

西伯利亚北极河流有机碳输出特征及影响要素

刘诗奇¹, 王 平^{1,2}, 王田野³, 黄其威^{1,2}, 于静洁^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 河流有机碳输出是北极碳循环的重要组成部分, 对气候变化十分敏感。本文利用 ArcticGRO 的径流及有机碳数据, 通过数理统计分析等方法, 对 2004—2017 年间俄罗斯西伯利亚地区的鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河有机碳输出进行研究。结果显示: 西伯利亚 3 大河流的年均有机碳输出总量约 23 Tg, 其中溶解有机碳(DOC)输出约 18.55 Tg, 占北极地区 50% 以上, 接近颗粒有机碳(POC)输出的 4 倍。2009—2017 年间的年均 DOC 输出量较 1999—2008 年存在较大差异, 鄂毕河增加 18%, 叶尼塞河下降 13%, 而勒拿河增加了近 70%。春、夏两季有机碳输出总量占全年 85% 以上, 春季为有机碳输出高峰期, 而在鄂毕河流域春、夏季贡献率相当。各流域河流有机碳输出特征不同且具有季节性变化, 主要受径流、冻土及人类活动等的影响。其中, DOC 输出总量在年际与季节性变化特征上均与径流变化呈显著正相关, 随径流增加 DOC 浓度也相应增大; 而多年冻土也因类型及分布差异对河流 DOC 与 POC 具有不同程度的影响。研究气候变化下的北极河流有机碳输出特征及影响要素, 有助于深入理解北极河流有机碳输出对气候及环境变化的综合响应, 为揭示气候变化下的北极碳循环过程奠定基础。

关键词: 北极河流; 西伯利亚; 有机碳; 径流; 多年冻土

DOI: 10.11821/dlxb202105002

1 引言

在河流侵蚀和搬运作用下, 从陆地迁移至海洋的碳是全球碳循环的重要组成^[1]。气候增暖在北极具有“极地放大效应”(Polar-amplified Warming)^[2], 导致北极地区多年冻土退化、活动层厚度增加^[3-4]。多年冻土中储存的有机碳大量释放^[5], 并部分随河流输出至北冰洋^[5-6], 这一过程成为极地碳循环中的重要环节。而广泛发育的多年冻土, 不仅影响着北极河流有机碳输出, 也使其同北极多年冻土层一样, 对气候变化十分敏感^[7]。

20 世纪 80 年代起, 诸多学者针对世界河流有机碳展开研究^[1, 8], 但受限于监测数据, 多数研究仅在年际尺度上分析各流域有机碳输出^[1]。20 世纪 90 年代以来, 该领域的科学研究主要围绕河流有机碳输出的时空特征、影响因素及其对气候变化的响应开展^[1, 5, 9-11]。西伯利亚地区拥有鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河 3 条北极大型河流^[5, 12], 作为北冰洋淡水输入的重要源区, 流域内广泛发育多年冻土, 是北极气候与环境变化研究的重点区域^[4, 13]。

收稿日期: 2020-03-05; 修订日期: 2020-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001098); 国家科技基础资源调查专项(2017FY101301, 2017FY101302); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4); 中国博士后科学基金项目(2020M670434) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42001098; The Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China, No.2017FY101301, No.2017FY101302; The Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2017-4; China Postdoctoral Science Foundation, No.2020M670434]

作者简介: 刘诗奇(1990-), 女, 黑龙江人, 博士后, 主要从事地质环境与气候变化研究。E-mail: liusq@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王平(1979-), 男, 安徽人, 博士, 副研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wangping@igsrr.ac.cn

1065-1077 页

与世界其他河流一样,西伯利亚北极河流有机碳输出受径流、地形和土壤有机碳含量等多要素的影响^[1]。而与此同时,由于其高纬度的地域属性和广泛发育的多年冻土,气候变暖引起的冻土退化又将对各环境要素产生不同程度的影响^[14-15],并明显反映在河流有机碳输出的时空响应上。

因此,研究气候变暖条件下的北极河流有机碳输出特征及其影响要素,有利于深入揭示北极碳循环对气候及环境变化的综合响应,为建立北极河流有机碳输出与环境变化的关系,增强对北极碳循环的认识,科学应对气候变暖等提供理论依据。本文在前人研究基础上,通过分析2004—2017年鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河的ArcticGRO (Arctic Great Rivers Observatory) 径流及有机碳数据(<https://arcticgreatrivers.org/>)获得各流域河流有机碳输出的年际和季节性变化规律,并对比1999—2008年与2009—2017年的有机碳输出特征,进一步揭示西伯利亚北极河流有机碳输出的影响要素。

2 研究区概况

北冰洋仅占全球海洋体积1%,却拥有超过世界10%的径流输入(约3300 km³/a)^[16-17]。北极地区最大的3条河流均位于俄罗斯西伯利亚地区,自西向东分别为鄂毕河(Ob River)、叶尼塞河(Yenisei River)和勒拿河(Lena River)(图1),其流域面积及河流径流量均可与北美最大的密西西比河流域相提并论^[9, 17](表1)。但不同于世界其他河流,西伯利亚北极河流流域内广泛发育多年冻土,且覆盖率随纬度的增加自上游向下游呈增加趋势^[14],河流冬季结冰而春季洪泛^[18]。气候变化影响着上述流域内多年冻土、降水、径流和河流化学组分等各个方面,进而导致河流下游生态系统发生变化^[19]。

鄂毕河是俄罗斯第三大河流^[21],南起阿尔泰山脉,向西再向北流经世界最大的泥炭地系统湿地——西西伯利亚平原^[22],并最终汇入北冰洋喀拉海域,淡水汇入量约占北冰洋淡水汇入总量的15%^[23]。多年冻土面积占流域的4%~10%^[24],其中不连续多年冻土之下富集大量泥炭^[25],气候变化将导致该地区全新世泥炭沉积的稳定性变差,预计未来将不断减少^[5]。流域南部上游是俄罗斯小麦的主产区,而中下游是西西伯利亚油气田。20世纪50年代中期至80年代,鄂毕河流域共修建大型水库1座,中型水库3座。整体而言,鄂毕河流域人类活动较多,工农业的发展在一定程度上影响着流域的生态环境^[26]。

