

基于 CDOM 吸收特性的东北地区水库 DOC 浓度遥感估算^{*}

赖锋发¹, 杨倩¹, 宋开山^{2**}, 尚盈辛²

(1: 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130018)

(2: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 有色溶解性有机物(CDOM)广泛存在于水体中, 占溶解有机碳(DOC)10%~90%, 其浓度影响水环境碳循环过程、污染物质迁移以及水生生物群落的结构和功能。为分析东北地区水库DOC碳循环情况, 本文于2015—2020年对第二松花江流域典型水库白山水库和丰满水库进行5次现场观测和室内实验, 在分析CDOM吸收特性的基础上, 基于Landsat系列卫星利用波段比值法建立CDOM浓度反演模型($R^2=0.82$), 根据实测值CDOM与DOC的强相关性($R^2=0.78$), 进而估算水库DOC浓度。结果表明: ①利用野外实测数据和Landsat系列卫星能够对东北内陆水库CDOM浓度进行良好反演, ②2000—2020年白山水库和丰满水库年际CDOM和DOC浓度变化不大, 在2010年之后表现出轻微上升趋势, CDOM浓度从支流和干流的汇入到主库区呈现逐渐减少趋势, ③白山水库和丰满水库M值(CDOM在250和365 nm处吸收系数比值)和 $S_{275-295}$ (CDOM在275~295 nm波段处的吸收光谱的斜率)较小、 $SUVA_{254}$ (CDOM在波长254 nm处的吸收系数与DOC浓度的比值)较大, 表明其CDOM组分中腐殖质含量较高, 倾向于陆源大分子, ④利用多元回归分析方法分析水库CDOM变化主要受到降水、化肥施用量和污水排放量的影响。综上, 本研究丰富了对东北典型水库CDOM浓度变化的认识, 为构建东北地区水库CDOM反演模型和DOC储量估算提供了数据基础。

关键词: 有色溶解有机物(CDOM); 溶解有机碳(DOC); Landsat; 水库; 遥感反演; 丰满水库; 白山水库

Remote sensing estimation of DOC concentration of reservoirs in Northeast China based on CDOM absorption^{*}

Lai Fengfa¹, Yang Qian¹, Song Kaishan^{2**} & Shang Yingxin²

(1: School of Geomatics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130018, P.R.China)

(2: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, P.R.China)

Abstract: Colored dissolved organic matter (CDOM) widely exists in water, accounting for 10%–90% of dissolved organic carbon (DOC). In order to analyze the distributions of DOC concentrations in the reservoirs in the northeastern China, five field campaigns were carried out in Baishan Reservoir and Fengman Reservoir in the Songhua River Basin from 2015 to 2020. Based on the analysis of the absorption characteristics of CDOM coefficient (355 nm), the remote sensing inversion model of CDOM absorption coefficient at 355nm ($R^2=0.82$) is established by band ratio method based on Landsat series satellites and the DOC concentrations of the reservoirs are estimated according to the strong correlations between CDOM and DOC. The results show that: The CDOM concentrations of inland reservoirs in the northeastern China can be well retrieved by using the in-situ sampling data and Landsat data-sets; The annual spatial-temporal distributions of CDOM and DOC concentrations in the Baishan Reservoir and the Fengman Reservoir from 2000 to 2020 are with low fluctuations, and the concentration of CDOM and DOC appeared an upward trend after 2010. The Baishan Reservoir and the Fengman Reservoir have lower M values (the ratio of absorption coefficient of CDOM at 250 nm and 365 nm) and $S_{275-295}$ (the slope of the absorption spectrum of CDOM at the 275–295 nm), and higher $SUVA_{254}$ (the ratio of CDOM absorption coefficient at 254 nm to DOC concentration), indicating that the humic contents in the CDOM compositions are higher, and tend to be consisted of terrigenous macromolecules. Using multiple regression analysis method to analyze the annual driving fac-

* 2022-02-18 收稿; 2022-06-12 收修改稿。

吉林省博士后择优资助重点项目、吉林省自然科学基金自由探索一般项目(YDZJ202201ZYTS473)和中国博士后科学基金特别资助项目(2021T140662)联合资助。

** 通信作者; E-mail: songkaishan@iga.cn。

tors of CDOM distributions of the reservoirs is mainly affected by rainfalls, fertilizer applications and sewage discharges. Finally, this study enriches the understanding of the variations of CDOM concentrations in typical reservoirs in the northeastern China and provides a reference for the construction of DOC inversion models and contributes to the accuracy estimation of DOC concentrations.

Keywords: Colored dissolved organic matter (CDOM); dissolved organic carbon (DOC); Landsat; reservoir; remote sensing inversion; Fengman Reservoir; Baishan Reservoir

有色溶解性有机物(CDOM)又称黄色物质,是溶解性有机质(DOM)中有色的部分,占溶解有机碳(DOC)的10%~90%^[1],CDOM是水体中主要的吸光物质,其光学特性比较单一,在水中主要表现为吸收特性,其散射可以忽略不计。CDOM从紫外到蓝波段的吸收非常强烈,在阻止紫外线对水生生态系统不利影响的同时,还改变着水下光强的分布,影响水生生物群落的结构和功能^[2]。此外CDOM组成成分复杂,主要由富里酸、腐殖质、芳烃聚合物等物质组成,通过陆源和内源两个途径输入到水体中,陆源通常是陆生植被降解后形成的腐殖质,内源通常由水体中藻类和水生植被降解所形成^[3]。CDOM的来源、性质以及空间分布在不同水体中存在着显著差异,CDOM光谱吸收特性能有效表征其物质组成和来源^[4-6],并在一定程度上指示水体的污染状况。

DOC是内陆水体最主要的碳组分之一,也是DOM的主要成分,在水环境生态系统中扮演着多种角色,对全球碳循环过程及气候变化都具有至关重要的作用^[2]。正确认识河流溶解有机碳的行为特征,了解内陆水体中有机碳的储量和规律,对区域碳循环和碳估算具有重要意义。近年来,自然水体中的CDOM已成为研究热点,国内外学者在大洋I类水体^[7]、河口近岸水体^[8]以及内陆自然水体^[9]中均发现CDOM与DOC有良好的关系,并利用MODIS、SeaWiFS和Landsat系列卫星构建了CDOM吸收系数与遥感反射率反演模型,根据DOC与CDOM吸收的关系完成对内陆水体DOC浓度进行估算。

水库作为极其重要的II类水体具有复杂的光学特性,其中CDOM的浓度和组成差异直接导致了水库之间水下光场性质和结构的差异性,对于整个内陆水体碳循环系统具有重要贡献。目前我国内陆水体CDOM和DOC的相关研究在南方地区典型湖库已相当系统,东北地区水库CDOM光学特性的研究近年来也在不断深入。以往研究表明东北地区内陆水体的DOC浓度普遍高于南方地区内陆水体,在我国内陆水体碳循环作用中占有重要位置^[10]。随着东北老工业基地城市的快速发展,大量人类污染物和氮磷营养盐排入水库导致水体生态系统结构和功能发生变化,因此东北地区水库CDOM的光学特性研究亟待解决。利用CDOM作为水体生态环境指示因子、水体碳循环示踪物对表征水库水生生态系统有着重要的作用,这对于构建东北地区水库水质参数反演监测理论模型以及水资源管理具有重要的国家战略意义。本研究以位于松花江上的东北地区三大水库中的丰满水库和白山水库为研究对象,其水系一脉相承,两水库区域内具有显著人类活动及地表径流输入特征。通过解析两个水库的CDOM吸收与DOC浓度特征,利用Landsat系列遥感数据进行两水库的CDOM年际时空反演研究,结合CDOM吸收特征与DOC浓度的相关性,对水库DOC浓度进行时空演变分析,并解析DOC浓度变化的驱动因素,以期进一步揭示CDOM在东北地区内陆水库型湖泊中的光学特性变化,为水质参数反演监测提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

