

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体景观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138)	
《环境科学》征稿简则 (1155)	
信息 (824, 853, 883)	

面向 GOCI 数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究

杜成功¹, 李云梅^{1,2*}, 王桥³, 朱利³, 吕恒^{1,2}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 总磷浓度是水质评价的一个重要指标, 是水体富营养化、蓝藻水华暴发的重要影响因素, 遥感技术具有范围广、时效高的优势, 利用卫星遥感监测总磷浓度, 对于水质和富营养化的研究有着重要意义. 利用 2013~2014 年 3 次地面实验数据, 构建了基于 GOCI 影像的总磷反演模型, 为了检验模型的适用性, 选取 2014 年春、夏、秋、冬各 1 日 GOCI 影像, 对太湖总磷浓度的日内变化进行分析. 结果表明, 利用 GOCI 数据 8 个波段的波段组合作为变量, 进行逐步回归分析所建立的模型具有较高的反演精度, 模型的决定系数为 0.898, 平均绝对误差百分比为 14.296%, 均方根误差为 0.026 mg·L⁻¹. 同时, 利用地面实测样点与同步卫星影像对模型进行了精度分析, 2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 24 日同步影像的验证精度分别为: 平均绝对误差百分比为 33.642% 和 22.551%, 均方根误差为 0.076 mg·L⁻¹ 和 0.028 mg·L⁻¹. 对 4 个季节中 4 d 的 30 幅影像对比分析表明, 不同季节总磷浓度的绝对含量存在差异, 但是, 总磷浓度的时空分布及从早晨到下午的差异性存在相似性. 从空间分布上看, 梅梁湾、竺山湾、贡湖湾及西南部沿岸小梅港、长兜港总磷浓度长期偏高, 各个区域的总磷浓度变化受到风向、风速等因素的影响; 从时间变化上看, 早上总磷浓度最高, 随后逐渐降低, 反映了总磷浓度受到温度和光照影响的效果.

关键词: GOCI 影像; 太湖; 总磷; 遥感反演; 时空变化

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0862-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.010

Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data

DU Cheng-gong¹, LI Yun-mei^{1,2*}, WANG Qiao³, ZHU Li³, LÜ Heng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: The TP concentration is an important index of water quality and an important influencing factor of eutrophication and algae blooms. Remote sensing technology has advantages of wide scope and high time limited efficacy. Monitoring the concentration of TP by satellite remote sensing is important for the study of water quality and eutrophication. In situ datasets collected during the three times of experiments in Taihu Lake between 2013 and 2014 were used to develop the TP inversion model based on GOCI data. The GOCI data in spring, summer, autumn and winter in 2014 were selected to analyze the time and space changes of TP concentration in Taihu Lake. The results showed that the TP algorithm was built up based on the variables, which was to use the eight band combination of GOCI data as variable, and build model using Multi factor linear regression method. The algorithm achieved more accurate TP estimation with $R^2 = 0.898$, MAPE = 14.296%, RMSE = 0.026 mg·L⁻¹. Meantime, a analysis on the precision of the model by using the measured sample points and the synchronous satellite images with MAPE = 33.642%, 22.551%, RMSE = 0.076 mg·L⁻¹, 0.028 mg·L⁻¹ on August 5, 2014 and October 24, 2014. Through the analysis of the 30 images on the four days of the four seasons, it showed that the absolute concentration of total phosphorus was different in different seasons. But temporal and spatial distribution of total phosphorus concentration was similar in the morning and afternoon. In spatial distribution, the TP concentration in Meiliang Bay, Zhushan Bay, Gonghu Bay, Xiaomei Port and Changdou Port in the southwest coast was at a continuously high position. The TP concentration change in different regions was influenced by wind direction, wind speed and other factors. The TP concentration highest in the morning, and then gradually decreased, this phenomenon reflected that the TP concentration was affected by temperature and light.

Key words: GOCI data; Taihu Lake; total phosphorus; remote sensing inversion; spatial-temporal change

随着工农业经济的高速发展, 每年大量的工农业废水和城市生活污水排入湖泊水体, 导致我国湖泊水体中磷(P)浓度普遍偏高. 对湖泊水体总磷进行准确监测, 是对湖泊环境进行有效管理和控制水体富营养化的重要环节. 国内外许多学者对总磷的遥感监测模型进行了研究. 如文献[1]基于特定营

养盐和海水表层温度的关系, 通过温度间接建立了营养盐遥感反演模型. 还有一些研究则直接基于水

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-10-16

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重大专项(05-Y30B02-9001-13/15-6)

作者简介: 杜成功(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感监测, E-mail: ducg1023@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

面光谱与总磷的相关关系建立其遥感反演模型, 如 Isenstein 等^[2]以尚普兰湖为研究区域, 以 Landsat ETM+ 数据为遥感数据源, 利用多元线性回归方程建立了 P 营养物质的反演方程。Wu 等^[3]则是根据 Landsat TM 数据建立了钱塘江 P 含量的遥感反演经验模型, 并探讨了其空间分布特征。Gao 等^[4]根据总磷浓度对巢湖进行分区, 对不同区域分别利用多元线性回归方法建立了总磷反演模型。Sun 等^[5]针对内陆富营养化湖泊, 结合光谱分类和支持向量机方法, 构建了总磷反演模型, 并将此模型应用于 HJ1A/HSI 影像。王丽艳等^[6]利用长时间序列的 MODIS 数据, 通过分析各波段及波段组合反射率因子与呼伦湖水体总磷浓度之间的关系建立了利用 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体总磷浓度的半经验模型。Chang 等^[7]则是基于 MODIS 数据, 采用遗传算法程序对美国佛罗里达州西部坦帕湾的总磷浓度的空间分布进行了研究。潘洁等^[8]基于 Hyperion 影像, 对射阳河口的无机氮磷浓度反演进行了研究。王林等^[9]综合利用大洋河河口海域水体调查的实测数据及环境一号 CCD 影像数据, 建立了营养盐的经验反演模型, 进行了该区域营养盐浓度反演研究。

太湖是典型的大型富营养化浅水湖泊, 其浮游植物漂移、分解, 底泥再悬浮、营养盐释放等容易受到水动力扰动的影响, 导致 1 d 中水体营养盐随着风速风向等气象条件而发生变化。通常的遥感数据, 由于受到时间分辨率的制约, 难以监测短时间内湖泊总磷的变化情况。2010 年韩国发射了世界上第一颗地球静止海洋水色卫星, 1 d 可提供 8 景 GOCI (geostationary ocean color imager) 影像数据^[10], 该数据的使用, 为研究短时期内水体总磷的时空变化及其与环境、气候等因素的相互关系提供了新的数据源。

目前对太湖总磷浓度反演的研究比较少, Sun 等^[5]的模型比较复杂, 同时针对环境星的影像; Song 等^[11]的模型针对高光谱遥感数据。没有适用于 GOCI 数据的总磷反演模型, 为了发挥 GOCI 数据的优势, 因此本研究采用 GOCI 影像及同步实测总磷浓度数据对太湖水体总磷浓度反演进行探讨, 建立基于 GOCI 遥感影像的总磷反演模型并进行验证。选取最优反演模型, 利用 GOCI 遥感影像分析太湖水体总磷浓度的时空变化。

