

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测：以安徽省升金湖与连接长江段为例

王行行^{1,2}, 王杰^{1,2*}, 崔玉环³

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 安徽大学湿地生态保护与修复安徽省重点实验室, 合肥 230601; 3. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036)

摘要: 开展河湖系统悬浮物监测对掌握水体泥沙运移规律、制定水环境治理措施具有重要意义. 以安徽省升金湖与连接长江段水体为研究区, 根据实测光谱模拟 Sentinel-2 MSI 影像波段反射率, 结合同步水体悬浮物实测数据建立反演模型; 而后根据 2017~2019 年 28 景 MSI 影像水体悬浮物反演结果, 分析河湖系统水体悬浮物浓度的变化规律, 并探究水位变化对其空间分异的影响. 结果表明: ① 根据 MSI 影像第六波段与第三波段的比值建立的二次多项式模型具有较高的反演精度 ($R^2 = 0.863$, $RMSE = 22.211 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 适用于高浊度水体悬浮物反演; ② 在空间上, 升金湖入湖口附近、上中湖区西北部和下湖悬浮物浓度相对较高, 除夏季外升金湖悬浮物浓度均高于其连接长江段; 在时间上, 升金湖悬浮物浓度在夏季相对较低, 在其他季节较高, 而与其连接的长江水体呈现相反的年内变化规律; ③ 闸控影响下河湖连通性改变造成的水位变化, 是影响升金湖-长江悬浮物空间分异的关键因素. 在平水期与枯水期, 升金湖对长江悬浮物浓度变化具有一定的贡献度, 而在丰水期, 升金湖与长江悬浮物浓度变化之间的相关性不明显.

关键词: Sentinel-2 MSI 影像; 升金湖; 悬浮物浓度; 遥感反演; 水位

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1207-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201907164

Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province

WANG Hang-hang^{1,2}, WANG Jie^{1,2*}, CUI Yu-huan³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Carrying out monitoring of suspended sediment concentration in river and lake systems is of great significance for understanding the laws of sediment transport in water and formulating policies on water environmental control. Taking Shengjin Lake and the connected Yangtze river section in Anhui province as the study area, band reflectance of a Sentinel-2 MSI sensor is simulated according to field spectral datasets, and the retrieval model is established by statistical regression from the synchronized suspended sediment concentration measurements. Then, the retrieved results from 28 scene MSI images during 2017-2019 are used to analyze the spatiotemporal variation of suspended sediment concentration in rivers and lakes, and the influence of water level variation on their spatial differentiation is also discussed. The results show that: ① The retrieval model established by the ratio of the sixth band to the third band of the MSI sensor is suitable for high-turbidity water type, with high accuracy ($R^2 = 0.863$, $RMSE = 22.211 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). ② Spatially, the suspended sediment concentration near the lake entrances, northwestern parts of the upper and middle lake areas, and the lower lake is relatively higher, and that of Shengjin Lake is lower than that of the Yangtze River overall except for in summer. Temporally, the suspended sediment concentration in Shengjin Lake is relatively lower in summer and higher in other seasons, while the connected Yangtze River section exhibits the opposite intra-annual variation. ③ The water level, which is caused by the connectivity of rivers and lakes under the influence of the sluice, is the key factor affecting the spatial differentiation of suspended sediment concentration in the river and lake system. The suspended sediment concentration in Shengjin Lake contributes to the Yangtze River in dry and normal water periods, and that in the normal water period is more significant. In contrast, during the flood period, the correlation between suspended sediment concentration in the Yangtze River and that in Shengjin Lake is not obvious.

Key words: Sentinel-2 MSI image; Shengjin Lake; suspended sediment concentration; remote sensing retrieval; water level

水体悬浮物直接影响太阳光在水中的衰减过程, 从而影响到河湖系统水体初级生产力和水下动植物的生存环境^[1~3]. 同时, 悬浮物对水中重金属和有机物具有强烈吸附作用, 是水生态与水环境评价的重要参数^[4,5]. 因此探究河湖系统水体悬浮物空间分异规律, 对掌握水体泥沙运移规律、有效开展

水环境治理具有重要意义^[6]. 水体悬浮物监测一般

收稿日期: 2019-07-18; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401022); 安徽高校自然科学基金项目(KJ2019A0045); 安徽省自然科学基金项目(1608085QD82)

作者简介: 王行行(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: hang723245655@163.com

* 通信作者, E-mail: wangjie@ahu.edu.cn

采用实地采样室内测定的方法,尽管测定精确,但其成本很高,只能获取离散的样点数据,无法获取大范围水体悬浮物的时空变化规律^[7~9].自 Landsat 系列卫星发射以来,通过遥感反演获取水质参数的方法得到快速发展,已被广泛用于获取大范围水体悬浮物的时空变化研究,克服了传统方法的局限性^[10].

目前水体悬浮物遥感估算通常采用经验/半经验方法,通过模拟可见光(或近红外)波段反射率与实测悬浮物浓度之间的关系,构建适用于不同水域的悬浮物反演模型,所涉及的遥感数据主要包括 MERIS^[11,12]、VIIRS^[13]、HJ-1 CCD^[14,15]、MODIS^[16]、Landsat^[17,18]和 GOCI^[5]等.但上述遥感数据源往往存在着空间、时间分辨率不可兼得的缺陷,难以有效反映河湖系统水体悬浮物的动态变化特征.

与其它传感器相比,Sentinel-2 卫星搭载的多光谱成像仪(MSI)具有较高的时间和空间分辨率^[19],自投入使用即被应用于水体悬浮物浓度估算方面的研究.如 Kutser 等^[20]的研究表明 Sentinel-2 MSI 在提取黑色湖泊悬浮物方面优于 Landsat 8 OLI;Liu 等^[9]利用 MSI 数据反演鄱阳湖悬浮物浓度,并与 MODIS 反演结果作对比,发现两者具有一致性;Caballero 等^[19]根据 MSI 数据构建了适用于西班牙西海岸区域的多条件水体悬浮物反演算法.然而,上述基于 Sentinel-2 MSI 的水体悬浮物反演模型在高浊度水域中的通用性还有待进一步研究.

长江中下游大多数湖泊为通江浅水湖泊,自 20 世纪 50 年代以来,因建闸和筑堤等水利工程的影响,改变了河湖系统水体的自然连通状态,进而导致其水质状况的变化.迄今为止,开展长江中下游地区河湖系统水体悬浮物空间分异规律的研究还未见报道.因而,本文以升金湖-长江河湖系统为研究区,利用 Sentinel-2 MSI 数据建立了适用于高浊度水体悬浮物浓度遥感反演模型,根据多时相遥感影像反演结果分析河湖系统水体悬浮物的动态特征,最后探讨了水位变化对河湖系统水体悬浮物空间分异的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

升金湖位于长江南岸安徽省池州市境内,是国际重要湿地之一,也是东方白鹤和白头鹤等珍稀水禽的重要栖息地,有着“中国鹤湖”之称,具有重要的国际影响力^[21].湖面面积约为 132.8 km²,其东南侧张溪河为主要入湖支流,沿着水流方向分为上湖、中湖和下湖这 3 个湖区^[22].其中,上湖和中湖之间

设有姜坝水文站,下湖与长江之间设有黄湓闸水文站(图 1).

