

Lambert 冰川流域东西两侧气候环境变化

张明军^{1,2}, 效存德², 任贾文², 李忠勤², 秦大河²

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 1992~1993 年, 中国科学家参加了澳大利亚南极考察队对 Lambert 冰川流域西侧的考察, 1996 起, 中国南极考察队对 Lambert 流域东侧进行了多次考察。本文基于以上考察的研究成果, 对 Lambert 冰川流域东西两侧气候环境变化特征进行了对比研究。结果表明: Lambert 冰川两侧无论是降水还是温度, 在几十年时间尺度上其变化趋势都存在着明显差异, Lambert 冰川东西两侧从海岸向内陆近 500 km 断面上表面积速率的分布截然不同, 同时, Lambert 冰川东西两侧的 $\delta^{18}\text{O}$ 随温度的变化率 (又简称 δ -温度梯度) 差别也很大, 另外, 反映水汽输送强度的海盐离子浓度近 50 年来的变化趋势相反。以上证据表明, Lambert 冰川谷地可能是东南极洲一条重要的气候界线, 其原因可能是特殊的局地环流 (顺时针的气旋活动) 导致不同的水汽来源, 再加上局部地形的影响所致。

关键词: Lambert 冰川流域; 气温; 降水; 水汽输送; 地形

1 引言

Lambert 冰川流域位于 $68.5^{\circ}\sim 81.15^{\circ}\text{S}$, $40^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$ 之间, 是东南极高原最大的冰川系统 (图 1)。它主要包括 Lambert 冰川、冰川上游及东西两侧冰川补给区和下游 Army 冰架 3 个部分, 总流域面积 $1.55 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1], 约占东南极冰盖总面积的 1/8。其中 Amery 冰架面积 6.9 万 km^2 ^[2], Lambert 冰川位于东南极地盾最大的一个地堑型谷地里, 底床起伏很大, 变化幅度达 3 500 m 以上, 其最低点低于海平面 2 000 m 以下^[3]。Lambert 冰川周围有许多冰原

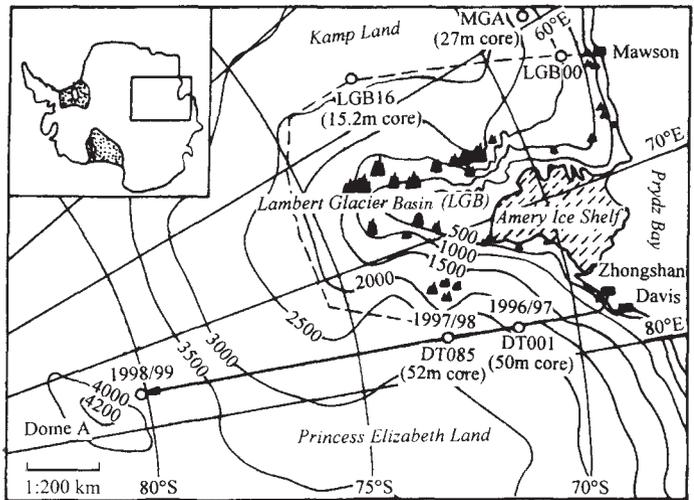


图 1 Lambert 冰川流域考察路线和主要冰芯钻取地点示意图

Fig. 1 The Lambert Glacier Basin (LGB) traverse route and locations of ice cores drilled over the LGB

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-04-09

基金项目: 科技部国际合作重点项目 (2001CB711003); 国家自然科学基金项目 (40305007); 西北师范大学科技与知识创新工程项目 (NWNNU-KJCXGC-02-20) [Foundation: The Key International Cooperation Project of Ministry of Science and Technology of China, No.2001CB711003; National Natural Science Foundation of China, No. 40305007; The Science and Technology Innovation Project of Northwest Normal University, No. NWNNU-KJCXGC-02-20]

作者简介: 张明军 (1975-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 副教授, 主要从事冰川与环境演变方面的研究。

