

多年冻土退化对冻结层上水变化的影响研究

朱 亮, 杨明楠, 刘景涛, 张玉玺, 李 备, 周 冰, 陈 玺

The influence of permafrost degradation on the change of suprapermafrost water : A case study in the source area of the Yellow River

ZHU Liang, YANG Mingnan, LIU Jingtao, ZHANG Yuxi, LI Bei, ZHOU Bing, and CHEN Xi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303060>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River

李云凤, 王文科, 王国庆, 刘翠善, 郑昊昌, 马稚桐 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 10-19

格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析

Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment

黄金廷, 李宗泽, 王文科, 宋歌, 王嘉玮 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 31-37

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性

Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas

王严, 胡卸文, 杨瀛, 于振江, 曹希超 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 40-45

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

贵州深切峡谷区典型岩溶地下河水文水化学特征

Hydrological and hydrochemical regime of a typical subterranean river in a deep canyon karst area: A case study in the Santang underground river, Guizhou

陈旺光, 曾成, 龚效宇, 邵治钦, 邓俊祖, 杨明星 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 19-29



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303060

朱亮, 杨明楠, 刘景涛, 等. 多年冻土退化对冻结层上水变化的影响研究——以黄河源区为例 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 3-13.

ZHU Liang, YANG Mingnan, LIU Jingtao, *et al.* The influence of permafrost degradation on the change of suprapermafrost water : A case study in the source area of the Yellow River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 3-13.

多年冻土退化对冻结层上水变化的影响研究 ——以黄河源区为例

朱 亮¹, 杨明楠¹, 刘景涛^{1,2}, 张玉玺^{1,2}, 李 备¹, 周 冰^{1,3}, 陈 玺¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省/中国地质调查局地下水污染机理与修复重点实验室, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 冻结层上水是支撑寒区生态系统的重要水源和维持寒区水热循环过程的重要纽带, 科学认识冻土退化对冻结层上水的影响作用, 对气候变化加剧下高寒地区水资源及生态保护具有重要意义。针对黄河源区多年冻土退化的水文效应, 基于典型监测点冻土地温、含水率监测数据和黄河沿水文站断面径流变化数据, 分析黄河源区多年冻土退化特征, 探讨冻结层上水水位埋深和补给过程对多年冻土退化的响应。结果表明: 2010—2020 年监测点 0~2.4 m 剖面上平均升温 0.42 °C, 多年冻土上界面埋深由 2.1 m 降至 2.5 m, 平均下降速率 4 cm/a; 以 2018 年为时间节点, 冻结层上水埋深由 0.9 m 以浅降至 0.9~1.8 m 之间; 冻土退化引起活动层融化期(5—10 月)的径流过程提前、径流极值比降低、1 月份径流过程线更加凸出。地温是控制冻结层上水变化的核心要素, 在暖湿化的气候变化条件下, 多年冻土退化将改变冻结层上水的动态特征及其与地表水之间的水力联系, 进一步影响黄河源区的水文生态过程。

关键词: 冻土退化; 冻结层上水; 土壤水; 地表径流; 黄河源区; 气候变化

中图分类号: P641.139

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0003-11

The influence of permafrost degradation on the change of suprapermafrost water : A case study in the source area of the Yellow River

ZHU Liang¹, YANG Mingnan¹, LIU Jingtao^{1,2}, ZHANG Yuxi^{1,2}, LI Bei¹, ZHOU Bing^{1,3}, CHEN Xi¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Pollution Mechanism and Remediation, China Geological Survey/Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 3. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China*)

Abstract: The supra-permafrost water is a vital water source to support the ecosystem and an important link in maintaining the hydrothermal cycle in the permafrost area. Under the intensification of climate change, scientific understanding of the effect of permafrost degradation on the supra-permafrost water is of great significance to

收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2023-06-17

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费项目(YK202312); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230422)

第一作者: 朱亮(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水资源与地下水环境方面的研究。E-mail: liangzhuz@163.com

通讯作者: 杨明楠(1985-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事水循环与水环境演化方面的研究。E-mail: 381477131@qq.com

water resources and ecological protection. Focusing on the hydrological effects of permafrost degradation in the source areas of the Yellow River, this study analyzed the degradation characteristics of permafrost, and revealed the response of the depth of groundwater level and recharge process of the supra-permafrost water to the permafrost degradation, on the basis of the temperature and moisture content of frozen soil at typical monitoring points and the runoff change at the Huangheyan Hydrologic Station. The results show that the average temperature increased 0.42 °C at the 0–2.4 m profile of the monitoring point from 2010 to 2020. The depth of the upper interface of the permafrost reduced from 2.1 m to 2.5 m, with an average decrease rate of 4cm/a. After 2018, the depth of supra-permafrost water level reduced from less than 0.9 m to 0.9–1.8 m. The permafrost degradation led to the runoff process in the melting period of active layer (May–October) being advanced, the ratio of extreme value being reduced, and the runoff hydrograph in January being more prominent. Ground temperature is the dominant factor in controlling the changes of depth of the supra-permafrost water. Under the condition of warm and humid climate change, Permafrost degradation would change the dynamic characteristics of the water above the frozen layer and its hydraulic relationship with surface water, affecting the hydrological and ecological processes in the source area of the Yellow River.

Keywords: permafrost degradation; suprapermfrost water; soil water; runoff; source area of the Yellow River; climate change

多年冻土区地下水系统与非冻土区之间存在显著差别,根据埋藏条件、空间分布和补径排特征,多年冻土区地下水主要分为冻结层上水、冻结层间水、冻结层下水和河湖融区地下水 4 种类型^[1]。其中,冻结层上水赋存于多年冻土上部的季节性融化带中,是多年冻土与地表进行水热交换的重要纽带和支撑高寒植被生态系统的重要水分来源,其空间分布和动态变化是影响寒区水文循环和生态格局演变的关键因素^[2-3]。在全球变暖的气候变化背景下,多年冻土发生广泛退化,尤其是中低纬度地区的高海拔型冻土的退化速度更加显著^[4-7]。作为维持高寒地区水文生态过程的关键地质要素,多年冻土退化一方面使多年冻土中的固态水向液态水转化并对冻结层上水形成有效补给;另一方面多年冻土顶板下降使活动层厚度和冻结层上水埋深增加,引起大气降水、土壤水和冻结层上水“三水”转化关系的变化,直接或间接地影响冻结层上水的水源补给及动态变化过程,并进一步对流域水资源格局及生态功能产生显著影响^[8-10]。近几十年来,在我国以三江源地区为代表的青藏高原多年冻土发育区出现了植被退化、径流衰减等一系列生态环境问题,这些都与多年冻土退化引起的冻结层上水的变化存在密切关系^[11-12]。因此,研究冻结层上水变化对多年冻土退化的响应是揭示气候变化下寒区水循环及生态演变的关键所在。

