

红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化

徐海^{①②} 洪业汤^① 林庆华^① 洪冰^① 姜洪波^① 朱泳焯^①

(^①中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ^②中国科学院研究生院, 北京 100039.

E-mail: xuhai@public.gz.cn)

摘要 红原泥炭氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化, 其总体趋势与金川温度变化及敦德温度变化一致, 与格陵兰冰芯记录的温度变化趋势也相似. 具体的气候事件具有明显的全球一致性. 距今 6 ka 温度变化存在两个明显的“转折点”: 即距今 4 ka 左右气温由低温变为高温, 距今 1.5 ka 左右气温由高温变为低温. 功率谱分析发现红原泥炭氧同位素序列包含 1220~1087, 752, 444, 325, 213, 127~123, 88 和 79 a 这样的周期. 分析表明红原地区气候驱动因子可能主要是太阳活动, 同时海洋活动信号也通过海气耦合传递给季风, 再由季风携带到红原地区.

关键词 泥炭 氧同位素 温度 红原

大量的研究成果表明, 全球气候尤其是北半球气候在很大程度上具有一致性. 如 Bond 等人^[1]研究发现北大西洋沉积柱气候记录与格陵兰冰芯气候记录遥相关; Porter 等人^[2]以中国黄土气候资料证实东亚冬季风与 Heinrich 事件的对应关系; Sirocko 等人^[3]发现了亚热带季风与北大西洋 Heinrich 事件的对应关系等等. 同时大量的研究工作已经证实全新世气候变化具有明显的不稳定性特征^[1,4,5]. 在一定程度上, 可以说气候全球变化的总体轮廓已经初步勾画出来. 然而, 气候变化的性质和原因的不确定性仍然是当前研究的焦点之一.

高分辨率的气候代用资料的获取是研究气候变化驱动机制的基本条件, 它不仅有助于掌握过去全球变化(PAGES)的历史、推断全球变化的性质及其成因; 而且对气候变化及其预测(CLIVAR)有相当重要的意义, 是 PAGES/CLIVAR 研究计划^[6]的重点之一. 中国中全新世以来的高精度气候变化是研究的热点之一^[7~9]. 其意义不仅在于较准确地掌握近几千年气候变化历史, 而且在很大程度上还可以与中国悠久的历史文化相印证.

植物纤维素氧同位素灵敏地记录了植物在合成该纤维素时外界环境水的氧同位素比值^[9-12], 而后者与气候因素特别是温度有着密切的联系^[13,14]. 通过测定植物纤维素氧同位素组成, 就可以反演该纤维素合成时段外界气候环境的变化情况, 从而达到恢复过去气候变化的目的. 泥炭由于具有时间分辨率高、时间跨度长以及对气候变化响应灵敏等优点, 被认为是一种比较理想的提取古气候信息的自然历史

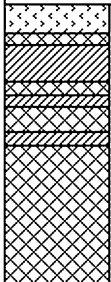
档案^[9,12,15-17]. 本文报道四川红原地区距今 6 ka 泥炭氧同位素温度代用指标序列, 用以反映红原地区中、晚全新世高精度的温度气候变化历史. 研究发现红原气温距今 6 ka 总体趋势与中国其他许多地方一致; 具体气候事件具有明确的全球一致性. 对该区的气候驱动模式做了初步探讨.

1 样品的采集及实验方法

红原位于青藏高原东北边缘, 地形具有由山地向高原过渡的典型特征. 该区属大陆性高原寒温带季风型气候. 春秋短促, 长冬无夏; 冬春季节风大、雪大, 气候干燥严寒, 大地霜冻; 夏秋季气候暖和湿润, 多雨多雹. 年平均气温 1.1℃, 1 月均温 -10.3℃, 7 月均温 10.9℃. 昼夜温差大, 雨量充足, 雨热同期. 日照时间长, 太阳辐射强^[18]. 采样点位于红原县城以西(32°46'N, 102°30'E), 海拔 3466 m.

在日本国立环境研究所的加速器质谱仪上完成 ¹⁴C 定年^[19]. 采用 ¹⁴C 校正程序 Calib 4.3^[20]进行年代校正, 并采用 Intcal 98^[21]校正程序作校正结果比较(图 1). 本文采用的年龄为 Calib 4.3 校正结果.

