J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):2090-2103
DOI 10.18307/2025.0628

我国北方典型湖库水体溶解性有机质赋存特征及影响因素*

黄鑫鑫[1,2],焦立新[1,2**],刘亚萍[1,2],程云轩[1,2],张渝婷[1,2],刘　静[3],冯雅茹[3]
(1:中国环境科学研究院,环境基准与风险评估全国重点实验室,北京 100012)
(2:中国环境科学研究院,水生态环境研究所,北京 100012)
(3:成都理工大学生态环境学院,成都 610059)

摘　要: 溶解性有机质(DOM)在水生生态系统和生物地球化学过程中起着至关重要的作用。解析我国北方典型湖库水体溶解性有机质组分特征、来源及影响因素对湖泊水体有机物污染及防治具有十分重要的意义。本研究共采集了北方8个典型湖库130个点位的表层水样,采集区域如下:小兴凯湖、松花湖、大伙房水库、官厅水库、于桥水库、白洋淀、衡水湖、南四湖。结果显示:①采用平行因子分析(PARAFAC)从北方8个湖库水体的DOM中分离出3个组分:类腐殖质(C1)、类色氨酸(C2)、类酪氨酸(C3)。其中东北地区湖库的DOM具有较强的腐殖化和较弱的自生源特征,华北地区湖库的DOM具有较强的自生源特征;相较于其他湖库,白洋淀的DOM具有强烈的自生源特征,且DOM含量和类蛋白质占比偏高。②人类活动等外源带来的类腐殖质输入与COD_{Mn}、腐殖化指数(HIX)呈显著正相关;类蛋白质组分C2、C3含量与溶解性有机碳浓度、荧光指数、生物源指数显著正相关,以及与HIX指数呈显著负相关;DOM各组分与氮营养盐的相关性比磷营养盐高。③较大的流域面积会延长DOM在湖内的滞留时间,并促进内源DOM组分的积累;较深的水体有利于DOM组分的保存。温度升高会增强DOM的湖内转化,增强内源特征,减弱外源特征。降水量较多的地区,雨水径流会将陆源腐殖质输入水体,增强外源DOM特征。水生植被和微生物主要通过内源过程来影响DOM的动态变化,共同调节水体的营养循环和生态功能。人类活动会向水体中输入大量有机质,改变水体DOM特征。农业活动通过促进微生物代谢增强DOM的内源特征;高植被覆盖度地区会增加陆源类腐殖质组分的输入;而城市用地则会向水体输入大量有机物和污染物,改变DOM的组成特征。
关键词: 北方湖库;溶解性有机质;平行因子分析(PARAFAC);相关性分析;冗余分析(RDA分析)

Distribution characteristics and environmental controls of dissolved organic matter in typical lakes and reservoirs in northern China*

Huang Xinxin[1,2], Jiao Lixin[1,2**], Liu Yaping[1,2], Cheng Yunxuan[1,2], Zhang Yuting[1,2], Liu Jing[3] & Feng Yaru[3]
(1: *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *P. R. China*)
(2: *Institute of Water Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *P. R. China*)
(3: *College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *P. R. China*)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) is pivotal in aquatic ecosystems and biogeochemical cycles. Understanding the composition characteristics, sources, and influencing factors of DOM in typical lakes and reservoirs across northern China is crucial for effective organic matter pollution control and safe water transfer. This study collected 130 surface water samples from eight representative water bodies: Lake Xiaoxingkai, Lake Songhua, Dahuofang Reservoir, Guanting Reservoir, Yuqiao Reservoir, Lake Baiyangdian, Lake Hengshui, and Lake Nansi. The key findings are as follows: (1) Through parallel factor analysis (PARAFAC), three distinct fluorescent components were identified in the DOM of these lakes and reservoirs: humic-like substances (C1), tryptophan-like substances (C2), and tyrosine-like substances (C3). DOM in northern lakes and reservoirs exhibited strong humification

* 2024-12-02收稿;2025-02-24收修改稿。
国家科技基础性工作专项(2015FY110900-005)资助。
** 通信作者;E-mail:jiaolx@craes.org.cn。

characteristics with relatively low autochthonous contributions, while those in northern China demonstrated pronounced autochthonous features. Notably, Lake Baiyangdian displayed unique DOM characteristics with higher DOM content and protein-like components than other studied water bodies. (2) Humic-like substances from anthropogenic sources significantly positively correlated with COD_{Mn} and humification index (HIX). Protein-like components (C2, C3) showed significant positive correlations with dissolved organic carbon , fluorescence index, and autogenetic index but negative correlations with HIX. DOM components correlated more strongly with nitrogen than phosphorus nutrients. (3) A larger watershed area extends the retention time of DOM in lakes, promoting the accumulation of endogenous DOM components, while deeper water bodies facilitate the preservation of DOM. Elevated temperatures enhance the in-lake transformation of DOM, intensifying its endogenous characteristics and reducing its exogenous features. In regions with higher precipitation, rainfall-runoff transports terrestrial humic-like substances into water bodies, increasing the exogenous DOM signature. Aquatic vegetation and microorganisms predominantly influence DOM dynamics through endogenous processes, collectively regulating nutrient cycling and ecological functions in aquatic systems. Human activities introduce substantial amounts of organic matter into water bodies, altering the characteristics of DOM. Agricultural practices enhance the endogenous DOM signature by stimulating microbial metabolism; areas with high vegetation coverage contribute more terrestrial humic-like components to water bodies; and urban areas introduce substantial amounts of organic matter and pollutants, modifying the composition and characteristics of DOM.

Keywords: Northern lakes and reservoirs; dissolved organic matter; parallel factor analysis (PARAFAC); correlation analysis; redundancy analysis (RDA)

溶解性有机质(DOM)作为水生和陆地生态系统碳库中最活跃的有机组分,对相关环境的碳储量具有重要影响。DOM 在陆地—河流—湖库系统的碳循环过程中发挥着关键作用:一方面,降雨径流将陆源 DOM 输送至水体;另一方面,河流汇入过程又将大量 DOM 带入湖库[1]。同时,DOM 作为微生物的主要碳源和营养源,通过微生物的分解与合成过程,驱动着碳、氮、磷等元素的生物地球化学循环[2]。根据来源差异,湖泊 DOM 可分为外源 DOM 和内源 DOM 两大类。其中,外源 DOM 主要来源于降雨径流输入和人类活动排放,其输入通常与湖泊营养水平的升高密切相关[2]。内源 DOM 则主要来自水生植被的降解产物以及微生物代谢活动释放的有机物质[3]。

三维激发发射矩阵(3D-EEM)是一种方便、高效、无损的 DOM 分析方法,可在线实时监测,在 DOM 溯源分析中具有很大潜力。三维荧光光谱(excitation-emission matrix, EEM)包含大量来自 DOM 的指纹信息,EEM 衍生的腐殖化指数(HIX)和生物源指数(BIX)等荧光指标参数为 DOM 的高分辨率综合分析提供了支持[4],其有效信息的解译和筛选是光谱解译和溯源分析的难点。EEM 技术对 DOM 荧光特性的分析易受水体环境参数(如 pH、温度、离子强度)的影响。具体而言,pH 值的波动可能导致荧光峰位置偏移或强度改变,进而影响 DOM 组分的精确识别[5]。针对复杂荧光光谱的解析,通常需要借助平行因子分析(PARAFAC)等数学方法,但该模型的构建与验证过程较为复杂,且对数据质量要求严格。因此,在实验过程中需严格控制水样的关键参数(pH、温度、离子强度),以最大限度降低环境因素对荧光特性的干扰。同时,在使用 PARAFAC 模型解析荧光光谱时,应通过核心一致性检验和拆半分析验证等方法确保模型的可靠性。此外,建议结合 OpenFluor 等在线光谱数据库进行比对分析,以进一步提升解析结果的准确性[6]。

近年来,EEM 技术在北方湖库水体 DOM 的组成、来源及空间分布特征研究中得到了广泛应用。研究表明,北方地区湖库 DOM 具有显著的区域特征。其中 Wen 等[7]对中国北方半干旱地区的研究发现,淡水湖 DOM 主要来源于陆源输入,而盐湖则以自生源 DOM 为主。Wang 等[8]研究发现,呼伦湖 DOM 以陆源腐殖质为主,浓度显著高于国内外其他湖泊,且时空分布呈现显著差异,主要受气候、人类活动、湖盆地形和生物因素的综合影响。Cui 等[9]研究发现,白洋淀上覆水中蛋白类物质荧光峰强度较高,这主要归因于上游废水排放和水产养殖排泄物的输入,这些有机物的增加不仅导致水体氮磷浓度升高,还促进了微生物的生长代谢,进而增加了 DOM 含量。

现有研究表明,DOM 的荧光组成受土地利用方式、气候条件、水文特征和营养水平等多重因素的影响[10]。其中,人类活动对 DOM 的时空分布具有显著影响。在人类活动密集区域,大量生活和工业污水的排入显著改变了湖泊外源 DOM 的输入量[11]。气候变化主要通过降水模式、径流量和气温波动影响 DOM 动

