

# 下扬子苏南地区构造-热演化及烃源岩成烃史研究\* ——以圣科1井为例

袁玉松<sup>1</sup> 郭彤楼<sup>2</sup> 胡圣标<sup>1</sup> 曾萍<sup>3</sup> 陈安定<sup>3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国石化南方勘探开发分公司, 昆明 650021;

3. 江苏石油勘探局地质科学研究院, 扬州 225000

**摘要** 下扬子地区为我国南方重要油气勘探区, 圣科1井位于下扬子苏南句容盆地。以其 $R_o$ 为古温标的热史恢复结果表明, 苏南地区整个古生代海相盆地发育阶段热流值相对低而平稳; 印支-早中燕山期, 基底热流值有所升高; 晚燕山期热流值大幅度升高, 早白垩世末达到最高古热流( $84 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ); 进入晚白垩世, 热流值开始降低, 盆地冷却。盆地演化经历了加里东、印支、燕山、喜山四大构造抬升事件, 其造成的不整合面上地层剥蚀量分别为400, 700, 2500, 850 m, 不整合面对应地史时期基底古热流值分别为57, 67, 84, 58  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。生烃史正演计算表明, 下古生界烃源岩经历过多期生烃, 但二叠系和下三叠统烃源岩只经历了一期生烃过程。盆地沉降史和剥蚀量估算结果分析认为, 苏南地区 $K_2$ -E伸展盆地发育阶段表现为弱拉张, 伸展阶段盆地最大沉降量在1000 m左右。从热史、构造沉降史和烃源岩成熟度史综合分析, 苏南地区“二次生烃”的条件不利。

**关键词** 苏南句容 圣科1井 构造-演化 烃源岩成熟度史 二次生烃

下扬子地区是我国南方重要油气勘探区之一, 以通扬隆起为界, 其北为苏北盆地, 其南称苏南地区。圣科1井位于下扬子苏南地区句容盆地, 从海相构造区划, 属于南陵-句容推覆构造带(图1)。该井是以解剖江苏下扬子区中、古生界地下地质情况为主, 并侦查中、古生界海相地层含油气性为目的的科学探井, 它在中国南方海相油气勘探中占有重要地位。圣科1井钻井地质剖面揭示的地层有中、上寒武统, 下奥陶统, 下志留统, 上泥盆统, 二叠系, 上三叠统及上白垩统。但上二叠统龙潭组就重复出现四次, 下三叠统青龙组重复出现3次。构造剖面揭示该区地质构造、地层变形、变位十分复杂, 证实为一经过强烈推覆、挤压形成的倒转向斜。

复杂的构造型式与地层重复无疑给该井的地史与热史恢复带来困难。但作为一口科学探井, 又为苏南地区惟一一口有比较系统的古温标测试数据

(镜质体反射率)的钻井, 对其进行热史恢复, 获得准确的热史参数也就尤显珍贵, 将为苏南乃至整个下扬子地区油气勘探提供区域构造-热演化史方面的基础数据和烃源岩成烃史资料, 对区内油气成藏研究和勘探部署具有重要意义。

## 1 区域地质构造背景

作为下扬子板块的一部分, 苏南地区基底具有下扬子基底的特征, 由双重结构的前震旦系变质基底组成。其下层基底由深变质的太古界及下元古界组成, 上层基底为浅变质上元古界板溪群及相当地层组成。下扬子区的基底与典型的古老克拉通盆地基底有别, 形成时间较晚, 固化程度不高, 是其构造活动性强的因素之一。关于下扬子地区的构造演化史, 许多作者从不同的角度做过论叙, 但基本一致认为下扬子地区经历了早、中三叠世以前的稳定

2004-09-03 收稿, 2004-11-01 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40172100)和中国石化股份有限公司重点科研项目: 南方中生代热历史及烃源岩热演化资助项目

