

基于多源遥感数据的玛纳斯河流域冰川物质平衡变化

赵贵宁¹, 张正勇¹, 刘琳¹, 徐丽萍¹, 王璞玉², 李丽¹, 宁珊¹

(1. 石河子大学, 石河子 832000; 2. 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, 兰州 730000)

摘要: 冰川物质平衡变化是连接气候和水资源的重要纽带,对河川径流有重要的调节功能。本文采用MOD11C3和TRMM 3B43等多源遥感数据驱动度日模型,模拟了2000—2016年玛纳斯河(简称玛河)流域冰川物质平衡过程,并分析了冰川融水对径流的补给规律。结果表明:①通过构建气温及降水反演模型能有效校正气象遥感原数据的精度,且经降尺度后能较精细刻画冰川区气候变化特征。冰川区年均气温和降水量分别为-7.57℃和410.71 mm,海拔4200 m处为气候变化剧烈地带,气温直减率以其为界上下分别为-0.03℃/100 m和-0.57℃/100 m,降水梯度分别为-2.66 mm/100 m和4.8 mm/100 m,海拔大于4700 m后降水又以5.17 mm/100 m递增。②研究期内流域冰川持续呈负平衡状态,累积物质平衡达-9811.19 mm w.e.,年均物质平衡介于-464.85~-632.19 mm w.e.之间。垂向物质平衡在消融区和积累区分别以244.83 mm w.e./100 m、18.77 mm w.e./100 m递增。2000—2002年、2008—2010年冰川消融减缓,2002—2008年、2010—2016年消融加剧,其中2005—2009年期间冰川亏损最为强烈。③年内河川径流对冰川物质平衡变化响应强烈,尤以7月、8月物质平衡亏损最为严重占全年总量的75.4%,使得同期河川径流量占全年径流总量的55.1%。年际冰川融水补给率波动于19%~31%之间,可能是不同年份降水和积雪融水补给率差异较大所致。玛河与天山北坡其他河流冰川融水贡献率非常接近,也进一步证实了本研究物质平衡估算结果的可靠性。本研究可为其他流域冰川物质平衡研究提供借鉴和参考。

关键词: 多源遥感数据;度日模型;物质平衡;冰川融水;玛纳斯河流域

DOI: 10.11821/dlxb202001008

1 引言

全球变暖背景下,作为“固态水库”的冰川正在受到气候变化的强烈影响^[1]。地处中低纬地区的山岳冰川对气候变化的响应更为敏感,其冰川物质平衡既是区域气候的指示剂,也是冰川规模和径流变化的物质基础^[2]。为研究冰川表面物质平衡的具体变化,一般采用花杆或雪坑直接量测,但因大多冰川气候和地理环境无法开展野外冰面观测,故物质平衡模型模拟便成了最有效的方法。在众多物质平衡模型中,基于能量平衡的物理模型和水量平衡的度日模型应用较为普遍,但因能量物质平衡模型包含参数复杂且难以全面获取,一般只局限于有详细实测数据的单条冰川,而度日模型却因简单和普适性强的优点被广泛应用于大尺度冰川物质平衡研究,相关研究显示流域尺度上度日模型能取得和能量物质平衡近似的结果^[3-4]。度日模型最主要的输入要素为气温和降水,该类数据一

收稿日期: 2018-12-27; 修订日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761108, 31760151, 41641003) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41761108, No.31760151, No.41641003]

作者简介: 赵贵宁(1992-), 男, 硕士生, 主要从事冰川变化对气候响应研究。E-mail: 13345492733@163.com

通讯作者: 张正勇(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源及气候变化研究。E-mail: zyz0815@163.com

般来源于周边气象站或冰川区布设有限的气象站^[5], 并采用气温和降水递减率等空间插值方法获得冰面气候数值, 但该过程忽略了地形差异对气候的影响, 数据虽易于获取但其客观性和精细度较低, 此传统获取气象数据的方式制约了物质平衡模拟的精确性。随着遥感技术在气象监测中的应用, 各类遥感产品被用于气象预报与气象服务的诸多领域, 其中MODIS地表温度数据对冰雪表面温度的反演效果良好, 且适宜于中纬度高海拔地区^[6], TRMM降水数据也因其较高的精度多被应用于地理环境复杂区域的降水研究中^[7], 如此利用遥感产品覆盖范围广、时效性强的特性为高寒冰川区气象数据获取提供了新途径。气象遥感产品虽可弥补度日模型气象数据来源的局限性, 但考虑到其空间分辨率较低无法满足模型数据输入要求, 还需进行必要的降尺度处理以提高数据分辨率^[8]。

冰川融水体现了冰川物质平衡的具体变化, 对区域水资源有着深刻影响。天山区冰川融水对绿洲经济发展和生态建设具有重要的支撑作用^[9], 当前天山区冰川物质平衡研究已不局限于部分典型冰川, 许多学者尝试在物质平衡数据稀缺地区开展物质平衡模型模拟, 以期深入分析整个天山区冰川物质平衡时空变化规律^[10-13]。玛纳斯河(简称玛河)发源于天山北坡依连哈比尔尕山冰川地带, 其径流对下游石河子垦区农业发展起到了决定性作用^[14], 但现有玛河流域冰川研究中鲜有探讨冰川物质平衡变化^[15-16]。本文尝试采用MOD11C3和TRMM 3B43数据刻画冰川区气温和降水分布特征, 并以此驱动度日模型模拟玛河流域冰川物质平衡变化, 探讨当前区域气候背景下冰川物质平衡变化及其对径流的贡献, 以期为流域水资源管理利用提供参考。

2 研究区概况

玛河流域位于准噶尔盆地南缘, 南起依连哈比尔尕山, 北接古尔班通古特沙漠, 其地理范围为85°01'E~86°32'E、43°27'N~45°21'N(图1), 属于典型的大陆性气候, 年平均气温6.0~6.9℃, 降水主要集中在春季和夏季, 年降水量110~200 mm^[17]。由于溯源侵蚀强烈, 分水岭南移至高大山区地带, 为冰川积累提供了条件^[18]。据《简明中国冰川目录》统计, 玛河上游分布冰川800余条, 面积达608.25 km², 是准噶尔内流区冰川数目最多、规模最大的一条河流^[19]。流域地势由东南向西北倾斜, 径流出山口以下是径流散失区, 出山口至海拔1500 m是汇流区, 1500~3600 m是主要的产流区, 3600 m以上终年积雪覆盖是径流的融水补给区。肯斯瓦特水文站为玛河径流出山口控制站, 海拔约为900 m, 控水面积为5156 km²^[17]。

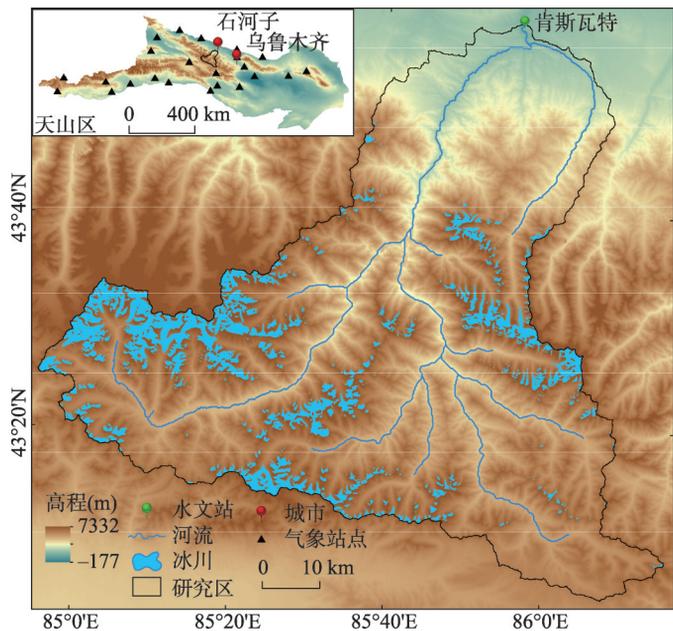


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the Manas river basin

3 数据来源及研究方法

3.1 数据来源

本研究所需数据主要包括多源遥感数据、实测气象数据和水文数据(表1),其中数字地形高程(DEM)用来划分冰川区高程带和提取地形因子,是构建气温和降水反演模型的基础;MOD11C3和TRMM 3B43遥感数据用来表现山区气温和降水的空间分布情况;植被指数(NDVI)数据反映研究区下垫面植被覆盖度变化;实测气象数据用来检验遥感数据的反演精度及反演模型的适用性;水文数据用来分析玛河径流变化特征和验证冰川融水的模拟精度;研究区冰川面积数据来源于第二次冰川编目数据集,此数据获取时间处于本研究中期;积雪数据用来计算研究区的积雪度日因子。