地下水水位是反映非冻土区潜水资源变化的重

要信息,但在多年冻土区,由于受活动层冻融过程及多年冻土退化等多种因素的影响,水位变化比较复杂且不能完全反映冻结层上水资源的变化特征,融合地温、土壤体积含水率和水位等的多元监测数据集才是准确研判冻结层上水变化的主要依据^[13-14]。在流域尺度上,当多年冻土的覆盖率超过 60% 时,冻融过程将对径流过程产生明显的影响作用^[6],冻结层上水作为多年冻土区地表径流的一个重要补给源,因此,地表径流的变化也是反映冻结层上水变化的重要信息。北极主要河流水文监测资料表明,大部分多年冻土区河流的入海径流量呈现持续增加趋势,与当地降水变化趋势关系不明显,而与气温变化趋势相关性较强^[15]。在我国天山、祁连山的一些流域及长江源区、雅鲁藏布江源区等多年冻土分布区也都存在气候增温胁迫下的径流增加趋势^[16-18]。遥感数据对比分析发现,近年来随着气候变暖,青藏高原多年冻土区的内陆湖泊大多存在面积扩张、水位上升态势^[19-20],比较极端的实例是地处高原腹地的卓乃湖水位持续上涨并发生溃决事件^[21]。这些变化与冰冻圈固态水融化形成新的补给水源进而参与流域水循环具有密切关系。除了引起径流的年际变化外,多年冻土退化对于径流的季节性变化也存在一定的影响。由于冻土退化,活动层增厚增加了活动层的储水能力,20 世纪 80 年代以来黄河源区的春季直接融雪径流系数随着冻融指数的下降而减小,随着气温的持续变暖春汛在

未来可能会逐渐消失。在暖湿化的气候条件下,青藏高原区域地下水资源量在2003—2012年总体上储量增加,年增长率为9.7 mm,地下水的增加引起冬季基流排泄量的增加和地表径流的季节分配趋于平缓^[22-25]。但也有研究表明冻土对径流的季节调节作用主要体现在暖季尤其是6月径流的增加,其余月份径流均减小^[26]。由于径流的季节性变化还与气象条件、人类活动、区域水文地质特征等多方面因素有关,而且不同研究区所采用的径流数据系列及分析方法不同,多年冻土退化对季节性径流变化的影响机制及影响程度等仍是一个有争议的问题,而且在活动层冻结状态下,冬季径流的变化更多地受控于冻结层下水、层间水及河湖融区地下水,对冻结层上水变化的指示作用并不明确。

为深入揭示多年冻土区冻土退化对冻结层上水变化的影响作用,本文结合黄河源区多年冻土退化区的典型冻土监测数据和黄河沿水文站的径流数据,主要探讨冻结层上水水位埋深和冻结层上水的补给过程和补给源对多年冻土退化的响应变化。研究成果为科学认识气候变化下黄河源区冻土退化的水资源及水循环效应提供科学依据及理论支持。

1 研究区概况

黄河在玛多黄河沿水文站以上的河段称河源段,河长285.5 km,流域面积20 930 km²。黄河源区平均海拔高度在4 200 m以上,属高原大陆性半干旱高寒气候,多年平均降水量为326.4 mm,多年平均蒸发量

(E_{601})为797.7 mm。流域的中北部为扎陵湖—鄂陵湖盆地、黄河冲洪积平原,地势起伏和缓,其内湖泊星罗棋布,河溪较多,南部巴颜喀拉山地势高亢、山体纵横,沼泽湿地片状点缀其中。区内具有一定厚度的多年冻土(岩)形成一个较统一的隔水层,多年冻土厚度随海拔高度的降低而变薄,受其控制而出现了冻结层上水、冻结层下水、融区地下水等几种特殊的地下水类型。其中,分布于南北山区和广大丘陵区基岩裂隙冻结层上水,以及分布于山间、山前平原的第四系松散岩类冻结层上水,是该区分布最为广泛的地下水类型。在暖季,大气降水多直接入渗补给地下水,寒冷季节,大气降水多以冰雪形式得以保存,翌年随着暖季的到来,冰雪开始融化,以地表径流入渗的形式补给地下水,因而大气降水与地表水是区内地下水的主要补给来源。区域上基岩山区构成了黄河源区地下水的主要补给-涵养区,各类地下水经过山前冲洪积平原的径流转化后,都以黄河河谷为排泄基准面,向其径流排泄。

黄河源区位于青藏高原东部多年冻土区向季节性冻土区过渡的边缘地带,多年冻土覆盖面积占全区80%以上(图1),且多年冻土具有地温高、厚度小的特点,对气候变化十分敏感。从整个区域上来看,20世纪80年代以来,多年冻土下界面高程普遍升高了50~80 m。多年冻土由大片状逐渐变为岛状、斑状,厚度变薄,部分多年冻土岛完全消失变为季节性冻土^[27]。结合热传导计算模型的模拟结果显示,在不同气候变化情景下,到2100年黄河源区冻土退化幅度可达到22%~50%^[6]。

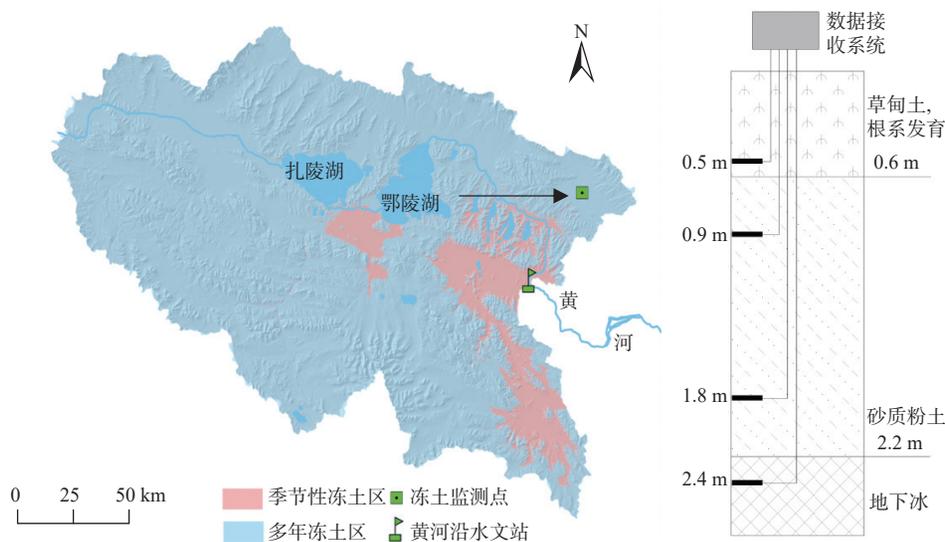


图1 监测点位置及冻土监测剖面示意图

Fig. 1 The distribution of permafrost and monitoring points in the source area of the Yellow River

