

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.009

长三角先行启动区水体透明度无人机遥感监测研究

赵海阳^{1,2}, 胡伟^{1,2}, 王宇^{1,2}, 魏小岛^{1,2}, 郭亚丽^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335)

摘要: 长三角一体化先行启动区是打造生态绿色高质量发展的标杆地。无人机遥感以其灵活、高效的特性,能够为先行启动区生态建设提供重要支持。结合原位实测光谱与透明度数据,构建适用于研究区的透明度反演模型,利用高光谱相机获得54 km²的无人机航拍影像,开展先行启动区透明度遥感监测研究。经验证,透明度反演模型在验证集上的均方根误差为6.7 cm。将透明度反演模型应用于航拍影像,获得了透明度空间分布状况,其中透明度较低水域为养殖塘,较高水域为圩区内小型河道。根据光谱分析发现,透明度较低水域的致浊物质有所区别,养殖塘和湖荡的致浊物质主要为藻类。太浦河两侧水闸在一定程度上削弱了太浦河水对圩区内部水体透明度的影响,部分水闸两侧的透明度相差30 cm左右。

关键词: 长三角一体化; 水体透明度; 无人机; 高光谱; 遥感监测

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0062-07

Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Monitoring on Water Transparency in the Pioneer Region of the Yangtze River Delta Integrated Development

ZHAO Haiyang^{1,2}, HU Wei^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, WEI Xiaodao^{1,2}, GUO Yali^{1,2}

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The pioneer zone for the integrated development of the Yangtze River Delta is a benchmark for advancing eco-friendly and high-quality development. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) remote sensing, with its flexible and efficient characteristics, can provide significant support for the ecological civilization construction in the pioneer region. By integrating in-situ measured spectral and water transparency data, a transparency retrieval model was developed for the research area. A UAV hyperspectral image covering 54 km² was acquired to monitor the spatial distribution of water transparency in the pioneer region. Validation results showed that the root mean square error (RMSE) of the transparency retrieval model on the validation set was 6.7 cm. Applying the transparency retrieval model to the aerial imagery revealed the spatial pattern of transparency, identifying low-transparency water bodies as aquaculture ponds and high-transparency ones as small rivers in the polder area. Spectral analysis indicated differences in turbidity-causing substances among low-transparency waters, and the turbidity agents in aquaculture ponds and lakes are algae. A transparency difference of approximately 30 cm was observed on either side of a water gate, suggesting that such hydraulic structures have reduced the

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103552)

通信作者: 郭亚丽 E-mail: gyl@sidri.com

impact of water from the Taipu River on the rivers inside the polder area.

Keywords: Yangtze River Delta Integrated Development; water transparency; UAV; hyperspectral; remote sensing monitoring

长三角生态绿色一体化发展示范区(简称示范区)建设是长三角一体化发展战略的突破口,其中的先行启动区更是承载着率先探索高质量绿色发展的重大使命^[1]。水环境监测是生态环境保护的基础性工作,能够为先行启动区生态文明建设提供重要支撑。遥感手段可在短时间内获取大范围监测数据,克服了传统水环境监测效率偏低的不足,得到了越来越多的应用^[2]。

透明度是衡量水环境的指标之一,能够综合反映河湖水体健康状况。国内外基于卫星影像的水体透明度遥感监测在内陆湖泊、水库、大面积河道进行了广泛应用^[3-5],但受卫星传感器空间分辨率的限制,基于卫星遥感的水环境监测无法应用于先行启动区水体。

无人机(UAV)作为一种低空平台,能够获取高空间分辨率的遥感影像,在小面积水环境监测领域具有显著的优势。在示范区内,已有学者利用无人机进行了水环境监测研究,如梁文广等^[6]利用无人机高光谱在太浦河进行水环境监测,但该研究航拍覆盖范围较小,且未包含圩区内部水体,无法为河道与圩区内部水体之间相互影响的研究提供数据支持。

本文以长三角一体化先行启动区金泽镇部分区域为研究区,利用原位光谱数据与透明度数据建立适用于该区域的透明度反演模型;通过固定翼无人机搭载高光谱相机获得研究区高光谱影像,进而得到区域内水体透明度的空间分布状况,为先行启动区的水环境监测提供数据支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

