

## 近50年丝绸之路经济带中国境内冰川变化

李龙<sup>1</sup>, 姚晓军<sup>2</sup>, 刘时银<sup>3,4</sup>, 卜亚平<sup>1</sup>, 官鹏<sup>2</sup>, 李晓锋<sup>2</sup>

(1. 兰州资源环境职业技术学院, 兰州 730021; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;  
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

**摘要:** 冰川是丝绸之路经济带中国境内重要的水资源, 对该区农业建设和经济发展至关重要。基于修订后的中国第一次冰川编目数据和最新发布的第二次冰川编目数据, 对丝绸之路经济带中国境内冰川变化进行分析。结果表明: (1) 丝绸之路经济带中国境内现有冰川 22523 条, 面积 25516.80 km<sup>2</sup>, 冰储量约 2592.85 km<sup>3</sup>, 分别占我国冰川相应总量的 46.37%、49.22% 和 57.39%, 其中新疆维吾尔自治区冰川储量最为丰富, 共计 2366.25 km<sup>3</sup>。(2) 丝绸之路经济带中国境内冰川以面积 < 0.5 km<sup>2</sup> 的冰川数量最多, 共计 15519 条, 占冰川总数的 68.90%; 面积则以介于 1~5 km<sup>2</sup> 冰川为主, 共计 6833.71 km<sup>2</sup>, 占冰川总面积的 26.78%; 各山系的冰川退缩海拔高度不同, 面积减少速度在各个高度带均有差异。(3) 近 50 年间丝绸之路经济带中国境内冰川面积共减少 4527.43 km<sup>2</sup>, 变化百分比为 -20.88%, 有 3114 条冰川消失, 冰川冰储量损失约 419.35 km<sup>3</sup>。(4) 丝绸之路经济带中国境内冰川变化整体呈现自西向东加快趋势, 减少速率整体上有自西南向东北加快趋势; 冰川朝北消失数量大于朝南消失数量, 东北方向面积减少最多, 东南方向面积减少最快。(5) 近 50 年间丝绸之路经济带中国境内有暖湿化趋势, 冬季气温升高速率大于夏季且降水增加幅度小于夏季的气候组合模式, 不利于冰川的积累从而导致冰川退缩; 冰川发育规模对冰川退缩也有一定影响, 但各山系冰川变化驱动力具有空间差异。

**关键词:** 冰川变化; 冰川编目; 气候变化; 丝绸之路经济带

气候变化是当今全球共同面临的重大课题, 以全球变暖为突出标志的全球环境变化及其可能对生态系统和人类社会产生的影响已引起极大关注<sup>[1]</sup>。已有资料显示, 自 19 世纪后期以来, 全球平均地表温度 (GMST) 持续上升, 1951-2012 年期间全球陆地和海洋年均温上升 0.89 °C 且增温速率呈明显加快趋势<sup>[2]</sup>; 自 1990 年以来全球陆地表面降水总体变化并不大<sup>[3]</sup>, 30°~60°N 降水增加较为明显, 平均每年增加 1~6 mm<sup>[4]</sup>。冰川不仅是反映气候变化的天然记录器和预警器<sup>[5]</sup>, 而且是冰冻圈的重要组成部分<sup>[6]</sup>, 素有“高山固体水库”之称<sup>[7]</sup>。中国是世界上中低纬度冰川最发育的国家, 第二次中国冰川编目表明, 中国共有冰川 48571 条, 总面积约 5.18 万 km<sup>2</sup>, 占世界冰川 (除南极和格陵兰冰盖外) 面积的 7.1%<sup>[8]</sup>。

丝绸之路经济带中国境内冰川分布区属于我国西北干旱内陆河流域地区, 气候变化与我国古丝绸之路的兴衰关系密切<sup>[9]</sup>, 冰川及其融水对于丝绸之路经济带的农业建设和经

收稿日期: 2018-12-13; 修订日期: 2019-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261016); 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目 (SKLCS-OP-2016-10); 兰州资源环境职业技术学院支持项目 (Z2016-14, JT2017-05)

作者简介: 李龙 (1988-), 男, 甘肃榆中人, 硕士, 讲师, 主要从事资源环境遥感与冰冻圈变化方面的研究。

E-mail: happygis@163.com

通讯作者: 姚晓军 (1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 副教授, 主要从事地理信息技术与冰冻圈变化方面的研究。

E-mail: xj\_yao@nwnu.edu.cn

济发展至关重要<sup>[10]</sup>, 不仅是丝绸之路经济带沿线城市与绿洲最重要的水资源<sup>[11]</sup>, 而且对维系本地区脆弱的生态平衡及社会经济可持续发展具有重要意义<sup>[12]</sup>。2006年我国启动科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”, 并基于第一次冰川编目结果, 较为完整地获得了2006-2010年中国及其各流域的冰川数据<sup>[8]</sup>。2013年, 习近平总书记提出建设“新丝绸之路经济带”的战略构想, 给古老丝绸之路赋予了崭新的时代内涵, 同时给丝绸之路经济带沿线甘肃—青海—新疆段的水资源保护与气候变化研究提供了动力<sup>[13]</sup>。本文基于最新发布的中国第二次冰川编目数据和第一次冰川编目修订后的矢量数据, 系统分析近50年丝绸之路经济带我国境内冰川及其变化特征, 从而为该地区生态环境建设、农业建设、经济建设提供冰川水资源储备及变化等数据支撑。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

19世纪70年代, 德国地理学家李希霍芬首次提出了“丝绸之路”的概念<sup>[14]</sup>。根据史书记载, 在我国境内不同时期曾有数条以运输丝绸为主要货物的东西方交流的交通要道。《中国丝绸之路旅游区总体规划(2008-2020年)》明确规范了丝绸之路所包含的行政范围, 包括河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆及新疆生产建设兵团等六省(自治区)一兵团<sup>[15]</sup>。文中所讨论的丝绸之路经济带, 以陇海—兰新铁路线为主轴, 包括铁路、公路等交通方式的亚欧大陆桥轴线的沿线区域<sup>[16]</sup>。在此基础上, 利用数字高程模型提取丝绸之路经济带沿线中国段流域范围, 主要包括新疆、甘肃、青海、内蒙古、四川、宁夏和西藏的部分区域(图1), 分别占各省(自治区)总面积的91.43%、74.16%、

