

DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0047

LIANG Pengbin, LI Zhongqin, ZHANG Hui, et al. Temporal and spatial variation characteristics of mass balance of global reference glaciers from 1984 through 2016 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 415–425. [梁鹏斌, 李忠勤, 张慧, 等. 1984–2016年全球参照冰川物质平衡时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 415–425.]

# 1984–2016年全球参照冰川物质平衡时空变化特征

梁鹏斌<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 张慧<sup>2</sup>, 王飞腾<sup>2</sup>, 牟建新<sup>1</sup>, 何海迪<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院  
冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 基于世界冰川监测服务处(WGMS)发布的冰川物质平衡数据,对全球40条典型参照冰川物质平衡资料进行分析,结果表明:1984年以来,40条冰川中的36条在观测时段内处于物质平衡为负的状态,冰川普遍退缩,尤其在中纬度比较强烈;全球参照冰川物质平衡的多年平均值为-563 mm,累积物质平衡为-18 590 mm,且2000年之后出现了加速消融的变化趋势;全球参照冰川物质平衡的年代际平均值呈阶梯下降,每10年,物质平衡值下降200 mm左右;由于区域气候变化的差异性以及冰川对气候变化的响应程度不同,冰川物质平衡变化表现出显著的区域特征,物质平衡值由北到南出逐渐增大,空间上呈现出典型的纬度地带性和经度地带性特征;气温是控制冰川物质平衡变化的主要因子,物质平衡过程通常与各地区不同时间尺度的气候波动和变化显著相关。

**关键词:** 冰川; 物质平衡; 累积物质平衡; 时空变化; 控制机理

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)03-0415-11

## 0 引言

目前,全球气候变化对地球环境的影响日益受到人们的关注,作为地球系统五大圈层之一的冰冻圈的研究得到了前所未有的重视<sup>[1]</sup>。冰冻圈是指地球表层(陆地和海洋表面及以下)水以固态形式存在的圈层,组成部分主要包括冰盖、冰川、积雪、冻土、海冰、湖冰、河冰和固态降水<sup>[2]</sup>。冰川作为冰冻圈的重要组成部分,它不仅是气候变化的重要驱动因素之一,而且是反映气候变化的记录器和预警器<sup>[3-4]</sup>。据统计,全球冰川和冰帽面积(不包括南极和格陵兰冰盖)约 $5.54 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,体积为 $(1.70 \pm 0.21) \times 10^5 \text{ km}^3$ ,被誉为“固体水库”<sup>[5]</sup>。20世纪以来全球气温升高,冰盖和山岳冰川均呈现出明显的退缩状态,这一退缩在最近20年出现了强烈加速趋势<sup>[6-9]</sup>。冰川的加速退缩不仅引起水资源的时空变化,而且对海平面的升降及区域水循

环等产生深刻影响<sup>[10-13]</sup>。

物质平衡,即冰川的积累与消融,是冰川的生命线,也是冰川发育水热条件的综合反映,对冰川的物理性质以及冰川的变化有着深刻的影响,既是冰川变化对气候最直接的反映,又是连接冰川与气候、冰川与水资源的纽带<sup>[14-15]</sup>。鉴于物质平衡的重要意义,它一直是冰川学中传统的观测及研究内容,自20世纪中期以来,许多国家相继选择有一定代表性的冰川,开展系统的连续的物质平衡观测研究<sup>[16]</sup>。国际上,北欧及阿尔卑斯山地区有关国家起步最早,接着是北美和前苏联,中国则在20世纪50年代末以来将物质平衡作为冰川学重要的研究内容。目前国内冰川物质平衡的研究多集中在单条冰川物质平衡的变化上<sup>[17-21]</sup>,虽然有的学者也在冰川物质平衡研究中涉及到区域冰川物质平衡变化及其对气候变化响应的差异,但这些区域大都集中在北半球和高亚洲地区<sup>[22-26]</sup>,且国内最近对大区

收稿日期: 2017-10-23; 修订日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471058); 国家自然科学基金委重大研究计划“黑河流域水-生态-经济系统的集成模拟与预测”项目(91425303); 国家自然科学基金(41771077)资助

作者简介: 梁鹏斌(1993-),男,甘肃庄浪人,2016年在西北师范大学获学士学位,现为西北师范大学在读硕士研究生,从事干旱区水资源研究。E-mail: 1510565025@qq.com

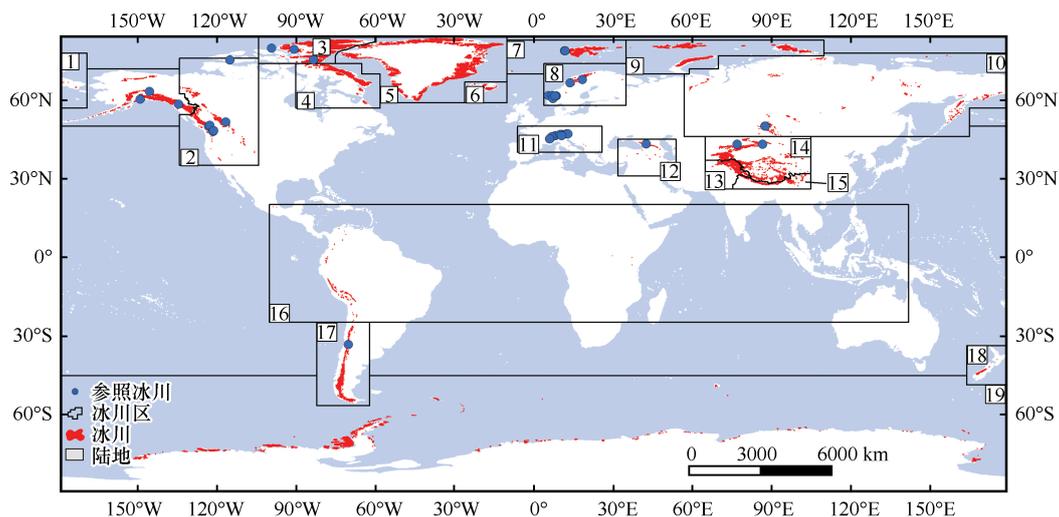
通信作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn.

