

地质历史时期海平面变化曲线的数学模型

赵玉光¹ 刘宝² 许效松²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 成都地质矿产研究所, 成都 610082)

摘要: 地层层序是古海平面变化的信息记录载体, 有效容纳空间($C(t)$)是地层层序的堆积场所, 是海平面变化($L(t)$)、构造沉降($Y(t)$)和地质时间(t)的函数. 通过对上扬子地台西缘二叠—三叠系层序地层学研究, 在总结前人海平面变化曲线研究方法的基础上, 建立了海平面变化曲线的数学模型(数学地质模型和数学函数模型), 即首先创立海平面变化曲线的数学地质模型: $C(t) = L(t) + Y(t)$, 进而提出了海平面变化曲线的数学函数模型. 运用该模型定量编制了上扬子地台西缘二叠—三叠纪海平面变化曲线.

关键词: 海平面变化曲线; 构造沉降; 有效容纳空间; 数学模型.

中图分类号: P539.2; P628+.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)02-0117-05

作者简介: 赵玉光, 男, 教授, 1963年生, 1990年毕业于中国地质大学(北京), 获硕士学位, 主要从事地质学、工程地质学、防灾减灾、地下工程与岩土工程等教学和科研工作.

本文以上扬子地台西缘二叠—三叠系为例, 在总结前人海平面变化研究方法的基础上, 采用有效容纳空间数学地质函数模型法重建海平面变化曲线, 实现海平面曲线定量化研究的目的. 通过本文的研究工作, 以期在海平面曲线定量化研究方面起到抛砖引玉的作用, 愿与地学界同行商榷.

1 海平面变化曲线编制方法的一般讨论

在地震横剖面上或在野外露头中通常看到的沉积几何体是沉积物堆积速率、全球海平面变化速率及构造运动速率等共同作用的产物. 迄今为止, 无论是用测高曲线^[1]和 Vail^[2]用海滨线位置的古标志与叠加在一起的地壳沉降相结合的创新概念等, 他们对于确定构造沉降量的大小、海平面变化的规模或者沉积速率等都不能提供确切的答案. 目前, 海平面变化曲线的建立方法, 可归纳为 6 种: (1) 具有指相意义的特殊沉积物, 以及沉积体系域中的沉积相组合、沉积环境标志; (2) 生物带组合关系与生物谱系法; (3) 碳氧同位素信息模型法; (4) 海岸上超曲线表示海平面变化趋势; (5) Fischer 图解法; (6) 多因素

海平面变化曲线绘制. 这 6 种方法笔者都进行过研究工作^①, 取得了较好的效果; 但这 6 种方法仅能解释某个地区或某个点的海平面相对变化情况, 不能进行有效的全球海平面变化的对比. 本文通过总结前人对海平面变化研究的方法, 提出了海平面变化曲线定量化研究的一种新方法——有效容纳空间数学地质模型. 这些工作可弥补地质历史时期海平面变化定量化研究的一些空白和存在的不足.

2 海平面变化曲线的数学模型

2.1 几个基本概念

(1) 沉积物有效容纳空间 (accommodation space). 在海域盆地中, 沉积物容纳空间又叫有效容纳空间, 系指古海平面的变化与盆地构造沉降复合效应的结果, 造成在古海平面以下产生了一个有效的可容纳沉积物堆积的空间, 该空间内沉积物充填到受古海平面所控制的高度为止^②. 可见, 沉积物容纳空间或有效容纳空间包含着构造沉降和海平面变化两个因素.

^①“八五”国家基础性研究重大关键项目“中国古大陆及其边缘层序地层及海平面变化”研究报告, 1997.

^② Sangree J B, Vail P R. A summary of exploration of sequence stratigraphy. GCSSEPM Foundation Eleventh Annual Research Conference Program and Abstracts, 1990. 321~327.

(2)构造沉降(tectonic subsidence). 构造沉降系指由于区域构造应力场作用, 导致盆地基地的相对下降, 这无疑可以形成一个沉积物的沉积空间, 然而没有海平面变化作为前提条件, 则这个空间是无效的. 海平面的变化可以决定可容空间的有效性. 构造沉降和海平面变化的耦合使可容空间成为现实, 这两个因素则为沉积物有效可容空间系数.

(3)地层视厚度(S). 地层视厚度系指现今在野外地质露头剖面或钻井岩心上被观测的地层厚度, 这种地层视厚度小于地质历史时期沉积物沉积时的厚度, 因为沉积物经历漫长的地质历史时期的机械压实及成岩作用等固结成岩石, 使地层厚度减小.

(4)去压实校正地层厚度(S^*). 它是根据沉积物随埋深的压实和成岩规律, 恢复由于压实及成岩等因素所减少的沉积物厚度, 最后确定沉积物在地质历史时期沉积时的地层厚度. 这种地层厚度能够准确地指示古海平面变化和构造沉降.

