

南极冰盖边缘近 250 年来气温变化的地域分布特征

张明军¹, 效存德², 李忠勤², 任贾文², 秦大河², 康建成³, 李军⁴

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 3. 中国极地研究所, 上海 200129;

4. Antarctic CRC and Australian Antarctic Division, Hobart, 7001, Australia.)

摘要: 通过对南极冰盖边缘 17 支浅冰芯氧同位素的对比研究, 揭示了整个南极冰盖边缘近 50 年来、150 年来和 250 年来气温变化的地域分布特征。近 50 年来, 南极冰盖边缘的氧同位素温度有的呈现上升趋势, 有的呈现下降趋势, 但气温变化的地域规律性不强; 近 150 年来, 南极冰盖边缘的同位素温度的升高和降低趋势大致呈现出一种交替分布的态势; 近 250 年来, 南极冰盖边缘所有的氧同位素温度都记录了小冰期的降温事件。气温的这种地域分布特征可能是南大洋独特的环流形式——环南极波 (ACW) ——在特殊地形 (如大的冰盆) 影响下, 在南极冰盖边缘的表现形式, 并且随着时间尺度的不同, 南大洋独特的环流形式、ACW 和地形的影响强度各异。

关 键 词: 南极; 冰芯; 气温; 地形; 环南极波; 绕极流

中图分类号: P467

1 引言

描述和认识季节、年、十年和百年时间尺度上气候变化的物理机制和可预报性, 通过发展全球耦合的气候模式扩大季节到年际尺度气候预报的范围并提高准确度, 是当前气候变化研究的重点和突破口之一。

广袤的南极大陆因缺乏长序列器测气象记录, 给气候变化 (即使百年尺度) 的研究带来困难。目前为止, 对南极洲短期气候变化的历史与驱动机制尚不清楚, 就南极地区如何响应中、低纬地区的气候变化亦认识不足。因此, 从浅冰芯中提取高分辨率气候信息成为最佳研究途径。从 20 世纪 90 年代初开始, 国际南极冰川学界出台了“国际横穿南极科学考察计划” (简称 ITASE), 从属于“南极地区的全球变化 (GLOCHANT) 计划”, 旨在以若干个国家执行各自独立的断面考察对南极冰盖实施网状覆盖性冰芯钻取, 重点研究过去 200 年以来的气候、环境变化^[1]。目前, 美国在西南极冰盖、欧共体国家在 Droning Maud 地、日本在 Mizuho 高原, 澳大利亚在 Lambert 冰川流域均已执行了数年

收稿日期: 2002-07-10; 修订日期: 2002-11-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-303); 科技部国际合作重点项目 (2001CB711003); 国家自然科学基金资助项目 (49971021) [Foundation Item: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-303, Key International Cooperation Project of Ministry of Science and Technology of China, No. 2001DIA50040; National Natural Science Foundation of China, No. 49971021]

作者简介: 张明军 (1975-) 男, 甘肃宁县人, 博士生, 主要从事冰川与环境演变研究。E-mail: zhangmj@ns.lzb.ac.cn

到十年的断面考察,在各自断面上钻取了一系列浅冰芯,恢复出几乎整个南极冰盖主要地理单元过去数百年来气候变化的概貌,但这一图式给科学家们带来了迷惑。比如,在冰盖不同地点冰芯中恢复得到的气温和降水变化结果异常矛盾,有些地点为上升,有些地点为下降,又有些地点无明显趋势^[2-12]。各国冰川学家和气候学家在寻求解释时发现,一些地点的气候变化与 ENSO 事件有良好对应,而另一些则无任何关联。因此,各国科学家共同面临挑战,重新提出科学命题:南极洲十年至百年尺度气候变化的驱动因素到底是什么?

中国是 ITASE 计划成员国,并从 1996/1997 年开始实施中国断面考察,从中山站至南极冰盖最高点 A 冰穹断面已连续三次深入到南极冰盖高原,沿线钻取了 50 至 100 m 冰芯共 5 支^[13],涵盖记录时段为 200 至 1000 年,冰盖边缘地带冰芯的分辨率可达季节/年,内陆高原达年/10 年。通过对中国 ITASE 断面南极冰盖边缘地带冰芯记录的氧同位素温度与南极冰盖边缘地带其它冰芯同位素温度的对比研究,本文揭示了整个南极冰盖边缘地带近 50 年来,150 年来和 250 年来气温变化的地域分布特征,并试图给出南极冰盖边缘地带 10 年至百年尺度上气候变化的驱动因素及其关系。

