

文章编号: 1000-0550(2006) 03-0440-06

松潘阿坝地区烃源岩有机质热演化特征

范明^{1,2} 秦建中² 张渠²

(1 南京大学地球科学系 南京 210009; 2 中国石油化工股份有限公司无锡实验地质研究所 江苏无锡 214141)

摘要 对松潘阿坝的烃源岩热演化特征进行了全面研究, 选用了适合高演化区的成熟度指标: 包裹体测温、沥青反射率及干酪根 H/C 等地化指标。研究认为: 1) 该区烃源岩在热演化程度普遍达到了成熟—高成熟阶段; 2) 沥青反射率及包裹体均一温度均具有多期性, 表明该区烃源岩经历了二次或多次生烃。3) 平面上, 烃源岩的热演化程度明显受动力变质、断裂带及岩浆活动的控制, 总体表现为四周高、中间低的特征。存在一个唐克为中心的演化程度相对较低的地区, 该区可作为勘探初期首选的靶区。4) 纵向上, 沥青反射率随深度变化的趋势变得不很明显。5) 由于松潘阿坝地区在三叠系之上缺少了像四川盆地连续过渡的侏罗系、白垩系沉积, 出现了较大的热演化断层, 下部烃源岩生烃早于四川盆地, 从而使得烃源岩及三叠系保存条件变差。

关键词 松潘—阿坝 烃源岩 演化程度 伊利石结晶度

第一作者简介 范明 男 1964 年出生 高级工程师 石油地质

中图分类号 TE121 **文献标识码** A

1 引言

松潘阿坝地块地处四川西北, 是夹持于秦岭、龙门山和巴颜客拉山脉之间的一个中生代末期发育定形的三角形地块, 与四川盆地以龙门山相隔。地球物理资料的解释, 认为两者均是扬子地台的西部边缘区, 与扬子地块基底具有相同的特点, 其形成和发展有着内在联系^[1]。

中三叠世后, 松潘阿坝地区受到了来自华北板块由北向南的强烈挤压、印度板块由西南向东北的强烈推挤, 同时由于扬子板块本身由南向北的运动, 而使该区沿龙门山一线从扬子板块断开, 成为相对独立的松潘—阿坝三角形地块。松潘阿坝地区, 三叠纪后整体抬升, 侏罗系、白垩系及第三系在本区仅有零星分布, 三叠系之上大多为第四系直接覆盖。从寒武系—三叠系共发育寒武系、志留系两套主力烃源岩, 及泥盆系、三叠系两套辅助烃源层^[2, 3]。

前人对该区三叠系泥质岩演化程度的研究认为, 该区若尔盖、红原、松潘一带, 在三叠系覆盖之下的二叠系应为一片反射率 (R_o) 小于 1.5% 低变质区。三叠系的红原、塘克一带其 R_o 仅 1.05% ~ 1.12%。并显示出由四周向松潘阿坝、若尔盖地区变质程度逐渐变低的分布特点^[1]。

本文采用了松潘阿坝地区多条综合剖面的 101

个沥青反射率、全区三叠系 177 个样品的镜质体反射率、145 个泥板岩的伊利石结晶度、部分样品的干酪根 H/C、包裹体均一温度等资料, 对该区烃源岩的热演化程度纵横向变化特征进行了全面研究。认为本区三叠系及其以下地层烃源岩热演化程度普遍较高, 总体变化趋势仍为四周高、中间低, 热演化的平面展布特征受断裂及岩浆活动的控制。

2 指标的筛选

对于烃源岩热演化程度的评定有很多指标, 除镜质体反射率以外, 大多指标均存在一定的适用范围。从全区总体的热演化程度看, 烃源岩样品的热解峰温均应大于 540°C ($R_o > 2.0\%$), 而实测结果发现有部分样品的热解峰温竟然小于 400°C, 表明由于 S_2 含量太低 (本区大多均小于 0.1 mg/g), 热解峰温 T_{max} 变得不可靠。

生物标志化合物的成熟度参数绝大多数只适用于成油高峰之前热演化阶段的确定, 当热演化程度高于生油高峰期后, 其不再随热演化程度的升高而发生变化, 所以生物标志化合物成熟度参数也不适用于本区热演化程度的评价。

