

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.019

基于无人机多光谱成像的镇江市古运河水质反演

王超¹, 管向伟², 解清杰¹, 董进波³, 赵文青¹, 林华星¹,
殷伟庆⁴

(1. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 中国昆仑工程有限公司,
北京 100037; 3. 江苏满江春城市规划设计研究有限责任公司, 江苏 镇江 212008;
4. 江苏省镇江环境监测中心, 江苏 镇江 212004)

摘要: 针对内陆城市微小河道水质难以快速化、全面化监测等问题,以镇江市古运河为研究对象,基于无人机(UAV)多光谱遥感技术,采用UAV搭载多光谱成像仪获取多光谱影像并对水质参数进行同步采集,分析典型城市水体的光谱特征,研究光谱参数与水质参数的相关性,确定特征光谱参数,并建立适用于镇江市古运河水质参数的反演模型。从模型拟合度和误差精度的角度进行分析,基于总氮(TN)、总磷(TP)实测值与模型预测值的对比,进行反演模型的比选;结合最佳反演模型与多光谱影像,绘制镇江市古运河水质参数的空间分布图,实现水质参数浓度的可视化,整体评价水质的污染级别并完成河道污染的源头追溯,同时为水质异常的快速诊断提供理论支撑。

关键词: 河道污染; 水质参数; 反演模型; 无人机(UAV); 多光谱成像; 镇江市古运河

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2026)01-0117-08

Water Quality Inversion of Zhenjiang Ancient Canal Based on UAV Multispectral Imaging

WANG Chao¹, GUAN Xiangwei², XIE Qingjie¹, DONG Jinbo³, ZHAO Wenqing¹,
LIN Huaxing¹, YIN Weiqing⁴

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013,
China; 2. China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Beijing 100037, China;
3. Jiangsu Manjiangchun Urban Planning and Design Co. Ltd., Zhenjiang 212008, China;
4. Zhenjiang Environmental Monitoring Center of Jiangsu, Zhenjiang 212004, China)

Abstract: To address challenges such as the difficulty in rapid and comprehensive monitoring of water quality in small urban inland rivers, this study took Zhenjiang Ancient Canal as the research object. Based on the multispectral remote sensing technology of unmanned aerial vehicle (UAV), a multispectral imager mounted on the UAV was employed to acquire multispectral images while simultaneously collecting water quality parameters. The spectral characteristics of typical urban water bodies were analyzed, and the correlation between spectral parameters and water quality parameters was investigated to identify characteristic spectral parameters. An inversion model suitable for water quality parameters of

基金项目: 镇江市科技计划(社会发展)项目(SH2021012)

通信作者: 解清杰 E-mail: xieqingjie73@163.com; 董进波 E-mail: zjsy0511@qq.com

Zhenjiang Ancient Canal was subsequently established. The model was evaluated in terms of fitting performance and error accuracy. By comparing the measured values of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) with model-predicted values, the optimal inversion model was selected. Integrating the best inversion model with multispectral images, spatial distribution maps of water quality parameters in Zhenjiang Ancient Canal were generated, achieving visualization of water quality concentration. This enabled a holistic assessment of pollution levels and tracing of pollution sources in the river channel, while also providing theoretical support for rapid diagnosis of water quality anomalies.

Keywords: river pollution; water quality parameter; inversion model; unmanned aerial vehicle (UAV); multispectral imaging; Zhenjiang Ancient Canal

水是我们赖以生存的重要自然资源之一。近年来,随着城市化进程不断加快,生活污水、工业废水的排放导致内陆城市水环境受到严重污染,污水治理迫在眉睫。掌握水环境的水质状况是首要前提,因此,高效、准确、实时的水质监测已成为水环境治理中尤为重要的环节。传统的水质监测技术需要花费大量的人力物力,而且仅能获得局部采样点的数据,无法实现对河湖水质全方位、大范围、长时间序列的监测^[1]。

