

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0007

WU Lei, LI Fenhua, LI Changbin, et al. Spatiotemporal distribution of snow cover and its variation in the upper reaches of the Taolai River basin, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):108–118. [武磊, 李奋华, 李常斌, 等. 祁连山讨赖河流域上游积雪时空分布及其变化研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):108–118.]

祁连山讨赖河流域上游积雪时空分布及其变化研究

武 磊^{1,2}, 李奋华³, 李常斌^{1,2}, 吕佳南^{1,2}, 谢旭红^{1,2}, 周 璇^{1,2}

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省讨赖河流域水资源局, 甘肃 酒泉 735000)

摘 要: 积雪是冰冻圈的重要组成部分,在水文循环和能量平衡中起着重要的作用。积雪时空分布及其变化分析是研究内陆河流域出山径流形成、分布及变异的前提。论文以祁连山讨赖河流域上游为研究区,采用降尺度方法获取高分辨率雪深数据,并基于Sen斜率法、敏感性分析和贡献率计算方法,分析2002—2018年间雪深时空变化,揭示积雪对地形及气候等因子的响应规律。结果表明:讨赖河流域上游雪深介于0~2.50 cm之间,变率介于-0.19~0.06 cm·a⁻¹之间,域内雪深减小面积占比68.30%。雪深随海拔的增大而增加,以海拔2 500 m为界发生增减变化,高海拔地区呈减小趋势;雪深随坡度增加则呈先增后减的趋势;各坡向雪深均呈减小态势,西北坡尤为显著。从敏感性均值来看,气温和辐射对雪深具负向抑减效应,降水则具正向促增效应。高海拔区域降水对积雪变化的贡献率相对较大;低海拔河谷地带气温对积雪变化的贡献更为显著。本研究为内陆河流域上游积雪动态研究提供了范例,对出山径流模拟、预测以及流域水资源管理具有一定参考价值。

关键词: 祁连山; 讨赖河流域上游; 积雪; 时空分布

中图分类号: P426.63⁵ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0108-11

0 引言

积雪是冰冻圈水分的主要存在形式,对环境变化极为敏感,在全球或区域气候系统中起着指示器的作用^[1-2]。全球变化背景下,升温导致积雪变化异常,对高山地带径流形成、水资源演化造成深远影响。特别是内陆河流域,高寒山区作为冰雪融水补给的源头,积雪的变化直接影响到上游出山径流,进而对中下游地区社会经济发展产生影响。因此,积雪变化及归因研究对于区域水资源管理和灾害防治具有重要的意义^[3-4]。

近年来,国际科学界关于积雪的研究计划越来越多,如世纪气候研究计划的气候和冰冻圈项目, NASA关于寒区陆面过程实验以及我国的西部环境和生态科学研究计划等,都把积雪及其动态列为研

究的关键内容,并取得了一系列瞩目的成果。当前积雪的相关研究主要集中在时空变化、雪深、雪水当量、反照率等方面,研究方法主要包括地面台站观测和遥感监测^[5-6]。Che等^[7]基于被动微波遥感数据发现1978—2006年我国积雪深度呈微弱上升趋势,积雪深度变化存在明显的区域性差异;马丽娟等^[8]发现,中国年均雪深呈显著上升趋势的气象台站主要分布于内蒙古东部、东北北部以及青藏高原北部等地区。

积雪及其相变参与着多种尺度能-水过程,具有十分重要的生态环境效应^[9-11]。2013年,IPCC关于全球气候变化的第五次评估报告中提出,近30年全球地表平均温度上升了0.85℃。气候变暖导致降水分配异常、冰川消融加速和积雪融化提前等,对积雪区雪盖分布、面积及雪深等均产生影响^[12-13]。

收稿日期: 2021-10-13; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金项目; 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2020-kb01); 甘肃省科技重大专项计划项目(20ZD7FA005)资助

作者简介: 武磊, 博士研究生, 主要从事寒旱区水文水资源领域研究. E-mail: wul17@lzu.edu.cn

通信作者: 李常斌, 教授, 主要从事水文水资源领域教研工作. E-mail: lichb@lzu.edu.cn

同时,积雪的高反射率、高相变潜热和低热传导等效能作用于陆-气交互及能-水平衡,反过来也对区域气候变化具有显著影响^[14-16];特别是山地积雪面积减小可致积雪覆盖区反射率降低,陆表系统吸收更多的太阳辐射,积雪消融将进一步加剧^[17-18]。

研究表明,气候因子对积雪变化的作用发生在地形因子影响的基础上。如随海拔升高,气温逐渐降低,积雪融化速率发生变缓;不同坡度和坡向承接的太阳辐射不同,导致地表温度差异,融雪过程也有所不同;上述地形和气候要素双重影响下,积雪分布呈现出显著的时空异质性^[19-21]。白淑英等^[22]分析了青藏高原积雪深时空分布与地形的关系,认为高原积雪分布受高程和坡度的双重影响,而高程是影响雪深的主要地形因子;除多^[23]以积雪覆盖率为指标分析了西藏高原积雪的地形影响,发现海拔越高积雪覆盖率越高,积雪持续时间越长,年内变化越稳定。此外,植被对积雪分布也有较为显著的影响。森林边缘、稀疏林地或相对开阔地域容易产生积雪,覆盖良好的林地因冠层截留,积雪累积量相对较低。

地处祁连山区的讨赖河流域上游出山径流由冰雪融水和降水共同补给,在内陆河流域中较具代表性。域内积雪分布和雪深变化很大程度上影响着出山径流及其年内分配,进而影响到中、下游地区“三生”体系水资源利用的可达性^[24-25]。厘清讨赖河流域上游积雪变化及其对地形和气候变化的响应机制,对区域水量平衡和气候变化具有一定的指示作用。本研究基于降尺度方法获取高分辨率雪深数据,采用空间统计、敏感性分析和贡献分离等方法就讨赖河流域2002—2018年间积雪变化进行综合分析,揭示雪深对地形和气候因子的响应规律,为内陆河上游水资源科学评估、规划和开发利用提供理论认知和数据方法参考。

1 研究区概况

讨赖河发源于祁连山区讨赖南山东段,属黑河一级支流。河流主要流经青海省祁连县、甘肃省肃南县、嘉峪关市以及酒泉市肃州区和金塔县,冰沟水文站断面以上为流域上游区域,集水面积6 883 km² (图1)。上游河川径流主要由降水和冰雪融水补给。域内地势高峻,气候阴湿寒冷,年降水量在300~450 mm之间,年蒸散发量在200~250 mm之

