DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.02.006

黄河吴忠段水体叶绿素a与悬浮物质量浓度的光谱反演模型

韩 芬, 杨娅婷*, 马 严, 雪彦虎
(宁夏回族自治区遥感调查院,宁夏 银川 750021)

摘 要:针对黄河吴忠段水体光学特性复杂和现有模型适配性差的问题,采集了30组水体样品与同步光谱数据,对原始光谱分别进行自然对数变换和一阶微分变换以增强光谱特征。在此基础上,采用归一化差值光谱指数(NDSI)与波段比值指数筛选最优敏感波段组合,构建叶绿素a(Chl-a)与悬浮物(TSS)质量浓度的多元线性回归反演模型。结果表明,一阶微分变换结合NDSI的反演模型效果最优,Chl-a与TSS质量浓度反演模型的决定系数(R^2)分别达0.98和0.92,反演精度显著优于传统方法。该方法可有效提升高光谱信息利用率,为黄河吴忠段水体高精度、本地化水质遥感监测提供参考。

关键词:高光谱;叶绿素a;悬浮物;黄河吴忠段;一阶微分;归一化差值光谱指数(NDSI)
中图分类号:X832;TP79 **文献标志码:**A

黄河的生态环境脆弱性已成为长期关注的焦点,宁夏段作为中游绿色发展区的关键枢纽,其水质安全正面临多重压力叠加的严峻考验。农业退水携带的氮磷营养盐、工业与生活污水的持续排放,导致水体氨氮浓度攀升、富营养化趋势显现,对水生态系统的稳定与安全构成了严重威胁[1-2]。在此背景下,传统监测手段的结构性短板日渐突出:人工采样流程烦琐、监测成本高昂、周期漫长,精度与效率的矛盾日益凸显,难以满足大范围、高频次的动态监测需求,无法为精准治污提供及时有效的数据支撑。

叶绿素a(chlorophyll-a,Chl-a)与悬浮物(TSS)质量浓度是表征水体富营养化程度与浑浊状况的核心指标[3]。高光谱遥感技术的兴起与应用,为破解传统水体监测的困境提供了全新思路。该技术凭借较高的光谱分辨率,可在可见光-近红外波段精准捕捉水体组分的吸收与散射特征,目前已成功应用于白洋淀、太湖、巢湖、南四湖及闽江流域等不同类型水体中Chl-a与TSS质量浓度的定量反演[4-10],充分展现出在大范围水质动态监测中的应用潜力。

然而,技术的通用性与区域水体的特殊性之间往往存在张力。黄河吴忠段的水体系统具有极强的复杂性,并非光学特性稳定的单一水体,而是受上游来水、引黄灌溉、农业面源污染及河道泥沙等多重因素交织影响的动态系统,其时空异质性远高于普通清洁水体或低泥沙河流。具体而言,灌溉退水输入的营养盐与高质量浓度悬浮物形成非线性耦合关系,导致常规光谱指数频繁出现信号饱和与组分混淆的问题;同时,高质量浓度悬浮物引发的强烈泥沙散射效应,使得原始反射率曲线出现明显的基线漂移与非线性畸变,直接削弱了光谱信号与水质参数之间的相关性。已有研究表明,一阶微分处理方法可有效消除光谱基线漂移与背景噪声的干扰,突出光谱吸收峰与反射峰的细微变化,对Chl-a特征波段及TSS反射拐点具有较强的敏感性和分辨能力,既能强化光谱曲线中蕴含的水体光学参数特征及变化规律,又可降低实测光谱中因测量环境等外部因

收稿日期:2026-01-30
基金项目:宁夏重点研发计划项目(2021BEG03004;2023AAC03787)
作者简介:韩芬(1984—),女,工程师,主要从事遥感影像数据处理及应用研究(545793241@qq.com)。
* **通信作者:**杨娅婷(1987—),女,工程师,主要从事卫星遥感影像、无人机航空遥感数据处理与信息解译研究(635639962@qq.com)。
引用格式:韩芬,杨娅婷,马严,等.黄河吴忠段水体叶绿素a与悬浮物质量浓度的光谱反演模型[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(2):145-152.