域物质平衡变化研究比较匮乏。本文从全球角度出发,以大区域为基础,选取国际上40条重点监测冰川,分析其近30年物质平衡的时空变化特征,旨在弥补国内在区域物质平衡变化方面的研究空白,以期全方位认识冰川物质平衡过程以及未来冰川变化提供科学的理论依据。

## 1 参照冰川分布概况

根据世界冰川编目(Randolph Glacier Inventory, 简称 RGI) 第五版数据,全球共发育山地冰川212 136条,总面积达74 5795 km<sup>2</sup>,单条冰川平均

面积为3.52 km<sup>2</sup>,冰川主要发育于亚洲中部、西南部和阿拉斯加及格陵兰岛四个区域,但南极大陆与次南极群岛、格陵兰岛及加拿大北极北部地区冰川面积占比大。由于冰川观测异常艰难,不可能对所有冰川进行实地观测,冰川学中的一个基本原理,就是在具有相同气候环境条件下发育的冰川,对气候变化响应的过程和机理具有相似性,因此可以借助于某条代表性冰川的观测研究,揭示这一区域冰川变化的普遍规律<sup>[27]</sup>。根据 Radić 等<sup>[28]</sup>、Zemp 等<sup>[29]</sup>的划分体系,本研究将全球冰川区划分为19个区域(图1),该方法同样被 IPCC 所采用<sup>[30-31]</sup>。



图中19个区域从西北到东南依次为: 1. 阿拉斯加、2. 北美洲西部、3. 加拿大北极北部、4. 加拿大北极南部、5. 格林兰、6. 冰岛、7. 斯瓦尔巴岛和扬马延岛、8. 斯堪的纳维亚、9. 俄罗斯北极、10. 亚洲北部、11. 中欧、12. 高加索和中东、13. 亚洲中部、14. 亚洲东南、15. 亚洲西南、16. 低纬度地区、17. 南部安第斯、18. 新西兰、19. 南极洲和亚南极岛屿

图1 参照冰川区域分布

Fig. 1 Distribution of the glaciers referenced in this paper, which located in the following 19 regions: 1. Alaska; 2. Western North America; 3. Arctic Canada North; 4. Arctic Canada South; 5. Greenland; 6. Iceland; 7. Svalbard and Jan Mayen; 8. Scandinavia; 9. Russian Arctic; 10. Asia North; 11. Central Europe; 12. Caucasus and Middle East; 13. Asia Central; 14. Asia South East; 15. Asia South West; 16. Low Latitudes; 17. Southern Andes; 18. New Zealand; 19. Antarctica and Sub Antarctic Islands

冰川区划分的主要理论依据为:以地理邻近度为基础(主要包括气候、水文和地形),基于三个主要原则,将全球冰川划分为19个一级区域。这三个指导原则包括:1)所划冰川区必须与公认的冰川范围相似;2)冰川区的集合应包括世界上所有的冰川;3)冰川区的界线简单且在地图上容易识别。对于全球冰川物质平衡的研究,这些冰川区域的划分由于易管理的冰川数量和地理范围而具有一定的合理性,因此将世界冰川进行区域划分,既有利于我们分析各区域内冰川变化的差异性,又为各区域之间冰川变化的综合比较提供了便利。由于参照冰川具有长期的连续的观测数据,选取了40条参照冰

川所在的10个区域进行时空变化分析(其中9个区域无参照冰川分布),参照冰川主要分布在欧洲及北美洲,亚洲及南美洲分布相对较少。除依查伦诺特冰川位于南美安第斯山脉,其它39条参照冰川均位于北半球,且大多数分布在欧洲阿尔卑斯山脉;参照冰川分布较多的区域为欧洲中部和斯堪的纳维亚,分别有11条和8条,南美安第斯和高加索地区仅有1条。

## 2 数据源

参照冰川可用以揭示区域尺度冰川的特征及其变化的普遍规律。目前,全球范围有观测记录的冰

表 1 参照冰川在各个区域的分布  
Table 1 Distribution of the referenced glaciers in various regions

区域	参照冰川
阿拉斯加	Gulkana glacier , Wolverine glacier , Lemon Creek glacier
北美西部	Place glacier , South Cascade glacier , Helm glacier , Peyto glacier , Columbia ( 2057) glacier
南美安第斯	Echaurren Norte glacier
加拿大北极	Devon Ice Cap NW , Meighen Ice Cap , Melville South Ice Cap , White glacier
斯瓦尔巴岛和扬马延岛	Austre Broeggerbreen glacier , Midtre Lovénbreen glacier
斯堪的纳维亚	Engabreen glacier , Alftobreen glacier , Nigardsbreen glacier , Grasubreen glacier , Storbreen glacier , Hellstugubreen glacier , Remebedalsskaaka glacier , Storglaciaeren glacier
欧洲中部	Saint Sorlin glacier , Sarennes glacier , Argentière glacier , Silvretta glacier , Gries glacier , Stubacher glacier , Sonnblickkees glacier , Vernagtferner glacier , Kesselwandferner glacier , Hintereisferner glacier , Caresèr glacier , Wurtenkees glacier
高加索和中东	Djankuat glacier
亚洲北部	No. 125 ( Vodopadny) glacier , Maliy Aktru glacier , Levyi Aktru glacier
亚洲中部	Ts. Tuyuksuyskiy glacier , Ürümqi Glacier No. 1 glacier

川数量为 452 条,具有连续长期观测记录的参照冰川有 40 条,观测序列长度均超过了 30 年。本研究选用 WGMS 在全球范围内选定的 40 条参照冰川,以表征全球 10 个区域冰川物质平衡变化(其中 9 个区域无参照冰川分布)。参照冰川的物质平衡资料均由传统的冰川学观测方法(花杆/雪坑法)获取,具备观测连续、资料序列长、质量高,能够较好地反映区域冰川物质平衡波动等优点。除乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡数据来源于《中国科学院天山冰川观测试验站年报》<sup>[32]</sup>,其它 39 条参照冰川的物质平衡数据均来源于 WGMS(<http://wgms.ch/>) 以及其出版刊物《Fluctuations of Glaciers》<sup>[33]</sup> 与《Glacier Mass Balance Bulletin》<sup>[34]</sup>,全球冰川编目数据来源于全球陆地冰空间测量计划(<http://www.glims.org/RGI/>)。各参照冰川起始观测年份不一,为避免由于观测时间不同所带来研究结果的不确定性,本研究选用 1984 年以来的观测数据。

### 3 结果与分析

#### 3.1 单条参照冰川物质平衡状况

本研究选取的 40 条参照冰川主要分布在欧亚大陆和北美大陆的从赤道到北极圈的广大地区。统计分析表明(表 2),40 条参照冰川中的 36 条在观测时段内处于累积物质平衡为负的状态,其中 12 条分布在高纬度,24 条在中纬度,平均年物质平衡值分别为 -403 mm 和 -757 mm,显示负物质平衡由南到北随纬度增加而减小的趋势,累积物质平衡

为正的冰川全部分布在高纬度,平均年物质平衡值为 215 mm。比较而言,全球 36 条参照冰川的年平均物质平衡值大于 4 条前进参照冰川的年均物质平衡值。上述事实说明,近期全球大多数参照冰川普遍退缩,尤其在中纬度比较强烈。

