

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(1): 119~127, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.013

Zhu C Q, Tian Y T, Xu M, et al. The effect of Emeishan supper mantle plume to the thermal evolution of source rocks in the Sichuan basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(1): 119~127, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.013

# 峨眉山超级地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响

朱传庆<sup>1,2</sup>, 田云涛<sup>1,2</sup>, 徐 明<sup>1,2</sup>, 饶 松<sup>1,2</sup>,

袁玉松<sup>3</sup>, 赵永庆<sup>4</sup>, 胡圣标<sup>1</sup>

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国石化石油勘探开发科学研究院, 北京 100083

4 中国石化勘探南方分公司, 成都 610041

**摘 要** 四川盆地的构造、热演化与峨眉山超级地幔柱有密切关系. 峨眉山超级地幔柱对四川盆地中二叠统之下的烃源岩热演化有着十分重要的影响. 在四川盆地热历史恢复的基础上, 研究了峨眉山超级地幔柱对盆地内烃源岩, 特别是中二叠统之下的古生界烃源岩热演化的影响. 结果表明, 中二叠统及下伏烃源岩的热演化受中晚二叠世发生在盆地西南方向的峨眉山超级地幔柱的影响巨大, 且具地区差异性. 即在靠近峨眉山地幔柱中心的地区, 有机质迅速成熟并达到其成熟度的最高值(以 H1 井为代表), 古生界烃源岩迅速进入过成熟, 此后未有二次生烃; 而远离峨眉山地幔柱的盆地大部分地区, 古生界烃源岩在二叠纪以来具有多次生烃过程. 中生界烃源岩热演化, 主要和前陆盆地阶段的构造过程包括前陆沉积和断裂的逆冲推覆等相关. 在烃源岩有机质成熟度演化史的基础上, 从盆地热史和烃源岩热演化的角度指出了下二叠统及之下烃源层在四川盆地不同地区油气勘探中的不同意义.

**关键词** 烃源岩热演化, 镜质体反射率, 古热流法, 峨眉山超级地幔柱, 四川盆地

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.013

中图分类号 P314

收稿日期 2009-11-03, 2010-01-07 收修定稿

## The effect of Emeishan supper mantle plume to the thermal evolution of source rocks in the Sichuan basin

ZHU Chuan-Qing<sup>1,2</sup>, TIAN Yun-Tao<sup>1,2</sup>, XU Ming<sup>1,2</sup>, RAO Song<sup>1,2</sup>,

YUAN Yu-Song<sup>3</sup>, ZHAO Yong-Qing<sup>4</sup>, HU Sheng-Biao<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 The Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

4 Exploration Department of South Company of Prospecting, SINOPEC, Chengdu 610041, China

**Abstract** Both the structural evolution and thermal history of the Sichuan Basin are closely related to the Emeishan Supper Mantle Plume (ESMP). The ESMP played an important role on the thermal evolution of the source rocks in the Sichuan basin. On this basis of the thermal history of the Sichuan basin, reconstructed based on vitrinite reflectance ( $R_o$ ) from boreholes in the basin using a paleo-heat flow method, the effect of the ESMP to the evolution of the Paleozoic

source rocks is studied. The results show that in the southwestern Sichuan Basin (the central of the ESMP) the evolution of organic matter of the Paleozoic source rocks, which became mature in middle Late Permian, was strongly affected by the ESMP. In more detail, in the region close to the ESMP (southwestern Sichuan Basin), the source rocks of lower Permian was heated to peak maturity (maximum  $R_o > 3\%$ ) at around 260 Ma (from the beginning of the Late Paleozoic to the end of the early Permian) and later there was no secondary hydrocarbon generation. However, in the regions (northeastern Sichuan Basin) far away from the ESMP, secondary hydrocarbon generation of the source rocks existed. The thermal evolution of the Mesozoic source rocks was related with Mesozoic foreland basin evolution-regional denudation and burial history of the basin, rather than the ESMP. Therefore, expect the regions far away from the ESMP; the prospect of oil and gas sourced from Paleozoic source rocks is unfavorable in the regions close to the ESMP.

**Keywords** Thermal evolution, Vitrinite reflectance, Paleo-heat flow method, Emeishan super mantle plume, Sichuan Basin

## 1 引言

油气盆地沉积岩层内的有机质成熟并向烃类转化,在这一过程中温度起着关键的作用.有机质演化过程中化学反应的速率与温度呈指数关系,而时间只是线性关系,所以有机质的成熟度主要受温度的控制<sup>[1, 2]</sup>.而且,盆地的热状态控制着油气的排出、运移、聚集以及保存等其他过程<sup>[3]</sup>,所以盆地的油气成藏与温度有着十分密切的关系.

地层的古地温受盆地的构造运动、沉积埋藏以及基底热流等因素控制,同时还与岩石热导率、沉积物中的放射性元素生热率等多种岩石物性参数有关.在盆地形成演化的漫长过程中,有时可能发生一些突发性的地质事件,如:岩浆的侵入、深部高温流体的上涌、盐丘的侵入等<sup>[4]</sup>.这些事件的发生使得盆地的热演化会经历一个突变的异常演化阶段<sup>[3]</sup>,其中影响较大的是岩浆的侵入.大批的学者曾通过数值模拟的方法研究过岩浆侵入对温度场的影响,或者通过实测资料发现了岩浆侵入等因素造成的古温标剖面的异常<sup>[3, 5~11]</sup>.虽然岩浆活动在整个盆地形成发育的地质历史时期中是短暂的、突发性的,但是岩浆的温度比围岩的温度高很多,这样就可能会对盆地的热演化过程产生很大的影响,因此在研究盆地沉积物有机质成熟度及油气储层评价中必须考虑岩浆的作用<sup>[3, 5]</sup>.目前,异常热作用如火山喷发、岩浆侵入对沉积有机质演化的影响已广泛地受到重视<sup>[8~11]</sup>.

