

文章编号: 1000-0240(2003)03-0275-13

冰芯对于过去全球变化研究的贡献

王宁练, 姚檀栋

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 系统地总结了冰芯在揭示过去气候环境变化、太阳活动、温室气体、火山活动、人类活动等方面研究所取得的成就, 着重对一些有争议的重大问题(如 Younger Dryas 事件、温室气体与气候变化之间的关系、南北半球气候变化之间的关系等)进行了论述, 并对其中个别问题提出了可能的解决途径。指出冰芯微生物、冰芯环境磁学将是冰芯研究的新方向。

关键词: 冰芯; 全球变化

中图分类号: P343.6 文献标识码: A

冰芯以其分辨率高、记录时间长、信息量大和保真度高等特点, 而成为过去全球变化研究的重要方法之一。冰芯不但记录着过去气候环境各种参数(如气温、降水、大气化学与大气环流等)的变化, 而且也记录着影响气候环境变化的各种因子(如太阳活动、火山活动和温室气体等)的变化, 同时还记录着人类活动对于环境的影响。

1 冰芯研究简史

20 世纪 50 年代初期, 科学家们通过对自然界各种水体中氧同位素的研究, 发现降水中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比率和大气过程(尤其是降水时的温度、水汽来源和降水云系的历史)有着密切关系, 并且这种关系不因降水形式的不同(降雨或降雪)而发生变化。Dansgaard^[1]和 Epstein^[2]首先将氧同位素比率可以反映气温的思想应用于冰川学研究, 发现粒雪层中氧同位素比率变化与雪层层位特征及气温季节变化具有很好的一致性。于是, 1954 年美国科学家 Bader^[3]首先提出在极地冰盖钻取连续冰芯以重建古气候环境的设想, 并在他的领导下美国军方雪冰与多年冻土研究基地(USA SIPRE, 现名为美国寒区研究与工程实验室, 即 USA CRREL)于 1956 和 1957 年夏季在格陵兰 Site 2 开展了深孔冰芯钻取计划^[4]。1966 年, 第一支穿透格陵兰冰层的透底冰芯

在 Camp Century 地点获得, 长度为 1 387 m^[5]。时隔两年, 第一支穿透南极冰层的透底冰芯在 Byrd 站获得, 长度为 2 164 m^[6]。目前已在两极冰盖及极区大冰帽的几十个地点钻取了中等深度(> 200 m)以上的冰芯, 其中南极 Vostok 冰芯是目前在极区钻取的深度最深(3 650 m)、年代跨距最大(> 400 ka)的冰芯。然而与极地冰川不同, 中低纬度冰川往往由于消融使其冰雪中的气候环境记录受到影响, 于是直到 20 世纪 70 年代中期人们才开始探索开展中低纬度的山地冰芯研究。当时瑞士提出了 Alps 山地冰芯计划, 旨在揭示人类活动对于环境的影响, 以及揭示消融对于冰雪气候环境记录的影响和冰雪中氢、氧同位素比率与气象要素的关系^[7]。几乎在 Alps 山地冰芯计划开展的同时, 美国俄亥俄州立大学极地研究所(现名为“伯德极地研究中心”)也开始对热带秘鲁的 Quelccaya 冰帽进行冰芯研究^[8], 并成功地在该冰帽上钻取了 164 m 的透底冰芯^[9]。自此以来, 山地冰芯研究便在全球中低纬度地区蓬勃开展起来, 其中在青藏高原西昆仑山钻取的古里雅冰芯是迄今中低纬度所获得的长度最长(309 m)、年代跨距最大(约 760 ka^[10, 11])的冰芯。

2 冰芯研究的贡献

2.1 Milankovich 循环

目前, 4 个完整的冰期-间冰期气候循环已通过

收稿日期: 2002-07-20; 修订日期: 2002-12-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-02)资助

作者简介: 王宁练(1966—), 男, 陕西兴平人, 研究员, 2001 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现主要从事冰芯气候环境记录、冰川变化与全球变化研究。E-mail: hlyang@ustb.edu.cn

南极 Vostok 冰芯得到了重建^[12], 发现该地区冰期-间冰期的气温变化幅度达 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 并表现出明显的地球轨道效应, 即具有明显的 100 ka、40 ka 和 23~19 ka 的周期. 同时发现, 大气中的温室气体 (CH_4 、 CO_2) 含量变化以及大气气溶胶含量变化等都存在地球轨道参数变化的周期. 对于格陵兰冰芯的研究也发现了气温^[13]、大气化学、大气环流^[14] 以及陆地生物的 N 排放^[15] 等的变化, 亦存在轨道效应. 末次间冰期以来青藏高原古里雅冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 也表现出 20 ka 和 40 ka 左右的明显周期^[10].

天文学研究表明, 地球中低纬度气候变化主要受岁差效应的影响, 而地轴倾斜效应对于气候变化的影响主要表现在极区^[16]. 天文理论的这一预测结果, 得到了青藏高原古里雅冰芯记录(显著的 20 ka 左右周期)^[10, 17] 和南极 Vostok 冰芯记录(其 $\delta^{18}\text{O}$ 变化, 偏心率的贡献为 37%, 地轴倾斜的贡献为 23%, 岁差贡献仅为 11%)^[12] 的有力支持. 而格陵兰冰芯记录中强烈的岁差周期^[13], 很可能说明北半球高纬度大气环流与季风环流之间存在强烈的耦合效应. 青藏高原冰芯与格陵兰冰芯记录的气候变化相对于轨道效应引起的太阳辐射变化的滞后时间(约 5 ka)^[10], 与亚洲季风 23 ka 的周期变化滞后于岁差变化的时间(约 5 ka)^[18] 之间的一致性很可能说明了这一点.

2.2 快速气候变化

早期当格陵兰深冰芯记录揭示出末次冰期内存在多次持续几百至几千年的相对温暖期(现称为 D-O 事件或 D-O 间冰阶或 D-O 循环)时^[19, 20], 受到了怀疑, 并认为这很可能是由于冰层扰动引起的. 然而, 在冰体流动简单、夏季温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的格陵兰顶部所获得的 GRIP 和 GISP2 两个深孔冰芯, 其记录均表明以前格陵兰冰芯记录的发现是正确的^[21, 22], 即在末次冰期内存在 D-O 事件, 并可识别出 24 个变幅达 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的相对温暖期. 冰期内这些持续约几千年的相对温暖阶段的建立, 在短短的几十年内就可完成^[21, 23]. 冰芯电导率(ECM)反映出在这些相对温暖阶段内, 气候也是不稳定的^[24]. 例如在 Allerod 和 Bolling 温暖期内存在 102 a 尺度的冷事件^[21, 24]. 格陵兰中部冰川积累量所指示的降水量变化随着 D-O 事件的发生, 也存在突变^[25]. 研究表明, D-O 事件很可能与北大西洋含盐量变化导致的海洋环流变化有关^[26, 27]. 最近发现 D-O 事件也存在于古里雅冰芯记录之中^[28]. 如

果格陵兰冰芯记录到的 D-O 事件的持续时间超过 2 ka, 这一事件在南极冰芯记录中也有明显的表现^[29]. 南极 Vostok 冰芯中过量氘(d)变化所揭示的其水汽源区洋面温度的变化与格陵兰冰芯记录的末次冰期气候变化存在一致性^[30]. D-O 事件在不同地区气候记录中的存在, 表明其发生应该存在某种共同的原因.

Younger Dryas (YD)事件是末次冰退期气候的快速转冷事件. 格陵兰冰芯记录表明, 这一时期的温度低于现今 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右^[31], 并伴随 50% 的净积累量减少^[32], 以及尘埃、海盐离子含量的增加^[33, 34] 和 CH_4 ^[35]、 N_2O ^[36] 含量的减少. 分辨率为年的格陵兰冰芯记录还表明, YD 事件的持续时间大约为 1.3 ka(日历年 12.7 ± 11.55 ka BP), 其建立和结束是极为迅速的, 仅在 5~20 a 的时间内就完成了^[32, 33, 37]. 青藏高原古里雅冰芯记录揭示出, 在 YD 事件时期内气候也存在着急剧的变化^[38], 这一点在高分辨率的格陵兰冰芯记录和欧洲湖泊沉积记录中也有明显的表现^[39]. 南美热带冰芯研究也表明, YD 事件的存在^[40, 41]. 对于南极内陆冰芯记录的研究, 未发现 YD 事件的存在, 而发现了在北半球 YD 事件发生之前存在一个相对较弱的冷期(日历年 14.4~12.9 ka BP)^[42], 被称为“南极气候逆转变冷”事件(通常简称为 ACR 事件), ACR 事件超前北半球 YD 事件至少 1.8 ka^[43]. 而对于取自南极边缘的 Taylor Dome 冰芯的研究, 发现在北半球 YD 事件发生时该冰芯记录中也表现出一个弱的冷期^[44], 这似乎表明 YD 事件信号从北半球到南半球的衰弱. 新西兰冰川在 YD 时期的前进^[45], 一直被认为是南半球 YD 事件存在的最好证据. 然而, 最近关于新西兰孢粉的研究结果, 显示这一时期气候以湿润为特征而不是以寒冷为特征^[46]. 综合不同地域冰芯中的尘埃记录^[12, 24, 40, 41, 47~50], 我们发现一个有趣的现象, 即 YD 时期大气中的尘埃含量只是在北半球增加, 而在南半球并未表现出显著增加趋势. 大气中尘埃含量的变化与大气环流强度和尘埃源区的干湿变化有关, 冰芯研究表明冰退期南半球的环流强度变化状况和北半球的相一致^[51], 因此 YD 时南半球大气尘埃未表现出增加趋势, 很可能表明这一时期南半球气候较为湿润.