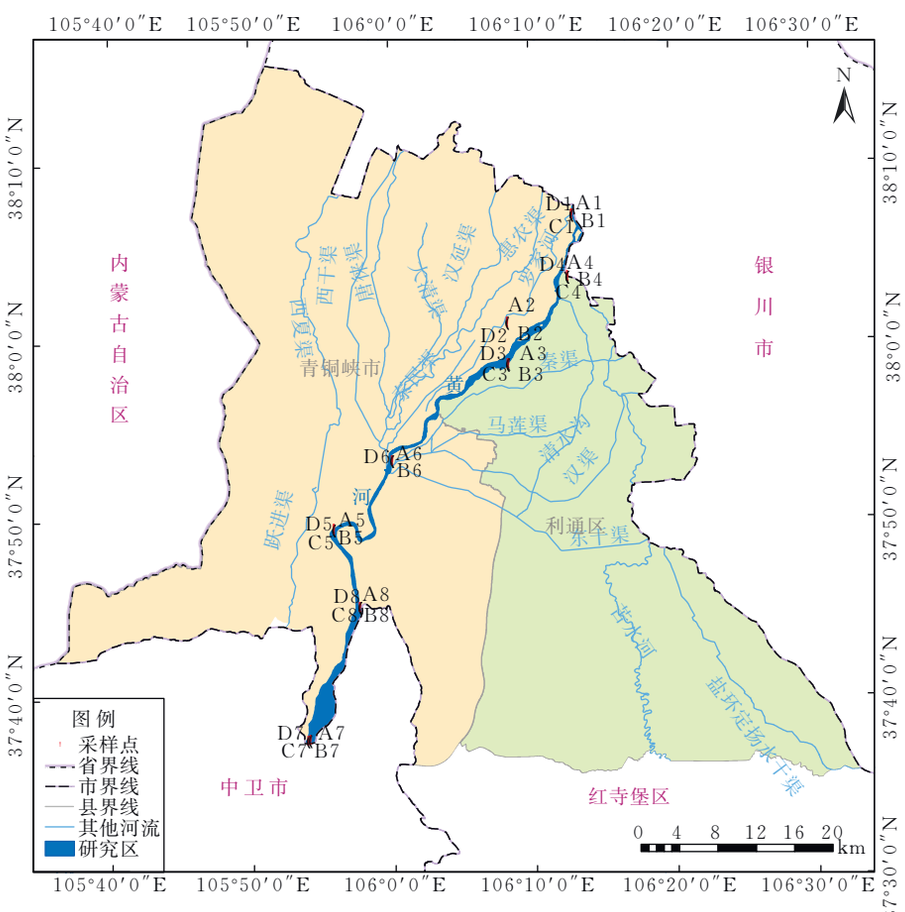
素引发的噪声误差,为复杂水体的光谱信息提纯提供了有力支撑[11-16]。

基于此,本文以黄河宁夏吴忠段为研究区,通过野外同步采集高光谱数据与水质参数,系统对比一阶微分变换与自然对数变换的光谱增强效果,进而构建波段比值指数与三波段归一化差值指数(NDSI)的线性回归反演模型。研究的核心目标是探索一种适配研究区本地化水体光学特性的水质反演路径,为该河段大范围同步水质监测及相关模型研究提供理论与实践参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

黄河宁夏吴忠段是黄河流经宁夏的重要河段,地理坐标为 105°42′E—106°36′E,37°28′N—38°47′N,全长约 69 km[17],流经青铜峡市与吴忠市利通区,是连接黄河中卫段与银川段的控制性河段。该河段河谷宽阔、河床稳定,地势南高北低,两岸局部分布低丘陵地貌。作为宁夏引黄灌区核心区之一,区域内分布了以西干渠、唐徕渠、惠农渠、秦渠等为骨干的灌溉系统和以清水沟、苦水河、罗家河等为主要入黄排水沟的排水体系,形成了完善的灌溉、排水水利网络[18-19]。水质监测显示,该河段干流长期稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅱ类(优)水平,入境与出境断面连续多年实现“Ⅱ类进、Ⅱ类出”,是黄河上游干旱区引黄灌区水质优良的典型代表[20]。其独特的地理区位、水资源利用模式及生态环境特征,能够较好地反映该区域共性特征,具备显著的典型性与科学研究价值。研究区及采样点见图 1。



注:底图来源于宁夏地理信息公共服务平台,审图号为宁S[2025]第013号。

图1 研究区及采样点位置图

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 数据采集

2022 年 4、6、8 月及 2023 年 4 月在研究区内共采集 30 组水体样品,并同步获取对应水体光谱数据。采样点位布设在罗家河、金南干沟、苦水河等入黄排水沟沟口,以及青铜峡景观水系人口密集区、黄河金沙湾断面国控监测点(以下简称金沙湾国控点)等区域(图 1、表 1)。采样期间天气晴朗,风力≤4级,水面平静,满足遥感地面同步观测要求。

