费希尔图解法在识别和定义长周期 海平面变化中的应用

梅冥相

(中国地质大学 北京)

费希尔图解(Fischer plots)是经线性沉降校正之后把米级旋回层序的累积厚度与时间 的变化作图而得出的一种图解方法。早先它被用来定义米兰柯维奇级别(10⁴—10⁵年)的相 对海平面振荡变化的一种定量方法,后来 Read 等(1988,1989)、Osleger(1990,1991)把它用 于估算三级海平面变化旋回(1—10Ma)的变化幅度,在区域对比的基础上可以用来定义区 域性三级海平面变化旋回。

1 费希尔图解的含义与作图方法

早在 1964 年,费希尔就介绍了一种方法来研究高频率振荡海平面变化幅度,即在假定 或已确定的米级旋回层序的平均周期值的基础上,把经过线性校正之后的环潮坪型碳酸盐 米级旋回层序的累积厚度作为纵坐标,时间为横坐标(图 1),从而得出一个变化图解。这种 图解法就被称为费希尔图解。在当时,费希尔是用构造沉降脉动而不是海平面变化来解释这 些米级旋回层序所反映的沉积环境的周期性变化。后来 Goldhammer 等(1987)又重新使用 这种图解来研究与米兰柯维奇机制有关的高频率(周期为 2×10⁴—10⁵ 年)海平面振荡变 化。另外,他还在关于意大利碳酸盐地层的研究中,运用费希尔图解来定义三级海平面变化。

通过碳酸盐旋回层序的计算机模拟,以及许多研究实例,如 Hardie Shinn(1986)、Read (1988,1989)、Osleger(1990,1991)等的成果,均表明运用费希尔图解来定义三级海平面变 化是一个可实用的途径,它可以消除在野外确定长周期旋回层序边界的偏差,从费希尔图解 中获得的数据,假如通过均衡沉降与压实作用校正以后,可以作为一个定量地估计长周期海 平面变化幅度的途径。

为什么可以用费希尔图解来定义长周期相对海平面变化并且求出其海平面变化幅度 呢?这是因为米级旋回层序的厚度变化与沉积物容纳空间的变化有关,沉积物容纳空间的变 化又是海平面变化和线性构造沉降速率的总和,因此经过线性沉降速率校正后的米级旋回 层序累积厚度随时间的变化即代表了长时限海平面变化的轨迹。在均衡沉降的构造背景下, 于长周期海平面变化旋回的上升阶段,叠加于其上的高频率海平面上升将产生有利于碳酸 盐沉积的水体环境,在环潮坪背景的这种相对较浅的情况下,碳酸盐沉积速率基本上与沉积 物容纳空间的增长速率保持同步,加上向上变浅的碳酸盐米级旋回层序变浅而暴露于水面 的时间较短,故发育较厚的碳酸盐米级旋回层序。在长周期海平面变化的下降阶段,在均衡

●本文 1994 年 1 月 8 日收稿。

沉降的构造背景下,沉积物容纳空间在逐渐减少,叠加于其上的高频率海平面上升将产生有限的沉积物容纳空间,而叠加于其上的高频率海平面下降将使碳酸盐米级旋回层序向上变 浅而暴露于水面的时间相对较长,因此发育较薄的米级旋回层序。这将被表示为正偏差与负 偏差,沉积作用与线性沉降大致同步,如米级旋回层序的厚度将倾向于与第一平均高频率旋 回周期内的构造沉降幅度相等。



 A.线性降速率为 0.05m/ka 的费希尔图解,B.线性降沉降速率为 0.025m/ka 的费希尔图解;
a.模拟出的三级海平面变化曲线;b.米级旋回层序的平均周期;c.米级旋回层序厚度;d.线性沉降 图解中的累积旋回层序的厚度(纵轴)被线性沉降加以校正(向下向右倾斜的斜线),其厚度随时间而变化即产生 了图解。横轴代表时间。每一个米级旋回层序的形成时间被假定为一个平均旋回周期。图解的始点为零点,即假定的 台地沉降在长周期旋回层序界面处的初始位置。线性沉降的幅度由平均沉降速率乘以米级旋回层序的平均周期所得, 垂线即代表米级旋回层序的厚度,下一个米级旋回层序的始点即为上一个米级旋回层序的图解终点,依次图解出所有 米级旋回层序,把所有米级旋回层序的图解顶点连起来就代表了长周期相对海平面变化的轨迹 (据 Read 和 Goldhammer,1988)

