

中东干旱区全新世气候变化的西风模式——以湖泊研究为例^{*}

安成邦, 陈发虎

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 综述了亚洲中部干旱区湖泊研究的古气候记录, 发现湖泊记录的全新世有效湿度在大框架上具有一致性变化。据此, 选择了其中年代可靠、代用指标湿度意义明确、时间分辨率较高的 8 个地点的记录, 半定量地集成了中东干旱区全新世期间湿度的变化。结果表明, 亚洲内陆干旱区全新世气候变化具有较清晰的阶段性变化, 大约 8cal kaBP 以前的早全新世气候干旱, 8–4cal kaBP 的中全新世气候湿润, 从距今 5–6cal kaBP 以来湿润程度逐步降低到晚全新世, 但晚全新世比早全新世湿润。内陆干旱区的全新世湿度变化框架与最新获得的亚洲季风变化模式存在较大差异, 因此推论出, 北大西洋海洋表面的温度变化可能是中东干旱区湿度的主要影响因素。

关键词: 中东干旱区; 全新世; 湖泊; 湿度

The pattern of Holocene climate change in the arid central Asia: a case study based on lakes

AN Chengbang & CHEN Fahu

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, P.R.China)

Abstract: The palaeoclimate records from lakes at the arid central Asian region (ACA) climatically dominated by the Westerly circulation shows synchronous and coherent moisture changes during the Holocene. Therefore, the sediment records from lakes in ACA with reliable chronologies and robust proxies were selected to reconstruct moisture histories based on a five-class ordinal wetness index with assigned scores from the driest to wettest periods at individual sites for 200-year time slices. There are 8 lakes suitable for the synthesis. The results show that ACA as a whole experienced a dry early Holocene, a wetter (less dry) early to mid-Holocene, and a moderately wet late Holocene, which is different from Holocene monsoon history recently recovered by documents such as speleothem. We propose that the pattern of Holocene effective-moisture evolution in the westerly dominated ACA was mainly determined by North Atlantic sea-surface temperatures (SSTs) and high-latitude air temperatures that affect the availability, amount and transport of water vapor.

Keywords: Mid-latitude arid central Asia; Holocene; lakes; moisture changes

全新世气候变化的复杂性的表现之一是空间分异性^[1], 即使全球全新世气候变化的主控因子相同, 地球各子系统之间的相互作用也会使气候变化信号发生变异, 而信号的变异是地理位置的函数。不同区域之间气候变化的模式可能是有差异的。现有的研究^[2-5]表明, 亚洲季风区, 全新世气候变化的基本模式是: 早-中全新世季风强大, 气候湿润, 中全新世以后季风强度减弱, 气候趋向干旱。但在中东干旱区, 不同地点的全新世气候变化差异较大。例如, 在中东干旱区的西部, 咸海的湖泊记录表明^[6], 中全新世气候湿润, 早、晚全新世气候干旱; 而来自中东干旱区东部季风边缘区的气候记录表明^[7-11], 全新世期间气候的湿润程度一直在波动, 并在中全新世出现了气候干旱的时段。全新世期间中东气候的这种变化的更加凸显了研究这一区域气候变化模式必要性。

^{*} 国家自然科学基金(90502008, 40871006)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”联合资助。2008-09-22 收稿; 2009-02-26 收修改稿。安成邦, 男, 1970 年生, 副教授; E-mail: cban@lzu.edu.cn.

