

旋回地层学的基本原理与研究方法

刘立 薛林福

(能源地质系) (地球科学系)

旋回地层学(Cyclostratigraphy)主要研究轨道旋加力(orbital forcing)与沉积旋回之间的成因联系。一百多年以来,由于 Adhemar(1942),Croll(1875),Gilbert(1895,1900),Milan Kovitch(1941)和 Berger(1978)和其他研究者的不懈努力,旋回地层学的理论基础业已形成,并可能进入繁荣时期。本文主要介绍轨道施加力与沉积旋回之间的关系、与轨道变化有关的旋回类型及旋回的识别等,以期能对我国的沉积学与地层学的研究有所推动。

1 轨道施加力与沉积旋回

众所周知,最早期的地层和沉积学研究是在 Lyell 的超均变论(Ultra-uniformitarian)的框架之下进行的。该理论认为,地球的状态是永恒不变的,连续地层之间的微小振荡被归因于沉积环境的局部随机偏差。然而,广泛分布的古代冰川作用的发现表明,地球并不遵从这种均变原则,而是显示出周期性的寒冷。Adhemar(1842)和 Croll(1875)将这种气候振荡归因于轨道施加力的影响。Gilbert(1895)认为,一定的韵律层理型式记录了敏感的相对地球轨道韵律的反应。Milankovitch(1941)对于轨道变化的气候响应的计算,为这种具有 $10^4 \sim 10^5$ a 周期的施加力的研究奠定了坚实的理论基础。

然而,轨道施加力是否象 Gilbert(1900)预言的那样,也能在非冰川时代的地层中留下印痕,其说法不一。一些气候学家认为,气候的轨道施加力是微不足道的,除非通过高纬度地区雪和冰的反照率的正反馈放大。一些持怀疑态度的地质学家坚信,即使轨道变化影响沉积作用,由于地层记录中充满了间断和其它作用的烙印,以至于不可能识别出可靠的轨道旋回性(Duff 等,1967;Algeo 和 Wilkinson,1988)。但是,来自地层记录详细观察的研究却清楚地表明,沉积旋回的确能够反映轨道施加力的变化。全新世沉积物既反映了冰川的变化,也反映了轨道旋回(Fischer 和 Bottjer, 1991)。全新世远洋沉积物通过生物生产率的变化(Arrhenius, 1952; Herbert 和 Mayer, 1991),有些地方通过溶解旋回(Gardner, 1975)记录了轨道施加力。佛罗里达的碳酸盐—碎屑稀释旋回记录了北美冰席的融化(Roof 等,1991)。

全新世以前地层记录中的各种相普遍具有重要的、振荡的样式(Fischer 和 Bottjer, 1991),其时间间隔属于 Milankovitch 频段。其中,始新世绿河组(Fischer 和 Roberts, 1991; Ripepe, Roberts 和 Fischer, 1991)和三叠—侏罗纪的 Newark 岩系(Olsen, 1986)是湖相旋回地层学研究的经典实例。三叠系 Castil 组硬石膏中的 20×10^4 a 季纹泥的厚度记录代表岁差旋回(Anderson, 1982, 1984)。白垩纪的远洋白垩和灰泥的韵律式沉积早就被归因于轨道施加力(Gilbert, 1895)。三叠纪碳酸盐台地的韵律式浮现也与轨道施加力有关(Schwarzacher, 1947, 1975)。

上述事实表明,地质历史中普遍具有微细的、多级脉冲式的、与轨道有关的旋回(Fischer 和 Bottjer, 1991)。

2 与轨道变化有关的旋回类型

地球历史中与轨道变化有关的旋回性可分成许多频段(Frequency band)(图 1),其中,原生轨道参数可表现为天

历(Calendar)段和太阳频段(Solar frequency band)。天历段的韵律性受太阳、地球和月球轨道相互作用的控制,包括潮汐,周日,半月和年旋回。

太阳频段的韵律性涉及太

阳(太阳黑子旋回),地球大气圈(ENSO 旋回)和磁圈(Gleisberg 旋回)的一些现象。Milankovitch 段由次生旋回构成,尤其是地球的岁差,地球轴斜度的振荡和其相对于轨道椭圆的轨道偏心率。灭绝旋回可能涉及到地球与彗星和小行星的相互作用,Wilson 旋回与地幔对流有关。

这些旋回产生的结果可分成两种情况。一种为引力的变化,该变化引起地球潮汐幅度、形状和时间的改变。另一种为太阳辐射在地球表面上引起地理和季节分布的变化,如周日、年和 Milankovitch 旋回。

