

中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展*

——以塔里木盆地为例

金之钧**

(中国石油化工股份公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

王清晨***

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 我国的含油气沉积盆地以经历过多次构造与沉积叠加为特征, 可用“叠合盆地”去统称那些由两种或两种以上类型的原型盆地叠加或复合在一起的盆地. 这些盆地的特性可概括为“多期成盆、多期改造、多套烃源岩、多次生排烃、多期运聚散”. 针对叠合盆地的特性, 应用波动分析方法进行“成盆-成烃-成藏”过程分析, 建立油气成藏体系理论将有助于提高此类盆地的油气勘探效率. 以塔里木盆地为例, 重点介绍当前在成盆、成烃及成藏研究过程中的重大进展. 成盆研究进展有: (i) 地球物理综合剖面揭示了塔里木板块向天山造山带的“层间插入消减”以及具有东西分段特征; (ii) 沉积-地球化学综合剖面研究成果揭示了库车坳陷中新生代的演化阶段及盆地性质; (iii) 野外调查及应力恢复结果显示, 第四纪以来库车坳陷处于天山挤压隆升后的浅层重力伸展阶段. 成烃研究进展有: (i) 建立了海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的环境指标; (ii) 确立了有效碳酸盐岩烃源岩的有机质丰度下限. 成藏研究进展有: (i) 建立起适应不同条件下流体包裹体古压力与古温度确定方法; (ii) 通过油源对比分析, 指出轮南、塔河地区的原油可能源于中上奥陶统源岩; (iii) 对轮南地区不同时代储层石油包裹体进行分期并探讨其形成时间.

关键词 叠合盆地 塔里木盆地 成盆 成烃 成藏

石油天然气既是国际竞争的重要战略资源, 又是每一个国家经济发展不可缺少的能源和自然资源.

然而, 尽管我国油气产量连年增长, 仍远不能满足国民经济快速发展的需求. 自1993年起, 我国石油的进

2003-10-17 收稿, 2004-06-24 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G19990433)资助

** E-mail: jinzj@pepris.com

*** E-mail: qcwang@mail.igcas.ac.cn

口量开始大于出口量;其后,供需差距逐年增大,而且预计会持续相当长的时间.造成我国油气供需缺口的原因并非由于油气资源贫乏,而是由于探明程度太低,油气储量增长缓慢.我国油气资源丰富,根据 1997 年第 15 届世界石油大会资料,我国石油资源量为 940 亿吨,天然气资源量为 42 万亿立方米,但探明程度很低,石油探明率不足 1/4,天然气探明率只有 4%^[1].显然,提高探明程度、增加探明储量是缓解我国油气供需矛盾的关键.

回顾国内外油气勘探实践,每一次油气资源与储量的飞跃都与理论的突破密切相关,从国外的背斜控油理论到我国陆相生油理论无不如此.面对目前我国勘探费用高,探井成功率偏低,油气储量增长缓慢的现状,我们感到油气地质理论研究已严重滞后于勘探实践.本文试图通过实例对我国含油气盆地的结构与油气成藏特征进行探讨,以期建立新的油气勘探理论做准备.

1 叠合盆地的发育特征

1.1 我国含油气盆地结构的叠加性

我国的含油气沉积盆地大多具有复杂的结构.座落在陆上的诸多含油气盆地(如渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地等)多具有结构上的叠加性,在中新生界沉积岩之下还发育了古生界沉积地层,甚至有元古界地层.这些时跨亿年,厚逾万米的地层往往被数个不整合面(包括角度不整合面和平行不整合面)所分隔,表明它们并不是在同一环境和构造背景下连续沉积的.我国含油气盆地的这种结构特征曾使一些国外学者感到茫然,以至于称之为“中国型盆地”^[2].我国学者则对其本质有较深刻的认识.例如,田在艺先生很早就强调含油气盆地的多旋回性^[3],朱夏先生则多次强调盆地的叠加作用,即“古生代盆地受中、新生代的沉积和构造的叠加而发生新的油气生、运、集、储”^[4].此类盆地被冠以不同的名称,如:一些学者建议,把两种盆地的复合称为复合盆地,而把 3 种或更多盆地的复合称为叠合盆地^[5],另一些学者则统称其称复杂叠加盆地^[6]、多旋回盆地或复合型盆地^[7]等.

盆地的多旋回性或叠加性是相对于单旋回或原

型盆地而言的.我们用“叠合盆地”这一术语来统称那些由两种或两种以上类型的原型盆地叠加或复合在一起的盆地,它们均经历了多期构造变革,具有复杂的盆地结构.

以塔里木盆地为例,其中发育了古生代、中生代和新生代地层,被若干个重要不整合面隔开(图 1).显然,这不是一个典型的克拉通盆地.塔里木盆地的平面结构以复杂的隆起与拗陷相间为特征,塔里木盆地的隆拗构造可分为 3 个带:北带包括库车拗陷和塔北隆起,近 EW 走向,与天山相邻;南带包括塔南隆起和东南拗陷,NEE 走向,与阿尔金山相邻;夹在二者间的中带包括北部拗陷、中央隆起和西南拗陷,是盆地的主体(图 1).值得注意的是,中带大致以东经 81° 线为界分为东西两段,西段与昆仑山相邻,为 NW 走向,被与北带平行的南天山横截,东段则转为近 EW 走向,被南带的塔南隆起横截.如果 NW 走向代表了早期构造线方向的话,它们显然受到了后期南天山和阿尔金山左旋活动叠加改造的影响.

如果揭去盆地的第三系可以看到,白垩系、侏罗系和三叠系自盆地东北向中央隆起西段(即巴楚隆起)依次尖灭(图 2(a)),直至昆仑山前重新出露.这表明,第三系是不整合叠覆在 NW 走向的两拗夹一隆的古构造上.进一步揭去三叠系则可以看到,北部拗陷的上二叠统、下二叠统和石炭系依次向 NE 方向尖灭(图 2(b)),暗示了三叠系不整合面下依然存在着 NW 走向的隆拗构造.虽然在巴楚隆起以西因缺失三叠系而难以恢复其下的古构造形态,但对比第三系下和三叠系下的古构造仍可发现,在盆地东北部,与第三系下的古拗陷对应的是三叠系下的古隆起.这无疑表明,塔里木盆地在中生代初和新生代初经历了两次构造叠加.

