

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1201

CHAI Mingtang, MA Wei, MU Yanhu. Distribution and engineering effect of supra-permafrost groundwater: review and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1794-1808. [柴明堂, 马巍, 穆彦虎. 冻结层上水的分布及工程影响研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1794-1808.]

冻结层上水的分布及工程影响研究现状与展望

柴明堂^{1,2}, 马 巍², 穆彦虎²

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 作为一种多年冻土区的特殊水文地质现象, 冻结层上水(或多年冻土层上水)的分布受局地因素的控制, 且随活动层的季节性冻融而变化, 影响地表水和地下水循环以及多年冻土环境中的水热平衡。多年冻土将冻结层上水限制在一个狭窄的空间内, 在暖季冻结层上水侧向和竖向的渗流传热将加剧多年冻土的退化, 也会对上覆工程构筑物的稳定运营造成极大威胁。目前关于冻结层上水的研究主要集中在分布特征、变化规律、流量计算、渗流模拟、水热耦合等方面。研究发现: 在全球升温背景下, 多年冻土退化速率加剧, 随着冻土厚度变薄和融区出现, 冻结层上水的流量及其与地下水的交换量均发生变化, 除了影响局地水文特征外, 还与工程病害密切相关, 如坡脚积水、路基沉降以及路面裂缝等。以区域分布特征为出发点, 对冻结层上水的研究现状进行了归纳和总结, 并对其工程影响有关的渗流传热理论研究成果进行了梳理, 对今后需要进行深入研究的方向进行了展望。这有助于全面理解冻结层上水在冻土区水文过程中的功能, 为相关研究提供了进一步的理论参考。

关键词: 冻结层上水; 水热耦合; 水文地质; 水量平衡; 活动层

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1794-15

0 引言

冻结层上水(或多年冻土层上水)是指分布于多年冻土层之上、活动层中的潜水, 主要存在于平坦的分水岭、平原和河流阶地, 随着气温和地表温度的变化而导致活动层土岩产生季节性冻融^[1]。多年冻土层作为弱透水层, 很大程度上阻碍了冻结层上水的下渗, 同时限制了地表水与冻土层下部融土层之间的水分交换和水力联系, 决定了冻结层上水的分布格局和循环方式^[2]。冻结层上水的形成、演化、运移和动力过程在水温、渗流量等方面都具有不同于常规地区潜水的特殊性; 它不仅是寒区能水循环中的一个关键组成部分, 而且与寒区生态环境变化密切相关, 在多年冻土区的陆地水循环中有着特殊作用^[3]。

冻结层上水在含水层厚度、水量、水温、相态、

水化学特征及水动力特征等方面均具有鲜明的季节性变化特性, 且受局地因素如地形、地貌、植被、降雨、岩性等的控制而产生区域性变化。冻结层上水和多年冻土相互制约、相互作用, 使寒区冻土水文地质条件具有特殊性^[4-5]。冻结层上水是多年冻土与大气系统、植被系统、地表水进行水热交换的重要纽带, 其空间分布控制着包气带含水量的变化特征和地表植被的分布类型^[3]。冻土退化将增大冻结层上含水层厚度, 势必影响到冻结层上水的分布特征和水量变化, 但因其动态过程的复杂性和观测研究的诸多困难, 尚缺乏对其运动规律、驱动因素和机制的系统认知^[6-7]。

本文对冻结层上水的研究现状进行了综述, 有助于系统地认知和掌握冻结层上水在多年冻土环境中的功能。从冻结层上水的赋存特征切入, 分析各类冻结层上水的分布、运移、补给以及排泄特征。

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001065; 41630636)资助

作者简介: 柴明堂, 副教授, 主要从事寒区环境与工程研究. E-mail: cmt620422@163.com

通信作者: 马巍, 研究员, 主要从事冻土力学及冻土物理学研究. E-mail: mawei@lzb.ac.cn

以此为基础,根据全球多年冻土的分布范围,分别归纳了青藏高原、祁连山、大兴安岭、俄罗斯以及北美等典型区域冻结层上水的分布特征。此外,还概括了冻结层上水对于多年冻土区既有工程构筑物稳定性的影响研究,并对冻结层上水在水循环系统中水量平衡和运移过程中对流传热的理论研究和数值计算进行了总结和整理。

1 冻结层上水的赋存特征

冻结层上水的定义是根据含水层与多年冻土层之间的空间关系而确定的^[8-9]。1932年,苏联学者将多年冻土区地下水分为冻结层上水、冻结层间水和冻结层下水,将冻结层上水又细分为冻结层上层滞水、季节性融化层水和冻结层上地下水3种^[10]。第一种,冻结层上水即为活动层中的水;第二种,部

分冻结层上水被季节性低温层覆盖;第三种,冻结层上水为冻结层上多年融区的水(图1)。随着对其认知的发展,寒区地下水的分类问题仍然没有完全解决,但对冻结层上水的形成和发展过程已有明确解释。活动层在冷季自上而下发生冻结,当冻结层上水水位低于冻结锋面时,呈现出非承压状态,当冻结锋面继续向下发展,低于冻结层上水水位时,冻结层上水呈现承压状态,当活动层完全冻结时,冻结层上水随之冻结^[11]。冻结层上水的补给主要来源于大气降水和冰雪融水,其排泄一部分以下降泉的方式溢出地表并汇流成溪,一部分通过沼泽湿地垂直蒸发排泄,另一部分则通过融区补给冻结层下水或层间水(图2)。由于冻结层上水的产流和补给都发生在活动层,因此其补给面积和分布面积基本重合^[1]。

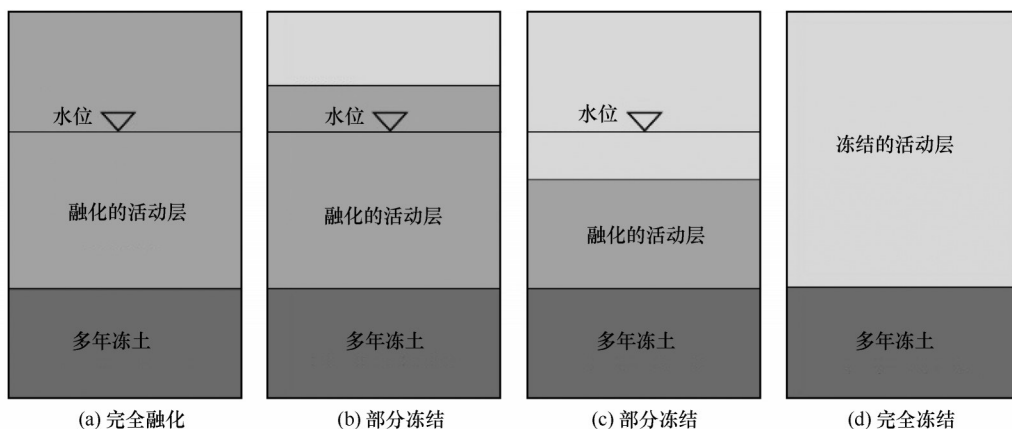


图1 活动层不同状态下冻结层上水类型示意图(据文献[10]改绘)

Fig. 1 The four types of supra-permafrost groundwater under different conditions of active layer (modified from Reference [10])

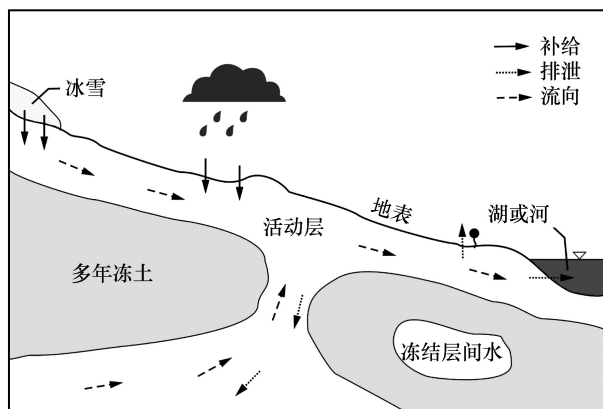


图2 冻结层上水的补给、排泄和流动示意图
(据文献[9]改绘)

Fig. 2 Recharge, discharge and flow of supra-permafrost groundwater (modified from Reference [9])

多年冻土对于冻结层上水具有阻隔、蓄水调节和蒸发抑制的作用^[12-13],目前主要通过定性研究来分析二者的相互关系。多年冻土层产生的水文效应影响到了水循环动态规律和地下水的补给排泄关系,使得降水、地表水、地下水限制了循环通道,对其三者之间的转换关系造成了制约^[14]。多年冻土的阻隔作用导致了土体导热导水性能的改变,直接影响着冻结层上水的下渗和蒸发^[15]。因此,多年冻土的退化将可能增加地表水和冻结层上水流量,其中包括冻结层上水水量、地下水和地表水的交换量、基流流量的增大。相反地,冻结层上水随着地形的变化在多年冻土层之上产生侧向流动,流动过程所引起的对流传热将造成下伏多年冻土的快速退化^[16-17]。总之,冻结层上水与多年冻土在热交换、

