

青藏高原过去 2 000 年来气候环境变化研究

姚檀栋 徐柏青

(中国科学院青藏高原研究所 北京 100085)

〔摘要〕 以现代过程研究为先导,以冰芯记录为手段,进行气候环境信息的挖掘,将影响环境的自然与人为因素进行整体研究,对环境长期演变过程中的重大自然事件和人为事件,特别是灾害事件进行剖析,从而揭示青藏高原过去 2 000 年来气候环境的变化特征与机理;阐明极低温环境下的微生物演化特征;揭示历史时期青藏高原大气温室气体含量变化的原因及其与气候变化之间的关系,并评价人类活动对环境的影响。

〔关键词〕 青藏高原 冰芯记录 气候环境变化

〔中图分类号〕 P412.4 P467

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)01-0014-04

STUDY ON THE CLIMATIC AND ENVIRONMENTAL CHANGE OVER THE LAST 2 000 YEARS IN THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

YAO Tan-dong XU Bai-qing

(Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Based on the modern process research, abundance of climate and environment information were collected, the influence factors from nature and human activities synthesized, and momentous climatic and environmental events, especially calamity climate events by the means of high resolution ice core analysis anatomized. In this paper, the character and mechanism of climatic and environmental evolution, microbe evolvement under the ultra-low temperature, the cause of atmospheric greenhouse concentration variations and its relation with climate change, and the estimate of the effect on environment by human activities are being discussed on the evidences from ice cores recovered in Qinghai-Tibet plateau.

Key Words: Tibetan Plateau, ice core record, climate and environment changes

CLC Numbers: P412.4 P467

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)01-0014-04

过去 2 000 年是全球气候变化研究的一个关键时段,因为这一时期是自然记录和文献记录共存的时期。过去 2 000 年来,气候环境变化主要受全球自然变化大背景的驱动,但人为活动的影响也不可忽视。随着工业革命的进一步发展,人类活动对环境的影响正在逐步加深。高分辨率气候环境变化记录是这一研究的核心趋向,冰芯研究无疑是十分重要的手段。

1 青藏高原冰芯记录的现代过程研究

降水中稳定同位素研究不仅是解释冰芯中稳定同位素记录的基础工作,而且也是研究水汽输送过程的一种有效手段。在青藏高原不同站点开展的连续降水中稳定同位素的系统研究,不仅为青藏高原不同地点冰芯中稳定同位素记录的解释提供了理论基础,而且对于青藏高原不同地区的水汽输送过程,尤其是西南季风的水汽输送过程和空间范围研究提供了有效的手段。目前已在青藏高原不同气候区的 10 多个站点开展了长期的系统的降水中稳定同位素监测工作,个别站点的观测时间已持续 10 年以上。

通过对青藏高原及其周边地区降水中稳定同位素的系统监测,发现青藏高原降水中稳定同位素组成与水汽来源的关系密切。在青藏高原南部的季风降水区,降水中稳定同位素比值($\delta^{18}\text{O}$)较低,而且由于水汽来源于湿润的洋面,降水及河水中过量氘的值也明显低于北部地区^[1-4]。研究还发现西南季风向北输送的最北界线是唐古拉山沿线一带,此带以北地区水汽来源以大陆性气团的水汽为主^[5];从时间变化上看,季风的活跃与间断又决定了高原降水中稳定同位素的季节变化。

已建立的青藏高原北部地区降水中稳定同位素比值与气温变化的定量关系,为该地区冰芯中稳定同位素记录的气候意义解释提供了科学依据。从青藏高原连续多年降水中稳定同位素的气候意义研究中发现,青藏高原北部地区降水中稳定同位素组成的变化受“温度效应”控制,气温每变化 1℃,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 大约变化 0.65‰^[4-6](图 1a)。降水中稳定同位素比值与气温变化的正相关关系也可以从当地冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与气象站气候变化的相关关系中得到验证。而在青藏高原南部地区,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受西南季风降水的影

收稿日期: 2004-11-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40121101、90102005),中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-339)联合资助。

作者简介: 姚檀栋,男,1954~,北京海淀区双清路 18 号中科院青藏高原研究所所长,研究员,主要从事青藏高原冰芯与气候环境研究;

E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn。

响,其波动与季风活动的强弱有关:当季风活动强盛时,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 为低值;而季风减弱时,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 升高。这种变化过程控制了青藏高原南部降水中稳定同位素比值的时空变化,而且在相关冰芯稳定同位素记录中也表现出与降水量的反相关关系^[9](图 1b)。但从更长时间尺度上看,即使是在青藏高原南部, $\delta^{18}\text{O}$ 仍然是温度指标。

