

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.093>



高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展

常启昕^{1,2}, 孙自永³, 潘 钊³, 李兆峰^{1,2}

1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059
2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059
3. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

摘要: 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制是认识流域水资源形成与转化过程, 以及预测气候变化下流域水文过程响应规律的基础. 通过分析国内外相关文献, 从高寒山区河道径流的水分来源及其气候变化下的影响机制、高寒山区不同类型下垫面对河道径流的调节机制、高寒山区不同类型地下水对河道径流的调节机制三个方面综述其研究进展, 总结问题与不足, 发现气候变化是影响高寒山区河道径流形成过程的主导因素, 探究水文输入、下垫面、地下水等次要影响因素与气候变化之间的响应规律是揭示高寒山区河道径流水文调节机制的关键科学问题, 并提出未来研究的总体趋势和改进建议, 为高寒山区河道径流形成机制及其对气候变化的响应规律研究提供参考依据.

关键词: 高寒山区; 河道径流; 径流形成; 水文调节; 气候变化; 水文地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2022)11-4196-14

收稿日期: 2021-12-08

Stream Runoff Formation and Hydrological Regulation Mechanism in Mountainous Alpine Regions: A Review

Chang Qixin^{1,2}, Sun Ziyong³, Pan Zhao³, Li Zhaofeng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: The formation and regulation mechanism of stream runoff in mountainous alpine regions is the basis of understanding the formation mechanism and transformation process of water resources in basins and predicting the response of hydrological processes in alpine watersheds to climate change. By analyzing relevant literature on hydrological processes in cold regions, we reviewed their research progress from the following three aspects: (1) the water source of stream runoff in mountainous alpine regions and its influence mechanism under climate change, (2) the regulation mechanism of stream runoff on different underlying surfaces in mountainous alpine regions, (3) the regulation mechanism of groundwater on stream runoff in mountainous alpine regions. We found that climate change was the dominant factor affecting the formation process of stream runoff in mountainous alpine regions. Moreover, the response relationship between the secondary influencing factors of stream runoff formation (such as hydrological inputs, underlying surfaces, groundwater) and climate change in mountainous alpine regions is the key to revealing the regulation mechanism of stream runoff. We proposed the future research trend and suggestions for improvement, providing a theoretical basis

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 42102301, 41772270, 41971041).

作者简介: 常启昕(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水文地质研究. E-mail: changqixin19@cdut.edu.cn

引用格式: 常启昕, 孙自永, 潘钊, 李兆峰, 2022. 高寒山区河道径流的形成与水文调节机制研究进展. 地球科学, 47(11):4196-4209.

Citation: Chang Qixin, Sun Ziyong, Pan Zhao, Li Zhaofeng, 2022. Stream Runoff Formation and Hydrological Regulation Mechanism in Mountainous Alpine Regions: A Review. *Earth Science*, 47(11):4196-4209.

for the runoff formation mechanism and its response to climate change in the mountainous alpine regions.

Key words: mountainous alpine regions; stream runoff; runoff formation; hydrological regulation; climate change; hydrogeology.

0 引言

山区是全球“水塔”的重要发源地(Xu *et al.*, 2008; Immerzeel *et al.*, 2020), 全球总面积约为 $33.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Meybeck *et al.*, 2001). 其中, 基于高差的地表粗糙度(Relief roughness)大于 40%、海拔高度大于 2 000 m 的高山区总面积约为 $5.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Meybeck *et al.*, 2001), 而“高寒山区”有明显的冰川覆盖和多年冻土存在, 且总面积近 $3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占高山区总面积的 51.7% (Meybeck *et al.*, 2001). 符合“高寒山区”这种条件的典型高山区有喜马拉雅山脉、喀喇昆仑山脉、阿尔泰山脉、祁连山脉、安第斯山脉、落基山脉、阿尔卑斯山脉、阿拉斯加山脉的部分区域等. 高寒山区不仅是诸多大型河流的源区(Ge *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2018), 具有非常重要的水源涵养和调节功能, 而且对中下游地区供水(Finger *et al.*, 2012)和河流栖息地条件(Brown *et al.*, 2006)起到关键保障作用(Ge *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2018).

近年来, 全球气候变暖导致高寒山区冰川萎缩、冻土退化等问题日趋严峻. 以亚洲“水塔”青藏高原为例, 已有研究发现(屈辰, 2017), 过去 30 多年来, 青藏高原及其相邻地区的冰川面积由 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 缩减至 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 退缩 15%; 多年冻土面积由 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 缩减为 $1.26 \times 10^6 \text{ km}^2$, 减少 16%; 大于 1 km^2 的湖泊数量从 1 081 个增加到 1 236 个, 湖泊面积从 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到近 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$; 受冰川融水径流量增大影响, 雅鲁藏布江、印度河上游年径流量呈增加趋势, 致使中下游地区雨季频繁发生洪涝灾害. 与此同时, 据预测, 21 世纪中叶冰川对地表径流的补给将达到最大值然后减少, 长远来看未来水资源存在潜在短缺的风险. 由此可见, 冰冻圈萎缩导致水资源变化的影响在高寒山区尤为显现(陈仁升等, 2014). 因此, 为了保障高寒山区水资源的合理调控以及可持续开发与利用, 高寒山区水文过程的相关研究显得尤为重要.

与北极、亚北极寒区相比, 我国高寒山区的水文过程具有如下特点(Cuo *et al.*, 2014, 安志宏等, 2018; 常启昕, 2019): ①发生在巨大高差、明显产流响应的山区; ②水文输入以降雨和冰雪融水为

主, 是维持高寒山区河道径流的主要水分来源; ③径流量变化与降水和气温的月变化规律相似, 5—9 月的湿润温暖季节径流量较高, 约占全年的 50%~80%, 在 7—8 月达到峰值, 且与季节冻土消融基本同步, 夏季降雨量高于春季融雪水量, 该时段活动层也最深; ④山区地下水在冬季、旱季维持河道径流和在季风季节(5 月下旬至 9 月)缓冲河道径流峰值流量方面发挥着关键作用(Yao *et al.*, 2021), 且冬季基流维持主要依赖于冲洪积孔隙含水层存储的地下水, 而不是基岩裂隙含水层存储的地下水; ⑤小流域在垂向上跨越不同的下垫面和水文地质单元, 巨大地形高差、稀疏植被、冻土等不同类型下垫面对河道径流具有驱动作用, 且不同单元的储水能力和导水能力存在显著差异, 其水流路径和水文连通性更为复杂; ⑥流域内多年冻土常呈不连续、分散乃至岛状分布, 冻土层上、层下和层间含水层普遍发育, 地表水与地下水之间以及地下水在不同层位间的转化十分频繁, 且地下水流路径较为复杂. 上述高寒山区水文过程的空间异质性强, 河道径流形成过程复杂且对气候变化敏感.

近年来, 高寒山区河道径流形成机制作为寒区水文过程研究的重要部分, 是预测气候变化影响下高寒流域水文过程响应研究的基础(Lu and Godt, 2013), 也是了解河道径流的水文调节机制的前提. 因此, 笔者试图通过高寒山区河道径流的水分来源及其气候变化下的影响机制、高寒山区不同下垫面对河道径流的调节机制、高寒山区不同类型地下水对河道径流的调节机制三个方面综述其研究进展, 总结不足与问题, 展望未来研究的总体趋势和方向, 旨在为高寒山区水资源的合理调控以及可持续开发与利用提供借鉴和参考, 有助于提升对寒区水文过程的认识.