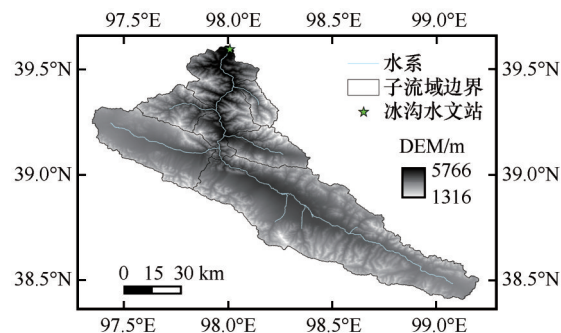


图1 讨赖河流域地理位置及高程和水系分布示意图

Fig. 1 The geographic location and spatial distribution of the altitude and stream networks of the Taolai River basin

间,年均气温-5~-3℃之间,昼夜温差大,太阳辐射强烈,属较典型高寒半干旱气候^[26-27]。覆被类型以高寒草甸为主,面积占比87%。山区河流每年10月至翌年4月为结冰期,4—5月间有微弱春汛,7—8月间降水量和冰川消融同期增大,形成主要汛期。根据冰沟水文站数据资料,讨赖河上游年出山径流量介于 $4.8 \times 10^8 \sim 9.2 \times 10^8$ m³之间,是中、下游酒泉盆地和金塔盆地各项用水的主要来源。讨赖河流域水资源较为丰富,但在上游供水和下游用水方面依旧存在水源单一、开发利用程度不高等问题^[28]。特别是上游山区积雪时空分布研究,是该区水资源量化评估和合理利用的基础性工作,但较少见诸报道。

2 数据和方法

2.1 数据

采用中国青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)发布的1979年1月到2020年12月逐日雪深分布数据,空间分辨率为0.25°(约27.5 km)^[7];积雪覆盖数据采用National Cryosphere Desert Data Center发布的2002—2018年高亚洲逐日积雪覆盖度数据集(<http://www.ncdc.ac.cn>),空间分辨率为500 m,用于雪深降尺度处理。DEM采用中国科学院地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)发布的30 m ASTER GDEM数字高程数据,用于计算流域坡度、坡向等地形要素;气温、降水数据来自1979—2018年中国区域地面气象要素驱动数据集(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),时间分辨率为3小时,空间分辨率为0.1°,通过ArcGIS空间分析工具计算讨赖河上游月平均气温以及月降水量;辐射数据采用欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)发布的地表净辐射数据产品(<https://www>).

ecmwf. int/), 空间分辨率为 0.25° , 时间分辨率为 3 h。采用双线性插值方法将上述气象数据的空间分辨率统一至 500 m, 便于空间要素的叠置分析, 时间序列统一至 2002—2018 年。

2.2 方法

2.2.1 雪深降尺度方法

将积雪覆盖数据转换为二值积雪图, 有积雪的像元记为 1, 没有积雪覆盖的像元为 0。由此计算出 2002 年至 2018 年的积雪覆盖日数图 (记为 SDY), 空间分辨率为 500 m。以初始雪深数据的分辨率 (27.5 km) 为参考, 基于像元统计, 获得每 55×55 个 SDY 网格内的积雪覆盖累加值 (记为 SDT), SDT 的分辨率为 27.5 km。根据公式 (1) 得到 500 m 的降尺度雪深数据。降尺度方法概念框架如图 2 所示, 首先将原始积雪数据二值化处理为 FSC 栅格, 按是否为 0 对该区域是否有雪进行过滤, 若 FSC 为 0, 则认为该天雪深为 0; 其次对 SDY 进行累加, 获得与原雪深数据相同分辨率的 SDT , 以此计算有积雪覆盖时雪深的空间概率大小 ($\frac{SDY \times 55 \times 55}{SDT}$), 按积雪空间分布概率修正雪深栅格, 高积雪分布概率像元对应的雪深值也更大^[12]。

$$\begin{cases} \text{if } FSC = 0 \\ SND_{sp} = 0 \\ \text{Else} \\ SND_{sp} = \frac{SND_a \times SDY \times 55 \times 55}{SDT} \end{cases} \quad (1)$$

式中: FSC 为积雪二值化数据; SND_{sp} 为 500 m 分辨率的雪深值; SND_a 为 27.5 km 空间分辨率雪深值; SDY 为 500 m 分辨率的积雪覆盖日数; SDT 为 27.5 km 边长正方形区域内共计 3 025 个 SDY 像元的累加值。

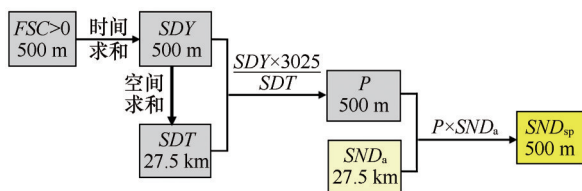


图 2 雪深降尺度技术路线图

Fig. 2 Calculation flowchart of the downscaling method for the snow depth raster data

2.2.2 Sen 斜率法

Sen 斜率在评估时间序列变化趋势及变化幅度时, 能降低或避免数据异常或缺失对分析结果的影响, 是一种较为成熟的变化幅度统计方法^[29]。以样

本序列在不同长度的变化率构造秩序列, 根据给定的显著性水平进行统计变量检验, 得到变化率取值范围, 进而以中值判断序列的变化趋势及幅度。Sen 斜率绝对值代表序列变化幅度, 正负代表变化趋势。计算公式为:

$$SS_{ij} = \text{MEDIAN} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right) \quad (2)$$

式中: SS_{ij} 为 Sen 斜率值; X_i 和 X_j 分别为第 i 时刻和第 j 时刻的序列值, 其中 $1 < i < j < n$, n 为序列长度。

2.2.3 敏感性分析

为研究积雪对气候变化的响应, 采用 Zheng 等^[30]提出的敏感性系数计算方法, 该方法被广泛应用于径流变化的气候或土地利用变化贡献分离研究中:

$$\varepsilon_x = \frac{\bar{x}}{y} \times \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: ε_x 为 y (本文中为雪深) 对气候要素 x (气温、降水、辐射) 的敏感性系数, 指气象要素 x 变化 1%, 引起的 y 变化 $\varepsilon_x\%$; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为气象要素 x 与预测要素 y 的多年平均值。

2.2.4 贡献率计算

多元线性回归以回归系数表征自变量对因变量的贡献程度, 利于解释因变量与多个自变量之间的关系, 可用于分析和预测不同要素对某一变量的影响。本文基于该方法构建雪深特征值与气温、降水和辐射之间的多元线性回归关系, 量化气候因素对雪深变化的相对贡献率。为了消除不同量纲对回归计算的影响, 在建立回归关系时将各变量进行归一化处理, 值域分布范围为 $[0, 1]$, 多元回归及贡献度计算式分别为:

$$y = a \times T + b \times P + c \times SR + \delta \quad (4)$$

$$\gamma_T = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c|} \times 100\% \quad (5)$$

式中: T 、 P 和 SR 分别为关键气候变量气温、降水和辐射; a 、 b 和 c 分别为三个气候变量的多元回归系数; δ 为回归常量; γ_T 为气温对积雪变化的贡献度, 降水和辐射贡献度计算式类似, 不予赘述。

