

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190399

冻土退化影响下坡面水文过程研究进展及趋势展望

曹 伟, 盛 煜, 吴吉春, 彭尔兴

(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: 全球气候变化背景下, 冻土将会发生显著变化, 进而影响寒区生态和水文系统的物理、化学和生物过程, 并诱发区域水资源恶化与生态功能退化, 其中坡面冻土水文过程是物质和能量在寒区地表各圈层迁移转化的重要载体与基本单元。为此, 基于“驱动-过程-机制”这一研究视角, 从冻土退化及其水文过程响应、冻土水文过程及其局地因素影响、冻土水文过程机制及其影响模拟等三个方面, 综述了国内外有关冻土退化影响下坡面水文过程研究方面的最新进展; 同时, 在总结了当前冻土水文过程研究不足的基础上, 提出了如下建议: (1) 更加注重坡面冻土水文过程要素观测与方法集成研究; (2) 更加注重坡面冻土水文过程变化机理与耦合机制研究; (3) 更加注重坡面冻土水文过程时空演化与效应评估研究。以期提升寒区流域径流形成演化的认知能力与径流变化的预测能力, 并为寒区流域水资源稳定和适应性利用提供理论基础与科学对策。

关键词: 冻土退化; 坡面水文过程; 研究进展; 趋势展望

中图分类号: P642.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2020)02-0001-06

冻土是冰冻圈自然生态系统重要的组成部分, 作为对温度和水分变化及其敏感的特殊地质体, 其不仅是连接冰冻圈与大气圈、生物圈、水圈、岩石圈的重要纽带, 而且也是地气交换、地表过程、水文循环的关键因素^[1-3]。在全球气候变化背景下, 冻土的变化将会显著影响寒区下垫面的变化, 冻土变化及其冻融过程进而影响着寒区生态和水文系统的物理、化学和生物过程^[4-6]。其中冻土水文过程是物质和能量在寒区地表各圈层之间迁移转化的重要载体与主要形式, 是水资源恶化与生态功能退化的主要驱动力之一^[7-9]。

冻土是巨大的固态水库, 其一旦退化, 将会导致季节融化深度增大、地下冰融化、地下水位下降, 特别是冻土水文地质条件的改变将会引起区域河流径流量的变化, 进而引发一系列冻土水文与环境问题^[5,9]。因此为应对气候变化造成的冻土退化及其水文影响, 急需在地球圈层或流域尺度上深刻认识和准确评估冻土变化的水文效应^[10-12]。山坡是流域水文响应的基本单元, 也是地表过程变化的重要场所, 因而弄清坡面冻土水文关键过程是流域水文模拟评估的重要前提。但是受制

于寒区数据监测困难, 冻土变化复杂, 水文过程独特等因素影响, 加之地形地貌、植被覆盖、土壤质地、水分条件等局地因素的复合叠加效应, 严重限制了对现有坡面冻土水文过程的认识^[13-15]。因而急需在局地尺度上全面认清冻土变化对水文过程的作用关系, 这对于深入理解寒区流域径流形成过程与演变规律, 准确预测冻土变化的生态与水文效应显得至关重要, 并尤为迫切。

1 冻土退化及其水文过程响应

由于冻土退化对气候变化具有强烈敏感性和重要反馈性, 是气候系统的重要组成部分, 因而弄清气候变化下的冻土退化过程与方式, 是深刻理解气候变化背景下冻土水文过程的理论基础和先决条件。自 20 世纪 70 至 80 年代以来, 国际上对全球变化背景下的多年冻土温度和活动层厚度进行了长期连续监测, 发现全球大部分多年冻土处于退化状态^[6]。近几十年来的研究发现美国阿拉斯加中部地区多年冻土退化、温度升高^[16-17]; 1999-2009 年期间, 挪威南部高山多年冻土的年平均地温也在逐年增加^[18]; 俄罗斯大部分多年

收稿日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971093, 91647103)

作者简介: 曹伟(1983-), 男, 安徽金寨人, 助理研究员, 高级工程师, 主要从事寒区环境与冻土水文研究。E-mail: caowei@lzb.ac.cn