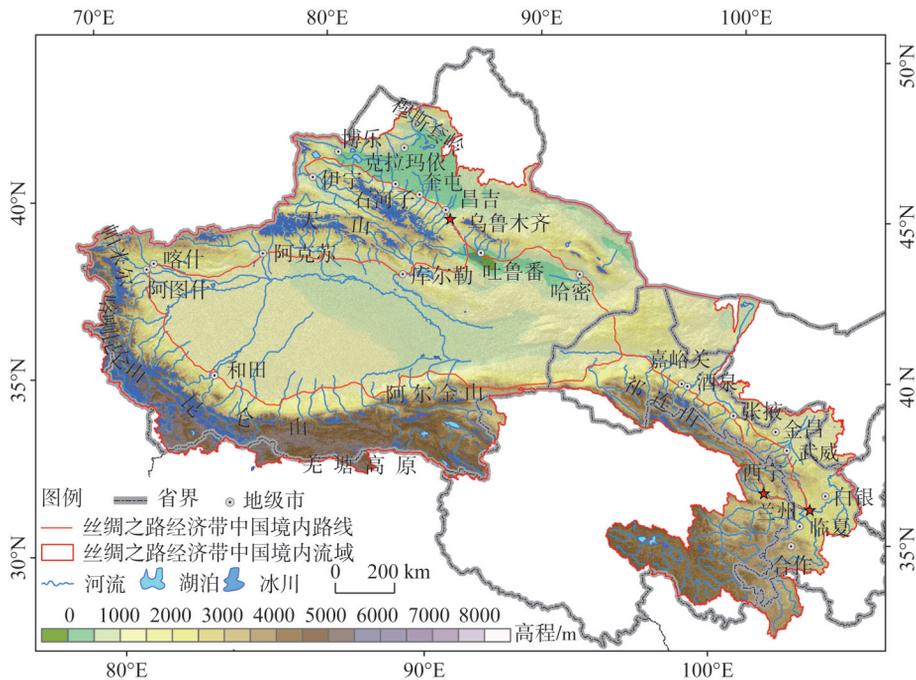


图1 丝绸之路经济带中国境内冰川分布

Fig. 1 Distribution of glaciers along the Silk Road Economic Belt in China

25.66%、6.58%、3.53%、1.91%和1.41%。丝绸之路经济带中国境内位于我国西北内陆地区，生态环境恶劣，交通不便，沟通闭塞，严重限制了其正常的经济发展<sup>[17]</sup>，现实的城市化与水资源及生态环境保护之间存在着各种矛盾与胁迫<sup>[18]</sup>。该区包括祁连山、昆仑山、天山和塔里木盆地等地貌单元，属于干旱半干旱气候，降水主要在夏季，冬季降水少、较干燥<sup>[19]</sup>，冰川融水对地表水资源产生重要影响<sup>[20]</sup>。

## 1.2 数据来源

两期冰川编目数据由中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈与全球变化研究室提供，编目方法详见文献 [8] 和文献 [21]。研究区 1961-2010 年气温和降水数据为中国地面降水和气温月值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集 (V 2.0)，由中国气象科学数据共享服务网提供。提取丝绸之路经济带集水流域所用的数字高程模型数据为国际农业研究磋商组织空间信息联盟 (CGIAR-CSI) 提供的空间分辨率为 90 m 的第 4 版 SRTM 数据；在本研究中，分别采用了冰川面积变化速率和面积变化相对速率来计算经济带沿线中国段冰川变化情况，方法详见文献 [12]，在此不再赘述。

## 1.3 研究方法

由于冰川会随着时间变化发生消失、分裂、甚至是合并情况<sup>[12]</sup>，以往学者在研究冰川变化时都是直接将两次数据进行对比，并没有考虑冰川实体的对应关系<sup>[22]</sup>。本文在前人研究的基础上，建立两次冰川编目数据冰川数量对应公式，计算方法如下：

$$S_g = F_g + M + S - D - C \quad (1)$$

式中： $S_g$  为第二次冰川编目的冰川数量； $F_g$  为第一次冰川编目的冰川数量； $M$  为第一次冰川编目漏编冰川数量； $S$  为第二次冰川编目由于冰川分裂而增加的数量； $D$  为两次冰川编目之间消失的冰川数量； $C$  为第二次冰川编目由于冰川合并而减少的数量。

目前，冰川冰储量计算大多都采用体积—面积经验公式<sup>[23]</sup>：

$$V = cA^\gamma \quad (2)$$

式中： $V$  为冰川冰储量 ( $\text{km}^3$ )； $A$  为冰川面积 ( $\text{km}^2$ )； $c$  和  $\gamma$  为经验系数<sup>[24-26]</sup>，取上述三种方法的平均值进行冰储量变化分析。

## 2 结果分析

### 2.1 丝绸之路经济带中国境内冰川现状

根据第二次冰川编目数据，2005-2011 年间，丝绸之路经济带中国境内共有冰川 22523 条，面积  $25516.80 \text{ km}^2$ ，冰储量约  $2592.85 \text{ km}^3$ 。由图 2 可知，丝绸之路经济带中国境内冰川的显著特征是数量以面积  $< 0.5 \text{ km}^2$  的冰川为主（共计 15519 条），占冰川总数的 68.90%，面积以  $1 \sim 5 \text{ km}^2$  的冰川为主 ( $6833.71 \text{ km}^2$ )，占冰川总面积的 26.78%。随着面积等级的增加，冰川数量呈减少趋势，面积最大的三条分别是音苏盖提冰川 ( $359.05 \text{ km}^2$ )、托木尔冰川 ( $358.25 \text{ km}^2$ ) 和土格别里齐冰川 ( $282.72 \text{ km}^2$ )，三者占研究区冰川总面积的 4.23%。

统计表明，丝绸之路经济带中国境内天山山系的冰川数量最多 (8144 条)，其次是昆仑山 (7253 条)，分别占该区冰川总数的 36.16% 和 32.20%；冰川面积和冰储量以昆仑山山系最大 ( $9470.92 \text{ km}^2$ 、 $934.58 \text{ km}^3$ )，分别占区内总量的 37.12% 和 36.04% (表 1)。在丝绸之路经济带中国境内冰川以天山和昆仑山为主，两个山系冰川数量、面积和冰储量的总和分别占研究区的 68.36%、67.39% 和 68.48%。除天山山系和昆仑山山系外，喀喇

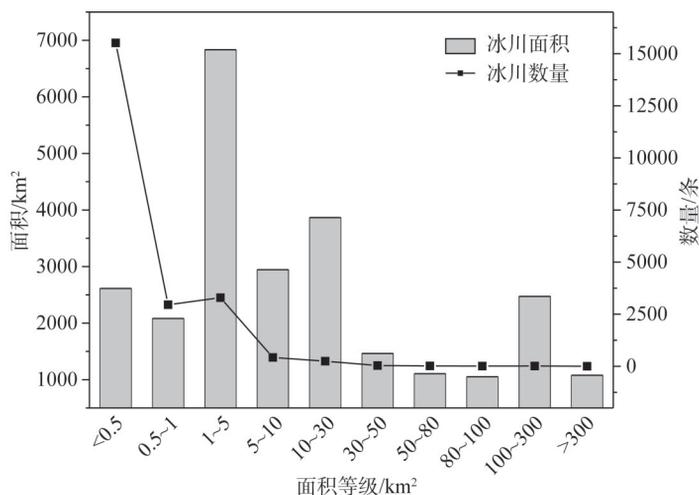


图2 2005-2010年间丝绸之路经济带中国境内不同面积等级冰川数量与面积

Fig. 2 Number and area of glaciers of different sizes along the Silk Road Economic Belt in China from 2005 to 2010

表1 丝绸之路经济带中国境内各山系冰川分布

Table 1 The statistics of glaciers in different mountain ranges along the Silk Road Economic Belt in China

山系	冰川数量		冰川面积		冰储量 (均值)	
	数量/条	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	储量/km <sup>3</sup>	占比/%
阿尔金山	449	1.99	281.21	1.10	14.81	0.57
喀喇昆仑山	2915	12.94	4666.95	18.29	552.64	21.31
昆仑山	7253	32.20	9470.92	37.12	934.58	36.04
穆斯套岭	1	0	0.66	0	0.02	0
帕米尔	1645	7.30	2242.31	8.79	190.34	7.34
祁连山	2100	9.32	1067.81	4.18	53.50	2.06
羌塘高原	16	0.07	61.94	0.24	5.94	0.23
天山	8144	36.16	7725.01	30.27	841.03	32.44
合计	22523	100	25516.80	100	2592.85	100

