

# 基于 Landsat-8 卫星遥感 反演内陆河湖水质参数

钱 进<sup>1</sup>, 李 澜<sup>2</sup>, 姚 敏<sup>1</sup>, 巩彩兰<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**以太湖为研究区,使用 Landsat-8 卫星 OLI 数据和无人机高光谱数据,对研究区 COD<sub>Mn</sub>、DO、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N 等 5 项水质参数进行遥感定量反演研究,通过各水质参数与遥感数据波段组合分析,构建高拟合度的水质参数反演模型,为内陆水体水质参数遥感定量反演提供理论基础。

**关键词:**遥感反演; OLI; 特征波段; 统计分析; 内陆水质

中图分类号:X832

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)

## Study on inversion model of water quality parameters of inland rivers and lakes based on Landsat-8 Satellite Remote Sensing

QIAN Jin<sup>1</sup>, LI Lan<sup>2</sup>, YAO Min<sup>1</sup>, GONG Cailan<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Taking Taihu Lake as the study area, using Landsat-8 OLI data and UAV hyperspectral data, the remote sensing quantitative inversion studies were conducted for five water quality parameters in the study area, including permanganate, dissolved oxygen, total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen. By analyzing the combination of each water quality parameter and remote sensing data band, a high fitting water quality parameter inversion model was constructed. It provides theoretical basis for remote sensing quantitative inversion of water quality parameters of inland water bodies.

**Key words:** remote sensing inversion; OLI; characteristic bands; statistical analysis; inland water quality

### 1 概 述

遥感技术是通过卫星探测从地球表面获取电磁辐射来计算表观参数,具有空间覆盖面广、实时连续、效率高等优势。采用遥感方法监测水体,为

内陆水体水质监测提供了新的途径<sup>[1]</sup>,水质遥感反演研究也广泛开展。杨荣等<sup>[2]</sup>使用 HJ-1A 卫星 CCD1 数据,以滇池为研究区,对悬浮物、叶绿素 a 的遥感定量反演进行了研究;洗翠玲等<sup>[3]</sup>以温瑞塘河为研究对象,利用高分辨率遥感数据和实测水质数

收稿日期:2022-09-22

作者简介:钱进(1974—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利信息化工作。E-mail:14508989@qq.com

据建立了TN和TP 2个水质参数的遥感反演模型。

除了自然形成的河流和湖泊之外,人工水体在城市地表水中占很大比例,纵横交错,形成河网。内陆水体如城市河网因水体更为细小、流动性强、易受城市复杂地物的影响,对遥感数据的空间分辨率和光谱分辨率要求更高,并且卫星观测数据易受到重复周期、天气、分辨率等影响,难以快速准确获得水质参数<sup>[4]</sup>。无人机遥感具有机动灵活、操作简便、分辨率高、时效性高的技术特点,结合遥感技术可弥补卫星遥感水体监测的不足。杨振等<sup>[5]</sup>结合无人机高光谱遥感数据和实测采样点数据建立水体悬浮物质量浓度和浊度的空间分布图,实现了水质参数可视化。

本文以太湖主体湖区为研究区,并选取8条内陆水体进行水质监测研究,8条内陆水体分别是官渎港、洪巷港、望虞河、棉堤桥、连湖港、沙塘河桥、东茭嘴、雅浦河。本研究利用 Landsat-8 卫星<sup>[6]</sup>OLI数据和无人机高光谱数据与地面实测水质参数数据进行统计分析,通过建立水质参数反演算法,对研究区内水质参数的定量反演进行研究,通过分析各水质参数与遥感数据波段组合,选取出高拟合度的水质参数反演模型。

## 2 数据处理

### 2.1 采样点数据

首先基于“水面之上法”,研究使用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec4 地物光谱仪测量 350~900 nm(间隔 1 nm)范围的遥感反射率(Rrs, Remote sensing of reflectance),并按照 GB/T 36540—2018 水体可见光—短波红外光谱反射率测量的标准测量。再根据卫星过境时间或无人机飞行时间同步实地采取水样数据,代入实验室进行分析获得各水质参数的质量浓度。