长三角一体化先行启动区包含上海市青浦区金泽镇、朱家角镇,江苏省吴江区黎里镇,浙江省嘉善县西塘镇、姚庄镇,面积约660 km²。其中,金泽镇位于上海市西南部,面积约108.5 km²,镇域内水网密布,水域面积约占全镇面积的25%,上海全市21个天然湖泊,有19个位于金泽镇。流经金泽镇的太浦河连接太湖与黄浦江,具备防洪、排涝、供水和航

运等综合性功能,是国家级主航道。上海市、嘉兴市的部分饮用水源地都位于该区域,因此需要对该区域水环境进行重点监测。

1.2 实测数据

本研究于2024年7月—11月在长三角一体化先行启动区的金泽镇、太浦河、拦路港等水域进行乘船采样,获得了155套透明度-遥感反射率(R_{rs})数据集,采样站位分布如图1所示。遥感反射率数据由广州耀海科技有限公司生产的Triplet AOP高光谱仪采集,该设备带有两个高光谱辐亮度传感器和一个高光谱辐照度传感器,可同时测量太阳下行辐照度、水体上行辐亮度、天空光下行辐亮度。利用野外实测的光谱数据,参考文献^[7]中的方法计算遥感反射率结果。

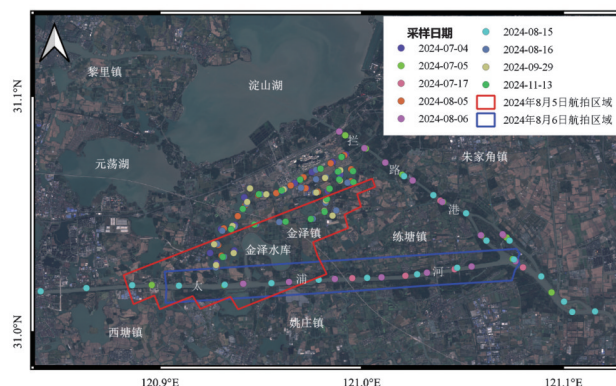


图1 金泽镇位置与采样站位分布

Fig.1 Location of Jinze Town and distribution of sampling stations

使用塞氏盘测量水体透明度,2024年7月—11月按日统计透明度,具体结果如表1所示。可以发现,太浦河和拦路港区域透明度的均值高于圩内河道。除2024年8月6日外,太浦河和拦路港区域的透明度平均值全部大于60 cm,而圩内河道的透明度均值在40~50 cm之间。但太浦河和拦路港区域的透明度标准差较大,主要原因是拦路港为淀山湖(上海市水源地之一)的泄水通道,拦路港河道内的透明度较高(70~105 cm),而太浦河的透明度仅为30~50 cm。

表1 2024年7月—11月水体透明度按日统计特征

Tab.1 Statistics characteristics of water transparency from July to November 2024

采样日期	采样数量/个	透明度平均值/cm	透明度标准差/cm	透明度范围/cm	区域
2024-07-04	19	49.16	18.69	20~92	圩内河道
2024-07-05	13	67.62	24.07	38~101	太浦河+拦路港
2024-07-17	8	62.38	26.66	39~101	太浦河+拦路港
2024-08-05	22	44.32	9.00	36~69	圩内河道
2024-08-06	14	57.29	17.18	42~92	太浦河+拦路港
2024-08-15	20	60.55	22.33	33~105	太浦河+拦路港
2024-08-16	22	42.45	11.11	18~75	圩内河道
2024-09-29	19	44.26	9.01	29~64	圩内河道
2024-11-13	18	40.83	6.23	34~58	圩内河道

1.3 无人机高光谱平台

本研究使用的无人机遥感平台为飞马垂起固定翼无人机 V10+芬兰 Specim 公司的 AFX10 高光谱相机。V10 无人机具有长航时的特点,负载 1 kg 时,续航时间可达 4 h,适用于大面积的航拍任务。AFX10 高光谱相机为线阵推扫相机,支持波段和空间分辨的选择设置,可以根据预设航线自动触发起终点进行数据采集,避免了冗余数据的采集。此外,AFX10 高光谱相机集成高精度的 GNSS/IMU 单元,能够为影像几何校正提供高精度的导航定位定向系统(POS)数据。

