

极地中深及深冰芯钻探项目进展及对我国的启示

李亚洲^{1,2}, 孙友宏^{1,2}, 张楠³, 范晓鹏³, 李冰^{1,2*}, 宫达³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 吉林大学极地科学与工程研究院, 吉林 长春 130026)

摘要:在极地开展中深及深冰芯钻探项目,对获取古气候信息、揭示冰盖运动规律以及预测未来全球环境变化等方面均具有重要意义。从20世纪60年代开始,世界各国已经在极地完成了26个中深冰芯钻探项目和14个深冰芯钻探项目。目前,仍有Dome A、Beyond EPICA、MYIC、Dome Fuji和Hercules Dome等5个深冰芯钻探项目正在实施中,且俄罗斯正在筹划Dome B的深冰芯钻探项目。目前,我国仅实施过1个中深冰芯钻探项目,而深冰芯钻探项目的深度刚突破800 m。与欧洲、美国、日本和俄罗斯相比,我国在中深和深冰芯钻探技术领域施工经验少,装备自主化程度低,技术水平落后。为此,我国应积极研发具有自主知识产权的深冰芯电动机械钻具,加快实施Dome A深冰芯钻探工程,开展中深冰芯钻探及古老蓝冰钻探项目,突破冰层快速钻探和定向取芯钻探等关键技术,从而促进我国极地冰芯钻探技术的发展,提高在极地冰芯科学领域的影响力。

关键词:极地;冰盖;中深冰芯;深冰芯;钻探项目;钻具

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)06-0001-13

Progress of intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in polar regions and its enlightenment for China

LI Yazhou^{1,2}, SUN Youhong^{1,2}, ZHANG Nan³, FAN Xiaopeng³, LI Bing^{1,2*}, GONG Da³

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (China University of Geosciences, Beijing),
Ministry of Education, Beijing 100083, China;

3. Institute of Polar Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: It is of great significance to carry out intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in polar regions for obtaining paleoclimate information and predicting future ice sheet evolution. Since the 1960s, countries around the world have completed 26 intermediate-depth ice-core drilling projects and 14 deep ice-core drilling projects in polar regions. At present, there are still five deep ice core drilling projects in progress, which are Dome A, Beyond EPICA, MYIC, Dome Fuji and Hercules Dome. Russia is also planning a deep ice core drilling project at Dome B. At present, China has only implemented one intermediate-depth ice-core drilling project, and the depth of the deep ice-core drilling project has just broken through 800m. Compared with Europe, the United States, Japan, Russia, China has less drilling experience, low degree of equipment independence, and relatively backward technical level in the field of intermediate-depth and deep ice-core drilling technology. Therefore, China should actively develop deep ice-core electromechanical drill with independent intellectual property rights, accelerate the implementation of Dome A deep

收稿日期:2024-07-15; 修回日期:2024-09-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.06.001

基金项目:国家重点研发计划项目“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”课题四“多工艺极地钻探装备研发与系统集成”(编号:2021YFA0719104);国家自然科学基金青年科学基金项目“可回收式热融钻具孔壁冻融过程的传热规律研究”(编号:42206255)

第一作者:李亚洲,男,汉族,1993年生,副教授,地质工程专业,博士,长期从事极地钻探技术与装备研究工作,北京市海淀区学院路29号, yazhouli@cugb.edu.cn.

通信作者:李冰,男,汉族,1988年生,副教授,地质工程专业,博士,长期从事极地钻探技术与装备研究工作,北京市海淀区学院路29号, bing@cugb.edu.cn.

引用格式:李亚洲,孙友宏,张楠,等.极地中深及深冰芯钻探项目进展及对我国的启示[J].钻探工程,2024,51(6):1-13.

LI Yazhou, SUN Youhong, ZHANG Nan, et al. Progress of intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in polar regions and its enlightenment for China[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 1-13.

ice-core drilling project, carry out intermediate-depth ice-core drilling and ancient blue ice drilling projects, break through key technologies such as rapid ice drilling and directional ice-core drilling technology, so as to promote the development of China's polar ice-core drilling technology and improve its influence in the field of polar ice core science.

Key words: polar regions; ice sheet; intermediate-depth ice-core; deep ice-core; drilling projects; drilling tool

0 引言

极地冰盖主要包括南极冰盖和格陵兰冰盖,其占到了地球表面积的11%^[1]。极地冰盖由降雪经压实作用形成,其中包含了冰盖形成过程中的重要信息^[2]。冰芯是在冰盖中钻取的柱状样品。通过分析冰芯中气泡的成分和水同位素等手段,可以重建古气候环境,揭示冰盖在历史时期的演化规律,从而为预测未来冰盖的变化规律提供重要依据^[3-5]。

钻探是在极地冰盖中获取冰芯的唯一手段,也是开展冰芯科学研究的前提。虽然人类早在1841年就已经开始发展冰芯钻探技术,但对极地雪冰样品的获取长期依赖雪坑进行^[6-7]。利用钻探技术开展冰芯科学研究始于20世纪50年代初期。1949—1952年,一支由挪威、英国和瑞典科学家组成的科考小组首次在南极毛德皇后地的冰架上钻取了约100 m的冰芯^[8-9]。与此同时,法国于1950—1951年期间在格陵兰岛分别钻取了一支126 m和150 m的冰芯^[7]。在1957—1958年的国际地球物理年期间,科学家首次提出在极地开展深冰芯钻探计划,并受到科学界广泛认可^[10]。随后,世界多国开始了在极地的冰芯钻探工作,拉开了冰芯科学研究的序幕。在过去的近70年时间里,人类已经在极地开展了一系列不同深度的冰芯钻探工作,获取了大量的冰芯样品。冰芯钻探也从最初主要由欧、美、日和前苏联等国家主导,逐步拓展到中国、韩国、巴西、印度等国家。随着冰芯科学研究的发展,冰芯钻探技术也日渐成熟。目前,能够在极地开展冰芯钻探作业的钻具类型已达几十种,可满足不同深度冰芯的钻探需求^[11-12]。

在工程上,按照钻探深度的不同可以将冰芯钻探分为浅表钻探(0~50 m)、浅冰芯钻探(50~400 m)、中深冰芯钻探(400~1500 m)和深冰芯钻探(1500~4000 m)^[11]。相较于浅表钻探和浅冰芯钻探,中深冰芯钻探和深冰芯钻探所用钻具质量大、钻探时间长,且一般均需采用钻井液,这导致中深冰芯和深冰芯钻探的资金投入和后勤保障需求较高。但与此同时,中深冰芯和深冰芯钻探也能获取

更古老的冰芯样品,具有更高的科学研究价值。值得注意的是,以上关于冰芯钻探的划分均出于工程目的。在科学研究上,对中深冰芯和深冰芯并没有严格的划分。本文旨在对极地已经完成的中深及深冰芯钻探项目进行总结,同时梳理出极地深冰芯钻探项目的最新进展,以期为我国开展中深及深冰芯钻探提供一定的启示。

1 极地中深及深冰芯钻探项目发展现状

中深冰芯钻探项目和深冰芯钻探项目均有各自不同的发展特点,以下将从这两个方面分别阐述其发展现状。

1.1 极地中深冰芯钻探项目发展现状分析

如表1所示,美国于1963年首先在格陵兰岛Camp Century开展中深冰芯钻探,并在1966年钻穿1387 m厚的冰盖,获取了透底冰芯^[13-14]。这项工程对极地冰芯科学的发展具有重要意义,它不仅是人类首次利用电动机械钻具开展中深冰层钻探,极大地促进了冰芯钻探技术的发展,而且使科学家认识到了极地冰芯的研究价值,为后续极地冰芯钻探工程的实施铺平了道路。