1 高寒山区河道径流的水分来源及其气候变化下的影响机制

我国高寒山区河道径流的主要水分输入来源对气候变化极为敏感, 且随季节变化, 河道径流量也呈季节变化规律(常启昕, 2019; Ma *et al.*, 2021; Veetil and Kamp, 2021): 以青藏高原东北缘

祁连山区为例,一般秋、冬季主要的输入类型是降水(降雪为主),因气温很低,以积雪形式存储于流域雪线以上地表,流域内无水分输入;春季气温升高,积雪消融,流域主要水分输入来源是积雪融水;夏季气温逐步升高,冰川消融,流域主要水分来源是冰雪融水和降雨。因祁连山区受季风气候影响,其半湿润区年降水量可达400~800 mm(黄颖等, 2020),降水集中在夏季,并且冰川和永久积雪也在这个季节消融提供大小可观的冰雪融水,以致河道径流在夏季保持较高的径流量,而在其他季节因降水稀少,河道径流量维持在较低的范围。

而位于近北极、亚北极地区的高寒山区有着不一样水分来源特征(Carey and Quinton, 2004),受副极地大陆性气候的影响,年降水量在250~500 mm,集中于暖季,而冷季降水虽然稀少,但因气温低、蒸发微弱、积雪期较长,以致山区积雪厚度较大(可达600~700 mm);因此在春季,积雪消融,通过积雪融水补给河道径流,此时河道径流量处于全年最高,而在夏季,积雪已经消融完毕,对于有冰川存在的流域,河道径流主要补给来源是冰雪融水和降雨,此时河道径流量维持在一个正常稳定的水平。由此可见,大气降水和冰雪融水是维持高寒山区河道径流的主要水分输入来源,降水事件出现和降水量大小取决于高寒山区的气候,冰雪消融速率和融水量大小取决于气温变化和冰川存储规模,这些共同决定了河道径流水分来源大小及其季节变化规律。

气候变化对高寒山区河道径流的影响已引起许多学者的关注(Cuo *et al.*, 2014)。气候变暖具体影响表现在冰川积雪消融、流域总蒸发量、高山区降水形态以及整个流域下垫面近地表温度(蓝永超等, 2001),能引起河道水分补给来源、径流量以及径流组分的动态特征发生变化。例如,李宝富等(2012)发现气候变暖可使融雪期提前以及融雪周期延长,使得大量冰雪融水提前汇入河道径流,径流量、潜在蒸散发量增加,导致其他季节冰雪融水量相对减少,径流量、潜在蒸散发量减小。Shen *et al.* (2020)利用小波相干性分析方法对黑河上游源区1960—2014年日径流量记录数据进行解析,发现自1972年以来,气候变化导致河道径流动态变得更为复杂。崔延华等(2017)基于黑河上游4个气象站的逐月实测气象资料以及莺落峡水文站逐月径流资料,发现祁连山区降水量、气温和潜在蒸散发量是影响黑河上游河道径流量的主要气象因子,径流

和降水存在显著正相关关系,春季气温和径流量呈正相关,夏季潜在蒸散发量增大对由降水量增大促使的年径流增大起到了一定的削弱作用。Song *et al.* (2021)基于欧亚北极和青藏高原20个冻土分布流域的数十年日径流量数据,分析了它们的年径流量历时曲线,发现河道径流的不同组分对气候变化因素有着不一样的响应规律,低流量主要由地下水维持,对气候变暖更为敏感,而高流量对降水响应更为敏感。因此,气候变化与河道水分补给来源、径流量以及径流组分的动态特征有着显著的响应关系,能够改变流域径流量和季节水量的分配,是影响高寒山区河道径流形成过程的重要因素。

综上所述,大气降水、冰雪融水是构成高寒山区河道径流的最主要水分来源,在全球气候变暖的大背景下,这些水分来源的季节和年际变化规律发生变化,历经高寒山区产、汇流过程后,直接影响着河道径流的季节和年际变化规律。以祁连山区“多年冻土+季节冻土”型流域(图1)为例,总结高寒山区流域地表径流和地下径流过程(常启昕, 2019):基岩山区和多年冻土区是主要的产流区,山前平原季节冻土区是主要的汇流区。地表径流过程:冰雪融水和降水一部分在多年冻岩区冰川前缘处河流源头附近直接进入河流,另一部分在多年冻土/冻岩区基岩分布区域以坡面流形式汇入河道;多年冻土区的冻土融水和降水当土壤因入渗达到饱和状态时则以坡面流形式汇入河流,季节冻土区的冻土融水和降水在基岩分布区域一部分以坡面流形式直接汇入河流。地下径流过程:冰雪融水和降水在多年冻岩区冰川前缘冰碛垅岗内侧急剧渗漏,迅速转化为第四系松散岩类冻结层孔隙水,其中一部分孔隙水穿过冰碛物后以下降泉形式排出,成为河流的源头,而另一部分孔隙水会补给位于低处的夷平面泥质砾石孔隙含水层,成为冻土层上孔隙水;在多年冻土区,降水和冻土融水部分入渗转化为冻土层上孔隙水,向山坡下方汇集时,在坡脚处受弱透水层和冻土层阻隔溢出地表,以坡面流的形式汇入河道径流;当河流进入山前平原时,通过河床下带状融区渗漏或侧向补给的形式再次转化为孔隙水,在山前平原末端出露,再次汇入河流。

针对这方面的研究需要全面的气象资料(降水量、潜在蒸散发量和气温数据)、水文资料(径流数据)。基于此数据,大多数研究采用传统基流分割方法来分析河道径流组分及其变化规律(常启昕等,

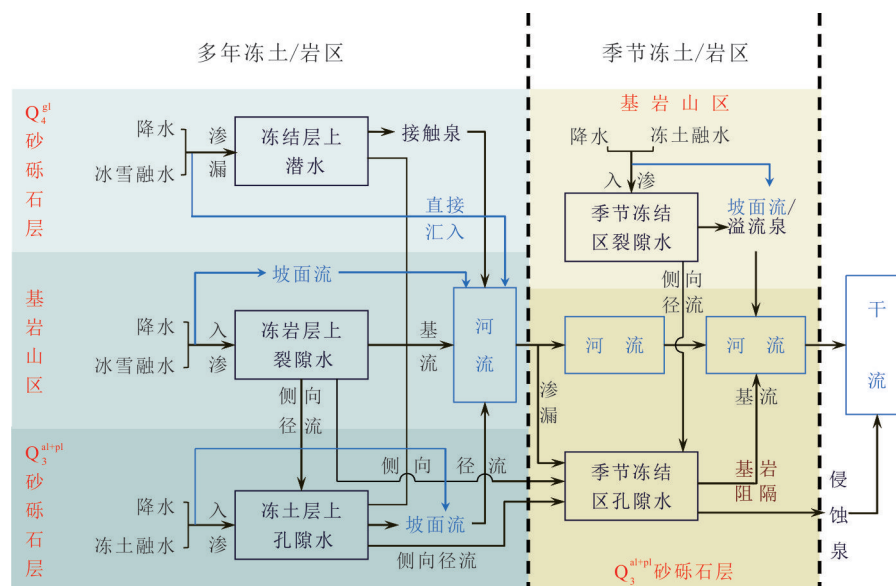


图1 祁连山“多年冻土+季节冻土”型流域产、汇流过程的概念模型(改绘自常启昕, 2019)

Fig.1 The conceptual model of the mechanism of runoff formation in alpine-gorge catchments of Qilian Mountains, composed of “permafrost” and “seasonally frozen ground”

2016). 而对于以冰雪融水和降水为主要水分来源的高寒山区流域, 可以引入环境同位素、水化学和温度数据来进一步解析河道径流组分(常启昕等, 2016). 例如, 常启昕(2019)和潘钊等(2018)都利用环境同位素和水化学示踪方法, 分别对葫芦沟和红泥沟的河道径流形成机制进行了深入分析, 前者采用多种径流分割方法, 发现葫芦沟流域中地下水是河道径流最高的贡献来源, 在夏季冰雪融水的贡献不可忽视; 后者发现红泥沟流域中河道径流量与降雨事件有显著响应, 地下水是河道径流的主要贡献者, 但降雨对河道径流的贡献不可忽视. 黄丽等(2012)采用分布式光纤测温技术监测河水、河床和地下水温度变化, 通过河道水温异常区识别排泄点或溢出点, 从而解析河道径流组分的比例及动态变化. 此外, 随着对地观测卫星遥感技术的发展, 遥感空间信息分析方法中微波遥感监测能为地表径流变化提供持续观测, 目前基于被动微波遥感亮度温度的河道径流模拟可为资料匮乏地区径流模拟提供新途径(许继军等, 2021).

