

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.006

基于 PLSR 的珠江口城市河流水质高光谱反演

黄 华¹, 李茂亿², 陈吟晖², 陈 耿³, 刘海龙⁴, 邢前国⁴, 蔡建楠²

(1. 广东环境保护工程职业学院, 广东 佛山 528216;
2. 中山市环境监测站, 广东 中山 528403; 3. 广东省环境监测中心, 广东 广州 510308;
4. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

摘要:为研究珠江口城市河流水体高光谱特征与城市河流水质指数(CWQI)的关系,对中山市典型河流开展了高光谱监测和同步水质分析,基于偏最小二乘回归(PLSR)建立了高光谱数据与CWQI的反演模型,并研究了反演模型的最佳光谱分辨率和最优主成分数。结果表明:基于化学需氧量、总磷、氨氮和溶解氧4项水质指标质量浓度值计算得到的CWQI值可较好地反映研究区河流水质状况;水体不同波段的光谱反射率与CWQI存在一定的相关性,可用于区分不同CWQI的水体;光谱分辨率为50 nm、提取主成分数为8时的反演模型效果最优,验证集均方根误差和平均相对误差分别为0.768和18.1%。将该反演模型与无人机高光谱监测数据结合,可较好地反映河流水质的空间差异。

关键词:城市河流水质指数;高光谱;偏最小二乘回归;无人机;珠江口;中山市

中图分类号:TV213.4;X87 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0036-07

Water quality retrieval by hyperspectral for city rivers in Pearl River Estuary based on partial least squares regression//HUANG Hua¹, LI Maoyi², CHEN Yinhui², CHEN Geng³, LIU Hailong⁴, XING Qianguo⁴, CAI Jiannan²
(1. Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China; 2. Zhongshan Environmental Monitoring Station, Zhongshan 528403, China; 3. Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China; 4. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: To study the relationship between hyperspectral characteristics of the city rivers in the Pearl River Estuary and the city river water quality index (CWQI), hyperspectral monitoring and simultaneous water quality analysis were carried out on the typical rivers in Zhongshan City. On this basis, a retrieval model of hyperspectral data and CWQI was established based on partial least squares regression (PLSR). The optimal spectral resolution and optimal principal component number of the retrieval model were studied. The results show that the CWQI obtained from the concentration of the four water quality indicators of chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₃-N) and dissolved oxygen (DO) can properly reflect the water quality of the rivers in study area. There is a certain correlation between the spectral reflectance of different bands and CWQI, and the spectral reflectance can be used to distinguish water with different CWQI. The retrieval model with a spectral resolution of 50 nm and the main component number of 8 is the best. The set RMSE and MRE were 0.768 and 18.1%, respectively. Combining this retrieval model with UAV hyperspectral monitoring data can properly reflect the spatial difference of river water quality.

Key words: city water quality index (CWQI); hyperspectral; partial least squares regression (PLSR); UAV; Pearl River Estuary; Zhongshan City

珠江口地区河网密布,河流水质状况直接影响城市的整体风貌和居民生活质量^[1]。近年来随着国家《水污染防治行动计划》的深入推进,城市河流

的综合整治和水质改善已成为珠江口各市的重要工作任务。为实现对河流水质状况监控及河流整治效果的评估,往往需要配套开展密集、长期的水质监测

基金项目:中国科学院科研仪器研制项目(YJKYYQ20170048);国家自然科学基金(41676171);中山市科技计划(200820173645089);广东省科技创新战略专项(PDJH2020b1091)

作者简介:黄华(1982—),男,讲师,硕士,主要从事环境规划与环境评价研究。E-mail:gkhlhh@qq.com

通信作者:蔡建楠(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事环境遥感研究。E-mail:jncai@foxmail.com

