

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0089

ZHAO Yin, ZHANG Yong, LIU Shiyin, et al. Review of maritime glacier mass balance in the southeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):930-945. [赵银, 张勇, 刘时银, 等. 青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):930-945.]

青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡研究进展

赵 银¹, 张 勇^{1,2}, 刘时银³, 王 欣¹

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 青藏东南部海洋型冰川具有独特的气候敏感性, 普遍呈现加速退缩趋势, 这不仅影响区域水资源安全, 而且伴生了相应的冰川灾害, 是当前青藏高原冰冻圈变化研究的热点区域之一。本文对海洋型冰川物质平衡时空变化特征进行了综述, 2000年以来冰川总体处于物质亏损状态, 其平均物质平衡介于 $-0.66 \sim -0.61 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间; 同时总结了海洋型冰川物质加速变化的驱动因素以及新特征。当前海洋型冰川物质平衡变化研究受观测数据缺乏和模型模拟不确定性等问题限制, 尤其现有模型对冰面裂隙增多与扩张、冰崖-冰面湖-表碛相互作用、冰内冰下过程、冰崩、末端冰湖水-冰相互作用等过程的描述过于简化或基本缺失, 其机理及影响仍存在较大的不确定性。未来需加强海洋型冰川物质平衡的综合监测, 基于多数据和多方法的集成研究提高模型对冰川物质平衡多物理过程的耦合与模拟能力, 为开展海洋型冰川物质变化的区域水资源效应和致灾效应研究奠定基础。

关键词: 海洋型冰川; 冰川物质平衡; 冰川监测; 青藏高原东南部

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-0930-16

0 引言

青藏高原是除两极以外全球冰川最为发育的地区^[1-2], 是印度河、恒河、长江、雅鲁藏布江等多条大江大河的发源地^[3-4], 尤其是“一带一路”干旱区内陆河的重要水源^[5]。青藏高原同时还是近几十年全球气候变暖最为剧烈的地区之一^[6-8]。随着气候变化叠加效应的不断累积, 青藏高原及周边地区冰川正在发生以退缩和减薄为特征的剧烈变化^[2,9], 深刻影响着该区域河流径流的年际和年内时空格局, 关系着中国及“一带一路”地区众多国家的水资源利用和水安全^[3,5,10]。

青藏高原冰川依据气候条件可分为极大陆型冰川、亚大陆型冰川和海洋型冰川^[11], 其中, 极大陆型冰川和亚大陆型冰川合称大陆型冰川^[12], 这类冰川平衡线较高, 平衡线附近的平均温度和降水量分别低于 -6°C 和 $1\,000\text{ mm}$, 冰川运动速度较缓^[11]。海

洋型冰川平衡线相对较低, 平衡线附近的年降水量可达 $1\,000 \sim 3\,000\text{ mm}$, 年平均温度高于 -6°C , 夏季平均温度介于 $1 \sim 5^\circ\text{C}$, 冰体温度相对较高, 接近于 0°C 。海洋型冰川集中分布于青藏高原东南部, 包括横断山、念青唐古拉山东中段和喜马拉雅山东段地区^[11,13], 具有高物质损失高积累, 运动速度快且底部滑动显著等特征^[11,14], 同时众多冰川消融区广泛分布着厚度不一的表碛^[14-16]。与大陆型冰川相比, 海洋型冰川对气候变化的响应更敏感^[11,17-18]。在全球变暖背景下, 海洋型冰川普遍呈现消融加剧^[15,19]、冰川表面运动活跃^[20]、冰内冰下水系广泛发育^[21]等特征, 改变了青藏高原东南部地区冰/雪崩、冰湖溃决洪水、泥石流、滑坡等自然灾害的发生频率、程度和危害范围^[14,22-25], 进而影响该区域河流沿岸及下游地区的水安全、基础设施安全和生态安全。未来全球气候持续变暖^[7], 青藏高原东南部冰川发生相

收稿日期: 2022-05-31; 修订日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171134; 42171137; 41671057; 41761144075)资助

作者简介: 赵银, 硕士研究生, 主要从事冰川变化研究. E-mail: zhaoyin0629@163.com

通信作者: 张勇, 教授, 主要从事冰冻圈变化及其影响研究. E-mail: yong.zhang@hnust.edu.cn

关灾害的风险也将随着区域经济体量和人口增加而升高^[26]。

青藏高原东南部海洋型冰川的观测相对薄弱, 监测冰川数量较少、区域分布不均, 仅数条冰川开展了冰川物质平衡、冰川运动、气象水文等观测与研究^[14, 19, 27-29], 尤其缺少长时间序列的冰川物质平衡观测, 严重制约了对气候变暖背景下青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡特征及其影响机制和相关灾害致灾机理的认识。因此, 准确评估海洋型冰川物质变化的原因、机制及影响, 将有助于降低冰川变化对流域水资源影响及致灾效应研究中的不确定性, 进而提高适应与减缓全球变化的能力。

本文基于现有研究结果和观测数据, 系统梳理青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡变化特征及其影响因素, 综合分析近期海洋型冰川物质亏损新特征及其潜在影响, 同时探讨海洋型冰川研究面临

的问题与挑战, 展望冰川物质变化研究相关的前沿问题, 为准确评估气候变暖条件下青藏高原东南部海洋型冰川变化及其对水资源利用与水安全、生态安全及相关灾害的影响奠定基础。

1 青藏高原东南部海洋型冰川分布与监测

1.1 海洋型冰川分布

依据 Shi 等^[11]的冰川类型区划方案, 海洋型冰川主要分布在青藏高原东南部地区(图 1), 共发育海洋型冰川 8 607 条, 总面积 13 203.2 km², 占中国现代冰川总条数和面积的 18.6% 和 22.2%^[13]。其中, 念青唐古拉山中东段冰川数量与规模最大, 分别占该区域海洋型冰川数量和面积的 49.7% 和 59.7%, 其次是喜马拉雅山东段, 其冰川面积占区域冰川面积的 28.3%, 横断山区的冰川数量和规模最小(表 1)。冰川面积—海拔高度分布特征[图 1(b)]

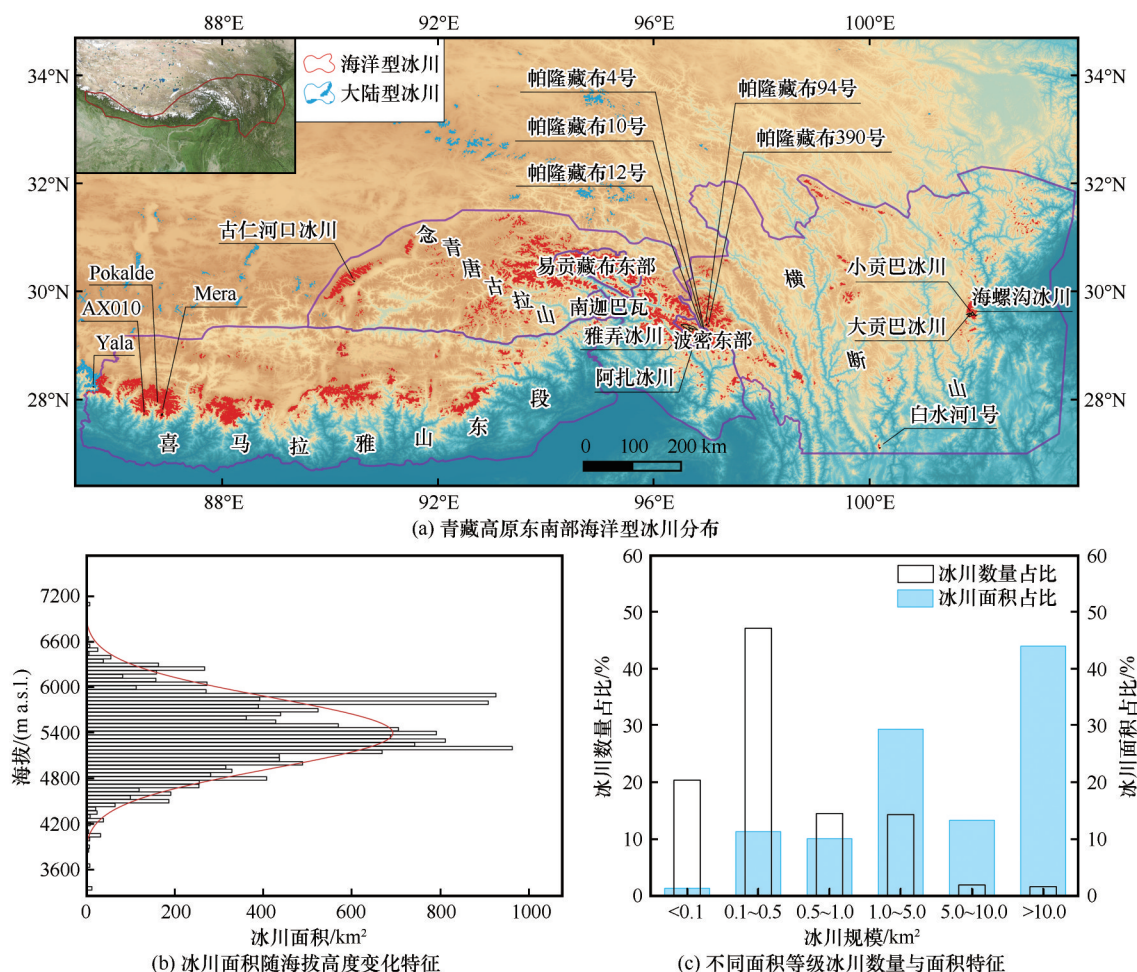


图 1 青藏高原东南部海洋型冰川分布(a), 冰川面积随海拔高度变化特征(b)和不同面积等级冰川数量与面积特征(c), 其中冰川数据来源于美国国家冰雪数据中心最新版本全球冰川编目数据^[30], 图(b)中红线表示冰川面积随海拔高度呈正态分布

Fig. 1 Maritime glaciers in the southeastern Tibetan Plateau (a), glacier area-altitude distribution (b) and glacier distribution for different area size classes (c), glacier data are from RGI 6.0^[30], red line in (b) denotes the normal distribution curve

