

冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究进展

常启昕¹,孙自永^{1,2},马 瑞^{1,2},王 旭³,龙 翔¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地,湖北 武汉 430074;
3. 中国地质大学(武汉)公共管理学院,湖北 武汉 430074)

摘要:针对地下水流过程及其与地表水转化关系研究中,冻土分布特征及融冻过程对地下水系统的影响机制相关研究较少的问题,通过分析国内外冻土区地下水对河道径流的贡献、地下水流动路径和地下水-热耦合模型的相关文献,对地下水流过程及其与地表水转化研究进行综述,认为:①受土壤中冻土空间异质性的影响,不同冻土区地下水对径流的贡献比例不一致;②利用水化学和同位素示踪剂研究地下水流动路径,有助于冻土区地下水流动系统概念模型的构建,但只能获得定性或半定量的结果;③地下多相流系统的水-热耦合模型可将冻土的变化与其相应的水文响应过程耦合在一起,实现了地下水流过程及其与地表水转化关系的定量刻画,但在实用性方面仍需进一步完善,是未来的主要研究方向。

关键词:冻土;地下水流;地表水-地下水相互作用;环境示踪剂;水-热耦合模型

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0087-08

A review of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region//CHANG Qixin¹, SUN Ziyong^{1,2}, MA Rui^{1,2}, WANG Xu³, LONG Xiang¹(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on a few studies concerning permafrost distribution and mechanisms of the freezing-thawing cycle of active layers influencing groundwater system in terms of groundwater flow and its interaction with surface water in permafrost region, this paper reviews the knowledge of groundwater flow and its interaction with surface water by analyzing studies of the contribution of groundwater flow to channel runoff, groundwater flow paths, and coupled flow and heat transport models. The results indicate that the contribution of groundwater flow to channel runoff varies greatly in different permafrost regions due to the spatial heterogeneity of permafrost. Although identification of groundwater flow paths based on chemical and isotopic tracers will help establish conceptual model of groundwater flow system in permafrost region, however, the analysis results are qualitative or semi-quantitative. Moreover, coupled flow and heat transport models of multi-phase groundwater, which link the vibration of permafrost and the hydrological response process, have already made it possible to quantify groundwater flow processes and groundwater's interaction with surface water. Future research should devote more attention to improving the practicability of the models in actual catchments.

Key words: permafrost; groundwater flow; groundwater-surface water interaction; environmental tracer; coupled flow and heat transport model

冰冻圈是世界上许多大型河流的水源区,冻土作为其重要组成部分,在北半球占到裸露地表的50%^[1],其中多年冻土面积约占陆地总面积的20%~25%,主要分布于极地和极地附近的区域、纬度较低的高山带以及高纬度地区的岛屿、山区^[2]。多年冻土不仅对冰冻圈水文过程有着重要的影响^[1,3],而且对气候变化的响应极为敏感^[4-5]。因此,对于源于冰冻圈的众多河流,冻土区水文过程研究是了解其径流形成机制与转化过程的关键,也是预测气候变化和人类活动影响下流域水文过程响应的基础。地下水流动过程作为冻土区水文循环的关键环节,不仅对流域水资源和径流形成具有控制作用,而且通

过与地表水的相互作用,影响着冻土区地表水文过程,因此是冻土区水文学研究的核心内容之一。

与其他地区相比,冻土区的地下水过程极为复杂和独特。一方面,冻土层具有相对隔水层的特点,它的存在影响着地下水含水系统的结构,进而控制着地下水流动系统^[6]。在非连续冻土区,“透镜状”冻土层和“天窗状”非冻土层的组合使得上述效应尤其显著,导致地下水在不同含水层间及地下与地表间发生频繁转化,使得地下水的补给、径流和排泄过程极为复杂^[1,7]。另一方面,冻土又不如构成含水系统及其边界的地下岩层那样稳定,季节变换和气候变化都会造成冻土层中水-热储存和运移规律的改变,使其发生周期性融冻甚至趋势性演化^[8-10]。冻土的这种动态过程不仅会引起部分地下水在固、液相间转化,影响参与到区域水循环中的水量,而且会导致冻土层厚度及其空间分布格局的变化^[11-16],造成含水系统的结构改变,进而影响地下水流动系统的结构,使得冻土区地下水流动过程的动态变化较其他地区复杂。正是由于冻土区地下水流动过程的重要性、独特性和复杂性,使得其研究具有重要的实用价值和科学意义。对冻土区地下水流动过程及其与地表水相互作用的探讨,不仅有助于深入了解径流的形成机制和转化过程,揭示气候变化和人类活动影响下冻土区水文过程的响应机制,为流域水资源的科学管理提供依据,而且可以推动地下水系统理论的发展,丰富水文地质学的知识体系。

