中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 2 期: 274 ~ 280
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

南极冰盖昆仑站深冰芯的雷达内部等时层定年

唐学远*, 孙波, 王甜甜

中国极地研究中心, 上海 200136
* 通讯作者, E-mail: tangxueyuan@pric.org.cn

收稿日期: 2018-11-12; 收修改稿日期: 2019-04-22; 接受日期: 2019-04-30; 网络版发表日期: 2019-06-17
国家自然科学基金项目(批准号: 41876230、41876227、41376192)、全球变化研究国家重大科学研究计划项目(编号: 2013CBA01804)和南北极环境综合考察与评估专项项目(编号: CHIANRE2017-01-01)资助

摘要 目前, 中国正在东南极Dome A地区的昆仑站(Kunlun)进行深冰芯钻探工程, 截至2018/2019年, 经过6个钻探季度的工作, 已经钻进超过800m. 冰龄和积累率是古气候与冰盖模式的重要边界条件. 冰雷达探测得到的冰盖内部等时层可被用来测定冰体的年代并反演过去的冰雪积累率. 2004/2005年中国国家南极科学考察队和2007/2008年德国阿尔弗雷德韦格纳研究所收集了Dome A冰穹地区以及Dome A至Vostok冰芯钻探点的冰雷达数据. 通过连接昆仑站钻探点与Vostok深冰芯钻探点的雷达内部等时层, 比较了两个钻探位置的深度-年代关系. 基于Vostok的冰芯年代, 获得了昆仑站冰芯钻探点50%的冰盖厚度以上的10条连续的内部等时层的年代. 这些层的冰龄涵盖从威斯康星(Wisconsin)冰期、Eemian间冰期到海洋氧同位素6期等冰期-间冰期旋回. 在表面以下1640m处与最深层相对应的昆仑站冰芯冰体的年代被确定为~160400年. 内部层的年代及其几何结构提供了冰芯所在区域冰盖过去上表面地貌信息. 利用所得到的年代-深度关系, 基于一个一维冰流模式, 估算了该地区相应历史阶段的冰雪积累率, 计算表明: Dome A区域过去16万年以来的积累率较低, 与目前的观测结果一致. 基于内部等时层获得的年龄-深度关系和古积累率信息将有助于构建并约束昆仑站深冰芯断代.

关键词 昆仑站, 冰芯, 雷达等时层, 年代-深度关系, 南极东冰盖

1 引言

2012/2013年, 中国冰川学家在东南极冰盖Dome A冰穹建造的昆仑站(80°25′01″S, 77°06′58″E)开始钻探一支新的深冰芯(Zhang等, 2014). 该地独特的冰川-气象条件使其成为深冰芯钻探的一个理想位置(Tang等, 2012). 虽然在Dome A地区冰盖下方发现了广泛的基底融水复结冰增生(Bell等, 2011; Tang等, 2015)和冰下水道/水系(Wolovick等, 2013), 但由于其独特的冰下地形、较小的积累率、较低的冰流速等环境条件, 该地区被认为很可能保存有较古老的冰芯气候记录(Ren等, 2009; Cui等, 2015). 恢复昆仑站深冰芯的气候记录有望成为理解中更新世气候过渡期温室气体浓度变化假设的一个重要步骤. 在更新世气候过渡期, 地球气候变化的周期从40ka转变为100ka(Xiao等, 2008; Fischer等, 2013).

年代-深度关系是解释深冰芯气候记录的关键. 冰芯年代测定过程通常需要许多年龄标志物(例如火山

中文引用格式: 唐学远, 孙波, 王甜甜. 2020. 南极冰盖昆仑站深冰芯的雷达内部等时层定年. 中国科学: 地球科学, 50: 274–280, doi: 10.1360/N072018-0028
英文引用格式: Tang X, Sun B, Wang T. 2020. Radar isochronic layer dating for a deep ice core at Kunlun Station, Antarctica. Science China Earth Sciences, 63: 303–308, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9365-8

