北冰洋有色溶解有机物与溶解有机碳遥感监测

李正茂[1], 黄 珏[1*], 张 珂[2]

（1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院，山东 青岛 266590；
2. 浙江大学 海洋学院，浙江 舟山 316021）

摘 要：借助 MODIS 卫星数据，利用准分析算法（Quasi-Analytical Algorithm，QAA）反演得到 2010 年与 2011 年夏季北冰洋表层水体有色溶解有机物（Colored Dissolved Organic Matter，CDOM）吸收系数，并依据实测反射率数据将 CDOM 与溶解有机碳（Dissolved Organic Carbon，DOC）分类，研究不同波段（412、443、490、532、555、667 nm）、不同类别的 CDOM 与 DOC 的相关性差异，在此基础上建立增强回归树模型，分析影响 DOC 质量浓度变化的主要驱动因素。结果表明：使用 QAA 反演北冰洋表层水体 CDOM 吸收系数具有较高的精度；反射波峰位于 555 nm 时，CDOM 与 DOC 相关性（R^2=0.95）高于整体相关性（R^2=0.94），CDOM 的反演精度更高（R^2=0.88，MRE=28.6%）；反射峰位于 490 或 465 nm 时，CDOM 与 DOC 相关性较弱（R^2=0.76），CDOM 的反演精度较低（R^2=0.37，MRE=36.4%）。影响因素分析表明，CDOM、悬浮颗粒物以及叶绿素 *a* 是影响北冰洋夏季 DOC 质量浓度变化的主要驱动因素。

关键词：北冰洋；有色溶解有机物；准分析算法 (QAA)；溶解有机碳；遥感反演

中图分类号：P715.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2023）01-0148-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210309003

引用格式：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.
LI Z M, HUANG J, ZHANG K. 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.

溶解有机碳（Dissolved Organic Carbon，DOC）是水体中最大的有机碳库，与浮游植物光合作用、生物代谢和微生物活动等息息相关，在水体碳循环中起着重要作用[1]。受全球变暖的影响，永久冻土融化，其中蕴含的大量 DOC 随河流汇入北冰洋[2-3]，这将对北冰洋水体环境和碳循环产生重要影响。因此，对北冰洋 DOC 含量进行监测，并研究其变化的驱动力因素具有重要的意义。对近岸海域[4-5]、河流河口[6-7]以及内陆湖泊[8]中 DOC 的研究表明，有色溶解有机物（Colored Dissolved Organic Matter，CDOM）吸收系数与 DOC 浓度之间存在着较高的线性相关关系，所以，可以通过反演 CDOM 吸收系数监测 DOC 浓度。

传统的水色遥感反演通常采用经验算法，即利用水体光谱反射率与水中各种物质浓度所建立的线性关系来反演水色参数，但该方法多基于统计模型，鲁棒性较差。而基于水体生物光学特性的半分析模型，具有明确的物理基础，且适用性更强，所以得到了广泛的应用[9-11]。目前常用的半分析模型主要有 QAA（Quasi-Analytical Algorithm）模型[9]、GSM（Garver-Siegel-Maritorena）模型[10-11]和 GIOP（Generalized marine Inherent Optical Properties）模型[12]等。其中，QAA 模型具有良好的可移植性，被成功应用于各类水域[9,13]。

随着遥感技术手段的不断发展，利用卫星影像监测水体 CDOM 已经成为一种广泛使用的有效方法。目前对内陆与近岸水体 CDOM 的遥感监测研究较多。例如：孙璐等[13]借助地球静止海色成像仪（Geostationary

收稿日期：2021-03-09
资助项目：国家自然科学基金项目（42076185, 41706194）；山东科技大学科研创新团队支持计划项目（2019TDJH103）
作者简介：李正茂（1997—），男，硕士研究生，主要从事环境遥感方面研究. E-mail: 847281478@qq.com
* **通信作者：**黄 珏（1987—），女，副教授，博士，主要从事水环境遥感方面研究. E-mail: huangjue@sdust.edu.cn

