

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0132

DU Fa, LI Zongxing, Gongjue Zhaxi, et al. A review of research on groundwater and its evolution in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(6):1789–1803. [杜发, 李宗省, 贡觉扎西, 等. 多年冻土地下水及其变化研究进展[J]. 冰川冻土, 2023, 45(6):1789–1803.]

多年冻土地下水及其变化研究进展

杜发^{1,2}, 李宗省^{1,3}, 贡觉扎西⁴, 桂娟^{1,2}, 周慧玲^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 祁连山同位素生态水文与国家公园观测研究站/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070; 4. 西藏自治区水文水资源勘测局 阿里水文水资源分局, 西藏阿里 859000)

摘要: 冻土的低渗透性改变了地表水下渗, 导致寒区流域产汇流过程发生改变; 其季节冻融及引起的活动层深度变化, 改变了土壤含水量从而调蓄流域储水量。过去数十年, 气候变暖引起冻土退化重塑了寒区水文地质环境、改变了地下水热状况; 而多年冻土退化的后果是其所含有的固态冰向液态地下水转化, 进而改变多年冻土地下水的时空模态、生态环境和工程设施基础, 影响多年冻土的碳汇功能, 以及释放封存于其内的温室气体并进一步加速气候变化。尽管水化学和数值模拟技术的发展提升了人们对于冻土地下水补径排和循环机理的理解, 但冻土区恶劣的环境和直接监测地下水的困难, 仍然使冻土地下水研究存在巨大挑战。本文通过梳理多年冻土地下水相关文献, 刻画了多年冻土地下水的时空模态, 探讨了冻土与地下水的相互作用, 认为在未来的研究中, 水化学方法应更加侧重于冻土地下水动态, 数值模拟应更加侧重于地下水热过程。另外, 还整合了气候变化背景下多年冻土地下水变化的相关研究成果, 描述了从补给区-排泄区、冻土融化起始-长期退化至消失过程中地下水的赋存、补径排变化以及这些变化所带来的影响。最后, 尝试性探讨了冻土地下水研究未来可能的发展, 以期对多年冻土地下水水文、水资源和生态环境研究提供有益参考。

关键词: 多年冻土地下水; 水化学; 冻土地下水模型; 冻土退化; 生态水文效应

中图分类号: P642.14; P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)06-1789-15

0 引言

冻土指在0℃或0℃以下含有冰的各种岩石或土, 其中多年冻土区约占北半球陆地面积的24%^[1]。冻土作为重要的寒区要素^[2], 其低渗透性形成隔水层改变了地表水下渗和蒸散发过程, 进而改变整个流域的产汇流; 其季节冻融及导致的活动层深度变化, 改变土壤含水量和含热量, 进而调蓄流域储水量^[3]。对冻土认识最早起源于19世纪早期, 直到1936年, 苏联多年冻土委员会在莫斯科建立了研究冻土水文的实验室, 开始了冻土地下水的正式研究^[4]。20世纪60年代, Williams^[4]整理并公开了第

一本综合性的冻土地下水出版物, 涵盖了彼时环北极圈地区人们对于多年冻土地下水野外现象和理化性质的基本认识。21世纪初, 学者们分别论述了全球主要多年冻土区地下水研究进展, 如加拿大^[5]、中国^[6-8]、阿拉斯加^[9]等。在过去几十年中, 冻土地下水尤其在水化学方法和数值模拟方面取得较大发展^[7], 包括冻土地下水水化学^[10-11]、融区^[12]、热融湖塘^[13]、冻土退化水热过程^[14-15]、冻土地下水模型^[16]等一些综述性文章相继出版。

随着全球气候的持续变暖, 对其十分敏感的寒区水文过程也已经并将持续发生显著改变, 带来的影响也将不断显现^[3]; 寒区水体多相态加速转换导

收稿日期: 2023-03-30; 修订日期: 2023-09-20

基金项目: 国家自然科学基金区域发展联合基金重点项目(U22A20592); 国家重点研发计划项目(2020YFA0607702); 甘肃省拔尖领军人才项目; 中国科学院青年交叉团队项目(JCTD-2022-18); 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项; 甘肃省创新群体项目(20JR10RA038); 中国工程科技发展战略甘肃研究院咨询研究项目(GS2022ZDI03)资助

作者简介: 杜发, 硕士研究生, 主要从事冻土地下水研究. E-mail: dufa0211@126.com

通信作者: 李宗省, 研究员, 主要从事高寒山区生态水文与国家公园研究. E-mail: lizxhhs@163.com

致水文过程剧烈变化^[17]进而引起水循环的结构、速度、时空过程、要素组成及其水文与生态效应发生改变。北半球作为主要的多年冻土区,环北极圈、青藏高原多年冻土地下水关系着原居民饮水、生活、基础设施、矿业开发和生态环境等各方面;地下水通常可以提供更安全和可持续的水源^[18],尤其是冻结期,冻土地下水是这些区域的唯一水源;然而它们都面临着气候变化、资源开发和人类活动增加所带来的影响和挑战。地下水资源几乎占全球饮用水需求的一半,气候变化对地下水水质和安全的影响是一个国际关注的问题^[14]。因此,研究冻土地下水,对于寒区水循环、水资源演变形势、寒区生态环境和工程建设具有重要价值^[7,14]。

本文中,我们主要梳理了2000年以后多年冻土地下水研究的相关文献;尽管在许多研究冻土地表水文过程的文献中涉及了一些地下水的知识,但本

文的研究重点是以地下水为主的低温水文地质过程。通过对这些文献整合、分析,本文从多年冻土地下水赋存和动态、多年冻土与地下水之间的水热作用、冻土地下水化学、冻土地下水模型和冻土退化对地下水的影响的角度进行了综述,以期多年冻土区地下水动态变化、水资源、气候变化和生态环境的研究提供参考。

1 多年冻土地下水赋存和动态

1.1 多年冻土地下水赋存

在多年冻土区,冻结作用改变了含水层的固有特性,降低了储水介质的渗透性^[5]。多年冻土严格控制地下水的分布,并直接影响其埋藏、补给、径流、排泄条件、水动力性质^[19]。通常按照地下水与冻土的空间分布关系,将冻土地下水分为冻土层上水、冻土层中水和冻土层下水三类(图1)。

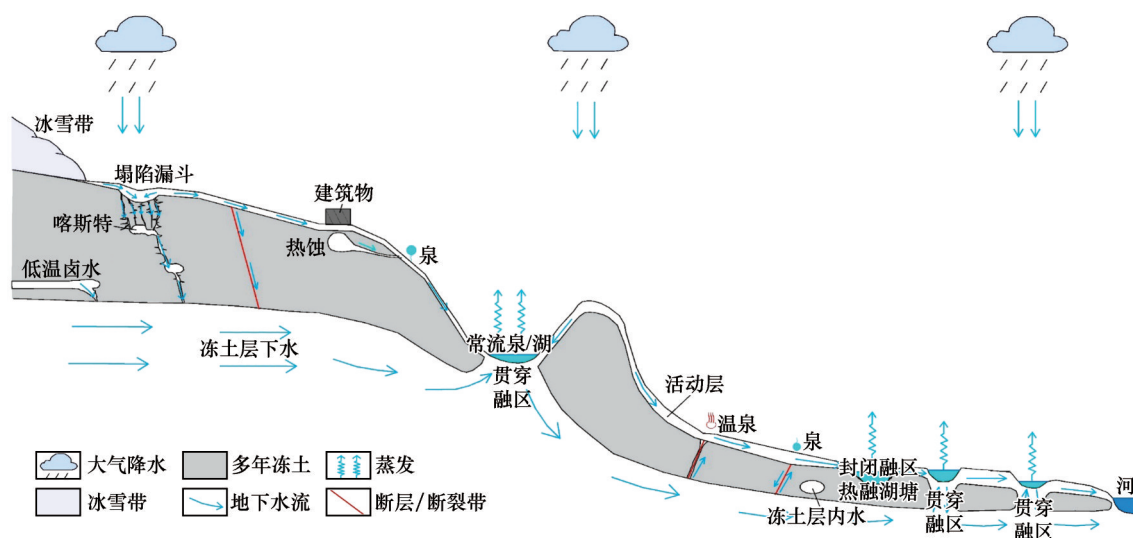


图1 多年冻土地下水时空模态概念图

Fig. 1 Conceptual map of groundwater distribution, recharge, runoff, discharge and circulation in permafrost regions

1.1.1 冻土层上水的赋存

冻土层上水分布于冻土层之上的活动层内^[7]。尽管影响冻土层上水形成和分布的自然因素有很多^[20],但将多年冻土的分布作为核心去认识冻土层上水的赋存规律,则发现整体上仍存在纬度性特征和垂直分布特征。纬度性特征表现为:由北向南(逐渐由大片连续多年冻土区过渡为不连续、零星和岛状多年冻土区),冻土层上水的赋存条件逐渐由差变好^[7,9,18],由“局部富集”^[7]逐渐演变为面状不连续普遍赋存且局部特征复杂^[18,21-24]。垂直分布由高到低具有类似规律且局地特征更为复杂,是连续

