

沉积间断与地层完整性估测

吴智勇 郭建华 吴东胜

(江汉石油学院, 湖北荆州 434102)

沉积间断的广泛存在, 给年代地层对比、生物演化序列的研究, 灾害性或幕式事件沉积层的分析造成了不利的影响, 降低了研究结果的精度。根据沉积间断的形成时期, 可将其划分为同生期沉积间断和后生期沉积间断; 根据沉积间断的分布范围, 可将其划分为微型、小型、中型、大型和巨型 5 个级别。一般而言, 微型和小型沉积间断大多形成于同生期, 大型和巨型沉积间断则主要由后生期的全球性海平面升降、古地理和古气候变化以及全球构造活动所形成, 而中型沉积间断(在沉积盆地范围内发育) 既可在同生期也可在后生期形成。地层完整性是指剖面上所有沉积物代表的总时间与地层剖面代表的总时间之比。由于地层剖面中或多或少地发育有沉积间断, 因此地层剖面的完整性是一个大于 0 小于 1 的小数。如何准确地测定地层剖面的完整性是目前仍未能解决的地质学难题, 近 10 余年来, 国外有许多研究者潜心于这一领域的研究, 从不同的角度提出了各自的测定方法, 这些方法包括: 长期与短期沉积速率比值法、剖面厚度与全球同期平均沉积厚度比值法、潜穴化石定性估测法以及古地磁法等。尽管这些方法各有其不足之处, 但却为今后的研究打下了坚实的基础。

关键词 沉积间断 地层完整性 间断类型 年代地层 对比

第一作者简介 吴智勇 男 33 岁 讲师(硕士) 全球地质学与事件地层学

早在本世纪初期就有人注意到, 由于沉积物堆积过程在本质上具有脉冲性和不稳定性, 因而所形成的地层是不完整的^[1]; 但由于以往对沉积岩层的研究是在较大的时间尺度下进行的, 小的沉积间断与地层不完整常被忽略。长期以来, 地质学者在直觉上认为, 沉积岩层是由稳定的沉积过程或连续不断的“沉积物雨”形成的, 可以大致看成是连续稳定的。本世纪 60 年代以来, 地球科学发生了翻天覆地的变革, 新的地学思维的提出与高新技术的应用, 极大地拓展了人们观察地球的视野。特别是 80 年代以来, 小行星陨击假说和新灾变论、事件地层学、地震地层学和层序地层学的相继提出, 以及生产实践与理论研究中高精度年代地层对比的迫切需要, 迫使人们开始以更小的时间尺度和更高的精度来观测地层记录, 岩层中的沉积间断与地层不完整性逐渐凸现成为制约地层观测精度的主要障碍。在这种情况下, 地质学者们开始关注地层完整性问题。

沉积地层剖面是地质过程(时间流) 的物质记录, 与时间增量相对应的沉积增量可以表现为正增量(沉积过程)、“零”增量(无沉积过程) 和负增量(侵蚀过程)。脉冲性是沉积物沉积过程的本质特征, 它表现在沉积物的堆积是快速而短暂的, 而在相对较长的时间内为无沉积作用时段和缓慢沉积时段。例如, 从周期性沉积(如潮汐沉积、年纹层沉积等) 到事件性沉积(如油

流沉积、风暴沉积等),其沉积方式都是脉冲式的,即便是作为背景沉积的大洋软泥,由于其沉积物源(如火山灰、宇宙尘、陆地风暴尘等)的供给亦受到地质事件或周期性营力的控制,因而亦呈现一定的脉冲性。这种断续的沉积脉冲之间的无沉积时段即构成了沉积岩层的沉积间断。另外,始于60年代的大洋钻探计划(DSDP/ODP)揭示出,即使是通常认为是静寂之地的大洋底部,仍有十分活跃的底流,它们的活动也在沉积记录中产生不同规模的沉积间断^[2,3]。

沉积间断的“普遍性”经历了一个漫长的探索 and 认识过程,已为地质学者们认识和接受^[4~11]。然而,地层剖面完整性的测定是目前还没有解决的地质学难题,关键是难于确定剖面中沉积间断的时限或沉积层段所代表的时间。由于地层剖面中沉积间断的时空规模千差万别,且有些间断在剖面上难以鉴别,因此,直接从剖面上测定沉积间断的时限几乎是不可能的。近10余年来,国外有许多研究者潜心于这一领域的研究,他们用不同的方法绕开沉积间断时限测定这一难关,提出了各自的地层完整性测定方法,尽管这些方法各有其不足之处,但却为今后的研究打下了坚实的基础。

