

论文

早二叠世-中三叠世四川盆地热演化及其动力学机制

何丽娟^{①*}, 许鹤华^②, 汪集旻^①^① 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;^② 中国科学院边缘海重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

* E-mail: ljhe@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2011-01-24; 接受日期: 2011-03-02

中国石油化工股份有限公司海相前瞻性研究项目(编号: YPH08101)资助

摘要 四川盆地位于扬子板块西缘, 是我国重要的含油气盆地之一. 早二叠世-中三叠世是盆地发育及热演化的重要时期, 其间经历了区域岩石圈拉张和峨眉山玄武岩活动两个重要构造热事件. 本文采用地球动力学模型, 分别模拟研究了区域岩石圈拉张和峨眉山玄武岩对盆地热演化的影响. 研究表明, 该时期岩石圈在拉张作用下温度场基本上处于增温状态, 盆地基底热流也随时间整体呈增加趋势. 但由于拉张系数较小, 岩石圈的减薄量有限, 受到的热扰动也不大. 岩石圈拉张造成盆地基底热流升高约 20%, 最大基底古热流出现在早三叠世, 约 60~62 mW m⁻². 地幔柱模型显示, 地幔柱活动对岩石圈热状态具有很大的影响, 其影响主要集中在地幔柱头上方(内带), 而四川盆地所处的外带及以外地区受到的影响很小. 部分喷发到盆地地表的岩浆对盆地烃源岩热演化会有剧烈的影响, 但影响时间和范围均有限. 因此, 早二叠世-中三叠世四川盆地热演化主要受区域岩石圈拉张控制, 并在川西南局部地区又叠加了峨眉山玄武岩的热效应.

关键词构造-热演化
数值模拟
岩石圈拉张
峨眉山玄武岩
四川盆地

盆地热历史控制着油气的生成、运移、聚集以及保存等过程, 是含油气盆地分析的重要环节. 近年来, 关于四川盆地的热史恢复作了很多工作^[1~4], 研究表明早二叠世-中三叠世是盆地热演化的重要时期, 其间盆地古热流达到了其历史最高值. 邱楠生等^[2]利用镜质组反射率和磷灰石与锆石的(U-Th)/He 年龄一起模拟了川东北地区三叠纪以来的构造-热演化特征, 其结果显示早三叠世的热流值在 51~66 mW m⁻². 朱传庆等^[4]在对四川盆地钻井古温标资料的分析和盆地热史的恢复中发现, 个别井在中、晚二叠世之间存在一个明显的热事件记录. 其中最典型的是 H1 井. 在 H1 井古温标数据上, 表现为镜质体反射率(R_o)值

在中、上二叠统之间发生突变, 即中二叠统及之下的地层, 经历了较高的古地温. 他们的研究表明, 在距今 275 Ma 时, 该套烃源层的温度在 40~70℃ 之间, 至 260 Ma, 即峨眉山玄武岩喷发时期, H1 井所处的温度迅速升高到 150℃ 以上, 最高古热流超过了 100 mW m⁻². 至 250 Ma 时, 地层温度又迅速降低至 60~70℃ 之间.

早二叠世-中三叠世四川盆地主要受两大构造热事件的影响: 其一是区域岩石圈拉张, 另一是峨眉山玄武岩活动. 究竟是哪种构造热事件控制着盆地的热历史与烃源岩热演化一直是石油地质学家关心的问题^[5,6], 也是近年来四川盆地热史研究的重点^[3]. 本

文采用地球动力学方法, 分别来模拟探讨岩石圈拉张与峨眉山玄武岩的热效应, 从而揭示四川盆地热演化的动力学机制.

1 地质背景

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地, 经历了古生代-早中生代的克拉通凹陷阶段和晚三叠世-新生代的前陆盆地阶段^[7]. 加里东运动之后, 中国南方已形成一个统一的板块——华南板块. 早、中海西期, 华南地区主体进入板内活动阶段, 但由于区域上的古特提斯洋的伸展与扩张, 本区主要处于伸展构造环境之中, 其活动方式以大陆边缘裂陷、陆内伸展拗陷与裂陷作用为主^[8]. 早、中二叠世, 受拉张断陷活动的控制, 四川盆地开始产生拗陷并接受沉积, 但沉积厚度不大, 且被随后的东吴运动所中止. 晚二叠世, 在扬子克拉通及其周缘地区又再次发生了区域性的大陆伸展与裂陷作用. 最为突出的是在川西南-滇黔桂地区发育了攀西裂谷系和南盘江继承性裂陷盆地.

