

蒸发和环流因素对湖泊演化的影响——河西走廊猪野泽不同位置全新世沉积物古环境意义探讨*

李 育, 李卓仑, 王乃昂

(兰州大学资源环境学院, 兰州大学干旱区水循环与水资源研究中心, 兰州 730000)

摘 要: 湖泊不同位置沉积物重建的古环境变化过程往往具有差异,而这种差异可能揭示了不同的古环境信息. 本文以河西走廊石羊河流域终端湖泊猪野泽为例,探讨湖泊不同位置沉积物所代表的古环境意义. 位于湖盆边缘的三角城剖面可能反映了石羊河上游地区的降水及其古径流量的变化,这种变化在千年尺度上对应了北大西洋 Bond 事件,显示该区域通过季风环流系统与全球气候系统的联系. 位于湖泊中部的 QTH01、QTH02、QTL-03 剖面反映了湖泊演化的信息,显示中全新世期间(约 7.0—约 3.5 cal ka BP)湖泊水位较高的特征,但是这种特征并不能和该流域的古径流相联系,说明该区域湖泊演化除了受千年尺度大气环流特征的影响外,湖泊表面蒸发可能也起了重要作用. 该研究为中亚地区普遍存在的中全新世高湖面问题提供了研究思路.

关键词: 全新世;湖泊演化;环流;蒸发;猪野泽;石羊河;河西走廊

Impacts of evaporation and circulation on lake evolution: paleoenvironmental implications for Holocene sediments at different locations of Lake Zhuye, Hexi Corridor

LI Yu, LI Zhuolun & WANG Nai'ang

(Center for Hydrologic Cycle and Water Resources in Arid Region, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: At different locations of a lake basin, sediments always indicate different environmental histories. In this paper, the terminal lake of the Shiyang River, Hexi Corridor, was taken as an example for investigating the palaeoenvironmental significances of lake sediments at different locations. Located on the edge of the lake basin, the Sanjiaocheng section may reflect the paleo-rainfall and paleo-runoff in the upper reaches of the Shiyang River, which corresponded to the millennial-scale Bond Events in the North Atlantic Ocean. The correlation could be caused by the linkage between the Asian monsoon circulation and the North Atlantic Ocean. Located in the middle of the lake basin, the QTH01, QTH02, QTL-03 sections reflect the information relating to the lake evolution, showing relatively high lake level during the mid-Holocene (~ 7.0 ~ 3.5 cal ka BP); however, the high lake level was not related to the Holocene paleo-runoff change. Therefore, the lake evolution was not only affected by the millennial-scale atmospheric circulation, but also by the lake surface evaporation. The mid-Holocene high lake levels were widely reported in arid Central Asia. This research provided new clues for detecting the climatic mechanisms of the mid-Holocene high lake levels in arid Central Asia.

Keywords: Holocene; lake evolution; circulation; evaporation; Lake Zhuye; Shiyang River; Hexi Corridor

根据湖泊表层沉积物的孢粉及理化指标研究^[14],湖盆不同位置沉积物的各种指标具有不同程度的差异,特别在干旱、半干旱区河流补给为主的湖泊中这种现象更加明显. 因此受湖盆地形、入湖河流等因素的影响,湖泊不同位置沉积物所反映的信息差异也可能会影响湖泊的古环境重建. 在这种情况下,同一湖泊不同位置沉积物往往揭示不同的古环境信息^[5-8]. 对已有重建结果的深入剖析不仅可以为正确认识和评估重建结果的可靠性提供有益的参考,还可以为深入了解该区域过去气候变化背景及其机制提供新的证据.

* 国家自然科学基金项目(41001116)和教育部博士研究生学术新人奖项目联合资助. 2011-11-15 收稿;2011-12-12 收修改稿. 李育,男,1981年生,副教授;E-mail: liyu@lzu.edu.cn.

在中国西北季风-西风过渡地区,全新世气候变化机制较为复杂,已有的重建结果显示季风-西风相互作用和共同影响^[9-10]. 该区域重建结果仍存在一些矛盾之处,其中位于石羊河流域终端湖泊——猪野泽,即显示了重建结果的复杂性和不一致性^[5-8]. 对于这种重建结果的不一致性,李育等^[9]通过该流域及湖泊不同位置全新世孢粉组合研究发现一些位置的孢粉组合并不能反映湖泊的演化,进而提出石羊河流域全新世环境变化可能受到季风与西风的共同作用. 但该区域不同位置沉积物理化指标的具体含义是否还有其他环境意义尚值得进一步分析和探讨. 因此,本文将进一步探讨石羊河终端湖泊猪野泽不同位置沉积物各种指标的具体含义,并在此基础上提出环流因素与蒸发因素对我国干旱、半干旱区全新世湖泊演化的影响.

