

引用格式:倪明霞,段峥嵘,夏建新. 新疆南疆周边高山冰川融化及其未来水资源安全风险[J]. 山地学报,2022,40(3):329-342.

NI Mingxia, DUAN Zhengrong, XIA Jianxin. Melting of mountain glacier and its risk to future water resources in Southern Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 2022, 40(3):329-342.

新疆南疆周边高山冰川融化及其未来水资源安全风险

倪明霞,段峥嵘,夏建新*

(中央民族大学 生命与环境科学学院,北京 100081)

摘要:高山冰川的季节性融水是中国新疆南疆地区重要的水资源补给。全球变暖使得冰川持续退缩、冰川融水增加,显著影响南疆生态环境和社会经济。当前冰川变化研究仅对南疆少数流域山区的融水径流进行了预测,缺乏对冰川融水峰值的精确预测,不能精确确定流量拐点出现的时间范围,且受限于数据精度,存在模拟结果不准确的情况。本研究应用月尺度的度日模型,估算1961—2019年南疆主要流域的物质平衡和冰川融水径流,并基于研究区范围内各流域的历史气候变化趋势设置情境,预估和分析未来60年各流域内可能的冰川物质平衡和融水径流的变化趋势,预测冰川融水可能出现拐点的时间节点。结果表明:(1)阿克苏河、渭干河和叶尔羌河流域自1961年开始,冰川长期保持物质亏损状态,而和田河和克里雅河流域则在20世纪90年代之前冰川物质正平衡,略有积累,90年代以后物质亏损严重,2000年之后为各流域物质亏损最严重的时期。(2)各流域60年来累积物质平衡分别为-17.5 m、-12.4 m、-14.2 m、-5.0 m和-0.9 m。(3)各流域冰川持续融化,但融水径流增加趋势不一致,预测阿克苏河流域冰川融水在2050—2060年将达顶,叶尔羌河流域冰川融水径流量在2070年后呈现逐步减少的趋势,其他三个流域在2080年之前冰川融水一直稳定增加,但增加趋势逐渐趋于平缓。研究结果有助于指导南疆地区水资源管理与合理利用、有效预防自然灾害。

关键词:南疆;度日模型;冰川物质平衡;冰川融水;预测

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

全球气温持续变暖,冰冻圈退缩^[1],绝大多数高寒山区的冰川处于退缩中,融水径流量普遍增加^[2-11]。自20世纪60年代以来,中国西北干旱地区的新疆南疆地区(以下简称“南疆”)高山冰川整体上以退缩为主,周边天山、喀喇昆仑山、帕米尔高原、昆仑山的冰川面积持续减少^[12-14]。随着新疆气候由暖干向暖湿转型^[15],气温上升导致的冰川消融速度远大于降水增加积累冰川物质量的速度^[16]。塔里木河主要受高山冰川补给,受到气温上升和降水增加双重影响,塔里木河源流流域径流量增

加^[17-21]。有研究认为,天山部分地区的融水径流未出现显著变化,而大部分研究则认为天山大部分地区径流显著增加,阿克苏河与叶尔羌河冰川融水至少持续增加至2050年,塔里木河流域冰川融水将在2030—2060年达到峰值^[11,22-25]。

冰川融水资源支撑南疆绿洲的生态和社会发展,影响当地农业生产和人居用水需求^[26-27]。由于冰川发育在高寒高海拔峰尖谷地,地形陡峭,长期定点观测极其困难,加上冰川水文过程的复杂性,虽然南疆冰川及其融水径流量的研究是当前热点,但成

收稿日期(Received date):2021-09-14;改回日期(Accepted date):2022-06-10

基金项目(Foundation item):国家科技重大专项子课题(2017ZX07101)。[Sub-Project of National Science and Technology Major Project (2017ZX07101)]

作者简介(Biography):倪明霞(1985-),女,江苏启东人,博士研究生,主要研究方向:少数民族地区环境可持续发展。[NI Mingxia (1985-), female, born in Qidong, Jiangsu province, Ph. D. candidate, research on environmental sustainability in minority areas] E-mail: mingxia_ni@126.com

*通讯作者(Corresponding author):夏建新(1969-),男,博士,教授,主要研究方向:环境管理。[XIA Jianxin (1969-), male, Ph. D., professor, research on environmental management] E-mail: jxxia@vip.sina.com

果并不丰富,结论仍显粗糙。过去大多采取模型估计,统计分析融水量对流域内径流量的贡献趋势,对南疆地区冰川融水径流是否增加并持续增加、何时达到峰值等水资源管理者和决策者关心的关键问题,还没有充分涉及。另外,对于冰川融水何时出现拐点等问题,过去的研究结论时间范围模糊且跨度较大,没有覆盖南疆主要冰川流域。此外,预测冰川融水径流,需要气候数据作为模型的输入,由于气候模式基于全球大范围背景之下,对于地方性气候的模拟并不准确,不同的情境必将影响模拟的结果。

本文以应用较为广泛的度日模型为研究方法,结合流域内气象因子的变化趋势,模拟出研究区范围内的地方性气候情境,将其作为模型中的气候输入数据,更精确地估算和预测南疆周边冰川的物质盈亏、冰川融水的径流量及其变化趋势,构建流域内气象因子、冰川物质及融水径流之间的关系,试图较精准地预测南疆几大典型流域内冰川融水的拐点。本研究可以为南疆地区的水资源管理和合理利用、提前预防灾害提供科学参考。

1 研究区概况

新疆地处我国西北地区,天山将其一分为二。天山以北俗称北疆,以南俗称南疆。南疆深处欧亚

大陆腹地,四周高山环绕,山地海拔平均高度4000~5000 m,最高达8611 m。南疆地区降雨稀少(年均降水量50~70 mm),蒸发却极其强烈(年均蒸发量1125~1600 mm)。水是维系南疆绿洲形成和发展的重要自然资源,是连接绿洲内各类生态子系统的桥梁,是绿洲得以生存和发展的重要保障。由9大水系(阿克苏河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、开都河-孔雀河、迪那河、渭干河与库车河、克里雅河以及车尔臣河)组成的塔里木河流域几乎涵盖了整个南疆的国土面积,是世界上最大的内陆河流域,其产流区集中分布在天山、东帕米尔高原、喀喇昆仑山、昆仑山等几大高大山系的现代冰川作用地带。

塔里木盆地边缘高大的天山、帕米尔高原、喀喇昆仑山和昆仑山山峰为冰川的发育提供了有利的水热条件。在我国二级流域中,塔里木河流域冰川分布数量最多(12664条),面积和冰储量最大(17649.94 km²、1841.24 km³)^[28]。各大支流中,冰川主要集中分布于阿克苏河、渭干河、叶尔羌河、和田河和克里雅河等流域(图1),上述五个流域拥有的冰川面积占塔里木河流域冰川总面积的90%以上,其中位于和田河和叶尔羌河流域的冰川面积占全流域冰川面积的54%。阿克苏河、渭干河、叶尔羌河、和田河以及克里雅河冰川融水径流分别占