山区及断裂冰岩带冻土层上水的主要特点,这是因为近地气温和降水、表层成分、坡度的改变影响了冻土条件^[20]。

1.1.2 冻土层中水的赋存

冻土层中水赋存于冻土层之内或被冻土层半包围,水位因冻土厚度不同而各异。一般将其分为三个亚类^[7],较大水体之下的融区水是最广泛和主要的类型^[18]。研究表明,封闭融区水多在小湖或河流下面形成,水力连通性仅限于地表水和冻土层上水^[12];开放融区水完全穿透多年冻土,连接了冻土层上水和冻土层下水;二者均属于融区通道水。孤

立融区水位于冻土层内,以封闭的未冻水形式存在,也认为是冻土层内水。裂隙、构造、河湖冻土层中水被普遍观测到^[19,21],其赋存往往与局部地质条件密切相关。

1.1.3 冻土层下水的赋存

冻土层下水位于多年冻土层之下。在多年冻土较薄的地方,分布于松散岩层或基岩中;在多年冻土层厚的地方,分布于风化裂隙、沉积含水层或断裂带^[5]。例如,早期北极、亚北极地区的供水井、矿井和油井所穿透的冻土层下水,多分布于砂、砾及淤泥松散沉积物岩层(冻土厚 30~106 m)中或更深的侏罗系沉积砂岩含水层(冻土厚 320~500 m)中^[4],随后的研究也发现了赋存于基岩裂隙和沉积岩孔隙^[25]、陆相碳酸盐岩层(冻土厚 150~550 m)^[26]中的冻土层下水。青藏高原沱沱河地区^[24]、不冻泉地区^[21]的冻土层下水赋存于山区多年冻结层之下的裂隙和溶隙内,或赋存于第四系多年冻结层之下的松散孔隙内。大兴安岭地区,冻土层下水分布于基岩的风化构造裂隙^[7]。

1.2 多年冻土地下水动态

在没有多年冻土的地区,地下水位通常受地形控制,形成地形控制的嵌套地下水流系统^[27]。而多年冻土的存在,使地下水的类型、水文地质特征、水体转换发生改变^[7];使地下水补径排和循环受局地下垫面景观(如地形、地质、土壤、海陆分布和植被等)的控制而变得复杂;地下水位不仅受融雪和降雨补给量的影响,还受活动层融化深度和冻土区补给路径的影响^[2]。

1.2.1 连续多年冻土区地下水动态

(1) 补给来源

连续多年冻土地下水的补给来源主要是冰雪融水和降水^[5,7,28-29],其补给方式为扩散流动或通过塌陷漏斗^[29]、裂隙及构造融区^[7]、碳酸盐岩溶^[30]通道等。冰缘环境的多年冻土区,冰川作用也会改变局部和区域的地下水流动系统^[31],较大的冰川下压力导致地表水注入对地下水补给^[32]。

(2) 流动

连续多年冻土区冻土层下水与冻土层上水基本无水力联系,因此冻土层上水往往形成活动层中的壤中流,在冻土层上沿地形流动;而连续多年冻土内或其下地下水的流动路径往往与热状态密切相关^[28]。在高纬多年冻土区,地下水的流动多发生在碳酸盐岩岩溶和裂隙基岩中^[30,33];而高山地带冻

土地下水聚集于破碎带,并泄流汇集于邻近谷地和盆地^[7]。此外,冻土层下也观测到地下水的流动^[28,34]。

(3) 排泄

连续多年冻土地下水以汇入河流、泉、开放水域、形成冰凌等方式排泄。例如,青藏高原连续多年冻土地下水通过沼泽湿地蒸发、泉、河道、裂隙等融区发生排泄^[7],在冬季形成冰椎等^[35];加拿大西部北极地区地下水排泄形成冰凌和常年开放水域^[33],而河流冰凌的出现是多年冻土区地下水常年排泄的证据^[29];布鲁克斯山脉地下水以泉水形式流出,补给河流基流和冬季水流^[30];阿拉斯加北极地区地下水通过冻土中的贯穿融区排泄,在阿拉斯加北坡形成泉水或汇入北冰洋^[34]。

1.2.2 不连续多年冻土区地下水动态

在不连续的多年冻土区,虽存在冻土的低温范围相对于连续区较小,然而局部因素变化会让温度有很大的空间变化;总体上冻土层上水和冻土层下水之间的水力联系会更为频繁,水动力特征也会因局部地质因素不同而有较大差异。此外,冻土的季节冻融增加,活动层深度也会季节性变化,导致不连续冻土区的地下水动态具有季节性特征^[36]。

(1) 补给

不连续冻土区,冻土地下水的补给除了冰雪融水和降水外,溪流和河水^[9]、活动层和冻土之间未冻结带的季节储水和释放,也是冻土地下水的主要来源。例如,Li 等^[37]和 Gui 等^[38]发现在青藏高原,冰川积雪融水、冻土融水和降水会混合渗透转化为地下水,而冻土的不连续区和其间融区的存在也会使地表水和地下水转换频繁而互为补给源^[37]。冻土地下水通常由未冻结的南坡补给后传输至谷底,其间未冻结区的补给可以从多年冻土层下面径流穿过多年冻土层^[34]。

(2) 径流

相较于连续区,不连续多年冻土区地下水除在活动层^[39]、构造裂隙、岩溶流动外,冻土之间的不连续区域、融区也是主要的流动通道;地下水会形成更深的流动路径,可以在冻土层之间或之下。高寒山区地下水流动受地形梯度和高海拔补给的驱动与维持^[40],地下水排放到低梯度溪流的流动时间比流动到高梯度溪流的时间长^[9]。斜坡上冻土层上水补给径流的流动路径为冻土层上覆的土壤有机层^[38]。

(3) 排泄

不连续冻土区,地下水的排泄形式以补给河流为主。当活动层逐渐饱和并形成壤中流后,其排泄方式主要有:或在孤立低洼汇集为浅层非承压含水层^[41];或沿岩溶、断裂等径流路径排泄补给河流基流^[42-43];或在湖泊、河流附近的贯穿融区及不存在多年冻土的区域排出地表^[34]。在森林冻土带,冻土地下水可能被森林吸收和补给河道径流,形成独特的森林-冻土水循环^[44]。定量分析发现,在具有浅高梯度河流的陡峭山谷中,地下水对河流的贡献高于宽广山谷平缓的低坡度河流^[9];地下水对河流的贡献季节

性变化,年内大部分时间冻土地下水对河流最高补给量达88%,而春季融解期,冻土层上水排泄补给河流流量超过90%^[36];高寒山区冰雪冻土带各水体混合转换的冻土地下水排泄对河流的贡献率约为80%^[38]。

2 多年冻土与地下水之间的水热作用

2.1 多年冻土对地下水的作用

多年冻土因处于冻结、富含冰具有低渗透性,往往作为区域隔水层,其冷生过程会改造局地水文地质条件,使冻土地下水的时空模态具有依赖于温度和水体多相态转变的特殊规律(图2)。

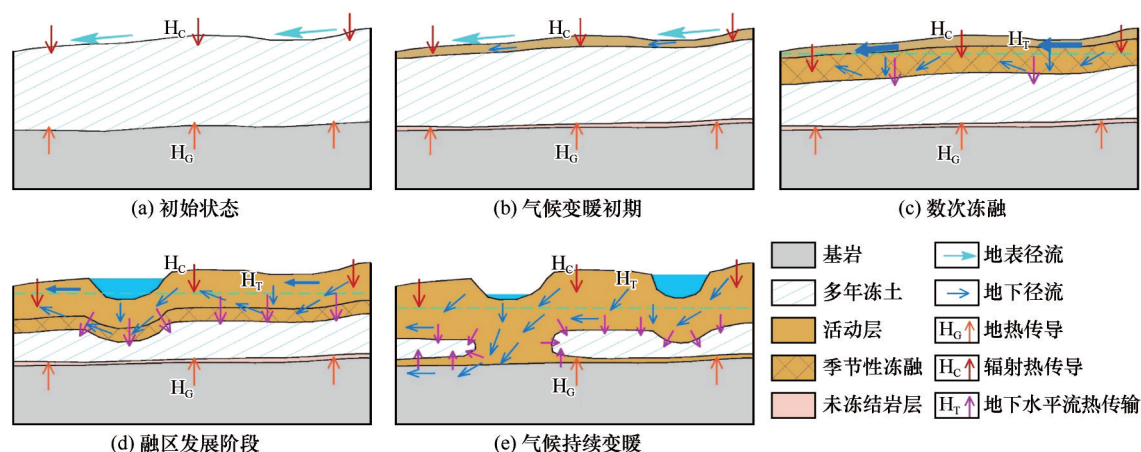


图2 多年冻土与地下水相互作用的水热过程概念图

Fig. 2 Conceptual map of hydrothermal processes in the interaction between permafrost and groundwater: initial state of permafrost (a), early stage of climate warming (b), undergone multiple freeze-thaw cycles (c), development stage of taliks (d), continued climate warming (e)