1 材料与方法

1.1 研究区

太湖位于长江三角洲的南缘, 是中国五大淡水

湖之一, 界于北纬 $30^{\circ}55'40'' \sim 31^{\circ}32'58''$ 和东经 $119^{\circ}52'32'' \sim 120^{\circ}36'10''$ 之间, 河港纵横, 河口众多, 有主要进出河流 50 余条, 是周边沿岸城市重要的水源地, 同时湖中各种浮游植物、动物和栖息类动物种类繁多, 具有良好的水生态系统。兼有远航、灌溉、渔业、旅游等多种功能, 对社会和经济的发展有着至关重要的作用。太湖西部主要入湖港口及湖湾^[12]如图 1 所示。

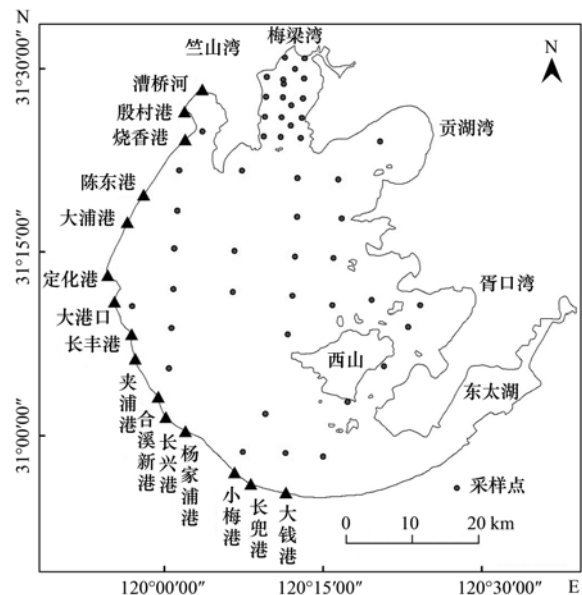


图 1 太湖主要入湖港口及采样点分布示意

Fig. 1 Ports into the lake and sampling stations in Lake Taihu

1.2 地面实验数据

2013 年 8 月 1 ~ 3 日、2014 年 8 月 5 ~ 6 日、2014 年 10 月 23 ~ 24 日对太湖进行了 3 次地面实验, 总共对 76 个采样点同步进行水面光谱观测和水样采集, 采样点分布如图 1 所示, 其中部分样点在 3 次采样中重复采样。水样在实验的当天带回实验室, 采用常规的测量方法测量总磷含量。

水面光谱数据利用 ASD 公司生产的 ASD Field Spec Pro 便携式光谱仪进行采集, 包括: 标准灰板、水体和天空光的光谱辐亮度信息, 同时记录了 GPS 点位、风速、气压及天气状况。水面光谱数据按照唐军武等^[13]介绍的方法换算成水面遥感反射率。

1.3 GOCI 遥感数据

采用 2014 年 8 月 5 日和 2014 年 10 月 24 日的 GOCI 数据进行建模及检验, 并将模型应用到 2014 年 1 月 1 日、2014 年 3 月 22 日、2014 年 8 月 4 日、2014 年 10 月 24 日的 GOCI 影像中, 分析不同季节太湖总磷含量日内变化规律。由于没有专门针对内陆水体的 GOCI 影像的成熟大气校正方法, 因此, 运

用目前世界上发展较为成熟的 6S 大气校正算法对 GOCI 影像进行大气校正。

GOCI 水色遥感传感器搭载于 COMS (communication ocean and meteorological satellite) 卫

星平台,可获取从可见光到近红外共 8 个波段的遥感物理量,可对目标区域进行连续观测(08:00~15:00,时间分辨率为 1 h),其波段设置如表 1 所示。

表 1 GOCI 波段及参数信息
Table 1 GOCI band and parameter information

波段	波段中心/nm	波宽/nm	类型	主要应用领域
B1	412	20	可见光	黄色物质、浊度
B2	443	20	可见光	叶绿素最大吸收
B3	490	20	可见光	叶绿素及其他色素
B4	555	20	可见光	浊度
B5	660	20	可见光	荧光信号、悬浮泥沙
B6	680	10	可见光	大气校正、荧光信号
B7	745	20	近红外光	大气校正、荧光信号基线
B8	865	40	近红外光	气溶胶光学厚度、水蒸气量

1.4 研究方法

通过对 GOCI 各波段遥感反射率与实测总磷数据进行相关性分析,找出相关性高的波段,同时选取 GOCI 各波段反射率值进行多种模式组合,讨论每个组合与总磷浓度的相关性,最后选取相关性高的波段及波段组合建立一元及多元回归模型,通过模型精度对比,确定最适合的模型,并将模型应用于 GOCI 影像上,分析太湖总磷时空变化规律。

2 结果与分析

2.1 总磷浓度与 GOCI 数据相关性分析

本文利用遥感反射率进行太湖总磷浓度反演模型研究,对遥感反射率和总磷浓度进行了相关性分析,如图 2 所示,400~695 nm 波段范围内,两者呈负相关关系,随着波长的增加,其相关性整体减弱。695~900 nm 波段范围内,两者呈现正相关关系,相关性大小整体一致。正负相关系数在 -0.38~0.42 之间,结果表明单波段与总磷浓度之间的相关性一般,无法确定相关性高的敏感波段,由于是针对 GOCI 数据的反演模型,所以通过 GOCI 数据 8 个波段之间的组合运算来探讨与总磷浓度敏感性高的变量。

由于与卫星数据同步的地面样点数据较少,因此,采用地面实测光谱模拟得到 GOCI 相应波段的遥感反射率数据,并利用该数据,分析总磷浓度与 GOCI 影像 8 个波段遥感反射率的相关关系。采用任意两波段的和、差、比值、NDVI 算法以及对单个波段求对数的方式,对 8 个波段进行组合,一共构建了 128 种组合方式,将原波段及转换后的波段反射率与总磷浓度实测值进行相关性分析,结果如图 3

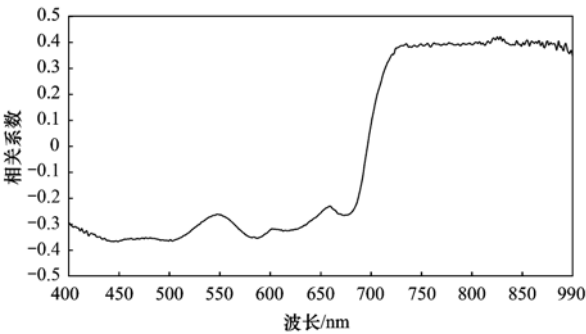


图 2 总磷与遥感反射率在不同波长处的相关系数
Fig. 2 Correlate coefficients between TP and remote sensing reflectance at different wavelengths

所示。

图 3 中,正负相关系数的范围为 -0.877~0.515,128 个波段组合中有 51 个的相关系数绝对值大于 0.4。相关系数最大的波段组合是 (r6-r7)/(r6+r7), $R=0.877$,其次为 r3-r7, $R=0.870$,式中, $r_i, i=1, \dots, 8$,表示 GOCI 数据相对应的波段遥感反射率。

2.2 总磷浓度反演模型的建立

对 2.1 节中相关系数绝对值大于 0.8 的 16 个波段组合分别进行检验,构建总磷浓度反演模型。随机选取实测数据中的 62 个点位数据进行建模实验,剩余 14 个点位数据用于模型验证。以每种波段组合为变量,分别构建线性模型、指数模型、幂函数模型和二次函数模型;同时,考虑到多变量对总磷浓度的共同作用与影响,对变量进行逐步线性回归分析和进入回归分析,建立多元回归分析模型。各个模型的分析结果见表 2。