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

岛山出露，地形异常复杂^[4]。

20 世纪 60 年代和 70 年代澳大利亚曾对 Lambert 冰川流域下游 Aermey 冰架和西侧近海岸区域及冰川谷地某些地段进行过现场考察，但重点为物质平衡状态研究^[3, 5-7]。1990-1994 年，澳大利亚南极考察队对 Lambert 冰川流域进行了横穿考察（简称 LGB 考察），特别是在西侧区段获得了连续几年积累速率观测资料，并通过浅冰芯研究揭示了过去几十年气候变化^[8-10]。

自 1996 年起，中国南极考察队连续 5 次进行了中山站 -Dome A 断面考察，获取了大量的观测资料，并钻取了数支浅冰芯，填补了 Lambert 冰川流域东侧伊丽莎白公主地无冰芯研究的空白。冰芯的钻取、分析过程以及定年在文献^[11-13]中有详细描述。本文对以上考察的现有成果进行总结对比，以揭示整个 Lambert 冰川流域的气候环境变化特征。

2 近 50 年来 Lambert 冰川流域东西两侧气候变化趋势

图 2 左面 3 图从上到下依次为近 50 年来 Lambert 冰川流域东侧 Davis 气象站记录的气温、DT001 和 DT085 冰芯记录的 $\delta^{18}O$ 和积累率变化情况，图 2 右面 3 图从上到下依次为近 50 年来 Lambert 冰川流域西侧 Mawson 气象站记录的气温、MGA 和 LGB16 冰芯记录的 $\delta^{18}O$ 和积累率变化情况，图中 $\delta^{18}O$ 为七点滑动平均值，直线为一元线性回归曲线。

为了揭示整个 Lambert 冰川流域近 50 年来的气候变化趋势，对 Lambert 冰川流域东侧的 DT001 和 DT085 两支冰芯记录的 $\delta^{18}O$ 和积累率与其西侧的 MGA 和 LGB16 两支冰芯的记录进行了对比，并同 Lambert 冰川流域东侧的 Davis 气象站和西侧的 Mawson 气象站记录的气温资料进行了比较（图 2）。结果表明，近 50 年来，Lambert 冰川流域东西两

