

综述与评述

构造—热年代学 在含油气盆地分析中的应用进展

郑建京¹, 高占冬^{1,2}, 王亚东¹, 郑有伟^{1,2}, 刘兴旺¹, 关宝文^{1,2}

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:含油气盆地尤其是叠合盆地在形成与演化过程中伴随着油气的成藏及改造,二者之间的时间匹配以及所发生的能量交换是当前含油气盆地研究的重点和难点。构造—热年代学特别是中低温测年体系的发展和应用,给含油气盆地分析带来了活力。构造—热年代学约束的含油气盆地的构造—热作用过程研究,使探讨和研究含油气盆地形成演化、热演化历史、沉积沉降及恢复剥蚀量成为可能,并由定性描述逐渐向定量或半定量计算转变,为含油气盆地分析工作的进行和发展提供了更广阔的平台。总结了构造—热年代学的高温—低温测年体系,并根据矿物热年代学年龄所代表的不同地质意义,结合各测年体系在含油气盆地的研究进展,提出其优势应用领域。重点介绍了与生油窗温度相近的裂变径迹和(U—Th)/He 低温测年体系在含油气盆地分析中的发展过程及目前重点应用方向,并初步预测 2 个测年体系在含油气盆地分析中未来可能的发展趋势。以构造—热年代学为主,传统地球化学、岩石学及矿物学等多学科交叉融合,不断拓展和深化其引用领域,能够更好地为科学研究和生产服务。

关键词:含油气盆地;构造—热年代学;测年体系;构造运动;热演化历史

中图分类号:TE121.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2014)10-1491-08

引用格式:Zheng Jianjing, Gao Zhandong, Wang Yadong, *et al.* Application progress of structure-thermochronology in petroliferous basin analysis[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1491-1498. [郑建京, 高占冬, 王亚东, 等. 构造—热年代学在含油气盆地分析中的应用进展[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1491-1498.]

0 引言

沉积盆地的构造演化与油气的生成、运移和聚集成藏密切相关,而大多数含油气盆地均由不同时代盆地叠合而成。不同时期地球动力学系统不同,导致盆地类型复杂,多期构造转换、叠加,使油气经历多次形成演化、保存和改造过程。因此,对此类型盆地的构造运动时间、强度及演化历史的研究极其重要。传统的地层对比、平衡剖面恢复、盆地模拟及

有机地球化学等手段能够在一定程度上约束盆地的单一构造演化或热演化历史,然而对于经历复杂演化过程的叠合盆地而言,该方法已经无法满足科学研究及生产需求。如何获取在叠合盆地的复杂构造运动过程中,盆地形成、演化与成烃成藏匹配的时间节点,以及在盆地抬升、埋藏过程中所发生的热变化信息,是当前含油气盆地研究的 2 个重要方向。盆地中沉积物碎屑矿物的热年代学方法,能够有效地记录盆地在形成演化过程中的温度、时间及构造强

收稿日期:2014-03-19;修回日期:2014-07-24.

基金项目:中国科学院西部行动计划项目“准噶尔盆地东部低熟气资源潜力与有利勘探区预测”(编号:KZCX2-XB3-12);中国科学院知识创新工程青年人才类重要方向项目“阿尔金断裂东段左旋走滑构造转换及其控油研究”(编号:KZCX2-EW-QN112)联合资助。

作者简介:郑建京(1956-),男,河北丰润人,研究员,博士生导师,主要从事中国中西北部盆地相关构造地质学研究。

E-mail:jjzheng@lzb.ac.cn.

度等信息,不但可以为含油气盆地的构造演化特征提供直接证据,而且也是油气勘探的有利依据。

1 构造—热年代学测年原理及应用

1973年,Donson首次提出封闭温度的概念,认为不同矿物具有不同的封闭温度,所以其形成年龄不同;随后,McDougall和Harrison等利用不同的测年方法对不同的矿物进行测年,得到各种矿物的年龄—温度体系^[1-4],成为构造—热年代学建立的理论基础。

构造—热年代学是在同位素年代学的基础上,结合矿物封闭温度理论发展起来的,涉及同位素年代学、构造地质学、岩石矿物学及计算机模拟技术等多个学科和技术方法,主要包括高温U—Pb体系、Sm—Nb体系,中低温Rb—Sr体系、FT体系和(U—Th)/He体系,以及温度区间跨度较大的Ar—Ar体系(图1)。这一交叉学科的出现,对传统构造地质学、年代学的应用与解释起到巨大的推动作用,是地质学研究领域的一次革命,它可为不同尺度构造事件、深层岩基对比、环境变迁和能源开发等提供重要的约束条件^[5]。最近10多年来,在山体抬升、盆地沉降、山体剥蚀以及构造变形的形成时间等方面产生了大量的研究成果。

