

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0025

ZHANG Guofei, LI Xiangfei, LI Zhongqin. Analysis of the changes of glacier mass balances in different parts of the world from 1980 to 2011[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 214-222. [张国飞, 李祥飞, 李忠勤. 1980-2011年全球不同地区冰川物质平衡变化分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 214-222.]

1980-2011年全球不同地区冰川物质平衡变化分析

张国飞¹, 李祥飞¹, 李忠勤²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210023; 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/天山冰川观测试验站, 甘肃兰州 730000)

摘要: 在气候变暖背景下, 全球大多数冰川加速退缩, 冰川物质亏损严重, 呈负平衡增长趋势。利用世界冰川监测服务处(WGMS)最新刊布的物质平衡资料, 对全球重点监测冰川的物质平衡现状及结果进行扼要的总结和比较, 分析了1980-2011年全球不同地区冰川物质平衡的区域特征、变化过程及总体变化趋势, 评估了冰川物质平衡对海平面变化的贡献。结果表明: 1980-2011年, 全球冰川物质亏损严重, 加速退缩, 平均减薄了14 m, 其中阿尔卑斯山脉及太平洋海岸山脉的退缩尤为明显, 平均减薄了30 m左右; 各地区冰川的平均物质平衡变化趋势与全球平均趋势基本保持一致, 具有典型的纬度地带性分布特征; 物质平衡变化过程分为正平衡波动型、负平衡波动型及负平衡持续增长型三类, 但总体上处于负平衡持续增长趋势; 在全球继续增温的未来, 冰川将会继续退缩, 物质亏损强度不断加大, 负平衡趋势不断增强。冰川物质平衡对海平面上升的贡献呈增大趋势, 且与全球气温上升基本上是同步的。

关键词: 全球冰川; 物质平衡; 海平面变化

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0214-09

0 引言

在气候变暖背景下, 全球大多数冰川的物质收支状态以亏损为主^[1-2]。冰川物质平衡是联系冰川与气候环境之间的关键链条, 其大小直接影响着冰川的进退, 反映了气候变化的强烈程度^[3-4]。现代冰川发育地区气温和降水的年际或周期变化直接影响着冰川物质平衡增减和平衡线高度升降。如果气候波动具有某一变化趋势, 则冰川将会通过调整自身状况, 改变冰川规模以适应气候环境变化^[5-7]。因此, 冰川物质平衡对气候变化具有非常敏感的反应。

冰川物质平衡的重要意义, 使它一直是冰川学中传统的观测及研究内容^[8-9]。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、连续的物质平衡观测研究, 其中北欧及阿尔卑

斯山脉周边国家最早, 接着是北美和苏联, 中国从20世纪50年代末开始将物质平衡作为重要的冰川研究内容。在国际上, 国际水文科学协会(IAHS)、联合国环境规划署(UNEP)及教科文组织(UNESCO)在瑞士的苏黎士设立了世界冰川监测服务处(World Glacier Monitoring Service, WGMS), 系统收集、整理、出版全球冰川物质平衡和冰川波动变化数据。从1967年起, 每5年出版一期冰川波动资料汇编(Fluctuations of Glaciers), 从1991年起, 又每2年出版一集冰川物质平衡通报(Glacier Mass Balance Bulletin, GMBB), 并选定10余条长期系统观测的冰川作为重点参照冰川进行详细报道。截至目前, 冰川物质平衡通报所报道的物质平衡监测资料已涉及到全球150条冰川(图1), 其中被WGMS重点监测并详细报道且时间序列超过15年的冰川有24条^[10-13]。

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801); 国家自然科学基金项目(41301069; 41641003)资助

作者简介: 张国飞(1989-), 男, 甘肃临泽人, 2014年在西北师范大学获硕士学位, 现为南京师范大学博士研究生, 从事陆面过程集成建模及其运用研究。E-mail: zhangguofei_lz@126.com.

