

四川盆地古地温梯度和中—新生代构造热历史

王 玮¹, 周祖翼¹, 郭彤楼², 许长海¹

(1. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国石化南方勘探开发分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 根据 27 口井的镜质体反射率剖面, 恢复了四川盆地早白垩世末—古新世时的古地温梯度。结果表明, 古地温梯度介于 $20\sim 25^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$, 总体呈南部略大于北部、东部大于西部的分布特征。根据古今地温梯度的对比, 川西坳陷新生代早期以来地温梯度没有明显的变化, 川东和川东北地区晚中生代以来地温梯度下降, 而川中和川南地区晚中生代以来地温梯度升高。结合构造演化背景分析, 盆地中新世代热历史主要受二叠纪末期的构造热事件、中生代晚期以来岩石圈厚度演化以及现今活动构造的影响。其中, 二叠纪末期的构造热事件波及盆地大部分地区; 现今活动构造对川南地区有明显的影响; 中生代晚期以来的岩石圈厚度演化, 可能是控制中新世代盆地大部分地区热历史的主要因素。

关键词: 四川盆地; 镜质体反射率; 构造热历史

中图分类号: P 314

文献标识码: A

Early Cretaceous-paleocene Geothermal Gradients and Cenozoic Tectono-thermal History of Sichuan Basin

WANG Wei¹, ZHOU Zuyi¹, GUO Tonglou², XU Changhai¹

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Sinopec Southern Exploration and Development Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Early cretaceous-paleocene geothermal gradients of Sichuan Basin are reconstructed from 27 vitrinite reflectance profiles. Results show that ancient geothermal gradients are between $20\sim 25^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ and are higher in the eastern and southern regions of the basin than in the western and northern regions. According to comparison of ancient and Current geothermal gradients, geothermal gradients descended in eastern and northeastern but increased in the central and southern regions since the late Mesozoic, while kept unchanged in western Sichuan Basin since the early Cenozoic. According to the tectonic evolution in this area, thermal

history of Sichuan Basin in the Mesozoic and Cenozoic was mainly affected by the late Permian tectono-thermal event, the evolution of the lithospheric thickness since the late Mesozoic and the recent active tectonics. The late Permian tectono-thermal event affected most parts of Sichuan Basin. Current active tectonics have significant impact on southern Sichuan, and the evolution of the lithosphere thickness may be the main factors influencing the Mesozoic-Cenozoic thermal history of Sichuan Basin.

Key words: Sichuan Basin; vitrinite reflectance; tectono-thermal history

镜质体反射率 R_o 。主要记录样品经历的最高温度且具有不可逆性^[1], 是约束盆地古地温梯度(及古热流)的主要手段之一^[2], 并已在四川盆地热历史的研究中得到了应用。曾道富在编制“古地温量版图”的基础上, 恢复盆地各套地层的古地温梯度^[3-4]; 伍大茂根据 Barker 等人建立的镜质体反射率与最高温度之间的关系, 研究了盆地各区域地层经历最高古地温时的地温梯度^[5]; 卢庆治采用 Easy% R_o 模型, 分别反演川东和川东北的热流史^[6-7]; 杨怀辉和王玮等人也利用类似方法, 讨论川西坳陷和鄂西渝东地区的热流史^[8-9]。

但是, 在上述大部分的研究中, 使用的数据有限或集中在盆地的局部区域, 同时, 研究者所使用的镜质体反射率模型不统一, 导致具体的结论相差很大。

笔者全面地收集了四川盆地的镜质体反射率剖面, 在此基础上, 利用简化的“Easy% R_o ”模型^[10], 恢复盆地各区域地层达到最大埋深时的古地温梯度, 然后结合本区构造演化, 对盆地不同区域中新世代的热历史进行讨论。

收稿日期: 2010-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(40621063)

第一作者: 王 玮(1969—), 男, 讲师, 理学博士, 主要研究方向为盆地分析及古温标解释. E-mail: ww200211@gmail.com

1 地质构造背景与现今地温场

四川盆地在构造上属于扬子板块的一部分. 根据构造和沉积特征,以华莹山断裂和巴中—龙泉山断裂为界,盆地自东向西可分为川东隔挡式褶皱-冲断带、川中隆起带和川西前陆拗陷带三个次级构造单元. 见图1.

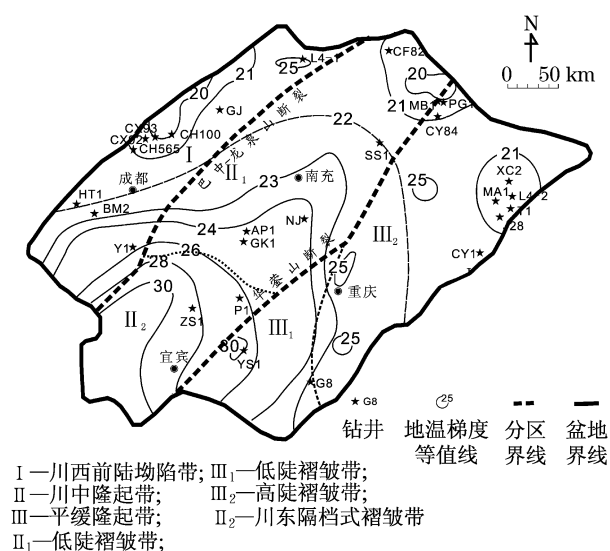


图1 四川盆地现今地温梯度分布(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)