1 研究区概况

石羊河流域(37°02'~39°17'N,100°57'~104°57'E)位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,流域全长300余千米,总面积 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[11],处于我国西北内陆干旱区与东部季风区的交汇过渡地带. 流域现代气候受到亚洲季风与西风带气流的共同影响^[12-13],流域内部气候条件差异很大,自南向北划分为3个气候区:南部祁连山高寒半干旱半湿润区,年降水量300~600 mm,年蒸发量700~1200 mm;中部走廊平原温凉干旱区,年降水量150~300 mm,年蒸发量1300~2000 mm;北部温暖干旱区,年降水量小于150 mm,年蒸发量2000~2600 mm^[11]. 流域终端湖泊猪野泽位于民勤盆地,其位置及高程见图1. 猪野泽是对终端湖盆的统称,终端湖盆内部又分为白碱湖、东硝池、西硝池、野麻湖和青土湖等小湖盆. 目前,除在猪野泽湖盆东部的白碱湖尚有少量积水外,其它湖泊全部消失,民勤盆地生态恶化严重,成为中国沙尘暴的源地之一^[14].

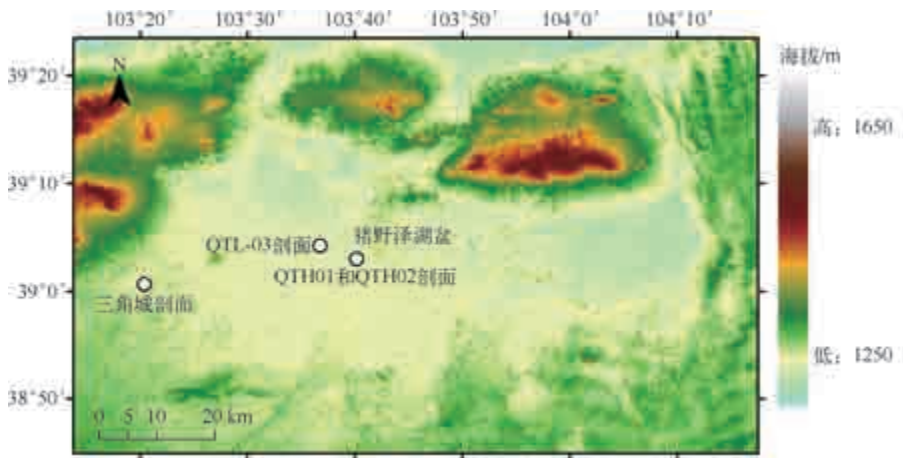


图1 猪野泽湖盆位置及高程示意图(白色空心圆表示三角城、QTH01、QTH02和QTL-03剖面;高程数据来自于30 m精度的ASTER-GDEM数据)

Fig. 1 Location and elevation of the Lake Zhuye basin

2 剖面及年代

该研究区剖面主要有三角城剖面、QTH01、QTH02和QTL-03共四个剖面(图1). 三角城剖面^[5-6](39°00'38"N,103°20'25"E)海拔1320 m,位于猪野泽湖盆西部的边缘位置. QTH01和QTH02剖面^[7-8]为本研究小组在猪野泽中部开挖的全新世剖面,两个剖面相距80 m,海拔1309 m. QTL-03剖面^[15]海拔1302 m,亦在湖盆中部. 上述剖面岩性及年代结果均已报道^[5-8,15],在此不做赘述.

由于上述剖面位于湖泊不同位置,以及受到湖底地形影响,故而在沉积速率和岩性组成上会存在一定的差异^[9]. 除位于湖泊边缘的三角城剖面与其他剖面差异较大,其他位于湖泊中部的QTH01、QTH02和QTL-03剖面均显示出中全新世期间的湖相沉积地层和晚全新世泥炭层和风成沉积. 虽然各剖面岩性存在差异,但是总体具有一定对应性.