表1 青藏高原东南部不同山区海洋型冰川分布特征,数据来源于Su等^[13]

Table 1 Maritime glaciers of different mountains in the southeastern Tibetan Plateau, data are derived from Su et al. ^[13]

山脉	海拔范围/m a. s. l.	冰川数量	冰川数量占比/%	冰川面积/km ²	冰川面积占比/%	平均面积/km ²
横断山	2 979~7 142	1 725	20.0	1 579.5	12.0	0.92
念青唐古拉山东中段	2 459~6 930	4 273	49.7	7 888.8	59.7	1.85
喜马拉雅山东段	3 225~8 798	2 609	30.3	3 734.9	28.3	1.43
总计	—	8 607	100	13 203.2	100	1.53

表明区域内 80% 的冰川面积集中分布在海拔 4 800~5 900 m 之间,海拔 4 800 m 以下冰川面积仅占区域冰川面积的 8.3%。区域内以小于 0.5 km² 的冰川为主,占区域冰川数量的 67.4%,但其面积仅占区域冰川面积的 9.0%,而大于 10 km² 的冰川共计 200 余条,其面积占区域冰川总面积的 47.8% [图 1(c)]。

海洋型冰川分布区主要受西风环流和南亚季风两大气候系统的控制,前者携带水汽较少,后者是该区域主要的降水来源^[14,31]。同时受地形影响,该地区形成了罕见的水汽通道,降水丰沛,是整个青藏高原最为湿润的地区^[14,31]。降水主要集中于每年 4—10 月份,占全年降水的 60%~90%,其他月份受西风环流控制,降水相对较少^[13]。青藏高原东南部地区最热的月份通常为 7 月份,不同山脉的平均气温在 16~19 ℃ 之间,最冷月在 1 月,平均气温在 0~4 ℃ 之间^[32]。贡嘎山东坡海螺沟冰川末端(海拔 3 000 m)1988—2019 年间年平均气温约 4.6 ℃,年平均降水量达 1 884 mm^[28,33]。玉龙雪山白水河 1 号冰川末端(海拔 4 700 m)2008—2020 年间年平均气温为 -0.11 ℃,夏季平均气温为 4.43 ℃,年平均降水量约为 2 389 mm^[19]。念青唐古拉山东段雅弄冰川末端(海拔 4 000 m)1979—2019 年间的年平均气温约为 -4.6 ℃,夏季平均温度约为 5.0 ℃,年降水量约 1 800 mm^[34]。此外,帕隆藏布 4 号冰川平衡线附近(海拔 5 400 m)降水量在 2 500~3 000 mm 左右^[35]。

1.2 海洋型冰川监测

青藏高原东南部海洋型冰川的调查最早可追溯到 20 世纪初期,国外不同学者曾对青藏高原东南部地区冰川有过描述^[36-38]。20 世纪 50 年代以来,国内学者先后从不同角度对海洋型冰川开展了观测与研究^[14,31,39-41],尤其 20 世纪 80 年代以来,青藏高原综合科学考察对不同海洋型冰川进行了野外调查和定位观测,获取了冰川、冻土、积雪、水文、气象等一系列观测数据。近年来,随着青藏高原气候变

暖,加之海洋型冰川对气候响应极为敏感,使青藏高原东南部地区成为受最为关注的区域之一^[19-20,27,29,32,42-43]。同时,遥感技术的发展为海洋型冰川大范围物质变化监测提供了重要的数据支持,近期不同研究基于多时相遥感影像、卫星测高、重力卫星、地形数据等多源数据系统获取了青藏高原东南部不同山区冰川物质平衡变化特征^[20,29,32,34,44-46]。

表 2 系统收集了青藏高原东南部不同山区冰川的研究成果。可以看出,青藏高原东南部仅有数条海洋型冰川开展了长期的物质平衡定位观测,主要包括玉龙雪山白水河 1 号冰川^[19,47]、帕隆藏布 94 号冰川^[27]、Mera 冰川^[48-49]和 Pokalde 冰川^[50]。这 4 条冰川具有 10 年以上的物质平衡观测序列,其他冰川物质平衡观测时段皆小于 10 年(表 2)。其中,海螺沟冰川尽管物质平衡观测不连续,但具有较长时段的气象和水文观测^[28,33]。海螺沟冰川是横断山区贡嘎山东坡最长的一条冰川,面积为 25.7 km²,长度为 13.1 km,海拔介于 2 990~7 556 m 之间^[14]。20 世纪 80 年代初横断山冰川考察对贡嘎山海螺沟冰川及周边冰川、冻土、积雪等开展了全面的调查和观测^[14]。随后中国科学院贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测站建立,从 1988 年至今对海螺沟冰川变化、水文与气象、冰川作用区生态与环境演化等进行了长期系统的观测^[15,28,51]。白水河 1 号冰川是玉龙雪山冰川区规模最大的一条冰川,面积为 1.17 km²,长度为 2.23 km,海拔介于 4 100~5 100 m 之间^[19,47,52]。白水河 1 号冰川观测始于 1982 年,开展了冰川物理化学及冰川与环境变化等研究^[52],随后 2006 年中国科学院玉龙雪山冰川与环境观测研究站的建立,成为该冰川系统、连续观测和研究的新起点^[19,47]。帕隆藏布 94 号冰川位于岗日嘎布山脉帕隆藏布源头,面积为 2.51 km²,长度为 2.9 km,海拔介于 5 000~5 635 m 之间,该冰川观测始于 2006 年,并持续至今^[27]。

监测表明,小冰期以来青藏高原东南部海洋型冰川面积约减少了 30%^[13],且不同山区、不同规模

表2 青藏高原东南部不同山区有观测和重建物质平衡序列的海洋型冰川
Table 2 Observed and reconstructed mass balance on maritime glaciers in the southeastern Tibetan Plateau

冰川	位置	观测/模拟 时段	海拔范围/ (m a. s. l.)	长度/km	面积/km ²	平均物质平 衡/m w. e.	年均气温/ (℃·a ⁻¹)	年降水/ (mm·a ⁻¹)	参考文献
白水河 1号冰川	27. 10° N, 100. 19° E	2008—2020/ [1952—2014]	4 390~5 096	1. 9	1. 32	-1. 46	-0. 11	2 398	[19,47,50]
海螺沟 冰川	29. 58° N, 101. 91° E	1989—1993/ [1950—2019]	2 984~7 142	13. 1	25. 71	[-0. 58]	4. 6	1 884	[33,53]
帕隆藏布 4号冰川	29. 23° N, 96. 92° E	2006—2007/ —	4 659~5 939	8. 0	11. 7	-0. 71	3. 7	—	[1,54~56]
帕隆藏布10号 冰川	29. 28° N, 96. 90° E	2005—2008/ [1952—2014]	4 910~5 625	2. 1	3. 5	-0. 78	—	—	[1]
帕隆藏布12号 冰川	29. 30° N, 96. 90° E	2005—2009/ [1952—2014]	5 130~5 265	0. 6	0. 2	-1. 70	—	—	[1]
帕隆藏布94号 冰川	29. 38° N, 96. 97° E	2006—2018/ [1952—2014]	5 000~5 635	2. 9	2. 5	-0. 94	—	—	[1]
帕隆藏布390号 冰川	29. 35° N, 97. 02° E	2006—2009/ [1952—2014]	5 160~5 460	1. 2	0. 5	-1. 02	—	—	[1]
雅弄冰川	29. 33° N, 96. 66° E	1980—2014/ —	3 969~6 341	31. 1	191	-0. 65	-4. 6	1 800	[1,34,57]
古仁河口 冰川	30. 18° N, 90. 46° E	2004—2009/ —	5 500~6 000	2. 5	1. 4	-0. 33	—	—	[58]
Yala	28. 25° N, 85. 60° E	2012—2019/ [1952—2014]	5 086~5 642	1. 5	1. 9	-0. 95	1. 5	1 057	[1,59]
Mera	27. 70° N, 86. 90° E	2008—2019/ —	4 940~6 420	3. 1	4. 84	-0. 03	—	—	[48~49]
Pokalde	27. 90° N, 86. 80° E	2010—2019/ [1952—2014]	5 430~5 660	0. 7	0. 08	-0. 79	—	—	[50]
AX010	27. 70° N, 86. 57° E	1996—1999/ [1952—2014]	4 952~5 360	1. 7	0. 38	-0. 73	2. 5	1 427	[1,60]

注：“[]”为冰川重建物质平衡时间段及重建年均物质平衡，“—”表示无观测或无发表数据。

冰川面积减少比例差异显著,规模越小的冰川减少比例越大^[13,42,52]。基于中国第一、二次冰川编目统计可知,念青唐古拉山、横断山和喜马拉雅山区冰川面积缩小比例介于20%~30%之间,其冰川退缩速率介于-8.61%·(10a)⁻¹~-7.86%·(10a)⁻¹之间^[61]。多源遥感监测表明,20世纪初期至1980年间,岗日嘎布山区冰川基本处于退缩状态,冰川面积减少了13.8%,储量减少了9.8%^[42];1980—2015年间,该山区冰川面积减少了24.9%^[44],同一时段内南迦巴瓦地区冰川面积减少了25.2%^[45],这两个山区冰川退缩速率显著高于其他山系^[44~45]。总体上,念青唐古拉山冰川面积退缩较快,2008—2018年间冰川退缩速率达到了-0.75%·a⁻¹,横断山区同一时段冰川面积退缩速率为-0.62%·a⁻¹^[62],而喜马拉雅山东段地区1990—2015年间冰川面积退缩率为0.48%·a⁻¹^[63]。此外,在青藏高原东南部监测发现少量的跃动冰

川,主要分布在喜马拉雅山和念青唐古拉山区^[64]。

2 青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡及其影响因素

2.1 海洋型冰川物质平衡研究进展

冰川物质平衡是单位时间内冰川上以固态降水形式为主的物质收入和以冰川消融为主的物质支出的代数和^[65~66]。物质平衡变化是冰川对气候变化的最直接响应,是冰川作用区能量—物质—水交换的纽带,是引起冰川规模和径流变化及致灾效应的物质基础^[57,67]。青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡研究常用的方法主要有花杆观测法、模型计算法、大地测量学、水量平衡法和重力测量法等。本文基于上述方法获取的冰川物质平衡数据,系统分析海洋型冰川物质平衡变化的空间格局,并综合剖析其影响因素。