2 资料来源

冰芯 GC30, LGB16, MGA 为中澳科学家合作钻取,DT001 和 DT085 为中国科学家独立钻取,其余冰芯数据均系引用(表1),冰芯的钻取近年等参见文献^[10,11,14-24]。(图1)。

3 近 50 年来气温变化特征

20 世纪,南、北半球的增暖现象同时被观测资料和气候模式所证明^[25, 26]。尽管如此,由南极冰芯恢复的稳定同位素显示气温变化也是各地有升有降^[10-12]。气温变化地域差异性不但在冰芯中被发现,而且也

表 1 文中涉及的南极冰芯位置及资料来源
Tab. 1 Locations and data of the ice cores discussed in the paper

冰芯名称	地理位置	海拔 (m)	资料来源
Siple	75°55'S, 84°15'W	1054	文献[24]
Dalinger Dome	64°12'S, 57°40'W	1640	文献[21]
T340	78°60'S, 55°W	未报道	文献[24]
Core E	73°36'S, 12°26'W	700	文献[22]
DML05	75°00'S, 0°01'E	2892	文献[16]
Epica	75°00'S, 2°00'E	2900	文献[22]
Mizuho	70°42'S, 44°20'E	2230	文献[24]
W200	69°35'S, 48°50'E	2165	文献[17]
MGA	68°39'S, 60°15'E	1830	本研究
LGB16	72°49'S, 57°20'E	2689	本研究
DT001	71°53'S, 77°55'E	2325	本研究
DT085	73°22'S, 77°01'E	2577	本研究
GC30	69°21'S, 110°51'E	2307	本研究
Law Dome	66°44'S, 112°50'E	1390	文献[24]
GD03	69°00'S, 115°30'E	1835	文献[15]
GD15	69°00'S, 130°48'E	2155	文献[15]
Hercules Nèvé	73°06'S, 165°28'E	2960	文献[23]

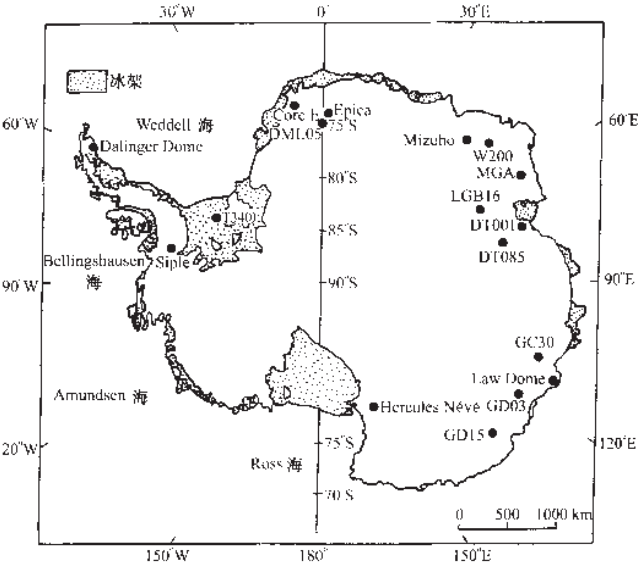


图 1 文中的南极冰芯位置为冰芯采样地点
Fig. 1 The location of core sites in the paper-coring site

被气象站所记录^[9]。东南极冰盖边缘 Lamert 冰川流域东西 2 侧 10 支浅冰芯内同位素记录的近 50 年来气温变化 (图 2)，反映 Lamert 冰川流域东侧近 50 年来气温整体上升，而西侧温度变化复杂得多，最明显的特点是，虽然 DML 西部升温且幅度与 Lamert 冰川以东地区接近，但在 Kamp 地和 Mizuho 高原温度下降或变化不明显。分布于 Lamert 冰川流域 2 侧的气象资料也印证了近 50 年来气温的上述分布格局^[27]。综观整个南极冰盖边缘近 50 年来的气温变化趋势^[9, 28]，可以看出，尽管南极地区近 50 年来气温整体上升，但是，气温变化趋势的地域差异性很强，地域分布比较复杂，这种复杂性表现在 2 个方面：一是像诸如 Lamert 冰川流域东西两侧，相距近 300 km，但近 50 年来的气温却表现出截然相反的趋势^[12]。二是在 10 年或更短时间尺度上，气温变化升降异常复杂^[24]。

