DOI:10.19789/j.1004-9398.2017.02.017

水体中 CDOM 遥感反演研究综述*

扶丹丹 张立燕** 梁志林
(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要

国内外对 CDOM 的研究重点已从研究其物理、化学性质逐渐转向使用遥感技术和数学模型反演其物质浓度. 遥感技术和数学模型反演能够实现快速有效的水质目标管理和全球碳循环研究目标. 本文综合论述了 CDOM 的研究进展和研究成果,探讨了当前该领域研究的主要方向和研究过程中存在的一些亟待解决的问题,并对未来的研究前景和预期实现目标进行了展望.

关键词: CDOM, 碳循环, 遥感反演.
中图分类号: X1

0 前 言

全球大量的碳储存在海洋、大气、土壤和植物中,大多数的碳循环发生在海洋与大气之间、大气与陆地之间,碳随陆地河流迁移至海洋也是一项重要的碳循环过程,它给了我们一个新的视角来观察陆地和海洋碳动态系统以及潜在气候变化的关系. 溶解性有机物(dissolved organic matter,DOM) 是水体中有机碳的一个大的储存库,是地球水圈中有机碳的主要载体和生物体的主要底物,对全球碳循环具有重要的贡献[1]. 有色可溶性有机物(colored dissolved organic matter,CDOM) 是 DOM 的光敏部分[2-4],不仅具有保守性[5-6]而且可以吸收紫外线和可见光[7]. CDOM 经常用作有效的示踪剂用于评价水生环境 DOM 的相关水平和空间分布. 研究表明 CDOM 在 440 nm 的吸收系数是可以从水面上空遥感(现场、航空、星载) 监测的,因为它的光色特性显示在整个紫外和可见光范围内,光的吸收随着波长的增加呈准指数下降[8]. 因此,通过遥感技术对相对 CDOM 水平的量化,可能是研究生态、环境变化和全球尺度碳循环有价值的工具[9]. CDOM 的研究进展已从基于荧光特性和季节变化特征的研究趋向与实际浓度的测量相结合的研究,从实际野外采样测量向遥感数据结合算法反演方向发展,且也已经取得了显著的成功. 遥感反演 CDOM 具有评估尺度 DOM 的潜力,不仅能为水质工作者管理水质提供帮助,也能为学者研究全球尺度气候变化提供便利,具有很重要的研究价值.

1 CDOM 基本特征

Kalle[10] 于 1938 年第一次引入黄色物质这一概念,经过几十年的研究发展,人们现在将该物质称为有色溶解有机物质(CDOM),又称作可溶性有机发色团或者粘质胶性溶解物. CDOM 由腐殖酸、富里酸和芳烃聚合物等物质组成的可溶性有机物混合物,它会减少水中透射的日光,影响光合作用,抑制浮游生物的生长,对水体生物活动造成影响. 根据结构和性质的差异,CDOM 可以分为两类: 类腐殖质和类蛋白质荧光组分[11]. CDOM 具有独特的光谱特征,在蓝色到紫外的短波波段有强烈的吸收光谱,而纯水在红色的长波波段有吸收,因此,不含或少含 CDOM 的水显示出蓝色. 随着 CDOM 的增长,水体颜色逐渐过渡到绿色、黄绿色和褐色.

CDOM 对水环境中的生物活动、物质循环和遥感监测有重要的影响,主要表现在以下几点: 1) CDOM 作为一种光吸收物质,对紫外线有着强烈吸收,对水体生态系统起到一定的保护作用; 2) CDOM

收稿日期: 2016-01-12
* 国家自然科学基金(41201075); 北京市教委科技项目(KM201210028012).
**通讯作者

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

会减少水中透射的日光[12]，影响光合作用. 在河口或者沿海区域，CDOM 的浓度较高，对光的吸收会延展到蓝光波段，与浮游植物吸收波段有重叠，这样就会对浮游植物的光合作用有一定的抑制作用，降低初级生产力，影响水生环境，破坏水体生态系统; 3) CDOM 可以络合金属离子，吸附有机污染物等，影响重金属和有机污染物的迁移等过程[13-14]; 4) CDOM 经过阳光的照射发生光漂白作用后被分解为小分子有机质，能供浮游生物生长繁殖利用; 5) CDOM 的生成、迁移转化对于 C、N、P、S 等元素的生物地球化学循环也起着重要的作用，间接影响着全球气候; 6) CDOM 会妨碍用卫星光谱仪对浮游生物数量和分布的测量. 由此可见，CDOM 的研究对于认识生态系统、地球上日益增强的紫外线的影响及整个生物地球化学循环过程都有着非常重要的意义.