Fig.1 Current geothermal gradient of Sichuan Basin(unit: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)

基底形成以来,四川盆地主要经历了以下沉积与构造演化阶段^[11-14]:震旦纪—中三叠世,盆地为海相碳酸盐岩台地沉积与构造演化阶段;晚三叠世晚期—早白垩世,随着龙门山构造带向东冲断、秦岭造山带向南推挤和江南隆起带向西推挤,形成了与盆地毗邻的三大构造带及与构造带平行展布的三个沉降中心带,并接受了巨厚的陆相碎屑岩沉积;早白垩世末开始,盆地向西部和南部萎缩,部分地区遭受剥蚀;始新世中—晚期开始,四川盆地全面隆升,各区域剥蚀量估计在2~4 km.

现今的四川盆地是一个中低地温梯度区,综合前人的研究成果^[15-17]和本研究收集的数据,图1给出了四川盆地现今地温梯度的分布. 图中,川中和川南($23 \sim 30 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 等值线)来自参考文献^[17];川西、川东和川东北等值线根据大地热流汇编^[18]和本次研究中收集到的数据,地温梯度的局部特征来自参考文献^[18]; $22 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 等值线为推测等值线.

总地来讲,四川盆地现今地温梯度呈西南高东北低、中部高周缘低的分布特征. 大部分地区地温梯

度介于 $20 \sim 25 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,盆地中部和南部为 $25 \sim 30 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,特别是在威远、宜宾及屏山之间的地区,高达 $30 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 以上. 而在盆地东缘、西缘和北缘地温梯度最低,一些地区小于 $20 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$.

川中地区大地热流在 $65 \sim 72 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[17-18],高于川西拗陷和川东地区(分别为 $55 \sim 60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[19]和平均 $47 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[6-7]),与地温梯度分布一致. 但川西大地热流明显高于川东,尽管川西拗陷和川东地温梯度相当. 原因在于两地测温井段的导热率不同,根据公开发表的资料,川西拗陷测温井段基本为三叠统地层,导热率为 $2.53 \sim 4.15 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$ ^[17-19];而川东测温井段涵盖二叠系至侏罗系地层,导热率平均约为 $2.25 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$ ^[6-7]. 因此,四川盆地大地热流与地温梯度的分布并不完全一致,表现为川中大地热流最高,川西其次,川东最低.

2 基于镜质体反射率简化模型的数据解释方法

镜质体反射率剖面常用的分析方法有古地温梯度法和古热流法^[2]. 古地温梯度法较为简便,但忽略了岩石热导率的垂向变化及地层压实过程中热导率随埋深的变化,也无法考虑盆地演化过程中诸如沉积、剥蚀、放射性生热等因素的非稳态热效应.

古热流法是一种以恢复区域的热流史为目标的镜质体反射率反演方法,在一定程度上克服了古地温梯度法的缺点. 但反演过程需定量描述多种地质过程和物性参数,而且一般情况下只能对样品经历最高古温度时的热流或地温梯度进行较好的约束^[9,20].

在本次收集到的剖面图中,大部分钻井缺乏生热率和导热率等资料,因此只能采用古地温梯度法. 古地温梯度法得到的地温梯度对应于研究井段平均热导率的平均地温梯度. 当镜质体反射率样品的取样与现今地温梯度的测量针对相同井段时,古今地温梯度具有可比性,通过对比可揭示盆地的热历史.

Easy% R_o 模型是目前应用最广泛的是镜质体反射率计算模型. 根据该模型,镜质体反射率并不直接与样品经历的最高古温度相对应,而是由样品经历的整个温度史决定,不能直接应用于古地温梯度法. 不过,通过引入最高古温度附近的温度变化率 H_r (单位 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$,见图2a),可简化为如下公式^[9]:

$$T_{\max} = (\ln R_o + 1.78)/0.0124 - \Delta T(R_o) + 5.9 \ln H_r,$$

$$0.3 < H_r < 25; \text{当 } H_r < 0.3 \text{ 时, } H_r = 0.3 \quad (1)$$

$$\Delta T(R_o) = \begin{cases} 262 \ln(R_o)^5 + 908 \ln(R_o)^4 + \\ 1130 \ln(R_o)^3 + 601 \ln(R_o)^2 + \\ 119 \ln(R_o) + 2 \\ - 87 \ln(R_o)^6 + 319 \ln(R_o)^5 - \\ 448 \ln(R_o)^4 + 291 \ln(R_o)^3 - \\ 93 \ln(R_o)^2 + 25 \ln(R_o) + 3 \end{cases}$$

其中, T_{\max} (图 2a) 为样品经历的最高温度, $^{\circ}\text{C}$. 研究表明^[21], 对于大部分沉积盆地, 地层温度变化率介于 $0.25 \sim 9.00 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$, 平均为 $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$. 图 2b 给出了不同温度变化率下镜质体反射率与样品所经历的最高温度之间的关系. 从图中可以看出, 依据 Easy% R_o 模型, 镜质体反射率大小主要取决于样品经历的最高古温度, 同时与最高古温度附近的温度变化率有关. 图 2a 中 K_1 和 K_2 分别为 T_{\max} 附近的增温速率和降温速率 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$)