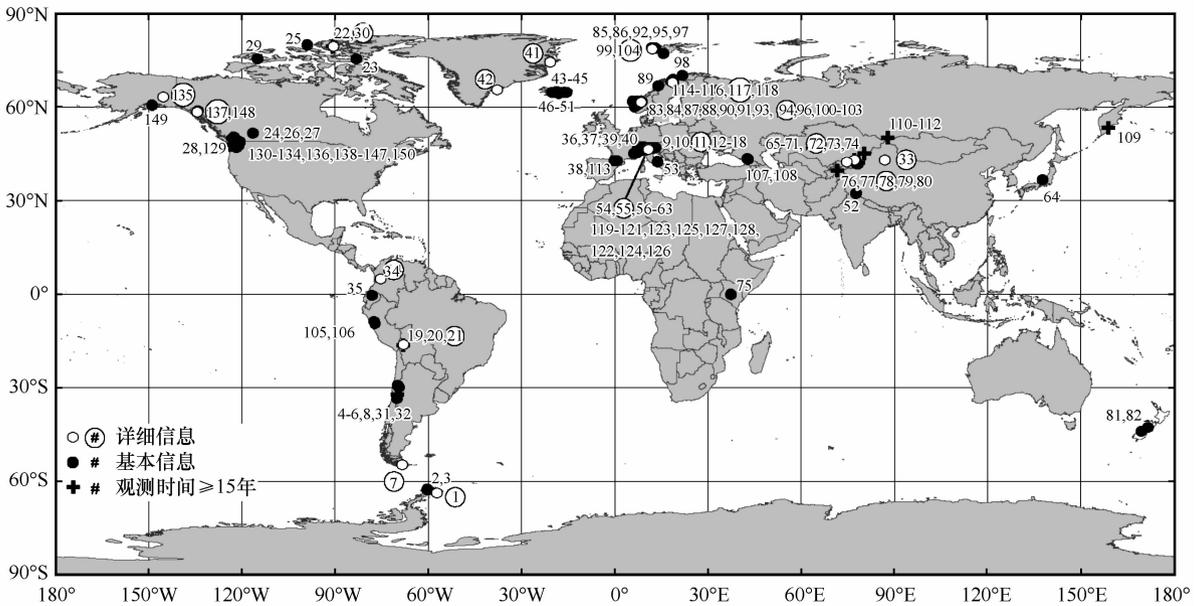


图1 全球150条冰川物质平衡监测点的分布

Fig. 1 Location of the 150 glaciers in different parts of the world, of which mass balance have been monitored

Jacob 等^[14]近期利用 GRACE 重力卫星数据研究了全球冰川对海平面变化的贡献,发现加拿大北极地区的冰川呈现出大的物质亏损,阿拉斯加地区的冰川物质亏损也比较显著。Dyurgerov 等^[15-17]研究表明,全球各区域冰川的物质平衡从 20 世纪 80 年代末或 90 年代初开始出现了显著负平衡和加速趋势,可归因于较高的年平均气温。Fischer^[18]对 Hintereisferner 冰川近 50 年的物质平衡观测资料进行了研究,指出高海拔地区冰川的物质平衡主要受冬季降水控制,低海拔地区的负平衡是夏季气温升高造成的。Kohler 等^[19]对斯瓦尔巴的冰川研究表明,近期的物质亏损是先前研究的 4 倍,呈现明显的加速趋势。上述研究均没有对各个区域冰川的物质平衡特征、变化过程进行相关的对比分析和总结。鉴于此,本文根据 WGMS 最新刊布的资料,利用全球不同地区冰川(不含南极冰盖和格陵兰冰盖)1980 - 2011 年物质平衡资料,对全球冰川物质平衡的现状与结果进行扼要的总结和比较,分析全球不同地区冰川物质平衡的区域特征、变化过程及总体变化趋势,评估冰川物质平衡对海平面变化的贡献。

1 数据来源

冰川物质平衡的现场观测是全球冰川监测的一个重要组成,也是全球气候相关观测系统的一部分。物质平衡最基本的观测方法是花杆/雪坑法,

后来研究者相继探索出大地测量法、水文学方法、重复测量法以及 GRACE 重力卫星测量法。随着研究的不断深入,物质平衡数据已被广泛地运用到各个领域。例如,利用物质平衡估算冰川对径流的贡献及海平面的变化、数值模拟冰川与气候间的相互关系等。为了进一步验证冰川的演变、阐明物理机制及冰川变化的相关关系, WGMS 作为世界数据系统的一个永久性机构,定期收集和出版标准的冰川数据。截至目前, WGMS 出版的物质平衡数据已有 150 条冰川,涉及 25 个国家和地区。本研究所用的物质平衡数据来源于 WGMS 出版的物质平衡通报第 12 期(Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010 - 2011))^[10]。

2 全球冰川物质平衡状况

目前纳入 WGMS 重点监测的冰川有包括天山乌鲁木齐河源 1 号冰川在内的 40 多条冰川。其中,冰川物质平衡研究已广泛涉及到北美洲阿拉斯加山脉、加拿大北极地区、太平洋海岸山脉,欧洲斯瓦尔巴、斯堪的纳维亚、阿尔卑斯山脉,高亚洲天山山脉、高加索山脉、阿尔泰山脉以及南美洲安第斯山脉^[10-13],代表了除南极冰盖和格陵兰冰盖外的主要冰川作用区。就物质平衡数据质量而言,北半球冰川的物质平衡数据质量和可信度较高,特别是欧洲斯瓦尔巴、加拿大北极地区、阿拉斯加山脉。全球大约 70% 的冰川物质平衡观测在斯堪的纳维

亚、阿尔卑斯山脉、阿拉斯加山脉开展, 剩余的 30% 分布在其他山地和极地地区。许多地区的冰川物质平衡资料几乎完全缺乏, 例如喀喇昆仑山、青藏高原、喜马拉雅山北部、南极冰盖和格陵兰冰盖、安第斯山脉和其他几个地区的冰帽^[15-16]。

1980-2011 年全球 10 个地区冰川的平均物质平衡、累积物质平衡结果及相应的重点参照冰川信息汇总于表 1。分析表明, 仅有斯堪的纳维亚的物质平衡处于微弱的负平衡状态, 平均物质平衡和累积物质平衡分别为 -57 mm 和 -1 815 mm, 其他 9 个地区的物质平衡均为强负平衡趋势, 表明全球大多数冰川的物质平衡亏损严重。其中安第斯山脉、

