中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 3 期: 310 ~ 320
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

塔里木盆地环满加尔凹陷油气来源与勘探方向

金之钧[1,2*], 刘全有[1,2], 云金表[1,2], 腾格尔[1,2]

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

* E-mail: jinzj.syky@sinopec.com

收稿日期: 2016-06-08; 接受日期: 2016-11-16; 网络版发表日期: 2017-01-13
国家自然科学基金项目(批准号: 41230312, 41322016, 41230312)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2012CB214800)资助

摘要 自塔河油田发现以来, 关于主力烃源岩是寒武系还是中上奥陶统一直存在争议. 本文以英买2和塔东2井原油作为中上奥陶统和寒武系烃源岩来源的端元, 对比分析了塔北轮南与哈德地区原油、沥青吸附烃和沥青包裹体饱和烃生物标志物. 其三环萜烷C_{21}/C_{23}比值小于1, 指示其与上奥陶统烃源岩有关, 而储层沥青和沥青包裹体中饱和烃中甾烷$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值大于25, 指示其与寒武系烃源岩有关. 但塔北原油该比值小于25, 具有上奥陶统烃源岩特征, 表明塔里木盆地原油来源具有复杂性. 塔里木盆地奥陶系油藏原油组分与碳同位素组成对比表明, 塔北(含塔河油田)、塔中等油藏原油主要处于以英买2和塔东2原油为端元构成的二元混合区间内, 指示了塔北和塔中原油呈现出寒武系和中上奥陶统烃源岩生成原油发生混合后的特征, 从塔北南坡向塔中北坡方向寒武系烃源岩贡献逐渐增加. 在钻井地层、沉积相资料约束下, 以地震反射特征为基础, 重新编制了寒武系、中下奥陶统和上奥陶统烃源岩空间展布, 指出优质烃源岩空间上主要位于盆地斜坡带, 纵向上主要发育于水进过程中最大海泛面. 受盆地构造格局迁移演化影响, 不同区域烃源岩的叠置不同. 盆地原始沉积结构和后期改造过程共同控制了油气分布, 塔中北围斜区-顺托-古城地区长期临近斜坡区, 必将是近期油气勘探的重要战场.

关键词 塔里木盆地, 海相烃源岩, 油源对比, 生物标志化合物

1 引言

尽管塔北隆起沙参2井发现至今已近30年, 然而对塔里木盆地台盆区油气来源的认识仍然存在很大争议. 第一种观点认为, 塔里木盆地海相油气主要来自寒武系-下奥陶统烃源岩, 中上奥陶统烃源岩(按照新地层划分属于上奥陶统) 在沙雅隆起上发育有限, 难以成为塔北隆起海相工业性油藏的主力贡献者(Cai等, 2009; Sun等, 2003; 顾忆, 2000; 顾忆等, 2003; 康玉柱等, 1996; 史鸿祥等, 2005; 赵孟军等, 2007), 海相油藏主要成藏期为海西晚期. 支持该学术观点的学者主要使用萜烷系列生物标志化合物和碳同位素组成等地球化学参数, 包括C_{21}/C_{23}三环萜烷、Pr/Ph、Pr/nC_{17}、Ph/nC_{18}、甲基菲指数、C_{15}/C_{16}倍半萜、C_{24}四环萜烷/C_{26}三环萜烷、伽马蜡烷/C_{30}藿烷、原油碳同位素以及硫同位素组成等. 第二种观点认为, 塔里木盆地

中文引用格式: 金之钧, 刘全有, 云金表, 腾格尔. 2017. 塔里木盆地环满加尔凹陷油气来源与勘探方向. 中国科学: 地球科学, 47: 310–320, doi: 10.1360/N072015-00573
英文引用格式: Jin Z J, Liu Q Y, Yun J B, Tenger. 2017. Potential petroleum sources and exploration directions around the Manjar Sag in the Tarim Basin. Science China Earth Sciences, 60: 235–245, doi: 10.1007/s11430-015-5573-7