采用碱-亚氯酸钠法^[22]从泥炭中提取 α -纤维素, 用改进的有机氧同位素分析方法^[23,24]测定纤维素氧同位素组成. 实验过程中插入标准样品和平行样品以保证实验数据的准确性与精确性. 实验工作均在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成. 氧同位素采用 SMOW 标准, 实验误差控制在 0.2‰ 以内. 实验结果见图 2.

地层	样品编号	深度 /cm	$\delta^{13}\text{C}$ /‰ (PDB)	AMS ¹⁴ C/aBP(1 σ)	校正结果/aBP(1 σ)	
					Calib 4.3	Intcal 98
	• HY38	38	-27.37	1291 ± 61	1243	1200
	• HY64	64	-26.87	1790 ± 76	1710	1711
	• HY78	78	-27.25	2088 ± 42	2043	2056
	• HY105	105	-27.59	3642 ± 44	3945	3971
	• HY130	130	-27.35	4148 ± 44	4690	4688
	• HY160	160	-27.47	5304 ± 48	6091	6078
	• HY220	220	-28.06	6430 ± 42	7367	7353

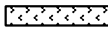


 现代草根层
  黄褐色泥炭
  褐黑色泥炭

图1 红原泥炭剖面定年结果

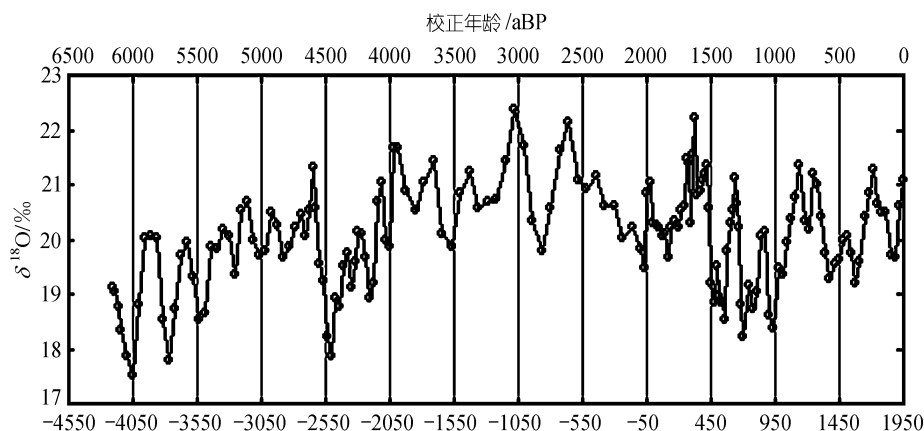


图2 红原泥炭纤维素氧同位素测定结果

横坐标负值表示公元前年代, 正值代表公元年代(图3同)

2 红原泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 序列指示的温度变化

为方便比较, 将红原泥炭氧同位素距平($\Delta\delta^{18}\text{O}$)时间序列以阴影图表示(图3)。同时还收集了金川泥炭^[9]、敦德冰芯^[25]、格陵兰冰芯^[26]氧同位素数据, 均以距平形式作图(图3)。从图3中可知, 红原地区温度变化在距今6 ka中可以划分为3个阶段: 6~4 ka为低温阶段; 4~1.5 ka为高温期; 1.5~0 ka为相对低温阶段。距今4和1.5 ka为两个明显的温度转折点。这两个转折点在红原、金川、敦德均表现明显, 表明中国距今6 ka温度变化存在这样两个转折时期。格陵兰冰芯记录也存在距今1.5 ka左右这样一个显著的温度变化转折。

2.1 6~4 kaBP间以低温为主, 气温波动在低温水平进行

该低温阶段与金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的温度变化一

致^[9,12], 同时祁连山敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的温度变化在该期也属于低温期^[25](图3)。该期间长江、黄河流域古文明遗址个数记录也明显地少于前后时期, 进一步证实该期气温比较寒冷^[25]。这样的寒冷气候在北美洲及欧洲^[27]、热带太平洋、澳大利亚、南美洲等许多地区^[28]中全新世气候变化中也有记录, 对应于中全新世寒冷气候^[27,28]。