高加索山脉、阿尔泰山脉及加拿大北极地区的物质平衡低于全球平均趋势, 物质平衡亏损强度不是很大, 在 1980-2011 年间冰川平均减薄了 3.6 ~ 11 m。但是天山山脉、阿拉斯加山脉、斯瓦尔巴、阿尔卑斯山脉及太平洋海岸山脉冰川的物质亏损剧烈, 尤其是阿尔卑斯山脉及太平洋海岸山脉冰川的退缩强度很大, 1980-2011 年冰川平均减薄 30 m 左右。1980-2011 年全球冰川的平均物质平衡和累积物质平衡分别为 -397 mm 和 -12 688 mm, 即全球冰川平均减薄了 14 m。上述事实说明, 1980-2011 年全球冰川加速退缩, 物质亏损严重, 其中阿尔卑斯山脉及太平洋海岸山脉的物质亏损尤为明显。

表 1 全球 10 个地区 1980-2011 年的平均物质平衡与累积物质平衡

Table 1 Mean mass balance (MMB) and cumulative mass balance (CMB) in the ten regions of the world from 1980 to 2011

地区	MMB/mm	CMB/mm	重点参照冰川
阿拉斯加山脉	-476	-15 240	Gulkana, Wolverine
太平洋海岸山脉	-844	-27 008	Place, South Cascade, Helm, Lemon Creek, Peyto
安第斯山脉	-309	-9 880	Echaurren Norte
加拿大北极地区	-210	-6 713	Devon Ice Cap NW, Meighen Ice Cap, White
斯瓦尔巴	-430	-13 745	Austre Brøggerbreen, Midtre Lovénbreen
斯堪的纳维亚	-57	-1 815	Engabreen, Ålftobreen, Nigardsbreen, Gråsubreen, Storbreen, Hellstugubreen, Rembesdalskkåka, Storglaciären
阿尔卑斯山脉	-862	-27 585	Saint Sorlin, Sarennes, Argentière, Silvretta, Gries, Vernagtferner, Stubacher Sonnblickkees, Kesselwandferner, Hintereisferner, Caresèr
高加索山脉	-154	-4 930	Djankuat
阿尔泰山脉	-110	-3 289	Vodopadny (No. 125), Maliy Aktru, Levyi Aktru
天山山脉	-464	-14 858	Ts. Tuyuksuyskiy, Ürümqi Glacier No. 1
平均	-397	-12 688	

3 全球冰川物质平衡变化

3.1 物质平衡的区域特征

冰川物质平衡在相同区域具有相似性, 不同区域具有较大的差异, 可通过某一区域内代表性参照冰川的研究来揭示该区域物质平衡特征及变化规律, 而通过不同区域代表性冰川研究可以获得大尺度冰川物质平衡的变化特征^[1,9]。区域气候及其波动或变化程度差异以及冰川规模、地形和表面状况决定了冰川对气候波动及变化的敏感程度存在差别, 不同地区冰川物质平衡状况具有明显差异^[6,9]。图 2 展示了 1980-2011 年全球 10 个地区冰川(南极冰盖和格陵兰冰盖除外)物质平衡的年际变化, 从中可以看出, 分散于全球各个地区冰川的平均物质平衡变化趋势基本上与全球平均趋势保持一致,

但各地区的变化趋势不尽相同, 具有鲜明的区域特征。

阿拉斯加山脉[图 2(a)]冰川在海洋性气候条件下由冷季降水补给, 物质平衡年际变化幅度较大, 1988 年以前物质平衡变化呈正平衡增长趋势, 总趋势似乎显示出增加。2004 年物质亏损严重, 物质平衡达到历史最低值 -2 355 mm, 致使该区冰川的累积物质平衡超出了全球平均水平[图 2(k)], 之后冰川处于剧烈的负平衡状态。

太平洋海岸山脉[图 2(b)]冰川物质平衡一直处于负平衡状态, 平均物质平衡为 -844 mm, 是全球平均水平 -397 mm 的 2 倍左右。1998 年以前, 物质平衡呈现稳定的负平衡增长趋势, 且在 1998 年达到最低值 -2 166 mm, 之后物质平衡变化幅度变大, 物质亏损严重, 且累积物质平衡远远超出全