地表水-地下水动态循环及区域水文效应等方面有着密切联系。

2 典型地区冻结层上水分布特征

2.1 青藏工程走廊

青藏高原被称为“世界屋脊”“亚洲水塔”“世界第三极”,是我国重要的生态安全屏障,也是全球气候变暖的“先兆区”和“放大器”^[18-19]。青藏高原地区是世界上中低纬度海拔最高、面积最大的多年冻土区,在目前气候背景下,多年冻土面积约为 $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$,随着高原平均气温的升高,青藏高原多年冻土将发生退化,在气温年增加 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0.052 \text{ }^\circ\text{C}$ 两种不同气候背景下 50 a 后多年冻土面积分别减少 8.8% 和 13.4%^[20-21]。此外,受地质构造、地形条件、水文特征和工程影响,青藏高原地区自然灾害分布呈高强度、高频率、突发性、季节性、准周期性特征^[22]。而冻结层上水作为地下水的一种,成为了多年冻土区典型的水文地质现象,在青藏高原冻土退化及灾害发生过程中有着不可忽视的影响。

青藏高原冻结层上水分布范围广,含水层以第四纪松散层、山区基岩风化破碎带为主^[23]。地下水的补给、流动和排泄均受到多年冻土的控制,同时,也受局地因素如地形、地貌、构造、地表水文的影响,因此,每个水文地质单元中的冻结层上水具有差异性。此外,由于多年冻土层厚度随高程的增大而加厚,这进一步改变了地下水动态变化规律,使得冻结层上水在含水层厚度、流速、水温、水文化学、动力学等方面都具有季节性变化^[24-26]。冻结层上水含水层厚度受与冻土上限有关,在青藏高原地区一般为 1~3 m,尤其是河流和小湖塘附近,含水层厚度较大,储水量较高。含水层的空间分布特征明显受到局部地形的控制,地势低洼地带储水量较大,在地势较高地区受径流及蒸发的影响,因储水量低而无法形成统一的含水层。青藏高原地区含水层的形成从每年 4 月土层中的冰体融化开始,一直到 9 月厚度达到最大^[27],冻土层上水的循环周期一般为 1~4 a^[3]。

目前对于青藏高原地区冻结层上水的研究主要集中在三个区域:青藏工程走廊,黄河源区和祁连山地区。青藏工程走廊内由于集中了 5 条重大线性工程而备受关注,冻结层上水的存在不但对工程稳定性有着不可忽视的影响,还对走廊沿线冻土环境特征的演化过程产生着不同程度的影响^[28-29];黄

河源区作为黄河流域的水源地,分布有许多小盆地、径流和湖泊,丰富的地表水和地下水使其在多年冻土区具有特殊的水文地质特征^[30-31],作为流域的重要补给来源,冻结层上水在黄河源区的水循环过程中起着调控作用;祁连山地区分布有大量内陆水系,下垫面特征复杂、冰川众多、储水量较大,冻结层上水广泛发育,在水分疏导、地下水交互方面具有不可替代的作用。

与其他区域类似,青藏工程走廊内的冻结层上水埋藏和分布状况也受地形、地貌、地层、冻土上限深度等因素的制约,补给来源为大气降水、融雪、冰川融水^[32]。廊内山区地带如昆仑山区、可可西里山区、风火山区、开心岭山区、唐古拉山区、头二九山区基本无冻结层上水,相反,在一些河流盆地地区如楚玛尔河断陷盆地、通天河盆地,由于表层为粉砂层、卵砾石层,地形平缓,冻土上限深,冻结层上水较为发育^[33]。

以沱沱河为例,冻结层上水在其流域内主要赋存于基岩类山区的活动层中,一般存在于每年 5—9 月,而 11 月至次年 4 月全部冻结。含水层厚度也受多年冻土层的控制,一般小于 3 m。这类冻结层上水通过风化裂隙及构造裂隙接受大气降水的补给后,产生的径流沿着冻结面进行流动,在山脚和山坡转折处以线状、片状的方式泄于地表或顺构造裂隙带直接补给冻结层下水^[34-35]。在沱沱河北部及南部的高山与高海拔丘陵地区,由于降水较少、寒冻风化较弱、节理裂隙不发育等原因,导致补给水源不足,加之所处地区储水空间有限,因此活动层内土体的富水性较差^[36]。在沱沱河东部的极高山地区,由于降水充沛、寒冻风化强烈、节理裂隙发育,加之山体宽厚、岩屑坡广泛分布,因此整个地区有利于大气降水入渗补给,富水性较好。除冻结层上水的空间分布特征之外,还有对其时间变化特征的研究,通过研究发现,风火山地区典型高寒草甸坡面冻结层上水位的季节性动态变化与活动层土壤温度和水分变化类似,活动层土壤温度控制了冻结层上水季节性动态变化格局。研究表明,距地表 60 cm 深度以下土壤含水率和地下水补给来源决定了冻结层上水水位动态变化的位相和幅度^[7]。

在青藏工程走廊内,热融湖塘作为富冰冻土区的一种常见地貌形态,其演化过程对于冻土退化、地表水和地下水动态平衡均具有重要影响,湖塘的存在及积水范围的扩大成为了工程安全运营的潜

在隐患,因此湖塘的演化特征在多年冻土区备受关注^[37-38],而冻结层上水在湖塘周边广泛发育,其排泄和补给过程与湖塘的变化密切相关。青藏工程走廊内青藏公路两侧从西大滩到可可西里山之间分布着数百个热融湖塘,且随着多年冻土的退化,湖塘数量呈增加趋势^[39-40]。冻结层上水的流入和流出影响着热融湖塘的水文过程,为了评估冻结层上水的热效应对于热融湖塘的发展的影响,可以通过水位、水温、冻结层上水流量的观测,结合探地雷达、电阻率层析成像、钻孔温度监测等方式对活动层厚度的时空变化以及湖塘周围冻土分布进行研究。研究发现,廊内典型湖塘周围的冻结层上水每年融化时长持续5个月,湖岸边温度较低的冻结层上水将补给湖水,在这一过程中伴随着与下伏冻土热交换的产生,将引起活动层厚度和湖塘周围冻土特征的定向差异^[41]。

2.2 黄河源区

黄河源区位于青藏高原东北部、青海省玛多县境内,承担着35%以上的黄河流域径流量,是整个黄河流域重要的水源地,极易受到人为和自然因素的影响而发生冻土环境退化^[42-43]。黄河源区冻融和风化作用强烈,地表岩石发生破碎,产生大量的裂隙,这有利于冻结层上水的储存。源区内地下水水位近几十年来呈现明显下降的趋势,甚至有些区域出现了冻结层上水消失的现象。多年冻土的退化使得冷生隔水层下移,导致了包气带土壤层的含水量减少,该区域出现了植被草场退化、植物多样性减少、沼泽湿地萎缩、荒漠化加剧及黄河断流等一系列生态环境问题^[30,44]。

整个源区内冻结层上水的发育与冻土类型密切相关,主要发育在含冰量较高的冻土层上部的季节性融化带内,埋藏深度受岩性、地层结构、坡向、植被覆盖率等诸多因素综合作用控制,埋藏深度一般为0.5~2 m^[45]。冻结层上水占水资源总量的88.3%,受冻结层上水供给的洼地和沼泽面积在逐年缩小。夏季和秋季入流量大,而春季和冬季由于活动层的冻结作用而入流量明显降低^[24]。黄河源区的冻结层上水主要分布在地形相对低洼的地表水和地下水汇集区,如巴颜喀拉山主峰——尕拉拉错周围的大型古冰川雪粒盆、玛曲源头的冰蚀洼地、以及冲积扇前缘及沟谷中^[46]。黄河源区的水文地质结构、地下水位的变化以及过度放牧和开采沙金等人为作用均会对冻结层上水的空间分布产生

影响,这些作用不仅影响着冻土类型的退化,还会引发一系列生态问题^[46]。源区内冻结层上水的主要补给来源是大气降水和地表水。在降水期内,大气降水和地表水给予地下水充足的水量补给,同时也伴随着水热交换,从而引起冻结层上界的消融和退化。冻结层上水主要通过河流、泉和蒸发排泄,有时通过融区补给冻结层下水^[45]。从沼泽草甸排泄出的冻结层上水汇聚成溪流,成为源区主要河流的发源地,是河流的主要补给来源之一。

2.3 祁连山

祁连山地区多年冻土广泛发育,且温度较高,是我国第二大内陆河黑河的上游地区^[47]。此地区冻地下水的补给来源主要是降水,在海拔3 800 m以上的多年冻土区,地下水以冻结层上水和冻结层下水形式存在;在海拔3 800 m以下的非多年冻土区,地下水主要以潜水形式存在^[48]。基岩山区冻结层上水储存于风化裂隙或孔隙中,含水层厚度随岩性的差异而不同,厚度一般为1~2 m,山区降水充沛,补给条件良好,冻结层上水较发育且水量丰富。各盆地内冻土平原冻结层上水则储存于第四系冰碛-冰水相含泥砂砾石层中,含水层厚度0.5~2 m^[49]。