1 沉积间断的定义与分类

1.1 定义

沉积间断是指由于沉积物沉积过程中的无沉积作用,沉积物沉积后固结成岩前的准同生期侵蚀作用,以及沉积物成岩后因构造作用、海平面升降、古地理、古气候变化等造成的某一地质时期内沉积记录中断的现象。可以看出,这一定义实际上包含了通常所称的“沉积间断(*diastem*)”和“地层缺失(*lacuna*)”两个部分。根据定义,“沉积间断”是指沉积过程中出现的一个小的或比较短的沉积中断现象,一般在恢复沉积之前很少或没有发生过侵蚀作用^[1];“地层缺失”是指地史时期中地层记录的比较大的明显的中断,一般指由平行不整合和角度不整合代表的地层缺失^[12]。由此可见,“沉积间断”和“地层缺失”在概念上虽有所差异,但它们都造成地层记录的缺与失,导致地层剖面的不完整,因而本文将它们统称为沉积间断(*hiatus*)。

1.2 沉积间断的类型

根据沉积间断发生的时间,可将其划分为同生期沉积间断和后生期沉积间断。

同生期沉积间断相当于传统定义上的“沉积间断”,是指在沉积过程中因无沉积作用和沉积物沉积后至固结成岩前的一段时间内因底流冲刷等准同生期侵蚀作用造成的沉积中断。这类间断的规模一般较小,大多局限于沉积盆地中。

后生期沉积间断与传统定义上的“地层缺失”基本一致,是指在沉积物固结成岩后,由于构造运动、海平面升降以及古气候、古地理变化等原因,使其遭受风化剥蚀而造成的沉积记录的缺与失。

此外,我们还可根据沉积间断的空间分布划分出微型、小型、中型、大型和巨型5级间断。微型间断是指产出于一地层剖面上、时空规模极小、对生物的演化序列没有影响的短期沉积中断,如年纹层或单层间的间断;小型间断分布在盆地的某一区域,其延续时间相对微型间断较长一些,在生物演化速度较快的地层剖面上可见到这类间断的影响,体系域之间的间断可归入这一类型;中型间断的影响范围遍及整个沉积盆地,对生物演化序列有明显影响,可见到生物演化链在这类间断处的中断,如层序边界的间断等。大型间断在大区域范围内发育,巨型间断则指全球性的地层缺失,它们对生物演化史具有重大影响,在这两类间断之上常可见到新的生物种类的产生。

这5类间断与前述同生期间断和后生期间断具有一定的对应关系,微型和小型间断主要是同生期间断,大型和巨型间断则多为后生期间断,中型间断既可由后生期变动造成,也可在沉积过程中产生。

2 地层完整性及其估测

2.1 地层完整性的定义

一般而言,某一剖面的地层完整性是指该剖面上保存的沉积物所代表的总时间与该剖面所代表的总时间之比。由于所有剖面上都赋存有不同时空规模的沉积间断,因此,地层完整性的取值具有概率特性,即任何剖面的完整性都在0和1之间。这一定义理论上是严格而准确的,但由于沉积物所代表的时间难以确定,因而很难测定地层的完整性。基于这一原因, Sadler^[4]和 Anders等^[13]在该定义中加入了时间步长的限定,对其进行简化。他们定义时间步长为 t 时的地层完整性是保存有沉积物的长度为 t 的时间段数目与剖面的时间段数目之比。这样,对于同一条地层剖面,其地层完整性随时间步长的变化而不同,时间步长越短,剖面所能分出的时间段就越多,该剖面的地层完整性就越小;反之,时间步长越长,剖面所能分出的时间段就越少,地层完整性就越大。由此可见,地层完整性为1的剖面并不是没有沉积间断,而只是没有长于所设定的时间步长的间断而已。

2.2 地层完整性的估测

地层完整性实质上是一个时间比值,要准确测定地层完整性,就必须精确测定沉积物代表的时间以及剖面所代表的时间。由于当前的同位素测龄技术的精确度还远远达不到这一要求,特别是延续时间较短的地层剖面更是如此。因此,要测定地层完整性,就必须绕开这一障碍,另辟蹊径。本文在此简要介绍几种主要方法,并对其适用范围和不足之处作一评述。