2.1.1 多年冻土形成隔水层改变地下水垂向运移

具有弱透水性的多年冻土形成隔水层^[19],从根本上改变了水分的垂向渗透,进而改变了冻土地下水的流动路径及循环^[5,39,45]。首先,降低地表水与中深层地下水的联系,导致大部分融雪和降雨变成冻土层上的直接径流^[2]。其次,极大阻断了冻土层上水对冻土层下水的补给,例如,Evans等^[43]研究表明多年冻土区总体积95%的地下水流沿浅表冻土活动层流动,而只有3%的水流穿过冻土层汇入冻土层下水。最后,使冻土地下水具有更浅的活动层径流路径^[46],且流动深度与冻土面积相关。此外,多年冻土形成的顶部隔水层可使地下水具有承压性,水头较高^[43]。

2.1.2 冻土调蓄地下水对径流的补给

冻土冻融改变了活动层的深度和表层土壤的蓄水能力,进而对地下水补给径流起着调控作用。多年冻土融化先会暂时储存于活动层;随着融化的

继续,冻土层上水和冻土融水混合会快速形成壤中流;冻土融化结束时,补给径流的水大部分是上一冻结期储存在活动层中的水^[39]。研究表明冻土融化期开始后1个月,直接径流比最大,随后活动层深度增加,土壤释放水分的速度变慢,直接径流比下降^[47]。不同的冻土规模和活动层深度的调控作用不同:地下水通量随多年冻土覆盖面积的减小而增加,从连续到不连续多年冻土的过渡区容易发生水文变化^[48];薄层冻土在冻结期对地下水结冰的影响较大,在解冻期对地下水排泄补给基流的影响较大^[49];表层60 cm以上活动层解冻对地下水补给径流量的增加有促进作用,而深度大于60 cm活动层增加会导致地表径流减少,衰退过程减慢^[50]。

2.1.3 冻土的反复冻融改变含水层结构

反复冻融会改变土壤的理化性质、破坏土壤或岩石结构,导致岩层物质分解成松散的碎屑^[51],增加了土壤的可蚀性。由于土壤质地的不同,不同土

层冻融循环对土壤孔隙结构的影响不同: 经过反复冻融的亚砂土、碎石土类结构变得疏松, 孔隙增多, 孔隙度增大, 透水性增强^[7]; 反复冻融的高寒草甸, 表层土壤细颗粒填充更深的孔隙和裂缝, 土壤孔隙连通性和土壤水分入渗速率则呈下降趋势^[52]。透水性增加的岩层, 随着冻土层上水对深部地下水的补径排条件更加有利, 为冻土层下水的富集提供空间, 岩层含水性可能会发生变化。此外, 当温度低于土壤中水的冻结温度时, 部分土壤水冻结膨胀并扩大土壤孔隙体积, 随含水量的增加冻胀加剧; 而当冰融化后扩大的孔隙体积无法完全恢复到冻结之前的大小。冻融次数不同, 对含水层结构的破坏程度不同, 室内控制实验也证明了这点^[53]。

2.2 地下水对多年冻土的影响

多年冻土严格控制冻土地下水的赋存和补径排, 反之, 地下水对多年冻土的影响主要是促进多年冻土退化, 该现象已被普遍认识到。多年冻土热状态主要受垂直热传导和潜热控制, 但研究发现平流热传输会显著加快多年冻土的融化速度^[54-55]。这是因为, 显著的地下水流会带动相对温暖的冻土层上水补给冻土层下水, 其平流热传输影响冻土解冻的速度和模式, 并进一步增加了地下水流量, 形成了一种“反馈”机制(图2), 进而增加的地下水流量会导致更多的地下水流量^[56]; 孤立的高地下水流速事件(如解冻初期地下水流速、流量的短暂增加)也对地温具有潜在影响^[57]。定量分析表明, 仅考虑热传导时冻土的退化速率比同时考虑热传导和平流热传输时冻土的退化速率要慢^[56]; 当存在横向地下水流时, 冻结的活动层解冻时间会提前1个月^[57]; 早期解冻速率尤其受到水流的影响, 并且地下水流绕过冻土和流经冻土对融化的影响不同, 后者提高了早期解冻速率。此外, 地下水平流热传输影响多年冻土的分布^[13], 仅考虑热传导和同时考虑平流热传输时冻土演化明显不同, 而最大影响发生在补给区之下^[56]。

融区是指多年冻土中未冻结的一部分或未冻结层。封闭融区可能形成于小湖或河流之下, 开放融区贯穿多年冻土并连接多年冻土层上、下的含水层^[12]。融区的存在加强了地表和地下的水力联系, 使冻土对近地表热响应敏感并作用于冻土。对比存在地下水流和不存在地下水流两种情况下湖底稳定多年冻土的厚度, 后者比前者大2~5倍; 同时具有平流热传输时融区附近冻土融化时间比仅通过热传导冻土融化时间减少一半^[54]。在开放融区形

成之前, 湖底多年冻土融化主要由热传导控制, 当水力条件导致湖泊和地下多年冻土含水层之间向上或向下流动时, 融化速度大大增加^[58]。

热融湖塘是自然或人为因素引起的活动层增厚, 导致地下冰或富冰多年冻土层发生局部融化, 地表土层随之沉陷而形成热融洼地并积水形成的湖塘^[1]。青藏高原近50年来热融湖塘数量扩张了约158%, 研究表明, 其数量的增加主要是流水侵蚀了富含冰的冻土引起崩塌^[59], 而其面积的扩张是由于湖水侵蚀湖岸的含冰冻土而导致湖岸坍塌^[60]。显然, 热融湖塘会导致多年冻土退化, 对周围多年冻土产生较大热输送, 使冻土上限增大, 并且对深部土层温度和多年冻土厚度影响较大^[61]。大部分情况下, 距离湖塘越近, 多年冻土的厚度越薄^[62]。热融湖塘对下部冻土的热作用还受到热融湖塘的面积、形状、深度、水温及湖水下部冻土层的地温状况等因素的影响^[63-64], 随季节变化而不同^[65]。

3 多年冻土地下水的水化学特征

冻土地下水化学特征受围岩、地质构造、地下水系统和温度等较多因素的影响^[11], 要总结其类型和主要离子规律十分困难。然而, 水化学方法却是过去几十年研究冻土地下水补径排特征和循环规律的重要手段, 统计发现, 1991—2011年间发表的使用水化学方法研究冻土地下水的文献增长了约10倍^[10]。本节中, 我们对已有成果中不同水化学示踪剂在研究冻土地下水时的不同侧重点进行梳理, 以供进行冻土地下水研究时参考。

3.1 水化学指示的冻土地下水补给源和排泄路径

依赖于水的相变过程中发生的同位素分馏以及由此产生的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 回归斜率差异, 氢氧稳定同位素是解析冻土地下水来源的常用手段^[10]。在北极和亚北极地区, 氢氧同位素已被普遍用于研究冻土地下冰物质来源^[66]、浅部冻土地下水来源解析及补给源的季节性变化^[39, 41, 67]、中深部冻土地下水来源解析和不同水体之间的转换^[36, 68-69]等。不像环北极圈存在较多工业和生产用水的地下深井, 青藏高原相关研究对以冻土层上水、泉水等为主的浅层冻土地下水进行了补给源解析^[67], 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素揭示了补给源的空间差异^[70]和年内变化^[38]。不能忽略的是, 稳定同位素进行分割时潜在的误差会造成分析结果的不确定性, 这对水分来源的定量识别存在一定的限制^[71]。

刻画不同深度冻土地下水补径排特征的示踪剂不同。评价冻土层上水在活动层中的流动路径,溶解有机碳(DOC)是有效的示踪剂,因为与相邻非冻土区相比,近地表土壤富含有机物而具有较高DOC和较低的溶质浓度^[72];将稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与DOC相结合,可综合解析冻土层上水来源和补给河流的径流机制与路径^[39,67]。对于较深的冻土地下水,主要化学离子与稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$)的结合使用,能有效评估多年冻土区、季节冻土区的地下水流动路径和水力连通性^[73]以及补径排变化^[41]。放射性同位素氚(^3H)和氡(^{222}Rn)质量平衡模型近年来也被用于量化多年冻土地下水排泄特征^[74]。要注意的是,基于示踪剂的径流分割方法将整个流域作为“黑箱”处理^[71],仅根据水文输入和输出间的同位素浓度关系来确定水体的转化关系,无法准确刻画从一个端元至另一个端元之间的产汇流过程。因此,更高的时空采样率有助于提高对水文机制的认识。