2.3 气候变化与温室气体含量变化的关系

南极 Vostok 冰芯记录表明^[12], 大气中温室气体含量在冰期和间冰期存在巨大的差异, CO_2 和 CH_4 含量分别可从冰期时的 $\sim 180\text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 320

~350 $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到间冰期时的 208 ~ 300 $\text{mL}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 650 ~ 770 $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$. 过去 420 ka BP 以来大气中 CO_2 和 CH_4 含量的变化与气温的变化存在显著的正相关关系(其相关系数分别高达 0.84 和 0.85). 北极和青藏高原冰芯记录也表明温室气体含量与气温之间的正相关^[52, 53]. 一些研究表明^[54, 55], 大气温室气体含量的巨大变化可以解释冰期-间冰期气温变化的 50% ~ 60%. 然而, 最近在假定太阳辐射不变仅利用冰芯中 CO_2 记录来驱动气候模型, 结果发现模型不仅无法产生北半球冰量 100 ka 的周期变化, 而且给出在冰期-间冰期时间尺度上气温的变化幅度也不足 1.5 $^\circ\text{C}$ ^[59]. 格陵兰冰芯研究结果表明^[57], 末次冰消期大气中 CO_2 和 CH_4 含量的增加超前格陵兰气温回升 2 ~ 3 ka, 进一步的研究认为这很可能与北半球中纬度大陆地区气温回升较早有关. 然而, 对于 GISP2 冰芯中 Old Dry as 冷期向 Bolling 暖期转换时期气泡中 $\delta^{15}\text{N}$ (温度指标)和 CH_4 浓度的同时分析与研究, 不仅发现气温在约短短的 70 a 间升高了 9 ± 3 $^\circ\text{C}$, 而且发现气温开始升高的时间比 CH_4 浓度开始增加的时间早 20 ~ 30 a^[58]. 南极 Vostok 冰芯的研究结果显示, 在倒数的三个冰消期, 大气中 CO_2 含量的增加滞后于气温上升约 (600 ± 400) a^[59]; Dome C 冰芯记录也表明在末次冰消期大气中 CO_2 含量的增加滞后于气温上升约 (800 ± 600) a^[60]; Taylor Dome 冰芯记录则揭示出在末次冰期中大气 CO_2 含量变化滞后于气温变化约 $(1\ 200 \pm 700)$ a^[61]. 然而, 一些研究指出温室气体含量变化相对于气温变化的滞后时间在冰-气年龄差异的误差范围之内^[12].

对比近几个世纪南极、北极和青藏高原冰芯中记录的大气 CH_4 含量^[53, 62], 尽管其变化趋势一致, 然而青藏高原冰芯中记录的 CH_4 含量最高, 格陵兰次之, 南极最低, 这一现象很可能表明中低纬度的湿地是大气中 CH_4 的主要源区之一. 极地冰芯研究发现^[12], 在冰期开始时大气中 CH_4 含量降低与气温降低是同步的, 而 CO_2 含量的变化却滞后于气温变化; 在冰期结束时 CH_4 含量的变化是十分特殊的, 即开始时缓慢增加, 然后在冰消期的后半期突然增加到极大值. 末次冰期时 CH_4 含量变化与 D-O 事件呈现明显的正相关, 而 CO_2 含量变化却与 Heinrich 事件存在着显著的联系^[63]. 尽管 YD 时期大气中 CH_4 浓度曾一度突然降低^[52], 然而南极冰芯记录所揭示的大气中 CO_2 含量(由于格陵兰冰芯

中碳酸岩物质甚或有机物氧化过程的存在, 使得南极冰芯中记录的 CO_2 含量变化较格陵兰冰芯的记录更能代表过去大气中 CO_2 的变化^[64, 65])自大约 16 ka BP 至全新世的稳定增加趋势并未被 YD 事件所中断^[43], 而只是在 ACR 事件时 CO_2 的增加速率有所减弱^[42, 57]. 这些支持了大气中 CO_2 含量的变化主要与大洋过程相关^[66] 的结论.

2.4 南北半球气候变化的差异

自从 70 年代深海记录研究发现南半球气候变化超前北半球气候变化约几千年的时间以来^[67], 南北半球之间气候变化的差异问题一直是古气候研究的焦点问题之一. 高分辨率和准确定年(依据 CH_4 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ 对比的方法)的两极冰芯记录对比研究揭示出, 在末次冰消期南极气温的回升比格陵兰早约 3 ka^[57], 在末次冰期内南极气候的波动平均早于格陵兰约 1 ~ 3 ka^[68, 69]. 南北极之间气候变化的位相差异可能与大洋环流有关的北大西洋深水产生速率的变化有关^[70]. 最近的研究还发现, 在 10 ka 尺度上南北极气候变化之间存在“跷跷板”效应^[71, 72]. 南北极气候变化的这种“跷跷板”效应, 不仅是检验气候模型模拟结果正确与否的标准之一, 同时也将促使人们必须充分认识中低纬度水循环过程及气候变化在全球变化中的作用.

另外, 南北半球气候变化的过程亦存在差异. 南极冰芯记录表明该地区气温变化呈现出升温 and 降温过程均比较和缓^[68], 而格陵兰冰芯记录却显示出该地区升温突然、降温缓慢的特征^[2]; 青藏高原冰芯记录又指示出该地区气温变化具有升温过程缓慢而降温突然的特征^[10]. 目前, 对于不同地区气温变化过程中的这种差异的原因还缺乏了解.

2.5 高纬度与高海拔的气温变化幅度

末次冰盛期时, 全球平均气温降低 5 $^\circ\text{C}$ 左右^[73]. 格陵兰冰芯记录表明, 该地区末次冰盛期气温与全新世相比降低达 10 ~ 15 $^\circ\text{C}$ ^[21, 22, 74], 南极 Vostok 冰芯记录揭示出末次冰盛期气温较全新世低 8 $^\circ\text{C}$ 左右^[13]. 海拔 6 048 m 的南美热带 Huascarán 冰芯记录表明, 末次冰盛期时的降温幅度达 8 ~ 12 $^\circ\text{C}$ ^[40], 青藏高原古里雅冰芯(海拔 6 200 m)记录也显示出末次冰盛期的降温在 8 $^\circ\text{C}$ 左右^[28]. 这些都表明中低纬度的高海拔地区和极地地区一样, 可能都是气候变化的敏感地区.

2.6 大气尘埃含量变化

冰芯中的尘埃物质(大气尘埃载荷的度量)来源于地表、火山和宇宙尘埃等, 其中陆地表面是其主

要来源. 将全球不同地区冰芯中尘埃含量进行对比, 发现北半球冰芯中的尘埃含量要高于南半球, 山地冰芯中的尘埃含量要高于极区. 例如格陵兰 Camp Century 冰芯中的微粒含量是南极 Byrd 冰芯中微粒含量的 7.8 倍^[49], 青藏高原古里雅冰芯中的微粒含量($10^6 \sim 10^7$ 个 \cdot mL⁻¹)^[11, 50]高出格陵兰 Camp Century 冰芯中的微粒含量($10^4 \sim 10^5$ 个 \cdot mL⁻¹)^[49]约 2 个数量级, 南美 Huascarán 冰芯冰期和间冰期时的微粒含量(分别为 $32.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[40]也明显高于同期南极 Vostok 冰芯中的微粒含量(分别为 $1 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[12]. 冰芯微粒含量的这种空间分布特征与北半球陆地面积宽广、尘埃物源丰富以及山地冰芯更接近尘埃物源区有着直接的联系. 冰芯记录揭示出冰期与间冰期大气中尘埃含量存在巨大的差异. 格陵兰冰芯中末次冰期时的尘埃含量是全新世的十几倍^[49], 在个别冰芯中甚至达到 40 倍^[24]; 南极不同地区的冰芯记录也显示出, 冰期时的尘埃含量是间冰期时的几倍到 40 倍^[12, 49]; 青藏高原敦德冰芯记录表明, 末次冰期时的尘埃含量大约是全新世的 3 倍^[73]; 南美热带赤道地区 Huascarán 冰芯记录的末次冰期与全新世的尘埃含量相差更为悬殊, 末次冰期时尘埃的平均含量约为全新世的 200 倍^[40]. 冰期时较高的尘埃含量表明, 这一时期尘埃源区范围扩大(包括大陆架出露)、干燥度增加、风力加大以及大气的经向输送加强等. 尽管不同地区冰芯中尘埃含量在冰期与间冰期之间的比值变化差异较大, 然而不论是在两极地区还是在青藏高原, 冰芯记录均表明一个共同的特征, 即暖期时大气尘埃含量低, 冷期时大气尘埃含量高.

