

文章编号:0253-9985(2008)05-0607-07

# 海相盆地热史恢复方法体系

胡圣标,何丽娟,朱传庆,汪集旻

(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)

**摘要:**从多期复杂热史的记录与恢复入手,介绍了常规热史恢复的基本原理和方法以及近些年古温标研究和构造-热演化模型方面的进展情况,然后针对海相残留盆地多期复杂热史恢复这一特殊问题,提出了盆地与岩石圈尺度并举、不同封闭温度的多种古温标和盆地模型结合的海相残留盆地热史恢复体系的初步思路以及工作的方法,藉以引起讨论和思考,促进海相盆地热史恢复研究的进展。

**关键词:**多期复杂热史;热史恢复方法体系;海相盆地

**中图分类号:**TE121.1

**文献标识码:**A

## Method system of thermal reconstruction for marine basins

Hu Shengbiao, He Lijuan, Zhu Chuanqing, Wang Jiyang

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

**Abstract:** Unfolding itself first with record and reconstruction of multiple-episode thermal evolution, the paper introduces the basic principles and methods adopted in conventional thermal history reconstruction, summarizes the latest advancement in the research of palaeotemperature scale and basin models, and proposes a possible system of thermal reconstruction for paleo-marine basins as well as related working methods, which puts emphasis on both basin scale and lithosphere scale and integrates multiple palaeotemperature scales with basin models. Hopefully, they may lead to comprehensive discussion and thinking over the issue and promote the advancement of thermal reconstruction for paleo-marine basins.

**Key words:** multiple episode thermal evolution; method system of thermal history reconstruction; marine basin

中国大陆地区海相盆地形成时代早(古生代或更早),经多期次构造叠加与改造,海相沉积盆地的原形已不复存在,因此刘光鼎先生称之为“残留盆地”。海相残留盆地长期和复杂的构造-热演化过程决定了其热史的多期性和复杂性。鉴于盆地热史的恢复过程是从现今追索到过去,因此海相盆地上覆陆相盆地或陆相地质时期热史的恢复乃海相残留盆地热史研究所不可逾越的工作。海相残留盆地的地质特点以及它与陆相盆地热史的密切关联决定了海相盆地较陆相盆地更为复杂<sup>[1]</sup>,它所要求的热史恢复技术和方法更为苛刻,远非某种单一的热史恢复方法就可以解决,它需

要一个更为复杂和多样化、且彼此补充的热史恢复方法体系。本文结合中石化前瞻性项目“中国陆域海相沉积盆地热体制与油气资源潜力”的研究实践,就海相盆地热史恢复方法体系的概念、构成及其相关因素作一初步探讨。

## 1 多期复杂热史的记录与恢复

在讨论海相盆地热史恢复方法体系之前,有必要阐明一下盆地多期复杂热史是如何被记录和恢复的。盆地演化过程中其热状态是变化的,这种变化直接影响盆地内油气生、运和储等动力学

收稿日期:2008-08-18。

第一作者简介:胡圣标(1963—),研究员、博士生导师,地热学与盆地热史恢复。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40172100)。

过程。盆地热史(包括盆地热流史和地层温度史)的恢复不仅对烃源层生烃期次、有机质成熟度史的确定和初次运移量及区带评价乃至圈闭评价等油气成藏描述具有不可或缺的意义,同时它也是研究盆地构造-热演化过程的一个重要方面。热史的恢复可以在岩石圈尺度和/或盆地尺度上进行。

### 1.1 岩石圈尺度的构造-热演化模拟

在岩石圈尺度上,盆地热史可根据盆地成因,通过盆地构造-热演化或地球物理模拟来恢复<sup>[2]</sup>。如,拉张盆地构造热演化模拟是在岩石圈尺度通过求解瞬态热传导方程来研究盆地在形成演化过程中的热历史及沉降史。它是建立在拉张盆地的地质、地球物理模型基础之上的。McKenzie (1978)<sup>[3]</sup>最早提出了一维瞬时均匀拉张模型,并模拟计算了拉张盆地的热历史。此后,随着对拉张盆地研究的深入,地质、地球物理资料的积累和丰富,及计算机和有限元模拟技术的发展,有关拉张盆地的模型及热模拟迅速发展,从瞬时拉张模型<sup>[3]</sup>、有限时拉张模型<sup>[4]</sup>,到多期拉张模型<sup>[5~7]</sup>,模型的每一步进展都为热史研究带来了重要发展。

