

文章编号: 1009-3850(2001)01-0088-05

古地理和古地形三维再造的发展趋势

黄大志, 王成善, 邓 林

(成都理工学院 应用数学系, 四川 成都 610059)

摘要:“模拟技术”是当今科学研究的主要手段之一, 把它应用于地质学的某些方面, 能取得很好的效果, 如盆地模拟已经发展到了比较成熟的阶段。但在古地理和古地形再造方面, 国内外在这方面的研究甚少, 尤其是在三维模拟方面。根据 Hay 等(1989)提出的物质平衡理论, 在给定时间间隔内, 作用在研究区表面的构造、侵蚀和沉积过程所造成的沉积物的侵蚀总量与沉积总量之间物质守恒, 与古地形再造和古地理重建相结合, 用三维数值模型来模拟研究区域的变化过程, 用 GIS 技术把这个变化过程的动态显示出来, 是一项具有理论意义和实践意义的工作。

关 键 词: 数值模型; 古地形再造; 欧拉极; 古地理重建

中图分类号: P541

文献标识码: A

Developments in three-dimensional palaeogeographic and palaeotopographic reconstructions

HUANG Da-zhi, WANG Cheng-shan, DENG Lin

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: “Simulation technology” is an important tool for modern scientific research and has been applicable to geological research, e. g. basin simulation. According to mass-balanced palaeogeographic reconstructions proposed by Hay et al (1989), palaeogeography, palaeotopography and palaeobathymetry of a closed erosional-depositional system can be reconstructed by restoring sedimentary masses to elevated surfaces in a drainage basin based on the inverse of present erosion equations and adjusting for isostasy, sea level changes, sediment compaction, and thermal subsidence. A mass-balanced palaeogeographic recon-

收稿日期: 2000-12-27

基金项目: 国土资源部 GIS 支持下的青藏高原隆升和沉积响应研究基金资助项目

作者简介: 黄大志(1974—), 男, 成都理工学院应用数学硕士。

struction in integration with GIS techniques is a quantitative description of the configuration of the earth's surface at a moment in the geologic past based on sedimentary mass balance, and presents a three-dimensional view of a sedimentary basin and its source area.

Key words: numerical simulation; palaeotopographic reconstruction; Euler polar; palaeogeographic reconstruction

1 研究现状

古地形再造是一种在二维平面上再现各个地质年代大陆板块的位置,国内外很多学者对古地形再造做了大量的研究。在七八十年代,基于板块构造理论和古地磁研究的古地形再造成为研究的热点(R. S. Dicit, 1970; P. Morel 和 E. Irving 1978; Scotese 1979; Smith, 1977, 1981; P. L. 弗斯特布鲁克, 1979; L. P. 佐年沙英, 1984; 王鸿祯, 1987), 他们做了很多各个时期在不同地点的古大陆再造工作^[1, 2]。古地形再造只有平面位置的信息而缺少垂向位置的信息,直到 Hay(1989)等提出的质量平衡的古地理再造方法,才使古地理再造向前迈进了一大步,所编制的图件才具有地形高程和水深。汪品先等(1996)采用此方法对早第三纪渤海湾盆地南缘的东营湖集水盆地进行了三维古地形再造研究,在一定范围内取得了较好效果。这种方法值得借鉴,但是它还是有一些不足之处:①没有反映沉积相的信息,其本质还是一个古水深图;②没有考虑水平位移和变形,其本质是固定论;③在物质质量平衡计算中,没有考虑俯冲消减的物质和俯冲碰撞所造成的抬升;④在各个网格单元沉积物质的质量计算中,没有很好的考虑沉积机制和沉积环境所造成的沉积物通量的变化。

