

DOI: 10.20103/j.stxb.202410242602

植殷, 杨亚宁, 王世杰, 郑磊, 刘仲婵, 吕行, 晏明全, 肖峰. 北极河流可溶性有机碳变化特征及影响因素评价. 生态学报, 2025, 45(12): - .
Zhi Y, Yang Y N, Wang S J, Zheng L, Liu Z L, Lü X, Yan M Q, Xiao F. Characteristics of dissolved organic carbon variation and evaluation of influencing factors in arctic rivers. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

北极河流可溶性有机碳变化特征及影响因素评价

植 殷¹, 杨亚宁¹, 王世杰¹, 郑 磊¹, 刘仲婵², 吕 行¹, 晏明全², 肖 峰^{1,*}

1 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206

2 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

摘要: 北极河流可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)输出是北冰洋碳循环的重要组成过程, 探究北极 DOC 浓度变化的影响因素具有重要意义。在定量分析北极 DOC 浓度变化的影响因素中, 冻土融解过程常被忽略, 因此有必要开展北极冻土融解过程与 DOC 浓度变化的研究。以北极六大流域多年冻土区为研究对象, 基于 DOC_{UVFV} 方法, 结合遥感影像数据计算 2003—2020 年河口 DOC 浓度, 采用广义相加模型评估了冻土融解深度对河口 DOC 浓度的贡献, 并进一步分析了冻土的土壤特性对 DOC 迁移过程的影响。结果表明: (1) 2003—2020 年期间, 北极地区通过河流由陆地汇入海洋的 DOC 浓度从 76.7 $\mu\text{mol/L}$ 增加到 101.3 $\mu\text{mol/L}$, 呈显著上升趋势。(2) 冻土融解深度对 DOC 的影响在初始融解期保持平缓, 随后在快速融解期呈现明显的增加趋势, 贡献率为 22.2%—77.1%, 完全融解期呈现略微下降的趋势。(3) 根据 K-means 将北极流域土壤分为 4 类, 排水能力强的土壤导致河口 DOC 对活动层融解响应迅速, 排水能力弱的土壤则促进土壤有机碳向 DOC 的转化; 吸附能力强的土壤致使活动层融解后期 DOC 输出减少, 吸附能力弱的土壤则促进河口 DOC 浓度持续增加。

关键词: 可溶性有机碳; 冻土活动层融解深度; 广义相加模型; 冻土土壤特性

Characteristics of dissolved organic carbon variation and evaluation of influencing factors in arctic rivers

ZHI Yin¹, YANG Yaning¹, WANG Shijie¹, ZHENG Lei¹, LIU Zhongli², LÜ Xing¹, YAN Mingquan², XIAO Feng^{1,*}

1 School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2 College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing, 100871, China

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) export from arctic rivers is a critical component of the Arctic carbon cycle. Investigating the influence of environmental factors on DOC concentration dynamics is crucial for understanding the implications of climate warming. However, permafrost is often overlooked in quantitative analyses of DOC concentration variations. Therefore, it is critical to investigate the relationship between permafrost and DOC in the Arctic. Permafrost degradation alters the hydrological pathways of Arctic rivers and releases large amounts of stored organic carbon, which significantly impacts the terrestrial-aquatic carbon flux and global biogeochemical cycles. Understanding the seasonal dynamics of permafrost thaw depth and its impact on DOC export is essential for improving biogeochemical models and predicting carbon flux changes under future climate warming scenarios. The study focuses on the six major arctic river basins within permafrost regions, calculating riverine DOC concentrations and permafrost thaw depths from 2003 to 2020. The DOC_{UVFV} method was employed in conjunction with remote sensing data to calculate DOC concentrations at river mouths from 2003 to 2020. Permafrost thaw depth data were estimated using the Stefan solution within the basins. A generalized additive model (GAM) was used to evaluate the contributions of permafrost thaw depth to estuary DOC concentrations and to further

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52030003)

收稿日期: 2024-10-24; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaofeng@ncepu.edu.cn

analyze how permafrost soil characteristics influence the DOC migration process. The results showed that: (1) From 2003 to 2020, the DOC concentration in the Arctic region, transported by rivers from land to the ocean, increased from 76.7 $\mu\text{mol/L}$ to 101.3 $\mu\text{mol/L}$, showing a significant upward trend. (2) The influence of permafrost thaw depth on DOC concentration remained gradual during the initial thaw period, followed by a marked increase during the rapid thaw period, with contribution rates ranging from 22.2% to 77.1%. In the complete thaw phase, the impact slightly decreased. (3) Using K-means clustering, arctic river basin soils were classified into four groups. Soils with high drainage capacity resulted in a rapid response of river mouth DOC to thaw depth, while soils with low drainage capacity facilitated the conversion of soil organic carbon to DOC. Soils with strong DOC adsorption capacity reduced DOC output in the later stages of thaw, while soils with weak adsorption capacity promoted a continuous increase in river mouth DOC concentration. This study highlights the significant role of permafrost thaw depth and soil properties in regulating DOC dynamics in arctic river basins. The results also suggest that soil characteristics, such as drainage capacity and DOC adsorption ability, play a crucial role in controlling DOC export and its seasonal variations in the Arctic region.

Key Words: dissolved organic carbon; permafrost active layer thaw depth; generalized additive model; permafrost soil characteristic

北极地区是全球碳循环的重要组成部分,陆地和沿海地区有机碳的输入对海洋碳库和生态系统起着至关重要的作用^[1-2]。长期的低温环境导致北极冻土储存了大量的有机碳(Organic Carbon, OC)^[3-5](约 1300 Pg),对全球土壤、河流和海洋之间的生物地球化学循环具有重要影响。Feng 等^[6]对欧亚北极河流的研究表明,冻土分布会影响地表水和地下水中 OC 的来源和释放。OC 主要以可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)和颗粒性有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)的形式向河口迁移。在过去几十年中,北极和亚北极地区受到全球快速变暖的影响^[7-9],多年冻土退化引起活动层厚度增加,冻土空间分布和类型发生改变。这不仅影响北极陆地河流的流动路径,还导致储存的大量有机碳释放,为水生生态系统提供丰富的碳源,并对全球陆地—大气—海洋系统的碳循环产生深刻影响^[10]。因此,有必要探究北极河流 DOC 的变化特征及其影响因素,以进一步揭示北极地区碳循环的关键过程。