在盆地尺度上,热史则是利用各种古温标[如 $R_o$ (镜质体反射率)、裂变径迹、 $(U-Th)/He$ 、自由基浓度等]来重建。古温标的种类繁多,但利用古温标在盆地尺度内进行热史恢复的基本方法不外乎以下3种:①随机反演法;②古地温梯度法;③古热流法<sup>[8~13]</sup>。热史恢复的关键是恢复不同地质时期的古地表热流,而恢复盆地古热流的关键在于是否存在使古温标所记录的早期热史信息得以保存的构造-热演化条件。在盆地尺度和岩石圈尺度上进行热史恢复的方法是不同的,盆地尺度依赖于古温标,岩石圈尺度则强调盆地的成因模型。

### 1.2 盆地尺度的古温标热史反演

就盆地尺度上多期复杂热史的记录和恢复过程,我们以济阳凹陷义和庄凸起上的义135井<sup>[14]</sup>来予以说明。义135井有新生界、中生界和古生界3个构造层组成。钻井的 $R_o$ 数据以分割3个构造层的不整合面为边界呈现跳跃变化(图1a)。根据 $R_o$ 值与温度和时间关系的动力学模型<sup>[15]</sup>,即

可计算出该构造层各样品对应的古温度值,从而得到当时的古地温剖面,并恢复出样品所在构造层达到最高古地温时的古地温剖面。所得古地温剖面表现为以构造层为单位的分段线性分布,且下伏层段古地温高于上覆层段(图1b),表明下伏层段经历了更高的古地温,且该井3个构造层分别于不同地质时期达到了最高古地温。如果某一构造层在早期所经历的最高古地温高于后期所经历的最高古地温,即未发生后期的热叠加和覆盖,那么处于最高古地温时的古温度会被作为最高古地温计的 $R_o$ 值所记录并得以保存。如果某一构造层在过去达到最高古地温,根据各构造层古地温剖面上古地温与深度的关系即可计算出该构造层达到最高古地温时的古地温梯度( $G = dT/dZ$ ),再由古地温梯度和剥蚀面处的古温度( $T_i$ )与古地表温度( $T_s$ )的差值可计算出相应不整合面上的剥蚀量( $E$ ): $E = (T_i - T_s) / (dT/dZ)$ (图1c,d)。根据所获得的剥蚀量,即可进行埋藏史恢复并得到不同层位达到最高古地温时的古孔隙度,由古孔隙度和现今岩石样品热导率及相应时刻的古地温梯度即可计算出当时的古热流值( $q$ )(图1e)。根据埋藏史和热流即可计算出各地层或样品所在位置的地温史,而根据地温史即可正演出样品的理论古温标值,从而与实测值进行拟合(图1f)。这就是利用古温标进行钻井热史恢复的原理。

### 1.3 盆地与岩石圈尺度热演化研究中值得注意的问题

利用古温标进行海相盆地多期复杂热史恢复需要牢记以下两条基本定律:①热史的可恢复定律,只有地层早期古地温高于晚期古地温时热史才得以恢复;②热史的可记录定律,老地层可以记录后期热史,但新地层不可能记录更老地质时期的热史。具体到一个研究区,盆地热史恢复如何入手、如何推进,可将整个过程分为以下3个阶段。阶段一:综合分析区域地质和钻井情况,部署采样计划。具体内容如下:①区域地质,即构造-热事件、构造活动期次与抬升剥蚀、古地理环境-古隆起及其变迁;②钻井地质,即钻井层位、埋藏史、不整合面及其性质;③盆地热演化,即剖面(古隆起)和钻井——确保各构造旋回均有剖面或钻井控制。阶段二:样品采集、碎样分选、实验室测试。阶段三:数据综合解释与热史恢复。具体内

