

塔北中、新生代前陆盆地沉降机制的数值模拟

曹守连 陈发景

海西运动后,塔里木板块和北部的伊犁-中天山板块、准噶尔-哈萨克斯坦板块等最终缝合,塔里木盆地北部地区进入晚期前陆盆地发展阶段。三叠-侏罗纪时,该区的构造格局是一隆两坳,即北部天山山前的库车前陆盆地和南部的阿瓦提-满加尔类前陆盆地被其间的塔北隆起所分隔(图1)。白垩纪后,库车前陆盆地向南扩展,并同阿瓦提-满加尔类前陆盆地合并,致使塔北地区演化为规模较大的前陆盆地。

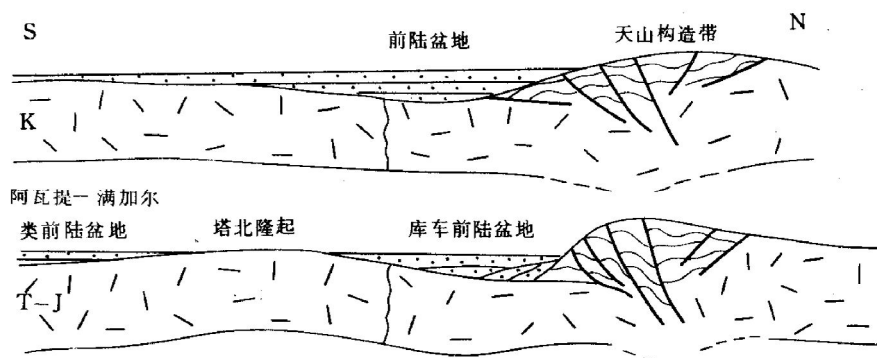


图1 塔里木盆地北部地区中、新生代古构造剖面略图

中、新生代以来,塔里木盆地北部地区的沉积建造、构造变形样式、构造沉降史以及古热史特征均表明该区具典型前陆盆地的性质。因此,对该区构造沉降机制的研究具有重要的理论意义。本文采用弹性挠曲模型对该区中、新生代的沉降机制进行了模拟。

一、前陆盆地的地球动力学特征

对岩石圈基本特征的了解是分析和模拟前陆盆地形成机制的基础。岩石圈的刚性性能使其能够传递应力,并通过发生挠曲来支撑其上覆的载荷,诸如冰川、山脉和岛弧等物体。这就是岩石圈的挠曲性质。大洋岩石圈被证实是弹性的,并且其抗挠刚度随洋壳年龄增大而变大。大陆岩石圈的性质较为复杂,是表现为弹性体还是粘弹性体至今仍存在争议。如果将其看成是具有一定刚度的弹性薄板,造山带构成其上覆的载荷,那么由于岩石圈的区域性均衡调整作用,造山带在沉降之时会在其周围产生盆地,这就是弹性薄板对造山带这一构造负载的挠曲响应,由此形成的盆地为挠曲性质的盆地。