3 结果

3.1 雪深的时空分布及变化特征

3.1.1 空间分布及变化

统计表明, 2002—2018 年间, 讨赖河流域上游多年平均雪深介于 0~5.87 cm 之间 [图 3(a)], 高值

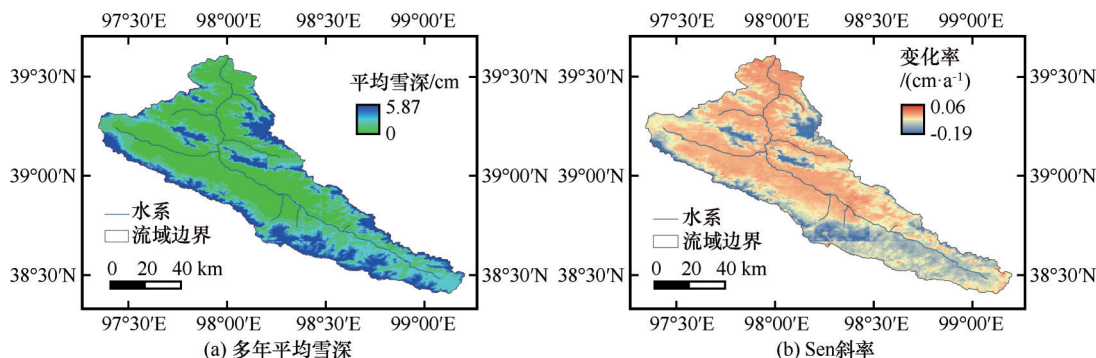


图3 讨赖河流域上游多年平均雪深(a)及其Sen斜率(b)的空间分布(2002—2018)

Fig. 3 Spatial distribution of multi-year average snow depth (a) and Sen's slope (b) in the upper reaches of Taolai River basin (2002—2018)

区主要分布在流域分水岭以及中上游海拔较高地带,低值区主要分布在流域下游以及地势较低的河谷地带。雪深变化介于 $-0.19 \sim 0.06 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间[图3(b)],增加区域主要分布在地势较低的河谷地区,减少区域主要分布在中上游分水岭地区以及海拔较高地带,总体呈现雪深高值区减少,低值区增加的空间变化格局。

3.1.2 年月尺度时变特征

讨赖河流域上游雪深的年际波动明显。统计时段内,区域雪深最大均值出现2008年,为1.89 cm,最小值出现在2017年,仅0.35 cm;2002—2018年间雪深总体呈微弱减小态势[图4(a)]。从年内分配来看,域内平均积雪深度冬、春季较大,1月最大,为2.25 cm;夏秋季较小,7—8月最小,基

本为0 cm[图4(b)]。

基于Sen斜率统计讨赖河流域上游月、年尺度雪深变率及其增、减面积占比,结果列于表1。可知,雪深在各月份各有增减,增减幅度有所差异,表现出一定的空间异质性。在1月、7月、11月和12月雪深增加区域的面积大于减小面积。平均而言,积雪发生减少以2—4月最为显著,减率均在 $0.02 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上;积雪发生增加的月份主要在11—12月,增率分别为 $0.017 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.045 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。3—6月和9—10月雪深减小区域的面积均在80%以上,8月、11月和12月雪深增加面积达80%以上。多年平均而言,雪深减小和增大面积占比分别为68.30%和31.70%,总体以减小为主,平均减小速率为 $-0.008 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

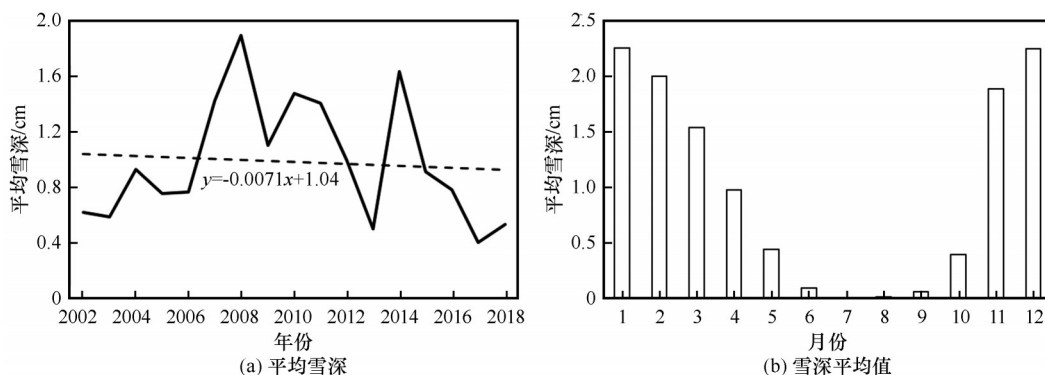


图4 讨赖河流域上游雪深年际动态(a)及多年平均月值分布(b)

Fig. 4 Annual dynamics (a) and multi-year average monthly value distribution (b) of snow depth in the upper reaches of Taolai River basin

3.2 地形对雪深变化的影响

3.2.1 讨赖河流域上游山区地形分布特征

地形因素如坡度和坡向深刻影响着坡地辐射收支、能量传输和生态水文等状况。本文以30 m

DEM通过ArcGIS计算获得讨赖河上游坡度、坡向空间分布,可以较准确地勾勒出流域的地形特征并满足统计需求。空间分析表明,讨赖河上游河谷地带坡度较小,总体介于 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间;向河谷两侧山

表1 雪深变率特征值及面积占比统计
Table 1 Statistics of variation characteristic value and area proportion of snow depth variability

月份	变率特征值/(cm·a ⁻¹)			面积占比/%	
	最小值	最大值	均值	减少	增加
1月	-0.098	0.065	-0.016	47.74	52.26
2月	-0.105	0.056	-0.028	70.47	29.53
3月	-0.133	0.015	-0.037	87.48	12.52
4月	-0.162	0.004	-0.044	98.23	1.77
5月	-0.041	0.000	-0.013	99.88	0.12
6月	-0.022	0.006	-0.003	96.55	3.45
7月	-0.000	0.007	0.002	0.78	99.22
8月	-0.005	0.016	0.005	64.23	35.77
9月	-0.048	0.005	-0.008	91.63	8.37
10月	-0.044	0.031	-0.006	81.05	18.95
11月	-0.059	0.089	0.017	15.78	84.22
12月	-0.078	0.123	0.045	7.43	92.57
年平均	-0.082	0.031	-0.008	68.30	31.70

势渐高,坡度逐渐增大,特别是接近分水岭地带,坡度大体在10°~20°之间;北部接近出山口区域地形复杂,坡度变化大,零星分布有20°~50°高值[图5(a)]。域内坡向构成相对复杂,总体以连片北坡为主,主要分布在讨赖河上游干流左岸[图5(b)]。讨赖河上游山地系统坡度及坡向的分布,是该区积雪受气候变化影响的地形基础。