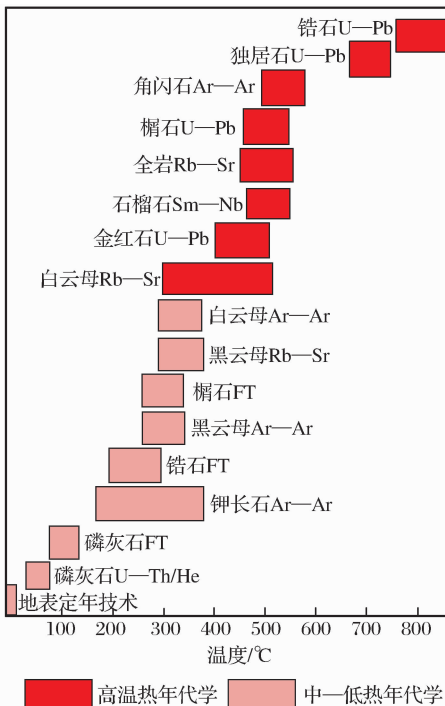


图1 同位素定年体系封闭温度^[5]

Fig. 1 The closed temperature of isotopic dating system^[5]

代和热,其得到的年龄值不仅具有时间上的意义,而且能提供所测定岩石经历的温度信息以及可能的形成深度,因而突破了只提供—个地质事件形成时间的局限,在解决与时间相关的问题的同时,还可重建山体及相邻地质体在构造事件发生时所处的热作用状态。此外,构造—热年代学测年体系多、时间—温度范围大,可测试的岩性包括火成岩、变质岩和沉积岩,因此应用极其广泛。近年来,逐渐被应用于含油气盆地分析方面,解决盆地演化中与热能相关及油气成藏相关的问题。但因不同矿物具有不同的封闭温度,所记录的地质体的深度范围也不同,使某一测年体系只在一定的地质事件中具有优势。

2 构造—热年代学测年体系优势应用领域

2.1 U—Pb 测年体系

U—Pb法是最早也是目前国内最重要的用来测定地质年龄的同位素测年方法。近10年来,引进的锆石微区U—Pb年龄测定技术推动了国内地质科学的发展。U—Pb测年体系最常用的矿物是锆石,有时也用斜锆石、金红石、独居石、榍石、磷灰石和锡石等含铀矿物^[6]。由于该体系矿物封闭温度 $>400^{\circ}\text{C}$,通常代表岩浆结晶年龄、岩体的变形或变质年龄,在沉积盆地中常用来判识地层的沉积时代及烃源岩类型,并对物源及沉积盆地的构造演化进行约束,许多学者将该体系矿物应用在各种盆地中,都取得了很好的效果^[7-10]。

2.2 Rb—Sr 与 Sm—Nd 测年体系

Rb—Sr法应用很广泛,其测年关键是等时线技术。由于Rb与K、Sr与Ca的地球化学性质基本一致,因此通常的含钾矿物如云母类、长石类、闪石类和辉石类都可进行Rb—Sr法测定,在花岗岩成因研究方面独具特色。近年来,Rb—Sr同位素系统容易被改造的特点逐渐被地质工作者所重视,与其他方法配合,在研究后期地质作用、水热循环、区域变质作用、地壳抬升及构造变形等方面效果良好。在沉积盆地中,利用Rb—Sr法测定成岩作用中形成的自生矿物如海绿石等的年龄,可以约束盆地内成岩作用时间,识别物源区^[11]。但因该测年方法对样品要求极高,且Rb具有流动性,极易形成开放系统,得到不正确的年龄,还经常受假等时线的困扰,因此该方法并不被盆地分析方面的学者所广泛应用。

构造—热年代学方法主要包括2个方面,即年

Sm—Nd 体系的保存性能良好,因此在确定基性、超基性岩石以及太古宙等古老岩石的年龄和成因方面很有效。同时,由于 Sm—Nd 体系在风化、沉积和变质作用过程中能保持自身的封闭性,因此利用沉积岩碎屑的 Sm—Nd 模式年龄可以鉴别沉积物的源区,判断源岩形成构造背景,了解其物源区存留地壳的平均年龄,揭示地壳形成和演化历史等^[12]。但 Sm、Nd 地球化学性质类似,地质作用过程中很难分离,所以二者的比值变化很小,有时不能给出正确可信的年龄,是该手段无可避免的缺陷。

