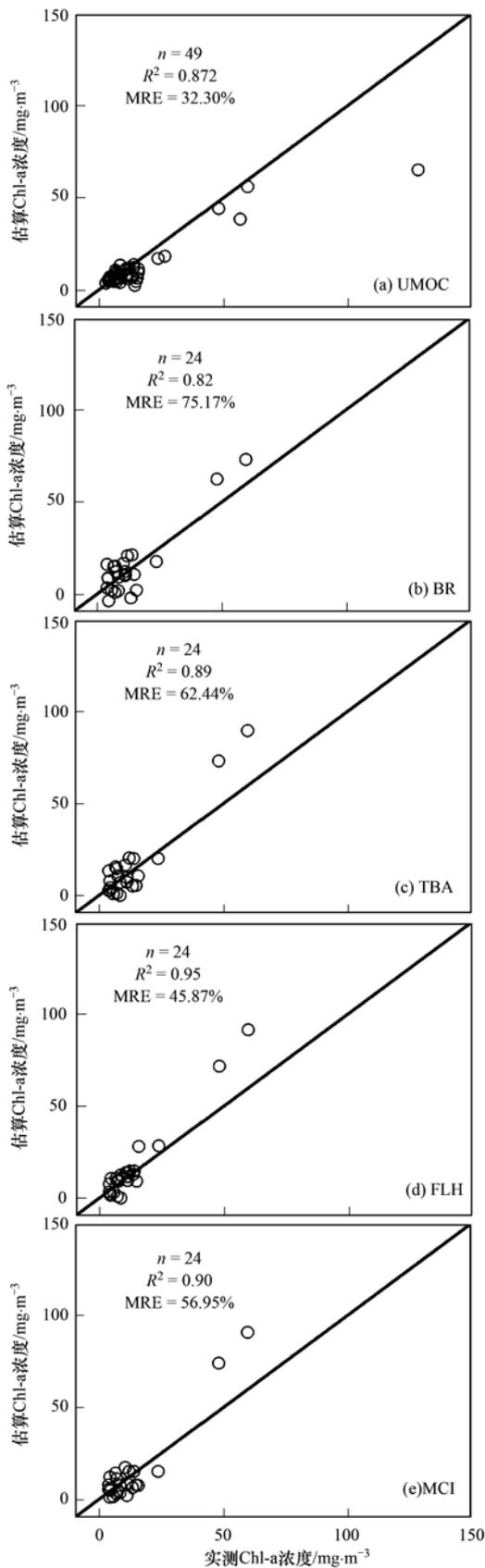


图 4 5 种 Chl-a 浓度估算模型估算精度对比

Fig. 4 Correlations between the measured and estimated Chl-a concentrations of the four algorithms

56.95%. FLH 算法平均相对误差为 45.87%. 与以上 4 种模型相比,UMOC 模型具有较高的估算精度,其平均相对误差为 32.30%. UMOc 模型估算的相对误差 (RE) 的范围为 0.004% ~ 79.46%,所有样本中 55.10% 和 79.59% 比例的样点其相对误差分别小于 30% 和 50%. 因此本研究利用 UMOc 模型,结合 2002 ~ 2012 年 MERIS 影像数据,获取洪泽湖长时间序列 Chl-a 浓度产品.

2.2 洪泽湖 Chl-a 浓度时空变化规律

2.2.1 洪泽湖 Chl-a 浓度空间分布情况

图 5 为 2002 ~ 2012 年洪泽湖平均 Chl-a 浓度空间分布. 洪泽湖平均 Chl-a 浓度空间差异明显,其中成子湖平均 Chl-a 浓度较高 (15.85 mg·m⁻³),溧河湾次之 (13.03 mg·m⁻³),东部区域最低 (10.25 mg·m⁻³). 这与前人^[13,24]对洪泽湖的研究结果相吻合,成子湖相对封闭,为洪泽湖主要的围网养殖区,换水较慢,富营养化程度较高;西部的溧河湾为主要入湖河流分布区域,且水草丰富,水体自净能力较强,其富营养化要低于成子湖;东部区域为洪泽湖主要的过水区域,水体浑浊且湖流扰动剧烈,其 Chl-a 浓度最低.

图 6 为 2003 ~ 2011 年洪泽湖年平均 Chl-a 浓度空间分布. 洪泽湖年平均 Chl-a 浓度最低值为 10.19 mg·m⁻³,出现在 2007 年,年平均 Chl-a 浓度最高值为 14.92 mg·m⁻³,出现在 2011 年. 2003 ~ 2007 年洪泽湖年平均 Chl-a 浓度的空间分布年际差异不大,年平均 Chl-a 浓度大于 20 mg·m⁻³ 的区域仅位于成子湖,