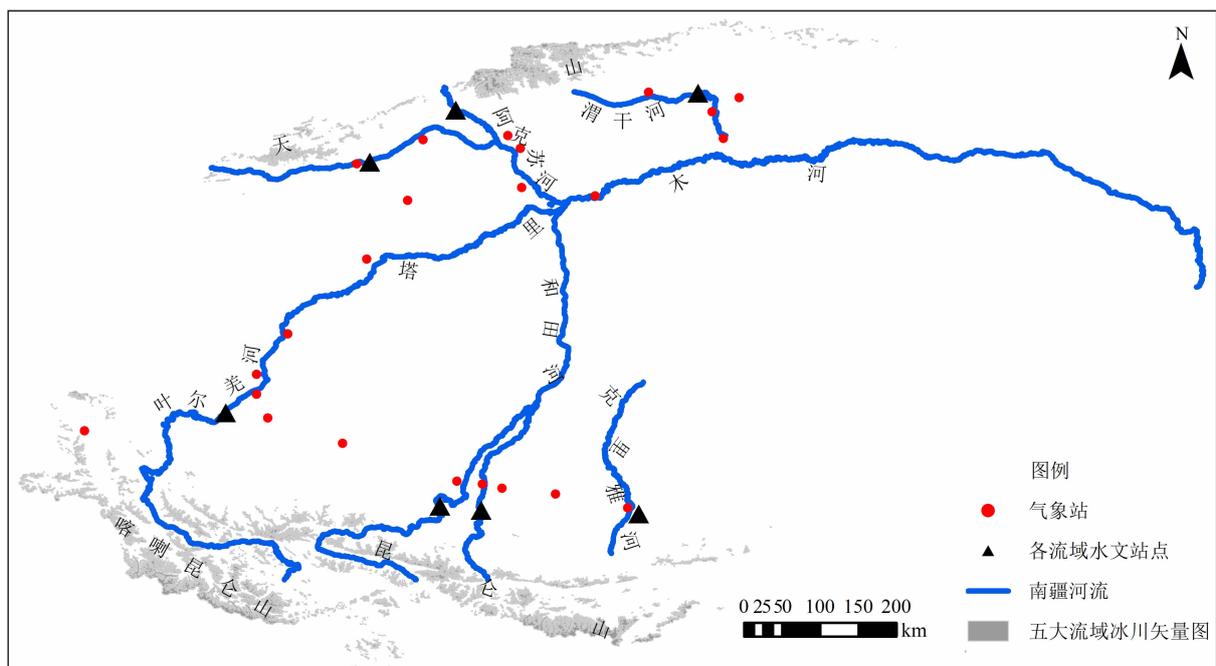


图1 研究区各流域水文站、气象站和冰川分布

Fig. 1 Locations of watersheds, hydrological stations, meteorological stations and glaciers in the study area, China

到总径流量的 53.1%、30.8%、64.3%、59.5%、69.0%，除渭干河外，均超过 50%，克里雅河接近 70%。冰川是南疆地区的“固体水库”，其季节性融水是该地区重要的水资源补给，对该地区绿洲稳定和可持续发展具有极为重要的意义。

2 数据与方法

2.1 数据

本研究应用阿克苏河、渭干河、叶尔羌河、和田河、克里雅河流域内 1961—2019 年气象数据(气温、降水)以及第一次和第二次冰川编目资料^[29-30]。其中,气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),地图数据选用全国地理信息资源目录服务系统的 30 m 全球地表覆盖数据(<http://www.webmap.cn/>),冰川编目数据来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),DEM 数据使用地理空间数据云 30 m 分辨率数字高程数据(<http://www.gscloud.cn/>)。

2.2 度日因子模型

度日因子模型是估算冰川物质平衡以及其对气候变化响应度最常用的研究方法之一。研究表明,度日模型在流域尺度上能较好地模拟出物质平衡和融水径流^[31]。

2.2.1 模型原理

在度日模型中输入月气象数据(气温和降水),根据冰川分布的空间差异来估算冰川的物质平衡和融水径流量。对于冰雪来说,物质平衡模型的计算方法如下:

$$A = DDF \times PDD \quad (1)$$

式中, A 为某一时段内冰雪的消融水当量(mm); DDF 为冰或雪的度日因子($\text{mm}/\text{d} \cdot ^\circ\text{C}$); PPD 为同一时段内的正积温,由下式获取:

$$PDD = \sum_{i=1}^n H_i \cdot T_i \quad (2)$$

式中, n 为月天数, $i=1$ 指从每月第 1 天计算起; T_i 为某一天的日均气温($^\circ\text{C}$), H_i 为逻辑变量,当 $T_i \geq 0$ $^\circ\text{C}$ 时, $H_i = 1$,当 $T_i < 0$ $^\circ\text{C}$ 时, $H_i = 0$ 。某一高程带内的冰川物质平衡量及冰川融水径流深的计算方法如下:

$$B_{m,i} = Ps_{m,i} - (1 - f) \times Ag_{m,i} \quad (3)$$

$$Q_{m,i} = Pl_{m,i} - (1 - f) \times Ag_{m,i} \quad (4)$$

式中, $B_{m,i}$ 为第 m 月 i 高程带内的冰川物质平衡量(mm); $Q_{m,i}$ 为 m 月 i 高程带内的冰川融水径流深; $Ps_{m,i}$ 为某时段内的冰川表面累积量,即固态降水量(mm); $Pl_{m,i}$ 为液态降水量(mm); $Ag_{m,i}$ 为 m 月 i 高程带内的冰川消融量(mm); f 为再冻结比例因子。

$Ps_{m,i}$ 和 $Pl_{m,i}$ 由康尔泗^[32] 等提出的临界温度法进行分离:

$$Ps_{m,i} = \begin{cases} P_{m,i} & T_{m,i} < T_s \\ P_{m,i} \times \frac{T_{m,i} - T_s}{T_l - T_s} & T_l > T_{m,i} \geq T_s \\ 0 & T_{m,i} > T_l \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_{m,i}$ 为 m 月 i 高程带的月平均降水量(mm); $T_{m,i}$ 为 m 月 i 高程带的月平均气温($^\circ\text{C}$); T_s 为固态降水临界气温($^\circ\text{C}$); T_l 为液态降水临界气温($^\circ\text{C}$)。

冰川消融量 $Ag_{m,i}$ 取决于潜在消融量 $Pms_{m,i}$ 和积雪累积量 $Acc_{m,i}$ 之间的关系。 $Pms_{m,i}$ 由 $Pdd_{m,i}$ 和 $Ddfs$ 计算得到。公式如下:

$$Pms_{m,i} = Pdd_{m,i} \times Ddfs \quad (6)$$

$$Ag_{m,i} = \begin{cases} Pms_{m,i} - Ems_{m,i} & Acc_{m,i} \geq Pms_{m,i} \\ Pms_{m,i} + (Pdd_{m,i} - \frac{Pdd_{m,i}}{Ddfs}) \times Ddfi - Ems_{m,i} & 0 < Acc_{m,i} < Pms_{m,i} \\ Pdd_{m,i} \times Ddfi - Ems_{m,i} & Acc_{m,i} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$Acc_{m,i} = \begin{cases} Acc_{m,i} - Pms_{m,i} & Acc_{m,i} \geq Pms_{m,i} > 0 \\ 0 & Acc_{m,i} < Pms_{m,i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Pdd_{m,i}$ 为第 m 月第 i 高程带内的正积温; $Ddfs$ 和 $Ddfi$ 分别是雪和冰的度日因子;蒸发量 $Ems_{m,i}$ 相对来说比较小,其在高山集水区的水量平衡中的作用有限^[33],因此在度日模型中将其假设为 0,忽略不计。

某一流域内的冰川融水径流深是各海拔带的冰川径流深之和,而冰川融水径流量为各海拔带的冰川融水径流量和,如下式所示:

$$Qd_i = \sum_{m=1} \sum_{i=1} Q_{m,i} \quad (9)$$

$$Q_k = \sum_{m=1} \sum_{i=1} Q_{m,i} \times Sa_i / 1000 \quad (10)$$

式中, Qd_i 为某一流域年融水径流深(mm); Q_k 为某一流域年融水径流量(m^3); Sa_i 为某一高程带的面积(m^2)。

2.2.2 模型参数的确定

各高程带内冰川面积根据流域内冰川矢量图和DEM按100 m间隔生成。计算过程中,各高程带之间相互独立。

在冰川尺度上,由于实测数据的稀缺,度日因子值一般基于典型冰川的观测数据进行率定,再推广应用于周边冰川。本研究参考已有研究的度日因子值(表1),再通过模型模拟所得的流域冰川物质平衡、融水径流与已有资料进行对比,调整和确定各个流域内的度日因子平均值。