该区域全新世沉积物年代测定主要采用 ^{14}C 测年法,由于干旱区湖泊沉积物 ^{14}C 年代结果易受到碳库效应的影响,容易导致测年结果的偏老.在河西走廊中段花海古湖泊碳库效应即在2500 a左右^[16].为了探讨猪野泽全新世沉积物的碳库效应,在QTH01剖面315 cm和425 cm深处通过不同测年物质进行年代对比,结果发现该剖面碳库效应很小^[7,9].同时,通过QTH01剖面OSL结果和 ^{14}C 年代结果的对比,发现不同测年方式的年代结果同样较为接近^[17],进一步表明该剖面碳库效应很小.根据陈发虎等^[5]的研究结果,三角城剖面仅存在550 a左右的碳库效应,亦表明该区域碳库效应较小.由于本研究主要探讨千年尺度的全新世气候变化模式,因此根据以上研究结果该区域的碳库效应所产生的测年结果偏差不会影响本文的研究.

3 结果与讨论

三角城剖面位于湖盆的边缘,其全新世期间主要环境代用指标包括总有机碳含量^[5]、碳酸盐含量^[5]、云杉花粉(*Picea*)含量^[6]、总孢粉浓度^[6](图2).已有的研究表明,由于该剖面距离湖心位置较远并且海拔位置较高,已经处于当时湖泊的边缘,其全新世孢粉组合并不能反映全新世湖泊演化的过程^[9].根据我国干旱、半干旱区岱海、红碱淖、囫囷淖和对口淖等湖泊的表层沉积物花粉组合研究,花粉以风力搬运为主的湖泊表层沉积物花粉组合差异较小,以河流搬运为主的湖泊表层沉积物花粉组合差异较大^[20],所以湖盆不同位置沉积物的花粉组合古环境意义可能受人湖河流的影响.朱艳等^[21]通过对比石羊河流域的空气、表土、河水和河床冲积物中的孢粉组合特征,得出该流域河流搬运孢粉的能力较风力强,并且河水搬运的孢粉对中下游河床冲积物及河水孢粉谱的贡献量非常大,并得出在终端湖泊沉积物中以云杉属为代表的山地乔木花粉主要受河水搬运.另外,青藏高原及临近区域表土花粉中云杉属和冷杉(*Abies*)花粉主要分布在海拔2500~4000 m,年均温度 $-1\sim 10^\circ\text{C}$,年均降雨量450~850 mm的区域^[22].这与猪野泽的气候特征明显不符,也证明了该区域河水对云杉属花粉的搬作用.云杉属植物属于喜冷湿的植物^[23],云杉属花粉气候响应面分析结果也显示,该花粉丰度受到湿度变化的控制^[24],这些说明猪野泽云杉属花粉的变化主要受控于上游祁连山区气候的湿润程度,上游地区降水增加会使云杉林扩张,同时水量增加也可以搬运更多的云杉属花粉到终端湖泊沉积.因此三角城剖面中云杉花粉变化主要揭示了上游降水和径流的变化过程.

此外三角城剖面的古环境指标显示了明显的千年尺度旋回^[5],考虑到测年的误差,这些旋回与北大西洋Bond事件具有很好的对应关系^[5,18],Bond事件发生时,三角城剖面的各种指标大都处于值较小的时期,对应了较小的古径流量.全新世Bond事件发生于北大西洋地区,通过洋流系统的传递,亚洲季风区对于该事件也较敏感.虽然两者是不同的气候系统,并且详细的传输机制仍有待进一步研究,但Bond事件在亚洲季风区却有很好的响应,在我国黄土高原地区也有明显的记录^[25].阿拉伯海弱季风期^[19]与Bond事件的对应关系表明(图2),阿曼和我国的绝对定年高分辨率全新世石笋记录也显示Bond事件发生时季风会突然减弱^[26-27].在青海湖地区,沉积物介形类壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 记录可以作为季风强度变化的一项很好的指标,其变化显示了晚冰期以来的气候并非受东南季风的影响,而主要受西南季风的控制^[28].王可丽等^[29]通过研究西风带与季风对中国西北地区的水汽输送得出石羊河上游位于高原切变线以东地区,受西南季风影响,有沿青藏高原东缘绕行或向北翻越的水汽输送流,并且南亚夏季风通过西南季风气流水汽输送直接影响我国西北地区南部和东部.因此水汽输送过程显示,在石羊河上游地区其水汽来源与青海湖地区具有较好的一致性,均受控于西南季风的水汽输送.Zhang等^[30]的研究结果显示,全新世印度季风与东亚季风强弱变化在时间上具有同步性.另外,季风边缘区千年尺度的降水多寡主要受控于亚洲季风的强弱^[12].近50 a石羊河出山径流对气候变化的响应研究发现,出山径流量的大小主要受控于降水的强弱,降水较多时,出山径流相对较高^[31].因此,当亚洲季风存在千年尺度的强弱波动时,其在该区域的反映主要体现在上游降水的多寡和对应出山径流的高低.三角城剖面中云杉花粉含量高低与Bond事件的很好对应,即证明该剖面云杉花粉含量主要揭示了上游降水的多寡和出山径流的高低.