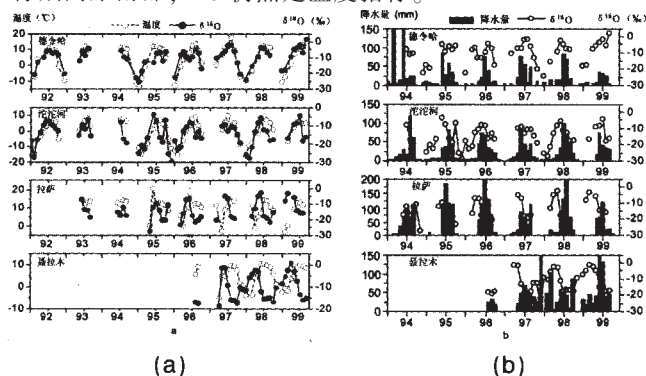


图 1 (a)青藏高原 4 个台站降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值及气温的季节性变化特征;(b) 青藏高原 4 个气象台站多年月平均降水量及 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化特征

2 青藏高原冰芯过去 2 000 年来的气候记录

过去 2 000 年来气候变化的重要特征是温度在波动中逐渐升高、降水在波动中逐渐增多。研究特别指出了小冰期以来青藏高原发生过 3 次冷期和 3 次暖期,但这 3 次冷暖变化出现的时间和变化幅度在不同地区是不同的,位相和变幅差异十分明显。如 3 个冷期中的最冷期,在祁连山敦德冰芯中出现于 17 世纪,而在西昆仑山古里雅冰芯出现于 19 世纪^[7-11]。这些结论不但在国内外得到广泛重视和引用,而且也逐渐被其后的研究所证实。

青藏高原古里雅冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录为青藏高原过去近 2 000 年的气候冷暖变化提供了一幅详细的图式(图 2):气温曾出现过 8 次相对暖的时期和 7 次冷的时期,最冷期是在公元 11~12 世纪。与之相应,降水曾出现过 5 次相对高降水时期和 4 次相对低降水时期,其波动次数小于温度^[7,8]。从公元 500 年至现在,温度和降水均呈波动的增高趋势,但二者的变化又各具不同的特征:温度低频变化的频率大于降水低频变化的频率,并且降水的增减变化滞后于温度的升降变化,滞后时间约为 50~100 年。这种滞后现象出现的物理背景可能是海洋比热大,对温度的上升和下降都有一个滞后反应过程^[7,8]。通过分析青藏高原古里雅冰芯中所记录

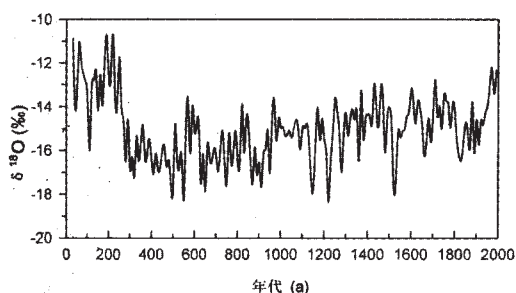


图 2 青藏高原古里雅冰芯过去 2 000 年来 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映的温度变化

的气候信息与 ENSO 事件的关系,指出在 El Nino 年古里雅冰芯所记录的降水量偏少。进一步的研究认为,印度季风是青藏高原冰芯中净积累量与 ENSO 事件关联的纽带^[12]。从古里雅冰芯记录与中国东部文献记录的对比,发现近 2 000 年以来许多重大气候事件是同时以至同年代出现的,反映出中低纬度带相距很远的不同区域间气候变化的共同特征,但也存在显著的差别,主要表现为“中世纪暖期”在东部有相当的表现,而西部则不显著。公元 1200 年以来,东部呈降温趋势,而西部呈升温之势^[13]。

对希夏邦马峰达索普冰芯研究表明,由该地区冰芯恢复的积累量能准确地反映印度季风变化的强弱。对过去 400 年来冰芯积累量序列的分析显示,积累量存在明显的阶段性变化特征:在百年尺度上有 4 次突变,其中,1750 年和 19 世纪初发生了两次由低向高的突变。近百年来,10 年尺度的突变也有 4 次:1920 年和 1950 年存在两次由高到低的突变,1940 年和 1970 年则发生了由低向高的突变。这些突变的发生与青藏高原和印度洋海面温度差距平发生时间相一致,这说明陆地-海洋热力对比突然加大或减小是印度季风降水发生突变的直接原因。分析该冰芯积累量记录后认为,当地夏季季风降水变化与印度北部季风降水趋势相吻合;其长期变化与北半球温度变化呈显著反相关,平均而言,温度每上升 0.1K,积累量减少 90mm(图 3)^[14-17]。