2.2 构造沉降模型及构造沉降恢复

对地质剖面地层视厚度累计曲线除去压实校正、古水深度和沉积负载的影响, 则构造沉降曲线模型可用方程表示^[3]:

$$Y = S^* \cdot \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} + h - \Delta SL \cdot \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w}. \quad (1)$$

式中: Y 为构造沉降, m ; S^* 为去压实校正地层厚度, m ; ρ_s 为平均沉积物密度, g/cm^3 ; ρ_m 为平均地幔密度($3.40 g/cm^3$); ρ_w 为平均海水密度($1.03 g/cm^3$); h 为沉积物沉积时的古水深度, m ; ΔSL 为相对现今海平面高度的全球海平面变化.

据方程(1)某一个地质时期(t)的构造沉降表示为: $\frac{dY}{dt} =$

$$\frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} \cdot \frac{dS^*}{dt} + \frac{dh}{dt} - \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \cdot \frac{d(\Delta SL)}{dt}. \quad (2)$$

图 1 是根据方程(2)建立的上扬子地台及其西缘泥盆纪至三叠纪构造沉降曲线, 分别建立了台地区、盆地边缘区和槽区三个不同相区的构造沉降曲线, 为研究区海平面变化曲线的重建奠定了必备的条件.

2.3 海平面变化曲线的数学地质模型

有效容纳空间($C(t)$)是可供沉积物堆积的潜在空间^[4], 是海平面变化($L(t)$)和构造沉降($Y(t)$)的函数, 它是由海平面变化和构造沉降决定和控制的, 用方程表示即为:

$$C(t) = L(t) + Y(t). \quad (3)$$

方程(3)可写成下列方程式:



图 1 上扬子地区及其西缘三叠纪构造格架及剖面点泥盆纪至三叠纪构造沉降的时空分布

Fig. 1 Triassic tectonic framework and space and time comparison of tectonic subsidence from Devonian to Triassic in different facies zones in the Upper Yangtze craton

$$C(t) - L(t) - Y(t) = 0. \tag{4}$$

据 Cisne 等^[5]有效容纳空间 C 、地层去压实校正厚度 S^* 和古水深 h 具有下列关系:

$$C - \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m} \cdot S^* - \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_m} \cdot h = 0. \tag{5}$$

式中: $\rho_m = 3\ 300\ \text{kg/m}^3$ 及 $\rho_w = 1\ 030\ \text{kg/m}^3$, 分别是地幔与海水的密度, ρ_s 为沉积物密度, 研究区 $\rho_s = 2\ 500 \sim 2\ 700\ \text{kg/m}^3$. 将地质剖面地层视厚度(S)经去压实校正得到地层去压实地层厚度值(S^*).

把方程(1),(5)分别代入方程(4)整理求得海平面变化(L)的数学地质模型:

$$L = \left[\frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m} - \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} \right] \cdot S^* + \Delta SL \cdot \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} - \frac{\rho_w}{\rho_m} \cdot h. \tag{6}$$

2.4 海平面变化曲线的数学函数模型

重建海平面变化曲线包括 2 个基本步骤:(1)确定地层岩性和地层年代;(2)运用数学地质模型求取海平面变化值,正值表示海平面上升,负值表示海平面下降.在某一给定的单一的地质剖面中取 n 个样点并编号为 $i = 1, 2, 3, \dots, n$.在任意给定的样点包括的要素为地层校正厚度为 S_i^* ,地质时间为 t_i (t_i 在给定的地质剖面上的年代地层学中已知),该单一的地质剖面 n 个地层校正厚度和 $\sum S_i^* = S_1 + S_2 + \dots + S_i + \dots + S_n$,其 n 个样点形成时间 $\sum t_i = t_1 +$

$t_2 + \dots + t_i + \dots + t_n$,第 i 个样点古水深度为 h_i (在以往的研究中已阐述过古水深度的估算^①).因此在任意给定第 i 个样点的校正厚度(S_i^*),古水深度(h_i)与该样点 i 的海平面变化曲线函数 $F(L)_i$,据方程(6)满足下列函数式,即某一单一的地质剖面第 i 个样点的海平面变化数学函数模型:

$$F(L)_i = \left[\frac{\rho_m - \rho_s^i}{\rho_m} - \frac{\rho_m - \rho_s^i}{\rho_m - \rho_w} \right] \cdot S_i^* + \Delta SL_i \cdot \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} - \frac{\rho_w}{\rho_m} \cdot h_i. \tag{7}$$

由方程(7)得到第 i 个样点的海平面变化,把某一给定地质剖面 n 个样点地质时间(t)进行积分得到积分函数,即为海平面变化曲线的数学函数模型:

$$F(L) = \iint_{i=1}^n \left[\frac{\rho_m - \rho_s^i}{\rho_m} - \frac{\rho_m - \rho_s^i}{\rho_m - \rho_w} \right] \cdot dS^* + \iint_{i=1}^n \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \cdot d(\Delta SL) - \iint_{i=1}^n \frac{\rho_w}{\rho_m} \cdot dh. \tag{8}$$

3 应用举例

3.1 海平面变化曲线重建

(1)广元上寺二叠—三叠纪海平面变化曲线重建.图 2 是根据上述模型建立的海平面变化曲线.从求得的海平面变化曲线可以得到两点认识:①早二叠世茅口期是二叠纪海平面上升最大时期,上升幅



