

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

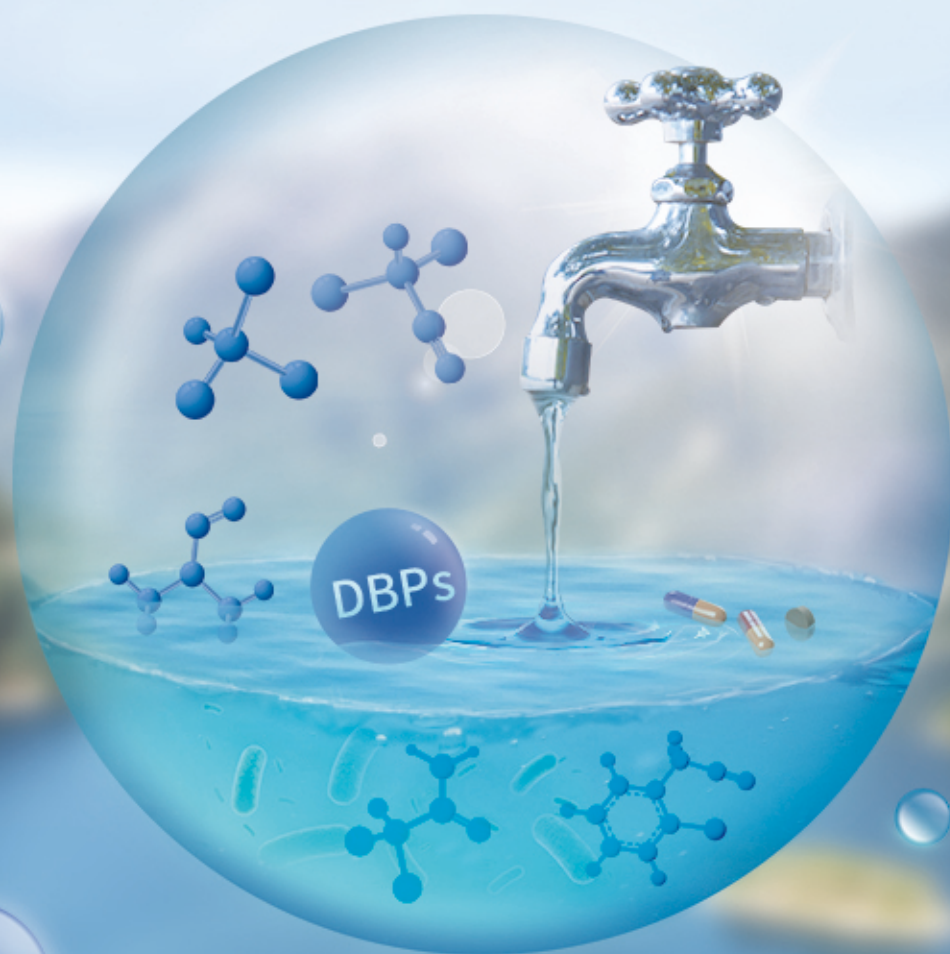
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演

李建鸿^{1,2}, 黄昌春^{1*}, 查勇¹, 王川¹, 尚娜娜¹, 郝维月¹

(1. 南京师范大学地理学院, 南京 210023; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 总悬浮物(TSM)是描述水体光学特性和污染程度的一个重要参数, 利用遥感技术准确获取面状水域悬浮物浓度的信息, 可有效地对水体浑浊程度、污染程度等信息指标进行高效监测分析, 解决观察范围小、不方便以及数据获取难等难题。以野外实测水体高光谱数据和悬浮物浓度及其组分等数据, 参照 MODIS(1~4 波段)、Landsat 8(1~5 波段)、Sentinel 2(2~6 波段)和 HJ-B1(1~4 波段)等常用波段范围, 构建长江干流(重庆-上海段)水体 TSM 的半经验模型, 从而检验、比较常用卫星对河流水体 TSM 的反演潜力。结果表明: ① 枯水期长江干流浊度和 TSM 从重庆到上海整体呈增加趋势, 相反有机悬浮物浓度在总悬浮物浓度中所占的比例(OSM/TSM)从重庆到上海整体呈现较小趋势。② 水体光谱曲线基本没用叶绿素 a 的光谱特征(700 nm 附近的反射峰), 而是展现出悬浮物浓度占主导因素的双峰型光谱特征。由于水体中悬浮物浓度较低($< 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 第一峰值明显高于第二峰值, 但反射峰位置具有明显的向波长方向移动的“红移”现象。③ 长江干流水体的反射率对悬浮物浓度最敏感的波段是 600~710 nm 和 475~550 nm 波段, 这些波段大部分都落在 MODIS、Landsat 8、Sentinel 2 和 HJ-1B 卫星绿波段和红波段内, 因此目前常用卫星的波段设置在反演长江干流水体 TSM 上都具有一定的潜力。其中 Sentinel 2 卫星波段设置最合处长江干流水体悬浮物浓度的反演, 其最佳的指数反演模型 RMSE 为 $10.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MAPE 为 23%。

关键词: 悬浮物浓度; 遥感反演; 经验模型; 长江干流; 空间变化

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5239-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103245

Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River

LI Jian-hong^{1,2}, HUANG Chang-chun^{1*}, ZHA Yong¹, WANG Chuan¹, SHANG Na-na¹, HAO Wei-yue¹

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Total suspended matter(TSM) is an important parameter that describes optical characteristics and water pollution level. Remote sensing was used to obtain suspended matter concentrations in the planar water body, which can monitor and analyze the reliability of turbidity and pollution levels. In this study, a semi-empirical model of suspended matter along the Yangtze River mainstream (from Chongqing to Shanghai) was constructed based on the field measured hyperspectral data and suspended matter concentration and its components, with reference to MODIS(1-4 band), Landsat 8(1-5 band), Sentinel 2(2-6 band), HJ-B1(1-4 band), and other commonly used band ranges. The results show that: ① Turbidity and TSM of the Yangtze River mainstream increased from Chongqing to Shanghai during the dry season, whereas the proportion of OSM to TSM (OSM/TSM) decreased from Chongqing to Shanghai. ② The spectral properties of chlorophyll-a were not obvious; however, it showed a bimodal spectral characteristic of suspended matter concentration. Due to the low concentration of suspended matter in the water ($< 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the first peak value was significantly higher than the second peak. However, peak reflection and position had an obvious “red shift” phenomenon in the direction of the wavelength. ③ The reflectance values of the Yangtze River mainstream were most sensitive to the concentration of suspended matter in the 600-710 nm and 475-550 nm bands. Most of these fall in the green and red band of MODIS, Landsat 8, Sentinel 2, and HJ-1B satellites. Therefore, the commonly used satellites have a band setting to detect the inversion of turbidity degree index of the Yangtze River main stream water body. The Sentinel 2 satellite band is most suitable for the inversion of suspended matter concentration in the Yangtze River mainstream. The mean absolute percentage error(MAPE) and root mean square error(RMSE) of the optimal exponential model were $10.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 23%, respectively.