工作,而采用常规的水样现场采集和实验室分析的方法存在耗时长、花费高、采样点位有限等局限,无法满足新形势下水环境管理工作的需要^[2]。

水质遥感技术基于水体水质与光谱特征之间的响应关系实现对水质指标的反演^[3],获得的水质信息具有时间和空间上的相对连续性,可以作为传统水质监测方法的有效补充,近年来得到迅速发展。其中,高光谱水质遥感技术由于具有纳米级的光谱分辨率和连续的光谱谱段,极大地增加了水体光谱信息量,有助于精准建立各种水质参数与光谱响应关系以提高反演模型的精度,成为水质遥感研究领域的热点。目前,相关研究主要面向的监测对象为水库和海洋水体,而珠江口河网水体受陆源物质大量输入和海洋潮汐因素的共同作用,有着与内陆二类水体和开阔大洋水体不同的水体光学特征,开展珠江口水体水质光学遥感研究具有重要的意义^[4]。目前城市河流水质遥感有关研究中的目标水质参数主要为水体浊度、悬浮物、叶绿素 a、有色可溶性有机物(CDOM)等光学活性参数^[5-7],对于河流水质综合指标的遥感反演研究较少。

本文以珠江口城市中山市为研究区,通过开展河流高光谱监测和同步水质分析,研究受测水体高光谱特征与城市河流水质指数(city river water quality index, CWQI)的关系,并基于偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)建立高光谱数据与河流水质指数的反演模型,同时探索水体高光谱监测的最佳光谱分辨率,以期在城市河流水质光谱监测及有关高光谱传感器的设计和应用提供参考。

1 研究方法

中山市地处珠江口西岸,北接广州,与深圳隔海相望,紧邻港澳,处在粤港澳大湾区的地理中心位置。中山市境内河流密布,不同规模的内河涌、排洪渠高达 1 000 余条。改革开放以来,中山市经济迅猛发展,但随着人口和产业聚集程度不断提高,河流水体受到了一定程度的污染。

1.1 河流光谱监测和数据处理

1.1.1 地面高光谱监测

于 2019 年 7—9 月选择中山市境内具有代表性的河流水体进行水质高光谱监测,共获得 151 个位点的现场实测数据。高光谱监测使用美国 Ocean Optics 公司 USB4000 光谱仪,光谱分辨率约为 0.20 nm,光谱范围为 345.34 ~ 1 046.12 nm,视场角为 15°。每次测量前均使用标准白板进行仪器定标。测量时将光谱仪探头垂直置于离河流水面

0.5 m 处测量河流水体上行辐射亮度 L_u 、天空辐射亮度 L_s 和太阳下行辐照度 E_d ,每个点位重复进行 3 次测量后取平均值作为测定结果。测点的光谱反射率 R_{rs} 计算公式^[8]为

$$R_{rs} = \frac{L_u - \gamma L_s}{E_d} \quad (1)$$

式中 γ 为天空光在水体表面的菲涅尔反射率,通常取经验值 0.028。考虑到 400 ~ 900 nm 波段范围以外的光谱反射率更易受外界条件及仪器设计误差等因素的影响,可能对监测结果带来信号噪声^[9],因此仅选择 400 ~ 900 nm 范围内共 2 534 个波段的原始光谱反射率数据用于构建反演模型。

1.1.2 无人机载高光谱监测

无人机遥感监测技术具有灵活性大、影像分辨率高、时效性强、成本低等优点,是水环境遥感研究的一个重要发展方向^[10]。在利用地面实测高光谱构建 CQWI 反演模型后,将其推广应用于无人机高光谱影像中,以评价模型应用于无人机载高光谱监测的适用性。无人机载高光谱监测采用北京智科远达数据技术有限公司 ZK-VNIR-FPG480 型高光谱成像扫描仪,其有效谱段范围为 400 ~ 1 000 nm,光谱通道数大于或等于 270,光谱分辨率小于或等于 2.8 nm,空间分辨率为 9 cm(100 m 飞行高度),视场角为 26°。高光谱成像扫描仪搭载在大疆 M600 PRO 无人机平台上,在晴朗天气条件下,根据设定的航线路线采集研究水体的光谱,并同步采集靶标的光谱数据,对水体数据进行定标运算得到水体反射率数据。无人机航拍区域主要为内河与外江交汇处、主要水工设施周边、码头作业区等潜在的水质突变点区域,以尽可能同时获取不同水质水体的光谱信息。