近年来,一些学者开展了 DOC 浓度与环境因素之间关系的研究,如径流、降水及土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量等。Raymond 等^[11-12]的研究证明,降水过程增加土壤湿度,促进土壤中的有机物溶解至水中,从而加剧 DOC 的释放;暴雨会产生地表径流,从而携带大量有机物进入河流系统。Fabre 等^[13]将 DOC 浓度与河流流量、SOC 含量、降水量以及流域的平均气温进行了关联分析。Amon 等^[14]认为,在春季解冻期,河流 DOC 主要来自土壤的浅层有机层和经过长期降解的地表植物凋落物。此外,部分学者使用生物地球化学过程模型模拟 DOC 从陆地进入北冰洋的横向转移路径^[15]。在多年冻土地区,土壤水以及冰楔中储存的 DOC 具有较大的释放潜力^[16-19]。Wickland 等^[20]量化了阿拉斯加北部全新世多年冻土土壤水中的 DOC 含量,认为冻土在解冻后可能成为周围陆地和水生环境 DOC 的重要来源之一。Prokushkin 等^[21]的研究表明,土壤特性会显著影响冻土融解过程中 DOC 的迁移与输出特征。活动层的季节性冻融循环会改变土壤的 DOC 输出能力和河流流动路径。王雯倩等^[22]在老爷岭多年冻土的研究发现,河流 DOC 浓度和输出通量在冻土冻融循环期主要受到径流和温度的影响。McFarlane 等^[23]通过研究巴罗环境观测站附近地表水以及地下水中 DOC 的含量,认为冻土活动层季节性融解深度的增加会导致水体中 DOC 浓度增加。然而,目前的研究集中在永久冻土退化对 DOC 释放造成的潜在影响,而针对活动层季节性融解深度与北极河流 DOC 输出之间关系的研究仍较为有限。因此,识别冻土活动层季节性融解对北极碳循环的影响机制具有重要意义,有必要基于冻土融解过程对北极河流 DOC 影响的认识,为北极地区碳循环、全球气候变化提供科学依据。

综上,本文为明确冻土季节性融解对 DOC 浓度的影响,采用广义相加模型研究了冻土融解过程中 DOC 浓度的变化规律,并展开探讨北极冻土的土壤特性对河流 DOC 输出的作用。研究目标包括:(1)分析北极河

流 DOC 输出的时空变化特征; (2) 揭示冻土活动层融解深度对 DOC 浓度的影响关系; (3) 明确冻土的土壤特性对 DOC 输出的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选取流入北冰洋的六大河流为研究区域, 具体包括: 位于欧亚大陆的鄂毕河 (Ob' River, OR)、叶尼塞河 (Yenisey River, YER)、勒拿河 (Lena River, LR)、科雷马河 (Kolyma River, KR), 以及北美洲的育空河 (Yukon River, YUR) 和麦肯齐河 (Mackenzie River, MR) (图 1)。这 6 条河流覆盖北冰洋 63% 的排水流域, 约占河流出口总水量的 49%^[24], 是 DOC 在地表水中运输的主要载体。在多年冻土退化和气候变暖的背景下, 河流中有机碳输出正在逐步增加, 北极地区的碳循环正在受到环境变化的深刻影响, 对下游海洋生态系统和全球碳平衡具有重要意义。

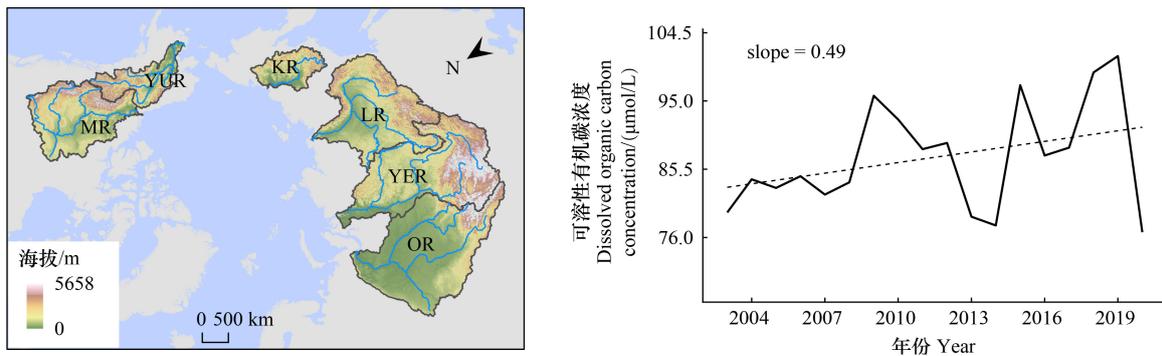


图 1 北极六大流域地理位置及其河口的 DOC 浓度变化

Fig.1 Geographic map of the six arctic basins and DOC concentration variation in the estuarine

OR: 鄂毕河; YER: 叶尼塞河; LR: 勒拿河; KR: 科雷马河; YUR: 育空河; MR: 麦肯齐河

1.2 研究方法

1.2.1 基于 DOC_{UVFW} 算法的河口 DOC 浓度计算

本文基于 Yan 等^[25]提出的 DOC_{UVFW} 算法, 结合北极河口的实测光谱数据和遥感影像, 计算 2003—2020 年北极河口 DOC 浓度, 具体计算方法如公式 (1) 和 (2) 所示。

$$\text{DOC} = \varphi \cdot a_g(275) \cdot (S_{\text{UVFW}} - \varepsilon) + \text{DOC}_{\text{cor}} \quad (1)$$

$$S_{\text{UVFW}} = \frac{a_g(275)}{a_g(275) + a_g(380)} \times S_{275-295} + \frac{a_g(380)}{a_g(275) + a_g(380)} \times S_{380-443} \quad (2)$$

式中, $a_g(275)$ 和 $a_g(380)$ 分别是波长 275 nm 和 380 nm 处的吸收系数; $S_{275-295}$ 和 $S_{380-443}$ 分别是波长范围 275—295 nm 和 380—443 nm 中的光谱斜率; φ 为回归系数; DOC_{cor} 为校正 DOC 的参数 ($\mu\text{mol/L}$); ε 表示海水中有色溶解有机物的比例 (nm^{-1})。 φ 、 ε 和 DOC_{cor} 通过最小二乘法确定。

1.2.2 基于 Stefan 公式的冻土活动层融解深度计算

活动层融解深度与冻土的土壤热特性及地表热量条件密切相关, 本文采用 Stefan 公式计算冻土活动层融解深度^[26-27]。具体计算公式为:

$$Z = E \sqrt{TI} \quad (3)$$

式中, Z 为冻土活动层融解深度; TI 为月融化指数 ($^{\circ}\text{C d}$), 表示从当年第一天起至该月最后一天地面温度为 0°C 以上的温度总和, 9 月份的融解深度作为给定年份的冻土活动层厚度; E 为土壤热特性参数, 与土壤导热系数、土壤容重、土壤含水量、冰的熔融潜热 ($3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}$) 以及融化季节地面温度与气温的比值相关^[26]。具

体数据来源见表(1)。

表 1 研究数据来源

Table 1 Data sources and information

数据变量 Variable	单位 Unit	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	数据来源 Source
土壤导热系数 Soil thermal conductivity	$\text{W m}^{-1}\text{C}^{-1}$	站点实测	—	https://doi.org/10.1594/PANGAEA.949737
土壤含水量 Soil water content	%	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	d	欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5
气温 Air temperature	K	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	d	欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5
地表温度 Surface temperature	K	$0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$	d	欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5
土壤质地 Soil texture	—	$0.0083^{\circ}\times 0.0083^{\circ}$	—	全球土壤数据集 (HWSD) http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/hwsd/en/
土壤容重 Soil bulk density	g/cm^3	$0.0083^{\circ}\times 0.0083^{\circ}$	—	全球土壤数据集 (HWSD) http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/hwsd/en/
有机碳含量 Organic carbon content	%	$0.0083^{\circ}\times 0.0083^{\circ}$	—	全球土壤数据集 (HWSD) http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/hwsd/en/
水体酸碱度 pH (H_2O)	—	$0.0083^{\circ}\times 0.0083^{\circ}$	—	全球土壤数据集 (HWSD) http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/hwsd/en/
阳离子交换率 Cation exchange capacity	cmol_c/kg	$0.0083^{\circ}\times 0.0083^{\circ}$	—	全球土壤数据集 (HWSD) http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/hwsd/en/
坡度 Slope	($^{\circ}$)	$0.0167^{\circ}\times 0.0167^{\circ}$	—	全球地形高程数据集 (ETOPO) https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/