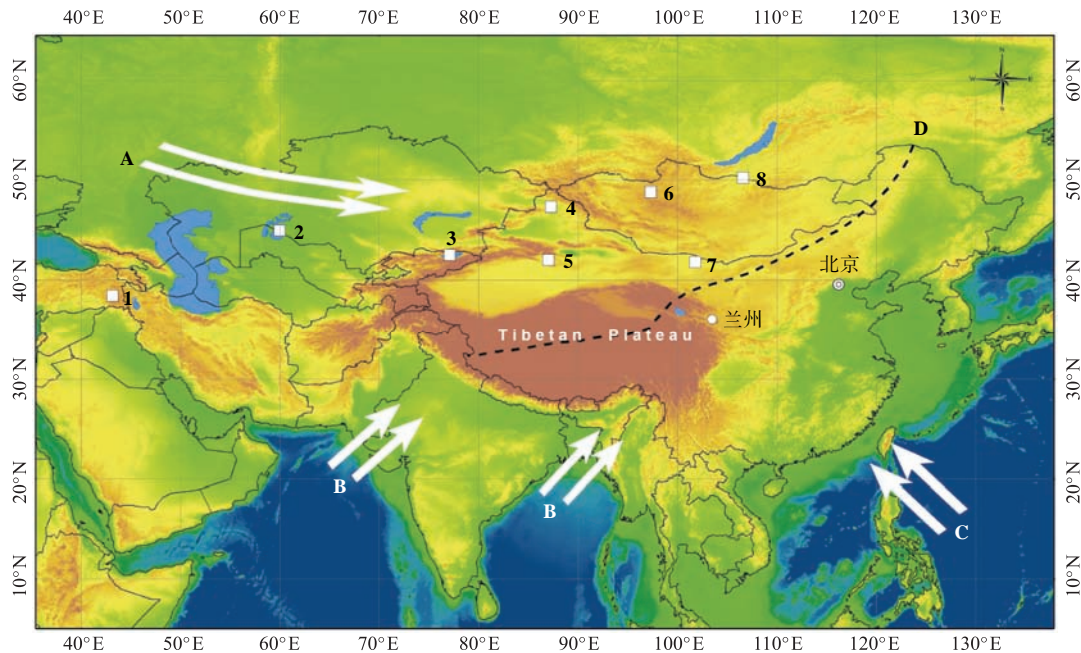


图 1 研究区范围及主要研究地点(图中数字代表的地点是同表 1(据文献[26]修改);
西风环流(A), 印度季风(B), 东亚季风(C); 现代亚洲季风界限^[27]在图中以虚线标出)

Fig.1 Map showing the palaeoclimatic sites selected in this study

(The site numbers are the same as those listed in Tab.1(revised from reference[26]) ;

Westerly (A), Indian Monsoon(B), East Asia Monsoon(C); Modern monsoon limit^[27] showed as dash line)

为了探讨中东亚干旱区全新世的气候变化模式, 我们把中东亚地区从气候变化的角度分为三大区域: 季风区、干旱区、以及季风区和干旱区之间的过渡带(图 1). 所谓中东亚干旱区, 包括的区域除了中亚以外, 还包括了传统上认为属于东亚地区的蒙古, 这一广大的区域在气候变化上具有共同性, 所以称之为中东亚干旱区. 季风区和过渡带国内学者研究较多^[22-23,33], 我们曾讨论了亚洲内陆干旱区与季风区的湿度错位相变化^[26,28,35], 并对蒙古的全新世气候变化进行了总结^[29], 本文进一步深入探讨内陆干旱区的全新世气候变化模式, 推动对西风环流控制的内陆干旱区气候变化的认识.

1 资料的选择与同一化

迄今为止, 已经发表了不少关于中东亚干旱区的气候变化的湖泊记录. 本文选择湖泊记录的标准有 4: (1)记录来自于湖泊沉积; (2)记录能够涵盖全新世的大部分时段, 且记录没有间断缺失; (3)记录中选用的代用指标应该能够反映降水或者有效湿度的变化; (4)记录的理论分辨率基本在 200 年以内. 根据以上标准, 选择了 8 个湖泊进行研究(表 1, 具体位置见图 1).

在每一个地点, 先把所用的 ^{14}C 年代根据原文中的信息, 尽量去掉老碳的影响, 然后把 ^{14}C 年代用 OxCal 3.10 程序^[36-37]校正为日历年龄(文中的年龄一律用 cal aBP 表示). 为了在不同的湖泊之间进行比较, 把湿润程度分为 5 级(0-4): 0 表示最干旱, 4 表示最湿润. 然后以 200 年的间距确定每一个研究点的不同时段的湿润程度. 当然这种分级是半定量的, 分级的依据来自于地层、代用指标的综合信息. 例如, 如果湖泊沉积地层以纹层为主, 代用指标中氧同位素为低值, 孢粉 *Artemisia/Chenopodiaceae* 为高值, 或者浮游性的硅藻含量高, 那么, 这一时段的气候状况就是湿润. 以博斯腾湖为例来说明如何把代用指标

转化为湿润程度分级. 博斯腾湖的岩芯地层表明^[38], 17–8.4cal kaBP, 湖泊沉积为沙层, 粒度较粗, 表明该时期湖泊处于干涸状态. 所以, 这一时段是博斯腾湖全新世期间最为干旱的时期, 其湿润程度为 0. 8.4cal kaBP 以后, 湿润程度主要依据孢粉 *Artemisia/Chenopodiaceae*^[37]来确定, 具体结果如图 2 所示. 更详细的信息可以参见参考文献[39].

