

天目山泥炭有机碳同位素特征及其古环境意义

杨桂芳^{1,2)} 黄俊华²⁾ 谢树成²⁾ 胡超涌²⁾ 戴晴¹⁾ 葛之亮¹⁾

1) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要 通过对浙江天目山泥炭剖面的高密度采样和有机碳同位素分析,重建了该地区4 ka BP以来的古植被特征和古环境演化历史。天目山3200 a BP之前,气候温和适度,晚期变冷变干,为中全新世末气候波动的过渡时期。3200~700 a BP,有机碳 $\delta^{13}C_{org}$ 值在波动中降低,气候出现多次急剧冷暖变化,指示了几次温暖与寒冷事件。700 a BP以来,有机碳同位素迅速正偏,表明又一暖期的出现,到了后期气温又有所降低,植被转化为草原草甸景观。天目山地区近4 ka以来的气候变化与国内外不同区域的研究资料相一致,但又有区域的差异性。

关键词 有机碳同位素; 气候演化; 植被演替; 泥炭

中图分类号: P597.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)06-778-05

Organic Carbon Isotopic Characteristics and Their Paleoenvironmental Implications: A Case Study of the Tianmushan Peat Bog

YANG Guifang^{1,2)} HUANG Junhua²⁾ XIE Shucheng²⁾ HU Chaoyong²⁾ DAI Qing¹⁾ GE Zhiliang¹⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074

Abstract Organic carbon isotope and lipid biomarker were used to determine paleovegetation characteristics and paleoenvironment changes of the Tianmushan Area, Zhejiang Province since the Middle Holocene. A combined analysis of organic carbon isotope signature and lipid biomarker depicted three remarkable paleoenvironment stages. Before 3200 a BP, the climate was relatively stable in spite of a cold-dry trend in the late stage, implying a transitional period. From 3200 to 700 a BP, it was a changeable period characterized by a couple of warm and cold events. The climate after 700 a BP was relatively warm first and became a bit cooler afterwards, possibly suggesting that the vegetation was dominated by grass plants. Significantly, the results obtained by the authors are well in line with the results of related comparative researches of different areas, thereby demonstrating the global traits and local characteristics of the paleoclimatic process and providing a useful basis for global change comparison.

Key words organic carbon isotope; paleoclimate evolution; paleovegetation change; peat

全新世植被演替及其季风气候关系的研究是当前全球变化研究的重点和难点,其重要性不仅在于对10 ka BP以来气候环境的揭示,更为重要的是,全新世作为距今最近的一个地质时期,其古气候

研究可以为预测未来可能出现的全球气候变化提供重要的借鉴作用,为人类的生存和可持续发展服务。随着全球变化研究的深入开展,近几十年来对不同区域的全新世气候特征进行了大量的探讨,取得了

本文由地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金项目(编号:GPMR200605)和湖北省地球表层重点实验室开放基金项目(编号:LESS-45)联合资助。

收稿日期:2008-09-20;改回日期:2008-10-25。责任编辑:刘志强。

第一作者简介:杨桂芳,女,1975年生,博士,副教授,主要从事全球变化与环境演变研究;通讯地址:100083,北京市海淀区学院路29号;电话:010-82322117;E-mail: yangguifang@cugb.edu.cn。

一系列可喜的成果(Denton et al., 1973; Enzel et al., 1999; 汪品先等, 1999; Zhang et al., 2000; 刘嘉麒等, 2001), 但至今对短尺度古植被及其季风气候的生态响应等研究还相对薄弱, 对典型季风气候区全新世植被演替和气候变迁的关系研究还有待更多的证据。

为了更好地反映全新世植被演替和气候变迁历史, 本文选择了典型季风区——浙江天目山为研究区域, 进行泥炭高分辨率古环境研究。天目山地区全新世气候环境变化的恢复一直缺少全面系统的研究(宋友桂等, 1998; 尹茜等, 2006; 杨桂芳等, 2008)。2005年5月, 笔者在天目山千亩田发现了4 ka BP以来的连续的全新世泥炭剖面, 该剖面的发现与研究补充和丰富了该区全新世气候环境变化研究的内容, 其特殊的地理位置及沉积学特征决定了其具有极为重要的作用。在可靠的年代学框架下, 笔者通过有机碳同位素分析, 并结合地质类脂物资料, 探讨有机碳同位素记录的全新世以来的植被演替过程和气候变迁历史, 旨在为中国东部典型季风区全新世以来的植被变化和季风波动提供重要的科学依据。