峨眉山玄武岩的喷发是晚古生代扬子板块西缘最重要的热事件^[9], 玄武岩出露面积达 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$. 而上扬子中、晚二叠世之间的东吴运动是峨眉山地幔柱上升所造成的地壳快速差异抬升^[9]. 此次抬升速度很快, 地层暴露地表的时间并不特别长, 茅口组遭受剥蚀, 随后便又一次沉降, 开始接受龙潭组的沉积^[10]. 何斌等^[11,12]通过地层学和沉积学的研究确定了峨眉山玄武岩喷发前地壳的快速大幅抬升和穹状隆起, 并据此将峨眉山超级地幔柱的影响区分成内带、中带、外带三个部分(图 1). 该分区由内带到外带也反映了峨眉山超级地幔柱构造、热效应由强到弱的变化. 其中四川盆地地处峨眉山地幔柱的外带及以外地区^[10-13].

2 岩石圈拉张的热效应

2.1 构造沉降史

定量研究盆地构造沉降史不仅有助于了解盆地的构造演化^[14], 还有助于理解岩石圈的拉张特征^[15], 为拉张盆地构造-热演化模拟提供目标函数. 这里, 我们收集了分别处于盆地不同区域的 16 口代表井(图

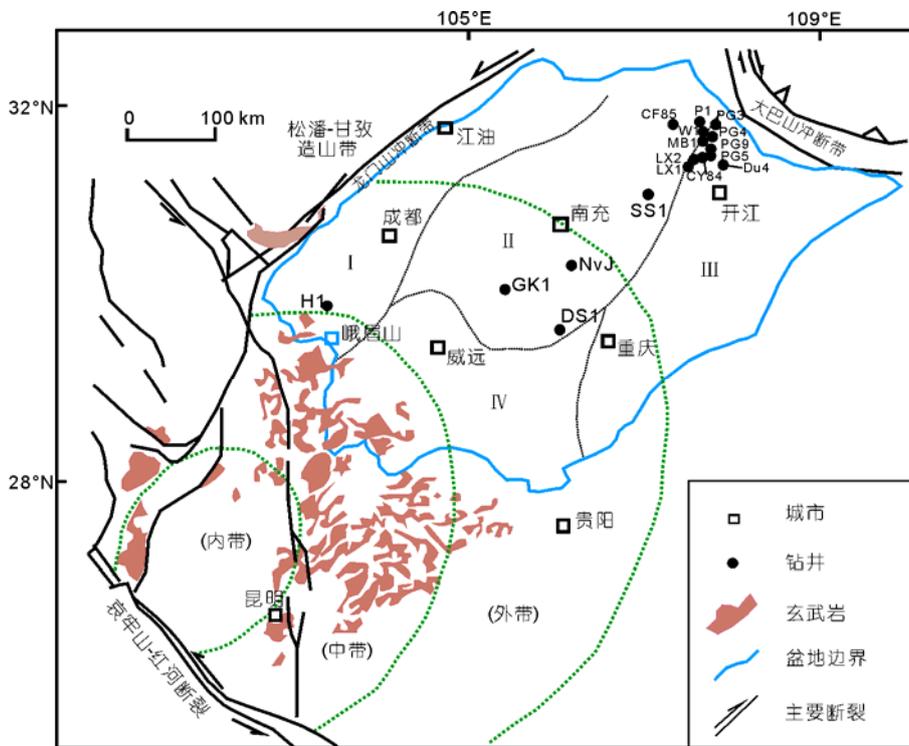


图 1 峨眉山玄武岩及四川盆地研究井的分布

I, 川西; II, 川中; III, 川东; IV, 川南. 修改自文献[3]

1), 采用回剥技术^[16,17]来计算二叠世-中三叠世的构造沉降史. 共有四口井位于峨眉山玄武岩的外带, 分别是 H1, GK1, NvJ 和 DS1. 其中 H1 井紧邻峨眉山玄武岩中带, 它是 20 世纪 80 年代初期完钻的一口区域探井, 且钻遇二叠系玄武岩. 玄武岩厚达 225 m, 与下伏下二叠统茅口组碳酸盐岩呈假整合接触.

在构造沉降史恢复时需考虑抬升剥蚀的影响. 据研究^[12], 峨眉山地幔柱中心的地壳抬升在 1300 m 左右, 中带在百米级, 至外带抬升剥蚀已不明显. 然而钻井 R₀ 数据所恢复的剥蚀量结果^[1,18]认为 H1 井不整合面的剥蚀量为 450 m, 该值可看作是此处剥蚀量的上限. 由于其他钻井所处地区剥蚀量普遍小于 100~150 m, 这里统一取剥蚀量 100 m.

