

Lambert 冰川流域物质平衡和南极冰盖变化*

任贾文 效存德 秦大河

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 兰州 730000

摘要 对 Lambert 冰川流域的现场考察资料和浅冰芯研究结果显示, 该流域东侧和西侧积累速率分布和过去几十年的变化具有明显差异: 东侧平均积累速率较西侧高; 近 50 年东侧处于增加状态, 西侧则为明显减小. 冰量平衡计算表明, 该冰川流域目前处于物质正平衡状态, 因而冰盖将趋于增厚. 据现有资料估计分析, 整个南极冰盖处于微弱负平衡. 如果南极地区气候变暖, 物质平衡将向正平衡方向发展, 因而不会引起海平面上升. 但是西南极冰盖的不稳定性可能随气候持续变暖而增强, 成为引起海平面上升的最重要潜在因素.

关键词 南极冰盖 物质平衡 Lambert 冰川流域 海平面变化

南极冰盖物质平衡及其对海平面的影响被国际南极研究科学委员会确定为南极地区全球变化研究的核心问题之一^[1], 因为南极冰盖储存的冰量占地球上总冰量的近 90%, 即使其有微小变化, 也可对海平面有重要影响. 过去几十年中, 南极冰盖物质平衡观测虽然积累了一些资料, 但一方面由于观测区域非常有限, 另一方面则由于观测时段的差异使有限资料难以对比, 致使人们对南极冰盖的物质平衡状态的评估产生很大不确定性. 本文基于东南极冰盖中山站-Dome A 断面考察和邻近的 Lambert 冰川西侧内陆考察中雪积累速率的观测和雪坑、浅冰芯研究, 对南极冰盖最大的冰流系统——Lambert 冰川流域的物质平衡状态给予评估, 并根据其他区域研究结果, 就整个南极冰盖的物质平衡状态和趋势及其对海平面的影响予以简要讨论.

1 Lambert 冰川流域和现场观测概况

Lambert 冰川流域面积 $1.55 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[2], 约占南极冰盖总面积的 1/8. Lambert 冰川镶嵌在东南极地盾最大的一个地堑型谷地里, 周围有许多裸露山峰, 地形异常复杂, 为现场物质平衡观测带来困难. 因此, 可通过内陆和两侧区域的观测, 确定该

冰川补给区域的物质平衡变化和流入该冰川的冰量, 进而对整个冰川流域物质平衡状态进行评估.

如图 1 所示, 穿越 Lambert 冰川流域的考察路线(标记为 LGB)起始于西侧 Mawson 站向内陆 130 km、海拔 1830 m 的 LGB00, 结束于中山站向内陆约 70 km、海拔 1038 m 的 LGB72, 总距离为 2014 km, 大部分海拔高度在 2500 m 左右. 中山站-Dome A 断面考察路线(标记为 DT)为从中山站出发, 最初 300 km 与 LGB 相重合, 在 LGB65 分开以后, 基本沿 77°E 向内陆直线延伸. 沿 LGB 路线, 1990~1994 年进行了 5 次考察, 其中 2 次为全程考察. 沿 DT 路线, 1997~1999 年进行了 3 次考察, 第 1 次到达距海岸(中山站)300 km 处, 第 2 次到达 460 km 处, 第 3 次到达 1100 km.

雪积累速率标杆测量每 2 km 进行, 由于 DT 路线 460~1100 km 仅进行了一次考察, 所获积累速率资料仅限于前 460 km. 在 LGB 路线上 17 个地点钻取了 24 支浅雪芯, 深度 10~60 m, 但比较详细的观测和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析(每 3 cm 切样)主要在西侧(LGB00~LGB16), 深度 10~27 m. 在 DT 线路上, 于 300、460、800 和 1100 km 等 4 个地点钻取了 5 支 50~100 m 冰(雪)芯.