#### 3.2 各冰川区物质平衡特征

##### 3.2.1 各冰川区物质平衡时间变化特征

将各个区域参照冰川自 1984 年以来的物质平衡值进行算数平均,得到各个区域平均物质平衡和累积物质平衡(图 2),假定所计算的区域平均物质平衡代表了区域中每一条冰川物质平衡的多年变化趋势,因此近似认为计算的区域平均物质平衡是区域中某条特定冰川物质平衡的时间过程。由于区域累积物质平衡的阶段划分较难确定,为了更好的研究区域累积物质平衡的阶段特征差异,笔者对总时间段内累积物质平衡根据最佳拟合效果不断尝试进行分段线性拟合,确定累积物质平衡分段结果,这种方法在研究 1 号冰川累积物质平衡阶段性特征以及海洋性冰川与大陆性冰川特征差异方面广泛应用<sup>[27,35]</sup>。不难看出,各区域平均物质平衡与累积物质平衡均呈现下降趋势,区域平均物质平衡介于 -953 ~ -53 mm,多年均值为 -430 mm,平均每年亏损较多的区域为欧洲中部,亏损较少的是斯堪的纳维亚地区,物质平衡波动较大的区域为南安第斯,较小的为加拿大北极北部地区。物质平衡曲线倾向率介于 -40.3 ~ -5.3,平均值为 -22.1,表明各个区域冰川物质平衡表现出不同程度的负增长趋

表 2 40 条参照冰川的累积物质平衡 ( CNB) 与年均物质平衡 ( MNB)

Table 2 Cumulative net mass balance ( CNB) and annual mean net mass balance ( MNB) of the 40 referenced glaciers

参照冰川	纬度	经度	地点	观测时段	CNB/mm	MNB/mm
Gulkana glacier	63.28° N	145.42° W	阿拉斯加肯纳山	1984 - 2014 年	-778	-25 672
Wolverine glacier	60.41° N	148.90° W	阿拉斯加肯纳山	1984 - 2014 年	-585	-19 295
Place glacier	50.42° N	122.60° W	海岸山	1984 - 2015 年	-1037	-33 176
South Cascade glacier	48.350° N	121.05° W	北喀斯喀特山	1984 - 2012 年	-754	-21 860
Helm glacier	49.957° N	122.98° W	海岸山	1984 - 2015 年	-1334	-41 365
Lemon Creek glacier	58.38° N	134.34° W	海岸山	1984 - 2015 年	-645	-21 288
Peyto glacier	51.65° N	116.56° W	海岸山	1984 - 2015 年	-867	-26 874
Columbia (2057) glacier	49.963° N	121.34° W	海岸山	1984 - 2015 年	-495	-15 840
Echaurren Norte glacier	33.53° S	70.13° W	安第斯山	1984 - 2015 年	-611	-20 174
Devon Ice Cap NW	75.04° N	83.25° W	德文岛	1984 - 2014 年	-204	-6 735
Meighen Ice Cap	79.95° N	99.13° W	埃尔斯米尔岛	1984 - 2014 年	-183	-5 842
White glacier	79.45° N	90.69° W	埃尔斯米尔岛	1984 - 2014 年	-312	-9 976
Melville South Ice Cap	75.04° N	115° E	埃尔斯米尔岛	1984 - 2013 年	-407	-13 009
Austre Broeggerbreen glacier	78.88° N	11.83° E	斯拉巴德	1984 - 2016 年	-499	-15 963
Midtre Lovénbreen glacier	78.88° N	12.04° E	斯拉巴德	1984 - 2016 年	-390	-14 222
Engabreen glacier	66.65° N	13.85° E	挪威北部	1984 - 2016 年	297	9 850
Alfotbreen glacier	61.75° N	5.65° E	挪威南部	1984 - 2016 年	66	2 182
Nigardsbreen glacier	61.72° N	7.13° E	挪威南部	1984 - 2016 年	444	14 656
Grasubreen glacier	61.65° N	8.06° E	挪威南部	1984 - 2016 年	-425	-14 025
Storglaciaeren glacier	61.57° N	8.13° E	挪威南部	1984 - 2016 年	-423	-13 972
Hellstugubreen glacier	61.56° N	8.44° E	挪威南部	1984 - 2016 年	-480	-15 828
Remebedalsskaaka glacier	60.53° N	7.368° E	挪威南部	1984 - 2016 年	54	1 798
Storbreen glacier	67.90° N	18.568° E	瑞典北部	1984 - 2016 年	-150	-4 940
Saint Sorlin glacier	45.16° N	6.1602° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-1294	-40 106
Sarennes glacier	45.11° N	6.1285° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-1738	-57 357
Argentière glacier	45.95° N	6.98° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-868	-26 898
Silvretta glacier	46.85° N	10.08° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-653	-21 542
Gries glacier	46.44° N	8.33° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-1128	-37 229
Sonnblickkees glacier	47.13° N	12.06° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-767	-25 313
Vernagtferner glacier	46.88° N	10.82° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-656	-21 662
Kesselwandferner glacier	46.83° N	10.79° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-312	-9 042
Hintereisferner glacier	46.08° N	10.77° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-932	-30 772
Caresèr glacier	46.45° N	10.70° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-1468	-48 435
Wurtenkees glacier	47.03° N	13.01° E	阿尔卑斯山	1984 - 2016 年	-888	-26 640
Djankuat glacier	43.19° N	42.76° E	高加索	1984 - 2015 年	-293	-9 660
No. 125 ( Vodopadny) glacier	50.04° N	87.78° E	阿勒泰山	1984 - 2012 年	-133	-3 850
Maliy Aktru glacier	50.04° N	87.74° E	阿勒泰山	1984 - 2012 年	-122	-3 550
Leviy Aktru glacier	50.08° N	87.749° E	阿勒泰山	1984 - 2012 年	-168	-4 880
Ts. Tuyuksuyskiy glacier	43.05° N	77.08° E	天山	1984 - 2016 年	-479	-15 822
Ürümqi Glacier No. 1 glacier	43.11° N	86.81° E	天山	1984 - 2016 年	-525	-17 339