遥感技术因其范围大、分辨率高、时效性强等特点,为河道水质监测提供了一种新的技术手段,根据承载平台的不同,可分为卫星遥感、航空遥感和无人机遥感。基于卫星遥感技术的水质监测主要应用于海洋与大型湖泊河流^[2-4],例如,张鹏等^[2]利用ZY1-02卫星遥感影像并结合实测水面反射光谱反演出南四湖的叶绿素a浓度,验证反演模型的精度为72%,并建立研究区域的叶绿素a浓度分布图;肖臣稷等^[3]采用高分五号卫星遥感数据与实测长江河口的叶绿素a浓度,构建叶绿素a浓度反演模型,平均相对误差为14.33%。林剑远等^[5]利用航空高光谱数据,通过半经验方法构建嘉兴市河网水系的总磷(TP)、总氮(TN)与化学需氧量(COD)的浓度反演模型。以上研究证明了遥感技术应用于水质监测的可行性。虽然卫星遥感与航空遥感技术已经成熟,且取得了良好的效果,但其受远距离遥感图像分辨率的限制,所获取的影像数据易被大气云层影响,影像的可用程度较低,同时影像获取周期较长,在实际操作中很难实现星地试验的同步进行,故无法应用于内陆城市小微流域河道的水质监测^[6-7]。近些年来,以无人机作为搭载平台的遥感手段迅速发展,弥补了卫星遥感和航空遥感在水质监

测方面的不足^[8-11],但目前这方面的报道较少,还需进行更为深入的研究。

笔者以镇江市古运河为研究对象,利用无人机(UAV)作为搭载平台,通过多光谱成像仪获取该区域的光谱反射率,根据相关性分析,挑选特征光谱参数,构建TP、TN的浓度反演模型,对其浓度分布进行研究,并对古运河的水质异常进行快速分析,旨在实现对城市微小河湖水质的大范围监测与异常诊断。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

近年来,江苏省镇江市深入开展黑臭水体、劣V类水体整治工作,水环境治理取得了阶段性成效,但仍有部分水体水质不稳定。其中,镇江市古运河由于周边环境复杂,河道两侧存在雨污排口,污染较为严重,长期处于劣V类水体状态。作为镇江市重要的河道之一,镇江市古运河在防洪排涝方面起到至关重要的作用,由镇江西北侧的京口闸蜿蜒贯穿整个主城区,直至东南侧的丹徒闸,全长16.92 km^[12]。此次选取古运河的虎踞桥至塔山桥河段作为研究对象。

1.2 研究方法

本研究的技术路线见图1。前期在现场沿河段均匀布设采样点位并采集水样,送至实验室进行水质分析。同步利用无人机搭载的多光谱成像仪获取河道的多光谱影像,经辐射校正等预处理后得到真实地物的反射率数据。再将各采样点位的光谱数据与测得的水质参数浓度进行Pearson相关性分析,筛选出相关性符合统计要求的光谱参数。随后分别构建线性、多项式以及指数函数进行拟合,择优确定最佳函数形式作为该水质参数的浓度反演

模型,并利用该模型绘制水质参数浓度分布图。

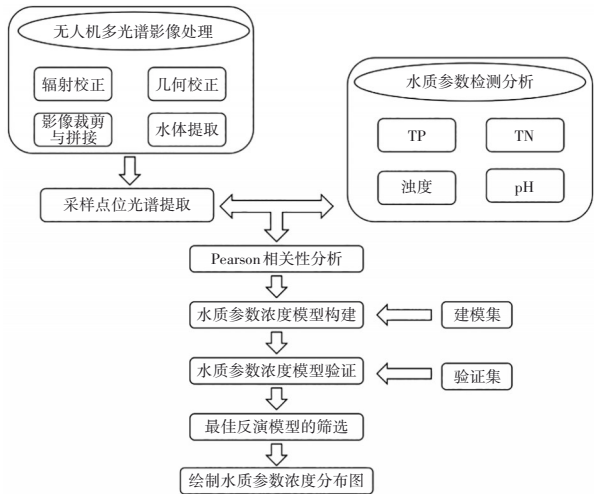


图1 技术路线

Fig.1 Technical roadmap

2 数据获取与处理

2.1 水样采集与分析

于2022年9月22日采用有机玻璃水样采集器与无人船在实验区域进行水样采集,为便于采样,岸边点位采用人工采集,对人工无法到达的位置则使用无人船辅助采样。共布设25个采样点,通过采样器采集水面以下0.5 m处水样,每个点位采集两份500 mL水样,一用一备,在现场使用TN100便携式浊度仪测定浊度。水样采集后立即送至实验室进行分析:TP采用钼锑抗分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,共获取25组有效数据。采样点位水质参数的统计结果见表1。其中,温度、TN、TP和浊度的变异系数分别为0.013、0.212、0.140和0.059。

表1 河道水质参数统计结果

Tab.1 Statistical results of water quality parameters of river channel

项目	温度/°C	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	浊度/NTU
最大值	26.40	1.115	0.042	29.40
最小值	24.80	0.450	0.025	22.80
平均值	25.13	0.747	0.030	25.04
标准差	0.334	0.158	0.004	1.488