水体中 CDOM 的形成和迁移转化是一个非常复杂的过程，这与水体动植物的分泌物、浮游植物的繁殖、代谢和分解、陆源径流输入、人为活动等过程有着密切的关系. 当前研究认为，水中 CDOM 有三个主要来源: 一是陆源径流输入(由植物尸体降解和沿岸水体中来自土壤的类腐殖质组成) ; 二是现场生物活动产生(包括浮游植物和细菌的有机体化学降解产物) ; 三是沉积物间隙.

CDOM 浓度受季节的影响比较明显. 春季，浮游植物大量繁殖，植物的光合作用增强，会导致海水中 CDOM 的增多. 夏季，CDOM 浓度较低的区域主要出现在光降解能力强而生产率低的表层海水中，而浓度较大的区域主要出现在光降解能力低而生产率高的下层水体. 冬季，CDOM 的分布与混合水层的深度有着明显的关系[15]. 同时雨水中含有较高浓度的 CDOM，这对 CDOM 浓度变化也具有较大的影响[16].

CDOM 归宿一般被认为有 2 个途径: 光化学反应降解[17]和细菌降解释放[18]. 因为光漂白作用是大部分海区 CDOM 的主要归宿[19]，所以光化学反应降解的研究近年来备受学者的关注，且研究表明光降解在南海生源要素的生物地球化学循环中起重要作用[20]. CDOM 经过光化学反应以后，化学性质和理化性质都发生相应的变化[21]，CDOM 在接受自然光特别是紫外辐射暴晒后，吸收明显降低，发生显著的光化学降解，降解过程符合一阶动力学衰减反应[22]. 光化学反应降解不仅可以损失 CDOM 吸收性质和荧光性质，还会向水体释放无机碳和氮，并产生小分子量的有机物，这些重要的营养物质为细菌和微生物的生长提供了有利条件，使得不同海域的细菌和微生物活性增加[7,12]，由此可见，光化学作用及微生物作用对于上层海洋及淡水的碳循环，均起着非常重要的作用.

2　结合荧光性质的 CDOM 研究方法

CDOM 荧光特性的研究在国内外早已开展[23]. CDOM 在特定波长的吸收系数及荧光强度都可代表 CDOM 的浓度水平，可以使用紫外分光光度计来测定 CDOM 吸收系数及光谱斜率[24]. 荧光测量确定地表水在紫外区的 CDOM 吸收系数具有相当好的精度，Vodacek 等[25]研究证明荧光测量能够可靠地估算宽阔海域的 CDOM 并可以依此测量溶解碳的浓度. CDOM 荧光特性也可被用来描述 CDOM 吸收的分布情况. Stedmon 等[26]通过结合荧光光谱和平行因子分析发明了一种快速、有效的表征溶解有机物(DOM) 的荧光组分的方法，该方法可用于 DOM 在一个库的定量和定性变化的示踪剂. NASA 的航空海洋雷达已经在使用 CDOM 荧光现在已经用来描述 CDOM 吸收的分布情况，但对于 CDOM 吸收与荧光关系随时间的变动上，还需要更多的调查研究.

