

有机相研究及其在盆地分析中的应用

郝芳 陈建渝 孙永传 解习农

(中国地质大学 武汉 430074)

摘要 有机相是具有一定丰度和特定成因类型的有机质的地层单元,决定有机相类型的最重要参数是干酪根的成因类型。为了反映沉积盆地中有机相的时空分布,我们提出了有机相组合和盆地有机充填序列等新概念。有机相及有机相层序、有机充填序列和有机相组合不仅是预测和在三维空间确定生油岩的分布、预测主力生油岩的排烃期和排出产物的组成的有效工具,而且可以弥补以骨架砂岩体为主要研究对象的沉积学分析的不足,在确定层序界线或不整合面的位置、研究盆地的构造沉降和沉积充填史等方面发挥重要作用。

关键词 有机相 有机相层序和有机相组合 盆地有机充填序列 盆地分析

第一作者简介 郝芳 男 28岁 讲师 有机地球化学和沉积学

1 引言

随着有机地球化学的迅速发展,如何在样品较少的情况下有效地预测油气源岩以及能否利用有机地球化学信息解决通过常规地质手段难以解决的地质问题成为有机地球化学工作者普遍关心的问题。长期以来,作为油气的生成母质,地层中的有机质得到了广泛的研究。然而有机质的性质和组成在反映盆地构造和沉积演化方面的意义却长期被忽视。事实上,地层单元中的有机质是盆地充填物质的重要组成部分,其组成和性质不仅是决定盆地油气潜能的重要因素并与一些重要的层控矿床的形成和分布密切相关(傅家谟等,1990),而且是沉积盆地的规模、几何形态、地质背景和发展演化等诸多因素综合作用的结果,因而可成为恢复和重建盆地地质演化过程的工具或“线索”。近年来,在对伊通地堑、倪丘集凹陷及柴达木盆地的研究中,我们在利用地化资料揭示盆地的构造、沉积演化过程方面进行了尝试,提出了可应用于盆地分析的有机相分类方案,并逐步发展和完善了有机相分析的思路和方法。本文的目的就在于探讨有机相研究在沉积盆地分析中的应用,揭示沉积学、地层学和有机相综合分析的重要意义。

2 有机相的定义、划分及判别

自 Rogers 等(1971)首次提出有机相以来,这一概念得到了广泛应用(如 Demaison 等, 1983; Jones, 1984, 1987; Waples, 1985)。然而,要使有机相研究应用于盆地分析,必须赋予有机相成因意义,从而使其具有预测和编图功能。为此,我们将有机相定义为含有一定丰度和

特定成因类型的有机质的地层单元。干酪根(有机质)的成因类型是我们根据有机质生源、沉积-成岩改造过程与干酪根化学组成之间关系的复杂性提出的,并定义为具有相同生源和沉积-成岩改造过程,从而具有相近的元素组成和化学结构的一组干酪根(郝芳和陈建渝,1993)。

有机相的划分应能充分体现地层单元中有机质的来源、性质及形成条件。由于沉积-成岩过程对相同生源的有机质的改造作用及热演化程度对干酪根化学组成的影响。Jones (1987)提出的直接根据干酪根 H/C 原子比和热解氢指数划分有机相的方案难以应用于盆地分析。因此,我们提出了根据干酪根(有机质)成因类型划分有机相的分类方案(表 1),并首次提出有机亚相(Organic Parafacies Hao 等,1993)的概念用以区分有机质的生源相同,但沉积-成岩改造过程明显不同的地层单元。每一种有机相都具有一种标志型干酪根成因类型,但可以含有少量非标志型干酪根,以保证有机相是一个可编图的地层单元(Hao 等,1993)。