昆仑山系和祁连山系也有较大规模的冰川分布, 数量分别占研究区总数的12.94%和9.32%, 喀喇昆仑山系的冰川总面积和冰川储量分别为4666.95 km<sup>2</sup>和552.64 km<sup>3</sup>, 祁连山系则仅为1067.81 km<sup>2</sup>和53.50 km<sup>3</sup>。帕米尔山系虽然冰川数量较少(1645条), 但是其冰川面积是祁连山系的2倍多(2242.31 km<sup>2</sup>), 冰储量是祁连山系的3倍多(190.34 km<sup>3</sup>)。相比而言, 冰川数量、面积和冰储量最少(最小)的分别是穆斯套岭、羌塘高原和阿尔金山, 在第二次冰川编目数据中, 穆斯套岭仅剩1条冰川。

以等高距为100 m对丝绸之路经济带中国境内冰川进行统计分析(图3)。丝绸之路经济带中国境内海拔最低的冰川出现在天山, 海拔高度为3274.8 m, 属于5Y741流域, 冰川编码G084232E43876N, 面积为0.03 km<sup>2</sup>; 海拔最高的冰川出现在昆仑山, 海拔高度为6533.4 m, 属于5Y636流域, 冰川编码G082030E36212N, 面积为0.06 km<sup>2</sup>。丝绸之路经济带各山系冰川面积最大值处海拔由低到高依次为穆斯套岭、天山、祁连山、帕米尔、喀喇昆仑山、阿尔金山、羌塘高原和昆仑山, 由东北向西南呈升高趋势。各山系冰川集

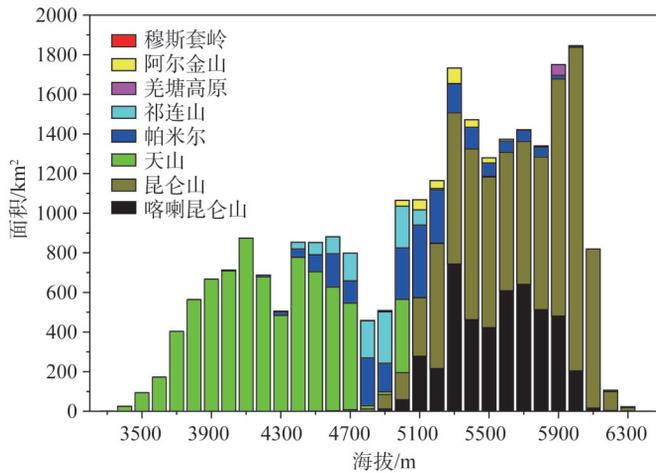


图3 丝绸之路经济带中国境内各海拔梯度下冰川面积分布

Fig. 3 Distribution of glacial area at various elevation gradients along the Silk Road Economic Belt in China

中分布区是指冰川分布在不同海拔梯段范围的集中程度，能较好地反映冰川的垂直发育特征<sup>[27]</sup>，丝绸之路经济带各山系冰川集中分布区冰川面积均占区内总面积的80%以上，海拔高度从3400 m上升至6000 m，海拔由低到高依次为穆斯套岭、天山、祁连山、帕米尔、阿尔金山、昆仑山、喀喇昆仑山和羌塘高原，亦有自东北向西南升高趋势。

在《简明中国冰川目录》<sup>[28]</sup>中，按照国际冰川编目规范，丝绸之路经济带中国境内冰川被划归于黄河上游水系（5J3）和大通河（5J4）等11个三级流域（表2）。无论是冰川数量还是冰川面积和冰储量，塔里木内流水系（5Y6）冰川资源总量最多，冰川面积和冰储量占丝绸之路经济带中国境内冰川相应总量的74.05%和80.34%，大通河（5J4）流域最少，仅有68条冰川，面积为20.82 km<sup>2</sup>，冰储量为0.72 km<sup>3</sup>。

表2 丝绸之路经济带中国境内各水系冰川分布

Table 2 The statistics of glaciers in different watersheds along the Silk Road Economic Belt in China

一级流域	三级流域（编码）	冰川数量		冰川面积		冰储量（均值）	
		数量/条	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	储量/km <sup>3</sup>	占比/%
黄河流域 (5J)	黄河上游水系（5J3）	96	0.43	105.92	0.42	7.91	0.31
	大通河流域（5J4）	68	0.30	20.82	0.08	0.72	0.03
中亚内流区 (5X)	伊犁河流域（5X0）	2124	9.43	1554.44	6.09	107.38	4.14
东亚内流区 (5Y)	河西内流水系（5Y4）	2060	9.15	1072.53	4.20	54.07	2.09
	柴达木内流水系（5Y5）	442	1.96	226.62	0.89	10.27	0.40
	塔里木内流水系（5Y6）	13250	58.83	18895.31	74.05	2083.08	80.34
	准噶尔内流水系（5Y7）	3097	13.75	1737.24	6.81	100.61	3.88
	吐鲁番—哈密盆地内 流水系（5Y8）	379	1.68	178.12	0.70	8.37	0.32
青藏高原 内流区（5Z）	阿雅格库木库里湖和 可可西里湖流域（5Z1）	603	2.68	638.31	2.50	62.82	2.42
	班公湖流域（5Z4）	207	0.92	724.47	2.84	127.61	4.92
	多格错仁湖流域（5Z5）	197	0.87	363.03	1.42	30.01	1.16
	合计	22523	100	25516.80	100	2592.85	100

在行政区划上, 丝绸之路经济带中国境内只有新疆、甘肃、青海和西藏四省(自治区)有冰川发育(表3)。其中, 位于新疆境内的冰川共20001条, 面积为23230.70 km<sup>2</sup>, 冰储量为2366.25 km<sup>3</sup>, 分别占该区冰川总量的88.80%、91.04%和91.26%。在其他三省(自治区)中, 甘肃省虽然在冰川数量上较多, 共1285条, 占总比例的5.71%, 但冰川面积和冰储量都是最小(少)的, 冰川面积为560.00 km<sup>2</sup>, 冰储量为25.58 km<sup>3</sup>, 分别占总比例的2.19%和0.99%。西藏省虽然冰川数量最少, 仅有214条冰川, 占总比例的0.95%, 但其冰川面积规模和冰储量远远大于甘肃省和青海省, 分别占总比例的3.93%和6.13%。

表3 丝绸之路经济带中国境内各省(自治区)冰川分布

Table 3 The statistics of glaciers of some provinces (autonomous regions) along the Silk Road Economic Belt in China

省(自治区)	冰川数量		冰川面积		冰储量(均值)	
	数量/条	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	储量/km <sup>3</sup>	占比/%
甘肃省	1285	5.71	560.00	2.19	25.58	0.99
青海省	1023	4.54	723.75	2.84	42.20	1.63
西藏自治区	214	0.95	1002.35	3.93	158.82	6.13
新疆维吾尔自治区	20001	88.80	23230.70	91.04	2366.25	91.26

## 2.2 近 50 年丝绸之路经济带中国境内冰川变化

丝绸之路经济带中国境内两次冰川编目数据冰川对应结果表明, 1956-2010年间, 丝绸之路经济带中国境内冰川面积共减少4527.43 km<sup>2</sup> (-20.88%)。其中, 3114条冰川消失, 减少面积485.28 km<sup>2</sup>; 1318条冰川分离为2964条, 面积由9780.07 km<sup>2</sup>减少为8732.96 km<sup>2</sup>, 73条冰川合并为35条, 冰川面积由232.64 km<sup>2</sup>增加为236.99 km<sup>2</sup>。在第二次冰川编目中第一次冰川编目有1641条冰川被遗漏, 在统计研究区冰川变化时不作考虑。近50年丝绸之路经济带中国境内冰川冰储量损失419.35 km<sup>3</sup>, 损失率为-104.84 km<sup>3</sup>/10 a和-1.3945%/10 a。