1.2 盆地的叠加性有利于烃源岩多次生排烃

由于叠合盆地的叠加性,在不同时期可发育多种类型的烃源岩、多种成因的储集体、以及多种结构的生储盖组合.例如,在塔里木盆地就发育了寒武-奥陶系海相烃源岩、石炭系-二叠系海陆过渡相烃源

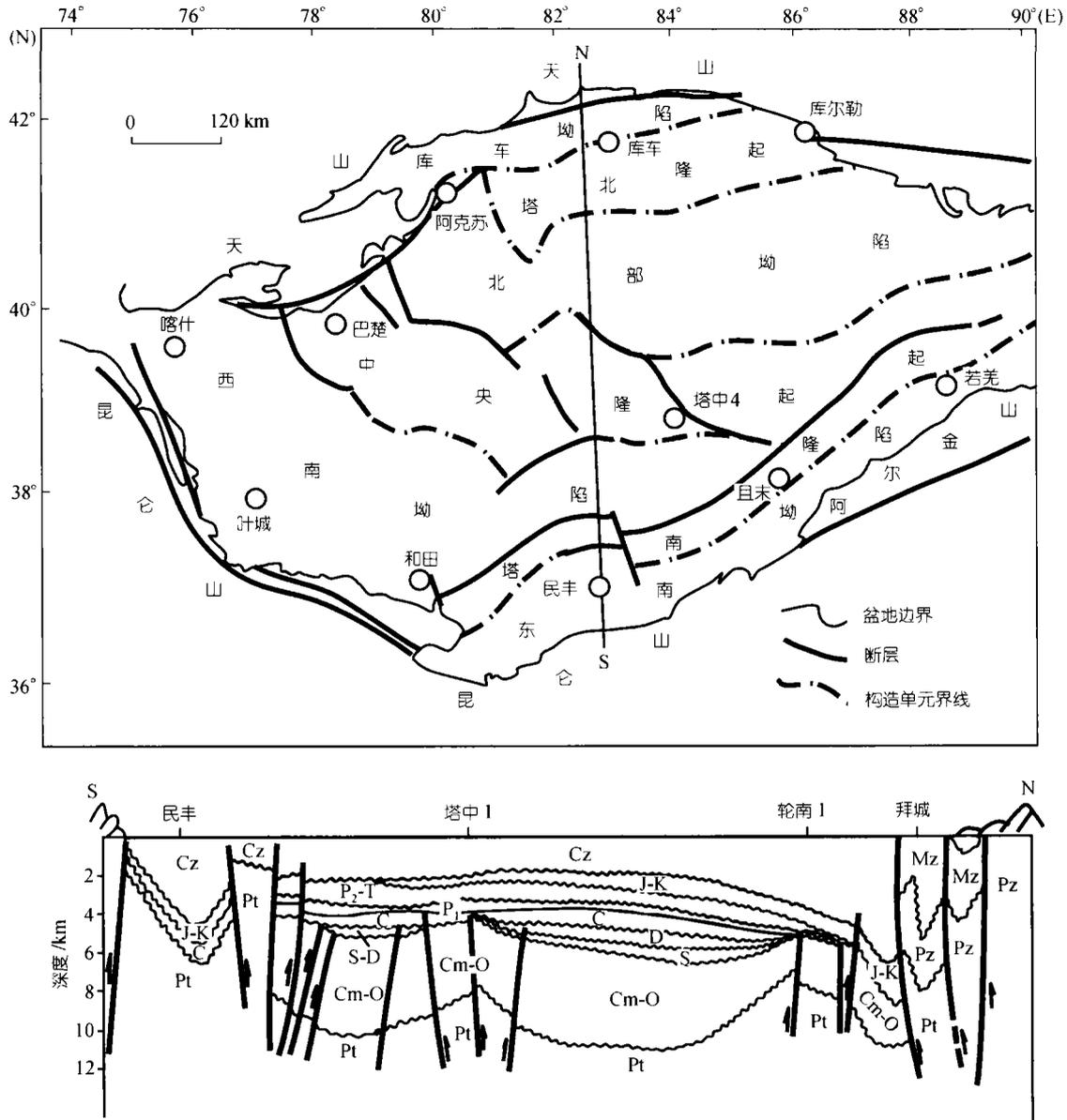


图1 塔里木盆地的结构(上图为平面结构, 下图为垂向结构, 据文献[8])

Cz 示新生界; Mz 示中生界(J 示侏罗系; K 示白垩系); Pz 示古生界(P 示二叠系; C 示石炭系; D 示泥盆系; S 示志留系; O 示奥陶系; Cm 示寒武系); Pt 示元古界

岩、及三叠系-侏罗系陆相烃源岩。沉积叠加的这种正面效应是不言而喻的, 本文不拟赘述。这里要强调的是, 叠合盆地中往往会发生沉降与抬升的多次交替, 这可在适当的时间空间造成多次生排烃。

以塔里木盆地的轮南地区为例。轮南位于塔北隆起中段, 其原油产出在奥陶系、石炭系、三叠系和侏罗系等地层中, 以三叠系为主产油层。该区的烃源

岩共有两层, 即寒武系底部的暗色泥岩、泥灰岩和上奥陶统底部的泥灰岩, 厚度均在 100 m 左右。应用改进的 Karweil 方法^[9], 并结合埋藏史与受热史, 可模拟计算上述地层中烃源岩的生烃史。从 VRo-t 图中可以看出, 寒武系烃源岩处于生油窗的时段为 452~210 Ma, 主生油期出现在 280~230 Ma; 中上奥陶统烃源岩处于生油窗的时段为 150~10 Ma, 主生油期出现在

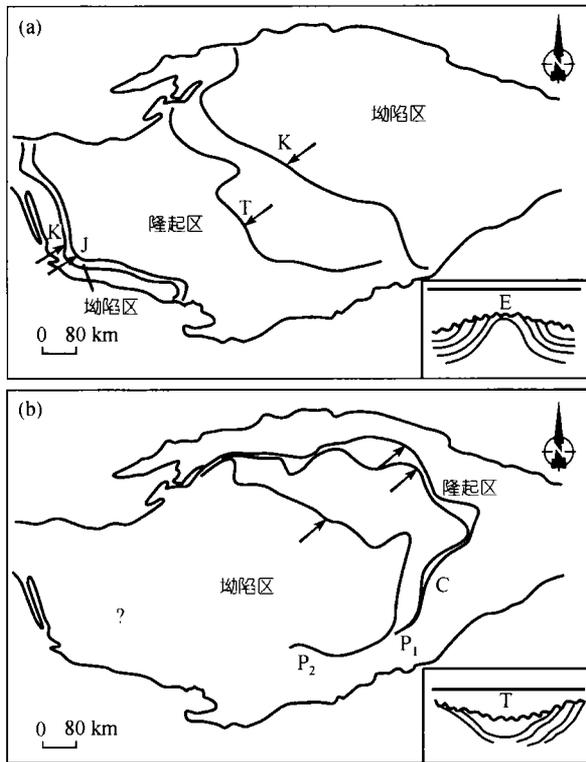


图 2 塔里木盆地地层尖灭线

(a) 第三系下地层尖灭线; (b) 三叠系下地层尖灭线. 箭头示地层尖灭方向. 右下角插图示意不整合面下地层褶皱形态

65~20 Ma(图3). 因此, 在发育有这些下古生界烃源岩的轮南地区, 至少曾有两期主生油期出现. 对整个盆地而言, 多套烃源岩、多期生排烃的特点就更加明显, 寒武系、石炭系、三叠系、及侏罗系等地层中发育多套烃源岩, 并在中晚奥陶世、二叠纪、第三纪多次出现生排烃高峰期^[8].