烃源岩 H/C 原子比随演化程度增高而变小, 这个参数应为评价烃源岩成熟度的有效指标, 但当演化程度较高时, 其比值很小, 无法进行进一步的划分, 只

收稿日期: 2005-08-12 收修改稿日期: 2005-10-16

表 1 松潘阿坝地区 尕尔良剖面典型样品沥青反射率统计表

Table 1 Statistics of bitumen reflectance of typical samples from Gaerliang cross section in Songpan-Aba area

样品号	剖面位置	层位	沥青反射率 (%) / (测点值)		
			第一组	第二组	第三组
T-02-3-13	当多沟	D ₃ c	4.57/(5)	2.50/(5)	1.70/(3)
T-02-3-10	当多沟	D ₁ g	5.66/(16)	4.12/(6)	2.50/(3)
T-02-2f134-1	占洼乡下地村	S ₁ x	4.67/(9)	2.83/(12)	2.03/(6)
T-02-2e-76-1	降扎白依沟	S ₁ y	5.30/(14)	3.48/(4)	1.62/(20)
R-02-2e-30-1	降扎白依沟	O ₂ s	3.13/(6)	1.94/(20)	1.05/(10)
T-02-2e-23-1	降扎白依沟	O ₂ s	4.99/(4)	2.37/(17)	1.23/(5)
T-02-2d-15-1	降扎白依沟	∈ _t	4.23/(4)	2.57/(11)	0.91/(28)
T-02-2d-4-1	降扎白依沟	∈ _t	3.75/(5)	2.48/(10)	1.65/(8)

能给出一个总体的成熟度较高的结论。

包裹体均一温度可以反映出不同成岩期次的热液温度,不同的包裹体均一温度可以反映将分布于迭部县的多条剖面的典型样品的沥青反射率数据综合成表 1(表中的分组只是从各样)该区油气注入的期次,但却无法反映烃源岩所达到的最高热演化程度。

对古生界地层,由于镜质组的缺乏,沥青反射率成为烃源岩成熟度评价有效手段,其反射率随成熟度的增加而升高。由于沥青反射率在高演化阶段存在各向异性的特点,演化程度越高,其不同方向的反射率差异就越大,对前油沥青及后油沥青也很难区分^[4]。人们常用各种经验公式将沥青反射率折算成镜质体反射率,但对于高演化地区,由于沥青反射率各向异性的存在,同一期沥青可能会有一个较宽范围的反射率区间,在应用中应将原始测量数据进行统计分期,才能准确评判烃源岩的热演化程度。

伊利石的结晶度是伊利石晶畴大小、膨胀层含量、晶体缺陷和化学组成不均一性的综合反映^[5],自 20 世纪 60 年代 Weaver 和 Kubler 提出伊利石的结晶度概念以来,已经积累了大量有关伊利石的结晶度随变质程度、温度、压力等变化的实际研究资料。Weaver(1960)最先提出用伊利石 10Å 衍射峰形态,即 10Å 和 10.5Å 处的强度之比(Weaver 指数),来测量伊利石的结晶度。Kubler^[6,7]则提出利用伊利石 10Å 衍射峰的半高宽,即 Kubler 指数,反映伊利石的结晶度。Kubler 指数越大,表示结晶度越差;Kubler 指数越小,则结晶度越好。Kubler 指数目前已被广泛采用。伊利石的结晶度(Kubler 指数)是划分成岩作用与低级变质作用和确立低级变质作用程度的主要指标^[8]。近变质带和浅变质带的界限为 $IC = 0.25^\circ(\Delta 2\theta)$;与成岩作用晚期阶段的界限为 $IC = 0.42^\circ(\Delta 2\theta)$ 。由于研究区烃源岩的热演化程度处于

