

## 云南鹤庆钻孔揭示的古生产力轨道尺度演化\*

肖海丰<sup>1,2</sup>, 沈吉<sup>1</sup>, 肖霞云<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 本文在分析鹤庆古湖泊不同演化阶段烧失量指标变化特点的基础上, 采用频谱分析、滤波分析方法, 探讨了该湖泊古生产力轨道尺度的演化特征. 综合分析结果显示: 在整个演化过程中, 由于北半球夏季太阳辐射与南半球潜热输出相位关系的不同, 导致斜率周期一直强于岁差周期; 在 987-1552 ka 阶段, 15 ka、10.7 ka 和 10 ka 为较强周期, 其中 10 ka、10.7 ka 周期是与 100 ka 周期强化有关的半岁差周期; 在湖泊古生产力演化中存在与气候变化相一致的中更新世转型.

**关键词:** 湖泊古生产力; 岁差; 斜率; 鹤庆钻孔

## The orbital scale evolution of the paleoproductivity reflected by Heqing Core in Yunnan Province

XIAO Haifeng<sup>1,2</sup>, SHEN Ji<sup>1</sup> & XIAO Xiayun<sup>1,2</sup>

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

**Abstract:** Based on loss on ignition of different parts of Heqing sediment cores, we studied the characteristics of orbital scale evolution of the lake paleoproductivity by using Spectral analysis and Filter methods. It shows that obliquity cycle is stronger than precession cycle in the 2.78 Ma, due to different phasing relationship between summer insolation in the northern hemisphere and latent heat export in the southern Hemisphere. 15 ka, 10.7 ka and 10 ka are the relatively stronger cycles from 987 ka to 1552 ka, in which 10 ka and 10.7 ka are semi-precession cycles related to the strengthened 100 ka cycles. Further, there is Mid-Pleistocene Revolution coincident with climatic changes in the evolution of lake paleoproductivity.

**Keywords:** Paleoproductivity of the lake; precession; obliquity; Heqing Core

云南鹤庆盆地位于青藏高原东南和云贵高原西北的连接部位, 为一构造断陷盆地, 其形成、演化与青藏高原隆升息息相关<sup>[1]</sup>. 盆地位于西南季风区, 其环境演化深受西南季风影响<sup>[2]</sup>. 对该盆地深钻岩芯的研究可追溯西南季风的演化及高原隆升对盆地的影响过程. 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”将云南鹤庆盆地作为首个深钻地点, 钻取岩芯 737.72 m, 钻孔岩芯以湖相沉积为主. 本研究以此岩芯作为材料, 以湖泊古生产力的演化为切入点, 分析其演化过程及轨道尺度的演化特点, 从而探索其演化的驱动要素及其动力学机制.

### 1 研究区概况

鹤庆盆地(100°8′-100°17′E, 26°27′-26°46′N)位于云南省鹤庆县西北部, 盆地属青藏高原古准平原面的东南延伸部分, 后断陷成盆. 盆地呈南北狭长展布, 与构造方向一致. 盆地北高南低, 海拔 2193-2240 m, 坡度约为 1°-3°, 面积 144 km<sup>2</sup>. 盆地四周群山环绕, 其北 40km 为玉龙雪山(5596 m), 有冰川发育. 盆地

\* 国家自然科学基金重点项目(40331003)和国家自然科学基金项目(40572109)共同资助. 2005-10-17 收稿; 2005-11-28 收修改稿. 肖海丰, 女, 1972 年生, 博士研究生; E-mail: xhf@niglas.ac.cn.

夏季主要受来自孟加拉湾的暖湿气流影响,冬季在南支西风急流控制下,具有冬温、夏暖湿的气候特点.年降水量在 900 - 1000 mm,主要集中于夏季.气温的年较差较小,年平均气温 13.5℃,1月均温 8℃,7月均温 21℃<sup>[3-6]</sup>.