距今6 ka左右记录到一次比较显著的降温。敦德冰芯在距今5.9 ka为一个显著降温, 与之对应。格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 指示距今6.03 ka为与之对应的低温期^[26]。西藏松西湖^[29]沉积物有机质 $\delta^{18}\text{O}$ 在距今6 ka左右有一次显著下降; 贵州七星洞石笋^[30] $\delta^{18}\text{O}$ 在距今6 ka左右也记录到一次显著的下降。另外, 北大西洋浮冰碎屑记录^[1]以及阿拉伯海沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ ^[4]在距今6 ka前后均记录到相应的降温事件。

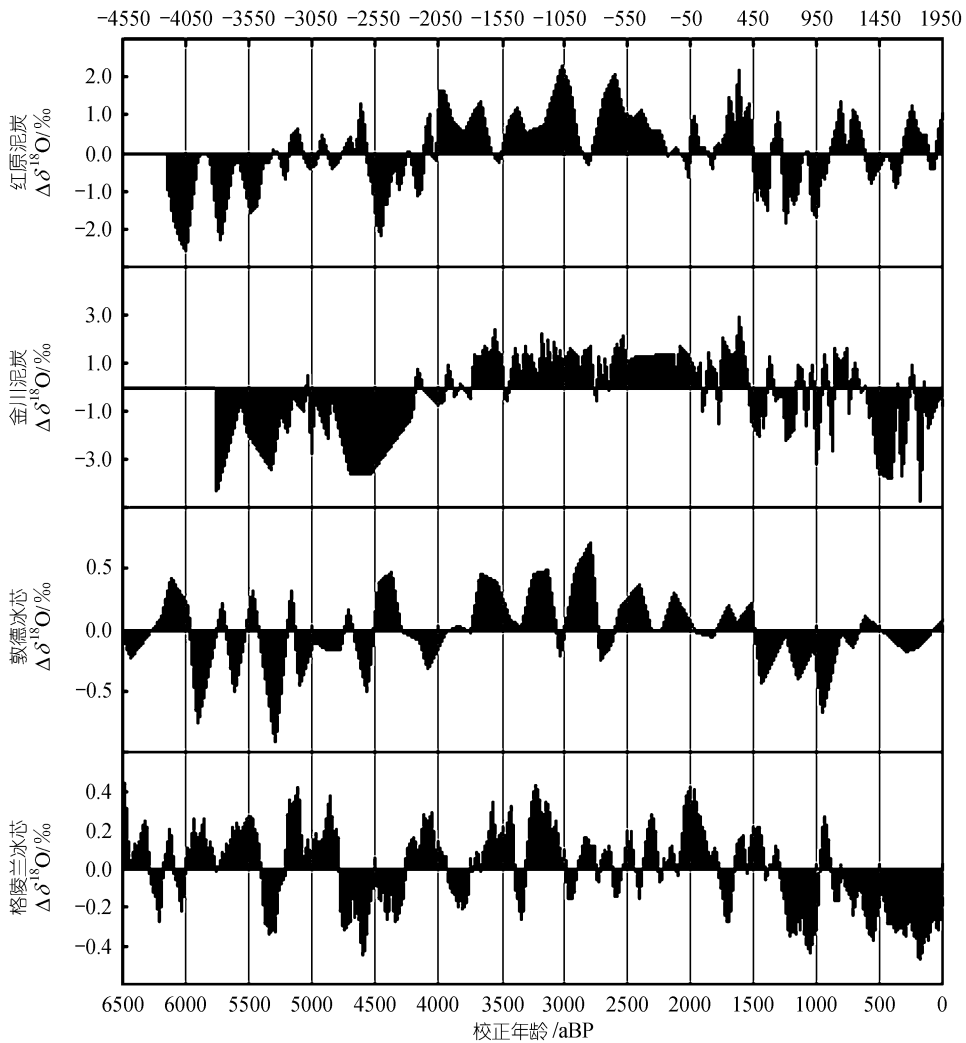


图 3 红原 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与其他地区 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对比

5.7~5.45 kaBP 记录到两次大的降温事件, 该事件大致对应于全球第 2 新冰期^[27]. 这些降温事件在金川泥炭氧同位素^[9,12]以及敦德冰芯氧同位素记录^[25]中都有体现.