1 样品采集和分析测试

天目山位于浙江省西北部, 地理坐标(30°29'58"N, 119°26'27"E), 沼泽区海拔高度1300~1500 m, 为典型的温暖湿润的季风气候区, 冬暖夏凉, 年平均气温14℃, 7月份的平均气温为26℃。在天目山最高峰龙王山附近挖掘人工剖面, 剖面深100 cm, 自下而上依次出现灰黑色粘土、棕灰色沼泽淤泥、黑色泥炭沼泽土、棕黑色沼泽泥炭土和上部含植物根系的棕黑色沼泽土。

在天目山泥炭剖面上以2 cm间隔采集有机碳同位素样品。测定前先将样品研磨成粉末状, 加入10%稀盐酸搅拌并浸泡24 h, 用蒸馏水冲洗至中性, 在低温(约80℃)下烘干后研磨过150目筛。称取2 g样品, 置于石英管内, 800℃下在通有氧气的石英管内充分燃烧15 min, 用液氮分离并纯化生成的CO₂气体, 最后在MAT-251型质谱仪上测定CO₂的有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)值, 重复测量误差小于 $\pm 0.2\text{‰}$ (PDB标准)。

在有机碳同位素测试分析的基础上, 以4 cm间隔采集分子化石样品。分子化石测试采用层析柱法分离, 制备的组分送GC-MS(HP6890色谱—HP5973质谱联用仪)分析。剖面的年代学确定主要根据尹茜等(2006)在同一地区的测试结果, 并结合另一剖

面的年代学数据进行内差和外推获得。

2 分析结果

天目山泥炭剖面的有机碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)总体偏负, 在-26.51‰至-30.44‰之间波动, 其平均值为-28.49‰, 自下而上有以下主要特征(图1): 在深度100~68 cm, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值比较稳定(大部分位于-29.00‰~-28.00‰之间); 深度68~30 cm为一高值区, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值总体偏高, 在后期其值迅速降低; 深度30~0 cm, 是一个明显的波动期, 且在深度18 cm和9 cm处出现了两个明显的峰值。由于类脂物中烷烃更能够敏感地记录植被和气候的信息(Xie et al., 2004), 笔者只针对正构烷烃的分布特征进行分析。正构烷烃的碳数分布范围为C₁₅~C₃₃, C₂₁以上高碳数分子相对含量较高, 并具有明显的奇偶优势。部分泥炭样品中正构烷烃分子是以C₂₉为主峰的单峰型分布, 而大部分样品出现了以C₁₇和C₂₉为主峰的双峰型分布, 但一般以后峰为主峰。平均链长值(ACL)发生了多次变化: 深度100~68 cm, ACL值在波动中上升; 深度68~30 cm, ACL值在波动中下降, 且在深度38 cm达到极小值; 深度30~0 cm, ACL值整体较高且变化平缓, 在距离地面约9 cm处出现了一次明显波动。碳优势指数CPI位于4.76~8.77之间, 平均值为6.49, 可细分为3个阶段: 深度100~68 cm, CPI值逐渐升高; 深度68~30 cm, CPI值整体较低且变化明显; 深度30~0 cm, CPI值迅速降低, 在深度约9 cm处又迅速回升。

3 指标的环境意义及古环境演化

在全球气候变化研究中, 稳定碳同位素作为良好的气候指标在反映古气候变化方面得到广泛应用(Stuiver, 1975; Meyers et al., 1993; 杨桂芳等, 2005; 陈发虎等, 2006)。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与沉积物中有机质的来源密不可分。泥炭有机质是由分解的植物残体逐渐转化和积累起来的, 而不同类型植被产生的有机质的碳同位素组成有显著差异, 所以有机碳同位素值可以很好地指示植被的类型(Stuiver, 1975)。本次研究的泥炭有机碳同位素值整体偏负(平均值为-28.49‰), 指示了当地的植被类型主要为C₃木本植物, 说明当地的气候条件相对温湿, 为C₃植物的大量繁殖提供了良好的条件。而且研究区刚好处于温度变化带(东经110°~120°之间), 因此 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的变动能敏感地记录植被演替和气候变化的详细信息。即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值较高时, 反映当时温

