

基于 GIS 的盆地古构造重建方法研究

刘学锋^{1,2} 孟令奎¹ 赵春宇¹ 黄长青¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 江汉石油学院地球科学系, 湖北省荆州市南环路 1 号, 434023)

摘要: 将 GIS 技术引入含油气盆地研究中, 阐述了盆地古构造重建的数学建模方法, 并将该方法与 GIS 集成, 扩展了 GIS 的空间分析功能, 建立了基于 GIS 的盆地古构造重建模型, 实现了盆地古构造重建的数据输入、管理、分析、处理和可视化表达的一体化。

关键词: GIS; 盆地; 古构造; 空间分析; 可视化

中图法分类号: P208; P547

再造地质历史时期的古构造格局是盆地模拟研究的重要内容之一, 也是盆地构造演化史研究、油气运移路径模拟的基础, 在含油气盆地研究中占有重要的地位。目前盆地研究中广泛使用的基于区域构造背景和构造运动期次的古构造演化史分析只能提供古构造演化方面的定性描述, 如何根据现有的地质记录较准确地恢复地质历史时期某一构造面的古构造格局, 实现古构造面貌的可视化表达已成为当今人们普遍关注的研究方向。笔者曾提出了一种利用回剥分析重建古构造格局的方法^[1], 但该方法只实现了古构造重建的数据定量处理, 对处理结果的图形表达只能借助其他软件实现。近年来, 随着计算机技术的飞速发展, GIS 技术也得到了迅猛发展, 其方便快捷的多源数据采集与输入功能、强大的地图编辑与空间数据管理功能、独特的多种空间分析方法, 以及直观的图形和属性数据的可视化表达方法正广泛应用于社会生活的各个方面。然而, 在油气勘探领域, GIS 的应用才刚刚起步, 主要涉及基于 GIS 的石油勘探图形的显示与管理等方面^[2-3], GIS 的强大空间分析功能尚未发挥应有的作用, 特别是在将石油地质定量分析方法与 GIS 集成解决油气勘探领域的深层次问题方面在理论上和实践上尚有许多问题需要探讨。本文将 GIS 技术引入含油气盆地研究中, 将盆地古构造重建的数学建模方法与 GIS 集成, 建立了基于 GIS 的盆地古构造重建模型。

1 盆地古构造重建数学建模

基于 GIS 的盆地古构造重建是建立在石油地质理论与 GIS 技术紧密结合的基础上, 是两种学科的交叉与融合, 石油地质理论是重建盆地古构造格局的理论基础, 盆地古构造重建中的相关算法来源于基于具体石油地质理论指导下的数学建模, 而 GIS 为求解这些数学问题提供了技术支持, 是古构造重建中数据的输入、分析处理及分析结果可视化表达的平台。以现今地质记录为基础的古构造重建是一个构造反演的过程, 目前, 除了一些基于一定石油地质理论的定性描述方法外, 重建盆地古构造格局的定量或半定量方法一般有两种: ①平衡剖面复原法, 这种方法只能恢复沿一定剖面方向的构造发育史; ②基于回剥分析技术的古构造恢复法^[1], 该方法可以建立不同地质历史时期盆地某一构造面在三维平面内的古构造格局。显然, 后者更能直观准确地反映盆地的古构造演化历史。本文以回剥分析技术为基础, 建立了盆地古构造重建的数学模型。

回剥分析(backstripping analysis)是 20 世纪 70 年代末逐渐发展起来的一种定量的盆地分析技术, 该技术最初是基于盆地沉降史定量分析提出的^[4-6], 随后被应用于盆地分析的其他领域^[7-9]。本文提出的盆地古构造重建首先从单个点入手, 求取过去一定地质历史时期给定构造

面的古海拔深度, 然后通过某种插值算法拟合该构造面的几何形态。可见, 其关键是构造面的古海拔深度的求取, 可借鉴回剥分析中的沉积物去压实技术实现, 其数学建模过程如下。

考虑二维平面内的一点 $P(x, y)$ (相当于盆地内位于该点的钻井井位), 通过钻井揭示地下某一层 1 的顶底海拔深度分别为 H_1 和 H_2 , 计算层 1 底面在层 1 沉积期末的古海拔深度 H'_2 (图 1)。事实上, 由于沉积物压实效应的影响, $H_2 - H_1$ 通常不等于 $H'_2 - H'_1$, 图 1 自左而右表明了沉积和压实过程, 将这一沉积压实过程视为一种可逆过程, 即通过去压实(回剥)的方法将上覆地层剥去(图 1 中自右向左), 与此同时, 恢复各沉积等时面的古海拔深度。

