

文章编号: 1000-0550(2003)04-0614-05

有效厚度拟合定量恢复原始地层超覆点位置^①

钟广法 周祖翼 耿建华

(同济大学海洋地质教育部重点实验室 上海 200092)

摘要 地层超覆点的迁移是层序地层分析和海平面变化曲线编制的重要依据。受构造抬升、海平面下降或二者共同作用影响,地层超覆点在沉积后常被剥蚀。如何恢复其原始沉积时的位置,至今尚无定量方法提出。基于地层厚度自盆地边缘向盆地中心依次增大,或先增大、后减小的分布特点,采用指数与线性相结合的分段函数模型,利用未剥蚀区地层厚度数据拟合外推恢复原始地层超覆点位置。该方法适用于被动大陆边缘、大型三角洲沉积区及坳陷型盆地,应用于巽他陆架晚新生代地层分析,取得满意效果。

关键词 地层超覆 剥蚀 有效厚度 数据拟合与外推 巽他陆架

第一作者简介 钟广法 男 1964年出生 博士 副教授 沉积学与地震、测井解释

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

地层超覆点(包括上超和退覆)是盆地沉积区与盆外侵蚀或无沉积区之间的分界点,其迁移是基准面变化及与之相关的盆地沉积作用范围扩张、收缩旋回的珍贵记录,是地层层序分析和海平面变化曲线编制的重要依据^[1-4]。受构造抬升、海平面下降或二者共同作用影响,盆缘地层超覆点常常遭受不同程度的剥蚀。如何恢复被剥蚀之地层超覆点的原始位置,至今尚无定量方法提出。通常的做法是借用构造地质学中绘制复原横剖面图时所采用的厚度趋势延伸作图法定性地予以恢复^[5],其精度难以把握,且结果往往因人而异。本文从沉积倾向剖面上地层厚度分布特点出发,提出根据有效地层厚度数据拟合外推原始地层超覆点位置的定量模型和方法。该方法适用于被动大陆边缘、大型三角洲沉积区及坳陷型盆地,应用于巽他陆架晚新生代地层分析,取得满意效果。

1 概念模型

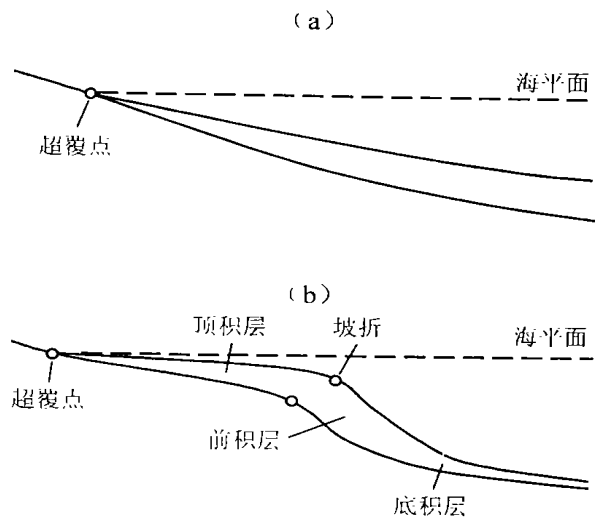
1.1 原始地层厚度分布模型

沉积倾向剖面上,地层原始沉积厚度的分布可以概括为以下两种类型:1)从盆地边缘至盆地中心依次增大(图 1a);2)自盆地边缘朝盆地中心先增大,后减小(图 1b)。前者常见于坳陷型盆地,如陆表海。后者常见于被动大陆边缘或大型三角洲沉积区,其地层剖面从形态上可以划分为三个部分:顶积层、前积层和底积层(图 1b)^[6]。在无剥蚀情况下,地层厚度大致在顶积层与前积层之间的分界点即前积坡折(简称坡折)附近取得最大值,由该处向陆、海两侧均呈递减趋势。以

最大厚度值点为界,可以把地层厚度变化趋势划分为单调性正好相反的两段:该点靠陆地一侧,地层厚度从超覆点开始向盆地方向单调增加,而该点靠盆地一侧则单调减少(图 1b)。