3.2.2 地形因子对积雪分布的影响

基于500 m高程阶、10°坡度阶以及45°坡向阶对域内高程、坡度和坡向进行重分类,统计各数值区间雪深分布及变化并绘制为箱图,箱图上、下线

端表示2002—2018年研究区雪深的最大、最小值;箱(中间方形区域)的上、下限表示序列统计的上、下四分位数;中间线条表示中位数;中间的方块表示均值。分析表明,雪深总体随高程的增大而增大,最大值出现在高于5 000 m高程区间,均值为5.03 cm;最小值出现在2 500~3 000 m地带,均值仅0.18 cm;高程越大,雪深波动越显著,以大于5 000 m区间为最,雪深最大值和最小值分别为7.75 cm和2.41 cm[图6(a)]。雪深随坡度增大呈先增后减的趋势,坡度30°~40°区间积雪分布最广,雪深介于0.58~2.69 cm之间,均值为1.88 cm;坡度60°~70°区间积雪分布最少,雪深介于0.08~0.37 cm,均值为0.18 cm[图6(b)]。坡向在讨赖河流域各个高程带均有分布,空间统计的均化效应使得坡向对雪深的局地影响相对较小,总体上为阳坡的南坡由于阳光照射充足,积雪深度最小,西北坡的积雪深度最大[图6(c)]。

结合表2~4的统计结果,高程较低的范围(2 000~2 500 m)雪深年变率为正,增率为0.008 cm·a⁻¹,2 500 m以上区间,雪深变率为负,尤以3 500~4 000 m之间的雪深减小最为显著,达到了-0.032 cm·a⁻¹。总体上不同坡度区间内的雪深均为减小趋势。随坡度增加,雪深减率呈先增后减的趋势,在10°~30°范围内的减小速率最大,为-0.048 cm·a⁻¹。全域而言,不同坡向的雪深变化差异均表现为减小;西北坡的减率最为显著,减小速率为-0.049 cm·a⁻¹;南坡的减小速率较小,仅为-0.033 cm·a⁻¹。

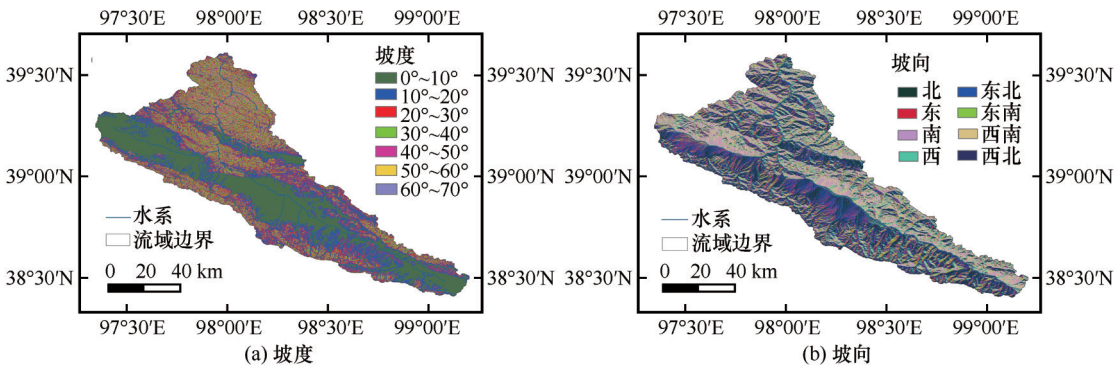


图5 讨赖河流域坡度(a)及坡向(b)的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of slope (a) and aspect (b) in Taolai River basin

3.3 气候变化对积雪的影响

3.3.1 气候变化及其积雪效应

2002—2018年间,讨赖河流域上游气温和辐射

发生增加,而降水呈减小趋势。气温呈显著上升趋势,气温线性增率达0.0065℃·a⁻¹。流域平均气温以2002年最低,为-5.64℃;2009年气温达最高值,

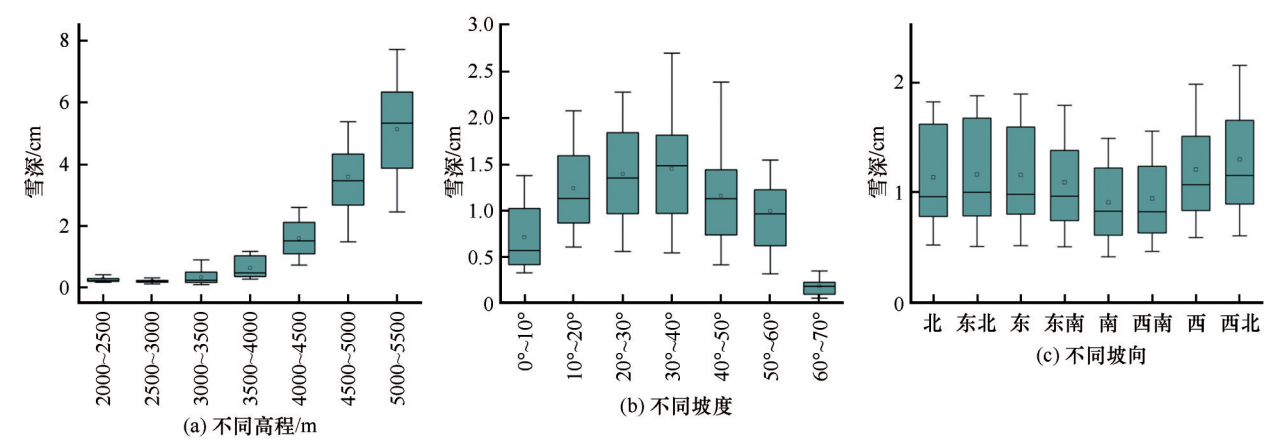


图6 不同高程(a)、坡度(b)以及坡向(c)区间雪深统计
Fig. 6 Statistics of snow depth in different elevation (a) , slope (b) and slope direction (c)

表2 高程影响下的雪深变率统计

高程范围	2 000~2 500 m	2 500~3 000 m	3 000~3 500 m	3 500~4 000 m	4 000~4 500 m	4 500~5 000 m	5 000~5 500 m
变化率	0.002	-0.001	-0.008	-0.032	-0.060	-0.106	-0.107

表3 坡度影响下的雪深变率统计

坡度	0°~10°	10°~20°	20°~30°	30°~40°	40°~50°	50°~60°	60°~70°
变化率	-0.032	-0.048	-0.048	-0.047	-0.037	-0.030	-0.005

表4 坡向影响下的雪深变率统计

坡向	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
变化率	-0.043	-0.044	-0.045	-0.042	-0.033	-0.035	-0.045	-0.049

