

doi:10.3799/dqkx.2012.103

# 晚冰期以来月亮湖孢粉记录 反映的古植被与古气候演化

伍婧<sup>1</sup>, 刘强<sup>2</sup>

1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

**摘要:** 地处季风/非季风影响过渡地带的月亮湖是大兴安岭中段阿尔山—柴河火山带中的一个火山口湖。其长8.86 m的沉积岩心孢粉记录, 揭示了末次冰期晚期以来的古植被演化和古气候变化历史: 20.9~18.0 cal. ka B.P. 期间研究区的植被为典型草原, 气候寒冷干旱; 18.0~15.3 cal. ka B.P. 期间研究区的植被为草甸草原, 气候寒冷湿润; 15.3~14.0 cal. ka B.P. 期间乔木开始在当地发育, 植被开始由草甸草原向森林草原转变, 气候向较为温暖湿润的方向转变; 14.0~12.8 cal. ka B.P. 期间森林草原在温暖湿润的气候影响下, 森林扩张, 草原退缩, 与Bølling-Allerød暖期相对应; 12.8~11.8 cal. ka B.P. 期间草原在寒冷气候下扩张, 可与新仙女木期相对应; 11.8~0.8 cal. ka B.P. 期间在较为温暖的气候条件下, 草原在气候快速变冷事件的影响下发生了多次扩张, 其中, 较为明显的6次气温突降事件分别发生在9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 5.4~5.2, 2.3~1.8 cal. ka B.P.. 这些快速气候变化事件与全球和区域中其他高分辨率古气候记录具有可比性, 揭示出月亮湖敏感地记录了全球和区域气候的变化, 同时也表明研究区的高分辨率孢粉分析是研究东亚季风强度变化的良好指标。

**关键词:** 大兴安岭; 月亮湖; 孢粉记录; 末次冰期晚期; 古植被; 古气候。

中图分类号: P534.63

文章编号: 1000-2383(2012)05-0947-08

收稿日期: 2011-11-09

## Pollen-Recorded Vegetation and Climate Changes from Moon Lake since Late Glacial

WU Jing<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>

1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** Moon Lake is one of the volcanic crater lakes at the Aershan-Chaihe volcanic field in the middle part of Daxing'an Mountain Range, located at the current northern margin of the East Asian monsoon. Pollen records of 8.86 m-long sediment core of Moon Lake reveal the vegetation evolution and climate change since the Late Glacial. The result indicates predominantly steppe communities, which are typical of cold and dry climate conditions between 20.9 and 18.0 cal. ka B.P.; the meadow communities which stand for cold and damp climate conditions are present between 18.0 and 15.3 cal. ka B.P.; the beginning of expansion of arbor marks the vegetation change from meadow to forest steppe and the onset of the Late Glacial climatic amelioration towards warm and humid from 15.3 to 14.0 cal. ka B.P.; the woodland expands with the shrink of steppe under the warm and humid climate from 14.0 to 12.8 cal. ka B.P., correlating with the Bølling-Allerød climate event; the steppe expands later from 12.8 to 11.8 cal. ka B.P. effected by the cold climate, correlating with the Younger Dryas climate events; forest steppe dominates study area under warm climate from 11.8 to 0.8 cal. ka B.P. with six times steppe expansion impacted by cold climate events, which occurred at 9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 5.4~5.2, 2.3~1.8 cal. ka B.P. during the Holocene. These climate events are comparable with other global and regional high-resolution paleoclimate records, revealing the Moon Lake sensitively record the global and regional climate change and high-resolution pollen analysis of study area is a good indicator of East Asian monsoon strength change.

**Key words:** Daxing'an Mountain Range; Moon Lake; pollen records; late glacial; palaeobotany; palaeoclimate.

全球气候在近 2 万年经历了末次盛冰期、冰消期和全新世 3 个较大的变化阶段, 其中从末次冰期向全新世的转变期, 即冰消期的气候变化特征一直是研究的重点问题之一。国内外学者就此问题的大量研究结果证实了该时期气候的不稳定性(Broecker, 1994; Bond *et al.*, 1997; Broecker *et al.*, 1998), 但是不同研究区之间这种不稳定性的表现并不一致, 且快速气候变化事件的起止时间也存在较大的分歧(An *et al.*, 1993; Brauer *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2001)。要明确这一时期全球气候变化的规律就需要从气候敏感地带获得可靠的高分辨率的气候记录。

季风区/非季风区的过渡地带对于气候环境变化特别敏感, 现今东亚夏季风能够到达的北缘地带就对气候变化敏感, 但在东北地区这一地带覆盖的区域内高分辨率的古气候记录较为缺乏, 特别是以孢粉为指标、分辨率能够达到数十年水平的记录更为稀少(刘金陵, 1989; Stebich *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2011)。现今这一地区覆盖着的温带针阔混交林, 是我国东北重要的林区。这片古老森林的生物多样性, 以及在东亚季风系统影响下表现出的多变性, 赋予了这一区域古植被、古气候变化重建工作极其重要的意义。因此, 我们选择地处大兴安岭中段的月亮湖作为研究对象, 通过高分辨率的孢粉记录, 揭示 2 万年以来该区域的古植被、古气候变化, 了解末次冰期晚期以来的全球气候变化规律, 对全球变化机制的理解具有重要的意义。

