

文章编号: 1000-0550(2010) 03-0405-07

湖相叠层石纹层生长节律记录的天文周期信号¹

伊海生^{1,2} 时志强¹ 杨伟¹ 惠博¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都 610059)

摘要 对采自青藏高原北部渐新统雅西措组中的叠层石样品进行了研究,通过切面观察和薄片鉴定,确定这些叠层石具有典型的富藻生物纹层和富屑碎屑纹层交替的显微结构特征,纹层生长带呈阶段式波状和柱状产出。采用样品数字图像的灰度值作为计量纹层个数和纹层厚度变化的指标,提取了 4 件样品的显微纹层厚度变化序列。根据功率谱分析结果,认为叠层石纹层偶为年际生长纹层,纹层偶的厚度变化与太阳黑子活动的 11 年天文周期具有一定的联系,提出湖相环境中叠层石的生长节律记录了太阳活动驱动的气候与环境变化的信息。

关键词 湖泊环境 叠层石 生长周期 频谱分析 太阳活动

第一作者简介 伊海生 男 1959 年出生 博士 博士研究生导师 沉积地质学 E-mail yhs@cdut.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

叠层石是蓝藻类微生物藻席通过生命活动粘结、捕集沉积矿物颗粒而形成的一种生物沉积构造^[1]。根据 20 世纪 60—70 年代对现代巴哈马台地碳酸盐沉积环境的观察资料,当时将海相叠层石的深色和浅色纹层组成的明暗交替的纹层结构解释为蓝绿藻席生长的昼夜节律,认为每个节律代表一个太阳日,即一个深浅纹层组成一对,对应一个日际生长层。有学者根据叠层石纹层中蓝绿藻席的生长和繁殖对应潮汐周期这一认识,曾提出叠层石纹层厚度的周期变化与潮汐韵律纹层类似,记录了地质时期的月节律和年节律,可以用来计算地球和月球之间的轨道参数^[2,3]。陆地湖泊水位涨落与月球周日运动驱动的潮汐现象并不明显,那么陆地湖泊环境产出的叠层石生长周期受什么因素控制?这是一个极有价值的科学问题^[4]。

对采自青藏高原新生代地层中的叠层石样品,采用数字图像分析方法进行了纹层厚度的测量,试图通过湖相叠层石纹层生长节律中周期信号的分析,探讨影响湖泊环境叠层石生长节律的天文控制因素。

1 采样位置和样品制备

样品采自距青藏公路约 30 km 处的通天河剖面,地理坐标分别为 N33°55'45", E92°37'13"。这一地区是青藏高原北部目前发现的渐新统雅西措组地层剖面出露最好的地段,地层序列连续,产状清楚。野外剖面上雅西措组岩性主要为黄褐色砂岩、灰色泥

岩与紫红色砂岩、粉砂岩韵律互层,间夹灰色碳酸盐岩和灰白色石膏层,地层厚度 1 741 m。底部与下伏始新世风火山群之间以细砾岩出现作为分界的标志,顶部灰色泥灰岩段划归中新世五道梁组^[5,6]。在通天河剖面中,雅西措组中下部二个层位见有湖相叠层石,单层厚度 15~25 cm,纹层形态以微波状和柱状为主。我们在剖面 32 层采集了 4 块叠层石样品,编号 Y_p 室内进行切面观测。

室内样品的制备过程中,首先沿叠层石微层生长方向标定切面方向,沿生长线方向每 2 cm 间隔平行切割成一系列薄板状标本,两面打磨成抛光断面,共计制成 4 个光面用于观察和测量。在与磨光面平行的同一方向切割样品,制成透光薄片,供显微镜下研究纹层的矿物组成和结构类型。

2 叠层石纹层形态和类型

垂直于叠层石生长方向的纵切面观察,明暗相间的生长韵律纹层清晰可见,而且纹层常呈波状和柱状产出。波状纹层生长带宽度介于 10~30 mm 之间,侧向延伸表现为平坦水平状或缓波状起伏的带状形态,波长 25~35 mm 左右,最大起伏高度 12 mm。柱状纹层生长带强烈上凸呈现穹窿状或锥状,宽度介于 5~16 mm 之间,一般为 8~12 mm,柱体高度变化于 6.5~45 mm 之间。柱体纵切面直径变化不大,柱体顶部一般呈圆弧形或穹窿状,单个纹层形态显示向上凸起,侧向合并。进一步观察叠层石波状和柱状生长

¹ 国家自然科学基金资助项目(批准号:40972084和 40872082)和教育博士点基金项目(编号:20060616005)资助。

收稿日期:2009-05-29 收修修改稿日期:2009-06-27

纹层带的空间关系,可以发现柱状和波状生长纹层带在纵向上呈旋回性交替出现。一般波状纹层带出现在一个叠层石生长层系的下部,而柱状生长纹层带生在波状纹层带之上,形成一个生长层系。在同一个生长层系内部,柱状纹层带一般出现在波状纹层带的凸起之上,可能反映它们生长在相似的水体环境。但在二个生长层系之间,可以观察到风暴成因的冲刷界面或暴露溶蚀面,指示纹层系生长节律的终止和间断。