升金湖经由黄湓闸与长江干流相通,湖泊水位由黄湓闸控制(图 1),在夏季水深达到 2.5~3 m,秋冬季水位持续下降,下湖中有一部分湖区从主湖区分离.在每年的 11~12 月,升金湖通过黄湓闸开始向长江放水;到来年 3~4 月,黄湓闸停止放水,开始正常运行,使湖泊逐渐恢复正常水位;在每年的 6~9 月,为防止长江水倒灌,黄湓闸处于关闭状态,此时升金湖与长江处于不连通状态.

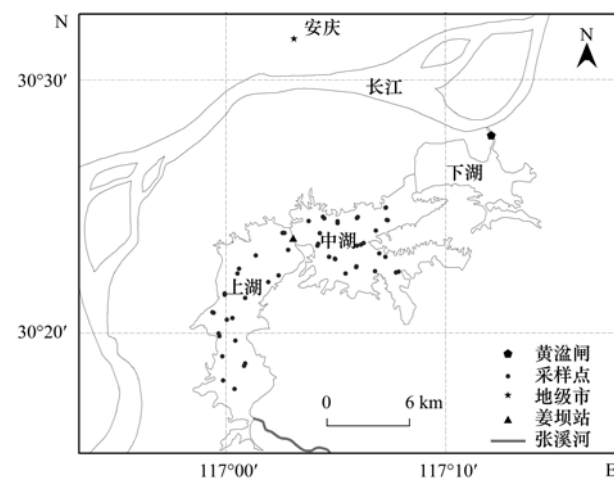


图 1 研究区概况与采样点示意

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling sites

1.2 实测数据集

本研究分别于 2017 年 4 月 14~15 日和 2017 年 10 月 21~22 日在升金湖进行了 2 次采样,在湖面布设了 53 个样点(图 1).利用荷兰 Avantes 公司生产的 AvaField-1 便携式地物光谱仪根据水表面以上测量法测定水体反射光谱曲线^[23],观测方位角为 135°,观测天顶角为 40°,需要测量的遥感参量有标准灰板、天空光和水面上行光谱辐亮度.与此同步测定水体样点的透明度、浊度以及地理位置,并采集表层水样 500 mL 带回实验室测定其悬浮物浓度、叶绿素浓度.其中,悬浮物浓度参照国家 GB 11901-89 标准采用烘干称重法测定,数值范围在 1.4~302 mg·L⁻¹,平均浓度为 62.28 mg·L⁻¹;叶绿素浓度参照国家 SL 88-2012 标准采用分光光度计法测定,数值范围在 0.28~30.9 μg·L⁻¹,平均浓度为 6.83 μg·L⁻¹.

本文所需的 2017~2019 年间逐日水位(姜坝站,代表升金湖上湖水位;黄湓闸上、闸下,分别代表升金湖下湖、长江水位)、降雨量和风速等气象指标均从安徽省遥测信息网上(<http://yc.wswj.net/ahyc/>)下载得到.

1.3 遥感数据集

本研究从欧洲航天局官网(<https://scihub>).

copernicus.eu/) 下载得到 2017 年 4 月至 2019 年 3 月的 Sentinel-2 MSI 影像, 去除有云的影像, 共 28 景 (表 1)。由于目前对 MSI 影像中的内陆水体缺少成熟的大气校正算法, 因此本文选用了欧洲航天局官网上提供 SNAP 软件下的 Sen2cor 模块, 对原始遥感影像分别进行辐射定标和大气校正。

表 1 Sentinel-2 MSI 影像及对应水位

Table 1 Sentinel-2 MSI images and corresponding water level

序号	日期(年-月-日)	影像类型	姜坝水位/m	黄溢闸闸上水位/m	黄溢闸闸下水位/m
1	2017-04-02	Sentinel-2A	11.13	11.13	11.14
2	2017-07-21	Sentinel-2A	14.72	14.73	14.88
3	2017-07-26	Sentinel-2B	14.25	14.17	14.12
4	2017-10-24	Sentinel-2B	11.29	11.28	12.50
5	2017-11-03	Sentinel-2B	11.37	11.36	11.35
6	2017-11-23	Sentinel-2B	10.74	8.77	7.95
7	2017-12-18	Sentinel-2A	10.32	9.82	7.09
8	2018-01-12	Sentinel-2B	10.70	8.52	7.76
9	2018-02-26	Sentinel-2A	10.76	8.61	7.84
10	2018-03-13	Sentinel-2B	10.82	9.11	8.20
11	2018-03-23	Sentinel-2B	10.84	10.5	8.19
12	2018-03-28	Sentinel-2A	10.79	9.39	8.41
13	2018-04-07	Sentinel-2A	10.80	8.75	7.94
14	2018-04-27	Sentinel-2A	10.77	10.17	8.76
15	2018-06-01	Sentinel-2B	11.21	11.15	11.23
16	2018-07-21	Sentinel-2B	12.25	12.36	13.62
17	2018-08-10	Sentinel-2B	12.71	12.69	12.44
18	2018-09-04	Sentinel-2A	12.56	12.12	11.38
19	2018-09-09	Sentinel-2B	11.94	11.23	10.69
20	2018-09-29	Sentinel-2B	10.73	10.76	8.41
21	2018-10-04	Sentinel-2A	10.71	10.76	8.92
22	2018-10-29	Sentinel-2B	10.67	10.63	8.37
23	2018-11-23	Sentinel-2A	10.23	8.83	8.83
24	2018-11-28	Sentinel-2B	10.30	8.93	8.93
25	2018-12-18	Sentinel-2B	10.69	9.01	8.05
26	2019-01-22	Sentinel-2A	10.67	8.58	8.56
27	2019-01-27	Sentinel-2B	10.59	9.59	8.81
28	2019-03-13	Sentinel-2A	11.15	11.13	11.29

1.4 研究方法

1.4.1 模拟遥感波段反射率

为有效建立适用于 MSI 影像的悬浮物浓度反演模型, 本研究基于实测水体光谱数据, 结合 MSI 传感器的光谱响应函数模拟遥感波段反射率 [式 (1)]。

$$R = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} f_i(\lambda) R_{rs}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} f_i(\lambda) d\lambda}$$

(1)

式中, R 为模拟波段反射率, R_{rs} 为实测光谱反射率, $f_i(\lambda)$ 为光谱响应函数, λ_1 和 λ_2 为遥感波段两端对应波长。

1.4.2 遥感影像预处理

本文对 Sentinel-2 MSI 影像的预处理主要包括辐射校正、无植被覆盖的水域提取这两部分。采用 SNAP 软件下 Sen2cor 模块^[20]对 MSI 影像进行辐射校正后, 分别合成水体指数 MNDWI、植被指数

NDVI [式 (2) ~ (3)]。首先根据水体指数 MNDWI 采用阈值法进行水域提取, 然后根据植被指数 NDVI 剔除水生植被分布区域, 最终得到无水生植被覆盖的水体遥感反射率影像^[24]。

$$MNDWI = \frac{\rho(\text{Green}) - \rho(\text{MIR})}{\rho(\text{Green}) + \rho(\text{MIR})}$$