## 1 研究区概况

月亮湖( $47^{\circ}30'25''\text{N}$ ,  $120^{\circ}52'05''\text{E}$ )位于内蒙古自治区扎兰屯市柴河镇境内, 东距柴河镇约 34 km, 西距阿尔山市约 80 km; 地处大兴安岭中部, 属寒温带大陆性季风气候区, 全年受东南海洋暖湿气流与西北干寒气流的交替控制。同时, 由于湖泊的海拔较高(湖面海拔约 1190 m), 因此表现出明显的大陆型高山气候特征, 即春秋相连, 夏季不明显, 冬季漫长寒冷。

月亮湖是一个直径约 220 m 近圆形的小型火山口湖, 属封闭型湖泊, 加之地处东亚季风尾闾区, 在敏感响应全球气候变化影响的同时, 也忠实记录了局地的气候变化。湖水的最大深度为 6.5 m(2006 年夏天实测数据), 湖底地形平坦, 受滑塌作用等不利因素影响小, 非常适合沉积物和孢粉的沉积、保存。湖泊的类型、形态和位置决定了月亮湖是区域和局部气候变化敏感的天然孢粉捕捉器。

月亮湖的湖盆位于火山锥体上部, 四周为火山熔岩和火山碎屑岩组成的火山岩垣, 其上生长着以兴安落叶松(*Larix sibirica*)、桦树(*Betula* spp.)为主的针叶—落叶阔叶混交林, 其下还有一些林下灌丛和草本植物。由于月亮湖地处大兴安岭中段, 气候较大兴安岭北麓温和, 兴安落叶松原始林开始逐渐向白桦(*Betula platyphyll*)—落叶松混交林和蒙古栎(*Quercus mongolicus*)—黑桦(*Betula dahurica*)—落叶松混交林过渡, 植被中寒温型明亮针叶林的成分减少, 中温型夏绿阔叶林成分增多。由于原生的兴安落叶松林和蒙古栎林遭到破坏, 区域中现分布有较多的黑桦林、白桦林、山杨(*Populus davida*ana)林和蒙古栎的萌生矮林、平棒(*Corylus heterophylla*)等灌丛和杂类草草甸(图 1)(王义凤等, 1979; 韩杰等, 2004)。

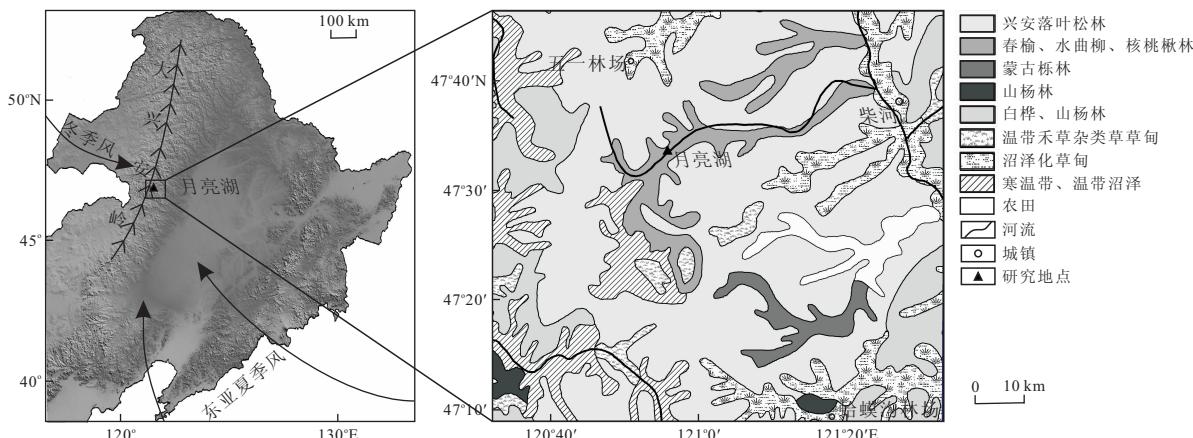


图 1 研究区植被分布及取样点位置

Fig. 1 Sample site location and vegetation surrounding

## 2 材料与方法

月亮湖沉积物岩心于 2007 年 3 月通过使用改进的活塞钻技术(piston drilling)获得。通过月亮湖中心两孔平行的岩心进行拼接, 获得连续的沉积序列, 其最下部深度为 886 cm。沉积序列自下而上为: 886~700 cm 为灰白色的粘土、有机质含量很低; 700~0 cm 为灰黑色的淤泥质粘土、有机质含量较高, 其中 587~350 cm 可见黑白相间的纹层。为了获得可靠的年龄, 21 个样品被送往波兰波兹南<sup>14</sup>C 实验室(Poznan radiocarbon Laboratory) 进行 AMS <sup>14</sup>C 年代测定。位于沉积序列 610 cm 以上的 15 个样品为树叶、果实、种子等植物残体, 其中陆生植物残体 9 个, 水生植物残体 6 个; 610 cm 之下因为缺乏植物残体, 挑选了 6 块沉积物进行全岩年龄测定。21 个 AMS<sup>14</sup>C 年龄经过 Calib6.0 校正程序校正后转换为日历年, 结果显示岩心最底部年龄约为 20.9 cal. ka B. P., 具体采样方法、岩心特征和测年结果参见已发表的文章(刘强等, 2010)。