随着科学技术的进一步发展,人们对事物的认识逐渐从现象深入到对本质的探索。地球科学也逐渐从定性走向定量,从现象描述走向机理探索的转化,使得数值模拟的作用日益明显。通过数值模拟检验现有假设,再现漫长地质过程中的环节对于古地形和古地理三维再造这种综合前沿学科,显得格外重要。地质过程的数值模拟,是在人们通过地质现象(或事实)研究所形成的对地质过程发生的“概念模型”基础之上,建立数学模型采用适当的数学理论以计算机作为工具,求解复杂地质体的变化过程,一方面验证“概念模型”的认识,另一方面深刻揭示地质过程中发生的内部作用机制,结合图形图象处理,显示技术,可对这一过程进行直观的动态图形表示。“模拟技术”是当今科学研究的主要手段之一,把它应用于地质方面,取得了很好的效果,如盆地模拟已经发展到了比较成熟的阶段,对于油气的探测和开发具有重要意义。而对于古地理和古地形再造(即模拟),还不很成熟,大部分则处于定性的模拟,很少有定量的模拟。

青藏高原是世界上最年轻的高原,也是世界上最高的高原,认识青藏高原高度变化的历史对于研究高原的隆升以及由高原隆升所引起的气候和环境变化具有非常重要的意义。精确地重塑青藏高原的隆升过程,再现青藏高原各个时期的古地形和古地理有着很重要的科学和实践意义,给我们进行古地理和古地形三维再造研究提供了一个良好的机会。迄今为止,对青藏高原古地形的再造在数值模拟方面的工作还不多,数值模型很少,三维数值模型更是没有。董文杰和汤懋苍(1997)所建立的数值模型是根据古地磁资料和星际氢原子浓度资料^[3],模拟出青藏高原隆升抬高和夷平降低过程,在青藏高原平均高度上取得了较为满意

的结果,但这个模型只有一维的高度信息,而没有平面的信息,不能完全反映出青藏高原的变化过程。下面我们就结合青藏高原的三维古地形来看其三维古地形和古地理的再造方法。

2 研究方法

2.1 古大陆的再造方法^[4,5]

古大陆再造又称为古地理图,就是再现现今各个陆块在地质历史时期各自的相对位置和
海陆关系的图件。经过长期的地质活动,各大陆板块现在所在的位置都不是以前的地方,它们相对于地轴在不停的移动。古大陆再造就是恢复各个时期这些板块的相对关系及位置。

进行古大陆再造一般分三个步骤:①确定在某一个地质历史时期,世界上有大大小小多少陆块以及各个陆块的界线,并进行必要的分离和拼合,这是一个纯地质问题;②根据古地磁资料,确定各个大陆板块原来的位置;③对大陆进行处理,复原大陆位置,就是用图示的方法再现各个大陆原来的位置,这是最关键的一步,一般采用欧拉定律和有限旋转方法。

欧拉定律又叫固定点定律,即在球面块体任何位移中,球面上有某一个点保持固定不动,这一点就是欧拉极。而我们所说的这种固定不动是相对的,是相对于某一瞬间,所以该运动又称其为有限旋转。

板块构造运动集合过程一般可以用一种成对的参数来表示:欧拉极 (E) 和绕欧拉极旋转的角度 (Ω)。 E 和 Ω 都是矢量, E 的方向是从地心指向球面上欧拉极的位置; Ω 的方向遵从右手法则:拇指指向为欧拉极方向,四指指向就是旋转的正向。对于某一大陆块体从古代到现在已经绕一系列欧拉极旋转了一系列角度,复原它就是使它绕相同的欧拉极反方向旋转相同的角度。

因此,欧拉极的求解非常重要。一般来说,可以依据对板块运动的实际观察结果来求得欧拉极。地球表面上任意一点都可以用两种坐标系来确定,大地坐标系即经纬度坐标,记为 $A(B, L)$,其中 B 为纬度, L 为经度;地心坐标系即为三维空间迪卡尔坐标,记为 $A(A_x, A_y, A_z)$ 。旋转操作就是根据各个陆块现代坐标计算它过去的坐标,在计算过程中一般采用地心坐标系,而最后结果转换成大地坐标系,以进行地图投影。这两种坐标系的转换关系是:

$$\begin{cases} A_x = \cos B \cos L \\ A_y = \cos B \sin L \\ A_z = \sin B \end{cases} \tag{1}$$