3.2 水化学指示的冻土地下水年龄

研究冻土地下水年龄和循环的主要方法是环境示踪剂法。常见的示踪剂有放射性同位素碳-14(^{14}C)、氚(^3H)^[10-11]和有机物示踪剂如氟利昂(CFC_s)、六氟化硫(SF_6)等^[75];其中, ^3H 、 CFC_s 和 SF_6 是测定年轻地下水的方法^[76-77],它们在冻土区地下水测年中的适用性和敏感性存在差异^[75]; ^{14}C 测年上限为35~40 ka^[69,76],适用于测量中、老地下水。当使用 ^{14}C 测年时,需要先校正非大气来源的稀释,以补给时的初始 ^{14}C 活度作为起点^[21]; ^{13}C 可用于校正,并且含水层中 ^{13}C 丰度在土壤衍生的溶解无机碳(DIC)和碳酸盐矿物之间存在显著差异,是地下水中DIC演变的良好示踪剂^[40];通过实测数据建立 ^{14}C - ^3H 相关曲线,也可反推出初始的 ^{14}C 的浓度用于校正;考虑到多年冻土区采样和化验的艰苦,使用 ^3H 和 ^{13}C 混合校正模型可作为最常用的 ^{14}C 测年校正模型^[69,76]。将水化学离子、稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)、放射性同位素(^3H 、 ^{14}C 和 U)及甲烷水合物烃类等多种示踪剂结合,往往用来分析不同深度冻土地下水的循环演化^[78-79]。必须要考虑的是,放射性示踪剂的应用受其浓度大小和示踪剂来源影响,导致其初始输入值确定困难和校正方法准确性有局限;而 CFC_s 和 SF_6 精度受校正因素如温度、过量空气和生物降解等影响。因此,根据局地条件选择合适的示踪剂进行冻土地下水测年尤为重要。

3.3 水化学指示的冻土地下水温度/环境

地下水中的气体受补给时大气成分、盐度和温度的影响,而水位线以下的惰性气体浓度将会得以保持^[33];这些惰性气体有三种组成成分,温度影响其分馏和分配^[80]。因而,惰性气体(He 、 Ne 、 Ar 、 Kr 、 Xe)能够估算地下水补给温度。例如,Utting等^[33]估算出地下水补给温度在0~5℃之间,进而可以比较地下水补给温度与排泄温度,来确定补给地下水是否将热量平流至地下;Saltel等^[69]估算出不同地下水补给温度,并与地下水年龄相结合,进而重建了一个大型含水层系统所记录的古气候环境。此外,利用详细的水化学组分数据,评估多年冻土地下水的水化学形成环境也被证明有效^[77]。要注意的是,使用惰性气体刻画补给温度时必须考虑到放射性衰变产生的惰性气体同位素,包括氚产生的 ^3He 、 α 衰变产生的 ^4He 和 ^{40}K 产生的 ^{40}Ar ^[33,69]。

3.4 水化学指示的冻土地下水污染

目前关于冻土地下水污染的研究较少,因为多年冻土区人类活动一般较少,水体的污染发生在一些工矿区。利用不同位置矿井中地下水的主要化学离子和同位素(^{18}O 、 D 、 ^3H 、 ^{14}C)浓度的变化,能有效评价地下水污染情况;例如,Stotler等^[68]评估发现采矿爆破和钻井用盐水改变地下水化学成分,并随着地下水循环演化造成污染。铀(U)是地下水中的一种潜在污染源,由于多年冻土区的低温环境会显著抑制铀还原,铀金矿等存在天然铀的地区的冻土层下水具有较高的铀浓度;当冻土退化时,冻土层下水向地表更多地排泄会加剧铀的迁移,进而造成水污染。将 ^{234}U - ^{235}U - ^{238}U 浓度与稳定同位素特征和水龄相结合^[81],是研究多年冻土地下水铀迁移机制的有效手段,可以帮助我们应对潜在的地下水铀污染威胁。

4 冻土退化对地下水和区域环境的影响

过去60年全球气候变暖,多年冻土不断退化^[7,13,82-83]。研究表明,多年冻土退化会引起地下水流系统的重新激活^[48,84],水文循环从地表水转变为以地下水为主的系统,进而影响当地水文、生态、工程基础设施甚至气候^[85-86](图3)。虽然地下水是冻土退化后直接变化的部分,但它不易观测,因此很少有单独去研究冻土退化对地下水影响的文章,往往通过其变化后引起地表水文过程及区域环境的改变来反映。

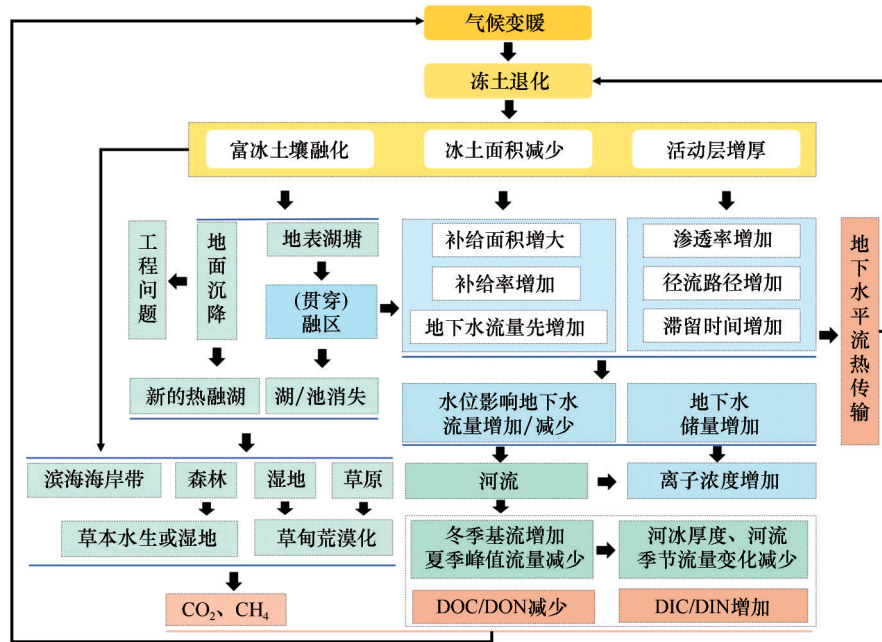


图3 气候变化背景下多年冻土地下水的变化

Fig. 3 Changes in permafrost groundwater under a warming climate

4.1 冻土退化引起地下水的变化及其影响

4.1.1 冻土退化引起地下水的变化

在补给区,多年冻土融化导致补给区的面积扩大、补给期延长、补给率增加、冻土融水补给比例升高^[85]。冻土层上水补给增加,有助于冻土之间的不连续区域以及融区的发展,其扩张和贯通会增加冻土层上、下的水力连通性^[87],进而改变冻土层上水的排泄结构、冻土层下水的补给结构和局部水循环结构。而深部地下水补给的增加可能导致多年冻土从底部融解的速度增加,反过来又加速冻土退化^[56]。

冻土退化改变原本地下水的流动方式。多年冻土的覆盖面积减少,会在近地表形成一个未冻结的含水层,冻土融水首先会暂时增加地下水流量,而地下水位高度决定最终冻土地下水流量的增减^[46,48,88]。多年冻土上界面加深,建立了一个逐渐向下增长的浅层地下水流系统,垂向渗透率增加^[85],更多的水从低导水率的深层通过^[45]。而深层多年冻土消失会导致深层地下水流路径的形成^[84],地下水循环越来越多地通过地下进行,而不是通过多年冻土层上面的不透水土壤的直接径流^[89]。此外,随活动层增厚地下水具有更长的径流时间^[5],具体的影响机制为:①活动层增厚使得地下水垂向流动渗透而不是直接平流,从而增加径流时间;②多年冻土转变为季节性冻土使径流方向偏离了直接

排泄的方向;③活动层中的水季节性冻结固定导致了径流时间延迟^[90]。

除了北极的一些海岸带,补给河流基流是冻土地下水最主要排泄方式。当前,多年冻土退化引起其补给的河流基流增加已被普遍记录到^[91-92]。基流的年内变化主要发生在冬季和春季^[93];冬季基流增加、夏季峰值流量减少^[48,83]。这些变化可能是活动层增厚使通过多年冻土层上含水层的流量增加而实现的,也可能是河流下方未冻结区的冻土层上水补给量增加来实现的^[42,84,88,94]。虽然刚开始时,不连续多年冻土区比连续多年冻土区的冻土退化更容易引起基流的增加^[91];然而,随着长期的持续退化,不连续的、零星的和孤立的多年冻土区的径流量呈现显著的减少趋势,而连续多年区径流量呈现显著的增加趋势。这主要是不连续多年冻土区,冻土横向退化、范围减小,先前储存在地表附近的水的渗透增加,导致地表缺水;连续多年冻土区垂直退化占主导地位,增厚的活动层下面仍然是一个低渗透性的冻结层,维持表层富水^[95]。试验模拟印证了这点,即温度升高的情况下,冻土融化先导致排水量增加,随后多年冻土退化进一步发展至完全融化,排水量再次减少^[90]。虽然流入河流的地下水总量增加,然而冻土层上水对基流的补给比例却在下降^[48],这也增加了基流的停留时间,最终增加了复合河水的停留时间。

冻土退化、活动层增厚引起地下水流动机制的改变增加了地下水的储存能力,在地下水位上升的地方,甚至在深层含水层的较大深度区间内弹性储存量发生变化的地方,地下水储存量将显著增加^[73,91,94]。进一步的研究表明,冻土退化引起地下水储量的增加与多年冻土面积负相关^[96]。