（王 燕 编辑）

Ocean Color Imager，GOCI）影像应用 QAA 对长江口及其邻近海域 CDOM 进行了遥感反演；吴志明等[14] 基于随机森林模型对中国内陆湖泊水体 CDOM 进行了反演，提高了内陆湖泊水体 CDOM 反演精度；Castillo 等[15] 建立了 CDOM 吸收系数的双波段经验模型，并对自密西西比河输送至墨西哥湾的 CDOM 进行了遥感监测；Mannino 等[16] 使用中分辨率成像光谱仪（Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer，MODIS）和海洋观测宽视场传感器（Sea-viewing Wide Field Sensor，SeaWiFS）卫星传感器，开发了针对美国中大西洋湾的 CDOM-DOC 光谱斜率反演算法。另外，有学者对大洋水体 CDOM 进行了遥感反演。例如：Matsuoka 等[17] 结合 MODIS 卫星数据和 GSM 半分析算法估算南波弗特海 CDOM 的吸收系数，并提出了一种常规的、近实时的从空间获取 DOC 浓度的方法；Julhs 等[18] 测试了 5 种水色遥感算法的统计性能，提出基于哨兵数据的神经网络算法是拉普捷夫海域效果最佳的 CDOM 卫星反演算法。一些学者还研究了影响内陆水体 DOC 浓度变化的因素。如：Ye 等[19] 分析了巢湖 DOC 浓度时空分布及影响特征，并探讨了水温、叶绿素 *a*（Chlorophyll *a*，简称 chl-*a*）浓度以及硝酸盐浓度对 DOC 动态变化的影响；Huang 等[20] 利用哨兵 2 号数据对北极六大河流 CDOM 进行了反演，提出河流流量、流域坡度、人类活动和土地覆盖变化是驱动 DOC 浓度变化的重要原因；Kuliński 和 Pempkowiak[21] 对影响波罗的海南部水域 DOC 分布的因素进行了量化分析，认为浮游生物活动和河流径流对 DOC 分布起着决定性作用。

综上所述，目前对北冰洋表层水体 CDOM 的遥感估算和 DOC 浓度变化的驱动因素研究仍然较少。本文借助 MODIS 卫星影像，根据实测光谱反射率峰值的位置将数据进行分类，并利用 QAA 估算北冰洋表层水体的 CDOM 与 DOC，进而分析影响北冰洋夏季 DOC 浓度变化的主要驱动因素，以期为北冰洋水色遥感和碳循环研究提供可靠的数据支持。

1　数据来源与研究方法

1.1　研究区域

北冰洋被世界上最大的陆架包围，陆架边缘海面积几乎占整个海域面积的 1/2[22]。北冰洋周围有超过其本身面积的流域盆地，据统计[23]，北冰洋海水体积仅占全球海洋的 1%，却接收了全球 11% 的淡水输入，因此各大河流径流带来的陆源物质将深刻影响着北冰洋的水体性质。大量的陆表径流是北冰洋中淡水、矿物质和陆源物质的主要来源，可以影响水体分层、光衰减、表面加热、大气交换、生物生产力和碳固定等，也是 CDOM 在吸收系数中占主导地位的重要原因[22]。陆表径流是该海域 DOC 和 CDOM 的主要来源，二者的分解和变化受到光降解、微生物降解、矿化和絮凝等作用的综合影响[23-24]。

1.2　数据来源

1.2.1　实测数据来源

本文使用的实测数据有表观反射率、CDOM 吸收系数、DOC 浓度、chl-*a* 质量浓度、水温、盐度以及悬浮颗粒物（Suspended Particulate Matter，SPM）质量浓度等。所有实测数据均来源于 2009 年、2010 年与 2011 年夏季楚科奇海和波弗特海的科考航次，来自 SeaBASS（SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System）网站[25]。本文选取北冰洋楚科奇海和波弗特海为研究区，位于研究区内的实测数据站点位置如图 1 所示。

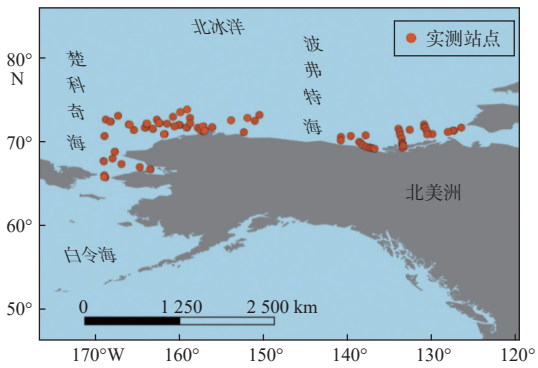


图 1　研究区与站点位置

Fig. 1　Geographic locations of sample collection

1.2.2 卫星数据来源

本文使用 MODIS 三级遥感反射率产品数据（MODIS-Aqua/L3SMI）进行 CDOM 吸收系数的遥感反演。MODIS 卫星时间分辨率较高，并针对水色参数反演设置了典型波段。该产品使用 NASA OBPG 算法进行了大气校正，其空间分辨率为 4 000 m。

