

沉积盆地热历史重建研究进展与挑战

邱楠生¹, 何丽娟^{2,3,4}, 常健¹, 朱传庆¹

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
2. 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;
3. 中国科学院 地球科学研究院, 北京 100029; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 系统介绍了沉积盆地热历史研究方法的现状和进展。沉积盆地热史重建方法主要包括古温标方法和地球动力学方法两大类,前者主要是从盆地的尺度来进行研究,后者则是从岩石圈的尺度来研究盆地的热历史。古温标方法主要包括了有机质成熟度指标和低温热年代学参数,由于可以通过实测数据来检验模拟结果,因而被认为是研究精度较高且切实可行的方法;实际工作中,一般采用多种古温标耦合反演热历史以提高模拟结果的精度和可靠性。针对多期构造演化盆地,可以结合多种古温标耦合反演和地球动力学正演方法进行相互补充和验证,从而实现定量恢复古老盆地复杂热历史。同时,盆地热史在研究构造抬升作用下的页岩气保存、盆地构造—热演化耦合作用等方面提供了重要的方法技术。目前,针对深层—超深层、海相层系和古老层系的热史重建仍存在诸多问题和挑战。

关键词: 热历史; 镜质体反射率; 低温热年代学; 地球动力学模型; 海相层系; 沉积盆地
中图分类号: TE121.1 **文献标识码:** A

Research progress and challenges of thermal history reconstruction in sedimentary basins

QIU Nansheng¹, HE Lijuan^{2,3,4}, CHANG Jian¹, ZHU Chuanqing¹

(1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*
2. *State Key Laboratory of Lithosphere Evolution, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China;*
3. *Institute of Geosciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The current status and development of the methods of thermal history reconstruction in sedimentary basins are introduced systematically in this paper. The reconstruction methods of thermal history of sedimentary basins mainly include thermal indicators and geodynamic methods. The former mainly considers thermal history at the basin scale; however, the latter uses thermal history of the basin on the scale of the lithosphere. Thermal indicators mainly include the maturity index of organic matter and low temperature thermochronology parameters. The thermal indicator method is considered to be feasible with high precision, because the simulation results can be verified by measured data. In actual work, a variety of thermal indicators are generally used to couple the inversion of thermal history to improve the accuracy and reliability of the simulation results. For basins with various tectonic evolution stages, the thermal indicator method and the geodynamic method can complement and verify each other, thereby realizing quantitative restoration of the complex thermal history of ancient basins. At the same time, the thermal history of basins provides an important method and technology for the study of shale gas preservation during tectonic uplift and basin–mountain tectono–thermal evolution coupling. At present, there are still many problems and challenges in the reconstruction of thermal history of deep and ultra-deep strata, marine strata and ancient strata.

Key words: thermal history; vitrinite reflectance; low temperature thermochronology; geodynamic model; marine strata; sedimentary basins

1 研究现状

沉积盆地热历史(简称热史)是指在地质历史

某一时期曾经出现过的热状况,它包括了盆地地温演化历史和热流演化历史。沉积盆地的热体制和热历史不仅是盆地动力学研究的重要内容,更是油

气勘探研究中不可缺少的内容,是当代地质学研究的前缘课题之一。沉积盆地的热历史与盆地内油气的生成、运移和聚集有密切的关系。盆地的热动力学及热史研究不仅被认为是含油气盆地地质学研究中的系统工程之一,在大陆动力学研究中也占有重要的地位,盆地的动态演化研究、油气成藏的动力学研究都离不开古地温的研究。目前,随着油气勘探难度的加大,勘探重心逐渐转向海洋及盆地深部,古地温在油气勘探应用方面的研究得到迅速的发展。盆地古地温研究在国外起步较早,也取得了许多成果。在国内,沉积盆地古地温的研究则开展较晚,但油气勘探部门非常重视这方面的工作。油气田区古地温研究已被列为国家“八五”、“九五”和“十五”科技攻关项目的内容,自“十一五”以来被列入国家油气重大专项的研究内容。在国家重点基础研究发展计划(973计划)项目中,沉积盆地的热体制和热历史研究也被列为重要的研究内容。油气领域的第一个“973计划”项目“中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测”设置了“中国典型叠合盆地深部热体制转换与热史反演”研究的课题,反映了盆地的热体制和热历史在盆地的动力学和油气勘探中的重要地位。此后多个油气领域的“973计划”项目都设置了“沉积盆地热体制研究”的课题或专题,如页岩气“973计划”项目“中国南方古生界页岩气赋存富集机理和资源潜力评价”设置了“构造热演化与页岩气的改造和保存研究”课题。此外,国家重点研发项目也设置了相应的研究任务。国家自然科学基金委每年均批准有项目开展沉积盆地热历史研究。国内众多油公司更是从不同角度立项开展盆地热历史与油气成藏关系的研究,特别是中石化设立的海相前瞻性项目“中国大陆海相沉积盆地热体制与油气资源”(2007—2011年)进一步推动了对沉积盆地热历史的系统研究。

我国沉积盆地系统的地热研究始于20世纪80年代初。汪集暘院士早在《李四光教授倡导的中国地热研究》一文中^[1],就指出我国的地热研究包括了大地热流研究、深部地热研究、区域地温场研究、地热数值模拟、地热实验和测试系统、地热资源研究、矿山地热研究和油田地热研究等8个部分的内容。国内大量学者利用古温标方法或地球动力学模型,对我国的含油气盆地热历史开展了大量的研究工作并取得了一系列的成果。目前,已逐步形成多种古温标耦合反演热历史与盆地构造—热演化模拟相结合的重建沉积盆地热历史的方法体

系。但总的来说,油气田区古地温的研究在我国仍是个薄弱环节,无论是古地温研究方法本身还是应用于盆地的研究,都需作进一步的研究工作。本文主要结合笔者近年来在沉积盆地热史重建方面的研究工作,归纳总结热史研究方法的相关进展和实例,在此基础上分析沉积盆地热史重建面临的挑战,指出沉积盆地热历史研究今后的方向。

2 沉积盆地热史重建方法进展

目前,国际上关于盆地热历史恢复的方法总体上包括古温标法(如镜质体反射率、磷灰石裂变径迹等)和地球动力学方法(如拉张模型、挤压模型等)2大类。前者主要是从盆地的尺度来进行研究,后者则是从岩石圈的尺度来研究盆地的热历史。古温标是在地质历史时期以某些物理、化学性质的变化记录了热史信息,并可用于恢复某一区域热历史的有机分子、固体有机质和矿物等。由于古温标方法可以通过古温标的实测数据来检验模拟结果,因而被认为是研究精度较高且切实可行的方法。

2.1 古温标方法热史重建

目前常用的古温标包括有机质古温标(如镜质体反射率、沥青反射率等)和矿物古温标(如磷灰石和锆石裂变径迹、磷灰石和锆石(U-Th)/He等)两类,后者也叫低温热年代学古温标。低温热年代学古温标不仅能给出相应的温度,而且能给出达到该温度的时间,成为近年来用于沉积盆地热历史定量重建和地层剥蚀量恢复的重要方法。除了常用的镜质体反射率和低温热年代学古温标外,针对海相碳酸盐岩层系的热史恢复,国内外学者还探索了一些适用的古温标,如有机质的荧光性、激光拉曼光谱、有机质自由基浓度、团簇同位素方法等。

2.1.1 有机质古温标方法

利用有机质成熟度指标来研究盆地的古地温是最早的也是最常用的方法,这是因为有机质成熟度与古地温有密切的关系。有机组分在热降解作用过程中其化学组成、结构和物理性质均发生了变化,各成熟度指标均以特定的化学动力学和温度相联系。由于镜质体反射率是有机质成熟度的最可靠指标,因而也是盆地古地温研究中最常用的指标或“温度计”。此外,利用沥青质或似镜质体反射率、笔石反射率换算成等效镜质体反射率也可研究古地温。

(1) 镜质体反射率(R_o)。镜质体是由高等植

物的木质纤维组织经腐殖凝胶化作用,形成以腐殖酸和沥青质为主要成分的凝胶化物质,再经煤化作用而成的一种显微组分。镜质体反射率是目前最常用且最有效的研究盆地古地温的方法之一。镜质体反射率值取决于有机质受热温度和受热时间,且以温度为主。