2 数据与方法

2.1 数据

本文的研究数据主要包括 1960—2020 年气象、水文数据、2010—2020 年冻土监测点的地温、土壤水分(体积含水率)监测数据和 2022 年 9 月—2023 年 9 月的地下水水位、土壤体积含水率监测数据。其中,气温、降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。径流数据为收集的黄河沿水文站的实测径流量。2010—2020 年的地温和土壤体积含水率数据为中科院在黄河源区多格茸盆地的冻土监测点的日均监测数据,监测层位深度分别为 0.5, 0.9, 1.8, 2.4 m; 监测点位于黄河源区东部边缘多年冻土退化明显的多格茸盆地; 监测点所在区的植被类型为高寒草甸, 草甸土厚度约 60 cm, 下部为砂质粉土。2022 年 9 月—2023 年 9 月的地下水水位、土壤体积含水率监测数据来源于课题组于 2022 年 7 月新建的冻土-地下水联合监测站的监测数据, 新建监测站与中科院冻土监测点处于同一个水文地质单元内, 从 2022 年 9 月底开始, 监测数据基本稳定, 监测结果开始具有有效性。

2.2 方法

以黄河源区多格茸盆地多年冻土监测数据为基础, 根据地温和土壤体积含水率的长序列监测结果, 采用趋势分析和对比分析的方法量化多年冻土上界面的退化幅度和冻结层上水水位埋深的变化; 进一步结合区域气温变化趋势划分不同冻土退化, 通过比较不同冻土退化阶段活动层融化期内径流过程的变化, 揭示多年冻土退化对冻结层上水补给过程的影响机制。

3 结果

3.1 地温变化特征

受气温升高的影响, 黄河源区多年冻土退化加剧。从各监测层位地温变化曲线(图 2)上可以看出, 2010—2020 年间, 0.5, 0.9, 1.8, 2.4 m 监测剖面上年均地温均呈波动上升趋势, 10 a 间各层的升温幅度分别为 0.71, 0.45, 0.26, 0.26 °C, 整个监测剖面上平均升温 0.42 °C。各层位年际之间的波动变化趋势一致, 浅层地温的升温幅度较大且波动性强, 而深层地温的升温幅度较小且波动性较弱。

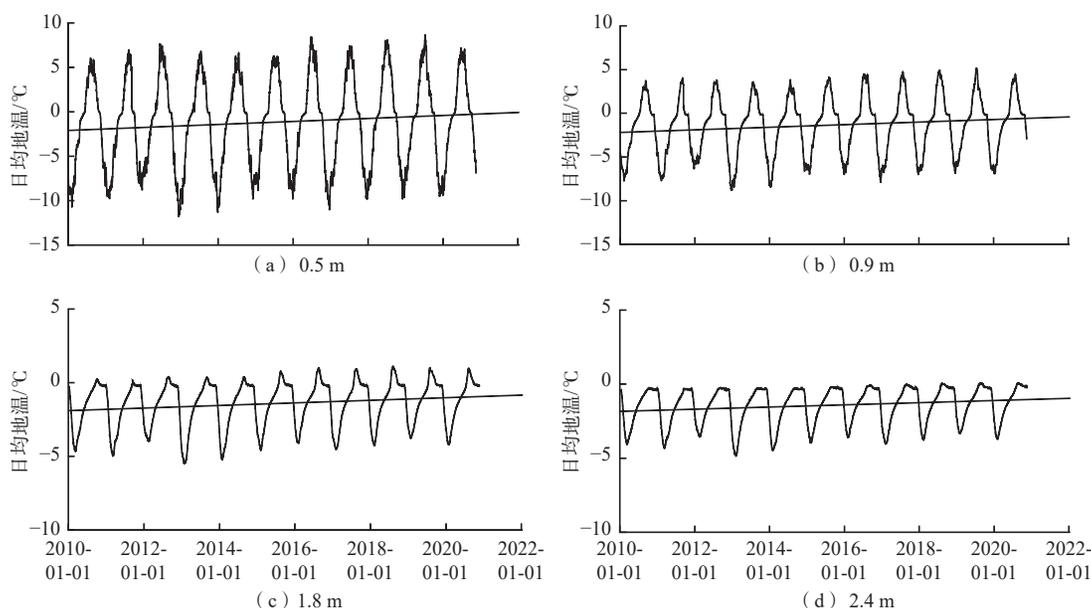


图 2 不同深度监测层位地温变化曲线

Fig. 2 Ground temperature changes in different monitoring layers

从不同层位地温的年内波动看, 随着深度的增加, 地温的谷值和峰值出现的时间不断向后推移, 其中, 0.5 m 地温的谷值和峰值分别出现在 1 月上旬和 8 月上旬, 且到达峰值后随气温的降低而快速降低, 2.4 m 地温的谷值和峰值分别出现在 3 月中旬和 10 月

中旬, 而峰值附近高温的时间持续近 2 个月。这说明表层地温受地表气温影响更加明显, 而深层地温在受气温变化的同时还与地温梯度及地层积温等因素有关^[28-31]。因此, 冻土的融化周期不是某个深度上的融化时间, 而是从最上层开始融化至最下层开始冻结的

一个时期。从各监测层位融化天数(地温 $>0^{\circ}\text{C}$)的变化上看(表1),各监测层位每年的融化天数总体上均呈增加趋势,其中0.5、0.9 m深度上的增速相对缓慢且存在波动,表现出受年度气温变化而变化的特征,而1.8、2.4 m深度上的增速相对较快且稳定。从2018年开始,2.4 m深度上的多年冻土转化为活动层,至2020年融化时间达到了29 d,明确指示了监测点上多年冻土的退化趋势。