4 近 150 年来气温变化

全球气象资料研究表明，无论是北半球、南半球还是全球近 150 年来平均气温都呈现出明显上升趋势^[29]，然而，由于南极气象资料缺乏和时间序列短，这些研究并没有包括南极冰盖过去 150 年来的气温变化状况。因此，在研究全球尤其是南半球的气温变化特征时，利用

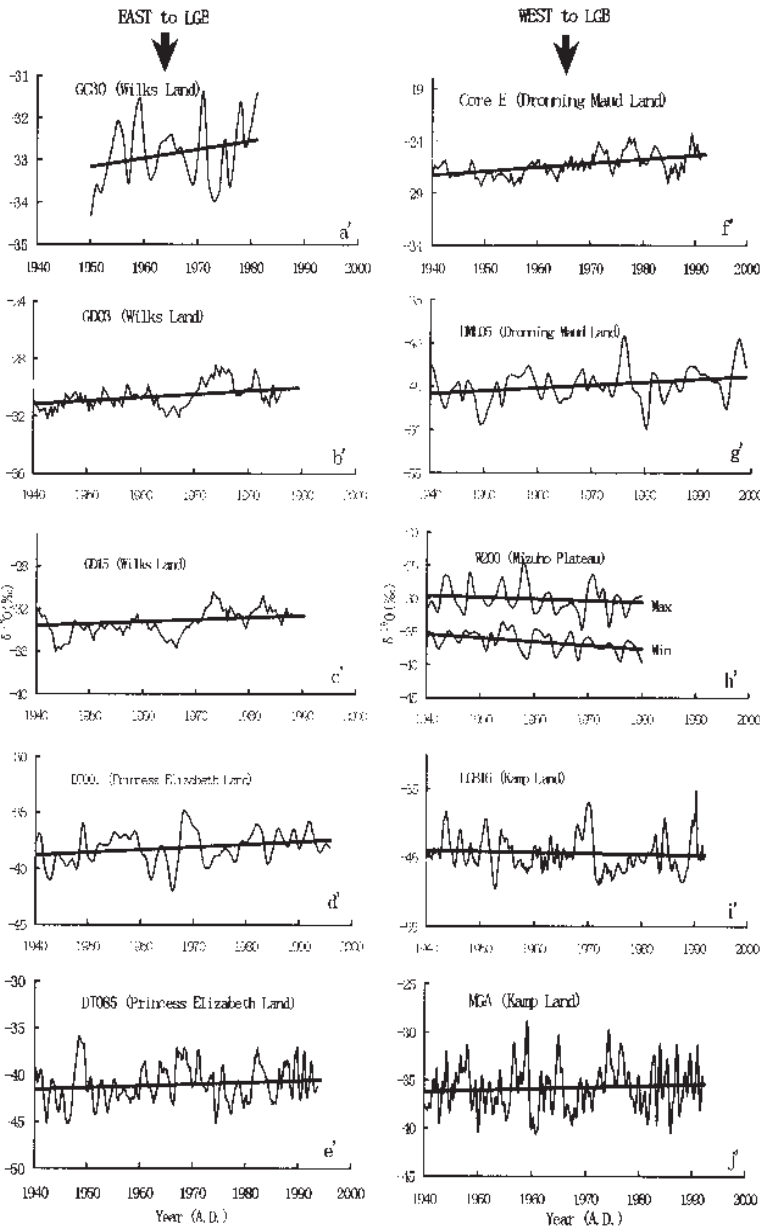


图 2 东南极冰盖 Lambert 冰川两侧 GC30, GD03, GD15, DT001, DT085, Core E, DML05, W200, LGB16 和 MGA 冰芯内同位素记录的 50 年来气温变化
Fig. 2 Isotopic temperature change in the past 50 years that recovered in the upper sections of the firm cores extracted from the eastern (GC30, GD03, GD15, DT001 and DT085) and western (Core E, DML05, W200, LGB16 and MGA) Lambert Glacier Basin, East Antarctica