早期仅仅是利用镜质体反射率与埋深剖面图来推算古地温,并建立了许多推算古地温的经验公式。但是,这些方法都不同程度地存在着缺陷,一方面它们未考虑地层的压实作用和抬升剥蚀作用;另一方面,因为有机质的热演化过程是一个不可逆的化学动力学过程,有机质的热演化程度与特定的化学反应动力学和地温及时间相联系,有机质的受热史很难用一个公式直接计算,更难用一个图表直接“量”出古地温。目前,主要采用拟合计算的模拟方法来模拟计算古地温,其步骤为:①重建地层沉积埋藏史,详细的沉积埋藏史是研究盆地古地温的基础;②假设一个古地温梯度或热流模型,结合埋藏史算得研究层经历的古地温;③由古地温计算研究层的成熟度;④比较实测成熟度和计算成熟度,通过反复修改假设的古地温梯度或热流模式及反复计算对比成熟度,使计算和实测的成熟度吻合得最好。最后选定的古地温模式及据此算得的热史可代表盆地的古地温梯度及研究层经历的热史。最常用的拟合计算方法包括 Lopatin-Waples 的 TTI 拟合算法^[2]、Lerche 拟合算法^[3-4]和化学动力学方法^[5-6]。而其中的化学动力学模型——Easy% R_o 模型^[7],自其建立以来一直被广泛应用来恢复热史。最近,该模型的建立者又提出了两种修正的模

型(即 Basin% R_o 和 Easy% R_o DL 模型)来研究热历史^[8]。但有学者认为 Easy% R_o 模型在 R_o 处于 0.5%~1.7% 之间会过高估算镜质体反射率值约 0.35%^[9],因而他们认为 Easy% R_o 模型的精度不如 Basin% R_o 和 Easy% R_o DL 模型,尤其是在镜质体反射率—深度剖面存在错断的情况下更是如此^[8]。

(2) 等效镜质体反射率(R_{equ})。下古生界层系和海相层系由于缺乏镜质体,无法利用最常用的镜质体反射率古温标进行热演化研究。沥青和其他有机质组分(如镜状体、笔石等)的反射率在一定程度上也是反映成熟度的有效指标。依据沥青、镜状体和笔石反射率等与镜质体反射率的关系换算而成的反射率值称之为“等效镜质体反射率”。已有众多文献介绍了沥青反射率^[10-14]、镜状体反射率^[15-21]、笔石反射率^[22-27]与镜质体反射率的换算关系,在此不一一介绍。但在利用等效镜质体反射率研究热历史的时候,特别要关注不同学者提出的换算关系差别较大(图 1),由此引起的热史结果也会存在较大的差异。

2.1.2 低温热年代学方法

低温热年代学定年体系是根据岩石矿物中放射性元素的衰变或裂变产物(如子体同位素或辐射损伤)在矿物晶体内的产出和累积来标定岩石样品的热年龄,即定量揭示山体或沉积盆地经历的构造—热演化史。低温热年代学方法主要包括裂变径迹和(U-Th)/He 两种。裂变径迹技术已被广泛应用于地质体构造运动热定年和热历史重建。目前常用的磷灰石、锆石和榍石裂变径迹的退火

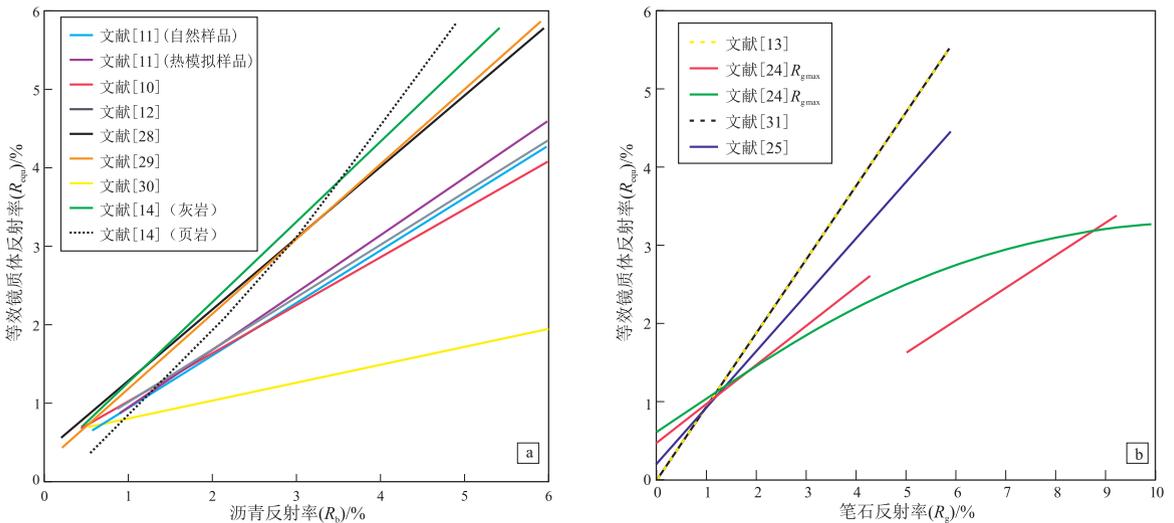


图 1 由沥青(a)和笔石(b)反射率依据不同换算关系得到的等效镜质体反射率

Fig.1 Equivalent vitrinite reflectance obtained from bitumen(a) and grapholite(b) reflectances according to different conversion relations

温度各不相同;磷灰石裂变径迹退火温度在 110~125 °C 之间^[32-33], 锆石为 210~240 °C^[33-35], 榍石在 265~310 °C 之间^[36]。目前,磷灰石裂变径迹退火已具有成熟的动力学模型^[37-40]而被广泛应用;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^[35,41],应用锆石和榍石裂变径迹热定年技术研究热史仍处于定性和半定量阶段。最近,笔者利用盆地中超深钻孔的系列样品研究了锆石裂变径迹退火行为,得到锆石裂变径迹完全退火温度可达 300 °C^[42]。由于锆石与磷灰石裂变径迹技术无论从方法还是原理上都具有相似性,在实际应用中往往将磷灰石与锆石裂变径迹技术结合在一起来解决地质问题。

近年来,(U-Th)/He 热定年技术作为一种新的低温热年代学方法在地质体定年、热演化、地貌演化与沉积物源研究等方面得到了广泛应用,为盆地热历史和构造抬升剥蚀量恢复又提供了新的途径。国外有学者将低温热年代学参数的热史路径模拟和平衡剖面恢复相结合,恢复构造演化史和构造剥蚀量及变形速率^[43-44]。目前,用于(U-Th)/He 热定年测试的矿物主要也是磷灰石、锆石和榍石。依据自然样品和热模拟实验,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 °C^[45],而笔者通过深钻孔自然演化样品得到的磷灰石的 He 封闭温度可达 85~90 °C^[46];锆石的(U-Th)/He 封闭温度在 170~190 °C 之间^[47],而我们利用超深钻孔系列样品得到的锆石 He 封闭温度为 200 °C^[42];榍石的

(U-Th)/He 封闭温度为 191~218 °C^[48]。最近,有些学者注意到了裂变辐射损伤对 He 年龄的影响^[49],并对破碎的磷灰石颗粒的 He 扩散行为进行了分析^[50-51],以使该方法更好地用于热事件定年研究。磷灰石裂变径迹和(U-Th)/He 热定年技术的结合可以揭示 45~110 °C 温度范围的精细热历史,但对于经历了较高温度的地层来说,利用磷灰石低温热年代学技术来恢复热历史已失去意义,必须探索较高封闭温度的锆石和榍石(U-Th)/He 热定年技术。由于不同的古温标所适用的温度范围不同,通过多种古温标的联合反演模拟热历史,可以揭示出 40~250 °C 温度范围的精细热历史,从而解决盆地复杂热历史的重建问题。

低温热年代学参数在国际上已被广泛应用于沉积盆地热历史的研究,每年都有海量的文献发表。在国内,低温热年代学定年技术已被应用于几乎所有的含油气盆地热史研究。在实际热史模拟中,往往结合多种低温热年代学参数和等效镜质体反射率进行多参数的耦合模拟,可以相互约束和验证。图 2 是塔里木盆地志留系钻孔样品热史路径模拟结果,该样品测试了磷灰石裂变径迹年龄和长度、锆石(U-Th)/He 年龄和等效镜质体反射率等多种参数,通过耦合模拟得到了该样品复杂的热史路径。因此,这种多种古温标耦合反演热历史的方法也为重建复杂构造演化的热历史提供了有效的途径。