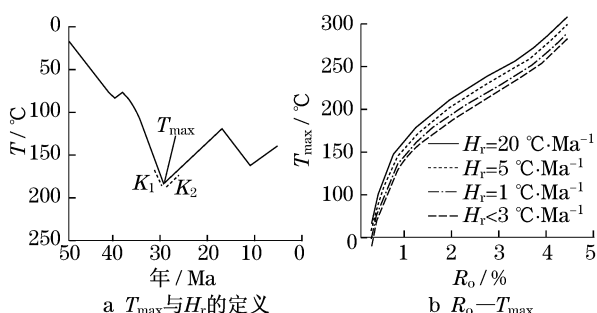


图2 简化的 Easy% R_o 模型

Fig.2 Simplified Easy% R_o model

由于晚白垩世以来四川盆地遭受到强烈的剥蚀, 因此可以合理地认为, 四川盆地的地层 (至少是浅部数千米的地层) 在早白垩世末及其后达到最大埋深时, 同时经历最高古温度. 这种情况下, H_r 主要取决于当时的地温梯度和最大埋深前后的沉积速率和剥蚀速率. 因此, 对于同一镜质体反射率剖面上的所有样品, H_r 是相同的. 在这种情况下, H_r 的取值会影响到剥蚀量的求取但不影响古地温梯度的求取. 本次研究只恢复古地温梯度, 因此, 对所有镜质体反射率数据, H_r 取 $1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{Ma}^{-1}$.

3 镜质体反射率及其预处理

本研究共收集了 37 口井的镜质体反射率剖面, 其中大部分数据来自公开发表的文献^[3-8, 22-26], 所处地层主要为侏罗系、三叠系和二叠系.

根据大部分镜质体反射率计算模型和大量实测的镜质体反射率剖面, 镜质体反射率的对数 ($\ln R_o$) 与深度呈良好的线性相关性或分段线性相关性. 本

次收集到的大部分剖面满足这一特征, 但部分剖面数据异常, 和整个数据剖面的趋势明显不符.

引起数据异常的原因可能有多种. 例如, 超压、岩浆活动及热流体等局部热事件, 断层和褶皱等构造活动等. 不同因素造成的镜质体反射率数据异常的幅度、范围和分布通常具有明显的特征, 借助这些典型的特征, 可以识别剖面上明显的异常数据.

经过预处理, 选择了 27 个 R_o 剖面 (位置见图 1) 进行解释 (见图 4). 其中, CF82, CY84, MB1, PG1 及 L4-1 来自参考文献[6]; L4-2, CY1, MA1, XC2 及 J28, T1 来自参考文献[7]; CH100, CX93 来自参考文献[22]; AP1 来自参考文献[23]; SS1 来自参考文献[4]; HT2 及 BM2 来自参考文献[24]; CX565, CY92 来自参考文献[25]; GK1 及 P1 来自参考文献[26]; 其他数据为本次研究收集.

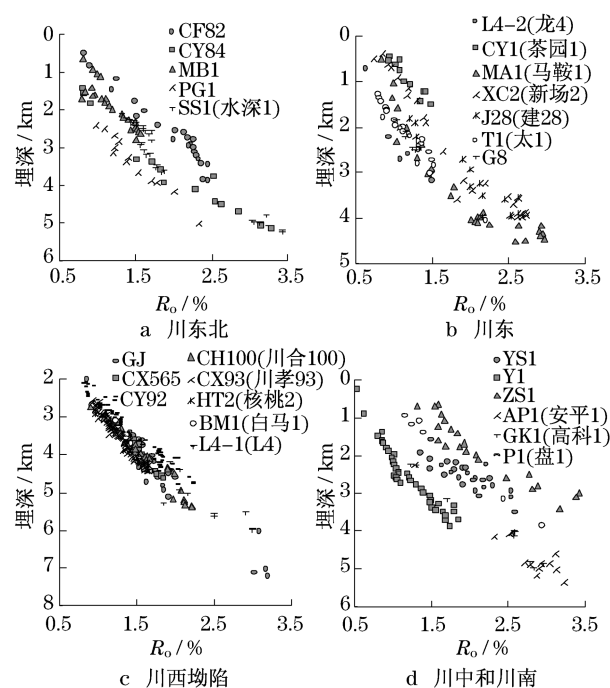


图3 四川盆地镜质体反射率剖面

Fig.3 VR Profiles in Sichuan Basin

注: 图例括号内为原文献钻井名称, 钻井位置见图 1

4 盆地各区域古今地温梯度的比较

对于上述剖面, 首先利用公式(1)将“ R_o —深度”关系转换为“样品最高古温度—深度”关系, 然后, 通过线性回归计算古地温梯度, 结果见表 1. 能够收集到的部分钻井的现今地温梯度也列于表中.

