

DOI: 10.5846/stxb202205301521

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.

Wang W Q, Cai Y S, Xiao X, Duan L L. Characteristics of stream dissolved organic carbon in the Laoyeling permafrost watershed during spring freeze-thaw period. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6716-6727.

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

王雯倩^{1,2}, 蔡玉山^{1,2}, 肖湘^{1,2}, 段亮亮^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

2 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

摘要: 溶解性有机碳(DOC)的输移过程是流域碳循环中重要的组成部分, 对全球碳循环产生重要影响。以大兴安岭多年冻土区的典型森林小流域—老爷岭流域为研究对象, 获得 2021 年 4 月 9 日到 6 月 30 日冻融期降雨量、气温、土温等气象数据及逐日径流量、径流 DOC 浓度, 计算了冻融循环期(4 月 9 日—28 日)和融化期(4 月 29 日—6 月 30 日)流域径流 DOC 的输出通量, 揭示了径流 DOC 浓度及输出通量的影响因素。结果表明: (1) 研究时段内, 老爷岭流域径流 DOC 浓度变化范围为 3.88—33.75 mg/L, 流域上游的径流 DOC 浓度变化趋势与下游基本一致, DOC 浓度随着温度的升高呈现下降趋势, 4 月份平均径流 DOC 浓度明显高于 5、6 月份。(2) 研究时段内流域径流 DOC 总输出通量为 3215.48 kg/km², 其中 5 月径流 DOC 输出通量高于 4、6 月份。径流量与径流 DOC 输出通量存在显著正相关关系 ($P < 0.05$), 是流域 DOC 输出通量的主导因素。(3) 研究时段内流域 DOC 浓度与平均气温呈极显著负相关 ($R^2 = 0.5048, P < 0.001$); 降水样品中的 DOC 浓度变化范围为 1.06—9.42 mg/L, 显著低于径流 DOC 浓度; 土壤中 DOC 含量变化趋势与径流 DOC 变化趋势一致, 0—10 cm、10—20 cm 土壤平均 DOC 浓度范围为 77.57—133.99 mg/L。(4) 冻融循环期平均日径流 DOC 浓度 (24.02 mg/L) 显著 ($P < 0.05$) 高于融化期 (14.64 mg/L), 而融化期平均日 DOC 输出通量 (48.02 kg/km²) 是冻融循环期 (9.52 kg/km²) 的 5 倍。研究结果揭示了大兴安岭多年冻土小流域春季冻融期径流 DOC 的输移特征及其影响因素, 对理解多年冻土区碳循环有重要意义。

关键词: 多年冻土区; 溶解性有机碳; 小流域; 径流 DOC 通量; 冻融期

Characteristics of stream dissolved organic carbon in the Laoyeling permafrost watershed during spring freeze-thaw period

WANG Wenqian^{1,2}, CAI Yushan^{1,2}, XIAO Xiang^{1,2}, DUAN Liangliang^{1,2,*}

1 School of forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, 26 Hexing Road, Harbin 150040, China

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) is the largest organic carbon pool in natural water body. The transport process of DOC is an important part of the carbon cycle in watersheds, which has significant impacts on the global carbon cycle. In order to investigate the characteristics of stream DOC flux and its influencing factors during the spring freeze-thaw, the rainfall, air temperature, soil temperature, daily runoff and daily stream DOC concentrations in a permafrost small watershed of Laoyeling in the Da Hinggan mountains were observed during the freeze-thaw period from April 9 to June 30 in 2021. The stream DOC flux was calculated from the freeze-thaw cycle period (April 9—28) and the thaw period (April 29—June 30), respectively. The results showed that: (1) during the study period, the stream DOC concentration in the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901018); 黑龙江省自然科学基金 (LH2020D003); 黑龙江省博士后基金 (LBH-Z20106)

收稿日期: 2022-05-30; **网络出版日期:** 2023-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liangliang.duan@nefu.edu.cn

study watershed varied in the range of 3.88—33.75 mg/L. The change trend of stream DOC concentration in the upper stream is consistent with that in the downstream of the study watershed. The average stream DOC concentration was significantly higher in April than that in May and June, and showed a decreasing trend associated with the increase of air temperature. (2) The total stream DOC flux was 3215.48 kg/km² in the watershed during the study period, of which the stream DOC flux in May was higher than that in April and June. The stream DOC flux showed a significantly positive correlation ($P < 0.05$) with the runoff, which was the dominant factor controlling flux of stream DOC in the study watershed. (3) During the study period, stream DOC concentration was significantly negatively correlated with air temperature ($R^2 = 0.5048, P < 0.001$). The variation range of DOC concentration in precipitation samples was 1.06—9.42 mg/L, which was much higher than that of stream. The dynamic of DOC concentration in soils was consistent with stream DOC. The average DOC concentration in 0—10 cm and 10—20 cm soil ranged from 77.57 to 133.99 mg/L. (4) The mean daily stream DOC concentration was significantly ($P < 0.05$) higher during freeze-thaw cycle (24.02 mg/L) than that during thawing period (14.64 mg/L), while the mean daily DOC flux during thawing period (48.02 kg/km²) was five times higher than that during freeze-thaw cycle period (9.52 kg/km²). The results reveal the transport characteristics of stream DOC and its influencing factors during the spring freeze-thaw period in a small permafrost watershed in Da Hinggan Mountains, which is of great significance for understanding the carbon cycle in the permafrost region.

Key Words: permafrost zone; dissolved organic carbon; small watershed; stream DOC flux; freeze-thaw period

溶解性有机碳(DOC)是水体中最大的有机碳库,是全球碳循环中最重要、最敏感的指标^[1],也是水生生态系统的一个重要组成部分^[2],在全球水体循环中起重要的作用。多年冻土是指存在时间为两年及以上、温度低于 0℃ 的岩石或土壤^[3],多分布于高纬度和高海拔地区,对区域水分、土壤和植被之间的生物地球化学循环有重要影响。Sato 等^[4]在西伯利亚的研究指出冻土活动层厚度越大,土壤持水能力越强,进而可以提高植被生产力。Young 等^[5]在加拿大的研究发现,气候变暖条件下冻融可增加水分入渗,抬升地下水位,促进植被生长。同时,多年冻土是全球重要的有机碳库,其有机碳储量达 1330—1580 Pg^[6],储量远高于大气圈碳库,约为大气碳总量的 2 倍^[7]。高纬度多年冻土赋存条件脆弱,对气候变化响应敏感,气候变暖正在导致冻土退化,活动层厚度逐年增加,分布连续性发生改变,冻土面积减少^[8]。随着多年冻土活动层的季节性消融,每年都有大量的有机碳从冻土中释放出来,并随水流向河流迁移^[9],为河流提供丰富的有机碳源,使其 DOC 浓度远高于其他地区的河流^[10],不仅影响河流生态系统的结构和功能,还对全球碳循环有着重要的作用。