图2是基于大地测量学方法监测的2000—2020年间青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡变化趋势。区域尺度上,2000—2020年间海洋型冰川物质平衡变化趋势存在一致性(图2),即冰川总体处于物质亏损状态,平均物质平衡介于 $-0.66 \sim -0.61 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[32,46,68-69]。2010年以来,冰川物质亏损呈加速态势(图2),平均物质平衡达到了 $-0.75 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[32]。不同山区海洋型冰川物质平衡差异十分显著(图2),其中横断山区2000—2019年间冰川

平均物质亏损最大,达到了 $-1.29 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$,念青唐古拉山区2010—2019年间冰川平均物质平衡达到了 $-1.0 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[70],喜马拉雅山东段冰川物质亏损相对较小^[32,68]。在念青唐古拉山区,波密东部地区2000—2019年间冰川平均物质亏损较大($-1.04 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$),易贡藏布东部地区次之,而岗日嘎布地区冰川物质亏损相对较小($-0.46 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$),与临近的南迦巴瓦地区2000—2019年间冰川平均物质亏损($-0.55 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$)相近(图2)。

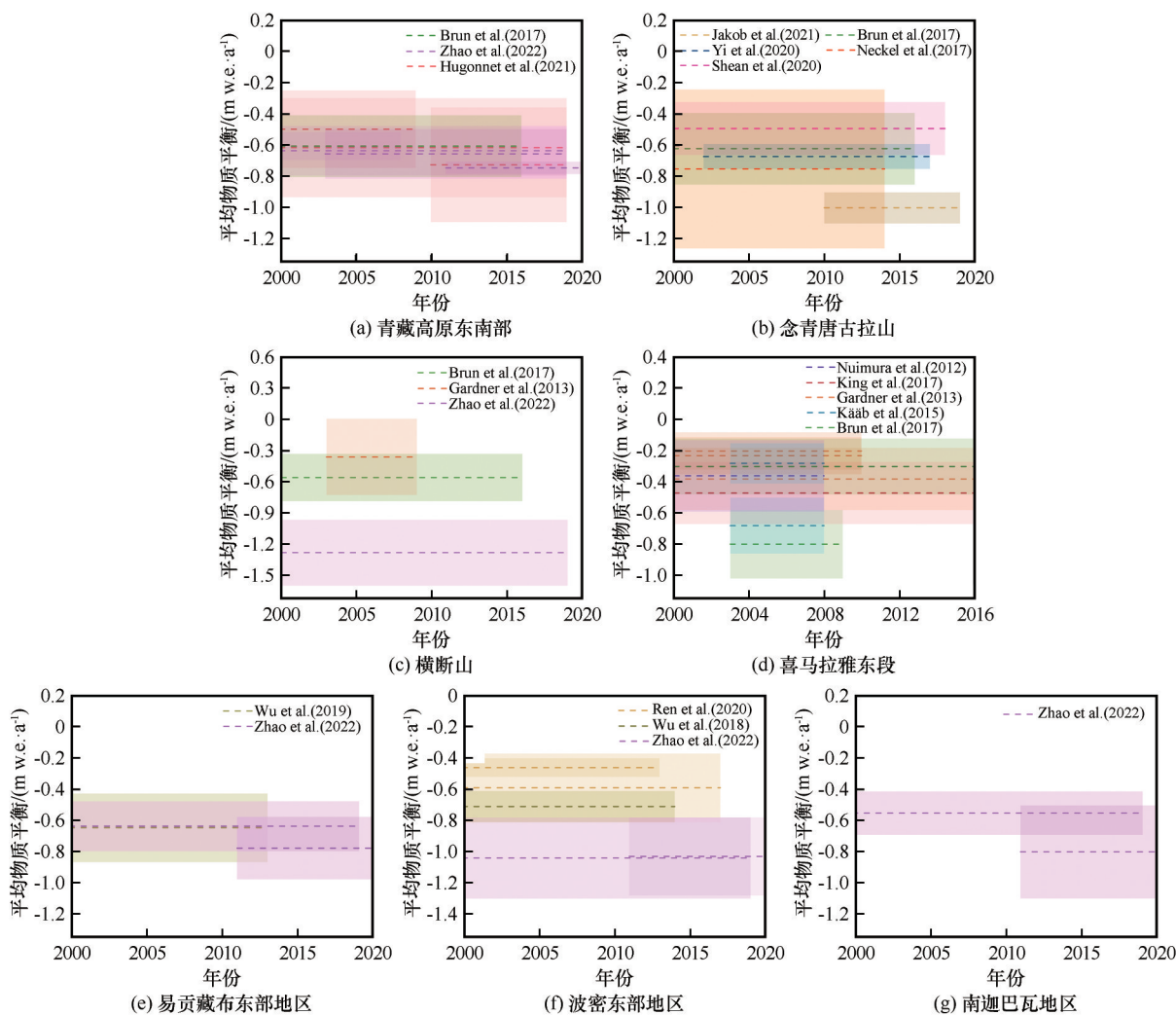


图2 青藏高原东南部不同时期冰川物质平衡变化特征,图中冰川物质平衡数据来源于文献资料^[32,46,57,68-78]

Fig. 2 Summary of glacier mass balances in different time periods for the southeastern Tibetan Plateau, data are derived from previous studies^[32,46,57,68-78]

从典型海洋型冰川物质平衡观测序列来看[图3(a)],各冰川监测物质平衡差异显著,其平均值介于 $-1.46 \sim -0.03 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。尽管不同冰川监测物质平衡的序列长度不一且起止年份存在着较大的差异,但各冰川多年平均物质平衡均为负值,

尤其2010年以来这些冰川物质亏损呈加速状态[图3(a)]。在这些典型监测冰川中,除古仁河口冰川和Mera冰川物质亏损较小外[图3(a)],其余冰川物质损失剧烈,其中白水河1号冰川2010年以来平均物质平衡达到了 $-1.55 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$,帕隆藏布94号冰

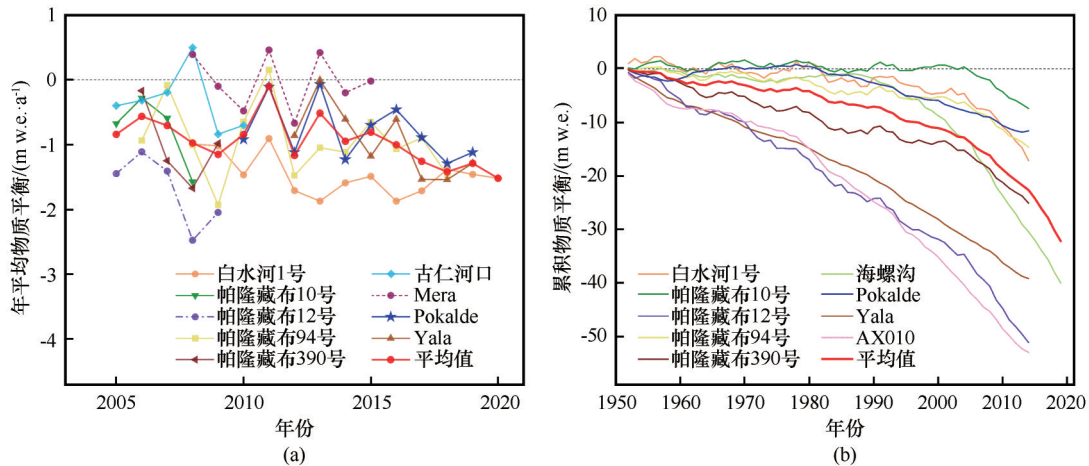


图3 青藏高原东南部代表性冰川观测物质平衡变化(a)和重建物质平衡累计变化(b),冰川物质平衡数据来源于世界冰川监测服务中心(WGMS)^[79]、Wang等^[50]和Yan等^[19]

Fig. 3 Observed mass balance variation (a) and cumulate variation of reconstructed mass balance (b) on different glaciers in the southeastern Tibetan Plateau, data are derived from World Glacier Monitoring Service(WGMS)^[79], Wang et al. (2019)^[50] and Yan et al. (2021)^[19]

川和Yala冰川达到了 $-0.95 \text{ m w. e.} \cdot \text{a}^{-1}$ 。重建的不同冰川物质平衡累积曲线表明[图3(b)],20世纪50年代到80年代末期,多数冰川表现为微弱的正平衡或负平衡,平均物质亏损速率较小,随后各冰川均处于负物质平衡加强的趋势,进入21世纪后冰川亏损速率迅速增加。2000年以来的冰川平均累计物质亏损量占1952—2020年间的总累计物质亏损总量的66%。不同冰川累计物质平衡存在显著差异,其中帕隆藏布10号冰川累计物质损失最小,而AX010冰川和帕隆藏布12号冰川累计物质损失最大,其次是海螺沟冰川[图3(b)]。对于同一地区内的冰川而言,冰川累计物质损失量差异同样显著,例如帕隆藏布流域各冰川累计物质损失量相差数倍之多[图3(b)]。

尽管有物质平衡监测记录的海洋型冰川在青藏高原东南部分布严重不均[图1(a)],且多为小规模冰川(表2),但通过上述区域尺度和冰川尺度分析可知,21世纪早期青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡变化处于相同的态势,即冰川物质亏损剧烈且呈加速趋势。虽然冰川物质平衡序列来源于野外观测、模型模拟和大地测量学等不同方法,但冰川物质平衡序列在变化趋势上存在较好的一致性。

2.2 冰川物质平衡变化驱动因素

在较短的时间尺度上,气候条件是冰川物质平衡变化的主要驱动因素^[65,80]。冰川积累的减少或消融的增加导致冰川物质亏损加速,这两者都是气温和降水变化的结果。IPCC第六次评估报告指出,