为-4.92℃[图7(a)]。降水的线性增率为-2.16 mm·a⁻¹。年降水量以2014年最低,为234 mm;2007年出现最高值,为423 mm[图7(b)]。辐射的线性增率为8.32 MJ·m⁻²。流域年总辐射以2007年最低,为3 820 MJ·m⁻²;2013年太阳辐射最高,为4 605 MJ·m⁻²[图7(c)]。

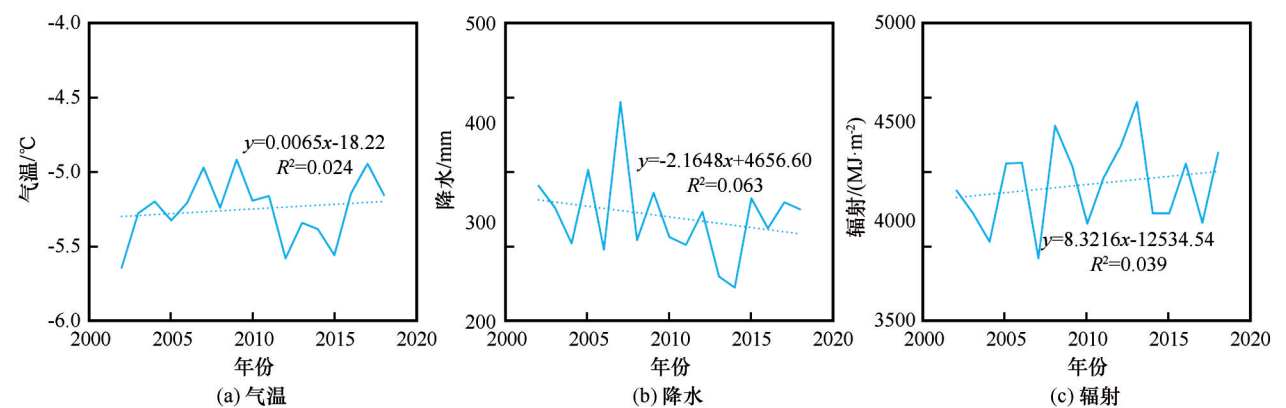


图7 讨赖河流域上游气温(a)、降水(b)以及辐射(c)的年际变化(2002—2018年)
Fig. 7 Annual variation of temperature (a) , precipitation (b) and radiation (c) in the upper reaches of Taolai River basin (2002—2018)

前述气候变化影响下,讨赖河流域上游积雪分布的时空分布格局异质性显著。敏感性分析表明,雪深对所遴选三个气候要素变化的响应有所不同。气温以负向抑减效应为主,域内因气温升高导致雪深显著减小的区域主要位于南部以及东部的分水岭地区,敏感系数(绝对值)最大为-6.23;雪深对降水的敏感性系数在上游以正效应为主,上游地区气温较低,降水增大有利于雪的累积,而下游地区则

主要表现为负减效应;辐射对雪深的影响以负向抑减效应为主,下游的少部分地区敏感性为正值,从下游至上游,辐射对雪深的负向驱动作用逐渐增强,敏感性系数最大值达-7.23。平均而言,雪深对气温、降水和辐射等三个要素的敏感性系数分别为-2.92、0.18和-2.88,表明上述三个要素增加1%当量时,讨赖河流域上游平均积雪深度将分别变化-2.92 cm、0.18 cm和-2.88 cm。

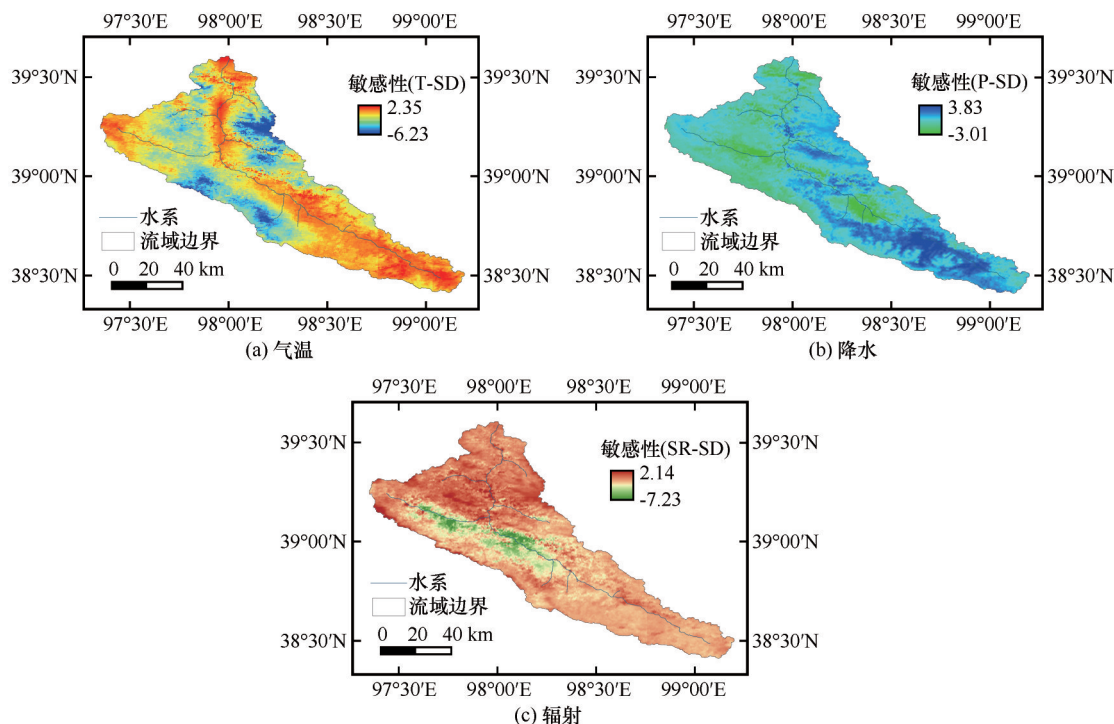


图8 讨赖河上游雪深对气温(a)、降水(b)和辐射(c)敏感性系数的空间分布(T、P、SR、SD分别表示气温、降水、辐射和雪深)
Fig. 8 Spatial distribution of sensitivity coefficients of snow depth to air temperature (a), precipitation (b) and radiation (c) in the upper reaches of Taolai River basin (T, P, SR and SD represent air temperature, precipitation, radiation and snow depth, respectively)

3.3.2 气候影响贡献分离

气候要素对雪深变化贡献率的空间分布如图9所示。气温对雪深的贡献率范围为2.13%至79.08%之间,高值区主要分布在流域河谷地区,低贡献区主要分布在流域海拔较高的分水岭地区以及东部区域。降水对雪深的贡献率范围在2.38%至48.27%之间,高值区主要分布在流域靠近上游的区域,中、下游大部分区域降水对雪深的影响较小。辐射对雪深变化的贡献率介于0.52%至60.80%之间,高值区主要分布在中下游分水岭,从下游至上游辐射贡献率逐渐降低。统计期间,气温、降水和辐射对讨赖河流域上游积雪变化的平均贡献率分别为33.63%、29.83%和36.54%,由前述