DOC 在流域的输移过程是全球碳循环的重要组成部分,主要受到气候变化、降水、温湿度等因素影响。例如,青藏高原高山山区的研究表明,随着温度的升高,冻土中的有机碳会释放出来^[11—12],并以 DOC 的形式随地下水迁移到地表河网中^[13],这导致高纬度和高海拔山区溪流中的 DOC 浓度增加。同时,降水是影响径流 DOC 浓度及输出的重要因素,降水的“冲刷效应”会增加径流 DOC 的浓度及 DOC 的输出^[14]。郑清等^[15]在千岛湖研究发现,伴随强降雨的开始,DOC 浓度呈现上升趋势;Grace 等^[16]在对马尔湖水体 DOC 的研究发现,降雨对湖泊水体 DOC 浓度的影响显著,雨季水体 DOC 浓度较高;孙会国等^[17]对西江、陶澍等^[18]对伊春河的研究同样得出了相同的研究结果。

在多年冻土区,多年冻土区活动层在冻融期频繁的冻融循环,会对流域内水流路径的深度及滞留时间造成显著影响^[19],进而影响溪流中 DOC 浓度。我国对于多年冻土区水体 DOC 的研究多集中于青藏高原地区^[20]。例如,Song 等^[21]在青海青藏高原的研究发现冻融循环影响土壤侧向碳输出,进而影响河流碳输出;Gao 等^[22]在对青藏高原黑河流域的研究发现,DOC 浓度具有明显季节性特征,春末、夏季 DOC 值较高。Mu 等^[23]在青藏高原北部的研究发现,随着解冻深度的增加,流域 DOC 浓度表现出下降趋势。然而,我国东北大、小兴安岭丘陵山地分布着约为 38 万平方公里的多年冻土,该地区与西部高山高原区在气候上差异很大,尤其是年均气温和降水量,这些差异势必给东北高纬区和西部高山高原区冻土特征带来差异^[24]。国际上对

多年冻土区水体 DOC 的研究比较全面,例如,Payandi-Rolland^[25] 等对欧洲东北部多年冻土泥炭地的研究发现,冻融循环中,泥炭地表水中 DOC 浓度略有增加,只出现了较小的变化,稳定性高。Frey 等^[10] 对西伯利亚河流的研究发现,由于多年冻土退化引起的活动层增厚使水文连通性增强,从而使 DOC 输出通量沿着纬度样带增加。然而,在研究河流 DOC 浓度与输出时,研究者的取样多为随机取样且间隔时间较长,样品偶然性较大,增加了以往研究结果的不确定性^[26—27]。

大兴安岭多年冻土区是我国境内唯一寒温带明亮针叶林区^[28],也是欧亚大陆高纬冻土区的南缘。冻土赋存条件脆弱,热稳定性较差,对气候变化响应敏感。近几十年的研究表明,该地区的多年冻土经历了显著的退化过程^[29]。同时,也有研究表明多年冻土活性层季节性冻融循环显著影响着径流路径和 DOC 化学特征^[30]。土壤中的 DOC 由于冻融过程以及壤中流作用,向溪流中迁移,改变水体中的有机碳含量。所以,在多年冻土持续退化的背景下,季节性冻融过程中河流 DOC 输出通量的变化特征及其影响因素成为该地区亟待解决的科学问题。本研究以大兴安岭多年冻土区的老爷岭小流域为研究对象,利用高频率(逐日)采样,同时结合下垫面和多年冻土活动层冻融特征,研究春季冻融期径流 DOC 的浓度和输出通量及其与径流量、降雨及多年冻土活动层冻融变化的关系,研究结果对理解高纬度多年冻土区在全球气候变暖影响下碳循环变化特征及其机制具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究流域选择在黑龙江漠河森林生态系统国家定位观测研究站所在的漠河林场范围内的老爷岭小流域(图1)(53°23′53″—53°27′30″ N, 122°14′27″—122°21′2″ E),流域面积 21.86 km²,海拔高度在 302—696 m 之间,平均海拔 533 m。其上游高差小,地势平坦的河谷湿地比例较大;下游的坡地面积较大,河岸谷地湿地比例小。地带性植被类型为寒温带明亮针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为优势建群种,其他乔木有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana* Dode)等。多年平均气温为-3.6℃,最高温 28.1℃,最低温-46.7℃,年均气温年较差为 48.2℃。多年平均降水量为 484 mm,降雨主要集中在 6—9 月份,全年无霜期约 90 d。其地带性土壤为棕色针叶林土,坡面土壤厚度为 10—30 cm,沟谷

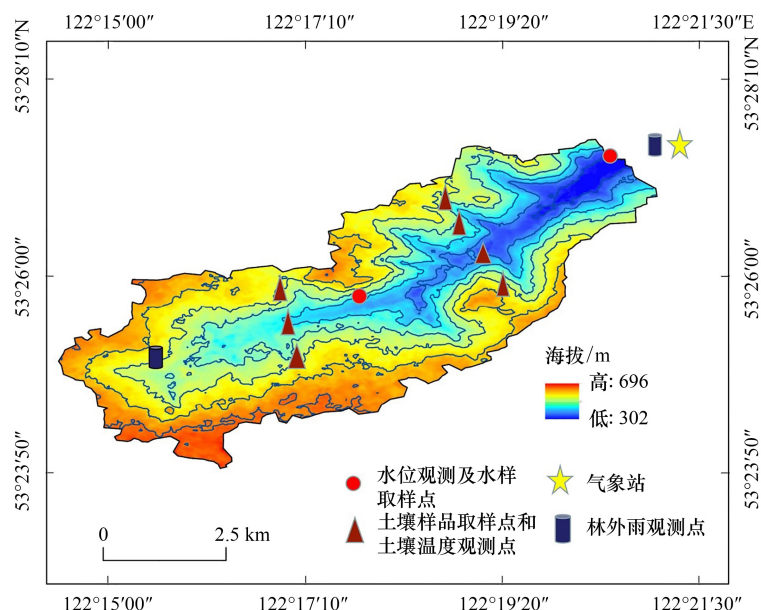


图1 老爷岭流域概况图

Fig.1 Overview of the Laoyeling River Basin Research Area

多为沼泽泥炭地,土壤厚度为 15—150 cm,并有多年的冻土存在。根据漠河生态站对多年冻土活动层的监测,活动层平均厚度在 1.0—1.5 m。

1.2 研究方法

1.2.1 地表径流量观测

在老爷岭小流域下游卡口处设置测流堰,宽度为 4.0 m。在此处布设水位计(Onset HOBO U24-1 型),记录时间间隔设为 0.5 h。观测期自 2021 年 4 月 9 日—2021 年 6 月 30 日,通过绘制水位—流量关系曲线,得到观测期内连续径流量数据。根据 0.5 h 连续流量数据计算得到逐日径流量,并根据流域的面积,将流量(m^3/s)数据转化为该流域的径流深(mm)数据。

1.2.2 水样收集

冬季由于气温降低,河水冻结,每年四月开始解冻。因此,流域下游取样期为 2021 年 4 月 9 日至 6 月 30 日,同期上游由于道路积雪,无法进入,所以上游取样期为 4 月 22 日至 6 月 30 日。上游采样点地处偏远,每天取样难以实现,所以将取样频率设置为下游每天取样,上游三天一取,河水的采集为定点采集。若有降雨事件发生,则将下游取样频率增加为每隔 6 h 取一次水样。