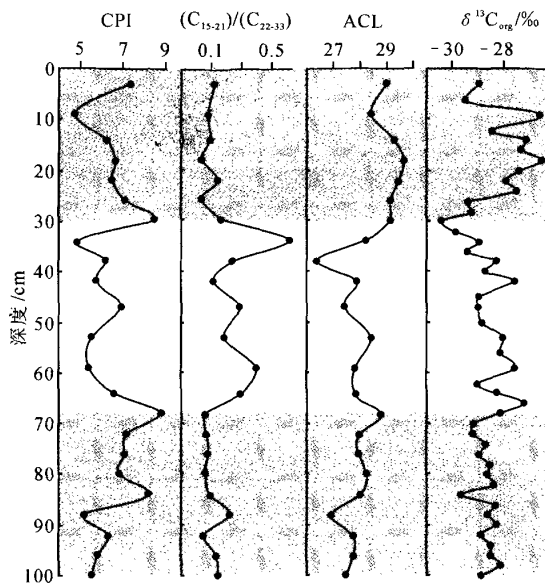


图1 天目山泥炭有机碳同位素和正构烷烃变化曲线

Fig. 1 Variations of $\delta^{13}C_{org}$ and n-alkanes of the Tianmushan peat profile

度较高;而 $\delta^{13}C_{org}$ 值较低时则对应于较冷的时期。深度100~68 cm,有机碳 $\delta^{13}C_{org}$ 值在平均值附近波动且保持相对稳定,显示了当时草本和木本植物同时存在,气候温和适度。在深度68~40 cm,木本 C_3 植被贡献的有所降低,而来源于草本 C_4 植物的有机质贡献增加,使得有机碳同位素相对较高。深度40~30 cm, $\delta^{13}C_{org}$ 值又迅速降低,表明随着环境温度的降低,木本 C_3 植物又大量发育。在表层30~0 cm, $\delta^{13}C_{org}$ 值出现了较高值,这可能是由于表层泥炭中有大量的植物碎屑,更为富集 $\delta^{13}C_{org}$ 。

正构烷烃广泛分布于植物和其他生物体中,不同生物源的正构烷烃具有不同的分布类型、碳数范围及主峰碳数。来源于藻类、菌类等低等生物的正构烷烃碳链较短(C_{13-21})通常以 C_{17} 、 C_{18} 或 C_{19} 为主的单峰型分布,缺少高碳数($>C_{25}$)的正构烷烃,无明显奇偶优势(Wakeham, 1990);陆生高等植物来源的正构烷烃碳链较长(C_{23-35})通常以 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} 为主峰的单峰型特征,具有显著的奇偶优势(Huang et al., 1999);而双峰型分布则被认为是混合来源。正构烷烃 C_{27} 、 C_{29} 和 C_{31} 的丰度变化,反映了木本和草本植物的相对变化关系(Cranwell, 1973);若类脂生物标志物高碳数($>C_{21}$)正构烷烃以 C_{29} 为主峰,表明植被类型以木本植物占优势。在深度100~68 cm,ACL值在波动中上升反映草本植

物逐渐取代木本植物并占优势,某些样品甚至出现了草本与木本相当的植被类型,表明后期的环境条件更适合高等草本植物的生长。在深度68~30 cm之间,ACL值逐渐降低,反映这一时期木本植物的相对比例有所提高;在深度30~0 cm ACL处于高值区,反映了草本植物的比例又有所增加,但在深度约9 cm处出现了小规模波动,可能暗示着当时气候相对温湿,为木本植物发育提供了生存空间。CPI值在该泥炭剖面中随深度变化呈现出不同程度的波动,这种变化规律可能与气候环境的变化有关。在深度100~68 cm,较高的CPI值反映了当时的环境更适合陆生高等植物的生长。深度68~30 cm, CPI值整体较低且出现了较频繁的变化,反映了这一时期高等植物的相对比例有所降低。在深度30~0 cm, CPI值有所下降,说明高等植物的比例有所增加,而细菌等微生物不太发育;但在距离地面约9 cm处出现了小规模波动,表明当时气候相对潮湿,为低等菌藻类的繁盛提供了一定条件。