2.3 Ar—Ar 测年体系

Ar—Ar 法的前身为 K—Ar 法,基本上所有的含钾矿物、岩石都可用该方法进行测年,矿物的封闭温度范围为 140~600℃,可记录埋深约 5~15km 范围内地质体所经历的热事件。因此,利用矿物对法或年龄高程法研究地质体的抬升—剥露历史是非常有利的工具。自 20 世纪 80 年代中期开始,国外一些学者^[13]开展了砂岩储层自生伊利石 K—Ar 法探讨油气成藏年龄和砂岩成岩年龄,王飞宇等^[14]将这种方法成功地应用于塔里木盆地的成藏时间分析。自生伊利石在碎屑岩储层中普遍存在,因此该成藏年代分析法具有广泛的适用性,但测试费用较高。

20 世纪末期,激光微区显微探针测年技术的出现,使 Ar—Ar 法取代了 K—Ar 法。近年来,一些学者积极探索该方法在油气成藏期研究中的应用,取得了比较理想的效果。该测年方法的主要测年载体为石英包裹体^[15-16]和盆地沉积物中的自生矿物(以伊利石为主)^[17]。上述测年方法分别被应用于松辽盆地、扬子地块南缘及塔里木盆地的油气成藏及改造方面的研究,使该测年手段在含油气盆地成藏研究中得到深化。值得注意的是,由于该测年体系的封闭温度较高,因此其更适用于深层次或较老地层内及埋深较大的基岩内油气成藏及改造研究。

2.4 裂变径迹测年体系

裂变径迹热年代学方法是 20 世纪 60 年代开始发展起来的一种新的同位素年代学方法,与传统的同位素年代学方法不同,其不通过直接测量矿物中放射性同位素含量来计算年龄,而是通过统计矿物中由放射性同位素所造成的损伤及径迹的条数来计算矿物年代。裂变径迹热年代学属于低温热年代学范畴,测定年龄的范围宽,解决地表 10km 以内的地质热事件(图 2),广泛应用于造山带的隆升与冷却

史、沉积盆地热演化历史恢复、剥蚀量计算、物源区分析,山体隆升剥露与盆地沉降沉积之间耦合关系、断裂活动时限及热液成矿时代和期次等方面^[18-19]。目前最常用的 2 种裂变径迹测年矿物为锆石和磷灰石(图 2),特别是磷灰石的封闭温度在 120~60℃之间,与油气的生油窗相吻合,而被广泛应用于含油气盆地分析中;锆石裂变径迹由于其退火区间温度较高,退火影响因素和退火模型研究较为薄弱,通常作为磷灰石裂变径迹热演化历史模拟的下限约束。随着退火特点研究的深入,锆石裂变径迹将会在盆地热演化历史定量研究中扮演重要的角色,特别是对于一些含天然气盆地,因为其潜在烃源岩的加热温度已经超过了磷灰石裂变径迹的保存区间^[20]。有国外学者^[21]已开始将锆石和磷灰石裂变径迹的方法相结合,来讨论盆地的沉降历史和热演化历史,而多种测年方法相结合解决叠合盆地的构造及油气成藏问题,是未来低温构造热年代学发展的一个主要方向。

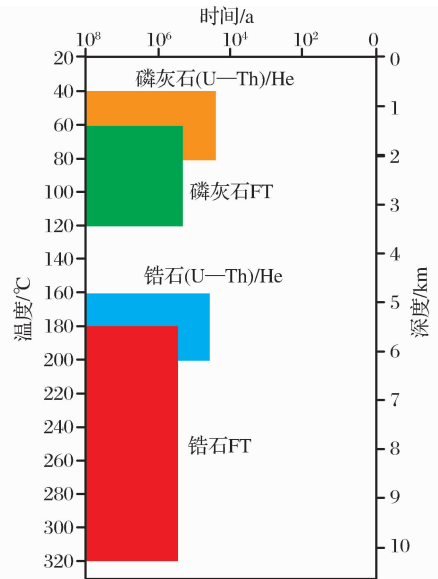


图 2 低温热年代学方法体系

Fig. 2 The method system of low temperature thermochronology

2.4.1 磷灰石裂变径迹在盆地热演化历史研究的应用

天然自发径迹的形成是一个不可逆的连续过程,矿物上的每一条裂变径迹记录了样品所经历的低于封闭温度的整个热演化历史的某一阶段的信息。裂变径迹分析的基础数据(径迹年龄、长度等)不仅反映样品达到最大古地温(封闭温度)时的时间,而且记录了样品所经历的温度历史。