Key words: suspend matter concentration; remote sensing inversion; empirical model; Yangtze River mainstream; spatial variation

总悬浮物(total suspended matter, TSM)包括不溶于水的无机物、有机物、泥沙和微生物等, 携带着大量的污染物, 是水质评价的一项重要指标, 其对光具有强烈的吸收和散射作用, 它的分布特征直接决定着光在水体中的传播, 从而影响着水体的透明度、真光层深度等光学参数, 进而影响湖泊热量收支、水生生物的生长和水体初级生产力^[1,2]。利用遥感技术准确获取面状水域水质信息是水色遥感应用的主要内容之一, 水色遥感技术可有效对悬浮物浓度进行监测分析, 解决观察范围小、不方便以及数据获取难等难题^[3,4]。水色遥感研究通常将水体分

为Ⅰ类水体和Ⅱ类水体, Ⅱ类水体复杂的光学性质一直是影响水质参数反演精度提高的障碍。但早在 1983 年 Carpenter 等^[5]的研究已经证明, 利用遥感定量方法监测悬浮物浓度是可行的, 而 Novo 等^[6]的研究则进一步通过分析实验室水体光谱反射率和总悬浮颗粒物浓度之间的关系, 发现水体光谱反射率和悬浮颗粒之间呈线性关系, 在 450~900 nm 处两

收稿日期: 2021-03-28; 修订日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971286)

作者简介: 李建鸿(1988~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向地理环境遥感, E-mail: jianhonglikarst@163.com

* 通信作者, E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

者的相关性较好,且红波段相关性最高。近年来国内外学者对Ⅱ类水体 TSM 更是进行了广泛的遥感研究,针对不同传感器、不同研究区建立了许多反演模型^[7]。目前利用遥感估算 TSM 的反演模型主要分为基于水体固有光学特征分析的分析模型和半分析模型^[8,9],基于水体表观光学特征回归统计分析的经验模型和半经验模型^[2,10~13],而目前以经验和半分析方法为主^[14]。经验模型的优点在于模型构建简单,而且在某种程度上可以降低大气校正误差带来的影响^[15]。汪小钦等^[16]和温小乐等^[17]的研究基于 TM 遥感影像,分别利用光谱混合分析法和回归分析法对福建闽江下游和江口 TSM 进行了反演,模型的相关系数均达到 0.8 以上。陈晓翔等^[18]以珠江口海域为研究区,用气象卫星 FY-1D 数据对遥感监测值与准同步实测悬浮泥沙浓度进行对比分析,证明 FY-1D 多波段组合可用于珠江口海域 TSM 浓度遥感估算。张毅博等^[14]的研究表明,利用 Landsat 8 的 B2、B3 和 B8 构建的多元回归模型能够较好地估算新安江水库水体的 TSM 浓度。Dekker 等^[8]的研究利用 Landsat TM 的 B2、B3 波段为变量构建经验模型,较好地估测了弗里斯兰湖区的 TSM 浓度。总结上述研究表明:690~900 nm 波段为水体 TSM 变化最敏感波段,水体反射率随悬浮物含量的增加而单调增加,适合用来监测悬浮物,且近红外波段似乎适合悬浮物浓度较高的水域,而可见光波段悬浮物浓度适合较低的水域^[14]。

尽管内陆水体悬浮物遥感研究已经取得了长足的进展,但目前主要集中在面积较大的湖泊、水库和河口,由于遥感影像时间分辨和空间分辨率的限制,对相对狭窄的河流水体的研究较少^[19~22],更没有形成业务化的高精度的面向全流域,全球内陆水体的产品体系。一方面是由于与湖泊、水库和河口相比,河道水体光学特性更为复杂而且随区域和季节变更变化大,导致很难构建普适性的高精度的水色遥感模型。另一方面是河流河道曲折多变,流程跨度大,水面宽窄相间,目前已有的卫星遥感空间分辨率与幅宽互相制约很难对分布较长的河道进行整体研究。但为了进一步提高内陆水体光学遥感的应用效果,需要进一步加强不同类型内陆水体光学特性数据获取和分析工作,在此基础上完善面向长时序和大范围内陆水体的水色遥感算法^[7]。长江是中国的第一大河,长约6 300 km,其不同区域的河道水体浑浊程度差异明显。为此,本研究利用野外实测水体光谱反射率和现场同步观测的浊度,悬浮颗粒物浓度数据相结合,建立枯水期长江主干流(重庆-上海)水体悬浮物的半经验模型,进一步完善内陆水

体水质遥感反演的研究,以期开展全流域水质研究提供了新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 研究区

长江长6 300 km,流域面积 $1.94 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图1)^[23]。宜昌水文站以上部分为上游,地形复杂,坡度陡,水流湍急,主要支流有嘉陵江和乌江,乌江流域南部以碳酸盐岩为主。长江中游(宜昌-湖口)流经洞庭湖平原、汉江平原和鄱阳湖平原。洞庭湖流域约92%为沉积岩(主要为石灰岩)和变质岩。汉江流域碳酸盐岩分布广泛,鄱阳湖盆地以变质岩为主。湖口水文站以下为下游,流经苏皖平原,河道较宽,没有大的支流,这一河段还包括潮汐淡水河口^[24]。本研究主要对重庆至上海长江口段长江干流进行研究,全长2 368.88 km,途经三峡水库和葛洲坝水库。三峡水库位于长江中上游交界处,为峡谷型水库,水库长600 km,库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。葛洲坝水库位于中国湖北省宜昌市境内的长江三峡末端河段上,距离长江三峡37 km^[25]。水库的建设极大地改变了流域的年际流量分配和沉积物的输移,进而可能影响到主干内的碳输移^[23,24]。

长江流域除源头部分地区外,约76%的区域属于亚热带季风气候区。整个流域的降水主要集中在雨季(5~10月),占全年降水总量的70%~90%^[24]。本次调查处于冬季枯水期,调查期前15 d,长江整个流域无大降雨事件,因此调查期间河流水位和流量相对比较平稳,大通水站平均流量($16\,400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)低于年平均流量($25\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),但风速较大(平均 $3.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),气温变化较大($-0.10 \sim 14.60^\circ\text{C}$),平均气温较低[(8.92 ± 3.32) $^\circ\text{C}$]。调查前期阴天较多,后期天气较为晴朗,沿程水温的变幅在7 $^\circ\text{C}$ 左右,上游较高($11.12 \sim 18.24^\circ\text{C}$),平均水温[(14.59 ± 2.58) $^\circ\text{C}$]。pH变化范围在7.66~8.36之间(上游较低),DO浓度在9.66~10.8 mg·L⁻¹之间,溶解氧饱和度范围在88.10%~100%,处于欠饱和状态。

1.2 样品的采集和分析

在2020-12-04~2020-12-16冬季枯水期对长江干流(重庆至上海长江河口)水环境进行调查。调查从嘉陵江与长江交汇处开始乘船顺流而下,船只平均航行速度 $10.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,在河流中央附近每10~50 km间隔,用10L的Niskin采样器采取中间线上水深0.5 m处的水样,共设置71个采样点(图1)。