研究发现青藏高原与格陵兰冰芯尘埃记录存在遥相关关系, 这表明两地冰芯中尘埃物质可能具有一个共同的源区——中亚干寒区, 并且西风环流是它们联系的纽带^[76]. 这一推论得到了格陵兰冰芯尘埃的矿物构成及同位素示踪研究结果的支持^[77]. 另外, 格陵兰高分辨率的冰芯记录还揭示出其尘埃含量变化存在明显的 11 a 周期, 而且这种周期从 100 ka BP 到现在一直存在^[78]. 这种现象很可能与太阳黑子活动 11 a 周期相关的太阳辐射变化引起的尘埃源区干燥度变化或环流强度变化有关. 上文曾提到中低纬度气候环境变化主要受岁差效应的影响, 而南极 Vostok 冰芯中近 180 ka BP 来的尘埃含量变化表现出明显的岁差效应^[48], 这说明其物质很可能主要来源于南半球的中低纬度地区. Vostok

冰芯尘埃的矿物分析结果表明, 南美可能是其尘埃物质的主要源地^[79].

2.7 太阳活动

大气中宇宙成因同位素(如¹⁴C、¹⁰Be、³⁶Cl等)产生速率的变化可以揭示太阳活动的信息. 南极 Vostok 冰芯研究发现, 在冰期-间冰期时间尺度上该冰芯中¹⁰Be 浓度的变化主要是由降水变化引起的^[80, 81], 然而该冰芯记录到的大约出现在 35 ka BP 和 60 ka BP 时的 2 个¹⁰Be 浓度峰值事件^[82], 却无法用降水变化解释. 其中发生在 35 ka BP 时的¹⁰Be 浓度峰值事件, 已得到了全球不同地域冰芯记录^[83~85]和海洋记录^[86, 87]的支持. 进一步的分析表明, 弱的太阳活动和弱的地磁场是该事件发生的主要原因^[85, 88]. 至于 60 ka BP 时的¹⁰Be 浓度峰值事件, 目前还缺乏其它地域的证据. 由于目前人们还无法准确估计在冰期-间冰期时间尺度上降水变化对于冰芯中¹⁰Be 浓度变化的影响程度, 因而妨碍了这一时间尺度上太阳活动信息的建立. 研究表明, 全新世时期冰芯中的¹⁰Be 浓度记录受降水变化的影响较小, 可以很好的揭示太阳活动状况^[89, 90], 并发现大约在 5600 BC、5100 BC、4200 BC、3500 BC、2800 BC、1900 BC、700 BC、300 BC、800 AD、1100 AD 和 1700 AD 时期太阳活动相对较弱^[91]. 由于¹⁰Be 在大气中的滞留时间很短, 仅为 1~2 a, 因此冰芯中¹⁰Be 记录也可以揭示较短时间尺度上的太阳活动信息, 如太阳活动的 11 a 周期^[92]. Maunder 极小期内太阳黑子周期是否存在, 对于天文学家在识别太阳非线性发动机与太阳随机波动方面的研究是极为重要的. 格陵兰冰芯中的¹⁰Be 浓度记录表明, 在 Maunder 极小期内太阳活动的黑子周期是存在的^[93]. 根据青藏高原古里雅冰芯中 NO₃⁻ 浓度可以揭示太阳活动信息的事实^[94], 进一步证实 Maunder 极小期内太阳活动周期是正常的^[95]. 南极冰芯中 NO₃⁻ 记录是否与太阳活动有关曾存在很大争议^[96, 97], 然而最近对于南极和北极高分辨率冰芯中 NO₃⁻ 记录的进一步研究, 发现其变化是可以揭示太阳活动的信息^[98, 99].

2.8 地磁场强度变化

地磁场的产生与地球存在转动的热核有关, 然而由于其强度变化会受到太阳活动的影响, 加之发生在地球大气中的许多过程与现象与地磁变化有关, 因此研究地磁场强度的变化不仅是地球物理学的重要研究内容, 也是日地关系研究的一个重要纽带. 长期连续的古地磁场强度变化主要依据海洋等

沉积记录来恢复, 最近利用大气中宇宙成因同位素产生速率的物理模型以及格陵兰冰芯中 ^{10}Be 和 ^{36}Cl 的沉积通量记录, 首次通过冰芯恢复了20~60 ka BP时期的古地磁强度变化, 发现其变化与海洋沉积物记录的古地磁强度变化具有很好的一直性, 这证明了利用冰芯记录恢复古地磁变化的有效性^[100]. 与其它方法相比, 利用冰芯中的宇宙成因同位素记录恢复古地磁的优点不仅在于分辨率高, 还在于宇宙成因同位素对地磁主偶极矩和弱的地磁场变化均很敏感.

2.9 火山活动

冰芯中可以揭示火山喷发信息的指标包括ECM、 SO_4^{2-} 浓度、 H^+ 浓度和火山灰^[101]. 一般来说, 低纬度火山喷发的影响范围可以波及到全球, 而中高纬度火山喷发的影响范围仅限于半球尺度. 但如果中高纬度的火山喷发极为强烈, 其喷发物质可以通过平流层影响到全球范围. 如大约117 AD时新西兰Taupo火山喷发的烟柱估计高达55 km, 在格陵兰冰芯中清楚的记录到这次喷发的信号^[102]. 冰芯记录的火山活动不仅真实可靠而且全面, 如近2 ka来格陵兰冰芯记录的69次过量 SO_4^{2-} 浓度事件中, 85%与文献记录的火山喷发相吻合^[102], 其余15%为文献未记载的火山活动. 过去110 ka来格陵兰高分辨率冰芯记录研究^[103]表明, 火山喷发主要集中在3个时期, 即6~17 ka BP(尤其是7~13 ka BP)、27~36 ka BP和79~85 ka BP, 其中第一个时期火山活动较强, 并与北半球冰盖消退、海平面上升期相一致, 而后两个时期火山活动相对较弱, 与冰盖增长、海平面下降期相对应. 这一发现极大地支持了陆地冰量变化及洋盆水量变化会导致火山活动增强的理论. 同时27~36 ka BP和79~85 ka BP两个时期的火山喷发, 还可能加强了末次冰盛期与末次冰期的建立. 南极冰芯也发现晚冰期时, 火山玻璃沉积的明显增加^[49]. 全新世火山活动主要发生在其早期阶段, 如格陵兰冰芯表明对于过量 SO_4^{2-} 浓度超过 $100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 的火山喷发事件, 在7~9 ka BP时期有18次, 而在0~2 ka BP仅有5次^[102]. 近2 ka来地球火山活动有增强趋势^[104], 其中最大的一次火山喷发发生在1259 AD, 这次喷发事件在两极冰芯中都具有明显的记录^[104~106]. 同时, 格陵兰冰芯记录表明, 1580~1640 AD和1780~1830 AD是近2 ka来火山活动的两个主要多发期^[104], 并导致了气候的显著变冷. 南极冰芯也揭示出19世纪是全球火山活动相对活

跃的时期^[105].

2.10 生物地球化学循环

在地球历史的大部分时间里, 燃烧过程(闪电、干旱所引起的植物起火燃烧)对于地球生物化学循环具有重要作用. 直到目前, 人们才认识到呼吸、光化学和燃烧等自然过程控制着大气中许多痕量气体含量的变化^[107]. 对于格陵兰GISP2冰芯近6 ka BP来的记录研究表明^[108], 5 ka BP之前, 0.75~0.35 ka BP以及0.15~0 ka BP是生物量燃烧的3个活跃期, 其中第一个时期与气候向暖干方向转化有关, 第二个时期与气候干燥和生物量分布调整有关, 第三个时期与人类活动有关. 进一步的分析发现, GISP2冰芯地点现代冰雪中的碳黑含量与320~330 AD时期的相当, 约为 $2.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而冰期时的碳黑含量不足 $0.05 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[109]. 南极Byrd冰芯记录表明^[110], 在末次冰期向全新世的过渡时期碳黑含量为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 到全新世碳黑含量有所增加, 平均为 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (变化于 $0.1 \sim 0.9 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间). 现有的分析资料表明, 全新世时期格陵兰冰芯记录的碳黑含量大约是南极冰芯记录的3~4倍, 这表明北半球的生物量燃烧程度要大于南半球. 目前关于过去生物量燃烧的冰芯记录研究主要集中在极地地区, 然而80%的生物量燃烧发生在热带地区^[111], 因此今后应加强中低纬度山地冰芯中与生物量燃烧相关的森林大火等记录的研究.