近年三维荧光光谱技术(excitation-emission matrix spectroscopy，EEMS) 得到迅速发展和广泛应用，EEMS 可以提供 CDOM 的最大激发/发射波长(Exmax/Emmax) 和荧光强度等具体信息，也可以对不同来源 CDOM 的谱峰进行区别，因此被认为是一种灵敏的“光谱指纹”技术，在 CDOM 的研究过程中具有十分显著的优势，得到越来越多的国内外相关专家学者的认可. 韩宇超等[27]对厦门湾九龙江口目前河口区使用 EEMS 技术研究发现: 单因水体盐度的变化并不会造成 CDOM 光学特征的明显变化，从河流至外海 CDOM 来源从以陆源为主转变到以海源为主，性质上从以类腐殖质荧光团为主转变到以类蛋白质荧光团为主. 王福利等[28]结合三维荧光光谱分析与吸收光谱两种方法，测定珠江口及广西沿海 CDOM 受陆源输入影响较大，CDOM 吸收光谱的光谱斜率 S(270 ~ 350) 随光辐射而逐渐增加，证明此方法可用于指示光降解引起的 CDOM 分子量的减小趋势. 肖隆庚等[29]利用三维荧光光谱技术分析中国南海有色溶解有机物(CDOM) 荧光组分的垂直分布特征，发现南海 CDOM 的垂直分布受光化学反应、海洋微生物活动及颗粒有机物再矿化的共同影响. 由此可见，诸多研究者利用荧光光谱技术研究不

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同环境水体中 CDOM 的来源和迁移转化并且取得了显著的成果,为国内外学者结合数学模型与传感器的方法研究 CDOM 浓度提供了丰富的研究资料.

三维荧光光谱分析技术虽然应用广泛,但也具有一定的局限性及缺陷: 1) 所检测的物质必须具有能够被捕捉到荧光信息; 2) 使用该技术检测过程中要充分考虑环境因素对检测物质所造成的影响,如溶剂、溶液 pH 值、温度等因素; 3) 该技术在分析中会受到溶液中其他成分的散射影响(主要是瑞利散射和拉曼散射)[30].

3 结合数学模型与传感器的 CDOM 遥感反演研究

卫星遥感具有快速、大范围、周期短、一次性成像成本低等特点,因此近年来国内外学者逐渐转向使用遥感技术结合算法的方式来实现 CDOM 反演研究. CDOM 反演的过程是模型求解的过程,反演的精度取决于遥感图像的精度和模型的准确性,通过研究提出准确的遥感反演模型对于水质研究的未来发展具有十分重要的意义.

3.1 国外 CDOM 遥感反演研究进展

使用遥感反演与数学模型研究 CDOM 的方法在国外早有发展,这种研究方式早在 1991 年就被 Carder 等[31]学者提出,他们发现浮游植物降解产生的碎屑、生物色素和细菌等与 CDOM 具有相似的光谱吸收特征,如果直接使用卫星遥感反演水生植物则会有较大误差,于是,他们便提出了使用算法、反射率模型估算 CDOM 含量的研究方向. 此后的二十年间,结合数学模型和遥感光谱的研究方式得到了迅速的发展. Lee 等[32]提出的沿海水域遥感反射率模型能够同时考虑底反射、CDOM 荧光和水的拉曼散射三个方面的研究结论,且他通过研究证明使用后向散射系数和 Q 因子两个参数的组合模型,能很好的实现实际测量和遥感反射模型反演结果的匹配. Vodacek 等[4]的研究发现,从内陆到外海岸架 CDOM 的吸收和荧光特性逐渐消失,消失度接近 70%,海洋参与降解与 CDOM 的季节性变化导致预测浑浊水体 CDOM 和叶绿素难度增加,并且从他的研究成果可以发现 CDOM 的荧光变化和光吸收之间季节变化关系和荧光量子产率 < 15%,若采用适当的方法,则针对 CDOM 吸收系数的定量遥感机载激光雷达会是一个非常强大的技术. Stedmon 等[33]对丹麦的河口和沿海水域 CDOM 的光学性质进行了研究并提出了估计光谱斜率系数的一种新的方法,该方法能够比传统方法更接近实测的吸收系数(92% 的残差的总和),并且通过这种残渣产生的光谱模型能够分辨出 CDOM 陆源来源的土地使用类型. Zhu 等[34]使用高光谱遥感反演方法反演 CDOM 吸收系数,结合 QAA-E 算法估计 CDOM 浓度,水的吸收、衰减系数等数据,能够使分离 CDOM 的精确度显著改善. Cao 等[35]提出了一套能提高海洋光化学和光生物率计算精度的多元统计新方法,该方法主要包括主成分分析、聚类分析、多元线性回归等内容,通过在 SeaWiFS 传感器波段附带 CDOM 光谱和遥感反射率 R_{rs} 匹配字段数据直接检索在可见光的紫外波长所有 CDOM 吸收光谱 R_{rs},能够进一步解决全球尺度的不同水类型 CDOM 动力学问题. 由此可见,在使用遥感反演 CDOM 浓度方面,国外学者取得了很多突破性的研究进展,他们已经逐步从认识 CDOM 吸收光谱的特征逐渐发展到使用不同的数学模型近似准确分离水体 CDOM 并准确估算其浓度的阶段.

