

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0096

LI Jing, LIU Shiyin, ZHANG Shiqiang, et al. Review on snowmelt runoff simulation in mountain regions, Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):1029–1040. [李晶, 刘时银, 张世强, 等. 中国西北山区融雪径流模拟研究回顾与展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):1029–1040.]

中国西北山区融雪径流模拟研究回顾与展望

李 晶^{1,2}, 刘时银³, 张世强⁴, 陈仁升⁵, 赵求东⁶, 郭万钦¹,
上官冬辉¹, 王荣军¹, 钟歆玥⁷, 尹振良⁶, 李弘毅⁷

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境与资源研究院 玉龙雪山冰冻圈与可持续发展国家科学野外观测研究站, 甘肃 兰州 730000; 3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 4. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 5. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 黑河上游生态-水文试验研究站, 甘肃 兰州 730000; 6. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 7. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 甘肃省遥感重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 融雪径流是西北地区宝贵的水资源。过去几十年, 西北山区融雪径流模拟研究广泛开展, 在积雪消融过程观测和模拟、驱动数据空间分布与融雪径流模型应用、分布式融雪径流模型改进和发展方面都开展了比较深入的研究, 取得了较好的成果。插值算法、遥感反演和数据同化技术的发展, 为分布式融雪径流模型在西北山区的广泛应用提供了数据支撑。气候变暖和社会经济的发展将进一步加剧西北干旱区水资源供需矛盾, 对融雪径流模拟的精度和时空分辨率提出了更高的要求。综合西北山区融雪径流模拟研究的已有进展和面临挑战, 提出未来西北山区融雪径流模拟研究需要在积雪积累和消融过程的机理探究、积雪时空分布变化监测和高精度积雪分布数据获取、气候变化对流域融雪径流影响量化方面开展深入研究。

关键词: 融雪径流; 空间分布; 水文模型; 气候变化; 消融模拟

中图分类号: P333; P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-1029-12

0 引言

融雪径流是西北干旱区水资源的重要组成部分。西北干旱区的主要河流都受到山区积雪融水的补给。积雪丰富的阿尔泰山地区融雪径流补给率超过40%^[1-2]。天山呼图壁河融雪径流补给率为27.7%^[3]。祁连山的黑河和疏勒河融雪径流补给率分别为20%和25%^[4]。受气候变化影响, 1960—2014年西北地区的融雪径流尤其是新疆天山和阿尔泰山地区以增加为主^[5]。二十世纪八九十年代融雪径流平均增幅达10%, 积雪较多的山区增加幅度可达20%^[6]。与此同时, 积雪提前融化, 融雪期变短, 融雪径流年内分配发生显著变化。20世纪80年

代中期以来天山南坡融雪时间提前20日左右, 融雪径流也明显提前^[7]。阿尔泰山额尔齐斯河4—5月径流比例增加, 6—7月径流比例减少^[2]。阿尔泰山克兰河最大径流月由6月提前到5月, 最大月径流增加了15%^[8]。祁连山北坡融雪径流提前10 d左右^[9]。

融雪径流模型是评估融雪径流变化、提升水资源管理效率的重要手段。根据融雪计算方法的不同, 可以将融雪径流模型分为度日模型和能量平衡模型两大类。度日模型根据气温和融雪率的经验关系来构建, 具有简单实用、数据需求少、易于推广的特点。在西北山区应用较多的典型的SRM (Snowmelt Runoff Model) 模型^[10]、SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[11]都是典型的度日模

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-06-13

基金项目: 国家重点研发计划项目“干旱区融雪洪水灾害监测预报和防控关键技术与示范”课题3“温升背景下雨雪冰混合洪水形成过程模拟技术研发”项目(2019YFC1510503); 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室资助项目(SK LCS-OP-2021-10; SK LCS-OP-2021-01)资助

作者简介: 李晶, 助理研究员, 主要从事山区冰雪水文观测与模拟研究. E-mail: jingli@lzb.ac.cn

型。度日模型的一些参数如度日因子具有明显的区域差异^[12-13],在不同区域应用时需要率定校准。参数确定是这类模型应用需要解决的关键问题。这类模型因为物理意义不够明确的限制,一般认为模型适合日及以上时间尺度的径流模拟。随着时空分辨率的提升,模型的模拟精度会降低。另一类是基于物质能量平衡的物理学模型,这类模型注重融雪的物理过程,从物质和能量平衡的角度详细描述积雪积累和消融过程。模型具有参数物理意义明确、模拟方法容易区域扩展、模拟精度高的特点。限制条件是需要详细的观测数据且模型参数较多,在数据稀缺地区难以推广应用。在西北山区流域应用较多的代表性模型有如 SNTHERM (Snow Thermal Model)^[14]、VIC (Variable Infiltration Capac-

ity)^[15]、GBEHM (Geomorphology-based Ecohydrological Model)^[16]等。

全球变暖背景下,气温的普遍升高使得雪线上升,冰雪消融速度加快。同时,人口增长和城市化进程导致水资源需求量不断增加。气候变化和人类活动双重影响下干旱区水资源供需矛盾将更加尖锐,需要对融雪径流过程及变化有更深入的认识和理解。过去几十年,应用相关模型并结合过程观测,西北山区融雪径流过程观测和模拟研究广泛开展(图1),在积雪消融过程观测和模拟、驱动数据获取与融雪径流模型应用、分布式融雪径流模型改进和发展方面都取得了较好的进展。本文将重点回顾这些进展,并结合社会经济发展需求展望需深入研究的方向。

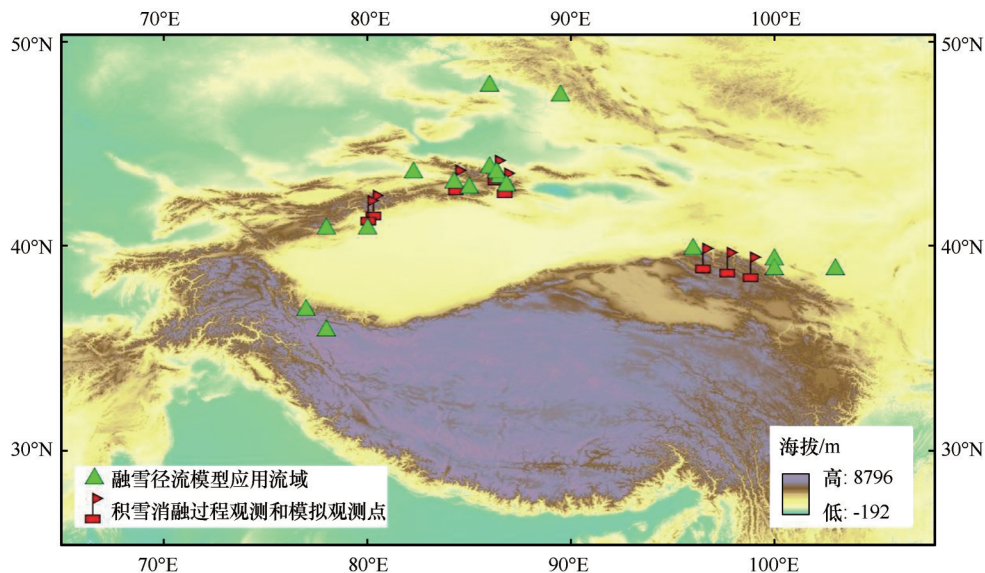


图1 近几十年中国西北山区融雪径流过程观测和模拟研究站点分布

Fig. 1 The distribution of locations for snowmelt process observation and simulation during recent decades in Northwest mountainous area of China