© 2017 中国科学》杂志社

目前保存下来的工业性海相油田主要来自中上奥陶统烃源岩, 并强调海相工业性烃源岩不必很厚, 但烃源岩需要具有较高的有机质丰度(TOC≥0.5%), 泥质碳酸盐岩也可以作为烃源岩(Li等, 2005; Li等, 2012; Li等, 2015; Ma等, 2008; Wang等, 2008; 李素梅等, 2004; 梁狄刚等, 2000; 吕修祥等, 1999; 张水昌等, 2004), 海相油藏属于白垩纪以来形成的产物. 支持该学术观点的学者主要使用甾烷系列生物标志化合物参数, 包括C_{26}甾烷、C_{28}甾烷、重排甾烷/规则甾烷、甲藻甾烷、甲藻三芳甾烷、4-甲基-24乙基-胆甾烷及芳构化甾烷等. 由于塔里木盆地台盆区原油多属于多期成藏, 如根据油源对比、包裹体和埋藏史模拟分析, 塔河-轮南大型油田主要存在中晚志留世和中新世-上新世两期油气充注, 对应的年代分别为429~415和8~2Ma, 包裹体均一温度分别为80~100和115~135 ℃ (Ma等, 2008; Wang等, 2008). 多期成藏和后期调整改造(包括生物降解、水洗、气洗、运移分馏等), 不同区块具有不同的油气性质或者同一区块不同井区和层位油气性质差异性较大.

截止2013年底, 塔里木海相油气探明地质储量22.2×10^8t, 共发现大中型油气田17个, 其中大型油田(>1000×10^4t) 包括塔河-轮南、东河塘、哈拉哈塘、塔中、英买等, 大型气田(>50×$10^8$$m^3$) 包括雅克拉、和田河、轮古、吉拉克、塔中I号带等. 目前, 油气储量的增加主要依靠原有油气田的滚动勘探和外围推展, 如何选择具有战略接替新领域和新层系是当前急需要解决的问题, 与此同时, 也需要考虑到油源这一始终制约油气勘探方向的重要因素. 本文结合塔里木盆地不同地质时期构造演化、岩相古地理空间展布和优质烃源岩发育的部位, 通过典型原油生物标志化合物对比分析, 揭示塔里木盆地台盆区海相原油来源和烃源岩有利分布区, 结合最新钻井资料信息, 刻画了研究区内盆地结构与沉积充填特征, 建立了古隆起和沉积斜坡迁移过程中优质烃源岩发育模式, 分析了油气聚集条件, 指出了近期油气勘探方向.