现场用 Palintest CT12 浊度计(英国百灵达公司)测量水体浊度,分辨率0.1 NTU,测试前用0.05、

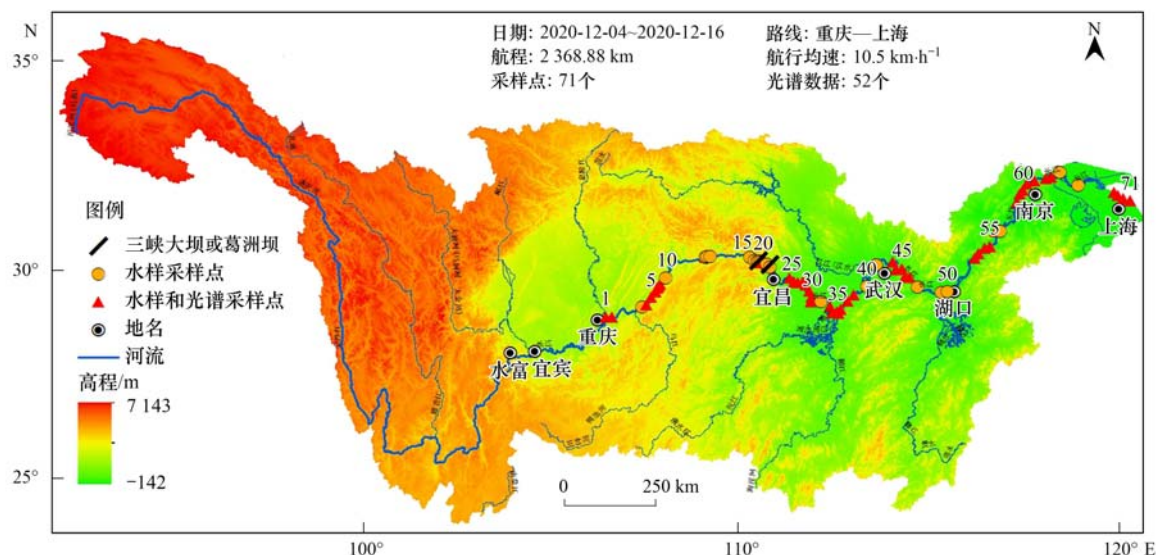


图1 长江干流取样点示意

Fig. 1 Sample sites of Yangtze River mainstream

20、100 和 200NTU 这 4 个标准浊度进行校正. 悬浮物浓度 (TSM) 的测量采用 GB11901-89H 烘干称重法进行. 现场用事先高温 (550℃) 烘干, 称重 (G_1) 的 0.7 μm 孔径的 Whatman GF/F 滤膜, 在 16 665.25 Pa 低真空度下过滤水样, 过滤体积 (V) 的范围一般在 0.5 ~ 4 L, 具体多少取决于水体中悬浮颗粒物的丰富程度. 过滤好的滤膜用滤膜夹避光保存, 回实验室后在 60℃ 条件下烘干滤膜, 以除去膜上水分, 冷却后称重 (G_2), $(G_2 - G_1)/V$ 为总悬浮物浓度. 再将滤膜在高温下 (550℃) 烘烤, 以除去膜上有机质, 冷却后称重 (G_3), $(G_3 - G_2)/V$ 为有机悬浮物浓度 (OSM), $[(G_2 - G_1) - (G_3 - G_2)]/V$ 为无机悬浮物浓度 (ISM).

现场用 ASD FieldSpec3 便捷式高分辨率光谱仪测量水体遥感反射率, 其波长范围为 350 ~ 2 500 nm, 其光谱分辨率为 1 nm. 观测角度的确定严格参照 NASA 2003 测量规范^[26] 及唐军武等^[27] 和李铜基等^[28] 的水面以上光谱测量方法, 尽可能大地避开太阳直射反射以及水面泡沫等的影响. 最终每个采样点获得的测量数据主要有: ① 实测水面光谱数据, 包括标准灰板 (其反射率 < 0.3), 水面离水辐亮度、天空辐亮度; ② 同步天空状况、水面状况、风速、经纬度等信息与数据. 遥感反射率提取的具体方法参考文献^[27]. 由于有些采样在晚上进行, 无法进行光谱测量, 本研究共采集有效光谱数据 52 个 (图 1).

1.3 统计分析

运用 OriginPro 2017 进行数据统计分析与做图, 包括计算平均值, 最大值, 最小值, 标准差等. 模型系数确定采用最小二乘法非线性拟合得到, 模型

反演精度用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 来衡量. RMSE 和 MAPE 的计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{imea}} - x_{\text{imod}})^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{\text{imea}} - x_{\text{imod}}}{x_{\text{imea}}} \right|}{n} \quad (2)$$

式中, x_{imod} 为估算值, x_{imea} 为测量值, n 为样本数.

2 结果与讨论

2.1 长江干流水体浑浊度, 总悬浮物浓度及组成空间分布特征

图 2 显示长江干流水体浊度、总悬浮物浓度 (TSM) 和有机悬浮物浓度在总悬浮物浓度中所占的比例 (OSM/TSM) 具有显著的空间变化特征, 浊度和 TSM 存在显著的相关关系 ($R^2 = 0.91$, $P < 0.01$). 枯水期长江干流浊度和 TSM 从重庆到上海整体呈现增加趋势 [图 2(a) 和 2(b)], 但相反 OSM/TSM 从重庆到上海整体呈现较少趋势 [图 2(c)]. 整体上, 长江干流浊度在 1.71 ~ 154 NTU 之间, 平均值为 (22.75 ± 24.94) NTU; TSM 浓度范围为 $1.54 \sim 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $(19.86 \pm 19.91) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 总悬浮物主要以无机悬浮物为主, 平均无机悬浮物占比 (ISM/TSM) 为 $(82.57 \pm 9.07)\%$. 上游段 (重庆至宜昌) 平均浊度为 (5.34 ± 3.1) NTU, 平均有机悬浮物浓度为 $(4.28 \pm 2.56) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均有机悬浮物占比为 $(26.90 \pm 8.85)\%$. 中游段 (宜昌至湖口)

平均浊度为 (16.92 ± 12.58) NTU, 平均有机悬浮物浓度为 $(15.50 \pm 12.97) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均有机悬浮物占比为 $(16.28 \pm 8.13)\%$. 下游段(湖口至长江口)平均浊度为 (47.12 ± 31.08) NTU, 平均有机悬浮物浓度为 $(38.91 \pm 21.76) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均有机悬浮物占比为 $(11.47 \pm 1.61)\%$.

此外,从图2可以看出由于大坝截留作用,三峡水库和葛洲坝水库水深增加,流速减缓,生物作用增加,因此三峡水库和葛洲坝水库的浊度、总悬浮物浓度虽然相对较低,但有机碳悬浮物占比远高于其

他河段,表现出明显的“湖泽效应”. 过坝后随着河道的加宽,水深变浅,由于水流的冲刷,浊度、总悬浮物浓度逐渐上升,同时有机悬浮物占比下降. 在通过洞庭湖之后浊度、总悬浮物浓度更是急剧增加,但通过鄱阳湖时浊度、总悬浮物浓度未见显著变化,这与两个湖区汇入的水体浊度、总悬浮物浓度存在差异有关. 此外,在通过武汉、南京和上海这三大城市市区时浊度和总悬浮物浓度显著增加. 这表明城市污水的汇入使得长江干流水体浑浊度显著增加.