1.3 MODIS 遥感影像的大气校正与验证

由于在近紫外-可见光范围内（250～700 nm）CDOM 吸收系数随波长的增加呈指数衰减趋势[26]，因此 CDOM 吸收系数的反演主要选用蓝-绿光波段。但是，蓝-绿光波段的大气校正往往存在较大误差，导致遥感影像大气校正的效果对 CDOM 的反演精度具有较大影响。在对实测数据和遥感数据质量进行评估后，本文最终筛选了 34 组数据用于构建反演模型，并确保实测数据与卫星遥感数据的时间差不超过 5 天。对比分析不同波段的实测遥感反射率和 MODIS 遥感反射率产品数据发现，在 412、443 和 488 nm 等短波波段处，MODIS 卫星反射率的大气校正存在较大的误差（R^2 分别为 0.114、0.109 和 0.191），与实测反射率相关性较低。随着波长增大，MODIS 遥感反射率数据与实测反射率数据的相关性逐渐升高，555 nm 处 R^2 为 0.711，基本满足遥感反演需求。

1.4 CDOM 吸收系数反演方法

本文利用 34 组匹配的实测 CDOM 浓度和遥感反射率数据进行 CDOM 吸收系数反演模型的构建。QAA 模型是经典的半分析反演算法模型，具有易于实现、性能优良和计算效率高等优势，因而得到了广泛的应用[27]，本文选用 QAA_V6 算法进行 CDOM 吸收系数的反演。

r_{rs} 为水面下遥感反射率，可以表示为：

$$r_{rs}(\lambda)=\frac{R_{rs}(\lambda)}{0.52+1.7R_{rs}(\lambda)}, \tag{1}$$

式中，R_{rs} 为水表面遥感反射率。水体总吸收系数和后向散射系数可以表示为非线性组合 u：

$$u(\lambda)=\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)+b_b(\lambda)}=\frac{-g_0+\sqrt{g_0{}^2+4g_1\times r_{rs}(\lambda)}}{2g_1}, \tag{2}$$

式中：a 为水体总吸收系数；b_b 为水体后向散射系数；g_0 和 g_1 为经验系数[27]，且 g_0=0.089，g_1=0.124 5。QAA_V6 算法基于 670 nm 处遥感反射率数值的大小将水体划分为较清洁和较浑浊两类，分别采用不同的参考波长（λ_0）进行计算[9,27]：①当 R_{rs}（670）＜0.001 5 sr^{-1} 时，λ_0=555 nm，且 $\chi=\lg\left[\frac{r_{rs}(443)+r_{rs}(490)}{r_{rs}(555)+5\frac{r_{rs}(670)}{r_{rs}(490)}r_{rs}(670)}\right]$，$a(\lambda_0)=a(555)=a_w(555)+10^{-1.146-1.366\chi-0.469\chi^2}$，$b_{bp}(\lambda_0)=\frac{u(\lambda_0)\times a(\lambda_0)}{1-u(\lambda_0)}-b_{bw}(555)$，其中 a_w 为纯海水吸收系数，b_{bp} 为悬浮颗粒物后向散射系数，b_{bw} 为纯海水后向散射系数。②当 R_{rs}（670）＞0.001 5 sr^{-1} 时，λ_0=670 nm，且 $a(\lambda_0)=a(670)=a_w(670)+0.39\left[\frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(443)+R_{rs}(490)}\right]^{1.14}$ $b_{bp}(\lambda_0)=\frac{u(\lambda_0)\times a(\lambda_0)}{1-u(\lambda_0)}-b_{bw}(670)$。由参考波长处的 $b_{bp}(\lambda_0)$ 可以进一步计算任意波长处的 $b_{bp}(\lambda)$：

$$b_{bp}(\lambda)=b_{bp}(\lambda_0)\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^{\eta}, \tag{3}$$

式中，η 为悬浮颗粒物后向散射系数的斜率，且 $\eta=2.0\times\left[1-1.2\exp\left(-0.9\frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)}\right)\right]$。

随后，本文依据 Dong 等[28] 提出的方法从不含纯水的总吸收系数（a_{nw}）中分离得到 CDOM 吸收系数（a_g），且 443 nm 处的 a_g 常用于表征 CDOM 浓度，因此 a_g（443）可以表示为：

$$a_g(443)=\frac{a_{nw}(443)-a_d(443)}{(1+c_1\times e^{c_2\psi})},\tag{4}$$

式中：c_1、c_2 为经验参数，本文针对研究区的水体光学特性将二者重新进行了拟合；ψ 为浮游植物和 CDOM 吸收系数的非线性组合，可以表示为 $\psi=\frac{a_{phg}(490)}{a_{phg}(443)}+\frac{a_{phg}(412)-a_{phg}(490)}{a_{phg}(443)}\times\frac{490-443}{490-412}$，其中 a_{phg} 为浮游植物与 CDOM 吸收系数之和；a_d(443)为 443 nm 处的碎屑物质吸收系数，可以进一步表示为 $a_d(443)=0.6\times\sigma^{0.9}$，其中，$\sigma$ 为不含纯水的总吸收系数、颗粒物后向散射系数和遥感反射率的非线性组合，$\sigma=0.05\times a_{nw}(443)+b_{bp}(555)\times 1.4^{\frac{R_{rs}(555)+R_{rs}(670)}{R_{rs}(443)}}$。