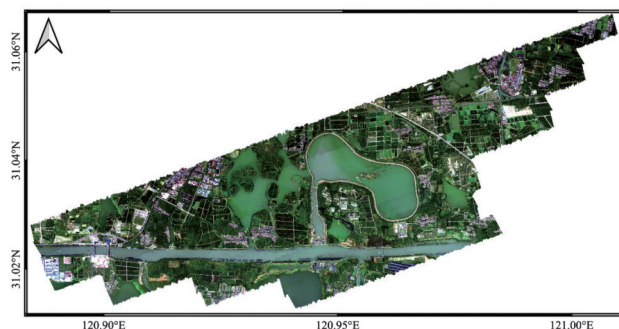
该研究分别于 2024 年 8 月 5 日(图 1 红框所示范围)和 8 月 6 日(图 1 蓝框所示范围)各进行了一次无人机高光谱影像航拍。两次航拍的覆盖范围、时间和获取的条带数见表 2。两次航拍无人机飞行速度均为 20 m/s,航高 500 m,旁向重叠率 10%。高光谱影像数据地面分辨率为 0.42 m,包含 400~1 000 nm 共 224 个波段。本研究共获取 54 km² 的航拍数据,较目前区域内已有研究^[6]覆盖面积提高了约 100 倍。

表2 航拍信息

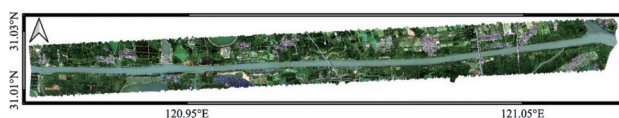
Tab.2 Aerial information

航拍日期	航拍覆盖面积/km ²	航拍时间	获取条带数/个
2024-08-05	29.9	13:48—15:20	10
2024-08-06	24.2	13:30—14:40	4

高光谱图像的预处理包括 POS 后差分解算、辐射定标、几何校正、反射率转换、条带拼接,其中,POS 后差分解算使用 POSPac 软件进行;辐射定标和几何校正使用相机出厂的定标文件及配套软件 CaliGeoPro 进行处理;反射率转换采用预先铺设在测区内已知反射率为 10% 的定标布进行,将反射率数据除以 π ,得到遥感反射率。最终真彩色拼接结果如图 2 所示。



a. 2024 年 8 月 5 日金泽镇



b. 2024 年 8 月 6 日太浦河

图2 航拍影像真彩色合成图

Fig.2 True color image of aerial images

2 透明度反演模型构建与验证

2.1 光谱分析

高光谱影像波段数量丰富,数据量庞大,增加了数据处理的复杂性,因此处理时一般需利用波段选择和特征提取进行降维处理。本研究采用波段选择方法进行数据处理,对 Triplet AOP 光谱仪计算得到的遥感反射率数据使用 Savitzky-Golay 滤波去除光谱噪声,再根据高光谱相机的波段设置插值求得每个采样站位的高光谱相机等效遥感反射率。

使用高光谱相机等效遥感反射率的单波段或波段组合值与透明度进行相关性分析,结果表明,遥感反射率与透明度呈显著负相关,在所有波段相关系数的绝对值均大于 0.45,即透明度越低,遥感反射率越高。蓝-绿波段与透明度的相关系数小于红-近红波段,遥感反射率与透明度相关性最强的位置出现在 700 nm 附近,相关系数为 -0.85。波长为 693~724 nm 的遥感反射率与透明度的相关系数绝对值均大于 0.80。

表 3 为不同波段组合形式中与透明度相关性最

强的波段组合。可以发现,除双波段相乘外,波段组合值与透明度相关性的最大值均大于单波段与透明度的相关性。三波段组合值与透明度的相关系数均大于0.9,双波段组合值与透明度的相关系数大于0.7。其中,双波段相乘的形式与透明度相关性在所有组合形式中最差,其相关系数为0.775, $\frac{R_{rs}(570) + R_{rs}(610)}{R_{rs}(583)}$ 组合值与透明度的相关系数最高,为0.926,但仅比 $R_{rs}(559)/R_{rs}(694)$ 组合形式与透明度的相关系数高0.002。为降低计算量和模型复杂度,在之后的透明度反演算法构建中使用 $R_{rs}(559)/R_{rs}(694)$ 的组合形式作为模型输入。

表3 波段组合值与水体透明度的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient between band combination value and water transparency