态,而人类活动则通过改变下垫面土地利用方式、植被覆盖、水利工程建设以及灌溉排水模式等产生影响。由于湖泊 DOM 的动态变化机制复杂,不仅与碳循环、营养盐循环和微生物活动等生态过程密切相关,还受到季节变化、气候条件和人类活动等多重因素的共同作用,现有研究尚难以全面揭示其变化规律。因此,本研究通过系统分析我国北方典型湖库 DOM 的赋存特征,深入探讨水质指标与 DOM 的相关性,以及水环境因素、水生态因素、人类活动和土地利用等环境因子对 DOM 组成的影响机制,对控制北方典型湖库溶解性有机质污染具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

研究选取小兴凯湖、松花湖、大伙房水库、官厅水库、于桥水库、白洋淀、衡水湖和南四湖作为研究对象。这 8 个湖库基本涵盖了北方温带季风气候区的空间分布特征,样本类型多样,包括草型湖泊(白洋淀)、森林流域湖库(松花湖、大伙房水库)以及农业面源污染显著区域(南四湖),能够较好地反映北方水生生态系统的多样性。本文选取的北方 8 个湖库的机制分析(如 DOM 分布特征、气候—水文—人类活动耦合作用)在相似地理气候区域内具有较高的推广价值,但对西北干旱区、高寒区及特大城市群湖库的代表性不足,适用性需要进一步验证。

本课题组于 2016 年在白洋淀、衡水湖、于桥水库分别采集了 15、10、9 个点位的表层水样;2017 年在小兴凯湖、松花湖、大伙房水库、南四湖分别采集了 15、29、10、25 个点位的表层水样;2018 年在官厅水库采集了 17 个点位的表层水样;共 130 份表层水样(图 1),采样点详细信息见附表Ⅰ。每个点位现场采集 500 mL 上覆水在 4 ℃冷藏条件下带回实验室,随后水样立即通过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜,水样原液和过滤后的滤液在 4 ℃冷藏,用于水质指标和 DOM 测定。

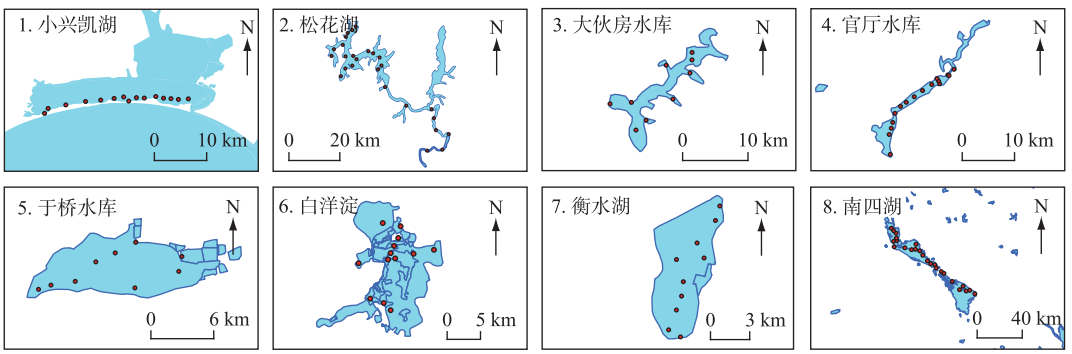


图 1 湖泊和水库的采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in lakes and reservoirs

1.2 水质指标测定

溶解性有机碳(DOC)浓度用 TOC 分析仪(HT1300,德国耶拿分析仪器)测定[12],高锰酸盐指数(COD_{Mn})依据高锰酸钾氧化法测定[13],总氮(TN)和溶解性总氮(DTN)浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定[14],氨氮(NH_3-N)浓度依据纳氏试剂分光光度法测定[15],硝态氮(NO_3^--N)浓度依据紫外分光光度法测定[14],溶解性有机氮 DON=DTN−NH_3-N−NO_3^--N[14],总磷(TP)和溶解总磷(DTP)浓度采用碱性过硫酸钾消解钼酸铵比色法测定[14],溶解性活性磷(DRP)浓度依据钼酸铵分光光度法来测定,溶解性有机磷 DOP=DTP−DRP。

1.3 三维荧光光谱测定

使用 F-7000 荧光光谱仪(Hitachi High Technologies, Tokyo, Japan)在 700 电压氙灯下测定 DOM 的荧光数据。激发光谱和发射光谱范围分别为 200~450 和 250~600 nm,数据采集间隔为 5 nm。本研究选取荧光指数(FI)、腐殖化指数(HIX)和自生源指数(BIX)3 个荧光参数来研究 DOM 的特征。FI 为激发波长 Ex 在

370 nm 时,发射波长 Em 在 470 nm 与 520 nm 处荧光强度的比值[16]。HIX 为 Ex 在 254 nm 时,Em 在 435~480 nm 与 300~345 nm 波段内的荧光强度积分值之比[17]。BIX 为 Ex 在 310 nm 时,Em 在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度的比值[18]。

1.4 平行因子分析(PARAFAC)

对所有样品进行非负约束和拉曼归一化处理,所得的相对荧光强度以拉曼单位(R. U.)表示[19]。对原始数据进行拉曼散射和瑞利散射校正,在相同条件下,所有样品的 EEM 光谱数据通过减去 Milli-Q 水的空白 EEM 来去除大部分散射。利用 MATLAB R2021a 中的 drEEM 工具箱对 PARAFAC 进行建模,利用拆半检验、残差分析和载荷分析来确定 PARAFAC 的结果。在 OpenFluor(http://www.openfluor.org)中对输出的 Ex 和 Em 数据进行定量比较,鉴定 PARAFAC 的荧光组分。

1.5 水环境、人类活动和土地利用数据

为了探讨水环境因素、水生态因素、人类活动和土地利用对湖泊 DOM 组分的影响。选取流域面积(DA)、平均水深(MD)、年平均气温(AAT)、年平均降水量(MAP)、年日照时数(ASD)作为水环境因素;水生植被、微生物作为水生态因素;人口密度(PD)、国内生产总值(GDP)、污水排放量(QWE)作为人为变量。具体数据来源见附表 II。

1.6 数据分析

利用 ArcGIS 10.8 软件对采样点进行空间制图。在 MATLAB R2021a 中使用 drEEM 工具箱对 EEMs 进行 PARAFAC 分析。在 R Studio 3.4.3 中使用“tidyverse”软件包对荧光指数数据进行分析。通过 Origin 2021 对 3 个荧光组分进行箱线图绘制,并对荧光参数与水质指标进行相关性分析。利用 Canoco 5 进行冗余分析(RDA),将环境因素和 DOM 之间的关系可视化。

2 结果与讨论

2.1 典型湖库水体溶解性有机碳氮磷赋存特征

北方 8 个典型湖库 DOC 浓度为 1.16~177.13 mg/L,平均值为 28.38 mg/L(表 1),其中白洋淀的 DOC 浓度显著高于其他湖泊(图 2a),变化范围在 112~177 mg/L 之间。与南方湖泊相比,北方湖库的 DOC 浓度整体偏高。这一结论可通过对比研究得到证实:贾海斌[20]对 39 个云南高原湖泊的研究表明,其 DOC 浓度为 5.68~21.56 mg/L,平均值为 12.55 mg/L;赖先强等[21]对 22 个长江流域湖泊的研究显示,DOC 浓度范围为 1.77~15.18 mg/L,平均值为 5.09 mg/L(表 1)。值得注意的是,白洋淀的 DOC 浓度显著高于上述南方湖泊,表现出独特的 DOM 特征。进一步分析表明,白洋淀的 DOM 主要来源于内源,其 DOC 也以内源性为主。内源性 DOC 的产生机制主要包括:(1)水生植被光合作用将水和 CO_2 转化为有机质;(2)河床底泥沉积物等内源碎屑物质的分解与释放。这些过程共同作用,显著提高了水体的 DOC 浓度,从而使得白洋淀的 DOC 浓度远高于同期研究的大部分湖泊。研究结果显示,北方湖库的 DON 浓度范围为 0.004~3.16 mg/L,平均值为 0.55 mg/L,整体高于云南高原湖泊的平均水平(0.045~1.74 mg/L,平均值为 0.39 mg/L)[20]。从区域分布来看,华北地区湖库(官厅水库、衡水湖、南四湖、白洋淀)的 DON 浓度相对较高(图 2b),平均值为 0.60 mg/L。在 DOP 方面,北方湖库的 DOP 浓度为 0.0006~0.20 mg/L,平均值为 0.034 mg/L,同样高于云南高原湖泊的平均水平(0.0017~0.088 mg/L,平均值为 0.029 mg/L)。其中,东北地区湖库(小兴凯湖、大伙房水库、松花湖)表现出较高的 DOP 浓度(图 2c),变化范围为 0.01~0.20 mg/L,平均值为 0.098 mg/L。