2.1 天历和太阳频段

在天历和太阳段中,周日振荡(diurnal oscillation)是地球表面生物与非生物的强有力驱动力。潮汐旋回在某些相中打上轨道现象的烙印。例如,澳大利亚元古代 Elatina 岩系(Williams, 1989a, 1989b, 1989c)便是一个典型实例。在该岩系中,潮汐沉积记录了半周日潮汐旋回。类似的现象也见于与美洲中陆地区旋回层有联系的石炭纪泥岩中(Kvale 等, 1989)。

年旋回的沉积记录为季纹泥(Anderson, 1986)。Ripepe 等(1991)将绿河组油页岩解释为季纹泥,并且在其中识别出 Nino 类型振荡,太阳黑子旋回和岁差旋回。

2.2 Milankovitch 频段

Milankovitch 频段主要表现为岁差,斜率和偏心率旋回(图 2,图 3)。岁差旋回的现今周期为 2.6×10^4 a,与椭圆轨道有关的岁差周期在约为 14000 a 和 28000 a 的两个极值之间变化,其余数约为 1.9×10^4 a 和 2.3×10^4 a(Berger, 1980, 1988)。在地质年代中,该周期被假定伴随着地球旋转变慢而加长。

斜度的变化达 3.5%,其现今的主周期为 4.1×10^4 a,随地球旋转速率降低,周期也趋向于变慢(Berger 等,1989)。

偏心率旋回包括一个 10×10^4 a 的主周期(具各次要分量),另一个为 4.0×10^4 a,其它较长的频率也可能存在,但目前尚不能肯定(Fischer 和 Bottjer, 1991)。

轨道变化的重要意义在于,它的变化引起优势气候的改变。其中,斜度的变化主要引起季节长短的改变。如果没有斜度,太阳将永远照耀着赤道。两极地区将永远处于黄昏或黎明

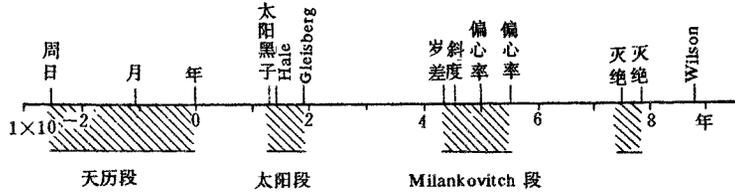


图 1 地质时间的韵律谱(据 Fischer 和 Herbert, 1986)

的光线之中,因而无季节变化。如果斜度为 90° ,那么在仲夏季节太阳将垂直位于赤道之上,季节的强烈程度将令人不堪忍受(Fischer 和 Bottjer, 1991)。如果斜度增加,日射的平均年纬度分布将变得更加均匀,而季节增长。在两极地区气候效应最为明显,斜度的增加使极区范围扩大,增长了极地冬夜的持续时间(转引自陆元法, 1989)。

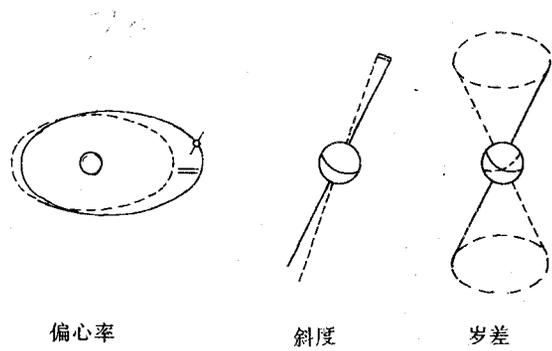


图2 地球的轨道变化(据 Fischer 等, 1990)

偏心率的改变也可以引起季节的变化。众所周知,地球近日点比远日点能够吸收更多的太阳能。目前北半球具有近日点的夏季,近日点的冬季,季节分异最小。而南半球则相反,它具有近日点的夏季和远日点的冬季,因而季节分异最大(Fischer 和 Bottjer, 1991)。单独看,偏心率对气候的影响是轻微的,然而当偏心率与岁差结合时就改变了太阳能量的分布,当某半球处于轨道的夏天近日点时,就经历了一个短而热的夏季和一个又长又冷的远日点冬季,即比正常季节长。同时,相反的那个半球就有远日点的夏季和近日点的冬季,经历较短的季节,这种影响直接随偏心率变化。结果产生岁差周期的气候旋回,其幅度随偏心率而变化, Berger 称这种关系为岁差指数。与斜度旋回不同,在岁差—偏心率复合旋回对气候所产生的影响中,两半球将是 180° 的异相。