## 2 材料与方法

钻孔位于鹤庆盆地中部.钻孔岩芯总长 737.72 m,底部约 37 m 为盆地形成初期的底砾岩,700 m 之上以湖相沉积为主.钻孔岩芯 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.对样品进行粒度、烧失量指标的测定.烧失量测定是将样品在 105℃ 条件下烘干后称重,之后放入马弗炉中在 550℃ 灼烧 5 h,密闭冷却后称重,而后按照以下公式计算烧失量:

$$P\% = (G - B) / (G - A) \times 100\%$$

其中, $P$  为烧失量; $G$  为坩埚重 + 105℃ 下烘干样重; $A$  为坩埚重; $B$  为 550℃ 下烘干样重 + 坩埚重.粒度测定在中国科学院湖泊沉积与环境重点实验室 Mastersizer - 2000 激光粒度仪上完成,多次重复测量误差 < 2%.古地磁年代测定由中国科学院地球环境研究所强小科副研究员完成,测定结果表明(图 1),B/M 界限位于 152.12 m,193.57 - 233.53 m 为 Jallomiro 极性事件,416.42 - 452.93 m 为 Olduvai 极性事件,Gauss 极性期的顶界在 668.52 m,整个钻孔反映约 2.78 Ma 以来的沉积过程.本文以古地磁测年为基础,采用余志伟<sup>[7]</sup>提出的自动轨道调谐法进行天文调谐来确定时间标尺,具体过程参见文献<sup>[8]</sup>.功率谱分析运用 SPECTRUM 软件<sup>[9]</sup>,使用法国的 "ANALYSERIES" 软件进行数字滤波分析.

## 3 结果与讨论

烧失量指标主要反映沉积物中有机质含量<sup>[10]</sup>,代表了湖泊及其流域初始生产力.由于湖泊及其流域的初始生产力主要受控于湖区气候环境,尤其是流域降水及其水热组合,因此沉积物烧失量的变化通过生产力而间接反映了湖区气候变化的特点.当然,湖泊沉积物的烧失量也受输入和保存两种过程影响<sup>[11]</sup>,在输入和保存条件较稳定的情况下,较快的沉积速率会冲淡有机质含量.

依据烧失量指标的变化特点,结合粒度特征,可将 2.78 MaBP 以来湖泊的古生产力演化过程划分为三个阶段:

阶段 A: 737.72 - 382.1 m (2780 - 1552 ka). 本段又可细分为三部分.本段底部 694.03 m 以下烧失量多在 10% 之下,694.03 m (2.66 MaBP) 附近烧失量突然增高,同时 694.03 - 689.33 m 之间出现大量螺壳,指示鹤庆湖盆此时开始积水成湖.向上 694.03 - 632.81 m (2.66 - 2.6 MaBP) 间烧失量指标继续波动升高,同时中值粒径逐渐变小,岩性以灰绿色泥为主,反映湖水不断加深的过程.中部 632.81 - 489.3 m (2.6 - 2.02 MaBP) 烧失量大多为 20% - 28%,是稳定的高值段,反映此阶段高的生产力水平,指示湖泊周围气候环境适宜,水生和陆上植物繁盛.本段中值粒径大多是 7 - 12  $\mu\text{m}$ ,是整个岩芯中最稳定且偏小的层段,应是指示此阶段稳定且较弱的水动力条件.烧失量指标还受成岩作用影响,其高值为高输入和有利保存条件的组合,通常湖底还原环境更有利于有机质保存;在水深较大情况下,湖泊产生分层现象,使湖底处于还原环境,利于湖底有机质保存<sup>[12]</sup>;因此本亚段是稳定的深水环境.本段上部 489.3 - 382.1 m (2.02 - 1.55 MaBP),烧失量从底部至中部趋于变小,但在上部稍有增大.总之,此阶段中烧失量指标表现为低 - 高 - 低的变化特点,指示古生产力的同类变化趋势.

阶段 B: 382.1 - 195.65 m (1552 - 987 ka). 此段下部 382.1 - 358.58 m (1.55 - 1.48 MaBP) 底界突变为红褐色砾石层,向上为红褐色和青灰色泥夹砂砾,此段中值粒径曲线为突出的峰值,沉积速率突然增大.在盆地分析中通常将沉积速率突然增大<sup>[13]</sup>,并伴随沉积粒极粗增生作为盆地周围山地上升的证据,因而此阶段可能为一次湖盆与周围山地的高差突然加大的构造运动过程.李吉均等的研究指出<sup>[14]</sup>,1.7 MaBP 发生青藏运动的最后一幕.鹤庆盆地可能受该期青藏高原隆升的构造运动影响,控盆断裂的差异升降运动加剧,从而引起山地和盆地高差的加大.本段上部的 358.58 - 195.65 m (1.48 - 0.987 MaBP) 烧失量大多为 11% - 24%,属于全孔的中值水平,该段烧失量曲线的周期性旋回波动特点较明显,指示古生产力的周期性旋回特征.