青藏高原数支冰芯记录揭示了 20 世纪青藏高原大范围的普遍增温趋势,并且增温幅度在高海拔区有被放大的迹象^[18]。高分辨率达索普冰芯记录表明,该区对西南季风的强弱波动尤为敏感。季风强度减弱与冰芯中较低的积累率、高的尘埃通量及高的离子浓度相对应。达索普冰芯记录的是公元 1789~1795 年的干旱事件,与发生在该区近千年历史上此次最为干旱的事件具有同等程度,甚至更为强烈^[19]。20 世纪以来印度和尼泊尔人类活动的加剧,使得达索普冰芯中离子浓度加倍,尘埃通量增长了 3 倍^[19]。

3 青藏高原冰芯过去 2 000 年来大气甲烷记录

冰芯包裹气体中的 CH_4 不仅能反映过去大气 CH_4 含量随时间的变化,而且能很好地揭示陆地 CH_4 随时间向大气中的释放和空间分布。研究认为,过去大气 CH_4 含量的自然波动主要是由于 CH_4 源强度的变化引起,特别是热带地区湿地面积的变化所致。最近 1 000 年来中低纬度对大气 CH_4 的贡献显得尤为明显,人类活动的加剧可能是其原因之一。大气甲烷研究依赖于几点关键的假设,其中之一就是假设 30°S~90°S 的 CH_4 源强度保持稳定不变,这一点已被南极和格陵兰冰芯 CH_4 记录定量对比研究所初步证实。因缺乏来自

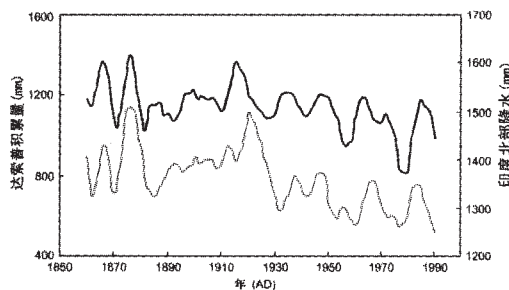


图 3 达索普冰芯积累量与同期印度北部降水量比较

自低纬度冰芯 CH_4 记录的直接证据,这一假设及相关结论在很大程度上受到质疑。因此,从中低纬度高海拔山地冰芯中进行 CH_4 提取分析在当前显得极为迫切。由于达索普冰芯钻取的海拔极高(7 200m a.s.l.)、冰温较低及夏季融化微弱,从而保证了原始大气 CH_4 含量在冰内长期保存而不被改变,这为恢复中低纬度大气

CH₄ 含量的记录提供了契机。

达索普冰芯记录揭示了中低纬度大气 CH₄ 含量与极地冰芯记录相同的变化趋势,并明确显示工业革命以来大气中 CH₄ 含量的增长。高分辨率达索普冰芯记录的工业革命以来大气 CH₄ 含量变化最显著的特征,是上个世纪两次世界大战期间人类活动 CH₄ 排放的减缓使大气 CH₄ 含量呈负增长。中低纬度大气 CH₄ 含量的恢复使我们有机会与极地冰芯记录进行定量对比研究。公元 0~1850 年中低纬度大气中的 CH₄ 的平均含量为 782ppb,与格陵兰及南极大气中的 CH₄ 平均含量差分别达 66ppb 和 107ppb,并且其最大自然波动幅度超过 220ppb,这是极地冰芯记录从未有过的。达索普冰芯记录表明工业革命前中低纬度为全球大气主要的 CH₄ 源区^[20-21]。

达索普冰芯记录的工业革命前 1500~1600 年间及中世纪暖期较高的大气 CH₄ 含量可能与季风加强及其所引起的大量 CH₄ 排放有关。随着季风的减退,在小冰期期间曾出现极低的大气 CH₄ 含量(最低含量为 658ppb),甚至比同时代南极大气中的 CH₄ 含量记录还要低^[21]。

