引用格式:QIANG Sining,SHANG Yingxin,WEN Zhidan,*et al*.Research progress on CDOM remote sensing inversion considering water body type and regional characteristics[J].Remote Sensing Technology and Application,2025,40(4):886-899.[强思宁,尚盈辛,温志丹,等.顾及水体类型和区域特征的CDOM遥感反演研究进展[J].遥感技术与应用,2025,40(4):886-899.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2025.4.0886

顾及水体类型和区域特征的CDOM遥感反演研究进展

强思宁[1,2],尚盈辛[1],温志丹[1],刘 阁[1],宋开山[1]
(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林 长春 130102;
2.长春师范大学 地理科学学院,吉林 长春 130123)

摘要:有色可溶性有机物(Colored Dissolved Organic Matter,CDOM)具有光学特性和重要遥感监测优势,它是生物地球化学循环的重要组成部分,具有光学活性的一部分,广泛存在于各种水体中,在全球水生生态系统循环、水色水质遥感和全球碳循环中都有重要的作用。不同区域和类型下CDOM光学特性具有显著差异性,可以为今后在内陆水体CDOM反演时普适性模型构建中加入关键环境与人为影响因子提供思路。本研究通过文献收集全球不同水域和类型湖泊CDOM特征进行分析,总结归纳不同纬度、不同水质类型湖泊的CDOM时空分布规律与来源特征,结果表明在不同自然地带分异下根据水体光学特性建立的模型能够更加准确攫取影响CDOM变化规律的关键因子。研究结果为内陆水体富营养化治理、有机污染物管理、水源地保护和人类社会可持续发展等提供科学依据,也为完善内陆水体碳估算提供数据支撑。

关 键 词:CDOM;遥感反演;光学吸收特性
中图分类号:X87;TP79 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-0323(2025)04-0886-14

1 引 言

有色可溶性有机物(Colored Dissolved Organic Matter,简称CDOM)是可溶性有机物(Dissolved Organic Matter,简称DOM)中具有光学活性的一部分,是水色三要素之一,广泛存在于各种水体中,在全球水生生态系统循环、水色水质遥感和全球碳循环中都有重要的作用(图1)。CDOM的组成多样:包含单糖、多糖、氨基酸、蛋白质、木质素和腐殖质等,结构复杂:含有多种有机质元素、化学键和官能团。随着CDOM浓度的增加,水色逐渐从蓝色加深到绿色再到棕黑色[1],在水中状态处于时刻变化中。CDOM来源广泛,主要分为内源与外源两大输入途径。内源主要包括水生植物、藻类和细菌等代谢过程及其残体分解产物;外源主要来自降水、入湖河水、污水处理厂废水以及直排生活污水等[2]。其中内源CDOM富含碳水化合物[3],较易降解,且参与微生物食物链中物质迁移转化及能量传递,对初级生产力具有显著贡献[4-6]。CDOM在水中可以络合金属离子,吸附有机污染物,影响重金属和有机污染物的迁移与转化[7-9],内陆水体中的CDOM通过固碳作用参与全球碳循环过程,产生的CO2和CH4等温室气体[10-11],因此CDOM既影响湖泊营养盐生物地球化学过程同时也关系着湖泊富营养化进程及碳循环与全球变暖[6,12]。

CDOM也是可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon,简称DOC)的一部分,由于DOC是可溶性有机物DOM的重要组成部分,因此DOM是

收稿日期:2024-07-08;**修订日期**:2025-04-22
基金项目:国家自然科学基金项目(U24A20582、42371390)和吉林省科技发展计划项目(YDZJ202501ZYTS576)。
作者简介:强思宁,硕士研究生,主要从事水环境遥感、内陆湖泊水色遥感的研究。E-mail: qiangsining@iga.ac.cn
通信作者:尚盈辛,副研究员,主要从事水环境遥感的研究。E-mail: shangyingxin@iga.ac.cn

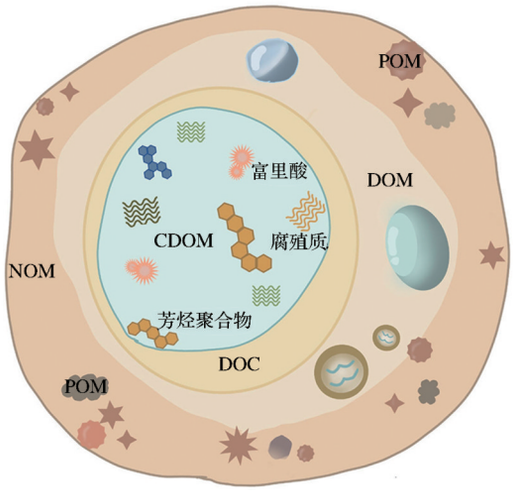

图 1　内陆水体中自然有机物 NOM 内部主要组分关系

Fig.1　The relationship between the main components of Natural Organic Matter (NOM) in inland waters

CDOM 的重要载体,CDOM 是 DOC 与 DOM 的指示剂(图 2),CDOM 的固有光学特征及表观光学特征以及 DOC 分布特征在国内外各类水体中广泛应用于研究其在水环境中的存在状态和环境行为,也是监测水环境污染及其治理效果的重要手段[13];其微观形态、分子量分布、化学键组成等内部特征的解析是认知其分子和结构、解释其作用机理和预测环境归趋的基础。

研究人员对 CDOM 的研究可以追溯到 20 世纪 80 年代,他们发现在通过遥感反射率准确地估算浮游植物、叶绿素和悬浮物之前,必须考虑 CDOM 的干扰[14-15],由此开辟了直接从遥感数据测量 CDOM 的可能性。水质评估一直是遥感界关注的问题,CDOM 是水质的重要衡量指标,对饮用水安全[16]、水生生态系统[17]、金属运输[18]等具有重要意义,卫星遥感数据已成功用于监测与反演各种水质参数,包括总悬浮物、浊度、叶绿素等[19],并在 CDOM 的预测和溯源方面具有巨大的潜力。在 CDOM 源汇跟踪中,跨学科研究与先进遥感技术的结合显示出巨大的潜力。对于 CDOM 这一物质组分以及理化性质与生化环境相互作用机制更深入的认知,基于水体固有光学特性、表观光学特性以及 CDOM 光学性质更全面的剖析开发出半分析模型,近年来机器学习算法也因其出色的预测性能被广泛应用于遥感建模反演过程中;遥感传感器也在随着内陆水体研究的深入的需求更新迭代,从手持光谱仪到机载高分辨率遥感传感器,从海洋水色卫星到陆地卫星,遥感应用到现实问题时反演精度的提高;研究尺度范围的扩展,遥感技术应用到水质参数监测与反演以来研究范围在时空尺度上的拓展,从区域性研究到全国甚至全球尺度。

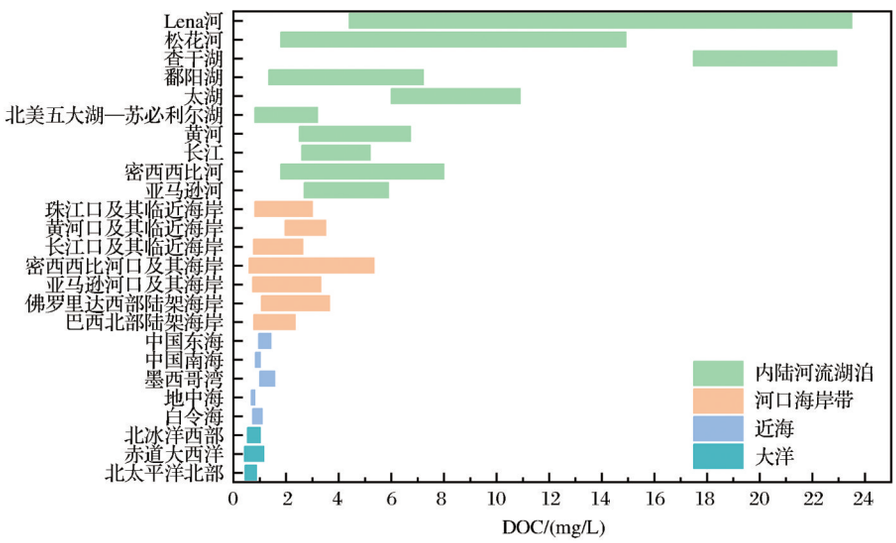

图 2　全球范围内不同水域 DOC 含量特征[20-35]