取样前,用河水将取样瓶冲洗三次,然后取满水样,盖好瓶盖,带回生态站保存好。每次取两组水样(每组三瓶计三次重复),一组用于测定 DOC 含量,另一组用于其他指标的测定,如 pH、电导率等。现场采集的样品立即带回生态站放入冰箱冷冻。在准备测试之前所有的样品都处于冷藏状态。在样品测试前,在室温条件下让其自然融化,然后立即测试相关指标。

DOC 浓度使用 Multi N/C 2100S 总有机碳分析仪测定,取三瓶水样测量的平均值作为河水样品 DOC 浓度。

1.2.3 土样收集

土壤样品的采集时间为一个月一次,采集地点分别在老爷岭流域的上游及中下游。上游在河流的河岸、阴坡和阳坡设定 3 个取样点;中下游在河流的河岸、河谷、阴坡、阳坡处设定 4 个取样点。每个取样点都按照枯落物(苔藓层)、腐殖质(草毡层)、土壤层分层取样,每层都装入对应的自封袋中,密封保存,带回生态站。枯落物和腐殖质层的样品称取 10 g,放入装有 50 ml 纯水的细口瓶中,之后放到振荡机上,振荡 5 h,静置 0.5 h。上清液过 0.45 μm 滤膜后,放入抽滤机中进行抽滤。将抽滤后的样品密封,放入冰箱冷藏保存,待测。土壤样品过 2 mm 筛,过筛后的样品,称取 10 g,烘箱烘干进行土壤含水率的测定;再称取 6 g 土壤置于离心管中,加 30 mL 去离子水(纯水),常温下振荡浸提 30 min,用高速离心机以 8000 r/min 离心 10 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,过滤后的样品密封冷藏保存,待测。在样品测试前,在室温条件下让其自然融化,然后立即测试样品的相关指标。

1.2.4 气象数据观测

大气温湿度、土壤温度和降水量来自漠河生态站内的标准气象场。同时,为了消除降水空间异质性,在流域上游高海拔处设置林外自计式降雨桶获得降雨数据。

在流域出口附近土壤安装土壤温度记录仪(Onset HOBO S-TMB),记录时间间隔为 1 h,分别监测 0 cm、5 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 深度处的土壤温度。

1.3 数据计算和处理

研究数据采用 SPSS 19.0 统计软件进行统计分析。采用差异性显著检验($\alpha = 0.05$)分析流域上下游以及不同时期(冻融循环期和融化期)径流 DOC 浓度、通量等差异,Pearson 相关分析方法分析径流 DOC 浓度、输出通量与各影响因素的相关性,图形采用 Origin 软件绘制。

流域 DOC 输出通量通过径流量和河水 DOC 浓度进行计算,流域日 DOC 输出通量计算公式如下:

$$F_{\text{DOC}} = (C \times Q) / A$$

式中, F_{DOC} 为输出通量(kg/km^2); C 为 DOC 浓度(mg/L); Q 为径流量(m^3/s); A 为流域面积(km^2)。

2 结果与分析

2.1 径流 DOC 浓度特征

在 2021 年 4 月 9 日到 6 月 30 日研究期间,老爷岭流域径流 DOC 浓度呈下降的趋势(图 2)。流域上游的径流 DOC 浓度变化趋势与下游基本一致,在研究期间呈逐渐下降趋势,变化范围为 3.26—33.88 mg/L,4 月 DOC 平均含量为 24.45 mg/L,5 月为 18.08 mg/L,6 月为 13.86 mg/L(表 1),研究期间的平均浓度为 18.80 mg/L。浓度最大值为 5 月 4 日,33.88 mg/L,最小值为 6 月 27 日,3.26 mg/L。

流域下游的 DOC 浓度的变化范围为 3.88—33.75 mg/L,4 月 DOC 平均含量为 23.98 mg/L,5 月为 16.94 mg/L,6 月为 11.66 mg/L(表 1),研究期间的平均浓度为 17.53 mg/L,最大值出现在 4 月 15 日,为 33.75 mg/L,最小值为 6 月 27 日,3.88 mg/L。

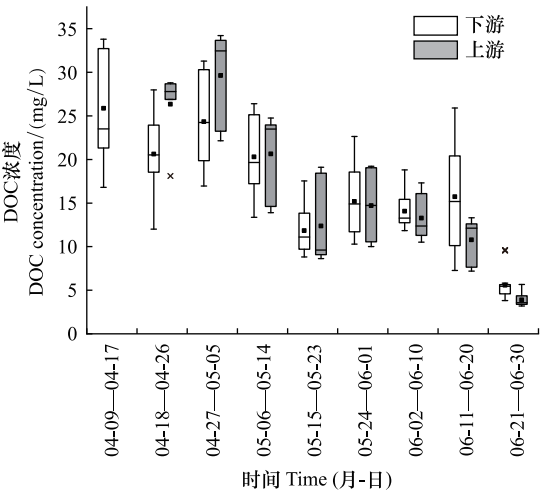


图 2 流域上下游溶解性有机碳(DOC)浓度
Fig. 2 Upstream and downstream dissolved organic carbon (DOC) concentrations in the basin

表 1 流域溶解性有机碳(DOC)浓度(平均值±标准差)

Table 1 Basin dissolved organic carbon (DOC) concentration (mean ± standard deviation)

月份 Month	上游 DOC Upstream DOC concentration/(mg/L)	下游 DOC Downstream DOC concentration/(mg/L)	月份 Month	上游 DOC Upstream DOC concentration/(mg/L)	下游 DOC Downstream DOC concentration/(mg/L)
4	24.45±1.92	23.98±0.13	6	13.86±0.39	11.66±0.28
5	18.08±0.37	16.94±0.30	平均值 Mean	18.80±0.59	17.53±0.24

DOC: Dissolved organic carbon

通过对流域上下游的差异性显著检验,发现两个采样点之间无显著性差异($P>0.05$)。但研究期间上游的月平均 DOC 浓度略高于下游,这可能是由于上游湿地面积占比大,湿地碳储量高,随径流向水体迁移,导致上游溪流中 DOC 浓度比下游高。

2.2 流域 DOC 输出通量特征

研究期间,流域 DOC 浓度、输出通量和径流量的变化如图 3 所示,流域 DOC 输出通量与 DOC 浓度和径流量的变化趋势一致。老爷岭流域的平均 DOC 浓度为 17.53 mg/L,DOC 浓度范围为 3.88—33.57 mg/L,DOC 的日平均通量为 38.74 kg/km²。在研究期间,DOC 输出通量表现出明显的月度变化(表 2),月平均输出通量先升高,在 5 月份达到最大值,然后略有下降趋势。老爷岭流域河水 DOC 输出通量集中在 5 月,占整个冻融期的 56.14%。此外研究期间 5 月份降水增多,这增加了河流径流和 DOC 浓度,进而进一步增加了 DOC 输出通量。

老爷岭流域的 DOC 输出通量与 DOC 浓度和径流量之间的相关性如图所示(图 4),DOC 输出通量与浓度呈线性正相关,相关性不显著($R^2=0.0368, P>0.05$),输出通量与径流量呈极显著正相关性($R^2=0.6779, P<0.001$)。说明径流量是流域 DOC 输出通量的主导因素。