冻土退化、多年冻土转化为季节冻土的过程中,它所含的固态冰转化为液态地下水,释放封存于地下冰中的有机碳库,温室气体和甲烷的排放量会增加,多年冻土的碳库功能被削弱,甚至会创造碳源^[97],导致大面积土壤碳循环的重大变化。通过地下水排放进入北极湖泊的横向 CH_4 输入量可能很大,并且构成了将地下冰固液转化中 CH_4 的产生与通过湖泊的大气排放联系起来的重要途径^[98]。此外,冻土所含冰的融化使冻土斜坡的不稳定性增加、表层地貌改变^[64,85,99],在不同生态系统其变化特征不同:冻土湿地生态系统,冻土退化导致湿地泄流,排水网络连贯,影响湿地分布^[45,55,85];高寒草地因冻土退化,草原萎缩为草甸,甚至出现沙漠化^[100];森林生态系统,冻土退化会导致其转化为草本水生或湿地生态系统^[101];喀斯特地区,新的热融湖塘会随冻土退化而形成,已有湖泊、池塘会因贯穿融区的发展将消失^[99,102];滨海多年冻土区,多年冻土退化将使近海排放的地下水增加,进而改变海冰分布和近海岸的海水循环^[85]。

4.1.2 冻土地下水变化的影响

冻土地下水流动的改变和排泄的增加会造成不同影响。一方面,地下水流动路径加深将导致积水范围和地表蒸发的速率降低;地下水流速的增加将改变特定场地的岩土工程条件,并增强地下水排放现象,如冻胀和结冰^[85];由于非冻结水的可用性增加,冻胀率增加,可能对许多工程结构如建筑物、公路、铁路和管道产生不利影响。另一方面,由于地下水排放增加,结冰活动的规模将会增加。增加的地下水流会加剧冲刷率,进而不成比例地增加溶解无机物溶质^[103]。而地下水补给河流流量比例增加的潜在影响有:①河流流量的季节性变化减少;②季节性河流温度发生变化;③河流冰厚度减少,冰破裂时间缩短^[48]。

4.2 冻土退化对地下水的水化学特征的影响

上文提到,冻土退化引起地下水流动路径变长和排泄量增加等。流动路径变长,地下水中的元素含量会因植物和微生物的吸附和吸收而降低;相反,

由于土壤的淋溶或基岩的风化,一些元素的浓度可能会沿流动路径增加。表层土壤和泥炭层产生的DOC和溶解有机氮(DON)不再直接径流向河流,而是被微生物迅速利用转换而衰减,分解在活动层或地下水中^[91,104]。随着地下水对河流补给量增加,河流中的DOC和DON输出减少、DIC和溶解无机氮(DIN)输出增加^[105],例如,Walvoord等^[91]发现,补给了育空河25%流量的地下水,贡献了河流DOC和DON的5%~10%,以及DIC和DIN的35%~45%。

此外,地下水主要离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)的浓度会随着多年冻土退化和地下水位降低而显著增加,这是由于与有机浅层土壤的相互作用减少,与深层矿物层的相互作用增加^[106];冻土退化也能改变水中的微量元素(如Ni、Mn等)含量^[107]。存在季节流量变化的区域,当发生春季融水和夏季降水事件时,冻土层上水中的DOC浓度升高、总溶解氮(TDN)浓度和主要离子浓度降低;夏季干旱期,有机物浓度下降,硅酸盐和碳酸盐矿物溶解比例升高;而冬季基流中TDN浓度略有增加,硅酸盐与碳酸盐溶解比例较低^[108];数值模拟表明,产生这些变化的本质是不同季节冻土层上水流动路径的改变,以及地下水与地表水之间的水力联系改变^[109]。

值得注意的是,在热融湖塘的形成、扩张和排干过程中,气候变暖、冻土退化可导致其周围高含冰量沉积物的融化,并反过来影响湖水和地下水的化学性质^[63]。一项来自热融湖的沉积物序列分析显示,热融湖塘长期发展演化过程中沉积物矿物粒度减小、主要化学元素浓度降低、有机质含量增加^[110];另一项研究显示,冻土融化使得热融湖塘的离子浓度和电导率升高^[111]。

5 多年冻土地下水模型的发展

多年冻土区气候环境恶劣,现场观测数据缺乏,因此,数值模拟成了研究冻土水文机理和预测未来演变趋势的重要手段^[5,14,16]。冻土地下水模型也称为低温水文地质模型^[14],主要分为三类^[16]:综合低温水文模型(具有耦合的地表和地下过程)、低温水文地质模型(仅模拟地下过程)以及在通用多物理建模环境中实现低温水文地质过程的模型。本节,我们简要对比当前冻土地下水模拟的应用和差异。

5.1 地下水、热过程的耦合及发展

早期开发的冻土地下水模型,为研究复杂水文

地质环境中地下水流和热条件之间的关系提供了很好的理解^[112]。然而大多数情况下,最初的这些模型不适于理解多维的冻土地下水流动系统^[16]。随后逐渐开发了 SUTRA 模型^[113-114]、FEFLOW 模型^[115-116]、HEATFLOW 模型^[55,117]、GEOtop 模型^[118]、MODFLOW 模型^[48,119]、FlexPDE 模型^[84,120]等二、三维模型和耦合冻土模块的分布式水文模型 MIKE SHE 模型^[121]、GBEHM 模型^[122]等。为了更细致地刻画低温冻融过程对地下水流和能量传输的影响,建模人员通过建立冰含量和水力传导率之间的关系、耦合动态冻融过程及其对土壤能量平衡、水力和热力性质的影响等措施^[118],来不断调整改进这些模型^[16]。

5.2 冻土地下水模型的应用

季节性冻融和地下水文地质结构对地下水补给和排泄的影响是多年冻土水文学中的关键因素^[16]。近年来冻土地下水模型的不断发展,使研究人员能够通过改变模型参数和边界条件等来模拟这些关键因素。而多年冻土区不同气候变化情景下复杂的地下水热过程的模拟结果普遍表明,地下水热状况会对气候引起的地表温度变化产生反馈,进而改变地表-地下水文地质条件。整体上,当前低温水文地质模型模拟的内容主要包括以下方面:模拟地下水的流动^[15,32,48,84]、模拟冻土与地下水之间的水热作用^[119-120]、模拟地下水的平流热传输和影响^[55-56,117]、模拟融区的发展和影响^[54,58]、模拟地下水补给河流的机理^[43,87,114]、模拟气候变化背景下冻土地下水的变化^[88,115,121]等。

5.3 冻土地下水模型的对比

由于包含了非线性冻融过程和复杂的水、热边界条件,冻土地下水模型比传统的地下水模型更为复杂,因此模型的受众基本是一些建模专家^[16];并且大多为封装化或商业化软件^[123],这就决定了冻土地下水模型在使用上的困难^[15]。在这里,我们尝试对近年来的低温水文地质模型做一些简单对比。

从模型维度上讲,冻土地下水的复杂性要求模拟时更多考虑三维空间和更大、结构更复杂的系统,近年来常见的低温水文地质模型中,SUTRA、FEFLOW、MIKE SHE、MODFLOW、GEOtop 都可进行三维模拟,而 FlexPDE、HEATFLOW 以二维模拟为主。尽管二维空间可能存在局限性^[15],然而目前为止,一维和二维模拟比三维模拟更常用于寒区地下水系统,这主要是三维模型对使用者的要求高以及寒区局地条件的差异太大而导致一个地区的参

数化方案并不能在另一个地区适用。从方法上来讲,一般的冻土地下水模型耦合冻融过程时,往往是克拉伯龙方程的一种形式与热力学相结合^[14];可将这些函数形式分类为3种^[16]:描述土壤冻结曲线的函数、描述土壤水分特征曲线来反映渗透率的函数、描述体积导热系数和热容随土壤含冰量变化引起土壤导热变化的函数。常见的,SUTRA 模型使用分段线性函数^[113]、指数函数^[114]或幂函数^[124]模拟土壤冻融曲线以耦合冻土土壤水热过程;FlexPDE 模型使用未定义的平滑函数曲线法,通过经验方程模拟土壤水热过程^[120,124];GEOtop 使用 Richards 方程来模拟变饱和的冻融过程^[125];HEATFLOW 模型使用指数函数模拟土壤冻结曲线,以土壤未冻结水分饱和度来反映渗透率^[117];MODFLOW 使用线性和非线性方程模拟地下水流动^[126];而 FEFLOW 模型通过对 Van Genuchten 方程参数的估计,根据固、液态水饱和度确定渗透率^[116]。

不能忽视的是,现有模型多基于数值方法求解,缺少实测数据检验,而且模型边界条件多为理想化条件,与复杂的野外条件相差较大^[22]。例如,大多数调查气候变化时冻土地下水变化的研究都假设了理想化的含水层^[124];STURA、FlexPDE 多限于对理想化地下环境的模拟^[15];HEATFLOW 忽略了地表积雪影响、热状况和水平热传导等,认为地表水的入渗是理想化的^[117];一些三维模型的边界条件不是特定的现场条件,也是基于理想化的情景^[15]。此外,虽然分布式水文模型 MIKE SHE、GBEHM 等针对寒区水循环中子过程/子单元分别建立冻土子模块,但存在参数众多难以率定的困难^[127]。当然,建模人员在不断优化这些不足。现有的一些解决方案,将单独的地表模型输出结果作为地下水模型的边界条件,以提高模拟的精度^[15]。例如,使用 SHAW 模型计算低温和地表水平衡,然后将其作为 FEFLOW 的边界条件^[115];对 GEOtop2.0 考虑了一些地表过程,消除使用地表模型输出边界条件来驱动地下水热传输模型的需要。