就 COD_{Mn} 而言,北方湖库 COD_{Mn} 范围为 0.30~7.31 mg/L,平均值为 3.71 mg/L。对比研究表明,崔同昆[22]2018 年对杞麓湖的调查显示,COD_{Mn} 为 6.1~9.2 mg/L,平均值为 7.59 mg/L;且《云南省 2017 年环境状况公报》指出,云南九大高原湖泊 COD_{Mn} 普遍超标,均高于北方湖库的相应水平。进一步分析发现,白洋淀的 DOC 浓度虽然显著高于其他湖库,但其 COD_{Mn} 却低于小兴凯湖和大伙房水库(图 2d)。这一现象与白洋淀有机物的组成特征密切相关。研究表明,白洋淀水体中的有机物主要来源于水生植被降解、沉积物释放以及人为污染,且以难生化降解的有机物为主[23]。这一特征在其他研究也得到证实:徐蓉桢等[23]的研究发现白洋淀 COD_{Mn} 较低而重铬酸盐指数(COD_{Cr})较高;井晨[24]通过对 95 个采样点的分析,发现 COD_{Cr} 浓度空间差异显著,平均值为 17.61 mg/L;刘鑫[25]对 30 个采样点的研究也证实 COD_{Cr} 存在空间差异性,平均值

高达 114.3 mg/L。值得注意的是,本研究采用的 COD_{Mn} 与上述研究的 COD_{Cr} 存在显著的方法学差异:COD_{Cr} 法能够快速氧化大部分难生化降解的有机物,而 COD_{Mn} 法对此类有机物的氧化能力相对较弱,这很好地解释了白洋淀 COD_{Mn} 较低而 COD_{Cr} 较高的现象[23]。

值得注意的是,水体 DOC 和 COD_{Mn} 是反映水体污染程度的重要指标。过高的溶解性碳、氮、磷浓度不仅会导致水体富营养化,还可能引发水质恶化。因此,深入研究北方湖库溶解性有机碳、氮、磷的赋存特征及其环境行为,对科学防控水体污染、维护水生态系统健康具有重要的理论和实践意义。

表 1 不同区域湖库水质和荧光特征

Tab. 1 Water quality and fluorescence characteristics of lakes and reservoirs in different regions

区域	DOC/(mg/L)	DON/(mg/L)	DOP/(mg/L)	COD_{Mn}/(mg/L)	FI	HIX	BIX	DOM 主要组分	文献
北方湖库	28.38	0.55	0.034	3.71	2.22±0.15	3.34±1.52	0.95±0.24	类腐殖质和类蛋白质	本研究
东北地区湖库	18.45	0.49	0.098	4.90	2.11±0.06	4.48±1.22	0.79±0.07	类腐殖质和类蛋白质	本研究
华北地区湖库	35.45	0.60	0.028	2.42	2.31±0.13	2.53±1.14	1.07±0.25	类腐殖质和类蛋白质	本研究
云南高原湖泊	12.55	0.39	0.029	7.59	1.55	4.79	0.88	类腐殖质	[20,22,26]
长江流域湖泊	5.09	/	/	/	1.64±0.26	/	1.32±0.40	类蛋白质	[21]

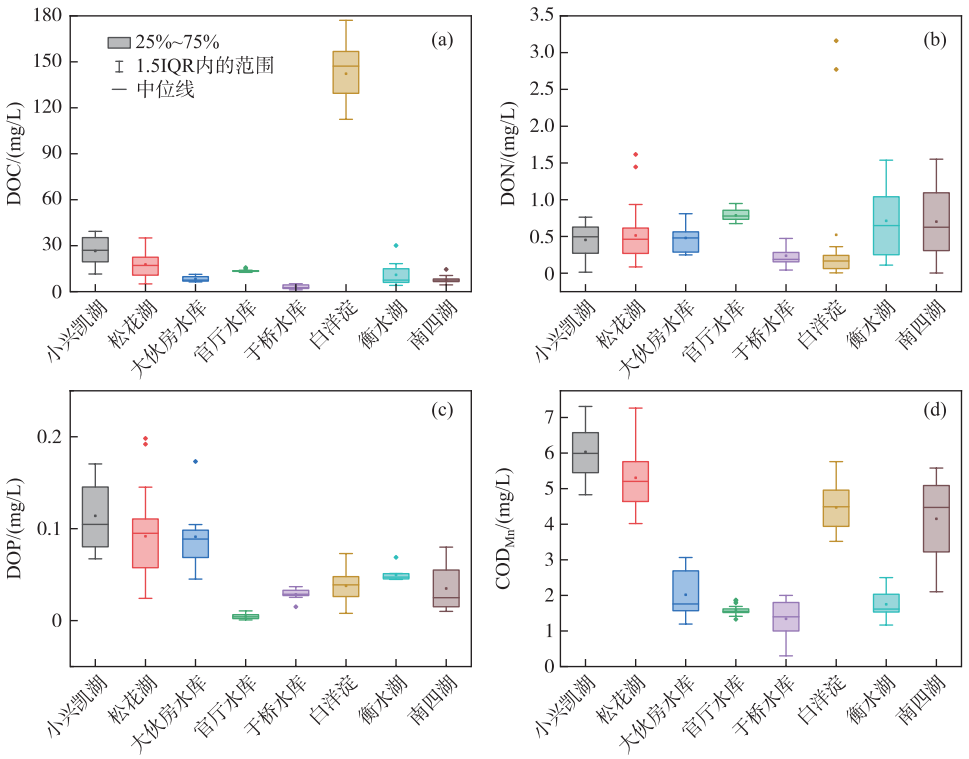


图 2 北方湖库水体溶解性有机氮、磷浓度分布

Fig. 2 Distribution of dissolved organic nitrogen and phosphorus of lakes and reservoirs in northern China

2.2 典型湖库水体 DOM 三维荧光光谱特征及其来源解析

2.2.1 DOM 三维荧光分析 本文通过 EEM-PARAFAC 模型成功识别出 3 种荧光成分(图 3),核心一致性、残差分析和折半检验结果如附图Ⅰ。各组分的最大激发波长(Ex)与发射波长(Em)如图 3 所示,分别为

260/425 nm(C1)、232/347 nm(C2)和 277/317 nm (C3)。基于 Openfluor 数据库的比对分析显示,这 3 种组分与已发表模型的匹配度均高于 0.95,具有较高的可靠性。具体而言,C1 组分与 Yamashita 等[27]研究发现的 C1 组分特征相似,属于类腐殖质组分。C1 组分主要来源于陆源输入,同时包含部分内源生成物质,其分子结构中含有丰富的芳香族化合物以及羧基、羟基等官能团。C2 组分与 Colin 等[28]研究发现的 C5 组分特征相似,为类色氨酸组分,主要来源于微生物等内源产生的蛋白类物质。C3 组分与 Zhuang 等[29]发现的 C5 组分相似,为类酪氨酸组分,主要来自水生植被、微生物等代谢产生的芳香性蛋白类结构。

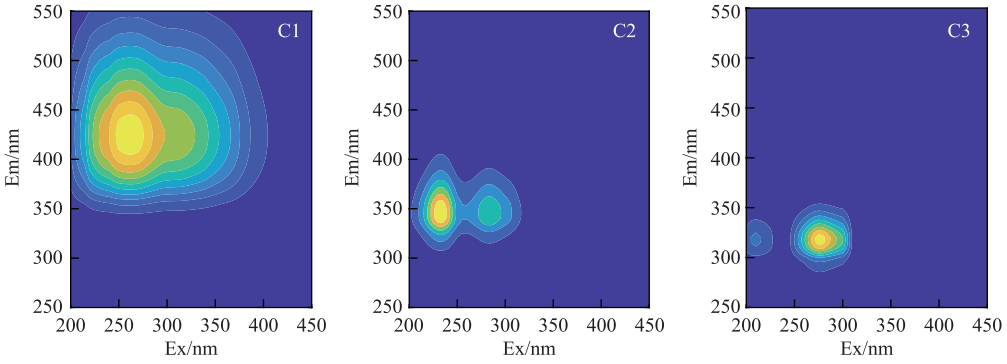


图 3 PARAFAC 组分(C1~C3)在光谱中的位置

Fig. 3 The location of PARAFAC components(C1−C3) in the spectrum

2.2.2 DOM 组分的分布特征 北方湖库 DOM 组分特征分析显示(图 4e),白洋淀以类蛋白质组分为主,而其他湖库的类腐殖质和类蛋白质组分含量差异相对较小。这一特征与我国其他区域湖泊形成鲜明对比:长江流域湖泊整体以类蛋白质组分为主,而云南高原湖泊整体上以陆源类腐殖质为主。其中,高海拔湖泊因气温较低抑制了微生物的活动,导致内源性类蛋白质含量偏低;相反,低海拔湖泊由于温度较高,促进了微生物的活动,使得类蛋白质组分含量相对较高[20]。