(2)

$$NDVI = \frac{\rho(\text{NIR}) - \rho(\text{Red})}{\rho(\text{NIR}) + \rho(\text{Red})}$$

(3)

式中, $\rho(\text{Green})$ 、 $\rho(\text{MIR})$ 、 $\rho(\text{Red})$ 和 $\rho(\text{NIR})$ 分别为 MSI 传感器绿光波段反射率、中红外波段反射率、红光波段反射率和近红外波段反射率。

2 结果与分析

2.1 水体悬浮物浓度的敏感波段分析

本文首先利用实测悬浮物浓度与水体光谱反射率进行相关性分析 (图 2), 发现两者在 520 ~ 600 nm 处相关系数为负值, 400 ~ 520 nm 和 600 ~ 900 nm 处为正值, 负相关性波谷在 560 nm 左右, 正相关

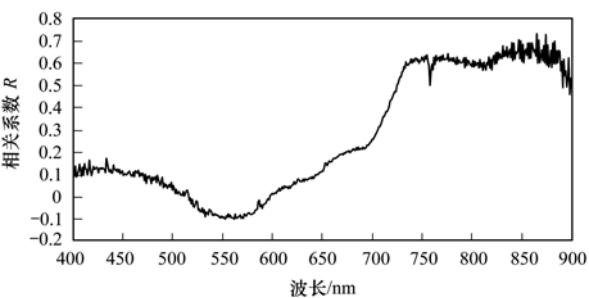
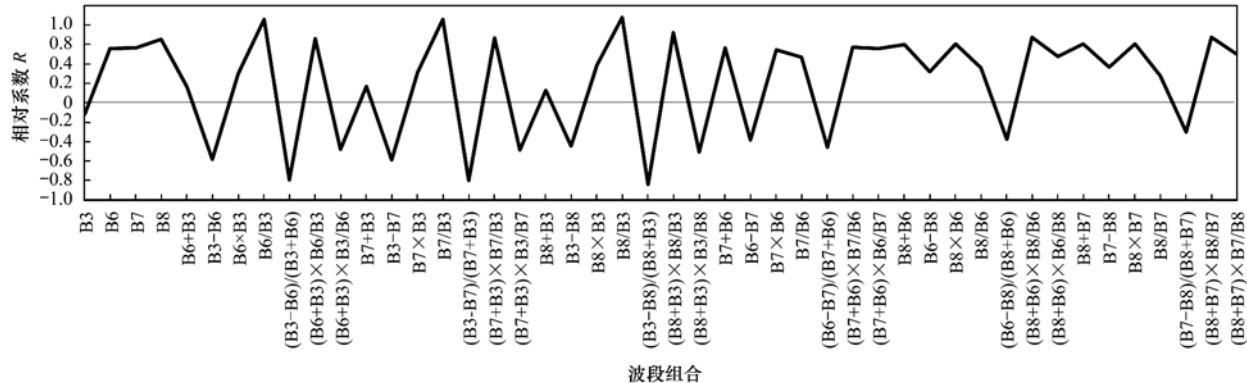


图2 实测悬浮物浓度与水体光谱反射率的相关分析

Fig. 2 Correlation between suspended sediment concentration and water spectral reflectance measurements

性的最大波峰在 750 nm 左右,在 730 ~ 880 nm 处相关系数基本大于 0.6.

由 Sentinel-2 MSI 传感器波段 的中心波长设置可知,对水体悬浮物浓度的敏感波段对应该传感器的 B3、B6、B7 和 B8 a 波段.而后本文对这 4 个波段的遥感反射率进行单波段和任意两波段组合法,分别与实测悬浮物浓度进行相关分析(图 3).由图 3 可知实测悬浮物浓度与不同波段组合的相关系数在 -0.839 ~ 0.877. 其中,相关系数绝对值大于 0.75 的组合方式有 6 组.



Bi 表示 MSI 传感器对应的不同波段
图3 MSI 传感器波段组合与实测悬浮物浓度的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient between band combination and suspended sediment concentration measurements

2.2 水体悬浮物反演模型的构建与检验

在此基础上,以不同波段组合指数为自变量,实测悬浮物浓度和实测对数悬浮物为因变量,构建水体悬浮物浓度遥感反演模型所构建的模型类型,包括线性、幂函数、倒数、二次函数与对数模型.本文

根据 2017 年春、秋季在升金湖湖面实测得到的 53 个样点数据,随机选取 36 个为训练样本,建立悬浮物浓度遥感反演模型,剩下的 17 个为检验样本,用于模型验证.不同模型的拟合精度结果见表 2,表中只显示了 R^2 大于 0.7 的模型.

表 2 不同悬浮物浓度模型拟合精度比较

Table 2 Comparison of different methods to build the models

波段组合	模型	拟合精度	
		R^2	RMSE/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
B6/B3	$\text{TSS} = 341.004x - 81.333$	0.734	30.946
	$\text{TSS} = 31.530 - 215.127x + 604.705x^2$	0.863	22.211
	$\ln(\text{TSS}) = 0.260 + 10.220x - 4.538x^2$	0.702	22.465
(B3 - B6)/(B3 + B6)	$\text{TSS} = -53.897 - 123.386 \ln(x)$	0.828	24.914
	$\text{TSS} = -4.341 + 22.284/x$	0.747	30.182
	$\text{TSS} = 358.406 - 1159.829x + 967.575x^2$	0.853	23.014
	$\ln(\text{TSS}) = -6.235x + 6.292$	0.701	24.716
B7/B3	$\ln(\text{TSS}) = 6.218 - 5.846x - 0.449x^2$	0.701	23.716
	$\text{TSS} = 334.670x - 74.555$	0.737	30.742
	$\text{TSS} = 12.929 - 97.475x + 465.358x^2$	0.831	24.663
(B3 - B7)/(B3 + B7)	$\text{TSS} = -41.653 - 113.106 \ln(x)$	0.813	25.977
	$\text{TSS} = 337.859 - 1031.993x + 817.885x^2$	0.827	24.974
B8/B3	$\text{TSS} = 477.466x - 55.354$	0.771	28.73
	$\text{TSS} = -9.219 + 128.308x + 541.515x^2$	0.812	26.006
	$\text{TSS} = -382.326x + 297.967$	0.704	32.659
(B3 - B8)/(B3 + B8)	$\text{TSS} = -44.315 - 207.528 \ln(x)$	0.795	27.157
	$\text{TSS} = -88.110 + 86.031/x$	0.785	27.848
	$\text{TSS} = 530.248 - 1242.283x + 748.516x^2$	0.817	25.696

从表 2 中看出,在构建模型中拟合精度最高是以 B6/B3 为自变量的二次多项式模型($R^2 = 0.863$, $RMSE = 22.211$),见图 4(a). 接下来利用剩下的 17 个检验样本对该模型的预测数值进行验证分析. 图 4(b) 显示了水体悬浮物浓度实测值与模型预测值之间的关系,可以看出两者基本分布在 $y = x$ 函数附近, R^2 达到 0.893, $RMSE$ 为 $21.607\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可见,本文所构建的反演模型具有较高的预测精度,适用于基于 Sentinel-2 MSI 影像的高浊度水体悬浮物浓度遥感反演研究.