波段组合形式	相关系数	波段组合形式	相关系数
$R_{rs}(702) + R_{rs}(705)$	0.846	$\frac{R_{rs}(570) + R_{rs}(610)}{R_{rs}(583)}$	0.926
$R_{rs}(707) - R_{rs}(798)$	0.886	$\frac{R_{rs}(599) - R_{rs}(602)}{R_{rs}(694)}$	0.914
$R_{rs}(599) \times R_{rs}(707)$	0.775	$\frac{R_{rs}(580)}{R_{rs}(610) + R_{rs}(694)}$	0.923
$R_{rs}(559)/R_{rs}(694)$	0.924	$\frac{R_{rs}(556)}{R_{rs}(770) - R_{rs}(798)}$	0.899

2.2 透明度反演模型构建与验证

以 $R_{rs}(559)/R_{rs}(694)$ 波段组合值为自变量(X),使用一次、二次、三次函数以及幂函数和指数构建透明度反演模型,通过均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)评估模型精度。

将高光谱相机等效的遥感反射率与对应的透明度数据集按照4:1的比例随机划分为训练集和测试集,将训练集上获得的模型在测试集上进行验证。最终的透明度遥感反演模型为:

$$SD = -75.8X^3 + 404.9X^2 - 634.4X + 338.6 \quad (1)$$

式中:SD为透明度,cm。

透明度反演模型的精度验证结果表明,模型在测试集上的RMSE为6.72 cm,MAPE为11.14%。研究构建的模型在训练集和测试集上的精度表现相似,说明模型不存在过拟合的现象。由于采集的透明度数据集中在30~50 cm,因此在该数据范围内模型精度较高,实测与模型反演的透明度散点多在

1:1线附近。根据水体类型的不同,分别计算了透明度反演模型在河道和湖荡内的误差,河道中模型的RMSE为6.43 cm、MAPE为10.96%,湖荡中模型的RMSE为6.76 cm、MAPE为11.66%。可知,模型在不同水体类型中应用的误差基本一致,表明构建的模型具有一定的稳定性。

将基于原位数据构建的透明度反演模型应用于无人机高光谱遥感影像,根据当天提取的反演结果,利用实测数据评估透明度模型在影像上的精度。结果表明,模型应用于无人机影像上仍旧保持良好的精度,RMSE为2.5 cm,MAPE为5.06%。由于影像匹配站点实测透明度为35~45 cm,因此验证精度高于原位数据集。

3 基于无人机影像的透明度监测应用

在透明度反演模型应用于无人机影像之前,使用归一化水体指数(NDWI)提取水体信息。针对研究使用的高光谱相机,NDWI的计算公式为:

$$NDWI = [R_{rs}(551) - R_{rs}(861)] / [R_{rs}(551) + R_{rs}(861)] \quad (2)$$

式中: $R_{rs}(551)$ 为551 nm波长处的遥感反射率, sr^{-1} ; $R_{rs}(861)$ 为861 nm波长处的遥感反射率, sr^{-1} 。

将透明度模型应用于无人机影像水体区域,可获得先行启动区透明度的空间分布图。

3.1 透明度空间分布

图3为2024年8月5日金泽镇透明度遥感反演结果。

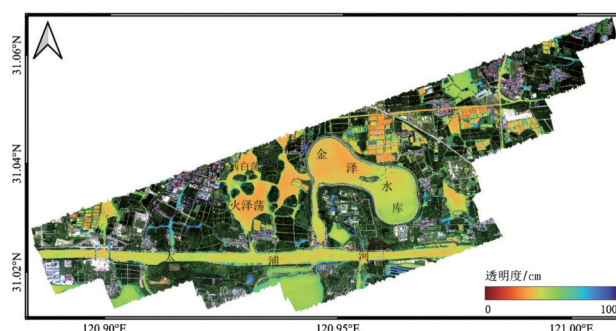


图3 2024年8月5日透明度遥感反演结果

Fig.3 Results of remote sensing retrieval of water transparency on August 5, 2024

航摄区域内透明度平均值为46 cm,最大值位于西侧金泽塘以及金泽水库南部水体,最低值位于南横港南侧的养殖塘。金泽水库在西南角引太浦河水入库,水体透明度存在西低东高的现象。以20

cm为间隔,对不同透明度区间的水体面积占航摄区域水体总面积的比例进行统计。结果显示,整个航摄区域的水体透明度都在20 cm以上。其中,透明度为40~60 cm的区域占比最大,为50.3%;其次是透明度为20~40 cm的区域,占比为37.8%;透明度大于80 cm的区域占比为4.6%。