1.5　驱动因素分析

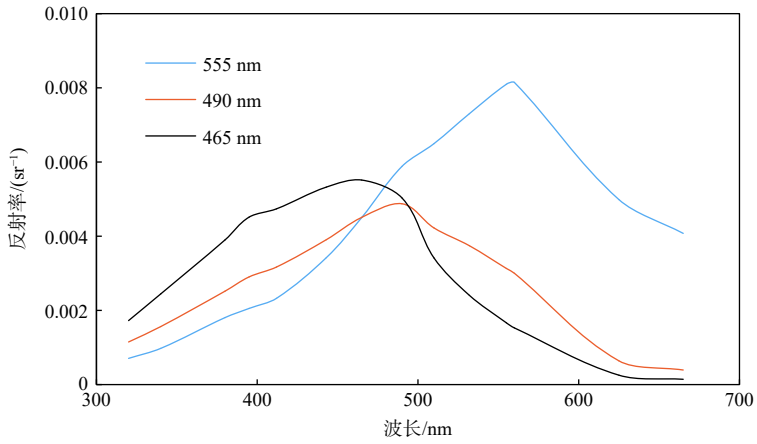
为进一步研究北冰洋表层水体中 DOC 浓度变化的主要驱动因素，本文共使用了 98 组匹配的实测数据，包括 DOC 浓度、水温、盐度、SPM 质量浓度、chl-*a* 质量浓度等，并利用增强回归树模型分析这些数据。

本文使用 R 语言分析数据，设置学习速率为 0.005，每次抽取 50% 的数据进行分析，50% 数据进行训练，并进行 5 次交叉验证，从而分析影响北冰洋表层水体 DOC 浓度变化各因素的贡献率。

2　结果与分析

2.1　CDOM 吸收系数反演结果

本文分析实测遥感反射率数据发现，所有反射率数据大致可以分为 2 类：类别一的反射峰位于 555 nm，类别二的反射峰位于 465～490 nm，如图 2 所示。



注：图例中的波段数值为反射峰位置。

图 2　实测反射波谱曲线示意图

Fig. 2　Diagram of field measured reflection spectrum curves

本文利用 QAA_V6 模型反演得到了 443 nm 处 CDOM 吸收系数 a_g(443)，并用于表征 CDOM 浓度。由图 3 可见，实测 a_g(443)与 MODIS 反演 a_g(443)之间具有较高的相关性且反演误差较小(y=0.647x+0.022，R^2=0.81，MRE=35.3%)，证明本文的反演结果较为准确。

随后，本文基于 MODIS 三级遥感反射率产品数据 MODIS-Aqua/L3SMI(共计 91 景)，获得北冰洋 2010 年夏季(6 月至 8 月)CDOM 浓度(用 a_g(443)代表)的空间分布情况，如图 4 所示。东西伯利亚海、楚科奇海、

拉普捷夫海以及波弗特海沿岸水域 CDOM 浓度相较其他海域偏高，均值高于 0.4 m^{-1}，即北冰洋东部海域沿岸的 CDOM 浓度高于西部海域。北冰洋东部海域沿岸的 CDOM 浓度高于西部海域，这可能是由于北冰洋东部海域靠近西伯利亚地区的勒拿河、鄂毕河和叶尼塞河等几大河流，夏季雨量激增、冻土溶解，河流径流量急剧增加，并携带高浓度 CDOM 进入该海域，造成北冰洋东部海域 CDOM 浓度高于西部。

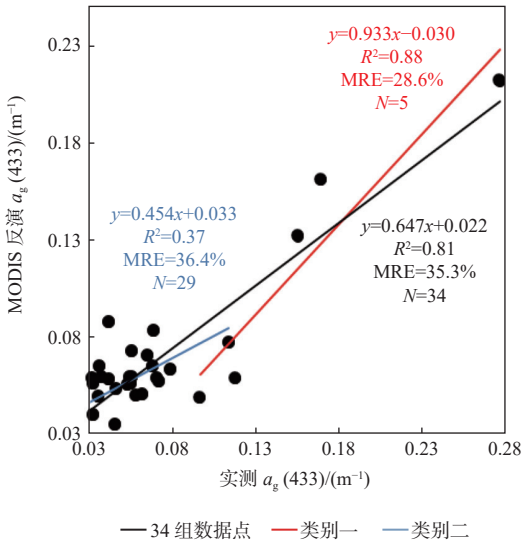


图 3 MODIS 反演 a_g(443)与实测 a_g(443)相关性

Fig. 3 The correlation between measured a_g(443) and MODIS retrieval a_g(443)

