

论地质事件沉积作用及 地质剖面与地震剖面的关系

王克宁

(石油地球物理勘探局解释中心)

摘 要

王克宁: 论地质事件沉积作用及地质剖面与地震剖面的关系, 《石油地球物理勘探》, 24 (3) 1989: 301~311

沉积岩石是一系列地质事件沉积作用的产物。风暴、特大洪水等稀有地质事件在地质时间尺度中频繁发生。在水盆中某一场所形成一个小层或小层组属积极性沉积作用, 而基本无沉积或虽有少量沉积但又被冲刷或剥蚀, 使趋于成岩的下伏地层暴露而形成的一个沉积间断面代表了消极性沉积作用。当把这一沉积新理论应用到地震资料解释时, 认为每两个小层或小层组之间的层面代表了一个相当长的沉积间断面, 这个面同时又是一个反射系数或大或小的岩石物性界面, 并由此得出地质剖面与地震剖面的关系。

关键词: 地质事件 积极沉积 消极沉积 地质剖面 地震剖面

ABSTRACT

Wang Kening: On both the episodic sedimentation and the relation between geological section and seismic section, OGP, 24 (3) 1989: 301~311

Sedimentary rock is the result of a series of episodic sedimentation. The rare episodic geological events such as hurricane and terrible flood frequently happened on a geological-time scale. A single stratum (or stratum band) formed on a location in a basin indicates constructive sedimentation; while the sedimentary discontinuity, which was caused by nonsedimentation or scouring and denudation that removed the new sediments to expose the underlying consolidated sediments, represents deconstructive sedimentation. When applying this new sedimentation theory into seismic data interpretation, people are of the

opinion that an interface between two thin beds (or two thin-bed bands) means a rather long-period sedimentation discontinuity surface, which is also considered as a physical interface with large or small reflection coefficient. From this opinion we can know the relation between geological section and seismic section.

Key words: geological event, constructive sedimentation, deconstructive sedimentation, geological section, seismic section

70年代以来,现代地质学进展很快,在沉积岩石学领域形成地质事件沉积理论是其中主要进展之一。事件一词出自英文 Episodic,指暴风、洪水、火山爆发、海啸、小行星撞击地球等,这些事件影响乃至控制沉积作用。地质事件理论是一个正在发展中的理论,目前,沉积学家们认识不尽一致。作者认为,地质事件所引起的沉积作用包括积极性和消极性两种,它们交替发生形成沉积岩石。地质事件沉积作用又可按成因划分为沉积因素主控和构造因素主控两大类。从地质事件沉积作用出发,作者探讨了地质剖面与地震剖面的关系。

地质事件沉积作用概述

图1为美国威斯康星州麦迪逊出露的一段上寒武系剖面,厚度仅十几米,共有四个沉积间断面,即下部4m处一层平面分布不甚稳定、厚约1cm的粗砂岩之底界面;8m

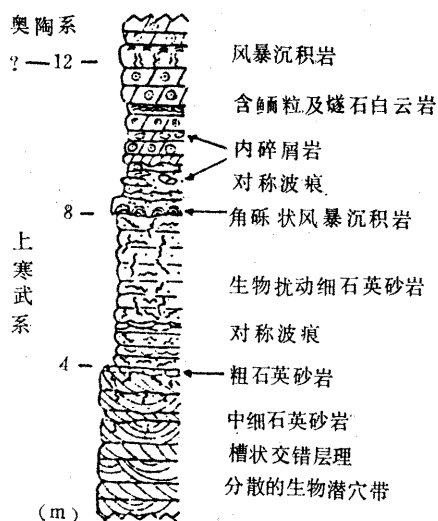


图1 多特场院剖面示意图
(据Dott, 1983)

处平面展布数平方公里、厚约0.5m的迭层石标志层之顶界面;剖面上部还有两组沉积间断面,即数层内碎屑灰岩和数层鲕屑白云岩夹石英砂岩。这四个沉积间断期代表一种间歇性的地质事件,如特大风暴在滨浅海所引起的波浪作用。这就提出了一个问题,沉积作用是一层一层地连续进行的呢?还是如图2所示随沉积空间和地质时间变化断续进行的呢?越来越多的沉积学家赞成后一种观点,把沉积岩石作为一系列地质事件的综合产物。

图3表示风暴、特大洪水等稀有地质事件在若干年中出现1次、10次和100次概率示意图。假设在某一沉积场所,每

10年发生一次特大洪水的概率为60%,那么在20年中可能性为80%,40年中可能性为85%。又如巨大陨星或小行星撞击地球水面的概率约为每40百万年一次。至于强度,有人根据海底核爆炸经验公式推算,一个直径10km的天外来客可在2000m深海域引起