具体而言,北方湖库 C1 类腐殖质组分的荧光强度范围为 0.004~0.58 R.U.,平均值为(0.29±0.16) R.U.。区域对比显示,东北湖库 C1 组分含量(0.15~0.57 R.U.,平均值为(0.35±0.12) R.U.)整体高于华北地区(0.004~0.58 R.U.,平均值为(0.25±0.18) R.U.)(图 4a)。这种空间差异可能与东北地区独特的自然环境有关:黑土地富含腐殖质、有机质和生物活性物质[30],通过水土流失、农业面源污染和生活污水排放等途径输入湖泊,导致该区域湖库 DOM 中类腐殖质占比偏高(图 4e)。值得注意的是,白洋淀的类蛋白质组分(C2、C3)荧光强度显著高于其他湖库(图 4b~d),这可能是因为白洋淀作为华北大平原最大的淡水草型湖泊,大量水生植被的光合作用、微生物代谢以及水产养殖增加了水体中内源性 DOM 的含量。此外,白洋淀较高的 DOC 浓度也为水生植被的繁殖提供了充足的营养物质,促进了内源性类蛋白质的分泌。对比南方典型湖库,滇池因北部区域微生物活动旺盛而表现出较高的类色氨酸含量;抚仙湖则因其优势藻类(如轮藻)的代谢活动而具有较高的类酪氨酸组分含量[14]。长江流域湖泊 DOM 具有空间异质性,整体上以类蛋白质为主,主要来源于水体微生物活动。这种空间差异主要受气候条件、人类活动强度、营养状态和湖泊水体流动性等因素的影响。特别是在长江口及其邻近海域,DOM 组分特征主要受长江径流输入、微生物活动以及悬浮颗粒物的吸附和絮凝作用调控[21]。

2.2.3 DOM 荧光指数分析 基于荧光指数分析,北方湖库的 DOM 来源特征如图 5 所示。荧光指数(FI)是判别 DOM 来源的重要指标,当 FI<1.4 时,DOM 主要来源于陆源输入(如陆地植物和土壤有机质)[31];当 1.4<FI<1.9 时,DOM 主要是由陆源与自生源贡献相结合;当 FI>1.9 时,DOM 以微生物活动的内源输入为主[32]。研究显示,北方湖库的 FI 值均大于 1.9,其中东北地区湖库(小兴凯湖、松花湖、大伙房水库)的 FI 值整体低于华北地区湖库(于桥水库、衡水湖、南四湖、白洋淀),表明华北地区湖库 DOM 以内源产生为主。FI 的区域差异可能是温度驱动的微生物活性差异、人类活动对营养状态的改变,以及陆源输入强度共同作用的结果。东北湖库由于年均气温较低,微生物活性受到抑制,加上黑土地有机质通过水土流失大量输入,导

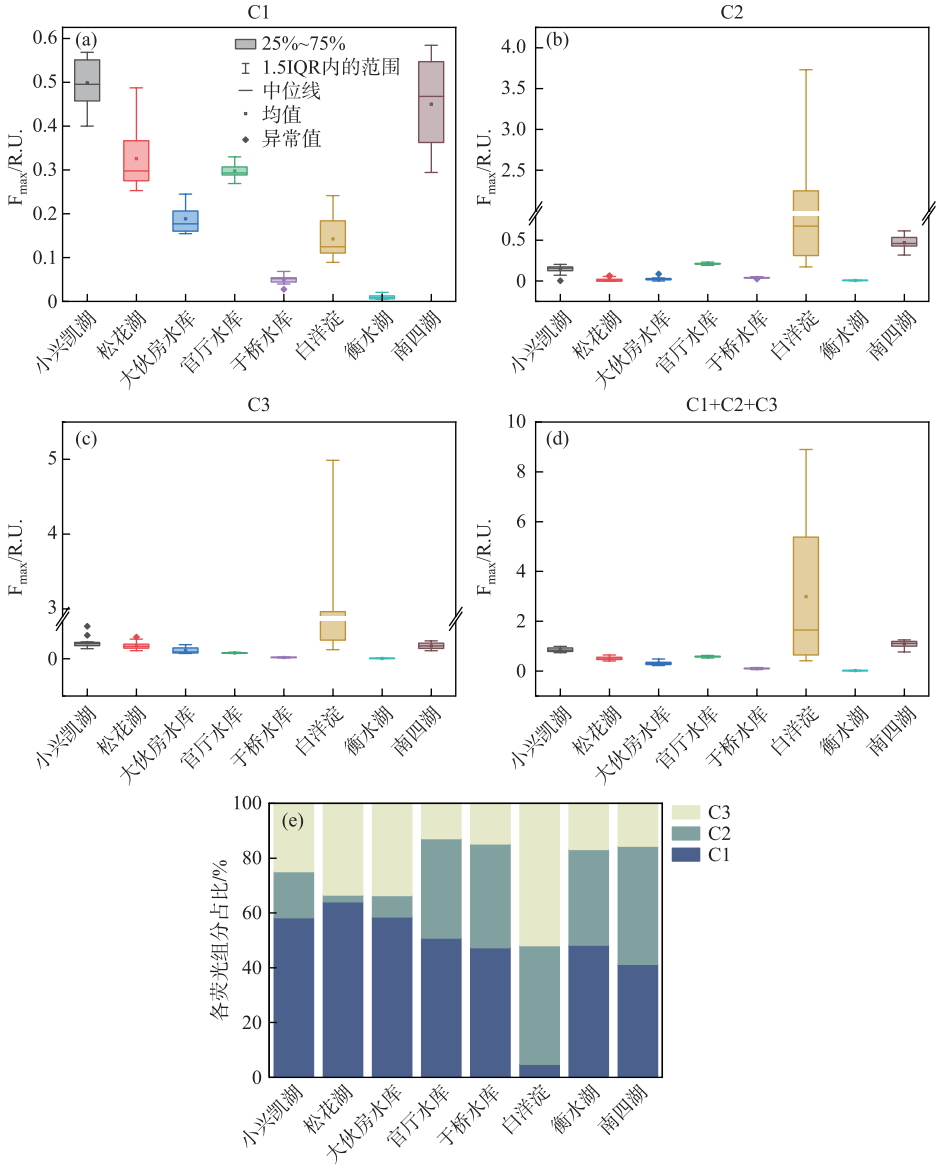


图 4 北方湖库水体 DOM 各荧光组分(C1~C3)的 F_{max}

Fig. 4 F_{max} of each fluorescence component (C1−C3) of DOM in lakes and reservoirs in northern China

致陆源 DOM(如类腐殖质)占主导地位,掩盖了微生物活动产生的自生源信号,使得内源 DOM 的贡献相对受限。而华北地区湖库的陆源输入通量较低(C1 组分均值为(0.25±0.18) R.U.),内源代谢产物(C2、C3)成为 DOM 的主要组分,其更高的荧光指数也证实了这一点。这可能与该地区较高的年均气温和密集的水产养殖有关,这些因素共同增强了微生物介导的内源 DOM 生成。相比之下,云南高原湖泊水体的 FI 值在 1.4~1.9 之间[26],长江流域内湖泊水体 FI 平均值为 1.64±0.26,整体低于北方湖库[21](表 2)。

腐殖化指数(HIX)可以有效表征 DOM 的腐殖化程度,HIX<4 表示 DOM 主要来源于微生物或水生植被等自生源;4<HIX<6 表示 DOM 具有较弱腐殖质和较强自生源特征;6<HIX<10 表示 DOM 具有较强腐殖质特征和较弱自生源成分;HIX>10 则表示 DOM 有强腐殖质特征和显著陆源贡献[33]。北方湖库 HIX 范围为

0.15~7.45,平均值为 3.34±1.52。其中东北地区湖库 HIX(2.13~7.45,平均值为 4.48±1.22)整体高于华北地区(0.15~5.34,平均值为 2.53±1.14),而白洋淀的 HIX 值最小(0.15~1.62,平均值为 0.59±0.50)。这表明东北湖库 DOM 具有较强的腐殖化特征,华北地区湖库 DOM 具有较弱腐殖质和较强自生源特征,而白洋淀的 DOM 以自生源为主。吴鹏[26]对云南高原湖泊的研究也证实了类似规律,星云湖 HIX 值偏高,说明其 DOM 受陆源腐殖质输入影响较大,而滇池、抚仙湖、程海、洱海的 HIX 值均小于 4,表明这些湖泊的 DOM 受微生物、水生植被等内源影响较大。研究还发现,HIX 指数的空间分布特征受到多种环境因子的综合影响,包括入湖河流的水质特征、人类活动强度、降雨冲刷作用以及流域土地利用类型等,这些因素共同导致了不同湖泊间 HIX 值的显著差异。

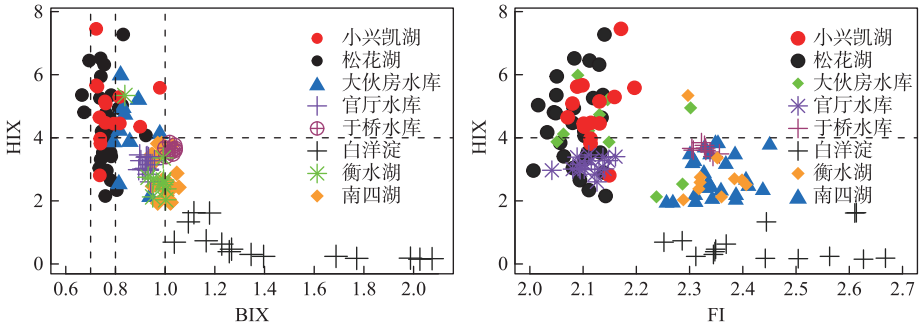


图 5 北方湖库水体 DOM 荧光参数分布

Fig. 5 Distribution of DOM fluorescence parameters in lakes and reservoirs in northern China