表1 数据来源

Tab. 1 Data sources

数据类型	时间	分辨率	数据来源
DEM	-	30 m×30 m	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
NDVI	2000—2016年	250 m×250 m	
MOD11C3		0.05°×0.05°	美国国家航空航天局(https://www.nasa.gov/)
TRMM 3B43		0.25°×0.25°	
气温		逐月	国家气象信息中心(http://data.cma.cn/)
降水			
径流量			肯斯瓦特水文站
冰川面积	2009年	-	寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/)
积雪密度	2014年		文献[20]

3.2 研究方法

本文尝试采用多源遥感数据驱动度日模型以模拟2000—2016年玛河流域冰川物质平衡变化。首先,选取MOD11C3和TRMM 3B43作为度日模型的主要输入数据,为提高反演数据精度结合其它影响因子构建天山区气温和降水反演模型,并用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)来评价遥感气象数据的反演精度。然后,以空间分辨率最小的DEM数据为标准,对MOD11C3和TRMM 3B43进行空间降尺度。最后,将满足精度和分辨率要求的MOD11C3和TRMM 3B43输入度日模型以模拟研究区冰川物质平衡变化情况。

3.2.1 气温及降水反演模型构建 本文利用MOD11C3和TRMM 3B43遥感气象数据代替传统站点气象数据,引入NDVI来体现下垫面条件^[21-23],基于诸地理因子、气象遥感数据和实测气象数据相关性,构建研究区气候反演模型,以提高遥感气象数据的准确性。在构建气温和降水反演模型过程中,因本研究区范围较小,其周边仅有1个国家气象站(石河子),为使模型达到理想的反演精度,拟将气温和降水分布范围扩大至整个天山区。在此基于研究期内天山区23个气象站点逐月实测气象数据、MOD11C3和TRMM 3B43,NDVI及DEM等数据,构建了山区逐月气温及降水反演回归模型(式(1)),其逐月回归系数如表2、表3所示。

$$y = \lambda + ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + ex_5 + fx_6 + gx_7 \quad (1)$$

式中: y 为实测气象数据; λ 为常数; x_1 为纬度; x_2 为经度; x_3 为海拔; x_4 为坡度; x_5 为坡向; x_6 为NDVI; x_7 为MOD11C3或TRMM 3B43数据; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 分别为回归系数。

表2 逐月平均温度回归模型系数及精度验证

Tab. 2 Monthly average temperature regression model coefficients and accuracy verification

月份	回归因子系数								精度验证	
	λ	a	b	c	d	e	f	g	RMSE	R^2
1	5.41	1.12	-0.64	-0.0020	0.210	0.0110	3.89	1.57	3.06	0.89
2	56.48	-0.47	-0.41	-0.0040	0.260	0.0101	8.97	1.38	1.78	0.94
3	121.38	-2.05	-0.26	-0.0070	0.220	0.0130	15.43	1.22	2.88	0.95
4	143.06	-2.54	-0.11	-0.0120	0.170	0.0060	6.88	0.84	1.82	0.94
5	140.79	-2.31	-0.05	-0.0100	0.170	0.0043	-1.61	0.76	1.16	0.95
6	127.95	-1.80	-0.04	-0.0130	0.136	0.0080	-4.57	0.63	1.16	0.96
7	108.19	-1.36	-0.04	-0.0130	0.120	0.0120	-5.25	0.66	1.42	0.96
8	109.65	-1.40	-0.05	-0.0130	0.120	0.0110	-5.25	0.63	1.16	0.94
9	111.77	-1.70	-0.04	-0.0090	0.160	0.0101	-3.00	0.72	1.30	0.92
10	81.19	-1.35	-0.10	-0.0058	0.208	0.0058	6.03	1.06	1.15	0.89
11	48.80	-0.57	-0.25	-0.0034	0.240	0.0110	9.49	1.18	1.27	0.90
12	51.62	0.26	-0.71	-0.0030	0.280	0.0120	-14.49	0.62	1.52	0.90

表3 逐月降水量回归模型系数及精度验证

Tab. 3 Monthly precipitation regression model coefficients and accuracy verification

月份	回归因子系数								精度验证	
	λ	a	b	c	d	e	f	g	RMSE	R^2
1	19.27	-1.15	0.34	-0.0021	0.049	0.0036	-1.86	1.15	3.69	0.74
2	42.42	-2.33	0.68	-0.0030	0.136	-0.0020	-38.85	1.18	9.31	0.76
3	-60.87	1.32	0.04	-0.0018	-0.006	0.0105	4.37	1.03	6.75	0.81
4	158.81	-4.82	0.65	-0.0113	0.108	0.0011	-29.90	1.64	10.33	0.85
5	63.84	-2.64	0.66	-0.0053	0.065	-0.0054	-24.15	1.31	13.20	0.85
6	-149.02	2.60	0.44	0.0095	-0.014	-0.0289	-19.10	1.01	14.41	0.88
7	-174.73	2.97	0.47	0.0145	0.106	-0.0261	-11.22	0.97	14.33	0.83
8	-83.76	1.29	0.26	0.0113	0.072	-0.0201	-11.61	1.11	19.69	0.84
9	-25.69	1.09	-0.27	0.0001	-0.027	0.0172	-20.52	1.51	8.43	0.82
10	38.29	0.60	-0.72	-0.0034	0.038	0.0143	-8.00	0.91	8.42	0.85
11	60.39	-1.92	0.28	-0.0047	0.035	-0.0002	-5.51	1.12	9.08	0.78
12	-4.97	-0.06	0.10	-0.0024	0.001	0.0007	-6.95	0.93	4.29	0.71

选用均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 来评估反演模型的适用性及遥感反演气象数据的准确性。RMSE 用来衡量遥感反演气象数据同实测数据之间的离散程度, 而 R^2 则能体现二者之间的相关性, RMSE 越小、 R^2 越大则模型适用性越强, 遥感反演气象数据精度越高; RMSE 越大、 R^2 越小则模型适用性越弱, 遥感反演气象数据精度越低。天山区逐月平均温度的 RMSE 介于 1.15~3.06、 R^2 均大于 0.89, 表明气温反演数据同实测数据之间离散程度较低且相关性较高, 反映出气温反演模型适用性强且遥感反演数据对山区气温变化情况表现精确。逐月降水量的 RMSE 略大, 其范围波动于 3.69~19.69, 体现出降水反演数据同实测数据之间离散程度较高, 但 R^2 波动于 0.71~0.88 之间, 表明二者相关性仍较高, 反演模型适用性较好且降水反演数据对山区降水实际分布情况刻画较为准确。综合气温及降水反演数据精度评价结果, 反映出遥感气象数据能准确客观描述天山区气候变化特征。

