. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0229

长江源和澜沧江源有色可溶性有机物（CDOM）组成特征、来源及差异性

宋涛[1,2,3]，蒋名亮[1,3,5]，徐宪根[6]，徐力刚[1,2,3,4**]，胡渠承[6]，顾 诚[6]
（1:中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全重点实验室，南京 210008）
（2:中国科学院大学，北京 100049）
（3:中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站，九江 332899）
（4:江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心，南昌 330029）
（5:江西省生态文明研究院，南昌 330036）
（6:常州市环境科学研究院，常州 213022）

摘要：长江源和澜沧江源是流域下游重要的水源涵养地和水生生态系统的天然屏障，近年来在气候变化和人类活动的叠加效应驱动下，两源区生态系统与生境保护面临巨大挑战。有色可溶性有机物（Chromophoric dissolved organic matter，CDOM）作为水生态系统的重要组成部分，在揭示水生态环境变化及响应方面具有重要指示作用。因此，本研究采用紫外-可见光谱与三维荧光光谱结合的方法，系统探索了冰雪消融期和丰水期长江源和澜沧江源干流和主要支流的 CDOM 光谱特征，揭示了两源区 CDOM 的组成特征、来源及差异性，旨在为揭示青藏高原腹地水体碳循环、有机物的迁移转化过程及评估源区受人类影响程度提供科学依据。研究结果表明，1）冰雪消融期长江源和澜沧江源的 CDOM 吸收系数a_{254}和 DOC 浓度均高于丰水期，表明冰雪消融期的冰川冻土融水显著增加了两源区有机质的输入；光谱参数 E2/E3 和 $SUVA_{254}$ 表明两源区 CDOM 的腐殖化程度、芳香性和相对分子质量整体较高，均表现出强陆源有机质特征。2）长江源和澜沧江源共提取 8 个荧光组分，长江源 CDOM 荧光组分均为 UVA 和 UVC 等陆源类腐殖质组成，而澜沧江源除陆源类腐殖质外，还检测到类色氨酸类物质（280nm/355nm，16%），表现出了一定的与人类活动高度相关的自生源特征。3）长江源荧光指数（FI）和自生源指数（BIX）均值分别为 1.36 和 0.26，整体低于澜沧江源（FI 均值为 1.45、HIX 均值为 0.52），表明长江源 CDOM 的陆源腐殖质特征高于澜沧江源；两源区 CDOM 均主要来源于陆域水土流失或通过大气沉降埋藏于冰川冻土所产所的有机物质，但澜沧江源还存在流域农业和畜牧业等有机质输入途径。
关键词：三江源；长江源；澜沧江源；有色可溶性有机质（CDOM）；平行因子分析；光谱分析

Characteristics, sources, and differences in the composition of CDOM in the sources of the Yangtze River and Lancang River

Song Tao[1,2,3], Jiang Mingliang[1,3,5], Xu Xiangen[6], Xu Ligang[1,2,3,4*], Hu Qucheng[6], Gu Cheng[6]
(1: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008,P.R.China)
(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049) (3: Poyang Lake Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899 P.R.China)
(4: Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029)
(5: Jiangxi Research Academy of Ecological Civilization, Nanchang 330036 P.R.China)
(6: Changzhou Institute of Environmental Science, Changzhou 213022 P.R.China)

Abstract: The sources of the Yangtze and Lancang rivers are important water sources and natural barriers for the aquatic ecosystems in the lower reaches of the river basins. In recent years, the ecosystems and habitats of the two source areas have faced significant challenges in terms of protection, driven by the combined effects of climate change and human activities. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is an important component of aquatic ecosystems and plays a key role in revealing changes and responses within them. In this study, the spectral characteristics of CDOM in the main streams and tributaries of the Yangtze and Lancang rivers during the ice-melting and water-abundance periods were explored using a combination of ultraviolet-visible (UV-Vis) and 3D fluorescence spectroscopy. This revealed the compositional characteristics, sources and differences of CDOM in the two source areas. The aim was to provide a scientific basis for understanding the carbon cycle and the migration and transformation processes of organic matter in the hinterland of the Tibetan Plateau, as well as evaluating the degree of human influence in the source areas. The results showed that: 1) the absorption coefficients (a_{254}) and dissolved organic carbon (DOC) in the Yangtze River and Lancang River sources were higher during the ice ablation period than during the abundant water period. This indicates that meltwater from glaciers and permafrost significantly increased the input of organic matter to these two source areas. Spectral parameters E2/E3 and SUVA254 indicated that the humification degree, aromaticity and relative molecular mass of CDOM were higher overall in the two source regions, all of which showed characteristics of a strong land source of organic matter. Secondly, a total of eight fluorescence fractions were extracted from the two source areas. The CDOM fluorescent components in the Yangtze River source area were composed entirely of terrestrial humic substances, including UVA and UVC. In contrast, the Lancang River source contained tryptophan-like substances (280 nm/355 nm, 16%), in addition to terrestrial humic substances, indicating a certain autochthonous characteristic highly correlated with human activities. The mean fluorescence index (FI) and autochthonous index (BIX) values for the Yangtze River source were 1.36 and 0.26, respectively. These values were lower than those for the Lancang River source, where the mean FI and BIX values were 1.45 and 0.52). This indicates that the terrestrial humus characteristics of the CDOM in the Yangtze River source are higher than in the Lancang River source. The CDOM in both source areas is mainly derived from organic matter produced by terrestrial water and soil erosion, or through atmospheric deposition and burial in glacial permafrost. The CDOM in both source areas is mainly derived from organic matter produced by soil erosion or buried in glacial permafrost through atmospheric deposition. However, the CDOM in the Lancang River source is also affected by the input of organic matter from agriculture and livestock in the basin.
Keywords: Three-River Headwaters Region; Yangtze River source; Lancang River source; Chromophoric dissolved organic matter (CDOM); Parallel factor analysis; Spectral analysis

溶解性有机质（Dissolved Organic Matter, DOM）是天然水体中最大的有机物库，占总有机物的 90%以上，在内陆水生系统的碳循环中起着至关重要的作用[1-2]。有色可溶性有机物（Colored dissolved organic matter, CDOM）是 DOM 中具有光学活性的部分，对紫外线（UV）和短波长可见光具有较强的吸收能力，主要由富里酸、腐殖质和芳烃聚合物等物质组成，在水生生态系统中发挥着重要作用[3]。例如：CDOM 浓度的增加能充分吸收紫外可见光，从而降低光合作用发生的透光深度，可以有效保护水生生物免受有害的紫外线辐射[4]；水体 CDOM 中还携带大量有机形态的碳氮磷元素，经光化学降解和微生物消耗过程得以释放，为水生生物生存提供物质支撑[5]。水体中 CDOM 的浓度和光学特性还可以指示水生生态系统碳循环过程和特征，水生生态系统中 CDOM 的来源包括两部分：水体内源（水体微生物活动和浮游动植物分解）和外来来源（土壤侵蚀、地表径流等）[6-8]，外来来源通常含有源自维管植物材料的腐殖质类芳香和高分子量物质，而水体内源主要包括源自藻类生物质或微生物降解活性的黄腐质类、小分子量和低芳香性有机分子[9]。此外，CDOM 也常用于追踪有机污染物的来源，并推断水生系统对环境压力的反应。可见，探索天然水体中 CDOM 的浓度、组成特征及主要来源对于理解生物地球化学碳循环过程机制、评估水生态环境受影响情况具有重要作用。