冻结层上水与地表水、其他类型的地下水之间具有水力联系。冻结层上水成为了冰川和积雪融水从高山往平原地区迁移的通道,作为蓄水池,冻结层上水对于水分的疏导能力产生的季节性变化主要体现在两方面:在暖季沿着地势从高到低流向产生溪流的沟谷地带;在冷季流向因河冰和季节性冻结造成的临时承压含水层,这也说明冷季平原地区储存的地下水和河槽中的基流进行了缓慢释放^[50]。为了研究冻土和地下水的交互影响,通过对祁连山葫芦沟流域三维水文地质模型的计算结果表明,此流域地下水在基流的形成中占43%,地表温度升高会使多年冻土的分布范围减小,增加地下水向河流的排泄。整个流域内冻结层上水距有明显的流动性特征,在渗流过程中有少部分向下穿透了多年冻土层。冻结层下水水头较高,而冻结层上水水头较低,向上的水力梯度驱动着温度更高的地下水流向地表,促进暗渠和融区的形成,增加地下水与地表水的交互作用^[51]。

2.4 大兴安岭

大兴安岭位于欧亚大陆多年冻土区的南部边缘,海拔1 100~1 500 m,冻结层上水在山间沟谷和

河谷谷地最为发育^[52]。区域内植被茂密、森林众多、降雨量大,水系有黑龙江和嫩江及其支流,如额木尔河、盘古河、呼玛河、讷漠尔河、乌裕尔河等,湿地沼泽较为发育,地下水的赋存特征受地质构造、岩性、风化作用和地形地貌等因素的影响。冻结层上水主要分布于大兴安岭北部较大的河谷平原区,含水层厚度、富水性随季节融化深度的增加而增大,此地区冻结层上水主要接受大气降水入渗补给,丰水期接受地表水补给,枯水期排泄于地表水^[53-54]。

此区域冻结层上含水层的分布、厚度、演变程度既与地形地貌有关,又受植被覆盖度的影响,还与地表粗糙度等地形因子有关。植物根系及堆积的枯枝败叶对降水起到良好的输导入渗和涵养功能,完整基岩就构成了稳定的隔水底板,地下水在基岩风化带里形成了冻结层上水。冻结层上水分布空间狭窄,富水条件普遍不佳,再加上接受降水补给时间短,水量贫乏,动态波动特征明显^[55]。基岩风化带冻结层上水按照流量大小分为水量中等和水量贫乏两类:中等水量的冻结层上水分布于伊勒呼里山分水岭北部大片中低山区,含水层岩性较为复杂,主要有侏罗系火山角砾岩;水量贫乏的冻结层上水主要分布于伊勒呼里山分水岭南部中山区以及分水岭北部零星山区,含水层岩性主要为侏罗系火山岩^[56]。

2.5 俄罗斯

俄罗斯多年冻土面积占国土面积的一半以上,是北半球多年冻土区的重要组成部分^[57]。俄罗斯典型地区的冻结层上水动态特征与气温变化密切相关,且含水层具有冻结层上水和冻结层间水的特点。在东西伯利亚勒拿河盆地,冻结层上水分布广泛,占多年冻结层面积的40%~60%,冻结层上水和冻结层间水混合体的滞留时间为1~55 a,多年冻土退化将增大地下水的补给^[58]。在季曼-伯朝拉地区,地下水水位动态变化与气温之间联系密切(图3)。该地区冻结层上水水位一年最小值出现在冬季末期,一年之中,近地面大气平均昼夜温度超过0℃后,包气带水分交换过程和冻结层上水水位开始出现季节性变化^[59]。

俄罗斯科学院西伯利亚分院冻土研究所和俄罗斯地质部的东北水文地质分部共同研究了不同地貌和岩性条件下冻结层上水的季节性变化,总结了三种典型地区的水位变化特征(图4)。当冻结层

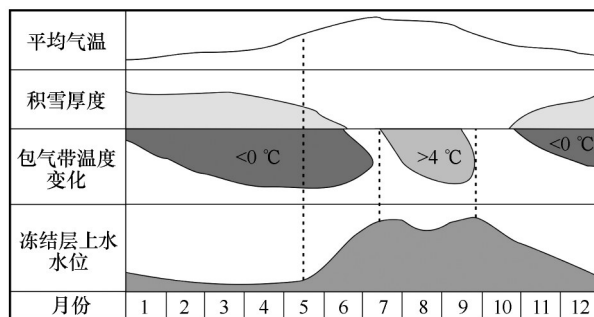
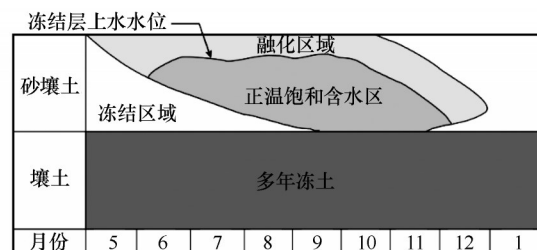
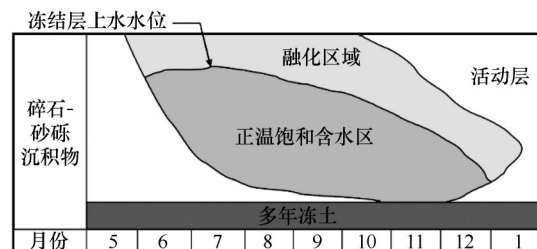


图3 俄罗斯季曼-伯朝拉地区冻结层上水水体动态示意图
(据文献[58]改绘)

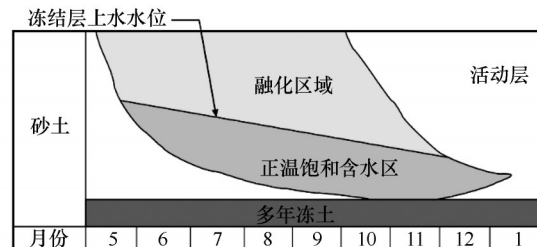
Fig. 3 Dynamic diagram of supra-permafrost groundwater in Timan-Pechora, Russia (modified from Reference [58])



(a) 冻结层上水水位距地表较浅



(b) 水位距离地表较深



(c) 水位与季节性融化层水资源枯竭无关

图4 三种典型冻结层上水水位变化特征
(据文献[60]改绘)

Fig. 4 Change characteristics of water level of the three types of supra-permafrost groundwater
(modified from Reference [60])

上水水位距地表较浅时,依靠积雪融化和大气降水进行补给,水位在衰减时期也能上升;当水位距离地表较深时,基本不受大气降水的影响,因此水位在夏季呈总体下降的趋势;当水位与季节性融化层水资源枯竭无关,与含水层自上而下和自下而上的冻结有关^[60]。除此之外,一些特殊地区如河床下融

区产生的冻结层上水不受季节性冻融过程的直接影响,影响程度取决于河谷的地貌、冻土特征、水文地质条件等^[61]。

高纬度多年冻土区人类活动较多,除了道路等线性工程之外,还分布有市政建筑等众多基础设施,城市的发展和扩张也对冻结层上水产生影响。通过已有文献可知,俄罗斯高纬度地区人类活动对冻结层上水补给的影响主要包括耕作区部分灌溉入渗和来自城市管道、蓄水系统水的渗漏两方面,通过对俄罗斯北部城市雅库茨克市区开展的综合性水文监测工作的研究表明,虽然人类活动因素产生的影响呈局部性特征,但却使冻结层上水的水文情势发生了本质性变化^[60]。

2.6 北美

北美地区的多年冻土主要分布于阿拉斯加和加拿大北部,对于冻结层上水的研究主要集中在几条主要河流的流域盆地如育空河、马更些河以及环北极地区的康沃利斯岛等区域^[62]。育空河全长约 3 300 km,穿越了加拿大及阿拉斯加地区,流域内多年冻土的分布和厚度差异性较大。随着多年冻土的融化,近 30 a 以来地下水占河流总流量的比例正以每年 0.7%~0.9% 的速度持续增大^[63]。马更些河是加拿大第一长河,马更些河盆地占整个加拿大国土面积的近四分之一,盆地中有 75% 的区域分布有连续或不连续多年冻土^[64],在春季融化过程中,冻结层上水占整个排泄量的 90%,这表明在此盆地中,冻结层上水是极地水文的重要组成部分^[65]。

对于育空河盆地地区冻结层上水的研究主要集中在活动层冻融过程、气候-湖泊-地下水之间关系、侧向流动特征三个方面,研究方法以实地观测和模拟计算为主,将二者结合,能够透过现象揭示机理,为查明冻结层上水的变化特征奠定基础。育空河盆地多年冻土区地下水向河流的排泄量逐年增大,地下水总量将有增大的趋势,这首先表现为地下水在低洼地带的排泄范围增大,除此之外还发