2 塔里木盆地台盆区油源对比

油源对比的核心是理清不同供烃母质之间关键组成和生物标志物的差异性, 较为常用的指标包括生物标志化合物、元素以及稳定同位素组成(δ^{13}C、δ^{34}S等). 但由于元素和稳定同位素组成的差别主要利用其测试数值分布范围与原油进行对比, 统计数量和代表性往往影响油源对比结果. 同时, 由于相似沉积环境形成烃源岩之间存在一定的重叠, 容易引起一定的争议. 生物标志化合物色质图谱和相关生物标志化合物类比一直是油源对比中最为常用的手段, 利用烃源岩中某些特定生物标志化合物与原油中生物标志物进行对比分析, 将他们抽提物的色质图谱相似的或者某些标志物比值分布范围相近的划分为一族, 即烃源岩与原油为同源. 这种油源对比的关键是代表性样品的选取, 烃源岩一般选取TOC含量大于0.5%且属于发现油藏范围内或附近, 避免烃源岩分布距离油藏太远; 代表性原油选取单一烃源岩生成且后期未经生物降解的正常原油为宜. 本文选取星火1井寒武系泥岩和轮南46井上奥统统良里塔格组灰色灰岩分别作为寒武系-下奥陶统和中上奥陶统烃源岩. 从他们饱和烃色质图谱可知(图1), 寒武系烃源岩与上奥陶统烃源岩最大的差别在于藿烷系列化合物中三环萜C_{21}/C_{23}比值和甾烷系列化合物中C_{27}-C_{28}-C_{29}形态, 在藿烷系列化合物中寒武系烃源岩中三环萜烷C_{21}相对丰度高于C_{23}(三环萜烷C_{21}/C_{23}大于1.0), 而上奥陶统三环萜烷C_{21}相对丰度低于C_{23}(三环萜烷C_{21}/C_{23}小于1.0). 由于三环萜烷具有极强的抗生物降解和热稳定性, 他们可以在相对较高的热成熟度下通过干酪根热裂解生成(Palaces等, 1986; Peters等, 1990), 因此, 塔里木盆地三环萜烷C_{21}/C_{23}比值的大小可能体现了寒武系与上奥陶统烃源岩热成熟度的差异性, 因为高成熟烃源岩更易于生成低碳数的三环萜烷. 寒武系烃源岩中甾烷系列化合物具有C_{27} > C_{28} < C_{29}特征, 呈V字型, 但C_{28}丰度明显偏高, C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})比值大于25, 而上奥陶统烃源岩也具有C_{27} > C_{28} < C_{29}的V字型特征, 但C_{28}丰度明显偏低, C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})比值小于25 (Wang等, 2008; Wang等, 2004; Zhang 和 Huang, 2005). 来自海相烃源岩的原油中C_{28}甾烷相对含量随着地质年代变老而增加, C_{29}甾烷则呈减少趋势(Moldowan等, 1985; Grantham 和 Wakefield, 1988), 这可能与浮游藻类有关, 譬如硅藻、颗石藻、沟鞭藻等. 因此, 塔里木盆地寒武系烃源岩具有相对较高的C_{28}甾烷丰度, 即暗示了地质年代老, 也表明浮游藻类贡献的相对增加.

目前, 学者普遍认为塔东2井和英买2井原油分别代表了寒武系和上奥陶统烃源岩生成的典型原油(Li

等, 2015; Wang等, 2008; Zhang等, 2000). 从饱和烃色质图谱来看(图2), 英买2井三环萜烷C_{21}/C_{23}比值小于1.0, $C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值小于25, 而塔东2井三环萜烷$C_{21}/C_{23}$比值大于1. 0, $C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值基本大于25. 因此, 本文以塔东2和英买2井分别作为来自寒武系和上奥陶统烃源岩的端元原油样本. 通过对塔北和哈德地区原油饱和烃、沥青质吸附烃和沥青质包裹体中饱和烃萜烷系列化合物分析(Tian 等, 2012), 三者均表现为三环萜烷C_{21}相对丰度低于C_{23}, 即三环萜烷C_{21}/C_{23}比值小于1.0, 具有中上奥统统烃源岩特征(图3). 原油饱和烃、沥青质吸附烃和沥青质包裹体饱和烃甾烷系列化合物中, 三者均表现为$C_{27}>C_{28}<C_{29}$的V字型, 但$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值变化较为复杂(图4, 表1). 塔北哈德地区HD601井, 沥青质吸附烃和沥青质包裹体饱和烃甾烷系列化合物$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值大于25, 表现为寒武系烃源岩来源特征, 而原油饱和烃甾烷系列化合物$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值略小于25, 难以判识寒武系和上奥陶统烃源岩来源. 而塔北的轮南地区LG15-1和LG40原油饱和烃甾烷系列化合物$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值小于25, 具有上奥陶统烃源岩来源特征, 但沥青质吸附烃和沥青质包裹体饱和烃中$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值大于25, 表现为寒武系烃源岩特征. 由此可见, 塔北的轮南和哈德地区原油和沥青来源较为复杂, 沥青质吸附烃和沥青质包裹体饱和烃均表现为寒武系烃源岩来源特征, 而轮南地区的LG15-1和LG40原油表现为上奥陶统烃源岩来源特征.

