

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.204>



# 青藏高原季节冻土山区河流的溶解性碳 输出特征及控制因素

赵鲁松<sup>1</sup>, 孙自永<sup>1,2\*</sup>, 马 瑞<sup>1,2</sup>, 胡雅璐<sup>1</sup>, 常启昕<sup>3</sup>, 潘艳喜<sup>1</sup>, 潘 钊<sup>1</sup>

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

2. 中国地质大学长江流域环境水科学湖北省重点实验室, 湖北武汉 430078

3. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059

**摘 要:** 高寒山区土壤碳是全球冻土碳库的重要组成部分, 以溶解相从陆地侧向输出到河流是该地区土壤碳输出的重要途径, 而以往研究主要集中在多年冻土区, 对季节冻土区关注较少. 为探讨季节冻土区河流溶解性碳的输出规律、影响因素及其作用机制, 以位于青藏高原祁连山北麓黑河上游的季节冻土山区——红泥沟小流域为研究区, 通过对河水中溶解性有机碳(DOC)和溶解性无机碳(DIC)浓度与通量的连续观测, 结合河水中稳定同位素丰度及流域内气象、水文、地温等观测数据, 发现在冻土消融前期(春末), 流域出口河水中DOC和DIC浓度较高但通量较低; 在冻土消融后期(夏季), 河水中DOC和DIC浓度较低但通量较高; 河水中DOC和DIC浓度在消融后期总体呈下降趋势, 但低流量期的浓度比高流量期略有上升. 研究表明: 对以红泥沟小流域为代表的季节冻土山区, 消融前期溶解性碳输出的主控因素仍是冻土特征及动态, 但在消融后期则变为水文输入特征主控, 以细粒残坡积物为主的薄层含水层和广泛发育的冻融扰动地貌也对其有重要影响, 导致河流中DOC浓度高于青藏高原其他地区的报道值.

**关键词:** 高寒山区; 青藏高原; 黑河上游; 季节冻土; 溶解性有机碳; 溶解性无机碳; 侧向输出; 环境地质; 水文地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2024)03-1177-12

收稿日期: 2022-04-06

## Characteristics and Controlling Factors of Dissolved Carbon Export from an Alpine Catchment underlain by Seasonal Frost in the Qilian Mountains, Qinghai-Xizang Plateau

Zhao Lusong<sup>1</sup>, Sun Ziyong<sup>1,2\*</sup>, Ma Rui<sup>1,2</sup>, Hu Yalu<sup>1</sup>, Chang Qixin<sup>3</sup>, Pan Yanxi<sup>1</sup>, Pan Zhao<sup>1</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. Hubei Key Laboratory of Yangtze River Basin Environmental Aquatic Science, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

3. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** Soil carbon storage in alpine regions is an important component of the global frost carbon pool. Lateral carbon export from terrestrial ecosystems to rivers in dissolved phase is an important pathway for soil carbon export from alpine catchments.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41772270); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(No. XDA2010010304).

**作者简介:** 赵鲁松 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事高寒山区河流碳循环的研究工作. ORCID: 0000-0002-6962-2698. E-mail: zhaolusong@cug.edu.cn

**\* 通讯作者:** 孙自永, ORCID: 0000-0001-6556-8105. E-mail: ziyong.sun@cug.edu.cn

**引用格式:** 赵鲁松, 孙自永, 马瑞, 胡雅璐, 常启昕, 潘艳喜, 潘钊, 2024. 青藏高原季节冻土山区河流的溶解性碳输出特征及控制因素. 地球科学, 49(3): 1177–1188.

**Citation:** Zhao Lusong, Sun Ziyong, Ma Rui, Hu Yalu, Chang Qixin, Pan Yanxi, Pan Zhao, 2024. Characteristics and Controlling Factors of Dissolved Carbon Export from an Alpine Catchment underlain by Seasonal Frost in the Qilian Mountains, Qinghai–Xizang Plateau. *Earth Science*, 49(3): 1177–1188.

Previous studies on dissolved carbon export from alpine catchments have focused on permafrost areas, and less attention has been paid to seasonal frost areas. To explore the patterns, influencing factors and mechanisms of dissolved carbon export through rivers in seasonal frost areas, we selected the Hongnigou catchment at the northern flank of the Qilian Mountains on the Qinghai-Xizang Plateau as the study area, and we made continuous observations of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved inorganic carbon (DIC) concentrations and fluxes in river water. Combining the observed data of stable isotope abundance in river water and meteorology, hydrology, and ground temperature in the catchment, it is found that: (1) during the early thawing period in late spring, the riverine DOC and DIC at the outlet of the catchment were high in concentration but low in flux; (2) during the late thawing period in summer, the riverine DOC and DIC were low in concentration but high in flux; and (3) both DOC and DIC concentrations in the river showed an overall decreasing trend in summer, but slightly increased during low flow periods compared to high flow periods. The study shows that for the alpine catchments underlain by seasonal frost, represented by the Hongnigou catchment, the dissolved carbon export is mainly influenced by frost characteristics and dynamics during the early thawing period. However, during the late thawing period in summer, it becomes dominated by hydrological input characteristics. During this period, the thin aquifers consisting mainly of fine-grained residual deposits and the widespread freeze-thaw disturbed landforms also have significant impacts, resulting in a higher riverine DOC concentration than that reported in other areas of the Qinghai-Xizang Plateau.

**Key words:** alpine regions; the Qinghai-Xizang Plateau; upper reaches of the Heihe River basin; seasonal frost; dissolved organic carbon; dissolved inorganic carbon; lateral export to the river; environmental geology; hydrogeology.

## 0 引言

冻土区土壤中储存着大量的碳,是全球重要碳库.据估计,北半球多年冻土区土壤碳储量约为  $1\,832\text{ Pg}$  ( $1\text{ Pg}=10^{15}\text{ g}$ ),且正因气候变暖导致的冻土退化而面临释放和输出风险(Mu *et al.*, 2015).以颗粒相和溶解相从陆地侧向输出到河流中,是冻土区碳输出的重要途径之一(Plaza *et al.*, 2019; Wild *et al.*, 2019).已有研究表明,北极、亚北极地区的河流溶解性碳浓度、通量变化与多年冻土特征和流域水文过程密切相关,溶解性有机碳浓度和通量通常在春季融雪期最高(McGuire *et al.*, 2009; Prokushkin *et al.*, 2011).

在北半球的高纬度及高海拔地区,除多年冻土外,也广泛分布季节冻土,其最大分布范围约占北半球陆地总面积的 51%(Zhang *et al.*, 2003).季节冻土区的地下水流动路径有别于多年冻土区:在多年冻土区,多年冻土层的弱透水性阻碍了深层地下水的流动与更新,增强了浅层地下水的流动;而在季节冻土区,消融初期水分下渗受限,地下水以浅层流动路径为主,但在完全消融期,浅层和深层地下水流动路径同时存在(Woo *et al.*, 2008; Walvoord *et al.*, 2012; Evans and Ge, 2017; 张淑勋等, 2023).在气候变暖情景下,季节冻土区的冻结深度和持续时间可能同时减小,使深层地下水的补给量、流动性和排泄量增强(Ireson *et al.*, 2013),从而影响溶解性碳的输出.此外,季节冻土区的土壤温

度较多年冻土区更高,微生物更活跃,也会影响有机碳和无机碳的转化与输出(Striegl *et al.*, 2005).因此,季节冻土区溶解性碳输出可能具有不同于多年冻土区的特征.然而,已有相关研究多集中在多年冻土区(Dornblaser and Striegl, 2015; Gao *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2019; Wild *et al.*, 2019),对季节冻土区河流溶解性碳输出鲜有报道.季节冻土区溶解性碳输出的通量有多大?对寒区土壤碳的侧向输出有多大贡献?随季节冻土层的冻融循环及演化有何变化规律?这些科学问题目前仍未得到明确解答.