表1 各流域度日因子系数

Tab. 1 Model parameters of each basin

流域名称	冰度日因子	雪度日因子
阿克苏河	2.50	1.40
渭干河	2.20	1.50
叶尔羌河	7.30	4.50
和田河	8.80	5.40
克里雅河	11.00	7.00

冰川末端的气温和降水数据通过流域内国家气象站实测数据插值获得。气温和降水梯度参考前研究数据,再据此获得各高程带内的气温和降水数据(表2、表3)。虽然插值获取的气象数据对应到具体位置可能不够精确,但是由于最终计算的是流域尺度上的冰川融水,因此只求在流域尺

度上尽量合理。

各流域固态降水临界温度($T_s = -0.5^\circ\text{C}$)、液态降水临界温度($T_l = 2^\circ\text{C}$)、固态降水校正系数(1.3)、液态降水校正系数(1.1)以及融水再冻结比例($f = 0.2$)等依据已有的研究结论^[13]。

3 模型验证

由于本研究区域在流域尺度上并无实测数据,模拟结果通过与其他文献结果作比较,以间接验证^[34-38]。主要从冰川物质平衡和冰川融水径流两个方面进行:

(1) 冰川物质平衡。计算结果显示,1961—1990年叶尔羌河流域冰川平均年物质平衡为 -121.77 mm ,同期高鑫等估算结果为 -117.5 mm ,康尔泗等利用最大熵原理估算出1954—1990年叶尔羌河流域冰川多年平均物质平衡为 -100.1 mm ;1961—2000年叶尔羌河流域冰川年物质平衡为 -158.3 mm ,同期,沈永平等估算帕米尔和喀喇昆仑山的冰川年物质平衡约为 -150 mm ;1991年之后物质平衡负平衡更加显著,平均年物质平衡达到 -320.1 mm ,同期其他研究估算值为 -301.2 mm 。

(2) 冰川融水径流。模型模拟的五个流域1961—2000年的年平均冰川融水径流量为 $117.27 \times 10^8\text{ m}^3$,同期高鑫等测算的塔里木河流域年

表2 纬度区间不同月份的气温递减率

Tab. 2 Temperature lapse rates in different months at different latitudes

纬度	气温递减率/($^\circ\text{C}/100\text{m}$)											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
36°N	0.39	0.42	0.46	0.49	0.49	0.48	0.46	0.45	0.41	0.44	0.50	0.42
40°N	0.29	0.39	0.48	0.58	0.61	0.63	0.59	0.56	0.53	0.47	0.43	0.31

表3 各流域月降水量梯度

Tab. 3 Monthly precipitation gradients in various basin

流域名称	月降水量梯度/($\text{mm}/100\text{m}$)											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
阿克苏河	0.29	0.35	0.75	0.75	2.33	4.59	4.81	4.35	2.37	0.77	0.20	0.42
渭干河	0.60	0.60	0.60	0.80	4.80	5.00	5.20	4.90	1.50	0.80	0.60	0.60
叶尔羌河	0.42	0.49	0.42	0.78	1.64	2.64	2.07	1.56	1.07	0.27	0.10	0.32
和田河	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.81	2.01	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
克里雅河	0.38	0.38	0.48	0.38	0.38	1.20	1.20	1.20	0.38	0.38	0.38	0.38

平均冰川融水径流量为 $138.72 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2000—2010 年的年平均冰川融水径流量为 $129.94 \times 10^8 \text{ m}^3$, 康尔泗等 2000 年测算的值为 $133.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 谢自楚等 2004 年测算的值为 $126.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。模型模拟的为阿克苏河、渭干河、叶尔羌河、和田河和克里雅河五大流域的冰川融水径流量, 对比数据则为整个塔里木河流域的冰川融水径流量, 因此数据相对偏小。

从上述对比验证的结果看, 本模型的计算结果与其他研究的测算结果比较吻合, 能够较好地模拟流域内冰川物质平衡和冰川融水径流量, 可信度较高。

4 气候变化对冰川融水的影响

气温和降水量的变化必然导致水资源配比的变化。气温变化影响南疆地区冰川的物质消融和积累, 进而影响径流量的增减。由度日模型模拟的各流域冰川融水径流量及气温的关系图(图 2)可以看出, 冰川消融产生的融水径流与气温呈现出一致的趋势, 随着气温上升而增加。

根据度日模型模拟了南疆五大流域自 1961 年以来的冰川物质平衡量。由图 3 可看出, 发源于天山的阿克苏河和渭干河流域, 近 60 年来始终处于物质亏损状态, 累积物质负平衡值分别为 -17.5 m 和 -12.4 m ; 叶尔羌河流域物质亏损也相当严重, 累积物质负平衡值为 -14.2 m ; 和田河和克里雅河流域在 1990 年之前冰川物质基本上处于正平衡状态, 略有积累, 1990 年以后物质亏损, 60 年来累积物质平衡 -5.0 m 和 -0.9 m 。2000 年后是各流域物质亏损最严重时期。

阿克苏河与渭干河发源于塔里木盆地北缘的天山, 平均海拔 4000 m 以上, 受西风环流影响, 流域内高海拔地区降水丰沛, 且两河流域的降水量增加趋势显著 ($8.56 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $8.53 \text{ mm}/10\text{a}$)。近年来, 尽管流域内降水量呈增加趋势, 但是由于气温上升显著, 由气温上升导致的冰川消融速度快于由降水带来的冰川物质累积速度, 因此流域内冰川物质负平衡加剧。这表明, 在阿克苏河及渭干河流域气温上升对冰川的影响大于降水增加的影响。

叶尔羌河西侧发源于帕米尔高原, 南侧发源于喀喇昆仑山和西昆仑山脉, 高山区平均海拔

5500 m, 冰山区集中分布在海拔 5100 ~ 5900 m 之处。叶尔羌河流域在 2000 年后气温增加显著, 降水量有一定的增加 ($5.87 \text{ mm}/10\text{a}$), 但增加趋势小于阿克苏河与渭干河。气温的上升导致冰川消融加剧, 物质亏损严重。

和田河与克里雅河位于塔里木盆地南缘, 发源于昆仑山脉, 山区平均海拔 5500 ~ 6000 m, 从帕米尔高原进入塔里木盆地的水汽由西向东逐渐减弱, 因此流域内降水稀少, 降水量增加趋势不显著 ($2.46 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $2.75 \text{ mm}/10\text{a}$)。1980 年之前, 流域内冰川均为正平衡, 之后和田河呈现微弱的负平衡, 至 2000 年后均表现出显著的负平衡, 与流域内气温发生显著变化的时间极其吻合。

综上所述, 近 60 年来, 南疆主要流域气温呈现显著的上升趋势, 冰川融水量显著增加, 冰川物质亏损严重, 且呈现出持续亏损的趋势。同时, 各流域内降水量也呈现出不同程度的增加趋势, 降水量的丰枯不仅直接影响径流量, 也由于影响冰雪累积而间接地影响到冰川融水量。在干旱且少雨的年份, 以晴朗天气居多, 在持续高温下冰川强烈消融, 释放出大量冰川融水; 在雨量较丰沛的年份, 以降雨湿润天气居多, 在热量不足的情况下冰川消融作用微弱, 冰川融水减少。因此, 冰川调节了不同气候下流域内的河川径流量, 使得干旱年份不缺水, 而多雨年份则不会发生严重的洪涝灾害, 具有重要的旱涝灾害缓冲功能。

5 气候变化条件下南疆水资源风险

5.1 南疆地区冰川现状

对比第一次(1999 年)和第二次(2014 年)冰川编目数据(表 4), 天山山脉及帕米尔高原的冰川退缩比较严重, 面积退缩率超过 20%, 冰川量退缩达到 30% 左右; 喀喇昆仑山退缩较小, 面积退缩率仅为 3.89%, 冰储量退缩在 10% 左右; 昆仑山的面积退缩率为 6.05%, 且冰川退缩在人口密集的周边低海拔地区最为明显^[39-40]。同时, 从表 5 中各流域的面积退缩率可以看出, 发源于天山和帕米尔高原的阿克苏河及叶尔羌河流域的冰川面积退缩比率较高。