2001—2020年间平均全球地表温度相对于1850—1900年升高了 $0.99 \text{ }^{\circ}\text{C}$,而2011—2020年间平均全球地表温度已上升约 $1.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[81]。青藏高原地表温度升温幅度显著高于同纬度地区及全球平均水平^[8],约是全球平均升温速率的两倍^[2-3]。在全球尺度上,全球地表平均气温与实测冰川物质平衡变化之间有着非常显著的相关性^[82],并在不同区域获得证实^[72,83]。

近期不同研究表明,青藏高原东南部不同地区升温显著^[3,32,84],整个区域年平均升温速率为 $0.23 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,尤其冬季升温速率达到了 $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[32]。不同气象站和不同典型冰川区气象观测证实了这一显著的升温趋势^[18-19,33,44-45],其中,玉龙雪山白水河1号冰川区2008—2020年间年平均升温速率为 $0.27 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[19],而贡嘎山海螺沟冰川末端1988—2017年间年平均升温速率达到了 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ^[33]。气温升高直接导致冰川消融季节变长,同时降低了降水中的降雪比例和冰川表面的反照率^[85]。另一方面,气温变化与冰川区能量平衡过程紧密相关,尤其入射长波辐射和感热通量受气温变化的强烈影响^[86-87]。气温变化信息主要通过入射长波辐射传递到冰川表面^[86],进而影响冰川表面的能量组分变化。由于海洋型冰川对气温变化的高敏感性^[11,17-18],青藏高原东南部气温升高加速了该地区冰川的物质亏损。近年来青藏高原东南部不同地区降水呈减少趋势^[18,33,44-45,84,88-89],而海洋型冰川为夏季补给型冰川,降水的减少进一步加强

了海洋型冰川的物质亏损。

此外,众多海洋型冰川消融区广泛分布着厚度不均一的表碛^[14,16,90],例如在贡嘎山地区,68%的冰川消融区被表碛覆盖,其覆盖比例介于1.7%~53%之间^[16]。冰川区表碛分布及其厚度差异,深刻影响着海洋型冰川消融速率的空间特征^[15-16,91]。由于表碛的差异分布,贡嘎山海螺沟冰川冰瀑布以下67%的消融区呈加速消融态势,仅19%的区域处于抑制冰川消融趋势^[15]。表碛对冰川消融加速或抑制的影响控制着冰川物质平衡变化的空间分布与高度结构^[90,92],尤其表碛分布及其厚度的异质性使得冰川表面产生显著的差异性消融,导致消融区冰崖和冰面湖广泛分布^[93-94]。这些冰崖和冰面湖的分布与变化是消融区局部加速消融的重要影响因素^[90,93-94]。典型流域分析发现,冰崖和冰面湖的分布导致冰川末端的减薄速率显著高于预期,在不考虑冰崖影响的情况下流域冰川物质损失将会被低估17.0%^[94],而冰面湖促进的消融量占该流域冰川物质损失的12.5%^[93]。由此可见,表碛分布,尤其是薄层表碛、冰崖和冰面湖的共同作用,是加速海洋型冰川物质亏损的另一重要影响因素。

综上可知,区域内不同的升温速率、降水趋势的区域差异、表碛空间分布差异以及地形条件等是青藏高原东南部海洋型冰川近年来物质亏损的重要影响因素,同时也是导致该区域冰川物质平衡变化空间差异的主要驱动因素。

3 海洋型冰川物质变化新特征

如上所述,过去几十年来冰川负物质平衡呈显著增加趋势,主要表现为冰川退缩^[44-45]、冰川消融区增大和减薄^[32]、冰川径流增加^[33]等特征。近年来随着气候变暖,海洋型冰川正在发生以失衡为特征的剧烈变化,导致了区域水安全和冰川灾害风险增加,呈现出了冰川物质变化的新特征。

3.1 冰川裂隙增大加深,冰面破碎化显著

近年来冰川表面裂隙逐渐增加,导致冰川破碎化现象日益显著。图4显示了玉龙雪山白水河1号冰川、雅弄冰川、大贡巴冰川和帕隆藏布4号冰川表面裂隙形成与变化过程。可以看出,2005年白水河1号冰川仅冰川末端有裂隙发育,近年来整个冰川包括积累区表面裂隙发育更为广泛[图4(a)]。野外观测也证实,白水河1号冰川表面破碎严重,裂隙分布明显增加和变大^[19,88]。此外,图4中也可以看

出雅弄冰川、大贡巴冰川、帕隆藏布4号冰川裂隙发育表现明显。随着气候变暖,冰川表面有效消融面积的增加,底部滑动加快,进而使冰川不同部位内部拉应力增加,导致冰川表面破碎化,裂隙增多、加深^[95],冰川稳定性进一步遭到破坏。同时,随着冰川表面破碎化加剧,受外力影响面积和深度不断扩大,导致冰川表面融水伴随裂隙更容易进入冰川内部,将热量带入冰内^[96],进一步加速了冰川消融和物质亏损。

3.2 冰崖和冰面湖广泛发育,冰面径流增大

随着海洋型冰川物质剧烈亏损,尤其是表碛覆盖冰川区,冰川差异性消融显著,导致冰川表面巨大的冰崖和大小不一的冰面湖广泛发育^[97-98],同时强烈的冰面消融在冰面汇集形成冰面径流。如图5所示,不同典型冰川区皆有冰面湖形成,且面积不断扩大。如上所述,冰崖和冰面湖的广泛分布所产生的冰川融水要比其周边冰川区的融水量大得多^[90,94,99]。这些冰崖和冰面湖的发育加速了局部冰川消融,进而导致冰面径流增大。冰面径流通过热融侵蚀在冰崖和其下部表碛覆盖表面之间形成间隙^[100],其可防止冰崖被掩埋,同时表碛沿着冰崖滚落积聚于其下部的冰面径流之中。随着冰面差异性消融加剧,冰川局部表面起伏随着时间的推移而增大,可产生新的冰崖或冰面湖,并通过增大冰川表面粗糙性来增加冰面径流的弯曲程度,进一步加剧冰面融水侵蚀、下切作用^[101]。由此可见,冰崖、冰面湖和冰面径流之间的相互作用将加速了冰川区物质变化过程及其径流变化。

3.3 冰内冰下水文过程日益增强,冰川储汇水能力改变

海洋型冰川区冰内冰下过程包括冰内及冰下水系、冰川底部滑动等过程,这些过程具有显著的季节变化特征^[28,65,102]。随着海洋型冰川消融加强和减薄,导致冰下水压变率增大和水压系数增加,进而导致冰川底部滑动过程加强,冰体向低海拔冰川区输送的速度相对加快,加速了冰川消融^[28,102]。冰内及冰下水系的形成和扩张与冰面水体输入有着直接的关系^[103-105],随着海洋型冰川冰面裂隙增大加深和冰面径流增大,在冰面径流的冲刷作用下,形成“冰洞”连接冰面径流和冰内及冰下水道,冰下水系规模和冰面融水输入的变化,势必导致冰内及冰下水系的空间分布向冰川上游方向延伸^[106-107],进而改变了整个冰川区冰内及冰下水系空间分布和水

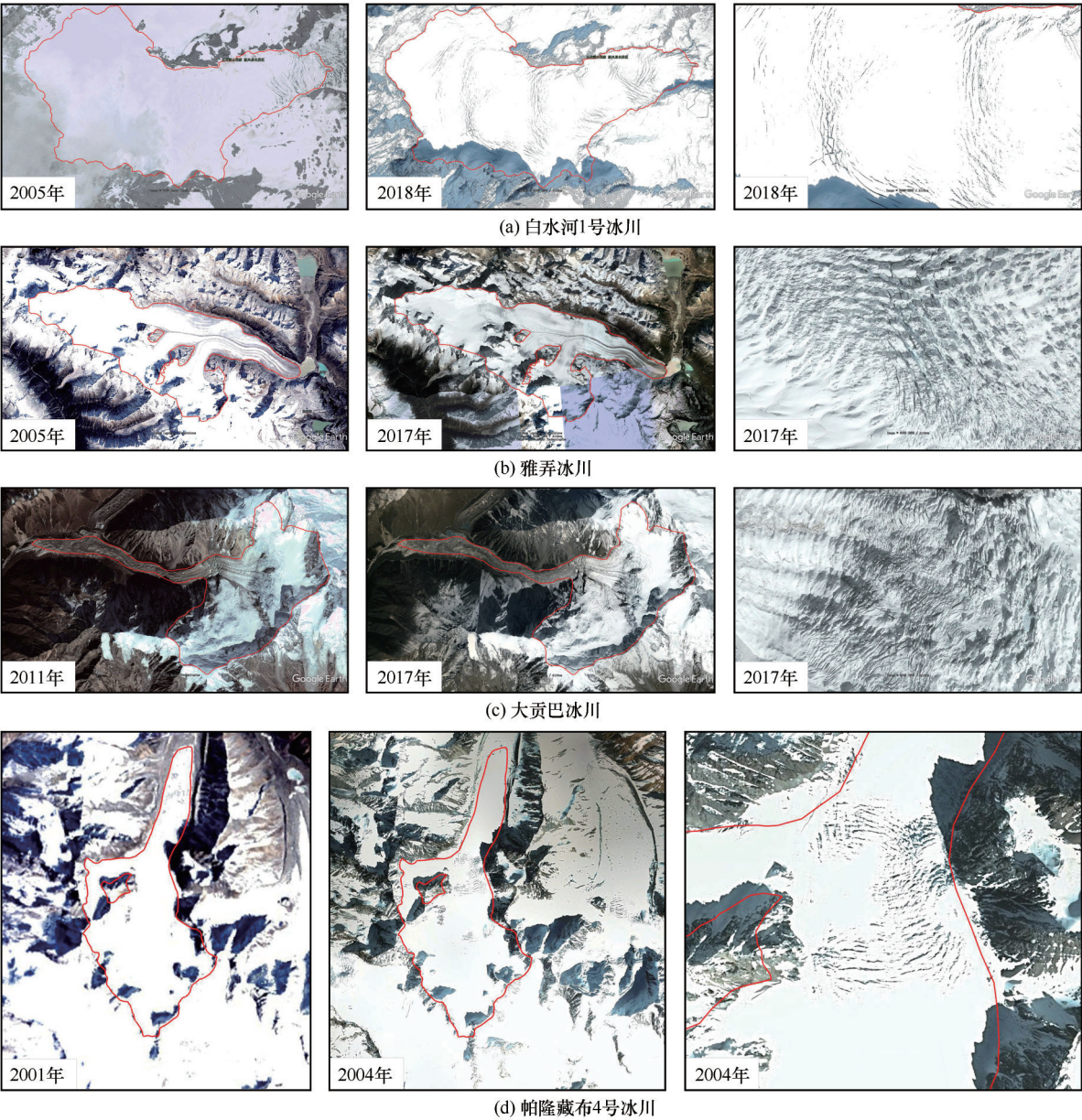


图4 不同时期玉龙雪山白水河1号冰川(a)、雅弄冰川(b)、大贡巴冰川(c)、帕隆藏布4号冰川(d)表面裂隙分布与变化
(图像来源于 Google Earth)