青藏高原作为全球中、低纬度冻土的主要分布区,土壤碳储量约为  $(160\pm 87)\text{ Pg}$ ,是北半球冻土碳库的重要组成部分(Mu *et al.*, 2015),且因其冻土具有高温(最高约  $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、总体厚度薄( $<100\text{ m}$ )和热状态不稳定的特点(Mu *et al.*, 2015),对气候变化极其敏感,储存的土壤碳具有很高的释放风险(毛楠等, 2022).在青藏高原冻土区,季节冻土的面积占比达 56%(Zou *et al.*, 2017),对整个高原浅层土壤( $0\sim 3\text{ m}$ )有机碳储量的贡献达 53.03%(Wang *et al.*, 2021a).与多年冻土区相比,季节冻土区的水文循环更为活跃,溶解性碳的侧向输出在碳循环中的作用也更为重要,对下游水生生态系统的影响可能更为突出.此外,受独特气候条件影响,青藏高原季节冻土区的水文输入与冻土冻融基本同步,即夏季时季节冻土完全消融,降雨输入也最为集中(程国

栋和金会军, 2013; 王烁等, 2017; 安志宏等, 2018), 此时的暴雨-径流事件可能对溶解性碳的侧向输出起着重要的控制作用(Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2021b), 使其显著有别于泛北极苔原地区. 因此, 探索青藏高原季节冻土区溶解性碳的侧向输出规律及其控制因素, 不仅有助于弥补现有寒区河流溶解性碳输出研究偏重多年冻土区而忽略季节冻土区的不足, 还可加深对青藏高原陆地-水域间碳迁移转化过程的理解, 为预测碳循环对气候变化的响应提供依据.

本文以位于青藏高原祁连山北麓黑河上游的季节冻土区小流域——红泥沟小流域为研究区, 基于对流域出口河水中溶解性有机碳(dissolved organic carbon, 简称DOC)、溶解性无机碳(dissolved inorganic carbon, 简称DIC)、溶解性总固体(total dissolved solid, 简称TDS)浓度及 $^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $^{18}\text{O}$ 、 $^2\text{H}$ 同位素丰度的连续观测, 结合流域内气象、水文、地温等监测数据, 分析了溶解性碳(DOC、DIC)的输出规律, 探讨了不同季节影响溶解性碳输出的主要因素及其机制, 以期气候变化条件下季节冻土山区的碳循环过程及预测研究提供支撑.

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

红泥沟小流域位于青藏高原祁连山北麓, 为黑河的二级子流域( $99^{\circ}51'30''\sim 99^{\circ}52'45''\text{E}$ ,  $38^{\circ}15'05''\sim 38^{\circ}15'55''\text{N}$ ), 面积约 $1.12\text{ km}^2$ , 海拔 $3\ 000\sim 3\ 600\text{ m}$ (图1), 属大陆性气候, 冬冷夏热, 年均气温为

$-3.9^{\circ}\text{C}$ , 年内潜在蒸发量约 $1\ 100\text{ mm}$ , 年均降水量为 $400\sim 600\text{ mm}$ , 其中7~9月降水量占全年的70%左右(Chen *et al.*, 2015; Chang *et al.*, 2018). 流域内河流总长约 $1.76\text{ km}$ , 流域出口处年均径流量约 $1.4\times 10^5\text{ m}^3/\text{a}$ (Chen *et al.*, 2015; 潘钊等, 2018), 11月至次年3月处于断流状态.

红泥沟小流域为低山丘陵地貌, 平均坡度 $16.6^{\circ}$ , 热融阶梯、滑坡、泥石流等冻融扰动地貌发育(潘钊等, 2018). 土地覆盖类型以高寒草甸与高寒灌丛为主. 前者主要分布在土壤含水量较高的低海拔区( $3\ 000\sim 3\ 100\text{ m}$ ), 常见物种为珠牙蓼、狼毒、披碱草等; 后者在太阳辐射较少的阴坡、半阴坡及半阳坡等较高(海拔 $3\ 250\sim 3\ 600\text{ m}$ )处均有分布(刘章文等, 2012), 常见物种为鬼箭锦鸡儿、金露梅、沙棘等. 土壤类型以山地栗钙土、草甸土和亚高山灌丛草甸土为主(刘章文等, 2012).

流域内土壤表层为厚约 $10\sim 30\text{ cm}$ 的腐殖质层, 其下为厚约 $160\text{ cm}$ 的淋溶层和厚约 $70\text{ cm}$ 的淀积层, 再往下是以黏土为主的风化层, 导水性较弱(青海省第二地质队五分队, 1989, 1:5万J-47-68-B(达郎农饲队)幅、J-47-69-A(祁连县)幅区域地质调查报告; 潘钊等, 2018). 流域上部(海拔 $3\ 500\sim 3\ 600\text{ m}$ )与下部(海拔 $3\ 000\sim 3\ 200\text{ m}$ )的基底主要为长石砂岩与石英砂岩, 流域中部(海拔 $3\ 200\sim 3\ 500\text{ m}$ )基底主要为夹有石膏层与页岩的砂岩, 导水性与富水性均较差(青海省第二地质队五分队, 1989, 1:5万J-47-68-B(达郎农饲队)幅、J-47-69-A(祁连县)幅区域地质调查报告).

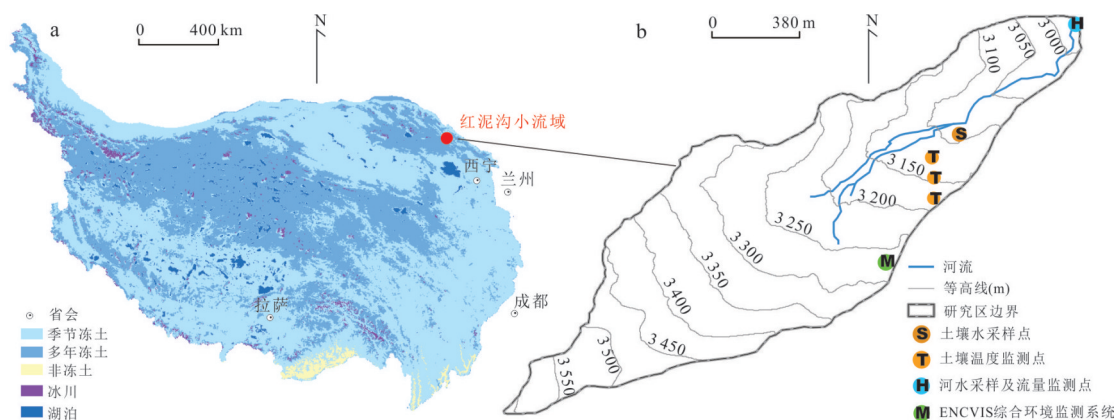


图1 红泥沟小流域在青藏高原的位置(a)以及小流域内采样点和监测点的位置(b)

Fig.1 Maps showing the location (a) of the Hongnigou catchment on the Qinghai-Xizang Plateau and the monitoring and sampling sites (b) in the Hongnigou catchment

表 1 土壤温度监测剖面的位置及监测深度

Table 1 Location and monitoring depths of three soil temperature monitoring profiles

| 土壤温度监测剖面    | 海拔<br>(m) | 土壤温度监测深度<br>(cm)        |
|-------------|-----------|-------------------------|
| T1(山坡顶部)    | 3 172     | 20、40、60、80、120、160、260 |
| T2(山坡中部)    | 3 159     | 20、40、60、80、120、160、240 |
| T3(山坡底部河岸带) | 3 144     | 20、40、60、80、120、160、200 |

1.2 野外观测

每日 08:00、14:00、20:00 定时观测流域出口处梯形流量堰内(图 1b)河水的流速与水位,根据建立的水位-流量关系,计算流域出口处河道径流量.流域内部有 1 套 ENVIS 综合环境观测系统(图 1b),监测指标包括气温、降水量、土壤温度等.此外,在近流域出口的山坡上,自上而下布置 3 个土壤温度监测剖面(T1、T2、T3)(图 1b),在不同深度处埋设温度探头(HOBO UA-002-64;美国 ONSET),以 15 min/次的频率、0.1 °C 的分辨率进行监测.土壤温度监测的信息详见表 1.