通过对塔里木盆地不同地区原油饱和烃组分和碳同位素组成统计分析(图5), 塔东2井和英买2井(英古2井)处于塔北、塔中等油藏的两个端元. 如果塔东2和英买2井能够分别代表来自寒武系和上奥陶统烃源岩的原油, 那么意味着塔北和塔中地区海相油藏的原油主要表现为二者的混合物. 从塔北 (含轮南-塔河、哈

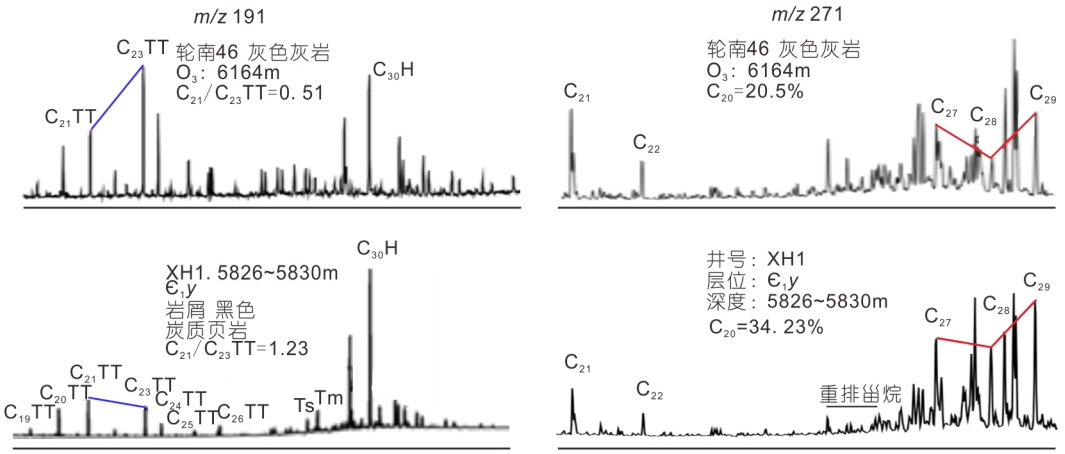

图 1　塔里木盆地寒武系与上奥陶统烃源岩萜烷与甾烷系列化合物色质图谱

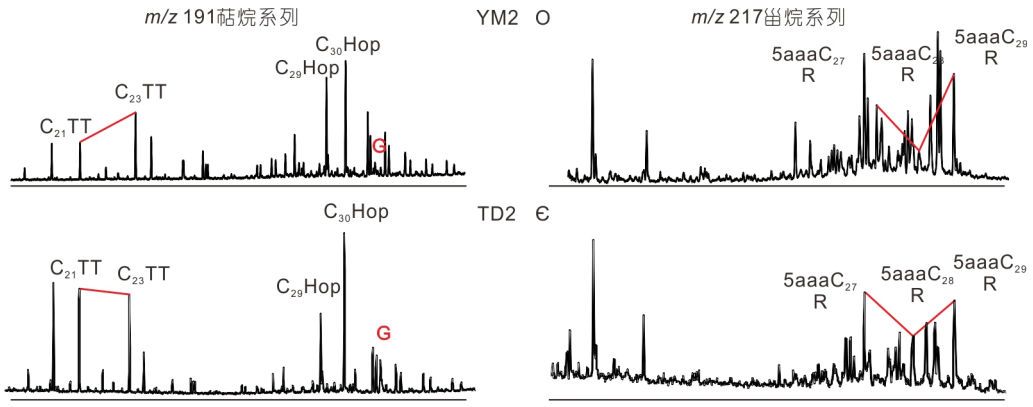

图 2　塔里木盆地YM2与TD2井饱和烃萜烷与甾烷系列化合物色质图谱

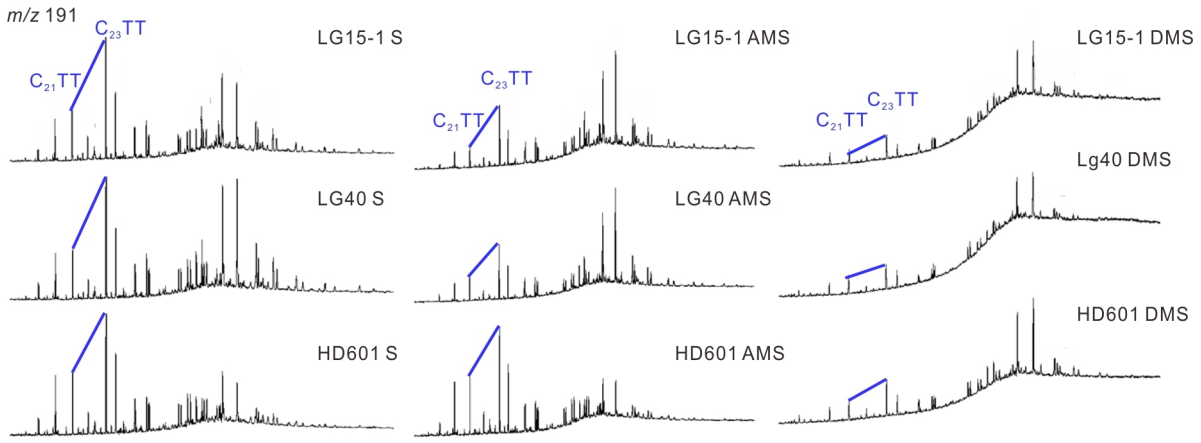

图 3　塔北轮南与哈德地区原油(S)、沥青吸附烃(AMS)与沥青质包裹体(DMS)饱和烃萜烷系列化合物色质图谱

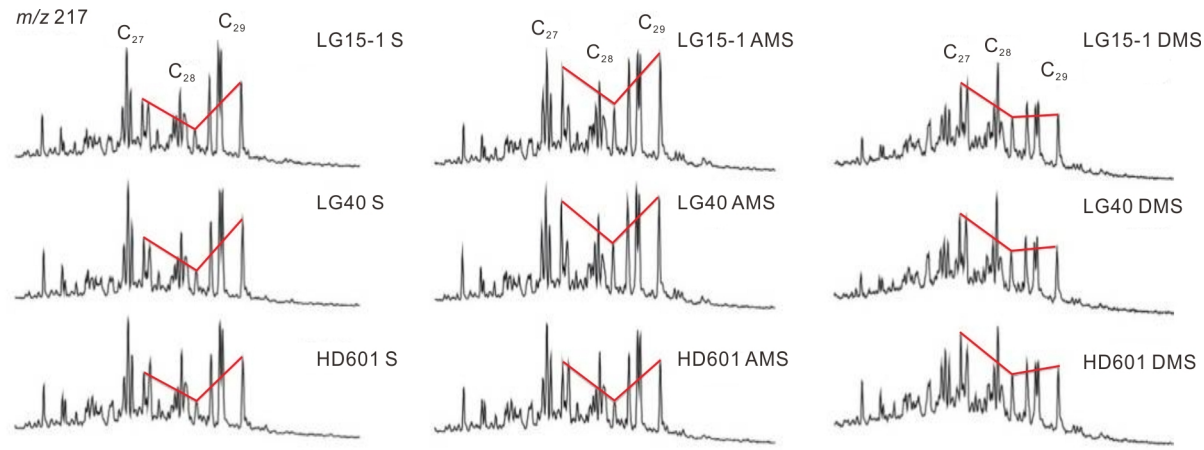

图 4　塔北轮南与哈德地区原油(S)、沥青吸附烃(AMS)与沥青质包裹体(DMS)饱和烃甾烷系列化合物色质图谱

表 1　塔北轮南与哈德地区原油(S)、沥青吸附烃(AMS)与沥青质包裹体(DMS)饱和烃甾烷相对丰度与$C_{28}/(C_{27}+C_{28}+C_{29})$比值数据表

样品	井位	深度(m)	层位	相对丰度			A[a)]	指示烃源岩来源
				$C_{27}\alpha\alpha R$	$C_{28}\alpha\alpha R$	$C_{29}\alpha\alpha R$		
	LG15-1	5953	O	567001	437050	885033	0.231	上奥陶统
S	LG40	5346	O	747218	578713	1116515	0.237	上奥陶统
	HD601	6677	O	748839	630494	1154474	0.249	上奥陶统/寒武系
	LG15-1			412846	395200	634467	0.274	寒武系
AMS	LG40			508259	432419	643624	0.273	寒武系
	HD601			329833	303530	465887	0.276	寒武系
	LG15-1			98036	83278	89689	0.307	寒武系
DMS	LG40			68800	62911	66292	0.318	寒武系
	HD601			35779	33693	36706	0.317	寒武系

a) $\alpha\alpha RC_{28}/(\alpha\alpha RC_{27}+\alpha\alpha RC_{28}+\alpha\alpha RC_{29})$