白山水库和丰满水库位于吉林省东南部地区,是松花江南源上建立的2个梯级水库。其水系一脉相承,是东北地区排名前三的大型水库,年内气温变化较大,封冻期长,降水量由东南山区向西北平原递减,来水相对集中在春季和夏季两个汛期。白山水库位于吉林省桦甸与靖宇两县交界处,于1992年正式完工,全河段位于长白山山脉中,层峦迭嶂,河谷狭长弯曲,水深能达80 m以上。丰满水库位于吉林省东部,是1937年丰满水电站建成后形成的人工湖泊,平均水深30~40 m,水库总库容107.8亿m³,库区水量丰富,落差集中,以发电防洪为主,兼具旅游开发功能,流域内森林覆盖率由东南向西北呈递减趋势,林区随着海拔的降低转变为适宜耕种的农田。

1.2 野外采样

本研究于2015年5月、2018年10月、2019年6月对白山水库采样,2015年8月、2018年10月、2020年

10月对丰满水库采样,采集丰满水库33个表层水样,白山水库76个表层水样,5次共采集109个有效采样点(图1)。现场利用YSI多参数水质仪(YSI EXO2)测定温度、pH、溶解氧DO、盐度、浊度、叶绿素等。在每个采样点用手持式GPS定位仪记录样点的位置和海拔高度。水样采集水面表层以下约0.2 m的水体,使用预清洁的PET塑料瓶收集约3 L水样,当天使用混合纤维滤膜(孔径0.45 μm)过滤水样,将初步过滤的水样放入车载冰箱冷冻保存,带回实验室进行测试。

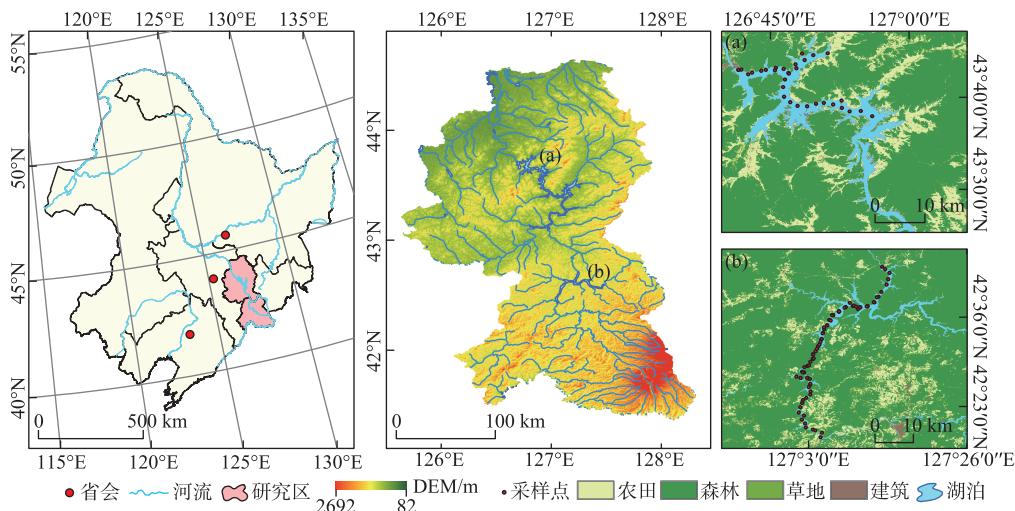


图1 研究区采样点分布(a:丰满水库;b:白山水库)

Fig.1 Samplingsites distribution of study area (a: Fengman Reservoir, b: Baishan Reservoir)

1.3 实验室 DOC 及 CDOM 参数测定及计算

DOC浓度是由初步过滤水样通过岛津总有机碳分析仪(TOC-VCPN)测试得出,CDOM吸收系数的测试是将初步过滤水样使用聚碳酸酯膜(Whatman 0.2 μm)再次过滤得到用于CDOM测试的水样,以超纯水作为参照,利用岛津紫外-可见光分光光度计(UV-6200)测量CDOM滤液在200~800 nm处的吸光度,利用公式1得到CDOM的吸收系数:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = 2.303A(\lambda)/L \quad (1)$$

式中, $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 表示 CDOM 的吸收系数(m^{-1}), L 为光路路径 1 cm, 本文 CDOM 浓度使用 355 nm 处吸收系数来表示。

$SUVA_{254}$ (比紫外吸光度)表示CDOM在波长254 nm处的吸收系数与DOC浓度的比值,用来表征单位DOC浓度的CDOM对光的吸收能力,其大小反映水体中有机质的芳香性和腐殖化程度, $SUVA_{254}$ 越高其芳香性和腐殖化程度越高^[11]。

M 值表示 $a_{\text{CDOM}}(250)/a_{\text{CDOM}}(365)$ 的比值,用来表征CDOM分子量的大小, M 值与CDOM相对分子质量的大小呈反比, M 值越大CDOM分子量越小,腐殖酸的比例越低^[12]。

CDOM吸收光谱特性通常用公式(2)表示,采用最小二乘法对275~400 nm之间波段进行非线性拟合得到不同光谱斜率值。光谱斜率 $S_{275-295}$ 表示CDOM在275~295 nm波段处吸收光谱的斜率, $S_{350-400}$ 表示CDOM在350~400 nm波段吸收光谱的斜率, SR 表示光谱斜率比,为 $S_{275-295}/S_{350-400}$ (λ_0 为440 nm):

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) \exp [S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

吸收光谱斜率 S 值的大小与DOC的来源和组成有关,当DOC以陆源即流域内土壤腐殖质淋溶析出为主时 S 值偏小,当DOC以内源即水体中生物自身分解为主时 S 值偏大。 $S_{275-295}$ 能表征富里酸和腐殖酸的比例差异,斜率 S 越高表明其富里酸含量越高,斜率 S 越低表明腐殖质含量越高^[12]。