孢粉样品按 2 cm 间隔采集, 共获得样品 419 个。孢粉浓缩物的提取采用标准的酸碱法(摩尔和韦伯, 1987), 每个样品根据岩性不同取 1~8 g。孢粉鉴定参照正式出版的孢粉图版进行(王开发和王宪曾, 1983; 摩尔和韦伯, 1987; 王伏雄等, 1995)。样品统计的孢粉总数在 349~889 粒之间。孢粉百分含量的计算以陆生植物花粉总和为分母, 孢粉浓度用外加石松孢子法进行计算。

## 3 结果

在月亮湖长 886 cm 的沉积序列中共鉴定出 128 个孢粉类型, 依据孢粉类型和针叶树、阔叶树及草本植物百分含量之间的关系及孢粉浓度特征, 自下而上共划分 6 个孢粉带(图 2)。

带 1: 886~826 cm(20.9~18.0 cal. ka B. P.), 蒿属(*Artemisia*)—禾本科(Gramineae)—莎草科(Cyperaceae)组合带。孢粉组合中草本植物占绝对优势(86.82%~99.52%), 主要由蒿属(26.71%~67.42%)和禾本科(8.88%~37.12%)组成, 并含一定量的莎草科、藜科(Chenopodiaceae)和唐松草属(*Thalictrum*); 针叶树(0~2.25%)和阔叶树(0~8.46%)含量都比较低; 水生植物(0.24%~4.83%)含量较高, 主要是狐尾藻属(*Myriophyllum*)(0~4.83%); 孢粉浓度低( $2.40 \times 10^3 \sim 21.70 \times 10^3$  粒/g)。

带 2: 826~732 cm(18.0~15.3 cal. ka B. P.), 莎草科—蒿属—禾本科组合带。孢粉组合中草本植物仍占绝对优势(90.11%~99.19%), 但莎草科(5.35%~51.22%)花粉含量明显上升, 蒿属(13.66%~51.11%)花粉含量急剧减少, 禾本科(11.50%~32.33%)花粉含量较高; 针叶树(0~1.51%)花粉含量低; 阔叶树(0~10.26%)花粉含量自底部向顶部递增; 水生植物(0.37%~6.44%)含量仍然较高; 孢粉浓度总体较低( $4.12 \times 10^3 \sim 85.64 \times 10^3$  粒/g)。

带 3: 732~588 cm(15.3~11.8 cal. ka B. P.), 蒿属—桦木属—禾本科组合带, 孢粉组合中草本植物(43.78%~93.00%)和阔叶树(5.00%~52.49%)花粉含量较高, 针叶树(0~5.85%)和水生植物(0~2.19%)花粉含量都较低, 孢粉浓度略有变化( $3.88 \times 10^3 \sim 98.81 \times 10^3$  粒/g)。该带可分为 3 个亚带: 3a 亚带(15.3~14.0 cal. ka B. P.)以较高的蒿属(34.37%~67.58%)和快速增长的桦木属(5.00%~19.96%)花粉为特征; 3b 亚带(14.0~12.8 cal. ka B. P.)以较高含量的桦木属(16.40%~51.99%)花粉为特征; 3c 亚带(12.8~11.8 cal. ka B. P.)以高蒿属(31.35%~61.68%)花粉含量为特征。

带 4: 588~432 cm(11.8~9.0 cal. ka B. P.), 桦木属—蒿属—藜科组合带, 以高含量的阔叶树(23.42%~61.35%)花粉和高孢粉浓度( $14.96 \times 10^3 \sim 0.39 \times 10^6$  粒/g)为特征, 针叶树(0~0.56%)和水生植物(0~0.92%)含量很低。该带可分为 2 个亚带: 4a 亚带(11.8~10.8 cal. ka B. P.)以高含量的桦木属(23.15%~61.18%)花粉和整个钻孔最高的孢粉浓度( $77.11 \times 10^3 \sim 0.39 \times 10^6$  粒/g)为特征; 4b 亚带(10.8~9.0 cal. ka B. P.)中阔叶树(24.56%~47.88%)花粉含量降低, 草本植物(50.24%~73.86%)花粉含量增加, 主要是蒿属(30.77%~58.42%)和藜科(2.87%~13.40%)。

带 5: 432~198 cm(9.0~2.9 cal. ka B. P.), 蒿属—桦木属—藜科组合带。孢粉组合中草本植物占优势(34.29%~78.82%), 主要由蒿属(23.00%~71.39%)和藜科(0.36%~9.72%)组成, 并含一定量的禾本科; 阔叶树(19.15%~63.12%)含量波动较大, 主要是桦木属(17.66%~61.60%), 并含一定量的榆属和栎属花粉; 针叶树(0~3.80%)和水生植物(0~2.14%)含量比较低; 孢粉浓度较低( $3.82 \times 10^3 \sim 11.70 \times 10^3$  粒/g)。