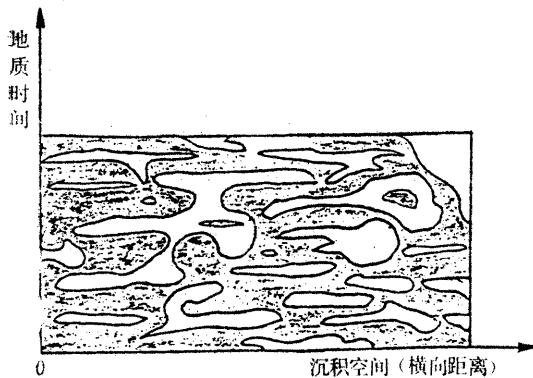


图2 随沉积空间和地质时间变化形成沉积岩过程示意图。

阴影部分表示有沉积作用发生, 空白部分表示无沉积或少沉积

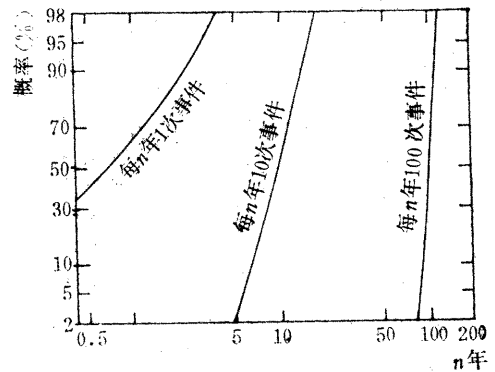


图3 地质事件概率图
(据 Crelener, 1967)

每秒 25km 初始速度的波浪, 冲击半径上万 公里。晚白垩纪以来, 应发生两次以上此类地质事件。一些地质家认为, 白垩纪末期恐龙等古生物的灭绝, 是由于大量陨星撞击地球产生的灰尘使恐龙呼吸困难乃至窒息引起的。因此, 在人类有历史记载的数千年, 不可能出现一些稀有地质事件, 在以百万年为单位的地质时间尺度中却是肯定会多次发生的。图 4 为 12 个重要地质事件重复出现的时间间隔及其能量级别。

P. M. Shadler (1981) 对沉积速率和缺失时间间隔做了认真的定量分析, 他认为地质时期和现代观测的同类岩石的沉积速率是相似的, 关键在于地层层面所代表的沉积间断时间可达数十年的数量级。Van Andel 进一步推测说, 在地层剖面形成过程中的大部分沉积间断极不明显, 很难辨认。图 5 剖面中, 不同岩石类型所代表的沉积速率是不同的, 剖面中上部碎屑岩的底界面, 即沉积间断面所代表的无沉积时间比两个间断之间地层形成的时间还要长。剖面下部页岩则相反, 沉积速度很慢, 层面所代表的无沉积时间很短, 在图中时间坐标上无法表示。

本文将小层定义为两个层面或两个层理面所分隔的最小单位, 厚度一般变化于 1mm~1m 之间。同一沉积环境中形成的一组小层, 如交错斜层理 (图 5 中海滨沉积) 和具粒度正韵律的递变层理等可称之为小层组。