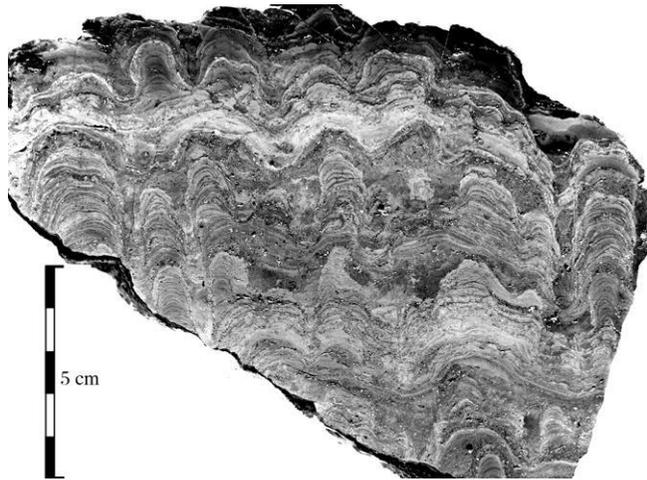


图 1 通天河剖面雅西措组湖相叠层石的纹层形态和韵律结构

Fig. 1 The rhythms and shapes of lacustrine stromatolite laminations from the Yaxiao Formation in Tongtianhe section

在光学显微镜下观察,可鉴别出明亮的碎屑纹层(富屑纹层)和深色的生物纹层(富藻纹层)。当纹层上凸成叠锥形时,明暗带清晰;当纹层呈微波状伸延时,有时几个亮带或暗带逐步合并加宽,亮带和暗带之间的界限模糊不清。进一步放大观察,发现富藻的暗色有机质纹层致密,一般由暗褐色藻斑块、藻丝体有机质残迹和泥微晶方解石构成,含有星散状分布的石英粉砂颗粒,含量变化于 5% ~ 20% 之间。富碎屑的明亮纹层疏松多孔,主要由粒径大小 0.025 ~ 0.005 mm 石英粉砂和泥晶粉屑组成,砂粒呈棱角状,含量 20% ~ 50%,常混有磨圆的浑圆形、椭球状泥晶结构的粉屑颗粒。有时也可见到单一的仅由泥晶粉屑或石英粉砂组成的富屑纹层。富屑纹层粒间填隙物的微细粒基质部分,无论颜色和成分都与富藻有机质纹层类似,但局部也出现微亮晶粒状方解石晶体,环绕砂粒呈薄膜状产出。有机质纹层、石英粉砂纹层、泥晶粉屑纹层组合成为明暗相间的层偶,层偶内

的纹层之间一般呈现渐变过渡关系。

3 叠层石纹层生长周期分析

研究叠层石的纹层生长周期的方法,目前普遍采用在显微镜下或反光镜下,通过目测直接对纹层进行计数和统计分析^[2,3,7]。这种方法对长序列连续的纹层韵律进行测量时,费时费力,而在纹层界线模糊的区域进行测量时又存在明显的误差。本文引进在洞穴石笋、树木年轮、湖泊季节纹泥中广泛采用数字图像分析方法^[8-10],以样品数字图像的灰度值作为计量纹层个数和厚度变化的指标,通过测量样品切面上沉积纹层色度变化,求取纹层个数和厚度,利用纹层厚度数据序列的频谱分析方法,识别叠层石多级生长周期的信息。

3.1 灰度数据采集

将样品抛光面和厚度标尺同时放置在常用扫描仪玻璃面板上进行图像扫描,图像扫描时参数仪器设定为自动对比度和 8 bit 灰度模式,扫描仪分辨率采用 600 dpi 图像灰度数据采集选用 UTHSCSA Image Tool 图像处理软件,导入扫描图像后进行反相处理,提高图像分辨。采用线性剖面工具沿路径采集灰度数据,测线路径一般选择在纹层清晰、生长带明显的剖面线上,采用折线法连续测量,测线宽度和步长设定为 1 pixel 测量结果以灰度值表示,它反映单位像元的反射光强度,其值介于 0(黑色) ~ 256(白色)之间,亮度越大,灰度级越高。ImageTool 软件输出的原始测点坐标位置以像素表示,根据样品扫描时同步放置的刻度标尺,也可以将以像素单位标定的测线路径转换为 mm 刻度的深度单位,最终得到深度-灰度数据序列。

3.2 纹层厚度计算

叠层石生长节律的最小结构单元是浅色富屑纹层和暗色富藻纹层组成的共轭对偶纹层,它在每一个生长节律中显示的数目或厚度变化,是研究叠层石生长周期的基础。样品数字图像的灰度变化曲线具有等间距采样,而且数据序列连续、纵向分辨率高的特点,根据我们提出的计算方法和步骤,通过对灰度数据处理,可以快速而精确的求取纹层个数和纹层厚度。图 2 示例表示利用图像灰度测量数据分步计算样品纹层数目和厚度的过程,具体方法和步骤说明如下:

1) 为了消除样品表面因为颜色差异造成的灰度测量数据偏移,首先采用最小二乘法对原始灰度曲线

进行拟合, 取其与原数据序列之差作为新数据序列;

2) 采用移动平均法过滤背景噪音, 突出纹层韵律的周期波动。移动平均点的取值视单个纹层厚度而定, 实际计算过程中采用 3 点移动平均值消除高频噪音。

3) 对经过前处理的灰度数据序列, 进行一阶差分法计算, 提取明暗纹层对应的坐标位置, 求取对偶纹层的个数和厚度。

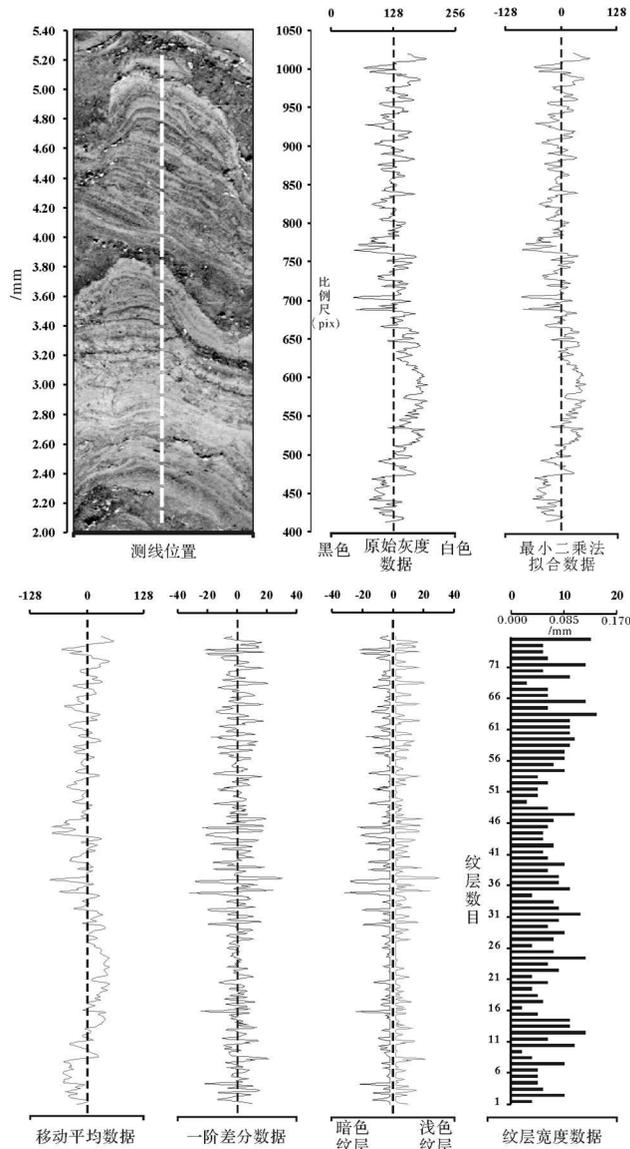


图 2 叠层石磨光断面的灰度测量及纹层厚度计算流程示意图

Fig. 2 The diagram showing grayscale measurement of polished section of stromatolite sample and procedure of lamination couple thickness calculation

线, 可以发现样品灰度变化清晰的反映了纹层节律的变化, 灰度值高对应纹层浅色带, 低值峰则指示暗色纹层; 经过最小二乘法拟合和移动平均处理, 消除了灰度值的长趋势漂移和 高频噪音, 而通过一阶差分处理的新数据序列反映了明暗纹层的分布及其坐标位置。计算结果显示, 在图 2 实验测线长度为 6 m 的路径上, 可识别的纹层层偶计有 75 个, 纹层厚度变化于 2~16 像素单位 (pix), 换算为 mm 单位为 0.17~1.36 mm。

据此方法, 选取纹层韵律清晰的 4 件样品进行了灰度测量和纹层厚度计算, 结果如表 1 所示。从表 1 可见, 研究样品叠层石纹层明暗纹层对厚度变化于 0.17~1.62 mm 之间, 平均厚度为 0.53~0.56 mm, 4 条测线的纹层个数为 164~186 可以满足频谱分析对数据点长度的要求。

表 1 叠层石纹层测量数据一览表

Table 1 The measured data of stromatolite laminations

测线编号	测线长度 /cm	灰度数据 测点	纹层对 数目	纹层对厚度	纹层对厚度
				平均值 /mm	变化范围 /mm
2A1 测线	9.7	1137	179	0.54	0.17~1.28
3A1 测线	10.2	1191	186	0.54	0.17~1.62
3B1 测线	9.5	1117	169	0.56	0.17~1.37
3B2 测线	8.9	1043	164	0.53	0.17~1.62