© 2019 《中国科学》杂志社

灰)以及相应古冰流模式的数值模拟(Parrenin等, 2007). 由冰盖的电磁回波探测成像得到的内部等时层可用来获取不同冰芯位置之间的年代-深度关系, 并推断验证冰芯的年代. 已有前人进行过南极冰盖的冰雷达内部等时层的长距离连接, 并被用于获取Vostok和EPICA冰芯地点(如Dome C)之间(Siegert等, 1998), 以及Dome Fuji冰芯地点和毛德皇后地(Dronning Maud Land)科恩站之间的内部等时层(Steinhage等, 2013), 从而推导Dome C的年代-深度关系. 从连接Vostok冰芯钻探点至Dome A的雷达剖面上, 曾连续追踪出六条年代久远的连续内部等时层(时间跨度30~161ka). Sun等(2014)模拟了Dome A下方的冰龄, Wang等(2016)利用雷达剖面反演了Dome A区域过去累积率的时空分布. 然而, 目前仍缺少直接连接至昆仑站深冰芯位置的雷达内部等时层结构图, 及其相应的等时层年代-深度关系. 本文将Vostok深冰芯钻探点与昆仑站冰芯钻探位置之间的内部等时层进行连接, 并据此推导出Dome A处昆仑站冰芯位置的年代-深度关系, 提供钻探点冰体年龄的估计值(35.6~160.4ka).

2　数据与方法

PRIC雷达测线数据来自中国极地研究所(PRIC), AWI雷达测线数据来自德国阿尔弗雷德韦格纳研究所(AWI)的东南极冰穹互联项目(DoCo)(图1a). PRIC数据由2004/2005年中心频率60MHz的地面雷达调查获得. Tang等(2011)详细描述了此次探测使用的雷达系统的各项参数. AWI数据由2008/2009国际极地年(IPY)期间AWI收集, 此次选取的雷达剖面为Vostok和Dome A之间的机载雷达数据. AWI机载雷达系统的技术细节参考Steinhage等(2013). 通过AWI雷达数据获取了Vostok冰芯钻探点到Dome A大约1300km的雷达剖面内部等时层的几何结构. 选择穿越昆仑冰芯钻探点的PRIC地面雷达剖面(约40km)连接AWI雷达剖面获取昆仑站深冰芯钻探点的内部等时层年代-深度信息.

内部等时层的示踪方法与Tang等(2011)提出的方法相同, 即从雷达剖面图(图2)中选择要跟踪层的一个参考点, 并将以该点为中心的窗口与相邻垂向剖面的一部分进行比较. 通过识别两个剖面之间的相关性, 将两层连接起来. 图2给出如图1所示地面雷达剖面的一部分回波样图. PRIC雷达剖面中的内部等时层通过沿雷达测线交叉点处的内部等时层匹配扩展到AWI机载雷达剖面. 因此, 沿着所连接的雷达剖面, 可获得高精度的连续内部等时层. PRIC和AWI雷达剖面之间有两个交叉点: S(80°21′27.41″S, 77°22′46.54″E)和N(80°20′31.30″S, 77°25′56.60″E)(图1b). 地面雷达图像中的层位可通过交叉点S和N与机载雷达数据显示的相应层的位置相匹配进行连接. 估计PRIC和AWI雷达深度之间的差异由交叉点分析进行. 利用雷达回波的双向走时和恒定的雷达波速(168.7m s^{-1})将各层的垂直位置转换为冰层深度(Plewes和Hubbard, 2001; Steinhage等, 2013). 表1显示交叉点层的垂向深度的平均误差小于50m. Kohnen站与Dome Fuji交叉点处的平均误差小于80m(Steinhage等, 2013), 在南极洲东部的Talos Dome该项平均误差不到100m(Frezzotti等, 2004). 深度差异可能来自于两个因素. 首先, 转换过程中沿着雷达剖面使用的雷达波速通常不是恒定值. 为了校正剖面顶部积雪中较高的雷达波速, 从深度值减去基于雪芯测量获得的平均偏移量, 其中AWI雷达剖面为16m, PRIC雷达剖面为15m(Steinhage等, 2001). 其次, 机载雷达数据可能会受到Dome A冰面导航角度和高度的影响. Dome A区域有相当多的冰丘, 这可能导致基岩和内部等时层深度的显著变化(Leysinger-Vieli等, 2007).