Thomas 水体富营养化程度划分标准如表2所示。可知,该河段富营养程度为中~富营养型。这与河段周边环境有关:北侧为城市居民区与学校,且在采样期间发现河道两侧的雨污排口持续排水,说明存在偷排现象。该结论可为后期河道水质参

数浓度分布提供理论依据。

表2 Thomas 水体富营养化程度划分

Tab.2 Thomas water eutrophication degree division

mg/L

富营养化程度	TP	无机氮
极贫	<0.005	<0.20
贫~中	[0.005,0.010)	[0.20,0.40)
中	[0.010,0.030)	[0.40,0.65)
中~富	[0.030,0.100]	[0.65,1.50]
富	>0.100	>1.50

2.2 多光谱遥感影像的获取与预处理

采用大疆精灵4无人机多光谱成像仪获取遥感影像,该设备包括1个用于可见光成像的彩色传感器和5个用于多光谱成像的单色传感器,各传感器有效像素均为208万,具有体积小、质量轻、便于携带等特点。表3为多光谱成像仪各波段的相关信息。可知,其波段范围涵盖了该研究重点讨论的水质参数反演所需的关键光谱信息。

表3 多光谱成像仪相关参数

Tab.3 Relevant parameters of multispectral image

波段	中心波长及范围/nm
Band 1 蓝波段(B)	450±16
Band 2 绿波段(G)	560±16
Band 3 红波段(R)	650±16
Band 4 红边波段(RE)	730±16
Band 5 近红外波段(NIR)	840±26

该研究在采集水样的同时获取多光谱影像,影像采集时间控制在10:00—15:00。由于遥感传感器在获取影像过程中会受到地物背景信息及大气条件的干扰,通常需对原始影像进行预处理。预处理流程主要包括大气校正、辐射校正、几何校正、影像拼接与裁剪等步骤。

大气校正的目的是消除大气和光照因素对地物反射率的干扰。此实验中无人机飞行高度较低,为150 m,受大气气溶胶等因素的影响可以忽略,与卫星遥感影像相比,辐射均匀性较好,因此影像未进行大气校正。由于从多光谱传感器获得的是像元的辐射亮度值,需通过辐射校正将灰度值转换为真实地物的反射率。该步骤采用反射率分别为0和100%的黑、白两色帆布作为定标板,通过提取影像中定标板的灰度值,并基于线性变换将其转换为真实地物的反射率。此外,利用地面测量获取的标志

性地物与道路交叉口的经纬度坐标对影像进行几何校正。最后,将校正后的多光谱影像导入大疆智图软件进行拼接,得到研究区域完整的多光谱遥感影像。

经预处理的遥感影像中,其周围的陆地环境会影响后续水质参数的精确反演。为有效消除陆地干扰,需从影像中提取水体掩膜。采用归一化差异水体指数(NDWI)算法提取研究区域内的水体^[13],水体提取效果如图2所示。



图2 水体提取效果示意

Fig.2 Schematics of water extraction effect

根据采样过程中记录的采样点经纬度坐标,将其导入ArcMap软件,提取各采样点对应的多光谱反射率数据。采样点位的遥感反射率曲线见图3。

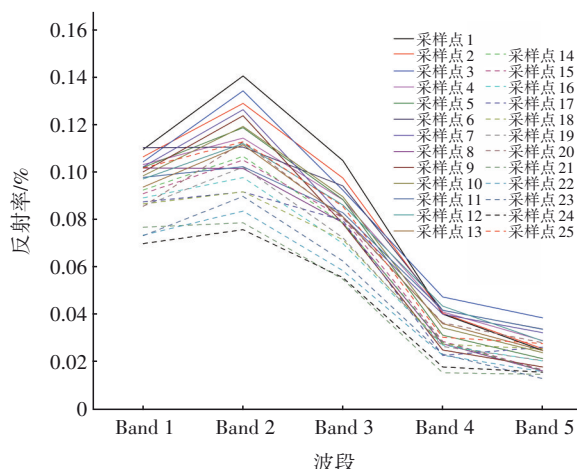


图3 采样点位遥感反射率曲线

Fig.3 Remote sensing reflectance curves of different sampling sites

由图3可知,25个采样点位的反射率曲线形态基本一致。曲线在Band 2波段(560 nm)处出现反射峰,这主要由于叶绿素与胡萝卜素的弱吸收以及水中悬浮物的散射作用。反射率沿长波方向呈递减趋势,这是由于水体对近红外的强吸收作用,因此在Band 5波段(840 nm)处反射率趋于0^[14-15]。各采样点因水质参数浓度存在差异,其反射率曲线在各波段的数值也相应发生变化。