3.2 国内 CDOM 遥感反演研究进展

国内对 CDOM 的研究起步较晚,但是对 CDOM 吸收特性的研究日趋成熟,研究的范围主要是在湖泊(如太湖和巢湖等)以及近岸水域(如杭州湾、九龙江和长江口等). 张云林等[36]通过对太湖典型草、藻型湖区东太湖和梅梁湾有色可溶性有机物(CDOM)的吸收和荧光特性研究发现: 二类水体的草、藻型湖区 CDOM 来源具有一致性,且 CDOM 的吸收系数与 DOM 浓度的相关性随波长的降低而增加,在短波部分存在明显的正相关. 马荣华等[37]根据不同水体的形态因子不同,发现浮游植物的降解对 CDOM 吸收具有重要甚至主导作用,在测试或计算总的吸收或散射系数时,必须充分考虑有机悬浮颗粒的吸收与散射特性,否则会带来较大的误差. 宋玲玲等[38]研究证明 CDOM 吸收系数在 300 ~ 500 nm 范围内随着波长的增加呈指数递减,超过 500 nm 之后呈线性递减关系. 张运林等[39]对梅梁湾、大太湖 CDOM 组成和来源的参数比吸收系数、分子量(M)值、拟合系数(S)值进行的研究发现 CDOM 在水中呈现显著的季节变化. 我国学者对 CDOM 的吸收系数研究日渐深入,但是如何从水体浮游生物、悬浮物中分离 CDOM 并进行有效估算仍是一项亟需解决的问题,因此有效实现 CDOM 与叶绿素及其他悬浮物的分离成为了此领域的研究重点.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

近几年国内学者在使用遥感反演 CDOM 领域取得了诸多进展,能够根据不同水体水质特征挑选适用波段,且吸收光谱信息同数学模型结合已经达到较好的分离效果,极大地促进了国内湖泊水质研究进展. 乐成峰等[40] 通过结合太湖实测水色因子吸收系数和藻类与 CDOM 吸收系数相似特性,根据浮游藻类吸收系数在 580 nm 与 692 nm 波长处比值恒定的特点,提出的适合于太湖的吸收系数分离方法实现了浮游藻类吸收系数能够较好地分离. 冯龙庆等[41] 通过对冬季太湖 CDOM 的吸收荧光特性及空间分布进行研究,验证了吸收系数的遥感反演算法具有一定效果,且实验数据证明该方法可以用于冬季太湖 CDOM 吸收系数 a(355) 的遥感估算. 周博天等[42] 通过采用溶解碳的遥感数据,结合研究区海域数据采样点的同期实测光谱吸收系数,建立基于改进光谱指数 NDSI、MRSI 的黄色物质吸收系数反演模型,用以研究珠江口东岸香港海域黄色物质的光谱吸收特性,并分析光谱指数与吸收系数 alpha_g(440) 之间的相关关系取得了新的研究进展. 该项实验研究发现 MRSI 模型提取的黄色物质吸收系数 alpha_g(440) 与实测值 $R^2 = 0.827\ 8$, RMSE = 0.033 2 之间的关系比 NDSI 模型的反演精度更高,且 MRSI 模型具有较强的区域适用性. 田野等[43] 以北京官厅水库为研究对象,通过野外和实验室测量数据建立水质参数遥感反演的生物光学模型,对夏季官厅水库的非色素颗粒物浓度、叶绿素 a 浓度和 CDOM 浓度进行了反演也取得了预期的效果,所采用的遥感反演模型基本适用于官厅水库水质监测,反演出的叶绿素、总悬浮物和 CDOM 的空间分布与实际测量值的空间分布基本吻合. Cao 等[35] 使用中分辨率成像光谱仪(MODIS) 开发衍生 CDOM 的方法实验取得很好的结果,为水质管理者更全面评估提供了一定的帮助. 由此可见,遥感数据结合算法反演实现水质监测管理、快速水动力学和碳循环研究目标指日可待.