极低级变质阶段,所以该指标成为评价该区成岩作用及烃源岩热演化程度的一个非常有效的指标。

综上所述,对于松潘阿坝地区烃源岩而言,适用于其热演化程度评价的指标只有镜质体反射率、沥青反射率和伊利石结晶度,包裹体均一温度可辅以确定成岩作用及油气注入的期次。

3 烃源岩纵向热演化特征

样品的测量值上进行的统计划分,相同的组其沥青反射率并不代表相同的沥青期次),样品具有多期沥青射率,岩性以板岩为主。纵向上看,当多沟泥盆系板岩中的第一期沥青反射率高于降扎白依沟寒武系样品的第一期沥青反射率,而这两条剖面相距仅 10 多千米(图 3),这只能说明,白依沟剖面寒武系地层中缺少了更早期的沥青,现今该样品的最高沥青反射率可能是第二期或更晚的沥青。当多沟泥盆系的样品中最高的一期沥青反射率达 5.66% (少数测点的沥青反射率达 6.0%),根据 Jacob^[3]的沥青反射率与镜质体反射率的换算公式: $R_A = 0.618R_o + 0.4$,其演化程度相当于镜质体反射率 3.90%,为过熟阶段晚期接近干酪根枯竭阶段,第二期沥青反射率为 4.12%,相当于 R_o 为 2.94%,表明该区经历过二次以上的生烃和注入过程。寒武系(图 1)、奥陶系和志留系的样品也同样存在经历了高热演化的多期沥青。

包裹体均一温度是直接测定不同时期的古地温的有效方法之一,可以作为判别和确定烃源层成熟度的指标,测定的均一温度或形成温度可以直接用于判断烃源岩的成熟度。图 2 是降扎白依沟剖面 B-02-2d-14-1 样品的包裹体均一温度频率图。由图中可以看出,本区有机质热演化具有多期性,各期的均一温度平均值分别为 168°C、191°C、237°C 和 275°C,根据均一温度与 R_o 的对应关系亦可判断出该区烃源层的

有机质演化程度应为干气以上阶段, 这从另一方面证实了该区沥青的多期性及烃源层的高演化性。

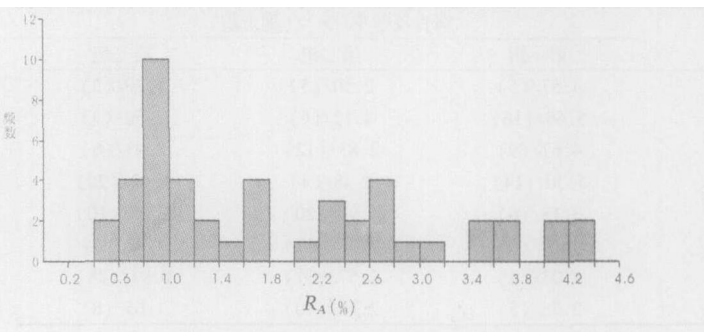


图 1 白依沟寒武系样品有机沥青质反射率频率图

Fig. 1 The statistic map of bitumen reflectance of Cambrian samples in the section Baiyigou

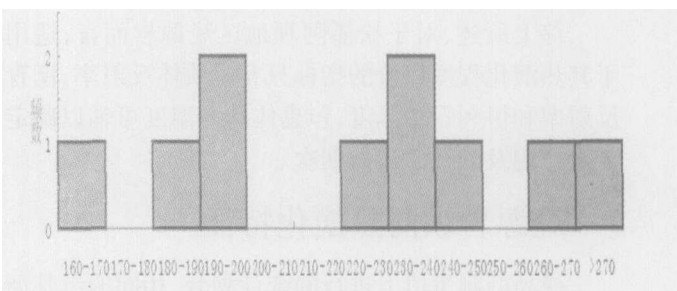


图 2 白依沟剖面寒武系 B-02-2d-14-1 样品包裹体均一温度频率图

Fig. 2 The monogenetic temperatures of Cambrian sample B-02-2d-14-1 in Baiyigou section

将所有样品的实测散点数据进行统计分期后得到如图 3 所示的沥青反射率散点纵向分布图。由图中可看出, 三叠系及其以下层位样品的沥青反射率在纵向上随深度、地层厚度变小(或层位变新)而变小的趋势不存在, 较高的热演化程度使得相同期次的沥青反射率趋于一致。

侏罗系、第三系在本区分布零星, 尽管侏罗系煤样的镜质体反射率仅为 0.67% 左右, 第三系煤样则更低, 但由于分布局限, 其上无储盖条件, 不能成为该区的烃源岩, 但侏罗系、第三系的低演化程度表明它们与三叠系及其下层位的地层之间存在较大的热演化间断。

松潘阿坝地区, 三叠系及其以下层位烃源岩干酪根 H/C 原子比普遍很小, 均小于 0.1, 表明有机质脱氢化严重, 残余有机质已不具备生烃能力, 该区烃源岩有机质演化程度已很高, 达到高成熟至过成熟区间。

