全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据

王宁练① 姚檀栋① L. G. Thompson② K. A. Henderson②

(①中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 兰州 730000; ②Byrd Polar Research Center, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA. E-mail: nlwang@ns.lzb.zc.cn)

摘要 根据古里雅冰芯记录, 揭示出全新世早期存在两次低温事件, 并且其发生年代(9.4 和 8.2 kaBP 左右)与全新世早期北大西洋的两次冰筏事件年代相一致. 其中后一次低温事件(即"8.2 kaBP 冷事件")极为显著, 并表现出迅速降温、缓慢升温的明显特征, 最冷时降温幅度达 7.8~10℃, 大于格陵兰冰芯记录中该冷事件的降温幅度. 这反映了青藏高原地区对于气候变化的敏感性. 弱的太阳活动和弱的热盐环流是"8.2 kaBP 冷事件"发生的关键原因.

关键词 古里雅冰芯 早全新世 气候突变 热盐环流 太阳活动

一般认为, 全新世的气候是相对稳定的, 而在冰期时气候是不稳定的[1]. 这一观点已被最近高分辨率的冰芯[2]和海洋沉积记录[3,4]所动摇. 由于许多古气候替代指标资料的分辨率较低, 使得人们对于发生在全新世(尤其是全新世早期)持续时间相对较短的降温事件难以鉴别, 以致研究较少. 然而, 对于这些事件发生规律和机制的认识, 将有助于提高人们对未来气候变化趋势的预测能力.

发生在大约 8.2 kaBP 时的气候环境突变事件是当前过去全球变化研究中的热点问题之一. 这不仅因为格陵兰冰芯记录到了这是冰后期最强的降温事件[5], 而且因为在这一时期其他地区的环境也发生了大的突变[6]. 然而, 迄今关于 8.2 kaBP 降温事件(即"8.2 kaBP 冷事件")的冰芯[1,5]、深海沉积[3,7~9]、湖泊沉积[10~12]和树轮[9]等证据均来自于环北大西洋地区, 因此人们一直认为该事件的发生可能与北大西洋热盐环流的减弱有关. 由于在环北大西洋以外地区关于"8.2 kaBP 冷事件"的发生与影响还缺乏足够的证据和系统分析, 限制了对该事件发生的时空特征及其空间耦合机制的研究. 有鉴于此, 本文将提供这一事件的青藏高原古里雅冰芯记录证据, 并结合不同地区过去气候环境变化的资料, 探讨"8.2 kaBP 冷事件"发生与影响的可能范围及其原因.

1 全新世早期古里雅冰芯中 δ^{18}O 值的变化

取自青藏高原西昆仑山古里雅冰帽的 309 m 冰芯, 其上部定年是依据污化层和 δ^{18}O 值季节变化进行的[13,14]. 由于冰川在重力作用下的流变变形, 使得其年层厚度从冰川上部向下部变得越来越薄, 以至到一定深度之后年层无法辨识. 古里雅冰芯所采用的上述两种定年方法, 只能进行到该冰芯的 120 m 深度处(至此可数出 1700 多个年层). 对于该冰芯中下部的定年采用了流变模型法、特征层位法(冰期时冰晶尺寸的减小和 δ^{18}O 值的降低)、温室气体对比法和放射性同位素法[15,16], 并发现该冰芯底部冰大约形成于 760 kaBP 之前[16], 这对于青藏高原大约在 700~800 kaBP 进入冰冻圈的观点[17]提供了直接证据. 目前, 通过该冰芯已恢复了末次间冰期以来的气候环境变化记录[15,16,18].