1.2 有效地层厚度分布模型

所谓“有效厚度”是指未剥蚀区地层的厚度。假定地层沉积后,未经受显著构造活动改造,地层的剥蚀作



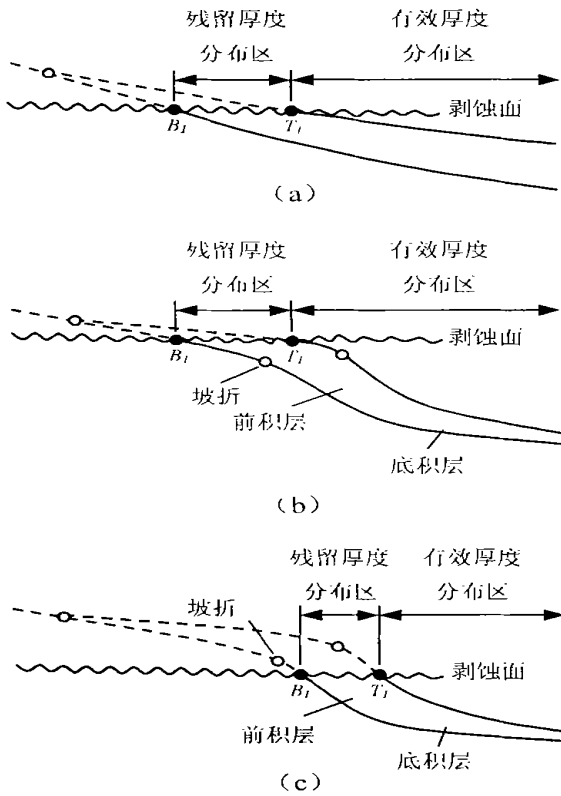
(a) 自盆地边缘到盆地中心,地层厚度依次增大;
(b) 自盆地边缘到盆地中心,地层厚度先增大、后减小

图 1 倾向剖面上地层厚度分布模型

Fig. 1 Conceptual distribution of stratal thickness along a dip section

(a) increasing basinward; (b) increasing first and then decreasing basinward

^① 国家自然科学基金资助项目(批准号:49806001)和国家重点基础研究专项经费资助项目(G2000078501)



(a)有效厚度朝盆地中心方向增大; (b)有效厚度朝盆地中心方向先增大、后减小; (c)有效厚度朝盆地方向减小

图 2 倾向剖面上有效地层厚度分布模型

Fig. 2 Conceptual distribution of effective stratal

thickness along a dip section

(a) increasing basinward; (b) increasing first and then decreasing basinward; (c) decreasing basinward

用仅由基准面或相对海平面的下降作用(决定于全球海平面变化和地表的沉降作用)引起,则地层的剥蚀作用一般始于盆地边缘,并逐渐向盆地中心推进。如图 2 所示,分别记地层底面和顶面向陆侧剥蚀点位置为 B_1 和 T_1 ,在未发生地层倒转的情况下, B_1 位于向陆侧, T_1 位于靠海侧。以 T_1 为界,可以将目前地层厚度的分布划分为两部分:介于 B_1 和 T_1 之间,为剥蚀残留厚度分布区; T_1 朝盆地方向为未剥蚀厚度或有效厚度分布区。

根据有效厚度变化趋势,可以将地层剥蚀量的大小划分为以下两种情形(图 2):若有效厚度从盆地边缘朝盆地中心方向逐渐增大(图 2a),或者是先增大、后减少(图 2b),为小剥蚀量情形;相反,如果有效厚度向盆地方向递减,则为大剥蚀量情形(图 2c)。

2 数学模型

在小剥蚀量情形下,有效地层厚度从其最大值点

开始,朝陆地或盆地边缘方向依次减小。取该点靠陆侧的有效厚度数据段,选用适当的数学函数对其进行拟合,根据拟合结果即可外推原始地层超覆点的位置。

选取倾向地层剖面靠陆地侧的端点为坐标原点, x 轴沿剖面延伸方向布置,其正方向指向盆地中心, y 轴代表地层厚度,建立如图 3 所示的坐标系。根据地层厚度分布模型,选用指数函数作为有效厚度拟合的基本函数。指数函数为单调函数,较好地满足了对最大有效厚度点以陆侧地层厚度单调变化特征进行拟合的要求。但指数函数以 x 轴为渐近线,按该函数对最大厚度点以陆一侧有效厚度数据进行拟合时,超覆点的位置在理论上位于 x 轴负无穷远处,显然与事实不符。为此,假定有效厚度从其最大值(记为 y_{max})开始朝陆地方向减薄至某一临界厚度(记为 y_c)后,即在接近地层超覆点附近,地层厚度近似服从线性分布,建立如下的分段函数模型

$$\begin{cases} y = ae^{bx} & (x_c \leq x \leq x_{max}) & (1a) \\ y = s_c(x - x_c) + y_c & (x \leq x_c) & (1b) \end{cases}$$