气象遥感数据用于流域尺度水文模拟或冰川物质平衡模拟时, 空间分辨率仍无法满

足模型输入要求, 还需通过降尺度提高遥感数据的空间分辨率, 以实现局域气候精细表达^[22-23]。为此, 基于天山区气温和降水反演模型, 以30 m分辨率的DEM数据为标准进行降尺度处理, 得到研究区各高程带的气温降水分布情况^[6-8, 21-23]。

3.2.2 度日模型 对于冰川与积雪消融来说, 某时段内的消融量表示如下^[24]:

$$A = D \times PDD \quad (2)$$

式中: A 为某时段内冰川冰与积雪的消融水当量 (mm w.e.); D 为冰川冰/雪的度日因子 (mm/(d·°C)); PDD 为某时段内的正积温 (°C), 可通过下式获得^[24]:

$$PDD = \int_{N_1-1}^{N_2} \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} T_m e^{-\frac{(T_m - T_a)^2}{2\delta^2}} dT dt \quad (3)$$

式中: 假设年内月均气温 T_m (°C) 呈正态分布; T_a 为年平均气温 (°C); δ 为气温分布标准差; N_1 、 N_2 为计算的起止日期, 时段为 $N=N_2-N_1+1$ 。

某点 (或高度处) 的物质净平衡为^[25]:

$$B_i = P + A + f \quad (4)$$

式中: B_i 为某时段内的冰川物质平衡量 (mm w.e.); P 为某时段内的冰川表面积量, 即固态降水量 (mm); A 为消融量 (mm w.e.); f 为融水渗浸冻结率或内补给 (mm w.e.), 通常以消融量的10%来计算^[24]。

固态降水量可按临界温度法计算^[25]:

$$P_s = \begin{cases} P & T \leq T_s \\ \frac{T_L - T}{T_L - T_s} P & T_s < T < T_L \\ 0 & T \geq T_L \end{cases} \quad (5)$$

$$P_L = P - P_s \quad (6)$$

式中: P_s 和 P_L 为固态与液态降水量 (mm); P 为月总降水量 (mm); T 是月平均气温 (°C); T_s 和 T_L 分别为固态与液态降水的临界温度 (°C); 通常可依据天山乌鲁木齐河源1号冰川 (简称乌源1号冰川) 观测结果和相关文献确定, 分别取-0.5 °C和2 °C^[25]。

整个冰川的物质平衡为^[26]:

$$B_n = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n B_i S_i \quad (7)$$

式中: S_i 为某高度带的面积 (m²)。冰川区高程分带自3278 m至山顶按每100 m划分为20个高程带, 最后分区统计各高程带冰川面积数据。

度日因子具有明显的空间分异性, 反映了积雪和冰川冰在一天内单位温度下的消融强度, 主要包含积雪度日因子和冰川冰度日因子^[25]。本研究积雪密度点源观测数据是通过查阅文献资料所得^[20], 然后采用克里金法插值获得整个研究区的积雪密度, 最后基于经验公式^[27] (式(8)) 获取冰川区各高程带积雪度日因子。而冰川冰度日因子在不同高程、坡度、坡向、遮蔽度等地形条件下差异显著^[3, 25], 为此基于其不同地形条件的统计学模型^[28] (式(9)) 来获取各高程带冰川冰度日因子。

$$D_s = 1.1 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (8)$$

式中: D_s 为积雪度日因子 (mm/(d·°C)); ρ_s 为雪密度 (kg/m³); ρ_w 为水密度 (kg/m³)。

$$D_i = -105.7\varphi + 96.8\lambda + 0.03h - 0.8 \cos(\omega - 180) + 20.3 \sin \alpha - 3447.4 \quad (9)$$

式中: D_i 为冰川冰度日因子 (mm/(d·°C)); φ 为纬度 (°); λ 为经度 (°); ω 为坡向 (°); α 为坡度 (°)。

3.3 模型验证

3.3.1 冰川物质平衡 鉴于玛河流域冰川物质平衡研究资料缺乏, 故选取位列其东西两侧 82 km、108 km 的乌源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 51 号冰川 (简称 51 号冰川) 同期物质平衡研究成果来检验模拟结果的可靠性。乌源 1 号冰川是世界冰川监测组织 (WGMS) 确定的全球重点监测的十条参照冰川之一, 也是中国监测时间最长、最为系统的冰川, 通常作为冰川研究的参照对象^[29-30], 51 号冰川亦属于天山北坡典型冰川, 其作为天山冰川观测站第二个定位监测的参照冰川, 于 1998 年开始每年开展 1~2 次观测, 以上两条典型冰川物质平衡的观测和模拟结果均可为本研究提供参考。Wu 在 1 号冰川采用度日模型模拟长序列冰川物质平衡发现, 模拟结果与观测结果非常一致^[31], 表明度日模型模拟结果能真实描述冰川物质平衡的实际变化情况, 为此研究区模拟结果可参照 1 号冰川物质平衡数值来检验其准确性。玛河流域冰川 2000—2016 年间平均物质平衡为 $-577.13 \text{ mm w.e./a}$, 而牟建新等基于 1 号冰川观测结果得出 1996—2015 年间平均物质平衡为 -677 mm w.e./a ^[32], Zhang 等在 51 号冰川基于度日模型模拟出 1999—2015 年间物质平衡为 -370 mm w.e./a ^[33]。造成以上差异的原因可能与西风带降水由西至东不断减少有关, 当冰川所处位置越靠西则所获降水越多, 对冰川补给也越明显, 冰川亏损就会相对较小; 反之, 则冰川亏损较大。另外分析天山区总体气温变化可知, 自西至东平均温度在不断升高, 这也会导致冰川消融不断加剧。可见, 模拟结果较准确地反映了玛河流域冰川物质平衡的基本特征。

3.3.2 冰川融水 冰川融水量与物质平衡过程紧密相关, 亦可作为物质平衡模拟结果精度检验的指标之一^[34]。本文通过物质平衡变化情况估算了各年冰川融水量及其对河川径流的补给率 (表 4), 并与天山北坡河流冰川融水补给率状况对比发现, 蓝永超所得准噶尔内流区平均融水补给率为 27.13%^[35], 与本研究所得 25% 比较一致, 而杨针娘在红山嘴

表 4 2000—2016 年冰川物质平衡及冰川融水补给率变化

Tab. 4 The changes of GMB and contribution rates of glacial meltwater to runoff from 2000 to 2016

年份	零物质平衡 线高度(m)	物质平衡 (mm w.e.)	冰川融水 (10^8 m^3)	纯冰消融 (10^8 m^3)	纯冰消融 比率	河川径流 (10^8 m^3)	冰川融水 比率
2000	4538	-545.86	3.29	2.72	0.83	16.29	0.20
2001	4550	-566.88	2.99	2.60	0.87	14.43	0.21
2002	4530	-551.41	3.51	2.82	0.80	18.74	0.19
2003	4558	-584.20	3.22	2.72	0.85	11.05	0.29
2004	4560	-620.49	3.47	2.90	0.83	12.28	0.28
2005	4532	-575.59	3.37	2.71	0.81	13.39	0.25
2006	4588	-632.19	3.63	2.99	0.82	13.18	0.28
2007	4537	-602.90	3.68	2.81	0.76	15.47	0.24
2008	4569	-624.72	3.27	2.82	0.86	13.77	0.24
2009	4507	-464.85	2.91	2.56	0.88	11.00	0.26
2010	4533	-527.05	3.36	2.84	0.85	16.62	0.20
2011	4560	-602.95	3.65	2.90	0.79	11.74	0.31
2012	4555	-597.01	3.46	2.79	0.81	12.54	0.28
2013	4553	-587.42	3.41	2.79	0.82	13.37	0.25
2014	4556	-563.95	3.21	2.75	0.86	10.65	0.30
2015	4573	-605.61	4.01	3.20	0.80	18.35	0.22
2016	4528	-558.11	3.48	2.82	0.81	15.45	0.23
均值	4549	-577.13	3.41	2.81	0.83	14.02	0.25