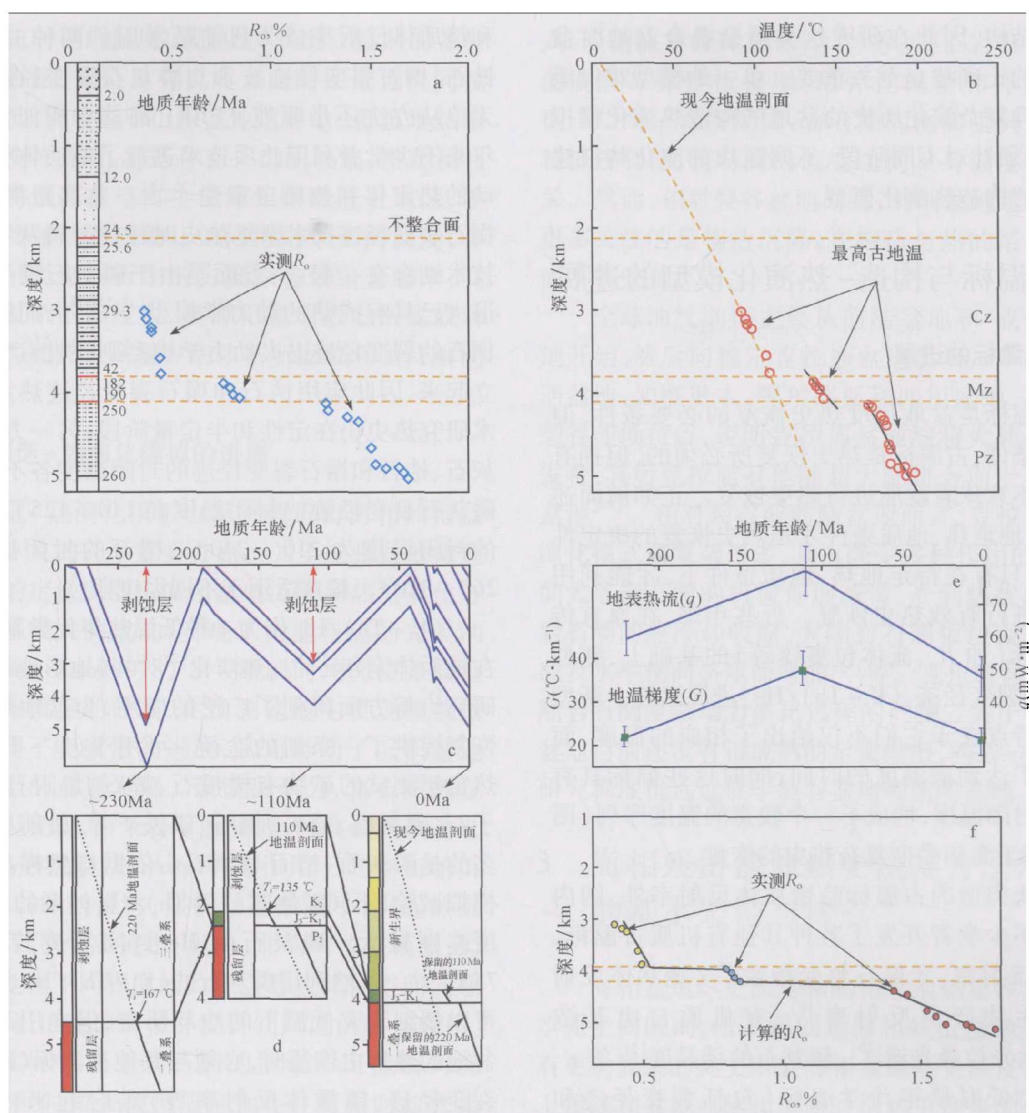


图1 济阳凹陷义和庄凸起135井多期热史恢复

Fig. 1 Reconstruction of multiple-episode thermal evolution in Well Yi-135, Yihezhuang uplift, Jiyang depression

容包括:①温标数据的定性解释;②方法选取与软件开发;③定量模拟到终极的盆地热史。盆地地尺度的热史恢复需要有效处理好野外-室内(实验室)、定性-定量、单井-盆地的关系。其中,采样部署攸关整个热史恢复的成败,需要予以足够重视。

另外,由于中国板块自古生代以来的多次构造运动造成了许多不同类型的沉积盆地具有鲜明的中国特色,以致给盆地的分类带来许多不确定性,更给盆地的构造热演化模拟带来了不少的困难。我国沉积盆地往往经历多个演化阶段,叠合盆地是我国盆地性质和演化的主要特色。同一盆

