

河南省典型湖库水体叶绿素 a 浓度的多光谱卫星反演算法构建

张淇越^{1,2}, 邱士可^{2,3}, 杜军^{2,3}, 朱春华¹, 王正^{2,4,5}, 张英卓⁶, 王超²,
杜文成⁷, 邓玉浩^{1,2}

(1.河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001; 2.河南省科学院地理研究所, 郑州 450052; 3.河南省遥感与地理信息系统重点实验室, 郑州 450052; 4.智慧中原地理信息技术河南省协同创新中心, 郑州 450046; 5.时空感知与智能处理自然资源部重点实验室, 郑州 450046; 6.华北水利水电大学管理与经济学院, 郑州 450046; 7.黄河勘测规划设计研究院, 郑州 450003)

摘要:【目的】叶绿素 a 浓度是衡量水体富营养化程度与水质状况的重要参数。由于河南省境内湖库类型多样、水体光学特性差异大, 基于单一水体构建的反演模型在区域推广中存在精度不高、适应性差等问题。为此, 本研究选取河南省境内三大流域中丹江口水库、小浪底水库、陆浑水库和白沙水库四座代表性水库进行研究, 旨在构建一种适应性强、精度高的叶绿素 a 浓度遥感反演模型。【方法】结合 Sentinel-2 MSI 与 Landsat8/9 OLI 卫星数据和 79 个实地采样点的水面光谱和叶绿素 a 浓度数据, 利用光谱一阶微分、归一化和光谱等效来确定敏感波段, 构建单波段、比值和混合波段等多种统计模型。通过精度比较确定最优模型, 并利用 R^2 、平均相对误差和均方根误差进行系统验证。【结果】①基于 Sentinel-2 MSI 卫星的 B4 (红波段) 与 B2 (蓝波段) 的波段比值模型在反演中表现最佳, 其模型 R^2 为 0.7024。平均相对误差和均方根误差分别为 31.74% 和 1.85。②利用该模型在陆浑水库叶绿素 a 浓度的长时序监测与反演中表现优异。【结论】本研究构建的基于 Sentinel-2 MSI 卫星的 B4/B2 波段比值模型能有效反演河南省典型湖库的叶绿素 a 浓度, 具有良好的精度与区域适应性, 解决了单一水体模型推广性不足的问题。

关键词: 叶绿素 a 浓度; 卫星反演; Sentinel-2 MSI; Landsat8/9 OLI; 多光谱

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号:

收稿日期/Received: 2025-11-01

修回日期/Revised: 2026-05-06

基金项目: 河南省科学院 2025 年人才队伍建设项目(20250601017); 河南省科学院创新团队项目(20230107); 省级科技研发计划联合基金(235200810024); 智慧中原地理信息技术河南省协同创新中心和时空感知与智能处理自然资源部重点实验室联合基金资助项目(232110); 河南省科学院创新平台建设专项(231001003)。

第一作者: 张淇越(2002—), 男, 硕士研究生, 从事水环境遥感方面的研究。E-mail: curry19491001@163.com。

通信作者: 王正(1985—), 男, 副研究员, 博士, 从事水环境遥感方面的研究。E-mail: wangzheng@igs-has.cn。

叶绿素 a(Chlorophyll-a,Chl-a)作为表征水体营养状态的核心指标之一,能够反映水体中浮游植物的生物量变化,对于评估水质状况、分析水华爆发风险及水生态系统健康具有重要意义^[1]。传统水质监测依赖于人工采样与实验室分析,虽然精度较高,但其成本高、周期长,难以满足对大范围、多时间尺度的水质动态监测需求^[2]。与传统地面测量方式相比,基于卫星遥感手段获取水体叶绿素 a 浓度具有空间连续观测和长时序动态监测等优点^[3]。基于蓝绿波段比值即可实现全球大洋水体叶绿素 a 的业务化反演^[4]。尤其是 20 世纪 90 年代末以来,随着 SeaWiFS、MODIS、MERIS、VIIRS、OLCI 等一系列具有较高信噪比和灵敏度的水色卫星传感器陆续在轨运行,为叶绿素 a 浓度的遥感监测研究提供了大量数据。但对于近岸和内陆浑浊水体,由于其光学特性复杂且随区域和季节变化大,实现精确的叶绿素 a 浓度反演仍有较大难度^[5]。并且,SeaWiFS、MODIS、MERIS、VIIRS、OLCI 等卫星虽然具有较高的信噪比,但其较低的空间分辨率制约了其在内陆中小水体的应用。

近年来,Landsat-8/9 OLI 与 Sentinel-2 MSI 等中高分辨率卫星的相继发射,显著提升了遥感数据获取的时间、空间及光谱分辨能力,为内陆水环境参数高精度反演提供合适的数据基础^[6]。相较于 Landsat 系列, Sentinel-2 的优势在于其显著提高了时间分辨率^[7],其双星组网实现了约 5 d 的全球重访周期,极大增强了获取连续、无云高质量影像的能力^[8]。这对于捕捉 Chl-a 浓度随季节变化、藻华暴发等短周期动态过程至关重要,有效支撑了更高时间精度的水体生态环境监测需求。

近些年来,基于遥感的 Chl-a 反演算法研究取得了显著进展,主要包括经验模型、半分析模型、机器学习模型等^[9]。其中,经验模型因其原理清晰、计算简便,在实际应用中被广泛采用。尤其是波段比值法因可有效削弱水面反射、背景干扰等非目标因素,在水质反演中具有较强的适应性和稳定性^[10]。然而,水体光学特性的差异性严重制约了单一经验模型的适用范围^[11]。不同区域、不同类型水体往往需分别建立各自的反演模型,缺乏普适性,影响了遥感在区域尺度水环境监测中的推广与应用^[12]。

河南省位于中国中东部黄河中下游地区,地形地貌复杂,水资源分布不均,湖库众多^[13]。既包括地势较高、以地表径流为主要补给水源的山

区水库,也包括地势低洼、受农业灌溉和城镇排水影响显著的平原湖泊。受气候及地理条件差异、水文特征、人类活动强度等因素共同影响,河南省湖库水体中 Chl-a 浓度存在显著空间差异。不同水体的遥感响应特征差异明显,导致基于局部数据建立的反演模型在其他水体中往往精度不佳甚至失效,亟须构建具备良好稳定性和推广性的普适性反演算法,以满足区域尺度水质遥感监测的实际需求。

以丹江口水库、小浪底水库、陆浑水库和白沙水库为研究区域,结合实测水质数据与多源遥感影像,采用波段比值法作为反演算法基础,通过分析遥感波段组合与 Chl-a 浓度的相关性,建立适用于多种水体的普适性经验模型。在模型构建过程中,充分考虑不同水体光学特性的差异,采用交叉验证与分组建模方法提升模型的泛化能力与鲁棒性。此外,本文还对模型在各类型水体中的适用性与精度表现进行了系统评估,以验证其普适性与稳定性。

1 研究区域数据集

1.1 研究区概况

丹江口水库位于长江最长的支流——汉江的中上游,跨河南、湖北两省,是国家重要战略水源地,南水北调中线工程的起点^[14]。水库主要由汉江与丹江汇流形成,水域面积约 1 022 km²,总库容约 290 亿 m³。水质长期保持在 II 类标准,具备典型的大型深水型水库的光学特征。