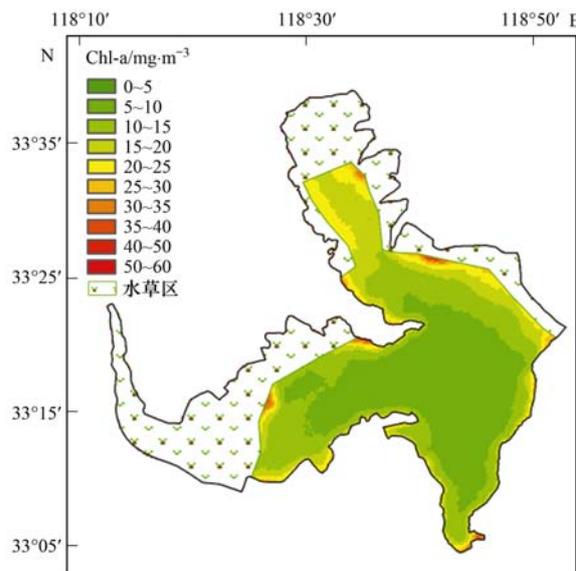


图 5 2002 ~ 2012 年洪泽湖 Chl-a 浓度整体空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Chl-a concentrations in Lake Hongze from 2002 to 2012

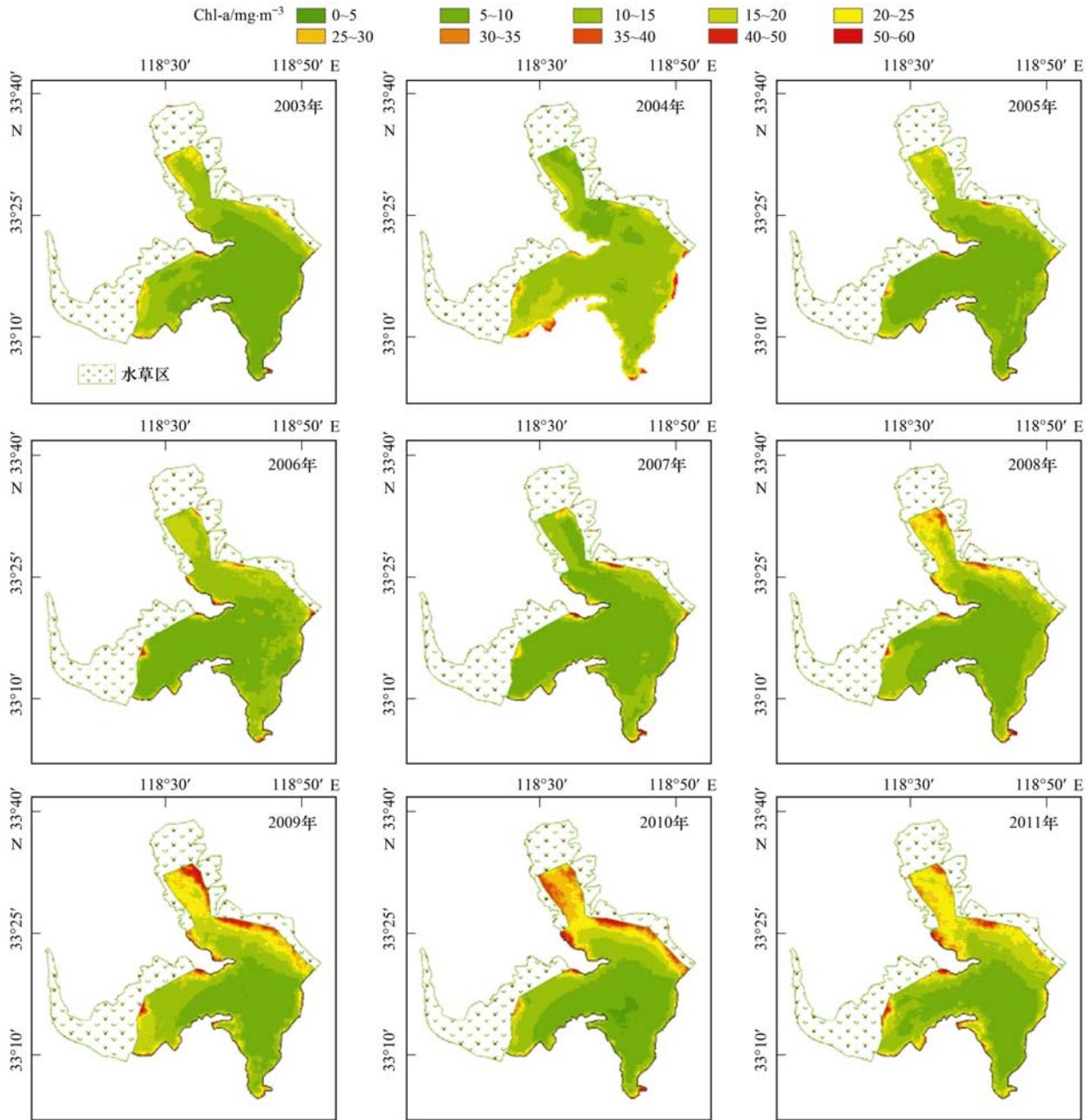


图 6 2003 ~ 2011 年洪泽湖年平均Chl-a浓度分布

Fig. 6 Annual mean Chl-a concentration distributions in Lake Hongze from 2003 to 2011