1.2 CWQI 构建和水质监测

目前,国内外对于地表水环境质量评价方法主要有单因子水质类别评价法、水质指数法和不确定性方法三大类^[11],其中水质指数法可综合多项水质指标的监测结果,计算过程简单,评价结果便于比较。本文采用原环境保护部《城市地表水环境质量排名技术规定(试行)》中规定的河流水质指数作为反映河流水质状况的综合指标,单项指标(除溶解氧外)和溶解氧的 CWQI 计算公式分别为

$$I_i = \frac{\rho_i}{\rho_{si}} \quad (2)$$

$$I_{DO} = \frac{\rho_s(DO)}{\rho(DO)} \quad (3)$$

式中: I_i 、 I_{DO} 分别为水质指标 i 和溶解氧的 CWQI; ρ_i 、 $\rho(DO)$ 分别为水质指标 i 和溶解氧的质量浓度测定

值; ρ_{si} 、 ρ_s (DO) 分别为水质指标 i 和溶解氧Ⅲ类地表水对应的质量浓度标准限值。所有水质指标的 CWQI 值相加即为该水样的 CWQI。

《城市地表水环境质量排名技术规定(试行)》推荐 CWQI 计算的基本水质指标为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》表 1 中除水温、粪大肠菌群和总氮以外的 21 项指标。为优化监测项目,对中山市各河流监测断面 2018—2019 年的数据(共计水质监测样本 2 669 个)进行了分析,结果显示中山市各河流的主要超标因子为化学需氧量(COD)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)和溶解氧(DO),这 4 项水质监测指标计算得到的 CWQI 值(I_4)与 21 项水质监测指标计算得到的 CWQI 值(I_{21})之比的均值和标准差分别为 53.7% 和 0.08%,相关系数 $r = 0.94$ ($P < 0.05$),两者具有显著的相关性(图 1),表明 I_4 可较好地反映河流水质状况,故本文中选取上述 4 项指标作为与光谱测量同步进行的水质监测指标,并计算 I_4 值作为河流水质综合评价结果。

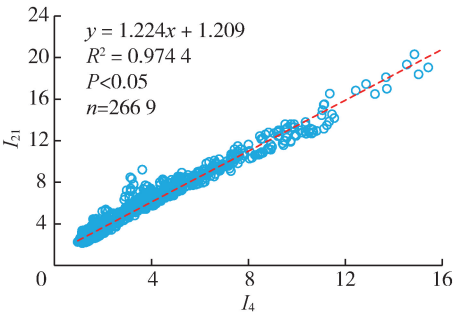


图 1 4 项和 21 项水质监测指标 CWQI 值的关系
Fig.1 Relationship between I_4 and I_{21} in CWQI

各河流监测点的水样采集与地面高光谱测量同步进行,水质监测指标为 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 DO。其中 DO 的质量浓度使用美国 YSI 公司 Pro 2030 多参数水质分析仪现场测定,其他指标取河流表层 0~20 cm 处混合样,装入洁净聚乙烯塑料瓶中并加入相应保存剂后置于低温保存箱及时送至实验室分析。COD 质量浓度采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度采用纳氏试剂光度法测定,TP 质量浓度采用钼锑抗分光光度法测定^[12],并使用空白样、平行样、标准样品和加标回收等措施对样品监测全过程进行

了质量控制。水质样品各特征指标见表 1,可见多数样品水质属于Ⅳ或Ⅴ类,主要定类水质指标为 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

1.3 PLSR 反演模型建立与评价

由于水体反射率数据波段数众多,相邻波段间隔紧密,而不同波段光谱反射率数据间最大方差膨胀因子大于 80 000,表明不同波段光谱反射率存在极严重的多重相关性^[13]。为提高反演模型精度,采用 PLSR 建立水体不同波段光谱反射率与 CWQI 的反演模型。PLSR 基于高维投影思想,通过提取主成分的方法对系统中的数据信息进行分解和筛选,实现对系统解释性最强的综合变量的有效抽取^[13-15]; PLSR 常用于样本量小、变量间存在多重相关性的数据处理,适用于中高光谱遥感数据反演模型的建立^[16-17]。

PLSR 建模的基本步骤^[18]为:①标准化处理水体光谱反射率数据矩阵 X 和水体 CWQI 数据矩阵 Y ,得到的标准化矩阵分别记为 E_0 和 F_0 ;②分别提取 E_0 和 F_0 第一对成分 T_1 和 U_1 , T_1 和 U_1 分别为 E_0 和 F_0 的线性组合并使之相关性最大;③分别求 E_0 和 F_0 在 T_1 上的回归,并得到回归残差矩阵 E_1 和 F_1 ;④用残差矩阵 E_1 和 F_1 代替 E_0 和 F_0 重复上述步骤;⑤检查收敛性以确定提取的主成分数。