地在不同时期、同一时期盆地不同区块往往经历着不同的构造运动特征。如塔里木和四川盆地,演化历史长且复杂,是古生代海相克拉通与中、新生代前陆盆地组成的叠合盆地。以塔里木盆地为例,它是一个在前震旦纪陆壳基底上发展起来的大型前陆-克拉通叠合盆地,具有演化历史漫长、多阶段构造演化、充填层系多的特点。盆地的形成经历了震旦纪-中泥盆世、晚泥盆世-三叠纪和侏罗纪-第四纪3个伸展-聚敛旋回演化阶段。伸展期原型盆地地层层序较稳定;聚敛期原型盆地地层侧向变化大。盆地演化与构造体制转换的地球动力学过程与方式决定了盆地具有复杂的叠

加地质结构,因此在研究这类复杂叠合盆地时盆地模型的正确建立至关重要。单一的模型难以满足这类具复杂演化历史的盆地的构造热演化模拟研究,必须针对不同阶段、不同区块的演化特征建立相应的构造热演化模型。

## 2 古温标与构造-热演化模型的进展

### 2.1 古温标的进展

古温标是盆地尺度热史恢复的必要条件,但非充分条件:古温标是热史恢复所必须的,但拥有古温标不意味着就能进行热史恢复。正如前面提及的,盆地地热、地质条件才是热史恢复的决定性因素,即只有在特定地热、地质条件下,才能利用古温标进行有效热史恢复。近些年来,在原有传统古温标(如  $R_o$ 、流体包裹体等)的基础上,新型温标[如裂变径迹、 $(U-Th)/He$ ]进展迅速。新型温标的特点在于它们不仅给出了相应的温度,而且给出了达到该温度的时间;同时这些温标具有不同的封闭温度,构成了一个较宽的温度序列(图2),有利于海相多期复杂热史的恢复。

传统类型的古温标除镜质体反射率外,国内外已有不少学者开发了各种其他有机质古温标,如沥青反射率、牙形石色变指数<sup>[16]</sup>、镜状体反射率<sup>[17]</sup>、生物碎屑反射率<sup>[18]</sup>、有机质自由基浓度<sup>[19]</sup>、激光拉曼光谱<sup>[20]</sup>、伊利石的结晶度<sup>[21]</sup>等。

新型低温热年代学温标[包括裂变径迹和 $(U-Th)/He$ ]是近些年发展最快的领域。利用磷灰石、锆石和榍石裂变径迹恢复盆地的热历史也是目前最常用的方法,尤其是磷灰石裂变径迹已

和镜质体反射率成为目前最常用的两种古温标。锆石、榍石裂变径迹技术与磷灰石裂变径迹技术无论从方法还是原理、应用上都具有相似性。近年来不少学者利用此项技术进行了地质体构造运动的热定年和热历史重建<sup>[22,23]</sup>。尤其是将锆石、榍石裂变径迹技术恢复热史时往往与磷灰石裂变技术结合在一起:一方面是由于磷灰石裂变径迹退火已具有成熟的动力学模型<sup>[15,24-26]</sup>,而锆石和榍石的裂变径迹退火动力学模型则还没有完全建立起来,因此应用锆石和榍石裂变径迹热定年技术研究热史仍在定性和半定量阶段;另一方面,磷灰石、锆石和榍石裂变径迹的封闭温度各不相同,磷灰石裂变径迹的封闭温度在110~125℃,锆石的封闭温度为210~240℃,榍石的封闭温度在265~310℃,各自适用于不同温度段。

$(U-Th)/He$ 作为一种低温热年代学新技术,在地质体定年<sup>[27,28]</sup>、热演化<sup>[29-31]</sup>和地形地貌演化研究<sup>[7]</sup>等方面得到了广泛的应用,为盆地热历史恢复提供了一条新的途径。可用于 $(U-Th)/He$ 热定年测试的矿物有橄榄石、辉石、角闪石、石榴子石、磷灰石、锆石、榍石、磁铁矿等,目前应用较多的是磷灰石、锆石和榍石。依据自然样品和热模拟试验,不同矿物其 $(U-Th)/He$ 体系的封闭温度差别较大。磷灰石的He封闭温度较低,为75℃<sup>[32]</sup>。虽然利用磷灰石的 $(U-Th)/He$ 热定年可以精细研究低温下的冷却历史,但在用于沉积盆地的热历史恢复时,必须与其他古温标(磷灰石裂变径迹、镜质体反射率等)结合起来才能奏效<sup>[33,34]</sup>。磷灰石裂变径迹和He热定年技术的结合可以揭示45~110℃温度范围的精细冷却历史。锆石的 $(U-Th)/He$ 封闭温度早期认为在140~160℃<sup>[35]</sup>,目前主要认为在170~190℃<sup>[36]</sup>;榍石的 $(U-Th)/He$ 封闭温度为191~218℃。目前国际上的研究实例,均采用将 $(U-Th)/He$ 方法与 $R_o$ 、裂变径迹甚至K/Ar和Ar/Ar等其他同位素定年技术结合起来进行,以便利用不同矿物 $(U-Th)/He$ 封闭温度的不同,综合起来对复杂热史轨迹进行恢复。