冰雪中MSA常被用来做为DMS海洋生物源强度变化的指标^[112]. 在冰期-间冰期时间尺度上, 两极冰芯记录的MSA含量变化存在一定的差异. 南极Vostok冰芯中MSA浓度在间冰期时(深海氧同位素1阶段和5e阶段)为 $5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 而在冰期时为 $25 \sim 31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[113]; 格陵兰GRIP冰芯记录的MSA浓度在冰期与间冰期几乎是一致的^[114]. 这些记录之间的差异表明, 南大洋过去对于气候变化的响应与北大西洋对于气候变化的响应可能存在差异^[114]. 另外, MSA与 nss-SO_4^{2-} 之间的质量比(记为R)通常被用来示踪海洋上空大气中 SO_4^{2-} 的来源. 在格陵兰Renland地区末次冰期时的冰层中, R值比现在观测到的低纬度海洋边界层中的R值(5%左右)还要低, 这表明在冰期时非生物来源的 SO_4^{2-} 主要控制着北半球高纬地区的S循环^[115]. 研究还发现R值与气温之间存在很好的关系^[116], 然而格陵兰Renland冰芯记录揭示出R值与气温之间呈正相关关系^[117], 而南极Vostok冰芯记录却表明R值与气温之间呈负相关关系^[118]. 两极地区冰雪

中 R 值与气温之间相反关系的原因值得进一步研究。

根据两极冰芯中 CH₄ 浓度记录以及纬向三箱模型,研究了末次冰期以来 CH₄ 不同源区对大气 CH₄ 含量变化的贡献^[119, 120], 结果发现虽然热带地区是大气 CH₄ 的主要源地, 然而除末次冰盛期之外(这一时期大气 CH₄ 含量绝大部分来自热带湿地), 北半球高纬湿地对大气 CH₄ 含量的贡献几乎与热带地区的贡献处于同一量级。

2.11 超新星爆炸

超新星爆炸时会产生大量的 X 射线, 当这些射线进入地球大气层后会使大气中产生大量的 NO (NO 和 NO₂ 是 NO₃⁻ 的前身), 从而在爆炸事件发生之后的冰雪沉积层中形成明显的 NO₃⁻ 浓度峰值。一般来说, 这一 NO₃⁻ 浓度峰值在远离土壤和海洋的地区容易得到反映。Rood *et al.*^[121] 曾在 1979 年报道了南极 South Pole 冰芯中的 NO₃⁻ 浓度记录, 发现有 4 个高于 NO₃⁻ 背景浓度 2(3 倍的峰值, 其中 1811 AD、1572 AD 和 1604 AD 的峰值浓度和当时已知的超新星爆炸事件相对应, 而第四个 NO₃⁻ 浓度峰值(大约出现在 1300 AD 左右)当时没有找到对应的超新星爆炸事件。随后, 对于格陵兰 Crete 冰芯 NO₃⁻ 浓度的分析表明^[122], 历史时期的超新星爆炸并没有引起该冰芯中 NO₃⁻ 浓度出现峰值。后来, 人们几乎拒绝接受冰芯中的 NO₃⁻ 浓度可以揭示超新星爆炸的信息^[123]。然而, 当最近天文学研究发现大约在 1320 AD 前后存在一个叫 Vela 的超新星时, 人们又重温 South Pole 冰芯的 NO₃⁻ 浓度记录, 发现当年的第四个 NO₃⁻ 浓度峰值正好出现在 1320 AD^[124, 125]。这激起了天文学家对于冰芯研究结果的浓厚兴趣。那么为什么超新星爆炸的信息在南极 South Pole 地区存在, 而在格陵兰 Crete 地区不存在。研究认为, 一种可能的原因是由于在极夜情况下极区高层大气可产生更多的 NO₃⁻, 而过去 1 000 a 中已知的几次超新星爆炸均发生在 4~10 月的北半球夏半年^[125]。

2.12 微生物及其 DNA

冰川冰虽然不能提供微生物的生长环境, 但它却是保存生物的良好载体。极地等偏远地区远离人类活动的影响, 同时又缺乏营养物质, 因此长期以来人们将这些地区视为“无菌”的环境。随着新近发展起来的 PCR 基因扩增技术在冰芯研究中的应用, 这一传统观念已被打破。Willerslev *et al.*^[126] 利用

分子生物学技术, 对取自北极 Hans Tausen 冰帽冰芯中 2~4 ka BP 时段的样品进行 18S rRNA 基因扩增, 得到了 120 个克隆体, 并根据它们的 DNA 序列是否具有相似性的原则, 发现这 120 个克隆体分属于 57 个分类群, 揭示出冰芯内真菌、植物、藻类和原虫的多样性。进一步的研究发现这些微生物既包括远源微生物又包括北极局地环境下的微生物。对于中低纬度和极地冰芯中活性细菌的研究^[127], 发现其种类和数量在接近地球主要生态系统的中低纬度冰芯中为多, 同时发现在大微粒含量高的冰芯层位活性细菌数量大, 这可能说明大颗粒有机和无机微粒是细菌传输中的主要载体; Ma *et al.*^[128] 从 GISP2 和 Dye 3 冰芯中分离出多种微生物, 包括细菌、丝状真菌、酵母菌和藻类; 目前已从青藏高原马兰冰芯中共分离出 10 属 75 株细菌和 2 属 6 株放线菌^[129], 其中细菌与南北极冰雪细菌有一定的相似性, 还未分离到极地冰雪中的真菌类和藻类生物, 这可能反映了地域环境的差别。研究发现南极 Vostok 冰芯底部冰起源于冰下湖水^[130], 这对于了解处于寒冷、黑暗的特殊生态环境下的微生物状况提供了机遇。Priscu *et al.*^[131] 利用 DNA 技术对 Vostok 冰芯底部湖冰样品的分析, 结果发现那里微生物多样性较低, 并且这些微生物由与现代蛋白菌(Proteobacteria)和放线菌类(Actinomycetes)密切相关的类群组成。同时根据南极 McMurdo Dry Valleys 地区现代湖泊湖冰和湖水之间微生物分级关系的研究结果, 并结合 Vostok 湖冰的微生物组成, 推测 Vostok 湖中含有无机养分、溶解有机碳和细菌, 这些物质有利于湖中活性微生物生态系统的维持。Karl *et al.*^[132] 进一步证实 Vostok 湖冰样品中存在有细菌, 同时发现融化的湖冰水样中包含能生长发育的活性呼吸细胞。最近, 对于 Vostok 底部冰芯的进一步研究发现, 该处微生物来源复杂, 有来自湖水的, 也有来自上部冰层的和冰碛物的, 并且微生物细胞数量沿冰芯方向呈周期性变化, 这可能与地质历史时期的一些自然事件引起的冰下湖水与底部冰的周期性相互作用有关^[133]。另外, 通过 RT-PCR 技术, 对格陵兰 140 ka BP 以来的不同时期的冰芯样品进行扩增, 均检测到了西红柿 *Mosaic Tobacco virus* 病毒, 并且其基因型与现代的一致^[134], 这预示着人类及其它寄生物的一些稳定性病毒也可以保存在冰川中, 而且古老的活性病毒可以随着冰川的融化而向现代环境中释放。由此可见, 冰芯微生物学应是一个值得重视的研究领域。

2.13 人类活动

人们通常认为空气污染是现代技术发展的产物, 事实上空气中的重金属污染自从人类学会用火以来就已产生^[135], 尤其是古代采矿和冶炼技术的发展使得空气中的重金属污染更为突出. 在古希腊和古罗马的文明时期, 对于 Pb 银矿的粗放开采与冶炼极为普遍, 重金属污染极为严重, Pb 中毒甚至成为罗马帝国衰亡的原因之一. 格陵兰冰芯记录表明, 这一时期的 Pb 含量($2 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)大约是全新世早期的($0.55 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$)4 倍^[136]. 而同期格陵兰冰芯中 Cu 含量的明显峰值^[137], 正揭示了罗马帝国对于铜合金产品(用于军备器械和钱币等)需求的增加. 对于近几百年来格陵兰冰雪中 Pb 含量的分析研究, 发现人类工业化以后 Pb 含量逐渐增加, 而从 20 世纪 30 年代世界经济复苏及汽车产业的大发展开始, 冰雪中 Pb 含量增加十分迅猛, 到 60 年代大约增加到 7 ka BP 的 200 倍^[138]. 这一研究结果(至少是部分原因), 导致了美国等西方国家从 1970 年开始限制含铅汽油的使用. 在这一政策的影响下, 从 20 世纪 70 年代到 90 年代格陵兰冰雪记录中的 Pb 含量大约降低了 7 倍^[139, 140]. 南极 Dome C 冰芯记录表明, 全新世中早期冰雪中 Pb 含量大约为 $0.5 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[141], 这与格陵兰冰芯记录的同期 Pb 含量^[136]惊人的一致, 这很可能表明全球偏远地区全新世降水中 Pb 含量的自然本底为这一量值. 最近对于南极 Coats Land 地区冰雪中 Pb 含量的研究, 认为现代自然来源的 Pb 含量大约为 $0.8 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[142], 而该地点冰雪中的 Pb 含量在 1920 年代达到了 $2.5 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$, 近期南极许多地点降水中的 Pb 含量均在 $2 \text{ pg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上^[143, 144], 这表明人类活动的影响已波及南极地区. 虽然近 70 a 来南极 Coats Land 地区冰雪中 Pb 含量的变化幅度远不如格陵兰冰芯记录的 Pb 含量的变化幅度^[140], 但二者之间的变化趋势却具有一定的相似性, 即自 20 世纪初以来均呈上升趋势, 并分别在 1960 年代(格陵兰)和 1970 年代(南极)达到极大值. 最近, 对于青藏高原冰芯中 Pb 含量记录的研究, 也发现人类活动对于这一地区存在着显著重金属污染^[145].

人类工业化以来向大气排放了大量的 SO_2 、 NO_x 等气体, 它们在大气中氧化后形成硫酸和硝酸, 致使降水的酸度增加. 将 20 世纪初以来欧洲人为 SO_4^{2-} 排放量与北极冰芯中过量 SO_4^{2-} 记录相比较, 发现二者呈现相同的增加趋势^[146]. 欧洲 Alps 冰芯记录揭示出, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度自本世纪初以

来均呈增加趋势, 并且在 1980 年代它们的浓度高出本世纪初约 3~4 倍^[147]. 同期格陵兰冰芯中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度也增加了 2(3 倍^[148, 149]. 目前, 南半球山地冰芯和南极冰芯^[150] 中还没有观测到 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度的明显增加趋势. 20 世纪南北半球冰芯中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度变化的差异, 正反映了两半球之间人类工业化程度的差异, 同时也表明降水对于对流层下部大气中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的清除速率较快.