近年来,冻土区地下水流动过程的相关研究逐渐增多,但主要集中在冻土区地下水流动过程的模拟及地下水与地表水间转化关系的刻画两个方面,而冻土分布格局及融冻过程对地下水循环的影响机制则缺乏深入探讨。笔者试图通过总结冻土区地下水对河道径流的贡献、地下水流动路径、地下水-热耦合模型等方面的研究进展,为冻土区地下水流动过程及其与地表水转化关系的研究提供新的思路。

1 冻土区地下水对河道径流的贡献

冻土区地下水对河道径流的补给是近年来地下水与地表水转化关系研究中的热点。已有研究表明,多年冻土区年均径流系数高于非冻土区,后者一般为0.2~0.3,前者可达到甚至超过0.7^[2]。导致这种差异的主要原因是多年冻土区地下水对河道径流的贡献与非冻土区不同^[2,9]。而随着气候变暖,冻土的退化可能造成更多的地下水排泄进入河道,导致径流系数的变化^[9-11]。因此,作为冰冻圈的重要组成部分,冻土区地下水对河道径流的贡献研究具有重要的意义。

目前地下水对河道径流贡献的研究主要采用基流分割法^[17-18]。传统研究多采用直接分割法(又称图解法),包括直线分割法、库捷林法、退水曲线法。该方法以流量过程线的起涨点和退水段拐点之间的连线作为基流与地表水的划分依据,忽略了流域条件及径流组成的差异,具有较强的主观性和经验性,精度难以保证^[18-21]。在此条件下,新的基流分割法应运而生,主要包括水量平衡法、时间序列法、示踪剂法。其中,水量平衡法包括参数分割法和水文模拟法,是依据水量平衡原理求解地下水出流过程的方法,有一定的物理基础,但其参数难以确定,缺乏适用性和可靠性。时间序列法包括基流指数法、数字滤波法、平滑最小值法、时间步长法等,多为模仿人工分割流量过程线的数学方法,易于采用计算机来实现复杂的计算,克服了人工方法的主观性,但没有严格的物理意义,使其应用受到限制^[17-21]。示踪剂法则以较常见的环境同位素作为天然示踪剂,并与水化学数据相结合,从而划分不同径流成分的组成比例,该方法基于质量守恒和同位素浓度守恒,克服了以上方法的缺点,在理论基础和实践操作上都显示出其独特的优点^[20,22-24]。正因如此,基于水化学和同位素示踪剂的径流分割方法是目前研究冻土区地下水对河道径流贡献所采用的主要方法。

早在20世纪初就有部分研究认为:冻土具有低渗透性,通常会限制降水入渗,并促进坡面流的产生;冻土区地下水主要以固态形式储存在冻土层中,只有近地表活动层中的地下水有可能排泄进入河道,但水量极小^[25-26]。因此,这些研究推断冻土区河道径流主要由降水转化成的地表径流补给,地下径流的补给也主要来自于活动层,深层地下水的补给量很少^[27]。但该观点只被少数水化学和同位素的实地示踪研究所证实^[28-29]。

自20世纪70年代引入水化学和同位素示踪法以后,大量同位素径流分割研究得以开展,并得出了与早期研究不一致的结论——冻土区地下水是河道径流的主要组成部分。Obradovic等^[30]、Gibson等^[31]、Metcalf等^[32]的研究发现:整个融雪期间,冻土区地下水的补给量占河道径流总量的50%左右;Carey等^[33]、Boucher等^[34]发现地下水对河道径流的贡献比例超过70%。对于冻土区地下水在河道径流中占有较高比例的原因,通常认为是随着冻土逐渐解冻,释放水分的同时改变了土层的渗透性,使更多的降水得以下渗,从而增大了地下水的排出量^[30,32-33]。Gibson等^[31]指出,造成地下水对河道径流贡献比例较高的主要原因是融雪水入渗后与活动层中地下水的混合,此外,有机层和矿质层分界面处

的管道流可能是另外一个重要原因。部分示踪研究还发现,冻土区地下水对河道径流的贡献随着季节的变化而变化^[35]。很多研究还报道了全球气候变暖背景下,冻土消融造成地下水对大型河流径流量贡献的增大,如加拿大的育空河、俄罗斯的鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河等^[36]。在过去 30 年里,由于冻土消融,地下水对加拿大育空河的年贡献率增大了 1%,加拿大西北地区多个大型河流的冬季基流甚至增加了 0.5%~272%^[36-37]。