敏感性分析可知,降水对积雪产生正向促增效应,但其影响小于气温和辐射的负向抑减效应。1982—2018年间,讨赖河流域上游积雪变化总体表现为减少。

4 讨论

地形对积雪形成、消融以及雪盖持续时间等具有重要影响^[31]。一方面,海拔越高气温越低,降雪相对较多,有利于积雪形成和保持^[32-33]。另一方面,山地迎风坡受风频率高,风吹影响使得雪更容易被搬运并沉积,积雪量通常较大^[34]。正常情况下,阳坡的雪较阴坡融化得快,因此很多地区同一高程阳坡和阴坡的雪量以及雪深均有所差别^[35]。坡度与

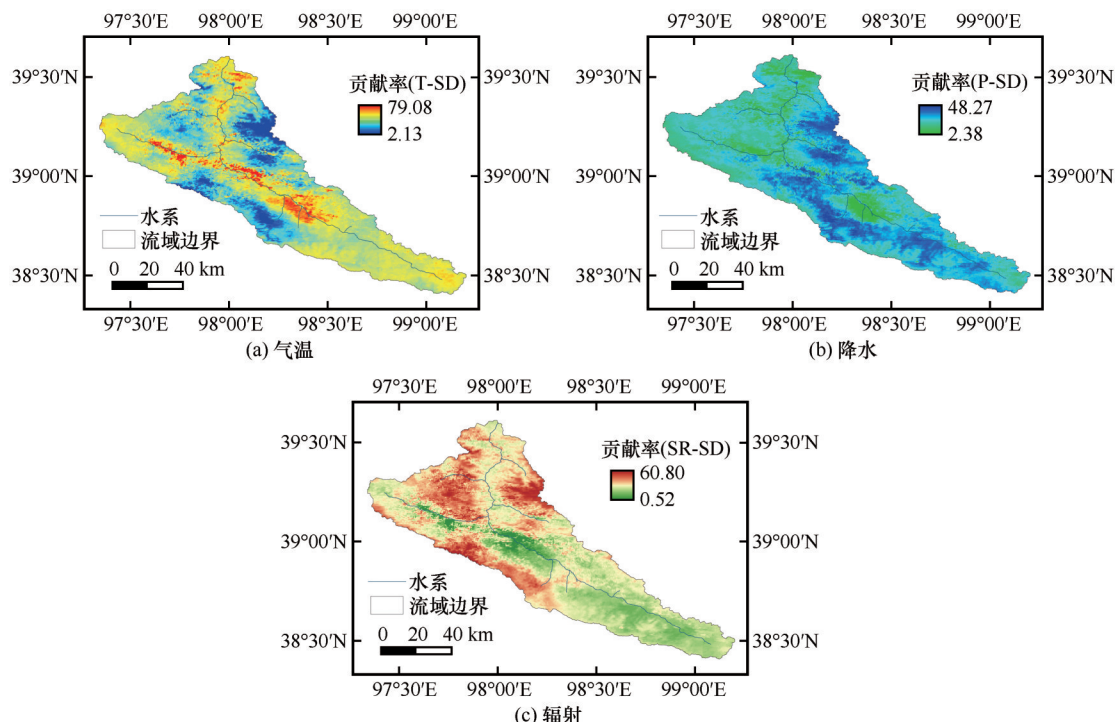


图9 气温(a)、降水(b)以及辐射(c)变化对雪深的贡献率(%)的空间分布(T、P、SR、SD分别表示气温、降水、辐射和雪深)

Fig. 9 Spatial distribution of contribution rate (%) of temperature (a), precipitation (b) and radiation (c) changes to snow depth variation (T, P, SR and SD represent temperature, precipitation, radiation and snow depth, respectively)

太阳入射角度密切相关,一定程度决定着积雪可接受的日照辐射量,对雪盖能量的收支情况和积雪消融速度产生影响^[36]。从气候影响的角度,气温越高,降水越丰,积雪面积越小;反之,积雪消融慢,积雪面积大^[37-38]。综合来看,海拔高的地区温度较低,降水的多寡决定了雪的来源,因此上游区域降水变化带来的贡献率相对较大;而河谷地带降水充足,气温的高低则是导致能否形成降雪的主要原因,因此河谷地区气温的贡献率更显著^[39-40]。统计期间,讨赖河流域上游气温及辐射均成增加趋势,降水则有所减小,三者的共同工作作用导致了雪深总体呈微弱减小。

山地融雪径流是西北干旱区水资源的重要组成部分,直接影响着出山径流及其季节分配^[41-42]。增温背景下,山地冰雪融水增加,有利于内陆河上游出山径流的增加,但这种正向促增是以冰雪固体物质减少为代价的。本次研究表明,讨赖河流域上游雪深在过去几十年总体发生减小,佐证了上述山地水文变化特征,且长期来看,随着冰雪物质退减,内陆河流域上游径流发生衰减的风险提升^[43-44]。此外,增温背景下融雪期提前,径流调蓄能力较低的山地流域,容易发生春汛。上述山地水文过程变异及其后果,需要引起各方重视^[45]。

除气温、降水和辐射等关键气候因素外,气溶胶含量、雪颗粒大小及结构密度等,均会对积雪变化产生影响。而且,冰雪消融不仅受气候变化和地形等控制,人类活动如土地利用变化等,会通过改变地表气温、湿度等对冰雪消融产生影响。受数据资料和方法等限制,本次研究暂不涉及上述内容,未来研究中将予以关注。

5 结论

论文以讨赖河流域上游为研究区,采用多源数据和多种方法,就该区积雪时空分布进行综合分析,并就地形和关键气候因子对积雪变化的影响进行初步探讨,主要结论如下:

(1) 讨赖河流域雪深高值区主要分布在分水岭地带以及上游海拔较高地带,而低值区多位于河谷地区,总体呈高值区域减少、低值区域增加的趋势;雪深在2月和4月减小最为显著,在11月和12月表现为增加趋势。

(2) 雪深随海拔增加而增大;随坡度增加呈先增后减趋势,坡度30°~40°区间积雪分布最广;坡向对雪深影响相对较小,但阳坡雪深较阴坡小;高海拔地域雪深减率更大。

(3) 气温和辐射对雪深具负向抑减效应,降水

则具正向促增效应;高海拔地域降水对积雪变化的贡献较大;低海拔河谷地带气温对积雪变化的贡献更为显著。

参考文献(References):