然而,前人的研究大多仅着眼于局部的岩浆作

用对围岩温度场、有机质演化的影响.而由于岩浆侵入体的规模较小,其影响范围也是相对有限的,对于整个沉积盆地的热状态和有机质演化来说,只能作为局部因素考虑.岩浆来源于深部的岩浆房,岩浆房的分布要远比岩浆侵入带的分布范围广,所以由岩浆房直接传递上来的热对地区的热演化有一定程度的影响,而且影响时间也要比岩浆侵入的影响时间长<sup>[3]</sup>.特别是超级地幔柱发育的地区,岩浆房可造成几百公里范围的穹状隆起<sup>[12~17]</sup>,其对上覆岩层的烘烤加热,使大范围内的温度场发生改变.

四川盆地是我国重要的油气盆地,地理位置上靠近我国惟一被世界学术界承认的大火成岩省:峨眉山玄武岩<sup>[18, 19]</sup>.近年来,学术界通过各种研究手段证明了峨眉山玄武岩的地幔柱成因<sup>[12~17, 20~25]</sup>.笔者等也曾就峨眉山超级地幔柱对四川盆地的地热学效应进行过讨论<sup>[26]</sup>.本文在峨眉山超级地幔柱对四川盆地热效应研究的基础上,以先进的理论方法为指导,运用 Thermodal for windows2008 软件,模拟了钻井的烃源岩成熟度史,在此基础上,讨论了峨眉山超级地幔柱对盆地内烃源岩,特别是中二叠统之下的古生界烃源岩热演化的影响.

## 2 地质背景

峨眉山大火成岩省位于扬子板块的西缘,紧邻三江构造带,其西以哀牢山—红河断裂为界与羌塘板块相邻,西北则以龙门山—小菁河断裂为界.峨眉山玄武岩出露面积  $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ .前人运用地幔柱上升引起地壳抬升的理论,通过对上扬子茅口组剥

蚀、不整合面特征和岩浆活动等方面的综合研究,结合对华南地区二叠纪的地层、沉积和岩相古地理等方面综合分析,提出上扬子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,峨眉山玄武岩的喷发是东吴运动在上扬子西缘最突出的表现的观点<sup>[13,27]</sup>.并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<sup>[13~17]</sup>(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.

四川盆地是一个在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地,经历了古生代一早中生代早期克拉通拗陷阶段(位于上扬子克拉通西部)和晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地阶段<sup>[28]</sup>.盆地从加里东期以来受到了多期构造运动的影响.四川盆地西南部处于峨眉山超级地幔柱的“中带”,川中及川南地区处于“外带”(图1).因此,在中晚二叠世之间的峨眉山超级地幔柱活动,也对盆地的构造、热演化产生了重要影响.峨眉山超级地幔柱是四川盆地古生界

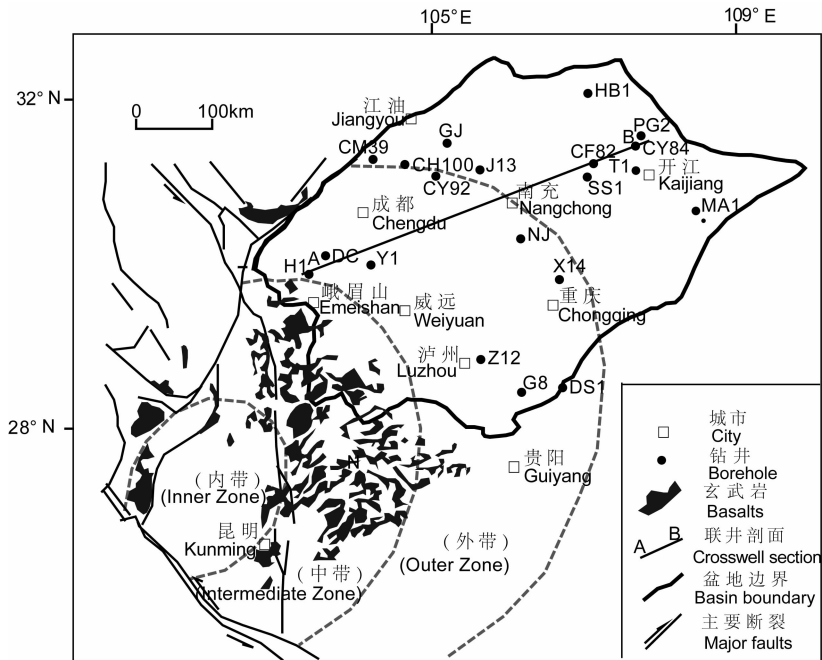


图1 峨眉山玄武岩及四川盆地主要钻井分布图(据文献<sup>[12~17]</sup>修改)

Fig. 1 Geology of the Emeishan large igneous province and the boreholes in the Sichuan basin (modified from Refs. <sup>[12~17]</sup>)

热体制的控制因素<sup>[26]</sup>.

四川盆地发育多套烃源岩,震旦系灯影组藻白云岩,下寒武统黑色炭质页岩,泥质岩及碳酸盐岩,志留系暗色泥质岩夹生物灰岩,二叠系生物灰岩及含煤层系,下三叠统暗色灰岩,中三叠统深色灰岩等层段,都具有生油气条件;陆相上三叠统暗色泥质岩及含煤层系、侏罗系自流井群暗色泥质岩及介壳灰岩是良好的生油层;同时,烃源层的分布和对油气生成的贡献,在不同的地区亦有所差异<sup>[29~32]</sup>.