如图2所示, 以穿越昆仑站深冰芯钻探点的雷达剖面为例, 对其雷达剖面进行了示踪. 沿着雷达剖面示踪了10条位于冰面以下约600~1700m的连续内部等时层. 这些位于Dome A冰穹冰盖下方的连续层提供了一种直接关联昆仑站冰芯钻探点与Vostok冰芯年代的方式. 利用Vostok冰芯钻探点现有的年龄-深度关系(Petit等, 1999)和内部层的等时性质, 可得出昆仑冰芯钻探点相应层位的年龄-深度关系. 这些确定年代的层位的深度为~630m至~1650m, 相应的年龄为35.6~160.4ka. 使用这种测年方法测得的层位年龄的不确定性在2ka (<5%)以内, 该不确定性主要来源于层位深度和冰芯年代-深度的不确定性(Eisen等, 2008; MacGregor等, 2009).

3　结果与讨论

3.1　昆仑站冰芯钻探点的年代深度关系

给定年代, 沿着相应的等时层, 深度的空间差异可

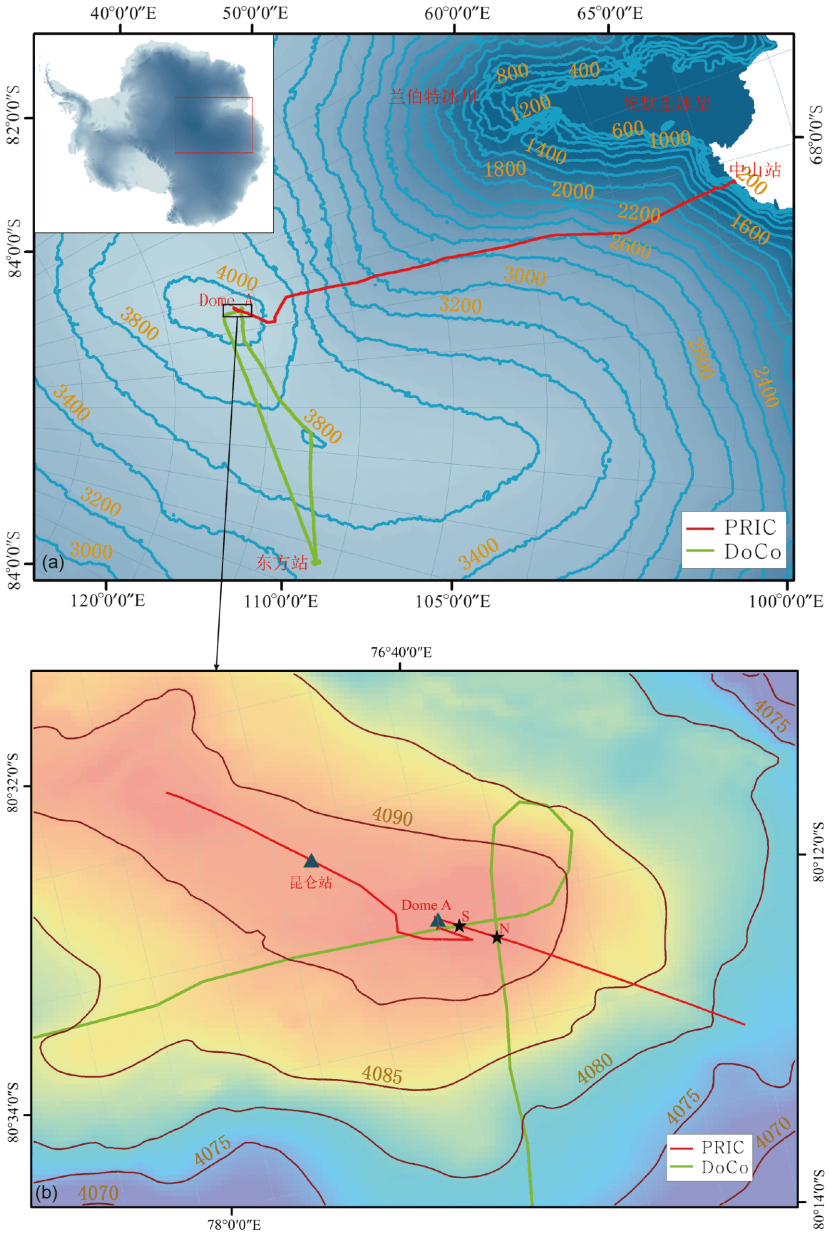


图 1　Dome A至Vostok的冰雷达测线

(a) 红线表示从中山站到Dome A的地面雷达测线(简称PRIC测线), 绿线表示Vostok和Dome A之间的机载雷达飞行线(简称AWI测线), 表面高程来自Bedmap 2, Fretwell等(2013). (b) 红线显示Dome A地区的地面雷达测线(长度37.45km). 昆仑站深冰芯位置和Dome A最高点标记为绿色三角, 黑五角(S和N)为PRIC和AWI雷达测线两者的交叉点(表面高程来自Bell等, 2011)

通过年代-深度关系推断出来. 图3给出了已确定年代的层位1~6的深度空间变化. 昆仑站冰芯钻探点、Dome A最高点以及PRIC和AWI雷达剖面测线交点(S和N)的年代-深度关系如表1所示. 