水文站估算的玛河融水补给可达34.6%^[36],较本研究结果偏高,可能在于水文站位置不同,且当时冰川规模较大(608.3 km²),虽冰川减薄微弱但融水总量反而较多,导致融水补给率较大。另外,奎屯河、乌鲁木齐河与玛河距离较近,皆属天山北坡典型冰雪补给型河流,二者融水贡献率分别为29.4%^[37]、26.7%^[38],也与玛河融水补给率相近。通过比较发现,玛河融水补给率估算结果比较准确,也体现出物质平衡模拟结果比较可靠。

4 结果分析

4.1 玛河流域冰川区气温和降水变化特征

山岳冰川对气候变化的响应非常敏感,然而山地气候复杂多变且难以全面监测,制约了对山岳冰川的深入研究,故获取精确的气候变化数据对冰川模拟和研究十分重要^[1]。2000—2016年玛河流域冰川区年均气温及年降水量变化显示(图2a、图2b),年均温为-7.57℃,在海拔4200m处气温变化明显,冰川末端至4200m处气温以0.57℃/100m递减,4200m至4700m处气温波动于-8℃左右,而在4700~4800m之间变化尤为剧烈骤降幅度达1.48℃/100m,且在海拔4800m时气温达到最低值为-8.85℃。研究期内冰川区年均降水量为410.71mm,在海拔4200m时降水亦有显著变化,此处降水达到极大值为418.25mm,冰川末端至4200m处递增梯度为4.89mm/100m,4200m至4700m以2.66mm/100m速率递减,在4700m处出现降水极小值为399.89mm,之后又以5.17mm/100m的速率快速递增。

已有研究表明^[39-40],冰川消融期气候变化是年物质平衡变化的主导因素,为此对流域冰川区消融期(5—9月)气温及降水进行分析(图2c、图2d),发现其与全年气温及降水在变化趋势上具有显著一致性,反映出全年气候变化深受消融期气候变化影响。消融期内海拔4200m处亦是气温及降水的变化分界线,其下气温直减率为-0.65℃/100m,

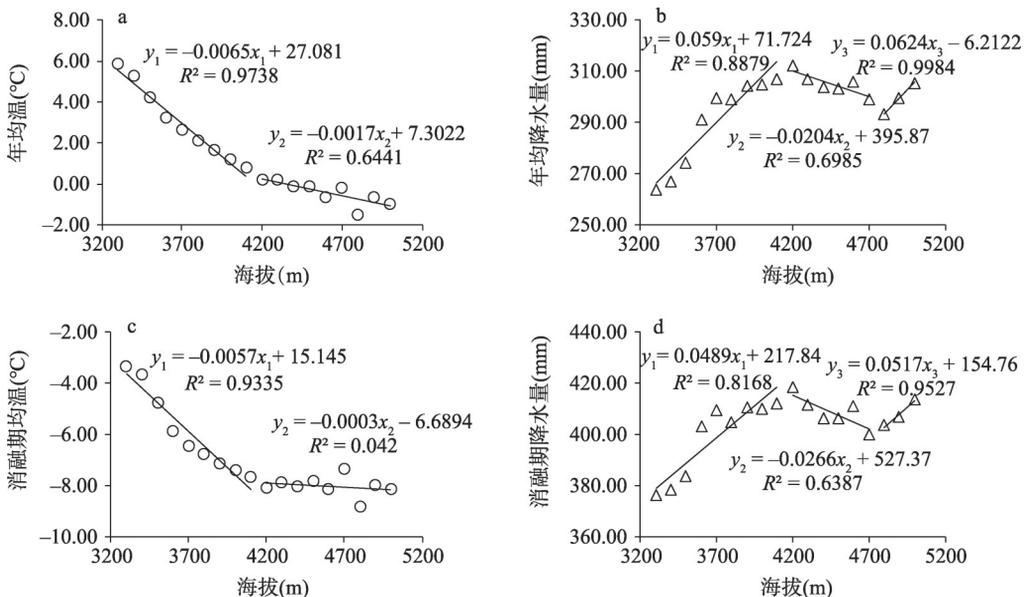


图2 玛河流域冰川年均气温、年降水量与消融期气温、降水量变化

Fig. 2 Annual average temperature, annual precipitation and temperature and precipitation in glacier ablation period in the Manas river basin

其上则为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,最低温出现在海拔4800 m附近;降水在低于4200 m时为 $5.9\text{ mm}/100\text{ m}$,海拔4200~4800 m之间时为 $-2.04\text{ mm}/100\text{ m}$,4800 m至冰川顶部则为 $6.24\text{ mm}/100\text{ m}$,冰川区最大降水带位于4100~4200 m之间。通过分析研究期内流域冰川区全年及消融期气候变化可知,反演气象数据对山区气候的精准刻画提高了冰川区气象数据的客观性,并准确反映了气温及降水的空间分布特征。

4.2 玛河流域冰川物质平衡变化特征

物质平衡变化是冰川消融和积累的综合体现。玛河流域研究期内冰川物质平衡表现为持续负平衡状态,多年累积物质平衡为 -9811.19 mm w.e. (即 -577.13 mm w.e./a),相当于冰川平均减薄11 m,最小负平衡出现在2009年(-464.85 mm w.e.),最大负平衡出现在2006年(-632.19 mm w.e.) (表4)。通过多年物质平衡距平值和累积距平值可反映其年际变化特征,研究期内有7年距平值为正(图3a),表明期间冰川消融较弱,而其余年份距平值为负,则冰川消融强烈,其中2009年距平值最大(112.28 mm w.e.)、2006年距平值最小(-36.72 mm w.e.);累积距平曲线显示,2000—2002年、2008—2010年期间冰川消融有所减缓,而2002—2008年、2010—2016年间冰川消融有所加剧,相对减缓和加剧速率分别为 17.98 mm w.e./a 、 81.18 mm w.e./a 和 -29.55 mm w.e./a 、 -8.71 mm w.e./a ,且在2005—2009年间累积物质平衡一直处于平均负平衡以下,反映出此阶段冰川亏损最强烈。2008年累积距平达到最小值(-110.08 mm w.e.),主要为2003—2008年间距平值始终低于平均物质平衡所致,而在2009年时持续负平衡状态骤然缓解,这种突变现象在乌源1号冰川也有所体现^[41]。从冰川物质平衡年内变化来看(图3b),研究区冰川的积累期(10月—次年4月)历时虽长但积累不明显(93.18 mm w.e.),积累始于每年10月,至次年4月降水明显增加使得积累最为显著,其他积累期月份较4月份气温低,降水却明显较少导致积累微弱。而消融期(5—9月)虽短但亏损严重(-670.31 mm w.e.),5月初冰川开始进入亏损状态,并至8月达到最大物质负平衡,随后因温度下降冰川消融逐渐减缓,期间冰川整体升温和降温过程变化幅度较大,也使得各月物质平衡情况差异较大。总体来看,年内物质平衡变化呈现出“弱积累、强消融”的变化特征。

冰川物质平衡变化具有明显的垂直地带性特征,原因在于影响其变化的水热组合和度日因子等关键要素在不同高程带存在显著差异^[25-26]。各高程带物质平衡变化显示(图4),其最大负平衡(-3112.5 mm w.e.)出现在3300~3400 m之间冰川末端处,海拔升高至4500~4600 m时转为正平衡状态,至4800~4900 m时达到最大正平衡(283.24 mm w.e.),