### 3 数据与研究方法

#### 3.1 镜质体反射率( $R_o$ )数据

镜质体反射率( $R_o$ )是目前公认的、并得到广泛应用的有机成熟度指标<sup>[33]</sup>,在恢复含油气盆地热

史、研究烃源岩热演化、生烃期次等方面取得了广泛的应用.

四川盆地在中晚三叠世经历了由海相沉积向陆相沉积的转换<sup>[28,30~32]</sup>.上三叠统及之上的地层为陆相沉积,地层中的 $R_o$ 数据可以直接作为恢复热史的指标.中三叠统之下,特别是二叠系及之下的海相沉积地层中的镜状体,又称海相镜质体(marine vitrinite),是我国下古生界高过成熟烃源岩中常见的显微组分.其形态似镜质体,热演化行为类似受抑制镜质体,镜状体反射率可以作为早古生代地层的成熟度指标<sup>[33]</sup>.

前人对于各种有机质古温标之间的等效换算也作了一些有意义的研究工作<sup>[34~39]</sup>.因此,在进行古地温恢复之前,根据前人所取得的镜状体反射率与镜质组反射率的方程,计算出等价 $R_o$ ,将镜状体反

射率作为有效的古温标用于热史恢复. 图 2 为部分重点研究井的  $R_o$  值的深度分布,  $R_o$  值分布在 0.5%~3.9% 之间, 与深度的相关性很好.

### 3.2 热史与成熟度史反演方法

基于古温标的盆地热史恢复方法主要有随机反演法、古地温梯度法和古热流法<sup>[33]</sup>. 本文主要采用古热流法进行热史恢复.

古热流法的出发点是影响地层温度史的因素是已知的且是可以定量描述的. 盆地内地层的热史(地温史)主要受地层埋藏和盆地热流影响, 其次还受到火山岩浆和地下流体活动等非稳态热效应的影响. 地层中的  $R_o$  值就记录了地层的埋藏史和盆地的热流史. 确定各剥蚀层的剥蚀厚度后, 可通过现今残留地层厚度的回剥来恢复地层埋藏史, 从而可以模拟与之伴随的沉积或剥蚀等非稳态热过程, 恢复热流史.

反演过程中采用的模型为平行化学反应模型(EASY%  $R_o$ )<sup>[40]</sup>. 反演前先将反演井剖面按实际地层和不整合分为若干构造层, 每一构造层内至多有两个未知量: 剥蚀厚度( $H_e$ )和剥蚀开始时的热流值( $Q_i$ ). 然后, 从最上一个构造层开始, 自上而下逐层反演. 由于古热流模型采用分段线性模型, 现今热流和岩石热导率、比热及密度都是已知的, 因此反演时间段( $t_i$ )之前  $t_{i-1}$  段内任意时刻( $t$ )的热流( $Q_{(t)}$ )为:

$$Q_{(t)} = Q_{i-1}(1 + \lambda_i \Delta_{ii}),$$

$$\lambda_{i-1} = (Q_i - Q_{i-1})/\Delta_{ii},$$

$$\Delta_{ii} = t_i - t_{i-1},$$

式中,  $Q_{i-1}$  为  $t_{i-1}$  时刻的热流值,  $\lambda_{i-1}$  为  $\Delta_{ii}$  时间段内的热流变化率. 通过二分法或非线性牛顿迭代法对  $H_e$  和  $Q_i$  进行迭代, 以使构造层内实测  $R_o$  值与相应的 EASY%  $R_o$  理论模型计算值达到最佳拟合,  $H_e$  和  $Q_i$  即可同时确定.

烃源岩热演化史, 或者说烃源岩成熟度史, 指烃源岩在不同地质时期的成熟度状况, 它主要由地层温度史决定. 根据已获得的盆地热流史, 结合地层埋藏史, 即可得到不同层位的地温史(即地层埋藏过程中的  $T-t$  路径或轨迹. 根据地层的热史路径和  $R_o$  动力学模型<sup>[40]</sup>, 可计算出表征地层中有机质成熟度状态的  $R_o$  值随时间的演化, 即地层中有机质的成熟度史.

## 4 烃源岩热演化与峨眉山超级地幔柱

四川盆地热历史可大致以 259 Ma 为界分为中

二叠世之前的热流升高阶段和晚二叠世之后的热流降低阶段. 259 Ma 之前的热流升高与以峨眉山超级地幔柱的发育和玄武岩喷发为代表的东吴运动有关, 峨眉山超级地幔柱是四川盆地古生代热历史的主要影响因素<sup>[26]</sup>. 峨眉山玄武岩喷发结束后, 四川盆地大规模的岩浆活动较少, 热史特征主要受控于构造、沉积活动, 受控于前陆盆地的发展演化. 由于烃源岩有机质的成熟度主要受温度控制, 因此, 其演化特征也与热史密不可分.

### 4.1 代表性钻井烃源岩演化特征

图 3、图 4 表示了 H1 井、CY84 井烃源层的成熟度史. 由该图可以看出, H1 井下二叠统(及下伏古生代烃源岩)由于受到峨眉山超级地幔柱热效应的影响, 短时间内经历了超高古地温, 因此具有一次性生烃, 且生烃时代久远( $P_2$  之前)的特点. CY84 井, 中、下二叠统(和下伏古生代烃源岩)的演化受峨眉山超级地幔柱的影响不明显, 与埋藏史相关程度较高, 存在二次或多次生烃. 从石油地质学的角度讲, 川东北地区古生界烃源岩的这种演化特征对油气成藏更为有利.