三江源区（长江、黄河、澜沧江）位于地球“第三极”青藏高原腹地，是中国乃至亚洲重要的生态屏障[10]。其独特的地理位置和复杂的地形地貌，使得该地区成为生态环境保护尤为关键的区域。三江源区河流密布、湖泊、沼泽众多，雪山冰川广布，是世界上海拔最高、面积最大、分布最集中的地区，湿地总面积

达 7.33 万 km^2，被誉为“中华水塔”、“亚洲水塔”[11-12]。三江源区特殊的自然地理特征塑造了其独特的高原水体碳循环过程，源区广袤的湖泊湿地和河流生态系统具有强大的碳汇能力，在全球碳循环过程中发挥重要作用[13]。源区主要承接冰川融水、降雨及地表径流的水资源补给，为下游地区提供稳定的水资源，其水体碳循环过程对于维持下游地区碳源汇的动态平衡具有重要调节作用[14]。独特的自然地理特征也决定了三江源区生态系统具有脆弱性，近年来在气候变化和人类活动双重影响下，加大了源区水生生态系统压力，对下游生态环境造成了潜在威胁，CDOM 作为生态系统功能和物质循环的重要物质组成，直接参与了水域的营养循环、碳循环等关键生态过程，探索具有独特气候特征的高海拔、高原区域的 CDOM 结构与组成有助于揭示源区水生态系统的功能和生物地球化学循环过程。此外，三江源区受人类干扰程度整体较低，其 CDOM 组成和特征更易受外界环境变化干扰，探索源区 CDOM 来源对于评估我国河流源区受人类干扰程度和气候变化影响具有重要指示作用，对于保障长江、澜沧江等中下游水资源供给和改善水生态环境存在重要价值。

我国主要河流源头区域的土壤和水环境中的有机碳生物地球化学过程已成为热点研究话题，但对于处于青藏高原腹地的长江源、澜沧江源 CDOM 的组成、来源和差异性的研究未见系统性报道，关于天然水体 CDOM 研究仍主要集中在内陆水体或者海洋的 CDOM 光学特性、组成以及解析环境受胁迫区域的有机物污染来源等方面[15-16]。目前关于长江源和澜沧江源的研究主要集中在 DOM 方面，例如：张子寒[17]系统探索了长江上中下游溶解性有机质（DOM）的光谱特征，并指出长江流域上游 DOM 的主要来源是陆源为主；赖先强等人[18]通过文献计量学的方法对长江流域干支流、湖泊和水库 DOM 的组分特征、来源、分子组成等进行了探索；Liu 等[19]利用光谱学和傅里叶变换离子回旋共振-质谱（FTICR-MS）的手段比较了澜沧江干流和受级联水库影响河段的 DOM 组成，但具有独特光学特性和更重要的环境指示意义的 CDOM 有待进一步深入研究。因此，本研究采用紫外-可见光谱与三维荧光光谱(3DEEMs, three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy)技术，系统探索了不同水期长江源和澜沧江源干支流 CDOM 吸收光谱的时空特征，揭示了两源区 CDOM 组分特征、来源和差异性，对于揭示具有独特气候地理特征的主要江河源头碳的生物地球化学过程和评估源区受人类干扰程度具有作用，以期为我国三江源区域生态环境保护及长大江大河中下游水生态环境改善提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

三江源包括长江源、黄河源和澜沧江源，由于黄河源区冰川补给相对较少且生境较为单一，源区有机质输入较少而相对稳定，因此本研究以生态异质性更为显著的长江源和澜沧江源作为研究对象。长江源位于青海省西南部，东西长约 500km，南北宽约 400km 的广阔高原，由北支楚玛尔河水系、西支沱沱河水系、南支当曲水系组成，除正源沱沱河外，还包括楚玛尔河、布曲、当曲、聂恰曲等主要支流[20]，流域面积约为 10.5 万 km^2。长江源区具有独特的高海拔地区特点，热量低，辐射强烈，两季（干、湿）明显，雨热同期、风冷同期；澜沧江源位于中国青海省唐古拉山东北部，地貌类型丰富，地形平缓，气候具有寒冷、干燥、风大、辐射强、冷季漫长等特点，年平均气温在-4.0℃~6.0℃之间，降水空间分布不均，自东南向西北递减，流域东部年平均降水量 500 毫米以上，西部年降水量则在 250 毫米左右。年内降水分布也呈现冷季少、暖季多的特点[21]。

本研究在长江源主要支流和澜沧江源干流及主要支流中共设置 33 个监测点位（图 1a），其中长江源主要支流 14 个，包括长江一级支流：雅砻江 4 个，二级支流：鲜水河（雅砻江支流）3 个、大渡河（岷江支流）4 个，三级支流：杜柯河（大渡河支流）2 个、阿柯河（大渡河支流）1 个；澜沧江干流和支流 19 个，包括澜沧江干流 7 个，一级支流：吉曲 3 个、巴曲 1 个，二级支流：子曲 4 个、扎那曲 1 个、阿涌 1 个、宁曲 1 个、布当曲 1 个。长江支流各采样点位海拔在 3000~4500m 之间，底质以泥沙、石砾为主；澜沧江采样点位海拔在 3500~4500m 之间，底质以石砾、卵石为主。综合考虑两源区的径流量变化，由于区域冰冻时间长，枯水期（11 月-4 月）地表径流较小或干涸，本研究分别以 5 月（冰雪消融期）和 8 月（丰水期）开展了两次水样采集，由于三江源区开展野外采样条件有限，交通条件不允许当天测定，因此采集

的水样装入有冰袋的冷藏箱内保存，用于 CDOM 紫外光谱和三维荧光测定的水样使用孔径为 0.22 μm 的 Millipore 膜当天过滤，用于水质和其他指标测定的水样当天运回临时实验室进行超低温冷冻保存（-20℃），并将当天采集的样品及时邮寄至实验室进行预处理与分析（保持样品不解冻）。

图 1 采样点位（a）、研究区位（b）和点位实况（c）

Fig.1 Sampling point (a), Study aera (b), and point reality (c)

1.2 样品处理及测定

保存水样的总氮（TN）、总磷（TP）、叶绿素 a（Chla）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）分别用碱性过硫酸钾紫外分光光度法、过硫酸钾-钼酸铵分光光度法、热乙醇提取-紫外分光光度法、酸性高锰酸钾法进行测定。将孔径为 0.7 μm 的 Whatman GF/F 膜在 450℃的高温下灼烧 4 h 后过滤水样，使用总有机碳分析仪（TOC-L CPN，Shimazdu）通过 680 ℃高温催化氧化燃烧法（High temperature catalytic oxidation，HTCO）测定水体溶解碳浓度（TC、DOC、IC）。