叶尼塞河,南起萨彦岭(南西伯利亚),向北经过中西伯利亚高原,最终汇入北冰洋喀拉海域^[27],约占北冰洋淡水汇入总量的22%^[28],是北冰洋淡水贡献率最大的河流^[7]。叶尼塞河径流具有明显的季节性,春季为径流高峰^[18]。整个流域每年有超过6个月均被冰雪覆盖,多年冻土覆盖率高达90%^[24],其中,连续多年冻土占34%,不连续多年冻土占11%,零散和孤立多年冻土共占45%^[29],仅部分南部区域不发育多年冻土。

勒拿河源起于南部贝加尔、斯塔诺沃伊山和朱格朱尔山脉地区,并最终汇入北



注:冻土数据来源于Jaroslav等^[20]。

图1 鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河流域位置及冻土分布

Fig. 1 Geographic location of Ob, Yenisei and Lena river basins and distribution of permafrost

表1 西伯利亚三大流域基本地理环境特征及人口数据统计

Tab. 1 Geographical characteristics and demographic statistics of the three Siberian river basins

	鄂毕河	叶尼塞河	勒拿河	来源文献
汇入海域	喀拉海		拉普捷夫海	
海域面积(10 ⁴ km ²)	661.5		363.2	[11]
海域DOC汇入(Tg/a)	11.1		8.26	
流域面积(10 ⁴ km ²)	311	257	247	[1]
	257	258	242	[39]
	299	254	246	[9]
	295	244	243	[32]
流域平均海拔(m)	305	769	608	
流域平均坡度(°)	1.98	4.90	4.91	
平均土壤厚度(cm)	216	93	49	
年均降水量(mm)	393	356	337	[1]
年均气温(°C)	-0.6	-4.5	-8.6	
土壤有机碳(kg/m ³)	20	12.6	12.9	
年径流量(km ³)	404~419	562~577	524~533	[39]
	405	626	525	[33]
	427	673	588	[9]
	410	610	540	[32]
多年冻土覆盖率(%)	4~18	36~66	78~94	[33]
	4	42	90	[39]
连续多年冻土占比(%)	1	31	77	
人口密度(人/km ²)	8	3	0.4	[9]
	7	2	1	[1]

冰洋拉普捷夫海域，主要位于东西伯利亚雅库特地区^[15]。整体属大陆性气候，年均降水量较低（200~500 mm），冬季寒冷漫长，最低温度可达-50℃，而夏季短暂且炎热，最高温度近35℃，流域内年均气温为-6℃，并随纬度升高而不断下降^[30]。流域南部以不连续多年冻土为主，从60°N向北逐渐过渡为连续多年冻土（厚度从50~1500 m不等），淡水汇入量约占北冰洋的15%，且将近85%来自于春—夏季洪水（5—9月）^[31]。

全球气候变暖影响着西伯利亚北极地区的多年冻土分布及降水模式^[28]，并导致河流径流过程及河水所携带物质组分发生改变^[14, 28]，包括河流有机碳含量的变化^[5]。在综合西伯利亚3大河流基本地理环境及人口特征数据（表1）的基础上，通过研究西伯利亚北极流域的河流有机碳输出特征，发现3大流域的河流有机碳在来源及输出规律方面具有高度相似性的同时，也在径流、冻融及人类活动等影响下，存在显著差异。

3 西伯利亚北极河流有机碳来源及输出方式

气候变暖导致北极地区多年冻土退化，活动层厚度增加，大量有机碳从冻土中释放^[34]，并部分随河流汇入北冰洋。多年冻土作为世界最大的陆地有机碳库，其有机碳储量达1330~1580 Pg^[35]，约为大气碳总量的2倍^[36]。因此，鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河作为西伯利亚地区的主要河流，将大量有机碳从陆地搬运至海洋系统，其有机碳来源和输出方式，也成为了研究北极地区碳循环过程与机理的关键^[9, 37]。

3.1 西伯利亚北极河流有机碳来源

河流有机碳的主要来源包括本地陆源有机物质、外来生物作用产物和人类生产生活排放三大类^[7]。其中,颗粒有机碳(POC)主要来源于本地生物作用、流水冲刷剥蚀以及土壤淋滤等物理风化作用产物,其浓度与悬浮固体总量(TSS)有关,而溶解有机碳(DOC)则主要来自于地表水和地下水的流动搬运,其浓度与地表水及地下水流量密切相关^[1]。

在多年冻土广泛发育的北极地区,由于有机碳输出机理不同,随河流输出的有机碳也具有明显的年代特征。DOC主要来源于现代陆相产物($\Delta^{14}\text{C}$ 平均值为 $(72\pm 39)\text{‰}$)^[38],而POC来源普遍比DOC更加久远($\Delta^{14}\text{C}$ 平均值为 $(-261\pm 82)\text{‰}$),对应同位素年龄约为1600~3300 a^[7],极有可能来自于多年冻土活动层,或多年冻土及泥炭层的有机碳^[27, 39],甚至部分来自于沿河床分布的更深、更古老沉积物的剥蚀产物^[5]。

三大流域DOC与POC输出的 $\Delta^{14}\text{C}$ 也因多年冻土的差异发育而显著不同。分析各流域河口处的有机碳监测数据(鄂毕河采样点:66.63°N, 66.60°E;叶尼塞河采样点:67.43°N, 86.48°E;勒拿河采样点:70.68°N, 127.39°E)发现,鄂毕河流域DOC的 $\Delta^{14}\text{C}$ 值从 -124.7‰ ~ 71.0‰ 不等,具有现代陆相产物和多年冻土活动层2种来源,说明在多年冻土发育程度较低的鄂毕河流域,多年冻土活动层中的有机碳相对不稳定,易于以溶解方式随河流输出;同样,在不连续和孤立多年冻土各占流域多年冻土总量1/3的叶尼塞河流域,也具有相似特征;而对于多年冻土发育程度较高的勒拿河流域,其河流输出的DOC($\Delta^{14}\text{C}$: -49.8‰ ~ 152.3‰)几乎全部来源于现代陆相产物^[5]。POC主要来自于多年冻土活动层,可见除风化剥蚀作用下以颗粒方式携带出多年冻土有机碳外,多年冻土发育程度较高的地区有机碳相对稳定,而随着多年冻土发育程度降低,多年冻土活动层有机碳更易于以溶解方式随河流输出,且相比较之下,孤立多年冻土较为发育的鄂毕河流域,其多年冻土活动层有机碳最为活跃,对气候变化的敏感度也更高。