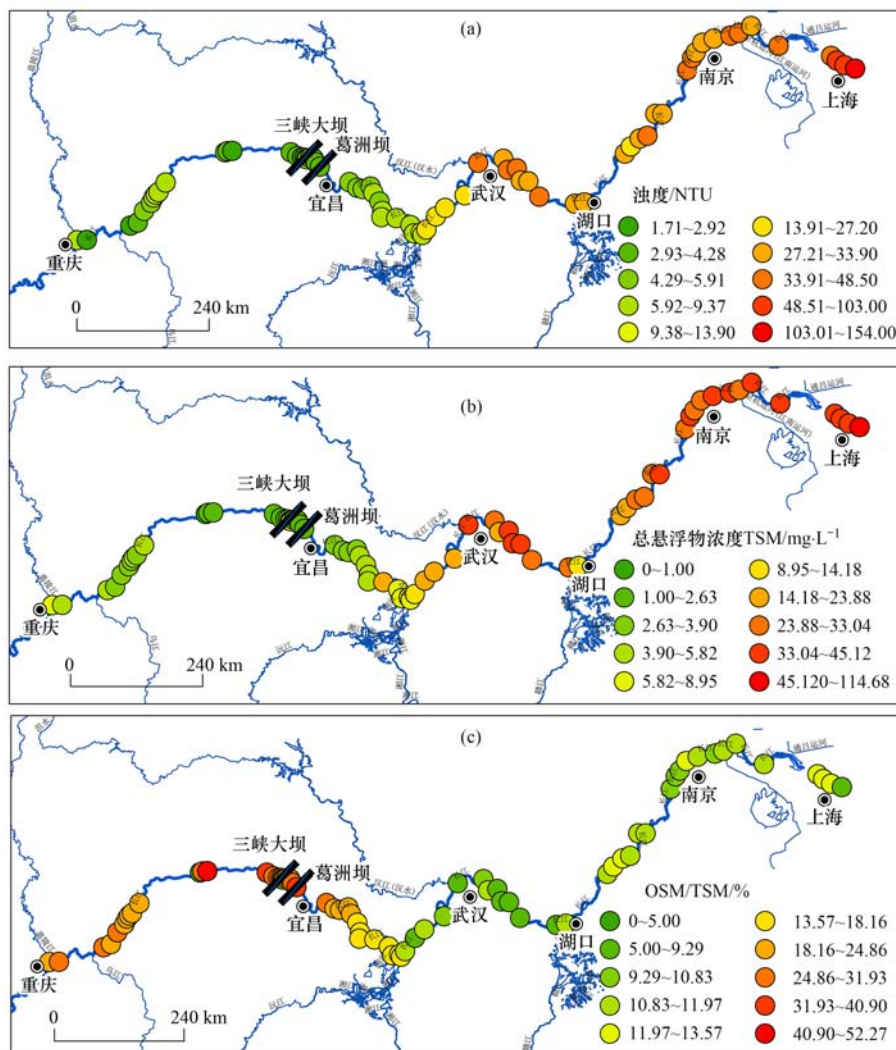


图2 长江干流浊度、TSM 和 OSM/TSM 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of turbidity, total suspended matter concentration and the proportion of suspended organic matter in the Yangtze River mainstream

2.2 长江干流水体光谱特征分析

浑浊水体的光谱反射特征是建立遥感信息与悬浮物浓度之间量化模型的基础,有关Ⅱ类水体悬浮物的光谱特性,国内外已有较多的测量研究. 悬浮物光谱反射曲线具有双峰型特征,在可见光及近红外波段范围内,水体反射率随悬浮物浓度的增加而增加,随着悬浮浓度的增大,反射峰位置会向波长方

向移动(“红移”)^[4,29]. 为了减少取样时间和地点差异对绝对反射率值的影响,本研究利用每个波长上的反射率除以整个波长范围内反射率的平均值,对野外实测光谱进行归一化处理. 与野外实测光谱相比[图3(a)],归一化后的遥感反射率[图3(b)]变化范围更加集中,波峰、波谷形状更明显,变化曲线更平滑. 图3(a)显示长江干流水体遥感反射率在0

~0.07 范围内, 水体光谱反射曲线基本没用叶绿素 a 的光谱特征(700 nm 附近的反射峰), 而是展现出悬浮物浓度占主导因素的双峰型光谱特征. 主反射峰出现在 562 ~ 590 nm 波段内, 次峰出现在 810 nm 波段附近, 但次峰并不十分明显(900 nm 以后波段明显受水汽影像, 因此并未对其进行分析), 此外主峰值大小与 TSM 浓度和浊度的相关性并不明显[图 3(c)]. 由于长江干流水体悬浮物浓度较低($< 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 因此第一峰值明显高于第二峰值^[4]. 但本研究与陈涛等^[29]的研究提出的悬浮物浓度小于 $1700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 反射峰值波长“红移”现象不明显的现象有所不同, 本研究发现虽然长江干流悬浮物浓度相对较小($< 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但同样存在光谱反射率峰波长“红移”现象[图 3(d)]. 长江干流 TSM 浓度范围为 $1.54 \sim 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浊度在 $1.71 \sim 154 \text{ NTU}$ 之间, 最大值和最小值相差近 75 ~ 90 倍. 由此笔者推测这种光谱反射峰位置“红移”现

象可能不一定与 TSM 浓度和浊度的大小有关, 而是与 TSM 和浊度的变化范围有关, 当 TSM 和浊度最大值和最小值差异达到一定范围就会出现光谱反射峰位置“红移”现象. 此外长江水体悬浮颗粒物组分同样存在较大差异, 这个可能是造成光谱反射峰位置“红移”现象另一原因. 长江水体 TSM 与 ISM/TSM 之间存在显著的对数关系[图 3(e)], 上游段(重庆至宜昌) TSM 浓度较低, 同时 ISM/TSM 也相对较低(图 2). 如图 3(f)所示, ISM/TSM 与光谱反射峰位置波长呈显著的正相关关系, OSM/TSM 与光谱反射峰位置波长显著的负相关关系, 这主要是由于 ISM 和 OSM 它们的粒径和折射系数的不同会对水体的光学性质产生不同的影响^[4], 这将直接影响内陆水体的遥感定量分析的精度^[29].