2.1.3 其他古温标方法

前述古温标方法在沉积盆地中已被普遍应用,但在实际应用中也存在一些问题。目前,对于早古

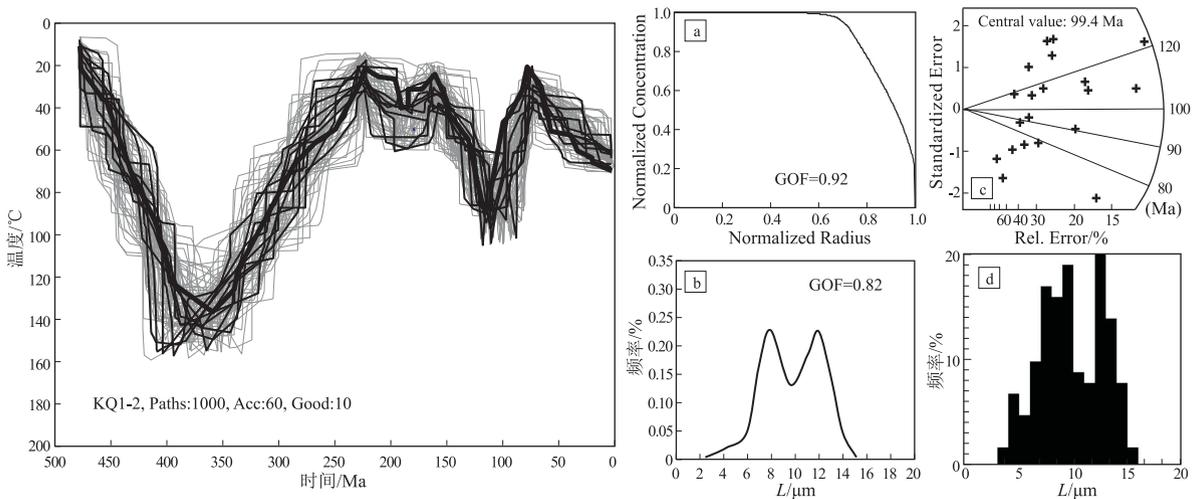


图 2 塔里木盆地志留系典型样品(KQ1 井,2 593.8 m,S_{1t})热史路径模拟结果^[46]

利用蒙特卡洛随机反演方法模拟了 1 000 条热史路径,其中 60 条是可接受的路径(细线),10 条是好的路径(较粗的线),最粗的线代表了最佳温度路径。

a. 锆石 He 扩散剖面, GOF 代表拟合度; b. 模拟的磷灰石裂变径迹长度分布; c. 测试 AFT 年龄; d. 实测 AFT 长度

Fig.2 Thermal history path simulation results of typical samples of the Silurian in Tarim Basin (well KQ1, 2 593.8 m, S_{1t})

生代碳酸盐岩地区所经受的热历史研究还缺乏有效的古温标,因为在这些地层中没有镜质体,也没有磷灰石和锆石矿物。因此,前述的常规古温标都不适用于早古生代碳酸盐岩地层。对于我国中西部沉积盆地下古生界碳酸盐岩和南方广大地区碳酸盐岩烃源岩成熟度的准确标定,一直是困扰这些地区油气资源评价的问题。国内外学者对下古生界和海相地层中有机质成熟度古温标进行了大量的探索,包括有机质的荧光性和激光拉曼光谱^[52-56]、有机质红外光谱^[21,57]、有机质固态核磁共振^[58-59]、孢粉颜色和牙形石色变指数^[60]、有机质自由基浓度^[61-65]、岩石热声发射方法^[66-69]等等。上述古温标中,有机质的荧光性和激光拉曼光谱、有机质红外光谱、有机质固态核磁共振等都与镜质体反射率挂钩,建立二者之间的函数关系之后,采用镜质体反射率的方法进行热史重建,这里不再一一叙述。

近年来,碳酸盐岩团簇同位素被引用到沉积盆地的热历史研究中。碳酸盐岩团簇同位素温度计是基于¹³C和¹⁸O重同位素之间的交换反应,该反应主要依赖于温度,随着温度的降低,矿物中会聚集更多的¹³C—¹⁸O,通过测量¹³C—¹⁸O的丰度偏离随机分布的程度(Δ_{47}),利用 Δ_{47} 与温度间的经验公式就可以获得团簇同位素温度($T_{\Delta 47}$)^[70-71]。该温度可记录矿物经历的温度信息而不依赖于矿物生长的流体环境。随着碳酸盐矿物经历温度增高,¹³C—¹⁸O键开始发生固态重排,驱使团簇同位素温度($T_{\Delta 47}$)与环境温度达到平衡^[72-74]。前人通过对碳酸盐矿物进行加热实验,在不同的热演化情景下改变团簇同位素的¹³C—¹⁸O的丰度,进而提出了不同动力学模型来预测固态重排过程^[72,74]。通过团簇同位素测温和现有的固态重排动力学模型,前人已经对沉积盆地的热历史进行了开创性的研究^[75-77],这也为我们利用团簇同位素和重排动力学模型来模拟沉积盆地的热历史提供了一种极具前途的方法。

2.2 地球动力学方法热史重建

利用地球动力学方法进行构造热演化模拟是研究沉积盆地的重要手段,也是恢复盆地热历史的有效方法之一。与古温标方法不同的是,构造热演化模型依赖于盆地成因类型。沉积盆地构造热演化模拟必须建立在盆地成因机制分析并与之相应的地质—地球物理模型基础之上,构造沉降史与热流演化史构成其2大核心研究内容。在理论上,构造热演化模拟的地球动力学方法依据的是基

于盆地成因分析的地质地球物理模型;在方法手段上,采用的是数值方法,如有限差分或有限元法;在研究尺度范围上,它着眼于盆地形成的岩石圈尺度,因而研究的是盆地演化过程中的区域热背景。该方法又包含运动学模型和动力学模型。

McKenzie 均匀拉张模型^[78]作为裂谷盆地运动学模型的代表,在预测盆地主要观测特征方面取得了重大成功,从而带动了沉积盆地运动学模型的发展。拉张盆地的运动学模型比较强调对热流史的研究。从瞬时均匀拉张模型^[78]、非均匀拉张模型^[79-84]、有限时拉张模型^[85-86]、应变速率模型^[87-90]到多期拉张模型^[91-96]等,模型的每一步进展,都为热史研究带来了发展。尽管运动学模型在预测盆地热流演化方面取得了成功,但由于运动学模型采用的是局部均衡模式,在预测构造沉降、解释盆地边缘上隆等几何形态方面存在一定的缺陷。而在拉张模型的另一类模型——动力学模型中,岩石圈流变性则是通过本构方程明确体现,能够实现热学与流变学的耦合,深入理解盆地动力学的基本过程^[97-99]。然而,模型初始扰动的给定、岩石圈流变学参数的不确定性等都在一定程度上阻碍了动力学模型的发展。另外,大尺度的动力学模型在与实际剖面观测结果的拟合及热流预测方面也不如运动学模型灵活、方便。

前陆盆地油气资源丰富但构造变形十分复杂,使得前陆盆地构造—热演化模拟面临挑战。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。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场密切相关。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^[100]。前陆盆地构造—热演化历史受不同空间尺度的多种因素影响:由地壳或岩石圈厚度变化及地幔上涌引起的热效应是长波长的;其他过程如逆冲推覆、剥蚀、快速沉积/压实、局部岩浆侵入及流体活动等则引起地温场的短波长扰动。DEMETRESCU等^[101]在模拟研究东喀尔巴阡山前陆盆地热体制时指出,在考虑区域热传导机制的同时,还应考虑沉积带来的热效应、地表温度随古气候变化的变化及流体流动对垂直温度分布特征的影响。VOORDE等^[102]也曾提出将区域及局部尺度的热过程相结合,指出要将岩石圈尺度及地壳尺度相耦合进行热过程分析。前陆盆地演化过程中构造与热的耦合体现在多个层面:岩石圈热演化对岩石圈强度时空分布及其挠

曲的影响;逆冲推覆作用的浅部温度效应;快速沉积作用对盆地温度场的影响等^[103-104]。

地球动力学的热史恢复方法与古温标方法可以互补,能有效补充古地温方法在盆地应用的局限性。如补充盆地达到最大古地温之前的热历史,填补盆地早期热历史研究的空白,如四川盆地^[105]。尤其在研究逐步升温盆地,或者今地温即是最大古地温的盆地,古温标方法可能会无能为力,而地球动力学方法则可发挥其优势(图3)。

3 沉积盆地热史重建面临的挑战

沉积盆地一般都经历过沉降沉积(增温)和抬升剥蚀(降温)等复杂的温度变化过程,对其热历史进行恢复的难度较大。目前,关于沉积盆地热历史重建仍然存在一系列问题,尤其是海相盆地和前陆盆地的热历史恢复仍存在挑战。随着我国海相沉积盆地油气勘探的不断突破,也带动了海相盆地