以及东部区域和溧河湾的沿岸狭长区域,全湖大部分水域年平均Chl-a浓度小于 $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 2008 ~ 2011 年相比于前 5 年,成子湖大部、溧河湾西部沿岸以及东部区域东北沿岸Chl-a浓度显著增加,都有较大面积的水域年平均Chl-a浓度大于 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.2.2 洪泽湖Chl-a浓度时间变化规律

图 5 和图 6 表明,即使是对于分区域(如东部区域)Chl-a浓度也具有较大的时空差异性,成子湖、溧河湾和东部水域都很难作为一个整体分析其年内和年际变化. 基于此,本研究利用计算得到的每个像元 2003 ~ 2011 长时间序列的月平均Chl-a浓度,

采用 ENVI 5.3 中的 IsoData 非监督分类方法对水体像元进行分类,共得到 3 种水体类型:区域 A、区域 B 和区域 C 水体(图 7). 区域 A 水体主要位于成子湖大部,东部水域东北部沿岸以及溧河湾沿岸的零星沿岸区域,区域 B 水体主要位于溧河湾和东部水域沿岸区域以及成子湖的湖心区域,区域 C 水体主要沿淮河入湖口呈扇形分布.

区域 C 水体年平均Chl-a浓度都较低,2003 ~ 2011 年年平均Chl-a浓度在 $8.11 \sim 13.842 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,年平均Chl-a浓度最高值出现在 2004 年,最低值出现在 2003 年. 区域 B 水体年平均Chl-a浓度在

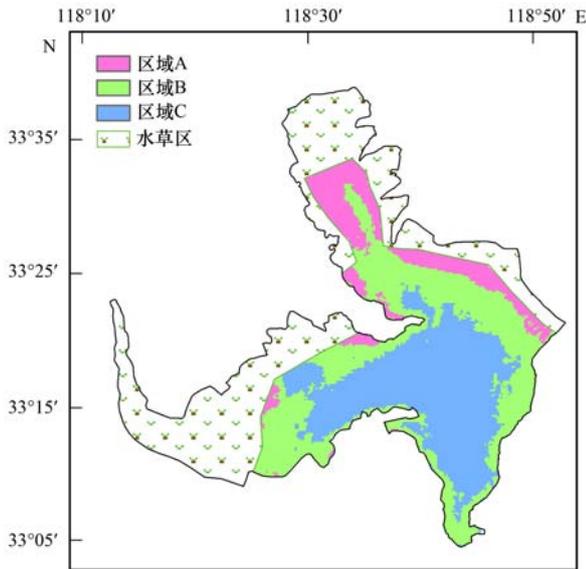


图 7 洪泽湖不同水体类型划分

Fig. 7 Classification of water types in Lake Hongze

8.86 ~ 16.80 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,年平均Chl-a浓度最高值出现在2004年,最低值出现在2007年.区域A水体年平均Chl-a浓度在11.51 ~ 22.11 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,年平均Chl-a浓度最高值出现在2010年,最低值出现在2007年.

图8为以上3种区域水体2003~2011年平均Chl-a浓度统计结果.总体而言,2003~2011年区域B和区域C水体年平均Chl-a浓度都有波动性,但是无明显的趋势,但是区域A水体明显分为两个阶段,2003~2007年年平均Chl-a浓度均较低,5年多年平均Chl-a浓度为12.79 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,2008~2011年显著上升,4年多年平均Chl-a浓度为19.96 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.图9为区域C水体两个阶段(2003~2007年和2008~2011年)多年不同季节平均Chl-a浓度统计结果.2008~2011年春、夏、秋这3个季节相

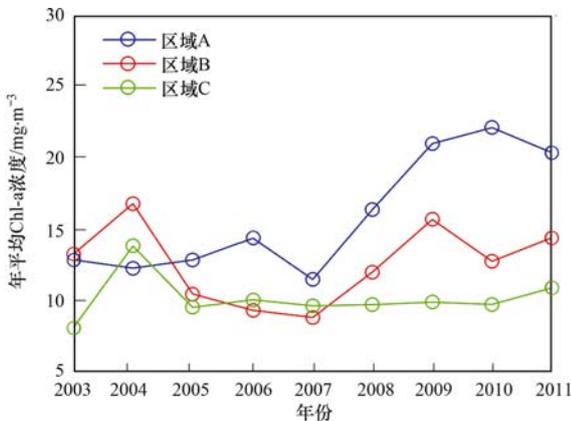


图 8 洪泽湖不同区域年平均Chl-a浓度统计结果

Fig. 8 Annual mean Chl-a concentrations in different water regions in Lake Hongze

比于2003~2007年同期,多年不同季节平均Chl-a浓度均显著提高,分别提高了8.77、15.68、9.84 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而冬季两个阶段相差不大.

