南极冰盖最高点满足钻取最古老冰芯的必要条件: Dome A 最新实测结果

效存德 李院生 侯书贵 Ian Allison 卞林根 任贾文

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 中国气象科学研究院, 北京 100081; 中国极地研究中心, 上海 200129; Australian Government Antarctic Division and Antarctic Climate and Ecosystems CRC, Tasmania 7001, Australia. E-mail: cdxiao@lzb.ac.cn)

摘要 在极地冰盖, “低温、低积累率”是获取古老冰芯的必要条件之一. 通过南极冰盖最高点 Dome A(冰穹 A)自动气象站连续记录的 2005 年和 2006 年 10 m 深度雪温数据, 得到 Dome A 的多年平均气温约为 -58.3°C , 较东南极冰盖分冰岭的其他冰穹如 Dome C, Dome F, Dome B 以及 Vostok 均低, 是迄今地球上实测最低年平均温度; 从雪冰气温代用指标 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 测值看, Dome A 在上述地点中亦最低. 自动气象站记录的雪面高度数据表明 2005~2006 年间 Dome A 年积累率约 0.01~0.02 m 水当量, 是迄今在东南极冰岭测得的最小积累率. Dome A 低温、低积累率特点是寻找年代超过 1 Ma 冰芯的必要条件.

关键词 南极分冰岭 Dome A 极端气温 积累率 中更新世气候转型(MPT)

在极地冰盖寻找低温和低积累率的地点十分重要, 主要体现在两方面:

() 获取年代序列超过百万年的冰芯是古气候学界的夙愿之一. 因为包含“化石大气”的长序列冰芯可能会对中更新世气候转型(MPT, 早于距今 0.9 Ma, 气候轨道周期从约 4 万年转变为约 10 万年)的“温室效应”假说^[1]加以验证, 而冰盖气候的低温、低积累率是获取长序列冰芯的必要条件. 最近启动的国际冰芯科学研究计划(IPICS)的主要目标之一是在极地冰盖寻找年代超过百万年的古老冰体.

() 难以获知冰期阶段的冰气异时差(即冰体与同层位气泡中气体的年代差), 是利用冰芯古气候记录推断温室气体与气候之间的位相(或因果)关系这一重大科学前沿问题时遇到的难题之一. 在冰盖腹地, 温度和积累率是决定密实化速率(亦冰气异时性)的关键因素^[2]. 因此, 选取当代尽可能接近冰期时期极端低温和低积累率地点^[3], 从现代冰气过程研究入手获取异时性实测值, 具有重要科学价值.

无疑, 满足上述要求的理想地点位于南极腹地^[4,5]. 1983 年 7 月南极 Vostok 站记录到全球极端最低温为 -89.2°C , 该地点的年积累率仅为 0.02~0.03 m 水当量^[3]. 但 Vostok 并非南极冰盖的最高点, Dome A 海拔

高度高于 Vostok 站 600 m, 直至 2005 年 1 月中国科学家到达 Dome A 之前从未进行过地面科学考察. 因此, 通过实测获取冰盖最高点 Dome A 的关键参数, 是冰川学界和气候学界长期所期盼的^[6]. 2005 年中国第 21 次南极考察队在 Dome A 取得的初步结果证实在此可能钻取到地球上最古老的冰体, 引起国际普遍关注^[7~10].

南极 Dome A 位于东南极冰盖分冰岭的中部(图 1), 是南极冰盖的最高点. 2005 年 1 月中国第 21 次南极考察队实测数据表明, Dome A 顶点精确位置是 $80^{\circ}22'01.63''\text{S}$, $77^{\circ}22'22.90''\text{E}$, 海拔 4092.46 m, 距离中山站 1228 km^[12]. 2005 年 1 月 17 日在 Dome A 顶点架设了自动气象站, 所在区域雪面平坦, 无雪丘分布, 雪面微特征表现为针状和羽状冰晶, 系静风状态下凝华降水(也称晴空降水)形成, 俗称“钻石尘”(diamond dust). 该自动气象站经 -99 低温环境测试和传感器测值订正后运往 Dome A 安装. 气象站记录参数包括 1, 2 和 4 m 高度温度、风速; 另外, 在 4 m 高度安装太阳短波辐射, 风向和湿度以及冰面高程传感器, 雪面以下安装有气压传感器以及 0.1, 1, 3, 5 和 10 m 雪层温度传感器. 气象站能够以 1/200 s 频次连续记录上述参数, 这些记录被实时传至 NOAA 卫星网

2007-04-28 收稿, 2007-08-01 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 40620120112, 40776002)、中国科学院创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-354)以及中国科学院“百人计划”项目资助

络(ARGOS), 并通过世界气象组织(WMO)使用的全球电信系统(GTS)传送到室内供读取研究.