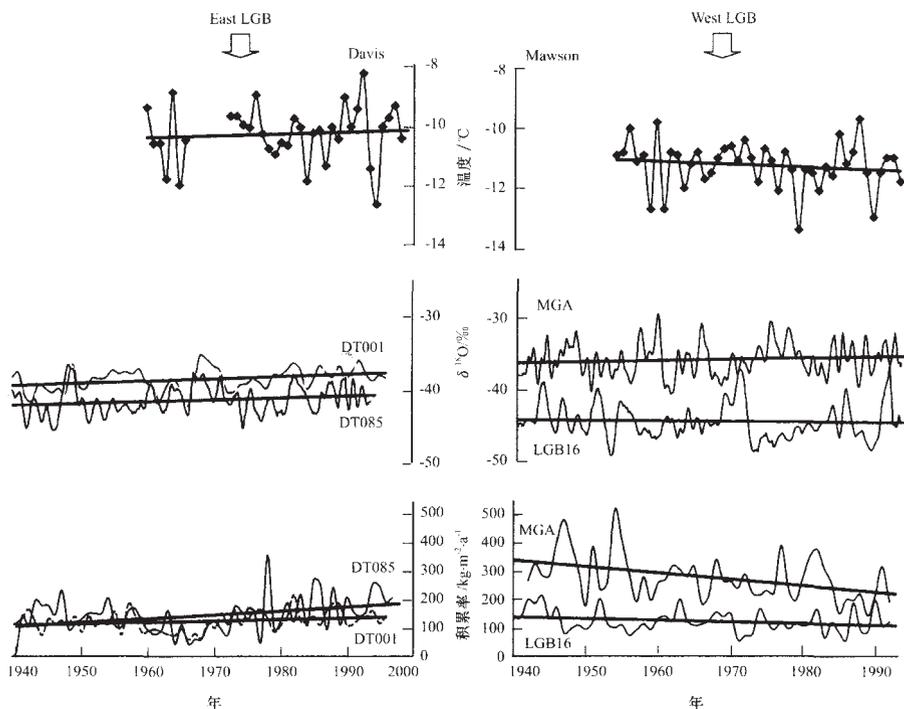


图 2 近 50 年来 Lambert 冰川流域东西两侧冰芯记录的 $\delta^{18}O$ 和积累率与气象站记录的气温变化情况

(Fig. 2) Variations of the seven-point smoothed $\delta^{18}O$ and the annual accumulation rates at DT001, DT085, MGA and LGB16 during the period 1940-1990s. Instrumental surface air temperature at Davis and Mawson is also shown

侧的气温和降水呈现出相反的变化趋势，即：Lambert 冰川流域东侧的伊丽莎白公主地近 50 年来气温和降水呈现增加趋势，而在 Lambert 冰川流域西侧，近 50 年来积累率明显下降，而 $\delta^{18}O$ 反映的气温却无明显变化趋势。Lambert 冰川两侧的气象站资料支持了冰芯记录的气温变化格局。同时，Lambert 冰川流域东侧两支冰芯记录的 $\delta^{18}O$ 和积累率的变化特征极为相似（图 2），而西侧两支冰芯则不然。

从 4 支冰芯记录的 10 年尺度上的 $\delta^{18}O$ 和积累率的情况可以看出，东侧的两支冰芯显示 20 世纪 60 年代是一个降水减少、温度降低的时期，而西侧却没有得到反映。同时，东侧的两支冰芯表明 1970 年以来 $\delta^{18}O$ 和积累率都呈增加趋势，西侧的冰芯显示 1970 年以来积累率显著减少， $\delta^{18}O$ 的变化比较复杂。

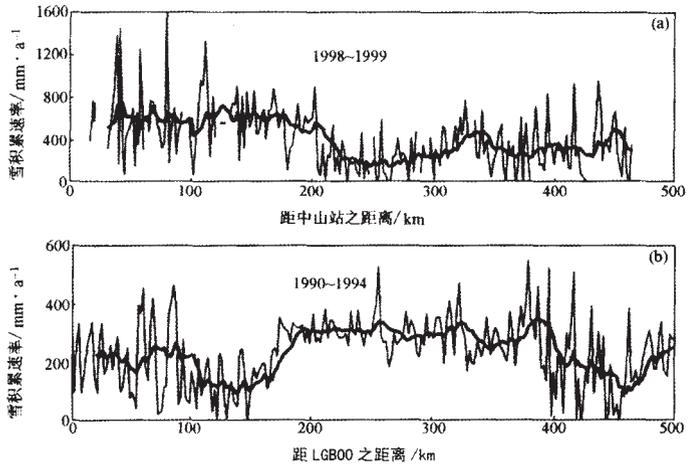


图 3 Lambert 冰川流域东侧和西侧每 2 km 标杆测量获得的积累速率（图中粗线表示 11 点滑动平均^[10]）

Fig. 3 The distribution of the accumulation rate measured by accumulation canes at 2 km intervals along the nearly 500 km of the traverse lines on both sides of the LGB. The eleven-point-smoothed profiles give the trends of spatial variations (bold lines)