从物理意义上讲,这一过程可以看成是一薄板上浮于无粘滞性的液态物质(软流圈)之上(图2)。薄板弯曲变形发生挠曲,挠曲度便是我们所说的沉降量。

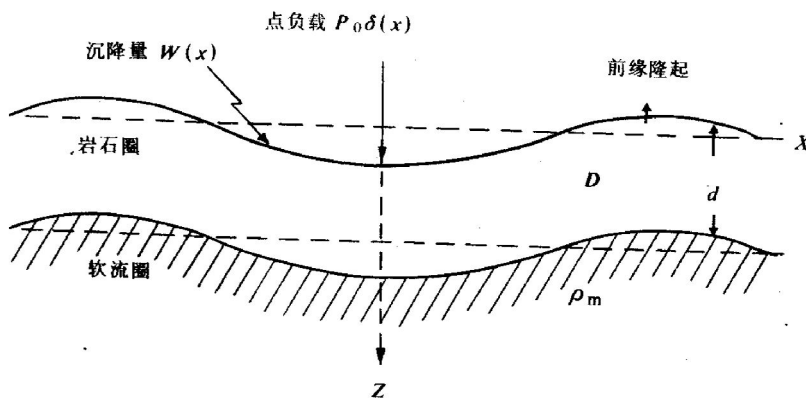


图2 大陆岩石圈在点负载作用下的挠曲响应示意图

D —岩石圈的抗挠刚度, d —岩石圈的厚度, ρ_m —地幔密度

前陆盆地的沉降过程与上述的岩石圈对负载的挠曲响应是吻合的。前陆盆地位于造山带的前缘,是在挤压性构造环境内形成的,和造山作用密切相关。前陆盆地定量模型的选取依赖于对岩石圈的流变特性的认识。如前所述,大陆岩石圈的性质始终存在争议,除弹性模式外还有粘弹性模式。粘弹性模式是指岩石圈表现为马克斯威尔粘弹性体,它以一个初始的高抗挠曲刚度为初值,加载后随时间的增长岩石圈的松弛效应使其抗挠刚度逐渐减小^[1]。无论视大陆岩石圈的力学性质是纯弹性的还是粘弹性的,都会得出某些不易接受的结论^[2,3];并且由于前陆盆地复杂的地质因素阻碍了对盆地沉降机制的定量模拟^[4]。但是许多作者还是在这方面作了有意义的探讨,并取得了较满意的成果^[5,6,7]。

总之,前陆盆地沉降的基本动力学机制是大陆岩石圈板片对构造负载的挠曲响应。构造负载是指盆地后方的造山带。前陆盆地演化史就是岩石圈的挠曲变形史。盆地的沉降、构造形变、沉积的旋回性以及隆升剥蚀都直接受造山带的控制,即受控于幕次式的褶皱冲断活动所形成的构造加载数量、期次和构造负载向克拉通方向的迁移速率和幅度等等。其次,对大陆岩石圈性质的理解是选取定量模型的关键。

二、前陆盆地模拟的数学模型和过程

岩石圈板块挠曲实际上是二维平板弯曲问题。平板的挠度可以通过平板在所有外加力和力矩作用下处于平衡状态来确定^[8]。上浮于无粘滞性流体之上的弹性板在负载作用下的垂直挠曲方程为:

$$D \frac{d^4 W}{dx^4} + \gamma_s W = P(x)$$

式中 $\gamma_s = (\rho_m - \rho_s) \cdot g$; $D = E \cdot \frac{d^3}{12(1-\nu^2)}$; W ——板块挠曲度, ρ_m ——软流圈密度; ρ_s ——盆地充填物密度, E ——杨氏模量, ν ——泊松比, d ——板块厚度; $P(x)$ ——所施加的构造负载, D ——岩石圈的抗挠刚度, g ——重力加速度。

对上式进行关于 x 变量的零级汉克尔变换, 变换式为:

$$\begin{cases} \bar{f}(\xi) = \int_0^\infty f(x) J_0(\xi \cdot x) x dx \\ f(x) = \int_0^\infty \bar{f}(\xi) J_0(\xi \cdot x) \xi d\xi \end{cases}$$

变换结果得:

$$D \xi^4 \bar{W}(\xi) + \gamma_s \bar{W}(\xi) = \bar{P}(\xi)$$

令 $\alpha = (4D/\gamma_s)^{\frac{1}{4}}$ 定义为挠曲参数, 替换上式中的 γ_s 得:

$$\bar{W}(\xi) = \frac{\bar{P}(\xi)}{D} \left[\frac{1}{\xi^4 + \frac{4}{\alpha^4}} \right]$$

如果将 $P(x)$ 用显函数表示为 $P_0 \delta(x)$ (点负载), $\delta(x)$ 为脉冲函数, 则 $P(\xi) = \frac{-P_0}{2\pi}$, 那么上式的逆变换为:

$$W(x) = G^*(x - x_0) = -\frac{P_0}{2\pi D} \int_0^\infty \left[\frac{1}{\xi^4 + \frac{4}{\alpha^4}} \right] \cdot J_0(\xi \cdot x) \xi d\xi$$

此式即为弹性薄板对点负载的挠曲响应。

由于前陆盆地的长轴方向平行于造山带的总体构造走向, 一般垂直于构造走向的横剖面可以反映前陆盆地的构造特征。因此, 本文采用了二维模型, 模拟的结果为构造横剖面。另外, 由于造山带的地形多不规则, 不能用已知显函数来描述, 因而挠曲方程中的负载函数 $P(x)$ 也很难给出, 这样就不能直接求挠曲方程的解, 因此, 本文采用有限元的思路将造山带负载划分为一组直方格子式构造负载, 每个小格子的负载量由其单元步长 S 、高程 H_i ($i=1, 2, 3 \cdots n$) 和密度 (ρ) 确定, 当有限元被划分到足够小时, 这种负载便可视为点负载。