20世纪80年代中期以前,利用裂变径迹年龄只能研究盆地简单热演化历史。Green^[22]、Gleadow等^[23]、Duddy等^[24]和 Naeser等^[25]做了大量详细的实验及验证工作后,认为裂变径迹年龄、封闭径迹长度及其分布状态可综合用于热演化历史研究,从而使裂变径迹对热演化历史研究较为全面系统^[26]。在沉积盆地中,浅部沉积岩中的磷灰石经历温度较低,在沉积埋深过程中没有遭受退火,这些单个磷灰石裂变径迹年龄代表的是母岩石的年龄,当埋深岩石遭受进一步升温时,进入磷灰石部分退火带内,温度高于120℃后,磷灰石发生完全退火,裂变径迹年龄降为0。在此期间,裂变径迹的封闭长度和分布状态都随温度发生相应的变化,据此可判断磷灰石受热情况,恢复盆地的热演化历史。自此,使盆地热演化历史的研究由定性到半定量再到进入定量研究阶段,同时结合其他手段可以对含油气盆地的烃源岩做热演化方面的评价^[27],以及划分油气成藏期次^[28],大大促进了油气勘探工作。

近年来,国内利用裂变径迹在准噶尔盆地^[29]、柴达木盆地^[30-31]、松辽盆地^[32-33]、南华北地区古生代地层^[34]、海拉尔盆地^[35]、鄂尔多斯盆地^[36]和塔里木盆地^[37]不同时代进行盆地热演化历史的恢复,进而探讨盆地内的油气生成、运移等演化过程及其构造控制因素等。尤其在一些专门的热演化历史恢复软件(如QTQt等)的研发,并配合以更多的裂变径迹参数,对地质体的热演化历史进行多重约束及反复模拟,最终可获取更加贴近实际地质条件的热演化历史^[38],使科学研究能更好地服务于生产。

2.4.2 地层抬升史及剥蚀量研究

埋藏和基底热流是引起沉积物经历热事件的2个主要因素,利用裂变径迹分析数据可以直接确定古地温梯度,进而利用古地温梯度的变化特征可区分热事件的可能原因。如果沉积地层的加热和冷却事件是由埋藏及随后的抬升、剥蚀作用所引起,则可以根据裂变径迹分析数据确定事件发生的时间。根据裂变径迹的年龄和平均长度及其分布状态,得到地层初始抬升时间和持续抬升时间,结合最高古地温及古地温梯度,就能够计算出地层剥蚀量及抬升速率^[19,39]。

近年来,利用磷灰石裂变径迹数据分析进行含油气盆地地层剥蚀量恢复的方法,已经在国内海、陆盆地均有涉及。纪友亮等^[40]利用磷灰石裂变径迹法、地震层速度法、镜质组反射率法、声波时差法以

及地质外推法等计算了渤海湾盆地中生代地层的剥蚀量并估算原始地层厚度,确定盆地类型,进而讨论了中生代盆地的演化特征,探讨不同时代的盆地类型及构造演化的石油地质意义。自此,国内学者开始利用磷灰石裂变径迹测年手段结合传统的盆地分析方法,对处于不同区域构造背景下不同类型的叠合盆地(如伊犁盆地、四川盆地和济阳拗陷等)进行升降温速率、地层剥蚀速率和剥蚀量等的研究,进而探讨不同状态下含油气盆地的构造演化特征及盆地内的油气生成、运移、聚集成藏和改造过程^[41-43]。

2.5 (U—Th)/He 测年体系

(U—Th)/He系统的优势是其封闭温度是已有同位素体系中最底的,能够记录地表2km以内地质体经历的时代与温度信息(图2)。目前,磷灰石、锆石等矿物的(U—Th)/He测年方法的技术日臻完善,应用日趋成熟而广泛,其与裂变径迹法、⁴⁰Ar/³⁹Ar法相结合,可以重建40~320℃浅—中地壳热演化历史,为研究地壳最表层的热演化提供了一个有效的手段^[44-45]。

(U—Th)/He测年方法已广泛应用于地质体定年、造山带热演化历史及地形地貌演化等方面的研究中,但运用于沉积盆地热演化历史恢复却是一种全新的应用,目前国内外将磷灰石、锆石(U—Th)/He数据与镜质体反射率、裂变径迹等方法结合起来进行沉积盆地详细而准确的热演化历史恢复的实例越来越多。

Green等^[46]把磷灰石(U—Th)/He定年技术运用到沉积盆地热演化历史恢复研究中,结果表明,该方法对确定构造形成后石油生成的时代、识别可能已导致聚集间断的构造幕以及更加有效的进行石油勘探均有很重要的意义。该方法在限制沉积岩区的热演化历史和折返历史、重建沉积盆地最后一次构造—热演化历史、模拟古老源岩演化状态方面具有良好的潜力^[47-53],并分别在我国四川盆地和塔里木盆地取得成功。

近年来,该测年手段也成功应用于海洋油气勘探中,吴景富等^[54]在南海北部深水区盆地利用磷灰石(U—Th)/He和镜质体反射率数据约束其热演化历史,并在此基础上对南海北部深水区的烃源岩热演化进行了研究,结果表明基于盆地构造演化模型的正演热演化历史可以作为烃源岩热演化计算的热演化历史基础,盆地内主力烃源岩热演化计算结果显示南海北部深水区存在4个生烃中心,即珠江