Carey 等^[27]、Boucher 等^[34]认为,冻土区土壤性状(尤其是含冰量)的空间异质性可能是造成上述分歧的主要原因。这种异质性导致不同流域内水文过程的响应方式出现了差异,流域间不具有可比性。此外,基于示踪剂的径流分割方法本身的限制性可能是更深层次的原因:该方法将整个流域作为“黑箱”处理,仅根据水文输入和输出间的关系来确定地下水对河道径流的贡献,对冻土区地下水流过程,特别是地下水的补给来源、流动路径及其与土壤水和地表水间的转化关系等未做深入探索,因而无法准确刻画地下水向河道的排泄过程。

2 冻土区地下水流动路径

地下水流动路径的研究,对识别地下水系统结构,了解地下水流过程及构建地下水流的概念模型等具有重要意义。但在冻土区,冻土层的存在使地下水流过程极为复杂和独特。在连续多年冻土区,地下水的流动主要受区域地形控制,无论是冻土层上水还是层下水,总体上以水平径流的形式从地势较高处流向河谷洼地,但局部地区又受微地形地貌及冻土特征的影响。在不连续或岛状多年冻土区,地下水除了水平径流外,还有纵向径流^[38]。由此可知,具有不同地形地貌背景的冻土区,地下水流动路径可能各不相同。

冻土区大多位置偏远且生活条件艰苦,地质和水文地质基础资料往往比较匮乏^[15],难以进行地下水含水系统和流动系统结构的直接刻画。相对而言,利用泉水和地表水的水化学和同位素特征来反演地下水流路径更具优势^[39]。因此,冻土区地下水流路径的已有研究多采用水化学和同位素示踪的方法。在冻土区,冻土层上水、层间水和层下水具有不同的补给来源、滞留时间,且接触不同的地层,所处的水文地球化学环境和经历的水-岩相互作用也各不相同,所以各层地下水的化学和同位素特征存在着明显差异,与地表水和土壤水的特征也不尽相同^[35],这种差异性为利用同位素和反应溶质示踪剂研究地下水流动路径奠定了基础。

早期的冻土区地下水流动路径示踪研究多采用 pH 值、电导率、主要离子等常规化学参数作为示踪剂。由于部分参数“活性”过强,即集水区内多种过程都可能影响其变化,使得这些参数与流动路径间不具有唯一对应性,在指示地下水流动路径时常存在多解,难以对结果进行解释^[40-41]。因此,采用对地下水流动路径具有唯一标记性的示踪剂就成为准确刻画地下水流动路径的关键。

在满足上述条件的示踪剂中,应用较早和较广的是可溶性 SiO₂^[36]。可溶性 SiO₂ 随水流在流域内迁移时浓度稳定,只在水与矿质土接触时才会发生化学反应从而改变浓度,反应速率快且可在短时间内达到平衡^[42]。因此,可溶性 SiO₂ 可用于指示水流是否经过矿质层,从而指示水流路径。与之相反的则是可溶性有机碳(DOC)^[43]。在地表水及浅层土壤水中,因水流与近地表土壤中的有机层接触,导致 DOC 浓度较高;在埋藏相对较深的地下水中,因水流在补给到地下含水层之前,往往流经矿质土,后者的化学吸收及生物作用使得 DOC 在地下水中浓度降低^[27,44-46]。当流域内冻土消融,会促使地下水流动路径变深,增大水与矿物交换时间,从而使 DOC 浓度降低而其他离子浓度增加。因此,DOC 常和 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 等离子联合指示冻土区水流路径^[33-34,36,47]。Petrone 等^[47]利用 2000—2001 年 2 个水文年观测的 DOC 和 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 及 Na⁺ 浓度,对阿拉斯加 2 个流域的地下水流动路径进行了对比研究。Wickland 等^[48]研究了美国阿拉斯加育空河及其 2 条支流,根据可降解的溶解有机碳(BDOC)和溶解有机物(DOM)化学组成的差异,指示了河道径流里来自不同径流途径的成分。

基质遭受到的风化作用通常随深度增加而减弱,但不同元素组成的矿物质具有不同的抗风化能力,所以地下介质中可溶性的元素比值,如 Ba/Sr、Ca/Sr、Ca/Na 和 Ca/Ba 等通常随深度增加而呈现趋势性变化,从而可以指示地下水的流动路径^[43,49-50]。例如,Land 等^[51]利用 Ba/Sr 比和 Ca/Sr 比区分出融雪期间地下径流的 3 种流动路径。任东兴等^[52]在青藏高原长江源区发育多年冻土的风火山流域开展了相关研究,发现来自融雪和冻土融水的径流水化学成分不同,可以用来区分河道径流的补给来源。