继美国之后,世界多国在南极和格陵兰岛开展了中深冰芯钻探工程。迄今为止,共有美国、丹麦、前苏联/俄罗斯、日本、英国、法国、澳大利亚、新西兰和中国等9个国家在极地开展了26个中深冰芯钻探项目(图1),其中,南极中深冰芯钻探项目21个,格陵兰岛中深冰芯钻探项目5个。如图2所示,前苏联/俄罗斯是开展中深冰芯钻探项目最多的国家,数量达到了8个。早在1972年,苏联就在南极Vostok站利用热融取芯钻具TELGA-14完成了一个952.4 m的钻孔^[15-16]。该钻孔未使用任何钻井液,是目前世界上采用“干孔”钻进方式在冰层中钻进的最深孔。除前苏联/俄罗斯之外,美国在南极施工完成了7个中深冰芯钻孔,英国和澳大利亚则各完成了3个中深冰芯钻孔,丹麦完成的2个中深冰芯钻孔均位于格陵兰岛。相比于其他国家,我国开展中深冰芯钻探较晚。2023—2024年,我国利用自

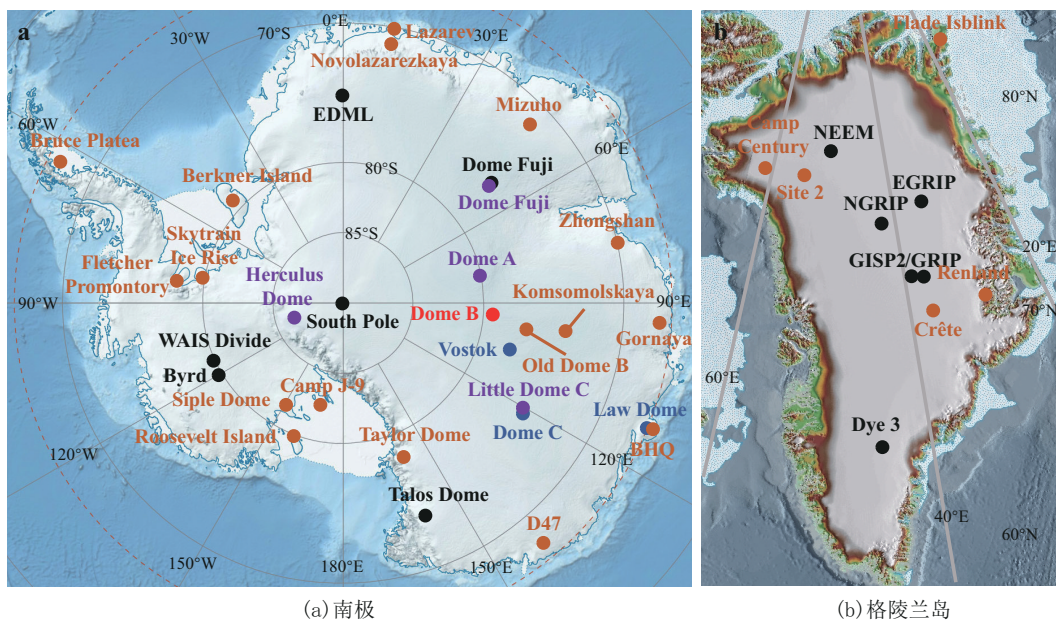
表 1 极地中深冰芯钻探项目概况

Table 1 Overview of the intermediate-depth ice-core drilling projects

主导国家	地 点	钻探点坐标	时间	孔深/m	钻具	冰厚/ m	海拔/ m	地表平 均气 温/℃	降雪积 累率/ (m·a ⁻¹)	钻井液
前苏联/俄罗斯	Vostok ^[15,18]	78.47°S,106.87°E	1970—1973	952.4 (1G)	TELGA-14	3769	3488	—55	0.022	无
	Lazarev 冰架 ^[19-20]	70.48°S,11.75°E	1976	447	ETB-3	447	—	—15	—	
	Novolazarezkaya 站 以南 40km ^[20-21]	70.97°S,11.37°E	1977	812		~1000	—	—	—	
	Camp J-9 ^[20,22]	82.37°S,168.62°W	1978	420		420	~600	—28	—	乙醇水溶液
	Gornaya 基地 ^[12,20]	67.20°S,93.28°E	1978	750	TELGA-14M、 TBZS-152M	—	—	—	—	
	Komsomolskaya 站 ^[19,21]	74.10°S,97.50°E	1982—1983	871.5	ETB-5	—	3500	—53	—	
	Mirny 站—Vostok 站 105 km 处 ^[20]	—	1987—1988	740	TELGA-14M、 TBZS-152M	—	—	—	—	TS-1
	Old Dome B ^[20-21]	77.06°S,94.92°E	1987—1988	780	ETB-130、ETB-5	—	3770	—57.5	0.035	乙醇水溶液
美国	Site 2 ^[7,23]	76.98°N,56.07°E	1957	411	Failing Model 314 钻机	—	~2000	—25.4	—	压缩空气
	Crête ^[24-25]	71.12°N,37.32°E	1974	404	—	—	3172	—30.4	0.298	—
	Camp Century ^[2,14,26]	77.17°N,61.13°W	1963—1966	1387	CRREL	1387	1887	—24	0.33	DF-A+三 氯乙烯
	Camp J-9 ^[19,22]	82.37°S,168.62°W	1978	416	PICO 绳索钻具	420	~600	—28	—	—
	Taylor Dome ^[27-28]	77.70°S,159.07°E	1993—1994	554	PICO-5.2"	554	2375	—43	0.06	乙酸丁酯
	Siple Dome ^[2,29]	81.65°S,148.81°W	1997—1999	1004		1004	620	—25	0.11	
	Bruce Plateau ^[30]	66.03°S,64.07°W	2009—2010	447	ETED	447	1975.5	—14.78	2	乙醇水溶液
英国	Berkner Island ^[31]	79.55°S,45.68°W	2003—2005	948		948	890	—26.5	0.13	Exxsol TM D60+ HCFC 141b
	Fletcher Promontory ^[32]	77.90°S,82.60°W	2011—2012	654	Hans Tausen	654	873	—27.1	0.38	Exxsol D60
	Skytrain Ice Rise ^[33]	79.74°S,78.55°W	2018—2019	651		651	784	—25.9	0.14± 0.02	Exxsol D60
	Renland ^[11,34-35]	71.31°N,26.72°W	2015	584	UCPH	584	2340	—18	0.49	ESTISOL TM 140
丹麦	Flade Isblink ^[11]	81.29°N,15.70°W	2006	436	Hans Tausen	~540	—	—22	—	ESTISOL TM 240+COA- SOL TM
法国	Dome C ^[36]	75.10°S,123.35°E	1977—1978	905	LGGE 热融钻具	3275	3233	—54	0.036	无
	D47, Adélie Land ^[12]	67.39°S,138.73°E	1987—1989	871	Forage 4000	—	1560	—	—	DF-A+ CFC 11
日本	Mizuho 站 ^[17]	70.70°S,44.33°E	1983—1984	700.6	JARE 热融钻具	2095	2230	—33.2	0.07	无
澳大利亚	BHQ ^[37]	~66.50°S,111.80°E	1977	430 474	ANARE 热融钻 具	780	~1000	—	—	—
	Law Dome ^[12,38]	66.77°S,112.80°E	1991—1993	1200	ISTUK	1220	1370	—22	0.7	Jet A-1+ 全氯乙烯
新西兰	Roosevelt Island ^[39]	79.36°S,161.71°W	2011—2012	763	Hans Tausen	763	550	—23.5	0.22	ESTISOL TM 240+COA- SOL TM
中国	中山站以南 25 km	69.59°S,76.39°E	2023—2024	545	IBED	545	692.7	—17.8	—	Jet A-1+ HCFC 141b