自生源指数(BIX)反映了水体 DOM 自生源的相对贡献,0.6<BIX<0.7 时,具有低的自生源组分;0.7<BIX<0.8 表示中度自生源组分;0.8<BIX<1 表示强自生源组分;BIX>1 则具有强烈的自生源组分,主要由微生物或水生植被产生[33]。北方湖泊 BIX 值范围为 0.67~2.07,平均值为 0.95±0.24。其中东北地区湖库 BIX(0.67~0.98,平均值为 0.79±0.07)整体低于华北地区(0.84~2.07,平均值为 1.07±0.25),白洋淀的 BIX 值最高(1.04~2.07,平均值为 1.44±0.35)。这表明东北地区湖库 DOM 具有较低的自生源特征,华北地区湖库的 DOM 具有较强的自生源特征,白洋淀的 DOM 强烈趋向于水生植被和微生物等内源产生。贾海斌[20]研究发现,云南高原湖泊水样 BIX 值为 0.51~1.18,平均值为 0.88,BIX 值随海拔升高而降低,高海拔湖泊(如老君山)的自生源特征较弱。

通过以上荧光指数分析北方湖库 DOM 的来源特征,发现东北与华北地区存在显著差异。东北地区湖库 DOM 表现出较强的腐殖化特征,而华北地区则呈现出较强的自生源特征,这种差异与气温、土地利用类型及生态系统特征密切相关。首先,东北地区广泛分布的黑土地富含腐殖质和有机质(含量高达 5%~10%),通过农业面源污染(如化肥施用)和水土流失等途径,大量陆源腐殖质被直接输入湖库;此外,该地区针阔混交林和湿地植被覆盖率较高,凋落物分解产生的大量芳香族化合物进一步强化了 DOM 的陆源特征;由于东北地区年均气温较低(如黑龙江地区为 3~5 ℃),这种气候条件抑制了水体微生物活性,从而减少了内源性类蛋白质物质的生成。相比之下,华北地区湖库的 DOM 则表现出较强的自生源特征,这与该地区较高的年均气温(华北平原为 12~14 ℃)密切相关,较高的气温为微生物增殖提供了有利条件。以白洋淀为代表的草型湖泊尤为突出,沉水植被覆盖度达 70% 以上,光合作用释放大量溶解性有机质;同时,密集的水产养殖活动显著提高了水体中微生物的活性,进一步促进了类蛋白物质的生成,使 DOM 的自生源特征更加显著。值得注意的是,不同湖库 DOM 特征的时空变化较为复杂,主要受人类活动、地理环境和水文条件等因素的综合影响。因此,通过结合三维荧光参数分析方法,深入研究北方湖库水体 DOM 的特征及来源,对科学防控水体有机质污染、维护水生态系统健康具有重要的理论和实践意义。

2.3 典型湖库水体 DOM 的影响因素

2.3.1 水质指标和荧光参数的相关性分析 将本研究中北方湖库的水质指标与 DOM 荧光参数进行相关性分析,探讨二者的关系(图 6)。COD_{Mn} 作为综合反映水中有机物含量的指标,其浓度随有机物含量增加而

升高。COD_{Mn}、HIX 和 C1 组分之间存在显著正相关($P<0.01$),这表明人类活动等外源输入的类腐殖质与 COD_{Mn}、HIX 指数呈显著正相关。这一发现与东北湖库 COD_{Mn} 和 C1 组分含量偏高的研究结果相吻合,进一步证实了人类活动对 DOM 组成的影响。TP 是水体中所有形式磷的总和,主要来源于人类活动带来的生活废水、化肥和有机磷农药等。COD_{Mn} 与 TP、C1 组分呈显著正相关($P<0.01$),TP 与 C1 组分呈显著正相关($P<0.01$),且 COD_{Mn} 与 FI、C1 组分与 FI 呈显著负相关($P<0.01$),这些结果表明,类腐殖质 C1 组分含量的增加与人类活动导致的污染程度加重以及 FI 指数降低密切相关。

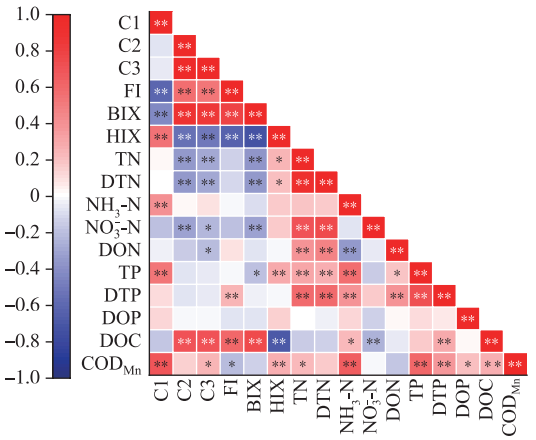


图 6 北方湖库水体荧光参数与水质指标的相关性分析(* $P\leqslant0.05$, ** $P\leqslant0.01$)

Fig. 6 Correlation analysis between fluorescence parameters and water quality indexes in northern lakes and reservoirs (* $P\leqslant0.05$, ** $P\leqslant0.01$)

DOC 与 HIX 呈显著负相关,与 FI、BIX、C2、C3 呈正相关($P<0.01$),同时 HIX 与 FI、BIX、C2、C3 呈负相关($P<0.01$),这表明类蛋白质组分(C2、C3)含量与 DOC 浓度、FI、BIX 指数呈正相关($P<0.01$),与 HIX 指数呈显著负相关($P<0.01$)。这一发现与白洋淀的研究结果一致,该湖泊 DOC 浓度较高,且 DOM 以内源性类蛋白质为主。水体 DOC 浓度与 C1 之间无显著相关性($P>0.05$),但与 C2、C3 之间呈显著正相关($P<0.01$),表明 DOC 与类蛋白质组分的相关性更强(图 6)。

水体中的 TN、DTN、NO_3^--N 与类蛋白质组分(C2、C3)呈显著负相关($P<0.05$),与类腐殖质 C1 无显著相关性($P>0.05$)。相比之下,磷营养盐与 DOM 组分之间未表现出明显的相关性,表明氮营养盐对 DOM 组成的影响更为显著。这一发现与李文超[34]的研究结果一致,即氮营养盐对 DOM 光谱参数的变化具有显著影响($P<0.05$),而磷营养盐的影响较弱。这种差异可能与水生植被和微生物对氮营养盐的优先利用有关,它们通过促进类蛋白质的释放来调节水体中的氮浓度。此外,Liu 等[35]的研究进一步指出,氮营养盐、DOM 与水生植物之间存在复杂的相互作用关系,氮营养盐的增加与水生植物丰度呈正相关,而类蛋白质也可被水生植物广泛吸收利用。综上所述,氮营养盐在 DOM 组成调控中起主导作用,且与水生生态系统中的生物过程密切相关。

2.3.2 水环境因素对 DOM 来源及组成的影响　湖库水体中的 DOM 会受到水环境因素(流域面积、水深、温度、降水、光照)、水生态因素(水生植被、微生物)、人类活动(人口密度、GDP、污水排放量)和土地利用等影响而发生变化,这些因素的相互作用显著影响着湖泊和水库的水生生态系统(图 7)。为深入探讨环境因子与荧光参数的关系,本研究采用冗余分析(RDA)方法,所有数据均经过对数变换处理。RDA 分析结果显示,RDA1 和 RDA2 分别解释了 76.77% 和 16.24% 的方差变化,累计解释率达 93.01%(图 8),其中 QWE、GDP、MAP 和 AAT 对水体光学参数的解释率分别为 32.1%、13.7%、13.5 和 12.6%,表明所选指标能够有效解释响应变量的变化情况。

水环境因素对 DOM 的影响机制分析表明,流域面积(DA)和水深(MD)是调控 DOM 在湖内滞留时间的关键因素。在本研究中 DA 与 C1、C2、C3 组分呈正相关,与 BIX 呈负相关,这表明较大的流域面积会延长

图 7 环境因素对水体 DOM 的影响

Fig. 7 The influence of environmental factors on DOM of water body

DOM 在湖内的滞留时间,并促进内源 DOM 组分的积累。同时 MD 与 C1、C2 呈正相关关系,说明较深的水体有利于 DOM 组分的保存。然而,白洋淀的研究结果表明,尽管其流域面积和水深相对较小,但 DOM 含量却较高,这表明水文因素对 DOM 组分的影响机制具有复杂性,在评估过程中还需综合考虑水生态和人类活动等因素的协同作用。