水体光谱反射率在不同波长位置上对 TSM 浓度的响应存在差异. 计算各波长光谱反射率和 TSM 浓度的相关系数, 有助于识别出对 TSM 浓度变化敏

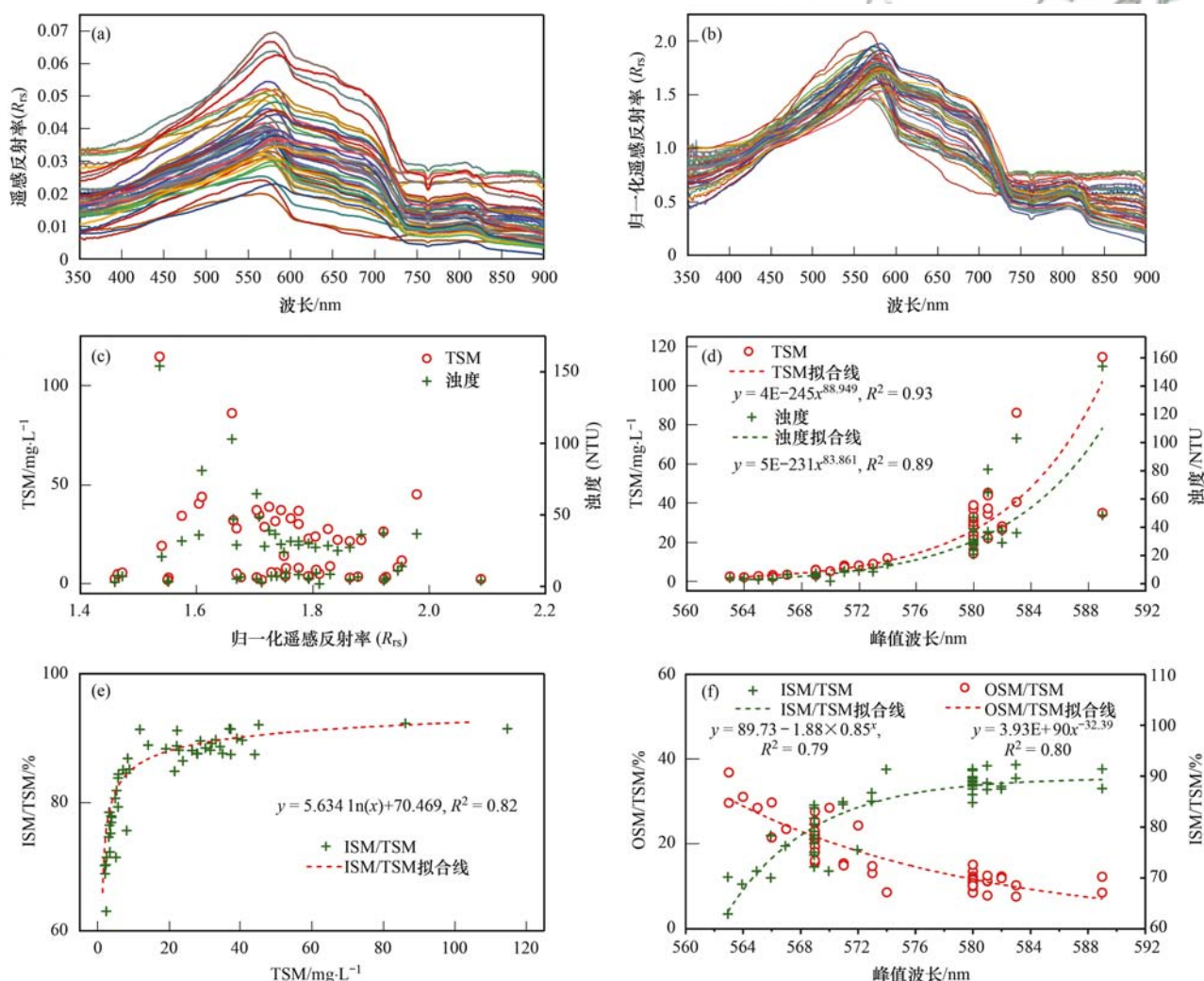


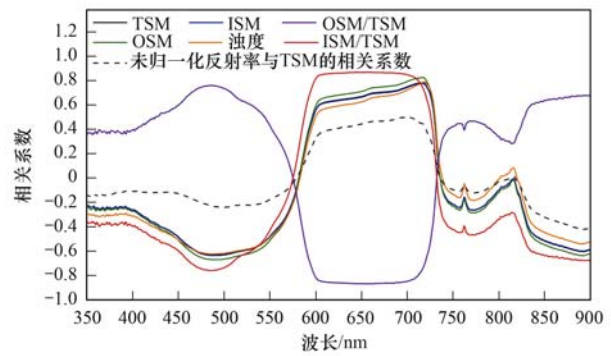
图 3 长江干流水体光谱特征

Fig. 3 Spectral characteristics of water bodies in the Yangtze River mainstream

感的波段^[4]. 图 4 显示, 实测反射率和归一化后反射率与 TSM 的相关系数曲线的形状基本一致, 但由于长江水体成分较为复杂, 各种物质相互作用, 因此相关系数最大值仅为 0.38, 而归一化后反射率与 TSM 的相关系数(最大值 0.78)明显大于实测反射率与 TSM 的相关系数. 归一化后光谱反射率与表层水体浊度、TSM、ISM、OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 相关系数变化曲线的形状基本一致, 相关系数在 475 ~ 550 nm 相对较低, 而在 600 ~ 710 nm 波段范围内相关性较好, 形成明显的峰值. TSM 与遥感反射率相关系数最大值为 0.78, 浊度与遥感反射率相关系数略小于 TSM, 而 ISM 和 OSM 各自的相关性都优于 TSM 的相关性, 且无机悬浮物占比 (ISM/TSM) 与光谱反射率的相关性最高(0.87). 总的来说, 长江干流水体中, 遥感反射率受有机悬浮和无机悬浮物的综合作用, 而无机悬浮物占比对长江干流水体遥感反射率影响最大.

2.3 长江干流水体浑浊程度半经验模型分析

在分析水体光谱规律的基础上, 可以建立水体总悬浮物浓度、浊度等与遥感反射率的数学拟合模型. 基于最小二乘法建立水体浊度、TSM、ISM、OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 与单波段或波段组合的拟合回归方程, 分析模型包括目前常用的指数函数, 对数函数、幂函数、线性函数和一元二次方程^[30]. 随机抽取 40 个有效点数据, 剩下 12 个有效数据作为反演模型的检验点, 反演精度用均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAPE) 来衡量^[31]. 通过对负相关系数和正相关系数排序, 经筛选比较发现反射率与悬浮物浓度相关系数变化曲线的峰值 600 ~ 710 nm 波段和谷值 475 ~ 550 nm 比值与悬浮物浓度的决定系数 R^2 较高. 经循环迭代发现最佳波



黑线与蓝线几乎完全重合; 虚线表示反射率未归一化处理, 其他实线表示反射率经过归一化处理

图 4 反射率(R_{rs})与浊度、TSM、ISM、OSM、OSM/TSM 和 ISM/TSM 的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients of reflectance(R_{rs}) with turbidity, TSM, ISM, OSM, OSM/TSM, and ISM/TSM

段组合 B_{707}/B_{536} 与 TSM 的相关系数 R^2 最高(0.81), 这一波段组合与在福建闽江下游选择的波段组合(B_{690}/B_{530})比较接近^[17]. 选择 B_{707}/B_{536} 作遥感因子建立水体浊度、TSM、ISM、OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 的反演模型, 最佳的拟合模型结果如图 5 和表 1 所示, 水体浊度、TSM、ISM 和 OSM 的最佳反演模型均为指数模型, 而 ISM/TSM 和 OSM/TSM 的最佳反演模型则为对数模型. 长江干流水体 TSM、ISM 和浊度的决定系数均在 0.8 以上, 模型预测的 RMSE 分别为 $5.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 7.9 NTU , 说明上述模型对水体悬浮物反演精度较高. 但从 TSM、ISM 和浊度的 MAPE (25%、27% 和 26%) 来看, 这些经验模型的效果还不是特别理想. 这主要是由于长江干流水体 TSM、ISM 和浊度的空间差异太大, 上游段水体 TSM、ISM 和浊度较低, 模型反演的效果较差, 反演结果往往大于实测结果 (图 5), 从而导致 MAPE 较大. 相反虽然 OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 的决定系数 R^2 与 TSM、ISM 和浊

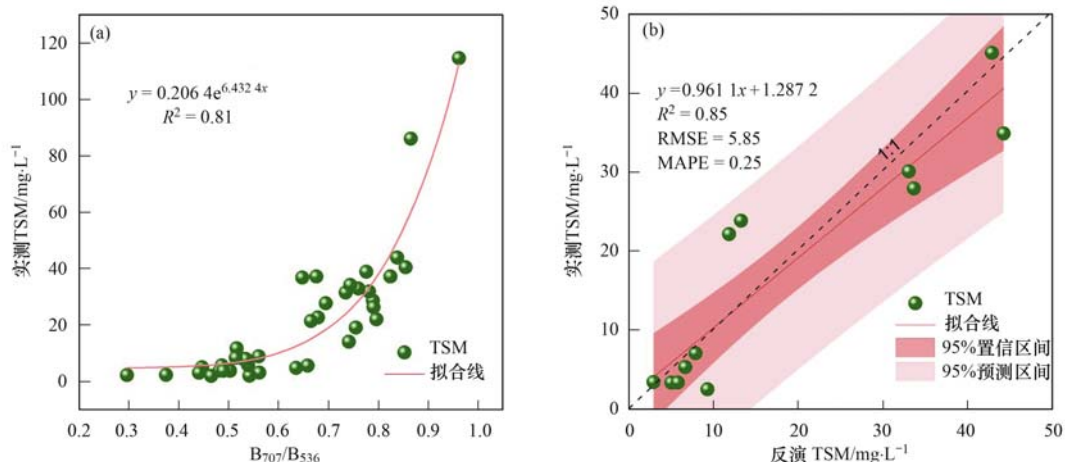


图 5 基于 B_{707}/B_{536} 反射率的长江干流水体 TSM 反演模型的拟合精度与预测精度

Fig. 5 Fit accuracy and prediction accuracy of TSM inversion model based on B_{707}/B_{536} reflectance in the Yangtze River mainstream

表 1 基于 B_{707}/B_{536} 反射率的最佳反演模型及反演精度¹⁾

Table 1 Optimal inversion model and inversion accuracy based on B_{707}/B_{536} reflectance

指标	最佳分析模型	决定系数 (R^2)	建模		模型预测	
			RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
TSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.2064e^{6.4324x}$	0.82	9.27	0.23	5.85	0.25
ISM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.1258e^{6.9202x}$	0.83	8.45	0.26	5.67	0.27
(ISM/TSM)/%	$y = 23.919 \ln(x) + 95.058$	0.68	4.22	0.04	4.24	0.03
OSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.1288e^{4.1965x}$	0.77	0.83	0.31	0.52	0.23
(OSM/TSM)/%	$y = -23.92 \ln(x) + 4.9425$	0.68	4.25	0.19	4.37	0.19
浊度/NTU	$y = 0.2618e^{6.3683x}$	0.82	11.70	0.32	7.98	0.26

