

沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地 热演化史恢复研究进展

任战利^{1,2}, 田 涛², 李进步³, 王继平³, 崔军平^{1,2}, 李 浩², 唐建云², 郭 科²

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069;
3. 中国石油长庆油田公司苏里格气田研究中心, 陕西 西安 710018)

摘 要:沉积盆地构造热事件的研究是盆地热演化史研究的热点及前缘领域。介绍了低温热年代学方法、古温标法及地球动力学模型方法研究中的新进展。叠合盆地构造-热演化史恢复是热演化史研究的前缘领域及难点, 低温热年代学测年技术已成为叠合盆地构造-热演化史恢复的重要方法。中国普遍发育叠合盆地, 叠合盆地古地温场经历的后期叠加改造普遍存在, 叠合盆地的后期盆地对前期盆地的古地温场信息有抹去或掩盖作用。从叠合盆地叠加与改造对古地温场产生影响的角度出发, 根据叠合盆地不同演化阶段地温场信息记录、保持及后期叠加改造情况的不同, 结合多种古地温研究方法, 以正确的地质模型及大量的实际地质资料为约束, 提出分演化阶段真实恢复叠合盆地热演化史的新思路及方法。

关键词:低温热年代学; 裂变径迹; 镜质体反射率; 古地温; 构造热事件; 热演化史; 叠合盆地; 沉积盆地
中图分类号:TE121.1; P314.2 **文献标志码:**A

Review on Methods of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins and Thermal Evolution History Reconstruction of Superimposed Basins

REN Zhan-li^{1,2}, TIAN Tao², LI Jin-bu³, WANG Ji-ping³, CUI Jun-ping^{1,2},
LI Hao², TANG Jian-yun², GUO Ke²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Sulige Gas-field
Research Center, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

Abstract: Tectonic-thermal event in sedimentary basin is a research hotspot and leading edge of basin thermal evolution history. The new developments of low temperature thermochronology, geothermometer and geodynamics model methods on the thermal evolution history in sedimentary basins were introduced. Reconstruction of tectonic-thermal evolution history of superimposed basins is one of the frontiers and difficulties in the research of thermal evolution history, and the dating technology of low temperature thermochronology is an important method for the reconstruction of tectonic-thermal evolution history of superimposed basins. A lot of superimposed basins are located in China, and the paleogeothermal fields of superimposed basins are generally superimposed and transformed in late stage, the paleogeothermal field information of

收稿日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372128); 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项基金项目(BJ08133-1);
国家科技重大专项项目(2011ZX05005-004-007HZ)

作者简介: 任战利(1961-), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: renzhanl@nwu.edu.cn.

superimposed basins in early stage is erased or covered by the basins in late stage. From the perspective of the effect of superimposition and transformation of superimposed basins on the paleogeothermal field, according to the differences of geothermal field information record, maintenance and late superposition and transformation of superimposed basins in different evolution stages, combined with various geothermal methods, taking the correct geological model and a large number of actual geological data as constraint, the new thought and method for the real reconstruction of thermal evolution history of superimposed basins were purposed in different evolution stages.

Key words: low temperature thermochronology; fission track; vitrinite reflectance; paleogeothermal; tectonic-thermal event; thermal evolution history; superimposed basin; sedimentary basin

0 引言

盆地构造热演化史恢复是盆地动力学、盆地分析及石油地质领域研究的前沿及难点问题之一。盆地热演化史控制了油气、煤等多种能源矿产的形成、演化及成藏(矿)^[1-11]。中国沉积盆地大多数是由不同时代盆地叠合而成,不同类型盆地的叠加及改造使叠合盆地热演化史非常复杂^[12-14]。叠合盆地热演化史的详细恢复不仅对盆地动力学及其演化有重要理论意义,而且对盆地油气、煤等多种矿产资源的形成、演化及成藏(矿)研究有重要现实意义^[1-4]。

构造热演化史主要研究不同成因机制盆地深部热结构、盆地热体制、地温场特征、盆地热史模拟和构造热事件等方面。热演化史分析可以提供盆地和造山带地质演化过程的隆升、构造热事件、构造运动、断裂带及热流体活动等发生的时间,进而详细恢复造山带、盆地的热演化史^[15-19]。

目前,国内外关于盆地热演化史恢复的方法研究,总体上可以分为3类:第1类是用盆地演化的热动力学模型来恢复热历史;第2类是利用各种古温标来恢复热历史;第3类是第1、2类方法的结合,即综合法。盆地热动力学模型与古温标相结合的综合法是已知现今热流、现今地温,依据一定的构造演化模型来求取古热流、古地温的一种正、反演技术。该方法利用了古温标法及地球动力学模型方法的优点,克服了地球动力学模型方法及古温标法的不足^[20-21]。由于古温标法可以通过实测数据来检验模拟结果,所以被认为是研究精度较高的方法^[4,20,22]。

20世纪80年代以来,构造热演化史研究方法与石油地质学的结合,在解决中国含油气盆地构造热事件和盆地热演化史恢复、油气生成、成藏期次、剥蚀量恢复、油气评价等关键问题方面显示了独特优势,发挥了重要作用^[23-27]。

笔者介绍了(U-Th)/He、裂变径迹定年方法以及镜质体反射率、流体包裹体、黏土矿物转变估算等古温标法的新进展及应用时需注意的问题。(U-Th)/He定年等低温热年代学方法及技术进展较大,已成为叠合盆地构造-热演化史恢复的一种重要方法。地球动力学模型方法主要介绍了伸展盆地、前陆盆地、克拉通盆地、走滑盆地等模型方法的新进展,其中伸展盆地的模型及热模拟发展迅速。第3类综合法的进展主要表现在第1、2类方法的进展上。沉积盆地构造热事件的研究是盆地热演化史研究的一个热点,笔者介绍了构造热事件的研究进展及研究方法。

中国普遍发育叠合盆地,叠合盆地构造地热演化史恢复是热演化史研究的前沿领域及难点,笔者根据多年的研究经验,在1991年提出的分演化阶段恢复叠合盆地热演化史思路和方法的基础上^[2,24-25],提出了盆地热演化史恢复应重视的基本问题和前提条件,进一步探讨和完善了分演化阶段真实恢复叠合盆地热演化史的思路及方法。

1 低温热年代学方法研究新进展

构造-热年代学是在同位素年代学研究基础上,以U-Pb、⁴⁰Ar/³⁹Ar、裂变径迹及(U-Th)/He等试验方法为依托,根据不同测年矿物的封闭温度理论,以构造地质学理论为指导,对大陆内部不同块体的构造变形时间、山体抬升和盆地沉降速率等提供精细的年代与热作用制约。10年多来,随着构造-热年代学理论和测年技术的不断完善,构造热作用过程与构造热年代学紧密结合,有助于探讨和研究中新世代大陆造山带演化与盆地形成、大陆边缘与大陆内部(板内)构造的关系,从而在更大的范围内建立构造演化的时序和动力学演化规律^[28-30]。

理论上讲,构造热年代学研究可以提供65℃~650℃范围内的热历史信息,但在山体隆升研究中

主要利用低温的锆石和磷灰石裂变径迹定年方法,近几年更低温的(U-Th)/He定年方法在山体隆升剥蚀和盆地热演化史研究方面也取得丰硕成果。在盆地油气地质领域,以磷灰石、锆石裂变径迹和(U-Th)/He热定年为代表的中—低温热年代学新技术在地质体定年、盆地隆升及热演化史研究方面取得了一系列新的成果^[29-35]。

1.1 (U-Th)/He定年方法进展

(U-Th)/He定年方法与其他放射性定年方法原理一样,虽然早在100年前就被Strutt提出来了,但由于测试仪器的限制以及测得年龄偏低等原因,一直没有得到广泛应用。1987年,Zeitler等在对磷灰石进行(U-Th)/He定年时,发现磷灰石He年龄是通过较低温度时的冷却年龄,并指出(U-Th)/He定年有可能作为一种低温温度计^[36]。这项研究引起了研究人员的极大关注,为(U-Th)/He定年方法的快速发展奠定了基础。(U-Th)/He定年方法的原理是根据磷灰石等矿物颗粒中U、Th衰变产生He发展而来的。通过测量样品中放射性He、U和Th的含量,就可以获得(U-Th)/He的年龄。目前应用较多的是磷灰石、锆石和楣石(U-Th)/He定年。

磷灰石(U-Th)/He的封闭温度是已有定年体系中较低的,因此,它能反映低温阶段的热历史信息。依据自然样品和热模拟试验,不同矿物(U-Th)/He体系的封闭温度差别较大,磷灰石He扩散的封闭温度较低(75℃)^[37],锆石He的封闭温度范围为170℃~190℃^[38],楣石范围则为191℃~218℃^[39]。磷灰石(U-Th)/He定年方法的应用已日趋成熟。在利用该方法定年时,磷灰石(U-Th)/He年龄会受多种因素影响:α粒子射出效应、复杂热历史、矿物内元素的不均匀分布以及晶体的辐射损伤^[40-41]。目前,多数应用研究中都采用磷灰石(U-Th)/He与磷灰石裂变径迹或锆石(U-Th)/He等定年方法相结合的方式详细研究地质体在低温阶段的演化过程。目前,国际上的研究实例均采用将(U-Th)/He定年与镜质体反射率、裂变径迹以及K/Ar、Ar/Ar等方法结合起来进行,以便利用不同矿物封闭温度的差异,对复杂热历史轨迹进行恢复^[40]。(U-Th)/He定年方法被广泛应用在沉积盆地物源和造山带地质体构造热演化、构造运动时间、剥蚀量恢复、造山带古地形演化历史、断裂带及热流体活动、盆地古地温演化及烃源岩成熟、生排烃等研究中^[40-46]。

1.2 裂变径迹定年方法进展

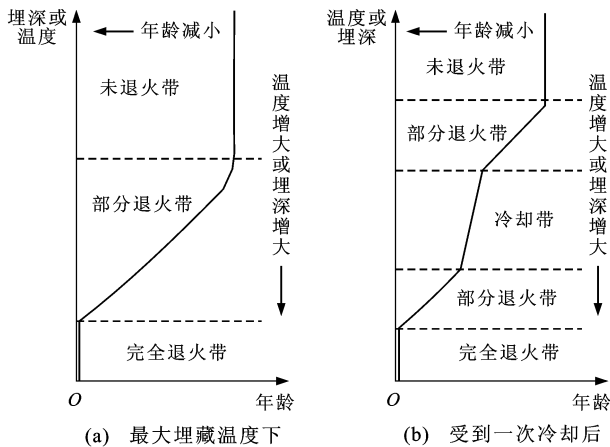
1.2.1 方法原理的进展

裂变径迹是约束盆地热演化的一种有效手段,裂变径迹测年是建立在矿物²³⁸U自发裂变并对载体矿物辐射损伤的基础上,通过分析矿物中自发径迹密度与²³⁸U含量发展而来的同位素测年^[47-50]。裂变径迹定年方法在造山带隆升、构造抬升演化及沉积盆地热演化史和油气勘探等方面被广泛应用^[32-34,51-54]。

磷灰石、锆石和楣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范围为110℃~125℃,锆石的封闭温度范围为210℃~240℃,楣石的封闭温度范围为265℃~310℃^[32-34,42]。

裂变径迹退火除受控于温度和时间外,还受磷灰石成分、磷灰石蚀刻特征等的影响。近年来,国内外对磷灰石裂变径迹的基础研究日趋深入,其应用领域和范围也在不断扩展。特别是最近10年多来,裂变径迹的基础研究工作在裂变径迹退火动力学^[55]、退火行为的主要影响和控制因素^[56]、多元退火模型^[57]、二维及三维热演化史反演等方面取得了较大突破^[58]。多元动力学退火模型按照退火动力学参数的不同,将磷灰石分成多个具有不同动力学性质的系列,然后对这些不同的系列分别进行模拟。应用多元动力学退火模型进行模拟分析,恢复的古地温更加准确。