表 1 有机相的划分

Table 1 Classification of Organic Facies

有机相	亚相	有机质生源	氧化还原条件 (可能的沉积环境)	标志型干酪根 成因类型	可出现的 干酪根成因类型	产物特征
A	-	湖生浮游植物	强还原 (深湖)	藻质 I 型(I a) 细菌改造 I 型(I br)	I A-a	高蜡原油
B	B	浮游植物为主 少量高等植物	还原-强还原 (深湖,较深湖-深湖;海相)	藻质 I A 型(I A-a)	I a I B-m	油
	B ₁	浮游植物为主 少量高等植物	弱氧化-弱还原 (深湖,较深湖-深湖;海相)	藻质 II 型(II a) 藻质 I B 型(I B-a)		气、油
C	-	浮游植物 高等植物	弱还原-还原 (深湖,浅湖-较深湖;海相)	混合 I B 型(I B-m)	I A-a II w	凝析油(轻质油)、气
D	D	高等植物	弱氧化-弱还原 (滨浅湖/海,沼泽)	木质 II 型(II w)	I B-m II w	气
	D ₁	高等植物	弱氧化-氧化 (缓慢沉积浅湖、较深湖)	壳质 I A 型(I A-e) 壳质 I B 型(I B-e)	II w II w	凝析油(轻质油)、气
	D ₂	高等植物	弱氧化-还原 (海水影响、成岩均一化)	木质 I B 型(I B-w)	II w	凝析油(轻质油)、气
E	-	高等植物	强氧化 (冲积平原,滨湖/海)	木质 IV 型(IV w) 再循环 IV 型(IV re)	II w I B-e	干气

决定有机相类型的最重要参数是干酪根成因类型,因此有机相的判别必须以多种有机地化参数的综合分析为基础。图 1 示出了我国东部某盆地同一井中埋深相近的三个干酪根样品的元素组成和热解产物。虽然取自浊流砂岩之下的深湖相泥岩的 1 号样品与该井浅部浅湖相泥岩的 3 号样品同属于 II 型干酪根,具有相近的 H/C 原子比和氢指数,但二者的热

解产物、稳定同位素组成和有机显微组分组合明显不同,表明二者的生源和形成条件明显不同,因而属于不同的有机相。这一实例充分揭示了仅仅根据干酪根的 H/C 原子比和热解氢指数划分有机相的缺陷,同时说明通过多种参数的综合分析判别有机相类型的重要性。因此,我们通常利用元素和 Rock-Eval 分析确定干酪根的化学类型,通过有机岩石学分析结合干酪根同位素组成及生物标志物分布确定有机质来源,在此基础上确定干酪根的成因类型,进而结合有机质丰度确定有机相(Hao 等,1993)。

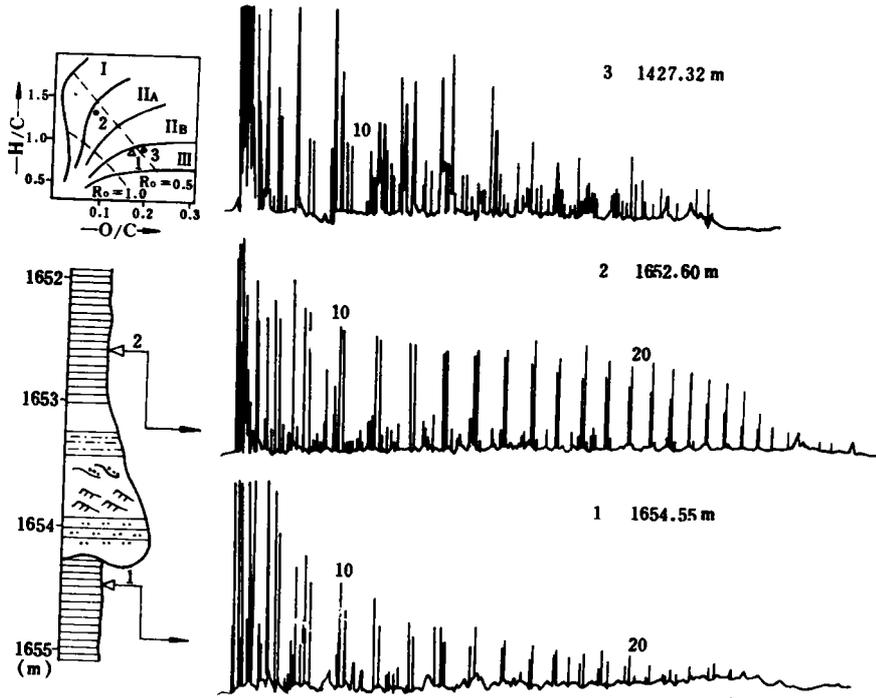


图 1 三个湖相干酪根的对比

Fig. 1 Comparison of three lacustrine kerogens

3 有机相组合和有机相层序分析

为使有机相研究应用于沉积盆地分析,必须考虑有机相的时空变化和三维分布。为此,必须研究有机相层序、盆地有机充填序列及有机相组合。

3.1 有机相垂向层序(Verticial Organic Facies Sequence—VOFS)