四川盆地古地温梯度等值线如图 4 所示. 从图中可以看出, 四川盆地古地温梯度分布总体呈现南

部略大于北部、东部大于西部的特征. 与现今地温梯度呈西南高东北低、中部高周缘低的分布特征明显不同. 同时,在盆地范围内,古地温梯度的差异($0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)小于现今($0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$).

表 1 根据镜质体反射率剖面得到四川盆地各井的古地温梯度
Tab.1 Ancient geothermal gradients from VR profiles

钻井编号	位置	剖面长度/km	样品数	古地温梯度±标准差/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1})$	R^2	现今地温梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1})$
CY84	川东北	3.3	11	25.7 ± 0.89	0.9893	—
PG1	川东北	2.6	13	23.2 ± 1.49	0.9565	—
MB1	川东北	1.2	24	23.3 ± 1.96	0.8648	—
CF82	川东北	3.9	24	22.7 ± 1.5	0.9145	20
XC2	川东	3.5	18	24.3 ± 0.92	0.9773	21
CY1	川东	1.1	11	27.2 ± 2.9	0.9044	21.7
J28	川东	2.1	15	24.6 ± 2.36	0.8929	20
L4-2	川东	2.6	8	25.8 ± 2.89	0.9302	—
T1	川东	2.8	25	26.7 ± 1.42	0.9389	—
MA1	川东	4	28	23.8 ± 1.67	0.899	—
G8	川东	0.6	7	24.2 ± 4.13	0.8724	—
ZS1	川南	2.8	22	24.6 ± 2.01	0.8949	—
YS1	川南	1.9	27	26.2 ± 3.78	0.6591	30
P1	川南	2.9	5	24.6 ± 0.48	0.9989	—
Y1	川南	3	38	23.1 ± 1.12	0.928	—
SS1	川中	3.1	29	23.4 ± 1.14	0.9396	—
NJ	川中	2.9	33	22.93 ± 1.06	0.9379	25.7
GK1	川中	2.7	9	24.4 ± 2.03	0.9537	—
AP1	川中	3.1	12	22.6 ± 2.21	0.9125	—
L4-1	川西	2.1	14	25.8 ± 3.2	0.8437	24
CX565	川西	1.6	22	20.7 ± 1.09	0.9482	—
CH100	川西	2.7	29	20.8 ± 0.96	0.9459	19.3
GJ	川西	5.2	26	18.2 ± 0.99	0.936	—
CX93	川西	1.9	68	20.3 ± 0.41	0.9737	—
CY92	川西	2.8	63	26.4 ± 0.94	0.9566	—
BM2	川西	0.6	5	21.7 ± 6.5	0.7878	—
HT1	川西	1.2	7	23.2 ± 2.57	0.9423	—

注:“R”表示相关系数;“—”表示未知. 后同.

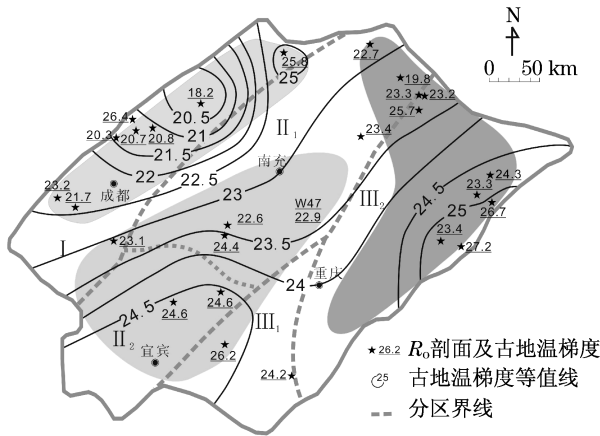


图 4 四川盆地古地温梯度等值线(单位: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)
Fig.4 Ancient geothermal gradient of Sichuan Basin (unit: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)

注:灰色区域的现今地温梯度大于古地温梯度;深灰色区域的现今地温梯度小于古地温梯度;浅灰色区域的古今地温梯度相当.

根据现今构造分区,结合分析结果的一致性 & 古今地温梯度的变化趋势,将古地温梯度分为 5 个区域. 表 2 汇总了各区域分析结果,其中古地温梯度对应时间为盆地各区域达到最大埋深的时间^[11-14].

表 2 四川盆地各区域古今地温梯度比较
Tab.2 Comparison of present and ancient geothermal gradients in different districts of Sichuan Basin

区域	地温梯度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1})$		热流/ $(\text{mW}\cdot\text{m}^{-2})$		古地温梯度对应的时间
	现今	古时	现今	古时	
川东北	20~21	0~23.7	47.3	0~52	早白垩世末
川东	20~21	0~25.2	~47	~57	早白垩末—晚白垩世
川中	22~26	0~23.3	65~72	<65	早白垩末—晚白垩世
川南	26~30	0~24.6	—	—	晚白垩世
川西	米仓山前: 0~25	25.8	—	—	晚白垩世—古新世
	中段山前: 20~22	21.2	55.3	55	古新世
	南段: 22~23	21.7~23.2	—	—	古新世

4.1 川东北与川东地区

川东北地区指川中隆起带和川东隔档式褶皱带北部. 现今 2~6 km 井段地温梯度介于 $18\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$, 平均 $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ ^[6]. 该区镜质体反射率主要来自 1~5 km 井段,在 4 口井中,除 CY84 指示的古地温梯度较高($25.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$)外,其他 3 口井均在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 左右,略高于现今的地温梯度.