此外,除各流域多年冻土的差异发育,Kutscher等也证实河流有机碳来源随河流流经区域不同而有所差异^[6]。例如,坡度较陡的山区有机碳输出浓度低于地势平缓的低地,山区河流有机碳主要来源于土壤有机质^[6]。

3.2 西伯利亚北极河流有机碳输出方式

河流有机碳通常以DOC和POC方式输出^[7]。全球河流汇入大洋的POC约160 Tg/a,略高于DOC(140 Tg/a)^[40]。北极地区的情况相反,其DOC输出总量(18~28 Tg/a)明显高达POC(4~7 Tg/a)4倍以上^[1, 32, 39]。而西伯利亚河流DOC输出总量甚至高达POC的10~20倍。以叶尼塞河流域为例,随河流输出的DOC高达4.64~4.69 Tg/a^[9],远超POC输出量(0.17 Tg/a)^[41]。因此,北极河流有机碳输出在时间和空间上具有一定的区域特征,且随着采样时间不同,河流有机碳输出的研究结果间也存在一定差异(表2),进而加大对北极河流有机碳输出规律认识的难度。

4 西伯利亚北极河流有机碳输出特征

4.1 河流有机碳输出的季节性

西伯利亚北极河流的径流量及有机碳输出具有明显的季节性^[5]。2004—2017年径流数据显示,从5月起径流量迅速增加至径流高峰,全年径流输出集中在5—10月(图2)。

在对北极河流有机碳输出的季节性变化研究中,通常将一个水文年划分为春、夏、冬3个季节来加以分析^[9, 42],包括:5—6月的春季洪水期(2个月);7—10月的夏季生物活动增多期(4个月);以及从11月开始至次年4月的冬季低流量期(6个月)^[9]。西伯利

表2 西伯利亚北极河流悬浮固体总量及输出有机碳数据统计(Tg/a)

Tab. 2 Total suspended solids and organic carbon output statistics of Arctic rivers in Siberia (Tg/a)				
	鄂毕河	叶尼塞河	勒拿河	来源文献
流量站	萨列哈尔德	伊加尔卡	丘休尔	[9]
水质监测站	萨列哈尔德	杜金卡	日甘斯克	
TSS	17	5.9	18	[39]
TOC	3.5	4.7	6.7	
DOC	3.1~3.2	4.1~4.9	3.4~4.7	[39]
	3.05	4.69	5.83	
	4.118	4.644	5.681	[10]
POC	0.31~0.6	0.17	0.47	[9]
				[39]

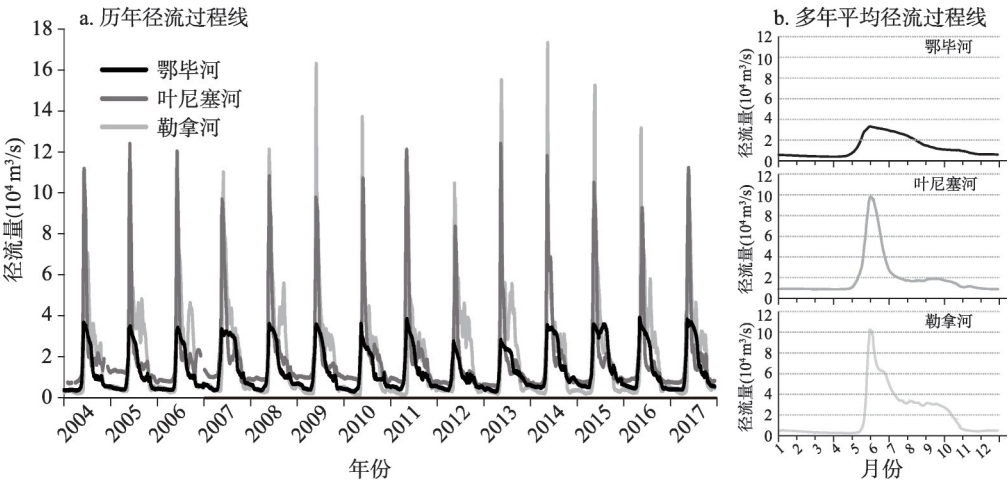


图2 2004—2017年鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河径流特征
Fig. 2 Discharge of Ob, Yenisei and Lena rivers from 2004 to 2017

亚北极河流的大规模有机碳输出始于春末夏初，并于5—6月期间达到峰值^[10]。春、夏两季是北极河流DOC和POC主要输出季节，冬季有机碳输出量最低^[5, 43]。

4.2 各流域河流有机碳输出的季节差异

对西伯利亚3大流域而言，春、夏两季的有机碳输出占全年85%以上，叶尼塞河和勒拿河的有机碳输出高峰期 of 春季，而鄂毕河则春、夏两季有机碳贡献率相当，其有机碳输出高峰期略晚于东部的另外2条河流（图3）。

分别研究DOC与POC发现，由于来源不同（图2），二者输出浓度差异较大。例如，鄂毕河年均DOC输出4.66 Tg，超过POC（0.63 Tg）的7倍，其年均DOC输出浓度（9.83 mg/L）也同样高于POC（1.23 mg/L）。此外，河流有机碳输出浓度和通量的季节性特征也极为相似，比如，鄂毕河春、夏两季DOC输出浓度较为相近（10.3 mg/L和10.9 mg/L），而DOC输出通量在春季和夏季的贡献率也比较相似。但由于径流量的不同，部分地区有机碳输出浓度与通量的季节相似性也会受到影响，如鄂毕河的平均DOC输出浓度明显高于叶尼塞河，但由于叶尼塞河径流量相对较大，最终二者年均DOC输出通量较为相近。

