

文章编号:1001-6112(2012)01-0084-05

同位素测年在油气成藏期研究中的应用

李婧婧^{1,2}, 王毅¹, 李慧莉¹, 张卫彪¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油大学 博士后流动站, 北京 102249)

摘要:同位素测年法使油气成藏期研究从定性分析走向定量分析。该文简述了同位素测年的原理,介绍了近年来取得较快发展的 K-Ar 法、⁴⁰Ar-³⁹Ar 法及 Re-Os 法,并着重对这 3 种方法在油气成藏期研究中的应用原理、测试对象、优缺点及在实际中的应用进行了阐述,为同位素测年在石油地质研究中的应用提供了有效的参考。

关键词:K-Ar 法; ⁴⁰Ar-³⁹Ar 法; Re-Os 法; 同位素测年; 油气成藏期

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Application of isotopic dating in geochronology of hydrocarbon migration and accumulation

Li Jingjing^{1,2}, Wang Yi¹, Li Huili¹, Zhang Weibiao¹

(1. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Post-Doctoral Mobile Station, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Isotopic dating makes the study of hydrocarbon reservoir forming stages change from qualitative to quantitative analysis. The mechanism of isotopic dating and three methods which developed rapidly in recent years have been introduced, including K-Ar, ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Re-Os. The application principle, test object, advantage and disadvantage as well as practical application of the methods have been discussed, providing effective reference for the application of isotopic dating in geochronology of hydrocarbon migration and accumulation.

Key words: K-Ar method; ⁴⁰Ar-³⁹Ar method; Re-Os method; isotopic dating; hydrocarbon reservoir forming stage

油气成藏期是指烃类流体在圈闭中聚集成藏的时限,是油气成藏研究的一个难点。确定油气的成藏时间,不仅具有深远的理论意义,而且对指导油气勘探具有重要的实践意义,是研究油气藏形成与分布规律首先要解决的问题^[1-4]。目前已经建立了圈闭形成时间法、烃源岩演化史法、油气藏饱和和压力法、油水界面追溯法、油藏地球化学法、有机岩石学法、流体包裹体均一温度—埋藏史投影法、同位素测年法、储层磁性矿物古地磁学分析法等多种研究方法^[5-8],其中同位素测年法因能提供成藏时间的绝对年龄,使该项研究从定性或半定量研究走上了定量研究,而表现出良好的发展前景。

同位素测年在金属矿床中的应用已较成熟,但用于油气勘探的时间较晚,于 20 世纪 80 年代中后期才逐步发展起来。目前国际和国内学者已探索了 K-Ar、Re-Os、U-Th-Pb、Sm-Nd 等放射性同位

素体系在油气成藏期研究中的应用,取得了较好的应用效果^[9-24]。近年来 K-Ar、Re-Os 同位素体系用于油气成藏期研究的发展较快,并取得了显著进步。本文着重叙述了同位素测年的基本原理及近年来国内外学者在 K-Ar、Re-Os 同位素体系用于油气成藏期研究方面的进展情况。

1 同位素测年原理

同位素测年法是一种利用自然界放射性同位素的衰变规律测定各种地质体形成时代的计时方法。自然界中同一元素不同质量数的核素互为同位素,其中能自发的放射出射线,衰变成另一种核素的同位素称为放射性同位素。在衰变过程中,放射性同位素(母体)的数量逐渐减少,新产生的同位素(子体)的数量逐渐增加,变化规律符合放射性衰变定律,即:放射性同位素的原子数目随时间作负指数函数衰减,用公式表达为:

收稿日期:2011-05-17;修订日期:2011-12-30。

作者简介:李婧婧(1980—),女,博士,从事油气地球化学研究。E-mail: jingjing2004_2007@126.com。

基金项目:国家重大专项(2011ZX05005-004)。

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中: N_t 为 t 时刻放射性母体的原子数; N_0 为放射性母体的初始原子数; λ 为衰变常数, 代表单位时间内原子的衰变速率; t 为衰变时间。

