

文章编号: 1000-0240 (1999) 03-0200-07

环北极地区冰川 (盖) 物质平衡研究进展

效存德, 秦大河, 任贾文, 李忠勤

(中国科学院 兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 回顾了环北极各分区冰川物质平衡观测、研究的历史与现状。过去 30 a 间, 北极冰川 (帽) 波动与全球平均变化保持同步。相对于中低纬地区冰川, 北极地区的小型冰川 (帽) 对全球气候变化反应更灵敏, 北极冰川物质平衡的平均变化对气候变化具有更好的指示意义。19 世纪末以来的百年时间里, 除本世纪 60 年代出现短暂的相对冰进外, 环北极冰川表现出普遍退缩趋势。

关键词: 北极; 物质平衡; 气候变化

中图分类号: P343.6 文献标识码: A

1 概述

环北极地区各类陆地冰体的总面积超过 $2.075 \times 10^6 \text{ km}^2$, 分散状分布于环北极大陆和大小岛屿之上。其中, 加拿大北极和阿拉斯加北部地区约合 $16.638 \times 10^6 \text{ km}^2$ (表 1), 主要包括加拿大北极群岛和阿拉斯加山脉、Brooks 山脉等; 大西洋北极地区约合 $185.201 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要包括格陵兰冰盖、冰岛、Svalbard 群岛和 Scandinavia 半岛北部地区; 俄罗斯北极地区约合 $5.7339 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要包括 Franz Josef 地、Novaya Zemlya 以及 Severnaya Zemlya 和乌拉尔山北部地区等。格陵兰岛上冰盖连同周边冰帽、溢出冰川的总冰量达 $300 \times 10^4 \text{ km}^3$, 其它北极冰川约合 $6 \times 10^4 \text{ km}^3$ 。

环北极地区冰川类型多样, 几乎包含了世界上所有冰川类型, 从极地冰盖到小型山地冰川以至雪斑 (firn/snow patches) 均有。冰川的水热结构亦十分复杂。有的冰川整体处于压力融点, 乌拉尔山北部有些冰川则完全属冷冰川, 但整体而言, 北极地区的冰川以复合冰川占主导。冰川动力特征亦变化多端, 如格陵兰 Jakobshavn 冰川是世界上最快速的冰流, 是加拿大北极和 Svalbard 地区典型溢出冰川流速的 200~400 倍。此外, 跃动冰川在北极地区

亦广泛分布。与南极冷冰盖不同, 多数北极冰川属温冰川, 因此, 北极冰川对全球变暖的响应比南极冰盖快速。所以, 环北极冰川物质平衡的动态监测将可能始终捕捉到全球气候变化的初始信号。北极冰帽和冰川的数量之广可占到全球小型冰川的三分之二, 如果它们全部融化, 可使全球海平面上升 0.5 m。尽管这一上升值并不可观, 但由于北半球高纬地区冰川的动态变化对全球气候变化十分敏感, 而且冰川消融业已对沿海海洋物理化学特性造成改变, 因此, 无论对地区洋流结构、生态环境监测, 还是对全球气候预测而言, 北极地区的冰川 (盖) 物质平衡研究都具有重要意义。

环北极地区冰川物质平衡观测资料的地区分布极不均匀 (图 1)。格陵兰冰盖资料最贫乏, Scandinavia 半岛北部地区、加拿大北极和 Svalbard 地区观测时间较长。物质平衡观测的持续时间以及不同冰川观测时采用的方法也有所不同。Dyurgeron 和 Meier 统计了全球山地冰川和亚极地冰川物质平衡观测的地点、时间区间和物质平衡变化量^[1]。在此, 我们选取 60°N 以北地区的统计资料, 重新统计物质平衡观测的时间长度与所观测冰川数目的关系, 统计结果如图 2 所示。在所统计的 110 条冰川中, 观测时间 30 a 以上 (包括

收稿日期: 1998-08-10; 修订日期: 1999-05-06

基金项目: 中国科学院“九五”重大项目 A (KZ951-A1-205, KZ951-A1-402-03); 国家“九五”科技攻关项目 (98-927-01) 资助

作者简介: 效存德 (1969-), 男, 甘肃定西县人, 助理研究员, 博士, 1992 年毕业于兰州大学地理科学系, 1997 年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获理学博士学位。现主要从事冰川化学与环境、南北极冰川与全球变化研究。

表 1 环北极地区主要冰川的分布和面积统计^[2]