已有调查发现, 天山山脉约有 97.52% 的冰川在空间范围上呈现持续缩小的趋势, 在过去的 50 多

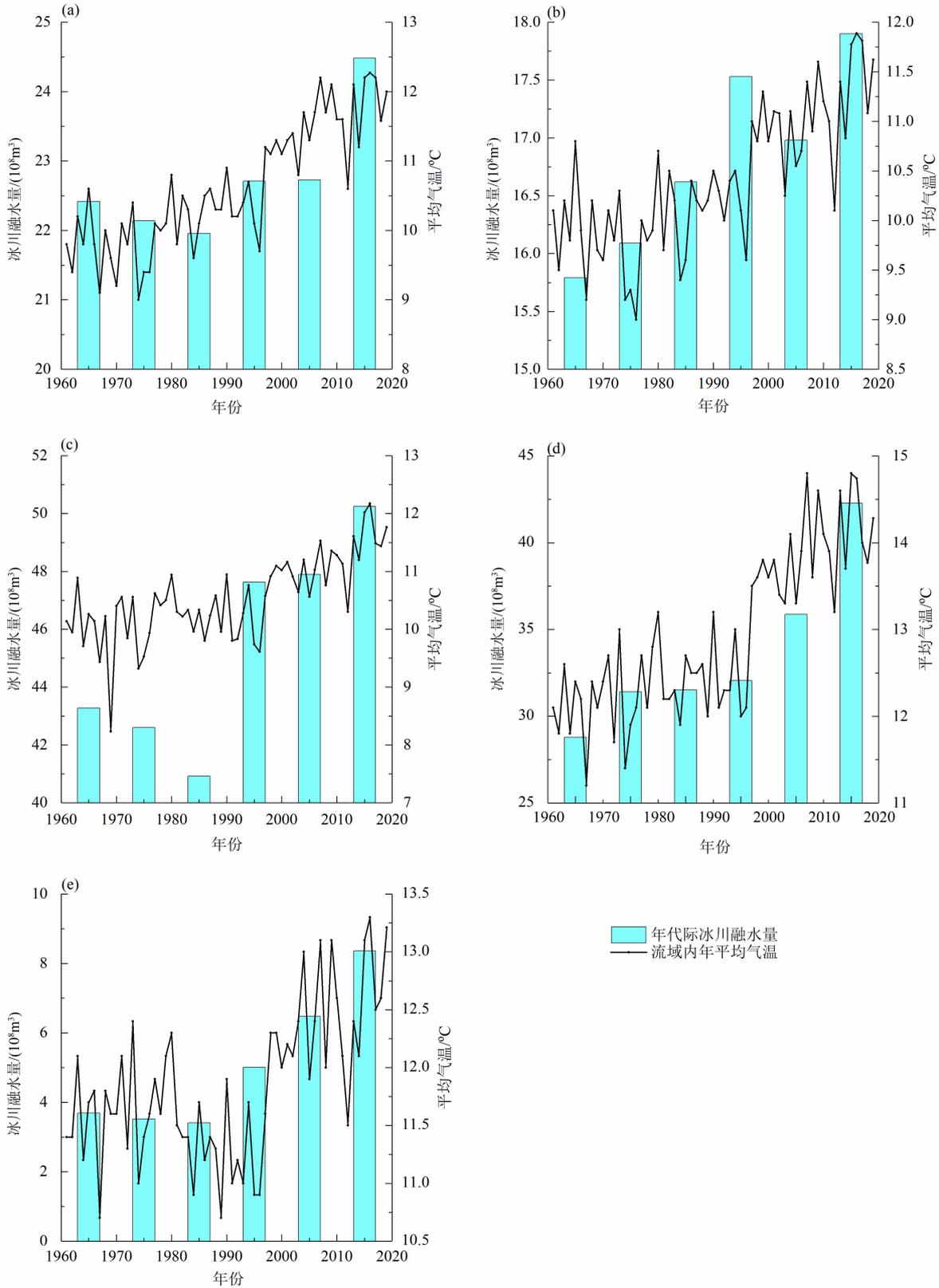


图2 各流域气温与冰川融水量对比图:

(a) 阿克苏河流域; (b) 渭干河流域; (c) 叶尔羌河流域; (d) 和田河流域; (e) 克里雅河流域

Fig.2 Temperature and glacial meltwater runoff in various basin: (a) Aksu; (b) Weigan; (c) Yarkant; (d) Hotan; (e) Kriya

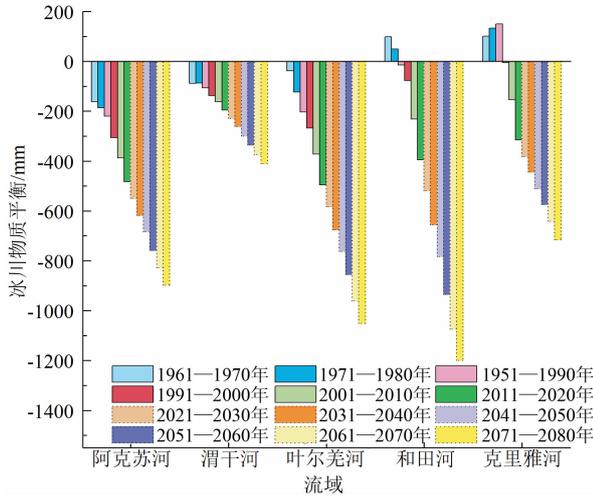


图3 各流域冰川物质平衡量
Fig. 3 Mass equilibrium of the glaciers

年里,冰川面积减少了 1619.82 km² (-18.41%), 储量亏损了 104.78 km³ (-12.16%)^[34]。其中,在两次冰川编目期间,阿克苏河流域冰川面积减少了 403.33 km², 退缩率为 -0.44%/a, 渭干河流域面积缩减 127.08 km², 退缩率为 -0.2%/a^[8, 41]。

叶尔羌河南部源于喀喇昆仑山和西昆仑山, 西侧源于帕米尔高原, 流域内许多冰川长期处于退缩

状态。对比两次冰川编目数据(表 5), 叶尔羌河流域冰川面积减少了 927 km², 退缩率为 -0.36%/a。随着气温上升, 大面积的冰川消融使得冰川物质亏损严重, 产生大量冰川融水, 叶尔羌河流域冰川融水量占整个流域内径流量的 64% 左右。

和田河及克里雅河流域发源于昆仑山, 昆仑山区是我国西部冰川数量最多的山系, 且以大规模冰川为主, 虽然温度上升使其处于退缩状态, 总面积退缩率为 7% 左右, 但总体相对稳定^[4, 44]。和田河流域近年来由于气温上升速率较高, 冰川退缩率达 -0.36%/a, 较克里雅河流域(-0.095%/a)显著。

通过流域内冰川现状的分析可以看出, 在气温持续上升的背景下, 南疆地区主要山脉和流域内冰川呈退缩趋势, 面积及冰储量均不同幅度地减少。施雅风等人研究指出, 预计 21 世纪上半期塔里木盆地冰川融水将持续增加, 增量达到 25% ~ 50% 左右, 小型冰川的融水将在本世纪前期达到峰值后开始下降, 而中大型冰川的融水量达到最大值会稍晚些, 将出现在本世纪后期^[45-46]。

5.2 未来南疆面临的水资源风险

径流量的增加短期内有利于南疆地区的发展,

表 4 第一次(1999 年)和第二次(2014 年)编目中各山脉冰川条数、面积及储量对比^[28, 41]
Tab. 4 Comparison of the number, area and volume of glaciers in first and second inventory in each mountain