1.2.3 基于广义加性模型的影响贡献分析

本文采用广义加性模型^[28] (Generalized Additive Model, GAM) 评估多年冻土区活动层融解深度对 DOC 的影响。模型的表达式为:

$$Y = \alpha + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \varepsilon \quad (4)$$

式中, Y 为被解释变量, α 是截距项, f_i 为解释变量的非参数平滑函数, x_i 是解释变量, n 为解释变量的数量, ε 为残差项。本文将 DOC 浓度作为被解释变量, 冻土活动层融解深度作为解释变量, 利用 GAM 模型拟合冻土融化与 DOC 浓度之间的关系。将 DOC 浓度数据加上常数“1”后进行对数变换, 以减少极值的影响, 并满足 GAM 中误差分布的要求^[29-31], 如式(5)所示:

$$\ln(\text{DOC}+1) = \alpha + s(\text{thaw depth}) + \varepsilon \quad (5)$$

式中, s 为自然样条平滑函数, thaw depth 表示冻土活动层融解深度, 以上参数均进行标准化预处理。 α 为截距, ε 为残差。

GAM 模型的性能和结果通过自由度、 P 值以及决定系数 (R^2) 进行评估。自由度反映 DOC 浓度与冻土融解深度的关系, 自由度为 1 表明二者线性相关; 自由度大于 1 时, 说明存在非线性关系, 且自由度越大, 非线性关系越强。 P 值用于判定统计结果的显著性, 决定系数 R^2 用于评估模型的拟合效果。根据 GAM 模型结果偏

差解释率, 衡量不同河流多年冻土区活动层融解深度对 DOC 输出的影响贡献。偏差解释率越高, 表明流域内冻土对 DOC 变化的影响越大。此外, 使用边际效应图评估冻土季节性融解与 DOC 之间的关系^[32]。考虑到陆地环境因素变化与 DOC 输出之间存在时滞效应^[33], 本文将当月的 DOC 值与前一个月的环境变量进行关联分析。使用交叉验证评估 GAM 的性能和贡献识别^[34-35], 约 80% 的数据子集被随机选择用于模型开发^[36-37]。对于每个流域, GAM 模型进行 100 次交叉验证确保结果的稳定性。

1.2.4 基于 K-means 聚类分析的土壤特性识别

土壤的排水能力由其质地、容重以及所处坡度决定, 而有机碳含量、pH 及阳离子交换率 (Cation Exchange Capacity, CEC) 等化学性质则影响土壤对 DOC 的吸附能力。为了分析不同土壤特性对 DOC 作用的相似性, 本文采用 K-means 算法对土壤质地、土壤容重、有机碳含量、pH、阳离子交换率和坡度进行聚类分析。K-means 算法以最小化簇内所有数据点到聚类中心的距离平方和为目标, 核心思想是通过迭代优化, 使得簇内数据间的相似性最大化, 同时簇间差异性最小化^[38]。计算公式如式(6)所示:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \| a_i - \mu_k \|^2 \quad (6)$$

式中, J 为聚类目标函数, K 为聚类数量, C_k 为第 k 个聚类数据集, a_i 为聚类集合中第 i 个数据点, μ_k 为第 k 个聚类中心。

1.3 数据来源

本研究使用的数据包括土壤热特性参数、地表温度、土壤排水特性参数和土壤 DOC 吸附特性参数, 见表 1。对于站点实测的土壤导热系数, 采用克里金插值法获得其空间分布特征。由于土壤热特性参数表征土壤自身的物理特性, 且不受气候变化影响, 因此土壤含水量、地面温度与气温的比值采用 2003—2020 年期间的平均值进行计算; 在聚类分析前, 需要对土壤质地、土壤容重、有机碳、pH、阳离子交换率等进行重采样, 以统一其与坡度数据的分辨率。

2 结果分析

2.1 河口 DOC 浓度变化特征

基于 DOC_{UVF} 算法计算得到 2003—2020 年 6 条河流出口处 DOC 浓度, 其年际变化如图 2 所示。由图 2 可知, 除 KR 外, 其余河流的河口处 DOC 浓度均呈现上升趋势, 这表明泛北极地区的陆地碳库的有机碳正在以河流 DOC 的形式加速汇入北冰洋。其中 YER 的增幅最大, 为 $2.27 \mu\text{mol L}^{-1} \text{a}^{-1}$, LR 和 OR 增幅较低, 分别为 0.53 和 $0.19 \mu\text{mol L}^{-1} \text{a}^{-1}$, 而 YUR、MR 及 KR 的变化趋势不明显, 变化幅度分别为 0.065 、 0.061 和 $-0.045 \mu\text{mol L}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。研究期间, OR 的河口 DOC 浓度在 2015 年达到最大值 $128.4 \mu\text{mol/L}$, 在 2013 年达到最小值 $87.9 \mu\text{mol/L}$; YER 的最大值为 2019 年的 $173.6 \mu\text{mol/L}$, 最小值为 2014 年的 $67.2 \mu\text{mol/L}$; LR 的最大值为 2010 年的 $109.3 \mu\text{mol/L}$, 最小值为 2006 年的 $71.3 \mu\text{mol/L}$; KR、YUR 及 MR 的 DOC 浓度变化相对平缓。KR 的最大值为 $88.6 \mu\text{mol/L}$ (2018 年), 最小值为 $67.5 \mu\text{mol/L}$ (2020 年); YUR 的最大值为 $81.1 \mu\text{mol/L}$ (2017 年), 最小值为 $74.1 \mu\text{mol/L}$ (2007 年); MR 的最大值和最小值分别为 $74.1 \mu\text{mol/L}$ (2017 年) 和 $69.3 \mu\text{mol/L}$ (2020 年)。在 2009—2011 年和 2018—2020 年, 位于欧亚大陆的四条河流出口处 DOC 浓度显著上升; 相反, 位于北美洲的 YUR 和 MR 则在 2015—2017 年明显上升, 且在 2018 年突然下降。此外, 位于欧亚大陆的河流出口处 DOC 浓度的增幅普遍大于北美洲的河流。

2003—2020 年 5—9 月北极河口 DOC 浓度变化如图 2 所示。OR、YER、KR、MR 河流出口 DOC 浓度的年内变化基本一致, 均呈现先上升后下降的趋势, 5 月为 DOC 浓度最低的时期, 在研究期间浓度变化范围为 57.3 — $73.5 \mu\text{mol/L}$, OR 河口 DOC 浓度在 8 月达到最大值, 为 $137.1 \mu\text{mol/L}$, YER、KR、MR 流域河口 DOC 浓度在 7 月达到最大值, 分别为 $152.2 \mu\text{mol/L}$ 、 $87.5 \mu\text{mol/L}$ 、 $77.7 \mu\text{mol/L}$, 随后在 8、9 月呈下降趋势; LR 流域河口 DOC 浓度在 6 月达到最小值 $65.7 \mu\text{mol/L}$, 随后迅速上升, 并在 9 月达到最大值 $120.1 \mu\text{mol/L}$; YUR 河口