Naeser等最早根据磷灰石裂变径迹(AFT)分析盆地热演化史,讨论了地层处于最大埋藏温度和受到一次冷却条件下,裂变径迹年龄与深度或温度之间关系的理论模式^[32]。根据AFT年龄与埋深的关系及分带,可以识别冷却事件发生的时间、速率及地层抬升量方面的信息。Naeser等认为在连续沉积且目前正处在最大埋藏地温状况下,磷灰石裂变径迹年龄-深度或温度图上会出现3个不同的带[图1(a)],从浅到深依次为:①未退火带,地层尚未受到退火作用,年龄反映物源的时代,大于或等于地层年龄;②部分退火带,地层已受到退火作用,年龄逐渐减小,小于地层年龄;③完全退火带,年龄等于0,地层达到完全退火。如果地层在达到最大埋藏温度后,由于抬升剥蚀或地温梯度的减小而冷却下来,磷灰石裂变径迹年龄-深度或温度图上会出现5个带[图1(b)],从上到下依次是:①未退火带;②部分退火带;③前完全退火带,也称为冷却带,该带为冷却后又新生出新的裂变径迹,该带的年龄、年龄-深度曲线的斜率和地层厚度可以确定冷却事件发生的时间、速率和地



图件引自文献[32]

图1 不同地质过程磷灰石裂变径迹退火带的划分
Fig. 1 Division of Apatite Fission Track Annealing Zones in Different Geological Processes

层抬升剥蚀方面的信息^[2,12,16]；④部分退火带；⑤完全退火带^[32-33]。

1.2.2 应用研究进展

裂变径迹定年方法的优点主要有：①确定最大古地温，古地温在 70 °C ~ 120 °C 范围内都可以确定；②确定最大古地温状况下冷却的时间，当地层完全退火后，又很快抬升到小于 50 °C 的情况下，记录的裂变径迹年龄代表了冷却时间，如果冷却时间延长或现今仍大于 50 °C 的情况下，估计的冷却年龄偏小，如果地层沉积后未完全退火，经受的温度小于 110 °C，则可通过长短径迹的相对比例来估算冷却时间；③确定地层达到最大古地温时的古地温梯度，在垂直深度图上，由裂变径迹定年方法结合镜质体反射率(R_o)可确定最大古地温曲线的斜率，即古地温梯度。

可利用该古温标法计算地层剥蚀厚度(ΔE)。其表达式为^[32-33]

$$\Delta E = \frac{(110 \pm 10)^\circ\text{C} - T_s}{G} \pm d \quad (1)$$

式中： T_s 是平均古地表温度； G 是古地温梯度； d 是某一具体地区部分退火带底界与现今平均表面的高差， d 为负值表示现今平均表面高于部分退火带底界， d 为正值表示现今平均表面低于部分退火带底界。

在盆地分析中，多数热历史模拟以 AFT 为主^[32-33]，其退火特点和退火模型研究较为深入，且退火区间为 60 °C ~ 150 °C，与生烃的温度接近。锆石裂变径迹(ZFT)退火区间温度较高，退火温度约为 250 °C^[59-60]，退火影响因素和退火模型研究较为薄弱，通常作为 AFT 热历史模拟的下限约束。锆石

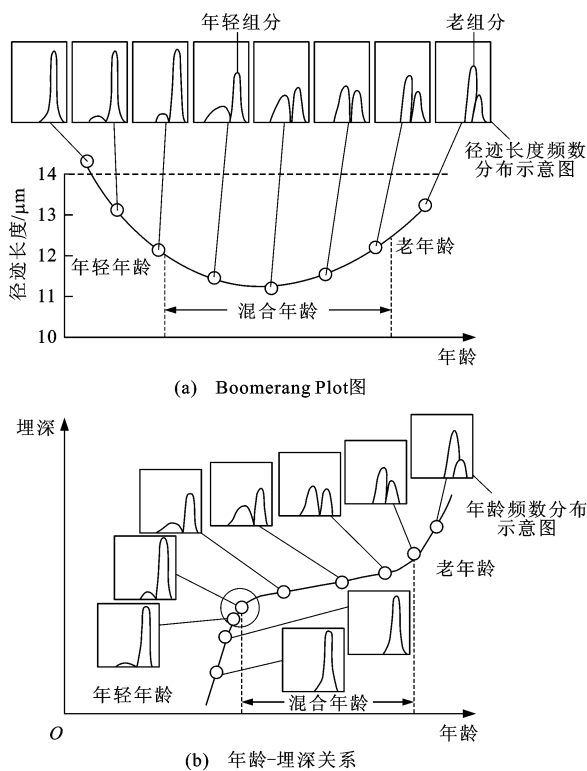
裂变径迹退火温度高于磷灰石，随着退火特点的深入研究，锆石裂变径迹可与磷灰石裂变径迹结合使用，对于热演化程度高的地层，其潜在烃源岩的加热温度已经超过 AFT 的保存区间，因此，ZFT 将在盆地热演化史定量研究中扮演重要角色^[36-37]。

近年来，除了裂变径迹定年方法不断改善外，更多的是通过对 AFT 年龄与长度特征进行深入分析，提供更多的热演化史信息。例如，根据地层磷灰石单颗年龄雷达分布图、磷灰石裂变径迹年龄-径迹长度及其标准偏差图、径迹长度分布柱状图等，结合其他温标，进行热演化史恢复^[60-63]。

利用径迹平均长度与年龄的分布关系可以判断断裂活动的时间，断裂摩擦生热导致磷灰石裂变径迹发生退火，断裂活动摩擦生热与盆地沉降增温导致磷灰石裂变径迹退火的机理一致^[64]。

另外，通过分析 AFT 平均径迹长度与年龄的分布特点及其相互关系，即利用 Boomerang Plot 图，分析构造活动发生的时间^[61]。Boomerang Plot 图由磷灰石裂变径迹年龄和平均径迹长度参数构成，是解释某一特定地区的磷灰石裂变径迹年龄系列数据的有效工具。在 Boomerang Plot 图上，两端分别为老年龄及年轻年龄，中间年龄相当于两端年龄数据之间的混合年龄。只有平均径迹长度大于 14 μm 的样品年龄能够代表快速冷却事件发生的时间。所有与中间年龄对应的径迹长度分布由不同比例的来自老年龄组分的初始标准径迹和来自较年轻结果的长径迹混合组成。在中部，平均径迹长度最短，且呈双峰状分布，此时两种长度达到最大分离化[图 2(a)]。虽然这些年龄本身只能提供很有限的地质信息，但是可从这个数据范围两端的大部分数据(包括最初的背景年龄和较年轻组分的年龄)，获取较可靠的信息，并且这个信息可以在热演化史模型下做进一步处理。通过 Boomerang Plots 图识别两个以上的热事件信息是可行的。国内外常用磷灰石裂变径迹年龄随埋藏深度变化的分布特征划分退火带，识别冷却带，在此基础上探讨冷却事件发生的时间、速率及地层抬升量。其中，最重要的是冷却带的识别，冷却带范围的径迹年龄受深度变化影响较小，径迹长度分布呈单峰状且以长径迹为主，该径迹年龄常用来限定抬升冷却事件发生的时间[图 2(b)]。

Cogne 等应用磷灰石裂变径迹年龄与长度的关系来分析巴西东南部的大陆边缘的区域构造活动，随着埋深的增加，径迹长度变小，抬升冷却时新的径迹产生长径迹的比例增加，导致径迹长度均值变



图件引自文献[61]

图2 磷灰石裂变径迹年龄、长度、埋深关系

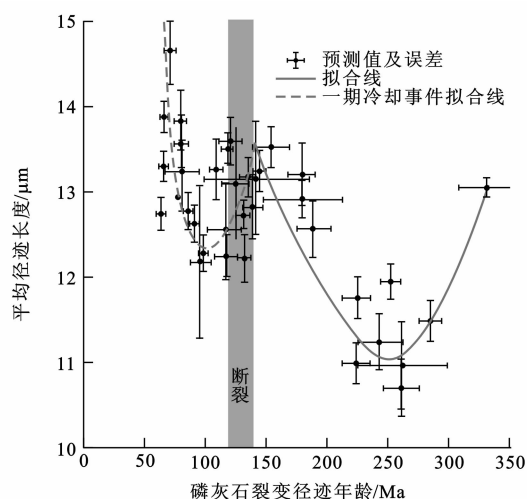
Fig. 2 Relationships Between Ages and Length, Buried Depth of Apatite Fission Track

大^[65]。在样品年龄与长度分布图中,磷灰石裂变径迹年龄为 $(330.3 \pm 22) \sim (64.5 \pm 3)$ Ma,平均长度范围为 $(14.67 \pm 0.4) \sim (10.71 \pm 0.33) \mu\text{m}$ 。长度与年龄分布图表明大约 130 Ma 时发生了一期冷却事件(大约在裂谷发育期后),另外一个可能的冷却事件发生在 70 Ma,这可能是裂谷后构造活动引起的(图 3)。

1.2.3 测试方法进展

传统的裂变径迹测试方法主要采用外探测器法,通常利用低 U 含量的白云母作为外探测器。将白云母片紧贴抛光后的矿物表面,通过热中子辐照使颗粒中²³⁵U 发生裂变,外探测器则记录²³⁵U 裂变产生的径迹(诱发裂变径迹)。但是,由于辐照周期相对较长,中子通量检测、²³⁸U 总衰变常数很难准确确定等诸多因素严重制约了裂变径迹定年方法的发展^[31-33]。

近年来,随着对磷灰石裂变径迹基础研究的日趋深入,激光剥蚀-ICPMS 技术在裂变径迹分析方面得到了很好的发展。早期激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱分析(LA-ICP-MS)在地学领域主要应用于微量元素分析和锆石原位 U-Pb 测年。随着该技术的发展和不断完善,实现了低 U 含量矿物的磷灰石颗粒²³⁸U 含量的直接测量^[66]。Hasebe 等直接



图件引自文献[65]

图3 磷灰石裂变径迹年龄与径迹长度的关系

Fig. 3 Relationship Between Ages and Length of Apatite Fission Track

利用激光剥蚀-ICPMS 技术进行磷灰石裂变径迹测年^[67],即在对磷灰石进行蚀刻和自发裂变径迹数目统计之后,使用 LA-ICP-MS 技术直接进行²³⁸U 含量的测试,以用于年龄计算。李天义等详细介绍了这种全新的磷灰石裂变径迹年龄测试分析方法——激光剥蚀-ICPMS 技术^[66]。激光剥蚀-ICPMS 技术测定磷灰石裂变径迹表观年龄过程中,省去给矿物加白云母片外探测器、热中子辐照、对外探测器的蚀刻、自发径迹与诱发径迹镜像位置矫正、诱发径迹统计及标准玻璃径迹统计等诸多程序,比外探测器法步骤更简单、更容易,极大地缩短了样品测试分析的周期,降低了人为因素对测试结果的影响,更能确保样品测试结果的准确性和可再现性,有可能成为未来裂变径迹定年的主流试验方法^[66]。

1.3 小结

磷灰石裂变径迹分析方法已经发展成为研究岩石低温热历史的有效手段,该技术正在向定量化方向发展^[35]。钾长石的 $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ 测年及锆石裂变径迹分析可提供 $150\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的高温热历史资料,也成为磷灰石裂变径迹分析方法的进一步补充^[32-33]。(U-Th)/He 定年方法能反映更低温度的热历史信息,是更低温热演化史恢复的一种新方法^[41]。