Fig. 4 Evolution of crevasses on Baishui River Glacier No. 1 (a), Yanong Glacier (b), Da Gongba Glacier (c) and Purlong No. 4 Glacier (d), images are from Google Earth

力状况。冰内及冰下水文过程的日益增强,一方面通过改变冰下水力热力条件变化深刻影响冰川动力过程和冰川侵蚀过程^[28, 108–109],另一方面显著影响水在冰川上的平均传输速度和储水性能,最直接的影响是冰川径流日洪峰和日变幅的增大^[104]。此外,随着冰内及冰下水系形态和结构的变化,影响着冰川蓄排水能力^[28],进而增加了冰川溃决洪水发生的频率。

3.4 冰川稳定性降低,冰崩易发

冰崩指冰川冰在重力作用下从冰川陡峭处或

冰架边缘处崩落的现象,该现象多发生于山地冰川末端或极地冰架边缘处,山地冰川冰瀑布段也常发生冰崩^[28–29]。海洋型冰川分布区是近年来青藏高原及周边地区的冰崩多发区,其原因主要是该类型冰川物质亏损强烈,冰川消融加剧、冰面径流增大、冰裂隙发育,导致冰面融水渗入冰体裂隙到达冰川基底,造成裂隙两侧冰川冰加速融化使得裂隙贯通,改变冰内及冰下排水系统及热力水力性质,引发冰体失稳^[110],同时随着冰温的升高和冰川底部水文过程的增强亦降低了冰川稳定性^[102],提高了冰崩事件

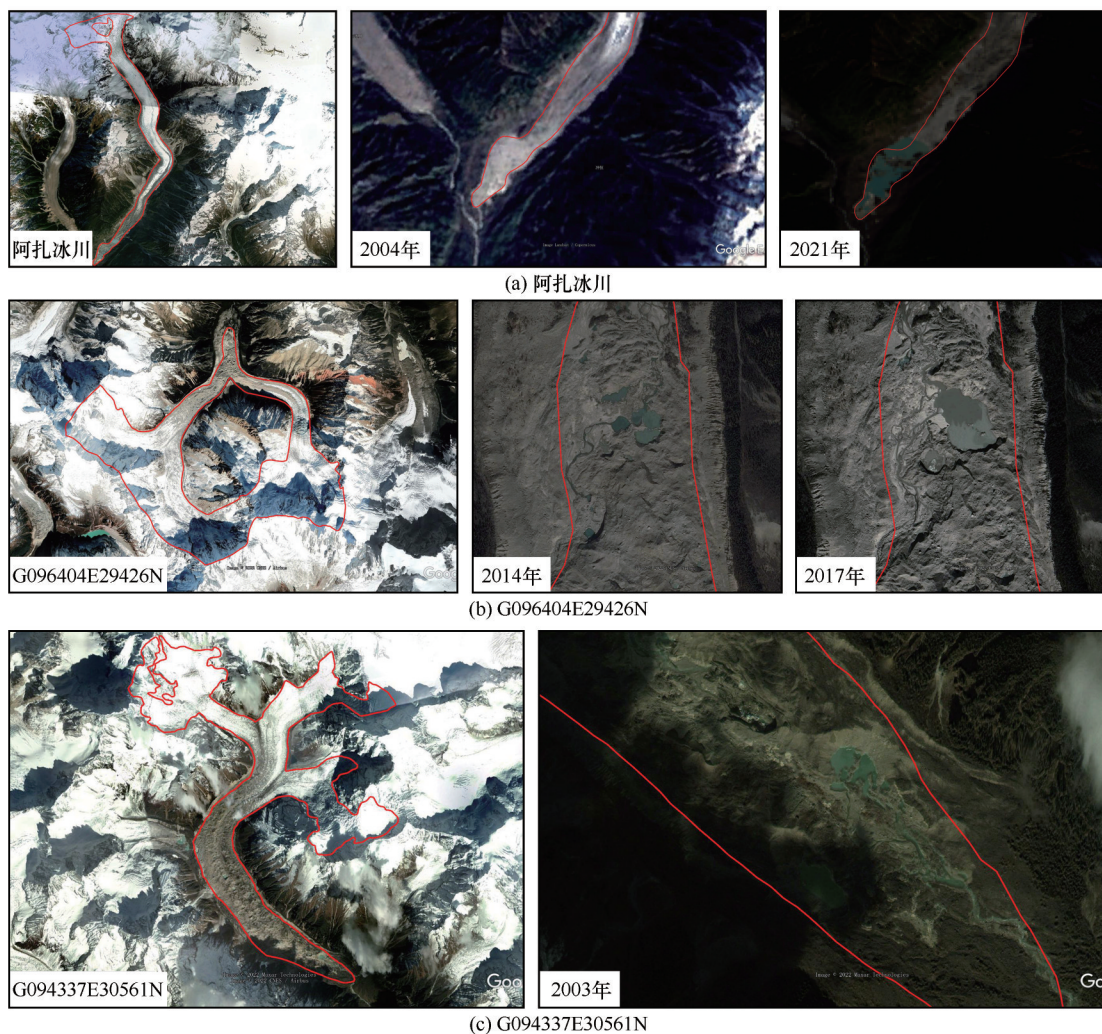


图5 青藏高原东南部阿扎冰川(a)、G096404E29426N(b)、G094337E30561N(c)冰川区冰面湖分布
(图像来源于 Google Earth)

Fig. 5 Supraglacial lakes on Azha Glacier (a), G096404E29426N (b) and G094337E30561N (c)
in the southeastern Tibetan Plateau, images are from Google Earth

发生的可能性。例如,2018年10月17日以及10月29日,雅鲁藏布江发生的两次冰崩堵江事件^[24]。冰崩发生使得冰川冰沿着冰川某一剪切破裂面或脆弱面迅速倾倒或滑塌,一方面造成严重的灾害,另一方面导致巨大的冰川区物质从高海拔地区快速到达冰川低海拔地区,从而加速了冰川区物质的亏损。

3.5 冰川末端冰湖发育扩张,加速冰川物质亏损

随着青藏高原冰川普遍萎缩,冰川末端冰湖广泛发育^[32,111-112]。如图6所示,与冰湖相连的冰川称为冰湖接触型冰川。冰川退缩和物质损失为末端冰湖形成与发育提供了空间和水量补给,导致其数量快速增加,面积快速扩张^[111]。与末端未发育冰湖的冰川相比,冰湖接触处型冰川物质损失由于末端

冰湖的存在可看作近似垂直于湖面的冰崖,而冰崖分布区是冰川区典型的强消融地带^[90,94,99];同时受冰体流动、差异性消融及冰裂隙分布等影响易引发末端冰体崩解^[113];而水下部分主要通过冰湖热融蚀作用促进水下冰川消融^[114],从而导致冰川物质的加速亏损。近年来,青藏高原东南部冰湖面积迅速扩大^[115-116],例如雅弄冰川末端冰湖面积在1999—2017年间增加了23%^[116]。研究表明,在2003—2017年间青藏高原东南部冰湖接触型冰川物质损失量比末端未发育冰湖的冰川增加了45%^[32]。需要指出的是,冰川末端冰湖的形成和扩张与冰湖接触型冰川的物质变化呈现了一种相互促进的动态关系,即冰川萎缩提高了冰湖的扩张速率,而不断扩张的冰湖通过水-冰界面热量/物质的相互作用,促进冰川