1) RMSE 为均方根误差, MAPE 为平均绝对误差, 下同

度相比要小,但如果仅考虑 MAPE 检验值,前三者的模拟效果要好于后三者(表 1)。

由于目前常用的遥感卫星所携带的传感器对光谱波段的设置是不同的,要进行有效的水体悬浮物遥感监测研究,在确定最佳反演光谱波段及反演模型的基础上,还要考虑卫星上传感器的特点。为了检验和比较目前常用的遥感卫星波段设置对河流水体悬浮物的反演潜力,本文还参考 MODIS (1~4 波段)、Landsat 8 (1~5 波段)、Sentinel 2 (2~6 波段) 和 HJ-1B (1~4 波段) 常用波段范围,根据各遥感卫星相应的光谱响应函数,用加权平均的方法计算相应波段的波段等效值^[32]作为自变量(x),总悬浮物浓度作为因变量(y),进行模型回归分析。结果如表 2 所示,MODIS 卫星的 $B1_{(620-672)}/B4_{(545-565)}$ 、

Landsat 8 卫星的 $B4_{(630-680)}/B2_{(450-515)}$ 、Sentinel 2 卫星的 $B5_{(659-714)}/B2_{(439-533)}$ 和 HJ-1B 卫星的 $B3_{(630-690)}/B2_{(520-600)}$ 为各卫星的最佳遥感波段。单考虑波段设置,不考虑卫星空间分辨和时间分辨的条件下,由于长江干流水体的反射率与悬浮物浓度敏感波段 (600~710 nm 和 475~550 nm) 大部分都落在 MODIS、Landsat 8、Sentinel 2 和 HJ-1B 卫星绿波段和红波段内,因此这些卫星的最佳反演模型的决定系数 R^2 都相对较高。Williams^[33] 的研究认为模型的好坏可以用决定系数来评价,评价标准为: $R^2 \geq 0.91$ 为精准; $0.82 \leq R^2 \leq 0.9$ 为较好; $0.66 \leq R^2 \leq 0.81$ 为一般; $0.50 \leq R^2 \leq 0.65$ 为较差。由表 2 的决定系数可知,这些反演模型对 TSM、ISM 和浊度的估算效果是较好的,而对 OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 估算

表 2 常用遥感卫星的最佳反演模型及反演精度统计

Table 2 Statistical table of the best inversion model and inversion accuracy of common remote sensing satellites

项目	指标	最佳分析模型	决定系数 (R^2)	模型拟合		模型预测	
				RMSE	MAPE	RMSE	MAPE
MODIS $B1_{(620-672)}/B4_{(545-565)}$	TSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0848e^{6.7042x}$	0.86	11.16	0.34	11.81	0.38
	ISM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0477e^{7.2234x}$	0.87	10.12	0.35	11.74	0.31
	(ISM/TSM)/%	$y = 28.902 \ln(x) + 92.737$	0.75	4.26	0.04	4.47	0.04
	OSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.075e^{4.3194x}$	0.77	0.95	0.19	0.56	0.17
	(OSM/TSM)/%	$y = -28.9 \ln(x) + 7.2635$	0.75	3.78	0.18	3.93	0.24
	浊度/NTU	$y = 0.1143e^{6.5675x}$	0.86	15.35	0.34	10.37	0.35
Landsat8 $B4_{(630-680)}/B2_{(450-515)}$	TSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.1407e^{4.4801x}$	0.83	17.82	0.27	11.21	0.26
	ISM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0816e^{4.8397x}$	0.84	16.75	0.29	11.37	0.28
	(ISM/TSM)/%	$y = 27.975 \ln(x) + 84.266$	0.79	3.45	0.03	3.11	0.03
	OSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.1081e^{2.8478x}$	0.74	1.34	0.23	0.55	0.24
	(OSM/TSM)/%	$y = -27.971 \ln(x) + 15.734$	0.79	3.45	0.19	3.11	0.19
	浊度/NTU	$y = 0.1825e^{4.417x}$	0.83	22.82	0.27	11.77	0.26
Sentinel 2 $B5_{(659-714)}/B2_{(439-533)}$	TSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.2207e^{5.2413x}$	0.82	10.78	0.22	10.23	0.23
	ISM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0134e^{5.6462x}$	0.82	9.99	0.21	9.32	0.25
	(ISM/TSM)/%	$y = 24.2881 \ln(x) + 90.693$	0.72	3.93	0.03	4.13	0.04
	OSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.1377e^{3.3894x}$	0.76	1.05	0.23	0.75	0.20
	(OSM/TSM)/%	$y = -24.291 \ln(x) + 9.3072$	0.73	3.93	0.10	4.13	0.15
	浊度/NTU	$y = 0.2772e^{5.2009x}$	0.83	12.39	0.22	12.54	0.21
HJ-1B $B3_{(630-690)}/B2_{(520-600)}$	TSM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0308e^{7.7015x}$	0.85	11.93	0.36	11.02	0.37
	ISM/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.016e^{8.3101x}$	0.86	10.78	0.37	11.03	0.31
	(ISM/TSM)/%	$y = 35.3541 \ln(x) + 92.896$	0.74	3.83	0.03	3.97	0.04
	OSM/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$y = 0.0397e^{4.9442x}$	0.78	0.95	0.31	0.57	0.31
	(OSM/TSM)/%	$y = -35.35 \ln(x) + 7.1039$	0.74	3.83	0.18	3.97	0.23
	浊度/NTU	$y = 0.0428e^{7.532x}$	0.84	16.32	0.36	6.03	0.30

效果一般. 这些反演模型对 TSM 预测的 RMSE 在 $10.23 \sim 11.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, MAPE 在 $4.01\% \sim 47.28\%$ 之间. 其中 Sentinel 2 卫星对长江干流水体悬浮物浓度的反演效果最佳. Sentinel 2 卫星对长江干流 TSM 预测的 RMSE 为 $10.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MAPE 为 23% . 与其他传感器相比, 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, 在水体 TSM 估算方面表现优越^[32]. 上述卫星的反演结果表明, 目前常用卫星的波段设置在反演长江干流水体浑浊程度指标上都具有一定的潜力. 但本研究建立经验模型缺乏坚实的物理基础, 因此模式在时间与空间上的普适性和适用性也许受到一定的限制^[31]. 此外, 上述分析仅根据各卫星传感器的波段设置做出的评价, 而在实际反演精度和实用性受卫星传感器空间分辨率, 时间分辨率、辐射定标精度, 大气校正效果等其他因素的影响. 如与 Landsat 相比, MODIS 可以提供更多的悬浮物浓度信息, 因为它的时间分辨率高得多. 此外, 只有少数 ETM + 图像是无云覆盖的, 而根据笔者的经验, 研究区域 1a 内相对清晰的 MODIS 图像有几十张. 但另一方面, 由于 MODIS 的空间分辨率, MODIS 数据可能不适用于长江上游等相对狭窄的河道. 各卫星传感器空间分辨率, 时间分辨率、辐射定标精度, 大气校正效果等其他因素的影响对悬浮物浓度反演的影响还需要更深入地研究^[21].