图 6 是笔者在美国沃希托山宾夕法尼亚群含煤地层中观察到的快速沉积。一层厚约

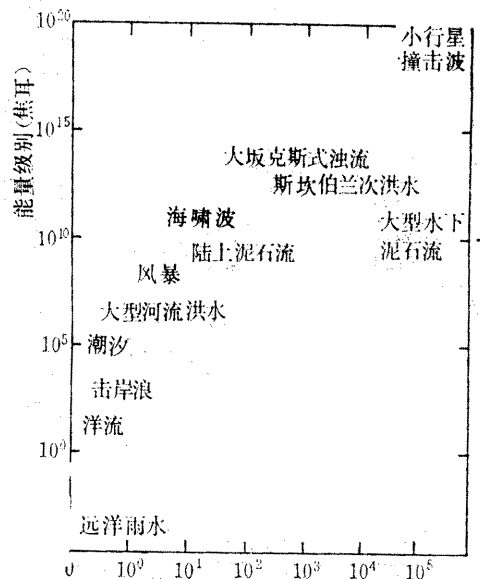


图4 同类地质事件重复出现时间间隔及能量级别

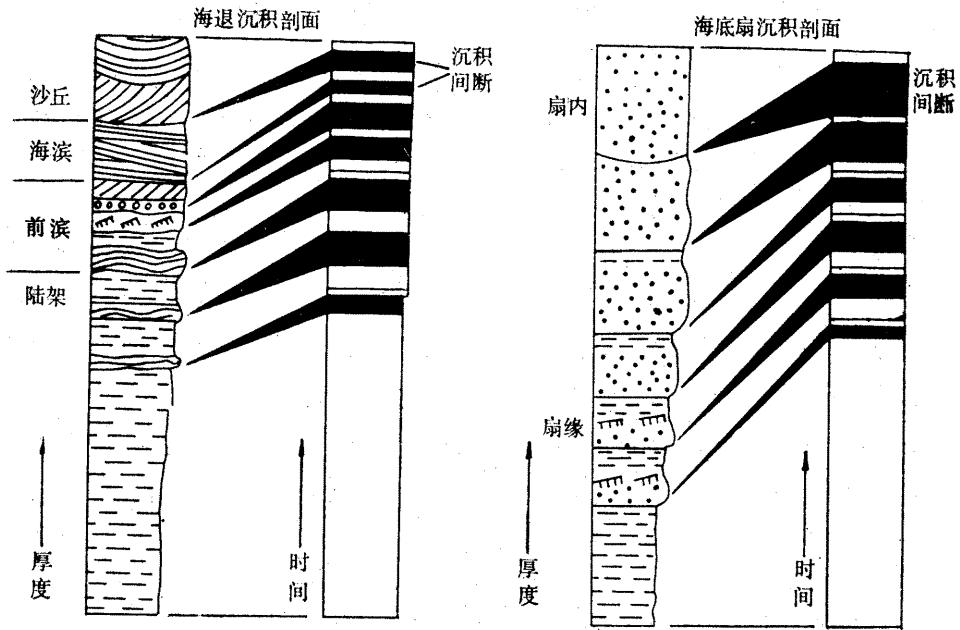


图 5 沉积间断所代表的时间间隔往往大于其下保存下来的岩层所代表的时间间隔 (据 Carr, 1982)

600mm 的砂岩中有若干蕨类植物树干化石 (图中箭头所指)，右侧的蕨类植物化石树干强烈弯曲，中间及左侧树干在强大水流冲击下折为几段，表明这层砂岩是从左向右来的大洪水在若干小时内冲击形成的，沉积速率可达 60mm/h。

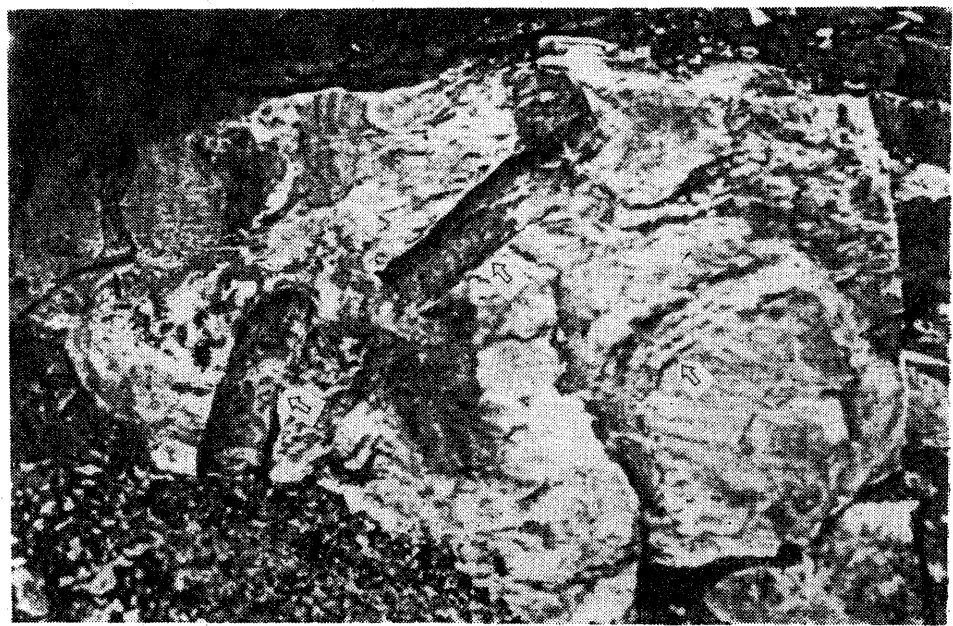


图 6 砂岩中蕨类植物化石 (箭头所指)

表 1 列出了若干地质事件持续时间长度和形成的沉积建造。头两种事件是常见的，

第三种事件是稀有的，第四种事件发生频率高于头两种并低于第三种。在这些地质事件中，有些地方受水流的冲蚀，有些地方露出水面被风化剥蚀，还有的地方是在两个地质事件之间长期处于相对静水状态。在这些地方没有沉积或极少沉积，均属消极性沉积作用，而地质事件在形成沉积物的地理环境中表现为积极性沉积作用。积极性与消极性沉积作用在一定空间与时间范围内交替进行的产物是沉积岩层，例如表1中后三种综合性地质事件分别形成不同级别的沉积层序。从地质时间尺度上看，事件沉积作用是很频繁的。