本次研究的正构烷烃的CPI、ACL值与有机碳同位素值的变化具有很好的相关性,这可能是由于有机碳同位素值与类脂生物标志物变化主要受控于气候的制约。两者共同指示了天目山中全新世以来植被类型的变化,这与人已有的研究成果完全吻合(尹茜等, 2006),可以划分为3个阶段(图2):

(1) 3200 a BP之前,各指标都相对稳定,说明当时气候波动不大,且类脂生物标志物分布特征和有机碳同位素值揭示了该时期气候温和适度,晚期逐渐向降温、变干方向转化。施雅风等人研究表明,4000~3000 a BP为全新世末气候波动的过渡时期,在泥炭、冰芯等均记录了过渡时期的特征(竺可桢, 1973; Yao et al., 1992; Bond et al., 1993; Shi et al., 1993; 王志国, 1998)。

(2) 3200~700 a BP,从CPI、ACL值可以看出,这一时期气候出现多次急剧的冷暖波动,主要表现为3200~2700 a BP有机碳 $\delta^{13}C_{org}$ 逐渐增加,而CPI值延续了前期的降低趋势,表明气候逐渐回升,环境不断好转;之后 $\delta^{13}C_{org}$ 和正构烷烃分布均出现了几次峰值和谷值,指示了几次温暖与寒冷事件,如2700~2000 a BP、1400~1000 a BP的两次暖期,刚好对应春秋一秦和隋唐温暖期;而2000~1400 a BP与1000~700 a BP两个冷期,则与东汉到六朝时代以及两宋时期的寒冷阶段相吻合(竺可桢, 1973)。

(3) 700 a BP以来,有机碳同位素迅速正偏,CPI值则显著降低,两者共同指示了又一暖期的出现,这

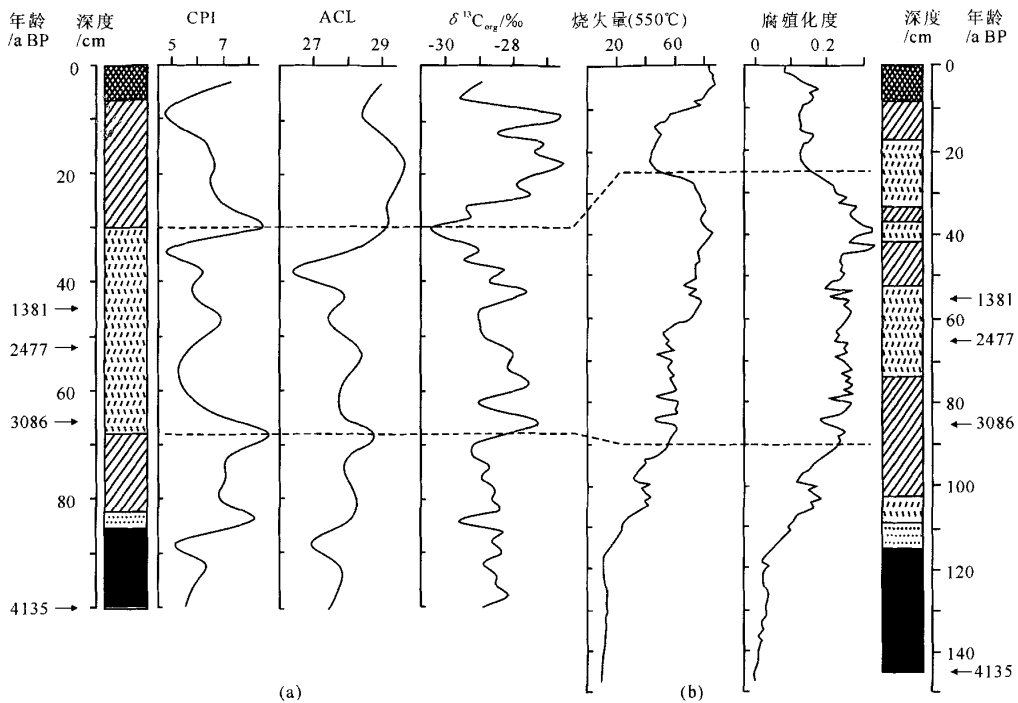


图2 天目山4 ka BP以来环境变化综合曲线(a)及其与尹茜等(2006)(b)结果对比图

Fig. 2 Paleoenvironmental variations of the Tianmushan Area since 4 ka BP (a) as compared with results of Yin et al. (2006) (b)