QTH01、QTH02、QTL-03位于猪野泽中部地区,三个剖面的粒度^[7]、地球化学^[7]及孢粉浓度^[8,15]见图3.由于湖泊不同位置之间重建结果会有一定差异,这种差异可能会影响到千年以下尺度的环境重建结果,即在次一级时间尺度上表现出差异.但上述曲线在千年尺度的趋势上却有很好的 consistency.根据这些指标的显示,中全新世(约7.0—约3.5 cal ka BP)期间,猪野泽中部沉积物粒度较细、TOC、C/N值偏高、有机碳同位素值偏低、总花粉浓度达到全新世期间的最高值.这些指标同时显示在中全新世期间湖泊水位及流域生产力

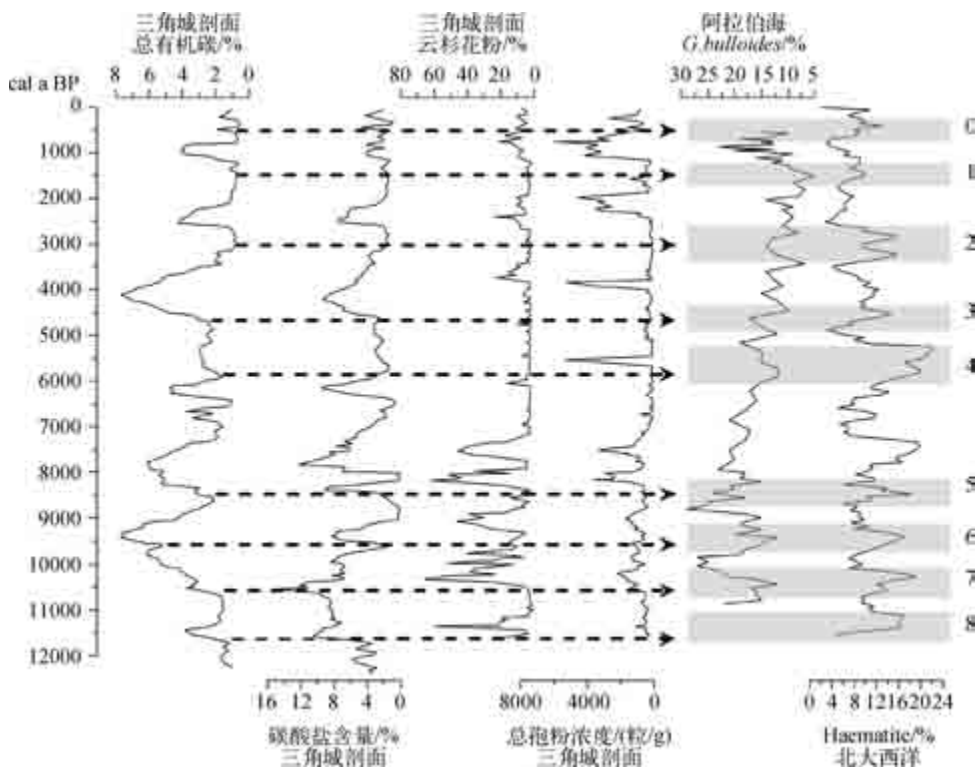


图2 三角城剖面总有机碳、碳酸盐含量、云杉花粉含量和总孢粉浓度在全新世期间的变化过程(图中右侧的两个指标为北大西洋地区全新世钻孔 Haematite 含量显示的 Bond 事件(0~8)^[18]及亚洲季风区阿拉伯海全新世钻孔 *G. bulloides* 含量^[19]显示的亚洲季风对 Bond 事件(0~8)的响应;图中灰色区域指示了 Bond 事件发生的时期,虚线箭头指示了猪野泽地区古径流量对 Bond 事件的响应,右侧的数字代表了 Bond 事件的次数)