2002-01-22 收稿, 2002-04-24 收修改稿

* 中国科学院知识创新项目(KZCX2-303)、科技部社会公益项目(2001DIA50040)、科技部国际合作重点项目(2001CB711003)和国家自然科学基金项目(批准号: 49971021)资助

E-mail: jwren@ns.lzb.ac.cn

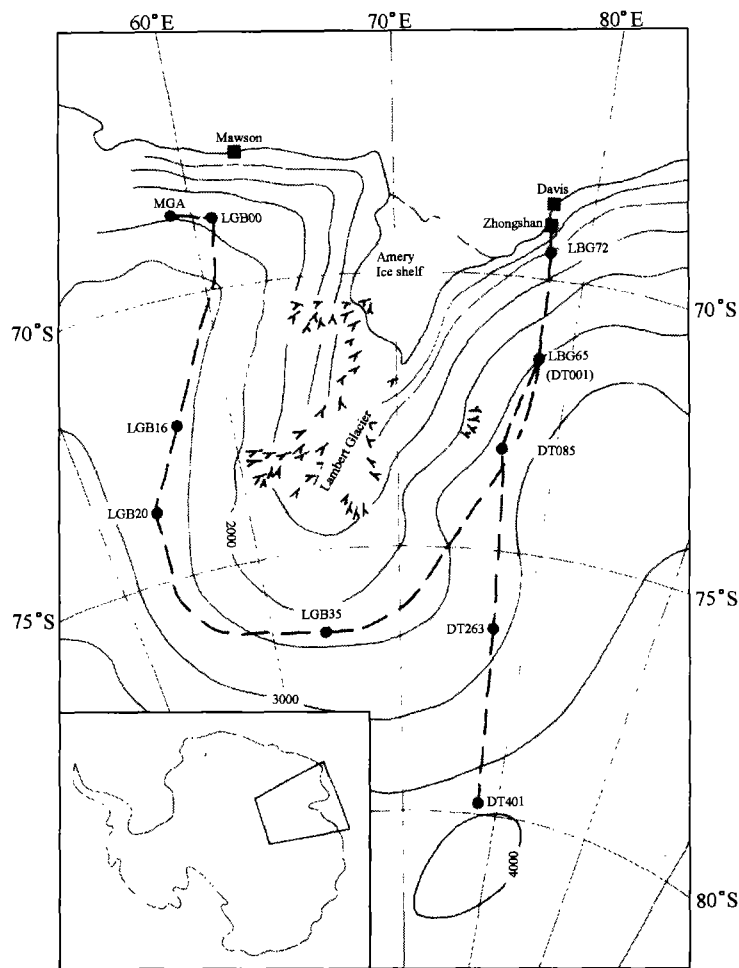


图1 Lambert 冰川流域及考察路线(短划线)示意图

2 Lambert 冰川流域表面积累速率分布特征

图2列举了东侧和西侧某些年份的积累速率分布,其中图2(a)为从中山站向 Dome A 方向 460 km 区段上 1998~1999 年的测量结果,图2(b)为 LGB00 至 LGB16 区段 1990~1994 年测量结果的平均值。从图2我们可以看出,积累速率分布的总趋势是自海岸向内陆不断减小,但东、西两侧有明显的差异:东侧在海岸附近积累速率最高,在向内陆减小过程中于 200~300 km 段出现非常明显的低值区;西侧则在近海岸并未出现最高值,而是在距海岸 300~500 km(距 LGB00 点 180~380 km)段出现比较稳定的高值。从地形上看,东侧从海岸到 500 km 均为海拔持续上升,但西侧则为前 300 km 不断上升,然后保持较为平坦的地势。另外,西侧自海岸到 LGB00 约 100 km 范围内有许多山峰出露,