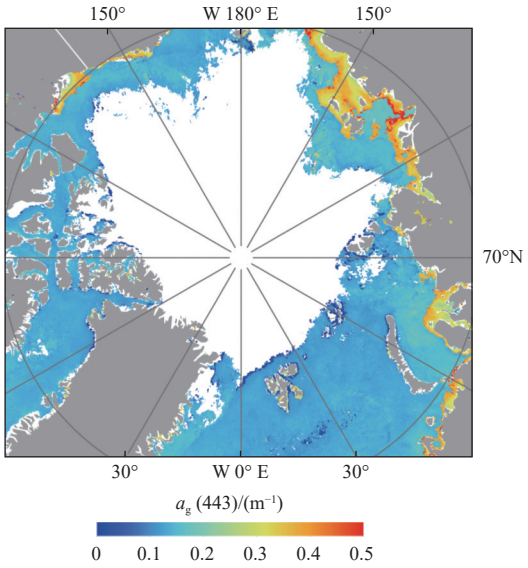


图 4 2010 年夏季(6 月至 8 月)北冰洋 CDOM 浓度的分布

Fig. 4 CDOM concentration distribution map of the Arctic Ocean in summer (from June to August) 2010

2.2 CDOM-DOC 相关性及影响因素分析

2.2.1 CDOM-DOC 相关性分析

进一步计算 2 类反射率数据对应的实测 CDOM 浓度和 DOC 浓度发现，类别一的 CDOM 浓度和 DOC 浓度较高，而类别二的 CDOM 浓度和 DOC 浓度较低，如表 1 所示。

表 1 实测遥感反射率数据、实测 CDOM 浓度和 DOC 浓度分类

Table 1 Statistics of field measured remote sensing reflectance, CDOM concentration, and DOC concentration

λ/nm	a_g(443)/(m^{-1})			DOC/(μmol·L^{-1})			N	类别
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值		
555	0.048	1.161	0.385	60.9	395.8	171.4	31	类别一
465 或 490	0.015	0.212	0.065	28.6	165.1	83.5	67	类别二

已有研究表明[29-31]，CDOM 浓度和 DOC 浓度之间存在良好的相关关系，这与本文获得的所有实测 CDOM 浓度与 DOC 浓度具有明显的相关关系(R^2=0.94)结果(图 5a)相符。将数据按波峰位置分类后发现，类别一 CDOM 浓度与 DOC 浓度的相关性(R^2=0.95，图 5b)高于类别二(R^2=0.76，图 5c)，即：在本研究区，当遥感反射率峰值位于 555 nm 处，CDOM 与 DOC 浓度较高，且二者之间的相关性较高；而当反射率峰值位于 465～490 nm 处，CDOM 与 DOC 浓度较低，且二者之间的相关性较低。

类别一的反演精度(R^2=0.88，N=5，MRE=28.6%)不仅优于类别二(R^2=0.37，N=29，MRE=36.4%)，而且优于未进行分类时的反演精度(图 3，R^2=0.81，N=34，MRE=35.3%)。由此可知，按波峰位置对数据进行分类，可以有效提高模型的反演精度，特别是对于 CDOM 和 DOC 浓度较高的海域，效果更加明显。