Fig.2　Characteristics of DOC content in different waters around the world

2　CDOM 光学特性

2.1　CDOM 吸收特性

CDOM 是一类含丰富共轭体系的有机化合物,在紫外到蓝光波段强烈吸收,吸收系数与波长表现为负指数关系,强烈的吸收作用显著改变水下光场,对水生环境中的初级生产产生重大影响。初级生产者如水生植物通过光合作用吸收二氧化碳释放氧气从而达到固定碳元素的作用,因此 CDOM 影响碳循环。水体中高浓度的 CDOM 一方面强烈吸

收太阳光，保护水生生物免受紫外线对细胞的破坏，另一方面限制了紫外辐射在水中的传播[36-38]，影响初级生产者对光的利用效率，较低的光利用效率与较高的有机营养物的富集会带来水体污染等水环境问题[39]。

CDOM吸收随其所包含的组分与分子比例不同而变化并且对应不同的吸收特征。不同自然纬度带下的多种类型水体在气象水文因素的影响下都有其吸收特点（图3）。CDOM的光学特性影响水体初级生产力，作为水生生态系统中重要物质显著影响着水体碳循环以及全球气候变化。因而研究CDOM吸收特性，地域分布、来源、组成、消亡途径等生物地球化学循环过程以及对紫外辐射衰减的贡献成为湖泊光学研究中非常重要的部分。综上，CDOM是全球水色遥感定量反演中的重要光学变量之一[40]，其在水生态系统、水色遥感和全球碳循环研究中具有广阔的应用前景[41]。目前许多研究都表明，湖泊营养状态以及水质理化参数对水体中CDOM的浓度和组成有显著影响，水生态系统中CDOM的来源组分、光学特性及迁移转化过程显著地改变了湖泊水色及水下光强和光谱分布，因此开展不同水体中CDOM的光化学及生物学特性研究，将其与内陆水体营养状态建立联系，实现营养状态的动态监测，为内陆及近海岸水体的整治与管理提供依据。

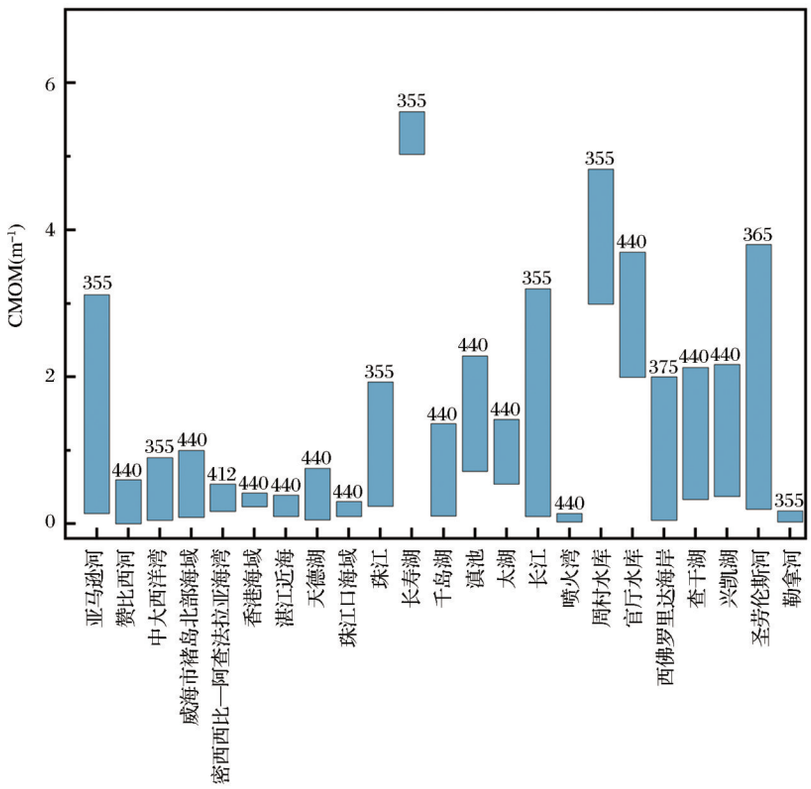

图3 全球范围内不同类型水域CDOM特定波长下浓度范围[34,42-55]

Fig.3 Concentration range of CDOM at specific wavelengths in different types of waters around the world[34,42-55]

2.2 CDOM荧光特性

CDOM的另一光学特性即荧光特性，即吸收入射的能量并发射更长的波长能量。CDOM是复杂的有机混合物，内陆不同类型水体中的CDOM组分来源多种多样且受到流域内自然和人为因素的影响，因此很难精确识别每一种成分。然而，包括三维激发发射光谱（3D-EEMs）荧光测定法在内的光学技术已经为CDOM的组成、来源和分子大小提供了有用的信息[5,56]。CDOM各荧光组分在微生物降解过程中的归宿往往与湖泊的光学性质、初级生产力高低、有机物结构特征等多因素相关。CDOM的荧光测量在海洋学中已有很长的历史[10]，近年来有关内陆水体CDOM两大光学特性与遥感相结合的研究旨在从微观与宏观尺度全面解析大范围内有机组分的来源、分布以及迁移转化过程进一步监测水质变化。针对荧光光谱的解谱开创的荧光区域积分法FRI以及平行因子分析方法PARAFAC等在水体CDOM荧光组分分析领域得到广泛应用。CDOM的吸收参数与荧光峰之间存在一定的相关关系，通过对CDOM在254 nm处吸收系数采用波

段比值方法进行建模，能够得出CDOM荧光峰C与Rrs线性回归关系并成功反演太湖巢湖CDOM荧光峰值[57]。不同区域不同营养类型水库中荧光总强度值以及主要荧光组分的比例存在显著差异，其中营养状态升高时类腐殖酸和富里酸比例升高同时腐殖化程度增加，而类酪氨酸、类色氨酸以及微生物类蛋白的含量则有降低的趋势[58]。此外内陆水体有机物输入源的不同主要来自不同土地利用方式[59]，土地利用类型和水体类型其对荧光强度以及水质参数的影像存在相关关系。CDOM荧光这一特性的研究对内陆不同水体中CDOM的组分及其来源的研究具有重要意义。

2.3　基于CDOM光学特性的表征技术与方法

在过去的30年里，用于描述CDOM丰度、来源和组成的名种技术和方法得到了快速发展（图4），有助于提高对CDOM分布、循环和转化的认识。CDOM的动态变化主要由流域相关过程和生物地球化学循环决定，光化学降解和微生物分解是CDOM循环的基本机制。光谱技术一直是CDOM有机质元素、化学键、官能团及分子空间构型的主要表征手段[60]。光学、同位素和质谱技术被用来描述CDOM的数量、组成和来源，而遥感和高频率观测能以高时间和空间分辨率绘制CDOM分布图。尽管内陆水域CDOM的高度复杂性、异质性、快速变化等特点，但依然可以通过诉诸稳定同位素、傅里叶变换离子回旋共振质谱法（FT-ICR-MS）等技术手段进行CDOM的表征追踪和动力学研究。未来在CDOM的表征追踪和动力学方面显然还需要做更多的工作，亟待完善基于多科学理论框架的CDOM研究体系。