2.3 温度和降雨与径流 DOC 通量的关系

降水和气温变化如图 5 所示。结果表明,从 2021 年

表 2 老爷岭流域冻融期径流量与溶解性有机碳(DOC)输出通量

Table 2 Runoff and dissolved organic carbon (DOC) output flux during the freeze-thaw period in the Laoyeling Basin

月份 Month	DOC 输出通量 DOC Runoff flux/ (kg/km ²)	径流量 Runoff/(m ³ /s)
4	242.5310	0.1066
5	1805.1775	0.7814
6	1167.7753	0.8287

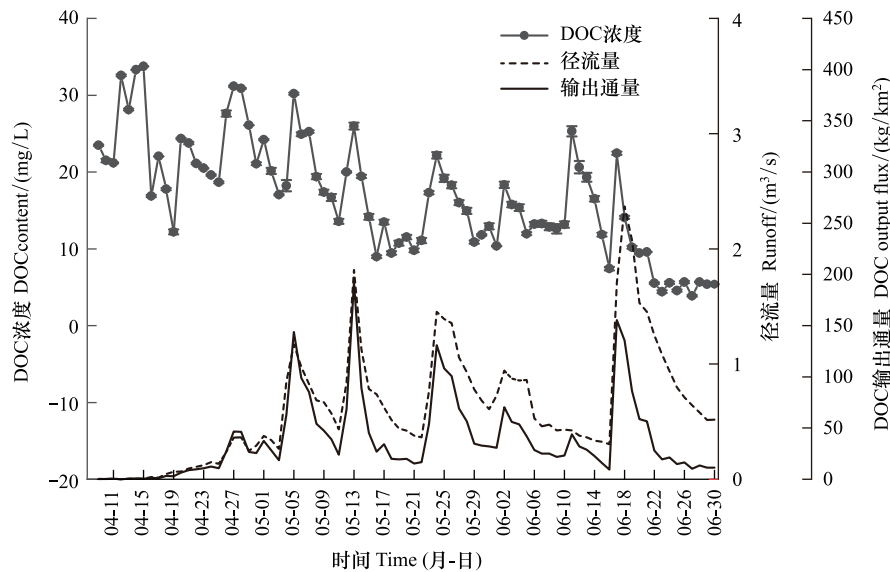


图3 溶解性有机碳(DOC)浓度、输出通量与径流量

Fig.3 Dissolved organic carbon (DOC) concentration, output flux and runoff

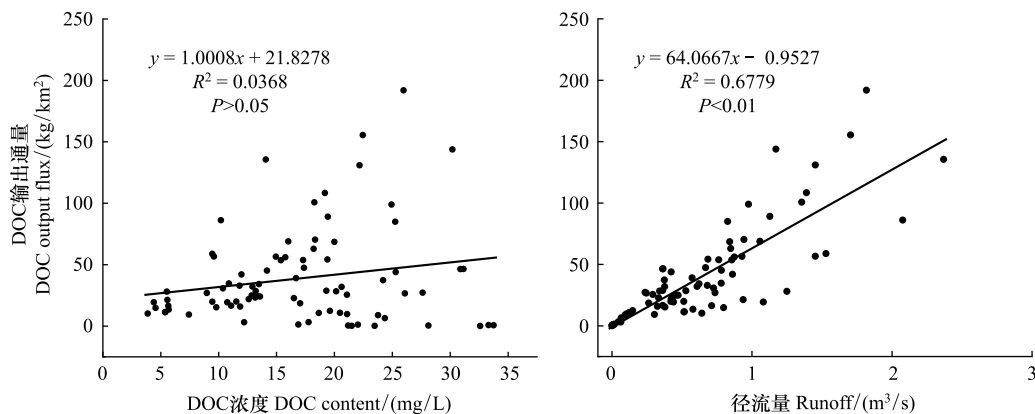


图4 溶解性有机碳(DOC)输出通量与DOC浓度、径流量的关系

Fig.4 Relationship between dissolved organic carbon (DOC) output flux and DOC concentration and runoff

4月9日至6月30日采样期间,最大降水量52.5 mm,期间无降水天数43 d。气温波动较大,最高气温23.59℃,最低气温-6.39℃,平均大气温度9.97℃。

老爷岭流域的日平均气温与径流DOC浓度和输出通量之间的相关性如图所示(图6),DOC浓度与平均气温呈极显著负相关($R^2=0.5048, P<0.001$),输出通量与气温无显著相关性($R^2=0.0489, P>0.05$)。

研究期间降水样品中的DOC浓度变化范围为1.06—9.42 mg/L,图7为降雨量与雨水中DOC浓度的关系,发现二者呈指数负相关($R^2=0.5458, P<0.05$),高降雨量能够导致低DOC浓度,说明降雨造成稀释效应,降雨量越大对应的稀释效应越强,DOC浓度越低。

为了研究降雨强度对径流DOC浓度及输出通量的影响,选择有降雨事件发生的时间进行分析,通过观察发现,在降雨发生时,径流DOC浓度有着明显的变化,表现出先升高后降低的趋势(图8)。DOC浓度峰值出现在5月24日,浓度为22.17 mg/L,与此同时流域径流量与DOC输出通量也达到了峰值,这种现象发生在最大降雨量(5月23日)之后的一天。此外通过计算发现DOC输出通量与降雨量呈显著正相关关系($R^2=0.379, P<0.01$)。

