引文格式：倪骏杰,方雄飞,牛新如,等. 基于无人机高光谱技术的辽河湿地水质参数反演[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):84-91. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.02.017

基于无人机高光谱技术的辽河湿地水质参数反演

倪骏杰[1]，方雄飞[1]，牛新如[1]，周　斌[2]，常　乐[3]，包妮沙[1*]
（1. 东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819；2. 辽宁省生态气象和卫星遥感中心，辽宁 沈阳 110166；
3. 沈阳城市建设学院，辽宁 沈阳 110167）

摘　要：无人机高光谱数据具有波段信息丰富、时空分辨率高等特性，常被应用于水质参数的反演当中。以辽河湿地为研究对象，基于实地水质参数数据与无人机高光谱数据，分别构建了叶绿素a（Chl-a）和总氮（*TN*）多种光谱指数。最终，基于相关性关系确定最佳Chl-a和*TN*光谱指数，进而建立一次线性模型、指数模型和偏最小二乘（PLS）模型。结果表明：Chl-a最优模型（归一化指数-指数模型）的精度为$R^2=0.90$，RMSE=0.003 5 mg/L，*TN*最优模型（差值指数-PLS模型）的精度为$R^2=0.66$，RMSE=0.24 mg/L。结合同时期同区域的无人机高光谱影像反演得到研究区水域的Chl-a和*TN*的浓度分布图，验证了无人机高光谱数据应用于水质参数反演的可行性。

关键词：无人机高光谱；叶绿素a；总氮；水质反演
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0084-04

Water Quality Parameters Inversion in Liao River Wetland Based on UAV Hyperspectral Technology

NI Junjie[1], FANG Xiongfei[1], NIU Xinru[1], ZHOU Bin[2], CHANG Le[3], BAO Nisha[1]
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Liaoning Ecological Meteorological and Satellite Remote Sensing Center, Shenyang 110166, China;
3. Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China)

Abstract: Hyperspectral data from unmanned aerial vehicles (UAVs), known for their rich band information and high spatio-temporal resolution, is often used in the inversion of water quality parameters. Taking water quality parameters of Liao River wetland as the main object, based on the field water quality parameter data and UAV hyperspectral data, multiple spectral indices for chlorophyll-a (Chl-a) and total nitrogen (*TN*) were constructed respectively. Furthermore, the optimal band combination was determined by the highest correlation coefficient. Based on the optimal index of Chl-a and *TN* , the linear model, exponential model and partial least squares (PLS) model were established. The results show that the accuracy of optimal Chl-a model (normalized spectral indices-exponential model) is R^2 =0.90, RMSE=0.003 5 mg/L. The accuracy of optimal TN model (difference spectral indices-PLS model) is R^2 =0.66, RMSE=0.24 mg/L. The concentration distribution map of Chl-a and TN in the study area was obtained by UAV hyperspectral images in the same period and region, which could verify the feasibility of applying UAV hyperspectral data to water quality parameter inversion.

Key words: UAV, Chl-a, TN, water quality inversion

在生态文明建设的新时期，湿地资源的保护与利用状况是国土调查的重要内容[1]。但是由于社会经济高速增长、全球变暖和人类活动加剧，水域环境污染现象日益突出[2]。传统的断面人工采样监测方式耗时且成本高，同时由于时间和空间的限制，数据采集频率低，结果时效性不佳，难以满足对水质的大范围、快速和实时监测需求[3]。在这种情况下，水质遥感法凭借其能够在空间和时间上连续反映水质分布情况的特点，成为了一种高效的监测手段[4]。与传统方法相比[5-13]，水质遥感监测技术能够广泛覆盖、快速响应，且成本更低，便于长期连续监控[14]。

本文以辽河三角洲湿地水质为研究对象，利用无人机成像高光谱数据建立了Chl-a、*TN*两类水质参数的反演模型，揭示水质变化的规律，并为有效治理水体污染提供科学依据。

