

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0080

戴长雷,于森,宋成杰,等.冻土水文地质学研究进展[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):782-801. DAI C L, YU M, SONG C J, et al. Research review of hydrogeology in the permafrost and seasonal frozen regions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 782-801. (in Chinese)

## 冻土水文地质学研究进展

戴长雷<sup>1,2,3</sup>, 于森<sup>2,3,4,5</sup>, 宋成杰<sup>1,2,3</sup>, Nadezhda Pavlova<sup>5</sup>, 尉意茹<sup>2,3,4,5</sup>, 李梦玲<sup>1,2,3</sup>

(1. 黑龙江大学寒区地下水研究所, 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080;  
3. 黑龙江大学中俄寒区水文和水利工程联合实验室, 哈尔滨 150080; 4. 东北联邦大学地质勘探学院,  
俄罗斯 雅库茨克 677000; 5. 俄罗斯科学院西伯利亚分院麦尔尼科夫冻土研究所, 俄罗斯 雅库茨克 677000)

**摘要:**冻土水文地质学主要研究冻土区水分要素的时空分布和运动规律及其与冻土间的相互作用。在微观上,冻结温度、未冻水含量以及孔隙水压力等冻土层独有的水热参数决定了冻土的结构和物理力学性质,同时影响了冻土层的冻融过程。而宏观上,冻土层的存在改变了常规的地表径流和水系模式,地下水的循环系统也由于冻土层的季节性冻融发生了根本变化,形成了冻土区独特的水文地质条件。从微观和宏观两种角度系统归纳与总结国内外冻土水文地质学研究进展,并分析包括地球物理技术、水化学、冻土水文模型在内的技术方法,同时对高寒区特有的地下水溢流冰、融雪入渗和冻土保墒现象的研究成果进行总结与分析。冻土水文的发展趋势应在积累研究数据和技术方法的基础上进一步探索产汇流过程机理,并建立更完善的冻土水文物理模型,定量分析冻土与水资源之间的相互作用。

**关键词:**冻土;水文地质学;产汇流;地球物理技术;水化学;冻土水文模型

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



冻土指的是温度在 0 °C 或在 0 °C 以下并含有冰的土壤和岩石,分布广泛,其中多年冻土约占全球陆地总面积的 25%,在我国则占国土面积的 22.4%<sup>[1]</sup>。冻土水文地质学是研究冻土区水分要素随空间、时间的变化规律,合理利用地下水以及防治其危害的学科。在微观上,冻土多是由矿物颗粒、冰、液相水(未冻水和强结合水)、水汽和空气组成的混合物,成分的组成控制了冻土层的内部构造、物理力学性质及其冻融过程<sup>[2]</sup>。由于冻土层作为相对不透水层,在一定时空尺度上阻碍了地表水与地下水间的水力联系。另外,季节性冻土层的季节性冻融循环过程显著地影响了地下水的渗流方向、速度和循环方式,这就导致了部分非冻区的地下水运移理

论和机制在冻土区并不适用<sup>[3-4]</sup>。因此,在微观的试验点尺度上研究包括冻结温度、未冻水含量以及孔隙水压力等冻土层独有的水热参数是冻土水文地质学研究的重要组成部分<sup>[5]</sup>。宏观上,活动层内土壤水分的相变使得多年冻土区地下水的补给、径流和排泄过程发生了根本变化,形成了冻土区独特的山坡尺度和流域尺度的水文现象<sup>[6]</sup>。

近年来,为了应对这种特殊的冻土水文地质条件,多种技术手段都取得了较大的突破,相较于传统的深层钻探技术,包括地电法、电磁技术、雷达技术和地震法在内的非侵入性或微创地球的物理方法已经可以快速、低成本地大范围内连续描述地下的特征,探测深度通常可以达到几十米<sup>[7]</sup>。水化学研究

收稿日期:2022-01-17 修回日期:2022-07-16 网络出版时间:2022-07-22

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220721.1334.002.html>

基金项目:冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201310);国家自然科学基金项目(41202171);国家留学基金项目(CSC 202008230159)

作者简介:戴长雷(1978—),男,山东郓城人,博士,教授,主要从事寒区地下水及国际河流方向的教学与科研工作。E-mail:daichanglei@126.com

及其示踪方法仍是研究冻土区地下水运移的重要方法<sup>[8]</sup>。冻土水文模型也更多地考虑到了融冰、雪入渗,土壤冻融,土壤水分运移等冻土区关键要素<sup>[9-11]</sup>。结合理论研究与技术方法,冻土水文地质学在多年冻土区的水热耦合研究、产汇流过程等方面都取得了较大的进展。通过理论研究、实践应用和技术手段 3 方面梳理冻土水文地质学研究框架,分析冻土水文地质学的发展趋势,以期为该学科及其对气候、环境和水资源等相关研究提供借鉴。

## 1 理论研究

### 1.1 试验点尺度

多年冻土层由于其活动层的冻融过程,使得其微观上的水文特征与非冻区相比有较大的区别<sup>[12]</sup>。其中,冻结温度是判断土壤是否冻结的关键因素,未冻水含量和孔隙水压力也是控制水分迁移的重要指标。这些冻土层独有的水热参数的研究可为冻土水文地质现象的机理研究提供参考。

#### 1.1.1 冻结温度研究

冻结温度是判断土体是否为冻结状态的重要参数,也是确定土体冻结深度、影响水分迁移的依据<sup>[13-14]</sup>。刘宗超<sup>[15]</sup>通过电势跃迁判断冻结温度,进而研究冻结温度与含水率、压力之间的关系;李毅

等<sup>[16]</sup>以过冷原理为基础研制了冰点仪,并对 4 种高含水率的黏土进行冻结温度变化规律试验,并指出冻结温度与外载、含水率的对应关系;张婷等<sup>[17]</sup>研制了一种冻结温度试验装置,结合实验结果给出了冻结温度与土中盐分含量、水质条件和含水率的对应关系。然而,仅仅通过冻结温度来判断土壤是否冻结并不全面,因此研究人员开始关注土体过冷温度与冻结温度的关系。周家作等<sup>[13]</sup>对多种类型土壤进行了冻结温度和最低过冷温度试验。结果表明,仅当环境温度低于土的最低过冷温度时,则土样整体才会进入稳定的冻结状态,并指出稳定冻结时间与土体内自由水冻结有关。

#### 1.1.2 未冻水含量研究

土体冻结后,并非土中所有的水都完成从液相到固相的转变。由于土体基质中表面吸附和孔隙的毛细特性而保存的液态水称为未冻水。开展未冻水研究的基础主要是未冻水含量的测定。目前未冻水含量测定方法多为量热法<sup>[18]</sup>、脉冲核磁共振法(NMR)<sup>[19]</sup>、频域反射法(FDR)<sup>[20]</sup>、时域反射法(TDR)<sup>[21]</sup>、扫描量热法(DSC)<sup>[22]</sup>等,见表 1。未冻水含量的变化对土体的水热特征以及力学性质影响较大,因而对未冻水的性质、状态以及变化规律的研究是冻土水文地质学研究中的重要组成部分。

表 1 未冻水含量测定试验方法

Tab. 1 Test method for determination of unfrozen water content

试验方法	研究对象	主要试验仪器	研究主要目的	主要试验结果
量热法 <sup>[18]</sup>	黏土、粉质黏土、粉土、泥炭质土、泥炭草炭、砾砂(砾砂、含细粒土砾砂)6 类土样	量热仪,热电偶和 PZ158/2 型数字电压表,THD-2015 型低温恒温槽,贝克曼温度表	归纳未冻水含量的变化规律,分析影响未冻水含量变化的主要因素	未冻水含量随着土质塑性增强而增加。在相同低温条件下有机土比无机土未冻水含量高,未冻水含量随着有机质含量的增长而增加
脉冲核磁共振法 <sup>[19]</sup> (NMR)	含水量 20% 的 Morin 黏土	PR-103 型脉冲核磁共振器	验证用 NMR 技术测定未冻水含量的可靠性,确定冻土在脱水过程中冰和未冻水之间的关系	当水从冻结黏性土中散失时,含水量将逐渐减少,而未冻水含量则几乎保持不变,同时验证了 NMR 技术具有较好精度
频域反射法 <sup>[20]</sup> (FDR)	含水率分别为 30.45%、26.33%、18.62%、13.54%、10.25% 的粉质黏土	5TM 水分传感器	分析冻融过程中未冻水含量及冻结温度产生差异的成因	初始含水率较大的土样冻结先于初始含水率较小的土样,且未冻水含量也更大,并在此过程中未冻水存在滞后效应
时域反射法 <sup>[21]</sup> (TDR)	20%、30% 和 40% 含水率的棕壤土	6050X1 Trase 系统	检验 TDR 技术在测定冻土中的未冻水含量时其原有的适用于计算融土含水量的标定曲线的可靠性	由 TDR 法测得的冻融特征曲线,受初始含水率影响很大,随初始含水率的升高而明显加大
扫描量热法 <sup>[22]</sup> (DSC)	壤土	Unipan-607 型补偿式扫描量热仪	检验扫描量热仪测定未冻水含量可靠性	证明扫描量热仪测定未冻结水含量的准确度,并提出了一种精确绘制升温过程中土壤中未冻水含量曲线的方法

### 1.1.3 孔隙水压力研究

季节性冻土层内孔隙水压力主要受冻融作用与外部荷载影响,同时导致土体中水分迁移<sup>[23]</sup>。张莲海等<sup>[24]</sup>通过自制的测压探头对砂土和粉质黏土在冻融循环过程中的孔隙水压力进行测定,结果表明在土样孔隙水压力主要受温度、冻结速率、土质和冻融循环次数等因素的影响。Eigenbrod 等<sup>[25]</sup>较早地选用细粒土在恒定温度梯度下进行了冻融试验。在冻融过程中,测量了土样不同点位的孔隙水压力和温度,结果表明当温度处于冻结温度以下时,孔隙水压力下降为负值;反之,孔隙水压力为正值。肖东辉等<sup>[23]</sup>基于荷载和无荷载对孔隙水压力变化进行研究,结果表明,孔隙水压力和含水量受温度影响,且荷载下方土体内部温度、孔隙水压力和含水量的周期性变化波幅都大于无荷载条件。

从试验点尺度来看,土体冻融过程是水-热-力三者耦合作用的过程,主要表现为温度变化驱动孔隙水迁移,同时土体在正负温的循环作用下进行冻融循环。当前的试验研究多是针对土体本身的特性进行的,而对冻土与其他基础建筑间相互作用关系的研究较少。水、热、力的相关参数较多,设计试验过程中难以同时考虑到,因此设计试验时需要进一步完善各参数间的整体控制。

## 1.2 山坡尺度

在山坡尺度上,由于多年冻土层的相对不透水性,地下水运移和循环多依赖于活动层的季节性冻融。其中,坡向和地势在冻土时空变化下对水文过程的影响较大。坡向的不同改变了多年冻土的水热变化特征,地势的改变很大程度上决定了冻土的发展状态及其水文过程。

### 1.2.1 坡向影响研究

坡向差异引起的不同坡面之间的辐射能量差异对多年冻土的水热变化特征具有至关重要的影响作用。Ishikawa 等<sup>[26]</sup>通过对蒙古国东北部不连续多年冻土的地温和土壤含水量的长期监测,结果表明在非连续多年冻土区,阴坡的冻土分布面积较大,且土壤含水量较大。周幼吾等<sup>[27]</sup>通过对天山和青藏高原部分地区进行多年的冻土考察研究,结果表明阴、阳坡冻土厚度相差 50~80 m,年平均地温相差 2℃以上。王庆锋等<sup>[28]</sup>在祁连山区的研究结果表明,在相同海拔高度的条件下,阴坡活动层的年平均温度低于阳坡,且阴、阳坡活动层含水量变化存在较大差异。兰爱玉等<sup>[29]</sup>对青藏高原多年冻土区的阴阳坡面的近地表水热变化进行定量研