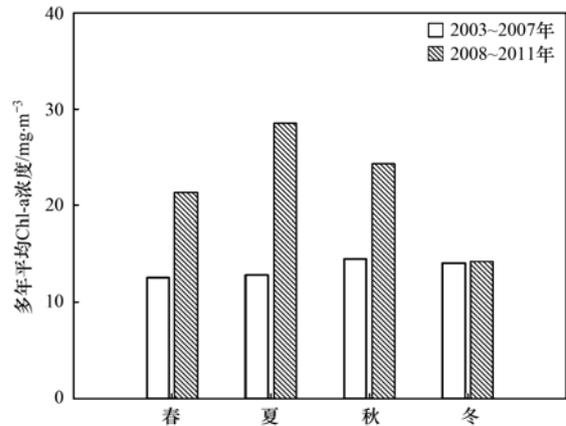


图 9 2003~2007年和2008~2011年洪泽湖区域C多年不同季节平均Chl-a浓度

Fig. 9 Mean Chl-a concentrations in different seasons in Region C in the periods of 2003-2007 and 2008-2011

3 讨论

3.1 不同Chl-a模型在洪泽湖水域适用性差异的原因

对于像洪泽湖此类的通江型浑浊二类水体,其高泥沙和低Chl-a浓度的特性,增加了水体Chl-a浓度准确估算的难度. Chl-a浓度估算模型是否适用于洪泽湖,则取决于模型能否从总吸收信号中剔除非色素碎屑物质信号,精确地提取Chl-a色素吸收信号. Chl-a与TSM的比值是一种可以用于量化水体悬浮颗粒物组成差异的因子^[25]. 如图10所示为以上5种算法所有采样点估算的相对误差(RE)与Chl-a:TSM比值的散点图. 当Chl-a:TSM大于 0.5×10^{-3} 时,即藻类占总悬浮物的比重较大时,所有算法估算的相对误差都小于100%,5种算法估算Chl-a的精度相差不大,但是这一部分样点所占的比重较小,仅为洪泽湖总样本的12.24%. 洪泽湖另外87.76%的样本其Chl-a:TSM比值都小于 0.5×10^{-3} . 对于这一部分样本,不同模型的表现具有较大的差异性. 其中未考虑去除非色素碎屑物质吸收信号去除的BR算法具有最大的RE,为333.40%. 其他3种考虑这一部分信号去除的算法包括TBA算法、FLH算法与MCI算法都具有一定的抗干扰能力,但是无论是TBA算法、FLH算法还是MCI算法仍然都有部分样点其相对误差大于100%. 说明以上3种算法的非色素碎屑物质吸收信号去除假设并不适用于洪泽湖占绝大部分的极为浑浊水体. 相比于BR算法、TBA算法、FLH算法和MCI算法,UMOC算法

在洪泽湖水域具有较强的抗干扰能力,所有采样点最大的相对误差仅为 79.46%,是一种适用于高浑浊水体的Chl-a浓度估算算法.

3.2 气象因子对洪泽湖Chl-a浓度年际变化的影响

图 11 为 2003 ~ 2011 年盱眙站年平均温度、年平均风速和年降水量变化曲线. 2003 ~ 2011 年平均

温度与年降水量都无明显的趋势,但是都有一定的波动性,而年平均风速具有显著下降的趋势($y = -0.0577x + 2.49$, $R^2 = 0.849$).

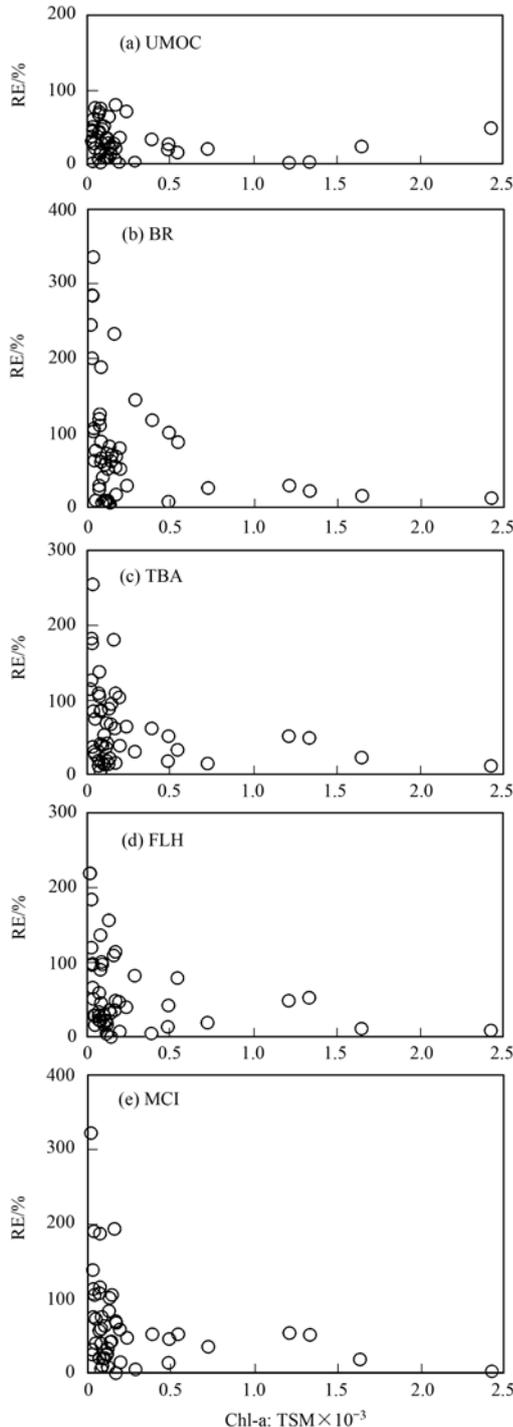


图 10 样点Chl-a: TSM 的比值与各算法估算的相对误差的散点图
Fig. 10 Relationships between the relative error and the ratio Chl-a: TSM

