

层序地层地球化学 ——地球化学研究的新进展

李美俊¹, 周东升²

(1. 石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国地质大学 能源系, 北京 100083)

摘要:层序地层地球化学是地球化学研究的新进展,它主要研究基于层序地层格架的烃源岩分布及其地球化学特征。层序地层地球化学的概念由 Peters 等人(2000)提出,并在勘探实践中取得了良好的效果。层序地层地球化学将地球化学方法与层序地层学研究相结合,主要用于研究:a)基于层序格架下的烃源岩分布特征和地球化学性质;b)烃源岩地球化学特征随海(湖)平面的变化规律;c)在油源对比和油油对比的基础上进行基于地层格架的原油成因分类;d)最终研究油气运聚和成藏特征并指导勘探。在研究中,层序地层格架的建立是基础,高分辨率的生物标志化合物分析是关键。在以寻找隐蔽油气藏、深层和非常规油气藏为主的中国东部陆相断陷湖盆的勘探中,开展层序地层地球化学研究具有重要的实践意义。

关键词:层序地层学;地球化学;化学层序地层学;化学地层学;层序地层地球化学

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

上世纪 90 年代以来,层序地层学的概念和方法逐渐形成完整的体系,并已经成为油气勘探中一种广泛应用的技术。层序地层学在油气勘探中的主要作用是通过识别各种关键性物理界面,有效地建立起沉积盆地的等时地层格架,在等时层序地层格架中进行沉积体系域的分析,预测生、储、盖层的分布及特征。由于油气钻探的主要目的是各种类型的储集岩体,所以层序地层学在油气勘探中主要用于预测不同类型储集体的展布、规模和储集条件;相对而言,对生油层和盖层的研究就少得多。

最近,Peters^[1]和 Bohacs^[2]等学者相继提出了层序地层地球化学或地球化学层序地层学的概念,其主要内容就是研究基于层序地层格架的烃源岩分布及其地球化学特征。

实际上,早在 1991 年的 AAPG 年会上,就有许多学者特别是地球化学家发表了一些关于层序地层格架中烃源岩研究的文章,并于 1993 年由 Katz 和 Pratt 主编了题为“Source Rocks in A Sequence Stratigraphic Framework”的“AAPG Studies in Geology”第 37 号专集。这些文章主要涉及以下 4 个方面的内容:a)沉积有机质特征随海平面升降的变化规律^[3];b)不同层序、同一层序中不同体系域有

机相的变化特征^[4];c)基于层序地层格架的有机质分布和地球化学特征^[5];d)利用无机地球化学和同位素化学研究海平面升降的变化特征等^[6]。

1 概念

Peters^[1]等在文中使用了“地球化学层序地层模型”(geochemical-sequence stratigraphic model)的术语;Bohacs^[2]等使用了“综合的层序地层地球化学格架”(an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework)的术语。在此之前,也出现过类似的概念,如化学地层学(chemostratigraphy, chemical stratigraphy)^[7, 8]和化学层序地层学(chemical-sequence stratigraphy)^[9, 10],它们主要是以化学方法为手段来进行地层的对比和划分。化学层序地层学还与层序地层学结合,为建立高精度、高分辨率的层序地层格架服务。而层序地层地球化学主要在层序地层格架建立的基础上,来研究不同层序、不同体系域中烃源岩的分布和地球化学特征;结合地质、测井、地震等资料,有助于深入研究油气的运聚和成藏特征,甚至还可以预测和评价砂体的含油气性和勘探潜力。所以笔者建议使用层序地层地

收稿日期:2003-02-10;修订日期:2003-07-18.

作者简介:李美俊(1972-),男(汉族),重庆市人,博士后,主要从事地球化学及油气成藏研究。

球化学这一术语,不但与化学地层学和化学层序地层学等概念区别开来,也能更好地反映层序地层地球化学的研究特点—基于层序地层格架下的油气地球化学研究。

2 研究内容

2.1 烃源岩的展布及地球化学特征

层序地层格架下,烃源岩中有机质的特征受盆地沉降、可容纳空间变化、海平面升降变化以及母源输入等因素控制的,层序地层学的研究为研究烃源岩的展布及有机质的地球化学特征提供了一个框架背景。如 Peters(2000)等人^[1]对印度尼西亚曼哈坎(Mahakam)三角洲和麦加锡(Makassar)斜坡建立了地球化学层序地层模型,如图 1 所示。在模型中,共识别出 4 套烃源岩,并根据烃源岩在层序地层格架中所处的位置,分别命名为高水位体系域沿岸平原煤层(HST 烃源岩)、低水位体系域煤系页岩(LST 源岩 1、LST 源岩 2)和水进体系域源岩(TST 源岩)。

