云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化

沈吉 肖海丰 王苏民 安芷生 强小科 肖霞云

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 哈尔滨师范大学地理系, 哈尔滨 150025; 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075. E-mail: jishen@niglas.ac.cn)

摘要 以云南鹤庆盆地 737 m 深钻湖泊岩芯为材料, 在对碳酸盐、烧失量指标实验分析的基础上, 首先分阶段探讨碳酸盐、烧失量指标演化特点, 然后采用交叉频谱分析和滤波分析方法, 探索西南季风的轨道尺度演化特征. 分析结果显示: 地球轨道参数的斜率、岁差周期是驱动西南季风演化的重要因素; 其次, 全球冰量变化和青藏高原隆升对西南季风演化也有重要影响.

关键词 鹤庆深钻 西南季风 轨道尺度演化

亚洲季风环境的形成和演化是国际全球变化研究十分关注的重大科学问题, 也是中国特色的研究内容. 然而, 较长时期以来中国古季风研究主要集中在东南季风区, 对于西南季风(印度季风)区的情况缺乏系统研究, 尤其是缺乏长时间尺度西南季风演化的陆相记录. Chen等人^[1]通过对位于印度洋东北部的 ODP758 站点(5°23'N, 90°21'E)深海岩芯中底栖有孔虫(*Cibicides wuellerstorfi*)的氧同位素研究, 重建了 2.8 Ma以来反映气候冷暖波动的 112 个氧同位素阶段, 获得了西南季风演化对全球冰量变化的响应; Clemens等人^[2~4]基于阿拉伯海钻孔岩芯的环境指标, 采用频谱分析方法, 揭示了印度夏季风轨道尺度的演化特征. 上述研究成果能否在陆相沉积中找到印证, 实现古气候演化记录的海陆对比.

云南高原位于西南季风区, 新生代以来随着青藏高原的隆升, 该区发育了众多构造断陷湖泊^[5]. 由于湖泊沉积忠实地记录了区域气候与环境的演变过程, 并具有连续性好、分辨率高、包含信息量丰富等特点, 近年来在全球变化和区域环境演化研究中发挥了愈来愈重要的作用^[6,7]. 在国家科技部和中国科学院联合支持的“中国大陆环境钻探计划”资助下, 于 2002 年 7 月在云南高原的鹤庆盆地实施了湖芯钻探, 获得了 737.72 m连续湖泊沉积岩芯. 本文对该深钻岩芯进行了高分辨率的碳酸盐含量和烧失量指标分析, 在此基础上采用交叉频谱分析和滤波分析方法, 探讨西南季风的轨道尺度演化特征.

1 研究区自然地理概况

鹤庆盆地(26°27'~26°46'N, 100°08'~100°17'E)为

一构造断陷盆地, 位于青藏高原东南边缘, 属滇西北横断山余脉. 盆地四周被高山环绕, 周围山峰海拔均在 2500 m以上, 紧邻鹤庆盆地的东西两侧是连续而较高峻的山地, 南面山地稍低, 而北面是相隔约 40 km的玉龙雪山(5596 m), 由此鹤庆盆地形成了一个完整的山间盆地. 盆地面积约 144 km², 呈南北长条形展布, 与构造带走向一致, 南北长约 22 km, 东西宽约 5~10 km, 盆地地势低平, 海拔 2193~2240 m, 北高南低, 坡度约 1°~3°. 盆地四周有小溪、小河汇入, 中部低洼地积水形成草海. 盆地中部有发源于玉龙雪山的漾弓江自北向南流过, 出盆地后折向东流入金沙江, 成为金沙江水系^[8](图 1).

盆地位于西南季风区, 夏季主要受来自孟加拉湾的暖湿气流影响, 冬季受南支西风急流控制, 另外还兼受青藏高原局地气候的影响, 因此具有春暖湿、冬温干的气候特点. 1月均温 8℃, 7月均温 21℃, 年均温 13.5℃. 1月平均降水量 2.4 mm, 7月为 229.3 mm, 年降雨量在 900~1000 mm之间, 主要集中在夏季, 占全年降雨量的 80%~90%^[9].

