

doi:10.3799/dqkx.2011.002

利用采样定理与沉积速率确定旋回分析最佳采样间隔

赵庆乐, 吴怀春, 李海燕, 张世红

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘要: 旋回地层学方法近年来被成功应用于年代确定及重大地质事件天文影响因素的判别。采样是旋回分析中重要的一步, 目前大多使用地球物理、地球化学替代性指标, 采样频率过高, 会大大增加测量和计算的工作量, 同时也会增加随机干扰或其他非气候因素的干扰; 采样频率过低, 可能识别不出其中所包含的米兰柯维奇旋回成分。为确定一个最佳的采样间隔, 通过对 80~100 Ma 理论日照量曲线及两个实测剖面 3 种采样间隔(密集采样间隔与约等于一个岁差周期沉积厚度四分之一和一半的采样间隔)数据分别进行谱估计并比较谱估计结果。发现在满足采样定理的前提下, 以一个岁差周期沉积厚度的约一半作为采样间隔, 既可以分析出全部的米兰柯维奇旋回信号, 又具有最少的工作量, 是旋回分析的最佳采样间隔。实际采样中需根据平均沉积速率来确定这个最佳采样间隔。

关键词: 米兰柯维奇理论; 旋回地层学; 沉积学; 沉积速率; 采样间隔。

中图分类号: P539.3

文章编号: 1000-2383(2011)01-0012-05

收稿日期: 2010-09-20

Determination of the Optimal Sampling Interval for Cyclostratigraphic Analysis by Using Sampling Theorem and Accumulation Rates

ZHAO Qing-le, WU Huai-chun, LI Hai-yan, ZHANG Shi-hong

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: In recent years, cyclostratigraphy has been successfully applied to dating strata and recognizing the possible astronomical forcing on major geological events. Sampling is one of the most important routines in cyclostratigraphic analysis to get the suitable geophysical or geochemical paleoclimate proxies. However, the workload will be significantly increased and random noises or other non-climatic noises will be introduced if the sampling frequency is too high; on the contrary, a lower sampling frequency may make it difficult to recognize Milankovitch signals in successions. In order to identify an optimal sampling interval, we used theoretic daily insolation data of time intervals of 80–100 Ma and two geological datasets to estimate each power spectra at three sampling intervals (high resolution, one quarter and half of one precession cycle), and then compared corresponding spectra analysis results. As a result, under the condition of satisfying the sampling theorem, sampling interval which equals to half of a precession cycle is the optimal sampling interval for cyclostratigraphic analysis. All Milankovitch signals can be identified and at the same time the workload is the least by using this optimal sampling interval. This interval should be determined according to the mean accumulation rate of the target successions during field sampling.

Key words: Milankovitch theory; cyclostratigraphy; sedimentology; accumulation rate; sampling interval.

近年来, 由于旋回地层学方法在地层年代确定方面的高精度性与连续性, 已被成功应用于诸多不同年代与地区的地层沉积持续时间及重大地质事件持续时间的确定与重要地质事件的天文影响因素的判别(Lisiecki and Raymo, 2005; Lourens *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2008)。旋回地层学方法是把地球

物理参数、地球化学参数或生物学参数作为古气候的替代性指标, 对由这些指标构成的信号进行能量谱估计; 如果能量谱中显著峰值的比例关系符合地球天文轨道周期的比例关系($\sim 20:5:2:1$), 则认为该地层沉积受到了天文轨道因素的影响。提取其中包含的稳定周期成分并进行轨道调谐可以确定地

层沉积持续的时间,采样是旋回分析中最重要的一步,由采样定理可知,要想识别出待分析信号中所有频率成分,采样频率必须高于待分析信号中最高频率信号频率的两倍(Lathi, 1998). 对于旋回地层学来说,目前大多使用地球物理、地球化学替代性指标,采样密度增大,会大大增加测量和计算的工作量,同时,也会增加随机干扰或其他非气候因素的干扰,采样密度过低,可能识别不出其中所包含的米兰柯维奇旋回成分. 为了比较能量谱,许多数学文章都假定采样频率为 1 使能量谱具有从 0~0.5 的频率轴(Weedon, 2003). 在进行旋回分析时,不同学者根据各自经验选择的采样间隔(sampling interval- Δt)也各不相同(Heard *et al.*, 2008; Locklair and Sageman, 2008; Wu *et al.*, 2009). 能否找到一个最佳的采样频率(间隔),使得以最少的工作量来识别出全部的米兰柯维奇旋回成分呢? 本文的研究目的就是寻找最佳采样频率(间隔)或能确定最佳采样频率(间隔)的方法.