3 Pearson相关性分析

3.1 光谱参数的构建

由于多光谱影像仅包含蓝、绿、红、红边及近红外5个波段,为降低背景信息干扰、提高光谱信息利用效率^[16],可以组合不同波段构建新的光谱参数。参考前人研究中用于水质参数反演的波段组合方法^[17-18],以 R_i 表示在第 i 个波段上的反射率,构建的光谱参数及其计算方法见表4。

表4 光谱参数及其计算方法

Tab.4 Spectral parameters and calculation methods

光谱参数	计算方法	光谱参数	计算方法	光谱参数	计算方法
R_1	实测 R_1	Y_9	R_1/R_3	Y_{17}	$R_2 + R_3$
R_2	实测 R_2	Y_{10}	R_1/R_4	Y_{18}	$R_2 + R_4$
R_3	实测 R_3	Y_{11}	R_2/R_4	Y_{19}	$R_2 + R_5$
R_4	实测 R_4	Y_{12}	R_3/R_4	Y_{20}	$R_3 + R_4$
R_5	实测 R_5	Y_{13}	$R_1 + R_2$	Y_{21}	$R_3 + R_5$
Y_6	$(R_1 - R_3)/(R_1 + R_3)$	Y_{14}	$R_1 + R_3$	Y_{22}	$R_4 + R_5$
Y_7	$(R_1 - R_4)/(R_1 + R_4)$	Y_{15}	$R_1 + R_4$	Y_{23}	$(R_2 + R_3)R_5$
Y_8	$(R_2 - R_4)/(R_2 + R_4)$	Y_{16}	$R_1 + R_5$	Y_{24}	$R_2 + R_3 + R_5$

3.2 相关性分析

采用SPSS软件中的相关分析模块,将所构建的光谱参数与实测TP、TN进行Pearson相关性分析,以评估两者间的相关程度。Pearson相关系数通过两个变量间的协方差除以各自标准差的乘积得出,用于衡量变量间的线性相关程度^[19],计算方法如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: r_{xy} 为水质参数浓度值与光谱组合参数之间的相关系数,取值范围为 $[-1, 1]$,若 $-1 \leq r_{xy} \leq 0$,表示两个变量呈负线性相关,若 $0 < r_{xy} \leq 1$,则表示呈正线性相关, r_{xy} 的绝对值越大表明相关性越强; n 为样本总数; x_i 与 y_i 分别为第 i 个样本的水质参数浓度值与光谱参数值; $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别表示的均值。

将构建的24组光谱参数与地面实测的25组TP、TN、浊度数据通过SPSS软件进行相关性分析。 p 表示在假设“变量间无相关性”成立的情况下,观测到相关性结果的概率,以 $p < 0.05$ 作为相关性显著的判断标准。光谱参数与水质参数之间的相关系数见表5。

表5 光谱参数与水质参数的相关系数
Tab.5 Correlation coefficients between spectral parameters and water quality parameters

光谱参数	TN		TP		浊度	
	r_{xy}	p	r_{xy}	p	r_{xy}	p
R_1	0.563**	0.003	-0.632**	0.001	0.329	0.109
R_2	0.608**	0.001	-0.606**	0.001	0.077	0.715
R_3	0.570**	0.003	-0.727**	0	0.249	0.230
R_4	0.713**	0	-0.646**	0	0.151	0.472
R_5	0.648**	0	-0.561**	0.003	0.171	0.413
Y_6	-0.349	0.087	0.637**	0.001	-0.002	0.994
Y_7	-0.683**	0	0.642**	0.001	-0.046	0.828
Y_8	-0.604**	0.001	0.593**	0.002	-0.152	0.468
Y_9	-0.358	0.078	0.653**	0.004	-0.004	0.985
Y_{10}	-0.660**	0	0.728**	0	-0.014	0.947
Y_{11}	-0.614**	0.001	0.699**	0	-0.111	0.598
Y_{12}	-0.672**	0	0.648**	0	-0.013	0.952
Y_{13}	0.612**	0.001	-0.640**	0.001	0.187	0.371
Y_{14}	0.579**	0.002	-0.696**	0	0.293	0.155
Y_{15}	0.661**	0	-0.670**	0	0.263	0.204
Y_{16}	0.635**	0	-0.646**	0	0.288	0.162
Y_{17}	0.611**	0.001	-0.680**	0	0.156	0.456
Y_{18}	0.690**	0	-0.663**	0	0.110	0.600
Y_{19}	0.678**	0	-0.649**	0	0.114	0.587
Y_{20}	0.663**	0	-0.729**	0	0.219	0.293
Y_{21}	0.637**	0.001	-0.712**	0	0.236	0.256
Y_{22}	0.709**	0	-0.631**	0.001	0.165	0.430
Y_{23}	0.720**	0	-0.588**	0.002	0.142	0.498
Y_{24}	0.651**	0	-0.692**	0	0.168	0.423