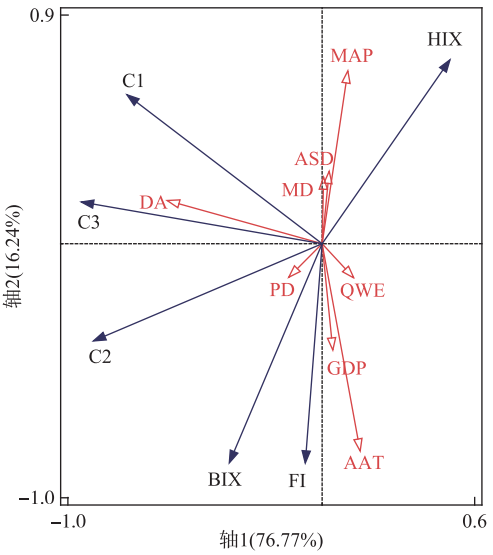


图 8 环境因子与荧光参数的冗余分析

Fig. 8 RDA of environmental factors and fluorescence parameters

年平均温度(AAT)与 C1、C2 呈负相关关系(图 8)。这可能是因为温度升高会增强微生物代谢相关酶的活性,促进对 DOM 的利用[36];同时也会加速腐殖质的生物降解,提高 DOM 的矿化速率[37]。此外,AAT 与 BIX、FI 呈正相关关系,表明温度升高会增强 DOM 的湖内转化,增强内源特征,同时减弱外源特征[38]。年日照时间(ASD)与 C1、HIX 呈正相关关系,在干旱地区,太阳辐射被认为是影响 DOM 性质的主要因素[39],强烈的太阳辐射会增强 DOM 的光化学变化。Tang 等[40]的研究通过实验模拟不同温度条件,发现温度对 DOM 内源和外源的影响较为复杂,主要通过调控微生物代谢过程实现,具体表现为:较高温度(如 25~35 ℃)会刺激微生物代谢,促使大分子有机物分解为小分子物质,使低分子量 DOM 浓度增加。同时,较高温度下 DOM 的结构发生变化,某些与芳香族化合物相关的官能团发生改变,促进了外源大分子芳香族化合物的分解。这可能源于微生物细胞裂解、颗粒有机物溶解以及温度冲击下微生物释放 DOM,从而增加了内源特征。然而,温度在影响湖泊生物地球化学过程中,往往与光照等环境因素相互影响,共同决定 DOM 的动态变化。Ejarque 等[38]发现温度与太阳辐射密切相关,影响外源 DOM 的光降解。在夏季湖泊水体中,温度升高和太阳辐射强度增加的协同作用,会促使陆源 DOM 中具有芳香族

结构的腐殖质组分发生光化学降解,导致外源 DOM 特征减弱。这一结果解释了东北湖库(AAT 较低)DOM 自生源特征较弱,而华北地区湖库(AAT 较高)DOM 自生源特征较强的现象。

年降水量(MAP)与 C1、C3、HIX 呈正相关关系,高降水量减少了 DOM 在湖内的滞留时间,降低了微生物降解效率。雨水径流将陆源腐殖质输入水体,增强了外源 DOM 特征。有关研究发现在降水的影响下,类腐殖质的荧光强度显著高于类蛋白质[41]。这一发现与本研究结果一致,降水量较少的白洋淀以类蛋白质组分为主,而降水量较多的其他湖库则以类腐殖质组分为主。这些发现与云贵高原湖泊的研究结果一致,在降水较多的季节,雨水径流会将陆源有机质带入湖泊,导致 DOM 含量和类腐殖质浓度显著增加[42],进一步证实了降水对 DOM 组成的显著影响[43]。此外,降水强度和降水频率等因素也会影响水体 DOM 的输入和转化。Zhou 等[44]发现暴雨事件增强了陆源 DOM 的输入,包括土壤有机物(如富里酸和腐殖质)以及植物分解产物。降水强度和频率的增加,使更多陆源有机质被冲刷进入湖泊,从而提高 DOM 输入量。然而,大部分陆源芳香族有机质具有较高的生物稳定性,难以被微生物降解,这意味着虽然暴雨事件增加了 DOM 的输入,但部分 DOM 可能无法被有效利用,从而影响湖泊生态系统的功能。此外,水体滞留时间对 DOM 的转化过程也起着重要作用。Liang 等[45]的研究发现,在暴雨期间,由于水体滞留时间较短,DOM 可能未能充分降解和转化便被输送到下游。而在降水较小的情况下,水体滞留时间较长,DOM 有更多时间进行光降解和生物降解,会增强 DOM 内源特征。综上所述,降水的强度、频率以及水体滞留时间等因素相互作用,共同决定了 DOM 在水体中的输入、分布与转化过程。

2.3.3 水生态因素对 DOM 来源及组成的影响　水生植被和微生物等生物因素对水体 DOM 的生成、转化和降解过程具有重要调控作用。水生植被可以通过根系分泌物和代谢产物向水体释放 DOM,这些 DOM 主要由类蛋白质和类腐殖质组成,具有较高的生物可利用性[46]。微生物可以通过降解 DOM 释放二氧化碳,同时也会将部分 DOM 转化为难降解的有机物,进而参与碳、氮、磷等元素的生物地球化学循环[47];其中藻类(尤其是蓝藻)在水华期间会释放大量内源性 DOM,这些 DOM 具有较低的腐殖化特征,且富含蛋白质、氨基酸和糖类等高生物活性物质,能够显著影响水体微生物的代谢活性和群落结构[48]。总体而言,水生植被和微生物主要通过内源过程来影响 DOM 的动态变化,共同调节水体的营养循环和生态功能,对维持水体质量和生态系统稳定性具有重要作用。这一机制在北方湖库中表现显著,其中华北地区湖库的自生源特征较为突出。以白洋淀为例,其 DOM 组分受到水生植被和微生物活动的共同影响,表现出类蛋白组分含量偏高的特征。这一现象与长江流域湖泊的特征相似,后者同样以类蛋白质组分为主,且主要来源于水体微生物的生命活动[21]。

2.3.4 人类活动及土地利用对 DOM 来源及组成的影响　衡量人类活动强度的常用指标包括人口密度、GDP 和污水排放量(QWE)等。在人口密集、经济发达的地区,工业和住宅污染源的直接排放,会使得水生环境中的 DOM 含量增加[49]。RDA 分析结果显示(图 8),GDP、人口密度与类腐殖质组分 C1 呈负相关关系,与类色氨酸组分 C2、FI、BIX 呈正相关关系。这可能是因为人类活动较强的流域会输出更多的陆源 DOM,本地生产指标的升高会增加生物可利用 DOM 的比例[50],人类活动排放的废水为微生物提供了营养物质,进而会促进内源性 DOM 组分的产生。值得注意的是,尽管污水排放通常会增加 DOM 含量,但本研究中 QWE 与 DOM 组分含量呈负相关。这一现象可能源于污水处理过程中的两个关键机制,一方面是污水在排放前经过处理,导致可生物降解有机物显著减少;另一方面是处理后的废水光学特征被陆源有机质信号所掩盖[51]。这种双重作用导致处理后的污水 DOM 特征发生显著改变,进而影响其在水体中的光信号表现。

不同类型的土地利用对水体 DOM 的输入具有显著影响,这种影响主要通过改变土壤有机物质的输入和微生物活动等途径实现。同时,植被覆盖度也会显著影响 DOM 的来源和组成。Singh 等[52]的研究表明,农田覆盖率与微生物源类腐殖质 DOM 呈显著正相关。农业活动通过施肥和土壤扰动输入富营养化物质(如 NH_4^+-N、DTP),促进了微生物代谢活动,从而增强了内源 DOM 的生成。相比之下,高植被覆盖区域(如森林和湿地)会促进陆源 DOM 的输入。这些区域的土壤会释放芳香族腐殖质,并通过径流输入水体,其 DOM 具有高还原性特征,且微生物利用率较低,主要以陆源腐殖质为主。此外,植被覆盖度高的地区,土壤有机物质的输入相对较少,因为植被能够吸收和固定土壤中的有机物质。Chen 等[53]的研究发现,城市用地的 DOM 主要来自污水排放和工业废水,地表径流也可能携带大量有机物和污染物进入水体。本研究结果进一步揭示了地域差异:东北地区湖库水体的 DOM 表现出较高的腐殖化程度,这可能与东北地区较高的森

林覆盖率有关;而华北地区由于农田覆盖率较高,水体 DOM 表现出较强的内源性特征(表 2)。

表 2 影响北方湖库 DOM 的环境因子

Tab. 2 Environmental factors affecting DOM in lakes and reservoirs in northern China