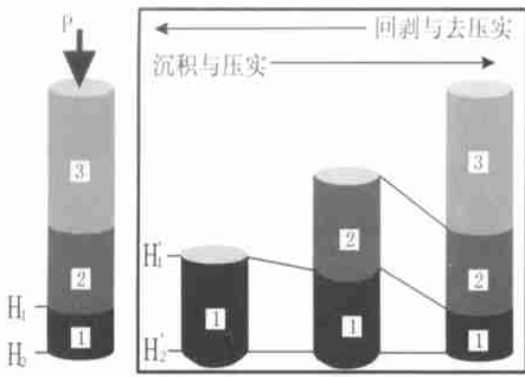


图 1 去压实过程示意图

Fig. 1 Successive Stages in a Decompacted Exercise

统计分析表明, 任一深度 (H) 处的孔隙度 (Φ) 随深度的变化满足指数关系, 即

$$\Phi = \Phi_0 e^{-cH}$$

式中, Φ_0 为沉积物位于地表时的孔隙度; c 为压实因子。

显然, 去压实前该沉积体的孔隙体积 (V_w) 可用下式表示:

$$V_w = \int_{H_1}^{H_2} s \Phi_0 e^{-cH} dH$$

式中, s 为沉积层底面积。

上式积分后得:

$$V_w = \frac{s\Phi_0}{c} (e^{-cH_1} - e^{-cH_2})$$

相应地, 沉积物骨架体积 (V_s) 为: $V_s = V - V_w$, V 为沉积体总体积。

如果考虑单位截面的某一沉积体 ($S^n = 1$), 则以上体积关系式可转换为深度关系式:

$$H_s = \Delta H - H_w = H_2 - H_1 -$$

$$\frac{\Phi_0}{c} (e^{-cH_1} - e^{-cH_2}) \quad (1)$$

式中, $H_s, H_w, \Delta H$ 分别为去压实前单位截面上骨架体积、孔隙流体体积和沉积体总体积。

同理, 去压实后, 沉积物骨架体积可表示为:

$$H'_s = H'_2 - H'_1 - \frac{\Phi_0}{c} (e^{-cH_1} - e^{-cH_2}) \quad (2)$$

式中, H'_s 为去压实后单位截面上的骨架体积。

假设沉积物在压实过程中体积的改变导因于沉积物中孔隙流体体积的变化, 而沉积物骨架体积保持不变, $H'_s = H_s$, 即

$$H'_2 - H'_1 = H_2 - H_1 - \frac{\Phi_0}{c} (e^{-cH_1} - e^{-cH_2}) + \frac{\Phi_0}{c} (e^{-cH'_1} - e^{-cH'_2}) \quad (3)$$

通过式(3)可以计算出层 1 底面在层 1 沉积期末 P 点处的古海拔深度 H'_2 , 采用迭代法可方便地对上式求解。显然, 对于二维平面内任一有钻井控制的点均可通过上述方法求得该点处的古海拔深度。

值得指出的是, 以上所求得的古海拔深度是相对于现今海平面而言的, 如果需要获得相对过去海平面的古海拔深度, 则需要估计过去各地质时期相对于现今的海平面变化量。不过, 不同的参照面标准只影响不同时期古海拔的相对变化量, 而不影响同期的古构造形态, 因此, 通常以现今海平面为参照标准来简化计算。

2 基于 GIS 的盆地古构造重建模型

模型是人类对事物的一种抽象。人们为了解决复杂的空间问题, 也试图建立一个简化的模型, 来模拟空间分析过程, 通常称为空间分析建模。它是通过作用于原始数据和派生数据的一组顺序的、交互的空间分析操作命令, 对一个空间决策过程进行的模拟^[10]。GIS 支持下的盆地古构造重建涉及原始数据输入与建库、数据的分析处理、DEM 生成及结果的三维可视化显示等过程, 其分析流程如图 2 所示。

2.1 原始数据输入与盆地古构造重建数据库建立

盆地古构造重建所需要的原始数据主要包括每个井点的井位位置坐标、各井的录井和测井数据。井点位置坐标可通过两种方式输入: ①以收集到的井点井位分布图为基础数字化输入; ②根据钻井完井报告提供的井位坐标键盘输入。各井录井和测井数据需要通过统计整理形成统一格式后通过键盘输入计算机。以上数据构成了盆地古构造