HST 烃源岩是在相对较高海平面时沉积在陆棚坡折带向陆一侧的煤和陆源有机质页岩。从层序地层角度看,它和低水位体系域生油灶最大的区别在于:高水位体系域生油灶中的有机质主要是原地聚集,而低水位体系域生油灶是由沿岸平原剥蚀后形成的碎屑颗粒经过较长距离的搬运后沉积形成

的。

LST 烃源岩是在低水位时期,与沿岸平原同期沉积的陆源有机质富集在沉积中心向海方向的外陆棚到斜坡部位而形成的。在相对海平面快速下降时期,沿岸平原沉积物的剥蚀作用为低水位生油灶提供了大量的有机质来源。这些向下倾斜的沉积中心可以充填大量的陆源有机质。

由于在水进体系域沉积期间,在有机质大量沉积之前,沼泽已被淹没,所以水进体系域中的煤含量非常少。油源对比表明,TST 组原油主要具海相有机质来源的特征,以藻类输入为主,同时混入陆源有机质。此外,Bohacs 等(1997)还研究了海陆过渡环境下煤系地层基于层序地层格架的分布特征^[11]。

2.2 烃源岩地球化学特征随海(湖)平面的变化规律

在研究层序地层格架中,常利用测井曲线进行层序地层的划分。同样可以利用测井曲线研究生油岩,Passey 等(1990)为这方面的研究奠定了一定的基础^[12]。Creaney 和 Passey(1993)详细研究了海相烃源岩 TOC(总有机碳)随层序体系域变化的特征^[13],结果如图 2 所示。在一个层序单元内的垂直剖面上,最大 TOC 含量往往与最大海泛面有关:在最大海泛面之上,由于高水位体系域的进积作用,沉积物被稀释,有机碳含量降低;在该海泛面之下,由于前一个水进体系域有较高的沉积速率,TOC 也降低。伴随着向最大海泛面方向 TOC 的增加,有机

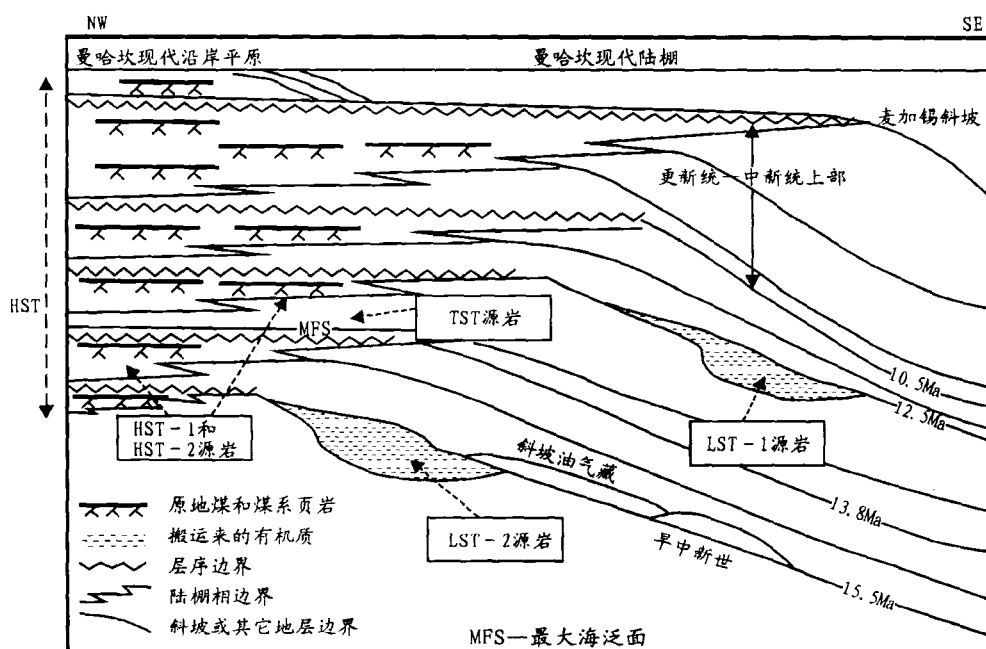
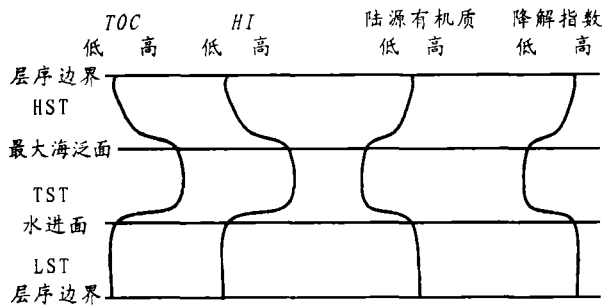