具体的过程是(图3): 假定变形前初始表面是水平的, 称之为沉积底线。与褶皱-冲断带负载相对应的负载以方块形式表示, 并称之为构造负载, 以区别盆内沉积物形成的沉积负载。显然沉积负载是促使岩石圈弯曲下沉的次一级因素。这样求出第一阶段的沉降量后, 假定盆地为沉积物快速充填到满, 前缘隆起也被剥蚀, 即可求第二次构造侵位后盆地的沉降, 依次类推即可求出前陆盆地演化过程中的沉降量。图中(d)与(e)的区别在于, (d)表示在构造加载过程中, 早期沉积层卷入褶皱, (e)表示在构造加载过程中, 早期沉积层不卷入褶皱。

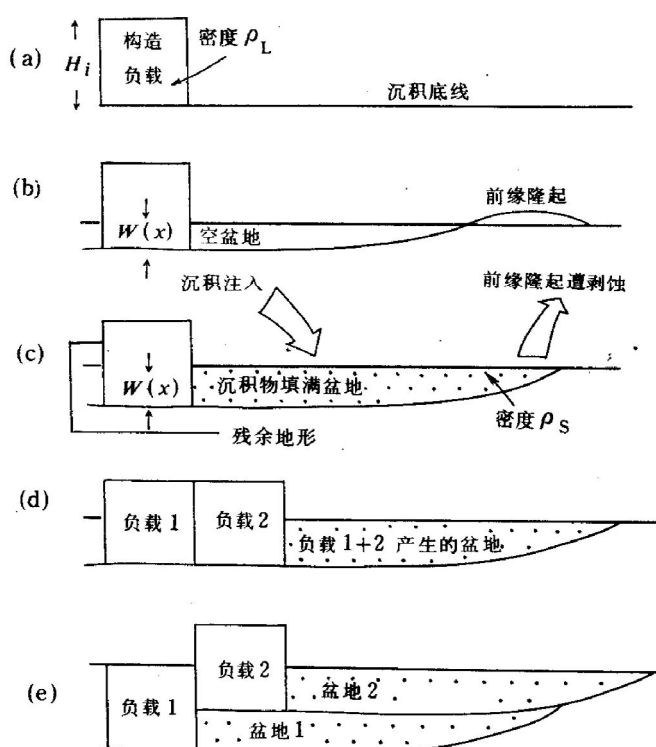


图3 挠曲模型示意图

(据 Beaumont^[5], 1981 修改)

示构造负载诱发前陆空盆地, 后为沉积物充填

需要说明的是, 在模拟过程中, 每个阶段的构造负载采用一组直方块来表示, 而且为了提高模拟结果的精确性, 一般在盆地较窄时, 采用的构造负载的单元步长也相应较窄。

计算岩石圈挠曲度所需要的主要参数有: 软流圈的密度 ρ_m 、构造负载密度 ρ_L 、沉积盆地充填物的密度 ρ_s 、岩石圈的抗挠刚度 D 、构造负载高度 H_i 和步长 S 等。根据深部地球物理研究, 一般 ρ_m 为 $3.2\text{--}3.3\text{ kg/m}^3$ ^[5,8]。理论上, 构造负载的密度是组成该负载的各部分密度的和, 但由于盆地各演化阶段的负载构造和密度是未知的, 所以一般较难获得构造负载密度 ρ_L 的值。考虑到本次所模拟的是中、新生代晚期前陆盆地的沉降, 构造负载主要由古生界的褶皱-冲断带构成, 故采用南天山的古生界密度平均值 2.6 kg/m^3 。沉积盖层密度 ρ_s 按阶段取平均值, 其中上二叠统-三叠系为 2.56 kg/m^3 ; 侏罗系为 2.52 kg/m^3 ; 下白垩统为 2.50 kg/m^3 ; 上白垩统-下第三系为 2.48 kg/m^3 ; 上第三系为 2.36 kg/m^3 。

模拟所需的最后参数是前陆盆地各阶段的宽度和实测沉降量。从区域地质分析得知, 晚二叠世-三叠纪和侏罗纪时, 盆地的宽度约为 70 km ; 侏罗纪时宽度为 100 km ; 早白垩世时宽度约 302 km ; 晚白垩世-早第三纪时宽度约 480 km ; 晚第三纪时由于盆地和塔里木南部昆仑山前陆盆地复合, 使前缘隆起的位置难于确定, 但很明显盆地的宽度大于晚白垩世-早第三纪阶段。各阶段的沉降量由校正的实测地层厚度给出。