表 1 亚洲中部干旱区过去湿润程度记录(表中湖泊按位置从西向东依次列出)
Tab.1 Palaeo-moisture records selected from arid central Asia

地点	湖泊	湖泊面积(m ²)	取芯处水深(m)	水深最大值(m)	样品分辨率(a)	测年方法	测年样品数量(个)	代用指标	文献
1	Lake Van	3522	420	458	Ca 20	纹层计年	-	氧同位素, 孢粉, 沉积速率	[12,13]
2	Aral Sea	17158	23	40.4	Ca 200	传统 ¹⁴ C	36	阶地, 历史文献, 沉积速率, 碳酸钙	[6,14]
3	Issyk-kul	1584	240	668	Ca 195	AMS- ¹⁴ C	8	氧同位素, 碳酸钙	[14,15,16]
4	乌伦古湖	927	12	13.9	Ca 90	AMS- ¹⁴ C	6	孢粉, 介形虫, 碳同位素, 氧同位素	[17,34]
5	博斯腾湖	1100	6.25; 16.10	16.5	10–80	AMS- ¹⁴ C	17	孢粉, 粒度, 碳酸钙	[18–21]
6	Lake TtImen	194	24.54	27	Ca 190	AMS- ¹⁴ C	6	硅藻, 孢粉, 碳酸钙	[24,25]
7	居延泽	24	N/A	0.63	Ca 160	AMS- ¹⁴ C	5	孢粉	[8,30]
8	Gun Nuur	4	5	5	25–100	AMS- ¹⁴ C	9	硅藻, 有机碳同位素, 碳酸钙, 磁化率	[31,32]

依此类推, 建立了 8 个湖泊的 200 年间距的湿润状况曲线(图 2). 在此基础上来讨论中东亚干旱区的湿度变化.

2 中东亚干旱区全新世湿度的变化模式

在 8cal kaBP 以前, 很多湖泊都是完全干涸或者水位非常低(图 2). 这些记录表明, 早全新世气候干旱. 8cal kaBP 以后, 湿润程度开始增加, 但不同地点之间存在差异. 例如, 蒙古国境内的研究地点 8 从 9cal kaBP 就开始出现了湖相沉积, 研究地点 7 从 7cal kaBP 以后才出现湖相沉积. 真正地理分异的原因很可能在于不同地点的地理和水文背景的差异, 譬如地下水的影响、局域地貌的影响、或者不同区域对气候变化的响应的差异等. 当然, 测年的误差也有可能会引起这样的差异. 但孢粉研究的数据表明, 蒙古在中全新世普遍比较湿润^[40].

在 8–4cal kaBP 的中全新世, 大多数湖泊都表现出最为湿润的状态. 之后湿润程度逐步降低, 但在 2cal kaBP 前后湿度略有增加. 简言之, 中东亚干旱区全新世湿度变化大致可以归纳如下: 8cal kaBP 以前的干旱的早全新世, 8–4cal kaBP 的湿润的中全新世, 湿润程度逐步降低的晚全新世, 但晚全新世比早全新世湿润. 综合这 8 个研究地点的湿度变化, 建立了中东亚干旱区全新世湿度变化的时间变化模式(图 2).

3 影响中东亚干旱区全新世气候变化的可能因素

显然, 中东亚干旱区湿度的变化模式近似于北大西洋海面温度(SST)的变化^[41]以及挪威海的海面温度的变化^[42–43]. 经历了早全新世的快速增温, 北大西洋的最温暖期出现在中全新世. 北大西洋最近的研究结果也证实了这一点^[44]. 格陵兰冰芯^[45]和欧洲孢粉^[46]的记录也表明了中全新世的高温. 这些证据表明, 全新世期间中东亚干旱区湿度变化和北大西洋地区的温度变化很有可能是相关的. 大西洋和太平洋对北美内陆的气候的影响已经被越来越多的器测^[47]和代用指标^[48]所证实. 同样, 欧亚大陆腹地的湿度变化受控于北大西洋海面温度的变化也是完全可能的.