将 151 个样本原始数据随机划分为建模集(120 个样本)和验证集(31 个样本)两部分,其中建模集用建立 PLSR 反演模型;验证集用于反演模型对 CWQI 反演效果的验证。模型验证效果分别采用相关系数(r)、均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)进行评价。

2 结果与分析

2.1 光谱反射率与 CWQI 的关系

根据 CWQI 计算结果,151 个水质样品的 CWQI 值范围为 1.36~10.75,平均值为 3.60,标准差为 1.91。将不同 CWQI 值范围的水样进行分类并计算其高光谱反射率均值,结果(图 2)显示,在 400~700 nm 波段范围内光谱反射率对不同 CWQI 值的水样有较好的区分度,水体光谱反射率均值随 CWQI 的增大依次递减,其中 $I_4 \leq 2$ 的水体反射率均值在

表 1 样品水质特征

Table 1 Characteristics of sample water quality

水质指标	质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)				偏度	峰度	不同水质类别样本数占比/%		
	最低	最高	平均	标准差			Ⅲ类及以上	Ⅳ、Ⅴ类	劣Ⅴ类
COD	5	72	15	10	2.82	11.19	78.1	17.2	3.3
TP	0.04	0.95	0.18	0.12	2.87	12.87	1.3	90.1	3.3
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.04	5.84	0.99	1.01	1.57	2.97	62.3	12.6	15.2
DO	2.17	15.63	6.04	1.69	0.76	5.90	76.2	23.8	0

整个波段范围内均高于其他类别的水体。但在 720 ~ 900 nm 波段范围内,出现 $I_4 > 5$ 的较差水质水体的光谱分辨率高于 $2 < I_4 \leq 5$ 水体的现象,表明水质较差水体在此波段范围内光谱特征的复杂性。根据图 2 光谱吸收与反射特征波段并结合地表水体光学活性参数的有关研究成果分析,CDOM 是导致水体 450 nm 波长处反射率变化的主要原因^[19]; 670 nm、760 nm 附近的反射低谷则与藻类和水分子吸收密切相关^[20-21];约 820 nm 波长处的反射峰则是水体悬浮颗粒物散射程度加强而形成的^[22]。上述分析表明,水体中溶解性有机碳、悬浮颗粒物、藻类的质量浓度水平对本研究水体反射率特征具有较大影响;而河流水体 COD、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO 质量浓度与水体中溶解性有机碳、悬浮颗粒物、藻类的丰富程度密切相关,COD 等非光学活性水质参数在一定程度上可通过溶解性有机碳、悬浮颗粒物、藻类等的光谱吸收特征得到体现。因此 CWQI 作为由上述 4 项指标构成的综合指标也与不同波段的水体光谱反射率存在一定的相关性,表明测得的水体光谱反射率信息是水质成分的综合反映,基于光谱反射率的水体 CWQI 反演具有较好的可行性。

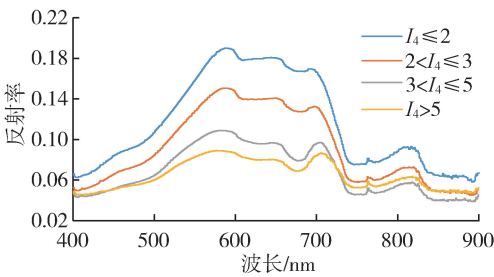


图 2 不同 CWQI 范围水样对应的高光谱反射率均值

Fig.2 Hyperspectral average reflectance of water samples with different CWQI range

2.2 不同光谱分辨率对 PLSR 反演模型的影响

为分析光谱分辨率对水体 PLSR 反演模型估算效果的影响,需找出水体 CWQI 高光谱遥感监测最佳光谱分辨率。采用分段三次 Hermite 插值多项式法对原始数据进行重采样,采样间隔依次为约 0.20 nm、1 nm、10 nm、20 nm、30 nm、40 nm、50 nm、60 nm、70 nm 和 80 nm,连同两端波段的总波段数分别为 2 534、900、51、26、18、14、11、10、9 和 8。在此基础上建立不同光谱分辨率样本集的 PLSR 反演模型,并根据相应的建模与验证精度评价结果研究模型估算精度随光谱分辨率的变化。结果(表 2)表明,在各光谱分辨率的数据集中,原始光谱数据集的 PLSR 反演模型的估算效果最差;对原始数据进行不同光谱分辨率的重采样后,均有助于提升 PLSR 反演模型的估算效果。PLSR 反演模型的验证集

