

珠江口河网水体非光学活性水质参数高光谱反演

蔡建楠^{1, 2}, 刘海龙³, 姜波³, 陈吟晖^{1, 2}, 李杰鸿^{1, 2}, 吴思晓², 梁建霞², 黄华⁴, 邢前国³

1. 中山市环境监测站, 广东 中山 528403;
2. 中山市生态环境局, 广东 中山 528403;
3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003;
4. 广东环境保护工程职业学院, 广东省无人机环保应用工程技术研究中心, 广东 佛山 528216

摘要: 以粤港澳大湾区中山市及其邻近水域河网水体为试验区, 同步采集现场光谱及水质数据, 研究受测水体的高光谱反射率特征, 并分析非光学活性参数中化学需氧量(COD_{Cr})、总磷(TP)浓度与高光谱反射率的相关性。结果显示, 各河流水体光谱反射率主要受悬浮颗粒物和叶绿素 *a* 的影响; 在 500~680nm 波段范围内, 水体光谱反射率大小与 COD_{Cr}、TP 浓度呈负相关关系; 与单波段相比, 特定波段的反射率比值与 COD_{Cr}、TP 浓度值的相关性较高, 与 COD_{Cr}、TP 浓度值相关性最高的反射率比值波段组合分别为 R_{675}/R_{794} 、 R_{690}/R_{815} 。选择上述波段组合建立的水质反演模型具有良好的估算精度, 模型估算平均相对误差分别为 27.2%、32.1%, 表明高光谱技术在珠江口河网水体非光学活性参数 COD_{Cr}、TP 浓度反演上具有较大的应用前景。

关键词: 珠江口河网; 非光学活性参数; 高光谱; 水质反演; 波段比值

中图分类号: P733.31 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2021)01-0058-7

Retrieval of non-optically active water quality parameters by hyperspectra for river network waters in the Pearl River estuary

CAI Jiannan^{1, 2}, LIU Hailong³, JIANG Bo³, CHEN Yin-hui^{1, 2}, LI Jie-hong^{1, 2}, WU Sixiao², LIANG Jianxia², HUANG Hua⁴, XING Qian-guo³

1. Zhongshan Environmental Monitoring Station, Zhongshan 528403, China;
2. Zhongshan Environmental Protection Agency, Zhongshan 528403, China;
3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
4. Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Guangdong Engineering Technology Research Center for UAV Environmental Application, Foshan 528216, China

Abstract: Field spectra and water quality measurements were performed in Zhongshan City and its adjacent river network in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. The hyperspectral reflectance characteristic of the river network and its correlation with the concentration of two non-optical activity parameters Chemical Oxygen Demand (COD_{Cr}) and Total Phosphorus (TP) were analyzed. The results showed that the spectral reflectance of the river network was mainly affected by

收稿日期: 2020-02-03; 修订日期: 2020-04-18。姚行桃编辑

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(YJKYYQ20170048); 国家自然科学基金项目(41676171); 广东省科技创新战略专项(PDJH2020b1091)

作者简介: 蔡建楠(1982—), 男, 广东省潮州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境监测遥感应用研究。email: jncai@foxmail.com

通信作者: 邢前国(1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事资源环境遥感应用研究。email: qgxing@yic.ac.cn

*感谢所有对本文付出努力的人, 感谢各位审稿专家对本文提出的宝贵建议。

Received date: 2020-02-03; **Revised date:** 2020-04-18. Editor: YAO Yantao

Foundation item: Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (YJKYYQ20170048); National Natural Science Foundation of China (41676171); Science and Technology Innovation Strategy Project of Guangdong Province (PDJH2020b1091)

Corresponding author: XING Qianguo. email: qgxing@yic.ac.cn

suspended particulate matter and chlorophyll-*a*. In the range of 500–680 nm, the spectral reflectance of the water had negative correlations with the concentrations of COD_{Cr} and TP. Compared with the single band, the reflectance ratio of the specific band had higher correlations with COD_{Cr} and TP concentrations. The reflectance ratio band combinations with the highest correlations with COD_{Cr} and TP concentrations are R_{675}/R_{794} and R_{690}/R_{815} , respectively. The water quality retrieval models that depend on the band combination show good estimation accuracy, with 27.2% and 32.1% of the average relative errors, indicating that the hyperspectral technology has good potential application for non-optical activity parameters (COD_{Cr} and TP) retrieval in the river network of the Pearl River estuary.