1 主要研究进展

1.1 积雪能量与物质平衡过程

1.1.1 积雪能量平衡观测

积雪能量平衡与物质平衡过程是紧密联系的。准确的积雪消融量可以通过积雪能量平衡观测得到。自动气象站技术的发展,积雪能量平衡观测研究在一些山区流域开展起来了。表1是西北山区不同区域积雪能量平衡组成的观测结果。结果表明,净辐射是积雪主要的能量来源,占比都在50%以上,但存在显著的时空差异,占比最大的可达84.9%。能量消耗方面,消融是主要的耗热项。占

比在62%~95%之间,也存在明显的时空差异。

1.1.2 积雪升华/蒸发观测与计算

积雪升华是积雪物质平衡过程的重要组成部分。雪升华/蒸发量观测方法主要有圆盘或蒸渗仪法、潜热通量法和涡动相关法等^[27-30]。早期研究主要在有较好观测条件的冰川上进行。谢维荣等^[31]、张寅生等^[32]、Calancar等^[33]以及Ohan^[34]分别采用蒸发器直接测量、热量平衡和梯度观测方法,获得了天山乌鲁木齐河源号冰川表面升华/蒸发量,并以此为基础计算了冰川区水量平衡。蒋熹等^[17]采用能量平衡法与蒸渗仪得到的祁连山七一冰川消融期

表1 西北山区积雪表面能量平衡观测结果
Table 1 Snow surface energy balance in the Northwest mountain region of China

冰川名称及位置	海拔/m	观测时段	主要能量来源项/%	主要能量消耗项/%	文献来源
天山南坡托木尔峰西琼台兰冰川	4 000	1978年7月	净辐射/59%	消融/82%	[17]
天山中段积雪与雪崩站	1 776	1987年3月26日—4月13日	净辐射/75.3%	消融/95.1%	[18]
天山北坡乌鲁木齐河源1号冰川	3 910	1986年—1990年6、7、8月	净辐射/84.9%	消融/94.2%	[19]
天山南坡科其喀尔冰川	4 200	2005年6—9月	净辐射/81.4%	消融/69.5%	[20]
祁连山中段七一冰川	4 473	2006年6月9日—9月28日	净辐射/82.4%	消融/87.2%	[21]
祁连山中段七一冰川	4 473	2007年7月1日—10月10日	净辐射/81%	消融/71.5%	[22]
天山北坡军塘湖流域	1 500	2009年3月2日—18日	净辐射/78%	—	[23]
祁连山西段老虎沟12号冰川	5 080	2006年6月21日—7月31日	净辐射/82.1%	消融/70.8%	[24]
祁连山西段老虎沟12号冰川	4 550	2012年6月1日—9月30日	净辐射/84%	消融/62%	[25]
祁连山中段八一冰川	4 274	2018年8月1日—2019年7月31日	净辐射/81%	消融/70%	[26]

升华/蒸发量进行比较,结果发现夜间计算值与测量值相差较小,而白天结果相差较大。孙维君等^[19]通过能量平衡方程计算得到的祁连山老虎沟12号冰川积累区消融期冰川表面日均升华/蒸发量值为0.8 mm。而同样采用能量平衡法,方潇雨等^[35]计算的十一冰川消融期日均蒸发/升华量仅为0.1 mm。严格的积雪升华/蒸发观测研究开始于1990年乌鲁木齐河源高山区的观测^[36],结果显示积雪月升华/蒸发量可占月降水量的55%~100%。李弘毅等^[37]采用梯度法计算了黑河上游祁连山冰沟流域积累期积雪升华/蒸发量,该时段雪升华/蒸发量达到降水量的68.8%。周宝佳等^[38]利用雪面蒸发器测量了古尔班通古特沙漠南缘和天山北坡阜康绿洲地区积累期雪面升华/蒸发量,沙漠区日均升华/蒸发量为0.015 mm·d⁻¹,绿洲区可达0.02 mm·d⁻¹。Guo等^[26]采用空气动力学方法计算了祁连山八一冰川雪面升华/蒸发量,消融期升华/蒸发量为0.3 mm·d⁻¹,与祁连山老虎沟12号冰川0.8 mm和祁连山十一冰川0.1 mm的升华/蒸发量差别明显。可见,尽管都在冰川消融期,积雪升华/蒸发量也存在显著的区域差异。

积雪的升华/蒸发伴随着潜热的消耗。从能量质量相互联系的角度,可以通过潜热通量的计算获得积雪升华/蒸发量。涡动相关方法是目前认为精度最好的潜热通量计算方法。但该方法在积雪区存在较多挑战。祁连山大冬树垭口的观测试验表明,受下垫面状况和气象条件的影响数据连续性较差^[39]。西北山区多使用空气动力学方法计算积雪潜热通量^[18-26]。但是,空气动力学方法需要比较好的气象观测数据,这对于有较多气象观测台站的区域是不困难的,但西北高海拔山区气象台站稀缺,

气象观测数据并不容易获得。如何获取高精度的山区气象分布数据是目前的难点。

1.1.3 积雪能量平衡与消融模拟

山区观测研究表明,能量平衡方法具有较好的适用性,可以比较精确地模拟积雪消融过程^[18,23,40]。为了适应山区积雪气象观测数据比较稀缺的限制,一些参数化能量平衡模型被开发出来。比较知名的UEB模型在西北山区积雪消融模拟研究取得了较好的效果^[41-43]。康尔泗等^[19]发展了一种参数化能量平衡消融模型并在天山乌鲁木齐河源一号冰川流域进行了应用。该模型提出了快速计算辐射和湍流通量的参数化方法。模型所需参数少,计算简单,但目前尚未进行区域推广,其他区域的适用性有待进一步研究。此外,蒋熹等^[44]在祁连山七一冰川发展了利用积雪深度和积雪日数计算积雪反照率的参数化方法,比单一的积雪日数参数化方法提高了计算精度,并进一步发展了冰川流域尺度的能量物质平衡模拟模型。

积雪反照率遥感反演相比参数化计算具有覆盖范围广的优势,具有很好的应用前景,是目前比较前沿和热点的研究。遥感反照率产品的精度验证和算法改进是目前研究的重点。MODIS反照率产品是目前最受关注的的数据,一些学者开展了该数据的精度评估,并进一步分析冰雪反照率的时空变化特征^[45-47]。刘俊峰等^[48]提出了用数码相机反演冰雪反照率的新方法,该方法的反演精度有待进一步的验证。最近,利用Landsat ETM数据在冰川流域上反演冰雪反照率算法取得了较好进展,反演精度相比MODIS产品有了明显提升^[49]。