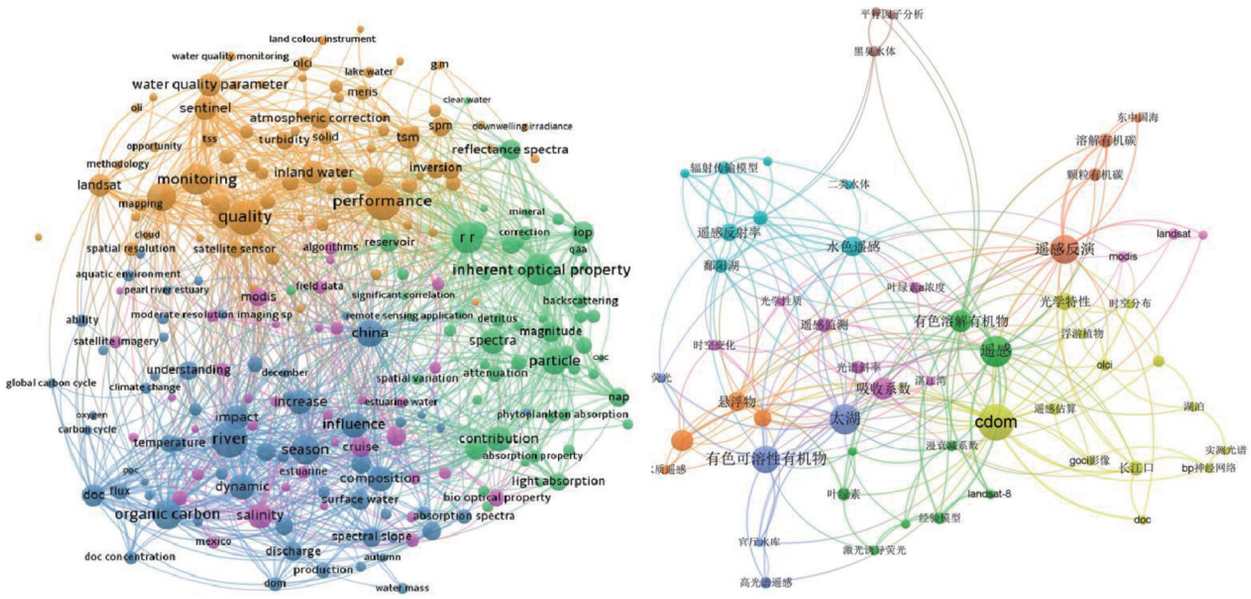

图4　中英文关键词距离密度图

Fig.4　Distance density diagram of Chinese and English keywords

3　CDOM遥感反演研究进展

3.1　CDOM遥感反演主要研究方法

在全球气候变化的影响下，过去40年来人类活动带来的富营养化和内生生态干扰导致陆地和内生CDOM向下游水生生态系统的输出增加，越来越多对水资源不合理的开发和使用导致水质污染，水资源管理者需要有效的方法来监测水质以及了解各种自然和人为因素对水环境造成影响的方式，以对水环境的保持与治理提供依据。传统现场观测的方法具有很大挑战性，而遥感能够突破时间和空间的限制，大大提高水质监测的效率和可靠性。阐明CDOM的分布和动态对于监测、评估和管理内陆水域至关重要。

CDOM的空间分异格局对区域供水安全和生态系统功能的维持具有同等重要的作用。水色光学遥感技术的发展与应用为水质遥感监测寻找到了出路，将利用水体光学特性探究其CDOM浓度与分布及其组分变化机制成为可能，并且能以高时间和空间分辨率绘制出CDOM分布图。鉴于CDOM对湖泊生态系统的结构和功能的重要性，准确有效的估算全国各类水体中CDOM含量的方法将是亟

需的。过去20年间CDOM遥感反演取得了里程碑式的成就，CDOM反演精度的提高源自一次又一次的科学性尝试与探索。在遥感反演方法的改进方面，由最初的经验算法到半经验再到半分析，近年来兴起的机器学习算法大大提高了单个水体的反演精度（图5）。

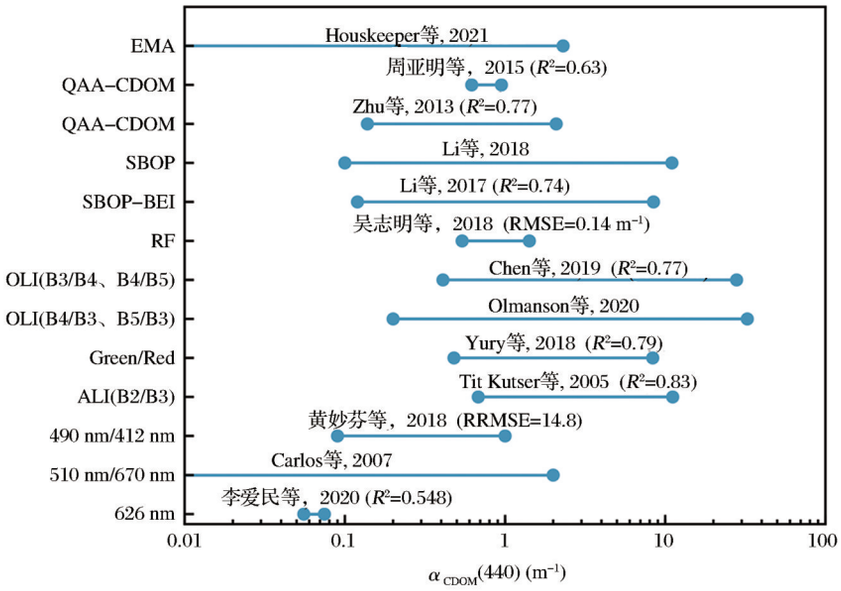

图5 CDOM（440）的检索模型概述

Fig.5 Overview of the retrieval model of CDOM（440）

经验反演算法，基于一元或多元回归方法从卫星获取的遥感反射率反演水体中光学、生物地球化学和水质参数等定量信息，学者们探究了多种与CDOM相关性高的敏感波段[61]并将其化成波段比值[62-65]与水质实测值之间建立简单回归关系。半分析算法，通过数值模拟的方法，将水体辐射传输方程近似之后得到的算法，它具有明确的物理含义，能够稳健地表达水体固有光学量（Inherent Optical Properties，IOPs）与水体成分含量之间的数学关系。半分析模型将基于物理的方法与水体固有光学特性相关的参数结合起来，利用现场测量参数化逆方程，以QAA-CDOM[55,66]、SBOP[67]为主的模型也历经多次改进以及BEI[68]等指数的引进来降低对大量的现场数据的依赖，提高对光学信号微弱物质的高效响应。机器学习算法，近年随着机器学习在遥感领域的发展，智能算法被广泛应用于解决多个水质参数之间复杂的线性或非线性关系。与经验模型和半分析模型不同，机器学习算法可以通过迭代学习来降低整体误差并获得最佳拟合模型。随机森林RF[61]、神经网络BP[69]、支持向量机SVM等非参数模型对样本进行分类训练并有效预测结果，能够克服经验模型普遍存在的重复利用性差、遥感因子间存在多重共线性等问题，但机器学习算法是否能用于内陆光学特征复杂水体水质参数遥感反演还需要进一步严格的测试和候选算法的改进以精准契合水环境遥感的需求。目前还没有通用的高度契合所有光学复杂的水体的算法来检索CDOM浓度以及分布，各种经验或是半经验算法都是针对特定水域类型进行优化产生的缺乏普适性。为了提高模型的普适性，学者们尝试使用如不同盐度[70]、不同悬浮物浓度[71]、不同营养状态等级[72]等广泛的水体分类标准降低其他光学活性物质在遥感研究中不同程度的干扰。

然而研究者们却不曾止步于在大洋甚至内陆复杂光学特性水体中CDOM浓度的反演与估算。内陆水体的水质遥感最终走向实用化必将其与水生态问题结合起来，CDOM与可溶性有机碳DOC[73]、化学需氧量COD、卤化消毒副产品DBPs[74]之间良好的相关关系可以作为间接监测手段，在水中有机物时空分布、流域营养物质输送模型和湖泊水域水质模型等问题中得到广泛应用[75]。

3.2 不同水体类型和区域的CDOM遥感反演研究

地表水中CDOM的浓度和组成在很大程度上取决于由气象和水文过程驱动的各种来源与由光和微生物施加的转化之间的动态平衡。基于Web of Science数据库输入"CDOM"＋"Remote Sens-

ing”关键词检索出的文献国别分布显示，美国发文328篇（占比38%）、中国发文217篇（占比25%）、德国发文64篇（占比7%），其中中国文献研究区关键词集中在长江口、三峡库区、太湖水体、鄱阳湖等。本研究大致将国内外文献中有关CDOM吸收遥感建模反演的研究按照自然纬度带分为寒带、温带、热带等不同区域分类讨论。低纬度地区的CDOM研究主要集中在沿海地区关于海岸带近海地区，中纬度温带地区湖泊众多，水体中微生物众多生化过程复杂，而高纬度极地地区水体总量庞大但多年冰封。在热带和亚热带地区，由于较高的温度和丰沛的雨水，土壤淋溶作用剧烈，CDOM的生物地球化学活动较为活跃，有机质分解产生的速度较快，CDOM丰度具有高度可变性。而在温带地区降水与温度次于热带，CDOM的浓度估算和来源分析也较为复杂。因此需要更为精细和复杂的遥感反演模型进行监测和评估。中纬度温带地区是国内外对CDOM开展研究最为集中的区域，这一纬度带内的水资源关系着人类的生命健康以及社会生产。寒带气候条件下水体中的CDOM的分解与转化速度较慢，CDOM的光谱响应也较为稳定，多采取较为简单和实用的遥感反演模型。此外在极寒气候下大部地区水体常年处于冰冻状态，CDOM的状态很难通过遥感监测分析，国内外有关遥感反演冰体中的CDOM还鲜有研究。