3 Lambert 冰川流域东西两侧积累速率分布特征

从 Lambert 冰川东侧从中山站向内陆和西侧从 LGB00 点向内陆实测表面积累速率的分布情况可以看出（图 3）：Lambert 冰川东西两侧从海岸向内陆近 500 km 断面上表面积累速率的分布截然不同^[10, 14, 15]。东侧自海岸向内陆整体上积累速率呈不断减小趋势，符合普遍规律，因为一般说来向内陆降水量逐渐减少。不过，从图中还可以看出，东侧近 500 km 断面上表面积累速率大概可以分为三段：0~200 km，高积累区；200~300 km，低积累区；300~460 km，中积累区。图 3b 显示，西侧自海岸向内陆积累速率的分布与东侧截然不同，西侧积累速率的最高值不在海岸，而是在距 LGB00 点 180~380 km 段出现比较稳定的高值。造成 Lambert 冰川流域东西两侧表面积累速率这种分布特征的原因可能是受地形的影响。Lambert 冰川流域东侧从海岸到 460 km 均为海拔持续上升，但西侧则为前 150 km 不断上升，然后保持较为平坦的地势（图 4）。

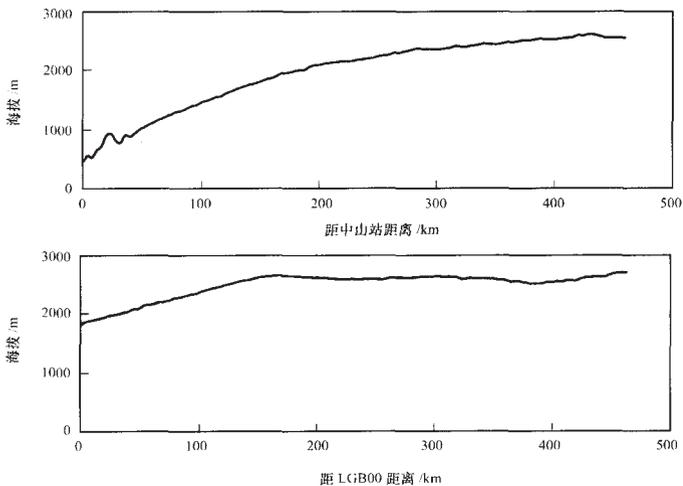


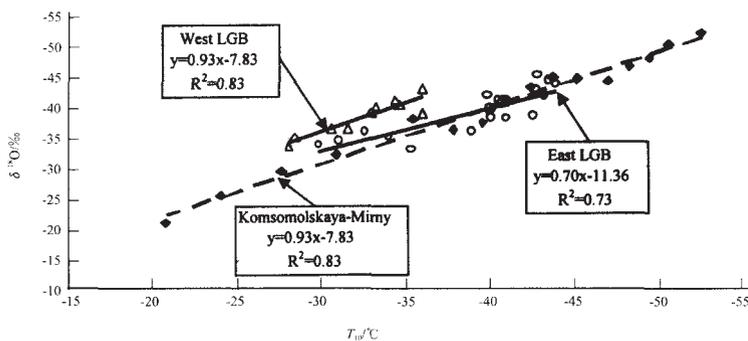
图 4 Lambert 冰川流域东西两侧海拔高度的变化

Fig. 4 Variations of the height along the nearly 500 km of the traverse lines on both sides of the LGB

4 Lambert 冰川流域东西两侧氧稳定同位素比率与温度的关系

图 5 所示为表面 2 m 雪层平均 $\delta^{18}\text{O}$ 与年平均温度的相关关系，这里使用的年平均温度均为冰盖 10 m 深处测得温度 (T_{10})。南极地区稳定同位素比率与年平均温度的关系已有许多研究报道，Dansgaard 等和 Robin 等对早期的测试分析结果曾做过总结^[16, 17]。这些研究显示，不同区域 $\delta^{18}\text{O}$ 值与温度线性关系中的常数有一定差异，所以研究各个区域 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的关系对深冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 剖面的解释至关重要。特别是 δ -温度梯度决定着温度变化幅度的确定，意义更为明显。

Lambert 冰川流域东西两侧 δ -温度梯度具有明显的差异 (图 5)。近年来，秦大河等对“横穿南极”雪样的分析结果展示了首次穿越东南极高原的大断面上 δ -温度梯度在不同区段有所不同^[18]，图 5 中绘出了“横穿南极”路线