1950 年代以来, 由于核工业的发展, 人类已向大气释放了大量不同的放射性物质, 如 1954 年和 1961—1962 年发生在北半球的核试验, 不仅在北半球山地冰芯^[151, 152] 和格陵兰冰芯^[153] 中形成了 β 活化度(主要由裂变产物⁹⁰Sr 和³⁷Cs 产生)和氡浓度的强信号记录, 而且在南极冰芯^[154] 中也有明显的表现. 对比南北半球的冰芯记录, 发现核试验产生的放射性物质在南北两半球之间的传输时间约为 2 a.

南美热带的秘鲁冰芯分析结果发现^[155], 在大约 490—620 AD 和 830—960 AD 两个时期微粒含量呈现明显的峰值, 而这两个时期又正值降水丰富的时期. 结合该冰芯中的孢粉分析及尘埃的粒径组成和扫描电镜分析结果, 认为这两次尘埃事件很可能与位于尘埃来源方向的 Titicaca 湖区的农业开垦和放牧有关. 另外, 格陵兰冰芯记录也为考古所发现的格陵兰周边一些北欧人长达 500 a 左右的居住点在 14 世纪的废弃提供了气候解释^[156].

3 冰芯研究的未来趋势

冰芯研究虽然已走过了近 50 a 的历程, 然而为了探索不同纬度及不同地区气候环境变化的特征及其耦合机制, 以及揭示过去重大气候环境事件发生的事实、特征及原因, 各国目前依然争先出台大的冰芯钻取计划. 西方发达国家不仅将目光瞄准极地冰盖, 而且也将目光投向中低纬度山地冰川, 尤其是青藏高原和中国西部高海拔山地冰川成为中低纬度冰芯研究聚焦的中心. 同时, 由于冰芯中新的研究方向的不断崛起和新技术的应用, 给冰芯研究充满了活力. 至今在冰芯中还存在着许多未被认识和研究的气候环境等信息, 因此冰芯的未来研究内容具有广阔的空间. 基于目前的认识程度, 未来近期内冰芯研究可在以下方面获得大的进展或突破:

(1) 太阳与气候变化. 揭示气候变化的原因是提高气候变化预测能力的根本所在. 目前关于太阳

与气候之间关系的研究,大多集中在地球轨道变化时间尺度和有仪器观测记录的近几个世纪,然而由于冰芯在记录气候变化的同时也记录了太阳活动的变化,这将会使人们在不同时间尺度(101~105 a)、不同时段和不同纬度地区充分地认识太阳与气候变化之间的关系。

(2) 温室气体与气候变化:一些全球性重大气候事件的发生时间以及两极气候变化是否具有位相差异等均存在争议,其问题的关键在于测年的准确性。事实上,不同地区冰芯中的温室气体记录,即可作为冰芯定年的方法,也可作为冰芯定年结果的检验标准。目前在南北两极冰芯气候记录对比中,都将温室气体记录作为定年的方法,然而由于不同冰芯冰-气年龄差异的估计均存在较大的误差,从而使不同冰芯的气候记录对比分析以及温室气体与气候变化之间的关系研究受到了极大的限制。如果对冰气年龄差异进行深入研究,并将冰芯中的温室气体记录作为冰芯定年结果的检验标准,那么温室气体与气候变化之间的关系问题以及不同地区气候变化的位相差异问题都将会有一个很好的答案。另外,应注重开展冰芯温室气体(CO₂和CH₄)的C同位素分析,以研究过去CO₂和CH₄循环的过程以及C循环与气候变化的关系,这对于未来气候预测也是最为重要的。

(3) 过去重大气候环境事件以及不同区域气候环境变化的耦合机制:在研究不同地区冰芯气候环境记录的同时,对于过去不同时期所发生的重大气候环境事件应给予高度的重视。不仅要研究这些事件在不同地区冰芯记录中存在与否的事实,还要分析其发生的过程、程度以及空间分布特征,这不仅有助于了解重大气候环境事件发生的原因及空间耦合机制,也有助于认识不同地区气候环境变化的在全球变化中的作用,同时也可作为特征气候时期的气候模拟结果提供检验的标准。

(4) 冰芯微生物:冰川作为一种特殊的极端环境,虽然冰芯微生物研究刚刚起步,但可以预计其研究结果将在环境、生物演化乃至生物医学等方面具有深远的影响。已有的研究已经表明,在现代不同地域、不同气候环境下的冰芯微生物存在差异,因此对于一个冰芯中微生物的连续分析,将不仅获得微生物演化的信息,而且可获得气候环境变化的大量信息。目前的微生物演化理论很少考虑时间迭加的影响,然而由于冰盖消融使得地质时期的微生物在不断地向环境中释放,造成现代环境中的微生物

物是一个历史混合体,因此目前基于现代基因型估计的变异速率可能是不正确的^[134]。南极冰盖底部黑暗、寒冷、高压环境中微生物的发现与研究,已启示人们在开展宇宙生物学的研究过程中,不要局限于探索其它星体表面是否存在生命,还要深入其内部寻找生命的痕迹(如在火星冰盖中探索)。

(5) 理化指标的气候环境意义:几乎在研究的所有冰芯中都进行了多种物理、化学指标的测试,然而由于各种指标是多种因素综合影响的结果,因而对于许多指标的气候环境意义还缺乏了解,或者对其所指示的气候环境信息缺乏定量研究。因此应加强现代过程的观测与分析,确立各种理化指标的气候环境意义,并建立它们与气候环境要素之间的定量关系。

(6) 冰芯环境磁学:新近对于格陵兰冰芯中尘埃磁性矿物的等热剩磁进行了探索性测量,结果发现其磁性特征可以作为环境信息的独立示踪器^[157]。因此,冰芯环境磁学将是冰芯尘埃研究中的一个新方向。

参考文献(References):

- [1] Dansgaard W. The O¹⁸ abundance in fresh water [J]. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 1954, **6**: 241-260.
- [2] Epstein S. Variations of the O¹⁸/O¹⁶ ratios of fresh waters and ice [J]. *Nat. Acad. Sci Natl. Research Council Nuclear Sci (Ser. Rept)*, 1956, **19**: 20-28.
- [3] Bader H. United States polar ice and snow studies in the International Geophysical Year [J]. *Am. Geophys. Union Geophys (Mon. Ser)*, 1958, **2**: 177-181.
- [4] Lange G R, Langway C C Jr, Hansen B L. Deep core drilling in glaciers [J]. *US Army Sci. Conf. Proc.* 1959, West Point, N. Y., 1959, **2**: 97-107.
- [5] Hansen B L, Langway C C Jr. Deep core drilling in ice and core analyses at Camp Century, Greenland, 1961-1966 [J]. *Antarc. J. US*, 1966 (Oct.): 207-208.
- [6] Gow A J, Ueda H T, Garfield D E. Antarctic ice sheet; preliminary results of first core hole to bedrock [J]. *Science*, 1968, **161**: 1 011-1 013.
- [7] Oeschger H, Schotterer U, Stauffer B, *et al.* First results from Alpine core drilling projects [J]. *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1977, **13**(1/2): 193-208.
- [8] Thompson L G, Dansgaard W. Oxygen isotope and microparticle studies of snow samples from Quelccaya Ice Cap, Peru [J]. *Antarctic Journal of the US*, 1975, **10**(1): 24-26.
- [9] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Bolzan J F, *et al.* A 1 500 year record of tropical precipitation recorded in ice cores from Quelccaya ice cap, Peru [J]. *Science*, 1985, **229**(4717): 971-973.
- [10] Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng, *et al.* A study of climatic variations since Last Interglaciation in the Guliya Ice Core [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, **27**(5): 447-