Table 1 Distribution and areas of glaciers surrounding the Arctic Ocean

地区划分	面积 /km ²	地区划分	面积 /km ²	地区划分	面积 /km ²
Ellesmere 岛	80 500	格陵兰 (总计)	1 802 600	Franz Josef 地	13 735
Axel Heiberg 岛	11 700	其中: 内陆冰盖	1 726 400	Novaya Zemlya	24 800
Devon 岛	16 200	周边冰川	76 200	乌拉尔山北部	28.7
Bylot 岛	5 000			Severnaya Zemlya	18 326
Baffin 岛	37 000	冰岛	11 260	Ushakov 岛	325
Coburg 岛	225	Jan Mayen	114	De Long 群岛	77
Meighen 岛	85	Svalbard	36 598	Victoria 岛	10.7
Meiville	160	Scandinavia 北部	1 441	Byrranga 山脉	30.5
North Kent 岛	152			(Taymyr 半岛)	
其它岛屿	736			Wrangel 岛	3.5
Brooks 山脉	722			Chukchi 半岛	3.0
阿拉斯加山脉	13 900				
合 计	166 380	合 计	1 852 013	合 计	57 339.4

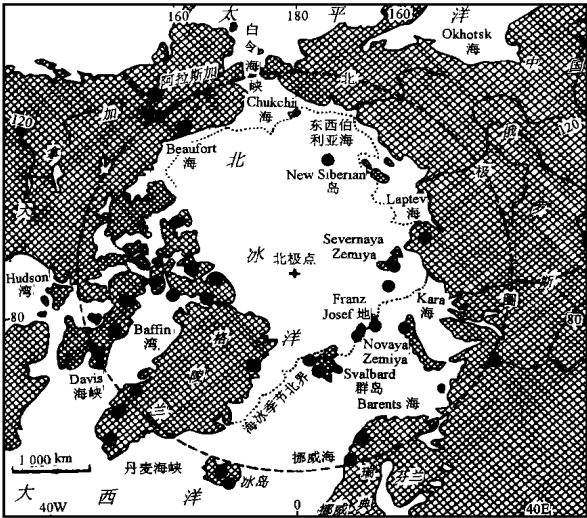


图 1 环北极地区物质平衡观测地点 (●) 分布^[2]

Fig. 1 Location map of glacier mass balance observation sites surrounding Arctic

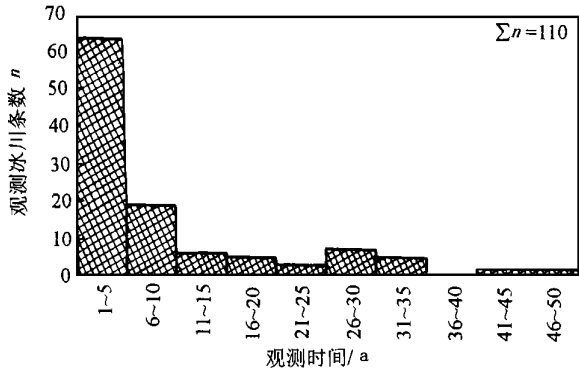


图 2 60°N 以北地区冰川物质平衡不同观测长度区间内的冰川数目统计

Fig. 2 Glacier numbers vs observation periods in the regions above 60°N

30 a) 10条, 占 9.1% . 物质平衡观测手段包括花杆测量法、雪层剖面法、雪冰化学法以及冰川形态测量法等. 本文将主要对北极圈以北 (包括北极圈附近地区) 冰川物质平衡观测的现状与结果分地区进行扼要总结, 并对资料序列较长的结果进行汇总和比较.

2 物质平衡研究现状

2.1 格陵兰地区

格陵兰冰盖由于地域广袤, 各地区冰川类型多样, 包括冰盖主体与冰盖相分离的冰穹和冰帽以及山谷冰川等, 冰川动力特征差异也很大, 因此, 对该冰盖 (川) 物质平衡的了解还不全面.

“格陵兰冰盖计划 – II” (GISP2) 钻取的透底冰芯气候记录表明, 快速气候变化导致不同气候阶段积累率的快速转化, 其转化时间短至仅仅数年. 尤其从“冷”阶段向“暖”阶段转化时时间更短, 从“暖”阶段向“冷”阶段转化时则相对缓和. GISP2冰芯记录的积累率快速变化可能是由于影响格陵兰地区的气旋路径和强度发生了转换, 尤其是路径的转换^[3].