进行旋转操作需要用到一些代数知识。设点 A 的迪卡尔坐标为 $A(A_x, A_y, A_z)$, 旋转后成为 $A'(A'_x, A'_y, A'_z)$, A' 可用两个 3×3 矩阵相乘得到:

$$A' = R * A \tag{2}$$

其中 R 是一个 3×3 矩阵,其值由欧拉极的坐标 $E(E_x, E_y, E_z)$ 及旋转角 Ω 求得。

这样便能求得其复原后的坐标。下一步就是进行投影操作。

底图投影的种类很多,在古大陆再造中最常用的有莫卡托投影(Mercater Projection), 摩尔威德投影(Mollweide Projection) 和球投影(Stereographic Projection) 三种。

2.2 物质平衡法

Hay 等(1989)所指的物质平衡是在给定的时间间隔内,作用在研究区表面的构造、侵蚀和沉积过程所造成沉积物的侵蚀总量与沉积总量之间的物质守恒^[6~8]。对于造山带而言,物质平衡实际就是造山过程中通过逆冲和地壳短缩作用在山脉中形成的物质积累与通过侵蚀作用从山脉中造成的物质流失之间的物质守恒(Metivier 和 Gaudemer, 1997)。物质平衡法已经在墨西哥湾西北美中西部大陆(Hay 等, 1989)^[6],渤海湾盆地(汪品先等, 1996),天山及其邻近的塔里木盆地和准噶尔盆地(Metivier 和 Gaudemer, 1997)的三维古地形重建中得到成功地运用。我们开展的三维古地形研究基于物质平衡方法,建立研究区被剥蚀的物质总量与盆地沉积物质总量保持守恒。

沉积区的物质积累将转变为一定的高度变化,这种高度变化受地壳均衡原理制约。若: i 为高原演化阶段(由老至新), h_i 为第 i 阶段高原地壳下部的山根厚度, H_i 为第 i 阶段高原高度,则山根的补偿厚度为(Metivier 和 Gaudemer, 1997)^[9]:

$$h_i = H_i \times \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_c} = 5.5 \times H_i \quad (1)$$

其中, ρ_m 为地幔密度(3300kgm^{-3}); ρ_c 为地壳密度(2700kgm^{-3})。这样,高原地壳厚度为:

$$L_i = h + H_i + h_i = h + H_i + 5.5 \times H_i = 35 + 6.5 \times H_i \quad (2)$$

其中, L_i 为第 i 阶段高原地壳厚度; h 为标准地壳厚度(35km)。

将研究内容以固体物质考虑,设其密度相同(2700kgm^{-3}),则研究区物质质量变化等于体积变化。造山带体积变化就等于体积流入量和流出量之和:

$$\begin{aligned} \Delta V_{i \rightarrow i+1} &= (V_{i+1} - V_i) [(H_{i+1} - H_i) + (h_{i+1} - h_i)] \times (S_i + \Delta S_{i \rightarrow i+1}) \\ &= [(H_{i+1} - H_i) + (5.5 \times H_{i+1} - 5.5 \times H_i)] \times (S_i + \Delta S_{i \rightarrow i+1}) \\ &= 6.5 \times (H_{i+1} - H_i) \times (S_i + \Delta S_{i \rightarrow i+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

则,高度变化:

$$\Delta H_{i \rightarrow i+1} = (H_{i+1} - H_i) = \frac{\Delta V_{i \rightarrow i+1}}{6.5 \times (S_i + \Delta S_{i \rightarrow i+1})} \quad (4)$$

其中, $\Delta V_{i \rightarrow i+1}$ 为第 i 到第 $i+1$ 阶段造山带体积变化; V_i 为第 i 阶段造山带的体积; $\Delta S_{i \rightarrow i+1}$ 为第 i 到第 $i+1$ 阶段造山带表面积变化; S_i 为第 i 阶段造山带表面积; $\Delta H_{i \rightarrow i+1}$ 为第 i 到第 $i+1$ 阶段造山带高度变化; H_i 为第 i 阶段造山带高度。