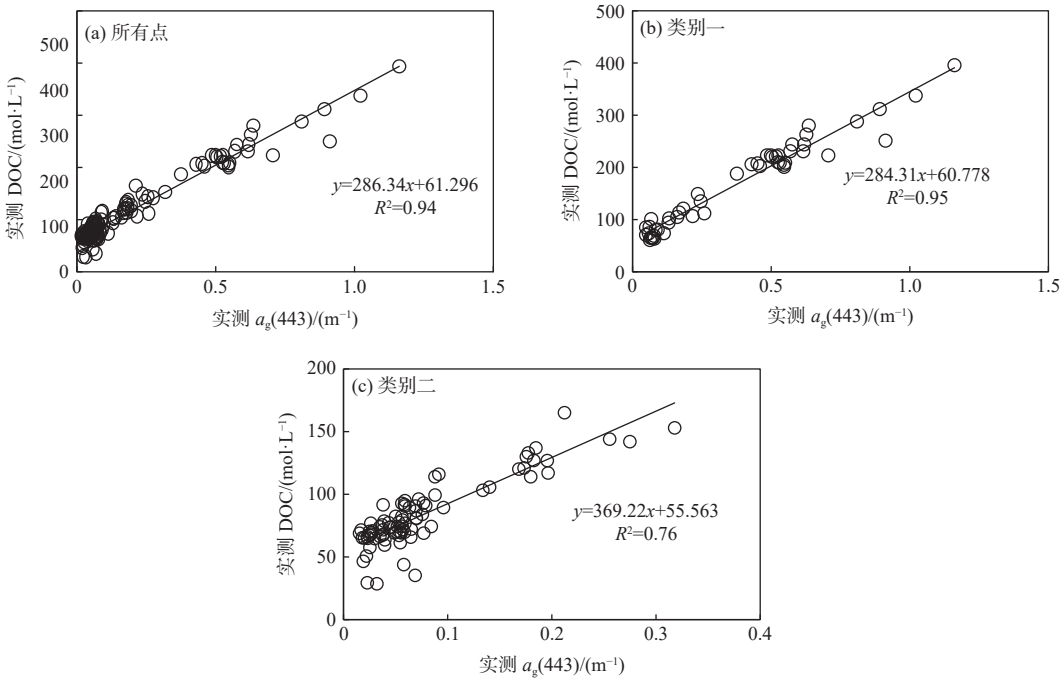


图 5　不同类别的实测 CDOM 与实测 DOC 相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis between measured CDOM and DOC for different classes

近年研究[31]直接使用 CDOM 与 DOC 的整体相关关系进行 DOC 的间接反演，对全球湖泊、河流以及海洋 DOC 反演时使用统一的线性回归模型，从而导致部分区域的反演结果并不理想（R^2＜0.5），这是由反演误差的累积与传递，以及未考虑水体类型差异而使用统一模型造成的。事实上，Matsuoka 等[29]进行北冰洋 DOC 反演时已经发现 CDOM 与 DOC 的相关性在北冰洋东部和西部存在差异，但并未对其进一步处理。依据光谱反射峰位置对数据进行分类后，类别一的 CDOM 反演精度上升，同时 CDOM 与 DOC 的相关性也高于类别二（图 3）。所以，基于反射峰位置对水体进行分类后，可以有效提高 CDOM 和 DOC 的反演精度，为北冰洋以及其他水域的相关研究提供了新思路。

2.2.2　DOC 浓度变化驱动因素分析

依据 1.5 节所述的 98 组匹配的实测数据，包括 DOC 浓度、水温（t）、盐度（S）、SPM 质量浓度（ρ_{SPM}）、chl-a 质量浓度（$\rho_{chl\text{-}a}$）等，进行 DOC 浓度变化的驱动因素分析。在增强回归树模型中，当单个变量的贡献率超过 5% 时，即可认为该变量对结果的影响是显著的[30]。由图 6 可知，CDOM、SPM 以及 chl-a 对 DOC 浓度变化产生显著影响，其贡献率分别为 48.91%、39.10% 和 7.74%，而温度、浮游植物吸收系数（a_{ph}(443)）、盐度却对 DOC 浓度变化影响较小，贡献率均低于 3%。

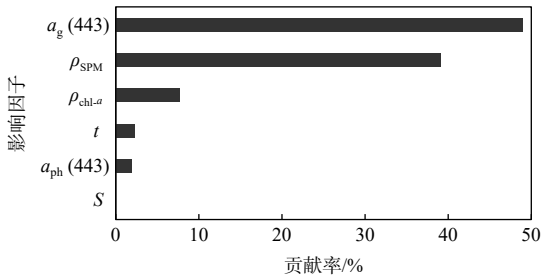


图 6　各影响因子对 DOC 浓度的影响

Fig. 6　The influence of factors on DOC concentration

研究表明[28-30]，CDOM 与 DOC 具有显著的相关性，CDOM 的分解是 DOC 的重要来源，因而对 DOC 浓度的变化具有显著影响。而 SPM 是重要的水体组分，高质量浓度 SPM 将增加水体散射和光衰减，从而降低海水透明度、减弱水下光场，影响海水中 CDOM 和 DOC 的光化学降解[31]。夏季，随着冻土溶解，河流携带大量陆源 DOC 进入大洋，陆源有机物相对比较稳定，且河口近岸水体中高质量浓度 SPM 的存在会减

弱太阳辐射在水体中的穿透能力，从而抑制 DOC 的光化学降解[32-33]，使 DOC 保持较高浓度。相反，大洋海域的低浓度 DOC 主要是以内源产生的 DOC 为主，同时水体浑浊度低，受 SPM 影响较小，其光化学分解作用较强。此外，浮游植物作为海水中含碳有机物的重要来源，光合作用是其进行生物固碳的重要形式，使有机物由不稳定态转换为稳定态。chl-*a* 是衡量海洋环境中浮游植物生物量的重要指标，DOC 代表了水体中溶解有机物质的总和，与水体中浮游植物的光合作用息息相关，DOC 强烈依赖于浮游植物活性、浮游动物摄食以及其他来源[34]，因而 chl-*a* 质量浓度也对 DOC 浓度变化存在较大影响。