我国东南部湖区地处热带亚热带沿海地区，气候温暖湿润雨热同期，雨季降水通过径流输入大量有机质悬浮物泥沙等河湖水库中，造成水体水质在时间和空间上变化较大。Xu等[71]利用原位反射率和水样数据建立了估算中国鄱阳湖复杂淡水环境中CDOM吸收的模型。作者所提出的基于波段比的CDOM反演模型对于鄱阳湖复杂光学水体是可靠的。东部地区水体由于受人类活动影响较大，富营养化日趋严重，CDOM的吸收较高，组分来源复杂多样且时间变异率较大，水体中CDOM的精确遥感反演具有挑战性，准确估算CDOM的浓度对于东部地区水质监测至关重要。Zhao等[76]提出了一种支持向量机算法SVM（Support Vector Machine）反演珠江口高浑浊海域CDOM在443 nm处吸收系数极其日动态，结果表明支持向量机算法较以往经验波段比值法具有较高的精度，并且在河口海岸复杂的水体中，具有高精度的CDOM遥感反演甚至可以为河口洋流羽流变化提供动力学观察。Ling等[65]利用四次巡航数据集，结合地球静止海洋彩色成像仪（GOCI）数据对水况通常光学复杂、浑浊、变化频繁的渤海和黄海进行CDOM浓度的估算反演，有效促进了对光学复杂的混浊沿海水域的简单而有效的CDOM估计方法的开发和应用。Liu等[77]利用MODIS数据建立的Rrs（667）/Rrs（443）和Rrs（748）/Rrs（412）波段比算法对广东省珠江口4个季节CDOM以及DOC进行估算。结果发现CDOM与DOC存在共变关系，内陆淡水的输入是珠江口CDOM的主要来源，来自浮游植物、微生物群落、湿地等的CDOM刚好平衡了河流CDOM的降解。基于水体光学特性开发的半解析方法QAA具有较高的适应性能，但当水体光学特性复杂CDOM浓度较高或由非藻类颗粒物占为主导时QAA的精度将会显著降低。Zhu等[78]通过改进的QAA-CDOM对密西西比河、亚马逊河和莫尔顿湾的CDOM进行评估，并且提高了河流主导的海岸带和其他沿海环境CDOM动态的高分辨率观测。Saiyidah Munirah[79]对马来西亚Likas河口CDOM吸收特性的空间和季风变异进行研究，结果发现季风变化可能改变研究区CDOM的来源。Pace等[80]的研究表明，位于五大湖区的密歇根州北部20个湖泊的夏季CDOM水平在6年期间发生了实质性的同步变化，他们将这些变化与影响流域外来有机物输入的气候条件联系起来。

从区域和类型上分析发现，全球不同纬度带下的气候因素综合对CDOM分布和特征产生长期影响[48,81]。关于我国内陆水体中CDOM的遥感反演研究近年更高频地集中在我国东南经济发达内陆水体水量充足地区，这里关于长江太湖及其有关水域的研究极其丰腴。张运林等[82-85]都先后利用经验或半经验方法对太湖等进行CDOM的反演与溯源分析，反演结果一致指向季节性差异较大且近岸浓度高于湖心的时空分布规律，揭示了CDOM的吸收和浓度受自然和人为多种因素共同作用。内陆水体中江河湖库都有其各异的光学性质，水库通常具有提供生产生活用水的重要作用。对水库中CDOM吸收与分布的遥感反演与监测有助于实现对水库水质的预警和管理[55,86]。在季节交替动容循环[87]期间，往往会导致内陆水体以及河口沿海水域CDOM浓度的显著性变化[88]。冯庆龙等[69,89-90]分别对太湖春秋冬等不同季节CDOM空间分布进行研究发现太湖水体中CDOM浓度在时间和空间分布

上有很大差异，不同季节变化明显，同一季节内CDOM水平波动明显。这一规律在高纬度极地地区[87]中季节交替气候变化下CDOM同样显现。有关研究[91-92]显示CDOM水平的季节性下降，并将这种损失与光漂白即由光化学反应引起的DNOM中显色官能团的损失联系起来。气候可以通过改变光漂白的数量和改变湖泊DOC的来源来改变CDOM的水平[80]。Xu等[71]建立了估算中国鄱阳湖复杂淡水环境中CDOM吸收的波段比值模型，估算了355 nm处的CDOM吸收系数。按照TSM浓度不同分类建立CDOM的反演模型，由此对于内陆光学复杂水体根据固有光学活性参数进行分类建模在一定程度上可以减小模型误差提高反演精度。此外，近年来极端事件[93]的频发可能导致CDOM浓度在短时间内发生突变[94]。孙璐等[95]利用优化后的QAA-CDOM-BP算法，对长江口及其邻近海域CDOM的日内变化进行反演和分析发现CDOM浓度主要受潮流径流等共同影响。在更大的空间尺度上，内陆和海洋间的水循环以及洋流会影响CDOM的分布。例如北大西洋暖流可能会促进CDOM沿特定途径的传播[96]。综合利用多尺度观测和模式模拟有助于更深入地了解这些复杂的时空动态。

结合盐度，CDOM的吸收特性具有作为淡水输入的示踪剂的潜力[97]，并且CDOM吸收与盐度的关系在沿海及内陆对水体CDOM吸收特性的遥感研究中非常有用[56]。按湖泊盐度区分发现，中纬度地区的咸水湖微咸水湖大致分布在我国西部地区，以内陆封闭湖为主，具体包括青藏高原湖区、蒙新湖区和东北湖区，矿化程度结合独特的高原山地、温带大陆性气候孕育了不同于东南沿海水体的CDOM特性。Liu等[98]在对青藏高原湖区的野外考察与室内实验后得出的结论验证了前人的这一理论，并在发现咸水湖和微咸水湖的长时间保水特性会改变CDOM吸收这一基础上，建立遥感数据与原位实测数据的回归模型，并进一步通过将内陆水域根据盐度梯度划分为4个独立的组，建立更加稳健的CDOM-DOC关系为遥感反演可达性低的区域水体CDOM以及DOC提供了很好的思路。Li等[99]对青藏高原长江、黄河源区的CDOM进行光谱研究与分析发现其主要来源于腐殖质，与环境变量之间关系明显，荧光组分的变化能够反映CDOM的动力学响应。CDOM分布浓度所决定的吸光特性在很大程度上影响水体整体光学特性和水下光场，这在高山和极地极寒地区的低营养水体或富含腐殖质的湖泊中尤为重要。淡水环境中的CDOM、TSM、Chla分别主导不同水体的光学变异性，特别是在短波长处的吸收尤为明显[97]，CDOM主要来源于外源输入且更容易受到光化学降解，因此经验算法多余解析算法因此遥感算法不具有可迁移性。高盐度的海水中的CDOM水平远低于内陆水体已成为共识，海洋与内陆水体中有关影响水体固有光学量IOPs的其他成分也有很大差异。早在上世纪海洋水色遥感领域的科学家们就发现地表水中的CDOM吸收与水体盐度显著相关[100]。不同于中低纬度地区，北冰洋高纬度极低地区的CDOM吸收更高[101]，并且该地区水体受Chla、SPM质量浓度等物质影响较大。可见，盐度影响水体有机质的溶解度以及和其他溶解性物质的相互作用，盐度水平对每个区域内的CDOM有不同的影响[102]。

4 CDOM遥感反演影响因素

4.1 内陆水体CDOM监测时空差异环境因素

虽然CDOM通常被认为是天然水体中一种相对稳定的特性，但是内陆水体不论是湖泊、河流、水库CDOM水平在季节和多年尺度上都存在较高的变异率，这一稳定性及时间变异性的矛盾关系是否能够允许使用一日、一月、一季度甚至一年内的实测数据样本以及遥感数据还未可知。在流经流域的水流路径变化的响应下，流动水中的CDOM水平可能出现较大的时间变化。例如，Brinkman和Hozalski[103]发现2007年在明尼苏达州明尼阿波利斯附近的密西西比河中，DOC和CDOM在254nm处的吸收率发生了很大变化，$a254$是DOC和CDOM的间接测量值，最高DOC值与春季径流和秋季降雨有关，但$a254$仅在秋季达到峰值，这表明CDOM可能不与DOC共变，而受其他因素影响。2015～2020《水污染防治行动计划》发布之后HIX随营养状态降低而降低的趋势[104]，环境因子、湖泊水文以及人类活动是影响HIX的主要驱动因素。研究发现不同纬度带下水体内源温度大致呈现由低纬向高纬递减，热量阶梯差异下的羽流变化带来有机物的转移；不同纬度下水体流域范围内的土地利用状况在一定程度决定了人为因素的干扰如工业生活污水排放造成的点源污染和农业活动造成的面源污染等[105]；此外不同水体所处的地理分异除纬度地带性