有机相垂向层序(VOFS)指有机相的垂向叠置关系,包括垂向上互相叠置的两种有机相的类型及其过渡型式(Hao 等,1993)。

根据垂向上互相叠置的两种有机相的类型可将有机相垂向层序划分为两种基本类型,即(1)下降型 由早期的高丰度、富氢有机相转变为晚期的较低丰度、相对贫氢的有机相,通常反映沉积-成岩过程中有机质的保存条件由好变差;(2)上升型 由早期的低丰度、贫氢有机相变为晚期的较高丰度、相对富氢的有机相,通常反映有机质的保存条件由差变好。根据

两种不同类型的有机相在垂向上的过渡关系,每一种有机相垂向层序的基本类型均可分为三类,即渐变型:从一种有机相到另一种有机相逐渐过渡,二者之间存在明显的过渡带,反映有机质保存条件的缓慢变化;速变型:从一种有机相迅速变为另一种有机相,二者之间的过渡相厚度很小,反映沉积-成岩条件的迅速变化;截然型:剖面上,一种有机相突然变为另一种有机相,二者之间不存在过渡带,反映生物发育特征特别是有机质保存条件的截然变化。因此,综合考虑垂向上互相叠置的两种有机相的类型及其过渡关系,可将有机相垂向层序划分为六类〔图2(上)〕。

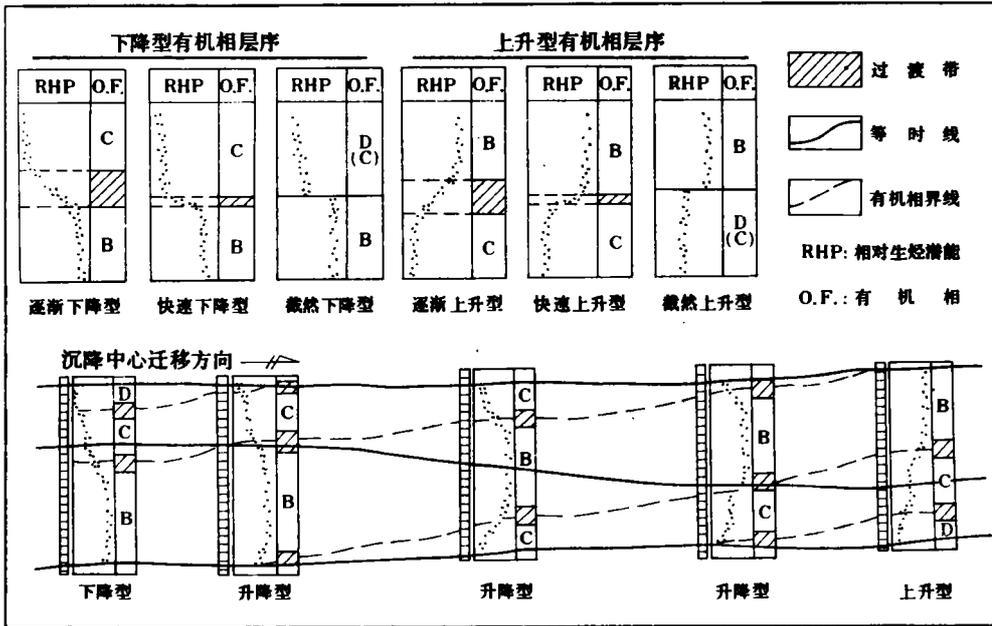


图2 有机相垂向层序类型(上)及反映沉降中心迁移的有机相层序的侧向组合型式(下)

Fig. 2 Schematic diagram showing types of vertical organic facies sequence (VOFS)(top) and lateral association pattern of VOFS reflecting subsidence—centre movement (bottom)