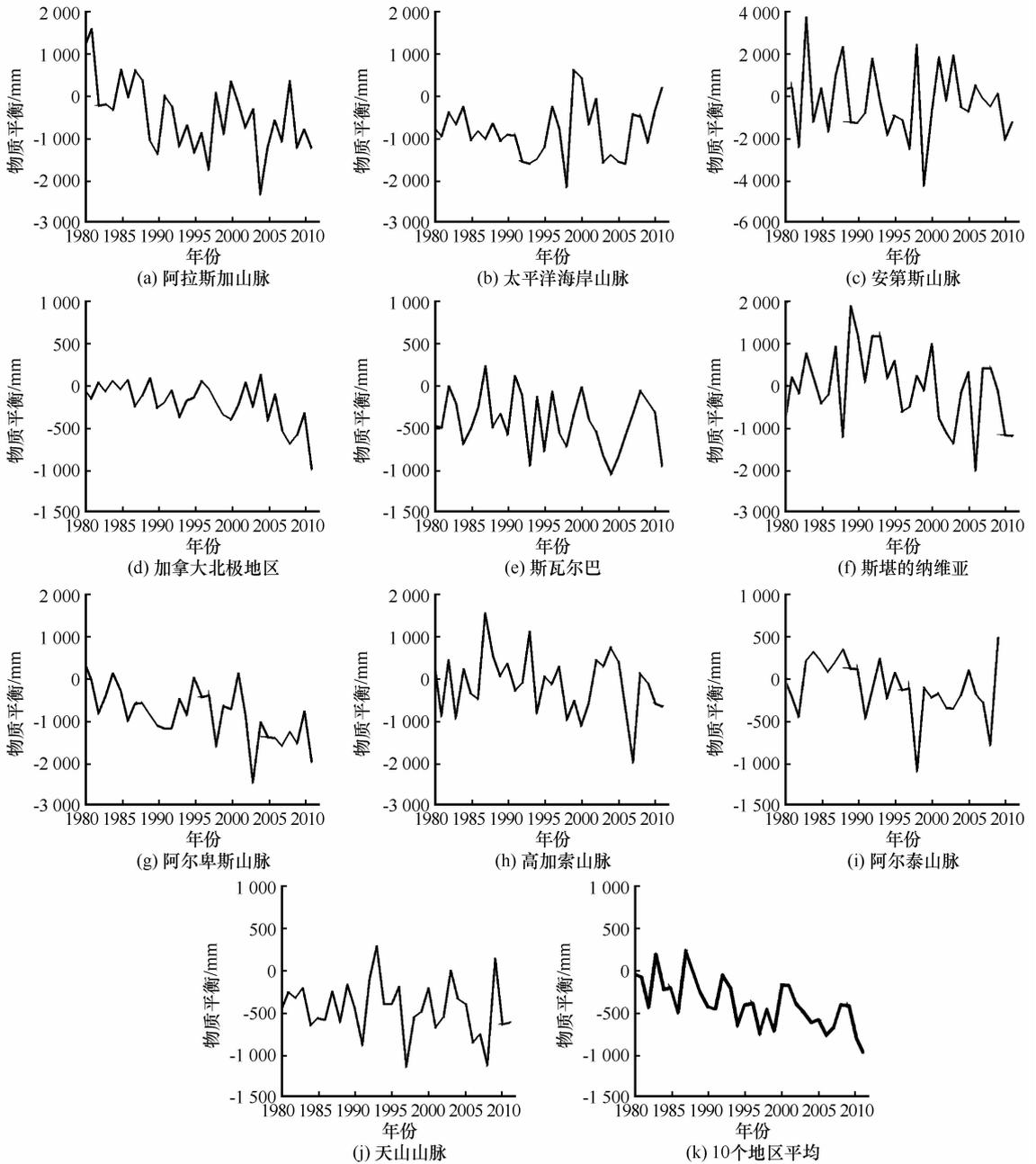


图2 全球10个地区冰川1980-2011年物质平衡变化

Fig. 2 Mass balance changes of the glaciers from 1980 to 2011: the Alaska Range (a), the Pacific Coast Ranges (b), the Andes (c), Canadian High Arctic (d), Svalbard (e), Scandinavia (f), the Alps (g), the Caucasus Mountains (h), the Altay Mountains (i), the Tien Shan (j) and the average mass balance of the above ten regions (k)

球平均趋势[图2(k)],表现出强烈的负平衡,物质平衡变化趋势基本上与天山山脉呈相反变化趋势,且变化幅度远大于天山山脉。

安第斯山脉[图2(c)]的Echaurren Norte冰川是该地区唯一具有较长观测数据的重点监测冰川,该冰川物质平衡的年度变化幅度比较大,最大幅度超过6 000 mm,表现出正-负-正的波浪式变化特征,物质平衡在1999年达到-4 280 mm,累积物

质平衡没有发生显著的变化。

加拿大北极地区[图2(d)]冰川的物质平衡变化幅度较小,物质平衡变化介于-992~121 mm,平均物质平衡为-210 mm,呈现出缓慢的负增长趋势,反映了北极岛屿冰川对气温变化具有较低的敏感性。

斯瓦尔巴[图2(e)]的大多数冰川属于亚极地区型冰川,物质平衡年度变化波动较大且呈长期稳定

的负平衡状态,该区物质平衡的变化趋势与全球平均趋势[图 2(k)]保持一致,累积物质平衡略低于全球平均趋势。

斯堪的纳维亚[图 2(f)]三面环海,冰川水汽补给丰富,物质平衡具有较高的年振幅和较大的年际变化,1980-1995 年该地区冰川显示出明显的正平衡,有少数冰川是负平衡,但 2000 年以后物质平衡开始出现显著的负平衡增长趋势,2006 年亏损尤为显著,物质平衡为 $-2\ 025\ \text{mm}$ 。

阿尔卑斯山脉[图 2(g)]冰川的物质平衡变化趋势在 1980-2011 年间的两端与全球平均趋势一致,中间部分变化幅度比较大;进入 20 世纪 80 年代以后,物质平衡呈现加速亏损,冰川负平衡值已超过天山山脉的冰川,且负平衡趋势远大于全球平均趋势[图 2(k)],尤其是 2003 年表现出强烈的负平衡,物质平衡为 $-2\ 510\ \text{mm}$ 。

高加索山脉[图 2(h)]Djankuat 冰川物质平衡年际变化幅度较大,1998 年以前为正平衡,之后开始出现负平衡,2007 年达到最低值 $-2\ 010\ \text{mm}$,但增长趋势小于全球平均趋势。