3.3 纹层厚度频谱分析

频谱分析技术是研究周期性现象中最为常用的一种统计分析方法, 其基本原理是通过对复合波系进行数据变换, 将其分解成若干振幅和相位不同的简谐波, 进而根据子波的主频率求取周期值^[11, 12]。目前广泛采用的频谱分析方法包括功率谱分析法和最大熵谱分析法^[13, 14]。本文采用频谱分析程序 POWGRAF2 对四条测线的纹层厚度数据序列分别进行了红噪音和白噪音背景下的离散傅立叶转换 (DFT) 和快速傅立叶转换 (FFT) 的计算, 通过对比, 证实二者结果相似。兹以图 3 所示红噪音背景下离散傅立叶转换计算的结果, 说明纹层厚度的特征周期分布。

图 3 中横坐标为频率, 纵坐标为功率谱, 一般功率值愈高, 表明这一周期在数据序列中出现的信号越强。功率谱曲线中高点处对应的横坐标值就是数据点的主频率点或主频分布区间, 频率值取倒数就可以获得相应的周期或旋回数, 其单位为纹层层偶数

观察和对比图 2 中原始灰度数据和处理后的曲

目。图中同时标出红噪声 90%、95% 和 99% 置信度曲线。从图 2 中可见, 在 2A1 测线和 3A2 测线的频谱图中, 通过红噪音置信度 99% 检验的最大周期值, 即最低频率的谱峰, 分别出现在频率点 0.0085 到 0.0089 附近, 其对应的纹层对个数为 11.19~11.64, 即每间隔 11 到 12 个纹层, 纹层层偶厚度出现一个变化周期。3B1 和 3B2 测线的低频周期相对要小, 最大周期介于 8.90~10.91 之间。另外, 在中频段还可以检出 4~7 纹层对组成的显著周期, 而高频段旋回周期不明显, 出现一系列弥散的波峰, 偶尔可观察到 2~3 个纹层组成的优势峰。

4 讨论

沉积节律记录了地质历史中的天文周期。这些天文周期包括阴历频段、阳历频段和米兰柯维奇频段。但是, 要判定叠层石生长节律与天文周期的关系, 关键取决于我们对叠层石纹层生长时间长度的认识。目前对叠层石韵律纹层是代表日生长节律还是年际纹层却有不同的解释, 而且现在通常采用的放射性同位素测年方法, 还达不到直接分辨叠层石韵律纹

层生长周期的精度。但是, 如果我们能够根据现代环境观测资料和沉积韵律类比, 认识叠层石纹层的形成机理与自然周期过程的关系, 揭示湖泊环境中有可能最有可能造成纹层沉积旋回的环境因素, 仍然可以说明其时间含义。

根据早期对巴巴马安德鲁斯岛现代碳酸盐沉积物的观察, Monty^[15, 16]最早提出叠层石明暗交替的纹层指示蓝绿藻生长的昼夜节律。他认为白天阳光充足, 藻类的光合作用强, 并且向光生长, 所以藻丝体向上生长; 夜晚光线弱, 藻类则处于休眠状态, 停止生长, 这时潮汐携带的泥砂开始沉降, 这样就形成叠层石中的富藻纹层和富屑纹层, 每一对纹层的生长周期正好是一个昼夜。曹瑞骥^[17]根据古代叠层石中残留的微生物排列方式的观察, 发现叠层石中原始藻丝体有直立和水平状生长方式的变化。他的解释是, 亮层形成于白天, 藻丝体分布稀疏, 垂直向上生长; 暗层形成于夜晚, 藻丝通常水平匍匐状生长, 相互重叠或缠绕在一起, 叠层石中亮带和暗带的周期性交替反映了藻丝体生长模式的昼夜更替。由于叠层石一般生长