2.3 升金湖与连接长江段悬浮物变化特征分析

本文将所构建的水体悬浮物反演模型应用于 2017 ~ 2019 年的 28 景 Sentinel-2 MSI 影像,得到对应日期的升金湖-长江连通水体悬浮物浓度反演结果. 为减少光学浅水区底质反射对水体悬浮物反演结果的影响,本文在利用 MNDWI 提取水体时,通过调整其阈值,对水体光学浅水区进行剔除. 而后根据表 1 按不同季节取均值,得到升金湖-长江悬浮物浓度在不同季节的遥感反演影像(图 5).

2.3.1 升金湖与连接长江段空间变化

从图 5 中可看出,升金湖水体悬浮物浓度时空差异较大,数值在 $10 \sim 300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,高值区主

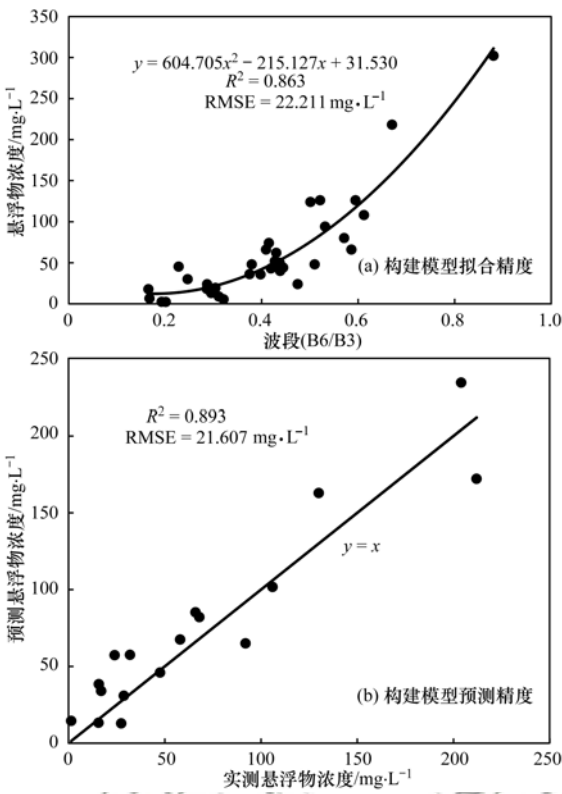


图 4 本文所构建模型的拟合精度与预测精度
Fig. 4 Fitting accuracy and prediction accuracy
of the model constructed in our paper