E-mail: yuanyusong@126.com

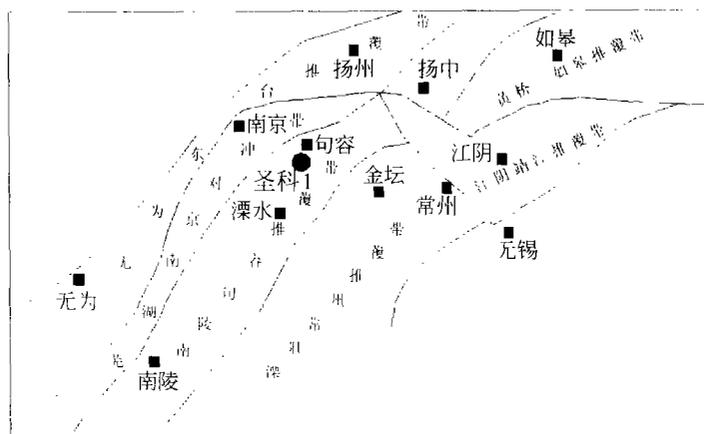


图1 圣科1井构造位置图

沉降、晚三叠世至早白垩世的挤压推覆、晚白垩世以后的拉张断陷、喜山期的隆升等构造演化历程<sup>[1]</sup>。

## 2 热史恢复

### 2.1 热史恢复原理与方法

关于沉积盆地热史恢复的原理过去已有过许多文献详细论叙过<sup>[2-4]</sup>。归纳起来不外乎两种基本模式，一是以研究区域热背景为目标、以与盆地成因相联系的地质地球物理模型为依据、以有限差分或有限元数值方法为手段的岩石圈尺度上的热史模拟；二是以研究盆地热演化史(热流史与地温史)为目标，以盆地沉积、构造演化史为依据、以古温标反演计算为手段的盆地尺度上的热史模拟。

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>[5]</sup>。考虑到研究区内现有古温标数据的实际情况，本文采用古热流法进行热史恢复。上述3种热史恢复方法，文献[5]已有详细介绍，在此仅就古热流法做一简单介绍。

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。影响地层温度史的主导因素包括：盆地热流史和地层埋藏史。一旦盆地热流史和地层剥蚀厚度已知，即可通过对地层埋藏史的恢复来模拟与之相伴随的非稳态热过程，从而重建地层温度史<sup>[6]</sup>。因此，古热流法热史反演的变量并非样品或地层的温度史，而是盆地热流史和不整合面地层剥蚀量，因而古热流法是一种间接反演法。

反演过程中，采用的镜质体反射率正演模型为

平行化学反应模型<sup>[9]</sup>，采用的计算机软件是中国科学院地质与地球物理研究所与英国帝国理工大学合作，在中文Windows平台上开发出的着重盆地热史恢复的“油气盆地热史恢复模拟系统，Thermodel for Windows”。

### 2.2 钻井地质数据文件的建立

应用“Thermodel for Windows”进行钻井热史反演，钻井地质数据文件的建立是十分重要的环节。建立钻井地质数据文件的基本原则是以钻井所在构造单元的沉积、构造演化背景为基础，合理划分构造层和确定不整合面。圣科1井钻井地质剖面所揭示的地层赋存状况与构造样式非常复杂，要想尽量接近真实地恢复其埋藏史，在建立地质数据文件时必须全面考虑构造演化、地层赋存、构造样式以及逆冲推覆与断层作用。首先，从区域构造运动考虑，广西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动在扬子区均有较强的表现，从而由下至上，可划分出四大构造层。其次，根据地层缺失情况，在大构造层之内再划分次级构造层和不整合面。下古生界缺失晚奥陶世与晚志留世地层，故将早古生代划分两个次级构造层；上古生界缺失孤峰组与大隆组沉积，从而也划分出两个次级构造层。最后，考虑到印支运动以后情况复杂，同一时代的地层多次重复出现，确认何者为原地体，何者为推覆体以及推覆作用发生的时间至关重要。圣科1井卷入重复的地层为二叠系龙潭组和三叠系青龙组，将所有重复出现的地层视为推覆体(或等效推覆体)，那么，推覆体累计厚度为1611 m。前人的研究结果认

为, 句容地区推覆作用发生的时间为早白垩世之后晚白垩世之前<sup>1)</sup>, 本文采用了这一成果。

### 2.3 热史反演参数

**2.3.1 岩性参数** 岩性参数是热史反演所需基本参数之一。岩性参数包括地层所含岩性的密度、热

导率、比热、生热率等。圣科1井揭示的主要岩性有灰岩、白云岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等, 其热导率、生热率等参数根据苏南地区钻井实测数据统计获得, 个别参数则采用国内外经典文献数据。参数赋值见表1。

表1 圣科1井主要岩性基本参数表

	灰岩	白云岩	砂岩	粉砂岩	泥岩	页岩
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.75	2.85	2.7	2.6	2.402	2.4
热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	3.18	4.8	2.41	2.4	2	2.5
比热/(kcal·K <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ) <sup>2)</sup>	0.2297	0.2177	0.2321	0.2560	0.1938	0.1938
生热率/(μW·m <sup>-3</sup> )	0.62	0.36	1.43	1.6	2.38	2.38