上东段 Komsomolskaya 到 Mirnyy 的 δ -温度梯度，可以看出，这一 δ -温度梯度值与 Lambert 冰川流域西侧的 δ -温度梯度比较接近，而与 Lambert 冰川流域东侧的 δ -温度梯度相差较大。

5 Lambert 冰川流域东西两侧海盐离子反映的大气输送强度的比较

1993 年在 Lambert 冰川流域西侧获得的长度为 15.2 m 的 LGB16 冰芯雪冰化学的研究结果表明^[19, 20]：主要的海盐离子 Cl^- 和 Na^+ 浓度在最近 60 年来总体上呈下降趋势，特别是 1932-1952 年间呈波动下降。由于 Cl^- 和 Na^+ 是主要的海盐离子，它们浓度的高低可以指示大气传输能力的强弱，因此，海盐离子浓度指示了 Lambert 冰川流域西侧在 1952 年之前，大气的传输能力较强，而 1952 年之后较弱^[19]。图 6 为 Lambert 冰川流域东侧 DT001 冰芯近 60 年来海盐离子浓度变化情况，从中可以看出，近 60 年来，海盐离子整体上呈现出上升趋势，特别是 20 世纪 70 年代以来，上升趋势非常显著，与积累率和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相似。

6 讨论和结论

从以上的叙述中我们知道，Lambert 冰川两侧无论是降水还是温度，在几十年时间尺度上都存在着明显差异，而且，Lambert 冰川东西两侧从海岸向内陆近 500 km 断面上表面积累速率的分布截然不同，另外，Lambert 冰川东西两侧的 δ -温度梯度差别也很大。这使我们认识到，Lambert 冰川谷地可能是东南极洲一条重要的气候界线，此界线两侧的气候存在明显的差异。

研究表明^[10]，Lambert 冰川两侧降水的差异更为显著，不仅表现在东西两侧的变化趋势截然相反，而且地域范围也比较大。南极冰盖近海岸降水的主要控制因素被认为是气旋活动的结果^[21, 22]。从南极地区水汽传输模拟图^[23]可知，近海岸水汽传输路径为顺时针绕

南极大陆。图 7 为综合 Connolley 等^[23]和 Slonaker 等^[24]的研究而给出的 Lambert 冰川流域及其两侧水汽通量模拟和观测结果。

Lambert 冰川流域东侧的水汽输送通量大于西侧的水汽输送通量(图 7), 而且, 西侧甚至有水汽向外输送的现象, 从而形成 Lambert 冰川谷地大气为顺时针方向的气旋活动。

基于以上认识, 本文试图对 Lambert 冰川流域东西两侧气候变化特征的原因做一探讨: Lambert 冰川流域东西两侧近 50 年来的积累率和气温的变化趋势相反, 东侧积累率增加, 气温升高, 西侧积累率减少, 气温变化趋势复杂, 这可能与 Lambert 冰川谷地特殊的局地环流有关。如前所述, 近 50 年来, Lambert 冰川流域西侧海盐离子 Cl^- 和 Na^+ 的浓度降低, 由于雪冰中 Cl^- 和 Na^+ 的浓度可以反映水汽输送的强度, 因此, 西侧近 50 年来积累率的减少可能因为近 50 年来水汽输送强度的减弱。同样, 东侧的研究表明, 近 50 年来, 雪冰中 Cl^- 和 Na^+ 的浓度升高, 所以水汽输送能力的加强可能导致东侧近 50 年来积累率增加。又由于 Lambert 冰川谷地盛行顺时针方向的气旋活动, 相比较而言, 东侧的水汽来源于低纬地区的气团, 而西侧的水汽来源于高纬地区气团, 不同的水汽来源使得 Lambert 冰川流域东西两侧的气温变化存在明显的差异, 东侧的水汽来源于低纬地区气团, 温度高, 再加上近 50 年来水汽输送强度增加, 使得东侧近 50 年来的气温增加, 从图 7 可以看出, 西侧既有来源于高纬地区气团的水汽, 也有来源于低纬地区气团的水汽, 低纬地区气团的水汽近 50 年来输送能力减弱, 高纬地区气团的水汽输送能力增强, 使得西侧地区近 50 年来气温变化比较复杂。这种差异不仅表现在近 50 年来气温的总体变化趋势上, 还表现在氧稳定同位素比率与温度的关系上。同时, 由于不同的水汽来源, 再加上受地形的影响, 使得 Lambert 冰川东西两侧从海岸向内陆近 500 km