Key words: river network of Pearl River estuary; non-optically active water quality parameter; hyperspectra; water quality retrieval; band ratio

珠江口地区河网密布, 区域内河流众多, 随着城市化过程的不断推进, 水质问题越来越突出, 直接影响到居民生活质量, 与粤港澳大湾区生态环境建设的目标不符。为此, 珠江口各地投入了巨大的社会资源, 广泛开展了河流整治工作, 其中长期、密集的河流水质监测工作对于城市未达标水体的精准识别和对河流整治效果的综合评估具有重要意义(王晓等, 2017; 张雪等, 2019)。但传统的水质监测分析方法存在成本高昂, 采样及分析过程耗时长, 且仅代表特定区域和时段等缺点, 监测结果往往难以准确反映监测对象整体的水质状况, 难以满足当前形势下水环境质量评价的需要(Wang et al, 2004)。

高光谱水质遥感监测技术主要基于水体实测光谱, 通过建立光谱特征和水质指标的关系模型, 实现对水质指标的反演(王桂芬等, 2010; 彭建等, 2018)。高光谱遥感数据的光谱谱段丰富, 在水质参数定量监测中具有良好的应用前景, 可作为传统水质监测方法的有效补充, 近年来得到迅速的发展(林剑远等, 2019), 其中浊度、悬浮物、叶绿素 *a* 等光学活性水质参数由于具有机理明确的光学响应特征而得到广泛的研究(Wang et al, 2019)。但水环境管理与整治工作中主要监控的指标为碳组分、营养盐等非光学活性水质参数, 该类参数具有光学响应波段不显著和复杂多样的特点, 因而开展该类参数的光谱特征研究及水质反演具有较高的科学意义和现实意义(邢前国, 2007)。近年来, 国内外学者采取了间接反演、半经验模型等方法开展了水体中总磷(TP)、总氮(TN)、溶解性有机碳(DOC)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)等非光学活性水质的高光谱反演研究(Song et al, 2012; Sudduth et al, 2015; Fichot et al, 2016; 张海威等, 2017), 然而相关研究主要集中于湖泊水库, 应用于河流特别是水质复杂河网地区的研究报道较少。本文通过珠江口中山市各类型河流的高光谱监测和同步水质分析, 研究受测水体的高光谱特征及其与河流化学需氧量(COD_{Cr})和总磷(TP)这两项水质指标浓度

的关系, 并尝试建立高光谱数据与水质指标浓度的反演模型, 进而为河流非光学活性水质参数高光谱监测的实施及相关高光谱传感器的设计提供参考。

1 研究区概况

中山市位于珠江口西岸, 地处粤港澳大湾区的几何中心, 北连广州, 毗邻港澳, 陆域总面积约 1783km^2 , 多年平均降雨量为 1748.7mm , 多年平均水资源总量 17.38亿 m^3 。中山市辖区内河流众多, 除磨刀门水道、鸡鸦水道、小榄水道、横门水道和石岐河五大主要河流外, 还有各种规模的河流超过 1000 条(图 1)。中山市经济发达, 产业集群密布, 近年来随着城市的快速发展和人口的不断增加, 部分河流水质受到了一定的污染。

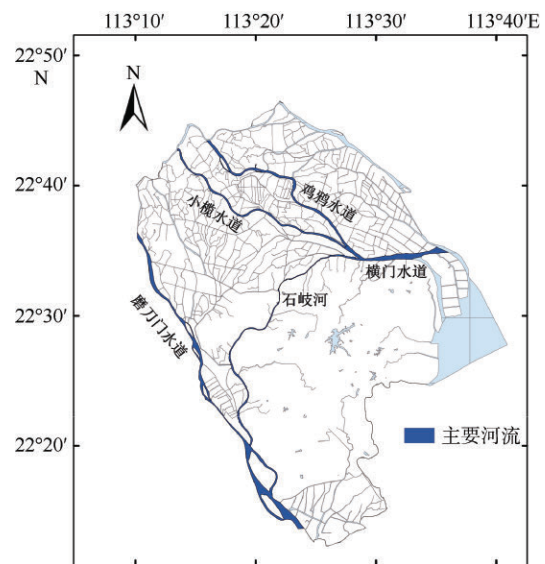


图 1 研究区河流水系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of river system in the study area