以上数据表明, 三叠系及古生界地层的热演化程度普遍较高, 达到过成熟中、晚期接近干酪枯竭根阶

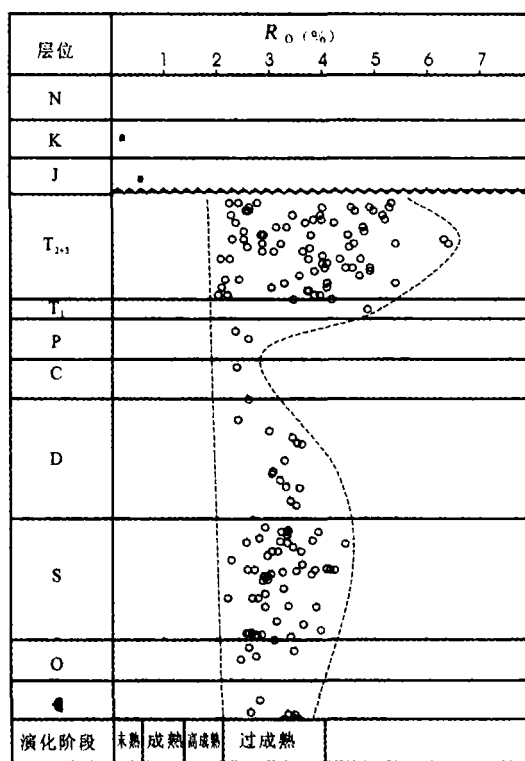


图 3 松潘阿坝地区沥青反射率散点图

Fig. 3 The plot of bitumen reflectance of Songpan-Aba area

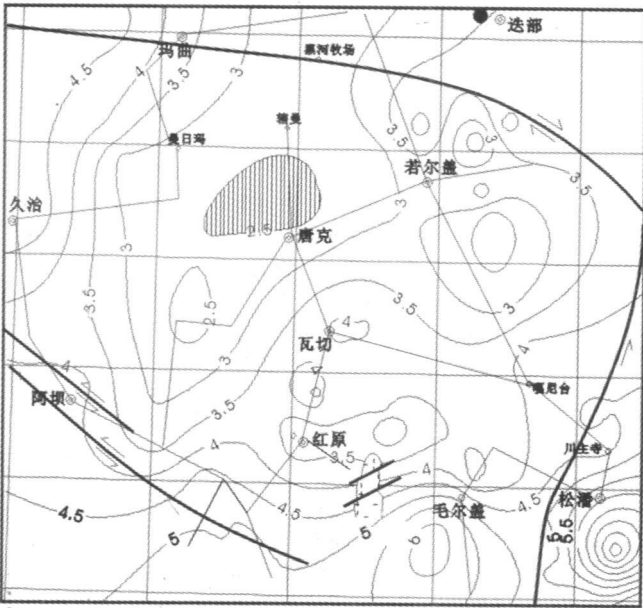
段, 并且均有二次或多次生烃过程, 不同层位样品的沥青反射率差别较小, 甚至倒转。根据泥盆系沥青反射率换算成的镜质体反射率, 最高的一期达 3.9%, 寒武、奥陶系烃源岩的热演化程度更高, 干酪根应达到枯竭阶段。

4 烃源岩热演化程度平面展布特征

平面上松潘阿坝地区几乎全为三叠系所覆盖, 所以三叠系烃源岩的热演化程度及变化规律, 基本可以反映全区各层位的热演化变化趋势。由图 3 中可看出, 由于局部地区受区域变质或火成岩的影响后, 使得三叠系烃源岩部分镜质体反射率高于典型剖面下部层位的反射率, 沥青反射率散点分布范围要比其它层位宽。

三叠系镜质体(或沥青)反射率平面展布特征也基本反映了本区各套地层在不同地区有机质热演化程度的差异和平面展布趋势。三叠系的烃源岩镜质体反射率的平面展布特征, 表现为四周高、中间低(图 4), 以唐克为中心存在一个镜质体反射率小于 2.5% 区域, 四周由于受岩体、周缘挤压高应力及边缘断裂的影响, 使得反射率增高有明显的增高^[7], 且变