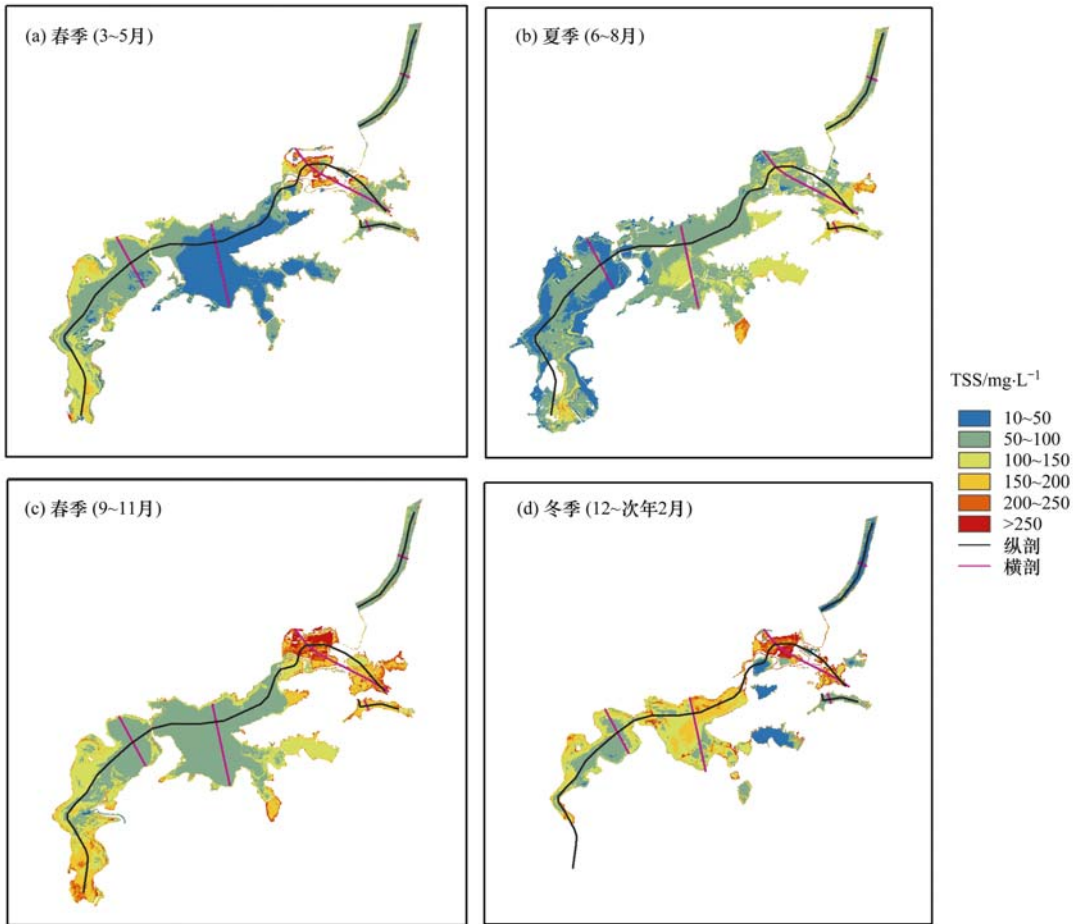


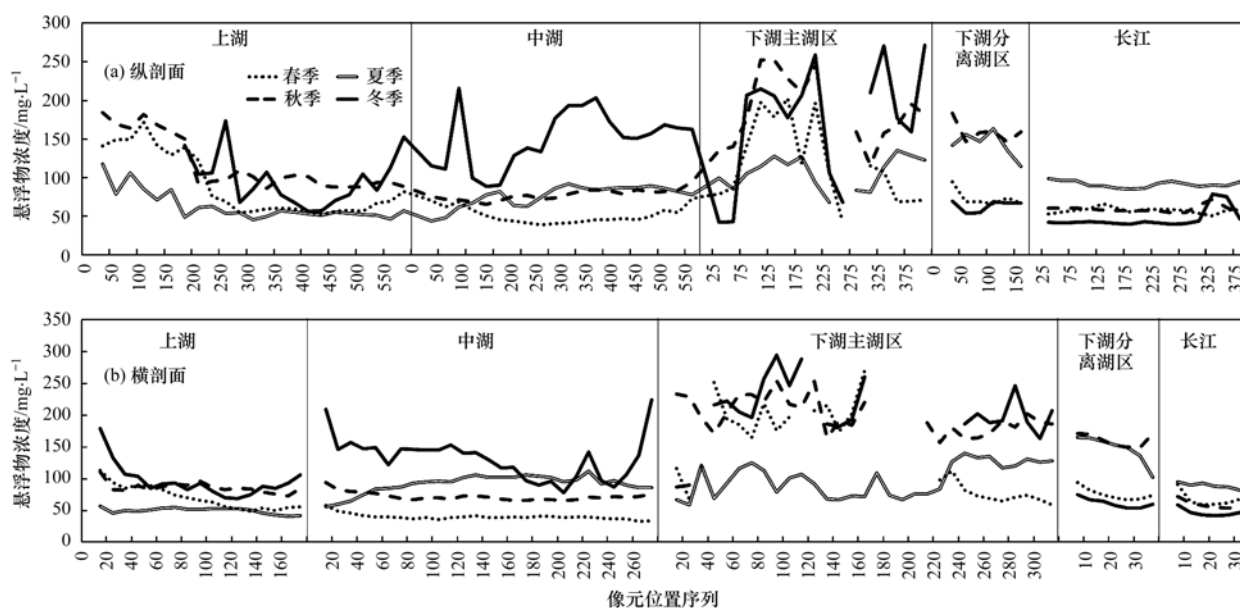
图 5 升金湖-长江水体悬浮物浓度遥感反演

Fig. 5 Retrieved results of suspended solids concentration in Shengjin Lake-Yangtze River

要集中在上湖南部和下湖. 其中, 上湖南部的悬浮物浓度较高, 主要是由于该区域位于主要入湖支流——张溪河的入湖口附近, 受到径流携沙作用影响, 且水深较浅易受到湖底泥沙再悬浮作用的影响^[24]; 下湖悬浮物浓度较高, 其原因在于该区域的围网养殖活动集中, 水生植被破坏殆尽, 导致水体悬浮物浓度增大^[21].

为进一步分析升金湖-长江水体悬浮物的空间变化, 本文分别绘制升金湖上湖、中湖、下湖以及长江水体悬浮物浓度的纵、横剖面图(图6). 沿着

水流方向[图6(a)], 升金湖入湖口和下湖悬浮物浓度整体要高于其它区域, 而在春、冬季节, 下湖分离湖区悬浮物浓度低于主湖区, 其原因在于该时期其与主湖区脱离, 不受水流携沙作用的影响; 除夏季以外, 长江水体悬浮物浓度均低于升金湖. 垂直于水流方向[图6(b)], 在升金湖上湖和中湖, 其西北部悬浮物浓度高于东南部, 其原因在于自2016年以来该区域修建了沿湖堤防水利工程, 人为扰动导致了局部水体悬浮物浓度升高; 在下湖, 除夏季外, 水体悬浮物浓度空间波动较大.



像元位置序列在每个湖区均从0开始, 纵剖面像元位置顺序从下而上, 顺着水流方向; 横剖面像元位置顺序从湖区的左到右

图6 升金湖-长江水体悬浮物浓度空间变化

Fig. 6 Spatial variation of suspended solids concentration in Shengjin Lake-Yangtze River

2.3.2 升金湖与连接长江段年内变化

为了探究河湖连通水体悬浮物浓度的年内变化规律, 根据这28景遥感影像反演结果采用GIS空间分析, 分别统计升金湖上湖、中湖、下湖及连接长江段水体悬浮物浓度的年内变化(图7).

从图7可看出, 长江水体悬浮物浓度在每年4月末~9月较高($TSS > 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其中在8月中旬达到最大($TSS > 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 上湖悬浮物浓度在每年9月末至来年4月较高($TSS > 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其他月份较低; 中湖在2017年11月末至

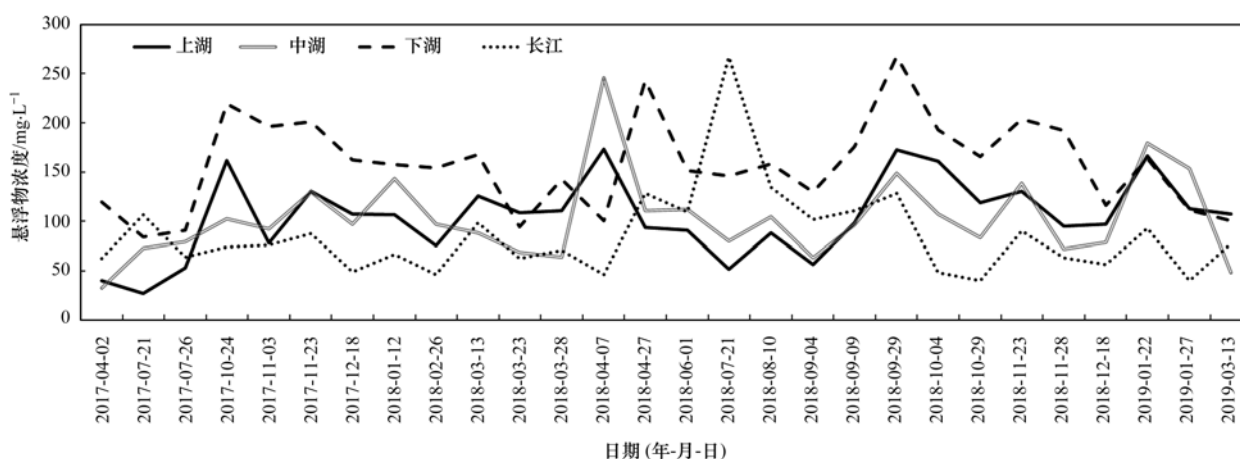


图7 升金湖-长江水体悬浮物浓度年内变化

Fig. 7 Intra-annual variation of suspended solids concentration in the Shengjin Lake-Yangtze River

2018 年 1 月、2018 年 4 月、2018 年 9 月末至 11 月和 2019 年 1 月的悬浮物浓度较高 ($TSS > 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 下湖悬浮物浓度在 2017 年 10 ~ 11 月、2018 年 4 月、2018 年 9 月末至 11 月和 2019 年 1 月的悬浮物浓度较高 ($TSS > 165\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 总体来看, 升金湖在 6 ~ 9 月初的水体悬浮物浓度相对较低, 在其他月份较高. 而与其连接长江水体呈现相反的年内变化规律, 有必要进一步分析水体悬浮物变化规律的驱动因素.

2.4 升金湖-长江水体悬浮物变化的影响因素

针对水体悬浮物变化的影响因素, 有学者也开展了一系列研究工作. 在自然因素上, 地表径

流^[25,26]、水位^[27,28]、风场^[6, 11]和降水^[15], 植被盖度和鱼群密度^[18]等是影响河湖水体悬浮物变化的关键因素. 在人为因素上, 在鄱阳湖^[29,30]、洞庭湖^[31]和新安江水库^[32]等的研究表明, 湖区采砂和水利工程建设等人类活动也会引起水体悬浮物时空格局发生变化.

为进一步探讨升金湖-长江水体悬浮物变化规律的驱动因素, 本文结合实测台站资料分析了水位、降雨、风速等气象要素与水体悬浮物浓度的相关关系, 发现实测水位与悬浮物浓度的相关性最高 (表 3). 因而, 文中将着重分析水位变化对升金湖-长江水体悬浮物变化的影响.