若干地质事件沉积作用 表1

时 间	地质事件	沉 积 建 造
若干分钟	击岸浪	一个海滨小层
若干分钟	波浪	一个波状小层
若干小时	骤发洪水	泥石流或浊流沉积
一周	洪水	冲积锥或三角洲
一年	综合以上等	一组季节纹泥
10^3 年	综合以上等	10mm远洋沉积
10^8 年	综合各类事件	克拉通大旋回

下面列举一个定量计算的例子。设有一个由10000个小层组构成的复理石建造，每小层组下部为100mm厚的浊积岩层，上部为50mm厚的页岩，总厚为1500m。占剖面厚度三分之二的浊积岩在地质时间尺度中是瞬间形成的，可以忽略不计。页岩沉积速率为0.05mm/a，则形成上述建造的时间等于500m页岩形成的时间，即10个百万年。类比早第三纪43百万年可形成约6500m的类似建造。根据页岩沉积基本连续进行的特点，可以每百万年50m为标准沉积速率，把各类构造层划为两大类，每百万年沉积速率小于50m者为消极地质沉积作用发育的振荡型构造层；大于50m者为积极地质沉积作用发育的建设型构造层。参考国内外有关盆地沉积速率资料，可初步建立起以构造层沉积速率与构造因素为背景的典型发育环境的关系（表2）。

地质事件沉积作用又可按成因划分为沉积因素主控和构造因素主控两大类，下面分别进行论述。

构造层沉积速率与典型发育环境对应关系

表2

沉积速率 (m/10 ⁶ a)	0					
-------------------------------	---	--	--	--	--	--

沉积因素主控的地质事件

水介质中, 风化、剥蚀的产物以及其它的松软沉积物经搬运而沉积的事件是沉积因素主控的地质事件。影响滨、浅海沉积的最强烈的地质事件是风暴。据统计, 墨西哥湾北部任何一片海域平均每一百年经历一次飓风, 从地质时间尺度看是极为频繁。例如1961年命名为卡拉的风暴沿美国德克萨斯州中部海岸引起的涌浪高于平均海平面4m (图7), 倒退的涌浪和水流把大量沉积物携向海洋方向沉积下来, 形成正粒序地层, 最厚处可达60m。M. Hayes 于1961年描述过这一地层 (图8左侧, 但20年之后, J. McGowen 发现这套沉积物已完全被潜穴生物均匀化了, 以至面目全非 (图8右侧))。

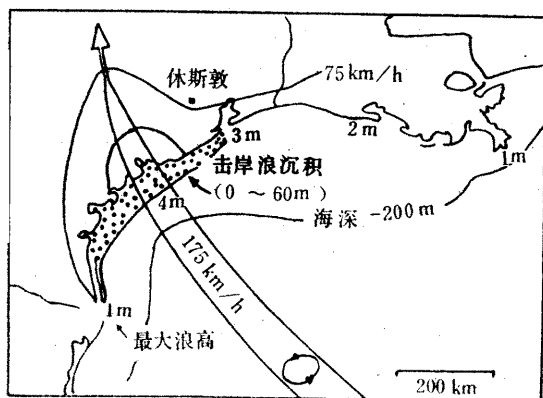


图7 墨西哥湾卡拉风暴经过路线、时速、最大击岸涌浪高度、击岸浪沉积范围和厚度 (据Hayes, 1967)