主研发的IBED钻具在距离中山站以南 25 km 的内陆冰盖施工了首个中深冰芯钻探项目,获取了连续

的冰芯样品,并钻取了 0.48 m 的冰下基岩(图 3)。



●黑色圆点表示已经完成的深冰芯钻探项目地点;●橙色圆点表示已经完成的中深冰芯钻探项目地点;●蓝色圆点表示既有深冰芯钻探项目,也有中深冰芯钻探项目的地点;●紫色圆点表示尚未完成的深冰芯钻探项目地点;●红色圆点表示正在规划中的深冰芯钻探项目地点

图 1 极地中深及深冰芯钻探地点

Fig.1 Drilling sites for intermediate-depth and deep ice-core drilling projects

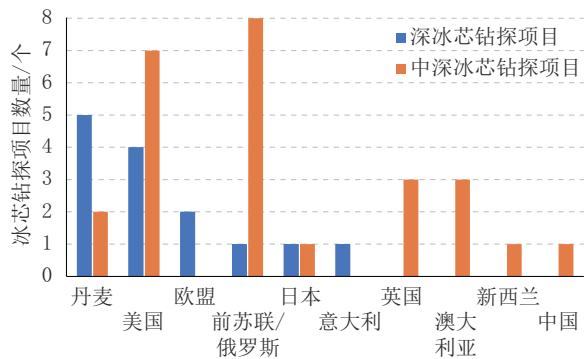


图 2 不同国家的中深及深冰芯钻探项目数

Fig.2 Number of intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in different countries



图 3 我国首个中深冰芯钻探项目营地

Fig.3 Drilling camp of Chinese first intermediate-depth ice-core drilling project

从时间上来看,20 世纪 70 年代和 80 年代是开展中深冰芯钻探最活跃的时期(图 4)。在 50 年代和 60 年代,都只有这一个中深冰芯钻探项目。而在之后的 70 年代,中深冰芯钻探项目达到了 10 个,主要由苏联和澳大利亚使用热融取心钻具完成。70 年代以后,中深冰芯钻探项目逐渐减少。进入本世纪后,中深冰芯钻探活动又开始活跃,主要由欧美等

发达国家实施。值得注意的是,在诸多中深冰芯钻探项目中,有许多项目并未钻穿冰盖,如日本在 Mizuho 站开展的钻探项目以及前苏联在 Novolazarevskaya 站以南 40 km 处实施的钻探项目等^[17,1-8]。这些未透底的钻探项目多集中在 20 世纪 70 至 80 年代。

从地域分布上可以看出,除 Vostok、Dome C、

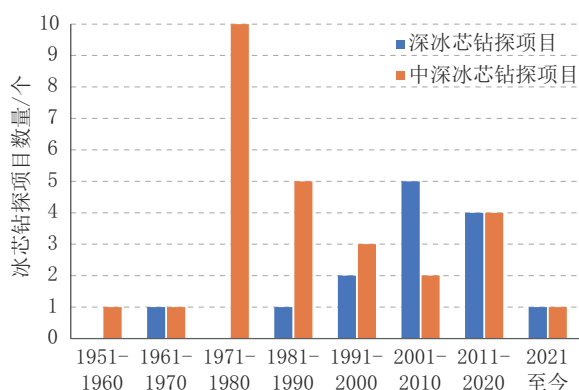


图4 不同年代中深及深冰芯钻探项目数(按照完成钻探项目的统计)

Fig.4 Number of intermediate-depth and deep ice-core drilling projects in different decades (counted according to the time completing the drilling projects)

Old Dome B 和 Komsomolskaya 等少数几个钻探点外,大部分的中深冰芯钻探点均位于距离海岸带较近的区域。相比南极内陆,这些地区的冰盖相对较薄、海拔较低、平均气温和降雪积累率较高。当然,从这些地区钻取的冰芯年龄也相对较小。

除前苏联/俄罗斯、法国和日本使用热融取芯钻具开展过中深冰芯钻探外,其他国家一般均采用电动机械钻具。这主要与冰芯钻探技术的发展历史相关,前苏联/俄罗斯、法国和日本的中深冰芯钻探集中在20世纪70和80年代,彼时,热融取芯钻具尚在普遍使用。进入90年代以后,热融取芯钻具逐渐退出历史舞台,电动机械钻具在中深冰层钻探中开始占据主导地位。热融取芯钻具一般采用乙二醇水溶液作为钻井液,而电动机械钻具则一般采用耐低温油类,并配以氟氯烃类物质作为加重剂。

1.2 极地深冰芯钻探项目发展现状分析

如表2所示,在成功实施Camp Century项目的基础上,美国于1966年率先在Byrd站实施深冰芯钻探工程,揭开了人类在极地开展深冰芯钻探的序幕^[40]。截止目前,只有美国、丹麦、欧盟、前苏联/俄罗斯、日本和意大利等6个国家和地区完成了14个深冰芯钻探工程(参见图2)。丹麦共主导完成深冰芯钻探项目5个,是完成深冰芯钻探项目最多的国家,其所完成的深冰芯钻探项目均位于格陵兰冰盖。美国紧随丹麦之后,在南极完成了3个深冰芯钻探项目,并在格陵兰岛开展了GISP2深冰芯钻探

工程^[41]。值得一提的是,美国在South Pole的深冰芯钻探工程并没有钻穿2700 m厚的冰盖,而只钻取了1751 m的冰芯^[42]。在世纪之交,欧盟多国在东南极Kohnen站和Dome C地区实施了EPICA项目,共完成了2口深冰芯钻孔^[43-44]。其中,在Dome C获取了冰龄超过80万年的冰芯,是目前已知最古老的连续冰芯样品,为南极古气候和冰盖演化研究提供了重要信息^[45]。苏联从1970年开始就在Vostok站开展钻探工作,其先后完成了1G到5G等5个钻孔,其中3G、4G的深度均超过了2200 m,但均未钻穿冰盖^[15,46]。直至2012年,俄罗斯才利用5G钻孔钻穿了3769 m厚的冰盖,并钻取了重新冻结的冰下湖水样品^[47]。5G钻孔是目前人类在冰层中钻进最深的钻孔^[48]。日本从1993年开始在Dome Fuji地区开展深冰芯钻探工程,最终在2006年成功完成了3035 m的深冰芯钻孔^[49]。

从图4可以看出,从20世纪60年代开始,深冰芯钻探工程逐渐变得越来越活跃。在本世纪的前2个10年里,各有4个深冰芯钻孔完成施工,这表明深冰芯钻探项目在极地科学研究中得到了越来越多的重视。深冰芯钻探工程旨在获取古老的冰芯样品,所以其钻探工程施工地点多处于南极内陆地区(图1)。这些地区普遍具有冰盖厚、气温低、海拔高和降雪积累率低的特点。以Vostok站为例,其冰盖厚度达到了3769 m,年平均气温低至 -55°C ,海拔高达3488 m,降雪积累率只有 0.022 m/a ^[18]。

除Vostok深冰芯钻探工程中部分井段使用了热融取芯钻具外,所有的深冰芯钻探项目均采用铠装电缆悬吊的电动机械钻具。常见的电动机械钻具包括ISTUK、PICO-5.2”、CREEL、Hans Tausen、DISC、KEMS和JARE钻具^[11,50]。其中,ISTUK、PICO-5.2”、CREEL钻具已经不再使用。Hans Tausen钻具是目前使用最多的电动机械钻具,共完成了丹麦和欧盟的4个深冰芯钻探项目^[51]。South Pole项目由于钻探深度相对较浅,使用美国研发的中深冰芯钻具IDD^[52]。深冰芯钻探均需使用钻井液,常用的钻井液包括乙酸丁酯、Jet A-1、Exxsol™ D60、Exxsol™ D40、Exxsol™ D30、DF-A、ESTISOL™ 240+COASOL™、Isopar K、TS-1、ESTISOL™ 140等,并辅以一定比例的加重剂^[53-54]。