盆地四周的山地垂直植被带发育, 北部玉龙雪山海拔 5000 m 为雪线高度, 3900 m 为树木线(冷杉林 *Abies* 上线), 3900~5000 m 之间主要由高山杜鹃灌丛、高山蒿草草地和高山砾石(岩屑)冻荒漠组成; 海拔 3100 m 左右山地生境明显变冷湿, 为夏季云雾线所在高度, 其上至 3900 m 都为亚高山寒温针叶林带(云杉林和冷杉林)分布的范围; 2800~3200 m 为山地针阔叶混交林, 以云杉、铁杉和硬叶常绿栎类(*Evergreen sclerophyllous*)为主, 硬叶常绿栎类成分包括黄背栎

图 1 鹤庆钻孔位置图

(*Quercus pannosa*)、光叶高山栎(*Quercus Rehderiana*)等; 2800 m以下为云南松林(*Pinus yunnanensis*); 在低海拔的山谷地区, 由于气候偏暖干, 分布干热河谷稀树灌木草丛^[10].

2 材料与方法

鹤庆深钻孔孔位置 $26^{\circ}33'43.1''\text{N}$, $100^{\circ}10'14.2''\text{E}$, 井口海拔为 2200 m, 孔深 737.72 m. 本次钻探首次在国内采用内衬管取芯的方法, 确保了岩芯不受外力作用而发生扭曲、变形, 全井取芯率高达 97%, 所获得的 737 m 岩芯在岩性特征上表现为 3 个大的沉积旋回: 下部(720.71~382.10 m)、中部(382.10~195.65 m)和上部(195.65~0 m)都是从含砾石泥沙层到粉砂质黏土和黏土的沉积旋回. 底部 737.72~720.71 m 以砾石为主, 是湖盆形成初期的底砾岩(图 2).

烧失量测定是在 550 条件下将样品放入马弗炉中灼烧 5 h, 而后计算失重的百分含量^[11]; 碳酸盐含量测定采用酸碱中和滴定法^[12]. 本次研究对深钻岩芯 200 m 以上按 20 cm 间距取样, 200 m 以下按 50 cm 间距取样, 共取样品 1989 个.

岩芯古地磁定年采用 U-channel 连续采样, 古地磁测定由中国科学院地球环境研究所强小科副研究员在超导磁力仪上完成. 时间标尺是通过天文调谐

来建立的, 以古地磁年代为节点^[13], 选择碳酸盐含量指标作为调谐材料, 以地球轨道的斜率和岁差为调谐目标, 采用自动轨道调谐法进行天文调谐^[14], 详细过程参见文献[15,16]. 采用法国“ANALYSERIES”软件进行数字滤波分析, 本文对 0~2.6 Ma BP 阶段(舍去湖泊形成初期不稳定部分)的碳酸盐含量、烧失量指标进行了 100 ka 滤波分析, 并分阶段将碳酸盐含量、烧失量指标与 ETP(代表地球轨道参数的变化, $\text{ETP} = \text{正交化的偏心率} + \text{正交化的斜率} - \text{正交化的岁差}$)进行交叉频谱分析.

3 分析结果

碳酸盐含量和烧失量曲线显示出大致相似的变化趋势(图 2). 在第一沉积旋回(720.71~382.10 m)中, 720.71~632.81 m 碳酸盐含量和烧失量从低值波动升高; 632.81~489.30 m 是稳定的高值段, 碳酸盐含量大多为 45%~65%, 烧失量大多为 20%~28%; 489.30~382.10 m 碳酸盐含量和烧失量在波动中趋于变小, 其中碳酸盐含量变化范围为 30%~55%, 烧失量变化范围为 16%~22%. 第二沉积旋回(382.10~195.65 m)碳酸盐含量和烧失量都显示出周期性旋回波动, 碳酸盐含量多数在 15%~57% 之间, 烧失量大多在 11%~24% 之间. 第三沉积旋回中, 底部 195.65~184.27 m

图2 鹤庆孔岩性特征与碳酸盐、烧失量指标变化曲线

碳酸盐含量和烧失量呈现上升趋势, 184.27~60 m 碳酸盐含量和烧失量再次出现周期性旋回波动, 60~26 m 碳酸盐含量和烧失量曲线波动幅度明显变小, 碳酸盐含量大多是 40%~50%, 烧失量多数是 17%~24%。26 m 以上碳酸盐含量和烧失量曲线波动幅度再次增大, 并出现最大峰值。从 1.6 m 向上碳酸盐含量和烧失量急剧变小。

碳酸盐含量和烧失量指标的 100 ka 滤波结果显示, 在碳酸盐指标的 100 ka 滤波曲线中(图 3(a)), 2.6~1.5 Ma BP 阶段 100 ka 周期的振幅为中等强度, 1.5~1.0 MaBP 阶段振幅最弱, 从 1.0 Ma BP 开始振幅迅速增强, 而后在 0.8~0.6 Ma BP 间振幅有轻微的弱化, 自 0.6 Ma BP 振幅又开始增强, 而后达到最大强度。在烧失量指标的 100 ka 滤波曲线中(图 3(b)),