对于沉积盆地这样的中-低温地热系统,热演化历史的恢复一直是地热研究领域的难题。从过去几十年的发展进程看,对于沉积盆地热历史的研究总体上是从定性、半定量向定量方向发展,沉积盆地热历史研究的最终(理想)目的是给出不同

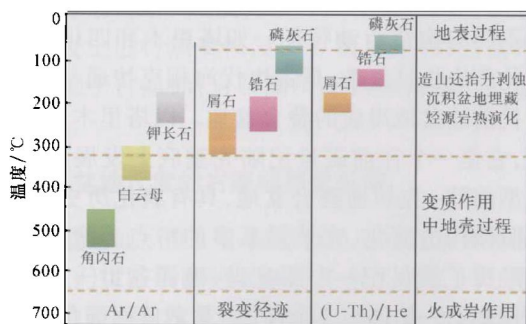


图2 地温年代学古温标序列及其封闭温度和应用范围  
Fig. 2 Sequence of palaeotemperature scales as well as its closure temperature and applicable range

地质历史时期的温度(或热流)状况。目前的各种古温标方法,无论是有机质方面的还是无机同位素方面的,在应用于沉积盆地这种中-低温地热系统的热史恢复时,都还存在一定的缺陷,需要相互补充。特别是在早古生代海相碳酸盐岩地区,缺乏用于测量的重矿物。如何将记录不同温度、存在于不同类型岩石中的古温标有效组合起来,共同反演复杂的温度史,是海相盆地热史恢复或者说建立海相热史恢复方法体系所面临和亟待解决的问题。

## 2.2 构造-热演化模拟的进展

构造-热演化模拟也是有效进行海相残留盆地热史恢复的一个重要方面。关于拉张盆地构造热演化的定量模型在描述盆地沉降和热流演化方面取得了极大的成功,实现了构造与热的完美的结合。Mckenzie(1978)<sup>[3]</sup>一维瞬时均匀拉张模型作为拉张模型的代表,在预测盆地主要观测数据方面取得了突破性的进展,从而带动了沉积盆地定量模型的迅速发展。该模型认为,岩石圈的拉张在瞬时完成,由于岩石圈减薄,热软流圈被动上涌,引起热扰动,在 Airy 均衡作用下产生初始沉降;随着时间的推移,热扰动逐渐减小,引起热沉降。此后,有学者提出(纵向)非均匀拉张模型;但地壳与地幔不同程度的拉张会导致几何空间问题的不协调,因此该模型并没得到广泛认可与应用。由于在实际情况下岩石圈的拉张不可能瞬时完成,故有限时拉张模型应运而生。有限时拉张模型又分匀速和非匀速两种拉张速率模式。不同拉张速率模式得到的演化结果差异不大,但所预测的演化过程却大相径庭。我国沉积盆地往往经历多个演化阶段,叠合盆地是我国盆地性质和演化的主要特色。如,中国东部新生代沉积盆地经历了多期拉张,单期的拉张模型难以适应其构造热演化模拟的需要,从而带动了多期拉张模型的发展。

前陆盆地是山系前缘与相邻克拉通之间的沉积盆地,是“在前陆构造环境中冲断负荷、隆升剥蚀、挠曲沉降、沉积充填相互作用的动力学过程中形成的盆地”<sup>[37,38]</sup>。前陆盆地油气资源丰富,但构造变形十分复杂。描述前陆盆地沉降的定量模型很多,其中主要关键要素包括沉积/构造负荷和岩石圈挠曲。关于负荷的模型有单侧临界锥体模