2 数据与方法

2.1 光谱测量和水样分析

2019年7月至9月在中山市实施了多次河流现场光谱测量。测定点位的选取以图1所示的中山市

主要河流及其支流为主要对象, 兼顾考虑入河污染特征、流经区域类型、周边环境特点的多样性和代表性, 以尽可能覆盖中山市各种水质类型的河流, 最终获得 151 个现场实测光谱数据和水质样品(代表性河流照片见图 2)。使用的测量设备为美国 Ocean Optics 公司的 USB4000 光谱仪, 测量光谱范围为 360~1000nm, 光谱分辨率<0.2nm。测量时选择晴天无云或少云天气状况下距正午 3h 的时段内进行。在每个点位离河流水面高度 0.5m 处, 测量河流水体的上行辐射亮度(L_u)、天空辐射亮度(L_s)和太阳下行辐射照度(E_d)。每个点位测量前对仪器进行暗电流校正, 并使用标准灰板进行调试, 使其信号基本保持在 80% 量程范围内。进行 3 次测量后取平均值作为光



图 2 代表性监测河流照片
黄色箭头标识处为监测点位置

Fig. 2 Photos of typical rivers (The position of the arrow indicates the monitoring points)

表 1 样品水质特征描述

Tab. 1 Description of characteristics of water quality

水质指标	最小浓度值 /(mg·L ⁻¹)	最大浓度值 /(mg·L ⁻¹)	平均浓度值 /(mg·L ⁻¹)	标准差 /(mg·L ⁻¹)
COD _{Cr}	5	72	15	9
TP	0.04	0.95	0.18	0.12

2.2 高光谱数据预处理

由于本研究获得的原始高光谱数据的波段数较多, 为提高计算效率和反演精度, 且有利于与其他研究成果相比较, 数据处理过程中仅保留 400~900nm 波段范围内的原始数据, 并将其光谱分辨率重采样为 1nm, 以降低信息冗余, 重采样后的数据将作为本次研究的数据。光谱分辨率重采样采用分段三次 Hermite 插值多项式(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial, PCHIP)法, 该方法可保持原始数据的形状和相应的单调性(Iqbal et al, 2013), 符合本研究后续数据分析需要。

2.3 相关分析与模型评价

2.3.1 水质指标与光谱反射率相关系数的计算

各水质指标浓度值与水体不同波段高光谱反射率的相关性分析有助于识别对水质指标变化敏感的特征波段, 从而进一步筛选可用于水质反演的最优特征波段及其组合。本研究中各水质指标浓度值与

谱测定结果, 利用所测数据代入公式(1), 即可计算测点的光谱反射率 R (无量纲)。

$$R = \frac{L_u - \rho L_s}{E_d} \quad (1)$$

式中: ρ 为天空光在水体表面的菲涅尔反射率, 通常取经验值 0.028(Mobley, 1999)。

监测点的水样采集与光谱测量同步进行, 水样分析项目为 COD_{Cr}、TP。水样取河流表层 0~20cm 处的混合样, 按照相应的国家技术规范要求保存并送至实验室进行分析。实验室分析过程采用平行样、标准样品、加标回收等质量控制方法, 以确保分析的准确度和精密度。全部样品测得的水质指标特征描述见表 1。

水体高光谱原始反射率相关系数的计算方法为:

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)(W_i - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{ij} - \bar{R}_j)^2 (W_i - \bar{W})^2}} \quad (2)$$

式中: r_j 为各水质指标与 j 波段光谱反射率的相关系数; R_{ij} 为第 i 个样品在 j 波段的光谱反射率; n 为水体样品个数; \bar{R}_j 为 n 个样品在 j 波段的光谱反射率的算术平均值; W_i 为第 i 个水体样品的水质指标浓度自然对数值, 用以消除不同指标之间数值的量级差异; \bar{W} 为 n 个样品的水质指标浓度自然对数值的算术平均值。