早期对格陵兰冰盖物质平衡的估算认为是负平衡^[4]. 但近期研究认为冰体厚度无明显变化^[5, 6], 可能略显增长, 其厚度变化速率为 $0.03 \pm 0.06 \text{ m/a}$, 几近平衡. 最近通过海洋卫星和地球卫星测高技术得到 1978~ 1988年间格陵兰 72°N 以南、海拔在 2 000 m 以上冰面的厚度增长速率为 $1.5 \pm 0.5 \text{ cm/a}$ ^[7]. 这一数值较 Zwally *et al.*^[8] 得出的增长速率要小. 海拔变化的空间差异介于 $-15 \sim +18 \text{ cm/a}$, 季节差异为 $\pm 15 \text{ cm}$, 年际差异为 $\pm 8 \text{ cm}$, 所以, 平均

增长速率显得太小，难以计算在极区增暖条件下，格陵兰冰盖究竟会发生怎样的长期变化。在格陵兰北部和东北部，通过卫星雷达干涉仪数据计算了 14 条溢出冰川的冰体支出量，其数值是通过计算冰山产生速率方法所得数值的 3.5 倍^[9]。结果显示格陵兰冰盖北部和东北部可能在减小，对海平面上升有正向作用。

物质平衡观测研究主要集中于冰盖边缘和溢出冰川上，90 年代以来，对格陵兰西部地区物质平衡获得了较深入的认识^[10-12]。除使用传统物质平衡观测方法外，还运用气象资料和能量平衡模拟去推算物质平衡分量^[13,14]，也动用激光探测器精确测量冰川几何形态的变化，对最近几十年来冰盖边缘的进退变化开展了广泛研究^[11]。

表 2 列出了不同研究者对格陵兰冰盖现代物质平衡的估算和模拟结果。

表 2 格陵兰冰盖现代物质平衡估算和模拟结果 ($10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 2 Current state of mass balance of the whole Greenland ice sheet as results of estimation and modelling by various authors

积累量	消融量	边缘崩解量	净平衡量	资料来源
500	- 330	- 280	- 110	文献 [4]
557	- 239	- 318	0	文献 [15]
535				文献 [16] ³⁾
539	- 254			文献 [17] ³⁾
553	- 237	- 316	~ 0	文献 [18] ³⁾
			+ 12.6	文献 [19] ⁴⁾

注：1) 从最新降水图中量测得到；2) 格网度日模型；3) 实测；4) 对过去 130 ka 以来的冰盖数字模拟。

2.2 加拿大北极地区

加拿大北极冰川（帽）物质平衡观测主要集中于 Ellesmere 岛、Coburg 岛、Axel Heiberg 岛、Merghen 岛、Melville 岛、Devon 岛和 Baffin 岛上，所观测的冰川类型包括较大冰帽及其溢出冰川、小冰帽、山谷冰川和邻北冰洋海岸的冰隆区。物质平衡观测最早从 1957 年开始，观测时间序列最长的当属 Meighen 冰帽，长达 40 a。

代表性观测冰川有：

(1) Devon 冰帽。1961 年开始观测至今，1965 年缺测。1961~ 1993 年间净平衡（指累计净平衡，下同）达 44 mm 水深^[20]。

(2) Agassize 冰帽。1977 年开始观测至今，位于该冰帽的 Drambuie 冰川在 1977~ 1993 年间净平衡为 - 381 mm 水深。

(3) Meighen 冰帽。1959 年开始观测至今，1972 年和 1979 年缺测。1960~ 1993 年间净平衡为 - 4 550 mm 水深（缺测年作估计内插）。由于冰帽大面积退缩，消融区一些物质平衡观测花杆实际处于裸岩区，故不能使用，观测误差较大。

(4) Merville 冰帽。1963 年开始观测至今。1968 年，1972 年和 1975~ 1979 年缺测。1963~ 1993 年间净平衡为 - 146 mm 水深（缺测年作估计内插）。

此外，Axel Heiberg 岛 White 冰川 1960~ 1992 年间净平衡为 - 100 mm 水深，Ward Hunt 岛冰隆区 1963~ 1993 年间净平衡为 - 43 mm 水深。

尽管在上述地点进行了较长时间序列的物质平衡观测，但从所获数据中并未得到持续而明显的物质平衡变化趋势。过去 30 多年观测表明，加拿大北极地区多数冰川（帽）消融呈增强趋势，而积累率的年际变化不大，因此，整体处于退缩状态。

2.3 阿拉斯加地区

该地区冰川主要集中于太平洋山系和落基山系，物质平衡观测资料较丰富的阿拉斯加山脉和 Brooks 山脉分属这两个山系。其中，阿拉斯加山脉属北极大陆型气候，而 Brooks 山脉则属海洋型气候。