有机相垂向层序反映有机质的生产能力和保存条件随时间的变化。气候、氧化-还原条件及介质的盐度、酸碱度的变化都可能造成有机相的垂向变化。气候对有机相影响的典型例子是米兰科维奇旋回沉积物中有机相的变化。然而,在大多数沉积盆地中,有机相的垂向变化主要是由有机质的保存条件特别是氧化-还原电位的变化引起的。在陆相盆地中,有机质的保存条件主要受控于水体深度,而后者是由盆地的构造和(或)负载沉降及沉积物供应共同决定的。因此,有机质保存条件的变化以及由此决定的有机相垂向层序反映了盆地构造沉降和(或)沉积充填特征的变化。正因如此,有机相垂向层序的研究对于有效地识别和准确地确定不整合面及层序和体系域的界线、揭示沉积盆地演化过程中的各种地质作用和事件具有极其重要的意义。

3.2 盆地的有机充填序列(Organic Basin—Fill Sequence—OBFS)

盆地的有机充填序列(OBFS)指一个盆地或其次级构造单元中从下到上发育的有机相类型及其总体叠置关系(Hao等,1993)。

与有机相垂向层序不同,盆地的有机充填序列不是某一具体部位的特定层位中有机相的垂向叠置关系,而是盆地或其次级构造单元中各时代地层有机相垂向叠加、过渡关系的综合概括。为了使有机充填序列反映控制盆地充填演化过程的最重要因素〔陆相盆地为构造沉降(李思田,1988),海相盆地为构造沉降和海平面升降(Vail,1987)〕的变化,同时减小局部事件对有机充填序列的影响,有机充填序列应由盆地(或其次级构造单元)各层位的最佳有机相构成(Hao等,1993)。

有机充填序列主要受控于盆地演化史。我国陆相盆地的演化史可简化为三个阶段:初始充填阶段、稳定沉降阶段和淤浅萎缩阶段。其中初始充填阶段和淤浅萎缩阶段以浅水、强氧化介质为特征,以有机相D或E占优势。因此,不同盆地或同一盆地不同次级构造单元有机充填序列的差别主要反映在稳定沉降阶段。我们已在中国陆相盆地中识别出升降型、相对稳定型、持续下降型、复合下降型及旋回性变化型等五种盆地有机充填序列(Hao等,1993),每种类型都反映了一定的构造沉降、沉积充填史。而且,虽然由于同一类型的不同盆地的大小及气候、营养物质供应条件的差异,各个盆地所发育的最佳有机相可能不同,但同类盆地具有相似的构造演化史,从而具有相似的有机相总体叠置次序。因此,有机充填序列是预测新盆地主要生油层位的有用工具。

3.3 有机相组合(Organic Facies Association—OFA)

有机相组合(OFA)指年代或岩性地层单元中由于沉积环境的变化而导致的有机相类型的变化及由此决定的有成因联系的有机相的三维形态、共生关系和组合型式。

有机相组合反映盆地某一演化阶段有机相的空间变化,它受控于并可反映盆地某一演化阶段沉积体系的空间配置,同时,由于任何地层单元都不是由单一有机相构成的,因此有机相组合亦是评价和比较地层单元生烃能力的重要参数。

4 有机相研究在盆地分析中的应用

在油气勘探和盆地分析中,有机相研究可用来:

4.1 预测油气源岩 在油气勘探中,大部分钻井分布于构造高点,可能未钻遇真正的生油岩。因此源岩的合理预测是非常重要的。根据已知区的有机相层序和有机相类型与沉积环境的关系,结合通过地震层序、地震相分析得出的未知区的沉积环境及沉积体系的时空配置,可以合理地预测整个盆地或其次级构造单元的主力生油层位及其分布;

4.2 确定生油岩和各种有机相的三维分布 这是计算油气生成量、模拟油气生成、运移史的基础,同时,与砂体的分布相结合,对于了解砂岩成岩作用场的化学特征、理解储层的非均质性、预测储集性能的横向变化、减小岩性油气藏勘探的风险亦具有重要意义;

4.3 预测各生油层位的排烃期和排出产物的组成(油、凝析油或气) 源岩的排烃期和排出产物的数量和组成是有机质丰度、类型和成熟度综合作用的结果,而有机质成熟度取决于热力条件(温度+有效受热时间)及由有机质的生源和沉积-成岩改造过程所决定的有机质的活化能(Hao and Chen, 1992;郝芳,陈建渝,1991)将有机质丰度和类型结合起来,根据干酪根成因类型确定的每一种有机相具有一定的活化能和生烃潜能,因此在一定的热力条件下,生成一定量的具有一定组成的烃类。因此,有机相分析是预测排烃期及从源岩中排出