综上所述,在考虑地下水模型时,我们优先要考虑下垫面环境条件和所选用模型代码的可用性,通常建立地下水模型时要考虑的参数有饱和导水率/渗透率和孔隙度、相对渗透函数、土壤冻结曲线、比热、导热系数和水体不同相态参数以及初始条件或边界条件的可塑性^[16],这些多与地质条件和研究程度相关,需要根据可用理化参数,考虑更加符合

实际条件的输入参数和边界条件,以匹配合适的模型。

6 结论和展望

通过整理和分析,本文刻画了冻土地下水的分布、补径排和循环特征;探讨了冻土与地下水之间的复杂水热作用。寒区的恶劣条件,使得水化学和数值模拟成为目前除了直接观测/监测外研究冻土地下水动态的主要方法,考虑到二者的特点,将可观测的水化学示踪剂作为低温水文地质模型的输入参数或约束条件,或许是值得尝试的。本文中,我们并没有对比高纬度地区和高海拔地区多年冻土地下水系统的异同,因为高山地区可支持研究的观测数据更少,局地特征和地质构造复杂性更加明显,并且地形对冻土地下水径流的影响已经被证明不可忽略。

不能忽视的是,过去几十年气候变暖、冻土退化引起冻土地下水的变化以及这些变化所带来的直接和间接影响已威胁到寒区的水资源安全和生态环境,庆幸的是,人们已经意识到了这些潜在的威胁。尽管目前关于地下水变化和影响的相关研究,初步预测了退化冻土所含冰转化为地下水的时空过程^[45,68,85]、预估了随着多年冻土退化而改变或已经改变的水文成分^[15,46,48,88]、评价了气候变化下地下水变化对区域环境的影响^[97-98],耦合冻土冻融、地下水流和平流热传输的复杂低温水文模型不断发展,然而有几个问题值得我们考虑:①大多数研究气候变化对冻土地下水影响的模型都假设了理想化的含水层,缺乏将寒冷地区模型模拟与现场数据进行比较^[14]。航空地球物理技术的发展已经支持了一些新兴的综合野外数据集^[128-129]和确定融区边界、热监测^[12]。将二者有效联系起来,有助于提高我们对冻土地下水变化的更好理解。②虽然高山多年冻土区是为世界大部分人口提供淡水的江河源头^[70],但很少有针对高山多年冻土环境的低温水文地质建模^[15],高山观测数据缺乏和建模时要考虑的地质条件更为复杂可能是主要原因。李宗省等^[130]已经建立了基于水化学和同位素数据的高寒山区水文观测网络,即使还不能利用航空地球物理技术建立高海拔多年冻土数据库,但这一观测网络已经为高山多年冻土区复杂的低温水文地质模拟提供了可用的数据基础。③平流热传输在冻土退化中的作用程度可能取决于与地表水体的接近程

度、降水的时间和强度、局地和区域地形等^[14],它的影响在模拟过程中是可变的,而目前的模拟没有考虑到这一点。④耦合气候变化和地下水复杂水热过程的一种方式,将气候模型输出转换为地下模型边界条件、以短期步长将大气环流模式(GCMs)模拟气候变化的输出作为输入条件,通过降尺度方式驱动低温水文模型^[14]。该过程本身的复杂性,以及由于气候变化引起地下水平流热传输潜在增加的影响,仅有个别模拟进行了尝试^[122]。怎样在模型中构建嵌套的时变热传输过程可能是未来模拟更为精准的一个关键。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Glossary of cryospheric science [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河. 冰冻圈科学辞典[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2016.]
- [2] Ding Yongjian. Introduction to hydrology in cold regions [M]. Beijing: Science Press, 2017. [丁永建. 寒区水文导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [3] Yang Yong, Chen Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 711-723. [阳勇, 陈仁升. 冻土水文研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 711-723.]
- [4] Williams J. Groundwater in permafrost regions; an annotated bibliography [R]. professional paper, 1965.
- [5] Woo M K. Permafrost hydrology [M]. Berlin: Springer, 2012
- [6] Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. Geocryology in China [M]. Beijing: Science Press, 2000. [周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [7] Cheng Guodong, Jin Huijun. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 5-23.
- [8] 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. [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.]
- [9] Callegary J B, Kikuchi C P, Koch J C, et al. Review: groundwater in Alaska (USA) [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(1): 25-39.
- [10] Lacelle D, Vasil'chuk Y K. Recent progress (2007—2012) in permafrost isotope geochemistry [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2013, 24(2): 138-145.
- [11] Cochand M, Molson J, Lemieux J M. Groundwater hydrogeochemistry in permafrost regions [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2019, 30(2): 90-103.
- [12] O'Neill H B, Roy-Leveille P, Lebedeva L, et al. Recent advances (2010—2019) in the study of taliks [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2020, 31(3): 346-357.
- [13] Serban R D, Jin Huijun, Serban M, et al. Shrinking thermokarst lakes and ponds on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau over the past three decades [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2021, 32(4): 601-617.
- [14] Kurylyk B L, MacQuarrie K T B, McKenzie J M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold

- and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 313-334.
- [15] Walvoord M, Kurylyk B. Hydrologic impacts of thawing permafrost: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(6): 1-20.
- [16] Lamontagne - Hallé P, McKenzie J M, Kurylyk B L, et al. Guidelines for cold - regions groundwater numerical modeling [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2020, 7(6): e1467.
- [17] Li Zongxing, Yuan Ruifeng, Feng Qi, et al. Climate background, relative rate, and runoff effect of multiphase water transformation in Qilian Mountains, the third pole region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 315-328.
- [18] Lemieux J M, Fortier R, Talbot-Poulin M C, et al. Groundwater occurrence in cold environments: examples from Nunavik, Canada [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(6): 1497-1513.
- [19] Wang Shaoling. On intrapermafrost water [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1990, 17(1): 46-47, 15. [王绍令. 试论冻结层内水 [J]. *水文地质工程地质*, 1990, 17(1): 46-47, 15.]
- [20] Shepev V V, Dai Changlei, Zhang Yiding. Northern Eurasian groundwater in the upper frozen layer distribution rules [J]. *Heilongjiang Water Resources*, 2016, 2(3): 19-26. [维克多, 戴长雷, 张一丁. 亚欧大陆北部冻结层上地下水分布规律 [J]. *黑龙江水利*, 2016, 2(3): 19-26.]
- [21] Li Yingzhi, Guo Yanwei, Geng Xin, et al. Distribution characteristics of groundwater in non-freezing spring area on Tibetan Plateau [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(3): 10-14. [李颖智, 郭彦威, 耿昕, 等. 青藏高原不冻泉地区地下水分布特征 [J]. *水资源保护*, 2013, 29(3): 10-14.]
- [22] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke. Soil moisture-heat migration characteristics within the permafrost active layer in Beiluhe [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(9): 176-181. [张明礼, 温智, 薛珂. 北麓河多年冻土活动层水热迁移规律分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(9): 176-181.]
- [23] Gao Zeyong, Niu Fujun, Wang Yibo, et al. Suprapermafrost groundwater flow and exchange around a thermokarst lake on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125882.
- [24] Li Zhenping. Analysis of groundwater characteristics in Tanggula Mountain Town, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. [李振萍. 青海唐古拉山镇地区地下水特征分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.]
- [25] Haldorsen S, Heim M, Lauritzen S E. Subpermafrost groundwater, western svalbard [J]. *Hydrology Research*, 1996, 27(1/2): 57-68.
- [26] Fedorova S V. Use of subpermafrost groundwater resources for drinking water supply in Yakutia [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 459(5): 052002.
- [27] Jiang Xiaowei, Wang Xusheng, Wan Li, et al. An analytical study on stagnation points in nested flow systems in basins with depth-decaying hydraulic conductivity [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(1): W01512.
- [28] Andersen D T. Cold springs in permafrost on Earth and Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(E3): 5015.
- [29] Ford D, Williams P W. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [30] Yoshikawa K, Hinzman L D, Kane D L. Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G4): G04S43.
- [31] Lemieux J M, Sudicky E A, Peltier W R, et al. Simulating the impact of glaciations on continental groundwater flow systems: 1. Relevant processes and model formulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(F3): F03017.
- [32] Piotrowski J A. Groundwater under ice sheets and glaciers [J]. *Glacier Science and Environmental Change*, 2006: 50-60.
- [33] Utting N, Clark I, Lauriol B, et al. Origin and flow dynamics of perennial groundwater in continuous permafrost terrain using isotopes and noble gases: case study of the Fishing Branch River, northern Yukon, Canada [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, 23(2): 91-106.
- [34] Kane D L, Yoshikawa K, McNamara J P. Regional groundwater flow in an area mapped as continuous permafrost, NE Alaska (USA) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 41-52.
- [35] Cheng Guodong, Zhao Lin. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(6): 521-531. [程国栋, 赵林. 青藏高原开发中的冻土问题 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(6): 521-531.]
- [36] Clark I D, Lauriol B, Harwood L, et al. Groundwater contributions to discharge in a permafrost setting, Big Fish River, N. W. T., Canada [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2001, 33(1): 62-69.
- [37] Li Zongxing, Gui Juan, Wang Xufeng, et al. Water resources in inland regions of central Asia: evidence from stable isotope tracing [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 1-16.
- [38] Gui Juan, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Contribution of cryosphere to runoff in the transition zone between the Tibetan Plateau and arid region based on environmental isotopes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(1): 97-122.
- [39] Carey S K, Quinton W L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data [J]. *Hydrology Research*, 2004, 35(4/5): 309-324.
- [40] Ge S, Wu Q B, Lu N, et al. Groundwater in the Tibet Plateau, Western China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18): L18403.
- [41] Cochand M, Molson J, Barth J A C, et al. Rapid groundwater recharge dynamics determined from hydrogeochemical and isotope data in a small permafrost watershed near Umiujaq (Nunavik, Canada) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(3): 853-868.
- [42] Ma Rui, Sun Ziyong, Hu Yalu, et al. Hydrological connectivity from glaciers to rivers in the Qinghai-Tibet Plateau: roles of suprapermafrost and subpermafrost groundwater [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4803-4823.
- [43] Evans S G, Ge Shemin, Liang Sihai. Analysis of groundwater flow in mountainous, headwater catchments with permafrost [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(12): 9564-9576.
- [44] Ma Fenyan, Chen Jiansheng, Zhan Lucheng, et al. New insights into water cycle in permafrost region of northern Greater Khingan Mountains, China [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, 330(3): 631-642.
- [45] Quinton W L, Baltzer J L. The active-layer hydrology of a peat plateau with thawing permafrost (Scotty Creek, Canada) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 201-220.
- [46] O'Connor M T, Cardenas M B, Neilson B T, et al. Active lay-