- 452.
- [11] Thompson L G, Yao T, Davis M E, *et al.* Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core [J]. *Science*, 1997, **276**(5 320): 1 821-1 827.
- [12] 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**(6 735): 429-436.
- [13] Yiou P, Fuhrer K, Meeker L D, *et al.* Paleoclimatic variability inferred from the spectral analysis of Greenland and Antarctic ice core data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 441-26 454.
- [14] Mayewski P A, Meeker L D, Twickler M S, *et al.* Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110 000-year-long glaciochemical series [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 345-26 366.
- [15] Meeker L D, Mayewski P A, Twickler M S, *et al.* An 110 000-year history of change in continental biogenic emissions and related atmospheric circulation inferred from the Greenland Ice Sheet Project Ice Core [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 489-26 504.
- [16] Crowley T J and North G R. *Paleoclimatology* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1991. 132-151.
- [17] Shi Yafeng, Liu Xiaodong, Li Bingyuan, *et al.* Strength summer monsoon on the Qinghai Tibetan Plateau and its correlation with the earth precession between 40~30 ka B.P. [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(14): 1 475-1 480.
- [18] Prell W L. Monsoonal climate of the Arabian Sea during the late Quaternary: A response to changing solar radiation [A]. *Milankovitch and Climate* (Berger A, *et al.* eds.) [M]. Boston: D. Reidel Pub. Co., 1984. 349-366.
- [19] Dansgaard W, Clausen H B, Gundestrup N, *et al.* A new Greenland deep ice core [J]. *Science*, 1982, **218**(4 579): 1 273-1 277.
- [20] Johnsen S J, Dansgaard W, Clausen H B, *et al.* Oxygen isotope profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets [J]. *Nature*, 1972, **235**: 429-434.
- [21] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, *et al.* Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, **359**(6 393): 311-313.
- [22] Grootes P M, Stuiver M, White J W C, *et al.* Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. *Nature*, 1993, **366**(6 455): 552-554.
- [23] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen H, *et al.* Evidence for a general instability of the past climate from a 250kyr ice core record. *Nature* [J]. 1993, **364**(6 434): 218-220.
- [24] Taylor K C, Lamorey G W, Doyle G A, *et al.* The "flickering switch" of late Pleistocene climate change [J]. *Nature*, 1993, **361**(6 411): 432-436.
- [25] Wagner G, Laj C, Beer J, *et al.* Reconstruction of the paleoaccumulation rate of central Greenland during the last 75 ka using the cosmogenic radionuclides ^{36}Cl and ^{10}Be and geomagnetic field intensity data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, **193**(3/4): 515-521.
- [26] Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change [J]. *Nature*, 1994, **372**(6 505): 421-424.
- [27] Bond G, Broecker W, Johnsen S, *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. *Nature*, 1993, **365**(6 442): 143-147.
- [28] Yao Tandong. Abrupt climatic changes on the Tibetan Plateau during the Last Ice Age [J]. *Science in China (Series. D)*, 1999, **42**(4): 358-368.
- [29] Bender M, Sowers T, Dickson M, *et al.* Climate correlation between Greenland and Antarctica during the past 100 000 years [J]. *Nature*, 1994, **372**(6 507): 663-666.
- [30] Mazaud A, Vimeux F, Jouzel J. Short fluctuations in Antarctic isotope records: a link with cold events in the North Atlantic [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, **177**(3/4): 219-225.
- [31] Severinghaus J P, Sowers T, Brook E J, *et al.* Timing of abrupt climate change at the end of the Younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice [J]. *Nature*, 1998, **391**(6 663): 141-146.
- [32] 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**(6 420): 527-529.
- [33] Mayewski P A, Meeker L D, Whitlow S L, *et al.* The atmosphere during the Younger Dryas [J]. *Science*, 1993, **261**(5 118): 195-197.
- [34] Zielinski G A, Meishon G R. Paleoenvironmental implications of the insoluble microparticle record in the GISP2 (Greenland) ice core during the rapidly changing climate of the Holocene Pleistocene transition [J]. *Geol. Soc. Of Am. Bull.*, 1997, **109**: 547-559.
- [35] Brook E J, Sowers T, Orchado J. Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110 000 years [J]. *Science*, 1996, **273**(2 578): 1 087-1 091.
- [36] Fluckiger J, Dallenbach A, Blunier T, *et al.* Variations in atmospheric N_2O concentration during abrupt climatic changes [J]. *Science*, 1999, **285**(5 425): 227-230.
- [37] Taber K C, Mayewski P A, Alley R B, *et al.* The Holocene Younger Dryas transition recorded at summit Greenland [J]. *Science*, 1997, **278**(5 339): 825-827.
- [38] Yang Zhihong, Yao Tandong, Huang Cui'an, *et al.* The record of Younger Dryas event in Guliya ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, **42**(18): 1 975-1 978. [杨志红, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰芯中的新仙女木事件记录. *科学通报*, 1997, **42**(18): 1 975-1 978.]
- [39] von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Brauer A, *et al.* A mid-European decadal isotope-climate record from 15 500 to 5 000 years BP [J]. *Science*, 1999, **284**(5 420): 1 654-1 657.
- [40] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al.* Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru [J]. *Science*, 1995, **269**(5 220): 46-50.
- [41] Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, *et al.* A 25 000-year tropical climate history from Bolivian ice cores [J]. *Science*, 1998, **282**(5 395): 1 858-1 864.
- [42] Jouzel J, Petit J R, Barkov N I, *et al.* The last deglaciation in Antarctica: further evidence of a "Younger Dryas" type climatic event [A]. *The last deglaciation: absolute and radiocarbon chronologies* [M] (Bard E, Broecker W S). Berlin: Springer-Verlag, 1992. 229-266.
- [43] Blunier T, Schwander J, Stauffer B, *et al.* Timing of the Antarctic cold reversal and the atmospheric CO_2 increase with respect to the Younger Dryas event [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(21): 2 683-2 686.

- [44] Steig E J, Brook E J, White J W C, *et al.* Synchronous climate changes in Antarctica and the North Atlantic [J]. *Science*, 1998, **282**(5 386): 92—95.
- [45] Denton G H, Hendy C H. Younger Dryas age advance of Franz Josef glacier in the Southern Alps of New Zealand [J]. *Science*, 1994, **264**(5 164): 1 434—1 437.
- [46] Singer G, Shulmeister J, Mcla B. Evidence against a significant Younger Dryas cooling event in New Zealand [J]. *Science*, 1998, **281**(5 378): 812—814.
- [47] Hammer C U, Clausen H B, Dansgaard W, *et al.* Continuous impurity analysis along the Dye 3 deep core [J]. *Geophysical Monograph*, 1985, **33**: 90—94.
- [48] Petit J R, Mounier L, Jouzel J, *et al.* Paleoclimatological and chronological implications of the Vostok dust record [J]. *Nature*, 1990, **343**(6 253): 56—58.
- [49] Thompson L G, Mosley-Thompson E. Microparticle concentration variations linked with climatic change: evidence from polar ice cores [J]. *Science*, 1981, **212**(4 496): 812—815.
- [50] Yao Tandong, Jiao Keqin, Huang Cuilan, *et al.* Variations of atmospheric components and environmental in the northern Tibetan Plateau since the Last Interglacial Age [A]. *Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Vol. 2)* [C]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996. 818—827. [姚檀栋, 焦克勤, 皇翠兰, 等. 末次间冰期以来青藏高原北部大气成分和环境变化[A]. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集(下) [C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 818—827.]
- [51] Mayewski P A, Twickler M S, Whitlow S I, *et al.* Climate change during the last deglaciation in Antarctica [J]. *Science*, 1996, **272**(5 268): 1 636—1 638.
- [52] Chappellaz J, Blunier T, Rataud D, *et al.* Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 ka BP [J]. *Nature*, 1993, **366**(6 454): 443—445.
- [53] Xu Baiqing, Yao Tandong. Dasuopu ice core record of atmosphere methane over the past 2 000 years [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, **31**(1): 54—58. [徐柏青, 姚檀栋. 达索普冰芯记录的过去 2 ka 来大气中甲烷浓度变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, **31**(1): 54—58.]
- [54] Lorius C, Jouzel J, Raynaud D, *et al.* The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming [J]. *Nature*, 1990, **347**(6 289): 139—145.
- [55] Crowley T J. Utilization of paleoclimate results to validate projections of a future greenhouse warming [A]. *Greenhouse gas climate change: a critical appraisal of simulations and observations (Schlesinger M E, ed.)* [M]. New York: Elsevier, 1991. 35—45.
- [56] Loutre M F, Berger A. No glacial—interglacial cycle in the ice volume simulated under a constant astronomical forcing and a variable CO₂ [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(6): 783—786.
- [57] Sowers T, Bender M. Climate records covering the last deglaciation [J]. *Science*, 1995, **269**(5 221): 210—214.
- [58] Severinghaus J P, Brook E J. Abrupt climate change at the end of the last glacial period inferred from trapped air in polar ice [J]. *Science*, 1999, **286**(5 441): 930—934.
- [59] Fischer H, Wahlen M, Smith J, *et al.* Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations [J]. *Science*, 1999, **283**(5 408): 1 712—1 714.
- [60] Monnin E, Indermuhle A, Dallenbach A, *et al.* Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination [J]. *Science*, 2001, **291**(5 501): 112—114.
- [61] Indermuhle A, Monnin E, Stauffer B, *et al.* Atmospheric CO₂ concentration from 60 to 20 ka BP from the Taylor Dome ice core Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(5): 735—738.
- [62] Stauffer B. Atmospheric carbon dioxide and methane concentrations in the past and synchronisation of ice core records from both hemispheres based on methane results [J]. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 1998, Special issue, No. **52**: 158—171.
- [63] Stauffer B, Blunier T, Dallenbach A, *et al.* Atmospheric CO₂ concentration and millennial-scale climate change during the last glacial period [J]. *Nature*, 1998, **392**(6 671): 59—62.
- [64] Raynaud D, Jouzel J, Barnola J M, *et al.* The ice record of greenhouse gases [J]. *Science*, 1993, **259**: 926—933.
- [65] Anklin M, Schwander J, Stauffer B, *et al.* CO₂ record between 40 and 8 ka BP from the Greenland ice core project ice core [J]. *Journal of geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 539—26 545.
- [66] Broecker W S. Ocean chemistry during glacial time [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, **46**: 1 689—1 705.
- [67] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages [J]. *Science*, 1976, **194**(4 170): 1 121—1 132.
- [68] Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, *et al.* Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period [J]. *Nature*, 1998, **394**(6 695): 739—743.
- [69] Blunier T, Brook E J. Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period [J]. *Science*, 2001, **291**(5 501): 109—112.
- [70] Crowley T J. North Atlantic Deep Water cools the southern hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1992, **7**(4): 489—497.
- [71] Broecker W S. Paleoocean circulation during the last deglaciation: a bipolar seesaw [J]. *Paleoceanography*, 1998, **13**(2): 119—121.
- [72] Stocker T F. The seesaw effect [J]. *Science*, 1998, **282**(5 386): 61—62.
- [73] Gates W L. Modeling the ice-age climate [J]. *Science*, 1976, **191**(4 232): 1 138—1 144.
- [74] Cuffey K M, Clow G D, Alley R B, *et al.* Large arctic temperature change at the Wisconsin-Holocene glacial transition [J]. *Science*, 1995, **270**(5 235): 455—458.
- [75] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al.* Holocene—late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai—Tibetan Plateau [74]. *Science*, 1989, **246**(4 929): 474—477.
- [76] Yao Tandong, Jiao Keqin, Huang Cuilan, *et al.* Environmental records in ice cores and their spatial coupling features [J]. *Quaternary Science*, 1995, **15**(2): 23—30. [姚檀栋, 焦克勤, 皇翠兰, 等. 冰芯所记录的环境变化及空间耦合特征[J]. *第四纪研究*, 1995, **15**(2): 23—30.]
- [77] Biscaye P E, Grousset F E, Revel S, *et al.* Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core, Summit, Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 765—26 781.
- [78] Ram M, Stolz M, Koenig G. Eleven year cycle of dust concen-