昆仑站钻探点的年代-深度剖面显示, 较浅层的冰龄为35.6~45.8ka, 对应层位的深度约占冰盖厚度的20~30%(总厚度约3100m). 这些层被标记为第1~3层和第7~8层, 与威斯康星冰期(Wisconsin)早期相对应. 相应的年平均层厚度约为1.8cm. 第4层和第10层分别为89.3和92.9ka(威斯康星冰期晚期), 对应于1125和1166m深度(35%冰

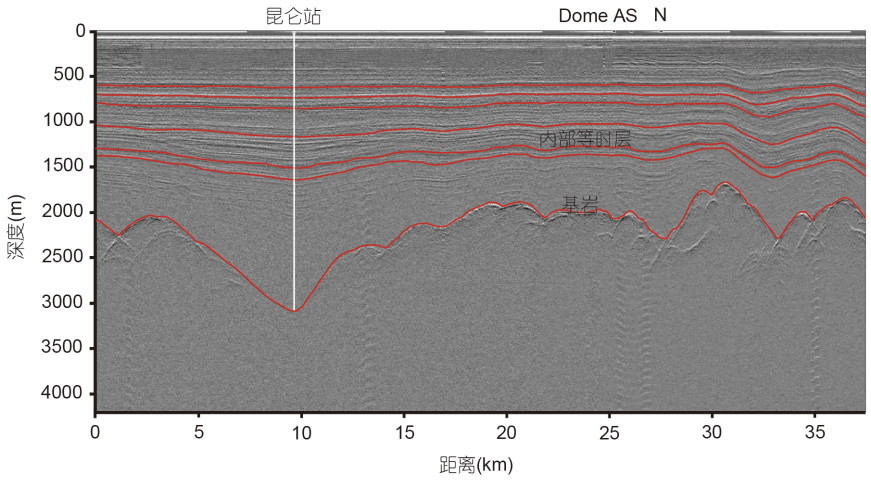


图 2　**60MHz地面雷达剖面图(图1中的昆仑站钻探点Dome A-S-N)和六个示踪的内部等时层**

表 1　**昆仑冰芯钻探点、Dome A及PRIC和AWI雷达线的交叉点(S和N)内部层的深度和年代**

层	昆仑站PRIC (m)	Dome A PRIC(m)	S			N			年代(ka)
			AWI(m)	PRIC(m)	PRIC-AWI(m)	AWI(m)	PRIC(m)	PRIC-AWI(m)	
1	628	593	626	599	−27	637	607	−30	35.6
2	737	694	691	700	9	703	709	6	39.5
3	855	793	752	800	48	770	814	44	45.8
4	1166	1025	1045	1035	−10	1074	1062	−12	92.9
5	1508	1284	1236	1289	53	1279	1329	50	121.9
6	1639	1376	1389	1383	−6	1435	1417	−18	160.4
7	596		612	569	−43	617	575	−42	35.1
8	696		679	662	−17	683	665	−18	38.7
9	1125		1031	1004	−27	1049	1026	−23	89.3
10	1483		1222	1272	50	1254	1298	44	118.6