1.1.4 雪层属性及融水下渗的观测和模拟

雪层属性及融水下渗的观测和模拟研究是非

常重要也极具挑战的工作。国外对雪层属性变化和融水下渗过程的观测和模拟均有比较深入的研究^[50]。西北山区的相关研究在21世纪初才逐渐开始,刘志辉团队在天山北坡军塘湖小流域开展了比较系统的观测研究,在影响因素和机理方面有了一些新的认识^[51]。魏召才^[52]观测到积雪在融雪期不断密实化和熟化,积雪颗粒粒径和冰晶之间的空隙不断增大,雪层最大持水能力不断减小。王元^[53]在军塘湖小流域的观测表明,雪层温度、雪层含水量和雪密度在垂直方向和水平方向上变化明显。张波等^[54]的观测研究表明,天山山区积雪消融除受能量条件控制外,冻土也是影响积雪产流效果和产流量的关键因素。雪粒径和雪深与积雪出流时间关系密切,相关系数分别为-0.88和0.98。陆恒等^[55]分析了天山森林下垫面雪层含水率垂直廓线的变化特征,结果表明雪层含水率受温度影响最显著,开阔地和林冠下微气象条件的不同造成雪层含水率差异明显。

从模拟角度出发,刘誉等^[56]应用雪热力模型(Snow Thermal Model, SNTHERM)开展了黑河冰沟流域的积雪过程与积雪特性参数模拟研究。结果表明,SNTHERM模型能比较准确模拟雪深和雪表温度变化。雪深观测和模拟的相关系数为0.865,均方根误差为1.69 cm。雪表温度模拟值与观测值的平均误差为0.67℃。辐射通量和初始雪特性参数为敏感参数。杨与广等^[57]在积雪属性变化研究的基础上重点开展了融雪产流研究,将融雪产流过程概化为融雪、积雪持水、积雪层中融雪水再冻结以及季节性冻土存在条件下融雪水下渗四个过程,结合能量、水量平衡原理构建融雪产流模型,应用表明模型较好地模拟了融雪期雪水当量变化过程以及融雪水的出流过程。

1.2 驱动数据获取与分布式融雪径流模型流域应用

空间分布的驱动数据是分布式融雪径流模型能否广泛应用的前提条件。西北山区观测站点稀少,覆盖范围有限,而山区气象要素空间异质性显著,有限的站点数据难以满足分布式模型的需求。近二十年来,随着空间插值、遥感反演和数据同化方法的出现和发展,空间分布数据的获取能力有了明显提升,分布式融雪径流模型在西北山区流域得到了比较广泛的应用(表2)。

1.2.1 空间插值

空间插值是制作气象要素空间分布数据的常用方法。根据气温垂直递减率进行气温空间插值是获取西北山区气温空间分布数据的主要方式,在融雪径流模拟研究中广泛应用^[4,59-61,67-69,80-84]。山区观测表明^[85],气温垂直递减率与自由大气垂直递减率差异明显,且时空异质性显著。因此准确的数值需要根据研究流域的实测数据计算得到。在地面观测站点稀疏的叶尔羌河源区,Li等^[74]引入探空资料来计算气温垂直递减率,相比用自由大气气温垂直递减率的模拟结果,前一种参数值的气温分布能更好地模拟融雪径流过程,也丰富了模型关键参数获取方法。Luo等^[64]在观测数据稀少的玛纳斯河模拟冰雪径流时,利用观测的径流量率定流域内的气温垂直递减率,也取得了较好的效果。

山区降水空间分布很复杂,高精度的降水分布数据非常难以得到。穆振侠^[86]的研究表明,天山山区的降水具有明显的垂直分布特征。科其喀尔冰川流域的观测表明^[85],3 000~3 700 m海拔区间降水随海拔升高而减少,3 700~4 200 m海拔区间降水随海拔上升而增加。在观测站点稀疏的西北山区流域,依据降水海拔梯度进行降水空间分布是获取模型降水驱动数据最常用的方法^[4,76-80]。山区降水的海拔梯度是进行空间插值的关键参数,在模型中可将它作为一个可调参数调整优化。Luo等^[64]在玛纳斯河流域模拟时用径流数据来率定降水的海拔梯度,为降水数据缺乏流域的径流模拟研究提供了借鉴。

为了获取较大流域的降水空间分布数据,一些研究使用了考虑较多影响因素的空间插值方法。比较常用是反距离权重加降水海拔梯度方法。该方法被用来制作了天山南坡阿克苏河流域^[76]、天山北坡呼图壁河流域^[3]和天山南坡木扎提河流域^[87]的降水分布数据,扩展了融雪径流模型的应用区域。

大尺度的插值降水数据产品在站点稀少、资料稀缺流域已经得到应用。天山开都河流域融雪径流模拟研究使用了APHRODITE格网降水数据^[71]。该数据由日本地球环境研究所和日本气象厅研究所联合实施的Asian Precipitation Highly Resolved Observational Data Integration Towards the Evaluation of Water Resources计划根据亚洲降水观测数据创建,是一套逐日的、空间分辨率为0.25°×0.25°的网格化降水数据集。魏光辉等^[79]在塔里木河源区

表2 分布式融雪径流模型在西北山区的应用概况及关键驱动数据来源

Table 2 A summary of the applying of distributed snowmelt runoff models in Northwest mountainous region of China and the critical forcing data

流域	所用模型	核心算法	驱动数据来源或空间分布方法	文献来源
阿尔泰山额尔齐斯河源区	GBEHM	能量平衡	CMFD同化格网数据加降尺度	[58]
天山巩乃斯河	SRM	度日因子	站点插值	[59]
天山玛纳斯河	SRM	度日因子	站点插值	[60]
天山玛纳斯河	SRM	度日因子	站点插值	[61]
天山玛纳斯河	SRM	度日因子	气象预报数值产品插值	[62]
天山玛纳斯河	SWAT	度日因子	站点插值	[63]
天山玛纳斯河	SWAT	度日因子	站点插值,参数率定	[64]
天山玛纳斯河	UEB	能量平衡	CMFD降尺度	[43]
天山北坡呼图壁河	DHSVM	能量平衡	WRF模拟	[65]
天山军塘湖	SWAT	能量平衡方法	站点插值加统计模型计算	[66]
天山北坡呼图壁河流域	VIC	能量平衡	站点插值,气候模式数据降尺度	[3]
天山乌鲁木齐河源区	SRM	度日因子	站点插值	[67]
天山乌鲁木齐河	SWAT	度日因子	站点插值	[68]
天山乌鲁木齐河源区	SRM	度日因子加总辐射和反照率	站点插值	[69]
天山开都河	SRM	度日因子	站点气象数据参数化处理	[70]
天山开都河	SRM	有效活动积温改进度日计算	插值降水加站点插值	[71]
天山开都河	SWAT	度日因子	气候模式数据降尺度加空间插值	[72]
天山开都河	SRM	度日因子	格网数据重新插值	[73]
昆仑山提孜那普河	SRM	度日因子加反照率	站点插值和GPCP格网数据	[74]
天山喀什河流域	VIC	能量平衡	CFSR再分析数据产品	[75]
天山南坡阿克苏河源区	VIC	能量平衡	站点插值	[76-77]
天山南坡托什干河流域	SRM	度日因子	站点插值加大尺度格网分布	[78]
天山南坡塔河源区	SRM	度日因子	插值格网数据	[79]
祁连山疏勒河	SRM	度日因子	站点插值	[80]
祁连山疏勒河	SRM	度日因子	站点插值	[4]
祁连山黑河上游	SRM	度日因子	站点插值	[81]
祁连山黑河上游	SRM	度日因子	站点插值	[82]
祁连山黑河上游	SWAT	度日因子	站点插值	[83]
祁连山黑河流域	SRM	度日因子	站点插值	[4]
祁连山石羊河	SWAT	度日因子	站点插值加统计公式	[84]