从各条冰川面积相对变化来看(图4a), 丝绸之路经济带中国境内面积<5 km<sup>2</sup>的冰川变化幅度较大, 而面积≥5.0 km<sup>2</sup>的冰川面积减少小于20%。面积<0.5 km<sup>2</sup>且面积损失大于50%的冰川共4321条, 占区内冰川总数的19.35%, 其中消失2981

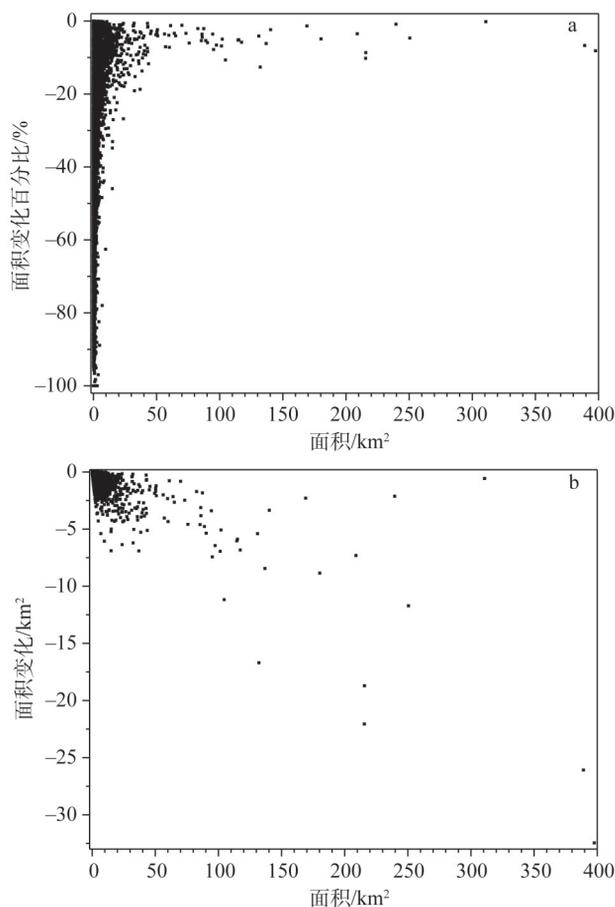


图4 近50年丝绸之路经济带中国境内冰川变化  
Fig. 4 Changes of glaciers on the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years

条；规模介于 $1\sim 5\text{ km}^2$ 和 $0.5\sim 1\text{ km}^2$ 的冰川数量分别为1296和1197条，分别占区内总数量的5.80%和5.36%，冰川消失数量分别为30条和107条，表明冰川退缩以面积 $<0.5\text{ km}^2$ 的冰川为主。面积变化绝对值小于 $5\text{ km}^2$ 的冰川相对集中（图4b），面积 $1\sim 5\text{ km}^2$ 的冰川面积减少最多，共计减少 $1513.96\text{ km}^2$ ，占冰川损失面积的33.44%，其次是 $<0.5\text{ km}^2$ 和 $0.5\sim 1\text{ km}^2$ 的冰川，分别减少 $1199.92\text{ km}^2$ 和 $773.15\text{ km}^2$ ，占冰川减少总量的26.50%和17.08%。在所有冰川等级规模中， $<5\text{ km}^2$ 的冰川减少量占总量的77.02%。因此，在丝绸之路经济带中国境内，冰川面积无论是相对变化还是绝对变化，面积 $<5\text{ km}^2$ 的冰川都占绝对主导地位。

近50年来丝绸之路经济带中国境内各山系不同海拔高度带冰川面积绝对变化和相对变化表明（图5），天山、昆仑山、喀喇昆仑山和帕米尔冰川减少量最多，分别减少 $1951.18\text{ km}^2$ 、 $1116.89\text{ km}^2$ 、 $691.59\text{ km}^2$ 和 $646.12\text{ km}^2$ ，共计 $646.12\text{ km}^2$ ，占区域冰川减少总面积的97.31%。各山系退缩冰川分布的海拔范围不同，其中天山 $3600\sim 4400\text{ m}$ 冰川减少量最大，为 $1691.52\text{ km}^2$ ，占其总变化量的86.70%；昆仑山冰川面积减少最大海拔区间位于 $5000\sim 5900\text{ m}$ ，共计减少 $988.69\text{ km}^2$ ，占其总变化的88.52%；帕米尔面积减少最大海拔区间位于 $4300\sim 5400\text{ m}$ ，共减少 $620.58\text{ km}^2$ ，占其总变化量的96.05%；喀喇昆仑山面积减少最大海拔区间位于 $5200\sim 5800\text{ m}$ ，共减少 $576.06\text{ km}^2$ ，占其总变化量的83.29%；祁连山和阿尔金山在海拔 $5000\text{ m}$ 左右减少冰川最大，均减少 $25\text{ km}^2$ 以上，但祁连山所占面积减少百分比更多，为95.90%，阿尔金山为77.96%。

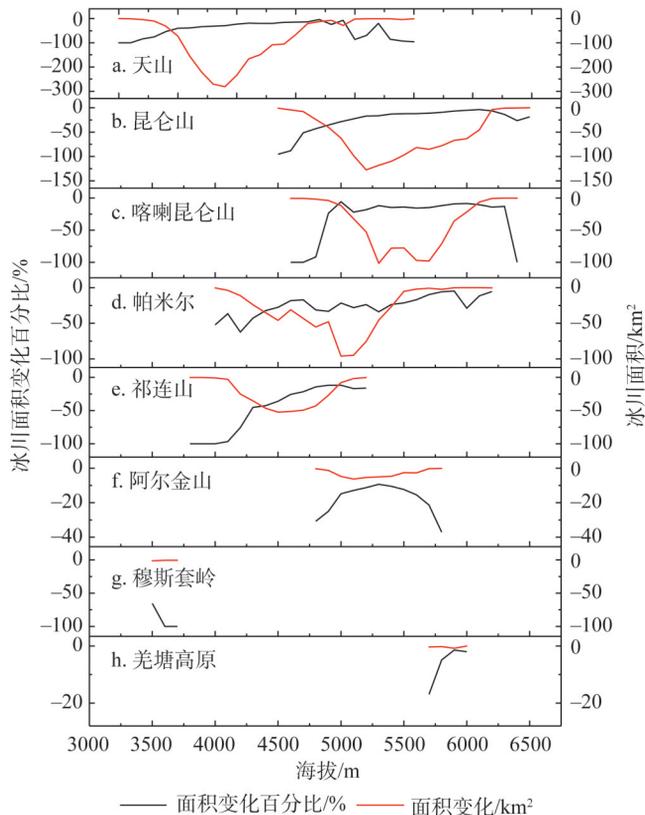


图5 近50年丝绸之路经济带中国境内各山系不同海拔高度带冰川变化

Fig. 5 Glacial changes of mountains at different altitudes along the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years

就冰川面积变化速率来看, 各个山系的冰川退缩海拔高度不同。天山和阿尔金山冰川减少速率最快的海拔区间位于冰川发育的低海拔和高海拔区域, 其中天山在 3000~3200 m 和 5300~5500 m 海拔梯度冰川减少速率最大, 均大于 85%; 阿尔金山在 4800~4900 m 和 5700~5800 m 海拔梯度冰川减少速率最大, 均大于 20%; 其他山系冰川退缩最快处均在各自山系的低海拔区。喀喇昆仑山、天山、祁连山和昆仑山的冰川变化速度最快, 变化速率均在超过 75%, 帕米尔和阿尔金山变化速率在 40% 左右。