使用孔径为 0.22 μm 的 Millipore 膜过滤后水样，然后使用 Shimazdu UV-1900 分光光度计法测定 CDOM 光谱吸收光谱，以 Milli-Q 水作为实验的空白对照，以 700 nm 处的吸光度进行基线校正。吸收光谱测定波长范围为 200～800 nm，间隔为 1 nm。根据以下公式计算 CDOM 紫外吸收光谱系数：

选择波长在 254nm 处的吸收系数a_{254}来表示 CDOM 浓度[22-23]:

$$a_\lambda = 2.303 \times \frac{D_\lambda}{r} \tag{1}$$

式中，a_λ为波长λnm 处的 CDOM 吸收系数，D_λ为对应波长λnm 出的吸光度，λ为比色皿的光学路径(m)。

紫外比吸收系数（$SUVA_{254}$）是波长在 254nm 处的吸收系数与 DOC 浓度之比，该值能够指示水体中包括芳香族化合物在内的具有不饱和碳键的化合物的浓度变化，其值随着 CDOM 的腐殖化程度的增加而增大[24]，计算公式如下：

$$SUVA_{254} = \frac{a_{254}}{DOC} \tag{2}$$

式中，a_{254}是 CDOM 在 254 nm 波长下的吸收系数(m^{-1})，DOC 浓度单位为(mg/L)。

CDOM 相对分子质量采用 E2/E3 来表征，E2/E3 是波长在 250 nm 和 365 nm 处吸收系数的比值，E2/E3

值越小，CDOM 的相对分子量越大[24]，计算公式如下：

$$\frac{E_2}{E_3}=\frac{a_{250}}{a_{365}} \tag{3}$$

式中，a_{250}和a_{365}是 CDOM 分别在 250 nm 和 365nm 波长下的吸收系数(m^{-1})。

1.3 三维荧光光谱及平行因子分析

采用 RF-6000 型荧光分光光度计（Shimazdu）测定 CDOM 荧光激发-发射光谱矩阵(excitation-emission matrices, EEMs)。激发光谱范围在 250~500 nm，间隔 5 nm；发射光谱范围在 250~600 nm，间隔 1 nm。测得的三维荧光光谱先用超纯水进行拉曼散射校正，即扣除超纯水 EEMs 光谱，并以超纯水 EEMs 中 350 nm 激发波长和 371~428nm 发射波长下的荧光强度积分值将所有 EEMs 定标为拉曼单位(Raman unit，R.U.)；再采用 drEEM 工具包裁剪插值的方法进行瑞丽散射校正；内滤波效应采用相应激发发射波长处吸光度校正予以消除。

平行因子分析(PARAFAC)采用交替最小二乘原理的迭代型三维数阵分解算法，将三维荧光数据解析为若干个具有唯一对应发射波长极值的荧光组分。采用 MATLAB R2018a 的 drEEM 工具箱进行平行因子分析，提取得到主要荧光组分和每个荧光组分的最大荧光强度（Fmax）用以表征各类荧光物质的相对荧光强度[25]。此外，本研究还使用荧光指数（Fluorescence index，FI）、生物源指数(Biological index，BIX)对长江源和澜沧江源 CDOM 的来源进行解析[26]。其中，FI 反映了芳香氨基酸与非芳香物对 DOM 荧光强度的相对贡献率，指 λ_{Ex}=370 nm 时，λ_{Em}在 450 nm 和 500 nm 处的荧光强度比值，FI<1.4时表示陆源为主，FI>1.9 时表示微生物来源为主；BIX 被定义为激发波长为 310nm 时，荧光发射波长在 380nm 和 430nm 处荧光强度的比值，它被用来估计内源物质对 DOM 的相对贡献，BIX＞1 时表明新生自生源占主要贡献，BIX 为 0.6～1 表示既有自生源也有外源的贡献，BIX<0.6 时表明以外源为主。

1.4 数据处理

运用 MatlabR2018a 软件中的 DOMFluor 工具箱处理 CDOM 三维荧光光谱数据并进行平行因子分析；使用 R4.4.1 对不同水期的各荧光参数与水质指标进行了 Person 相关性分析；使用 Arcgis Pro、R4.4.1、Origin 2021 软件用于数据处理和箱式图、相关性图等图像绘制。

2 结果与分析

2.1 长江源和澜沧江源 CDOM 吸收光谱时空特征

本研究分别以a_{254}、E_2/E_3 和 $SUVA_{254}$ 3 个光谱参数表征 CDOM 的相对浓度、相对分子质量和腐殖化程度，以评估不同时期长江源和澜沧江源 CDOM 浓度和组成的差异性。从 CDOM 浓度来看（图 2a），长江源和澜沧江源的a_{254}在时间上和空间上均存在显著差异，冰雪消融期（5 月）长江源a_{254}平均值为（23.49±6.91）m^{-1}，远高于丰水期（8 月）（7.11±2.02）m^{-1}，冰雪消融期和丰水期澜沧江源a_{254}平均值分别为（7.59±2.42）和（4.68±1.42）m^{-1}，整体表现出冰雪消融期大于丰水期的特征，但差异较小；对于 CDOM 相对分子质量而言（图 2b），冰雪消融期和丰水期长江源的 E_2/E_3 平均值分别为（5.65±1.05）和（6.46±2.27），澜沧江源的 E_2/E_3 平均值分别为（6.19±2.51）和（6.06±2.78），整体 E_2/E_3 值较小且不同时期差异性不大，表明长江源和澜沧江源的 CDOM 相对分子质量较大，均呈现强陆源大分子有机物特征；对于 CDOM 腐殖化程度而言（图 2c），不同时期的长江源、澜沧江源 $SUVA_{254}$ 表现出较大的差异性，其中冰雪消融期长江源的 $SUVA_{254}$ 平均值为（3.70±1.24），大于丰水期的 $SUVA_{254}$ 平均值（2.94±1.49）。而澜沧江源则表现出相反的趋势，冰雪消融期澜沧江源的 $SUVA_{254}$ 平均值为（1.25±0.45），低于丰水期的 $SUVA_{254}$ 平均值（2.24±1.09），冰雪消融期长江源 CDOM 的腐殖化程度更高，丰水期澜沧江源的 CDOM 腐殖化程度更高，但从整体来看，长江源和澜沧江源的 $SUVA_{254}$ 平均值达 2.53，表明两源地 CDOM 的整体腐殖化程度较高，芳香性较强，参与污染物迁移转化的活性可能较高。

长江源和澜沧江源的 DOC 浓度也存在显著差异（图 2d），冰雪消融期和丰水期长江源的 DOC 平均浓度分别为（6.57±1.59）和（2.93±1.24）mg/L，澜沧江源的 DOC 平均浓度分别为（6.37±1.51）和（2.52±1.20）mg/L，从时间尺度来看，冰雪融化期长江源和澜沧江源的 DOC 平均浓度均远高于丰水期，这与 α_{254} 光谱

参数所呈现出的规律基本一致，表明由于 5 月冰雪消融期温度升高，冰川融水和冻土融水增加，为长江源和澜沧江源输入了丰富的有机物；从两源区来看，冰雪消融期和丰水期长江源的 DOC 浓度整体高于澜沧江源，可见长江源区域的可溶性有机质的输入相对于澜沧江源更多。