Fig. 2 TOC, carbonate content, Picea pollen and total pollen concentration for the Sanjiaocheng section during the Holocene

较高^[7]。这些剖面位于湖盆的中部,海拔位置较低,湖水搅匀作用较强,可以较好地反映全新世湖泊演化状况^[9]。值得说明的是,本文的湖泊演化主要是指湖泊水位变化,它受到环流和湖泊表面蒸发等因素的影响,亦即上游降水、湖泊表面蒸发、流域产汇流及入湖径流共同作用的结果,但无法更为具体反映降水、径流以及季风强度这些单一因素变化对湖泊水位的影响。

位于湖泊边缘三角城剖面所反映的石羊河全新世上游降水和古径流的变化,主要受控于亚洲季风对上游地区降水的影响,而湖泊中部地区的沉积物主要反映全新世湖泊演化的特征。但是石羊河古径流量的变化并没有与猪野泽千年尺度的湖泊演化紧密相关。三角城剖面所反映的石羊河上游降水和古径流量变化显示了明显的千年尺度旋回,并且中全新世期间的径流量相对于早、晚全新世并不高出许多,但是猪野泽中部沉积物所显示的湖泊演化过程却明确显示了中全新世的高湖面,并且得到了地貌学证据的支持^[32-33]。根据水量平衡原理,封闭的湖泊中水位变化受控于3个因素,即入湖径流量、湖泊表面降水量和蒸发量^[34]。猪野泽位于我国干旱地区,年均降水量110 mm,而年水面蒸发量却达到2600 mm^[11],所以湖泊表面降水量对于湖泊水位的影响相对于其他两个因素较小,暂可不讨论;因此在不考虑构造因素的前提下,该地区湖泊演化实质受控于蒸发和径流的双重影响。根据本文的探讨,三角城剖面中全新世云杉花粉含量并未明显增加(图2),表明该时期径流增加不明显,因此该时期高湖面形成的原因可能是由于较低的蒸发量所造成的。本文作者和 Dr. Carrie Morrill 根据 CCSM3 模型结合湖泊能量平衡模型和湖泊水量平衡模型计算出的全新世 8.5 ka、6.0 ka 和 PI (Pre-industry 工业革命之前)之间东、中亚地区湖泊水位变化模式亦可以得出^[34],全新世