项目来源：省级大学生创新创业训练计划项目（231100）。
第一作者简介：倪骏杰（2003—），本科，研究方向为遥感水质监测应用，E-mail：756438914@qq.com。
通信作者：包妮沙（1985—），博士，教授，研究方向为生态遥感，E-mail：baonisha@mail.neu.edu.cn。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

本文的研究区域选定为位于辽河三角洲的中心位置的辽河入海口湿地（图1）的一处水渠（图1a）和一处人工水塘（图1b）。该地区拥有着典型的温带海岸湿地生态系统和独特的河口湿地风貌，还是鸟类迁徙路线上的重要节点。然而，该区域的围海养殖历史曾严重破坏了滨海湿地的生态环境。因此，及时、有效地监测辽河口湿地水质有助于制定有效的环境保护措施，为该地区的生态恢复提供科学依据。

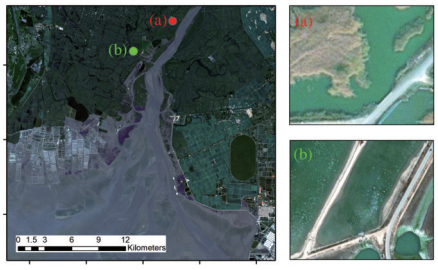


图1　研究区域图（影像来源高分一号）

1.2　数据获取与处理

1.2.1　实测数据

实地水质样本于2023年8月22日和8月23日两日在辽河入海口处进行采集，天气晴朗无云，无风，主要采集采样点的表层水体（水表面以下50 cm）。实地采样点共计为102个，每个采样点均采集1 500 ml的水体并装入白色塑料瓶中进行密封，现场记录水体表观性质（颜色）、采样点标号和地理坐标等数据。

在实验室中对采集的样本进行水质参数检测。Chl-a的检测采用了分光光度法（HJ 897-2017），*TN*采用碱性过硫酸钾分光光度法（GB/T 11894）。本次研究区范围内102个采样点水质参数的统计参数如表1所示（将所有数据保留3位小数）。

表1　研究区内102个样本的水质参数统计表

水质参数	最小值	最大值	均值	标准差	偏度	变异系数
Chl-a	0.002	0.077	0.012	0.013	2.322	1.045
TN	1.320	3.550	2.196	0.421	0.583	0.192

1.2.2　水面高光谱影像采集

使用大疆M600 Pro搭载的Resonon Pika L高光谱相机采集辽河入海口水面高光谱影像。该型号高光谱相机覆盖可见光-近红外区域中400~1 000 nm，光谱通道共有281个，光谱分辨率为2.1 nm，镜头焦距为17 mm，视场角为17.6°。每次飞行前后均使用白板进行标准校正，以避免由于云量变化导致影像曝光不均匀的问题。同时为了降低噪声影响，更方便的传输数据，在数据获取后采用“spline”插值方法对通道数据进行合并，重采样后将281个通道数据合并为150个波段，光谱分辨率为4 nm。数据采集后，在Mega Cube V 2软件中进行辐射定标和几何校正，然后用ArcGIS进行地理配准，最后在ENVI 5.3中进行影像无缝拼接、裁剪、反射率计算和构建感兴趣区。

2　研究方法及路线

2.1　叶绿素特征因子提取方法

2.1.1　三波段指数

三波段指数（three bands index，TBI）数学表达式如下所示：

$$\left[R_{rs}^{-1}(\lambda_1)-R_{rs}^{-1}(\lambda_2)\right]R_{rs}(\lambda_3)\propto C_{\mathrm{Chla}} \tag{1}$$

式中，C_{Chla}为叶绿素a浓度值；$R_{rs}(\lambda_i)$为λ_i处的反射率；$R_{rs}^{-1}(\lambda_i)$为λ_i处的反射率的倒数。

模型中波段选择的原则：① λ_1为叶绿素a吸收系数的最大敏感波长，范围在600~690 nm之间。② λ_2的波长应位于λ_1附近且叶绿素吸收作用较小处。③ λ_3位于水体中各组分吸收系数最小的波段附近，应大于730 nm。本文遍历计算$\left[R_{rs}^{-1}(\lambda_1)-R_{rs}^{-1}(\lambda_2)\right]R_{rs}(\lambda_3)$与叶绿素浓度之间最高的相关系数，来确定$\lambda_1$、$\lambda_2$和$\lambda_3$的最佳位置。