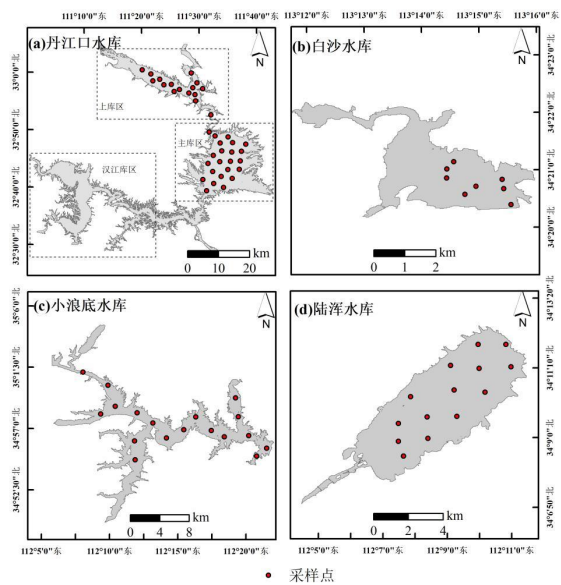


图 1 研究区域

Fig.1 Study Area

白沙水库位于河南省禹州市与登封市的交界处，属淮河流域上游，主要功能包括防洪、灌溉及区域供水^[15]。总库容为 2.78 亿 m³，控制流域面积约 627 km²。由于周边农田广布、村镇密集，水体受人为活动影响明显，水质评价常年为IV类，富营养化问题较为突出，光学特性复杂多变。

小浪底水库位于黄河中游干流之上，地处河南省洛阳市孟津区与济源市之间，是我国重要的水沙调控工程^[16]。其水域面积约 210 km²，控制流域面积广达 69.4 万 km²。受黄河高含沙径流影响，水体悬浮物浓度较高，水质多维持在III类水平，遥感反演时面临较强光谱混杂挑战。

陆浑水库位于河南省洛阳市嵩县境内伊洛河流域伊河中游段，是一座以防洪、灌溉为主的中型水库。其水域面积约 67.4 km²，控制流域面积 3 492 km²，占伊河流域的 57.9%。水库水质整体良好，处于II类标准，但受周边农业种植活动的影响，局部区域存在富营养化风险。

1.2 实测数据

本研究采用 2020—2024 年采集的实测叶绿素 a 浓度数据，共 79 个采样点。采用分光光度法对水样中的叶绿素 a 浓度进行测定，确保数据的准确性与代表性^[17]。所有高光谱数据均与水质采

样在同一时间、同一位点同步采集，使用 ASD 便携式光谱仪，在采样点上方测量水面以上高光谱反射率。测量时，仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 135°，探头与水面法线的夹角为 40°，测量前后均进行标准灰板校正^[18]。利用 ViewSpecPro 软件对光谱数据进行预处理，剔除观测异常、光谱噪声及信号畸变等干扰因素。最终获得水体遥感反射率光谱（如图 2 所示），为叶绿素 a 浓度的遥感反演建模提供可靠的数据支撑。采样具体时间和采样点数量见表 1。

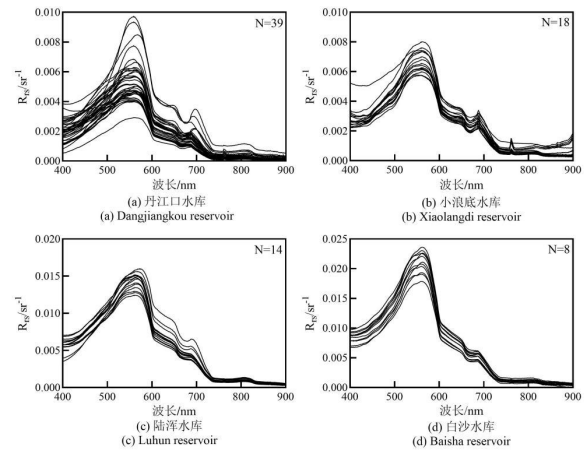


图 2 遥感反射率

Fig.2 Remote sensing reflectance

表 1 水库采样点信息表

Tab.1 Reservoir Sampling Points Information

区域	采集时间 (年.月.日)	采样点数量/个
丹江口水库	2023.10.30—2023.10.31	39
小浪底水库	2020.10.22	18
陆浑水库	2024.10.23	14
白沙水库	2024.4.26	8

1.3 遥感数据

本研究采用了 Landsat8/9 卫星配备的陆地成像仪 (Operational Land Imager, OLI) 以及 Sentinel2 卫星配备的多光谱成像仪 (MultiSpectral Instrument, MSI) 所获取的遥感数据。在数据选择方面，遵循与实地观测数据日期严格同步或时间间隔差不超过 1 d 的准同步这一标准。

针对 2020 年 10 月 22 日小浪底水库和 2024

年 4 月 26 日白沙水库的特定情况，由于 Landsat8/9 OLI 卫星的重访周期较长 (约 16 d)，未能获取到满足要求的影像资料。Kloiber 等在研究中提出在内陆湖库水体叶绿素 a 相对稳定的情况下，可将 Landsat 时间窗口放宽至 7 d^[19]。因此通过查找影像找到了 7 d 内与之对应的天气的影像，分别为 2020 年 10 月 20 日小浪底水库和 2024 年 5 月 1 日白沙水库。两颗卫星的具体参数见表 2。

表 2 Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2MSI 两卫星性能参数

Tab.2 Performance parameters of Landsat-8/9 OLI and Sentinel-2 MSI satellites

Landsat	Sentinel-2
---------	------------

Band	Wavelength/nm	Resolution/m	Band	Wavelength/nm	Resolution/m
Coastal	430-450	30	Coastal	433-453	60
Blue	450-515	30	Blue	458-523	10
Green	525-600	30	Green	543-578	10
Red	630-680	30	Red	650-680	10
—	—	—	Red Edge	698-713	20
—	—	—	Red Edge	733-748	20
—	—	—	Red Edge	773-793	20
NIR	845-885	30	NIR	785-900	10
—	—	—	Narrow NIR	855-875	20
—	—	—	Water vapor	935-955	60
SWIR1	1 560-1 660	30	SWIR-Cirrus	1 360-1 390	60
SWIR2	2 100-2 300	30	SWIR-1	1 565-1 655	20
PAN	503-675	15	SWIR-2	2 100-2 280	20
			—	—	—

2 研究方法

水体叶绿素 a 遥感反演技术流程如图 3 所示。该流程图首先整合实地采集的光谱数据及叶绿素 a 浓度测量值，构建基础数据集。Lansat-8/9 OLI 遥感影像经过辐射定标和 FLAASH 大气校正处理，以获取高质量的地表反射率。Sentinel-2 MSI 在官网获取 L2 级影像。为得到高质量的地表反射率，通过重采样实现不同传感器数据之间的空间一致性。随后，对反射率光谱进行归一化和一阶微分

变换以增强特征表达能力，并计算光谱等效参数，从而获取更具代表性的光谱特征。

研究将总体数据按比例划分为建模集（74%）与验证集（26%）。采用 Pearson 相关性分析筛选出与 Chla 浓度显著相关的波段或波段组合，作为输入特征用于构建反演模型。利用建模集建立叶绿素 a 浓度估算模型，并分别使用建模集与验证集进行模型精度验证，确保其可靠性与泛化能力。最终，利用所构建的模型反演研究区内叶绿素 a 的空间分布，并对反演结果进行系统的精度评价。