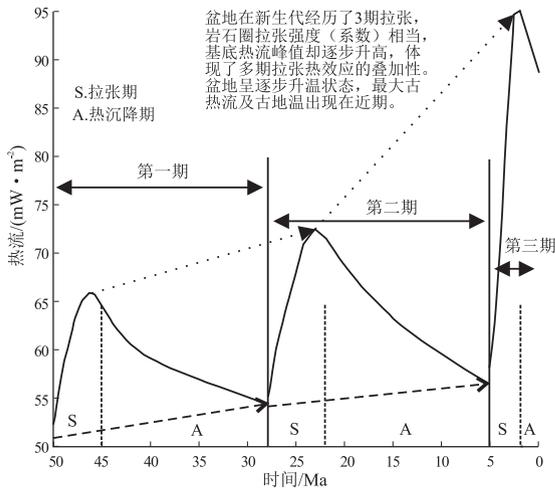


图3 莺歌海盆地基底热流新生代随时间的演化^[92]

Fig.3 Evolution of basement heat flow in Yinggehai Basin during the Cenozoic

热史重建方法的研究。我国海相盆地主要以古生代碳酸盐岩层系为主,经历过多期构造演化的历史,其烃源岩大都已达到高一过成熟阶段。现有的常规古温标在海相碳酸盐岩层系中缺乏,导致了海相盆地热史重建难度极大。针对我国盆地的具体地质问题,除了引进国际上现有的方法外,国内学者还积极探索一些新的方法。如建立和完善利用沥青反射率和镜状体反射率等有机质光学性质参数和有机质自由基浓度等古温标解决我国海相盆地的热历史恢复问题,发展了(U-Th)/He等低温热年代学指标恢复复杂构造演化盆地的热历史问题,建立多期拉张地球动力学模型解决裂谷盆地多期拉张的热历史恢复问题。总体上,重建沉积盆地热历史正朝着综合运用多种不同温度适用范围的古温标耦合反演方法及古温标与盆地动力学模型相结合的方向发展。多种古温标耦合反演不仅克服了单一古温标的缺陷,并可进行相互补充和验证,同时也提高了研究结果的精度和可信度,从而使得定量恢复古老盆地复杂热历史得以实现。

3.1 有效古温标和深层—超深层热史重建

理论上,任何一个样品都能测试得到一个古温标值,但该古温标并不都是能被用于反演热历史的,更不是测得一个古温标值就能“换算”成一个古温度值。从古温标到古温度,必须利用古温标的动力学模型与温度的关系,结合样品的沉积埋藏史,才能模拟计算得到古温度值(尽管该古温度值并不一定就是“对”的)。这就涉及到古温标的有效性。有效性是利用古温标来重建热历史的基础,有效古温标是指古温标所“记录”的热信息能被保留至今(图4)。在盆地凹陷持续沉降区,现今的温度即为地层经历的最高温度。在此情况下,古温标记录的早期热信息被后期巨大埋深的高温

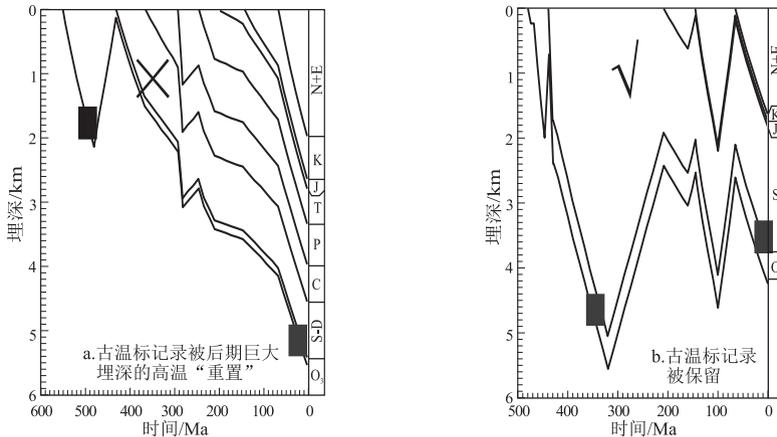


图4 热史重建的有效古温标示意

Fig.4 Effective ancient thermal indicators for thermal history reconstruction

所“重置”,无法用来恢复早期的热历史。反之,若地层后期遭受抬升剥蚀导致现今的温度低于早期经历的最高温度,则古温标记录的早期热信息能被保留至今而被用于热历史的反演模拟。由此可见,只有在特定地热地质条件下的热状态才可以被古温标记录。鉴于此,在盆地热历史恢复时采集古温标的样品必须要注意采集“有效”的样品。一般来说,可以考虑在盆地的隆起区或盆地边缘及露头区采集相应的样品进行古温标测试,但前提是采样区与研究区的构造演化是一致的。基于古温标的有效性,对于深层—超深层系的热历史研究,所面临的难题就是难以采集到合适的有效古温标样品。尤其像塔里木盆地,大部分地区在中—新生代都沉积了巨厚的地层,导致了古生界的古温标样品所记录的早期热信息大都被后期重置了。此时,采用地球动力学方法来重建深层—超深层的热历史是一种比较有效的方法。

3.2 海相层系和古老层系热史恢复

前文已述及,碳酸盐岩层系的热史重建仍存在许多问题。而这里所说的古老层系是指前寒武系为主的地层,大部分也是碳酸盐岩层系。我国的海相层系和古老层系都经历了多期地壳运动破坏,具有增温—降温—增温的多旋回演化过程。众所周知,有效古温标记录的是地质演化过程中的热信息。地层时代越老,经历的构造演化过程越长,对于早期的“热信息”就越难以保存下来;即使能保存早期的热信息,在反演热史的时候影响的因素也越多,模拟获得的热历史不确定性也越大(图5)。低温热年代学方法由于可以准确地研究温度演化

过程而被认为是可以解决复杂热历史的有效方法。但对于海相层系来说,关键是获得低温热年代学测试的磷灰石和锆石矿物颗粒。震旦系—下古生界海相地层中发育有碎屑岩层系(如四川盆地的志留系小河坝组、寒武系沧浪铺组、震旦系,塔里木盆地的震旦系等),可以获取磷灰石和锆石等矿物样品,为低温热年代学参数的测试提供保证;同时,众多露头样品由于抬升较早,为避免受到后期高温重置的影响,也可用来分析盆地的热历史。但是,需要注意的是在一些古老层系中(如震旦系)有时样品中磷灰石颗粒的质量(如数量和粒径大小)将会影响低温热年代学参数的测试。而对于碳酸盐岩层系来说,前述介绍的团簇同位素新型古温标是研究其热史的最具有前途的方法。最近,我们课题组通过与美国加州大学洛杉矶分校(UCLA)和加州理工大学合作,尝试利用碳酸盐团簇同位素古温标来研究古地温。通过系列自然样品的团簇同位素分析,获得了有效的古温度值^[106-107]。目前所用的固态重排动力学模型应用于盆地复杂热历史研究时仍存在问题,如依据交换/扩散动力学模型^[74]和一阶近似反应模型^[72]模拟得到的热历史有时存在较大的差异。因此对于碳酸盐团簇同位素古温标进行热史研究时,必须要利用合适的动力学模型。

3.3 构造—热演化与页岩气保存

四川盆地志留系龙马溪组是页岩气的重要产层。龙马溪组页岩在燕山—喜马拉雅期经历了强烈的构造隆升过程,对页岩气的保存影响很大。通过低温热年代学方法准确恢复中生代以来的构造