1 最佳采样间隔原理分析

识别地层中记录的地球轨道周期信号是旋回地层分析的基础. 地球围绕太阳运转轨道具有近乎确定的周期及比例关系,其轨道 3 要素的周期分别为约 405 ka、95~128 ka(偏心率)、41 ka(地轴斜率)和 19~24 ka(岁差)(Hinnov and Ogg, 2007). 上述 3 类周期中,以岁差的周期最短,频率最高. 根据采样定理,如果地层记录中包含了上述 3 类信号成分,采样频率必须高于岁差频率的两倍才能识别出上述 3 类信号. 旋回地层学上的采样频率是采样间隔的倒数,满足采样定理反映在采样间隔上就是要满足采样间隔小于包含一个完整岁差周期地层厚度的一半. 理论上,在满足采样定理的前提下,同一套地层采样间隔越大所需要的工作量越小. 但采样间隔变大,即采样频率变低,能否像高频采样那样完整的反映信号中所包含的有用频率成分呢? 如果采样间隔变大后,仍能显著、完整的反映信号中需要的频率成分,那么接近于一个岁差周期内地层沉积厚度一半的采样间隔就是寻找的最佳采样间隔.

2 数据及最佳采样间隔验证方法

笔者对上述分析进行了验证,验证数据分别选

用 La2004(Laskar *et al.*, 2004) 解决方案中 80~100 Ma(65°N, 6 月 21 日)的日照量数据、松辽盆地 M206 井自然伽马测井参数数据(Wu *et al.*, 2009)和 ODP208~1262 钻孔铁的(X-ray fluorescence) XRF 数据(Westerhold *et al.*, 2007). 3 组数据的原始采样间隔分别为 1 ka、0.125 m 和 0.05~0.15 m; 数据长度分别为 20 001 点(80 000~100 000)、496.875 m(1 286~1 782.875 m)和 22.05 m(117.56~139.61 m).

验证方法是对原始采样数据进行谱分析(采样频率均高于岁差频率数倍),根据谱分析结果找出一个岁差周期所对应的地层厚度,然后对原始采样数据进行抽取操作,使得两点之间的间隔约等于岁差周期长度的 1/4 和 1/2(仅对日照量数据进行 11 ka 间隔抽取);对所得时间序列进行 3 次样条插值,插值成原始采样间隔后进行谱分析,最后对谱分析的结果进行比较.

谱分析采用 Matlab 内置的谱分析函数 `pwelch` 或 `pmtm`,数据抽取利用 `vb.net` 编程实现.

3 数据验证结果

图 1 为 80~100 Ma 日照量曲线的频谱分析结果,图 1a 的采样间隔为 1 ka,图 1b 的采样间隔为 11 ka. 11 ka 的采样长度接近岁差周期长度的一半,从图 1b 中可见,对此采样间隔的数据进行插值后的谱分析结果,与采样间隔为 1 ka 的数据进行谱分析的结果完全相同,但数据点数只有不到原来的十分之一.

图 2 为松辽盆地 M206 井自然伽马测井曲线的频谱分析结果. 根据 0.125 m 采样间隔的数据进行谱分析知,20 ka 岁差周期所对应的地层厚度约为 1.84 m,由于原始数据为 0.125 m 的采样间隔,所以进行抽取时抽取间隔选为 0.5 m 和 0.875 m,如同在实际中每隔 0.5 m 和 0.875 m 测量一个点. 由图 2 可见,采样间隔扩大为 0.5 m 和 0.875 m 后,仍可以识别出与高频采样相同的主要频率成分,但以 0.875 m 采样需要的数据点数只有原来点数的约 15%.