图 1 是全新世早期古里雅冰芯中 δ^{18}O 值的变化情况. 如果将 δ^{18}O 值的 3 点滑动平均值低于其平均值的时段定义为 δ^{18}O 低值事件, 那么从该图可以看出在全新世早期的古里雅冰芯记录中存在两次 δ^{18}O

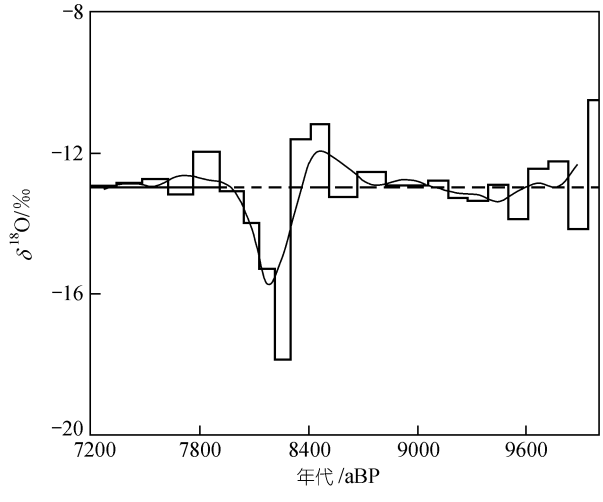

图 1 10~7.2 kaBP 时期古里雅冰芯中 δ^{18}O 值的变化
虚线为平均值, 粗实线为实测值, 细实线为 3 点滑动平均值

低值事件, 它们分别发生在 9.6~9.2 kaBP 和 8.4~8.0 kaBP. 其中后一次δ^{18}O 低值事件是极为显著的, 其平均值(–15.2‰)比其前后相同时段的δ^{18}O 平均值分别要低 2.7‰和 2.3‰, 并且其发生年代与格陵兰 GISP2 冰芯记录中“8.2 kaBP 冷事件”的发生年代(8.4~8.0 kaBP)[5]相一致, 这提供了环北大西洋以外地区该冷事件存在的证据. 另外, 古里雅冰芯中δ^{18}O 记录还表明, 在从约 8.4~8.3 kaBP 的 100 年间其值从–11.6‰迅速降低到–17.9‰, 降低幅度达 6.3‰, 大于格陵兰 GISP2 冰芯中δ^{18}O 值的降低幅度(约 2‰[5]); 之后到 8.0 kaBP 时, δ^{18}O 值逐渐缓升到–13.0‰左右. 这说明古里雅冰芯记录的“8.2 kaBP 冷事件”发生过程(降温迅速、升温缓慢)与格陵兰冰芯记录的该事件发生过程(温度降、升过程基本对称, 见图 2(b))存在差异.

2 “8.2 kaBP 冷事件”的降温幅度

近年来对青藏高原地区降水中δ^{18}O 值的气候学意义进行了大量研究[23~25], 结果表明青藏高原北部地区降水中δ^{18}O 值的变化主要受气温的影响. 最近对于欧亚腹地天山乌鲁木齐河流域地区现代降水中稳定氧同位素的研究, 也发现降水中δ^{18}O 值与气温之间存在明显的正相关关系[26]. 这些表明, 青藏高原北部地区冰芯中δ^{18}O 值是气温的可靠指标. 进一步的分析表明, 青藏高原北部地区降水中δ^{18}O 值每 1‰的变化, 相当于气温变化 1.6℃[25]. 该地区降水中δ^{18}O 值变化与气温变化的这一对比关系与欧洲(1.7℃/‰)[27]和格陵兰(1.8℃/‰)[28]的状况十分接近. 如果将高原北部地区降水中δ^{18}O 值与气温的上述对比关系应用于古里雅冰芯记录, 那么可以计算得到古里雅冰帽地区“8.2 kaBP 冷事件”最冷时的气温相对于该事件前后时期气温的降低幅度为 7.8~10℃, 大于格陵兰 GISP2 冰芯记录到的这次冷事件最冷时的降温幅度(6 ± 2)℃[5]. 同时, 根据古里雅冰芯δ^{18}O 记录发现, 在从约 8.4~8.3 kaBP 的 100 年间气温降幅达 10℃左右, 呈现明显的突变特征.