川东地区大部分镜质体率剖面来自其东北部的鄂西渝东地区. 根据钻井温度,该地区的钻井 XC2, J28 和 CY1 的现今地温梯度分别为 20,21 和 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (测温井段 1~4 km),与川东北地区接近. 镜质体反射率剖面指示的古地温梯度为 $24\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,平均约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,明显高于现今.

G8 井位于川东低陡褶皱带,现今地温梯度略高于鄂西渝东,约为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$;显示的晚白垩世地温梯度约为 $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,略大于现今.

4.2 川中与川南地区

川中指四川盆地中部,即川中平缓隆起区中南部. 川中地区现今地温梯度介于 $22\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ (见图 1). 不过,据文献^[16-17],图 1 中 NJ,GK1 及 AP1 井附近的地温梯度可能被低估了 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. 该地区 4 口井中,北部的 SS1 古今地温梯度接近. 南部 NJ,GK1 及 AP1 这 3 口井指示的古地温梯度介于 $22.6\sim 24.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. 考虑到可能被低估了

$1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,因此晚白垩世以来,这3口井的地温梯度可能升高了 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$.

川南主要指川中低陡褶皱带,包括川西坳陷带和川东褶皱带南部的部分地区.川南现今地温梯度为 $26\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,该区4口井所示在 $23.1\sim 26.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$.表明该地区晚白垩世以来地温梯度显著升高,升高幅度约 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,大于川中.

4.3 川西地区

川西地区主要指川西坳陷,但不包括其最南端.川西坳陷上三叠统地层的地温梯度普遍较低,多在 $17\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ [19].从现今地温梯度分布来看,龙门山中断前缘较低,向盆地内部、南部变大.

川西地区镜质体反射率也主要来自上三叠统地层.L4-1井指示的地温梯度较高,达 $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,与现今背景地温梯度相当.川西中段的CX93,CH100,CH565和GJ井指示的古地温梯度介于 $18\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,与现今地温梯度相当.然而,CY92指示的古地温梯度较高,达到 $26.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$.不仅远大于现今,也明显高于其他几个剖面所指示的古地温梯度.川西南段的HT1和BM井指示的古地温梯度在 $22\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$,也与现今地温梯度相当.

综合上述分析,晚中生代以来四川盆地各区域热历史演化存在差异:川西地区古今地温梯度相当(见图4浅灰色区域);川东和川东北地区古地温梯度高于现今,尤其是川东地区(图5深灰色区域);川中和川中南部地区地温梯度升高,尤其是川南地区(图5中灰色区域).

5 中-新生代四川盆地构造热历史

由于方法的局限性,利用镜质体反射率只能恢复四川盆地各区域早白垩世末—古近纪各区域地层达到最大埋深时的地温梯度.下面结合其构造演化,讨论其整个中生代以来的热历史.

5.1 二叠纪末期的构造热事件

峨眉山玄武岩喷发是晚古生代扬子板块西缘最重要的构造热事件[27-29].峨眉山玄武岩是被国际学术界认可的大火成岩省,中心位于云南大理至四川米易一带,东至贵州水城,西达金沙江边,北起甘孜,南达元江,出露区直径达800 km.测年资料和地层对比资料表明,玄武岩浆喷溢活动始于早二叠世,于晚二叠世达到高峰.

在盆地范围内,同一时期的玄武岩存在于川西南段熊坡背斜、龙泉山背斜油罐顶、大塔场背斜、威

远背斜;川东雷音铺、黄泥堂、大池干井等背斜上的钻井中均有发现[13,30].川东上二叠统底部发现玄武岩,经测定,系来自地壳深处 $35\sim 100\text{ km}$ 的上地幔物质,玄武岩沿隐伏深断裂带喷出或侵位呈顺层分布,已知厚度为 $18\sim 200\text{ m}$ 以上[13].可见,四川盆地在二叠纪也经历了一次构造热事件.

这次热事件可能与峨眉山大火成岩省有关,因此,影响范围不应仅限于川东和川西南,而是波及四川盆地大部分地区.受这期构造热事件的影响,中生代初期四川盆地处于比较高的地温场背景.

5.2 川南地区构造热历史

中三叠世末,上扬子地区转变为压扭环境.对于四川盆地大部分地区,挤压作用主要表现为壳内的滑脱推覆,深部热作用弱[11].而川南地区邻近康滇地区,康滇地区中生代以来壳下深部热作用一直比较活跃[31].无论是晚二叠世玄武岩浆溢流还是印支期的大陆裂谷发育,对川西南地区的热历史可能均有所影响,使该地区一直具有较高的地温梯度.

近期的活动构造对川南地区的影响是明显的.四川盆地现今的活动构造集中在盆地的西南部边界的荣经——马边——盐津逆冲构造带,以及盆地内部的内江、自贡、威远及乐山、仁寿等地[32],而这些正是四川盆地地温梯度最高的地区.这表明,这些地区的活动构造加强了深部热物质的向上对流和热传导,使区域地温梯度增高.