阿尔泰山脉[图 2(i)]冰川在 1980-1990 年物质平衡变化趋势与天山山脉相反,之后基本保持一致,物质平衡呈现缓慢的负增长趋势,2009 年该地区与天山山脉同时出现正平衡,物质平衡分别为 $480\ \text{mm}$ 和 $134\ \text{mm}$ 。

天山山脉[图 2(j)]冰川物质平衡从 1985 年以后开始进入了负平衡阶段,负平衡增长趋势与全球平均趋势具有良好的一致性,且变化趋势已超过全球平均趋势[图 2(k)],表明该区冰川处于强烈的退缩状态,物质亏损严重。

图 2(k)为全球 10 个地区冰川的平均物质平衡年际变化,可以看出 20 世纪 90 年代末以来,全球冰川呈现出显著的负平衡,物质亏损严重,其结果与该时期升高的平均气温相一致。

通过对全球 10 个地区冰川的物质平衡数据对比分析,发现不同地区的气候背景及其变化幅度和过程存在一定差异,导致各地区冰川物质平衡变化趋势不尽相同,使物质平衡变化具有典型的纬度地带性分布特征,但全球物质平衡变化趋势基本上是一致的,总体上处于负平衡状态,表现为物质亏损。20 世纪 80 年代以来,全球冰川呈持续负平衡增长趋势,总体处于退缩状态,且在 20 世纪 90 年代负平衡趋势明显增强,1980-2011 年全球冰川处于加速退缩状态,物质亏损强烈。

3.2 物质平衡变化过程

全球冰川 1980-1990 年的物质平衡变化过程可分为正平衡波动型、负平衡波动型及负平衡持续增长型三种^[1]。正平衡波动型的变化趋势指冰川物质平衡为正平衡,伴随着微弱的负平衡波动,斯堪的纳维亚就属于该类型[图 3(a)]。负平衡波动型与正平衡波动型相反,安第斯山脉、高加索山脉及阿尔泰山脉表现为负平衡趋势,中间也存在正平衡的波动或物质平衡表现为负-正-负的波动状态[图 3(b)]。负平衡持续增长型的变化趋势以持续的负平衡增长为主要特征,从图 3(c)可以看出,除阿拉斯加山脉从 20 世纪 90 年代初开始出现负平衡增长外,太平洋海岸山脉、加拿大北极地区、斯瓦尔巴、斯堪的纳维亚、阿尔卑斯山脉、天山山脉冰川的物质平衡都是从 20 世纪 80 年代初出现不同程度的负平衡增长,期间有较小幅度的正平衡短期波动。

图 3(d)是全球 10 个地区 1980-2011 年平均的累积物质平衡曲线。从全球角度来看,尽管个别地区冰川的物质平衡变化出现了微弱的正平衡,但随着全球气候逐渐变暖,全球大多数地区的冰川都处于负平衡增长状态,且这种负平衡增长趋势是不可阻挡的。由此表明,在气候不断变暖背景下全球冰川的物质平衡呈现出持续的负平衡增长趋势,物质亏损严重,处于剧烈的退缩状态。

3.3 物质平衡变化总体趋势

表 2 列出了全球 37 条冰川 1980-2009 年期间 3 个不同时段平均物质平衡状况^[10]。分析可知,全球冰川平均物质平衡的负平衡趋势在不断增强,从 $-223\ \text{mm}$ 减小到 $-668\ \text{mm}$ 。其中,2000-2009 年的平均物质平衡分别是 1980-1989 年和 1990-1999 年的 3 倍和 1.5 倍,表明物质亏损程度不断增强。从 3 个时段物质平衡的极值及波动范围可以看出,最大值不断减小,最小值越变越小,物质平衡呈负增长趋势。正平衡的百分比在持续减小,从 33% 减小到 20%,且 1990-1999 年和 2000-2009 年两个时段内无正平衡年,表明负平衡不断增强,物质亏损严重。此外,平均的积累区比率(AAR)在不断减小,即积累区面积缩小,消融区面积不断扩大,负平衡趋势增强。上述分析表明,从 20 世纪 90 年代初开始全球冰川均处于加速退缩状态,物质平衡呈现负平衡增长趋势。