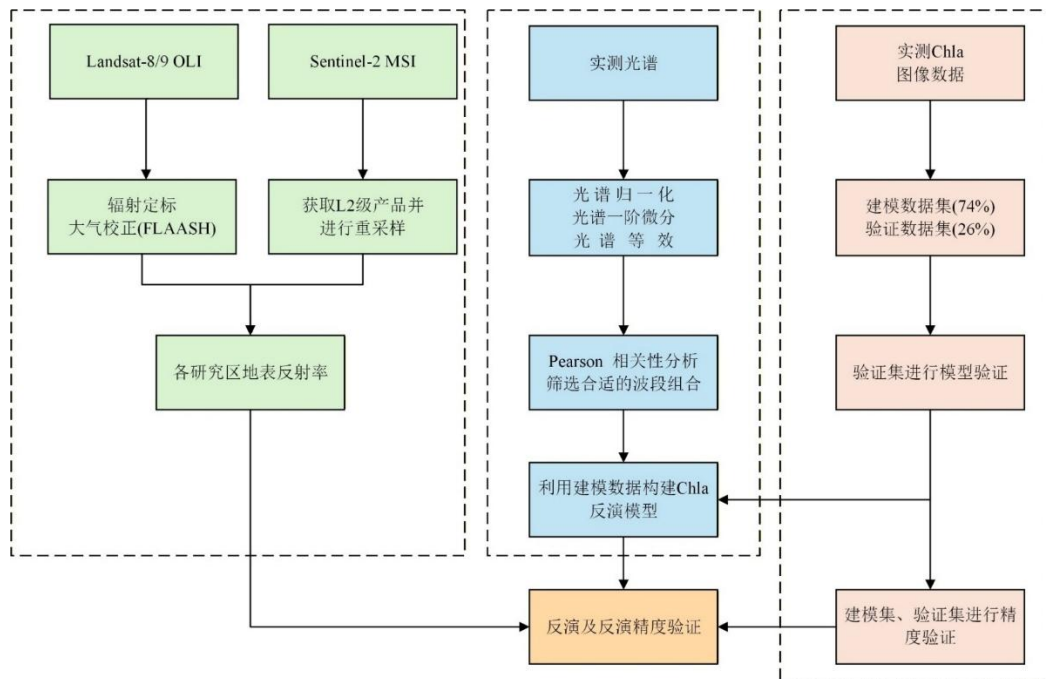


图3 叶绿素 a 遥感反演技术流程

Fig.3 Chlorophyll-a (Chla) Remote Sensing Retrieval

2.1 光谱等效

光谱等效 (Spectral Equivalence) 其核心在于通过数学建模与物理校正, 消除不同观测系统(如地面实测光谱与卫星传感器)间的光谱响应差异。在实测遥感反射率的应用中, 尽管水面之上法测量(如 ASD 光谱仪)通过标准化流程排除了大气过程辐射的直接干扰。然而, 当前结果与遥感反射率之间仍存在一定偏差; 为此, 可先通过光谱等效处理, 模拟出卫星传感器实际接收的遥感反射率, 再在此基础上进行后续分析。这样做有助于进一步消除误差、提高精度^[20]。公式如下:

$$R_T(B_x) = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R_{rs}(\lambda) F_0(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R_{rs}(\lambda) S_x(\lambda) d\lambda} \quad \#(1)$$

式中: 重采样至卫星波段的等效反射率 $R_T(B_x)$; λ_{max} 和 λ_{min} 分别为传感器波段的边界的最长和最短波长; $F_0(\lambda)$ 表示大气层外太阳辐照度(需根据日地距离校正至观测时刻); $S_x(\lambda)$ 为传感器特定波段的光谱响应函数。

光谱等效处理是连接地面实测高光谱数据与多光谱卫星影像的关键步骤。本研究利用 ASD 光谱仪实地测量的水面以上高光谱遥感反射率 $R_{rs}(\lambda)$, 结合 Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2 MSI 传感器对应波段的光谱响应函数 $S_x(\lambda)$ 以及对应日期的大气层外太阳辐照度 $F_0(\lambda)$, 代入公式(1), 计算得到各采样点在这两颗卫星各波段上的等效反射率 $R_T(B_x)$ 。此过程模拟了卫星传感器在对应波段接收到的信号。最终, 每个采样点的数据记录包含: ①基于卫星波段模拟的等效反射率(自变量); ②同步实测的叶绿素 a 浓度(因变量)。这些成对的数据, 共同构成了后续相关性分析、模型构建与验证的统一建模数据集, 从而实现了地面点状高光谱测量与卫星面状影像反射率在光谱特征上的直接关联与一致性处理, 为建立反演模型奠定了基础。

2.2 Pearson 相关性

皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient) 是一种衡量两个变量之间线性相关程度的统计指标^[21]。其取值范围为[-1,1], 其中正值

表示正相关, 负值表示负相关, 绝对值越接近 1, 表示变量之间的线性关系越强。常用于评估光谱变量(如波段、波段比值等)与目标参数(如叶绿素 a 浓度)之间的相关性, 便于筛选具有代表性的敏感因子, 提高模型构建的准确性与稳定性。公式如下:

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

式中: x_i 和 y_i 分别为变量 X 与 Y 的第 i 个样本值; \bar{x} 和 \bar{y} 为其均值; n 为样本数量。

2.3 误差分析

在遥感反演模型的精度评估中, 均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 与平均相对误差 (relative error, MRE) 是两种常用的统计指标^[22]。用于定量衡量模型预测值与实测值之间的偏差程度, 反映模型的拟合精度和泛化能力。RMSE 是评价模型绝对误差的指标, 其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2} \quad \#(3)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为第 i 个样本的预测值与实测值; i 为样本总数。RMSE 能够直观反映模型的预测偏差: 其值越小, 表明模型输出与真实值之间的偏离程度越低, 整体拟合能力越强。

MRE 则衡量相对误差的平均水平, 其公式为:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \right| \times 100\% \quad \#(4)$$

3 结果与讨论

3.1 选择敏感波段

对 400~900 nm 光谱反射率先开展一阶微分和归一化处理, 然后分析该处理后的光谱信号与叶绿素 a 实测值之间的 Pearson 相关性, 所得结果见图 3。从图 4 (a) 中可以看出, 波长在 470 nm 左右和大于 690 nm 时的 Pearson 相关系数较大。从图 4(b)中可知波长在 680 nm 左右时的 Pearson 相关系数较高。

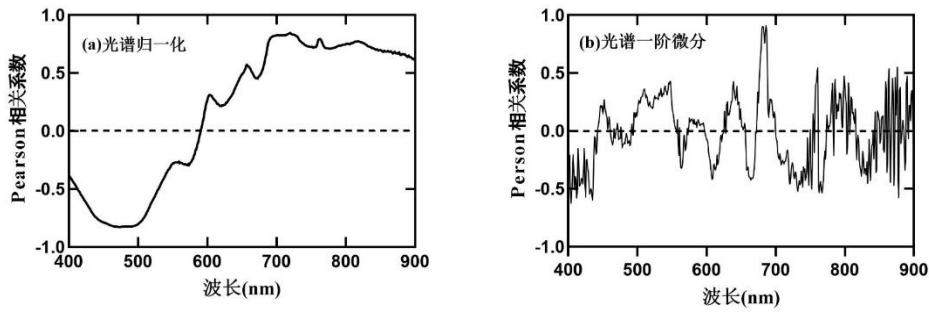


图 4 光谱归一化及一阶微分与叶绿素 a 浓度的相关系数曲线

Fig.4 Correlation coefficient curves of spectral normalization and first derivative with chlorophyll-a concentration

Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2 MSI 光谱等效反射率如图 5 所示。基于 Pearson 相关性分析，Landsat-8/9 OLI 卫星数据中，仅近红外 (NIR) 波段与叶绿素 a 浓度呈现较高相关性，其余波段相关性较低；Sentinel-2 MSI 卫星数据则在红光、红边及近红外波段表现出较高相关性。综合光谱归一化及一阶微分处理后的相关性分析结果，筛选出 Landsat-8/9 OLI 卫星的 B2 (蓝)、B4 (红)、

B5 (近红外) 波段以及 Sentinel-2 MSI 卫星的 B2 (蓝)、B4 (红)、B5 (红边)、B6 (红边)、B7 (红边)、B8 (近红外) 波段作为敏感波段。

为确定最优波段组合，对两个卫星筛选出的敏感波段进行数学运算组合 (包括加法、减法、乘法、除法)，并分析其与叶绿素 a 浓度的 Pearson 相关性。依据相关性分析的结果，筛选出对叶绿素 a 最为敏感的波段组合，以此为基础构建后续的反演模型，所确定的组合详见表 3 和表 4。

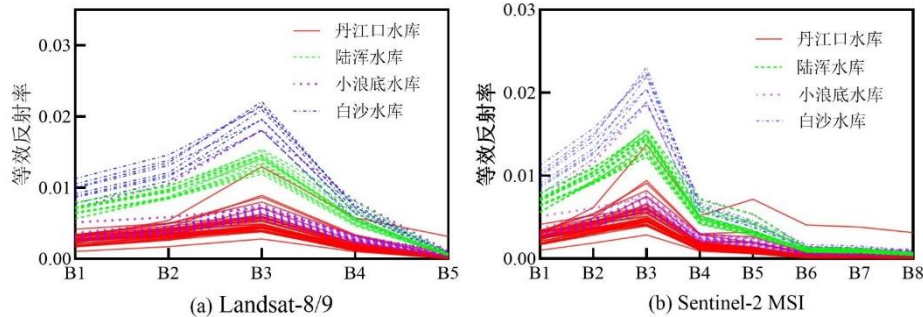


图 5 Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2 MSI 的波段等效反射率

Fig.5 Comparison of band-equivalent reflectance between Landsat-8/9 OLI and Sentinel-2 MSI

表 3 基于 Landsat-8/9 OLI 的不同波段形式与叶绿素 a 浓度相关性

Tab.3 Correlation of different band forms from Landsat-8/9 OLI with chlorophyll a concentration

波段	相关系数	波段	相关系数
B1	-0.10	B2/B4	-0.76
B2	-0.08	B4/B5	-0.50
B3	0.05	(B2+B5)/B4	-0.72
B4	0.19	B2/(B4+B5)	-0.76
B5	0.53	B5/B2	0.64
(B2-B5)/B4	-0.78	B2/(B4+B5)	-0.76
B4/(B2+B5)	0.76	B2/(B4-B5)	-0.62

表 4 Sentinel-2 MSI 波段及其组合与叶绿素 a 浓度的相关性统计

Tab.4 Correlation statistics between Sentinel-2 MSI bands/combinations and chlorophyll a concentration

波段	相关系数	波段	相关系数
B1	-0.13	(B2+B4)/B5	-0.83
B2	-0.06	B4/B2	0.84
B3	0.07	B2/B5	-0.81
B4	0.19	B4/B5	-0.85
B5	0.43	(B4+B7)/B5	-0.82
B6	0.49	B8*(B4+B5)	0.45
B7	0.49	(B4*B8)/B5	0.41
B8	0.53	(B5*B6)/B4	0.55

3.2 模型建立与验证

在内陆水体叶绿素 a 浓度的反演研究中，常见的方法主要包括经验模型、半经验模型、半分析模型以及机器学习方法。半经验模型是在生物光学机制的理论框架下，通过一定的假设条件，构建能够表征叶绿素 a 浓度变化的光谱指数，并依赖统计回归方法建立浓度与光谱参数之间的对应关系。半分析模型则更多地依托水体光学特性，从遥感反射率中分离出固有光学参数，并结合辐射传输方程的求解，实现对叶绿素 a 浓度的推算。机器学习方法以数据驱动为核心，将水体反射率与实测叶绿素 a 浓度输入到训练网络中，由模型自动挖掘二者之间复杂的非线性映射关系，从而

完成浓度预测。

本文采取半经验模型方法，通过对 Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2 MSI 的敏感波段进行组合后，筛选出与叶绿素 a 浓度统计相关性高的波段或波段组合，然后直接建立这些波段反射率与 Chla 值之间的统计回归模型(包括一次函数、二次函数、对数、指数、幂函数等)。每个卫星筛选出 3 个应用效果较好、精度较高的叶绿素 a 反演模型，进行叶绿素 a 浓度反演精度评价；对验证集进行精度评价的指标有 3 项，包括 R^2 ，RMSE 和 MRE；见表 5 和表 6。并使用预留的 21 条验证集来对筛选出来模型进行实测值与预测值验证，如图 6 和图 7 所示。

表 5 基于 Landsat-8/9 OLI 的回归模型及其验证

Tab.5 Regression models based on Landsat-8/9 OLI and their validation results

波段	函数形式	表达式	R^2	RMSE	MRE
B2/B4	指数	$y=56.822e^{-1.273x}$	0.71	1.97	34.46%
(B2+B5)/B4	指数	$y=79.487e^{-1.363x}$	0.60	2.45	43.09%
B2/(B4+B5)	指数	$y=38.629e^{-1.179x}$	0.69	1.62	27.88%

表 6 基于 Sentinel-2 MSI 的回归模型构建及验证

Tab.6 Regression models and performance tests based on Sentinel-2 MSI

波段	函数形式	表达式	R^2	RMSE	MRE
B4/B2	幂函数	$y=39.605x^{2.6221}$	0.70	1.85	31.74%
B2/B5	指数	$y=32.04e^{-0.565x}$	0.78	1.41	24.58%
(B2+B4)/B5	指数	$y=50.606e^{-0.492x}$	0.77	1.25	22.70%

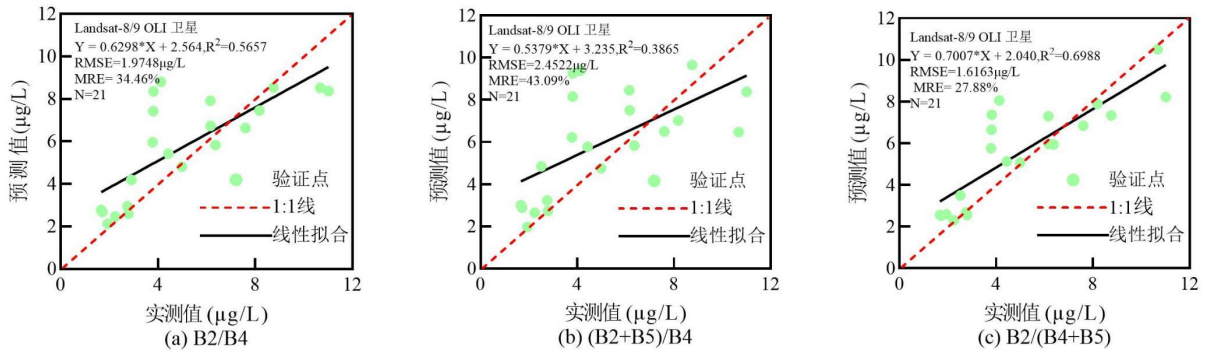


图6 Landsat-8/9 OLI 验证数据下叶绿素 a 反演的实测-预测对比

Fig.6 Comparison of measured vs. predicted Chla concentrations using the Landsat-8/9 OLI validation dataset