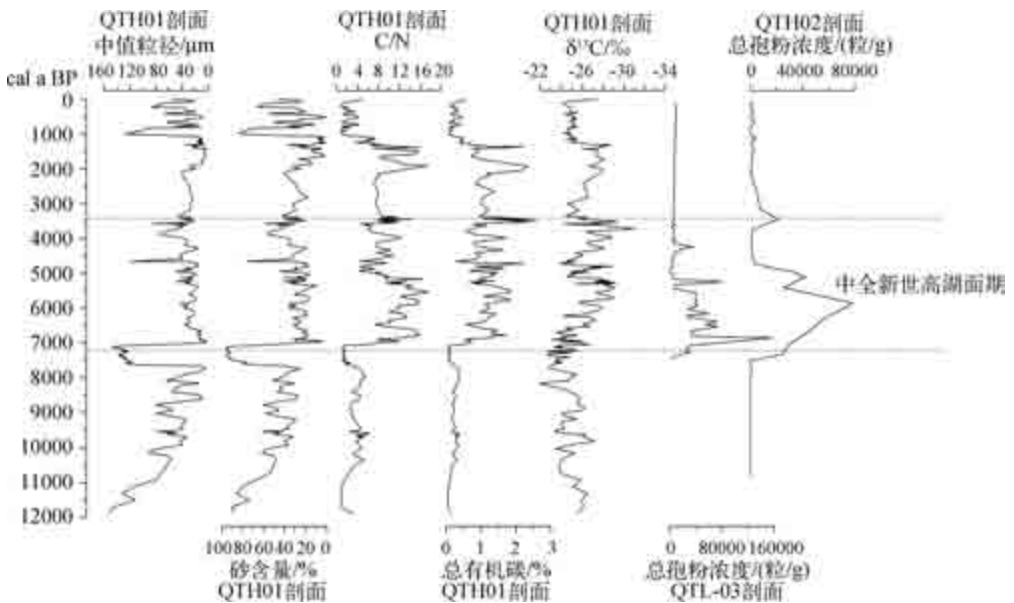


图3 QTH01 剖面中值粒径、砂含量、C/N、总有机碳含量、有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 、QTH02 和 QTL-03 剖面总孢粉浓度示意图(图中虚线划出的范围指示了猪野泽中部地区沉积物反映中全新世高湖面期)

Fig. 3 Median grain-size, sand content, C/N, total organic carbon content, $\delta^{13}\text{C}$ for the QTH01 section, and the total pollen concentration for the QTH02 and QTL-03 sections

间湖泊水位的变化在很大程度上取决于湖泊表面蒸发量;亚洲季风区早、中全新世的高湖面,与早、中全新世期间较低的湖泊表面蒸发量有关,这主要受控于较弱的冬季太阳辐射和较强的亚洲夏季风造成的高云量.而中纬度地区的中全新世高湖面也受该区域冬半年蒸发量较小的影响,主要原因是中全新世期间该区域冬半年湖泊表面被冰覆盖的时间较长,从而蒸发量较小.虽然该项模拟工作使用了全球尺度的 CCSM3 模型,尺度较大,不能针对具体湖泊和具体区域讨论,只能在大范围上讨论湖泊演化的机制.但总体来讲湖泊模型的研究也证明了全新世期间湖泊表面蒸发量对于湖泊演化的作用.

根据本文的进一步分析,石羊河流域全新世古径流量受控于季风环流,而猪野泽全新世的演化过程可能主要受控于湖泊表面蒸发量,环流因素与蒸发因素在该区域全新世环境变化过程中相互博弈,各自体现在不同位置的沉积物指标上.我国干旱、半干旱区以及中亚干旱区许多湖泊都显示了中全新世高湖面的特征,已有研究认为这主要受到西风环流的影响^[12],但该区域不同位置的环境重建结果差异性可能指示了该区域湖面的波动主要是受蒸发和径流的双重影响.

4 结论

通过本文对猪野泽不同位置沉积物重建环境结果的差异分析,位于湖盆边缘的三角城剖面可能反映了石羊河上游地区的降水及其古径流量的变化,而位于湖盆中央的 QTH01、QTH02 和 QTL-03 剖面主要反映了该区域湖泊演化的特征,即湖泊水位波动的情况.

石羊河上游地区降水及其古径流与湖泊演化在时间尺度上差异,尤其是中全新世期间(约 7.0—约 3.5 cal ka BP)湖泊水位较高的特征并不能与和该流域的古径流相联系,反映了该区域在千年尺度的湖泊演化过程中,除了受到千年尺度大气环流特征的影响,湖泊表面蒸发可能在湖泊演化中起主导作用.

致谢:感谢两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见,感谢编辑辛勤的工作.

5 参考文献

- [1] Sugita S. A model of pollen source area for an entire lake surface. *Quaternary Research*, 1993, **39**: 239-244.