化范围也较大, 局部地区 $R_o > 4.0\%$, 有机质已达到枯竭阶段。



当多沟、白依沟及占注下地村剖面均位于达部县西北。平面上该区均为三叠系所覆盖, 沿主要交通路线共采集样品 183 件。图中折线为三叠样品采集路线示意

图 4 松潘—阿坝地区三叠系镜质体反射率 ($R_o\%$) 平面等值线图

Fig 4 The isoline of Triassic vitinite reflectance in Songpan-Aba area

松潘—阿坝地区三叠系(变)泥质岩的伊利石结晶度 IC 值大部分(约 54%)分布在 $> 0.41 \sim 0.50$ 之间, 集中反映了松潘三叠系成岩演化阶段处于成岩作用晚期阶段; 仅有约 20% 的伊利石结晶度 IC 值为 $0.31 \sim 0.40$ 已过成岩作用晚期阶段 (0.42) 的界线, 而达到极低变质作用阶段; 但是约有 19% 的 IC 值分布于 $0.51 \sim 0.60$ 之间, 反映了研究区内更低的成岩演化阶段。从伊利石结晶度测试结果及等值线图(图 5)可以看出, 成岩作用晚期与极低级变质作用的分界线, 在区域上的分布是非常具有规律性。从镇江关向北经川主寺到若尔盖一线以东地区变质作用增强; 从松潘—毛尔盖一线以南地区变质作用增强的趋势非常明显; 在研究区西侧可以看出在阿坝到久治一线也反映出成岩演化程度稍高。而只有以唐克为中心的地区成岩演化程度较低, 伊利石结晶度 IC 值大于 0.42 因此相对全区而言是一个较好的勘探区域。

平面上看, 不管是镜质体反射率还是伊利石结晶度, 二者均表明, 松潘阿坝地区存在着一个以唐克为中心的相对低演化的地区, 烃源及保存条件相对较

好, 该区源岩的镜质体反射率小于 2.5% , 伊利石结晶度 > 0.42 区域。高演化区主要与周边断裂及局部火成岩分布有关。

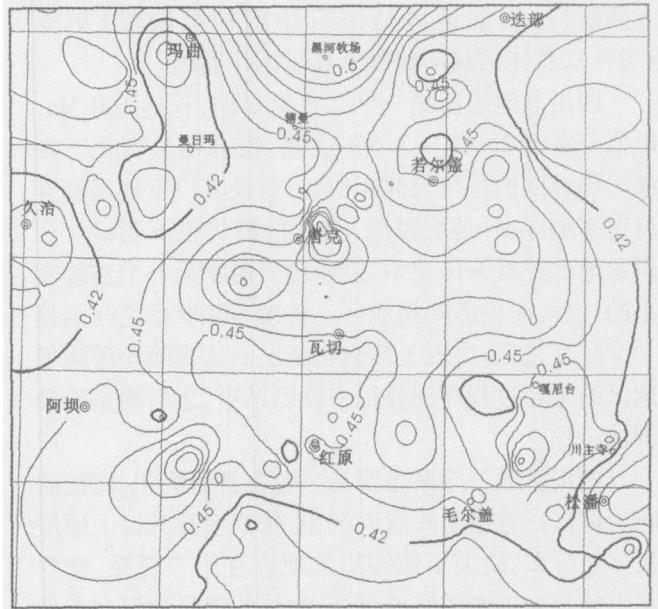


图 5 松潘—阿坝地区三叠系伊利石结晶度平面等值线图

Fig 5 The isoline of illite crystallinity (IC) value in Songpan-Aba area

5 与四川盆地的对比

松潘阿坝地区与四川盆地仅一山(龙门山)之隔, 两者均是扬子地台的西部边缘区, 与扬子地块基底具有相同的特点, 二者同样经历了晚元古代沉积基底形成阶段、古生代海相沉积阶段, 主力烃源层发育层位也基本相同^[6]。

三叠纪后, 随着印支、喜马拉雅运动的进一步发展, 四川盆地由三叠纪的前陆盆地逐渐向陆内山间盆地演化, 侏罗纪以来则主要为河流湖沼相沉积, 三叠系与其上覆地层之间为连续过渡沉积。而松潘阿坝地区, 三叠纪后整体抬升, 大多为第四系直接覆盖, 侏罗系、白垩系及第三系在本区仅有零星分布。

根据近年对四川盆地沥青反射率的研究成果, 其气源岩热演化具有以下几个特点:

岩石中有机质成熟度普遍较高, R_o 值一般大于 1.0% ^[12], H/C (原子比) 小于 1.0 干酪根红外谱图中与脂肪链有关的吸收峰 720cm^{-1} 、 1460cm^{-1} 、 2860cm^{-1} 、 2920cm^{-1} 、 3030cm^{-1} 等特征峰十分微弱甚至消失, 镜下观察, 常见裂缝、洞穴中有干涸状的沥青分布, 这些表明上三叠统及下伏烃源岩都已进入高成

熟至过成熟阶段。

松潘阿坝地区与四川盆地相比,三叠系及其以下地层的镜质体反射率均大于 2.0%,均达到或超过过成熟阶段,局部地区烃源岩达到枯竭阶段($R_o > 4.0\%$),总体的热演化程度高于四川盆地。

四川盆地志留纪—早二叠世早期,长达 160 Ma R_o 值分布于 2.0%~3.5% 之间,没有明显变化。松潘阿坝地区的特征与此相似,三叠及其以下地层沥青反射率随深度(地层厚度)变化的趋势也不明显。四川盆地二叠系—侏罗系,镜质体反射率是一个连续变小的过程,而松潘阿坝地区三叠系与侏罗系之间则是一个突变过程,出现了热演化断层。这表明松潘阿坝地区的生烃过程在三叠纪末就已结束,之后则是抬升剥蚀过程。

四川盆地三叠系主要是一套含膏盐沉积,而松潘阿坝地区三叠系为碎屑岩沉积,侏罗系及其以上地层仅零星分布,缺失了像四川盆地存在于三叠系、侏罗系中的几套重要的储盖组合,油气的储集和保存条件差于四川盆地。

综上所述,松潘阿坝地区各层系烃源岩的成熟度比四川盆地高,由于三叠系膏盐沉积的缺失,使得该区的保存条件较四川盆地差。

6 结论

通过以上研究,发现松潘阿坝地区烃源岩有机质热演化特征具有以下几点特征:

(1) 沥青反射率总体表现为高热演化和多期特征。三叠系及其以下层位的烃源岩已进入高成熟、过成熟阶段,局部地区已达到枯竭阶段。多期的沥青反射率数据表明该区经历过二次或多次生烃。

(2) 三叠系有机质镜质体反射率表现为四周高中间低,以唐克为中心存在着一个热演化程度相对较低、保存条件相对较好的地区,作为新区勘探,应以此为中心进行展开。

(3) 与四川盆地的对比表明,松潘阿坝地区烃源岩演化程度普遍高于四川盆地,该区三叠纪后整体抬升进入剥蚀阶段,三叠系和侏罗系之间存在较大的热演化断层,三叠系及其以上地层的封盖条件不如四川盆地,这对天然气的保存是一个不利因素。

参考文献 (References)

1 蔡立国. 中国南方海相油气勘探主要研究方向. 石油实验地质, 2003, 6: 533~538 [Cai Liguang. Problems and suggestions on marine pe-

troleum exploration in south China. *Petroleum Geology & Experiment* 2003, 6: 533~538]