通讯作者: 盛煜(1964-), 男, 甘肃酒泉人, 研究员, 主要从事冻土环境与工程研究。E-mail: sheng@lzb.ac.cn

冻土在过去二三十年间年零较差深度由 0.5m 增加到了 2.0m^[19]。受全球气温升高影响,过去几十年在青藏高原、天山等地的地温监测资料也显示了多年冻土处于退化状态^[6,20-21]。不同学者在总结诸多冻土退化特征的基础上,也对冻土退化的方式与过程进行了深入研究与探讨,结合青藏公路沿线多年冻土地温曲线特征,将其退化模式划分为下引式、上引式和侧引式,在下引式冻土退化过程中进一步划分出初始退化、强烈退化、融化夹层、季节冻土等 4 个阶段,分析多年冻土完全变为季节冻土的退化过程^[22]。从多年冻土历史演化的角度,基于数值模拟结果,将青藏高原多年冻土退化过程按地温的深度剖面曲线形态划分为初始阶段、升温阶段、0 梯度阶段、不衔接阶段和消失阶段^[23]。

气候变暖引发的冻土退化改变了地表水和地下水运移规律,深刻影响着区域水循环与水平衡,在深刻认识冻土退化过程与方式的基础上,为深入了解气候变化背景下的冻土变化及其水文效应,探讨冻土退化诱发水资源变化的作用机制,国内外已经开展了长时间连续观测研究冻土水文过程^[24-25],在全球、区域和流域等不同尺度国际科学研究计划中(如 CLIC、PUB 等)对其进行了监测和模拟,凸显了其科学价值与重要性。越来越多的证据显示冻土退化会对地表水-地下水运移过程产生直接影响^[26-28]。通过 30 年以上时间观测资料发现了加拿大西北部 23 条河流冬季基流占年平均径流量的 1.2%~86.6%,而这部分冬季基流则增加了 0.5%~271.6%,这主要是由于气候变化引起的冻土退化加快了地下水分下渗和水文循环过程所致^[29]。结合河西走廊疏勒河、黑河、石羊河和黄河上游 50 多年来冬季径流以及气温变化观测资料的对比分析发现:冻土退化将会减弱其隔水作用,使得流域地表水入渗变为地下水,增大地下水水库的储水能力,增加地下水水库库容,从而导致冬季径流增加,河流冬季退水过程有明显的减缓^[29]。

2 冻土水文过程及其局地因素影响

由于冻土水文过程的复杂性、独特性和多变性(见图 1),相比非冻土区而言,使得这一过程研究变得更加困难,通过不同尺度上的水文观测方法来探讨冻土退化对水文过程的影响是最为直接和最为常用的方法之一。基于 GRACE 卫星遥感资料,欧亚大陆 Lena 河流域不连续多年冻土区的地下水储量在 2002~2010 年期间增加了 $68 \pm 19 \text{ km}^3$,这主要是由于活动层加深、地下水位上升以及不连续冻土区地表水通过贯穿融区下

渗所致^[30]。在青藏高原多年冻土风火山小流域,表层土壤融化引起的超渗产流和地下潜流分别占春季径流总量的 66%~86%和 14%~34%,活动层的双向冻结控制和改变着秋季径流过程和径流组成^[31]。