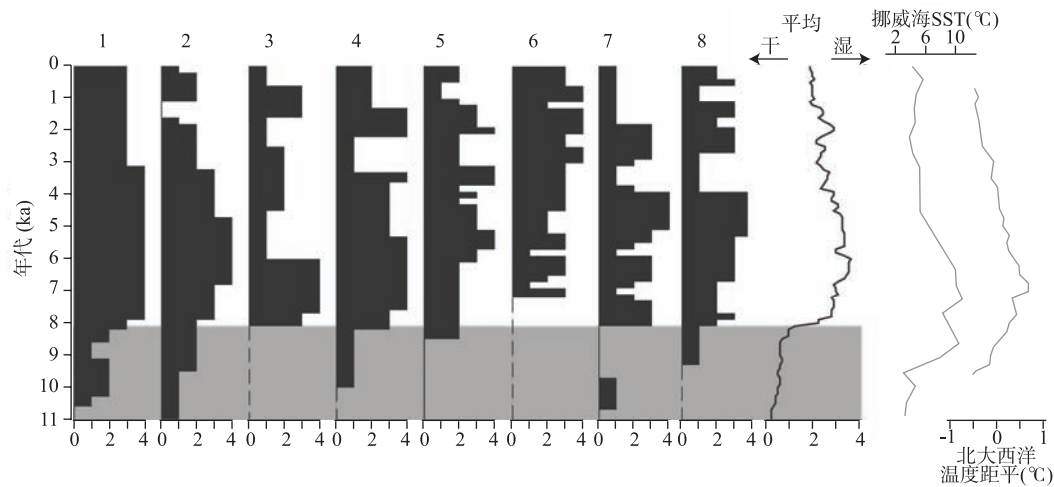


图2 不同研究地点的全新世气候湿润状况(图中数字代表的地点同表1(据文献^[26]修改))

Fig.2 Temporal moisture changes at each site (site numbers are the same as in Table 1) and the average moisture index (far right curve) for ACA as a whole during the Holocene (revised from references^[26])

中东干旱区的降水主要来源于北半球中纬度西风从北大西洋带来的水汽, 以及位于西风带的内陆湖泊的等水体的水汽^[49]。在冰消期和早全新世, 高纬度地带的冰盖仍然比中晚全新世的时候大, 导致中纬度地带气温仍然比较低, 虽然此时太阳辐射较强。大量的冰盖融水注入北大西洋, 也降低了海面温度。这两者已经被许多研究^[41-43,45,50]所证实。较低的海面温度抑制了水汽的产生, 中东干旱区较低的气温导致气旋活动较弱, 这些都导致中东干旱区在早全新世降水较少, 气候干旱。风成沉积和模拟结果^[51]都表明, 北大西洋通过西风对欧亚大陆的影响相当深入, 甚至可以到达黄土高原。在中晚全新世, 北半球的冰盖大幅度退缩消融, 北大西洋和高纬度地区的温度显著上升。北大西洋较高的海面温度增加了西风中的水汽含量, 而高纬度地区的温度较高导致中东干旱区的气旋活动加强, 两者都使得中东干旱区的降水量增加^[52]。晚全新世湿度的降低对应于北大西洋地区温度的降低。所以, 我们认为, 北大西洋地区的海面温度和气温的变化, 可能是影响中东干旱区湿度变化的主要因素。而在季风边缘区, 气候的变化比干旱区更为复杂, 因为除了上述因素之外, 边缘区明显要受到季风变化的影响。

青藏高原及周边山地组成的高亚洲对中东干旱区全新世气候的变化也有重要影响。一方面, 青藏高原的动力和热力作用加强了亚洲季风^[53], 另一方面, 青藏高原的动力和热力作用导致高亚洲北部毗邻地区的下沉气流盛行, 不可避免地导致中东干旱区的气候更加干旱^[54-55]。所以, 在早全新世, 太阳辐射强烈, 季风强盛的时候, 对应地出现的是中东干旱区气候的干旱^[11,56]。

4 结论

来自 8 个地点的研究结果表明, 北大西洋海洋表面的温度变化是中东干旱区湿度的主要影响因素。8cal kaBP 以前气候干旱, 8-4cal kaBP 的气候湿润, 4cal kaBP 以后湿润程度逐步降低。但这只是依据现有的发表结果得出的一个粗略的概念性框架。这个模式在冰期-间冰期尺度上是否适用, 需要更多的高精度、高分辨率的记录来证实, 也需要相关的模拟研究的结果来验证我们提出的中东干旱区气候变化的观点。

5 参考文献

- [1] Steig EJ. Mid-Holocene climate change. *Science*, 1999, **286**: 1485-1487.
- [2] Fleitmann D, Burns SJ, Mudelsee M *et al.* Holocene Forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, **300**: 1737-1739.