3.2 土壤水分变化特征

从2010—2020年土壤体积含水率变化曲线可以看出(图3),总体上各层位土壤体积含水率在年内呈波动变化趋势,且变化幅度随深度的增加而降低;不同深度上土壤体积含水率表现出不同的变化特征。0.5 m土壤体积含水率基本保持稳定;0.9 m土壤体积含水率呈明显下降趋势,尤其是年度含水率的最大值降低最为明显;1.8 m土壤体积含水率均呈增加趋势,其中年度含水率最小值增加较明显,而年度含水率最

表1 不同深度监测层位每年融化(地温 $>0^{\circ}\text{C}$)天数变化
Table 1 Annual change of melting days (ground temperature $>0^{\circ}\text{C}$) from the different monitoring layers

年份	融化天数/d			
	埋深0.5 m	埋深0.9 m	埋深1.8 m	埋深2.4 m
2010	139	113	31	0
2011	132	106	34	0
2012	140	107	42	0
2013	150	109	40	0
2014	142	108	38	0
2015	141	119	55	0
2016	138	113	60	0
2017	146	116	62	0
2018	148	116	67	12
2019	151	124	69	23
2020	147	118	63	29

大值相对稳定;2.4 m含水率的年度最大值和最小值均有明显增加。在整个垂直监测剖面上,土壤水分具有向深部迁移的变化特征。

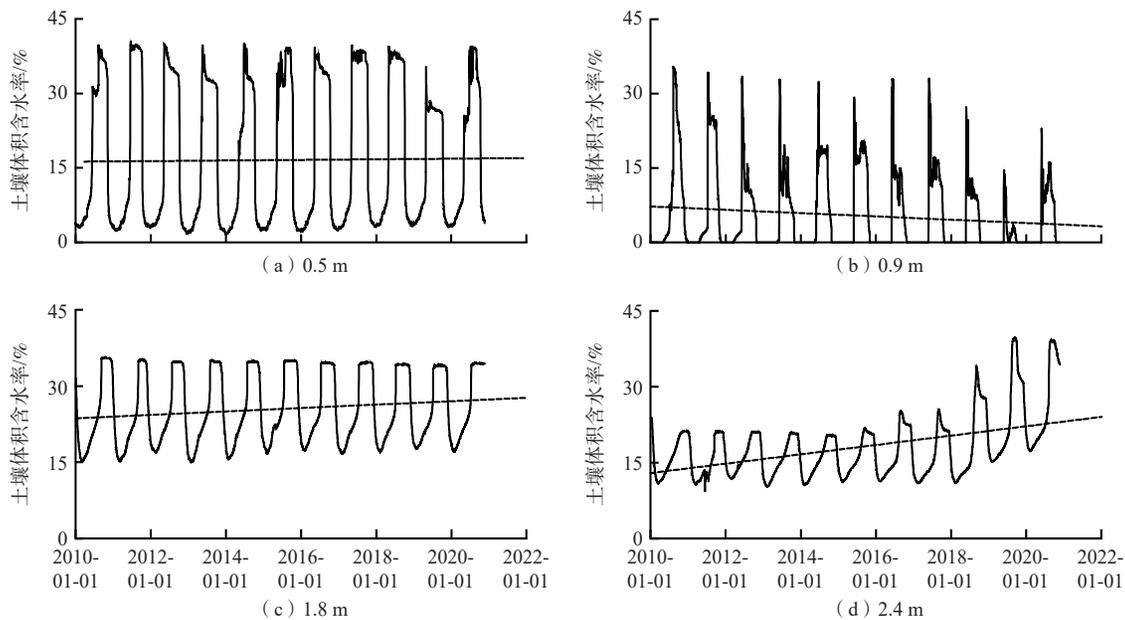


图3 2010—2020年不同深度监测层位土壤体积含水率变化曲线

Fig. 3 Changes of soil moisture content at different monitoring layers from 2010 to 2020

4 讨论

4.1 冻结层上水水位与土壤体积含水率及地温之间的变化关系

冻土属不透水或弱透土层,土壤水分在冻土层的上限附近聚积形成冻结层上水,随着冻土融化深度增加,饱和土壤受重力作用向下运移,进而引起冻结层上水水位下降和包气带厚度增加,因此,冻结层上

水水位变化与土壤水分及地温变化之间具有明确的响应关系^[3]。由于本次收集的2010—2020年的冻土监测项目中无地下水水位数据,无法直观判断冻结层上水水位变化信息。因此本文结合2022年9月—2023年9月的土壤体积含水率与冻结层上水水位监测结果,建立了一种依据土壤体积含水率变化判断冻结层上水水位变化的方法,并以此推断2010—2020年间冻结层上水水位的变化信息。

2022 年 9 月—2023 年 9 月, 冻结层上水水位经历 4 个阶段的变化: 2022 年 9—10 月随着降水量减小, 水位逐渐从 1.4 m 降至 2.6 m; 2022 年 10 月—2023 年 1 月, 随着气温下降, 活动层从上到下逐渐冻结, 在冻结层上水的上部又形成了一个临时不透水层, 冻结层上水表现出一定承压性, 即冻结层上水的冻结承压效应, 进而引起水位微弱上升, 最高升至 1.7 m; 2023 年 1—5 月, 活动层完全冻结, 这一时段内冻结层上水也处于冻结状态, 但监测结果显示的水位仍处于持续下降趋势, 这说明在长达 5 个月的冻结期内, 以固态形式存在的冻结层上水仍可能存在以气态形式向土壤及大气的转换过程; 2023 年 5—9 月, 随着活动层逐渐融化及降水量的增加, 水位上升并随降水量的变化而波动, 但可能受降水量大小的影响, 并未恢复至 2022 年的水平, 基本在 3.5 m 左右波动。综上可以看出, 多年冻土区冻结层上水水位的年内变化过程与一般非

冻土区存在显著差别, 除大气降水外, 温度对冻结层上水水位变化具有重要的控制作用。

不同层位土壤体积含水率也呈现不同的变化趋势。其中 0.2, 0.6 m 深度监测点包气带土壤体积含水率在 2022 年 9 月—2023 年 4 月期间基本稳定在 10% 以下, 5 月份以后含水率出现较大波动, 明显表现出受降水-蒸发控制的含水率变化特征。1.2, 2.0 m 深度监测点土壤体积含水率则对水位变化的节点产生积极响应, 即当水位高于相应剖面深度时, 土壤体积含水率基本稳定在 50% 左右, 当水位降至相应剖面深度以下时, 土壤体积含水率快速下降(图 4), 但在雨季并未出现较大波动, 这说明监测点上降水和蒸发作用对土壤水分变化的影响深度基本介于 0.6~1.2 m 之间。由此可见, 深部土壤体积含水率与水位变化密切相关, 据此可以根据土壤体积含水率的变化特征推断冻结层上水水位的变化。