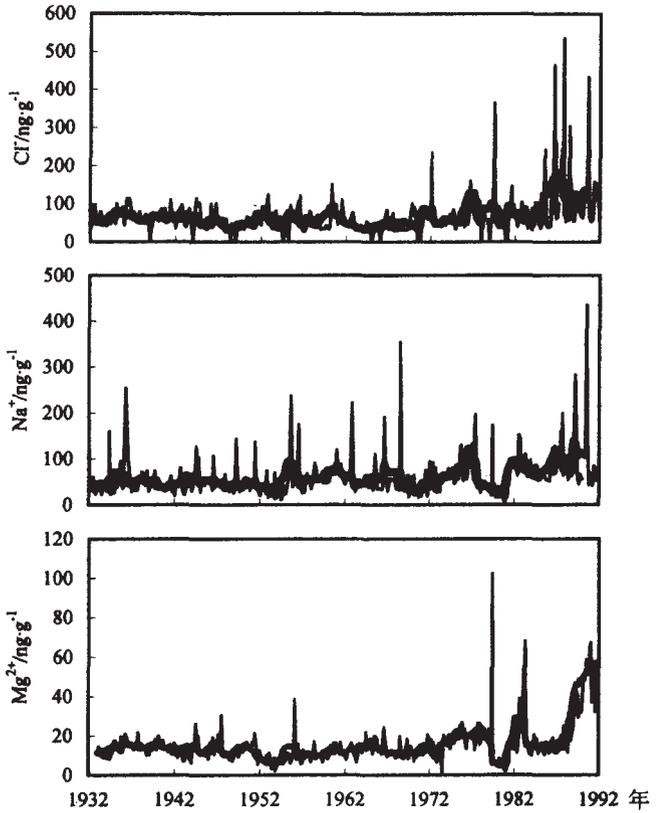


图 6 Lambert 冰川流域东侧 DT001 冰芯近 60 年来海盐离子浓度变化图

Fig. 6 Concentration variations of sea salt ions in the DT001 ice core recovered from east side of LGB

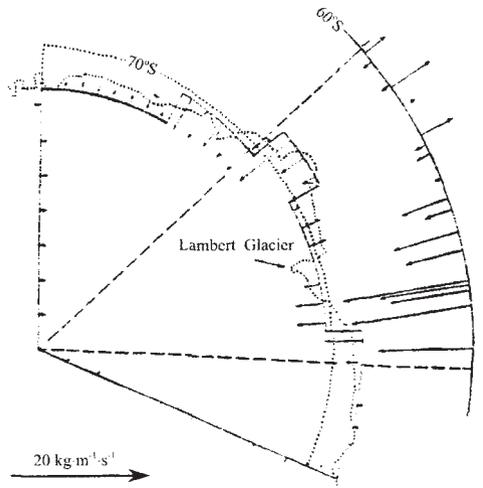


图 7 Lambert 冰川流域海岸水汽通量模拟^[23, 24]