(1) 阿拉斯加山脉。Gulkana 冰川物质平衡观测始于 1965 年，已报道的该冰川物质平衡观测资料介于 1966~ 1980 年^[21]。

(2) Brooks 山脉。其中 McCall 冰川 1957/ 1958 年度国际地球物理年和 1969~ 1975 年国际水文 10 a 期间获取了短期物质平衡实测资料，证明冰川的物质交换率极低。观测表明，1958~ 1993 年间该冰川末端一直处于退缩状态。对 Brooks 山脉的 Fork 东、西冰川；Susitna 冰川；Maclaren 冰川的物质平衡观测时间也都很短。

2.4 冰岛

自本世纪 20 年代起对冰岛 Vatnajokull 冰帽断续性地开展了物质平衡观测，从 20 年代初到 60 年代该冰川总的趋势是保持了负平衡，但自 70 年代以来转为零平衡偏正。过去 150 a 冰岛的温度变化显示自本世纪 40 年代开始出现夏季气温下降趋势。除此，80 年代中期以来冰岛 Tungnaarjokull 冰川和 Satujv kull 冰川开始物质平衡观测。

2.5 Svalbard 地区

Svalbard 群岛总冰量达 $1. \times 10^4 \text{ km}^3$ ，由于该地区位于挪威海热传输通道的最北端，对气候的响应十分敏感。1950 年挪威极地研究所开始对

Finsterwalderbreen冰川进行系统的物质平衡研究, 1966年扩展到 Broggerbreen冰川, 一年后又扩至 Lovenbreen, 1966年前苏联冰川学家开始对 Vuringbreen冰川开展系统的物质平衡调查; 1973~1976年间前苏联又将观测范围扩展到其它3条冰川上; 波兰研究人员亦于1988年在 Spitsbergen南部的 Hansbreen开展物质平衡研究. 此外, 法国和挪威合作通过钻取浅芯和无线电回波探测等方法对一些冰川进行了间接物质平衡研究. 挪威和前苏联对该地区物质平衡的研究多集中于小型山谷冰川上 (冰川面积 $2\sim 6\text{ km}^2$), 自1987年起物质平衡研究开始在面积较大的 Kongsvegen (冰川面积 105 km^2) 开展.

由于 Svalbard地区冰川多属跃动冰川, 因而难以使用冰川末端位置变化作为气候变化的指示器, 因此, 对物质平衡真实值的测量不得不涉及总冰量的变化. 代表性观测结果有:

(1) Finsterwarderbreen冰川 1950~1968年间显示稳定退缩趋势, 年均净平衡为 -0.25 m (水深) /a.

(2) Brøggerbreen和 Lovebreen 1967~1993年平均冬积累为: 前者为 $0.7\pm 0.16\text{ m}$ 水深, 后者为 $0.75\pm 0.18\text{ m}$ 水深; 此间平均年夏消融为: 前者为 $-1.15\pm 0.31\text{ m}$ 水深, 后者为 $-1.09\pm 0.29\text{ m}$ 水深. 几乎每年的夏消融大于冬积累, 因此总冰量持续减少, 两条冰川的冰面高度 1967~1993年间分别下降 11 m 和 8 m , 对 Brøggerbreen而言则意味着 10% 以上的冰量支出.

(3) 1987~1993年 Kongsvegen冰川平均年积累为 $0.79\text{ m}\pm 0.14\text{ m}$ 水深, 平均年消融为 $-0.73\pm 0.28\text{ m}$ 水深; Hansbreen 1988~1993年间平均年积累为 0.99 m 水深, 平均年消融为 1.31 m 水深. 这两个冰川的消融量计算同时包括了冰架崩解的冰量支出.

总的来说, Svalbard地区冰川在过去 26 a间无十分显著变化, 基本特征为: 1) 冬积累保持稳定略显增加, 年际波动很小; 2) 夏消融无明显长期变化趋势, 但年际间波动很大; 3) 净平衡取决于冰川面积 海拔分布: 低海拔冰川持续退缩, 但负平衡值较 26 a前略小; 高海拔冰川 (尤其积累区位于高海拔) 处于平衡或增长状态.