图 1 哈坎—麦加锡地区层序地层地球化学模型和预测的烃源岩分布^[1]

Fig. 1 Sequence-stratigraphic-geochemical model and predicted source rock distribution of Mahakam-Makassar area^[1]

图2 有机质特征与所处沉积层序位置的关系^[12]Fig. 2 Relationship between organic matter characteristics and position within a depositional sequence^[12]

质类型变好^[14],并依此建立了 HTB 单元模式 (high TOC at base, decreasing upward),即在基准面附近有有机碳含量最高,向上变小。所以,能根据层序地层格架来预测烃源岩有机碳在垂向上的分布。反之,通过对烃源岩的地球化学分析,也有助于层序地层格架的建立。

Ute Mann 和 Ruediger Stein(1997)^[15]研究了层序地层格架下有机相的分布和生烃潜力特征,有机地球化学和显微组分分析显示,在哥伦比亚 Quebrada Ocal, 上 Magdalena 谷白垩系黑色页岩中 4 种有机相,每种有机相分别位于层序地层格架不同的体系域中,具有不同的有机地球化学性质。

2.3 基于地层格架的原油成因分类

在油源对比和油油对比的基础上, Peters 等人^[1]利用高分辨率生物标志化合物的分析结果,划分出不同成因类型的油组,并根据地层格架下源岩的分类和原油的地球化学性质,分别命名为高位体系域(HST)、低位体系域 1(LST-1)、低位体系域 2(LST-2)和水进体系域油组(TST)。

HST 原油具有高的 C_{29} 甾烷、 C_{29} 异甾烷含量和高的异海松烷/锥满烷比值,饱和烃和芳烃稳定碳同位素都具有陆源有机质输入的特征。HST 原油含蜡量较高, LST-1 和 LST-2 含蜡量较少, TST 原油基本不含蜡,这表明 HST 源岩的陆源有机质输入比 LST 和 TST 都多,因为高分子量石蜡烃主要来自陆源植物。饱和烃色谱(GC)特征也证实了 HST 原油含有丰富的石蜡烃,色谱图呈后峰型,并表现出明显的奇偶优势;而 LST 原油一般具前峰型,没有奇偶优势。

与 HST 原油相比, LST 原油 C_{29} 甾烷和 C_{29} 异甾烷含量较低,异海松烷/锥满烷比值也较低。饱和烃和芳烃稳定碳同位素都表现出相对 HST 较少的陆源有机质输入和较多的海相有机质来源的特征。

TST 原油富含 C_{27} 和 C_{27} 异甾烷,表明更多的藻类和较少的陆源有机质输入。其它的地球化学指标如 C_{26}/C_{24} —降异甾烷比值及稳定碳同位素特征等都表明了较多的海相有机质输入。与其它样品相比,无论是原油还是源岩抽提物,其 Pr/Ph 比值都相对偏低,表明烃源岩沉积于还原性强一些的沉积环境,可能是弱氧化环境。

基于以上的地球化学模型, Peters 等人^[1]预测在目前的深水勘探中在低水位域会有较大的发现,结合盆地模拟结果可预测该地区的最终可采储量。4 个体系域油组,即高水位体系域(HST)、低水位体系域 1(LST-1)、低水位体系域 2(LST-2)和水进体系域(TST),分别占了最终可采储量的 45%、32%、11%和 12%。此外还预测出在深水勘探中将获得更多的 LST 原油。

2.4 地球化学研究和层序地层格架建立的相互印证

用地球化学的研究结果可以对层序地层格架进行检验和校正,从而建立更精确的层序地层格架。如 Hamilton(1994)等在非海相盆地中利用煤来研究层序地层的边界^[16]。Hamilton 等认为,区域性分布的煤层是在碎屑输入有限、泥炭大量生产时的产物,它们指示了大的盆地构造变动和显著的气候变化,因此与 Galloway (1989)^[17]的凝缩层相当,从而可以作为成因层序的边界。当然,结合化学层序地层学方法(chemical-sequence stratigraphy)划分层序地层格架也是非常有效的。