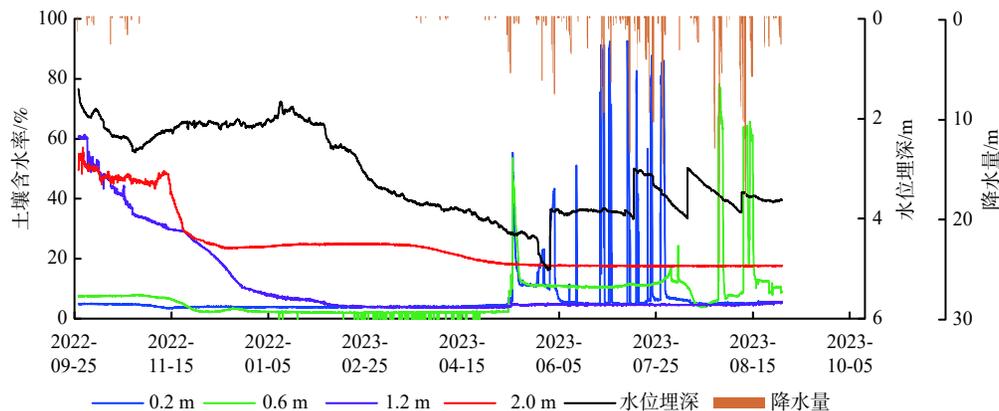


图 4 不同深度土壤体积含水率与冻结层上水水位埋深的变化关系

Fig. 4 Relationship between soil moisture content at different depths and depth of supra-permafrost water

土壤饱和含水率大小与土壤性质有关。黄河源区土壤物理性质的相关测试结果表明, 砂质土壤的饱和含水率一般在 30% 左右; 草甸土孔隙度大、结构疏松, 具有较强的水分吸持功能, 饱和含水率基本在 60% 以上^[32]。结合 2010—2020 年各监测层位地温和含水率波动变化趋势可以看出: 0.5 m 深度的监测层位的草甸土含水率在融化期内基本介于 35%~40% 之间, 大于其它 3 个监测层位的含水率, 但仍未达到饱和状态; 1.8 m 深度的监测层位的土壤体积含水率在融化期内基本介于 34%~35% 之间, 达到饱和状态, 且 10 a 融化期含水率基本保持稳定, 所以, 可以判断该监测点 2010—2020 年融化期内冻结层上水水位埋深一直位于 1.8 m 以浅; 对于 0.9 m 深度的监测层位

的土壤, 2010—2017 年融化期内能够达到饱和但存在较大波动, 2018—2020 年, 含水率的最大值分别降为 24.6%、14.5%、22.9%, 均未达到饱和状态, 因此, 可以判断从 2018 年开始, 融化期内冻结层上水水位埋深由 0.9 m 以浅降为 0.9~1.8 m; 2.4 m 深度的监测层位融化期内的土壤体积含水率在 2010—2014 年基本稳定在 20% 左右, 从 2016 年开始出现微弱上升, 2018、2019、2020 年含水率最大值分别上升至 34.0%、39.7%、39.2%, 也就是说从 2018 年开始, 2.4 m 深度的土壤在融化期内达到水分饱和状态, 即冻结层上水的底板由 2.4 m 以浅下降为 2.4 m 以深。以上分析结果表明, 2018 年是监测区冻结层上水水位下降的重要时间节点, 同时, 地温监测结果也表明 2.4 m 土壤从 2018 年

开始由多年冻土转化为季节性冻土(图2、表1)。由此可见,冻结层上水水位下降与多年冻土退化的时间节点完全一致,两者之间具有明确的响应关系,地温变化对冻结层上水水位年际、年内波动具有重要作用。随着地温不断升高,多年冻土持续退化,冻结层上水底板埋深增大,包气带厚度也随之增加,在不考虑降水量变化等因素的影响时,包气带增加的厚度相当于多年冻土上界面下降的深度。

一年中的最高温度是判断某一深度是否为多年冻土的重要标志,当最高温度出现正值时说明该深度为活动层,而最高温度为负值时说明该深度为多年冻土层。因此,可以根据地温在垂向剖面上的变化规律,在不同层位地温监测结果的基础上,准确识别出最高温度的正负值交界深度,即多年冻土的上界面埋藏深度。根据0.5, 0.9, 1.8, 2.4 m剖面上最高地温的监测结果,分别拟合得到2010年、2020年最高地温与深度之间的变化关系(图5),据此计算得到2010年、2020年最高地温正负值分界的深度分别为2.1, 2.5 m,即2010—2020年多年冻土上界面埋深从2.1 m降至2.5 m,下降速率为4 cm/a,据此绘制2010年和2020年多年冻土及活动层的变化情况如图6所示。由于该监测点位于多年冻土和季节性冻土的过渡地带,属于黄河源区多年冻土退化最为明显的地区之一,所以本次计算得到的年均冻土退化速率符合黄河源区不同区域上多年冻土退化速率(2.2~4.4 cm/a)^[33]的变化趋势。值得注意的是,0.9 m土壤在融化期的含水率由饱和变为不饱和并呈降低趋势,表现出不断干燥化的土壤水分变化特征,在地表植被耗水和冻土退化引起地下水水位进一步下降的双重作用下,这一干燥化土壤层将会呈增厚趋势。多年冻土退化引起包气带厚度增加和局部土壤干燥化能够在客观上增强包气带土壤对水分的储运能力,并将进一步对降水入渗过程、冻