考虑到不同地区不同介质的分辨率存在差异, 以及只有在相同时间尺度上进行气候变化的对比才有意义, 表 1 列出了在 100 a 时间尺度上不同地区“8.2 kaBP 冷事件”时的降温幅度状况. 我们曾根据青藏高原冰芯中末次冰盛期时的δ^{18}O 值和现代的差异值与极地冰芯中这一差异值基本相一致的事实, 以及末次冰期时青藏高原冰芯记录的气候突变与格陵兰冰芯记录的可比性和高原现代气温变化随高度增大的事实, 提出了青藏高原是气候变化的敏感区概念[29]. 从表 1 可以看出, 发生在大约 8.2 kaBP 时的降温事件在古里雅冰芯记录中也表现得十分显著. 这对于青藏高原是气候变化的敏感区又增加了一个新的证据. 造成青藏高原地区对于气候变化敏感的关键原因, 很可能与该地区的积雪变化对于气候的反馈作用有关. 当气候变冷时, 青藏高原地区积雪面积会增大、年内持续时间会延长, 致使下垫面的反射率大大增加, 气候迅速变冷; 而当气候变暖时, 高原积雪面积会减少、年内持续时间会缩短, 从而导致下垫面反射率的减小, 这将有利于气温的回升, 同时由于高原积雪、冻土和冰川的融化吸热会使升温过程变缓.

表 1 不同地区“8.2 kaBP 冷事件”100 a 尺度上的降温幅度对比

地区	降温幅度/℃	资料来源
格陵兰中部	约 2.8	文献[10]
北海	＞2	文献[9]
北大西洋东部	约 2	文献[3]
德国南部	约 1.7	文献[10]
青藏高原西北部	3.7~4.3	本文

3 讨论

早期对于祁连山敦德冰芯的研究已发现全新世早期存在持续时间约 300~400 a 的强降温事件[30], 并且降温幅度(约 3~4℃)与古里雅冰芯记录的降温幅度相一致. 考虑到敦德冰芯下部定年具有 100 a 级的误差[31], 因此敦德冰芯记录中发生在 8.9~8.7 kaBP 时期的那次强降温事件很可能与 8.4~8.0 kaBP 时期的强降温事件相对应. 目前已在西昆仑山古里雅冰帽地区、祁连山敦德冰帽地区及川西稻城古冰帽等地区, 发现了与该冷期相对应的终碛[32~34]. 在青海共和盆地也发现有这一时期形成的冻融褶皱现象存在[35]. 由于不同样品中 ^{14}C 的活度不仅反映 ^{14}C 的衰变(与测年相关), 而且反映其所在碳交换储存库的活度状况, 因此 ^{14}C 年代与日历年之间存在差异. 研究表明[36], 7.65~7.2 kaBP ^{14}C 时期对应于 8.4~8.0 kaBP 日历年时期. 考虑到这一点, 发生在大约 7.5 kaBP ^{14}C 时期的青海湖古水温降低事件[37], 北京地区发现的 7.7 kaBP ^{14}C 时期山地暗针叶林向丘陵平原区的扩展[38], 以及我国东部地区 7.7~7.5 kaBP ^{14}C 时期曾出现 1~2℃的降温事件[39], 都可能与“8.2 kaBP 冷事件”相关. 在