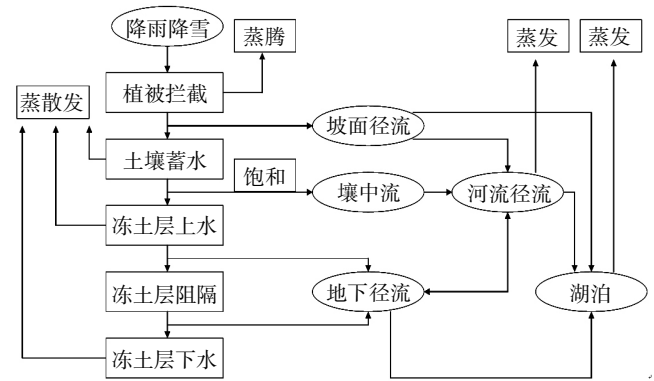


图 1 多年冻土区水流过程示意图
Fig.1 The flow process in the permafrost areas

此外,由于在冻土区进行野外监测困难,造成该地区水文资料较为匮乏,从而难以对冻土水文过程进行直接刻画,相对而言,同位素示踪的方法研究冻土区地表-地下水流路径更具优势^[32-34]。利用同位素分析加拿大西北部 5 个流域的径流组成发现融雪径流、浅层地表径流以及低洼和沼泽地区的地表径流分别在春季洪水和夏秋季径流期占有较大比重,地下水则是全年径流的主要来源^[35]。通过稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的分析青藏高原地区冻土水文过程表明活动层冻融过程显著改变了河流稳定同位素组成,大气降水、河流流水、热融湖水和冻土退化状态下的地下冰有着密切的水文联系^[36]。

受到地形地貌、植被覆盖、土壤质地等局地因素的影响,在冻土区形成了不同的地貌景观,从而造成了冻土水文过程的多样性与差异性,进而显著影响着寒区冻土地表径流过程和地下水水力联系(见图 2)。冻土退化将减弱其作为天然冷生隔水层的作用,在北极多年冻土区主要河流已经发现夏季多年冻土融化将会增加地下水储水能力,减弱浅层地下水向河流径流的补给能力,冬季基流则将会有所增加^[25,37-38]。在不连续冻土区,由于冻土较薄,地表水与地下水的水力联系紧密,冻土退化对地下冰融化形成的基流影响较大,加剧了地下水的季节变化,但使地表径流季节分布趋于平缓^[39]。冻土区土地覆被变化的改变将会对水文过程产生显著影响,其植被覆盖类型及其面积比例的变化将从根本上改变了流域水文循环和储水能力,增加了河流连通性,从而导致加拿大西北部 Liard 河

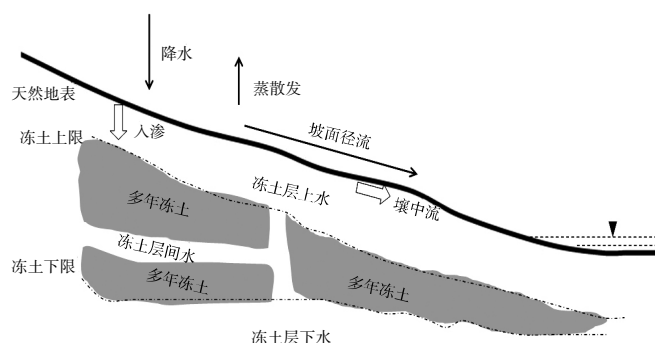


图2 坡面冻土水文过程示意图

Fig.2 The hydrological process of frozen soil at the slope

流域年径流量在 1996~2012 年逐渐增加^[40]。山坡、缓坡、平地等 3 种不同类型地形冻土水文过程存在着显著区别与差异:①山坡地形多年冻土作为隔水层,将阻碍水流的下渗,增加地表径流,从而导致夏季降雨成为多年冻土区径流最大的补给来源;②缓坡地形多年冻土退化后易形成“蓄满-溢出”模式,并为地下水流动提供运移通道,进而联系各个流域;③平坦地形冻土水分垂向交换多于水平交换,其中降水、蒸发、入渗和渗漏是其主要的水文过程^[8]。

3 冻土水文过程机制及其影响模拟

为深入揭示冻土退化对水文过程的作用机制,准确评估冻土退化对水资源变化的影响,以物理过程机制为基础的冻土水文模型作为一种重要手段与研究工具日益兴起,以期进一步提升流域水资源形成及其转化机制的认知水平^[41]。基于物理过程的冻土水热耦合理论逐步发展,以此为基础逐步发展起来了诸多陆面过程模型并得到了广泛应用,主要包括了 SHAW、CoupModel、VIC 等一维陆面过程模型,它们在不同程度上实现了对冻土水热过程的模拟^[11,32,42-43]。第三代陆面过程模型 SiB2,它是一个简单但真实的包含了生物过程的一维模型,能够计算大气近地层到地表植被之间的能量、动量、水量交互过程,其在地表能量和水分平衡模拟方面独具优势,经过改进,在土壤水分的基础上增加了土壤冻融的模拟。