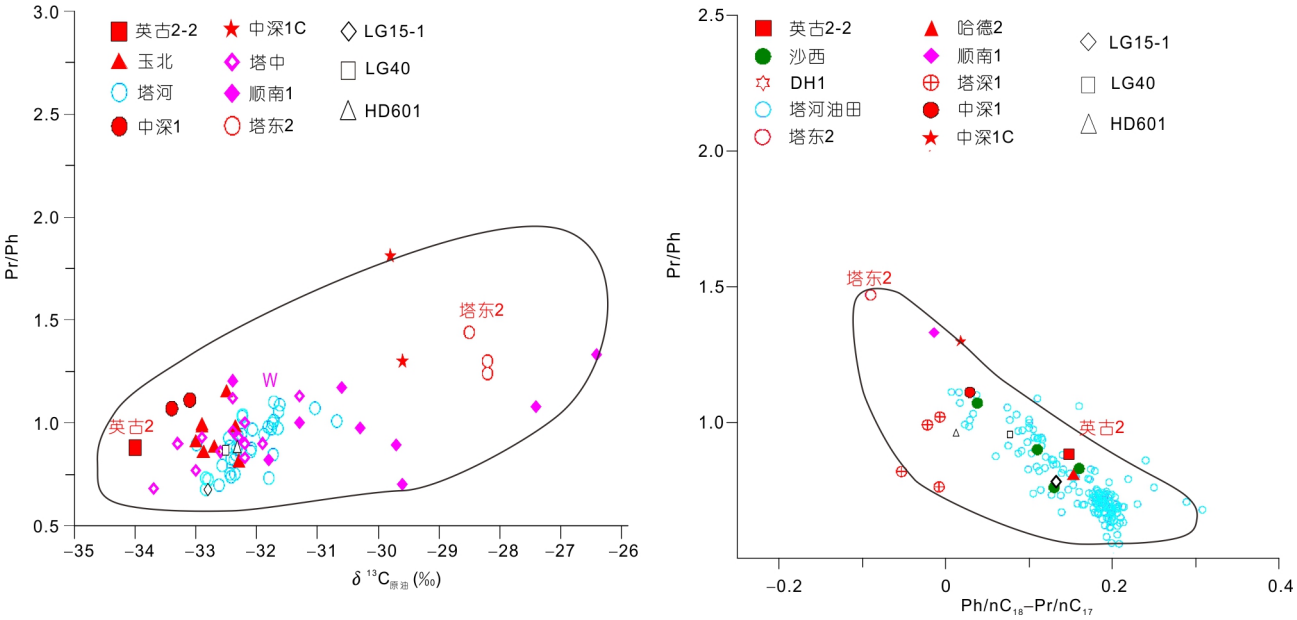

图 5　塔里木盆地不同油藏原油饱和烃组分与碳同位素组成关系图

德) 向塔中北坡寒武系烃源岩对油藏的贡献逐渐增加. 正是因为塔北和塔中原油主要为寒武系和上奥陶统烃源岩形成的原油发生了混合, 导致了不同学者在利用生物标志化合物进行油源对比时获得的结果存在一定的差异.

根据对全球15个主要碳酸盐岩含油气盆地235个大油气田统计, 油气储量主要集中在距离烃源岩分布区域的5km范围内, 一般小于100km, 具有近源成藏的特点(白国平, 2014)[1]. 原油中含氮化合物含量的变化指示了塔北地区塔河油田原油主要来自于台盆区中西部和东南部(Wang等, 2004). 因此, 推测塔河油田原油主要为多期充注运移成藏的, 其东南方向是其烃源灶供烃区域之一, 烃源灶距离塔河大油田距离应该不足100km.