厚). 相应的年层厚度约1.25cm. 冰芯的深部(1500m; 第5层)为121.9ka, 大致相当于Eemian间冰期的初期. 第6层为160.4ka, 与海洋同位素阶段6(MIS 6)相对应, 相应的年层厚度约为1.0cm. 如果将各层的绝对深度按从昆仑站钻探点冰盖总厚度进行无量纲化尺度分析, 则各层的几何结构相对于相对深度呈平滑变化; 因此, 冰盖浅部的同一层对应于相似深度, 而较深部的同一层的相应深度有较大波动(图2). 光滑等时层的这种空间变化模式意味着冰穹周围存在相对稳定的流动. 内部层的几何结构与冰穹Dome A的表面应变场一致(Yang等, 2014). 各层的冰层结构图显示, 在深部等时层与基岩之间表现出较大的局部差异. 稳定的层垂向变薄意味着冰穹周围的老冰可能被保留下来.

将Dome A的昆仑冰芯延伸至Vostok、Dome C和Dome Fuji等深冰芯(Petit等, 1999; EPICA Community Members, 2004; Jouzel等, 2007; Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017), 对南极冰盖不同深冰芯的年代-深度曲线进行对比, 结果显示出东南极冰盖不同位置的深冰芯年代-深度曲线存在显著的差异(图4). 在较浅层(冰厚的30%), 冰穹(Dome C和Dome Fuji)的年代-深度关系与昆仑站冰芯表现出相似的模式, 且同一深度的冰龄小于昆仑站冰芯, 相对差异小于10%; 在Vostok冰芯的冰龄大于昆仑站冰芯, 相对差异较小, 约为20%. 浅层Dome A的冰较Vostok的冰相对年轻, 与Dome A冰穹区域的水平冰流速较低有关. 根据GPS的多次测量, Dome A区域的表面平均速度(~(11±2.5)cm

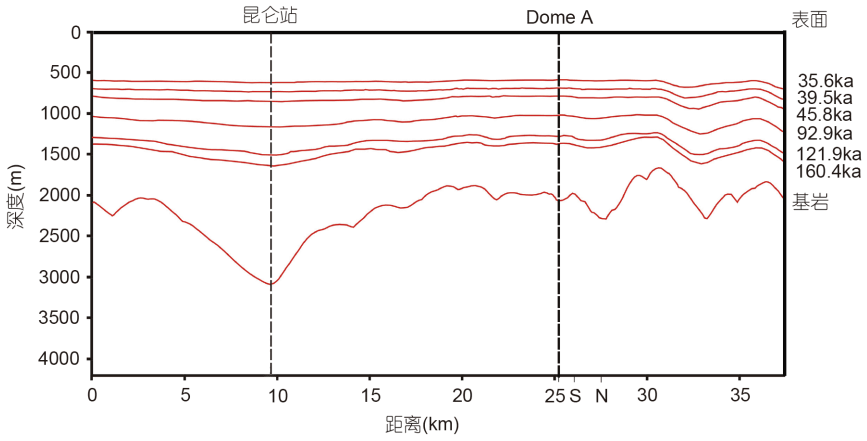


图 3　Vostok钻探点冰芯年代诱导的内部雷达等时层的定年

这里仅显示第1~6层

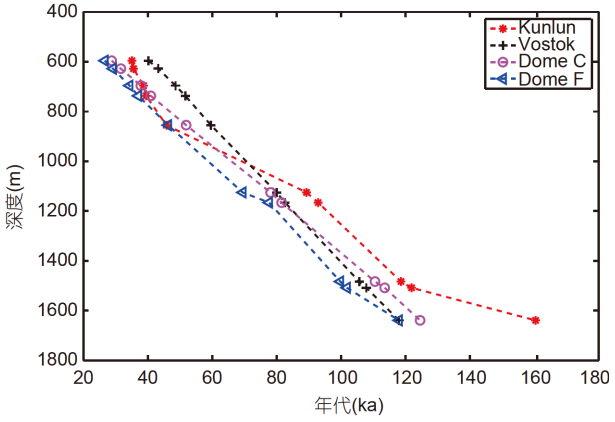


图 4　东南极冰盖不同冰芯在给定深度的年龄-深度曲线比较

Vostok冰芯年龄数据来自Petit等(1999), Dome C冰芯年龄数据来自Jouzel等(2007), Dome Fuji冰芯年龄数据来自Dome Fuji Ice Core Project Members(2017), 对比数据细节见网络版附表1(http://earthcn.scichina.com)