流域冻土水文模型在传统水文模型中引入冻土变化,并逐步拓展到通过陆面过程模式与传统水文模型的耦合,改进模型的物理机制,进而实现冻土水文过程的模拟^[11,43-45]。考虑了冻土水热耦合问题的内陆高寒山区流域分布式水热耦合模型(DWHC)吸纳了 SHAW 和 COUP 等模型思想,将土壤冻结状态分为完全冻结、

未冻结和部分冻结 3 种,并在黑河山区流域得以初步应用^[46]。分布式生态水文模型 GBEHM 应用 SiB2 的一种简单生物圈模式代替 Penman-Monteith 公式的蒸散量估算,并加入了基于能量平衡为基础的模块进行冻土水文过程模拟^[47]。基于能量和水量平衡的分布式水文模型 WEB-DHM 借鉴了 SiB2 的能量平衡和生物物理机制,耦合冻土参数化方案,将其嵌入到基于地形描述坡面产汇流的分布式水文模型 GBHM 中,从而在模型中加入了冻土模拟^[48]。基于物理过程的寒区流域分布式水文模型 SHAWDHM 则将冻土水热 SHAW 模型与 GBHM 模型进行了完全耦合,并应用于黑河流域的冻土水文模拟^[49]。

此外,在冻土地下水模型方面,目前也主要基于 MODFLOW、FEFLOW 等较为成熟的地下水模拟模型,考虑冻土的变化,开展冻土退化对地下水影响的数值模拟研究。FlexPDE 模型认为地下水流是一个受地形控制的松散沉积含水层系统,并考虑了冻土冰水相变因素,模拟高纬度地区多年冻土退化的水文地质过程及其对地下水流的影响,结果表明由冻土退化引起的含水层渗透能力的改变以及含水层储水量的变化是控制基流增加的主要原因^[50]。美国地质调查局(USGS)则在阿拉斯加 Yukon 河流域基于 MODFLOW-2000 模型开展了气候变暖条件下多年冻土融化对地下水影响的数值模拟工作,研究充分考虑了冻土从连续性状况过渡到不连续性状况,结果显示地下水的排泄方式强烈受多年冻土分布控制,随着多年冻土覆盖度降低,地下水总流量相应增加,基流占地下水总流量的比率先增加,在冻土从连续冻土转变为不连续冻土后(冻土覆盖度约占 90%)逐渐降低,由地下冰融化形成基流对侧向流的贡献也显著下降^[38]。

4 研究不足与趋势展望

纵观目前国内外已有研究,有关冻土水文过程研究取得了一定进展。但是目前仍然存在以下几个主要问题:

(1)冻土水文过程数据获取尚有困难。对寒区气象、冻土、水文要素的精确观测是研究冻土水文过程及其冻土水文模型的基础。然而,冻土通常分布于高海拔高纬度等高寒地区,野外监测匮乏,获取数据不足,导致现有观测数据尚不能满足目前研究的需要,特别是研究冻土水文过程机制需要大量的冻土水文观测数据与试验数据为基础。

(2)冻土水文过程关键因素考虑不足。多年冻土的

形成演化不仅受气候水文因素影响,还受地质地貌、土壤植被等因素影响,其变化过程与方式相对复杂。由于冻土的复杂性,造成了冻土水文过程只能对冻土因素作简化处理,从而弱化了冻土在寒区水文过程中的关键作用,未能将冻土及其相关因素全面考虑到冻土水文过程中,造成对现有冻土水文过程的认识尚有很多不足。

(3)冻土水文物理过程机制并未弄清。由于冻土变化过程与土壤冻融过程、活动层水热过程、产汇流过程高度叠加耦合,使得冻土水文过程复杂而独特。特别是受冻土变化类型及方式认识不清或考虑不足的影响,缺乏不同冻土类型和方式下水文过程的对比,多数研究仍集中在冻土区与非冻土区水文过程的对比上,对冻土水文物理过程机制的认识尚有很多局限性。

(4)冻土水文过程尺度效应有待加强。受野外监测困难,研究资料匮乏、变化过程复杂等因素影响,现有冻土水文过程研究较少考虑其尺度效应。但是精确评估冻土变化的水文效应及其水文影响,必须基于准确的冻土要素参数、水文参数、尺度参数。特别是现有冻土水文过程模拟仅仅叠加了冻土参数化方案,并未对方案进行精细化描述,从而限制了冻土水文过程的准确模拟与精确预测。