2.6~2.0 Ma BP 阶段 100 ka 周期的振幅较弱, 自 2.0 Ma BP 开始增强, 2.0~1.5 Ma BP 间振幅较大, 1.5~1.0 Ma BP 间振幅最弱, 从 1.0 Ma BP 开始振幅再次增强, 并且在 0.4 MaBP 振幅达到最大强度。

图 4 为碳酸盐含量、烧失量指标在 2.6~1.6, 1.6~1.0 和 1.0~0 Ma BP 三个演化阶段与 ETP 的交叉频谱分析结果。由图 4 可见, 就碳酸盐含量、烧失量指标的功率谱而言, 在 2.6~1.6 Ma BP 阶段两类指标显示 41 ka 周期的强度最大, 23 ka 周期也很明显; 在 1.6~1.0 Ma BP 阶段, 碳酸盐含量、烧失量指标功率谱中最强周期除了 41 ka, 还出现了 54 ka 的周期; 在 1.0~0 Ma BP 阶段两类指标的功率谱中 100 ka 周期的强度最大。

三个演化阶段的碳酸盐含量、烧失量指标与 ETP 的相关性在 41 和 23 ka 周期上均通过了检验, 表明两

图 3 碳酸盐含量曲线 100 ka 滤波结果(a)和烧失量曲线 100 ka 滤波结果(b)

图 4 鹤庆钻孔碳酸盐含量、烧失量指标与 ETP 的分阶段交叉频谱分析结果

点划线代表 ETP 的谱; 实线代表碳酸盐或烧失量指标的谱; 点线代表相关系数; 水平实线代表相关系数 80% 的检验标准. (a) 1.0~0 Ma BP 阶段碳酸盐指标与 ETP 的交叉频谱; (b) 1.0~0 Ma BP 阶段烧失量指标与 ETP 的交叉频谱; (c) 1.6~1.0 Ma BP 阶段碳酸盐指标与 ETP 的交叉频谱; (d) 1.6~1.0 Ma BP 阶段烧失量指标与 ETP 的交叉频谱; (e) 2.6~1.6 Ma BP 阶段碳酸盐指标与 ETP 的交叉频谱; (f) 2.6~1.6 Ma BP 阶段烧失量指标与 ETP 的交叉频谱

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/CSB2007-52-10-1168>

类指标与斜率和岁差周期一直为强相关。1.0~0 Ma BP阶段碳酸盐含量、烧失量指标的功率谱中 100 ka 周期虽然强度最大,但两类指标与 ETP 的相关性没能通过检验,即在此周期上不能证明碳酸盐含量、烧失量指标与地球轨道参数存在线性响应关系。

4 讨论

烧失量指标主要反映沉积物中有机质含量^[17],代表了湖泊及其流域初始生产力。湖泊及其流域的初始生产力主要受控于区域降水及其水热组合特点,而该区域的降水主要受西南季风强弱变化的影响^[18]。湖泊沉积物中碳酸盐的来源主要包括外源和内源,外源是指流域内通过地表径流输入湖泊的碳酸盐,内源包括生物成因和湖水化学沉淀产生的碳酸盐^[19]。由于本区是碳酸盐岩分布地区^[20],流域内碳酸盐岩溶蚀并随径流带入湖泊,成为影响沉积物中碳酸盐积累的重要因素,而溶蚀过程主要受夏季西南季风降水的影响,因而沉积物中碳酸盐含量、烧失量指标共同反映了西南季风的强弱变化。此外,湖面的高、低波动是流域降水量的直接记录^[21],高湖面在记录流域较大降水量的同时,其湖底形成的还原环境有利于有机质保存,低湖面则相反。因此,沉积物中有机质含量与湖泊的氧化-还原特征可协同反映湖面的波动历史。

4.1 西南季风演化及其周期性特征

鹤庆深钻岩芯碳酸盐含量和烧失量指标较好地记录了第四纪以来西南季风演化及其环境特征。根据盆地底砾岩分布年代,鹤庆湖盆的形成时间约为 2.78 Ma BP^[13],推测盆地的形成与高原隆升对周边地区的拉张有关,随着青藏高原的隆升,其周边物质必然向高原汇聚,从而在高原周围拉伸出一系列构造断陷盆地^[22]。施雅风等人^[23]的研究指出,2.8~2.5 Ma BP发生青藏运动B幕,该幕运动使高原面隆升并达到了水汽凝结和动力临界高度,使浅薄高原季风转变为深厚高原季风,在对流层顶形成强大的青藏高压,促使西南季风加强,降水增多。鹤庆盆地在 2.65 Ma BP积水成湖响应于西南季风的增强,湖水逐渐加深反映了西南季风的加强。与此相应,青藏高原中部那曲地区错鄂深钻岩芯的岩性与花粉记录也表现出明显的成湖期^[24]。该时段鹤庆湖泊沉积岩芯中孢粉浓度快速增加,尤其是水生植物孢粉(*Myriophyllum*)具有较高含量(另文发表),指示了流域范围内降水的增多以及湖泊一定深度水体的形成。