水体样品采集时,采样船位于采样点下游方向,以避免船体搅动底部沉积物造成水样污染。采样前,先用采样水荡洗采样器与容量为 1 L 的水样瓶 2～3 次,并贴好标签。GPS 定位后,立即采集水面至水面以下 50 cm 水柱水样。为保障数据可靠性及与影像数据的可对比性,每个采样点位均平行采集 5 份水样,并注明采样时间、点位编号及周边环境信息。完成后,水样立即放入 0～6 ℃保温箱中避光保存,并于当日送至实验室进行理化参量化验,测定悬浮物与叶绿素 a 的质量浓度(表 1)。

同步光谱数据采集时,利用 SR-3500 便携式地物光谱仪,视场角(FOV)为 25°,光谱覆盖范围为 350～2 500 nm(350～1 000 nm 分辨率约为 3.5 nm)。标准板采用提前定标准确的反射率为

表 1　数据采集情况与水质参数化验结果

Tab. 1　Data collection conditions and laboratory test results of water quality parameters

序号	采集时间	采样点位置		采样点编号	采样点	ρ(TSS)/(mg·L^{-1})	ρ(Chl-a)/(μg·L^{-1})
		东经/(°)	北纬/(°)				
1	2022-04-01	106.211 706	38.123 425	A1	罗家河口	8	4
2	2022-04-01	106.134 025	38.023 086	A2	青铜峡景观水系	6	2
3	2022-04-01	106.134 533	37.983 753	A3	金南干沟入黄口	5	5
4	2022-04-01	106.206 247	38.065 314	A4	苦水河	106	51
5	2022-04-02	105.926 347	37.830 814	A5	金沙湾国控点	6	5
6	2022-04-02	105.996 250	37.894 658	A6	青铜峡大坝黄河口	5	12
7	2022-04-02	105.895 222	37.620 028	A7	南河子沟口	5	6
8	2022-04-02	105.956 569	37.757 789	A8	新田大横沟沟口	4	9
9	2022-06-15	106.211 706	38.123 425	B1	罗家河口	18	3
10	2022-06-15	106.134 025	38.023 086	B2	青铜峡景观水系	12	3
11	2022-06-15	106.134 533	37.983 753	B3	金南干沟入黄口	34	4
12	2022-06-15	106.206 247	38.065 314	B4	苦水河	28	7
13	2022-06-16	105.926 347	37.830 814	B5	金沙湾国控点	18	4
14	2022-06-16	105.996 250	37.894 658	B6	青铜峡大坝黄河口	16	6
15	2022-06-16	105.895 222	37.620 028	B7	南河子沟口	20	4
16	2022-06-16	105.956 569	37.757 789	B8	新田大横沟沟口	14	7
17	2022-08-30	106.211 980	38.123 470	C1	罗家河口	362	2
18	2022-08-30	106.135 220	37.984 730	C3	金南干沟入黄口	802	3
19	2022-08-30	106.205 890	38.065 690	C4	苦水河	300	4
20	2022-08-30	105.926 410	37.830 700	C5	金沙湾国控点	1 020	3
21	2022-08-30	105.897 930	37.620 100	C7	南河子沟口	168	3
22	2022-08-30	105.956 590	37.757 370	C8	新田大横沟沟口	422	2
23	2023-04-06	106.212 000	38.123 290	D1	罗家河口	6	2
24	2023-04-06	106.134 280	38.022 630	D2	青铜峡景观水系	8	3
25	2023-04-06	106.134 340	37.984 140	D3	金南干沟入黄口	6	2
26	2023-04-06	106.205 850	38.065 700	D4	苦水河	45	4
27	2023-04-07	105.926 400	37.830 760	D5	金沙湾国控点	6	3
28	2023-04-07	105.995 490	37.894 960	D6	青铜峡大坝黄河口	10	3
29	2023-04-07	105.897 820	37.620 400	D7	南河子沟口	28	2
30	2023-04-07	105.956 100	37.757 910	D8	新田大横沟沟口	8	4

20% 的灰板,每次测量严格按照灰板—水体—天空光的顺序依次快速进行[21]。观测几何设定为天顶角 40°、方位角 135°,以规避太阳直射反射及船体阴影;每个站点重复观测大于等于 5 条光谱,测量时长跨越一个波浪周期,以修正平台摇摆误差。