坡面尺度不仅是认识地表过程变化的重要基础,也是构建分布式水文模型的基本单元,同时也分析流域径流过程的研究核心。冻土水文过程只有放在坡面尺度上才能全面认识其影响因素与变化规律,才能深入研究冻土水文物理过程,才能明晰冻土水文过程的尺度效应,因而开展坡面冻土水文过程研究将是全面深刻理解流域冻土水文过程的关键所在。下一步应做好以下几个方面的研究:

(1)更加注重坡面冻土水文过程要素观测与方法集成研究。应立足于不同山地景观类型,加强降雨降雪、大气温度、空气湿度、风速风向、蒸发辐射等气象要素的观测,完善冻土地温、冻土厚度、冻土上限、冻融过程、地下含冰量、岩性土质等冻土要素的观测,补充大气降水、地表产流、分层土壤水、冻结层上水、分层地下冰、冻结层下水、流域出口径流等水文要素的观测。在此基础上,综合集成野外定位监测、地球物理勘探、水文地质试验、同位素示踪、室内模型试验和数值模型模拟等相关研究方法,才能进一步认知坡面冻土水文物理过程。

(2)更加注重坡面冻土水文过程变化机理与耦合机制研究。应进一步弄清土壤冻融对包气带水分运移和冻结层上水的影响,阐明冻土地下冰冰水相变转化

关系与融化产汇流过程。基于大气降水、地表水、土壤水、地下水等四水在坡面空间上的转化关系,探讨冻土与地表水、地下水的相互作用联系,融合土壤冻融、活动层水热、冻土层变化、坡面水文循环等物理变化过程,构建坡面冻土水文物理过程耦合模型,才能深入揭示坡面冻土水文物理过程的作用机制。

(3)更加注重坡面冻土水文过程时空演化与效应评估研究。应进一步考虑气候变化驱动下的典型冻土退化过程,进一步考虑局地因素影响下的不同冻土景观类型,深入研究坡面冻土水文过程的时间变化规律与空间分异特征。强化坡面尺度在寒区径流过程中的基础作用和根本功能,显化冻土要素在坡面冻土水文过程上的精细化描述和精准化表达,分析坡面冻土水文过程的尺度效应及其适用性,进而从区域或流域尺度上精确评估多年冻土退化的生态水文效应,从而显著提升寒区流域径流形成过程及演化规律的认知能力与径流变化的预测能力。

参考文献:

- [1] Bibi S, Wang L, Li X P, et al. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau: a review [J]. *International Journal of Climatology*, 2018,(3).
- [2] Hu H C, Wang G X, Wang Y B, et al. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009,54(7):1225-1233.
- [3] Zhang Y S, Ma Y Z, Zhang Y L, et al. Hillslope patterns in thaw-freeze cycle and hydrothermal regimes on Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015,60(7):664-673.
- [4] Chang J, Wang G X, Li C J, 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]. *Science China (Earth Sciences)*, 2015,45(4):481-493.
- [5] Jorgenson M T, Romanovsky V, Harden J, et al. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change [J]. *Canadian Journal of Forest Research-Revue*, 2010,40(7):1219-1236.
- [6] 张廷军. 全球多年冻土与气候变化研究进展 [J]. *第四纪研究*, 2012,32(1):27-38. (ZHANG Tingjun. Progress of global permafrost and climate change studies [J]. *Quaternary Sciences*, 2012,32(1): 27-38. (in Chinese))
- [7] Oliva M, Pereira P, Antoniadou D. The environmental consequences of permafrost degradation in a changing climate [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,616:435-437.
- [8] Woo M K, Kane D L, Carey S K, et al. Progress in permafrost hydrology in the New Millennium [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2008,9(2):237-254.
- [9] Walvoord M A, Kurylyk B L. Hydrologic impacts of thawing permafrost—a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016,15(6).