4　存在的问题及展望

经过几十年的研究成果积累,人们对 CDOM 的空间分布特征已经基本掌握,CDOM 遥感在 I 类水体中得到很好的研究,在开放海洋环境,CDOM 浓度通常具有低的浓度和空间均匀性[44]. 这些水中的 CDOM 主要是地方性的,由浮游植物的渗出物和部分分解产物形成[7]. 但是有关 CDOM 的时间分布特征的研究成果大部分仍局限在年际或者季节间的变化,长时间持续的高分辨率研究数据依然十分缺乏,这严重影响了我们对 CDOM 属性特征的深入了解. 近年来结合数学模型与传感器反演 CDOM 浓度技术迅速发展,但是野外测量与遥感影像之间的时间差异仍是尚未解决的难题,且众多的研究表明,不同的数学模型估算 CDOM 浓度所采用的波长并不相同. 目前的研究尚未根据不同的水体特征得出统一数学模型和统一的波长选择方案,这也是今后 CDOM 研究过程中的重要问题.

海洋区域水质从沿岸到外海成规律性变化,区域特征明显,物质组成多样、来源复杂,相应水体生物 - 光学特性的差异较大,水色反演算法的区域性特征明显[45]. 湖泊水体的污染事件持续时间较短,水质变化较为迅速,数小时内就会发生非常大的变化. 且不同湖泊、同一湖泊中的不同位置、季节等因素均会影响 CDOM 的吸收光谱,相比海洋,湖泊面积较小,水质变化的空间尺度也较小,往往发生在数 10 m 范围内. 因此使用遥感反演水体 CDOM 必需充分考虑海洋水体与内陆湖泊水体的差异,水质的时空变化等因素. 在今后的水体 CDOM 反演研究过程中还存在着诸多问题亟需解决.

1) 由于水体卫星遥感的业务化运行要求卫星传感器具有高时间分辨率、高空间分辨率和高光谱分辨率. 但通常的卫星传感器很难同时满足上述 3 个要求,因此,研制一个考虑各种水体特殊要求专门的水色遥感传感器,将具有广阔的应用前景.

2) 在沿海海洋卫星反演 CDOM 的过程中,太阳天顶角、传感器视场角、大气矫正方式、实际地点 CDOM 的时空异质性和其他光学性质等几个因素应该进一步了解和探索,以减少测量的不确定性.

3) 相比海洋水体,湖泊等二类水体具有更为复杂的光学特性,研究过程中必须充分考虑湖泊水体光学特性的复杂性和 3 种物质组分(叶绿素、悬浮物和 CDOM) 光谱特征的相互影响. 如果能够实现不同传感器在恰当的波谱通道处设置波段,或许能够实现不同物质组分的探测所需的效果.

4) 相比海洋水体,湖泊通常水深较小,因此底质对遥感反射比有一定的贡献,所以需要额外建立基于湖泊水体辐射传输的底质贡献模型. 且由于硬质湖底或者底泥具有不同的反射特征,是通过水下光谱仪或者普通的地物光谱仪携带的水下镜头来测还是实验室测量,哪一种测量方法更具有准确性,是

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实际研究中需要考虑的重要问题.

5) 早期使用卫星和实地测量同步时,数据并非严格同步,通常有一天或者数天误差,这与实际情况存在较大偏差、甚至错误. 因此对于像湖泊或者海岸区域这种水质变化迅速的水体,应该考虑尽可能的确保星地试验的同步性,同时保证野外现场试验具有可比性. 因此建立稳定的水体遥感试验平台,获取系统有效的水色遥感试验数据对于实现星地同步观测,减少建模误差和提高反演精度是十分必要的.

6) 水体的总吸收包括纯水、浮游植物色素的吸收、CDOM 的吸收和无机悬浮颗粒的吸收,如何从总的吸收光谱中高精度地获取 CDOM 的物质组份含量,需要建立合适数学模型,实现水质长时间精确反演.

7) 统一的水色遥感反演模型难以建立,主要是由于模型参数的差异. 大量研究发现沿海和河流 CDOM 受陆源影响较大,成分复杂易变,对模型要求更高. 且由于 CDOM 在水中空间分布特征受季节、水体中的位置等限制,使得水体物质组分的空间差异都很大,这使得生物光学模型参数具有很大的区域性,不能统一参数化,因此如何建立一个统一的模式,也是一个需要重点关注的问题.