阶段 C: 195.65 - 0 m (987 - 0 ka). 本段下部 195.65 - 184.27 m (0.987 - 0.91 MaBP) 间岩性变化较大, 底部 195.65 - 189.64 m 为红褐色砂砾混杂堆积, 夹杂一些大砾石, 189.64 m 以上是红褐色粗砂和泥互层. 此阶段中值粒径大多为 10 - 44  $\mu\text{m}$ , 为中值粒径曲线中突出的峰值段, 烧失量曲线为谷值段. 本段岩芯指标变化特征指示山盆相对高差继续增大, 可能是对青藏高原昆黄运动的沉积响应. 从本段底部开始, 烧失量曲线的波动周期明显增大, 波动幅度也稍有增加, 向上 60 - 26 m 段, 烧失量曲线波动幅度明显变小, 比较稳定, 烧失量主要在 17% - 24% 范围内, 处于中高值. 本段上部 26 m 以上, 烧失量波动幅度再次增大, 出现最大峰值. 总之, 此阶段的古生产力演化的周期性旋回性更加突出, 但是不同次阶段的振幅存在差异.

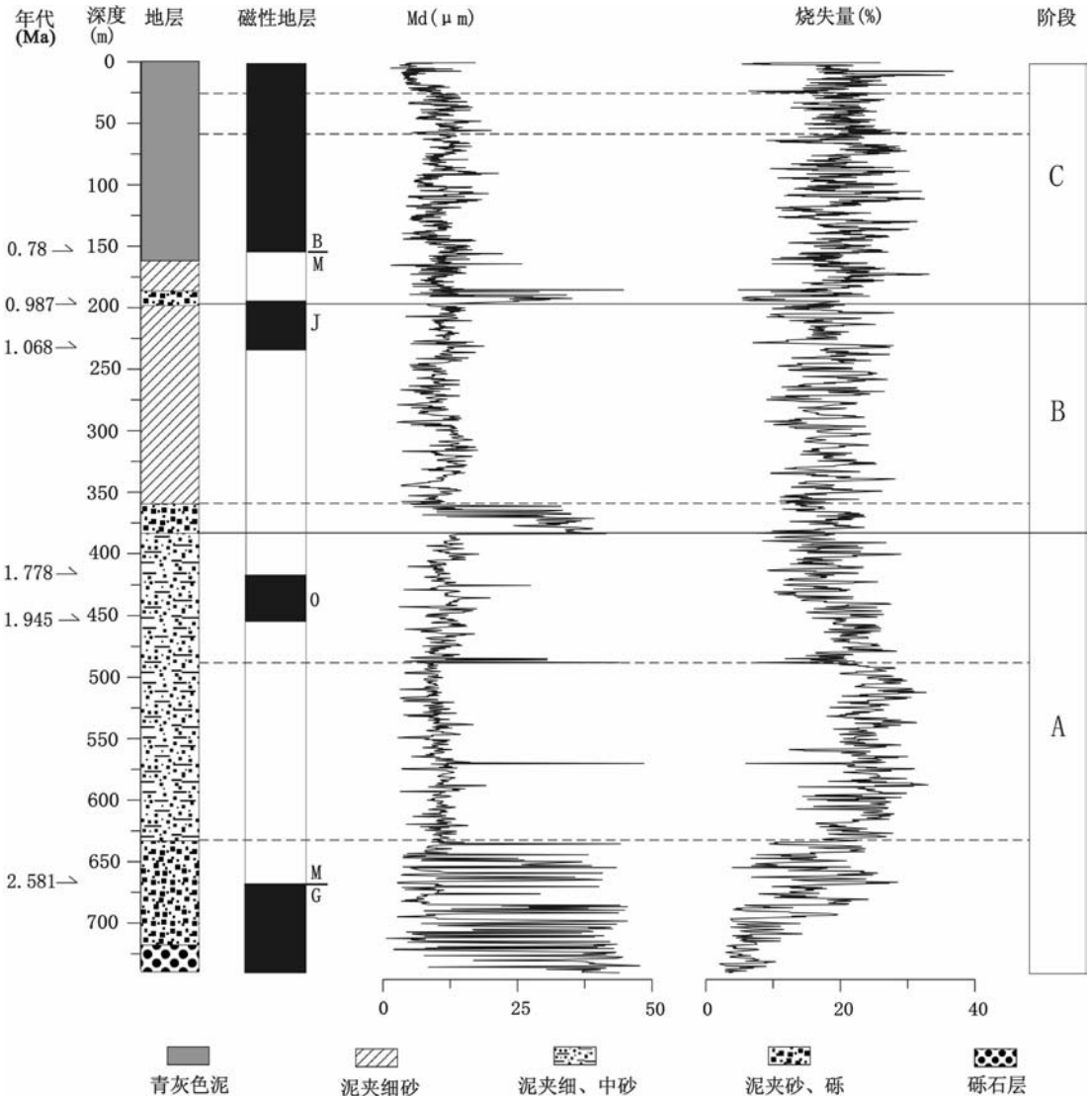


图 1 鹤庆孔岩性特征与环境指标变化曲线

Fig. 1 Lithology feature and curve of environmental proxy change in Heqing Core

为了解古生产力轨道尺度演化特点, 对 0 - 2581 ka 阶段 (舍去湖泊形成初期不稳定的部分) 烧失量指标进行功率谱分析和 100 ka 滤波分析. 图 2 为烧失量指标的 100 ka 滤波结果, 由图可见, 在 2581 - 2000 ka