2 古温标法研究新进展

2.1 镜质体反射率方法进展

镜质体反射率有效记录了沉积地层经历的最高古地温,且不因后期构造抬升剥蚀而降低,作为有机质成熟度指标被广泛应用于盆地综合分析和油气地

质研究中。

应用镜质体反射率研究盆地热演化史的方法很多。由于对活化能及时间、温度的作用认识不同,不同方法计算的古地温有一定差异。现今应用的模型主要有 6 种:①Price 等仅将镜质体反射率作为温度的函数模型^[22,68];②Hood 等将时间与镜质体反射率结合作为经验性的方法模型^[69-70];③Antia 等将镜质体反射率作为单一活化能的阿伦尼斯一级化学反应模型^[28,71];④Waples 等将镜质体反射率作为阿伦尼斯一级化学反应模型,其具有单一活化能,但活化能是温度的函数^[72-73];⑤Larter 将镜质体反射率作为平行的阿伦尼斯一级化学反应模型,其活化能具高斯分布^[74];⑥Sweeney 等提出 Easy% R_o 模型^[75],将镜质体反射率作为一系列平行的阿伦尼斯一级化学反应,用活化能的一个分布模拟镜质体的所有反应,包括脱水、 CO_2 、 CH_4 及更大分子量烃类的裂解。Easy% R_o 模型可应用于 R_o 为 0.3%~4.5% 的条件下,加热速率从实验室环境(每星期升高 1℃)、岩浆侵入环境(每天升高 1℃)到各种地质环境(每百年升高 10℃至每百万年升高 1℃)都可应用该模型。

以上 6 种镜质体反射率模型中,模型①、②是经验性的模型,在应用于地质情况时,常被用于最大古地温的粗略估计。Barker 等利用世界上 35 个地区超过 600 份腐殖型有机质的平均镜质体反射率(R_m)及其对应的最大温度(T_{max}),建立回归方程 $\ln R_m = 0.0096T_{max} - 1.4$,估算最大温度,其判定系数 $R^2 = 0.7$,表明 R_m 与 T_{max} 具有十分密切的相关性^[68]。有机质成熟度在经历 1~10 Ma 后达到稳定,此时增加有效加热时间并不能增加有机质的成熟度,而盆地体系大约 90% 在小于最大古地温 15℃以内的范围内经历了大于 1 Ma 的时间,足以使有机质热成熟度达到稳定。因此,可用 R_m 确定最大古地温。模型①具有统计规律,是经验性的,是一种最为简单的估算热演化史的方法,使用时要注意其应用条件^[68,70];模型②的缺陷在于,实际应用时最大古地温及有效受热时间难以确定;模型③、④也是经验性的,也有局限性,主要是由于单一反应不能很好地模拟温度和加热速率分布很广的复杂反应;模型⑤中,Larter 正确地应用了活化能分布的化学动力学方法,认为 R_o 是温度和时间函数,温度比时间更为重要,但该模型由于仅依靠 R_o 与化学变化的相关关系,因而是有局限性的,化学变化发生在生油窗范围内, R_o 值为 0.5%~1.3%;模型⑥中,

Easy% R_o 模型是预测 R_o 最为精确的方法,对不同热演化史过程、不同类型盆地古地温恢复有广泛的适应性,在中等到高成熟度时更为准确,但在成熟度较低($R_o < 0.9\%$)时,Easy% R_o 模型对 R_o 可能估计过高,而 Middleton 等的模型更为准确^[75]。

镜质体反射率方法在恢复盆地热演化史、恢复剥蚀厚度等方面得到了广泛应用,但是镜质体反射率方法本身也有许多局限性。 R_o 与时间-温度的关系及有机质成熟作用的反应动力学问题仍将困扰广大研究工作者。

当前,对于碳酸盐岩地层的热演化史恢复是研究的热点及难点之一。由于缺乏典型的镜质体供测定反射率,目前对于碳酸盐岩烃源岩成熟度的评价,主要利用沥青反射率、孢粉颜色、镜状体反射率、海相镜质体反射率、有机质荧光参数等来研究源岩有机质的成熟情况^[76]。这些评价参数在一定程度上可以用作热演化史恢复的古温标。目前,沥青反射率是应用最为广泛的有效指标之一。只有原地沥青才能用于研究源岩的有机质成熟度,因此,其常常也被称作固体沥青反射率。目前,应用最多的是根据实际剖面 and 热模拟试验建立镜质体反射率与沥青反射率的关系。丰国秀等得出镜质体反射率和沥青反射率(R_b)的经验公式 $R_o = 0.3195 + 0.679R_b$,判定系数 $R^2 = 0.98$ ^[77]。

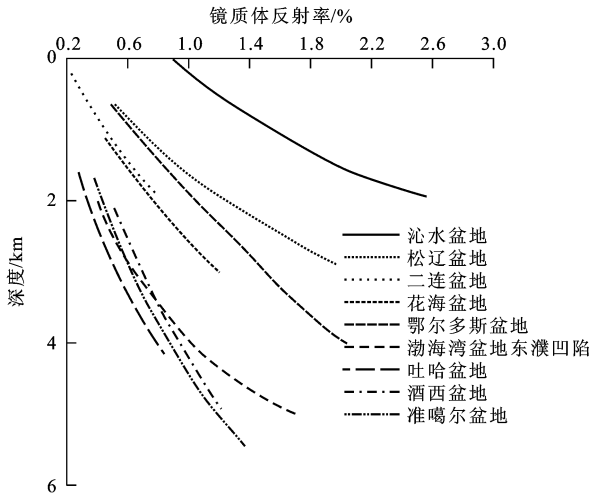
在镜质体缺少的地区,可以用沥青反射率代替镜质体反射率。将测定的沥青反射率换算成为镜质体反射率^[77-80],然后就可以利用目前常用的各种镜质体反射率模型模拟计算古地温。

当前,对于碳酸盐岩地层的热演化史恢复,利用沥青反射率,结合包裹体测温及海相层中碎屑岩的热年代学测试技术,是恢复碳酸盐岩地层构造热演化史的一条可行途径^[81]。

镜质体反射率是温度、时间的函数,有效记录了沉积地层经历的最高古地温。Burruss 将沉积盆地镜质体反射率剖面划分为 4 种类型^[82]:①似线型,表明地温梯度随时间呈连续而近于恒定的变化;②两段型,表明被热事件分开的两段具不同的地温梯度;③突变型,强烈的热扰动后转为正常, R_o 值突然中断或跳动,表明可能对应着较大地层间断的不整合;④过渡型,位于两段型与突变型之间。其中,两段型是恢复不同时期古地温及古地温场的理想剖面^[82]。

镜质体反射率与最大埋深时深度的关系及其斜率反映了古地温梯度的大小^[82-87]。在沉积盆地中,镜质体反射率与深度的关系提供了盆地热演化史的

大量信息, R_0 与深度曲线的斜率指示着盆地的古地温梯度的大小。中国北方不同盆地镜质体反射率与深度的关系图中, R_0 与深度曲线的斜率差异很大, 表明不同盆地古地温梯度差异很大, 其中沁水盆地古地温梯度最高(图4)^[83,85]。应用镜质体反射率与深度的关系资料可以恢复地层的剥蚀厚度及古地温梯度。Suggate 制作了镜质体反射率-深度-古地温梯度关系图, 应用该图可以估算古地温梯度及剥蚀厚度(图5)^[86]。



图件引自文献[2]

图4 中国北方沉积盆地镜质体反射率与深度的关系

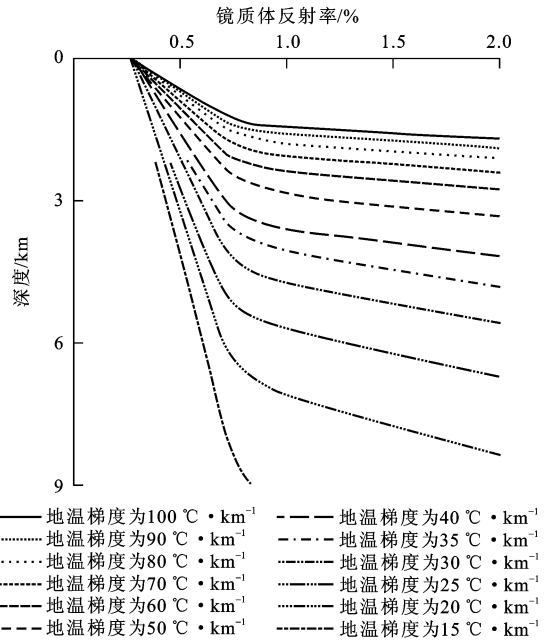
Fig. 4 Relationship Between Vitrinite Reflectance and Depth in Sedimentary Basins of Northern China

镜质体反射率不是很精确的热指标。在应用镜质体反射率恢复古地温时, 要在较大的深度段进行较多样品的镜质体反射率分析。少数样品无法精确约束镜质体反射率与深度的变化规律, 分析镜质体反射率与深度的变化趋势对准确恢复古地温及古地温梯度十分重要^[86]。

2.2 黏土矿物转变估算古地温进展

自生黏土矿物组分和它们的结晶程度与其经历的最高古地温有着密切的关系, 而且这种关系在成岩埋藏过程中具有不可逆性, 因此, 黏土矿物是一种理想的地质温度计, 有着广阔的研究和应用前景。

近年的研究表明伊蒙间层矿物、高岭石的结构有序性、伊利石和绿泥石的结晶度及绿泥石的化学成分在地热体系中与温度之间均成一定的线性关系, 可用来获取沉积岩所经历的成岩作用和热事件的信息。常用的黏土矿物地质温度计有伊蒙间层矿物、伊利石结晶度、绿泥石化学成分等。通过对自生黏土矿物及其转化特征进行系统研究, 可获得有关



图件引自文献[86]

图5 不同地温梯度下镜质体反射率与深度的关系

Fig. 5 Relationship Between Vitrinite Reflectance and Depth Under Different Geothermal Gradients

地层的成岩温度、相关古地温梯度资料及其盆地演化信息^[87]。

对于伊利石结晶度与其形成温度的关系, 前人已进行了大量研究。Ji 等计算了自生伊利石的形成温度(T), 自生伊利石结晶度(I_{IC})与其形成温度的关系式为^[88]

$$T = 3841.98e^{-0.6219I_{IC}} \quad (2)$$

根据伊利石结晶度可以计算样品经历的最高古地温。

利用蒙脱石向伊利石转化的热动力学模型可以模拟计算盆地的古地温^[89]。MaChi 等根据 Harvey 等的原始数据, 建立了计算简便的伊蒙间层中伊利石体积分数与其形成温度的线性表达式

$$Y = 0.342 + 2.737 \times 10^{-3} T \quad (3)$$

式中: Y 为伊蒙间层中伊利石体积分数。

伊利石结晶度的影响因素包括其生长环境的温度、压力、岩性、钾含量(即水岩组成和岩石孔渗性)以及生长时间, 其中温度最为重要。利用伊蒙混层矿物特征来探讨古地温, 获取古地温梯度, 并恢复剥蚀厚度是一个比较有效的方法。张哲等应用该方法对济阳拗陷盆地中地层自生伊蒙混层矿物进行了研究, 探讨了其经历的古地温和古地温梯度; 在此基础上, 对沙河街组四段和孔店组地层的剥蚀深度进行了估算^[89]。

古巴西部矿场页岩中的黏土矿物分析结果显示,伊利石、绿泥石的结晶度与镜质体反射率有很好的线性关系。通过已经发表的数据在地面热液系统的约束下建立古地温与镜质体反射率关系曲线,结合样品伊利石、绿泥石结晶度的分析结果,可以推算样品经历的古地温^[90]。

2.3 流体包裹体方法进展

流体包裹体是成岩矿物结晶时所捕获的部分成矿流体,可应用于测定古温度和恢复盆地热历史。

流体包裹体按成分可分为原生包裹体、次生包裹体、假次生包裹体和变生包裹体 4 种。应用包裹体进行研究的 3 个假设条件为:①均一体系,即包裹体形成时,被捕获包裹体内的物质为均匀相;②封闭体系,即包裹体形成后,没有物质进入或溢出;③等容体系,即包裹体形成后,包裹体的体积没有发生变化。一般认为,只有符合这 3 个基本前提的包裹体测定结果才是有效的和可靠的^[91]。