的叶尔羌河和玉龙喀什河径流模拟中使用了中国地面降水日值 $0.5^{\circ}\times0.5^{\circ}$ 格点降水数据。该数据集基于国家气象信息中心基础资料专项最新整编的中国地面高密度台站(2 472个国家级气象观测站)的降水资料,利用薄盘样条法进行空间插值生成。

目前,降水插值主要是利用地面观测降水数据,数据源比较单一,空间分辨率也比较粗。值得关注的是数据同化技术的快速发展,通过融合地面站点、遥感反演以及模型模拟的多源数据,可以获得精度更好、时空分辨率更高的空间分布数据。后文将专门讨论相关数据集及其应用情况。

1.2.2 遥感反演

遥感反演降水具有覆盖范围广的优势。目前,

遥感反演降水空间分辨率有待进一步提高,在山区流域的应用还处于探索阶段。Li等^[74]使用了GPCP(Global Precipitation Climatology Project,全球降水气候计划)降水数据来模拟塔里木河源区提孜那普河的融雪径流。该数据综合了数十颗静止卫星和极轨卫星的红外和微波资料并经过全球多个台站数据校正后的卫星降水产品,空间分辨率为 $1^{\circ}\times1^{\circ}$,数据仍在不断发展中。TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)卫星于1997年在日本发射成功。基于该卫星的降水产品主要有TPMA、CMORPH、PERSIANN和GSMaP。穆振侠等^[86]在天山西部山区径流模拟中使用了TRMM的TP-MA3B43月尺度数据来确定流域的降水梯度。

TRMM降水数据与站点数据相比,具有空间稳定性方面的明显优势。全球降水观测计划(Global Precipitation Measurement, GPM)是继 TRMM 之后的新一代全球卫星降水产品。在中国大陆区域的对比研究表明^[88],GPM 的 IMERG 降水产品在所有的时空尺度下均明显优于 TRMM 的 TPMA3B42 数据,特别是在中高纬度干旱地区的表现更为突出。不过,IMERG 降水产品虽然相对较好地捕捉到降水的日变化情况,但仍有进一步提高的空间。特别是在干旱气候和高纬度地区,未来有望为西北山区融雪径流模拟提供高精度的降水数据。

遥感积雪面积能够较好地反映积雪空间分布信息,非常适合作为水文模型的驱动数据。Snowmelt Runoff Model(SRM)模型的广泛应用正是得益于不断发展和丰富的遥感积雪面积数据。马虹等^[59]使用 AVHRR 积雪面积数据来模拟巩乃斯河流域融雪径流。MODIS 积雪面积数据具有时空分辨率高,覆盖范围大的特点,叶尔羌河源区^[74],黑河^[81-82],塔里木河源区的托什干河^[78],疏勒河^[4,80]等流域的融雪径流研究均使用该数据。值得指出的是,云覆盖会影响积雪面积产品的精度。叶尔羌河源区的融雪径流模拟研究表明,去云后的 MODIS 积雪面积数据可以提升模拟效果^[74]。

如前文所述,遥感反照率产品如 MODIS 产品在反照率时空变化方面已经有了不少应用。但目前遥感反照率的时间分辨率尚难以满足融雪径流模型的需求,需要进一步发展改进。

1.2.3 数据同化

数据同化可以融合多种数据源,弥补单一数据源时空精度有限的缺陷,从而扩展模型的应用范围。高瑞等^[75]在模拟喀什河流域径流使用了美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的全球范围内的高分辨率再分析数据(Climote Forecast System Reanalysis, CFSR)。该数据时间分辨率为日,空间分辨率为 $0.312^{\circ}\times 0.312^{\circ}$ 。Wu 等^[58]在额尔齐斯河源区使用 NCEP/NCAR 再分析数据来驱动融雪径流模型。该数据集也是美国环境预报中心(NCEP)制作的一种同化数据,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。包括的气象要素有气温、降水、太阳辐射、长波辐射等。Liu 等^[43]应用中国陆面气象数据集 CMFD 数据开展了天山北坡玛纳斯河的冰雪径流模拟。CMFD 数据是中国气象信息中心制作的同化数据集。该数据集时间

分辨率为3小时,空间分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,气象要素包括气温、气压、湿度、风速向下短波、向下长波和降水。不过,目前同化数据的空间分辨率对山区来说仍然较粗,在山区融雪径流模拟时需要进行降尺度处理。制作更高空间分辨率和精度更好的同化数据,是数据同化技术的发展方向。

1.3 模型改进和发展

我国的分布式流域融雪径流模型研究虽然起步较晚。但最近十多年来也取得了一些可喜的进展。Yang^[89]进一步发展了 GBEHM 模型。该模型从山区产汇流特点出发,采用坡面单元的空间离散方式,采用积雪能量平衡算法,雪层也划分为多层。模型量化了黑河源区^[90]和额尔齐斯河源区^[58]融雪径流在山区地表径流的贡献比例和融雪量的空间分布。Chen 等^[91-92]建立了内陆河高寒山区流域分布式热耦合模型(DWHC),综合考虑了冰川、冻土和积雪等寒区水文要素。其分布式格网设计可以很方便地与气候模式数据耦合,在黑河流域也有成功应用。Wang 等^[93-95]发展了耦合陆面过程的分布式水文模型系统(WEB-DHM)。重点描述了雪层内部过程,将雪层进行了垂直分层,在洪扎河流域有成功应用^[96]。Ding 等^[97]提出了针对冰川流域的分布式能量物质平衡模型,通过改进冰雪能量平衡中反照率和感热潜热的参数化方法提升消融模拟精度,该模型适合开展冰川尺度物质-能量过程模拟研究。此外,从应用地理信息系统等现代技术手段角度出发,俞鑫颖等^[98]建立了基于 DEM 和地理信息系统(GIS)的格网式空间分布积雪水文模型。房世峰等^[99]以天山北坡积雪流域的观测为基础,发展了基于“3S”的分布式融雪径流模型。不过,这两个模型均采用度日因子方法进行消融计算,未来需考虑引入物理意义更显著的能量平衡方法。

总的来说,我国的融雪径流模型还处于不断发展中,受观测手段和观测数据的限制,融雪径流过程的机理探究和模型应用和效果验证研究都需要进一步深入研究。未来可从山区积雪过程和产汇流机理研究出发,综合应用遥感、模拟和数据同化等技术手段,发展具有干旱区特色的融雪径流模型。

2 结论与展望

综合目前西北山区融雪径流的研究进展和区域特征,结合已有研究基础和融雪径流模拟研究的

发展态势,未来融雪径流模拟研究需加强以下研究。

2.1 山区积雪积累和消融过程的机理研究

西北山区积雪分布区多发育森林及草地。森林等植被覆盖对积雪消融的影响需进一步量化。森林对积雪消融的影响已有一些研究。额尔齐斯河源区观测表明,树冠对积雪消融速率影响明显,树冠下积雪消融速率只有无树冠覆盖的二分之一^[100]。森林对积雪能量平衡影响明显,天山西部的研究表明,雪岭云杉林冠下积雪表面净短波辐射和显热明显小于开阔地^[101]。但目前的认识尚不能量化各因素的影响,还只是一些定性的认识。进一步的量化研究需要深入的机理分析。植被覆盖及冰雪表面积雪升华/蒸发的高精度计算方法急需建立。目前的观测表明积雪升华/蒸发量的空间差异显著,但点尺度的观测难以估算区域上的数值,需要发展可靠的计算方法进行区域积雪升华/蒸发量估算。