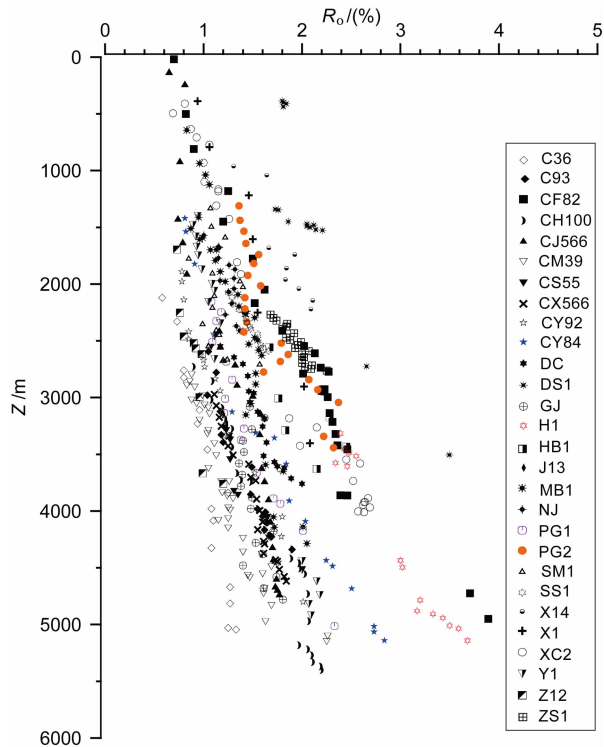
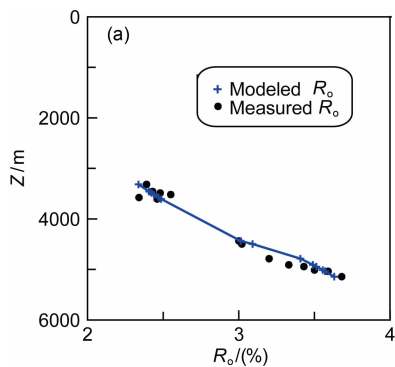
### 4.2 下二叠统烃源岩剖面演化特征

本次研究还分析了过 H1-J13-PG2 等井的跨越盆地西南、西北、川中、川东北区域的剖面(图 1)上成熟度随时间的演化规律. 该条剖面跨越了峨眉山超级地幔柱的中带和外带, 穿过了多个构造区, 因此, 可以较明显地看出峨眉山超级地幔柱对盆地烃源岩热演化的影响.

图 5 为该条剖面的烃源岩成熟度演化. 由图中可以看出, 川西南(H1 井)地区的有机质在 270 Ma 左右迅速生烃,  $R_o$  值在 260 Ma 左右即达到 3.0% 以上, 进入过成熟状态. 该套烃源层在盆地其他地区的演化则主要和埋藏史有关, 大致在 200 Ma 时,  $R_o$  值达到 1.0%, 进入成熟晚期. 川西北、川中、川东北等地区, 由于后期前陆盆地的发育, 沉积埋藏较厚, 有机质的最终成熟度较高,  $R_o$  值超过了 2%. 川南(威远古隆起)地区, 由于后期地层沉积较薄, 最终有机质成熟度较低,  $R_o$  值在 1.2% 左右, 处于成熟晚期.

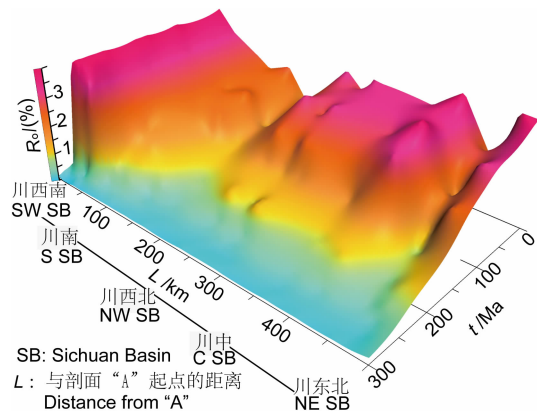
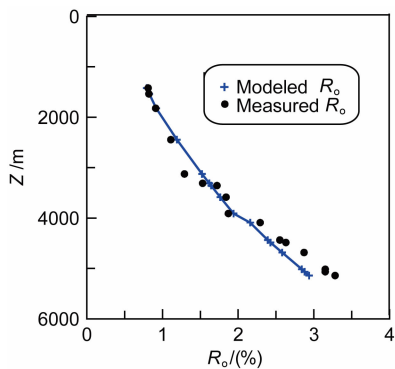
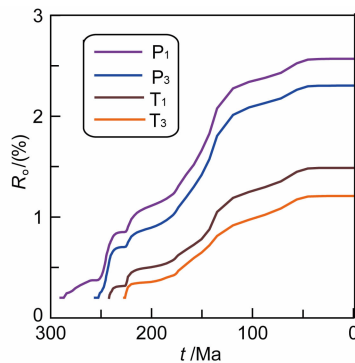
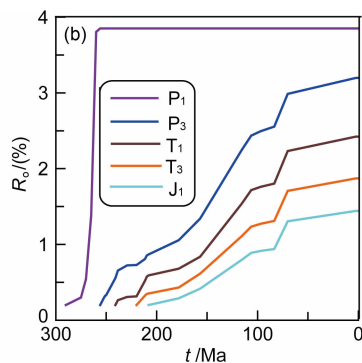
### 4.3 下二叠统烃源岩平面演化特征

二叠系烃源岩在盆地内广泛发育<sup>[41~46]</sup>, 因此, 需从全盆角度考虑一下该套烃源岩的温度史及有机质成熟度演化. 由于峨眉山玄武岩的喷发发生在中晚二叠世, 因此, 峨眉山超级地幔柱的孕育、玄武岩的喷发等过程产生的热效应, 都可能对下二叠统烃