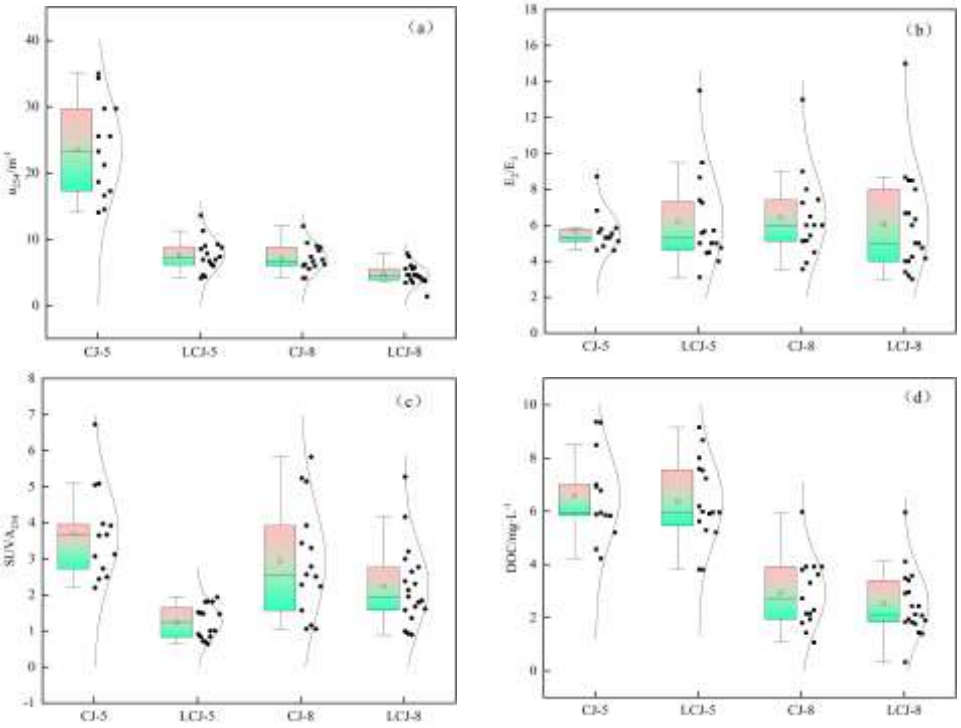

图 2 长江源和澜沧江源a_{254}（a）、、E_2/E_3（b）和 $SUVA_{254}$（c）和 DOC（d）
（CJ 代表长江，LCJ 代表澜沧江，5 和 8 分别代表月份）

Fig.2 The a_{254}、DOC、E_2/E_3 and $SUVA_{254}$ of Yangtze River Source and Lancang River Source (CJ represents the Yangtze River, LCJ represents the Lancang River, and 5 and 8 represent the months, respectively)

2.2 长江源和澜沧江源 CDOM 荧光组分特征

使用 PARAFAC 分析对长江源和澜沧江源的 CDOM 荧光组分进行提取，长江源和澜沧江源分别得到 4 个荧光组分（表 1、图 3），所提取的 8 个组分均能通过对半检验、随机初始化检验及残差分析。

长江源的 4 个组分均为类腐殖质类物质，整体表现了强陆源特征。其中 CJ-C1（λ_{Ex}=260nm，λ_{Em}=500nm）和 CJ-C4（λ_{Ex}=290nm，λ_{Em}=400nm）为典型 UVA 类腐殖质，CJ-C1 组分的分子质量较高，通常认为此种组分为陆源有机质[27]，但 CJ-C4 组分的相对分子质量较低，在海洋中较为常见，在湿地、农业和废水环境中也有报道[28]；CJ-C2（λ_{Ex}=260nm，λ_{Em}=420nm）是一种常见的类腐殖质物质，通常认为该组分可能来源于腐殖质类物质的降解[27]；CJ-C3（λ_{Ex}=350nm，λ_{Em}=450nm）为典型的 UVC 类腐殖质，是一种高分质量量的陆源性类腐殖质，通常认为该组分在森林和湿地中较为常见[29-30]。

澜沧江源共提取到类腐殖质和类色氨酸两种类型组分，整体也表现为强陆源特征。其中，LCJ-C1（λ_{Ex}=255nm，λ_{Em}=480nm）、LCJ-C2（λ_{Ex}=255nm，λ_{Em}=400nm）和 LCJ-C3（λ_{Ex}=330nm，λ_{Em}=440nm）分别为典型的 UVA 类腐殖质、类腐殖质类和 UVC 类腐殖质[27-30]，与长江源 CJ-C1、CJ-C2 和 CJ-C3 组分高度一致，均表现出显著的陆源特征，表明长江源和澜沧江源的 CDOM 组分受到陆源植物或土壤有机质输入的强烈影响；与长江源不同的是 LCJ-C4（λ_{Ex}=280nm，λ_{Em}=355nm）组分为典型的类色氨酸物质，这种物质通常被认为来源于与人类生产生活高度相关的污水或自生源产生过程生成的蛋白质成分[31]，表明澜沧江源 CDOM 组分也表现出了与人类活动高度相关或自生源特征。

表 1 长江源和澜沧江源 CDOM 组分的物质类型和特征[27-31]

Tab. 1 Material types and characteristics of CDOM components in the Yangtze and Lancang rivers source

区域	组分	荧光峰位置（E_X/E_m）	波长范围	物质类型	特征和来源
长江源	CJ-C1	260nm/500nm	E_x：250~295 E_m：478~504	UVA 类腐殖质	分子量较高，与富里酸类似较，主要来源于陆源有机质
	CJ-C2	260nm/420nm	E_x：255~265 E_m：388~425	类腐殖质	降解的腐殖质类物质
	CJ-C3	350nm/450nm	E_x：320~360 E_m：420~460	UVC 类腐殖质	高分子腐殖质，主要来源于湿地和森林
	CJ-C4	290nm/400nm	E_x：295~325 E_m：370~430	UVA 类腐殖质	低分子量，常见于湿地、农业环境和废水中
澜沧江源	LCJ-C1	255nm/480nm	E_x：250~295 E_m：478~504	UVA 类腐殖质	分子量较高，与富里酸类似较，主要来源于陆源有机质
	LCJ-C2	255nm/400nm	E_x：255~265 E_m：388~425	类腐殖质	降解的腐殖质类物质
	LCJ-C3	330nm/440nm	E_x：320~360 E_m：420~460	UVC 类腐殖质	高分子腐殖质，主要来源于湿地和森林
	LCJ-C4	280nm/350nm	E_x：270~280 E_m：330~370	类色氨酸	人类活动或自生源产生过程生成的蛋白质成分