山脉	第一次冰川编目(1999)			第二次冰川编目(2014)			退缩率	
	条数	面积/km ²	冰储量/km ³	条数	面积/km ²	冰储量/km ³	面积/%	冰储量/%
天山山脉	9081	9236	1012	7934	7179.77	707.95 ± 45.05	-22.26	-25.60 ~ -34.50
帕米尔高原	1289	2696	248	1612	2159.62	176.89 ± 4.63	-19.90	-26.81 ~ -30.54
喀喇昆仑山	3454	6231	686	5316	5988.67	558.18 ± 34.68	-3.89	-8.52 ~ -13.58
昆仑山	7694	12266	1283	8922	11524.13	1106.34 ± 56.60	-6.05	-9.37 ~ -18.18

表 5 第一次(1999 年)和第二次(2014 年)编目中各流域冰川条数及面积对比^[18-19]
Tab. 5 Comparison of the number and area of glaciers in first and second inventory in each basin

流域冰川(编码)	第一次冰川编目		第二次冰川编目		减少幅度	
	条数	面积/km ²	条数	面积/km ²	面积退缩/km ²	退缩率/%
阿克苏河流域(5Y67)	1005	2411.560	762	1797.580	403.330	-0.440 ^[42]
渭干河流域(5Y68)	853	1784.140	878	1657.060	127.080	-0.200 ^[42]
叶尔羌河流域(5Y65)	3297	6341.820	3274	5414.770	927.050	-0.360 ^[43]
和田河流域(5Y64)	3594	5733.370	3801	5014.690	718.680	-0.360 ^[33]
克里雅河流域(5Y63)	905	1479.780	978	1381.090	98.690	-0.095 ^[44]

然而对于长期的可持续发展却存在一定的安全隐患。水资源量的增加致使绿洲面积拓展,使得人类活动区域不断扩大,耕地面积随之增加,耕地面积的增加必然大幅度提升对水量的需求,为绿洲的可持续发展带来风险。2018年IPCC特别报告指出,山地冰川的退缩将改变下游的可用水量和水质,对高山地区的人们甚至下游社区产生影响^[47]。长期而言,随着冰川不断退缩,冰储量将逐步下降,冰川融水产生的径流也相应减少,整个绿洲地区的可用水资源量变少,在干旱时期尤其是极端干旱的年份,失去了冰川的缓冲调节作用^[48],南疆地区的绿洲将面临着巨大的风险。

气候变暖影响了降水及冰川融化过程,导致径流及蓄水的变化。已有研究预测,未来天山山区将由于冰川退缩而致使径流过程发生很大变化^[49-50]。即使控制在最低升温情况下(RCP2.6,即至2100年全球升温低于2℃目标),天山—帕米尔—北喀喇昆仑山地区在2045年之前面临着冰川持续退缩的状况,若在RCP8.5情境下(至2100年全球升温低于5℃目标),温度升高将会导致该区域内冰川大幅度退缩,与20世纪60年代相比,2095年大部分冰川将消失,冰水储量减少54%~65%,有些区域高达94%,这将严重削弱冰川在高山地区的缓冲器功能^[51]。

因此,根据未来气候变化趋势预测冰川融水径流的变化趋势,及其可能出现拐点的时间节点,有助于指导南疆地区水资源管理与合理利用、预防旱涝灾害的发生。然而,目前绝大多数气象数据的模拟使用全球气候模式输出,但作为大尺度平均数据,其应用到单个流域则无法代表实际的气温和降水变化

情况^[52]。有研究显示,采用全球气候模式输出气象数据模拟1号冰川的融水径流,结果显示融水径流平稳减少直至冰川消亡时突然急剧减少,但利用1号冰川附近气象站的实测数据斜率模拟,结果显示出有拐点存在。这主要是由于冰川所在地的升温速率远高于全球平均值^[53]。而南疆地区处于北半球中纬度地带,升温速率同样高于全球平均水平。因此,本研究根据南疆主要河流所在地区过去60年的气象数据,计算出研究区范围内各流域的气温和降水随着时间的大致变化趋势(表6),并基于此历史气候变化趋势进行情境设置,如表7。

表6 南疆主要河流气温和降水年际变化趋势

Tab.6 Change trends of temperature and precipitation of main rivers in southern Xinjiang

流域	气温		降水	
	斜率/(℃/10a)	Z值	斜率/(℃/10a)	Z值
阿克苏河	0.45	7.18**	8.56	2.55**
渭干河	0.32	5.30**	8.53	3.68**
叶尔羌河	0.29	5.99**	5.87	1.96*
和田河	0.44	6.39**	2.46	1.12
克里雅河	0.22	3.85**	2.75	0.78

注:*、**和*分别表示数据通过了0.01和0.05的显著性检验。

通过估算各流域内未来60年冰川物质平衡及融水径流量可以看出(图3、图4),各流域冰川持续融化,物质平衡持续亏损,但融水径流增加趋势却并不一致。预测结果显示,阿克苏河流域冰川融水在21世纪50至60年代将达到顶峰,叶尔羌河流域冰川融水径流量则在21世纪70年代达到

表7 南疆主要流域气候变化情境

Tab.7 Climate change scenarios in main basins

流域	2030年		2050年		2080年	
	气温/℃	降水/mm	气温/℃	降水/mm	气温/℃	降水/mm
阿克苏河流域	+0.45	+8.56	+1.35	+25.68	+2.70	+51.36
渭干河流域	+0.32	+8.53	+0.96	+25.59	+1.92	+51.18
叶尔羌河流域	+0.29	+5.87	+0.87	+17.61	+1.74	+35.22
和田河流域	+0.44	+2.46	+1.32	+7.38	+2.64	+14.76
克里雅河流域	+0.22	+2.75	+0.66	+8.25	+1.32	+16.50