式中, a, b 为待定系数,由实际有效厚度数据拟合确定; e 为自然常数; x_{max} 和 x_c 分别为最大厚度和临界厚度在剖面上的位置坐标; s_c 为临界厚度点 (x_c, y_c) 以陆一侧线性厚度函数(方程 1b)的斜率,可以用拟合指数函数(1a)在 (x_c, y_c) 处切线的斜率代替,称为临界斜率。

实际中,先根据最大厚度值点以陆侧的有效厚度数据 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 用最小二乘法拟合确定模型(1a)中指数函数的待定系数 a, b ; 然后对拟合指数函数求导,并计算其在临界厚度点 (x_c, y_c) 处的导数值,它代表了指数函数在该点处切线的斜率,令它等于预先求出或给定的临界斜率 s_c 值

$$abe^{bx_c} = s_c \tag{1}$$

即可确定临界厚度点的坐标位置

$$\begin{cases} x_c = \frac{1}{b} (\ln s_c - \ln a - \ln b) \\ y_c = ae^{bx_c} \end{cases} \tag{2}$$

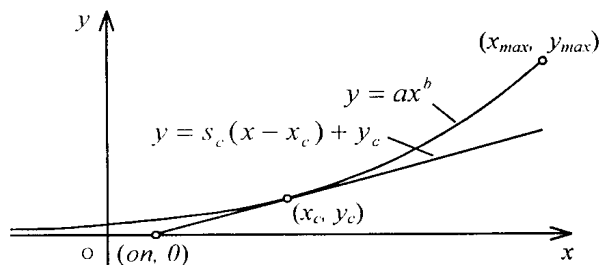


图 3 倾向剖面上地层厚度变化的分段函数模型

Fig. 3 A piecewise-constructed function model to depict the lateral changes of stratal thickness along a dip section

将(2)代入(1b),并令 $y=0$,解得 x ,即为所求地层超覆点在剖面方向上的位置 on

$$on = x_c - y_c / s_c \quad (3)$$

在大剥蚀量情形下(图2c),无法直接根据有效厚度数据通过模型(1)拟合恢复超覆点的原始位置,此时可以采用转化法将其化为小剥蚀量情形。具体做法是,对于要拟合的大剥蚀量地层,以其顶面为顶界,以该地层所在的产状相同的一组地层(如同一上超层组)的底面为底界,即将大剥蚀量地层与下伏同组地层合并,统计有效厚度,并使其分布满足小剥蚀量情形,然后根据模型(1)~(3)拟合求得原始超覆点位置,将其作为所求的大剥蚀量地层顶面之原始超覆点位置。

3 临界斜率 s_c 的确定

临界斜率 s_c 是模型(1)~(3)中的一项关键参数,可由以下两种方法确定。第一种是替代法,即用产状相同或相近的同组地层中未剥蚀层的临界斜率近似代替。记未剥蚀层超覆点在 x 方向的空间位置为 on_0 ,用指数函数对其地层厚度进行拟合,设拟合方程为

$$y = a_0 e^{b_0 x} \quad (4)$$

过超覆点 $(on_0, 0)$ 作(4)的切线,切点坐标及切线斜率分别记为 (x_{c0}, y_{c0}) 和 s_{c0} ,得到如下的切线方程

$$y = s_{c0} = x - on_0 \quad (5)$$

又切线(5)的斜率 s_{c0} 等于切点 (x_{c0}, y_{c0}) 处拟合指数函数(4)的导数,即

$$s_{c0} = a_0 e^{b_0 x_{c0}} \quad (6)$$

由(4)~(6),解得切点坐标 (x_{c0}, y_{c0})

$$\begin{cases} x_{c0} = 1/b_0 + on_0 \\ y_{c0} = a_0 e^{b_0 x_{c0}} \end{cases}$$