表 3 水体悬浮物浓度与实测水位等气象要素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between suspended solids concentration and measured meteorological factors					
项目	姜坝水位	黄溢闸闸上水位	黄溢闸闸下水位	风速	降雨量
上湖	-0.622	-0.575	-0.585	-0.040	0.094
中湖	-0.296	-0.440	-0.385	0.136	0.350
下湖	-0.426	-0.279	-0.281	-0.241	-0.264
长江	0.337	0.373	0.470	0.307	-0.181

2.5 升金湖-长江水体的水文周期划分

根据黄溢闸实测水位 (闸上水位) 资料, 生成 2017 ~ 2019 年升金湖-长江水体逐日水位变化 (图 8). 从图 8 中可看出, 每年 4 月初闸上、闸下水位均开始上升, 上升至 11 m 左右, 两者相差不大; 每年 6 ~ 9 月, 长江水位高于升金湖水位时, 为了防止长江水倒灌, 黄溢闸处于关闭状态, 闸上、闸下水位均开

始上升, 上升到 12 m 以上; 每年 9 ~ 10 月, 闸上、闸下水位均开始下降, 下降至 11 m 左右; 在每年 11 月至来年 3 月, 黄溢闸频繁向长江放水, 闸上、闸下水位继续下降, 下降至 10 m 以下. 按照上述规律, 本文根据实测水位将一个水文周期分成枯水期、平水期、丰水期. 枯水期, 黄溢闸上水位低于 10 m, 平水期黄溢闸上水位 10 ~ 12 m, 丰水期黄溢闸上水位大于 12 m.

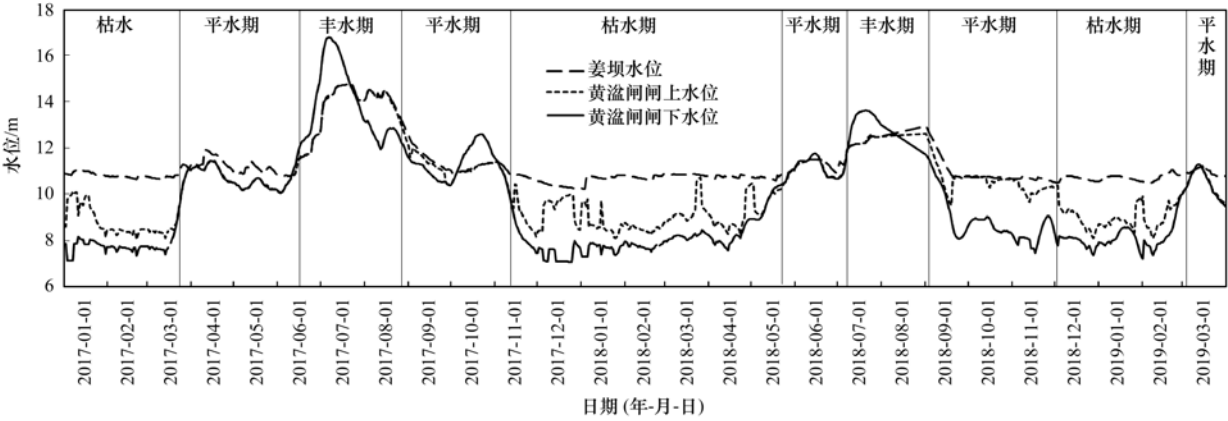


图 8 2017 ~ 2019 年升金湖-长江水体逐日水位变化

Fig. 8 Daily water level variation of Shengjin Lake-Yangtze River from 2017 to 2019

3 讨论

3.1 遥感模型对水体悬浮物浓度估算精度的影响

在 2.2 节中根据实测数据对构建的悬浮物浓度反演模型进行了精度验证, 表明该模型在地面观测尺度上模拟精度较高. 本文把该模型应用于同期成像的 Sentinel-2 MSI 遥感影像, 并根据选择的检验样本对水体悬浮物浓度遥感反演值进行精度验证

(图 9).

在鄱阳湖, Liu 等^[9]采用统计回归方法也建立了基于 Sentinel-2 MSI 影像的悬浮物反演模型, 并与同期 MODIS 影像反演结果作比较. 为了评价遥感模型对水体悬浮物浓度估算精度的影响, 本文尝试将刘会增等所构建的模型应用于升金湖卫星影像, 并与本文所构建模型的反演精度进行比较 (图 9)

从图 9 中可以看出, 本文构建的波段比值模型

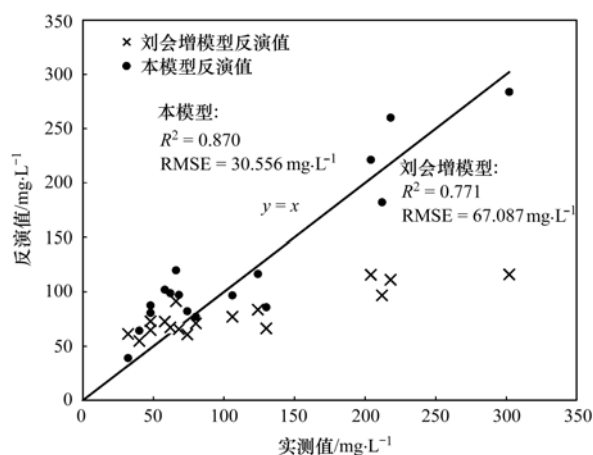


图9 本文模型与刘会增模型的遥感反演精度比较

Fig. 9 Comparison of retrieved accuracy between our model and the model by Liu

在升金湖水体悬浮物浓度遥感反演中精度更高 ($R^2 = 0.870$, $RMSE = 30.556 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而刘会增等所构建的单波段模型在悬浮物浓度较高时 ($TSS > 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表现出明显的低估现象. 这反映了本研究提出的模型更为适用于高浊度水体悬浮物遥感反演, 其原因在于高浊度水体悬浮物与 MSI 影像在第六波段反射率的相关系数达到最大, 而在第三波段达到最小 (图 2), 通过波段比值运算增强了其与水体悬浮物浓度的相关性.

此外, 结合图 4 与图 9, 本文构建的模型在卫星尺度上反演精度比在地面尺度要低, 分析其原因有二: ①该模型是基于地面实测数据构建的, 将其应用到卫星尺度, 空间尺度差异致使其适用性下降; ②受所用水体大气校正方法的限制, 在低浊度水体 ($TSS < 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 影像中的 B6/B3 (反射率比值) 要高于实测光谱, 导致悬浮物遥感反演数值偏大.

3.2 水位变化对升金湖-长江水体悬浮物空间分异的影响

按 2.5 节中的枯水期、平水期、丰水期这 3 个水文周期划分, 本文分别对升金湖-长江水体悬浮物浓度的空间分异特征进行统计分析 (图 10), 进而分析在不同水文周期升金湖与长江水体悬浮物浓度变化的相关性 (图 11).