	环境因子	简称	单位	小兴凯湖	松花湖	大伙房水库	官厅水库	于桥水库	白洋淀	衡水湖	南四湖
水环境因素	流域面积	DA	km^2	170	550	110	130	135	366	75	1266
	平均水深	MD	m	1.8	22	12	50	4.6	7	3.5	1.46
	年日照时间	ASD	h	2430.84	2238.72	2607.47	2754.08	2448.79	2123.09	2244.45	2448.62
	年平均降水量	MAP	mm	883.39	1073.81	834.53	521.66	737.17	650.43	728.51	856.68
	年平均温度	AAT	℃	5.10	5.16	7.05	6.57	14.1	12.73	14.30	15.44
人类活动	人口密度	PD	人/km^2	354.78	912.28	1013.62	307.30	1156.80	1184.41	553.64	1258.27
	国内生产总值	GDP	亿元	522.46	2208.85	954.50	1429.29	17885.39	3477.13	1420.18	4636.77
	污水排放量	QWE	10000 m^3	500	19239	20735	8401	99693	13702	4176	15063
土地覆盖	农田	/	%	59.23	39.49	18.82	32.62	54.46	45.79	78.13	71.00
	森林	/	%	31.46	56.02	76.05	18.56	3.10	21.14	0.01	1.20
	草地	/	%	0.08	0.04	0.09	44.87	0.22	16.52	0.00	0.83
	不透水垫面	/	%	2.48	2.90	4.22	3.27	33.32	14.61	21.34	19.11
	灌木	/	%	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	1.32	0.00	0.00

3 结论

1) 采用平行因子分析(PARAFAC)从北方湖库水体 DOM 中分离出 3 个组分:类腐殖质(C1)、类色氨酸(C2)、类酪氨酸(C3)。其中东北湖库 DOM 具有较强的腐殖化和较弱的自生源特征,华北地区湖库 DOM 具有较强的自生源特征;相较于其他湖库,白洋淀的 DOM 具有强烈的自生源特征,且 DOM 含量和类蛋白质占比偏高。

2) 人类活动等外源带来的类腐殖质输入与 COD_{Mn}、HIX 指数呈显著正相关($P<0.01$);类蛋白质组分 C2、C3 含量与 DOC 浓度、FI、BIX 指数呈显著正相关($P<0.01$),以及与 HIX 指数呈显著负相关($P<0.01$);DOM 各组分与氮营养盐的相关性比磷营养盐高。

3) 较大的流域面积会延长 DOM 在湖内的滞留时间,并促进内源 DOM 组分的积累;较深的水体有利于 DOM 组分的保存。温度升高会增强 DOM 的湖内转化,增强内源特征,减弱外源特征。降水量较多的地区,雨水径流会将陆源腐殖质输入水体,增强外源 DOM 特征。水生植被和微生物主要通过内源过程来影响 DOM 的动态变化,共同调节水体的营养循环和生态功能。人类活动会向水体中输入大量的有机质,改变水体 DOM 特征。农业活动通过促进微生物代谢增强了 DOM 的内源特征;高植被覆盖度地区会增加陆源类腐殖质组分的输入;而城市用地则会向水体输入大量有机物和污染物,改变 DOM 的组成特征。

4 附录

附图Ⅰ、附表Ⅰ~Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2025.0628)。

5 参考文献

[1] 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.

[2] Liu SS, Hou JW, Suo CY *et al*. Molecular-level composition of dissolved organic matter in distinct trophic states in Chinese lakes: Implications for eutrophic lake management and the global carbon cycle. *Water Research*, 2022, **217**: 118438. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118438.

[3] Zhang YD, Su YL, Liu ZW *et al*. Lipid biomarker evidence for determining the origin and distribution of organic matter in surface sediments of Lake Taihu, Eastern China. *Ecological Indicators*, 2017, **77**: 397-408. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.02.031.

[4] Xiao K, Han BJ, Sun JY *et al*. Stokes shift and specific fluorescence as potential indicators of organic matter hydrophobicity and molecular weight in membrane bioreactors. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(15): 8985-8993. DOI: 10.1021/acs.est.9b02114.

[5] Li WJ, Lu L, Du HH. Deciphering DOM-metal binding using EEM-PARAFAC: Mechanisms, challenges, and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, **31**(10): 14388-14405. DOI: 10.1007/s11356-024-32072-z.

[6] Li W, Li X, Han CX *et al*. A new view into three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy for dissolved organic matter. *Science of the Total Environment*, 2023, **855**: 158963. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158963.

[7] Wen ZD, Song KS, Shang YX *et al*. Differences in the distribution and optical properties of DOM between fresh and saline lakes in a semi-arid area of Northern China. *Aquatic Sciences*, 2018, **80**(2): 22. DOI: 10.1007/s00027-018-0572-5.

[8] Wang WW, Zheng BH, Jiang X *et al*. Characteristics and source of dissolved organic matter in Lake Hulun, a large shallow eutrophic steppe lake in northern China. *Water*, 2020, **12**(4): 953. DOI: 10.3390/w12040953.

[9] Cui J, Yuan DH, Guo XJ *et al*. Characterization of dissolved organic matter in Lake Baiyangdian using spectroscopic techniques and multivariate statistical analysis. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2016, **44**(11): 1444-1452. DOI: 10.1002/clen.201500887.

[10] Williams CJ, Frost PC, Morales-Williams AM *et al*. Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 613-626. DOI: 10.1111/gcb.13094.

[11] Stedmon CA, Markager S, Søndergaard M *et al*. Dissolved organic matter (DOM) export to a temperate estuary: Seasonal variations and implications of land use. *Estuaries and Coasts*, 2006, **29**(3): 388-400. DOI: 10.1007/BF02784988.

[12] Jian ZJ, Xu J, Liu JQ *et al*. Comparative study on absorption and fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in sub-lakes and main lake of Poyang Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(4): 741-751. [简正军, 徐健, 刘甲庆等. 鄱阳湖碟形湖和通江水域有色可溶性有机物(CDOM)的吸收与荧光特性对比研究. 环境科学研究, 2024, **37**(4): 741-751.]

[13] Zhang DP, Zhang LS, Meng FS *et al*. Fluorescence characteristics analysis of DOM in typical section of Heilongjiang River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(5): 1099-1110. [张道萍, 张铃松, 孟凡生等. 黑龙江流域典型断面水体 DOM 荧光特性分析. 环境科学研究, 2021, **34**(5): 1099-1110.]

[14] 吴鹏. 云南典型高原湖泊溶解性有机质特征研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.

[15] Ji MC, Li SJ, Chang M *et al*. Photometric characteristics and sources of colored dissolved organic matter in surface water from Erlong Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(8): 1821-1829. [纪美辰, 李思佳, 常明等. 二龙湖表层水体有色溶解有机物的光学特性及来源. 环境科学研究, 2020, **33**(8): 1821-1829.]

[16] Cory RM, McKnight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149. DOI: 10.1021/es0506962.

[17] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M *et al*. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50. DOI: 10.1016/S0045-6535(98)00166-0.

[18] Long YC, Wang LY, Hu J *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of DOM in sediments from Guizhou Caohai based on UV-vis and EEM-PARAFAC. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(12): 2698-2709. [龙云川, 王龙燕, 胡菁等. 基于 UV-Vis 和 EEM-PARAFAC 的草海沉积物 DOM 时空分布特征. 环境科学研究, 2024, **37**(12): 2698-2709.]

[19] Lawaetz AJ, Stedmon CA. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940. DOI: 10.1366/000370209788964548.

[20] 贾海斌. 云南高原湖泊溶解性有机质荧光特征及影响因素研究[学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2019.

[21] 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*, 2025, **46**(5): 2719-2731. 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, 2025, **46**(5): 2719-2731.]

[22] 崔同昆. 杞麓湖水质富营养化现状调查及防治对策研究[学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.

[23] Xu RZ, Wang YS, Yin DC *et al*. Seasonal and spatial variation characteristics of surface water quality and its influencing factors in Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1382-1394. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401138. [徐蓉桢, 王雨山, 尹德超等. 白洋淀地表水水质季节与空间变化特征及其影响因素. 环境科学, 2025, **46**(3): 1382-1394.]

[24] 井晨. 白洋淀 CDOM 时空变化特征及其来源分析[学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.

[25] 刘鑫. 白洋淀流域水体污染时空变化特征与污染削减技术研究[学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2020.

[26] 吴鹏. 云南典型高原湖泊溶解性有机质特征研[学位论文]. 天津: 天津大学, 2020.

[27] Yamashita Y, Kloeppel BD, Knoepp J *et al*. Effects of watershed history on dissolved organic matter characteristics in headwater streams. *Ecosystems*, 2011, **14**(7): 1110-1122. DOI: 10.1007/s10021-011-9469-z.

[28] Stedmon CA, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697. DOI: 10.4319/lo.2005.50.2.0686.

[29] Zhuang WE, Chen W, Cheng Q *et al*. Assessing the priming effect of dissolved organic matter from typical sources using fluorescence EEMs-PARAFAC. *Chemosphere*, 2021, **264**: 128600. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128600.

[30] Wang X, Huo G, Guan WD *et al*. Research status and development trend of soil organic matter in black soil based on bibliometric analysis. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2024, **50**(2): 1-5. [王祥, 霍刚, 关卫东等. 基于文献计量学分析黑土土壤有机质研究现状及发展趋势. 内蒙古石油化工, 2024, **50**(2): 1-5.]

[31] Sun W, Hu H, Zhao Q *et al*. Fluorescence characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Dali-nor Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(9): 2084-2093. [孙伟, 胡泓, 赵茜等. 达里诺尔湖水体 DOM 荧光特征及其来源解析. 环境科学研究, 2020, **33**(9): 2084-2093.]