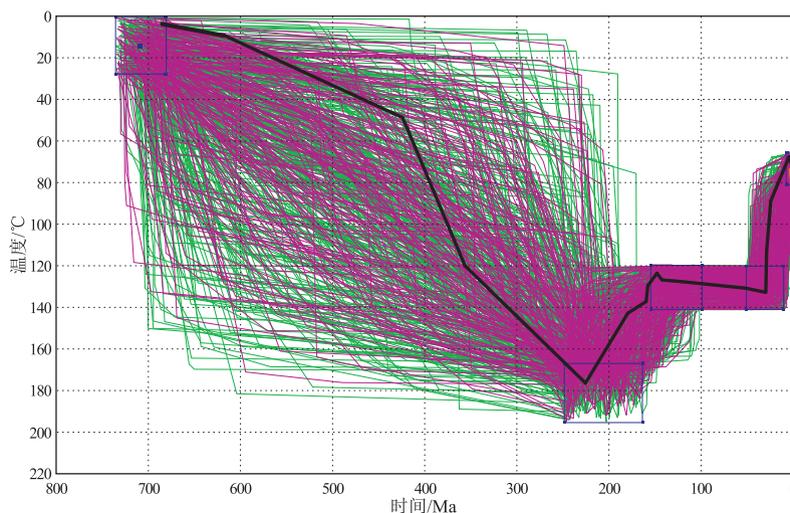


图5 塔里木盆地巴楚隆起同1井新元古界火山碎屑岩样品的热史路径模拟
早期的热史路径的不确定性大,可信度低。

隆升过程和隆升幅度及由此引起的温压条件的变化是研究页岩气保存的关键。通过建立龙马溪组页岩的“埋藏—生烃—抬升”格架,并结合页岩的埋藏史、热史、生烃史及压力演化史,可以分析页岩含气性随构造抬升的变化特征。图6是采用俞凌杰等^[108]建立的埋藏条件下页岩气赋存量计算方法,计算的川东地区典型井龙马溪组页岩在不同抬升阶段的含气量。结果表明川东地区龙马溪组页岩在早白垩世埋深达到最大,地层温度和压力达到峰值,页岩含气量达到最大。燕山期以来,受构造隆升引起的温压变化导致了含气性具有明显变化。早白垩世—晚白垩世,龙马溪组页岩发生快速隆升,地层温度和压力分别由 227 °C、107 MPa 快速降低为 110 °C、38 MPa,页岩游离气量从 5.92 m³/t 减少至 3.42 m³/t,其中一部分转化为吸附气,吸附气量从 0.92 m³/t 增加至 1.15 m³/t,散失量为 2.27 m³/t;晚白垩世—渐新世,龙马溪页岩缓慢隆升,地层温度与压力缓慢降为 100 °C、32 MPa,页岩气散失量为 0.32 m³/t;渐新世以来,龙马溪组页岩再次快速隆升,地层温度及压力快速降低为 60 °C、16 MPa,页岩气散失量为 1.10 m³/t。可以看出,燕山期是页岩气发生差异散失的主要时期。

由此可见,通过低温热年代学方法获得页岩精细的构造抬升冷却过程,可以为页岩气保存的动态研究提供重要的基础资料。

3.4 盆山构造—热演化耦合关系研究

结合磷灰石裂变径迹和(U-Th)/He 年龄可以精细地反映 45~110 °C 的冷却历史。由此,可以通过低温热年代学方法研究盆地和造山带(物源区)的构造—热演化耦合关系。近年来许多学者已借助低温热年代学参数对逆冲推覆带热历史、构造变形时间及地温场等进行了大量研究^[109-114]。由于

受断层活动、快速构造隆升及热液流体等因素的影响,逆冲推覆带局部区域往往会发生热对流扰动,造成区域性地温场变得异常复杂,并对热年代参数造成影响。依托盆地模拟软件、平衡剖面恢复及实测低温热年代学年龄,一些学者通过建立二维热动力学模型探讨了逆冲推覆带变形过程中的热演化对热年代学参数的影响程度^[43-44,115-116]。目前,国内利用实测低温热年代学年龄及单样品正反演模拟方法对逆冲推覆带进行了一些研究,但关于二维热动力学模拟和变形过程中热对流对低温热年代学年龄影响的研究还很少。

同时,低温热年代学参数还可以用于沉积物源分析及物源区构造隆升史研究。磷灰石、锆石等矿物被搬运到沉积盆地后,如果沉积埋藏深度很浅,所处的地温未超过低温热年代学体系的封闭温度,那么矿物内保留的仍是物源区热信息,可有效地用于研究物源区隆升史和盆山耦合关系^[117-123]。为了更准确地揭示物源区,可以综合锆石裂变径迹、锆石 U-Pb 年龄、锆石颗粒形态和颜色及沉积速率等进行研究^[124-127]。通过对未重置低温热年代学年龄重分组分析,可探讨研究区存在几个物源区及物源区主次关系,然后建立分组低温热年代学年龄峰值年龄、地层年龄及时滞三者模式图,揭示造山楔逆冲样式和山体隆升期次,并通过时滞与低温热年代学年龄的关系,计算山体不同冷却阶段的剥蚀速率。

4 结论

通过对沉积盆地热历史研究方法的现状和进展的分析,总结出沉积盆地热史重建方法主要包括古温标方法和地球动力学方法 2 大类。古温标方法主要包括有机质成熟度指标和低温热年代学参

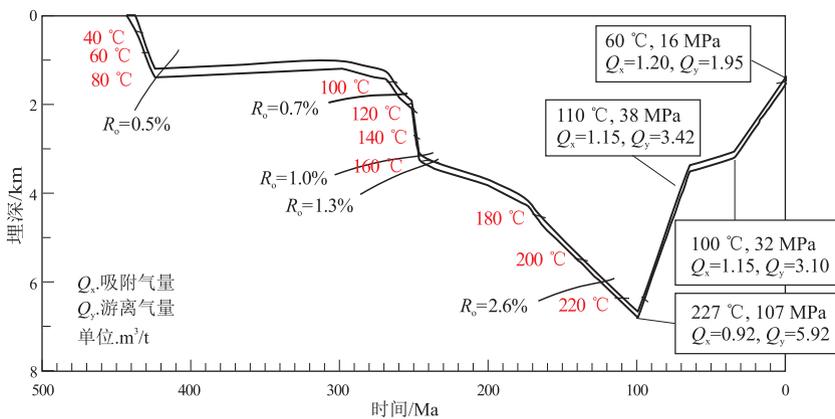


图6 川东地区典型单井龙马溪组构造—热演化与页岩气含气性变化

Fig.6 Structural-thermal evolution and shale gas content in Longmaxi Formation of a typical single well in eastern Sichuan

数,多种古温标耦合反演热历史可以提高模拟结果的精度和可靠性,是目前的发展趋势。依赖盆地成因类型的地球动力学方法重建热史可以与古温标方法互补,能有效补充古地温方法的局限性。针对多期构造演化复杂盆地的热史重建,可以结合多种古温标耦合反演和地球动力学正演方法进行相互补充和验证。盆地热史在研究构造抬升作用下的页岩气保存、盆山构造—热演化耦合作用等方面提供了重要的方法技术。目前,针对深层—超深层、海相层系和古老层系的热史重建,在古温标的有效性、古温标定量动力学模型等方面仍有待于深入的研究。

致谢:感谢国家自然科学基金委、中国石油和中国石化在项目研究中的资助。

参考文献:

- [1] 汪集暘,李四光教授倡导的中国地热研究[J].第四纪研究,1989(3):279-285.
WANG Jiyang.Geochemical studies in China;promoted by professor LI Siguang (J.S.LEE)[J].Quaternary Sciences,1989(3):279-285.
- [2] WAPLES D W.Time and temperature in petroleum formation; application of Lopatin's method to petroleum exploration[J].AAPG Bulletin,1980,64(6):916-926.
- [3] LERCHE I,YARZAB R F,KENDALL C G S C.Determination of paleoheat flux from vitrinite reflectance data[J].AAPG Bulletin,1984,68(11):1704-1717.
- [4] LERCHE I.Inversion of multiple thermal indicators; quantitative methods of determining paleoheat flux and geological parameters.I. Theoretical development for paleoheat flux[J].Mathematical Geology,1988,20(1):1-36.
- [5] TISSOT B P,PELET R,UNGERER P H.Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation[J].AAPG Bulletin,1987,71(12):1445-1466.
- [6] TISSOT B P,WELTE D H.Petroleum formation and occurrence [M].Berlin,Heidelberg:Springer-Verlag,1984:180-180.
- [7] SWEENEY J J,BURNHAM A K.Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J].AAPG Bulletin,1990,74(10):1559-1570.
- [8] PETERS K E,BURNHAM A K,WALTERS C C,et al.Guidelines for kinetic input to petroleum system models from open-system pyrolysis[J].Marine and Petroleum Geology,2018,92:979-986.
- [9] NIELSEN S B,CLAUSEN O R,MCGREGOR E.Basin% R_o : a vitrinite reflectance model derived from basin and laboratory data[J].Basin Research,2017,29(S1):515-536.
- [10] JACOB H.Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen") [J].International Journal of Coal Geology,1989,11(1):65-79.
- [11] 丰国秀,陈盛吉.岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J].天然气工业,1988(8):20-25.
FENG Guoxiu,CHEN Shengji.Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J].Natural Gas Industry,1988(8):20-25.
- [12] 刘德汉,史继扬.高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨[J].石油勘探与开发,1994,21(3):113-115.
LIU Dehan,SHI Jiyang.Discussion on unconventional evaluation method of high evolution carbonate source rock [J].Petroleum Exploration and Development,1994,21(3):113-115.
- [13] BERTRAND R.Standardization of solid bitumen reflectance to vitrinite in some Paleozoic sequences of Canada [J].Energy Sources,1993,15(2):269-287.
- [14] BERTRAND R,MALO M.Dispersed organic matter reflectance and thermal maturation in four hydrocarbon exploration wells in the Hudson Bay Basin;regional implications[R].Ottawa,Ontario: Geological Survey of Canada,2012:52.
- [15] 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(4):394-406.
- [16] 程顶胜,郝石生,王飞宇.高过成熟烃源岩成熟度指标:镜状体反射率[J].石油勘探与开发,1995,22(1):25-28.
CHENG Dingsheng,HAO Shisheng,WANG Feiyu.Reflectance of vitrinite-like macerals,a possible thermal maturity index for highly/over-matured source rocks of the Lower Paleozoic [J].Petroleum Exploration and Development,1995,22(1):25-28.
- [17] 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[J].地球化学,1999,28(6):580-588.
LIU Zufa,XIAO Xianming,FU Jiamo,et al.Marine vitrinite reflectance as a maturity indicator of Lower Palaeozoic hydrocarbon source rocks[J].Geochimica,1999,28(6):580-588.
- [18] 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[J].天然气工业,1996,16(4):14-18.
WANG Feiyu,HE Ping,CHENG Dingsheng,et al.Vitrinite like reflectance as the maturity indicator for Lower Paleozoic high-over matured source rocks[J].Natural Gas Industry,1996,16(4):14-18.
- [19] XIAO Xianming,WILKINS R W T,LIU Dehan,et al.Investigation of thermal maturity of Lower Palaeozoic hydrocarbon source rocks by means of vitrinite-like maceral reflectance;a Tarim Basin case study[J].Organic Geochemistry,2000,31(10):1041-1052.
- [20] SCHMIDT J S,ARAUJO C V,SOUZA I V A F,et al.Hydrous pyrolysis maturation of vitrinite-like and humic vitrinite macerals: implications for thermal maturity analysis[J].International Journal of Coal Geology,2015,144-145:5-14.
- [21] 王晔,邱楠生,马中良,等.固体沥青反射率与镜质体反射率的等效关系评价[J].中国矿业大学学报,2020,49(3):563-575.
WANG Ye,QIU Nansheng,MA Zhongliang,et al.Evaluation of equivalent relationship between vitrinite reflectance and solid bitumen reflectance[J].Journal of China University of Mining & Technology,2020,49(3):563-575.
- [22] GOODARZI F,NORFORD B S.Graptolites as indicators of the temperature histories of rocks[J].Journal of the Geological Society of London,1985,142(6):1089-1099.
- [23] COLE G A.Graptolite-chitinozoan reflectance and its relation-

- ship to other geochemical maturity indicators in the Silurian Qusaiba shale, Saudi Arabia[J]. *Energy & Fuels*, 1994, 8(6): 1443-1459.
- [24] 曹长群, 尚庆华, 方一亭. 探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用[J]. *古生物学报*, 2000, 39(1): 151-156.
- CAO Changqun, SHANG Qinghua, FANG Yiting. The study of graptolite reflectance as the indicator of source-rock maturation in Ordovician and Silurian of Tarim Basin, Ordos, Jiangsu areas[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(1): 151-156.
- [25] PETERSEN H I, SCHOVSBO N H, NIELSEN A T. Reflectance measurements of zooclasts and solid bitumen in Lower Paleozoic shales, southern Scandinavia; correlation to vitrinite reflectance[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 114: 1-18.
- [26] WANG Ye, QIU Nansheng, BORJIGIN Tenger, et al. Integrated assessment of thermal maturity of the Upper Ordovician-Lower Silurian Wufeng-Longmaxi shale in Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 100: 447-465.
- [27] LUO Qingyong, FARIBORZ G, ZHONG Ningning, et al. Graptolites as fossil geo-thermometers and source material of hydrocarbons: an overview of four decades of progress[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 200: 103000.
- [28] LANDIS C R, CASTAÑO J R. Maturation and bulk chemical properties of a suite of solid hydrocarbons[J]. *Organic Geochemistry*, 1995, 22(1): 137-149.
- [29] SCHOENHERR J, LITKE R, URAI J L, et al. Polyphase thermal evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as deduced by maturity of solid reservoir bitumen[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(8): 1293-1318.
- [30] RIEDIGER C L. Solid bitumen reflectance and Rock-Eval T_{max} as maturation indices: an example from the "Nordegg Member", Western Canada Sedimentary Basin[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1993, 22(3/4): 295-315.
- [31] BERTRAND R, MALO M. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation in Siluro-Devonian rocks of the Gaspé Belt Basin, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2001, 49(2): 238-261.
- [32] GREEN P F, DUDDY I R, GLEADOW A J W, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. a qualitative description[J]. *Chemical Geology*, 1986, 59: 237-253.
- [33] WAGNER M, ALTHERR R, VAN DEN HAUTE P. Apatite fission-track analysis of Kenyan basement rocks: constraints on the tectonic evolution of the Kenya dome. A reconnaissance study[J]. *Tectonophysics*, 1992, 204(1/2): 93-110.
- [34] TAGAMI T, CARTER A, HURFORD A J. Natural long-term annealing of the zircon fission-track system in Vienna Basin deep borehole samples; constraints upon the partial annealing zone and closure temperature[J]. *Chemical Geology*, 1996, 130(1/2): 147-157.
- [35] YAMADA R, MURAKAMI M, TAGAMI T. Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; reassessment of laboratory experiments[J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(1/2): 75-91.
- [36] COYLE D A, WAGNER G A. Positioning the titanite fission-track partial annealing zone[J]. *Chemical Geology*, 1998, 149(1/2): 117-125.
- [37] LASLETT 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): 1-13.
- [38] GREEN P F, DUDDY I R, LASLETT G M, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales[J]. *Chemical Geology*, 1989, 79(2): 155-182.
- [39] DONELICK R A, KETCHAM R A, CARLSON W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics II: crystallographic orientation effects[J]. *American Mineralogist*, 1999, 84(9): 1224-1234.
- [40] 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(9): 1235-1255.
- [41] YAMADA R, TAGAMI T, NISHIMURA S, et al. Annealing kinetics of fission tracks in zircon; an experimental study[J]. *Chemical Geology*, 1995, 122(1/4): 249-258.
- [42] QIU Nansheng, CAI Chang'e. Detrital zircon (U-Th)/He and fission track data of natural deep borehole samples and its geological significance [C]//15th International Conference on Thermochronology. Maresias, Brazil: [s.l.], 2016: 133-133.
- [43] MORA A, CASALLAS W, KETCHAM R A, et al. Kinematic restoration of contractional basement structures using thermokinematic models: a key tool for petroleum system modeling[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(8): 1575-1598.
- [44] ALMENDRAL A, ROBLES W, PARRA M, et al. FetKin: coupling kinematic restorations and temperature to predict thrusting, exhumation histories, and thermochronometric ages[J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(8): 1557-1573.
- [45] 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): 4231-4240.
- [46] QIU Nansheng, CHANG Jian, ZUO Yinhui, et al. Thermal evolution and maturation of Lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, Northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(5): 789-821.
- [47] 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.
- [48] REINERS P W, BRADY R, FARLEY K A, et al. Helium and argon thermochronometry of the Gold Butte block, south Virgin Mountains, Nevada[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 178(3/4): 315-326.
- [49] FLOWERS R M, KETCHAM R A, SHUSTER D L, et al. Apatite (U-Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(8): 2347-2365.
- [50] BROWN R W, BEUCHER R, ROPER S, et al. Natural age dispersion arising from the analysis of broken crystals. Part I: theoretical basis and implications for the apatite (U-Th)/He thermochronometer[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013,