在平水期, 水体悬浮物浓度表现为下湖 > 上湖 > 中湖 > 长江. 其原因在于此时期长江上游径流量较小, 泥沙冲刷量少, 水体悬浮物含量较低, 故长江悬浮物浓度小于升金湖. 升金湖悬浮物浓度表现为下湖 > 上湖 > 中湖, 这主要受不同湖区水动力条件的影响: 在上湖、中湖之间有姜坝拦截, 一定程度上减小了中湖水流冲击; 下湖围有人工鱼塘, 破坏了水生植被生长, 对水体悬浮物吸附能力减弱, 加大了下湖的悬浮物浓度^[18]; 此时期, 黄溢闸基本处于开

闸状态, 升金湖下湖与长江的悬浮物浓度变化呈现显著相关 [图 11 (a), $R = 0.748$]. 这说明在平水期升金湖悬浮物浓度对长江悬浮物浓度具有较高的贡献度, 但水体悬浮物输入到长江后即被稀释.

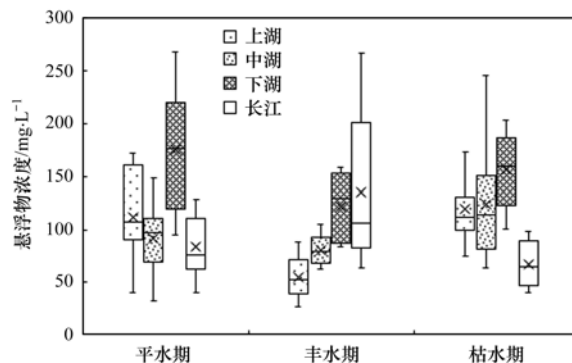


图10 不同水文周期升金湖-长江水体悬浮物浓度空间分异

Fig. 10 Spatial variation of suspended sediment concentration in Shengjin Lake-Yangtze River over different hydrology periods

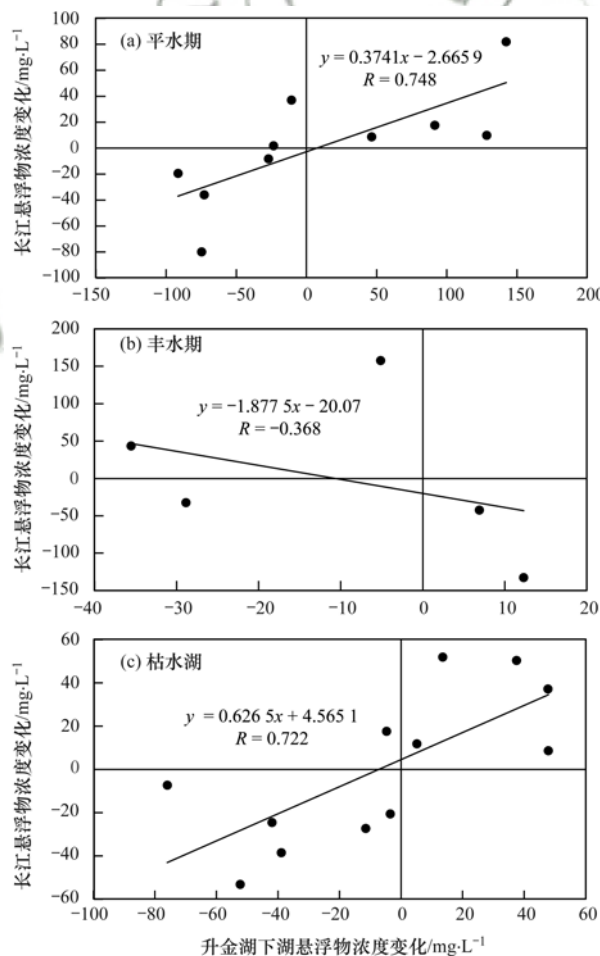


图11 不同水文周期升金湖与长江水体悬浮物浓度变化量的相关性

Fig. 11 Correlation of suspended sediment concentration variation between Shengjin Lake and the connected Yangtze River in different hydrological cycles

在丰水期, 水体悬浮物浓度表现为长江 > 下湖 > 中湖 > 上湖. 其原因在于此时入湖径流量较大, 导

致湖泊水位升高, 水流受到黄溢闸的拦截作用, 所携带泥沙堆积在中、下湖, 使得下湖悬浮物浓度最大, 中湖悬浮物浓度较低, 上湖悬浮物最低。而此时长江径流量、水位波动较大, 且受到上游水流携沙作用的影响, 使得悬浮物浓度高于升金湖, 且悬浮物浓度值波动范围较大。此时期黄溢闸基本处于关闭状态, 升金湖下湖与长江的悬浮物浓度值变化之间的相关系数很小[图 11(b), $R = -0.368$], 两者之间的相关性不明显。

在枯水期, 水体悬浮物浓度表现为下湖 > 中湖 > 上湖 > 长江, 这与平水期的空间分异规律基本一致。此时期长江与升金湖下湖的悬浮物浓度值变化之间也存在显著的相关性[图 11(c), $R = 0.722$], 但不如平水期的相关性高。这主要因为该时期黄溢闸频繁向长江放水, 湖面水位下降致使下湖分成一些小湖泊, 并与主湖区隔离, 在一定程度上降低了升金湖下湖与长江悬浮物浓度变化的相关性。

4 结论

(1) 利用实测水体光谱模拟 Sentinel-2 MSI 影像波段反射率, 建立了以 B6/B3 波段比为自变量的水体悬浮物反演模型。同时利用实测悬浮物浓度从地面尺度、卫星尺度分别对模型反演数值进行精度验证, 结果表明该模型适用于 Sentinel-2 MSI 影像的高浊度水体悬浮物浓度遥感反演。

(2) 不同时空 Sentinel-2 MSI 影像的水体悬浮物浓度遥感监测结果表明: 在空间上, 升金湖入湖口附近、上中湖西北部和下湖悬浮物浓度要高于其它区域, 且除夏季外, 长江水体的悬浮物浓度均低于升金湖; 在时间上, 升金湖水体悬浮物浓度在 6~9 月相对较低, 在其他月份较高, 而与其连接的长江水体呈现相反的年内变化规律。

(3) 闸控运作影响下河湖连通性改变所造成的湖泊水位变化, 是导致升金湖-长江水体悬浮物浓度空间分异的关键因素。在平水期、枯水期, 水体悬浮物浓度表现为下湖 > 上(中)湖 > 中(上)湖 > 长江, 此时期升金湖和长江基本处于连通状态, 升金湖对长江悬浮物浓度具有一定的贡献度, 且平水期更为显著; 而在丰水期, 水体悬浮物浓度则呈现为长江 > 下湖 > 中湖 > 上湖, 升金湖和长江处于隔离状态, 对应水体悬浮物浓度变化的相关性不明显。

参考文献:

[1] 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.
Zhao L N, Wang Y N, Jin Q, *et al.* Method for estimating the concentration of total suspended matter in lakes based on goci images using a classification system[J]. Acta Ecologica Sinica,