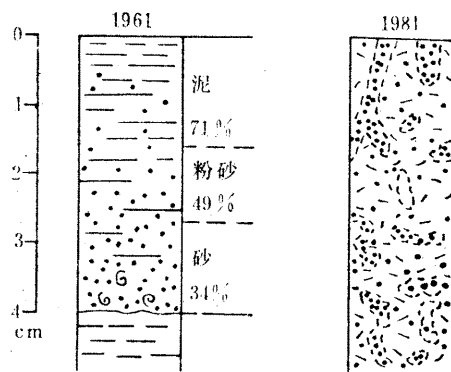


图8 卡拉风暴导致的近岸沉积

左图为风暴发生后的剖面; 右图为20年后生物扰动改造了的剖面

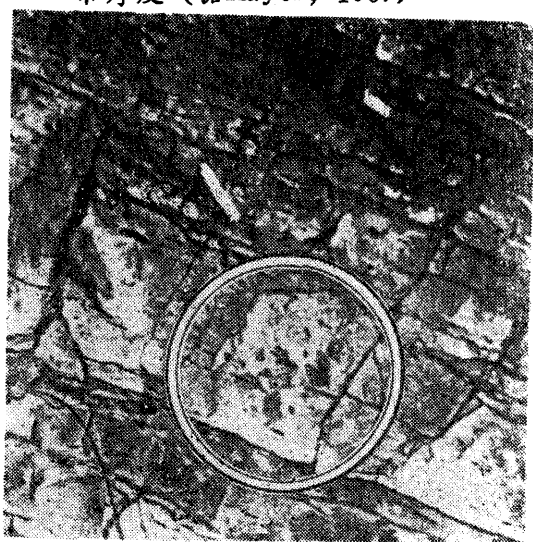


图9 灰白色河道砂岩沉积中的深褐色页岩碎片(圆圈内)是形成河道砂时的水流携带而来的

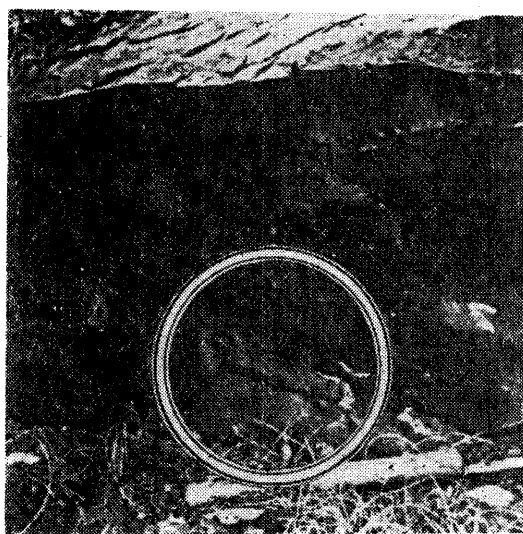


图10 盆底密度流形成的细砂岩底面构造

舌尖(圆圈内)方向指示古水流方向

潜穴生物将上部的细质沉积物食用后排泄到正粒序地层的下部，同时也将下部沉积物食用后带到上部，致使原有的粒序消失，这是原始沉积粒序遭到破坏的一个例证。

美国特拉华盆地北部二叠系地层中观察到一套洪水浊积成因的深水河道沉积，宽1~2km，厚20~30m的若干槽状砂岩体平面上交错延伸到盆地中部，其上广泛覆盖一层均匀的纹层状粉砂岩。J. C. Harms (1980) 认为，在古洪水进入盆地初期，先形成一个垂向密度分层的水体，同一层水体密度相似，向上变小。砂岩体是由盆底的密度流沉积而成，而上部广泛覆盖的粉砂岩是在中等水深两个方向不同的粉砂质密度流相遇后沉积的。图9、图10分别为作者观察到的深水河道砂岩体纵剖面 and 底层面。我国华北盆地渐新统沙三段深水相泥岩中有类似成因的砂岩体。

构造因素主控的地质事件

由构造地质作用如断裂、地震、火山等诱发的地质事件是构造因素主控的地质事件，大坂克斯浊流是这类地质事件的典型例子。大坂克斯浊流最初起因是加拿大东部纽芬兰岛南部大陆板块边缘的一次强烈地震引起的大规模海底滑坡，由滑坡导致浊流（图11），据估算初始浊流的流速约为1~2m/s，最后增至20m/s。该浊流经辽阔的北美东部深海平原达数百公里，沉积了可以辨认的递变层理建造。

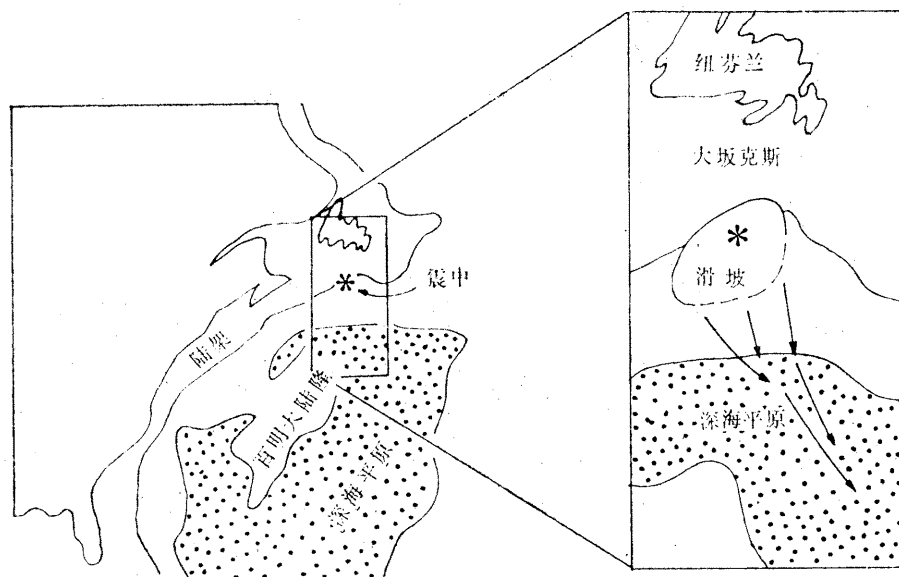


图 11 1929年纽芬兰地震引起的大坂克斯浊流（据 Heezen and Darke, 1964）

K. A. Kastans 和 M. B. Cita (1981) 在地中海海底发现一套均质化泥灰质软泥，经鉴定为3500年前著名的圣托威尼火山爆发的产物。据大量钻孔资料推测，古火山口的水深为70m，大量气体进出引起海啸，海水的垂向振动和径向冲击把3500m深处水下平原的大量纹层状泥灰质沉积物冲蚀到邻近3600m深的海底整体沉积下来，其特征是无内部沉积构造。