同位素方法在冻土区水流路径的示踪研究中也得到了不同程度的应用^[39]。Mcintosh 等^[53]在欧洲和北美地区,通过 D、¹⁸O 和 ¹⁴C 等同位素来区分冻土消融释放的地下水和其他来源的地下水。Bagard 等^[54]利用主要化学组分、微量元素、Sr 和 U 同位素分析了西伯利亚冻土区河道径流补给来源的季节性

变化,发现汛期期间河道径流主要由在土壤有机层中流动的地表径流补给,夏季和秋季主要由经历显著水-岩作用的浅层地下径流补给,冬季则由深层地下水补给。Casanova 等^[55]用 B 同位素作为示踪剂,研究了芬兰和瑞士冻土区不同场地内地下水的冻结过程对其补给和排泄的影响。此外,³⁴S、¹³C、¹⁵N 等反应溶质同位素也可用来指示流域内水的流动路径。例如,由于土壤有机层中的微生物作用活跃,浅层地下径流中可溶性无机碳(DIC)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值常较深层地下水低,所以可用于识别多年冻土区不同深度的地下径流^[56]。

虽然同位素和水化学示踪法自 20 世纪 70 年代起就被广泛用于水文地质学研究中,且显示了其独特的优势,但在冻土区地下水流动路径研究中的应用还相对较少,有待进一步加强。此外,该方法自身也存在着一些局限性,具体体现在该方法只能得到定性或半定量的结果;因影响冻土区水文地球化学过程或同位素丰度的因素众多,研究结果常具有多解性;使用时需满足一定的假设条件,否则会使研究结果产生不确定性。例如,Sklash 等^[57]、Uhlenbrook 等^[58]指出,在利用水稳定同位素建立二元混合模型进行径流分割时,有 5 种潜在的误差来源会造成分割结果的不确定性。目前,示踪法的不确定性研究已引起国内外学者的重视,许多学者致力于开发更为准确的不确定性评价方法,部分学者则通过改进径流分割模型,力图消除或降低这种不确定性,基于水稳定同位素的融雪径流分割,提出了一种新的同位素输入值校正法 RunCE (runoff-corrected event water approach),该方法可降低因融雪水的时程变化所带来的误差^[59]。总体而言,尽管水化学和同位素示踪方法在水分来源的定量识别中存在着一定的限制性,但却有助于概念模型的构建(在偏远高海拔地区,甚至是形成概念性认识的唯一手段),从而为数值模型的构建奠定基础。

3 冻土区地下水-热耦合模型

构建冻土区地下多相流系统数值模型,不仅可以更精确地刻画冻土区地下水流动过程,反映地下水与地表水间的转化关系,揭示冻土分布特征对地下水系统的影响机制,进而提升流域水资源形成及其转化机制的认知水平,还可为气候变化和人类活动影响下冻土区水文过程的响应机制研究提供支撑,为流域水资源的管理提供依据^[2,60]。

目前,在冻土区开展的水文试验和观测逐渐增多,但建立的基于物理过程且适用于冻土区的数值模型仍然较少^[15]。已有的 SHAW^[61]、COUP^[62]、

SWATMOD^[63]等水文模型侧重于对地表径流或土壤水的模拟,对地下水流过程考虑较少^[64-66]。HydroGeoSphere^[65,67]和 GSFLOW^[68]等模型虽然包含了地下水流过程,但忽略了水的物理相变(孔隙水冻结和融化过程)及其引起的相关变化。

近几年,冻土区地下水-热耦合数值模型日渐兴起。其中,部分模型考虑到了水的不同相态,以及因冻土冻融引起的孔隙率和渗透性的变化。例如,为分析冻土对季节性和长期温度变化的水文响应,Ge 等^[11]利用美国地调局开发的 SUTRA 软件建立了青藏高原北部冻土山区流域的二维剖面地下水流和热传导耦合模型。该模型考虑了水的物理相变对渗透性的影响,模拟结果表明,随着气候变暖,冻土区地下水向河谷的排泄量增大。Bense 等^[12]建立了一个假想的、由地形驱动的多级次松散沉积物含水系统的二维剖面模型,并用于预测地表变暖情形下高纬度地区冻土融化对水文地质过程的影响。该模型考虑了非稳定状态下的热传输和水流运移,并考虑了冻土融冻过程中的渗透性变化。模拟结果表明,无论是冻土消融过程中含水介质渗透性的增大,抑或冻土层下水水头上升造成的含水层储水量的释放,都会导致河道基流的增加。Provost 等^[69]针对北欧冻土区建立了长度为 1 500 km 的地下水流二维剖面模型,预测了未来 140 ka 内由气候变化所引起的地下水流过程的变化。模型中,冻土厚度变化的模拟与水流的模拟是分离的,且未考虑冻土冻融过程中引起的渗透性的变化。