1.3 样品采集与测试

河水采样点位于流域出口(图 1b),采样时段为 2013 年 5 月 9 日至 6 月 1 日、2013 年 7 月 5 日至 9 月 21 日,采样频率为 1 次/天.采样时,利用便携式水质分析仪(HQ14D;美国 HACH)对样品的温度、电导率、溶解氧、pH 值以及氧化还原电位进行现场测定.根据拟测指标对样品分类处理与保存:用于阴、阳离子测试的样品,现场用 0.22 μm 滤膜抽滤后保存于 50 mL 的 PET 瓶中,待样品瓶装满,阴离子样品直接密封,阳离子样品用优级纯浓 HNO<sub>3</sub> 酸化至样品 pH<2 后密封保存;用于 DOC、DIC 浓度和 <sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 丰度测试的样品,现场用 0.7 μm 提前燃烧的玻璃纤维滤膜抽滤后,保存在 40 mL 棕色螺纹玻璃瓶中,随后密封;用于氢氧同位素测试的水样,现场用 0.22 μm 滤膜抽滤,保存于 2 mL 透明玻璃瓶,装满后密封.以上样品均在 4 °C 下冷藏保存,直至带回实验室测定.碱度指标(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)在采样后 24 h 内用酸碱指示剂滴定法测定.

降水采样点位于流域出口附近(图 1b).待降水结束后,将收集的降水用 0.22 μm 滤膜现场抽滤,保存于 2 mL 透明玻璃瓶,装满后密封,在 4 °C 下冷藏保存,直至带回实验室进行 <sup>2</sup>H 和 <sup>18</sup>O 同位素丰度测试.土壤水采样点位于流域下部(图 1b),采集的是土壤样,保存于 8 mL 带螺纹盖的玻璃瓶中,并用

Parafilm 胶膜密封;带回实验室后用低温真空蒸馏法提取水分,并用 0.22 μm 滤膜过滤,保存于 2 mL 透明玻璃瓶中,直至进行 <sup>2</sup>H 和 <sup>18</sup>O 同位素丰度测试.

阴、阳离子水样送至中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室,分别采用离子色谱仪(761/813 型;瑞士 Metrohm)与电感耦合等离子体发射光谱仪(IRIS Intrepid II XSP;美国 Thermo Elemental)进行测定,测试精度分别为 0.05 mg/L 和 0.002 mg/L. <sup>2</sup>H 和 <sup>18</sup>O 同位素采用 Picarro L2130-i 超高精度液态水和水汽同位素分析仪(美国 Picarro)测定,测试结果与 V-SMOW(Vienna standard mean ocean water)标准样品对比,用千分偏差 δ 表示,测试精度分别为 0.025‰ 和 0.100‰.DOC 水样送至华中科技大学,采用有机碳分析仪(muti N/C 2100 TOC;德国 Analytik Jena)测定,测试精度为 0.001 μg/L.DIC 和 <sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 水样送至自然资源部第三海洋研究所,采用稳定同位素质谱仪(Delta V advantage;美国 Thermo Scientific)分析,稳定碳同位素测试结果与 V-PDB(Vienna peedee belemnite)标准样品对比,用千分偏差 δ 表示,测试精度分别为 0.6 mg/L 和 0.06‰.

1.4 河流溶解性碳通量计算

红泥沟小流域河流 DOC、DIC 的日输出通量采用下式计算(You and Li, 2021):

$$F_d=C_d\times Q_d,$$
(1)

其中,  $F_d$  (kgC/d) 为 DOC、DIC 的日通量,  $C_d$  (mg/L) 为河水 DOC 和 DIC 的日均浓度,  $Q_d$  (m<sup>3</sup>/d) 为河道日径流量.

2 结果

2.1 地温变化特征

图 2 展示了 2012 年 9 月至 2013 年 8 月红泥沟小流域山坡顶部(T1)、中部(T2)和河岸带(T3)不同深度处的地温.T1 剖面的土壤温度数据表明:山坡顶部冻土层消融始于 4 月初,于 10 月中下旬重新冻结;2.6 m 深度处的土壤温度年内较稳定,仅 2~3 月间低于 0 °C,应是季节冻土层的下边界.T2 剖面的土壤温度数据表明:山坡中部冻土层消融始于 4 月中旬,于 10 月下旬重新冻结;因温度探头布设深度有限,未捕获全年温度大于 0 °C 的层位,但由最大监测深度 2.4 m 处的冻土在 6 月下旬消融和次年 1 月下旬冻结,可推测季节冻土层的下边界深于 2.4 m.T3 剖面的土壤温度数据表明:河岸带冻土层消融始

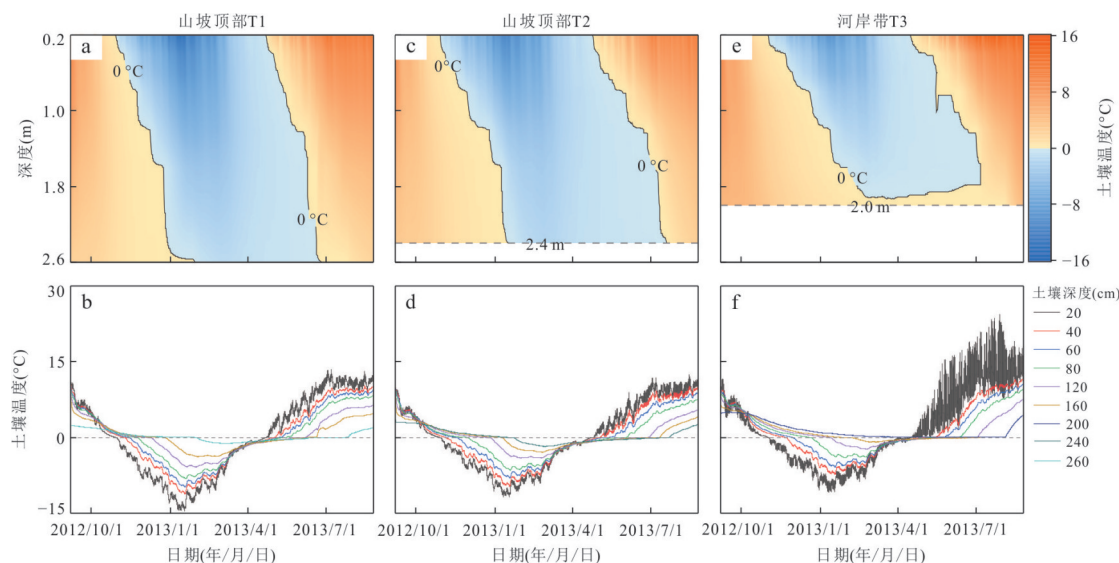


图2 2012年9月~2013年8月红泥沟小流域山坡顶部(a、b)、中部(c、d)和河岸带(e、f)不同深度处土壤温度随时间的变化  
Fig.2 Time series of soil temperature at different depths at the top (a, b), middle (c, d) and bottom (e, f) of a slope in the Hongni-gou catchment from September 2012 to August 2013

于3月底,于10月底开始重新冻结;地表以下2 m处的土壤温度始终在0 °C以上,故季节性冻土层下边界应在2 m深度以上。

三个监测点的对比结果表明:自坡顶至坡底,随海拔降低,季节冻土层的下边界变浅,消融时间变早,重新冻结时间变晚。据此将采样期大致划分为两个阶段:(1)消融前期,季节冻土层的消融速度较慢,大部分时段的消融深度仍<1 m,且降雨稀少,河道径流量小,大部分时段<0.5×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/d,2013年5月9日至6月1日的采样期可代表该阶段;(2)消融后期,季节冻土层的消融速度快速增大,消融深度很快增至>2 m,且降雨集中,河道径流量大(>1×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/d),2013年7月5日至9月21日的采样期可代表该阶段。