图 3 为 ODP208-1262 岩心铁的 XRF 数据频谱图. 根据高频采样的谱分析结果可知,一个岁差周期对应的沉积厚度约 0.29 m,由于原始采样间隔的不均匀性,新的采样间隔约为 0.05 m 和 0.1~0.14 m. 由图 3 可见,采样间隔加大,同样未影响原始信号中

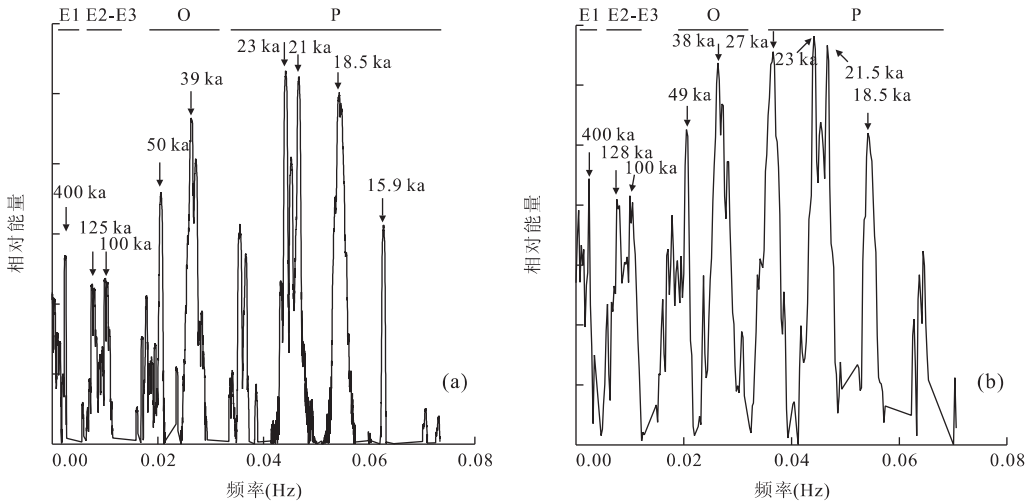


图 1 80~100 Ma 日照量曲线频谱

Fig. 1 Spectra of 80—100 Ma daily insolation curve

a. 采样间隔=1 ka; b. 采样间隔=11 ka

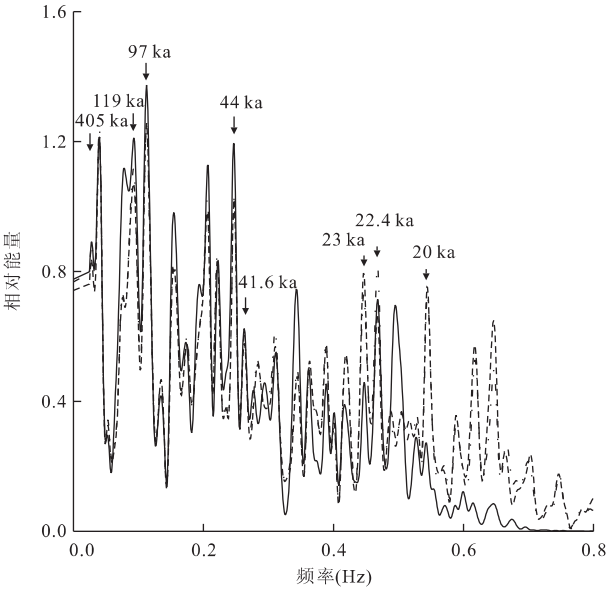


图 2 M206 井自然伽马测井曲线频谱

Fig. 2 Spectra of well M206 nature gamma-ray logging
虚线:采样间隔=0.125 m;点画线:采样间隔=0.5 m;实线:采样间隔=0.875 m