在上述参数确定以后, 通过计算机进行正演, 采用网格搜寻法最终就确定抗挠刚度 D 、构造负载 $P(x)$ 和沉降量 $W(x)$ 。

结论和讨论

精确模拟前陆盆地的沉降或其地层的展布是困难的, 许多参数的未知性阻碍了这一过程的实现, 例如构造负载的形状和数量, 加载作用的过程以及大陆岩石圈的力学性质等等。因此, 本文的意图是从定量的角度上模拟中、新生代时塔北地区盆地沉降机理, 进而佐证该盆地的性质。

根据本区构造运动特征和大地构造演化的阶段性, 将中、新生代前陆盆地的沉降分为晚二叠世-三叠纪、侏罗纪、早白垩世、晚白垩世-早第三纪、晚第三纪五个阶段, 采用了 Beaumont^[5] 的参数搜寻法分别予以模拟。

从模拟的结果上看, 各阶段理论值与实测值拟合较好(图4), 仅局部地段理论值和实测值

存在明显的误差。但这种误差并不是模型自身造成的,而是地质作用不均匀性的表现,如在早白垩世和晚白垩世-早第三纪阶段,由于沙雅隆起的继承性活动,其上部沉积的下白垩统和上白垩统-下第三系厚度较小,从而造成盆地底界呈微隆起伏。

本次模拟以亚2井为水平参考点,从图中可以看出,由于构造负载的逐渐南移,盆地各阶段沉积中心也向南迁移。从三叠纪到侏罗纪,前陆盆地向南迁移距离约20 km。白垩纪-第三纪阶段,盆地抗挠刚度增强,对应的挠曲波长也相应增大,白垩纪的沉降中心基本上处于现今的库车坳陷北缘,晚第三纪沉降中心已经迁移到现今的秋里塔克一带,与三叠纪相比,总的迁移距离近90 km。

模拟结果表明,前陆盆地的沉降是构造负载和沉积物负载共同作用所引起的。构造沉降在先,然后

再为沉积物充填,充填的沉积物负载导致盆地一定程度的进一步沉降。虽然沉积负载所引起的沉降与纯构造沉降有数量级的差别。但其的确具有两种明显的效果,一方面使盆地进一步沉降,另一方面使盆地宽度加大。而不同密度的充填物,所产生的这种效应的程度是不同的,水负载引起的盆地再沉降量和增加的宽度远不及沉积负载。

理论模拟曲线于前陆盆地的南部出现一宽阔隆起区和一沉降量较小的宽阔盆地,其中三叠纪和侏罗纪时,其位置分别相当于沙雅隆起和阿瓦提-满加尔坳陷,理论隆起区高出海平面的峰值分别为367 m和304 m。由于尚不能定量获得沙雅隆起被剥蚀的地层厚度,所以与理论值不好对比。但在隆起带的宽度上,理论值远远大于实际情况,一般可达上百公里,二者差别较大。从盆地沉降量上看,最大理论计算值仅厚20余米,而阿-满坳陷内仅上二叠统-三叠系就厚达1100 m,二者的差值也非常明显;而就盆地的宽度而言,理论值远远大于实际值,可达几百公里,二者的差别更甚。上述的种种差别说明,不能用简单的挠曲机制既解释前陆盆地又解释这种与其以隆起相隔的克拉通盆地的沉降机制,而其真正的沉降机制可能还和岩石圈板块在强烈水平挤压力作用下发生的类似于纵弯变形作用有关。由于阿-满坳陷产生一定规模的沉降,所以使沙雅隆起范围缩小、变窄。因此,这种受前陆影响以前缘隆起为物源的克拉通内沉降盆地,其沉降机制可能包括多方面的因素,其中包括挠曲诱发、沉积物负载作用和水平挤压造成的纵弯变形。挠曲模型中加入水平力的影响会使挠曲方程的解复杂化,至今