将其代入(6),即可求得临界斜率 s_{c0}

$$s_{c0} = a_0 b_0 e^{b_0 (1/b_0 + on_0)} \quad (7)$$

替代法的不足之处在于:1)当地层剥蚀程度较高,同组地层中没有保存完整的小层存在时,该方法难以应用;2)同组地层中,各小层的临界斜率不可能完全相同,因而用替代法确定出来的剥蚀地层超覆点的位置可能存在一定的误差。

为此,提出用试探法确定临界斜率 s_{c0} 和超覆点的位置坐标 on 。其做法是:预先给定临界斜率 s_c 的变化范围,并按一定的步长得到一组离散的临界斜率值 $s_{ci} (i=1, 2, \dots, k)$; 然后根据(2)和(3)逐一计算出 s_{ci} 不同取值时超覆点的位置 on_i ; 对不同 s_{ci} 取值时模型(1)的拟合误差进行比较,找出误差最小时的 s_{ci} 值,它所对应的超覆点位置 on_i ,即为所求的最佳拟合超覆点位置。拟合误差可以由拟合地层厚度与实际地层厚

度之残差的标准差 σ 和相对残差的标准差 σ_r 等参数确定。

4 应用实例及效果分析

南海南部巽他陆架是目前世界上除两极地区之外最为宽广的陆架。晚新生代,受冰期、间冰期气候交替变化影响,该陆架曾频繁出露与淹没,被认为是解译全球海平面变化的理想地区之一^[7]。但是,陆架的频繁出露也造成了部分地层超覆点的剥蚀。作者在根据德国太阳号 SO-115 航次在巽他陆架纳土纳群岛东北海域(2~6°E, 107~111°N)采集的高分辨率反射地震剖面进行地震层序和海平面变化研究过程中,应用本文提出的有效厚度拟合方法对被剥蚀的原始地层超覆点位置逐一进行恢复,取得满意效果^[4]。

拟合实例如图4所示。图中,横坐标代表地震剖面方向上的位置,用地震道的相对序号表示,其零点设在剖面靠陆地侧的端点处,由该点开始,往盆地方向地震道相对道号依次增大,道间距为25 m。图4a为 p29-p23 大剖面第四系 4、5 两个相邻反射界面间有效厚度拟合结果。该地层为典型的小剥蚀量情形,地层顶界(反射界面5)剥蚀残留超覆点位于相对道号5990处,拟合得到其原始地层超覆点位于相对道号-23处(即位于剖面靠陆地侧端点以陆方向23个道间距处),厚度拟合误差 σ 和 σ_r 分别为5.855和0.080。图4b为 p29-p23 大剖面第四系 25、26 两个相邻反射界面间地层厚度拟合结果。该层亦为小剥蚀量情形,地层顶界剥蚀残留超覆点位于道号9027处,拟合得到原始地层超覆点位于道号8210处,厚度拟合误差 σ 和 σ_r 分别为5.201及0.127。图4c为 p35-p32-p15-GZ1 大剖面上新统第37反射界面原始地层超覆点拟合结果。该界面上超点被剥蚀,残留超覆点位于道号4657处,且属于大剥蚀量情形,无法按小剥蚀量情形用与其下伏反射界面36之间有效地层厚度进行拟合处理,故采取将其与下伏同一上超层组内其它反射地层单元并层的办法转化为小剥蚀量情形,根据其与所在上超单元底界33反射界面之间地层有效厚度进行拟合,得到原始地层上超点位于道号1864处,拟合误差 σ 和 σ_r 分别为10.491和0.246。

为了检验有效厚度拟合效果,逐层将拟合地层厚度与实际有效厚度进行比较,计算拟合残差的标准差及相对残差的标准差。对三条区域反射地震大剖面上新统一第四系共66个剥蚀层拟合结果的统计表明,拟合厚度与实际厚度残差的标准差介于1.115~24.164之间,平均为7.404;拟合厚度与实际厚度相对残差的标准差介于0.058~0.436之间,平均为0.190(图5),