**2.3.2 现今地表热流** 现今地表热流是热史反演中重要约束条件之一。由于受井温测试资料的限制, 未能计算圣科1井的大地热流值, 故采用圣科1井附近地区过去所发表的实测大地热流数据, 计算其平均值获得。选取圣科1井附近6个测点的实测大地热流值(南京63.6 mW·m<sup>-2</sup>, N1井67.3 mW·m<sup>-2</sup>, 句容1井51.5 mW·m<sup>-2</sup>, 句容68.3, 69.3, 67.3 mW·m<sup>-2</sup>)计算的大地热流平均值为64 mW·m<sup>-2</sup>。这个平均值比下扬子地区的背景值要稍高, 下扬子地区的大地热流背景值为60 mW·m<sup>-2</sup>[10]。

**2.3.3 古温标数据分析** 镜质体是沉积岩中最常见的固体形态有机质, 其反射率随热演化程度增加而增大, 且具有不可逆性, 即不会因后期地层抬升冷却而减小。因此长期以来它作为一种地质温度计被广泛用于研究烃源岩成熟度和沉积盆地热演化历史。用镜质体反射率确定沉积盆地、生油层、煤层的古地温已有20多年的历史, 理论基础可靠, 方法上也比较成熟。

在热稳态下, 镜质体反射率与深度呈线性关系, Ro剖面反映连续时间段内样品所在地层的地温梯度, 当地温梯度高时, Ro值随深度增加快, 反之增加慢; 当Ro剖面不连续或存在突变与分段

时, 则反映剖面中不同线性段内地温梯度不同, 而且还能反映不整合、断层、岩浆侵入与样品埋藏史等地质现象以及不整合面上地层剥蚀量大小。圣科1井Ro剖面(图2)明显地分为两段, 由推覆体组成的向斜上翼段Ro值随深度变化缓慢, 由原地体组成的向斜下翼Ro值随深度变化快。剖面顶部第一个样品现今埋深仅577 m, 来自二叠系龙潭组, 但现今Ro值却高达0.78, 显然与实际埋深不符, 这一特征反映挤压、推覆现象的存在, 并表明地层来自深部。Ro剖面不连续性反映推覆作用发生之前, 下翼地层之上已有相当厚度的地层被剥蚀, 这就是被剥蚀掉的前陆盆地时期沉积的T<sub>3</sub>-J<sub>1-2</sub>地层。

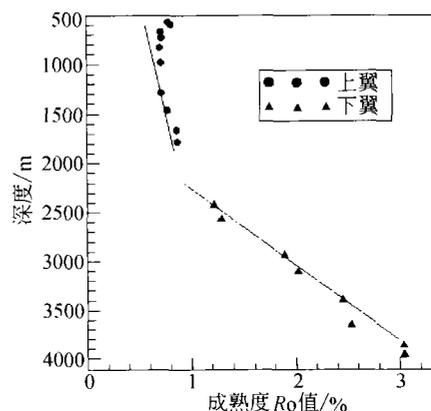


图2 圣科1井Ro-深度剖面图

1) 周祖翼, 等. 下扬子区印支期以来主要构造运动性质表现及其对油气藏形成与改造的作用. 中目石化股份有限公司油田勘探开发事业部南方海相油气项目经理部, 2001, 132

2) 1 cal=4.1868 J

### 3 热史恢复结果及构造-热演化涵义

#### 3.1 热史恢复结果

圣科1井古热流法热史反演结果(图3)表明,整个中、古生代海相盆地发育阶段热流值相对低而平稳;印支-早中燕山期,基底热流值有所升高;晚燕山期,热流值大幅度升高,早白垩世末达到最高古热流( $84 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ),早白垩世末以后,热流值开始降低,盆地冷却,至晚白垩世末热流趋于稳