此外,对雪层含水量、雪层导水和导热系数、饱和含水率等雪层属性的垂直分布特征及变化以及雪面雨的影响需要更深入的研究。值得指出的是,精细的积雪过程观测系统已经在一些山区流域建立。祁连山大垭口和葫芦沟流域、额尔齐斯河源区的可可托海地区和天山北坡呼图壁河上游的军塘湖小流域都布设了比较详细和全面的积雪过程观测系统。经过一段时间的数据积累,有望在过程研究方面取得进展。

2.2 积雪时空分布变化监测和高精度积雪分布数据获取

高精度积雪分布数据缺乏是目前限制模型应用的主要因素。山区地形复杂,下垫面类型多样,坡度、坡向和植被覆盖等都会产生积雪分布的不均匀性,斑块状积雪是主要的分布方式。山区地面观测站点稀少,仅通过数据插值方法难以得到精度合适的分布结果。遥感数据虽然能获取地面站点覆盖不到区域的数据,但当前可利用的大尺度遥感数据产品分辨率有限。融雪末期的瞬时降雪、雪层厚度变化、风吹雪导致的积雪再分配等都给积雪面积数据带来了较大误差。

目前,积雪面积、积雪深度和积雪反照率等关键参数均可以通过遥感技术获得,可见光遥感影像如 MODIS、Landsat TM/ETM 数据适合大范围积雪面积和积雪反照率信息的提取。无人机和近景摄影测量技术适用于小流域尺度较高精度的积雪覆

盖范围和雪深监测。被动微波遥感适合大范围雪深信息的提取。激光测距仪 Lidar 提取雪深具有数据精度和空间分辨率都较高的优势。可见,遥感数据各有其优缺点,充分利用多源遥感数据,最大程度消除外界因素带来的误差,提高数据分辨率和精度,减少模型输入数据的不确定性。是目前面临的一大挑战,也是当前研究的重点。

2.3 山区冰雪关键过程与模型耦合

目前水文模型对冰雪过程的模拟能力还有欠缺。冻融过程以及冰川、积雪和降雨径流组分区都有待进一步的研究。通过强化野外综合观测(如典型冰雪-大气界面能量通量等)和室内分析(如土壤水热性质测量等),研究冰雪消融、土壤冻融水热传输过程,认识相关机理,发展冰雪下垫面过程参数化算法,并与现有的积雪水文模型进行耦合,从而实现冰川-积雪-冻土综合水文过程模拟,以更好地认识西北山区冰冻圈与其他圈层相互作用机理,提升对区域水资源和水灾害的模拟和预测能力。

2.4 气候变化对流域融雪径流的影响

利用模型模拟气候变暖趋势下未来融雪径流的响应是当前研究的热点。而高精度的气候驱动是目前的难点。未来气候情景数据存在较大的不确定性。气候变化情景除了通过历史数据计算出未来变化趋势之外,更多的是采用气候模型如 GCM 模型的模拟结果。但目前模型数据空间分辨率低,考虑如地形、植被、云量等影响区域气候要素的作用还很不够,仅适用于大尺度范围研究,难以直接应用于流域尺度的融雪径流过程模拟。需对全球尺度的 GCM 模型数据进行降尺度处理来获取适用于流域尺度模拟的驱动数据。但降尺度方法以及降尺度数据如何提升精度仍有待进一步深入研究。

此外,目前的分布式积雪消融模型都是基于单点上积雪水热过程的观测和分析。积雪真实分布有显著的空间异质性,尤其是西北山区积雪较薄,积雪分布连续性很差。而且山区地形起伏,将单点上的能量过程模拟直接应用于网格必然会出现较大的误差,这种误差随着网格选取尺度的不同也会产生变化。积雪面积-雪水当量曲线以及概率分布函数是陆面模型和水文模型常用的描述积雪空间异质性的方法。但这些方法在研究气候变化对西北山区流域融雪径流影响的区域适用性,以及模型网格尺度的影响需要有更多的应用研究。模型的

多尺度转换以及模型参数的区域化也是融雪径流模拟需要解决的问题。

参考文献(References):

- [1] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya. Responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513-527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [2] Zhang Wei, Kang Shichang, Shen Yongping, et al. Response of snow hydrological processes to a changing climate during 1961 to 2016 in the headwater of Irtysh River basin, Chinese Altai Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2295-2310.
- [3] Qin Yan, Zhao Quidong, Liu Yongqiang, et al. Response of snow hydrological processes to climate change in the Hutubi River basin on the north slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 190-199. [秦艳, 赵求东, 刘永强, 等. 天山北坡呼图壁河流域积雪水文过程对气候变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 190-199.]
- [4] Chen Rensheng, Zhang Shiqiang, Yang Yong, et al. The impact of cryospheric change on runoff of cold regions in Western China[M]. Beijing: Science Press, 2019. [陈仁升, 张世强, 阳勇, 等. 冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [5] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 690-702. [丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 690-702.]
- [6] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Kang Ersi, et al. Response of the snowmelt and glacier runoff to the climate warming-up in the last 40 years in Xinjiang Autonomous Region, China[J]. *Science China Earth Science*, 1999, 42(S1): 44-51.
- [7] Shen Yanjun, Shen Yanjun, Fink M, et al. Trends and variability in streamflow and snowmelt runoff timing in the southern Tianshan Mountains[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 173-181.
- [8] Shen Yongping, Wang Guoya, Su Hongchao. et al. Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River basin with snow-dominated of the Altay Mountains region, Xinjiang, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 845-854. [沈永平, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 845-854.]
- [9] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zongsheng, et al. The effect of climate change during snowmelt period on streamflow in the mountainous areas of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1461-1470. [李宝富, 陈亚宁, 陈忠升, 等. 西北干旱山区融雪期气候变化对径流量的影响[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1461-1470.]
- [10] Martinec J, Rango A, Roberts R. Snowmelt Runoff Model (SRM) user's manual. Updated edition 2005, WinSRM1.10 [R]. USDA Jornada Experimental Range, New Mexico State University, Las Cruces, USA.
- [11] Arnold J G, Fohrer N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(3): 563-572
- [12] Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1): 104-115.
- [13] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in Western China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 89-98. [张勇, 刘时银, 丁永建. 中国西部冰川度日因子的空间变化特征[J]. *地理学报*, 2006, 61(1): 89-98.]
- [14] Jordan R E. A one-dimensional temperature model for a snow cover: technical documentation for SNTherm. 89 [R]. Hanover, New Hampshire, US Army Corps of Engineers Laboratory, Special Report. 1991, 91-16: 1-49.
- [15] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification[J]. *Global Planet Change*, 1996, 13: 195-206.
- [16] Yang D, Herath S, Musiak K. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(1): 49-65.
- [17] Kou Youguan, Xiao Shu, Zhang Yongliang, et al. Radiation balance and vapor transport in the Mt. Tuomuer District [C]// *Glacial and Weather in Mt. Tuomuer District, Tianshan. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House*, 1985: 120-142. [寇有观, 肖鋋, 张永亮, 等. 托木尔峰地区的辐射平衡及水汽输送[C]//天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 120-142.]
- [18] Ma Hong, Liu Yifeng, Hu Ruji. Energy balance and snowmelt simulation of seasonal snow in the western Tianshan Mountains, China[J]. *Geographical Research*, 1993, 12(1): 87-93. [马虹, 刘一峰, 胡汝骥. 天山季节性积雪的能量平衡研究和融雪速率模拟[J]. *地理研究*, 1993, 12(1): 87-93.]
- [19] Kang Ersi, Ohmura A. A parameterized energy balance model of glacier melting on the Tianshan Mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(5): 467-476. [康尔泗, Atsumu Ohmura. 天山冰川消融参数化能量平衡模型[J]. *地理学报*, 1994, 49(5): 467-476.]
- [20] Li Jing, Liu Shiyin, Zhang Yong. Snow surface energy balance over the ablation period on the Keqicar Baxi Glacier in the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 366-373. [李晶, 刘时银, 张勇. 天山南坡科契卡尔巴西冰川消融期雪面能量平衡研究[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 366-373.]
- [21] Chen Liang, Duan Keqin, Wang Ninglian, et al. Characteristics of the surface energy balance of the Qiyi Glacier in Qilian mountains in melting season [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 882-888. [陈亮, 段克勤, 王宁练, 等. 祁连山七一冰川消融期间的能量平衡特征[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 882-888.]
- [22] Jiang Xi, Wang Ninglian, Yang Shengpeng, et al. The surface energy balance on the Qiyi Glacier in Qilian mountains during the ablation period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 686-695. [蒋熹, 王宁练, 杨胜朋, 等. 祁连山七一冰川暖季能量平衡及小气候特征分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 686-695.]
- [23] Qin Yan, Liu Zhihui, Qiao Peng. The process of water and heat transfer in snow layer during snowmelt period based on energy balance theory [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2010, 4(5): 11-15. [秦艳, 刘志辉, 乔鹏. 基于能量平衡的融雪期雪层水热过程研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 4(5): 11-15.]
- [24] Sun Weijun, Qin Xiang, Ren Jiawen, et al. Surface energy balance in the accumulation zone of the Laohugou Glacier No. 12