2.2.1 长期与短期沉积速率比值法

沉积层序的实际观测厚度要比根据现代沉积速率推测的结果小得多^[4]。假定产生这一现象的原因是剖面中存在有沉积间断,则可以用整个剖面的总沉积速率(即长期沉积速率)与剖面中某一时段的沉积速率(即短期沉积速率)之比来表征该剖面的地层完整性。其中长期沉积速率可由剖面厚度除以剖面延续时间来获得,但对于延续时间较短的剖面,则因同位素测龄技术误差较大,影响明显,所以,准确测定短期沉积速率是这一方法的关键。

1981年, Sadler收集了25 000多个不同沉积环境的沉积速率值,将其标绘在沉积速率-时间跨度图上,发现这些沉积速率值的变化幅度相当大,至少跨越了11个数量级。另外,这些数据点的分布呈现一个总的趋势,即沉积速率随着时间跨度的增大而降低^[4]。在此基础上, Sadler^[4]用整个剖面的长期堆积速率(S)除以给定时段平均堆积速率(S')表示该剖面的地层完整性。 S 可用剖面厚度与同位素测龄值之比来确定,但 S' 几乎无法用测年方法获得。因此, Sadler^[4]采用从沉积速率-时间跨度图上读出的相同沉积环境下该时段的平均沉积速率($\bar{S}$)来代替 S' ,进而求出平均的或预期的地层完整性。

Sadler和 Strauss^[11]采用经验数据与理论模型对地层完整性进行了探讨。他们认为,时间尺度 t 时的地层完整性可能取决于沉积物沉积史的三个性质,即剖面的年代、长期净沉积速率及沉积速率的不稳定性。测定不稳定性方法取决于沉积速率的波动类型,随机波动,采用标准偏差即可;而规则的周期性波动,则要用波长与振幅来描述。经过模拟研究,他们得出了如下结论:地层完整性是时间尺度 t 、长期净沉积速率及周期性波动情况下的波长的增函数,但

随标准偏差与振幅的增大而降低。

2.2.2 剖面厚度与全球同期平均沉积厚度比值法

McShea 和 Raup^[14]认为,某一地层剖面的完整性可以用该剖面的厚度与这一时期的全球平均沉积厚度的比值来代表。他们援引两份全球沉积速率的资料作为全球平均沉积厚度的依据,其中之一是 Gibbs^[15]对地球主要河流每年沉积物运载量的统计,其估计值为 $0.93 \text{ km}^3/\text{a}$, 用该值除以陆地有效沉积面积(包括大陆架在内为 $1.32 \times 10^8 \text{ km}^2$)即可得出年平均堆积厚度为 0.007 mm ^[14, 16],这一数据包含了无沉积作用区的影响;其二是来自 Ronov^[17]估测的 25 个地质时期的沉积物总量,将其除以沉积面积即得到这些地质时期的沉积厚度。McShea 和 Raup^[14]据此认为,地层剖面的厚度越大,则该剖面越完整。

然而,Tipper^[16]认为,McShea 和 Raup^[14]在用 Ronov^[17]的数据建立地层完整性与地层厚度的关系时存在 5 个方面的问题,其中主要是这一方法的核心——全球沉积厚度的计算没有考虑的影响因素太多,因而存在着相当大的误差,特别在时间跨度较小时偏差更大,因此,这一方法不可能准确测定地层完整性。McShea 和 Raup^[14]自己也认为,这一方法仅适合对地层完整性作定性估测。

2.2.3 潜穴化石定性估测法

Wetzel 和 Aigner^[18]提出一个测定海相层序地层完整性的经验方法。他们认为,潜穴化石组合展示了一个特定的垂向分带特征,当某一潜穴化石组合被浊流、风暴或其他灾害性事件削截时,通过分析被削截潜穴的类型和各潜穴的原始深度,即可得出这次事件造成的最小削截深度。Wetzel 和 Aigner^[18]采用这一方法对非洲西北部大陆边缘半深海沉积以及德国西南部的浅海沉积作了完整性研究,首先分析出研究区域常见的潜穴生物组合及潜穴深度,然后测定底流削截深度并最终计算其完整性。该方法适用于时间跨度较小的海相岩层的完整性分析,特别在削截量不超过生物扰动量(一般为 25 cm)时其计算结果十分精确;但其应用范围较为狭窄,难以推广到其他岩层中,且对无沉积作用产生的沉积间断无法测定。