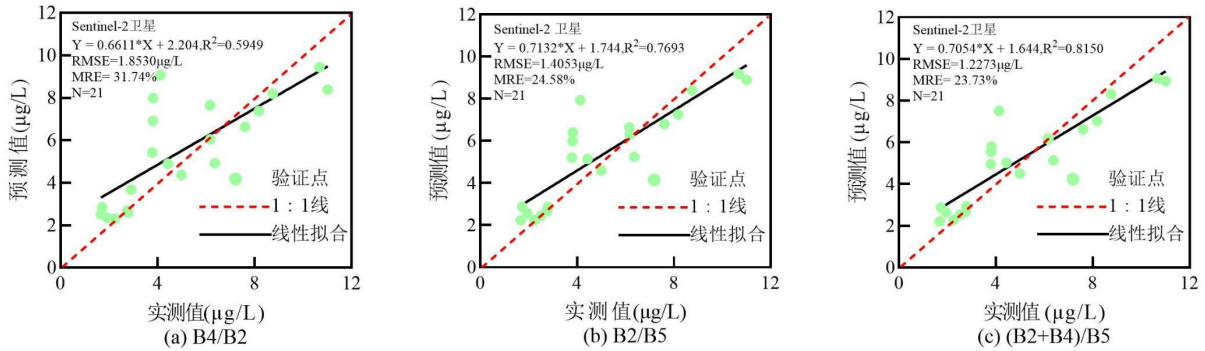


图7 Sentinel-2 MSI 验证数据下叶绿素 a 反演的实测-预测对比

Fig.7 Comparison of measured vs. predicted Chla using the Sentinel-2 MSI validation dataset

3.3 模型反演空间分布以及验证分析

为深入探究模型在叶绿素 a 浓度反演中的适用性与可靠性，本文分别选取基于 Landsat-8/9 卫星与 Sentinel-2 卫星所构建的反演模型，分别应用于四个库区（四个时间段）的遥感影像数据，开展叶绿素 a 浓度的遥感反演工作。随后，选取实地采样点的叶绿素 a 浓度测量值与遥感反演结果进行对比，通过计算均方根误差 RMSE 评估模型的反演精度，并采用线性回归方法进行拟合分析，从趋势一致性与误差大小两个方面综合评价各模型的表现。

反演结果如图 8 和图 9 所示。丹江口水库主库区（图 8（a）所示）是深水湖泊型湖库，沉积条件好，整体浓度维持 $3 \mu\text{g/L}$ 左右。上库区作为丹江、老鹤河和滔河等河流的主要汇水区域，接纳河流携带的营养物质、水动力条件不良、合适的光照和温度，共同促进了叶绿素 a 浓度的升高，使得叶绿素 a 浓度在 $10 \mu\text{g/L}$ 上下。汉江库区是典型的河道型湖库，受狭长地形制约，沿岸人类

活动输入大量营养盐，加之入库段水力阻滞延长水体滞留时间，共同驱动该区域形成藻类聚集带，使得汉江区域叶绿素 a 浓度在 $12 \mu\text{g/L}$ 以上。

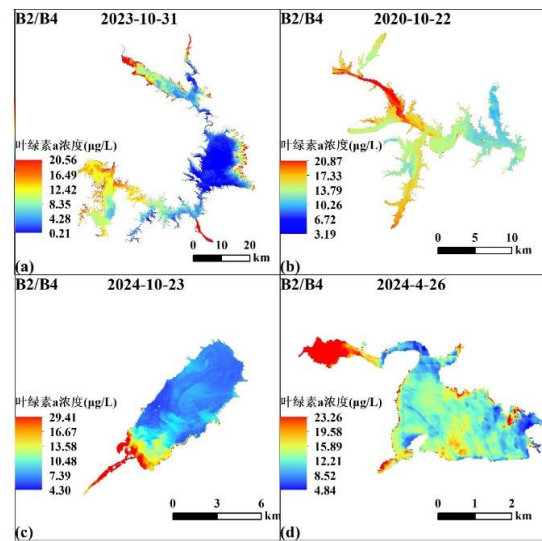


图8 基于 Landsat-8/9 OLI 图像反演的研究区叶绿素 a 浓度分布图

Fig.8 Chlorophyll a concentration maps retrieved based on Landsat-8/9 OLI images in study areas

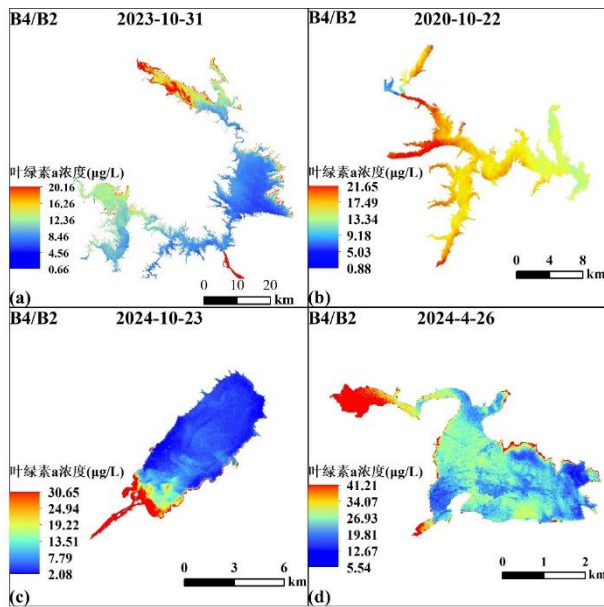


图9 基于 Sentinel-2 MSI 图像反演的研究区叶绿素 a 浓度分布图

Fig.9 Chlorophyll a concentration maps retrieved based on Sentinel-2 MSI images in study areas

白沙水库周围农田较多，下雨时化肥、肥料被冲进水里，给藻类提供了丰富的“食物”，叶绿素 a 浓度平均在 22 $\mu\text{g/L}$ 左右。东南角靠近大坝的区域叶绿素 a 浓度维持在 6 $\mu\text{g/L}$ ，主要因其处于水库最深水域，阳光穿透能力有限导致真光层浅薄，藻类光合作用受抑制；同时大坝放水发电或灌溉时形成强劲下泄水流，持续冲刷带走表层浮游植物，使白沙水库出现了西高东低的分布状态。

2020 年 9 月份小浪底水库调水调沙结束后开始蓄水到 10 月份，叶绿素 a 浓度总体呈现西高东低的分布。入库流量锐减导致富含营养盐的细颗粒物在库尾快速沉降。沉降过程既提升水体

透光性，又促使沉积物界面营养盐（特别是磷）释放，形成光照与营养盐富集区，驱动浮游植物复苏增殖^[23]。库湾区高值则源于地形导致的“营养陷阱”效应：滞流水体减弱营养盐扩散稀释，有利于周边输入及沉积物释放的营养盐汇聚积累^[24]。东部坝前区域浓度相对较低主要因营养盐在缓慢东移过程中持续沉降消耗，浓度沿程递减。此外，坝前水深大、水体分层加剧，表层混合层薄且受风扰弱，深层富营养盐水体向上补充受限，导致表层营养盐匮乏，叶绿素 a 浓度整体较低。

陆浑水库的叶绿素 a 浓度从入库口的 30 $\mu\text{g/L}$ 左右递减到出库区的 3 $\mu\text{g/L}$ ，原因是靠近大坝泄水结构，较强的水流条件不利于浮游植物细胞的长时间滞留和聚集生长。入库河口区域靠近人类生活区域，携带流域内农业活动、生活污水等产生的营养盐进入库区，使得叶绿素 a 浓度升高。岸线一带毗邻人类生活区，人类活动强度较大，使得叶绿素 a 浓度升高。