## 2.2 降水、河水和土壤水稳定同位素特征

由降水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 监测数据得到的当地大气降水线(LMWL)为 $\delta^2\text{H}=8.23\delta^{18}\text{O}+18.53$  ( $R^2=0.97$ ,图3),斜率略高于全球大气降水线(GMWL),截距(18.53)远高于全球平均值10,应与研究区空气湿度低、二次蒸发强烈有关。

在消融前期,河水的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别为-40.45‰~-29.19‰和-6.81‰~-4.83‰,均值分别为-34.53‰±2.71‰( $n=24$ )(本文中均使用mean±SD)和-5.90‰±0.48‰( $n=24$ );在 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图中,河水样都落在当地大气降水线的右下方,与消融前期土壤水的 $\delta^2\text{H}$ (-36.02‰±0.39‰;

$n=3$ )和 $\delta^{18}\text{O}$ (-6.10‰±0.18‰; $n=3$ )值相似,笔者推断地下冰消融释水对河水可能有重要贡献。

在消融后期,河水的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围分别为-36.73‰~-21.25‰和-6.60‰~-4.85‰,均值分别为-30.03‰±2.67‰( $n=78$ )和-5.77‰±0.37‰( $n=78$ );在 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图中,河水样大都落在当地大气降水线上,且位于消融后期降雨样的分布范围内,但远高于此时土壤水的 $\delta^2\text{H}$ (-39.09‰±3.97‰, $n=22$ )和 $\delta^{18}\text{O}$ (-6.56‰±0.71‰, $n=22$ )值,笔者推断河水可能主要源于降雨转化成的坡面流或地下浅层径流等“快速流”,未与土壤水充分混合。

## 2.3 流域DOC、DIC和TDS输出特征

**2.3.1 不同消融阶段间的差异** 与消融前期((15.23±2.30) mg/L; $n=24$ )相比,消融后期流域出口河水中DOC浓度((12.52±1.13) mg/L; $n=79$ )较低,且随时间呈平缓降低的趋势(图4b)。从DOC浓度与流量关系(图5a)可以发现,不同时期的DOC浓度受流量影响程度不同:DOC浓度在消融前期随流量增大而升高,在消融后期则随流量增大而稍有降低。

流域出口河水中DIC浓度亦是消融前期((160.74±19.78) mg/L; $n=24$ )高于消融后期((125.98±13.97) mg/L; $n=78$ )。在消融前期,有降水发生时河水DIC浓度略升高,而在消融后期,降水发生时河水DIC浓度则下降(图4c)。由DIC浓度

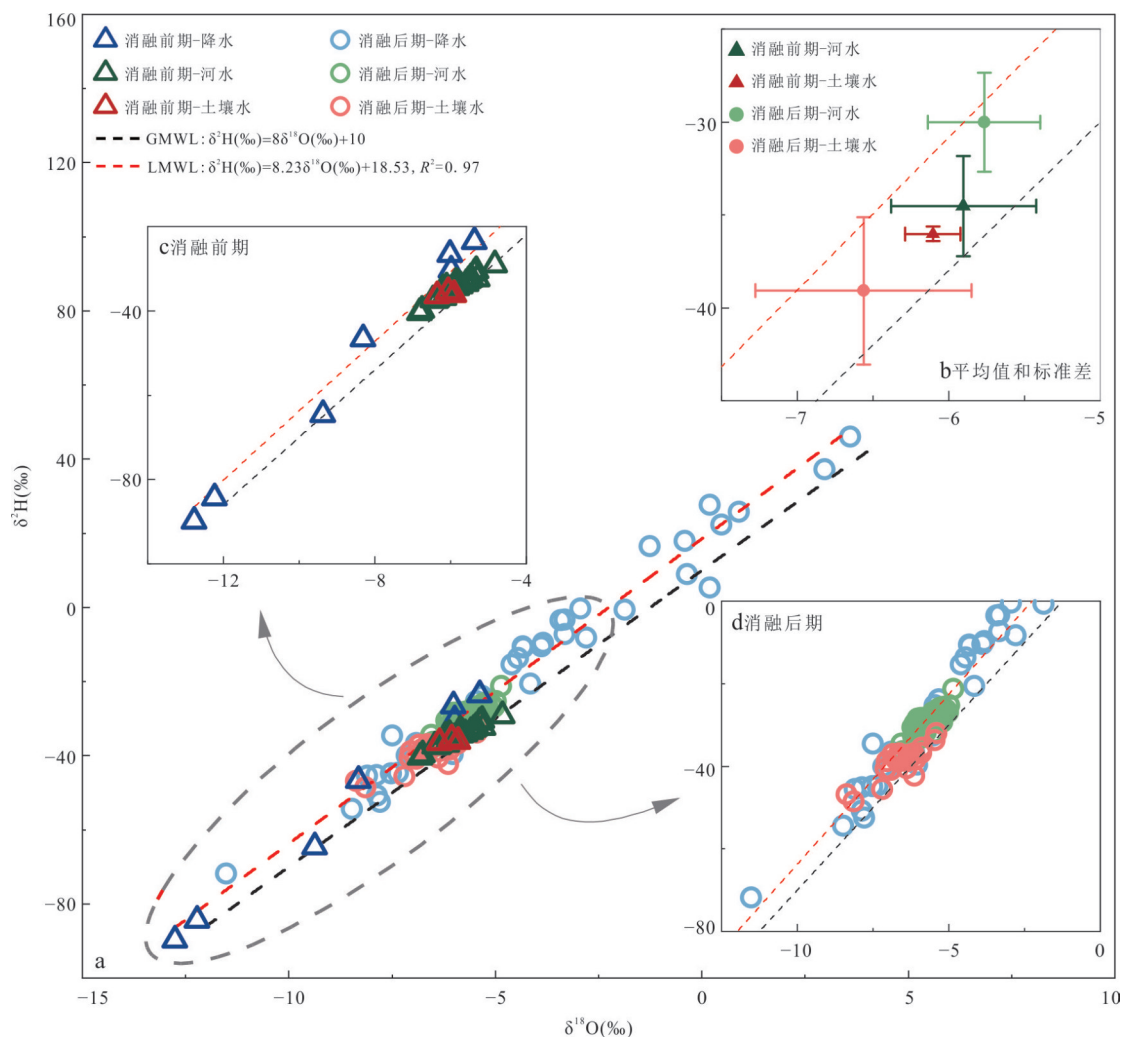


图 3 不同时期红泥沟小流域内河水、土壤水和降水的  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  关系(a, c, d)及其统计值(b)

Fig.3 The  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  relationships (a, c, d) and their means and standard deviations (b) of stream water, soil water and precipitation in the Hongnigou catchment during different periods

与流量关系(图 5b)可知:在消融前期, DIC 浓度并未随流量增加而下降,反而在总体保持平稳中略有上升;在消融后期, DIC 浓度则随流量增加而下降.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  也具有明显的季节性变化(图 4d):消融前期河水中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  平均值为  $-6.87\text{‰} \pm 0.41\text{‰}$  ( $n=24$ ), 较消融后期 ( $-8.00\text{‰} \pm 0.63\text{‰}$ ;  $n=78$ ) 更偏正, 即  $^{13}\text{C}$  更为富集.

流域出口河水 TDS 浓度的变化趋势与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  相似. 消融前期河水 TDS 浓度 ( $(3\ 387.07 \pm 348.87) \text{ mg/L}$ ;  $n=24$ ) 明显高于消融后期 ( $(2\ 167.64 \pm 491.50) \text{ mg/L}$ ;  $n=79$ ), 最高可达  $4\ 106.81 \text{ mg/L}$ . 在消融后期, TDS 浓度总体上随时间呈增高趋势, 但因降水频发, 河道径流量波动较大, TDS 浓度的变动幅度亦较大(图 4d). 从 TDS 与流量关系(图 5c)可看出:在消融前期, TDS 浓度

随流量增加略有上升, 但基本保持平稳;在消融后期, TDS 浓度随流量增加而呈显著下降趋势.