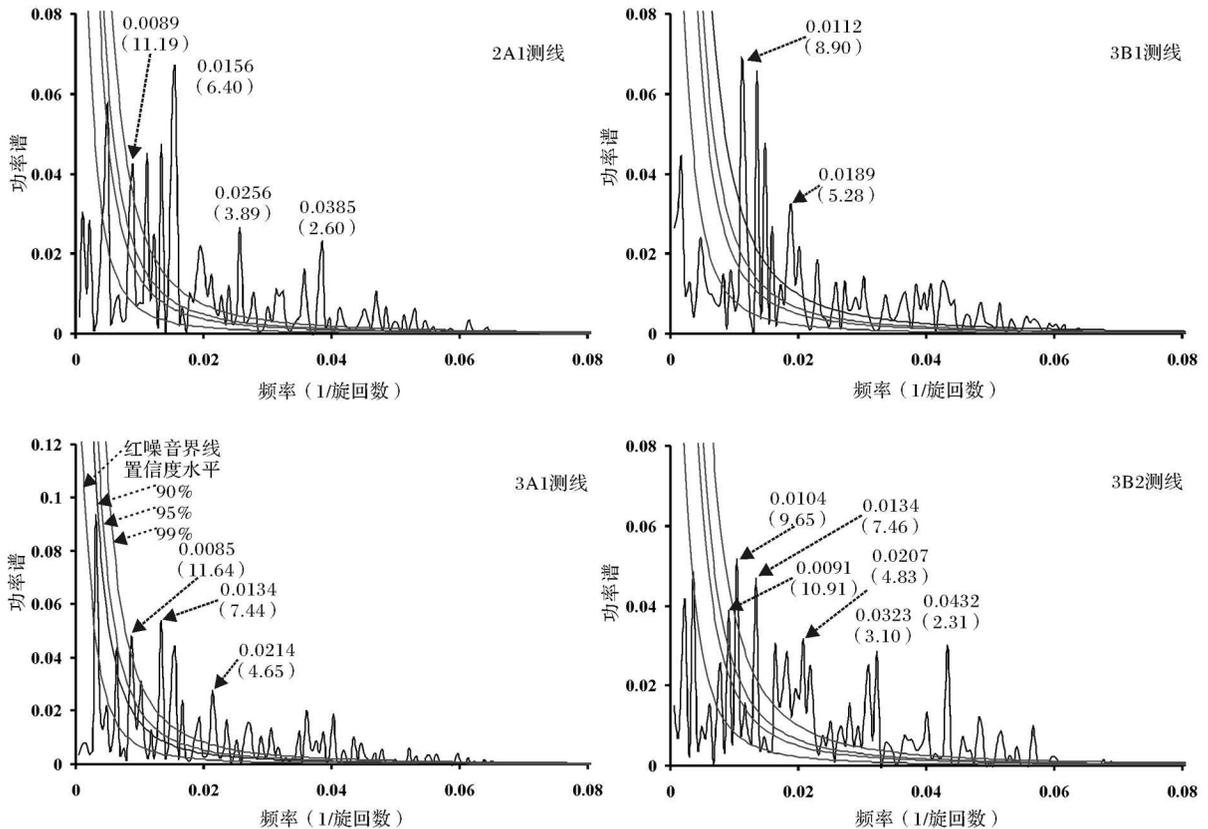


图 3 叠层石剖面纹层厚度的频谱分析图

Fig 3 Power spectrum diagram of lamination thickness values from stromatolites profile

在滨海环境, 其生长和繁殖受潮汐涨落及其所携带泥沙量的影响, 因此叠层石纹层厚度的周期性变化可以反映古代的潮汐周期。根据这个认识, V anyo 等^[17]和 Cao^[18]曾用天、月、季来解释叠层石中的纹层、纹层组和纹层带的周期, 并提出可由此来推断过去地球—月球—太阳位置的变化, 计算古地月距离和古日长度。如朱士兴等^[2]根据华北蓟县系雾迷山组叠层石月节律中的昼夜节律数和年节律中的月节律数, 指出 13 亿年前月球绕地球旋转一周至少需要 42 天, 地球绕太阳公转一周至少需要 546 天。屈原皋等^[3]对周口店地区铁岭组叠层石纹层厚度变化周期进行了研究, 认为 10 亿年前叠层石纹层对的厚度变化反映了月节律和年节律, 提出那时每个月有 40 天, 一年至少有 516 天。

但是, 据 Pannella^[19]和 Jones^[20]对海相叠层石纹层厚度节律的研究, 发现在叠层石中很少能观察到现代和古代潮汐沉积中见到的 14 个纹层对和 28 个纹层对组成的双周潮和月潮周期, 而这二个生长周期是海洋生物介壳最明显的生长节律^[21]。通过¹⁴C 测年也发现, 现代叠层石生长速率每年仅有 0.16 ~ 0.35 mm, 这也不支持将叠层石纹层解释为日生长的观点^[22, 23]。而且应用藻席周日向光性生长的理论也很难解释洞穴黑暗带淡水叠层石和深水大洋锰质叠层石的韵律纹理的形成机理。Davies^[24]对澳大利亚西部鲨鱼湾潮间带叠层石的观察证实, 只有冬季潮汐和冬季风带来泥和沙才能在藻席表面形成富屑纹层, 要到下一年夏季藻席重新开始生长繁盛时才能形成富藻纹层, 因此叠层石的明暗纹层记录的是冬半年和夏半年的季节性周期。Pak^[25]认为, 藻席中蓝绿藻可能是逐日生长的, 也可能存在季节性生长周期, 但富屑纹层形成的明显受季节控制。这是因为正常情况下日潮涨落搬运的泥沙量很少, 因此很难形成富屑纹层, 只有在一年中的季节性高潮期或者是风暴潮期间形成的碎屑纹层才能保存下来, 所以叠层石的纹层是年际纹层。