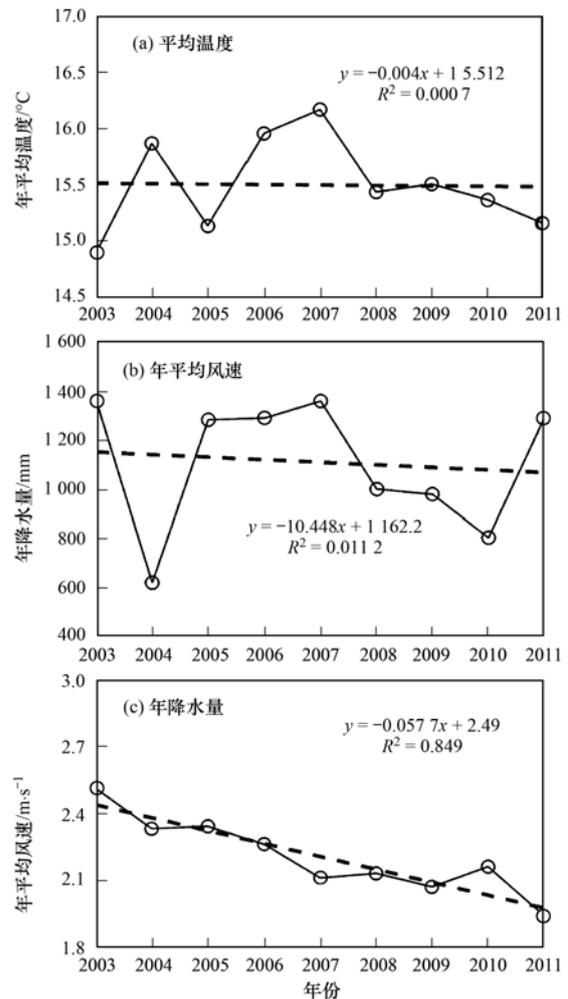


图 11 2003 ~ 2011 年盱眙气象站年平均温度、年平均风速和年降水量变化趋势

Fig. 11 Annual mean temperature, annual mean wind speed, and annual precipitation observed at the Xuyi meteorological station from 2003 to 2011

图 12 为 2003 ~ 2011 年洪泽湖不同水域Chl-a浓度平均值与同步年平均气温、年平均风速以及年降水量之间的散点图. 区域 B 和区域 C 年平均 Chl-a浓度与年平均气温和年平均风速都不具有显著性的关系,其与年平均降水量都具有很好的相关性(区域 B: $r = -0.65$, $P < 0.05$; 区域 C: $r = -0.66$, $P < 0.05$). 2004 年盱眙站年降水量为 620.6 mm,为 2003 ~ 2011 年间降水量最少的一年,仅相当于这 9 年平均降水量的 55.91%,在这一年区域 B 和区域 C 年平均 Chl-a浓度都出现了这 9 年来的峰值. 年降水量对于区域 B 和区域 C 年平均 Chl-a浓度具有显著的影响,其原因可能为区域 B 和

区域 C 为洪泽湖主要的过水通道,其藻类的生长繁殖受湖流的扰动显著^[24],较少的降水量导致入湖水量减少,洪泽湖关闸蓄水,水域换水周期增长,水体透明度增加,更利于藻类的停留和繁殖,导致以上 2 个区域Chl-a浓度较高,反之则Chl-a浓度较低. 区域 A 年平均Chl-a浓度与年平均气温和年降水量都不具有相关性,其与年平均风速呈显著性的负相关关系($r = -0.64, P < 0.05$). 区域 C 大部分为近岸区域,水深较浅,较低的风速减少了水体的扰动,水体透明度较高,可以有更多的光进入水体,藻类的初级

生产力较高,从而导致水体Chl-a浓度的提高. 图 13 为 1957 ~ 2015 年盱眙气象站年平均风速的变化情况. 盱眙站年平均风速呈显著的下降趋势,平均每年下降约 $0.031 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 尽管江苏省政府对洪泽湖进行了严格的营养盐入湖控制,风速下降的气候大背景有利于洪泽湖藻类的生长与繁殖,洪泽湖区域 C 的富营养化程度仍然可能加重,威胁到南水北调的水质安全.