需要指出的是,上述研究建立的水-热耦合模型大多属于理想条件下的假想模型,主要用于推断气候变暖情景下冻土层在较长时间尺度下的演变及其对地下水循环的影响,而针对具体研究地点的实际地下水系统的实证计算和模拟比较缺乏,且对模型的校正及后续验证研究也不够深入。为更好地揭示冻土区地下水流过程,精确计算地下水资源量及基流对河道的补给量,需要通过更多的实证研究提升模型的实用性。

4 讨论与展望

综上所述,受冻土区恶劣的研究条件以及传统基流分割方法缺陷的限制,水化学和同位素示踪方法仍是目前研究冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系的主要手段。然而,冻土分布特征以及融冻过程对地下水循环和河道径流形成的影响机制极为复杂,不仅会引起部分地下水在固-液相间转化,而且会造成冻土层厚度和分布格局的变化,即引起地下水含水系统结构的改变,进而影响地下水的补

给、径流、排泄过程。因此,冻土对地下水系统的影响也是冻土区地下水过程及其效应研究的难点所在,如何准确地刻画冻土分布特征和冻融过程对地下水含水系统和流动系统的影响是该研究要解决的关键科学问题。今后应在以下几个方面加强研究:

a. 冻土区基础水文地质数据的积累。冻土区通常处于高海拔或低纬度偏远地区,水文与水文地质调查工作难以开展,长期的野外监测工作难以维持^[53],这必然导致基础资料的匮乏,从而限制冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究的开展。因此,建议从以下两方面进行完善:①在冻土区合理布设新的水文地质监测孔,并整合已有的监测孔,构建地下水监测网络,进行水位、水温、水化学和同位素等的动态监测;②开展系统的水文地质调查,除了调查气象、水文、区域地质、水文地质、地下水环境、特殊类型地下水等常规内容外,还应增加冻土相关的内容,如多年冻土和季节性冻土的分布特征、冻土的融冻规律、活动层的厚度、冻土层上-层间-层下水的联系等。

b. 水化学与同位素示踪结果的不确定性分析。具体来讲,一是继续完善不确定性的评价模型,尽可能全面地考虑示踪研究中所有参数及各个环节的潜在误差,分析示踪法各假定条件的满足程度,从而对示踪结果的合理性和可信度形成清醒认识;二是从采样点的布设、采样与测试环节的控制,以及径流分割模型的改进等多个方面着手,探索降低或消除不确定性的途径,如通过对模型输入项的校正^[70],降低时程效应带来的不确定性^[22],或者利用辅助示踪剂^[71-72]、温度、水位等多源数据^[73]来共同约束分割模型。

c. 冻土区水-热耦合模型的实用性。目前,考虑水在不同相态间变化和冻土融冻过程中渗透性能变化的冻土区地下水-热耦合模型研究刚刚起步^[4,10-11],多数模型是对实际情况进行极度简化处理后的理想模型^[61-68],主要用于预测气候变化下冻土的消融对地下水流过程和水资源的可能影响。这些模型往往很少校正或不校正,故难以用于具体地区的实际地下水流的模拟及水资源量的计算。关于冻土区水-热耦合模型实用性的改进,将来有两个方向值得注意:①针对具体研究区域构建三维的实际模型,用于地下水流动过程刻画、数据整合和结果预测。在构建模型的过程中,关键科学问题是水文尺度的转化,即将点(井)上获取的参数通过空间技术^[74-75]扩展到面上。异质性的精确刻画则可能是面临的另一个主要挑战,它不仅会在模拟面积较大或高差较大的流域内出现,在模拟规模较小但存在