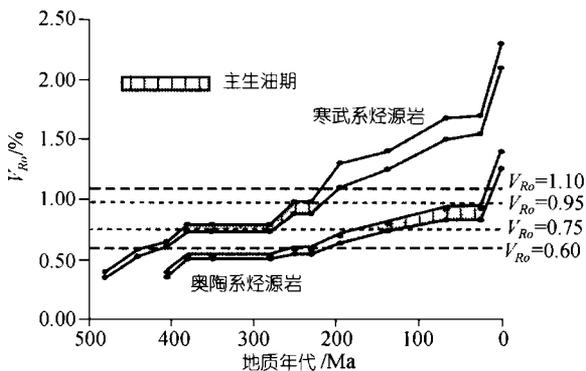


图 3 轮南地区下古生界烃源岩的两期主生油期 (详见正文)

1.3 盆地的叠加性与油气多次运聚散

油气有别于固体矿产的最大特点是其可流动性, 构造叠加会使原有油气藏开始新一轮的调整、运移、散失、甚至重新聚集成藏. 例如, 虽然塔里木盆地在中晚奥陶世时的排烃量最大, 然而, 目前见到的志留系砂岩中广泛分布的沥青表明, 当时形成的油气藏已遭到破坏, 反映了构造叠加的负面影响. 造成油气藏破坏的直接原因很多, 包括流体冲刷、抬升剥蚀、沉降深埋、断裂切入、深部动力过程等. 对西部 30 个油气藏的破坏原因进行统计后发现, 最常见的因素是抬升剥蚀(占 33%)、断裂切入(占 33%)、及流体冲洗(占 23%). 其中的流体冲洗也是由于古油气藏被抬升至近地表而引起的, 由此可见构造活动的重要性.

构造叠加并不总是造成油气藏的破坏, 还可对油气藏进行调整, 甚至可形成次生油气藏. 仍以轮南地区为例, 那里下古生界中发育了 3 期沥青, 它们的沥青反射率(BR_o)分别为 1.20%~1.40%, 0.80%~1.0%, 和 < 0.05%. 应用沥青反射率, 结合埋藏史及受热史研究表明, 这 3 期运移沥青的形成时间为 380~400 Ma, 130~25 Ma, 及 < 15 Ma. 与沥青发育空间相对应, 下古生界地层中还发育有 3 期有机包裹体, 它们在荧光下分别为绿黄-黄色、绿黄色和黄绿-绿色, 相应的共生盐水溶液均一温度为 80~100℃, 60~80℃, 及 100~150℃. 结合埋藏史及受热史, 推算出这 3 期有机包裹体形成于早泥盆世, 白垩纪及晚第三纪. 换言之, 这些古生代形成的油气藏经历了 3 期运移.

桑塔木油田的 T_{III} 油组由 7 个油藏组成, 各油藏具独立的油水系统, 油水界面自西向东逐渐抬升, 在西端的 LN44 井油藏深度为 -3836 m, 至东端 LN14 井深度为 -3692 m. 这 7 个油藏具有相同的压力系数, 均介于 50.3~51.5 MPa 间. 对它们原油中性含氮化合物分馏作用的研究表明, 曾发生过自西向东的运移聚集, 因此原油中性含氮化合物绝对浓度向东逐渐变小, 而屏蔽化合物与部分屏蔽化合物比值向东逐渐增大. 测井资料还表明, 西端的 LN44 井油水界面之下仍有 0.5 m 油层, 含油饱和度达 55%; 其东侧 LN39 井油水界面之下有 1.0 m 油层, 含油饱和度达 46%; JF123 井油水界面之下也有 1.5 m 油层, 含油饱

和度为 56%; 再向东, JF123 井的油层中部发现 5 m 厚沥青层, 指示了早期油水界面的位置. 上述资料暗示, 桑塔木 T_{II} 油组早期曾为一完整的油藏, 高点应在西侧的 LN44 至 LN39 间. 是后期的构造活动使东部抬升, 一系列断裂把原来完整的油藏切割成数个小圈闭, 并抬高了古油藏的溢出点, 油气沿上倾方向重新运移, 自西向东依次充满今天所见的 7 个油藏圈闭 (图 4). 古构造恢复表明, 这一过程发生在晚第三纪末期^[10].

实际上, 相对于调整改造前的古油藏而言, JF121 井及其以东的 4 个油藏已属次生油藏, 它们是再次运移聚集而成的. 这种实例在塔里木盆地比较常见, 如轮南 2 井油田、塔中 4 号油田等. 当然, 这种次生油藏的形成伴随着对古油藏的破坏, 整体上是造成了工业价值的降低. 从理论上讲, 当一些原生小油藏被破坏后, 若能运移聚集到一起, 还可形成大型油藏, 这种可能性不应该忽略.

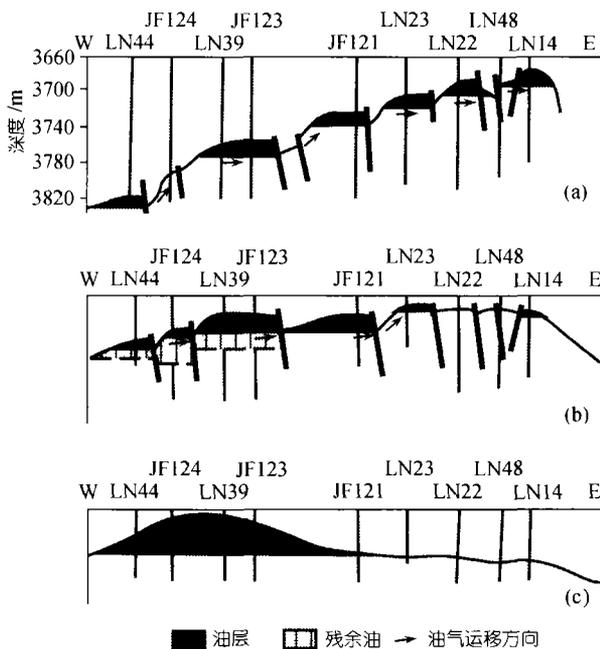


图 4 桑塔木 T_{II} 油组油藏晚第三纪调整示意图
(a) 现今; (b) 库车组沉积之前(N-2); (c) 康村组沉积之前(N-1). 图示均指示原油自西向东移运

2 分析方法

叠合盆地的分析是以成盆-成烃-成藏的动态

过程研究为主线. 在成盆方面, 从盆山耦合的地球动力学背景出发, 考察叠合盆地的形成演化历史, 突出对构造改造的反演和对盆地热史的恢复; 在成烃方面, 抓住碳酸盐岩优质烃源岩发育环境和生排烃机理及效率诸关键问题开展工作; 在成藏方面, 突出对叠合盆地油气多期运移、多期聚散与油气系统结构演化诸科学问题的研究.

2.1 波动分析法

波动分析方法是叠合盆地分析有效方法之一(图 5). 波动是物质运动的基本形式之一, 大到天体的运动, 小到细胞内物质的运动, 无不包含着波动现象. 地质上的“旋回性”、“周期性”、“韵律性”、“等距性”、“脉动性”都是地质体波状运动的表现形式.

将成盆、成烃、成藏动态的研究思路有机融合于地壳的波动过程, 通过求得沉积速度, 进一步用滑动平均的方法对这些似周期及非周期的沉降速度处理, 分解出一些有周期规律的波动曲线, 通过不同小区之间波动方程的分析对比, 将获得盆地演化历史的新认识, 包括: (i) 控制盆地演化的波动周期; (ii) 不整合面的时空分布、成因和剥蚀量; (iii) 地层格架的时空分布、成因和形成过程; (iv) 沉积波动过程平面迁移及机制; (v) 基底沉降波动过程. 结合成藏因素与成藏作用分析, 进一步分析波动过程对油气形成与分布的控制作用^[11-16].

波动分析法的突出特点是具有预测性, 波动方程一旦确定, 我们就可以预测在无地层记录的漫长过程中可能发生的各种地质作用. 更重要的是该方法揭示了盆地演化的内在控制因素, 也就是动力学背景, 从本质上揭露了叠合盆地的性质.