实测水质数据来自太湖主体湖区分布均匀的 32 个常规采样点。本研究利用 2019 年 1 月至 2021 年 2 月间各采样点的历史水质数据,采集的水质数据包括温度、COD<sub>Mn</sub>、DO、TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、透明度、Chl-a、悬浮物浓度等参数。本研究主要讨论 COD<sub>Mn</sub>、DO、TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 这 5 个水质参数的反演规律。

### 2.2 遥感数据

本研究使用的遥感数据源为 Landsat-8 卫星 OLI 传感器。表 1 为 Landsat-8 卫星的技术参数表。选用 2020 年 5 月 3 日的一景 OLI 影像,作为反演模

型的应用。该图像拍摄时间在本研究选用的历史实测数据监测时间之内,且晴朗少云(云覆盖度 1.25%),影像质量较好,适合提取光谱信息并进行水质反演。

表 1 Landsat-8 技术参数

传感器	波段数	Landsat-8	
		波段范围/ $\mu\text{m}$	信噪比/dB
OLI	1	0.433~0.453	130
	2	0.450~0.515	130
	3	0.525~0.600	100
	4	0.630~0.680	90
	5	0.845~0.885	90
	6	1.560~1.660	100
	7	2.100~2.300	100
	8	0.500~0.680	80
	9	1.360~1.390	50
TIRS	10	10.600~11.190	0.4K
	11	11.500~12.510	0.4K

遥感图像预处理能够保证探测器的输出可以反映被测量目标的真实变化,校正探测器性能的自然衰变对测量结果的影响,并能消除几何畸变、大气消光等现象,从而获取感兴趣的目标区域图像。因此,首先应对遥感图像进行预处理。本研究主要进行的预处理包括辐射定标、大气校正、图像去噪和水体提取。通过预处理,获得可进行波段间运算的太湖主体湖区影像数据。

### 2.3 无人机高光谱数据

与卫星遥感影像相比,搭载在无人机上的高光谱传感器获取的影像在处理过程上较为简便,可省去复杂繁琐的大气校正过程,只需采用与多光谱传感器配套的软件将获取的影像导出,进行几何校正和辐亮度与反射率的校正后即可得到光谱反射率数据。本研究使用的无人机高光谱成像系统及性能参数见表 2 所示。

## 3 模型构建

以研究区采样点实测水质数据与对应采样点的遥感传感器和无人机等效光谱反射率数据建立了多元回归模型,根据各个模型计算各采样点的水质参数值,并以相关系数  $R^2$  来评估模型精度。

表2 无人机成像系统成像参数性能

光谱仪参数				探测器参数				工作参数			
F数	色散宽度/ mm	起始波长/ nm	截止波长/ nm	阵列 长度/ pixel	阵列 宽度/ pixel	像素 大小/ μm	量化 位数	视场	瞬时视场/ mrad	空间 分辨率/ cm@100 m	幅宽/ m@100 m
3	3	400	1 000	1 936.0	1 464.0	4.5	16.0	57.17	0.56	5.63	108.90

3.1 反射率确定

3.1.1 遥感数据反射率转换

获取采样点水体实测光谱反射率后,根据 OLI 的光谱响应函数,首先将实测水体反射率数据转换为遥感传感器的等效反射率,计算方法如公式(1)所示:

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_F(\lambda)r(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_F(\lambda)d\lambda}$$
 (1)

式中:λ为波长;S<sub>F</sub>(λ)为 OLI 的光谱响应函数;r(λ)为实测水体反射率;R为计算后的等效反射率。

3.1.2 无人机反射率

实验飞行前铺设不同反射率的靶标,再采用经验线性校正法进行反射率计算。反射率=增益×DN 值+偏置(图 1)。

3.2 水质参数分布与相关性分析

在计算水体等效反射率后,对实测水质进行处

理和分析,得到各水质参数分布情况见表 3。

3.3 特征波段选择与建模

COD<sub>Mn</sub>:根据经验分析,COD<sub>Mn</sub>与绿光和近红外的归一化系数具有较好的线性关系。其特征波段与 COD<sub>Mn</sub>的关系如图 2(a)所示。