流体包裹体应用于确定古地温需要 3 个方面的资料:①详细的岩石学分析建立包裹体形成的相对时间;②详细分析含有包裹体岩石的埋藏史和构造史;③分析单个包裹体的相态和化学成分,定义捕获流体的压力-体积-温度特性^[91]。

在对包裹体进行显微镜详细鉴定的基础上,确定待测的包裹体,应用均一法测量其均一温度。均一温度是捕获流体的最低形成温度。目前,均一温度数据是在常压条件下获得的,而包裹体却是在成岩成矿时的温度、压力以及成分等一定的条件下被捕获的,因此,对目前所测均一温度应进行压力的校正,以便接近当时被捕获的物理化学条件,获得包裹体形成时的温度。包裹体内的流体成分控制着流体的基本物理性质——压力-体积-温度关系,流体成分现在除可以通过冷冻法、压碎法对流体成分和盐度进行估计外,还可以用气相色谱法、离子色谱法、电子探针和激光拉曼光谱法等进行分析^[92]。

包裹体测温最关键的问题是要确定包裹体形成期次及形成时代;流体活动时间可以从流体包裹体与成岩矿物世代及其共生系列关系及应用流体包裹体中的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 或 Rb - Sr 测年确定^[92-94]。在确定了包裹体形成期次后,对不同期的包裹体分别进行均一温度测定;包裹体均一温度经过一定的压力校正,即可获得矿物形成或油气运聚时的古地温,从而可获得所在岩层的最大古地温,继而用于确定古地温梯度、埋藏深度、剥蚀厚度,恢复盆地热演化史。

Tilley 等将流体包裹体研究与镜质体反射率资

料进行对比,研究了加拿大阿尔伯达深盆地热演化史,确定了其在油气生成和演化阶段、地温异常时期和在盆地内的变化规律^[95]。

包裹体研究在各方面均已取得了较大的进展,但随着研究工作的深入,也出现了新的问题:很多包裹体可能不是从均匀体系中捕获的;地质过程中,如何区分从均匀体系和非均匀体系捕获的包裹体;从非均匀流体中捕获包裹体的机理问题;捕获时的非均匀流体和捕获后出现的非均匀性之间的差别问题^[96]。

2.4 小结

古地温温标研究新方法不断出现且进一步完善。目前,各种古温标法对于沉积盆地热演化史的恢复都存在一定的局限性。靠单一的方法或学科已不能满足盆地热演化史恢复的要求,多学科、多种方法的综合研究是恢复盆地热演化史的有效途径及趋势^[20-21,40,97-98]。

3 地球动力学模型方法研究进展

地球动力学模型方法是通过对盆地形成和发展过程中岩石圈构造(伸展、减薄、均衡调整、挠曲变形等)及相应热效应的模拟(盆地定量模型),获得岩石圈热演化史(温度和热流的时空变化)。不同类型的盆地具有不同的热演化史模型。根据已知或假定的初始边界条件,通过调整模型参数,使模型计算结果与实际观测的盆地构造沉降史进行拟合,从而确定盆地底部热流史,进而结合盆地埋藏史恢复盆地内地层的热演化史^[2,20]。

不同类型的盆地由于其形成的地球动力学背景和成因机制的差异,导致盆地演化过程的不同,因而描述其构造热演化过程的数学模型也是不同的。Allen 等详细论述了岩石圈伸展作用形成的盆地、挠曲盆地及与走滑变形有关的盆地的热演化史模型^[99-100]。

3.1 伸展盆地

伸展盆地是目前研究比较广泛且研究程度较高的盆地类型,裂谷、坳陷、坳拉槽和被动大陆边缘是其基本样式。伸展盆地在地球壳和岩石圈伸展、减薄作用下形成,主要构造热作用过程包括岩石圈的伸展减薄、地幔侵位、与热膨胀和冷却收缩以及沉积负载相关的均衡调整。

1978 年,McKenzie 研究了被动裂谷或机械伸展模型的定量结论后,提出了瞬时均匀伸展模型^[101];提出了计算初始沉降、热沉降和地表垂直热传递的数学表达式,奠定了伸展盆地定量模型和模

拟研究的理论基础^[101]。该模型已成功应用于北海盆地和各种大陆架,并且 McKenzie 的均匀伸展模型仍然是进一步研究更为复杂的地壳变形的的基础。

随着对拉张盆地研究的深入,有关拉张盆地的模型及热模拟迅速发展,经历了瞬时拉张模型、有限时拉张模型、多期拉张模型等多个发展阶段。在实际情况下,岩石圈的拉张不可能瞬时完成,单期的拉张模型难以适应其构造热演化模拟的需要,因而带动了多期拉张模型的发展。以莺歌海盆地为例,盆地每拉一次就热一次,整体处于逐步升温状态,盆地发生了3期拉张,多期拉张盆地热具有继承性和叠加作用。多期拉张模型裂谷盆地构造热演化研究增加了新的内容,并带来了更广阔的发展空间^[102-103]。

3.2 前陆盆地

前陆盆地发生于挤压构造环境,与洋壳俯冲消减直至陆-陆或弧-陆碰撞作用有关。前陆盆地形成的主要控制因素为逆冲带的构造负荷、盆地沉积物负荷以及在造山过程中形成的地壳内部水平挤压力^[99]。关于负荷的模型有单侧临界锥体模式,双侧临界锥体模式等。关于岩石圈挠曲的模型有1983年 Karner 等提出的热弹性流变学模型和1985年 Willett 等提出的黏弹性流变学模型等。热弹性流变学模型可以解释挠曲与热演化史之间的关系,而黏弹性流变学模型则能够解释岩石圈抗刚度随加载作用时间的变化关系^[99]。

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。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,而在构造与热的结合方面尚不够完善。

3.3 克拉通盆地

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,是结构最为简单但成因不明的盆地。其成因主要有地壳伸展、热衰减、克拉通边缘构造负荷、板内应力、欠补偿质量等,在地壳伸展热沉降方面与弧后盆地及大陆裂谷盆地相似。克拉通盆地往往表现出阶段性沉降的特点,热沉降仅适用于盆地发展的某些阶段。

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。

3.4 走滑盆地

走滑盆地的沉积作用与重要大断裂的走向滑动相伴随。陆内剪切平移非常普遍,走滑盆地是一种

常见的盆地类型,其常见类型有拉分盆地。根据力学与沉降史,走滑盆地有两种主要类型:一类是影响地幔的走滑盆地,可以看作是“热”盆地,如潘农盆地;另一类为“薄皮”走滑盆地,可以看作是“冷”盆地,如维也纳盆地^[99]。

在走滑盆地中,热力学和沉降模型没有很好地建立起来,这主要是由于其构造历史复杂。在与岩石圈变薄有关的盆地中,由于伸展过程中热流通过盆地周边有侧向损失,统一的均匀伸展模型在应用中要做一定修改。

3.5 小结

沉积盆地和造山带的形成、演化密切相关,造山带与盆地在深部岩石圈存在耦合关系。从盆山耦合角度研究盆地热动力学过程演化是盆地热演化史研究的方向之一。

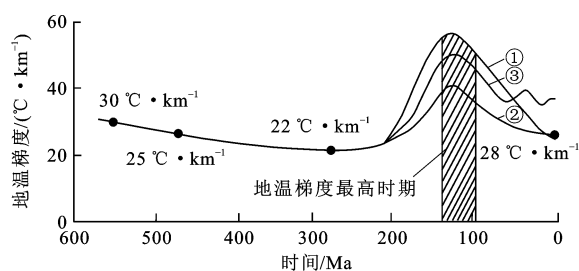
叠合盆地具有复杂的地质结构及不同的地球动力学过程^[20],克拉通盆地复杂的构造热演化模型的建立及其构造热演化模拟是今后盆地构造热演化史研究的主要发展方向^[102]。

4 构造热事件与盆地热演化史恢复

沉积盆地构造热事件的研究是盆地热演化史恢复研究的一个热点。近年来,构造-热事件对盆地或造山带构造演化及其油气等矿产成藏、成矿作用的重要性受到越来越多的关注^[104-105]。

盆地构造热事件发生时期、形成机制、影响范围、对油气、煤的演化程度的影响及对成藏的控制作用是研究的重点^[104-110]。引起热事件的主要因素有地幔中温度变化导致的基底热变化、异常热流体活动、热异常与岩浆活动(侵入体侵位)、岩石圈减薄等。

根据火成岩年龄、裂变径迹、强烈构造运动发生时期及古地温梯度恢复等资料,首次确定了鄂尔多斯盆地、沁水盆地中生代晚期发生过一期构造热事件,该构造热事件主要发生在中生代晚期早白垩世100~140 Ma。构造热事件发生时期为地温梯度、热流值异常时期,沁水盆地的古地温梯度可达每百米5.56℃,远高于鄂尔多斯盆地(图6)^[12,16-19,24-25,83-85,111]。异常地温场形成的根本原因在于中生代晚期早白垩世鄂尔多斯盆地、沁水盆地岩石圈深部的热活动增强,鄂尔多斯盆地、沁水盆地中生代晚期构造热事件发生时间与华北地块岩石圈全区范围内由亏损地幔性质转变为富集地幔性质时期、岩石圈减薄时期及华北东部构造体制转折时期一致^[2,17,19]。中生代晚期的构造热事件对油气和煤的成藏、成矿有重要的控制作用,



图件引自文献[2]和[111];①为沁水盆地;②为鄂尔多斯盆地;
③为渤海湾盆地

图 6 鄂尔多斯盆地与沁水、渤海湾盆地
构造热演化史对比

Fig. 6 Comparison of Tectonic-thermal Evolution History
Among Ordos, Qinshui and Bohai Bay Basins

构造热事件发生时期是油气主要成藏时期^[24-25,105,107]。

加拿大东部海域的诺瓦斯科舍省盆地的上侏罗统一下白垩统砂岩是重要的天然气储层。侏罗系灰岩流体包裹体及白垩系砂岩磷灰石裂变径迹研究表明,该盆地存在晚中生代的热事件。流体包裹体捕获温度随埋藏史曲线的变化表明,地温梯度可达 $55\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,高地温梯度的持续时间为 $100 \sim 135\text{ Ma}$,与加拿大 Orpheus graben 西南部 and Orpheus graben 地堑盆地区域性的火山活动时间及在大洋中脊高熔体的生产时间相对应,早白垩世热事件控制了油气成熟和储层胶结物的沉淀^[110]。中欧 Upper Silesia 煤盆地东北较浅的石炭系上部地层产生了广泛的普遍的伊利石化,伊利石 K-Ar 测年确定了一期中生代的热事件;构造热事件发生时间是 175 Ma ,是由特提斯打开过程中产生的大西洋裂谷作用和岩石圈减薄引起的^[112]。

葡萄牙西南的晚古生代岩石在约 700 m 的深度段内,90 个样品测定的镜质体反射率基本呈直线状, R_o 可达 5% ,有机质成熟度很高,主要对应于变质无烟煤煤阶。热演化史恢复表明,高成熟度是晚造山期后热流叠加的结果,异常高温峰值是在华力西变形之前达到的,中生代重新埋藏对晚古生代岩石的高成熟度没有影响^[113]。

乌克兰 Donets 盆地东南部的 R_o 值高,热流值高, R_o 形式可能与岩浆活动有关。最大埋深时的热流值为 $70\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,热事件发生时的热流值最大可达 $200\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$;热事件发生在最大埋深之后 (240 Ma),热事件解释了盆地外动力成矿的空间分布。岩浆热事件的热作用在二叠纪抬升期间可能使地壳减薄^[106]。