口盆地的白云凹陷和琼东南盆地的乐东凹陷、陵水凹陷和松南凹陷,生烃中心烃源岩有机质现今处于过成熟状态,以生气为主;受盆地基底热流显著升高的影响,32~23.3Ma时段为南海北部深水区烃源岩快速成熟阶段,琼东南盆地烃源岩有机质现今(2.48Ma后)还存在一期加速成熟过程,而珠江口盆地则不存在此期快速成熟过程。

含油气盆地研究中,最关键也是最难的2个问题是盆地形成演化与油气成烃成藏时间的匹配和盆地演化过程中沉降及抬升过程中,构造—热作用所引起的能量交换对油气形成的控制,综合为一个受各种条件约束的构造—热演化历史体系。构造—热年代学方法尤其是其中的中低温测年体系,可以约束地表以下7~8km以内40~320℃以内的地质体的构造事件,并可重建地质历史时期内地质体所经历的抬升、沉降等所引起的复杂的热演化过程,这恰恰可为具有复杂构造演化过程的叠合盆地提供油气勘探所需的构造—热信息。而且,随着叠合盆地内浅层油气大部分已被探明,深层勘探成为必须,同时伴随资源环境效应的相关问题,也使传统的热演化历史恢复手段如镜质体反射率等显得效率低而成本大。再者,随着能源需求的扩大及科学技术的发展,油气勘探领域也从陆地逐渐向海洋扩展,海洋特殊的构造沉积背景往往会使传统的盆地分析手段失效,此时对温度灵敏度较高的(U—Th)/He测年体系更加显示出其优越性。

3 结语

一个热年代学年龄到底代表什么地质意义?是岩体的变形年龄、冷却年龄、岩浆结晶年龄、峰期变质年龄还是退变质年龄?首先要从热年代学应用原理出发,明确地质意义,才能对年龄做出有价值的解释。世界上不存在能解决含油气盆地所有时代及其他问题的热年代学方法,每一种测年手段都有其优缺点及优势测年矿物,因此每种方法都各有所长,需根据实际情况确定测年方法,其中包括研究区地质历史的复杂性、测年岩石的估计时代、获取测年对象的难易程度、岩石的新鲜程度、测年方法的适应性和精度等。因此,深化中低温构造—热年代学测年方法在含油气盆地分析中的应用,探索热年代学参数的热演化机理,更好的与矿物学、岩石学、地球化学相结合,不断扩大其应用领域,使其更好地服务于盆地分析研究及生产勘探,是该学科与含油气盆地分

析交叉并不断发展的方向。

参考文献(References):

- [1] Dodson Marin H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Control Mineral and Petroleum*, 1973, 40(3): 259-274.
- [2] McDougall Ian, Harrison T Mark. *Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method*[M]. London: Oxford University Press, 1999: 12-69.
- [3] Harrison T Mark, Ducan Ian, McDougall Ian. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: temperature, pressure and compositional effects[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49(11): 2461-2468.
- [4] Hames W E, Bowring S A. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 124(1-4): 161-169.
- [5] Wang Yu. Some thoughts on tectono—thermochronology[J]. *Earth Science Frontiers: China University of Geoscience(Beijing)*, 2004, 11(4): 435-443. [王瑜. 构造—热年代学—发展与思考[J]. *地质前沿: 中国地质大学(北京)*, 2004, 11(4): 435-443.]
- [6] Zhou Hongying, Li Huimin. U-Pb isotope dating technique and potential prospects for applying in geology[J]. *Geological Survey and Research*, 2011, 34(1): 63-70. [周红英, 李惠民. U-Pb 同位素定年技术及其地质应用潜力[J]. *地质调查与研究*, 2011, 34(1): 63-70.]
- [7] Xie Xiangyang, Heller Paul L. U-Pb detrital zircon geochronology and its implications: The early Late Triassic Yanchang Formation, south Ordos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 64: 86-98.
- [8] Xie Shiwen, Wu Yuanbao, Zhang Zeming, *et al.* U-Pb ages and trace elements of detrital zircons from Early Cretaceous sedimentary rocks in the Jialai Basin, north margin of the Sulu UHP terrane: Provenances and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2012, 154: 346-360.
- [9] Li Zhong, Tang Wangxin, Peng Shoutao, *et al.* Detrital zircon U-Pb geochronological and depositional records of Mesozoic profile in the southern Junggar Basin, northwest China, and their responses to basin-range tectonic evolution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 47(4): 1016-1040. [李忠, 汤望新, 彭守涛, 等. 准噶尔盆地南缘中—新生代碎屑锆石的 U-Pb 年代学和沉积学记录及其反映的盆山构造演化[J]. *地质科学*, 2012, 47(4): 1016-1040.]
- [10] Zhang Jin, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* Detrital zircon U-Pb ages of Middle Ordovician flysch sandstones in the western ordos margin: New constraints on their provenances, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 1030-1047.
- [11] Chen Fukun, Zhu Xiyang, Wang Wei, *et al.* Single grain detrital muscovite Rb-Sr isotopic composition as an indicator of provenance for the Carboniferous sedimentary rocks in northern