图 1 东南极冰岭及其主要冰穹(Dome)及 Vostok 位置示意
南极冰盖数字高程模型(DEM)源于文献 [11]

本文主要基于 FS23D 型温度传感器(探测精度 0.05)所记录的 2005 年和 2006 年 10 m 深度处雪温, 讨论 Dome A 年平均气温; 通过安装在距离雪面 4 m 高度的 Campbell SR50 型超声探测传感器(探测精度 0.01 m)记录的 2005 年和 2006 年连续雪面高程变化, 研究雪面积累率的变化过程 [13]. 雪面高程传感器以超声波探测传感器与雪面之间的距离变化, 视角为 22°. Campbell SR50 以 1/200 s 频率记录的数据完整度优于 98%. 需要注意的是: () 雪面高程变化不受冰盖流动影响, 因为气象站随冰盖一起流动, 且 Dome A 是冰盖顶点, 冰流可以忽略不计 [13]. () 气象站记录 2005~2006 年 Dome A 地区风速在 5 m/s 以下, 无风吹雪再分配过程, 其他过程(如凝华/升华)引起的雪面升高和降低在空间上分布比较均匀且被传感器记录, 因此雪面高程变化等同于积累量变化.

极地冰盖 10 m 以上雪层温度受气温的日变化和季节变化影响较显著, 10 m 深度处则基本不受季节变化影响而保持常年恒定. 根据热力学传导原理和冰川学理论推导, 在没有融水渗浸和再冻结的成冰作用带(干雪带)内, 10 m 深度雪温相当于该地点的多年平均气温 [2,14~17]. 图 2 为 Dome A 自动气象站记录的 2005~2006 年 10 m 深度雪温以及 1, 2 和 4 m 高度气温月平均值, 2005 年 10 m 深度雪温平均为 -58.3 , 2006 年为 -58.2 , 雪温的月平均差值保持在 0.2 以内. 2005 年 1 月考察期间, 分别用中国、日本造各 1 套便

携式测温探头测量了 Dome A 钻孔内 10 m 深度雪温, 置于钻孔一昼夜后读数均为 -58.3 , 与 Dome A 自动气象站运行两年间记录的 10 m 深度平均雪温值非常一致, 也说明以 10 m 雪温值代表多年平均气温值非常稳定和可靠.

图 2 南极冰盖顶点 Dome A 实测 2005 年 1 月 17 日至 2006 年 12 月 31 日之间月平均 1 m 高度(AiT1)、2 m 高度(AiT2)、4 m 高度(AiT4)气温以及 10 m 深度(SST10)雪温变化

与东南极冰盖分冰岭主要冰穹以及 Vostok 站进行对比, Dome A 多年平均气温最低(表 1), 这也是地球表面最低的年平均气温.

表 1 东南极冰盖分冰岭各冰穹以及 Vostok 站的地理、气候、冰川学参数

冰穹	地理坐标	海拔 /m	年平均气温/	积累率 /m w.e. · a ⁻¹	表层雪 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 平均值/‰	资料来源
Dome A	80°00'S, 77°21'E	4092	-58.3	0.016~0.023	-58.4/-450	本研究, 文献 [18]
Vostok ^{a)}	72°28'S, 106°48'E	3490	-55.5	0.023	-56.4/-440	文献 [4], [19]
Dome F	77°19'S, 39°42'E	3810	-54.3	0.032	-54.9/-425	文献 [20]
Dome B	77°05'S, 94°55'E	3650	-57.5	0.038	-55.2/-430	文献 [5], [21] ^{b)}
Dome C	74°39'S, 124°10'E	3240	-53.5	0.034	-50.1/-390	文献 [22], [23]

a) Vostok 位于分冰岭之上, 但不是冰穹; b) 其中 $\delta^{18}\text{O}$ 为 Valerie Masson 提供

气象站记录的 1, 2 和 4 m 高度气温显示了强烈的近地层大气逆温, 1~2 m 高度之间年平均逆温达 1.1 , 2~4 m 高度间达 1.5 . 短时间尺度上逆温更强, 将另文讨论. 值得指出, 用 1 m 高度传感器测值得到 2005~2006 年间年平均气温仅为 -53 , 经与低海拔 Vostok, Dome F 等地点记录的同期气温相比, 显然偏高. 有理由怀疑气温传感器可能对极夜期间极端低温(<-83)的记录有遗漏, 有待进一步野外核实. 因

此, 仅讨论 10 m 深度处雪温.