1.4 遥感影像获取与模型构建

由于白山水库和丰满水库较长河段都在山谷中蜿蜒,水面宽度大多不超过500 m,Landsat系列卫星能

提供 30 m 的空间分辨率和较好的时间序列支持,因此本研究使用 Landsat 系列卫星进行反演。遥感影像数据利用 Google earth engine (GEE) 平台提供的地表反射率数据集“USGS Landsat 5/7/8 Surface Reflectance Tier 1”。地表反射率是将已经通过大气校正的地面反射辐射量与入射量之比,反映地表对太阳辐射吸收和反射的能力,反射率越大,地表吸收的太阳辐射就越小。其中“Landsat5/7 Surface Reflectance Tier 1”数据集是 Landsat 5 TM 和 landsat7 ETM+的原始数据利用 LEDAPS 程序根据 6S 辐射传输模型进行处理得到地表反射率产品,“Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1”使用 LaSRC 程序进行大气校正后生成。其中 Landsat 5 TM 拥有 7 个波段,包含 3 个可见光、1 个近红外、2 个短波红外和 1 个热红外波段,Landsat 7 ETM+增加一个 15 m 分辨率的全色波段并将热红外分辨率提高至 30 m,Landsat 8 OLI 在 Landsat 7 ETM+的基础上新增蓝色波段(0.433~0.453 μm)和用于云检测的短波红外波段(1.36~1.39 μm)。

通过 GEE 平台挑选出采样当天或者相近时间无云影像,提取出采样点位置处的遥感反射率,从白山水库和丰满水库分别随机抽取三分之二的样本进行模型建立,剩余三分之一的样本用于模型精度验证,通过回归分析将相关系数较高的波段或波段组合作为自变量进行拟合分析,建立 CDOM 遥感反演模型。基于构建的遥感 CDOM 波段组合模型,估算 2000—2020 年白山水库和丰满水库时空变化情况(除去 2012 年无合适遥感影像),利用 GEE 筛选出无云非结冰期 184 景 Landsat 系列卫星影像,影像分布如图 2 所示,为减少因不同月份可利用的遥感影像数量分布不均的误差,在计算时空分布时,首先计算非冰期春、夏、秋季影像 CDOM 的均值,再以非冰期不同季节平均值计算 CDOM 年均值。

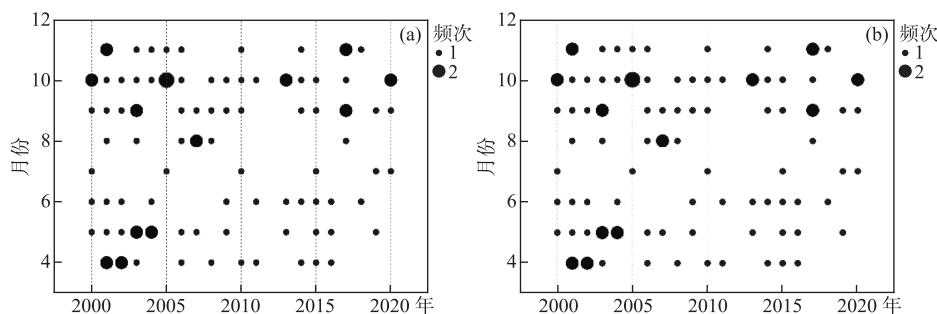


图 2 遥感影像时间分布(a:丰满水库;b:白山水库)

Fig.2 Time distribution of remote sensing image (a: Fengman Reservoir, b: Baishan Reservoir)

1.5 其他数据

本文使用的 DEM 数据为 ASTER GDEM V3 数字高程数据集(<https://search.earthdata.nasa.gov/>),该数据集空间分辨率为 1 弧秒(约 30 m),参考大地水准面为世界大地测量系统(WGS84)和 1996 年地球重力模型(EGM96)大地水准面投影。土地利用数据来自于 GlobeLand30 V2020 版(<http://globeland30.org/>),气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)中国地面气候标准值月值数据集,收集其中降水、温度信息;归一化植被指数(NDVI)来自中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据集 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V061,分辨率为 1 km 的月均值数据;人口、化肥使用量、工业废水、生活废水等统计数据来自吉林省统计局公布的统计年鉴。

1.6 统计分析和随机森林模型

本文采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析,包括方差分析(ANOVA)用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验,分别用 ** ($P<0.01$) 和 * ($P<0.05$) 表示,Pearson 相关性分析、Spearman 相关性分析、拟合分析、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)来分析估计值和实测值是否一致,其中 RMSE 和 MRE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{估计}} - X_{\text{实测}})^2}{n}} \quad (3)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{估计}} - X_{\text{实测}}}{X_{\text{实测}}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

将气象数据和NDVI月均数据计算为年均值,结合水体所在行政区统计年鉴的人口、污水排放量、化肥使用量等多种类型驱动因子,通过Spearman相关性分析计算单个因子与CDOM的相关性,筛选出相关性显著的因子($P<0.05$)作为自变量,将年均CDOM值作为因变量,基于多元回归分析方法^[13],利用SPSS软件对丰满水库和白山水库的自然和人为因素进行回归分析,最后根据标准化回归系数和回归方程确定不同因子贡献度。

利用R语言Trend包中的mk.test函数实现Mann-Kendall(M-K)检验,M-K趋势检验法是一种非参数检验,它不需要数据服从特定的分布,是一种常用的趋势检验方法,其中Uf的值大于零表示序列呈现上升趋势,反之呈下降趋势,当超过显著水平临界线时表明上升或下降趋势明显。

随机森林模型由Breiman等^[14]基于bagging算法构建,近年来也逐步被应用于水质参数反演^[15-16],本文利用R语言中randomForest包实现随机森林模型,其中最重要的参数为mtry和ntree,mtry表示指定节点中用于二叉树的最佳变量个数,ntree表示随机森林所包含的决策树数目。将Landsat 8 B1~B7这7个波段的地表反射率作为输入自变量, $a_{\text{CDOM}}(355)$ 作为因变量,随机挑选三分之二采样点用于模型构建,三分之一用于检验。

2 结果

2.1 CDOM吸收系数特征分析

CDOM吸收系数从紫外到可见光的范围内大致呈指数递减(图3),以355 nm处吸收系数表征CDOM浓度,其中丰满水库CDOM浓度均值为 $(4.73 \pm 1.37) \text{ m}^{-1}$,白山水库为 $(7.18 \pm 2.75) \text{ m}^{-1}$,总体上白山水库CDOM浓度高于丰满水库,两个水库样点除数值上有一定差距外,吸收特性一致表现为紫外波段吸收强烈,在275~295 nm左右呈现出一个吸收肩,这与施坤等^[17]的结果一致,丰满水库和白山水库的吸收肩斜率 $S_{275-295}$ 变化范围(均值)分别为 $0.0157 \sim 0.0234$ (0.018 ± 0.002) 和 $0.0154 \sim 0.0206$ (0.017 ± 0.0015) nm^{-1} ,丰满水库的均值略高于白山水库,反映丰满水库CDOM中富里酸占比高于白山水库。

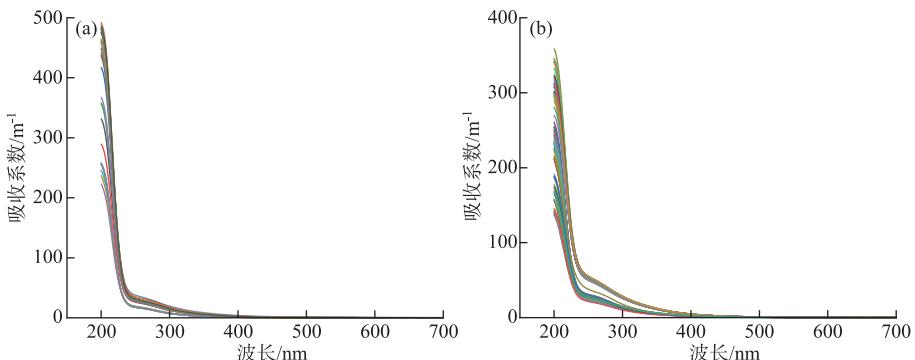


图3 CDOM吸收系数曲线(a:丰满水库;b:白山水库)