2 高寒山区不同类型下垫面对河道径流的调节机制

已有研究证明, 高寒山区不同类型下垫面(诸如不同地形、地貌、植被类型、土壤条件)对河道径流形成有一定的影响(Lyon and Destouni, 2010; 常

启昕, 2019). 例如, 王金叶等(2006)发现祁连山排露沟流域内水分状况与径流形成潜力具有在空间上的异质性, 随坡向、海拔等地形因子而发生规律性变化. 宋倩(2013)利用喀什河流域80年代和2000年的土地利用类型图模拟与实测的多年平均径流量进行对比分析, 发现不同土地类型对径流变化没有明显影响, 气候变化才是其主要影响因素. 张志强等(2001)综述了森林植被影响下径流形成机制, 总结发现森林植被影响水文过程, 促进降雨再分配、影响土壤水分运动、改变产流汇流条件, 进而在一定程度上起到消减洪峰、增加枯水期河道径流、控制土壤侵蚀、改善河流水质的作用. 苏同宣(2021)基于黑河上游植被动态遥感数据, 发现1992—2015年期间, 气候变化背景下植被动态变化没有明显影响黑河上游降雨产流, 其多年平均产流变化量波动范围仅为-39.43~27.52 mm. 由此可见, 在高寒山区, 地表植被、土地利用对地表产、汇流影响不大, 对河道径流的调节影响可以忽略不计, 不同地形因子对河道径流的调节有一定程度的影响, 而气候变化才是影响高寒山区河道径流的主导因素.

季节冻土和多年冻土是高寒山区典型分布的下垫面类型(程国栋等, 2019). 季节冻土融冻循环作用受制于气候变化和受热条件. 在完全冻结期, 近地表气温极低, 活动层土壤会发生冻结, 表层土壤的渗透性变小, 削弱降水入渗强度, 促进地表径

流产生,当地表积雪消融时,直接进入河道径流.同时,冻结后形成的地下冰充满了岩层的孔隙和裂隙,极大程度减弱了岩层的渗透性(Шепелёв, 2014),这种隔水层或弱透水层导致了水文地质条件的改变,使地下水类型由潜水转变为承压水(图2),地表水和地下水的交互作用发生转变,进而影响河道径流.在完全消融期,近地表气温较高,活动层表层土壤渗透性恢复自然状态,但由于期间降雨事件频繁、降水强度较高,表层土壤极易饱和,部分无法下渗的降水会以坡面漫流形式进入河道径流.例如,在加拿大北极高地,通过整个融雪季节径流量和组分的变化特征,发现融雪季节后期季节冻土融冻循环过程对于地表和地下的产流有重要的作用(Woo and Steer, 1982),其径流过程与冰川积雪覆盖流域中的情况非常相似——在消融期具有更高的峰值流量和在冻结期有更低的基流流量(Yang *et al.*, 2002; Woo, 2012; Evans *et al.*, 2018).

高寒山区多年冻土分布在特定的海拔范围,全球气候变暖会导致多年冻土退化和分布条件改变.例如,程国栋等(2019)系统归纳和总结青藏高原多年冻土基本特征现状,发现多年冻土退化会降低草地生态系统对径流的调节能力.由于青藏高原多年冻土区随着气候变暖活动层厚度增大,会增加土壤水分下渗能力,表层土壤含水量降低,进而导致植被发生退化,并且改变降雨截留和分配过程,同时,植被退化引起根系和细土壤颗粒减少,土壤持水率降低,进一步削弱了地表径流形成,因此土壤的冻融深度变化对河道径流具有重要的调节作用(程国栋和金会军, 2013; 程国栋等, 2019).此外, Han and Menzel (2022)发现 1984—2013 年近 30 年期间气候变暖诱发的冻土退化导致两个南部的西伯利亚流域径流机制发生变化.由于高寒流域多年冻土区分布着不同类型的多年冻土(不连续、分散和岛状分布),冻土层上水、层间水和层下水与地表径流

之间相互转化更为复杂(Woo *et al.*, 2008),且广泛存在着具有强渗透性的有机土壤(Carey and Woo, 2001),土壤中发育有不规则的优势流路径,比如土壤管道(soil pipe)(Carey and Woo, 2000)、水路径(water track)(Kane *et al.*, 1989)和矿物土岗(mineral earth hummocks)(Quinton and Marsh, 1998),为地表水进入地下提供快捷的通道,这会较大程度上限制坡面漫流的产生(Quinton *et al.*, 2000, 2005).这种优势流路径形成过程与冻土区特殊的气温和地温有关:在冻土区,强渗透性的有机土壤通常覆盖在相对不可渗透的矿物基质上,为土壤管道形成提供了一个理想的环境,在两者界面处,冻结过程将腐烂的有机物与矿质土壤混合在一起,形成了一个土壤强度低、渗透率高、易受渗流侵蚀的区域(Carey and Woo, 2013).该界面也是富含冰透镜体的位置,大量融水在这里汇集,并在融雪期间快速饱和(Carey and Woo, 1999).在冬季,地面和大气之间的巨大温度梯度促使水汽通量从近地表有机土壤层向上流向覆盖的积雪层,使近地表土层干燥,并促使干缩裂隙的形成.同时,土壤的快速冷却还可能导致收缩裂隙的形成,从而为地表水进入土壤提供优势流路径,继而在一定程度上影响地表径流的形成.

目前,气象卫星、陆地资源卫星和微波技术等遥感手段在高寒山区水文过程研究中得到了广泛应用(何咏琪, 2014),尤其分析不同类型下垫面的水文过程有着非同凡响的效果.例如,刘蛟等(2017)以降水和冰雪融水为主要补给的叶尔羌河流域为研究区,利用降水、温度、积雪覆盖面积和潜在蒸散发量的遥感数据为支撑,构建流域的 MIKE SHE 模型,估算河道的年平均径流深为 146.66 mm,基流补给占总径流的 21.3%.张家森等(2022)对于下垫面为季节性积雪的帕隆藏布流域,利用遥感解译和气象水文观测等方法估算该

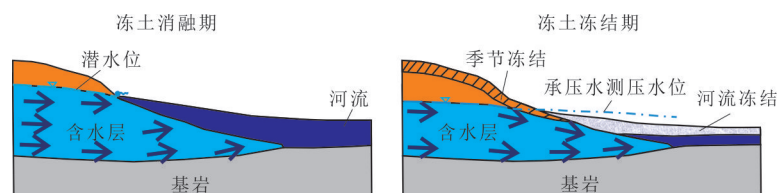


图2 冻土消融期和冻结期两种情景下河水与浅层地下水交互关系变化概念图(改绘自 Ma *et al.*, 2017)

Fig.2 Conceptual diagram of the interaction between river water and shallow groundwater under two scenarios of frozen period and thawed period

流域不同类型地下水的径流模数。因此,利用遥感技术和选用合适方法对遥感数据进行解译和验证,有助于提升对无(缺)资料的高寒山区流域不同下垫面条件下河道径流形成机制的认识。

3 高寒山区不同类型地下水对河道径流的调节机制

高寒山区地下水对河道径流具有较强的水文调节功能(Somers and McKenzie, 2020):因高寒山区陡峭的地形坡度以及暖季丰富的水分补给(冰雪融水和降水),河道径流具有较高流速和溶质通量,高寒山区含水层储存的地下水可以缓冲和稳定流域出口的径流量和溶质浓度(Cochand *et al.*, 2019),以及维持冬季或旱季河道径流量(Paznekas and Hayashi, 2016)。

首先,裸露的基岩在高寒山区流域分布比例大(普遍 50% 以上)。以黑河源区为例,基于黑河源区的 1981 年水文地质调查发现,黑河源区仍以基岩为主,主要分布在干流两侧较高的山区,其中基岩裂隙水分布面积约 3 645 km²,且基岩山区是主要的汇水区(即补给区),降水和冰雪融水为河道径流的主要水分来源,最终排泄至黑河干流(常启昕, 2019; Ma *et al.*, 2021)。因此,基岩裂隙水是高寒山区主要的地下水类型之一。以往主流观点也认为基流维持主要依赖于基岩裂隙水,基岩裂隙主导地下水流动(Katsuyama *et al.*, 2010),是调控高寒山区流域径流变化的主要角色(Clou and Sueker, 2000; Liu *et al.*, 2004)。例如, Wetzel (2003)在更新世冰碛松散沉积物广泛分布的莱恩巴赫集水区开展相关研究,发现山区较低渗透性的基岩、稀疏的植被、高地形梯度有助于地表径流的形成,致使河道径流量具有高峰值特征以及暴雨径流具有快速退水过程的特点。然而,在诸如此类高寒山区径流组分解析研究中存在如下两个问题难以解释(Caballero *et al.*, 2002; Baraer *et al.*, 2009; Muir *et al.*, 2011; Langston *et al.*, 2013):①浅层裂隙水在冬季大多冻结,如何维持基流?②基岩裂隙的储水空间和导水能力有限,无法解释全年径流中地下水高达 50% 以上的贡献。