2.3.2 反演模型的建立与评价

以相关分析所确定的特征波段反射率及其组合作为自变量, 以水质指标实测浓度值作为因变量, 建立相关水质反演模型。本研究从 151 个光谱及水质样品中随机选择 130 个样本作为建模数据集, 并计算回归模型的决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE(Root Mean Squared Error), 以评价拟合精度并确定最优模型。在确定最优模型后, 利用未参与建模的 21 个样本作为验证数据集, 进行估算结果与实测值的对比分析, 以绝对误差 AE(Absolute Error)和平均相对误差 MRE(Mean Relative Error)评价模型的泛化能力。 R^2 、RMSE、AE 和 MRE 的计算公式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (W_i' - \bar{W})^2}{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - W_i')^2}{n}} \quad (4)$$

$$AE = |W_i - W_i'| \quad (5)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n |W_i - W_i'|}{n\bar{W}} \times 100\% \quad (6)$$

以上各式中, W_i 为建模集(验证集)第 i 个样本的 COD_{Cr} (或 TP)浓度实测值; W_i' 为建模集(验证集)第 i 个样本的 COD_{Cr} (或 TP)浓度估算值; \bar{W} 为建模集 COD_{Cr} (或 TP)浓度实测值的平均值; n 为建模集(验证集)样本数。

3 结果与讨论

3.1 河流水体高光谱反射率特征

本研究中的实测城市河流水体在 400~900nm 波段范围内各波段的光谱反射率均值及第 10、第 90 百分位数如图 3 所示。所测河流水体高光谱总体特征表现为: 400~500nm 范围内的水体光谱反射率总体较低; 随后水体光谱反射率随波长增加而上升, 并呈现“三峰二谷”的光谱形态特征, 即在 585nm、710nm、810nm 附近有明显的反射峰, 在 670nm、760nm 附近有明显的反射低谷。根据相关研究, 地表水在 585nm、710nm 附近的反射峰主要由后向散射和在该波段处较弱的吸收共同作用所致; 810nm 附近的反射峰则是由于该处水分子吸收系数较小, 水体悬浮颗粒物散射程度加强而进一步提高了水体的反射能力(陈雯扬 等, 2010); 670nm、760nm 附近的反射低谷分别由藻类和水分子吸收所致(陈楚群 等, 2001; 刘志国 等, 2007; 杨锦坤 等, 2007)。上述分析表明各河流水体光谱反射率主要受悬浮颗粒物和叶绿素 a 影响(刘志国 等, 2007)。

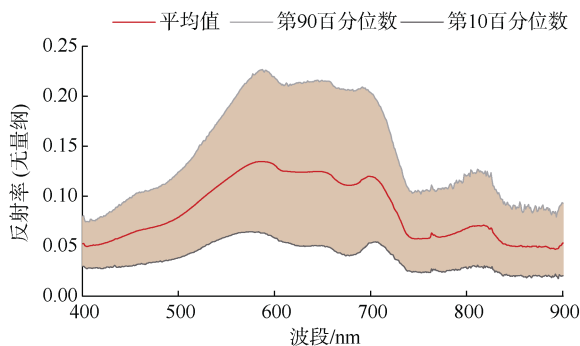


图 3 实测水体高光谱反射率
Fig. 3 Hyperspectral reflectance of sampled water

3.2 水质指标与水体光谱相关性分析

3.2.1 水质指标与高光谱原始反射率的相关性

根据图 4 显示, 各水体样品中 COD_{Cr} 、TP 浓度的自然对数值与水体光谱反射率的相关性特征基本趋于一致, 即在 400~900nm 波段上总体呈负相关, 该负相关性先增大后减少; 在 550~680nm 波段范围内具有较高的相关性, COD_{Cr} 、TP 浓度对数值与光谱反射率相关性最高, 分别可达 -0.55 和 -0.46; 相关程度在 680nm 之后的波段中迅速下降, 在 720nm 以上波长范围内相关系数均不到 -0.15。