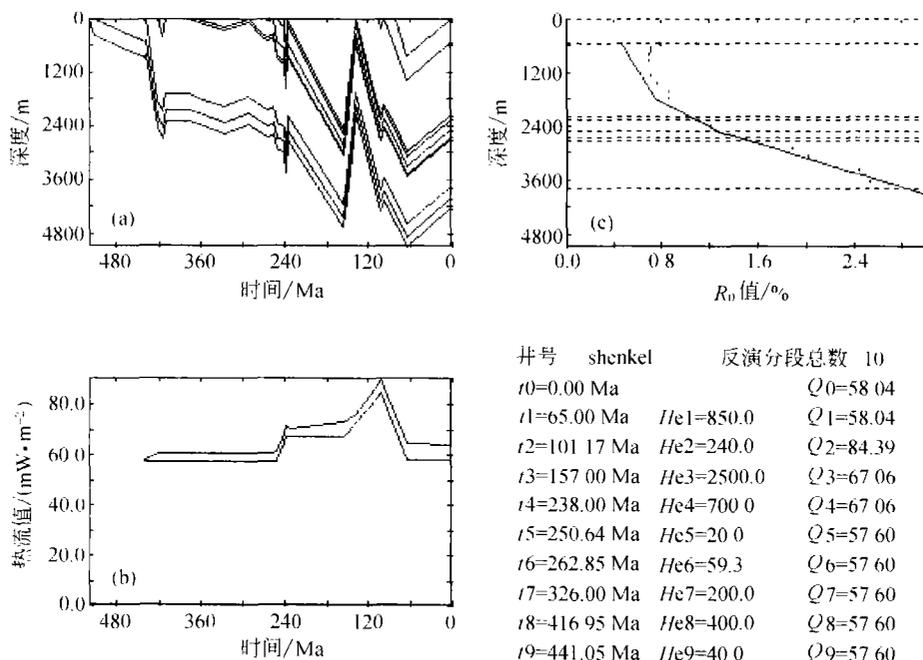


图3 苏南地区圣科1井热史反演结果

(a) 地层埋藏史; (b) 盆地热流史; (c) 预测值与实测值的拟合程度

图3(a)中地层埋藏史表明,圣科1井最后一期抬升时间为晚白垩世末,这与磷灰石裂变径迹资料所代表的结果一致.苏南地区的磷灰石裂变径迹年龄资料表明浦口组沉积未发生快速抬升<sup>[11]</sup>.

图3(c)中,实线代表模拟计算过程中 $R_o$ 预测值.不难发现,上端预测值与实测值不太吻合,这并非热史路径不可靠,而正是挤压、推覆作用引起地层变形和倒转现象的表现.因为顶部样品来自倒转向斜上翼(最上面3个样品来自二叠系龙潭组),该套地层是通过挤压推覆、褶皱变形后从深部上来的,之前已经历过较大的埋深和较高的古地温,从而导致实测值比理论预测值高,以及 $R_o$ 值随深度

定.从区域构造和盆地演化角度,下扬子区具重大意义的抬升剥蚀事件有四期,即加里东运动、印支运动、燕山运动和喜山运动.四大构造运动对应四个区域性不整合面.‘‘Thermodel for Windows’’软件中古热流法热史反演在恢复热流史( $Q$ ,  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ )的同时,还能同步估算不整合面上地层剥蚀量( $H_o$ , m).估算结果(表2)表明,加里东、印支、喜山不整合面上剥蚀量不大,燕山期剥蚀厚度最大,达2500 m.

变化的倒转现象.可见,热史反演结果在一定程度上还能反映挤压变形、推覆作用等地质现象.

表2 圣科1井不整合面剥蚀量与古热流估算结果

不整合面	剥蚀量/m	基底古热流值/ $(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$
喜山不整合面	850	58
燕山不整合面	2500	84
印支不整合面	700 <sup>a)</sup>	67 <sup>a)</sup>
加里东不整合面	100 <sup>a)</sup>	57 <sup>a)</sup>

a)热史路径往下顺延最佳拟合值,仅作参考意义

#### 3.2 构造-热演化涵义

构造演化与热演化是盆地演化史中不可分割两

个方面,两者相辅相成,各为主体同时又各为客体。一方面,构造演化影响乃至决定着盆地的热演化史,另一方面,深部岩石圈热结构的改变又促进或决定着构造运动的发生。就盆地热演化史而言,包含热流史和地层温度史两方面的涵义。热史恢复即对盆地的热流史和地温史进行重建。当盆地热流史确定后,地层温度史主要由沉积埋藏史决定,因此,盆地热流史更具热演化背景含义。