其次,全新世(高径流量特征)之后、更新世冰期形成的松散沉积物在高寒山区流域广泛存在,其赋存的孔隙水也是高寒山区地下水主要类型之一。松散沉积物具有高导水率的典型特征(Lauber

et al., 2014),一般由冰碛物和坡积物组成,主要成分为不具层理、分选性和磨圆度差的碎屑物,具有较强的非均质性和渗透性。松散堆积物主要的沉积类型有岩屑锥(debris cones)、岩屑坡(talus slopes)和冲洪积物等(Muir *et al.*, 2011; McClymont *et al.*, 2012; Langston *et al.*, 2013),具有较强的导水能力和一定的储水能力,有助于枯水季基流维持和丰水季存储与疏排地下水,为探究高寒山区河道径流的形成与水文调节机制提供了新的思路和突破口。再次以黑河源区为例,第四系松散沉积物主要分布在黑河上游出山口冲(洪)积带(沿着干流方向)以及干流两侧各个子流域山前冲洪积平原,且松散岩类孔隙水分布面积约 1 392 km²,第四系松散沉积物构成的孔隙含水层是地下水进入河道的必经通道(常启昕, 2019; Ma *et al.*, 2021)。然而,第四系松散沉积物分布范围有限(相对于基岩裂隙),它们构成的孔隙含水层以及赋存的地下水常常被忽略(Käser and Hunkeler, 2016)。近十年来,已有研究致力于高寒环境中不同类型松散沉积物对水文过程的影响,它在河道径流形成过程中起着关键调控作用(Caballero *et al.*, 2002; Baraer *et al.*, 2009; McClymont *et al.*, 2010; Muir *et al.*, 2011; McClymont *et al.*, 2012; Langston *et al.*, 2013)。

松散堆积物通常覆盖在相对隔水的基岩上,因在流域中所处的位置不同,具有不一样的水理性质、储水和导水能力,导致其构成的孔隙含水层水力特征存在差异,从而对地下水补给、径流和排泄过程产生不同影响,进而影响河道径流(Lauber *et al.*, 2014)。根据分布位置的不同,高寒山区孔隙含水层可以分为 3 类(图 3 和表 1):①第 I 类是位于冰川前缘的孔隙含水层,由孔隙大、坡度高、导水能力强和储水能力差的岩屑锥和岩屑坡组成,导水系数较大,水力响应快,其地下水水位易出现大幅度波动,这是因为在海拔较高处地下水补给来源受制于冰川和积雪的消融速度(Käser and Hunkeler, 2016),到冬季补给来源被中断时,该类含水层储存的地下水会迅速疏干,具有较差的储水能力;②第 II 类是位于较高丘陵顶部的孔隙含水层,由分选性很差的次棱角状的泥质砾石组成,一般处于多年冻土区,地下水因多年冻土存在而被分为冻土层上水、冻土层间水和冻土层下水,该类含水层的储水能力一般;③第 III 类孔隙含水层相较于前两类高程更低,一般位于季节冻土区河流阶地和山前倾斜平

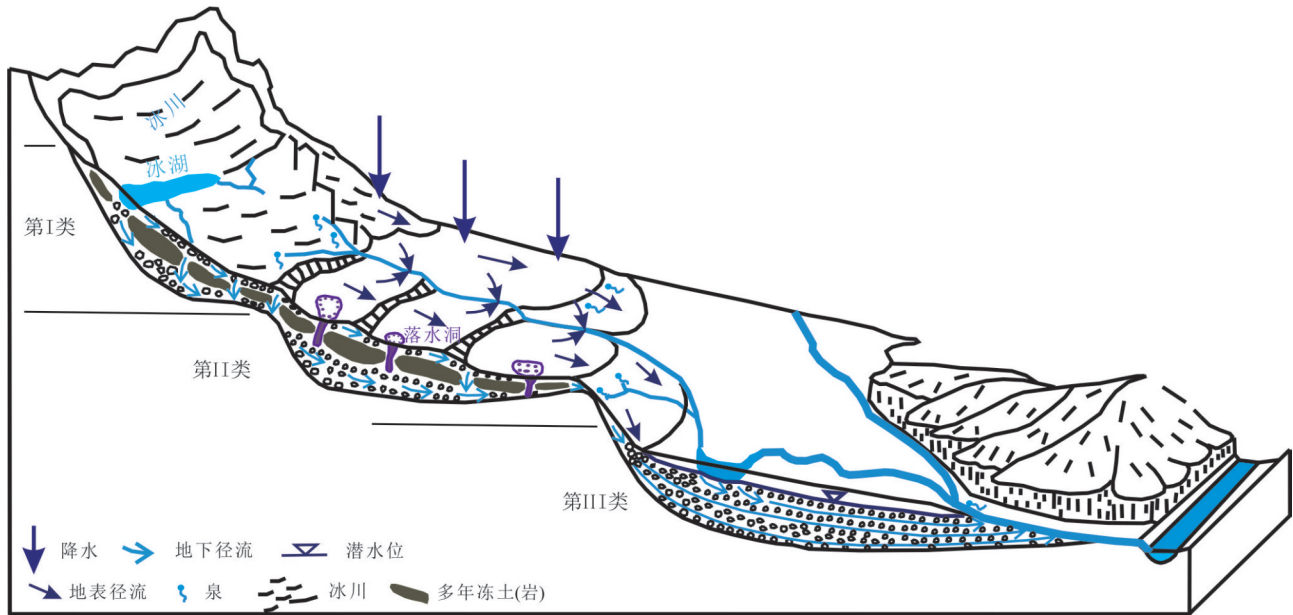
图3 高寒山区孔隙含水层类型分类概念示意图(改绘自 Ma *et al.*, 2017)

Fig.3 Schematic diagram of classification of porous aquifers in mountainous alpine regions

表1 高寒山区孔隙含水层的水力特征

Table 1 Hydraulic characteristics of porous aquifers in mountainous alpine regions

类别	沉积厚度 (m)	沉积成因	沉积物组成	孔径和连通性	含水层类型
第I类	5~30	冰碛和岩屑堆	无分选的角砾和巨砾	具有高连通性的大孔径	以潜水为主
第II类	5~30	冰碛和冰川沉积	分选性很差的次棱角状的泥质砾石	具有中等连通性的大孔径	以承压为主
第III类	20~50	冰水和冰碛沉积	分选性很差,带有不稳定性巨石的次棱角状泥质砂砾卵石	具有中等连通性的中一大孔径	暖季:潜水 冷季:承压

原,由坡度较小、孔隙较小而孔隙度较高的冲洪积物组成,具有较强的储水能力和导水能力,构成了蓄水和流量调节的有利储水层,但是靠近河岸带其含水介质性质易受季节冻土融冻循环作用影响.第I~III类的高寒山区孔隙含水层具有不一样的水力特征——厚度、水理性质、储水和导水能力、与其他水文单元的连通性、含水层类型(潜水、承压)等,其中部分水力特征见表1.

高寒山区第I、II类孔隙含水层以孔隙大、坡度高、导水能力强和储水能力差的岩屑锥和岩屑坡为主,多位于较高海拔处的冰川前缘和多年冻土区,其水文输入(主要是冰川融水)和输出(基流排泄)相对单一,目前研究主要侧重于气候变化下第I、II类孔隙含水层对地下水的调蓄作用(Muir *et al.*, 2011; Hood and Hayashi, 2015),能够调控高寒山区流域河道径流变化,能够解释上述第1个问题(本章

节第2段),但无法完全解释第2个问题.而第III类孔隙含水层常以河流阶地、山前倾斜平原等形式出现,构成径流由山区产流区流至河道的必经通道,在丰水季河道径流调节上起到重要的缓冲作用,在枯水季径流调节上起到维持基流的作用(Tague *et al.*, 2008; Chang *et al.*, 2018; 常启昕, 2019),可以完全解释第2个问题.但受限于特殊的地理位置(上游多年冻土/岩区和下游季节冻土区河流之间)和有限的松散堆积物分布范围,少有关于其水文调节能力的研究.因为岩屑锥和岩屑坡多位于较高海拔处的冰川前缘,其水文输入(主要是冰川融水)和输出(基流排泄)单一,所以现有研究多关注单一类型含水层的性质(分布、厚度、给水度、渗透性等);但是对于海拔相对较低处的沉积物来说,其补给和排泄条件会变得更为复杂,与其他类型含水层间也可能存在更为密切的联系,含水层性质也可能因冻