差异外还有垂直地带性以及海陆差异等，这些因素综合造成气候（大气温度、气压、风速、降水等）不同因此对CDOM与DOC也有显著影响。

4.2　不同类型水体CDOM遥感模型异构

近几十年来，对CDOM的研究取得了丰硕的成果，但在理论、数据、反演模型等方面仍存在一些瓶颈。不同水体在遥感反射率光谱与吸收光谱上存在着显著的差异，这是由不同水体中光学活性物质组成及贡献比例差异造成的，也是引起水色参数反演算法不确定性的原因。其次CDOM的浓度水平难以精确测量，CDOM吸收但不散射或反射光，在富含CDOM的水域中，离水光信号微弱。虽然CDOM的光吸收随可见波长增加呈指数下降，但是可见光谱中没有与CDOM唯一相关的可用于反映其水平高低的波带，国内外学者多采用250～450 nm范围内特定波长下的吸收系数值作为CDOM浓度的表征。内陆水体成分复杂，不同自然人为因素条件下水体中的光学活性物质对总体光学特性影响存在很大差异。在光学复杂的水域（CDOM、NAP和Phytoplankton）中各种光学活性物质可能不同程度的主导水光反射与散射，往往很难将CDOM和其他物质信号区分开，因此测量低至中等水平的CDOM特别困难。Kutser等[106]于2001年研究了一种半解析模型，用于从机载光谱仪收集的湖泊高光谱数据中检索CDOM、叶绿素和悬浮物的值。Zhu等[107]也使用半解析反演技术检索吸收系数、a_{CDOM}和a_{NAP}（非藻类颗粒物吸收）的独立波长相关值。基于在密西西比河和阿恰法拉亚河上收集的高光谱数据，CDOM和NAP具有相似的光谱形状和斜率。因此，不同水体中自然和人为因素影响下的CDOM光学响应的不确定性影响CDOM建模与反演精度的稳定与通用性。

遥感数据的加入对于大尺度环境监测来说是一次概念和技术的创新，然而不同的大气校正方法显著影响遥感数据准确性。一般来说，必须使用大气校正以避免可能大于水参数变异性的不必要的光照效应。吸光度随波长增加呈指数下降，这意味着它对反射率的影响在蓝色波段范围更大，而在这一波段范围中大气校正更困难[62]，通常更倾向于更加关注内陆水体反射信号中的绿色和红色波段[108-110]。然而，Toming等[111]发现，对于Sentinel-2A，当使用大气未校正的图像时，小尺度（单幅图像）的a(420)检索结果更好。在涉及多幅图像的大尺度上，我们发现当对图像应用大气校正时，a(420)检索更成功。通过比较B3/B4a波段比大气校正前后的原位和模拟a(420)，我们评估了使用Sen2Cor的附加值。在此分析的基础上，我们发现大气校正总体上工作良好，并且使用重复k-fold交叉验证来评估算法性能，以获得更合理的模型系数估计。光谱的任何差异都会导致CDOM带比检索的绝对精度存在较大差异。这可以用依赖于每个波段比的光谱测量的偏差和不确定性来解释。Kutser等[62]指出，大气校正是困难的在蓝色区域，特别是对于湖泊反射率较低，并得出结论，使用绿色的波段是更可取的。

5　结　语

在全球气候环境变化的背景下，通过遥感反演手段监测内陆水体的有机物、有机碳等水质参数的分布与动态变化对于更深刻把握水体污染物浓度、来源、转化机制以及全球碳循环和碳估算有理论意义。研究进展对于当前尚处于研究空白但拥有世界上最大的淡水系统的非洲大陆[112]，变化多样且分布广泛地表水的两极地区，对全球气候和水资源具有重大意义的水体至关重要。全球不同水域已有研究进行总结归纳，有助于抓住其中的关键异同点为未来跨越时空的局限开发适用于更广阔水域的反演模型、更精确估算水体碳含量奠定基础。

（1）阐明CDOM的分布和动态变化对于监测和管理内陆水环境及水质健康至关重要。基于CDOM吸收特性建立的遥感模型反演出的CDOM分布状况能够更加直观的表现出水体中有机质的演化与归趋。在不同自然地带分异下进一步根据水体光学特性建立的模型能够更加准确攫取影响CDOM变化规律的关键因子，提高预测结果的真实有效性。

（2）不同自然纬度带下的气候（如温度、降水、风速等）水文条件（径流、排泄、水量等）以及人类活动程度之间存在较大差异，这些因素直接决定了CDOM组成来源、演化过程以及水体理化参数等都存在很大差别，因此基于不同区域不同水体模型的差异是必要的综合考量的结果。但在未来适应更大范围更长时间序列下湖泊的遥感反演模型对于未来大尺度水环境研究以及全球碳循环机制有重要意义。

（3）遥感可以提供跨越各种湖泊生态系统的实

时同步的信息,未来可以将更为深层的内陆水体理化过程纳入研究,将宏观尺度光学遥感与微观尺度分子原子级光谱、同位素、质谱等多种技术手段融合后可以作为综合管理各种内陆水体水质的宝贵工具,为全球生态环境综合治理提供依据。

(4)随着人工智能(AI)的快速发展,AI与CDOM遥感监测的未来结合,将在环境科学和水质管理领域引发深刻变革,进一步提升预测模型的泛化能力。此外,AI驱动的遥感大模型可实现CDOM的实时动态监测与污染预警。随着边缘计算与轻量化模型的发展,CDOM遥感监测将迈向实时化与智能化,赋能全球水环境保护。

参考文献(References):

[1] Al-Kharusi, HENSGENS G, ABDI A M, *et al*. Drought offsets the controls on colored dissolved organic matter in lakes [J]. Remote Sensing, 2024, 16(8): 1345. DOI: 10.3390/rs16081345

[2] ZHANG Y L, ZHOU L, ZHOU Y Q, *et al*. Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143550. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143550

[3] MURPHY K R, STEDMON C A, WAITE T D, *et al*. Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 2008, 108(1/2): 40-58. DOI: 10.1016/j.marchem.2007.10.003

[4] AHONEN S A, JONES R I, SEPPÄLÄ J, *et al*. Phytoplankton absorb mainly red light in lakes with high chromophoric dissolved organic matter[J]. LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPGY, 2025, 9999: 1-16 DOI: 10.1002/lno.70034

[5] MENENDEZ A, TZORTZIOU M. Driving factors of colored dissolved organic matter dynamics across a complex urbanized estuary[J]. Science of The Total Environment, 2024, 921: 171083. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171083

[6] Menendez A, Tzortziou M, Augmenting estuary monitoring from space: New retrievals of fine-scale CDOM quality and DOC exchange[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2025, 137: 104389. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104389.

[7] MESFIOUI R, ABDULLA H A N, HATCHER P G. Photochemical alterations of natural and anthropogenic dissolved organic Nitrogen in the York River[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 159-167. DOI: 10.1021/es504095c

[8] CHEN L, LIU L, LIU S, *et al*. The application of remote sensing technology in inland water quality monitoring and water environment science: Recent progress and perspectives[J]. Remote Sens, 2025, 17: 667. DOI: 10.3390/rs17040667.