陆相断陷盆地中,大断裂的脉动式活动及伴生的岩浆活动常常诱发出构造地震和“湖啸”,在箕状凹陷斜坡上的松散沉积物受其影响,滑塌到水盆中重新沉积。其特征是新形成的小层或小层组分选变好、厚度加大,顶部一般为一层均质化泥岩,该泥岩含较丰富的生物化石和钙质。作者认为,在静水环境中,陆相断陷沉积泥岩发育,而海相沉积页岩发育。其原因之一是陆相断陷盆地中上述成因的浊积或准浊积作用往往将原始季节性纹层状泥质沉积物均质化。

地质剖面与地震剖面之间的关系

综上所述,消极地质事件沉积作用和积极地质事件沉积作用在不同沉积环境中随时间发展交替进行,当我们研究地层剖面时,不仅要看到已记录下来的沉积物,而且还要注意到不同级别的沉积间断及其延续的时间在地质历史中占有相当比例(图5)。一个小层或小层组形成后,往往经历了一个相当长的地质历史时期,小层的累集构成了大套地层。从地震资料解释角度研究地质事件沉积理论,得到一个意义重大的启迪,即沉积盆地内,小层或小层组内部岩石的性质,包括密度和速度在横向一定范围内是相当均匀的。而在纵向上小层或小层组之间则存在密度和速度的离散性差异。因而可以得到如下结论,每两个小层或小层组之间的层面,代表了一个相当长的沉积间断面,这个面同时又是一个反射系数或大或小的岩石物性界面。沉积晚期,成岩和后生阶段的均质化作用、交代作用、胶结作用和重结晶作用,可能消除若干低级别沉积间断面,形成均质化的较大的一个小层组,但这并不明显地影响上述结论的正确性。地震资料解释中对地震反射层位、反射系数及瞬时相位的研究主要是对消极地质事件的研究,而对层速度、波阻抗或复波单轴反射层位的研究则是对沉积地质事件的研究。由此出发并综合前人的认识来研究地质剖面与地震剖面之间的关系可得出如下论点。

论点1 小层或小层组之间的沉积间断面是地震反射层位的基本波阻抗界面。

论点2 地质层位是地震反射层位形成的必要条件,但不是充分条件。

因为地质层位即沉积间断面在空间的分布就是反射系数在空间的分布,然而只有那些反射系数足够大并为地震记录分辨出来的地质层位才能形成地震反射同相轴。一次地质事件沉积作用中所形成的小层或小层组的厚度一般变化于1mm~1m之间,极少有超过20m的。一个10m厚、层速度为3000m/s的砂层的双程反射时间仅7ms,然而地震波的视周期常达30~90ms。所以,即便是目前高分辨率勘探资料也无法分辨出地质剖面中绝大多数小层或小层组之间的沉积间断面。只有当那些小层之间的沉积间断面同时也是如下间断面时,才有可能形成地震反射,即:①上下两个岩性段之间的沉积间断面具有一定的厚度;②上下两个相似岩性段之间由于岩石粒度、成分及形成时间差异如能引起足够大的密度、速度差异,也能形成地震反射层(图12)。例如辽河油田H-2-10井证实,沙三、四段之间的沉积间断面的上下均为泥岩,由声波时差求得上泥岩层速度为2500m/s,下泥岩为3700m/s;③区域性构造运动所引起的沉积间断面,即时间跨度可大可小的不整合面;④若干薄层之间反射系数较大的沉积间断面,往往形成较强振