图2 四川盆地钻井  $R_o$  值深度分布Fig. 2 Relationship between  $R_o$  values and depth图3 H1井  $R_o$  模拟值与实测值对比图(左)和烃源岩成熟度史(右)Fig. 3 Modeled and measured  $R_o$  values (left panel) and maturation history of the source rocks (right panel) of the Well H1

源岩的有机质成熟度演化产生影响,甚至构成控制性的影响因素。

图6展示了四川盆地下二叠统的古地温史。在距今275 Ma时,该套烃源层的温度在40~70°C之间,盆地西南部温度较中北部高。至260 Ma,即峨眉山玄武岩喷发时期,H1井所处的距离峨眉山超级地幔柱中带较近的四川盆地西南部的温度迅速升高

图5 H1-J13-PG2 联井剖面下二叠统烃源岩成熟度演化  
Fig. 5 Maturation history of the low Permian source rocks of the section crossing H1, J13 and PG2 boreholes图4 CY84井  $R_o$  预测值与实测值对比图(左)和烃源岩成熟度史(右)Fig. 4 Modeled and measured  $R_o$  values (left panel) and maturation history of the source rocks (right panel) of the Well CY84

到 150℃ 以上, 至 250 Ma 时, 随着岩浆活动的结束, 地层温度又迅速降低至 60~70℃ 之间. 250 Ma 之后, 盆地范围的岩浆活动不发育, 各构造区域的热背景较为接近, 因此, 地层的温度主要和埋藏深度有关. 后期沉积厚的地区, 下二叠统的温度也相应增高. 因此, 川西和川北地区等因龙门山前陆盆地、大巴山前陆盆地发育而造成三叠系、侏罗系等沉积较厚的地区<sup>[46]</sup>下二叠统的埋深增加快、后期埋藏深, 温度也较别的地区高. 这个特征在现今下二叠统的地温分布更为明显: 川西北下二叠统的温度达到了

170℃ 以上, 而川东南等后期地层沉积少或沉积后发生剥蚀作用, 现今二叠系埋藏浅(甚至出露)的地区, 下二叠统的温度则较低, 在 70℃ 之下.

由于峨眉山玄武岩喷发的热效应, 四川盆地西南部的下二叠统烃源岩有机质迅速演化, 岩浆活动结束后, 即在距今 256 Ma 时, 盆地西南部该套地层的  $R_o$  值已达到 1.0% 以上, 进入成熟晚期. 而盆地其他地区, 受岩浆活动的影响并不强烈,  $R_o$  值在 0.3%~0.6% 之间, 未进入生油窗或处于低成熟状态(图 7).

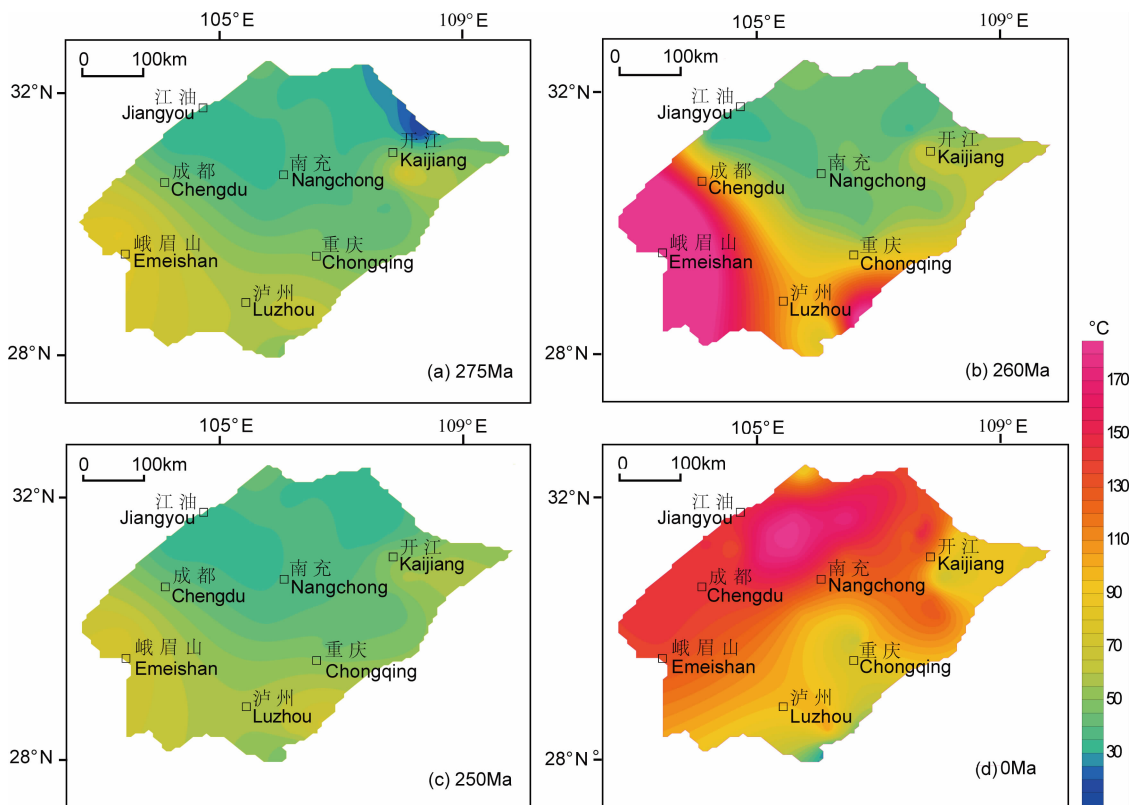


图 6 四川盆地下二叠统不同时期温度平面图

Fig. 6 Temperature distribution of the low Permian in different times in the Sichuan basin