养殖塘、湖荡(如火泽荡、西白荡)、太浦河的水体透明度均较低。根据光谱分析,这3个区域水体的致浊物质并不相同。在养殖塘、湖荡和太浦河水体提取的遥感反射率见图4。可以发现,养殖塘、湖荡内水体的光谱在700 nm处出现强烈的反射峰,表示该水域内叶绿素含量较高,而太浦河光谱在700 nm处无反射峰,说明太浦河内的致浊物质主要为悬浮颗粒物。养殖塘与湖荡光谱在650 nm左右出现反射峰,而在625 nm和675 nm形成反射谷,表明水体内部存在大量蓝藻^[8-10]。此外,研究区内的实测数据也显示,该区域蓝藻密度最高,部分湖泊水体流速较低,易发生水华灾害^[11-13]。

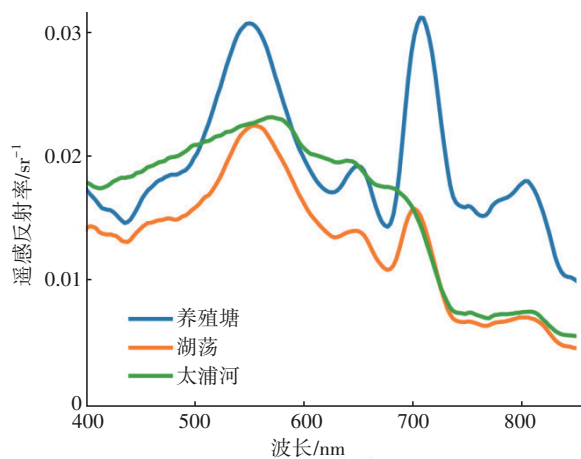


图4 养殖塘、湖荡、太浦河样本点光谱

Fig.4 Spectral of sample points in aquaculture ponds, lakes and Taipu River

图5为2024年8月6日太浦河的透明度反演结果,区域内透明度均值为56 cm。以20 cm为间隔,对不同透明度区间的占比进行统计。结果表明,整个测区的水体透明度仍在20 cm以上,仅0.8%的水域透明度为20~40 cm。航摄区域内70.4%的水体透明度为40~60 cm,60~80 cm的区域占19.5%,透明度>80 cm的区域占9.3%。此次航摄沿太浦河流向共覆盖约16 km,发现太浦河透明度从西到东并无明显变化,航道中心透明度为45 cm左右,与已有研究^[14]相符。由于过往船舶对水体的扰动,水中颗

粒物不易沉降,太浦河中心航道的水体透明度低于河道两侧。图5中A处红框放大效果如图6所示。可以看出,太浦河沿岸存在零星透明度较高的区域,这主要归因于岸边生长的水草在一定程度上抑制了底泥再悬浮。

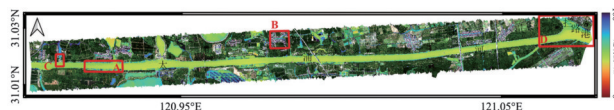


图5 2024年8月6日太浦河及其周边水域透明度

Fig.5 Water transparency of Taipu River and its surrounding waters on August 6, 2024

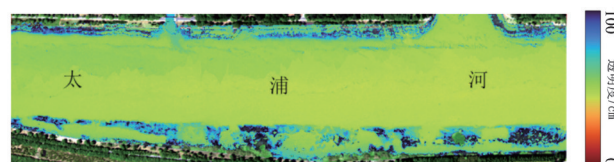


图6 太浦河水体透明度结果局部放大示意

Fig.6 Partial enlargement of the water transparency results of Taipu River

从图3和图5可以发现,航摄区域透明度较高的水体为圩区内小型河道,如大伐港、塔圩江、金泽塘等,而河道的透明度受到居民生活的影响。先行启动区水系发达,村庄大都沿河道集中建设,但经过住宅集中区的河道透明度显著低于同一河道的其他水域。例如,钱盛港(图5中B处红框)流经钱盛村的村中心时,水体透明度为60~65 cm;至村庄边缘时水体透明度逐渐升高,最高可以达到100 cm(见图7)。