究后指出:2016—2019 年阴、阳坡的冻融循环总次数分别为 109 和 368 次,阳坡各深度土壤温度均显著大于阴坡;阳坡土壤表层水分变化速率较快,但土壤含水量低于阴坡。刘广岳等<sup>[30]</sup>在各拉丹冬南北两坡进行了多年冻土野外考察,结果表明北坡多年冻土的热稳定性、地下冰含量、冰缘地貌类型多样性均高于南坡。

### 1.2.2 地势影响研究

地势的改变对冻土发育影响较大,进而会对水文过程产生影响。周幼吾等<sup>[27]</sup>在祁连山区的研究结果表明,山地的多年冻土分布一般具有明显的垂直带性,并且随着海拔增高,导致年平均地温降低,多年冻土层厚度增大。Gao 等<sup>[31]</sup>在葫芦沟流域的研究结果表明:海拔相对较高的区域的土壤类型多为多年冻土,在冬季,冻土层导热系数较高,隔热性能差,导致冻土层厚度较大;海拔相对较低的区域多为季节性冻土层,植被覆盖度较好,冻土层导热系数较低,隔热性能好,季节性冻土层厚度较小。McEachern 等<sup>[32]</sup>采用同位素分析法对亚伯达(Alberta)北部的非连续多年冻土区的水文过程进行分析并指出,山区夏季径流主要受融雪水和降水补给,而地势较低的平坦地形中地下水补给占径流比例较大。

综上所述,由于多年冻土区的阴阳坡效应,在相同海拔条件下,阴坡的活动层年平均温度普遍低于阳坡,阴坡的冻土层厚度更大,而阳坡冻土表层的冻融循环更为频繁,但含水量普遍低于阴坡。海拔较高的山区在夏季多由融雪水和降水补给径流,随着地势的降低,地下水对径流的补给占比逐渐增大。

## 1.3 区域尺度

### 1.3.1 地下水补给规律及影响因素研究

在寒区,大气降水和地表水通过冻土表层入渗是影响地下水水源补给的主要因素<sup>[33-34]</sup>。这些因素对于地下水的影响主要取决于气候<sup>[35-37]</sup>、地质构造<sup>[38-39]</sup>、土壤质地<sup>[40-41]</sup>、地表坡度<sup>[42-43]</sup>、植被覆盖<sup>[44-45]</sup>等条件。

较高的温度和降水量会提高地下水的补给潜力。影响程度取决于持续时间,因为更强降雨的补给可能受到土壤蓄水能力的限制。Eckhardt 等<sup>[35]</sup>采用 SWAT-G 模型模拟了德国迪尔流域(Dill catchment)地下水补给对气候变化的响应。在气候变暖的情况下,夏季补给量减少了 50%。Mcintosh 等<sup>[36]</sup>综合欧洲、北美、格陵兰和南极洲地球化学和同位素案例研究的结果指出,更新世地下水主要由

冰层融水、在多年冻土形成前的湖泊和降水补给。Utting 等<sup>[37]</sup>在 2006—2008 年对加拿大育空地区奥格尔维山脉的河流、支流小溪和泉进行了水化学和稳定同位素分析,发现地下水补给是融雪和降水的混合物。

地质构造和土壤质地是影响地表水和地下水连接通道的重要因素<sup>[38-41]</sup>。尽管干燥、疏水的沙子最初会限制渗透,但较其他土壤类型,沙土和壤土等颗粒间孔隙较大的土壤拥有更快的渗透速率。颗粒间孔隙较小的土壤,如黏土和粉土,降水或地表水在入渗过程中很容易形成毛细水,因此,入渗过程中在包气带的蒸发量较大,从而减少地下水的补给量。Carsel 等<sup>[40]</sup>提出了从砂土到粉质黏土等 12 种土壤类型的持水特征概率密度函数的建立方法,并对比分析其渗透速率。此外,李振萍<sup>[46]</sup>发现岩屑和冻融裂缝的发育对土壤入渗过程有重大影响,楚马河下游岩屑的影响,砂砾含水层具有高渗透性,渗透系数超过 3.4 m/d。Wohling 等<sup>[41]</sup>采用广泛的野外观测数据库对不同类型土壤的渗透速率进行评估,结果表明渗透速率与土壤颗粒级配和降雨量有关。

地表坡度对地下水的补给也存在一定影响。Carey 等<sup>[42]</sup>分析加拿大山区流域的产汇流过程,结果表明,不同地形下的融雪水补给过程,最多可达到两个月的时间差距。Woo 等<sup>[43]</sup>系统总结了不同地形的冻土水文过程,指出山区的多年冻土层类似弱透水层,限制地下水深层补给,导致夏季降雨成为多年冻土区最大的补给源,而平缓地形主要在融雪期后受湖泊等地表水补给。

对于植被密度较大的地区,在截留和蒸腾作用下会改变地下水的补给量。Petheram 等<sup>[44]</sup>发现,尽管降水占补给量的很大比例,但植被根系截留的地下水量与全年植被的平均补给量仍然存在显著差异。Kane 等<sup>[45]</sup>通过对加拿大魁北克(Quebec)北部的非连续多年冻土区不同植被覆盖的 5 个监测点作为研究区,采用地下水位涨落法计算地下水补给量,结果表明,随着植被密度的增加,地下水补给量增加。

总的来说,冻土区地下水水源补给主要受大气降水和地表水补给。在经过长期且稳定的负温期后,活动层季节性融化,冻土区地下水的补给源主要包括该年度暖季的大气降水、融雪水和季节性冻结层融水。若活动层由卵砾石层和大块碎石层等透水能力强的岩层构成,大气降水与地表水也可直接对深层地下水进行补给。同时,地形越平缓,植被密度越大,地下水受补给效率越高。

### 1.3.2 冻土区径流变化特征研究

多年冻土层类似于弱透水层,限制深层入渗,增加了径流系数,导致夏季降雨成为多年冻土区径流最大的补给源<sup>[43]</sup>。Carey 等<sup>[42]</sup>通过对加拿大山区流域产流过程研究后指出,地下水补给径流过程主要发生在春季,地表多孔介质虽然冻结但仍能允许部分水量通过,该层蓄满后迅速产生径流。到了夏末,活动层完全融化,流域的调蓄能力增强,此时融雪水和冻土层融水对径流贡献很小<sup>[47]</sup>。冬季,主要由泉补给径流<sup>[48]</sup>。

地下水对地表径流贡献的定量分析成为研究人员关注的重点。廖厚初等<sup>[49]</sup>通过对黑龙江省科后站的资料进行分析,发现地下水补给占年径流量的 12%~15%。Li 等<sup>[50-51]</sup>以不连续冻土为主要下垫面的祁连山石羊河地区作为研究区,通过分析 2013—2014 年<sup>18</sup>O 稳定同位素浓度变化数据,指出地下水补给占年径流量的 20%~38%。Qin 等<sup>[52]</sup>选择疏勒河上游的多年冻土层作为研究区域。采用基于 ARNO 基流公式的 VIC(variable infiltration capacity)模型对基流进行模拟,并以实测数据对模拟结果进行验证,结果表明冻土层融化后的地下水在地表径流中所占比例较高。Wang 等<sup>[53]</sup>以青藏高原风火山流域为研究区,分析地下水对径流的贡献程度,并得出结论:春季融化期地下径流约占总径流量 14%~34%;秋季冻结期地下水流量是产流的主要来源,占风火山流域河流总径流量的 75%以上。以上研究结果表明,地下水是地表径流的重要补给来源,不同地区地下水对径流的补给量在空间上存在差异,连续多年冻土区的地下水对径流的补给量大于非连续冻土区。

### 1.3.3 冻土区地下水排泄特征研究

泉是地下水的天然露头,泉水也是地下水的排泄方式之一。泉的流量通常大于相同横截面积的地下水渗流量<sup>[54]</sup>。泉水可以是季节性的,也可以是常年的。季节性泉通常由冻结层上水排泄产生,缺乏稳定的供水。Hiyama 等<sup>[55]</sup>在蒙古中部杭爱山附近的 7 个季节性泉采集了水样,并进行水化学与同位素分析,结果表明其中 2 个热喀斯特泉主要为冻结层上水排放而形成。常年不冻结的泉多是由于更深的水源排泄产生的,一般有通道将这类泉与冻结层间水或冻结层下水相连<sup>[56-57]</sup>。Haldorsen 等<sup>[58]</sup>在北极地区的斯瓦尔巴群岛通过观测发现冻结层下水排泄出地表形成了许多不同流量的不冻泉,他们认为这与冻土层下的断裂带有关。位于加拿大高纬度北极地区中西部阿克塞尔海伯格岛(Axel Heiberg Is-

land)的常年温泉(水温不低于6℃),全年保持恒定的排放温度和流量。年平均气温为-15℃,主要由600 m左右的永久冻土覆盖。Andersen<sup>[59]</sup>采用水热耦合模型并结合温度和排放速率的观测结果,指出水源主要为冻结层下水。

在冻土区地下水以泉的形式进行排泄的过程中,冻土层的特有属性起着非常重要的作用。这类泉不仅可由季节性冻结层中的冻结层上水形成,还有由冻结层间水和冻结层下水作为补给水源而形成。泉的持续时间多取决于补给水源的埋藏深度和年平均气温,其中,不冻泉的补给水源多为冻结层间水和冻结层下水。

## 2 典型水文地质现象研究

### 2.1 地下水溢流冰

地下水溢流冰(也被称为冰湖、冰丘、涎流冰等)<sup>[60-61]</sup>,是指地下水从地表或河冰裂缝溢出后,受低温影响冻结而成的积冰体。在我国东北大兴安岭地区,溢流冰漫延开来,会侵害道路或建筑物,以及对基础设施的性能产生负面影响,是寒区特有的一种水文地质灾害<sup>[62]</sup>。

为确定地下水溢流冰的补给水源,Clark等<sup>[63]</sup>较早地采用稳定同位素对加拿大育空河流域北部的的水样进行检测,指出溢流冰的水源补给主要来自居间不冻层(talik),因为水中成分含有较高含量的硫酸钙。近年来 Павлова等<sup>[64]</sup>通过对萨哈(雅库特)共和国中部的部分冰泉多年的水化学监测,结果表明溢流冰的水源多为冻结层间水或冻结层下水。赵庆春等<sup>[65]</sup>通过多年观测指出,上层滞水、潜水、承压水等类型的地下水都可能导致地下水溢流冰的发育。造成意见不统一的主要原因是冻土区影响地下水形成和分布的自然因素十分复杂,包括地面坡度、地质构造以及冻土层的深度等。Шепелёв<sup>[66]</sup>通过多年原位监测结果分析后指出,冻结层上水(活动层内季节性冻结水)、冻结层间水(居间不冻层水、透水融区的冻结层间水)和冻结层下水其中之一或两者组合为溢流积冰点进行地下水补给。

冷季与暖季的时长比例、冬季的负积温以及气候条件同样是影响积冰规模的重要影响因素。Yoshikawa等<sup>[67]</sup>采用遥感技术和地球物理调查,对阿拉斯加布鲁克斯山脉部分积冰体状态和不冻泉的特征进行监测,结果表明积冰体的发育过程受温度和降水影响较大。陈安等<sup>[68]</sup>通过详细研究西藏部分公路所处区域内的气候及地形地质特征指出,该地区持续的负温是溢流冰发育的重要条件。焦臣