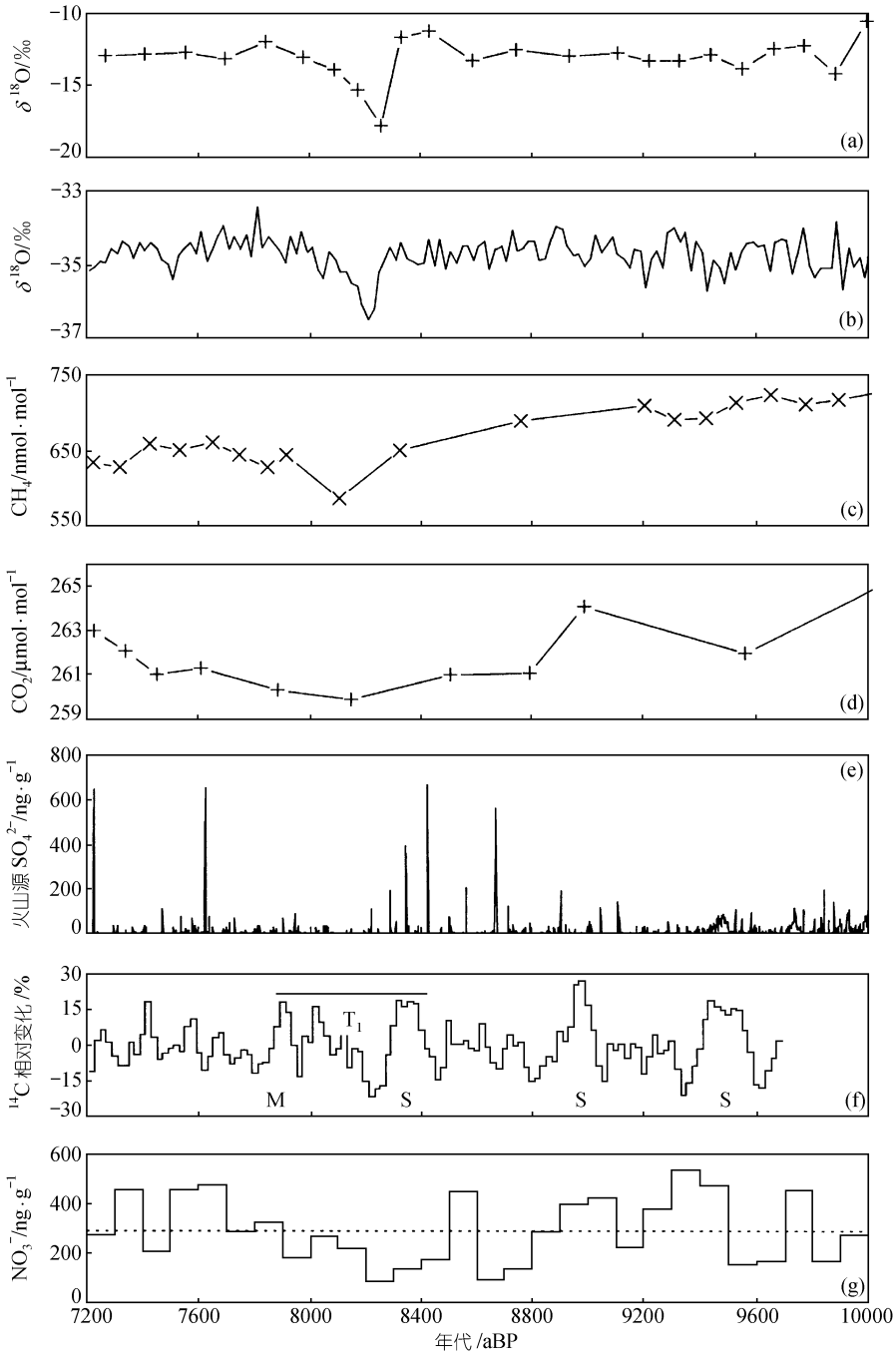

图 2 10~7.2 kaBP 时期气温变化与大气温室气体含量、火山活动及太阳活动的对比

(a) 古里雅冰芯中 $\delta^{18}O$ 值的变化; (b) 格陵兰 GISP2 冰芯中 $\delta^{18}O$ 值的变化[5]; (c) 格陵兰 GRIP 冰芯中 CH_4 记录[19]; (d) 南极 Taylor Dome 冰芯中的 CO_2 记录[20]; (e) 格陵兰 GISP2 冰芯中火山源 SO_4^{2-} 浓度记录[21]; (f) 大气 ^{14}C 产生速率的相对变化(M 代表该时段类似于 Maunder 极小期, S 代表该时段类似于 Sporer 极小期, T_1 代表弱太阳活动相对集中的时段)[22]; (g) 古里雅冰芯中的 NO_3^- 浓度变化

Ters[40]的冰后期海平面稳定上升变化过程曲线中, 8.2 kaBP 左右出现小的下降说明那时冷的气候已使全球陆地冰量有所增加. 斯堪的那维亚半岛[41~43]、欧洲 Alps 山[41]、南美 Andes 山[44]等地区均已发现 8.0 kaBP 之前的冰川前进遗迹便是证明. 亚非季风区的许多湖泊在 7~8 kaBP ^{14}C 时期的明显萎缩[45], 指示

了这一时期季风的衰退. 由此可见, “8.2 kaBP 冷事件”的发生与影响在一定程度上具有全球性. 这种全球大范围内同时发生的重大气候环境事件, 应该与影响地球气候系统的外在因素变化有关, 也可能与地球气候系统中具有全球影响的内在因素变化有关[46].