2.1.2　水体叶绿素a监测指数

基于水体叶绿素a的监测指数（water chlorophyll-a index，WCI）。计算公式为：

$$\mathrm{WCI}=\frac{R_{\lambda1}-R_{\lambda2}}{R_{\lambda2}-R_{\lambda3}} \tag{2}$$

式中，$R_{\lambda i}$为波段λ_i处的反射率。

WCI指数选取和三波段法类似的迭代计算方法，通过计算WCI指数与叶绿素浓度之间的相关系数，并不断调整3个波段的位置，将相关系数最大时的3个波段位置作为迭代结果，根据迭代结果构建反演模型。

2.1.3　归一化光谱指数

归一化光谱指数（normalized spectral indices，NSI）的计算公式为：

$$\mathrm{NSI}=\frac{R_{\lambda1}-R_{\lambda2}}{R_{\lambda1}+R_{\lambda2}} \tag{3}$$

式中，$R_{\lambda i}$为波段λi处的反射率。且λ_1和λ_2的选择有一定限定，λ_1和λ_2均选择光学特性由叶绿素a主导的特征光谱处，也在一定程度上减少了其他水体组分的影响。λ_1与λ_2的选定优先考虑叶绿素a所主导的特征波段范围内，能够在一定程度上降低其他水体成分的干扰。

2.2 总氮特征因子提取方法

本文使用差值光谱指数（difference spectral indices，DSI）、比值光谱指数（ratio spectral indices，RSI）和NSI作为光谱指数提取总氮特征因子，能够有效地降低背景噪声，更加有效地提取光谱信息。DSI和RSI的计算公式如下所示：

$$DSI = R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2} \tag{4}$$

$$RSI = \frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} \tag{5}$$

式中，$R_{\lambda 1}$和$R_{\lambda 2}$为任意2个波段处的光谱反射率。

2.3 建模方法

建模之前，使用皮尔逊（Pearson）相关系数确定最佳光谱指数形式及各波段分布位置，随后基于Chl-a和*TN*的最佳光谱指数，构建一次线性模型和指数模型。除此之外，由于较高相关性的波段组合存在多个，所以可以用多元线性回归的方法来建立模型。

偏最小二乘（PLS）回归模型，是一种结合了主成分分析、典型相关分析以及多元线性回归分析多种优点的多元统计回归模型。一次线性模型、指数模型和PLS回归模型拟合的函数如下所示：

$$y = ax + b \tag{6}$$

$$y = ae^{bx} \tag{7}$$

$$y = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i + b \tag{8}$$

式中，y为预测的水质参数浓度；x为波段指数。

决定系数R^2能够评估模型的拟合效果，最高为1。R^2值越接近1，拟合效果越佳。均方根误差（root mean square error，RMSE）衡量预测值与实际值的离散程度，是评价模型预测能力的重要指标，其较低的值表明模型预测精度更高。RMSE计算公式如下所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_{iP} - y_{iM}\right)^2}{n}} \tag{9}$$

式中，下标P和M分别为预测值和实测值；n为样本数量。

3 结果分析

3.1 光谱特征分析

水体原始光谱存在许多噪声干扰，为减少噪声影响，本文使用Savitzky-Golay滤波器对光谱曲线进行平滑处理，结果如图2所示。可以看出在400~560 nm范围内，辽河水体光谱反射率逐渐上升，并于570 nm附近形成反射峰，这是因为水体中叶绿素在此处的吸收能力较弱，并在570 nm之后呈下降趋势。Chl-a在670 nm附近的吸收特性会导致该波段处形成“反射谷”。此外，Thiemann通过实验确定了700 nm附近反射率峰的主要是由于水体吸收的增加，导致红边区域（>700 nm）反射率减小。而810 nm附近的反射峰则主要是由于水体悬浮物的后向散射作用。综合分析各个水样点的光谱可以发现其光谱曲线趋势基本一致，但由于不同的水样点的水质参数浓度不一，导致其光谱反射率大小存在一定差异。