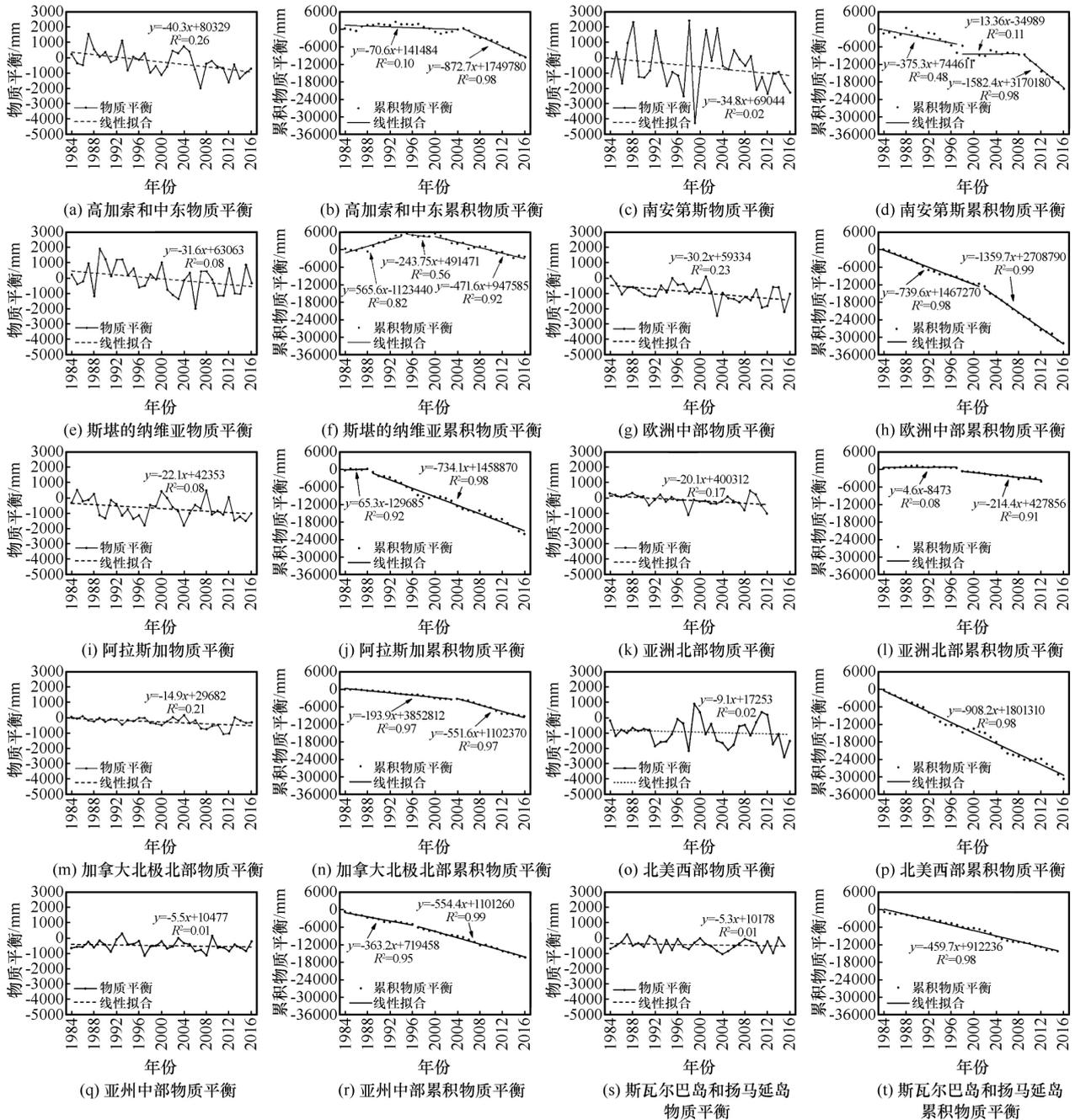


图 2 各区域物质平衡与累积物质平衡变化

Fig. 2 Variations of mass balance and cumulative mass balance in each glacier regions

势, 亏损速率最快的高加索和中东地区, 最慢的是斯瓦尔巴岛和扬马延岛地区。

1984 - 2016 年各区域累积物质平衡介于 -32 200 ~ -2 530 mm, 均值为 -16 279 mm, 累积亏损最多的区域欧洲中部, 较少的为斯堪的纳维亚地区, 累积物质平衡表现出不同的阶段性特征, 大都在 20 世纪 90 年代中后期发生突变, 最早的是阿拉斯加地区 (1988 年), 最晚的是南安第斯地区 (2009 年), 而北美西部、斯瓦尔巴岛群岛和扬马延

岛地区自观测以来一直处于加速消融, 累积物质平衡变化无明显阶段性特征。

3.2.2 各冰川区物质平衡空间变化特征

各个区域 1980 - 2016 年多年平均物质平衡和物质平衡曲线倾向率的空间变化如图 3 所示。10 个区域的多年平均物质平衡均为负值, 冰川每年亏损物质最多的区域为欧洲中部和北美西部, 物质亏损最少的区域为斯堪的纳维亚和高加索和中东地区, 而且在空间上表现出典型的区域性、纬度地带

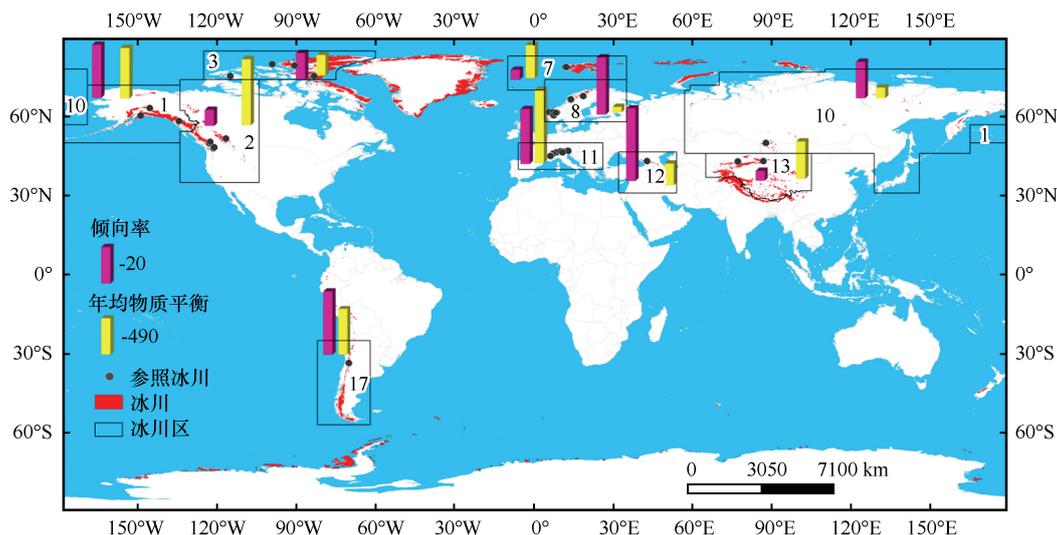


图3 各冰川区物质平衡与物质平衡倾向率的空间变化

Fig. 3 Spatial variations of mass balance and mass balance tendency rate in various glacier regions