整体而言，叶尼塞河的河流有机碳输出以春季为主，其贡献量约为夏季的3倍；勒拿河有机碳输出浓度处于三大流域中等水平，但因其2004—2017年期间较高的径流量，

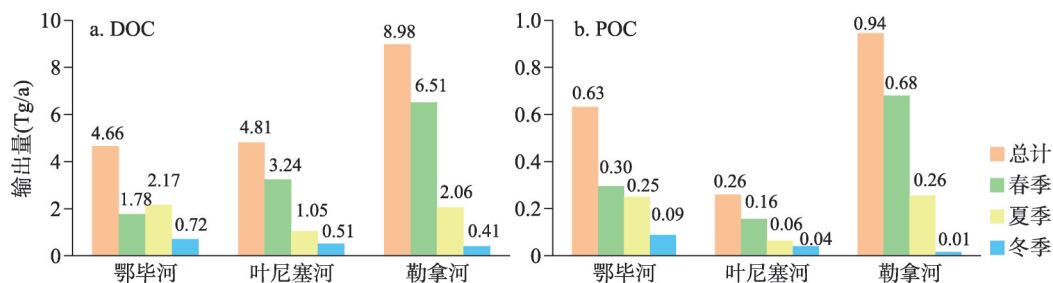


图3 2004—2017年西伯利亚北极河流DOC、POC年均及各季节输出

Fig. 3 Annual and seasonal output of DOC and POC in Arctic rivers in Siberia from 2004 to 2017

河流有机碳输出通量最大 (DOC输出约8.98 Tg/a), 约是鄂毕河和叶尼塞河之和, 春季贡献率明显高于夏季, 冬季输出极少。因此, 通过季节性差异分析, 发现河流有机碳输出浓度和径流量的大小共同决定着输出通量, 而河流有机碳来源和径流量同时又影响着其输出浓度。

4.3 河流有机碳输出的年际特征

西伯利亚三大流域的有机碳输出明显高于北极其他河流^[33], 其DOC输出超过北极全部河流的一半^[5, 7, 9, 43-44], 而POC仅处在北极河流的中等水平 (1.26~1.55 Tg/a)^[32]。分析3条河流2004—2017年的年均有机碳输出浓度并与6月份对比, 发现在不同的河流流经区域及多年冻土发育程度下, POC和DOC输出的年际变化规律不同, 且各流域差异明显, 6月份的河流有机碳输出浓度与全年趋势类似, 但仍在个别年份或整体数值上存在不同 (图4)。

2004—2017年期间各流域POC输出浓度均呈下降趋势, 叶尼塞河明显低于另外2条河流 (< 1 mg/L), 而鄂毕河和勒拿河均在2012年呈现断阶式下降。据此推测, 孤立和连续多年冻土相对发育的流域中POC更易随河流输出, 且连续多年冻土发育的勒拿流域POC对环境变化更为敏感。对DOC而言, 鄂毕河年均DOC浓度相对稳定 (7.4~12 mg/L), 但6月DOC浓度 (8.1~15.7 mg/L) 自2011年起有所增加。勒拿河DOC输出浓度以2012年为转折, 先增后降, 且历年来波动较大 (6.18~14.76 mg/L), 6月份DOC浓度普遍高于年

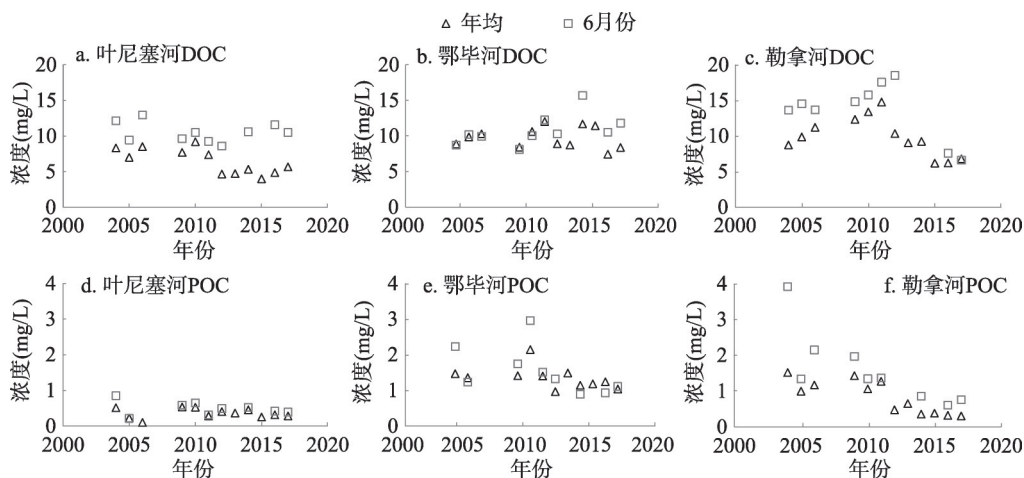


图4 2004—2017年西伯利亚北极河流有机碳输出浓度

Fig. 4 Concentration of organic carbon output in Arctic rivers in Siberia from 2004 to 2017

均, 但年际变化趋势相同。叶尼塞河6月份DOC浓度(8.6~13 mg/L)则几乎不变, 而年均DOC浓度不仅略低于另外2条河流(4~9.2 mg/L), 且在2012年后明显减少。对三大流域而言, DOC来源主要为现代陆相产物, 但均不同程度的包括部分多年冻土活动层来源。因此, 流域环境的不同及多年冻土发育程度的差异均使各流域DOC输出浓度具有明显的区域差异性, 河流有机碳输出特征是各流域地下多年冻土发育与流域环境变化的综合作用结果。

4.4 不同季节河流有机碳输出的多年变化规律

除季节性特征外, 西伯利亚三大流域各季节的河流有机碳输出也随气候变暖, 出现不同程度的变化。对比1999—2008年(数据来源于Holmes等^[9])和2009—2017年(数据来源于ArcticGRO)数据(图5), 发现鄂毕河DOC输出在各个季节均有所增加, 年均DOC输出总量增长18%; 叶尼塞河在春、夏、冬季的河流DOC输出均呈下降趋势, 平均下降11%~15%; 勒拿河流域则相对复杂, 春季DOC输出明显增加, 2009—2017年期间的年均春季DOC输出是1999—2008年期间的2倍以上, 而夏、冬两季均减少近1/3。整体看来, 各流域年均DOC输出变化规律与春季较为一致, 且对西伯利亚三大流域而言, 河流有机碳输出变化特征具有区域性差异, 如夏、冬两季, 鄂毕河流域DOC输出呈增加趋势, 而向东过渡到叶尼塞河和勒拿河流域, 则表现为减少趋势。