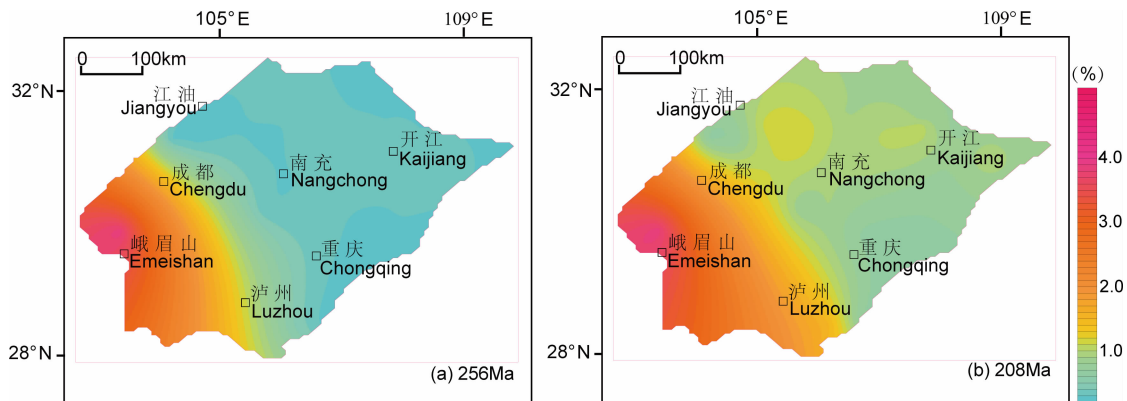


图 7 256 Ma(左)和 208 Ma(右)四川盆地下二叠统烃源岩有机质成熟度

Fig. 7 The maturation of the low Permian source rocks at 256 Ma (left panel) and 208 Ma (right panel) respectively in the Sichuan basin

256 Ma 之后,随着岩浆活动的结束,下二叠统烃源层的地层温度主要和埋藏深度,也即后期地层沉积厚度有关<sup>[46]</sup>,因此,有机质演化程度,也与之具有一致的关系。图 7 显示,在中侏罗纪末,川西、川北等沉积较厚的地区,烃源岩随埋藏加深而进一步演化(有机质生烃),下二叠统烃源岩有机质演化程度也较高, $R_o$  值在 1%~1.2% 之间,进入了成熟晚期。除了该地区 and 盆地西南部的其余区域, $R_o$  值仍在 1.0% 之下。而盆地西南部,由于下二叠统在 260 Ma 受岩浆活动影响,经历了较高的古地温,后期的温度远小于岩浆烘烤时的温度,有机质演化程度没有较大改变,也即没有再发生生烃过程。特别是峨眉山地区,有机质的  $R_o$  值已达 3.0% 以上,进入过成熟状态,在后期漫长的地质历史中,成熟度未再增加。

## 5 结 论

峨眉山超级地幔柱是四川盆地经历的最重要构造-热事件,对四川海相油气,尤其是下古生界油气成藏有非常重要的意义:从盆地热史和烃源岩热演化的角度看,峨眉山超级地幔柱影响区的中二叠统及下伏烃源岩在峨眉山玄武岩喷发期即已达到其成熟度的最大值,生烃期早,不利于油气的保存,故这一地区应以三叠纪-侏罗纪烃源岩形成的油气为勘探目标;而峨眉山超级地幔柱影响区以外的地区,中-下组合的海相烃源岩存在晚二叠世以来的二次生烃,如果成藏条件具备,应具有较大勘探潜力。

对烃源岩热演化区域差异研究的精度受制于钻井数据的数量和质量,本文的研究成果仅是在目前收集到的钻井数据上所取得的成果。随着资料的丰富、研究的深入,对峨眉山超级地幔柱与四川盆地古生界烃源岩演化差异的时空关系的认识将会更加清晰。

**致 谢** 感谢汪集旸院士等在研究过程中予以的指导,感谢徐义刚研究员等提供峨眉山玄武岩研究的相关资料,感谢中石化勘探南方分公司及研究院、中石化西南油气分公司研究院在资料收集、样品采集方面提供的帮助。古温标反演方法上得益于与课题组诸多老师、同学的探讨,一并致谢。

## 参考文献 (References)

[1] Tissot B P, Pelect R Ungerer. Thermal history of sedimentary basin, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation. *AAPG*, 1987, **71**: 1445~1466

[2] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum Formation and Occurrence*. New-York, Springer Verlag, 1984. 699

[3] 范桃园, 石耀霖, 周炎如. 沉积盆地热演化过程中的岩浆作用. *中国科学院研究生院学报*, 1999, **16**(1): 63~69  
Fan T Y, Shi Y L, Zhou Y R. Effect of magma intrusion on the thermal evolution in a sedimentary Basin. *J Grad School Chin Acad Sci (in Chinese)*, 1999, **16**: 63~69

[4] Petersen K, Lerche I. Thermal anomalies in sedimentary near evolving salt structure; importance for modeling timing of oil generation. *AA PG*, 1994, **78**: 1473

[5] 万丛礼, 李继红, 裴卫兵等. 沉积盆地侵入岩区的异常“温度场、压力场和地球化学场”与油气的关系——以东营凹陷纯西辉长岩为例. *西安石油大学学报(自然科学)*, 2005, **20**(1): 26~30  
Wan C L, Li J H, Pei W B, et al. Relationship between the temperature, pressure and geochemistry fields in the intrusive rock in sedimentary basin and oil-gas reservoirs: taking Chunxi gabbros in Dongying Sag as an example. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 2005, **20**(1): 26~30