3 研究方法和常用指标

3.1 研究方法

尽管层序地层格架的研究并不是层序地层地球化学研究的主要目的,但正如 Payenberg 和 Miall (2001)所指出的那样:“层序地层格架是层序地层地球化学不可缺少的部分,层序地层格架建立得越好,地球化学层序地层模型才能建立得更好。”^[18,19]所以层序地层地球化学研究,首先应综合钻井、测井和地震资料,进行层序地层学的研究,建立起层序地层格架;然后对原油和源岩抽提物进行高分辨率的地球化学分析,研究层序地层格架下烃源岩的分布和地球化学性质,在油源对比和油油对比的基础上进行原油的成因分类,探讨不同类型原油的地球化学性质、成因和来源;最后结合研究的地质、地球物理等资料,研究烃源岩的生烃潜力和不同成因原油的分布、成藏和勘探潜力。

地球化学的分析方法包括常规的分析,如密度、含硫量、含蜡量和族组成的测定;还有饱和烃和芳烃的色谱(GC)分析,重要的手段是通过饱和烃和芳烃的色谱-质谱(GC-MS)分析得出大量的生物标志化合物参数;也包括干酪根、原油和抽提物的稳定碳同位素分析;还可以进行盆地模拟和干酪根的生烃动力学研究等;此外,测井的地球化学分析也是一种有效的方法^[12]。

3.2 常用指标

常用的地球化学指标包括:

a) 常规分析,包括源岩有机碳含量、岩石热解、原油密度(g/cm^3)、含蜡量(%、重量百分比)、含硫量(%、重量百分比)和族组成(饱和烃、芳烃、非烃和沥青质的百分含量)等。

b) 饱和烃色谱参数,包括 Pr/Ph 、 $\text{Pr}/n\text{C}_{17}$ 、 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 、OEP 和色谱图峰型(前峰型、后峰型和双峰型)等。

c) GC-MS 分析得出的生物标志化合物参数,包括 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 甾烷和异甾烷的百分含量、 $\text{C}_{29}/(\text{C}_{29} + \text{C}_{30})$ 藿烷、奥利烷/(奥利烷+藿烷)和甾烷异构化参数($\text{C}_{29} - \text{S}/(\text{S} + \text{R})$)、 $\text{C}_{29} - \beta\beta/(\beta\beta + \alpha\alpha)$ 等。

d) 碳同位素参数,包括饱和烃、芳烃和干酪根的碳同位素组成及饱和烃单体烃的同位素甚至单个生物标志化合物的同位素特征($\delta^{13}\text{C}$, ‰)。

此外,其它表征母源性质的生物标志化合物和生物标志化合物组合都是非常有用的地球化学指标。

4 在油气勘探中的意义

层序地层地球化学研究在油气勘探中具有重要的实践意义。

4.1 提高生油岩体积和生烃量的精度

目前,在油气资源评价中普遍存在两个难题:一是源岩体积计算不准确,因为一般钻井的目的层是储集岩体,揭露深层泥岩特别是生烃洼陷中心泥岩段的井特别少,对烃源岩的分布只能推测,而且深层的地震资料品质往往较差,对烃源岩体积的估算往往不准确;二是源岩生烃能力评价精度不够,因为有机质丰度和类型的确定只能依靠少数井、少量样品的分析化验结果,生烃能力只能以点代面,精度相当低。通过分析高精度层序地层格架下烃源岩的分布和地球化学特征,可以提高生油岩体积和生烃量的精度,从而更客观、更精确地预测油气资源。

4.2 提高油气成因分类的精度

以前的烃源岩评价,大都基于传统的地层分层,这样的评价比较笼统,掩盖了一段地层内次一级地层烃源岩沉积、分布和地球化学性质的差异。而通过建立高精度的层序地层格架,将烃源岩的评价细画到体系域水平,有利于更精细的油气成因分类,进而更深入地研究油气成藏特征。笔者曾对辽河盆地大民屯凹陷高蜡油的成因进行了较深入的研究,前人的研究认为大民屯凹陷的高蜡油来自沙四段烃源岩,我们的研究发现高蜡油主要与沙四层序湖扩展体系域的油页岩有关,而正常油主要来自沙四层序高位体系域的暗色泥岩和沙三下层序湖扩展和高位体系域的泥岩。将油气的成因研究细化到了体系域水平,这样有利于研究不同成因油气的资源潜力和运聚成藏特征,从而指导该区的勘探部署工作。