2.2 成藏体系分析法

经典的含油气系统概念不能适应我国叠合盆地的油气勘探^[17-18], 主要体现在: (i) 不适用于多源、混源型油气藏的研究; (ii) 研究方法过于简单, 尤其对勘探程度低的地区缺乏有效性; (iii) 缺乏对系统动态演化的研究; (iv) 缺乏系统内部油气分布规律的研究. 针对这一问题, 金之钧等以系统论为指导, 使用“元素-结构-功能”这一真正意义上的系统思想体

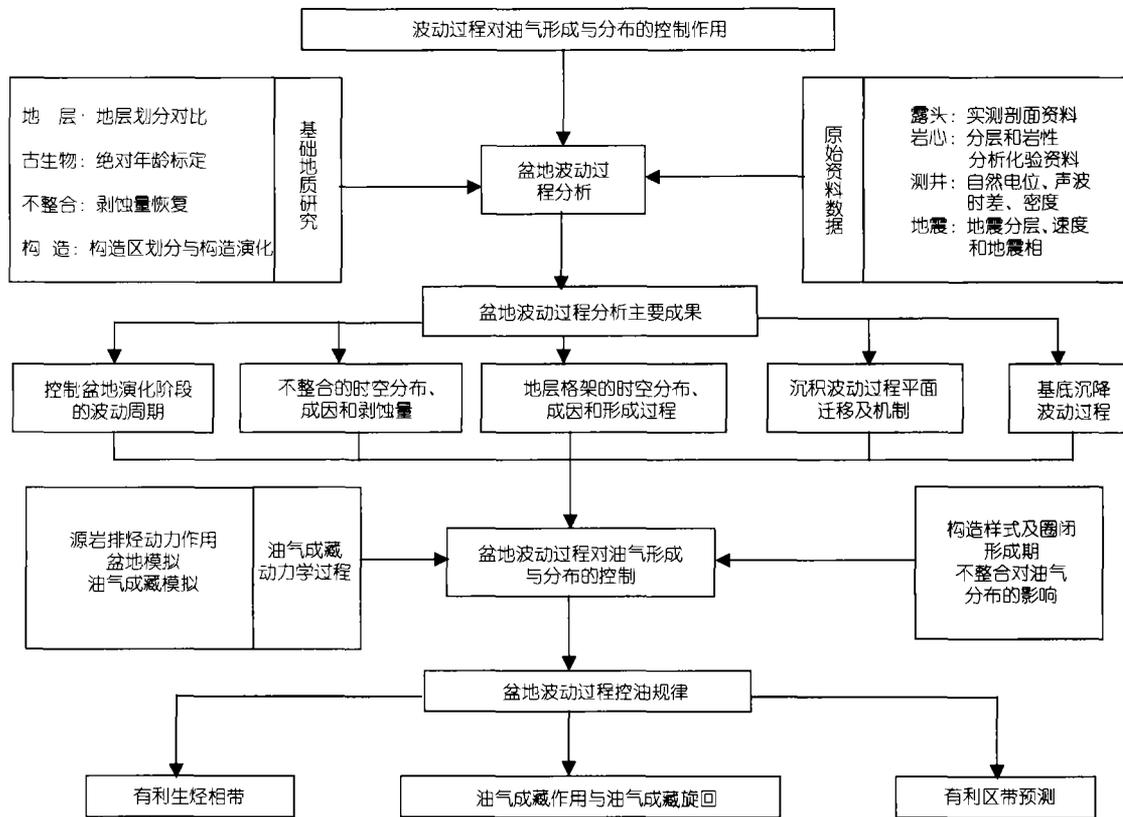


图 5 波动分析技术思路及主要内容流程图

系, 提出了油气成藏体系的概念^[18], 即油气成藏体系是地表以下油气成藏的自然体系, 它包括了形成油气藏的一切必要元素, 即烃源体(即含烃流体)、输导体和圈闭, 以及这些元素之间的有效配置的结构. 油气成藏体系必须具备这样的结构, 即能够产生任何单一元素所不具备的功能——形成油气藏. 它与含油气系统的最大区别是强调聚油气构造或圈闭的重要性(图 6).

油气成藏体系的划分原则是: (i) 以聚油单元为核心, 以运移通道为主线, 以供源区为边界进行成藏体系划分; (ii) 一个具有统一油气水界面的油气藏只能属于一个油气成藏体系; (iii) 对于多套烃源岩、多期成藏的多旋回盆地, 首先应当根据构造层、高压封闭层等特征对成藏旋回(生、储、盖、含油气组合)进行划分, 然后据此实施油气成藏体系的类型划分; (iv) 在油气成藏体系划分时, 兼顾烃源岩和主要的油气运移聚集区; (v) 在油气成藏体系内部, 应

有统一的温压场和水动力场.

油气成藏体系的研究方法是: (i) 确定圈闭类

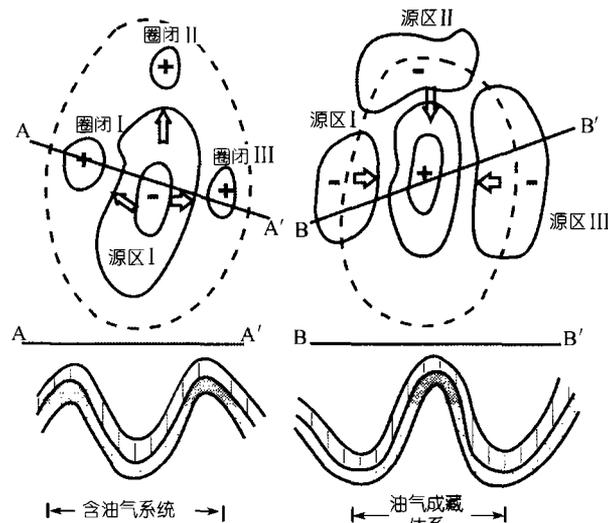


图 6 含油气系统与成藏体系比较图

型及油气有利聚集区; (ii) 确定有效供油区及供油范围; (iii) 确定油气运移输导体系; (iv) 恢复油气运聚历史; (v) 建立油气成藏模式. 该方法从油气成藏的动态演化规律出发, 将其视为一个“生命有机体”, 强调了油气的生、运、聚再到破坏耗散的全过程^[18].

3 研究新进展

通过近几年来多学科、多领域的综合研究, 我们所承担的一项国家重点基础研究发展规划项目“中国典型叠合盆地油气富集与分布预测”在叠合盆地形成与演化、叠合盆地源岩分布与控制因素、叠合盆地油气源对比与分析、叠合盆地多期成藏与多期改造等诸多方面取得了许多重大进展. 限于篇幅, 在此仅以塔里木盆地为例, 围绕成盆、成烃及成藏方面简要介绍.

3.1 成盆

(1) 盆山(天山与两侧盆地)耦合关系及其分段性.