[6] Sun Y G, Fu J M, Liu D H, et al. Effect of volcanism on maturation of sedimentary organic matter and its significance for hydrocarbon generation, a case: the East Sag of Liaohe Basin. *Chinese Sci Bull*, 1995, **40**(17): 1446~1450

[7] 叶加仁, 杨香华. 沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义. *沉积学报*, 2001, **19**(2): 214~219  
Ye J R, Yang X H. Thermal fluid flow in sedimentary basins and its significance to pool-forming dynamics. *Acta Sedimentologica Sinica (in Chinese)*, 1995, **40**(11): 1019~1022

[8] 曾治平, 倪建华, 王敏芳等. 地层热流体活动与有机质成烃的关系. *西南石油学院学报*, 2003, **25**(1): 16~20  
Zeng Z P, Ni J H, Wang M F, et al. The relations between the action of thermal fluid in formation and organism evolution. *Journal of Southwest Petroleum Institute (in Chinese)*, 2003, **25**(1): 16~20

[9] 郝 芳, 孙永传, 李思田等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化. *地球科学—中国地质大学学报*, 1996, **21**(1): 618~630  
Hao F, Sun Y C, Li S T, et al. Enhancement of organic maturation and petroleum generation by hydrothermal fluids. *Earth Science—Journal of China University of Geo Sciences (in Chinese)*, 1996, **21**(1): 618~630

[10] 宋占东, 查明, 曲江秀等. 阳信洼陷火成岩对烃源岩形成及演化的作用. *石油学报*, 2007, **28**(3): 39~44  
Song Z D, Cha M, Qu J X, et al. Effect of igneous rocks on formation and evolution of source rocks in Yangxin Sag. *Acta Petrol Eisinica (in Chinese)*, 2007, **28**(3): 39~44

[11] 孟元林, 肖丽华, 杨俊生等. 木里盆地有机质热演化异常及其演化史. *地质论评*, 1999, **45**(2): 135~141  
Meng Y L, Xiao L H, Yang J S, et al. Thermal history and evolution abnormality of organic matter in the muli basin. *Geological Review (in Chinese)*, 1999, **45**(2): 135~141

[12] 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):1~9
- Xu Y G, Zhong S L. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*. (in Chinese), 2001, **30**(1):1~9
- [13] 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**(2):194~202
- He B, Xu Y G, Xiao L, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records. *Acta Geologica Sinica*. (in Chinese), 2003, **77**(2):194~202
- [14] 何斌,徐义刚,肖龙等. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义. *地质评论*, 2006, **52**(1):30~37
- He B, Xu Y G, Xiao L, et al. Geological review sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications. *Geological Review* (in Chinese), 2006, **52**(1):30~37
- [15] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 2004, **32**(10):917~920; doi: 10.1130/G20602.1
- [16] Xu Y G, He B. Thick, high-velocity crust in the Emeishan large igneous province, SW China: Evidence for crustal growth by magmatic underplating or intraplating. *Geological Society of America Special Paper*, 2007, **430**: 841~858, doi: 10.1130/2007.2430(39).
- [17] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(13):3084~3104; doi:10.1016/j.gca.2008.04.019
- [18] Mathoney J J, Coffin M. Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism. Washington D C; AGU Geophysical Monography, 1997. 1~438
- [19] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, **166**:177~195
- [20] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. *地学前缘*, 2002, **9**(4):341~353
- Xu Y G. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, **9**(4):341~353
- [21] 侯增谦,卢记仁,李红阳等. 中国西南特提斯构造演化—幔柱构造控制. *地球学报*, 1996, **17**(4):439~452
- Hou Z Q, Lu J R, Li H Y, et al. Tectonic evolution of the Tethys in southwestern China: is controlled by plume tectonics. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 1996, **17**(4):439~452
- [22] 李建康,王登红. 峨眉地幔柱动力学数值模拟的初步研究. *地球学报*, 2004, **25**(5):509~514
- Li J K, Wang D H. A preliminary research on the numerical simulation of the Emei Mantle Plume. *Acta Geosci Sin.* (in Chinese), 2004, **25**(5):509~514
- [23] 宋谢炎,侯增谦,汪云亮等. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因. *矿物岩石*, 2002, **22**(4):27~32
- Song X Y, Hou Z Q, Wang Y L, et al. The mantle plume features of Emeishan basalts. *J Mineral Petrol.* (in Chinese), 2002, **22**: 27~32
- [24] 宋谢炎,王玉兰,曹志敏等. 峨眉山玄武岩、峨眉地裂运动与幔热柱. *地质地球化学*, 1998, **1**:47~52
- Song X Y, Wang Y L, Cao Z M, et al. Emeishan basalts, Emei tafrogeny and mantle plume. *Geology-Geochemistry* (in Chinese), 1998, **1**:47~52
- [25] 张招崇,王福生,郝艳丽. 峨眉山大火成岩省中的苦橄岩地幔柱活动证据. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, **24**(1):17~22
- Zhang Z C, Wang F S, Hao Y L. Picrites from the Emeishan large igneous province: evidence for the mantle plume activity. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 2005, **24**(1):17~22
- [26] Zhu C Q, Xu M, Yuan Y S, et al. Palaeo-geothermal response and record of the effusing of Emeishan basalts in the Sichuan basin. *Chinese Sci Bull*, 2010, 1~8, doi: 10.1007/s11434-009-0490-y
- [27] 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**(1):89~96
- He B, Xu Y G, Wang Y M, et al. Nature of the Dongwu movement and its temporal and spatial evolution. *Earth Sci-J Chin Univ Geosci* (in Chinese), 2005, **30**(1): 89~96
- [28] 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):1~18
- Liu H P, Li J M, Li X Q, et al. Evolution of cratonic basins and carbonate-evaporite sedimentary sequence hydrocarbon systems in China. *Geoscience* (in Chinese), 2006, **20**: 1~18
- [29] 朱光有,张水昌,梁英波等. 四川盆地天然气特征及气源. *地学前缘*, 2006, **13**(2):234~248
- Zhu G Y, Zhang S C, Liang Y B, et al. The characteristics of natural gas in Sichuan basin and its sources. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, **13**(2):234~248
- [30] 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
- Guo Z W, Deng K L, Han Y H, et al. The Formation and Development of Sichuan Basin. Beijing; Geological Publishing House, 1996
- [31] 毛琼,邹光富,张洪茂等. 四川盆地动力学演化与油气前景探讨. *天然气工业*, 2006, **26**(11):7~10
- Mao Q, Zou G F, Zhang H M, et al. Discussion on geodynamic evolution and oil/gas prospect of the Sichuan basin. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2006, **26**(11):7~10
- [32] 周小进,杨帆. 中国南方新元古代-早古生代构造演化与盆地原型分析. *石油实验地质*, 2007, **29**(5):446~451
- Zhou X J, Yang F. Tectonic evolution and prototypes analysis from neoproterozoic to Early Paleozoic in South China. *Petroleum Geology & Experiment* (in Chinese),