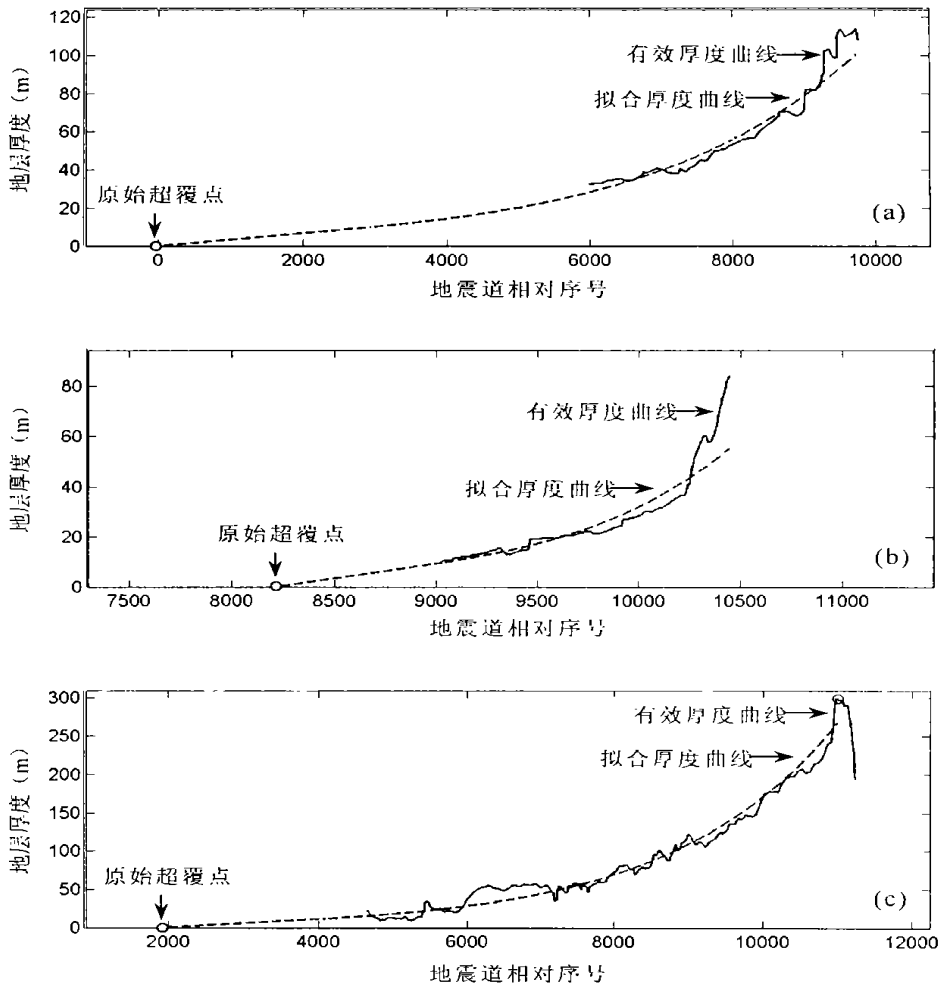


图 4 巽他陆架有效厚度拟合外推原始地层超覆点实例

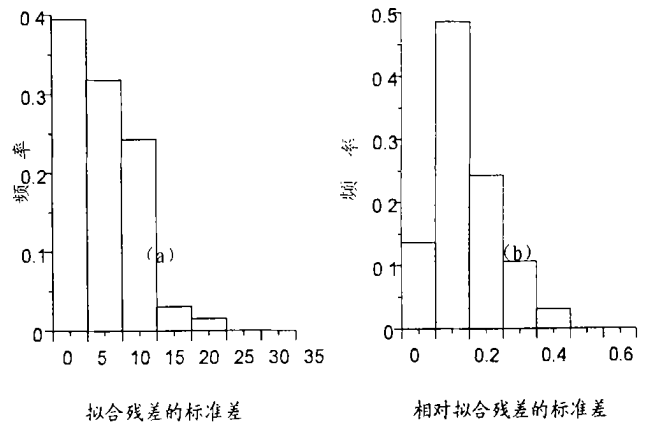
Fig. 4 Examples of extrapolating original positions of removed onlap-offlap points by effective thickness fitting from northern Sunda Shelf

拟合效果总体较好。

拟合误差主要来源于以下两方面: 第一, 客观上, 受构造或沉积等因素的影响, 某些地层的厚度在横向上变化不规则, 导致拟合误差增大。例如, 由于断层的影响, 地层厚度在断阶与断阶间不连续而呈跳跃式或锯齿状变化时, 拟合残差一般较大; 又如当存在下切河道充填沉积及丘状沉积体时, 地层厚度在横向上会出现局部增厚现象, 影响拟合效果。第二, 拟合模型及方法上的不足引起的误差, 主要表现在, 指数函数对最大厚度点附近的厚度变化逼近效果较差, 致使拟合误差增大(图 4b)。