在达索普冰芯过去 2000 年记录中,最近一次大气 CH₄ 含量低值出现在公元 1790 年左右,而自从公元 1850 年大气 CH₄ 含量呈现快速上升趋势。尽管一些极地冰芯记录显示人类活动导致大气 CH₄ 含量的快速增长的起始时间更早(公元 1750 年左右),但在达索普冰芯记录中没有发现这种迹象。Rasmussen 和 Khalil 通过对极地冰芯记录的研究认为,人类活动引起大气 CH₄ 含量的快速增长起始于 150 年前,这和我们的记录是相一致的。同时发现,150 年前达索普冰芯记录的 CH₄ 含量只有现在的 45%,这表明 150 年前人类活动并未对大气 CH₄ 产生重要的影响(图 4)^[20,22]。

4 青藏高原冰芯人类活动污染记录

痕量重金属是冰芯环境记录研究的一个重要方面,通过冰芯记录的恢复能够直观地反映人类活动的排放历史,并且通过相关同位素组成的研究能够判别其来源的变化。达索普冰芯上部 40m 约 50 年来痕量 Pb 的测试结果表明,冰芯自下而上 Pb 的浓度呈明显的增长趋势。这种增长可以大致划分为 4 个阶段:在 40~35m 之间,Pb 的平均浓度为 37ppt;从 34~22m,Pb 的浓度明显增大,平均浓度达 87ppt;而从 21~3m,Pb 的平均浓度增长了约 4 倍,为 162ppt;冰芯最上部 2m,Pb 的浓度急剧增大,达到 564ppt。达索普冰芯中 Pb 的含量在上世纪 50 年代,具有很低的浓度,甚至低于同时代格陵兰冰中 Pb 的浓度,可以认为该值接近希夏邦马

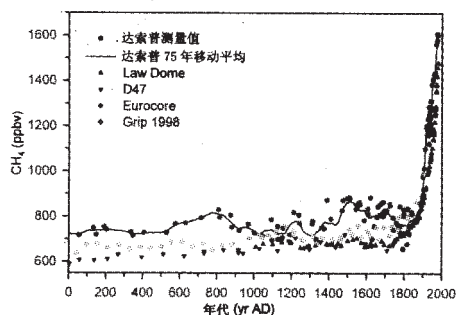


图 4 过去 2000 年来达索普、格陵兰及南极冰芯中 CH₄ 含量对比

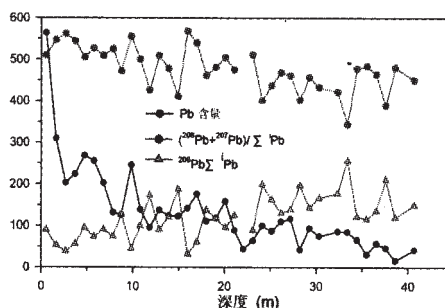


图 5 达索普冰芯中 Pb 含量及相关稳定同位素组成的变化

地区的自然本底,而后期的增长在很大程度上是由于人类工业活动加剧造成,这种增长自 70 年代至今变得非常显著(图 5)^[23]。相关同位素组成研究表明,自上世纪 70 年代以来随着 Pb 含量的增长,同时 Pb 同位素组成亦向富 U 铅、贫 Th 铅演化。这种 Pb 同位素组成的演化明确地指示出 Pb 来源的变化^[24]。根据相关资料分析,认为上世纪 70 年代以来印度次大陆工业活动的加剧是引起喜马拉雅地区大气 Pb 浓度增长的主要原因。

雪冰中微量有机物的提取分析具有气候和环境双重意义。从达索普冰川海拔 7200m 雪样品中共检测出分别源于自然生物和石油残余物的 100 多种有机化合物^[25,26]。检出的源于亚热带高等植物和海洋低等生物的化合物有 C₁₅~C₃₃ 正构烷烃、C₆~C₁₈ 的一元正脂肪酸、C₂₄~C₃₁ 的正脂肪族-2-酮及酯,但未能发现在对流层下部存在的稳定性较差的化合物,显示出对流层上部和下部有机组成的不同。源于石油残余物的有姥鲛烷、植烷、C₁₉~C₂₉ 长链三环萜、C₂₄ 四环萜、C₂₇~C₃₅ 的 αβ 型藿烷、C₂₇~C₂₉ 甾烷以及叠加于生物源上的正构烷烃,这说明偏远的希夏邦马地区对流层上部已受到来自于印度次大陆和中东地区人类活动有机质的污染^[25,26]。