2.2.4 古地磁法

Algeo^[19]提出,由于古地磁倒转与沉积事件无关,因而地层剖面中地磁倒转的分布可以用来评价地层的完整性。他认为,地层剖面越完整,在地层单元沉积时期发生倒转并记录在地层单元内的概率越大;反之,地层剖面越不完整,在沉积间断期间发生倒转并记录在地层单元接触面的概率也越大。基于这一原理,Algeo^[19]分析测定了地层单元内或地层单元接触处的古地磁倒转的频率,其频率的比值反映了沉积时间与间断时间之比,由此可以计算出地层剖面的完整性。地层完整性与古地磁倒转频率间的这种关系可以用概率理论来确定。Algeo^[19]采用蒙特卡罗方法对这一方法进行了评估,表明这一地层完整性估测方法在古地磁倒转次数与地层单元数之比在 1:8 和 2:1 之间,以及实际的地层完整性小于 0.15 或大于 0.85 时估测结果最为准确。假定新生代的地磁倒转频率为 $1 \sim 5 \text{ 次}/\text{Ma}$,则该方法能够测定平均周期为 25 ka 到 2 Ma 的地层剖面的完整性,大致相当于准层序与层序的延续时间。古地磁倒转和沉积事件互不相关,因而这一方法与 Sadler^[4]及 McShea 和 Raup^[14]的方法相比更为可信。但它同样也存在着一些特定的要求和局限性:地层剖面必须具有初始碎屑剩余磁性;所研究的地层剖面在沉积时期必须发生中等频率的地磁倒转;地层剖面跨越的地磁倒转过程必须是稳定的;该方法对地磁倒转次数与所研究的地层单元数之比有一定限制;对剖面的地层单元有一定要求(不能少于 25,一般为 100 甚至更多)。

3 沉积间断与地层完整性的研究意义

沉积间断与地层剖面的不完整性极大地影响了地质现象的解释。

首先, 地层剖面的完整性可以帮助我们正确确定沉积环境。沉积环境是影响地层剖面完整性的重要因素, 例如, 河流与湖泊沉积、深海与浅海沉积以及海相与陆相沉积所形成的地层剖面的完整性之间有着极大的区别。

其次, 地层完整性的确定对于评价古生物演化方式(点断平衡或渐变), 以及古生物绝灭方式(背景绝灭或异常绝灭)是至关重要的。古生物的集群绝灭是当前地质学研究热点之一, 自 Alvarez 等^[20]的小行星陨击假说提出后, 不同的研究者提出了多种关于生物集群绝灭的解释(见殷鸿福等^[21])。这些成因解释都有一个隐涵的前提, 即所研究的地层剖面必须是完整的。现在看来这一前提也许是不正确的。1984年, Dingus^[22]采用 Sadler^[4]的方法对3条河流沉积剖面和5条深海沉积剖面进行地层完整性估测。他认为, 这些剖面在时间尺度小于100 ka时几乎全部是不完整的, 例如, 白垩与第三系界线所在的古地磁时(29R)的地层完整性在1/600至1/10之间(时间步长为100 ka)^[22]。Dingus^[22]据此认为, 这一时期的生物绝灭也许是在沉积间断时期由渐变方式造成的。

第三, 古地磁的倒转过程主要记录于沉积岩层中, 因此, 要恢复地史时期的地磁场倒转史, 建立全球磁性地层框架, 也需要对地层剖面进行完整性研究。

第四, 对地层记录“不完整性”的确认, 是地学思维的一次变革。沉积物沉积过程的脉冲性和不连续性表明, 沉积记录的不连续是普遍的, 而连续则是偶然的。这一认识冲击了传统地质学的哲学根基——均变论, 是对其片面性的一种必要补充。