等<sup>[69]</sup>认为由于高原地区的昼夜温差起伏较大,受气候条件影响,冻土层频繁的冻融过程导致地下水溢流冰昼夜交替出现。

补给通道的渗透能力会直接影响溢流冰的形成规模。Шепелёв<sup>[66]</sup>通过一系列的试验指出,地下水的冻结较大程度上改变了岩层的渗透性,因为含水层冻结后形成的地下冰充满岩层裂隙与岩石孔隙。于森<sup>[70]</sup>通过对西伯利亚典型地下水溢流冰区域布鲁斯(Buluus)的温度、降水量、地下水水位以及冻深进行监测,同时采集水样并进行水化学成分的测定,结合积冰体进行现场勘测和遥感监测,结果表明,长期稳定的负温环境是溢流冰发育的先决条件,充沛的降水是积冰体成的主要物质条件,冻土层内存在过水通道,水头差提供主要驱动力。

然而以上成果都是从宏观的角度针对冻土层内地下水的补给、运移和排泄规律及其影响因素进行研究的,而地下水溢流冰的微观特征研究同样重要。Woo<sup>[54]</sup>回顾了溢流冰的发育、控制和预防的相关研究,从热力学角度提出溢流冰形成过程的一维、二维模型,并初步揭示溢流冰形成机理。张浩<sup>[71]</sup>通过室内外实验结合数值模拟指出,饱水粗粒土的冻结是积冰的内部条件,外部条件是三层体形成的密闭体系。

### 2.2 融雪入渗

在冬季,大部分降水以雪的形式积累在地面上,积雪具有多种特征,其低导热特性防止土壤的过度降温,从而影响土壤的冻结深度、冻结速率和水热迁移状况等<sup>[72]</sup>。同时,积雪也可作为淡水资源<sup>[73]</sup>。由于气候变暖,世界各地寒冷地区的活动层深度和冻结期正在减少<sup>[74-76]</sup>。由于冻土层的状况对融雪入渗的数量和时间有很大影响,因此,冻土深度和冻期的缩短对冬春两季土壤水分和溶质的运移具有重要意义。融雪入渗大致划分为积雪层入渗、包气带融层入渗和包气带冻层至饱水带入渗等3个阶段<sup>[77]</sup>。

#### 2.2.1 积雪层入渗

干燥的雪主要由空气和雪花或冰晶组成。由于很大一部分雪层充满了空气,在热辐射、温度和风力等因素作用下,积雪层的融化在其表面和内部同时进行。融雪过程受到土壤温度、冻土层厚度、越冬前土壤含水量、积雪厚度等因素影响。Iwata等<sup>[78]</sup>通过监测结果指出,在融雪水越过积雪层到达地表面后,如果融雪水足够多且超过地表面的渗透能力,则部分融雪水沿着地表形成超渗产流。Carey等<sup>[79]</sup>结合北极高山地区多年监测结果,并充分考虑土壤类

型、多年冻土层厚度、地形和植被覆盖条件指出,积雪厚度越大、活动层厚度越小的坡面,融雪径流量越大。然而,当土壤的固有渗透率相对较高、融雪量较小时,融雪水可能会完全入渗<sup>[80]</sup>。Iwata等<sup>[81]</sup>在北海道地区设置了积雪监测点,该地土壤类型主要为火山灰土,同时对土壤温度、含水量以及气候参数进行监测,结果表明,在融雪期间有78~161 mm融雪水渗入地下。这是由于雪的导热系数极低,一般低于0.10 W/m/K,大约是土壤的1/5到1/20,使得积雪在大气和地面之间起到了绝佳的隔热作用,降低地表冻结速率<sup>[82]</sup>。

### 2.2.2 包气带融层入渗

春季融雪前的土壤水分动态往往被忽略不计,因为监测显示,未冻结土壤在积雪覆盖下土壤含水量是稳定的<sup>[81,83]</sup>。在春季融雪开始时,季节性冻土层也开始逐渐融化,在地表和冻土层上界之间形成一个融层,融雪水渗过地表进入包气带融层。冻层导水率通常比融层低,当融雪速度大于融层底部下渗速度时,水分在融层积蓄<sup>[84]</sup>。在融层饱水以后,溢出地表,蓄满产流<sup>[85]</sup>。Wang等<sup>[86]</sup>在气温上升至不同阶段的条件下,利用SRM(snowmelt runoff model)模型对融雪径流进行了模拟,结果表明,在包气带融层入渗阶段产生的径流对气温的响应较大,气温上升幅度越大,融雪径流出现的时间越早,流量越大。

### 2.2.3 包气带冻层至饱水带入渗

融雪水渗过包气带融层继续向下渗流到包气带冻层,冻层导水率通常比融层低<sup>[84]</sup>。Stadler等<sup>[85]</sup>发现瑞士阿尔卑斯山粉质的森林土壤存在地表径流,监测结果表明位于包气带的土壤冻结后仍存在连通的孔隙,部分融雪水受重力、热力双重因素驱动入渗,遇冷冻结进一步降低冻土层导水率<sup>[87]</sup>。另外一部分穿过冻层的融雪水在重力作用下继续下渗到饱水带<sup>[77]</sup>。

## 2.3 冻土保墒

冻土保墒指的是季节性冻土层在冻融过程中的土壤持水量,其中“墒”指的是土壤含水量,冻土保墒是季节性冻土区特有的水文地质现象。冻土区长期负温环境使得土壤的持水性质与非冻区不同,其包气带内土壤在冻结后起着蓄水保墒和隔热减渗的作用,导致在春季冻结层土壤的墒情较高。在土壤冻融过程的不同阶段,其主要影响因素也会随之改变<sup>[88]</sup>。

在冻结过程中,外部环境温度的变化影响了土壤冻结锋(含冰土层与不含冰土层之间的分离锋)的

迁移速率<sup>[89]</sup>,调整了土壤中水分的分布<sup>[90]</sup>。土壤孔隙结构和地下水位埋藏深度也在一定程度上影响了土壤冻结过程中的水分分布<sup>[91-93]</sup>。在稳定冻结期,季节性冻土层厚度、范围和规模变化很小。在这个阶段,冻结层孔隙内的水分多数已冻结成冰,剩余水分以未冻水形式储存在冻土层内。

在季节性冻土层的融化阶段,冻土层内主要由融雪水入渗和季冻层融化的水分构成。Шепелёв<sup>[66]</sup>结合多年监测结果指出,冻土层在暖季融化释放出水分,继而提高冻土层墒值。戴长雷等<sup>[77,94]</sup>设计融雪水入渗试验,通过分析实验结果表明,在冻结期土壤水分在水土势的作用下由非冻区向冻结区迁移,持水率峰值一般在冻结锋前沿10~20 cm,并指出融雪入渗是寒区春季最重要的水文过程之一,融雪入渗对于保持土壤墒情具有重要作用。

从整体上看,国内外关于地下水溢流冰、融雪入渗和冻土保墒这些冻土水文地质现象的研究多数还停留在形成规律和影响因素分析的阶段,难以表述、反映及最终量化这些冻土水文地质现象的完整过程。这是由于研究区多处于高寒且具有一定危险性的缺资料地区,监测点数量较少,而且大部分监测点都是随机选择的,监测方法不尽相同,冻结层的固有特性也一般不计,研究结果具有局限性,同时也与这些冻土水文地质问题本身的复杂性、多学科性以及所需的研究理论、试验技术等方面条件的限制、不成熟等都有一定的关系。

## 3 技术手段的应用

冻土层的存在也使得地下水的补、径、排过程与非冻区相比有着根本性的不同。然而,由于多年冻土区环境有很多局限性(如高海拔、高纬度),也给冻土水文地质研究的带来较多困难,包括缺乏地下水数据、地质条件探测的困难、部分大型仪器无法正常工作等。但是在过去20年里,技术方法的进步使多年冻土区地下水研究取得突破性进展,较多的地球物理技术已实际应用在多年冻土区,包括地电法中的电阻率层析成像技术和电容耦合电阻率层析成像技术,电磁技术中的频域电磁感应和时域电磁感应,探地雷达技术和地震折射层析成像等,这些非侵入性或微创地球的物理方法已经可以快速、低成本地大范围内连续描述地下的特征,同时也在逐步地提升着精确度。水化学示踪技术冻土区地下水运移过程发挥着重要作用。冻土水文模型对于地下水的补给、径流和排泄过程也具有着重要意义。

### 3.1 地球物理技术

冻土层多存在于高寒区,传统的深层钻探技术是冻土水文地质相关数据最直接的获取方法。但这种方法相对昂贵、耗时且对后勤要求较高,因此很难在偏远地区使用。大范围内连续描述地下的特征,调查深度通常可以达到几十米,而且可以快速、低成本地应用。与钻探现场提供的点源信息相比,这些非侵入性或微创地球物理方法可以快速提供整个调查区域的信息。

通过应用地球物理方法测量地下地球物理性质

(电阻率、介电常数和地震波速度等),以推断冻土条件和冻土的物理性质,进而在水平和垂直方向上圈定活动层、永久冻土层和居间不冻层(talik)的厚度<sup>[7]</sup>。用地球物理方法探测和表征多年冻土,取决于冻土与非冻土间不同的地球物理性质。这些差异主要与含有冰或未冻水的冻土层的物理性质有关<sup>[95]</sup>。目前,多用于区分冻结和未冻结物质的地球物理特征参数是电阻率、介电常数和地震波速度<sup>[96]</sup>,相应地衍生出了多种地球物理勘探技术,其主要特征见表 2。

表 2 地球物理技术主要特征<sup>[7]</sup>  
Tab. 2 Main characteristics of geophysical technology<sup>[7]</sup>

分类	技术方法	应用	存在的问题
地电法	电阻率层析成像(ERT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 探测冻土层中的大规模冰体</li> <li>• 监测冻土层的演化过程并提供可视化演化过程</li> <li>• 量化研究冻土层中冰含量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在电极和地面之间必须获得良好的电接触</li> <li>• 有时很难区分冰、空气和特定岩石类型</li> <li>• 数据处理需要有数据反演经验</li> </ul>
	电容耦合电阻率层析成像	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不连续冻土带和居间不冻层的探测</li> <li>• 监测冻土层的演化过程并提供可视化演化过程</li> <li>• 量化研究冻土层中冰含量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 无须与地面进行电接触</li> <li>• 布置简便,快速数据采集</li> <li>• 适合高电阻区域</li> <li>• 数据处理需要有数据反演经验</li> </ul>
电磁技术	频域电磁感应(FEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 绘制冰缘现象的边界</li> <li>• 映射不同区域活性层厚度的差异</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 设备轻便</li> <li>• 不同的地表条件对调查结果影响较大</li> <li>• 数据处理简单</li> <li>• 对人为电磁噪声(电源线等)敏感</li> </ul>
	时域电磁感应(TEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 确定永久冻土层的厚度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通常穿透深度大</li> <li>• 对人为电磁噪声(电源线等)敏感</li> </ul>
地震法	地震折射层析成像	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 探测冻土层中的大规模冰体</li> <li>• 映射活性层厚度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 接收器的数量应至少为 12 个,每个接收器之间或每隔一个接收器位置之间设置炮点</li> <li>• 可用人工手段(例如大锤)作为震源</li> <li>• 地震检波器对风和雨很敏感,会导致数据混乱</li> <li>• 需要有数据反演经验才能进行数据处理</li> </ul>
雷达技术	探地雷达技术(GPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 冻土层内地下冰的边界划定</li> <li>• 映射活性层厚度</li> <li>• 冰雪厚度探测</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在导电的近地表情况下穿透深度较小</li> <li>• 难以在非均匀的介质中应用</li> <li>• 需要选择合适的天线频率</li> <li>• 对人为电磁噪声(电力线等)敏感</li> </ul>