由于冰川发育少或者位于丝绸之路经济带中国境内的冰川数量少的特点, 穆斯套岭山 (共发育有冰川 7 条) 海拔 3600 m 以上高度带冰川均已消失, 仅剩海拔 3500 m 高度带的 1 条冰川, 此冰川面积减少 1.25 km<sup>2</sup>。羌塘高原冰川退缩较为缓慢, 退缩最大的高度带为海拔 5700 m 高度带, 面积变化百分比为 16.92%, 其余海拔高度带均低于 5%, 冰川变化量最大值位于 5900 m 海拔高度带, 为 0.80 km<sup>2</sup>, 其他海拔高度带冰川损失均小于 0.4 km<sup>2</sup>。

从冰川朝向来看, 丝绸之路经济带中国境内冰川朝北消失数量大于朝南消失数量 (图 6a)。冰川消失数量正北最多, 共消失冰川 732 条; 天山冰川消失数量最多, 共计消失 1572 条, 羌塘高原无冰川消失。冰川消失数量与区域内冰川数量成正比 ( $R^2=0.984$ ), 其中穆斯套岭冰川消失数量占冰川总数量最多, 为 85.71%。统计表明, 冰川消失数量与各朝向冰川规模相一致 ( $R^2=0.969$ ), 朝北向冰川规模小, 在气候变化背景下更容易消失。对比发现, 北方冰川数量少但消失数量多, 冰川消失数量百分比与冰川消失数量呈相反趋势 (图 6b), 西南方向消失比例最大, 为 22.71%。冰川消失数量百分比与各朝向冰川规模呈负相关关系 ( $R^2=0.880$ )。从各朝向面积变化来看, 东北方向面积减少最多, 共计 1245.98 km<sup>2</sup>, 正东方向减少最少, 为 165.97 km<sup>2</sup>; 各朝向减少面积与各朝向冰川发育规模呈正相关关系 ( $R^2=0.637$ )。从各朝向冰川面积减少相对速率来看, 东南方向面积减少最快, 为 13.19%/10 a, 正东方向面积减少最慢, 为 1.43%/10 a。

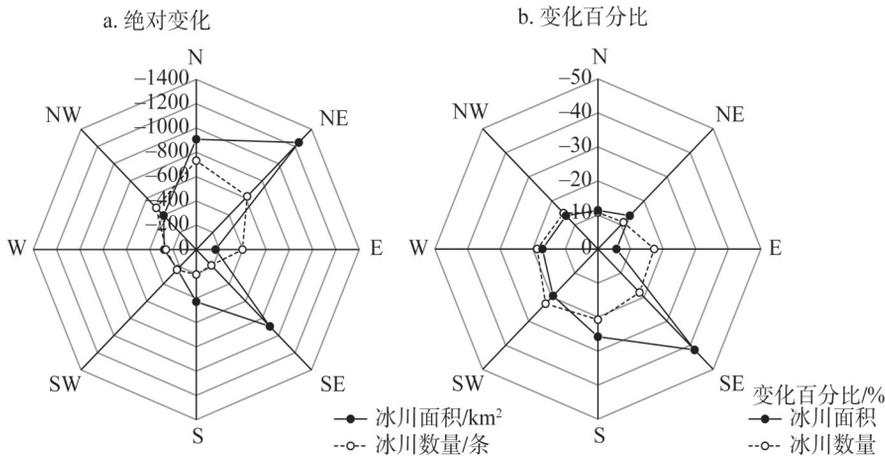


图 6 近 50 年丝绸之路经济带中国境内不同朝向冰川数量与面积变化

Fig. 6 Number and area changes of glaciers along Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years

利用 0.5°×0.5°地理格网对丝绸之路经济带中国境内的近 50 年冰川变化进行分析, 天山冰川面积减少最多, 为 -447.43 km<sup>2</sup>/10 a; 其次是昆仑山、喀喇昆仑山、帕米尔和祁连山, 面积减少分别为 264.62 km<sup>2</sup>/10 a、169.87 km<sup>2</sup>/10 a、155.45 km<sup>2</sup>/10 a 和 85.97 km<sup>2</sup>/10 a; 穆斯套岭冰川面积减少最少, 面积仅减少 0.58 km<sup>2</sup>/10 a, 这与其冰川发育数量、规模有关

(图7a)。总体而言,丝绸之路经济带中国境内冰川面积决定冰川面积变化速率( $R^2=0.984$ )。从各山系冰川面积变化相对速率看(图7b),可以将面积变化相对速率大致分为四个等级,即穆斯塔岭冰川面积变化最快,面积变化相对速率为 $-37.03\%/10\text{ a}$ ;祁连山、帕米尔和天山较快,面积变化相对速率为 $-6.00\%/10\text{ a}$ 左右;阿尔金山较慢,面积变化相对速率为 $-2.70\%/10\text{ a}$ ;羌塘高原、喀喇昆仑山和昆仑山最慢,面积变化相对速率为 $-0.40\%/10\text{ a}$ 左右。由此得出,丝绸之路经济带中国境内冰川减少速率整体上有自西南向东北加快趋势。

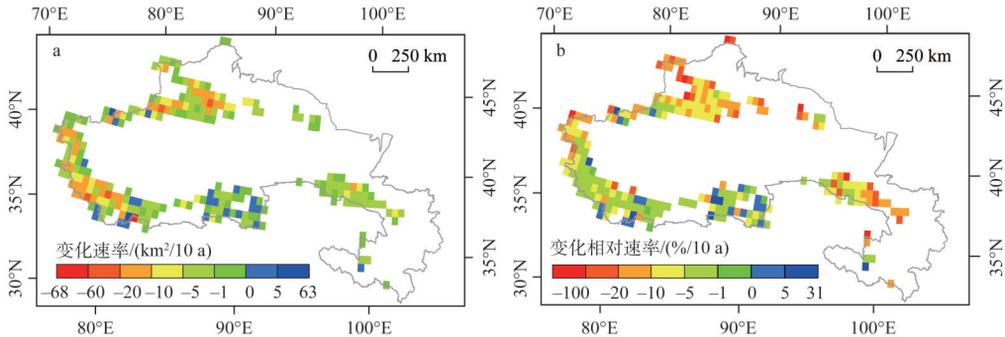


图7 近50年丝绸之路经济带中国境内冰川面积变化速率和变化相对速率

Fig. 7 Rate and relative rate of glaciers area change along the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years

### 2.3 冰川变化与气候变化关系探讨

影响冰川变化的因素有很多,但气候变化占主导地位<sup>[29]</sup>。气温是冰川消融的原因,降水量是冰川积累的因素,二者的不同组合形式决定了冰川的不同性质、发育和演化过程<sup>[30]</sup>。已有研究发现,气温对大面积冰川的长时间尺度变化有影响,降水量通常只对小面积冰川的短时间尺度变化有影响<sup>[31]</sup>。由图8可知,1961-2010年间,丝绸之路经济带中国境内地区普遍气温上升,平均上升 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,天山以北地区、昆仑山东段地区、羌塘高原北部地区、阿尔金山和整个祁连山地区增温尤为显著,只有帕米尔南部、昆仑山和喀喇昆仑山北部的小部分区域年均气温有降低趋势,全年气温倾向率为 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右。相对气温而言,丝绸之路经济带中国境内地区全年降水倾向率为 $5.58\text{ mm}/10\text{ a}$ ,并且全年降水变化与全年气温变化的空间分布基本一致,增温速率快的地区降水增加也多。