图7 钱盛港水体透明度

Fig.7 Water transparency of Qianshenggang River

3.2 不同水体间的相互影响

传统的水环境监测手段难以对研究区进行整体认识,而遥感手段能够有效弥补这一缺陷,并且能够发现不同水体之间的相互影响,为水环境污染治理提供更为丰富的数据。为此,采用以下两个示例进行说明。

① 太浦河沿岸设有多处水闸,有效阻隔了太浦河对圩区内部水体透明度的影响。太浦河与金泽塘由金泽塘南泵站分隔(见图5中C处红框)。该泵站水闸南侧,太浦河透明度为50 cm左右,而水闸北侧水体透明度升至80 cm左右(见图8)。未来可结合水闸运行数据,深入分析水闸对透明度阻隔效应的动态机制,并基于透明度空间分布特征,优化闸坝调度方案,以进一步提升区域水环境质量。

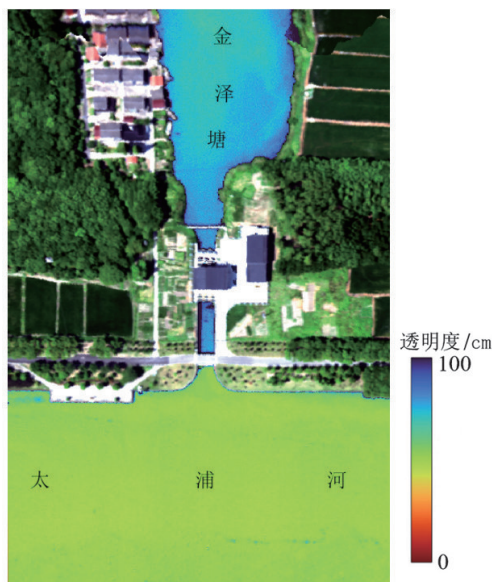


图8 水闸对透明度的阻隔效应

Fig.8 Blocking effect of water gates on water transparency

② 拦路港来水透明度较高(约70 cm),而太浦河水体透明度在45 cm左右。在太浦河与拦路港交汇处(见图5中D处红框),透明度呈现明显的分界线(见图9),且水体交汇区域的透明度有所降低,可能是不同方向的来水使得水中悬浮物更不易沉降。

目前的研究主要关注先行启动区内透明度的空间分布情况,未来可增加航拍频次,获取不同时期的航拍影像,更加系统地分析透明度的时空演变规律,并结合水质和生态模型,深入探讨蓝藻迁移、上游来水等对水体透明度的影响,进一步完善先行

启动区水环境监测体系。

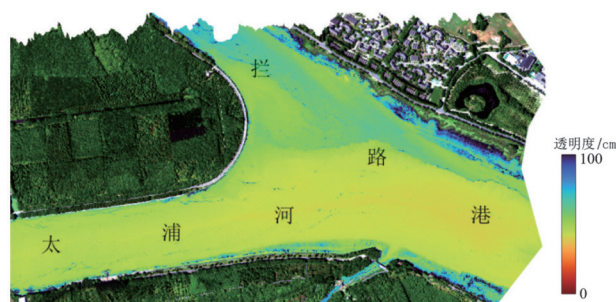


图9 太浦河与拦路港交汇处透明度分布

Fig.9 Water transparency distribution at the intersection of Taipu River and Lanlu River

4 结论

① 单波段遥感反射率值与透明度呈显著负相关,两者相关性最强的位置出现在700 nm附近,相关系数为-0.85。 $R_{rs}(559)/R_{rs}(694)$ 的波段组合形式与透明度的相关系数最高为0.924,以该波段组合形式为输入构建透明度反演模型,模型在测试集上的RMSE为6.72 cm、MAPE为11.14%。

② 通过无人机影像透明度反演结果发现,研究区内透明度较低的水域为养殖塘,较高的水域为圩区内小型河道。根据光谱分析发现,不同水体的致浊物质存在差别,未来的研究可通过构建水色三要素反演模型,进行更加精细的致浊物质分析。

③ 通过分析太浦河与圩区内部河道、太浦河与拦路港等交汇处的透明度分布,证明无人机遥感成果可直观显示区域内水体透明度的空间分布变化以及不同水体的相互影响,能够为水环境污染溯源提供丰富的数据支撑。

虽然无人机遥感技术能够弥补地面监测覆盖范围有限的不足,但无人机水环境监测只能在白天且天气条件较好的情况下进行。未来可与卫星遥感、水质自动站等多源数据融合,构建“空-天-地-水-工”一体化监测体系,全面提升先行启动区水环境监测与管理能力。