#### 3.1.1 地电法相关技术

电阻率对冻土层从解冻到冻结的转变过程非常敏感,在冰点,由于从导电水到非导电冰的相变,电阻率急剧增加,因此电阻率层析成像(electrical resistivity tomography, ERT)技术是进行多年冻土调查的有力工具<sup>[96]</sup>。Daily 等<sup>[97]</sup>将电阻率层析成像应用于包气带水的监测,通过分析指出较粗、排水良好的土壤(沙子和砾石)的电阻率更高,而颗粒较细的土壤(粉土和黏土)通过毛细作用保持更多水分,则成像为更高的导电性。Kneisel<sup>[98]</sup>在中纬度高阿尔卑斯山和高纬度部分山地环境应用二维电阻率层析

成像技术确定多年冻土的位置、范围及其特征与活动层的空间变异性以及不连续冻土层的内部结构。Kneisel 等<sup>[99]</sup>在二维电阻率层析成像技术的基础上使用三维电阻率层析成像技术,进一步对地下电阻率分布进行空间成像,并且明显改善了对地下结构的描述和表征。

电阻率层析成像不仅可以使使用电极的电偶耦合,也可以使用电容耦合电阻率层析成像对冻土层物理特性进行观测。De Pascale 等<sup>[100]</sup>对加拿大西部北极地区冻土层结构与冰含量进行测定,结果表明高电阻表面(坚硬的冰冻地面或积雪覆盖的冻土

层)更适合应用电容耦合电阻率进行量测。Hauck 等<sup>[101]</sup>通过对瑞士的上恩加丁(Upper Engadine)多年冻土区进行地探指出,在冻土区浅层采用电容耦合电阻率层析成像技术对于小规模岩性变化的捕捉更加准确。

### 3.1.2 探地雷达

探地雷达技术是一种多由频率在 10~1 000 MHz 的短波来探测地下结构和特征的地球物理方法<sup>[102]</sup>。与依赖于电阻率的直流电阻率技术不同,探地雷达对介电常数的变化非常敏感。然而,大多数冻土地区的高电阻率为探地雷达技术提供了有利条件,因为传播到地面的电磁信号的衰减随着电阻率的降低而增加。对于冻结和未冻结的介质,介电常数变化幅度很大<sup>[103]</sup>。在大多数山地永久冻土层的测量中,探地雷达技术对介电常数的变化最为敏感,而介电常数决定了地质雷达波的传播速度<sup>[104]</sup>。Hinkel 等<sup>[105]</sup>采用探地雷达对阿拉斯加巴罗环境观测站 1 km<sup>2</sup> 的活动层进行了探测,探定了冻土上界与冻土下界的位置,同时识别到了冰楔。You 等<sup>[106]</sup>利用探地雷达结合电阻率层析成像和钻孔温度监测相结合的方法,研究了青藏高原活动层厚度的时空变化,较为清晰地识别出活动层的冻融变化。

### 3.1.3 地震折射层析成像技术

地震法是通过人工激发弹性波在地壳内传播,其速度变化主要由岩石和土壤的物理特性决定。波的传播速度一般在土壤冻结后急剧增加,其中,属粗粒沉积物的增幅最大。冻结速度的增加与未冻结水含量的减少密切相关,进而也会影响波速<sup>[107]</sup>。因此可以通过地震法来探明未冻结的活动层厚度。Kneisel 等<sup>[7]</sup>采用地震折射层析成像技术对冻土区的多年观测结果显示,纵波在未冻结的活动层中传递速度一般为 400~1 500 m/s,而在多年冻土层中一般为 2 000~4 000 m/s,两者之间的纵波速度有明显差异,在图像中成层状分布。当地震波到达分层界面时,一部分能量被折射到深层,而反射波将其余能量传输回地面,由检波器记录,因此地震折射层析成像技术也可以用于探测大深度的多年冻土层的厚度。Schwamborn 等<sup>[108]</sup>通过地震折射层析成像技术探明了勒拿河三角洲西部尼古拉湖(Nikolay Lake)湖冰层、湖水层、湖水下方活动层以及多年冻土层的厚度。

在冻结土壤中,地震波的传递速度会达到一个平缓期,进一步的降温产生的影响较小。这是由于地震波能量主要通过固体基质传输,因此一旦孔隙体积大部分被冰填满,孔隙体积较小的未冻结水含量进一步减少,速度变化可以忽略不计。如果多年

冻土区域的横、纵波速度和密度都已知,也可以对杨氏模量、剪切模量和泊松比进行估算。

### 3.1.4 电磁技术

电磁技术包含的方法种类较多,勘探深度普遍较大,一般在 500~2 000 m,并且可提供较高分辨率的深部信息<sup>[109]</sup>。目前,电磁技术已广泛用于多年冻土的研究<sup>[110-113]</sup>。电磁技术包括频域电磁系统、频域电磁系统、甚低频系统和无线电大地电磁法。Hauck 等<sup>[96]</sup>分析并总结了电磁技术在多年冻土条件下的应用特征。目前,较多采用的是频域电磁感应(FEM)和时域电磁感应(TEM)。

频域电磁法主要是结合天然交变电磁场来研究地球电性结构,多应用于区域性的大地构造勘探,具有探测深度大、频率低、波长长、成本低等优点。Hauck 等<sup>[114]</sup>采用频域电磁法对挪威南部多年冻土区进行了大规模的电磁感应剖面探测,并指出未冻水含量在研究区海拔 1 400 m 急剧增加。时域电磁法以岩石的导电性、导磁性差异为物质基础<sup>[115]</sup>。结合电磁感应原理,向地下发送一次脉冲磁场,并在此间隙利用线圈或接地电极观测二次涡流场,并对该场的时空规律进行研究来达到识别地质构造的目的<sup>[110,116-117]</sup>。Harada 等<sup>[110]</sup>等利用时域电磁方法研究了西伯利亚永久冻土的深部构造,结果表明研究区内居间不冻层(talik)下界位于研究区地表以下 23 m 处,该结果与钻探结果基本吻合。

近 20 年来,随着地球物理勘测技术的进步和计算机算力的提升,数据的快速收集和地下成像技术等有了较大进步。但在地形复杂的高山冻土环境下仍无法大范围地对冻土层构造进行有效的 3D 地球物理测绘,而通过合并多个紧密联系的 2D 地球物理调查的结果,进而建立地下特征和岩性的 3D 图像的方法正在逐渐完善<sup>[7]</sup>。同时,地球物理勘测以高时间分辨率进行延时测量,使得自动监测成为可能,自动监测结果结合大气温度和积雪的时空变化数据,可更深入地研究冻土层的冻融过程。

### 3.2 水化学方法

地下水的时空变化主要表现在地下水补、径、排过程,并在此过程中留下水化学信息,追踪、识别和提取水化学信息是研究地下水演化规律的重要手段。通过投放人工示踪剂研究地下水中天然示踪剂的时间、空间的变化规律,进而查明地下水的演化规律。目前多通过天然地球化学示踪剂研究地下水演化过程,主要包含水化学示踪法、元素示踪法和同位素示踪法<sup>[118]</sup>。



### 3.2.1 水化学示踪法

针对地下水体本身的资源属性以及可利用性,有必要进行地下水的化学组分分析。水化学分析是确定地下水来源、类型及分布的直接方法之一。通过检测各离子含量,结合野外观测,可较好地解释冻土区地下水的演化过程。Woo 等<sup>[43]</sup>在 2000 至 2008 年间冻土水文地质学的研究进展的基础上强调了关于水化学特征的研究。Шенелёв<sup>[66]</sup>对雅库特中部季节性冻土区的地下水化学特征监测,结果表明部分化合物(如  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{CaSO}_4$  等)在温度不高于  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时在水中的溶解度明显降低,在结冰区变成沉淀物。

### 3.2.2 元素示踪法

地下水演化过程中的天然元素示踪剂多以保守性元素为主,如 Cl、Br、稀土元素(rare earth elements)等<sup>[119]</sup>。保守性元素 Cl 和 Br 是研究地下水来源、运移及演化机制的良好指示剂。Cartwright 等<sup>[119]</sup>通过分析指出 Cl 与 Br 含量比值与地下水补给量和地下水矿化度有关。Johannesson 等<sup>[120]</sup>采用稀土元素作为示踪剂对美国内华达中南部的地下水成分进行监测,结果表明稀土元素可以确定不同来源地下水的混合比例。

根据地下水中主要阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$ )的浓度及微量元素(Fe、Mn、Br、Sr、F、Ba、 $\text{HS}^-$ )的浓度,也可以分析冻土区地下水系统特性。Petrone 等<sup>[121]</sup>通过对阿拉斯加 3 个不同冻土覆盖率(分别为 53%、18%和 4%)的流域进行水化学成分监测,结果表明,与冻土覆盖率小的流域相比,冻土覆盖率高的流域  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  的离子浓度更低。而地表水中可溶性有机碳(DOC)和  $\text{K}^+$  的浓度大多与近地表有机土壤中的潜水流动有关<sup>[122-123]</sup>。Larsen 等<sup>[124]</sup>对阿拉斯加北部 417 个湖泊进行水化学成分检测,并根据主要阳离子浓度估算了地下水对湖泊的补给量。中国青藏高原的水化学研究主要集中在冻结层上水,其矿化度较低,主要类型为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ <sup>[125-127]</sup>。Clark 等<sup>[128]</sup>通过分析加拿大西北部冻土区的冻结层上水的水化学成分,结果表明其主要类型为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{Na}$ 、 $\text{Cl}$  和  $\text{SO}$  可以忽略不计,且矿化度很低。Alexeev 等<sup>[129]</sup>采用钻探设备探寻到 2 个居间不冻层,并通过采集、分析得出其内的冻结层间水的盐度变化范围为  $35\sim 400\text{ g/L}$ ,随深度增加而增加,其水化学成分主要为  $\text{Cl-Mg-Ca}$  型。Bagard 等<sup>[130]</sup>研究了西伯利亚中部冻结层下水对冬季基流的补给,结果表明研究区冻结层下水的主要类型为  $\text{Na}^-\text{Cl}$

和  $\text{Ca}^-\text{Cl}$ ,其中 TDS 介于  $10\sim 500\text{ g/L}$ 。

### 3.2.3 同位素示踪法

同位素示踪法主要适用于地下水演化过程,通过同位素示踪法可以分析地下水成因,研究补、径、排过程及其运动特征,并可估算地下水的贮留时间<sup>[131-133]</sup>。近年来,多用于示踪剂的同位素有 O、H、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$  等。氧是构成水分子的元素,不同来源的水,氧同位素组成存在着一定的差异,因此氧同位素多用于分析水的来源、运移过程以及贮留时间<sup>[134]</sup>。 $^2\text{H}$  多用于确定地下水来源与补给, $^3\text{H}$  在分析地下水年龄和贮留时间和补给过程有重要作用<sup>[135]</sup>。同时,C、S、Cl、B、Li 等元素的同位素也不断被应用于地下水演化规律和过程的研究<sup>[118]</sup>。 $^{14}\text{C}$  可以用于分析地下水的年龄及补给过程, $^{13}\text{C}$  和  $^{34}\text{S}$  在分析地下水与冻土间相互作用有重要作用。 $^{36}\text{Cl}$  和  $^{37}\text{Cl}$  作为示踪剂多用于确定咸水成因<sup>[136]</sup>。 $^{10}\text{B}$  和  $^{11}\text{B}$  之间质量差大,分馏效应显著,因此硼同位素组成可用于分析地下水来源<sup>[137]</sup>。Li 同位素组成特征多用于分析卤水、海水等流体的运移过程<sup>[138]</sup>。