- [1] Li Zhaoguo, Lü Shihua, Chen Hao, et al. Changes in climate and snow cover and their synergistic influence on spring runoff in the source region of the Yellow River[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149503.
- [2] Ahluwalia R S, Rai S P, Meetei P N, et al. Spatial-diurnal variability of snow/glacier melt runoff in glacier regime river valley: central Himalaya, India[J]. *Quaternary International*, 2021, 585: 183-194.
- [3] Cheng Genwei, Fan Jihui, Peng Li. Progresses in soil freezing-thawing effects on the runoff generation in plateau-mountain regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(10): 1020-1029. [程根伟, 范继辉, 彭立. 高原山地土壤冻融对径流形成的影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(10): 1020-1029.]
- [4] Xiang Yanyun, Wang Zhicheng, Zhang Hui, et al. Study of snowmelt runoff simulation in arid regions: Progress and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 892-901. [向燕芸, 王志成, 张辉, 等. 干旱区融雪径流模拟的研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 892-901.]
- [5] Cheng Fei, Li Qiaoping, Shen Xinyong, et al. Evaluation of Eurasian snow cover fraction prediction based on BCC-CSM 1.1 m[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2021, 32(5): 553-566. [成菲, 李巧萍, 沈新勇, 等. BCC-CSM 1.1 m 对欧亚积雪覆盖的预测评估[J]. *应用气象学报*, 2021, 32(5): 553-566.]
- [6] Tan Qiuyang, Cheng Lei, Xu Zongxue, et al. Spatiotemporal distribution of snow cover depth and its driving factors in the Yarlung Zangbo River Basin, 1979—2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1049-1059. [谭秋阳, 程磊, 徐宗学, 等. 1979—2017年雅鲁藏布江流域雪深时空分布特征及其影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1049-1059.]
- [7] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993—2002[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 64-67. [车涛, 李新. 1993—2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 64-67.]
- [8] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957—2009[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 1-11. [马丽娟, 秦大河. 1957—2009年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 1-11.]
- [9] Tang Zhiguang, Deng Gang, Hu Guojie, et al. Spatiotemporal dynamics of snow phenology in the High Mountain Asia and its response to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1400-1411. [唐志光, 邓刚, 胡国杰, 等. 亚洲高山区积雪物候时空动态及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1400-1411.]
- [10] Li Fei, Liu Miaomiao, Wang Shuixian. Change in snow coverage and responses to climate change from 2001 to 2013 in the upper reaches of Kaidu River Basin[J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1160-1168. [李斐, 刘苗苗, 王永献. 2001—2013年开都河流域上游积雪时空分布特征及其对气象因子的响应[J]. *资源科学*, 2016, 38(6): 1160-1168.]
- [11] Wang Jingzhe, Liu Zhihui, Tashpolat Tiypet al. Thawing process of seasonal frozen soil on northern slope of the Tianshan Mountains during snowmelt period[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 282-292. [王敬哲, 刘志辉, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 天山北坡融雪期季节性冻土融化过程分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 282-292.]
- [12] Deng Jie, Huang Xiaodong, Ma Xiaofang, et al. Downscaling algorithm and verification of AMSR2 snow cover depth products in north Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(6): 1181-1188. [邓婕, 黄晓东, 马晓芳, 等. 新疆北部 AMSR2 雪深产品降尺度算法及验证[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(6): 1181-1188.]
- [13] Liu Jinping, Ren Yanqun, Zhang Wanchang, et al. Study on the influence of climate and underlying surface change on runoff in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(1): 275-287. [刘金平, 任艳群, 张万昌, 等. 雅鲁藏布江流域气候和下垫面变化对径流的影响研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 275-287.]
- [14] Liu Yan, Liu Youcun, Jiao Keqin, et al. Advances on water resources research in upper reaches of the Urumqi River since 1990[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 958-967. [刘燕, 刘友存, 焦克勤, 等. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 958-967.]
- [15] Chen Haiyan, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Quantifying the contributions of snow/glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174: 47-57.
- [16] Bavay M, Grünwald T, Lehning M. Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 55: 4-16.
- [17] Luo Tengfei, Tan Debao, Wen Xiongfei, et al. Remotely-sensed monitoring of snow-ice in the source region of Changjiang River based on MODIS and analysis of its change rule[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 143-147. [骆腾飞, 谭德宝, 文雄飞, 等. 基于 MODIS 的长江源区雪冰遥感监测及其变化规律分析[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 143-147.]
- [18] Xi Axing, Liu Zhihui, Lu Wenjun. Processes of seasonal frozen soil freezing-thawing and impact on snowmelt runoff in arid area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(2): 333-339. [习阿幸, 刘志辉, 卢文君. 干旱区季节性冻土冻融状况及对融雪径流的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 333-339.]
- [19] Huang Jinbai, Wang Bin, Wen Jiawei. Characteristics of surface runoff in the rainy season and snowmelt period of semiarid western of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(5): 87-96. [黄金柏, 王斌, 温佳伟. 黑龙江省西部半干旱区雨季及融雪期径流特性[J]. *东北农业大学学报*, 2019, 50(5): 87-96.]
- [20] He Ying. Spatial-temporal variation of snow depth in permafrost region of Heilongjiang Province from 1961 to 2015[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2018(2): 38-39. [贺英. 1961—2015年阿勒泰地区积雪变化特征研究[J]. *陕西水利*, 2018(2): 38-39.]
- [21] Lu Boquan, Liu Shibo. Remote sensing analyzing of spatial-temporal distributions of snow depth in the Heilongjiang permafrost regions[J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2017, 33(6): 105-110. [鲁博权, 刘世博. 1979