DO:根据经验分析,DO 的平方根与(红-近红)/(绿-近红)存在一定的线性关系。其特征波段与 DO 的关系如图 2(b)所示。

TN:根据经验分析,TN 与红绿光比值具有线性关系。其特征波段与 TN 的关系如图 2(c)所示。

TP:根据经验分析,TP 与(红-蓝)/(绿-近红)的线性关系较强。其特征波段与 TP 的关系如图 2(d)所示。

NH<sub>3</sub>-N:根据实测数据分析 NH<sub>3</sub>-N 与 TN 相关性强,因此可以用 TN 的特征波段作为 NH<sub>3</sub>-N 的特征波段。其特征波段与 NH<sub>3</sub>-N 的关系如图 2(e)所示。

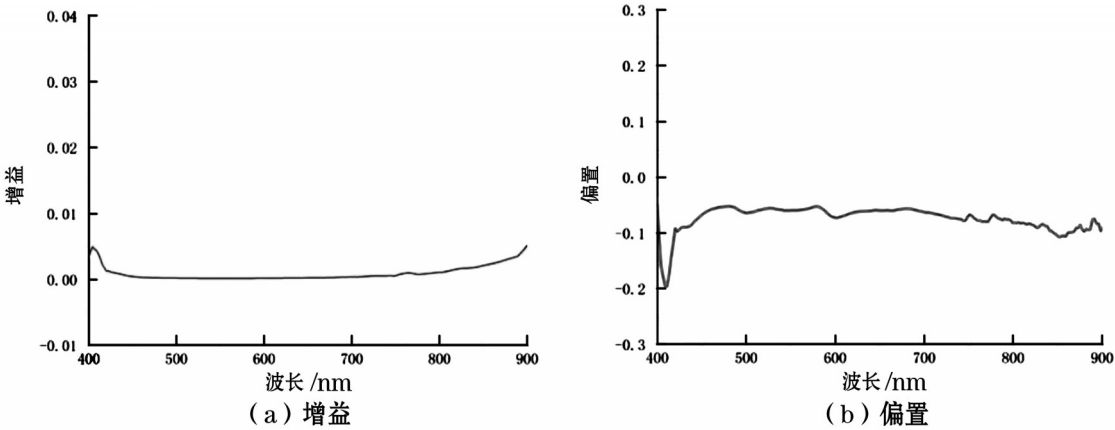


图1 计算得到的增益和偏置

表3 水质参数分布情况

单位:mg/L

类别	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$
最小值	2.17	2.10	0.76	0.015	0.050
最大值	11.50	14.60	9.10	0.664	4.940
均值	4.69	8.77	2.05	0.112	0.654
标准差	1.75	2.76	1.05	0.104	0.074
中位数	4.29	8.77	1.81	0.074	0.325