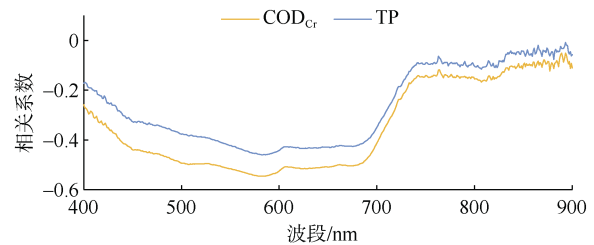


图 4 不同波段光谱反射率与 COD_{Cr} 和 TP 浓度对数值的相关性

Fig. 4 Relationships between the logarithm of COD_{Cr} , TP concentration and hyperspectral reflectance

3.2.2 水质指标与光谱反射率比值的相关性

对任意两个波段的原始光谱反射率数据进行比值计算, 形成新的光谱变量, 并与水质指标进行回归分析, 进而突出光谱的吸收与反射特征, 这一方法已被广泛应用于水质高光谱反演经验模型的构建中(Song et al, 2012)。本研究将每个样本光谱数据中 501 个波段的反射率进行两两比值计算, 形成 151 个 501×501 的比值数据矩阵后, 再按照公式(2)分别计算矩阵中对应光谱反射率比值与 COD_{Cr} 和 TP 浓度对数值的相关系数, 以识别出与水质指标相关性最密切的波段组合, 相关性矩阵计算结果见图 5。

COD_{Cr} 、TP 浓度对数值与反射率比值的相关系数最高分别为 0.795 和 0.731, 对应的波段组合分别为 R_{675}/R_{794} 、 R_{690}/R_{815} 。结合图 3 的光谱形态分析, 该最优波段组合基本上与光谱反射率曲线吸收峰和近红外反射峰分别对应。这表明与直接利用单波段原始数据相比, 反射率比值处理更加强了光谱的差异特征, 有助于进一步筛选与 COD_{Cr} 、TP 浓度值相关性高的波段组合。

根据图 5 所示, 与 COD_{Cr} 、TP 浓度对数值相关性较高的主要是红波段与近红外反射率间的比值, 如 R_{675}/R_{794} 、 R_{690}/R_{815} , 其波长与叶绿素的特征吸收、泥沙的反射峰位置一致, 说明非光学活性参数

COD_{Cr}、TP 与光学敏感性参数中的叶绿素及悬浮物有一定的相关性: 由叶绿素表征的浮游植物本身就

是 COD_{Cr} 的重要来源, TP 则可能主要以悬浮颗粒形式出现, 且浮游植物本身也对悬浮物浓度有贡献。

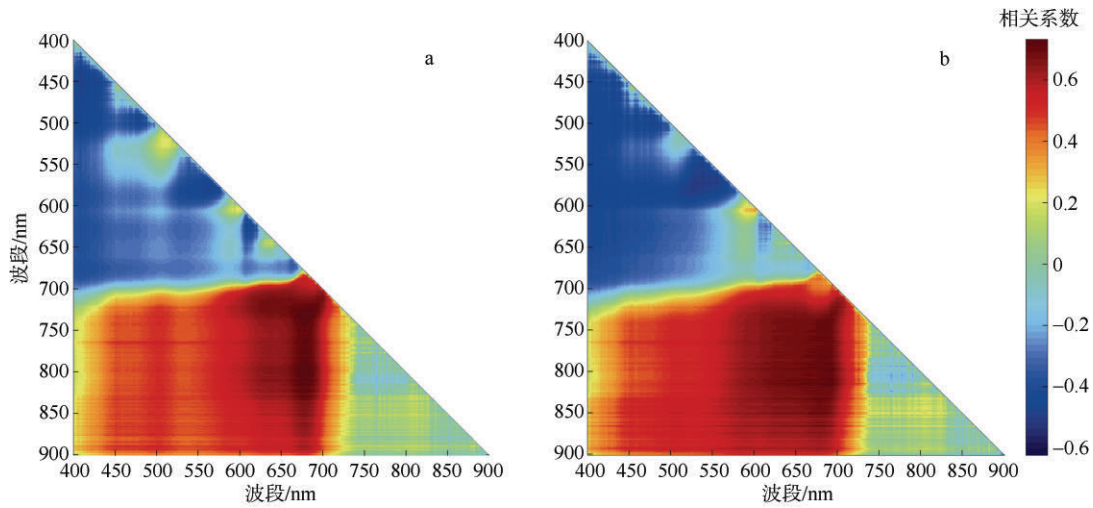


图 5 COD_{Cr}(a)和 TP(b)浓度对数值与光谱反射率比值的相关性矩阵

Fig. 5 Correlation matrix of relationships between the logarithm of COD_{Cr} (a) and TP (b) concentrations and spectral reflection ratio indexes