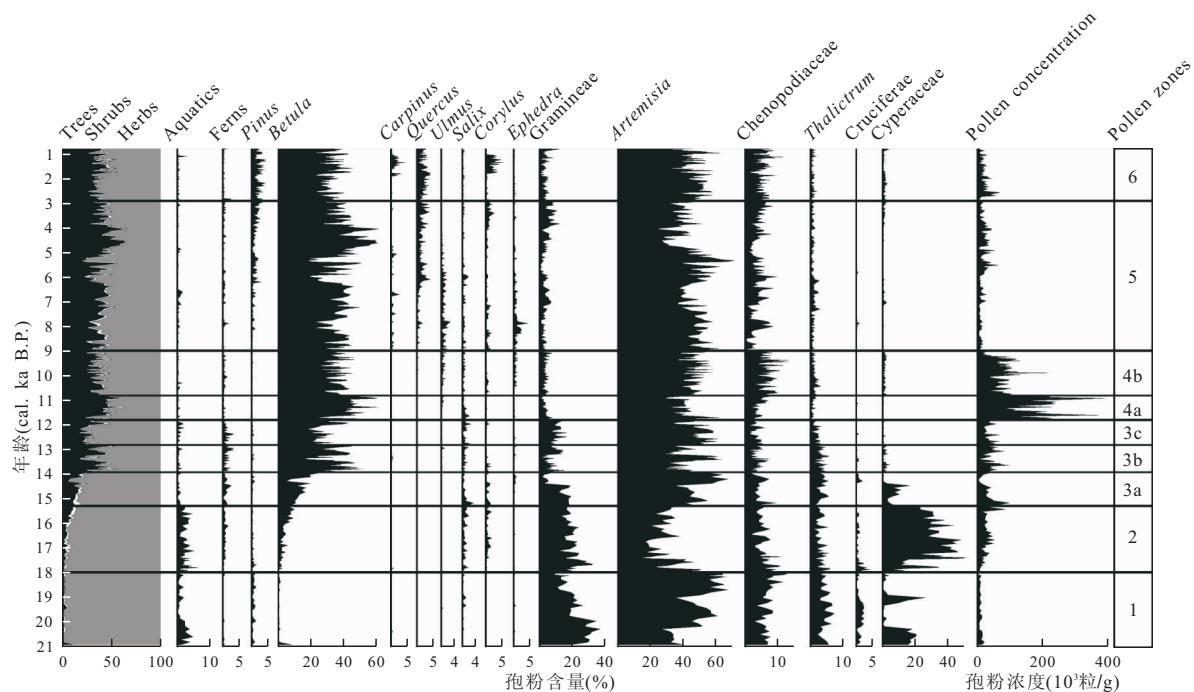


图 2 月亮湖沉积序列主要孢粉类型百分含量

Fig. 2 Pollen percentage of major taxa of Moon Lake

$10^3 \sim 64.32 \times 10^3$  粒/g).

带 6: 198~50 cm(2.9~0.8 cal. ka B. P.), 萍属—桦木属—藜科组合带。孢粉组合中草本植物仍略占优势(44.10%~73.02%), 主要由蒿属(29.47%~62.58%)、藜科(1.12%~11.59%)和禾本科(0.44%~12.19%)组成; 阔叶树(23.36%~50.00%)含量较高, 主要是桦木属(20.41%~45.79%), 并含一定量的栎属, 在钻孔的顶部还含有一定量的鹅耳枥属和榛属; 针叶树(0.40%~4.50%)含量为全钻孔中最高, 主要是松属(0.40%~4.50%); 水生植物(0~3.02%)含量普遍较低; 孢粉浓度较低( $4.04 \times 10^3 \sim 67.55 \times 10^3$  粒/g)。

## 4 讨论

### 4.1 古植被、古气候演化历史

前人对现代土壤的大量研究工作表明, 在孢粉谱中常见的花粉类型中, 蒿属和藜科花粉通常具超代表性(许英勤等, 1996; 刘会平和谢玲娣, 1998; 刘会平等, 2001; 杨振京等, 2003; 程波等, 2004; Li et al., 2005; 李月丛等, 2005; 李月丛等, 2007; 罗传秀等, 2008; 潘韬等, 2008); 桦木属也多具超代表性(童国榜等, 1996; 李宜垠等, 2000; 杨振京等, 2003;

李月丛等, 2005). 禾本科和莎草科除了在西北干旱区和东北的部分研究中具超代表性(阎顺等, 1996; 李宜垠等, 2000; 李月丛等, 2005; 罗传秀等, 2008)之外, 在其他研究区均具低代表性(许英勤等, 1996; 刘会平和谢玲娣, 1998; 刘会平等, 2001; 杨振京等, 2003; 程波等, 2004; 李月丛等, 2005; 蔡遥等, 2007; 潘韬等, 2008). 我们根据绝大多数学者的观点, 以孢粉组合来重建古植被、古气候的演化阶段。值得注意的一点是在现代区域植被中为建群种的落叶松属, 具低代表性(童国榜等, 1996; 张佳华等, 1996; Xu et al., 2007), 其孢粉在孢粉谱中极为少见, 给古植被、古气候演化阶段的推测增加了很大的不确定性。根据孢粉谱, 月亮湖沉积记录的湖盆周边区域的古植被演化大致经历了以下阶段:

20.9~18.0 cal. ka B. P.: 孢粉组合中禾本科花粉含量高于10%, 最高达37%, 蒿属花粉含量大部分高于30%, 最高达70%, 据现代花粉代表性的研究可推测当时当地的植被为以禾本科和蒿属建群的典型草原, 气候较寒冷干旱, 与末次冰盛期的植被气候特征相符。18.0~15.3 cal. ka B. P.: 孢粉组合中莎草科和禾本科花粉含量分别为5.35%~51.22%和11.50%~32.33%, 蒿属花粉含量急剧下降, 大部分低于30%, 这显示当时的植被可能为草甸草原, 气候较为寒冷湿润。

15.3~14.0 cal. ka B. P.: 阔叶树花粉含量, 特别是桦木属(5.00%~19.96%)花粉含量逐步增加, 莎属(34.37%~67.58%)花粉含量也大幅度增加, 可能指示植被从草甸草原向森林草原转变, 气温逐步升高。14.0~12.8 cal. ka B. P.: 桦木属花粉迅速增加且和莎属呈消长关系, 其中 14.0~13.4 和 13.2~12.8 cal. ka B. P. 时期桦木属高含量(>40%)而莎属低含量(>30%)可能显示了森林扩张和温暖湿润的气候; 13.4~13.2 cal. ka B. P. 阶段莎属高含量(>50%)而桦木属低含量(>15%)指示了在较寒冷干旱气候条件下草原的扩张。12.8~11.8 cal. ka B. P.: 以莎属为主的草本植物花粉含量明显升高, 标志着在较寒冷干旱气候下草原的扩张。

11.8~10.8 cal. ka B. P.: 桦木属(23.15%~61.18%)花粉含量的大幅度增加和高孢粉浓度( $77.11 \times 10^3$ ~ $0.39 \times 10^6$  粒/g)指示了森林的扩张和温暖湿润的气候。10.8~9.0 cal. ka B. P.: 莎属(30.77%~58.42%)和藜科(2.87%~13.40%)花粉含量的增加和孢粉浓度( $14.96 \times 10^3$ ~ $0.21 \times 10^6$  粒/g)的降低可能指示了草原扩张, 森林退缩, 但气候仍较为温暖湿润。9.0~2.9 cal. ka B. P.: 孢粉组合仍以莎属和桦木属为主, 且互为消长; 但植物种类增多, 植被为森林草原, 气候温暖湿润。其中 9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 5.4~5.2 cal. ka B. P. 期间, 多次发生森林退缩和草原扩张, 气候温凉偏干。2.9~0.8 cal. ka B. P.: 组合仍以莎属和桦木属花粉为主, 但莎属(29.47%~62.58%)增加, 桦木属(20.41%~45.79%)减少, 特别是 2.3~1.8 cal. ka B. P. 期间, 植被仍以森林草原为主, 但草原扩张, 指示气候更为温凉偏干, 在钻孔顶部榛属灌丛花粉含量的增加指示原生植被有被破坏的迹象, 森林郁闭度降低。

自末次冰盛期以来, 当地的植被经历了典型草原→草甸草原→森林草原→森林扩张→草原扩张→森林扩张→多次快速的草原扩张→草原扩张的转变; 气候经历了寒冷干旱→寒冷湿润→温暖略湿→温暖湿润→寒冷偏湿→温暖湿润→温暖偏干→温凉偏干的阶段。

#### 4.2 快速气候变化事件

末次冰期向全新世过渡期, 即晚冰期, 发生了一系列全球性的快速冷暖变化事件, 包括老仙女木期(Oldest Dryas)、Bølling 暖期、中仙女木期(Older Dryas)、Allerød 暖期和新仙女木期(Younger Dryas)等(刘嘉麒等, 2001)。在进入晚冰期之后, 研究

区孢粉谱的变化更多地反映了气候的冷暖交替: 气候变冷时阔叶树花粉含量减少, 草本花粉含量增加; 气候变暖时则反之。月亮湖孢粉记录显示的 14.0~12.8 cal. ka B. P. 的温暖湿润与 Bølling-Allerød 暖期的气候条件类似, 12.8~11.8 cal. ka B. P. 的降温可与新仙女木期相对应。