3　塔里木盆地多套烃源岩空间展布与发育模式

根据野外露头、钻井地球化学剖面研究, 塔里木盆地海相烃源岩纵向上主要发育寒武系、中下奥陶统、上奥陶统三个层段.

寒武系烃源岩包括玉尔吐斯组(柯坪隆起)、西山布拉克组-西大山组(库鲁克塔格), 其中以玉尔吐斯组最为发育(相当于玉尔吐斯组层位最为发育). 目前在盆地内部的雅克拉凸起、库尔勒鼻凸和塔东隆起都钻遇该层位烃源岩(云金表等, 2014). 星火1井钻遇的寒武系玉尔吐斯组烃源岩累计厚度近40m, TOC介于1.0~9.43%, 平均值为5.5%(7个样品). 根据古构造恢复与岩相古地理重建, 玉尔吐斯组是寒武纪早期区域拉张时海进填平补齐(层序)的产物, 在塔里木盆地北部坳陷和南部普遍具有发育的背景, 但厚度变化大, 一般不超过20m, 其中东北部发育的拗拉槽是该套烃源岩最发育的地区(图6)(云金表等, 2014).

中下奥陶统烃源岩主要包括黑土凹组和萨尔干组. 下奥陶统黑土凹组由黑色笔石页岩和灰黑色-黑色薄层硅质岩组成, 主要分布于库鲁克塔格南区剖面和塔东盆地区(金之钧, 2005), 在塔东地区塔东1、塔东2井、英东2、尉犁1、库南1井钻遇了黑土凹组盆地相烃源岩, 但至库南1井相变为台地相的鹰山组. 中奥陶统萨尔干组岩性为黑色页岩夹灰黑色薄层或透镜状泥灰岩, 为一套台地边缘相沉积. 该套烃源岩沿柯坪-阿克苏一带呈狭长条带状分布, 在大湾沟剖面厚13.04m, 在阿克苏四石场剖面厚6.7m, 苏巴什沟剖面厚约5m.