总体来看，相较于 Landsat-8/9 OLI, Sentinel-2 MSI 的反演结果在空间格局上更接近真实情况，表现更优。

图 10 (a) 展示了基于 Landsat-8/9 OLI 影像的 3 种模型反演叶绿素 a 浓度与实测值之间的线性拟合结果，并计算了均方根误差 (RMSE)。分析表明，3 种模型的线性拟合结果相差不大， R^2 的值都在 0.5 左右，RMSE 的值都在 3 附近波动，但是在反演空间分布中基于波段组合 B2/B4 构建的模型反演精度在丹江口水库的汉江库区以及小浪底水库的库湾区域更符合实际情况。图 10 (b) 则展示了基于 Sentinel-2 MSI 影像的 3 种模型反演结果对比。对比发现，Sentinel-2 MSI 数据的最优反演模型为波段组合 (B4/B2)，其 R^2 为 0.736 4 是三者最高的，RMSE 的值为 2.44 是 3 种模型中最低的。综上，基于 Sentinel-2 MSI 反演模型在反演精度和误差上，较 Landsat-8/9 OLI 精度更高，更适合作为水体叶绿素 a 浓度反演的数据源。

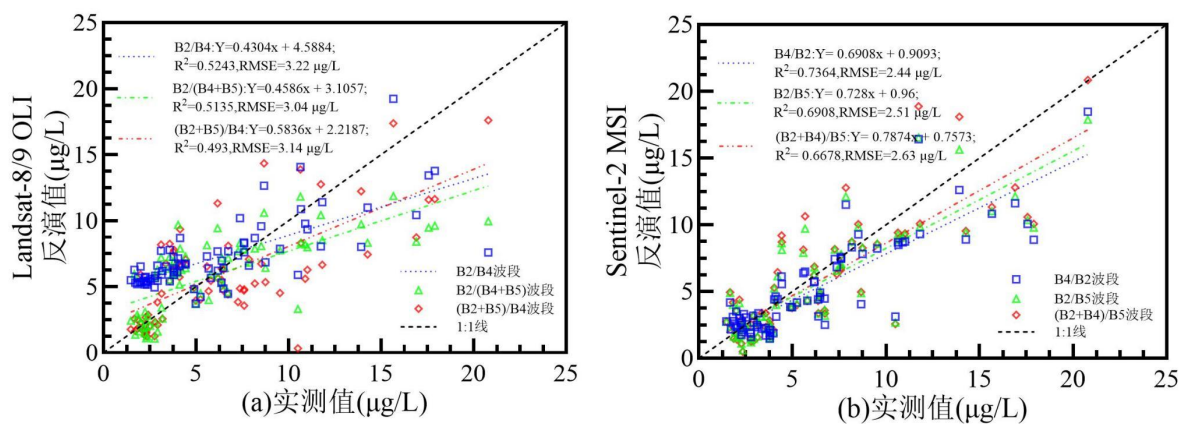


图 10 Landsat-8/9 OLI 和 Sentinel-2 MSI 模型精度验证

Fig.10 Accuracy validation of Landsat-8/9 OLI and Sentinel-2 MSI models

3.4 时序验证

为了验证基于 Sentinel-2 MSI 数据源所建立的 B4/B2 最优反演模型的可行性，选择了 2017 年—2025 年 9 年间的陆浑水库来做验证，在此基础上划定了 3 块区域，分别为 A（入湖口）、B

（湖库中间）、C（出湖口），用这 3 块区域来提取这 9 年中叶绿素 a 浓度平均值的变化。9 年陆浑水库叶绿素 a 浓度分布结果如图 11 所示，浓度变化曲线如图 12 所示。

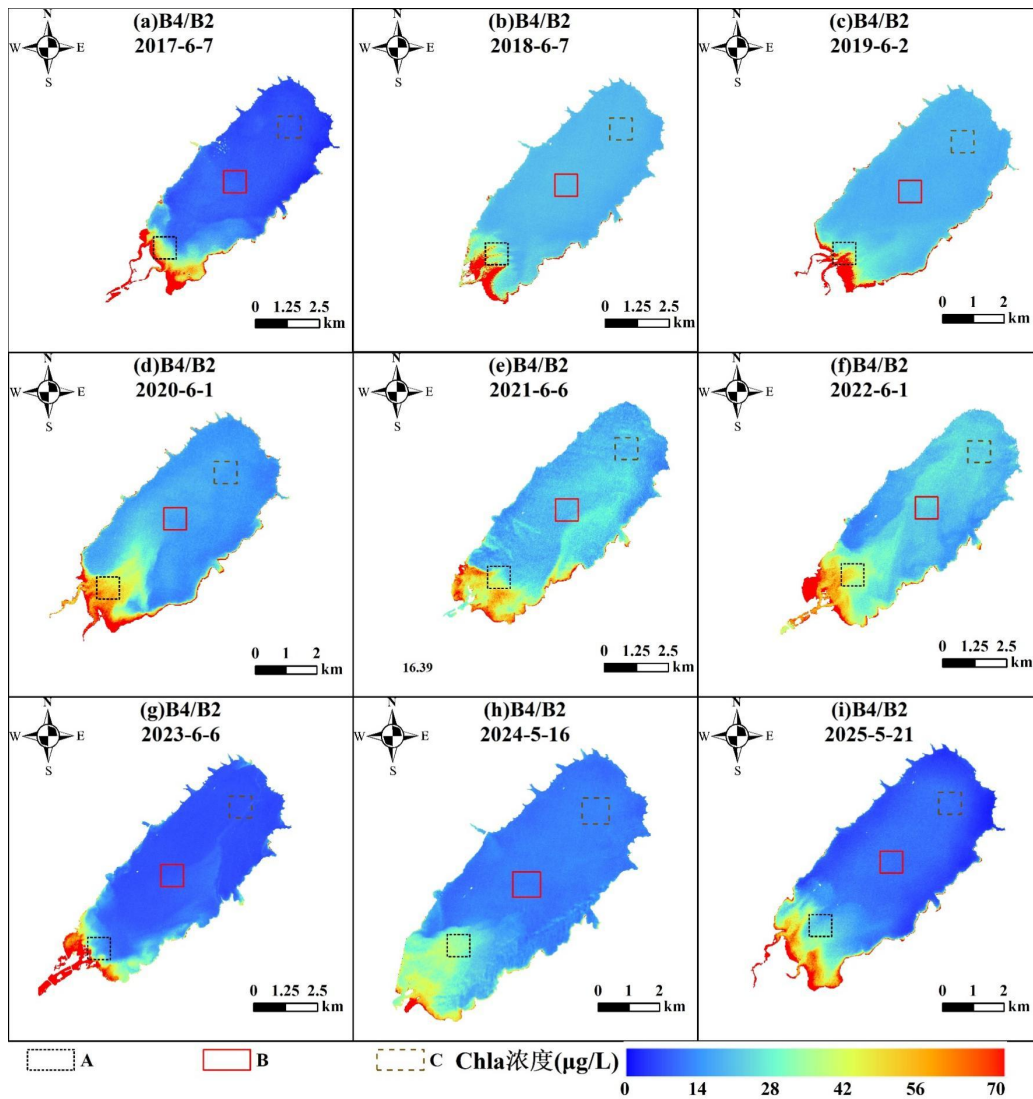


图 11 2017—2025 年陆浑水库叶绿素 a 浓度分布图

Fig.11 Spatial distribution of Chlorophyll-a Concentration in Lulun Reservoir from 2017 to 2025