2.6 Scandinavia半岛北部地区

Scandinavia半岛北部地区 (瑞典和挪威境内) 冰川物质平衡研究时间序列最长的是位于挪威边境山脊线附近的冰斗冰川 Storglaciaren (68°N , 18.5°E), 该冰川是一大陆型冰川, 同时也是世界上物质平衡连续观测时间最长的冰川. 1947~1994年近 50 a的观测表明, 冬季降水积累呈明显正增长趋势, 约合 0.5 m 水深, 夏季消融则呈负增长趋势, 消融量与积累量相当, 最终导致净平衡的总趋势由负转为正. 该地区另一条观测时间较长的冰川是 Engabreen (67°N , 14°E), 处于挪威西海岸海洋型气候条件下, 1970年开始物质平衡观测. 1970~1994年间该冰川显示明显正平衡, 相当于 18 m 水深的净积累量.

Scandinavia半岛北部地区 $66^\circ\sim 68^\circ\text{N}$ 纬度范围内冰川净平衡的主导趋势是正平衡不断增长, 归因于冬季降水积累的增加, 但更北的地区如 70°N 附近的 Langfjordjokulen冰川则无明显长期变化趋势.

2.7 俄罗斯北极地区

俄罗斯北极地区冰川物质平衡观测年代较分散, 且不同时期采用的观测方法不同, 因此主要的资料是“恢复”出来的. 恢复资料表明, 20世纪俄罗斯北极全境物质平衡值显负值, 但实测数据极端贫乏. 在俄罗斯北极地区, 北地群岛 (Severnaya Zemlya) 上冰川的观测时间最长, 其中位于十月革

表 3 俄罗斯北极地区主要冰川分布区物质平衡估算结果^[22]

Table 3 Estimation of the mean mass balance of glaciers in the Russian Arctic

现代冰川分布区	观测时间 年代	平均积累量 /g° cm ⁻²	平均消融量 /g° cm ⁻²	边缘崩解 /g° cm ⁻²	净平衡 /g° cm ⁻²	相对冰量损失 /%
Franz Josef地	1929~ 1959	28	- 32	- 17	- 21	0.1
Novaya Zemlya	1930~ 1960	35	- 52	- 8.2	- 25	0.1
Severnaya Zemlya	1929~ 1972	25	- 35	- 3.0	- 13	0.04
De Long岛	1956~ 1972	18	- 27	- 1.0	- 10	0.1
Ushakov 岛	1935~ 1965	30	- 30	- 3.5	- 3.5	0.2
Victoria 岛	1960~ 1972	28	- 31	- 9	- 12	0.2
Byrranga山脉	1929~ 1972	70	- 100		- 30	0.6
平 均	1929~ 1972	30	- 41	- 9	- 20	0.04~ 0.6

命岛西南部的 Vovilov 冰川开展过从 1974/1975~1980/1981 年度以及 1985/1986~1987/1988 年度前后共 10 a 物质平衡观测。曾以 1952 年和 1985 年航片比较发现,冰川南侧和西侧前进而北侧退缩,因此,导致冰川面积发生如下变化:冰川南侧和西侧增长 14.6 km²,而北侧退缩 11 km²,总的变化结果是冰川面积增大了 3.5 km²。北极乌拉尔山区的代表性观测冰川为 IGAN 冰川和 Obruchev 冰川,1957~1981 年净平衡分别为 -18.7 g°cm⁻² 和 -13.4 g°cm⁻²。

表 3 为俄罗斯北极地区主要冰川物质平衡研究的估算结果^[22]。

3 物质平衡变化的长期趋势及全球对比

3.1 过去 30 a 来的变化趋势及全球对比

自 1967 年开始至 1993 年,全球冰川监测服务中心(WGMS)已出版 6 册《Fluctuations of Glaciers》(1967, 1973, 1977, 1985, 1988, 1993)。自 1991 年起, WGMS 陆续发表了许多观测中冰川每 2 a 的实测数据,并公布 10 条典型冰川的详细监测结果,这些结果公布在《Glacier Mass Balance Bulletin》(1991, 1993, 1994, 1996)上。除南极冰盖和格陵兰冰盖外,世界其它冰川面积约合 68×10⁴ km²,虽然仅占地球陆地冰体总面积的 4%,但对本世纪由于全球增暖而导致海平面的上升值贡献了