多种类型的地下水(冻土层上水、层间水、层下承压水、层下无压水等)、不同类型的冻土区(连续多年冻土区、不连续多年冻土区、季节性冻土区)或冻土与冻岩皆可能构成含水介质的流域内也会遇到^[76]。可能的突破方向是建立冻土区水文地质试验场,开展多手段、高精度的试验,获取模型所需的相关参数,同时形成冻土区含水介质异质性的理论认识。②在模型的构建和校正过程中,充分利用多源数据,以提高模型的可靠性。如基于地下水流动路径的示踪结果构建冻土区地下水流概念模型,开展少量水文地质调查和试验以获取模型所需的水力学和热力学参数,将河道径流的同位素分割结果作为模型的约束条件,用水位、流量、水温等野外自动监测数据对模型进行校正。

参考文献:

- [1] WOO M. Permafrost hydrology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [2] 杨针娘. 中国寒区水文[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 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.
- [4] 周剑, 王根绪, 李新, 等. 高寒冻土地区草甸草地生态系统的能量-水分平衡分析 [J]. 冰川冻土, 2008, 30 (3): 398-407. (ZHOU Jian, WANG Genxu, LI Xin, et al. Energy-water balance of meadow ecosystem in cold frozen soil areas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30 (3): 398-407. (in Chinese))
- [5] GRENIER C, RÉGNIER D, MOUCHE E, et al. Impact of permafrost development on groundwater flow patterns: a numerical study considering freezing cycles on a two-dimensional vertical cut through a generic river-plain system [J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21 (1): 257-270.
- [6] BENISE 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.
- [7] 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.
- [8] HARRIS C, ARENSEN L U, CHRISTIANSEN H H, et al. Permafrost and climate in Europe: monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92 (3): 117-171.
- [9] MCKENZIE J M, VOSS C I. Permafrost thaw in a nested

- groundwater-flow system[J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 299-316.
- [10] 罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 巴颜喀拉山青康公路沿线多年冻土和活动层分布特征及影响因素[J]. *地理科学*, 2013, 33(5): 635-640. (LUO Dongliang, JIN Huijun, LIN Lin, et al. Distributive features and controlling factors of permafrost and the active layer thickness in the Bayan Har Mountains along the Qinghai-Kangding Highway on Northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 635-640. (in Chinese))
- [11] GE S, MCKENZIE J M, VOSS C I, 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): 130-137.
- [12] BENSON 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(3): 1-18.
- [13] O'DONNELL J A, AIKEN G R, WALVOORD M A, et al. Dissolved organic matter composition of winter flow in the Yukon River Basin: implications of permafrost thaw and increased groundwater discharge [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4): 103-112.
- [14] GUGLIELMIN M. Advances in permafrost and periglacial research in Antarctica: a review [J]. *Geomorphology*, 2012, 155(3): 1-6.
- [15] CHENG G, JIN H. Permafrost and groundwater on the Qinghai-Tibet Plateau and in Northeast China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1): 5-23.
- [16] 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))
- [17] 黄国如. 流量过程线的自动分割方法探讨[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 73-78. (HUANG Guoru. Base flow separation from daily flow hydrograph using automated techniques[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 73-78. (in Chinese))
- [18] 徐磊磊, 刘敬林, 金昌杰, 等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3073-3080. (XU Leilei, LIU Jinglin, JIN Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3073-3080. (in Chinese))
- [19] TALLAKSEN L M. A review of baseflow recession analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 165(1): 349-370.
- [20] 张华, 张勃, 赵传燕. 黑河上游多年基流变化及其原因分析[J]. *地理研究*, 2011, 30(8): 1421-1430. (ZHANG Hua, ZHANG Bo, ZHAO Chuanyan. Annual base flow change and its causes in the upper reaches of Heihe River [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(8): 1421-1430. (in Chinese))
- [21] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 1-15. (CHEN Liqun, LIU Changming, LI Fadong. Reviews on base flow researches [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(1): 1-15. (in Chinese))
- [22] 孙彦龙, 庞中和. 高寒流域同位素径流分割研究进展[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 619-625. (KONG Yanlong, PANG Zhonghe. Isotope hydrograph separation in alpine catchments: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 619-625. (in Chinese))
- [23] 吴锦奎, 杨淇越, 叶柏生, 等. 同位素技术在流域水文研究中的重要进展[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 1024-1032. (WU Jinkui, YANG Qiyue, YE Baisheng, et al. Important progresses on the use of isotope techniques in catchment hydrology [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 1024-1032. (in Chinese))
- [24] 瞿思敏, 包为民, 石朋, 等. 同位素流量过程线分割研究进展与展望[J]. *水电能源科学*, 2006, 24(1): 80-83. (QU Simin, BAO Weiming, SHI Peng, et al. Review on isotopic hydrograph separation methods [J]. *Water Resources and Power*, 2006, 24(1): 80-83. (in Chinese))
- [25] KANE D L, BREDTHAUER S R, STEIN J. Subarctic snowmelt runoff generation[C]//The Northern Community @ sA Search for a Quality Environment. Reston, Virginia: ASCE, 1981: 591-601.
- [26] HINZMAN L D, KANE D L, EVERETT K R. Hillslope hydrology in an arctic setting [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Permafrost. Beijing: South China Press, 1993: 257-271.
- [27] CAREY S K, WOO M. Slope runoff processes and flow generation in a subarctic, subalpine catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 253(1): 110-129.
- [28] MCNAMARA J P, KANE D L, HINZMAN L D. Hydrograph separations in an arctic watershed using mixing model and graphical techniques [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(7): 1707-1719.
- [29] COOPER L W, SOLIS C, KANE D L, et al. Application of oxygen-18 tracer techniques to arctic hydrological processes[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1993, 25(3): 247-255.
- [30] OBRADOVIC M M, SKLASH M G. An isotopic and geochemical study of snowmelt runoff in a small arctic watershed[J]. *Hydrological Processes*, 1986, 1(1): 15-30.
- [31] GIBSON J J, EDWARDS T W D, PROWSE T D. Runoff generation in a high boreal wetland in Northern Canada [J]. *Nordic Hydrology*, 1993, 24(2/3): 213-224.