2 旋回地层的人工模拟

图 1 及图 2 表明了线性均衡沉降的构造背景下,叠加于周期为 2Ma 的三级海平面升降 变化之上的高频率振荡变化、滞后时间及一定沉积速率等综合作用产生旋回层序的过程。高 频率海平面变化与米兰柯维奇旋回机制有关。要注意的是,高频率海平面变化的形式将不影



图 2 叠加有高频振荡变化的三级海平面变化曲线

三级海平面曲线的变化幅度为 12.5m,周期为 2Ma,叠加其上的高频率海平面振荡变化的周期为 10×10⁴ 及 2×10⁴ 年,其叠加结果用来产生图 1 所示的旋回变化。该海平面变化曲线只是用来表示碳酸盐米级旋回层序怎样用费希尔图 解来表示,三级海平面曲线是相对的。米级旋回层序的相变界限未加以表示。向上变细的箭头表示米级旋回层序的厚 度,由纵坐标表示(据 Read 和 Goldhammer,1988)

响人工模拟的结果,它与长周期海平面变化具有密切的联系;在三级海平面变化的上升阶 段,所形成的米级旋回层序较厚,反之较薄(图 3 示)。图1所示的费希尔图解,是应用图 2 及 图 3 所示的模拟模式产生的米级旋回层序厚度而建立的。费希尔图解和模拟图解得出的长 周期海平面变化曲线是相同的。图 1 之 A 所示的费希尔图解实际上定义了变化幅度为 12.5m 的长周期海平面变化。该模式所使用的沉降速率值为 0.055m/ka,在长时限海平面 变化的上升与下降阶段于 10⁵ 年周期内均形成两个米级旋回层序。但是,在沉降速率较低的 地区(如其值为 0.025m/ka),在长周期海平面变化的上升阶段于 10⁵ 年周期内发育两个米 级旋回层序,而在下降阶段内只发育一个(图 3 之 B、D)。只是在极少的情况下,米级旋回层 序不发育,由费希尔图解所定义的长周期海平面变化曲线是一水平线。模式模拟结果表明, 只有在适当的构造沉降速率背景下,费希尔图解才能定义出长周期海平面变化的最大变化 幅度。在沉降速率较低的地区,由于在长周期海平面变化的上升与下降阶段于相同的时间周 期内发育的米级旋回层序的个数不一样,费希尔图解对长周期海平面变化幅度的估算偏低, 因为过高地估算了以形成于长周期海平面上升阶段的米级旋回层序的形成周期所假定的平 均旋回周期。也就是说,过高地估算了长周期海平面变化旋回的下降幅度。由于较多的高频 率海平面变化旋回被忽视,就会造成费希尔图解对自然事实的曲解。

3 费希尔图解与相对海平面变化曲线——以美国阿帕拉契亚山脉的早奥陶世为例

下面以 Read 等(1988)的研究成果为例,介绍应用费希尔图解在研究美国阿帕拉契亚 山脉的早奥陶世地层中用来定义三级海平面变化曲线的方法与分析过程。

3.1 相序与沉积背景

在阿帕拉契亚山脉,早奥陶世地层厚 0—1200m,地层总厚度向沉积中心变厚,向克拉通 及穹窿区变薄。它由持续时限为 2—5Ma、厚数十至 200m 的几个三级旋回层序叠加而构成。



图 3 不同幅度的人工模拟旋回模式

海平面变化曲线与图 2 相同。A 和 C 表示了分别在 0.055m/Ka 及 0.025m/ka 的构造沉降幅度下,碳酸盐米级旋回层 序(属环潮坪型,梅冥相)的形成过程,均具有相同的米级旋回层序个数(4 个),它们均形成于三级海平面上升阶段;B 和 D 表示长周期海平面下降阶段米级旋回层序的形成过程。注意 B(沉降速率为 0.055m/ka)表示的米级旋回层序个 数与长周期海平面上升阶段相同,D(沉降速率为 0.025m/ka)表示的个数要少(据 Read 等,1988)