- tration variability observed in the dust profile of the GISP2 ice core from central Greenland: possible solar cycle connection [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(19): 2 359—2 362.
- [79] Gaudichet A, De Angelis M, Lefevre R, *et al.* Mineralogy of insoluble particles in the Vostok Antarctic ice core over the last climatic cycle (150 kyr) [J]. *Geophysical Research Letters*, 1988, **15**(13): 1 471—1 474.
- [80] Raisbeck G M, Yiou F, FrunEAU M, *et al.* Cosmogenic ^{10}Be concentrations in Antarctic ice during the past 30 000 years [J]. *Nature*, 1981, **292**(5 826): 825—826.
- [81] Yiou F, Raisbeck G M, Bourles D, *et al.* ^{10}Be in ice at Vostok, Antarctica during the past climatic cycle [J]. *Nature*, 1985, **316**(6 025): 616—617.
- [82] Raisbeck G M, Yiou F, Bourles D, *et al.* Evidence for two intervals of enhanced ^{10}Be deposition in Antarctic ice during the last glacial period [J]. *Nature*, 1987, **326**(6 110): 273—277.
- [83] Baumgartner S, Beer J, Suter M, *et al.* Chlorine 36 fallout in the Summit Greenland Ice Core Project ice core [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 659—26 662.
- [84] Yiou F, Raisbeck G M, Baumgartner S, *et al.* Beryllium 10 in the Greenland Ice Core Project ice core at Summit Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C12): 26 783—26 794.
- [85] Wang Ninglian, Yao Tandong, Qin Dahe, *et al.* A new evidence for enhanced cosmogenic isotopes' production rate in atmosphere ~37 ka BP by Guliya Ice Core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(7): 765—769. [王宁练, 姚檀栋, 秦大河, 等. 约37 ka BP 大气中宇宙成因同位素含量增加的古里雅冰芯证据 [J]. *科学通报*, 1999, **44**(7): 765—769.]
- [86] McHargue L R, Damon P E, Donahue D J. Enhanced cosmic ray production of ^{10}Be coincident with the Mono Lake and Laschamp geomagnetic excursions [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(5): 659—662.
- [87] Castagnoli C C, Albrecht A, Beer J, *et al.* Evidence for enhanced ^{10}Be deposition in Mediterranean sediments 35 ka BP [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(6): 707—710.
- [88] Baumgartner S, Beer J, Masarik J, *et al.* Geomagnetic modulation of the ^{36}Cl flux in the GRIP ice core, Greenland [J]. *Science*, 1998, **279**(5 355): 1 330—1 332.
- [89] Raisbeck G M, Yiou F. ^{10}Be as a proxy indicator of variations in solar activity and geomagnetic field intensity during the last 10 000 years [A]. *Secular solar and geomagnetic variations in the last 10 000 years* (Stephenson F R, Wolfendale A W, eds.) [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. 287—296.
- [90] Beer J, Siegenthaler U, Blinov A. Temporal ^{10}Be variations in ice: information on solar activity and geomagnetic field intensity [A]. *Secular solar and geomagnetic variations in the last 10 000 years* (Stephenson F R, Wolfendale A W, eds.) [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. 297—313.
- [91] Beer J, Siegenthaler U, Bonani G, *et al.* Information on past solar activity and geomagnetism from ^{10}Be in the Camp Century ice core [J]. *Nature*, 1988, **331**(6 158): 675—679.
- [92] Beer J, Blinov A, Bonani G, *et al.* Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity [J]. *Nature*, 1990, **347**(6 289): 164—166.
- [93] Beer J. Cosmogenic isotopes as a tool to study solar and terrestrial variability [A]. *Past and present variability of the solar-terrestrial system: measurement, data analysis and theoretical models* (Catagnoni G C, Provenzale A, eds.) [M]. Amsterdam: IOS Press, 1997. 25—36.
- [94] Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G. The nitrogen concentration recorded in the Guliya ice core on the Tibetan Plateau and solar activity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **42**(3): 309—312. [王宁练, 姚檀栋, Thompson L G. 青藏高原古里雅冰芯中 NO_3^- 浓度与太阳活动 [J]. *科学通报*, 1998, **42**(3): 309—312.]
- [95] Wang Ninglian, Thompson L G, Gole-Dai J. The nature of the solar activity during the Maunder Minimum recorded in the Guliya ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(16): 1 697—1 704. [王宁练, Thompson L G, Cole-Dai J. 青藏高原古里雅冰芯记录所揭示的 Maunder 极小期太阳活动特征 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(16): 1 697—1 704.]
- [96] Zeller E J, Parker B C. Nitrate ion in Antarctic firn as a marker for solar activity [J]. *Geophysical Research Letters*, 1981, **8**(8): 895—898.
- [97] Legrand M R, Delmas R J. Relative contributions of tropospheric and stratospheric sources to nitrate in Antarctic snow [J]. *Tellus*, 1986, **38**(B): 236—249.
- [98] Derschhoff G, Zeller E J. Ultra-high resolution nitrate in polar ice as indicator of past solar activity [J]. *Solar Physics*, 1998, **177**(1/2): 365—374.
- [99] Shea M A, Smart D F, Derschhoff G A M. Identification of major proton fluence events from nitrates in polar ice cores [J]. *Radiation Measurements*, 1999, **30**(3): 309—316.
- [100] Wagner G, Masarik J, Beer J, *et al.* Reconstruction of the geomagnetic field between 20 and 60 ka BP from cosmogenic radionuclides in the GRIP ice core [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2000, **172**(B1/4): 597—604.
- [101] Hammer C U. Past volcanism revealed by Greenland Ice Sheet impurities [J]. *Nature*, 1977, **270**: 482—486.
- [102] Zielinski G A, Mayewski P A, Meeker L D, *et al.* Record of volcanism since 7000 BC from the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system [J]. *Science*, 1994, **264**(5 161): 948—952.
- [103] Zielinski G A, Mayewski P A, Meeker L D, *et al.* A 110 000-yr record of explosive volcanism from the GISP2 (Greenland) ice core [J]. *Quaternary Research*, 1996, **45**(2): 109—118.
- [104] Zielinski G A. Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D10): 20 937—20 955.
- [105] Palais J M, Gemani M S, Zielinski G A. Inter-hemispheric transport of volcanic ash from a 1259 AD volcanic eruption to the Greenland and Antarctic Ice Sheets [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(8): 801—804.
- [106] Delmas R J, Kirchner S, Palais J M, *et al.* 1 000 years of explosive volcanism recorded at the South Pole [J]. *Tellus*, 1992, **44**(B): 335—350.
- [107] Dignon J. Impact of biomass burning on the atmosphere [A]. *Ice core studies of global biogeochemical cycles* (Delmas R J, ed.) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 299—311.
- [108] Taylor K C, Mayewski P A, Twickler M S, *et al.* Biomass burning recorded in the GISP2 ice core: a record from eastern Canada? [J]. *The Holocene*, 1996, **6**(1): 1—6.
- [109] Chylek P, Johnson B, Damiano P A, *et al.* Biomass burning