4.6~4.2 kaBP 为一次非常显著的寒冷事件, 该次降温幅度大而且历时较长. 红原泥炭纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 上升幅度很大($\delta^{13}\text{C}$ 上升对应气候转向干冷), 几乎与新仙女木期(Y D)记录到的 $\delta^{13}\text{C}$ 上升幅度近似, 表明该期气候异常干冷(待发表数据). 金川泥炭^[9,12] $\delta^{18}\text{O}$ 在 4.7~4.3 kaBP 记录到一次类似事件. 河北太师庄泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及孢粉记录^[31]表明 4.8~4.2 kaBP 气候干冷. 松西湖^[29]沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 在距今 4.3 ka 左右记录了一次较大的下降. 格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[26]表明

4.7~4.3 kaBP 间存在一次幅度大而且历时长降温事件. 欧洲阿尔卑斯地区^[32]在 4.8~4.5 kaBP 期间存在一次很明显的降温. 该期间撒哈拉淡水湖全部干涸, 撒哈拉文明结束; 寒冷干燥的气候导致美索布达米亚北部定居点被遗弃, 南部 Akkadian 帝国崩溃; 印度河流域及埃及古文明也几乎在同一时期发生崩溃^[33,34].

2.2 4~1.5 kaBP 为高温期, 存在几次较大的降温波动

该期 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的温度距平主要在零距平线以上波动, 气温相对较高. 金川^[9,12]泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与之相似, 该期 $\delta^{18}\text{O}$ 温度几乎全在零距平线以上波动. 敦德冰芯^[25]中也有类似记录. 考古研究表明该

期中国文明十分活跃^[31]; 两河流域(长江、黄河)古文明发展迅速^[25]; 中国在该期完成了从新石器时代向青铜器时代的过渡^[9,12]; 商代(1.6~1 kaBC)都城殷墟出土的大量甲骨文记录, 表明当时气候较现今高温干燥^[9,12,35]. 同时, 植物学证据也表明该期属于温暖气候期. 如金川泥炭孢粉记录表明该期间乔木花粉总量明显增多, 而与之相反的水生植物花粉却急剧减少, 表明该期气候趋向暖干^[36].

4~1.5 kaBP 虽然以高温气候为主, 但也存在几次明显而且是全球性的降温记录. 3.6~3.5 kaBP 间记录到一次明显降温, 该降温事件在金川^[9,12]泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中也有较大表现. 敦德冰芯^[25] $\delta^{18}\text{O}$ 以及格陵兰冰芯^[26] $\delta^{18}\text{O}$ 均在距今 3.4 ka 左右记录到该次降温. 北美洞穴方解石碳氧同位素记录^[37]表明在距今 3.6 ka 气温下降了大约 4℃.

2.9~2.7 kaBP 之间存在一次大幅度的降温. 该次降温在金川^[9,12]泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中也有表现, 但其降温强度却比红原记录到的降温强度小. 敦德^[25]冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 2.8~2.7 kaBP 期间也有很大的下降幅度. 从中国历史文献总结出来的气候变化情况也表明 850~800 aBC 间(2.8~2.75 kaBP)气候异常干冷^[38]. 上述降温事件不仅在中国有较充分的表现, 在世界许多地方诸如欧洲、北美、南美、新西兰、日本、加勒比海以及热带非洲等许多地方都有该降温事件的证据^[39].

270~420 aAD (1680~1530 aBP)之间有一段相对高温时期, 该记录与金川^[9,12]泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及敦德^[25]冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录都相似. 以前的研究多数将 50 aBC~450 aAD (2~1.5 kaBP)段笼统地视为低温段, 然而综观距今 6 ka 中国气温变化趋势, 270~420 aAD (1680~1530 aBP)之间的温暖气候并不比历史上其他高温期逊色, 却似乎没有引起足够的重视. 对该期气候需要进一步确认.

2.3 1500~0 aBP 气温相对较低

450 aAD 至今气温在零距平线上下波动, 但总体来说低温的年份比较多. 金川泥炭、敦德冰芯以及格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录均表明该期气温较以前偏低.

竺可桢^[7]首次提出了隋唐温暖期(约 600~900 aAD)概念, 并指出 600~1000 aAD 期间为相对温暖的时期. 但红原记录到的 450~950 aAD 间气温却很低, 存在 500, 700 和 900 aAD 3 次寒冷事件. 这 3 次寒冷事件在金川泥炭、敦德冰芯氧同位素记录中都得到了充分的体现. 古里雅冰芯^[40]10 年尺度的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中,

也看不出明显的隋唐温暖期. 这些结论可能表明所谓的“隋唐温暖期”气候在中国一些地区并不存在.