但东侧仅在海岸几千米范围出现裸岩。这些地形差异可导致降雪沉积过程和沉积后重分布的差异。另外,从已有的水汽传输模拟研究结果^[3,4]分析,东侧接受水汽似乎比西侧要多一些,而且东侧气流入侵比西侧容易。如果计算积累速率平均值,则可得:东侧自中山站向内陆 460 km 区段上 1998~1999 年为 $171 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,从 LGB72 向内陆 300 km 段内 1994 年平均为 $124 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;西侧 LGB00 至 LGB16 段内 1994 年平均为 $94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

东侧自 LGB72 向内陆 300 km 范围 1994 年以来的测量结果表明,1994~1999 年积累速率增加了 $49.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,增加幅度为 40%。从空间变化来看,近海岸区域增加量较大,向内陆方向逐渐减小,特别是 1997~1999 年间这种特征更为显著。

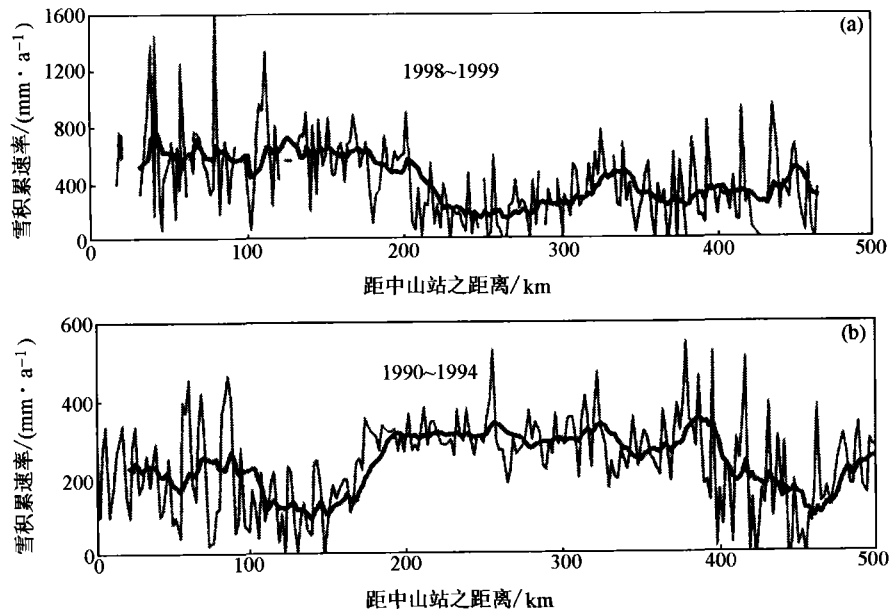


图2 Lambert冰川每2 km标杆测量获得的积累速率分布
(a) 东侧; (b) 西侧

3 Lambert冰川流域积累速率的变化

通过冰芯研究可恢复过去积累速率的变化,但在缺乏绝对定年资料的情况下,冰芯年代序列的可靠性就是非常关键的问题.对Lambert冰川西侧雪层剖面和积累速率变化的研究表明^[5],由于风力很大,雪的搬运和重新堆积可导致较低积累速率年层在同位素剖面和地层学剖面中显示不出来.因而认为,只能对积累速率较高的地点和内陆深处风力较小、地形平坦的地点,通过同位素、固体电导和地层学剖面的综合对比确定几十年时间尺度的年层序列.在东侧区域,对DT001雪坑和冰芯同位素与主要阴、阳离子的剖面分析表明^[6],同位素剖面仍然不能用于冰芯定年,但用几种主要离子剖面对比定年可得到比较好的效果.

图3展示了Lambert冰川东侧距海岸约300 km处DT001和约500 km处DT085冰芯研究得出的近50年来积累速率的变化.可以看出,过去50年以来积累速率变化的总趋势为上升,但在20世纪60年代曾有所降低. Ren等^[7,8]通过对西侧LGB00~LGB16区段10~27 m冰芯的研究认为,过去30~60年间积累速率呈下降趋势,其下降值在靠近海岸较大,在LGB00向西约40 km处的MGA达到37%;向内陆方向逐渐减小,在LGB16为16%;20世纪80年代后期以来有所增加.