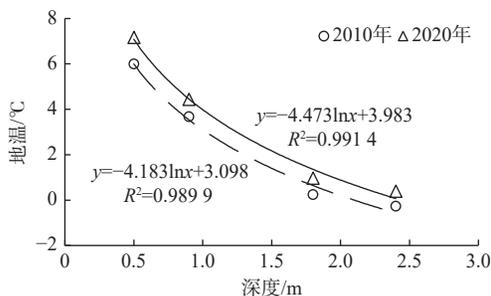


图5 2010年和2020年最高地温随深度的变化趋势

Fig. 5 The change trends of max ground temperature with depth at 2010 and 2020

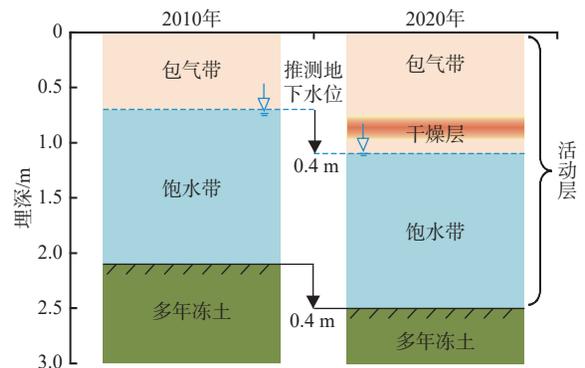


图6 2010与2020年多年冻土及活动层变化概念模型

Fig. 6 Conceptual model of permafrost and active layer evolution from 2010 to 2020

冻结层上水的补给过程产生影响。

4.2 冻结层上水变化与冻土退化的关系

根据黄河源区地下水的补径排条件,流域内各类地下水均以黄河河谷为排泄基准面向其径流排泄,作为地表径流的一个重要来源,冻结层上水补给量约占黄河源区年径流量的14.4%^[9],因此冻结层上水变化可以直观地反映在径流的季节性变化过程中。径流变化是大气降水在地表产流、土壤入渗和蒸散发等多种途径上分配的结果,下垫面性质、包气带厚度、气候条件及人类活动等因素都会对径流过程产生影响^[35]。结合黄河源区近60 a的年均气温变化趋势(图7),可以将冻土变化分为2个阶段:1960—1980年,气温虽有波动,但增温趋势并不明显,可以作为多年冻土稳定阶段;1981—2020年,增温趋势明显,可以作为多年冻土退化阶段。但从2001年开始,位于鄂陵湖下游的黄河源水电站开始运行,至2022年6月大坝彻底拆除,因此,2001—2020年为冻土退化叠加水电站运行阶段。对比不同阶段径流过程变化可以发现,2001—2020年,在丰水期降水量增加的情况下,径流峰值不增反降,而且枯水期径流明显增加,总体上径流过程线更加扁平化,季节性变化趋于均匀(图8)。这充分

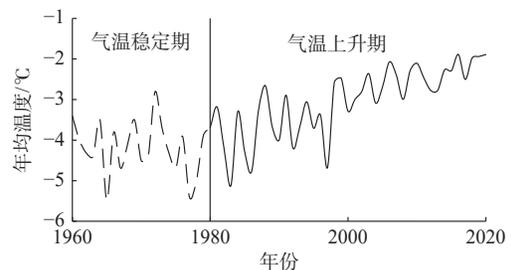


图7 玛多气象站1960—2020年年均气温变化

Fig. 7 The changes of average annual temperature at Maduo meteorological station from 1960 to 2020

体现了水电站蓄水发电过程中削峰补枯的径流变化特征,人为调蓄很大程度上掩盖了冻土退化对径流过程变化的影响作用。因此,为了消除水电站调节的影响,在冻土退化阶段的径流过程特征分析中去除了 2001—2020 年的变化数据。

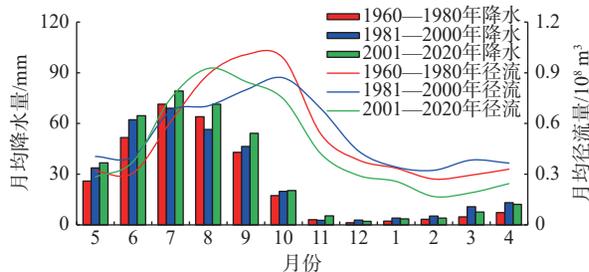


图 8 不同冻土退化阶段降水量和径流量月均变换

Fig. 8 Seasonal variation of precipitation and runoff in different frozen soil degradation stages

由于冻结期内活动层基本处于冻结状态,河流主要受冻结层下水和河湖融区地下水补给^[1],因此,冻结层上水变化引起的径流变化主要体现在融化期(5—10月)。与 1960—1980 年相比,1981—2000 年径流过程的变化主要表现在 2 个方面:(1)5—10 月的径流过程线趋于扁平化,径流峰值降低,极值比由 1.7 减小至 1.2,径流系数由 0.10 降为 0.08,即融化期内各月的径流趋于均匀,这反映了多年冻土退化引起包气带厚度增加,包气带土壤对降水调蓄能力增强的变化特征;(2)在降水量年内分配基本稳定的情况下,6—8 月份径流出现明显增加,且峰值由 9 月提前至 8 月,这反映了地温增加引起活动层中地下冰融化提前并对河水形成补给的变化特征。

在 1960—1980 年和 1981—2000 年的退水过程线上,1 月份都存在一个径流平稳期,这与非冻土区的退水曲线逐渐降低的变化趋势存在较大差别。其原因

在于,在地温梯度作用下,活动层的融化和冻结都是从表层逐渐向深层发展,前人的研究结果也显示部分区域活动层下部在 1 月份还存在正温层^[34],因此,在降雨径流逐渐退去的情况下,1 月份的径流平稳期是活动层下部融水的补给作用形成的。1981—2000 年退水曲线在 1 月份凸起更明显,凸起部分的径流量由 1960—1980 年的 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加至 1981—2000 年的 $0.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,这说明在冻土退化阶段,深部多年冻土融化对冻结层上水的补给量增大。

研究不同冻土退化阶段径流变化特征可知,冻土退化对冻结层上水补给变化的影响主要表现在 3 个方面:活动层融水对冻结层上水的补给提前,包气带土壤对降水的调蓄能力增强,多年冻土融水对冻结层上水的补给增强。但包气带厚度增加带来的地表入渗增量是否能够对冻结层上水形成有效补给仍是一个有待深入研究的问题。有研究认为冻土退化使地下水储水空间增大从而增加降水入渗补给量,支撑这一观点的证据为枯水期径流量的增加^[9],但由于枯水期内冻结层上水基本处于冻结状态,径流主要以冻结层下水和河湖融区地下水补给为主,因此枯水期径流的变化特征并不能完全代表降水入渗补给量的变化特征。