圣科1井热史反演结果既与苏南地区构造演化特征相一致,又与中国东部区域构造演化背景相吻合。印支运动以前,苏南地区古生代海相盆地演化阶段处于稳定克拉通台地背景之下,基底热流值较低而稳定。印支期是亚洲大陆东部古地理、古构造格架发生巨变的转折点,是亚洲大陆与太平洋板块之间构造体制演化新阶段的开始。印支运动使苏南地区结束了海相盆地沉积演化史,完成了由海到陆的变迁,地壳开始活化,基底热流值有所升高。印支运动后,苏南地区由洋陆板块构造体制稳定阶段进入板内形变体制的活动阶段,形成了 $T_3-K_1$ 陆相碎屑含煤建造及火山岩系,此阶段既是 $T_3-K_1$ 压性盆地的形成阶段,又是古生代地层发生强烈褶皱、冲断、原始构造形态被改造阶段。中国东部新生代玄武岩及其包体的矿物学、岩石学和地球化学研究发现,中国东部在燕山期主要表现为岩石圈减薄,并在其东部出现软流圈地幔与地壳直接接触的独特地质现象,早先存在的古老岩石圈地幔大多由于拆沉作用而不复存在,现今岩石圈地幔主体是在燕山晚期及其以后形成的。因此,中国东部燕山运动的本质就是岩石圈的减薄<sup>[12]</sup>。岩石圈减薄,软流圈上升,盆地基底热流升高。圣科1井于早白垩世末(101 Ma)基底热流达到最高值,反映了晚燕山期的构造热事件。从晚白垩世开始,热流值降低,盆地冷却。晚白垩世是中国东部地区构造演化的另一转折点,区域应力场由挤压转换成NW-SE向的拉张。此阶段最大的特点是印支-早燕山期形成的挤压构造发生反转,挤压阶段形成的逆断层反转为正断层,与此同时,中生代上叠陆相盆地形成,并经历了早期充填、拗陷,晚期断陷的盆地演化过程。但从圣科1井的热史恢复结果看,苏南地区 $K_2-E$ 时期拉张作用与中国东部其他地区相比显得较弱,沉降幅度小,伸展阶段的最大总沉降量仅1000 m左右,

其中构造沉降量600 m左右(图4),既不如苏北(苏北盆地最大沉积厚度约为6 km),更小于渤海(渤海湾盆地晚始新世、渐新世地层厚度达10 km)。

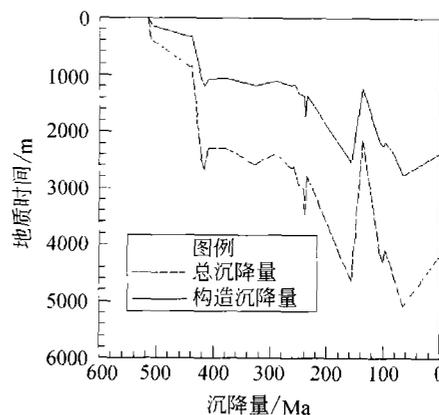


图4 圣科1井构造沉降史图

总之,盆地演化的低热流阶段与古生代海相盆地演化的稳定阶段相对应;印支-早中燕山期热流值小幅度升高是新构造运动体制下地壳开始活化的表现;晚燕山期高热流与该时期中国东部岩石圈减薄、软流圈上升及强烈的区域构造岩浆活动热事件相对应;喜山期的冷却过程表明中生代构造热事件的结束,且在盆地演化的伸展阶段,苏南地区拉张作用相对较弱,岩石圈较厚,基底热流值较低。

#### 4 烃源岩成烃史

通过古热流法进行热史反演之后,得到盆地底部热流史和各不整合上地层剥蚀量,再通过地温史模拟器计算出地层温度史。在求取地层温度史后,通过正演模型可以计算出烃源岩成熟度史。苏南句容地区圣科1井下古生界烃源岩(以中寒武统底部烃源岩为例说明,奥陶系、志留系底部烃源岩成熟度史往后顺延15 Ma左右)于430 Ma开始成熟,430—230 Ma处于成熟早期,230—200 Ma处于成熟晚期,200—178 Ma达高成熟阶段,178 Ma以后进入过成熟。早古生代三套主要烃源岩在110—100 Ma间还有一次快速增熟过程,100 Ma以后成熟度演化终止。二叠系底部烃源岩于210 Ma进入成熟阶段,于167 Ma进入成熟晚期阶段,于100 Ma刚跨入高成熟阶段便终止演化。三叠系底部烃源岩现今还处于成熟生油阶段(图5)。