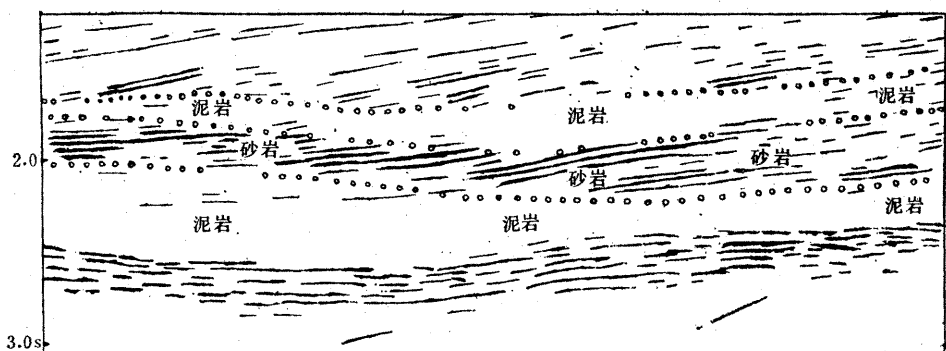


图 12 大民屯地区沙三段地震反射同相轴剖面，砂岩中较陡的三角洲前积层反射层位已证实是地层的真实产状（据李庆忠，1987）

幅、较高频反射同相轴，这在地震剖面中十分普遍。

论点 3 明显穿时的岩性界面形成地震反射层位的可能性很小。

因为明显穿过地质等时面的岩性界面一侧，岩石粒度、密度、速度等性质向非基底的另一侧是渐变的。其次，这种岩性界面是极不光滑的。所以，除滨水相披盖状砂砾岩带、生物岩礁、侵入岩体等特殊情形外，明显穿时的岩性界面难以形成地震反射层位。

论点 4 深水、半深水相砂泥岩地质剖面中，能形成地震反射同相轴的薄层砂（砾）岩体顶界面相当于地质等时面。

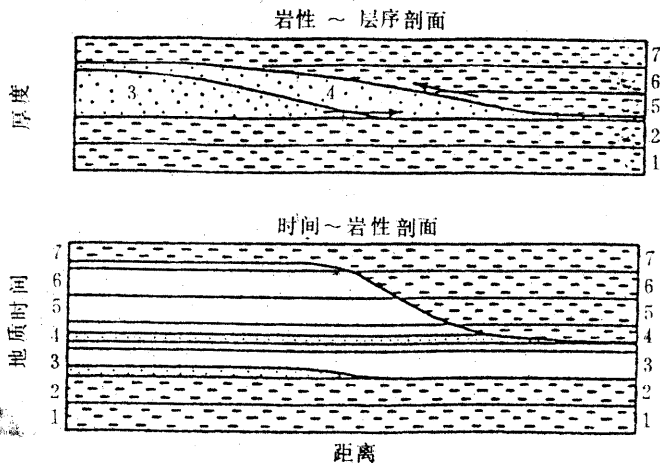


图 13 深水、半深水砂（砾）泥岩沉积时空关系示意图

图 13 中第 3、4 小层代表具有内部粒度韵律的砂（砾）岩小层，一个或一组这样的小层构成深水、半深水相泥岩中的薄层砂岩体，是一次或若干次地质事件如洪水油流的产物。从地质时间尺度看，这类砂岩体顶底界所引起的地震反射同相轴（可能仅为单轴）可以近似地当作地质等时面。

论点 5 空间交错叠置、横向变化的薄片状小层或小层组，造成那些具有地质意义的地震层位横向上反射特征的变化。

论点 6 由论点 5 可知，横向反射特征的变化，特别是振幅的变化，使相邻地震道

相似反射特征连接而成的单轴反射段成为穿时的非地质层位, 不能作为砂岩体等地质解释。

论点7 由论点5推出, 根据钻井资料鉴定出的层位与地震资料解释的地质层位, 其误差范围在半个相位左右。因此, 在钻井、测井、地震层位标定时, 不可过于求精, 而应进行小层序分析。

论点8 盆地沉积愈复杂, 地震分辨率愈高; 研究精度愈高, 愈不能把实际地震剖面段设为连续、均匀或层状介质模型来进行资料处理和解释。尽管水平层状介质模型往往是一个比较符合实际的简化模型。

最后提供一个实例, 用来说明由沉积因素和构造因素主控的两类地质事件沉积的地质剖面与地震剖面之间的关系。

在图14地震剖面中, 2.75s上下各有一强反射同相轴, 以下为不连续蠕虫状短轴反射。钻井揭示下强波3934m以下为沙三段底部一套厚约500m的砾岩体, 砾石巨大, 表面新鲜, 成分以白云岩为主, 次为页岩、砂岩。经对比, 砾石母岩时代在井段中有下新上老的特点。虽然, 由于沙三初期受区域性裂陷运动影响, 大兴断裂多次强烈活动, 使古地形高差显著。不断掀起的上断棱岩体, 遭受强烈风化并形成大量崩解岩石。脉动式断裂活动及相邻断块间的互相调整扭转引起频频地震, 加上雨水、洪水作用, 使得上断棱岩石不断滑塌坠落到断槽中。所以这套砾岩体是由构造因素主控的一套地质事件沉积层序。上强波在井中相当96m暗色泥岩夹细砾岩段, 细砾岩共12层34.5m, 集中于上部。上强波向断层方向变为左行雁列的两组短轴反射。经研究, 从该井段开始, 断层活动相对平稳进行, 断陷湖泊不断扩大, 砾石原为停积在断面上倾方向的滨湖冲积扇,