流域出口河水 DOC 和 DIC 输出通量也具有明显的季节性差异(图 6). 在消融前期, DOC 和 DIC 输出通量分别为  $(3.69 \pm 3.58) \text{ kgC/d}$  ( $n=24$ ) 和  $(38.34 \pm 39.89) \text{ kgC/d}$  ( $n=24$ ), 消融后期则分别为  $(18.00 \pm 10.66) \text{ kgC/d}$  ( $n=79$ ) 和  $(175.94 \pm 76.56) \text{ kgC/d}$  ( $n=78$ ), 是溶解性碳输出的主要阶段. DOC 与 DIC 输出通量都与流量呈显著正相关关系(图 6).

**2.3.2 消融后期不同流量期的差异** 对红泥沟小流域出口处河道径流量、河水水化学和同位素组成等动态变化(图 4)的考察表明:消融后期大致由降雨-径流事件形成的 4 个高流量期(7 月 6 日至 7 月 25 日、8 月 15 日至 8 月 27 日、8 月 31 日至 9 月 3 日、9 月

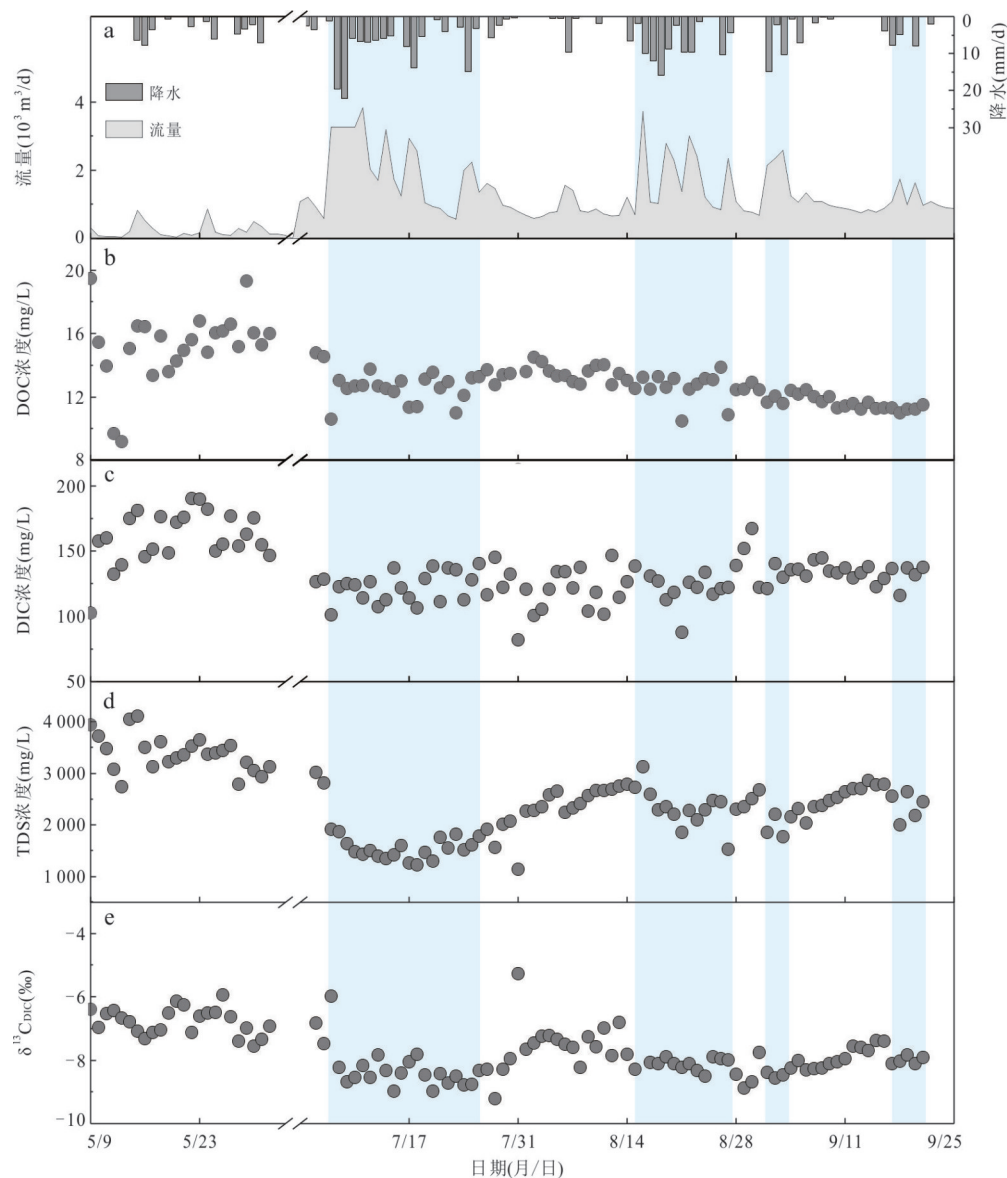


图4 红泥沟小流域出口河道径流量、河水水化学和同位素组成的动态变化

Fig.4 Time series of stream discharge and the hydrochemical and isotopic compositions of stream water at the outlet of the Hongnigou catchment

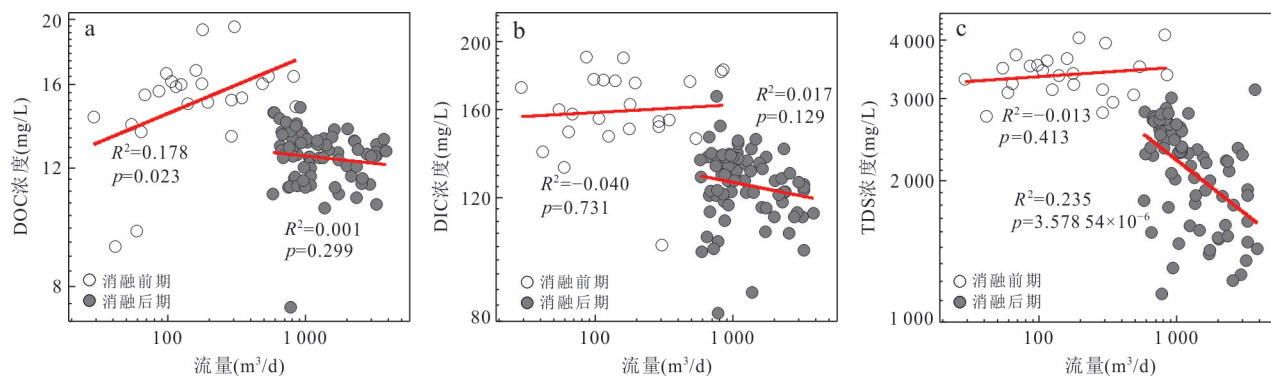


图5 红泥沟小流域出口河流流量与河水中DOC、DIC及TDS浓度间的关系

Fig.5 Relationships between solute concentration and discharge at the outlet of the Hongnigou catchment for DOC, DIC and TDS