整体而言, 1999—2008年与2009—2017年间, 鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河的春季DOC输出从不到全年的一半增长至全年的63.03%(表3), 且主要受勒拿河流域近十年春季河流DOC输出大幅提高的影响。此外, 尽管不同流域春季有机碳贡献率和变化趋势各异, 但随着气候变暖, 春、冬河流DOC贡献比均有所提高, 尤其是勒拿河流域。

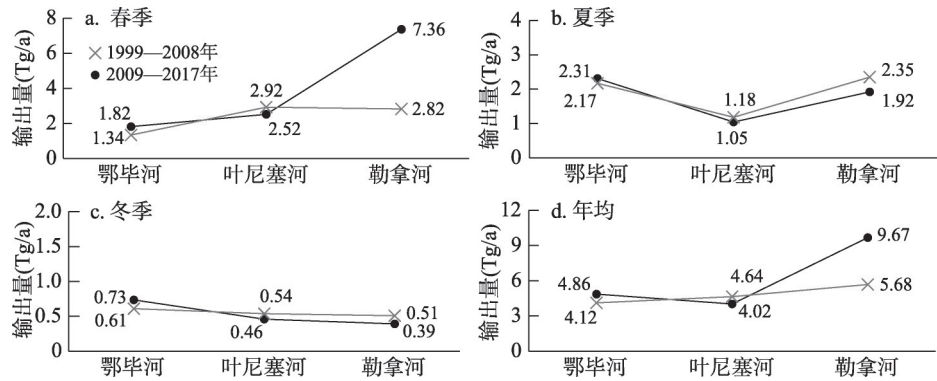


图5 西伯利亚北极河流DOC输出特征对比
Fig. 5 Comparison of DOC output characteristics of Arctic rivers in Siberia

表3 1999—2008年及2009—2017年西伯利亚北极河流季节性DOC输出
Tab. 3 Seasonal DOC output of Arctic rivers in Siberia in 1999-2008 and 2009-2017

河流	鄂毕河		叶尼塞河		勒拿河		总输出	
时段	1999—2008	2009—2017	1999—2008	2009—2017	1999—2008	2009—2017	1999—2008	2009—2017
DOC _春 (Tg/a)	1.34	1.82 ↑	2.92	2.52 ↓	2.82	7.36 ↑	7.09	11.69 ↑
DOC _夏 (Tg/a)	2.17	2.31 ↑	1.18	1.05 ↓	2.35	1.92 ↓	5.70	5.28 ↓
DOC _冬 (Tg/a)	0.61	0.73 ↑	0.54	0.46 ↓	0.51	0.39 ↓	1.65	1.58 ↓
DOC _总 (Tg/a)	4.12	4.86 ↑	4.64	4.02 ↓	5.68	9.67 ↑	14.44	18.55 ↑
DOC _春 /DOC _冬	2.20	2.47 ↑	5.45	5.49 ↑	5.56	18.86 ↑	4.28	7.39 ↑
DOC _春 占比(%)	32.49	37.36 ↑	62.96	62.59 ↓	49.69	76.11 ↑	49.06	63.03 ↑

注: 1999—2008年数据来自文献[9];箭头表示2009—2017年相对于1999—2008年的变化趋势。

5 西伯利亚北极河流有机碳输出的影响要素

5.1 径流过程

Holmes 等证实春季融雪引起的径流增加会导致河流有机碳输出增多^[9]。而西伯利亚 3 大流域 2004—2017 年径流与有机碳输出数据，再次证实河流 DOC 和 POC 浓度随径流量增加而增大的同时，存在一定区域差异（图 6）。其中鄂毕河的有机碳浓度与径流线性关系最弱，表明除径流外，有机碳输出受其他因素影响较多，而叶尼塞河及勒拿河的径流与有机碳浓度间的线性相关更强，且叶尼塞河径流与 DOC 浓度的线性相关性最好（ $R^2_{\text{DOC}} \approx 0.74$ ），但与 POC 浓度的线性回归系数明显偏低，说明对于较大的流域而言，其大流量且长时间的搬运过程，一方面补充了河流有机碳，另一方面也加剧有机碳的分解和沉降^[45]。

西伯利亚河流径流的季节性特征也影响着河流有机碳输出^[29]。鄂毕河流域 2009—2017 年间的河流径流量略高于 1999—2008 年期间，夏季占比相对较多（图 7a），河流

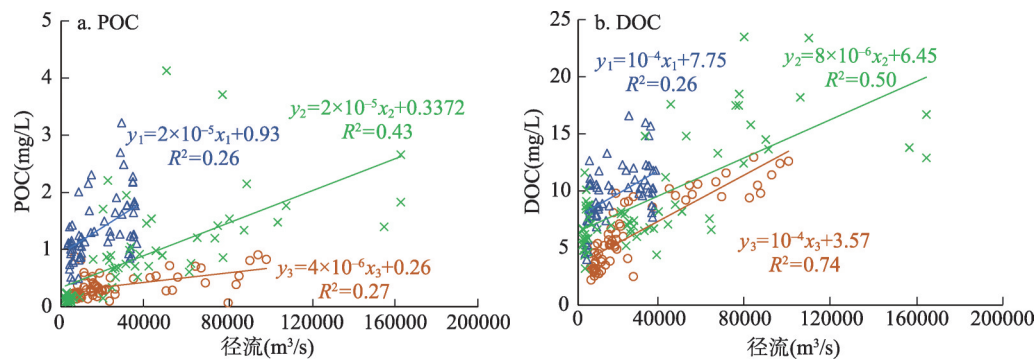
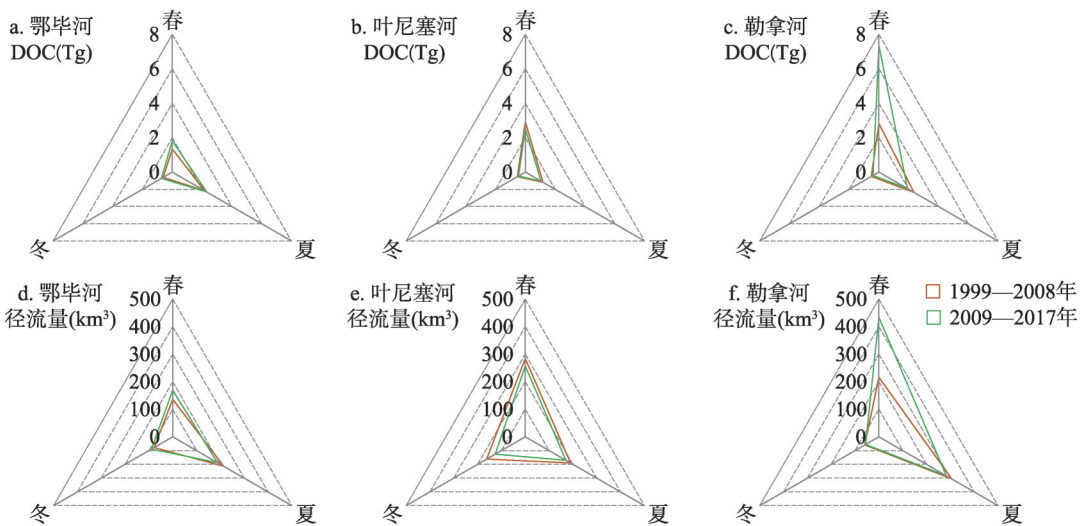