30%。由于两极两大冰盖的物质平衡各分量的不确定性极大,且对其现状与近期波动历史观测和模拟结果迥异,尚无公认的观点。这里的讨论仅涉及除冰盖以外的两极冰川(帽)。

图 3 为 1961~1989 年共 30 a 间北极各地与全球冰川(除两极冰盖外,下同)净物质平衡年际变化,各地区物质平衡值采用面积加权平均法。从 60 年代以来,全球冰川保持持续负平衡,总的趋势处于退缩状态,实际上随着小冰期在本世纪初告终而转为全球显著增暖,这种趋势已保持了近百年^[23]。李培基^[24]认为,因本世纪大气 CO₂ 的增温效应导致了冷圈波动,加速了山地冰川的普遍退缩与消融。从图 3 易见,分散于北极圈内各岛屿冰川的平均净平衡变化趋势与全球平均趋势保持年际吻合,线性相关系数为 0.74,南极冰盖和格陵兰冰盖周边小型冰川的平均变化趋势亦与全球趋势一致,相关系数达 0.77。其中单就 Devon 冰帽的变化就与全球冰川波动的相关系数达 0.76。上述冰川过去 30 a 的净物质平衡和全球平均状况一样,除 60 年代出现短暂正平衡外,之后一直以负平衡占主导。

有所不同的是,处于中低纬地区的亚洲和欧洲山地冰川与全球平均趋势差异较大,欧、亚相互间也不吻合,个别时期(如 70 年代)甚至出现欧、亚相反。1961~1989 年 30 a 间欧、亚平均冰川物质平衡变化与全球平均趋势相关性很差($r=0.41$,

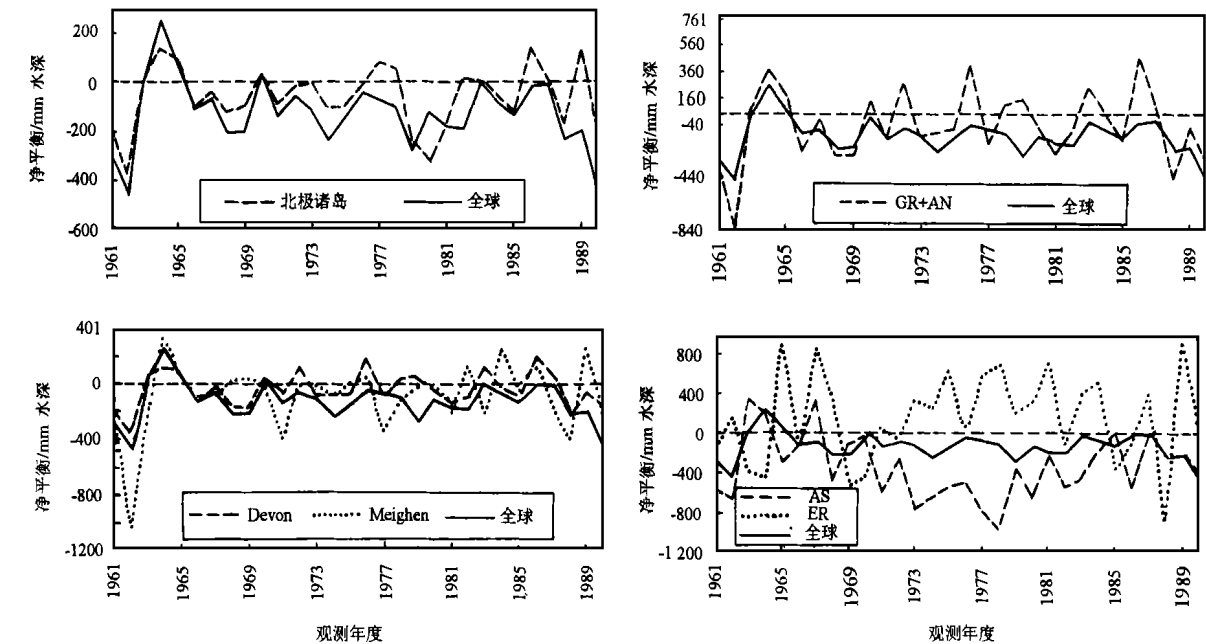


图 3 1961~1989 年北极与全球冰川物质平衡变化趋势
“GR+AN”为格陵兰和南极地区小型冰川;“AS”为亚洲山地冰川;“ER”为欧洲山地冰川

Fig. 3 Year-to-year fluctuation of glacier mass balance over Arctic regions and global

0.009)。相关性差,这一方面与中低纬地区的冰川数量较少有关,但最主要的原因可能是,由于中低纬高山冰川物质平衡变化的影响因子复杂,受复杂环流系统、局地气候和地形制约,造成不同冰川对全球气候响应形式、时间和幅度的差异。前文已提及,北极冰帽和冰川(指北极圈附近及其以北地区)的数量之多可占到全球小型冰川的60%,其中,北极诸岛占35%,格陵兰周围小型冰川占10.5%,阿拉斯加地区占11%,Scandinavia地区和冰岛地区占2%^[2],且多数北极冰川属温冰川。因此,北极冰川对全球增暖的响应比较快速。也就是说,对气候变化的敏感性方面,中低纬冰川较北极冰川有更大的个体差异,而北极地区的小型冰川较中低纬冰川能够更敏感地反映全球变化总体趋势。