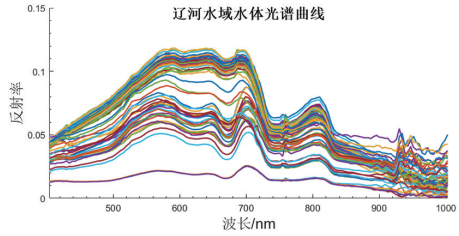


图2 经SG处理后的102个观测点反射率光谱曲线

3.2 水质参数与各指数的相关性

通过遍历计算400~1 000 nm范围内的所有波段位置的TBI、WCI和NSI与Chl-a浓度之间的相关系数，得到图3a、b、c。同理遍历计算DSI、RSI和NSI与TN浓度的相关系数得到图3d、e、f。

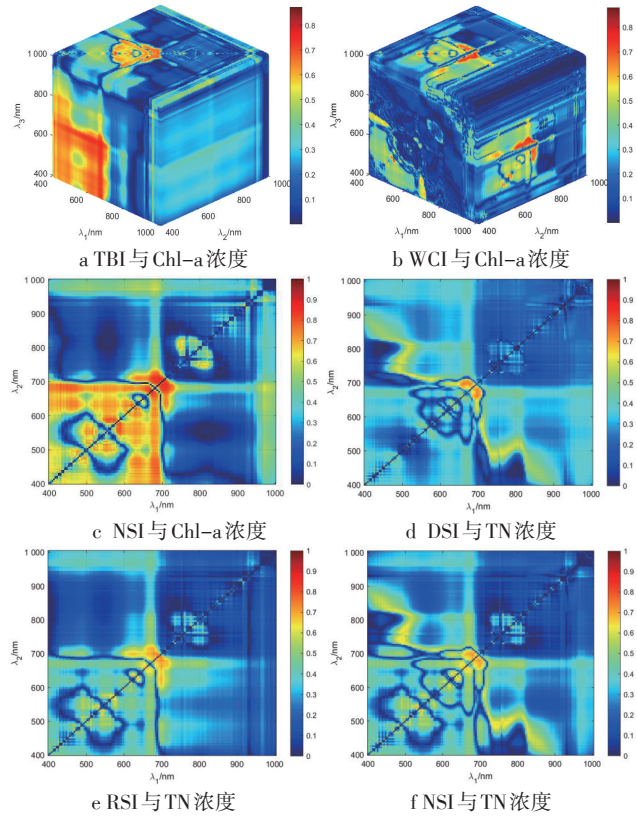


图3 水质参数与光谱指数相关性热力图

在图3中，颜色越接近红色的区域相关系数越

大，越接近蓝色的区域代表相关系数越小，对角线的区域是在选择相同波段时指数为定值，相关系数为0。在选取TBI和NSI的最佳波段组合时需在指数相应的波段范围。

3.3　水质反演模型构建和验证

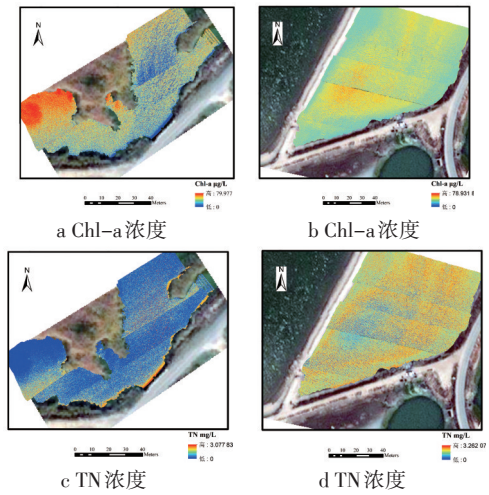
根据3.2小节的研究结果，筛选出2种水质参数与各光谱指数相关系数最高的最优波段，建立各水质参数与光谱指数之间的一次线性函数模型、指数函数模型，并选取其中相关系数最大的10个波段组合进行PLS回归建模。