4.3 提示烃源岩地球化学特征随海(湖)平面变化的规律

烃源岩的类型、丰度等地球化学特征是受构造背景和沉积环境等因素控制的。海(湖)平面的升降所引起的沉积层序及体系域的旋回变化是层序地层学研究的主要依据,这种海(湖)平面变化必然在烃源岩中留下记录。通过研究烃源岩的地球化学特征,可以总结这种变化规律,利用规律可以更精确地预测烃源岩的地球化学特征。

4.4 实现地球化学研究和层序地层格架建立的相互印证

用地球化学的研究结果可以对层序地层格架进行检验和校正,从而建立更精确的层序地层格架。

5 建议

国内的一些学者也作过类似的研究和总结,如基于层序地层格架的有机相研究、应用层序地层学方法研究生油岩和利用高分辨率层序地层学研究油气资源序列等^[20-22]。但应用地球化学层序学的概念和方法来解决陆相湖盆的油气勘探问题还非常少。Bohacs 等人(2000)^[2]对湖盆类型、生烃潜力和油气特征研究进行了系统的总结,并建立一个湖盆的层序地层地球化学格架^[22],这对开展湖盆的层序地层地球化学研究具有重要的借鉴意义。在实际研究中,还应该注意以下几点。

a) 层序地层格架是基础。尽管层序地层格架的研究并不是层序地层地球化学研究的主要目的,但正如 Payenberg 和 Miall(2001)所指出的那样:“层序地层格架是层序地层地球化学不可缺少的部分,层序地层格架建立得越好,地球化学层序地层模型

才能建立得更好。”^[18,19]

b)高分辨率(high-resolution biomarkers analyses)生物标志化合物分析是关键。随着分析技术和计算机技术在化学分析中的应用,地球化学分析精度已越来越高,现在已达到分子级水平,即可检测单个化合物的分子特征。只有利用高分辨率的地球化学指标,才能将总体特征差别不大的源岩和原油进行细分,进行更精细的油—源对比和油—油对比。

c)常规的地球化学分析资料不可缺少,它们往往也能提供非常有用的宏观地球化学特征信息。

d)层序地层地球化学的最终目的是用于油气勘探。现在层序地层学已广泛应用于隐蔽油气藏的预测,并取得了很好的效果,但它只指出有利储层砂体的分布和特征,对砂体的含油气性没有预测。层序地层地球化学研究有助于开展砂体含油气性、油气性质及规模的预测,并通过结合地质背景和油气的生运聚特征指导勘探。

e)层序地层地球化学研究是一项工作量大、难度大的工作,涉及到地质、地震、地球化学等综合知识,对研究者的素质提出了更高的要求。但这项工作的开展对油田特别是我国东部勘探程度非常高的油田具有重要的意义。目前这些油田增储上产的主要措施是寻找隐蔽油气藏、钻探深层,由于勘探程度较高,勘探难度越来越大,常规的勘探方法和单一的勘探手段效果已越来越差。在这种形势下,就需要做更加扎实细致的工作。多年的勘探实践积累了丰富的地质、地球物理、钻井和地球化学资料,有利于在建立精度较高的层序地层格架的基础上,开展层序地层地球化学研究,真正将地球化学直接用于油气勘探。

参考文献:

- [1] Peters K E, et al. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(1): 12—44.
- [2] Bohacs K M, et al. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework[A] Gierlowski E H, Kordesch, Kelts K R. Lake Basins Through Space and Time[C]. AAPG Studies in Geology 46, 2000: 3—34.
- [3] Wignall P B, Maynard J R. The sequence stratigraphy of transgressive black shales[A]. Katz B J, Pratt L M. Lake Basins Through Space and Time[C]. AAPG Studies in Geology 37, 1993: 35—48.
- [4] Steffen D, Corin G E. Sedimentology of organic matter in upper Tithonian-Berriasian deep-sea carbonates of southern France: evidence of eustatic control[A]. Katz B J, Pratt L M. Lake Basins Through Space and Time[C]. AAPG Studies in Geology 37, 1993: 49—66.
- [5] Bohacs K M. Source quality variations tied to sequence development in Monterey and associated formations, Southwestern California[A]. Katz B J, Pratt L M. Lake Basins Through Space and Time[C]. AAPG Studies in Geology 37, 1993: 177—204.
- [6] Zaback D A, Pratt L M. Paleogeographic interpretation of variations in the sulfur isotopic compositions and Mn/Fe ratios in the Miocene Monterey formation, Santa Maria Basin, California[A]. Katz B J, Pratt L M. Lake Basins Through Space and Time[C]. AAPG Studies in Geology 37, 1993: 205—220.
- [7] 秦正永. 化学地层学的兴起及其应用前景[J]. 地质论评, 1991, 37(3): 265—272.
- [8] 刘拓. 化学地层学简介[J]. 新疆石油地质, 1994, (2): 24—31.
- [9] 王大锐, 白玉雷, 赵治信. 塔里木盆地海相古生界化学地层学研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 18—20.
- [10] 周瑞琪, 等. 判断面缺失时间的计算问题[J]. 地质学报, 1957, 71(1): 7—16.
- [11] Bohacs K, Suter J. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: fundamental controls and paralic examples[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 1612—1639.
- [12] Passey Q R, et al. A practical model for organic richness from porosity resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 77(3): 1777—1794.
- [13] Creaney S, Passey Q R. Recurring patterns of total organic carbon and source rock quality within a sequence stratigraphic framework[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(3): 386—401.
- [14] Carroll A R, Bohacs K M. Lake-types controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins[J]. AAPG Bulletin, 2001, 86(6): 1033—1053.
- [15] Mann U, Stein R. Organic facies variations, source rock potential, and sea level change in Cretaceous black shales of the Quebrada Ocal, upper Magdalena valley, Colombia [J]. AAPG Bulletin, 81(4): 556—576.
- [16] Hamilton D S, Tadros N Z. Utility of coal seams as genetic stratigraphic sequence boundaries in nonmarine basins: an example from the Gunnedah Basin, Australia[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(2): 267—286.
- [17] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequence in basin analysis (I): architecture and genetics of flooding surface bounded by depositional unites [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 125—142.
- [18] John W S, Sarg J F, Peters K E. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia; reply [J]. AAPG Bulletin, 2001, 86(6).
- [19] Tobias H D, Payenberg, Miall A D. A new geochemical-sequence stratigraphic model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia; discuss[J]. AAPG Bulletin, 2001, 86(6).

(下转第497页)

qualitative analysis and simple-hydrocarbon carbon-isotopic analysis on minor or trace hydrocarbon gases generated from thermal simulation. The gases in gold tubes were collected and quantified by a Toepler mercury pump, and then were sent into a gas chromatograph to make compositional analysis. The residual gases were collected and transferred so as to make carbon isotopic analysis. In this paper, the detailed structure and operating mechanism of the system were introduced, and several factors affecting analysis precision were discussed.

Key words: hydrocarbon; carbon isotope; gas chromatography; gas analysis

(上接第 491 页)

[20] 郝黎明, 邵龙义. 基于层序地层格架的有机相研究进展[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 60-64.

[21] 张建国. 应用层序地层学研究生油岩[J]. 世界石油工业, 1997, 4(1): 18-21.

[22] 鲁洪波, 姜在兴. 高分辨率层序地层学在资源序列评价中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(5): 9-12.

[23] 刘立, 等. 湖相油页岩的沉积环境及其层序地层意义[J]. 石油实验地质, 1996, 18(3): 311-316.

SEQUENCE STRATIGRAPHIC GEOCHEMISTRY —A NEW PROGRESS OF GEOCHEMISTRY

LI Mei-jun¹, ZHOU Dong-sheng²

(1. School of Earth Resources and Information, Petroleum University, Beijing 102249, China;

2. Department of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Sequence stratigraphic geochemistry is a new progress of geochemistry. It mainly studies the occurrence, distribution and geochemical characteristics of source rocks under a sequence stratigraphic framework. The concept of sequence stratigraphic geochemistry was proposed by Peters et al. in 2000, and was effectively used in hydrocarbon exploration practice. Combining geochemistry with sequence stratigraphy, it can be used to study the distribution and geochemical characteristics of source rocks from a sequence standpoint and the changing rules of the geochemical characteristics of source rocks with the sea (lake) level. It can also make the genetic classification of crude oil under a sequence stratigraphic framework on the basis of oil-oil and oil-source correlation, and study the characteristics of hydrocarbon migration and accumulation. It can be eventually used to direct hydrocarbon exploration. During the course of sequence-stratigraphic-geochemical research, the setup of a sequence stratigraphic framework is the base, and the high-resolution analyses of biomarkers are the key. The study of sequence stratigraphic geochemistry is necessary in the exploration of continental fault lake basins in East China, where the exploration is focused on seeking for unconventional hydrocarbon accumulations such as subtle or deep reservoirs.

Key words: sequence stratigraphy; geochemistry; chemical-sequence stratigraphy; chemical stratigraphy; sequence stratigraphic geochemistry