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著。

针对TP,24个光谱参数均满足相关性要求;对于TN,符合要求的光谱参数相较于TP略少,包括

$R_1 \sim R_5$ 、 Y_7 、 Y_8 、 $Y_{10} \sim Y_{24}$;浊度的相关性整体较差。将相关系数由大到小排序,选择相关系数较大的若干光谱参数用于建模。TN反演模型选用 Y_{23} 、 R_4 、 Y_{22} 、 Y_{18} ;TP反演模型选用 Y_{20} 、 Y_{10} 、 R_3 、 Y_{21} ;由于浊度相关性分析的显著性较差,理论上其反演效果难以达到预期。

4 反演模型的构建与验证

4.1 模型的构建

将25组数据进行分组,其中70%用于构建反演模型,其余30%用于模型的精度验证。以最优光谱参数为自变量,相应的水质参数为因变量,通过SPSS软件分别建立线性函数模型(U_{TN} 、 U_{TP})、指数函数模型(E_{TN} 、 E_{TP})以及多项式函数模型(PL_{TN} 、 PL_{TP}),进一步反映光谱参数与水质参数之间的关系。各函数模型的表达式如下:

① 线性函数模型

$$y = a_0x + b_0 \tag{2}$$

式中: y 为因变量,表示水质参数的浓度; a_0 为线性函数模型的斜率; x 为自变量,表示光谱参数的计算值; b_0 为线性函数模型的截距。

② 指数函数模型

$$y = a^x (a > 0 \text{ 且 } a \neq 1) \tag{3}$$

式中: a 为常数。

③ 多项式函数模型

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_ix^i + b \tag{4}$$

式中: $a_1, a_2, \cdots, a_i$ 为回归系数; b 为常数项。

输入前期处理得到的建模集数据,分别生成4种反演模型。各水质参数的反演模型见表6,其中, R^2 为决定系数, RMSE为均方根差。

表6 水质参数反演模型

Tab.6 Water quality parameter inversion models

水质参数	光谱参数	反演模型:表达式	R^2	RMSE
TN	Y_{23}	$U_{TN}: y = 0.104 + 3.081 \times Y_{23}$	0.416	0.138
		$E_{TN}: y = -0.0687 + 99.036^{Y_{23}}$	0.465	0.187
		$PL_{TN}: y = 0.6832 - 78.6831 \times Y_{23} + 21587.8844 \times Y_{23}^2$	0.647	0.111
		$PL_{TN}: y = 0.8099 - 236.28 \times Y_{23} + 70821.0906 \times Y_{23}^2 - 4379126.8115 \times Y_{23}^3$	0.660	0.113
	R_4	$U_{TN}: y = 0.410 + 12.509 \times R_4$	0.488	0.129
		$E_{TN}: y = -0.8004 + 17.866^{R_4}$	0.498	0.181
		$PL_{TN}: y = 0.5532 - 1.2674 \times R_4 + 280.2141 \times R_4^2$	0.501	0.132
		$PL_{TN}: y = 0.23 + 52.3037 \times R_4 - 2327.8533 \times R_4^2 + 38128.9728 \times R_4^3$	0.515	0.135
	Y_{22}	$U_{TN}: y = 0.405 + 7.447 \times Y_{22}$	0.481	0.130
		$E_{TN}: y = -0.7912 + 10.423^{Y_{22}}$	0.471	0.186
		$PL_{TN}: y = 0.8111 - 15.0112 \times Y_{22} + 266.115 \times Y_{22}^2$	0.584	0.120
		$PL_{TN}: y = 0.0335 + 55.1045 \times Y_{22} - 1609.87015 \times Y_{22}^2 + 15297.3209 \times Y_{22}^3$	0.636	0.117

续表6(Continued)