和进入圈闭的石油的组成的有用工具(Hao等,1993)。

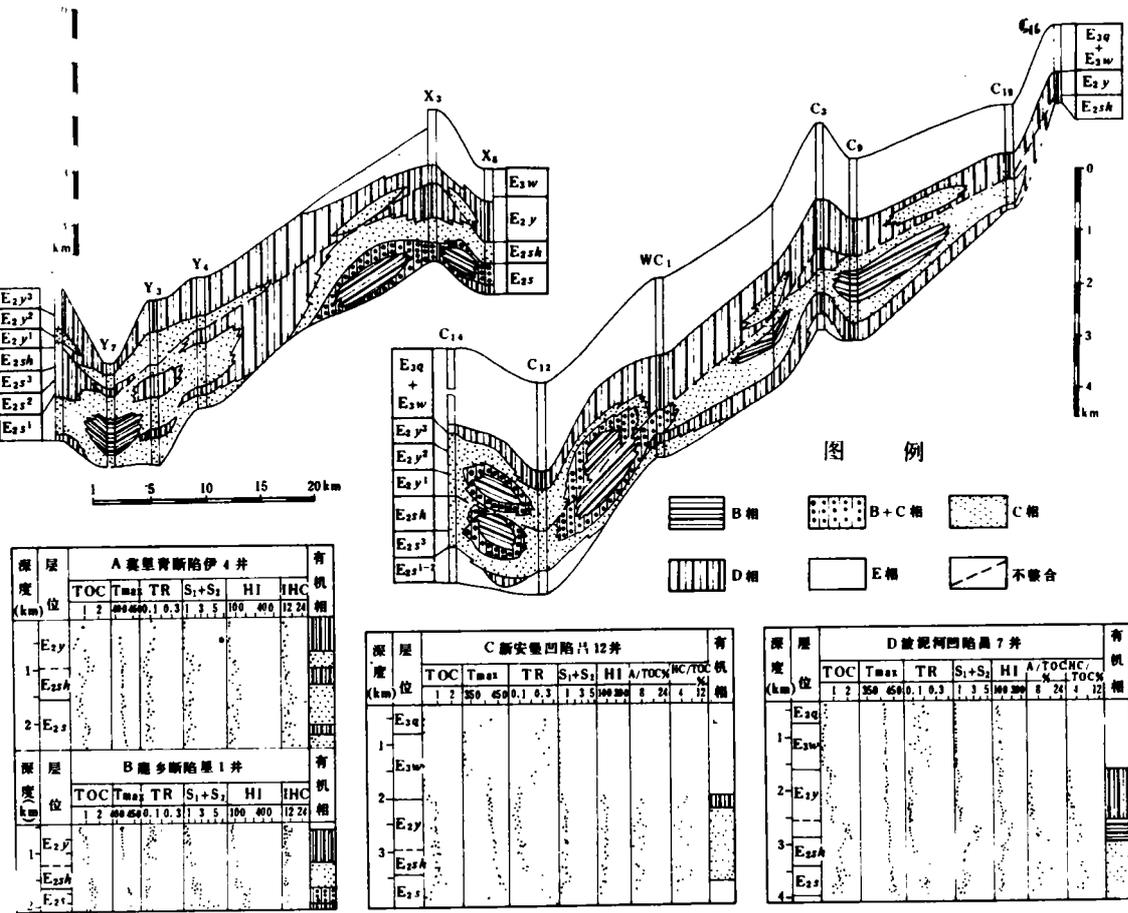


图3 伊通地堑有机相的时空(上)分布及各次级构造单元的代表性有机相剖面(下)

Fig. 3 Distribution of organic facies in the Yitong Graben (top) and typical organic facies profiles of each sub-unit (bottom)

4.4 通过判断沉积过程、确定层序和体系域界线,辅助进行沉积环境和层序地层分析 层序地层分析的首要任务之一是确定层序界线,在盆地边缘,层序界线为不整合面,可以根据地震反射结构、测井曲线和岩芯判别。然而,在远离盆地边缘的部位,层序界线过渡为整合面,层序界线上、下可能均为细粒泥质沉积,地震剖面、测井曲线对层序界线均无明显的响应。在此情况下,有机相分析成为准确确定层序界线的唯一有效途径;