RMSE 随着光谱分辨率的降低呈现先减小后增大的趋势。光谱分辨率为 50 nm、波段数为 11 个时,验证集 RMSE 最小达 0.790,MRE 为 18.63%,模型估算效果最优。但总体上重采样后各验证集的 PLSR 反演模型估算效果均处于接近的水平。该现象表明,在 CWQI 的遥感监测中,过高的光谱分辨率可能会造成数据冗余和引入环境噪声,造成模型复杂化并影响模型稳定性。反之,在较低的光谱分辨率下,数量较少的波段可在基本涵盖水体主要污染物特征谱段的同时,增强光谱信噪比,从而提高估算精度。

表 2 不同波段数的 PLSR 建模效果评价

Table 2 Evaluation of PLSR model using different number wavelengths

分辨率/nm	波段数/个	RMSE	r	MRE/%
约 0.20	2 534	1.251	0.574	30.30
1	900	0.859	0.796	20.27
10	51	0.861	0.794	20.29
20	26	0.872	0.789	20.43
30	18	0.836	0.808	19.39
40	14	0.816	0.825	18.63
50	11	0.790	0.834	18.64
60	10	0.819	0.829	19.69
70	9	0.800	0.848	19.47
80	8	0.859	0.831	19.20

注:均采用舍一交叉验证方法确定 PLSR 反演模型主成分数。

2.3 提取的主成分数对 PLSR 反演模型的影响

确定提取的主成分数是 PLSR 反演模型建立和优化的另一重要环节。目前 PLSR 建模确定主成分数的方法主要有舍一交叉验证方法、分批交叉验证方法、分裂样本交叉验证方法、随机样本交叉验证方法等^[17],其中舍一交叉验证方法的应用较为广泛,但该方法得到的建模主成分数可能不是最优值,主成分数过多或过少可能会导致欠拟合或过拟合,影响模型的估算准确度^[23]。本文采用 50 nm 分辨率的水体光谱反射率数据,分别提取 2 ~ 10 个主成分进行 PLSR 建模,以验证集 RMSE 最小时对应的主成分数为最佳的主成分数。图 3 表明,模型的 RMSE 随主成分数的增加呈先下降后增加的趋势,当主成分数为 8 时,模型的 RMSE 达到最低值。

因此,确定建模最佳主成分数为 8,并建立 PLSR 反演模型如下:

$$\begin{aligned}
 I = & 4.84 - 23.33R_{400} + 22.62R_{450} + 53.53R_{500} + \\
 & 4.69R_{550} - 24.19R_{600} - 102.32R_{650} + \\
 & 75.96R_{700} + 25.38R_{750} - 30.93R_{800} + \\
 & 46.15R_{850} - 19.99R_{900}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

式中 R_j 为不同波长处的水体光谱反射率。

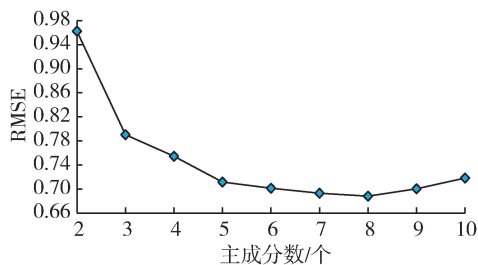


图3 不同主成分数与验证集 RMSE 的关系

Fig.3 Relationship between validation data set RMSE and different principal components

2.4 PLSR 反演模型估算效果评价

以 31 个验证集样本的 CWQI 实测值为纵坐标、CWQI 高光谱反演模型(式(4))计算值为横坐标,绘制其实测值与计算值的对比散点图(图 4)。结果表明,该反演模型的估算精度良好, RMSE、MRE 分别为 0.768 和 18.1%,说明该反演模型在有效缩减