Fig.3 CDOM absorption coefficient curve(a: Fengman Reservoir, b: Baishan Reservoir)

从图4可以看出,白山水库与丰满水库的 $SUVA_{254}$ 均值分别为 (6.63 ± 0.73) 、 $(5.21 \pm 0.59) \text{ L/(mg·m)}$,白山水库和丰满水库的 $S_{275-295}$ 均值分别为 0.017 ± 0.001 和 0.018 ± 0.002 ,M值均值分别为 6.31 ± 0.52 和 7.29 ± 1.0 ,CDOM各项吸收参数显示白山水库腐殖酸含量略高于丰满水库,两个水库CDOM组分和来源具有差异性($P<0.05$)。

2.2 CDOM建模与验证

通过CDOM吸收曲线可以看出CDOM在短波段更为敏感,因此选择CDOM常用建模波段蓝波段(430~450 nm)、绿波段(530~590 nm)、红波段(640~670 nm),利用波段比值的经验方法进行建模估算CDOM。如

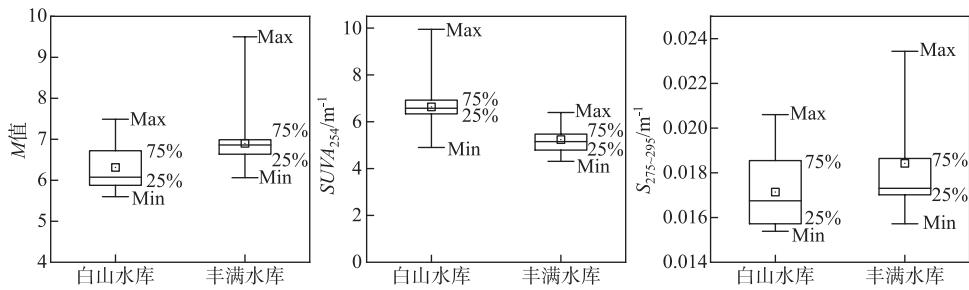
图 4 白山水库和丰满水库 CDOM 吸收参数 M 值、 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$

Fig.4 CDOM absorption parameters M , $SUVA_{254}$ and $S_{275-295}$ values of Baishan Reservoir and Fengman Reservoir

表 1 所示,单波段反演 $a_{CDOM}(355)$ 与蓝波段的相关性最好(验证 $R^2=0.32$, $RMSE=2.21\text{ m}^{-1}$, $MRE=36.47\%$),其次是绿波段(验证 $R^2=0.19$, $RMSE=2.43\text{ m}^{-1}$, $MRE=39.93\%$),最后通过对比 R^2 、 $RMSE$ 选择最优模型——红/蓝,绿波段模型效果最好,验证 $R^2=0.86$, $RMSE=0.97\text{ m}^{-1}$, $MRE=15.18\%$ 。

表 1 波段组合

Tab.1 Band combination

波段组合	反演模型	建模 R^2	验证 R^2	$RMSE/\text{m}^{-1}$	$MRE/\%$
蓝	$a_{CDOM}(355)= -0.008x+9.35$	0.34	0.32	2.21	36.47
绿	$a_{CDOM}(355)= -0.004x+8.563$	0.19	0.19	2.43	39.93
红	$a_{CDOM}(355)= -0.003x+7.645$	0.081	0.08	2.58	40.16
蓝+绿	$a_{CDOM}(355)= -0.003x+8.947$	0.25	0.25	2.33	37.87
绿/蓝	$a_{CDOM}(355)= 8.84x-5.804$	0.63	0.58	1.75	26.41
红/蓝	$a_{CDOM}(355)= 6.49x-0.538$	0.70	0.70	1.48	19.05
红/蓝, 蓝	$a_{CDOM}(355)= 5.758B4/B2-0.006B2+2.302$	0.86	0.82	1.16	19.41
红/蓝, 绿	$a_{CDOM}(355)= -0.005B3+6.5389B4/B2+1.595$	0.90	0.86	0.97	15.18

2.3 基于 CDOM 的 DOC 浓度估算

CDOM 与 DOC 具有较好的一致性,不仅体现在海洋、河口和海岸带,还体现在内陆湖泊河流中。本研究将实测 CDOM 和 DOC 数据分为三分之二用于建模($N=73$),三分之一用于验证($N=35$),通过回归分析得到 $DOC=0.478a_{CDOM}(355)+2.515$,对比丰满水库和白山水库 DOC 与 $a_{CDOM}(355)$ 呈现良好线性关系,其 R^2 分别为 0.79 和 0.92,与先前诸多研究表现一致,证实 CDOM 反演 DOC 的可能性。

随机将实测 DOC 数据三分之二用于建模,三分之一用于验证,即丰满水库 22 个点用于训练模型,10 个点用于精度验证,白山水库 51 个点用于训练模型,25 个点用于精度验证。通过分析丰满水库、白山水库采样点数据中 CDOM 与 DOC 的相关关系,得出 $a_{CDOM}(355)$ 与 DOC 呈显著正相关(图 5a),验证结果如图 5b 所示,方程斜率接近 1,散点均匀分散于两侧, $R^2=0.78$, $RMSE=0.65\text{ m}^{-1}$, $MSE=10.9\%$ 。

2.4 CDOM 与 DOC 的时空演变

利用 GEE 平台筛选出 2000—2020 年无云非结冰期 184 景 Landsat 系列卫星影像,基于 CDOM 波段组合模型反演 CDOM 值,通过 CDOM 与 DOC 较好的一致性,得到 2000—2020 年 DOC 空间分布平均值(图 6,7)。白山水库年均 DOC 浓度范围(均值)为 $5.05\sim 8.6(5.9\pm 0.97)\text{ m}^{-1}$,而丰满水库年均浓度(均值)为 $4.84\sim 6.97(5.35\pm 0.6)\text{ m}^{-1}$,从整体上看白山水库和丰满水库 DOC 浓度一直上下波动但变化幅度不大,从时间上看年均最高值均为 2017 年,最低值均为 2011 年,白山水库在绝大多数年份均值高于丰满水库(除 2009 年)。从空间上看,高值区域的分布大致符合东部和南部高,西北部较低的情况,丰满水库干流和支流汇入的河段即水库的南部和东部区域 DOC 浓度相对较高,汇入水库之后 DOC 浓度都有一定程度的减小,白山水库 DOC 高