- in the Qilian Mountains during ablation period[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 38-46. [孙维君, 秦翔, 任贾文, 等. 祁连山老虎沟12号冰川积累区消融期能量平衡特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 38-46.]
- [25] Chen Jizu, Qin Xiang, Wu Jinkui, et al. Simulating the energy and mass balances on the Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 38-47. [陈记祖, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟12号冰川表面能量和物质平衡模拟[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 38-47.]
- [26] Guo Shuhai, Chen Rensheng, Han Chuntan, et al. Five-year analysis of evaporsublimation characteristics and its role on surface energy balance SEB on a midlatitude continental glacier[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(12): e2021EA001901.
- [27] Meiman J R, Grant L O. Snow-air interactions and management of mountain watershed snowpack[M]. Colorado: Environmental Resources Center, Colorado State University, 1974.
- [28] Daniel Moore R. On the use of bulk aerodynamic formulae over melting snow[J]. *Hydrology Research*, 1983, 14(4): 193-206.
- [29] Box J E, Steffen K. Sublimation on the Greenland Ice Sheet from automated weather station observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106 (D24): 33965-33981.
- [30] Zhang Y, Suzuki K, Kadota T, et al. Sublimation from snow surface in southern mountain taiga of eastern Siberia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D21): D21103.
- [31] Xie Weirong, Cao Meisheng. Preliminary results of snow sublimation measurement on the Glacier No. 1 at the head of the Urumqi River, Tianshan Mountains[C]//Study of Glaciers and Hydrology of the Urumqi River, Tainting Mountain. Beijing: Science Press, 1965: 70-73. [谢维荣, 曹梅盛. 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪面蒸发测量的初步结果[C]//天山乌鲁木齐河冰川与水文研究. 北京: 科学出版社, 1965: 70-73.]
- [32] Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Yang Daqing. The study of evaporation at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains[C]//Proceedings of the 4th National Conference of Glaciology and Geocryology (Glaciology). Beijing: Science Press, 1990: 87-94. [张寅生, 康尔泗, 杨大庆. 天山乌鲁木齐河源区蒸发研究[C]//第四届全国冰川冻土学术会议论文集(冰川学). 北京: 科学出版社, 1990: 87-94.]
- [33] Calanca P, Heuberger R. Energy balance[C]//Glacial Climate Research in the Tianshan, research report on project Glacier No. 1, 1991: 1985-1987.
- [34] Ohan H. The influence of humidity on the ablation of continental glaciers[C]//The International Symposium on Mountain Glaciology Relating to Human Activity, Lanzhou, 1991: 26-30.
- [35] Fang Xiaoyu, Li Zhongqin, Wuennemann B, et al. Physical energy-balance and statistical glacier melting models comparison and testing for Shiyi Glacier, Heihe River basin, Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 336-350. [方潇雨, 李忠勤, Bernd Wuennemann, 等. 冰川物质平衡模式及其对比研究——以祁连山黑河流域十一冰川研究为例[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 336-350.]
- [36] Yang Daqing, Zhang Yinsheng. Results of snow surface sublimation measurements in the mountain area of Urumqi River basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(2): 122-128. [杨大庆, 张寅生. 乌鲁木齐河流域山区冬季积雪蒸发观测的主要结果[J]. 冰川冻土, 1992, 14(2): 122-128.]
- [37] Li Hongyi, Wang Jian, Bai Yunjie, et al. The snow hydrological processes during a representative snow cover period in Binggou watershed in the upper reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2): 293-300. [李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 293-300.]
- [38] Zhou Baojia, Zhou Hongfei, Dai Qiong. Experimental study of the snow evaporation in desert and oases of Junggar Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 843-849. [周宝佳, 周宏飞, 代琼. 准噶尔盆地沙漠-绿洲雪面蒸发实验研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 843-849.]
- [39] Liu, Shaomin, Che Tao, Xu Ziwei, et al. Qilian Mountains integrated observatory network: dataset of Heihe integrated observatory network (automatic weather station of Yakou Station, 2020)[DB]. Beijing: National Tibetan Plateau Data Center, 2021. [刘绍民, 车涛, 徐自为, 等. 祁连山综合观测网: 黑河流域地表过程综合观测网(垭口站自动气象站-2020). 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2021.]
- [40] Gao Liming, Zhang Yaonan, Shen Yongping, et al. Analysis of water and heat transfer in snow layer during snowmelt period in Irtysh River basin based on energy balance theory[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 323-331. [高黎明, 张耀南, 沈永平, 等. 基于能量平衡对额尔齐斯河流域融雪过程的研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 323-331.]
- [41] Wu Xuejiao, Wang Ninglian, Shen Yongping, et al. *In-situ* observations and modeling of spring snowmelt processes in an Altay Mountains river basin[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8: 084697.
- [42] Liu Yan, Zhang Pu, Nie Lei, et al. Exploration of the snow ablation process in the semiarid region in China by combining site-based measurements and the Utah energy balance model: a case study of the Manas River basin[J]. *Water*, 2019, 11(5): 1058.
- [43] Liu Yan, Xu Jianhui, Lu Xinyu, et al. Assessment of glacier and snowmelt-driven streamflow in the arid middle Tianshan Mountains of China[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(12): 2750-2762.
- [44] Jiang Xi, Wang Ninglian, He Jianqiao, et al. A study of parameterization of albedo on the Qiye Glacier in Qilian Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 30-37. [蒋熹, 王宁练, 贺建桥, 等. 祁连山七一冰川反照率的参数化研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 30-37.]
- [45] Wang Jie, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Variations of albedo on the Dongkemadi Glacier, Tanggula range[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 21-28. [王杰, 何晓波, 叶柏生, 等. 唐古拉山冬克玛底冰川反照率变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 21-28.]
- [46] Wang Junyao, Huai Baojuan, Wang Yetang, et al. Spatiotemporal variation of albedo of four representative glaciers in the Heihe River basin based on multi-source data[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1396-1405. [王俊瑶, 怀保娟, 王叶堂, 等. 基于MOD10A1的祁连山黑河流域典型冰川反照率时空变化研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1396-1405.]
- [47] Yue Xiaoying, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. The characteristics of surface albedo on the Urumqi Glacier No. 1 during the ablation season in eastern Tien Shan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1412-1423. [岳晓英, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川消融期反照