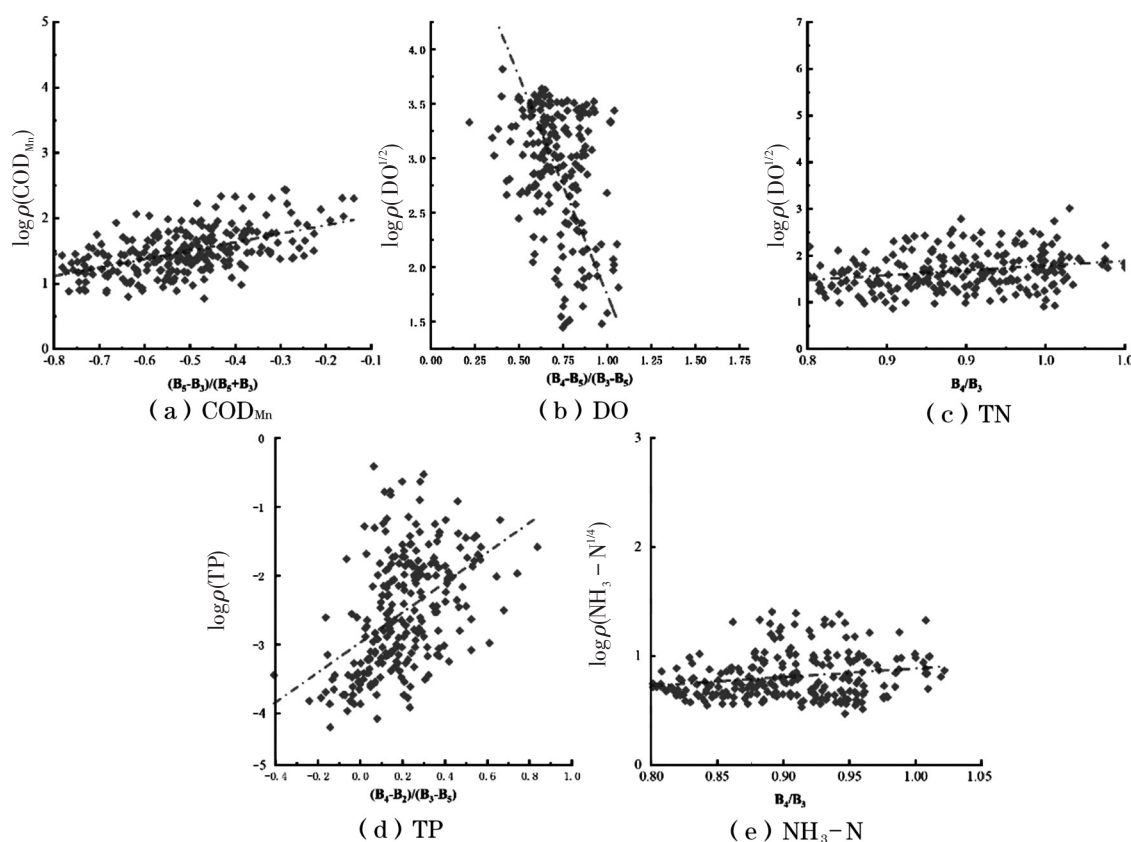


图2 特征波段组合与水质参数的线性关系

最终得到的各水质参数的反演模型和拟合优度  $R^2$  见公式(2)~(6)。

$$\log \rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 1.296 \times \frac{B_5 - B_3}{B_3 + B_5} - 1.156, R^2 = 0.445 \quad (2)$$

$$\sqrt{\rho(\text{DO})} = -1.218 \times \frac{B_4 - B_5}{B_3 - B_5} + 3.795, R^2 = 0.397 \quad (3)$$

$$\sqrt{\rho(\text{TN})} = 2.06 \times \frac{B_4}{B_3} - 0.165, R^2 = 0.557 \quad (4)$$

$$\log \rho(\text{TP}) = 2.518 \times \frac{B_4 - B_2}{B_3 - B_5} - 2.986, R^2 = 0.462 \quad (5)$$

$$\sqrt[4]{\rho(\text{NH}_3 - \text{N})} = 0.8 \times \frac{B_4}{B_3} - 0.087, R^2 = 0.346 \quad (6)$$

## 4 结果应用

### 4.1 卫星影像水质参数反演结果及精度评定

利用2020年5月3日的Landsat-8卫星OLI数据,应用本研究构建的相应模型,以水质标准类别为划分依据,得到太湖主体湖区  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DO、TN、TP和  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度的空间分布图,如图3所示。

可以看出,太湖湖区大部分  $\text{COD}_{\text{Mn}} \leq 4 \text{ mg/L}$ ,符合 I、II 类水的标准,湖西部区域的高锰酸盐指数较高、部分区域有 V 类水的标准;从 DO 质量浓度来

看,湖区大部分区域的 DO 质量浓度值均  $\geq 6 \text{ mg/L}$ ,属于 I、II 类水,西部湖区存在部分水体满足 III、IV 类水的标准;就 TN 质量浓度而言,水体可见清晰的类别差异,除西部部分区域,其余大部的 TN 质量浓度已达 V 类水质标准、少部区域劣 V 类;由 TP 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的空间分布图可见,这2种水质质量浓度很低,太湖湖区绝大部分达到 I、II 类水质的标准。