5.3 四川盆地中-新生代岩石圈厚度的演化

根据地震和重力研究结果,四川盆地地壳的厚度变化不大,但岩石圈的厚度变化很大,形成以川中为幔隆区、甘孜——阿坝和川东为幔拗区的岩石圈格局,川西处于幔隆区和幔拗区的过渡带上[33].

四川盆地大地热流(见表2)与岩石圈形态相对应.事实上,从更广大的区域来看,四川盆地及其邻近区域的大地热流和岩石圈厚度之间存在明显的关联性[11].基于这种对应关系,一些研究者认为,现今川中地区的高热流源于岩石圈的减薄,而部分周缘地区的低热流源于岩石圈的增厚[11-12,33].本研究为这一认识提供了证据.

关于中-新生代四川盆地岩石圈厚度演化的机制,前人并未给出详细论述.根据文献[34],现今四川盆地岩石圈厚度大于120 km的区域位于大巴山和华蓥山构造带前缘.因此,四川盆地现今岩石圈格局可能始于盆地东缘与东北缘在中燕山期所受到的挤压作用.如图5所示,受 J_3-K_1 期间的西北向主应力场强烈挤压,盆地东缘与东北缘形成了大巴山和

华蓥山弧形构造带,并在构造带前缘形成厚岩石圈.挤压可能只是使岩石圈小幅度增厚,但由于与下地幔相比,上地幔较冷,密度较大,岩石圈初始的小幅度增厚会诱发上地幔岩石圈重力失稳^[35],并导致上述两个区域上地幔岩石圈大幅度增厚.而伴随着盆地周缘地区岩石圈的增厚,川中地区岩石圈减薄.而在盆地西部,晚三叠世时晚龙门山崛起,长期的挤压和走滑作用主要在比较薄弱的龙门山释放^[11],因此,川西岩石圈比较稳定.

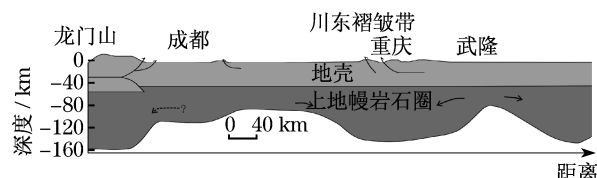


图5 四川盆地岩石圈演化图

Fig.5 Lithosphere development in Sichuan Basin

总结上述分析,可认为四川盆地中生代以来各区域热历史经历了三个阶段:①进入中生代,川西南、川东由于受二叠纪末期构造热事件的影响而具有较高的地温梯度,这一热事件可能也影响到盆地其他区域;②二叠纪末期构造热事件后,盆地热历史进入一个比较平稳的发展阶段,盆地范围内地温梯度差异不大,川南和川东地区地温梯度较高;③中生代晚期至今,由于岩石圈的演化和构造活动,较为统一的地温场发生分异.川西地区地温梯度保持稳定;川东及川东北因岩石圈增厚导致地温梯度下降;川中地区持续的地幔隆起引起地温梯度升高;川南地区新生代以来壳下活动比较强烈,地温梯度升高.

6 结语

通过对27口井的镜质体反射率的解释,恢复了四川盆地各区地层达到最大埋深时的古地温梯度.古地温梯度分布总体呈现南部略大于北部、东部大于西部的特征.不同区域古地温梯度的差异不大($0\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$).古今地温梯度的对比则表明,晚中生代以来,四川盆地各区域热历史演化存在差异:川西地区古今地温梯度相当;川东和川东北地区古地温梯度高于现今地温梯度,尤其是川东地区;川中和川中南部地区地温梯度升高,尤其是川南地区.

结合本区构造演化背景,四川盆地中新生代热历史主要受二叠纪末期的构造热事件、中生代晚期以来岩石圈厚度演化以及现今活动构造影响.其中,二叠纪末期的构造热事件波及盆地大部分地区;近

期的构造活动对川中南部地区有明显的影响,使得该区域现今地温梯度较高;中生代晚期以来的岩石圈厚度演化,可能是控制中生代晚期以来四川盆地热历史的主要因素,一方面川中因岩石圈减薄引起地温梯度升高,另一方面川东和川东北地区因岩石圈增厚引起地温梯度降低.

参考文献:

- [1] Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:2649.
- [2] 胡圣标,汪集旻. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. *地学前缘*, 1995 (4):171.
Hu S B, Wang J Y. Principles and progresses on thermal regime of sedimentary basins—an overview [J]. *Earth Science Frontiers*, 1995 (4):171.
- [3] 曾道富. 四川盆地有机质成熟度及其动态演化历史初探[J]. *石油勘探与开发*, 1987, 6:22.
ZENG Daofu. The preliminary study of the maturity of organic matter and their evolution in Sichuan basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1987, 6:22.
- [4] 曾道富,曾学思. 四川盆地古地温及古地温梯度的研究[J]. *天然气工程*, 1987, 7(4):12.
ZENG Daofu, ZENG Xuesi. A research on paleo-geotherm and paleo-geothermal gradient of Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 1987, 7(4):12.
- [5] 伍大茂,吴乃苓,郇建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义[J]. *石油学报*, 1998, 19(1):18.
WU Damao, WU Nailong, XUAN Jianjun. Paleogeotemperature in Sichuan Basin and its geological significance [J]. *Acta Petroleum Sinica*, 1998, 19(1):18.
- [6] 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[J]. *地球物理学报*, 2006, 48(5):1110.
LU Qingzhi, HU Shengbiao, GUO Tonglou, et al. The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 48(5):1110.
- [7] 卢庆治,马永生. 鄂西-渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J]. *地质科学*, 2007, 42(1):189.
LU Qingzhi, MA Yongsheng. Thermal history and hydrocarbon generation history in Western Hubei-Eastern Chongqing area [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(1):189.
- [8] 杨怀辉,李忠惠. 从古热流值和剥蚀量的研究来判断地热的发育[J]. *四川地质学报*, 2004, 24(3):180.
Yang H H, Li Z H. Development of geothermal pool deduced from old thermal current values and denudation quantity [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2004, 24(3):180.
- [9] 王玮,周祖翼. 镜质体反射率剖面反演中的不确定性分析——以鄂西渝东茶园1井为例[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(3):292.
Wang W, Zhou Z Y. Uncertainties in the inversion of vitrinite reflectance profile—a case study of Well Chayuan 1 [J].

- Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(3):292.
- [10] 王玮, 周祖翼, 于鹏. 2005. 镜质体反射率与最高温度及其附近温度变化率的关系—几种镜质体反射率计算模型的比较[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6):1375.
- Wang W, Zhou Z Y, YU Peng. Relations between vitrinite reflectance, peak temperature and its neighboring temperature variation rate; a comparison of methods[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6):1375.
- [11] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社, 1996.
- Guo Z W, Deng K L, Han Y H, et al. The formation and evolution of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [12] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京:南京大学出版社, 1997.
- Zhang Y C. Prototype analysis of petroliferous basins in China [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997.
- [13] 董崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- Dong C G. The structure evolvement of Sichuan Basin and the gather of oil and gas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [14] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008(3):293.
- Liu S G, Sun W, Li Z W. Tectonic uplifting and gas pool formation since Late Cretaceous Epoch, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008(3):293.
- [15] 谢晓黎, 于汇津. 四川盆地地温场的特征[J]. 成都地质学院学报, 1988, 15(4):107.
- XIE Xiaoli, YU Huijin. The characteristics of the regional geothermal field in Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1988, 15(4):107.
- [16] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京:地质出版社, 1990:130.
- Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. The basic characteristics of geothermal field in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990:130.
- [17] 韩永辉, 吴春生. 四川盆地地温梯度及几个深井的热流值[J]. 石油与天然气地质, 1993, 14(1):80.
- Han Y H, Wu C S. Geothermal gradient and heat flow values of some deep wells in Sichuan Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1993, 14(1):80.
- [18] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编:2版 [J]. 地震地质, 1990, V12(4):351.
- Wang J Y, Huang S P. Compilation of heat flow data in the China continental area; 2nd Edition [J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4):351.
- [19] 黄少鹏, 汪集旸. 四川盆地川西北拗陷几个深孔热流测试[J]. 科学通报, 1990, 35(10):773.
- Huang S P, Wang J Y. Heat flow test for several deep wells in the northwestern Sichuan depression [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(10):773.
- [20] Ferrero C, Gallagher K. Stochastic thermal history modelling. 1. Constraining heat flow histories and their uncertainty[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19:633.
- [21] Wood D A. Relationship between thermal maturity indices calculated using Arrhenius equation and Lopatin method: implications for petroleum exploration [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72:115.
- [22] 王玲辉. 川西坳陷上三叠统成藏年代地球化学特征研究[D]. 成都:成都理工大学矿产普查与勘探专业, 2008:29.
- Wang L H. A study on geochemical characteristics of reservoir forming geochronology of Upper Triassic in Western Sichuan Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008:29.
- [23] 袁海锋. 四川盆地震旦系—下古生界油气成藏机理[D]. 成都:成都理工大学矿产普查与勘探专业, 2008:70.
- Yuan H F. The mechanism of hydrocarbon accumulation of Sinian—Lower Palaeozoic, Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008:70.
- [24] 廖仕孟. 川西雾中山—莲花山地区上三叠统油气成藏条件研究[D]. 南充:西南石油大学矿产普查与勘探专业, 2006:45.
- Liao S M. The conditions of pool formation in the upper Triassic in Wuzhongshan—Lianhuashan area, Western Sichuan basin [D]. Nancong: Southwest Petroleum University, 2006:45.
- [25] 李书兵. 川西坳陷中段上三叠统成藏年代学及流体演化特征研究[D]. 成都:成都理工大学矿产普查与勘探专业, 2007:42.
- Li S B. Research on petroleum accumulation geochronology and the characteristics of fluid evolution of upper Triassic in the middle part of western Sichuan depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007:42.
- [26] 汪泽成, 赵文智. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京:地质出版社, 2002:161.
- Wang Z C, Zhao W Z. Tectonic sequence and gas exploration of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:161.
- [27] 熊舜华, 李建林. 峨眉山区晚二叠世大陆裂谷边缘玄武岩的特征[J]. 成都地质学院学报, 1994, 3:43.
- Xiong S H, Li J L. The characteristics of the late Permian basalts in the margin of continental rift in Emeishan area [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1994, 3:43.
- [28] 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[J]. 地球化学, 2001, 30(1):1.
- Xu Y G, Zhong S L. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. Geochimica, 2001, 30(1):1.
- [29] 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:来自沉积地层学研究的新证据. 地质学报[J]. 2003, 77(2):194.
- He B, Xu Y G, Xiao L, et al. Generation and spatial distribution of the emeishan large igneous province: new evidence from stratigraphic records [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2):194.
- [30] 宋文海, 庞家黎. 四川盆地西南部上二叠统玄武岩含气性研究[J]. 天然气工业, 1994, 14(5):11.
- Song H W, Pang J L. Gasbearing study of P2 basalt in the southwest part of Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(5):11.
- [31] 从柏林. 攀西古裂谷的形成与演化[M]. 北京:科学出版