- Dabie, China[J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43(4): 257-273.
- [12] Blichert-Toft Janne, Puchtel Igor S. Depleted mantle sources through time; evidence from Lu-Hf and Sm-Nd isotope systematics of Archean komatiites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(3/4): 598-606.
- [13] Hogg A J C, Hamilton P J, Macintyre R M. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir; K-Ar dating in the Alwyn area(UK North-Sea)[J]. *Marine Petrol Geology*, 1993, 10(3): 279-294.
- [14] Wang Feiyu, He Ping, Zhang Shuichang, *et al.* The K-Ar isotope dating of authigenic illites and timing of hydrocarbon fluid emplacement in sandstone reservoir[J]. *Geological Review*, 1997, 43(5): 540-546. [王飞宇, 何萍, 张水昌, 等. 利用自生伊利石 K-Ar 定年分析烃类进入储集层的时间[J]. *地质论评*, 1997, 43(5): 540-546.]
- [15] Wu Heyong, Yun Jianbing, Feng Zihui, *et al.* CO₂ gas emplacement age in the Songliao Basin: Insight from volcanic quartz ⁴⁰Ar/³⁹Ar stepwise crushing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(17): 1795-1799.
- [16] Liu Zhaoqian, Mei Lianfu, Qiu Huaning, *et al.* ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology constraints on hydrocarbon accumulation and destruction periods in the Bankeng paleo-reservoir in the southern margin of the middle Yangtze block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 2803-2812.
- [17] Zhang Youyu, Luo Xiuquan. K-Ar and Ar-Ar dating of authigenic illite and hydrocarbon accumulation history of Carboniferous and Silurian sandstone reservoirs in well Ha 6, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 749-757. [张有瑜, 罗修泉. 塔里木盆地哈 6 井石炭系、志留系砂岩自生伊利石 K-Ar、Ar-Ar 测年与成藏年代[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 749-757.]
- [18] Zhou Hai, Lei Chuan. The study progress in apatite fission track(AFT)[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(1): 167-177. [周海, 雷川. 磷灰石裂变径迹(AFT)研究进展[J]. *西北地质*, 2013, 46(1): 167-177.]
- [19] Qiao Jianxin, Zhao Hongge, Wang Hairan. Fission-track thermochronology: Method, application and latest progress[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(3): 308-312. [乔建新, 赵红格, 王海然. 裂变径迹热年代学方法、应用及其研究展望[J]. *地质与资源*, 2012, 21(3): 308-312.]
- [20] Jiao Ruohong, Xu Changhai, Zhang Xiangtao *et al.* Zircon fission-track thermochronology (ZFT): Advances and applications[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 171-182. [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.]
- [21] Emmel B, Kumar R, Jacobs J, *et al.* The low-temperature thermochronological record of sedimentary rocks from the central Rovuma Basin (N Mozambique)-Constraints on provenance and thermal history[J]. *Gondwana Research*, 2013, 25(3): 1216-1229.
- [22] Green Paul F. On the thermo-tectonic evolution of northern England; Evidence from fission track analysis[J]. *Geological Magazine*, 1986, 123: 493-506.
- [23] Gleadow Andrew J W, Duddy Ian R, Green Paul F, *et al.* Fission track lengths in the apatite annealing zone and the interpretation of mixed ages[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 78: 245-254.
- [24] Duddy I R, Green P F, Laslett G M. Thermal annealing of fission tracks in apatite-3 variable temperature behavior[J]. *Chemical Geology*, 1988, 73: 25-83.
- [25] Naeser Nancy D, Naeser Charles W, McCulloh Thane H. Thermal history of rocks in Southern San Joaquin Valley, California; Evidence from fission-track analysis[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(1): 13-29.
- [26] Dan Xuanlong, Liu Zhaojun, Teng Tianbo. Application of fission track method in basin analysis[J]. *Global Geology*, 1995, 14(2): 47-51. [单玄龙, 刘招君, 滕佃波. 裂变径迹方法在盆地分析中的应用[J]. *世界地质*, 1995, 14(2): 47-51.]
- [27] Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, *et al.* Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 157-164. [郑德文, 张培震, 万景林, 等. 六盘山盆地热演化历史的裂变径迹证据[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 157-164.]
- [28] Ren Zhanli, Liu Li, Cui Junping, *et al.* Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(4): 502-506. [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.]
- [29] Qiu Nansheng. Method 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. [邱楠生. 沉积盆地热演化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.]
- [30] Wang Shiming, Ma Changqian, She Zhenbing *et al.* Apatite fission track analyses of cenozoic sedimentary source and basin thermal history in west Qaidam Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(5): 29-36. [王世明, 马昌前, 余振兵, 等. 柴西新生代沉积源区及盆地热演化历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(5): 29-36.]
- [31] Liu Xingwang, Zheng Jianjing, Yang Xin *et al.* Sedimentology revelation to Meso-Cenozoic tectonic movement process of Altun Strike-slip fault[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 119-128. [刘兴旺, 郑建京, 杨鑫, 等. 中、新生代阿尔金山走滑断裂系构造运动的沉积学揭示[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 119-128.]
- [32] Jiang Jiyu, Jiang Yanchun, Wang Jiangfeng, *et al.* Application of fission track method in the Binbei region[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2009, 33(3): 43-48. [姜继玉, 姜艳春, 王剑峰, 等. 磷灰石裂变径迹在滨北地区热演化历史研究中的应用[J]. *大庆石油学院学报*, 2009, 33(3): 43-48.]