陆地湖泊水体与滨海环境不同, 它很少受潮汐影响, 日月引潮力驱动的湖平面升降变化十分微弱, 因此很难采用潮汐周期来解释叠层石纹层的生长模式。据 Anderson 等^[26]对现代湖泊的观测, 现代底栖和浮游蓝绿藻群落一般生活在温暖浅水环境。夏季水温上升, 日照与光合作用增强, 藻类生长繁茂, 生物生产力大为增加, 藻类分解的有机质以及藻类生物化学作用诱发的碳酸盐矿物沉淀形成富有机质的微晶碳酸

盐纹层; 单个有机纹层的厚度与季节性水体温度高低以及降水量影响的陆源注入营养成分多少有关。而冬季水温下降, 藻类生长受到抑制或进入休眠期, 陆源石英碎屑和泥晶粉屑含量相对增加, 出现富屑纹层。蓝绿藻生长期短, 它的繁殖受季节控制, 而富屑纹层是正常的湖泊沉积, 其纹层厚度主要受水动力强度变化的影响, 因此叠层石纹层层偶可能指示季节韵律或年际纹层, 气候因素驱动的湖水化学性质的周期性波动可能是控制湖相叠层石生长节律的关键因素。伊海生等^[27]对湖相叠层石的单个暗色纹层和浅色纹层进行了碳、氧同位素分析, 证实纹层同位素成分反映季节性气候变化信号, 提出陆地湖泊环境中叠层石的对偶纹层为年纹层成因。现代和古代湖泊沉积记录中由于季节演替而形成的年纹层的广泛出现为此提供了佐证。例如, Chafeta 等^[28]和 Kano 等^[29]对陆地环境钙化和泉华中叠层石的研究, 也发现这些具有与湖相叠层石相似纹层结构的碳酸盐沉积, 反映的是春夏季和秋冬季节水体化学性质和沉淀速率的变化。

如果叠层石一个共轭对偶纹层沉积的时间周期为一年, 则湖相叠层石生长节律对应的天文周期可以得到最合理的解释。频谱分析图中检出的纹层层偶个数为 9~12 的特征频谱峰, 换算为以年为单位的周期, 则对应太阳黑子活动的 11 年周期 (Schwabe sunspot cycle)。目前, 在现代气候参数测量记录中, 如气温、气压、降雨量以及冰芯、树轮都发现这个周期的存在^[30]。另外, 在古代岩石记录如石炭纪、二叠纪、侏罗纪乃至前寒武纪冰川湖纹泥沉积韵律中也普遍出现^[31, 32]。中频段出现的 4~7 年周期的频谱峰比较分散, 显著性不明显。这个周期在非洲肯尼亚的 Magadi 湖和美国绿河组纹层状沉积中也有报道^[33, 34], 一般解释为它与厄尔尼诺—南方涛动 (ENSO) 事件有关。2~3 年的高频谱峰可能反映降水量变化的准两年振荡周期 ((QBO))。

太阳活动是全球气候与环境变化的主要驱动因素, 太阳黑子数是反映太阳辐照量变化的重要指标。Schwabe 在 1843 年就发现太阳黑子的出现具有平均约 11 年最为显著的周期, 嗣后还发现有与之存在倍频关系的 22 年双重黑子旋回。现代气象和水文观测资料已经证实, 年际降水量和河流径流量都与太阳活动周期之间存在对应关系, 太阳黑子活动的峰值年和谷值年与气候异常现象如厄尔尼诺和拉尼娜事件的振荡周期之间也可能有一定的联系^[30]。Fischer 等^[35]和 Ripepe 等^[33]在研究美国怀俄明州著名的始

新统绿河组沉积时发现,湖相油页岩的年际纹层厚度变化记录有6年周期的 ENSO 旋回和11年周期的太阳黑子周期。黄瑾等^[7]在现代太平洋深海锰质叠层石纹层韵律中也发现纹层组的平均生长周期为10.7年,接近太阳黑子活动的11年周期。这些证据进一步说明,天文因素驱动的气候因素和水文状态变化,是影响湖泊环境中蓝绿藻微生物生长和繁盛主要因素,而湖相叠层石的生长节律,可以作为记录我们研究地质历史时期天文周期信号的地质载体。

5 结论

(1) 采自青藏高原北部雅西措组的湖相叠层石具有明显的富藻生物纹层和富屑碎屑纹层交替的特征,纹层生长带呈波状和柱状产出。湖相叠层石与海相叠层石纹层结构序列相似,也具有多级生长节律。

(2) 采用数字图像的灰度测量技术,可以利用岩石样品磨光面的灰度值作为纹层计数和纹层厚度变化的指标,快速有效地求取高分辨率毫米级纹层厚度数据序列,进而对沉积韵律的周期信号进行分析。

(3) 根据湖相叠层石样品光面实测的纹层厚度进行的频谱分析结果,表明叠层石纹层的生长节律与太阳黑子活动的11年天文周期具有一定的对应关系,太阳辐照量的周期变化驱动湖泊流域的气候要素和水文状态波动,可能是控制湖相叠层石生长模式的主导因素。