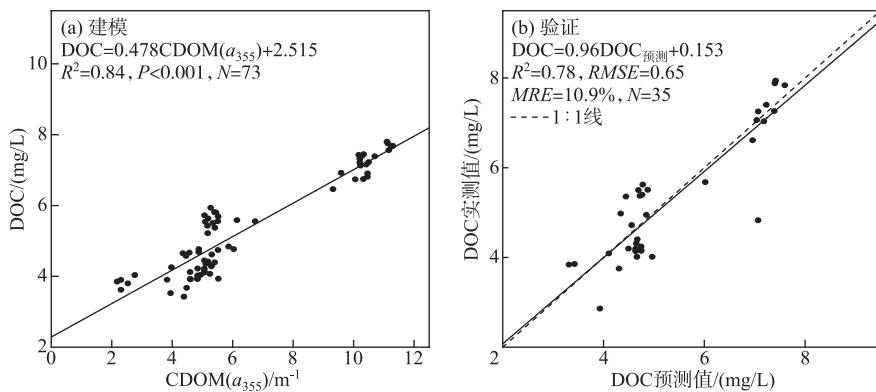


图 5 CDOM 吸收系数与 DOC 浓度模型构建和验证

Fig.5 Construction and verification of CDOM absorption coefficient and DOC concentration model

浓度区域主要出现在上游段头道松花江的汇入段以及东部二道松花江汇入段,丰满水库 DOC 高浓度区主要出现在南部支流辉发河的汇入段以及东部蛟河支流的汇入段。

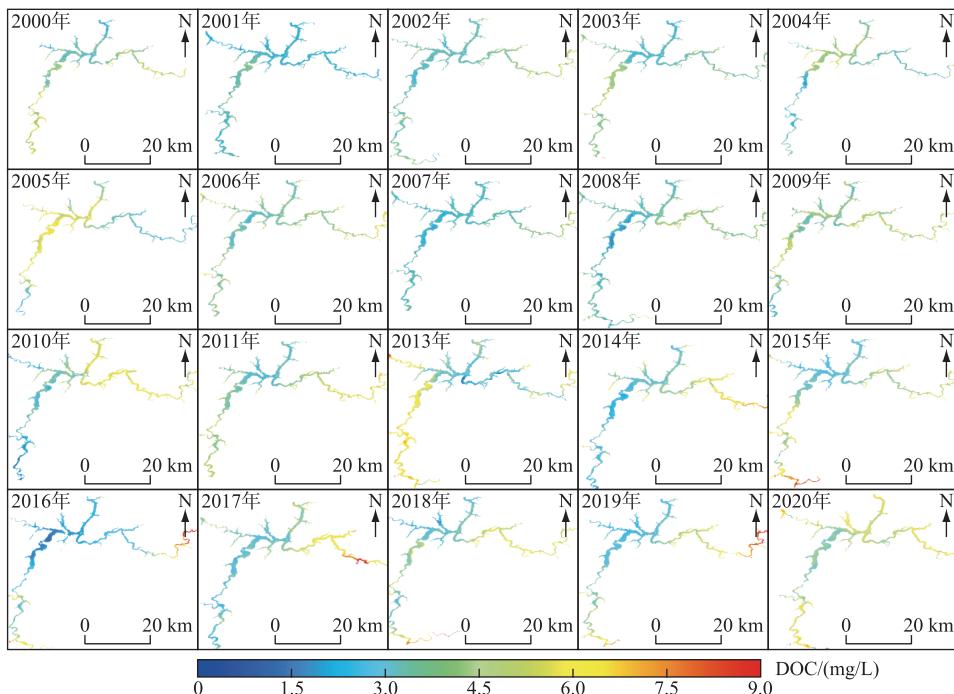


图 6 2000—2020 年白山水库 DOC 浓度时空分布

Fig.6 Spatio-temporal distribution of DOC concentration in Baishan Reservoir from 2000 to 2020

通过 M-K 检验分析 DOC 年均值变化可以看出,UF 均在显著区间内波动,白山水库和丰满水库的变化基本一致,呈现变化不显著,在 2010 年之前,变化呈现上下波动,2010 年之后均表现出上升趋势(图 8)。

2.5 驱动力分析结果

所有的驱动因素数据时间段均选择 2000—2020 年,分别计算出水库年均 CDOM 与气象和人类活动因子 Spearman 相关系数和显著性检验 P 值(表 2),通过构建多元线性回归模型,评价驱动因子变化对水库

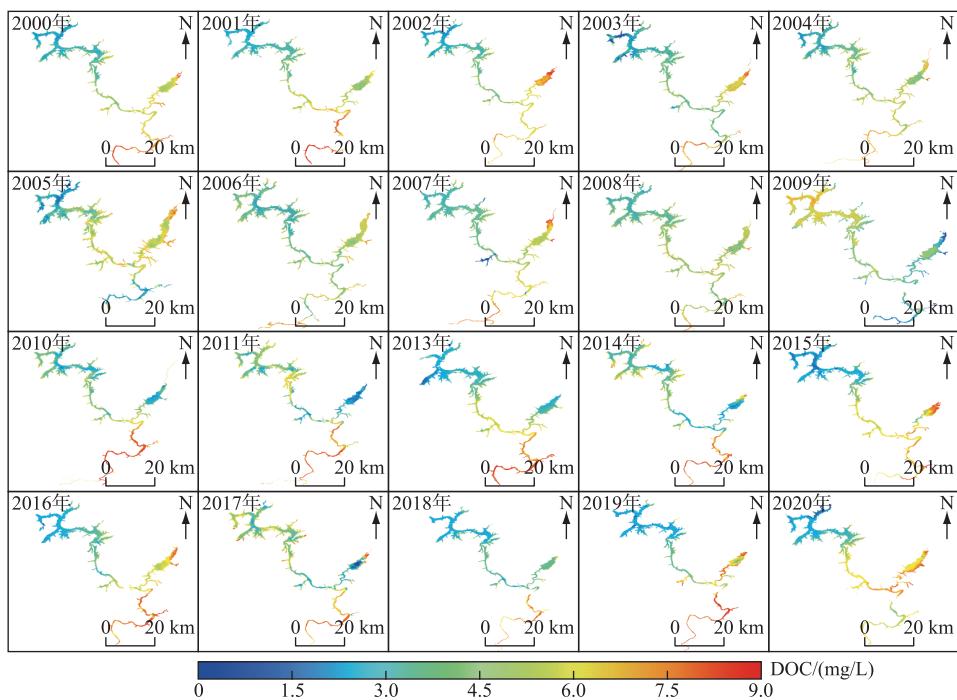


图 7 2000—2020 年丰满水库 DOC 浓度时空分布

Fig.7 Spatio-temporal distribution of DOC concentration in Fengman Reservoir from 2000 to 2020

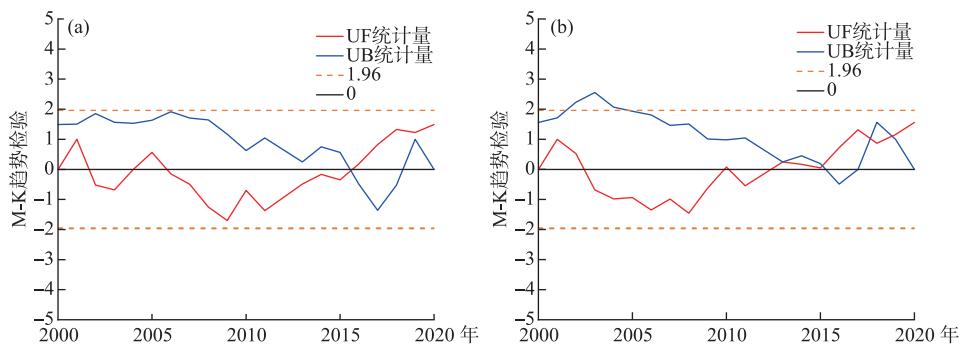
图 8 白山水库(a)与丰满水库(b)DOC 年均变化的 M-K 检验(橙色虚线表示 Z 值($P=0.05$))