在项目实施过程中, 我们对天山造山带的基底结构进行了地质学和地球物理学综合研究. 本期刊出的赵俊猛等文章为其中的部分成果^[19]. 他们在研究中提出, 天山造山带的岩石圈结构及盆山耦合具有明显的分段性. 卡拉库姆-新都库什天然地震剖面揭示费尔干纳盆地由北向南插入到天山之下; 沙雅-布尔津综合地球物理剖面表明塔里木盆地向天山造山带“层间插入与俯冲消减”, 而准噶尔盆地与天山造山带主要以走滑接触为主; 库尔勒-吉木萨尔高质量的地震宽角反射/折射记录, 揭示了塔里木与准噶尔同时向天山造山带对冲; 可可托海-阿克塞地震剖面是中国西北部第一条深地震测深剖面, 探测结果没有发现明显的岩石圈俯冲^[20]. 由这些深部岩石圈尺度的资料, 对天山造山带的分段及盆山耦合关系类型的差异可窥见一斑.

拜城-大柴旦的综合地球物理剖面, 在库车附近发现了双 Moho 面^[21,22], 且其间的距离由西向东逐渐尖灭于尉犁附近. 经过反复研究与正演计算, 得到塔里木板块东西分段的推论, 并建立了东西两块运动差异的追赶模式. 这也正是造成塔里木北缘库车坳陷阳霞凹陷与拜城凹陷不同的地质结构、构造特征及沉积建造差异的深部原因, 进而也影响到生储盖与

油气分布的差异.

(2) 沉积-地球化学综合指标反映的构造演化. 在天山南库车坳陷的沉积特征、碎屑组分及重矿物分析的基础上, 结合砂岩全岩的主元素分析, 证实了坳陷的沉积记录在下-中三叠统间、侏罗系-白垩系间及白垩系-第三系间存在着突变现象(图 7).

如图 7 所示, 在下-中三叠统间主要表现为代表稳定重矿物组合的金红石+锆石+电气石含量明显增大, 同时, $Al/(Ca+Na)$ 等反映碎屑成分风化指数的综合指标也显著增高, 反映了当时研究区构造活动性的逐渐减小, 可能不存在明显的盆山格局. 在侏罗系-白垩系间, 金红石+锆石+电气石含量明显降低, 砂岩碎屑成分中的石英含量显著减少; 砂岩地球化学成分分析表明, $Al/(Ca+Na)$ 明显降低, 而 Ca 和 $Fe+Mg$ 则逐渐增加. 这一变化趋势一直持续到第三系中, 并且在白垩系-第三系间出现大量辉石和角闪石这些极易风化磨蚀的重矿物组分. 这些特征表明, 从白垩纪开始, 研究区的构造活动性开始变大, 并在第三纪后逐渐加剧.

本期刊出的林畅松等^[23]论文分别论述了库车坳陷白垩系沉积层序的充填响应模式及英吉苏坳陷中生界沉积构造背景, 从另一侧面反映了盆地沉积对构造活动的响应关系.

(3) 浅层伸展构造的厘定. 库车坳陷北部单斜带与天山南缘带的界线为塔里木盆地北部的盆山边界. 大致以羊布拉克为界, 盆山边界产状分为两类: 以西, 第三系不整合在中生界之上, 而其下部的三叠系又不整合在古生界之上; 以东, 第三系与古生界被断层隔开, 策达雅沟观测到断层带内的运动学标志, 指示向盆地方向滑落, 地层下陡上缓的产状变化显示出同构造沉积特征. 因此, 上述盆山边界是库车第三纪盆地的构造边界.

通过对盆山边界处露头脆性变形的观测和研究, 对有明确指向构造的断层及擦痕进行测量, 并对古应力状态进行恢复表明, 盆山边界的应力状态差异较大^[24]. 以羊布拉克为界: 以东, 阳霞和策达雅沟表现为近 E-W 向的斜向伸展的特征; 以西, 表现出明显的垂直于地层走向的伸展状态, 多为近 S-N 向.

依据断层相互切割关系及空间展布型式, 识别

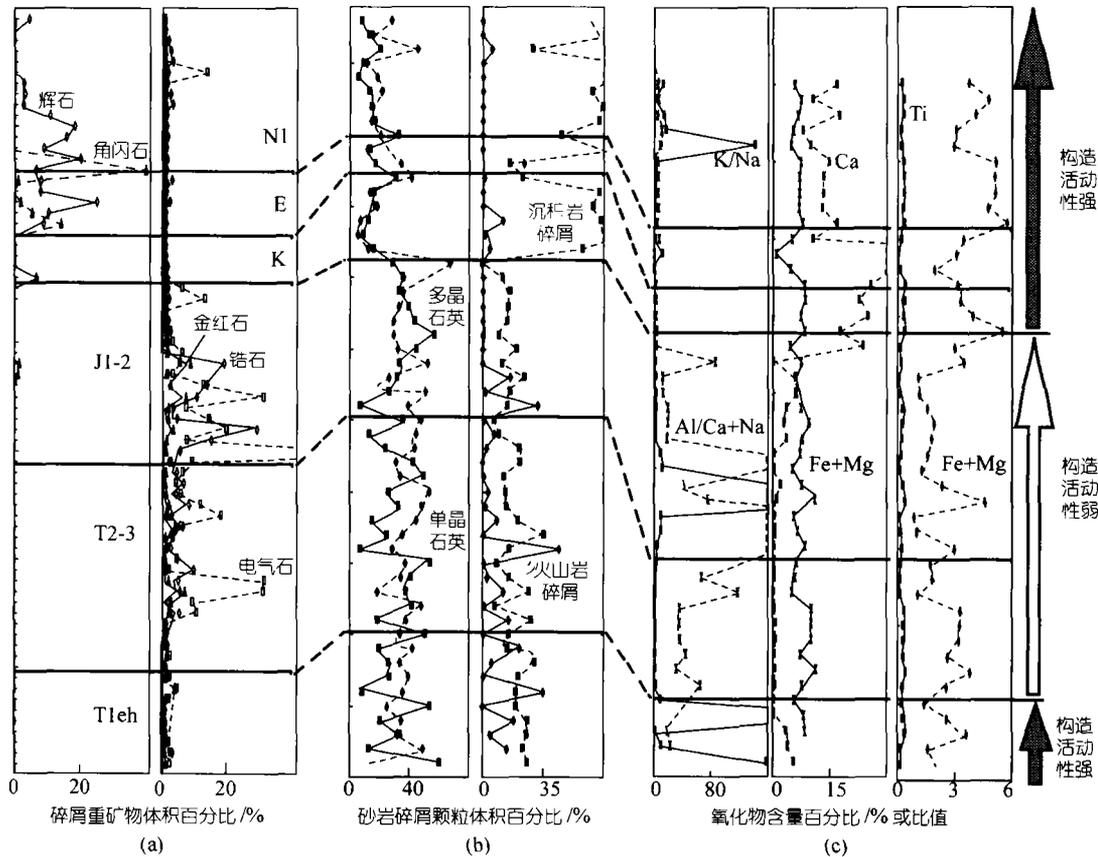


图 7 库车河中新生界碎屑岩组分综合指标演变对比(据王清晨, 李忠¹⁾)
详细讨论见正文

出三组形成时间和运动学特征明显不同的断层. 结合前人研究结果, 早期的逆冲挤压变形最早始于吉迪克组沉积期, 第二期挤压变形始于库车组沉积时, 而第三期为正断层, 形成于西域期. 本期刊出的王清晨等论文^[25]进一步论述了盆地边缘与内部变形特征与古应力状态的差别, 并指出是天山的隆升引起了盆地中盖层的重力构造.