- 122;478-497.
- [51] BEUCHER R, BROWN R W, ROPER S, et al. Natural age dispersion arising from the analysis of broken crystals: Part II: practical application to apatite (U-Th)/He thermochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 120: 395-416.
- [52] JEHLIČKA J, BÉNY C. Application of Raman microspectrometry in the study of structural changes in Precambrian kerogens during regional metamorphism [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(2): 211-213.
- [53] PóCSIK I, HUNDHAUSEN M, KOÖS M, et al. Origin of the D peak in the Raman spectrum of microcrystalline graphite [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 227-230: 1083-1086.
- [54] ZENG Yishan, WU Chaodong. Raman and infrared spectroscopic study of kerogen treated at elevated temperatures and pressures [J]. *Fuel*, 2007, 86(7/8): 1192-1200.
- [55] LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: methodology and geological applications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(11): 1285-1298.
- [56] ZHOU Qin, XIAO Xianming, PAN Lei, et al. The relationship between micro-Raman spectral parameters and reflectance of solid bitumen [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 121: 19-25.
- [57] LIS G P, MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, et al. FTIR absorption indices for thermal maturity in comparison with vitrinite reflectance R_o in type-II kerogens from Devonian black shales [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(11): 1533-1552.
- [58] 王兆云, 范璞, 程克明. 碳酸盐岩热演化指标研究 [J]. *中国科学(B辑)*, 1995, 25(5): 556-560.
WANG Zhaoyun, FAN Pu, CHENG Keming. Study on thermal evolution indicator for carbonate strata [J]. *Science in China (B)*, 1995, 25(5): 556-560.
- [59] WEI Zhibin, GAO Xiuxiang, ZHANG Dajiang. Assessment of thermal evolution of kerogen geopolymers with their structural parameters measured by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy [J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(1): 240-250.
- [60] 周希云. 上扬子区二叠系至下三叠统牙形石颜色变化指标及其油气评价 [J]. *海相沉积区油气地质*, 1987, 1(2): 83-90.
ZHOU Xiyun. CAI of conodonts from Permian to Lower Triassic in Upper Yangzi area and its oil and gas evaluation [J]. *Petroleum Geology in Marine Sedimentary Area*, 1987, 1(2): 83-90.
- [61] PUSEY W C. Paleotemperatures in the Gulf Coast using the ESR-kerogen method [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies*, 1973, 23: 195-202.
- [62] BAKR M Y, AKIYAMA M, SANADA Y, et al. Radical concentration of kerogen as a maturation parameter [J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 12(1): 29-32.
- [63] QIU Nansheng, WANG Jiyang, ZHOU Licheng, et al. Thermal evolution of source rocks in sedimentary basin by using electron paramagnetic resonance techniques [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(19): 1625-1628.
- [64] QIU Nansheng, LI Huili, JIN Zhijun, et al. Temperature and time effect on the concentrations of free radicals in coal: evidence from laboratory pyrolysis experiments [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 69(3): 220-228.
- [65] QIU Nansheng, WANG Jiyang. The use of free radicals of organic matter to determine paleogeothermal gradient [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(1/2): 77-86.
- [66] 席道瑛, 程经毅, 黄建华. 声发射在研究岩石古温度中的应用 [J]. *中国科学技术大学学报*, 1996, 26(1): 97-101.
XI Daoying, CHENG Jingyi, HUANG Jianhua. The application of acoustic emission in the study of ancient temperature of rock [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1996, 26(1): 97-101.
- [67] YAVUZ H, DEMIRDAG S, CARAN S. Thermal effect on the physical properties of carbonate rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(1): 94-103.
- [68] 李佳蔚, 邱植生, 梅庆华, 等. 利用热声发射技术测量岩石最高古温度的探索 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(11): 2898-2905.
LI Jiawei, QIU Nansheng, MEI Qinghua, et al. Study on measuring the highest rock paleotemperature with thermo-acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2898-2905.
- [69] 张建坤, 何生, 易积正, 等. 岩石热声发射和盆模技术研究中扬子区西部下古生界海相页岩最高古地温和热成熟史 [J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 58-67.
ZHANG Jiankun, HE Sheng, YI Jizheng, et al. Rock thermo-acoustic emission and basin modeling technologies applied to the study of maximum paleotemperatures and thermal maturity histories of Lower Paleozoic marine shales in the western Middle Yangtze area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 58-67.
- [70] EILER J M. "Clumped-isotope" geochemistry: the study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 309-327.
- [71] EILER J M. Paleoclimate reconstruction using carbonate clumped isotope thermometry [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(25/26): 3575-3588.
- [72] PASSEY B H, HENKES G A. Carbonate clumped isotope bond reordering and geospeedometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 351-352: 223-236.
- [73] HENKES G A, PASSEY B H, GROSSMAN E L, et al. Temperature limits for preservation of primary calcite clumped isotope paleotemperatures [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2014, 139: 362-382.
- [74] STOLPER D A, EILER J M. The kinetics of solid-state isotope-exchange reactions for clumped isotopes: a study of inorganic calcites and apatites from natural and experimental samples [J]. *American Journal of Science*, 2015, 315(5): 363-411.
- [75] SHENTON B J, GROSSMAN E L, PASSEY B H, et al. Clumped isotope thermometry in deeply buried sedimentary carbonates: the effects of bond reordering and recrystallization [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127(7/8): 1036-1051.
- [76] GALLAGHER T M, SHELDON N D, MAUK J L, et al. Constraining the thermal history of the North American midcontinent rift system using carbonate clumped isotopes and organic thermal maturity indices [J]. *Precambrian Research*, 2017, 294: 53-66.
- [77] MANGENOT X, DEÇONINCK J F, BONIFACIE M, et al. Ther-

- mal and exhumation histories of the northern subalpine chains (Bauges and Bornes-France): evidence from forward thermal modeling coupling clay mineral diagenesis, organic maturity and carbonate clumped isotope (Δ_{47}) data [J]. *Basin Research*, 2019, 31(2): 361-379.
- [78] MCKENZIE D. Some remarks on the development of sedimentary basins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 40(1): 25-32.
- [79] ROYDEN L, KEEN C E. Rifting process and thermal evolution of the continental margin of eastern Canada determined from subsidence curves [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 51(2): 343-361.
- [80] HELLINGER S J, SCLATER J G. Some comments on two-layer extensional models for the evolution of sedimentary basins [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 1983, 88(B10): 8251-8269.
- [81] KUSZNIR N J, ZIEGLER P A. The mechanics of continental extension and sedimentary basin formation: a simple-shear/pure-shear flexural cantilever model [J]. *Tectonophysics*, 1992, 215(1/2): 117-131.
- [82] DEHLER S A, KEEN C E, ROHR K M M. Tectonic and thermal evolution of Queen Charlotte Basin: lithospheric deformation and subsidence models [J]. *Basin Research*, 2003, 9(3): 243-261.
- [83] KUSZNIR N J, KARNER G D. Continental lithospheric thinning and breakup in response to upwelling divergent mantle flow: application to the Woodlark, Newfoundland and Iberia margins [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2007, 282(1): 389-419.
- [84] BAUR F, LITTKER R, WIELENS H, et al. Basin modeling meets rift analysis: a numerical modeling study from the Jeanne d'Arc Basin, offshore Newfoundland, Canada [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(3): 585-599.
- [85] JARVIS G T, MCKENZIE D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 48(1): 42-52.
- [86] 何丽娟. 辽河盆地新生代多期构造热演化模拟 [J]. *地球物理学报*, 1999, 42(1): 62-68.
HE Lijuan. Multiple tectono-thermal modeling of Liaohu Basin in the Cenozoic [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(1): 62-68.
- [87] WHITE N. An inverse method for determining lithospheric strain rate variation on geological timescales [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 122(3/4): 351-371.
- [88] WHITE N, BELLINGHAM P. A two - dimensional inverse model for extensional sedimentary basins 1. Theory [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2002, 107(B10): ETG 17-1-ETG 17-20.
- [89] SONG Haibin, CHEN Lin, ZHANG Jiong, et al. A Matlab program for 1D strain rate inversion [J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(1): 16-23.
- [90] CHEN Lin, ZHANG Zhongjie, SONG Haibin, et al. Numerical modeling of extensional sedimentary basin formation with Matlab: application to the northern margin of the South China Sea [J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 51: 153-165.
- [91] HE Lijuan, WANG Kelin, XIONG Liangping, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3/4): 211-220.
- [92] HE Lijuan, XIONG Liangping, WANG Jiyang. Heat flow and thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2002, 351(3): 245-253.
- [93] HE Lijuan, WANG Jiyang. Tectono-thermal modelling of sedimentary basins with episodic extension and inversion, a case history of the Jiyang Basin, North China [J]. *Basin Research*, 2004, 16(4): 587-599.
- [94] CHEN Lin. Stretching factor estimation for the long-duration and multi-stage continental extensional tectonics: application to the Baiyun Sag in the northern margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2014, 611: 167-180.
- [95] LIU Qiongying, HE Lijuan, HUANG Fang, et al. Cenozoic lithospheric evolution of the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton: constraint from tectono-thermal modeling [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 368-382.
- [96] LIU Qiongying, HE Lijuan, CHEN Lichun. Tectono-thermal modeling of Cenozoic multiple rift episodes in the Bohai Bay Basin, eastern China and its geodynamic implications [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107(1): 53-69.
- [97] POLYANSKY O P. Dynamic causes for the opening of the Baikal Rift Zone: a numerical modelling approach [J]. *Tectonophysics*, 2002, 351(1/2): 91-117.
- [98] VAN AVENDONK H J A, LAVIER L L, SHILLINGTON D J, et al. Extension of continental crust at the margin of the eastern Grand Banks, Newfoundland [J]. *Tectonophysics*, 2009, 468(1/4): 131-148.
- [99] HUISMANS R S, BEAUMONT C. Depth-dependent extension, two-stage breakup and cratonic underplating at rifted margins [J]. *Nature*, 2011, 473(7345): 74-78.
- [100] 何丽娟, 汪集旻. 沉积盆地构造热演化研究进展: 回顾与展望 [J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1215-1219.
HE Lijuan, WANG Jiyang. Tectono-thermal modeling of sedimentary basins: review and outlook [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1215-1219.
- [101] DEMETRESCU C, WILHELM H, ENE M, et al. On the geothermal regime of the foreland of the eastern Carpathians bend [J]. *Journal of Geodynamics*, 2005, 39(1): 29-59.
- [102] VOORDE M T, GASPARESCRIBANO J M, JUEZ-LARRÉ J, et al. Thermal effects of linked lithospheric and upper crustal-scale processes: insights from numerical modeling of the Cenozoic Central Catalan Coastal Ranges (NE Spain) [J]. *Tectonics*, 2007, 26(5): TC5018.
- [103] HE Lijuan. Permian to Late Triassic evolution of the Longmen Shan Foreland Basin (Western Sichuan): model results from both the lithospheric extension and flexure [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 93: 49-59.
- [104] 何丽娟, 许鹤华, 刘琼颖. 前陆盆地构造—热演化: 以龙门山前陆盆地为例 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 127-136.
HE Lijuan, XU Hehua, LIU Qiongying. Tectono-thermal modeling of the foreland basins: a case study of the Longmenshan Foreland