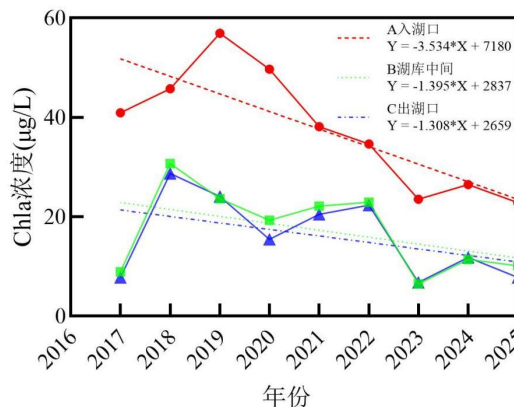


图 12 陆浑水库 2017-2025 年叶绿素 a 浓度监测与趋势分析图

Fig.12 Lulun Reservoir Chlorophyll-a Concentration Monitoring and Trend Analysis (2017-2025)

从图 11 和图 12 可以看出，2017—2025 年，陆浑水库叶绿素 a 浓度时空分布存在显著差异，

并呈现出一定的阶段性变化特征。从空间分布来看，Chla 浓度整体呈现从入湖口向出湖口逐渐递

减的格局,A区域的浓度显著高于B和C区域的,表明陆浑水库的营养输入主要来源于上游流域,并在库区中经过沉降、稀释和生物利用等过程逐渐降低。

在时间序列上,2017—2019年,陆浑水库整体的叶绿素a浓度没有下降反而升高了。通过与嵩县陆浑湖湿地公园管理中心交流发现,2018年陆浑湖禁止了湖泊网箱养鱼等旅游和渔业活动,可以看出来这并非政策的无效,而是湖泊生态系统对强烈人为干预做出的一种复杂且暂时的应激反应。从2020—2025年,3个区域的平均浓度出现了明显的下降。A区域从49.71 $\mu\text{g/L}$ (2020年)降至22.85 $\mu\text{g/L}$ (2025年),B区域从19.30 $\mu\text{g/L}$ (2020年)降至10.13 $\mu\text{g/L}$ (2025年),C区域从15.49 $\mu\text{g/L}$ (2020年)降至7.79 $\mu\text{g/L}$ (2025年),虽然中间略有波动,但还是充分说明了政策实施和管控带来的良性效果。

从趋势变化来看,虽然2020年前后出现显著升高,但整体上3个区域的叶绿素a浓度在2017—2025年均呈减小趋势,线性回归结果显示入湖口(A)下降速率(3.534 $\mu\text{g/L/年}$)远高于库心(B)(1.395 $\mu\text{g/L/年}$)和出湖口(1.308 $\mu\text{g/L/年}$)。这说明近几年流域治理措施及水库管理可能已取得一定成效,使得藻类水平逐渐得到控制。

总的来说,陆浑水库的Chla时空分布特征揭示了典型的“入湖口高、库心与出湖口低”的格局,且其变化趋势表现出先升后降的过程。这一结果显示水库管理在削减外部营养输入方面已经取得积极进展,但入湖口区域依旧是水质控制的关键区,需要加强对上游污染源的治理与生态修复,防止再次反弹。

4. 结论

本研究以河南省四个典型湖库为研究对象,开发了一种适用于不同类型湖库的水体中叶绿素a浓度的普适性遥感反演模型。通过对比分析,发现Sentinel-2 MSI数据源较Landsat-8/9 OLI更适合内陆水体叶绿素a的反演,具有更高的反演精度。基于星地一体化遥感监测数据,结合光谱归一化、一阶微分和光谱等效分析方法能精准有效地筛选出敏感波段,建立了统一的半经验遥感反演模型,确定了由Sentinel-2 MSI数据所建立的B4/B2的最优波段组合。该模型在长江流域的丹江口水库、黄河流域的陆浑水库、小浪底水库和淮河流域的白沙水库四种不同类型的湖库中均表

现出良好的适用性。所建立的叶绿素a浓度反演模型的决定系数 R^2 达到0.7024,验证模型的 R^2 为0.7364均达到了较高的精度水平,满足反演的精度要求。

本研究开发的区域优化算法为湖泊水库水体叶绿素a浓度遥感监测提供了通用技术框架,实现了大范围、高频次的水质参数动态监测。该算法通过耦合Landsat-8/9 OLI与Sentinel-2 MSI多源卫星数据,结合实测光谱与叶绿素a浓度的协同处理,构建了稳健的反演模型。基于多光谱遥感数据生成的叶绿素a浓度空间分布图,显著提升了湖库水质监测的时空分辨率,不仅拓展了遥感技术在水环境领域的应用深度,更为水资源管理决策提供了科学依据,对促进生态保护与可持续发展具有重要实践价值。

尽管该模型在4个典型湖库验证中取得良好精度,但是在复杂水环境中的适应性仍需进一步验证。未来研究将重点拓展不同营养状态与浑浊度水体的验证范围,探索叶绿素a与总磷、透明度等参数的协同反演机制,最终通过集成原位监测、水文模型与遥感技术构建天地一体化的水环境预警平台。这些改进有望强化算法的工程化应用能力,为水环境保护提供精准化技术支撑。

参 考 文 献

- [1]Manun M,Atique U,An K G.Assessment of water quality based on trophic status and nutrients-chlorophyll empirical models of different elevation reservoirs[J].Water,2021,13(24):3640.
- [2]王桥.中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题[J].遥感学报,2021,25(1):25-36.[Wang Q.Advances and some frontier issues of environmental remote sensing monitoring technology in China[J].National Remote Sensing Bulletin,2021,25(1):25-36.]
- [3]刘瑶,李俊生,肖晨超,等.资源一号02D高光谱影像内陆水体叶绿素a浓度反演[J].遥感学报,2022,26(1):168-178.[Liu Y,Li J S,Xiao C C,et al.Retrieval of chlorophyll-a concentration in inland waters using ZY-1 02D hyperspectral imagery[J].National Remote Sensing Bulletin,2022,26(1):168-178.]
- [4]罗婕纯一,秦龙君,毛鹏,等.水质遥感监测的关键要素叶绿素a的反演算法研究进展[J].遥感技术与应用,2021,36(03):473-488.[Luo J C Y,Qin L J,Mao P,et al.Research Progress on Inversion Algorithms for Chlorophyll-a, A Key Parameter in Water Quality Remote