构造沉降史结果如图 2. 其中图 2D 中的 8 口钻井由于钻探深度不够, 缺乏完整的资料, 只恢复了晚

二叠世以后的构造沉降史. 从构造沉降结果来看, 盆地沉降大致可分为两个阶段, 早、中二叠世沉降期与晚二叠世-中三叠世沉降期, 两个沉降期之间有一个快速隆升.

2.2 模型与参数

本文采用多期拉张模型^[19-21]来模拟四川盆地早二叠世-中三叠世的构造-热演化历史. 该模型假定由于岩石圈拉张减薄, 在 Airy 均衡模式作用下产生同裂谷期沉降. 同时由于岩石圈减薄, 热软流圈上涌引起热扰动. 随着拉张的结束, 热扰动逐渐衰减, 岩石圈冷却产生热沉降. 模型采用有限元方法在拉格朗日坐标系下求解热传导方程(1), 通过节点位移描述模型的构造形变, 节点温度描述温度场的演变, 进而模拟研究盆地的构造-热演化史, 详见文献^[19-21].

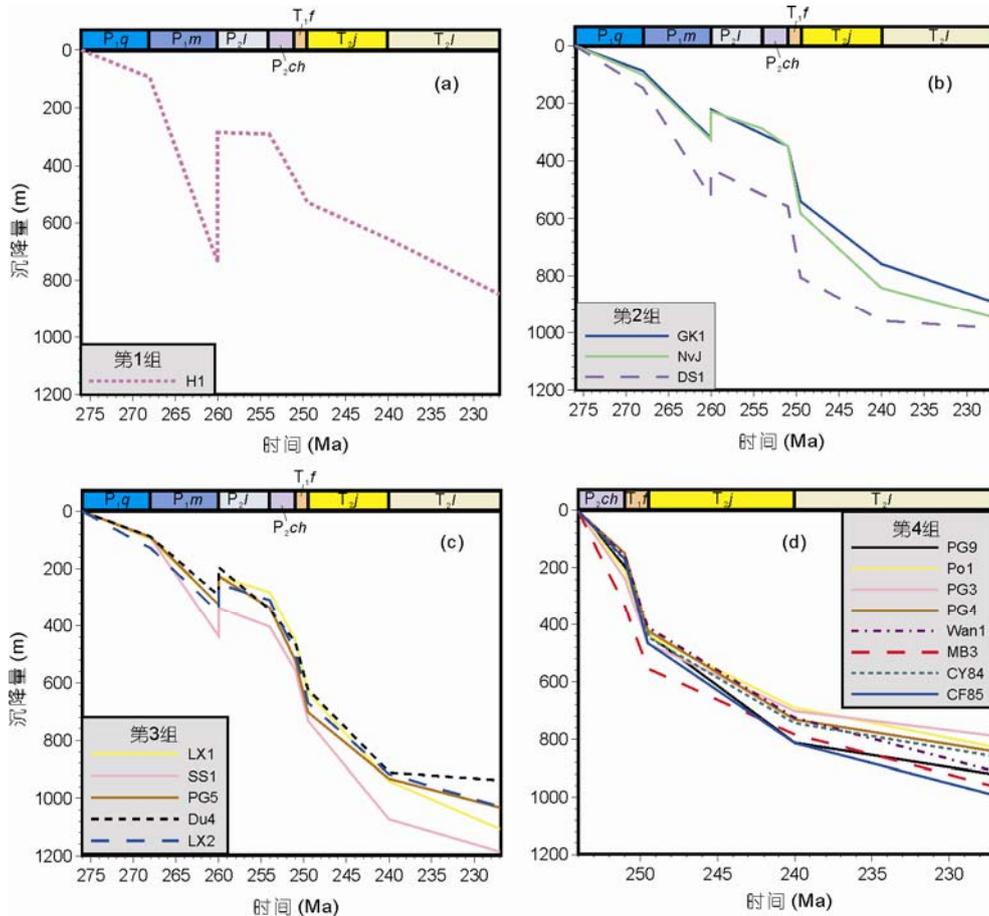


图 2 四川盆地各区域代表井构造沉降史

P_{1q}, 早二叠世栖霞组; P_{1m}, 早二叠世茅口组; P_{2l}, 晚二叠世龙潭组; P_{2ch}, 晚二叠世长兴组; T_{1f}, 早三叠世飞仙关组; T_{2j}, 早三叠世嘉陵江组; T_{2l}, 中三叠世雷口坡组. 下同

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + A, \quad (1)$$

其中 T 是温度, t 代表时间. ρ , c , λ 和 A 分别为密度、比热、热导率和放射性生热.