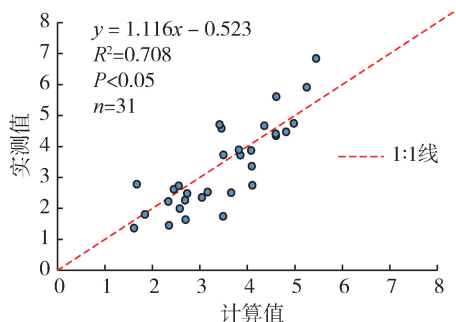


图4 验证集样本 CWQI 实测值与反演模型计算值比较

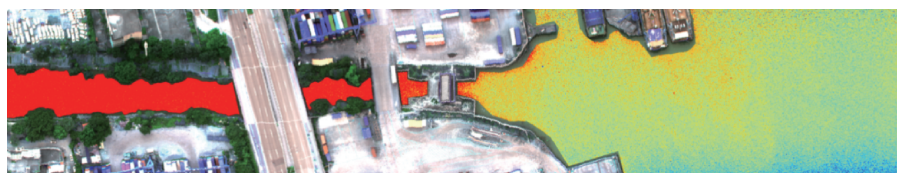
Fig.4 Comparison of measured and estimated values of CWQI for validation samples

了高光谱输入参数的前提下,仍然保持了良好的泛化能力和反演精度。

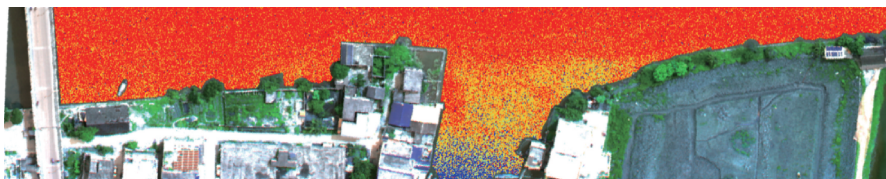
2.5 反演结果

由于无人机航拍覆盖范围较大,本文未进行同步的水质分析,主要对基于无人机高光谱影像的 CWQI 反演效果做初步定性分析,并重点关注河流水质突变区域 CWQI 反演结果的合理性。从应用结果(图 5)上看,反演得到的 CWQI 值可较合理地反映出河流水质的空间差异。如图 5(a)反演结果突出了地理位置接近,但因水闸控制导致连通性差的水体水质的显著差异;图 5(b)反演结果反映了河流交汇处水体混合过程中的局部水质差异;图 5(c)反演结果突出了码头船舶作业引起的水体扰动和水质变化。该结果表明,基于地面高光谱测点数据建立的 CWQI 反演模型应用于空间影像数据反演 CWQI 具有较好的可行性。

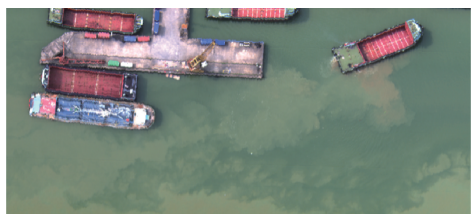
受限于无人机航程的限制,每次作业时间约在 20 min 左右,对于河流水质大范围监测的能力较为不足,仅能重点开展局部区域的水质高光谱反演。同时,现场航飞采用多航带作业方式,但对于水体流动性强,涨落潮剧烈的水域,水体流动导致水质的时空变化不能被无人机同步采集;这种准同步的水体光谱数据与实际河流的水质分布会有一定差异。但整体上反演模型应用于无人机高光谱影像的 CWQI 反演可取得良好效果,表明该方法具有良好的业务化运行潜力。



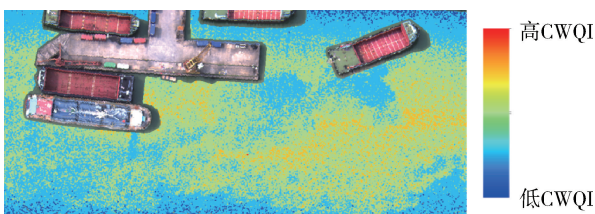
(a) 某水闸两侧水体



(b) 某河渠与外江干流交汇处水体



(c) 码头作业区水体(无人机影像 RGB 波段合成)



(d) 码头作业区水体(CWQI 反演结果)