现,此地区冻结层上水对于基流的贡献率有所降低^[66]。在气候变化背景下,湖泊与地下水之间在融区形成过程中有着密切关系,气温变暖会加剧冻土融化、增加冻结层上水流量。在寒区,除了气候是冻土环境变化的主导因素外,湖面面积和地下水流动在多年冻土融化和融区形成过程中有着重要影响。湖边缘季节性的冻融循环影响着冻结层上水的运移和冻结过程,在湖面产流区域,多年冻土的分布影响着湖中水体在冻结层上下之间的交换,与此同时,冻土分布特征也受湖水及冻结层的影响^[67]。冻结层上水在坡面地区将产生侧向流动,与垂向流动一并形成了其特殊的水文地质现象,Wolf Creek 盆地坡面垂向的渗透和蒸发过程在南坡较为明显,而北坡的下伏多年冻土阻止了深层渗漏,使得冻结层上水得以存储^[68]。

加拿大的多年冻土主要分布在北部的极地地区,对于冻结层上水的研究主要集中在坡面、河流流域以及极地岛屿等典型区域。在极地地区,产生坡面地表径流的原因在于冻结层上水水位的上升和活动层土壤的饱和,坡面径流取决于冻结层上水水位,并与地表形态有关。从径流源头来看,融雪所占比例最大,降雨次之,排泄方式依次为蒸发、侧向径流。侧向径流包括地表流和地下流,地下流则跟导水系数、活动层厚度、水位等因素有关^[69]。在加拿大北部的砾石地貌中,有湿地、积水和径流,所有的这些地貌都与冻结层上水的局地渗流有关。砾石具有很高的单位产水量和导水系数,能够促进水分流动,但是,浅层冻结锋面影响着深层的渗透,因此,当有融雪和降雨的充足补给时,在地表与水位相交的地方有渗流,且具有季节性变化特征(图 5)。通过水量平衡计算可知,上坡砾石区域的渗流是湿地和积水的主要来源,连续性的渗流改变了植被特征和土壤含水率^[70]。此外,冻结层上水对河流流量有一定程度的贡献,在河道下方的活动层厚度通常更大,甚至出现融区,原因在于冻结层上

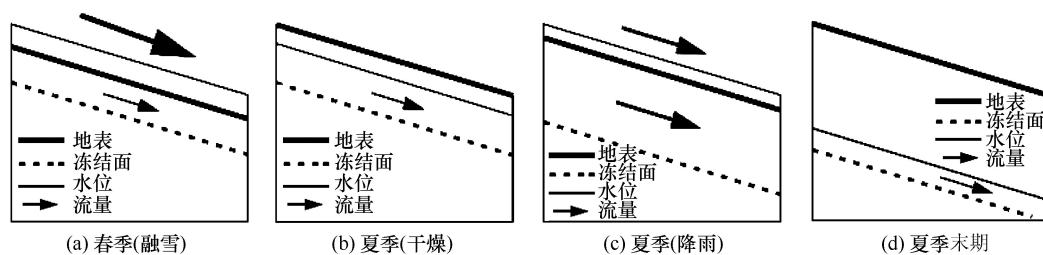


图 5 坡面径流示意图(据文献[69]改绘,箭头大小代表流量大小)

Fig. 5 Slope runoff diagram (modified from Reference [69], and size of arrow represents magnitude of flow)

水的携热效应^[71]。

结合定性分析和定量计算,可获得冻结层上水排泄和河流、溪流流量、活动层厚度、含冰量之间的关系^[72]。加拿大西北部的康沃利斯岛位于多年冻土区,活动层融化过程对于此地区坡面径流量和冻结层上水水量有着重要影响^[73]。岛内片状湿地较为发育,许多湿地依靠降水和冻结层上水进行补给。选取岛内典型区域的片状湿地研究发现,阳坡地下水流量大于阴坡,阳坡地下水流量有冻结层上水的补给,每个单位宽度单元的平均流量为 $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$,水流的持续时间在暖季更长^[74]。在岛南岸冻胀丘发育地区,因为颗粒筛选作用,冻胀丘中心为细颗粒,而冻胀丘之间的沟谷地带则为粗颗粒。通过对冻胀丘之间沟谷地区冻结层上水优先流的观测发现,在优先流经过的区域导水系数为 $90 \sim 1\,000 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,然而在冻胀丘中心仅为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[75]。

3 冻结层上水对工程稳定性的影响

由上述可知,多年冻土对于冻结层上水的影响特征主要有以下四个方面:①减缓水循环过程;②阻隔水分运动的垂向通道,影响地表水和地下水的转换;③使含水层的变化具有季节性特点和动态规律;④冻胀作用改变了土壤结构并增强了入渗能力^[14]。随着多年冻土区人类活动的加剧和各类工程的修筑,冻结层上水的存在及其渗流携热效应严重影响着各类工程基础的热收支特征,直接对工程稳定性产生威胁,冻结层上水渗流、冻土退化及工程稳定性之间的相互影响,但三者的定量关系有待研究。从已有文献来看,冻结层上水对于工程稳定性的影响研究主要集中在公路、铁路以及机场。

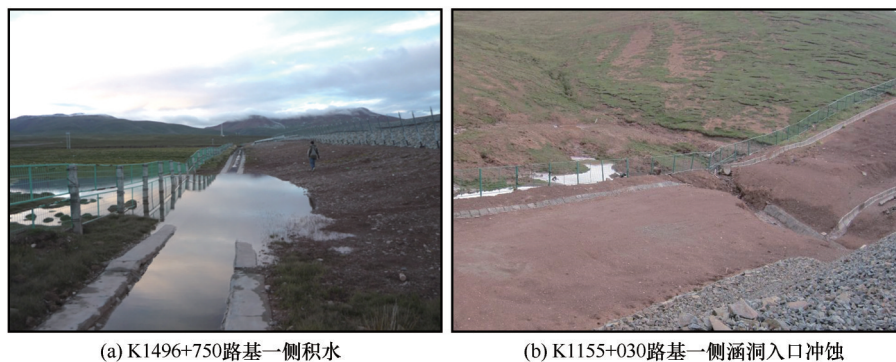
对于多年冻土区的道路工程而言,当冻结层上水穿越路基时,由于路基下部多年冻土上限的下降(少部分采取“主动冷却”措施的路基下部冻土上限会上升),加之路基的荷载作用,会使得冻结层上水的渗流特征发生变化。随着运营时间的增加,活动层和路基中冻结层上水($2 \sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$)的渗流将造成多年冻土温度升高,造成多年冻土退化,同时还会加速融区的出现,加剧路基不均匀沉降,导致路基病害的出现^[76]。通过室内模型试验,结合现场监测资料,能够从冻结层上水夏季渗流导致路基下伏多年冻土融化的角度,进一步证明路面横向裂缝、纵向裂缝以及路基不均匀沉降的成因^[77]。针对冻结层上水对公路路基的影响,可采用防水材料,阻隔水

分迁移和渗透通道,对路基下部过水进行隔水治理可有效降低路基沉降,同时降低因为活动层集水而造成的冻胀^[78]。

经过阿拉斯加和加拿大北部地区的阿拉斯加公路,穿越了不连续多年冻土区,1970年以来沿线年平均气温升高了 $1.5 \sim 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$,多年冻土发生了明显退化^[79]。de Grandpré等^[80]在阿拉斯加公路两侧布设了25个地下水监测孔,评估了地下水流动对路基下伏多年冻土的热影响,通过获取的研究区域的地形、水位、地温、地层等数据,建立了二维地下水流动模型。现场监测数据表明,路基下部水体在流动过程中逐渐放热,地下水运移过程中的对流传热加速了路基下伏多年冻土的退化。通过对阿拉斯加公路试验段地下水的渗流传热效应进行计算,发现冻结层上水对于融化盘的形成及路基下伏的温度场分布具有重要影响。计算结果表明,50 a后地下水渗流作用将使得路基下部的融化深度增加8 m、路基地底部温度升高 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[81]。由此可知,在地表湿润条件下,有必要将地下水渗流引入传热模型中,更好地反映路基和下伏冻土复杂的交互效应。

冻结层上水的存在对青藏铁路路基的稳定性也造成了一定程度的影响,地表水和冻结层上水的入渗是引起多年冻土融化和边坡破坏的主要因素(图6)。当含水率较低时活动层中的细粒土具有较高的强度,当含水率较高时土体强度极大程度上降低。开挖沟渠排水能够降低地表径流和地下水的侵蚀以及降低坡面土的含水率,因此青藏铁路在一些坡脚地区采用了防水材料修建排水渠,来降低水流破坏^[82]。研究还发现,因冻结层上水造成的积水 and 径流,会对路基产生侧向热扰动,路基修筑9 a后,下伏 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线区域厚度达5.5 m,路基两侧的沉降累计达160 mm,然而随着积水的排出,在经过两个冷季之后,这一 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 区域快速并完全冻结,多年冻土上限向上移动,沉降量显著降低(图7)^[83]。要想解决地下水渗流问题,可从三方面入手:首先,采用高分辨率的遥感图像来判定地形和植被特征,并采用考虑地下水渗流的传热模型;其次,采取有效的工程措施来引导地下水穿越路基(引流),如开挖沟渠进行排水,并采用计算模型来模拟这些治理措施对于地基土的侵蚀程度;最后,选用最优工程措施,在典型地区进行试验,验证治理效果^[77]。