图 4(a)是 1945-2011 年全球代表性冰川的物质平衡年际变化曲线^[10]。从中看出,20 世纪 70 年

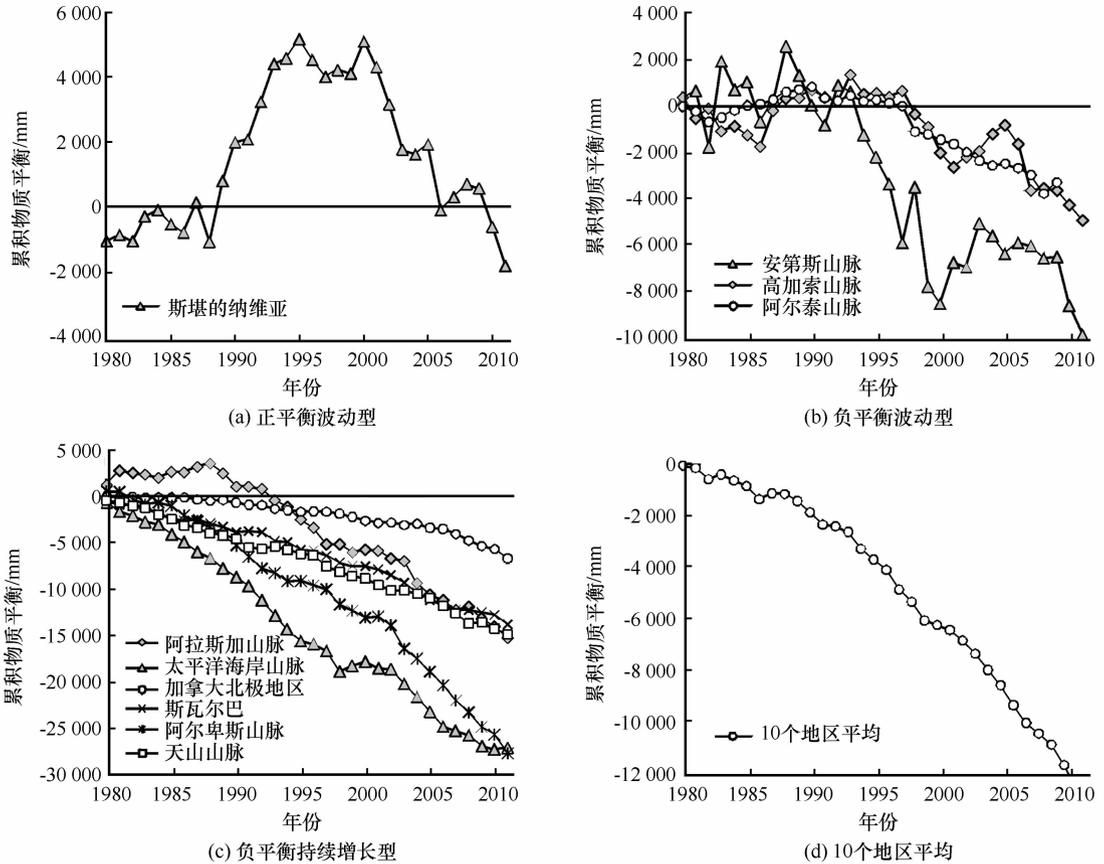


图3 全球10个地区冰川1980-2011年累积物质平衡曲线

Fig. 3 Cumulative mass balance of the glaciers from 1980 to 2011 in Scandinavia (a), the Andes, the Caucasus Mountains and the Altay Mountains (b), the Alaska Range, the Pacific Coast Ranges, Canadian High Arctic, Svalbard, the Alps, the Tien Shan (c), average cumulative mass balance of the above ten regions (d)

表2 全球37条冰川1980-1989、1990-1999及2000-2009年平均物质平衡

Table 2 Mean mass balances of the 37 glaciers of the world from 1980 to 1989, from 1990 to 1999 and from 2000 to 2009

项目	1980-1989年	1990-1999年	2000-2009年
平均物质平衡/mm	-223	-439	-668
标准偏差/mm	769	885	891
最小值/mm	-1 862	-2 559	-2 760
最大值/mm	1 966	1 567	1 159
波动幅度/mm	3 828	4 126	3 919
正平衡百分比/%	33	26	20
正平衡年份百分比/%	20	0	0
平均AAR/%	49	45	38

代以前,全球冰川的物质平衡年际变化幅度非常大,总体上呈现负平衡变化趋势;20世纪70-90年代虽然物质平衡年际变化幅度比较小,但冰川保持持续的负平衡状态,总体趋势处于退缩状态;20

世纪90年代后,负平衡变化趋势明显增强,冰川处于加速退缩状态。

图4(b)是全球代表性冰川的累积物质平衡变化曲线^[10],参考年份为1980年。累积物质平衡曲线的斜率反映了物质亏损的强烈程度,从中看出,20世纪80年代全球冰川开始退缩,在90年代冰川物质亏损严重,负平衡增长趋势不断增强,表明全球冰川处于加速退缩状态。对于整个研究时段而言,全球冰川加速退缩,处于强负平衡状态。IPCC第五次评估报告(AR5)指出,过去100年全球平均气温升高约 0.89°C ,过去连续3个10年中的任意一个都比有记录以来的其他任何10年的地表温度都要高,21世纪第一个10年的地表温度为有史以来最高;相对于1986-2005年,2016-2035年全球平均地表温度将升高 $0.3\sim 0.7^{\circ}\text{C}$,2081-2100年可能升高 $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ ^[20]。可以推断,在气候不断变暖的未来,全球冰川将会继续退缩,物质亏损强度不断增大,负平衡趋势不断增强。