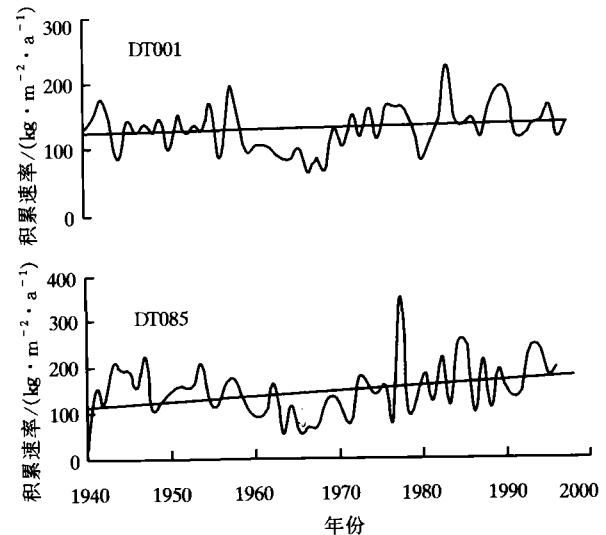


图3 Lambert冰川东侧DT001和DT085冰芯恢复的过去50年积累速率变化

4 Lambert冰川流域的物质平衡状态

过去几十年间,关于Lambert冰川流域物质平衡研究已有许多报道,但大多是根据小区域观测资料进行估计,可靠性较低,但所得结果基本都倾向于物质平衡处于正平衡状态.如Budd等^[9,10]对Amery冰架的测量结果的分析, Morgan等^[11]对Mawson站向内陆至2000 m高度20世纪70年代的积累速率和运动速度的测量结果的讨论, Allison^[12]

根据冰川谷地中央海拔1500~2000m的一个断面上考察资料所做的估算和 McIntyre^[13]据卫星影像的判断等。最近, Fricker 等^[2]根据 LGB 考察路线冰体运动速度和厚度测量结果, 计算了越过该断面的冰流通量, 然后根据不同类型积累速率分布就该流域物质平衡进行了计算, 可所得结果却似是而非, 认为主要是内陆地区积累速率资料不够充分。

由于 DT 路线向内陆延伸较远, 虽然自 500 km 以后积累速率标杆尚未进行复测, 但根据某些地点雪坑观测和冰芯地层学剖面, 可粗略确定该路线上积累速率分布, 这对 Lambert 冰川流域内陆深处是很有意义的资料补充。

在补充这些新资料以后, 我们重新计算了 LGB 上游区域物质积累总量, 其结果为: 东区 12.7 Gt·a⁻¹, 西区 15.4 Gt·a⁻¹, 中区 21.6 Gt·a⁻¹, 总计为 49.7 Gt·a⁻¹, 比 LGB 考察断面冰通量 44 Gt·a⁻¹高出 13%, 意味着该区域处于物质正平衡状态(表 1)。

表 1 LGB 考察路线上游区域计算出的
积累量与流出该区域的冰量

	东部	中部	西部	总计	误差估计/%
面积/10 ⁴ km ²	16.9	41.8	21.7	80.4	±(3~5)
积累量/Gt·a ⁻¹	12.7	21.6	15.4	49.7	±(8~15)
流出冰量/Gt·a ⁻¹	8.6	21.8	13.6	44.0	±(5~10)
物质平衡/%	47.7	-0.9	13.2	13.0	±(10~20)

对比 Fricker 等的研究^[2], 我们增加了 Lambert 冰川东侧内陆深处一些地点实测资料, 使其计算结果可靠性有所增加。但是, 在靠近分冰岭的区域实测资料仍然比较少, 因而根据现有资料外推而得到

的积累速率分布仍存在较大的不确定性。不过, 考虑到计算中积累速率数据大多为 1990~1994 年间的观测值, 而近几年积累速率增加又比较明显, 目前物质平衡处于正平衡的可能较大。因此, 如果继续保持目前气候条件的话, Lambert 冰川流域的冰体厚度将会增厚。