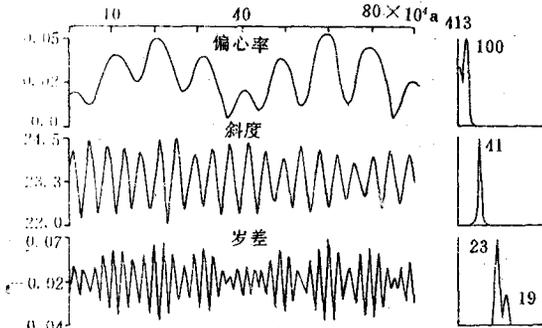


图3 轨道变化的旋回样式(据 Imbrie 和 Imbrie, 1979)

与 Milankovitch 频段有关的地层记录比较普遍,在湖泊、蒸发盐盆地、海洋碳酸盐台地、深海体系、半深海体系和碎屑体系中均发现了与该频段有关的旋回沉积,陆元法(1989)曾对其进行了系统的介绍,这里不再赘述。

3 旋回周期性的识别

3.1 滤除噪音

旋回地层学的核心问题是根据轨道施加力来解释地层记录中的旋回现象。然而,地层记录中的旋回并不都是由轨道变化产生的,地层中的旋回可归纳为海平面升降变化、构造变动、气候变迁(轨道变化)和复合成因四种类型(Perlmutter 和 Matthews, 1989)。其中,海平面变化是人们最早识别出的产生旋回地层的营力。早在 19 世纪, Newberry(1874)就明确提出,向上变细的层序之上为向上变粗的层序覆盖的现象,是海平面升降变化造成的。Wanless 和 Shepherd(1936)认为,冰川—海平面升降及伴随的气候变迁是古生代旋回层的成因。Vail 等(1977)和 Pasamentier 与 Vail(1989)则把海平面变化作为控制沉积作用和沉积样式的首

要因素。

构造变化也是产生沉积旋回的原生驱动力,Willam(1891)曾断言,沉积旋回最可能是“由一致的沉淀条件下,……逐渐减少的坡度引起的”(即恒定气候条件下的隆起和侵蚀旋回)。Twenhofel(1932),Krynine(1942)和 Weller(1956)所提出的、众所周知的沉积模式则主要强调构造,物源区和侵蚀的相互作用。在近年来的研究中,Bott 和 Jehnson(1967),Veizer 和 Jansen(1985)和 Blair(1986)也持类似的观点。

实际上,地层记录应是海平面(或湖平面)变化,构造和古气候联合作用的产物。长期的盆地构造演化控制了盆地地层的宏观旋回地层样式,例如裂谷盆地的同裂谷沉降与裂谷后沉降的旋回地层样式。而 Milankovitch 频段引起的短期气候变化则叠加在长期的盆地构造演化旋回之上,在构造活动稳定时期保存了轨道变化的信号。海平面(湖平面)变化则是构造和气候联合作用的产物(Perlmutter 和 Matthews,1989),在层序地层学中,旋回地层仅是其第四和第五级旋回(Fischer 和 Bottjer,1991)。因此,在旋回地层学的研究中,滤除与轨道旋回力无关的其他作用的影响噪音是十分必要的。一般而言,构造作用相对静止时期是旋回地层学研究的良机。

3.2 定时

旋回地层学的研究精度依赖于准确的年代地层学研究,目前应用的定时方法主要为季纹泥计数,放射性年代外延和相对频率等。

季纹泥计数 Anderson(1992a,1986b)利用该方法研究了二叠纪蒸发盐的 Milankovitch 周期,Bradley(1929),Fischer 和 Robert(1991)则根据季纹泥在始新世绿河组中识别出岁差旋回。

放射性年代外延 年代的单元通常依赖于它所在阶的年代。新生代和中生代阶的置信系数为 0.5 和 1.5,古生代的置信限则差多了。这些年龄可用来计算岩石的大致沉积速率(由于可能的间断,因而导致不确定性),由给定的韵律层序所代表的时间的外延引起进一步的误差。因而,一般而言,这种外延相当不确切。外延的结果可能落在 Milankovitch 频段之内,但与 Milankovitch 频率的可靠对比则是达不到的。我们仅能进行这样的假设,如果所观察的韵律具有 Milankovitch 频段的周期,那么它就可能与该频段之内的某个天文旋回有关。