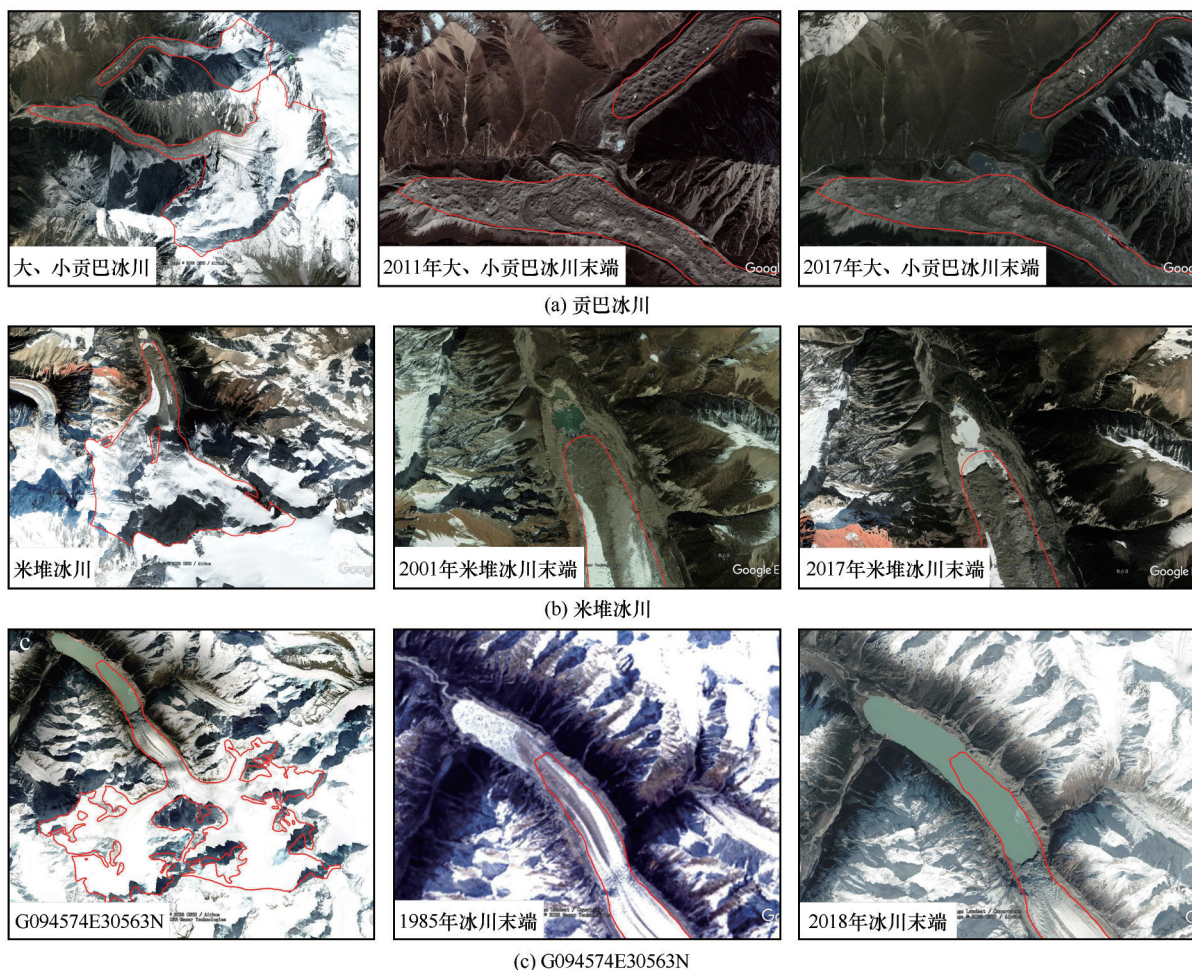


图6 青藏高原东南部贡巴冰川(a)、米堆冰川(b)、G094574E30563N(c)的冰川末端冰湖发育(图像来源于 Google Earth)

Fig. 6 Glacial lakes in front of Gongba Glacier (a), Midui Glacier (b) and G094574E30563N (c) in the southeastern Tibetan Plateau, images are from Google Earth

末端消融和冰体流动,引发冰体崩解,进一步加速了冰川末端的退缩和物质亏损。

4 海洋型冰川物质平衡研究的挑战与展望

4.1 提高海洋型冰川区监测能力,建立全面系统的物质平衡基础数据库

可靠的观测资料是研究海洋型冰川物质平衡及其影响的基础,目前青藏高原东南部开展长期定位观测的海洋型冰川数量较少,且多以小规模冰川为主(表2),冰川物质平衡相关数据的监测与积累仍存在较大缺口,这是海洋型冰川物质平衡研究面临的关键问题。随着遥感技术的发展,各类遥感数据广泛应用到青藏高原东南部海洋型冰川的物质平衡研究中,获取了不同时间段的冰川物质变化数据^[20,29,32,34,44-46]。然而,受云、雨、地形等因素影响,且众多海洋型冰川区表碛分布广泛,表碛、冰崖、冰面湖等混杂,极大地增加了遥感识别的难度,深刻影

响冰川遥感图像的判别以及冰川物质变化的遥感监测精度^[62,85]。较大规模冰川观测数据尤其是长时间序列冰川物质平衡观测资料的匮乏,制约了对海洋型冰川多相态水转化机制的认识及其水资源效应和致灾过程物理机制的理解。

在未来的研究中,基于现有的冰川观测结果,需进一步加强对海洋型冰川区的监测能力,综合地-空-天监测,形成完整的冰川物质平衡的监测网。同时,利用遥感、大数据、合成孔径雷达等先进探测技术和数据分析、同化技术,获取第一手冰川物质变化数据,建立集冰川消融、积累、气象水文等于一体的基础资料数据集,为冰川物质平衡变化及对气候变化响应机理研究提供数据支持。

4.2 加强冰川物质平衡多物理过程的集成研究,提高模型模拟精度

海洋型冰川物质平衡模拟主要基于能量-物质平衡模型和度日模型开展^[17,50,91]。如上所述,海洋

型冰川野外定位监测存在一定的困难,大多数海洋型冰川物质平衡观测存在时间序列短、不连续的特点,且冰面条件复杂,制约着冰川物质平衡模型参数的率定,模型在广大无/缺资料冰川区的应用受限,物质平衡模拟精度的提高是模型模拟面临的巨大挑战。因此,现有冰川物质平衡模型参数区域化研究亟待加强。现有众多模型考虑了冰川消融、积累及融水再冻结过程^[17-18,50],少数模型考虑了表碛空间分布对冰川物质平衡的影响^[17]。随着气候变暖,海洋型冰川物质平衡对其响应复杂性加剧,物质平衡各过程发生着剧烈变化,冰面裂隙增多与扩张、冰崖-冰面湖-表碛相互作用、冰内冰下过程、冰崩等过程是目前海洋型冰川物质亏损新的表现形式,这些过程都已被证实在海洋型冰川物质平衡变化过程中存在着一定作用,深刻理解这些表现过程的物理机制是准确开展个过程模拟的基础。但现有冰川物质平衡模型很难评估这些过程的综合影响、每个过程的贡献大小及他们之间的相互影响。现有海洋型冰川物质平衡模型对于这些重要过程的描述过于简化或基本缺失,尤其对冰湖接触型冰川末端水-冰界面热量/物质相互作用过程对冰川区物质损失的影响考虑甚微,仅在格陵兰地区少数几条大规模入海冰川开展了模拟研究^[114],而青藏高原东南部冰湖接触型冰川鲜有相关研究,部分研究在喜马拉雅山冰川区发展了考虑冰崖和冰面湖的冰川消融模型^[93-94,99],但需要详细的野外监测数据和气象、地形等驱动数据,限制了该类模型在其他区域的发展与应用。现有模型对这些过程描述的缺失可能导致模型模拟结果存在一定的误差。因此,发展精细刻画上述多个重要物质亏损过程的冰川物质平衡模型是目前海洋型冰川物质平衡研究亟需解决的难题。在未来研究中需要考虑每个过程在不同时间尺度、不同季节和不同冰川的作用,加强冰川物质平衡多过程的综合集成研究,精细刻画冰面裂隙、冰崖-冰面湖-表碛相互作用、冰内冰下过程、冰崩等物理过程,尤其是冰湖接触型冰川末端水-冰界面热量/物质相互作用及对末端消融和崩解的影响,进而提高海洋型冰川物质平衡模型的模拟精度,为进一步开展海洋型冰川物质变化的区域水资源效应和致灾效应研究奠定基础。

4.3 海洋型冰川分布范围的再界定

海洋型冰川主要分布于青藏高原东南部的横断山、念青唐古拉山中东段和喜马拉雅山东段地

区^[11],该分布范围由 Shi 等^[11]基于降水量和冰温的差异划分。这一划分方案因符合青藏高原冰川的基本特征而在区域冰川变化及影响研究中得到了广泛应用,并沿用至今。然而,近几十年来,青藏高原地区升温剧烈,且升温幅度明显大于同纬度其他地区^[8],同时降水增加或减少的区域差异显著^[3,32,84]。青藏高原东南部不同气象站和不同典型冰川区气象观测证实了该区域显著的升温趋势和降水的空间差异特征^[18-19,33,44-45]。因此,在目前青藏高原气候变化背景下,之前基于当时气候条件和有限冰川观测资料的海洋型冰川分布范围划分方案在现阶段是否仍然适用,是一个非常值得考虑的问题。此外,近期开展了众多青藏高原东南部海洋型冰川变化及影响的研究^[32,46,57,69,72],这些研究所采用的海洋型冰川分布范围并不一致,导致对该地区冰川变化及影响的总体认识有较大的差异(图2)。

近年来,随着青藏高原东南部冰川观测数据的日益丰富,结合多源遥感数据,进一步加深了对海洋型冰川的冰温、冰川运动、水热过程等的认识。基于最新的气候观测数据、长序列再分析气候资料、冰川动力模型等,结合冰川区地形条件,在未来的研究中,可对海洋型冰川现有的划分依据进一步更新。基于划分依据的更新,结合现有冰川编目数据,进而获取符合现代气候条件和冰川特征的海洋型冰川数量、面积和分布范围,为进一步认识和理解海洋型冰川对气候变化的响应特征及其区域水资源效应和致灾机制提供更为准确的数据支持。

5 结论

基于大地测量法、野外观测、模型模拟等获取的冰川物质平衡数据,本文系统总结了青藏高原东南部海洋型冰川物质平衡变化过程、特征及其影响因素。得到结论如下:

20世纪90年代以前,多数海洋型冰川平均物质亏损速率较小,随后冰川总体处于物质亏损加强的趋势,平均物质平衡介于 $-0.66 \sim -0.61 \text{ m w. e. } \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,其中1952—2020年间66%的总累计冰川物质亏损量产生于2000年以后时期。

冰川物质亏损速率具有显著的区域差异,其中横断山冰川平均物质亏损最大,喜马拉雅山东段最小;持续升温、降水减少、表碛分布等是海洋型冰川物质亏损加速的主要驱动因素;冰面裂隙增大、冰崖-冰面湖-表碛相互作用、冰内冰下过程、冰崩、末

端冰湖水-冰相互作用等过程是目前海洋型冰川物质亏损的新表现形式。

然而,观测资料稀少和模型模拟不确定性较大导致海洋型冰川物质平衡变化研究尚存在较多难点和挑战,尤其现有海洋型冰川物质平衡模型对于冰面裂隙增大、冰崖-冰面湖-表碛相互作用、冰内冰下过程、冰崩、末端冰湖水-冰相互作用等过程的描述过于简化或基本缺失。

因此,未来需要加强海洋型冰川的监测,构建较大规模冰川监测网,发展耦合上述多物理过程的冰川物质平衡模型,利用多源数据、多种手段进行冰川物质平衡变化研究,为准确理解海洋型冰川物质亏损加速过程和机理奠定基础,也为提高区域水资源效应、致灾效应预估能力提供支撑。

参考文献(References):