水质参数	光谱参数	反演模型:表达式	R^2	RMSE
TP	Y_{18}	$U_{TN}: y = 0.137 + 4.447 \times Y_{18}$	0.458	0.133
		$E_{TN}: y = -1.1867 + 6.3287 Y_{18}$	0.464	0.187
		$PL_{TN}: y = 0.7037 - 4.7443 \times Y_{18} + 35.6979 \times Y_{18}^2$	0.481	0.134
		$PL_{TN}: y = 4.3896 - 94.4726 \times Y_{18} + 738.2793 \times Y_{18}^2 - 1779.9606 \times Y_{18}^3$	0.523	0.133
	Y_{20}	$U_{TP}: y = 0.044 - 0.139 \times Y_{20}$	0.502	0.003
		$E_{TP}: y = -3.0619 - 4.3675 Y_{20}$	0.495	0.104
		$PL_{TP}: y = 0.0665 - 0.6093 \times Y_{20} + 2.3748 \times Y_{20}^2$	0.592	0.003
		$PL_{TP}: y = 0.1206 - 2.38942 \times Y_{20} + 20.984 \times Y_{20}^2$	0.617	0.003
	Y_{10}	$U_{TP}: y = 0.021 + 0.002 \times Y_{10}$	0.603	0.003
		$E_{TP}: y = -3.7836 + 0.06521 Y_{10}$	0.552	0.098
		$PL_{TP}: y = 0.0275 - 0.00064 \times Y_{10} + 0.000263 \times Y_{10}^2$	0.645	0.003
		$PL_{TP}: y = 0.0502 - 0.0155 \times Y_{10} + 0.00323 \times Y_{10}^2 - 0.00018 \times Y_{10}^3$	0.671	0.003
	R_3	$U_{TP}: y = 0.047 + 0.218 \times R_3$	0.475	0.003
		$E_{TP}: y = -2.9795 - 6.8771 R_3$	0.471	0.106
		$PL_{TP}: y = 0.0727 - 0.9189 \times R_3 + 4.6257 \times R_3^2$	0.547	0.003
		$PL_{TP}: y = 0.1726 - 5.0464 \times R_3 + 59.4768 \times R_3^2 - 235.6852 \times R_3^3$	0.574	0.003
	Y_{21}	$U_{TP}: y = 0.045 + 0.152 \times Y_{21}$	0.462	0.003
		$E_{TP}: y = -3.0556 - 4.7847 Y_{21}$	0.457	0.108
		$PL_{TP}: y = 0.0703 - 0.7408 \times Y_{21} + 3.2164 \times Y_{21}^2$	0.563	0.003
		$PL_{TP}: y = 0.058 - 0.3144 \times Y_{21} - 1.50253 \times Y_{21}^2 + 16.8118 \times Y_{21}^3$	0.563	0.003

由表6可知,基于相关性最高的前4个光谱参数构建的各水质参数反演模型,其 R^2 均在0.55左右。对于TN,4种反演模型中多项式模型的 R^2 普遍高于其他类型,其中以光谱参数 Y_{23} 为自变量构建的多项式模型最优, $R^2=0.660$;其余光谱参数对应的4种模型 R^2 变化幅度相对稳定。对于TP,多项式模型的 R^2 同样普遍高于其他类型,其中以 Y_{10} 为自变量构建的多项式模型最优, $R^2=0.671$;其余光谱参数所建模型的 R^2 变化也较为平稳。反演模型拟合见图4。可直观看出,TN与TP的实测值均较为均匀地分布在三次多项式拟合曲线两侧,因此,选择三次多项式模型作为TN与TP的最佳反演模型。

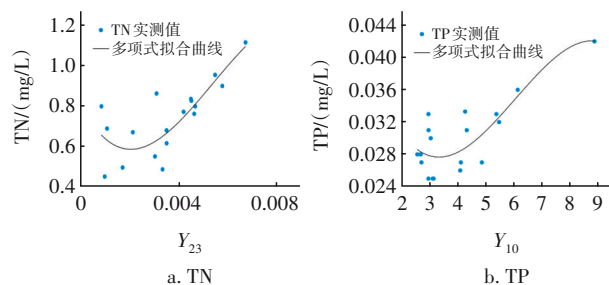


图4 水质参数反演模型拟合

Fig.4 Fitting of water quality parameter inversion models

4.2 模型的验证

采用剩余的30%数据集对各水质参数反演模

型进行精度验证,将验证集中水质参数的实测值与模型反演得到的预测值进行拟合,具体见图5。可知,TN、TP的验证 R^2 分别为0.886和0.869,说明两种反演模型的精度较高。同时,拟合曲线贴近1:1标准趋势线,实测值与预测值的比值点均匀分布在两侧,表明反演模型的预测水平较为稳定,与实测值一致性较高。