San Juan 盆地位于美国科罗拉多州和新墨西

哥州,是一个重要的产油盆地,油气来自于白垩系。镜质体反射率呈北高南低分布,北部镜质体反射率大于 2.0% 。热演化史恢复表明,盆地北部存在热异常,镜质体的高成熟度与深埋的热源及热流体循环有关。盆地在 $20 \sim 40\text{ Ma}$ 有一次短暂的热事件,热事件使盆地北部白垩系地层成熟度提高,对油气的生成、煤的排列有重要影响^[114]。

盆地构造热事件可以通过古温标法、岩石学方法、构造恢复方法、盆地模拟方法、热年代学技术 (Ar-Ar 测年、K-Ar 测年、裂变径迹、ESR 测年等),结合区域构造-沉积建造特征来确定^[83-85,104-116]。裂变径迹定年方法提供最大古地温、古温度随时间的变化、最大古地温到达时间的信息。盆地模拟方法 (Easy% R_o 模型)是恢复复杂温度-沉降地质过程的有效方法,对盆地模拟有最重要影响的是地层厚度、热流和岩性^[98,117]。

5 叠合盆地热演化史恢复思路及方法

中国沉积盆地现今大多是由不同时代盆地叠合而成,叠合盆地演化具有长期性、构造演化的多阶段性及多次的抬升剥蚀等特征,不同构造演化阶段具有不同的构造热体制,因而具有复杂的构造热演化史^[2]。

5.1 盆地热演化史恢复应重视的问题

短期和简单盆地的热演化史恢复较为简单,而叠合盆地热演化史复杂,叠合盆地热演化史恢复是热演化史研究的前缘问题及难点。要恢复叠合盆地复杂的构造热演化史,首先应重视盆地热演化史研究领域已取得的重要认识,这是进行古地温恢复的重要基础和前提。

(1)盆地现今地温场可以反映盆地现今的热体制,盆地现今地温场研究是盆地古地温恢复的基础^[20-21,98,105]。对于现今处于最大埋深的盆地,现今地温大部分情况是地层经历的最大地温,现今地温已抹去了盆地演化早期的古地温场信息^[118-119]。

(2)盆地古热流可用间接的方法确定(如反射率模型、成熟度指标、构造演化史等),某一时期的古热流仅可代表古地温演化历史中的片断。盆地构造热事件发生时期、古地温梯度及古热流的确定是古地温演化历史过程中的片段,但这些热演化史的片断对盆地热演化史的真实恢复有重要的约束和限定作用^[73,98,105]。

(3)对叠合盆地而言,后期盆地对前期盆地的古地温有改造或改变作用,对早期的构造热事件也是

如此,后期的构造热事件对前期的构造热事件有改造作用,早期的构造热事件信息可能被后期的构造热事件或盆地叠加抹去或掩盖^[2,24,98,105,111-113,119-120]。盆地发育初期,古地温梯度对盆地现今的成熟度形式没有影响,成熟度样式归因于沉降(岩浆活动引起的成熟度样式的变化除外)^[121]。西欧 Saar 盆地热流史通过最大埋深期间的深埋和一个中等的热流史就可解释,石炭纪—二叠纪岩浆岩对古地温分布的影响已被后期的深埋所掩盖^[122]。

(4)只有盆地演化早期的古地温信息有记录,才可根据古地温温标恢复早期的古地温及古地温场^[111,119-120]。对鄂尔多斯这样的叠合盆地,盆地演化早期的古地温场信息已被后期的盆地叠加,或被后期的构造热事件所抹去或掩盖,但古地温温标已记录盆地演化早期的古地温场信息,因此,进行古地温恢复时要特别注意这些问题^[24,111,119-120]。

(5)抬升型盆地古地温高于现今地温,地层记录了达到最大埋深的古地温及古地温场信息。抬升型盆地是恢复最大埋深期古地温、古地温梯度及古热流的理想地区,可以通过古地温温标及热演化史模拟真实恢复古地温及古热流。恢复出的最大埋深期古热流也可看作古地温演化史中的片段,对盆地热演化史恢复有重要的约束及限定作用^[83-85,98,104-105]。

(6)扎实的盆地地质研究成果是建立盆地地质模型的基础。例如,叠合盆地不同时期盆地类型、盆地叠加样式、各期盆地沉积特征、叠合盆地构造演化史、多期次剥蚀厚度的精确恢复等,是建立叠合盆地地质模型的基础^[98,104-105,111,119-120]。

5.2 盆地热演化史恢复的思路及方法

中国沉积盆地现今大多是由不同时代盆地叠合而成,由于处于不同的地球动力学系统中,所以不同时期盆地类型和热演化史是动态变化的。

叠合盆地大多经历了多期次盆地的叠加和多期次构造的改造。早期盆地地温场的信息被抹去或改变在中国含油气盆地中普遍存在,特别是古生代含油气盆地更为明显和普遍^[111,119-120]。地温场信息的抹去或改造与盆地形态、范围等的改造往往没有可比性。盆地形态改造不一定意味着地温场的改造。按改造作用方式的不同,地温场信息可划分为4种类型:深埋改造型、热事件改造型、应力改造型和热流体改造型。

由于不同类型盆地叠加及改造作用,叠合类型多样,叠合盆地热演化过程复杂,恢复叠合盆地的热演化史难度更大。叠合盆地内往往存在地层不整合

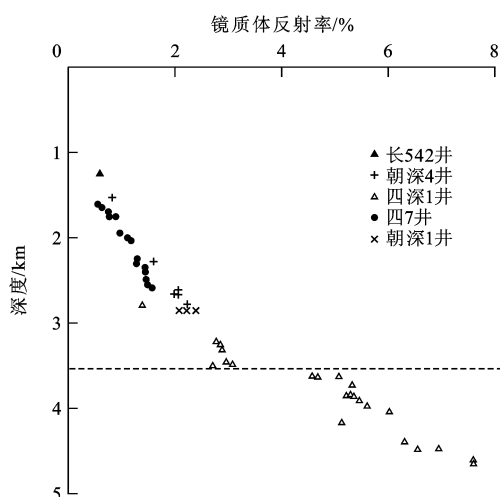
面。地层不整合面常成为划分叠合盆地不同构造演化阶段和不同盆地热演化史阶段的分界面。任战利根据沉积盆地不同演化阶段地温场信息的记录、保持及后期叠加改造情况的不同,以盆地内不整合面上、下两段 R_0 直线是否能拟合为一条直线为例,从盆地叠加与改造对古地温场信息影响的角度出发,详细讨论了叠合盆地热演化史恢复的思路,提出了分演化阶段真实恢复叠合盆地热演化史的方法及思路^[2,24,97,111,119-120]。根据近年来的最新研究进展,对分演化阶段真实恢复叠合盆地热演化史的方法及思路进行了补充完善。

(1)建立叠合盆地不同时期盆地地质模型。叠合盆地古地温的恢复必须将叠合盆地分解为不同时期的原型,从而分别进行研究;在盆地热演化史恢复中,需要对每一时期的原型盆地做更为精确的热历史过程分析。在盆地不同演化阶段,主导控制因素可能不同,因而其热演化史也是有差异的。正确恢复每一演化阶段盆地的古地温是热演化史研究的主要目标。每一演化阶段盆地形成的大地构造位置、地球动力学背景、盆地类型、盆地性质、沉降历史需要有较为清楚的认识,从而建立叠合盆地不同时期盆地的地质模型^[98,105],这样就可能对原型盆地的地温场状况及演化史有基本了解,为进一步恢复每一演化阶段原型盆地的古地温场状况及建立古地温梯度演化模型打下基础^[111,119-120]。

(2)确定古地温演化史特定时期片段,约束古地温演化趋势。分析不同时期不同盆地叠加改造对古地温场信息的影响,选择古地温记录保持的层段,应用多种古地温温标及热年代学方法计算古地温形成时间及古热流、古地温梯度的恢复^[111,119-120]。

当不整合面以下的分支 R_0 剖面的斜率未被改变或未被全部改变时,可用不整合面以下未被改变的镜质体反射率-埋深关系来恢复剥蚀前的古地温场信息。两分支回归直线的斜率仍主要受各自时代的地温梯度和经历的有效加热时间的控制^[111,119-120]。例如:加拿大 Tulita 西北区 Keele 构造带泥盆系与白垩系存在镜质体反射率的间断,表明古地温不连续^[123];塔里木盆地孔雀河斜坡、松辽盆地镜质体反射率-埋深曲线在不整合面上、下有明显错断,表明存在古地温不连续^[124-125];松辽盆地镜质体反射率-埋深曲线在朝阳沟阶地为具有不同地温梯度的两段型,在石炭系—二叠系地层顶部与白垩系地层之间不整合面上、下 R_0 值明显错断, R_0 值在不整合面上、下差值达到 1.61%(图 6)。古地温

间断面的存在表明不整合面上、下具有不连续的古地温变化,说明在上覆白垩系地层沉积前,石炭系—二叠系地层已达到最大古地温值^[124]。这种保留下来的各自地壳发展历史中的镜质体反射率—埋深曲线可用来恢复各自地壳发展历史时期的平均古地温梯度(图 7),结合热导率的测定,可确定各自地壳发展历史时期的古大地热流值,对盆地热演化史的演化趋势有限定作用^[111,119-120]。



图件引自文献^[124]

图 7 朝阳沟阶地镜质体反射率与深度的关系

Fig. 7 Relationship Between Vitrinite Reflectance and Depth in Chaoyanggou Terrace

当不整合面上、下两段 R_0 剖面拟合为一条回归直线后,此时的 R_0 剖面完全掩盖了不整合面以下(如中生代)的古地温场特征,只能反映不整合面以上的古地温场特征。这种剖面不能用来恢复叠合盆地剥蚀前阶段的平均古地温梯度^[97,111,119-120]。

(3)结合叠合盆地周缘地层保留的古地温场信息恢复古地温梯度。当叠合盆地内不整合面上、下两期盆地的两段 R_0 剖面完全拟合为一条直线时,后期古地温场抹去或掩盖了前期古地温场信息,这时的 R_0 剖面已不能用来恢复不整合面以前期的古地温梯度。此时,结合盆地构造发展史,可选择保持了盆地演化早期某个阶段的古地温场特征的盆地周缘地层来恢复盆地演化早期某个片段的古地温梯度^[111,119-120]。

(4)运用将今论古的方法初步建立符合叠合盆地古地温梯度随地质年代变化的模式及精确地恢复地层埋藏史。当叠合盆地内不整合面上、下两段 R_0 剖面完全拟合为一条直线,且现今地层处于最大地温状态,盆地周缘又无法提供盆地演化某个阶级的古地温场信息时,应用古温标法原则上已不能进行

热演化史的恢复,此时可根据盆地不同时期构造背景、类型,采用将今论古的方法,结合盆地热演化史中片段恢复的古地温梯度值作为约束,初步建立符合实际情况的古地温梯度随地质年代变化的模式^[97,111,119-120]。应用多种方法精确恢复不同界面的剥蚀厚度,结合测年资料恢复叠合盆地的埋藏史。

(5)计算叠合盆地不同埋深古地温温标值。根据初步建立的古地温演化史模式及埋藏史,选择适合的古地温温标与温度关系模型,根据古地温温标模型计算不同埋深的古地温温标值(如计算地层的理论镜质体反射率)^[28,67,71-75]。

(6)将理论值与大量实测值进行反复对比及拟合,真实恢复叠合盆地热演化史。不同深度、不同层位具有丰富古地温温标数据的典型井对古地温演化趋势的真实恢复有重要作用,将理论的古地温温标值(如镜质体反射率)与大量古地温温标的实测值(如实测的镜质体反射率)进行反复的对比及拟合,并用多种地温计资料进行综合分析、互相补充和验证,在限定了演化历史片段的古地温状况的情况下^[25,111,119-120],不断修改参数。古地温恢复掌握的原则是地层从上到下,时代是从新到老,先使新地层、新时代达到很好的拟合,再推到老地层,最终使之达到最佳拟合,从而真实恢复叠合盆地的古地温演化史^[25,111,119-120]。