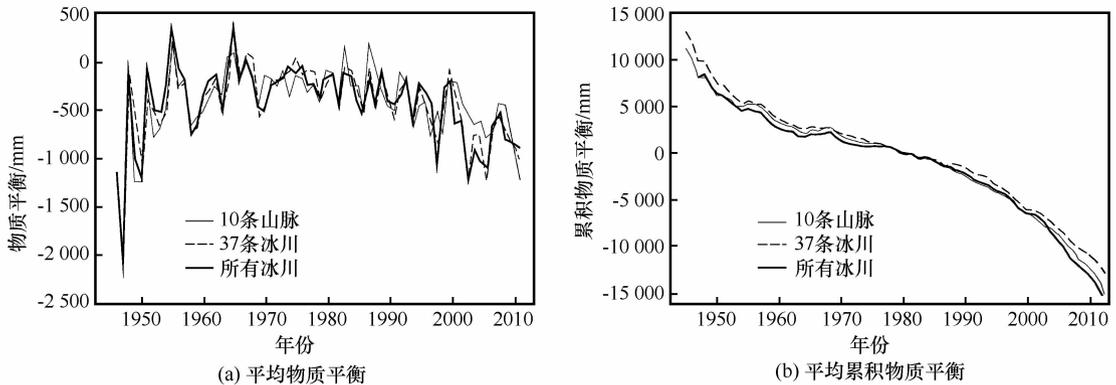


图4 1945 - 2011 年全球代表性冰川的平均物质平衡 (a) 及平均累积物质平衡 (b) 曲线^[10]

Fig.4 Variations of mean mass balances (a) and mean cumulative mass balances (b) of the representative glaciers from 1945 to 2011^[10]

4 全球冰川物质平衡对海平面变化的贡献

冰冻圈变化对海平面上升的贡献极为重要, 如果全球海平面以目前的上升速率持续变化几十年甚至上百年, 则将对人类社会经济、生态环境产生深刻影响^[21]。Dyurgerov^[15]对冰川及海平面的变化研究表明, 1961 - 1993 年冰川负平衡对全球平均海平面上升的贡献为 13 mm, 占全球平均海平面上升总数的 20%。Jacob 等^[14]利用 GRACE 重力卫星数据研究表明, 2003 - 2010 年全球冰川(不包括南极冰盖和格陵兰冰盖)的物质亏损速率为 $-(148 \pm 30) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$, 对全球海平面上升的总贡献为 $(0.41 \pm 0.08) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。南极冰盖、格陵兰冰盖及周边冰川及冰帽的物质亏损对全球海平面上升的贡献为 $(1.06 \pm 0.19) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 全球所有冰川覆盖地区(包括南极冰盖和格陵兰冰盖)对全球海平面上升的总贡献为 $(1.48 \pm 0.26) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

IPCC 第五次评估报告指出, 近几十年全球冰川(包括南极冰盖和格陵兰冰盖)总体处于持续退缩状态^[20-21]。AR5 给出 1993 - 2010 年海平面上升速率为 $(3.2 \pm 0.4) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 海洋热膨胀的贡献为 $(1.1 \pm 0.3) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 全球冰川贡献为 $(0.76 \pm 0.37) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 格陵兰冰盖贡献为 $(0.33 \pm 0.08) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 南极冰盖贡献为 $(0.23 \pm 0.11) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 20 世纪 70 年代以来, 冰川冰损失和因变暖导致的海洋热膨胀共同贡献了全球海平面上升的约 75%^[21]。由此表明, 20 世纪 70 年代以来冰川物质平衡对海平面上升的贡献呈增大趋势, 且与全球气温上升基本上是同步的。专家预估, 未来几十年至 21 世纪末, 冰川、海冰、积雪都会持续萎缩^[20]: 全球冰川冰量(不包括南极地区的冰川)在 RCP2.6 情

景下将减少 15% ~ 55%, 在 RCP8.5 情景下将减少 35% ~ 85%; 全球平均海平面将继续上升, 在 RCP2.6 情景下将上升 0.26 ~ 0.55 m, 在 RCP8.5 情景下将上升 0.52 ~ 0.98 m; 2081 - 2100 年海平面的上升速率为 $8 \sim 16 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

5 结论

物质平衡是冰川对气候变化的直接反应。全球各区域的冰川系统因区域环境的差异, 对全球变化的响应也有所不同, 各地区冰川系统的物质平衡表现出不同的特点。利用全球不同地区(除两极冰盖外)冰川 1980 - 2011 年的物质平衡资料, 分析了冰川物质平衡的区域特征、变化过程及总体变化趋势, 评估了冰川物质平衡对海平面变化的贡献。得出以下结论:

(1) 全球冰川物质亏损严重, 加速退缩, 平均减薄了 14 m, 其中阿尔卑斯山脉及太平洋海岸山脉的退缩尤为明显, 平均减薄了 30 m 左右。

(2) 各地区冰川的平均物质平衡变化趋势基本上与全球平均趋势保持一致, 但各地区的变化趋势不尽相同, 使物质平衡变化具有典型的纬度地带性分布特征, 主要原因是区域气候及其波动或变化程度差异以及冰川规模、地形和表面状况对气候波动及变化的敏感性不同。

(3) 物质平衡变化过程分为正平衡波动型、负平衡波动型及负平衡持续增长型三类, 但总体上呈现出持续负平衡增长趋势, 物质亏损严重、冰川剧烈退缩, 反映出全球气候暖化的趋势。

(4) 全球冰川在 20 世纪 90 年代后出现加速退缩, 物质亏损强烈, 处于强负平衡状态。在全球气候不断变暖的未来, 冰川将会继续退缩, 物质亏损

强度不断增大, 负平衡趋势不断增强。

(5) 冰川物质平衡对海平面上升的贡献呈增大趋势, 且与全球气温上升基本上是同步的。

参考文献 (References):