5 南极冰盖的物质平衡状态

南极冰盖物质平衡各主要分量实测资料的丰富程度不尽相同。过去几十年在不同区域进行的考察已经积累了比较丰富的积累速率观测资料, 使我们能够获得整个冰盖积累速率分布的概貌^[14,15]。冰盖边缘崩解主要依赖于卫星遥感监测, 需要较长时间才能确定崩解量平均值。关于冰架底部消融, 实测资料极为贫乏, 根据模式计算的结果多为区域性的, 有些研究者也曾汇总有关资料对整个南极冰盖的底部消融进行估计, 但差异较大。Jacobs 等^[16]曾对此做过较详细的述评, 按照他们的分析, 底部消融估算值的误差可达 50%。

表 2 为 Jacobs 等^[16]汇总的 20 世纪 90 年代以前南极冰盖物质平衡研究的一些主要结果。从该表中可看出, 有些研究者对物质平衡各分量区分较细, 将陆地冰和冰架分别讨论, 有些则比较笼统, 仅给出总积累和总消融。由于物质平衡各分量的估算都存在误差, 特别是冰架崩解和冰架融化的估计误差很大, 而且有些研究者在估算时将南极半岛也没有包括在内, 对物质平衡状态的结论大相径庭。Jacobs 等^[16]似乎是对各方面因素考虑得相对比较全面的, 但毕竟实测资料有限, 其结果还是有很大的不确定性。

表 2 南极冰盖物质平衡各分量计算结果统计^[16]

(单位: Gt·a⁻¹)

陆地冰积累	冰架区积累	积累总计	冰架崩解	冰架融化	融化径流	平衡值	文献
		1749	-855	-251		+487	[17]
		2000	-1700	-550		-400	[18]
1490	356	1885	-1053	-293			[19]
		2080	-1450	-200	-10	+420	[20]
		2000	-2400	-320	-60	-720	[21]
		2000	-1800			+200	[22]
			-2300			-	[23]
1468	495	1963					[24]
		2141					[25]
1817	287	2104					[26]
		2200	-2200			0	[27]
1660						+180	[28]
1528	616	2144	-2016	-544	-53	-469	[16]
误差估计/%		±20	±33	±50	±50		

最近几年关于冰盖表面积累量又有一些新的估计,例如, Bromwich 等^[29]依据水汽平衡分析估计出冰盖总积累量为 $2196 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$; Turner 等^[30]用类似的方法得出的值为 $2106 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$; Vaughan 等^[31]采用基于 ERS-1 卫星测高技术建立的数字高程模型和以传统资料作补充的方法,对整个南极冰盖作了流域区划,根据冰盖表面物质平衡实测资料,计算了每个流域的表面物质平衡,进而估算出整个南极冰盖表面物质积累为 $2288 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,其中陆地冰积累量为 $1811 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$; Huybrechts 等^[32]汇总各种积累速率观测资料估计出的总积累量为 $2344 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,其中陆地冰为 $1924 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$. Jacobs 等^[33]后来对冰架消融得出的重新估计值为 $756 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$. 将这些新的研究成果与表 2 综合起来分析,可大致得出南极冰盖物质平衡各分量和平衡状态为:陆地冰积累量 $(1829 \pm 87) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,总积累量 $(2233 \pm 86) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,冰山崩解量 $(2072 \pm 304) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,冰架融化 $(540 \pm 218) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,陆地冰边缘线上冰流通量 $(2209 \pm 32) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,平衡值 $(-389 \pm 384) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,其误差估计为 $\pm 10\%$.