多年冻土区的机场跑道在运营过程中也受到了冻结层上水的影响,跑道的不稳定性跟冻土退化



(a) K1496+750路基一侧积水

(b) K1155+030路基一侧涵洞入口冲蚀

图6 青藏铁路附近水毁现场照片

Fig. 6 Photos showing the water damage near the Qinghai-Tibet Railway: ponding at K1496+750 (a) and erosion on side of a culvert at K1155+030 (b)

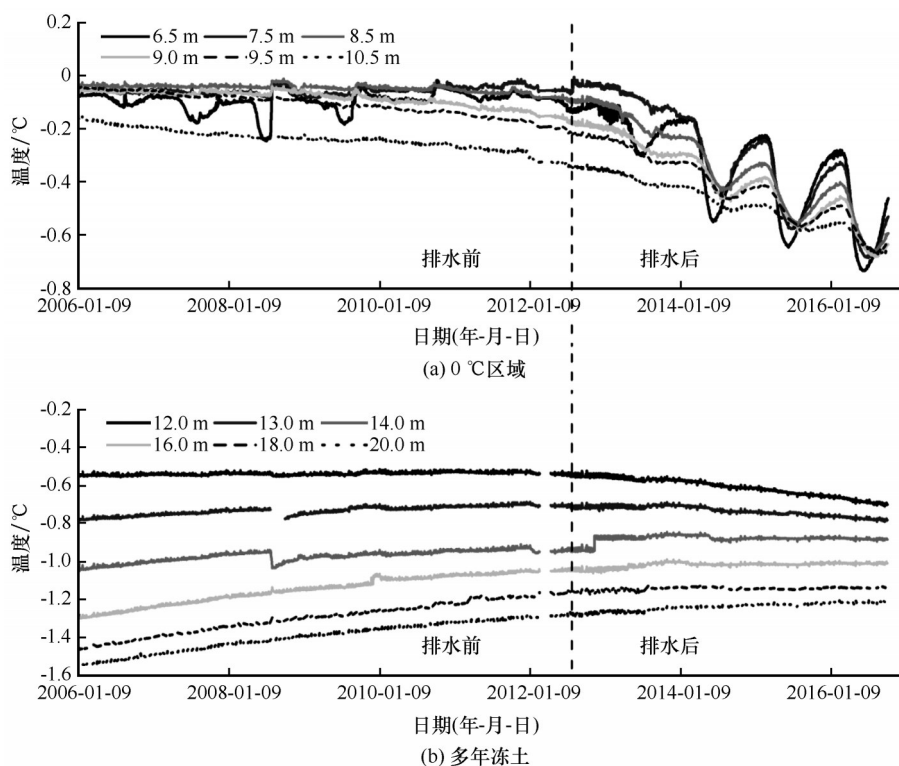


图7 青藏铁路K1101+680处排水前后不同深度温度变化(数据来源于文献[83])

Fig. 7 Variations of soil temperatures at different depths at K1101+680 of the Qinghai-Tibet Railway in 0 °C range (a) and in permafrost layer (b) (The data is from Reference [83])

及排水条件有关,跑道的冻胀融沉与地下水有关^[84]。Ghias等^[85]对加拿大伊魁特国际机场跑道地下水运移和传热进行了数值模拟,研究了机场跑道地下水流动与下伏冻土融化及融沉过程的交互影响。通过计算可知,在全球变暖背景下,地下水的对流传热的影响较小,但是不可忽略,热传导过程控制着未冻水含量以及活动层厚度、冻胀融沉的量级。除此之外,在俄罗斯雅库茨克地区,受人类活动的影响,冻结层上水的化学成分发生了改变,这将影响地下管线、地基、路面基层、路面面层以及其

他构筑物的安全运营。人类活动和不良地质现象对城市基础设施构成了越来越多的威胁,甚至将引发环境问题,在城市发展过程中必须重视这一问题^[86]。

4 理论研究

对于冻结层上水的理论研究主要可以归纳为三个方面:一是水文模型的建立与改进,二是水量平衡计算,三是渗流携热效应。含水层土体的导水系数、液态水储存能力、冻结层上水水位随着土体

的冻融与温度密切相关,而且活动层的双向冻结控制和改变了冻结层上水的渗流过程,向下冻结控制着地表径流的产生和冻结层上水的补充,向上冻结影响着地下水尤其是冻结层上水的排出^[87]。由此可见,冻结层上水的渗流过程和水位变化特征受局地因素的控制,极为复杂,因此截至目前,仍然没有有效的数学模型和理论来预测多年冻土区地下水的变化特征^[88]。

4.1 水文模型

国际上第一代水文模型很好地描绘了流域产流的基本规律,如斯坦福模型、水箱模型、新安江模型,但这类模型忽略了地形、植被等的空间变化对流域产流过程的影响。随后发展出了一批分布式水文模型,如以地形为基础的水文模型(TOPMODEL)、SHE(Système Hydrologique Européen)、VIC(Variable Infiltration Capacity)、DHSVM(Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)、GBHM(Geomorphology-Based Hydrological Model)等^[89]。近十多年来,由于气象学、生态学、冰冻圈等学科的兴起和发展,分布式水文模型与多学科的交叉研究越来越多,这使得建模难度增加,分布式水文模型开始描述不同圈层之间的关系,即“多圈层水文模型”^[90-91]。目前中国寒区水文模型的主要限制因素是缺乏全面、同步的观测数据,可通过观测、试验、模拟等方法,获取寒区水文过程的基本规律、经验公式和关键参数^[92]。

基于物理学基础的水文数值模型能够定性和定量地分析含水层冻融过程中的关键影响因素,且能够反映出水文要素的变化。在已有水文模型的基础上,可以采用热传导方程模拟冻土上限在水文模型中的演变过程^[93],结合能量平衡计算地表热状况的空间分布特征,以此为基础可以得到土壤剖面的融化深度^[94],也可以通过水分迁移模型和热传导模型的耦合,可以研究多年冻土形成和演化过程中的水力特性,同时研究地下水和地表水的季节性变化特征^[95],还可以采用达西方程、流体连续性方程、溶质连续性方程、能量迁移方程来计算冰川作用下地下水流动^[96]。此外,也可以通过在已有的简易地下水模型(SIMGM)、陆面模式(GLM)中增加未冻水含量、相变、土层性质等参数等方式进行改进^[97],建立面向对象的模型系统,来模拟和预测中小尺度的区域中水循环特征^[98]及对气候的反馈^[99-100]。

4.2 水量平衡计算

水量平衡计算能够确定区域内各部分水分的补给与排泄比例,能够反映各部分水分的转化关系。在河流湖泊密集地区,冻结层上水能够补给地表水体,多年冻土的低渗透性不但能够阻碍热量向冻土下限进行传输,而且能够消除从湖泊流出的地下水,降低维持湖泊的用水量^[101]。通过对水量平衡的详细测量表明,加拿大马更些三角洲地区在过去的5 a中,水分供给量接近于排泄量,这使得湖泊保持较高的滞水量。多年冻土在控制源自周围盆地流向湖泊的水分供给(Q_{sp} , Q_s)和来源于湖泊的水分流失(Q_{sb})两方面中发挥着重要作用,湖泊盆地只有当其具有正水平衡的时候才聚集水分,各部分水分平衡的原理^[102]为

$$P + E + Q_{sp} + Q_{sb} + Q_s = ds/dt \quad (1)$$

式中: P 为湖面降雨量(mm); E 为湖面蒸发量(mm); Q_{sp} 和 Q_s 为来源于周边盆地的冻结层上水和地表细沟径流(mm); Q_{sb} 为冻结层下水流经湖泊下部融区的水量(mm); ds/dt 为湖泊储水变化量(mm)^[103]。

秋季冻结期间的产流量是地表蓄流和地下水排泄的主要组成部分,产流量方程^[104]可写为

$$R = (P + Q_s - E) - \int_0^{W'_m} \left(1 - \frac{W'_m}{W'_{mm}}\right)^B dW'_m + z(T_{sd}) \quad (2)$$

式中: R 为流域内的产流量(mm); P 为日降水量(mm); E 为实际日蒸发量(mm); B 为反映流域内蓄水容量空间分布不均匀性的参数; W'_m 为流域内各点蓄水容量; W'_{mm} 为流域内最大的点蓄水容量; T_{sd} 为冻结层上水含水层底部或者接近其底部的温度(近似等于在完全融化阶段活动层边界或者靠近其边界的土壤温度); $z(T_{sd})$ 为冻结层上水排泄方程,随着 T_{sd} 而变化,是秋季径流消退率和 T_{sd} 的回归关系^[105]。

通过对育空河盆地冻土冻融过程中的水量平衡计算,结果表明,流经冻结层上含水层的水分总共占据流经整个系统的地下水流量的25%,尽管冻结层上区域在面积上占整个盆地的89%,但在体积上只占盆地的不到1%。计算过程中还发现,单位孔隙体积的水分流经整个冻结层上蓄水层平均时间大约为30 a;有76%的冻结层上水排泄到远离主要河流和开放性融区等地势较低的区域中(如湖泊、湿地、溪流);在冻结层上区域中跟河流有关的横向流占整个冻结层上水水量的21%,横向流排泄