2 研究方法

2.1 技术路线

本研究以数据获取—预处理—特征增强—模型构建—精度验证为主线开展研究工作,具体流程如下:首先,收集地面实测光谱数据与对应水体样本的实验室水质化验数据,并完成数据的整合与规范化处理。其次,针对原始光谱数据中存在的噪声及无效信息,进行异常波段剔除与 Savitzky-Golay(S-G)滤波平滑去噪预处理,以提升光谱数据的可靠性。在此基础上,先后采用自然对数变换与一阶微分变换两种方法,增强光谱特征信息的辨识度,同时开展 TSS、Chl-a 两类水质参数与各光谱波段间的相关性分析。随后,基于相关性分析结果,利用波段比值指数与三波段归一化差值指数,构建水质参数的线性回归反演模型。最后,选取独立验证集对模型进行精度检验,从决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)等方面,综合评价模型的反演精度与稳定性,最终确定最优水质参数反演模型。水质参数反演模型构建流程见图 2。

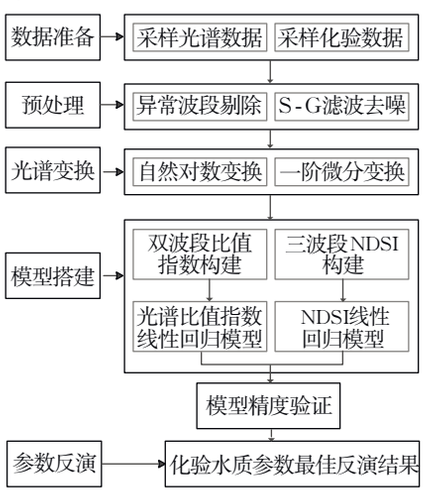


图2 水质参数反演模型构建流程图

Fig. 2 Flowchart of water quality parameter inversion modeling

2.2 异常光谱处理

光谱数据采集过程中,受外界环境干扰与传感器自身噪声的共同作用,原始光谱在首尾波段通常表现出较高的噪声水平,光谱曲线易产生无规律的异常波动,直接影响数据质量与后续反演分析的准确性。为此,本研究对实测光谱开展了波段剔除与滤波去噪预处理。在波段剔除阶段,通过保留有效光谱区间,最终选用 399.3~901.6 nm 范围内共计 370 个波段用于后续分析;采用 S-G 滤波算法进行去噪处理,设置窗口大小为 9、多项式阶数为 3,以实现对光谱曲线随机噪声的有效抑制,提升光谱数据的平滑性与稳定性[21-22]。

2.3 反射率计算

目前,对Ⅱ类水体的光谱测量主要采用水表面以上测量法。该方法使用与陆地光谱测量近似的仪器,通过设定测量几何与观测时间获取主要观测量[23],然后,按式(1)计算光谱反射率。即

$$R_{rs}=(DN_{sw}-rDN_{sky})\rho_p/\pi DN_p, \tag{1}$$

式中:R_{rs} 为光谱反射率;DN_{sw}、DN_{sky}、DN_p 分别为光谱仪面向水体、天空和标准板时实测的数字量化值(DN)的平均值;根据经验值,气-水界面表面反射率 r 取 0.022;ρ_p 为标准灰板反射率。

2.4 光谱变换

光谱数据中往往包含大量噪声与冗余信息,这些无效信息易掩盖光谱的细微变化特征,进而降低模型对光谱特征的辨识度与提取效果。为强化有效光谱信息、凸显隐含的细微特征,并削弱无效信息的干扰,本研究选取自然对数变换与一阶微分变换两种方法,对预处理后的光谱数据作进一步优化处理。其中,自然对数变换可有效压缩光谱数值的动态区间,使数据分布趋于均匀,进而提升数据的稳定性和可解释性;一阶微分变换则能放大光谱曲线的梯度变化,增强细微特征的辨识度,有利于挖掘光谱中潜藏的有效信息。自然对数变换的计算公式为

$$R_{ef}=\ln(R_d)。 \tag{2}$$

式中:R_{ef} 为经自然对数变换后的光谱值;R_d 为原始光谱数据。

一阶微分变换的公式为

$$f'(x_l)=\lim_{h\to 0}\frac{f(x_l+h)-f(x_l-h)}{2h}, \tag{3}$$

式中:$f'(x_l)$ 为在波段 l 处的光谱一阶微分值;$f(x_l)$ 为原始光谱在波段 l 处的反射率值,$l\in[2,3,\cdots,L-1]$,L 为波长数量;h 取值 0.1。