[9] ZHOU Y Q, ZHANG Y L, SHI K, *et al*. Lake Taihu, a large, shallow and eutrophic aquatic ecosystem in China serves as a sink for chromophoric dissolved organic matter[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(2): 597-606. DOI: 10.1016/j.jglr.2015.03.027

[10] COBLE P G. Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color[J]. ChemInform, 2007, 38(20): 402-418. DOI: 10.1002/chin.200720265

[11] KOWALCZUK P, COOPER W J, DURAKO M J, *et al*. Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: Relationships between fluorescence and its components, absorption coefficients and organic carbon concentrations[J]. Marine Chemistry, 2010, 118(1/2): 22-36. DOI: 10.1016/j.marchem.2009.10.002

[12] TRANVIK L J, DOWNING J A, COTNER J B, *et al*. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate[J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6part2): 2298-2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298

[13] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, *et al*. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706-719. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2009.03.002

[14] FERRARI G M, TASSAN S. Evaluation of yellow substance absorption on the remote sensing of water quality in the gulf of naples: A case study[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(12): 2177-2189. DOI: 10.1080/01431169208904261

[15] KARABASHEV G S, KHANAEV S A, KULESHOV A F. On the variability of yellow substance in the Skagerrak and the Kattegat[J]. Oceanologica Acta, 1993, 16(2): 115-125.

[16] EVANS C D, MONTEITH D T, COOPER D M. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts[J]. Environmental Pollution, 2005, 137(1): 55-71. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.12.031

[17] HÄDER D P, KUMAR H D, SMITH R C, *et al*. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2007, 6(3): 267-285. DOI: 10.1039/b700020k

[18] BERGAMASCHI B A, FLECK J A, DOWNING B D, *et al*. Methyl mercury dynamics in a tidal wetland quantified using *in situ* optical measurements[J]. Limnology and Oceanography, 2011, 56(4): 1355-1371. DOI: 10.4319/lo.2011.56.4.1355

[19] VINCENT R K, QIN X M, MCKAY R M L, *et al*. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 381-392. DOI: 10.1016/j.rse.2003.10.014

[20] CAO F, MEDEIROS P M, MILLER W L. Optical characterization of dissolved organic matter in the Amazon River plume and the Adjacent Ocean: Examining the relative role of mixing, photochemistry, and microbial alterations[J]. Marine Chemistry, 2016, 186: 178-188. DOI: 10.1016/j.marchem.2016.09.007

[21] CHEN H, MENG W, ZHENG B H, *et al*. Optical signatures of dissolved organic matter in the watershed of a globally large river (Yangtze River, China)[J]. Limnologica, 2013, 43(6): 482-491. DOI: 10.1016/j.limno.2013.04.004

[22] DITTMAR T, HERTKORN N, KATTNER G, *et al*. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20 (1): GB1012. DOI: 10.1029/2005GB002570

[23] DUBOIS K D, LEE D, VEIZER J. Isotopic constraints on alkalinity, dissolved organic carbon, and atmospheric carbon dioxide fluxes in the Mississippi River[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, 115: G02018. DOI: 10.1029/2009JG001102

[24] GUO L D, COLEMAN C H, SANTSCHI P H. The distribution of colloidal and dissolved organic carbon in the gulf of Mexico [J]. Marine Chemistry, 1994, 45 (1/2): 105-119. DOI: 10.1016/0304-4203(94)90095-7

[25] GUO L D, TANAKA T, WANG D L, *et al*. Distributions, speciation and stable isotope composition of organic matter in the southeastern Bering Sea[J]. Marine Chemistry, 2004, 91 (1/2/3/4): 211-226. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.07.002

[26] HUNG J J, LIN P L, LIU K K. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4/5): 545-569. DOI: 10.1016/S0278-4343(99)00085-0

[27] HUNG J J, WANG S M, CHEN Y L. Biogeochemical controls on distributions and fluxes of dissolved and particulate organic carbon in the Northern South China Sea[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54 (14/15): 1486-1503. DOI: 10.1016/j.dsr2.2007.05.006

[28] SANTINELLI C, NANNICINI L, SERITTI A. DOC dynamics in the meso and bathypelagic layers of the Mediterranean Sea[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(16): 1446-1459. DOI: 10.1016/j.dsr2.2010.02.014

[29] SEIDEL M, DITTMAR T, WARD N D, *et al*. Seasonal and spatial variability of dissolved organic matter composition in the lower Amazon River[J]. Biogeochemistry, 2016, 131 (3): 281-302. DOI: 10.1007/s10533-016-0279-4

[30] THOMAS C, CAUWET G, MINSTER J F. Dissolved organic carbon in the equatorial Atlantic Ocean [J]. Marine Chemistry, 1995, 49(2/3): 155-169. DOI: 10.1016/0304-4203(94)00061-H

[31] TRIGG S, FLASSE S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(16): 3161-3168. DOI: 10.1080/01431160050145045

[32] WANG D L, HENRICHS S M, GUO L D. Distributions of nutrients, dissolved organic carbon and carbohydrates in the western Arctic Ocean[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(14): 1654-1667. DOI: 10.1016/j.csr.2006.05.001

[33] SONG K S, WEN Z D, SHANG Y X, *et al*. Quantification of Dissolved Organic Carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 391-402. DOI: 10.1016/j. jenvman. 2018.03.121

[34] LI Sijia, SONG Kaishan, ZHAO Ying, *et al*. Absorption characteristics of particulates and CDOM in waters of Chagan Lake and Xinlicheng reservoir in autumn[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 112-122.[李思佳, 宋开山, 赵莹, 等. 查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 112-122.]

[35] WU Ming, HUANG Jue, GONG Lijiao, *et al*. Analysis of DOC concentration variation and driving forces in the Arctic River Lena based on long-term Landsat time series[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(3): 830-845.[吴铭, 黄珏, 宫丽娇, 等. 长时序Landsat的北极Lena河DOC浓度变化及驱动力分析[J]. 遥感学报, 2021, 25(3): 830-845.]

[36] RAN L S, LU X X, SUN H G, *et al*. Spatial and seasonal variability of organic carbon transport in the Yellow River, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498: 76-88. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.018

[37] PIENITZ R, VINCENT W F. Effect of climate change relative to ozone depletion on UV exposure in subarctic lakes[J]. Nature, 2000, 404(6777): 484-487. DOI: 10.1038/35006616

[38] LI Zhengmao, HUANG Jue, ZHANG Ke. Remote sensing monitoring of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the Arctic Ocean[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(1): 148-156.[李正茂, 黄珏, 张珂. 北冰洋有色溶解有机物与溶解有机碳遥感监测[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(1): 148-156.]

[39] LI Liuyang. Spatio-temporal distribution and influencing factors analysis of CDOM in Eutrophic Lakes [D]. Kaifeng: Henan University, 2019.[李柳阳. 富营养化湖泊CDOM浓度的时空分布特征及影响因素分析——以太湖为例[D]. 开封: 河南大学, 2019.]

[40] SONG Kaishan, WEN Zhidan, LIU Ge, *et al*. The research progress of CDOM optical characteristics and remote sensing retrieval for inland waters[J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 115-125.[宋开山, 温志丹, 刘阁, 等. 内陆水体CDOM光学特性与遥感反演研究进展[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 115-125.]

[41] ZHANG Yunlin. Advances in chromophoric dissolved organic matter in aquatic ecosystems[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006, 28(3): 119-127.[张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2006, 28(3): 119-127.]

[42] DEL CASTILLO C E, GILBES F, COBLE P G, *et al*. On the dispersal of riverine colored dissolved organic matter over the West Florida Shelf[J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45(6): 1425-1432. DOI: 10.4319/lo.2000.45.6.1425

[43] GREEN S A, BLOUGH N V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters[J]. Limnology and Oceanography, 1994, 39(8): 1903-1916. DOI: 10.4319/lo.1994.39.8.1903

[44] GUO W D, STEDMON C A, HAN Y C, *et al*. The conser-

vative and non-conservative behavior of chromophoric dissolved organic matter in Chinese estuarine waters[J]. Marine Chemistry,2007,107(3):357-366. DOI:10.1016/j.marchem.2007.03.006

[45] NIEKE B, REUTER R, HEUERMANN R, *et al*. Light absorption and fluorescence properties of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM), in the St. Lawrence Estuary (Case 2 waters)[J].Continental Shelf Research,1997,17(3):235-252. DOI: 10.1016/S0278-4343(96)00034-9

[46] SASAKI H, MIYAMURA T, SAITOH S I, *et al*. Seasonal variation of absorption by particles and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 64(2/3): 447-458. DOI: 10.1016/j.ecss.2005.03.008

[47] SIDDORN J R, BOWERS D G, HOGUANE A M. Detecting the Zambezi River plume using observed optical properties [J]. Marine Pollution Bulletin,2001,42(10):942-950. DOI: 10.1016/S0025-326X(01)00053-4

[48] STEDMON C A, AMON R M W, RINEHART A J, *et al*. The supply and characteristics of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Arctic Ocean: Pan Arctic trends and differences [J]. Marine Chemistry, 2011, 124 (1/2/3/4): 108-118. DOI: 10.1016/j.marchem.2010.12.007

[49] ASMALA E, PAERL R W,Osburn C L, *et al*. Optical transformation of riverine colored dissolved organic matter during salt-induced flocculation[J]. Biogeochemistry ,2025,168, 47. DOI:10.1007/s10533-025-01237-4

[50] HUANG Miaofen, WANG Difeng, XING Xufeng, *et al*. The research on remote sensing mode of retrieving $a_g(440)$ in Zhujiang River Estuary and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(7): 67-77.[黄妙芬, 王迪峰, 邢旭峰, 等. 珠江口海域$a_g(440)$遥感模式研究及应用[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 67-77.]