图 6 2004—2017 年西伯利亚北极河流径流量与有机碳输出浓度的关系
Fig. 6 Relationship between runoff and organic carbon output of Arctic rivers in Siberia from 2004 to 2017



注：1999—2008 年数据来自文献[9]。

图 7 1999—2008 年及 2009—2017 年西伯利亚北极河流年均径流量及 DOC 输出
Fig. 7 Annual runoff and DOC output of Arctic rivers in Siberia in 1999–2008 and 2009–2017

DOC输出总量表现为相同趋势(图7d);相比之下,叶尼塞河2009—2017年间河流径流有所减少,春季占比相对较多(图7b),河流DOC输出总量不仅同步减少,但冬季河流径流量减少更为明显(图7e);勒拿河春季的河流径流量和DOC输出都表现为显著的增长,但夏季河流DOC输出随径流量减少而降低,冬季占比最低(图7c、7f)。因此,各流域有机碳输出的年际及季节性特征不同,但同一流域的河流有机碳输出与径流特征却表现出较为一致的趋势。

5.2 冻融过程

西伯利亚地区广泛发育的多年冻土不仅储存大量有机碳^[46],也是北极淡水及海洋生态系统中有机碳的重要来源^[47]。Wild等通过研究西伯利亚河流2003—2013年的高时间分辨率碳同位素记录,发现西伯利亚河流总有机碳(TOC)的(17±8)%来源于多年冻土—泥炭层^[5]。而多年冻土的存在,限制了径流对地表剥蚀作用的同时^[7],也阻碍了DOC的深层迁移,使其在土壤及地表水体中富集^[48]。

随着全球气候变暖,多年冻土退化,活动层厚度加深,长期储存在多年冻土中的有机碳大量释放,并部分随河流径流输出至北冰洋^[71]。河流径流量随流域内多年冻土的覆盖率增高而非线性增大,多年冻土覆盖率对河流径流的影响甚至远超过降水量^[14]。因此高纬度多年冻土的融化不仅影响河流径流过程^[29],也影响河流有机碳输出^[49-50]。Fabre等研究表明,不同类型多年冻土对河流有机碳输出有着不同程度的影响,且对不同类型有机碳而言,起主导作用的多年冻土类型有所不同^[7]。例如,河流POC输出主要受控于孤立多年冻土,而不连续多年冻土的贡献率相对较低,仅为4.2%。根据模型预测,到2050年北极地区的多年冻土面积将减少13%~28%^[51]。因此,深入研究多年冻土区的有机碳来源及运输路径,对判断气候变化对多年冻土及河流有机碳的影响具有重要意义。

5.3 人类活动

人类活动对北极地区环境的影响包括人类的资源利用和污染排放^[38]。水坝建设、水库调节和其他人类活动导致的河流径流模式变化^[14,31],间接影响着河流有机碳输出等。

西伯利亚3大流域中,鄂毕河流域人口密度最大(表1),社会经济发展程度最高,该流域河水中溶解无机氮(DIN)和总溶解磷(TDP)含量明显较高^[9],且与其他河流不同,鄂毕河径流量与有机碳浓度之间不具有明显的线性关系(图6)。

此外,Raymond等发现,尽管北极河流有机碳随径流输出具有相似的季节性特征,但鄂毕河流域的径流及有机碳输出季节性波动相对较弱,极有可能是流域上游的水坝及湖泊影响了河流的天然径流过程^[10]。而在对2004—2017年三大流域的径流研究中,也发现了同样的特征(图2)。Yang等证实,在鄂毕河流域上游地区,农业和工业用水以及为削减夏季洪峰的水库人为调节使夏季径流明显减少,而冬季放水发电又导致鄂毕河上游冬季径流增加^[21]。

同时,在频繁进行核武器试验的20世纪50年代,流域内的大气CO₂浓度达到高峰,同时期流域内的河流输出有机碳中¹⁴C也相对富集^[38]。因此,相对于气候因素,人类活动对区域碳循环的影响可能更为重要和直接^[21]。

5.4 其他要素

有研究表明,气候变暖不是影响河流有机碳输出的唯一控制因素^[52]。Vaks等认为古地理环境、夏季日照强度、北冰洋海面温度及海冰等均可对多年冻土分布带来影响,进而影响流域的有机碳输出及储存条件^[52];Semiletov等通过研究北冰洋淡水水量平衡发现,勒拿河流域径流的季节性变化与净降水量的变化趋势相同^[53],Callaghan等的研究发现,北极陆地径流输入主要是融雪径流^[54],且受气温及融雪过程的影响明显,而径流与

河流有机碳（尤其是DOC）输出特征相对一致，因此温度和降水也是影响北极河流有机碳输出的重要因素；此外，由于河流有机碳的搬运受到地表及地下不同环境要素影响，部分有机碳（约10%~50%的POC和3%~35%的DOC）由于在搬运过程中不断发生矿化、降解而处于不稳定状态，甚至发生POC与DOC间的相互转化^[55]，影响着河流有机碳的输出；同时，北极河流有机碳还与流域土壤有机碳含量直接相关^[56]，也明显受到地形坡度等的控制作用，例如，坡度通过影响地表径流的展布特征、与土壤接触范围及停留时间，决定着冲刷剥蚀和淋滤过程，进而影响径流水体中DOC与POC的浓度^[57]。