参考文献:

- [1] 刘瀚斌,郭巍,彭欣,等. 长三角一体化示范区的绿色治理现代化水平评估与建议:以先行启动区五镇为例[J]. 上海城市管理, 2022, 31(5): 2-11.
LIU H B, GUO W, PENG X, et al. Research on the green governance model of the Yangtze River Delta eco-

- green integrated development demonstration zone [J]. Shanghai Urban Management, 2022, 31(5): 2-11 (in Chinese).
- [2] 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]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 37-52 (in Chinese).
- [3] MACIEL D A, BARBOSA C C F, NOVO E M L D M, et al. Water clarity in Brazilian water assessed using Sentinel I -2 and machine learning methods[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 182: 134-152.
- [4] ZHAO Y L, WANG S L, ZHANG F F, et al. Retrieval and spatio-temporal variations analysis of Yangtze River water clarity from 2017 to 2020 based on Sentinel I -2 images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2260.
- [5] TAO H, SONG K S, LIU G, et al. A Landsat-derived annual inland water clarity dataset of China between 1984 and 2018[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(1): 79-94.
- [6] 梁文广, 吴勇锋, 石一凡, 等. 基于无人机高光谱的太浦河水质反演[J]. 测绘通报, 2024(4): 29-34.
- LIANG W G, WU Y F, SHI Y F, et al. Inversion of Taipu River water quality parameters by UAV hyperspectral imaging technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(4): 29-34 (in Chinese).
- [7] 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]. National Remote Sensing Bulletin, 2004, 8(1): 37-44 (in Chinese).
- [8] 冯炼. 卫星遥感解译湖泊蓝藻水华的几个关键问题探讨[J]. 湖泊科学, 2021, 33(3): 647-652.
- FENG L. Key issues in detecting lacustrine cyanobacterial bloom using satellite remote sensing[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(3): 647-652 (in Chinese).
- [9] 胡月红, 周丽芸, 张屹, 等. 基于620 nm藻蓝蛋白特征吸收峰提取蓝藻水华光谱指数的方法研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(8): 1736-1748.
- HU Y H, ZHOU L Y, ZHANG Y, et al. Research on spectral index method for extracting cyanobacterial blooms based on 620 nm characteristic absorption peak of phycocyanin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(8): 1736-1748 (in Chinese).
- [10] 吕丽丽, 宋开山, 刘阁, 等. 内陆水体藻蓝蛋白遥感反演研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 32-48.
- LÜ L L, SONG K S, LIU G, et al. Advances in remote sensing of phycocyanin for inland waters [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 32-48 (in Chinese).
- [11] 秦红. 长三角绿色一体化发展示范区湖泊健康状况调查与评价[J]. 水资源开发与管理, 2025, 11(1): 1-10.
- QIN H. Investigation and evaluation of lake health in the Yangtze River Delta green integrated development demonstration zone [J]. Water Resources Development and Management, 2025, 11(1): 1-10 (in Chinese).
- [12] 毛嘉欣, 陈皓若, 李丰, 等. 生态型水源水库浮游甲壳类群落结构对水环境因子和生物因子的响应[J]. 环境科学学报, 2024, 44(4): 401-410.
- MAO J X, CHEN H R, LI F, et al. Impact of water environmental and biological factors on planktonic crustacean community structure in ecological water source reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(4): 401-410 (in Chinese).
- [13] 查阳, 王迪芳, 曹承进, 等. 太浦河金泽水源地大莲湖示范区水系水环境状况调查研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021(4): 64-71.
- ZHA Y, WANG D F, CAO C J, et al. Investigation of the environmental status of water at the Dalian Lake demonstration area in the Jinze water source area of Taipu River [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021(4): 64-71 (in Chinese).
- [14] 王宇, 周维奇, 白濛雨, 等. 长三角先行启动区水体透明度时空变化特征及影响因素[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(5): 73-80.
- WANG Y, ZHOU W Q, BAI M Y, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of water transparency in the pilot zone of Yangtze River Delta [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(5): 73-80 (in Chinese).

作者简介: 赵海阳(1997—), 男, 河南许昌人, 硕士, 注册测绘师, 主要从事水环境遥感研究工作。

E-mail: zhao_haiyang@ctg.com.cn

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-07-22

(编辑: 丁彩娟)