根据表 2 可以看出建模效果最好的为第 19 个

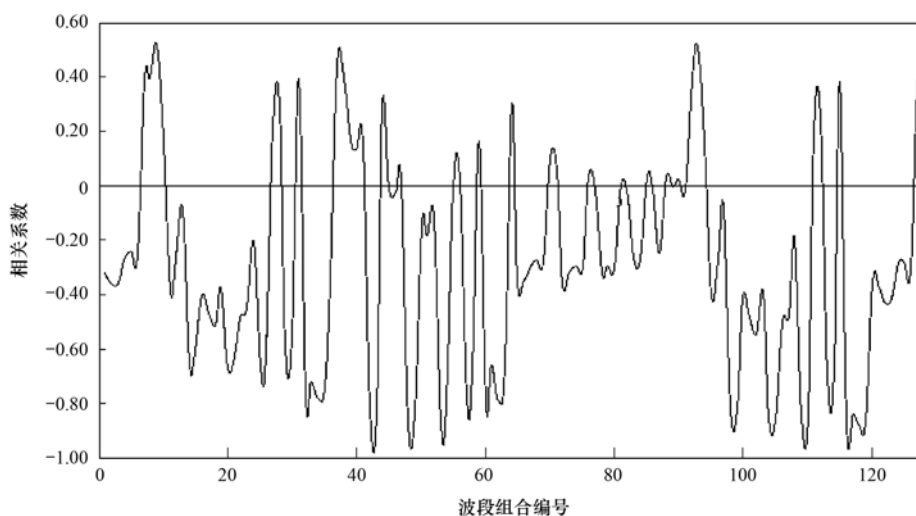


图3 波段组合与实测总磷浓度相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between band combination and the measured total phosphorus concentration

变量组合所构建的回归分析模型, 式中的 x_1 为 $r3-r7$, x_2 为 $(r6-r8)/(r6+r8)$, 模型的决定系数 R^2 为 0.898, 且 F 值为 122.457, 结果较为可靠。

2.3 总磷浓度反演模型检验

模型的精度和适用性通过地面同步采样和光谱测量数据以及星-地同步数据进行检验。

2.3.1 利用地面同步数据进行模型检验

利用剩余的 14 个实测数据对精度最高的模型 $y = -6.739x_1 - 0.217x_2 + 0.303$ 进行验证分析。图 4 为实测值与预测值对比结果。从中可以看出, 模型反演的预测值与实测值之间误差较小, 结果比较接近, 相对误差最小值为 0.116%, 平均绝对误差百分比 MAPE 和均方根误差 RMSE 分别为 14.296%、 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见所建立的模型具有较高的精度及一定的适应性。

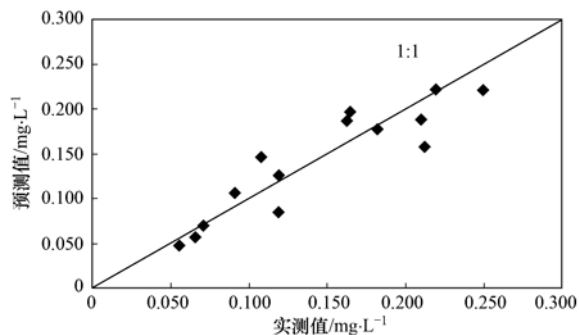


图4 总磷浓度预测值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of the predicted total phosphorus concentrations and the measured total phosphorus concentrations

2.3.2 利用星-地同步数据进行模型检验

2014 年 8 月 5 日与 2014 年 10 月 24 日分别获

取了 4 个与 GOCI 影像同步的数据, 因此, 利用这两天的 GOCI 影像数据, 对反演结果进行评价。首先, 选择与采样时间相近的 GOCI 影像进行总磷反演, 其次, 根据实测的总磷浓度与反演结果进行对比分析。图 5、图 6 为影像反演和实测值对比结果。

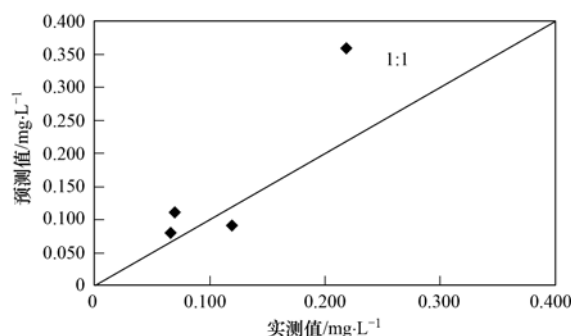


图5 2014 年 8 月 5 日影像总磷预测值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of the predicted total phosphorus concentrations from GOCI data and the measured total phosphorus concentrations on August 5, 2014

从图 5、图 6 中可以看出, 模型反演结果与实测结果相近, 2014 年 8 月, 平均绝对误差百分比 MAPE = 33.642%, 均方根误差 RMSE = $0.076 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2014 年 10 月, 平均绝对误差百分比 MAPE = 22.551%, 均方根误差 RMSE = $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。说明所建立的模型适用于 GOCI 影像的总磷浓度的反演。