- 2 蔡立国, 等. 青藏高原东部石油地质基本特征. 南京: 南京大学出版社, 1993 [Cai Liguang *et al.* The Basic Petroleum Geology Characteristics of Tibetan Plateau. Nanjing: Nanjing University Press, 1993]
- 3 戴金星, 傅诚德, 关德范. 天然气地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1997 [Dai Jinxing, Fu Chengde, Guan Defan. New Progress in Gas Geology Research. Beijing: Science Press, 1997]
- 4 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国天然气的聚集区带. 北京: 科学出版社, 1997 [Dai Jinxing, Song Yan, Zhang Houfu. The Gas Accumulation Zone of China. Beijing: Science Press, 1997]
- 5 高志农, 陈远荫. 碳酸盐岩中天然沥青演化特征的再认识. 石油实验地质, 1998, 4: 405~410 [Gao Zhinong, Chen Yuanyin. New understanding to the evolutionary characteristics of natural bitumen in carbonate rocks. *Petroleum Geology & Experiment* 1998, 4: 405~410]
- 6 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地的形成与演化. 北京: 地质出版社, 1994 [Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui *et al.* The Formation and Evolution of Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1994]
- 7 刘文汇, 徐永昌, 张守春, 等. 一种新的成烃机制——力化学作用及其实验证据. 沉积学报, 2000, 18(2): 314~318 [Liu Wenhui, Xu Yongchang, Zhang Shouchun *et al.* A new kind of mechanism for hydrocarbon generation—mechanochemical function and experimental evidence. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000, 18(2): 314~318]
- 8 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集. 北京: 地质出版社, 1992 [Tong Chongguang. The Structural Evolution and Accumulation of Hydrocarbon in Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1992]
- 9 汪泽成, 赵文智, 张林, 吴世祥. 四川盆地构造层序与天然气勘探. 北京: 地质出版社, 2002 [Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Zhang Lin and Wu Shixiang. The Structural Stratigraphy and Hydrocarbon exploration of Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 2002]
- 10 吴俊. 有机显微组分成熟度特征与煤成油气期评价. 石油实验地质, 1995, 17(4): 377~383 [Wu Jun. Characteristics of organic maceral maturity and evaluation of coal-related hydrocarbon phases. *Petroleum Geology & Experiment* 1995, 17(4): 377~383]
- 11 肖贤明, 吴治君, 刘德汉, 等. 早古生代海相烃源岩成熟度的有机岩石学评价方法. 沉积学报, 1995, 13(2): 112~119 [Xiao Xianming, Wu Zhijun, Liu Dehan *et al.* Evaluation of maturity of the early Paleozoic marine hydrocarbon source rocks on the basis of organic petrology. *Acta Sedimentologica Sinica* 1995, 13(2): 112~119]
- 12 尹长河, 王廷栋, 王顺玉, 等. 威远、资阳震旦系干酪根与油裂解气的鉴别. 沉积学报, 2001, 19(1): 156~160 [Yin Changhe, Wang Tingdong, Wang Shunyu *et al.* Differences between kerogen and oil-cracked Gases in Sinian Reservoirs of Weiyuan and Ziyang Area. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19(1): 156~160]
- 13 张渠, 秦建中, 范明, 等. 松潘—阿坝地区下古生界烃源岩评价. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 582~584 [Zhang Qu, Qin Jianzhong, Fan Ming *et al.* Hydrocarbon source rock evaluation of the Lower Paleozoic in Songpan-Aba area. *Petroleum Geology & Experiment* 2003, 25 (Supp): 582~584]

- 14 金聚畅, 秦建中, 张志荣, 等. 松潘—阿坝地区高演化沥青的成因分析. 石油实验地质, 2004 (4): 370~ 374 [Jin Juchang Q in Jianzhong Zhang Zhirong *et al.* Genetic analysis of the high matured bitumen in Songpan-Aba area. *Petroleum Geology & Experiment* 2004, (4): 370~ 374]
- 15 郑和荣, 李铁军, 蔡立国, 等. 中国中西部前陆冲断褶皱带油气地质条件及勘探建议. 石油与天然气地质, 2004 (2): 156~ 161 [Zheng Herong Li Tiejun Cai Liguang *et al.* Petroleum geologic conditions in foreland thrust fold belts in west central China and proposals for exploration. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 156~ 161]
- 16 中国石油地质志第十卷. 四川油气区. 北京: 石油工业出版社, 1987 [Chinese Petroleum Geology Annals Vol. 10 of Oil and Gas in Sichuan Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987]

Comparison of Hydrocarbon Source Rock in Songpan-Aba Area and Sicuan Basin

FAN Ming^{1, 2} QIN Jian-zhong² ZHANG Qu²

(1. Earth Science Department of Nanjing University, Nanjing 210009;

2. Wuxi Petroleum and Geology Research Institute, SINOPEC, Wuxi Jiangsu 214141)

Abstract On the basis of the investigation on hydrocarbon source in Songpan-Aba area, this paper compares the organic thermal evolution with that in Sichuan basin, which has some similarities in structural evolution to Songpan-Aba area before middle Triassic. It is approach that the thermal evolutional level is higher in Songpan-Aba area than that in Sichuan basin, and there are several different Bitumen reflectance levels there. Due to the fault and magna activity, the vitrinite reflectance is higher in the margin than that in the center of Songpan-Aba area. This area centered with Tangke with lower thermal evolution level can be the exploration area at the beginning.

Key words structural evolution, thermal evolution, reflectance