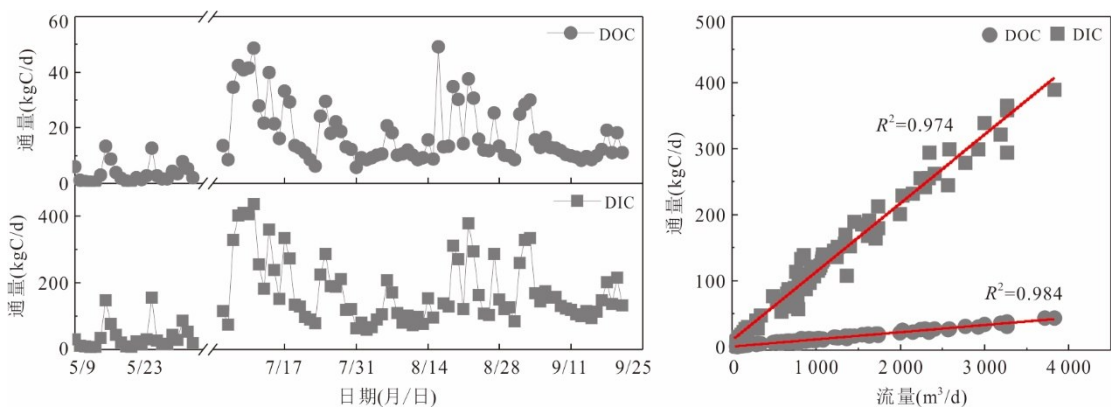


图 6 红泥沟小流域 DOC、DIC 输出通量的动态变化及其与河流流量的关系

Fig.6 Time series of DOC and DIC export fluxes from the Hongnigou catchment and their relationships with stream discharge

表 2 红泥沟小流域出口河水水化学及溶解性碳输出的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of stream water chemistry and dissolved carbon export at the outlet of the Hongnigou catchment

| 参数                                 | 单位    | 消融前期(2013年5月9日至6月1日) |          |                 | 消融后期(2013年7月5日至9月21日) |          |                 |
|------------------------------------|-------|----------------------|----------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------|
|                                    |       | 最小值                  | 最大值      | 平均值±标准差         | 最小值                   | 最大值      | 平均值±标准差         |
| $\delta^2\text{H}$                 | ‰     | -40.45               | -29.19   | -34.53±2.71     | -37.90                | -21.25   | -30.03±2.67     |
| $\delta^{18}\text{O}$              | ‰     | -6.81                | -4.83    | -5.90±0.48      | -6.60                 | -4.85    | -5.77±0.37      |
| TDS                                | mg/L  | 2 743.67             | 4 106.81 | 3 387.07±348.87 | 1 147.41              | 3 128.59 | 2 167.64±491.50 |
| DOC                                | mg/L  | 9.19                 | 19.48    | 15.23±2.30      | 7.46                  | 14.78    | 12.52±1.13      |
| DOC<br>通量                          | kgC/d | 0.38                 | 13.49    | 3.69±3.58       | 5.83                  | 49.21    | 18.00±10.66     |
| DIC                                | mg/L  | 102.70               | 190.31   | 160.74±19.78    | 82.09                 | 167.42   | 125.98±13.97    |
| DIC<br>通量                          | kgC/d | 4.96                 | 155.41   | 38.34±39.89     | 59.22                 | 436.38   | 175.94±96.56    |
| $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ | ‰     | -7.55                | -5.94    | -6.78±0.41      | -9.22                 | -5.27    | -8.00±0.63      |

17日至9月20日)和其间的3个低流量期组成,高、低流量期内河流DOC、DIC和TDS等的输出特征存在着差异.差异最为显著的是TDS浓度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值:在低流量期间呈现出明显的上升趋势,TDS浓度可增至3 000 mg/L以上;在高流量期间则回落,TDS浓度可降至1 000 mg/L左右.河水中DOC和DIC浓度在夏季虽然总体上呈降低趋势,但在低流量期仍相较于高流量期间略有上升.

3 讨论

3.1 影响河流DOC输出的主要因素

研究区河水的DOC输出表现出明显的季节性差异:春末季节冻土层开始消融时的DOC浓度高于夏季活动层消融深度较深时期或完全消融时;DOC的通量则相反,且与流量呈显著正相关.青

高原其他地区(主要是多年冻土区)报道的DOC输出特征也与之类似(Mu *et al.*, 2017; 王烁等, 2017; Gao *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2019; You and Li, 2021).这种在青藏高原具有普遍性的DOC输出特征显著有别于北极、亚北极地区,后者通常在春季融雪期DOC浓度较高,DOC通量输出占主导地位(McGuire *et al.*, 2009; Prokushkin *et al.*, 2011).笔者推测该差异可能是两类地区间水文气候条件的不同造成的.在北极地区,河流径流量的40%~80%集中发生在春季解冻期间(Stein and MacDonald, 2004).在青藏高原地区,水文输入、河流径流与冻土层的消融基本同步,即在冻土消融达到最深时的夏季,降雨也最为集中,且多以暴雨形式发生(安志宏等, 2018),使得降雨-径流事件的“稀释”和“冲洗”效应显著.这导致在消融后期(夏季),青藏高原地区的水文输入对河流中DOC的浓

度和输出通量起着重要的控制作用,使其呈现类似于温带季风区的特征(Lloret *et al.*, 2013),反而有别于同为寒区的泛北极地区.夏季时降雨-径流事件“稀释”效应的存在可由高流量期间河水DOC浓度反而较低流量期间略有下降得到佐证,“冲洗”效应则可由径流虽然有较大波动但河水中DOC浓度总体呈降低趋势得到佐证(图4).

虽然季节性变化特征类似,但本研究区河水中DOC浓度明显高于青藏高原其他河流的报道值(普遍介于0~5 mg/L)(Gao *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2019; You and Li, 2021),而与同属黑河流域的俄博岭小流域的河水DOC浓度(~10 mg/L)接近(Mu *et al.*, 2017).通过流域间主要特征的对比,笔者推断红泥沟小流域河水中较高的DOC浓度与其独特的水文地质条件和地貌特征有关.红泥沟小流域下伏基岩以泥质岩类为主,形成了良好的隔水底板;上覆含水层又主要由泥质岩类风化形成的厚度小、粘质成分含量较高的残坡积物构成,下渗能力和导水能力差,限制了降雨的入渗速度和深度,使得降雨-径流的汇流路径被限制在浅表有机质层内.另一方面,与俄博岭小流域类似(牟翠翠等, 2013),红泥沟小流域内广泛发育热融滑塌、泥石流、地裂缝等冻融扰动地貌(导致其河水中粘粒含量高,呈红色泥浆状,故名“红泥沟”),使有机质层暴露于地表,为流经的浅层径流提供了相对充足的可溶性碳源.

### 3.2 不同消融阶段溶解性碳输出的主控机制

在春末消融前期,研究区河水主要接受积雪融水和活动层内地下冰融水补给(Chang *et al.*, 2018).河水和土壤水 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相似性(图3)指示着汇流路径主要为活动层内的侧向流动.此时活动层仍较浅(大部分时段深度<1 m;图2),水流被限制在富含有机质的浅层土壤中,导致河水中DOC浓

度较高.这与前人解释北极地区春汛期间观测到的DOC浓度峰时所提出的机制一致(Dornblaser and Striegl, 2015).但该机制无法解释为何本研究中DIC和TDS的浓度也在消融前期达到全年最高:此时冰雪融水的流动仍被限制在土壤表层,并未流经深部矿质土,无法获得源于风化作用或DOC矿化的无机溶质,也没有足够的滞留时间将之充分溶滤出来,该区TDS和DIC的浓度分别高达3 000~4 000 mg/L和150~200 mg/L.野外调查表明,冬、春季时红泥沟小流域内地表盐分聚积现象非常显著(图7),尤以河岸带最为突出.据此推断前一年由秋、冬季土壤重冻结时的“排盐”(salt exclusion)效应引起的地表盐分聚积,应是导致春季河水具有较高DOC浓度的另一重要机制.地表冻结时溶质向土壤表层富集并在浅层土壤孔隙中沉淀(张殿发等, 2005; Ireson *et al.*, 2013; Amankwah *et al.*, 2021; Wan *et al.*, 2021),当次年春季冰雪融水流经地表和土壤浅层时,聚积的盐分被溶解、携带进入河流.由于冻结排盐“排出”的不仅仅是DOC,还有大量的无机溶质,从而解释了为何河水中的DIC和TDS浓度也和DOC类似,保持在较高水平.