2.3.3 模型适用性及影响因素分析

很多学者利用 GOCI 影像数据建立了内陆富营养化湖泊的水质参数反演模型, 冯驰等^[14]和郭宇龙等^[15]针对 GOCI 数据分别构建了两种新的叶绿素

表 2 不同变量建模分析
Table 2 Modeling analysis of different variables

波段组合变量编号	模型类型	拟合模型方程	R^2	F
1	线性	$y = -12.393x + 0.142$	0.695	136.760
	二次方程	$y = -11.940x^2 + 102.642x + 0.139$	0.698	68.217
	指数函数	$y = 0.120e^{-87.846x}$	0.701	140.761
2	线性	$y = -14.814x + 0.229$	0.727	159.412
	二次方程	$y = -18.466x^2 + 401.270x + 0.227$	0.751	88.777
	指数函数	$y = 0.218e^{-102.025x}$	0.692	134.675
3	线性	$y = -12.027x + 0.180$	0.764	193.746
	二次方程	$y = -12.579x^2 + 211.982x + 0.172$	0.784	106.805
	指数函数	$y = 0.156e^{-83.792x}$	0.744	174.367
4	线性	$y = -12.383x + 0.255$	0.699	139.280
	二次方程	$y = -20.730x^2 + 504.010x + 0.272$	0.769	98.415
	指数函数	$y = 0.258e^{-83.913x}$	0.644	108.684
5	线性	$y = -11.301x + 0.242$	0.768	198.225
	二次方程	$y = -14.775x^2 + 241.715x + 0.244$	0.803	120.416
	指数函数	$y = 0.238e^{-77.582x}$	0.726	159.201
6	线性	$y = -10.637x + 0.301$	0.648	110.281
	二次方程	$y = -22.294x^2 + 415.957x + 0.365$	0.722	76.797
	指数函数	$y = 0.347e^{-71.023x}$	0.580	82.718
7	线性	$y = -0.372x + 0.152$	0.667	120.030
	二次方程	$y = -0.387x^2 + 0.328x + 0.140$	0.723	77.153
	指数函数	$y = 0.128e^{-2.781x}$	0.746	176.182
8	线性	$y = -0.358x + 0.232$	0.695	136.871
	二次方程	$y = -0.470x^2 + 0.234x + 0.259$	0.730	79.841
	指数函数	$y = 0.230e^{-2.610x}$	0.741	171.587
9	线性	$y = -0.375x + 0.182$	0.721	155.013
	二次方程	$y = -0.410x^2 + 0.225x + 0.175$	0.756	91.174
	指数函数	$y = 0.160e^{-2.735x}$	0.768	198.513
10	线性	$y = -0.372x + 0.263$	0.745	175.350
	二次方程	$y = -0.464x^2 + 0.268x + 0.175$	0.763	95.220
	指数函数	$y = 0.281e^{-2.640x}$	0.755	185.093
11	线性	$y = -0.401x + 0.236$	0.712	148.459
	二次方程	$y = -0.504x^2 + 0.238x + 0.262$	0.745	86.087
	指数函数	$y = 0.236e^{-2.902x}$	0.749	178.763
12	线性	$y = -0.408x + 0.321$	0.717	152.343
	二次方程	$y = -0.583x^2 + 0.232x + 0.346$	0.735	82.017
	指数函数	$y = 0.423e^{-2.889x}$	0.722	156.104
13	线性	$y = -0.502x + 0.300$	0.739	169.564
	二次方程	$y = -0.601x^2 + 0.308x + 0.199$	0.747	87.172
	指数函数	$y = 0.361e^{-3.510x}$	0.726	159.058
14	线性	$y = -0.491x + 0.392$	0.707	144.946
	对数函数	$y = -0.123 \ln(x) + 0.054$	0.565	78.044
	二次方程	$y = -0.674x^2 + 0.208x + 0.427$	0.714	73.485
	幂函数	$y = 0.071x^{-0.748}$	0.418	43.016
	指数函数	$y = 0.675e^{-3.407x}$	0.683	128.999
15	线性	$y = -0.465x + 0.267$	0.747	177.043
	二次方程	$y = -0.483x^2 + 0.051x + 0.267$	0.748	87.471
	指数函数	$y = 0.283e^{-3.208x}$	0.713	149.213
16	线性	$y = -0.464x + 0.359$	0.742	172.537
	二次方程	$y = -0.509x^2 + 0.060x + 0.366$	0.743	85.256
	指数函数	$y = 0.526e^{-3.161x}$	0.693	135.292
17	进入回归分析	$y = 0.376 + 12.287x_1 - 58.448x_2 + 64.895x_3 - 22.797x_4 - 0.052x_5 + 1.173x_6 - 2.047x_7 + 0.627x_8 + 1.813x_9 - 2.458x_{10} - 2.701x_{11} + 3.166x_{12}$	0.847	22.546
18	逐步回归分析	$y = -11.301x_1 + 0.242$	0.876	198.225
19	逐步回归分析	$y = -6.739x_1 - 0.217x_2 + 0.303$	0.898	122.457

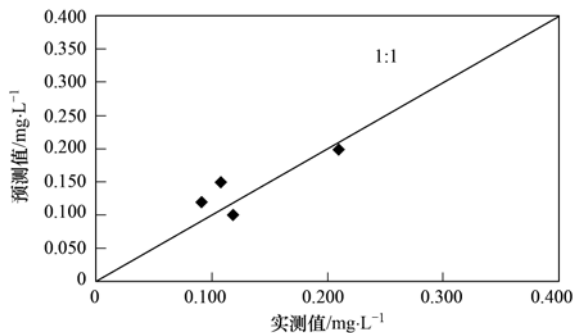


图6 2014年10月24日影像总磷预测值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of the predicted total phosphorus concentrations from GOCI data and the measured total phosphorus concentrations on October 24, 2014

反演模型; 江彬彬等^[16]和赵丽娜等^[17]等则运用 GOCI 数据进行了总悬浮物反演模型的研究. 而针对总磷浓度的反演模型比较少. 本文建立模型采用的 62 个样点总磷浓度范围为 $0.036 \sim 0.396 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.154 \pm 0.086) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度范围比较大, 研究表明当水体中的磷超过 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时就可能引起水的富营养化发生, 可见太湖水体重度富营养化, 同时图 4 中 14 个验证点能够较好地分布在 1:1 线附近, 不存在明显的高估低估现象, 可见

模型在此范围内有较好的适用性. 另外太湖是典型的富营养化湖泊, 众多研究发现, 富营养化湖泊中总磷与悬浮物、叶绿素 a 有着很好的相关性, Song 等^[11]、韩涛等^[18]和邓建才等^[19]发现太湖底泥的再悬浮是水中总磷的重要来源; 另外 Song 等^[11]和刘瑶等^[20]也说明了总磷的变化受到水体浮游植物的影响, 从而导致总磷与叶绿素 a 有一定的相关性. 可见此类湖泊的总磷浓度主要受这两个参数的影响. 为了分析叶绿素浓度与悬浮物浓度对所建立模型的影响程度, 研究了模型的相对误差和总磷浓度与叶绿素浓度的比值 (TP: Chla) 以及总磷浓度与总悬浮物浓度比值 (TP: TSM) 的关系. 图 7 给出了模型的相对误差与 TP: Chla 之间以及相对误差与 TP: TSM 值的关系, 从中可以看出模型的相对误差随着 TP: Chla 的值增加呈逐渐递减的趋势, 但该递减趋势并不明显. 模型相对误差与 PC: TSM 值基本上没有相关性. 由此可见, 两种成分对模型的影响较小. 所构建的模型能够较好地反演水体中的总磷浓度. 所以本文所构建的模型适用于运用 GOCI 数据分析富营养化湖泊的总磷浓度的变化研究中.

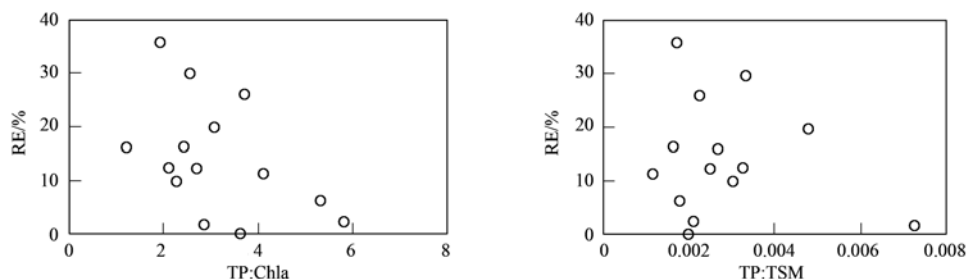


图7 模型影响因素分析

Fig. 7 Analysis of influencing factors on the inversion model

2.4 太湖总磷浓度时空变化分析

选取 2014 年 4 个季节共 4 d 30 景影像进行总磷浓度变化分析, 数据获取日期分别为 2014 年 1 月 1 日 (7 景), 2014 年 3 月 22 日 (8 景), 2014 年 8 月 4 日 (8 景), 2014 年 10 月 24 日 (7 景). 这些影像数据质量良好, 没有云层覆盖.

2.4.1 太湖总磷浓度空间分布变化

(1) 太湖总磷浓度空间分布规律

2014 年 1 月 1 日 08:00 ~ 14:00 太湖总磷浓度反演结果如图 8 所示. 从早上 08:00 的影像可以看出最高值出现在太湖西南部沿岸区域, 其余高值区出现在梅梁湾、竺山湾、贡湖湾, 湖心区高值区呈现块状分布. 西南部出现一条带状的高值区, 总磷

向东北方向扩散, 其余区域总磷分布均匀, 浓度相对较低. 为了具体地分析太湖的总磷浓度的区域差异性, 将全湖分为梅梁湾、竺山湾、贡湖湾、西部沿岸及湖心区这 5 个区域进行分析讨论, 如图 9, 可见梅梁湾的总磷浓度最高, 其次是竺山湾, 两湾的浓度高于全湖. 最低的区域为湖心区.