Wang *et al.* (2001) 在南京葫芦洞的工作显示, 石笋记录的末次冰期向 Bølling-Allerød 暖期的快速转型发生在 14.6 cal. ka B. P. 前后的 180 a 当中; Bølling-Allerød 暖期的开始时间为 14.5 cal. ka B. P., 结束时间为 12.8 cal. ka B. P., 持续了大约 1 700 a; Dykoski *et al.* (2005) 在贵州董歌洞的工作显示, 自 16.0 cal. ka B. P. 伊始, 东亚夏季风逐渐缓慢增强; 14.7 cal. ka B. P.  $\delta^{18}\text{O}$  数值向偏轻方向的剧烈变化对应着格陵兰地区 Bølling-Allerød 暖期的开始, 这一时期也持续了大约 1 700 a。本研究中, Bølling-Allerød 暖期的开始时间为 14.0 cal. ka B. P., 结束于 12.8 cal. ka B. P., 持续了大约 1 200 a 的时间, 转型开始得较晚, 这可能是研究区纬度较高, 或者是大陆型寒温带地区植被对于气候的响应滞后造成的。新仙女木期是末次冰期向全新世过渡过程中的最后一次快速降温事件, 也是迄今在古气候记录中研究最为详细的一次降温事件。关于新仙女木期的年代较为公认的观点是界于 12.9~11.5 cal. ka B. P. 之间(Bond *et al.*, 1997), 事件大约持续了 1 300 a 左右, 然后突然结束。南京葫芦洞石笋记录的新仙女木期的开始时间为 12.8 cal. ka B. P., 结束时间为 11.5 cal. ka B. P. 左右(Wang *et al.*, 2001); 贵州董歌洞的新仙女木期开始时间为 13.0 cal. ka B. P., 结束时间为 11.5 cal. ka B. P. 左右(Dykoski *et al.*, 2005)。本研究表明, 大兴安岭中段月亮湖周边地区新仙女木期的开始时间为 12.8 cal. ka B. P., 和葫芦洞、董歌洞的结果较为一致, 较属于同一植被带的四海龙湾玛珥湖记录偏早(Stebich *et al.*, 2009)。新仙女木期于 11.8 cal. ka B. P. 左右突然结束, 结束时间较早, 过程迅速, 持续时间仅为 1 000 a, 这一研究结果和四海龙湾玛珥湖的孢粉记录表征的新仙女木期持续时间为 1 000~1 300 a 的研究结果比较一致。

本研究显示全新世以来 6 次较为明显的气温突降事件发生在 9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 5.4~5.2, 2.3~1.8 cal. ka B. P., 其中 8.2~7.8 和 6.1~5.6 cal. ka B. P. 事件与 Bond *et al.* (1997) 提出的千年尺度上的冷事件发生时间

相一致。9.0~8.9, 8.2~7.8 cal. ka B. P. 的冷事件与贵州董歌洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  曲线记录的 9.2 和 8.1/8.2 cal. ka B. P. 降温事件可以类比 (Dykoski *et al.*, 2005), 但事件发生的时间都略晚。9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 2.3~1.8 cal. ka B. P. 发生的气温突降事件与镜泊湖的孢粉记录具有一致性 (Li *et al.*, 2011)。在对位于长白山西坡辉南县的孤山屯泥炭沉积的孢粉记录研究显示, 在 5.0 cal. ka B. P. 左右有一次降温事件 (刘金陵, 1989), 这一事件可与研究区 5.4~5.2 cal. ka B. P. 的降温事件相对应。此外, 很多高分辨率的古气候记录显示, 全新世以来最大的气温突降事件始于 8.4 cal. ka B. P., 结束于 8.0 cal. ka B. P., 峰值出现在 8.2 cal. ka B. P. (即 8200 a B. P. 降温事件), 持续时间 400 a。而本研究区的孢粉资料表明, 8.2 cal. ka B. P. 开始草本植物花粉含量增加, 阔叶树花粉减少, 至 7.8 cal. ka B. P. 结束, 与 8.2 cal. ka B. P. 的降温事件相对应, 持续时间和其他研究相一致, 但开始和结束的时间都略晚, 降温没有新仙女木期剧烈, 这可能是由于定年误差导致的时间偏差。

综上所述, 可以看出月亮湖孢粉记录的这些快速气候变化与东亚季风影响区的其他高分辨率记录有较好的对应性, 在定年误差的范围内, 气候事件具有较好的同步性。月亮湖孢粉记录反映出的降温事件都发生在东亚夏季风强度较弱的时期, 升温事件则伴随着东亚夏季风强度的增强。因此, 月亮湖的孢粉记录敏感地反映了东亚夏季风强度的变化。

## 5 结论

月亮湖沉积序列孢粉谱显示, 研究区自末次冰期晚期以来, 古植被经历了自典型草原向草甸草原, 再向森林草原演化的过程。20.9~18.0 cal. ka B. P. 期间植被为典型草原, 气候寒冷干旱; 18.0~15.3 cal. ka B. P. 期间植被为草甸草原, 气候较为寒冷湿润; 15.3~14.0 cal. ka B. P. 期间植被从草甸草原向森林草原转变, 气温逐步升高; 14.0~12.8 cal. ka B. P. 期间在总体温暖湿润的气候影响下, 草原森林互为消长; 12.8~11.8 cal. ka B. P. 期间草原在较寒冷干旱气候下扩张; 11.8~10.8 cal. ka B. P. 期间森林扩张, 早全新世早期气候温暖湿润; 10.8~9.0 cal. ka B. P. 期间在较为温暖湿润的气候条件下, 草原扩张, 森林退缩; 9.0~2.9 cal. ka

B. P. 期间植被为森林草原, 其间在温凉偏干气候的影响下多次发生森林的退缩和草原的扩张; 2.9~0.8 cal. ka B. P. 期间, 植被仍以森林草原为主, 但草原扩张, 气候更为温凉偏干。

末次冰消期, 研究区的气候波动频繁, 存在明显的冷暖变化, 可与北欧地区的 Bølling-Allerød 暖期和新仙女木期相对应。全新世以来 6 次较为明显的气温突降事件发生在 9.0~8.9, 8.2~7.8, 7.0~6.8, 6.1~5.6, 5.4~5.2, 2.3~1.8 cal. ka B. P.。