对于夏季消融后期的溶解性碳输出,由河水与降雨的 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值对比(图3)可推断:在降雨-径流事件导致的高流量期,蓄满流或超渗流等是河道径流的主要汇流路径.这种“快速流”不仅导致径流量急剧增高,形成稀释效应,还导致水-岩作用时间缩短,溶滤作用无法充分进行(Buffam *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2019).该推断也可由河水中DIC和TDS浓度同样也较消融前期显著降低(图4)得到佐证.潘钊等(2018)的研究也表明,红泥沟小流域在高流量时期易形成蓄满产流,导致河水电导率降低.在低流量期,即降雨-径流事件的退水阶段,TDS浓度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的明显上升则指示了水流路径的加深

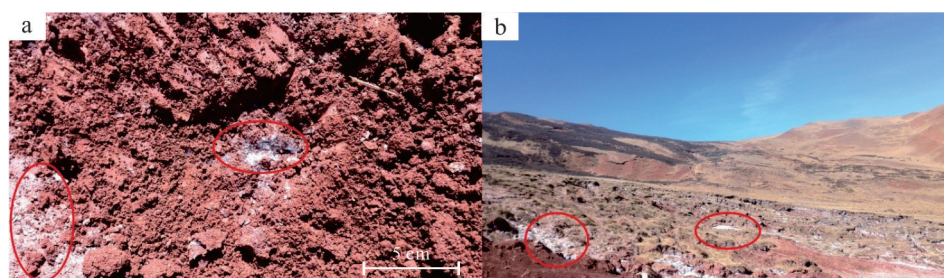


图7 红泥沟小流域河岸带内因土壤冻结“排盐”所导致的地表盐分聚积现象(摄于2013年4月)

Fig.7 Pictures showing the salt accumulation on ground surface in the riparian zone of the Hongnigou catchment caused by salt exclusion during the soil re-freezing (taken in April 2013)

和水流滞留时间的增长. 这种“慢速流”不仅导致流经深部矿质土壤的地下水对河道径流的贡献逐渐增高(Jencso *et al.*, 2009; Hirst *et al.*, 2022), 造成河流中 DIC 浓度的升高, 也使近地表的水-岩作用较“快速流”更为充分, 造成 DOC 浓度的略微增大. 由此可见, 研究区消融后期河流溶解性碳的输出受两种机制的共同作用: 坡面流和浅层地下径流主导着高流量期间水分和溶质的输移, 决定了该阶段河流溶解性碳的总体输出特征; 低流量期间地下水对水分和溶质输移的贡献增大, 塑造了该阶段河流溶解性碳输出的细节特征.

## 4 结论与展望

基于祁连山北麓红泥沟小流域河水 DOC、DIC、TDS 浓度及  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$  值的连续监测, 结合流域内气象、水文、地温等监测数据, 本文对青藏高原季节冻土山区河流溶解性碳的输出规律及其控制因素进行了探索, 得到以下主要结论:

(1) 河流溶解性碳输出具有明显的季节性差异. DOC 和 DIC 的浓度在消融前期(春末)高于消融后期(夏季), DOC 和 DIC 的通量则相反. 夏季时 DOC 和 DIC 的浓度总体呈降低趋势, 但低流量期略高于高流量期间.

(2) 在消融前期, 冻土特征及动态是影响水文过程和溶解性碳输出的主控因素. 过剩冰融水是河道径流的重要水分来源; 冻土将汇流路径限制在富含有机质的土壤浅层; 前一年秋冬季节土壤冻结排盐使溶质向地表聚积, 成为河流溶解性碳的重要来源.

(3) 在消融后期, 溶解性碳输出的主控因素变为水文输入特征、水文地质条件和地貌特征. 相对集中的降雨具有显著的“稀释”和“冲洗”效应, 使河流中 DOC 浓度低但通量高, 有别于同为寒区的泛北极地区; 以细粒残坡积物为主的薄层含水层和广泛发育的冻融扰动地貌使 DOC 浓度高于青藏高原其他河流的报道值.

(4) 在消融后期, 坡面流和浅层地下径流主导着高流量期间(降雨集中时段)水分和溶质的输移, 控制着河流溶解性碳的总体输出特征; 低流量期间(相对干旱时段)地下水对水分和溶质输移的贡献增大, 塑造了河流溶解性碳输出的细节特征.

在全球气候变暖的背景下, 青藏高原冻土退化显著. 季节冻土区碳释放的研究对预测气候变化影

响下高寒山区多年冻土向季节冻土过渡时的碳循环十分重要. 由于野外工作条件恶劣, 水文监测仪器布设及样品采集较为困难, 所以本研究对流域水文过程的刻画不够全面, 对河流溶解性碳的输出机制以定性推断为主, 这也是大多数泛北极和青藏高原冻土区河流溶解性碳研究的局限之处. 在未来的研究中, 应加大对典型小流域的多要素水文过程监测, 精细刻画气候变化下的河流溶解性碳输出过程, 探索流域水文-碳循环过程的耦合机制, 并由典型小流域扩展到祁连山区和青藏高原, 预测气候变化对区域尺度上河流溶解性碳输出的影响.

致谢: 感谢匿名审稿专家提出的有益建议, 感谢中国科学院黑河上游生态-水文试验研究站工作人员在野外工作中的帮助!

## References

- Amankwah, S. K., Ireson, A. M., Maulé, C., et al., 2021. A Model for the Soil Freezing Characteristic Curve that Represents the Dominant Role of Salt Exclusion. *Water Resources Research*, 57(8): e2021WR030070. <https://doi.org/10.1029/2021WR030070>
- An, Z. H., Sun, Z. Y., Hu, Y. L., et al., 2018. Export of Dissolved Organic Carbon in Streams Draining Permafrost-Dominated Areas: A Review. *Geological Science and Technology Information*, 37(1): 204–211 (in Chinese with English abstract).
- Buffam, I., Laudon, H., Temnerud, J., et al., 2007. Landscape-Scale Variability of Acidity and Dissolved Organic Carbon during Spring Flood in a Boreal Stream Network. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112: G01022. <https://doi.org/10.1029/2006jg000218>
- Chang, Q. X., Ma, R., Sun, Z. Y., et al., 2018. Using Isotopic and Geochemical Tracers to Determine the Contribution of Glacier-Snow Meltwater to Streamflow in a Partly Glacierized Alpine-Gorge Catchment in North-eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18): 10037–10056. <https://doi.org/10.1029/2018jd028683>
- Chen, R., Liu, J., Kang, E., et al., 2015. Precipitation Measurement Intercomparison in the Qilian Mountains, North-Eastern Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 9(5): 1995–2008. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1995-2015>
- Cheng, G. D., Jin, H. J., 2013. Groundwater in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau and its Changes. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).