模型中的参数取值列于表 1. 其中上地壳的热导率与生热率均来自本次研究的 31 块露头样品测试结果, 其他参数来自文献. 与岩石热导率不同, 岩石生热率是随时间衰减的. 由于测试得到的是现今值, 而模拟计算的是早二叠世-中三叠世(275~227 Ma)的热历史, 因此依据公式(2)^[24]对现今生热率进行校正:

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda(t - t_0)), \quad (2)$$

其中 $\lambda = 3.0 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, A_0 是现今(t_0)的生热率. 上地壳的现今实测值为 $1.12 \mu\text{W m}^{-3}$, 校正后早二叠世-中三叠世的生热率为 $1.2 \mu\text{W m}^{-3}$. 中下地壳现今生热率为 $0.45 \mu\text{W m}^{-3}$ ^[23], 校正后为 $0.5 \mu\text{W m}^{-3}$.

我们将盆地的演化分为两个拉张期次: 早、中二叠世(276~260 Ma)与晚二叠世-中三叠世(260 Ma~227 Ma). 在第一期拉张结束后, 模型假定岩石圈有一瞬时抬升(东吴运动), 随后进入第二期拉张. 通过理论与实测构造沉降量的拟和, 就可以计算得到的各期拉张系数及热演化结果.

为了讨论初始地壳厚度对模拟结果的影响, 这里分别假定地壳厚度为 35, 30 和 25 km 进行模拟对比, 得到的理论构造沉降曲线和热流演化曲线如图 3. 显然, 不同的初始地壳厚度会导致不同的构造沉降路径和热流演化结果. 虽然地壳厚度的减小会降低地壳热流值从而造成初始基底热流的降低, 但在总构造沉降量不变的情况下, 地壳厚度越小则需要的拉

张量越大, 故而拉张造成的基底热流峰值越高. 当地壳厚度为 30 和 25 km 时, 模拟得到的热流峰值比地壳厚度为 35 km 时热流峰值高 2~8 mW m^{-2} , 分别不超过 3%和 14%. 但模拟结果显示, 当初始地壳厚度为 35 km 时, 模拟结果(图 3 中的黑色实线)能更好地拟和实测值. 因此, 在下面的模拟中, 我们选取 35 km 作为初始地壳厚度.

2.3 模拟结果

模拟结果显示, 早、中二叠世的岩石圈拉张呈现出自盆地南部向北部逐渐减弱的趋势(表 2), 岩石圈拉张系数介于 1.088 与 1.262. 该期拉张造成了栖霞组沉积和茅口组沉积.

在经历了短暂快速的抬升剥蚀后, 盆地进入第二期拉张. 第二期演化又可细分为三个阶段: 早期缓慢拉张、中期快速拉张、后期张后热沉降. 该期拉张系数变化在 1.122~1.303, 较前一期拉张强一些. 与第一期拉张特征相反, 该期拉张强度在盆地北部相对较强, 中部次之, 南部略弱.

盆地基底热流随时间的演化以及岩石圈温度场及其基底随时间的演化分别如图 4 和图 5. 结果显示, 早二叠世-中三叠世岩石圈温度场基本上处于增温状态. 随着拉张的持续和强度的增加, 岩石圈不断地减薄并被加热, 在此过程中, 盆地基底热流也随着时间总体上呈上升趋势(图 4). 盆地基底最高古热流出现在早三叠世, 约 60~62 mW m^{-2} , 相对初始值升高 20%. 总的来讲, 该时期拉张系数偏小, 岩石圈的减薄量有限, 受到的热扰动也不大. 因此, 区域岩石圈拉张对盆地基底热流造成的升高量很有限.

表 1 模型参数表

参数名称	参数取值	来源
初始岩石圈厚度 (km)	125	
初始地壳厚度 (km)	35	
0°C 地幔物质密度 (kg m^{-3})	3330	文献[20]
0°C 地壳物质密度 (kg m^{-3})	2800	文献[20]
地幔岩石热导率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2.9	文献[20]
中下地壳岩石热导率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2.6	文献[22]
上地壳 10 km 岩石热导率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	2.9	本文实测
中下地壳岩石生热率 ($\mu\text{W m}^{-3}$)	0.5	本文据文献[23]校正
上地壳 10km 岩石生热率 ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.2	本文实测并校正
热膨胀系数 (K^{-1})	3.28×10^{-5}	文献[20]
岩石圈底部温度 (°C)	1330	文献[20]