图 10 所展现的是 2014 年春季 3 月 22 日的 1 d 8 景的影像, 可以看出当天全湖的总磷高值区位于梅梁湾、竺山湾、贡湖湾及西部沿岸区域. 竺山湾浓度整体最高, 西南部沿岸区域总磷含量明显高于周边地区, 湖心区含量较低.

图 11 所示为 2014 年 8 月 4 日 1 d 8 景影像的太湖总磷浓度, 从中可以看出, 水华发生地梅梁湾、

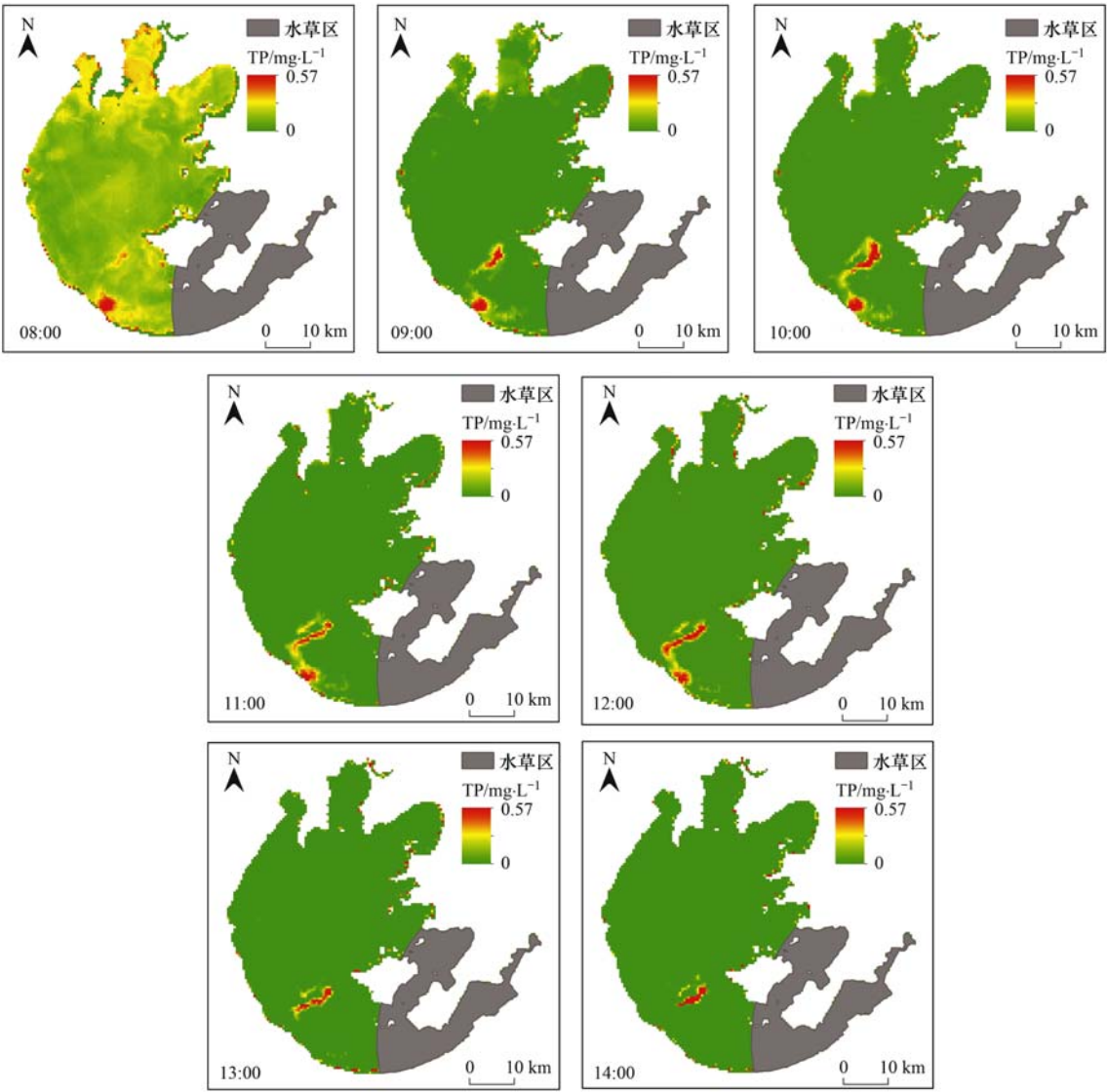


图 8 2014 年 1 月 1 日太湖总磷浓度时空分布

Fig. 8 Temporal and spatial distribution of total phosphorus concentration on January 1, 2014

竺山湾、贡湖湾及西北部沿岸区域总磷浓度很高,较其余区域差异很明显,从西部沿岸区域延伸出多条总磷浓度高的条带状区域,湖心区相比较之下含量比较低.

从 2014 年 10 月 24 日影像中看出(图 12),08:00 梅梁湾北部及竺山湾南部总磷浓度比较高,竺山湾和梅梁湾的总磷平均浓度远大于全湖的浓度,在竺山湾出口处向东南部湖心延伸有一条总磷含量高的条带出现,其余区域总磷含量较低.

(2)太湖总磷浓度空间差异性原因分析

从 4 个季节 30 幅总磷反演影像中可以看出梅梁湾、竺山湾、贡湖湾及西部沿岸是总磷含量较高的区域,而湖心区含量比较低. 主要由于 3 个湖湾及西部沿岸区域受到入湖河流及点源的污染较为严

重,从图 1 中可以明显看出太湖西部分布着众多入湖港口,大量的生活污水及工业废水排入太湖,带入了大量的营养盐物质,水体富营养化程度比较高,是水华易发生地. 此外,长期的富营养化状态导致底泥中含有丰富的营养盐,致使这几个区域的总磷浓度一直处于较高的状态. 同时,从影像上可以看出,西南部沿岸总磷含量明显高于周边地区,主要因为该区域有两条入湖河道,即长兜港和小梅港,长兜港为太湖流域最大的入湖河道^[21],东、西苕溪在此汇合后流入太湖,由于经过城镇,带入了大量的生活污水、工业废水,同时,由于此河道通航,水流量大,导致底泥再悬浮较其他区域显著,也是造成该区域营养盐浓度较高的原因. 湖心区及东部区域总磷浓度较低,水质相对较好,主要由于沿岸输入的总磷在迁