于河流组成了河流的基流;冻结层上区域只有一小部分(3%)向下渗透通过多年冻土层。冻结层下水和冻结层上水对基流的贡献率之比为3:1,这表明基流主要的来源在于深部地下流^[65]。

4.3 渗流传热效应

对于冻结层上水在渗流过程中的对流传热研究能够揭示冻结层上水在运移过程中与多年冻土的热交换机理,此部分研究中一般采用热传导方程和渗流方程以水-热耦合的方式对研究对象进行有限元计算。活动层的含水率及导热特征决定着下伏冻土与大气边界层的交互作用,冻结温度场主要以热传导、热对流两种传热方式形成热量传递,地下水渗流场对温度场影响主要通过热对流方式^[106-107]。冻土中渗流场和温度场的作用是相互的,一方面,冻土中温度场随外界温度的改变,既可以引起水的黏度及渗透系数的改变,也会因为温度梯度的存在引起水的迁移,还将引起冰水相变;另一方面,冻土中渗流场的存在和变化,使得渗流作用参与土水系统热传递和热交换过程,影响冻土中温度场的分布^[108]。

在全球升温背景下,冻结层上水的渗流传热能够加速多年冻土退化,同时能促进地下水向地表、河流的排放,这将进一步导致冻结层上水量的增大。通过传热-渗流耦合模型计算发现,在冻结层上水作用下,青藏高原地区的活动层厚度和排出地表水量在40 a内增大3倍^[109]。数值计算能够精确刻画流量、水温、水位的分布特征,也可以快速预测其变化趋势,但数值计算的正确性需要采用室内试验进行验证。通过带有控温功能的模型试验,能够反映冻结层上水运移过程中的对流和传热对冻土退化的影响。当水温大于气温时,渗流携热效应导致冻土退化加速^[110]。在模型试验的基础上,结合数值计算,二者相互验证,相互补充,能够直观准确地反映冻结层上水的存在对于多年冻土退化的影响。

5 结论与展望

冻结层上水的研究正从定性的特征分析向定量的机理研究发展,已有的观测和模拟研究已经揭示了冻结层上水的影响因素、赋存特征、补给排泄以及动态变化。冻结层上水的存在使多年冻土区的水文地质条件变得更为复杂,冻结层上水与多年冻土层的相互影响、相互制约的交互作用将会对整个冻土区的生态环境产生深远影响,与此同时,冻

土层上水的存在加剧了冻土工程病害的形成和发展。在今后有必要在以下几个方面进行深入研究:

(1)对冻结层上水与地表水的相互关系及转化特征进行研究。在冻结层上水发育地区,往往伴随着一定的地表水(径流或积水),应该对地表水和大气降水对冻结层上水的贡献度进行分析,结合同位素测量结果和渗流模型,定量描绘地表水的入渗及其冻结层上水的迁移出露过程,考虑地形因素对冻结层上水流量流速的影响,反映冻结层上水对坡面径流的调控机制,以此揭示地表积水与冻结层上水之间的转换规律、补给占比及其年度变化特征。

(2)对多年冻土区路基稳定性受冻结层上水的影响机理进行研究。多年冻土区路基/地基下部冻结层上水的存在成为了其稳定性的潜在隐患,冻结层上水的存在加剧了路基沉降、边坡损毁和路面裂缝均的发生,有必要对路基沉降、路面病害与冻结层上水之间的关系进行研究,考虑冻结层上水渗流过程对温度场的影响,并以此来建立符合现场工况的物理模型来进行水热耦合计算,并分析冻结层上水的渗流过程对路基变形的影响程度,以此来修正有冻结层上水存在条件下的路基变形计算模型。

(3)对全球升温背景下冻结层上水与多年冻土交互作用及变化特征进行预测。首先,需要对冻结层上水水位、流速、构成等基本参数在测试过程中的新方法和新手段进行探索,应采用新的监测方法和传感器,提高测量精度,从整体上掌握冻结层上水的存在范围和流动特征。在此基础上,对多年冻土与冻结层上水的相互作用进行研究,揭示活动层的冻融过程对冻结层上水的影响及其冻结层上水对冻土退化的影响,分析多年冻土对冻结层上水流动特征的限制,并结合气候变化模式预测二者的动态发展规律。

参考文献(References):

- [1] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Chen Rensheng, et al. Introduction to hydrology in cold regions [M]. Beijing: Science Press, 2017. [丁永建, 张世强, 陈仁升, 等. 寒区水文导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [2] Metcalfe R A, Buttle J M. Soil partitioning and surface store controls on spring runoff from a boreal forest peatland basin in north-central Manitoba, Canada [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(12): 2305-2324.
- [3] Cheng Guodong, Jin Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes [J]. Hydrology and Engineering Geology, 2013, 40(1): 1-11. [程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 1-11.]
- [4] Liu Guangsheng, Wang Genxu, Sun Xiangyang, et al. Varia-

- tion characteristics of stable isotopes in precipitation and river water in Fenghuoshan permafrost watershed [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 621-627. [刘光生, 王根绪, 孙向阳, 等. 多年冻土区风火山流域降水河水稳定同位素特征分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 621-627.]
- [5] 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.
- [6] Pang Qiangqiang, Zhao Lin, Li Shuxun, et al. Active layer thickness variations on the Qinghai-Tibet Plateau under the scenarios of climate change [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(3): 849-857.
- [7] Chang Juan, Wang Genxu, Li Chunjie, et al. Seasonal dynamics of suprapermfrost groundwater and its response to the freezing-thawing processes of soil in the permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2015, 45(4): 481-493. [常娟, 王根绪, 李春杰, 等. 青藏高原连续多年冻土区的冻结层上水季节动态及其对活动层土壤冻融过程的响应特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(4): 481-493.]
- [8] Williams J R, Waller R M. Ground water occurrence in permafrost regions of Alaska [C]// *Proceedings of the 1st International Conference on Permafrost*. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1966: 159-164.
- [9] Woo M K. *Permafrost hydrology* [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2012.
- [10] Shepelev V V. Supra-permafrost water in cold regions [M]. Dai Changlei, Li Huiyu, Sun Yingna, et al trans. Beijing: China Water and Power Press, 2014. [舍佩廖夫. 寒区冻结层上水[M]. 戴长雷, 李卉玉, 孙颖娜, 等译. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.]
- [11] Liu Baotian, Li Yixin. The exploitation and change characteristics of groundwater in seasonal frozen ground [J]. *Groundwater*, 1996(1): 35-37. [柳宝田, 李益新. 季节性冻土区地下水的变化规律及开发利用[J]. *地下水*, 1996(1): 35-37.]
- [12] Jorgenson M T, Romanovsky V, Harden J, et al. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(7): 1219-1236.
- [13] Woo M K. *Permafrost hydrology in North America* [J]. *Atmosphere-Ocean*, 1986, 24(3): 201-234.
- [14] Xiao Difang, Liao Houchu, Guo Feng. Discussion on the permafrost hydrology [C]// *The 2nd Seminar on Sustainable Utilization of Water Resources in Cold Regions*. Beijing: China Water and Power Press, 2009: 80-89. [肖迪芳, 廖厚初, 郭峰. 冻土水文学方法问题讨论[C]//第2届“寒区水资源及其可持续利用”学术研讨会. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 80-89.]
- [15] Wu Mousong, Wang Kang, Tan Xiao, et al. Water movement in soil freezing and thawing cycles and flux simulation [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 543-550. [吴谋松, 王康, 谭霄, 等. 土壤冻融过程中水流迁移特性及通量模拟[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 543-550.]
- [16] Allard M, Lemay M, Barrette C, et al. Chapter 6. Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: importance for municipal and transportation infrastructures [R]// *Nunavik and Nunatsiavut: from science to policy*. Québec City, Québec, Canada: ArcticNet Inc., 2012: 171-197.
- [17] Walvoord M A, Kurylyk B L. Hydrologic impacts of thawing permafrost: a review [J/OL]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(6) [2021-12-10]. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010>.
- [18] Cheng Guodong. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet Railway [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42(2): 169-176.
- [19] Yao Tandong, Chen Fahu, Cui Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 924-931. [姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931.]
- [20] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2005, 48(6): 797-804.
- [21] Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3036-3047. [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展[J]. *科学通报*, 2015, 60(32): 3036-3047.]
- [22] Cui Peng, Jia Yang, Su Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(9): 985-992. [崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 985-992.]
- [23] Zhou Youwu, Qiu Guoqing, Guo Dongxin, et al. *Geocryology in China* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 128-136. [周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. *中国冻土* [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 128-136.]
- [24] Cheng Guodong, Jin Huijun. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in Northeast China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 5-23.
- [25] Wang Shaoling, Bian Chunyu, Wang Jian. Hydrogeological characteristics of permafrost area of Qing-Zang Plateau [J]. *Qinghai Geology*, 1994(1): 40-47. [王绍令, 边纯玉, 王健. 青藏高原多年冻土区水文地质特征[J]. *青海地质*, 1994(1): 40-47.]
- [26] 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.]
- [27] Bi Huanjun. An analysis of the characteristics of groundwater in permafrost regions of the Tibetan Plateau and its development and utilization perspective [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(Suppl 1): 17-19. [毕焕军. 青藏高原多年冻土区地下水特征及开发利用前景分析[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(增刊1): 17-19.]
- [28] Ma Wei, Niu Fujun, Mu Yanhu. Basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1185-1191. [马巍, 牛富俊, 穆彦虎. 青藏高原重大冻土工程的基础研究[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1185-1191.]
- [29] Jin Huijun, Yu Qihao, Wang Shaoling, et al. Changes in permafrost environments along the Qinghai-Tibet engineering corridor induced by anthropogenic activities and climate warming [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(3): 317-333.
- [30] Peng Xuanming, Wu Qingbai, Tian Mingzhong. The effect of groundwater table lowering on ecological environment in the headwaters of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 667-671. [彭轩明, 吴青柏, 田明中. 黄河源区地下水位下降对生态环境的影响[J]. *冰川冻*