- [3] Yuan DX, Cheng H, Edwards RL *et al.* Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, **304**: 575-578.
- [4] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL *et al.* The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic Climate. *Science*, 2005, **308**: 854-857.
- [5] Shao XH, Wang YJ, Cheng H *et al.* Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in Central China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**: 221-228.
- [6] Boomer I, Aladin N, Plotnikov I *et al.* The palaeolimnology of the Aral Sea: a review. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 1259-1278.
- [7] Chen CTA, Lan HC, Lou JY *et al.* The dry Holocene Megathermal in Inner Mongolia. *Palaeoecology*, 2003, **193**: 181-200.
- [8] Chen FH, Wu W, Holmes JA *et al.* A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alashan Plateau, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 1401-1410.
- [9] Chen FH, Cheng B, Zhao Y *et al.* Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen records of Lake Zhuyeze, Arid China. *The Holocene*, 2006, **16**: 675-684.
- [10] Schettler G, Liu Q, Mingram J *et al.* East-Asian monsoon variability between 15000 and 2000 cal yr BP recorded in varved sediments of Lake Sihailongwan (northeastern China, Long Gang volcanic field). *The Holocene*, 2006, **16**: 1043-1057.
- [11] Zhao Y, Yu ZC, Chen FH *et al.* Holocene vegetation and climate history at Hurleg Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, **145**: 275-288.
- [12] Landmann G, Reimer A, Lemcke G *et al.* Dating Lateglacial abrupt climate changes in the 14,570 yr long continuous varve record of Lake Van, Turkey. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, **122**: 107-118.
- [13] Wick L, Lemcke G, Sturm M. Evidence of Lateglacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia: high-resolution pollen, charcoal, isotopic and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *The Holocene*, 2003, **13**: 665-675.
- [14] Ferronskii VI, Polyakov VA, Brezgunov VS *et al.* Variations in the hydrological regime of Kara-Bogaz-Gol Gulf, Lake Issyk-Kul, and the Aral Sea assessed based on data of bottom sediment studies. *Water Resources*, 2003, **30**: 252-259.
- [15] Rasmussen KA, Ricketts RD, Johnson TC *et al.* An 8,000 year multi-proxy record from Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. *PAGES News*, 2001, **9**: 5-6.
- [16] Ricketts RD, Johnson TC, Brown ET *et al.* The Holocene paleolimnology of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan: trace element and stable isotope composition of ostracodes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, **176**: 207-227.
- [17] 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起等. 西风区全新世以来湖泊沉积记录的高分辨率古气候演化. *科学通报*, 2007, **52**(9): 1042-1049.
- [18] Wünnemann B, Chen FH, Riedel F *et al.* Holocene lake deposits of Bosten Lake, southern Xinjiang, China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 1429-1432.
- [19] Wünnemann B, Mischke S, Chen FH. A Holocene sedimentary record from Bosten Lake, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, **234**: 223-238.
- [20] 黄小忠. 新疆博斯腾湖记录的亚洲中部干旱区全新世气候变化研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [21] Huang XZ, Chen FH, Fan YX *et al.* Dry late-glacial and early Holocene climate in arid central Asia indicated by lithological and palynological evidence from Bosten Lake, China. *Quaternary International*, 2009, **194**(1-2): 19-27.
- [22] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候波动与重要事件. *中国科学(B 辑)*, 1992, **22**(1-2): 1300-1308.
- [23] 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.
- [24] Peck JA, Khosbayan P, Fowell SJ *et al.* Mid to Late Holocene climate change in north central Mongolia as recorded in the sediments of Lake Telmen. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, **183**: 135-153.
- [25] Fowell SJ, Hansen BCS, Peck JA *et al.* Mid to late Holocene climate evolution of the Lake Telmen basin, North Central Mongolia, based on palynological data. *Quaternary Research*, 2003, **59**: 353-363.
- [26] Chen FH, Yu ZC, Yang ML *et al.* Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, **27**: 351-364.
- [27] 高由禧. 东亚季风的若干问题. 北京: 科学出版社, 1962.
- [28] 李志飞, 吕雁斌, 陶士臣等. 新疆东部全新世气候变化特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, **28**(6): 107-111.
- [29] An CB, Chen FH, Loukas B. Holocene Environmental Changes in Mongolia: A Review. *Global and Planetary Change*, 2008, **63**: 283-289.