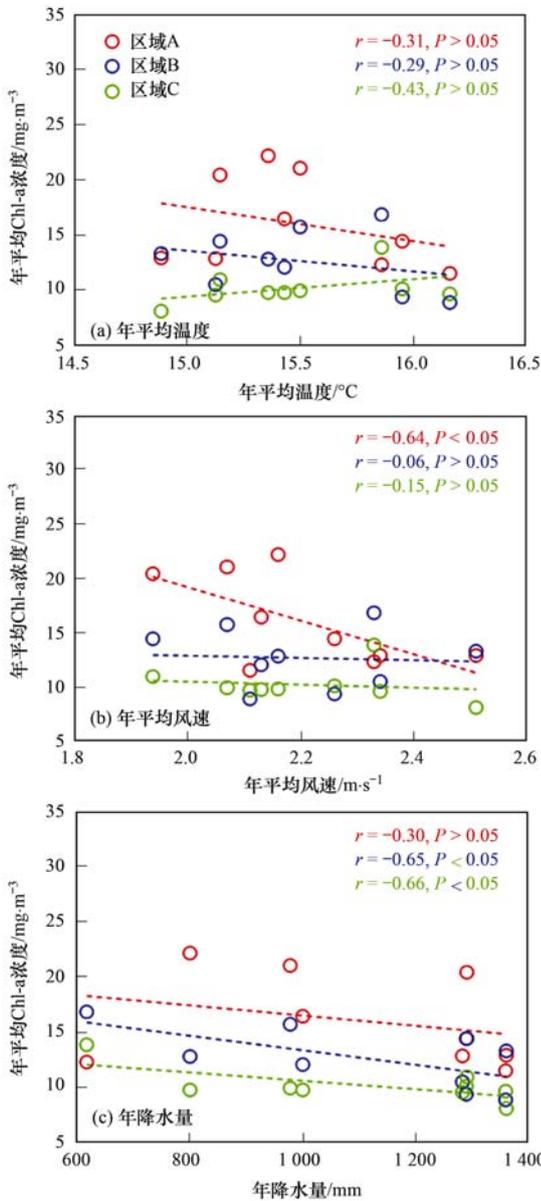


图 12 洪泽湖区域 A、区域 B 和区域 C Chl-a 浓度年平均值分别与年平均温度、年平均风速、和年降水量的散点图

Fig. 12 Relationships between annual mean Chl-a concentrations and annual mean temperature, annual mean wind speed, and annual precipitation in Region A, Region B, and Region C

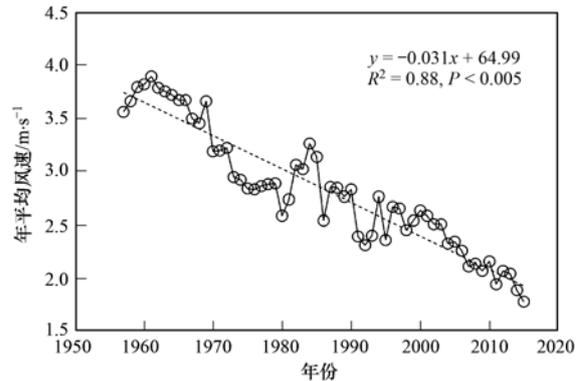


图 13 盱眙站 1957 ~ 2015 年平均风速变化趋势

Fig. 13 Annual mean wind speed observed at the XuYu meteorological station from 1957 to 2015

3.3 淮河对洪泽湖Chl-a浓度空间分布的影响

洪泽湖主要的入湖河流为淮河、怀洪新河、下草湾引河、新汴河、濉河、老濉河和徐洪河等,淮河入湖水量最大,入湖水量占总入湖水量的 75% 以上,其中汛期(7 ~ 9 月)和非汛期(1 ~ 6 月和 10 ~ 12 月)分别占淮河年入湖总量的 71.29% 和 28.71%^[26]. 图 14 为 2002 ~ 2012 年汛期和非汛期洪泽湖逐像元多年平均Chl-a浓度与其距离淮河入湖口的距离的散点图. 在汛期水体Chl-a浓度与离淮河入湖口的距离呈显著的正相关关系($y = 1.084x - 6.4$),二者的 R^2 达到了 0.46. 正是由于淮河汛期对洪泽湖的冲刷作用,洪泽湖虽然也是富营养化湖泊,但是并没有像太湖、巢湖和滇池等湖泊一样在 7 ~ 9 月大范围频繁地发生水华. 在非汛期,水体Chl-a浓度与离淮河入湖口的距离虽然也成正相关关系($y = 0.243x + 8.8$),但是二者的 R^2 仅为 0.17,说明此时随着入湖水量的减少,淮河对洪泽湖藻类生长繁殖的抑制作用减弱^[26]. 2003 ~ 2011 年洪泽湖发生的最大面积的一次水华即发生在非汛期且温度较高的 10 月. 2006 年 10 月 31 日,在靠近淮安市朱坝镇水域,水华面积达到了 33.56 km^2 (图 15).