综上，西伯利亚北极河流有机碳输出的时空特征复杂，北冰洋海冰、夏季日照强度、土壤有机碳含量及流域气温、降水、坡度、水动力强度等各流域沉积环境特征均可对河流有机碳输出过程产生影响^[1, 52]。

6 结论

西伯利亚北极河流有机碳输出是全球碳循环的重要一环，且间接反映各环境要素对全球气候变暖的响应。研究全球变暖背景下的北极河流有机碳输出，有利于揭示其与北极环境变化的关系，增强对北极地区碳循环的认识，为科学应对气候变暖提供依据。

鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河流域的有机碳输出特征明显不同且具有季节性特征，主要受气候、径流过程、冻融过程及人类活动等环境要素的影响。春、夏两季为河流有机碳输出的主要时期，而不同河流有机碳输出的季节特征存在差异。随着气候变暖，三大河流DOC输出与径流变化呈显著正相关，同时，因多年冻土类型和发育程度不同对河流有机碳输出的影响有所差异。此外，与北极气温、降水等气象要素不同，河流有机碳数据的获取不仅受地域限制，还由于高纬度河流的冬季冻结，导致数据获取在时间上的局限性。因此，河流有机碳输出在时间和空间上具有极强的变异性，进而取样时间和地点对研究结果至关重要，西伯利亚河流有机碳输出的研究仍需更多科学数据的支撑和更为深入的量化表征。

当然，已有诸多研究证实，西伯利亚北极河流有机碳输出随气候变暖而不断变化。因此，在分析北极河流有机碳输出的同时，需加深对河流有机碳与多年冻土、径流、植被等各环境要素的定量关系分析，为气候变暖条件下北极地区的资源合理利用及环境保护提供科学评价及建议。

致谢：中国科学院地理科学与资源研究所朱秉启研究员在本文修改与完善过程中所给予的宝贵建议。

参考文献(References)

- [1] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 23-41.
- [2] Stuecker M F, Bitz C M, Armour K C, et al. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. *Nature Climate Change*, 2018, 8(12): 1076-1081.
- [3] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334-1337.
- [4] Turetsky M R, Abbott B W, Jones M C, et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 2020, 13(2): 138-143.
- [5] Wild B, Andersson A, Bröder L, et al. Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost. *PNAS*, 2019, 116(21): 10280-10285.
- [6] Kutscher L, Mörrh C M, Porcelli D, et al. Spatial variation in concentration and sources of organic carbon in the Lena River, Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(8): 1999-2016.
- [7] Fabre C, Sauvage S, Tananaev N, et al. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The

- case of the Yenisei River basin. *Water Research*, 2019, 158: 118-135.
- [8] Schlesinger W H, Melack J M. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus*, 2016, 33(4): 172-187.
- [9] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. *Estuaries and Coasts*, 2012, 35(2): 369-382.
- [10] Raymond P A, McClelland J W, Holmes R M, et al. 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): GB4011. DOI: 10.1029/2007GB002934.
- [11] Manizza M, Follows M J, Dutkiewicz S, et al. Modeling transport and fate of riverine dissolved organic carbon in the Arctic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(4): GB4006. DOI: 10.1029/2008GB003396.
- [12] Wang Ping, Wang Tianye, Wang Guan, et al. Spatial distribution and potential exploration of water resources in Siberia. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2186-2195. [王平, 王田野, 王冠, 等. 西伯利亚淡水资源格局与合作开发潜力分析. *资源科学*, 2018, 40(11): 2186-2195.]
- [13] Teufel B, Sushama L. Abrupt changes across the Arctic permafrost region endanger northern development. *Nature Climate Change*, 2019, 9(11): 858-862.
- [14] Song C L, Wang G X, Mao T X, et al. Linkage between permafrost distribution and river runoff changes across the Arctic and the Tibetan Plateau. *Science China (Earth Sciences)*, 2020, 63(2): 292-302.
- [15] Murphy M J, Porcelli D, Strandmann P, et al. Tracing silicate weathering processes in the permafrost-dominated Lena River watershed using lithium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 245: 154-171.
- [16] Menard H W, Smith S M. Hypsometry of ocean basin provinces. *Journal of Geophysical Research*, 1966, 71(18): 4305-4325.
- [17] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, 94(C10): 14485-14498.
- [18] Prowse T, Alfredsen K, Beltaos S, et al. Arctic freshwater ice and its climatic role. *AMBIO*, 2011, 40(Suppl.1): 46-52.
- [19] Carmack E C, Yamamoto-Kawai M, Haine T W N, et al. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 675-717.
- [20] Obu J, Westermann S, Bartsch A, et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 299-316.
- [21] Yang D Q, Ye B S, Shiklomanov A. Discharge characteristics and changes over the Ob river watershed in Siberia. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(4): 595-610.
- [22] Chadburn S E, Burke E J, Cox P M, et al. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 2017, 7(5): 340-344.
- [23] Grabs W E, Portmann F, Couet T. Discharge observation networks in arctic regions: Computation of the river runoff into the Arctic Ocean, its seasonality and variability//Lewis E L, Jones E P, Lemke P, et al. *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000.
- [24] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 1999, 23(2): 132-154.
- [25] Alexandrov G A, Brovkin V A, Kleinen T. The influence of climate on peatland extent in Western Siberia since the Last Glacial Maximum. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24784. DOI: 10.1038/srep24784.
- [26] Dynesius M, Nilsson C J S. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 1994, 266(5186): 753-762.
- [27] Amon R M W, Rinehart A J, Duan S, et al. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2012, 94: 217-237.
- [28] Hindshaw R S, Teisserenc R, Dantec T L, et al. Seasonal change of geochemical sources and processes in the Yenisei River: A Sr, Mg and Li isotope study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 255: 222-236.
- [29] McClelland W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D18): D18102. DOI: 10.1029/2004JD004583.
- [30] Fedorov A N, Ivanova R N, Park H, et al. Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia. *Polar Science*, 2014, 8(2): 114-128.
- [31] Ye B S, Yang D Q, Kane D L. Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations. *Water Resources Research*, 2003, 39(7): 1200. DOI: 10.1029/2003WR001991.
- [32] Durand F, Piccuch C G, Becker M, et al. Impact of continental freshwater runoff on coastal sea level. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(6): 1437-1466.