重建数据库的主体。盆地古构造重建数据库由若干属性表组成, 主要包括钻井基本参数表、声波测

井数据表、砂泥岩百分含量表、沉积时间序列表和古海拔深度表, 各表包含的字段见表 1~表 5。

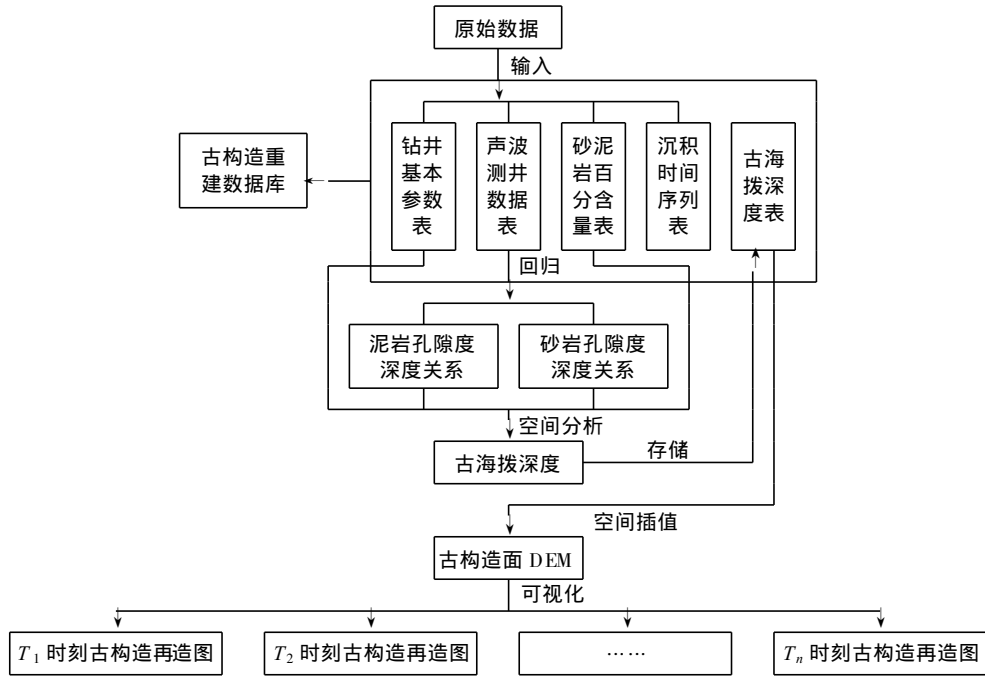


图 2 基于 GIS 的盆地古构造重建模型

Fig. 2 Basin Palaeotectonic Reconstruction Model Based on GIS

表 1 钻井基本参数表

Tab. 1 Basic Parameters of Drilling Well

井点号	X 坐标	Y 坐标	层位 1 底深	层位 2 底深	...	层位 n 底深
No. 1

表 2 声波测井数据表

Tab. 2 Sonar Log Data

井点号	岩性	深度	声波时差
No. 1

表 3 砂泥岩百分含量表

Tab. 3 Centesimal Content(%) of Sandstone and Mudstone in Stratum

井点号	层位	砂岩含量	泥岩含量
No. 1

表 4 沉积时间序列表

Tab. 4 Deposition Time Sequence

层位	起始沉积时间/Ma	结束沉积时间/Ma
层位 1
层位 2
...
层位 n

建立, 表 5 用于存储空间分析处理后的结果。对于同一地区, 表 4 一旦建立后一般不再改变, 而表 1~3 可随着盆地钻井的增加实时更新。由于只涉及点的位置信息, 通常每个点的 X、Y 坐标都为定长字段, 将反映井点空间位置信息的 X、Y 坐标放在钻井基本参数属性表中存储管理。

表 5 构造面古海拔深度表

Tab. 5 Structural Surface Palaeo-depth

Relative to Sea Level

井点号	层位 1 沉积末	层位 2 沉积末	...	层位 n 沉积末
No. 1

2.2 空间分析及构造面古海拔深度求取

空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的数据分析技术, 强大的空间分析功能是 GIS 区别于其他信息系统的显著特征之一^[10]。然而, 一个面向大众的 GIS 软件通常提供的是一些通用的空间分析模型, 无法满足特定 GIS 用户的所有需求, 但一些商品化程度较高的 GIS 软件大都具有二次开发功能, 以使用户能够根据自己的需要建立以实际用户工作环境为基础的应用模型。在基于 GIS 的盆地古构造重建中, 除了应用空间数据查询、统计分析等常规空间分析方法外, 通过二次开发, 将前述盆地古构造重建的数学建模方法嵌入到 GIS 的空间分析模型中去, 对 GIS 的空间