冰芯恢复南极冰盖过去 150 年来气温变化特征的研究就显得尤为重要。南极冰盖边缘百年尺度上几支浅冰芯的同位素分析结果可以看出 (图 3), 近 150 年来, 整个南极大陆大多数冰芯记录的同位素温度呈现上升趋势, 而南极半岛和伊莉莎白公主地 150 年来的气温呈现明显的下降趋势(1997~1998 年中国第二次南极内陆冰盖考察获得的 50m 雪芯氧同位素初步分析结果表明, 近 150 年来雪芯记录的同位素温度也呈现出明显的下降趋势)。近 150 年来, 南极冰盖边缘的稳定同位素温度的升高和降低趋势大致呈现出一种交替分布态势, 即南极半岛的 Dalinger Dome, Siple, T340 三支冰芯、Dronning Maud 地和 Mizuho 高原的 Epica, Mizuho 2 支冰芯、伊莉莎白公主地的 DT001 冰芯、Law Dome, Hercules Nev■两支冰芯内同位素记录的气温呈现出降低—升高—降低—升高的变化态势 (图 1、图 3)。

5 近 250 年来气温变化特征

近 250 年来, 气候变化最显著的事件是小冰期事件, 这一较为寒冷的时期在北半球温度资料中首先被发现^[30]。Lamb 认为这一时期介于公元 1550~1850 年之间^[31]。通过一系列不同来源资料的比较研究, Jones 和 Bradley 认为小冰期不是一次持续时间长的冷期, 而是由一系列的冷事件组成^[32]。然而, 不同的地理区域, 最冷时期的时间并不相一致^[23]。南极冰盖边缘 6 支时间尺度在 250 年左右的浅冰芯记录的氧同位素温度变化情况可以看出 (图 4), 250 年来, 南极冰盖边缘的浅冰芯都记录了小冰期的降温事件^[23, 24, 33]。

6 分析和讨论

以往对南极冰盖气候变化地域差异性的轮廓性解释是: 南半球独特的大气环流模式阻隔了中低纬地区与高纬地区的直接联系, 尤其绕极洋流的阻隔作用使得南北向能量交换较弱, 与全球相比南极地区气候变化具有一定独特性。近年来的研究表明, 东南极冰盖边缘地区的气候变化与南大洋有紧密联系^[12, 27]。过去的几年里, 一种被称为环南极波 (ACW) 的现象被海洋学家所发现^[34]。ACW 是绕极洋流引发的一种气候异常以顺时针方向环南大洋波动性传递的现象, 这些异常包括

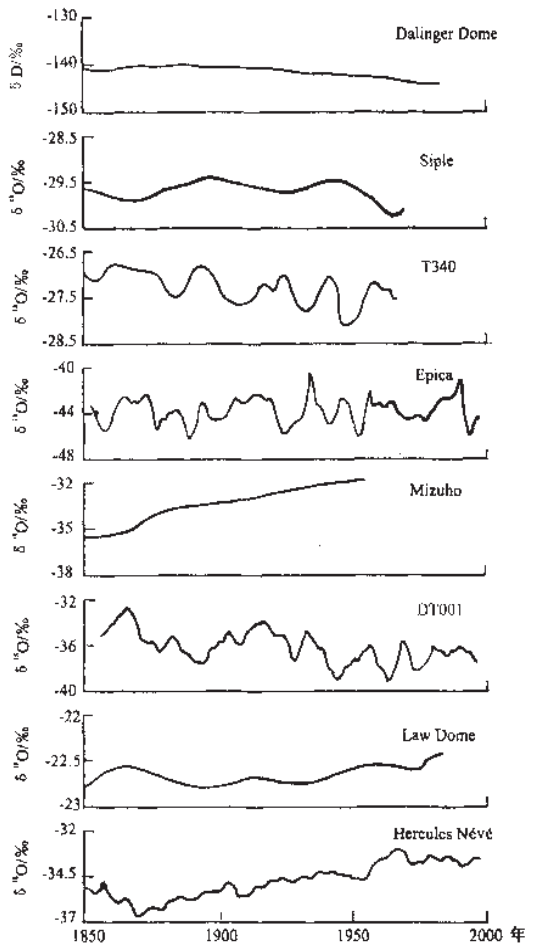


图 3 南极冰盖 Dalinger Dome, Siple, T340, Epica, Mizuho, DT001, Law Dome 和 Hercules Neve 冰芯内同位素记录的 150 年来气温变化图

Fig. 3 The Antarctic isotope records in the past 150 years: Dalinger Dome, Siple, T340, Epica, Mizuho, DT001, Law Dome, Hercules Neve