- [33] Xiang Caifu, Feng Zhiqiang, Pang Xiongqi, *et al.* Late stage thermal history of the Songliao Basin and its tectonic implications; Evidence from apatite fission track (AFT) analyses [J]. *Science China; Series D*, 2007, 37(8): 1024-1031. [向才富, 冯志强, 庞雄奇, 等. 松辽盆地晚期热演化历史及其构造意义: 磷灰石裂变径迹 (AFT) 证据 [J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(8): 1024-1031.]
- [34] Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Liu Yongtao. Reconstruction of thermal evolutionary history of the Upper Paleozoic in the southern north China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(1): 64-74. [赵俊峰, 刘池洋, 刘永涛, 等. 南华北地区上古生界热演化史恢复 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 31(1): 64-74.]
- [35] Cui Junping, Ren Zhanli, Chen Yulin. Study on the relations between geothermal history and oil-gas generation in Beier Depression of Hailaer Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 388-394. [崔军平, 任战利, 陈玉林. 海拉尔盆地贝尔凹陷热演化史与油气关系研究 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 388-394.]
- [36] Ding Chao, Chen Gang, Li Zhenhua, *et al.* Apatite fission track analysis of tectono-thermal history in the northeast of Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2011, 25(3): 581-588, 616. [丁超, 陈刚, 李振华, 等. 鄂尔多斯盆地东北部构造热演化史的磷灰石裂变径迹分析 [J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 581-588, 616.]
- [37] Xiang C, Pang X, Daniüik M. Post-Triassic thermal history of the Tazhong Uplift Zone in the Tarim Basin, northwest China; Evidence from apatite fission-track thermochronology [J]. *Geoscience Frontiers*, 2013, 4(6): 743-754.
- [38] Gallagher K. Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 2012, 117(B02408): 1-16.
- [39] Zhou Zuyi, Mao Fengming, Liao Zongting, *et al.* Estimation of the multi-component fission track age data and its application in the provenance study of sedimentary basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 456-458, 473. [周祖翼, 毛凤鸣, 廖宗廷, 等. 裂变径迹年龄多成分分离技术及其在沉积盆地物源分析中的应用 [J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 456-458, 473.]
- [40] Ji Youliang, Hu Guangming, Huan Jianjun, *et al.* Eroded strata thickness of Mesozoic and evolution of Mesozoic and Cenozoic basins in the Bohai Bay Basin area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 351-358. [纪友亮, 胡光明, 黄建军, 等. 渤海湾地区中生代地层剥蚀量及中、新生代构造演化研究 [J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 351-358.]
- [41] Han Xiaozhong, Li Shengxiang, Cai Huangqi, *et al.* Uplift-denudation in the south margin and its sedimentary response in the southern Yili Basin; Analysis apatite fission track method [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(10): 2447-2455. [韩效忠, 李胜祥, 蔡煌琦, 等. 伊犁盆地南缘隆升剥蚀及其盆地南部的沉积响应——利用磷灰石裂变径迹分析 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2447-2455.]
- [42] Deng Bin, Liu Shugen, Liu Shun, *et al.* Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2009, 36(6): 675-686. [邓宾, 刘树根, 刘顺, 等. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 675-686.]
- [43] Liu Shilin, Lin Ge, Zhenh Herong, *et al.* Stratigraphic erosion recovery of the 2nd episode of Himalayan movement in Jiyang Depression [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(4): 358-360. [刘士林, 林柯, 郑和荣, 等. 济阳拗陷喜马拉雅运动 II 幕地层剥蚀厚度恢复 [J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(4): 358-360.]
- [44] Li Zongxing, Zhao Ping, Sun Zhanxue. The application of AFT and (U-Th)/He analysis technique in petroleum exploration [J]. *Progress in Geophys*, 2012, 27(4): 1648-1654. [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.]
- [45] Jiang Yi, Chang Hong. Apatite (U-TH)/He dating; A review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2012, 31(5): 757-766. [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.]
- [46] Green P F, Duddy I R, Crowhurst P V. Integrated (U-Th)/He Dating, AFTA and Vitrinite Reflectance Results in Seven Orway Basin Wells Confirm Regional Late Miocene Exhumation and Validate Helium Diffusion Systematics [R]. AAPG Annual Convention, 2003, Salt Lake City, Utah.
- [47] Peppé Daniel J, Reiners Peter W. Conodont (U-Th)/He thermochronology: initial results, potential, and problems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(324): 569-580.
- [48] Qin Jianzhong, Wang Jie, Qiu Nansheng. Evidence of thermal evolution history of Northeast Sichuan Basin-(U-Th)/He low temperature thermochronometry of apatite and zircon [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19(6): 591-601.
- [49] Qin Jianzhong, Wang Jie, Qiu Nansheng *et al.* New Paleo-geothermometers for the inversion of dynamic thermal evolution history of marine sequences in South China-(U-Th)/He age and closure temperature of apatite and zircon [J]. *Oil & Gas geology*, 2010, 31(3): 277-287. [秦建中, 王杰, 邱楠生, 等. 反演南方海相层系热演化历史动态演化的新温标—磷灰石、锆石 (U-Th)/He 年龄和封闭温度 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 277-287.]
- [50] Qiu Nansheng, Jiang Guang, Mei Qinghua, *et al.* The Paleozoic tectonothermal evolution of the Bachu Uplift of the Tarim Basin, NW China; Constraints from (U-Th)/He ages, apatite fission track and vitrinite reflectance data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 551-563.
- [51] Qiu Nansheng, Wang Jiyang, Mei Qinghua, *et al.* Constraints of (U-Th)/He ages on early Paleozoic tectonothermal evolution of the Tarim Basin [J]. *Science China Earth Sciences*,