Fig. 7 Modeling of moisture fluxes on the coast region of Lambert Glacier Basin

断面上表面积累速率的分布截然不同。东侧地形从海岸到 460 km 均为海拔持续上升, 如前所述, 本地的降水的变化趋势也是从沿海向内陆递减, 从这一点我们可以看出, 本地的水汽主要来源于周边的海洋, 同时, 从降水的地段性可以看出, 本地区降水的类型主要是水汽受动力抬升形成的地形雨, 具体分析如下, 在沿海至 200 km 范围内, 海拔高度从开始的 386 m 上升到 2 000 m 左右, 水汽在入侵和爬升过程中, 当气温降到凝结温度以下, 水汽即凝结形成大量降水, 而在海拔高度 2 000 m 以上, 由于在前一阶段大量降水, 水汽猛减, 因此, 这一地区的降水量迅速减少并趋于平稳。西侧地形则为前 150 km 不断上升, 然后保持较为平坦的地势, 又由于此地盛行顺时针的气旋活动, 使得前 150 km 的积累率很低, 出现与东侧相反的分布特征。

总之, 特殊的局地环流(顺时针的气旋活动)导致不同的水汽来源, 再加上局部地形的影响, 可能是 Lambert 冰川流域东西两侧的气候存在明显差异的原因。

参考文献 (References)

- [1] Fricker H A, Warner R C, Allison I. Mass balance of the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf system, East Antarctica: a comparison of computed balance fluxes and measured fluxes. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(155): 561-570.
- [2] Phillips H A. Applications of ERS satellite radar altimetry in the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf system, East Antarctica. (Ph.D. Thesis, University of Tasmania), 1999.
- [3] Allison I. The mass budget of the Lambert Glacier drainage basin, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1979, 22(87): 223-235.
- [4] Ren Jiawen, Qin Dahe, Xiao Cunde et al. Mass balance of the Lambert Glacier basin and the change of Antarctic ice sheet. *World Science and Technology Research and Development*, 2002, 24(4): 87-92. [任贾文, 秦大河, 效存德等. Lambert 冰川流域物质平衡和南极冰盖变化. *世界科技研究与发展*, 2002, 24(4): 87-92.]
- [5] Budd W F, Smith I L, Wishart E. The Amery Ice Shelf. In: Oura H (ed.), *Physics of Snow and Ice*, Vol. 1, Part 1. Sapporo, Japan: Hokkaido University, 1967. 447-467.
- [6] Budd W F, Corry M J, Jacka T H. Results from the Amery Ice Shelf Project. *Annals of Glaciology*, 1982, 3: 36-41.
- [7] Morgan V I, Jacka T H. Mass balance studies in East Antarctica. *IAHS Publ.*, 1981, 131: 253-260.
- [8] Highham M, Greven M. Surface mass balance and snow surface properties from the Lambert Glacier basin traverses 1990-94. Hobart, Tasmania, Australia: Antarctic CRC, Research Report 9, 1997.
- [9] Ren Jiawen, Qin Dahe, Allison I. 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): 425-431.
- [10] Ren Jiawen, Qin Dahe, Allison I. Variations of snow accumulation and temperature over past decades in the Lambert Glacier basin, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, 1999, 29: 29-32.
- [11] Zhang Mingjun, Li Zhongqin, Qin Dahe et al. A continuous 250-year record of volcanic activity from Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Antarctic Science*, 2002, 14(1): 55-60.
- [12] Xiao Cunde, Qin Dahe. Climate regime of the coastal Antarctic ice sheet over the past 50 years indicated by the ice-core and meteorological records. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 1-10. [效存德, 秦大河. 冰芯和台站记录的近 50 年来东南极冰盖边缘地区气候变化格局. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 1-10.]
- [13] Li Zhongqin, Zhang Mingjun, Qin Dahe et al. Primary research on the seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$, Cl⁻, NO₃⁻, Na⁺ and Ca²⁺ in the snow and firn recovered from Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(19): 2114-2118. [李忠勤, 张明军, 秦大河等. 南极洲伊丽莎白公主地区冰雪中 $\delta^{18}\text{O}$, Cl⁻, NO₃⁻, Na⁺ 和 Ca²⁺ 年层效应初探. *科学通报*, 1999, 44(19): 2114-2118.]
- [14] Qin Dahe, Ren Jiawen, Kang Jiancheng et al. Primary results of glaciological study along a 1100 km transect from Zhongshan Station to Dome A, East Antarctic ice sheet. *Annals of Glaciology*, 2000, 31: 198-204.
- [15] Ren Jiawen, Xiao Cunde, Qin Dahe et al. Mass balance of the Lambert Glacier basin and the change of Antarctic ice sheet. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(10): 1064-1069. [任贾文, 效存德, 秦大河. Lambert 冰川流域物质平衡和南极冰盖变化. *自然科学进展*, 2002, 12(10): 1064-1069.]
- [16] Dansgaard W, Johnsen S J. Stable isotope glaciology. *Meddelelserom Groenland*, 1973, 197(2): 1-53.
- [17] Robin G de Q (ed.). *The climatic record in polar ice sheets*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1983.
- [18] Qin Dahe, Petit J R, Jouzel J et al. Distribution of stable isotopes in surface snow along the route of the 1990 International Trans-Antarctica Expedition. *Journal of Glaciology*, 1994, 40(134): 107-118.
- [19] Sun Junying. Study on chemistry of aerosol and snow/ice from cryosphere: cases studies at the Antarctic, the Arctic and