海表温度 (SSTs), 海面气压 (SLP), 经向风速 (MWS) 和海冰范围(SIE) 等。研究表明^[34], 南半球海气异常, 如 ENSO 可以传递到绕极海流中, 绕极海流携带这种异常环南大洋运动, 从而造成气温、气压等异常在环南大洋海面上交替分布的态势 (图 5)。这种态势极可能影响到南极冰盖沿岸, 从而使南极冰盖沿岸的气候变化呈现出明显的区域差异性。因此, 南极冰盖边缘浅冰芯记录的同位素反映的近 50 年来、150 年来和 250 年来气温的变化可能是南大洋独特的环流形式——环南极波 (ACW) ——在特殊地形 (如大的冰盆) 影响下, 在南极冰盖边缘的表现形式。

从近 50 年来、150 年来和 250 年来南极冰盖边缘气温变化趋势的地域分布特征可以看出, 在 50 年时间尺度上, 气温的变化可能受局部地形的影响比较大, 因此, 气温的上升和降低趋势地域差异性很强, 地域分布态势比较复杂; 在 150 年尺度上, 气温的变化受环南极波的影响可能更大, 由此造成南极冰盖边缘的稳定同位素温度的升高和降低趋势大致呈现出一种交替分布的态势^[35]; 而对 250 年尺度上小冰期这样的降温事件, 在南极冰盖边缘的浅冰芯氧同位素的记录中都有反映, 因此, 南极冰盖边缘 250 年尺度上小冰期事件可能受到南大洋独特的环流, 甚至全球大气环流的影响。

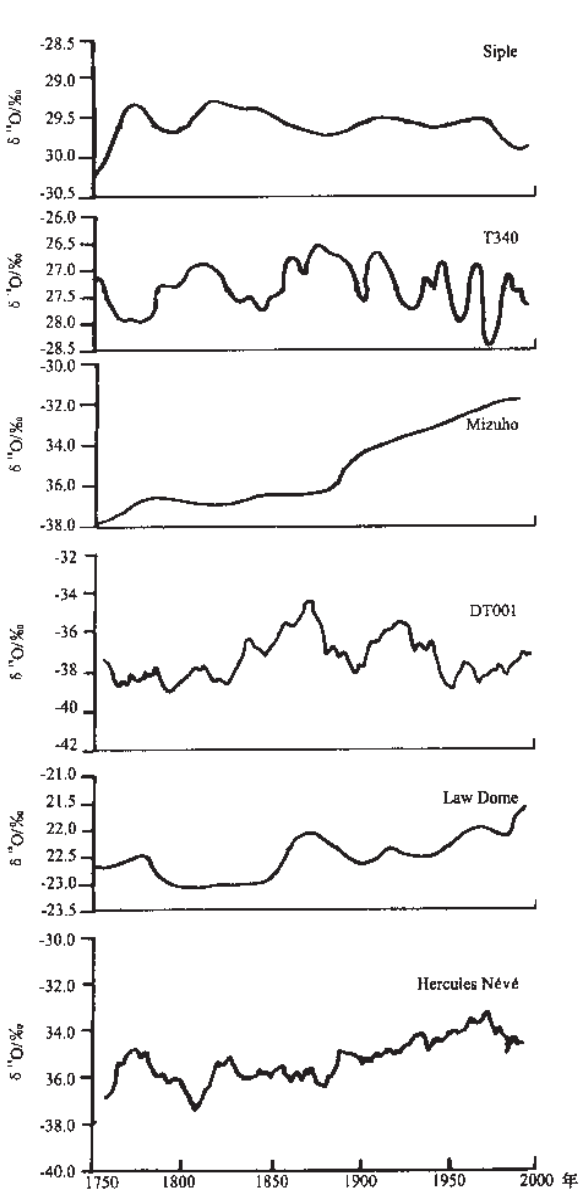


图 4 南极冰盖 Dalinger Dome, Siple, Mizuho, DT001, Law Dome 和 Hercules Neve 冰芯内同位素记录的 250 年来气温变化
Fig. 4 The Antarctic isotope records in the past 250 years: Dalinger Dome, Siple, Mizuho, DT001, Law Dome, Hercules Neve

致谢: 样品分析中, 阴离子由皇翠兰测定, 阳离子由王晓香测定, $\delta^{18}\text{O}$ 由孙维贞测定, 特此致谢。

参考文献 (References)

[1] U. S. ITASE: Science and Implication Plan for A U.S. Contribution to the International Trans-Antarctic Scientific