图 2 四川广元上寺晚古生代构造沉降曲线模型与二叠—三叠纪海平面变化绝对值曲线的重建

Fig. 2 Tectonic subsidence curve of Late Paleozoic and reconstruction of absolute value curve of sea-level changes during the Permian and Triassic in Shangsi, Guangyuan County, Sichuan Province



图 3 四川广元上寺和峨嵋山龙门洞二叠—三叠纪海平面升降曲线重建与 Haq 曲线的比较

Fig. 3 Reconstruction of sea-level rising and falling curves during the Permian and Triassic in Shangsi, Guangyuan and Longmendong, Emeishan, Sichuan and comparison with Haq curve

度约为 80 m, 代表了茅口期为海进型碳酸盐岩缓坡沉积环境; ②晚二叠世末海平面曲线反映了海平面急剧下降, 下降幅度值约高达 118 m(图 2)。

(2)峨嵋山龙门洞二叠—三叠纪海平面变化曲线。该剖面海平面变化曲线特征亦具有广元上寺剖面的两个特点(图 3), 晚二叠世海平面下降与地层层序记录信息是吻合的。

3.2 海平面变化曲线数学模型研究的意义

地质剖面的海平面变化曲线高度敏感地依赖于构造沉降量、地层去压实校正厚度以及古水深度。本文在不同地点的地质剖面所重建的海平面曲线表现为变化幅度和发生的时间是一致的, 反映了该数学模型是可靠的。

上述海平面变化曲线与沉积物所反映的古水深度具有非一致性, 但与古特提斯洋的扩张则具有一致性的特点, 晚三叠世海平面的下降也与特提斯洋的消亡同步。可见, 古海平面变化研究对恢复全球板块构造和盆地分析以及大尺度的地质对比等具有很大的潜在优势。同时, 对于现今(第四纪以来)海平面变化研究, 进而预测长周期与短周期海平面变化具有现实的指导意义。

4 结论

层序地层学研究的目的除了建立全球沉积记录对比外, 建立可对比的海平面升降曲线也是其重要

的使命.本文在研究中不拘于套用一般的已有的实例或公式,而是采用新的方法和手段,提出了有效可容空间定量标定计算的数学模型法,建立了上扬子地台和西缘不同地区的海平面升降曲线.

绝对海平面变化在同一板块上的任一地区均具有相同的升降值,但是从沉积物所反映的只是沉积区海水的深度和相对海平面变化,没有量的概念.其主导因素是,沉积区的构造沉降和沉积速率掩盖了海水升降的绝对值,因此在建立海平面绝对变化时遵循两个原则:一是校正构造沉降量和古水深;二是对不同地区进行对比.校正计算后的上扬子地台西缘海平面变化值分别为:早二叠世海平面上升50~80 m;晚二叠世时海平面上升了118 m;早、中三叠世海平面上升53 m.

参考文献:

[1] Hardenbol J, Vail P R, Ferrer J. Interpreting environments, subsidence history and sea-level changes on passive margins from seismic biostratigraphy [A]. In:

Abstract of 26th Int Geol Congr, Geology of Continental Margins [C]. Oceanal Acta, 1981, Suppl 4: 33~44.

[2] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure [A]. In: Balley A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy [C]. AAPG, 1987, 27: 1~10.

[3] Bond G C, Kominiz M A. Construction of tectonic subsidence curves for the early Paleozoic miogeocline, southern Canadian Rocky Mountains: implication for subsidence mechanisms, age of breakup, and crustal thinning [J]. GSAB, 1984, 95: 155~173.

[4] Jervey M T. Quantitative geological modelling of siliciclastic rock sequence and their seismic expressions [A]. In: Wilgus C K, Hastings B, Ross C, et al, eds. Sea level changes: an integrated approach [C]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogist Special Publication, 1988, 42: 47~69.

[5] Cisne J L, Gilder R F, Rabe B D. Eperic sedimentation and sea level: synthetic ecostratigraphy [J]. Lethaia, 1984, 17: 267~288.

MATHEMATICAL MODEL OF SEA-LEVEL CHANGE CURVES IN GEOLOGICAL HISTORY

Zhao Yuguang¹ Liu Baojun² Xu Xiaosong²

(1. Building College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China)

Abstract: The stratigraphical sequences are considered as a medium to record sea-level changes. The effective accommodation space ($C(t)$), an accumulation strata for stratigraphic sequences, is a function of sea-level changes ($L(t)$), tectonic subsidence ($Y(t)$) and geological time (t). The research into the Permian - Triassic sequence stratigraphy in the western margin of the Upper Yangtze block, and the summary of previous research methods for the sea-level change curves both have been employed to establish the mathematical model of sea-level change curves, including mathematical geological model and mathematical function model. Firstly, the mathematical geological model of sea-level change curves: $C(t) = L(t) + Y(t)$ is established, then the mathematical function model is proposed. The mathematical model has been used to compile quantitatively the Permian - Triassic seal-level change curves on the western margin of the Upper Yangtze block.

Key words: sea-level change curve; tectonic subsidence; effective accommodation space; mathematical model.