4 结论

(1) 基于洪泽湖水体实测水质参数与同步光谱

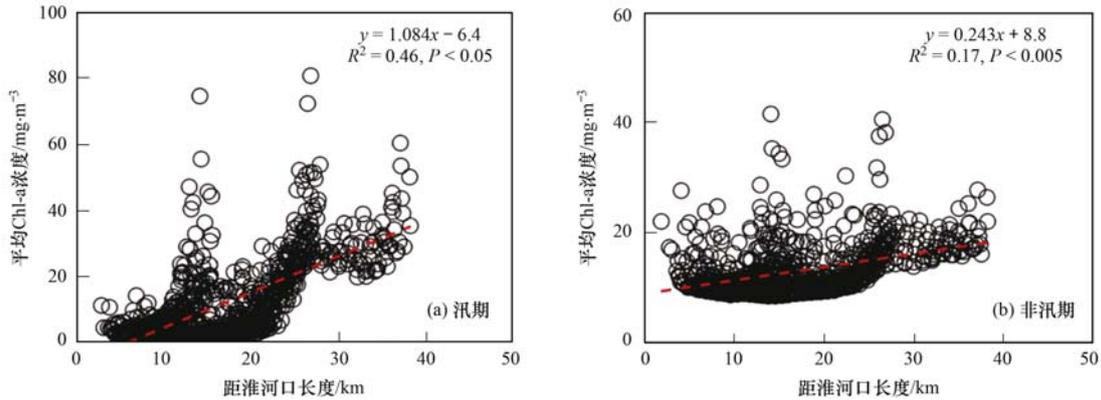


图 14 2002 ~ 2012 洪泽湖汛期和非汛期逐像元多年平均Chl-a浓度与其距离淮河入湖口距离的散点图

Fig. 14 Linear relationship between the distance from the estuary and mean Chl-a concentrations of every pixel in the wet and dry season between 2002 and 2012

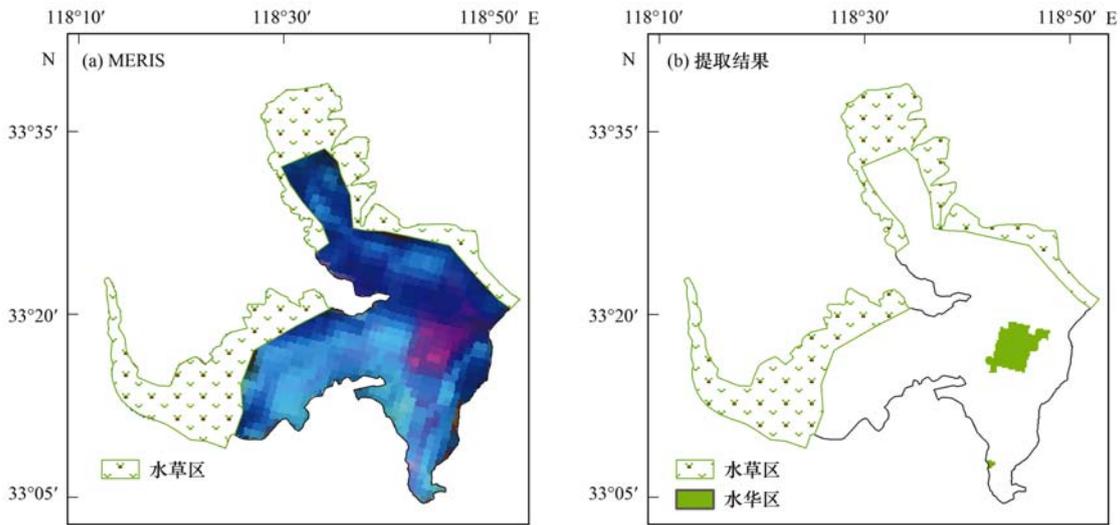


图 15 2006 年 10 月 31 日 MERIS 影像标准假彩色合成及水华区提取结果

Fig. 15 Standard false color MERIS image and the bloom extraction results on October 31, 2006

数据,评估了 UMOc 模型、波段比值(BR)模型、三波段(TBA)模型、荧光基线(FLH)模型与最大叶绿素(MCI)模型在洪泽湖水域Chl-a估算的精度. 5种模型其Chl-a估算的平均相对误差分别为 32.30%、75.17%、62.44%、45.87%和 56.95%,UMOC 模型是洪泽湖水域基于 MERIS/OLCI 影像数据反演 Chl-a的最优模型. 利用所有样本 Ch-a: TSM 的比值与估算的相对误差的关系,分析了非色素碎屑物质对以上 5 种算法反演 Chl-a浓度的干扰,结果表明 UMOc 算法具有最好的抗干扰能力,其估算结果稳定可靠.

(2)将 UMOc 模型应用于 2002 ~ 2012 年经过大气校正的 689 景 MERIS 影像,得到了这一时间段内的洪泽湖 Chl-a浓度遥感估算产品,结果表明,洪泽湖 Chl-a浓度具有明显的时空差异性. 依据水体像元长时间序列月平均 Chl-a浓度的差异,将洪泽湖水

体分为了区域 A,区域 B 和区域 C 这 3 种类型. 从 Chl-a浓度的年际变化看,区域 B 和区域 C 水体无明显的变化趋势,区域 A 则显著增加. 与气象因子的相关性分析表明,区域 B 和区域 C 年平均 Chl-a的波动主要受年降水量的影响,反映了该 2 个区域 Chl-a浓度的变化主要受湖流强度的控制,区域 A 年平均 Chl-a浓度的变化与年平均风速呈显著负相关性,风速下降的气候大背景可能会加重这一区域的富营养化程度,威胁南水北调的水质安全. 此外,在汛期(7 ~ 9 月)洪泽湖水体 Chl-a浓度与离淮河入湖口的距离呈显著的正相关关系,证明了这一时期淮河对洪泽湖藻类浓度具有明显的抑制作用.