将数据按照4∶1的比例分成训练集和测试集。通过上述分析，分别建立不同光谱指数同Chl-a和*TN*的反演模型。

模型建立结果显示，Chl-a的最优反演模型是基于NSI构建的指数模型，精度为$R^2=0.90$，RMSE=0.003 5 mg/L，相对于三波段的TBI模型，双波段的WCI和NSI模型更适合此地的Chl-a的反演任务，*TN*的最优反演模型是基于DSI构建的PLS模型，精度为$R^2=0.66$，RMSE=0.24 mg/L。预测值与实测值的数据对比结果反映出上述2模型能够较好地完成对水质参数的反演。

3.4　水质参数的高光谱图像反演

通过无人机搭载高光谱成像仪采集的研究区同期高光谱影像，利用最优的水质参数预测模型，反演影像中每个像元的水质参数，绘制Chl-a和*TN*浓度的空间分布图，结果如图4所示。反演结果显示水域Chl-a浓度基本呈现为西高东低的分布状态，西部近岸部分Chl-a浓度达到了70 ug/L。*TN*则呈现为靠近东面陆地的部分浓度高达到3 mg/L，其余部分浓度较低。水域西北部为芦苇地，水生植物较多，东南部靠近路面，水生植物较少，但受人类活动影响较大，可见其反演结果与实际较为符合。图4b中水域的Chl-a浓度分布为四周沿岸部分低，中间稍高为50 ug/L，*TN*浓度分布为相反的中间低，四周高为3 mg/L。整体来看图4b中水域的水质参数浓度分布变化幅度相较于图4a中水域更小。



a Chl-a浓度　b Chl-a浓度

c TN浓度　d TN浓度

图4　水质参数反演图

4　结　语

本文基于水质参数数据及无人机获取的辽河湿地高光谱影像，分析各光谱指数与水质参数的相关系数，提出了基于Chl-a和TN光谱指数，并构建Chl-a和*TN*定量反演模型。通过对研究区水体Chl-a和*TN*含量的空间分布特征进行分析，发现两处水域都呈现显著的变化，反演结果与实际情况较为吻合，验证了模型的反演精度。

然而本研究目前仅针对辽河湿地开展，后续研究将进一步考虑提高模型普适性及鲁棒性，提升其在不同水域环境下的泛化能力；同时考虑引入机器学习算法，更好拟合水体质量参数与光谱指数之间的复杂关系。水质参数的空间分布制图可以实现湿地水体质量的动态监测及预警，对湿地关键生态功能定量化、湿地生态系统功能维系、区域经济可持续发展等具有重要意义。

参考文献

[1] 陈超,虞瑶,陶旸,等. 基于国土调查数据的湿地资源更新方法探索[J]. 地理空间信息,2024,22(4):99-101

[2] 敦力民,尹海丹,马嵩. 基于哨兵2号时序影像的水华提取[J]. 地理空间信息,2024,22(1):44-48

[3] 张运林,施坤,张毅博,等. 陆基(地基、岸基)水环境遥感的提出、实践和初步应用[J]. 遥感学报,2021,25(11):2163-2172

[4] 郭荣幸,王超梁,陈济民,等. 基于Sentinel-2多光谱遥感影像的小浪底水质反演[J]. 人民黄河,2024,46(1):93-96

[5] 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

[6] 陈艳,刘绥华,王堃,等. 基于Landsat卫星影像的草海水质遥感反演及营养状态评价[J]. 水生态学杂志,2020,41(3):24-31

[7] 邓磊,毛智慧. 无人机载轻小型遥感器的林业应用进展研究[J]. 地理空间信息,2024,22(5):1-13

[8] 王俊岭. 无人机遥感在水环境管理中的应用[J]. 环境保护与循环经济,2023,43(11):80-83

[9] 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

[10] 黄宇,陈兴海,刘业林,等. 基于无人机高光谱成像技术的河

(下转第91页)