以上各表中, 表 1~表 4 由原始数据输入时

分析功能进行扩展,生成古构造重建模块,以满足盆地古构造重建的需要。

为求取构造面古海拔深度,首先以“岩性”为检索字段在盆地古构造重建数据库中的声波测井数据表中分别检索出砂岩和泥岩的深度和声波时差,通过回归分析拟合砂岩和泥岩孔隙度和深度变化关系(即求取式(3)中的 Φ_0 和 c 值),然后结合钻井基本参数表和砂泥岩百分含量表中的相关数据,运用古构造重建模块求取各井点不同时期的古海拔深度,将结果存入古构造重建数据库中的构造面古海拔深度表中,供生成古构造面 DEM 使用。

2.3 DEM 生成与古构造面形态再造

以上获得的不同时期的古海拔深度(H)与相应点在二维欧氏空间的平面坐标(x, y)共同确定了三维空间的一个惟一点,代表相应时期特定构造面在该点的空间定位。这些点是三维空间的一些离散点,无法表征古构造面在三位空间的连续变化,为了再造盆地古构造面在三维空间的构造形态,笔者借鉴了 GIS 生成三维地形表面的方法,从古构造重建数据库构造面古海拔深度表中提取同一时期同一构造面的古海拔深度作为“原始”采样点的“高程”值,并以“井点号”作为关键

字段从钻井基本参数表中检索出相应井点的位置坐标,通过空间插值运算生成该时期该构造面的数值高程模型(DEM)。

DEM 生成后,利用 GIS 的三维图形显示技术,通过三维到二维的坐标转换、隐藏线、面消除、阴影处理、光照模型等技术^[10,13],将三维空间数据投影在二维屏幕上,便可实现古构造面形态的逼真再现。

3 应用

以中国科学院地理所开发的 GIS 基础软件平台 SuperMap 提供的 GIS 二次开发控件为基础,在 VB 环境下开发基于 GIS 的古构造分析软件,将古构造分析数学建模方法与 GIS 核心模块集成,对我国南方某地区二叠系底面开展古构造重建研究。图 3 为该地区二叠纪末、中三叠世末、三叠纪末、侏罗纪末四个时期二叠系底面的古构造重建,与笔者 1999 年基于回剥分析和其它图形显示技术对同一地区的研究结果^[1]吻合较好,且与以往的方法相比,基于 GIS 的盆地古构造重建