2.4 湖泊与河流悬浮物浓度反演模型的差异分析

很多学者利用各种卫星传感器和不同的波段来构建湖泊、水库悬浮物浓度的遥感反演模型, 如 Dekker 等^[8]的研究表明 Landsat 5 的 $B2_{(620-690)}$ 和 $B3_{(520-600)}$ 的平均值, 适用于弗里西亚湖悬浮物浓度 ($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的反演; 相似地, Tyler 等^[9]的研究表明 Landsat 5 的 $B3_{(520-600)}$ 与巴拉顿湖的悬浮物浓度 ($\text{TSM} < 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 存在显著的相关性. 张毅博等^[14]的研究提出利用 Landsat 8 的 $B2_{(450-510)}$ 、 $B3_{(530-590)}$ 和 $B8_{(500-680)}$ 构建的多元回归模型能够较好地估算较清洁水体的 TSM 浓度 ($0.04 \sim 24.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 光洁等^[34]的研究发现 Landsat 5 ($B2 + B3$)/($B2/B3$) 能够很好地反演太湖水体总悬浮物浓度. 李渊等^[35]的研究基于光谱分类法发现我国环境一号卫星的 $B3_{(520-600)}$ 和 $B4_{(750-900)}$, 同样能够很好地反演太湖和巢湖水体总悬浮物浓度. 总的来说, 近红外波段似乎适合悬浮物浓度较高的水域, 而可见光波段悬浮物浓度适合较低的水域. 为了进一步评估本研究的模型, 选择上述湖泊和水库模型估算长江干流 TSM 浓度的研究发现, 以上模型的估算值和测量值之间的平均绝对误差 (MAPE) 在 $46.84\% \sim$

95.24% , 模型的精度低 (表 3), 不能满足长江干流 TSM 浓度反演的精度要求. 湖泊和水库的模型不适用于长江干流 TSM 估算, 可能与不同区域 TSM 组分存在差异有关. 虽然太湖、巢湖等一些湖泊水体的光学特性都较大地受到无机悬浮物的影响^[34,35], 但湖泊和水库水体的藻类仍远高于长江干流, 由于 ISM 和 OSM 它们的粒径和折射系数的不同, 叶绿素与悬浮物浓度的遥感信息会相互干扰^[9], 从而影响湖泊、水库模型估算长江干流 TSM 的精度.

也有一些学者建立了专门针对河流悬浮物浓度的经验模型, 如温小乐等^[17]的研究利用 TM 遥感影像 ($B2 + B3$)² 波段组, 用光谱混合分析法和回归分析法构建福建闽江下游 TSM 的反演模型, 模型的相关系数达到 0.855, 将该模型应用于长江干流 TSM 浓度反演, MAPE 为 35.42% . 邢晓达等^[19]利用 HJ-1B 的 $B3_{(630-690)}/B2_{(520-600)}$ 建立的一元二次经验模型, 对湾坝区河流的 TSM 浓度预测的决定系数能达到 0.92, 模型预测的 MAPE 能达到 33.12% , 但将该模型应用于长江干流 TSM 浓度反演, MAPE 只有 45.41% (表 3), 精度低于本研究利用 HJ-1B 的 $B3_{(630-690)}/B2_{(520-600)}$ 建立的指数模型 (MAPE = 37.41%). 而 Wang 等^[22,36]的研究利用 Landsat 7 的 $B4_{(760-900)}$ 建立的单波段模型用于本研究的 TSM 反演效果同样相对较差, MAPE 只有 65.8% 和 68.41% . 造成这两个模型反演效果较差的原因有两个: ① Wang 等^[22,36]建立模型所用的 TSM 浓度在 $22 \sim 2610 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 远大于本研究的 $1.54 \sim 114.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ② Wang 等^[22,36]建立的均为单波段模型, 而从图 4 中可以看出, 本研究实测的单波段反射率与 TSM 浓度的相关系数较低, 最大只有 0.38, 因此, 单波段模型很难用于长江干流冬季水体 TSM 浓度的遥感估算. 本研究根据各遥感卫星传感器相应的光谱响应函数, 用加权平均的方法计算相应波段的波段等效值所构建的波段比值模型在某种程度上降低了天气、光照环境带来的影响. 利用验证样本对该模型进行验证, 结果表明该模型精度较高, 因此可以认为, 利用上述各遥感卫星传感器波段设置特点构建的模型对长江干流冬季总悬浮物浓度信息的反演模型是可行的. 稀缺的空间和时间采样的约束显著影响 TSM 反演模型的建立和效用^[37], 由于是经验模型, 其内在机制并不清楚, 并且受到样本数量的限制, 本文所构建的模型对于长江不同区域 (重庆以上河段, 各支流), 不同季节, 不同水位环境 (洪水期、枯水期和平水期) 的 TSM 浓度估算是否仍然有效还需要更深入地研究.

表3 典型湖泊、水库和河流悬浮物浓度经验模型统计¹⁾

Table 3 Statistical table of empirical models of suspended matter concentration in typical lakes, reservoirs and rivers					
卫星	敏感波段	最佳反演模型	研究区	MAPE/%	文献
Landsat 5	B2 ₍₆₂₀₋₆₉₀₎ 和 B3 ₍₅₂₀₋₆₀₀₎	TSM = 0.758 1e ^{61.683}	弗里西亚湖	75.21	[8]
Landsat 5	B3 ₍₅₂₀₋₆₀₀₎	TSM = -2.44 + 1.36B3	巴拉顿湖	95.24	[9]
Landsat 8	B2 ₍₄₅₀₋₅₁₀₎ 、B3 ₍₅₃₀₋₅₉₀₎ 和 B8 ₍₅₀₀₋₆₈₀₎	TSM = -191.02B2 + 36.80B3 + 172.66 B8 + 4.57	新安江水库	54.11	[14]
Landsat 4、5	B2 ₍₆₂₀₋₆₉₀₎ 和 B3 ₍₅₂₀₋₆₀₀₎	ln(TSM) = 11.071(B2 + B3)/B2/B3(11月)	太湖	46.86	[34]
HJ-1B	B3 ₍₅₂₀₋₆₀₀₎ 和 B4 ₍₇₅₀₋₉₀₀₎	TSM = 8.612 5e ^{54.877B4} (一类)	太湖、巢湖	50.14	[35]
		TSM = 3 163.7B3 - 61.728 (二类)		67.48	
		TSM = 9.447 6e ^{51.899B4} (未分类)		48.76	
Landsat 5	[B3 ₍₆₃₀₋₆₉₀₎ + B2 _{(520-600)]²}	TSM = 3793.7(B2 + B3) ² - 16.5	闽江下游	35.42	[17]
HJ-1B	B3 ₍₆₃₀₋₆₉₀₎ /B2 ₍₅₂₀₋₆₀₀₎	TSM = 252.2(B3/B2) ² - 282.09(B3/B2) + 83.853	漫湾坝区河流	45.41	[19]
Landsat 7	B4 ₍₇₆₀₋₉₀₀₎	TSM = 0.361 7 × B4 ^{3.056 4}	长江上游	65.8	[22]
Landsat 7	B4 ₍₇₆₀₋₉₀₀₎	ln(TSM) = 3.182 36 ln(B4) - 1.400 60	长江中上游	68.41	[37]

1) MAPE 为将各模型应用于本研究实测 TSM 浓度估算时的平均绝对误差

3 结论

(1) 枯水期长江干流浊度和总悬浮物浓度 (TSM) 从重庆到上海整体呈现增加趋势, 但相反有机悬浮物浓度在总悬浮物浓度中所占的比例 (OSM/TSM) 从重庆到上海整体呈现较小趋势。

(2) 长江干流悬浮物以无机悬浮为主, 其水体光谱曲线展现出悬浮物浓度占主导因素的双峰型光谱特征, 但由于水体中悬浮物浓度较低 (< 154 mg·L⁻¹), 第一峰值明显高于第二峰值, 但反射峰位置具有明显地向波长方向移动的“红移”现象。经筛选比较发现, 野外实测的水体高光谱数据中 B₇₀₇/B₅₃₆ 与悬浮物浓度的相关系数 R² 最高, 达到了 0.81。选择 B₇₀₇/B₅₃₆ 作遥感因子建立水体浊度、TSM、ISM、OSM、ISM/TSM 和 OSM/TSM 的反演模型, 其中水体浊度、TSM、ISM 和 OSM 的最佳反演模型均为指数模型, 而 ISM/TSM 和 OSM/TSM 的最佳反演模型则为对数模型。