2.5 相关性分析

采用 Pearson 相关性分析法,依次针对原始光谱、自然对数变换光谱及一阶微分变换光谱,系统解析 TSS 与 Chl-a 两类水质参数同各光谱波段间的相关特征[24],结果呈现显著差异。

原始光谱条件下,TSS 的质量浓度相关性系数

在可见光至近红外波段整体呈上升趋势,其中,可见光区域多表现为中等程度正相关,近红外区域则呈现强正相关;与之相比,Chl-a 的质量浓度在各光谱通道的相关性波动更为剧烈,正、负相关交替出现的特征十分突出。总体来看,原始光谱与 TSS 的质量浓度的相关程度普遍高于 Chl-a 的质量浓度,其最大相关系数超过 0.8,体现出较强的线性相关关系。

经自然对数变换处理后,光谱数据与 TSS 的质量浓度在各波段均保持正相关,且相关性系数波动幅度明显减小,稳定性显著提升;而 Chl-a 的质量浓度与光谱数据在各波段的相关关系仍存在正、负交替出现的现象,数值波动较大,相关系数普遍低于 0.7。由此可见,对数变换可有效强化光谱与 TSS 质量浓度的高相关性,而与 Chl-a 质量浓度之间仅表现出中等程度相关。

经一阶微分变换后,各波段光谱与 TSS、Chl-a 的相关信息均得到显著增强,表明该变换方法能够有效突出水体光谱中与两类水质参数相关的特征信息。与此同时,不同谱段与两种水质参数的相关系数同样呈现正负交替分布,可为后续优选波段、构建组合反演模型提供更为丰富的依据。

3　模型构建方法

3.1　基于光谱比值指数的线性回归算法

借鉴植被光谱比值特征指数的构建思路,对预处理后的光谱数据进行两两波段比值运算(B_1/B_2),生成与各样本对应的光谱比值指数矩阵。分别对原始光谱、经自然对数变换及一阶微分处理后的光谱依次开展上述比值指数构建操作,通过数据融合生成三维光谱立方体。随后,将该三维光谱立方体分别与 TSS 质量浓度、Chl-a 质量浓度数据进行相关性分析,筛选出与两类水质参数相关性最优的比值指数组合。最终,以筛选得到的敏感比值指数为基础,构建线性回归反演模型,实现对 TSS 与 Chl-a 两类水质参数的定量反演。

3.2　基于光谱归一化差值指数的线性回归算法

参照植被光谱归一化差值特征指数的构建方式,对处理后的各样本光谱数据进行逐波段遍历运算,构建基于三波段的优化归一化差值指数,进而生成各样本光谱的归一化差值指数矩阵。其中,归一化差值指数(NDSI)的计算公式为

$$\mathrm{NDSI}_{(i,j,z)}=\frac{R_i-R_j}{R_z+R_j}\left(i\neq j\neq z\right)。\tag{4}$$

式中:R_i、R_j、R_z 分别代表第 i、j、z 波段水面实测反射率;i、j、z 取值范围为 400～900 nm。基于上述构建的归一化差值指数,用其分别与 TSS 质量浓度、Chl-a 质量浓度数据开展相关性分析,筛选出相关性最优的波段组合,进行归一化处理,并结合线性回归方法完成反演模型的构建。

3.3　精度验证

为验证模型精度,获取最优水质参数反演模型,使用决定系数(R^2)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)对模型整体的预测能力和稳定性进行评估,计算公式[25-26]分别为

$$R^2=\frac{\sum(y_\mathrm{p}-\bar{y}_\mathrm{t})^2}{\sum(y_\mathrm{t}-\bar{y}_\mathrm{t})^2},\tag{5}$$

$$\mathrm{MRE}=\frac{1}{n}\sum\frac{|y_\mathrm{p}-y_\mathrm{t}|}{y_\mathrm{t}},\tag{6}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum(y_\mathrm{p}-y_\mathrm{t})^2}{n}}。\tag{7}$$