致谢: 月亮湖沉积物岩心钻探工作得到了中国科学院地质与地球物理研究所储国强副研究员的大力协助; 岩心分样工作得到旺罗副研究员的帮助; 孢粉分析工作得到中国地质科学院水文地质环境地质研究所童国榜研究员的协助; 数据的分析和文章的修改得到了北京师范大学马玉贞教授的指导, 在此一并表示感谢。

## References

- An, Z. S., Stepen, C. P., Zhou, W. J., et al., 1993. Episode of strengthened Summer Monsoon climate of Younger Dryas age on the Loess Plateau of central China. *Quaternary Research*, 39: 45—54. doi: 10.1006/qres.1993.1005
- Bond, G., Shower, W., Cheseby, M., et al., 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278: 1257—1266. doi: 10.1126/science.278.5341.1257
- Broecker, W. S., 1994. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 374: 421—424. doi: 10.1038/372421a0
- Broecker, W. S., Andree, M., Wolfli, W., et al., 1998. The chronology of the last deglaciation: implication to the cause of the Younger Dryas event. *Paleoceanography*, 3 (1): 1—19. doi: 10.1029/PA003i001p00001
- Brauer, A., Enderes, C., Gunter, C., et al., 1999. High resolution sediment and vegetation response to Younger Dryas climate changes in varved lake sediments from Meerfelder Maar, Germany. *Quaternary Science Reviews*, 18: 321—329. doi: 10.1016/S0277-3791(98)00084-5
- Cai, Y., Wang, Y., Jiang, F. C., et al., 2007. Characteristics of pollen assemblages in surface soils in the Maquan-Hongyuan area, Zogé plateau, northern Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 51(4): 333—339 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, B., Zhu, Y., Chen, F. H., et al., 2004. Relationship

- between the surface pollen and vegetation in Shiyang River drainage, Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(1): 81—88 (in Chinese with English abstract).
- Dykoski, C. A., Edwards, R. L., Cheng, H., et al., 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 71—86. doi: 10.1016/j.epsl.2005.01.036
- Han, J., Wen, R. Y., Chi, Z. Y., 2004. Study on distribution of forest vegetation of Xing'an Mountain Range. *Inner Mongolia Technology and Economy*, 16: 111—113 (in Chinese).
- Li, C. H., Wu, Y. H., Hou, X. H., 2011. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment. *Quaternary International*, 229: 67—73. doi: 10.1016/j.quaint.2009.12.015
- Li, Y. C., Xu, Q. H., Xiao, J. L., et al., 2005. Indication of some major pollen taxa in surface samples to their parent plants of forest in northern China. *Quaternary Sciences*, 25(5): 598—608 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. C., Xu, Q. H., Zhao, Y. K., et al., 2005. Pollen indication to source plants in the eastern desert of China. *Chinese Science Bulletin*, 50(15): 1632—1641. doi: 10.1360/04wd0170
- Li, Y. C., Xu, Q. H., Xiao, J. L., et al., 2007. Relationship between surface pollen and vegetation in some shrub communities of northern China. *Scientia Geographica Sinica*, 27(2): 205—210 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Y., Zhang, X. S., Zhou, G. S., 2000. Study of quantitative relationship between vegetation and pollen in surface samples in the eastern forest area of Northeast China transect. *Acta Botanica Sinica*, 42(1): 81—88 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. P., Tang, X. C., Wang, K. F., et al., 2001. A study on the representation of common pollens in soils on the northern slope of Shennongjia Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 21(4): 378—380 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. P., Xie, L. D., 1998. A study on the representation of some main pollens in Shennongjia region. *Journal of Central China Normal University (Nat. Sci.)*, 32(4): 118—120 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., 1989. Vegetational and climatic changes at Gushantun bog in Jilin, NE China since 13,000 Y. B. P.. *Acta Palaeontologica Sinica*, 28(4): 495—511 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Q., Ni, Y. Y., Chu, G. Q., 2001. Main palaeoclimatic events in the Quaternary. *Quaternary Sciences*, 21(3): 239—248 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., Li, Q., Wang, L., et al., 2010. Stable carbon isotope record of bulk organic matter from a sediment core at Moon Lake in the middle part of Daxing'an Mountain range in Northeast China during the last 21 ka. *Quaternary Sciences*, 30(6): 1069—1077 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1001-7410.2010.06.0
- Luo, C. X., Zheng, Z., Pan, A., et al., 2008. Spatial distribution of modern pollen in Xinjiang region. *Scientia Geographica Sinica*, 28(2): 272—275 (in Chinese with English abstract).
- Mooer, P. D., Web, J. A., 1987. Pollen analysis. Translated by Li, W. Y., Xiang, X. M., Liu, G. X.. Guangxi People's Publishing House, Nanning (in Chinese).
- Pan, T., Wu, S. H., Dai, E. F., et al., 2008. Quantitative relationships between surface pollen and spores assemblages and vegetation in the southern subtropics of Yunnan Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(12): 6060—6069 (in Chinese with English abstract).
- Stebich, M., Mingram, J., Han, J. T., et al., 2009. Late Pleistocene spread of (cool-) temperate forests in Northeast China and climate changes synchronous with the North Atlantic region. *Global and Planetary Change*, 65: 56—70. doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.010
- Tong, G. B., Yang, X. D., Wang, S. M., et al., 1996. Sporopollen dissemination and quantitative character of surface sample of Manzhouli-Dayangshu region. *Acta Botanica Sinica*, 38(10): 815—821 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. X., Qian, N. F., Zhang, Y. L., 1995. Pollen morphology of plant in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, K. F., Wang, X. Z., 1983. Palynology outline. Peking University Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, Y. F., Yong, S. P., Liu, Z. L., 1979. Characteristics of the vegetational zones in the Nei Mongol autonomous region. *Acta Botanica Sinica*, 21(3): 274—284 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, 294(5550): 2345—2348. doi: 10.1126/science.1064618
- Xu, Q. H., Li, Y. C., Yang, X. L., et al., 2007. Quantitative relationship between pollen and vegetation in northern China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 50(1): 1—10.