性和经度地带性特征。区域性表现在各区域之间多年平均物质平衡相差较大,区域平均值为 $-429.8$  mm,最大值出现在中欧( $-944$  mm),最小值出现在斯堪的纳维亚( $-53$  mm),相差 $-891$  mm,区域性特征显著;纬度地带性表现在从北美西部( $-857$  mm)到阿拉斯加( $-607$  mm)以及加拿大北极北部( $-253$  mm),多年平均物质平衡在不断减小,同样的特征也表现在亚洲中部( $-484$  mm)到亚洲北部( $-109$  mm);经度地带性表现在从高加索和中东( $-160$  mm)到亚洲中部( $-484$  mm)到阿拉斯加( $-607$  mm)以及北美西部( $-857$  mm),多年平均物质平衡在增大,加拿大北极北部( $-253$  mm)到斯瓦尔巴岛和扬马延岛( $-410$  mm)同样也在增大。

冰川物质平衡反应冰川收支情况,由发生在冰川表面的物质/能量平衡过程决定。<sup>[27]</sup>物质平衡随时间变化曲线的倾向率是物质平衡下降趋势快慢的反映,不难看出,全球各个冰川区物质平衡曲线倾向率均呈负值,介于 $-40.3 \sim -5.3$ ,平均值为 $-22.1$ ,表明各个区域冰川物质平衡表现出不同程度的负增长趋势,区域差异性显著。其中,冰川消融变化较快是欧洲中部、高加索和中东地区、阿拉斯加地区,较慢是亚洲中部、斯瓦尔巴群岛和扬马延岛和北美西部地区,冰川消融变化最快的是欧洲中部地区,最慢的是亚洲中部。

对比年均物质平衡与倾向率发现,欧洲中部、阿拉斯加与南安第斯山地区的物质平衡和倾向率值均较低,表明物质亏损量大且亏损速度快;高加索与中东和斯堪的纳维亚地区的物质平衡值较低但倾

向率却较高,表明物质亏损量大,但是亏损的速率低;亚洲北部与加拿大北极北部地区的物质平衡与倾向率均偏低,表明物质亏损幅度和亏损速度均较小;北美西部、亚洲中部与斯瓦尔巴群岛与扬马延岛的物质平衡较高但倾向率却较低,表明物质损耗大,但变化速率相对较低。

### 3.3 全球参照冰川物质平衡特征

#### 3.3.1 物质平衡年际变化特征

冰川物质平衡作为联结冰川波动与气候变化的桥梁和纽带,其净平衡的大小直接影响着冰川的进退,也直接反映着气候变化的强烈程度<sup>[22]</sup>。将40条参照冰川1984年以来的物质平衡值进行算数平均计算,得到全球参照冰川物质平衡年际和累积变化平均曲线(图4)。研究表明,1984-2016年全球参照冰川年均物质平衡均为负值,且整体呈下降趋势,平均值为 $-563$  mm。其中1983年物质平衡值最大,为 $-26$  mm;2003年物质平衡出现最小值,为 $-1246$  mm。物质平衡在1997年之前的波动较小,1997-2003年期间的波动较大,之后波动再次减小,表明1997-2003年是一个波动期,之后冰川整体开始加速消融。

1984-2016年全球参照冰川累积物质平衡值为 $-18590$  mm,其变化大体上可以分为1984-2000年和2000-2016年两个阶段。这两个阶段的平均物质平衡值分别为 $-372$  mm和 $-743$  mm。同期,其线性变化趋势曲线的斜率由 $-379$ 降至 $-793$ ,由于曲线斜率减小表明冰川处于加速消融状态,因此推断,全球冰川在2000年之后出现了加

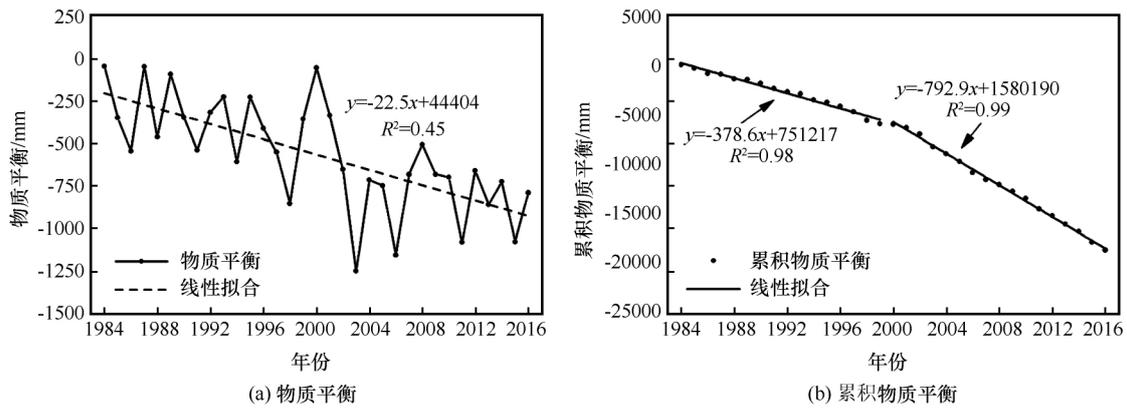


图 4 全球冰川物质平衡与累积物质平衡变化  
Fig. 4 Mass balance and cumulative mass balance variability of global glaciers

速消融的变化趋势。

### 3.3.2 物质平衡年代际变化特征

为了研究全球参照冰川物质平衡阶段性变化,以 10 年为间隔,进行年代际计算(图 5),结果表明:全球参照冰川物质平衡的年代际平均值差异很大,呈阶梯状下降,冰川消融加速趋势显著,每十年,物质平衡值下降 200 mm,尤其是 1990 - 2010 年的下降最为显著。2010 - 2016 年物质平衡均值为四个年代际中的最低值,达到 -839 mm,较之 1980 - 1990 年,降低了约 4 倍。

全球参照冰川物质平衡的年代际变化表明,1980 - 2000 年全球参照冰川物质均处在亏损状态,年代际物质平衡变化较小,冰川消融速率也较小,2000 年以后冰川消融量不断增大,消融速率明显上升。

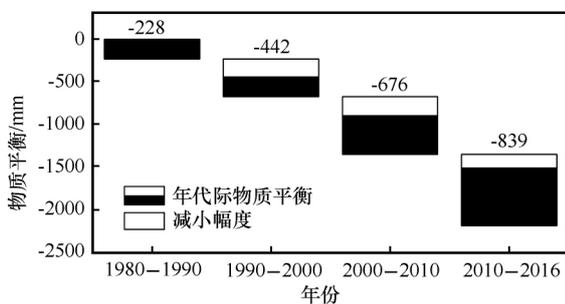


图 5 全球参照冰川物质平衡年代际变化  
Fig. 5 Decadal variation of mass balance of global referenced glaciers