3.3 基于反射率比值的水质反演模型

3.3.1 模型的建立

基于上述反射率比值的筛选结果, 选择 R_{675}/R_{794} 和 R_{690}/R_{815} 作为 COD_{Cr}、TP 反演模型的自变量, 分别采用线性、指数、幂函数三种拟合方式

建立回归模型。建立的水质指标光谱反演回归模型及结果评价见表 2、图 6。各拟合方程参数均通过 $P < 0.05$ 的显著性检验。其中, COD_{Cr}、TP 最优拟合模型为幂函数模型, 模型决定系数 R^2 分别达到 0.661 和 0.569; 总体上 COD_{Cr} 拟合效果略优于 TP。

表 2 COD_{Cr} 和 TP 浓度反演模型拟合结果比较

Tab. 2 Fitting results of COD_{Cr} and TP concentration retrieval models

水质指标	波段组合	拟合方式	回归模型方程	R^2	RMSE
COD _{Cr}	R_{675}/R_{794}	线性拟合	$y = -10.4x + 33.85$	0.332	8.641
		指数拟合	$y = 104.6e^{-1.239x}$	0.563	6.991
		幂函数拟合	$y = 23.59x^{-1.135}$	0.661	6.159
TP	R_{690}/R_{815}	线性拟合	$y = -0.143x + 0.4331$	0.301	0.109
		指数拟合	$y = 1.353e^{-1.227x}$	0.467	0.096
		幂函数拟合	$y = 0.3629x^{-1.596}$	0.569	0.086

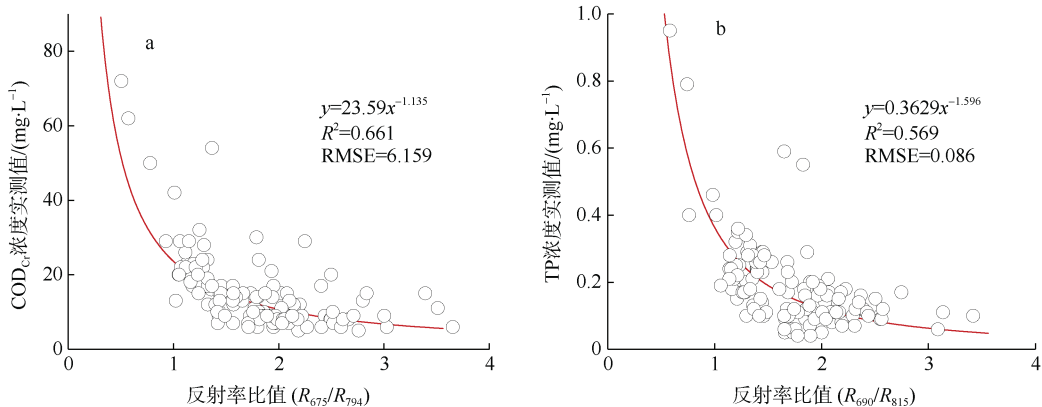


图 6 COD_{Cr}(a)、TP(b)浓度最优反演模型拟合结果

Fig. 6 Fitting results of the best COD_{Cr} (a) and TP (b) concentration retrieval models

3.3.2 模型的精度验证及评价

基于上述 COD_{Cr}、TP 浓度高光谱反演最优拟合模型, 利用验证数据集进行模型估算结果与实测值的对比分析。结果(表 3、图 7)显示, COD_{Cr}、TP 浓度反演模型的估算精度良好, 两者的 MRE 分别为 27.2%和 32.1%, 表明采用最优反射率比值作为自变量构建的幂函数模型具有良好的适用性, 可较好地反演水体中的 COD_{Cr}、

TP 浓度值。

表 3 COD_{Cr} 和 TP 浓度估算结果评价

Tab. 3 Evaluation of estimation results for COD_{Cr} and TP concentrations

水质指标	绝对误差最大值 /(mg·L ⁻¹)	绝对误差最小值 /(mg·L ⁻¹)	平均相对误差 /%
COD _{Cr}	8.607	0.435	27.2
TP	0.121	0.002	32.1