- [1] Yang Daqing. On the mass balance of 50 mountain glaciers in the Northern Hemisphere[J]. *Advances in Water Science*, 1992, 3(3): 161 - 165. [杨大庆. 北半球 50 条山地冰川近期的物质平衡状况[J]. *水科学进展*, 1992, 3(3): 161 - 165.]
- [2] Li Qiaoyuan, Xie Zichu, Dai Yanan, et al. The variation of glaciers in Nepal during 1980 - 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 935 - 948. [李巧媛, 谢自楚, 戴亚南, 等. 尼泊尔冰川 1980 - 2010 年的变化特征[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 935 - 948.]
- [3] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Yao Tandong, et al. Glaciers and their environments in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. [施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [4] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Zhou Wenjuan, et al. Variations of glacier mass balance and their climate implication in the Northern Hemisphere[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.]
- [5] Ding Yongjian, Bing Hongtao. Variations of glacier mass balance and their response to climatic change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(Suppl 1): 23 - 30. [丁永建, 炳洪涛. 近 40 年来冰川物质平衡变化及对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(增刊 1): 23 - 30.]
- [6] Ye Wanhua, Wang Feiteng, Li Zhongqin, et al. Temporal and spatial distributions of the equilibrium line altitudes of the monitoring glaciers in High Asia[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.]
- [7] He Haidi, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Variation characteristics of glacier mass balance in Svalbard, Arctic, in recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 701 - 709. [何海迪, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近 50 年来北極斯瓦尔巴地区冰川物质平衡变化特征[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 701 - 709.]
- [8] Liu Chaohai, Xie Zichu. The introduction to glaciology[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [刘潮海, 谢自楚. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [9] Liu Shiyin, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Regional characteristics of glacier mass balance variations in High Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 97 - 105. [刘时银, 丁永建, 叶佰生, 等. 高亚洲地区冰川物质平衡变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 97 - 105.]
- [10] Zemp M, Nussbaumer S U, Naegeli K, et al. Glacier mass balance bulletin: No. 12 (2010 - 2011)[R]. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2013.
- [11] Zemp M, Nussbaumer S U, Gärtner-Roer I, et al. Glacier mass balance bulletin: No. 11 (2009 - 2010)[R]. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2011.
- [12] Zemp M, Nussbaumer S U, Gärtner-Roer I, et al. Global glacier change bulletin: No. 2 (2014 - 2015)[R]. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2017.
- [13] Zemp M, Gärtner-Roer I, Nussbaumer S U, et al. Global glacier change bulletin: No. 1 (2012 - 2013)[R]. Zurich, Switzerland: World Glacier Monitoring Service, 2015.
- [14] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise[J]. *Nature*, 2012, 482: 514 - 518.
- [15] Dyurgerov M B. Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis; INSTAAR/OP-55[R]. Boulder, Colorado, USA; Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, 2002.
- [16] Dyurgerov M B, Meier M F. Glaciers and the changing earth system; INSTAAR/OP-58[R]. Boulder, Colorado, USA; Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, 2005.
- [17] Dyurgerov M B. Reanalysis of glacier changes; from the IGY to the IPY, 1960 - 2008[J]. *Data of Glaciological Studies*, 2010, 108: 1 - 116.
- [18] Fischer A. Glaciers and climate change: interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 71: 13 - 26.
- [19] Kohler J, James T D, Murray T, et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(18) [2018-04-14]. <https://doi.org/10.1029/2007GL030681>.
- [20] IPCC. Summary for policymakers[M]// *Climate change 2013: the physical science basis: contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2013: 1 - 28.
- [21] Ren Jiawen. Updating assessment results of global cryospheric change from SPM of IPCC WGI fifth assessment report[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1065 - 1067. [任贾文. 全球冰冻圈现状和未来变化的最新评估: IPCC WGI AR5 SPM 发布[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1065 - 1067.]

Analysis of the changes of glacier mass balances in different parts of the world from 1980 to 2011

ZHANG Guofei¹, LI Xiangfei¹, LI Zhongqin²

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science / Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Most of the glaciers in the world are seriously retreating with the climate warming; mass balances of the glaciers show a serious mass loss and a negative balance tendency. In this paper, based on the new mass balance data published by the World Glacier Monitoring Service, the current status of the glaciers in the world is summarized and compared; the regional characteristics, the change process and the overall tendency of the glacier mass balance changes in different parts of the world, as well as the recent contribution of glacier mass balance to sea level rise, are analyzed. The results showed that the global glaciers had experienced an accelerating mass loss and accelerating shrink, and the average glacier thickness had thinned 14 m from 1980 to 2011; the Alps and the Pacific Coast Ranges were particularly vulnerable, where glaciers had thinned about 30 m in average; the average mass balance changing tendency of the glaciers in different parts of the world had basically consistence with the general global average tendency; the changes of mass balance had been characterized by typical latitudinal zonality. Temporally, the change process of the mass balance of global glaciers may be divided into fluctuating positive balance type, fluctuating negative balance type and continuous increasing negative balance type. However, as a whole, the general tendency is continuous increasing negative balance. As the global climate warming in the future, the global glaciers will continue to shrink, mass loss rate will be increasing, negative balance will be increasing. The contribution of glacier mass balance to sea level rise will be increasing. It is believed that global temperature rise will be basically in synchrony.

Key words: global glaciers; mass balance; sea level change

(本文编辑: 武俊杰)