- [33] Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, 520 (7546): 171-179.
- [34] An Zhihong, Sun Ziyong, Hu Yalu, et al. Export of dissolved organic carbon in streams draining permafrost-dominated areas: A review. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(1): 204-211. [安志宏, 孙自永, 胡雅璐, 等. 多年冻土区河流溶解性有机碳输出的研究进展. *地质科技情报*, 2018, 37(1): 204-211.]
- [35] Cooper L W, Benner R, McClelland J W, et al. Linkages among runoff, dissolved organic carbon, and the stable oxygen isotope composition of seawater and other water mass indicators in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2005, 110(G2): G02013. DOI: 10.1029/2005JG000031.
- [36] Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2009, 37(1): 47-66.
- [37] McClelland J W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Particulate organic carbon and nitrogen export from major Arctic rivers. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(5): 629-643.
- [38] Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, et al. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GB0A08. DOI: 10.1029/2009GB003587.
- [39] Dittmar T, Kattner G. The biogeochemistry of the river and shelf ecosystem of the Arctic Ocean: A review. *Marine Chemistry*, 2003, 83(3-4): 103-120.
- [40] Lobbes J M, Fitznar H P, Kattner G. Biogeochemical characteristics of dissolved and particulate organic matter in Russian rivers entering the Arctic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(17): 2973-2983.
- [41] Striegl R G, Dornblaser M M, Aiken G R, et al. Carbon export and cycling by the Yukon, Tanana, and Porcupine rivers, Alaska, 2001-2005. *Water Resources Research*, 2007, 43(2): W02411. DOI: 10.1029/2006WR005201.
- [42] Mu C C, Zhang F, Chen X, et al. Carbon and mercury export from the Arctic rivers and response to permafrost degradation. *Water Research*, 2019, 161: 54-60.
- [43] Schuster P F, Striegl R G, Aiken G R, et al. Mercury export from the Yukon river basin and potential response to a changing climate. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9262-9267.
- [44] Prokushkin A S, Pokrovsky O S, Korets M A, et al. Sources of dissolved organic carbon in rivers of the Yenisei River basin. *Doklady Earth Sciences*, 2018, 480(2): 763-766.
- [45] Ma X L, Liu G M, Wu X D, et al. Influence of land cover on riverine dissolved organic carbon concentrations and export in the Three Rivers Headwater Region of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 314-322.
- [46] Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 2014, 11(23): 6573-6593.
- [47] MacDonald R W, Harner T, Fyfe J. Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environment*, 2005, 342(1-3): 5-86.
- [48] Frey K E, McClelland J W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. *Hydrological Processes*, 2009, 23(1): 169-182.
- [49] Schuster P F, Schaefer K M, Aiken G R, et al. Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(3): 1463-1471.
- [50] Rydberg J, Klaminder J, Rosén P, et al. Climate driven release of carbon and mercury from permafrost mires increases mercury loading to sub-arctic lakes. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4778-4783.
- [51] Wang Tianye. Assess the spatial distribution of permafrost and its changes under the scenario of climatic warming on the Qinghai-Tibet Plateau and the Mongolian Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [王田野. 气候变暖背景下青藏高原和蒙古高原多年冻土分布及变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.]
- [52] Vaks A, Mason A J, Breitenbach S F M, et al. Palaeoclimate evidence of vulnerable permafrost during times of low sea ice. *Nature*, 2020, 577(7789): 221-225.
- [53] Shiklomanov I A, Shiklomanov A I, Lammers R B, et al. *The Dynamics of River Water Inflow to the Arctic Ocean*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000.
- [54] Callaghan T V, Johansson M, Key J, et al. Feedbacks and interactions: From the arctic cryosphere to the climate system. *AMBIO*, 2011, 40(1): 75-86.
- [55] Holmes R M, McClelland J W, Raymond P A, et al. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(3): L03402. DOI: 10.1029/2007GL032837.
- [56] Degens E T, Kempe S, Richey J E. *Biogeochemistry of Major World Rivers*. Chichester: John Wiley and Sons, 1991.
- [57] Clair T A, Pollock T L, Ehrman J M. Exports of carbon and nitrogen from river basins in Canada's Atlantic Provinces. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(4): 441-450.

Characteristic analysis of organic carbon output and its affecting factors of Arctic rivers in Siberia

LIU Shiqi¹, WANG Ping^{1,2}, WANG Tianye³, HUANG Qiwei^{1,2}, YU Jingjie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As an important component of Arctic carbon cycle, riverine organic carbon export is very sensitive to climate change. In order to analyze the organic carbon output from 2004 to 2017 of Ob, Yenisei and Lena rivers in Siberia of Russia, river discharge and organic carbon data from the ArcticGRO (<https://arcticgreativers.org/>) were used in this study through mathematical statistical analysis and other methods. Results showed that the total annual organic carbon output of these three rivers is about 23 Tg, among which the dissolved organic carbon (DOC) output is approximately 18.55 Tg, more than half of the total in Arctic regions, and nearly 4 times of particulate organic carbon (POC) output. The output of annual DOC from 2009 to 2017 is significantly different from that of 1999-2008, DOC output of Ob River increased by 18% annually, Lena River increased by almost 70%, while Yenisei River dropped by 13%. The organic carbon output in spring and summer reached more than 85% of the whole year, with an output peak in spring, but the outputs of Ob River in spring and summer were almost the same. The organic carbon output characteristics of these river basins are different in seasonality, which was mainly affected by runoff, permafrost and human activities. Among them, the total DOC output has a significant positive correlation with runoff variation in terms of inter-annual and seasonal changes. In general, DOC concentration becomes larger as the discharge increases. Permafrost also has notable influence on river DOC and POC due to various types of distribution. Therefore, the study of the characteristics and influencing factors of the organic carbon output of Arctic rivers under climate change is conducive to in-depth understanding of the comprehensive response of the organic carbon output of Arctic rivers to climate and environmental changes, which lays a foundation for revealing the process of the Arctic carbon cycle under climate change.

Keywords: Arctic river; Siberia; organic carbon; runoff; permafrost