4.5 通过详细的有机相垂向层序、有机充填序列和有机相组合分析,研究和恢复盆地的构造沉降和沉积充填史。

下面我们将通过实例论述有机相分析在研究盆地演化过程中的应用,揭示沉积学与有机相综合分析的重要意义。关于有机相研究在油气资源评价中的应用见郝芳和陈建渝(1994)。

图 2 下部是根据柴达木盆地第三系生油岩的实测资料概括出的沉降中心迁移过程中有机相垂向层序的变化。从中可以看出,随沉降中心的迁移,有机相层序依次由下降型过渡为升降型和上升型。这种有机相层序的组合型式与区域性水井或水退形成的有机相层序的组合型式明显不同,清楚地反映出沉降中心的迁移规律。需要指出的是,虽然在很多情况下厚度分析法和以骨架砂岩为主要研究对象的沉积学分析亦可以反映沉降中心的迁移,但一方面,砂岩主要发育于盆地边缘,易遭受侵蚀,且其沉积特征易受物源供应和一些局部因素的影响,另一方面,准确的剥蚀厚度恢复和古水深校正是难以实现的,更重要的是,在一些盆地中,沉降中心的迁移仅限于深水区,既未影响粗粒沉积岩的沉积特征,亦未引起地层厚度的明显差异。在此情况下,有机相层序的对比分析及其空间组合型式的研究成为识别沉降中心迁移的唯一有效途径。

表 2 伊通地堇各次级构造单元的有机充填序列和有机相组合

Table 2 Organic basin-fill sequences and organic facies association of the Yitong Graben

层位	有机相组合			
	莫里青断陷	鹿乡断陷	新安堡凹陷	波泥河凹陷
E _{3q}				
E _{3w}		E-D-E	E-D-E	E-D-E
E _{2y} ³	E-D-E		D-C-D	
E _{2y} ²	D-C-D	D-C-D	D-C-B-C-D	D-C-D
E _{2y} ¹	D-C-BC-C-D			
E _{2sh} ²				D-C-B-C-D
E _{2sh} ¹		D-C-D	D-C-B-C-D	
E _{2s} ³	D-C-D	D-C-BC-C-D		
E _{2s} ²				D-C-D
E _{2s} ¹	D-C-B-C-D	D-C-B-C-D	D-C-D	
OBFS	复合下降型	持续下降型	相对稳定型	升降型

图 3 是伊通地堇第三系的有机相分布图,表 2 列出了该地堇各次级构造单元的有机充填序列(OBFS)和各层位的有机相组合。伊通地堇各次级构造单元同一层位不同的有机相组合、不同构造单元明显不同的有机充填序列及其空间组合型式表明伊通地堇经历了西南部相对强烈沉降(E_{2s}¹-E_{2s}²)、均衡沉降(E_{2s}³-E_{2sh}¹)、东北部相对强烈沉降(E_{2sh}²)及西南部相对强烈沉降(E_{2y}¹)、均衡沉降(E_{2y}²-E_{2y}³)、东北部相对强烈沉降(E_{3w}-E_{3q})等六个构造演化阶段(Hao 等,1993),证明伊通地堇下第三系实际上是盆地由西南部相对强烈沉降→均衡沉降→东北部相对强烈沉降两大沉降旋回的产物,并在每个旋回的末期发生了明显的抬升和剥蚀(Hao 等,1993)。需要指出的是,详细的沉积学分析表明,伊通地堇各次级构造单元具有统一的无机充填序列(解习农,1992^①),因此仅仅进行沉积学分析难以揭示上述演化规律,

① 解习农,1992,伊通地堇层序地层分析及充填史研究,中国地质大学博士论文

充分说明了有机相分析在盆地沉降—充填演化研究中的独特功能。

从表 2 中还可以看出,伊通地堇渐新统(E_3)和始新统(E_2)的有机相组合存在本质差别,前者以形成于强氧化环境的有机相 E 占绝对优势,而后者则发育有具有一定的低等水生浮游植物输入、反映相对较强的还原环境的有机相 B 和有机相 C,表明从始新世到渐新世盆地的构造演化和沉积充填特征发生了根本变化。非常有意义的是,渐新统和始新统的分界面正是盆地由张扭体制到压扭体制的构造应力场转换面,这意味着,有机相及其组合和层序分析不仅可以揭示盆地的构造沉降规律,对盆地演化过程中构造背景和动力学机制的变化亦有清楚的反映。