注:+表示未来气温的上升幅度和降水的增加幅度。

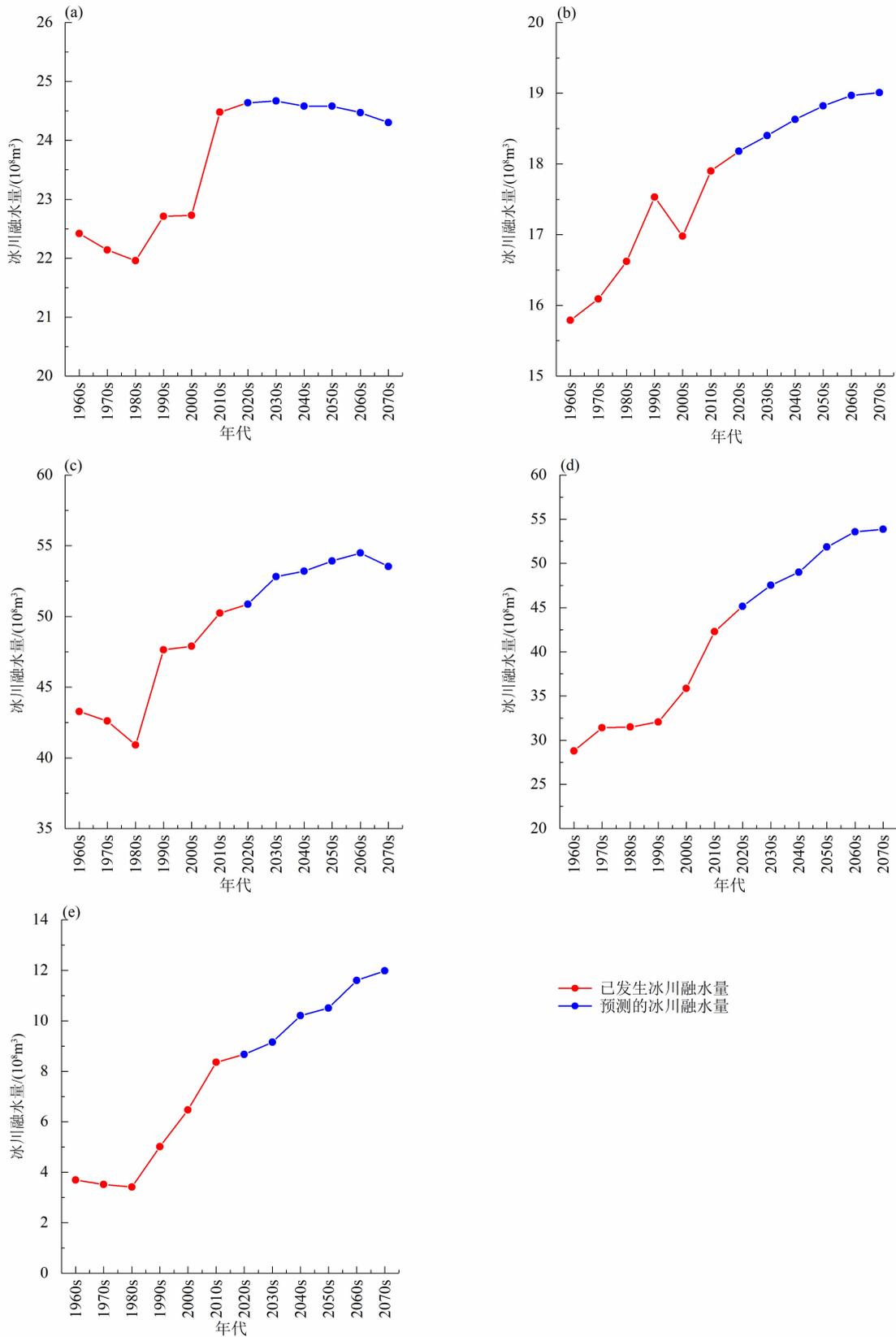


图4 各流域冰川融水量预测：

(a) 阿克苏河流域；(b) 渭干河流域；(c) 叶尔羌河流域；(d) 和田河流域；(e) 克里雅河流域

Fig. 4 Prediction of the glacial meltwater in basins: (a) Aksu; (b) Weigan; (c) Yarkant; (d) Hotan; (e) Kriya

峰值后呈现逐步减少的趋势,其他三个流域在 21 世纪 80 年代之前冰川融水量稳定增加,但增加趋势逐渐趋于平缓。

1990 年之前,阿克苏河流域每十年的平均冰川融水量呈微弱递减趋势,而在 1990 年气温突变之后融水量显著增加。由于气温的不断上升,冰川持续后退,冰川面积越来越小,预计冰川融水量在 21 世纪 50 或 60 年代达到顶峰后呈现减少态势,但减少趋势较缓,这可能与阿克苏河流域持续增加的降水量有关,尤其在低气温天气,固态降水增加,为冰川物质积累提供有利条件,减缓了冰川退缩的速度。相对于阿克苏河流域,渭干河流域内气温上升较缓,冰川面积退缩率也相对较缓,且近年来降水量同样显著增加,因此流域内冰川融水持续稳定释放,2080 年之前并未出现拐点。

叶尔羌河流域内虽然气温上升趋势较阿克苏河流域内缓慢,但其位于塔里木盆地南缘,气温基数高于北缘的阿克苏河流域,气温上升导致冰川大面积消融。此外,流域内降水量也小于盆地北缘流域,对冰川补给较少,因此物质持续严重亏损。20 世纪 90 年代之前,叶尔羌河流域冰川融水量在年代际尺度上呈现出减少趋势,90 年代之后则大幅增加,与流域内气温出现显著变化的时间非常吻合。由于冰川面积大幅退缩,冰川融水径流量持续增加,预计叶尔羌河流域的冰川融水径流量将在 2070 年前达到最高峰,之后开始回落。但是,有学者研究表明,由于近年来喀喇昆仑山冰川地区降水量呈增加趋势,从而缓解了因升温而导致的冰川退缩,甚至出现了支冰川前进超覆的现象,即所谓的“喀喇昆仑异常”^[54-55],这将有助于叶尔羌河流域冰川的物质积累和前进,延缓“拐点”的到来。发源于昆仑山的和田河与克里雅河流域的冰川,随着气温上升持续融化,冰川融水径流稳定增加,但在 2070 年后,冰川融水增加量趋于平缓。

南疆水资源主要来源于降水和高山冰川的季节性融水,降水和冰川融水的变化将直接影响水资源的变化。在过去的几十年里,尽管形成水源的径流有所增加,但是随着人类的发展和水平的提高,流域内对水资源的需求同时呈现逐年增加的趋势,因此下游径流量反而持续减少^[56]。气候持续变暖引起冰川消融,最终将导致冰川及其融水减少甚至消失,一旦遭遇降水干枯年份,若

没有冰川融水的缓冲,流域内绿洲将面临严重的缺水风险。

6 结论与讨论

采用月尺度的度日模型,模拟了 1961—2019 年南疆主要流域的物质平衡和冰川融水径流,并基于研究区范围内各流域的历史气候变化趋势设置情境,模拟和分析未来 60 年各流域内冰川融水径流量的变化趋势,预测冰川融水可能出现拐点的时间节点,主要结论如下:

(1)从 1961 年至今,阿克苏河、渭干河和叶尔羌河流域,冰川持续融化退缩;1990 年之前,和田河和克里雅河流域冰川物质正平衡,略有积累,1990 年以后物质亏损严重,且 2000 年之后为各流域物质亏损最严重的时期。60 年来,各流域累积物质平衡分别为 -17.5 m 、 -12.4 m 、 -14.2 m 、 -5.0 m 和 -0.9 m 。

(2)各流域冰川持续融化,但融水径流增加趋势并不一致。预测阿克苏河流域冰川融水在 21 世纪 50 或 60 年代将达顶,叶尔羌河流域冰川融水径流量自 21 世纪 70 年代后呈现逐步减少的趋势,其他三个流域在 21 世纪 80 年代之前冰川融水稳定增加,但增加趋势逐渐趋于平缓。

(3)模型模拟结果可能存在的误差主要包括:度日因子值为流域平均值,未考虑时间和空间上的变化;冰川末端气象数据通过周边气象站实测数据插值获得,存在一定的误差;降水梯度在设置时未考虑最大降水高度带,某些高度带可能存在偏差;冰川面积参考两次冰川编目数据的变化率,这可能导致其他时期的模拟融水量有一定偏差;气候变化趋势根据历史数据来估算,未考虑其他因素(如人类活动等)对气候存在的影响,预测的冰川物质平衡和融水径流可能存在偏差。

在气候变化的影响下,气温上升导致冰川消融,已成为全球关注的水生态安全问题。我国西北干旱地区,特别是在冰川融水补给比重较高的南疆区域,由于冰川融水量增加造成的水资源重分配问题,对区域水资源利用与管理影响极大。在实测资料极其匮乏的南疆地区,本研究尽量考虑了气温、降水和冰川面积在时间和空间上的变化,使用实测气象资料进行插值获取冰川最低海拔处气象数据作为模型的