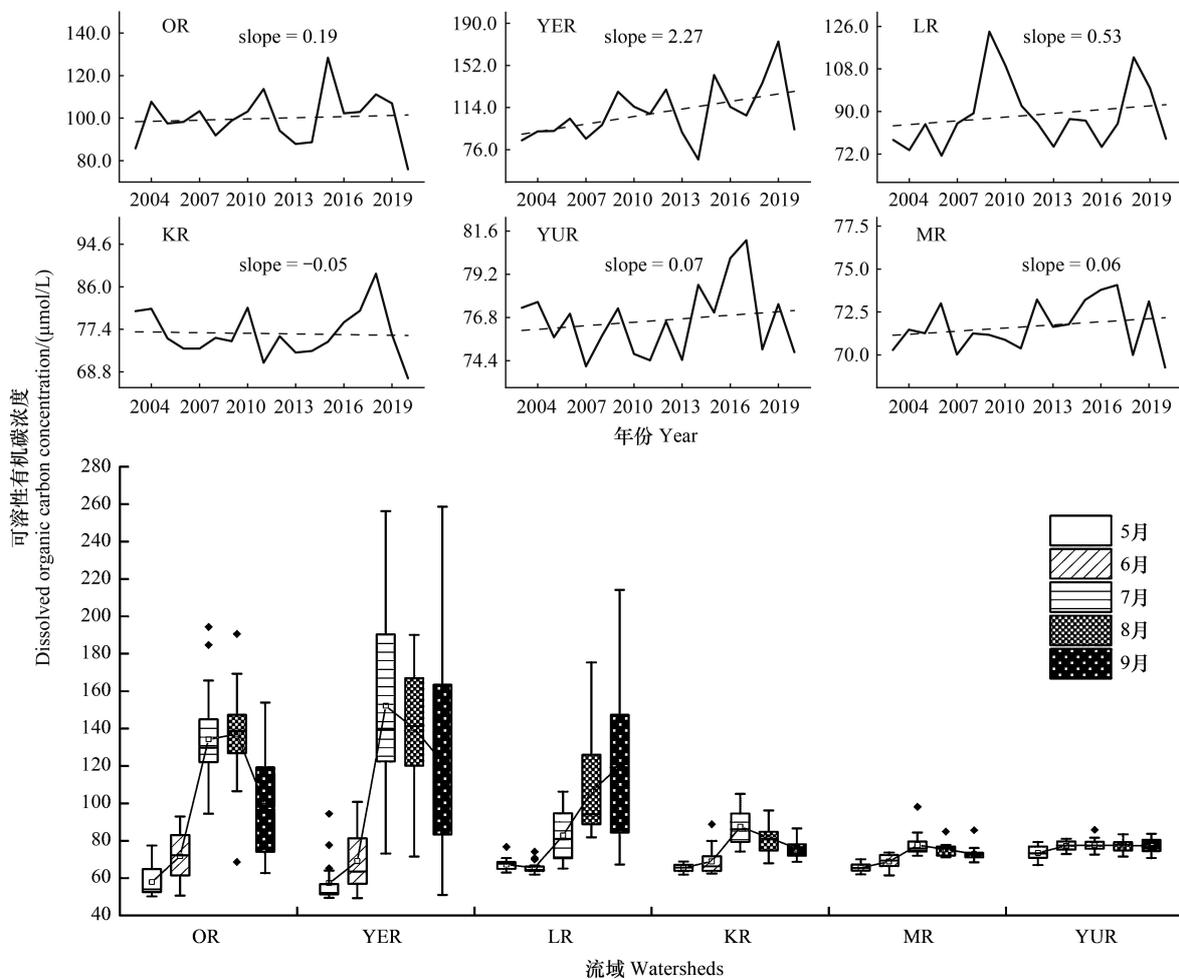


图2 2003—2020年北极六大流域DOC出口浓度变化

Fig.2 DOC concentration variation among six largest arctic basins during 2003—2020

DOC浓度变化较小,其最小值为 $73.5 \mu\text{mol/L}$,发生在5月,最大值为 $77.6 \mu\text{mol/L}$,发生在7月。

2.2 冻土活动层融解深度变化

2003—2020年北极流域内冻土活动层厚度的年际变化如图3所示,总体呈现不同程度的上升趋势。北极六大流域中,YER的增幅最显著,年增长率为 0.49 cm/a ,其次为LR流域(0.33 cm/a),MR和OR分别为 0.25 cm/a 和 0.20 cm/a 。KR和YUR的年增长率较低,分别为 0.04 cm/a 和 0.05 cm/a 。研究期间,OR流域冻土活动层厚度在2012年达到最大值 161.2 cm ,在2010年达到最小值 144.3 cm ;YER流域冻土活动层厚度的最大值为2020年的 178.6 cm ,最小值为2010年的 163.7 cm ;LR的最大值为2020年的 110.8 cm ,最小值为2004年的 98.3 cm ;MR的最大值为2012年的 124.4 cm ,最小值为2004年的 110.3 cm ;KR和YUR的变化幅度较小,最大值分别为2010年的 88.8 cm 和2004年的 58.8 cm ,最小值分别为2004年的 76.9 cm 和2008年的 51.2 cm 。位于中西伯利亚高原的两大流域(YER、LR)活动层厚度增幅普遍高于其他河流,说明该地区气候变化对多年冻土的影响更显著。

2003—2020年5—9月冻土活动层融解深度变化如图3所示,各流域融解深度逐渐增加,并在9月达到最大值。OR和YER的融解深度变化幅度较大,在5月分别为 57.7 cm 和 56.1 cm ,9月增加至 150.5 cm 和 166.2 cm 。LR和KR流域的融解深度分别从5月的 32.2 cm 和 17.2 cm 增加至9月的 106.6 cm 和 79.8 cm 。YUR流域冻土融解深度变化较小,5月为 19.4 cm ,9月为 55.2 cm 。MR流域在5月冻土融解深度最小,为 39.8 cm ,

9 月达到最大值 117.5 cm。冻土活动层融解深度年内随气温上升逐渐增大, 不同流域的变化幅度与冻土区气候条件存在显著差异。其中 OR、YER 流域冻土活动层融解深度及年内增幅明显高于其他流域。