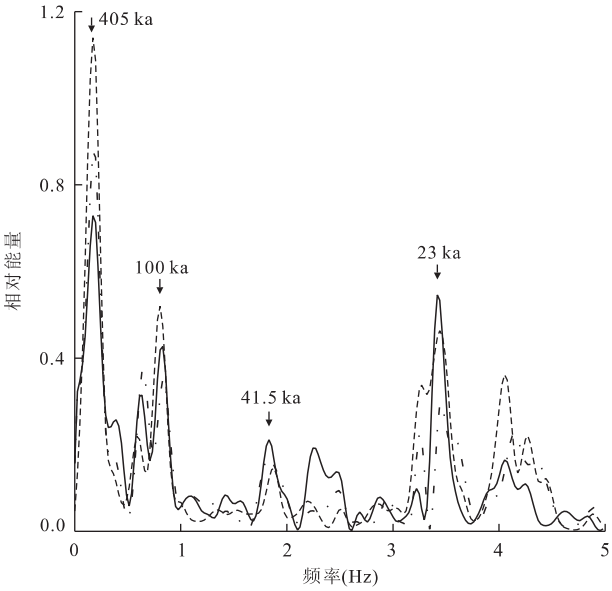


图 3 ODP208-1262 岩心铁的 XRF 数据曲线频谱

Fig. 3 Spectra of iron XRF data of ODP leg 208 site 1262 core
虚线:采样间隔=0.02 m;点画线:采样间隔=0.06 m;实线:采样间隔=0.1 m

地球轨道 3 要素信号的识别,但与高频采样相比,工作量显著降低(0.1~0.14 m 采样需要的数据点数只有原来的约 20%)。

由图 2、图 3 可见,低密度采样还可能对部分高频成分起到一定的压制作用.笔者把 M206 井和 ODP208-1262 的原始采样数据分别进行了 7 点滑动平均与 6 点滑动平均,所得结果分别进行谱分析与低密度采样数据(采样间隔分别为 0.875 m 和 0.10 m)谱分析结果进行比较.比较结果如图 4 所示。

由图 4 可见,低密度采样可以压制部分高频成分.在高频采样基础上进行 N 点抽取所获得的低密度采样对高频成分的压制作用,与在同样高密度采样基础上进行 N 点滑动平均后对高频成分的压制作用相当或稍好于后者的作用。

4 沉积速率的估计

上述方法中岁差周期长度是根据已算得的岁差

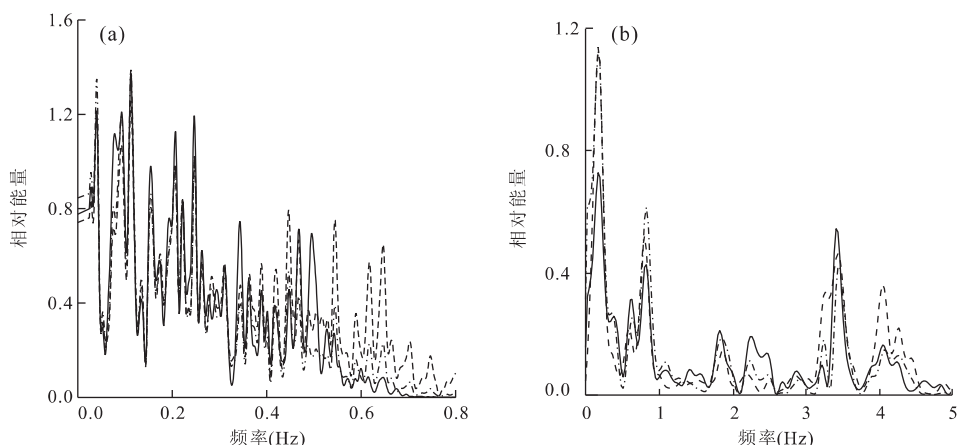


图 4 低密度采样数据与高密度采样数据滑动平均后(a)及高密度采样数据谱(b)分析结果比较

Fig. 4 Comparison of spectra results for low densely sampled data, moving average of high densely sampling data (a) and high densely sampling data (b)