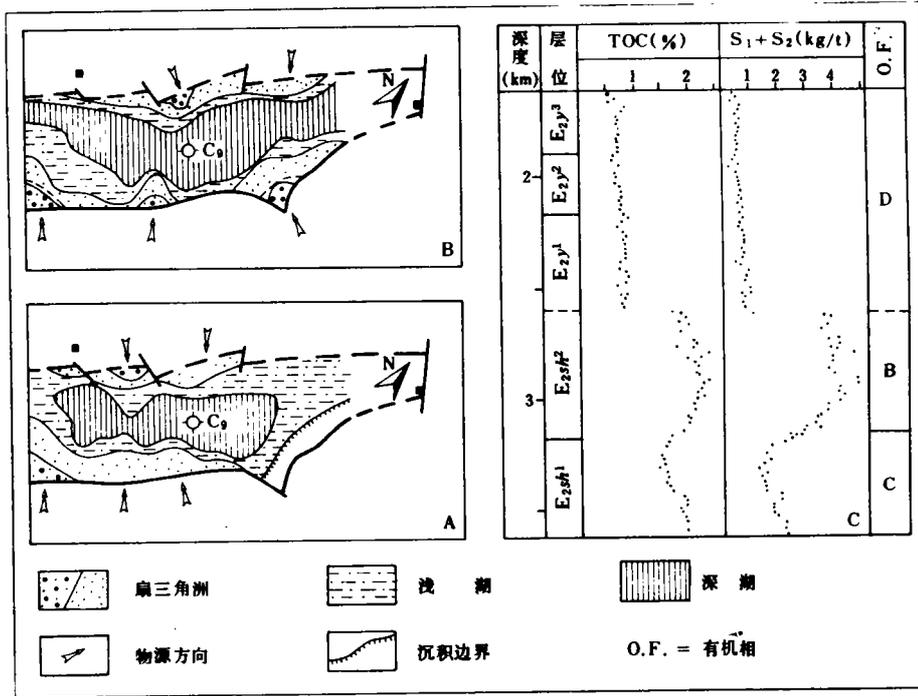


图 4 伊通地堇波泥河凹陷奢岭组(A)和永吉组(B)的古环境图及代表性有机相层序(C)

Fig. 4 Palaeoenvironment map of Sheling Formation (A) and Yongji Formation (B) and typical VOFS (C) in Buonihe Depression, Yitong Graben

图 4 是伊通地堇波泥河凹陷奢岭组(E_{2sh} , 图 4A)和永吉组(E_{2y} , 图 4B)的古环境图及该凹陷代表性有机相剖面图(图 4C)。对比图 4A 和 4B 可以看出,从奢岭期到永吉期,波泥河凹陷的沉积范围和深湖区明显增大,表现出明显的水进。但在该凹陷中,从奢岭组到永吉组发育了截然下降型有机相层序(图 4C),表明永吉期有机质的保存条件较差。实际上,奢岭期是波泥河凹陷构造沉降幅度最大的时期,且湖底坡度较大(该期发育的深水重力流沉积证明了这一点)。因此,水体深度较大,介质的还原性较强。有机质保存条件较好,抗氧化降解能力较弱的水生浮游植物来源的有机质得以保存,因此发育了有机相 B。奢岭组沉积后,波泥河凹陷发生抬升和一定程度的剥蚀,在重新沉降接受沉积时(永吉期),该凹陷的构造沉降幅度明显变小,且由于剥蚀夷平作用,湖底坡度变小,因此,尽管湖泊面积较大(沉积范围较

大),但深度较奢岭期明显变小,有机质保存条件明显变差,大部分低等水生浮游植物来源的有机质被氧化降解,未发育有机相 B。因此,从奢岭组到永吉组发育了截然下降型有机相层序(图 4C)。有机相分析证明,永吉期的水进是以广而浅为特征的,仅仅进行沉积学分析而不进行有机相研究将不可能揭示永吉期水进的本质,进一步证明了有机相研究在盆地分析中的重要意义和独特功能。