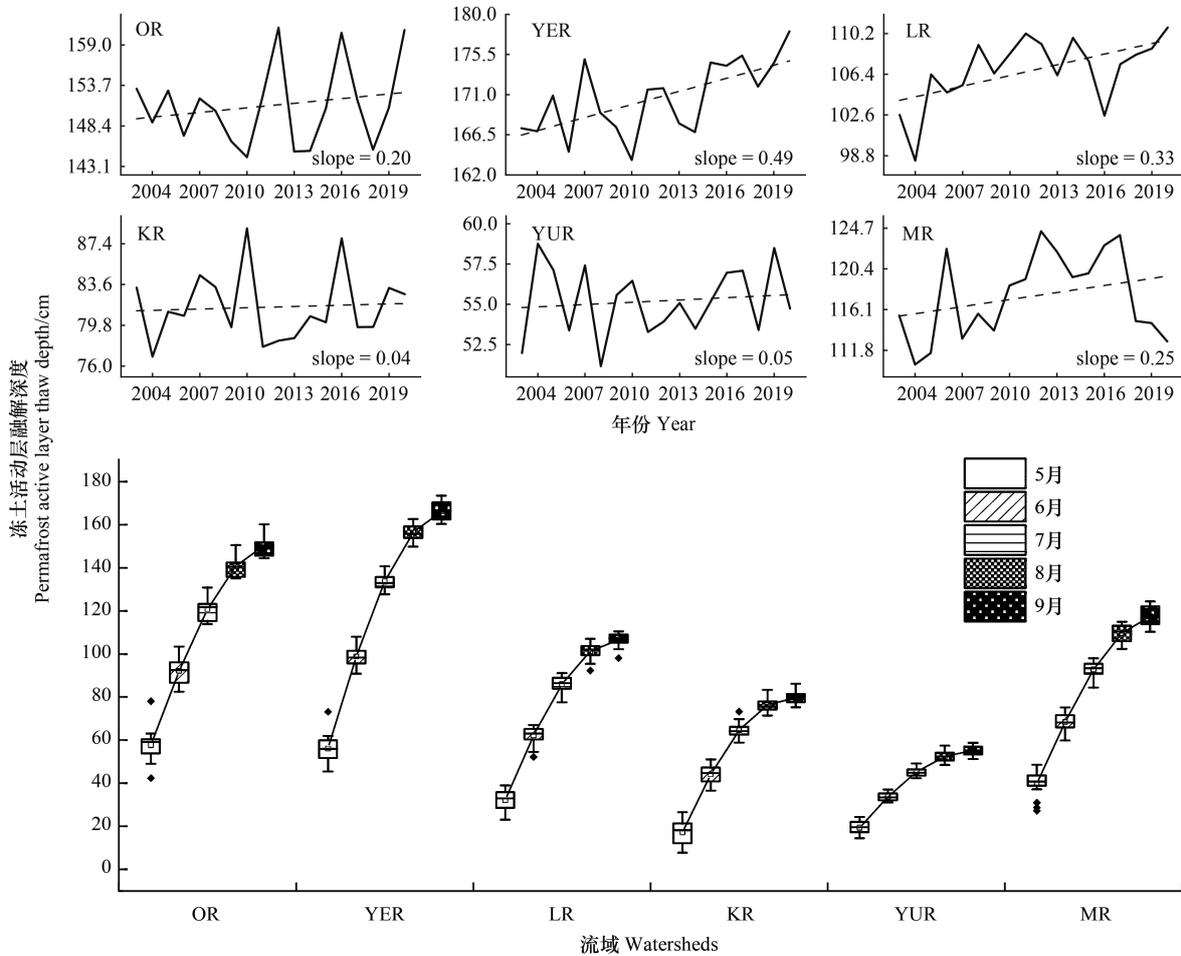


图 3 2003—2020 年北极六大流域冻土活动层融解深度变化

Fig.3 Permafrost active layer thaw depth variation among six largest arctic basins during 2003—2020

2.3 冻土融解深度对 DOC 浓度的影响

北极六大流域活动层融解深度与河口 DOC 浓度关系的 GAM 模型拟合结果如表 2 所示。结果显示 R^2 范围为 0.53—0.77, 表明模型拟合效果较好。各河流 GAM 模型自由度均大于 1, P 值均小于 0.001, 说明冻土活动层融解深度与 DOC 浓度之间存在显著的非线性关系。

表 2 北极六大河流 DOC 出口浓度的 GAM 模型拟合结果

Table 2 GAM model results of DOC concentration in the six arctic rivers

河流 River	自由度 Effective degrees of freedom	P	决定系数 R^2 Determination coefficient
鄂毕河 OR	5.64	<0.001 ***	0.77
叶尼塞河 YER	4.83	<0.001 ***	0.63
勒拿河 LR	2.83	<0.001 ***	0.65
科雷马河 KR	5.19	<0.001 ***	0.61
育空河 YUR	6.37	<0.001 ***	0.53
麦肯齐河 MR	4.58	<0.001 ***	0.69

OR: 鄂毕河 Ob' river; YER: 叶尼塞河 Yenisey river; LR: 勒拿河 Lena river; KR: 科雷马河 Kolyma river; YUR: 育空河 Yukon river; MR: 麦肯齐河 Mackenzie river; 表中 *** 表示 GAM 模型拟合结果在 0.001 水平下显著

GAM 模型对冻土活动层融解深度交叉验证的结果如图 4 所示。由图 4 可知,在 OR 地区,冻土的贡献率为 77.0%,为 6 个流域中最高值。MR 流域的融解深度对 DOC 浓度的贡献率为 73.2%,仅次于 OR 流域。YER 和 LR 流域冻土对河口 DOC 浓度的影响程度相近,贡献率分别为 68.7%和 67.8%。KR 和 YUR 冻土活动层融解深度对 DOC 浓度影响相对较低,贡献率分别为 65.2%和 65.8%。结果表明,融解深度是解释北极六大流域中影响 DOC 浓度变化的重要环境因素。

图 5 展示了 6 条河流出口处 DOC 浓度对融解深度的非线性响应关系。OR 和 YER 流域的活动层融解深度在 0—80 cm 时,河口处 DOC 浓度变化平缓。当冻土活动层融解深度超过 80 cm 时,DOC 浓度明显增加;活动层融解至 130 cm 时,DOC 的响应约为 45%,随后开始下降。LR 流域在融解深度小于 60 cm 时,河口 DOC 浓度无明显变化;当融解深度超过 60 cm 后,DOC 浓度与融解深度呈现出较强的正相关性,最大响应约为 40%。KR 流域活动层融解在 0—35 cm 深度范围内时,冻土对 DOC 浓度增加具有遏止作用,DOC 浓度随融解深度增加而下降;当融解深度超过 35 cm,DOC 浓度迅速增加,最大增幅为 10%。随着融解深度加深至 65 cm 以上,冻土对 DOC 的正向影响减弱。YUR 流域 DOC 浓度对冻土的响应与其他流域差异较大,DOC 浓度随活动层融解深度增加而上升,且上升速率随着融解深度的增加而减缓;当融解深度达到 35 cm 后,DOC 浓度趋于稳定,边际效应保持在 3%左右。MR 流域的边际效应曲线与 YER 流域相似,DOC 浓度在冻土活动层融解深度小于 95 cm 时呈现缓慢增加的趋势,并在融解深度继续增加时略有下降。

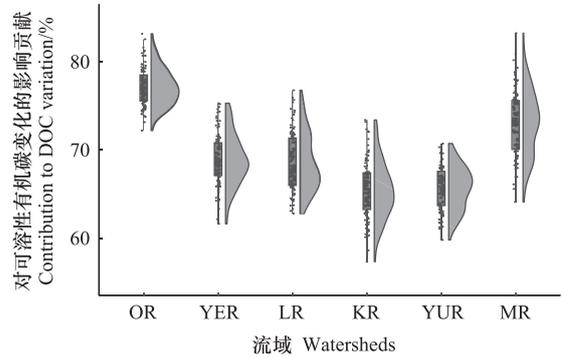


图 4 冻土活动层融解深度对北极六大流域 DOC 浓度变化的影响

Fig.4 Contributions of permafrost active layer thaw depth to arctic six largest basins DOC concentration