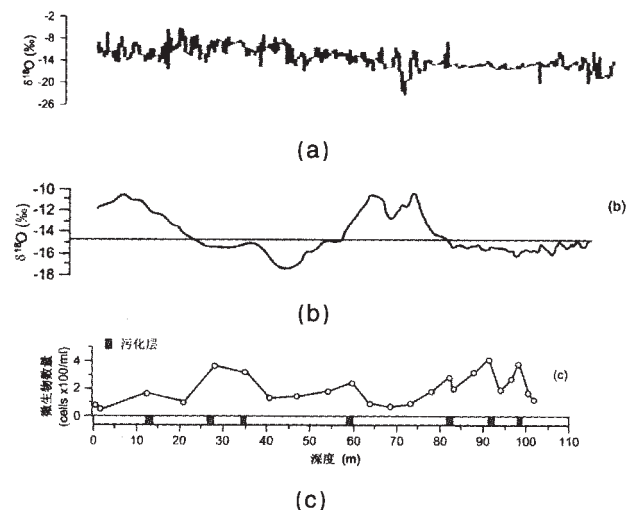


图 6 马兰冰芯中微生物菌群数量和 δ¹⁸O 的变化曲线
(a) δ¹⁸O 年平均值曲线; (b) δ¹⁸O 的 30 点滑动平均曲线;
(c) 微生物菌群数量随深度的变化曲线

达索普雪坑样品中有机指标 nC₂₉/nC₁₇, nC₂₂⁺/nC₂₁⁻, nC₂₉/nC₂₇, nC₂₉/nC₂₄, C₃₀ 酮/C₃₀ 酯, C₂₄ 四环萜/C₂₄ 三环萜, CPI_n 等有很好的季节性变化特征,可以明显地划分出夏半年(季风盛行)和冬半年(西风盛行),对大气环流有指示意义。夏季风盛行时,正构烷烃 nC₁₇>nC₂₉, 正构烷烃的 nC₂₉/nC₁₇, nC₂₂⁺/nC₂₁⁻, nC₂₉/nC₂₇, nC₂₉/nC₂₄, C₃₀ 酮/C₃₀ 酯, C₂₄ 四环萜/C₂₄ 三环萜等比值和 CPI_n 值降低。而西风盛行时,正构烷烃 nC₁₇<nC₂₉, 正构烷烃的 nC₂₉/nC₁₇, nC₂₂⁺/nC₂₁⁻, nC₂₉/nC₂₇, nC₂₉/nC₂₄, C₃₀ 酮/C₃₀ 酯, C₂₄ 四环萜/C₂₄ 三环萜等比值和 CPI_n 值升高^[25]。

5 青藏高原冰芯中微生物研究

通过对青藏高原冰芯中微生物的研究发现,冰芯中的微生物类群具有极其丰富的多样性,且绝大部分属于耐冷和嗜冷的微生物。已先后对我国青藏高原达索普、马兰、敦德、普若岗日以及慕士塔格冰芯进行了微生物的分离和DNA方面的研究工作^[27],结果表明,冰芯不同深度的细菌对UV-B辐射的抗性显示出一定的规律性,微生物对UV-B辐射的抗性随深度的减小而增大,且具有很明显的趋势。说明在冰芯样品中的微生物在最近一段历史时期内对UV-B辐射的抗性在不断增强,正好反映了工业革命以来由于臭氧层减薄引起的环境UV-B辐射的增强过程。研究同时发现,冰芯中的微生物垂直数量分布能由冰芯记录的气候环境变化来解释,冰芯中的微生物数量与 $\delta^{18}\text{O}$ 代表的温度变化呈现明显的负相关关系^[28,29](图6)。

微生物数量与矿物含量有密切的对应关系,较多的微生物群落总是出现在矿物含量较高的冰层,而在纯净的冰层中检测到的微生物数量则较低。这也就是说,冰芯中微生物的研究可以成为冰芯环境记录研究的一个新指标。

参考文献(References)