3.2 百年趋势

随着本世纪以来全球显著增暖,加速了全球范围冰川退缩与融化的主导趋势,这一特征在北极冰川上表现十分明显。图4为1875~1975年百年间内北极前进冰川的统计结果^[2]。无论北极冰盖(帽)或山地冰川,北极大陆或北极诸岛,加拿大北极、大西洋北极或俄罗斯北极,均显示世纪之交开始北极前进冰川的数目大幅度下降。换言之,多数冰川以退缩或保持稳定而存在,只有60年代出现

了短暂的冰进阶段,成为百年来单一冰退趋势中唯一的“插曲”,是这一时期全球降温的直接后果。60年代的冰进事件在世界各地山地冰川上都有反映^[23],但在中低纬地区,各地区冰进开始的时间有较大差异,并且不是唯一的“插曲”。与全球近百年来平均气温显示的稳定增暖相比较,相对于中低纬地区而言,北极冰川(不包括冰盖)的总体变化能更好地反映全球气候变化趋势。尽管环北极不同地区的冰川对全球气候的响应也存在时域差异。

参考文献:

- [1] Dyurgerov M B, Meier M F. Mass balance of mountain and subpolar glaciers: a new global assessment for 1961~1990 [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1997, **29** (4): 379~391.
- [2] Jania J, Hagen J O. Report on mass balance of arctic glacier [R]. Sosnowiec-Oslo International Arctic Science Committee, 1995. 1~23.
- [3] Bromwich D. Ice sheets and sea level [J]. *Nature*, 1995, **373** (6509): 18~19.
- [4] Bauer A. Nouvelle estimation du bilan de masse de l'Inlandsis du Groenland [J]. *Deep Sea Research*, 1968, **14** (1B): 13~17.
- [5] Kostecka J M, Whillans I M. Mass balance along two transects of the west side of the Greenland Ice Sheet [J]. *Journal of Glaciology*, 1988, **34** (116): 31~39.
- [6] Reeh N, Gundestrup N S. Mass balance of the Greenland ice sheet at Dye 3 [J]. *Journal of Glaciology*, 1985, **31** (108): 198~200.
- [7] Davis C H, Kluever C A, Haines B J. Elevation change of the south Greenland ice sheet [J]. *Science*, 1998, **279** (5127): 2086~2088.
- [8] Zwally H J, Brenner A C, Major J A, et al. Growth of the Greenland Ice Sheet: measurement [J]. *Science*, 1989, **246** (4937): 1587~1589.
- [9] Rignot E J, Gogineni S P, Krabill W B, et al. North and northeast Greenland ice discharge from satellite radar interferometry [J]. *Science*, 1997, **276** (4918): 934~937.
- [10] Weidick A. Investigation Greenland's glaciers [J]. *Groenlands Geologiska Undersokelser Rapport*, 1990, 148: 46~51.
- [11] Weidick A. A change in status of the Greenland Inland Ice [J]. *Groenlands Geologiska Undersokelser Rapport*, 1991, 152: 39~41.
- [12] Weidick A, Boggild C E, Knudsen N T. Glacier inventory and atlas of west Greenland [J]. *Groenlands Geologiska Undersokelser Rapport*, 1992, 158.
- [13] Braithwaite R J, Olesen O B. Calculation of glacier ablation from air temperature, West Greenland [A]. *Oerlemans: Glacier fluctuation and climatic change [C]*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 219~233.
- [14] Braithwaite R J, Reeh N, Weidick A. Greenland glaciers and the "greenhouse effect", status 1991 [J]. *Groenlands Geologiska Undersokelser Rapport*, 1992, 155: 9~13.
- [15] Reeh N. Greenland Ice-Sheet mass balance and sea-level change [A]. *Glaciers, Ice sheets, and Sea Level: Effect of a Induced Climatic Change [C]*. Washington: National Academy Press, 1985. 155~171.