- (4):582—599. doi:10.1007/s11430-007-2044-y
- Xu, Y. Q., Yan, S., Jia, Q. B., et al., 1996. Relationship between the surface spore-pollen and surrounding vegetation on the south slope of Tianshan Mountains. *Arid Land Geogra*, 19(3): 24—30 (in Chinese with English abstract).
- Yan, S., Jia, B. Q., Xu, Y. Q., et al., 1996. The surface sampling of vegetation and pollen in the source area of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18: 264—273 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. J., Xu, Q. H., Meng, L. R., et al., 2003. Quantitative relationship between pollen in the surface soil and vegetation in the Yanshan area. *Acta Phytocologica Sinica*, 27(6): 804—809 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Kong, Z. C., Du, N. Q., 1996. Pollen analysis of surface samples from Baihua and Dongling Mountains in Beijing. *Marine Geol. & Quarter Geol.*, 16(3): 101—112 (in Chinese with English abstract).
- 刘会平,唐晓春,王开发,等,2001.神农架北坡表土常见花粉的R值研究.地理科学,21(4):378—380.
- 刘会平,谢玲娣,1998.神农架南坡常见花粉的R值研究.华中师范大学学报(自然科学版),32(4):118—120.
- 刘金陵,1989.长白山区孤山屯沼泽地13 000年以来的植被和气候变化.古生物学报,28(4):495—511.
- 刘嘉麒,倪云燕,储国强,2001.第四纪的主要气候事件.第四纪研究,21(3):239—248.
- 刘强,李倩,旺罗,等,2010.21 ka B. P.以来大兴安岭中段月亮湖沉积物全岩有机碳同位素组成变化及其古气候意义.第四纪研究,30(6):1069—1077.
- 罗传秀,郑卓,潘安定,等,2008.新疆地区表土孢粉空间分布规律研究.地理科学,28(2):272—275.
- Mooer, P. D., Web, J. A., 1987. 孢粉分析指南. 李文漪,肖向明,刘光绣,译. 南宁:广西人民出版社.
- 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等,2008.云南亚热带南部表土孢粉组合与植被间的定量关系.生态学报,28(12):6060—6069.
- 童国榜,羊向东,王苏民,等,1996.满洲里一大杨树一带表土孢粉的散布规律及数量特征.植物学报,38(10):814—821.
- 王伏雄,钱南芬,张玉龙,等,1995.中国植物孢粉形态.北京:科学出版社.
- 王开发,王宪曾,1983.孢粉学概论.北京:北京大学出版社.
- 王义凤,雍世鹏,刘钟龄,1979.内蒙古自治区的植被地带特征.植物学报,21(3):274—284.
- 许英勤,阎顺,贾宝全,等,1996.天山南坡表土孢粉分析及其与植被的数量关系.干旱区地理,19(3):24—30.
- 阎顺,贾宝全,许英勤,等,1996.乌鲁木齐河源区植被及表土花粉.冰川冻土,18(增刊):264—273.
- 杨振京,许清海,孟令尧,等,2003.燕山地区表土花粉与植被间的关系.植物生态学报,27(6):804—809.
- 张佳华,孔昭宸,杜乃秋,1996.北京地区百花山、东灵山表土花粉的特征分析.海洋地质与第四纪地质,16(3):101—113.

## 附中文参考文献

- 蔡遥,王燕,蒋复初,等,2007.川北若尔盖高原玛曲—红原一带表土中孢粉组合的特征.地质力学学报,13(4):333—339.
- 程波,朱艳,陈发虎,等,2004.石羊河流域表土孢粉与植被的关系.冰川冻土,26(1):81—88.
- 韩杰,温瑞勇,迟占颖,2004.浅谈大小兴安岭森林植被分布.内蒙古科技与经济,16:111—113.
- 李月丛,许清海,肖举乐,等,2005.中国北方森林植被主要表土花粉类型对植被的指示性.第四纪研究,25(5):598—608.
- 李月丛,许清海,肖举乐,等,2007.中国北方几种灌丛群落表土花粉与植被关系研究.地理科学,27(2):205—210.
- 李宜垠,张新时,周广胜,2000.中国东北样带(NECT)东部森林区的植被与表土花粉的定量关系.植物学报,42(1):81—88.