- [1] Yao T, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D23): 29 531~29 537
- [2] Tian L, Yao T, Schuster P F. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical research, 2003, 108: 7~14
- [3] Tian Lide, Yao Tangdong, Sun Weizhen. Relationship between dD and $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation on north and south of the Tibetan plateau and moisture recycling [J]. Science in China(D), 2001, 44 (9):789~796
- [4] Tian Lide, Yao Tandong, Stievenard M. Deuterium in precipitation and relevant climate in West China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(4): 357~361
- [5] Tian Lide, Tandong Yao, Atusi Numaguti. Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2001, 79 (5): 101~108
- [6] Tian Lide, Masson-Delmotte V, Stievenard M, Yao T, Jouzel J. Tibetan Plateau summer monsoon northward extent revealed by measurements of water stable isotopes [J]. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D22): 28 081~28 087
- [7] Yao T, et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2000a on the Xizang (Tibet) Plateau-Guliya ice core record [J]. Science in China, 1996, 39: 426~433
- [8] Yao T, et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2000 years on the Tibetan plateau-Guliya Ice core record [J]. Sciences in China, 1997, 39: 425~433
- [9] Yao T, et al. Climate and environment records in Guliya Ice Cap [J]. Science in China, 1995, 38: 228~237
- [10] Yao T, et al. Temperature and precipitation fluctuations since 1600 A.D. provided by the Dunde Ice Cap, China [C]. IAHS Publ., 1991, 208. 61~70
- [11] Yao T, et al. High resolution record of paleo-climate since the Little Ice Age from the Tibetan ice cores [J]. Quaternary International, 1997, 37: 19~23
- [12] Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing, Thompson L G. The ENSO Events Recorded in Guliya Ice Core [J]. Climatic Change, 2000, 47: 401~409
- [13] Shi Yafeng, Yao Tandong, Yang Bao. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East China during the last 2000 years [J]. Science in China (Series D), 1999, 42: 91~100
- [14] Duan Keqin, Yao Tandong, Pu Jianchen, Sun weizhen. Response of monsoon variability in Himalayas to global warming [J]. Chinese science bulletin, 2002, 47(21): 1 842~1 845
- [15] Duan Keqin, Yao Tandong, Sun Weizhen, Li Xinqin. India monsoon variability in the Himalaya science AD 1800 [J]. Annals of Glaciology, 2002, 35: 437~442
- [16] Duan Keqin, Yao Tandong. Precipitation variability in central Himalayas and its relation to Northern hemisphere temperature [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (14): 1 480~1 482
- [17] Duan Keqin and Yao Tandong. Modern environment and climate recorded in the Dasuopu ice core. In: Formation and evolution environmental changes and sustainable development on the Tibetan Plateau [C]. edited by Zheng Du et al. Beijing: Academy Press, 2000. 54~61
- [18] Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian, Shi Yafeng. Amplitude of climatic changes in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(13): 1 236~1 243
- [19] Thompson L G, Yao T, E Mosley-thompson, Davis M, Henderson K A, Lin P-N. A High-Resolution Millennial Record of the South Asian Monsoon from Himalayan Ice Cores [J]. Science, 2000, 289: 1 916~1 919
- [20] Xu Baiqing, Yao Tandong. Dasuopu ice core record of atmospheric methane over the past 2000 years [J]. Science in China, 2001, 44(8): 221~227
- [21] Yao Tandong, Duan Keqin, Xu Baiqing, et al. Temperature and methane changes over the past 1000 years recorded in Dasuopu glacier (central Himalaya) ice core [J]. Annals of Glaciology, 2002, 35: 379~383
- [22] YaoTandong, Thompson L G, Xu Baiqing, et al. Temperature and methane records over the past 2ka in Dasuopu ice core [J]. Science in china(series D), 2002, 45(12): 1 068~1 074
- [23] Huo Wenmian, Yao Tandong, Li Yuefang. Increase atmospheric pollution revealed by Pb record of a 7000m ice core [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(14): 1 309~1 312
- [24] 霍文冕, 姚檀栋, 李月芳. 达索普冰芯中 Pb 记录反映的大气污染及其同位素证据 [J]. 冰川冻土, 1999, 21(2):125~128
- [25] Xie shucheng, Yao Tandong et al. Climatic and environmental implications from arganic matter in Dasuopu glacier in Xixiabangma in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science in China (series D), 1999, 42(4): 383~391
- [26] Xie shucheng, Yao Tandong et al. Geochemical analyses of a Himalayan snowpit profile: implications for atmospheric pollution and climate [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31: 15~223
- [27] Zhang X J, Yao T D, Ma X J, Wang N L. Microorganisms in a high altitude glacier ice in Tibet [J]. Folia Microbiol, 2002, 47(3): 241~245
- [28] Xiang S R, Yao T D, An L Z, Xu B Q, et al. Bacterial Diversity in Malan Ice Core from the Tibetan Plateau [J]. Folia Microbiol, 2004, 49(5): 210~214
- [29] 姚檀栋, 向述荣, 张晓君, 浦健辰. 马兰和普若岗日冰芯记录的微生物学特征 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 193~199

(责任编辑 邱夜明)