图5 基于无人机高光谱影像的 CWQI 反演结果

Fig.5 Retrieved CWQI diagram based on UAV hyperspectral image

3 结 语

2019年7—9月在珠三角地区中山市选择代表性河流进行了水体高光谱反射率监测和同步水质监测,并以基于COD、TP、NH₃-N和DO 4项水质指标计算得到的CWQI来表征河流水质状况。CWQI与水体高光谱反射率的相关分析表明,不同波段高光谱反射率对水质状况有较好的光学敏感性;基于PLSR建立高光谱数据与CWQI的最优反演模型,其验证数据集RMSE和MRE分别为0.768和18.1%,具有良好的反演精度。将该模型应用于无人机高光谱影像的CWQI反演,可以较合理地反映出河流水质的空间差异。尽管无人机航程、水流变化复杂等因素可能对无人机高光谱水质反演产生影响,但水质高光谱反演模型和无人机结合,可为河流水质综合评价提供一种大范围覆盖、可视化表达的技术手段,具有良好的业务化运行潜力。

参考文献:

- [1] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
- [2] 彭令,梅军军,王娜,等. 工矿业城市区域水质参数高光谱定量反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2922-2928. (PENG Ling, MEI Junjun, WANG Na, et al. Quantitative inversion of water quality parameters in industrial and mining cities from hyperspectral remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2922-2928. (in Chinese))
- [3] 彭建,徐飞雄,邓凯,等. 琅琊山景区不同指标浓度下水质光谱差异分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1499-1507. (PENG Jian, XU Feixiong, DENG Kai, et al. Spectral differences of water quality at different index concentrations: in Langya Mountain scenic area[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(5): 1499-1507. (in Chinese))
- [4] 王珊珊,王永波,扶卿华,等. 珠江口水体组分的吸收特性分析[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4511-4521. (WANG Shanshan, WANG Yongbo, FU Qinghua, et al. Spectral absorption properties of the water constituents in the estuary of Zhujiang River[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4511-4521. (in Chinese))
- [5] WANG X, YANG W. Water quality monitoring and evaluation using remote-sensing techniques in China: a systematic review [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2019, 5(1): 47-56.
- [6] FICHOT C G, DOWNING B D, BERGAMASCHI B A, et al. High-resolution remote sensing of water quality in the San Francisco Bay: delta estuary [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 50(2): 573.
- [7] ERSAN B, DERYA M. Assessment of surface water quality by using satellite images fusion based on PCA method in the Lake Gala, Turkey [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(5): 2983-2989.
- [8] MOBLEY C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. Applied Optics, 1999, 38(36): 7442-7455.
- [9] 牛明香,王俊. 基于 Landsat 遥感影像的黄河三角洲东营段海岸线变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 26-33. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Analysis of coastline variations in Dongying section of Yellow River Delta based on Landsat remote sensing image[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 26-33. (in Chinese))
- [10] 汪雨豪,李家国,汪洁,等. 基于 GF-2 影像的苏州市区水质遥感监测[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5875-5885. (WANG Yuhao, LI Jianguo, WANG Jie, et al. Remote sensing monitoring of water quality in Suzhou urban area based on GF-2 image[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5875-5885. (in Chinese))
- [11] 嵇晓燕,孙宗光,陈亚男. 城市地表水环境质量排名方法研究[J]. 中国环境监测, 2016, 32(4): 54-57. (JI Xiaoyan, SUN Zongguang, CHEN Yanan. Method study on sequence of city surface water environmental quality[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(4): 54-57. (in Chinese))
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [13] WOLD S, SJÖSTRÖM M, ERIKSSON L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 109-130.
- [14] 丁胜祥,董增川,张莉,等. 基于偏最小二乘回归的洪水预报方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 367-371. (DING Shengxiang, DONG Zengchuan, ZHANG Li, et al. A method of flood forecasting based on partial least squares regression [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(4): 367-371. (in Chinese))
- [15] 郭卫华,周永章. 基于 PLSR 的中山市水资源压力演变特征与趋势[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 23-27. (GUO Weihua, ZHOU Yongzhang. Evolution characteristics and trend of water resources stress of Zhongshan City based on PLSR method [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 23-27. (in Chinese))
- [16] SUDDUTH K A, JANG G, LERCH R N, et al. Long-term agroecosystem research in the central Mississippi River