沉积层序穿过沉积走向呈带状分布。在西部台地内部地区主要发育向上变浅、向上变薄的环 潮坪型米级旋回层序。碳酸盐米级旋回层序具有一个突变的基底面,其上覆盖鲕粒一骨屑一 内碎屑颗粒灰岩(开阔潮下环境的产物)以及凝块石生物丘,向上变为交错纹层状球粒碳酸 盐(局限潮下及潮间坪下部环境的产物)。在这种潮坪环境中,每一个米级旋回层序都记录了 泥状潮坪越过浅潮下相岩石向盆地方向的进积作用。一些纹层状潮坪覆盖层中含有石英砂 岩夹层,或者含有少量石英砂。另外一些米级旋回层序的覆盖层是由角砾岩组成,该角砾岩 由大气暴露作用形成的钙质壳或盐溶垮塌形成。在弗吉尼亚一带的外陆架,一些米级旋回层 序缺乏潮坪覆盖层,它们还是以向上变浅为特征,由下至上由深潮下相岩石、风暴沉积灰岩, 局部由潮下交错纹层状球粒灰岩组成,而且由具有齿状剥蚀顶面(潮汐冲蚀面或微喀斯特 面)的潮下生物丘粘结岩作为覆盖层,覆盖层中局部发育筛积灰砂(Bova 和 Read, 1987)

3.2 相对海平面变化曲线

图 4 所示的年代地层对比图以及海平面变化曲线是根据许多人的研究资料建立的。相 对海平面变化曲线由相对水体深度推断而得出,从深到浅岩相指示物为:风暴沉积发育的潮

岩相古地理。





稠密点代表以灰岩为主的地层,空白代表旋回性白云岩,稀疏点代表石英砂岩,竖线代表非沉积作用不整合。剖面分布 地区为,New York(N.Y.)、Pennsylvania(P.A.)、Virginia—Maryland 北部(N.VA.MD)、Virginia 西南部(SW.VA)、 Tennessee 东北部(WE.TENN)、Alabama(AL)。被用来进行费希尔图解的剖面(图 5)用黑柱表示,N(Nittany Arch)、 G(Goodwins Ferry)、A(Avens Ridge)、R(Rose Hill),0-2至0-6 属早奧陶世

下泥质碳酸盐、潮下藻生物丘灰岩、环潮坪旋回性灰岩、旋回层白云岩、石英砂及石英砂岩。 大级别的海侵一海退事件(图4示)可以在阿帕拉契亚山脉进行大规模追索,并且经历的构 造沉降速率为 0.01-0.04m/ka(图5)。

3.3 阿帕拉契亚山脉奥陶纪地层的费希尔图解

费希尔图解所选用的剖面如图 4 示,横跨 500km,得出的结果如图 5 示。在宾夕法尼亚, 建立图解的地层包括 Nittany 白云岩以及 Axeman 灰岩组下部;在弗吉尼亚则包括 Chepultepee 组及 Kinsport—Mascot 组;只是 Goodwins Ferry 剖面才包括了整个上 Knox 层序。奥 陶系的底界难以确定,只是为了作图的目的均把它置于下 Knox 群顶部的厚层砂岩之上。图 解所用的绝对年龄是 Dang 时代表 (Palmer,1983),即早奥陶世的时限为 20Ma。假如所有图 解使用的时限是一致的,那实际年龄值将不会影响海平面变化的幅度,而只是影响海平面变 化曲线的形状 (变陡的程度)。其结果,使用过长或过短的时限只是将沿时间轴变化的海平面 曲线拉长或缩短。米级旋回层序代表的平均旋回周期由下式计算:

组的持续时限(Ma)×旋回剖面厚度

剖面中旋回个数×组的厚度。

要注意的是,如果用来作费希尔图解的剖面的地层间隔太大,并且把地层的总厚度及其时限 来计算其米级旋回层序的平均旋回周期,图解的结果可能为一水平线。因此,米级旋回层序 的旋回周期的平均值的确定不一定按上式计算,因为该计算公式未对米级旋回层序的滞后 时间以及间断所损耗的时间加以校正,特别是对潮下碳酸盐米级旋回层序以及包含有大量 页岩的地层,如果使用确定的旋回周期值(如相当于米兰柯维奇旋回的何种级别)可能效果 还更好些。

图 4 所示的早奥陶世地层包含有五个三级海平面变化旋回层序(0-2 到 0-6),用费希尔图解均可在不同地点定义出这些海平面变化事件。在用费希尔图解来定义三级海平面变化的那些剖面中,有些三级旋回层序全由环潮坪型米级旋回层序构成(如宾夕法尼亚剖面),

· (1)