自然条件下, 核衰变过程是不可逆的, 衰变速度不受温度、压力、电磁场等外界条件的影响, 也不受元素所处状态的影响, 只和时间有关^[25]。因此, 当某种放射性元素进入矿物、岩石等自然封闭体系后, 在该体系中放射性母体或子体同位素持续衰变和积累, 因而通过测定矿物(或岩石)中放射性母体和子体的含量, 即可根据放射性衰变定律建立的公式计算出矿物(或岩石)的地质年龄。

2 K-Ar 同位素体系

钾(K)是元素周期表中第19号元素, 其同位素⁴⁰K是放射性同位素。⁴⁰K存在2个衰变分支, 分别产生稳定同位素子体⁴⁰Ar和⁴⁰Ca。约89%的⁴⁰K衰变成⁴⁰Ca, 但在多数岩石中被普通(非放射成因)⁴⁰Ca所掩盖, 因此该衰变体系作为测年工具的应用受到限制。虽仅有11%的⁴⁰K衰变生成⁴⁰Ar, 但在氩气中该同位素以放射成因组分为主, 因而该衰变可用于地质计时, 且⁴⁰K→⁴⁰Ar衰变是K-Ar同位素体系用于定年的基础^[26]。

K-Ar同位素体系可用于油气成藏期的研究基于以下地质事实: 在含钾的水介质条件下, 砂岩储集层中发生硅酸盐成岩作用, 生成的自生粘土矿物充填在岩石颗粒中。当油气充注后, 富含钾的地层水被代替, 硅酸盐成岩作用终止^[10]。伊利石——一种富钾的硅酸盐云母类粘土矿物, 常常是在油气注入之前形成的最晚的胶结物或形成最晚的胶结物之一, 因此可通过测定储集层中自生伊利石的年龄限定油气充注时间^[10]。

在伊利石停止生长以后, K-Ar同位素体系被封闭在矿物中, 增加的放射性成因的⁴⁰Ar的量即为衰变的⁴⁰K的量, 结合公式(1), 可得:

$${}^{40}\text{Ar}^* = \frac{\lambda_{\text{EC}}}{\lambda_{\text{total}}} {}^{40}\text{K} (e^{\lambda_{\text{total}} t} - 1) \quad (2)$$

式中: ${}^{40}\text{Ar}^*$ 表示增加的放射性成因的⁴⁰Ar的量; λ_{EC} 表示衰变成⁴⁰Ar的衰变常数; λ_{total} 表示⁴⁰K的总的衰变常数; $\frac{\lambda_{\text{EC}}}{\lambda_{\text{total}}} {}^{40}\text{K}$ 表示衰变为⁴⁰Ar的⁴⁰K的量; t 为形成年龄。

公式(2)中, 通过确定⁴⁰Ar和⁴⁰K的量即能得到伊利石停止生长的时间。根据实验室在确定⁴⁰K

时测量参数的差异, K-Ar同位素体系测年技术可分为K-Ar法和⁴⁰Ar-³⁹Ar法^[26]。2种方法均不是直接测定⁴⁰K, 前者测定样品中的K元素的总量, 再根据K的同位素组成来计算⁴⁰K含量; 后者通过中子活化将³⁹K转化为³⁹Ar, 通过测定³⁹Ar含量来确定³⁹K的量, 进而计算出⁴⁰K的量。