相对频率 由于 Milankovitch 旋回是多级的,因而数值比将能提供识别指纹。岁差与短偏心率旋回之比在中新生代约近于 5。在整个地质年代中,短偏心率与长偏心率旋回之比为 4:1。“Schwarzacher 束”在所观察的记录中绝大部分为 5:1,这表明被称之为 Berger 岁差指数的偏心率——岁差复合参数是轨道旋回力中的最有效参数。

3.3 研究方法

旋回的显示方式各种各样,包括同位素比值(更新世旋回地层学)、元素/矿物成分、颗粒大小、遗迹化石动物群的变化和生物的扰动程度、实体化石量和层厚等(陆元法,1989)。旋回地层学的研究方法主要包括岩心、钻井测井记录和野外实测等。

岩心 岩心是研究地层旋回性的最方便的方法之一。Bradley(1929)通过薄片观察,研究绿河组油页岩季候泥的厚度,发现了太阳黑子旋回和另一个约 30 a 的旋回。Crowley 等(1986)则利用岩心的醋酸揭片研究了 Parachute Creek 段的 Mahogany 带油页岩。他发现除 400 a 段外,其它的油页岩厚度皆为随机变化。在 400a 段出现两个尖峰,一个在 5.4a,另一

个在 10.8a。Ripepe 等(1991)根据醋酸揭片的数字化图像分析,在绿河组 Tipton 和 Laney 段油页岩中发现 4.8~5.6a 的 Elno 型(ENSO)的天体动力学现象和 10.4~10.7a 的太阳黑子旋回。

Herbert 和 Fischer(1986)曾经利用显微光密度计扫描产生的暗度曲线,和平均间隔为 2cm 的碳酸钙值曲线,并分析了意大利中部 Scisti a Fucoidi 组的一段 8m 厚的阿尔布阶(1.6Ma),从而获得了 100×10^3 a 偏心率旋回(E_1)和 400×10^3 a 的偏心率旋回(E_2)。

钻井测井记录 用于旋回地层学研究的测井曲线主要包括油气勘探中常规应用的伽马射线测井曲线、声速测井曲线和电阻测井曲线。Herbert 和 Mayer(1991)根据深海钻井和大洋钻井中常规使用的,伽马射线衰减孔隙度测量仪(Gamma Ray Attenuation Porosity Evaluator, 缩写为 GRAPE)获得的湿容重曲线来进行沉积振荡的研究。该湿容重曲线在各种远洋环境中与碳酸盐含量呈正相关关系。因此,富含生物的深海软泥的 GRAPE 曲线记录了含钙较多和含灰质较多或硅质沉积之间的振荡,从而为年代学和沉积速率的研究提供了独立的途径。

野外实测 对于旋回地层学的研究而言,虽然地层剖面的直接测量一般不够精确,但也可对旋回成因进行粗略的估计。Astin(1990)根据野外实测将苏格兰 Orkney 泥盆纪湖相沉积物的旋回性与 Milankovith 旋回联系起来。该湖相沉积由 45 个一级旋回组成,平均 12m 厚,它们是由周期 25×10^3 a 的气候波动造成的,并且也存在着 100×10^3 a 和 400×10^3 a 的周期,因而该时期的沉积是由岁差和两个偏心率轨道旋回组成的。

4 结束语

目前,轨道旋回地层学仍是一个发展中的概念(Fischer 和 Bottjer,1991)。对于概念的本身仍存在着争议,例如 Perlmutter 和 Matthews(1989)提出,“旋回地层学是研究由气候和构造相互作用产生的,地层记录中的旋回沉积样式”,即将构造的影响也视为旋回地层学的组成部分。显然,这与大部分研究者的理解是相悖的,但也不无道理。因为在许多情况下,我们难以把构造作用与气候作用截然分开。

尽管我们已有十分确凿的证据说明,轨道施加力与沉积旋回之间具有成因上的联系。然而,我们却面临着更为有力的挑战,例如如何将地层记录中的构造等“噪音”剔除,如何将局部的、分隔的研究推广到区域的、全球和时间上连续的研究,如何精确定时等问题。这些问题的解决必将旋回地层学的研究推向一个新的阶段。