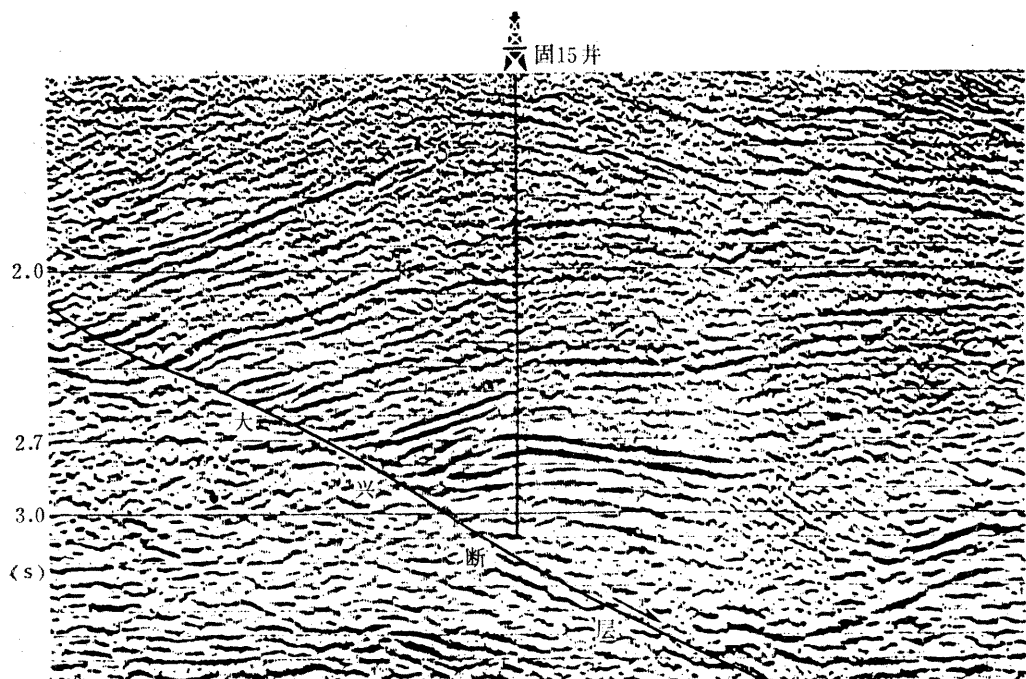


图14 LF511剖面中两个地质事件沉积层序的地震响应

骤发洪水期间垂直断面即沿剖面方向的短直河流将这些砾石再次搬运到深水断槽中, 形成一套由沉积因素主控的地质事件沉积层序。该层序中砾岩普见萤光显示, 初步测试日产气 $40.3 \times 10^3 \text{m}^3$ 。

本文对地质事件沉积作用的论述将有助于对沉积岩和地层形成过程中机械作用的认识, 同时有助于地震剖面的地质解释。

袁秉衡、李庆忠、刘铁泉和范雅琳认真审阅了本稿并提出了宝贵的意见, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Baker, V. R.: Paleohydrology and sedimentology of Lake Missoula flooding in eastern Washington, *Geol. Soc. America Spec.* 1973: 144
- [2] Ball, M., Shinn, E. A., and Stockman, K. W.: The geologic effects of Hurricane Donna in south Florida, *Jour. Geology*, Vol. 75, 1967: 583~597
- [3] Carr, T. R.: Log-linear models, Markov chains and cyclic sedimentation, *Jour. Sed. Petrology*, Vol. 52, 1987: 905~912
- [4] Coleman, P. J.: Tsunamis as geological agents; *Geol. Soc. Australia Jour.* Vol. 15, 1968: 256~273
- [5] Dott, R. H., Jr: Editorial: the challenge of scientific creationism, *Jour. Sed. Petrology*, Vol. 51, 1986: 701~704
- [6] Gretener, P. E.: Significance of the rare event in geology, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, Vol. 51, 1967: 2197~2206
- [7] Heezen, B. C., and Drake, C. L.: Grand Banks slump, *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* Vol. 48, 1964: 221~233
- [8] Sadler, P. M.: Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections, *Jour. Geol.*, Vol. 89, 1981: 569~584
- [9] Van Andel, Tj. H.: Consider the incompleteness of the geological record, *Nature*, Vol. 294, 1981: 397~398
- [10] 李庆忠: 陆相沉积地震地层学若干问题, 《石油地球物理勘探》, 22 (5) 1987: 489~511

(上接第 255 页)

seismic profiles, *Geophysics*, 52 (3) 1987: 307~321

- [8] McMechan, G. A.: Synthetic finite-offset vertical seismic profiles for laterally varying media, *Geophysics*, 50 (4) 1985: 627~636
- [9] Moon, W., Carswell, A., Tang, R. and Dilliston, C.: Radon transform wave field separation for vertical seismic profiling data, *Geophysics*, 51 (4) 1986: 940~947