夏季降水量增加和平均气温降低的组合形式更有利于冰川发育<sup>[30]</sup>。通常情况下,降水量的显著增加会导致冰川积累增多,并且冰川表面的降水会增加反射率,进而抑制冰川表面温度增加,减少冰川消融<sup>[30]</sup>。此外,冬季气温上升直接导致冰川积累期缩短和冰川消融期增加,气温升高对冰川消融的贡献在夏季更为直接<sup>[29]</sup>。从图8可以看出,整个丝绸之路经济带中国境内除帕米尔、昆仑山和喀喇昆仑山北部的小部分区域冬季气温有降低趋势以外,其他地区升温迅速,冬季降水在昆仑山中部、喀喇昆仑山东部和羌塘高原西北地区以及祁连山中部和东部的小部分区域略有减少趋势,其他地区冬季降水略有增加。无论是冬季降水增加或减少,其幅度均不会超过 $10\text{ mm}/10\text{ a}$ 。夏季气温升高速率较冬季有所下降,但是空间分布并无太大变化;夏季降水较冬季增加迅速,天山、祁连山、阿尔金山、昆仑山东部和羌塘高原北部增加尤为明显,平均都以 $20\text{ mm}/10\text{ a}$ 左右的速度增加。

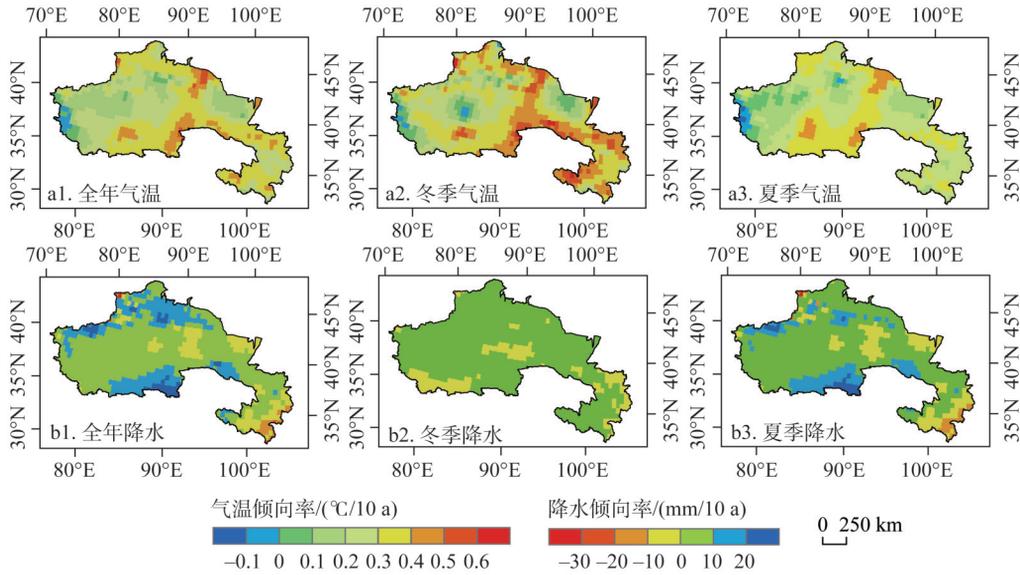


图 8 1961-2010 年丝绸之路经济带中国境内地区气温和降水变化倾向率

Fig. 8 Changes of temperature and precipitation along the Silk Road Economic Belt from 1960s to 2000s

对比各山系冰川面积变化相对速率(图 7), 穆斯套岭冰川面积变化相对速率最快, 气温升高速率和降水增加速率在夏季无明显变化, 另外冰川面积最大为 1.57 km<sup>2</sup>, 其余冰川均小于 0.5 km<sup>2</sup> 且已消失, 是由于气温升高而冰川规模特别小而导致的。祁连山区、帕米尔山区和天山山区冰川变化相对速率大致相同, 而且影响其冰川变化的气温、降水因子在空间上分布也具有有一致性, 都是全年气温(降水)升高(增加)迅速, 并且冬季气温增幅高于夏季, 夏季降水增加高于冬季<sup>[12,27]</sup>。阿尔金山区冬季气温升高迅速, 但降水大部分都集中在夏季, 气温升高和降水在波动中变化不大是造成研究区冰川退缩的主要原因<sup>[33]</sup>。在羌塘高原无论冬季或夏季气温都有所升高, 但是降水补给明显较大, 降水一定程度上补给了冰川物质亏损<sup>[34]</sup>。在喀喇昆仑山区, 无论是冬季或夏季气温都呈明显的下降趋势, 降水增加不明显, 气温持续降低是其冰川退缩缓慢的主要原因, 个别冰川还出现了冰川前进、合并等现象<sup>[35]</sup>。在昆仑山东部区域, 气温持续升高, 降水增加明显, 降水一定程度上弥补了冰川物质亏损<sup>[36]</sup>。在昆仑山西部区域, 气温升高和降水增加的组合不利于该区域冰川积累, 但是相对于中国其他冰川区该区域冰川消融较慢<sup>[37]</sup>, 年降水量的增加不能够抵消由夏季温度剧烈上升导致的冰川消融<sup>[36]</sup>; 另外, 昆仑山西部区域冰川规模普遍较大, 这也一定程度上减缓了冰川的整体退缩。昆仑山东段区域气温升高迅速, 但降水补给增加速率缓慢<sup>[36]</sup>, 冰川面积规模一定程度上减缓了冰川退缩速率<sup>[37]</sup>。综上所述, 丝绸之路经济带中国境内有暖湿化趋势, 冬季气温升高速率大于夏季, 冬季降水增加幅度较大却小于夏季。这种气候组合不利于冰川的积累导致冰川退缩, 冰川发育规模对其也有一定影响, 但各山系空间具有空间差异。

### 2.4 冰川变化对区域生态环境和水资源的影响

气候变化引起的冰川变化及其对人类活动影响, 首先是冰川退缩引起的生态环境变化和灾害效应<sup>[38]</sup>。随着全球气温升高, 冰川加速消融导致冰湖数量与规模不断增多增大, 冰湖溃决灾害频发, 给生态环境和人身财产造成重大损失<sup>[39]</sup>。丝绸之路经济带中国

境内冰湖数量众多, 诸多山系存在危险冰湖<sup>[40]</sup>, 冰川快速退缩引发冰川洪水和区域淹没等自然现象会对人类生存环境造成重大影响, 同时有可能造成当地动植物生物习性的改变<sup>[41]</sup>。冰川变化影响河流径流变化<sup>[42]</sup>。两次冰川编目数据表明近50年来丝绸之路经济带中国境内冰川冰储量损失419.35 km<sup>3</sup>, 其损失率为-100 km<sup>3</sup>/10 a。毋庸置疑, 丝绸之路经济带中国境内冰川退缩导致该地区水资源利用形势严峻。例如在新疆东部盆地地区, 冰川融水量增大加之当地的不合理利用, 水资源安全受到极大威胁, 与此同时该地区坎儿井数量及其水量锐减, 该地区冰川退缩势必会影响下游乌鲁木齐市和吐鲁番盆地的水资源利用<sup>[43]</sup>。水是制约丝绸之路经济带中国境内生态环境和经济发展的主要因素, 是该区域农业和工业生产的宝贵财富, 所以合理利用和保护冰川水资源尤为重要, 要更好的保护当地生态环境, 节能减排, 使冰川更好地发挥其水源保证的作用。