- [2] Xu QH, Li YC, Yang XL *et al.* Source and distribution of pollen in the surface sediment of Daihai Lake, Inner Mongolia. *Quaternary International*, 2005, **136**: 33-45.
- [3] Jin ZD, Li FC, Cao JJ *et al.* Geochemistry of Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, north China: Implications for provenance, sedimentary sorting, and catchment weathering. *Geomorphology*, 2006, **80**: 147-163.
- [4] Pradit S, Wattayakorn G, Angsupanich S *et al.* Distribution of trace elements in sediments and biota of Songkhla Lake, Southern Thailand. *Water Air Soil Pollution*, 2010, **206**: 155-174.
- [5] 陈发虎,朱 艳,李吉均等. 民勤盆地湖泊沉积记录的全新世千百年尺度夏季风快速变化. 科学通报,2001,**46**(17):1414-1419.
- [6] Chen FH, Cheng B, Zhao Y *et al.* Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China. *The Holocene*, 2006, **16**: 675-684.
- [7] Li Y, Wang NA, Cheng HY *et al.* Holocene environmental change in the marginal area of the Asian monsoon: a record from Zhuye Lake, NW China. *Boreas*, 2009, **38**: 349-361.
- [8] Li Y, Wang NA, Morrill C *et al.* Environmental change implied by the relationship between pollen assemblages and grain-size in N. W. Chinese lake sediments since the Late Glacial. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2009, **154**: 54-64.
- [9] 李 育,王乃昂,李卓仑等. 石羊河流域全新世孢粉记录及其对气候系统响应争论的启示. 科学通报,2011,**56**(2): 161-173.
- [10] 王乃昂,李卓仑,李 育等. 河西走廊花海剖面晚冰期以来年代学及沉积特征研究. 沉积学报,2011,**29**(3): 552-560.
- [11] 陈隆亨,曲耀光. 河西地区水土资源及其开发利用. 北京:科学出版社,1992:77-78.
- [12] 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 Review*, 2008, **27**: 351-364.
- [13] 中国科学院《中国自然地理气候》编辑委员会. 中国自然地理气候. 北京:科学出版社,1984:1-30.
- [14] 张克存,屈建军,马中华. 近 50a 来民勤沙尘暴的环境特征. 中国沙漠,2004,**24**(3):257-260.
- [15] Zhao Y, Yu ZC, Chen FH *et al.* Holocene vegetation and climate change from a lake sediment record in the Tengger Sandy Desert, northwest China. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**: 2054-2064.
- [16] Wang NA, Li ZL, Li Y *et al.* Younger Dryas event recorded by the mirabilite deposition in Huahai Lake, Hexi Corridor, NW China. *Quaternary International*, 2010 (doi: 10.1016/j.quaint.2010.11.017).
- [17] Long H, Lai ZP, Wang NA *et al.* A combined luminescence and radiocarbon dating study of Holocene lacustrine sediments from arid northern China. *Quaternary Geochronology*, 2011, **6**: 1-9.
- [18] Bond GC, Kromer B, Beer J *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, **294**: 2130-2136.
- [19] Gupta AK, Anderson DM, Overpeck JT. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2003, **421**: 354-357.
- [20] 田 芳,许清海,李月丛等. 中国北方季风尾闾区不同类型湖泊表层沉积物花粉组合特征. 科学通报,2009,**54**(4): 479-487.
- [21] 朱 艳,程 波,陈发虎等. 石羊河流域现代孢粉传播研究. 科学通报,2004,**49**(1):15-21.
- [22] Lu HY, Wu NQ, Yang XD *et al.* Spatial pattern of *Abies* and *Picea* surface pollen distribution along the elevation gradient in the Qinghai-Tibetan Plateau and Xinjiang, China. *Boreas*, 2008, **37**: 254-262.
- [23] 《中国植被》编辑委员会. 中国植被. 北京:科学出版社,1980:195-197.
- [24] 孙湘君,王臻瑜,宋长青. 中国北方部分科属花粉-气候响应面分析. 中国科学:D 辑,1996,**26**:431-436.
- [25] Porter SC, An ZS. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciations. *Nature*, 1995, **375**: 305-308.
- [26] 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.
- [27] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL *et al.* The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, **308**: 854-856.
- [28] Liu XQ, Shen J, Wang SM *et al.* Southwest monsoon changes indicated by oxygen isotope of ostracode shells from sediments in Qinghai Lake since the late Glacial. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(4): 539-544.
- [29] 王可丽,江 灏,赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送. 水科学研究进展,2005,**16**(3):432-438.
- [30] Zhang JW, Chen FH, Holmes JA *et al.* Holocene monsoon climate documented by oxygen and carbon isotopes from lake sediments and peat bogs in China: a review and synthesis. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**: 1973-1987.
- [31] 马宏伟,王乃昂. 近 50 年石羊河出山口径流对气候变化的响应. 干旱区资源与环境,2010,**24**(1):113-117.
- [32] Zhang HC, Peng JL, Ma YZ *et al.* Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, **211**: 45-48.
- [33] 王乃昂,李卓仑,程弘毅等. 阿拉善高原晚第四纪高湖面与大湖期的再探讨. 科学通报,2011,**56**(17):1367-1377.
- [34] Li Y, Morrill C. Multiple factors causing Holocene lake-level change in monsoonal and arid central Asia as identified by model experiments. *Climate Dynamics*, 2010, **35**: 1119-1132.