6 南极冰盖变化趋势及其对海平面的影响

根据不同地点积累速率变化研究,南极冰盖大部分区域积累速率呈增加趋势,小部分区域变化不明显或呈减小趋势.增加趋势比较明显的区域是东南极冰盖东部、西南极冰盖除 Ronne 冰架外的大部分区域.东南极冰盖从 Lambert 冰川向西,既有积累速率减小的报道,也有变化不明显的研究结果.另外,南极点的变化趋势也似是而非,尽管积累速率增大的结果似乎占优.如果气候变暖,随着海洋蒸发增强,冰盖上的降水亦将增大,冰盖积累速率也会增大.关于边缘崩解和冰架融化的变化趋势的直接证据非常缺乏,但如果气候变暖的话,他们肯定也会增大.但是在升温初期,降水量增大的效应比较明显,也更为直接.而如果温度持续升高,则冰盖消融增大的结果会逐渐显示出来.

那么,南极冰盖这种物质平衡状态和趋势对海平面有何影响呢?一般认为,目前海平面的上升,其上升速率为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,主要归因于气温升高导致的海水热膨胀、温带冰川的消融增大和格陵兰冰盖物质负平衡,南极冰盖被认为大致处于零平衡状态而对海平面没有重要影响.按照 Warrick 等的估计^[27], $0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 归因于海水热膨胀,另有

$0.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 归因于小冰川和冰帽的融化, $0.25 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 归因于格陵兰冰盖,剩余 $0.45 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升量的来源尚不清楚.于是,又有人认为应考虑南极冰盖的作用,如 Jacobs 等^[16]估算的南极冰盖物质平衡为 $-469 \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$,如果假定其中一半为海平面以下冰体消融,剩余部分也足以解释 $0.45 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的海平面上升.但是,根据目前南极冰盖物质平衡状态趋于向正平衡发展的趋势来看,南极冰盖近期内对海平面不会有明显影响,即使冰架边缘崩解有所增大,也因为这部分冰体本来就漂浮在海洋中而不产生海平面上升效应.

当然,如果气候持续变暖,冰盖物质支出进一步增大,尤其是陆地冰的消融增大的话,就会使海平面上升,只是这可能需要较长时间.另外,在气候持续变暖的情况下,西南极冰盖是否会发生突变将是非常重要的研究课题,因为西南极冰盖具有较大的不稳定性,是引起海平面上升的最重要潜在因素.

致谢 本文应用的中山站-Dome A 断面现场观测资料来自中国南极考察队内陆冰盖考察队全体人员的辛劳工作,澳大利亚南极局 Ian Allison 博士等提供了 Lambert 冰川考察路线上的运动速度和冰体厚度等资料,在此向他们致谢.

参 考 文 献

- 1 Weller G E. The Role of the Antarctic in Global Change: An International Plan for a Regional Research Programme. Cambridge: SCAR, 1993
- 2 Fricker H A, et al. Mass balance of the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf system, East Antarctica: A comparison of computed balance fluxes and measured fluxes. *J Glaciol*, 2000, 46(155): 561
- 3 Connolley W M, et al. A modeling and observational study of East Antarctic surface mass balance. *J Geophys Res*, 1996, 101(D1): 1335
- 4 Slonaker R L, et al. Atmospheric moisture transport across the Southern Ocean via satellite observations. *J Geophys Res*, 1999, 104(D8): 9229
- 5 任贾文,等.东南极洲 Lambert 冰川流域西部地区的雪层剖面和积累速率变化特征. *冰川冻土*, 1995, 17(3): 274
- 6 李忠勤,等.南极洲伊丽莎白公主地区冰雪中 $\delta^{18}\text{O}$, Cl^- , Na^+ 和 Ca^{2+} 年层效应初探. *科学通报*, 1999, 44(19): 2114
- 7 Ren Jiawen, et al. Distribution of stable isotopes in surface snow and climatic change in past decades over the Lambert Glacier basin, East Antarctica. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(4): 425
- 8 Ren Jiawen, et al. Variations of snow accumulation and temperature over past decades in the Lambert Glacier basin, East Antarctica.