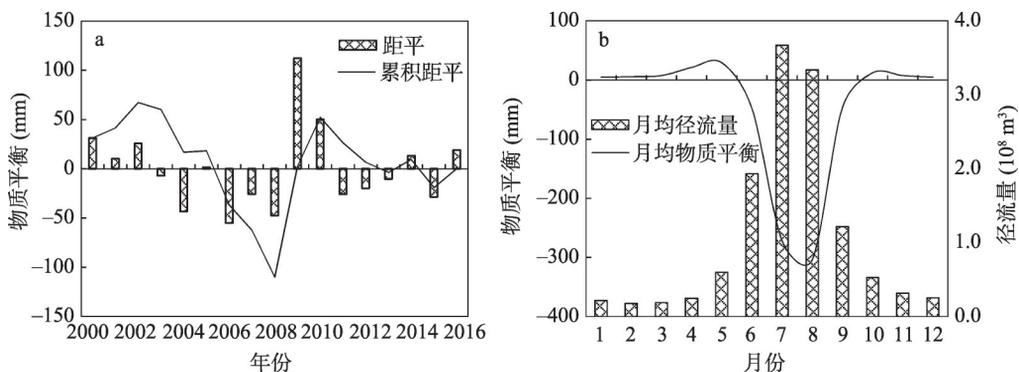


图3 玛河流域冰川年物质平衡距平和累积距平及逐月物质平衡和径流变化

Fig. 3 Anomalies and cumulative anomalies of annual mean GMB, and monthly runoff with GMB changes in the Manas river basin

4900 m 以上因气温有所回升而降水偏少导致正平衡又逐渐减小。同时,通过各高程带年物质平衡计算出玛河流域冰川零物质平衡线(ELA),其海拔位置体现了冰川年积累和消融的总体状态,以上为积累区,以下为消融区^[42]。研究期内 ELA 波动于 4500~4600 m 之间(表 4),平均值高达 4549 m,其最高海拔(4588 m)出现在 2006 年,最低海拔(4057 m)出现在 2009 年,表明 2006 年和 2009 年是冰川消融最强烈和最微弱年份,这与冰川年物质平衡估算结果一致。

为探究冰川消融区、积累区及整体物质平衡随海拔变化规律,本研究分区构建了物质平衡与海拔的线性回归模型(表 5),发现物质平衡在积累区受海拔升高影响微弱($R^2 = 0.073$),其累积速率仅为 18.77 mm w.e./100 m;而消融区受海拔升高影响显著($R^2 = 0.93$),消融速率可达 -244.83 mm w.e./100 m,消融区面积远大于积累区且消融速率远胜于积累速率,也进一步表明研究区冰川整体处于消融状态。从冰川区整体来看,物质平衡变化和海拔亦存在明显相关性($R^2 = 0.87$),线性递增速率达 179.09 mm w.e./100 m,但实际在零物质平衡线以上物质平衡随海拔的递变并不是简单的线性递增,而是不断趋向于零平衡线($R^2 = 0.993$)。海拔对物质平衡的垂向分布影响深刻,但并不是简单的线性变化,原因在于海拔主要通过改变水热垂向分布进而影响各高程带物质平衡,同时度日因子、坡度、坡向和山谷风等诸多因素在空间分布上存在显著差异亦对其产生影响,综合作用下研究区冰川物质平衡垂向变化趋势呈现出先急速增长后缓慢减小的状态(图 4)。

表 5 冰川区物质平衡随海拔变化拟合曲线

Tab. 5 Fitting curves for GMB changes with altitudes in the glacial area

区域	拟合方程	相关性
消融区	$y_1 = 2.4483x - 10729$	$R^2 = 0.927$
积累区	$y_2 = 0.1877x - 788.3$	$R^2 = 0.073$
冰川区(整体)	$y_3 = 1.7909x - 2522.5$ (线性)	$R^2 = 0.873$
	$y_4 = -0.0014x^2 + 13.75x - 32691$ (非线性)	$R^2 = 0.993$

注: y_1, y_2, y_3, y_4 表示各区域内物质平衡; x 表示海拔; R^2 为决定系数。

4.3 物质平衡对径流的影响

冰川融水对天山区众多河流具有显著的补给调节作用^[39],而引起其动态变化的根本原因则是物质平衡变化。研究区物质平衡与径流的年内变化显示(图 3b),冰川消融最强烈的时段主要集中在 7—8 月,物质负平衡可达 -575.63 mm w.e.,占全年绝对变化量(763.78 mm w.e.)的 75.4%,而同期的径流量为 $7.73 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全年总径流量的 55.1%,亦达到了径流高峰。同时,其余各月物质平衡与径流也有较强的相关性,但二者的峰值时期略有差异,最大负物质平衡出现在 8 月而最大径流量出现在 7 月,主要在于研究区最大降水量发生在 7 月份,而降水对冰川消融有缓解作用,使得负平衡状态有所减弱,但 8 月份受气温升高影响整个冰川均处于消融状态,降水在冰川表面大多为液态,导致负平衡有所加剧。由此可知,在月尺度上径流与物质平衡的协同变

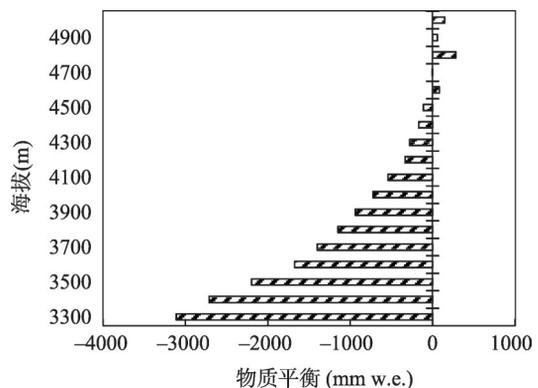


图 4 玛河流域冰川各高程带物质平衡变化

Fig. 4 GMB changes of the elevations in the Manas river basin

化体现出了“固态水库”良好的补给调节作用。

干旱区内陆河水资源大多来自于高寒山区的“三元”产流,除冰川消融产流外降雨汇集和积雪融化也对河川径流有明显补给作用。研究期内玛河流域冰川融水补给率波动于19%~31%之间,年均补给率为25%,总体呈现出波动性上升趋势,表明冰川消融有所加剧,其对径流补给持续性增加。研究发现冰川物质平衡与河川径流呈现出较为一致的变化趋势,二者相关系数达-0.49,且在2009年前后物质平衡对径流补给发生了显著变化,相关系数由-0.58变为-0.45;冰川融水对径流补给影响时也发现,相关系数由0.40减小到0.38,表明物质平衡变化对河川径流补给的调控能力有所减弱。郑锦涛等^[43]研究气候变化下玛河流域山区径流演变显示,2009年以后气候暖湿化更为显著,山区产流高度依赖气候变化,气温上升积雪融化加剧,降水量也呈明显增加,使得降水和积雪融水对径流补给贡献有所增强。总体来看,干旱区内陆河流域径流组分和形成过程对气候变化非常敏感。

5 讨论与结论

5.1 讨论

5.1.1 度日因子对物质平衡的影响 冰川物质平衡变化不仅受气温和降水影响,同时度日因子也起到决定性作用^[25]。玛河流域冰川区积雪度日因子值(D_s)在冰川末端出现最大值(2.60 mm/(d·°C)),在冰川顶端值最小(2.21 mm/(d·°C)),平均度日因子值为2.44 mm/(d·°C),呈现出两端快速减小中间平缓增加的变化趋势,但整体上自末端起 D_s 在不断递减(图5)。陈妮等^[20]认为积雪密度的