参考文献 (References)

- Rilling R. Microbial carbonates—the geological record of calcified bacterial algal mats and biofilms [J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 179–214
- 朱士兴, 黄学光. 13亿年前叠层石的生长节律和地—日—月动力学 [J]. *微生物学报*, 2003, 20(1): 23–30 [Zhu Shixing, Huang Xueguang. The Earth-Sun-Moon dynamics from growth rhythms of 1.300 Ma stromatolites [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2003, 20(1): 23–30]
- 屈原皋, 解古巍, 龚一鸣. 10亿年前的地—日—月关系: 来自叠层石的证据 [J]. *科学通报*, 2004, 49(20): 2083–2089 [Qu Yuangao, Xie Guwei, Gong Yiming. Connection on Earth-Sun-Moon at 1.0 Ga: The attestation from stromatolites [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(20): 2083–2089]
- 伊海生, 林金辉, 周恩恩, 等. 可可西里地区中新世湖相叠层石成因及其古气候意义 [J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 106–113 [Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, et al. The origin of Miocene lacustrine stromatolites in the Hohxil area and its paleoclimatic implications [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 106–113]
- 伊海生, 林金辉, 赵西西, 等. 西藏高原沱沱盆地渐新世—中新世湖相碳酸盐稀土元素地球化学特征与正斜异常成因初探 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(1): 1–10 [Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhao Xixi, et al. Geochemistry of rare earth elements and origin of positive Europium anomaly in Miocene-Oligocene lacustrine carbonates from Tuotuohe basin of Tibetan plateau [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 1–10]
- 伊海生, 林金辉, 周恩恩, 等. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳、氧同位素特征及古环境意义 [J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 304–312 [Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, et al. Carbon and oxygen isotope characteristics and paleoenvironmental implication of the Cenozoic lacustrine carbonate rocks in northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 304–312]
- 黄瑾, 张富生, 林承毅, 等. 东太平洋锰结核中叠层石纹层韵律的研究 [J]. *东海海洋*, 1999, 17(3): 32–37 [Huang Jin, Zhang Fusheng, Lin Cheng, et al. Study on rhythm of the stromatolitic lamina in the manganese nodules from the East Pacific ocean [J]. *Donghai Marine Science*, 1999, 17(3): 32–37]
- Schaaf M, Thuro J. Tracing short cycles in long records—the study of inter-annual to inter-centennial climate change from long sediment records—examples from the Santa Barbara Basin [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1997, 154: 613–622
- 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义—①. 灰度的年际变化 [J]. *中国科学: D辑*, 2000, 30(3): 239–248 [Qing Xiaoguang, Liu Dongsheng, Tan Ming, et al. The gray scale variation in stalagmite micro lamina from Beijing Shihua Cave and its climatic significance—①. Gray scale inter-annual variation [J]. *Science in China D Series*, 2000, 30(3): 239–248]
- 吴江滢, 邵晓华, 孔兴功, 等. 盛冰期太阳活动在南京石笋年层序列中的印迹 [J]. *科学通报*, 2006, 51(4): 431–435 [Wu Jiangying, Shao Xiaohua, Kong Xingong, et al. Solar activity records in annual lamina series during IGM in Nanjing stalagmite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 431–435]
- 郑兴平, 卢文忠. 地质信号的频谱特征与实例 [J]. *海相油气地质*, 2003, 3(1–2): 99–102 [Zheng Xingping, Lu Wenzhong. Spectrum signature for geological signal and an applying case [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2003, 3(1–2): 99–102]
- 韩喜球, 王惠群, 方银霞, 等. 东太平洋锰结核中叠层石纹层周期信号的谱分析及其意义 [J]. *地质学报*, 2001, 75(4): 548–553 [Han Xiqiu, Wang Huiqun, Fang Yinxia, et al. Spectral analyses of rhythmic laminae of stromatolite in manganese nodules from the Pacific Ocean and their significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4): 548–553]
- Pardo-Iguz E, Zuzia Rodriguez-Tovar F J. POWGRA2: a program for graphical spectral analysis in cyclostratigraphy [J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30: 533–542
- Pardo-Iguz E, Zuzia Rodriguez-Tovar F J. MAXENPER: a program for maximum entropy spectral estimation with assessment of statistical significance by the permutation test [J]. *Computers and Geosciences*, 2005, 31: 555–567
- Monty C L V. Distribution and structure of recent stromatolitic algal mats—Eastern Andros Island, Bahamas [J]. *Annals Soc. Geol. Belgique*, 1967, 90(3): 55–100
- Monty C L V. The origin and development of cryptalgal fabrics [C] // Walter M R, ed. *Stromatolites* [J]. *Developments in Sedimentology*, 1976, 20. Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam, 193–249
- Vanyo J P, Awramik S M. Stromatolites and Earth-Sun-Moon dynamics [J]. *Precambrian Research*, 1985, 29: 121–142
- 曹瑞骥. 晚震旦世灯影组叠层石中微生物的排列方式和降解序