- Ann Glaciol, 1999, 29: 29
- 9 Budd W F, et al. The Amery Ice Shelf. In: Oura H ed. Physics of Snow and Ice, Vol. 1, Part 1. Sapporo, Japan. Hokkaido University, 1967. 447
- 10 Budd W F, et al. Results from the Amery Ice Shelf Project. Ann Glaciol, 1982, 3: 36
- 11 Morgan V I, et al. Mass balance studies in East Antarctica. IAHS Publ, 1981, 131: 253
- 12 Allison I. The mass budget of the Lambert Glacier drainage basin, Antarctica. J Glaciol, 1979, 22(87): 223
- 13 McIntyre N F, et al. A re-assessment of the mass balance of the Lambert Glacier drainage basin, Antarctica. J Glaciol, 1985, 21(107): 34
- 14 Robin G de Q, et al. Fifty years of progress in understanding ice sheets. Journal of Glaciology, 1987, Special Issue: 33
- 15 秦大河, 等. 南极冰盖的物质平衡与海平面变化. 见: 秦大河, 等主编. 南极冰川学. 北京: 科学出版社, 2001
- 16 Jacobs S S, et al. Melting of ice shelves and the mass balance of Antarctica. J Glaciol, 1992, 38(130): 375
- 17 Meier M F. Snow and ice in a changing hydrological world. Journal des hydrologiques, 1983, 28(1): 3
- 18 Losev K S. Calculations of the mass balance of the Antarctic ice cap. Sov Antarctic Exped Inf Bull, 1963, 5(1): 60
- 19 Barkov N I. Ice Shelves of Antarctica. Balkema: Rotterdam, 1985
- 20 Bull C. Snow accumulation in Antarctica. In: Quam L O, ed. Research in the Antarctica. Washington DC: American Association for the Advancement of Science, 1971. 367~421
- 21 Kotlyakov V M, et al. The ice budget of Antarctica. Polar Geogr Greol, 1978, 2(4): 251
- 22 Budd W F, et al. The state of balance of the Antarctic ice sheet-an updated assessment 1984. In: Polar Research Board ed. Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level: Effect of a CO₂-induced climatic change. Washington DC: National Academy Press, 1985. 172
- 23 Orheim O. Iceberg discharge and the mass balance of Antarctica. In: Polar Research Board ed. Glaciers, Ice Sheets, and Sea Level: Effect of a CO₂-induced Climatic Change. Washington DC: National Academy Press, 1985. 210
- 24 Giovinetto M B, et al. Surface balance in ice drainage systems of Antarctica. Antarctic J U S, 1985, 20(4): 6
- 25 Giovinetto M B, et al. Choosing between some incompatible regional surface-mass-balance data sets in Antarctica. Antarctic J U S, 1989, 24(1): 7
- 26 Fortuin J P, et al. Parameterization of the annual surface temperature and mass balance of Antarctica. Ann Glaciol, 1990, 14: 78
- 27 Warrick R, et al. Sea level rise. In: Houghton J, et al. eds. Climate change: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 257~281
- 28 Bentley C R, et al. Mass balance of Antarctica and sea level change. In: Weller G, et al. eds. Polar Regions and Climate and Global Change. Fairbanks: University of Alaska, 1991. 481
- 29 Bromwich D H, et al. Antarctic precipitation and its contribution to the global sea level budget. Ann Glaciol, 1998, 27: 220
- 30 Turner J, et al. Spatial and temporal variability of net snow accumulation over the Antarctic from ECMWF re-analysis project data. International Journal of Climatology, 1999, 19(7): 697
- 31 Vaughan D G, et al. Reassessment of net surface mass balance in Antarctica. J Climate, 1999, 12(4): 933
- 32 Huybrechts P, et al. Balance velocities and measured properties of the Antarctic ice sheet from a new compilation of gridded datasets for modeling. Ann Glaciol, 2000, 30: 47
- 33 Jacobs S S, et al. Antarctic ice sheet melting in Southeast Pacific. Geophys Res Lett, 1996, 23(9): 957