据此,冻土退化影响下冻结层上水补给变化可以概化为图 9 所示,在多年冻土稳定阶段,冻结层上水主要由当年的降水入渗补给量和活动层中上年度冻结过程中形成的地下冰融水量两部分组成。冻结层上水处于“补给—冻结—融化”的循环过程,在冻结过程中,土壤的重力水、毛细管水以及潜水蒸发的水分受温度势的作用上升,在冻结锋面聚集冻结^[36-37],这就是前一年枯水期内活动层上部虽然处于非饱和状态,但仍可以在第 2 年融化初期产生融水补给量的原因,冻结层上水的补给总体上随降水量的变化而变化。

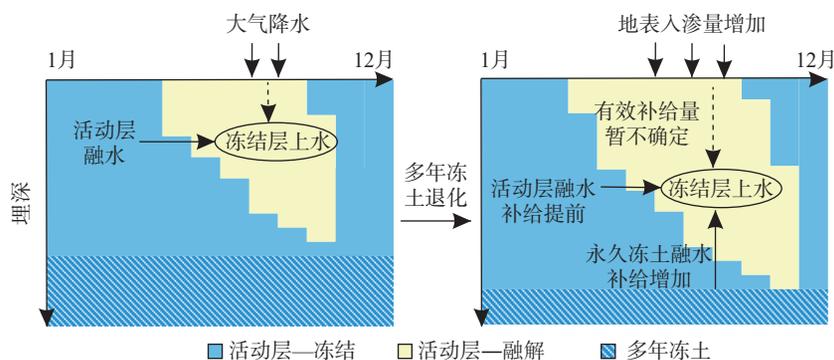


图 9 冻土退化影响下冻结层上水补给变化示意图

Fig. 9 Changes in the recharge source of supra-permafrost water under the influence of permafrost degradation

在多年冻土退化阶段,每年都会有一定厚度的多年冻土融化转变为活动层,在引起冻结层上水水位下降、包气带厚度增加的同时,多年冻土融水也形成了冻结层上水的一个新的水量来源,而且地温不断升高导致活动层的融化时间提前、融期增长,地下冰开始融化参与水循环的时间越来越早而结束的时间越来越晚。

5 结论

(1)土壤温度控制了冻结层上水水位的年际变化和年内波动的总体态势,随着地温升高和多年冻土退化,融化期内冻结层上水整体向深部运移并引起水位埋深的增加。垂向剖面上土壤体积含水率变化可以作为判断冻结层上水变化的一个重要依据。多年冻土退化引起的隔水顶板下降是多年冻土区冻结层上水水位下降的一个重要原因,因此冻结层上水水位的下降不能作为判断多年冻土区冻结层上水水资源衰减的依据,这是区别于非冻土区潜水资源变化的一个重要特征,对于科学认识气候变化下多年冻土区冻结层上水水资源演变具有重要意义。

(2)随着冻融过程加剧,活动层融水对冻结层上水的有效补给时间提前,非饱和带土壤的降雨调蓄能力增加,多年冻土融水对冻结层上水的补给增强,这些变化引起活动层融化期内(5—10月)径流过程趋于均匀,1月份径流量微弱增加。但活动层厚度增加对冻结层上水降水入渗补给量变化的影响机制仍是一个亟待深入研究的问题。

野外监测是获取冻土水文过程关键数据的重要手段,但冻土区的野外监测数据存在一定先天性不足,因为当土壤和冻结层上水冻结时,监测探头的工作原理决定了含水率和水位的监测结果不能准确反映冻结过程中水分的运移过程和变化规律。因此,下一步将在野外在线监测的基础上开展冻融过程的室内物理模拟,弥补冻结期内野外监测数据的失真问题;同时,进一步补充完善野外监测系统,在小流域尺度上形成冻土、降水、产流、蒸散发等综合要素观测系统,支撑开展小流域尺度上的水平衡研究工作。

致谢: 针对黄河源区多年冻土分布及退化等基本特征,中国科学院吴吉春老师带领项目组进行了野外踏勘,并且在冻土监测站点布设、监测设备选取及安装等方面给予了大力支持,特此表示衷心地感谢!

参考文献 (References):

- [1] 程国栋,金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11. [CHENG Guodong, JIN Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 曹文炳,万力,周训,等. 黄河源区冻结层上水地质环境影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(6): 6-10. [CAO Wenbing, WAN Li, ZHOU Xun, et al. A study of the geological environmental of suprapermafrost water in the headwater area of the Yellow River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(6): 6-10. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 常娟,王根绪,李春杰,等. 青藏高原连续多年冻土区的冻结层上水季节动态及其对活动层土壤冻融过程的响应特征[J]. 中国科学(地球科学), 2015, 45(4): 481-493. [CHANG Juan, WANG Genxu, LI Chunjie, et al. Seasonal dynamics of suprapermafrost groundwater and its response to the freeing-thawing processes of soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2015, 45(4): 481-493. (in Chinese with English abstract)]
- [4] OLIVA M, PEREIRA P, ANTONIADES D. The environmental consequences of permafrost degradation in a changing climate[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617: 435-437.
- [5] CZERNIAWSKA J, CHLACHULA J. Climate-change induced permafrost degradation in Yakutia, East Siberia[J]. Arctic, 2020, 73(4): 509-528.
- [6] CAO Wei, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Soil hydrological process and migration mode influenced by the freeze-thaw process in the activity layer of permafrost regions in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 184: 103236.
- [7] SHENG Yu, MA Shuai, CAO Wei, et al. Spatiotemporal changes of permafrost in the Headwater Area of the Yellow River under a changing climate[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(1): 133-152.
- [8] 代军臣,王根绪,宋春林,等. 三江源区径流退水过程演变规律[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1342-1350. [DAI Junchen, WANG Genxu, SONG Chunlin, et al. Study on the law of runoff retreat in the three-river headwaters region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(6): 1342-1350. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MA Qiang, JIN Huijun, BENSE V F, et al. Impacts of degrading permafrost on streamflow in the source area of

- Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(4): 225 – 239.
- [10] SONG Chunlin, WANG Genxu, MAO Tianxu, et al. Linkage between permafrost distribution and river runoff changes across the Arctic and the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(2): 292 – 302.
- [11] 罗斯琼, 李红梅, 马迪, 等. 三江源冻土-植被相互作用及气候效应研究现状及展望 [J]. 高原气象, 2022, 41(2): 255 – 267. [LUO Siqiong, LI Hongmei, MA Di, et al. Review and prospects of frozen soil-vegetation interaction and climate effects in the three rivers source region[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(2): 255 – 267. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 叶仁政, 常娟. 中国冻土地下水研究现状与进展综述 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 183 – 196. [YE Renzheng, CHANG Juan. Study of groundwater in permafrost regions of China: status and process[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 183 – 196. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 曹伟, 盛煜, 吴吉春, 等. 黄河源区不同类型冻土土壤水分入渗特性 [J]. 生态学报, 2021, 41(2): 655 – 664. [CAO Wei, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Soil moisture infiltration characteristics of different types of frozen soil in the Source Area of the Yellow River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 655 – 664. (in Chinese with English abstract)]
- [14] HUANG Huan, CHEN Changfu, MO Xiaojie, et al. Mechanisms of salt rejection at the ice-liquid interface during the freezing of pore fluids in the seasonal frozen soil area[J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 449 – 457.
- [15] FRAMPTON A, PAINTER S L, DESTOUNI G. Permafrost degradation and subsurface-flow changes caused by surface warming trends[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 271 – 280.
- [16] 李玉平, 韩添丁, 沈永平, 等. 天山南坡清水河与阿拉沟流域径流变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 127 – 135. [LI Yuping, HAN Tianding, SHEN Yongping, et al. Characteristics of runoff variation and its response to climate change of Qingshuihe River and Alagou River watersheds in southern slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 127 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘金平, 任艳群, 张万昌, 等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究 [J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 275 – 287. [LIU Jinping, REN Yanqun, ZHANG Wanchang, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 275 – 287. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蒋佑承, 刘蛟, 商滢. 气候变化对多年冻土区径流组成的影响分析——以长江源区为例 [J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 63 – 68. [JIANG Youcheng, LIU Jiao, SHANG Ying. Research on the influence of climate change on the different runoff components in the permafrost area: A case study of the source area of the Yangtze River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(3): 63 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [19] ZHU Yu, LIU Shiyin, YI Ying, et al. Spatio-temporal variations in terrestrial water storage and its controlling factors in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Hydrology Research*, 2021, 52(1): 323 – 338.
- [20] 张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 等. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展 [J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 115 – 125. [ZHANG Guoqing, WANG Mengmeng, ZHOU Tao, et al. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1): 115 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘宝康, 李林, 杜玉娥, 等. 青藏高原可可西里卓乃湖溃堤成因及其影响分析 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 305 – 311. [LIU Baokang, LI Lin, DU Yu'e, et al. Causes of the outburst of Zonag Lake in Hoh Xil, Tibetan Plateau, and its impact on surrounding environment[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 305 – 311. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264 – 1273. [ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in qinghai-tibet plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1264 – 1273. (in Chinese with English abstract)]
- [23] XU Ran, HU Hongchang, TIAN Fuqiang, et al. Projected climate change impacts on future streamflow of the Yarlung Tsangpo-Brahmaputra River[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 175: 144 – 159.
- [24] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021,

- 19(1): 103 – 110. [BAI Yanling, WANG Fang, LIU Yang. Quantitative analysis of runoff evolution and driving factors in the upper reaches of Datong River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 103 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [25] YU Guoqiang, WANG Qian, ZHU Lifeng, et al. Regulation of vegetation pattern on the hydrodynamic processes of erosion on hillslope in Loess Plateau, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2023, 11(1): 4 – 19.
- [26] 宋蕾. 青藏高原黄河源区冻土水文效应模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [SONG Lei. Simulation study on hydrological effect of frozen soil in the source area of the Yellow River in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [27] JIN Huijun, HE Ruixia, CHENG Guodong, et al. Changes in frozen ground in the Source Area of the Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 045206.
- [28] 张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 1961—2010 年新疆季节性最大冻土深度对冬季负积温的响应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1419 – 1427. [ZHANG Shanqing, PU Zongchao, LI Jinglin, et al. Response of the maximum depth of seasonal freezing to the cumulated negative temperature in Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1419 – 1427. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 孙永寿, 刘弢, 李燕. 黄河源区降水径流一致性及其影响因素分析 [J]. 人民黄河, 2021, 43(10): 51 – 55. [SUN Yongshou, LIU Tao, LI Yan. Analysis on the consistency of precipitation and runoff in the source area of the Yellow River and its influencing factors[J]. *Yellow River*, 2021, 43(10): 51 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [30] LU Zhixiang, FENG Qi, ZOU Songbing, et al. The heterogeneity of hydrometeorological changes during the period of 1961—2016 in the source region of the Yellow River, China[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2020, 12(2): 104 – 118.
- [31] 李万志, 刘玮, 张调风, 等. 气候和人类活动对黄河源区径流量变化的贡献率研究 [J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 985 – 992. [LI Wanzhi, LIU Wei, ZHANG Tiaofeng, et al. The contribution rate of climate and human activities on runoff change in the source regions of Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 985 – 992. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 段中华, 乔有明, 全小龙, 等. 黄河源区湿地、草地土壤理化性质和碳氮组成及其稳定同位素特征分析 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 247 – 252. [DUAN Zhonghua, QIAO Youming, QUAN Xiaolong, et al. Analysis of nitrogen and carbon composition and stable isotope characteristics and physicochemical properties of wetland and grassland soil in source region of the Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 247 – 252. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 王生廷, 盛煜, 曹伟, 等. 基于地貌分类的黄河源区多年冻土层地下冰储量估算 [J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 801 – 810. [WANG Shengting, SHENG Yu, CAO Wei, et al. Estimation of permafrost ice reserves in the source area of the Yellow River using landform classification[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 801 – 810. (in Chinese with English abstract)]
- [34] ZHU Liang, YANG Mingnan, LIU Jingtao, et al. Evolution of the freeze-thaw cycles in the source region of the Yellow River under the influence of climate change and its hydrological effects[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022, 10(4): 322 – 334.
- [35] ZHU Liang, LIU Jingtao, YANG Mingnan, et al. Evolutionary trend of water cycle in Beichuan River Basin of China under the influence of vegetation restoration[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2021, 9(3): 202 – 211.
- [36] 张光辉, 费宇红, 申建梅, 等. 降水补给地下水过程中包气带变化对入渗的影响 [J]. 水利学报, 2007, 38(5): 611 – 617. [ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, SHEN Jianmei, et al. Influence of unsaturated zone thickness on precipitation infiltration for recharge of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(5): 611 – 617. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 孙才奇, 李川川, 陈艺鑫, 等. 天山冰缘环境活动层冻融过程定位观测研究 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 272 – 279. [SUN Caiqi, LI Chuanchuan, CHEN Yixin, et al. A long term monitoring of frost heaving in periglacial environment in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 272 – 279. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