- Sensing Monitoring[J].Remote Sensing Technology and Application 2021,36(3):473-488.]
- [5]杭鑫,曹云,杭蓉蓉,等.基于随机森林算法与高分观测的太湖叶绿素 a 浓度估算模型[J].气象,2021,47(12):1525-1536.[Hang X,Cao Y,Hang R R,et al.A chlorophyll-a concentration estimation model for Lake Taihu based on Random Forest algorithm and GF observation[J].Meteorological Monthly,2021,47(12):1525-1536.]
- [6]张良培,何江,杨倩倩,等.数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J].测绘学报,2022,51(07):1317-1337.[Zhang L P,He J, YANG Q Q,et al. Research Progress on Data-Driven Multi-Source Remote Sensing Information Fusion[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(7):1317-1337.]
- [7]张磊,宫兆宁,王启为,等.Sentinel-2影像多特征优选的黄河三角洲湿地信息提取[J].遥感学报,2019,23(02):313-326.[Zhang L,Gong Z N,Wang Q W,et al.Wetland information extraction in the Yellow River Delta based on multi-feature optimization from Sentinel-2 imagery[J].National Remote Sensing Bulletin,2019,23(2):313-326.]
- [8]孙伟伟,杨刚,陈超,等.中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析[J].遥感学报,2020,24(05):479-510.[Sun W W,Yang G,CHEN C,et al.Development status and literature analysis of Earth observation remote sensing satellites in China[J].National Remote Sensing Bulletin,2020,24(5):479-510.]
- [9]Cao Q,Yu G L,Qiao Z Y.Application and recent progress of inland water monitoring using remote sensing techniques[J].Environmental Monitoring and Assessment,2022,195(1):125.
- [10]Hou Y K,Zhang A B,Lv R L,et al.A study on water quality parameters estimation for urban rivers based on ground hyperspectral remote sensing technology[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(42):63640-63654.
- [11]Adjovu E G,Stephen H,James D,et al.Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters[J].Remote Sensing,2023,15(7):1938.
- [12]冯思维,杨清华,贾伟洁,等.基于光学遥感的内陆地表水体提取综述[J].自然资源遥感,2024,36(03):41-56.[Feng S W, Yang Q H, Jia W J,et al.A review of inland surface water extraction based on optical remote sensing[J].Remote Sensing for Natural Resources,2024,36(3):41-56.]
- [13]赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(01):131-147.[Zhao X Y,Du Y X,Li H,et al.Spatiotemporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River[J].Journal of Natural Resources,2021,36(1):131-147.]
- [14]葛利玲,王璐.融合多源遥感数据的河南省淅川县植被动态演变研究[J].自然资源遥感,2025,37(3):192-202.[Ge L L,Wang L.Research on vegetation dynamic evolution in Xichuan County,Henan Province by integrating multi-source remote sensing data[J].Remote Sensing for Natural Resources,2025,37(3):192-202.]
- [15]An M,Fan L J,Huang J,et al.The gap of water supply-Demand and its driving factors:From water footprint view in Huaihe River Basin[J].PLoS One,2021,16(3):e0247604.
- [16]张金良,鲁俊,韦诗涛,等.小浪底水库调水调沙后续动力不足原因和对策[J].人民黄河,2021,43(01):5-9.[Zhang J L,Lu J,Wei S T et al.Causes and countermeasures for the insufficient subsequent dynamic in the water-sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir[J].Yellow River,2021,43(1):5-9.]
- [17]Saberi M,Khosravi V,Brom J,et al.Examining the sensitivity of simulated EnMAP data for estimating chlorophyll-a and total suspended solids in inland waters[J].Ecological Informatics,2023,75:102058.
- [18]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,(01):37-44.[Tang J W,Tian G L,Wang X Y,et al.Water body spectral measurement and analysis I :Above-water method[J].Journal of Remote Sensing,2004,(1):37-44.]
- [19]Kloiber S M,Brezonik P L,Olmanson L G,et al.A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data[J].Remote sensing of Environment,2002,82(1):38-47.
- [20]邓玉浩,朱春华,邱士可,等.河南省典型湖库水体透明度遥感反演算法构建[J].华中师范大学学报(自然科学版),2025,59(06):923-935.[Deng Y H, Zhu C H, Qiu S K,et al.Construction of a remote sensing retrieval algorithm for water transparency in typical lakes and reservoirs in Henan Province[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition),2025,59(6):923-935.]
- [21]赵朔,桂峰兰,柳后起.基于三种机器学习模型的太湖总氮

- 浓度预测[J].中国农村水利水电,2022(6):24-28,39.[Zhao S, Gui F L,Liu H Q.Prediction of total nitrogen concentration in Lake Taihu based on three machine learning models[J].China Rural Water and Hydropower,2022(6):24-28,39.]
- [22]高晨,徐健,高丹,等.基于GF-1与实测光谱数据鄱阳湖丰水期总悬浮物浓度反演[J].国土资源遥感,2019,31(01):101-109.[Gao C,Xu J,Gao D,et al.Retrieval of total suspended matter concentration in Poyang Lake during wet season based on GF-1 and in-situ spectral data[J].Remote Sensing for Natural Resources,2019,31(1):101-109.]
- [23]陶洁,李莎拉,张李婷,等.黄河三角洲湿地生态环境质量评价与景观格局分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(06):1-9.[Tao J,Li S L,Zhang L T,et al.Evaluation of ecological environment quality and analysis of landscape pattern in the Yellow River Delta wetland[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(6):1-9.]
- [24]刘建华,高新科,施天乐,等.黄河流域农业用水效率的时空格局及影响因素研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(06):23-33.[Liu J H,Gao X K,Shi T L,et al.Spatiotemporal pattern and influencing factors of agricultural water use efficiency in the Yellow River Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(6):23-33.]

Construction of a Multispectral Satellite-Based Retrieval Algorithm for Chlorophyll-a Concentration in Typical Lake Water Bodies of Henan Province

(ZHANG Qiyue^{1,2}, QIU Shike^{2,3}, DU Jun^{2,3}, ZHU Chunhua¹, WANG Zheng^{2,4,5}, ZHANG Yingzhuo⁶, WANG CHAO², DU Wencheng⁷, DENG Yuhao^{1,2})

(1.School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2.Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China; 3.Henan Key Laboratory of Remote Sensing and GIS,Zhengzhou 450052, China; 4.Collaborative Innovation Center of Geospatial Information Technology for Smart Central Plains, Zhengzhou 450046, China; 5.Key Laboratory of Spatiotemporal Perception and Intelligent Processing, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450046, China; 6.School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 7.Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: 【Objective】 Chlorophyll-a (Chl-a) concentration is a crucial parameter for assessing the degree of eutrophication and water quality status of water bodies. Due to the diverse types of lakes and reservoirs in Henan Province and the significant differences in their optical properties, retrieval models based on a single water body suffer from low accuracy and poor adaptability when applied regionally. Therefore, this study selects four representative reservoirs—Danjiangkou, Xiaolangdi, Luhun, and Baisha—from three major river basins within Henan Province, aiming to construct a robust and highly accurate remote sensing retrieval model for Chl-a concentration with strong regional adaptability. **【Methods】** This research integrates Sentinel-2 MSI and Landsat-8/9 OLI satellite data with field data from 79 sampling points, including water surface spectra and measured Chl-a concentrations. Sensitive spectral bands were identified by applying first-order differentiation, normalization, and spectral equivalence analysis to the spectral data. Subsequently, various statistical models, including single-band, band ratio, and multi-band combination models, were developed. The optimal model was selected through accuracy comparison and systematically evaluated using the coefficient of determination (R^2), Mean Relative Error (MRE), and Root Mean Square Error (RMSE). **【Results】** (1)The band ratio model utilizing the B4 (Red) and B2 (Blue) bands of Sentinel-2 MSI satellite data demonstrated the best performance, achieving a model R^2 of 0.702 4. The Mean Relative Error (MRE) and Root Mean Square Error (RMSE) were 31.74% and 1.85 $\mu\text{g/L}$, respectively.(2)This model also showed good performance when applied to a long-term time-series analysis of Chl-a concentration in Luhun Reservoir. **【Conclusion】** The B4/B2 band ratio model based on

Sentinel-2 MSI data developed in this study can effectively retrieve Chl-a concentrations in typical lakes and reservoirs of Henan Province. It exhibits good accuracy and regional adaptability, successfully addressing the limited transferability of single-water-body models. This model provides a reliable methodological basis for regional water quality monitoring and eutrophication management.

Key word:Chlorophyll-a concentration;satellite inversion; Sentinel-2 MSI; Landsat8/9 OLI; multi-spectroscopy