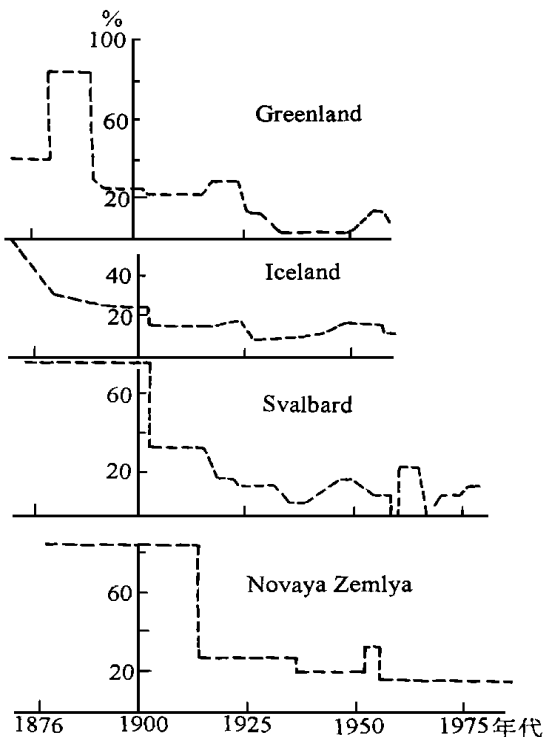


图4 百年来北极前进冰川数目占百分数的变化^[2]

Fig. 4 Ratios of advanced glaciers to the total

glacier numbers in Arctic

[16] Ohmura A, Reeh N. New precipitation and accumulation maps for Greenland [J] . Journal of Glaciology, 1991, 37 (125): 140~ 148.

[17] Huybrechts P, Letreguilly A, Reeh N. Greenland ice sheet and greenhouse warming [J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology, 1991, 89 (1): 79~ 92

[18] Reeh N. Calving from Greenland glaciers: observations, balance estimates of valving rates, calving laws [A] . Dalish Polar Centre. Workshop on the calving rate of west Greenland glaciers in response to climate change [C] . Copenhagen, 1994. 171.

[19] Huybrechts P. The present evolution of the Greenland ice sheet: an assessment by modeling [J] . Global Planet. Change, 1994, 39~ 51.

[20] Koerner R M. Canadian Arctic [A] . Jania J, Hagen J O. Report on Mass Balance of Arctic Glacier committee [C] . Sosnowiec-Oslo International arctic science, 1995. 5~ 8.

[21] Haeberli W. Fluctuations of Glaciers 1975~ 1980 (Vol. 4) [M] . Paris IAHS (ICSII) -UNESCO, 1985.

[22] Govorukha L S. Modern glaciation of the Soviet Arctic (in Russian) [M] , 1989. 256

[23] 王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化 [J] . 冰川冻土, 1992, 14 (3): 242~ 250.

[24] 李培基. 近百年来冷圈波动 [J] . 冰川冻土, 1988, 10 (2): 105~ 116

[25] 丁永建. 近 40年来全球冰川波动对气候变化的反应 [J] . 中国科学 (B辑), 1995, 25 (10): 1 093~ 1 098.

Progress of Mass Balance Study on Glaciers in the Arctic

XIAO Cun-de, QIN Da-he, REN Jia-wen, LI Zhong-qin

(The Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, LIGG, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract The history and progress of mass balance study on glaciers in the Arctic are reviewed. The observation sites of mass balance of glaciers over Arctic region are not equally distributed: less on Greenland and more on north Scandinavia, the Canadian Arctic and Svalbard. The observation period also much varies. Among the 110 glaciers in the Circum Polar region, only 10 exceed a period of 30-year's observation.

Early estimates suggest a negative balance for the Greenland ice sheet. But more recent studies suggest no significant change in ice thickness, with perhaps a very slight thickening, 0.03 ± 0.06 m per year. The average growth rate is too small to determine how the Greenland ice sheet is undergoing a long-term change owing to a warmer polar climate. In the north and northeast Greenland, ice discharge calculated from satellite radar interferometry data of 14 outlet glaciers is 3.5 times that estimated from iceberg production. The results suggest that the north and northeast parts

of the Greenland ice sheet may be thinning and contributing positively to sea-level rise. The thinning of Greenland, alike other Arctic glaciers or ice caps, has been increased since around the 1990s.

In the past 30 a, the fluctuation of Arctic small glaciers was in coincide with that of global mean fluctuation, while the glaciers of Asia and Europe did not show such a good correspondence. Hence the glaciers over the high Arctic may respond more rapidly to the global climate change than those in low and middle latitudes. The behavior of Arctic small glaciers could be a sensible indicator for global climate change. During the past 100 a, Arctic glaciers showed a widespread retreat except a short term advancement during the 1960s, which was coincided with the global cooling during this period. The decreasing of the percentage of advanced glaciers over the Arctic during the past century was coincided with the global warming after the Little Ice Age.

Key words Arctic; mass balance; climatic change