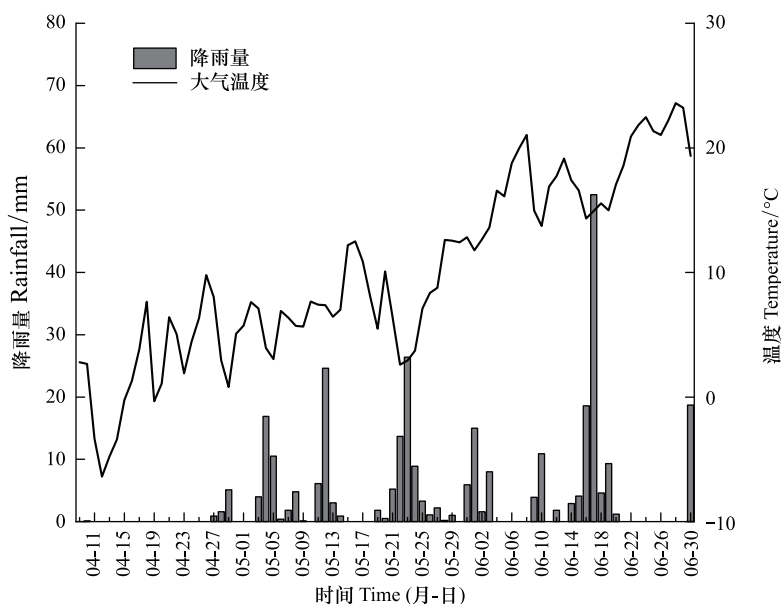


图5 降水量和气温变化

Fig.5 Rainfall and temperature changes

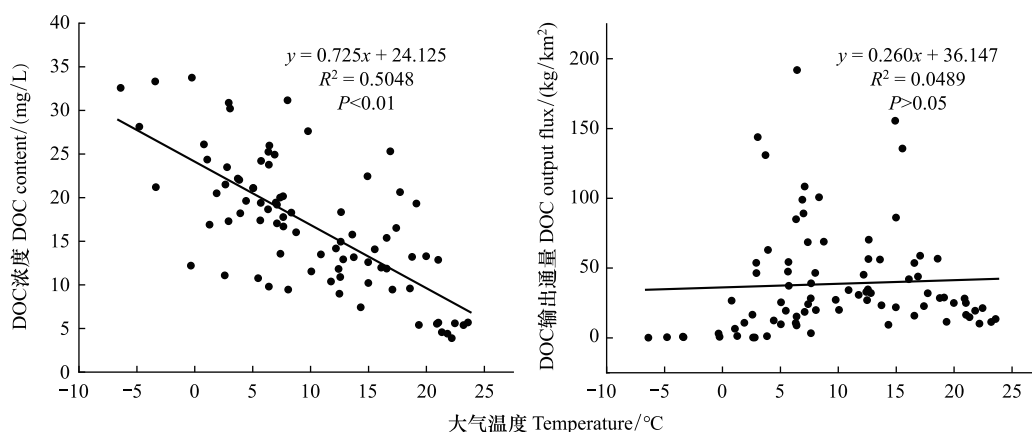


图6 溶解性有机碳(DOC)浓度、输出通量与气温的关系

Fig.6 Relationship between dissolved organic carbon (DOC) concentration, output flux and temperature

2.4 土壤与径流 DOC 浓度特征

为了研究土壤 DOC 与径流 DOC 之间的联系,取小流域河谷 0—10 cm、10—20 cm 土壤 DOC 与径流 DOC 进行研究(20 cm 以下土壤多为沙砾)。研究期间小流域 0—10 cm、10—20 cm 土壤 DOC 浓度变化如图 9 所示,可以看出 4 月份 DOC 浓度最高,0—10 cm、10—20 cm 土壤平均 DOC 浓度为 133.99 mg/L。这可能是因为冬季气温寒冷,土壤处于冻结状态,微生物细胞的分解和植物细根的死亡释放的 DOC 得以冷冻保存。春季气温上升,表层开始融化,土壤 DOC 随径流迁移到附近水体中,导致此时径流中较高 DOC 含量。到 5 月随着降水增多,微生物活动开始增加,使得土壤 DOC 浓度有所下降,为 77.57 mg/L。6 月份土壤 DOC 含量增加,浓度

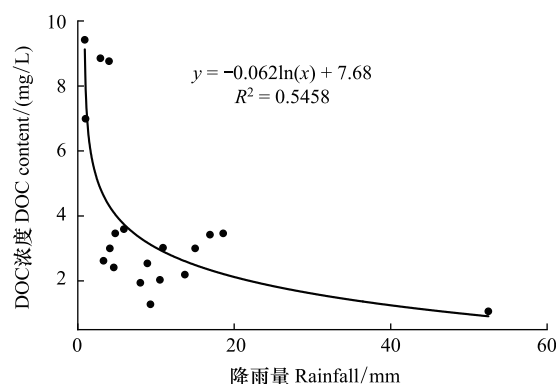


图7 降雨量与雨水中溶解性有机碳(DOC)浓度的关系

Fig.7 Relationship between rainfall and dissolved organic carbon (DOC) concentration in rain

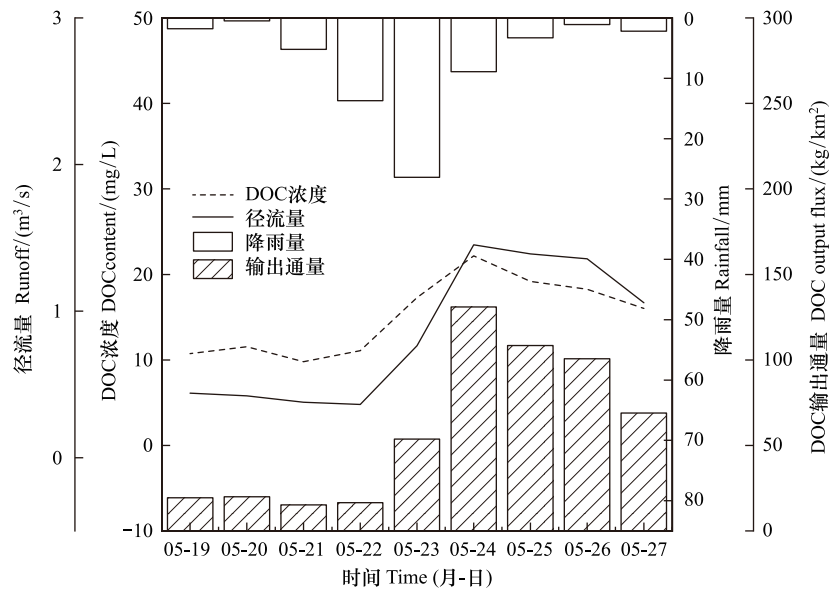


图8 降雨量、径流量、溶解性有机碳(DOC)浓度及输出通量

Fig.8 Rainfall, runoff, dissolved organic carbon (DOC) concentration and output flux

为 83.78 mg/L,但由于土壤融化深度的加深,DOC 流动路径、滞留时间变长,容易被矿化,以及微生物和植物对 DOC 的利用,进而导致径流 DOC 浓度下降。

2.5 活动层融化(土壤温湿度)与 DOC 输出通量的相关性

研究期间老爷岭不同土层(0、5、10、20、30、40 cm)的土壤温度和不同土层(10、20、30 cm)土壤湿度的动态变化如图 10 所示。以 40 cm 土层日平均温度达到 0℃ 为阈值,将取样期间划分为 2 个时期,分别为冻融循环期(4 月 9 日—4 月 28 日)和融化期(4 月 29 日—6 月 30 日)。为了揭示冻融(土壤温度)对径流 DOC 浓度和输出通量的影响,将不同时期的平均土壤温度与 DOC 浓度和输出通量做线性回归分析(图 11)发现,在冻融循环期土温与 DOC 输出通量呈极显著($P < 0.01$)正相关关系,而与 DOC 浓度没有显著关系。在融化期土壤温度与径流 DOC 浓度和输出通量均存在极显著($P < 0.01$)负相关关系。

为了消除降雨对 DOC 浓度和输出通量的影响,选取了两段无降雨事件发生时期(冻融循环期 4 月 19—25 日和融化期 6 月 23—29 日),进一步揭示不同时期土壤温度对径流 DOC 输出的影响(图 12)。可以看出两个时期径流中的 DOC 浓度都表现为下降趋势,且冻融循环期 DOC 浓度显著高于融化期,而融化期 DOC 输出通量高于冻融循环期。此外在冻融循环期,径流 DOC 浓度变化较大,径流量持续上升,输出通量主要受到浓度和径流量的共同影响;而融化期 DOC 浓度基本保持在稳定水平,输出通量与径流量均呈下降趋势,此时 DOC 输出通量主要受到径流量变化的影响。通过计算发现冻融循环期平均日径流 DOC 浓度(24.02 mg/L)为融化期(14.64 mg/L)的 1.6 倍,而融化期平均日 DOC 输出通量(48.02 kg/km²)约为冻融循环期(9.52 kg/km²)的 5 倍。