3 结 语

本文借助 MODIS 卫星数据，使用 QAA 估算了北冰洋表层水体的 CDOM 浓度，并根据实测光谱反射率峰值的位置将数据进行分类，分析发现光谱反射峰位于 555 nm 处时，CDOM-DOC 相关性更强，且遥感反演效果更优，进而分析了影响 DOC 浓度变化的驱动因素，得到以下主要结论。

1）使用 QAA 对北冰洋表层水体 CDOM 进行估算具有可行性，实测 a_g（443）与反演 a_g（443）的相关性明显（R^2=0.81，MRE=35.3%），具有较好的反演精度。

2）依据光谱反射率峰值的位置将数据分为 2 类：类别一和类别二。其中，类别一的 CDOM 与 DOC 相关性（R^2=0.95）高于整体相关性（R^2=0.94），类别二的 CDOM 与 DOC 相关性（R^2=0.76）低于整体相关性（R^2=0.94），同时类别一 CDOM 的反演精度（R^2=0.88，MRE=28.6%）优于类别二（R^2=0.37，MRE=36.4%）。

3）利用增强回归树分析发现，CDOM、SPM 以及 chl-*a* 是影响 DOC 浓度变化的主要驱动因素。

东西北冰洋水体存在较大差异性，本文使用的实测数据较少且主要集中于西北冰洋地区，未能包含东北冰洋海域，在今后的研究中应扩大实测数据范围进行算法改进。Zhu 等[34] 指出 QAA 中的经验参数会对 CDOM 吸收系数的反演结果产生一定的影响，因而需要对算法中的各参数进行研究来整体优化北冰洋海域的模型参数。海水中的 SPM 等物质对海水反射率产生复杂影响，并在一定程度上影响大气校正效果，因而需要继续研究卫星影像大气校正误差对 CDOM 反演所产生的影响。

参考文献 (References):

[1] CARLSON C A, DUCKLOW H W, MICHAELS A F. Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea[J]. Nature, 1994, 371(6496): 405-408.

[2] TARNOCAI C, CANADELL J G, SCHUUR E A, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): GB2023-1-GB2023-11.

[3] STEDMON C A, AMON R M, 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(1/4): 108-118.

[4] FICHOT C G, BENNER R. A novel method to estimate DOC concentrations from CDOM absorption coefficients in coastal waters[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(3): L03610-1-L03610-5.

[5] 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.

[6] LIU D, BAI Y, HE X Q, et al. Satellite-derived particulate organic carbon flux in the Changjiang River through different stages of the Three Gorges Dam[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 223: 154-165.

[7] SPENCER R G, AIKEN G R, BUTLER K D, et al. Utilizing chromophoric dissolved organic matter measurements to derive export and reactivity of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean: a case study of the Yukon River, Alaska[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(6): L06401-1-L06401-6.

[8] KUTSER T, PIERSON D C, TRANVIK L, et al. Using satellite remote sensing to estimate the colored dissolved organic matter absorption coefficient in lakes[J]. Ecosystems, 2005, 8(6): 709-720.

[9] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. Applied Optics, 2002, 41(27): 5755-5772.

[10] GARVER S A, SIEGEL D A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation: 1. time series from the Sargasso Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102(C8): 18607-18625.

[11] MARITORENA S, SIEGEL D A, PETERSON A R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications[J]. Applied Optics, 2002, 41(15): 2705-2714.

[12] WERDELL P J, FRANZ B A, BAILEY S W, et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2019-2037.

[13] 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. SUN L, JIANG J G, ZHU W N. Remote sensing inversion and daily variation of CDOM based on GOCI in the Changjiang Estuary and adjacent waters[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(9): 133-145.

[14] 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. WU Z M, LI J C, WANG R, et al. Estimation of CDOM concentration in inland lake based on random forest using Sentinel3A OLCI[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 979-991.

[15] CASTILLO C E, MILLER R L. On the use of ocean color remote sensing to measure the transport of dissolved organic carbon by the Mississippi River Plume[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 836-844.

[16] 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: C07051-1-C07051-19.

[17] MATSUOKA A, HOOKER S B, BRICAUD A, et al. Estimating absorption coefficients of colored dissolved organic matter (CDOM) using a semi-analytical algorithm for southern Beaufort Sea waters: application to deriving concentrations of dissolved organic carbon from space[J]. Biogeosciences, 2013, 10(2): 917-927.

[18] JUHLS B, OVERDUIN P P, HÖLEMANN J, et al. Dissolved organic matter at the fluvial-marine transition in the Laptev Sea using in situ data and ocean colour remote sensing[J]. Biogeosciences, 2019, 16(13): 2693-2713.

[19] YE L L, WU X D, LIU B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of dissolved organic matter and influencing factors in Lake Chaohu[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3186-3193.