[51] HUANG Miaofen, WANG Zhonglin, XING Xufeng, *et al*. Remote sensing analysis of the distribution characteristics of CDOM and COD in Northern Chu island waters off Weihai, Shandong Province[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(2): 63-70.[黄妙芬, 王忠林, 邢旭峰, 等. 威海市褚岛北部海域CDOM和COD分布特征遥感分析[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(2): 63-70.]

[52] LI Aiming, XIA Guangping, QI Xin, *et al*. The retrieval method for water quality CDOM parameter of Tiande Lake in Zhengzhou based on hyperspectral remote sensing of Zhuhai-1 [J].Journal of Geomatics Science and Technology,2020,37(4): 388-91,97[李爱民, 夏光平, 齐鑫,等. 珠海一号高光谱遥感的郑州天德湖水质CDOM反演方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2020, 37(4):388-91,97.]

[53] PIAO Dewei,WANG Fengkun, Envionmental conditions and the protecton measures for waters of Lake Xingkai [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(2):196-202.[朴德雄, 王凤昆. 兴凯湖水环境状况及其保护对策 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(2):196-202.]

[54] YU Guo, FU Dongyang, ZHONG Yafeng, *et al*. Remote sensing retrieval of colored dissolved organic matter in Zhanjiang Coastal Area[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(1): 55-62.[余果, 付东洋, 钟雅枫, 等. 湛江近海有色溶解有机物遥感反演[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(1): 55-62.]

[55] ZHOU Yaming, LI Junsheng, SHEN Qian, *et al*. Retrieving chromophoric dissolved organic matter in Guanting Reservoir based on in situ measured reflectance data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(4):1015-1019.[周亚明,李俊生,申茜,等. 基于水面光谱数据的官厅水库有色可溶性有机物反演[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(4):1015-1019.]

[56] KOWALCZUK P, STEDMON C A, MARKAGER S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll[J]. Marine Chemistry, 2006, 101(1/2): 1-11. DOI: 10.1016/j.marchem.2005.12.005

[57] MIAO S, LYU 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[J]. Ecological Indicators,2019,101:399-409. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.01.039

[58] SHANG Yingxin. Characterization of optical properties and remote sensing retrieval of CDOM in typical reservoirs across China[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2020.[尚盈辛. 中国典型水库CDOM光学特性及遥感反演研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.]

[59] Li R, Mishra D R,Chen X, *et al*. Large River overrides tidal marsh Outwelling in spatial gradients of dissolved organic carbon: observations across yangtze estuary-coastal marsh complex[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2025, 18: 10026-10041. DOI: 10.1109/JSTARS.2025.3543417.

[60] HE Wei, BAI Zelin, LI Yilong, *et al*. Advances in the characteristics analysis and source identification of the dissolved organic matter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 359-372.[何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 359-372.]

[61] WU Zhiming, LI Jianchao, WANG Rui, *et al*. Estimation of CDOM concentration in inland lake based on random forest using Sentinel-3A OLCI[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 979-991.[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[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 979-991.]

[62] KUTSER T, PIERSON D C, KALLIO K Y, *et al*. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(4): 535-540. DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.009

[63] SLONECKER E T,JONES D K,PELLERIN B A. The new Landsat 8 potential for remote sensing of Colored Dissolved Organic Matter(CDOM)[J]. Marine Pollution Bulletin,2016, 107(2): 518-527. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.02.076

[64] DVORNIKOV Y, LEIBMAN M, HEIM B, *et al*. Terrestrial CDOM in Lakes of Yamal Peninsula: Connection to lake

and lake catchment properties[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 167. DOI: 10.3390/rs10020167

[65] LING Z B, SUN D Y, WANG S Q, *et al*. Remote sensing estimation of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) from GOCI measurements in the Bohai Sea and Yellow Sea [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(7): 6872-6885. DOI: 10.1007/s11356-019-07435-6

[66] ZHU W N, YU Q, TIAN Y Q. Uncertainty analysis of remote sensing of colored dissolved organic matter: Evaluations and comparisons for Three rivers in North America[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 84: 12-22. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.07.005

[67] LI J W, YU Q, TIAN Y Q, *et al*. Spatio-temporal variations of CDOM in shallow inland waters from a semi-analytical inversion of Landsat-8[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 218: 189-200. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.014

[68] LI J W, YU Q, TIAN Y Q, *et al*. Remote sensing estimation of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) in optically shallow waters[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 128: 98-110. DOI: 10.1016/j. isprsjprs. 2017. 03.015

[69] FENG Longqing, SHI Zhiqiang, PAN Jianjun, *et al*. Characteristics of spectral absorption, fluorescence and remote sensing algorithms of chromophoric dissolved organic matter in winter, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3): 348-356.[冯龙庆, 时志强, 潘剑君, 等. 太湖冬季有色可溶性有机物吸收荧光特性及遥感算法[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 348-356.]

[70] LIU G, LI S J, SONG K S, *et al*. Remote sensing of CDOM and DOC in Alpine lakes across the Qinghai-Tibet Plateau using Sentinel-2A imagery data[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112231. DOI: 10.1016/j. jenvman.2021.112231

[71] XU J, FANG C Y, GAO D, *et al*. Optical models for remote sensing of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) absorption in Poyang Lake[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 142: 124-136. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.004

[72] SHANG Y X, LIU G, WEN Z D, *et al*. Remote estimates of CDOM using Sentinel-2 remote sensing data in reservoirs with different trophic states across China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112275. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112275

[73] DE STEFANO L G, VALDIVIA A S, GIANELLO D, *et al*. Using CDOM spectral shape information to improve the estimation of DOC concentration in inland waters: A case study of Andean Patagonian Lakes[J]. Science of the Total Environment, 2022, 824: 153752. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2022. 153752

[74] CHEN Y L, ARNOLD W A, GRIFFIN C G, *et al*. Assessment of the chlorine demand and disinfection byproduct formation potential of surface waters *via* satellite remote sensing[J]. Water Research, 2019, 165: 115001. DOI: 10.1016/j. watres. 2019.115001

[75] ZHANG Bo, ZHANG Bo, HONG Mei, *et al*. Advance in remote sensing of lake water quality[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 301-310.[张博, 张柏, 洪梅, 等. 湖泊水质遥感研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 301-310.]

[76] ZHAO J, CAO W X, XU Z T, *et al*. Estimating CDOM concentration in highly turbid estuarine coastal waters[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(8): 5856-5873. DOI: 10.1029/2018JC013756

[77] LIU D, BAI Y, HE X Q, *et al*. The dynamic observation of dissolved organic matter in the Zhujiang (Pearl River) Estuary in China from space[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(7): 105-117. DOI: 10.1007/s13131-017-1248-7

[78] ZHU W N, YU Q. Inversion of chromophoric dissolved organic matter from EO-1 hyperion imagery for turbid estuarine and coastal waters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(6): 3286-3298. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2224117

[79] MOHD-SHAZALI S M, MADIHAH J S, ALI N, *et al*. Dynamics of absorption properties of CDOM and its composition in Likas estuary, North Borneo, Malaysia[J]. Oceanologia, 2022, 64(4): 583-594. DOI: 10.1016/j.oceano.2022.04.005

[80] PACE M L, COLE J J. Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2002, 47(2): 333-342. DOI: 10.4319/lo.2002.47.2.0333

[81] NELSON N B, SIEGEL D A. The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter[J]. Annual Review of Marine Science, 2013, 5: 447-476. DOI: 10.1146/annurev-marine-120710-100751

[82] ZHANG Yunlin, QIN Boqiang. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang bay and Da Taihu lake in Taihu lake in summer and winter[J]. 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[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 415-423.]