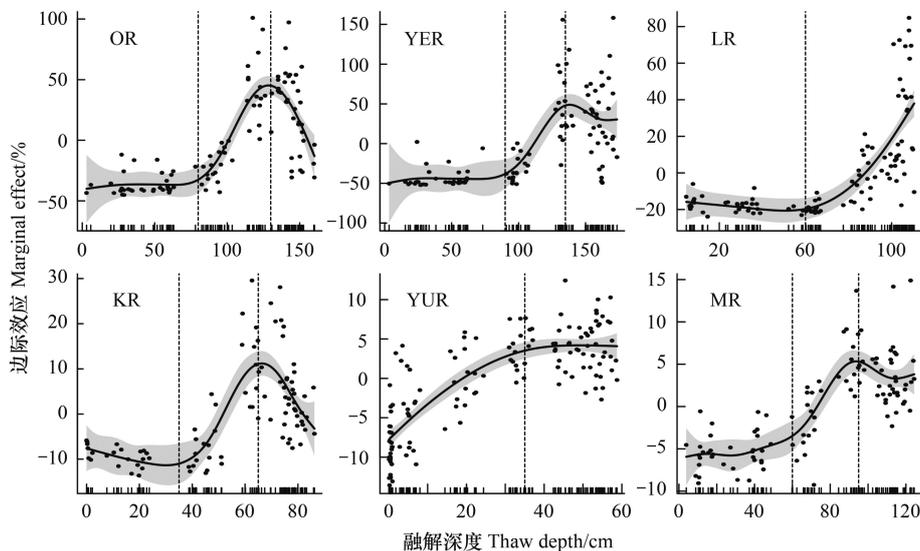


图 5 冻土活动层融解深度对北极六大河流 DOC 入海口浓度影响的边际效应

Fig.5 Marginal effects of permafrost active layer thaw depth on the DOC concentration of six arctic rivers

阴影区域表示 95% 的置信区间

为进一步讨论不同阶段 DOC 对冻土的响应差异,根据 DOC 浓度对冻土活动层融解深度的响应曲线特征,除 LR、YUR 外,将冻土融解过程划分为初始融解阶段、快速融解阶段和完全融解阶段。LR 流域冻土融解

过程仅划分为初始融解阶段和快速融解阶段, 而 YUR 冻土融解过程划分为快速融解阶段和完全融解阶段。对冻土融解过程的 3 个阶段分别应用 GAM 分析, 结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 冻土对河口 DOC 浓度的影响主要集中在快速融解阶段, 贡献率范围为 22.2%—77.1%。在初始融解阶段, 冻土活动层融解对 DOC 浓度变化的贡献率为 2.5%—53.2%。在完全融解阶段, 贡献率范围为 0.2%—35.3%。

2.4 土壤特性对 DOC 浓度变化的影响

根据 Prokushkin 等^[21]的研究, 冻土的土壤特性会显著影响冻土活动层融解过程中 DOC 的迁移与输出特征。本文基于 K-means 聚类方法对北极流域的土壤特性进行分类, 结果如表 3 与图 7 所示。

研究流域的土壤根据质地、容重、坡度、有机碳含量、pH 和阳离子交换率被划分为四类(表 3)。其中, I 类土壤主要为砂质土壤, 容重高(1.61 kg/dm³)、坡度低(0.89°), 导致地表水流速度较快。II 类土壤具有较低的容重(1.37 kg/dm³)和坡度(0.67°), 质地疏松, 有机碳含量与 CEC 均较高, 表明其具备较强的有机碳吸附和储存潜力。III 类土壤坡度大(4.65°)、容重高(1.49 kg/dm³), 导致地表径流速度快, 水土接触时间短, 且有机质含量较低(0.78%), 限制 SOC 的解吸和 DOC 的溶解。IV 类土壤容重、坡度较低, 质地疏松, 促进水与土壤充分接触, 同时 CEC 较高(96.27 cmol_c/kg), 对 DOC 具有较强的吸附作用, 并且能通过阳离子交换过程吸附有机碳, 从而减少 DOC 的转化。

表 3 土壤参数的 K-means 聚类中心点

Table 3 Centroids for K-means clustering of soil parameters

聚类 Cluster group	容重/(kg/dm ³) Bulk density	坡度/(°) Slope	土壤质地 Soil texture class	有机碳含量/% Organic carbon	pH	阳离子交换率/(cmol _c /kg) Cation exchange capacity
I	1.61	0.89	11.53	0.74	5.28	4.62
II	1.37	0.67	7.4	0.89	6.48	17.27
III	1.49	4.65	9.88	0.78	6.25	10.39
IV	1.35	0.28	7.02	36.1	4.85	96.27

I: 土壤排水能力较强, DOC 吸附能力弱; II: 土壤排水能力较弱, DOC 吸附能力较强; III: 土壤排水能力强, DOC 吸附能力较弱; IV: 土壤排水能力弱, DOC 吸附能力强

各流域的面积占比数据显示, 各类土壤在不同流域中的分布差异显著(图 7)。I 类土壤主要分布在 LR 流域, 面积占比达到 63.0%。II 类土壤在北极流域广泛分布, OR、YER、KR 和 YUR 流域均以 II 类土壤为主, 面积占比分别为 65.7%、55.1%、56.3%和 60.8%。III 类土壤主要分布在 YUR 流域, 面积占比为 27.4%。IV 类土壤主要分布在 OR 和 MR 流域, 占比分别为 15.4%和 23.6%。

3 讨论

3.1 北极河口 DOC 浓度变化特征

通过对北极六大河流域 DOC 浓度的年际和年内变化研究, 发现北极河流出口 DOC 浓度总体呈上升趋势。这一趋势与 Kicklighter 等^[15]基于生物地球化学模型模拟的结果一致, 表明泛北极地区陆地有机碳通过河流向北冰洋输出的 DOC 正在持续增加。从年际变化来看, 六大流域中 YER 的 DOC 浓度增幅最为显著, 是其他河流的 4 倍以上。这表明中西伯利亚高原地区对气候变化的响应更为敏感。河口 DOC 浓度的年内变化进一步揭示了各流域的季节性特征。OR、YER、KR 和 MR 的河口 DOC 浓度呈现出“先上升后下降”的季节性

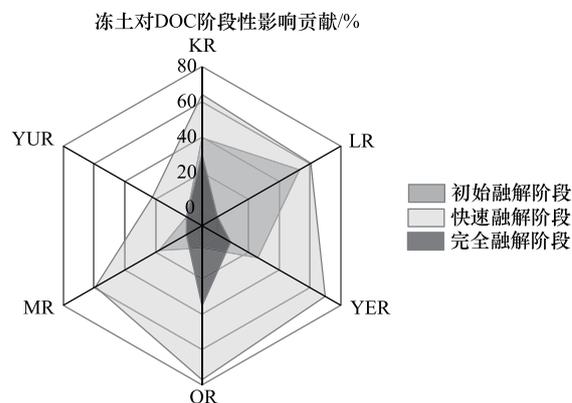


图 6 冻土在各融解阶段对 DOC 的影响作用

Fig.6 Permafrost contribution in initial, rapid and complete melting periods with GAM

趋势。可能的原因是夏季冻土快速融解释放大量有机碳,同时降雨增加河流径流量,增强对土壤有机碳的淋溶,导致河流中 DOC 浓度上升。随着气温进一步升高,植物生产和微生物活动的加强增加碳固存和转化,导致后期 DOC 浓度下降。