值得一提的是,深冰芯钻探工程施工具有较大的卡钻风险。在目前已经完成的14个深冰芯钻探

表2 极地深冰芯钻探项目概况

Table 2 Overview of the deep ice-core drilling projects

主导国家	地点	钻探点坐标	时间	孔深/ m	钻具	冰厚/ m	海拔/ m	地表平 均气 温/℃	降雪积 累率/ (m·a ⁻¹)	钻井液
丹麦	Dye3站 ^[57-58]	65.18°N, 43.82°W	1979—1981	2037	ISTUK	2037	2490	−20	0.56	Jet A-1+全氯乙烯
	GRIP ^[58-59]	72.58°N, 37.63°W	1989—1992	3029		3029	3238	−32	0.23	Exxsol™ D60+ CFC 113
	NGRIP ^[56, 58]	75.10°N, 42.32°W	1996—1997 1998—2003	1310 3085		3091	2917	−32	0.19	Exxsol™ D60+ HCFC 141b
	NEEM ^[60]	77.45°N, 51.60°W	2007—2012	2540	Hans Tausen	2540	2450	−29	0.22	ESTISOL™ 240+
	EGRIP ^[61-63]	75.63°N, 36.00°W	2016—2023	2664		2664	2708	−30	0.11	COASOL™
美国	Byrd站 ^[2, 64]	80.02°S, 119.52°W	1966—1968	2164	CREEL	2164	1530	−28	0.14	DF-A+三氯乙烯
	GISP2 ^[2, 58, 65]	72.60°N, 38.50°W	1989—1993	3035	PICO-5.2"	3053	3200	−32	0.22	乙酸丁酯
	WAIS Divide ^[66-67]	79.47°S, 112.09°W	2006—2012	3405	DISC	3455	1766	−30	0.22	Isopar K+HCFC 141b
	South Pole ^[42, 68]	89.99°S, 98.16°W	2014—2016	1751	IDD	2700	2835	−49	0.08	ESTISOL™ 140
	Dome C ^[44, 69]	75.10°S, 123.35°E	1999—2004	3260	Hans Tausen	3275	3233	−54	0.036	Exxsol™ D30+ HCFC 141b
欧盟	Kohnen ^[70-71]	75°S, 0°E	2000—2006	2774		2774	2892	−44	0.064	Exxsol™ D40+ HCFC 141b
前苏联/ 俄罗斯	Vostok ^[18, 72-73]	78.47°S, 106.87°E	1980—1986	2202 (3G)	TELGA-14M、 TBZS-152M、 TBS-112VCh、 KEMS-112/ 132/135	3769	3488	−55	0.022	TS-1+CFC 11、 TS-1+HCFC 141b
			1986—1989	2546 (4G)						
			1990—2012	3769 (5G)						
日本	Dome F ^[49, 55, 74]	77.32°S, 39.70°E	1993—1996 2003—2007	2504 3035	JARE	3035	3810	−58	0.03	乙酸丁酯
意大利	Talos Dome ^[75-77]	72.78°S, 159.07°E	2005—2007	1620	Hans Tausen	1795	2318	−41	0.08	Exxsol™ D40+ HCFC 141b

工程中, Dome C、Dome Fuji、Vostok 和 NorthGRIP 等 4 个项目均发生过因卡钻而不得不放弃钻孔的现象。Dome C 的第一个钻孔在钻至 783 m 时发生卡钻, 不得不从地表开始重新钻进^[44]。日本在 Dome F 钻探第一个孔时, 因钻井液不足, 导致钻具在大约 2300 m 处发生卡钻事故^[55]。Vostok 站的 3G 钻孔和 4G 钻孔分别在 2202 m 和 2546 m 发生卡钻事故^[15]。NorthGRIP 项目则在 1310 m 处发生卡钻事故, 导致不得不在附近开始钻探第二个钻孔^[56]。

1.3 极地中深冰芯和深冰芯钻探项目现状综合分析

美国是世界上最早开展中深冰芯和深冰芯钻探项目的国家, 其在极地共完成 11 项中深冰芯和深冰芯钻探项目。前苏联/俄罗斯完成的中深冰芯和深冰芯钻探项目也达到了 9 项之多, 但前苏联/俄罗

斯的钻探项目多集中在 20 世界 70 年代, 使用的钻探设备和钻探工艺较陈旧, 且许多中深冰芯钻探项目均未透底。因此, 综合来看, 美国在极地中深冰芯和深冰芯钻探领域处于领先地位。丹麦作为格陵兰岛的所有国, 其在极地共完成中深冰芯和深冰芯钻探项目 7 项, 走在世界前列, 尤其是在深冰芯钻探领域, 其掌握了先进的技术、积累了丰富的工作经验。欧盟各国一般联合在一起开展深冰芯钻探项目, 而且深度介入丹麦在格陵兰岛的各项钻探工程。英国在极地主要开展中深层冰芯的钻取。相比于欧、美、日等国家, 我国在极地中深及深冰芯钻探领域起步晚, 实施钻探工程少, 钻探经验相对匮乏。

中深冰芯和深冰芯钻探工程多在极地偏远地区实施, 一般均需较强的后勤保障支撑。因此, 世

界各国的钻探项目主要依靠其科考站进行,这导致各国的冰芯钻探工程呈现出明显的地域性特点。美国、英国和新西兰在南极的科考站主要集中在西南极地区,故其冰芯钻探项目也主要分布在西南极;前苏联/俄罗斯、欧盟、日本、澳大利亚和中国的冰芯钻探项目则主要集中在东南极;丹麦所有的中深冰芯和深冰芯钻探项目全部位于格陵兰岛。

与中深冰芯钻探项目相比,深冰芯钻探项目一般位于极地内陆地区,其冰盖厚度更大、自然环境更恶劣、后勤保障更困难。这就导致深冰芯钻探工程的钻探时间一般长达 3~8 年,Vostok 站 5G 钻孔的钻探时间甚至长达 12 年,远超中深冰芯钻探项目 1~3 年的钻探周期。这也导致深冰芯钻探工程资金投入很大,为此,一些深冰芯钻探工程并不由单

个国家独自开展,而是通过广泛的国际合作来获取资金和技术支持。例如,丹麦主导的 EGRIP 项目,就包括了来自美国、英国、中国、加拿大、法国、德国、冰岛、意大利、日本、挪威、韩国、瑞典、瑞士等 13 个国家的合作伙伴。

2 极地深冰芯钻探项目最新进展

深冰芯钻探工程因其资金投入大、钻探技术难度高、科学价值突出、社会影响力大等因素,受到极地科学界的广泛关注。虽然目前已经在极地完成了诸多深冰芯钻探项目,但仍有 5 项深冰芯钻探项目正在实施过程中(见表 3),且俄罗斯也在规划一项新的深冰芯钻探项目。以下将对这些项目逐一进行介绍。

表 3 尚未完成的深冰芯钻探项目
Table 3 Deep ice-core drilling projects in progress

主导国家	地 点	钻探点坐标	时间	当下孔深/m	钻具	冰厚/m	海拔/m	地表平均气温/℃	降雪积累率/(m•a ⁻¹)	钻井液
中国	Dome A ^[78,81]	80.42°S,77.12°E	2012 至今	803.7	JARE	3090	4092	-58	0.025	乙酸丁酯
欧盟	Little Dome C ^[82-86]	75.30°S,122.45°E	2021 至今	1836.18	AWI	2760	3233	-55	0.019	ESTISOL™140
澳大利亚	Little Dome C ^[82-86]	75.34°S,122.52°E	2023 至今	无	—	2760	3233	-55	0.019	—
日本	Dome Fuji ^[87-88]	77.31°S,39.70°E	2023 至今	—	JARE	3028	3810	-58	0.03	乙酸丁酯
美国	Hercules Dome ^[89-90]	~85.8°S,102.9°W	预计 2026—2030	无	Foro 3000	~1600	~2618	-41	0.13	Isopar K 或 ESTISOL™140