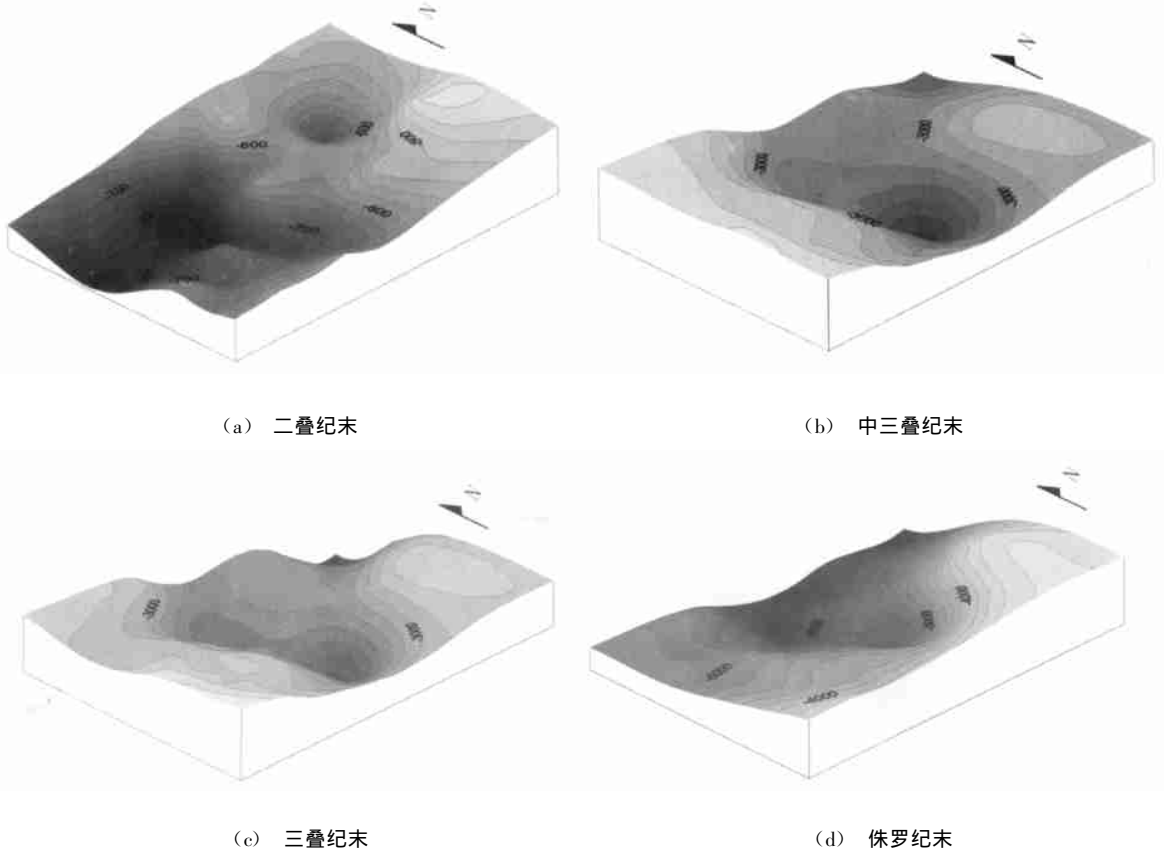


图 3 我国南方某地区二叠系底古构造重建

Fig. 3 Palaeotectonic Reconstruction of the Base of Permian in Some Area of Southern China

方法明显存在以下优点: ①由于采用了 GIS 的三维图形显示技术, 再造的古构造格局更直观, 更具表现力; ②由于采用数据库形式管理原始数据和分析结果数据, 数据的复用、更新非常方便。随着盆地勘探程度的提高, 可以随时将新增数据添加到数据库中, 通过 GIS 的相关操作, 方便地对古构造再造图进行更新; ③借助 GIS 的空间叠加、变值运算等操作, 可以方便地为盆地古构造演化史的地质分析提供许多中间图件, 使地质分析逐渐从定性向定量发展。例如, 将图 3 中的中三叠世末古构造图(图 3(b))与二叠纪末古构造重建图(图 3(a))进行地图代数运算(两图对应的 DEM 相减)可以得到中三叠世二叠系底的隆升/沉降幅度图(图 4), 定量地反映该时期二叠系底面在不同地区的差异隆升/沉降情况。藉此可以定量地分析沉降中心的迁移方向及构造运动强度与盆地沉降之间的定量关系。

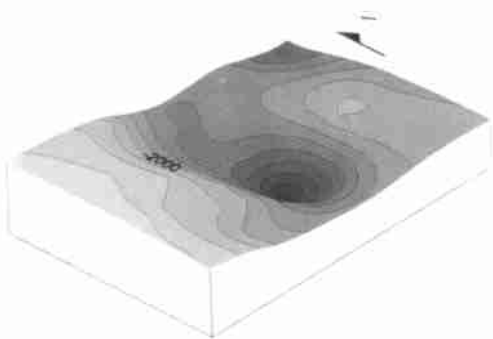


图 4 我国南方某地区二叠系底面中三叠世沉降幅度

Fig. 4 Subsidence Amplitude of the Base of Permian During Middle Triassic in Some Area of Southern China

4 结 语

通过将盆地古构造重建数学建模方法与 GIS 集成, 扩展 GIS 的空间分析功能, 并借鉴 GIS 的多种三维可视化表达方法, 不仅可以实现盆地古构造重建的数据输入、管理、分析、处理和可视化表达的一体化, 而且可以为盆地构造演化史分析提供更多的定量方面的信息, 实现分析数据的实时更新, 使分析结果建立在最新的资料基础之上。同时, 基于 GIS 的盆地古构造重建的核心是特定