[32] McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK *et al*. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48. DOI: 10.4319/lo.2001.46.1.0038.

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

[34] 李文超. 黄河小浪底至开封段水体溶解性有机质环境行为特征研究[学位论文]. 开封: 河南大学, 2023.

[35] Liu Q, Jiang Y, Huang X *et al*. Hydrological conditions can change the effects of major nutrients and dissolved organic matter on phytoplankton community dynamics in a eutrophic river. *Journal of Hydrology*, 2024, **628**: 130503. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130503.

[36] Freixa A, Acuña V, Casellas M *et al*. Warmer night-time temperature promotes microbial heterotrophic activity and modifies stream sediment community. *Global Change Biology*, 2017, **23**(9): 3825-3837. DOI: 10.1111/gcb.13664.

[37] Laudon H, Buttle J, Carey SK *et al*. Cross-regional prediction of long-term trajectory of stream water DOC response to climate change. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(18). DOI: 10.1029/2012GL053033.

[38] Ejarque E, Khan S, Steniczka G *et al*. Climate-induced hydrological variation controls the transformation of dissolved organic matter in a subalpine lake. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1355-1371. DOI: 10.1002/lno.10777.

[39] Zagarese HE, Tartarotti B, Cravero W *et al*. UV damage in shallow lakes: The implications of water mixing. *Journal of Plankton Research*, 1998, **20**(8): 1423-1433. DOI: 10.1093/plankt/20.8.1423.

[40] Tang G, Li BR, Zhang BW *et al*. Temperature effects on microbial dissolved organic matter metabolisms: Linking size fractions, fluorescent compositions, and functional groups. *Science of the Total Environment*, 2023, **864**: 161175. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161175.

[41] Bai YJ, Zhang SR, Mu EL *et al*. Characterizing the spatiotemporal distribution of dissolved organic matter (DOM) in the Yongding River Basin: Insights from flow regulation. *Journal of Environmental Management*, 2023, **325**(Pt B): 116476. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116476.

[42] 杨炫. 云贵高原湖泊溶解性有机物光谱特性及其对 COD_{Mn} 和 BOD_5 的代用潜力[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2022.

[43] Pisani O, Bosch DD, Coffin AW *et al*. Riparian land cover and hydrology influence stream dissolved organic matter composition in an agricultural watershed. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**: 137165. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137165.

[44] Zhou YQ, Liu M, Zhou L *et al*. Rainstorm events shift the molecular composition and export of dissolved organic matter in a large drinking water reservoir in China: High frequency buoys and field observations. *Water Research*, 2020, **187**: 116471. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116471.

[45] Liang K, Li TY, He BH *et al*. Dynamics of dissolved organic carbon in runoff discharge under different rainfall patterns in a representative agricultural catchment. *Journal of Hydrology*, 2023, **617**: 129079. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129079.

[46] Kajan K, Osterholz H, Stegen J *et al*. Mechanisms shaping dissolved organic matter and microbial community in lake ecosystems. *Water Research*, 2023, **245**: 120653. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120653.

[47] Li WZ, Liu N, Li JF *et al*. Chemodiversity of dissolved organic matter is governed by microbial biogeography in inland waters. *Environmental Science & Technology*, 2023, **57**(20): 7753-7763. DOI: 10.1021/acs.est.3c00896.

[48] Ju Q, Zhang Q, Cao CC *et al*. Response of microbial community to natural organic matter input in lake sediments. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3263-3271. DOI: 10.13227/j.hjkx.202011205. [居琪, 章奇, 曹驰程等. 湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应. 环境科学, 2021, **42**(7): 3263-3271.]

[49] Kelso JE, Baker MA. Organic matter is a mixture of terrestrial, autochthonous, and wastewater effluent in an urban river. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, **7**: 202. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00202.

[50] Osburn CL, Handsel LT, Mikan MP *et al*. Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8628-8636. DOI: 10.1021/es3007723.

[51] Zhou Y, Chen L, Zhou L *et al*. Key factors driving dissolved organic matter composition and bioavailability in lakes situated along the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project, China. *Water Research*, 2023, **233**: 119782. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119782.

[52] Singh S, Dash P, Silwal S *et al*. Influence of land use and land cover on the spatial variability of dissolved organic matter in multiple aquatic environments. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(16): 14124-14141. DOI: 10.1007/s11356-017-8917-5.

[53] Chen S, Du YX, Das P *et al*. Agricultural land use changes stream dissolved organic matter *via* altering soil inputs to streams. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**: 148968. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148968.

附表Ⅰ 8个湖库的采样信息

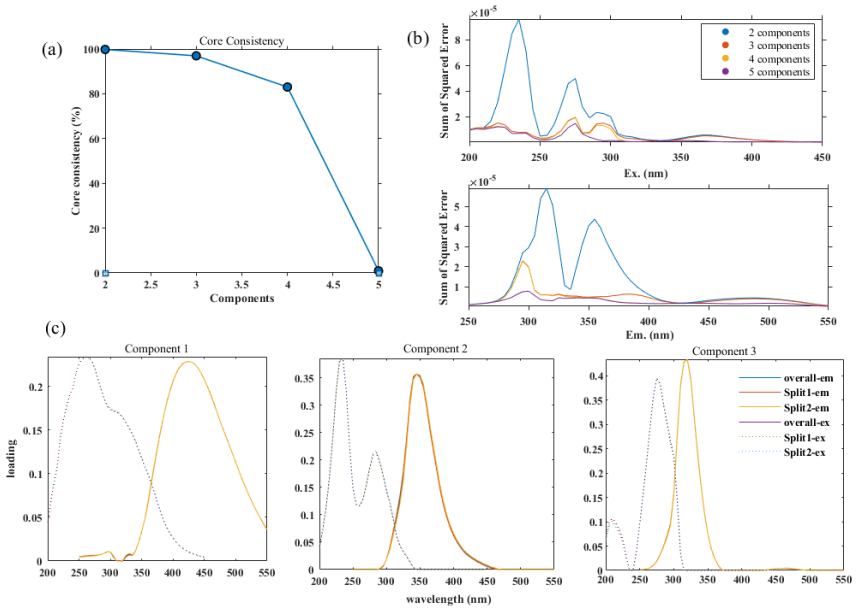
Attached Tab.Ⅰ Sampling information from eight lake repositories

湖库名称	北纬	东经	采样时间	采样深度/m
小兴凯湖	45°20′N	132°40′E	2017年7月	0.5
松花湖	43°07′~43°50′N	126°45′~127°38′E	2017年7月	0.5
大伙房水库	41°41′~42°38′N	123°39′~125°28′E	2017年7月	0.5
官厅水库	38°51′~41°14′N	112°08′~116°21′E	2018年7月	0.5
于桥水库	39°56′~40°23′N	117°26′~118°12′E	2016年11月	0.5
白洋淀	38°44′~38°59′N	115°45′~116°07′E	2016年3月	0.5
衡水湖	37°31′~37°41′N	115°27′~115°42′E	2016年10月	0.5
南四湖	34°24′~35°59′N	115°02′~117°42′E	2017年11月	0.5

附表Ⅱ 水环境、人类活动和土地利用数据

Attached Tab.Ⅱ Water environment, human activities and land use data

数据名称	原始数据来源	数据处理方法
流域面积 平均水深	https://baike.baidu.com/item	https://baike.baidu.com/item
年平均气温	美国国家海洋和大气管理局（NOAA）下设的国家环境信息中心(NCEI) https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/	1. 使用反距离权重法（IDW）插值生成全国逐日平均气温栅格图； 2. 基于地级市行政边界统计逐日气温数值； 3. 逐日数据汇总为逐月、逐年平均气温。
年平均降水	美国国家海洋和大气管理局（NOAA）下设的国家环境信息中心(NCEI) https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/	1. 整合全国气象站点逐日降水量数据； 2. IDW 插值生成全国逐日降水量栅格； 3. 按地级市边界计算区域平均值； 4. 逐日数据累加为逐月、逐年累计降水量。
年日照时数	中国地面气候资料日值数据集（V3.0）	1. 使用 IDW 插值生成逐日日照时数栅格； 2. 按省级、地级市、区县行政边界分区统计； 3. 逐日数据累加为逐月、逐年日照时数。
国内生产总值	流域省级统计年鉴	直接引用年鉴中公开的统计数据
污水排放量	《中国城市建设统计年鉴》	直接引用年鉴中记录的污水排放量数据
人口密度	《中国城市建设统计年鉴》	直接引用年鉴中统计的人口密度数据
土地覆盖类型	武汉大学杨杰和黄昕团队发布的 30m 年度土地覆盖栅格数据	1. 基于 1990—2022 年 30 m 分辨率栅格数据； 2. 按省级、地级市、区县行政边界进行空间汇总； 3. 统计各行政区划内不同土地覆盖类型的面积比例。



附图Ⅰ (a) 核心一致性，(b) 残差分析，(c) 拆半验证。

Attached Fig.Ⅰ (a) Core consistency, (b) residual analysis, (c) split-half validation.