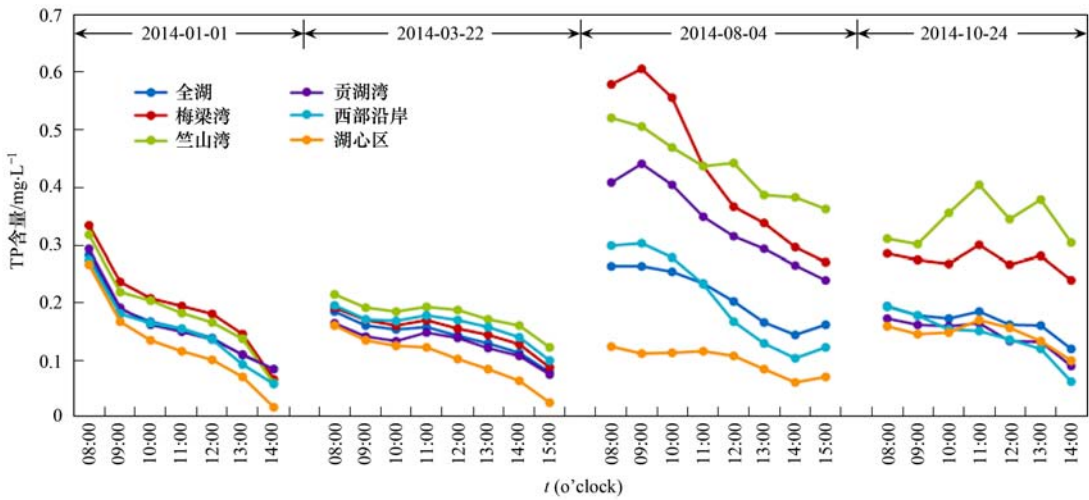


图 9 太湖总磷平均含量的日内变化

Fig. 9 Diurnal variation of the average content of total phosphorus in Lake Taihu

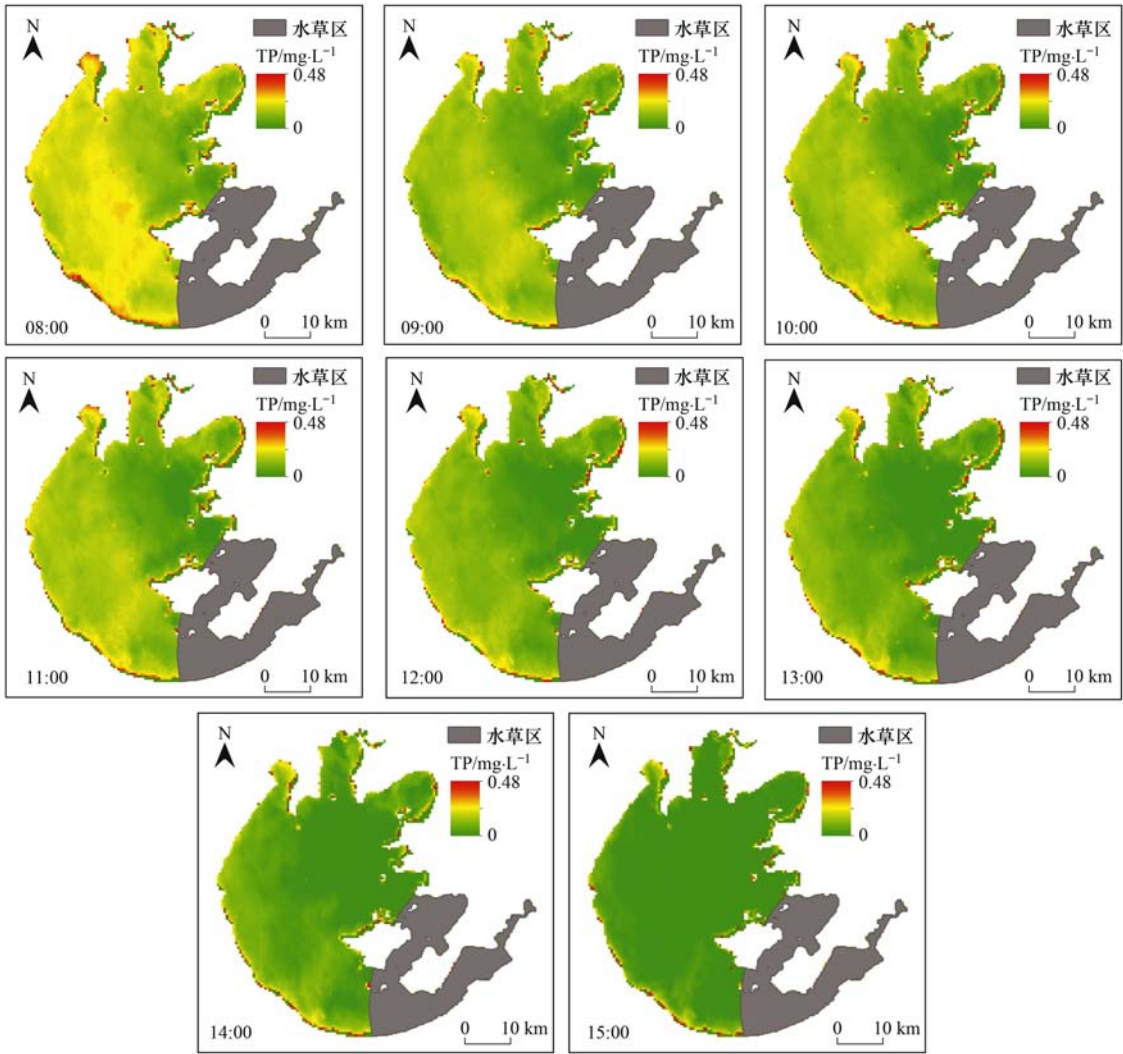


图 10 2014 年 3 月 22 日太湖总磷浓度时空分布

Fig. 10 Temporal and spatial distribution of total phosphorus concentration on March 22, 2014