对于反演模型的精度评定,主要用了均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、平均相对误差百分比(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE), RMSE 是 MSE 的算数平方根,表示反演值与实测值的偏差程度。MAE 是绝对误差的平均值,能更好地表现反演值与实测值误差的实际情况。这些指标已经被证实能够较为完整地评估水体水质遥感的算法性能。

$$\text{RMSE}(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (8)$$



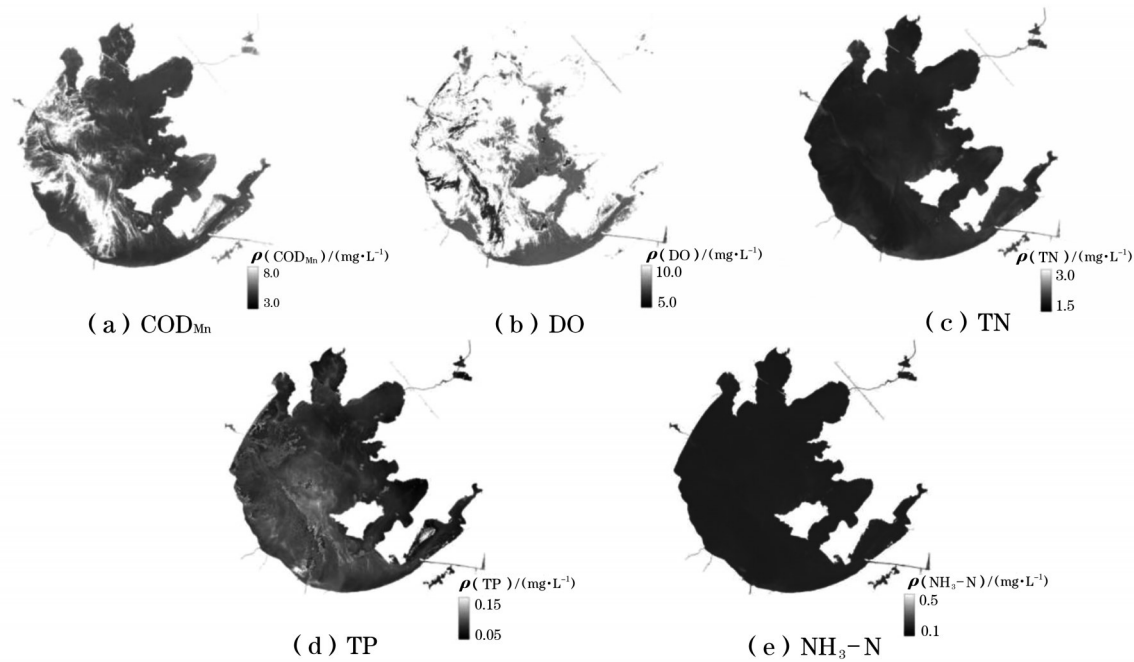


图3 5种水质参数的空间分布

$$MAE = 10^y MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \log_{10} \hat{y}_i - \log_{10} y_i \right| \quad (9)$$

式中： $N$ 为样本数； $\hat{y}_i$ 为反演值； $y_i$ 是实测值。MAE在计算时进行log10变换是为了更好地评估非高斯分布的数据集。MAPE计算的是绝对值,但可以转换为百分比。

选择时间为2020年11月9日的影像与地面采样的数据对反演结果进行验证,将各水质参数测量真值与模型反演值对照,32个点的平均误差如表4所示。从表4可以看出,DO和TP的反演误差较小,

模型反演精度较高。TN的反演误差较大,在该时刻的反演精度较差。分析误差较大的原因在于选取的验证数据量较少,在本研究中只使用了2020年11月9日的实测水质参数真值与遥感影像模型反演值,不能完全说明模型的精确性。另外,误差来源也有实测数据与真实参数值的误差,遥感影像预处理带来的误差以及本研究构建的模型本身误差。

4.2 无人机影像水质参数反演结果及精度评定

应用本研究构建的相应模型,以水质标准类别为划分依据,得到的各个无人机影像成像时刻的水

表4 32个点的平均误差

误差	COD <sub>Mn</sub>	DO	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N
平均绝对误差	0.922	-0.651	0.444	-0.013	-0.011
平均相对误差	0.260	-0.069	0.700	0.077	0.313