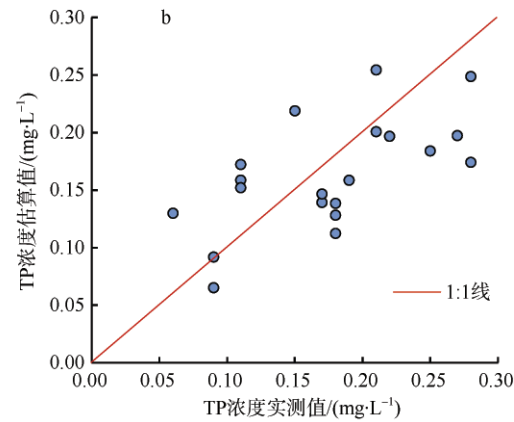
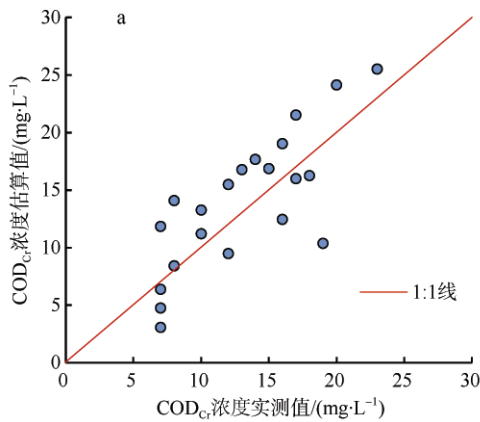


图 7 COD_{Cr}(a)、TP(b)浓度实测值与模型估算值比较

Fig. 7 Comparison of measured and estimated values of COD_{Cr} (a) and TP (b) concentrations

4 结论

本文通过对广东省中山市 151 个河网水体监测点的高光谱监测和水质分析, 获得了水体的高光谱反射率特征, 并构建了 COD_{Cr} 和 TP 浓度反演模型, 得到以下结论:

1) 各河流水体光谱反射率主要受悬浮颗粒物和叶绿素 a 影响。在 500~680nm 波段范围内, COD_{Cr} 和 TP 浓度对数值与单波段光谱反射率存在较强的

负相关关系。与单波段相比, 特定波段的反射率比值与 COD_{Cr}、TP 浓度值的相关性较高, 与 COD_{Cr} 和 TP 浓度值相关性最大的波段组合分别为 R₆₇₅/R₇₉₄、R₆₉₀/R₈₁₅。

2) 基于上述反射率波段比值组合建立的 COD_{Cr} 和 TP 浓度幂函数反演模型的决定系数 R² 分别为 0.661 和 0.569, 估算平均相对误差分别为 27.2%和 32.1%, 表明高光谱技术在珠江口河网水体 COD_{Cr}、TP 浓度的水质反演中具有一定的应用潜景。

参考文献 References

陈楚群, 施平, 毛庆文, 2001. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. 热带海洋学报, 20(2): 66-70. CHEN CHUQUN, SHI PING, MAO QINGWEN, 2001. Satellite remotely-sensed analysis of distribution characters of chlorophyll concentration in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 20(2): 66-70 (in Chinese with English abstract).
 陈雯扬, 许惠平, 2010. 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, (2): 31-35. CHEN WENYANG, XU HUIPING, 2010. Estimation on suspended sedimentation concentration of East Sea based on hyperspectral data[J]. Port & Waterway Engineering, (2): 31-35 (in Chinese with English abstract).
 林剑远, 张长兴, 2019. 航空高光谱遥感反演城市河网水质参数[J]. 遥感信息, 34(2): 23-29. LIN JIANYUAN, ZHANG

CHANGXING, 2019. Inversion of water quality parameters of urban river network using airborne hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing Information, 34(2): 23-29 (in Chinese with English abstract).
 刘志国, 周云轩, 沈芳, 2007. 河口水体泥沙浓度的水面光谱统计模式分析[J]. 水利学报, 38(7): 799-805. LIU ZHIGUO, ZHOU YUNXUAN, SHEN FANG, 2007. Statistic analysis of suspended sediment concentration in offshore waters based on field measurement of reflectance hyper-spectral[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 38(7): 799-805 (in Chinese with English abstract).
 彭建, 徐飞雄, 邓凯, 等, 2018. 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, 38(5): 1499-1507. PENG JIAN, XU FEIXIONG, DENG KAI, et al, 2018. Spectral differences of water quality at different index