关于叠合盆地多期变形与油气运聚的关系, 本期刊出的一系列论文进行了论述, 如: 汤良杰等对塔里木盆地多期盐构造的论述^[26], 周新源和罗金海对塔里木盆地南缘冲断带的论述^[27], 张仲培和王清晨对库车坳陷中-新生界节理的论述^[28], 曾联波等对库车坳陷中-新生代应力场的论述^[29]等.

3.2 成烃

(1) 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育主控因素. 通过地质学和地球化学综合研究, 认为塔里木盆地海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主控因素有: (i) 下寒武统烃源岩的形成与海底热水流体密切相关, 但不同地区有一定差异; (ii) 适当低的无机物输入和沉积速率有利于高丰度烃源岩形成; (iii) 沉积物有机质含量增加的最佳 CaCl_2 浓度范围为 $0.001 \sim 0.100 \text{ mol/L}$, 大于 0.100 mol/L 的 CaCl_2 浓度明显抑制甚至终止藻细胞的生长; (iv) 重碳-重氧期与高丰度烃源岩呈正相关; (v) 下古生界中某些微量元素含量与高丰度烃源岩呈正相关, 暗示海域中营养盐促使了生烃母质生物勃发.

1) 王清晨, 李 忠. 中国典型叠合盆地关键构造变革时期的盆山耦合与深部过程. 973 项目年度报告, 2003

高丰度烃源岩仅发育于被动大陆边缘背景下的裂谷、克拉通内裂谷、克拉通内坳陷盆地和克拉通边缘坳陷盆地、活动大陆边缘背景下的前缘斜坡、挠曲类前陆坳陷中。被动大陆边缘背景下的克拉通台地及活动大陆边缘背景下的前渊坳陷中一般没有烃源岩发育。

本期刊出的陈践发等^[30]和鲍志东等的论文^[31]从一个侧面反映了这方面的研究成果。

(2) 有效碳酸盐岩烃源岩有机质丰度下限的确定。针对我国碳酸盐岩烃源岩多处于高一过成熟阶段的特点, 我们通过大量的碳酸盐岩生排烃机理模拟实验, 从生排烃机理和数值计算两个方面探索有效烃源岩的有机质丰度下限值, 初步确定有效碳酸盐岩油源岩的有机质丰度下限值应为 0.4%~0.5%, 而有效气源岩的下限应根据烃源岩有机质生烃潜力变化和 TSR 两个方面关系来确定。

根据物质平衡原理, 以生气量、吸附气量、油溶气量、水溶气量、扩散气量计算模型为基础, 制作了碳酸盐岩气源岩有机质丰度下限评价图版(图8)。图版直观反映了有机质丰度、类型和成熟度这三方面指标对碳酸盐岩气源岩有机质丰度评价标准的影响。可以看出, 碳酸盐岩作为气源岩的有机质丰度下限受源岩层厚度、有机质的生烃潜力和成熟度的影响很大, 对与生烃潜力在 500 mg/g 左右的成熟的碳酸盐岩烃源岩, 有机质的丰度下限值约为 0.17%~0.2%。但这一丰度下限值尚未考虑在构造运动期间以机械渗滤形式散失的天然气。因此, 确定碳酸盐岩成为气源岩所要求的有机质丰度下限值还要高一些, 可能为 0.25%~0.3%。这方面的研究成果集中反映在本期刊出的钟宁宁等^[32]和薛海涛等^[33]的论文中。

3.3 成藏

(1) 流体包裹体古温压分析。应用 PVTsim 模拟

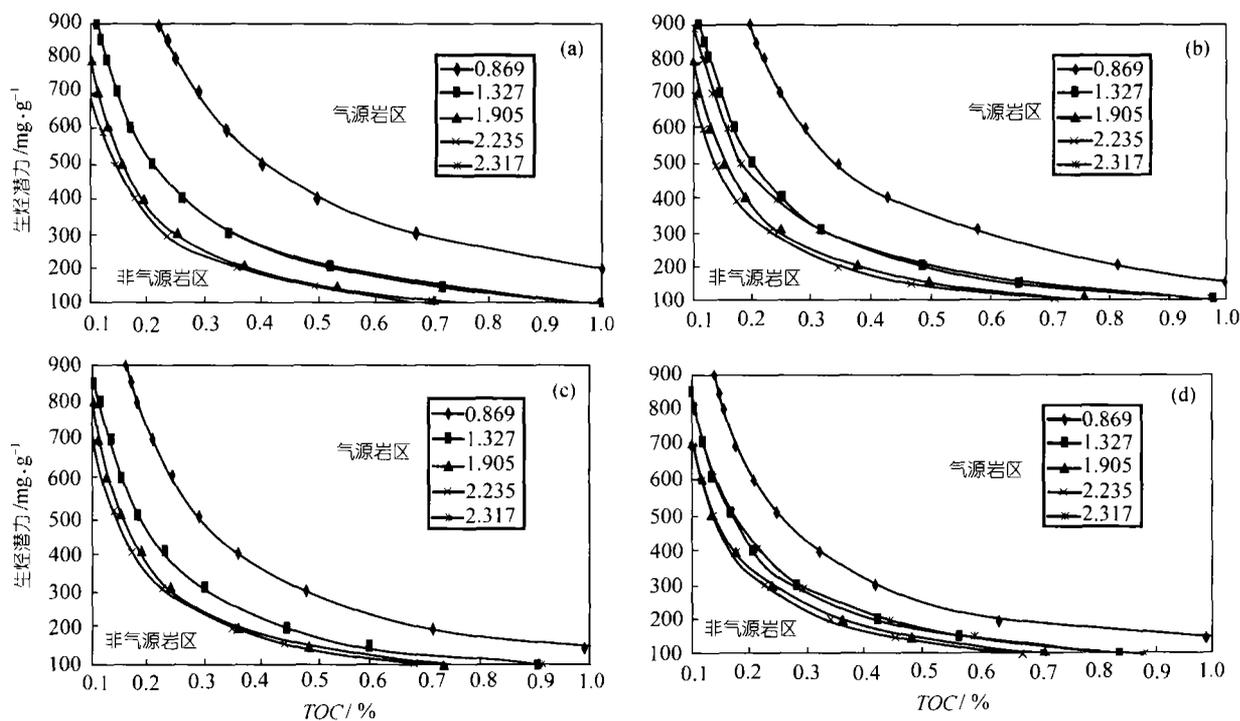


图8 碳酸盐岩气源岩有机质丰度下限划分图版¹⁾
(a) 源岩厚 100 m; (b) 源岩厚 200 m; (c) 源岩厚 500 m; (d) 源岩厚 1000 m

1) 钟宁宁, 耿安松. 中国典型叠合盆地碳酸盐岩烃源岩生排烃机理与效率. 973 项目年度报告, 2003

软件与共聚焦激光扫描显微镜相结合,建立起适应不同条件下流体包裹体古压力与古温度确定方法¹⁾。一种是利用液态烃包裹体和同期盐水包裹体等容线方程联立求解包裹体真正捕获时的温压,另一种是应用盐水包裹体求取捕获压力。