## 4 讨论

水、热及其组合是影响冰川发育的主要气候因子。气温决定冰川消融,降水决定冰川积累,二者的组合共同决定着冰川的性质、发育和演化<sup>[36]</sup>。

下面对各个区域冰川物质亏损机理加以讨论:

高加索地区 20 世纪 70 年代以来,尤其是 1993 年后夏季消融增加,冬季降水量增加幅度不大导致对冰川积累较少;1985 - 2000 年冰川表面岩屑覆盖度增加,裸冰面积减少 10%,冰川反照率下降,物质亏损<sup>[37-38]</sup>。21 世纪初期,冰川积累期降水显著增多,气温低于 90 年代均值,冰川在 2000 - 2005 年出现正物质平衡。2005 年后,降水增幅降低,气温持续上升,北大西洋涛动与该区域冰川消融显著相关,黑海暖平流及强暖雨加剧了冰川消融<sup>[39]</sup>。

南安第斯地区冰川常年受西风环流控制,降水量变化成为冰川物质平衡的主控因素。20 世纪以来,气候变暖趋势加剧,降水减少,冰川物质损失较多。1997 - 2008 年间累积物质平衡波动较小,归因于西风漂流势力减弱,加之以小规模冰川退缩为主,冰川物质损失绝对量较小<sup>[40-41]</sup>。2009 年之后气温变暖,干旱频繁,冬季降水显著减少,冰川退缩严重<sup>[42]</sup>。

20 世纪 80 年代西风带持续增强与夏季海流变冷的共同作用使斯堪的纳维亚半岛冰川出现前进,消融减缓<sup>[43]</sup>,1989 - 1995 年冰川进入一个短暂的物质盈余期,而在此之间大陆性冰川普遍处于退缩状态,海洋性冰川存在阶段性的前进与退缩,进入 21 世纪,冰川均处于物质亏损状态<sup>[44-45]</sup>。1995 - 2009 年气温升高是物质平衡亏损的主控因素,降水不足以抵消气温升高导致的冰川消融,北大西洋涛动与北极涛动是影响冰川物质平衡的重要环流因子<sup>[46]</sup>。

欧洲中部地区冰川自 19 世纪 40 年代以来的加速消融归因于夏季太阳辐射的增强,同时辐射对气温与冰川消融关系有显著影响<sup>[47]</sup>,消融期延长与

气温升高,冰川物质持续亏损,10月至次年5月的降水与6-9月的气温影响冰川年内物质平衡过程<sup>[48]</sup>。撒哈拉沙漠灰尘与黑炭使该区域冰川消融增加了15%~19%,相应平均物质平衡减少280~490 mm<sup>[49]</sup>。

20世纪70年代中期以来,受降水增加与气温上升的双重影响,阿拉斯加地区冰川出现物质积累。20世纪90年代以来气温持续升高,上升速度是全球平均水平的两倍,气温成为影响冰川物质收支的主控因素<sup>[50-51]</sup>,加之阿留申低压势力和阿拉斯加暖流均增强,夏季增温明显,冬春季降水量显著减小,冰川物质亏损<sup>[52]</sup>。

亚洲北部受西伯利亚气团和北冰洋气团的控制,属于亚寒带大陆性气候,终年严寒,以固态降水为主。近年来夏季气温上升显著,降水也略微增加,但降水量的增加不足以抵消夏季气温上升导致的冰川消融,冰川物质平衡总体处于下降趋势,加之受区域大气环流过程影响,春、冬季降水增加显著,冬平衡增大,物质平衡总体波动较小<sup>[53-54]</sup>。

加拿大北极地区自1960年以来的40年间冬季降雪变化不大,2004年之前物质平衡波动极小,累积物质平衡趋势下降缓慢<sup>[55-56]</sup>。2005年之后冰川物质平衡变化受气温上升、风吹雪现象影响,物质平衡波动较大,物质亏损出现加剧现象<sup>[57]</sup>,1987年以来受环北极涡旋位置偏东与强度减弱的影响,气温上升,物质平衡变化趋向负值,夏季气温波动是影响冰川物质平衡年际波动的主要因子<sup>[58]</sup>。

1977年以来冬季气温上升使降雨比重增大,夏季气温上升使消融量加剧,二者共同作用使北美西部地区冰川物质亏损<sup>[59]</sup>;冰川物质平衡与太平洋年代际震荡显著相关,1977年以来阿拉斯加暖湿气流加强,冬季出现更多的温暖气旋,夏季反气旋和太平洋高压脊持久,累积物质平衡倾向率较高,冰川消融加剧<sup>[28 60-61]</sup>。

受大陆性气候影响,亚洲中部地区冰川属夏季积累型冰川,19世纪70年代以来冰川消融主要受夏季气温上升影响<sup>[62]</sup>。1997年以来消融期正积温增大,冰温升高,表面反照率下降,冰川加速消融<sup>[63]</sup>。此外,西风带、西伯利亚反气旋以及南方气旋对冰川物质平衡产生影响<sup>[64-65]</sup>。

斯瓦尔巴群岛和扬马延岛地区是20世纪全球升温幅度较大区域之一。近年来冬季气温上升明显、冰川积雪时空变化主要受夏季气温消融与极地东风再分配的影响,冬季降水对物质平衡变化影响

较小<sup>[66]</sup>。北大西洋暖流势力持续增强,增温趋势显著,冰川物质亏损<sup>[67]</sup>。

## 5 结论

由于物质平衡的变化不仅在一定区域内具有相似性,而且区域之间也存在一定的联系。本文将全球40条参照冰川划分为10个区域,对比分析了各个区域物质平衡及累积物质平衡变化的若干特征,得出以下结论:

(1) 1984年以来,40条冰川中的36条在观测时段内处于物质平衡为负的状态,冰川普遍退缩,尤其在中纬度较强烈。从2000年开始,冰川物质平衡与之前相比较,呈现显著加速亏损趋势。

(2) 由于区域气候变化的差异性以及冰川对气候变化的响应程度不同,冰川物质平衡变化表现出显著的区域特征,各冰川区平均物质平衡介于-953~-53 mm,累积物质平衡介于-32 200~-2 530 mm,物质平衡值由北到南出逐渐增大,空间上呈现出典型的纬度地带性和经度地带性。

(3) 1984-2016年全球参照冰川年均物质平衡均为负值,且整体呈下降趋势,平均值为-563 mm,累积物质平衡-18 590 mm;年代际物质平衡值呈阶梯下降,每10年,物质平衡值下降200 mm。