- Basin[J].Earth Science Frontiers,2017,24(3):127-136.
- [105] 何雨娟,黄方,刘琼颖,等.四川盆地早古生代构造热演化特征[J].地球科学与环境学报,2014,36(2):10-17.
HE Lijuan, HUANG Fang, LIU Qiongying, et al. Tectono-thermal evolution of Sichuan Basin in Early Paleozoic[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 10-17.
- [106] 徐秋晨,邱楠生,刘雯,等.利用团簇同位素恢复沉积盆地热历史的探索[J].科学通报,2019,64(5/6):566-578.
XU Qiuchen, QIU Nansheng, LIU Wen, et al. Reconstructing the basin thermal history with clumped isotope[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(5/6): 566-578.
- [107] 刘雨晨,邱楠生,常健,等.碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用:以塔里木盆地顺托果勒地区为例[J].地球物理学报,2020,63(2):597-611.
LIU Yuchen, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Application of clumped isotope thermometry to thermal evolution of sedimentary basins: a case study of Shuntuoguole area in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 597-611.
- [108] 俞俊杰,范明,腾格尔,等.埋藏条件下页岩气赋存形式研究[J].石油实验地质,2016,38(4):438-444.
YU Lingjie, FAN Ming, TENGGER, et al. Shale gas occurrence under burial conditions[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 438-444.
- [109] CHANG Jian, QIU Nansheng, LI Jiawei. Tectono-thermal evolution of the northwestern edge of the Tarim Basin in China: constraints from apatite (U - Th)/He thermochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 61: 187-198.
- [110] FILLON C, GAUTHERON C, VAN DER BEEK P. Oligocene-Miocene burial and exhumation of the southern Pyrenean foreland quantified by low-temperature thermochronology[J]. Journal of the Geological Society, 2013, 170(1): 67-77.
- [111] GUENTHNER W R, REINERS P W, TIAN Yuntao. Interpreting date-eU correlations in zircon (U-Th)/He datasets: a case study from the Longmen Shan, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 403: 328-339.
- [112] RAK A J, MCQUARRIE N, EHLERS T A. Kinematics, exhumation, and sedimentation of the North Central Andes (Bolivia): an integrated thermochronometer and thermokinematic modeling approach[J]. Tectonics, 2017, 36(11): 2524-2554.
- [113] ALDEGA L, BIGI S, CARMINATI E, et al. The Zagros fold-and-thrust belt in the Fars province (Iran): II. Thermal evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 93: 376-390.
- [114] BALESTRA M, CORRADO S, ALDEGA L, et al. Thermal and structural modeling of the Scillato wedge-top basin source-to-sink system: insights into the Sicilian fold-and-thrust belt evolution (Italy)[J]. GSA Bulletin, 2019, 131(11/12): 1763-1782.
- [115] MCQUARRIE N, EHLERS T A. Influence of thrust belt geometry and shortening rate on thermochronometer cooling ages: insights from thermokinematic and erosion modeling of the Bhutan Himalaya[J]. Tectonics, 2015, 34(6): 1055-1079.
- [116] CHAPMAN J B, CARRAPA B, BALLATO P, et al. Intracontinental subduction beneath the Pamir Mountains: constraints from thermokinematic modeling of shortening in the Tajik fold-and-thrust belt [J]. GSA Bulletin, 2017, 129(11/12): 1450-1471.
- [117] QIU Nansheng, CHANG Jian, LI Jiawei, et al. New evidence on the Neogene uplift of South Tianshan: constraints from the (U-Th)/He and AFT ages of borehole samples of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation [J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101(6): 1625-1643.
- [118] YU Shun, CHEN Wen, EVANS N J, et al. Cenozoic uplift, exhumation and deformation in the north Kuqa Depression, China as constrained by (U-Th)/He thermochronometry [J]. Tectonophysics, 2014, 630: 166-182.
- [119] FOSDICK J C, CARRAPA B, ORTIZ G. Faulting and erosion in the Argentine Precordillera during changes in subduction regime: reconciling bedrock cooling and detrital records [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 432: 73-83.
- [120] TIAN Yuntao, QIU Nansheng, KOHN B P, et al. Detrital zircon (U-Th)/He thermochronometry of the Mesozoic Daba Shan Foreland Basin, Central China: evidence for timing of post-orogenic denudation [J]. Tectonophysics, 2012, 570-571: 65-77.
- [121] CHANG Jian, TIAN Yuntao, QIU Nansheng. Mid-Late Miocene deformation of the northern Kuqa fold-and-thrust belt (southern Chinese Tian Shan): an apatite (U-Th-Sm)/He study [J]. Tectonophysics, 2017, 694: 101-113.
- [122] CHANG Jian, LI Dan, MIN K, et al. Cenozoic deformation of the Kalpin fold-and-thrust belt, southern Chinese Tian Shan: new insights from low-T thermochronology and sandbox modeling [J]. Tectonophysics, 2019, 766: 416-432.
- [123] CHANG Jian, QIU Nansheng, LIU Shuai, et al. Post-Triassic multiple exhumation of the Taihang Mountains revealed via low-T thermochronology: implications for the paleo-geomorphic reconstruction of the North China Craton [J]. Gondwana Research, 2019, 68: 34-49.
- [124] DUNKL I, DI GIULIO A, KUHLEMANN J. Combination of single-grain fission-track chronology and morphological analysis of detrital zircon crystals in provenance studies: sources of the Macigno Formation (Apennines, Italy) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(4): 515-524.
- [125] GARVER J I, KAMP P J J. Integration of zircon color and zircon fission-track zonation patterns in orogenic belts: application to the Southern Alps, New Zealand [J]. Tectonophysics, 2002, 349(1/4): 203-219.
- [126] BERNET M, VAN DER BEEK P, PIK R, et al. Miocene to recent exhumation of the central Himalaya determined from combined detrital zircon fission-track and U/Pb analysis of Siwalik sediments, western Nepal [J]. Basin Research, 2006, 18(4): 393-412.
- [127] CAO Kai, BERNET M, WANG Guocan, et al. Focused Pliocene-Quaternary exhumation of the Eastern Pamir Domes, Western China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 363: 16-26.