- [30] Herzschuh U, Tarasov P, Wunnemann B *et al.* Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, **211**: 1-17.
- [31] Wang WG, Feng ZD, Lee XQ *et al.* Holocene abrupt climate shifts recorded in Gun Nuur lake core, northern Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**: 520-526.
- [32] Feng ZD, Wang WG, Guo LL *et al.* Lacustrine and eolian records of Holocene climate changes in the Mongolian Plateau: preliminary results. *Quaternary International*, 2005, **136**: 25-32.
- [33] 王苏民, 吉 磊. 呼伦湖晚第四纪湖相地层沉积学及湖面波动历史. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 297-306.
- [34] 羊向东, 王苏民. 呼伦湖、乌伦古湖全新世植物群发展与气候环境变化. 海洋与湖沼, 1996, (1): 67-72.
- [35] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以博斯腾湖为例. 第四纪研究, 2006, **26**(6): 881-887.
- [36] Bronk Ramsey C. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal Program. *Radiocarbon*, 1995, **37**: 425-430.
- [37] Bronk Ramsey C. Development of the radiocarbon program OxCal. *Radiocarbon*, 2001, **43**: 355-363.
- [38] Huang XZ, Chen FH, Fan YX *et al.* Dry late-glacial and early Holocene climate in arid central Asia indicated by lithological and palynological evidence from Bosten Lake, China. *Quaternary International*, 2008, **146**: 52-58.
- [39] Yang ML, Chen FH, Wunnemann B *et al.* Holocene lake status records and moisture change in Arid Central Asia. *Quaternary International*, 2008(doi:10.1016/j. quaint. 2008. 01. 003).
- [40] Tarasov PE, Guiot J, Cheddadi R *et al.* Climate in northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, **171**: 635-645.
- [41] Kaplan MR, Wolfe AP. Spatial and temporal variability of Holocene temperature in the North Atlantic region. *Quaternary Research*, 2006, **65**: 223-231.
- [42] Koc N, Jansen E, Hafliðason H *et al.* Paleoclimatographic reconstructions of surface ocean conditions in the Greenland, Iceland and Norwegian Seas through the last 14 ka based on diatoms. *Quaternary Science Reviews*, 1993, **12**: 115-140.
- [43] Birks CJA, Koc N. A high-resolution diatom record of late- Quaternary sea-surface temperatures and oceanographic conditions from the eastern Norwegian Sea. *Boreas*, 2002, **31**: 323-344.
- [44] Kim JH, Meggers H, Rimbu N *et al.* Impacts of the North Atlantic gyre circulation on Holocene climate off northwest Africa. *Geology*, 2007, **35**: 387-390.
- [45] Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N *et al.* Past temperatures directly from the Greenland ice sheet. *Science*, 1998, **282**: 268-271.
- [46] Davis BAS, Brewer S, Stevenson AC *et al.* The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**: 1701-1716.
- [47] McCabe GJ, Palecki MA, Betancourt JL *et al.* Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**: 4136-4141.
- [48] Li YX, Yu ZC, Kodama KP *et al.* Sensitive moisture response to Holocene millennial-scale climate variations in the mid-Atlantic region, USA. *The Holocene*, 2007, **17**: 1-6.
- [49] Bö hner J. General climatic controls and topoclimatic variations in central and high Asia. *Boreas*, 2006, **35**: 279-295.
- [50] Johnsen SJ, Dahl-Jensen D, Gundestrup N *et al.* Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. *Journal of Quaternary Science*, 2001, **16**: 299-307.
- [51] Vandenberghe J, Renssen H, van Huissteden K *et al.* Penetration of Atlantic westerly winds into central and East Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**: 2380-2389.
- [52] Numaguti A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**: 1957-1972.
- [53] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 中国科学出版社, 1979.
- [54] Broccoli AJ, Manabe S. The effects of orography on midlatitude northern hemisphere dry climates. *Journal of Climate*, 1992, **5**: 1181-1201.
- [55] Rodwell MJ, Hoskins BJ. Monsoons and the dynamics of deserts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, **122**: 1385-1404.
- [56] Sato T, Kimura F. Impact of diabatic heating over the Tibetan Plateau on subsidence over northeast Asian arid region. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**: L05809.