5 结论

地层超覆点对于层序地层和海平面变化研究至关重要。如何恢复被剥蚀之地层超覆点的原始位置, 至今尚无定量方法提出。本文基于地层厚度自盆地边缘朝盆地中心依次增大, 或先增大、后减小的分布特点,



(a) 拟合残差的标准差; (b) 拟合相对残差的标准差
图 5 巽他陆架有效厚度拟合误差频率分布直方图

Fig. 5 Histograms of errors of effective thickness fitting
(a) standard deviation of errors;
(b) standard deviation of relative errors

提出用指数与线性相结合的分段函数模型定量刻画盆地边缘地层厚度的横向变化。根据该模型,利用未剥蚀区地层厚度数据,拟合外推确定地层超覆点原始沉积时的位置。该方法适用于被动大陆边缘、大型三角洲沉积区及坳陷型盆地,经巽他陆架晚新生代实际地震地层资料检验,效果较好。

致谢 本文在马在田院士指导下完成,SO115航次地震资料由德国汉堡大学 HOWK in Wong 教授提供,在此表示感谢!

参考文献(References)

- 1 Vail P R, Mitchum R M Jr, Todd R G, *et al.* Seismic stratigraphy and global changes of sea level[A]. In: Payton C E ed. Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration[C]. AAPG Memoir 26. 1977. 49~212
- 2 Vail P R, Hardenbol J, Todd R G. Jurassic unconformities, chronostratigraphy and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy[A]. In: Schlee J S ed. Interregional unconformities and

hydrocarbon accumulation[C]. AAPG Memoir 36. 1984. 129~144

- 3 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present)[J]. Science, 1987, 235: 1156~1167
- 4 钟广法. 巽他陆架晚新生代地震超覆层序与海平面变化研究[D]. 上海: 同济大学海洋与地球科学学院, 2002[Zhong G. Late Cenozoic onlap-offlap sequences and sea level changes on the northern Sunda Shelf, South China Sea[D]. Shanghai: School of Ocean and Earth Science, Tongji University, 2000]
- 5 徐怀大, 樊太亮, 韩革华, 等. 新疆塔里木盆地层序地层特征[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 192~199[Xu H, Fan T, Han G, *et al.* Sequence stratigraphy in the Tarim Basin, Xinjiang Uigur Autonomous Region, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 192~199]
- 6 Emery D, Myers K J. Sequence stratigraphy[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1996. 1~297
- 7 汪品先. 古环境研究[A]. 见: 金性春, 周祖翼, 汪品先编. 大洋钻探与中国地球科学[C]. 上海: 同济大学出版社, 1995. 145~148[Wang P. Paleo-environmental research[A]. In: Jin X, Zhou Z, Wang P. Ocean drilling program and earth sciences in China[C]. Shanghai: Tongji University Press, 1995. 145~148]

Extrapolating the Original Positions of Removed Onlap-Offlap Points Using a Piecewise-Constructed Model of Effective Stratal Thickness

ZHONG Guang-fa ZHOU Zu-yi GENG Jian-hua

(The Key Laboratory of Marine Geology of China Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The shift of onlap-offlap points is a critical factor in sequence stratigraphic analysis and charting sea level curves. Onlap-offlap points, however, are easily removed due to tectonic uplift, eustatic sea level fall, and so on. How to recover the original positions of removed onlap and offlap points has still been a pending problem. In this paper, we presented a piecewise-constructed function model to depict the lateral changes of stratal thickness along a dip section. It is assumed that the thickness of a stratum decreases exponentially from its maximum towards basin margin, and thins linearly on areas adjacent to the onlap-offlap points. Using this model, the positions of removed onlap and offlap points can be extrapolated by fitting the thickness data in non-removal areas. This approach is used in the study of the Pliocene to Pleistocene strata on the northern Sunda Shelf, South China Sea, and the results are to our satisfaction.

Key words stratal layout, erosion, effective stratal thickness, piecewise-constructed function, numerical fitting and extrapolation, Sunda Shelf