参 考 文 献

- 1 Barrell J. Rhythms and the measurement of geologic time. *Geol Soc America Bull*, 1917, 28: 745~ 904
- 2 汪品先. 间断地层学与地震地层学. 见: 同济大学海洋地质系编. 古海洋学概论. 上海: 同济大学出版社, 1989. 12~ 19
- 3 Ledbetter M T, Ciesielski P E. Post Miocene disconformities and paleoceanography in the Atlantic sector of the southern ocean. *Palaeogeog, Palaeoclim, Palaeoeco*, 1986, 52: 185~ 214
- 4 Sadler P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Journal of Geology*, 1981, 89: 569~ 584
- 5 Tipper J C. Rates of sedimentation and stratigraphic completeness. *Nature*, 1983, 302: 696~ 698
- 6 Crowley K D. Filtering of depositional events and the completeness of sedimentary sequence. *Jour Sed Petrology*, 1984, 54: 127~ 136
- 7 Friend P F, Johnson N M, McRae L E. Time level plots and accumulation rates of sediment sequence. *Geol Mag*, 1989, 126: 491~ 498
- 8 Beer J A. Steadiness and lithologic completeness, Bermejo basin. *Journal of Geology*, 1990, 98: 501~ 517
- 9 McRae L E. Paleomagnetic isochrons, unsteadiness, and non uniformity of sedimentation in Miocene fluvial strata of the Siwalik group, northern Pakistan. *Journal of Geology*, 1990, 98: 433~ 456
- 10 McRae L E. Paleomagnetic isochrons, unsteadiness, and non uniformity of sedimentation in Miocene intermontane basin sediments at Salla, eastern Andean cordillera, Bolivia. *Journal of Geology*, 1990, 98: 479~ 500
- 11 Sadler P M, Strauss D J. Estimation of completeness of stratigraphical sections using empirical data and theoretical models. *Journal of the Geological Society, London*, 1990, 147: 471~ 485
- 12 Wheeler H E. Baselevel, lithosphere surface and time stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 1964, 75: 599~ 609
- 13 Anders M H, Knieger S W, Sadler P M. A new look at sedimentation rates and the completeness of the stratigraphic record. *Journal of Geology*, 1987, 95: 1~ 14

- 14 McShea D W, Raup D M. Completeness of the geological record. *Journal of Geology*, 1986, 94: 569~ 574
- 15 Gibbs R J. Sites of river-derived sedimentation in the ocean. *Geology*, 1981, 9: 77~ 80
- 16 Tipper J C. Estimating stratigraphic completeness. *Journal of Geology*, 1987, 95: 710~ 715
- 17 Ronov A B. The earth's sedimentary shell—quantitative patterns of its structure, compositions and evolution. *Int Geol Review*, 1982, 24: 1 313~ 1 363
- 18 Wetzel A, Aigner T. Stratigraphic completeness: tiered trace fossils provide a measure stick. *Geology*, 1986, 14: 234~ 237
- 19 Algeo T J. Quantifying stratigraphic completeness: a probabilistic approach using paleomagnetic data. *Journal of Geology*, 1993, 101: 421~ 433
- 20 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 1980, 208: 1 095~ 1 108
- 21 殷鸿福, 徐道一, 吴瑞棠. 地质演化突变观. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 1~ 201
- 22 Dingus L. Effects of stratigraphic completeness on interpretations of extinction rates across the Cretaceous-Tertiary boundary. *Paleobiology*, 1984, 10: 420~ 438

HIATUS AND STRATIGRAPHIC COMPLETENESS ESTIMATION

Wu Zhiyong Guo Jianhua Wu Dongsheng
(*Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei*)

Abstract

Extensive occurrence of hiatus in geological record imposes bad effects on the study of chronostratigraphic correlation, organic evolution, catastrophic or episodic depositional layers, and on analysis precise. Hiatus could be classified into syn-depositional and post-depositional ones according to their formation stages, and into micro, small, median, large and giant ones according to their scales. The micro and small hiatus generally formed in syngenetic stages; the large and giant ones resulted from global eustatic movements, paleogeographic and paleoclimatic changes, tectonic activities in epigenetic stage; the median ones formed in both the syngenetic and epigenetic stages. The completeness of a stratigraphic section is defined as the fraction of time intervals of some specified length(t) that left a record. The value of the completeness of any section is less than one but greater than zero. How to determine the completeness of a section is still a unsolved problem. In recent ten years or more, some research workers proposed a number of approaches such as the ratio between long-term and short-term sedimentation rates, the ratio of thicknesses between a section and globe average synchronous deposits, tiered trace fossils and paleomagnetic data methods. These methods have laid down a firm foundation for future work.