⁴⁰Ar-³⁹Ar法是在K-Ar法的基础上发展起来的, 又称为现代K-Ar法。相对于K-Ar法, ⁴⁰Ar-³⁹Ar法具有测试精度高、测试对象唯一、样品用量少、碎屑矿物干扰少等优点, 但测试过程中有机气体的干扰和核反冲作用的影响限制了该方法的应用。有机气体经过质谱计离子源电离形成的有机碎片离子, 将涵盖所有Ar同位素(质荷比 $m/e = 36 \sim 40$) 如果不能有效地除去有机杂质, 将会得到错误的年龄数据, 可能会导致“零”年龄现象^[17, 27]。由我国学者邱华宁等研制出的有机杂质气体纯化装置能有效的解决有机气体在检测中的干扰, 为获得可靠的同位素年龄数据奠定了实验技术基础^[17]。但核照射时中子活化产物³⁹Ar将因核反冲作用而产生易位或部分丢失, 导致表观年龄变老的问题却还未得到有效的解决。虽有人提出用“显微包裹”技术克服³⁹Ar的反冲丢失^[28], 但部分学者对此持不同态度。⁴⁰Ar-³⁹Ar法目前虽还未十分完善, 但表现出良好的发展前景, 尤其在20世纪末出现的激光微区显微探针⁴⁰Ar-³⁹Ar测年技术, 将定年技术推向微区微量高精度高分辨率定年的新里程^[29], 有望实现对叠合盆地中多期次油气成藏年代的准确厘定。综合比较这2种测年方法可以发现, ⁴⁰Ar-³⁹Ar法目前还处于实验技术的探索、完善阶段, 将是未来油气成藏期研究的有力工具; 而K-Ar法虽在数据精度方面不如⁴⁰Ar-³⁹Ar法, 但能够满足生产、科研需求, 且测试技术相对较成熟, 是目前研究碎屑岩油气藏成藏时间的有效手段。

K-Ar同位素体系用于油气成藏期研究的对象为储层自生伊利石, 在进行K-Ar法测年时, 分析对象中混入陆源碎屑伊利石将大大影响测试结果, 因此自生伊利石的分离提纯对测试结果的准确性有重要影响。研究证明砂岩岩性及伊利石/蒙皂石间层矿物的间层比对自生伊利石纯度有一定程度影响^[30]。相对于粉砂岩和泥质粉砂岩, 中砂岩和细砂岩的分选相对较好、孔隙发育且连通性较好、渗透率较高, 有利于自生伊利石的发育, 分离出的自生伊利石纯度较高。对伊利石/蒙皂石(I/S)层间比小的岩石, I/S间层可能是由其陆源母体矿物——蒙皂石经较为彻底的成岩改造而成, 或由孔

隙流体直接沉淀生成,对其分离得到的自生伊利石纯度较 I/S 层间比大的样品更高。因此,中砂岩、细砂岩及 I/S 层间比小的岩石其测试结果能更精确地反映自生伊利石成岩作用停止的时间。

储层自生伊利石 K-Ar 法同位素测年实际上是 K-Ar 法同位素年龄测定技术在确定自生伊利石年龄上的应用。从物理测量的角度看,K-Ar 定年范围没有年龄上限的限制,下限(最低年龄)主要涉及在大量大气 Ar 背景下微量放射成因 Ar 的检测问题,随着放射成因 Ar 占总⁴⁰Ar 比例的下降,放射成因 Ar 的测量误差将呈指数增长。在极为有利的情况下,K-Ar 法可以测定的地质年龄为几千年^[26]。

20 世纪 80 年代中后期,Mingchou Lee^[9]等最早将自生伊利石定年方法用于分析北海南部赤底统砂岩气藏形成时间。国内王飞宇^[11]和张有瑜^[12-13]等率先在我国开展了油气田自生伊利石 K-Ar 法定年研究,研究表明,塔里木盆地志留系古油气藏主要形成于加里东晚期—海西晚期,东河砂岩油气藏主要形成于海西晚期,库车坳陷、喀什凹陷中生界油气藏成藏时间主要集中在喜山期,测试结果不仅与油气系统等常规油气成藏史研究成果基本一致,而且还进一步反映了油藏形成时间上的差异。姜振学等^[31]对吐哈盆地葡北地区侏罗系油藏、辛仁臣等^[32]对松辽盆地喇嘛甸白垩系油藏、赵靖舟等^[33]对塔里木盆地哈得 4 石炭系油田的成藏年代也进行了 K-Ar 法测年,均取得了良好效果。近年来,王龙樟^[16]、施和生^[18]、云建兵^[34]、吴河勇^[35]等对⁴⁰Ar-³⁹Ar 法在油气成藏期研究中的应用展开了积极的探索,通过阶段加热获得的年龄谱,可有效的剔除碎屑伊利石对测年结果的影响。实验结果表明,鄂尔多斯盆地北部苏里格气田二叠系气藏的成藏时间晚于 169 ~ 189 Ma^[16];珠江口盆地珠海组自生伊利石年龄为(12.1 ± 2.2) Ma 代表了油气成藏年龄最大值^[34];松辽盆地深层 CO₂ 气藏充注发生于白垩纪晚期^[35]。