叠合盆地热演化史的恢复是一项难度很大的工作,主要是由于不同时期盆地的叠加,盆地演化早期的古地温信息已被抹去,早期古地温场的信息保留很少;特别是古生代大型海相盆地古地温场的恢复难度很大,任战利等进行了有益的探讨^[24-26,111,119-120,124-127]。

目前,各种古地温温标对于沉积盆地热演化史的恢复都存在一定的局限性,靠单一的方法或学科已不能满足叠合盆地热演化史恢复的要求。从盆地叠加与改造对叠合盆地古地温场信息产生影响的角度出发,根据叠合盆地不同演化阶段古地温场信息记录、保持及后期叠加改造情况的不同,以正确的地质模型及大量实际地质资料为约束,应用多学科、多种古温标法综合研究日益成为叠合盆地热演化史恢复的发展趋势^[73,98,105,111,119-120]。

6 结 语

(1)近年来,以磷灰石、锆石裂变径迹和(U-Th)/He 定年为代表的中—低温热年代学新技术在盆地隆升及热演化研究方面取得了新进展,(U-Th)/He 定年方法已成为低温热年代学领域研究的

一种重要手段。激光剥蚀-ICPMS法是一种直接进行磷灰石裂变径迹表观年龄测试分析的新方法。

(2)目前,各种古温标法对于沉积盆地热演化史的恢复都存在一定的局限性,靠单一的方法已不能满足盆地热演化史恢复的要求。多种古地温研究方法相结合、相互约束的综合研究是恢复盆地热演化史的有效途径及趋势。

(3)沉积盆地构造热演化史模型从简单到复杂,从定性→半定量→定量方向发展,拉张盆地从单一拉张模型,发展到多期拉张模型。叠合盆地复杂的构造热演化模型的建立及其构造热演化模拟是今后盆地构造热演化研究的主要发展方向。

(4)沉积盆地构造热事件的研究是盆地热演化史研究的一个热点。构造热事件对盆地或造山带构造演化及其成藏、成矿作用有重要的控制作用。盆地构造热事件可以通过古温标法、岩石学方法、构造恢复方法、盆地模拟方法、热年代学方法等来确定。

(5)叠合盆地具有复杂的构造热演化史,其热演化史恢复是热演化史研究的前缘及难点。叠合盆地古地温场经历的后期叠加改造普遍存在,后期盆地对前期盆地的古地温信息有抹去或掩盖作用。从叠合盆地叠加与改造对古地温场信息产生影响的角度出发,根据叠合盆地不同演化阶段地温场信息记录、保持及后期叠加改造情况的不同,将多种古地温研究方法结合,以正确的地质模型及大量的实际地质资料为约束,进一步完善了分演化阶段真实恢复叠合盆地热演化史的思路及方法。

参考文献:

References:

- [1] 赵重远,刘池洋,任战利.含油气盆地地质学及其研究中的系统工程[J].石油与天然气地质,1990,11(1):108-113.
ZHAO Zhong-yuan, LIU Chi-yang, REN Zhan-li. Geology of Petroliferous Basins and Their Systematic Engineering in Research[J]. Oil and Gas Geology, 1990, 11(1): 108-113.
- [2] 任战利.中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M].北京:石油工业出版社,1999.
REN Zhan-li. Research on Tectono-thermal Evolution History in Sedimentary Basins of North China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [3] 何丽娟,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 Li-juan, HUANG Fang, LIU Qiong-ying, et al. Tectono-thermal Evolution of Sichuan Basin in Early Paleozoic[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 10-17.
- [4] 邱楠生.沉积盆地热历史恢复方法及其在油气勘探中的应用[J].海相油气地质,2005,10(2):45-51.
QIU Nan-sheng. Methods of Thermal History Reconstruction of Sedimentary Basins and Their Application in Oil and Gas Exploration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(2): 45-51.
- [5] 王杰,秦建中,刘文汇,等.川东北元坝地区中生代构造与动态热演化史:磷灰石、锆石(U-Th)/He定年分析[J].石油实验地质,2012,34(1):19-24.
WANG Jie, QIN Jian-zhong, LIU Wen-hui, et al. Mesozoic Tectonics and Dynamic Thermal History in Yuanba Area of Northeastern Sichuan Basin: Application of (U-Th)/He Dating of Apatite and Zircon[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(1): 19-24.
- [6] 闫桂京,许红,杨艳秋.苏北-南黄海盆地构造热演化特征及其油气地质意义[J].天然气工业,2014,34(5):49-55.
YAN Gui-jing, XU Hong, YANG Yan-qiu, et al. Tectonic-thermal Evolution Characteristics of the Northern Jiangsu and South Yellow Sea Basins and Their Petroleum Geological Significance[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 49-55.
- [7] 吴群,彭金宁.川东北地区埋藏史及热史分析:以普光2井为例[J].石油实验地质,2013,35(2):133-138.
WU Qun, PENG Jin-ning. Burial and Thermal Histories of Northeastern Sichuan Basin: A Case Study of Well Puguang 2[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(2): 133-138.
- [8] 刘玉虎,赵丹丹,刘兴旺,等.吐哈侏罗纪原型盆地演化对烃源岩分布的控制[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(8):29-39.
LIU Yu-hu, ZHAO Dan-dan, LIU Xing-wang, et al. The Evolution of Turpan-Hami Jurassic Prototype Basin and its Control on the Distribution of Source Rocks[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(8): 29-39.
- [9] 李岩,王云鹏,赵长毅,等.四川盆地上三叠统须家河组烃源岩埋藏史及热演化特征[J].地质通报,2013,32(11):1798-1805.
LI Yan, WANG Yun-peng, ZHAO Chang-yi, et al. Burial History and Thermal Evolution Characteristics of Source Rocks of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(11): 1798-1805.
- [10] 董田,何生,林社卿.泌阳凹陷核桃园组烃源岩有

- 机地化特征及热演化成熟史[J]. 石油实验地质, 2013, 35(2): 187-194.
- DONG Tian, HE Sheng, LIN She-qing. Organic Geochemical Characteristics and Thermal Evolution Maturity History Modeling of Source Rocks in Eocene Hetaoyuan Formation of Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35 (2): 187-194.
- [11] 卢龙飞, 蔡进功, 刘文汇, 等. 泥质烃源岩中粘土矿物结合有机质热演化的红外发射光谱研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 215-222.
- LU Long-fei, CAI Jin-gong, LIU Wen-hui, et al. Infra-red Emission Spectroscopy Study of Thermal Evolution of Organic Matter Bound by Clay Minerals in Muddy Hydrocarbon Source Rocks[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2): 215-222.
- [12] 任战利, 赵重远, 张 军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56-65.
- REN Zhan-li, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Jun, et al. Research on Paleotemperature in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.
- [13] 崔军平, 任战利. 海拉尔盆地古地温研究[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 151-156.
- CUI Jun-ping, REN Zhan-li. Research on the Paleotemperature in Hailaer Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(4): 151-156.
- [14] 崔军平, 任战利, 史 政, 等. 东北地区二叠纪沉积特征及原型盆地分析[J]. 现代地质, 2013, 27(2): 260-268.
- CUI Jun-ping, REN Zhan-li, SHI Zheng, et al. Analysis on Permian Depositional Characteristics and Prototype Basin of Northeast China[J]. Geoscience, 2013, 27(2): 260-268.
- [15] 胡圣标, 郝 杰, 付明希, 等. 秦岭—大别—苏鲁造山带白垩纪以来的抬升冷却史——低温年代学数据约束[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1167-1173.
- HU Sheng-biao, HAO Jie, FU Ming-xi, et al. Cenozoic Denudation and Cooling History of Qinling-Dabie-Sulu Orogens—Apatite Fission Track Thermochronology Constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(4): 1167-1173.
- [16] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 339-349.
- REN Zhan-li. Thermal History of Ordos Basin Assessed by Apatite Fission Track Analysis[J]. Acta Geophysica Sinica, 1995, 38(3): 339-349.
- [17] 任战利, 肖 晖, 刘 丽, 等. 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32 (1): 43-47.
- REN Zhan-li, XIAO Hui, LIU Li, et al. Determination of Mesozoic Tectonic Heat Event in Qinshui Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 43-47.
- [18] 任战利, 张小会, 刘池洋, 等. 花海—金塔盆地生油岩古温度的确定指明了油气勘探方向[J]. 科学通报, 1995, 40(10): 921-923.
- REN Zhan-li, ZHANG Xiao-hui, LIU Chi-yang, et al. Determination of Oil Source Rock Palaeotemperature Ascertains the Direction of Oil-gas Exploration in Huahai-Jinta Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (10): 921-923.
- [19] 任战利, 肖 晖, 刘 丽, 等. 沁水盆地构造-热演化史的裂变径迹证据[J]. 科学通报, 2005, 50(增 1): 87-92.
- REN Zhan-li, XIAO Hui, LIU Li, et al. The Evidence of Fission-track for Tectonic-thermal History in Qinshui Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (S1): 87-92.
- [20] 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, 2(3/4): 171-180.
- HU Sheng-biao, WANG Ji-yang. Principles and Progresses on Thermal Regime of Sedimentary Basins: An Overview[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 171-180.
- [21] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- QIU Nan-sheng, HU Sheng-biao, HE Li-juan. Theory and Application of Thermal Mechanics Research in Sedimentary Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [22] PRICE L C. Geologic Time as a Parameter in Organic Metamorphism and Vitrinite Reflectance as an Absolute Paleogeothermometer [J]. Journal of Petroleum Geology, 1983, 6(1): 5-37.
- [23] 任战利, 张世焕. 中国北方沉积盆地热演化史与油气关系研究[J]. 地球学报, 1999, 20(增): 489-494.
- REN Zhan-li, ZHANG Shi-huan. Research on the Relations Between Geothermal History and Oil-gas Accumulation in Sedimentary Basins of the North China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(S): 489-494.
- [24] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 17-24.
- REN Zhan-li. Research on the Relations Between Geothermal History and Oil-gas Accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 17-24.
- [25] 任战利, 张 盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学: D 辑, 2007, 37 (增 1): 23-32.