- record and black carbon in the GISP2 ice core [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(2): 89–92.
- [110] Chylek P, Johnson B, Wu H. Black carbon concentration in Byrd Station ice core, from 13 000 to 700 years before present [J]. *Annales Geophysicae*, 1992, **10**: 625–629.
- [111] Cachier H. Combustion carbonaceous aerosols in the atmosphere; implications for ice core studies [A]. *Ice core studies of global biogeochemical cycles* (Delmas R J, ed.) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 313–346.
- [112] Saigne C, Legrand M. Methanesulfonic acid in Antarctic ice [J]. *Nature*, 1987, **330**(6 145): 240–242.
- [113] Legrand M, Feniet-Saigne C, Saltzman E S, *et al.* Ice-core record of oceanic emissions of dimethylsulphide during the last climate cycle [J]. *Nature*, 1991, **350**(6 314): 144–146.
- [114] Legrand M, Hammer C, Angelis M De, *et al.* Sulfur-containing species (methanesulfonate and SO₄) over the last climatic cycle in the Greenland Ice Core Project (central Greenland) ice core [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(C): 26 663–26 679.
- [115] Legrand M. Sulphur-derived species in polar ice: a review [A]. *Ice core studies of global biogeochemical cycles* (Delmas R J, ed.) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 91–119.
- [116] Bates T S, Calhoun J A, Quinn P K. Variations in the methanesulfonate to sulfate molar ratio in submicrometer marine aerosol particles over the South Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 9 859–9 865.
- [117] Hannon M E, Saltzman E S. The first Greenland ice core record of methanesulfonate and sulfate over a full glacial cycle [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, **20**: 1 163–1 166.
- [118] Legrand M, Feniet-Saigne C, Saltzman E S, *et al.* Spatial and temporal variations of methanesulfonic acid and non sea salt sulphate in Antarctic ice [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**: 245–260.
- [119] Chappellaz J, Blunier T, Kintis S, *et al.* Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Holocene [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D13): 15 987–15 997.
- [120] Dallenbach A, Blunier T, Fluckiger J, *et al.* Changes in the atmospheric CH₄ gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(7): 1 005–1 008.
- [121] Rood R T, Sarazin C L, Zeller E J, *et al.* X or γ-rays from supernovae in glacial ice [J]. *Nature*, 1979, **282**: 701–703.
- [122] Risbo T, Clausen H B, Rasmussen K L. Supernovae and nitrate in the Greenland Ice Sheet [J]. *Nature*, 1981, **294**(5 842): 637–639.
- [123] Wolff E W. Nitrate in polar ice [A]. *Ice core studies of global biogeochemical cycles* (Delmas R J, ed.) [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 195–224.
- [124] Matthews R. On ice: Antarctica yields clues to a “lost” supernovae [J]. *New Scientist*, 1999, **163**(2 204): 7.
- [125] Burgess C P, Zuber K. Footprints of the newly discovered Vela supernova in Antarctic ice cores? [J]. *Astroparticle Physics*, 2000, **14**(1): 1–6.
- [126] Willerslev E, Hansen A J, Christensen B, *et al.* Diversity of Holocene life forms in fossil glacier ice [J]. *PNAS*, 1999, **96**(14): 8 017–8 021.
- [127] Christner B C, Mosley-Thompson E, Thompson L G, *et al.* Recovery and identification of viable bacteria immured in glacial ice [J]. *Icarus*, 2000, **144**(2): 479–485.
- [128] Ma L J, Catharine M C, Stamer W T, *et al.* Revival and characterization of fungi from ancient polar ice [J]. *Mycologist*, 1999, **13**: 70–73.
- [129] Zhang Xiaojun, Yao Tandong, Ma Xiaojun, *et al.* Analysis of the characteristics of microorganisms packed in the ice core of Malan Glacier, Tibet, in China [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, **44**(Supp. 1): 369–374.
- [130] Jouzel J, Petit J R, Shouchez R, *et al.* More than 200 meters of lake ice above subglacial lake Vostok, Antarctica [J]. *Science*, 1999, **286**(5 447): 2 138–2 141.
- [131] Prisco J C, Adams E E, Lyons W B, *et al.* Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica [J]. *Science*, 1999, **286**(5 447): 2 141–2 144.
- [132] Karl D M, Bird D F, Bjrkman K, *et al.* Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok, Antarctica [J]. *Science*, 1999, **286**(5 447): 2 144–2 147.
- [133] Abyzov S S, Mitskevich I N, Poglazova M N, *et al.* Microflora in the basal strata at Antarctic ice core above the Vostok Lake [J]. *Advance in Space Research*, 2001, **28**(4): 701–706.
- [134] Castello J D, Rogers S O, Stamer W T, *et al.* Detection of tomato mosaic tobamovirus RNA in ancient glacial ice [J]. *Polar Biology*, 1999, **22**(3): 207–212.
- [135] Nriagu J O. A history of global metal pollution [J]. *Science*, 1996, **272**(5 259): 223–224.
- [136] Hong S, Candelone J P, Patterson C C, *et al.* Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations [J]. *Science*, 1994, **265**(5 180): 1 841–1 843.
- [137] Hong S, Candelone J P, Patterson C C, *et al.* History of ancient copper smelting pollution during Roman and Medieval Times recorded in Greenland ice [J]. *Science*, 1996, **272**(5 359): 246–249.
- [138] Murozumi M, Chow T J, Patterson C. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, **33**: 1 247–1 294.
- [139] Boutron C F, Gorlach U, Candelone J P, *et al.* Decrease in anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s [J]. *Nature*, 1991, **353**(6 340): 153–156.
- [140] Candelone J P, Hong S, Pellone C, *et al.* Post-industrial revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metals as documented in central Greenland snow and ice [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D8): 16 605–16 616.
- [141] Boutron C F, Patterson C C. Lead concentration changes in Antarctic ice during the Wisconsin/Holocene transition [J]. *Nature*, 1986, **323**(6 085): 222–225.
- [142] Wolff E W, Suttie E D. Antarctic snow record of southern hemisphere lead pollution [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, **21**(9): 781–784.
- [143] Qin Dahu, Ren Jiawen, Sun Junying, *et al.* Concentration of Pb and environmental significance in modern rainfall, Antarctic [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, **25**(3): 302–308. [秦大河, 任贾文, 孙俊英, 等. 南极冰盖现代降水中的 Pb 含量及其环境意义 [J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, **25**(3): 302–308.]

- [144] Boutron C F, Patterson C C. Relative levels of natural and anthropogenic lead in recent Antarctic snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **92**(D7): 8 454—8 464.
- [145] Huo Wenmian, Yao Tandong, Li Yuefang. The ice core record of anthropogenic lead pollution at 7 000 m altitude [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(9): 978—981. [霍文冕, 姚檀栋, 李月芳. 7 000 m 处冰芯中 Pb 记录的人类活动污染[J]. *科学通报*, 1999, **44**(9): 978—981.]
- [146] Barrie L A, Fisher D, Koerner R M. Twentieth century trends in Arctic air pollution revealed by conductivity and acidity observations in snow and ice in the Canadian high Arctic [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, **19**: 2 055—2 063.
- [147] Wagenbach D, Munnich K O, Schotterer U, *et al.* The anthropogenic impact on snow chemistry at Colle Gnifetti, Swiss Alps [J]. *Annals of Glaciology*, 1988, **10**: 183—187.
- [148] Neftel A, Beer J, Oeschger H, *et al.* Sulphate and nitrate concentrations in snow from South Greenland 1895—1978 [J]. *Nature*, 1985, **314**(6 012): 611—613.
- [149] Mayewski P A, Lyons W B, Spencer M J, *et al.* Sulfate and nitrate concentrations from a South Greenland ice core [J]. *Science*, 1986, **232**(4 753): 975—977.
- [150] Clausen H B, Langway C C Jr. The ionic deposits in polar ice cores [A]. *The environmental record in glaciers and ice sheets* (Oeschger H, Langway C C, eds.) [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1989. 225—248.
- [151] Oerter H, Rauert W. Core drilling on Vemagtferner (Oetztal Alps Austria) in 1979: tritium contents [J]. *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1982, **18**(1): 13—22.
- [152] Thompson L G, Mosley—Thompson E, Davis M E, *et al.* Glacial stage ice-core records from the subtropical Dunde Ice Cap, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1990, **14**: 288—297.
- [153] Clausen H B, Hammer C U. The Laki and Tambora eruptions as revealed in Greenland ice cores from 11 locations [J]. *Annals of Glaciology*, 1988, **10**: 16—22.
- [154] Lambert G, Ardouin B, Sanak J, *et al.* Accumulation of snow and radioactive debris in Antarctica: a possible refined radiochronology beyond reference levels [J]. *IAHS-AISH*, 1977, **118**: 146—158.
- [155] Thompson L G, Davis M E, Mosley—Thompson E, *et al.* Pre-Incan agricultural activity recorded in dust layers in two tropical ice cores [J]. *Nature*, 1988, **336**(6 201): 763—765.
- [156] Barlow L K, Sadler J P, Ogilvie A E J, *et al.* Interdisciplinary investigations of the end of the Norse Western Settlement in Greenland [J]. *The Holocene*, 1997, **7**(4): 489—499.
- [157] Lauci L, Kent D V, Biscaye P E, *et al.* Isothermal remnant magnetization of Greenland ice: preliminary results [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(8): 1 639—1 642.

Contributions of Ice Core to the Past Global Change Research

WANG Ning-lian, YAO Tan-dong

(Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: In this paper, the successful achievements of ice core study are comprehensively reviewed in such aspects as past environmental and climatic changes, abrupt climate changes, solar activity, atmospheric dust content, greenhouse gases, volcanism, biogeochemical cycle, universal events and human influences on environment. Some important issues are dis-

cussed, such as the Younger Dryas events, the correlation between climate changes and greenhouse gases, and the phase difference between climate changes in the northern and southern hemispheres. Some new research directions in ice core study are suggested too, for examples, microorganism and environmental geomagnetism.

Key words: ice core; global change