- 2007, **29**(5): 446~451
- [33] 邱楠生. 沉积盆地热历史恢复方法及其在油气勘探中的应用. 海相油气地质, 2005, **10**(2): 45~51  
Qiu N S. Methods of thermal history reconstruction of sedimentary basins and their application in oil and gas exploration. *Mar Or Petr Geol.* (in Chinese), 2005, **10**: 45~51
- [34] 王飞宇, 边立曾, 张水昌, 等. 塔里木盆地奥陶系海相源岩中两类生烃母质. 中国科学(D), 2001, **31**(2): 96~102  
Wang F Y, Bian L Z, Zhang S C, et al. Two kinds of hydrocarbon generations of Ordovician Marine source rocks in Tarim basin. *Sci Chin. (Series D)* (in Chinese), 2001, **31**: 96~102
- [35] 王飞宇, 何萍, 程顶胜等. 镜状体反射率可作为下古生界高过成熟烃源岩成熟度标尺. 天然气工业, 1996, **16**(4): 14~18  
Wang F Y, He P, Cheng D S, et al. Take vitrinite like reflectance as the maturity indicator for lower Paleozoic high-overmature source rock. *Natl Gas Ind* (in Chinese), 1996, **16**: 14~18
- [36] 王飞宇, 何萍, 程顶胜等. 下古生界高过成熟烃源岩有机成熟度评价. 天然气地球科学, 1994, **5**(6): 1~14  
Wang F Y, He P, Cheng D S, et al. Evaluation of the high and over matured lower Palaeozoic source rocks. *Natl Gas Geosci* (in Chinese), 1994, **5**(6): 1~14
- [37] 王飞宇, 何萍, 高岗等. 下古生界高过成熟烃源岩中的镜状体. 石油大学学报, 1995, **19**(增刊): 25~30  
Wang F Y, He P, Gao G, et al. Vitrinite-like macerals in Chinese early palaeozoic source rocks. *J Univ Petr* (in Chinese), 1995, **19** (Suppl.): 25~30
- [38] 王飞宇, 张水昌, 张宝民等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史. 地球化学, 2003, **32**(5): 461~468  
Wang F Y, Zhang S C, Zhang B M, et al. Maturity and its history of Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin. *Geochemica* (in Chinese), 2003, **32**: 461~468
- [39] 刘祖发, 肖贤明, 傅家谟等. 海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究. 地球化学, 1999, **28**(6): 580~588  
Liu Z F, Xiao X M, Fu J M, et al. Marine vitrinite reflectance as a maturity indicator of lower Palaeozoic hydrocarbon source rocks. *Geochemica* (in Chinese), 1999, **28**(6): 580~588
- [40] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 1990, **74**(10): 1559~1570
- [41] 黄籍中. 从有机质成熟度看四川盆地古生界油气勘探. 天然气工业, 2007, **27**(8): 6~8  
Huang J Z. A discussion on petroleum exploration of the lower Paleozoic in Sichuan basin from the viewpoint of organic metamorphism. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 2007, **27**(8): 6~8
- [42] 王兰生, 李宗银, 沈平等. 四川盆地东部大中型气藏成烃条件分析. 天然气地球科学, 2004, **115**(6): 567~571  
Wang L S, Li Z Y, Shen P, et al. On the hydrocarbon generation conditions of the large and middle scale gas fields in eastern part of Sichuan basin. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 2004, **115**(6): 567~571
- [43] 姚雪根. 四川盆地天然气成藏条件及其勘探方向. 海相油气地质, 2002, **7**(1): 13~28  
Yao X G. Accumulation and preservation conditions of natural gas in Sichuan basin. *MOPG* (in Chinese), 2002, **7**(1): 13~28
- [44] 康竹林. 中国海相地层天然气勘探领域和方向. 海相油气地质, 1997, **2**(3): 1~4  
Kang Z L. Natural gas exploration potential of marine sequence of China. *MOPG* (in Chinese), 1997, **2**(3): 1~4
- [45] 陈能贵, 杨斌. 中国南方海相地层区烃源岩有机质热演化特征. 海相油气地质, 1999, **4**(1): 1~6  
Chen N G, Yang B. Maturity and its history of Marine Sequence of South China. *MOPG* (in Chinese), 1999, **4**(1): 1~6
- [46] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(B04409): 1~23

(本文编辑 胡素芳)