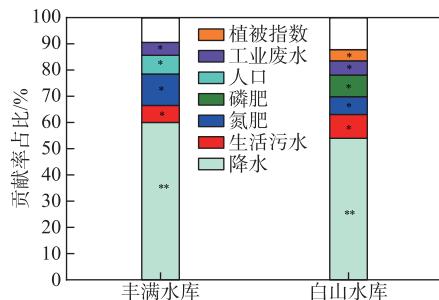
Fig.8 M-K test of average annual variation of DOC in Baishan Reservoir (a) and Fengman Reservoir (b)

CDOM 的贡献情况。白山水库年均 CDOM 变化回归方程由 6 个驱动因子组成,可解释其年均变化的 83.1% ($R^2 = 0.831$),贡献率排前 3 位的因素是降水、生活污水排放量和磷肥的使用量,分别贡献 54%、9.07% 和 8.73%,丰满水库年均 CDOM 变化回归方程由 6 个驱动因子组成,可解释其年均变化的 79.4% ($R^2 = 0.794$),贡献率排前 3 位的是降水、氮肥使用量和人口,分别贡献 60%、12%、7.2%。其中对白山水库和丰满水库 CDOM 影响最大的因子均为降水,分别占贡献率的 54% 和 65% (图 9)。年际变化研究中选取的影像以秋季居多,秋季白山地区正逢锋面过境以及受台风北上影响雨水极为丰富,白山水库和丰满水库两岸地形极为复杂,沟叉港湾众多,周边农田环绕,因此受降水和农田施肥的影响较为密切。

表 2 水库 CDOM 与气候和人为因素的相关性

Tab.2 Correlation between CDOM of reservoir and climate and human factors

水库	降水		生活污水		氮肥		磷肥		人口		工业废水		NDVI		温度	
	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P
丰满	0.86	0.006 **	0.63	0.041 *	0.66	0.037 *	0.61	0.055 *	0.62	0.046 *	0.77	0.016 *	0.47	0.071	0.33	0.160
白山	0.82	0.009 **	0.72	0.037 *	0.64	0.039 *	0.68	0.043 *	0.33	0.139	0.80	0.039 *	0.69	0.041 *	0.37	0.120

图 9 各驱动因子对白山水库和丰满水库 CDOM 的贡献率
(* 表示 $P<0.01$, ** 表示 $P<0.05$)Fig.9 Contribution rate of driving factors to CDOM of Baishan Reservoir and Fengman Reservoir
(* indicates $P<0.01$, ** indicates $P<0.05$)

3 讨论

3.1 CDOM 吸收特征分析

CDOM 各项吸收参数多年均值均显示白山水库的腐殖酸含量略大于丰满水库, 即白山水库 CDOM 的分子量略大于丰满水库, 并表现出良好的一致性。 $SUVA_{254}$ 与 CDOM 中芳香族成分有强相关性, 更高的 $SUVA_{254}$ 反映芳香族含量更高(表 3), 对比国内其他河流湖泊, 白山水库和丰满水库中 $SUVA_{254}$ 值相对较高, 即 CDOM 芳香族的含量较高且白山水库高于丰满水库。研究发现^[18], 河流或者受河流影响较大的河口及沿岸区域, 其 S 值通常较小, 在 $0.011\sim0.018 \text{ nm}^{-1}$ 之间, 而白山水库和丰满水库的 $S_{275\sim295}$ 均值分别为 (0.017 ± 0.0015) 和 $(0.018\pm0.002) \text{ nm}^{-1}$, 反映出水库受河流输入的影响较大, 白山水库与丰满水库中 $a_{\text{CDOM}}(355)$ 的吸收系数与斜率 $S_{275\sim295}$ 呈现相反的关系, 较低的 S 值对应较高的 CDOM 吸收系数, 这同殷燕等在新安江水库^[19]以及段洪涛等在太湖^[20]的研究一致。

表 3 相关文献中湖库 CDOM 吸收参数对比

Tab.3 Comparison of CDOM absorption parameters in lakes and reservoirs in related literature

水体名称	M 值变化范围(均值)	$S_{275\sim295}$ 变化范围	$SUVA_{254}$ 变化范围
白山水库	5.6~7.49(6.31)	0.015~0.020	6.63~9.94
丰满水库	5.56~9.5(7.29)	0.015~0.023	4.30~6.39
鄱阳湖 ^[23]	4.17~8.55(6.01)	0.011~0.019	4.12~7.87
洱海 ^[24]	7.17~11.40(9.76)	0.016~0.024	0.60~3.81
呼伦湖和贝尔湖 ^[25]	5.47~20.73(8.02)	0.015~0.031	0.79~3.74
天目湖流域 ^[26]	4.59~10.13(6.54)	0.013~0.023($S_{280\sim500}$)	—

“—”表示文献中未给出数据。

从年际变化反演和驱动力分析的结果看, CDOM 浓度的变化主要受到人类活动和气候变化方面的影响, 在各支流汇入时浓度变化尤为明显。辉发河口与蛟河汇入口水质较差, 在反演的年际变化中可以清晰地看出, 支流汇入处 CDOM 浓度较大, 支流给丰满水库库区带来大量污染物, 但是由于丰满水库中下游段湖水较深、湖面逐渐变宽、水流速度逐渐放缓, 在水体的自净作用下, 污染物逐渐被降解稀释, 因此越靠近下游, 丰满大坝水质越好, CDOM 浓度越低, 而白山水库河道相对狭小, 从支流汇入的高浓度 CDOM 逐渐被降解稀释的效果不如丰满水库明显。

CDOM 各项吸收参数均表明白山水库和丰满水库 CDOM 倾向于陆源大分子腐殖酸。通常陆源有机物主要来源于土壤表层中生物的降解, 通过降水的方式进入库区^[21], 根据驱动力分析可以看出降水和污水排放量贡献率超过 $2/3$, 降水将水库周边林地、草地和农田等生产降解出的部分有机物冲刷进入库区, 而随着

城镇化的进程,白山水库和丰满水库周围常伴有城镇污水进入^[22],污水排放分别占白山水库和丰满水库 CDOM 贡献率的 16.52% 和 8.6%,未处理或者处理不完全的污水注入库区导致 CDOM 浓度增加。