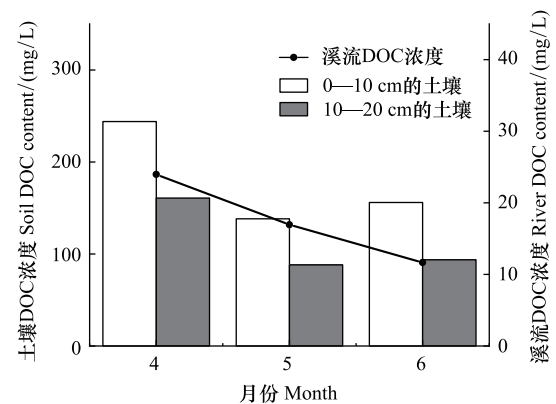


图9 浅层土壤与水体溶解性有机碳(DOC)的关系

Fig.9 Relationship between shallow soil and water dissolved organic carbon (DOC)

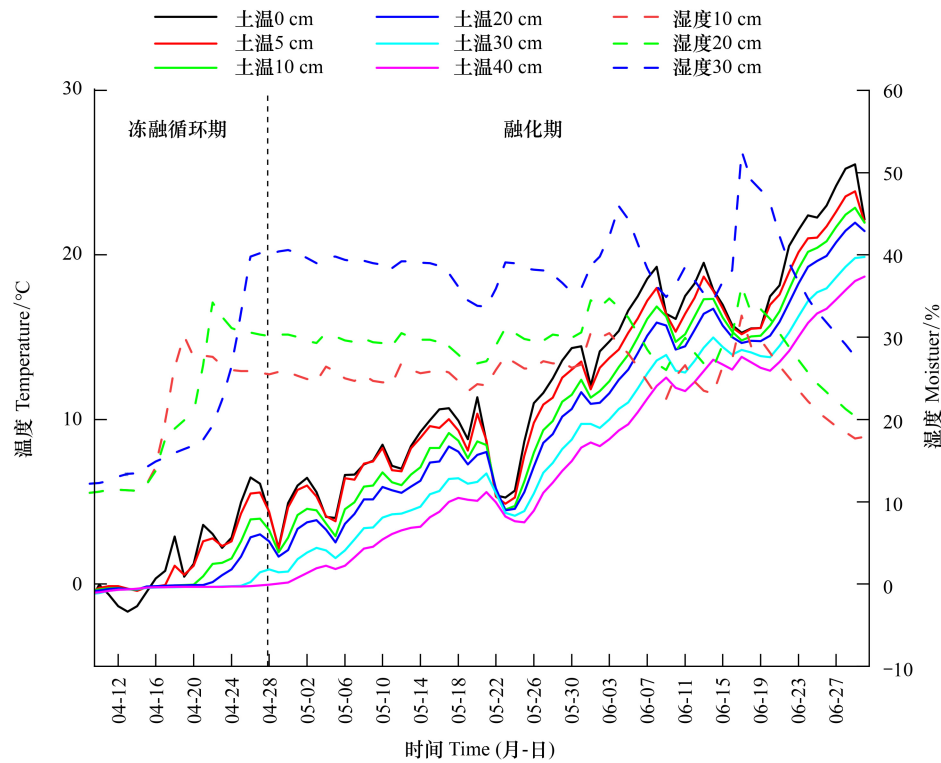


图 10 不同深度土壤温湿度
Fig.10 Soil temperature and humidity at different depths

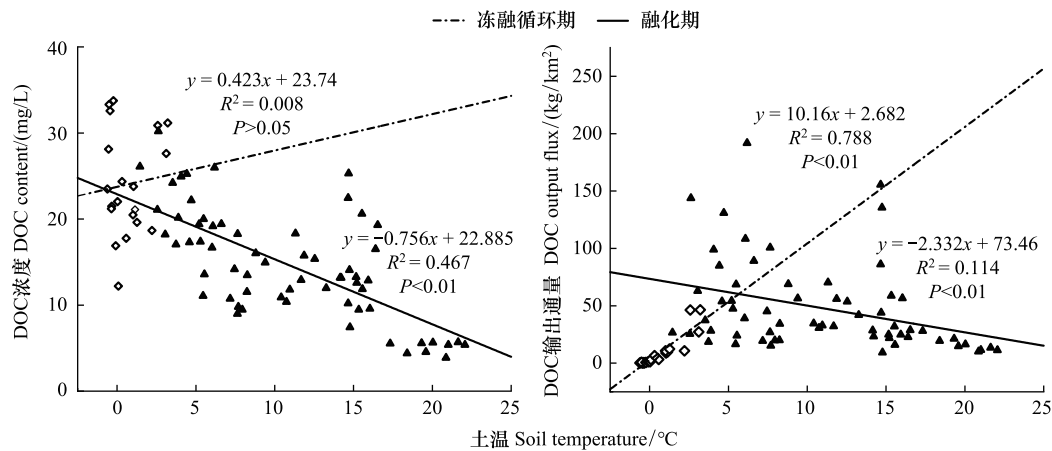


图 11 不同时期溶解性有机碳(DOC)浓度、输出通量与土壤温度的相关性
Fig.11 Correlation of dissolved organic carbon (DOC) concentration, output flux and soil temperature in different periods

3 讨论

3.1 老爷岭小流域径流 DOC 输出特征

结果表明,老爷岭流域春季冻融期溪流中 DOC 浓度变化差异较大,整体上表现为下降的趋势,4 月份径流 DOC 浓度明显高于 5、6 月份。这与 Zhu 等研究指出祁连山流域径流 DOC 浓度在春季较高的结果保持一致^[31]。径流 DOC 月输出通量在研究期间(4、5、6 月)分别为 242.5、1805.2、1167.8 kg/km²(表 2)。DOC 输出

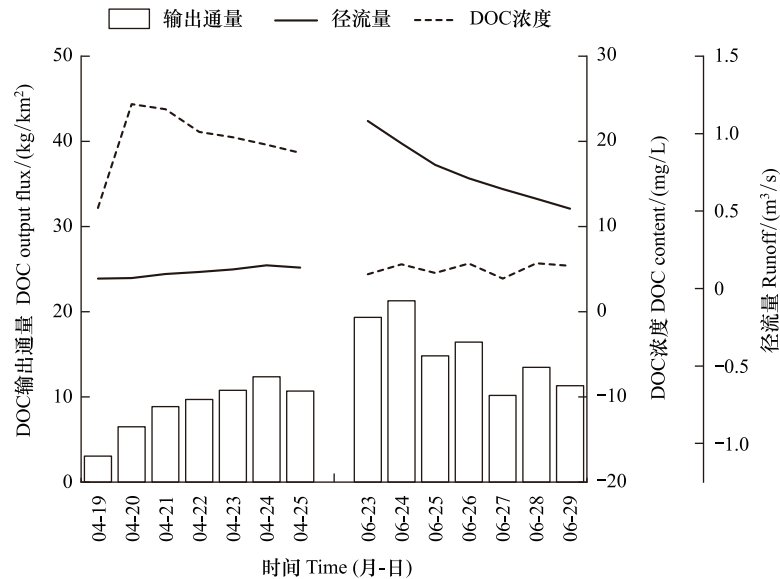


图 12 不同时期溶解性有机碳 (DOC) 浓度、输出通量与径流量

Fig.12 Dissolved organic carbon (DOC) concentration, output flux and runoff in different periods