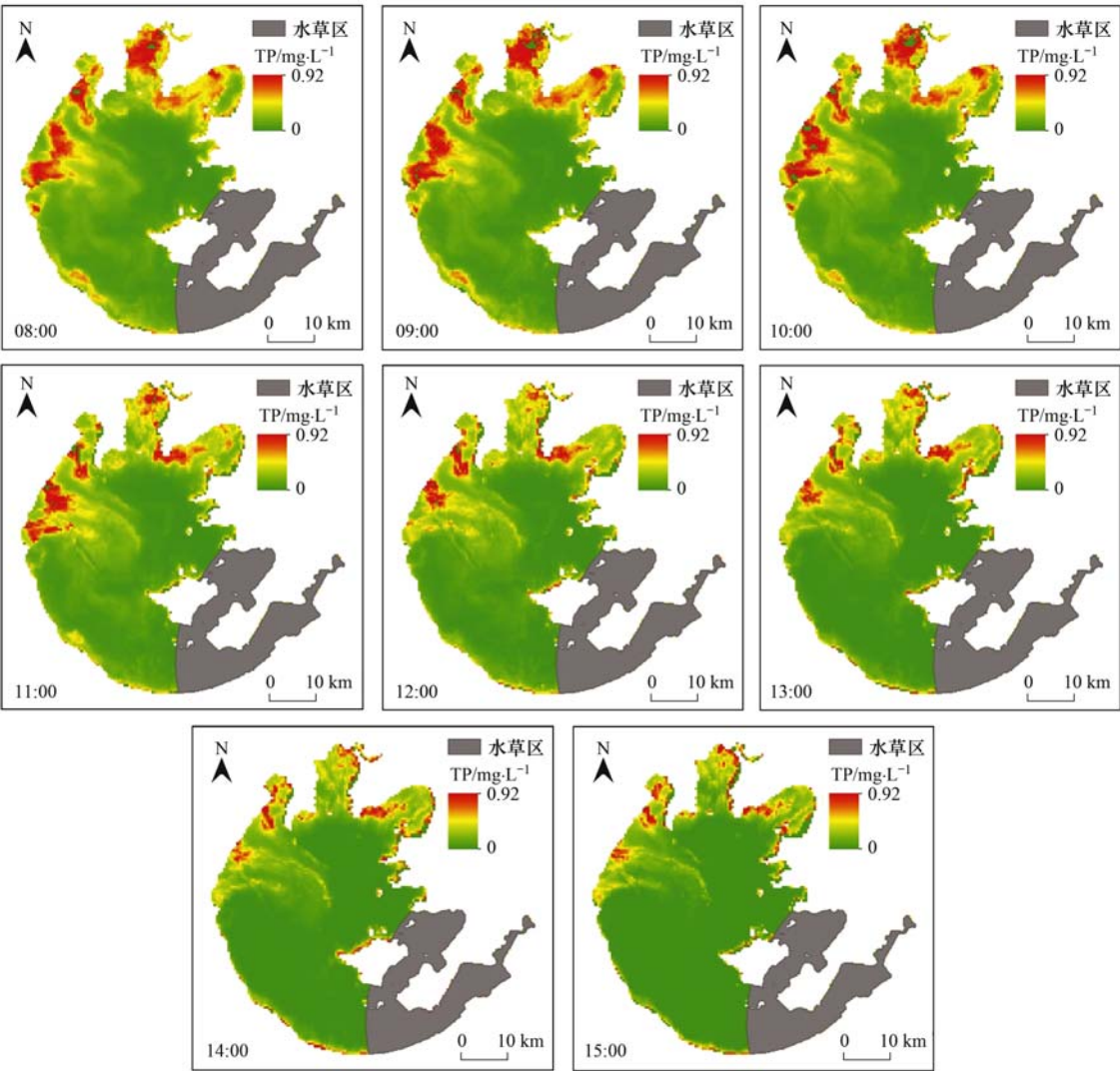


图 11 2014 年 8 月 4 日太湖总磷浓度时空分布

Fig. 11 Temporal and spatial distribution of total phosphorus concentration on August 4, 2014

移过程中逐渐被稀释；而东部湖区拥有较多的大型水生植物,这些植物在生长过程中吸收磷元素,并对底泥的再悬浮起到了抑制作用^[22],另一方面这部分区域位于太湖下游,主要是出湖河道,污染源较少,从而使得总磷浓度比较低。

2.4.2 太湖总磷浓度随时间的变化

(1) 太湖总磷浓度随时间的变化规律

从图 8 中可以看出 2014 年 1 月 1 日早上 08:00 全湖的总磷浓度最高,随着时间的变化,全湖的总磷浓度逐渐降低,西南部高值区逐渐向东北区域扩散。图 9 定量地表现了总磷含量均值 1 d 的变化状况, 08:00 ~ 09:00 之间总磷含量普遍下降最快, 09:00 ~ 13:00 之间全湖各区域总磷下降缓慢,而从 13:00 ~ 14:00 又开始加快。西南部出现一条带状的高值区,总磷向东北方向扩散,其余区域总磷分布均匀,

浓度相对较低。

2014 年 3 月 22 日随着时间变化,太湖整体总磷浓度逐渐降低,总磷浓度高值区降低尤为明显,湖心区变化不大。总磷含量整体趋势从东向西逐渐降低。到 15:00,西南部长兜港和小梅港附近总磷浓度相比于附近区域较高。

水华暴发期 2014 年 8 月 4 日上午 08:00 的影像显示梅梁湾、竺山湾、贡湖湾以及西部沿岸总磷浓度很高,随着时间的变化,高值区逐渐变少,整体由南部向北部慢慢降低。在当天 15:00, 3 个湾的北部沿岸区域总磷浓度还是较高。

2014 年 10 月 24 日全湖整体浓度逐渐降低。从图 9 中看出,从 08:00 ~ 09:00 影像反演结果显示梅梁湾及竺山湾浓度逐渐降低,但是从 10:00 点开始浓度逐渐升高,在 11:00 点到达最大值,影像中显示

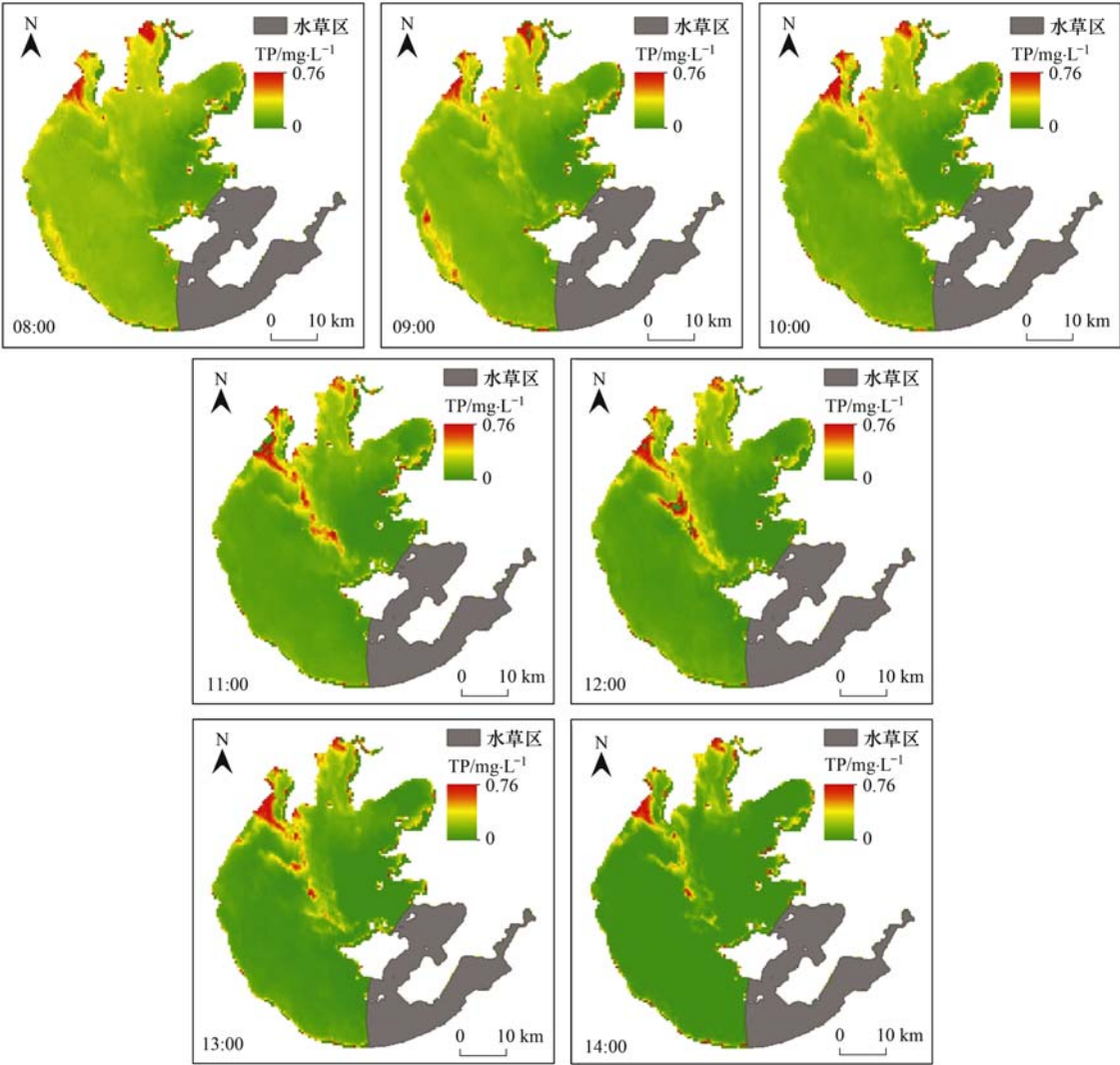


图 12 2014 年 10 月 24 日太湖总磷浓度时空分布

Fig. 12 Temporal and spatial distribution of total phosphorus concentration on October 24, 2014

太湖整体总磷浓度最后的变化也是由南向北递减. 高值区也是发生水华的区域, 同时从竺山湾出口处向东南部湖心延伸总磷含量高的条带也是水华漂浮的区域.