参考文献:

[1] 金相灿, 朱莹. 我国主要湖泊和水库水体的营养特征及其变化[J]. 环境科学研究, 1991, 4(1): 11-20.
Jin X C, Zhu X. Tropic characteristics and changes of water bodies of the main lakes and reservoirs in China[J]. Research of

- Environmental Sciences, 1991, **4**(1): 11-20.
- [2] Kane D D, Conroy J D, Richards R P, *et al.* Re-eutrophication of Lake Erie: correlations between tributary nutrient loads and phytoplankton biomass [J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, **40**(3): 496-501.
- [3] Gaube P, Chelton D B, Strutton P G, *et al.* Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and Ekman pumping in nonlinear mesoscale eddies [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, **118**(12): 6349-6370.
- [4] Groom S, Herut B, Brenner S, *et al.* Satellite-derived spatial and temporal biological variability in the Cyprus Eddy [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2005, **52**(22-23): 2990-3010.
- [5] Gordoa A, Illas X, Cruzado A, *et al.* Spatio-temporal patterns in the north-western Mediterranean from MERIS derived chlorophyll a concentration [J]. Scientia Marina, 2008, **72**(4): 757-767.
- [6] Abdul-Hadi A, Mansor S, Pradhan B, *et al.* Seasonal variability of chlorophyll-a and oceanographic conditions in Sabah waters in relation to Asian monsoon—a remote sensing study [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(5): 3977-3991.
- [7] Le C F, Hu C M, English D, *et al.* Towards a long-term chlorophyll-a data record in a turbid estuary using MODIS observations [J]. Progress in Oceanography, 2013, **109**: 90-103.
- [8] Zhang F F, Li J S, Shen Q, *et al.* Algorithms and schemes for chlorophyll a estimation by remote sensing and optical classification for Turbid Lake Taihu, China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, **8**(1): 350-364.
- [9] Feng L, Hu C M, Han X X, *et al.* Long-term distribution patterns of chlorophyll-a concentration in China's largest freshwater lake: MERIS full-resolution observations with a practical approach [J]. Remote Sensing, 2015, **7**(1): 275-299.
- [10] Palmer S C J, Odermatt D, Hunter P D, *et al.* Satellite remote sensing of phytoplankton phenology in Lake Balaton using 10 years of MERIS observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **158**: 441-52.
- [11] Gittings J A, Raitsos D E, Racault M F, *et al.* Seasonal phytoplankton blooms in the Gulf of Aden revealed by remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **189**: 56-66.
- [12] Cao Z G, Duan H T, Cui H S, *et al.* Remote estimation of suspended matters concentrations using VIIRS in Lake Hongze, China [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, **35**(4): 462-469.
- [13] Ren Y, Pei H Y, Hu W R, *et al.* Spatiotemporal distribution pattern of cyanobacteria community and its relationship with the environmental factors in Hongze Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(10): 6919-6933.
- [14] Qi L, Hu C M, Cannizzaro J, *et al.* VIIRS observations of a *Karenia brevis* bloom in the northeastern gulf of Mexico in the absence of a fluorescence band [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, **12**(11): 2213-2217.
- [15] Ruddick K G, Ovidio F, Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters [J]. Applied Optics, 2000, **39**(6): 897-912.
- [16] Le C F, Hu C M, Cannizzaro J, *et al.* Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **129**: 75-89.
- [17] Gurlin D, Gitelson A A, Moses W J. Remote estimation of chl-*a* concentration in turbid productive waters—return to a simple two-band NIR-red model? [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(12): 3479-3490.
- [18] 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.
- [19] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, *et al.* Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS—the Azov sea case study [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, **6**(4): 845-849.
- [20] Liu G, Li Y M, Lyu H, *et al.* An improved land target - based atmospheric correction method for Lake Taihu [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, **9**(2): 793-803.
- [21] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. Applied Optics, 1997, **36**(33): 8710-8723.
- [22] Gons H J, Rijkeboer M, Ruddick K G, *et al.* A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal waters [J]. Journal of Plankton Research, 2002, **24**(9): 947-951.
- [23] Matsushita B, Yang W, Yu G L, *et al.* A hybrid algorithm for estimating the chlorophyll-a concentration across different trophic states in Asian inland waters [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, **102**: 28-37.
- [24] 齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等. 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 583-591.
- Qi L Y, Huang J C, Gao J F, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of chlorophyll-a concentration in Lake Hongze [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(3): 583-591.
- [25] Sun D Y, Hu C M, Qiu Z F, *et al.* Influence of a red band-based water classification approach on chlorophyll algorithms for optically complex estuaries [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **155**: 289-302.
- [26] 朱喜, 胡明明. 中国淡水湖泊蓝藻暴发治理与预防 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 352-384.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)