2.3 长江源和澜沧江源 CDOM 组成特征

本研究提取了长江源和澜沧江源各荧光组分的最大荧光强度值（Fmax），用于表征各荧光组分的相对含量（图 4）。从整体来看，长江源各荧光的组分的 Fmax 整体高于澜沧江源，表明长江源 CDOM 的相对含量整体高于澜沧江源。长江源 CDOM 的四个荧光组分 CJ-C1、CJ-C2、CJ-C3 和 CJ-C4（均为类腐殖质）的 Fmax 平均值分别为 0.14 R.U.、0.25 R.U.、0.13 R.U.和 0.17 R.U.，主要以 CJ-C2 和 CJ-C4 组分为主，两种主要组分的占比分别为 36.4%和 24.4%；澜沧江源 CDOM 以陆源性类腐殖质物质为主，同时存在小部分类色氨酸类蛋白质，LCJ-C1、LCJ-C2、LCJ-C3 和 LCJ-C4 的 Fmax 平均值分别为 0.08 R.U.、0.10 R.U.、0.05 R.U.和 0.05R.U.，其中类腐殖质类物质（LCJ-C1、LCJ-C2、LCJ-C3）的 Fmax 占总荧光强度的 83.4%，类色氨酸（LCJ-C4）类物质占 16.6%。

从 CDOM 组成来看，长江源和澜沧江源整体表现为陆源类腐殖质特征，主要原因可能是冰雪融水期温度逐渐升高，冰川、冻土中储存的有机质分解，通过地表径流汇入长江源和澜沧江源干支流中，导致两源地陆源性类腐殖质的含量较高。不同的是，对于澜沧江而言，冰雪消融期汇入的陆源有机质是其 CDOM 的主要组成，但与人类活动或微生物活动及藻类、水生植被分解等过程分解产生的类蛋白物质在澜沧江源中也占一定比重，其主要原因可能是由于澜沧江源采样区域人口密度高于长江源，地理位置更接近人类活动频繁的区域（主要为畜牧业、农业和旅游业），导致澜沧江源的 CDOM 组成表现出了部分与人类活动高度相关的整体特征。

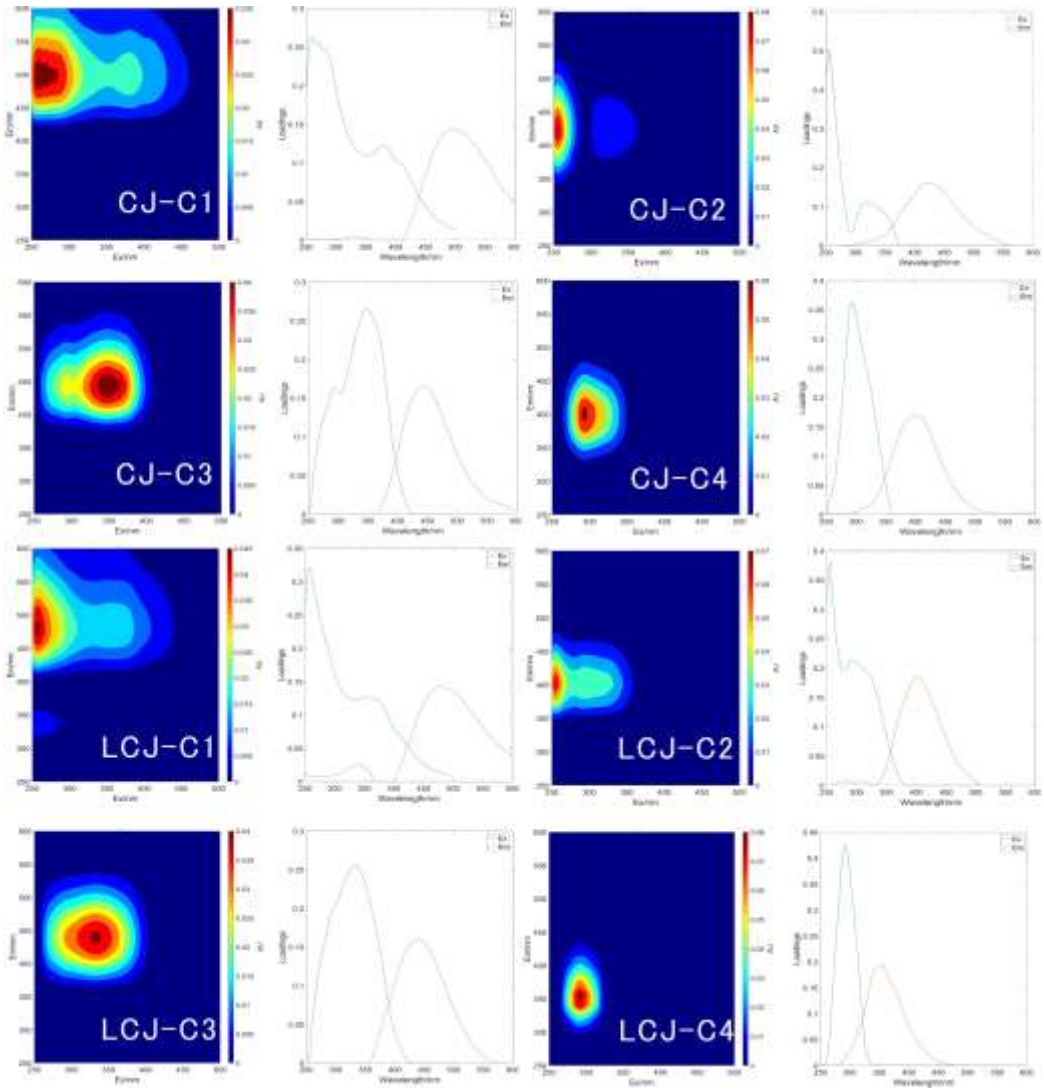

图 3 长江源和澜沧江源 CDOM 组分特征

Fig.3 Characteristics of CDOM Components in the Source of Yangtze River and Lancang River

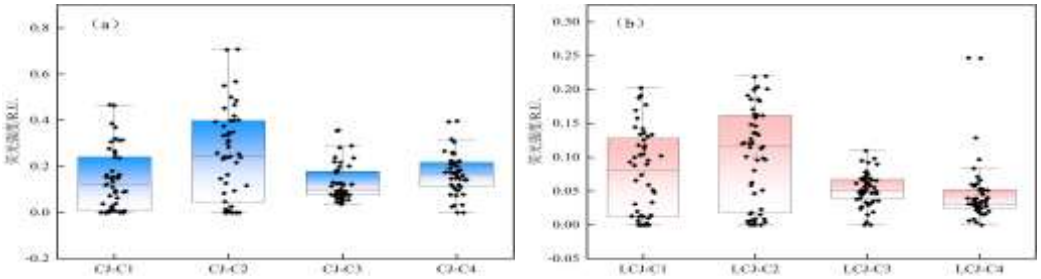

图 4 长江源 CDOM 组成特征（a）和澜沧江源 CDOM 组分特征（b）

Fig.4 Composition characteristics of CDOM in the Yangtze River source (a) and the composition characteristics of CDOM in the Lancang River source (b)