- [32] 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.
- [33] CAREY S K, QUINTON W L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data [J]. Nordic Hydrology, 2004, 35(4): 309-324.
- [34] BOUCHER J, CAREY S. Exploring runoff processes using chemical, isotopic and hydrometric data in a discontinuous permafrost catchment [J]. Hydrology Research, 2010, 41(6): 508-519.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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): 195-225.
- [38] 杨润田, 林凤桐. 多年冻土区水文地质及工程地质学 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1986.
- [39] 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, 2013, 21(1): 79-91.
- [40] MAULE C P, STEIN J. Hydrologic flow path definition and partitioning of spring meltwater [J]. Water Resources Research, 1990, 26(12): 2959-2970.
- [41] 刘彦广. 基于水化学和同位素的高寒山区雨季径流过程示踪 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [42] HOOPER R P, SHOEMAKER C A. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation [J]. Water Resources Research, 1986, 22(10): 1444-1454.
- [43] KENDALL C, MCDONNELL J J. Isotope tracers in catchment hydrology [M]. Berlin, Heidelberg: Elsevier, 2012.
- [44] BOYER E W, HORNBERGER G M, BENCALA K E, et al. Response characteristics of DOC flushing in an alpine catchment [J]. Hydrological Processes, 1997, 11(12): 1635-1647.
- [45] MACLEAN R, OSWOOD M W, IRONS III J G, et al. The effect of permafrost on stream biogeochemistry: a case study of two streams in the Alaskan (USA) taiga [J]. Biogeochemistry, 1999, 47(3): 239-267.
- [46] HARRIS K J, CAREY A E, LYONS W B, et al. Solute and isotope geochemistry of subsurface ice melt seeps in Taylor Valley, Antarctica [J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119(5/6): 548-555.
- [47] 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(2): 347-366.
- [48] WICKLAND K P, AIKEN G R, BUTLER K, et al. Biodegradability of dissolved organic carbon in the Yukon River and its tributaries: seasonality and importance of inorganic nitrogen [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): 143-157.
- [49] AUBERT D, PROBST A, STILLE P, et al. Evidence of hydrological control of Sr behavior in stream water (Strengbach Catchment, Vosges Mountains, France) [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(3): 285-300.
- [50] BLUM J D, EREL Y. Radiogenic isotopes in weathering and hydrology [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 5: 365-392.
- [51] LAND M, INGRI J, ANDERSSON P S, et al. Ba/Sr, Ca/Sr and Sr-87/Sr-86 ratios in soil water and groundwater: implications for relative contributions to stream water discharge [J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(3): 311-325.
- [52] 任东兴, 王根绪, 胡宏昌, 等. 青藏高原多年冻土区典型小流域径流水化学特征 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2010, 46(1): 7-13. (REN Dongxing, WANG Genxu, HU Hongchang, et al. Hydrochemical characteristics of runoff in a typical small permafrost of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(1): 7-13. (in Chinese))
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] CASANOVA J, NÉGREL P, BLOMQUIST R. Boron isotope fractionation in groundwaters as an indicator of past permafrost conditions in the fractured crystalline bedrock of the fennoscandian shield [J]. Water Research, 2005, 39(2): 362-370.
- [56] KENDALL C, DOCTOR D H. Stable isotope applications in hydrologic studies [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 5: 319-364.