- Expedition, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire, 1996. 62.
- [2] Peel D A, Mulvaney R. Air temperature and snow accumulation in the Antarctic Peninsula during the past 50 years (Abstract). *Annals of Glaciology*, 1988, 11: 207.
 - [3] Pourchet M. Some meteorological application of radioactive fallout measurements in Antarctic snow. *J of Geophysical Research*, 1983, 88(C10): 6013-6020.
 - [4] Morgan V I. Evidence from Antarctic ice core for recent increases in snow accumulation. *Nature*, 1991, 354: 58-60.
 - [5] Mosley T E. Recent increase in South Pole snow accumulation. *Annals of Glaciology*, 1995, 21: 131-138.
 - [6] Bindshadler R. The detailed net mass balance of the ice plain on Ice Stream B, Antarctica *J of Glaciology*, 1993, 39 (133): 471-482.
 - [7] Kamada T. Thinning of the ice sheet estimated from total content of ice cores in Mizuho Plateau, East Antarctica. *Annals Glaciology*, 1990, 14: 131-135.
 - [8] Graf W. Isotopic and stratigraphical interpretation of a 16m firn core nearby Druzhnaya I. In: Miller H (ed.), *Filchner Ronne Ice Shelf Programme, Report No.4*, 1990, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute: 46-49.
 - [9] Jones P D. Recent variations in mean temperature and the diurnal temperature range in the Antarctic. *Geophysical Research Letter*, 1995, 22(11): 1345-1348.
 - [10] Ren Jiawen, Qin Dahe, Allison I. Variations of snow accumulation and temperature over past decades in the Lambert Glacier basin, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 1999, 29: 29-32.
 - [11] Isaksson E, Karlen W. Spatial and temporal patterns in snow accumulation, western Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1994, 40(135): 399-409.
 - [12] Xiao Cunde, Ren Jiawen, Qin Dahe et al. Complexity of the climatic regime over the Lambert Glacier basin of the east Antarctic ice sheet: firn core evidences. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(15): 160-162.
 - [13] Qin Dahe, Ren Jiawen, Kang Jiancheng et al. Primary results of glaciological study along a 1100km transect from Zhongshan Station to Dome A, East Antarctic ice sheet. *Annals of Glaciology*, 2000, 31: 198-204.
 - [14] Qin Dahe, Wang Wenti. The historical climatic records in ice cores from the surface layer of Wilks Land, Antarctica. *Science in China (Series B)*, 1990, 33(4): 460-466.
 - [15] Goodwin I D. Snow accumulation variability from seasonal surface observations and firn-core stratigraphy, eastern Wilks Land, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1991, 37(127): 383-387.
 - [16] Oerter H. Accumulation studies on Amundsenisen, Dronning Maud Land, Antarctica, by means of tritium, dielectric profiling and stable-isotopic measurements. *Annals of Glaciology*, 1999, 29: 1-9.
 - [17] Satow K, Watanabe O. Seasonal variation of oxygen isotopic composition of firn cores in the Antarctic ice sheet. *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 256-260.
 - [18] Li Zhongqin, Zhang Mingjun. Primary research on the seasonal variations of $\delta^{18}\text{O}$, Cl^- , NO_3^- , Na^+ and Ca^{2+} in the snow and firn recovered from Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2270-2274.
 - [19] Zhang Mingjun, Li Zhongqin, Xiao Cunde et al. A continuous 250-year record of volcanic activity from Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Antarctic Science*, 2002, 14(1): 55-60.
 - [20] Zhang Mingjun, Li Zhongqin, Qin Dahe et al. Accumulation and temperature changes in Princess Elizabeth Land, Antarctica in the past 250 years. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(7): 523-528.
 - [21] Aristarain A J, Jouzel J, Lorius C. A 400 years isotope record of the Antarctic Peninsula climate. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(12): 2369-2372.
 - [22] Isaksson E, Karlen W, Gundestrup N et al. A century of accumulation and temperature change in Dronning Maud (Land) Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 7085-7094.
 - [23] Stenni B, Caprioli R, Cimino L, Torcini S. 200 years of isotope and chemical records in a firn core from Hercules