遥感反演水体中 CDOM 实现水质监测和碳循环研究的目标,既取决于大气辐射传输和水体辐射传输过程的建模效果和精度,也受水体的动力学过程影响,建立融合水动力过程的一体化的卫星遥感反演模型,提高水质参数的反演精度为水质的预测预警提供基础和依据,是一项非常有意义的巨大挑战. 近年来,越来越多的学者致力于研究合适的数学模型,希望通过结合卫星传感器达到高精度的水质参数反演结构,遥感反演算法仍在不断发展和进步,相信很快就能取得突破性的成果.

参 考 文 献

[1] 贾陈忠,孔淑琼,张彩香. 溶解性有机物的特征及对环境污染物的影响[J]. 广州化工, 2014,40(3):98 - 101.

[2] Ferrari G M, Dowell M D, Grossi S, et al. Relationship between the optical properties of chromophoric dissolved organic matter and total concentration of dissolved organic carbon in the southern Baltic Sea region[J]. Marine Chemistry, 1996, 55(3 - 4):299 - 316.

[3] Mannino A, Russ M E, Hooker S B. Algorithm development and validation for satellite-derived distributions of DOC and CDOM in the US Middle Atlantic Bight[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2008,113(C7): 827 - 830.

[4] Vodacek A, Blough N V, DeGrandpre M D, et al. Seasonal variation of CDOM and DOC in the Middle Atlantic Bight: Terrestrial inputs and photo oxidation[J]. Limnology and Oceanography,1997, 42(4):674 - 686.

[5] 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]. Cominent Shelf Res,1997,17(3):235 - 252.

[6] Stedmon C A,Markager S. Behaviour of the optical propenies of coloured dissolved organic matter under conservative mixing[J]. Est Coast ShelfSci,2003,57(5 - 6):973 - 979.

[7] Nelson N B, Siegel D A. Chromophoric DOM in the open ocean[M]// Hansell D ,Carlson C. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. San Diego, CA: Academic Press, 2002:547 - 578.

[8] 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.

[9] 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(6):2298 - 2314.

[10] Kalle K. Zum problem der meerwasserfarbe[J]. Annalen der Hydrologischen und Marinen Mitteilungen, 1938, 66: 1 - 13.

[11] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation emission matrix spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 1996, 51(4):325 - 346.

[12] Blough N V ,Del Vecchio R. Chromophoric DOM in the coastal environment[M]// Hansell D ,Carlson C. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. San Diego, CA:Academic Press,2002,509 - 546.

[13] Coble P G. Marine optical biogeo chemistry: the chemistry of ocean color[J]. Chemical Reviews,2007, 38(20):402 - 418.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14] 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: 22 – 36.

[15] Nelson N B, Siegel D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998, 45(6): 931 – 957.

[16] 程远月,郭卫东,龙爱民,等. 利用三维荧光光谱和吸收光谱研究雨水中 CDOM 的光学特性 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2413 – 2416.

[17] Skoog A, Wedbrog H, Fogelqvist E. Photobleaching of fluoreseence and the organic carbon concentration in a coastal environment [J]. Marine Chemistry, 1996, 55(3 – 4): 333 – 345.

[18] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. Marine Chemistry, 2002, 77(1): 23 – 41.

[19] Del Castillo C E, Coble P G, Morell J M, et al. Analysis of the optical properties of the Orinoco River plume by absotption and fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1999, 66(1 – 2): 35 – 51.

[20] 王福利,郭卫东. 秋季南海珠江口和北部湾溶解有机物的光降解 [J]. 环境科学学报, 2010(30): 606 – 613.

[21] Osburn C L, Morris D P. Photochemistry of chromophoric dissolved organic matter in natural waters [M] // Helbling E W, Zagarese H. UV Effects in aquatic organisms and ecosystems. London: The Royal Society of Chemistry Press, 2003: 185 – 217.

[22] 韩宇超,郭卫东. 河口区有色溶解有机物(CDOM)三维荧光光谱的影响因素 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1646 – 1653.