### 3 结论

(1) 目前, 丝绸之路经济带中国境内共有冰川22523条, 面积为25516.80 km<sup>2</sup>, 冰储量约2592.85 km<sup>3</sup>。其中, 新疆分别占88.80%、91.04%和91.26%, 甘肃分别占5.71%、2.19%和0.99%, 青海分别占4.54%、2.84%和1.63%, 西藏分别占0.95%、3.93%和6.13%。丝绸之路经济带中国境内冰川以面积<0.5 km<sup>2</sup>的冰川数量最多, 占冰川总数的68.90%, 面积以1~5 km<sup>2</sup>冰川为主, 占冰川总面积的26.78%; 面积≥300 km<sup>2</sup>的冰川共有三条, 分别是音苏盖提、托木尔和土格别里齐冰川, 面积分别为359.05 km<sup>2</sup>、358.25 km<sup>2</sup>和282.72 km<sup>2</sup>。

(2) 丝绸之路经济带中国境内海拔最低的冰川出现在天山, 海拔高度为3274.8 m, 面积0.03 km<sup>2</sup>; 海拔最高的冰川出现在昆仑山, 海拔高度为6533.4 m, 面积0.06 km<sup>2</sup>。冰川面积随海拔高度分布可划分为3200~4900 m和4900~6600 m两个梯度, 各梯度冰川面积分别占冰川总面积的33.50%和66.50%。

(3) 丝绸之路经济带中国境天山冰川数量最多(8144条), 占区内冰川总数的36.16%; 冰川面积和冰储量昆仑山最大(9470.92 km<sup>2</sup>、934.58 km<sup>3</sup>), 分别占区内各自总量的37.12%和36.04%; 冰川数量、面积和冰储量最少(最小)的分别是穆斯套岭、羌塘高原和阿尔金山, 在第二次冰川编目数据中, 穆斯套岭仅剩1条冰川。在11个三级流域中, 塔里木内流水系冰川资源总量最多。

(4) 1956-2010年间, 丝绸之路经济带中国境内冰川面积共减少4527.43 km<sup>2</sup>, 占冰川总面积的20.88%。其中, 3114条冰川消失, 1318条冰川分离为2964条, 73条冰川合并为35条。冰川冰储量损失419.35 km<sup>3</sup>, 面积小于<5 km<sup>2</sup>的冰川变化占绝对主导地位。天山冰川减少量最多, 昆仑山次之; 穆斯套岭冰川变化百分比最大, 占该山系冰川总面积的77.90%, 祁连山、帕米尔和天山变化百分比均在20%左右; 羌塘高原无论是冰川面积绝对变化还是变化百分比都是最少的。各山系的冰川退缩海拔高度不同, 面积减少速度在各个高度带均有差异。总体而言, 冰川消失数量北方远远大于南方, 东北方向面积减少最多, 正东方向减少最少, 东南方向面积减少最快, 正东方向面积减少最慢。

(5) 丝绸之路经济带中国境内冰川减少速率整体上有自西南向东北加快趋势, 在所有山系中穆斯套岭冰川面积变化最快, 面积变化相对速率为-37.03%/10 a; 祁连山、帕米尔和天山较快, 面积变化相对速率为-6.00%/10 a左右; 阿尔金山较慢, 面积变化相对速率

为 $-2.70\%/10\text{ a}$ ; 羌塘高原、喀喇昆仑山和昆仑山最慢, 面积变化相对速率为 $-0.40\%/10\text{ a}$ 左右。丝绸之路经济带中国境内有暖湿化趋势, 冬季气温升高速率大于夏季, 冬季降水增加幅度较大却小于夏季, 这种气候组合不利于冰川的积累, 导致冰川退缩; 冰川发育规模对冰川退缩也有一定影响, 但各山系冰川变化驱动力具有空间差异。在气候变化背景下, 丝绸之路经济带中国境内各省市、各流域冰川融水合理利用是当前面对的重要问题, 如何形成长效用水、跨流域调水是今后工作的重点。

### 参考文献(References):

- [1] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究: 现状、趋势及关键问题. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 187-195. [QIN D H, DING Y J. Cryospheric changes and their impacts: Present, trends and key issues. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2009, 5(4): 187-195.]
- [2] Working Group I contribution to the IPCC 5<sup>th</sup> Assessment Report "Climate Change 2013: The Physical Science Basis". <http://www.climatechange2013.org>.
- [3] MITCHELL T D, JONES P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. International Journal of Climatology, 2005, 25: 693-712.
- [4] BECKER A. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present. Earth System Science Data, 2013, 5: 71-99.
- [5] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45(4): 434-438. [SHI Y F, LIU S Y. Estimate No. 1 the response No. 1 glaciers in China to the global warming-up in the 21<sup>st</sup> century. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 434-438.]
- [6] RACOVITEANU A E, PAUL F, PAUP B, et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Workshop, Boulder, Colorado, USA. Annals of Glaciology, 2009, 50(53): 53-69.
- [7] 谢自楚, 冯清华, 王欣, 等. 中国冰川系统变化趋势预测研究. 水土保持研究, 2005, 12(5): 77-82. [XIE Z C, FENG Q H, WANG X, et al. Modeling the response of glacier system to climate warming-taking glaciers in China as an example. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 77-82.]
- [8] 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. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16. [LIU S Y, YAO X J, GUO W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16.]
- [9] 胡文康. 新疆“丝绸之路”及其环境变迁. 干旱区研究, 1990, (4): 1-8. [HU W K. Xinjiang "Silk Road" and its environmental changes. Arid Zone Research, 1990, (4): 1-8.]
- [10] 刘潮海, 康尔泗, 刘时银, 等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29(s1): 55-62. [LIU C H, KANG E S, LIU S Y, et al. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of northwest China. Science in China Series D, 1999, 29(s1): 55-62.]
- [11] 张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. 冰川冻土, 2012, 34(4): 848-854. [ZHANG J T, HE X J, SHANGGUAN D H, et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of Northwest China and its countermeasure. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 848-854.]
- [12] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414. [SUN M P, LIU S Y, YAO X J, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [13] 潘竟虎, 胡艳兴, 董晓峰. 丝绸之路经济带经济差异时空格局演变特征. 经济地理, 2016, 36(1): 10-17. [PAN J H, HU Y X, DONG X F. Spatial-temporal evolution of economic disparity for the Silk Road Economic Zone. Economic Geography, 2016, 36(1): 10-17.]
- [14] 欧阳正宇. 丝绸之路非物质文化遗产旅游开发 RMP 分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 203-208. [OUYANG Z Y. An analytic frame work of RMP for intangible cultural heritage of Silk Road tourism. Journal of Arid Land Resource-