a^{-1})接近于零(Yang等, 2014); 而Vostok的表面速度约为2m a^{-1}(MacGregor等, 2009年). Dome A处的冰流较慢意味着冰变薄的影响可以忽略. 在相对深度为30~50%时, 昆仑站冰芯钻探点给定深度的冰龄比其他三支深冰芯都要老. 例如, 在1125m深处, 昆仑站雷达等时层第9层的相应冰龄为89.3ka, 在Vostok为80ka, Dome C为78ka, Dome Fuji为69.5ka. Dome A的冰相对较老的一个解释是, 从海岸到Dome A冰穹雪累积率较低且空间变化率最小(Hou等, 2007; Ding等, 2011). 较低的累积率是降水量较低、更平坦光滑的表面以及地面风速较低的综合结果(Fischer等, 2013).

3.2　昆仑站古积累率

通过冰流模式模拟可以估算冰的温度和年龄, 但为了提高模型结果的准确性, 这类模型需要输入冰雪累积率及其时空变化. 因此, 确定昆仑站所在地区古积累率对于未来的冰川学研究以及昆仑站冰芯的气候信息重建非常重要. 昆仑站的古冰雪积累速率可以用一维冰流模型来估算. 基于Dansgaard-Johnsen(D-J)模型, 由年代-深度关系可以简单估计平均累积率. D-J模型假设垂直应变率在基岩上方的某个阈值h处为恒定即为常数, 从该阈值h向下直到基岩, 应变率线性降低至零(Siegert, 2003). 对于固定冰厚H, 深度$d=H-z$处的累积率由以下公式得出:

$$A(z)=\begin{cases}\dfrac{2H-h}{2t(z)}\log\left(\dfrac{2H-h}{2z-h}\right), & h\le z<H,\\ \dfrac{2H-h}{t(h)-t(z)}\left(\dfrac{h}{z}-1\right), & 0<z<h,\end{cases} \tag{1}$$

式中, $A(z)$为积累速率, H为昆仑站冰芯钻探点总冰厚(3100m), $t(z)$为层的冰龄, z为层上距离, 此处取冰层阈值h为800m. 计算表明, 过去160.4kyr的平均积累速率为1.57~2.24cm a^{-1}. 这一结果与Dome A测得的当前积累率(Hou等, 2007)以及Dome A过去约161kyr的古累积率一致(Wang等, 2016).

4　结论

基于直接提取地面冰雷达探测和航空冰雷达测量追踪的内部等时层, 并连接至Vostok冰芯进行年代匹

配，获得昆仑站深冰芯内部等时层的年代-深度关系. 识别出冰盖表面以下约630~1640m深度的10条内部等时层，其中最浅层628m处的年龄为35.6ka，最深层1639m处的年龄为160.4ka. 研究表明，昆仑站冰芯钻探点的年代-深度曲线在较浅层具有类似的模式, 这与Vostok相反. 在1/3冰层厚度的下方深部, 昆仑站冰芯钻探点的冰龄比三个典型的南极深冰芯(Dome C、Dome Fuji和Vostok)更古老. 利用适用于冰穹处应变率变化的冰流模式, 对过去的冰雪累积率进行了估计, 计算结果与目前观测得到的积累率一致. 利用昆仑站深冰芯的年代-深度关系, 以及冰盖厚度、地热通量和冰晶组构，预期能对冰芯钻探区域的冰流模式进行约束，从而合理估计出冰盖底部冰体的年龄及其应变历史. 结合内部等时层、过去的大气成分和其他来自冰芯的气候代用指标，将有助于为昆仑站深冰芯重建可靠的冰芯年代学.

致谢　感谢德国阿尔弗雷德韦格纳研究所的Daniel Steinhage提供Vostok至Dome A机载雷达数据. 加拿大国家水文中心的杨大庆对文章修改提供了指导.