3 讨论

3.1 CDOM 光谱参数与水质参数的关系

CDOM 光谱参数与水质参数之间通常存在着多种复杂关系[1,3,6]，这些关系可以在一定程度上揭示 CDOM 的主要影响因素或来源。因此，为进一步揭示长江源和澜沧江源 CDOM 的主要影响因素，本研究分别对冰雪消融期（5 月）和丰水期（8 月）长江源和澜沧江源的 CDOM 光谱参数和水质参数进行了相关性分析（图 5）。冰雪消融期（图 5a）存在几组显著的相关关系，其中a_{254}与 $SUVA_{254}$、TP、COD 之间存在显著的正相关关系，相关系数分别为 0.92（p<0.05）、0.69（p<0.05）和 0.55（p<0.05），而a_{254}与 FI 之间则为显著的负相关关系（相关系数为-0.55，p<0.05），由此可见，冰雪消融期 CDOM 相对浓度越大，CDOM 腐殖化程度越高，FI 值越低，表明陆源性贡献越大，结合 CDOM 吸收光谱特征、组分特征等来看，冰雪消融期长江源和澜沧江源的 CDOM 浓度受陆源有机质输入影响程度较高；从 CDOM 结构表征指标来看，$SUVA_{254}$ 与 TP 和 COD 呈显著正相关关系（0.53，p<0.05；0.47，p<0.05），这与前人的研究结果可以相互印证[32-33]，不同的是，长江源和澜沧江源地处青藏高原腹地，区别于流域下游受工业、农业和城镇面源等影响较大的水体，长江源和澜沧江源的氮和磷主要来源于农业畜禽粪便或通过大气沉降至地面[34-35]，冰川冻土消融后又以径流的方式返回河流，$SUVA_{254}$ 与 TP 和 COD 之间的正相关关系证明了长江源和澜沧江源的 CDOM 结构可能受到陆源畜禽粪便和大气沉降的影响。

对于丰水期而言（图 5b），a_{254}与 COD 之间存在显著的正相关关系（0.75，p<0.05），但与 TP 呈显著负相关关系（0.75，p<0.05），丰水期监测点位 TP 平均浓度为 0.04mg/L 低于冰雪消融期（0.07mg/L），丰水期流量加大后整体稀释了水体 TP 浓度，但陆源（植被、降雨等）输入的有机质含量升高，因此呈现显著的负相关关系；很多长江中下游内源释放为主的湖泊（太湖、巢湖等）CDOM 研究中证明了a_{254}与 Chla 之间通常呈正相关关系[1, 36-37]，证明了藻类降解产生的 CDOM 是这些富营养浅水湖泊溶解性碳的主要贡献。但在本研究中这个结论不成立，无论是冰雪消融期还是丰水期，长江源和澜沧江源 Chla 浓度与 CDOM 之间均不存在显著的相关关系，证明两源地藻类的生长并不会显著影响两源地的 CDOM 组成，不会增加两源区 CDOM 的自生源特征表现，因此两源地 CDOM 组成和特征仍表现为陆源特征。然而，从澜沧江源的 CDOM 组分特征和紫外光谱特征来看，澜沧江源在一定程度上受到了人类活动干扰，CDOM 呈现出一定的自生源特征，如果两源区受农业、畜牧业及人类开发程度不断增大或在全球气候持续变暖的背景下，氮磷的输入会破解区域营养盐限制，两源地 CDOM 的自生源特征会愈加明显，最终变为陆源为主、自生源为辅的整体特征。

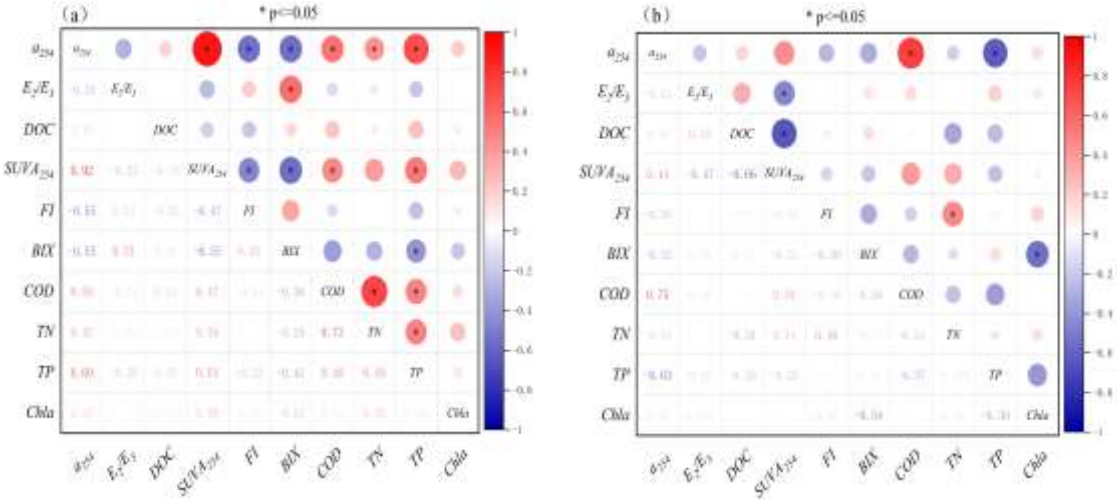

图 5 5 月 CDOM 光谱参数与水质相关性（a）和 8 月 CDOM 光谱参数与水质相关性（b）

Fig.5 Correlation between CDOM spectral parameters and water quality in May (a) and August (b)

3.2 长江源和澜沧江源 CDOM 来源解析

研究表明，河湖等水体中 CDOM 主要来源主要分为外源和内源，外源有机质主要以高分子的类腐殖质和与人类活动高度相关的类色氨酸物质为主，内源主要以水生生物降解产生的低分子有机物为主[38-39]。长江源和澜沧江源的 CDOM 吸收光谱参数、荧光组分特征等均表现了强腐殖化程度、高芳香性和高分子质量等外源有机质特征，为进一步揭示两源区有机质的主要来源，本研究采用荧光指数（Fluorescence index，*FI*）和自生源指数（Index of recent of autochthonous contribution，*BIX*）进行了深入探索[3,6]（图 6）。

长江源 FI 和 BIX 均值分为 1.36、0.26，除个别点位的 FI 值大于 1.4 外，其他点位均表现为典型的陆源有机质输入特征，这与张子寒、赖先强等人[17,18]的研究结论相互印证。长江源的 CDOM 均为类腐殖质类物质，表现出强腐殖化程度、高芳香性和高分子质量特性。潘艳喜[40]、李佳袁[41]等人在研究中揭示了冰川、冻土融水显著增加了地表径流的有机质含量，且陆源输入的 DOM 的芳香性及腐殖化程度较高，表明河流源头 DOM 受到了冰川、冻土消融影响。对于本研究而言，冰雪消融期的长江源有机质含量和 CDOM 含量整体高于丰水期，与潘艳喜[40]、李佳袁[41]的研究结果相互验证，长江源区水生态环境保护受到我国高度重视，流域生境受人类活动影响较小，外加海拔、气候和营养盐限制，长江源 CDOM 的自生源特征相对较小，由此可见，长江源的 CDOM 主要来源于陆域水土流失或通过大气沉降埋藏于冰川冻土所产生的有机物质。澜沧江源 FI 和 BIX 均值分为 1.45、0.52，整体高于长江源，CDOM 整体也呈现强陆源特征。空间上，澜沧江源很多点位的 FI 和 BIX 均大于 1.4 和 0.6，表现出陆源和自生源共存的来源特征，韩祥峰等人[42]在对澜沧江流域的溶解性有机质研究时也得到了与本研究相同的结论。