冻土层的存在会限制地表水和地下水间水化学成分的交换,并延长地下水的停留时间,进而增加岩-水间的相互作用。目前,对于冻土区水文地球化学的研究,多集中于天然地球化学示踪剂对不同地质条件和地下水停留时间条件下地下水演化过程研究。然而,年内冻土区化学成分的改变,除了受水分迁移过程和岩-水间的相互作用的影响以外,温度也是影响因素。冻土区地下水的温度在年内发生季节性变化,水化学参数(水中溶解性气体和同位素成分的含量、氧化还原电位、pH 值、介电系数等)也随之改变<sup>[66]</sup>,目前对该问题的研究还十分薄弱。

### 3.3 冻土水文模型

构建冻土区水文模型,可以描述地下水渗流的微观过程,分析冻土层冻融过程中地表水与地下水的转化关系,同时也可以进一步了解冻土区地下水的补、径、排过程,可为冻土层对地下水循环过程影响的相关研究提供支撑。近年来,冻土水文模型受到了更多的关注,比较经典的 SHAW<sup>[139]</sup>、COUP<sup>[140]</sup>、SWATMOD<sup>[141]</sup> 等水文模型多为针对地表径流过程的模拟。HydroGeoSphere<sup>[142-143]</sup> 模型更多考虑了地下渗流过程。目前,已建立的冻土水文模型大多为经验或半经验性质的概念性模型,主要是针对冻土水文循环过程的子环节的研究,多集中在冻土入渗模型、冻融模型、水热耦合模型、流域冻土水文模型,见表 3。

表3 冻土水文地质模型汇总  
Tab. 3 Summary of hydrogeological models of frozen soil

模型类型	模型名称	主要输入参数	输出参数	应用范围	特点
入渗模型	SWAP 中的冻土层入渗模型 <sup>[144]</sup>	融雪量、非冻土饱和水力传导速率、含水率、土壤孔隙度、含冰率	水分入渗速率	冻土层入渗过程	考虑了热量传递引起的土壤冻融对入渗的影响
	垂向冻土层入渗模型 <sup>[145]</sup>	土壤的比热容、土壤饱和度、土壤预融化平均温度、入渗时间	累积入渗量	冻土层入渗过程	预测冻土入渗的半经验参数模型
	融雪入渗模型 <sup>[146]</sup>	融雪当量、土壤平均含水率	融雪入渗量	融雪入渗过程	经验模型,考虑了融雪入渗的影响
冻融模型	Stefan 模型 <sup>[147-149]</sup>	温度、导热系数、土壤水分相变引起的潜热变化、冰的融化潜热、土壤的干容重、总含水量、未冻水含量、冻结指数、融化指数	季节冻结或融化深度	活动层冻融过程	简化了土壤冻融深度的分析计算过程
	Kudryavtsev 模型 <sup>[149-151]</sup>	积雪和植被对温度的贡献、土壤含水量和冻融过程土壤温度变化	季节冻结或融化深度	活动层冻融过程	该模型考虑了地表影响因子和暖季、冷季的持续时间以及积雪效应对冻土深度变化的影响
	TTOP 模型 <sup>[10]</sup>	饱和土壤和干土壤的导热系数、土壤饱和度、冻土土壤的液态水含量(土壤的饱和含水量)、液态水、冰和固体颗粒的导热系数、土壤其他组分的平均导热系数、冻结温度、土壤密度	冻土分布指数	活动层冻融过程	可以耦合积雪因子对改模型进行改进 <sup>[152]</sup>
水热耦合模型	内陆河高寒山区流域分布式水热耦合(DWHC)模型 <sup>[153]</sup>	气象因子、植被因子、土壤参数、地形因子	各层土壤的温度、含水量、热传导、潜热变化、水势梯度、导水率和水分入渗和毛细水分上升量等	内陆河山区流域和其他存在季节冻土和多年冻土的流域水文循环过程	主要由气象因子模型、植被截留模型、冰川和积雪融化模型、水热耦合模型、蒸散发模型、入渗模型和产、汇流模型等子模型构成
	二维剖面地下水热传导耦合模型 <sup>[11]</sup>	水的密度、水的动力黏滞系数、冻结温度、渗透率、孔隙度、温度	地下水渗流速率	山区多年冻土区地下水渗流过程	考虑到水的物理相变对渗透性的影响对 SUTRA 模型进行的改进
	“积雪-土壤-砂砾石层”连续体的水热耦合模型 <sup>[154]</sup>	积雪密度、积雪的导热系数、积雪的体积热容量、土壤(砂砾石层)、水、冰的体积热容量、土壤导热系数和饱和含水率	积雪厚度、不同深度地温、土壤含水率、冻结深度	砂砾石层为主要成分的冻土层的融雪入渗和冻融过程	水热耦合考虑到了冻融过程以及融雪入渗过程
	Coup 模型 <sup>[155]</sup>	降水量、气温、相对湿度、风速和云量、植被高度、盖度以及根的分布、根深、土壤分层厚度、粒度、干密度、孔隙度、比重、饱和导水率	地温、液态含水量、冻土冻结深度和冻结时间、净辐射、总辐射、土壤热通量、土壤水通量	季节性冻土层水热传输过程	能够进行水热耦合过程的模拟,同时也可以考虑到植被覆盖带来的影响
流域冻土水文模型	多年冻土区的分布式产流模型 <sup>[156]</sup>	雪水当量、降雨量、坡度、水力传导系数、土壤密度、土壤孔隙度、导水率随活动层深度的变化规律	径流量	多年冻土区融雪入渗和降雨径流过程	考虑了土壤冻融过程对地下水运移的影响
	内陆河山区流域径流模型 <sup>[157]</sup>	融冰、雪当量、降水量、气温	径流量	高山冰雪冻土带和山区植被带对山区径流的形成和汇流过程	借鉴了瑞典水文气象研究所 HBV 概念性水文模型
	融雪径流模型(SRM) <sup>[158]</sup>	日气温、日降水量和日流域积雪覆盖率	日径流量	高山冰雪冻土带对山区径流过程	引入了积雪遥感数据作为模型的驱动变量之一,提高了模型的精度,也扩大了模型的应用范围
	寒区水文模型(CRHM) <sup>[159]</sup>	风吹雪参数、融冰、雪参数、冻土入渗参数、蒸散发参数等	吹雪量、径流量、冻土入渗量,蒸散发量	草原、森林、山区以及沼泽等各种不同地貌的寒区环节的水文过程	考虑到包括风吹雪、蒸散发、融冰、雪下渗、坡面径流、地表径流及汇流过程等寒区水文过程
	水箱(TANK)模型 <sup>[160]</sup>	日平均气温、日最高、最低气温、时间、降水量、蒸发量、高程等	日径流量	多年冻土、冰川地区的径流过程	适用于雨、雪、冰川融水混合补给河流,模拟计算流量

目前,国内外的冻土水文地质模拟主要是针对冻土区土壤内水分迁移过程、土壤冻融过程的模拟、考虑水热介质的水热耦合模拟以及大尺度的流域冻土水文模拟。因为冻土区环境较为恶劣,监测数据不够丰富,并且由于活动层的冻融过程以及融雪入渗等过程的复杂性,这些模拟的机理研究还不够完善。因此,这些模型多为概化部分参数和过程的针对单一区域的模型或经验模型。为此,需要加强冻土区基础数据的积累,深化冻土区水文地质现象的机理研究,进而提升模型的适用性。

## 4 结 语

冻土水文地质学是一门十分复杂的学科,不仅与冻土类型(永久冻土、多年冻土、季节性冻土和短暂冻土)、地下水类型(冻结层上水,冻结层间水和冻结层下水)有关,气候条件也有着较大影响,同时也涉及物理学、地貌学、气候学、热学和化学等多种领域,更多时候是多学科领域的交叉应用。因此,在具备以上条件的基础上,结合已有的研究基础,接下来的冻土地质学研究应更多地集中于以下几方面:加强试验点尺度的相关研究,试验过程中进一步完善水-热-力各参数间的整体控制,研究冻土层独特的力学参数对于分析季节性冻融问题至关重要;结合包括地电法、电磁技术、地震法和雷达技术在内的地球物理勘探技术,天然地球化学示踪法和遥感技术等多元化的技术方法对区域尺度的地下水补给、径流和排泄过程进行调查和观测,总结地下水动态变化规律;加强包括地下水溢流冰、融雪入渗、冻土保墒以及流域尺度的冻土区水文地质现象的机理研究,同时加强冻土区基础数据的积累,进而提升冻土区水文模型适用性。

### 参考文献(References):

[1] 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. (YANG Y, CHEN R S. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2011,26(7):711-723. (in Chinese))

[2] 郭利娜. 冻土理论研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3):145-154. (GUO L N. Research progress of frozen soil theory[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019,50(3):145-154. (in Chinese))

[3] GAO H, WANG J, YANG Y, et al. Permafrost hydrology of the Qinghai-Tibet Plateau: A review of processes and modeling[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8:1-13. DOI:10.3389/feart. 2020. 576838.

[4] WALVOORD M A, KURYLYK B L. Hydrologic impacts of thawing permafrost: A review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(6): 1-20. DOI: 10.2136/vzj2016.01.0010.

[5] 周永毅,张建经,闫世杰,等. 土体冻融特性试验研究现状与思考[J/OL]. 岩石力学与工程学报:1-18[2022-01-13]. (ZHOU Y Y, ZHANG J J, YAN S J, et al. Advance and review on the experimental researches of the freezing and thawing characteristics of soils[J/OL]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*:1-18[2022-01-13]. (in Chinese)) DOI:10.13722/j.cnki.jrme. 2021. 0433.

[6] 程国栋,周幼吾. 中国冻土学的现状和展望[J]. 冰川冻土, 1988,10(3):221-227. (CHENG G D, ZHOU Y W. Current status and outlook of permafrost science in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988,10(3):221-227. (in Chinese))

[7] KNEISEL C, HAUCK C, FORTIER R, et al. Advances in geophysical methods for permafrost investigations [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(2): 157-178. DOI:10.1002/ppp. 616.

[8] COCHAND M, MOLSON J, LEMIEUX J M. Groundwater hydrogeochemistry in permafrost regions [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, 30(2): 90-103. DOI:10.1002/ppp. 1998.

[9] 王晓巍,付强,丁辉,等. 季节性冻土区水文特性及模型研究进展 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 953-959. (WANG X W, FU Q, DING H, et al. Advances in researches on hydrologic features and their modeling in seasonal frozen soil regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009,31(5):953-959. (in Chinese))

[10] RISEBOROUGH D, SHIKLOMANOV N, ETZELMÜLLER B, et al. Recent advances in permafrost modelling [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008, 19(2): 137-156. DOI:10.1002/ppp. 615.

[11] GE S, 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. DOI:10.1029/2011gl047911.

[12] 樊贵盛,郑秀清,贾宏骥. 季节性冻融土壤的冻融特点和减渗特性的研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 24-32. (FAN G S, ZHENG X Q, JIA H J. Experimental study on the freezing and thawing features and reduction infiltration characteristics of seasonal freezing and thawing soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1):24-32. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0564-3929. 2000. 01. 004.