(3) 为检验、比较常用卫星对河道水体浑浊程度的反演潜力, 参照 MODIS (1~4 波段)、Landsat 8 (1~5 波段)、Sentinel 2 (2~6 波段) 和 HJ-B1 (1~4 波段) 等常用波段范围, 用加权平均的方法计算相应波段的波段等效值构建长江干流水体悬浮物浓度半经验模型。本研究发现, 长江干流水体的反射率对悬浮物浓度最敏感的波段是 600~710 nm 和 475~550 nm 波段, 这些波段大部分都落在 MODIS、Landsat 8、Sentinel 2 和 HJ-1B 卫星绿波段和红波段内, 因此目前常用卫星的波段设置在反演长江干流水体浑浊程度指标上都具有一定的潜力。其中 Sentinel 2 卫星波段设置最合适长江干流水体悬浮

物浓度的反演, 其最佳的指数数反演模型 RMSE 为 10.23 mg·L⁻¹, MAPE 为 23%。

参考文献:

[1] Lee Z, Shang S L, Hu C M, et al. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **169**: 139-149.

[2] Güttler F N, Niculescu S, Gohin F. Turbidity retrieval and monitoring of Danube Delta waters using multi-sensor optical remote sensing data: an integrated view from the delta plain lakes to the western-northwestern Black Sea coastal zone [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **132**: 86-101.

[3] 李云梅, 黄家柱, 陆皖宁, 等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测 [J]. 海洋与湖沼, 2006, **37** (2): 171-177.

Li Y M, Huang J Z, Lu W N, et al. Model-based remote sensing on the concentration of suspended sediments in Taihu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2006, **37** (2): 171-177.

[4] 马荣华, 段洪涛, 唐军武, 等. 湖泊水环境遥感 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[5] Carpenter D J, Carpenter S M. Modeling inland water quality using Landsat data [J]. Remote Sensing of Environment, 1983, **13** (4): 345-352.

[6] Novo E M L M, Steffen C A, Braga C Z F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, **36** (1): 67-72.

[7] 张兵, 李俊生, 申茜, 等. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2021, **25** (1): 37-52.

Zhang B, Li J S, Shen Q, et al. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, **25** (1): 37-52.

[8] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the Southern Frisian lakes [J]. Science of the Total Environment, 2001, **268** (1-3): 197-214.

[9] Tyler A N, Svab E, Preston T, et al. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: a mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, **27** (8): 1521-1537.

- [10] Kloiber S M, Brezonik P L, Olmanson L G, *et al.* A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**(1): 38-47.
- [11] Olmanson L G, Bauer M E, Brezonik P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10, 000 lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(11): 4086-4097.
- [12] Feng L, Hou X J, Zheng Y. Monitoring and understanding the water transparency changes of fifty large lakes on the Yangtze Plain based on long-term MODIS observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**: 675-686.
- [13] Liu D, Duan H T, Loiselle S, *et al.* Observations of water transparency in China's lakes from space[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.jag.2020.102187.
- [14] 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.
- [15] Xi H Y, Zhang Y Z. Total suspended matter observation in the Pearl River estuary from in situ and MERIS data[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **177**(1-4): 563-574.
- [16] 汪小钦, 王钦敏, 郭群勇, 等. 遥感在悬浮物质浓度提取中的应用——以福建闽江口为例[J]. *遥感学报*, 2003, **7**(1): 54-57.
Wang X Q, Wang Q M, Wu Q Y, *et al.* Estimating suspended sediment concentration in coastal waters of Minjiang River using remote sensing images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, **7**(1): 54-57.
- [17] 温小乐, 徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2441-2447.
Wen X L, Xu H Q. Quantitative estimation of suspended solid concentration in the lower Min River based on multi-source synchronal data[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2441-2447.
- [18] 陈晓翔, 丁晓英. 用 FY-1D 数据估算珠江口海域悬浮泥沙含量[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, **43**(S1): 194-196.
Chen X X, Ding X Y. Study on estimating the suspended sediment concentration in the Pearl River estuary using FY-1D data[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsenti*, 2004, **43**(S1): 194-196.
- [19] 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 Q, 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.
- [20] Onderka M, Pekárová P. Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **397**(1-3): 238-243.
- [21] Wang J J, Lu X X. Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: an example from the Lower Yangtze River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(5): 1131-1138.
- [22] Wang J J, Lu X X, Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the upper Yangtze River using Landsat ETM+[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(S2): 273-280.
- [23] Liu D, Bai Y, He X Q, *et al.* Satellite-derived particulate organic carbon flux in the Changjiang River through different stages of the Three Gorges Dam[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **223**: 154-165.
- [24] Zhang L J, Xue M, Wang M, *et al.* The spatiotemporal distribution of dissolved inorganic and organic carbon in the main stem of the Changjiang(Yangtze)River and the effect of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(5): 741-757.
- [25] Ran X B, Yu Z G, Chen H T, *et al.* Silicon and sediment transport of the Changjiang River (Yangtze River): could the Three Gorges Reservoir be a filter? [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **70**(4): 1881-1893.
- [26] Mueller J L, Clark D K, Kuwahara V S, *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 4, Volume VI: special topics in ocean protocols and appendices[J]. *Nasa Technical Memorandum*, 2003, (211621): 1-124.
- [27] 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.
- [28] 李铜基, 唐军武, 陈清莲, 等. 光谱仪测量离水辐射亮度的方法[J]. *热带海洋学报*, 2001, **20**(4): 56-60.
Li T J, Tang J W, Chen Q L, *et al.* A method for measuring water-leaving radiance using photometer[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, **20**(4): 56-60.
- [29] 陈涛, 李武, 吴曙初. 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系[J]. *海洋学报*, 1994, **16**(1): 38-43.
- [30] 焦红波, 查勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(2): 242-248.
Jiao H B, Zha Y, Li Y M, *et al.* Modelling Chlorophyll-a concentration in Taihu Lake from hyperspectral reflectance data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(2): 242-248.
- [31] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 悬浮颗粒物和叶绿素普适性生物光学反演模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(5): 462-467.
Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Suspended particle matter and chlorophyll-a universal bio-optical retrieval model[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, **32**(5): 462-467.
- [32] 王行行, 王杰, 崔玉环. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1207-1216.
Wang H H, Wang J, Cui Y H. 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[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1207-1216.
- [33] Williams P C. Implementation of near-infrared technology[A]. In: Williams P, Norris K(Eds.). *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*[M]. Sao Paulo: American Association of Cereal Chemists, Inc., 2001. 145-169.
- [34] 光洁, 韦玉春, 黄家柱, 等. 分季节的太湖悬浮物遥感估测模型研究[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(3): 241-249.
Guang J, Wei Y C, Hung J D, *et al.* Seasonal suspended sediment estimating models in Lake Taihu using remote sensing data[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, **19**(3): 241-249.

- [35] 李渊, 李云梅, 施坤, 等. 基于光谱分类的总悬浮物浓度估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(10): 2721-2726.
Li Y, Li Y M, Shi K, *et al.* Evaluation of total suspended matter based on spectral classification[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, **33**(10): 2721-2726.
- [36] Wang J J, Lu X X, Liew S C, *et al.* Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, **34**(8): 1082-1092.
- [37] Walling D E, Collins A L, Jones P A, *et al.* Establishing fine-grained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK[J]. Journal of Hydrology, 2006, **330**(1-2): 126-141.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020年12月29日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续19次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)