- 社, 1988.
- Cong B L. Formation and evolution of the Panxi Paleo-Rift system[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [32] 唐荣昌, 黄祖智, 马声浩, 等. 四川活动断裂带的基本特征[J]. 地震地质, 1995, 17(4): 390.
- Tang R C, Huang Z Z, Ma S H, et al. Basic characteristics of active fault zones in Sichuan province [J]. Seismology and Geology, 1995, 17(4): 390.
- [33] 罗志立. 四川盆地基底结构的新认识[J]. 成都理工学院学报. 1998, 25 (2): 192.
- Luo Z L. New recognition of basement in Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25 (2): 192.
- [34] 马力, 陈焕江, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 地质出版社, 2004: 135.
- Ma L, Chen H J, Gan K W, et al. Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 135.
- [35] Houseman G A, Molnar P. Gravitational (Rayleigh—Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere[J]. Geophys. J. Int, 1997, 128: 125.
- [36] 张洪荣, 黄秀英. 四川阿坝—秀山地质断面[J]. 四川地质学报, 1993, 13(2): 94.
- Zhang H R, Huang X Y. Aba-xiushan geoscience transect in Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 1993, 13(2): 94.
-
- (上接第 473 页)
- [2] Federal Emergency Mangement Agency. Nehrp Guidelmes for the Seismic Rehabilitation of Buildings[S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [3] American Society of Civil Engineers. Seismic rehabilitation of existing buildings[S]. Reston: ASCE/SEI 41—06, 2007.
- [4] 林同炎, S. D. 斯多台斯伯利, 高立人, 等. 结构概念和体系[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- LIN Tongyan, Sidney D Stotesbury, GAO Liren, et al. Structural concepts and systems for archtects and engineers[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [5] 钱稼茹, 罗文斌. 静力弹塑性分析: 基于性能/位移抗震设计的分析工具[J]. 建筑结构, 2000, 30(6): 23.
- QIAN Jiaru, LUO Wenbin. Static pushover analysis—an analytical tool for performance/displacement-based seismic design[J]. Building Structure, 2000, 30(6): 23.
- [6] 谢礼立, 马玉宏, 翟长海. 基于性态的抗震设防与设计地震动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- XIE Lili, MA Yuhong, ZHAI Changhai, Performance-based seismic design and design ground motion[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [7] 尹华伟, 汪梦甫, 周锡元. 结构静力弹塑性分析方法与改进[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 45.
- YIN Huawei, WANG Mengfu, ZHOU Xiyuan. Studies and improvements on structural static pushover analysis method [J]. Engineering Mechnics, 2003, 20(4): 45.
- [8] 杨溥, 李英民, 王亚勇, 等. 结构静力弹塑性分析方法与改进[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 44.
- YANG Pu, LI Yingmin, WANG Yayong, et al. A study on improvement of push-over analysis [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 44.
- [9] SEAOC Vision 2000. Performance-based seismic engineering of buildings[R]. Sacramento: Association of California, 1995.
- [10] 中国地震工程局力学研究所. CECS160—2004 建筑工程抗震性态设计通则[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- Institute of Engineering Mechanics of China Earthpuake Adminstratration. CECS160—2004 General rule for performance-based seismic design of buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [11] 吕西林. 超限高层建筑工程抗震设计指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- LU Xilin. Seismic design guidelines for tall buildings beyond the scope of design codes [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2009.
- [12] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- JGJ 3—2002 Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [13] 同济大学建筑设计研究院. 上海中心大厦项目结构超限审查会送审报告分册一: 主篇[R]. 上海: 同济大学建筑设计研究院, 2009.
- Architectural Design & Research Insititute of Tongji University. Inspection report (1): beyond the scope of design codes of Shanghai Tower[R]. Shanghai: Architectural Design & Research Insititute of Tongji University.
- [14] 同济大学建筑设计研究院. 上海中心大厦项目结构超限审查会送审报告分册二: 专题[R]. 上海: 同济大学建筑设计研究院, 2009.
- Architectural Design & Research Insititute of Tongji University. Inspection report (2): beyond the scope of design codes of Shanghai Tower[R]. Shanghai: Architectural Design & Research Insititute of Tongji University.
- [15] R·克拉夫, J·彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Ray Clough, Joseph Penzien. Dynamics of structures [M]. Translated by WHANG Guangyuan. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.