- er groundwater flow: the interrelated effects of stratigraphy, thaw, and topography[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(8): 6555-6576.
- [47] Yamazaki Y, Kubota J, Ohata T, et al. Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(3): 453-467.
- [48] Walvoord M A, Voss C I, Wellman T P. Influence of permafrost distribution on groundwater flow in the context of climate-driven permafrost thaw: example from Yukon Flats Basin, Alaska, United States[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): W07524.
- [49] Qin Yue, Yang Dawen, Gao Bing, et al. Impacts of climate warming on the frozen ground and eco-hydrology in the Yellow River source region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 605/606: 830-841.
- [50] Wang Genxu, Hu Hongchang, Li Taibin. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4): 438-449.
- [51] Mutlutürk M, Altindag R, Türk G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(2): 237-244.
- [52] Lv Mingxia, Wang Yibo, Gao Zeyong. The change process of soil hydrological properties in the permafrost active layer of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *CATENA*, 2022, 210: 105938.
- [53] Xie Shengbo, Qu Jianjun, Xu Xiangtian, et al. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Natural Hazards*, 2017, 85(2): 829-850.
- [54] Rowland J C, Travis B J, Wilson C J. The role of advective heat transport in talik development beneath lakes and ponds in discontinuous permafrost[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): L17504.
- [55] Dagenais S, Molson J, Lemieux J M, et al. Coupled cryo-hydrogeological modelling of permafrost dynamics near Umiujaq (Nunavik, Canada)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(3): 887-904.
- [56] McKenzie J M, Voss C I. Permafrost thaw in a nested groundwater-flow system[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 299-316.
- [57] Sjöberg Y, Coon E, Sannel A B K, et al. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: a case study based on field observations and numerical modeling[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(3): 1591-1606.
- [58] 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)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 281-298.
- [59] Luo Jing, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. Abrupt increase in thermokarst lakes on the central Tibetan Plateau over the last 50 years[J]. *CATENA*, 2022, 217: 106497.
- [60] Luo Jing, Niu Fujun, Lin Zhanju, et al. Thermokarst lake changes between 1969 and 2010 in the Beilu River Basin, Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(9): 871. [罗京, 牛富俊, 林战举, 等. 1969—2010年青藏高原北麓河盆地热喀斯特湖塘演化过程[J]. *科学通报*, 2015, 60(9): 871.]
- [61] Niu Fujun, Dong Sheng, Lin Zhanju, et al. Distribution of thermokarst lakes and its thermal influence on permafrost along Qinghai-Tibet Highway[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 695-702. [牛富俊, 董晟, 林战举, 等. 青藏公路沿线热喀斯特湖分布特征及其热效应研究[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 695-702.]
- [62] Cui Wei, Wu Qingbai, Liu Yongzhi. The thermal effect of a thermokarst lake on permafrost[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 755-760. [崔巍, 吴青柏, 刘永智. 热融湖塘对多年冻土的热影响[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 755-760.]
- [63] Niu Fujun, Wang Wei, Lin Zhanju, et al. Study on environmental and hydrological effects of thermokarst lakes in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(4): 335-342. [牛富俊, 王玮, 林战举, 等. 青藏高原多年冻土区热喀斯特湖环境及水文学效应研究[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(4): 335-342.]
- [64] Lin Z J, Niu F J, Fang J H, et al. Interannual variations in the hydrothermal regime around a thermokarst lake in Beiluhe, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geomorphology*, 2017, 276: 16-26.
- [65] Butcher J B, Nover D, Johnson T E, et al. Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change[J]. *Climatic Change*, 2015, 129(1): 295-305.
- [66] Fritz M, Wetterich S, Meyer H, et al. Origin and characteristics of massive ground ice on Herschel Island (western Canadian Arctic) as revealed by stable water isotope and hydrochemical signatures[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, 22(1): 26-38.
- [67] Carey S K, Quinton W L. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1): 95-114.
- [68] Stotler R L, Frapet S K, Ruskeeniemä T, et al. Hydrogeochemistry of groundwaters in and below the base of thick permafrost at Lupin, Nunavut, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(1/2): 80-95.
- [69] Saltel M, Rebeix R, Thomas B, et al. Paleoclimate variations and impact on groundwater recharge in multi-layer aquifer systems using a multi-tracer approach (northern Aquitaine Basin, France)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(4): 1439-1457.
- [70] Zhang Baijuan, Li Zongxing, Feng Qi, et al. A review of isotope ecohydrology in the cold regions of Western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159438.
- [71] Chang Qixin, Sun Ziyong, Ma Rui, et al. A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(5): 87-94. [常启昕, 孙自永, 马瑞, 等. 冻土区地下水流程及其与地表水转化关系研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(5): 87-94.]
- [72] MacLean R, Oswood M W, et al. The effect of permafrost on stream biogeochemistry: a case study of two streams in the Alaskan (U. S. A.) taiga[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(3): 239-267.
- [73] Hu Yalu, Ma Rui, Wang Yanxin, et al. Using hydrogeochemical data to trace groundwater flow paths in a cold alpine catchment[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(14): 1942-1960.
- [74] Wan Chengwei, Li Kai, Shen Sichen, et al. Using tritium and ^{222}Rn to estimate groundwater discharge and thawing permafrost contributing to surface water in permafrost regions on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chem-*