式、双侧临界锥体模式<sup>[39~41]</sup>等;关于岩石圈挠曲的模型有弹性板模型、粘弹性模型和弹塑性模型<sup>[42,43]</sup>等。众所周知,岩石圈的挠曲受其流变学特征控制,而岩石圈的流变结构又与温度密切相关。然而,相对裂谷盆地而言,前陆盆地定量模型更多关注的是构造沉降,在构造与热的结合方面尚不够完善。

全球油气勘探主要从前陆盆地和/或裂谷盆地开始,然后向稳定克拉通盆地发展。中国克拉通盆地,如塔里木、鄂尔多斯和四川盆地,下伏有裂谷或拗拉谷,说明克拉通盆地随超大陆裂解而发育,其后克拉通盆地随超大陆拼合而上叠前陆盆地<sup>[44]</sup>。相对裂谷或前陆盆地而言,克拉通盆地演化模式要复杂得多,其沉降受多种作用的控制,如大陆岩石圈的机械伸展减薄、受到热扰动大陆岩石圈的热冷却收缩、大陆岩石圈板块因重力负载及水平横向挤压而弯曲<sup>[45]</sup>等。克拉通盆地是大陆岩石圈复杂动力演化过程的产物。关于克拉通盆地目前还没有很成熟的定量模型,构造-热演化研究程度也远远低于裂谷盆地和前陆盆地。

## 3 海相残留盆地热史恢复方法体系的基本架构与特点

海相盆地热史恢复和陆相盆地热史恢复并无本质上的区别,所不同的是海相残留盆地通常具有更为复杂的热史以及海相盆地热史恢复需基于上覆陆相盆地或陆相地质时期热史恢复的基础之上来进行。海相残留盆地多期构造改造与叠加的地质特点以及它与陆相盆地热史的密切关联决定了海相残留盆地较陆相盆地更为复杂,它所要求的热史恢复技术和方法更为复杂,远非某种单一的热史恢复方法就足以解决,它需要一个更为复杂和多样化、且彼此补充的热史恢复方法体系。所谓海相盆地热史恢复方法体系是指针对海相盆地特殊的地热、地质特点,从不同研究尺度,有机结合不同的方法,达到有效恢复海相盆地多期复杂热史的综合集成。

从研究对象或者尺度而言,以盆地为核心,但不拘泥于盆地尺度,对于特定地质时期(拉张减薄、逆冲推覆、前陆岩石圈挠曲等演化阶段)从岩石圈尺度开展研究;在研究的方式上,盆地尺度采用钻井或地表露头剖面的“单井”热史古温标反

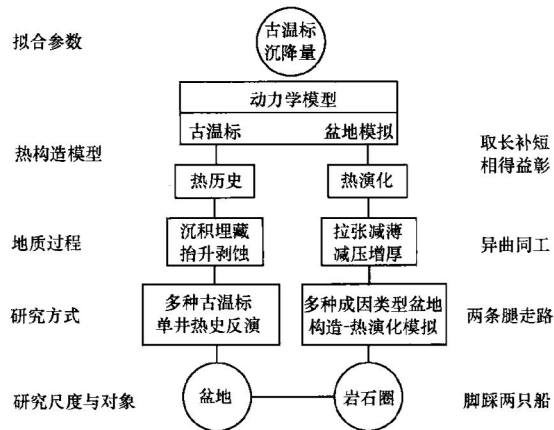


图3 海相盆地热史恢复体系的基本架构与原理

Fig. 3 Basic structure and principles for thermal history reconstruction of marine basins

演,岩石圈尺度采用特定成因类型盆地的构造-热演化模拟;就地质过程而言,盆地内的沉积埋藏与抬升剥蚀,盆地下伏岩石圈的拉张减薄、挤压增厚、逆冲推覆及其相应的热效应均会得到重视。无论是盆地的动力学模型还是不同温标的动力学模型,均会根据实际地质条件和样品采集层特点予以考虑。特别需要指出的是,相对于陆相盆地相对短期和简单的热史恢复,海相残留盆地钻井热史的恢复将需要在温标的选取和综合上下功夫,既要考虑温标的多样性和互补性,以提高热史反演的精度,又要兼顾样品的可获得性(灰岩中不存在磷灰石和锆石等重矿物)和温标的封闭温度及温度区间的覆盖性。最终无论从盆地尺度还是岩石圈尺度上的热史恢复结果,均需彼此呼应且与实际地质资料(构造沉降量、地层有机质成熟度以及古温标值)相一致(拟合)。关于海相盆地热史恢复体系的初步方案示于图3,有待于工作过程中予以补充和完善。

总而言之,海相残留盆地热史恢复是一个有较大难度的系统工程,要求不同方法、多种温标、缜密的采样设计和计算机软件工具等多方面、多层次的紧密配合与协调。

致谢:值刘光鼎先生80华诞之际,仅以拙文向先生致以由衷的敬意!