(4) 气温仍然是控制冰川物质平衡变化的主要因子,物质平衡的时间变化过程通常与各地区不同时间尺度的气候波动和变化显著相关。此外,地形对冰川物质平衡也有显著影响。

由于参照冰川分布不均,且主要集中在北半球的欧洲中部和斯堪的纳维亚地区,南半球分布较少,因此,本文关于南美安第斯地区以及高加索和中东地区物质平衡变化的结论是一般性的,需要更进一步深入细致的研究。

## 参考文献(References):

- [1] He Haidi, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Variations characteristics of glacier mass balance in Svalbard[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 701-709. [何海迪,李忠勤,王璞玉,等.近50年来北极斯瓦尔巴岛地区物质平衡变化特征[J].冰川冻土,2017,39(4):701-709.]
- [2] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric change and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 869-879. [秦大河,周波涛,效存德.冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J].气象学报,2014,72(5):869-879.]
- [3] Oerlemans J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers[M]. Science, 1994, 26(5156): 243-245.
- [4] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Comparison of glaciological and geodetic mass balance at Ürümqi Glacier No. 1,

- Tian Shan, Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 114(469): 14 - 22.
- [5] Huss M, Farinotti D. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(117): 1 - 10.
- [6] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(4): 1406 - 1411.
- [7] Kaser G. Glacier-climate interaction at low latitude [J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(157): 195 - 204.
- [8] Barry R G. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(3): 285 - 306.
- [9] Solomon S, Qin Dahe, Manning M, et al. The physical science basis [M]. Canada: Intergovernmental Panel on Climate Change 2007, 2007: 235 - 337.
- [10] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Analysis of the relation between glacier volume change and area change in the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 9 - 15. [王璞玉, 李忠勤, 李慧琳, 等. 天山冰储量变化和面积变化关系分析研究 [J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 9 - 15.]
- [11] Zemp M, Hoelzle M, Haeblerli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network [J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(50): 101 - 111.
- [12] Arendt A A, Echelmeyer K A, Harrison W D, et al. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level [J]. *Science*, 2002, 297(5580): 382 - 386.
- [13] Ye Wanhua, Wang Feiteng, Li Zhongqin, et al. Temporal and spatial distributions of the equilibrium line altitudes of the monitoring glaciers in High Asian [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1459 - 1469. [叶万花, 王飞腾, 李忠勤, 等. 高亚洲定位监测冰川平衡线高度时空分布特征研究 [J]. *冰川冻土*, 2016, 38(6): 1459 - 1469.]
- [14] Thibert E, Eckert N, Vincent C. Climatic drivers of seasonal glacier mass balances: an analysis of 6 decades at Glacier de Sarennes (French Alps) [J]. *Cryosphere*, 2013, 7(1): 47 - 66.
- [15] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin, et al. Characteristics of a partially debris-covered glacier and its response to atmospheric warming in Mt. Tomor, Tien Shan, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 159(1): 11 - 24.
- [16] Xie Zichu, Liu Chaohai. Introduction to glaciology [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [17] Xu Chunhai, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Estimation of mass balance of Shiyi Glacier in the Heihe River basin, Qilian Mountains during 2000 - 2012 Based on LiDAR and SRTM [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 88 - 100. [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 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 88 - 100.]
- [18] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ningliang. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1214 - 1221. [王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1214 - 1221.]
- [19] 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.]
- [20] Zhang Jian, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Recent variation of mass balance of the Xiao Dongkemadi Glacier in the Tanggula Range and its influencing factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 263 - 271. [张健, 何晓波, 叶柏生, 等. 近期小冬克玛底冰川物质平衡变化及其影响因素分析 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 263 - 271.]
- [21] Pu Hongzheng, Han Tianding, Li Xiangying, et al. Characteristics of the altitude-dependent mass balance and their impact runoff of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1251 - 1259. [蒲红铮, 韩添丁, 李向应, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡高度变化特征及其对径流的影响 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36(5): 1251 - 1259.]
- [22] Xie Zichu, Ding Liangfu. Glacier mass balance in High Asia and its respond to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 4 - 11. [谢自楚, 丁良福. 高亚洲冰川物质平衡及其对气候变化的响应研究 [J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊 1): 4 - 11.]
- [23] Xie Zichu, Zhou Zaigen, Li Qiaoyuan, et al. Progress and prospects of mass balance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(10): 1065 - 1072. [谢自楚, 周宰根, 李巧媛, 等. 高亚洲冰川系统物质平衡特征及其对全球变化响应研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(10): 1065 - 1072.]
- [24] Kang Ersi. Characteristics of energy balance and computation on the mass balance change of the High-Asia cryosphere [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 12 - 22. [康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究 [J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊 1): 12 - 22.]
- [25] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Zhou Wenjuan, et al. Variations of glacier mass balance and their climatic implication [J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11(6): 590 - 596. [丁永建, 刘时银, 周文娟, 等. 北半球冰川物质平衡变化的若干特征及其气候意义 [J]. *地球科学进展*, 1996, 11(6): 590 - 596.]
- [26] Cao Meisheng. Abrupt changes in glacier mass balance over northern hemisphere [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(3): 249 - 252. [曹梅盛. 北半球冰川物质平衡的突变 [J]. *冰川冻土*, 1999, 21(3): 249 - 252.]
- [27] Li Zhongqin. The recent studies and applications of Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川近期研究与应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [28] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2010, 115(F1): 87 - 105.
- [29] Zemp M, Frey H, Gärtnerroer I, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st Century [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 745 - 762.
- [30] Pfeffer W T, Arendt A A, Bliss A, et al. The Randolph Glacier inventory: a globally complete inventory of glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537 - 552.
- [31] Qin Dahe, Plattner G K, Tignor M, et al. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- [32] Tianshan Glaciological Station. Annual report of Tianshan Glaciological Station: volume 1 ~ 18 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, 2008. [天山冰川站. 天山冰川站年报: 1 ~ 18 卷. 兰州: 中国科学院天山站, 2008.]
- [33] World Glacier Monitoring Service (WGMS). Fluctuations of glaciers Vol. 1 ~ 10 [R]. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2013.
- [34] World Glacier Monitoring Service (WGMS). Glacier mass balance bulletin No. 1 ~ 11 [R]. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2013.
- [35] Su Bo, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. A comparative study on mass balance between the continental glaciers and the temperate glaciers: taking the typical glaciers in the Tianshan Mountains and the Alps as examples [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1131 - 1140. [苏勃, 李忠勤, 张明军, 等. 大陆型冰川与海洋型冰川物质平衡对比研究——以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例 [J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1131 - 1140.]
- [36] Zhang Guofei. Study on mass balance and its relationship with climate change of Ürümqi Glacier No. 1 in Tianshan Mountains, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. [张国飞. 中国天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡及其与气候变化关系研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.]
- [37] Stokes C R, Gurney S D, Shahgedanova M, et al. Late-20th-century changes in glacier extent in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia [J]. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(176): 99 - 109.
- [38] Stokes C R, Popovnin V, Aleynikov A, et al. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia, and associated increase in supraglacial debris cover and supra-/proglacial lake development [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 195 - 203.
- [39] Shahgedanova M, Nosenko G, Khromova T, et al. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th Century: an assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D16): 751 - 763.
- [40] Bown F, Rivera A, Acuña C. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 48(6): 43 - 48.
- [41] Francou B, Vuille M, Wagnon P, et al. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the Twentieth Century: Chacaltaya, Bolivia, 16 S [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D5): 1 - 12.
- [42] Salzmann N, Huggel C, Rohrer M, et al. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes [J]. *Cryosphere*, 2013, 7(1): 103 - 118.
- [43] Pohjola V A, Rogers J C. Atmospheric circulation and variations in Scandinavian glacier mass balance [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47(1): 29 - 36.
- [44] Paul F, Andreassen L M. A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: challenges and change assessment [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(192): 607 - 618.
- [45] Andreassen L M, Kjølmoen B, Rasmussen A, et al. Langfjordkelen, a rapidly shrinking glacier in northern Norway [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(209): 581 - 593.
- [46] Nesje A, Dahl S O, Thun T, et al. The 'Little Ice Age' glacial expansion in western Scandinavia: summer temperature or winter precipitation? [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30(7/8): 789 - 801.
- [47] Huss M, Funk M, Ohmura A. Strong Alpine glacier melt in the 1940s due to enhanced solar radiation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(23): 845 - 878.
- [48] Carturan L, Baroni C, Brunetti M, et al. Analysis of the mass balance time series of glaciers in the Italian Alps [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(2): 695 - 712.
- [49] Gabbi J, Huss M, Bauder A, et al. The impact of Saharan dust and black carbon on albedo and long-term mass balance of an Alpine glacier [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(4): 1385 - 1400.
- [50] Arendt A A. Assessing the status of Alaska's glaciers [J]. *Science*, 2011, 332(6033): 1044 - 1045.
- [51] Cox L H, March R S. Comparison of geodetic and glaciological mass-balance techniques, Gulkana Glacier, Alaska, USA [J]. *Journal of Glaciology*, 2004, 50(170): 363 - 370.
- [52] Pelto M S. Glacier annual balance measurement, forecasting and climate correlations, North Cascades, Washington 1984 - 2006 [J]. *The Cryosphere*, 2008, 2(1): 13 - 21.
- [53] Surazakov A B, Aizen V B, Aizen E M, et al. Glacier changes in the Siberian Altai Mountains, Ob River basin, (1952 - 2006) estimated with high resolution imagery [J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4): 1 - 7.
- [54] Narozhniy Y, Zemtsov V. Current state of the Altai glaciers (Russia) and trends over the period of instrumental observations 1952 - 2008 [J]. *Ambio*, 2011, 40(6): 575 - 588.
- [55] Shepherd A, Wingham D. Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets [J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1529 - 1532.
- [56] Shepherd A, Zhijun D U, Benham T J, et al. Mass balance of Devon Ice Cap, Canadian Arctic [J]. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 249 - 254.
- [57] Gardner A S, Sharp M. Influence of the Arctic circumpolar vortex on the mass balance of Canadian high Arctic glaciers [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(18): 4586 - 4598.
- [58] Ruman C J, Sushama L, Winger K. Retreating Canadian glaciers and their implications for regional climate and hydrology in future climate [C] // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2017, 19: 1663.
- [59] Pelto M S. Impact of climate change on north cascade Alpine glaciers, and Alpine runoff [J]. *Northwest Science*, 2016, 82(1): 65 - 75.
- [60] Criscitiello A S, Kelly M A, Tremblay B. The response of Taku and Lemon Creek glaciers to climate [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2010, 42(1): 34 - 44.
- [61] Moore R D, Demuth M N. Mass balance and streamflow variability at Place Glacier, Canada, in relation to recent climate fluctuations [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(18): 3473 - 3486.
- [62] Takeuchi N, Li Z. Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2008, 40(4): 744 - 750.
- [63] Li Zhongqin, Li Huilin, Chen Yaning. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: a case study of Ürümqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(4): 423 - 430.
- [64] Kononova N K, Pimankina N V, Yeriskovskaya L A, et al. Effects of atmospheric circulation on summertime precipitation variability and glacier mass balance over the Tuyuksu Glacier in Tianshan Mountains, Kazakhstan [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(5): 687 - 695.