- 率特征[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1412-1423.]
- [48] Liu Junfeng, Chen Rensheng, Song Yaouxuan, et al. Glacier ice and snow surface albedo determined by using time-lapse camera photography[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 259-267. [刘俊峰, 陈仁升, 宋耀选, 等. 基于相机摄影测量的冰面反照率反演方法研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 259-267.]
- [49] Ren Shaoting. Spatio-temporal relationship between glacier mass balance and glacier surface albedo over the high mountain asia by remote sensing observations[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. [任少亭. 基于遥感观测的高亚洲地区冰川物质平衡与冰川反照率的时空关系研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.]
- [50] Sturm M. White water: Fifty years of snow research in WRR and the outlook for the future[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 4948-4965.
- [51] Yang Jinming, Li Chengzhi, Fang Shifeng, et al. A review of seasonal snow-melt flood simulation and forecast in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2019, 36(1): 80-88. [杨金明, 李诚志, 房世峰, 等. 新疆地区季节性融雪洪水模拟与预报研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(1): 80-88.]
- [52] Wei Zhaoai. The study on snow melt processes simulation and snow characteristics analysis[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010. [魏召才. 融雪过程模拟及积雪特性分析研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.]
- [53] Wang Yuan, Liu Zhihui, Chen Chong. Density, liquid water content and temperature of snow cover in northern slope of the Tianshan Mountains in snowmelt season[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 803-811. [王元, 刘志辉, 陈冲. 天山北坡融雪期雪层含水率、密度和雪层温度研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 803-811.]
- [54] Zhang Bo, Liu Zhihui, Gao Yun, et al. Simulation and analysis of snow melt water outflow condition in typical snowmelt period[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 502-509. [张波, 刘志辉, 高云, 等. 典型融雪期雪层融雪水出流条件模拟及分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 502-509.]
- [55] Lu Heng, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. Physical characteristics of forest snow in the western Tianshan mountains, China[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1403-1409. [陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部季节性森林积雪物理特性[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1403-1409.]
- [56] Liu Yu, Jiang Lingmei, Shi Jiancheng, et al. Validation and sensitivity analysis of the snow thermal model (SNTHERM) at Binggou Basin, Gansu[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(4): 792-810. [刘誉, 蒋玲梅, 施建成, 等. 雪热力模型(SNTHERM)在冰沟流域的模拟和敏感性试验[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 792-810.]
- [57] Yang Yuguang. The study for the structuring of snowmelt model on condition that seasonally frozen ground presence: take Juntanghu River basin for example[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012. [杨与广. 季节性冻土存在条件下融雪径流模型研建[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.]
- [58] Wu Xuejiao, Zhang Wei, Li Hongyi, et al. Analysis of seasonal snowmelt contribution using a distributed energy balance model for a river basin in the Altai Mountains of northwestern China[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14046.
- [59] Ma Hong, Cheng Guodong. A test of Snowmelt Runoff Model (SRM) for the Gongnaisi River basin in the western Tianshan Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2088-2093. [马虹, 程国栋. SRM融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2088-2093.]
- [60] Feng Xuezhi, Li Wenjun, Shi Zhengtao, et al. Satellite snow-cover monitoring and snowmelt runoff simulation of Manas River in Tianshan region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(1): 18-21. [冯学智, 李文君, 史正涛, 等. 卫星雪盖监测与玛纳斯河融雪径流模拟[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 18-21.]
- [61] Lu Ping. Snowcover monitoring and snowmelt runoff based on MODIS data of Xinjiang Manasi River watershed[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005. [陆平. 基于MODIS数据的新疆玛纳斯河流域积雪监测与融雪径流模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.]
- [62] Zhang Pu, Wang Jian, Liu Yan, et al. Application of SRM to flood forecast and forwarning of Manasi River basin in spring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 456-461. [张璞, 王建, 刘艳, 等. SRM模型在玛纳斯河流域春季洪水预警中的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 456-461.]
- [63] Li Hui, Lei Xiaoyun, Bao Anming, et al. Application of simulation about montanic daily runoff volume in the Manas River basin based on SWAT model[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 686-690. [李慧, 雷晓云, 包安明, 等. 基于SWAT模型的山区日径流模拟在玛纳斯河流域的应用[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 686-690.]
- [64] Luo Yi, Arnold J, Liu Shiyin, et al. Inclusion of glacier processes for distributed hydrological modeling at basin scale with application to a watershed in Tianshan Mountains, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 477: 72-85.
- [65] Zhao Q, Liu Z, Ye B, et al. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(10): 1897-1906.
- [66] Meng Xianyong, Ji Xiaonan, Liu Zhihui, et al. Research on improvement and application of snowmelt module in SWAT[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 528-539. [孟现勇, 吉晓楠, 刘志辉, 等. SWAT模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 528-539.]
- [67] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 41-48.]
- [68] Zhao Jie, Xu Changchun, Gao Shentong, et al. Hydrological modeling in the Urumqi River basin based on SWAT[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 666-674. [赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 等. 基于SWAT模型的乌鲁木齐河流域径流模拟[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 666-674.]
- [69] Muattar Saydi, Ding Jianli, Vasisht Sagan, et al. Snowmelt modeling using two melt-rate models in the Urumqi River watershed, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2271-2284.
- [70] Zhang Yichi, Li Baolin, Bao Anming, et al. Study on snowmelt runoff simulation in the Kaidu River basin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2006, 36(Suppl 2): 24-32. [张一驰, 李宝林, 包安明, 等. 开都河流域融雪径流模拟研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 2): 24-32.]
- [71] Li Lanhai, Shang Ming, Zhang Minsheng, et al. Snowmelt runoff simulation driven by APHRODITE precipitation dataset[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 53-59. [李兰海, 尚明, 张敏生, 等. APHRODITE降水数据驱动的融雪径