虚线:高密度采样数据能量谱;点画线:高密度采样数据滑动平均后数据能量谱;实线:低密度采样数据能量谱

周期的频率确定的,实际采样中需对其进行估计。由于一个岁差周期的时间已知(约 20 ka),如果估计出平均沉积速率,则可计算出一个岁差周期所对应的地层沉积厚度。Machlus *et al.* (2008) 对怀俄明(Wyoming)始新世绿河组(Green River Formation) 266~364 m 地层进行旋回分析,他们根据 1.2~1.7 Ma 的跨越时间,选择了约 3~5 ka(约 1 m)的采样间隔。这种做法可以给笔者启示,即以总的沉积厚度除以持续时间来获得平均沉积速率,以平均沉积速率乘以时间得到一个岁差周期沉积的地层厚度。2009 版国际地质年代表^①对显生宙绝大部分地层的年代作了较精确界定,辅之以所研究地层的厚度,不难估计出其平均沉积速率,进而获得一个岁差周期沉积的地层厚度。实际采样间隔应适当小于根据上述方法估算出的厚度的一半。对于重大地质事件层,如 Elmo(Lourens *et al.*, 2005),其沉积厚度较薄(10~15 cm),根据上述方法估计的采样间隔可能大于事件层的沉积厚度,从而造成信息丢失。因此对可能包含重大地质事件层的地层应进行密集采样。

5 结论

旋回地层分析中在满足采样定理的前提下,选择根据沉积速率确定的一个岁差周期内地层沉积厚度的一半作为采样间隔,可以用最少的工作量来识别出地层中包含的稳定的地球轨道要素信号。因而

在一个岁差周期内地层沉积厚度的一半是旋回地层分析中的最佳采样间隔。值得注意的是,由于沉积速率估计中的误差,实际采样间隔需适当小于由沉积速率估计获得的采样间隔,而对于可能包含重大地质事件层的地层应进行密集采样。

References

- Heard, T. G., Pickering, K. T., Robinson, S. A., 2008. Milankovitch forcing of bioturbation intensity in deep-marine thin-bedded siliciclastic turbidites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2): 130-138. doi: 10.1016/j.epsl.2008.04.025
- Hinnov, L. A., Ogg, J. G., 2007. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale. *Stratigraphy*, 4: 239-251.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261-285. doi: 10.1051/0004-6361:20041335
- Lathi, B. P., 1998. Signal processing and linear systems. Berkeley Cambridge Press, Carmichael.
- Li, Y. X., Bralower, T. J., Montañez, I. P., et al., 2008. Toward an orbital chronology for the early Aptian Oceanic Anoxic Event (OAE1a, ~120 Ma). *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4): 88-100. doi: 10.1016/j.epsl.2008.03.055
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20: PA1003. doi: 10.1029/2004PA001071
- Locklair, R. E., Sageman, B. B., 2008. Cyclostratigraphy of the Upper Cretaceous Niobrara Formation, western In-

^①International Commission on Stratigraphy, 2009. <http://www.stratigraphy.org/upload/ISChart2009.pdf>.

- terior, U. S. A. : a Coniacian-Santonian orbital timescale. *Earth and Planetary Science Letters*, 269(3—4): 540—553. doi:10. 1016/j. epsl. 2008. 03. 021
- Lourens, L. J. , Sluijs, A. , Kroon, D. , et al. , 2005. Astronomical pacing of Late Palaeocene to Early Eocene global warming events. *Nature*, 435: 1083 — 1087. doi: 10. 1038/nature03814
- Machlus, M. L. , Olsen, P. E. , Christie-Blick, N. , et al. , 2008. Spectral analysis of the Lower Eocene Wilkins Peak Member, Green River Formation, Wyoming: support for Milankovitch cyclicity. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(1—2): 64 — 75. doi: 10. 1016/j. epsl. 2007. 12. 024
- Weedon, G. P. , 2003. Time-series analysis and cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles. Cambridge University Press, Cambridge.
- Westerhold, T. , Rohl, U. , Laskar, J. , et al. , 2007. On the duration of magnetochrons C24r and C25n and the timing of Early Eocene global warming events; implications from the Ocean Drilling Program Leg 208 Walvis Ridge depth transect. *Paleoceanography*, 22; PA2201. doi: 10. 1029/2006PA001322
- Wu, H. C. , Zhang, S. H. , Jiang, G. Q. , et al. , 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(3—4): 308 — 323. doi: 10. 1016/j. epsl. 2008. 12. 016