一温暖期持续时间较长,极高的有机碳同位素值显示了该时期C₄植被明显增多,发育典型的森林和草原景观。这一点在类脂生物标志物分布特征上也得到了验证,显然很大程度上受气候因素的影响。到了后期气温又有所降低,植被逐渐转化为草原草甸景观。

为便于研究,笔者结合前人已有的一些研究成果对该区气候环境特征进行综合分析(图2)。结果表明,几种指标的结果吻合得较好,可以很好地揭示该地区中全新世以来的气候环境演化特征(尹茜等,2006)。位于季风气候变化的敏感区,研究区的植被演替与气候变化与其他相似地区的总体特征类似,具有明显的全球性特征。更有意义的是,研究区气候环境存在几次比较明显的季风波动事件,其时间跨度为0.5 ka左右,全新世这种百年尺度的气候变化规律在我国南海深海柱样中以及黄土记录中也有发现。这种变化是否与末次冰期变化的机制原因相同,还有待进一步研究。

4 结论

根据天目山泥炭有机碳同位素组成,结合岩性和沉积物类脂生物标志物特征,重建了该地区4 ka

BP以来的气候变化,并据此将研究区中全新世以来环境演化分为早(4100~3200 a BP)、中(3200~700 a BP)、晚(700 a BP以来)3个环境演化阶段。早期气候温和适度;中期气候出现多次急剧的冷暖波动;晚期气候转暖,后期气温又有所降低,植被逐渐转化为草原草甸景观。研究所得的4 ka BP以来的气候变化与尹茜等(2006)的研究成果具有很好的可比性。本文中有有机碳同位素提供的气候信息较好地反映出研究区中全新世的重要气候事件,包括几次温暖与寒冷气候事件,与国内外典型区域的研究资料相一致(竺可桢,1973;张美良等,2003),但又有区域的差异性,在短时间尺度上天目山地区气候变化更加频繁,显露出有机碳同位素的重要研究潜质。

另外,C₃、C₄植物分布以及所反映的气候环境特征与经度、纬度、海拔高度存在密切关系,研究区刚好处于温度变化带(东经110°~120°)与海拔高度的过渡带(1400 m),因此能敏感地记录植被演替和气候变化的详细信息。依据中国的温度和水分状况的特点,通过分析研究区有机碳同位素记录的植被演替的特性,可以深入剖析该指标的古气候和古生态指示意义,特别是配合正构烷烃等其他指标进行综合分析,为其在古环境演化中的应用提供重要的科学依据。