3 Re-Os 同位素体系

Re 元素位于元素周期表中第 6 周期的第 7 副族,有 2 种同位素:¹⁸⁵Re 和¹⁸⁷Re;Os 元素位于元素周期表中第 6 周期的第 8 副族,有 7 种同位素:¹⁸⁴Os, ¹⁸⁶Os, ¹⁸⁷Os, ¹⁸⁸Os, ¹⁸⁹Os, ¹⁹⁰Os, ¹⁹²O, 其中¹⁸⁷Re 是放射性同位素,经过衰变形成¹⁸⁷Os:¹⁸⁷Re → ¹⁸⁷Os。在 *t* 时刻,衰变的母体(¹⁸⁷Re)和子体(¹⁸⁷Os)之间存在以下关系:

$$({}^{187}\text{Os})_t - ({}^{187}\text{Os})_o = ({}^{187}\text{Re})_o - ({}^{187}\text{Re})_t \quad (3)$$

将公式(3)用 Os 非放射性同位素¹⁸⁸Os 标准化,并结合公式(1)可得:

$$\left(\frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{188}\text{Os}}\right)_t = \left(\frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{188}\text{Os}}\right)_o + \left(\frac{{}^{187}\text{Re}}{{}^{188}\text{Os}}\right)_t (e^{\lambda t} - 1) \quad (4)$$

式中: λ 为¹⁸⁷Os 的衰变常数,其他参数意义同前。

对于一组来自同一母源、同时形成且形成时母子体比值不同的样品来说, (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_o 具有相同的值, (e^{λt}-1) 为一常数,因此公式(4)变成 (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_t 随 (¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os)_t 变化的直线方程,该方程称为等时线方程^[36]。根据实验室测得 (¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_t、(¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os)_t 数据得到的直线斜率——(e^{λt}-1) 可计算出时间,同时直线在 *y* 轴的截距为 Os 同位素的初始比值。因此 Re-Os 同位素体系既可用于地质定年亦可用于同位素示踪。

已有研究表明,Re、Os 元素虽然在自然界中的丰度很低,但在黑色页岩中相对富集^[37]。黑色页岩中的 Re、Os 元素主要来自海水,在氧化条件下以高价态的 ReO₄- 和 HO₂O₅- 的形式存在于海水中,其溶解度较大,十分容易迁移,在还原条件下被还原成活动性低的价态形式,被有机物吸附^[38-40]。实验证明,在黑色页岩中 Re、Os 元素的含量有随有机质含量增加而增高的趋势^[41],并且在原油中 Re、Os 含量主要与沥青质的含量正相关,大于 83% 的 Re、Os 赋存在沥青质中^[42],因此可以推断 Re、Os 元素以络合物的形式赋存于有机质中。

采用 Re、Os 等时线法测年要求样品具有以下 3 方面特征:1) 同源性,即测试对象具有均一的同位素初始值;2) 分异性,即成矿时 Re、Os 元素发生分异,同源的不同样品中具有不同的母子体比值;3) 封闭性,即矿物形成后对同位素体系一直保持封闭状态,地质过程中没有发生同位素的重置,否则所测时间为重置后的时间^[43]。前 2 个条件受成矿性质决定的,往往在得到数据后才能发现测试对象能否满足条件,除根据经验提前判断外,没有更好的办法预测;第 3 个条件发生在地质历史过程中,明确矿物对同位素体系的封闭机理对正确解释测试结果有重要的意义。