此外, 在考察期间还钻取了 110 m 冰芯, 测试了 δD 值, 采集了 2.3 m 雪坑样品, 测试了 $\delta^{18}O$ 值. 因为冰盖内陆地区的 δ 值是气温的良好代用指标, δ 值与冰盖其他地点测值相比较, 也是检验气温地域分布的常用方法 [24]. 因此, 平均气温的地域差异也可通过雪冰内氢氧稳定同位素比率 ($\delta^{18}O$, δD 值) 得以反映.

将 Dome A 顶点 2.3 m 深雪坑的 $\delta^{18}O$ 测值与其他冰穹同时代雪层(百年内)相比较, Dome A 的 $\delta^{18}O$ 平均值最低(图 3); 对最近数千年以来雪冰 δD 测值也进行了初步对比, Dome A 亦最低. 根据南极内陆腹地 δ 值与气温之间存在良好的线性关系, 证明 Dome A 平均气温最低, 是地球“寒极”.

南极冰盖表面积累率的实测研究已有不少, 但南极冰盖面积广袤(约 1400 万平方公里), 这些实测值毕竟是有限的, 对资料空白区积累率前人仅仅尝试通过模式进行了估算, Dome A 地区便是最大的资料空白区. Dome A 自动气象站首次连续记录了 2005 年和 2006 年雪面积累率(高度)的变化. 从图 4 可见, 雪面积累具有明显的季节变化特征:

() 每年 1~4 月雪面高度保持相对稳定. 为便于表示, 我们称其为稳定期(WD).

() 极夜期间, 从 5 月初至 10 月中旬, 雪面高度变化大, 2005 年总体呈升高, 2006 年则总体呈下降, 因为 Dome A 风速极小, 我们排除吹雪再分配的影响, 所以, 只可能是不同年份大气水汽含量不同以及升华/凝华过程造成的, 也不排除极夜传感器探测有误

(如蒙冰)之可能, 但不影响最终结果, 具体过程需详细研究, 这一季节我们表示为波动期(BD).

() 10 月中旬至 12 月为雪面高程总体呈升高趋势, 表示为积累期(JL).

计算得出, Dome A 积累率 2005 年和 2006 年分别为 0.11 和 0.05 m 水当量, 两年合计 0.16 m 水当量, 实测 Dome A 表层雪密度 $< 0.2 \text{ g/cm}^3$, 因此, 得出 Dome A 年均积累率 $< 0.016 \text{ m}$ 水当量, 与基于 Dome A 雪坑标志层估算结果接近 [18], 也与模拟结果接近 [25,26]. Dome A 的实测积累率较南极分冰岭已知全新世低积累地区(表 1)的实测值还要低, 约为其他冰穹积累率的 1/3 至 1/2, 接近于 Vostok 末次冰期冰盛期(LGM)期间的积累率 [7].

总之, 初步研究结果表明, Dome A 具有地球上极端低温和极低降水量, 意味着: () 相同冰层厚度下, Dome A 冰芯较其他地点的冰芯包含年代更久远的记录. 因此, Dome A 是冰川古气候研究的良好地点, 尤其可能获取超过 1 Ma 的古气候记录; () 雪的密实化速率缓慢, 冰-气年龄差大, 可以用 Dome A 实测的冰气异时性关系推断较低海拔冰芯中(Vostok, Dome C, Dome F 等)冰期阶段的温室气体含量与气温之间的位相关系.

当然, 仅“低温、低积累率”并非获取最古老冰芯的充分条件. 要钻取到最古老冰芯, 尚需冰层厚度大、冰/岩界面地热通量低、底部冰层形变小等其他约束条件. “2007~2008 国际极地年(IPY)”中国行动计划已将 Dome A 地区相关工作列入研究重点, 可望通

图3 东南极冰盖分冰岭表层雪内 $\delta^{18}O$ 和 δD 值比较

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-20-2456> 资料来源见表1

图 4 南极冰盖顶点 Dome A 实测 2005 年 1 月 17 日至 2006 年 12 月 31 日雪面积累率变化逐日变化的 10 d 滑动曲线。WD, BD, JL 分别表示雪面高度“稳定”、“波动”和“积累”期