- [10] 李新,程国栋,康尔泗,等. 数字黑河的思考与实践 3:模型集成[J]. 地球科学进展, 2010,25 (8):851-865. (LI Xin, CHENG Guodong, KANG Ersi, et al. Digital Heihe River basin 3: model integration [J]. *Advances in Earth Science*, 2010,25(8):851-865. (in Chinese))
- [11] 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. (WANG Lei, LI Xiuping, ZHOU Jing, et al. Hydrological modelling over the Tibetan Plateau: current status and perspective [J]. *Advances in Earth Science*, 2014,29(6):674-682. (in Chinese))
- [12] 杨大文,徐宗学,李哲,等. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018,37(1):36-45. (YANG Dawen, XU Zongxue, LI Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences [J]. *Advances in Earth Science*, 2018,37(1):36-45. (in Chinese))
- [13] 程根伟,范继辉,彭立. 高原山地土壤冻融对径流形成的影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017,32(10):1020-1029. (CHENG Genwei, FAN Jihui, PENG Li. Progresses in soil freezing-thawing effects on the runoff generation in plateau-mountain regions [J]. *Advances in Earth Science*, 2017,32(10):1020-1029. (in Chinese))
- [14] 付晓雷,余钟波,丁永建,等. 不同滤波算法在土壤湿度同化中的应用[J]. 冰川冻土, 2018,40(3):580-587. (FU Xiaolei, YU Zhongbo, DING Yongjian, et al. Application of different filters in soil moisture assimilation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018,40(3):580-587. (in Chinese))
- [15] 郝振纯,张越关,杨传国,等. 黄河源区水文模拟中地形和融雪影响[J]. 水科学进展, 2013,24(3):311-318. (HAO Zhenchun, ZHANG Yueguan, YANG Chuanguo, et al. Effects of topography and snowmelt on hydrologic simulation in the Yellow River's source region [J]. *Advances in Water Science*, 2013,24(3):311-318. (in Chinese))
- [16] Jorgenson M T, Racine C H, Walters J C, et al. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska [J]. *Climatic Change*, 2001,48(4):551-579.
- [17] Osterkamp T E, Romanovsky V E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999,10(1):17-37.
- [18] Isaksen K, Odegard R S, Etzelmuller B, et al. Degrading mountain permafrost in Southern Norway:spatial and temporal variability of mean ground temperatures, 1999-2009 [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011,22(4):361-377.
- [19] 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.
- [20] Wang S L, Jin H J, Li S X, et al. Permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau and its environmental impacts [J]. *Permafrost and Periglacial Process*. 2000,11(1):43-53.
- [21] Wu Q B, Zhang T J. Recent permafrost warming on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008,113.
- [22] Jin H J, Zhao L, Wang S L, et al. Thermal regimes and degradation modes of permafrost along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2006,49(11):1170-1183.
- [23] Wu J C, Sheng Y, Wu Q B, et al. Processes and modes of permafrost degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010,53(1):150-158.
- [24] Gao T G, Zhang T J, Cao L, et al. Reduced winter runoff in a mountainous permafrost region in the northern Tibetan Plateau[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2016,126:36-43.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Frampton A, Painter S L, Destouni G. Permafrost degradation and subsurface-flow changes caused by surface warming trends [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013,21(1):271-280.
- [28] Pan X C, Helgason W, Ireson A, et al. Field-scale water balance closure in seasonally frozen conditions [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017,21(11):5401-5413.
- [29] Niu L, Ye B S, Li J, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in Western China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011,54(4):615-624.
- [30] Velicogna I, Tong J, Zhang T, et al. Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012,39.
- [31] 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.
- [32] 常启昕,孙自永,马瑞,等. 冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(5):87-94. (CHANG Qixin, SUN Ziyong, MA Rui, et al. A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016,36(5):87-94. (in Chinese))
- [33] Ma R, Sun Z Y, Hu Y L, et al. Hydrological connectivity from glaciers to rivers in the Qinghai-Tibet Plateau: roles of suprapermafrost and subpermafrost groundwater [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017,21(9):4803-4823.
- [34] Sugimoto A, Naito D, Yanagisawa N, et al. Characteristics of soil moisture in permafrost observed in East Siberian taiga with stable isotopes of water[J]. *Hydrological Processes*, 2003,17(6):1073-1092.
- [35] St Amour N A, Gibson J J, Edwards T W D, et al. Isotopic time-series partitioning of streamflow components in lake-and wetland-dominated river basins, Liard Basin, Northwest Territories, Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2005,19(17):3357-3381.
- [36] Song C L, Wang G X, Liu G S, et al. Stable isotope variations