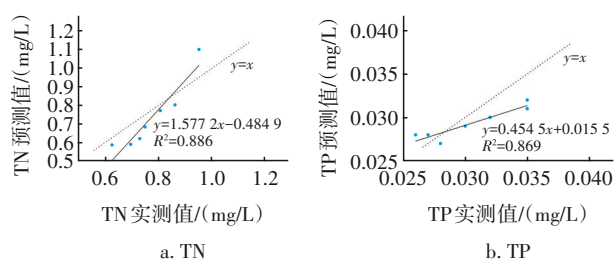


图5 水质参数实测值与预测值拟合

Fig.5 Fitting of water quality parameter measured values and predicted values

经水质参数反演模型评价可知,TN、TP的建模 R^2 与验证 R^2 均处于较高水平,且相对分析误差(RPD)分别为3.46与3.67,说明这两种水质参数反演模型具有较高的预测精度和稳定性。为验证模型的适用性,将此反演模型应用于该河段其他时期获取的光谱影像,并将相应采样点的实测值与预测值进行对比。可知,TN与TP的实测值与模型预测

值十分接近,表明此模型针对该河段不同时期的水质参数浓度预测可行性良好。

5 水质参数浓度分布图绘制

基于多光谱影像,采用最佳反演模型对图像的像元进行估算评价,将模型导入ENVI软件,利用Band Math波段运算模块将图像每个像元的光谱反射率转换为相应水质参数浓度值。再通过灰度分割,依据浓度浮动范围设定分割区间,最终绘制镇江市古运河TN、TP浓度空间分布图,具体见图6。可知,TN呈绿色的区域较多,而TP呈红色的区域较多,表明虎踞桥至梦溪路河段TN、TP整体浓度偏高,这主要与该河段北侧为城市居民区有关,采样期间可见明显的雨污排口持续排水。梦溪路至塔山桥河段水体TN、TP浓度整体亦较高,这与河道上方为学校区域、周边零星分布居住区的情况相符。河道下游TN、TP浓度明显较低,实地调查表明,该段为植被覆盖区,未进行大规模人为开发,且河道两侧无雨污排口。

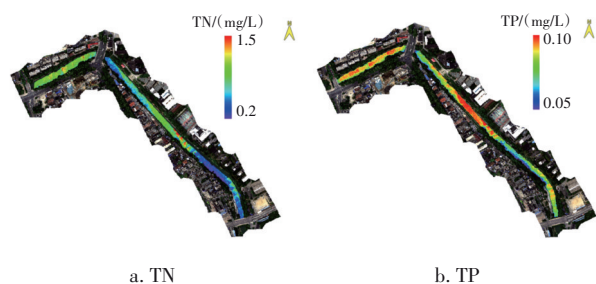


图6 水质参数浓度空间分布

Fig.6 Spatial distributions of water quality parameter concentrations

6 结论

该研究借助无人机多光谱技术,明确了水质参数反演的敏感光谱组合,构建了相应的浓度反演模型。尽管受天气、温度等方面限制,模型在长时间序列上的普适性仍需进一步验证,但现有研究已取得较好成效。该方法能够有效监测水质异常变化,可为镇江市古运河水质的异常快速诊断提供方向,并为后续水质监测与水环境保护管理提供可靠的理论依据和技术支持。

参考文献:

[1] SAGAN V, PETERSON K T, MAIMAITIJANG M, et al. Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices,

bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 205: 103187.

[2] 张鹏,郭正鑫,刘振军. 高光谱卫星影像水质遥感反演[J]. 测绘通报,2022(S2): 206-211.

ZHANG P, GUO Z X, LIU Z J. Remote sensing inversion of water quality in inland waters based on hyperspectral satellite images [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(S2): 206-211(in Chinese).

[3] 肖臣稷,王卿,王敏,等. 基于高分五号卫星遥感数据的长江河口叶绿素a浓度反演[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(4):92-99.

XIAO C J, WANG Q, WANG M, et al. Inversion of chlorophyll-a concentration in the Yangtze River estuary based on remote sensing data from GF-5 satellite [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2022, 48(4):92-99(in Chinese).

[4] 冯天时,庞治国,江威. 基于珠海一号高光谱卫星的巢湖叶绿素a浓度反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(8): 2642-2648.

FENG T S, PANG Z G, JIANG W. Remote sensing retrieval of chlorophyll-a concentration in Lake Chaohu based on Zhuhai-1 hyperspectral satellite [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42 (8) : 2642-2648(in Chinese).

[5] 林剑远,张长兴. 航空高光谱遥感反演城市河网水质参数[J]. 遥感信息, 2019, 34(2): 23-29.

LIN J Y, ZHANG C X. Inversion of water quality parameters of urban river network using airborne hyperspectral remote sensing [J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(2): 23-29(in Chinese).

[6] 李鑫,孙伟,李林. 基于小型无人机可见光遥感的蓝藻识别研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40 (4): 153-156,159.