研究表明[47,48], 古里雅冰芯中 NO_3^- 浓度的升降变化可以反映太阳活动的强弱变化, 如果这种关系在全新世早期还存在, 那么 8.5~8.1 kaBP 时期 NO_3^- 浓度的低值(图 2(g))就揭示出那时太阳活动较弱. Stuiver 等人[22]根据大气中 ^{14}C 产生速率的变化, 发现 9.6 kaBP 以来太阳活动存在许多类似于 Maunder(M)和 Sporer(S)极小期的变化, 其中 8.4~7.8 kaBP 时期是全新世 4 个太阳活动极小期相对集中的时期之一(见图 2(f)中 T_1 所示). 最近, Perry 等人[49]根据简单的太阳亮度模型计算了近 90 ka 以来太阳辐射变化, 结果表明 8.4~8.0 kaBP 时期太阳辐射相对较弱. 因此, 弱的太阳活动或弱的太阳辐射可能是产生 8.2 kaBP 时北半球乃至全球尺度气候环境事件的主要外在因素.

最近大量研究表明[50~53], 全球气候环境突变与热盐环流变化密切相关, 而全球热盐环流输送带的运转是由北大西洋深水(NADW)形成驱动的, 因此在北大西洋地区的过量淡水(冰川融水、降水、河川径流)注入会直接影响到该区域洋面的热盐状况, 进而导致 NADW 形成速率和热盐环流强度的变化. 应用全球海-气耦合模型对于北大西洋热盐环流对淡水注入的敏感性研究表明[54,55], 当淡水注入持续时间超过 500 a, 强度超过 0.06~0.1 Sv (1 Sv = 10^6 m^3/s)时, 北大西洋热盐环流将难以维持. 这意味着在 NADW 形成过程中向大气的大量热输送(表层温度、盐度较高的海水在下沉热过程中随温度的降低而释热)将明显减小, 从而导致北大西洋地区首先降温, 并进而通过大气环流和深海洋流的调整影响全球气候环境. 研究表明[56], 全新世早期残存于北美哈德逊湾的劳伦冰盖所形成的 Agassiz 和 Ojibway 阻塞湖, 在大约 8.47 kaBP 时突然排泄, 将大约 2×10^{14} m^3 的淡水通过哈德逊海峡注入到 Labrador 海(该海域是 NADW 形成的三大区域之一), 破坏了这一区域中层海水的形成. 这一突发事件目前被认为是造成 8.4~8.2 kaBP 时期北大西洋地区突然降温的原因, 估计其引起的大气降温幅度大约是 Younger Dryas 时期的 1/3[56]. 北大西洋地区的降温信息会通过大气环流向欧洲等地区传播, 同时可能通过西风急流的加强和南移, 将该地区的降温信息和极区冷空气向北半球中低纬度输送, 从而导致北半球大范围降温. 这一过程可能是北大西洋地区降温事件与包括青藏高原在内的北半球大范围地区降温事件关联的纽带. 因此, 可以认为热盐环流的减弱是“8.2 kaBP 冷事件”发生或加强的一个相对独立的内在因素. 另外, 北大西洋地区淡水注入引起热盐环流的减弱, 还将会使南半球大洋的深海流通增强, 从而可造成两极气候变化的“跷跷板效应”[57]. 这很可能是南极冰芯中没有记录到 8.4~8.0 kaBP 时期明显降温的原因.