3.2 冻土活动层融解深度对流域 DOC 输出的影响

通过对北极六大流域多年冻土活动层融解深度与河流 DOC 出口浓度的研究,发现在冻土融解初期,大多数流域 DOC 浓度与活动层融解深度保持平缓的响应关系。当融解深度达到一定值后,DOC 浓度与其呈正相关并迅速增加。根据 Beck 等^[39]的研究,造成这一现象的原因可能是活动层的季节性解冻使来自融化土壤和植被冲刷的 DOC 进入溪流,使河流系统中 DOC 浓度上升。随着活动层融解深度的加深,深层矿物土层导水率相对较低^[40],导致通过河流向海洋输送的 DOC 减少。

OR、YER、LR、KR 和 MR 流域的边际效应图显示,DOC 浓度的初始增加发生在活动层厚度的 50%左右。当融解深度在达到在冻土活动层厚度的 80%时,DOC 浓度对冻土响应达到最大值。

通过对三个阶段分别应用 GAM 分析冻土融解过程对 DOC 的影响,发现冻土对河流 DOC 浓度的影响主要作用于快速融解阶段。根据 Finlay 等^[41]的研究,造成这一现象的原因可能是活动层融解深度明显加深,此时浅层土壤具有相对较高的渗透性和导水性,促进 DOC 迁移进入河流系统。在初始融解阶段,富含有机碳的活动层因季节性融解释放 DOC 到土壤水系统中,但释放在很大程度上受限于活动层融解深度^[42]。在完全融解阶段,融解深度持续增加,但冻土对 DOC 浓度的影响减弱。在 OR 流域,完全融解阶段的影响远大于初始融解阶段。而在 YER、LR、KR 和 MR 流域,初始融解阶段 DOC 浓度对冻土响应相对更为显著。YUR 流域冻土在快速融解和完全融解阶段对 DOC 浓度的影响明显低于其他流域。

3.3 土壤特性对 DOC 浓度的影响

通过对北极流域土壤特性的聚类研究,将北极土壤分为 4 类。结合图 5,进一步分析冻土的土壤特性在活动层融解过程中对 DOC 迁移的作用。I 类土壤的高容重和有限的有机质含量使其对 DOC 的吸附能力较弱,冻土融化过程中释放的 DOC 易迁移进入河流,从而增加河流 DOC 浓度。在以 I 类土壤为主的 LR 流域表现为河流中的 DOC 浓度持续增加。II 类土壤的渗透性强,pH 值呈弱酸性至中性,促进了 SOC 向 DOC 的转化。同时,有机质含量较高,CEC 较强,增强了对 DOC 的吸附能力。因此在冻土融化早期,DOC 浓度迅速增加,而在融化后期,由于吸附效应增强,DOC 输出减少。III 类土壤的坡度较陡,促进地表径流的快速流动,同时导致土壤对 DOC 的吸附力减弱。在 YUR 流域表现为冻土活动层融解深度较浅时,河口 DOC 浓度迅速增加。IV 类土壤由于较高的 CEC,通过阳离子交换过程吸附的有机碳增加,从而减少 DOC 的降解^[43-44]。

4 结论

(1) 采用 DOC_{UVFW} 方法计算北极六大流域河口的 DOC 浓度,结果显示其在 2003—2020 年期间呈现上升趋势。

(2) 冻土活动层融解深度对北极六大河流河口 DOC 浓度具有重要影响。DOC 浓度对融解深度的响应表现出阶段性特征:初始融解阶段缓慢增加,快速融解阶段显著上升,完全融解阶段则逐渐减弱。

(3) 北极流域土壤按其排水能力和 DOC 吸附能力分为 4 类:排水能力强的土壤导致河口 DOC 对活动层融解的响应更为迅速,而排水能力弱的土壤则促进土壤有机碳向 DOC 的转化;吸附能力强的土壤则会减少活

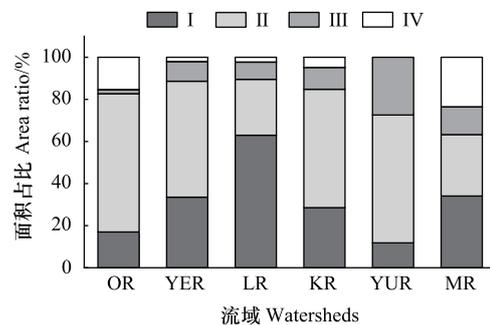


图 7 K-means 聚类在北极流域内的面积占比

Fig.7 Percentage of area within the arctic watershed for each k-means clustering groups

I: 土壤排水能力较强,DOC 吸附能力弱; II: 土壤排水能力较弱,DOC 吸附能力较强; III: 土壤排水能力强,DOC 吸附能力较弱; IV: 土壤排水能力弱,DOC 吸附能力强

动层融解后期的 DOC 输出, 而吸附能力弱的土壤则有助于河口 DOC 浓度的持续增加。

参考文献 (References):