土冻融循环而发生显著的动态变化,进而影响其储水和导水能力,需要对这种复杂水力联系及冻融循环影响下的水文调节功能的内在机制进行研究。

针对最为复杂的第 III 类孔隙含水层,山前补给(Mountain-front recharge)是其获取补给的主要方式之一(Houston, 2002; King *et al.*, 2017)——丰水季多年冻土(岩)区因较小的降雨入渗系数,具有响应迅速、较高的产流特征,地表径流在季节冻土区山前平原冲洪积扇顶边缘渗漏补给第 III 类孔隙含水层的地下水,有效降低出山口地表径流量快速增长的速度;枯水季山前补给过程刚刚结束时,水力梯度会随着地下水逐渐释放而迅速减小,这种正在减小的水力梯度反过来会减缓地下水的释放速度,阻止枯水季地下水疏干,第 III 类孔隙含水层起到基流维持的作用。侧向补给是第 III 类孔隙含水层获取补给的另一种重要方式,也是高寒流域多年冻土(岩)区山坡、沟谷与(间歇性)河道的重要水文连通形式(Käser and Hunkeler, 2016; 刘金涛等, 2019): ①通过超渗产流或者饱和坡面流的形式产生; ②通过壤中流或者优势流方式产生; ③以山坡浅层地下径流方式产生(Carey and Woo, 2001)。而这种补给方式更易受制于此类含水层的水力特征和冻土融冻循环作用。因此,山前补给和侧向补给是第 III 类孔隙含水层获得地下水补给的主要方式,山前补给主要受制于河岸带地质岩性和松散堆积物分布形态以及河道和水流特征,侧向补给主要受制于冻土融冻循环影响下的河岸孔隙含水层水力特征。

第 III 类孔隙含水层这两种重要的获取水分补给方式与冲洪积扇的地质条件和地貌形态以及河道和水流特征息息相关(Houston, 2002): ①扇顶入渗速率(infiltration rate)最高,且与垂直饱和渗透系数成正比; ②随着地下水位的深度增加,入渗率增大,从而地下水的水力梯度也随之增大; ③入渗速率随水流速度、过水面积和持续时间的增加而增大; ④活跃河道的入渗速率最大,河漫滩区域的入渗速率最小。已有研究发现第 III 类孔隙含水层通常不像河网系统那样连续(Käser and Hunkeler, 2016)。含水层非均质性和基岩约束导致沿着河岸带冲(洪)积网络产生可见和不可见的纵向不连续点。在许多情况下,此类含水层被基岩的“高点”或“瓶颈”分割开来,使整个系统看起来像“串珠”(Larkin and Sharp Jr, 1992),可能会在该含水层内形成不连续的隔间。加之高寒山区冻土融冻循环作用的

影响,冲洪积扇(或冲洪积平原)河岸带饱和区浅层介质类型在含水层与隔水层间转变,致使地下水在潜水和承压水间转换,然而这种情况往往被忽略,大多数研究倾向于更简单的非均质性模型。这种高度分隔、含水介质类型循环变化的此类孔隙含水层在向河流释放有限的地下水或接收地表水补给时,增加了冲洪积扇(或冲洪积平原)河岸带地表水与地下水的相互作用及转化关系的复杂性(Rhodes *et al.*, 2017),导致第 III 类孔隙含水层径流调节机制研究更具挑战性。

综上所述,了解高寒山区含水层水力特征是探究高寒山区不同类型地下水对河道径流的调节机制的前提。传统水文地质调查方法是初步分析含水层的水力特征的最佳手段(Maloszewski *et al.*, 2002; Blume *et al.*, 2007; Mueller *et al.*, 2013; Käser and Hunkeler, 2016)。比如,通过采用泉流量指数衰减分析(王泽君等, 2020)、流量响应(即峰值流量与最大降水强度之比)、流量比(峰值流量和初始流量的比率)、水文时间序列分析(李严等, 2021)、水均衡方法等分析方法来调查高寒山区泉水补给来源、地下水径流特征、地下水储存量变化(Houston, 2002; Goldscheider, 2005; Gremaud *et al.*, 2009; Finger *et al.*, 2013)。在实际研究中应考虑降水和泉水流量峰值之间的时间滞后(Haga *et al.*, 2005),再根据暴雨径流和基流退水特征,帮助识别快速流和缓慢流这两种不同路径的径流组分(Millares *et al.*, 2009),较低且平缓的基流退水曲线指示一个稳定的基流量,能够反映含水层储存水量对基流维持起到重要作用。退水曲线很大程度上依赖于含水层水力特征,例如渗透性好的内部结构、较高的有效孔隙度(Geyer *et al.*, 2008)。同时,通过水文地质钻孔提供沉积物的岩性资料和水文地质试验(如渗水试验、抽水试验、注水试验、微水试验等)获取相关水文地质参数,是查明高寒山区水文地质特征最直观的方法,但人力和成本上需要花费很高的代价。另有研究引入浅层地球物理勘探技术(Otto *et al.*, 2009)来辅助水文地质调查,具有不破坏介质原有结构的优点。目前,许多学者多采用探地雷达法(ground-penetrating radar, GPR)(Sass and Wollny, 2001)、电阻率层析成像(electrical resistivity tomography, ERT)(Sass, 2006)和地震折射波法(seismic refraction profile, SRP)(Schrott *et al.*, 2003),确定沉积物的物理性质,如

碎屑体积和内部结构,结合水文地质调查,进一步推断其水力特征。然而,这种方法在高寒山区环境中实施时,仍存在一定的难度(Bales *et al.*, 2006),比如交通运输和仪器布设受到限制,导致研究耗时长、条件艰苦、研究成本过高等问题(常启昕等, 2016)。

4 结论与展望

高寒山区作为诸多河流发源地,其河道径流形成与调节机制是认识流域水资源形成机制与转化过程、预测气候变化影响下流域水文过程响应的基础。高寒山区冰川、积雪、植被对气候变化极为敏感,河道径流水分来源具有显著的季节变化特征,同时沿着海拔梯度变化,高寒山区具有不一样的下垫面类型,尤其是多年冻土和季节冻土的存在,加之冻融循环影响下复杂的地下水过程及其与地表径流的交互作用,以致高寒山区河道径流形成与调节机制研究更具有挑战性。

本文通过综述高寒山区河道径流的水分来源及其气候变化下的影响机制、不同类型下垫面对河道径流的调节机制、不同类型地下水对河道径流的调节机制 3 个方面的研究进展,发现气候变化主导高寒山区河道径流形成过程,探究高寒山区河道径流形成次要影响因素(比如不同水分来源、下垫面和地下水等)与气候变化之间的响应规律是揭示河道径流水文调节机制的关键科学问题,今后应从以下 4 个方面加强和完善:

(1) 高寒山区位置偏远、人烟稀少,缺乏翔实的水文地质资料以及全面、同步的观测数据是阻碍研究发展的主要因素,建议补充传统水文地质勘察(观测地下水位、泉流量),累积水文地质基础数据,开展高精度、长时间的气象、水文数据监测,同时引入或联合多种先进技术和方法,例如分布式光纤测温技术、被动微波遥感技术、浅层地球物理勘探技术、同位素和水化学示踪方法等,为资料严重匮乏的高寒山区研究河道径流形成与调节机制提供新的途径。

(2) 由于来自冰川和积雪消融的冰雪融水是维持高寒山区河道径流的主要水分来源之一,对气候变化极为敏感,在暖季对河道径流形成有着关键调节作用,可以在冰川存储(单一存储、中期存储和长期存储)、冰内及冰下融水径流等(Jansson *et al.*, 2003)方面探究气候变

化下河道径流变化规律及其水文调节机制。

(3) 深入探究高寒山区典型下垫面对河道径流的调节作用,尤其在多年冻土和季节冻土共同存在的高寒流域,除了下垫面具备冻土的独特特性外,还会出现特殊的冻土区地貌,比如热喀斯特(thermokarst)、穹形泥炭丘(palsas)、冰丘(pingo)、冰楔(ice wedge)等,致使河道径流的调节机制更为复杂。

(4) 多关注高寒山区含水层以及赋存的地下水对河道径流的调节作用,尤其是松散堆积物构成的孔隙含水层及其赋存的孔隙水,它们在河道径流形成过程中具有重要水文调节作用,其水力特征以及地下水补给—径流—排泄条件受冻土融冻作用变得更为复杂,冻土融冻循环影响下河道径流水文调节功能的内在机制犹未可知。