参考文献

Bell R E, Ferraccioli F, Creyts T T, Braaten D, Corr H, Das I, Damaske D, Frearson N, Jordan T, Rose K, Studinger M, Wolovick M. 2011. Widespread persistent thickening of the east Antarctic ice sheet by freezing from the base. Science, 331: 1592–1595

Cui X B, Sun B, Guo J X, Wang T T, Zhang D. 2015. A new detailed ice thickness and subglacial topography DEM for Dome A, East Antarctica. Polar Sci, 9: 354–358

Ding M, Xiao C, Li Y, Ren J, Hou S, Jin B, Sun B. 2011. Spatial variability of surface mass balance along a traverse route from Zhongshan station to Dome A, Antarctica. J Glaciol, 57: 658–666

Dome Fuji Ice Core Project Members. 2017. State dependence of climatic instability over the past 720000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. Sci Adv, 3: e1600446

Eisen O, Frezzotti M, Genthon C, Isaksson E, Magand O, van den Broeke M R, Dixon D A, Ekaykin A, Holmlund P, Kameda T, Karlöf L, Kaspari S, Lipenkov V Y, Oerter H, Takahashi S, Vaughan D G. 2008. Ground-based measurements of spatial and temporal variability of snow accumulation in East Antarctica. Rev Geophys, 46: RG2001

EPICA Community Members L. 2004. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. Nature, 429: 623–628

Fischer H, Severinghaus J, Brook E, Wolff E, Albert M, Alemany O, Arthern R, Bentley C, Blankenship D, Chappellaz J, Creyts T, Dahl-Jensen D, Dinn M, Frezzotti M, Fujita S, Gallee H, Hindmarsh R, Hudspeth D, Jugie G, Kawamura K, Lipenkov V, Miller H, Mulvaney R, Parrenin F, Pattyn F, Ritz C, Schwander J, Steinhage D, van Ommen T, Wilhelms F. 2013. Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS “Oldest-Ice” ice core. Clim Past, 9: 2489–2505

Fretwell P, Pritchard H D, Vaughan D G, Bamber Jonathan L, Barrand N E, Bell R, Bianchi C, Bingham R G, Blankenship Donald D, Casassa G, Catania Ginny A, Callens D, Conway H, Cook A J, Corr Hugh F J, Damaske D, Damm V, Ferraccioli F, Forsberg René, Fujita S, Gim Y, Gogineni Sivaprasad, Griggs J A, Hindmarsh R, Holmlund P, Holt J W, Jacobel R W, Jenkins A, Jokat W, Jordan T, King E C, Kohler J, Krabill William B, Riger-Kusk M, Langley K A, Leitchenkov G, Leuschen Carl J, Lyendyk B P, Matsuoka K, Mouginot J, Nitsche F O, Nogi Y, Nost O A, Popov S V, Rignot E, Rippin D M, Rivera A, Roberts James A, Ross N, Siegert M J, Smith A M, Steinhage Daniel, Studinger M, Sun B, Tinto B K, Welch B C, Wilson D, Young Duncan A, Xiangbin C, Zirizzotti A. 2013. Bedmap2: Improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. Cryosphere, 7: 375–393

Frezzotti M, Bitelli G, De Michelis P, Deponti A, Forieri A, Gandolfi S, Maggi V, Mancini F, Remy F, Tabacco I E, Urbini S, Vittuari L, Zirizzottl A. 2004. Geophysical survey at Talos Dome, East Antarctica: The search for a new deep-drilling site. Ann Glaciol, 39: 423–432

Hou S G, Li Y S, Xiao C D, Ren J W. 2007. Recent accumulation rate at Dome A, Antarctica. Chin Sci Bull, 52: 428–431

Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, Dreyfus G, Falourd S, Hoffmann G, Minster B, Nouet J, Barnola J M, Chappellaz J, Fischer H, Gallet J C, Johnsen S, Leuenberger M, Loulergue L, Luethi D, Oerter H, Parrenin F, Raisbeck G, Raynaud D, Schilt A, Schwander J, Selmo E, Souchez R, Spahni R, Stauffer B, Steffensen J P, Stenni B, Stocker T F, Tison J L, Werner M, Wolff E W. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800000 years. Science, 317: 793–796

Leysinger-Vieli G J M C, Hindmarsh R C A, Siegert M J. 2007. Three-dimensional flow influences on radar layer stratigraphy. Ann Glaciol, 46: 22–28