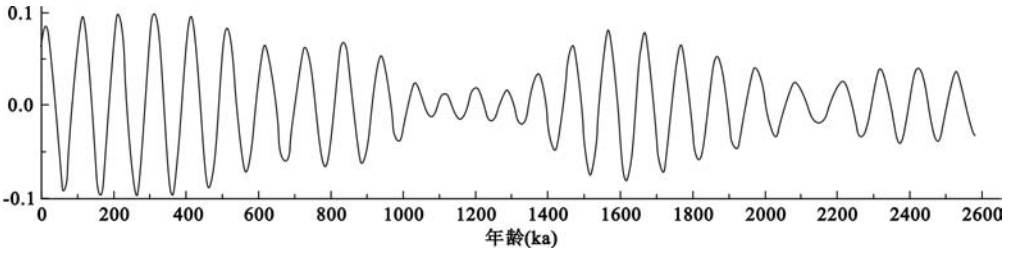


图2 鹤庆孔烧失量指标的100 ka 滤波结果

Fig. 2 Filtered 100 ka curve of loss on ignition in Heqing Core

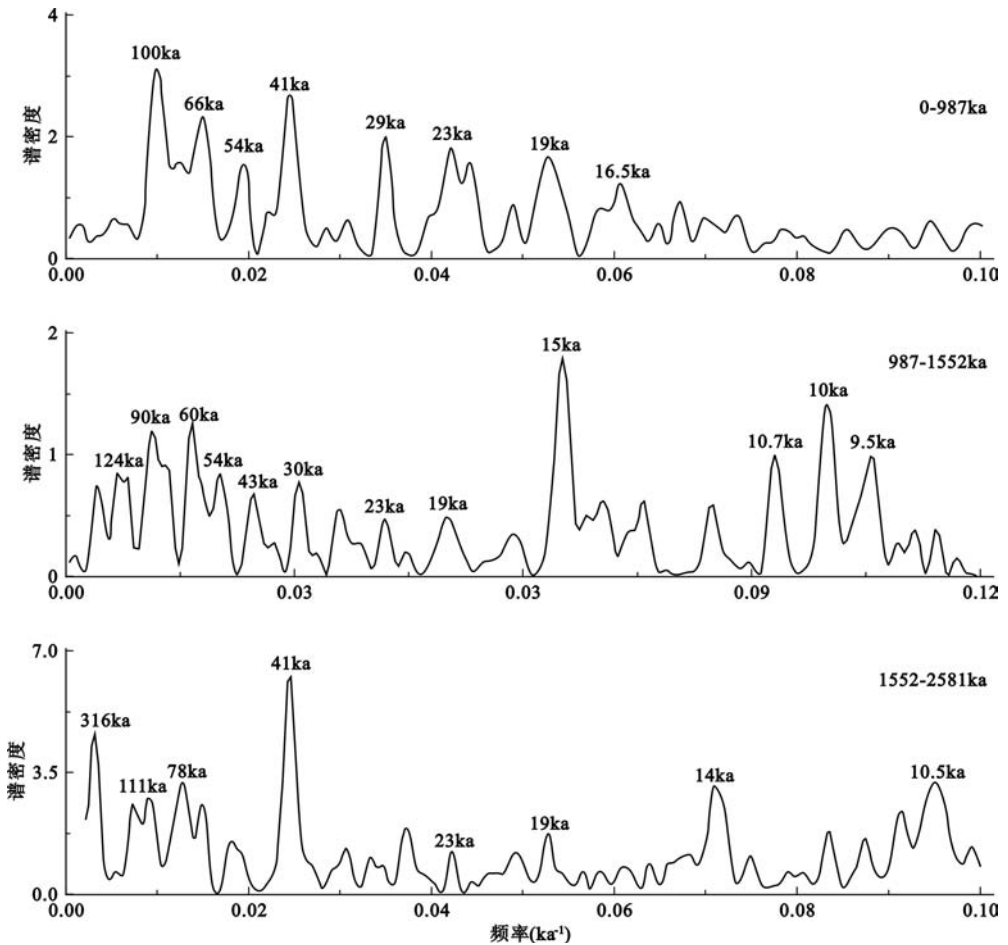


图3 鹤庆孔烧失量指标分阶段功率谱图

Fig. 3 Grading power spectrum of loss on ignition in Heqing Core

间 100 ka 周期的振幅较弱,自 2000 ka 振幅开始增强,2000 - 1400 ka 间振幅较大,1400 - 1000 ka 间振幅最弱,从 1000 ka 开始振幅再次增强,并且在 400 ka 振幅达到最大强度. 对烧失量指标分 0 - 987 ka、987 - 1552 ka、1552 - 2581 ka 三阶段进行功率谱分析(图 3),在 1552 - 2581 ka 阶段的功率谱中,41 ka 周期为最强周

期;以下依次为 316 ka、78 ka、14 ka、10.5 ka 和 111 ka 周期;23 ka、19 ka 周期的强度较弱。987 - 1552 ka 阶段出现较多的周期,15 ka 为最强的周期;其次为 10 ka 周期;然后依次为 60 ka、90 ka、10.7 ka、9.5 ka、124 ka、54 ka、43 ka、30 ka 周期的强度更弱些;23 ka 和 19 ka 周期的强度最弱。0 - 987 ka 阶段 100 ka 周期的强度最大;41 ka 周期的强度稍弱些;以下依次为 66 ka、29 ka、23 ka、19 ka;54 ka 和 16.5 ka 周期的强度最弱。

在烧失量指标的频谱分析和滤波分析基础上,本文从三方面探讨鹤庆湖泊古生产力轨道尺度的演化特征。