有些是由向上变浅的潮下型米级旋回层序组成(如 Avens Bridge),前者不给予时间及厚度 校正面后者必须进行时间及厚度的校正。

图 5 早奧陶世上 Knox-Beckmantown 碳酸盐地层的费希尔图解

左下角的小框图表示出了剖面的位置以及早奧陶世地层的厚度等值线图。N=Nittang 穹窿区(沉降速率为 0.029m/ka、靛回周期为 158333 年),A=Avens Bridge(沉降速率为 0.023m/ka、平均旋回周期为 119760 年),G=Goodwins Ferry(沉降速率为 0.186m/ka,周期为 186195 年),R=Rose Hill(沉降速率为 0.0175m/ka,周期为 195142 年)。黑色 三角形表示含有石英砂的米级旋回层序,b为角砾岩。图解中的最低点(0-4 旋回层序的低水位期)发育的角砾岩在纽 约州的大部分地区均可以道ງ到并且可以进行清晰的对比(据 Read 等,1988)

运用费希尔图解来定义三级旋回层序(相当于"层序地层学"定义的"层序"),是在假定 构造沉降是线性的前提下,由图解所得出的相对于初始点的水平线上的偏差,即反映了海平 面变化或沉降速率的变化。各个剖面的费希尔图解的结果的近似性是事实,这又反过来支持 了海平面变化解释。

1 h - ..

从米级旋回层序的累积厚度和逐渐变化中可得出三级海平面变化幅度。米级旋回层序 叠加形式所反映出的垂向上的系统变化,可以用来定义三级旋回层序以及三级旋回层序的 体系域。图解上所示的三级海平面上升阶段发育的米级旋回层序构成了海侵体系域,其特征 是米级旋回层序主要由开阔海相岩石组成,白云岩较少,在外陆架常缺乏潮坪覆盖层 (Nguyen 等,1985;Bova 和 Read,1987)。与三级海平面上升造成的沉积物容纳空间的增长 速率变大相响应,环潮坪型米级旋回层序具有向上变厚的趋势。图解上的最大正偏差等同于 最大海泛面或者凝缩段,也作为三级海平面变化旋回的最高水位期。发育于图解的下降翼, 即三级海平面变化的下降阶段的环潮坪型米级旋回层序,构成了高水位体系域。它们以向上 总体变薄为特征,发育较多的局限及半局限环境的白云岩,这是叠加在线性构造沉降之上的 三级海平面下降造成沉积物容纳空间增长速度减小或沉积物容纳空间总体变小的结果。那 些以含有石英砂的白云岩覆盖层为特征的环潮坪型碳酸盐米级旋回层序正好作为识别三级 旋回层序的界面的标志,因为它是在低水位条件下接近三级旋回层界面形成时,来自于克拉 通内陆的硅质碎屑注入的结果。

在沉降速率较低的地区(如 Goodwins Ferry),图解得出的海平面变化幅度要比高沉降 速率的地区(如 Avens Bridge)要小。这可能是由于在低沉降速率地区于三级海平面下降阶 段,许多高频率旋回层序"失去节拍"所致。

某一两个米级旋回层序的界面未识别出来,对用费希尔图解得出的长周期海平面变化 曲线影响较小,但对较小级别的海平面变化幅度与周期的认识影响较大。图解如一般表明了 周期为 2×10⁴ 年至百万年的高频率旋回信号,那么在一般情况下只可能反映出周期为 40 万年至 80 万年的米兰柯维奇信号。

费希尔图解得出的长周期海平面变化曲线是否由海平面产生的,其粗略检验方法是:把 经过沉积物载荷产生的构造沉降校正之后的米级旋回层序厚度与热沉降速率等数据来进行 重新图解,这还要包括压实作用的校正。如果 S 是与沉积物负载有关的沉降,Pm 和 Ps 分别 是压实以后和未压实而饱和水的碳酸盐沉积物密度(3.3g/cm² 和 2.3g/cm³)。 △TS 是由热 沉降和/或海平面变化产生的容纳空间,Z 是由于与热沉降、海平面上升或下降、沉积物载荷 有关的沉积物总厚度,则:

 $S(Pm-Ps)/Ps = \triangle TS, \notin S = 2.3 \triangle TS$

并且又存在以下关系:

 $Z=3.3 \triangle TS, \mathbf{x} \triangle TS=0.3Z$

假如不存在海平面上升,那么沉积物负载占据的空间大致就为热沉降的量,该热沉降的 速率是地层堆积速率(地层厚度/形成时间)的 0.3 倍。因此,任何与热沉降曲线的偏差都代 表了海平面振荡变化。因而任何时候的相对海平面变化(△SL)为:

△SL=(0.3×累积米级旋回层序厚度)--(热沉降速率×时间)。该△SL值与费希尔图 解进行对比,图解得出的海平面长周期变化幅度要小三分之一。因此,如果图 5 所示的三级 海平面变化幅度在垂向上减小三分之一(如 10m 作为 3m),那它可以作为绝对海平面变化 记录。这可能是最小的幅度,因为在图解上所示的高水位峰值比实际峰值出现的时间要晚, 这可能与周期海平面上升阶段的米级旋回层序的形成周期要比下降段的短有关。在费希尔 图解中,把峰值向左迁移将使得出的长周期海平面变化幅度增大。

费希尔图解提供了一个由米级旋回层序的有序叠加形式所决定的三级海平面变化幅度 及其空间对比的定量方法,特别是对那些缺乏生物地层控制的环潮坪地层更加显示出它的 实用价值,这给在露头上识别三级旋回层序并进行空间对比提供了一个新的思路和可实用 的方法。

主要参考文献

梅冥相;1992、碳酸盐台地的层序地层格架及旋回地层级次,《岩相古地理》第2期。

梅冥相,1993,碳酸盐米级旋回层序的成因类型及成因机制,《岩相古地理》第6期。

张选阳译编,李文汉校,1989,层序地层及海平面变化,《岩相古地理》第1期。

陆元法译编,李文汉审校,1989,旋回地层学,《岩相古地理》第1期。

Anderson, E. J. and Goodwin, P. W. 1990. The significance of meter scale allocycles in the quest for a fundmental stratigraphical unit, Journal of The Geological Society, London, V. 147; pp. 507-518.

Goldhammer, R. K. et al., 1987, High frequence glacio-eusfatic sea-level oscillations with Middle Triassic platform carbonates in northern Ilaly, Am. J. Sci., Vol. 287, pp. 853-892.

Goldhammer, R. K. et al., 1990. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing, Examples from Alpine Triassic platform carbonates, Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 102, pp. 535-562.

Osleger , D. A. , and Read , J. F. , 1991. Relation of custasy of stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, U. S. A., J. Sedi. Petrol., Vol. 61, pp. 1225-1252.

Read, J. F. and Goldhammer, R. K., 1988. Use of Fischer Plots to define third order sea-level curves in peritidal cyclic carbonates, Early Ordovician, Appalachians, Geology, Vol. 16, pp. 895–899.

(上接第53页)

似锦,临岸修建的座座亭台,欧式别墅和酒楼,红顶黄墙,赫然林立,点缀着天池幽雅的气氛。

2. 大小天池错落有致

当乘车驶进两峰对峙的"石门",驶过一段谷深林密、蜿蜒曲折的盘山公路后,蓦一转弯, 便是视线较为开阔、坡度变缓的山间丘陵,向右下俯瞰,见一方圆 50m 左右的清碧深邃的池 水,这就是小天池。池上方山崖上,悬挂一道落差近百米的银白瀑布,溅珠吐玉;深红色飞檐 亭台座落在池旁;山间薄雾缭绕,烟波浩淼,道路缓缓延伸,给人一种如登仙境,虚无缥缈的 感应气氛。大天池湖面开阔又给人一种"天上人间"的平远意境。无疑,小天池对大天池的观 赏起到了"抛砖引玉"的效果,二者在空间组合上承上启下,错落有致。

3. 塞外风情浓郁

天池附近,有许多喻萨克牧民牵着"姑娘追"、"叼羊"用的赛马等候在停车场,热情地邀 请游客乘骑到湖滨,到湖源。这种有偿服务,可以让你体会到游牧的惬意;品尝烤羊肉串、烤 全羊、烤镶、抓饭等风味小吃,可使你一饱口福;当你登上傍湖的山峰,便可一揽苍翠的峻岭 环抱着宽阔的牧场,悠闲吃草的羊群象浮动的白云,一顶顶白色的毡房好似朵白雪莲,极目 环顾,雪峰、塔松、碧波、山花、青草、羊群、毡房,构成一幅塞外湖光山色图。

总之,天池具有极强的旅游吸引功能。有古诗云:"层层碧海映苍穹,玉峰青松竹更幽,万 树丛中飞瀑布,峰峦积雪几千秋"。此诗虽不是为天山天池而作,却是天池的真实写照。