- es and Environment, 2012, 26(12): 203-208.]
- [15] 李文兵, 南宇. 论丝绸之路沿线旅游合作机制. 干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 196-200. [LI W B, NAN Y. Discussion on the mechanism of the Silk Road tourism cooperation. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(1): 196-200.]
- [16] 南宇, 杨阿莉. 西北丝绸之路区重点旅游城市梯度开发研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(9): 161-167. [NAN Y, YANG A L. The exploitation of the key tourist cities along the Silk Road in the Northwestern China. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(9): 161-167.]
- [17] 邵波, 陈兴鹏. 中国西北地区经济与生态环境协调发展现状研究. 干旱区地理, 2005, 28(1): 136-141. [SHAO B, CHEN X P. Research on the actuality of the coordinated development of economy and ecological environment in Northwest China. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 136-141.]
- [18] 方创琳, 黄金川, 步伟娜. 西北干旱区水资源约束下城市化过程及生态效应研究的理论探讨. 干旱区地理, 2004, 27(1): 1-7. [FANG C L, HUANG J C, BU W N. Theoretical study on urbanization process and ecological effect with the restriction of water resource in arid area of Northwest China. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 1-7.]
- [19] 靳立亚, 李静, 王新, 等. 近50年来中国西北地区干湿状况时空分布. 地理学报, 2004, 59(6): 847-854. [JIN L Y, LI J, WANG X, et al. The temporal and spatial distribution of surface dry-wet conditions over Northwestern China in recent 50 years. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 847-854.]
- [20] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 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. [CHEN Y N, LI Z, FAN Y T, 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.]
- [21] GUO W, LIU S, XU J, et al. The Second Chinese Glacier Inventory. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357-372.
- [22] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析. 地理学报, 2014, 69(3): 365-377. [HUAI B J, LI Z Q, SUN M P, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 365-377.]
- [23] GÄRTNER-ROER I, NAEGELI K, HUSS M, et al. A database of worldwide glacier thickness observations. Global and Planetary Change, 2014, 122: 330-344.
- [24] RADIĆ V, HOCK R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, F01010, Doi: 10.1029/2009JF001373.
- [25] GRINSTED A. An estimate of global glacier volume. The Cryosphere, 2013, 7: 141-151.
- [26] LIU S, SUN W, SHEN Y, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the Western Qilian Mountains, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. Journal of Glaciology, 2003, 49(164): 117-124.
- [27] 姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近50年来中国阿尔泰山冰川变化: 基于中国第二次冰川编目成果. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1734-1745. [YAO X J, LIU S Y, GUO W Q, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China. Journal of Natural Resources, 2012, 27(10): 1734-1745.]
- [28] 施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. [SHI Y F. A Concise China Glacier Inventory. Shanghai: Shanghai Science Popular Press, 2005.]
- [29] 段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237. [DUAN J P, WANG L L, REN J W, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century. Progress in Geography, 2009, 28(2): 231-237.]
- [30] 康尔泗. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流. 北京: 科学出版社, 2002: 33-37. [KANG E S. Glacier-snow Water Resources and Mountain Runoff in the Arid Area of Northwest China. Beijing: Science Press, 2002: 33-37.]
- [31] 高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨. 高原气象, 2000, 19(1): 9-16. [GAO X Q, TANG M C, FENG S. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change. Plateau Meteorology, 2000, 19(1): 9-16.]
- [32] 徐春海, 李忠勤, 王飞腾, 等. 基于LiDAR、SRTM DEM的祁连山黑河流域十一冰川2000-2012年物质平衡估算. 自然资源学报, 2017, 32(1): 88-100. [XU C H, LI Z Q, WANG F T, et al. Estimation of mass balance of Shiyi Glacier in the Heihe River Basin, Qilian Mountains during 2000-2012 based on LiDAR and SRTM. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 88-100.]

- [33] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973-2010年阿尔金山冰川变化. 地理研究, 2013, 32(8): 1430-1438. [ZHU H Y, YANG T B, TIAN H Z. Glacier variation in the Altun Mountains from 1973 to 2010. Geographical Research, 2013, 32(8): 1430-1438.]
- [34] 王利平, 谢自楚, 刘时银, 等. 1970-2000年羌塘高原冰川变化及其预测研究. 冰川冻土, 2011, 33(5): 979-990. [WANG L P, XIE Z C, LIU S Y, et al. Glacierized area variation and its response to climate change in Qangtang Plateau during 1970-2000. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 979-990.]
- [35] 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. 冰川冻土, 2015, 37(1): 1-13. [FENG T, LIU S Y, XU J L, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the First and Second Glacier Inventories of China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 1-13.]
- [36] 姜珊. 基于遥感的东昆仑山冰川和气候变化研究. 兰州: 兰州大学, 2012. [JIANG S. Research on glacier and climate change in the eastern Kunlun Mountains based on remote sensing. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]
- [37] 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. 山地学报, 2015, 33(2): 157-165. [LI C X, YANG T B, TIAN H Z. Variation of Western Kunlun Mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976-2010. Mountain Research, 2015, 33(2): 157-165.]
- [38] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-186. [YAO T D, QIN D H, SHEN Y P, et al. Cryospheric changes and their impacts on regional water cycle and ecological conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(3): 179-186.]
- [39] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377-1390. [YAO X J, LIU S Y, SUN M P, et al. Study on the glacial lake outburst flood Events in Tibet since the 20<sup>th</sup> century. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1377-1390.]
- [40] 陈晨, 郑江华, 刘永强, 等. 近20年中国阿尔泰山山区冰川湖泊对区域气候变化响应的时空特征. 地理研究, 2015, 34(2): 270-284. [CHEN C, ZHENG J H, LIU Y Q, et al. The response of glacial lakes in the Altay Mountains of China to climate change during 1992-2013. Geographical Research, 2015, 34(2): 270-284.]
- [41] 沈永平, 梁红. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁. 冰川冻土, 2001, 23(2): 208-211. [SHEN Y P, LIANG H. Global ice melting accelerated would threaten to human environmental safety. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 208-211.]
- [42] 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. [LAN Y C, SHEN Y P, WU S F, 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.]
- [43] 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. [LI K M, LI Z Q, GAO W Y, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in Eastern Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2708-2716.]

## Glacier changes along the Silk Road Economic Belt in China in the past 50 years:

### Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory

LI Long<sup>1</sup>, YAO Xiao-jun<sup>2</sup>, LIU Shi-yin<sup>3,4</sup>, BU Ya-ping<sup>1</sup>, GONG Peng<sup>2</sup>, LI Xiao-feng<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech College, Lanzhou 730021, China; 2. College of Geographical and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 4. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Glaciers, important water resources in northwestern China, are of great importance to the agricultural construction and economic development of the Silk Road Economic Belt. Based on the revised First (1956s- 1983s) and the newly released Second Chinese Glacier Inventory (2005s- 2010s), glacier changes in the glaciated regions along the Silk Road Economic Belt in China were analyzed. The results show that: (1) Glaciated areas along the Silk Road Economic Belt in China contained 22523 glaciers, covering an area of 25516.80 km<sup>2</sup> and ice volume of 2592.85 km<sup>3</sup>, respectively, accounting for 46.37%, 49.22% and 57.39% of the total glacier area accordingly, and among which the total amount of glacier resources in Xinjiang was the largest. (2) While most glaciers were small (15519 glaciers, 68.9% was smaller than 0.5 km<sup>2</sup>), some larger ones (totally 6833.71 km<sup>2</sup>, with each having 1.0 and 5.0 km<sup>2</sup>) covered 26.78% of the total glacier area. The altitude of concentrating regions in the glacier retreat of each mountain range was different, and the rate of area reduction differed in each height zone. (3) During the period from 1956 to 2010s, the glacier area in glaciated regions along the Silk Road Economic Belt decreased by 4547.43 km<sup>2</sup> with a percentage change of -20.88%. In the past 50 years, 3114 glaciers have disappeared, 1318 glaciers have been separated into 2964, and 73 glaciers have been merged into 35, and the loss of glacial ice volume was about 419.35 km<sup>3</sup>. (4) The glacier changes along the Silk Road Economic Belt had the generally accelerated trend from west to east and accordingly the rate of reduction appeared from southwest to northeast. The number of glaciers that disappeared in the north was greater than that in the south. The area of the northeast was reduced most, and the largest reduction rate was found in the southeast. (5) During the period from 1961 to 2010, a warming and humidification trend was observed in the glaciated regions along the Silk Road Economic Belt, the increase rate of temperature in the dry season was greater than that in the wet season, and the increase in the precipitation in the dry season was smaller than that in the wet season. The pattern of climate combination was not conducive to the accumulation of glaciers, hence leading to the retreating of glaciers. The scale of glacier development also had some impact on the retreat of glaciers, but there were spatial differences in terms of the driving forces of glaciers in each mountain range.

**Keywords:** glacier changes; glacier inventory; climate change; the Silk Road Economic Belt in China