- REN Zhan-li, ZHANG Sheng, GAO Sheng-li, et al. Tectonic Thermal History and Its Significance on the Formation of Oil and Gas Accumulation and Mineral Deposit in Ordos Basin[J]. *Science in China; Series D*, 2007, 37(S1): 23-32.
- [26] 邱楠生, 金之钧, 王飞宇. 多期构造演化盆地的复杂地温场对油气生成的影响——以塔里木盆地塔中地区为例[J]. *沉积学报*, 1997, 15(2): 142-144.
- QIU Nan-sheng, JIN Zhi-jun, WANG Fei-yu. The Effect of the Complex Geothermal Field Based on the Multi-structure Evolution to Hydrocarbon Generation—A Case of Tazhong Area in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(2): 142-144.
- [27] 王良书, 施央申. 油气盆地地热研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989.
- WANG Liang-shu, SHI Yang-shen. Geothermal Research of Oil-gas Basins[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1989.
- [28] WOOD D A. Relationships Between Thermal Maturity Indices Calculated Using Arrhenius Equation and Lopatin Method; Implications for Petroleum Exploration[J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(2): 115-134.
- [29] 王 瑜. 构造-热年代学——发展与思考[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 435-443.
- WANG Yu. Some Thoughts on Tectono-thermochronology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 435-443.
- [30] 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 碎屑颗粒热年代学——一种揭示盆山耦合过程的年代学方法[J]. *地震地质*, 2000, 22(增): 25-36.
- ZHENG De-wen, ZHANG Pei-zhen, WAN Jing-lin, et al. Detrital Grain Thermochronology—A Potential Method for Research on Coupling Process Between Basin and Mountain[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(S): 25-36.
- [31] 袁万明, 杜杨松, 杨立强, 等. 西藏冈底斯带南木林地区构造活动的磷灰石裂变径迹分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2911-2917.
- YUAN Wan-ming, DU Yang-song, YANG Li-qiang, et al. Apatite Fission Track Studies on the Tectonics in Nanmulin Area of Gangdese Terrane, Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2911-2917.
- [32] NAESER N D, NAESER C W, MCCULLOH T H. The Application of Fission-track Dating to the Depositional and Thermal History of Rocks in Sedimentary Basins[M] // NAESER N D, MCCULLOH T H. Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories. New York: Springer-Verlag, 1989: 157-180.
- [33] GLEADOW A J W, DUDDY I R, LOVERING J F. Fission Track Analysis: A New Tool for the Evaluation of Thermal Histories and Hydrocarbon Potential[J]. *APEA Journal*, 1983, 23: 93-102.
- [34] WILKE F D H, SOBEL E R, O'BRIEN P J, et al. Apatite Fission Track and (U-Th)/He Ages from the Higher Himalayan Crystallines, Kaghan Valley, Pakistan; Implications for an Eocene Plateau and Oligocene to Pliocene Exhumation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 59: 14-23.
- [35] GLEADOW A J W, KOHN B P, BROWN R W, et al. Fission Track Thermotectonic Imaging of the Australian Continent[J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1/2/3/4): 5-21.
- [36] ZEITLER P K, HERCZEG A L, MCDOUGALL I, et al. U-Th-He Dating of Apatite: A Potential Thermochronometer[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(10): 2865-2868.
- [37] 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.
- [38] 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(1/2/3/4): 297-308.
- [39] REINERS P W, FARLEY K A. Helium Diffusion and (U-Th)/He Thermochronometry of Titanite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3845-3859.
- [40] 蒋 毅, 常 宏. 磷灰石(U-Th)/He 定年方法综述[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(5): 757-766.
- JIANG Yi, CHANG Hong. Apatite (U-Th)/He Dating: A Review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(5): 757-766.
- [41] 周 雁, 李天义, 何 生, 等. 低温热年代学方法及其在叠合盆地构造-热演化研究中的应用[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 40(4): 399-408.
- ZHOU Yan, LI Tian-yi, HE Sheng, et al. Application of Low Temperature Thermochronology in Tectothermal History Analysis of Superimposed Basins[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2013, 40(4): 399-408.
- [42] 焦若鸿, 许长海, 张向涛, 等. 锆石裂变径迹(ZFT)年代学: 进展与应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 171-182.
- JIAO Ruo-hong, XU Chang-hai, ZHANG Xiang-tao, et al. Zircon Fission-track Thermochronology (ZFT):

- Advances and Applications [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 171-182.
- [43] 喻 顺, 陈 文, 吕修祥, 等. (U-Th)/He 技术约束下库车盆地北缘构造热演化: 以吐孜 2 井为例[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(1): 62-74.
YU Shun, CHEN Wen, LU Xiu-xiang, et al. (U-Th)/He Thermochronometry Constraints on the Mesozoic-Cenozoic Tectono-thermal Evolution of Kuqa Basin: A Case Study of Well TZ2 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(1): 62-74.
- [44] 常 健, 邱楠生, 李佳蔚. 塔里木盆地与南天山的耦合关系: 来自 (U-Th)/He 年龄的新证据[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 234-243.
CHANG Jian, QIU Nan-sheng, LI Jia-wei. The Coupling Relationship Between the South Tianshan Mountains and the Tarim Basin: New Evidence from the (U-Th)/He Ages [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 234-243.
- [45] 吕红华, 常 远, 王 玮, 等. 天山中新世早期快速剥露: 磷灰石裂变径迹与 (U-Th)/He 低温热年代学证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(12): 1964-1974.
LU Hong-hua, CHANG Yuan, WANG Wei, et al. Rapid Exhumation of the Tianshan Mountains Since the Early Miocene: Evidence from Combined Apatite Fission Track and (U-Th)/He Thermochronology [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(12): 1964-1974.
- [46] 李宗星, 赵 平, 孙占学. 磷灰石裂变径迹及 (U-Th)/He 分析技术在石油勘探中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(4): 1648-1654.
LI Zong-xing, ZHAO Ping, SUN Zhan-xue. The Application of AFT and (U-Th)/He Analysis Technique in Petroleum Exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(4): 1648-1654.
- [47] 高洪雷, 刘红旭, 何建国, 等. 东天山地区中—新生代隆升—剥露过程: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. *地学前缘*, 2014, 21(1): 249-260.
GAO Hong-lei, LIU Hong-xu, HE Jian-guo, et al. Mesozoic-Cenozoic Uplift-exhumation History of East Tianshan: Evidence from Apatite Fission Track [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 249-260.
- [48] 郇伟静, 李 娜, 袁万明, 等. 四川甘孜—理塘金成矿带成矿时代与构造活动的裂变径迹研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(4): 1338-1346.
HUAN Wei-jing, LI Na, YUAN Wan-ming, et al. Fission Track Constrains on Mineralization Time and Tectonic Events in Ganzi-Litang Gold Belt, Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(4): 1338-1346.
- [49] 韩 伟, 卢进才, 张云鹏, 等. 内蒙古西部额济纳旗及其邻区磷灰石裂变径迹研究及其油气地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(3): 647-655.
HAN Wei, LU Jin-cai, ZHANG Yun-peng, et al. Apatite Fission Track and Its Petroleum Geological Significance of the Ejina Area and Its Vicinity, Western Inner Mongolia [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(3): 647-655.
- [50] 周 海, 雷 川. 磷灰石裂变径迹 (AFT) 研究进展 [J]. *西北地质*, 2013, 46(1): 168-177.
ZHOU Hai, LEI Chuan. The Study Progress in Apatite Fission Track (AFT) [J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(1): 168-177.
- [51] 张艳妮, 李荣西, 刘海青, 等. 四川盆地北缘大巴山前陆构造中—新生代构造隆升史 [J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(1): 230-238.
ZHANG Yan-ni, LI Rong-xi, LIU Hai-qing, et al. Mesozoic-Cenozoic Tectonic Uplift History of Dabashan Foreland Structure in the Northern Rim of Sichuan Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2014, 36(1): 230-238.
- [52] 邓 宾, 刘树根, 王国芝, 等. 四川盆地南部地区新生代隆升剥露研究——低温热年代学证据 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(6): 1958-1973.
DENG Bin, LIU Shu-gen, WANG Guo-zhi, et al. Cenozoic Uplift and Exhumation in Southern Sichuan Basin—Evidence from Low-temperature Thermochronology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(6): 1958-1973.
- [53] 赵长煜, 宋海斌, 杨振武, 等. 南海南部边缘沉积盆地构造—热演化历史 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57(5): 1543-1553.
ZHAO Chang-yu, SONG Hai-bin, YANG Zhen-wei, et al. Tectonic and Thermal Evolution Modeling for the Marginal Basins of the Southern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(5): 1543-1553.
- [54] 潘澄雨, 孟元库, 汪新文. 运用磷灰石裂变径迹分析依连哈比尔尕山北缘盆山演化史 [J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(6): 680-683.
PAN Cheng-yu, MENG Yuan-ku, WANG Xin-wen. Analysis of Basin-mountain Evolution History in Northern Margin of Yilianhabierga Mountain by Using Apatite Fission-track [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(6): 680-683.
- [55] 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.
- [56] BARBARAND J, CARTER A, WOOD I, et al. Compositional and Structural Control of Fission-track Annealing in Apatite [J]. *Chemical Geology*, 2003, 198(1/2): 107-137.
- [57] KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al. Improved Modeling of Fission-track Annealing in Apatite [J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(5/6): 799-810.
- [58] STEPHENSON J, GALLAGHER K, HOLMES C C. Low Temperature Thermochronology and Strategies for Multiple Samples 2: Partition Modelling for 2D/3D Distributions with Discontinuities [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3/4): 557-570.
- [59] BRANDON M T, VANCE J A. Tectonic Evolution of the Cenozoic Olympic Subduction Complex, Washington State, as Deduced from Fission Track Ages for Detrital Zircons [J]. *American Journal of Science*, 1992, 292: 565-636.
- [60] KETCHAM R A, DONELICK R A, BALESTRIERI M L, et al. Reproducibility of Apatite Fission-track Length Data and Thermal History Reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(3/4): 504-515.
- [61] GREEN P F. On the Thermo-tectonic Evolution of Northern England: Evidence from Fission Track Analysis [J]. *Geological Magazine*, 1986, 123(5): 493-506.
- [62] PEDERSEN V K, NIELSEN S B, GALLAGHER K. The Post-orogenic Evolution of the Northeast Greenland Caledonides Constrained from Apatite Fission Track Analysis and Inverse Geodynamic Modelling [J]. *Tectonophysics*, 2012, 530/531: 318-330.
- [63] SAHU H S, RAAB M J, KOHN B P, et al. Thermal History of the Krishna-Godavari Basin, India: Constraints from Apatite Fission Track Thermochronology and Organic Maturity Data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 1-20.
- [64] GLEADOW A J W, BROWN R W. Fission-track Thermochronology and the Long-term Denudational Response to Tectonics [M] // SUMMERFIELD M A. *Geomorphology and Global Tectonics*. New York: Wiley, 2000: 57-75.
- [65] COGNE N, GALLAGHER K, COBBOLD P R. Post-rift Reactivation of the Onshore Margin of Southeast Brazil: Evidence from Apatite (U-Th)/He and Fission-track Data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 309(1/2): 118-130.
- [66] 李天义, 周雁, 方石, 等. 磷灰石裂变径迹年龄测试分析新方法——激光剥蚀-ICPMS法 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 550-557.
- LI Tian-yi, ZHOU Yan, FANG Shi, et al. A New Method for Apatite Fission Track Dating—The Laser-ICPMS Method [J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(4): 550-557.
- [67] HASEBE N, BARBARAND J, JARVIS K, et al. Apatite Fission-track Chronometry Using Laser Ablation ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2004, 207(3/4): 135-145.
- [68] BARKER C E, PAWLEWICZ M J. The Correlation of Vitrinite Reflectance with Maximum Temperature in Humic Organic Matter [M] // BUNTEBARTH G, STEGENA L. *Paleogeothermics: Evaluation of Geothermal Conditions in the Geological Past*. Berlin: Springer-Verlag, 1986: 79-93.
- [69] HOOD A, GUTJAHR C C M, HEACOCK R L. Organic Metamorphism and the Generation of Petroleum [J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(6): 986-996.
- [70] BARKER C E. Temperature and Time in the Thermal Maturation of Sedimentary Organic Matter [M] // NAESER N D, MCCULLOH T H. *Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories*. New York: Springer-Verlag, 1989: 73-98.
- [71] ANTIA D D J. Kinetic Method for Modeling Vitrinite Reflectance [J]. *Geology*, 1986, 14(7): 606-608.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] LARTER S. Some Pragmatic Perspectives in Source Rock Geochemistry [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1988, 5(3): 194-204.
- [75] 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.
- [76] PETERSEN H I, ANDERSEN C, HOLME A C, et al. Vitrinite Reflectance Gradients of Deep Wells with Thick Chalk Sections and High Pressure: Implications for Source Rock Maturation, Danish-Norwegian Central Graben, North Sea [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 100: 65-81.
- [77] 丰国秀, 陈盛吉. 岩石中沥青反射与镜质体反射率之