- of precipitation and streamflow reveal the young water fraction of a permafrost watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2017,31:935-947.
- [37] 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):297-304.
- [38] 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.
- [39] Yang D Q, Ye B S, Kane D L. Stream flow changes over Siberian Yenisei River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2004,296 (1-4):59-80.
- [40] Cannon 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.
- [41] 徐宗学. 水文模型:回顾与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010,46(3):278-289. (XU Zongxue. Hydrological models: past, present and future [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2010,46(3):278-289. (in Chinese))
- [42] 段志华,张钰,张伟,等. 评估 4 种寒区陆面、水文过程模式及在青藏高原的应用前景[J]. 水资源与水工程学报, 2012,23(6):43-50. (DUAN Zhihua, ZHANG Yu, ZHANG Wei, et al. Application research of four cold regions land surface and hydrological model to Qinghai-Tibet plateau frozen soil region [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012,23(6):43-50. (in Chinese))
- [43] 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 Yong, CHEN Rensheng. Research review on hydrology in the permafrost and seasonal frozen regions [J]. *Advances in Earth Science*, 2011,26(7):711-723. (in Chinese))
- [44] 孙颖娜,付强,姜宁,等. 寒区冻土水文模拟模型研究若干进展[J]. 水文, 2008,28(4):1-4. (SUN Yingna, FU Qiang, JIANG Ning, et al. Research on hydrological frozen soil simulation model for cold area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2008,28(4):1-4. (in Chinese))
- [45] 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 Xiaowei, FU Qiang, DING Hui, 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))
- [46] 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 Rensheng, LV Shihua, KANG Ersi, 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))
- [47] Yang D W, Gao B, Jiao Y, et al. A distributed scheme developed for eco-hydrological modeling in the upper Heihe River [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015,58(1):36-45.
- [48] Wang L, Zhou J, Qi J, et al. Development of a land surface model with coupled snow and frozen soil physics [J]. *Water Resources Research*, 2017,53(6):5085-5103.
- [49] Zhang Y L, Cheng G D, Li X, et al. Influences of frozen ground and climate change on hydrological processes in an alpine watershed: a case study in the upstream area of the Hei'he River, Northwest China [J]. *Permafrost & Periglacial Processes*, 2016,28 (2):420-432.
- [50] Bense V F, Kooi H, Ferguson G, et al. Permafrost degradation as a control on hydrogeological regime shifts in a warming climate [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2012,117.

Review and Outlook on Hill-Slope Hydrological Process Affected by Permafrost Degradation

CAO Wei, SHENG Yu, WU Jichun, PENG Erxing

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Under the influence of global climate change, the significant permafrost degradation affects the physical, chemical and biological process of the ecological and hydrological system in cold regions. It would induce the water-resources deterioration and ecological-function degradation. Hill-slope hydrological process of permafrost is the important carrier and elementary unit of matter migration and energy transformation among each surface layer of cold regions. Therefore, based on the perspective of 'driving-process-mechanism', this paper summarized the latest progress in the study on hill-slope hydrological process affected by permafrost degradation at home and abroad in three aspects and its hydrological-process response; the hydrological process of permafrost and its local factors; the hydrological-process mechanism of permafrost and its impact simulation. At the same time, on the basis of summarizing the lack of current research on the hydrological process of permafrost, the suggestions are given priority to (1) the elements' observation and method integration of hill-slope hydrological process of permafrost; (2) the change mechanism and coupling mechanism of hill-slope hydrological process of permafrost; (3) the spatiotemporal evolution and effect evaluation of hill-slope hydrological process of permafrost. It will improve the cognitive ability of runoff formation and evolution and the prediction ability of runoff change. And it also provides theoretical basis and scientific countermeasures for the stable and adaptive utilization of basin water resource in cold regions.

Key words: permafrost degradation; hill-slope hydrological process; research progress; development trend