- 土, 2003, 25(6): 667-671.]
- [31] Jin Huijun, He Ruixia, Cheng Guodong, et al. Changes in frozen ground in the source area of the Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts [J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4) [2019-06-10]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045206>.
- [32] Guo Fengqing, Zeng Hui, Cong Peitong. Sources, classifications, new research development and tendency of the groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(3): 160-165. [郭凤清, 曾辉, 丛沛桐. 青藏高原地下水的来源、分类、研究动向及发展趋势[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(3): 160-165.]
- [33] Deng Mingwan. Distribution of groundwater in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Railway Technical Innovation*, 2003(2): 25-27. [邓明万. 青藏铁路沿线多年冻土区地下水的分布规律[J]. *铁路技术创新*, 2003(2): 25-27.]
- [34] Chen Chongxi, Lin Min. Groundwater dynamics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. [陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.]
- [35] Tan Liwei, Li Fuxue, Li Zhenping, et al. Study on groundwater characteristics and development in permafrost region of Tuo-tuo River[J]. *Yellow River*, 2016, 38(5): 62-67. [谭立渭, 李富学, 李振萍, 等. 沱沱河多年冻土区地下水特征及开发利用研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(5): 62-67.]
- [36] Li Zhenping. Characteristic analysis of groundwater in Qinghai Tangelashan area [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, 2013.]
- [37] Lin Zhanju, Niu Fujun, Xu Zhiying, et al. Thermal regime of a thermokarst lake and its influence on permafrost, Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21: 315-324.
- [38] Yoshikawa K, Hinzman L D. Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near Council, Alaska[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, 14: 151-160.
- [39] Niu Fujun, Lin Zhanju, Liu Hua, et al. Characteristics of thermokarst lakes and their influence on permafrost in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3/4): 222-233.
- [40] 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]. *Science Bulletin*, 2015, 60(5): 556-564.
- [41] You Yanhui, Yu Qihao, Pan Xicai, 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.
- [42] Xu Zongxue, Zhao Fangfang, Li Jingyu. Response of stream-flow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin [J]. *Quaternary International*, 2009, 208(1/2): 62-75.
- [43] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Liu Changming, et al. Changes in stream flow regime in headwater catchments of the Yellow River basin since the 1950s[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(7): 886-893.
- [44] Zhang Senqi, Wang Yonggui, Zhu Hua, et al. Changes in water environment and their ecologicgeologic environmental effects in the headwater area of the Yellow River[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(3): 11-14. [张森琦, 王永贵, 朱桦, 等. 黄河源区水环境变化及其生态环境地质效应[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(3): 11-14.]
- [45] Cao Wenbing, Wan Li, Zhou Xun, et al. A study of the geological environmental of suprapermfrost water in the headwater area of the Yellow River [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2003, 30(6): 6-10. [曹文炳, 万力, 周训, 等. 黄河源区冻结层上水地质环境影响研究[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(6): 6-10.]
- [46] Hong Tao. Space-time variety characteristics and eco-environment effect of permafrost in the source region of the Yellow River [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. [洪涛. 黄河源区多年冻土的时空变化特征及其生态环境效应[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.]
- [47] Cao Bin. Conditions and dynamics of permafrost in the Qilian Mountains over the upper reaches of Heihe River basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [曹斌. 黑河上游祁连山区多年冻土状态与动态研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [48] Zhang Ju, Liu Xingchun, Yin Zheng. Hydrogeological conditions of basin on the west section of Qilianshan[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1997(1): 80-84. [张举, 刘兴春, 尹政. 祁连山西段诸盆地水文地质条件[J]. *甘肃地质*, 1997(1): 80-84.]
- [49] Cao Jiye. Appraisalment on the groundwater resources in permafrost areas in the middle-east section of Mt. Qilian[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(1): 65-76. [曹继业. 祁连山中、东段多年冻结区地下水天然资源评价[J]. *冰川冻土*, 1985, 7(1): 65-76.]
- [50] Ma Rui, Sun Ziyong, Hu Yalu, et al. Hydrological connectivity from glaciers to rivers in the Qinghai-Tibet Plateau: roles of suprapermfrost and subpermafrost groundwater [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(9): 4803-4823.
- [51] 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.
- [52] Yang Yongpeng, Cheng Dongxing, Fu Huixia. Engineering geological characteristics and evaluations of permafrost in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(5): 657-662. [杨永鹏, 程东幸, 伏慧霞. 东北大兴安岭多年冻土区工程地质特征及评价[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(5): 657-662.]
- [53] Chen Qinglai. Engineering geological research of the permafrost in high latitudes area and its impact on pipeline construction [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007. [陈情来. 高纬度地区管道建设中的冻土工程地质问题研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.]
- [54] Zhao Qin, Xu Yunchang, Kou Liwei, et al. Underground water types and the related regulation in perennial frozen soil environment in Holapen Basin [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2001, 28(3): 85-87. [赵钦, 徐运昌, 寇丽伟, 等. 霍拉盆盆地多年冻土环境中地下水类型及赋存规律[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2001, 28(3): 85-87.]
- [55] Yuan Haiyi, Liu Xuekui. Permafrost characteristics and the exploitation and utilization of ground water in Hanjiayuan area, Da Hinggan Ling [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(2): 242-245. [元海义, 刘学奎. 大兴安岭韩家园地区多年冻土特征及其地下水的开采和利用[J]. *冰川冻土*, 1993, 15(2): 242-245.]
- [56] Yin Xilin. Distribution of long-term frozen soil and characteristics of freezing layer water at northeast slope of Mt. Daxinganlin [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1999(3):