参考文献

- 陈发虎, 饶志国, 张家武, 金明, 马剑英. 2006. 陇西黄土高原末次冰期有机碳同位素变化及其意义[J]. 科学通报, 51(11): 1310 ~ 1317.
- 刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 2001. 第四纪的主要气候事件[J]. 第四纪研究, 21(3): 239 ~ 248.
- 宋友桂, 朱诚. 1998. 天目山深溪流域晚更新世晚期以来环境演变[J]. 山地研究, 16(4): 257 ~ 262.
- 汪品先, 葛知潜. 1999. 寻找高分辨率的古环境记录[J]. 第四纪研究, 19(1): 1 ~ 17.
- 王志国. 1998. 吉林金川泥炭纤维素稳定碳同位素组成序列与东北季风区五千多年来的环境变迁[J]. 矿物岩石地球化学通报, 17(1): 52 ~ 54.
- 杨桂芳, 彭红霞, 陈中原, 李长安, 黄俊华, 胡超涌. 2005. 兰州与江汉平原有机碳同位素的古气候指示意义对比研究[J]. 长江流域资源与环境, 14(4): 486 ~ 490.
- 杨桂芳, 谢树成, 黄俊华, 陈中原. 2008. 天目山泥炭类脂物记录的微生物特征和植被演替[J]. 地学前缘, 15(4): 170 ~ 177.
- 尹茜, 朱诚, 马春梅, 王富葆, 赵志平, 郑朝贵, 黄林燕, 田晓四. 2006. 天目山千亩泥炭腐殖化度记录的中全新世气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 26(6): 117 ~ 122.
- 张美良, 袁道先, 林玉石, 覃嘉铭, 章程, 程海. 2003. 桂林响水洞 6.00 ka BP 以来石笋高分辨率的气候记录[J]. 地球学报, 24(5): 439 ~ 444.
- 竺可桢. 1973. 中国五千年气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 16(2): 226 ~ 256.
- MEYERS P A, ISHIWATARI R. 1993. Lacustrine organic geochemistry: an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 20: 867 ~ 900.
- SHI Yafeng, KONG Zhaocheng, WANG Sumin, TANG Lingyu, WANG Fubao, YAO Tandong, ZHAO Xitao, ZHANG Peiyuan, SHI Shaohua. 1993. Mid-Holocene climates and environment in China[J]. *Global and Planetary Change*, 7: 219 ~ 233.
- SONG Yougui, ZHU Cheng. 1998. Environmental evolution since late Pleistocene in Shengxi stream valley of Tianmushan mountains[J]. *Mountain Research*, 16(4): 257 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- STUIVER M. 1975. Climate versus changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the Late Quaternary[J]. *Quaternary Research*, 5: 251 ~ 262.
- WAKEHAM S G. 1990. Algal and bacterial hydrocarbons in particulate matter and interfacial sediment of the Caria co Trench [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 1325 ~ 1336.
- WANG Pinxian, JIAN Zhimin. 1999. Searching high-resolution paleoenvironmental records: a review[J]. *Quaternary Science*, 19(1): 1 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- WANG Zhiguo. 1998. Reconstruction of past 5000 year humidity changes of Northeast China Using $\delta^{13}\text{C}$ values of peat cellulose in Jinchuan region, Jilin Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 17(1): 52 ~ 54 (in Chinese with English abstract).
- XIE Shucheng, NOTT C J, AVSEJS L A, MADDY D, CHAMBERS F M, EVERSHERD R P. 2004. Molecular and isotopic stratigraphy in an ombrotrophic mire for palaeoclimate reconstruction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(13): 2849 ~ 2862.
- YANG Guifang, PENG Hongxia, CHEN Zhongyuan, LI Chang'an, HUANG Junhua, HU Chaoyong. 2005. Paleoclimatic implications of Lanzhou and Jiangnan Plain: a climate proxy study of organic carbon isotope [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 14(4): 486 ~ 490 (in Chinese with English abstract).
- YANG Guifang, XIE Shucheng, HUANG Junhua, CHEN Zhongyuan. 2008. Microbial characteristics and vegetation changes as recorded in lipid biomarker of Tianmushan peat bog [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 170 ~ 177.
- YAO T D, THOMPSON L G. 1992. Trends and features of climatic changes in the past 5000 years recorded by the Dunde ice core [J]. *Annales de Glaciologie*, 16: 21 ~ 24.
- YIN Qian, ZHU Cheng, MA Chunmei, WANG Fubao, ZHAO Zhiping, ZHENG Chaogui, HUANG Linyan, TIAN Xiaosi. 2006. Holocene climate change recorded in peat humification in Tianmu mountain region [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(6): 117 ~ 122 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG H C, MA Y Z, WÜNNEMANN B, PACHUR H J. 2000. A Holocene climatic record from arid northwestern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162: 389 ~ 401.
- ZHANG Meiliang, YUAN Daoxian, LIN Yushi, QIN Jiaming, ZHANG Cheng, CHENG Hai. 2003. High resolution climatic records of stalagmite from Xianshui Cave in Gulin since 6.00 ka B P [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(5): 439 ~ 444 (in Chinese with English abstract).
- ZHU K Z. 1973. Preliminary study on the climate changes since 5000 years in China [J]. *Science in China*, 16(2): 226 ~ 256.