[20] HUANG J, WU M, CUI T W, et al. Quantifying DOC and its controlling factors in major Arctic rivers during ice-free conditions using Sentinel-2 data[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 2904-1-2904-20.

[21] KULIŃSKI K, PEMPKOWIAK J. Dissolved organic carbon in the southern Baltic Sea: quantification of factors affecting its distribution[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 78(1): 38-44.

[22] FICHOT C G, KAISER K, HOOKER S B, et al. Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1053-1-1053-6.

[23] MATSUOKA A, ORTEGA-RETUERTA E, BRICAUD A, et al. Characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Western Arctic Ocean: relationships with microbial activities[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2015, 118: 44-52.

[24] MATSUOKA A, BOSS E, BABIN M, et al. Pan-Arctic optical characteristics of colored dissolved organic matter: tracing dissolved organic carbon in changing Arctic waters using satellite ocean color data[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 200: 89-10.

[25] SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System[DB/OL]. [2022-06-01]. https://seabass.gsfc.nasa.gov/.

[26] MASSICOTTE P, ASMALA E, STEDMON C, et al. Global distribution of dissolved organic matter along the aquatic continuum: across rivers, lakes and oceans[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 180-191.

[27] LIU Y, XIAO C, LI J, et al. Secchi disk depth estimation from China's new generation of GF-5 hyperspectral observations using a semi-analytical scheme[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1849-1-1849-17.

[28] DONG Q, SHANG S, LEE Z. An algorithm to retrieve absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from ocean color[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 128: 259-267.

[29] MATSUOKA A, BABIN M, DOXARAN D, et al. A synthesis of light absorption properties of the Arctic Ocean: application to semianalytical estimates of dissolved organic carbon concentrations from space[J]. Biogeosciences, 2014, 11(12): 3131-3147.

[30] TIETJEN T, VäHäTALO A V, WETZEL R G. Effects of clay mineral turbidity on dissolved organic carbon and bacterial production[J]. Aquatic Sciences, 2005, 67(1): 51-60.

[31] 朱静, 张朝晖. 近海CDOM光反应变化及SPM对其影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10): 9-13. ZHU J, ZHANG Z H. Photoreaction changes of CDOM in offshore and study on effects of SPM on photoreaction[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(10): 9-13.

[32] 郭卫东, 王超, 李炎, 等. 水环境中溶解有机质的光谱表征: 从流域到深海[J]. 地球科学进展, 2020, 35(9): 933-947. GUO W D, WANG C, LI Y, et al. Characterization of aquatic dissolved organic matter by spectral analysis: from watershed to deep ocean[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(9): 933-947.

[33] HESSEN D O, CARROLL J L, KJELDSTAD B, et al. Input of organic carbon as determinant of nutrient fluxes, light climate and productivi-

ty in the Ob and Yenisey estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 88(1): 53-62.

[34] ZHU W, 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: C02011-1-C02011-22.

Remote Sensing Monitoring of Colored Dissolved Organic Matter and Dissolved Organic Carbon in the Arctic Ocean

LI Zheng-mao[1], HUANG Jue[1], ZHANG Ke[2]

(1. *College of Geodesy and Geomatics*, *Shandong University of Science and Technology*, Qingdao 266590, China;
2. *Ocean College*, *Zhejiang University*, Zhoushan 310027, China)

Abstract: With the help of MODIS satellite data, the QAA (Quasi-Analytical Algorithm) algorithm was used to obtain the absorption coefficient of colored dissolved organic matter (CDOM) in the surface waters of the Arctic Ocean during the summer of 2010 and 2011. CDOM and DOC were classified according to the field measured reflectance data, and the correlation differences between CDOM and DOC in different bands (412, 443, 490, 532, 555, 667 nm) and different categories were studied. Finally, a boosted regression tree model was developed to analyze the main driving factors of DOC concentration changes. The results show that the inversion of CDOM absorption coefficients in surface waters of the Arctic Ocean using the QAA algorithm is highly feasible. In addition, classification based on peak reflectance could improve the inversion accuracy. When the peak reflectance located in 555 nm, the correlation between CDOM and DOC (R^2=0.95) was higher than overall correlation (R^2=0.94), and the inversion accuracy of CDOM was relatively high (R^2=0.88, MRE=28.6%). In comparison, when the peak reflectance located in 490 or 465 nm, the correlation between CDOM and DOC (R^2=0.76) was weak, and the inversion accuracy of CDOM was relatively low (R^2=0.37, MRE=36.4%). Analysis of influencing factors shows that CDOM, suspended particulate matter, and chlorophyll-*a* were the main drivers of DOC concentration changes in the Arctic Ocean during summer.

Key words: Arctic Ocean; colored dissolved organic matter; Quasi-Analytical Algorithm (QAA); dissolved organic carbon; remote sensing retrieval

Received: March 9, 2021