式中:y_p 代表因变量在模型中的预测值;y_t 代表因变量的实际化验值;$\bar{y}_t$ 表示因变量的实际化验值均值;n 表示样本数量。

4　水质参数反演结果

为验证基于自然对数变换与一阶微分处理所构建的水质参数反演模型及其估算指数的代表性与泛化能力,本研究采用留一法交叉验证(leave-one-out cross validation, LOOCV)评估模型性能,以对比不同光谱变换策略对 TSS 质量浓度和 Chl-a 质量浓度预测精度的影响。实验共采集两种参数的同步实测样本各 30 组。验证流程如下:依次从 30 组样本中抽取 1 组作为独立测试集,其余 29 组作为训练集用于模型构建;该抽样过程循环迭代 30 次,确保每组样本均作为测试集完成一次验证。最终,基于全部验证结果计算 R^2、MRE 和 RMSE 3 项统计指标,综合评价模型的预测精度与稳定性,结果如表 2 所示。

由表 2 的评价结果可知,Chl-a 质量浓度反演模型中,原始光谱、自然对数变换及一阶微分变换 3 种策略下,归一化差值指数的 R^2 均显著优于原始光谱和比值指数。其中,经一阶微分处理的 NDSI 的拟合度最优,自然对数变换次之,原始光谱最低。说明 NDSI 在预测效能与拟合精度方面均优于比值指数,且经一阶微分处理后的光谱信息对 Chl-a 质量浓度具有更高的反演精度与最优的拟合表现。与此同时,上述 3 种变换形式下 NDSI 的 MRE 与 RMSE 均低于比值指数,进一步证明了一阶微分变

表 2 叶绿素 a、悬浮物质量浓度的统计回归模型及精度评估结果

Tab. 2 Statistical regression models and accuracy assessments for Chl-a and TSS concentrations

指 标	光谱变换	指 数	计算公式	|R|	R^2	MRE	RMSE	留一法交叉验证		
								R^2	MRE	RMSE
叶绿素 a	原始光谱	归一化差值	116.06x—6.24	0.93	0.85	0.67	3.88	0.85	0.79	5.94
		比 值	139.95x—145.59	0.92	0.84	0.72	4.05	0.84	0.85	5.96
	自然对数	归一化差值	773.70x—10.87	0.95	0.89	0.64	3.37	0.89	0.75	5.24
		比 值	498.03x—506.34	0.93	0.84	0.75	3.98	0.84	0.87	6.09
	一阶微分	归一化差值	82.75x+3.27	0.99	0.98	0.26	1.59	0.98	0.28	1.52
		比 值	—14.80x—6.68	0.98	0.96	0.35	2.16	0.96	0.39	2.41
悬浮物	原始光谱	归一化差值	13 288.40x+260.22	0.93	0.85	4.55	119.54	0.85	4.78	92.18
		比 值	630.86x—61.09	0.92	0.82	3.15	127.80	0.82	3.31	81.18
	自然对数	归一化差值	15 814.71x+338.73	0.92	0.81	4.62	131.45	0.81	4.85	98.67
		比 值	7 774.49x—7 468.07	0.91	0.80	4.81	134.44	0.80	5.05	103.54
	一阶微分	归一化差值	816.11x+804.41	0.96	0.92	2.96	87.96	0.92	3.16	62.13
		比 值	1 086.16x—26.18	0.95	0.90	2.63	98.52	0.90	2.77	75.50

换的 NDSI 的预测值与实测值偏差最小,模型输出具有最佳的稳定性。各采样点位存在水质差异,青铜峡景观水系、罗家河口及金沙湾国控点等采样点位的 Chl-a 与悬浮物质量浓度低且波动平缓,这为模型提供了稳定的拟合基础,有效保障了低质量浓度区间的反演精度;而苦水河及青铜峡大坝采样点位的 Chl-a 与悬浮物质量浓度波动大且存在异常高值,致使模型残差显著增大。

针对 TSS 质量浓度的反演,经一阶微分处理的 NDSI 表现最优。相比之下,原始光谱和经自然对数变换的 NDSI 的 R^2 值偏低,而 MRE 和 RMSE 值偏高,尤其是 RMSE 值分别高达 119.54 和 131.45,说明预测精度与稳定性较差。该现象主要归因于金沙湾国控点、金南干沟入黄口及罗家河口等点位在 8 月出现了 TSS 质量浓度达数百 mg/L 乃至超 1 000 mg/L 的极端异常高值。反观一阶微分变换,其能有效抑制高质量浓度极值引发的扰动,既适用于支流、沟口等波动剧烈点位,亦能兼容干流及景观水系等平稳水体,从而显著增强了模型的泛化能力与稳定性。