2.5~2.0 Ma BP,岩芯以青灰、灰黑色黏土为主,富含有机质和水生植物孢粉,碳酸盐含量和烧失量是全岩芯最高值段,显示稳定的深水还原环境。该时期降水充沛、流域有效湿度较大,是西南季风强盛时期。2.0~1.5 Ma BP期间碳酸盐含量和烧失量指标指示湖水稍有变浅,流域植被显示湖区有效湿度下降,反映西南季风有所减弱。1.5 Ma BP附近岩芯出现含砾石沉积,孢粉组合显示垂直植被带谱发育,反映湖盆与周围山地高差增大的一次构造运动。1.5~1.0 Ma BP期间碳酸盐含量和烧失量指标呈周期性高频震荡,湖面也表现为高低震荡的波动过程,显示该时期西南季风演化主要受地球轨道的影响。1.0 Ma BP附近岩芯中再次出现粗大砾石沉积,孢粉组合表明垂直植被带谱进一步完善,接近现代流域植被带谱,记录了一次强烈而短暂的构造运动。1.0 Ma BP以后碳酸盐含量和烧失量指标再次表现为周期性震荡,但变化的幅度增大且频率降低,反映西南季风周期演化的频率降低。

深钻岩芯碳酸盐含量、烧失量指标与ETP的交叉频谱分析结果显示,在斜率、岁差周期上两者的相关性通过了检验,可见地球轨道参数的斜率、岁差周期是影响西南季风演化的重要因素。Clemens等人^[2]利用阿拉伯海钻孔岩芯,在进行印度季风轨道尺度演化的研究中也发现,气候代用指标与ETP在斜率、岁差周期上是相关的。由此可见西南季风在轨道尺度演化上具有海陆可比性。

4.2 西南季风演化过程中的构造介入以及中更新世气候转型

鹤庆深钻岩芯在 1.5 Ma BP(382.10 m)附近和 1.0 Ma BP(195.65 m)附近分别出现含砾石沉积,这两个时期孢粉组合分别显示了垂直植被带的发育和完善,反映湖盆和周围山地高差的增大。尽管 1.5 Ma BP附近的含砾石沉积似乎与施雅风和李吉均等人^[25]认为的青藏运动C幕相吻合,1.0 Ma BP附近的含砾石沉积也在李吉均等人^[26]认为的昆黄运动时间范围内,但这两个砾石层是否真正记录了青藏高原二次快速的构造隆升事件,或是局部区域性构造运动,仍然需要做更多深入细致的工作来加以确定。

在深钻岩芯碳酸盐含量、烧失量指标的 100 ka 滤波曲线中,从 1.0 Ma BP开始振幅迅速增强,显示了中更新世气候转型的特征。碳酸盐含量、烧失量指标功率谱中,在 1.0~0 Ma BP阶段 100 ka周期突变为主导周期,也显示了中更新世的气候转型。有关中更新

世气候转型的起因,目前仍然是个国际难题。Raymo 等人^[27]在自己的研究中主张,由于晚新生代高原隆升使岩石风化作用加剧,增加了二氧化碳的消耗,当其浓度降到一定值之后,冰盖更容易加大,转入 100 ka 周期。而北大西洋深层水的减少使全球气候干旱化,又是导致转型的直接原因。Berger 等人^[28]认为在长期冰蚀作用下北半球极区的地形遭受改造,产生出深凹的陆架海区,可以容纳更大规模的北半球冰盖,这些冰盖动力学条件的改变,使北半球冰盖的增长不以 41 ka 为限,从而导致了非线性的 100 ka 周期的产生。Shackleton^[29]发现在 100 ka 周期中,冰体积变化落后于空气二氧化碳和深水温度变化,因此认为 100 ka 周期不是由冰盖动力引起的,可能是通过偏心率周期影响空气二氧化碳浓度变化而进入古气候记录的。汪品先等人^[30]在对南沙 ODP1143 孔的研究中发现,100 ka 冰期旋回中的强相位是低纬区的热带表层水反应在先,高纬区与冰盖的相关反应在后,认为气候周期由 41 ka 向 100 ka 转化是全球碳循环和大气二氧化碳的长期变化所致,且低纬海区具有重要贡献。