- [1] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [2] Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [3] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian Water Tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [4] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the World's Water Towers[J]. *Nature*, 2020, 577(7790): 364-369.
- [5] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. *Advances in water Science*, 2020, 31(5): 690-702. [丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 690-702.]
- [6] Yao T D, Xue Y K, Chen D L, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(3): 423-444.
- [7] Lee J Y, Marotzke J, Bala G, et al. Future global climate: scenario-based projections and near-term information[M]//Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021: 553-672.
- [8] You Qinglong, Kang Shichang, Li Jiandong, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 885-901. [游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 885-901.]
- [9] Kang Shichang, Guo Wanqin, Zhong Xinyue, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 16(2): 143-152. [康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 143-152.]
- [10] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress[J]. *Nature*, 2019, 569(7758): 649-654.
- [11] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 668-672.
- [12] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Introduction of cryospheric science[M]. Beijing: Science Press, 2017. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [13] Su Zhen, Shi Yafeng. Response of monsoonal temperate glaciers to global warming since the Little Ice Age[J]. *Quaternary International*, 2002, 97: 123-131.
- [14] Li Jijun, Su Zhen. Glaciers in the Hengduan Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [15] Zhang Y, Fujita K, Liu S Y, et al. Distribution of debris thickness and its effect on ice melt at Hailuoguo glacier, southeastern Tibetan Plateau, using in situ surveys and ASTER imagery[J]. *Journal of Glaciology*, 2011, 57(206): 1147-1157.
- [16] Zhang Y, Hirabayashi Y, Fujita K, et al. Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(1): 170-184.
- [17] Zhang Y, Hirabayashi Y, Liu S Y. Catchment-scale reconstruction of glacier mass balance using observations and global climate data: case study of the Hailuoguo catchment, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 444: 146-160.
- [18] Yang Wei, Guo Xiaofeng, Yao Tandong, et al. Recent accelerating mass loss of southeast Tibetan glaciers and the relationship with changes in macroscale atmospheric circulations[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(3): 805-815.
- [19] Yan Xingguo, Ma Jinzhu, Ma Xiaoyi, et al. Accelerated glacier mass loss with atmospheric changes on Mt. Yulong, South-eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126931.
- [20] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Zhu Yu, et al. Dynamics of glacier surface velocity and ice thickness for maritime glaciers in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125527.
- [21] Liu Qiao, Liu Shiyin. Progress in the study of englacial and subglacial drainage system of glaciers[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(6): 660-669. [刘巧, 刘时银. 冰川冰内及冰下水系研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(6): 660-669.]
- [22] Cheng Zunlan, Zhu Pingyi, Dang Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 954-959. [程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 954-959.]
- [23] Chen Chen, Zhang Limin, Xiao Te, et al. Barrier lake bursting

- and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124603.
- [24] An Baosheng, Wang Weicai, Yang Wei, et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 816: 151652.
- [25] Ding Yongjian, Mu Cuicui, Wu Tonghua, et al. Increasing cryospheric hazards in a warming climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 213: 103500.
- [26] Cui Peng, Guo Xiaojun, Jiang Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1313-1321. [崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1313-1321.]
- [27] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Characteristics of recent temperate glacier fluctuations in the Parlang Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1775-1780. [杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征[J]. *科学通报*, 2010, 55(18): 1775-1780.]
- [28] Liu Qiao, Zhang Yong. Studies on the dynamics of monsoonal temperate glaciers in Mt. Gongga: a review[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(5): 717-726. [刘巧, 张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望[J]. *山地学报*, 2017, 35(5): 717-726.]
- [29] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Zhu Yu, et al. High-resolution monitoring of glacier dynamics based on unmanned aerial vehicle survey in the Meili Snow Mountain[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(9): 1581-1589. [吴坤鹏, 刘时银, 朱钰, 等. 基于无人机摄影测量的梅里雪山明永冰川末端表面高程动态监测[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1581-1589.]
- [30] RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory: a dataset of global glacier outlines: Version 6.0[R]. Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
- [31] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, et al. *Glaciers in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. *西藏冰川* [M]. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [32] Zhao Fanyu, Long Di, Li Xingdong, et al. Rapid glacier mass loss in the Southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 270: 112853.
- [33] Zhang Y, Liu S Y, Liu Q, et al. The role of debris cover in catchment runoff: a case study of the Hailuoguo catchment, south-eastern Tibetan Plateau[J]. *Water*, 2019, 11(12): 2601.
- [34] Zhou Yushan, Li Xin, Zheng Donghai, et al. Evolution of geodetic mass balance over the largest lake-terminating glacier in the Tibetan Plateau with a revised radar penetration depth based on multi-source high-resolution satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 275: 113029.
- [35] Yang Wei, Yao Tandong, Guo Xiaofeng, et al. Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(17): 9579-9594.
- [36] Ward F K. The Himalaya east of the Tsangpo[J]. *Geographical Journal*, 1934, 84(5): 369-397.
- [37] Ward F K. The snow mountains of Yunnan[J]. *Geographical Journal*, 1924, 64(3): 222-231.
- [38] Heim A. The glaciation and solifluction of Minya Gongkar[J]. *The Geographical Journal*, 1936, 87(5): 444-450.
- [39] Cui Zhijiu. Preliminary observations of the modern glaciers of Gongga Mountain: commemorating comrades who heroically sacrificed their lives for the conquest of Gongga Mountain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1958, 24(3): 318-342. [崔之久. 贡嘎山现代冰川的初步观察——纪念为征服贡嘎山而英勇牺牲的战友[J]. *地理学报*, 1958, 24(3): 318-342.]
- [40] Li Bingyuan, Wang Fubao, Zhang Qingsong. *Quaternary geology of Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1983. [李炳元, 王富葆, 张青松. *西藏第四纪地质* [M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [41] Yao Tandong. Glacier climate and environment of the Qinghai-Tibet Plateau: a study on glaciers on the Qinghai-Tibet Plateau in China and Japan in 1989 [M]. Beijing: Science Press, 1993. [姚檀栋. *青藏高原冰川气候与环境: 1989年中日青藏高原冰川考察研究* [M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [42] Liu Shiyin, Shanguan Donghui, Ding Yongjian, et al. Glacier variations since the early 20th Century in the Gangrigabu range, southeast Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 55-63. [刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 55-63.]
- [43] Zhong Y, Liu Q, Westoby M, et al. Intensified paraglacial slope failures due to accelerating downwasting of a temperate glacier in Mt. Gongga, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2022, 10(1): 23-42.
- [44] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Bao Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 24-34. [吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980—2015年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 24-34.]
- [45] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1115-1125. [吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1115-1125.]
- [46] Yi S, Song C Q, Heki K, et al. Satellite-observed monthly glacier and snow mass changes in southeast Tibet: implication for substantial meltwater contribution to the Brahmaputra[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(7): 2267-2281.
- [47] Wang Shijin, Che Yanjun, Pang Hongxi, et al. Accelerated changes of glaciers in the Yulong Snow Mountain, Southeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Regional Environmental Change*, 2020, 20(2): 1-13.
- [48] Sherpa S F, Wagnon P, Brun F, et al. Contrasted surface mass balances of debris-free glaciers observed between the southern and the inner parts of the Everest region (2007—2015) [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(240): 637-651.
- [49] Wagnon P, Brun F, Khadka A, et al. Reanalysing the 2007—19 glaciological mass-balance series of Mera Glacier, Nepal, Central Himalaya, using geodetic mass balance[J]. *Journal of Glaciology*, 2021, 67(261): 117-125.
- [50] Wang R J, Liu S Y, Shanguan D H, et al. Spatial heterogeneity in glacier mass-balance sensitivity across High Mountain Asia[J]. *Water*, 2019, 11(4): 776.
- [51] Su Zhen, Song Guoping, Cao Zhen tang. Maritime characteristics of Hailuoguo glacier in the Gongga Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 51-59.