### 3.1 斜率周期的影响大于岁差周期

三阶段烧失量指标的功率谱图中一直存在斜率周期和岁差周期,可见鹤庆湖泊古生产力的演化一直受岁差和斜率动力因素驱动(图3)。同时还可看出,在三阶段中斜率周期强度一直强于岁差周期。Clemens<sup>[15]</sup>在对中印度洋西南季风(印度夏季风)演化的分析中也发现这种现象,认为产生的原因是:印度夏季风轨道尺度演化中,同时受北半球夏季太阳辐射和南半球潜热输出的影响,在岁差周期内,这两类过程相位相反彼此削弱,而在斜率周期内两者是同相的,因此使得斜率周期强度大于岁差周期。

### 3.2 987 - 1552 ka 阶段的特殊性

在 987 - 1552 ka 阶段的功率谱中出现多种周期,15 ka 为最突出周期,半岁差周期 10.7 ka、10 ka 的强度较大,斜率周期组(60 ka、54 ka、43 ka 和 30 ka)的强度稍强于偏心率周期(90 ka、124 ka),岁差周期(23 ka、19 ka)为最弱周期。Berger<sup>[16]</sup>在研究中曾指出,15 ka 的气候周期也是由轨道动力引起的;Clemens<sup>[15]</sup>在对印度夏季风的研究中也发现较强的 16 ka 周期,此阶段 15 ka 周期增强的原因有待于进一步探索。此阶段半岁差周期的增强可能为中更新世转型前的过渡,Short 等<sup>[17]</sup>的数值模拟试验结果显示,100 ka 周期高振幅的出现需要模式中引入 10 ka 的半岁差周期;Rutherford 等<sup>[18]</sup>在研究中发现,1.5 Ma 之前热带半岁差循环(11.5 ka)开始传导到高纬,和 100 ka 周期振幅此时出现增长一致,认为由于绕赤道热流增强或北半球约 1.5 Ma 以前从热带到高纬半岁差循环的加强,导致向连续 100 ka 冰期循环的转变。余志伟等<sup>[19]</sup>在对黄土沉积的研究中也发现,100 ka 周期的产生可能是岁差、半岁差周期波非线性交互作用的结果。