过进一步的冰川物理学探测、冰/气异时性以及冰川动力学研究, 得出更加细致的结果。

致谢 国家海洋局极地考察办公室和中国极地研究中心为中国第 21 次南极考察队(CHINARE-21)提供野外考察和后勤支持, CHINARE-21 全体考察队员协同完成野外工作; 法国气候与环境科学实验室 Valerie Masson 博士提供 Dome B 数据, 秦大河院士对本文提出宝贵意见, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- Clark P U, Archer D, Pollard D, et al. The middle Pleistocene transition: Characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric $p\text{CO}_2$. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 3150—3184[DOI]
- 秦大河. 南极冰盖表面层内雪的密实化过程. *冰川冻土*, 1987, 9(3): 190—205
- Siegert M J. Glacial-interglacial variations in central East Antarctic ice accumulation rates. *Quat Sci Rev*, 2003, 22: 741—750[DOI]
- Ekaykin A A, Lipenkov V Y, Barkov N I, et al. Spatial and temporal variability in isotope composition of recent snow in the vicinity of Vostok Station: Implications for ice-core record interpretation. *Ann Glaciol*, 2002, 35: 181—186
- Masson V, Vimeux F, Jouzel J, et al. Holocene climate variability in Antarctica based on 11 ice core isotopic records. *Quat Res*, 2000, 54: 348—358[DOI]
- Blunier T, Schwander J, Chappellaz J, et al. What was the surface temperature in central Antarctica during the last glacial maximum? *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 218: 379—388 [DOI]
- Nature. China's hunt for climate clues reaches a peak. *Nature*, 2005, 433: 564
- Nature. China set to drill for Antarctica's oldest ice. *Nature*, 2006, 444: 255
- Nicola J. Polar research: Buried treasure. *Nature*, 2007, 446: 126—128[DOI]
- Stone R. Long (and perilous) March heralds China's rise as polar research power. *Science*, 2007, 315: 1516[DOI]
- Liu H X, Jezek K C, Li B, et al. Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA, 2001
- Zhang S, Dongcheng E, Wang Z, et al. Surface topography around the summit of Dome A, Antarctica, from real-time kinematic GPS. *J Glaciol*, 2006, 177: 159—160
- 效存德, 秦大河, 卡林根, 等. 东南极 Lambert 冰盆-Amery 冰架区域雪面相对高程变化的精确监测. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(7): 675—685
- Yamada T, Narita H. Snow Temperature at 10 meters below the Surface in Mizuho Plateau. *Japanese Antarctic Research Expedition Data Report*, 1975, 27(Glaciol): 145
- Satow K. Snow Temperatures at a depth of 10 meters. *Japanese Antarctic Research Expedition Data Report*, 1977, 36(Glaciol): 59—60
- Martin P J, Peel D A. The spatial distribution of 10 m temperatures in the Antarctic Peninsula. *J Glaciol*, 1978, 20(83): 311—317
- NSIDC. THERMAP: Ice temperature measurements of the Antarctic Ice Sheet. 2007. <http://nsidc.org/data/docs/agdc/thermap/documentation.html>
- 侯书贵, 李院生, 效存德, 等. 南极 Dome A 地区的近期积累率. *科学通报*, 2007, 52(2): 243—245
- Ekaykin A, Lipenkov V Y, Kuzmina I N, et al. The changes in isotope composition and accumulation of snow at Vostok station, East

- Antarctica, over the past 200 years. *Ann Glaciol*, 2004, 39: 569—575
- 20 Watanabe O, Kamiyama K, Motoyama H, et al. General tendencies of stable isotopes and major chemical constituents of the Dome Fuji deep ice core. *Memoirs of National Institute of Polar Research Special Issue No.57*. Tokyo: National Institute of Polar Research, 2003. 1—24
- 21 Jouzel J, Vaikmae R, Petit J R, et al. The two-step shape and timing of the last deglaciation in Antarctica. *Clim Dyn*, 1995, 11: 151—161[DOI]
- 22 Jouzel J, Masson V, Cattani O, et al. A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record. *Geophys Res Lett*, 2001, 28 (16): 3199—3202[DOI]
- 23 Stenni B, Masson-Delmotte V, Johnsen S, et al. An oceanic cold reversal during the last deglaciation. *Science*, 2001, 293: 2074—2077[DOI]
- 24 Kavanaugh J L, Cuffey K M. Space and time variation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Antarctic precipitation revisited. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17(1): 1017, doi: 10.11029/2002GB001910[DOI]
- 25 Vaughan D G, Bamber J L, Giovinetto M, et al. Reassessment of net surface mass balance in Antarctica. *J Clim*, 1999, 12 (4): 933—946[DOI]
- 26 Giovinetto M B, Zwally H J. Spatial distribution of net surface accumulation on the Antarctic ice sheet. *Ann Glaciol*, 2000, 31: 171—178