地质事件的数学建模, GIS 只是为实现这些建模方法提供了一种平台, 地质事件的复杂性和不可逆性决定了任何数学建模过程都只是对实际地质事件的近似, 分析结果的真实性和拟合程度。盆地古构造重建的数学建模过程还存在许多亟待解决的问题, 如对于存在明显沉积间断的地区如何正确估计剥蚀量, 对有较大水平位移的地区井点如何归位等。相信随着 GIS 和盆地模拟技术的不断发展, 二者的结合将为解决地质学领域的复杂问题提供更加快捷、简便、可行的方法。

参 考 文 献

- 1 刘学锋, 何幼斌, 张或丹. 利用回剥分析重建古构造格局. 古地学报, 1999, 1(2): 15~21
- 2 Bonham-Carter G. An Overview of GIS in the Geosciences. AAPG Computer Applications in Geology, 2000 (4): 17~26
- 3 潘继平, 王 华, 甘甫平. 基于 GIS 的石油勘探图形库系统分析和设计. 地球科学, 2002, 27(1): 59~62
- 4 Steckler M S, Watts A B. Subsidence of the Atlantic Type Continental Margin of New York. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 41: 1~13
- 5 Watts A B. Tectonic Subsidence, Flexure and Global Changes of Sea Level. Nature, 1982, 297: 469~474
- 6 Allen P A, Allen J R. Basin Analysis Principles and Applications. Blackwell Scientific Publications, 1990. 263~281
- 7 Sawyer D S. Total Tectonic Subsidence: A Parameter for Distinguishing Crust Type at the U. S. Atlantic Continental Margin. Journal of Geophysical Research, 1985, 90 (B9): 7 751~7 769
- 8 刘学锋. 对 Watts 等构造沉降量公式的修正. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 82~85
- 9 刘学锋, 刘绍平. 巴彦浩特盆地沉降史分析. 西安石油学院学报, 1997, 12(2): 25~31
- 10 邬 伦, 刘 瑜, 张 晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用. 北京: 科学出版社, 2001
- 11 郭仁忠. 空间分析. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000
- 12 李志林, 朱 庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉大学出版社, 2001

第一作者简介: 刘学锋, 副教授, 博士生。现主要从事 GIS 及盆地分析方面的研究工作。

E-mail: lxlf02@163.com

(下转第 207 页)

Finally, according to the character of input and output data sets in cadastral management and land subdivision, the paper extends the functions of popular GIS platform (MapInfo Professional 6.0) in order to demonstrate the efficiency of the new data model. The method is to create two relation tables; one is Event table and the other is Object table (the format of Object table is TAB of MapInfo) in database. All events should be stored in Event table according to time sequence, and spatial entities including spatial and attribute information are recorded in Object table. Through processing the two relation tables, we can display, analyze and query simply spatio-temporal information of entities in land management.

Key words: T-GIS; geographical event; time-varying sequence

About the first author: MENG Lingkui professor, Ph. D supervisor. He majors in GIS etc.

(上接第 201 页)

Method for Basin Palaeotectonic Reconstruction Based on GIS

LIU Xuefeng^{1,2} MENG Lingkui¹ ZHAO Chunyu¹ HUANG Changqing¹

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

(2 Department of Geoscience, Jiangnan Petroleum Institute, 1 Nanhuan Road, Jingzhou, Hubei, China 434023)

Abstract: In this paper, first, we have expounded the mathematical modeling method about basin palaeotectonic reconstruction. Then, we integrate this modeling method with GIS in order to expand the spatial analysis functions of GIS. Finally, a basin palaeotectonic reconstruction model based on GIS has been made, which includes a series of procedures, such as data-input, build-up of palaeotectonic reconstruction database, spatial analysis, generation of digital elevation model (DEM) of palaeotectonic surface, visualization expression of DEM, and geological analysis of palaeotectonic reconstruction map in different geological history period. As a case of application, using the model proposed in this paper, we has successfully reconstructed the palaeotectonic frameworks of the base of Permian in some area of southern China at the end of the Permian, Middle Triassic, Late Triassic and Middle Jurassic, respectively. By comparing the results with the research productions we obtained based on the combination of backstripping analysis method and other graphic display techniques in the same area in 1999, it is clear that reconstructing the basin palaeotectonic pattern based on GIS can not only gain satisfactory results, but also has a lot of advantages in aspects of graphic display, renewal of data and graphics, and assistance geological analysis.

Key words: GIS; basin; palaeotectonic; spatial analysis; visualization

About the first author: LIU Xuefeng, associate professor, Ph.D candidate. His major research interests include GIS and basin analysis.
E-mail: lx02@163.com