表5 无人机影像水质反演结果

地点	COD <sub>Mn</sub>		DO		TN		TP		NH <sub>3</sub> -N	
	真实	反演	真实	反演	真实	反演	真实	反演	真实	反演
官渎港	II	II	I	II	V	V	II	II	II	I
洪巷港	II	I	II	II	劣V	劣V	III	III	II	II
望虞河	II	III	II	II	劣V	劣V	II	II	II	III
棉堤桥	III	III	I	II	V	V	III	III	III	III
连湖港	II	II	II	II	劣V	劣V	劣V	劣V	II	II
沙塘河	II	I	II	II	劣V	劣V	II	II	I	II
东茭嘴	I	II	II	II	劣V	劣V	I	II	II	II
雅浦河	II	II	II	II	劣V	劣V	II	II	II	II

质参数的反演结果如表5所示。

根据反演结果显示,内陆水体的 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 大部分符合Ⅰ、Ⅱ类水的标准,望虞河与棉堤桥的指数较高,满足Ⅲ、Ⅳ类水的标准; $\text{DO}$ 指数较好,只有连湖港部分水体未达到Ⅰ、Ⅱ类水的标准; $\text{TN}$ 指数不理想,内陆水体大部分只达到劣Ⅴ类标准,少部分水体满足Ⅴ类标准; $\text{TP}$ 指数和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指数水平在内陆水体中大体一致,大部分为Ⅰ、Ⅱ类水的标准,少部分达到Ⅲ、Ⅳ类水的标准,只有连湖港 $\text{TP}$ 指数为劣Ⅴ类标准。

选择无人机飞行监测过的一定数量样本,利用

表6 精度评定结果

水质参数	验证点数量	MAPE/%	MAE	RMSE/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	8	12.10	0.340	0.536
$\text{DO}$	8	17.36	0.542	1.094
$\text{NH}_3\text{-N}$	8	38.30	0.136	0.193
$\text{TP}$	8	33.50	0.124	0.070
$\text{TN}$	8	13.60	0.056	0.259

MAPE、MAE、RMSE指标对反演结果进行精度评定,结果如表6所示。

## 5 分 析

本研究利用Landsat 8卫星OLI数据和无人机高光谱数据,以太湖为研究区,采用遥感方法特征波段选择与采样点实测光谱数据相结合的方法,通过统计分析,研究了太湖 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{DO}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等5项水质参数的遥感定量反演规律,分别构建了高拟合度的水质参数反演模型应用于遥感图像中,卫星影像得到的太湖水质质量浓度反演结果和无人机影像所覆盖太湖边缘河流水质反演结果非常

一致,形成了这5项水质参数的空间分布图,对太湖湖区的水质状况进行了评估。综合本文的研究结果,可得到以下结论:太湖主体湖区的 $\text{TP}$ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度值很低, $\text{DO}$ 质量浓度较高,从 $\text{TP}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{DO}$ 指标来看,基本达到Ⅰ、Ⅱ类水的水平。

理论研究和实验验证均证明,无人机遥感技术在水质要素反演中应用是可行的,可以针对一些区域面积较小的水体进行水质参数的反演估测。此外,利用无人机遥感影像结合卫星波段建模算法进行水质参数质量浓度反演,可以得到更加准确的水质参数空间分布情况,对于准确评估水域水质参数的时空变化和进行水域治理等具有重要的应用价值和实际意义。

在构建水质参数模型时,仅通过经验分析方法,缺少更多波段组合的可能性,使模型构建过程存在局限性。因此,在今后的研究中将通过统计分析与神经网络结合的方法,寻找拟合度更高的波段组合,建立更高精度的水质参数反演模型。

### 参考文献:

- [1] 王波,黄津辉,郭宏伟,等.基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J].水资源保护,2022,38(3):117-124.
- [2] 杨荣,杨昆,洪亮,等.基于HJ-1A卫星CCD1数据的滇池水质参数反演模型研究[J].节水灌溉,2015(3):42-45.
- [3] 冼翠玲,张艳军,张明琴,等.基于高分辨率多光谱影像的温瑞塘河水质反演模型研究[J].中国农村水利水电,2017(3):90-95.
- [4] 潘鑫,杨子,杨英宝,等.基于高分六号卫星遥感影像的太湖叶绿素a质量浓度反演[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):50-56.
- [5] 杨振,卢小平,武永斌,等.无人机高光谱遥感的水质参数反演与模型构建[J].测绘科学,2020,45(9):60-64,95.
- [6] 阎孟冬.基于Landsat-8卫星影像数据的清河水库水质反演模型研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.