[23] Horg F, Vodacek A, Blough N V. Inherent optical-properties of the ocean-retrieval of the absorption-coefficient of chromophoric dissolved organic-matter from fluorescence measurements [J]. Limnology and Oceanography, 1993, 38(7): 1394 – 1402

[24] 白莹. 黄东海春秋季有色溶解有机物(CDOM)的分布特征及季节变化的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

[25] Vodacek A, Hoge F E, Swift R N, et al. The use of in situ and airborne fluorescence measurements to determne uv absorption coefficients and doc concentrations in sueface waters [J]. Limnology and Ocean Ography, 1995, 40(2): 411 – 415.

[26] Stedmon C A, Markage S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. Limnology and Ocean Ography, 2005, 50(2): 686 – 697.

[27] 韩宇超,郭卫东. 河口区有色溶解有机物(CDOM)三维荧光光谱的影响因素 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1646 – 1653.

[28] 王福利,郭卫东. 秋季南海珠江口和北部湾溶解有机物的光降解 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 606 – 613.

[29] 肖隆庚,陈文松,陈国丰,等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 160 – 167.

[30] 梁逸曾. 白灰黑复杂多组分分析体系及其化学计量学算法 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1996.

[31] Cader K L, Hawes S K, Baker K A, et al. Reflectance model for quantifying chlorophyll-a in the presence of productivity degradation products [J]. Jouranl of Geophysical Research-oceans 1991, 96(C11): 20599 – 20611.

[32] Lee Z P, Carder K L, Hawes S K, et al. Model for the interpretation of hyperspectral remote-sensing peflectance [J]. Applied Optics, 1994, 33(24): 5721 – 5732.

[33] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Danish coastal waters [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2000, 51(2): 267 – 278.

[34] 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): 1029 – 2010.

[35] Cao F, Miller W L. A new algorithm to retrieve chromophoric dissolved organic matter (CDOM) absorption spectra in the UV from ocean color [J]. Jouranl of Geophysical Research-oceans, 2015, 120(1): 496 – 516.

[36] 张运林,秦伯强,马荣华,等. 太湖典型草、藻型湖区有色可溶性有机物的吸收及荧光特性 [J]. 环境科学, 2005, 26(2): 142 – 147.

[37] 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.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[38] 宋玲玲,仇雁翎,张洪恩,等. 淀山湖有色可溶性有机物的光谱吸收特性[J]. 湖泊科学,2007,19(3):250-254.
[39] 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.
[40] 乐成峰,李云梅,查勇,等. 太湖水体浮游藻类吸收系数分离方法研究[J]. 光学学报,2010,30(11):3090-3096.
[41] 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.
[42] 周博天,刘湘南,吴伶,等. 基于水色遥感的香港海域黄色物质浓度反演模型[J]. 海洋环境科学,2013,32(1):115-119.
[43] 田野,郭子祺,乔彦超,等. 基于遥感的官厅水库水质监测研究[J]. 生态学报,2015,35(7):2217-2226.
[44] Yu Q, Tian Y Q, Chen R F, et al. Functional linear analysis of in situ hyperspectral data for assessing CDOM in rivers[J]. Photo grammetric Engineering and Remote Sensing, 2010,76(10):1147-1158.
[45] Antonio M, Michael G N, Stanford B H, et al. Algorithm development and validation of CDOM properties for estuarine and continental shelf waters along the northeastern U.S. coast[J]. Remote Sensing of Environment,2014,152(3):576-602.

The Review of CDOM Remote Sensing Inversion in Water

Fu Dandan Zhang Liyan Liang Zhilin

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract

At present, the research priorities has gradually turned from the physical and chemical properties of CDOM to the direction of using remote sensing technology and mathematical model to retrieve the concentration of material at home and abroad, in order to achieve rapid and efficient management of water quality objectives and the global carbon cycle research goals. In this paper, firstly we reviewed the research progress and research results of CDOM in domestic and abroad, secondly discussed the main direction of the current research in this field and some problems to be solved, and finally prospected for the future research and the expected goal.

Key words: CDOM, carbon cycle, remote sensing inversion.

通讯作者 张立燕,女,讲师,主要从事高光谱遥感图像处理及应用研究. E-mail: zhangliyan010@126.com.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net