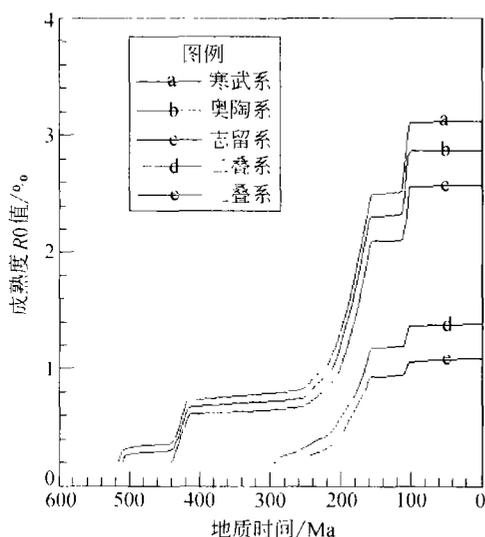


图5 圣科1井主要烃源岩成熟度史

圣科1井寒武系、奥陶系、志留系3套早古生代烃源岩都不同程度地经历过多期生烃。其中寒武系烃源岩在志留纪末已大量生烃，晚古生代期间虽连续生烃，但产烃率低，中三叠世进入第二期生烃高峰。奥陶系底部烃源岩在志留纪末已开始生烃，中三叠纪达到生烃高峰。志留系底部烃源岩在志留纪末有少量烃类生成，主要生烃高峰为中三叠世-早中侏罗世。二叠系和下三叠统烃源岩只经历了一期生烃过程，生烃开始时间和生烃高峰都出现在早白垩世。

综合圣科1井的热流史与烃源岩成熟度史分析，苏南地区“二次生烃”条件不利（这里的“二次生烃”，特指 $K_2$ -E上叠伸展盆地沉积引起的中、古生界海相烃源岩埋深增熟生烃）。一方面，下古生界烃源岩在中侏罗世末已达过成熟阶段，于100 Ma成熟度演化终止。二叠系与三叠系烃源岩现今还处于高成熟阶段或成熟生油阶段，也于100 Ma后不再增熟。古生界烃源岩在早白垩世末或更早烃转化率就接近100%。另一方面，盆地达到最高古热流的时间为早白垩世末，此后盆地基底热流是一个降低过程，而且， $K_2$ -E时期的弱伸展形成的上叠中新生代盆地沉积厚度不大，且抬升时间早（早第三纪），从而海相烃源岩埋深增熟的条件不利。当然，在苏南地区也不排除存在下第三系沉积的深凹地带，如直溪桥断陷等局部地区存在“二次生烃”的可能。

## 5 结论

通过古热流法对圣科1井热史反演，可初步认为：

(1) 苏南地区热-构造演化经历了古生代克拉通内陆台地海相盆地阶段的低热流；印支期地壳开始活化阶段的热流值小幅度上升； $J_3$ - $K_1$ 时期走滑盆地阶段的高热流及 $K_2$ -E时期弱伸展阶段的低热流过程。

(2) 与加里东、印支、燕山、喜山四大构造抬升事件相对应的不整合面上地层剥蚀量差别较大，以燕山期剥蚀量最大。

(3) 苏南地区 $K_2$ -E时期表现为弱拉张，伸展阶段最大沉降量1000 m左右。

(4) 下古生界烃源岩存在多期生烃，二叠系和下三叠统烃源岩只经历了一期生烃过程。

(5) 从热史、构造沉降史和烃源岩成熟度史综合分析，苏南大部分地区“二次生烃”条件不利。

## 参 考 文 献

- 1 张建球. 下扬子中、古生界构造演化与油气藏形成. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 146-149
- 2 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 2004, 3-11
- 3 柳广弟. 含油气盆地沉降史和热史分析. 北京: 石油大学出版社, 2000, 320-328
- 4 李荣西, 等. 用镜质体反射率重建沉积盆地构造演化特征. 矿物学报, 2001, 21(1): 706
- 5 胡圣标, 张容燕. 油气盆地热史恢复方法. 勘探家, 1998, 1: 56-61
- 6 何丽娟. 沉积盆地构造热演化模拟的研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(6): 661-662
- 7 何丽娟, 等. 拉张盆地构造热演化模拟的影响因素. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(2): 223
- 8 Lutz T M, Omar G. Inverse methods of modeling thermal histories from apatite fission track data. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104: 181-195
- 9 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG Bulletin, 1990, 10: 1559-1570
- 10 丁良书, 等. 下扬子区地温场和大地热流密度分布. 地球物理学报, 1995, 38(4): 474
- 11 周祖翼, 等. 裂变径迹分析及其在沉积盆地中的应用. 石油试验地质, 2001, 23(3): 334
- 12 吴福元, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 2000, 6(3): 383-385