References

- An, Z.H., Sun, Z.Y., Hu, Y.L., et al., 2018. Export of Dissolved Organic Carbon in Streams Draining Permafrost-Dominated Areas: A Review. *Geological Science and Technology Information*, 37(1): 204–211 (in Chinese with English abstract).
- Bales, R.C., Molotch, N.P., Painter, T.H., et al., 2006. Mountain Hydrology of the Western United States. *Water Resources Research*, 42(8): W08432. <https://doi.org/10.1029/2005wr004387>
- Baraer, M., McKenzie, J.M., Mark, B.G., et al., 2009. Characterizing Contributions of Glacier Melt and Groundwater during the Dry Season in a Poorly Gauged Catchment of the Cordillera Blanca (Peru). *Advances in Geosciences*, 22: 41–49. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-41-2009>
- Blume, T., Zehe, E., Bronstert, A., 2007. Rainfall-Runoff Response, Event-Based Runoff Coefficients and Hydrograph Separation. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5): 843–862. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.843>
- Brown, L.E., Hannah, D.M., Milner, A.M., 2006. Thermal Variability and Stream Flow Permanency in an Alpine River System. *River Research and Applications*, 22(4): 493–501. <https://doi.org/10.1002/rra.915>
- Caballero, Y., Jomelli, V., Chevallier, P., et al., 2002. Hydrological Characteristics of Slope Deposits in High Tropical Mountains (Cordillera Real, Bolivia). *CATENA*, 47(2): 101–116. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00179-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00179-5)
- Carey, S.K., Quinton, W.L., 2004. Evaluating Snowmelt Run-

- off Generation in a Discontinuous Permafrost Catchment Using Stable Isotope, Hydrochemical and Hydrometric Data. *Hydrology Research*, 35(4/5): 309–324. <https://doi.org/10.2166/nh.2004.0023>
- Carey, S.K., Woo, M.K., 1999. Hydrology of Two Slopes in Subarctic Yukon, Canada. *Hydrological Processes*, 13(16): 2549–2562. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199911\)13:162549:aid-hyp938>3.0.co;2-h](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199911)13:162549:aid-hyp938>3.0.co;2-h)
- Carey, S.K., Woo, M.K., 2000. The Role of Soil Pipes as a Slope Runoff Mechanism, Subarctic Yukon, Canada. *Journal of Hydrology*, 233(1/2/3/4): 206–222. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00234-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00234-1)
- Carey, S.K., Woo, M.K., 2001. Slope Runoff Processes and Flow Generation in a Subarctic, Subalpine Catchment. *Journal of Hydrology*, 253(1–4): 110–129. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00478-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00478-4)
- Carey, S.K., Woo, M.K., 2013. Hydrogeomorphic Relations among Soil Pipes, Flow Pathways, and Soil Detachments within a Permafrost Hillslope. *Physical Geography*, 23(2): 95–114. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.23.2.95>
- Chang, Q.X., 2019. Water Sources of Stream Runoff in Alpine Region and Their Seasonal Variations—A Case Study of Hulugou Catchment in the Headwaters of the Heihe River(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Chang, Q.X., Ma, R., Sun, Z.Y., et al., 2018. Using Isotopic and Geochemical Tracers to Determine the Contribution of Glacier-Snow Meltwater to Streamflow in a Partly Glacierized Alpine-Gorge Catchment in Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18): 10037–10056. <https://doi.org/10.1029/2018JD028683>
- Chang, Q.X., Sun, Z.Y., Ma, R., et al., 2016. A Review of Groundwater Flow and Its Interaction with Surface Water in Permafrost Region. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 36(5): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Chen, R.S., Yang, Y., Han, C.T., et al., 2014. Field Experimental Research on Hydrological Function over Several Typical Underlying Surfaces in the Cold Regions of Western China. *Advances in Earth Science*, 29(4): 507–514 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, G.D., Jin, H.J., 2013. Groundwater in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau and its Changes. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, G.D., Zhao, L., Li, R., et al., 2019. Characteristic, Changes and Impacts of Permafrost on Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 64(27): 2783–2795 (in Chinese with English abstract).
- Clow, D. W., Sueker, J. K., 2000. Relations between Basin Characteristics and Stream Water Chemistry in Alpine/Subalpine Basins in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Water Resources Research*, 36(1): 49–61. <https://doi.org/10.1029/1999WR900294>
- Cochand, M., Christe, P., Ornstein, P., et al., 2019. Groundwater Storage in High Alpine Catchments and Its Contribution to Streamflow. *Water Resources Research*, 55(4): 2613–2630. <https://doi.org/10.1029/2018WR022989>
- Cui, Y. H., Song, Y., Su, X. L., 2017. Impacts of Climate Change in Qilian Mountain Area on Runoff in the Heihe River Basin. *Yellow River*, 39(5): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Cuo, L., Zhang, Y.X., Zhu, F.X., et al., 2014. Characteristics and Changes of Streamflow on the Tibetan Plateau: A Review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2: 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.004>
- Evans, S.G., Ge, S.M., Voss, C.I., et al., 2018. The Role of Frozen Soil in Groundwater Discharge Predictions for Warming Alpine Watersheds. *Water Resources Research*, 54(3): 1599–1615. <https://doi.org/10.1002/2017WR022098>
- Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A., et al., 2012. Projections of Future Water Resources and Their Uncertainty in a Glacierized Catchment in the Swiss Alps and the Subsequent Effects on Hydropower Production during the 21st Century. *Water Resources Research*, 48(2): W02521. <https://doi.org/10.1029/2011WR010733>
- Finger, D., Hugentobler, A., Huss, M., et al., 2013. Identification of Glacial Meltwater Runoff in a Karstic Environment and Its Implication for Present and Future Water Availability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8): 3261–3277. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3261-2013>
- Ge, S., Wu, Q.B., Lu, N., et al., 2008. Groundwater in the Tibet Plateau, Western China. *Geophysical Research Letters*, 35(18): L18403. <https://doi.org/10.1029/2008GL034809>
- Geyer, T., Birk, S., Liedl, R., et al., 2008. Quantification of Temporal Distribution of Recharge in Karst Systems from Spring Hydrographs. *Journal of Hydrology*, 348(3/4): 452–463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.015>
- Goldscheider, N., 2005. Fold Structure and Underground Drainage Pattern in the Alpine Karst System Hochifen-