从留一法交叉验证的结果可知(表 2),Chl-a 与 TSS 质量浓度的反演均以经一阶微分处理的 NDSI 的表现最为优异,呈现较高的预测稳定性和准确性。针对 Chl-a 质量浓度的反演,经自然对数变换的 NDSI 的表现次优,其 R^2、MRE 及 RMSE 3 项指标均优于对应的原始光谱验证值;而 TSS 质量浓度的反演中,原始光谱的比值指数结果优于自然对数变换的结果。

综上所述,在 Chl-a 与 TSS 质量浓度的反演中,经一阶微分处理后的 NDSI 均展现出最优反演效果;经自然对数变换后的 NDSI 在 Chl-a 质量浓度反演中表现次之;原始光谱比值在 TSS 质量浓度反演中表现最次。上述结果表明,一阶微分处理可有效增强光谱信息中的有效信息,显著提升水质参数遥感反演的精度与可靠性。

5 结论与讨论

5.1 结论

本研究通过系统对比不同光谱预处理方法与特征指数在黄河吴忠段水质反演中的效果,得出以下 2 点主要结论。

(1)一阶微分变换能有效增强水体光谱中与 Chl-a 和 TSS 质量浓度相关的细微特征,显著提升光谱数据与水质参数之间的相关性。

(2)基于一阶微分变换的 NDSI 模型在 Chl-a 和 TSS 质量浓度反演中均表现出最优性能,相较于传统比值指数更适用于本地化建模。

5.2 讨论

本研究基于一阶微分和自然对数变换,分别构建了 Chl-a 与 TSS 质量浓度的波段比值指数和三波段 NDSI 的线性回归反演模型。经对比分析可知,一阶微分结合 NDSI 模型的可靠性与稳定性更优,其主要原因在于:一阶微分变换的“去噪提纯”与 NDSI 的“敏感信息强化”可形成协同效应,既能有

效增强水质参数与光谱信号的线性关联度,又能弥补单一 NDSI 在复杂噪声环境下的局限性。

此外,现有水质遥感反演模型多基于低浊度、寡营养水体构建,适配清洁湖库与少沙河流,难以适配黄河流域水体。传统单波段、波段比值模型精度低,难以应对黄河复杂水体光学特征;纯解析模型参数设定与实际水体光学特性不符,外推性差;半解析模型对实测数据与拟合条件要求严苛,难以大范围应用。加之黄河水体含沙量高、浑浊度大、光谱衰减快,直接套用外来模型易产生系统性误差[27-30]。因此,结合研究区实测高光谱数据与同步水质化验数据,融合区域特有的水文光学特征,构建具有区域针对性的本地化反演模型是有效提高反演精度、保障监测结果准确可靠的关键路径。

本研究受限于实地采样的时空条件约束,难以实现大范围、长时序水体样本的系统性获取。后续研究可从以下方面深化:一是融合卫星遥感与无人机平台,构建多源数据协同的水质监测体系,实现大范围、高频次水质动态监测;二是通过多季节、多区域采样,进一步验证与优化模型的区域普适性与季节稳健性。同时,未来可充分结合研究区水文与光学特征,引入机器学习算法,集成多波段光谱、微分光谱与 NDSI 等多维特征变量,提升模型对复杂非线性关系的拟合能力;通过扩充实测样本数量与空间覆盖度,分季节、分灌溉周期构建差异化反演模型,以适应不同时期水体组分的动态变化,增强模型的时序稳定性与业务化应用能力,为黄河吴忠段水质大范围、高精度动态监测提供可靠技术支撑。

参考文献:

[1] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 1-6.

[2] 韩宇平, 刘沛衡, 王如厂, 等. 黄河宁夏段水生态环境保护与治理策略初探[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2021, 37(3): 1-6.

[3] 吴召仕, 张路, 刘宝贵, 等. 鄱阳湖丰水期水体中叶绿素a含量空间分布及其与环境因子的关系[J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 286-292.

[4] 周华冕, 徐慧, 龙良红, 等. 基于香溪河中游水体总磷总氮高光谱估算模型比较[J]. 中国农村水利水电, 2024(11): 125-132.

[5] 张圣昊, 赵起超, 韩宝辉, 等. 基于实测光谱的白洋淀叶绿素a浓度反演[J]. 大气与环境光学学报, 2024, 19(4): 468-478.

[6] 马荣华, 戴锦芳. 结合Landsat ETM与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 97-103.

[7] 吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟MERIS数据的太湖悬浮物遥感定量模型[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 104-109.

[8] 仲苏珂, 吕恒, 杨子谦, 等. Sentinel-3 OLCI数据的内陆湖泊有机悬浮物浓度遥感估算[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 155-167.