轮南地区晚古生代与中生代油气储层为砂岩,由于包裹体生长条件的限制,有机包裹体很少,而盐水包裹体丰富,且主要产于裂纹中。在不少情况下,较难确定与有机包裹体共生的盐水包裹体。因此,只有用第二种方法求取捕获温度与捕获压力,方法如下:

$$P_{捕x}=P_{饱}+\Delta P$$

$$T_{捕x}=T_{均}+\Delta T$$

其中 $P_{捕x}$, $T_{捕x}$ 分别为某流体包裹体捕获温度与压力, ΔP 与 ΔT 是根据轮南地区按第一种方法求取的捕获压力与捕获温度与饱和压力及温度的差值,即校正值。应当指出,在不同均一条件下, ΔT 与 ΔP 不会完全一样,但变化在一定范围内。因此,按第二种方法所确定的捕获压力实际上是近似捕获压力。

(2) 轮南、塔河稠油油源对比。自 20 世纪 80 年代沙参 2 井发现以来,对其油源研究一直处于争论之中,目前争论的焦点集中在是寒武系-下奥陶统还是中上奥陶统生源。

轮南、塔河油田稠油饱和烃色谱图中具有完整的正构烷烃分布,但基线不同程度抬升,普遍含有 25-降藿烷系列,表明原油存在两期充注过程。其三环萜烷以 C_{23} 为主峰, C_{24} 四环萜烷的丰度普遍较低, C_{24} -四环/ C_{26} 三环萜烷的比值在 0.6~0.8 之间。藿烷系列中 C_{29} 藿烷、 C_{31} 藿烷、 C_{35} 藿烷较高、伽马蜡烷含量较低, $G/C_{30}H$ 小于 0.15, 甾烷的分布模式为 $C_{29}>C_{27}>C_{28}$, 但 C_{28} 甾烷含量明显低于 TD2 井稠油。

特殊标记化合物表明,轮南、塔河稠油甲藻甾烷和 4-甲基-24-乙基胆甾烷含量低,而 3-甲基-24-乙基胆甾烷含量高;三芳甲藻甾烷分布上,以 3 β -甲基-24-乙基胆甾烷占优势,其它三芳甾烷含量低甲藻甾烷几乎检测不到;具有较高含量的 27-降胆甾烷,这些特点与中上奥陶统烃源岩的面貌相似,表明中上

奥陶统可能是轮南、塔河稠油的源岩,而与寒武系生源的 TD2 井稠油具有明显差别。

混源油的配比实验表明,随 TD2 井比例的增加, $G/C_{30}H$ 比值、 C_{28}/C_{29} 甾烷比值、甲藻甾烷含量、4-甲基-24-乙基胆甾烷含量均会增加。值得注意的是, YW2 井原油若混入 25% 比例的寒武系生源的原油, $G/C_{30}H$ 比值就会从 0.03 增加到 0.18, 甲藻甾烷绝对含量、4-甲基-24-乙基胆甾烷绝对含量会从 0 增加到 6, 20 $\mu g/goil$, 体现了寒武系源岩的特征。而现今轮南、塔河稠油找不到寒武系生源的分子标志物,将原油中的生物标志物归因于中上奥陶统的污染证据不足。

沥青质钒离子催化氧化实验表明,不考虑 C_{16} , C_{18} 酸的异常高值,轮南、塔河稠油沥青质 RICO 产物有机相一元酸分布基本呈单峰形,主峰一般在 $C_9\sim C_{11}$ 之间;而 TD2 井原油沥青质 RICO 产物有机相一元酸主峰碳移至 $C_{14}\sim C_{15}$, 在 C_9 出现一次主峰,呈现“双峰型”的分布。在稠油沥青质 RICO 产物中,其甾烷酸(甲酯)的分布呈现出 $C_{30}>C_{28}>C_{29}$ 的分布, TD2 井稠油沥青质甾烷酸(甲酯)组成上则呈现 $C_{28}>C_{30}>C_{29}$ 的分布,轮南、塔河油田稠油在 4 甲基甾烷酸呈现 $4M-C_{30}>>4M-C_{28}>4M-C_{29}$ 的分布面貌,而 TD2 井 4-甲基甾烷酸呈现 $4M-C_{28}>4M-C_{30}>4M-C_{29}$ 的分布面貌。

沥青质 RICO 产物一元酸和生酸酸存在的差异表明轮南、塔河稠油中高分子量部分——沥青质来源也不同于 TD2 井稠油。若我们承认 TD2 井为寒武系生源的原油,那么轮南、塔河油田的稠油可能的来源应为中上奥陶统^[34]。

(3) 轮南地区不同时代储层中有机包裹体分期及形成时间。轮南地区不同时代储层石油包裹体具有明显分期性,采用如下标志进行综合分期:(i) 石油包裹体产状;(ii) 石油包裹体的荧光特征;(iii) 石油包裹体均一温度及其共生盐水溶液包裹体均一温度;(iv) 与石油包裹体共生沥青特征及成熟度;(v) 石油包裹体成份;(vi) 石油包裹体形成古压力;(vii) 储层油气地化特征。我们的研究表明¹⁾, 早古生代碳

1) 彭平安, 吕修祥. 中国典型叠合盆地成藏年代学研究. 973 项目年度报告, 2003

酸盐岩储层中存在四期有机包裹体(表1), 按形成时间顺序称为 I 期、II 期、III 期及 IV 期。其中第 I、II、III 期分布广泛, 与区域性油气充注事件有关, 第 IV 期分布局限, 与局部热流体活动有关。通过流体包裹体、古压力、沥青质组成及反射率、自生矿物伊利石测年数据等综合分析, 认为下古生界碳酸盐岩 3 期有机包裹体分别形成于晚志留-早泥盆世、晚白垩世及晚第三纪。

石炭系砂岩储层存在一期有机包裹体, 其捕获温压分别为 135~139°C 及 35~37 MPa; 三叠系砂岩储层存在二类有机包裹体, 虽性质不同, 但成藏时间相当, 其捕获温度与压力为 97~138°C、28~39 MPa。石炭系及三叠系储层包裹体与奥陶系第 III 期有相似的温压环境(图 9), 均形成于晚第三纪。

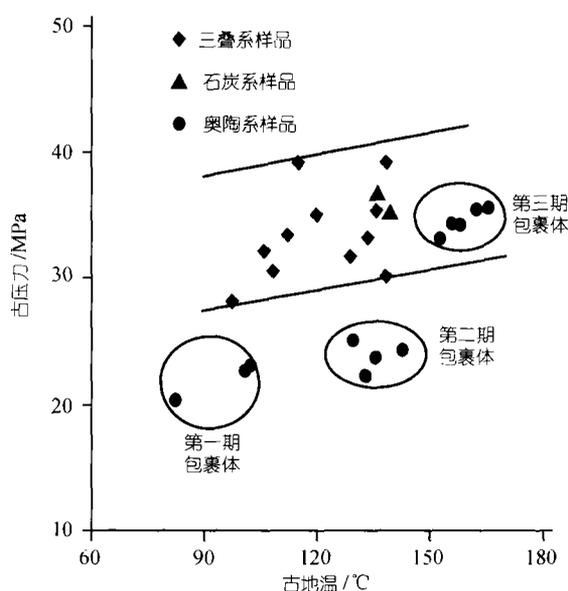


图 9 轮南地区不同时代储层中有机包裹体古压力-温度关系(据彭平安、吕修祥, 2003¹⁾)

表 1 轮南低隆起奥陶系碳酸盐岩石油包裹体分期

期次	产状	荧光颜色	均一温度/°C	共生沥青 Ro/%	古压力/MPa
I	次生加大边、方解石细脉	绿、黄、黄绿色	90~100	1.2~1.5	20~22
II	方解石细脉、次生加大边	黄绿、绿黄色	120~130	0.8~1.0	23~25
III	方解石细脉	绿黄、黄绿色	140~150	< 0.05	33~36
IV	方解石细脉	黄色	190~200	1.8~2.0	35~39