1100~1300 aAD 间红原 $\delta^{18}\text{O}$ 升高, 表明该期为一个温暖期, 金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 研究结果也证实该期温暖气候的存在. 这种温暖气候正好对应于中世纪温暖期^[41]. 关于中世纪温暖期气候在中国的存在问题目前尚存在较多的质疑^[7,25,40,42,43].

综观全球研究结果, 中世纪温暖期气候存在并且是全球化的. Huang 等人^[44]研究了全球各大洲 6144 个地方距今 20 ka 地表温度变化, 充分肯定了中世纪温暖气候的全球性. 我们认为中世纪温暖气候在中国是存在的, 不过不同地区由于地区差异可能表现不一致, 而且不同的气候代用指标对气候变化响应的灵敏性也不一致. 最近, Broecker^[45]强调中世纪温暖期是一个全球性气候事件, 它在全球不同地区的表现差异与不同温度代用指标对温度变化响应的灵敏性有关.

1370~1400, 1550~1610 和 1780~1880 aAD 为 3 次寒冷事件, 该寒冷事件与传统的“小冰期”^[46,47]气候对应.

3 红原温度变化的驱动因素初探

上述分析表明, 红原泥炭氧同位素中记录的气温信号不仅与中国大量的研究资料相一致, 而且在许多较大的气候事件上与世界许多研究结果一致, 这表明红原气候变化具有全球性.

对红原泥炭氧同位素序列作功率谱分析, 所得结果如图 4. 使用的功率谱分析软件为 REDFIT35^[48], 该软件专门为非等间距时间序列(unevenly spaced time series)功率谱分析设计. 分析过程中使用了如下参数: $n_{50} = 4$ (WOSA segment: Welch-Overlap-Segment-Averaging procedure); $iWin = 2$ (取样窗函数: Welch spectrum window), 其余参数均使用软件默认参数(各参数及其具体意义见 Schulz 文^[48]).

79, 88, 110 和 123~127 a 这样的周期在许多研究中均有所表现, 是对太阳活动周期的响应^[9,12]. 213 a 周期置信水平较低, 但该处却是一个很明显的峰型. 这一周期在红原泥炭总有机碳序列中表现显著^[49]; 金川^[12]泥炭氧同位素序列中记录到一个 207 a 的显著周期, 与之对应. 根据太阳活动基本调和函数($T = 11 \times 2^n$)周期定义, 325 和 752 a 这两个周期可能分别对应于太阳活动第 5, 6 级周期(352 和 704 a). 444 a 周期目前尚不足以给出合理解释, 但红原泥炭总有机碳

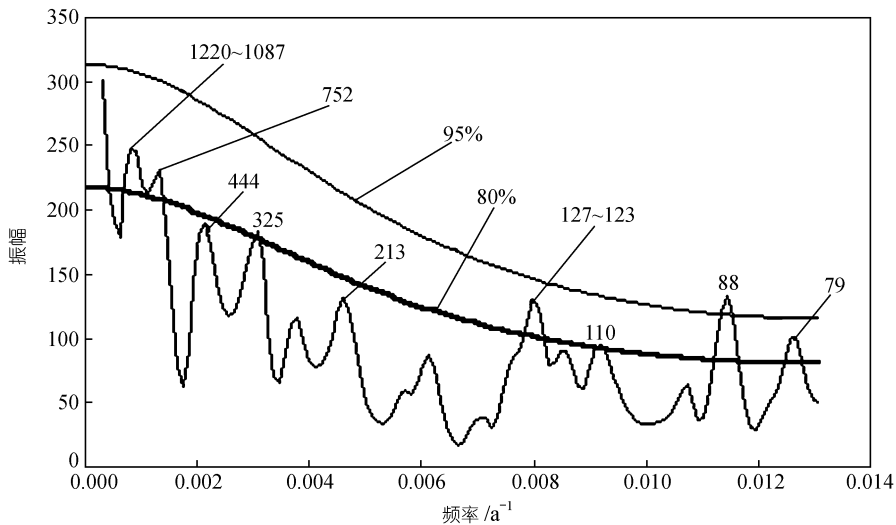


图 4 红原泥炭氧同位素序列功率谱分析结果
标注 95% 和 80% 的平滑曲线分别代表 95% 和 80% 置信水平

序列中包含一个 427 a 的周期^[49], 二者可能对应. 1220~1087 a 这样的周期属于全新世千年尺度周期的体现^[1~5].