### 3.3 中更新世转型的变化

鹤庆烧失量指标 100 ka 滤波曲线中,从 1000 ka 开始振幅明显增强,显示了中更新世气候转型的变化;在三阶段的功率谱分析中,在 0 - 987 ka 阶段 100 ka 突变为主导周期,也显示了中更新世气候的转变,因此鹤庆湖泊古生产力演化揭示了区域气候演化中存在中更新世转型。关于中更新世气候转型的原因,不同的研究者各执己见,Raymo<sup>[20]</sup>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弱使全球气候干旱化,又是导致转型的直接原因。Rutherford 等<sup>[18]</sup>的观点在上文中也已阐述。Shackleton<sup>[21]</sup>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因素引起的,可能是通过偏心率周期影响空气中二氧化碳浓度变化而进入古气候记录的。

本文对烧失量指标 C 阶段的分析中已指出,此时正值青藏高原加速隆升的昆黄运动阶段,那么此阶段 100 ka 周期增强应与青藏高原的加速隆升有关。由于高原加速隆升引起风化剥蚀作用加剧,增加了对空气中二氧化碳的消耗,从而导致二氧化碳浓度降低,当二氧化碳的浓度降到一定值以后,可能使偏心率对其浓度的调控作用突现出来,从而转入 100 ka 周期。

## 4 结论

(1) 沉积岩芯烧失量指标记录了鹤庆古湖 2.78 Ma 以来,从成湖初期较低生产力—深湖形成后较高生产力—湖面波动生产力周期旋回的历史过程。

(2) 鹤庆湖泊古生产力的演化一直受岁差和斜率因素驱动,斜率周期的强度一直强于岁差周期。

(3) 100 ka 滤波曲线和分阶段功率谱分析共同指示了湖区西南季风演化过程中存在中更新世转型。

致谢:衷心感谢同济大学海洋地质实验室田军老师、中国矿业大学余志伟老师在方法和技术上给予的支持和帮助!

## 5 参考文献

- [1] 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. 大地构造与成矿学, 1999, **23**(2): 115 - 122.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 蒋雪中, 王苏民, 杨向东等. 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.
- [5] 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.
- [6] 蒋雪中, 王苏民, 杨向东. 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.
- [7] Yu Z W, Ding Z L. An automatic orbital tuning method for paleoclimate records. *Geophysical Research letters*, 1998, **25**(24): 4525 - 4528.
- [8] 肖海丰, 沈吉, 肖霞云. 云南鹤庆钻孔揭示的西南季风轨道尺度演化. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 274 - 282.
- [9] Schulz M, Statteger K. Spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers and Geosciences*, 1997, **23**: 929 - 945.
- [10] 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.
- [11] 刘春莲, 杨建林. 影响湖相沉积岩中有机碳分布的主要因素——以三水盆地为例. 沉积学报, **19**(10): 113 - 116.
- [12] 王冠民, 钟建华. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望. 岩石矿物学杂志, 2004, **23**(1): 43 - 48.
- [13] 薛滨, 王苏民, 夏威岚等. 若尔盖 RM 孔揭示的青藏高原 900 kaBP 以来的隆升与环境变化. 中国科学(D 辑), 1997, **27**(6): 543 - 547.
- [14] 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: 广州科技出版社, 1998: 399 - 401.
- [15] Clemens S C, Prell W L. A 350,000 year summer-monsoon multi-proxy stack from the Owen Ridge, Northern Arabian Sea. *Marine Geology*, 2003, **201**(1 - 3): 35 - 51.
- [16] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**(4): 297 - 317.
- [17] Short D A, Mengel J G, Crowley T J, et al. Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography. *Quaternary Research*, 1991, **35**(2): 157 - 173.
- [18] Rutherford S, Hondt S D. Early onset and tropical forcing of 100000-year Pleistocene glacial cycles. *Nature*, 2000, **408**: 72 - 75.
- [19] 余志伟, 丁仲礼. 黄土古气候纪录中的 100 ka 周期与岁差、半岁差周期的非线性耦合关系. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 520 - 528.
- [20] 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.
- [21] 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.