- Dornblaser, M. M., Striegl, R. G., 2015. Switching Predominance of Organic Versus Inorganic Carbon Exports from an Intermediate-Size Subarctic Watershed. *Geophysical Research Letters*, 42(2): 386–394. <https://doi.org/10.1002/2014gl062349>
- Lloret, E., Dessert, C., Pastor, L., et al., 2013. Dynamic of Particulate and Dissolved Organic Carbon in Small Volcanic Mountainous Tropical Watersheds. *Chemical Geology*, 351: 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.023>
- Evans, S. G., Ge, S. M., 2017. Contrasting Hydrogeologic Responses to Warming in Permafrost and Seasonally Frozen Ground Hillslopes. *Geophysical Research Letters*, 44(4): 1803–1813. <https://doi.org/10.1002/2016gl072009>
- Gao, T. G., Kang, S. C., Chen, R. S., et al., 2019. 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*, 686: 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.478>
- Hirst, C., Mauclet, E., Monhonval, A., et al., 2022. Seasonal Changes in Hydrology and Permafrost Degradation Control Mineral Element-Bound DOC Transport from Permafrost Soils to Streams. *Global Biogeochemical Cycles*, 36(2): e2021GB007105. <https://doi.org/10.1029/2021GB007105>
- Ireson, A. M., van der Kamp, G., Ferguson, G., et al., 2013. Hydrogeological Processes in Seasonally Frozen Northern Latitudes: Understanding, Gaps and Challenges. *Hydrogeology Journal*, 21(1): 53–66. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0916-5>
- Jencso, K. G., McGlynn, B. L., Gooseff, M. N., et al., 2009. Hydrologic Connectivity between Landscapes and Streams: Transferring Reach- and Plot-Scale Understanding to the Catchment Scale. *Water Resources Research*, 45(4): W04428. <https://doi.org/10.1029/2008wr007225>
- Liu, Z. W., Chen, R. S., Song, Y. X., et al., 2012. Characteristics of Rainfall Interception for Four Typical Shrubs in Qilian Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 32(4): 333–342 (in Chinese with English abstract).
- Mao, N., Liu, G. M., Li, L. S., et al., 2022. Methane Fluxes and Their Relationships with Methane-Related Microbes in Permafrost Regions of the Qilian Mountains. *Earth Science*, 47(2): 556–567 (in Chinese with English abstract).
- McGuire, A. D., Anderson, L. G., Christensen, T. R., et al., 2009. Sensitivity of the Carbon Cycle in the Arctic to Climate Change. *Ecological Monographs*, 79(4): 523–555. <https://doi.org/10.1890/08-2025.1>
- Mu, C. C., Zhang, T. J., Cao, B., et al., 2013. Study of the Organic Carbon Storage in the Active Layer of Permafrost over the Eboling Mountain in the Upper Reaches of the Heihe River in the Eastern Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Mu, C., Zhang, T., Wu, Q., et al., 2015. Editorial: Organic Carbon Pools in Permafrost Regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *The Cryosphere*, 9(2): 479–486. <https://doi.org/10.5194/tc-9-479-2015>
- Mu, C. C., Abbott, B. W., Wu, X. D., et al., 2017. Thaw Depth Determines Dissolved Organic Carbon Concentration and Biodegradability on the Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 44(18): 9389–9399. <https://doi.org/10.1002/2017gl075067>
- Pan, Z., Sun, Z. Y., Ma, R., et al., 2018. Isotopic Investigation of Rainfall-Runoff Generation in an Alpine Catchment in Headwater Regions of Heihe River, Northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science*, 43(11): 4226–4236 (in Chinese with English abstract).
- Plaza, C., Pegoraro, E., Bracho, R., et al., 2019. Direct Observation of Permafrost Degradation and Rapid Soil Carbon Loss in Tundra. *Nature Geoscience*, 12(8): 627–631. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0387-6>
- Prokushkin, A. S., Pokrovsky, O. S., Shirokova, L. S., et al., 2011. Sources and the Flux Pattern of Dissolved Carbon in Rivers of the Yenisey Basin Draining the Central Siberian Plateau. *Environmental Research Letters*, 6(4): 045212. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045212>
- Song, C. L., Wang, G. X., Mao, T. X., et al., 2019. Importance of Active Layer Freeze-Thaw Cycles on the Riverine Dissolved Carbon Export on the Qinghai-Tibet Plateau Permafrost Region. *PeerJ*, 7: e7146. <https://doi.org/10.7717/peerj.7146>
- Stein, R., MacDonald, R., 2004. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Springer-Verlag, Berlin.
- Striegl, R. G., Aiken, G. R., Dornblaser, M. M., et al., 2005. A Decrease in Discharge-Normalized DOC Export by the Yukon River during Summer through Autumn. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21413. <https://doi.org/10.1029/2005gl024413>
- Walvoord, M. A., Voss, C. I., Wellman, T. P., 2012. Influence of Permafrost Distribution on Groundwater Flow in the Context of Climate-Driven Permafrost Thaw: Ex-

- ample from Yukon Flats Basin, Alaska, United States. *Water Resources Research*, 48(7): W07524. <https://doi.org/10.1029/2011wr011595>
- Wan, H. L., Bian, J. M., Zhang, H., et al., 2021. Assessment of Future Climate Change Impacts on Water-Heat-Salt Migration in Unsaturated Frozen Soil Using CoupModel. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 15(1): 10. <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1302-5>
- Wang, D., Wu, T. H., Zhao, L., et al., 2021a. A 1 km Resolution Soil Organic Carbon Dataset for Frozen Ground in the Third Pole. *Earth System Science Data*, 13(7): 3453–3465. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3453-2021>
- Wang, S., Sun, Z. Y., Hu, Y. L., et al., 2017. Intra-Annual Variation of Dissolved Organic Carbon Export through Stream from an Typical Alpine Catchment in Qinghai-Tibet Plateau: Patterns and Hydrological Controls. *Safety and Environmental Engineering*, 24(2): 1–7, 15 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Liu, T., Wang, L., et al., 2021b. Spatial-Temporal Variations in Riverine Carbon Strongly Influenced by Local Hydrological Events in an Alpine Catchment. *Biogeosciences*, 18(10): 3015–3028. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3015-2021>
- Wild, B., Andersson, A., Bröder, L., et al., 2019. Rivers across the Siberian Arctic Unearth the Patterns of Carbon Release from Thawing Permafrost. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(21): 10280–10285. <https://doi.org/10.1073/pnas.1811797116>
- Woo, M. K., Kane, D. L., Carey, S. K., et al., 2008. Progress in Permafrost Hydrology in the New Millennium. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2): 237–254. <https://doi.org/10.1002/ppp.613>
- You, X. N., Li, X. Y., 2021. Seasonal Variations in Dissolved Organic Carbon in the Source Region of the Yellow River on the Tibetan Plateau. *Water*, 13(20): 2901. <https://doi.org/10.3390/w13202901>
- Zhang, D. F., Zheng, Q. H., Dong, Z. Y., 2005. Mechanism of Soil Salt-Moisture Transfer under Freeze-Thawing Condition. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 25(6): 14–18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Jin, Z. D., Li, F. C., et al., 2013. Controls on Seasonal Variations of Silicate Weathering and CO<sub>2</sub> Consumption in Two River Catchments on the NE Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 547–560. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.004>
- Zhang, S. X., Sun, Z. Y., Pan, Y. X., et al., 2023. Using Temperature to Trace River-Groundwater Interactions in Alpine Regions: A Case Study in the Upper Reaches of the Heihe River. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(4): 95–106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., et al., 2003. Distribution of Seasonally and Perennially Frozen Ground in the Northern Hemisphere. In: Guglielmin, M., Balks, M., Paetzold, R., eds., *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. A.A. Balkema Publishers, Amsterdam.
- Zou, D. F., Zhao, L., Sheng, Y., et al., 2017. A New Map of Permafrost Distribution on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 11(6): 2527–2542. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2527-2017>

## 中文参考文献

- 安志宏, 孙自永, 胡雅璐, 等, 2018. 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*, 37(1): 204–211.
- 程国栋, 金会军, 2013. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化. *水文地质工程地质*, 40(1): 1–11.
- 刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 等, 2012. 祁连山典型灌丛降雨截留特征. *生态学报*, 32(4): 333–342.
- 毛楠, 刘桂民, 李莉莎, 等, 2022. 祁连山多年冻土区甲烷通量与甲烷微生物群落组成的关系. *地球科学*, 47(2): 556–567.
- 牟翠翠, 张廷军, 曹斌, 等, 2013. 祁连山区黑河上游俄博岭多年冻土区活动层碳储量研究. *冰川冻土*, 35(1): 1–9.
- 潘钊, 孙自永, 马瑞, 等, 2018. 黑河上游高寒山区降雨-径流形成过程的同位素示踪. *地球科学*, 43(11): 4226–4236.
- 王烁, 孙自永, 胡雅璐, 等, 2017. 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*, 24(2): 1–7, 15.
- 张殿发, 郑琦宏, 董志颖, 2005. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨. *水土保持通报*, 25(6): 14–18.
- 张淑勋, 孙自永, 潘艳喜, 等, 2023. 基于温度示踪的高寒地区河水与地下水相互作用: 以黑河上游流域为例. *地质科技通报*, 42(4): 95–106.