通量在 5 月份最多, 占整个冻融期间输出通量的 56.14%。春季冻融期径流中 DOC 输出通量 5 月 > 6 月 > 4 月。研究结果与刘诗奇等^[32]在西伯利亚北极河流研究得到的河流大规模有机碳输出始于春末夏初, 并于 5—6 月期间达到峰值的结果保持一致。造成这种现象的原因可能是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^[32]。4 月, 河流并未完全融化, 导致此时径流量小。通过计算发现 4 月的河流径流量为仅占整个研究期间老爷岭流域径流量的 4.65%, 所以导致 4 月份径流 DOC 浓度高, 但输出通量少。之后, 流域内降雨事件增多, 降雨量增高, 使得流域径流量升高。同时降雨对河流附近地表产生冲刷效应, 将土壤表层的可溶性有机碳携入河道, 增加了 DOC 的输入量, 导致溪流中 DOC 浓度升高。从而使得 5、6 月份 DOC 输出通量显著增高。此外, 5 月流域 DOC 输出通量大于 6 月, 可能是因为 5、6 月份流域径流量相差不大, 但 5 月 DOC 平均浓度 (16.94 mg/L) 比 6 月 (11.66 mg/L) 高约 5 mg/L (表 1); 此外 6 月温度升高会促进微生物的活性^[33], 还可能改变植物的物种组成和生产量^[34], 使得植物对大气中的碳利用量增高, 从而使得 DOC 输出通量降低。

3.2 冻融作用对流域 DOC 输出的影响

通过对老爷岭流域不同时期土壤温度与流域 DOC 浓度、输出通量的研究, 结果表明: 冻融循环期径流 DOC 浓度高于融化期, 融化期平均日 DOC 输出通量 (48.02 kg/km²) 显著高于冻融循环期 (9.52 kg/km²)。造成这种现象的原因可能是冻融循环期, 森林中具有较厚的积雪覆盖, 且该时期由于寒冷的气温, 使得土壤处于冻结状态。同时限制微生物的活性, 提高植被细根死亡^[35], 植被吸收量很小, 土壤内可供淋溶的 DOC 较多。但是该时期流域内降水较少, 溪流径流量小, 导致 DOC 输出通量少。而到了融化期, 土壤温度的不断增长, 使得土壤活动层加厚, 与邻近地表水之间的连通性增强; 同时, 该时期积雪开始融化。融雪期是北方地区可溶性有机碳通过融雪径流从陆地生态系统向河流输出的关键时期^[36]。此时活动层较薄, 流域储水能力差。大部分冰层和融雪水都转化成了径流, 导致流域径流量大且增长快。这就导致流域 DOC 输出通量增加, 且显著高于冻融循环期。此外, Holmes 等^[37]也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。流域径流量的变化是影响径流 DOC 输出通量变化的主要因素。这与苟小林等^[38]在森林小流域对 DOC 的研究以及王烁等^[39]在高寒山区典型小流域径流 DOC 输出的研究结果高度一致。

3.3 径流 DOC 随径流的变化特征

结果发现, 径流 DOC 浓度和输出通量对径流变化比较敏感, 径流量是影响 DOC 输出通量的主要因素。这与 Zhong^[40]等在金沙江的研究发现 C 通量与径流之间有明显的正相关关系的研究结果相似。冻融循环

期,流域内河流未完全融化且降水较少,使得该时期径流量小,DOC 输出通量小;融化期流域内融雪水和降雨增多,充分补给径流,导致溪流径流量迅速增长,从而使得融化期 DOC 输出通量显著高于冻融循环期。此外径流 DOC 浓度与径流的变化基本同步,高径流量对应高径流 DOC 浓度。这与 Chen^[41]等在岷江流域河流得到 DOC 浓度与径流量正相关的结论一致。降雨通过对径流量的改变,来影响径流 DOC 浓度的变化。降雨期间径流 DOC 浓度整体呈现先急速上升后缓慢下降的趋势。径流 DOC 浓度峰值出现在降雨初期的最大降雨强度之后,原因可能是当降雨发生时,整个流域的土壤表层有机质处于富集状态,伴随着降雨的不断发生,土壤表层的土壤有机物不断冲刷^[42]以及土壤中的壤中流携带有机物流入溪流^[43],最终在降雨强度最大时冲刷效应最强,进而导致径流中 DOC 浓度达到峰值。之后,降雨不断持续,雨水的不断增加与汇集,导致溪流中的 DOC 浓度逐渐被稀释,从而导致在溪流中 DOC 浓度达到顶峰后不断缓慢持续下降。一方面流域降雨加强了地表冲刷,导致地表径流和大量土壤 DOC 输送到溪流中,从而增加了溪流中的 DOC 浓度,另一方面,降雨增加使径流量增加,导致 DOC 输出通量增加。此研究结果与大多数文献所报道的径流 DOC 浓度降雨时期高于其他时期的研究结果一致^[17-18,44]。

4 结论

通过对大兴安岭北部多年冻土区老爷岭小流域春季冻融期(4月至6月)径流 DOC 浓度、径流量以及气温、降雨和土壤温湿度等环境因子的连续观测,发现研究时段内,老爷岭流域径流 DOC 浓度变化范围为 3.88—33.75 mg/L;径流 DOC 浓度和输出通量在冻融循环期和融化期具有显著差异,主要受到径流和温度的影响。冻融循环期 DOC 浓度显著高于融化期,然而,融化期平均日 DOC 输出通量(48.02 kg/km²)是冻融循环期(9.52 kg/km²)的 5 倍。径流量越大,径流 DOC 输出通量越高。揭示了大兴安岭多年冻土区老爷岭流域春季冻融期径流 DOC 的输移特征及影响因素。

参考文献(References):