5 结束语

从以上论述和实例分析中不难看出,有机相分析可以提供很多仅仅进行沉积学和地层学分析所无法获得的有关盆地构造沉降和沉积充填演化的重要信息。因此,在沉积盆地分析中具有独特的功能和重要意义。使有机相研究应用于盆地分析的关键是赋予有机相成因意义并确定盆地中有机相的时空分布。为此,有机相垂向层序、盆地有机充填序列和有机相组合的研究是非常必要的。以有机地球化学与沉积学相结合为基础的有机相分析反映了近期有机地球化学的重要进展之一,并在一定程度上扩大了有机地球化学的应用领域。但是,根据有机相研究盆地的构造沉降和沉积充填过程还仅仅是我们的初步尝试,在这一领域尚有许多问题有待进一步深入研究,恳切希望各位专家指正。

收修改稿日期:1993-06-20

参 考 文 献

- [1] 黄第藩,李晋超,1984,陆相有机质演化和成烃机理,北京:石油工业出版社。
- [2] 李思田,1988,断陷盆地分析与煤聚集规律,地质出版社。
- [3] 郝芳,陈建渝,1991,有机地球化学基础理论和勘探应用的新进展,地质科技情报。
- [4] 郝芳,陈建渝,1993,论有机质生烃潜能与生源的关系及干酪根的成因类型,现代地质,(1):57~65。
- [5] 郝芳,陈建渝,1994,沉积盆地的有机相研究及其在油气资源评价中的应用,矿物学岩石学论丛(9),地质出版社,101~109。
- [6] Demaison G. J. et al., 1983, Predictive source bed stratigraphy, a guide to regional petroleum occurrence. In Proc. of Eleventh World Petroleum Congress, 2, 17~29.
- [7] Demaison G. J. and Moore G. T., 1980, Anoxic environments and oil source bed genesis. Organic Geochemistry 2, 9~31.
- [8] Hao Fang and Chen Jianyu, 1992, The cause and mechanism of vitrinite reflectance anomalies. Journal of Petroleum Geology 15(4):419~434.
- [9] Hao Fang, Chen Jianyu, Sun Yongchuan and Liu Yiaozhong, 1993, Application of organic facies studies to sedimentary basin analysis, a case study from the Yitong Graben, China. Org. Geochem. 20(1):27~42.
- [10] Jones R. W., 1984, Comparison of carbonate and shale source rocks. In Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks(Edited by Palacas J. G.), AAPG Studies in Geology 18, 163~180.
- [11] Jones R. W., 1987, Organic Facies. In Advances in Petroleum Geochemistry I (Edited by Brooks J. and Welte D.), 1~90.
- [12] Vail P. R., 1987, Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part 1: seismic stratigraphy interpretation procedure. In Atlas of Seismic Stratigraphy, Vol. 1(Edited by Bally A. W.), AAPG Studies in Geology, 27, 1~10.

Organic Facies Studies and Their Use in Sedimentary Basin Analysis

Hao Fang, Chen Jianyu, Sun Yongchuan and Xie Xinong

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

An organic facies is defined as a mappable stratigraphic unit containing organic matter (OM) of a particular genetic type in certain abundance. A new organic facies classification, which is based on indicative genetic kerogen (OM) type, is proposed. The improved definition and classification makes organic facies capable of reflecting the origin, diagenetic alternation of organic matter comprehensively, and, the organic facies thus defined and classified, which must be identified on the basis of synthetical parameters other than by atomic H/C ratios and/or Rock—Eval Hydrogen Index values merely. Several new concepts concerning organic facies such as Vertical Organic Facies Sequence (VOFS), Organic Facies Association (OFA) and Organic Basin—fill Sequence (OBFS) are advanced, and their significance in basin analysis is discussed in detail. Several cases are presented in this paper which confirm that organic facies, especially VOFS, OFA and OBFS analysis can not only become a very useful tool for prediction and three—dimensional mapping of petroleum source rocks, but also make up for some shortcomings of sedimentological studies that put the stress on coarse rocks, and therefore may play a distinctive role in identifying and accurately locating unconformities or sequence/systems tract boundaries as well as in reconstructing the tectonic subsidence and sedimentary fill histories of sedimentary basins.

Key Words: Organic facies, Organic facies sequence and association, Organic basin—fill sequence, Basin analysis.