- [57] SKLASH M G, FARVOLDEN R N. The role of groundwater in storm runoff[J]. Journal of Hydrology, 1979,43:45-65.
- [58] UHLENBROOK S, HOEG S. Quantifying uncertainties in tracer-based hydrograph separations;a case study for two-, three- and five-component hydrograph separations in a mountainous catchment[J]. Hydrological Processes,2003, 17(2):431-453.
- [59] VITVAR T, AGGARWAL P K, MCDONNELL J J. A review of isotope applications in catchment hydrology [M]. Dordrecht:Springer Netherlands,2005.
- [60] IRESON A M, KAMP G V D, FERGUSON G, et al. Hydrogeological processes in seasonally frozen northern latitudes: understanding, gaps and challenges [J]. Hydrogeology Journal,2013,21(1):53-66.
- [61] FLERCHINGER G N, SEXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I: theory and development[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1989,32(2):565-571.
- [62] 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.
- [63] 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):1-16.
- [64] 凌敏华,陈喜,程勤波,等. 地表水与地下水耦合模型研究进展[J]. 水利水电科技进展,2010,30(4):79-84. (LING Minhua, CHEN Xi, CHENG Qinbo, et al. Advances in coupled surface water and groundwater models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010,30(4):79-84. (in Chinese))
- [65] 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 Ligang, ZHANG Qi, ZUO Haijun. Status and progress of research on interaction and coupled modeling of surface water and groundwater [J]. Water Resources Protection,2009,25(5):82-85. (in Chinese))
- [66] 陈仁升,康尔泗,吉喜斌. 黑河源区高山草甸的冻土及水文过程初步研究[J]. 冰川冻土,2007,29(3):387-396. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, JI Xibing. Preliminary study of the hydrological processes in the alpine meadow and permafrost regions at the headwaters of Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007,29(3):387-396. (in Chinese))
- [67] 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 Wenxi, LIU Pai, XU Wei, et al. Numerical simulation of groundwater and sensitivity analysis of parameters based on HydroGeoSphere technology [J]. Water Resources and Power, 2011, 29 (6):64-67. (in Chinese))
- [68] MARKSTROM S L, REGAN R S, NISWONGER R G, et al. Gsflow-a basin-scale model for coupled simulation of groundwater and surface-water flow: concepts for modeling surface-water flow with the U. S. geological survey precipitation runoff modeling system model [C]//3rd Federal Hydrologic Modeling Conference. Nevada, Reno: U. S. Geological Survey,2006.
- [69] PROVOST A M, VOSS C I, NEUZIL C E. Glaciation and regional groundwater flow in the fennoscandian shield[J]. Geofluids,2012,12(1):79-96.
- [70] CAPELL R, TETZLAFF D, SOULSBY C. Can time domain and source area tracers reduce uncertainty in rainfall-runoff models in larger heterogeneous catchments? [J]. Water Resources Research,2012,48(9):184-189.
- [71] MROCZKOWSKI M, RAPER P G, KUCZERA G. The quest for more powerful validation of conceptual catchment models [J]. Water Resources Research, 1997, 33 (10): 2325-2335.
- [72] SEIBERT J, MCDONNELL J J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: use of soft data for multicriteria model calibration [J]. Water Resources Research,2002,38(11):1-14.
- [73] 马瑞,董启明,孙自永,等. 地表水与地下水相互作用的温度示踪与模拟研究进展[J]. 地质科技情报,2013,32(2):131-137. (MA Rui, DONG Qiming, SUN Ziyong, et al. Using heat to trace and model the surface water-groundwater interactions;a review [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32 (2): 131-137. (in Chinese))
- [74] 王中根,刘昌明,左其亭,等. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展,2002,21(5):430-439. (WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM [J]. Progress in Geography, 2002, 21 (5): 430-439. (in Chinese))
- [75] 姜光辉,郭芳. 利用 GIS 水化学和同位素方法判断灵水来源[J]. 水资源保护,2012,28(1):59-63. (JIANG Guanghui, GUO Fang. Source identification of Lingshui Spring using GIS-based hydrochemistry and environmental isotopic methods [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1):59-63. (in Chinese))
- [76] 程国栋,金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化 [J]. 水文地质工程地质,2013,40(1):1-11. (CHENG Guodong, JIN Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40 (1): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-23 编辑:骆超)