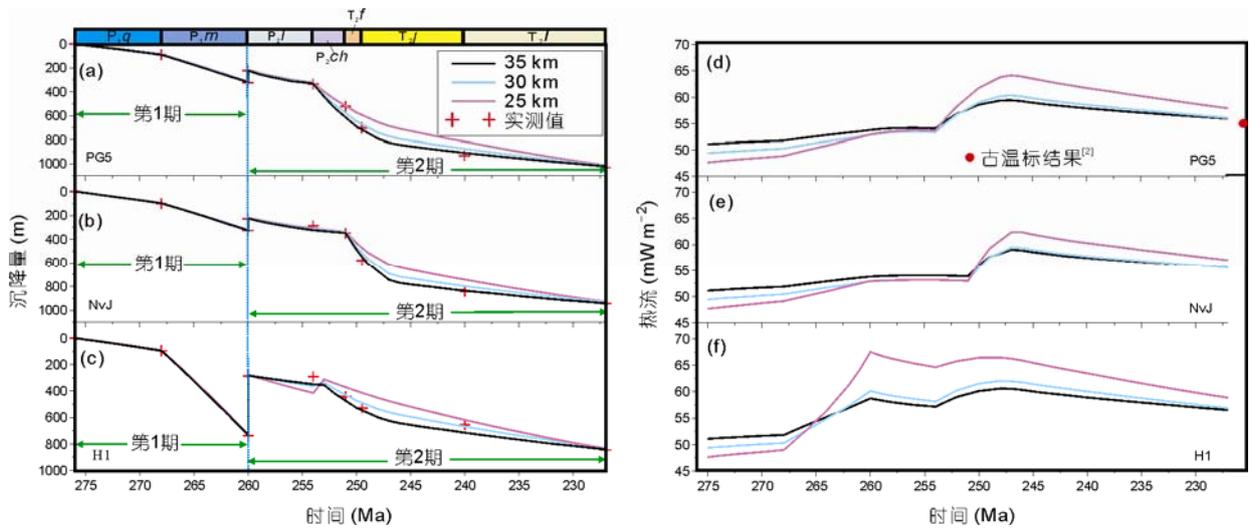


图3 基于不同的初始地壳厚度得到的构造-热演化模拟结果

(a)~(c)典型井构造沉降模拟结果与实测值的对比. 图中实线为模拟值, 十字为实测值. (d)~(f)基底热流随时间的演化

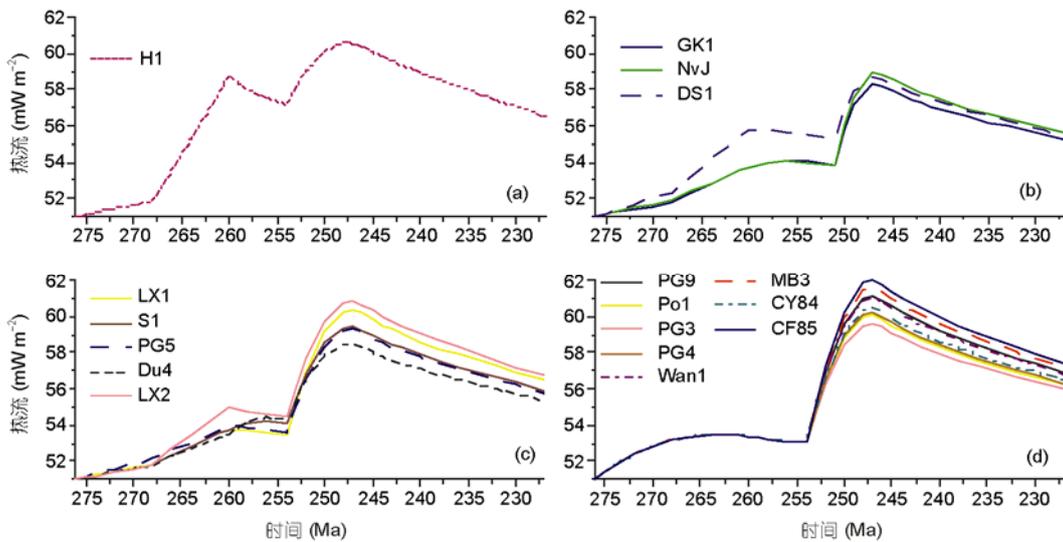


图4 四川盆地模拟井二叠纪-中三叠世基底热流随时间的演化

3 峨眉山玄武岩的热效应

峨眉山玄武岩是指分布于扬子克拉通西缘, 云南、四川和贵州境内的晚二叠世玄武岩, 其西界为哀牢山-红河断裂, 西北则以龙门山-小菁河断裂界. 同时在地震剖面上显示^[25], 在地壳底部有厚度数千千米到十几千米的高速异常体, 研究表明这些异常体是由地幔岩浆底侵而形成的. 因此, 许多学者认为在晚二叠世该区域有一次地幔柱活动^[11,13]. 本研究建立

一数值模型来模拟地幔柱的活动过程及其对四川盆地热历史的影响.