8.2 kaBP 左右的低温事件, 会通过海、陆热力对比差异的减小而使季风减弱, 导致大气 CH_4 主要源区之一的热带湿地面积的萎缩, 最终引起 CH_4 排放量的减少. 格陵兰冰芯记录所揭示的大气 CH_4 浓度在“8.2 kaBP 冷事件”时期的降低(见图 2(c))[19], 很可能与这一过程有关. 研究表明, 大洋环流的变化(尤其是南大洋的变化)是大气 CO_2 含量变化的主要因素[58]. 最近的分析发现, 陆地生态系统的净初级生产力变化也可导致大气 CO_2 含量的改变[59], 这一点在大范围森林建立和消亡时期可能比较明显. 因此, 可以认为全新世初期大气 CO_2 含量总的降低趋势(见图 2(d))[20]很可能与北半球高纬度冰盖消退过程中森林的建立与扩张有关. 然而, 大气 CO_2 含量在“8.2 kaBP 冷事件”时期降低到一个最低点, 这可能与该时期北大西洋等地区降温引起 CO_2 在海水中的溶解度增加有关, 也可能与热盐环流减弱引起的海洋生产力变化有关. 这些分析表明, “8.2 kaBP 冷事件”时期大气 CH_4 和 CO_2 含量的波动应属于地球气候系统内部的反馈机制, 并不构成“8.2 kaBP 冷事件”发生的原因, 加之这一时期大气 CH_4 和 CO_2 浓度降低幅度相对较小, 因此它们对于该低温事件的加强程度也较弱. 格陵兰冰芯记录表明[21], 火山活动在“8.2 kaBP 冷事件”之前相对较强, 而在该事件发生的最冷时期较弱(见图 2(e)), 因此火山活动对该事件早期的降温过程可能有一定的加强作用, 但不构成这次强降温事件的主要原因.

前面曾提到, 除“8.2 kaBP 冷事件”之外, 古里雅冰芯还记录到在 9.6~9.2 kaBP 时期存在降温程度相对较小的一次冷事件(见图 1). 这次冷事件在敦德冰芯记录[30]中也有相应的表现, 而在格陵兰冰芯记录中并不明显(见图 2(b)). 北大西洋深海沉积记录表明[3],

在 9.4 kaBP 左右也存在与 8.1 kaBP 左右同样的冰筏事件. 可见, 古里雅冰芯记录的这些气候事件与北大西洋地区的气候事件在发生时间上具有一致性, 这可能预示着在古里雅冰芯记录的全新世气候变化中存在与北大西洋气候变化相一致的千年尺度周期, 同时也说明这些不同地域同期发生的气候环境事件存在某种共同的影响因素. 这些问题有待于进一步研究. 另外, 从图 2(c)和(d)中可以发现, 大气 CH_4 和 CO_2 含量在 9.4 kaBP 冷事件时期也存在小的向下波动. 这些事实表明, 地球气候系统在这一时期也可能出现过一次幅度较小的调整波动. 从图 2(g)可以看出, 这次事件也可能与太阳活动减弱有关.

4 结论

古里雅冰芯记录表明, 在全新世早期存在两次降温事件, 它们分别发生在 9.6~9.2 kaBP 和 8.4~8.0 kaBP 时期, 其中后一次降温事件是极为显著的, 这给出了“8.2 kaBP 冷事件”在环北大西洋地区之外存在的证据. 西风环流是古里雅冰芯记录到的降温事件与北大西洋地区降温事件关联的纽带. 考虑到 ^{14}C 年代和日历年之间的差异, 重新审视了青藏高原和其他地区以前关于冰川变化、湖泊沉积等的研究结果, 发现“8.2 kaBP 冷事件”的发生及其影响具有全球性. 通过对热盐环流状况、太阳活动、大气温室气体含量变化、火山喷发历史等的综合分析, 认为弱的太阳活动或弱的太阳辐射是“8.2 kaBP 冷事件”发生的主要外在因素, 而北美冰湖溃决导致的北大西洋热盐环流减弱[60]是该事件发生或加强的主要内在因素. 9.6~9.2 kaBP 时期的相对寒冷气候也可能与弱的太阳活动有关.

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1998040800)、中国科学院知识创新工程西部项目(批准号: KZCX1-10-02)和国家自然科学基金(批准号: 49801004)资助.