- Gottesacker. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98(1): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00015-005-1143-z>
- Gremaud, V., Goldscheider, N., Savoy, L., et al., 2009. Geological Structure, Recharge Processes and Underground Drainage of a Glacierised Karst Aquifer System, Tsanfleuron–Sanetsch, Swiss Alps. *Hydrogeology Journal*, 17(8): 1833–1848. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0485-4>
- Haga, H., Matsumoto, Y., Matsutani, J., et al., 2005. Flow Paths, Rainfall Properties, and Antecedent Soil Moisture Controlling Lags to Peak Discharge in a Granitic Unchanneled Catchment. *Water Resources Research*, 41(12): W12410. <https://doi.org/10.1029/2005WR004236>
- Han, L., Menzel, L., 2022. Hydrological Variability in Southern Siberia and the Role of Permafrost Degradation. *Journal of Hydrology*, 604: 127203. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127203>
- He, Y.Q., 2014. Snow Hydrological Simulation in Alpine Areas Using Remote Sensing and GIS Technologies (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Hood, J.L., Hayashi, M., 2015. Characterization of Snowmelt Flux and Groundwater Storage in an Alpine Headwater Basin. *Journal of Hydrology*, 521: 482–497. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.041>
- Houston, J., 2002. Groundwater Recharge through an Alluvial Fan in the Atacama Desert, Northern Chile: Mechanisms, Magnitudes and Causes. *Hydrological Processes*, 16(15): 3019–3035. <https://doi.org/10.1002/hyp.1086>
- Huang, L., Zheng, C.M., Liu, J., et al., 2012. Application of Distributed Temperature Sensing to Study Groundwater–Surface Water Interactions in the Heihe River Basin. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Mao, W.Q., Wang, X.Y., et al., 2020. Temporal and Spatial Distribution of Precipitation in the Qilian Mountain and Its Surrounding Areas in Recent 39 Years. *Journal of Arid Meteorology*, 38(4): 527–534 (in Chinese with English abstract).
- Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M., et al., 2020. Importance and Vulnerability of the World's Water Towers. *Nature*, 577(7790): 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- Jansson, P., Hock, R., Schneider, T., 2003. The Concept of Glacier Storage: A Review. *Journal of Hydrology*, 282(1/2/3/4): 116–129. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0)
- Kane, D.L., Hinzman, L.D., Benson, C.S., et al., 1989. Hydrology of Imnavait Creek, an Arctic Watershed. *Ecography*, 12(3): 262–269. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1989.tb00845.x>
- Käser, D., Hunkeler, D., 2016. Contribution of Alluvial Groundwater to the Outflow of Mountainous Catchments. *Water Resources Research*, 52(2): 680–697. <https://doi.org/10.1002/2014WR016730>
- Katsuyama, M., Tani, M., Nishimoto, S., 2010. Connection between Streamwater Mean Residence Time and Bedrock Groundwater Recharge/Discharge Dynamics in Weathered Granite Catchments. *Hydrological Processes*, 24(16): 2287–2299. <https://doi.org/10.1002/hyp.7741>
- King, A.C., Raiber, M., Cox, M.E., et al., 2017. Comparison of Groundwater Recharge Estimation Techniques in an Alluvial Aquifer System with an Intermittent/Ephemeral Stream (Queensland, Australia). *Hydrogeology Journal*, 25(6): 1759–1777. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1565-5>
- Lan, Y.C., Wu, Y.Q., Kang, E.S., et al., 2001. Response of Runoff from the Northern Slope of the Qilian Mountain to Global Climatic Changes. *Journal of Lanzhou University*, 37(4): 125–132 (in Chinese with English abstract).
- Langston, G., Hayashi, M., Roy, J.W., 2013. Quantifying Groundwater–Surface Water Interactions in a Proglacial Moraine Using Heat and Solute Tracers. *Water Resources Research*, 49(9): 5411–5426. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20372>
- Larkin, R.G., Sharp Jr, M., 1992. On the Relationship between River–Basin Geomorphology, Aquifer Hydraulics, and Ground–Water Flow Direction in Alluvial Aquifers. *Geological Society of America Bulletin*, 104(12): 1608–1620. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1608:otrbrb>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1608:otrbrb>2.3.co;2)
- Lauber, U., Kotyla, P., Morche, D., et al., 2014. Hydrogeology of an Alpine Rockfall Aquifer System and Its Role in Flood Attenuation and Maintaining Baseflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11): 4437–4452. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4437-2014>
- Li, B.F., Chen, Y.N., Chen, Z.S., et al., 2012. The Effect of Climate Change during Snowmelt Period on Streamflow in the Mountainous Areas of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 67(11): 1461–1470 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Wang, J.L., Jin, M.G., et al., 2021. Hydrodynamic Characteristics of Jinan Karst Spring System Identified by Hydrologic Time–Series Data. *Earth Science*, 46(7):

- 2583—2593 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. J., Williams, M. W., Caine, N., 2004. Source Waters and Flow Paths in an Alpine Catchment, Colorado Front Range, United States. *Water Resources Research*, 40(9): W09401. <https://doi.org/10.1029/2004WR003076>
- Liu, J., Liu, T., Huang, Y., et al., 2017. Simulation and Analysis of the Hydrological Processes in the Yarkant River Basin Based on Remote Sensing Data. *Progress in Geography*, 36(6): 753—761 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. T., Han, X. L., Liu, J. L., et al., 2019. Understanding of Critical Zone Structures and Hydrological Connectivity: A Review. *Advances in Water Science*, 30(1): 112—122 (in Chinese with English abstract).
- Lu, N., Godt, J. W., 2013. Hillslope Hydrology and Stability. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139108164>
- Lyon, S. W., Destouni, G., 2010. Changes in Catchment-Scale Recession Flow Properties in Response to Permafrost Thawing in the Yukon River Basin. *International Journal of Climatology*, 30(14): 2138—2145. <https://doi.org/10.1002/joc.1993>
- Ma, R., Sun, Z. Y., Chang, Q. X., et al., 2021. Control of the Interactions between Stream and Groundwater by Permafrost and Seasonal Frost in an Alpine Catchment, Northeastern Tibet Plateau, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(5): e2020JD033689. <https://doi.org/10.1029/2020JD033689>
- Ma, R., Sun, Z. Y., Hu, Y. L., et al., 2017. Hydrological Connectivity from Glaciers to Rivers in the Qinghai-Tibet Plateau: Roles of Suprapermafrost and Subpermafrost Groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9): 4803—4823. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4803-2017>
- Maloszewski, P., Stichler, W., Zuber, A., et al., 2002. Identifying the Flow Systems in a Karstic-Fissured-Porous Aquifer, the Schneealpe, Austria, by Modelling of Environmental ^{18}O and ^3H Isotopes. *Journal of Hydrology*, 256(1/2): 48—59. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00526-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00526-1)
- McClymont, A. F., Hayashi, M., Bentley, L. R., et al., 2010. Groundwater Flow and Storage within an Alpine Meadow-Talus Complex. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6): 859—872. <https://doi.org/10.5194/hess-14-859-2010>
- McClymont, A. F., Hayashi, M., Bentley, L. R., et al., 2012. Locating and Characterising Groundwater Storage Areas within an Alpine Watershed Using Time-Lapse Gravity, GPR and Seismic Refraction Methods. *Hydrological Processes*, 26(12): 1792—1804. <https://doi.org/10.1002/hyp.9316>
- Meybeck, M., Green, P., Vörösmarty, C., 2001. A New Typology for Mountains and other Relief Classes. *Mountain Research and Development*, 21(1): 34—45. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0034:antfma\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0034:antfma]2.0.co;2)
- Millares, A., Polo, M. J., Losada, M. A., 2009. The Hydrological Response of Baseflow in Fractured Mountain Areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1261—1271. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1261-2009>
- Mueller, M. H., Weingartner, R., Alewell, C., 2013. Importance of Vegetation, Topography and Flow Paths for Water Transit Times of Base Flow in Alpine Headwater Catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1661—1679. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1661-2013>
- Muir, D. L., Hayashi, M., McClymont, A. F., 2011. Hydrological Storage and Transmission Characteristics of an Alpine Talus. *Hydrological Processes*, 25(19): 2954—2966. <https://doi.org/10.1002/hyp.8060>
- Otto, J. C., Schrott, L., Jaboyedoff, M., et al., 2009. Quantifying Sediment Storage in a High Alpine Valley (Turtmanntal, Switzerland). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(13): 1726—1742. <https://doi.org/10.1002/esp.1856>
- Pan, Z., Sun, Z. Y., Ma, R., et al., 2018. Isotopic Investigation of Rainfall-Runoff Generation in an Alpine Catchment in Headwater Regions of Heihe River, Northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science*, 43(11): 4226—4236 (in Chinese with English abstract).
- Paznekas, A., Hayashi, M., 2016. Groundwater Contribution to Winter Streamflow in the Canadian Rockies. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 41(4): 484—499. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1060870>
- Qu, C., 2017. Yao Tandong: Love the Glacier and Guard the Pure Land. *Invention & Innovation*, (3): 20—21 (in Chinese with English abstract).
- Quinton, W. L., Gray, D. M., Marsh, P., 2000. Subsurface Drainage from Hummock-Covered Hillslopes in the Arctic Tundra. *Journal of Hydrology*, 237(1/2): 113—125. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00304-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00304-8)
- Quinton, W. L., Marsh, P., 1998. The Influence of Mineral Earth Hummocks on Subsurface Drainage in the Continuous Permafrost Zone. *Permafrost and Periglacial Processes*