- 2014年黑龙江省冻土区积雪深度时空变化分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2017, 33(6): 105-110.]
- [22] Bai Shuying, Wu Qi, Shi Jianqiao, et al. Relationship between the spatial and temporal distribution of snow depth and the terrain over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(4): 171-178. [白淑英, 吴奇, 史建桥, 等. 青藏高原积雪深度时空分布与地形的关系[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 171-178.]
- [23] Chu Duo. Spatial-temporal variations of snow cover on the Tibet Autonomous Region from 2000 to 2014 using MODIS data [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(1): 27-37. [除多. 2000—2014年青藏高原积雪覆盖时空变化[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 27-37.]
- [24] Wang Yajun, Xu Liping, Guo Peng, et al. Analysis on melting snow and ice cover in Manas mountain river basin during the period from 1977 to 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 208-212, 218. [王雅君, 徐丽萍, 郭鹏, 等. 1977—2013年玛河流域山区冰雪覆被消融态势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 208-212, 218.]
- [25] Li Changbin, Qi Jianguo, Wang Shuaibing, et al. Spatiotemporal characteristics of alpine snow and ice melt under a changing regional climate: a case study in Northwest China[J]. Quaternary International, 2015, 358: 126-136.
- [26] Gao Yan, Feng Qi, Li Zongxing, et al. The variation of climate extremes in the Taolaihe River basin in the Qilian Mountains of China during 1957—2012[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 814-826. [高妍, 冯起, 李宗省, 等. 祁连山讨赖河流域1957—2012年极端气候变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 814-826.]
- [27] Gao Yan, Feng Qi, Li Zongxing, et al. Potential evaporation in the Taolaihe River basin during 1957—2012[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(4): 1125-1132. [高妍, 冯起, 李宗省, 等. 1957—2012年讨赖河流域潜在蒸发量变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1125-1132.]
- [28] Li Changbin, Wang Liuming, Wang Wanrui, et al. An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability [J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 30-42.
- [29] Wu Lei, Li Changbin, Xie Xuhong, et al. Future variation in mountainous discharge in arid northwestern China: a basin case study [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(9): 2287-2303.
- [30] Zheng Hongxing, Zhang Lu, Zhu Ruirui, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): W00A19.
- [31] Lan Jinjing, Ji Weiqian, Du Weibing. Spatiotemporal variation of snow ice on eastern Tianshan Mountain by remote sensing and meteorological data [J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(4): 30-34. [兰进京, 姬伟倩, 都伟冰. 遥感和气象数据天山东部冰雪时空变化研究[J]. 遥感信息, 2020, 35(4): 30-34.]
- [32] Xu Xianhua, Li Yanlin, Liu Yihua, et al. Analysis on the variation of snow cover in the south of Huangnan in the last 56 years [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 65-70. [许显花, 李延林, 刘义花, 等. 黄南南部近56年积雪变化分析研究[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 65-70.]
- [33] Ren Yanqun, Liu Hailong, Bao Anming, et al. Spatial and temporal characteristics of snow depth in the Tianshan Mountains derived from SSM/I and MODIS data[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1178-1187. [任艳群, 刘海隆, 包安明, 等. 基于SSM/I和MODIS数据的天山山区积雪深度时空特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1178-1187.]
- [34] Cao Zhi. Research on the effect of terrain on snow distribution and characteristics in Changbai and Wanda Mountain hilly area [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. [曹志. 地形对长白山完达山山地丘陵地区积雪分布及特性影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.]
- [35] Li Jimei, Zhang Yutao, Zhang Yunyun. Impact of seasonal snowmelt on snowpack at woodland, grassland and bare land in north slope of Tian Mountain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 106-114. [李吉玫, 张毓涛, 张云云. 天山北坡融雪期林地、草地、裸地积雪特性及其影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 106-114.]
- [36] Tian Liuxi, Li Weizhong, Zhang Yao, et al. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5974-5983. [田柳茜, 李卫忠, 张尧, 等. 青藏高原1979—2007年间的积雪变化[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5974-5983.]
- [37] Guan Xiaoxiang, Liu Cuishan, Bao Zhenxin, et al. Spatial-temporal variability of the snow over the Yellow River source region and its influencing climate factors [J]. China Environmental Science, 2021, 41(3): 1045-1054. [管晓祥, 刘翠善, 鲍振鑫, 等. 黄河源区积雪变化时空特征及其与气候要素的关系[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1045-1054.]
- [38] Li Yali, Lei Xiangjie, Li Qian, et al. The variation characteristics of snow cover in the Mount Hua from 1953 to 2016 and its relationship to air temperature and precipitation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 791-800. [李亚丽, 雷向杰, 李茜, 等. 1953—2016年华山积雪变化特征及其与气温和降水的关系[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 791-800.]
- [39] Bi Zherui, Sa Chula, Wang Mulan, et al. Spatiotemporal change of snow depth in the Mongolian Plateau and its response to climate change [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition), 2020, 49(3): 256-262. [毕哲睿, 萨楚拉, 王牧兰, 等. 蒙古高原雪深时空变化及其对气候变化的响应[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2020, 49(3): 256-262.]
- [40] Liu Jinping, Zhang Wanchang, Deng Cai, et al. Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River Basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 643-654. [刘金平, 张万昌, 邓财, 等. 2000—2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 643-654.]
- [41] Li Baofu, Chen Yaning, Chen Zhongsheng, 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. 西北干旱区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.]
- [42] 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. [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.]
- [43] Wang Zilong, He Xin, Jiang Qiuxiang, et al. Simulation and forecast of winter runoff in medium basin of Northeast China

- under climate change [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 575-582. [王子龙, 何馨, 姜秋香, 等. 气候变化下东北中等流域冬季径流模拟和预测[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 575-582.]
- [44] Liu Xiaojiao, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. Variation of snow cover and its influence on spring runoff in the source region of Yellow River [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(2): 226-233. [刘晓娇, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 黄河源区积雪变化特征及其对春季径流的影响[J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 226-233.]
- [45] Duan Binbin, Niu Chunxia, Liu Zhihui. The influence of seasonal frozen soil freezing and thawing on the snowmelt flood in northern slope of Tianshan Mountain [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(3): 180-185. [段斌斌, 牛春霞, 刘志辉. 天山北坡季节性冻土冻融对融雪洪水的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(3): 180-185.]

Spatiotemporal distribution of snow cover and its variation in the upper reaches of the Taolai River basin, Qilian Mountains

WU Lei^{1,2}, LI Fenhua³, LI Changbin^{1,2}, LÜ Jianan^{1,2}, XIE Xuhong^{1,2}, ZHOU Xuan^{1,2}

(1. College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Water Resources Bureau of Taolai River Basin in Gansu Province, Jiuquan 735000, Gansu, China)

Abstract: Snow is an important part of the cryosphere and plays an important role in the hydrological cycle and energy balance. Study of the spatiotemporal characteristics of snow cover and its change is the prerequisite for analyzing the formation, distribution and variation of runoff from mountains in inland river basins. In this study, we selected the upper reaches of the Taolai River basin of Qilian Mountains as the study area, used down-scaling methods to obtain high-resolution snow depth data, and adopted methods of spatial statistics, sensitivity analysis and contribution separations to quantify snow cover distribution and variation influenced by terrain and the regional climate during the time period from 2002 to 2018. Results showed that basin early average snow depth ranged from 0 cm to 2.5 cm, with variation from $-0.19 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ to $0.06 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$. The area of snow depth reduction during the study period accounted for 68.30% of the total area. It was found that the snow depth increase more with altitude and less with the increase of slope. Variation of snow depth increased below 2 500 m a. s. l. and decreased above 2 500 m a. s. l. As the slope increases, it first increases and then decreases; the snow depth of each aspect decreases, especially in the northwest orientation. The sensitivity of snow depth to air temperature and solar radiation were found negative in general, while that of the precipitation was found positive. The precipitation in high-altitude areas has a relatively large contribution to the snow depth variation, while in the valley areas, the contribution of temperature to snow cover is more significant. This work provides an example for the study of snow dynamics in the upper reaches of inland river watersheds, and benefits model simulation and prediction of mountain runoff and regional water management.

Key words: Qilian Mountains; the upper reaches of the Taolai River basin; snow cover; spatiotemporal distribution

(责任编辑: 戴礼云)