[13] 周家作,谭龙,韦昌富,等. 土的冻结温度与过冷温度

- 试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 777-785. (ZHOU J Z, TAN L, WEI C F, et al. Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 777-785. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.023.
- [14] STYLE R W, PEPPIN S S, COCKS A C, et al. Ice-lens formation and geometrical supercooling in soils and other colloidal materials[J]. Physical Review E, 2011, 84(4): 041402. DOI: 10.1103/PhysRevE.84.041402.
- [15] 刘宗超. 湿土冻结温度及其测定[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 15(3): 27-34. (LIU Z C. Wet soil freezing temperature and its determination[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986, 15(3): 27-34. (in Chinese))
- [16] 李毅, 崔广心, 吕恒林. 有压条件下湿黏土结冰温度的研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 45-48. (LI Y, CUI G X, LYU H L. Research on freezing temperature of wet clay under pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(1): 45-48. (in Chinese))
- [17] 张婷, 杨平. 不同因素对浅表土冻结温度的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 132-134. (ZHANG T, YANG P. Effect of different factors on the freezing temperature of shallow top soil[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2009, 33(4): 132-134. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2009.04.029.
- [18] 冷毅飞, 张喜发, 杨凤学, 等. 冻土未冻水含量的量热法试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3758-3764. (LENG Y F, ZHANG X F, YANG F X, et al. Experimental research on unfrozen water content of frozen soils by calorimetry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3758-3764. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.12.011.
- [19] 泰斯 A R, 奥利丰特 J L, 朱元林, 等. 用脉冲核磁共振法及物理解吸试验测定的冻土中冰和未冻水之间的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 37-46. (TICE A R, OLIPHANT J L, ZHU Y L, et al. Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soils as determined by pulsed nuclear resonance and physical desorption data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2): 37-46. (in Chinese))
- [20] 路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻融过程中未冻水含量及冻结温度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1803-1812. (LU J G, ZHANG M Y, ZHANG X Y, et al. Experimental study on the unfrozen water content and the freezing temperature during freezing and thawing processes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1803-1812. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1433.
- [21] 都洋, 陈晓飞, 张玉龙, 等. 用 NMR 法验证在冻土中 TDR 标定曲线的可靠性[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 788-794. (DU Y, CHEN X F, ZHANG Y L, et al. Reliability of calibration curves measured by TDR in frozen soils verified by NMR[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 788-794. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2004.06.020.
- [22] KOZLOWSKI T. A comprehensive method of determining the soil unfrozen water curves[J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 36(1-3): 71-79. DOI: 10.1016/s0165-232x(03)00007-7.
- [23] 肖东辉, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻融与荷载作用下土体内部孔隙水压力、水分变化规律及其模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 977-986. (XIAO D H, MA W, ZHAO S P, et al. Experimental study on pore water pressure and moisture change law inside soil under freeze-thaw and load and its model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 977-986. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0345.
- [24] 张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1856-1864. (ZHANG L H, MA W, YANG C S. Pore water pressure testing study of soils during freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1856-1864. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.07.005.
- [25] EIGENBROD K D, KNUTSSON S, SHENG D. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(2): 77-92. DOI: 10.1061/(asce)0887-381x(1996)10:2(77).
- [26] ISHIKAWA M, SHARKHUU N, ZHANG Y, et al. Ground thermal and moisture conditions at the southern boundary of discontinuous permafrost, Mongolia [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2005, 16(2): 209-216. DOI: 10.2307/1552053.
- [27] 周幼吾, 郭东信. 我国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, 4(1): 1-19. (ZHOU Y W, GUO D X. Principal characteristics of permafrost in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(1): 1-19. (in Chinese))
- [28] 王庆锋, 金会军, 张廷军, 等. 祁连山区黑河上游高山多年冻土区活动层季节冻融过程及其影响因素[J]. 科学通报, 2016, 61(24): 2742-2756. (WANG Q F, JIN H J, ZHANG T J, et al. Active layer seasonal

- freeze-thaw processes and influencing factors in the alpine permafrost regions in the upper reaches of the Heihe River in Qilian Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61 (24): 2742-2756. (in Chinese)) DOI:10.1360/n972015-01237.
- [29] 兰爱玉,林战举,范星文,等. 青藏高原北麓河多年冻土区阴阳坡地表能量和浅层土壤温湿度差异研究[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 962-979. (LAN A Y, LIN Z J, FAN X W. et al. Differences of surface energy and shallow soil temperature and humidity at sunny and shady slopes in permafrost region, Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 962-979. (in Chinese))
- [30] 刘广岳,邹德富,杨斌,等. 青藏高原腹地各拉丹冬南北坡多年冻土考察初步结果[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1): 83-95. (LIU G Y, ZOU D F, YANG B. et al. Preliminary results of permafrost investigation on northern and southern slopes of Mt. Geladandong, interior Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1): 83-95. (in Chinese))
- [31] GAO H, HAN C, CHEN R, et al. Frozen-soil hydrological modeling for a mountainous catchment at northeast of the Tibetan Plateau[J/OL]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions: 1-40[2022. 3. 16]. DOI:10.5194/hess-2022-98.
- [32] MCEACHERN P, PREPAS E, CHANASYK D. Landscape control of water chemistry in northern boreal streams of Alberta[J]. Journal of Hydrology, 2006, 323(1): 303-324. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.016.
- [33] DOBLE R C, CROSBIE R S. Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 25(1): 3-23. DOI:10.1007/s10040-016-1470-3.
- [34] CONNOR R F, QUINTON W L, CRAIG J R, et al. Changing hydrologic connectivity due to permafrost thaw in the lower Liard River valley, NWT, Canada [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(14): 4163-4178. DOI:10.1002/hyp.10206.
- [35] ECKHARDT K, ULBRICH U. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range[J]. Journal of Hydrology, 2003, 284(1-4): 244-252. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.08.005.
- [36] MCINTOSH J C, SCHLEGEL M E, PERSON M. Glacial impacts on hydrologic processes in sedimentary basins: Evidence from natural tracer studies[J]. Geofluids, 2012, 12(1): 7-21. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2011.00344.x.
- [37] 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. DOI: 10.1002/ppp.1732.
- [38] 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. DOI: 10.1029/2007gl030216.
- [39] 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(1): L01401. DOI:10.1029/2008gl035822.
- [40] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. Water resources research, 1988, 24(5): 755-769. DOI:10.1029/wr024i005p00755.
- [41] WOHLING D, LEANEY F, CROSBIE R. Deep drainage estimates using multiple linear regression with percent clay content and rainfall[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(2): 563-572. DOI: 10.5194/hess-16-563-2012.
- [42] CAREY S K, WOO M-K. Spatial variability of hill-slope water balance, Wolf Creek basin, subarctic Yukon[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(16): 3113-3132. DOI:10.1002/hyp.319.
- [43] WOO M-K, KANE D L, CAREY S K, et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2008, 19(2): 237-254. DOI:10.1002/ppp.613.
- [44] PETHERAM C, WALKER G, GRAYSON R, et al. Towards a framework for predicting impacts of land-use on recharge1. : A review of recharge studies in Australia[J]. Soil Research, 2002, 40(3): 397-417. DOI:10.1071/sr00057.
- [45] KANE D L, YOSHIKAWA K, MCNAMARA J P. Regional groundwater flow in an area mapped as continuous permafrost, NE Alaska (USA)[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 21(1): 41-52. DOI:10.1007/s10040-012-0937-0.
- [46] 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. (LI Z P. Characteristic analysis of groundwater in Qinghai Tanggu-

- lashan area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese))
- [47] WANG J, AIHEMAITI A, DING Y, et al. Variations of pH value and electrical conductivity in the Dongkemadi basin, Tanggula Range [J]. Huanjing Kexue, 2007, 28(10): 2301-2306.
- [48] WALKER H J, HUDSON P F. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River Delta, Alaska [J]. Geomorphology, 2003, 56(3-4): 291-303. DOI: 10.1016/s0169-555x(03)00157-0.
- [49] 廖厚初, 张滨, 肖迪芳. 寒区冻土水文特性及冻土对地下水补给的影响[J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(3): 123-126. (LIAO H C, ZHANG B, XIAO D F. Frozen earth hydrology characteristic in the cold area and influence to groundwater supply from frozen earth[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2008, 35(3): 123-126. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2095-008X.2008.03.039.
- [50] LI Z X, QI F, WANG Q J, et al. Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China[J]. Global and Planetary Change, 2016, 143: 189-195. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.06.005.
- [51] LI Z X, QI F, WANG Q J, et al. Contribution from frozen soil meltwater to runoff in an inland river basin under water scarcity by isotopic tracing in northwestern China [J]. Global and Planetary Change, 2016, 136: 41-51. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.12.002.
- [52] QIN J, DING Y, HAN T, et al. Identification of the factors influencing the baseflow in the permafrost region of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Water, 2017, 9(9): 666. DOI: 10.3390/w9090666.
- [53] WANG G X, MAO T X, CHANG J, et al. Processes of runoff generation operating during the spring and autumn seasons in a permafrost catchment on semi-arid plateaus [J]. Journal of Hydrology, 2017, 550: 307-317. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.020.
- [54] WOO M K. Permafrost hydrology[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-23462-0.
- [55] HIYAMA T, DASHTSEREN A, ASAI K, et al. Groundwater age of spring discharges under changing permafrost conditions: the Khangai Mountains in central Mongolia [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(1): 015008. DOI: 10.1088/1748-9326/abd1a1.
- [56] GRASBY S E, ALLEN C C, LONGAZO T G, et al. Supraglacial sulfur springs and associated biological activity in the Canadian high arctic - Signs of life beneath the ice [J]. Astrobiology, 2003, 3(3): 583-596. DOI: 10.1089/153110703322610672.
- [57] 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. DOI: 10.1088/1748-9326/aad404.
- [58] HALDORSEN S, HEIM M, DALE B, et al. Sensitivity to long-term climate change of subpermafrost groundwater systems in Svalbard [J]. Quaternary Research, 2017, 73(2): 393-402. DOI: 10.1016/j.yqres.2009.11.002.
- [59] ANDERSEN D T. Cold springs in permafrost on Earth and Mars [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(E3): 5015. DOI: 10.1029/2000je001436.
- [60] 王增朋. 冰湖的类型、成因与防治 [J]. 森林工程, 1994, 7(3): 57-60. (WANG Z P. Types, Causes and control of glacial lakes [J]. Forest Engineering, 1994, 7(3): 57-60. (in Chinese)) DOI: 10.16270/j.cnki.sl-gc.1994.03.016.
- [61] 刘建平, 王宝良, 黄锐. 永冻地区冰丘、冰椎的产生及防治 [J]. 黑龙江交通科技, 1999, 6(2): 38. (LIU J P, WANG B L, HUANG R. Generation and prevention of ice mounds and ice vertebrae in permafrost areas [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 1999, 6(2): 38. (in Chinese)) DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.1999.02.024.
- [62] 戴长雷, 于森, 张晓红, 等. 西伯利亚布鲁斯地下水溢流积冰的边坡水热过程模拟 [J]. 水利学报, 2020, 51(4): 430-438. (DAI C L, YU M, ZHANG X H, et al. Simulation of slope hydrothermal process of groundwater overflow icing accumulation in Buluus, Siberia [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 430-438. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190843.
- [63] CLARK I D, LAURIOL B. Aufeis of the Firth River basin, northern Yukon, Canada: Insights into permafrost hydrogeology and karst [J]. Arctic and Alpine Research, 1997, 29(2): 240-252. DOI: doi.org/10.2307/1552053.
- [64] ПАВЛОВА Н, КОЛЕСНИКОВ А, ЕФРЕМОВ В, et al. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в центральной Якутии [J]. Водные ресурсы, 2016, 43(2): 216-216.
- [65] 赵庆春, 金继华, 金万俊, 等. 冰湖的成因、发育规律及其治理研究 [J]. 林业科技通讯, 1995, 38(8): 15-16. (ZHAO Q C, JIN J H, JIN W J, et al. Research on the genesis and development pattern of glacial lakes and their management [J]. Forest Science and Technolo-