#### 参 考 文 献

- 郭彤楼,田海芹. 南方中-古生界油气勘探的若干地质问题及对策[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 244 ~ 247
- 何丽娟,熊亮萍,汪集旻. 拉张盆地多期构造热演化模拟中的影响因素[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 125 ~ 131
- McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth Planet Sci Lett, 1978, 40: 25 ~ 32
- Jarvis G T, McKenzie D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. Earth Planet Sci Lett, 1980, 48: 42 ~ 52
- 何丽娟,熊亮萍,汪集旻. 沉积盆地多期拉张模拟中拉张系数的计算[J]. 科学通报, 1995, 40(24): 2 261 ~ 2 263
- Lin Changsong, Li Sitian, Zhang Qiming, et al. Subsidence and stretching of some Mesozoic-Cenozoic rift basins in East China [Z]. Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Geological Congress, 1996. 176 ~ 196
- Dehler S A, Keen C E, Rohrt K M. Tectonic and thermal evolution of Queen Charlotte basin: lithospheric deformation and subsidence models [J]. Basin Research, 1997, 9: 243 ~ 261
- 陈刚,李丕龙. R<sub>0</sub>反演的盆地热史恢复方法与相关问题[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 343 ~ 347
- Corrigan J. Inversion of apatite fission track data for thermal history information[J]. J of Geophys Res, 1991, 96(B6): 10 347 ~ 10 360
- Bray R J, Green P F, Duddy I R. Thermal history reconstruction using apatite fission track analysis and vitrinite reflectance: a case study from the East Midlands of England data from Alaska and the southern North Sea [A]. In: Hardman R S P, ed. Exploration Britain: geological insights for the next decade [C]. Geological Society of London Special Publication, 1992, 67: 3 ~ 25
- 胡圣标,汪集旻. 沉积盆地地热体制的研究方法原理和进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 171 ~ 179
- 刘丽,任战利. 济源-中牟-黄口坳陷带热演化史与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 355 ~ 361
- 胡圣标,张容燕,周礼成. 沉积盆地热史恢复方法[J]. 勘探家, 1998, 3(4): 52 ~ 54
- 李荣西. 胜利油气区晚古生代烃源岩及其油气生成、运移与聚集研究[D]. 北京:中国矿业大学, 1997
- Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission track annealing kinetics III: extrapolation to geological time scales[J]. American Mineralogist, 1999, 84: 1 235 ~ 1 255
- Brime C, Perri M C, Pondrelli M, et al. Thermal evolution of Palaeozoic-Triassic sequences of the Carnic Alps: Kuebler index and conodont colour alteration index evidence[J]. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, 2003, 9: 77 ~ 82
- Buchardt B J, Lewan M D. Reflectance of vitrinite-like macerals as a thermal maturity index for Cambrian Ordovician Alum shale, Southern Scandinavia[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 394 ~ 406
- Goodarzi F, Norford B S. Optical properties of graptolite epiderm—a review [J]. Bulletin of Geology Society Denmark, 1987, 35: 141 ~ 147
- Pusey W C. Paleotemperatures in the Gulf Coast using the ESR-kerosene method [J]. Trans Gulf Coast Assoc Geol Soc, 1973, XXIII: 195 ~ 202
- 胡凯,刘英俊, Ronald W T W. 激光拉曼光谱碳质地温计: 一种新的古地温测试方法[J]. 科学通报, 1992, 37(14): 1 302 ~