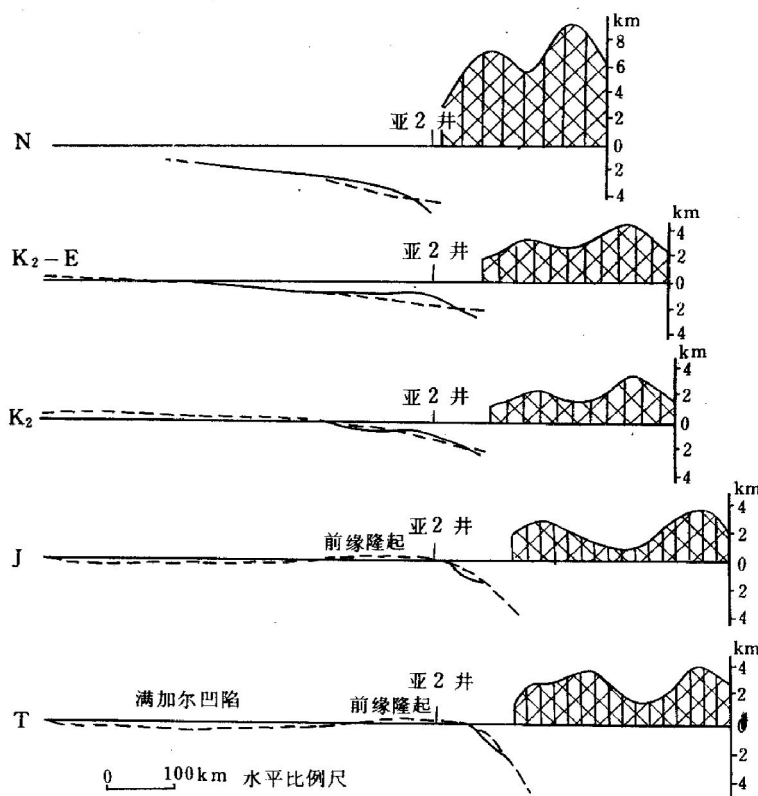


图4 塔北地区前陆盆地中新生代沉降模拟图

图中实线是实测沉降量,虚线为理论模拟值,网格状的方块代表了产生相应时代地层所需的地表构造负载,其中三叠纪和侏罗纪阶段,每个方块负载的步长取20 km,早白垩世和晚白垩世-早第三纪阶段每个方块负载的步长取25 km,晚第三纪阶段每个方块负载的步长取30 km

尚未见到这方面的讨论。而本次前陆盆地形成机制的模拟处于初期的探索性阶段,这一问题只能有待今后进一步研究。

模拟中发现前陆岩石圈的挠曲波长(盆地宽度)和挠曲幅度(盆地深度)取决于 D 和 $P(x)$ 的共同作用。其中, D 值的变化对挠曲波长最为敏感,其大小与挠曲波长成正比,与挠曲幅度成反比,即将 D 值取得较小时,盆地表现为既窄又深,相反增大 D 值时,盆地逐渐加宽变浅, $P(x)$ 的变化对挠曲幅度最敏感,其大小与挠曲幅度成正比,与挠曲波长成反比,即当负载较大时,盆地的深度较大,而宽度却变窄,反之亦然。另外 $P(x)$ 的空间分布也对挠曲波长产生一定的影响。

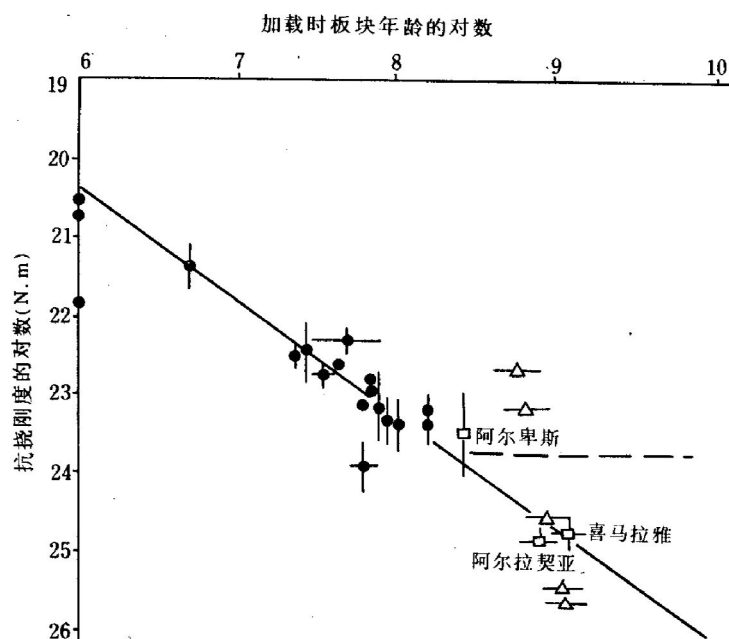


图5 大洋和大陆岩石圈抗挠刚度与基底热年龄相关图

(据 Karner 和 Watts^[9]补充)