- [苏珍, 宋国平, 曹真堂. 贡嘎山海螺沟冰川的海洋性特征[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊1): 51-59.]
- [52] He Yuanqing, Zhang Zhonglin, Yao Tandong, et al. Modern changes of climate and glaciers in China's monsoonal temperate-glacier region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 550-558. [何元庆, 张忠林, 姚檀栋, 等. 中国季风温冰川区近代气候变化与冰川动态[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 550-558.]
- [53] Liu X W, Xu Z X, Yang H, et al. Responses of the glacier mass balance to climate change in the Tibetan Plateau during 1975—2013 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2019JD032132.
- [54] Ding Baohong, Yang Kun, Yang Wei, et al. Development of a Water and Enthalpy Budget-based Glacier mass balance Model (WEB-GM) and its preliminary validation[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3146-3178.
- [55] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Quick ice mass loss and abrupt retreat of the maritime glaciers in the Kangri Karpo Mountains, southeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(16): 2547-2551.
- [56] Yang Wei, Guo Xiaofeng, Yao Tandong, et al. Summertime surface energy budget and ablation modeling in the ablation zone of a maritime Tibetan glacier[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D14116.
- [57] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Jiang Zongli, et al. Recent glacier mass balance and area changes in the Kangri Karpo Mountains from DEMs and glacier inventories [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(1): 103-121.
- [58] Zhao L Y, Tian L D, Zwinger T, et al. Numerical simulations of Gurenhekou glacier on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(219): 71-82.
- [59] Acharya A, Kayastha R B. Mass and energy balance estimation of Yala glacier (2011—2017), Langtang valley, Nepal [J]. *Water*, 2018, 11(1): 6.
- [60] Ageta Y, Ohata T, Tanaka Y, et al. Mass balance of Glacier AX010 in Shorong Himal, East Nepal during the summer monsoon season glaciological expedition of Nepal, contribution No. 66[J]. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*, 1980, 41(Special): 34-41.
- [61] Liu Shiyin, Zhang Yong, Liu Qiao, et al. Study on the impact of climate change on glacier and its risk[M]. Beijing: Science Press, 2017. [刘时银, 张勇, 刘巧, 等. 气候变化对冰川影响与风险研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [62] Zhao Huaqiu, Wang Xin, Zhao Xuanru, et al. Analysis of glacier changes in China from 2008 to 2018[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 976-986. [赵华秋, 王欣, 赵轩茹, 等. 2008—2018年中国冰川变化分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 976-986.]
- [63] Ji Qin, Liu Rui, Yang Taibao. Glacier variations in the Himalayas during 1990—2015[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(10): 2403-2414. [冀琴, 刘睿, 杨太保. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测[J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2403-2414.]
- [64] Guillet G, King O, Lv M, et al. A regionally resolved inventory of High Mountain Asia surge-type glaciers, derived from a multi-factor remote sensing approach [J]. *The Cryosphere*, 2022, 16(2): 603-623.
- [65] Cuffey K M, Paterson W S B. The physics of glaciers[M]. Academic Press, 2010.
- [66] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Cryosphere science dictionary[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学词典[M]. 北京: 气象出版社, 2016.]
- [67] Haeberli W, Whiteman C. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters: a general framework [M]. Academic Press, 2015: 1-34.
- [68] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. *Nature geoscience*, 2017, 10(9): 668-673.
- [69] Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. *Nature*, 2021, 592(7856): 726-731.
- [70] Jakob L, Gourmelen N, Ewart M, et al. Spatially and temporally resolved ice loss in High Mountain Asia and the Gulf of Alaska observed by CryoSat-2 swath altimetry between 2010 and 2019[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 1845-1862.
- [71] Nuimura T, Fujita K, Yamaguchi S, et al. Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992—2008[J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(210): 648-656.
- [72] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 852-857.
- [73] King A D, Karoly D J. Climate extremes in Europe at 1.5 and 2 degrees of global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(11): 114031.
- [74] Ren S T, Menenti M, Jia L, et al. Glacier mass balance in the Nyainqentanglha Mountains between 2000 and 2017 retrieved from ZiYuan-3 stereo images and the SRTM DEM[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 864.
- [75] Neckel N, Loibl D, Rankl M. Recent slowdown and thinning of debris-covered glaciers in south-eastern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 464: 95-102.
- [76] Shean D E, Bhushan S, Montesano P, et al. A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 7: 363.
- [77] Kääb A, Treichler D, Nuth C, et al. Brief communication: contending estimates of 2003—2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(2): 557-564.
- [78] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Jiang Zongli, et al. Glacier mass balance over the central Nyainqentanglha Range during recent decades derived from remote-sensing data[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(251): 422-439.
- [79] WGMS: Fluctuations of glaciers database, world glacier monitoring service[DB]. Zurich, Switzerland, 2021.
- [80] Kaser G, Cogley J G, Dyurgerov M B, et al. Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961—2004[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 1-5.
- [81] Gulev S K, Thorne P W, Ahn J, et al. Changing state of the climate system[J]. *Climate change*, 2021: 287-422.
- [82] Morice C P, Kennedy J J, Rayner N A, et al. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 data set [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D08101.
- [83] Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, et al. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years[J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaav7266.
- [84] Yang Kun, Wu Hui, Qin Jun, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water

- cycle: a review[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [85] Fujita K. Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 276: 14-19.
- [86] Ohmura A. Physical basis for the temperature-based melt-index method[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(4): 753-761.
- [87] Mölg T, Maussion F, Yang W, et al. The footprint of Asian monsoon dynamics in the mass and energy balance of a Tibetan glacier[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(6): 1445-1461.
- [88] Du Jiankuo, He Yuanqing, Li Shuang, et al. Mass balance of a typical monsoonal temperate glacier in Hengduan Mountains region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1415-1422. [杜建括, 何元庆, 李双, 等. 横断山区典型海洋型冰川物质平衡研究[J]. *地理学报*, 2015, 70(9): 1415-1422.]
- [89] Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 188: 1-14.
- [90] Zhang Yong, Liu Shiyin, Wang Xin. Debris-cover effect in the Tibetan Plateau and surroundings: a review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(3): 900-913. [张勇, 刘时银, 王欣. 青藏高原及周边冰川区表碛影响研究进展[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(3): 900-913.]
- [91] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Influence of supraglacial debris on summer ablation and mass balance in the 24K Glacier, southeast Tibetan Plateau[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2010, 92(3): 353-360.
- [92] Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(1/2): 156-174.
- [93] Miles E S, Willis I, Buri P, et al. Surface pond energy absorption across four Himalayan glaciers accounts for 1/8 of total catchment ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10464-10473.
- [94] Buri P, Miles E S, Steiner J F, et al. Supraglacial ice cliffs can substantially increase the mass loss of debris-covered glaciers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2020GL092150.
- [95] Benn D I, Warren C R, Mottram R H. Calving processes and the dynamics of calving glaciers[J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 82(3/4): 143-179.
- [96] Bassis J N, Ma Y. Evolution of basal crevasses links ice shelf stability to ocean forcing[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 409: 203-211.
- [97] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Investigation of ice cliffs in the debris-covered area of Koxkar Glacier, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(6): 879-884. [韩海东, 刘时银, 丁永建, 等. 科其喀尔冰川表碛区冰崖形态调查[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(6): 879-884.]
- [98] Sakai A, Fujita K. Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalayas[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195): 177-181.
- [99] Sakai A, Nakawo M, Fujita K. Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2002, 34(1): 12-19.
- [100] Reid T D, Brock B W. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(199): 903-916.
- [101] Anderson L S, Armstrong W H, Anderson R S, et al. The causes of debris-covered glacier thinning: evidence for the importance of ice dynamics from Kennicott Glacier, Alaska[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021: 723.
- [102] Gu Ju, Zhang Yong, Liu Shiyin, et al. Research on estimation methods of glacier basal sliding on the Tibetan Plateau: progress, problems and prospects[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(3): 307-316. [顾菊, 张勇, 刘时银, 等. 青藏高原冰川底部滑动估算方法研究: 进展、问题与展望[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(3): 307-316.]
- [103] Stenborg T. Studies of the internal drainage of glaciers[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1969, 51A(1/2): 13-41.
- [104] Fountain A G, Walder J S. Water flow through temperate glaciers[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(3): 299-328.
- [105] Fountain A G, Jacobel R W, Schlichting R, et al. Fractures as the main pathways of water flow in temperate glaciers[J]. *Nature*, 2005, 433(7026): 618-621.
- [106] Nienow P, Sharp M, Willis I. Temporal switching between englacial and subglacial drainage pathways: dye tracer evidence from the Haut Glacier d'Arolla, Switzerland[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1996, 78(1): 51-60.
- [107] Church G, Bauder A, Grab M, et al. Ground-penetrating radar imaging reveals glacier's drainage network in 3D[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(8): 3975-3988.
- [108] Iken A. The effect of the subglacial water pressure on the sliding velocity of a glacier in an idealized numerical model[J]. *Journal of Glaciology*, 1981, 27(97): 407-421.
- [109] Eyles N. The role of meltwater in glacial processes[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190(1): 257-268.
- [110] Liu Guoxiang, Zhang Bo, Zhang Rui, et al. Monitoring Dynamics of Hailuoguo glacier and the secondary landslide disasters based on combination of satellite SAR and Ground-Based SAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995. [刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 980-995.]
- [111] Song C Q, Sheng Y W, Wang J D, et al. Heterogeneous glacial lake changes and links of lake expansions to the rapid thinning of adjacent glacier termini in the Himalayas[J]. *Geomorphology*, 2017, 280: 30-38.
- [112] King O, Bhattacharya A, Bhambri R, et al. Glacial lakes exacerbate Himalayan glacier mass loss[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-9.
- [113] Benn D I, Åström J A. Calving glaciers and ice shelves[J]. *Advances in Physics: X*, 2018, 3(1): 1513819.
- [114] Cook S J, Christoffersen P, Todd J, et al. Coupled modelling of subglacial hydrology and calving-front melting at Store Glacier, West Greenland[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(3): 905-924.
- [115] Wang X, Guo X Y, Yang C D, et al. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2169-2182.
- [116] Li Gang, Li Yu, Lin Hui, et al. Two periods of geodetic glacier mass balance at Eastern Nyainqentanglha derived from multi-platform bistatic SAR interferometry[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 104: 102541.

Review of maritime glacier mass balance in the southeastern Tibetan Plateau

ZHAO Yin¹, ZHANG Yong^{1,2}, LIU Shiyin³, WANG Xin¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Maritime glaciers mainly concentrate in the southeastern Tibetan Plateau, including the Hengduan Mountains, central and eastern Nyainqentanglha Mountains and eastern Himalayas, which show higher mass loss and accumulation and ice temperature compared to other glacier types, with relatively fast ice velocity. Maritime glaciers show the unique sensitive to the changing climate and have experienced the most dramatic mass loss over the past decades, with important consequences for assessing regional water resource availability and glacial hazards risk. It has become a hotspot for the cryosphere change of the Tibetan Plateau. This study summarizes the spatial and temporal characteristics of mass balance of maritime glaciers, and reviews the driving factors of accelerated mass change and new features of mass change of maritime glaciers. As a consequence of continuous temperature rising, precipitation changing and spatially distributed debris cover, maritime glaciers has been experiencing dramatic mass loss since the year of 2000, on which the average mass balance varies from -0.66 to -0.61 m w. e. $\cdot a^{-1}$. In particular, these glaciers experience an accelerating trend in mass loss over the past ten years. However, the current studies on maritime glacier mass balance still suffers from insufficient observational data and uncertainties of model simulations. In particular, the existing models are oversimplification or basically missing in describing the processes such as ice crevasse enlargement, interaction between ice cliff, supraglacial pond and debris cover, englacial and subglacial system and ice avalanche as well as the interaction between ice and water at the terminus of lake-terminating glaciers, and their mechanisms and impacts are still uncertain. This study motivates further effort to further develop the monitoring system of maritime glacier mass balance, and improve models' ability to couple the multi physical processes of glacier mass balance through conducting integrated research based on multi-data and multi-approaches. Overall, this study draws an integrated view of understanding the characteristics of maritime glacier mass change and associated driven factors in the southeastern Tibetan Plateau, which provides a foundation for understanding and predicting the status of maritime glaciers and their responses to climate change as well as assessing the vulnerability of regional water resources and glacier-related hazards in the southeastern Tibetan Plateau.

Key words: maritime glacier; glacier mass balance; glacier monitoring; southeastern Tibetan Plateau

(责任编辑: 王宁练)