- concentrations: in Langya Mountain scenic area[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 38(5): 1499–1507 (in Chinese with English abstract).
- 王桂芬, 曹文熙, 杨跃忠, 等, 2010. 珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式[J]. 热带海洋学报, 29(2): 52–58. WANG GUIFEN, CAO WENXI, YANG YUEZHONG, et al, 2010. Variations of absorption coefficient of seawater in the Pearl River Estuary and a hyperspectral retrieval model for an algal bloom[J]. Journal of Tropical Oceanography, 29(2): 52–58 (in Chinese with English abstract).
- 王晓, 逢勇, 沈春其, 等, 2017. 太湖流域跨界水环境动态监测点位优化布局[J]. 水资源保护, 33(5): 130–137. WANG XIAO, PANG YONG, SHEN CHUNQI, et al, 2017. Layout optimization of water environmental monitoring site of trans-boundary of Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 33(5): 130–137 (in Chinese with English abstract).
- 邢前国, 2007. 珠江口水质高光谱反演[D]. 广州: 中国科学院研究生院(南海海洋研究所). XING QIANGUO, 2007. Retrieval of water quality in the pearl river estuary using hyperspectral technique[D]. Guangzhou: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (South China Sea Institute of Oceanography) (in Chinese with English abstract).
- 杨锦坤, 陈楚群, 唐世林, 等, 2007. 珠江口水体叶绿素荧光特性研究[J]. 热带海洋学报, 26(4): 15–20. YANG JINKUN, CHEN CHUQUN, TANG SHILIN, et al, 2007. Research on chlorophyll fluorescence properties of water in Zhujiang River estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 26(4): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- 张海威, 张飞, 李哲, 等, 2017. 艾比湖流域地表水水体悬浮物、总氮与总磷光谱诊断及空间分布特征[J]. 生态环境学报, 26(6): 1042–1050. ZHANG HAIWEI, ZHANG FEI, LI ZHE, et al, 2017. Spectral diagnosis and spatial distribution of SS, TN and TP in surface water in Ebinur Lake watershed[J]. Ecology and Environment Sciences, 26(6): 1042–1050 (in Chinese with English abstract).
- 张雪, 赖积保, 李家国, 等, 2019. 基于高分一号影像的深圳市黑臭水体遥感识别[J]. 科学技术与工程, 19(4): 268–274. ZHANG XUE, LAI JIBAO, LI JIAGUO, et al, 2019. Remote sensing recognition of black-odor waterbodies in Shenzhen City based on GF-1 satellite[J]. Science Technology and Engineering, 19(4): 268–274 (in Chinese with English abstract).
- FICHOT C G, DOWNING B D, BERGAMASCHI B A, et al, 2016. High-resolution remote sensing of water quality in the San Francisco Bay-Delta Estuary[J]. Environmental Science & Technology, 50(2): 573–583.
- IQBAL Z, SYED K S, ISHAQ M, 2013. Optimal fin shape in finned double pipe with fully developed laminar flow[J]. Applied Thermal Engineering, 51(1–2): 1202–1223.
- MOBLEY C D, 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements[J]. Applied Optics, 38(36): 7442–7455.
- SONG KAISHAN, LI LIN, LI SHUAI, et al, 2012. Hyperspectral remote sensing of total phosphorus (TP) in three central Indiana water supply reservoirs[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 223(4): 1481–1502.
- SUDDUTH K A, JANG G S, LERCH R N, et al, 2015. Long-term agroecosystem research in the central Mississippi river basin: hyperspectral remote sensing of reservoir water quality[J]. Journal of Environmental Quality, 44(1): 71–83.
- WANG XIAOYAN, YANG WU, 2019. Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: a systematic review[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 5(1): 47–56.
- WANG YUNPENG, XIA HAO, FU JIAMO, et al, 2004. Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT/TM data[J]. Science of the Total Environment, 328(1–3): 195–206.