LI X, SUN W, LI L. Study on the recognition of *Spirulina* based on visible light remote sensing of the small UAV [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(4): 153-156,159(in Chinese).

[7] 肖潇,徐坚,赵登忠,等. 基于国产卫星多光谱影像的河流水体浊度遥感联合反演研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 128-136.

XIAO X, XU J, ZHAO D Z, et al. Combined remote sensing retrieval of river turbidity based on Chinese satellite data [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(6): 128-136(in Chinese).

[8] 黄宇,陈兴海,刘业林,等. 基于无人机高光谱成像

- 技术的河湖水质参数反演[J]. 人民长江, 2020, 51(3): 205-212.
- HUANG Y, CHEN X H, LIU Y L, et al. Inversion of river and lake water quality parameters by UAV hyperspectral imaging technology [J]. Yangtze River, 2020, 51(3): 205-212(in Chinese).
- [9] 刘彦君, 夏凯, 冯海林, 等. 基于无人机多光谱影像的小微水域水质要素反演[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1241-1249.
- LIU Y J, XIA K, FENG H L, et al. Inversion of water quality elements in small and micro-size water region using multispectral image by UAV [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4): 1241-1249(in Chinese).
- [10] 李澜. 基于无人机高光谱遥感的城市中小河流水质等级判别研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
- LI L. Research on Discrimination Method of Urban River Water Quality Level Based on UAV Hyperspectral Remote Sensing [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences), 2021 (in Chinese).
- [11] 庞吉玉, 张安兵, 王贺封, 等. 基于无人机多光谱影像和XGBoost模型的城市河流水质参数反演[J]. 中国农村水利水电, 2023(3): 111-119.
- PANG J Y, ZHANG A B, WANG H F, et al. Inversion of urban river water quality parameters based on UAV multispectral imagery and XGBoost model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3): 111-119 (in Chinese).
- [12] 孙峰, 刘朗, 肖甜甜. 镇江市古运河“一河一策”行动计划编制研究[J]. 水资源开发与管理, 2019(8): 71-74.
- SUN F, LIU L, XIAO T T. Study on the plan of action of “one policy to one river” for Zhenjiang Ancient Canal [J]. Water Resources Development and Management, 2019(8): 71-74(in Chinese).
- [13] 王仁军, 刘宝康, 杜玉娥, 等. 基于GF-6的可可西里典型湖泊水体面积提取方法研究[J]. 测绘通报, 2022, 542(5): 32-37.
- WANG R J, LIU B K, DU Y E, et al. Extraction method and accuracy evaluation of typical water body in Hoh Xil region based on GF-6 WFV data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, 542(5): 32-37 (in Chinese).
- [14] 邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 分离悬浮质影响的光学波段(400-900 nm)水吸收系数测量[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 174-191.
- DENG R R, HE Y Q, QIN Y, et al. Pure water absorption coefficient measurement after eliminating the impact of suspended substance in spectrum from 400 nm to 900 nm [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(1): 174-191(in Chinese).
- [15] 赵琳. 基于多光谱遥感技术的白洋淀水质演变监测方法研究[J]. 现代信息科技, 2023, 7(3): 106-109.
- ZHAO L. Study on monitoring method for water quality evolution in Baiyang Lake based on multispectral remote sensing technology [J]. Modern Information Technology, 2023, 7(3): 106-109(in Chinese).
- [16] 胡义强, 杨骥, 荆文龙, 等. 茅尾海入海河口池塘养殖污染状况遥感调查[J]. 测绘通报, 2022(7): 12-17, 53.
- HU Y Q, YANG J, JING W L, et al. Remote sensing investigation on water pollution of pond aquaculture in estuary of Maowei Sea [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(7): 12-17, 53(in Chinese).
- [17] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698-700.
- [18] SERAFIN J, GRISETTI G. NICP: Dense normal based point cloud registration [C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg: IEEE, 2015.
- [19] 何波, 潘力. 融合内容和改进协同过滤的个性化推荐算法[J]. 控制工程, 2018, 25(8): 1553-1558.
- HE B, PAN L. Personalized recommendation algorithm based on content fusion and improved collaborative filtering [J]. Control Engineering of China, 2018, 25(8): 1553-1558(in Chinese).

作者简介:王超(1997—),男,江苏扬州人,硕士,助理工程师,主要从事水环境遥感监测、企业碳管理与技术咨询等工作。

E-mail:1017674146@qq.com

收稿日期:2024-03-23

修回日期:2024-05-08

(编辑:沈靖怡)