2015, **35**(16): 5528-5536.
[2] Nezlin N P, Digiacomo P M, Stein E D, *et al.* Stormwater runoff plumes observed by SeaWiFS radiometer in the Southern California Bight[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, **98**(4): 494-510.
[3] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.
[4] Zhao X L, Zhao J H, Zhang H M, *et al.* Remote sensing of sub-surface suspended sediment concentration by using the range bias of green surface point of airborne LiDAR bathymetry[J]. Remote Sensing, 2018, **10**(5): 681-700.
[5] 胡耀躲, 张运林, 杨波, 等. 基于高频次 GOCI 数据的太湖悬浮物浓度短期动态和驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 992-1003.
Hu Y D, Zhang Y L, Yang B, *et al.* Short-term dynamics and driving factors of total suspended matter concentration in Lake Taihu using high frequent geostationary ocean color imager data[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 992-1003.
[6] Caballero I, Morris E P, Ruiz J, *et al.* Assessment of suspended solids in the Guadalquivir estuary using new DEIMOS-1 medium spatial resolution imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **146**: 148-158.
[7] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **164**: 43-56.
[8] Chen J L, Fang X R, Wen Z F, *et al.* Spatio-temporal patterns and impacts of sediment variations in downstream of the Three Gorges Dam on the Yangtze River, China[J]. Sustainability, 2018, **10**(11): 4093-4100.
[9] Liu H Z, Li Q Q, Shi T Z, *et al.* Application of Sentinel 2 MSI images to retrieve suspended particulate matter concentrations in Poyang Lake[J]. Remote Sensing, 2017, **9**(7): 761-780.
[10] 黄李童, 陈江, 朱渭宁. 基于 Landsat-8 的城市湖泊水体总悬浮物吸收系数的遥感反演——以杭州西湖为例[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(10): 4073-4082.
Huang L T, Chen J, Zhu W N. Remote sensing inversion of total suspended matter absorption coefficient in coastal urban lakes using Landsat-8: case study of West Lake in Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(10): 4073-4082.
[11] Zhang Y L, Shi K, Liu X H, *et al.* Lake topography and wind waves determining seasonal-spatial dynamics of total suspended matter in turbid Lake Taihu, China: assessment using long-term high-resolution MERIS data[J]. PLoS One, 2014, **9**(5): 1-13.
[12] Loisel H, Mangin A, Vantrepotte V, *et al.* Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **150**: 218-230.
[13] 曹志刚, 段洪涛, 崔海山, 等. 基于 VIIRS 数据洪泽湖悬浮物浓度估算算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2016, **35**(4): 462-469.
Cao Z G, Duan H T, Cui H S, *et al.* Remote estimation of suspended matter concentrations using VIIRS in Lake Hongze, China[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, **35**(4): 462-469.
[14] Yu Z F, Chen X L, Zhou B, *et al.* Assessment of total suspended sediment concentrations in Poyang Lake using HJ-1A/1B CCD imagery[J]. Chinese Journal of Oceanology and

- Limnology, 2012, **30**(2): 295-304.
- [15] 邢晓达, 申茜, 李俊生, 等. 基于 HJ-CCD 的漫湾坝区河流悬浮物浓度遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2016, **31**(4): 682-690.
- Xing X D, Shen X, Li J S, *et al.* Inversion of suspended matter concentration of the river of Manwan dam regions based on HJ-CCD Data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, **31**(4): 682-690.
- [16] Cao Z G, Duan H T, Feng L, *et al.* Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **192**: 98-113.
- [17] Cai L N, Tang D L, Li C Y. An investigation of spatial variation of suspended sediment concentration induced by a bay bridge based on Landsat TM and OLI data [J]. Advances in Space Research, 2015, **56**(2): 293-303.
- [18] 乔娜, 黄长平, 张立福, 等. 典型浅水草型湖泊水体悬浮物浓度遥感反演[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, **38**(6): 510-516.
- Qiao N, Huang C P, Zhang L F, *et al.* Remote sensing inversion of total suspended matter concentration in typical shallow macrophytic lake [J]. Journal of Hubei University (Natural and Science), 2016, **38**(6): 510-516.
- [19] Caballero I, Steinmetz F, Navarro G, *et al.* Evaluation of the first year of operational Sentinel-2A data for retrieval of suspended solids in medium- to high-turbidity waters [J]. Remote Sensing, 2018, **10**(7): 982-1005.
- [20] Kutser T, Paavel B, Verpoorter C, *et al.* Remote sensing of Black Lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters [J]. Remote Sensing, 2016, **8**(6): 497-512.
- [21] 杨李, 董斌, 汪庆, 等. 安徽升金湖国家级自然保护区水鸟生境适宜性变化 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1027-1034.
- Yang L, Dong B, Wang Q, *et al.* Habitat suitability change of water birds in Shengjinhu National Nature Reserve, Anhui Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(6): 1027-1034.
- [22] 叶小康, 董斌, 王成, 等. 升金湖湿地时空演变对越冬鹤类种群动态的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(1): 63-69.
- Ye X K, Dong B, Wang C, *et al.* Effects of spatiotemporal changes of Shengjin Lake wetland on the dynamics of wintering cranes population [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(1): 63-69.
- [23] 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.
- Tang J W, Tian G L, Wang X Y, *et al.* The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, **8**(1): 37-44.
- [24] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589-595.
- Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, **9**(5): 589-595.
- [25] 周阳, 刘金娥, 许晓光, 等. 风浪扰动下湖滨带悬浮物和营养盐响应特征 [J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 948-956.
- Zhou Y, Liu J E, Xu X G, *et al.* Response of suspended solids and dissolved nutrients in littoral zone of Lake Taihu under wind-wave disturbances [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 948-956.
- [26] He Y H, Gui Z H, Su C J, *et al.* Response of sediment load to hydrological change in the upstream part of the Lancang-Mekong River over the past 50 years [J]. Water, 2018, **10**(7): 888-902.
- [27] 江彬彬, 张霄宇, 杜泳, 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): 220-227.
- Jiang B B, Zhang X Y, Du Y, *et al.* Retrieving high concentration of suspended sediments based on GOCI: an example from coastal water around Hangzhou Bay, China [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2015, **42**(2): 220-227.
- [28] Wang J L, Chen E Y, Li G, *et al.* Spatial and temporal variations of suspended solid concentrations from 2000 to 2013 in Poyang Lake, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(16): 590-605.
- [29] 李海军, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 考虑采砂影响的鄱阳湖丰水期悬浮泥沙浓度模拟 [J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 421-431.
- Li H J, Chen X L, Lu J Z, *et al.* Numerical simulation of suspended sediment concentration in Lake Poyang during flood season considering dredging activities [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 421-431.
- [30] Cui L J, Qiu Y, Fei T, *et al.* Using remotely sensed suspended sediment concentration variation to improve management of Poyang Lake, China [J]. Lake and Reservoir Management, 2013, **29**(1): 47-60.
- [31] Zheng Z B, Li Y M, Guo Y L, *et al.* Landsat-based long-term monitoring of total suspended matter concentration pattern change in the wet season for Dongting Lake, China [J]. Remote Sensing, 2015, **7**(10): 13975-13999.
- [32] 张毅博, 张运林, 查勇, 等. 基于 Landsat 8 影像估算新安江水库总悬浮物浓度 [J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 56-63.
- Zhang Y B, Zhang Y L, Zha Y, *et al.* Remote sensing estimation of total suspended matter concentration in Xin'anjiang reservoir using Landsat 8 data [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 56-63.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)