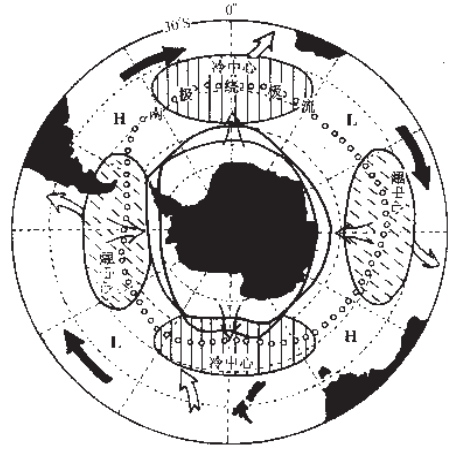


图 5 环南极波简化示意图

H: 海平面高压中心; L: 海平面低压中心; τ : 经向风速; 黑箭头表示气候异常自西向东的传递; 白箭头表示南极绕极流与北而亚热带环流的交换。

Fig. 5 Antarctic Circumpolar Wave [34]

H: high atmospheric sea-level pressure, L: low atmospheric sea-level pressure, τ : meridional wind stress. Black arrows depict the general eastward motion of anomalies, and white arrows: communications between the circumpolar current and the more northerly subtropical gyres.

- Neve, northern Victoria Land, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 1999, 29: 106-112.
- [24] Mosley-Thompson E. Paleoenvironmental conditions in Antarctic since A. D. 1500: ice core evidence. In: Bradley R S, Jones P D (eds.), *Climate since A. D. 1500*. London and New York, Routledge, 1992. 572-591.
- [25] Fyfe J C, Boer G J, Flato G M. The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming. *Geophysical Research Letter*, 1999, 26(11): 1601-1604.
- [26] Wu X, Budd W F, Jacka T H. Simulations of south Hemisphere warming and Antarctic sea-ice changes using global climate models. *Annals of Glaciology*, 1999, 29: 61-65.
- [27] Xiao Cunde, Qin Dahe, Ren Jiawen et al. 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)[效存德, 秦大河, 任贾文 等. 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)]
- [28] Lu Longhua, Bian Lingen, Jia Pengqun. The temporal and special characteristics of the surface air temperature variations over the Antarctic and its surrounding area. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(4): 432-438.
- [29] Jone P D, New M, Parker D E et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37: 173-184.
- [30] Groveman B S, Landsberg H E. Simulated Northern Hemisphere temperature departures: 1579-1880. *Geophysical Research Letters*, 1979, 6(10): 767-769.
- [31] Lamb H H. *Climate: present, past and future. 2: Climatic history and the future*. London: Methuen, 1977.
- [32] Jone P D, Bradley R S. Climatic variations over the last 500 years. In: Bradley R S, Jones P D (eds.), *Climate since A. D. 1500*. London and New York: Routledge, 1992. 649-665.
- [33] Mosley-Thompson E, Thompson L G, Grocete P. Little Ice Age (Neoglacial) Paleoenvironmental conditions at Siple Station, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 1990, 14: 199-204.
- [34] White W B, Peterson R G. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature, and sea-ice extent. *Nature*, 1996, 380: 699-702.
- [35] Zhang Mingjun, Li Zhongqin, Xiao Cunde et al. The decreasing trend of temperature in Princess Elizabeth Land, Antarctica in the past 150 years. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(17): 1474-1478.

The Temperature Variations over the Antarctic Coastal Regions in the Past 250 Years

ZHANG Mingjun¹, XIAO Cunde², LI Zhongqin², REN Jiawen², QIN Dahe²,
KANG Jiancheng³, LI Jun⁴

(1. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China*; 2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China*; 3. *Chinese Institute of Polar Research, Shanghai 200129, China*; 4. *Antarctic Cooperation Research Center and Australian Antarctic Division, Hobart 7001, Australia*)

Abstract: By comparing the oxygen isotope temperatures recorded by 17 shallow ice cores from the coastal regions of Antarctica, this paper presents the special characteristics of the temperature variations over the Antarctic coastal regions in the past 50, 150 and 250 years. In the past 50 years, the isotopic temperatures recorded in the ice cores at different sites of the Antarctic coastal regions differ great. For instance, although the increasing isotopic temperatures have been reported for many sites studied, some sites show decreasing trends. In the past 150 years, the isotope temperatures in the coastal regions of Antarctica show an alternant-distributing pattern. In the past 250 years, all the ice cores from the coastal regions of Antarctica record the so-called Little Ice Age (LIA).

Key words: Antarctica; ice core; temperature; circumpolar wave; circumpolar circulation