鹤庆深钻既位于西南季风区,靠近印度洋,又在青藏高原东南边缘。在 1.0 Ma BP 以前该地区气候主要受海洋影响,表现为低纬驱动的信号;1.0 Ma BP 以后,随着青藏高原的隆升,全球冰量变化对气候的影响开始在该地区显现,北极冰盖增大对气候周期的影响通过大气环流影响到研究区。

致谢 衷心感谢同济大学海洋地质国家重点实验室田军老师、中国矿业大学余志伟老师在方法和技术上给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Chen J J, Farrell J W, Murray D W et al. Timescale and paleoceanographic implications of a 3.6 m. y. oxygen isotope record from the northeast Indian Ocean (Ocean Drilling Program site 758). *Paleoceanography*, 1995, 10(1): 21—47[DOI]
- 2 Clemens S C, Prell W L, Murray D et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon. *Nature*, 1991, 353: 720—725 [DOI]
- 3 Clemens S C, Prell W L. A 350000 year summer-monsoon multi-proxy stack from the Owen Ridge, Northern Arabian Sea. *Mar Geol*, 2003, 201(1-3): 35—51[DOI]
- 4 Clemens S C, Murray D W, Prell W L. Nonstationary phase of the Plio-Pleistocene Asian monsoon. *Science*, 1996, 274: 943—947[DOI]
- 5 中国科学院南京地理与湖泊研究所,等. 云南断陷湖泊环境与沉积. 北京: 科学出版社, 1989. 1—5
- 6 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. *科学通报*, 1999, 44(6): 579—587
- 7 沈吉, 王苏民, Matsumoto R, 等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(12): 1017—1023
- 8 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 横断山区自然地理. 北京: 科学出版社, 1997. 90—97
- 9 云南省鹤庆县志编纂委员会. 鹤庆县志. 昆明: 云南人民出版社, 1991. 82—86
- 10 云南植被编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987. 417—773
- 11 Oliver H, Andre F L, Gerry L. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *J Paleol*, 2001, 25: 101—110[DOI]
- 12 沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 508—513
- 13 肖海丰, 沈吉, 肖霞云. 云南省鹤庆盆地 2.78 Ma 以来的环境演化. *湖泊科学*, 2006, 18(3): 255—260
- 14 Yu Z W, Ding Z L. An automatic orbital tuning method for paleoclimate records. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 4525—4528[DOI]
- 15 肖海丰, 沈吉, 肖霞云. 鹤庆孔碳酸盐记录与深海 $\delta^{18}\text{O}$ 、黄土粒度记录的对比分析. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 274—282
- 16 Liu D S, Ding Z L, Rutter N. Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quat Sci Rev*, 1999, 17 (3): 1205—1212[DOI]
- 17 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 烧失量数值波动对北京地区过去气候和环境的特征响应. *生态学报*, 1998, 18(4): 343—347
- 18 蒋雪中, 王苏民, 羊向东. 云南鹤庆盆地 30 ka 以来的古气候与环境变迁. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 10—16
- 19 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(1): 73—80
- 20 蒋雪中, 王苏民, 羊向东, 等. 云南鹤庆盆地末次盛冰期的孢粉记录与古季风. *微体古生物学报*, 2001, 18(3): 263—267
- 21 彭金兰, 王苏民. 云南鹤庆盆地 15 万年以来的介形类及环境变迁. *湖泊科学*, 2003, 15(1): 1—10
- 22 李峰, 薛传东. 滇西北新生代以来地球动力学背景及其环境影响. *大地构造与成矿*, 1999, 23(2): 115—122
- 23 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. *地理学报*, 1999, (1): 10—21
- 24 沈吉, 吕厚远, 王苏民, 等. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部 2.8 MaBP 以来环境演化及其对构造事件响应. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(4): 359—366
- 25 施雅风, 李吉均, 李炳元. 青藏高原晚新生代隆起与环境变化. 广州: 广东科技出版社, 1998. 1—463
- 26 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381—391
- 27 Raymo M E, Oppo D W, Curru W. The mid-pleistocene climate transition: A deep sea carbon isotopic perspective. *Paleoceanography*, 1997, 12(4): 546—559[DOI]
- 28 Berger W H, Jansen E. Mid-Pleistocene climate shift-The Nansen connection. *Geophys Monogr*, 1994, 84: 295—311
- 29 Shackleton N J. The 100000 year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 2000, 289: 1897—1901[DOI]
- 30 汪品先, 田军, 成鑫荣. 第四纪冰期旋回转型在南沙深海的记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(10): 793—799