MacGregor J A, Matsuoka K, Koutnik M R, Waddington E D, Studinger M, Winebrenner D P. 2009. Millennially averaged accumulation rates for the Vostok subglacial lake region inferred from deep internal layers. Ann Glaciol, 50: 25–34

Parrenin F, Dreyfus G, Durand G, Fujita S, Gagliardini O, Gillet F, Jouzel J, Kawamura K, Lhomme N, Masson-Delmotte V, Ritz C, Schwander J, Shoji H, Uemura R, Watanabe O, Yoshida N. 2007. 1-

D-ice flow modelling at EPICA Dome C and Dome Fuji, East Antarctica. Clim Past, 3: 243–259

Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, PÉpin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 399: 429–436

Plewes L A, Hubbard B. 2001. A review of the use of radio-echo sounding in glaciology. Prog Phys Geog, 25: 203–236

Ren J W, Xiao C D, Hou S G, Li Y S, Sun B. 2009. New focuses of polar ice-core study: NEEM and Dome A. Chin Sci Bull, 54: 1009–1011

Siegert M J, Hodgkins R, Dowdeswell J A. 1998. A chronology for the Dome C deep ice-core site through radio-echo layer Correlation with the Vostok Ice Core, Antarctica. Geophys Res Lett, 25: 1019–1022

Siegert M J. 2003. Glacial-interglacial variations in central East Antarctic ice accumulation rates. Quat Sci Rev, 22: 741–750

Steinhage D, Kipfstuhl S, Nixdorf U, Miller H. 2013. Internal structure of the ice sheet between Kohnen station and Dome Fuji, Antarctica, revealed by airborne radio-echo sounding. Ann Glaciol, 54: 163–167

Steinhage D, Nixdorf U, Meyer U, Miller H. 2001. Subglacial topography and internal structure of central and western Dronning Maud Land, Antarctica, determined from airborne radio echo sounding. J Appl Geophys, 47: 183–189

Sun B, Moore J C, Zwinger T, Liyun Z, Steinhage D, Tang X, Zhang D, Cui X, Martín C. 2014. How old is the ice beneath Dome A, Antarctica? Cryosphere, 8: 289–305

Tang X Y, Sun B, Guo J X, Liu X J, Cui X B, Zhao B, Chen Y. 2015. A freeze-on ice zone along the Zhongshan-Kunlun ice sheet profile, East Antarctica, by a new ground-based ice-penetrating radar. Chin Sci Bull, 60: 574–576

Tang X Y, Sun B, Zhang Z H, Zhang X P, Cui X B, Li X. 2011. Structure of the internal isochronous layers at Dome A, East Antarctica. Sci China Earth Sci, 54: 445–450

Tang X Y, Sun B, Li Y S, Li X, Cui X B. 2012. Dome Argus: Ideal site for deep ice drilling. Adv Polar Sci, 23: 47–54

Wang T T, Sun B, Tang X Y, Pang X B, Cui X B, Guo J X, Wang H. 2016. Spatio-temporal variability of past accumulation rates inferred from isochronous layers at Dome A, East Antarctica. Ann Glaciol, 57: 87–93

Wolovick M J, Bell R E, Creyts T T, Frearson N. 2013. Identification and control of subglacial water networks under Dome A, Antarctica. J Geophys Res-Earth Surf, 118: 140–154

Xiao C D, Li Y, Hou S, Allison I, Bian L, Ren J. 2008. Preliminary evidence indicating Dome A (Antarctica) satisfying preconditions for drilling the oldest ice core. Chin Sci Bull, 53: 102–106

Yang Y D, Sun B, Wang Z M, Ding M H, Hwang C, Ai S T, Wang L Z, Du Y J, Dongchen E. 2014. GPS-derived velocity and strain fields around Dome Argus, Antarctica. J Glaciol, 60: 735–742

Zhang N, An C L, Fan X P, Shi G T, Li C J, Liu J F, Hu Z Y, Talalay P, Sun Y H, Li Y S. 2014. Chinese first deep ice-core drilling project DK-1 at Dome A, Antarctica (2011–2013): Progress and performance. Ann Glaciol, 55: 88–98

(责任编委: 李新)