- Basin; hyperspectral remote sensing of reservoir water quality[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(1):71-83.
- [17] 贺军亮,崔军丽,张淑媛,等. 基于偏最小二乘的土壤重金属铜含量高光谱估算[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(5): 998-1004. (HE Junliang, CUI Junli, ZHANG Shuyuan, et al. Hyperspectral estimation of heavy metal Cu content in soil based on partial least square method[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(5):998-1004. (in Chinese))
- [18] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与 PLS 过程)[J]. *数理统计与管理*, 2002(3): 58-64. (GAO Huixian. Statistical analyses for multiple correlation variables of two sets(3)(partial least squares regression and PLS procedure)[J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2002(3):58-64. (in Chinese))
- [19] 陈楚群,施平. 应用水色卫星遥感技术估算珠江口海域溶解有机碳浓度[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(6):715-719. (CHEN Chuqun, SHI Ping. Application of ocean color satellite remote sensing data for estimation of DOC concentration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(6):715-719. (in Chinese))
- [20] 刘志国,周云轩,沈芳. 河口水体泥沙浓度的水面光谱统计模式分析[J]. *水利学报*, 2007, 38(7):799-805. (LIU Zhiguo, ZHOU Yunxuan, SHEN Fang. Statistic analysis of suspended sediment concentration in offshore waters based on field measurement of reflectance hyperspectral[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7):799-805. (in Chinese))
- [21] 杨锦坤,陈楚群,唐世林,等. 珠江口水体叶绿素荧光特性研究[J]. *热带海洋学报*, 2007(4):15-20. (YANG Jinkun, CHEN Chuqun, TANG Shilin, et al. Research on chlorophyll fluorescence properties of water in Zhujiang River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007(4):15-20. (in Chinese))
- [22] 陈雯扬,许惠平. 基于高光谱数据的东海近海悬浮泥沙浓度估测研究[J]. *水运工程*, 2010, 438(2):31-35. (CHEN Wenyang, XU Huiping. Estimation on suspended sedimentation concentration of East Sea based on hyperspectral data[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2010, 438(2):31-35. (in Chinese))
- [23] 杨岚,冯新沪. 动态优化偏最小二乘模型的建立与应用[J]. *后勤工程学院学报*, 2008, 24(2):75-77. (YANG Lan, FENG Xinlu. Dynamic optimized partial least squares regression [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2008, 24(2):75-77. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-05 编辑:熊水斌)

(上接第 21 页)

- [24] 唱彤,郦建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. *水资源保护*, 2020, 36(1):44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1):44-51. (in Chinese))
- [25] PENG J, CHEN X, LIU Y, et al. Spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Applied Geography*, 2016, 74:170-181.
- [26] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services[J]. *Ecology Letters*, 2010, 12(12):1394-1404.
- [27] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等. 东江流域近 50 年旱涝时空演变特征[J]. *地理科学*, 2014, 34(11):1391-1398. (HE Yanhu, CHEN Xiaohong, LIN Kairong, et al. Characteristic of the spatio-temporal distribution of droughts and floods in the Dongjiang Basin in recent 50 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11):1391-1398. (in Chinese))
- [28] 张文彬,胡健,马艺鸣. 支撑力和压力脱钩视角下中国生态承载力评价[J]. *经济地理*, 2020, 40(2):181-188. (ZHANG Wenbin, HU Jian, MA Yiming. Assessment of China's ecological carrying capacity from the perspective of decoupling of supporting force and pressure[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(2):181-188. (in Chinese))
- [29] 徐凯,房艳刚. 乡村地域多功能空间分异特征及类型识别:以辽宁省 78 个区县为例[J]. *地理研究*, 2019, 38(3):482-495. (XU Kai, FANG Yangang. Spatial differentiation and type identification of rural territorial multi-functions in Liaoning Province [J]. *Geographical Research*, 2019, 38(3):482-495. (in Chinese))
- [30] WILLEMEN L, HEIN L, VAN MENSVOORT M E F, et al. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1):62-73.
- [31] 刘彦随,刘玉,陈玉福. 中国地域多功能性评价及其决策机制[J]. *地理学报*, 2011, 66(10):1379-1389. (LIU Yansui, LIU Yu, CHEN Yufu. Territorial multi-functionality evaluation and decision-making mechanism at county scale in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10):1379-1389. (in Chinese))

(收稿日期:2020-10-03 编辑:王 芳)