参 考 文 献

- 1 陆元法. 旋回地层学. 岩相古地理, 1989, (1): 31~40
- 2 Algeo T J, Wilkinson B H. Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation. *Journal of Geology*, 1988, 96: 313~322
- 3 Adhemar J A. *Revolutions des Mers, Deluges periodiques*. private publication, Paris, 1842
- 4 Anderson R Y. A long geoclimatic record from the Permian. *Journal of Geophysical Research*, 1982a, 87: 7285~7294
- 5 Anderson R Y. Orbital forcing of evaporite sedimentation. In: Berger A, Imbrie J, Kukla G, Saltzman B, eds. *Milankovitch and climate*. Dordrecht, D. Reidel, 1982b: 147~162
- 6 Anderson R Y. The varve microcosm: propagator of cyclic bedding. *Paleoceanography*, 1986, 1: 373~382

- 7 Astin T R. The Devonian lacustrine sediments of Orkney ,Scotland ;implications for climate cyclicality, basin structure and maturation history. *Journal of the Geological Society*,London,1990,147:141~151
- 8 Berger A. Long term variations of caloric insulation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*,1978,9:139~167
- 9 Berger A. Milankovitch astronomical theory of paleoclimates;a modern review. *Vistas in Astronomy* , 1980.24:103~122
- 10 Berger A. Milankovitch theory and climate . *Reviews of Geophysics*,1988,26:624~657
- 11 Berger A,Loutre M F,Dehant V. Influence of the changing lunar orbit on the astronomical frequencies of pre-Quaternary insolation patterns. *Paleoceanography*,1989,(4):555~564
- 12 Blair T C. Tectonic and hydrologic contros on cyclic alluvial fan, fluvial and lacustrine rift basin sedimentation ,Jurassic—lowermost Cretaceous Todos Santos Formation,Chiapas,Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*,1986,57:845~862
- 13 Bott M H P, Johnson G A L. The controlling mechanism of carboniferous cyclic sedimentation . *Quarterly Journal of the Geological Society of London*,1967,122:421~441
- 14 Bradley W B. The varves and climate of the Green River epoch. U. S. Geological Survey Professional Paper 158,1929.,:87~110
- 15 Croll J. *Climate and Time in their Geological Relations*. Appleton,New York,1875
- 16 Crowley K D,Duchon C E,Rhi J. Climate record in varved sediments of the Eocene Green River Formation. *Journal of Geophysical Research*,1986,91:8637~8647
- 17 Fischer A G,De Boer P I,Premoli Silva I. Cyclostratigraphy . In : Ginsburg R N,Beadoin B, eds. , *Crataceous Resources, Events and Rhythms: Background and Plans for Research : NaTO ASI Theories*,Dordtecht,Klewer,1990:139~172
- 18 Fischer A G,Bottjer D J. Orbital forcing and Sedimentary Sequences . *Journal of Sedimentary Petrology* ,1991,61(7):1063~1069
- 19 Fischer A G,Roberts L T. Cyclicality in Green River Formation (Lacustrine Eocene) of Wyoming . *Journal of Sedimentary Petrology*,1991,61(7):1146~1154
- 20 Gardner J V. Late Pleistocene Carbonate dissolution Cycles in the eastern equitorial Atlantic . In :Sliter W V,Be A W H,Berger W H, eds. ,*Dissolution of Deep Sea Carbonates*. Cusnman Foundation Special Publication,1975,13:129~141
- 21 Gilbert G K. Sedimentary measurement of geological time . *Journal of Geology*,1895,3:121~125
- 22 Gilbert G K. Rhythms and geological time :american Association for the Advancement of Science, *Proceedings* ,1990,V. XLIX:1~19
- 23 Herbert T D,Mayer L A. Long climatic time series from sediment physical property measurements. *Journal of sedimentary petrology*,1991,61(7):1089~1108
- 24 Imbrie J,Imbrie K. *Ice Age:solving the Mystery*:short Hills,NJ,Harvard University Press,1979:224
- 25 Kvale E P , Archer A W, Johnson H R. Daily, monthly and yearly tidal cycles within laminated siltstones of the mansfield Formation (Pennsylvanian) of Indiana . *Geology*,1989,17:365~368
- 26 Perlmutter M A,Matthews M D. Global cyclostratigraphy — a model . In:Cross T A,ed. *Quantitative dynamic stratigraphy*,Prentice Hall,1989:233~260
- 27 Ripepe M,Roberts L T,Fischer A G. Enso and sunsport cycles in varved Eocene oil shales from image analysis . *Journal of Sedimentary Petrology* ,1991,61(7):1155~1163