western China. Ph.D. Thesis, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2002. [孙俊英. 冰冻圈大气气溶胶和雪冰化学研究 -- 以南、北极和中国西部高山区为例. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士论文, 2002.]

- [20] Sun Junying, Ren Jiawen, Qin Dahe. 60 years record of biogenic sulfur from Lambert Glacier basin firn core, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 362-367.
- [21] Morgan V I, Goodwin I D, Etheridge D M et al. Evidence from Antarctic ice core for recent increase in snow accumulation. *Nature*, 1991, 354(6348): 58-60.
- [22] Bromwich D H. Snowfall in high southern latitudes. *Review of Geophysics*, 1988, 26 (1): 149-168.
- [23] Connolley W M, King J C. A modeling and observational study of East Antarctic surface mass balance. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D1): 1335-1343.
- [24] Slonaker R L, Van Woert M L. Atmospheric moisture transport across the Southern Ocean via satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D8): 9229-9249.

Climatic and Environmental Features on Both Sides of the Lambert Glacier Basin

ZHANG Mingjun^{1,2}, XIAO Cunde², REN Jiawen², LI Zhongqin², QIN Dahe²

(1. *Geography and Environment College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: During the 1992-1993 joint Australian-Chinese over-snow traverse on the western Lambert Glacier Basin (LGB), two firn cores were drilled respectively at MGA and LGB16. During the 1996-1997 and 1997-1998 austral summers, two firn cores were drilled respectively at DT001 and DT085 on the eastern LGB. Based on the achievements made during the expeditions, the climatic and environmental features on both sides of the LGB have been studied. Results show that during the past 50 years, the trends of both air temperature and accumulation rate show a slight increase on the east side of the LGB, in contrast to the west side of the LGB. The spatial trends of the accumulation rate measured by accumulation canes at 2 km intervals along the nearly 500 km of the traverse lines on both sides of the LGB are different. Moreover, correlations of $\delta^{18}\text{O}$ vs T_{10} along the two sides of the LGB are also different. In addition, the variations of sea salt ion concentrations show different trends in the past 50 years. All the evidences show the Lambert Glacier is a dividing region for the different climatic regimes over the East Antarctic ice sheet, which may be due to different moisture resources resulted from the special local circumfluence such as cyclone activities and local terrain influences. The International Trans-Antarctic Scientific Expedition (ITASE) has its initial aim to reveal an overall spatial pattern of climatic change on Antarctic ice sheet for the past 200 years. This study re-confirms the importance of continental to regional scaled circulation to annual-decadal scaled climatic change in Antarctica.

Key words: Lambert Glacier Basin air; temperature; precipitation; moisture transportation and terrain