时空差异主要是雪层含水量不同所致,在低海拔处因太阳辐射强烈积雪消融迅速,故雪层含水量较多积雪密度较大,而在高海拔处因太阳辐射较弱积雪不易消融,致使雪层含水量较少积雪密度也相对较小。虽然海拔由低至高固态降水总体在不断增加,在密实化作用下积雪密度会有所增大,但相较雪水含量差异导致的积雪密度变化其影响是比较微弱的。值得注意的是在海拔3900 m以上 D_s 的突变可能是由风吹雪导致的,冰川顶部积雪受山风影响体积不断减小,将积雪堆积到海拔3900~4700 m增加了此间积雪量,经密实化过程后积雪密度不断增大,进一步引起 D_s 变大。冰川冰度日因子(D_i)在垂向呈现出先减小后增大的趋势,变化范围为2.75~4.78 mm/(d·°C),平均 D_i 为3.70 mm/(d·°C),最小值在4100 m附近为3.54 mm/(d·°C),最大值出现在冰川顶端为4.01 mm/(d·°C),正如张勇等^[25, 28]认为 D_i 的垂向变化与冰川高程、坡度、坡向、遮蔽、表碛覆盖等地形条件以及局域气候环境相关,冰川表面地形越有利于接受太阳辐射、气候越暖湿则越有利于冰川消融, D_i 也就相应越大,研究区冰川冰度日因子最小值位于海拔4100 m处,可能由于此处太阳辐射强烈且气候干冷,冰面以升华为主,抑制了冰川消融,导致 D_i 相对较小。度日因子的变化体现了冰川消融能力的空间差异,这将对物质平衡空间分异产生显著影响。综合来看,太阳辐射是影响度日因子变化的最直接因素,冰川区地形条件越有利于接受太阳辐射,则度日因子一般会越大,但诸如相对湿度、风速等气象要素也会使度日因子发生改变。

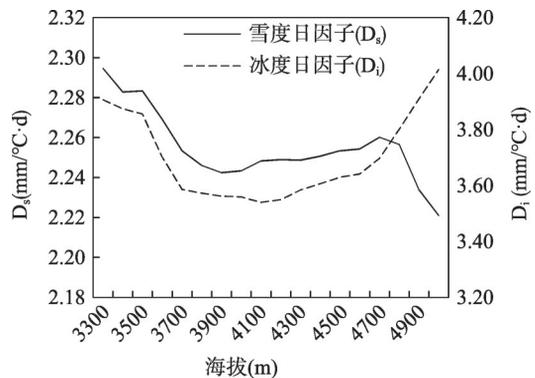


图5 研究区冰川冰/积雪度日因子变化
Fig. 5 Changes of glacial ice/snow degree-day factor in the Manas river basin

5.1.2 物质平衡及融水补给的空间差异 物质平衡受气候与地形等诸多因素的综合作用影响,在不同区域表现出显著的空间分异特征。为探究天山区冰川物质平衡变化的空间差异性,本研究比较玛河冰川、乌源1号东西支冰川及奎屯哈希勒根51号冰川的物质平衡的同期变化情况。Zhang等^[33]得到1999—2015年间奎屯哈希勒根51号冰川的物质平衡为 -370 mm w.e./a ;张国飞等^[44-45]在乌源1号冰川利用1990—2010年观测资料,得出东支和西支物质平衡分别为 -582 mm w.e./a 、 -485 mm w.e./a ,而玛河流域冰川在研究期内物质平衡为 -577.13 mm w.e./a ,可以看出天山区冰川由西至东物质负平衡有所加剧,结合资料发现^[33],其主要原因为天山区冰川受西风带影响,由西至东降水量呈衰减趋势、而气温反呈上升趋势,尤其在冰川消融期(5—9月)体现得更为明显,引起冰川积累和消融发生直接变化,进而促使物质平衡在空间分布上也呈现出由西至东不断减小的趋势,但同时又受天山地形地貌等因素的制约,促使冰川物质平衡在局域出现波动,这也可能是乌源1号冰川西支物质平衡偏大的原因,故在物质平衡研究中不仅应注意气候变化的直接影响,也要考虑到地形等间接因素产生的差异。

冰川融水量的波动是由物质平衡的动态变化引起的,直接影响河川径流的补给。玛河流域冰川研究期内累积物质平衡为 -9811.19 mm w.e. ,融水量累积达 $57.93\times 10^8\text{ m}^3$,冰川融水年均补给率波动于19%~31%之间,对河流调蓄发挥了重要作用。与天山区其他流域融水补给率相比,较塔里木内流区的32.8%~38.5%偏低,比吐—哈内流区的12.01%~11.4%及伊犁河流域的16.9%~13.7%则偏高^[36-37],原因在于融水量主要受控于物质平衡及冰川面积的变化,物质负平衡或冰川面积退缩加剧,冰川亏损就越强烈,融水量及补给率将持续上升,反之将会有所减小。另外,融水对径流的补给状况还受到降水及地下水变化的影响。天山北坡冰川融水对径流的补给中,整个区域的融水补给率为27.1%^[37],由西至东各流域融水补给率情况分别为奎屯河流域为29.4%^[37]、玛河流域冰川为34.6%^[36]、乌鲁木齐河流域为26.7%^[38]、白杨河流域为37.6%^[47],总体呈波动性上升趋势。虽然天山北坡物质负平衡状态由西至东在不断增强,但融水补给率却有所波动,由此可知,融水对径流补给状况不仅受冰川消融强度的影响,还可能与降水和地下水等因素有关。

5.2 结论

(1) 基于多源遥感数据构建了山区气温及降水反演模型,经降尺度后,分析了玛河流域冰川区气温及降水的垂向变化特征,研究发现海拔4200 m以下区域的气温直减率为 $-0.57\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 、降水梯度为 $4.8\text{ mm}/100\text{ m}$;而海拔4200 m以上区域的气温直减率则为 $-0.03\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$,降水梯度在海拔4200~4700 m之间为 $2.66\text{ mm}/100\text{ m}$ 、大于海拔4700 m时为 $5.17\text{ mm}/100\text{ m}$,且最大降水高度带在海拔4100~4200 m之间,体现出遥感数据对冰川区气温和降水的空间分异特征刻画比较精细。

(2) 研究利用多源遥感数据驱动度日模型模拟玛河流域冰川物质平衡发现,研究期内流域冰川持续呈负平衡状态,物质平衡为 -577.13 mm w.e./a ,累积变化了 -9811.19 mm w.e. ,零物质平衡线平均高达4549 m,累积物质平衡变化显示2000—2002年和2008—2010年冰川消融减缓,而2002—2008年和2010—2016年冰川消融加剧,且在2005—2009年冰川亏损最为强烈。同时,年内物质平衡变化表现出4月因降水增多积累最明显,而8月受气温影响消融最强烈。

(3) 河川径流变化与物质平衡变化具有明显同步性。年内径流、降水和冰川融水量都集中在夏季,冰川消融盛期7、8月冰川物质平衡亏损最为严重达 -575.63 mm w.e. ,占全年绝对变化量的75.4%,使得同期河川径流量也达到了全年径流总量的55.1%。而年际冰川融水波动于19%~31%,可能是降水和积雪融水年际差异所致。

本研究利用度日模型研究玛河流域冰川物质平衡过程中, 受篇幅所限没有考虑研究期内流域冰川面积变化, 正如有学者所言忽略面积变化会导致物质平衡估算出现偏差^[48], 尤其在全球气候变暖的背景下, 绝大多数冰川都处于退缩状态, 这可能会导致偏高估计物质平衡损失。在未来冰川物质平衡研究中, 要进一步关注冰川面积动态变化对物质平衡的影响, 以深入探究物质平衡及融水补给的动态演变机制。