- 列 [J]. 微体古生物学报, 1989, 6(1): 11-16 [Cao Ruiji Arrangement pattern and degradation sequences of microorganisms within the stromatolites from the Tongying Formation (Upper Sinian) [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1989, 6(1): 11-16]
- 19 Pannella G. Geophysical inferences from stromatolite lamination [C] // M r Walter Ed. Stromatolites Elsevier, Amsterdam, 1976 673-685
- 20 Jones C. Periodicities in stromatolite lamination from early Proterozoic Hearen Formation, Green Slave Lake [J]. Canada Palaeontology, 1981, 24: 231-250
- 21 周瑶琪, 赵振宇, 冀国盛. 奥陶纪以来生物贝壳生长纹层与地月轨道参数的演化 [J]. 生态环境, 2005, 14(5): 625-630 [Zhou Yaoqi, Zhao Zhenyu, Ji Guosheng. The growth laminates of biological shell and the evolution of orbital parameters of the Earth-Moon from Ordovician to Quaternary [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(5): 625-630]
- 22 Chivas A R, Torgersen T, Polach H A. Growth rates and Holocene development of stromatolites from Shark Bay, Western Australia [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1990, 37: 113-121
- 23 Paul C K, Neumann A C, Bebout B, et al. Growth rate and stable isotopic character of modern stromatolites from San Salvador, Bahamas [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1992, 95: 335-344
- 24 Davies G R. Algal laminated sediments: Gadsstone embayment, Shark Bay, Western Australia. Mon [J]. American Association of Petroleum Geologists, 1970, 13: 169-205
- 25 Park R K. Note on the significance of lamination in stromatolites [J]. Sedimentology, 1976, 23: 379-393
- 26 Anderson R Y, Dean W E. Lacustrine varve formation through time [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 62: 215-235
- 27 伊海生, 时志强, 惠博, 等. 湖相叠层石纹层的碳、氧同位素特征及其生长节律的古环境意义 [J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 1681-176 [Yi Haisheng, Shi Zhiqiang, Hui Bo, et al. The oxygen and carbon isotopic signatures of laminations in lacustrine stromatolites and palaeoenvironmental significances of growth rhythmites [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(6): 168-176]
- 28 Chafetz H S, Utech N M, Fitzmaurice S P. Differences in the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signatures of seasonal laminations comprising travertine stromatolites [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(6): 1015-1028
- 29 Kano A, Matsuoaka J, Koj T, et al. Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 191: 243-262
- 30 黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近 400 年来的降水量变化与太阳活动 [J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 184-191 [Huang Lei, Shao Xumei. Precipitation variation in Delinhang Qinghai and solar activity over the last 400 years [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(2): 184-191]
- 31 Livingstone D M and Hajdas I. Climatically relevant periodicities in the thicknesses of biogenic carbonate varves in Soppensee, Switzerland (9740-6870 calendar yr BP) [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25(1): 17-24
- 32 Hughes G R, Giegengack R, Krikos H N. Modern spectral climate patterns in rhythmically deposited argillites of the Gowganda Formation (early Proterozoic), southern Ontario, Canada [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 207(1-4): 13-22
- 33 Rippe M, Roberts L T, Fischer A G. ENSO and sunspot cycles in varved Eocene oil shales from: in age analysis [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7): 1155-1163
- 34 Damati B, Taib M, Williamson D. Laminated deposits from Lake Magadi (Kenya): climatic contrast effect during the maximum wet period between 12000-10000 yrs BP [J]. Bulletin de la Société Géologique de France, 1992, 163: 407-414
- 35 Fischer A G, Roberts L T. Cyclicity in the Green River Formation (Lacustrine Eocene) of Wyoming [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7): 1146-1154

Astronomical Periodicity Signals from Lamination Growth Rhythm Records of Lacustrine Stromatolites

YI Haisheng^{1,2} SHI Zhiqiang¹ YANG Wei¹ HUI Bo¹

(1 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2 State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059)

Abstract The lacustrine stromatolite samples was collected from the Oligocene Yaxicuo Formation in northern Tibetan Plateau. The microtexture features of alternative dark organic-rich lamination and light mineral-rich lamination distinctly display on polished sections and under microscope observation. The lamination bands occur as wavy and column shapes with step growth episodes. The grayscale values to extract from digitized photographs can be used as a method of lamination couplet counts and thickness measurements. The lamination couplet thickness series are obtained from four sample segments. Individual lamination couplet is interpreted to correspond to annual growth patterns. The periodicities in lamination couplet thickness variations are detected by power spectral analysis. Its significant spectral peaks about 11 years periodicities are related to 11 years sunspot cycle. It is suggested that regular growth rhythms of lacustrine stromatolites may record climate and environmental oscillations forced by sunspot activity.

Key words Lacustrine environment, stromatolite, growth rhythm, spectral analysis, solar activity