地幔柱活动是地球深部的高温热物质上涌到岩石圈底部和岩石圈相互作用的过程. 同时, 地幔柱活动将引起大量的岩浆活动, 导致岩浆喷发. 在岩浆喷发的同时还有大量的岩浆侵入到壳幔边界等层位. 基于目前的地质地球物理观测资料及认识^[25], 我们设计一理论模型来模拟地幔柱对岩石圈热结构的影响. 该二维模型长 1000 km, 宽 600 km (图 6(a)). 模

表 2 模拟井拉张系数

井	β_1	β_2	β_{Σ}
H1	1.262	1.122	1.416
GK1	1.098	1.167	1.247
NvJ	1.099	1.186	1.281
DS1	1.169	1.125	1.315
LX1	1.098	1.244	1.366
SS1	1.137	1.227	1.395
PG5	1.098	1.217	1.336
Du4	1.088	1.153	1.254
LX2	1.105	1.205	1.331
PG9	1.100	1.273	1.400
Po1	1.100	1.236	1.360
PG3	1.100	1.222	1.344
PG4	1.100	1.242	1.366
Wan1	1.100	1.269	1.396
MB3	1.100	1.289	1.418
CY84	1.100	1.250	1.375
CF85	1.100	1.303	1.433

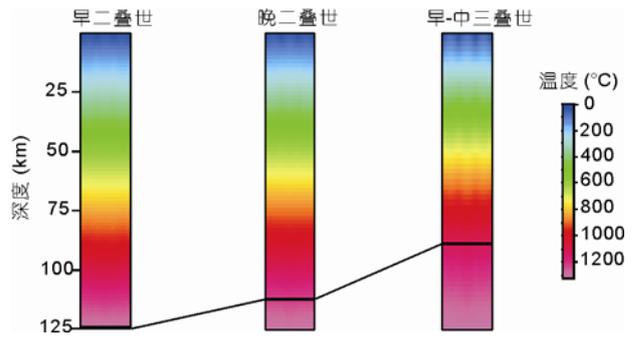


图 5 早二叠世-中三叠世岩石圈温度场及底界的演化
基于 SS1 井结果

型上边界为温度边界, 这里取 20°C , 下边界为 600 km 间断面, 温度 1600°C . 地幔柱柱头宽 400 km (内带), 温度取低钛玄武岩的形成温度 1550°C [13]. 宽底