- gy, 1995, 38(8): 15-16. (in Chinese))
- [66] ШЕПЕЛЁВ В В. Надмерзлотные воды криолитозоны [М]. Новосибирск: Академическое издательство "Гео", 2011.
- [67] 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. DOI: 10. 1029/2006jg000294.
- [68] 陈安, 彭振斌, 杜长学, 等. 高寒地区公路涎流冰灾害及防治[J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 181-184. (CHEN A, PENG Z B, DU C X, et al. Drift ices along the road located in the tableland chilliness mountain area and method to deal with them [J]. *Geoscience*, 2006, 20(1): 181-184. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-8527. 2006. 01. 021.
- [69] 焦臣, 陈鹏郎. 青藏公路流冰冻害的防治[J]. *西安公路交通大学学报*, 1997, 22(2): 43-45. (JIAO C, CHEN P L. Prevention and control of freezing damage by flowing ice on Qinghai-Tibet Highway [J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 1997, 22(2): 43-45. (in Chinese)) DOI: 10. 19721/j. cnki. 1671-8879. 1997. 02. 009.
- [70] 于森. 高寒区地下水溢流积冰形成机理研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020. (YU M. Research on the formation mechanism of groundwater overflow ice accumulation in alpine regions [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020. (in Chinese)) DOI: 10. 27123/d. cnki. ghlju. 2020. 001123.
- [71] 张浩. 公路涎流冰形成机理与防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016. (ZHANG H. Research on the formation mechanism and prevention technology of highway saliva ice [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese))
- [72] 陈晓飞, 田静, 张雪萍, 等. 积雪融雪过程中水、热、溶质耦合运移规律的研究进展[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(2): 288-292. (CHEN X F, TIAN J, ZHANG X P, et al. An overview of the researches on the coupled transport of water, heat and solute in the accumulating and melting processes of snowpack [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 288-292. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0240. 2006. 02. 021.
- [73] SINGH P, BENGTSSON L. Hydrological sensitivity of a large Himalayan basin to climate change [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(13): 2363-2385. DOI: 10. 1002/hyp. 1468.
- [74] CUTFORTH H, O'BRIEN E, TUCHELT J, et al. Long-term changes in the frost-free season on the Canadian prairies [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2004, 84(4): 1085-1091. DOI: 10. 4141/p03-169.
- [75] FRAUENFELD O W, ZHANG T, BARRY R G, et al. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109: D05101. DOI: 10. 1029/2003jd004245.
- [76] HIROTA T, IWATA Y, HAYASHI M, et al. Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2006, 84(4): 821-833. DOI: 10. 2151/jmsj. 84. 821.
- [77] 戴长雷, 孙思淼, 叶勇. 高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 269-272. (DAI C L, SUN S M, YE Y. Analysis of influencing factors of snowmelt water infiltration into ground in frigid zone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(3): 269-272. (in Chinese))
- [78] IWATA Y, HIROTA T, HAYASHI M, et al. Effects of frozen soil and snow cover on cold-season soil water dynamics in Tokachi, Japan [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(13): 1755-1765. DOI: 10. 1002/hyp. 7621.
- [79] CAREY S K, WOO M-K. Slope runoff processes and flow generation in a subarctic, subalpine catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 253(1-4): 110-129. DOI: 10. 1016/s0022-1694(1)00478-4.
- [80] STÄHLI M, JANSSON P E, LUNDIN L C. Soil moisture redistribution and infiltration in frozen sandy soils [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(1): 95-103. DOI: 10. 1029/1998wr900045.
- [81] IWATA Y, HAYASHI M, HIROTA T. Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover [J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(1): 79-86. DOI: 10. 2136/vzj2007. 0089.
- [82] ZHANG T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview [J]. *Reviews of Geophysics*, 2005, 43(4): RG4002. DOI: 10. 1029/2004rg000157.
- [83] SEYFRIED M S, GRANT L E, MARKS D, et al. Simulated soil water storage effects on streamflow generation in a mountainous snowmelt environment, Idaho, USA [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(6): 858-873. DOI: 10. 1002/hyp. 7211.
- [84] BAYARD D, STÄHLI M, PARRIAUX A, et al. The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1-4): 66-84. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2004. 11. 012.

- [85] STADLER D, WUNDERLI H, AUCKENTHALER A, et al. Measurement of frost-induced snowmelt runoff in a forest soil[J]. *Hydrological Processes*, 1996, 10(10): 1293-1304. DOI: 10. 1002/(sici) 1099-1085 (199610)10:10.
- [86] WANG J, LI H, HAO X. Responses of snowmelt runoff to climatic change in an inland river basin, Northwestern China, over the past 50 years[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(10): 1979-1987. DOI: 10. 5194/hess-14-1979-2010.
- [87] NYBERG L, STÄHLI M, MELLANDER P E, et al. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal forest transect I. : Field investigations [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(6): 909-926. DOI: 10. 1002/hyp. 256.
- [88] 常龙艳. 冻层持水性对寒区冻土保墒的影响研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014. (CHANG L Y. Research on the influences of frozen soil water retention properties on soil moisture conservation in cold regions[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2014. (in Chinese))
- [89] WATANABE K, MIZOGUCHI M. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 34(2): 103-110. DOI: 10. 1016/s0165-232x(01)00063-5.
- [90] BING H, HE P, ZHANG Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 675-681. DOI: 10. 1007/s12665-015-4072-9.
- [91] BRONFENBRENER L, BRONFENBRENER R. Frost heave and phase front instability in freezing soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(1): 19-38. DOI: 10. 1016/j. coldregions. 2010. 07. 001.
- [92] GATMIRI B, MAGHOUL P, DUHAMEL D. Two-dimensional transient thermo-hydro-mechanical fundamental solutions of multiphase porous media in frequency and time domains[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(5): 595-610. DOI: 10. 1016/j. ijsolstr. 2009. 10. 022.
- [93] HOU R, LI T, FU Q, et al. Characteristics of water-heat variation and the transfer relationship in sandy loam under different conditions[J]. *Geoderma*, 2019, 340: 259-268. DOI: 10. 1016/j. geoderma. 2019. 01. 024.
- [94] 戴长雷, 李治军. 寒区闭流区土壤水分垂向渗流系统物理模拟试验装置分析与设计[J]. *黑龙江大学学报*, 2008, 35(4): 86-88. (DAI C L, LI Z J. Analysis and design on the physical simulation experiment device of vertical infiltration system of soil water in frigid zone and closed drainage area[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang*, 2008, 35(4): 86-88. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-008X. 2008. 04. 024.
- [95] WARD S H. *Geotechnical an environmental geophysics: volume I: Review and tutorial*[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. DOI: 10. 1190/1. 9781560802785. index.
- [96] HAUCK C, KNEISEL C. *Applied geophysics in periglacial environments*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10. 1017/cbo9780511535628. 018.
- [97] DAILY W, RAMIREZ A, LABRECQUE D, et al. Electrical resistivity tomography of vadose water movement[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(5): 1429-1442. DOI: 10. 1029/91wr03087.
- [98] KNEISEL C. Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging [J]. *Geomorphology*, 2006, 80(1-2): 32-44. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2005. 09. 012.
- [99] KNEISEL C, EMMERT A, KÄSTL J. Application of 3D electrical resistivity imaging for mapping frozen ground conditions exemplified by three case studies [J]. *Geomorphology*, 2014, 210: 71-82. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2013. 12. 022.
- [100] DE PASCALE G P, POLLARD W H, WILLIAMS K K. Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113: F02S90. DOI: 10. 1029/2006jg000585.
- [101] HAUCK C, KNEISEL C. Application of capacitively-coupled and DC electrical resistivity imaging for mountain permafrost studies [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, 17(2): 169-177. DOI: 10. 1002/ppp. 555.
- [102] DAVIS J L, ANNAN A P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1[J]. *Geophysical Prospecting*, 1989, 37(5): 531-551. DOI: 10. 1016/0148-9062(90)90172-x.
- [103] MOORMAN B J, ROBINSON S D, BURGESS M M. Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14(4): 319-329. DOI: 10. 1002/ppp. 463.
- [104] MAURER H, HAUCK C. Geophysical imaging of alpine rock glaciers[J]. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(180): 110-120. DOI: 10. 3189/172756507781833893.
- [105] HINKEL K M, DOOLITTLE J A, BOCKHEIM J G, et al. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska[J].



- Permafrost and Periglacial Processes, 2001, 12(2): 179-190. DOI: 10. 1002/ppp. 369.
- [106] YOU Y, YU Q, PAN X, et al. Thermal effects of lateral supra-permafrost water flow around a thermokarst lake on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(13): 2429-2437. DOI: 10. 1002/hyp. 11193.
- [107] KING M S, ZIMMERMAN R W, CORWIN R F. Seismic and electrical properties of unconsolidated permafrost [J]. Geophysical Prospecting, 1988, 36(4): 349-364. DOI: 10. 1111/j. 1365-2478. 1988. tb02168. x.
- [108] SCHWAMBORN G J, DIX J K, BULL J M, et al. High-resolution seismic and ground penetrating radar-geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, northern Siberia [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, 13(4): 259-269. DOI: 10. 1002/ppp. 430.
- [109] 朱卫平, 刘诗华, 朱宏伟, 等. 常用地球物理方法勘探深度研究 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2608-2618. (ZHU W P, LIU S H, ZHU H W, et al. Study on the exploration depth of geophysical methods commonly used [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2608-2618. (in Chinese)) DOI: 10. 6038/pg20170643.
- [110] HARADA K, WADA K, SUEYOSHI T, et al. Resistivity structures in Alas areas in central Yakutia, Siberia, and the interpretation of permafrost history [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17(2): 105-118. DOI: 10. 1002/ppp. 551.
- [111] INGEMAN-NIELSEN T. Geophysical techniques applied to permafrost investigations in Greenland [M]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2006.
- [112] COCKX L, GHYSELS G, VAN MEIRVENNE M, et al. Prospecting frost-wedge pseudomorphs and their polygonal network using the electromagnetic induction sensor EM38DD [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17(2): 163-168. DOI: 10. 1002/ppp. 546.
- [113] YOSHIKAWA K, LEUSCHEN C, IKEDA A, et al. Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice) [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: E06S19. DOI: 10. 1029/2005je002573.
- [114] HAUCK C, ISAKSEN K, VONDER MÜHLL D, et al. Geophysical surveys designed to delineate the altitudinal limit of mountain permafrost: An example from Jotunheimen, Norway [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2004, 15(3): 191-205. DOI: 10. 1002/ppp. 493.
- [115] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319-326. (XUE G Q, YU J C. New progress of research and application of transient electromagnetic method in coal [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319-326. (in Chinese)) DOI: 10. 6038/pg20170145.
- [116] TODD B J, DALLIMORE S R. Electromagnetic and geological transect across permafrost terrain, Mackenzie River delta, Canada [J]. Geophysics, 1998, 63(6): 1914-1924. DOI: 10. 1190/1. 1444484.
- [117] HARADA K, WADA K, FUKUDA M. Permafrost mapping by transient electromagnetic method [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2000, 11(1): 71-84. DOI: 10. 1002/(sici) 1099-1530(200001/03) 11.
- [118] 滕彦国, 左锐, 王金生, 等. 区域地下水演化的地球化学研究进展 [J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 127-136. (TENG Y G, ZUO R, WANG J S, et al. Progress in geochemistry of regional groundwater evolution [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 127-136. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 01. 002.
- [119] CARTWRIGHT I, WEAVER T R, FIFIELD L K. Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: An example from the southeast Murray basin, Australia [J]. Chemical Geology, 2006, 231(1-2): 38-56. DOI: 10. 1016/j. chemgeo. 2005. 12. 009.
- [120] JOHANNESSON K H, STETZENBACH K J, HODGE V F. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(17): 3605-3618. DOI: 10. 1016/s0016-7037(97)00177-4.
- [121] PETRONE K C, JONES J B, HINZMAN L D, et al. Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2006, 111: G02020. DOI: 10. 1029/2005jg000055.
- [122] BOUCHER J L, CAREY S K. Exploring runoff processes using chemical, isotopic and hydrometric data in a discontinuous permafrost catchment [J]. Hydrology Research, 2010, 41(6): 508-519. DOI: 10. 2166/nh. 2010. 146.
- [123] CAREY S K, BOUCHER J L, DUARTE C M. Inferring groundwater contributions and pathways to streamflow during snowmelt over multiple years in a