- 45-51. [尹喜霖. 大兴安岭东北坡多年冻土分布及冻结层水特征[J]. 勘察科学技术, 1999(3): 45-51.]
- [57] Romanovsky V E, Drozdov D S, Oberman N G, et al. Thermal state of permafrost in Russia[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21(2): 136-155.
- [58] 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.
- [59] Shepelev V V. Movement characteristics of frozen groundwater of permafrost region of Russia[J]. Dai Changlei, Sun Yingna, Miao Xingya, trans. *Heilongjiang Water Resources*, 2016, 2(8): 22-29. [舍佩廖夫. 俄罗斯永冻区冻结层上水动态特征[J]. 戴长雷, 孙颖娜, 苗兴亚, 译. 黑龙江水利, 2016, 2(8): 22-29.]
- [60] Shepelev V V. The influence of human activities of the supra-permafrost water in the cryolithozone[J]. Dai Changlei, Li Huiyu, trans. *Heilongjiang Water Resources*, 2016, 2(11): 33-41. [舍佩廖夫. 人类活动对冻结层上水的影响[J]. 戴长雷, 李卉玉, 译. 黑龙江水利, 2016, 2(11): 33-41.]
- [61] Shepelev V V. Movement characteristics of different types of frozen groundwater[J]. Dai Changlei, Sun Yingna, Liu Yue, trans. *Heilongjiang Water Resources*, 2016, 2(7): 18-24. [舍佩廖夫. 不同类型冻结层上水运动特征[J]. 戴长雷, 孙颖娜, 刘月, 译. 黑龙江水利, 2016, 2(7): 18-24.]
- [62] Chadburn S E, Burke E J, Cox P M, et al. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(5): 340-345.
- [63] 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): 2021-12-10. <https://doi.org/10.1029/2007GL030216>.
- [64] Aziz O I A, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/2/3/4): 282-294.
- [65] 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.
- [66] 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): 2021-12-10. <https://doi.org/10.1029/2011WR011595>.
- [67] 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.
- [68] Woo M K, Carey S K. Permafrost, seasonal frost and slope hydrology, central Wolf Creek basin, Yukon[C]// *Proceedings of Workshop on Wolf Creek Research Basin: hydrology, ecology, environment*. Saskatoon, Saskatchewan, Canada: National Water Research Institute, 1999: 45-53.
- [69] Woo M K, Steer P. Occurrence of surface flow on arctic slopes, southwestern Cornwallis Island[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1982, 19(12): 2368-2377.
- [70] Woo M K, Xia Z J. Suprapermfrost groundwater seepage in gravelly terrain, Resolute, NWT, Canada[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1995, 6(1): 57-72.
- [71] 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.
- [72] 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): 2019-06-10. <https://doi.org/10.1029/2009GL039225>.
- [73] Woo M, Steer P. Slope hydrology as influenced by thawing of the active layer, Resolute, NWT[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1983, 20(6): 978-986.
- [74] Woo M, Young K L, Brown L. High Arctic patchy wetlands: hydrologic variability and their sustainability[J]. *Physical Geography*, 2006, 27(4): 297-307.
- [75] Hodgson R, Young K L. Preferential groundwater flow through a sorted net landscape, Arctic Canada[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(3): 319-328.
- [76] de Grandpré I, Fortier D, Stephani E. Impact of groundwater flow on permafrost degradation: implications for transportation infrastructures[C]// *Proceedings of the Joint 63rd Canadian Geotechnical Conference and 6th Canadian Permafrost Conference*. Calgary, Alberta, Canada: Canadian Geotechnical Society, 2010: 534-540.
- [77] Darrow M M, Daanen R P, Zottola J T, et al. Impact of groundwater flow on permafrost degradation and transportation infrastructure stability[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Transportation, 2013.
- [78] Kutvitskaya N B, Kozlova E B. Design of engineering protection for beds and foundations of oil, gas, and condensate field facilities under difficult permafrost soil conditions[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, 52(5): 267-272.
- [79] Panda S K, Prakash A, Solie D N, et al. Remote sensing and field-based mapping of permafrost distribution along the Alaska Highway corridor, interior Alaska[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21(3): 271-281.
- [80] de Grandpré I, Fortier D, Stephani E. Degradation of permafrost beneath a road embankment enhanced by heat advected in groundwater[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2012, 49(8): 953-962.
- [81] Zottola J, Darrow M, Daanen R, et al. Investigating the effects of groundwater flow on the thermal stability of embankments over permafrost[C]// *Proceedings of the 15th International Specialty Conference on Cold Regions Engineering*. Québec City, Québec, Canada: American Society of Civil Engineers, 2012: 601-611.
- [82] Wen Zhi, Zhang Tingjun, Sheng Yu, et al. Managing ice-rich permafrost exposed during cutting excavation along Qinghai-Tibetan Railway: experiences and implementation[J]. *Engineering Geology*, 2011, 122(3/4): 316-327.
- [83] Mu Yanhu, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Impacts of supra-permafrost water ponding and drainage on a railway embankment in continuous permafrost zone, the interior of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 154: 23-31.
- [84] Makarov V N. Groundwater modification and its effect on the infrastructure of Yakutsk[J]. *Materials and Geoenvironment*, 2003, 50: 201-204.
- [85] Ghias M S, Therrien R, Molson J, et al. Controls on permafrost thaw in a coupled groundwater-flow and heat-transport system: Iqaluit Airport, Nunavut, Canada[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(3): 657-673.
- [86] Oldenborger G A, LeBlanc A M, Sladen W E. Geophysical

- monitoring of permafrost conditions at Iqaluit International Airport, Baffin Island, Nunavut [C]// Summary of Activities 2013. Iqaluit, NU, Canada: Canada-Nunavut Geoscience Office, 2014: 129-138.
- [87] 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.
- [88] Chang Juan, Wang Genxu, Mao Tianxu. Simulation and prediction of suprapermafrost groundwater level variation in response to climate change using a neural network model[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1211-1220.
- [89] 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.]
- [90] Tang Qihong, Oki T, Kanae S. A distributed biosphere hydrological model (DBHM) for large river basin[J]. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 2006, 50: 37-42.
- [91] Wang Lei, Koike T, Yang Kun, et al. Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflow and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1/2): 21-34.
- [92] Chen Rensheng, Kang Ersi, Ding Yongjian. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 307-317. [陈仁升, 康尔泗, 丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 307-317.]
- [93] Hayashi M, Goeller N, Quinton W L, et al. A simple heat-conduction method for simulating the frost-table depth in hydrological models[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2007, 21(19): 2610-2622.
- [94] Hinzman L D, Goering D J, Kane D L. A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D22): 28975-28991.
- [95] Frampton A, Painter S, Lyon S W, et al. Non-isothermal, three-phase simulations of near-surface flows in a model permafrost system under seasonal variability and climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(3/4): 352-359.
- [96] 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/OL]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113 [2019-06-10]. https://www.onacademic.com/detail/journal_1000035773236710_e27c.html.
- [97] Nicolsky D J, Romanovsky V E, Alexeev V A, et al. Improved modeling of permafrost dynamics in a GCM land-surface scheme[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8) [2019-06-10]. https://www.researchgate.net/publication/230651796_Improved_modeling_of_permafrost_dynamics_in_a_GCM_land-surface_scheme.
- [98] Swenson S C, Lawrence D M, Lee H. Improved simulation of the terrestrial hydrological cycle in permafrost regions by the Community Land Model[J/OL]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(3) [2021-12-10]. <https://doi.org/10.1029/2012MS000165>.
- [99] Niu Guoyue, Yang Zongliang, Dickinson R E, et al. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with gravity recovery and climate experiment data[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112 [2019-06-10]. https://www.onacademic.com/detail/journal_1000035771960810_b482.html.
- [100] Pomeroy J W, Gray D M, 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.
- [101] Marsh P, Hey M. The flooding hydrology of Mackenzie Delta lakes near Inuvik, NWT, Canada[J]. *Arctic*, 1989, 42: 41-49.
- [102] Marsh P. Permafrost and lakes in the Mackenzie Delta[C]// *Proceedings of the 5th Canadian Permafrost Conference*. Québec City, Québec, Canada: University Laval Press, 1990, 54: 131-136.
- [103] Brutsaert W. *Hydrology: an introduction* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [104] Lyon S W, Destouni G, Giesler R, et al. Estimation of permafrost thawing rates in a sub-arctic catchment using recession flow analysis[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(5): 595-604.
- [105] Yang Yang. Study on influence of groundwater seepage on freezing temperature field of contact channel[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2017. [杨杨. 地下水渗流对联络通道冻结温度场的影响研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2017.]
- [106] Boike J, Roth K, Overduin P P. Thermal and hydrologic dynamics of the active layer at a continuous permafrost site (Taymyr Peninsula, Siberia)[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(3): 355-363.
- [107] Guo Lina, Li Tongchun, Liu Xiaoqing, et al. FEM analysis research on unsteady temperature-seepage coupling system of frozen soil phase changing[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 98-104. [郭利娜, 李同春, 刘晓青, 等. 考虑冻土相变的非稳定温度场-渗流场耦合有限元分析研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(6): 98-104.]
- [108] Liu Bangjia. Study on the constitutive change laws of the aeolian soil roadbed under the coupling function of freezing, thawing and the transfusion[D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2009. [刘滨霞. 冻融和渗流耦合作用下风积土路基结构性演变规律的研究[D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.]
- [109] 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/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14) [2019-06-10]. <https://doi.org/10.1029/2011GL047911>.
- [110] Veuille S, Fortier D, Verpaest M, et al. Heat advection in the active layer of permafrost: physical modelling to quantify the impact of subsurface flow on soil thawing[C]// *Proceedings of the 7th Canadian Conference on Permafrost and the 68th Canadian Geotechnical Conference*. Québec City, Québec, Canada: Canadian Geotechnical Society, 2015: 20-23.

Distribution and engineering effect of supra-permafrost groundwater: review and prospect

CHAI Mingtang^{1,2}, MA Wei², MU Yanhu²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Permafrost regions account for one fourth of the lands in the Earth. As a hydrogeological phenomenon in permafrost regions, the distribution of supra-permafrost groundwater is dominated by local factors, which has changed with the seasonal freezing and thawing of the active layer. The supra-permafrost groundwater has affected the cycle of groundwater, ground surface water and hydrothermal balance of the permafrost environment. The supra-permafrost groundwater is limited by the permafrost in a narrow space and aggravates the permafrost degradation by the lateral seepage and heat transfer. Furthermore, the foundation is threatened by the supra-permafrost groundwater by heat convection. The existed research focuses on the distribution, seasonal change, flow, seepage and hydro-thermal coupling. In this paper, the research advances on supra-permafrost groundwater are summarized based on the characteristics of regional distribution. The influence on engineering stability, hydrologic model, water balance calculation and heat transfer effect of supra-permafrost groundwater are reviewed. The supra-permafrost groundwater has interacted and limited with the permafrost, which will cause the profound effects on the ecological environment in permafrost regions. The research prospect in future is proposed. This paper will be helpful to comprehensively understand the role of supra-permafrost groundwater in the hydrologic process and useful to learn the status of supra-permafrost groundwater.

Key words: supra-permafrost groundwater; hydro-thermal coupling; hydrogeology; water balance; active layer

(责任编辑: 金会军; 编辑: 武俊杰)