- 流模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 53-59.]
- [72] Fang G H, Yang J, Chen Y N, et al. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(6): 2547-2559.
- [73] Xiang Yanyun. Spatio-temporal distribution of snow cover and snowmelt runoff modelling in Kaidu River basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018. [向燕芸. 开都河流域积雪时空分布及融雪径流模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.]
- [74] Li Xingong, Williams M W. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(19): 3931-3940.
- [75] Gao Rui, Mu Zhenxia, Peng Liang, et al. Application research of VIC model with the mode of water balance and energy balance in Kashi River basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(1): 106-112. [高瑞, 穆振侠, 彭亮, 等. 水量平衡与能量平衡模式下的VIC模型在喀什河流域的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1): 106-112.]
- [76] Zhao Qiudong, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Hydrological process of a typical catchment in cold region: simulation and analysis [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 595-605. [赵求东, 叶柏生, 丁永建, 等. 典型寒区流域水文过程模拟及分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 595-605.]
- [77] Zhao Qiudong, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Coupling a glacier melt model to the Variable Infiltration Capacity (VIC) model for hydrological modeling in north-western China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(1): 87-101.
- [78] Li Jing, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Snow cover dynamics and snowmelt runoff modeling in the Toxkan River Basin, source region of the Tarim River, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(6): 1508-1516. [李晶, 刘时银, 魏俊峰, 等. 塔里木河源区托什干河流域积雪动态及融雪径流模拟与预估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1508-1516.]
- [79] Wei Guanghui, Xiang Yiheng, Chen Jie, et al. The spatial and temporal variations of snow coverage in Tarim River basin and its snowmelt runoff simulation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(4): 49-55, 60. [魏光辉, 向怡衡, 陈杰, 等. 塔里木河流域积雪时空变化及融雪径流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2020(4): 49-55, 60.]
- [80] Zhao Jun, Huang Yongsheng, Song Geging, et al. Application of snowmelt runoff model in upper stream of Shule River basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(1): 72-76, 80. [赵军, 黄永生, 宋阁庆, 等. SRM融雪径流模型在疏勒河流域上游的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 72-76, 80.]
- [81] Wang Jian, Shen Yongping, Lu Anxin, et al. Impact of climate change on snowmelt runoff in the mountainous regions of northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(1): 28-33. [王建, 沈永平, 鲁安新, 等. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 28-33.]
- [82] Li Hongyi, Wang Jian. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(5): 769-775. [李弘毅, 王建. SRM融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775.]
- [83] Yu Wenjun. Improvement and application of SWAT hydrologic model in mountainous upper Heihe River basin[D]. Nanjing: NanjingNormalUniversity, 2012. [余文君. SWAT模型在黑河山区流域的改进与应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.]
- [84] Li Chengliu. Runoff simulation in upstream of the Shiyang River basin using SWAT model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. [李成六. 基于SWAT模型的石羊河流域上游山区径流模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.]
- [85] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Near-surface meteorological characteristics on the Koxkar Baxi Glacier, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 967-975. [韩海东, 刘时银, 丁永建, 等. 科其喀尔巴西冰川的近地层基本气象特征[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 967-975.]
- [86] Mu Zhenxia. Research on vertical distribution law of precipitation and snowmelt runoff simulation in high cold alpine areas [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2010. [穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.]
- [87] Zhao Qiudong, Zhao Chuancheng, Qin Yan, et al. Response of the hydrological processes to climate change in the Muzati River basin with high glacierization, southern slope of the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1285-1298. [赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 天山南坡高冰川覆盖率的木扎提河流域水文过程对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1285-1298.]
- [88] Tang Guoqiang, Ma Yingzhao, Long Di, et al. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 152-167.
- [89] Yang D, Gao B, Jia 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.
- [90] Li Hongyi, Li Xin, Yang Dawen, et al. Tracing snowmelt paths in an integrated hydrological model for understanding seasonal snowmelt contribution at basin scale[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 8874-8895.
- [91] Chen Rensheng, Lu Shihua, Kang Ersi, et al. A distributed water-heat coupled model for mountainous watershed of an inland river basin of Northwest China (I): model structure and equations[J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(6): 1299-1309.
- [92] Chen Rensheng, Kang Ersi, Lu Shihua, et al. A distributed water-heat coupled model for mountainous watershed of an inland river basin in Northwest China (II): using meteorological and hydrological data [J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(1): 17-28.
- [93] Wang Lei, Koike T, Yang Kun, et al. Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D8): D08107.
- [94] 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.
- [95] Wang Lei, Koike T, Yang Dawen, et al. Improving the hydrology of the Simple Biosphere Model 2 and its evaluation within the framework of a distributed hydrological model [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54(6): 989-1006.
- [96] Shrestha M, Koike T, Hirabayashi Y, et al. Integrated simulation of snow and glacier melt in water and energy balance-based, distributed hydrological modeling framework at Hunza River basin of Pakistan Karakoram region [J]. *Journal of Geo-*

- physical Research: Atmospheres, 2015, 120(10): 4889-4919.
- [97] Ding Baohong, Yang Kun, Yang Wei, et al. Development of a Water and Enthalpy Budget-based Glacier mass balance Model (WEB-GM) and its preliminary validation[J]. Water Resources Research, 2017, 53(4): 3146-3178.
- [98] Yu Xinying, Liu Xinren. Distributed hydrological model for watersheds supplemented with melted snow and glacier water and rainfall[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2002, 30(5): 23-27. [俞鑫颖, 刘新仁. 分布式冰雪融水雨水混合水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 23-27.]
- [99] Fang Shifeng, Pei Huan, Liu Zhihui, et al. Study on the distributed snowmelt runoff process based on RS and GIS [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(4): 655-662. [房世峰, 裴欢, 刘志辉, 等. 遥感和GIS支持下的分布式融雪径流过程模拟研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(4): 655-662.]
- [100] Zhang Wei, Shen Yongping, He Jianqiao, et al. Assessment of the effects of forest on snow ablation in the headwaters of the Irtysh River, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1260-1270. [张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 额尔齐斯河源区森林对春季融雪过程的影响评估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1260-1270.]
- [101] Lu Heng, Wei Wenshou, Liu Mingzhe, et al. The characteristic of energy budget on snow surface beneath *Picea Schrenkiana* forest in the west Tianshan Mountains of China during snow-melt period[J]. Mountain Research, 2015, 33(2): 173-182. [陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 融雪期天山西部森林积雪表面能量平衡特征[J]. 山地学报, 2015, 33(2): 173-182.]

Review on snowmelt runoff simulation in mountain regions, Northwest China

LI Jing^{1,2}, LIU Shiyin³, ZHANG Shiqiang⁴, CHEN Rensheng⁵, ZHAO Qiudong⁶,
GUO Wanqin¹, SHANGGUAN Donghui¹, WANG Rongjun¹,
ZHONG Xinyue⁷, YIN Zhengliang⁶, LI Hongyi⁷

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. National Field Science Observation and Research Station of Yulong Snow Mountain Cryosphere and Sustainable Development, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Northwestern University, Xi'an 710127, China; 5. Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 6. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 7. Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Snowmelt runoff is a valuable water resource in Northwest China. In the past few decades, progress has been achieved in snowmelt runoff simulation in mountainous areas, including observation and simulation of snow melt process, improvement and development of distributed snow melt runoff model, and ability for application of snow melt runoff model with temporal and spatial distribution driving data. The development of interpolation algorithm, remote sensing and data assimilation technology provides data support for the widespread application of distributed snowmelt runoff model in northwest mountainous regions of China. Climate warming and economic and social development will further aggravate the contradiction between supply and demand of water resources in the arid regions of Northwest China, which requires higher precision and detail spatial and temporal resolution of snowmelt runoff simulation. Based on the progress and challenges on snowmelt runoff simulation in mountainous regions of Northwest China, following studies need more attention: the mechanism of snow accumulation and ablation, snow cover spatial and temporal distribution monitoring and high precision of snow distribution data acquisition, quantitative climate change impact on river basin snowmelt runoff.

Key words: snowmelt runoff; spatial distribution; hydrological model; climate change; melting simulation

(责任编辑: 许民)