[83] MA Ronghua, DAI Jinfang, ZHANG Yunlin. Influence factors and slope coefficients of spectral absorption of Coloured Dissolved Or Ganic Matter(CDOM) in East Taihu Lake, China[J]. Journal of Lake Science, 2005, 17(2): 120-6.[马荣华, 戴锦芳, 张运林. 东太湖CDOM吸收光谱的影响因素与参数确定[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 120-126.]

[84] LE Chengfeng, LI Yunmei, ZHA Yong, *et al*. Seasonal variation of in water constituents' absorption properties in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2008, 29(9): 2448-2455.[乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2448-2455.]

[85] JIANG Guangjia, MA Ronghua, DUAN Hongtao. Estimation of the contribution of Chromophoric Dissolved Organic Matter to total light absorption by remote sensing in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 914-922.[姜广甲, 马荣华, 段洪涛. 太湖有色溶解有机物对水体总吸收贡献的遥感估算[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 914-922.]

[86] FANG Kaikai, HUANG Tinglin, ZHANG Chunhua, *et al*. Summer absorption characteristics, spatial distribution and source analysis of CDOM in Zhoucun Reservoir in Huaihe

Catchment[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 151-159.[方开凯, 黄廷林, 张春华, 等. 淮河流域周村水库夏季CDOM吸收光谱特征、空间分布及其来源分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 151-159.]

[87] GRANSKOG M A, STEDMON C A, DODD P A, *et al*. Characteristics of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Arctic outflow in the Fram Strait: Assessing the changes and fate of terrigenous CDOM in the Arctic Ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117(C12). DOI: 10.1029/2012JC008075

[88] HARVEY E T, KRATZER S, ANDERSSON A. Relationships between colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in different coastal gradients of the Baltic Sea [J]. Ambio, 2015, 44(3): 392-401. DOI: 10.1007/s13280-015-0658-4

[89] Liu Zhonghua, LI Yunmei, LU Heng, *et al*. Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 438-447.[刘忠华, 李云梅, 吕恒, 等. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 438-447.]

[90] ZHANG Yunlin, FENG Sheng, MA Ronghua, *et al*. Spatial variation and estimation of optically active substances in Taihu Lake in autumn of 2004[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(9): 967-972.[张运林, 冯胜, 马荣华, 等. 太湖秋季光学活性物质空间分布及其遥感估算模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(9): 967-972.]

[91] SHANK G C, ZEPP R G, VÄHÄTALO A, *et al*. Photobleaching kinetics of Chromophoric Dissolved Organic Matter derived from mangrove leaf litter and floating Sargassum colonies[J]. Marine Chemistry, 2010, 119(1-4): 162-171. DOI: 10. 1016/j.marchem.2010.01.003

[92] ZHANG Y L, LIU X H, OSBURN C L, *et al*. Photobleaching response of different sources of Chromophoric Dissolved Organic Matter exposed to natural solar radiation using absorption and excitation-emission matrix spectra [J]. Plos One, 2013, 8(10): e77515. DOI: 10.1371/journal.pone.0077515

[93] YUAN X, WANG Y M, JI P, *et al*. A global transition to flash droughts under climate change[J]. Science, 2023, 380(6641): 187-191. DOI: 10.1126/science.abn6301

[94] ZHOU Y Q, ZHOU J, JEPPESEN E, *et al*. Will enhanced turbulence in inland waters result in elevated production of autochthonous dissolved organic matter?[J]. Science of the Total Environment, 2016, 543: 405-415. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.051

[95] SUN Lu, JIANG Jingang, ZHU Weining. Remote sensing inversion and daily variation of CDOM based on GOCI in the Changjiang Estuary and adjacent waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(9): 133-145.[孙璐, 蒋锦刚, 朱渭宁. 基于GOCI影像的长江口及其邻近海域CDOM遥感反演及其日内变化研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(9): 133-145.]

[96] NELSON N B, SIEGEL D A, CARLSON C A, *et al*. Hydrography of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the North Atlantic[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2007, 54(5): 710-731. DOI: 10.1016/j.dsr.2007.02.006

[97] STEDMON C A, OSBURN C L, KRAGH T. Tracing water mass mixing in the Baltic-North Sea transition zone using the optical properties of coloured dissolved organic matter[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(1): 156-162. DOI: 10.1016/j.ecss.2009.12.022

[98] LIU G, LI S J, SONG K S, *et al*. Remote sensing of CDOM and DOC in alpine lakes across the Qinghai-Tibet Plateau using Sentinel-2A imagery data[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112231. DOI: 10.1016/j. jenvman.2021.112231

[99] LI D B, PAN B Z, ZHENG X, *et al*. CDOM in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers, China: Optical properties, possible sources, and their relationships with environmental variables[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(26): 32856-32873. DOI: 10.1007/s11356-020-09385-w

[100] FERRARI G M, DOWELL M D. CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the southern Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47(1): 91-105. DOI: 10.1006/ecss. 1997.0309

[101] SANTIAGO M I, FREY K E. Assessment of empirical and semi-analytical algorithms using MODIS-Aqua for representing *in situ* chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bering, Chukchi, and Western Beaufort Seas of the Pacific Arctic Region[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3673. DOI: 10.3390/rs13183673

[102] ZHOU Y Q, YAO X L, ZHANG Y B, *et al*. Potential rainfall-intensity and pH-driven shifts in the apparent fluorescent Composition of Dissolved Organic Matter in rainwater[J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 638-648. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.02.048

[103] BRINKMAN B M, HOZALSKI R M. Temporal variation of NOM and its effects on membrane treatment[J]. Journal AWWA, 2011, 103(2): 98-106. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2011.tb11405.x

[104] SHANG Y X, SONG K S, LAI F F, *et al*. Remote sensing of fluorescent humification levels and its potential environmental linkages in lakes across China[J]. Water Research, 2023, 230: 119540. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119540

[105] OLMANSON L G, PAGE B P, FINLAY J C, *et al*. Regional measurements and spatial/temporal analysis of CDOM in 10 000+ optically variable Minnesota lakes using Landsat 8 imagery[J]. Science of the Total Environment, 2020, 724: 138141. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138141

[106] KUTSER T, HERLEVI A, KALLIO K, *et al*. A hyperspectral model for interpretation of passive optical remote sensing data from turbid lakes[J]. Science of the Total Environment, 2001, 268(1/2/3): 47-58. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00682-3

[107] ZHU W N, YU Q, TIAN Y Q, *et al*. Estimation of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Mississippi and Atchafalaya river plume regions using above-surface hyperspectral

remote sensing[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116(C2): 1-22. DOI: 10.1029/2010JC006523

[108] GILERSON A A, GITELSON A A, ZHOU J, *et al*. Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 24109-24125. DOI: 10.1364/OE.18.024109

[109] GITELSON A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367-3373. DOI: 10.1080/01431169208904125

[110] MOSES W J, GITELSON A A, PERK R L, *et al*. Estimation of chlorophyll-A concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data[J]. Water Research, 2012, 46(4): 993-1004. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.068

[111] TOMING K, KUTSER T, LAAS A, *et al*. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 640. DOI: 10.3390/rs8080640

[112] PAPA F, CRÉTAUX J F, GRIPPA M, *et al*. Water resources in Africa under global change: Monitoring surface waters from space[J]. Surveys in Geophysics, 2023, 44(1): 43-93. DOI: 10.1007/s10712-022-09700-9

Research Progress on CDOM Remote Sensing Inversion Considering Water Body Type and Regional Characteristics

QIANG Sining[1,2], SHANG Yingxin[1], WEN Zhidan[1], LIU Ge[1], SONG Kaishan[1]

(1.*Northeast Institute of Geography and Agroecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changchun* 130102, *China*;
2.*College of Geography Science*, *Changchun Normal University*, *Changchun* 130123, *China*)

Abstract: Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) exhibits unique optical properties and significant advantages in remote sensing monitoring. However, notable differences exist in the optical characteristics of different CDOM types. This study systematically summarizes CDOM features in global water bodies and various lake types through literature review. This study demonstrates that models established based on aquatic optical properties under different natural geographical zones can more accurately identify the key factors for CDOM variation patterns. This research provides theoretical foundations for regional CDOM monitoring and water quality assessment through remote sensing techniques.

Key words: CDOM; Remote sensing inversion; Optical absorption characteristics