3.2 CDOM 模型讨论

通过波段比值将遥感影像与地面信息联系起来是很常见的,例如用于叶绿素反演^[27]、水体悬浮颗粒物反演^[28]和监督分类^[29]等,诸多学者研究表明^[30-31]通过波段比值可以校正大气的一些影响,增强所需的信息或者减弱其他信息的干扰。本文采用红、绿、蓝 3 个波段建立波段比值模型,得到良好的效果($R^2 = 0.86$, $RMSE = 0.97$, $MRE = 15.1\%$),由于 CDOM 的光学吸收特性随着波长增加呈现指数型递减,理论上短波的 CDOM 浓度更加敏感,蓝波段是反演 CDOM 的理想波段,但是蓝波段大气校正结果通常误差较大,在内陆水体中易受其他水体组分影响,而 CDOM 在红波段的响应可以忽略不计,因此红波段的加入起到归一化的作用,减少大气校正误差的影响提升反演精度,绿波段的加入一定程度上能够减弱浮游植物和非藻类颗粒物在蓝波段的吸收对 CDOM 反演造成的影响。

利用遥感影像对 CDOM 进行估测不仅仅只有波段比值方法,还有机器学习算法^[16]、QAA 算法^[32]和矩阵反演法^[33]等,但这些方法同样具有不足之处,比如计算复杂、计算量大或者模型构建复杂需要更多实测固有光学特性参数进行模型构建,而波段比值法进行反演建模的优点是算法简单、便于快速计算实现,能够一定程度上消除大气影响,在面对获取的遥感影像具有薄雾干扰时,波段比值模型表现出更好的抗干扰能力,缺点在于得出的反演模型只能用做特定的研究区域,普适性较差。本文尝试使用机器学习中随机森林算法对白山水库和丰满水库 CDOM 进行估算,在两水库采样点中随机挑选 72 个采样点作为训练集用于模型构建,36 个采样点作为验证集用于模型检验,将 Landsat 8 B1~B7 这 7 个波段的地表反射率作为输入自变量, a_{CDOM} (355)作为因变量,采用 R 语言的随机森林包实现反演。随机森林在验证精度上和波段比值模型相似(表 4),虽然该算法的相关性较高,但由于样品数量较少,会对随机森林算法的准确性产生影响,因此不具有可行性。在今后研究中将进一步进行补充实验采样,尝试在大尺度地区进行机器学习算法模型的构建,最终构建具有东北地区普适性的精确 CDOM 遥感反演模型和 DOC 估算模型。

3.3 DOC 估算的不确定性

我国内陆水体中 DOC 的浓度受区域地理条件、人类活动以及季节的影响较大,赵莹^[34]、尚盈辛等^[35]研究表明各类内陆水体在不同的地域、季节以及人类活动的影响下,DOC 与 CDOM 的相关性具有很大的不确定性,因此需要在不同地区建立 DOC 与 CDOM 的相关性模型,为进一步精确估算 DOC 浓度提供理论数据支撑。

由于 DOC 并没有明显的光谱特性,因此 DOC 的遥感反演通常是依靠间接的形式进行估算^[36],利用 CDOM 与 DOC 的强相关性估算 DOC 避免不了误差的累计传播。同时,DOC 和 CDOM 的来源不一定是相同的,尽管 CDOM 与 DOC 呈现明显线性关系,但是根据来源的不同线性关系强弱会发生变化^[37],在河流交汇口,水体的垂直和水平交换速率较大,水体各项物质浓度不稳定,CDOM 比 DOC 更容易发生光降解^[38],这些复杂的原因增加了 DOC 反演的不确定性。

白山水库和丰满水库位于我国东北地区,四季分明,冬季严寒漫长,夏季雨热同期,每年从 12 月上旬开始结冰到次年 3 月份陆续融化,在这期间由于冰雪覆盖的影响,导致卫星遥感影像很难对 CDOM 进行很好地估算,Song 等^[39]对东北松嫩平原 40 个湖泊进行研究,发现同一点的冰样 CDOM 浓度远小于水样,因此在估算的年均情况中去除了冬季的影响,容易导致年均值有一定程度的高估。在今后的研究中会进一步扩大东北地区水库的采样和研究范围,选取不同季节、不同类型的水库进行 CDOM 与 DOC 的相关性研究以及 CDOM 和 DOC 的遥感反演模型构建,为今后构建东北地区具有普适性的大尺度区域 DOC 估算和相关部门提供水库水质监测应用提供数据支撑。

表 4 经验模型与随机森林模型对比

Tab.4 Comparison between empirical model and stochastic forest model

模型	建模	验证	$RMSE/m^{-1}$	$MRE/\%$
	R^2	R^2		
本文经验模型	0.9	0.86	0.97	15.18
随机森林模型	0.89	0.84	0.83	13.80

4 结论

本文通过野外实测数据和Landsat系列卫星验证了通过遥感影像反演东北地区典型内陆水库——丰满水库和白山水库无冰期CDOM变化的能力($R^2=0.86, RMSE=0.97 \text{ m}^{-1}$)，反演2000—2020年(除去2012年无遥感影像) a_{CDOM} (355)年均值，体现出Landsat系列卫星利用波段比值法反演丰满水库和白山水库CDOM的可靠性，根据CDOM与DOC的强相关性反演出水库DOC浓度年均值($R^2=0.78, RMSE=0.65$)，证明了遥感影像对DOC浓度变化监测的能力，增加了对东北典型水库碳循环的了解。

从反演结果来看，白山水库和丰满水库CDOM与DOC呈现出空间差异和季节差异。从空间上看，白山水库与丰满水库的高值区都分布在东部和南部支流的汇入处，越靠近下游大坝附近值越低。通过分析CDOM的吸收特性，发现白山水库的腐殖酸含量略高于丰满水库。总体来看，白山水库和丰满水库CDOM更倾向于陆源大分子的腐殖酸，降水、化肥使用量和污水排放量对白山水库和丰满水库CDOM时空变化起到主要影响作用。因此，在未来工作中将利用三维荧光技术结合平行因子以及分子结构分析等方法对东北典型水库CDOM空间分布特征及其来源做进一步遥感监测建模和时空演变分析。