[9] 安如, 刘影影, 曲春梅, 等. NDCI法Ⅱ类水体叶绿素a浓度高光谱遥感数据估算[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 437-444.

[10] 田建林, 邓孺孺, 秦雁, 等. 基于遥感反演的珠江三角洲水体污染源目视解译实证研究[J]. 经济地理, 2018, 38(8): 172-178.

[11] Salam R, Towfiqul Islam A R M, Shill B K, et al. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111604.

[12] 李祥, 刘帅, 陈发明, 等. 基于SSA-XGBoost算法的水质叶绿素a遥感高光谱反演[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(12): 169-176.

[13] 赵程铭, 董晓华, 李中华, 等. 基于神经网络的黄柏河东支流域水质遥感估算[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(6): 195-202.

[14] 许颖. 章江下游水质高光谱遥感监测研究[D]. 赣州: 赣南师范大学, 2022.

[15] 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(6): 923-935.

[16] 钱家炜. 山仔水库叶绿素a高光谱反演模型构建研究[J]. 海峡科学, 2025(6): 85-88.

[17] 杨家文. 黄河吴忠段水生态环境协同治理研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.

[18] 祁萍. 黄河宁夏段与沙湖水质评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.

[19] 宁夏回族自治区水利厅. 2024年宁夏水资源公报[R/OL]. 2025-07-25. https://slt.nx.gov.cn/xxgk_281/fdzdgknr/gbxx/szygb/202507/t20250725_4971216.html.

[20] 宁夏回族自治区生态环境厅. 2024年宁夏生态环境状况公报[R/OL]. 2025-05-29. https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202505/t20250529_4920938.html.

[21] 刘佩霞, 王军邦, 王猛, 等. 2000—2018年三江源区归一化差植被指数数据集[J]. 中国科学数据, 2023, 8(2): 213-222.

[22] 朱慧, 李玉华, 李位见, 等. 基于多源遥感数据的重庆地区6种主要非粮作物物候影像特征分析[J]. 四川农业科技, 2024(11): 16-22.

[23] 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，2004，8(1)：37-44.
[24] 张宇. 基于珠海一号高光谱卫星的贵州草海三种水质参数反演研究[D]. 贵阳：贵州大学，2023.
[25] 吴奇，宫福征，白伟桦，等. 太子河干流总氮与氨氮水质参数反演及时空变化研究[J]. 生态与农村环境学报，2024，40(8)：1017-1028.
[26] 钱进，李澜，姚敏，等. 基于Landsat-8卫星遥感反演内陆河湖水质参数[J]. 江苏水利，2023(2)：34-39.
[27] 肖潇，徐坚，赵登忠，等. 基于高光谱数据的汉江中下游典型河段水体悬浮物遥感反演[J]. 长江科学院院报，2020，37(11)：141-148.
[28] 蔡世荣. 珠江口悬浮泥沙的季节变化定量遥感监测和趋势分析[D]. 广州：广州大学，2024.
[29] 任江华. 高浑浊水体叶绿素a浓度遥感反演模型研究[D]. 东营：中国石油大学(华东)，2023.
[30] 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.

Spectral Inversion Model of Chlorophyll-a and Suspended Solids Concentration in the Wuzhong Section of the Yellow River

HAN Fen, *YANG Yating**, *MA Yan*, *XUE Yanhu*
(Ningxia Hui Autonomous Region Remote Sensing Survey Institute, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In response to the complex optical characteristics of water bodies in the Wuzhong section of the Yellow River and the poor adaptability of existing models, 30 sets of water samples and synchronous spectral data were collected. The original spectra were subjected to natural logarithm transformation and first-order differential transformation to enhance spectral features. The optimal sensitive band combinations were then selected using the normalized difference spectral index (NDSI) and band ratio indices to construct a multiple linear regression inversion model for chlorophyll-a (Chl-a) and total suspended solids (TSS) concentrations. The results demonstrate that the inversion model combining first-order differential transformation and NDSI yields the best performance, achieving R^2 values of 0.98 and 0.92 for Chl-a and TSS, respectively, significantly outperforming traditional methods. This approach effectively improves the utilization of hyperspectral information and provides a reference for high-precision, localized remote sensing monitoring of water quality in the Wuzhong section of the Yellow River.

Keywords: hyperspectral; chlorophyll-a; suspended solids; Wuzhong Section of the Yellow River; first-order differential; normalized difference spectral index (NDSI)

(责任编辑 李 琼)