- [65] Dyurgerov M B , Mikhalenko V N , Kunakhovitch M G , et al. Simultaneous monitoring of mass balance fluctuations of and runoff from Tien Shan glaciers[J]. *Annals of Glaciology* ,1991 ,16 ( 8) : 134 – 134.
- [66] Memild S H ,Hanna E ,Yde J C , et al. Atmospheric and oceanic influence on mass balance of northern North Atlantic region land-terminating glaciers [J]. *Geografiska Annaler* , 2015 , 96( 4) : 561 – 577.
- [67] Hanssen-Bauer I , Achberger C , Benestad R E , et al. Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia: a review [J]. *Climate Research* ,2005 ,29( 3) : 255 – 268.

## Temporal and spatial variation characteristics of mass balance of global reference glaciers from 1984 through 2016

LIANG Pengbin<sup>1</sup> , LI Zhongqin<sup>1 2</sup> , ZHANG Hui<sup>2</sup> , WANG Feiteng<sup>2</sup> , MU Jianxin<sup>1</sup> , HE Haidi<sup>1</sup>

( 1. College of Geography and Environment Sciences ,Northwest Normal University ,Lanzhou 730070 ,China ; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station ,Northwest Institute of Eco-Environment and Resources , Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000 ,China)

**Abstract:** Based on the glacier mass balance data released by the World Glacier Monitoring Service , variation of 40 reference glacier mass balances all over the world were analyzed. It was found that since 1984 ,36 of the 40 reference glaciers , have retreated , especially in the middle latitude regions , global glaciers have shown a trend of accelerated ablation after 2000 , with a multi-year average of mass balance of  $-563$  mm and a cumulative mass balance of  $-18\,590$  mm. The decadal mean mass balance of global reference glaciers have been descending step by step , and the mass balance declining by about 200 mm every ten years , especially from 1990 to 2010. Due to the different regional climate change and the different response of glaciers to climate , the glacier mass balance has shown significant regional characteristics and the mass balance has gradually increased from north to south , showing typical latitude and longitude features. Temperature is the main factor controlling the glacier mass balance change , the variation process of mass balance has been usually associated with climate fluctuation in each regions.

**Key words:** glacier; mass balance; cumulative mass balance; temporal and spatial variation; control mechanism

( 本文编辑: 周成林)