2.1 中国 Dome A 深冰芯钻探项目

Dome A 深冰芯钻探工程由我国主导实施,项目于 2012 年第 28 次中国南极考察期间开始施工,当年即钻探至 120.79 m 的深度^[78]。Dome A 为南极冰盖最高点,是开展深冰芯钻探的理想地点^[79]。初步预计,该地区的冰芯年龄可能达到 60~70 万年^[80]。截止 2018 年,Dome A 深冰芯钻孔的深度达到了 803.7 m(见图 5),这也是我国目前在极地冰层完成的最深钻孔^[81]。2018 年以后,因多方面原因,Dome A 深冰芯钻探工程处于停滞状态,没有开展进一步的钻探作业。

2.2 欧盟 Beyond EPICA 深冰芯钻探项目

欧盟在完成 EPICA 项目后,只找到了冰龄为 80 万年的冰芯。为了找到冰龄超过 150 万年的古老冰芯,欧盟启动了 Beyond EPICA 项目(见图 6)。该项目通过前期大量的冰雷达勘探作业,结合冰川运动模式,将深冰芯钻探区域锁定在 Little Dome C 区



图 5 Dome A 深冰芯钻探项目突破 800 m^[81]
Fig.5 Breakthrough of 800m in Dome A deep ice-core drilling project

域。该区域距离 Dome C 深冰芯钻探点仅 34 km^[82-83]。Beyond EPICA 项目的参与国家包括德国、意大利、英国、法国、荷兰、瑞典、瑞士、法国、挪威、丹麦、比利时等国。该项目于 2019 年开始筹划,2021 年 12 月 4 日正式进行钻探施工。2022 年钻探深度达到 130 m,2023 年钻探深度达到 804.65 m,到

2024年钻孔深度已经突破了1836.18 m。整个钻探工程预计在2026年结束^[84]。



图6 Beyond EPICA项目钻探营地^[84]

Fig.6 Drilling camp of Beyond EPICA project

2.3 澳大利亚MYIC深冰芯钻探项目

澳大利亚在2016年首次提出在东南极开展深冰芯钻探项目MYIC(Million Year Ice Core),以寻找冰龄超过百万年的古老冰芯^[85]。2021年将钻探地点确定为Little Dome C区域,其距离Beyond EPICA项目钻探点仅5 km。2022—2024年,澳大利亚科研人员通过内陆车队运输抵达钻探点,开展了物资运输、浅冰芯钻探及营地建设等前期准备工作,但目前尚未完成钻探前的所有准备工作(见图7)。MYIC项目整个钻探过程大概需要4~5年,投资约4500万澳元。MYIC项目和Beyond EPICA项目的钻探点相距很近,获取的冰芯将独立开展研究,从而为古气候研究提供切实可靠的证据^[86]。



图7 澳大利亚科研人员抵达MYIC项目钻探点^[86]

Fig.7 Australian researchers arrived at the drilling site of MYIC project

2.4 日本Dome Fuji第三次深冰芯钻探项目

从2016年开始,日本和美国、德国、挪威合作连续多年在Dome Fuji及其周边区域开展了一系列冰川学调查,如冰雷达探测以及浅冰芯钻探等,为在该地区开展深冰芯钻探工程进行选址^[87,91]。2023

年,日本正式在Dome Fuji区域启动第三次深冰芯钻探工程^[88,92]。这是日本国立极地研究所在Dome Fuji区域实施的第三口深冰芯钻孔,钻探所使用的装备与工艺与之前两次深冰芯钻探项目基本相同。

2.5 美国Hercules Dome深冰芯钻探项目

Hercules Dome位于西南极Horlick山和Thiel山之间,距离南极点约400 km^[89]。美国计划于2026年在Hercules Dome开展深冰芯钻探工程,旨在获取该地区末次间冰期以来的古气候记录,揭示12.5万年前西南极冰盖是否发生过大的崩解事件。该钻探项目获得美国自然科学基金委约300万美元的资助,预计于2030年钻穿约1600 m厚的冰盖^[90]。Hercules Dome深冰芯钻探项目将采用美国最新研发的Foro3000钻具,该钻具的最大钻探能力可达3000 m^[93]。

2.6 俄罗斯深冰芯钻探计划

目前俄罗斯也在积极筹划在南极Dome B区域开展深冰芯钻探工程。Dome B(79.02°S,93.69°E)位于东南极Vostok站和我国昆仑站之间,距Vostok站约300 km。2020年,俄罗斯科考队抵达Dome B地区,对该地区开展了初步的冰川学调查,钻取了一根20.5 m长的浅冰芯^[94]。调查结果显示,该地区冰盖厚度约2500 m,海拔约3807 m,年平均气温低至-58.1℃,降雪积累率只有0.0228 m/a,满足深冰芯钻探的初步条件。未来,俄罗斯计划在Dome B地区开展进一步的冰川和地球物理调查。

3 极地中深及深冰芯钻探项目对我国的启示

从20世纪60年代开始,世界各国已经在极地开展了诸多中深及深冰芯钻探项目。目前,极地深冰芯钻探工程仍在如火如荼地开展。相较于欧、美、日和俄罗斯等发达国家,我国在中深及深冰芯钻探领域还有较大的差距。为此,我国应积极吸取国外中深及深冰芯钻探项目的经验教训,在项目规划实施及关键技术突破方面加快发展步伐。

3.1 推进中深及深冰芯钻探项目规划实施

在项目规划实施方面,我国应基于已有后勤保障条件积极开展中深冰芯钻探,同时加快推进实施深冰芯钻探工程,并开展古老蓝冰搜寻及相关钻探项目。

3.1.1 基于已有后勤保障条件开展中深冰芯钻探

吉林大学研发的IBED钻具采用移动式钻探

舱,其钻探能力达到1500 m,可在冰盖上实现灵活快速移动^[95-96]。第40次中国南极科学考察期间,IBED 钻具顺利钻穿了545 m厚的冰盖,证明其具备完成中深冰层钻探取芯的能力。目前,我国主要在东南极中山站至昆仑站沿线开展内陆考察,且已具备较好的后勤支撑保障条件。因此,我国可基于现有后勤保障能力,在中山站至昆仑站沿线寻找具有科学研究价值的钻探点,实施更多的中深冰芯钻探工程。

3.1.2 深冰芯钻探项目应积极开展国际合作

极地深冰芯钻探是一项工期长、资金投入大、科研产业链长的大科学工程,对项目主导方有很高的要求。为此,很多深冰芯钻探工程并不是由一个国家单独来承担的,而是由多方共同出资、共同参与的,从而实现资金、技术和人力的共享,达到科研成果最大程度的产出。例如,EGRIP 项目和 Beyond EPICA 项目就由数十个国家共同完成。我国在后续开展深冰芯钻探项目时,如果在资金、技术和人力方面存在困难,亦可采用这种发展模式,最大程度推动科研成果的产出,提高我国在冰芯科学研究领域的影响力。

3.1.3 加快实施 Dome A 深冰芯钻探工程

深冰芯钻探仍然是当下极地科学研究的前沿领域,美国、欧盟、澳大利亚、俄罗斯、日本等发达国家均在积极开展深冰芯钻探项目。我国主导的 Dome A 深冰芯钻探项目目前已经钻至803 m的深度,有望在冰盖底部发现古老冰芯,从而为 Dome A 地区的古气候演化提供重要依据。继续实施 Dome A 深冰芯钻探工程,不仅能够促进我国深冰芯钻探技术的进步,培养相关专业人才,而且能够提高我国冰芯科学研究水平,增强在南极相关事务上的话语权。因此,我国应做好规划,加快实施 Dome A 深冰芯钻探工程。