1) 彭平安、吕修祥. 中国典型叠合盆地成藏年代学研究. 973 项目年度报告, 2003

平面上, 奥陶系三期有机包裹体在东部均有发现, 而在西部仅发现有第 II 期。三叠系砂岩储层中类型 1 有机包裹体虽不多, 但在全区均有发现, 但类型 2 仅发现于东部解放渠东背斜构造带。三类有机包裹体分布看, 分布最广的是 II 期与第 III 期, I 期最少。

4 结语

我国大多数含油气沉积盆地以构造与沉积叠加为特征。叠合盆地在不同时期可发育多种类型的烃源岩、多种成因的储集体、以及多种结构的生储盖组合, 而沉降与抬升的多次交替可使这些烃源岩在适当的时间进入生油窗, 从而造成多次生排烃, 并引起油气的多期运聚散。

针对我国陆上沉积盆地的多旋回性及多期改造的特点, 我们提出了适合于叠合盆地构造演化研究的波动分析法。针对叠合盆地油气成藏的多源、多期性特点, 我们提出了油气成藏的成藏体系分析法。

成盆研究历来受到重视, 因为盆地的存在是油气生成和运聚的前提; 但在叠合盆地演化过程中, 先期盆地的后期改造往往控制了油气的成藏。因此, 我们认为, 对叠合盆地中重要变革期或转折期的研究显得更为重要。

我们在对诸多油气田资料统计和开展大量生烃实验的基础上, 揭示了海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的构造环境及主控因素, 提出了有效碳酸盐岩油源岩的有机质丰度下限值应为 0.4%~0.5%, 而有效气源岩的下限受源岩厚度、生烃潜力及成熟度影响。我们希望能把这一更为客观的认识推广开来, 以提高我国油气勘探的效率。

我们深知, 对叠合盆地的研究刚刚起步, 在叠合盆地中高效率开展油气勘探仍然是一项迫切而又艰巨的任务。我们将继续我们的努力。

参 考 文 献

- 1 《世纪石油之光》编委会. 世纪石油之光. 北京: 新华出版社, 1998. 399
- 2 Bally A W, Snelson S., Realms of subsidence. In: Miall A D, ed. Facts and principles of world petroleum occurrence. Can Soc Petro Geol Mem 6, 1980. 9~94
- 3 田在艺. 中国含油气盆地构造特征及其远景评价. 见: 田在艺, 田在艺石油地质论文选集. 北京: 石油工业出版社, 1997. 56~68
- 4 朱 夏. 试论中国中生代油气盆地的地球动力学背景. 见: 朱夏, 主编. 中国中生代盆地构造和演化. 北京: 科学出版社, 1983. 1~10
- 5 张 垲, 高明远, 姚慧君, 等. 中国大陆板块构造与含油气盆地. 见: 《中国含油气区构造特征》编委会. 中国含油气区构造特征. 北京: 石油工业出版社, 1989. 20~34
- 6 胡见义, 徐树宝. 跨越构造运动体制油气藏的形成. 见: 孙肇才, 张渝昌, 主编. 中国油气盆地分析——朱夏学术思想研讨文集. 北京: 石油工业出版社, 1993. 87~91
- 7 田在艺. 含油气盆地形成的条件. 见: 孙肇才, 张渝昌, 主编. 中国油气盆地分析——朱夏学术思想研讨文集. 北京: 石油工业出版社, 1993. 18~31
- 8 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997. 438
- 9 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟, 等. 应用沥青反射率推算油气生成与运移的地质时间. 科学通报, 2000, 45(19): 2123~2127
- 10 李小地. 油气藏成因模式探讨. 石油勘探与开发. 1996, 23(4): 1~5
- 11 施比伊曼 В И, 张一伟, 金之钧, 等. 波动地质学在黄骅坳陷演化分析中的应用——再论地壳波状运动. 石油学报, 1994, 15: 19~26
- 12 李京昌, 金之钧, 刘国臣, 等. 100 Ma——塔里木盆地演化的重要周期. 地学前缘, 1997, 4(3~4): 312~317
- 13 刘国臣, 李京昌, 金之钧, 等. 波动地质学研究中的资料收集与整理. 石油大学学报, 1994, 18(6): 1~7
- 14 李京昌, 金之钧, 刘国臣. 盆地沉降史研究的新方法——波动分析. 地球科学进展, 1997, 12(5): 479~483
- 15 张一伟, 李京昌, 金之钧, 等. 中国含油气盆地波状运动特征研究. 地学前缘, 1997, 4(3~4): 306~311
- 16 金之钧, 刘国臣, 李京昌, 等. 塔里木盆地一级演化周期的识别及其意义. 地学前缘, 1998, 5: 191~197
- 17 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 叠合盆地油气资源评价问题及其研究意义. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 9~13
- 18 金之钧, 张一伟, 王捷, 等著. 油气成藏机理与分布规律. 北京: 石油工业出版社, 2003. 73~94
- 19 赵俊猛, 王清晨, 段永红, 等. 天山造山带基底结构的有限差分研究. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 13~18
- 20 赵俊猛, 李植纯, 马宗晋. 天山分段性的地球物理学分析. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 125~131
- 21 Zhao Junmeng, Liu Guodong, Lu Zaoxun, et al. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. Tectonophysics, 2003, 376: 199~239
- 22 赵俊猛, 张先康, 邓宏钊, 等. 拜城-大柴旦剖面的上地壳 Q 值结构. 地球物理学报, 2003, 46(4): 503~509
- 23 林畅松, 王清华, 肖建新, 库车坳陷白垩纪沉积层序构成及充填响应模式. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 74~82
- 24 王清晨, 张仲培, 林 伟, 库车盆地-天山边界的晚第三纪断层活动性质与应力状态. 科学通报, 2003, 48(24): 199~239
- 25 王清晨, 张仲培, 林 伟, 等. 库车-天山盆地系统晚地三纪变形特征. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 45~55
- 26 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 塔里木盆地多期盐构造与油气聚集. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 89~97
- 27 周新源, 罗金海. 塔里木盆地南缘冲断带构造特征及其油气勘探前景. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 56~62
- 28 张仲培, 王清晨. 库车坳陷中生界节理发育特征及其对区域应力场转换的指示. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 63~73
- 29 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场及其油气运聚效应. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 98~106
- 30 陈践发, 孙省利, 刘文汇, 等. 塔里木盆地地下寒武统富有机质层段地球化学特征及成因探讨. 中国科学, D 辑, 2004, (增刊 I): 107~113
- 31 鲍志东, 陈践发, 张水昌, 等. 北华北中上元古界有利烃源岩发育环境及其控制因素. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 114~119
- 32 钟宁宁, 卢双舫, 黄志龙, 等. 烃源岩生烃演化过程 TOC 的值演变及其控制因素. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 120~126
- 33 薛海涛, 卢双舫, 钟宁宁. 碳酸盐岩气源岩有机质丰度下限研究. 中国科学, D 辑, 2004, 34(增刊 I): 127~133
- 34 马安来, 张水昌, 张大江, 等. 轮南、塔河稠油油源对比. 石油与天然气地质, 25(1): 31~38