输入数据,并根据研究区历史气候变化趋势推演出未来气候变化情境,参考第一次和第二次冰川编目中冰川面积的变化率,在区域空间尺度和年代际时间范围内估算未来 60 年研究区内的冰川物质平衡及冰川融水量,以及冰川融水可能出现拐点的时间段,探讨未来南疆可能面临的水资源风险,为地区水资源管理、合理利用以及有效预防旱涝灾害提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Special report: The ocean and cryosphere in a changing climate — summary for policymakers [R]. WMO/UNEP, 2019:4
- [2] 魏潇娜,龙爱华,尹振良,等. 和田河流域冰川融水径流对气候变化的响应模拟研究[J/OL]. 水资源保护, 2021 - 10 - 09. [WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation study on the response of glacier runoff to climate change in Hotan River basin [J/OL]. Water Resources Protection, 2021 - 10 - 09] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20211008.1555.020.html>
- [3] LI Zongxing, LI Zongjie, FENG Qi, et al. Runoff dominated by supra-permafrost water in the source region of the Yangtze River using environmental isotopes [J]. Journal of Hydrology, 2019, **582**:124506. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124506
- [4] 宋梦媛,李忠勤,金爽,等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川流域同位素特征及径流分割研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(3): 156 - 160. [SONG Mengyuan, LI Zhongqin, JIN Shuang, et al. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, **29**(3):156 - 160] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.097
- [5] PENNA D, ENGEL M, MAO L, et al. Tracer-based analysis of spatial and temporal variations of water sources in a glacierized catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, **18**(12):5271 - 5288. DOI: 10.5194/hess-18-5271-2014
- [6] SUN Jiaqi, WANG Xiaojun, CAO Yongqiang, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of hydrological and meteorological elements in Nenjiang River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018:137. DOI: 10.1007/s00704 - 018 - 2641 - z
- [7] CHEN R S, SONG Y X, KANG E S, et al. A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian Mountains of China and its meteorological gradient [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2014, **46**(2):505 - 523. DOI: 10.1657/1938 - 4246 - 46.2.505
- [8] 沈永平,刘时银,丁永健,等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(2):513 - 527. [SHEN Yongping, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Glacier mass balance change in Tailanhe River watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, **25**(2):513 - 527]
- [9] 骆建伟,柯长青,喻薛凝. 2000—2020 年兴都库什东部冰川区物质平衡变化及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(1): 159 - 170. [LUO Jianwei, KE Changqing, YU Xuening. Variations of glacier mass balance in the eastern Hindu Kush from 2000 to 2020 and its influencing factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, **44**(1):159 - 170] DOI: 10.7522/j.issn.1000 - 0240.2022.0027
- [10] LIU Shiyin, ZHANG Yong, ZHANG Yingsong, et al. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region, China [J]. Journal of Glaciology, 2009, **55**(190):353 - 362. DOI: 10.3189/002214309788608778
- [11] ZHANG Shiqiang, GAO Xin, ZHANG Xiaowen, et al. Projection of glacier runoff in Yarkant River basin and Beida River basin, western China [J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(18): 2773 - 2781. DOI: 10.1002/hyp.8373
- [12] 张正勇,何新林,刘琳,等. 中国天山冰川生态服务功能及价值评估[J]. 地理学报, 2018, **73**(5): 856 - 867. [ZHANG Zhengyong, HE Xinlin, LIU Lin, et al. Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(5): 856 - 867] DOI: 10.11821/dlx201805006
- [13] 许艾文. 近 40 年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2017: 1 - 62. [XU Aiwen. Monitoring glacier change based on remote sensing in China Karakoram for the last four decades [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017:1 - 62] DOI: 10.7666/d.D01300462
- [14] 李成秀,杨太保,田洪阵. 近 40 年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素[J]. 山地学报, 2015, **33**(2): 157 - 165. [LI Chengxiu, YANG Taobao, TIAN Hongzhen. Variation of western Kunlun Mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976 - 2010 [J]. Mountain Research, 2015, **33**(2): 157 - 165] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000021
- [15] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(2):152 - 164. [SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(2):152 - 164] DOI: 10.3321/j.issn:1001 - 7410.2003.02.005
- [16] 蓝永超,沈永平,吴素芬,等. 近 50 年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(11):1 - 8. [LAN Yongchao, SHEN Yongping, WU Sufen, et al. Changes of the glaciers and the glacier water resources in the typical river basins on the north and south slopes of the Tianshan Mountains since 1960s [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, **21**(11):1 - 8] DOI: 10.3969/j.issn.1003

- 7578.2007.11.001
- [17] 周海鹰,沈明希,陈杰,等. 塔里木河流域 60a 来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(2): 221 - 229. [ZHOU Haiying, SHEN Mingxi, CHEN Jie, et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River Basin during the last 60 years [J]. Arid Land Geography, 2018, **41**(2): 221 - 229] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2018.02.001
- [18] IMMERZEEL W W., VAN BEEK L P H., BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers [J]. Science, 2010, **382**(5984): 1382 - 1385. DOI: 10.1126/science.1183188
- [19] 左京平. 气候变化影响下塔里木河流域径流不确定性与缺水风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2021: 1 - 161. [ZUO Jingping. Assessment of the uncertainty of runoff and the water shortage risk in the Tarim River basin under the impact of climate change [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021: 1 - 161] DOI: 10.27149/d.cnki.ghdsu.2021.000391
- [20] 邓海军,陈亚宁. 中亚天山山区冰雪变化及其对区域水资源的影响[J]. 地理学报, 2018, **73**(7): 1309 - 1323. [DENG Haijun, CHEN Yaning. The glacier and snow variations and their impact on water resources in mountain regions: A case study in Tianshan Mountains of central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(7): 1309 - 1323] DOI: 10.11821/dlxb201807010
- [21] 王大伟,师庆东,董弟文,等. 新疆克里雅河径流量变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, **35**(6): 1271 - 1279. [WANG Dawei, SHI Qingdong, DONG Diwen, et al. Response of runoff volume change to climate in the Keriya River in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2018, **35**(6): 1271 - 1279] DOI: 10.13866/j.azr.2018.06.03
- [22] ZHAO Qiudong, ZHANG Shiqiang, DING Yongjian, et al. Modeling hydrologic response to climate change and shrinking glaciers in the highly glacierized Kunma Like River catchment, central Tian Shan [J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, **16**(6): 2383 - 2402. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0231.1
- [23] SORG A, BOLCH T, STOFFEL M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (central Asia) [J]. Nature Climate Change, 2012, **2**(10): 725 - 731. DOI: 10.1038/NCLIMATE1592
- [24] HUSS M, HOCK R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. Nature Climate Change, 2018, **8**(2): 135 - 140. DOI: 10.1038/s41558-017-0049-x
- [25] ROUNCE D R, HOCK R, SHEAN D. Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source Python Glacier Evolution Model (PyGEM) [J]. Frontiers in Earth Science, 2020, **7**: 331. DOI: 10.3389/feart.2019.00331
- [26] PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. Nature, 2010, **467**(7311): 43 - 51. DOI: 10.1038/nature09364
- [27] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 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. [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 513 - 527] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0204.2013.0061
- [28] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 3 - 16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 3 - 16] DOI: 10.11821/dlxb201501001
- [29] 吴立宗,李新. 中国第一次冰川编目数据集[G]. 寒区旱区科学数据中心, 2004. [WU Lizong, LI Xin. First Glacier Inventory Dataset of China [G]. Cold and Arid Regions Scientific Data Center, 2004] DOI: 10.3972/westdc.011.2013.db
- [30] 上官冬辉,刘时银,郭万钦,等. 中国第二次冰川编目数据集[G]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 2014. [SHANGGUAN Donghui, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Second Glacier Inventory Dataset of China [G]. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2014] DOI: 10.3972/glacier.001.2013.db
- [31] ZHANG Shiqiang, YE Baisheng, LIU Shiyin. A modified monthly degree-day model for evaluating glacier runoff changes in China. Part I: Model development [J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(11): 1686 - 1696. DOI: 10.1002/hyp.8286
- [32] KANG Ersi, CHENG Guodong, LAN Yongchao, et al. A model for simulating the response of runoff from the mountainous watersheds of inland river basins in the arid area of northwest China to climatic changes [J]. Science in China, 1999, **42**(1): 52 - 63. DOI: 10.1007/bf02878853
- [33] 李成秀. 昆仑山冰川和积雪变化的遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2014: 1 - 63. [LI Chengxiu. Remote sensing monitoring of glacier and snow cover in Kunlun Mountain [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014: 1 - 63]
- [34] 高鑫,叶柏生,张世强,等. 1961~2006年塔里木河流域冰川融水变化及其对径流的影响[J]. 中国科学:地球科学, 2010, **40**(5): 654 - 665. [GAO Xin, YE Baisheng, ZHANG Shiqiang, et al. Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961 - 2006 in the Tarim River Basin, China [J]. Science China: Earth Science, 2010, **40**(5): 654 - 665] DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.01081
- [35] 谢自楚,王欣,康尔泗,等. 中国冰川径流的评估及其未来 50a 变化趋势预测[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(4): 457 - 466. [XIE Zichu, WANG Xin, KANG Ersi, et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(4): 457 - 466] DOI: 10.