3.1.4 开展古老蓝冰搜寻及相关钻探项目

深冰芯钻探项目大多都为寻找最古老的冰芯。但近年来的研究表明,极地的蓝冰区域能获取比深冰芯钻探项目更古老的冰芯样品。为此,美国已经在南极 Allan 山开展了多次蓝冰搜寻项目,并专门研发了大直径蓝冰钻具 BID (Blue Ice Drill) 用于蓝冰样品的钻取^[97-98]。2021年,美国启动了 COLDEX (Center for Oldest Ice Exploration) 项目,该项目旨在通过各种技术手段,获取冰龄达150万年的连续

冰芯样品和更古老的蓝冰样品^[99]。因此,作为深冰芯钻探项目的有益补充,我国也应该研发相应的蓝冰钻具,在我国极地考察活动区域内开展蓝冰钻探项目。

3.2 加快中深及深冰芯钻探关键技术研发

在中深及深冰芯钻探技术方面,我国应研发具有自主知识产权的深冰芯电动机械钻具及冰层快速钻探技术,同时突破定向取芯钻探、脆冰层和暖冰层钻探等关键技术。

3.2.1 研发具有自主知识产权的深冰芯电动机械钻具

极地中深及深冰芯的钻取既可以采用热融取芯钻具,也可采用电动机械钻具。热融取芯钻具因功率消耗大、冰芯质量差、含灰尘冰层钻进困难等原因,在20世纪90年代之后,已经逐渐被电动机械钻具取代,目前已经很少有国家利用热融取芯钻具开展中深及深冰芯钻探工程了。有鉴于此,我国在发展冰芯钻探技术时,应以电动机械钻具为主。目前,中国科学院西北生态资源研究院已经研发出高效的 BZXJ 系列浅冰芯钻具^[100],吉林大学则研发了钻探能力达到1500 m的 IBED 钻具,其可完成中深层冰芯钻取任务。但我国在 Dome A 开展深冰芯钻探工程施工时只能使用日本的 JARE 钻具,尚没有自主研发的深冰芯钻具。为此,我国有必要在已有浅冰芯和中深冰芯电动机械钻具研发经验的基础上,研发具有自主知识产权的深冰芯电动机械钻具。

3.2.2 研发冰层快速钻探技术

深冰芯钻探工程投入大、成本高,且不一定能够钻获古老的冰芯样品,具有较大的风险性。但是如果能在开展深冰芯钻探工程之前,先在目标钻探点快速钻穿冰盖,确认冰层年龄,那么就能够极大地减少深冰芯钻探项目的风险。为此,美国的 RAID 钻具^[101]、法国的 SUBGLACIOR 钻具^[102]、英国的 BAS RAID 钻具^[103]、瑞士的 RADIX 钻具^[104]应运而生。这些钻具在钻探方法和钻具结构等方面各有特点,但它们均具备较快的钻探速度,从而能够大大减少钻探至冰层底部所需的时间。虽然目前这些钻具均处于测试阶段,尚未应用于实际深冰芯钻探工程,但其显示出的应用潜力巨大,我国也应该及早布局相关技术领域的发展。

3.2.3 突破冰层钻探领域的关键技术

深冰芯样品因难以获取和稀少而十分宝贵。若能够在深冰芯钻孔孔壁上开展定向取芯钻探作业,那么就能获取较多的冰芯样品。但目前,仅美国和俄罗斯掌握了冰层中的定向取芯钻探技术。美国在冰层侧壁取芯时,采用动力机构实现主动造斜,其研发的定向取芯钻具在 WAIS Divide 项目中先后完成5次侧壁取芯,获取冰芯样品 285 m^[67,105]。俄罗斯则利用造斜器和钻具在重力下的自然纠偏完成了诸多分支孔的钻探^[15,48]。为此,我国也有必要开展这方面的技术研发,为深冰芯钻探工程做好技术储备。此外,在中深及深冰芯钻探中,我国还应突破脆冰层和暖冰层钻进等技术难题^[106]。

4 结语

中深及深冰芯钻探工程对极地冰芯科学的发展具有重要意义。在过去约60年的时间里,世界各国已经在南极和格陵兰冰盖完成了26个中深冰芯钻探工程和14个深冰芯钻探工程,获取了大量的古气候、古环境信息,有力促进了冰芯科学的发展和进步。总的来看,中深及深冰芯钻探项目方兴未艾,目前仍有多个深冰芯钻探项目正在实施和规划中。目前,美、欧、日和俄罗斯等国在中深及深冰芯钻探领域位居世界前列。相比之下,我国在中深和深冰芯钻探技术领域施工经验少,装备自主化程度低,技术水平落后。有鉴于此,我国应通过合理规划 and 开展国际合作等方式突破冰层快速钻探和定向取芯钻探等关键技术,研发具有自主知识产权的深冰芯钻具,加快实施 Dome A 深冰芯钻探工程,开展中深冰芯钻探及古老蓝冰钻探项目,从而促进我国极地冰芯科学的研究水平,提高在极地事务的话语权。

参考文献(References):

- [1] Graham A G C. Ice sheet [M]//Singh V P, Singh P, Haritashya U K. Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. Berlin: Springer, 2011:592-608.
- [2] Cuffey K M, Paterson W S B. The Physics of Glaciers (4th ed.) [M]. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010.
- [3] 姚檀栋. 冰芯研究与全球变化[J]. 中国科学院院刊, 1996, 11(5):368-371.
YAO Tandong. Ice core research and global change[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 1996, 11(5):368-371.
- [4] 姚檀栋, 王宁练. 冰芯研究的过去、现在和未来[J]. 科学通报, 1997, 42(3):225-230.
YAO Tandong, WANG Ninglian. The past, present and future of ice core research[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(3):225-230
- [5] 王宁练, 姚檀栋. 冰芯对于过去全球变化研究的贡献[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3):275-287.
WANG Ninglian, YAO Tandong. Contributions of ice core to the past global change research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3):275-287.
- [6] Clarke G K C. A short history of scientific investigations on glaciers[J]. Journal of Glaciology, 1987, 3(S1):4-24.
- [7] Langway Jr C C. The history of early polar ice cores[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52(2):101-117.
- [8] Roberts B R. Norwegian-British-Swedish Antarctic expedition, 1949-52[J]. Nature, 1950, 165(4184):8-9.
- [9] Schytt V. The Norwegian-British-Swedish Antarctic expedition, 1949-52: I. summary of the glaciological work; Preliminary report [J]. Journal of Glaciology, 1953, 2(13):204-205.
- [10] Korsmo F L. The genesis of the international geophysical year [J]. Physics Today, 2007, 60(7):38-43.
- [11] Talalay P G. Mechanical Ice Drilling Technology [M]. Singapore: Springer, 2016.
- [12] Talalay P G. Thermal Ice Drilling Technology [M]. Singapore: Springer, 2020.
- [13] Hansen B L, Langway C C J. Deep core drilling in ice and core analysis at Camp Century, Greenland, 1961-1966[J]. Antarctic Journal of the United States, 1966, 1(5):207-208.
- [14] Ueda H T, Garfield D E. Drilling through the Greenland ice sheet: AR-126[R]. Hanover: 1968:1-7.
- [15] Vasiliev N I, Talalay P G, Bobin N E, et al. Deep drilling at Vostok Station, Antarctica: History and recent events[J]. Annals of Glaciology, 2007, 47:10-23.
- [16] 王秋雯, 李冰, Talalay Pavel, 等. 南极东方站深冰层及冰下湖钻探技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(9):35-46.
WANG Qiuwen, LI Bing, Talalay Pavel, et al. Drilling technology for deep ice and the subglacial lake at Vostok Station, Antarctica[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):35-46.
- [17] Narita H, Mae S, Nakawo M, et al. Ice-coring at Mizuho Station, Antarctica, and core analyses: A contribution from the Glaciological Research Program in East Dronning Maud Land, Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 1988, 10(1):213.
- [18] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 399(6735):429-436.
- [19] Zagorodnov V, Thompson L G, Kelley J J, et al. Antifreeze thermal ice core drilling: An effective approach to the acquisition of ice cores[J]. Cold Regions Science and Technology, 1998, 28(3):189-202.
- [20] Ueda H T, Talalay P G. Fifty years of Soviet and Russian drilling activity in polar and non-polar ice: A chronological history: ERDC/CRREL TR-07-20[R]. 2007:1-130.
- [21] Morev V A, Manevskiy L N, Yakovlev V M, et al. Drilling with ethanol-based antifreeze in Antarctica[C]//Proceedings of the Third International Workshop on Ice Drilling Technology.