目前有关 Re-Os 同位素体系在有机质中的封闭机理尚不十分明确,仅进行了初步探索。1) Jaffe^[44]等的研究表明风化后的黑色页岩 Re 丢失 99%, Os 丢失 39%; Hannan^[45]等在对挪威多个地区的黑色页岩研究中发现,受河流等氧化性流体影响的样品其 Re、Os 同位素等时线比较散乱,而

未受影响的样品却能获得非常好的等时线。2) Creaser 等^[46]测定了加拿大阿尔伯塔盆地不成熟到过成熟黑色页岩的形成年龄,均得到较好的等时线。3) Selby 和 Creaser^[47]通过对加拿大西部沉积盆地中的油砂研究认为,得到的年龄反映了油气生成、迁移的年龄。综合分析以上研究成果,可以初步认为:Re、Os 元素以络合物的形式封闭于干酪根中,烃源岩的热演化不会破坏系统的封闭性,但在油气运移过程中,Re-Os 同位素体系发生重置,所记录时间为烃类停止运移后的时间。因此对烃源岩测年得到的是烃源岩的沉积年龄,对储层中油气测年得到的是油气成藏的时间,对沥青测年得到的是油气藏被破坏的时间。

20 世纪 80 年代,Ravizza 等^[48]就发现富有机质沉积岩中富集 Re、Os 元素,并探索性地将 Re-Os 同位素体系用于沉积岩的年代学研究,用该方法测定黑色岩系得到的年龄结果与其他的测试方法得到的数据有较好的可比性。近 10 年来,Re-Os 法应用于油气成藏期的研究已经成为国际上的前沿,并取得了重要的成果。Selby 和 Creaser^[47]通过对加拿大阿尔伯塔盆地的油砂进行分析,获得了较好的 Re-Os 等时线,厘定油气的迁移年龄为 $(112 \pm 5.3) \text{ Ma}$,挑战了前人认为的晚白垩世成藏的观点。同时,他们^[49]对加拿大 MVT 型铅锌矿床的沥青也进行 Re-Os 同位素分析,也获得了较好的 Re-Os 等时线年龄,得到的年龄数据与闪锌矿 Rb-Sr 定年以及古地磁定年所得到的数据在误差范围内基本一致。陈玲等^[50]用 Re-Os 法研究了我国南方麻江古油藏中的沥青物质的形成时代,获得结果与区域构造以及流体活动事件相符合,再次证实了有机质中 Re-Os 同位素体系具有计时功能。

相对于其他同位素测年方法,Re-Os 法的最大优势在于直接对参与油气成藏的地质体(烃源岩、沥青、原油)进行研究,得到油气成藏期的直接证据,且不受油气储层岩性的影响。虽然前人也有用 U-Pb 同位素体系判断沥青的形成时间^[22],但由于背景铅含量高导致其同位素比值不能确定,且²³⁸U 是较易迁移的核素,容易流失,难以形成稳定的封闭体系,而使得 U-Pb 体系在富有机质地质样品定年的应用受到限制^[47]。虽然目前在应用 Re-Os 同位素体系研究油气成藏期时也遇到了一些难以作出合理解释的结果^[51],这可能与目前对极其特殊地质情况下有机质对 Re-Os 同位素体系的封闭机理尚未得到充分的研究有关。

4 结束语

相对于其他油气成藏期研究方法,同位素测年法因能够提供直接、精确的数据而备受关注。但在复杂的地质条件中,沉积岩及有机质对同位素体系的封闭机理远不如金属矿床明确。因此对于一名油气地质工作者,正确理解同位素体系的测年原理,全面掌握测试结果的产生过程,对合理解释实验数据有重要意义。本文仅对 K-Ar 法、⁴⁰Ar-³⁹Ar 法及 Re-Os 法的原理及发展、应用情况作了介绍,以期抛砖引玉,推动同位素测年在石油地质研究中的应用。

参考文献:

- [1] Tissot B, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [2] 张厚福,方朝亮,张枝焕,等. 石油地质学 [M]. 北京:石油工业出版社,1999.
- [3] 金之钧,张一伟,王捷,等. 油气成藏机理与分布规律 [M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- [4] 周小进. 南华北上古生界油气成藏关键条件分析 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 420-427.
- [5] 马安来,张水昌,张大江,等. 油气成藏期研究新进展 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 271-276.
- [6] 高岗,黄志龙. 油气成藏期研究进展 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 661-665.
- [7] 李建华,范柏江,耿辉. 油气成藏期研究方法和进展 [J]. 科技导报, 2010, 28(22): 106-111.
- [8] 刘文汇,秦建中,腾格尔,等. 海相层系成烃成藏地球化学技术进展 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 553-559.
- [9] Lee Mingchou, Aronson J L, Savin S M. K/Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendes Sandstone, Netherlands [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(9): 1381-1385.
- [10] Hamilton P J, Kelley S, Fallick A E. K-Ar dating of illite in hydrocarbon reservoirs [J]. Clay Minerals, 1989, 24: 215-231.
- [11] 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.
- [12] 张有瑜, Horst Zwingmann, Andrew Todd, 等. 塔里木盆地典型砂岩油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素测年研究与成藏年代探讨 [J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 637-648.
- [13] 张有瑜, 罗修泉. 英买力沥青砂岩自生伊利石 K-Ar 测年与成藏年代 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 203-210.
- [14] Dong H L, Hall C M, Peacor D R, et al. Thermal ⁴⁰Ar/³⁹Ar separation of diagenetic from detrital illitic clays in Gulf Coast shales [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 175(3-4): 309-325.
- [15] Qiu H N, Wijbrans J R. The Paleozoic metamorphic history of the Central Orogenic Belt of China from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geo-chronology of eclogite garnet fluid inclusions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 268(3-4): 501-514.
- [16] 王龙樟,戴憧漠,彭平安. 自生伊利石⁴⁰Ar/³⁹Ar 法定年技术