参 考 文 献

1 Dansgarrd W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature, 1993, 364(6434): 218~220
2 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. Science, 1995, 270(5244): 1962~1964
3 Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. Science, 1997, 278(5341): 1257~1266
4 Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. Nature, 1999, 397(6719): 515~517
5 Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200yr ago. Geology, 1997, 25(6): 483~486
6 de Vernal A, Hillaire-Marcel C, von Grafenstein U, et al. Researchers look for links among paleoclimate events. EOS, 1997, 78: 247~249
7 Hughen K A, Overpeck J T, Trumbore S, et al. Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation. Nature, 1996, 380(6569): 51~54
8 deMenocal P, Ortiz J, Guilderson T, et al. Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm period. Science, 2000, 288(5474): 2198~2202
9 Klitgaard-Kristensen D, Sejrup H P, Haflidason H, et al. A regional 8200 cal. yr BP cooling event in northwest Europe, induced by final stages of the Laurentide ice-sheet deglaciation? Journal of Quaternary Science, 1998, 13(2): 165~169
10 von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Muller J, et al. The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. Climate Dynamics, 1998, 14(1): 73~81
11 Hu F S, Slawinski D, Wright Jr H E, et al. Abrupt changes in North American climate during early Holocene times. Nature, 1999, 400(6743): 437~440
12 Korhola A, Weckstrom J, Holmstrom L, et al. A quantitative Holocene climatic record from diatoms in Northern Fennoscandia. Quaternary Research, 2000, 54(2): 284~294
13 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化. 中国科学, B 辑, 1995, 25(10): 1108~1114
14 姚檀栋, 杨志红, 皇翠兰, 等. 近 2 ka 来高分辨率的连续气候环境变化记录——古里雅冰芯近 2 ka 记录初步研究. 科学通报, 1996, 41(12): 1103~1106
15 姚檀栋, L G Thompson, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 447~452
16 Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. Science, 1997, 276(5320): 1821~1825
17 施雅风. 冰冻圈的变化. 见: 施雅风, 李吉均, 李炳元主编. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广州: 广东科技出版社, 1998. 347~363
18 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. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集(下册). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 818~827
19 Chappellaz J, Blunier T, Raynaud D, et al. Synchronous changes in atmospheric CH_4 and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. Nature, 1993, 366(6454): 443~445
20 Indermühle A, Stocker T F, Joos F, et al. Holocene carbon-cycle dynamics based on CO_2 trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. Nature, 1999, 398(6723): 121~126
21 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. Science, 1994, 264(5161): 948~952
22 Stuiver M, Braziunas T F. Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillations. Nature, 1989, 338(6214): 405~408

23 田立德, 姚檀栋, 杨志红. 青藏高原降水中$\delta^{18}O$ 的空间分布特征及其影响因素. 见: 青藏项目专家委员会编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊(1995). 北京: 科学出版社, 1996. 243~250

24 章新平, 施雅风, 姚檀栋. 青藏高原东北部降水中$\delta^{18}O$ 的变化特征. 中国科学, B 辑, 1995, 25(5): 540~547

25 Yao Tandong, Thompson L G, Mosley-Thompson, et al. Climatological significance of $\delta^{18}O$ in north Tibetan ice core. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D23): 29531~29537

26 Yao Tandong, Masson V, Jouzel J, et al. Relationships between $\delta^{18}O$ in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, east Tianshan Mountains, China. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3473~3476

27 Rozanski K, Araguas-Araguas I, Gonfantini R. Isotopic patters in modern global precipitation. In: Swart P K, Lohmann K C, Mckenzie J, et al, eds. Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophysical Monograph 78. American Geophysical Union, 1993. 1~36

28 Cuffey K M, Alley R B, Grootes P M, et al. Calibration of the $\delta^{18}O$ isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperature. Journal of Glaciology, 1994, 40(135): 341~349

29 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 高海拔地区气候变化幅度问题. 科学通报, 2000, 45(1): 98~106

30 姚檀栋, 施雅风, Thompson L G, 等. 祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化. 见: 施雅风主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 206~211

31 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学, B 辑, 1992, (4): 1300~1308

32 李世杰, 焦克勤. 3 万年以来西昆仑山南坡的冰川变化. 冰川冻土, 1990, 12(4): 311~317

33 焦克勤, 姚檀栋, 李世杰. 西昆仑山 32 ka 来的冰川与环境演变. 冰川冻土, 2000, 22(3): 250~256

34 郑本兴, 马秋华. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期探讨. 冰川冻土, 1995, 17(1): 23~32