- 3969/j. issn. 1000 - 0240. 2006. 04. 001
- [36] 沈永平, 王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展 [J]. 冰川冻土, 2002, **24**(6): 819. [SHEN Yongping, WANG Shunde. New progress in glacier and water resources changes in Tarim Basin, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(6): 819] DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 - 0240. 2002. 06. 022
- [37] 康尔泗. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 14 - 54. [KANG Ersi. Ice and snow water resources and mountain runoff in arid area of northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 14 - 54]
- [38] 施雅风. 中国冰川与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 190 - 233. [SHI Yafeng. Glaciers and related environments in China [M]. Beijing: Science Press, 2000: 190 - 233]
- [39] 何毅, 杨太保, 田洪阵, 等. 近 23 年来天山冰川面积变化对气候的响应 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(3): 53 - 60. [HE Yi, YANG Taibao, TIAN Hongzhen, et al. Response of glacier area variation to climate change in northern Tianshan Mountains in the past 23 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, **27**(3): 53 - 60] DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2013. 03. 006
- [40] ZHANG Yong, LIU Shiyin, XU Junli, et al. Glacier change and glacier runoff variation in the Tuotuo River basin, the source region of Yangtze River in western China [J]. Environmental Geology (Berlin), 2008, **56**(1): 59 - 68. DOI: 10. 1007/s00254 - 007 - 1139 - 2
- [41] 刘潮海, 施雅风, 王宗太, 等. 中国冰川资源及其分布特征——中国冰川目录编制完成 [J]. 冰川冻土, 2000, **22**(2): 106 - 112. [LIU Chaohai, SHI Yafeng, WANG Zongtai, et al. Glacier resources and their distributive characteristics in China: A review on Chinese glacier inventory [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(2): 106 - 112] DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 - 0240. 2000. 02. 002
- [42] 邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959 年来中国天山冰川资源时空变化 [J]. 地理学报, 2017, **72**(9): 1594 - 1605. [XING Wucheng, LI Zhongqin, ZHANG Hui, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(9): 1594 - 1605] DOI: 10. 11821/dlxb201709005
- [43] 冯童, 刘时银, 许君利, 等. 1968—2009 年叶尔羌河流域冰川变化——基于第一、二次中国冰川编目数据 [J]. 冰川冻土, 2015, **37**(1): 1 - 13. [FENG Tong, LIU Shiyin, XU Junli, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the First and Second Glacier Inventories of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, **37**(1): 1 - 13] DOI: 10. 7522/j. issn. 1000 - 0240. 2015. 0001
- [44] 许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河—克里雅河流内流区近 30a 来的冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2006, **28**(3): 312 - 318. [XU Junli, LIU Shiyin, ZHANG Shiqiang, et al. Glaciers fluctuations in the Karamilan Keriya River watershed in the past 30 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(3): 312 - 318] DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 - 0240. 2006. 03. 002
- [45] 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究 [J]. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 96 - 106. [LI Zhongqin, LI Kaiming, WANG Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, north western China [J]. Quaternary Sciences, 2010, **30**(1): 96 - 106] DOI: 1. 3969/j. issn. 1001 - 7410. 2010. 01. 09
- [46] 施雅风. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估 [J]. 冰川冻土, 2001, **23**(4): 333 - 341. [SHI Yafeng. Estimation of water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(4): 333 - 341] DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 - 0240. 2001. 04. 001
- [47] MASSON-DELMOTTE V, PORTNER H O, CHEN Yang, et al. Global warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report [R]. IPCC: WMO/UNEP, 2018: 212 - 216.
- [48] PRITCHARD H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. Nature, 2019, **569**(7758): 649 - 654. DOI: 10. 1038/s41586 - 019 - 1240 - 1
- [49] YU Yang, CHEN Xi, DISSE M, et al. Climate change in Central Asia: Sino-German cooperative research findings [J]. Science Bulletin, 2020, **65**(9): 689 - 692. DOI: 10. 1016/j. scib. 2020. 02. 008
- [50] CHEN Yaning, LI Weihong, DENG Haijun, et al. Changes in Central Asia's Water Tower: Past, present and future [J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1): 35458. DOI: 10. 1038/srep35458
- [51] LUO Yi, WANG Xiaolei, PIAO Shilong, et al. Contrasting streamflow regimes induced by melting glaciers across the Tien Shan-Pamir-North Karakoram [J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1): 1 - 9. DOI: 10. 1038/s41598 - 018 - 34829 - 2
- [52] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险 [J]. 科学通报, 2019, **64**(27): 2770 - 2782. [YAO Tandong, YU Wusheng, WU Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(27): 2770 - 2782] DOI: 10. 1360/TB - 2019 - 0246
- [53] 李忠勤. 山地冰川物质平衡和动力过程模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 98 - 108. [LI Zhongqin. Mass balance and dynamic process simulation of mountain glacier [M]. Beijing: Science Press, 2019: 98 - 108]
- [54] LIN Hui, LI Gang, CUO Lan, et al. A decreasing glacier mass balance gradient from the edge of the Upper Tarim Basin to the Karakoram during 2000 - 2014 [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1): 6712 - 6719. DOI: 10. 1038/s41598 - 017 - 07133 - 8
- [55] KAPNICK S B, DELWORTH T L, ASHFAQ M, et al. Snowfall

less sensitive to warming in Karakoram than in Himalayas due to a unique seasonal cycle [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(11): 834–840. DOI: 10.1038/NGEO2269

[56] TAO Hui, GEMMER M, BAI Yungang, et al. Trends of

streamflow in the Tarim River Basin during the past 50 years: Human impact or climate change? [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 16(1):1–9. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.016

Melting of Mountain Glacier and Its Risk to Future Water Resources in Southern Xinjiang, China

NI Mingxia, DUAN Zhengrong, XIA Jianxin*

(*College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China*)

Abstract: Seasonal meltwater of alpine glaciers is principal water supply in southern Xinjiang, China. Global warming makes glaciers in southern Xinjiang continue to retreat and increase glacier meltwater, inevitably interfering local ecological environment and social economy. Past research on glacier changes merely involved in the estimation of meltwater runoff in the mountainous areas of several basins in southern Xinjiang, but short of exact prediction of the peak values of meltwater of these glaciers. By now, all achieved speculations on the turn points of glacier discharge appear to be recognized by neither in their broad time range nor in accuracy, but simulation outputs undesirable. In this study, a monthly Degree-Day Model was used to estimate the mass balance and meltwater runoff from 1961 to 2019 in five major basins in Southern Xinjiang. Based on historical meteorological records in the study areas, this study analyzed the changes of glacier mass balance, glacier meltwater runoff and its turn point in the next 60 years. Results show that: (1) Glaciers in the Aksu, Weigan, and Yarkant River basin have been at a stage of mass loss since 1961. Glaciers in Hotan and Kriya River basin were in a positive mass balance before the 1990s, with a slight mass accumulation, followed by severe mass loss. All basins turned to be in the stage of severe mass loss after 2000. (2) In the last 60 years, the total glacier mass balance in the basin was -17.5 m, -12.4 m, -14.2 m, -5.0 m, and -0.9 m, respectively. (3) According to our evaluation, although glaciers are inclined to continue to melt, there will be distinct inconsistency between basins for their increasing trend of meltwater runoff. To be specific, glacial meltwater is expected to peak in 2050—2060 in the Aksu River basin; In the Yarkant River basin it should continue to increase until 2070; In the other three basins, they will be in a steady increase before 2080, but with a tendency to increase in a slowly flat manner. This study would aid in the guidance of regional water resource regulation, proper utilization and effective disaster prevention in southern Xinjiang.

Key words: Southern Xinjiang; Degree-Day Model; glacier mass balance; glacial melt water; prediction