图中黑点代表大洋岩石圈,方格和三角形代表大陆岩石圈,其中三角形自上而下分别代表塔北地区三叠纪、侏罗纪、早白垩世、晚白垩世-早第三纪和晚第三纪的抗挠刚度

对全球各地区的抗挠刚度进行了统计比较分析表明,岩石圈的抗挠刚度与岩石圈的类型和岩石圈加载时的热年龄有关^[9]。总的来说,大洋岩石圈比大陆岩石圈的 D 值要小,大洋岩石圈越靠近洋中脊其抗挠刚度越大;大陆岩石圈的 D 值取决于加载时的基底热年龄,基底热年龄越大,其抗挠刚度越大。塔北地区岩石圈的变化也基本上符合这一规律,并和其他前陆地区岩石圈抗挠刚度有一定的可比性。比较不同的模拟阶段得到的抗挠刚度 D 值,发现自晚二叠世以来它有规律地增加(图5)。

塔北地区早期的抗挠刚度偏小,主要是和热事件有关。早二叠世整个塔北地区盆地普遍存在玄武岩喷溢作用。该期热事件引起塔北地区岩石圈软化,从而降低抗挠刚度。热事件以后岩石圈的抗挠刚度逐渐回升增大。

综上所述,弹性挠曲模型基本上较好地解释了塔北地区晚期前陆盆地自三叠纪以来的沉降机理,盆地沉降的幅度主要取决于构造负载和岩石圈的抗挠刚度,负载量与沉降幅度成正比;盆地范围主要取决于岩石圈的抗挠刚度,盆地宽度与抗挠刚度成正比,盆地内沉积物的充填使沉降幅度和盆地宽度进一步加大。岩石圈的抗挠刚度随着其热年龄的增加而逐渐增大。塔北地区中、新生代的盆地基本上是挠曲性质的盆地;盆地的演化和构造迁移与天山造山带的动力学演化过程息息相关。

参 考 文 献

- 1 Walcott R I. Flexural rigidity, thickness and viscosity of the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 3941—3954
- 2 Bodine J H, Steckler M S, Watts A B. Observation of flexure and the rheology of the oceanic lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86, 3695—3707
- 3 Karner G D, Steckler M S, Thorne J A. Long term thermo-mechanical properties of the continental lithosphere. *Nature*, 1983, 304, 250—253
- 4 Allen P A *et al.* Foreland basins, an introduction. In: Allen P A. *et al.* ed. Foreland Basins, London, Blackwell Scientific Publication. 1986. 3—12
- 5 Beaumont C. Foreland Basins. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1981, 65, 291—329
- 6 Beaumont C. The Evolution of Sedimentary Basins on a Viscoelastic Lithosphere, theory and examples. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1978, 55, 471—497
- 7 Jordan T D. Thrust loads and Foreland Basin evolution, Cretaceous, Western United States, *AAPG. Bull.* 1981, 65, 2506—2520
- 8 特科特, D L, 舒伯特 G 等著. 地球动力学-连续介质物理在地质问题上的应用. 韩见传, 詹贤鉴等译. 北京: 地震出版社, 1986. 94—124
- 9 Karner G D. *et al* Gravity anomalies and flexure of the Lithosphere at Mountain Ranges. *J. Geophys. Res.* 1983, 88 (B12), 10449—10474

NUMERICAL MODELLING OF SUBSIDENCE MECHANISM OF A MESO-CENOZOIC FORELAND BASIN IN NORTH TARIM

Cao Shoulian Chen Fajing

(China University of Geosciences, Beijing)

Luo Chuanrong

(Comprehensive Research Institute of Petroleum Geology, MGMR, Jiangling, Hubei)

Abstract

A typical foreland basin developed in the northern part of Tarim after Hercynian. The basin was firstly confined to the piedmont of South Tianshan during Triassic-Jurassic, then extended southward and covered a large area since Cretaceous. The purpose of this paper is attempting to discuss the subsidence mechanism of the basin through numerical modelling. Assuming the continental lithosphere of the area to be a uniform elastic plate, taking Tianshan orogenic zone as tectonic loads, strata distribution modelling was made in five stages. The main parameters necessary for the modelling included observed structural sections, flexural rigidity of the lithosphere and the amounts of tectonic loads. The results of the modelling are theoretic structural sections and topography of specified load feature. Finite element method was used to solve the flexure equation during the modelling process. The theoretical subsidence profiles show considerable fit with the

observed tectonic sections except some differences in Shaya uplift. This indicates that the flexural response of the lithosphere to Tianshan mountain loads may be used to explain the main subsidence mechanism of the basin. The parameters acquired through modelling are analogous to some typical foreland basin during Meso-Cenozoic.