35 Zhou S Z, Chen F H, Pan B T, et al. Environmental change during the Holocene in western China on a millennial timescale. The Holocene, 1991, 1(2): 151~156

36 Stuiver M, Braziunas T F. Modeling atmospheric ^{14}C influences and ^{14}C ages of marine samples to 10000 BC. Radiocarbon, 1993, 35(1): 137~189

37 张彭熹, 张保珍, 钱桂敏, 等. 青海湖全新世以来古环境参数的研究. 第四纪研究, 1994, 14(3): 225~236

38 孔昭宸, 杜乃秋, 张子斌. 北京地区 10000 年以来的植物群发展和气候变化. 植物学报, 1982, 24(2): 172~181

39 唐领余, 沈才明, 于革, 等. 长江中下游及其以南地区 10000 年来气候变化序列探讨. 见: 施雅风, 张丕远主编. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 108~194

40 Ters M. Variations in Holocene sea level on the French Atlantic coast and their climatic significance. In: Rampino M R, Sanders J E, Newman W S, et al, eds. Climate History, Periodicity, and Predictability. New York: Van Nostrand Reihold, 1987. 204~336

41 Denton G H, Karlen W. Holocene climatic variations: Their pattern and possible cause. Quaternary Research, 1973, 3(2): 155~205

42 Karlen W. Scandinavian glacial and climatic fluctuations during the Holocene. Quaternary Science Reviews, 1988, 7(2): 199~209

43 Dahl S O, Nesje A. Holocene glacier fluctuations at Hardangerjokulen, central-southern Norway: A high resolution composite chronology from lacustrine and terrestrial deposits. The Holocene, 1994, 4(2): 269~277

44 Wenzens G. Fluctuations of outlet and valley glaciers in the Southern Andes (Argentina) during the past 13000 years. Quaternary Research, 1999, 51(2): 238~247

45 Gasse F, van Campo E. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 126(3): 435~456

46 王宁练, 姚檀栋, 邵雪梅. 温室气体与气候: 过去变化对未来的启示. 地球科学进展, 2001, 16(6): 821~828

47 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. 科学通报, 1998, 43(3): 309~312

48 Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G. Nitrate concentration in the Guliya ice core and solar activity. PAGES Newsletter, 2000, 8(2): 11

49 Perry C A, Hsu K J. Geophysical, archaeological, and historical evidence support a solar-output model for climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, 97(23): 12433~12438

50 Broecker W S, Bond G, Klas M, et al. A salt oscillator in the glacial Atlantic? The concept. Paleoceanography, 1990, 5(4): 469~478

51 Street-Perrott F A, Perrott R A. Abrupt climate fluctuations in the tropics: The influence of Atlantic Ocean circulation. Nature, 1990, 343(6259): 607~612

52 Boyle E A. Is ocean thermohaline circulation linked to abrupt stadial/interstadial transitions? Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1-5): 255~272

53 Marotzke J. Abrupt climate change and thermohaline circulation: mechanisms and predictability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, 97(4): 1347~1350

54 Rahmstorf S. Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. Nature, 1995, 378(6553): 145~149

55 Manabe S, Stouffer R J. Study of abrupt climate change by a coupled ocean-atmosphere model. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1-5): 285~299

56 Barber D C, Dyke A, Hillaire-Marcel C, et al. Forcing of the cold event of 8200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. Nature, 1999, 400(6742): 344~348

57 Broecker W S. Paleocean circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw. Paleoceanography, 1998, 13(2): 119~121

58 Siegenthaler U, Wenk Th. Rapid atmospheric CO_2 variations and ocean circulation. Nature, 1984, 308(5960): 624~626

59 Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system. Science, 2000, 290(5490): 291~296

60 Renssen H, Goosse H, Fichefet T, et al. The 8.2 kyr BP event simulated by a global atmosphere-sea-ice-ocean model. Geophysical Research Letters, 2001, 28(8): 1567~1570

(2001-12-03 收稿, 2002-03-08 收修改稿)