上述周期中以 79, 88 和 123~127 a 这几个周期最显著, 这可能说明影响红原地区温度变化的主要驱动因素是太阳活动. 红原地区气候变化的驱动因素十分复杂, 太阳活动变化可能是驱动该区温度变化的主要因素, 但其他因素如季风活动、红原地区特殊的地理位置对气候的影响也不容忽视. 红原地区受东南季风和西南季风(尤其是西南季风)控制. 海洋活动信号可以通过海气耦合传递到季风中, 再由季风将这些信号记录到红原地区. 研究发现南中国海海面盐度序列包含 775 a 的周期^[50]; 阿拉伯海沉积记录^[3]稀土元素(REE)丰度序列包含 1020~1150 a 周期, Ca 含量序列包含 1150 a 周期, *Globigerina* 微粒含量序列包含 1120 a 周期, 这种典型的海洋活动准千年周期在许多工作中均有体现^[51,52]. 红原温度序列中包含的 752 和 1087~1220 a 这样的周期可能分别来源于由东南季风携带的南中国海海洋信号和由西南季风携带的阿拉伯海海洋信号. 这两者对红原地区气候的影响各占多大权重? 目前的研究水平尚不足以作出结论.

致谢 本工作受国家自然科学基金重点基金(编号: 49733130)和中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室前沿领域项目资助.

参 考 文 献

- Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates. *Science*, 1997, 278: 1257~1266
- Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305~308
- Sirocko F, Garbe-Schonberg D, McIntyre A. Teleconnections between the subtropical monsoon and high-latitude climates during the last deglaciation. *Science*, 1996, 272: 526~529
- Sirocko F, Sarnthein P, Erlenkeuser H. Century-scale events in monsoonal climate over the past 24000 years. *Nature*, 1993, 364: 322~324
- 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: 1962~1964
- International CLIVAR Project Office, 2001: Report from PAGES/CLIVAR Workshop on "Climate of the last millennium", February. International CLIVAR Project Office, CLIVAR Publication Series No 41 (Unpublished manuscript)
- 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, (2): 168~189
- 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. *中国科学, B 辑*, 1992, (10): 1089~1093
- 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5000 a 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(6): 520~524
- Epstein S, Thompson P, Yapp J C. Oxygen and hydrogen isotopic ratios in plant cellulose. *Science*, 1977, 198: 1209~1215
- Burk R L, Stuiver M. Oxygen isotope ratios in trees reflects mean annual temperature and humidity. *Science*, 1981, 211: 1417~1419
- Hong Y T, Jiang H B, Liu T S, et al. Response of climate to solar

- forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. *The Holocene*, 2000, 10(1): 1~7
- 13 Kazimierz R, Lius A A, Roberto G. Relationship between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 1992, 258: 981~985
- 14 Siegenthaler U, Oeschger H. Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. *Nature*, 1980, 285: 314~317
- 15 Brenninkmeijer C A M, Van Geel B, Mook W G. Variations in the D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in cellulose extracted from a peat bog core. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 61: 283~290
- 16 Sukumar R, Ramesh R, Pant R K, et al. A $\delta^{13}\text{C}$ record of late Quaternary Climate change from tropical peats in southern India. *Nature*, 1993, 364: 703~705
- 17 White J W C, Clais P, Figge R A, et al. A high-resolution record of atmospheric CO_2 content from carbon isotopes in peat. *Nature*, 1994, 367: 153~156
- 18 中华人民共和国民政部, 中华人民共和国建设部编. 中国县情大全·西南卷. 北京: 中国社会科学出版社, 1993. 508~509
- 19 Kume H, Yasuyuki S, Atsushi T, et al. The AMS facility at the National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1997, 123: 31~33
- 20 Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, 1993, 35: 215~230
- 21 Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1041~1083
- 22 Yapp C J, Epstein S. A reexamination of cellulose carbon-bound hydrogen δD measurements and some factors affecting plant-water D/H relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 955~965
- 23 Edwards T W D, Buhay W M, Elgood R J, et al. An improved nickel-tube pyrolysis method for oxygen isotope analysis of organic matter and water. *Chemical Geology (isotope Geoscience section)*, 1994, 114: 179~183
- 24 陶发祥, 姜洪波, 洪业汤, 等. 改进的有机碳同位素分析方法. *科学通报*, 1996, 41(11): 1017~1020
- 25 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, (12): 1300~1307
- 26 Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research*, 1995, 44: 341~354
- 27 Denton G H, Karlén W. Holocene climatic variations—their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, 1973, 3: 155~205
- 28 Steig E J. PALEOCLIMATE: Mid-Holocene Climate Change. *Science*, 1999, 286: 1485~1487
- 29 Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000-year climate record from western Tibet. *Nature*, 1991, 353: 742~745
- 30 蔡演军, 彭子成, 安芷生, 等. 贵州七星洞全新世石笋的氧同位素记录及其指示的季风气候变化. *科学通报*, 2001, 46(16): 1398~1402
- 31 靳桂云, 刘东生. 华北北部中全新世降温气候事件与古文化变迁. *科学通报*, 2001, 46(20): 1725~1730
- 32 Baroni C, Orom Belli G. The Alpine “Iceman” and Holocene climate change. *Quaternary Research*, 1996, 46(1): 78~83
- 33 Weiss H, Courty M A, Wetterstrom W, et al. The genesis and collapse of third-millennium north Mesopotamian civilization. *Science*, 1993, 261: 955
- 34 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移. *中国科学, D辑*, 1998, 28(4): 367~384
- 35 胡厚宣. 气候变化与殷代之气候探讨. 民国丛书·甲骨学. 上海: 上海书店, 1990. 1~64
- 36 孙湘君, 袁绍敏. 据花粉资料推断吉林金川地区近 1 万年的植被演化. 见: 刘东生主编. 黄土·第四纪地质·全球变化. 北京: 科学出版社, 1990. 46~57
- 37 Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, et al. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from Cold Water Cave, northeast Iowa. *Science*, 1992, 258: 1626~1630
- 38 侯甬坚, 祝一志. 历史记录提取的近 5~2.7 ka 黄河中下游平原重要气候事件及其环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(4): 23~29
- 39 Van Geel B, Buurman J, Waterbolk H T. Archaeological and palaeoecological indications of an abrupt climate change in the Netherlands, and evidence for climatological teleconnections around 2650BP. *Journal of Quaternary Science*, 1996, 11(6): 451~460
- 40 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2000 a 古里雅冰芯 10 a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. *中国科学, D辑*, 1999, 29(增刊 1): 79~86
- 41 Lamb H H. *Climate: Present, Past and Future*, vol 2, London: Methuen, 1977. 435~461
- 42 满志敏. 关于唐代气候冷暖问题的讨论. *第四纪研究*, 1998, 25(1): 20~30
- 43 Zhang De'er. Evidence for the existence of the medieval warm period in China. *Climatic Change*, 1994, 26(2-3): 287~297
- 44 Huang S, Pollack H N. Late Quaternary temperature changes seen in world-wide continental heat flow measurements. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 1947~1950
- 45 Broecker W S. Was the medieval warm period global. *Science*, 2001, 291: 1497~1499
- 46 Lamb H H. *The Changing Climate*. London: Methuen, 1966
- 47 Bradley R S, Jones P. The little ice age. *The Holocene*, 1992, 3: 367~376
- 48 Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers and Geoscience*, 2002, 28(3): 421~426
- 49 周卫建, 卢雪峰, 武振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年. *科学通报*, 2001, 46(12): 1040~1044
- 50 Wang L J, Sarinthein M, Erlenkeuser H, et al. Holocene variations in Asian monsoon moisture: A bidecadal sediment record from the South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(18): 2889~2892
- 51 Chapman M R, Shackleton N J. Evidence of 550-year and 1000-year cyclicities in North Atlantic circulation patterns during the Holocene. *The Holocene*, 2000, 10(3): 287~291
- 52 Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in north Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 1999, 397: 515~517

(2002-02-15 收稿, 2002-05-15 收修改稿)