长江源与澜沧江源 CDOM 来源呈现出一定的差异性。长江源 CDOM 主要来源于陆源有机质输入，腐殖化程度和芳香性高于澜沧江源；澜沧江源 CDOM 组分中还存在类色氨酸物质，且采样点位下游区域生境受到了畜牧业和人类建设活动的一定干扰，根据以上证据推断澜沧江在接受陆域水土流失和冰川冻土消融所产生的有机质外，还受到了流域农业和畜牧业的影响；此外，澜沧江整体的 CDOM 相对浓度相对于长江较低，所以受自生源影响相对程度较高。同时，澜沧江源和长江源的整体 DOC 含量差异性却不显著，表明澜沧江流域水体的溶解性有机碳除了 CDOM 外，可能还存在氨基酸、脂肪酸、烃类、尿素等物质[12]，进一步印证了澜沧江源 CDOM 受人类活动影响的结论。

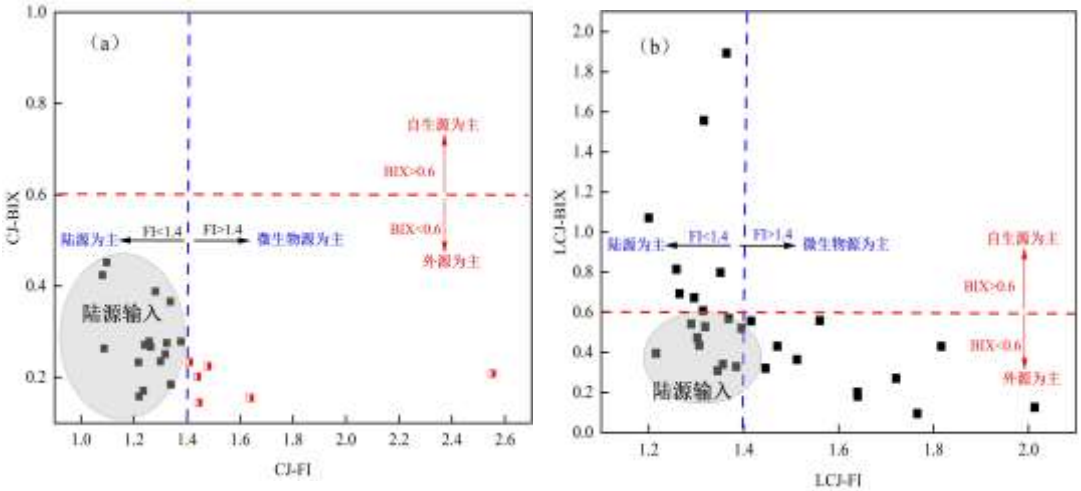

图 6 长江源 CDOM 来源解析（a）和澜沧江源 CDOM 来源解析（b）

Fig.6 Source of CDOM in the Yangtze River Source (a) and Lancang River Source (b)

4 结论

1）长江源和澜沧江源的 CDOM 浓度呈冰雪消融期高于丰水期的规律，两源区的 CDOM 结构整体表

现为强腐殖化程度、高芳香性的陆源大分子有机物特征。

2）丰水期和冰雪消融期长江源和澜沧江源荧光组分均以陆源类腐殖质物质为主，长江源陆类腐殖质特征更强，澜沧江源荧光组分存在类色氨酸物质，表明澜沧江源 CDOM 组成可能受到人类活动的一定影响。

3）丰水期和冰雪消融期长江源和澜沧江源的 CDOM 均主要来源于陆域水土流失或通过大气沉降埋藏于冰川冻土所产生的有机物质，但澜沧江源还存在流域农业和畜牧业等有机质输入途径。

5 参考文献

[1] Yang YR, Shi JC, Yi QT *et al*. Variation analysis of source and composition of CDOM in a source water reservoir of Yellow River diversion project during normal and wet seasons. *J. Lake Sci*, 2023, **35**(05):1635-1646. DOI: 10.18307/2023.0524. [杨永锐, 史建超, 易齐涛等. 引黄水源水库平——丰水期有色可溶性有机物(CDOM)的来源、组成及差异分析.湖泊科学, 2023, **35**(5):1635-1646.]

[2] Ren H, Wang G, Ding W *et al*. Response of dissolved organic matter (DOM) and microbial community to submerged macrophytes restoration in lakes: a review. *Environmental Research*, 2023, **231**: 116185. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116185.

[3] Lai FF, Yang Q, Song KS *et al*. Remote sensing estimation of DOC concentration of reservoirs in Northeast China based on CDOM absorption. *J. Lake Sci*, 2023, **35**(1):224-235. DOI:10.18307/2023.0116. [赖锋发, 杨倩, 宋开山等. 基于 CDOM 吸收特性的东北地区水库 DOC 浓度遥感估算. 湖泊科学, 2023, **35**(1):224-235.]

[4] 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.

[5] 郭燕妮. 大型通江湖泊有色可溶性有机物来源、组成及生物可利用性研究[学位论文]. 湖南：湖南师范大学, 2021.

[6] Derrien M, Brogi S R, Gonçalves-Araujo R. Characterization of aquatic organic matter: assessment, perspectives and research priorities. *Water Research*, 2019, **163**: 114908. DOI: 10.1016/j.watres.2019.114908.

[7] 张柳青.南水北调东线枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成及生物可利用性特征[学位论文].四川：西华师范大学, 2020.

[8] Zhang Y, Gao G, Shi K *et al*. Absorption and fluorescence characteristics of rainwater CDOM and contribution to Lake Taihu, China. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 483-491.DOI：10.1016/j.atmosenv.2014.09.038.

[9] Zhang Y, Liu X, Wang M *et al*. Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2013, **55**: 26-37.DOI：10.1016/j.orggeochem.2012.11.007.

[10] Gao WM, Song Q, Zhang HX *et al*. Analysis of Spatial and Temporal Changes and Driving Factors of Ecological Vulnerability in Sanjiangyuan Region. *Ecology and Environment*, 2024, **33**(10):1648-1660. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.10.016. [高文明, 宋芊, 张皓翔等. 三江源区生态脆弱性时空演变及驱动因素分析. 生态环境学报, 2024, **33**(10):1648-1660.]

[11] Zhao Q, Wang G, Zhao JQ *et al*. Water circulation and water resources of Asia's water tower: The past and future. *Chinese Science Bulletin*, 2023, **68**(36): 4982-4994. [张强, 王港, 赵佳琪等. 亚洲水塔水循环和水资源研究进展与展望.科学通报, 2023, **68**(36): 4982-4994.]

[12] Yao T, Bolch T, Chen D, *et al*. The imbalance of the Asian water tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, **3**(10): 618-632. DOI: 10.1038/s43017-022-00299-4.

[13] Yang J, Kang S, Chen D *et al*. South Asian black carbon is threatening the water sustainability of the Asian Water Tower. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 7360. DOI: 10.1038/s41467-022-35128-1.

[14] Immerzeel WW, Van Beek LPH, Bierkens MFP. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, **328**(5984): 1382-1385. DOI: 10.1126/science.1183188.

[15] Cao F, Tzortziou M, Hu C *et al*. Remote sensing retrievals of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon dynamics in North American estuaries and their margins. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **205**: 151-165.DOI：10.1016/j.rse.2017.11.014.