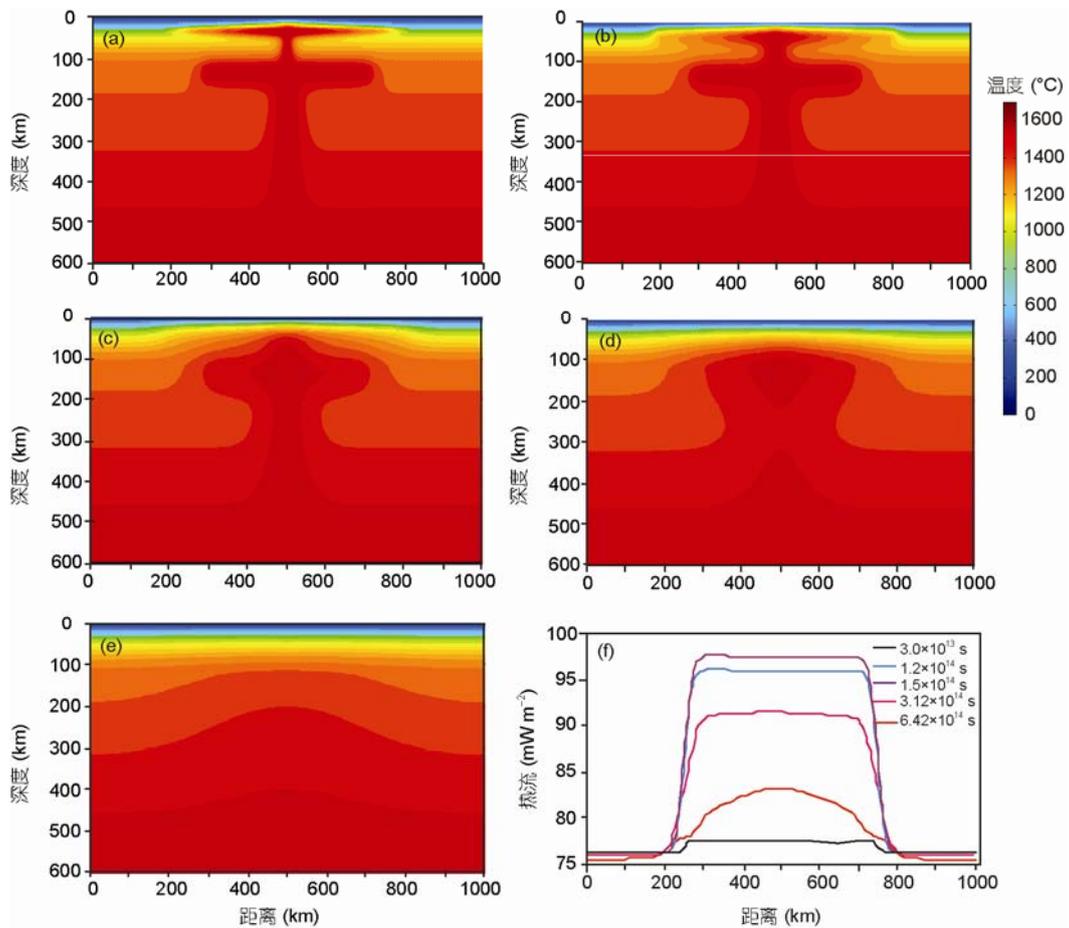


图 6 地幔柱理论模型及热演化特征

(a) 地幔柱形成、岩浆侵入壳幔边界; (b)-(e) 分别是 10, 20, 50 和 80 Ma 时岩石圈温度场; (f) 地表热流随时间的衰减

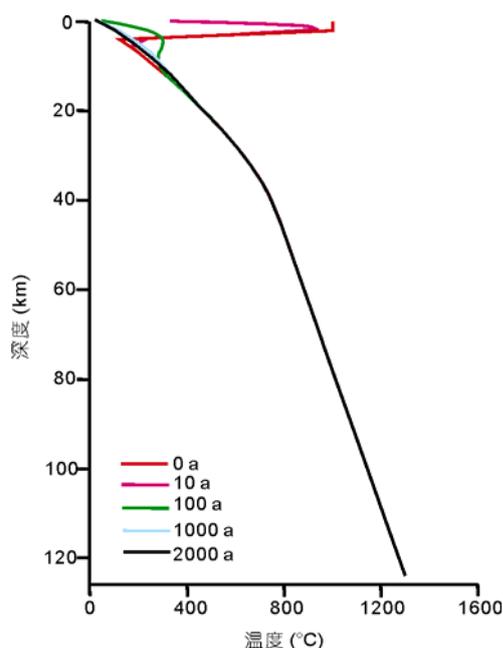


图7 喷发到四川盆地地表的岩浆对下伏岩石圈温度场的影响

侵至壳幔边界的岩浆范围为 600 km 宽(中带), 厚度 20 km, 温度 1300°C。

模拟结果表明地幔柱活动对岩石圈热结构具有很大的影响(图 6)。影响主要在地幔柱的头部上方(内带), 在中心地区最高热流可达到近 100 mW m^{-2} , 该影响持续时间很长, 直到 60~80 Ma 后才逐渐消除。地幔柱活动对中带也有一定的影响, 但在 10 Ma 后影

致谢 感谢朱传庆博士提供的资料, 以及胡圣标、施小斌研究员在多次会议中的讨论给予本文写作的灵感。同时, 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景. 地球物理学报, 2005, 48: 1110-1116
- 2 邱楠生, 秦建中, McInnes B I A, 等. 川东北地区构造-热演化探讨——来自(U-Th)/He 年龄和 R_0 的约束. 高校地质学报, 2008, 14: 223-230
- 3 朱传庆, 田云涛, 徐明, 等. 峨眉山超级地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响. 地球物理学报, 2010, 53: 119-127
- 4 朱传庆, 徐明, 袁玉松, 等. 峨眉山玄武岩喷发在四川盆地的地热学响应. 科学通报, 2010, 55: 474-482
- 5 张若祥, 王兴志, 蓝大樵, 等. 川西南地区峨眉山玄武岩储层评价. 天然气勘探与开发, 2006, 29: 17-21
- 6 冯仁蔚, 王兴志, 张帆, 等. 四川西南部周公山及邻区“峨眉山玄武岩”特征及储集性能研究. 沉积学报, 2008, 26: 913-924
- 7 刘和甫, 李景明, 李晓清, 等. 中国克拉通盆地演化与碳酸盐岩-蒸发岩层序油气系统. 现代地质, 2006, 20: 1-18
- 8 马永生. 中国海相油气勘探. 北京: 地质出版社, 2007
- 9 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30: 89-96
- 10 陈维涛, 周瑶琪, 马永生, 等. 关于龙门山地区东吴运动的存在及其性质的认识. 地质学报, 2007, 81: 1518-1525