- [1] 陈吉吉,郭婧,徐蘇士,陶蕾,荆红卫. 北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探. 环境科学, 2020, 41(11): 4905-4913.
- [2] Winterdahl M, Laudon H, Lyon S W, Pers C, Bishop K. Sensitivity of stream dissolved organic carbon to temperature and discharge: implications of future climates. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(1): 126-144.
- [3] Dobinski W. Permafrost. *Earth-Science Reviews*, 2011, 108(3/4): 158-169.
- [4] Sato H, Kobayashi H, Iwahana G, Ohta T. Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(16): 5690-5704.
- [5] Young N L, Lemieux J M, Delottier H, Fortier R, Fortier P. A conceptual model for anticipating the impact of landscape evolution on groundwater recharge in degrading permafrost environments. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e2020GL087695.
- [6] Cooper L W, Benner R, McClelland J W, Peterson B J, Holmes R M, Raymond P A, Hansell D A, Grebmeier J M, Codispoti L A. 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): 308-324.
- [7] Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2009, 37: 47-66.
- [8] 吴祥文,臧淑英,马大龙,任建华,李昊,赵光影. 大兴安岭多年冻土区森林土壤温室气体通量. 地理学报, 2020, 75(11): 2319-2331.
- [9] 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: a Publication of the Ecological Society of America*, 2013, 23(8): 1817-1836.
- [10] Frey K E, McClelland J W. Impacts of permafrost degradation on Arctic River biogeochemistry. *Hydrological Processes*, 2009, 23(1): 169-182.
- [11] 孙晓新,宋长春,王宪伟,毛璐,郭跃东,路永正. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展. 生态学报, 2011, 31(18): 5379-5386.
- [12] Drake T W, Wickland K P, Spencer R G M, McKnight D M, Striegl R G. Ancient low-molecular-weight organic acids in permafrost fuel rapid carbon dioxide production upon thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(45): 13946-13951.
- [13] Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, Grosse G, Harden J W, Hayes D J, Hugelius G, Koven C D, Kuhry P, Lawrence D M, Natali S M, Olefeldt D, Romanovsky V E, Schaefer K, Turetsky M R, Treat C C, Vonk J E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, 520(7546): 171-179.
- [14] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 1982, 282(4): 401-450.
- [15] 郑清,黎云祥,朱广伟,俞洁,朱梦圆,许海,王裕成,刘明亮. 夏季强降雨期间千岛湖有机碳的时空分布特征及影响因素. 环境科学研究

究, 2022, 35(4): 896-907.

- [16] Abarike G A, Song Z G, Han Y Q, Wang S B, Bin W, Liu Y Q. Dissolved organic carbon concentration and its seasonal variation in the Huguangyan Maar Lake of Southern China. *Acta Geochimica*, 2021, 40(5): 806-818.
- [17] 孙会国, 汉景泰, 张淑荣, 吕喜玺. “05-06”西江特大洪水对河流碳输出通量的影响. *科学通报*, 2006, 51(23): 2773-2779.
- [18] 陶澍, 梁涛, 徐尚平, 狄雯华. 伊春河河水溶解态有机碳含量和输出通量的时空变化. *地理学报*, 1997, 52(3): 254-261.
- [19] Wellman T P, Voss C I, Walvoord M A. Impacts of climate, lake size, and supra- and sub-permafrost groundwater flow on lake-talik evolution, Yukon Flats, Alaska (USA). *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 281-298.
- [20] Jin H J. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes. *ydrogeology & Engineering Geology*, 2013.
- [21] Song C L, Wang G X, Mao T X, Chen X P, Huang K W, Sun X Y, Hu Z Y. Importance of active layer freeze-thaw cycles on the riverine dissolved carbon export on the Qinghai-Tibet Plateau permafrost region. *PeerJ*, 2019, 7: e7146.
- [22] Gao T G, Kang S C, Chen R S, Zhang T G, Zhang T J, Han C T, Tripathee L, Sillanpää M, Zhang Y L. Riverine dissolved organic carbon and its optical properties in a permafrost region of the Upper Heihe River Basin in the Northern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 370-381.
- [23] Mu C C, Abbott B W, Wu X D, Zhao Q, Wang H J, Su H, Wang S F, Gao T G, Guo H, Peng X Q, Zhang T J. Thaw depth determines dissolved organic carbon concentration and biodegradability on the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(18): 9389-9399.
- [24] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征. *冰川冻土*, 1982, 4(1): 1-19, 95.
- [25] Payandi-Rolland D, Shirokova L S, Labonne F, Bénézeth P, Pokrovsky O S. Impact of freeze-thaw cycles on organic carbon and metals in waters of permafrost peatlands. *Chemosphere*, 2021, 279: 130510.
- [26] 马明真, 高扬, 郝卓. 亚热带典型流域 C、N 沉降季节变化特征及其耦合输出过程. *生态学报*, 2019, 39(2): 599-610.
- [27] 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰. 三江源高寒草甸下溪流溶解性有机碳的季节性输移特征. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10): 2387-2394.
- [28] 段亮亮, 满秀玲, 俞正祥, 刘玉杰, 朱宾宾. 森林干扰对大兴安岭北部森林小流域径流情势的影响. *生态学报*, 2017, 37(5): 1421-1430.
- [29] Jin H J, Yu Q H, Lü L Z, Guo D X, He R X, Yu S P, Sun G Y, Li Y W. Degradation of permafrost in the xing'anling mountains, northeastern China. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, 18(3): 245-258.
- [30] Guo Y D, Song C C, Tan W W, Wang X W, Lu Y Z. Hydrological processes and permafrost regulate magnitude, source and chemical characteristics of dissolved organic carbon export in a peatland catchment of northeastern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(2): 1081-1093.
- [31] Zhu G F, Wan Q Z, Yong L L, Li Q Q, Zhang Z Y, Guo H W, Zhang Y, Sun Z G, Zhang Z X, Ma H Y. Dissolved organic carbon transport in the Qilian mountainous areas of China. *Hydrological Processes*, 2020, 34(25): 4985-4995.
- [32] 刘诗奇, 王平, 王田野, 黄其威, 于静洁. 西伯利亚北极河流有机碳输出特征及影响要素. *地理学报*, 2021, 76(5): 1065-1077.
- [33] Malmer N, Johansson T, Olsrud M. Vegetation, climatic changes and net carbon sequestration in a North-Scandinavian subarctic mire over 30 years. *Global Change Biology*, 2010, 11(11): 1895-1909.
- [34] Moore T R, Roulet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic Change*, 1998, 40(2): 229-245.
- [35] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 175-190.
- [36] 张著, 王传宽. 帽儿山天然次生林融雪径流可溶性有机碳时间动态及垂直分布. *北京林业大学学报*, 2016, 38(11): 1-8.
- [37] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, Tank S E, Bulygina E, Eglinton T I, Gordeev V V, Gurtovaya T Y, Raymond P A, Repeta D J, Staples R, Striegl R G, Zhulidov A V, Zimov S A. 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.
- [38] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 徐振锋, 刘金铃, 李志萍, 黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 205-210.
- [39] 王烁, 孙自永, 胡雅璐, 葛孟琰, 常启昕. 高寒山区典型小流域河流溶解性有机碳输出的年内变化及其成因. *安全与环境工程*, 2017, 24(2): 1-7, 15.
- [40] Zhong J, Li S L, Zhu X T, Liu J, Xu S, Xu S, Liu C Q. Dynamics and fluxes of dissolved carbon under short-term climate variabilities in headwaters of the Changjiang River, draining the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126128.
- [41] Chen S, Zhong J, Li C, Liu J, Wang W F, Xu S, Li S L. Coupled effects of hydrology and temperature on temporal dynamics of dissolved carbon in the Min River, Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125641.
- [42] 徐亚娟, 高扬, 朱宁华, 朱波, 陈维梁, 于贵瑞. 紫色土流域次降雨条件下碳、磷非点源输出过程及其流失负荷. *生态学报*, 2014, 34(17): 5021-5029.
- [43] 乔慧娇. 季节性降雨事件对河流溶解性有机碳的影响——以农业用地为例[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.
- [44] 吴红宝, 秦晓波, 吕成文, 李玉娥, 廖育林, 万运帆, 高清竹, 李勇. 脱甲河流域水体溶解有机碳时空分布特征. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10): 1968-1976.