而研究区物质体积变化量 $\Delta V_{i \rightarrow i+1}$ 等于大陆运动所造成的体积变化和沉积物剥蚀的变化量之和,前者引起的研究区地壳固体体积变化为:

$$\Delta V_{0_{i \rightarrow i+1}} = V_i \times (T_{i+1} - T_i) \times W \times L_i \quad (5)$$

其中, $\Delta V_{0_{i \rightarrow i+1}}$ 为第 i 到第 $i+1$ 阶段大陆运动造成造山带体积的变化; V_i 为第 i 阶段大陆运动速度; T_i 为第 i 阶段地质时代; W 为大陆运动前缘的宽度。

后者可以通过沉积盆地研究获得:

$$\Delta V_{S_{i \rightarrow i+1}} = \sum V_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中, $\Delta V_{S_{i \rightarrow i+1}}$ 为第 i 到第 $i+1$ 阶段所有沉积盆地的沉积物体积; V_{ij} 为第 i 阶段第 j 个盆地的沉积物体积。

根据物质平衡方法, 研究区物质体积变化等于通过大陆地壳运动(俯冲或挤出)形成的体积变化和通过侵蚀作用造成的体积变化之和, 我们通过⁽⁵⁾式计算地壳运动形成的体积变化, 侵蚀作用造成的体积变化通过利用 GIS 软件 ARC/VIEW 对沉积盆地各个时期等厚图计算获得, 由式⁽⁸⁾获得总体积变化总量, 然后通过总的体积变化用⁽⁴⁾式计算海拔高程变化。

$$\Delta V_{i \rightarrow i+1} = \Delta V_{0 \rightarrow i+1} + \Delta V_{S i \rightarrow i+1} \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (8)$$

3 结论

综上所述, 我们可以看出, 古大陆再造主要是在平面上的恢复, 而物质平衡法则没有平面的信息, 要想实现三维古地形再造, 我们可以把古大陆再造与物质平衡法相结合, 来计算研究区域的平面变化和高度变化, 那么我们就可得到三维的古地形和古地理。具体对于青藏高原来说, 我们可根据古大陆再造, 来再现青藏高原在欧亚大陆板块和印度大陆板陆碰撞以来的各个时期的地理位置, 建立地质模型和数学模型, 恢复青藏高原在各个时期的形状和面积; 在垂直方向上, 根据 Hay 等的物质平衡法, 在青藏高原这一个封闭体系(包括青藏高原和它所有的沉积盆地)内, 把所有沉积盆地由青藏高原剥蚀物分时期的返回到青藏高原, 就可以得到青藏高原不同时期的古高度。这样我们就可以得到三维的青藏高原的古地形和古地理。

参考文献:

- [1] 王成善, 刘志飞, 王国芝等. 新生代青藏高原三维古地形再造[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(1): 1—7
- [2] 王鸿祯. 中国古地图集[M]. 北京: 地图出版社, 1983
- [3] 董文杰, 汤懋昌. 青藏高原隆升和夷平过程的数值模型研究[J]. 中国科学, 1997, 27(1): 65—69
- [4] 李翔, 张玲华. 利用微型计算机进行世界古大陆再造成图方法与实例[J]. 现代地质, 1989, 3(1): 17—26
- [5] 王金定. 旋转极点和板块运动再造[J]. 河南地质情报, 1986, 51(2): 29—31
- [6] HAY W W, SHAW C A and WORLD C N. Mass-balanced paleogeographic reconstruction [J]. Geologische Rundschau, 1989, 78(1): 207—242
- [7] 刘树臣译. 质量平衡的古地理再造[J]. 国外地质科技, 1991, 107(3—4): 32—50
- [8] 成鑫荣, 陈东敬, 陆培德. 古高度再造与集水盆地古地形[A]. 含油盆地古湖泊学研究方法[C], 上海: 海洋出版社, 1993, 15—35
- [9] METIVIER F, GAUDEMER Y, TAPPONIER P and KLEIN M. Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic [J]. International Journal of Geophysics, 1999, 137: 280—318.