- 间的关系[J]. 天然气工业, 1988, 8(3): 20-25.
- FENG Guo-xiu, CHEN Sheng-ji. Relationship Between the Reflectance of Bitumen and Vitrinite in Rock[J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(3): 20-25.
- [78] 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 Fei-yu, HE Ping, CHENG Ding-sheng, et al. Vitrinite-like Reflectance Can Be Taken as the Maturity Index for the High-to-over Mature Source Rocks in Low Paleozoic[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(4): 14-18.
- [79] 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 De-han, SHI Ji-yang. The Unconventional Evaluation Method of Carbonate Source Rocks at High Mature Stages [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(3): 113-115.
- [80] PETERSEN H I, SHERWOOD N, MATHIESEN A, et al. Application of Integrated Vitrinite Reflectance and FMM Analyses for Thermal Maturity Assessment of the Northeastern Malay Basin, Offshore Vietnam; Implications for Petroleum Prospectivity Evaluation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(3): 319-332.
- [81] 邱楠生, 李慧莉, 金之钧. 沉积盆地地下古生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 561-567.
- QIU Nan-sheng, LI Hui-li, JIN Zhi-jun. Study of the Thermal History Reconstruction for Lower Paleozoic Carbonate Succession [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 561-567.
- [82] BURRUSS R C. Paleotemperatures from Fluid Inclusions: Advances in Theory and Technique [M] // NAESER N D, MCCULLOCH T H. Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories. New York: Springer-Verlag, 1989: 119-131.
- [83] 任战利, 赵重远. 鄂尔多斯盆地与沁水盆地中生代晚期地温场对比研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 134-137.
- REN Zhan-li, ZHAO Zhong-yuan. Late Mesozoic Comparative Research on the Geothermal Field of the Ordos Basin and Qinshui Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 134-137.
- [84] 任战利, 张 盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674-684.
- REN Zhan-li, ZHANG Sheng, GAO Sheng-li, et al. Research on Region of Maturation Anomaly and Formation Time in Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.
- [85] 任战利, 赵重远. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 1-4.
- REN Zhan-li, ZHAO Zhong-yuan. Recovery and Comparison of Geothermal Gradient for Late Mesozoic Sedimentary Basins in the Northern Part of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 1-4.
- [86] SUGGATE R P. Relations Between Depth of Burial, Vitrinite Reflectance and Geothermal Gradient [J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(1): 5-32.
- [87] BELAID A, KROOSS B M, LITTKER R. Thermal History and Source Rock Characterization of a Paleozoic Section in the Awbari Trough, Murzuq Basin, SW Libya [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(3): 612-632.
- [88] JI J F, BROWNE P R L. Relationship Between Illite Crystallinity and Temperature in Active Geothermal Systems of New Zealand [J]. Clays and Clay Minerals, 2000, 48(1): 139-144.
- [89] 张 哲, 陈小明, 赵 明. 利用伊/蒙混层矿物对山东济阳拗陷古地温和剥蚀深度的反演[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2008, 44(6): 621-631.
- ZHANG Zhe, CHEN Xiao-ming, ZHAO Ming. The Use of the Mixed-layer Illite/Smectite to Trace the Paleotemperature and the Eroded Strata Thickness in the Jiyang Basin, Eastern China [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2008, 44(6): 621-631.
- [90] MAYNARD J B, ELSWICK E R, HOWER J C. Reflectance of Dispersed Vitrinite in Shales Hosting Pb-Zn-Cu Ore Deposits in Western Cuba: Comparison with Clay Crystallinity [J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 47(3/4): 161-170.
- [91] 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, et al. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [92] 欧光习, 李林强, 孙玉梅. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 1-11.
- OU Guang-xi, LI Lin-qiang, SUN Yu-mei. Theory and Application of the Fluid Inclusion Research on the Sedimentary Basins [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 1-11.

- [93] 邱华宁,彭良.⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学与流体包裹体定年[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1997.
QIU Hua-ning, PENG Liang. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Chronology and Fluid Inclusion Dating[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997.
- [94] WALGENWITZ F, PAGEL M, MEYER A, et al. Thermo-chronological Approach to Reservoir Diagenesis in the Offshore Angola Basin: A fluid Inclusion, ⁴⁰Ar-³⁹Ar and K-Ar Investigation[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(5): 547-563.
- [95] TILLEY B J, NESBITT B E, LONGSTAFFE F J. Thermal History of Alberta Deep Basin: Comparative Study of Fluid Inclusion and Vitrinite Reflectance Data[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10): 1206-1222.
- [96] 刘斌. 烃类包裹体热动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LIU Bin. Thermodynamics of Hydrocarbon Inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [97] 任战利. 沉积盆地热演化史研究新进展[J]. 地球科学进展, 1992, 7(3): 43-49.
REN Zhan-li. Advances on Thermal Histories of Sedimentary Basins[J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(3): 43-49.
- [98] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地热演化史研究现状及进展[M]//刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展. 北京: 科学出版社, 2005: 17-25.
REN Zhan-li, ZHANG Sheng, GAO Sheng-li, et al. Present Situation and Progress on Thermal History Research of Ordos Basin[M]//LIU Chi-yang. Study Progress of Accumulation and Distribution Patterns for Multiple Energy Mineral Deposits Coexisting in the Basin. Beijing: Science Press, 2005: 17-25.
- [99] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment[M]. 3rd ed. London: Wiley-Blackwell, 2013.
- [100] 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(3/4): 53-58.
HE Deng-fa, LI De-sheng. Advances in Studies of the Dynamics of Sedimentary Basins[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3/4): 53-58.
- [101] MCKENZIE D. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40(1): 25-32.
- [102] 何丽娟. 沉积盆地构造热演化模拟的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 661-665.
HE Li-juan. Advance in Tectono-thermal Modelling of Sedimentary Basins[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 661-665.
- [103] 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 Li-juan, WANG Ji-yang. Tectono-thermal Modeling of Sedimentary Basins: Review and Outlook[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1215-1219.
- [104] 任战利, 赵重远, 陈刚, 等. 沁水盆地中生代晚期构造热事件[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 46-48.
REN Zhan-li, ZHAO Zhong-yuan, CHEN Gang, et al. Tectonic Thermal Events of Late Mesozoic in Qinshui Basin[J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(1): 46-48.
- [105] 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 502-506.
REN Zhan-li, LIU Li, CUI Jun-ping, et al. Application of Tectonic-thermal Evolution History to Hydrocarbon Accumulation Timing in Sedimentary Basins[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(4): 502-506.
- [106] SACHSENHOFER R F, PRIVALOV V A, ZHYKALYAK M V, et al. The Donets Basin (Ukraine/Russia): Coalification and Thermal History[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 49(1): 33-55.
- [107] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190-198.
REN Zhan-li, LI Wen-hou, LIANG Yu, et al. Tight Oil Reservoir Formation Conditions and Main Controlling Factors of Yanchang Formation in Southeastern of Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(2): 190-198.
- [108] 于强, 任战利, 倪军, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区中生界热演化史探讨[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 801-805.
YU Qiang, REN Zhan-li, NI Jun, et al. The Thermal Evolution History of Mesozoic, Fuxian Exploratory Area of Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2012, 42(5): 801-805.
- [109] 于强, 任战利, 王宝江, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史[J]. 地质论评, 2012, 58(2): 303-308.
YU Qiang, REN Zhan-li, WANG Bao-jiang, et al. Thermal Evolution History of the Upper Paleozoic in Yanchang Exploratory Area, Ordos Basin[J]. Geological Review, 2012, 58(2): 303-308.
- [110] KARIM A, HANLEY J J, PE-PIPER G, et al. Palaeohydrogeological and Thermal Events Recorded by

- Fluid Inclusions and Stable Isotopes of Diagenetic Minerals in Lower Cretaceous Sandstones, Offshore Nova Scotia, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1147-1169.
- [111] 任战利. 中国北方沉积盆地构造热演化史恢复及其对比研究[D]. 西安: 西北大学, 1998.
- REN Zhan-li. Comparison and Recovery of Tectonical Thermal History of Sedimentary Basins in the North China[D]. Xi'an: Northwest University, 1998.
- [112] SRODON J, CLAUER N, BANAS M, et al. K-Ar Evidence for a Mesozoic Thermal Event Superimposed on Burial Diagenesis of the Upper Silesia Coal Basin[J]. Clay Minerals, 2006, 41(2): 669-690.
- [113] FERNANDES P, MUSGRAVE J A, CLAYTON G, et al. New Evidence Concerning the Thermal History of Devonian and Carboniferous Rocks in the South Portuguese Zone[J]. Journal of the Geological Society, 2012, 169(6): 647-654.
- [114] LAW B E. Thermal Maturity Patterns of Cretaceous and Tertiary Rocks, San Juan Basin, Colorado and New Mexico[J]. GSA Bulletin, 1992, 104(2): 192-207.
- [115] HAMILTON P J, KELLY S, FALICK A E. K/Ar Dating of Illite in Hydrocarbon Reservoirs[J]. Clay Minerals, 1989, 24(2): 215-231.
- [116] PETMECKY S, MEIER L, REISER H, et al. High Thermal Maturity in the Lower Saxony Basin: Intrusion or Deep Burial? [J]. Tectonophysics, 1999, 304(4): 317-344.
- [117] 邓 宾, 刘树根, 刘 顺, 等. 川西若尔盖地区中—新生代构造—热事件及其年代学框架[J]. 地球科学, 2013, 38(2): 317-328.
- DENG Bin, LIU Shu-gen, LIU Shun, et al. Tectono-thermal Events and Chronological Framework in Zoige and Its Periphery[J]. Earth Science, 2013, 38(2): 317-328.
- [118] 张世焕, 任战利, 马团校, 等. 吐鲁番—哈密盆地现今地温与油气关系研究[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 432-440.
- ZHANG Shi-huan, REN Zhan-li, MA Tuan-xiao, et al. Research on the Relations Between Present Temperature and Oil-gas Generation in Tulufan-Hami Basin [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 432-440.
- [119] 任战利. 关于沉积盆地古地温场恢复问题的探讨[J]. 西北大学学报, 1991, 21(增): 227-234.
- REN Zhan-li. Discussion on Paleogeothermal Recovery in Sedimentary Basin[J]. Journal of Northwest University, 1991, 21(S): 227-234.
- [120] 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33-37.
- REN Zhan-li. Comparison of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins, North China[J]. Oil and Gas Geology, 2000, 21(1): 33-37.
- [121] FRIBERG L, POELCHAU H S, KROOSS B, et al. 3D-modelling of Thermal History and Simulation of Methane and Nitrogen Migration Along the Northeast German Seismic DEKORP Profile 9601[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69/70: 263-267.
- [122] HERTLE M, LITCKE R. Coalification Pattern and Thermal Modelling of the Permo-Carboniferous Saar Basin(SW-Germany)[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 42(4): 273-296.
- [123] ISSLER D R, GRIST A M, STASIUK L D. Post-Early Devonian Thermal Constraints on Hydrocarbon Source Rock Maturation in the Keele Tectonic Zone, Tulita Area, NWT, Canada, from Multi-kinetic Apatite Fission Track Thermochronology, Vitrinite Reflectance and Shale Compaction[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53(4): 405-431.
- [124] 任战利, 萧德铭, 迟元林, 等. 松辽盆地基底石炭—二叠系热演化史[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 430-439.
- REN Zhan-li, XIAO De-ming, CHI Yuan-lin, et al. Restoration of Thermal History of the Permo-Carboniferous Basement in the Songliao Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(3): 430-439.
- [125] 任战利, 肖 晖, 韩 伟, 等. 孔雀河斜坡与库鲁克隆起构造—热演化史研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 510-516.
- REN Zhan-li, XIAO Hui, HAN Wei, et al. Research on Basin-mountain Tectonic-thermal History of Kongquehe Slope and Kuruketag Uplift[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2009, 39(3): 510-516.
- [126] 秦建中, 李志明, 腾格尔. 中国南方高演化海相层系的古温标[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 608-618.
- QIN Jian-zhong, LI Zhi-ming, TENG Ge-er. A Study on Palaeo-geothermometer of High Mature Marine Sequences in South China[J]. Oil and Gas Geology, 2009, 30(5): 608-618.
- [127] 胡圣标, 何丽娟, 朱传庆, 等. 海相盆地热史恢复方法体系[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 607-613.
- HU Sheng-biao, HE Li-juan, ZHU Chuan-qing, et al. Method System of Thermal Reconstruction for Marine Basins[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(5): 607-613.