- Grenoble, 1988:110-133.
- [22] Zotikov I A. Antifreeze-thermodrilling for core through the central part of the Ross Ice Shelf (J-9 Camp), Antarctica: CRREL Report 79-24[R]. Hanover: 1979:1-12.
- [23] Lange G R. Deep rotary core drilling in ice: CRREL Technical Report 94[R]. Hanover: 1973: 1-48.
- [24] Langway J C C, Clausen H B, Hammer C U. An inter-hemispheric volcanic time-marker in ice cores from Greenland and Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 1988,10(1):102-108.
- [25] Clausen H B, Gundestrup N S, Johnsen S J, et al. Glaciological investigations in the Crête area, central Greenland: A search for a new deep-drilling site[J]. *Annals of Glaciology*, 1988,10(1):10-15.
- [26] Drinkwater M R, Long D G, Bingham A W. Greenland snow accumulation estimates from satellite radar scatterometer data [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001,106 (D24):33935-33950.
- [27] Fitzpatrick J J. Preliminary report on the physical and stratigraphic properties of the Taylor Dome ice core[J]. *Antarctic Journal of the United States*, 1994,29(5):84.
- [28] David L M, Waddington E D, Marshall H, et al. Accumulation rate measurements at Taylor Dome, East Antarctica: Techniques and strategies for mass balance measurements in polar environments[J]. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, 1999,81(4):683-694.
- [29] Gow A J, Meese D. Physical properties, crystalline textures and c-axis fabrics of the Siple Dome (Antarctica) ice core[J]. *Journal of Glaciology*, 2007,53(183):573-584.
- [30] Zagorodnov V, Nagornov O, Scambos T A, et al. Borehole temperatures reveal details of 20th century warming at Bruce Plateau, Antarctic Peninsula[J]. *The Cryosphere*, 2012,6(3): 675-686.
- [31] Mulvaney R, Alemany O, Possenti P. The Berkner Island (Antarctica) ice-core drilling project[J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47(1):115-124.
- [32] Mulvaney R, Triest J, Alemany O. The James Ross Island and the Fletcher Promontory ice-core drilling projects[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(68):179-188.
- [33] Mulvaney R, Rix J, Polfrey S, et al. Ice drilling on Skytrain Ice Rise and Sherman Island, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2021,62(85-86):311-323.
- [34] Koldtoft I, Grinsted A, Vinther B M, et al. Ice thickness and volume of the Renland Ice Cap, East Greenland[J]. *Journal of Glaciology*, 2021,67(264):714-726.
- [35] Hughes A G, Jones T R, Vinther B M, et al. High-frequency climate variability in the Holocene from a coastal-dome ice core in east-central Greenland[J]. *Climate of the Past*, 2020,16(4): 1369-1386.
- [36] Lorious C, Donnou D. A 905-meter deep core drilling at Dome C (East Antarctica) and related surface programs[J]. *Antarctic Journal of the United States*, 1978,13(4):50-51.
- [37] Etheridge D M. Dynamics of the Law dome ice cap, Antarctica, as found from borehole measurements[J]. *Annals of Glaciology*, 1989,12:46-50.
- [38] Morgan V I, Wookey C W, Li J, et al. Site information and initial results from deep ice drilling on Law dome, Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 1997,43(143):3-10.
- [39] Lee J E, Brook E J, Bertler N A N, et al. An 83000-year-old ice core from Roosevelt Island, Ross Sea, Antarctica[J]. *Climate of the Past*, 2020,16(5):1691-1713.
- [40] Ueda H T. Byrd Station drilling 1966-69[J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47:24-27.
- [41] Alley R B, Anandakrishnan S. Variations in melt-layer frequency in the GISP2 ice core: Implications for Holocene summer temperatures in central Greenland[J]. *Annals of Glaciology*, 1995,21(1):64-70.
- [42] Johnson J A, Kuhl T, Boeckmann G, et al. Drilling operations for the South Pole Ice Core (SPICEcore) project[J]. *Annals of Glaciology*, 2021,62(84):75-88.
- [43] Wilhelms F, Miller H, Gerasimoff M D, et al. The EPICA Dronning Maud Land deep drilling operation[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(68):355-366.
- [44] Augustin L, Panichi S, Frascati F. EPICA Dome C 2 drilling operations: Performances, difficulties, results [J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47:68-72.
- [45] Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years[J]. *Science*, 2007,317(5839):793-796.
- [46] Litvinenko V S, Vasiliev N I, Lipenkov V Y, et al. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok Station, Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55 (68) : 173-178.
- [47] 孙友宏,李冰,范晓鹏,等.南极冰下湖钻进与采样技术研究进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017,44(S1):16-22.
SUN Youhong, LI Bing, FAN Xiaopeng, et al. Research progress of drilling and sampling technologies in Antarctic subglacial lake [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(S1): 16-22.
- [48] Turkeev A, Vasilev N, Lipenkov V Y, et al. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice [J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62 (85/86):305-310.
- [49] Motoyama H, Takahashi A, Tanaka Y, et al. Deep ice core drilling to a depth of 3035.22 m at Dome Fuji, Antarctica in 2001-07[J]. *Annals of Glaciology*, 2021,62(85/86):212-222.
- [50] 张楠,王亮, Talalay Pavel,等.极地冰钻关键技术研究进展 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020,47(2):1-16.
ZHANG Nan, WANG Liang, Talalay Pavel, et al. Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(2):1-16
- [51] Johnsen S J, Hansen S B, Sheldon S G, et al. The Hans Taussen drill: Design, performance, further developments and some lessons learned[J]. *Annals of Glaciology*, 2007,47:89.
- [52] Johnson J A, Shturmakov A J, Kuhl T W, et al. Next generation of an intermediate depth drill [J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(68):27-33.
- [53] Talalay P, Hu Z Y, Xu H W, et al. Environmental considerations of low-temperature drilling fluids[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(65):31-40.