5 参考文献

- [1] Song KS, Zang SY, Zhao Y et al. Spatiotemporal characterization of dissolved carbon for inland waters in semi-humid/semi-arid region, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(10): 4269-4281. DOI: 10.5194/hess-17-4269-2013.
- [2] Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2298-2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- [3] Shen H, Zhao DZ, Fu YN et al. An overview of optics characteristic and remote sensing of CDOM. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(6): 949-954. [沈红, 赵冬至, 付云娜等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展. 遥感学报, 2006, **10**(6): 949-954.]
- [4] Loiselle SA, Bracchini L, Dattilo AM et al. The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 590-597. DOI: 10.4319/lo.2009.54.2.0590.
- [5] Miao S, Lv H, Wang Q et al. Estimation of terrestrial humic-like substances in inland lakes based on the optical and fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) using OLCI images. *Ecological Indicators*, 2019, **101**: 399-409. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.01.039.
- [6] Li YM, Zhao H, Bi S et al. Research progress of remote sensing monitoring of case II water environmental parameters based on water optical classification. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, **26**(1): 19-31. [李云梅, 赵焕, 毕顺等. 基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展. 遥感学报, 2022, **26**(1): 19-31.]
- [7] Vodacek A, Hogel FE, Swift RN et al. The use of *in situ* and airborne fluorescence measurements to determine UV absorption coefficients and DOC concentrations in surface waters. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(2): 411-415. DOI: 10.4319/lo.1995.40.2.02411.
- [8] Liu Q, Pan DL, Bai Y et al. The satellite reversion of dissolved organic carbon (DOC) based on the analysis of the mixing behavior of DOC and colored dissolved organic matter: The East China Sea as an example. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, **32**(2): 1-11. DOI: 10.1007/s13131-013-0272-x.
- [9] Jiang GJ, Ma RH, Duan HT. Estimation of DOC concentrations using CDOM absorption coefficients: A case study in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2235-2243. DOI: 10.13227/j.hjkx.2012.07.024. [姜广甲, 马荣华, 段洪涛. 利用CDOM吸收系数估算太湖水体表层DOC浓度. 环境科学, 2012, **33**(7): 2235-2243.]
- [10] Song KS, Zhao Y, Wen ZD et al. A systematic examination of the relationships between CDOM and DOC in inland waters in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, **21**(10): 5127-5141. DOI: 10.5194/hess-21-5127-2017.
- [11] Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969. DOI: 10.4319/lo.2008.53.3.00955.
- [12] Shang YX, Song KS, Jacinthe PA et al. Characterization of CDOM in reservoirs and its linkage to trophic status assessment across China using spectroscopic analysis. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 1-11. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.028.
- [13] Tao S, Fang J, Zhao X et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *PNAS*, 2015, **112**(7): 2281-2286. DOI: 10.1073/pnas.1411748112.
- [14] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- [15] Wu ZM, Li JC, Wang R et al. Estimation of CDOM concentration in inland lake based on random forest using Sentinel-3A OLCI. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 979-991. DOI: 10.18307/2018.0411. [吴志明, 李建超, 王睿等. 基于随机森林的内陆湖泊水体有色可溶性有机物(CDOM)浓度遥感估算. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 979-991.]
- [16] Ruescas A, Hieronymi M, Mateo-Garcia G et al. Machine learning regression approaches for colored dissolved organic matter (CDOM) re-

- trieval with S2-MSI and S3-OLCI simulated data. *Remote Sensing*, 2018, **10**(5) : 786. DOI: 10.3390/rs10050786.
- [17] Shi K, Li YM, Wang Q et al. Similarities and differences in absorption characteristics and composition of CDOM between Taihu Lake and Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2010, **31**(5) : 1183-1191. DOI: 10.13227/j.hjkx.2010.05.007. [施坤, 李云梅, 王桥等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同. 环境科学, 2010, **31**(5) : 1183-1191.]
- [18] Blough NV, del Vecchio R. Chromophoric DOM in the coastal environment. *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*. Amsterdam: Elsevier, 2002: 509-546. DOI: 10.1016/b978-012323841-2/50012-9.
- [19] Yin Y, Wu ZX, Zhang YL et al. Absorption characteristics and sources analysis of CDOM in Xin'anjiang Reservoir in summer. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12) : 3207-3214. [殷燕, 吴志旭, 张运林等. 新安江水库夏季 CDOM 吸收光谱特征及来源分析. 中国环境科学, 2014, **34**(12) : 3207-3214.]
- [20] Duan HT, Ma RH, Kong WJ et al. Optical properties of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(2) : 242-247. DOI: 10.18307/2009.0213. [段洪涛, 马荣华, 孔维娟等. 太湖沿岸水体 CDOM 吸收光谱特性. 湖泊科学, 2009, **21**(2) : 242-247.]
- [21] Xenopoulos MA, Lodge DM, Frentress J et al. Regional comparisons of watershed determinants of dissolved organic carbon in temperate lakes from the Upper Great Lakes region and selected regions globally. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(6) : 2321-2334. DOI: 10.4319/lo.2003.48.6.2321.
- [22] 朱蕾. 松花湖流域水土流失与湖泊富营养化研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [23] 徐健. 鄱阳湖 DOC 和 CDOM 的特性、时空分布及其遥感监测[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- [24] Guan YY, Huo D, Wu XY et al. The characteristics of edom optical and its influence factors in Erhai Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4) : 838-845. DOI: 10.7541/2021.2020.123. [管玉莹, 霍达, 吴兴元等. 洱海 CDOM 吸收光谱特征变化及其影响因素. 水生生物学报, 2021, **45**(4) : 838-845.]
- [25] Wen ZD, Song KS, Zhao Y et al. Influence of environmental factors on spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, **20**(2) : 787-801. DOI: 10.5194/hess-20-787-2016.
- [26] Niu C, Zhang YL, Zhu GW et al. Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu Catchment. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(9) : 998-1007. [牛城, 张运林, 朱广伟等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比. 环境科学研究, 2014, **27**(9) : 998-1007.]
- [27] Gitelson AA, Gao BC, Li RR et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean—The Azov Sea case study. *Environmental Research Letters*, 2011, **6**(2) : 024023. DOI: 10.1088/1748-9326/6/2/024023.
- [28] Doxaran D, Froidefond JM, Castaing P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(23) : 5079-5085. DOI: 10.1080/0143116021000009912.
- [29] Inzana J, Kusky T, Higgs G et al. Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*, 2003, **37**(1/2) : 59-72. DOI: 10.1016/S0899-5362(03)00071-X.
- [30] Dekker A. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing[Dissertation]. Amsterdam: Free University, 1993.
- [31] Kallio K, Kutser T, Hannonen T et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1/2/3) : 59-77. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00685-9.
- [32] 周亚明. 典型内陆水体有色可溶性有机物遥感反演[学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [33] Zhu WN, Yu Q, Tian YQ et al. An assessment of remote sensing algorithms for colored dissolved organic matter in complex freshwater environments. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140** : 766-778. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.015.
- [34] 赵莹. 内陆水体 CDOM 荧光特性及遥感反演研究[学位论文]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2018.
- [35] Shang YX, Song KS, Jiang P et al. Optical absorption properties and diffuse attenuation of photosynthetic active radiation for inland waters across the Tibetan Plateau. *J Lake Sci*, 2018, (3) : 802-811. DOI: 10.18307/2018.0322. [尚盈辛, 宋开山, 蒋盼等. 青藏高原典型湖库光学吸收特性与光合有效辐射衰减系数初步研究. 湖泊科学, 2018, (3) : 802-811.]
- [36] Pan DL, Liu Q, Bai Y. Progress in remote sensing of DOC: Based on the analysis of conservative behaviors of DOC and CDOM in global large rivers estuaries. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, **34**(4) : 1-11. [潘德炉, 刘琼, 白雁. DOC 遥感研究进展——基于全球大河 DOC 与 CDOM 保守性特征. 海洋学报, 2012, **34**(4) : 1-11.]
- [37] Zhang YL, Qin BQ. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang Bay and Da Taihu Lake in Taihu Lake in summer and winter. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(3) : 415-423. [张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析. 水科学进展, 2007, **18**(3) : 415-423.]
- [38] Opsahl SP, Zepp RG. Photochemically-induced alteration of stable carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) in terrigenous dissolved organic carbon. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(12) : 2417-2420. DOI: 10.1029/2000gl012686.
- [39] Song KS, Wen ZD, Jacinthe PA et al. Dissolved carbon and CDOM in lake ice and underlying waters along a salinity gradient in shallow lakes of Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2019, **571** : 545-558. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.012.