- [1] Smith S V, Hollibaugh J T. Coastal metabolism and the oceanic organic carbon balance. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(1): 75-89.
- [2] Raymond P A, Bauer J E. Bacterial consumption of DOC during transport through a temperate estuary. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, 22: 1-12.
- [3] Zimov S A, Schuur E A G, Chapin F S. Permafrost and the global carbon budget. *Science*, 2006, 312(5780): 1612-1613.
- [4] Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden J W, Schuur E A G, Ping C L, Schirmer L, Grosse G, Michaelson G J, Koven C D, O'Donnell J A, Elberling B, Mishra U, Camill P, Yu Z, Palmtag J, Kuhry P. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 2014, 11(23): 6573-6593.
- [5] Mu C, Zhang T, Wu Q, Peng X, Cao B, Zhang X, Cao B, Cheng G. Organic carbon pools in permafrost regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *The Cryosphere*, 2015, 9(2): 479-486.
- [6] Feng X J, Vonk J E, van Dongen B E, Gustafsson Ö, Semiletov I P, Dudarev O V, Wang Z H, Montluçon D B, Wacker L, Eglinton T I. Differential mobilization of terrestrial carbon pools in Eurasian Arctic river basins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(35): 14168-14173.
- [7] Serreze M C, Walsh J E, Chapin F S, Osterkamp T, Dyurgerov M, Romanovsky V, Oechel W C, Morison J, Zhang T, Barry R G. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*, 2000, 46(1): 159-207.
- [8] Graversen R G, Mauritsen T, Tjernström M, Källén E, Svensson G. Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature*, 2008, 451(7174): 53-56.
- [9] Rantanen M, Karpechko A Y, Lipponen A, Nordling K, Hyvärinen O, Ruosteenoja K, Vihma T, Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 168.
- [10] Kipp L E, Charette M A, Moore W S, Henderson P B, Rigor I G. Increased fluxes of shelf-derived materials to the central Arctic Ocean. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao1302.
- [11] Raymond P A, Saiers J E. Event controlled DOC export from forested watersheds. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1): 197-209.
- [12] Raymond P A, McClelland J W, Holmes R M, Zhulidov A V, Mull K, Peterson B J, Striegl R G, Aiken G R, Gurtovaya T Y. Flux and age of dissolved organic carbon exported to the Arctic Ocean; a carbon isotopic study of the five largest Arctic rivers. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): doi:10.1029/2007GB002934.
- [13] Fabre C, Sauvage S, Probst J L, Sánchez-Pérez J M. Global-scale daily riverine DOC fluxes from lands to the oceans with a generic model. *Global and Planetary Change*, 2020, 194: 103294.
- [14] Amon R M W, Rinehart A J, Duan S, Louchouart P, Prokushkin A, Guggenberger G, Bauch D, Stedmon C, Raymond P A, Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, Walker S A, Zhulidov A V. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 94: 217-237.
- [15] Kicklighter D W, Hayes D J, McClelland J W, Peterson B J, McGuire A D, Melillo J M. Insights and issues with simulating terrestrial DOC loading of Arctic river networks. *Ecological Applications*, 2013, 23(8): 1817-1836.
- [16] Michaelson G J, Ping C L, Kling G W, Hobbie J E. The character and bioactivity of dissolved organic matter at thaw and in the spring runoff waters of the Arctic tundra North Slope, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28939-28946.
- [17] Vonk J E, Mann P J, Dowdy K L, Davydova A, Davydov S P, Zimov N, Spencer R M, Bulygina E B, Eglinton T I, Holmes R M. Dissolved organic carbon loss from Yedoma permafrost amplified by ice wedge thaw. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035023.
- [18] Fritz M, Opel T, Tanski G, Herzsuh U, Meyer H, Eulenburg A, Lantuit H. Dissolved organic carbon (DOC) in Arctic ground ice. *The Cryosphere*, 2015, 9(2): 737-752.
- [19] 熊净, 孙自永, 胡雅璐, 马瑞. 高寒山区土壤溶解性有机质特征及其对河流溶解性有机质输出的影响. *地球科学*, 2024, 49(11): 4169-4183.
- [20] Wickland K P, Waldrop M P, Aiken G R, Koch J C, Jorgenson M T, Striegl R G. Dissolved organic carbon and nitrogen release from boreal Holocene permafrost and seasonally frozen soils of Alaska. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 065011.
- [21] Prokushkin A S, Kawahigashi M, Tokareva I V. Global warming and dissolved organic carbon release from permafrost soils//*Permafrost Soils*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 237-250.
- [22] 王雯倩, 蔡玉山, 肖湘, 段亮亮. 老爷岭多年冻土小流域春季冻融期径流溶解性有机碳变化特征. *生态学报*, 2023, 43(16): 6716-6727.
- [23] McFarlane K J, Throckmorton H M, Heikoop J M, Newman B D, Hedgpeth A L, Repasch M N, Guilderson T P, Wilson C J. Age and chemistry of dissolved organic carbon reveal enhanced leaching of ancient labile carbon at the permafrost thaw zone. *Biogeosciences*, 2022, 19(4):

- 1211-1223.
- [24] Shiklomanov A I, Lammers R B. Changing Discharge Patterns of High-Latitude Rivers // Roger A P eds. Climate Vulnerability. Elsevier, 2013: 161-175.
- [25] Yan M, Liu Z, Mo S, Zhang C, Liu F, Korshin G. A Novel Method to Dynamically Observe the Three-dimensional Global Oceanic Dissolved Organic Carbon Reservoir. (2023-02-02) [2024-05-29]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2357170/v1>
- [26] Nelson F E, Outcalt S I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost. Arctic and Alpine Research, 1987, 19(3): 279-288.
- [27] Zhang T, Osterkamp T E, Starnes K. Effects of climate on the active layer and permafrost on the north slope of Alaska, U.S.A. Permafrost and Periglacial Processes, 1997, 8(1): 45-67.
- [28] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models. Statistical Science, 1986, 1(3): 297-310.
- [29] 陆化杰, 陈新军, 曹杰. 基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鲑钓渔业 CPUE 标准化. 生态学报, 2013, 33(17): 5375-5384.
- [30] Zhang C L, Chen Y, Xu B D, Xue Y, Ren Y P. Comparing the prediction of joint species distribution models with respect to characteristics of sampling data. Ecography, 2018, 41(11): 1876-1887.
- [31] Zhang Y L, Xue Y, Xu B D, Zhang C L, Zan X X. Evaluating the effect of input variables on quantifying the spatial distribution of croaker *Johnius belangerii* in Haizhou Bay, China. Journal of Oceanology and Limnology, 2021, 39(4): 1570-1583.
- [32] Pearce J L, Beringer J, Nicholls N, Hyndman R J, Uotila P, Tapper N J. Investigating the influence of synoptic-scale meteorology on air quality using self-organizing maps and generalized additive modelling. Atmospheric Environment, 2011, 45(1): 128-136.
- [33] 范林峰, 季芳, 匡星星, 郭芷琳, 张锐, 郑春苗. 喜马拉雅北麓多年冻土退化对河川径流的影响. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(6): 2020-2030.
- [34] Mouquet N, Lagadeuc Y, Devictor V, Doyen L, Duputié A, Eveillard D, Faure D, Garnier E, Gimenez O, Huneman P, Jabot F, Jarne P, Joly D, Julliard R, Kéfi S, Kergoat G J, Lavorel S, Le Gall L, Meslin L, Morand S, Morin X, Morlon H, Pinay G, Pradel R, Schurr F M, Thuiller W, Loreau M. REVIEW: Predictive ecology in a changing world. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(5): 1293-1310.
- [35] Yu W, Guo A, Zhang Y, Chen X J, Qian W G, Li Y S. Climate-induced habitat suitability variations of chub mackerel *Scomber japonicus* in the East China Sea. Fisheries Research, 2018, 207: 63-73.
- [36] Zuur A F, Ieno E N, Smith G M. Analysing Ecological Data. New York, NY: Springer New York, 2007. doi:10.1007/978-0-387-45972-1.
- [37] Zhang Y L, Yu H M, Yu H Q, Xu B D, Zhang C L, Ren Y P, Xue Y, Xu L L. Optimization of environmental variables in habitat suitability modeling for *Mantis* shrimp *Oratosquilla oratoria* in the Haizhou Bay and adjacent waters. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(6): 36-47.
- [38] 王森, 刘琛, 邢帅杰. K-means 聚类算法研究综述. 华东交通大学学报, 2022, 39(5): 119-126.
- [39] Beck P S A, Goetz S J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008; ecological variability and regional differences. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 045501.
- [40] Young-Robertson J M, Ogle K, Welker J M. Thawing seasonal ground ice: an important water source for boreal forest plants in Interior Alaska. Ecohydrology, 2017, 10(3): e1796.
- [41] Finlay J, Neff J, Zimov S, Davydova A, Davydov S. Snowmelt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: Implications for characterization and flux of river DOC. Geophysical Research Letters, 2006, 33(10): doi:10.1029/2006GL025754.
- [42] Neff J C, Finlay J C, Zimov S A, Davydov S P, Carrasco J J, Schuur E A G, Davydova A I. Seasonal changes in the age and structure of dissolved organic carbon in Siberian rivers and streams. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23): doi:10.1029/2006GL028222.
- [43] Grünewald G, Kaiser K, Jahn R, Guggenberger G. Organic matter stabilization in young calcareous soils as revealed by density fractionation and analysis of lignin-derived constituents. Organic Geochemistry, 2006, 37(11): 1573-1589.
- [44] Mikutta R, Kaiser K. Organic matter bound to mineral surfaces: Resistance to chemical and biological oxidation. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(8): 1738-1741.