(2) 太湖总磷浓度随时间变化的原因分析

太湖总磷浓度的日内变化与当天的气候环境以及岸边河道有着密切的关系, 风向和风速会导致水体表层营养盐的迁移, 这对非沿岸区域有着显著的影响, 如 2014 年 1 月 1 日西南部出现的带状总磷高值区, 主要由于当天受西南风影响, 风力 4 ~ 5 级; 2014 年 3 月 22 日和 2014 年 8 月 4 日盛行东南风, 风力携带表层营养物质向西北移动, 导致当天总磷浓度自东向西、自北向南逐渐减少; 2014 年 10 月 24 日梅梁湾和竺山湾的变化与当天盛行的南风有关, 表层水的总磷被南风输移到湾内. 而太湖沿岸的总磷浓度主要受到入湖河道的影响, 以至于长时

间都处于一个相对较高的状态. 夏季及秋季的 GOCI 影像反演的总磷浓度普遍高于冬季及春季, 局部区域特别是 3 个湾地区有明显的变高趋势. 由于此时气候条件适宜, 水华暴发, 促使底泥中磷元素释放, 同时, 藻类、水生植物的腐烂死亡也会释放营养盐. 另外, 太湖夏秋季盛行东南风, 会使一部分藻类及总磷随水流迁移到西北区域, 从而增加了总磷的浓度. 夏季降雨量大, 农作物施肥, 河道从流域带入了大量营养盐进入太湖, 也是湖泊的磷增加的原因.

从图 9 中可以看出, 一年四季太湖全湖的总磷浓度都是早上 08:00 最高, 随后逐渐慢慢降低, 到了下午 15:00 达到最低, 呈现出慢慢降低的趋势, 主要是由于湖泊中磷的含量与水温及光照有着密切的关系^[23]. 低温会影响磷的吸附, 从而导致低温条件下水体中磷的浓度高于高温条件下的浓度; 在低温条件下, 虽然沉水植物腐烂分解缓慢, 向上覆水体释放

氮磷较少,但由于温度抑制了微生物的活动,减少磷的转换;在低温状态下,藻类植物繁殖减慢会减少总磷的吸收;光照与沉积物中磷释放量的变化趋势呈负相关^[24]。因此,经过一夜的低温状态,早上 08:00 的遥感影像呈现出较高的总磷浓度。

3 结论

(1)利用 3 次野外实验采样数据,拟合 GOCI 影像波段数据,建立基于 GOCI 数据的总磷浓度遥感反演模型。利用 2014 年 8 月 5 日及 2014 年 10 月 24 日星地同步数据对模型进行验证,验证结果表明该模型可以应用于 GOCI 卫星数据的总磷浓度反演。

(2)利用 2014 年 1 月 1 日、2014 年 3 月 22 日、2014 年 8 月 4 日、2014 年 10 月 24 日的 GOCI 影像反演太湖总磷浓度,并对其日内变化时空特征及季节分异状况进行了分析。结果表明,GOCI 数据能够清晰展现总磷浓度的空间分布,能够体现出水体受风向等外界因素影响而导致的总磷浓度的变化。从日内变化来看,太湖的总磷浓度从早上 08:00 以后逐渐降低,这主要和水温及光照有关;从空间分布来看,4 个季节的影像都表明,梅梁湾、竺山湾、贡湖湾这 3 个湾总磷浓度一直处于较高的水平,这主要和其长期处于富营养化的状态有关。此外,由于受到入湖河流的影响,西部沿岸特别是西南部的小梅港、长兜港,总磷浓度高于全湖的水平。

(3)利用 GOCI 数据高时间分辨率的特点,可以捕捉 1 d 内营养盐的变化特征,有利于对营养盐循环过程进行实时监测,在湖泊生态环境变化机制的研究中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Silió-Calzada A, Bricaud A, Gentili B. Estimates of sea surface nitrate concentrations from sea surface temperature and chlorophyll concentration in upwelling areas: A case study for the Benguela system[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(6): 3173-3180.
- [2] Isenstein E M, Park M H. Assessment of nutrient distributions in Lake Champlain using satellite remote sensing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(9): 1831-1836.
- [3] Wu C F, Wu J P, Qi J G, *et al.* Empirical estimation of total phosphorus concentration in the mainstream of the Qiantang River in China using Landsat TM data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(9): 2309-2324.
- [4] Gao Y N, Gao J F, Yin H B, *et al.* Remote sensing estimation of the total phosphorus concentration in a large lake using band combinations and regional multivariate statistical modeling techniques[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **151**: 33-43.
- [5] Sun D Y, Qiu Z F, Li Y M, *et al.* Detection of total phosphorus concentrations of turbid inland waters using a remote sensing method[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225**: 1953.
- [6] 王丽艳, 李畅游, 孙标. 基于 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体总磷浓度及富营养化状态评价[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5528-5534.
- [7] Chang N B, Xuan Z M, Yang Y J. Exploring spatiotemporal patterns of phosphorus concentrations in a coastal bay with MODIS images and machine learning models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**: 100-110.
- [8] 潘洁, 张鹰, 谭子辉. 基于高光谱的射阳河口悬浮泥沙浓度定量反演研究[J]. *海洋科学*, 2011, **35**(9): 85-90.
- [9] 王林, 赵冬至, 杨建洪. 基于环境一号卫星的大洋河口海域营养盐遥感反演[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 136-141.
- [10] 李冠男, 王林, 王祥, 等. 静止水色卫星 GOCI 及其应用进展[J]. *海洋环境科学*, 2014, **33**(6): 966-971.
- [11] Song K S, Li L, Li S, *et al.* Hyperspectral remote sensing of total phosphorus (TP) in three central Indiana water supply reservoirs[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(4): 1481-1502.
- [12] 燕姝雯, 余辉, 张璐璐, 等. 2009 年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(6): 855-862.
- [13] 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.
- [14] 冯驰, 金琦, 王艳楠, 等. 基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1557-1564.
- [15] 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 等. 一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3175-3185.
- [16] 江彬彬, 张霄宇, 黄大松, 等. 基于 GOCI 的近岸高浓度悬浮泥沙遥感反演——以杭州湾及邻近海域为例[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2015, **42**(2): 213-220.
- [17] 赵丽娜, 王艳楠, 金琦, 等. 基于 GOCI 影像的湖泊悬浮物浓度分类反演[J]. *生态学报*, 2015, **35**(16): 5528-5536.
- [18] 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 等. 太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3862-3871.
- [19] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- [20] 刘瑶, 江辉. 鄱阳湖表层水体总磷含量遥感反演及其时空特征分析[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(12): 2169-2177.
- [21] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [22] 冯露露, 李正魁, 周涛. 太湖浮游植物和各形态无机氮的时空分布特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(5): 739-745.
- [23] 张菊, 邓焕广, 王东启, 等. 不同温度条件下徒骇河沉水植物腐烂对上覆水体中营养盐浓度的影响[J]. *水资源保护*, 2011, **27**(4): 22-26.
- [24] 王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 120-126.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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