2010,53:964-976.

- [52] Chang Jian, Qiu Nansheng. Closure temperature of (U-Th)/He system in apatite obtained from natural drillhole samples in the Tarim Basin and its geological significance[J]. China Science Bulletin, 2012, 57, 234-243.
- [53] Liu Wenhui, Wang Jie, Tao Cheng, *et al.* The geochronology of petroleum accumulation of China marine sequence[J]. Nat-

ural Gas Geoscience, 2013, 24(2):199-209. [刘文汇, 王杰, 陶成, 等. 中国海相层系油气成藏年代学[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2):199-209.]

- [54] Wu Jingfu, Yang Shuchun, Zhang Gongcheng *et al.* Geothermal history and thermal evolution of the source rocks in the deep-water area of the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(1):170-180.

Application Progress of Structure-Thermochronology in Petroliferous Basin Analysis

ZHENG Jian-jing¹, GAO Zhan-dong^{1,2}, WANG Ya-dong¹, ZHENG You-wei^{1,2},
LIU Xing-wang¹, GUAN Bao-wen^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province / Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: With the development and application of tectono-thermochronology, particularly the middle to low temperature dating system, hydrocarbon basin analysis is full of vitality. Because process of the formation and evolution of hydrocarbon basins, especially superimposed basins, accompanied oil and gas accumulation, transformation and the energy exchange, it is important to discuss and study the formation, evolution, thermal history, deposition, subsidence and restoration denudation of petroliferous basins according to the tectono-thermal process which was constrained by tectono-thermochronology. Recently, this study gradually shifts from the qualitative description to the quantitative or semi-quantitative calculation, which provides a broader platform for conduction and development of oil and gas basins analysis. This paper summarizes the thermal chronology dating systems from high to low temperature of tectono-thermochronology, and proposes their advantage applications depending on the geological significance of the mineral thermal ages and research progress of each measuring system in superimposed basins. We focused on the development process and current important application of fission track and (U-Th)/He dating systems in hydrocarbon basins whose annealing zone are similar to the oil window, and preliminarily forecast their possible development trends in the future. A variety of disciplines such as tectono-thermochronology, geochemistry, petrology and mineralogy intersects and integrates which can better serve the scientific research and production.

Key words: Hydrocarbon basin; Tectono-thermochronology; Dating system; Tectonic movement; Thermal evolution history