响消失。而四川盆地所处的外带及以外地区受到的影响很小。然而, 喷发到盆地地表的岩浆会对盆地温度场产生较大影响(图 7)。模拟结果显示, 其温度影响主要集中在浅层, 持续的时间较短, 在 100~1000 a 之间。事实上, 目前关于峨眉山地幔柱是否存在还有很大争议^[26]。即使峨眉山地幔柱存在, 从我们的数值模拟结果来看, 也不会对整个四川盆地的热演化造成严重影响。

4 结论

(1) 利用多期拉张模型, 模拟研究了早二叠世-中三叠世区域岩石圈拉张对四川盆地构造-热演化的影响。模拟结果显示, 在拉张作用下岩石圈温度场基本上处于增温状态, 盆地基底热流也随时间整体呈增加趋势。但由于拉张系数较小, 岩石圈的减薄量有限, 受到的热扰动也不大。最大基底古热流出现在早三叠世, 约 $60\sim 62 \text{ mW m}^{-2}$ 。

(2) 地幔柱模型表明, 地幔柱活动对岩石圈热状态具有很大的影响, 其影响主要体现在地幔柱的头部上方(内带), 而四川盆地所处的外带及以外地区受到的影响很小。部分喷发到盆地地表的岩浆对浅层温度场会有剧烈的影响, 但影响时间和范围均有限。古温标所记录的异常高温可能与喷发到地表的岩浆有关。

(3) 早二叠世-中三叠世四川盆地热演化主要受区域岩石圈拉张控制, 但在川西南局部地区又叠加了峨眉山玄武岩的热效应。

- 11 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据. *地质学报*, 2003, 77: 194–202
- 12 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度. *大地构造与成矿学*, 2005, 29: 316–320
- 13 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. *地球化学*, 2001, 30: 1–9
- 14 Van Wees J D, Arche A, Bejldorff C G, et al. Temporal and spatial variations in tectonic subsidence in the Iberian Basin (eastern Spain): Inferences from automated forward modelling of high-resolution stratigraphy (Permian-Mesozoic). *Tectonophysics*, 1998, 300: 285–310
- 15 Hu S, O’Sullivan P B, Raza A, et al. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China: A Cenozoic rifted and local pull-apart basin. *Phys Earth Planet Inter*, 2001, 126: 221–235
- 16 Sclater J G, Christie P A F. Continental stretching: An explanation of the post-mid-Cretaceous subsidence in the North Sea Basin. *J Geophys Res*, 1980, 85: 3711–3739
- 17 Loup B. Sea-level changes and extensional tectonics in the Lower Jurassic of the northern Helvetic realm (western Switzerland). In: Frostyck L E, Steel R J, eds. *Tectonic Controls and Signatures in Sedimentary Basins*. *Int Ass Sediment (Special Publ)*, 1993, 20: 129–159
- 18 朱传庆, 徐明, 单竞男, 等. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量. *中国地质*, 2009, 36: 1268–1277
- 19 何丽娟. 辽河盆地新生代多期构造热演化模拟. *地球物理学报*, 1999, 42: 75–82
- 20 He L J, Wang K L, Xiong L P, et al. Heat flow and the thermal history of the South China Sea. *Phys Earth Planet Inter*, 2001, 126: 211–220
- 21 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旸, 等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2000, 30: 415–419
- 22 Govers R, Wortel M J R. Initiation of asymmetric extension in continental lithosphere. *Tectonophysics*, 1993, 223: 75–96
- 23 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. *四川盆地形成与演化*. 北京: 地质出版社, 1996
- 24 Jaupart C, Mareschal J C, Guillou-Frottier L. Heat flow and thickness of the lithosphere in the Canadian Shield. *J Geophys Res*, 1998, 103: 15269–15286
- 25 Xu Y, He B. Thick, high-velocity crust in the Emeishan large igneous province, southwestern China: Evidence for crustal growth by magmatic underplating or intraplating. *The Geological Society of America Special Paper*, 2007, 430: 841–858
- 26 刘成英, 朱日祥. 试论峨眉山玄武岩的地球动力学含义. *地学前缘*, 2009, 16: 52–69