- istry, 2019, 322(2): 561-578.
- [75] Hiyama T, Asai K, Kolesnikov A B, et al. Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River Basin, eastern Siberia[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 035040.
- [76] Malov A I. Tritium records to trace groundwater recharge and mixing in the western Russian Arctic[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(17): 583.
- [77] Xu Qiue, Jiao Yuanmei, Zhang Zhaonian, et al. Definitions of groundwater age and dating methods: progresses and prospects [J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(6): 594-609. [徐秋娥, 角媛梅, 张兆年, 等. 地下水年龄的概念及其测定方法研究进展[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(6): 594-609.]
- [78] Stotler R L, Frapè S K, Freifeld B M, et al. Hydrogeology, chemical and microbial activity measurement through deep permafrost[J]. *Ground Water*, 2011, 49(3): 348-364.
- [79] Wang Zhenxing. Study on the mechanism of regional groundwater circulation evolution under the condition of plateau frozen soil degradation: a case study of Datong River source area[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2020. [王振兴. 高原冻土退化条件下区域地下水循环演化机制研究——以大通河源区为例[D]. 北京: 中国地质科学院, 2020.]
- [80] Aeschbach-Hertig W, Peeters F, Beyerle U, et al. Palaeotemperature reconstruction from noble gases in ground water taking into account equilibration with entrapped air[J]. *Nature*, 2000, 405(6790): 1040-1044.
- [81] Skierszkan E K, Dockrey J W, Helsen J, et al. Persistence of uranium in old and cold subpermafrost groundwater indicated by linking ^{234}U - ^{235}U - ^{238}U , groundwater ages, and hydrogeochemistry[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2021, 5(12): 3474-3487.
- [82] Osterkamp T E. The recent warming of permafrost in Alaska [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 49(3/4): 187-202.
- [83] Smith S L, Romanovsky V E, Lewkowicz A G, et al. Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the international polar year [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21(2): 117-135.
- [84] Bense V F, Ferguson G, Kooi H. Evolution of shallow groundwater flow systems in areas of degrading permafrost[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(22): L22401.
- [85] Michel F A, Van Everdingen R O. Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, 5(3): 191-195.
- [86] O'Neill H B, Burn C R, Allard M, et al. Permafrost thaw and northern development[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(8): 722-723.
- [87] Lamontagne-Hallé P, McKenzie J M, Kurylyk B L, et al. Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(8): 084017.
- [88] Ge Shemin, McKenzie J, Voss C, et al. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost response to seasonal and long term air temperature variation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14): L14402.
- [89] Bense V F, Kooi H, Ferguson G, et al. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F3): F03036.
- [90] Frampton A, Destouni G. Impact of degrading permafrost on subsurface solute transport pathways and travel times[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7680-7701.
- [91] Walvoord M A, Striegl R G. Increased groundwater to stream discharge from permafrost thawing in the Yukon River Basin: potential impacts on lateral export of carbon and nitrogen[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(12): L12402.
- [92] St Jacques J M, Sauchyn D J. Increasing winter baseflow and mean annual streamflow from possible permafrost thawing in the Northwest Territories, Canada [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L01401.
- [93] 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.
- [94] Xu Min, Kang Shichang, Chen Xuelong, et al. Detection of hydrological variations and their impacts on vegetation from multiple satellite observations in the Three-River Source Region of the Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1220-1232.
- [95] Han Li, Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127203.
- [96] Yi Wenxuan, Feng Yuqing, Liang Sihai, et al. Increasing annual streamflow and groundwater storage in response to climate warming in the Yangtze River source region[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 084011.
- [97] Grosse G, Romanovsky V, Jorgenson T, et al. Vulnerability and feedbacks of permafrost to climate change[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011, 92(9): 73-74.
- [98] Olid C, Rodellas V, Rocher-Ros G, et al. Groundwater discharge as a driver of methane emissions from Arctic Lakes[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3667.
- [99] Jones B M, Grosse G, Arp C D, et al. Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00M03.
- [100] Guo Zhenggang, Niu Fujun, Zhan Hu, et al. Changes of grassland ecosystem due to degradation of permafrost frozen soil in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3294-3301. [郭正刚, 牛富俊, 湛虎, 等. 青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3294-3301.]
- [101] Hinzman L D, Bettez N D, Bolton W R, et al. Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions [J]. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 251-298.
- [102] Carroll M L, Townshend J R G, DiMiceli C M, et al. Shrinking Lakes of the Arctic: spatial relationships and trajectory of change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(20): L20406.
- [103] Lafrenière M J, Lamoureux S F. Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 212-223.
- [104] Striegl R G, Aiken G R, Dornblaser M M, et al. A decrease in discharge-normalized DOC export by the Yukon River during summer through autumn [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21413.
- [105] Lyon S W, Destouni G. Changes in catchment-scale recession flow properties in response to permafrost thawing in the Yukon River Basin[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(14): 2138-2145.
- [106] Toohey R C, Herman-Mercer N M, Schuster P F, et al. Multi-decadal increases in the Yukon River Basin of chemical fluxes

- as indicators of changing flowpaths, groundwater, and permafrost[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(23): 12120-12130.
- [107] Colombo N, Salerno F, Gruber S, et al. Review: impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 69-83.
- [108] Douglas T A, Blum J D, Guo Laodong, et al. Hydrogeochemistry of seasonal flow regimes in the Chena River, a subarctic watershed draining discontinuous permafrost in interior Alaska (USA)[J]. *Chemical Geology*, 2013, 335: 48-62.
- [109] Neilson B T, Cardenas M B, O'Connor M T, et al. Groundwater flow and exchange across the land surface explain carbon export patterns in continuous permafrost watersheds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(15): 7596-7605.
- [110] Bouchard F, Francus P, Pienitz R, et al. Sedimentology and geochemistry of thermokarst ponds in discontinuous permafrost, subarctic Quebec, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00M04.
- [111] Gao Zeyong, Niu Fujun, Wang Yibo, et al. Hydrological characteristics of thermokarst lake and its environmental effects on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 174-184. [高泽永, 牛富俊, 王一博, 等. 青藏高原多年冻土区热喀斯特湖水文特征及环境效应[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 174-184.]
- [112] Forster C, Smith L. The influence of groundwater flow on thermal regimes in mountainous terrain: a model study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B7): 9439-9451.
- [113] McKenzie J M, Voss C I, Siegel D I. Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 966-983.
- [114] Evans S G, Ge Shemin, Voss C I, et al. The role of frozen soil in groundwater discharge predictions for warming alpine watersheds[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(3): 1599-1615.
- [115] Langford J E, Schincariol R A, Nagare R M, et al. Transient and transition factors in modeling permafrost thaw and groundwater flow[J]. *Groundwater*, 2020, 58(2): 258-268.
- [116] Huang Kewei, Dai Junchen, Wang Genxu, et al. The impact of land surface temperatures on suprapermfrost groundwater on the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(6): 1475-1488.
- [117] Shojae Ghias M, Therrien R, Molson J, et al. Numerical simulations of shallow groundwater flow and heat transport in continuous permafrost setting under impact of climate warming[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(3): 436-448.
- [118] Endrizzi S, Quinton W L, Marsh P. Modelling the spatial pattern of ground thaw in a small basin in the Arctic tundra[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2011, 5(1): 367-400.
- [119] Liao Chang, Zhuang Qianlai. Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2017, 49(1): 81-100.
- [120] Mohammed A A, Bense V F, Kurylyk B L, et al. Modeling reactive solute transport in permafrost-affected groundwater systems[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(7): e2020WR028771.
- [121] Bosson E, Sabel U, Gustafsson L G, et al. Influences of shifts in climate, landscape, and permafrost on terrestrial hydrology[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5): D05120.
- [122] Gao Bing, Yang Dawen, Qin Yue, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 657-673.
- [123] Hu Jinhua, Lu Zheng, Tong Jinhui, et al. Simulating thermohydrologic processes in cold region soil system: a computational fluid dynamics study[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 948-963. [胡锦涛, 陆峥, 仝金辉, 等. 基于计算流体力学的寒区土壤水热耦合模型研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 948-963.]
- [124] Kurylyk B L, Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 60: 160-177.
- [125] Dall'Amico M, Endrizzi S, Gruber S, et al. A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(2): 469-484.
- [126] Niswonger R, Panday S, Ibaraki M. MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005[J]. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 2011, 6(A37): 44.
- [127] Wang Lei, Li Xiuping, Zhou Jing, et al. Hydrological modeling over the Tibetan Plateau: current status and perspective[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 674-682. [王磊, 李秀萍, 周璟, 等. 青藏高原水文模拟的现状与未来[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 674-682.]
- [128] Minsley B J, Abraham J D, Smith B D, et al. Airborne electromagnetic imaging of discontinuous permafrost[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(2): L02503.
- [129] Parsekian A D, Grosse G, Walbrecker J O, et al. Detecting unfrozen sediments below thermokarst lakes with surface nuclear magnetic resonance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(3): 535-540.
- [130] Li Zongxing, Zhang Baijuan, Feng Qi, et al. A review of isotope ecohydrology in the cold regions of Western China[J]. *Earth Science*, 2023, 48(3): 1156-1178. [李宗省, 张百娟, 冯起, 等. 我国西部高寒山区同位素生态水文研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(3): 1156-1178.]

A review of research on groundwater and its evolution in permafrost regions

DU Fa^{1,2}, LI Zongxing^{1,3}, Gongjue Zhaxi⁴, GUI Juan^{1,2}, ZHOU Huiling^{1,2}

(1. Observation and Research Station of Eco-Hydrology and National Park by Stable Isotope Tracing in Qilian Mountains / Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

4. Ali Hydrology and Water Resources Sub-Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Tibet Autonomous Region, Ngari 859000, Tibet, China)

Abstract: Due to the low permeability of permafrost, the seasonal freeze-thaw cycle and its accompanying hydrothermal transportation, the occurrence, storage and flow processes in the basin was changed, and water resource was affected. Over the past few decades, climate warming has caused permafrost degradation and accelerated multiphase transformations of water, which is remodeling the hydrogeological conditions in cold regions and changing the groundwater hydrothermal status. Melting of frozen soil ice affects the spatial and temporal patterns of permafrost groundwater, threatens regional water resources, ecological environment and engineering facilities; in addition, this process also releases greenhouse gases and reduces the carbon storage function of permafrost, thus accelerating climate change. Although hydrogeochemistry and numerical simulation techniques are widely used in cryosphere hydrological studies, that advancing the understanding of permafrost groundwater mechanisms, there are huge challenges in the research of groundwater in permafrost. This review compares articles on permafrost groundwater, illustrates the spatial and temporal modalities of permafrost groundwater, discusses the interaction between permafrost and groundwater, and highlights the different focuses when studying based on hydrochemical and numerical models. The scattered research results of permafrost groundwater changes due to climate warming are integrated. The characteristics of permafrost groundwater changes and the hydrological, ecological and environmental effects of these changes are systematically described in the background of climate warming, spatially from the recharge zone to the discharge zone, and temporally from the initiation of permafrost thawing to long-term degradation to its disappearance. This article provides a reference for the study of hydrology, water resources and ecology of permafrost groundwater.

Key words: permafrost groundwater; hydrogeochemistry; cryohydrogeologic model; permafrost degradation; eco-hydrological effects

(责任编辑: 牛富俊)