- es, 9(3): 213–228. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199807/09\)9:3213:AID-PPP285>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199807/09)9:3213:AID-PPP285>3.0.CO;2-E)
- Quinton, W.L., Shirazi, T., Carey, S.K., et al., 2005. Soil Water Storage and Active-Layer Development in a Sub-Alpine Tundra Hillslope, Southern Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(4): 369–382. <https://doi.org/10.1002/ppp.543>
- Rhodes, K.A., Proffitt, T., Rowley, T., et al., 2017. The Importance of Bank Storage in Supplying Baseflow to Rivers Flowing through Compartmentalized, Alluvial Aquifers. *Water Resources Research*, 53(12): 10539–10557. <https://doi.org/10.1002/2017WR021619>
- Sass, O., 2006. Determination of the Internal Structure of Alpine Talus Deposits Using Different Geophysical Methods (Lechtaler Alps, Austria). *Geomorphology*, 80(1/2): 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.09.006>
- Sass, O., Wollny, K., 2001. Investigations Regarding Alpine Talus Slopes Using Ground-Penetrating Radar (GPR) in the Bavarian Alps, Germany. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(10): 1071–1086. <https://doi.org/10.1002/esp.254>
- Schrott, L., Hufschmidt, G., Hankammer, M., et al., 2003. Spatial Distribution of Sediment Storage Types and Quantification of Valley Fill Deposits in an Alpine Basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology*, 55(1/2/3/4): 45–63. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00131-4)
- Shen, S., Song, C.Q., Cheng, C.X., et al., 2020. The Coupling Impact of Climate Change on Streamflow Complexity in the Headwater Area of the Northeastern Tibetan Plateau across Multiple Timescales. *Journal of Hydrology*, 588: 124996. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124996>
- Somers, L.D., McKenzie, J.M., 2020. A Review of Groundwater in High Mountain Environments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(6): e1475. <https://doi.org/10.1002/wat2.1475>
- Song, C.L., Wang, G.X., Sun, X.Y., et al., 2021. River Runoff Components Change Variably and Respond Differently to Climate Change in the Eurasian Arctic and Qinghai-Tibet Plateau Permafrost Regions. *Journal of Hydrology*, 601: 126653. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126653>
- Song, Q., 2013. Response of Runoff to Environment Change in the West of Tianshan Mountain (Dissertation). Xinjiang Agricultural University, Urumqi (in Chinese with English abstract).
- Su, T.X., 2021. Research on the Impact of Vegetation Dynamics on Streamflow and Ecology in the Upper Heihe River Basin (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Tague, C., Grant, G., Farrell, M., et al., 2008. Deep Groundwater Mediates Streamflow Response to Climate Warming in the Oregon Cascades. *Climatic Change*, 86(1–2): 189–210. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9294-8>
- Weettil, B. K., Kamp, U., 2021. Glacial Lakes in the Andes under a Changing Climate: A Review. *Journal of Earth Science*, 32(6): 1575–1593. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1118-z>
- Wang, J.Y., Wang, Y.H., Li, X., et al., 2006. Water Situation and Runoff Production in the Pailugou Basin of Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(1): 62–69 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.J., Zhou, H., Qi, L.X., et al., 2020. Method for Characterizing Structure and Hydrological Response in Karst Water Systems: A Case Study in Y-M System in Three Gorges Area. *Earth Science*, 45(12): 4512–4523 (in Chinese with English abstract).
- Wetzel, K.F., 2003. Runoff Production Processes in Small Alpine Catchments within the Unconsolidated Pleistocene Sediments of the Lainbach Area (Upper Bavaria). *Hydrological Processes*, 17(12): 2463–2483. <https://doi.org/10.1002/hyp.1254>
- Woo, M.K., 2012. Permafrost Hydrology. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg. 519. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23462-0>
- Woo, M.K., Kane, D.L., Carey, S.K., et al., 2008. Progress in Permafrost Hydrology in the New Millennium. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2): 237–254. <https://doi.org/10.1002/ppp.613>
- Woo, M.K., Steer, P., 1982. Occurrence of Surface Flow on Arctic Slopes, Southwestern Cornwallis Island. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19(12): 2368–2377. <https://doi.org/10.1139/e82-206>
- Xu, J.J., Qu, X., Zeng, Z.Y., et al., 2021. River Runoff Simulation and Analysis for Typical Basins Based on High-Resolution Brightness Temperature Observations. *Advances in Water Science*, 32(6): 877–889 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.D., Lu, C.G., Shi, X.H., et al., 2008. World Water Tower: an Atmospheric Perspective. *Geophysical Research Letters*, 35(20): L20815. <https://doi.org/10.1029/2008GL035867>
- Yang, D.Q., Kane, D.L., Hinzman, L.D., et al., 2002. Siberian Lena River Hydrologic Regime and Recent Change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D23):

- ACL14-1. <https://doi.org/10.1029/2002JD002542>
- Yao, Y. Y., Zheng, C. M., Andrews, C. B., et al., 2021. Role of Groundwater in Sustaining Northern Himalayan Rivers. *Geophysical Research Letters*, 48(10): e2020GL092354. <https://doi.org/10.1029/2020GL092354>
- Zhang, J. S., Xu, M., Zhang, Q., et al., 2022. Estimating Groundwater Runoff Modulus Method Based on Remote Sensing in Mountainous Areas of Southeast Tibet. *Earth Science*, 47(2): 642–651 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Wang, L. X., Yu, X. X., et al., 2001. Impacts of Forest Vegetation on Runoff Generation Mechanisms: A Review. *Journal of Natural Resources*, 16(1): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Шепелёв, В. В., 2014. Supramafrost Waters in the Cryolithozone. China Water & Power Press, Beijing (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- Шепелёв, В. В., 2014. 寒区冻结层上水. 北京: 中国水利水电出版社, 128.
- 安志宏, 孙自永, 胡雅璐, 等, 2018. 多年冻土区河流溶解性有机碳输出的研究进展. *地质科技情报*, 37(1): 204–211.
- 常启昕, 2019. 高寒山区河道径流水分来源及其季节变化规律: 以黑河上游葫芦沟流域为例 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 常启昕, 孙自永, 马瑞, 等, 2016. 冻土区地下水流过程及其与地表水转化关系研究进展. *水利水电科技进展*, 36(5): 87–94.
- 陈仁升, 阳勇, 韩春坛, 等, 2014. 高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究. *地球科学进展*, 29(4): 507–514.
- 程国栋, 金会军, 2013. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化. *水文地质工程地质*, 40(1): 1–11.
- 程国栋, 赵林, 李韧, 等, 2019. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. *科学通报*, 64(27): 2783–2795.
- 崔延华, 宋悦, 粟晓玲, 2017. 祁连山区气候变化对黑河出山径流的影响. *人民黄河*, 39(5): 15–20.
- 何咏琪, 2014. 基于遥感及 GIS 技术的寒区积雪水文模拟研究 (硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 黄丽, 郑春苗, 刘杰, 等, 2012. 分布式光纤测温技术在黑河中游地表水与地下水转换研究中的应用. *水文地质工程地质*, 39(2): 1–6.
- 黄颖, 毛文茜, 王潇雅, 等, 2020. 近 39a 祁连山及其周边地区降水量时空分布特征. *干旱气象*, 38(4): 527–534.
- 蓝永超, 仵彦卿, 康尔泗, 等, 2001. 祁连山北麓出山径流对气候变化的响应. *兰州大学学报*, 37(4): 125–132.
- 李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等, 2012. 西北干旱区山区融雪期气候变化对径流量的影响. *地理学报*, 67(11): 1461–1470.
- 李严, 王家乐, 靳孟贵, 等, 2021. 运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征. *地球科学*, 46(7): 2583–2593.
- 刘蛟, 刘铁, 黄粤, 等, 2017. 基于遥感数据的叶尔羌河流域水文过程模拟与分析. *地理科学进展*, 36(6): 753–761.
- 刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等, 2019. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展. *水科学进展*, 30(1): 112–122.
- 潘钊, 孙自永, 马瑞, 等, 2018. 黑河上游高寒山区降雨—径流形成过程的同位素示踪. *地球科学*, 43(11): 4226–4236.
- 屈辰, 2017. 姚檀栋: 情系冰川守净土. *发明与创新·大科技*, (3): 20–21.
- 宋倩, 2013. 天山西部山区径流过程对变化环境的响应研究 (硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学.
- 苏同宣, 2021. 黑河上游植被动态对径流变化和生态的影响研究 (硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 王金叶, 王彦辉, 李新, 等, 2006. 祁连山排露沟流域水分状况与径流形成. *冰川冻土*, 28(1): 62–69.
- 王泽君, 周宏, 齐凌轩, 等, 2020. 岩溶水系统结构和水文响应机制的定量识别方法: 以三峡鱼迷岩溶水系统为例. *地球科学*, 45(12): 4512–4523.
- 许继军, 屈星, 曾子悦, 等, 2021. 基于高精度遥感亮温的典型流域河道径流模拟分析. *水科学进展*, 32(6): 877–889.
- 张家森, 许模, 张强, 等, 2022. 基于遥感技术估算藏东南山区地下水径流模数方法. *地球科学*, 47(2): 642–651.
- 张志强, 王礼先, 余新晓, 等, 2001. 森林植被影响径流形成机制研究进展. *自然资源学报*, 16(1): 79–84.