- discontinuous permafrost subarctic environment (Yukon, Canada) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 67-77. DOI: 10. 1007/s10040-012-0920-9.
- [124] LARSEN A, O'DONNELL J, SCHMIDT J, et al. Physical and chemical characteristics of lakes across heterogeneous landscapes in arctic and subarctic Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(4): 989-1008. DOI: 10. 1002/2016jg003729.
- [125] CHENG G D, JIN H J. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in northeast China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 5-23. DOI: 10. 1007/s10040-012-0927-2.
- [126] MA R, SUN Z, HU Y, 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. DOI: 10. 5194/hess-2017-7-rc2.
- [127] CHANG J, YE R, WANG G. Progress in permafrost hydrogeology in China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, 26(5): 1387-1399. DOI: 10. 1007/s10040-018-1802-6.
- [128] CLARK I D, LAURIOL B, HARWOOD L, et al. Groundwater contributions to discharge in a permafrost setting, Big Fish River, NWT, Canada [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2001, 33(1): 62-69. DOI: 10. 1080/15230430. 2001. 12003405.
- [129] ALEXEEV S V, ALEXEEVA L P. Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia [J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11(5): 574-581. DOI: 10. 1007/s10040-003-0270-8.
- [130] BAGARD M L, CHABAUX F, POKROVSKY O S, et al. Seasonal variability of element fluxes in two central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(12): 3335-3357. DOI: 10. 1016/j. gca. 2011. 03. 024.
- [131] CALLEGARY J B, KIKUCHI C P, KOCH J C, et al. Review: Groundwater in Alaska (USA) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 25-39. DOI: 10. 1007/s10040-012-0940-5.
- [132] LACELLE D, VASIL'CHUK Y K. Recent progress (2007-2012) in permafrost isotope geochemistry [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2013, 24(2): 138-145. DOI: 10. 1002/ppp. 1768.
- [133] UTTING N, LAURIOL B, MOCHNACZ N, et al. Noble gas and isotope geochemistry in western Canadian Arctic watersheds: Tracing groundwater recharge in permafrost terrain [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 21(1): 79-91. DOI: 10. 1007/s10040-012-0913-8.
- [134] SOULSBY C, MALCOLM R, HELLIWELL R, et al. Isotope hydrology of the Allt a'Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland: Implications for hydrological pathways and residence times [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(4): 747-762. DOI: 10. 1002/(sici)1099-1085(200003)14:4.
- [135] 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. DOI: 10. 1088/1748-9326/8/3/035040.
- [136] MACFARLANE P A, CLARK J F, DAVISSON M L, et al. Late-Quaternary recharge determined from chloride in shallow groundwater in the central Great Plains [J]. *Quaternary Research*, 2000, 53(2): 167-174. DOI: 10. 1006/qres. 1999. 2113.
- [137] 刘丛强. 流体-岩石反应体系中的硼同位素地球化学 [J]. *地球化学*, 1996, 25(1): 93-100. (LIU C Q. Application of boron isotope geochemistry to water-rock interaction system [J]. *Geochimica*, 1996, 25(1): 93-100. (in Chinese)) DOI: 10. 19700/j. 0379-1726. 1996. 01. 010.
- [138] LYONS W B, WELCH K A. Lithium in waters of a polar desert [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(20): 4309-4319. DOI: 10. 1016/s0016-7037(97)00203-2.
- [139] FLERCHINGER G, SAXTON K. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and development [J]. *Trans ASAE*, 1989, 32(2): 565-571. DOI: 10. 13031/2013. 31040.
- [140] JANSSON P-E, MOON D S. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(1): 37-46. DOI: 10. 1016/s1364-8152(00)00062-1.
- [141] KIM N W, CHUNG I M, WON Y S, et al. Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model [J]. *Journal of hydrology*, 2008, 356(1-2): 1-16. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2008. 02. 024.
- [142] 徐力刚, 张奇, 左海军. 地表水地下水的交互与耦合模拟研究现状与进展 [J]. *水资源保护*, 2009, 25(5): 82-85. (XU L G, ZHANG Q, ZUO H J. Status and progress of research on interaction and coupled modeling of surface water and groundwater [J]. *Wa-*

- ter Resources Protection, 2009, 25(5): 82-85. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2009. 05. 020.
- [143] 卢文喜, 刘派, 徐威, 等. 基于 HydroGeoSphere 的地下水数值模拟及参数灵敏度分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 64-67. (LU W X, LIU P, XU W, et al. Numerical simulation and parameter sensitivity analysis of groundwater based on HydroGeoSphere [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 64-67. (in Chinese))
- [144] GUSEV Y M, NASONOVA O. The land surface parameterization scheme SWAP: Description and partial validation [J]. Global and Planetary Change, 1998, 19(1-4): 63-86. DOI: 10. 1016/s0921-8181(98) 00042-3.
- [145] ZHAO L, GRAY D. A parametric expression for estimating infiltration into frozen soils[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(13): 1761-1775. DOI: 10. 1002/(sici)1099-1085(19971030)11:13.
- [146] GRANGER R, GRAY D, DYCK G. Snowmelt infiltration to frozen prairie soils[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1984, 21(6): 669-677. DOI: 10. 1016/0148-9062(85)92399-x.
- [147] WOO M-K, MOLLINGA M, SMITH S L. Modeling maximum active layer thaw in boreal and tundra environments using limited data[M]. Berlin: Springer, 2008. DOI: 10. 1007/978-3-540-75136-6\_7.
- [148] 刘文惠, 谢昌卫, 刘海瑞, 等. Stefan 方程在土壤冻融过程模拟中的应用[J/OL]. 冰川冻土: 1-13. (LIU W H, XIE C W, LIU H R, et al. Application of Stefan equation on simulating freezing-thawing process of permafrost [J/OL]. Journal of Glaciology and Geocryology: 1-13. (in Chinese))
- [149] 王澄海, 靳双龙, 吴忠元, 等. 估算冻结(融化)深度方法的比较及在中国地区的修正和应用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 132-140. (WANG C H, JIN S L, WU Z Y, et al. Evaluation and application of the estimation methods of frozen (thawing) depth over China[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(2): 132-140. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2009. 02. 003.
- [150] ROMANOVSKY V, OSTERKAMP T. Thawing of the active layer on the coastal plain of the Alaskan Arctic [J]. Permafrost and Periglacial processes, 1997, 8(1): 1-22. DOI: 10. 1002/(sici) 1099-1530(199701)8.
- [151] SHIKLOMANOV N, NELSON F. Analytic representation of the active layer thickness field, Kuparuk River basin, Alaska[J]. Ecological Modelling, 1999, 123(2-3): 105-125. DOI: 10. 1016/s0304-3800(99) 00127-1.
- [152] RISEBOROUGH D W. Exploring the parameters of a simple model of the permafrost-climate relationship[D]. Ottawa: Carleton University, 2004. DOI: 10. 22215/etd/2004-05938.
- [153] 陈仁升, 吕世华, 康尔泗, 等. 内陆河高寒山区流域分布式水热耦合模型(I): 模型原理[J]. 地球科学进展, 2006, 21(8): 806-818. (CHEN R S, LYU S H, KANG E S, et al. A distributed water-heat coupled (DWHC) model for mountainous watershed of an inland river basin (I): Model structure and equations[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 806-818. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2006. 08. 005.
- [154] 周祖昊, 刘扬李, 李玉庆, 等. 基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: I. “积雪-土壤-砂砾石层”连续体水热耦合模拟[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 20-32. (ZHOU Z H, LIU Y L, LI Y Q, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai-Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: I: Hydrothermal coupling simulation of "snow-soil-sand gravel layer" continuum[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 20-32. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2021. 01. 003.
- [155] 阳勇, 陈仁升, 吉喜斌, 等. 黑河高山草甸冻土带水热传输过程[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 30-35. (YANG Y, CHEN R S, JI X B, et al. Heat and water transfer processes on alpine meadow frozen grounds of Heihe mountainous in northwest China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 30-35. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 01. 012.
- [156] KUCHMENT L S, GELFAN A, DEMIDOV V. A distributed model of runoff generation in the permafrost regions[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240(1-2): 1-22. DOI: 10. 1016/s0022-1694(00)00318-8.
- [157] 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 18-26. (KANG E S, CHENG G D, LAN Y C, et al. Application of a conceptual hydrological model in the runoff forecast of a mountainous watershed[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(1): 18-26. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-8166. 2002. 01. 004.
- [158] 马虹, 程国栋. SRM 融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2088-2093. (MA H, CEHNG G D. Application experiment of snow melting runoff model in Gongnai

- River basin of West Tianshan Mountain[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2088-2093. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0023-074X. 2003. 19. 017.
- [159] POMEROY J, GRAY D, BROWN T, et al. The cold regions hydrological model; A platform for basing process representation and model structure on physical evidence[J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2007, 21(19): 2650-2667. DOI: 10. 1002/hyp. 6787.
- [160] 吴煦廉. 水箱模型在雨、雪、冰川融水补给河流上的应用[J]. 水文, 1993, 22(1): 10-15. (WU X L. Application of water tank models in rain, snow and glacier meltwater supply rivers[J]. Journal of China Hydrology, 1993, 22(1): 10-15. (in Chinese)) DOI: 10. 19797/j. cnki. 1000-0852. 1993. 01. 003.

### Research review of hydrogeology in the permafrost and seasonal frozen regions

DAI Changlei<sup>1,2,3</sup>, YU Miao<sup>2,3,4,5</sup>, SONG Chengjie<sup>1,2,3</sup>, NADEZHDA Pavlova<sup>5</sup>, WEI Yiru<sup>2,3,4,5</sup>, LI Mengling<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Groundwater in Cold Region, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. School of Hydraulic & Electric-power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

3. China and Russian Cold Region Hydrology and Water Conservancy Engineering Joint Laboratory, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 4. Faculty of Geology and Survey,

North-Eastern Federal University, Yakutsk 677000, Russia; 5. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk 677000, Russia)

**Abstract:** Frozen soil hydrogeology mainly studies the spatial and temporal distribution and movement of water elements in frozen soil areas and their interaction with frozen soil. Microscopically, the unique hydrothermal parameters of frozen soil, such as freezing temperature, unfrozen water content and pore water pressure, determine the structure and physical and mechanical properties of frozen soil, and affect the freezing and thawing process of frozen soil. Macroscopically, the existence of permafrost has changed the conventional surface runoff and water system model, and the process of groundwater recharge, runoff and discharge has changed fundamentally due to the seasonal freezing and thawing of permafrost, which forms a special hydrogeological environment in permafrost region. The research progress of frozen soil hydrogeology at home and abroad from microscopic and macroscopic perspectives systematically summarized, and the technical methods including geophysical technology, hydrochemistry and frozen soil hydrological model are analyzed. The research results of groundwater overflow ice, snowmelt infiltration and frozen soil moisture conservation in alpine region are analyzed. The development trend of permafrost hydrology should further explore the mechanism of runoff generation and confluence on the basis of accumulating research data and technical methods, and establish a more perfect hydrological physical model of permafrost to quantitatively analyze the interaction between permafrost and water resources.

**Key words:** frozen soil; hydrogeology; runoff generation and confluence; geophysical technology; hydrochemistry; frozen soil hydrological model