参考文献(References)

- [1] Chen Yanning, Fang Gong Huan, Wang Huaijun, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 方功焕, 王怀军, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [2] Gao H, Ding Y, Zhao Q, et al. The importance of aspect for modelling the hydrological response in a glacier catchment in Central Asia. *Hydrological Processes*, 2017, 31(16): 2842-2859.
- [3] Qing Wenwu, Liu Junfeng, Yang Yuquan, et al. Uncertainty analysis of the parameters of the temperature-index method: A case study of Shiyi Glacier in Qilian Mountains. *Advance in Earth Sciences*, 2016, 31(9): 937-945. [卿文武, 刘俊峰, 杨钰泉, 等. 基于气温的物质平衡模型的参数不确定性分析: 以祁连山十一冰川为例. *地球科学进展*, 2016, 31(9): 937-945.]
- [4] Yin Zhenliang, Feng Qi, Liu Shiyin, et al. The application progress of hydrological model in quantifying the contribution of glacier runoff to total watershed runoff. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 248-258. [尹振良, 冯起, 刘时银, 等. 水文模型在估算冰川径流研究中的应用现状. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 248-258.]
- [5] 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(2): 336-350. [方潇雨, 李忠勤, Wuennemann B, 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. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 336-350.]
- [6] Yang Min. Comparison and application of space-time fusion methods for scale-down of surface temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017. [杨敏. 地表温度降尺度时空融合方法对比及其应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.]
- [7] Jin Xiaolong, Shao Hua, Qiu Yuan, et al. Correction method of TRMM satellite precipitation data in Tianshan Mountains. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(7): 882-891. [金晓龙, 邵华, 邱源, 等. TRMM 卫星降水数据在天山山区的校正方法研究. *气象*, 2018, 44(7): 882-891.]
- [8] Fan Xuewei, Liu Hailong. Downscaling method of TRMM satellite precipitation data over the Tianshan Mountains. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 478-488. [范雪薇, 刘海隆. 天山山区 TRMM 降水数据的空间降尺度研究. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 478-488.]
- [9] Zhang Zhengyong, He Xinlin, Liu Lin, et al. Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 856-867. [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. *地理学报*, 2018, 73(5): 856-867.]
- [10] Chen Wuhua. Study on glacier change in Tomur Area of Tianshan Mountains based on RS and GIS [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016. [陈物华. 基于 RS 和 GIS 的天山托木尔地区冰川变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.]
- [11] Xinjiang Institute of Ecology and Geography. Progress in the monitoring and reconstruction of the material balance of the BatySook glacier in the Xier River Basin, Tianshan Mountains, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences. *Arid Land Geography*, 2017, 40(2): 354. [中国科学院新疆生态与地理研究所. 中国科学院新疆生态与地理研究所在天山锡尔河流域 BatySook 冰川物质平衡监测与重建中获进展. *干旱区地理*, 2017, 40(2): 354.]
- [12] Liu Q, Liu S. Response of glacier mass balance to climate change in the Tianshan Mountains during the second half of the twentieth century. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1/2): 303-316.
- [13] Li Jia. Monitoring the glacier mass balance variations in the Central Tien Shan using remote sensing techniques. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(1): 128. [李佳. 利用遥感技术监测天山中部冰川物质平衡变化. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(1): 128.]
- [14] Li Junli, Jiang Liangliang, Bao Anming, et al. Spatio-temporal change analysis of cultivated land in Manas drainage basin during 1962-2010. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4): 277-285. [李均

- 力, 姜亮亮, 包安明, 等. 1962—2010年玛纳斯流域耕地景观的时空变化分析. 农业工程学报, 2015, 31(4): 277-285.]
- [15] Xu Chunhai, Wang Feiteng, Li Zhongqin, et al. Glacier variation in the Manas River Basin during the Period from 1972 to 2013. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 628-635. [徐春海, 王飞腾, 李忠勤, 等. 1972—2013年新疆玛纳斯河流域冰川变化. 干旱区研究, 2016, 33(3): 628-635.]
- [16] Fan Xiaobing, Yan Lili, Xu Jinghua, et al. Analysis of glacier change in Manas River basin in the last 50 years based on multi-source data. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1188-1198. [樊晓兵, 彦立利, 徐京华, 等. 基于多源数据的近50年玛纳斯河流域冰川变化分析. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1188-1198.]
- [17] Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Liu Haijiang, et al. Oasis expansion and eco-environmental evolution in Manas River Basin in the past 50 years. *Science in China: Earth Sciences*, 2005, 35(11): 1074-1086. [程维明, 周成虎, 刘海江, 等. 玛纳斯河流域50年绿洲扩张及生态环境演变研究. 中国科学: 地球科学, 2005, 35(11): 1074-1086.]
- [18] Zheng Wenlong, Du Jinkang, Zhou Xiaobing, et al. Vertical distribution of snow cover and its relation to temperature over the Manasi River Basin of Tianshan Mountains, Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 403-419. [郑文龙, 都金康, 周小兵, 等. 中国天山玛纳斯河流域积雪垂直分布及其与温度的关系. 地理学报, 2017, 72(4): 403-419.]
- [19] Shi Yafeng. Concise Glacier Inventory of China. Shanghai Science Popularization Press, 2005: 1-158. [施雅风. 简明中国冰川目录. 上海科学普及出版社, 2005: 1-158.]
- [20] Chen Ni, Feng Xuezhong, Xiao Pengfeng, et al. Analysis of snow layer parameters in Manasi River Basin. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2015, 51(5): 936-943. [陈妮, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 玛纳斯河流域春季雪层参数特性分析. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 936-943.]
- [21] Li Xiaojun, Jiang Tao, Xin Xiaozhou, et al. Spatial downscaling of land surface temperature based on MODIS data. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(12): 3443-3450. [李小军, 江涛, 辛晓洲, 等. 基于MODIS的地表温度空间降尺度方法. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3443-3450.]
- [22] Zhang Yiran. Spatial scaling method of surface temperature and its application based on domestic high-score image [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. [张逸然. 地表温度空间降尺度方法及其基于国产高分影像的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.]
- [23] Wang Wanrui. Temporal and spatial variation of precipitation in Northwest China based on TRMM data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [王万瑞. 基于TRMM数据的中国西北降水时空变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [24] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Wang Ninglian, et al. Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No. 1 at the Urumqi River Head, Tianshan Mts. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 9-13. [刘时银, 丁永建, 王宁练, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究. 冰川冻土, 1998, 20(1): 9-13.]
- [25] Zhang Yong, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Spatial variation of degree-day factors on the observed glaciers in western China. *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. 地理学报, 2006, 61(1): 89-98.]
- [26] Gao Xin, Ye Baisheng, Zhang Shiqiang, et al. The change of glacial meltwater in the Tarim River Basin from 1961 to 2006 and its impact on runoff. *Chinese Science: Earth Science*, 2010, 40(5): 654-665. [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. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(5): 654-665.]
- [27] Muattar Saydi, Ding Jianli, Abudu Shalamus, et al. Simulation of snowmelt runoff in the catchments on northern slope of the Tianshan Mountains. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 636-642. [穆艾塔尔·赛地, 丁建丽, 阿不都·沙拉木, 等. 天山北坡山区流域融雪径流模拟研究. 干旱区研究, 2016, 33(3): 636-642.]
- [28] Chen Rensheng, Kang Ersi, Ding Yongjian. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 307-317. [陈仁升, 康尔泗, 丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数. 水科学进展, 2014, 25(3): 307-317.]
- [29] Liang Pengbin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Temporal and spatial variation characteristics of mass balance of global reference glaciers from 1984 through 2016. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 415-425. [梁鹏斌, 李忠勤, 张慧, 等. 1984-2016年全球参照冰川物质平衡时空变化特征. 冰川冻土, 2018, 40(3): 415-425.]
- [30] Zhang Guofei, Li Xiangfei, Li Zhongqin. Analysis of the changes of glacier mass balances in different parts of the world from 1980 to 2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 214-222. [张国飞, 李祥飞, 李忠勤. 1980—2011年全球不同地区冰川物质平衡变化分析. 冰川冻土, 2018, 40(2): 214-222.]
- [31] Wu Lihua, Li Huilin, Wang Lin. Application of a degree-day model for determination of mass balance of Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tianshan, China. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 470-481.
- [32] Mu Jianxin, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Mass balance variation of continental glacier and temperate glacier and their