- 1 305
- 21 Aldega L, Cello G, Corrado S, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Southern Apennines (Italy): thermal constraints and modelling [J]. *Atti Ticinensi di Scienze della Terra*, 2003, 9: 135 - 140
- 22 Thomas R J, Jacobs J. A titanite fission-track profile across the Southeast Kaapvaal Craton and the Natal metamorphic province: evidence for cryptic differential Meso- to Neoproterozoic tectonism [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 31(1A): 79 - 80
- 23 Hu Shengbiao, 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 [J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3-4): 221 - 235
- 24 Lastett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2: a quantitative analysis [J]. *Chemical Geology*, 1987, 65: 1 - 13
- 25 Green P F, Duddy I R, Crowhurst P V. Integrated (U-Th)/He dating, AFTA and vitrinite reflectance results in seven Otway Basin wells confirm regional Late Miocene exhumation and validate Helium diffusion systematics [Z]. AAPG Annual Convention, Salt Lake City, Utah, 2003
- 26 Donelick R A, Ketcham R A, Carlson W D. Variability of apatite fission track annealing kinetics 11: crystallographic orientation effects [J]. *American Mineralogist*, 1999, 84: 1 224 - 1 234
- 27 Kohn B P, Farley K A, Pillans B. (U-Th)/He and fission track dating of the Pleistocene Rangitawa Tephra, north island, New Zealand: a comparative study [A]. In: Geological Society of Australia, ed. 9<sup>th</sup> international conference on fission trace dating and thermochronometry [C]. Victoria, Australia: Geological Society of Australia, 2000. 207 - 208
- 28 Reiners P W, Zhou Z Y, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, Eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology [J]. *American Journal of Science*, 2003, 303: 489 - 518
- 29 House M A, Wernicke B P, Farley K A, et al. Cenozoic thermal evolution of the central Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He thermochronometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 151: 167 - 179
- 30 House M A, Kohn B P, Farley K A, et al. Evaluating thermal history models for the Otway Basin, southeastern Australia, using (U-Th)/He and fission-track data from borehole apatites [J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1-4): 277 - 295
- 31 Reed J S, Spotila J A, Bodnar R J, et al. Paleothermometry and thermochronology of Carboniferous strata, central Appalachian Basin, southern West Virginia: burial and geomorphic evolution of the Appalachian Plateau [Z]. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 2002, 34(6): 133
- 32 Wolf R A, Farley K A, Silver L T. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21): 4 231 - 4 240
- 33 Crowhurst P V, Green P F, Kamp P J J. Appraisal of (U-Th)/He apatite thermochronology as a thermal history tool for hydrocarbon exploration: an example from the Taranaki Basin, New Zealand [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(10): 1 801 - 1 819
- 34 Wolf R, Farley K A, Kass D M. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U-Th)/He thermochronometer [J]. *Chemical Geology*, 1998, 148: 105 - 114
- 35 Reiners P W, Farley K A. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of titanite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3 845 - 3 859
- 36 Reiners P W, Farley K A, Hickes H J. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon: initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte [J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1-4): 297 - 308
- 37 赵靖舟, 王清华, 时保宏, 等. 塔里木古生界克拉通盆地海相油气富集规律与古隆起控油气论 [J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(6): 703 - 712
- 38 何登发, 李德生. 沉积盆地动力学研究的新进展 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(3): 53 - 58
- 39 Dahlen F A, Suppe J, Davis D. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: cohesive Coulomb theory [J]. *J Geophys Res*, 1984, 89: 10 087 - 10 101
- 40 Beaumont C, Fullsack P, Hamilton J, et al. Preliminary results from a mechanical model of the tectonics of compressive crustal deformation, Alberta Basement Transects [Z]. University of British Columbia, 1992. 21 - 61
- 41 Willett S D, Beaumont C, Fullsack P. Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens [J]. *Geology*, 1993, 21: 371 - 374
- 42 Garcia-Castellanos D, Ferná' ndez M, Torne M. Numerical modeling of foreland basin formation: a program relating thrusting, flexure, sediment geometry and lithosphere rheology [J]. *Comput Geosci*, 1997, 23: 993 - 1 003
- 43 Garcia-Castellanos D, Ferná' ndez M, Torne M. Modeling the evolution of the Guadalquivir foreland basin (southern Spain) [J]. *Tectonics*, 2002, 21: 10 - 18
- 44 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 [J]. *现代地质*, 2006, 20(1): 1 - 18
- 45 刘波, 钱祥麟, 王英华. 克拉通盆地类型及成因机制综述 [J]. *地质科技情报*, 1997, 16(4): 23 - 28

(编辑 李 军)