[16] Andrew A A, Del Vecchio R, Subramaniam A *et al*. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Equatorial Atlantic Ocean: Optical properties and their relation to CDOM structure and source. *Marine Chemistry*, 2013, **148**: 33-43. DOI：10.1016/j.marchem.2012.11.001.

[17] Zhang ZH, Chen X, Li HB *et al*. Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in the Yangtze River Basin and Its Response to Natural and Human Activities. *Environmental Science*, 2024, 1-19. DOI: 10.13227/j.hjkx.202403243. [张子寒,陈星,李海彬等.长江流域溶解性有机质光谱特征及其对自然和人为活动的响应.环境科学, 1-19]

[18] Lai XQ，Gao B，Xu DY. Research Progress on Component Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter in Water Bodies of the Yangtze River Basin. *Environmental Science*, 2024, 1-18. DOI：10.13227/j.hjkx.202402128. [赖先强,高博,徐东昱.长江流域水体溶解性有机质组分特征及其影响因素研究进展.环境科学, 1-18]

[19] Liu T, Wang X, Zhu E *et al*. Evolution of the dissolved organic matter composition along the Upper Mekong (Lancang) Rive. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021, **5**(2): 319-330. DOI：10.1021/acsearthspacechem.0c00292.

[20] Liu Y，Wei LS，Huang AB *et al*. Spatial and temporal evolution of soil water and its response to the environment in the Yangtze River source area under climate change. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, **50**(05): 39-52. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301034. [刘勇,魏良帅,黄安邦等.气候变化下长江源土壤水时空演化及其环境响应.水文地质工程地质, 2023, **50**(5): 39-52.]

[21] Liu C, Ren XL, Zhang L *et al*. Spatio-temporal variation of net primary productivity in Three-River-Source National Park using a multi-model integration method. *Acta Geographica Sinica*, 2024, **79**(09):2356-2371. DOI: 10.11821/dlxb202409013. [刘畅,任小丽,张黎等. 三江源国家公园 NPP 长时序时空变化多模型集成分析. 地理学报, 2024, **79**(09):2356-2371.]

[22] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.DOI: 10.4319/1o.1981.26.1.0043.

[23] A D L, A B P, A X H *et al*. Assessing the potential to use CDOM as an indicator of water quality for the sediment-laden Yellow river, China. *Environmental Pollution*, 2021, **289**:117970. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117970.

[24] 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.2008.53.3.0955.

[25] Zhang WH, Zhao DL, Wang XY et al. Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve. *Environmental Science*, 2020，**41**(11):4958-4969. DOI:10.13227/j.hjkx.202004165. [张文浩, 赵铎霖, 王晓毓等. 太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征.环境科学, 2020, **41**(11):4958-4969.]

[26] Zhuang D, Shao T, Zheng K. Characteristics, sources and driving factors of riverine CDOM in a severe erosion basin on the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2023, **148**: 110080. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110080.

[27] 陈煜.腐殖质与铁、磷相互作用研究[学位论文]. 云南：云南大学, 2018.

[28] Jian ZJ and Xu J. Composition characteristics and source of chromophoric dissolved organic matter in Poyang Lake wetland based on three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **42**(02):213-223. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2021.0458. [简正军, 徐健. 基于三维荧光光谱的鄱阳湖湿地水体有色可溶性有机物组成特征和来源. 环境科学学报, 2022, **42**(02):213-223.]

[29] Liu ZB, Liang WJ, Qin LP et al. Distribution and seasonal variations of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1198-1208. DOI: 10.13227/j.hjkx.201805119. [刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍等. 渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化. 环境科学, 2019, **40**(3): 1198-1208.]

[30] FELLMAN JB, HOOD E, SPENCER R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6):2452-2462. DOI: 10.4319/lo.2010.55.6.2452.

[31] Liu C, Du Y, Yin H *et al*. Exchanges of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface influenced by the external suspended particulate matter and the residual matter after dredging. *Environmental Pollution*, 2019, **246**(MAR.): 207-216. DOI:10.1016/j.envpol.2018.11.092.

[32] Yin DC, Xu JJ, Jin Y *et al*. Characteristics of Phytoplankton Assemblage and Distribution in the Source Regions of the Yangtze River and Lancang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, **34**(01):61-66. DOI: 10.,11988/ckyyb.20150878. [殷大聪, 许继军, 金燕等. 长江源与澜沧江源区浮游植物组成与分布特性研究.长江科学院院报, 2017, **34**(01):61-66.]

[33] Zhao Y, Song K, Wen Z *et al*. Evaluation of CDOM sources and their links with water quality in the lakes of Northeast China using fluorescence spectroscopy. *Journal of Hydrology*, 2017, **550**: 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.027.

[34] Wang YQ, Ru SY, Huang W *et al*. Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming. *Environmental Science* 2023, **44**(09):4906-4914. DOI:10.13227/j.hjkx.202208137. [王永强, 卢少勇, 黄蔚等. 太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析.环境科学, 2023, **44**(09):4906-4914.]

[35] Ye YS, Chen J, Xu JJ *et al*. Stoichiometric Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Water Body in the Source Regions of the Yangtze River and Nujiang River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, **36**(09):6-11. DOI: 10.11988/ckyyb. 20180401. [叶玉适, 陈进, 许继军等.长江源和怒江源区水体氮磷化学计量特征初探.长江科学院院报, 2019, **36**(09):6-11.]

[36] Shi Y, Li YP, Zhang LQ *et al*. Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Gehu, Lake Dianshan and Lake Yangcheng in different hydrological seasons. *J. Lake Sci*, 2021, **33**(01):168-180. DOI：10. 18307/2021. 0124. [石玉,李元鹏,张柳青,等.不同丰枯情景下长江三角洲非通江湖泊(滆湖、淀山湖和阳澄湖)有色可溶性有机物组成特征.湖泊科学, 2021, **33**(01):168-180.]

[37] Shang Y, Song K, Jacinthe P A *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.

[38] Miller M P and McKnight D M. Comparison of seasonal changes in fluorescent dissolved organic matter among aquatic lake and stream sites in the Green Lakes Valley. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(12)：1-12. DOI：10.1029/2009JG000985.

[39] Zhang Y, Yin Y, Feng L *et al*. Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis. *Water research*, 2011, **45**(16): 5110-5122. DOI：10.1016/j.watres.2011.07.014.

[40] 潘艳喜. 冻土水文过程对高寒山区河流溶解性有机碳输出的作用[学位论文]. 北京：中国地质大学, 2022.

[41] 李佳袁. 黄河上游鄂龙段溶解性有机碳的输移特征及通量研究[学位论文]. 西安：西安理工大学, 2022.

[42] Han XF, Guo MW, Liu K *et al*. Quantifying the Source of Organic Matter in the Sediments of the Nuozhadu Reservoir in the Lancang River Basin. Earth and Environment, 2024, 1-10. DOI: 10.3724/EE.1672-9250.2024.52.019. [韩祥峰, 郭明伟, 刘坤等.澜沧江流域糯扎渡水库沉积物有机质来源的定量研究.地球与环境, 1-10]