- response to climate change in western China: Taking Urumqi Glacier No. 1 and Parlung No. 94 Glacier as examples. *Arid Land Geography*, 2019, 42(1): 20-28. [牟建新, 李忠勤, 张慧, 等. 中国西部大陆性冰川与海洋性冰川物质平衡变化及其对气候响应: 以乌源1号冰川和帕隆94号冰川为例. *干旱区地理*, 2019, 42(1): 20-28.]
- [33] Zhang Hui, Li Zhongqin, Zhou Pin, et al. Mass-balance observations and reconstruction for Haxilegen Glacier No. 51, eastern Tien Shan, from 1999 to 2015. *Journal of Glaciology*, 2018, 64(247): 689-699.
- [34] Yao Tandong, Li Zhiguo, Yang Wei, et al. Characteristics of glacial distribution and material balance in the Yarlung Zangbo River Basin and its impact on lakes. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1750-1756. [姚檀栋, 李治国, 杨威, 等. 雅鲁藏布江流域冰川分布和物质平衡特征及其对湖泊的影响. *科学通报*, 2010, 55(18): 1750-1756.]
- [35] 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. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(11): 1-8. [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. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 1-8.]
- [36] Yang Zhenjiang. Glacier water resources in China. *Natural Resources*, 1987(1): 46-55, 68. [杨针娘. 中国冰川水资源. *自然资源*, 1987(1): 46-55, 68.]
- [37] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513-527. [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. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [38] Sun Congjian, Chen Wei. Streamflow components in inland rivers in the Tianshan Mountains, Northwest China. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 37-44. [孙从建, 陈伟. 天山山区典型内陆河流域径流组分特征分析. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 37-44.]
- [39] Sun Meiping, Li Zhongqin, Yao Xiaojun, et al. Analysis on runoff variation of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River from 1959 to 2008. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(4): 650-660. [孙美平, 李忠勤, 姚晓军, 等. 1959—2008年乌鲁木齐河源1号冰川融水径流变化及其原因. *自然资源学报*, 2012, 27(4): 650-660.]
- [40] He Haidi, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Variation characteristics of glacier mass balance in Svalbard, Arctic, in recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 701-709. [何海迪, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近50年来北极斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变化特征. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 701-709.]
- [41] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. A positive mass balance appeared at Urumqi Glacier No. 1 in 2009. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 263-268. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川2009年出现物质正平衡. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 263-268.]
- [42] Cui Hang, Wang Jie. The methods for estimating the equilibrium line altitudes of a glacier. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 345-354. [崔航, 王杰. 冰川物质平衡线的估算方法. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 345-354.]
- [43] Zheng Jintao. Research on runoff evolution in mountainous area under climate change in Manas River [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. [郑锦涛. 气候变化驱动下玛纳斯河山区径流演变规律研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.]
- [44] Zhang Guofei. Glacier matter balance and its relation to climate change at the source of Urumqi River, Tianshan, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. [张国飞. 中国天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡及其与气候变化关系研究. 兰州: 西北师范大学, 2014.]
- [45] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Weidong, et al. Mass balance change in east and west branches of Glacier No. 1 at Urumqi riverhead, China, during last 20 years. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2412-2417. [张国飞, 李忠勤, 王卫东, 等. 近20年乌鲁木齐河源1号冰川东支和西支物质平衡变化. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2412-2417.]
- [46] Zhang Wei, Dong Yingwei, Yu Zhilong, et al. Discussion of the difference of the timing and extent of glaciers in the late Quaternary controlled by the westerly and East Asia monsoon as well as the tectonic movement. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 909-920. [张威, 董应巍, 于治龙, 等. 气候和地貌对晚第四纪冰川发育差异性的影响. *地理学报*, 2013, 68(7): 909-920.]
- [47] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, et al. Recent retreat of glaciers in the East Tianshan Mountains of Xinjiang and its impact on water resources. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(32): 2708-2716. [李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708-2716.]
- [48] Wang Guoya, Shen Yongping. The effect of change in glacierized area on the calculation of mass balance in the Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 1-7. [王国亚, 沈永平. 天山乌鲁木齐河源1号冰川面积变化对物质平衡计算的影响. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 1-7.]

Changes of glacier mass balance in Manas river basin based on multi-source remote sensing data

ZHAO Guining¹, ZHANG Zhengyong¹, LIU Lin¹, XU Liping¹,
WANG Puyu², LI Li¹, NING Shan¹

(1. Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science,
Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The glacier mass balance (GMB) is an important link between climate and water resources, which has remarkable regulation functions for river runoff. The research, using MOD11C3, TRMM 3B43 and other multi-source remote sensing data to drive the degree-day model, simulates the GMB processes and analyzes the recharge of glacial meltwater to runoff in the Manas River Basin (MRB) during 2000-2016. The results show that: (1) By constructing the temperature and precipitation inversion model, the accuracy of the meteorological remote sensing data can be effectively corrected, and the characteristics of climate change in the glacial region can be well described after downscaling. The annual average temperature and precipitation in the glacier area were $-7.57\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 410.71 mm , respectively. The place at an altitude of 4200 m is a severe climate change zone. Above 4200 m , the temperature drop rates and precipitation gradients were $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ and $-2.66\text{ mm}/100\text{ m}$, respectively; while below 4200 m , they were $-0.57\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ and $4.8\text{ mm}/100\text{ m}$, respectively. Besides, at a higher altitude of 4700 m , the precipitation increased by $5.17\text{ mm}/100\text{ m}$. (2) During the study period, the glaciers in the basin continued to be in a negative state, with a cumulative GMB of -9811.19 mm w.e. and an average annual GMB between -464.85 mm w.e. and -632.19 mm w.e. The vertical GMB increased by $244.83\text{ w.e.}/100\text{ m}$ and $18.77\text{ w.e.}/100\text{ m}$ in the ablation zone and the accumulation zone, respectively. From 2000 to 2002 and 2008 to 2010, the melting of glaciers slowed down, and the ablation was intensified from 2002 to 2008 and from 2010 to 2016. Strikingly, the loss of glaciers was most serious during the period 2005-2009. (3) The river runoff responded strongly to the change of GMB within the year, especially in July and August, namely, the GMB loss accounted for 75.4% of the total amount of the whole year, and the river runoff accounted for 55.1% of the annual total. The inter-annual glacial meltwater recharge rate fluctuated between 19% and 31%, which may be due to the differences of precipitation and snow melt water recharge rates in different years. The contribution rate of glacial meltwater of the MRB is close to that of other river basins on the northern slope of the Tianshan Mountains, which can further confirm the reliability of the GMB estimation results. Above all, the research can provide reference for the study of GMB in other river basins.

Keywords: multi-source remote sensing data; degree-day model; glacier mass balance (GMB); glacial meltwater; Manas river basin (MRB)