- [54] 孙金声,王宗轮,刘敬平,等.南极地区低温钻井液研究进展与发展方向[J].石油勘探与开发,2022,49(5):1005-1011.
SUN Jinsheng, WANG Zonglun, LIU Jingping, et al. Research progress and development direction of low-temperature drilling fluid for Antarctic region [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1005-1011.
- [55] Motoyama H. The second deep ice coring project at Dome Fuji, Antarctica[J]. Scientific Drilling, 2007, 5:41-43.
- [56] Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, Miller H, et al. The North-GRIP deep drilling programme [J]. Annals of Glaciology, 2002, 35:1-4.
- [57] Gundestrup N S, Hansen B L. Borehole survey at dye-3, South Greenland [J]. Journal of Glaciology, 1984, 30(106): 282-288.
- [58] Vinther B M, Clausen H B, Johnsen S J, et al. A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111:D13102.
- [59] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record [J]. Nature, 1993, 364(6434):218-220.
- [60] Dmehners N C. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core [J]. Nature, 2013, 493(7433): 489-494.
- [61] University of Copenhagen[EB/OL]. <https://eastgrip.nbi.ku.dk/>.
- [62] Erhardt T, Jensen C M, Adolphi F, et al. High-resolution aerosol data from the top 3.8 kyr of the East Greenland Ice Coring Project (EGRIP) ice core[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(11):5079-5091.
- [63] Stoll N, Hoerhold M, Erhardt T, et al. Microstructure, micro-inclusions, and mineralogy along the EGRIP (East Greenland Ice Core Project) ice core—Part 2: Implications for palaeo-mineralogy[J]. The Cryosphere, 2022, 16(2):667-688.
- [64] Gow A J. Bubbles and bubble pressures in Antarctic glacier ice [J]. Journal of Glaciology, 1968, 7(50):167-182.
- [65] Alley R B, Meese D A, Shuman C A, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event[J]. Nature, 1993, 362(6420):527-529.
- [66] Fudge T J, Steig E J, Markle B R, et al. Onset of deglacial warming in West Antarctica driven by local orbital forcing[J]. Nature, 2013, 500(7463):440-444.
- [67] Slawny K R, Johnson J A, Mortensen N B, et al. Production drilling at WAIS Divide [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68):147-155.
- [68] Souney J M, Twickler M S, Aydin M, et al. Core handling, transportation and processing for the South Pole ice core (SPICEcore) project [J]. Annals of Glaciology, 2021, 62(84): 118-130.
- [69] Parrenin F, Barnola J M, Beer J, et al. The EDC3 chronology for the EPICA Dome C ice core[J]. Climate of the Past, 2007, 3(3):485-497.
- [70] Severi M, Becagli S, Castellano E, et al. Synchronisation of the EDML and EDC ice cores for the last 52 kyr by volcanic signature matching [J]. Climate of the Past, 2007, 3(3): 367-374.
- [71] Ueltzhoeffer K J, Bendel V, Freitag J, et al. Distribution of air bubbles in the EDML and EDC (Antarctica) ice cores, using a new method of automatic image analysis[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196):339-348.
- [72] Vasiliev N I, Talalay P G, Vostok Deep Ice Core Drilling Parties. Twenty years of drilling the deepest hole in ice[J]. Scientific Drilling, 2011, 11:41-45.
- [73] Jouzel J. A brief history of ice core science over the last 50 yr [J]. Climate of the Past, 2013, 9(6):2525-2547.
- [74] Fujii Y, Azuma N, Tanaka Y, et al. Deep ice core drilling to 2503 m depth at Dome Fuji, Antarctica[J]. Memoirs of National Institute of Polar Research, 2002, 56:103-116.
- [75] Stenni B, Buiron D, Frezzotti M, et al. Expression of the bipolar see-saw in Antarctic climate records during the last deglaciation[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(1):46-49.
- [76] Buiron D, Chappellaz J, Stenni B, et al. TALDICE-1 age scale of the Talos Dome deep ice core, East Antarctica[J]. Climate of the Past, 2011, 7(1):1-16.
- [77] TALDICE[EB/OL]. <https://www.taldice.org/>.
- [78] Zhang N, An C, Fan X, et al. Chinese first deep ice-core drilling project DK-1 at Dome A, Antarctica (2011-2013): Progress and performance[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 88-98.
- [79] Xiao C D, Li Y S, Hou S G, et al. Preliminary evidence indicating Dome A (Antarctica) satisfying preconditions for drilling the oldest ice core[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(1): 102-106.
- [80] Sun B, Moore J C, Zwinger T, et al. How old is the ice beneath Dome A, Antarctica?[J]. The Cryosphere, 2014, 8(3): 1121-1128.
- [81] Hu Z Y, Shi G T, Talalay P, et al. Deep ice-core drilling to 800m at Dome A in East Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 2021, 62(85):293-304.
- [82] Parrenin F, Cavitte M G P, Blankenship D D, et al. Is there 1.5-million-year-old ice near Dome C, Antarctica? [J]. The Cryosphere, 2017, 11(6):2427-2437.
- [83] Passalacqua O, Cavitte M, Gagliardini O, et al. Brief communication: Candidate sites of 1.5 Myr old ice 37 km southwest of the Dome C summit, East Antarctica [J]. The Cryosphere, 2018, 12(6):2167-2174.
- [84] Beyond EPICA oldest ice[EB/OL]. <https://www.beyondepica.eu/en/>.
- [85] Long C A, Hodgson-Johnston I, Nielsen H E F. The Australian ice core programme: History, context, and bibliometric analysis[J]. The Polar Journal, 2024, 14(1):247-269.
- [86] Million year ice core[EB/OL]. <https://www.antarctica.gov.au/science/climate-processes-and-change/antarctic-palaeoclimate>.
- [87] Obase T, Abe-Ouchi A, Saito F, et al. A one-dimensional temperature and age modeling study for selecting the drill site of the oldest ice core near Dome Fuji, Antarctica [J]. The Cryosphere, 2023, 17(6):2543-2562.
- [88] Kawamura K, Oyabu I. Two decades of deep ice cores from Antarctica[J]. Nature, 2024, 630(8018):825-827.
- [89] Fudge T J, Hills B H, Horlings A N, et al. A site for deep ice

- coring at West Hercules Dome: Results from ground-based geophysics and modeling[J]. *Journal of Glaciology*, 2023, 69(275):538-550.
- [90] Hercules dome ice core[EB/OL]. <https://www.herculesdome.org/>.
- [91] Karlsson N B, Binder T, Eagles G, et al. Glaciological characteristics in the Dome Fuji region and new assessment for "Old-est Ice"[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(7):2413-2424.
- [92] Dome Fuji Deep Ice Coring Project 3[EB/OL]. <http://dome-fuji3.org/>.
- [93] FORO 3000 drill[EB/OL]. <https://icedrill.org/equipment/foro-3000-drill>.
- [94] Ekaykin A A, Bolshunov A, Lipenkov V Y, et al. First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica[J]. *Antarctic Science*, 2021, 33(4):418-427.
- [95] Talalay P, Li X C, Zhang N, et al. Antarctic subglacial drill rig. Part II: Ice and bedrock electromechanical drill (IBED)[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):12-22.
- [96] Talalay P, Sun Y H, Fan X P, et al. Antarctic subglacial drilling rig: Part I. General concept and drilling shelter structure[J]. *Annals of Glaciology*, 2021, 62(84):1-11.
- [97] Yan Y Z, Bender M L, Brook E J, et al. Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice[J]. *Nature*, 2019, 574(7780):663-666.
- [98] Kuhl T W, Johnson J A, Shturmakov A J, et al. A new large-diameter ice-core drill: The Blue Ice Drill[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):1-6.
- [99] Center for oldest ice exploration[EB/OL]. <https://coldex.org/>.
- [100] 高新生,朱国才,任贾文,等.我国轻型高山冰芯机械钻机的发展和应用[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6):1364-1370.
- GAO Xinsheng, ZHU Guocai, REN Jiawen, et al. Development and application of light-weight core drills for ice coring of glaciers in high mountains in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6):1364-1370.
- [101] Goodge J W, Severinghaus J P. Rapid access ice drill: A new tool for exploration of the deep Antarctic ice sheets and subglacial geology[J]. *Journal of Glaciology*, 2016, 62(236):1049-1064.
- [102] Alemany O, Chappellaz J, Triest J, et al. The SUBGLACIOR drilling probe: Concept and design[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):233-242.
- [103] Rix J, Mulvaney R, Hong J, et al. Development of the British Antarctic survey rapid access isotope drill[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(250):288-298.
- [104] Schwander J, Marending S, Stocker T F, et al. RADIX: A minimal-resources rapid-access drilling system[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):34-38.
- [105] Gibson C J, Johnson J A, Shturmakov A J, et al. Replicate ice-coring system architecture: Mechanical design[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(68):165-172.
- [106] 曹品鲁,陈宝义,刘春朋,等.极地深冰芯钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(9):58-62.
- CAO Pinlu, CHEN Baoyi, LIU Chunpeng, et al. Analysis of the technology difficulties and countermeasures in warm ice deep core drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(9):58-62.

(编辑 周红军)