- 及气藏成藏期的确定[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1): 78-82.
- [17] 邱华宁, 吴河勇, 冯子辉, 等. 油气成藏⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年难题与可行性分析[J]. 地球化学, 2009, 38(4): 405-411.
- [18] 施和生, 朱俊章, 邱华宁, 等. 利用自生伊利石激光加热⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年技术探讨惠州凹陷新近系油气充注时间[J]. 地质前缘, 2009, 16(1): 290-295.
- [19] Creaser R A, Sannigrahi P, Chacko T, et al. Further evaluation of the Re - Os geochronometer in organic - rich sedimentary rocks: A test of hydrocarbon maturation effects in the Exshaw Formation, Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3441-3452.
- [20] Selby D, Creaser R A. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using rhenium - osmium isotopes [J]. *Science*, 2005, 308: 1293-1295.
- [21] Parnell J, Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into a bitumen-bearing ore deposit, North Wales [J]. *Geology*, 1990, 18(10): 1028-1030.
- [22] 张景廉, 朱炳泉, 张平中, 等. 塔里木盆地北部沥青、干酪根 Pb-Sr-Nd 同位素体系及成因演化[J]. 地质科学, 1998, 33(3): 310-317.
- [23] 顾雪祥, 李葆华, 徐仕海, 等. 贵州石头寨二叠系古油藏油气成藏期分析: 流体包裹体与 Sm-Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2797-2786.
- [24] 潘爱芳, 赫英, 黎荣剑. 鄂尔多斯盆地能源矿产氯仿沥青 Sm-Nd 同位素研究[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 440-444.
- [25] 中国科学院地球化学研究所. 高等地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 203-227.
- [26] 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: 9-45.
- [27] Dong H L, Hall C M, Peacor D R, et al. Thermal ⁴⁰Ar/³⁹Ar separation of diagenetic from detrital illitic clays in Gulf Coast shales[J]. *Earth Planer Sci Lett*, 2000, 175(3/4): 309-325.
- [28] Smith P E, Evensen N M, York D, et al. First successful ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of glauconites: Argon recoil in single grains of cryptocrystalline material[J]. *Geology*, 1993, 21(1): 41-44.
- [29] 穆治国, 高永军. 20 世纪末激光显微探针定年把 K-Ar 年代学推向了新的里程碑[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 136-142.
- [30] 张有瑜, 罗修泉, 宋健. 油气储层中自生伊利石 K-Ar 同位素年代学研究若干问题的初步探讨[J]. 现代地质, 2002, 16(4): 403-407.
- [31] 姜振学, 庞雄奇, 黄志龙. 叠合盆地油气运聚期次研究方法及应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 22-25.
- [32] 辛仁臣, 田春志, 窦同君. 油藏成藏年代学分析[J]. 地质前缘, 2000, 7(3): 48-54.
- [33] 赵靖舟, 吴保国. 塔里木盆地哈得 4 油田成藏模式探讨[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(1): 20-23.
- [34] 云建兵, 施和生, 朱俊章, 等. 砂岩储层自生伊利石⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年技术及油气成藏年龄探讨[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1134-1140.
- [35] 吴河勇, 云建兵, 冯子辉, 等. 松辽盆地深层 CO₂ 气藏⁴⁰Ar-³⁹Ar 成藏年龄探讨[J]. 中国科学, 2010, 55(8): 693-697.
- [36] 李永峰, 毛景文, 白凤军, 等. Re-Os 同位素体系及其地质应用[J]. 地质与勘探, 2004, 40(1): 64-67.
- [37] Ravizza G, Esser B K. A possible link between the seawater osmium isotope record and weathering of ancient sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1993, 107(3-4): 255-258.
- [38] Bruland K W. Trace elements in seawater [M]//Riley J P, Chester R, eds. *Chemical Oceanography*. 2nd Edition. London: Academic, 1983: 147-220.
- [39] Peucker-Ehrenbrink B, Ravizza G. The marine osmium isotope record[J]. *Terra Nova*, 2000, 12(5): 205-219.
- [40] Yoshiro Yamashitaa, Yoshio Takahashi, Hiromitsu Haba, et al. Comparison of reductive accumulation of Re and Os in seawater-sediment systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(14): 3458-3475.
- [41] Ravizza G, Turekian K K, Hay B J. The geochemistry of rhenium and osmium in recent sediments from the Black Sea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(12): 3741-3752.
- [42] Selby D, Creaser R A, Fowler M G. Re-Os elemental and isotopic systematics in crude oils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(2): 378-386.
- [43] 李超, 屈文俊, 王登红, 等. 富有机质地质样品 Re-Os 同位素体系研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(4): 421-430.
- [44] Jaffe L A, Peucker-Ehrenbrink B, Petsch S T. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198(3-4): 339-353.
- [45] Hannah J L, Yang G, Xu G, et al. Re-Os isotopic disturbances at unconformities: Challenges and opportunities [C]//Goldschmidt Conference Abstracts. 2009: A491.
- [46] Creaser R A, Sannigrahi P, Chacko T, et al. Further evaluation of the Re - Os geochronometer in organic - rich sedimentary rocks: a test of hydrocarbon maturation effects in the Exshaw Formation, Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(19): 3441-3452.
- [47] Selby D, Creaser R A. Direct radiometric dating of hydrocarbon deposits using Rhenium- Osmium isotopes [J]. *Science*, 2005, 308(5726): 1293-1295.
- [48] Ravizza G, Turekian K K. Application of the ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os system to black shale geochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(12): 3257-3262.
- [49] Selby D, Creaser R A, Dewing K, et al. Evaluation of bitumen as a ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os geochronometer for hydrocarbon maturation and migration: A case study from the Polaris MVT deposit [J]. *Canada Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(12): 1-15.
- [50] 陈玲, 马昌前, 凌文黎, 等. 中国南方存在印支期的油气: Re-Os 同位素体系的制约[J]. 地质科技情报, 2010, 29(2): 95-99.
- [51] Stein H, Yang G, Zimmerman A, et al. Re-Os fractionation from instantaneous maturation from the Siljan impact site, Central Sweden [C]//Goldschmidt Conference Abstract. 2009: A1268.