1) 白国平. 2014. 国外重点含油气区海相碳酸盐岩层系油气富集规律研究. 国家重大专项报告

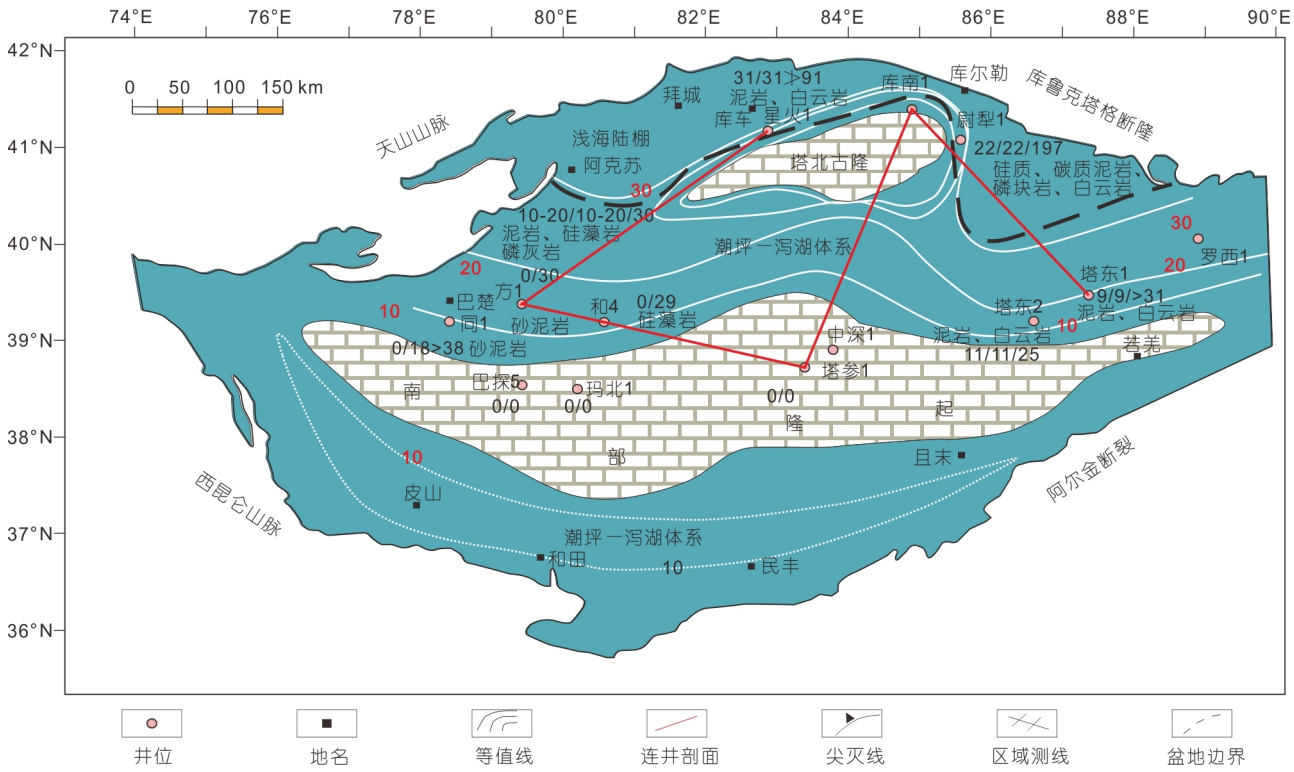

图 6　塔里木盆地寒武系烃源岩分布图

在盆地区萨尔干组对应于一间房组上部, 相当于中奥陶统上部(赵宗举等, 2006), 塔河北部一间房组为缓坡台地相, 发育大量的藻灰岩, 至S114井地层变薄, 泥灰岩厚度增大, 变为台内凹陷. 中下奥陶统烃源岩TOC介于0.61~4.1%, 平均值为1.77%(7个样品), 有机质类型为Ⅱ型, 有机质主要源于藻类和疑源类. 野外和钻井揭示该套烃源岩以台内凹陷和台缘斜坡相沉积为主, 环满加尔凹陷是该套烃源岩发育的主要区域. 同时, 一间房组沉积时期, 塔北隆起与中央古隆起之间发育台内凹陷, 满加尔与阿瓦提很可能相互连通, 并发育萨尔干组烃源岩(图7)(金之钧等, 2009). 上奥陶统烃源岩主要是指分布于塔中、塔北地区的良里塔格组台缘斜坡灰泥丘相烃源岩以及出露于阿克苏地区的印干组黑色页岩烃源岩. 该套地层以黑色、深灰色碳质、钙质和粉砂质页岩与泥屑灰岩为标志, 含丰富的笔石和几丁虫, 以及少量三叶虫和磷酸质壳腕足动物, 形成于台地边缘和凹陷边缘相(图8). 塔北隆起区上奥陶统烃源岩有机碳含量分布于0.47~0.56%, 大于0.5%的源岩厚度分布为6~28m, 其中哈德地区的HD17井烃源岩TOC值可高达1.7%. 在塔中低隆区良里塔格组源岩发育最好的区域, TOC值最高可达5.44%(TZ201井), 平均TOC值分布于0.5~0.84%, TOC值大于0.5%地层厚度为30~90m, TZ43井累计厚度可达300m. 塔东地区在晚奥陶世大部分处于快速充填状态, 不能形成有效的烃源岩.

对全球202个烃源岩发育环境的统计表明, 斜坡带是烃源岩发育最为有利的部位(金之钧, 2011). 从塔里木盆地钻遇寒武系烃源岩层有机碳分析可知, 斜坡相和斜坡-盆地相是优质海相烃源岩发育的主要部位(图9). 但由于同沉积阶段古隆起和古斜坡是发生迁移的, 不同沉积时期, 发育烃源岩的斜坡带也在发生变化. 从过阿克库勒鼻凸至环满加尔凹陷地震剖面可知(图10), 自震旦系-寒武系 (TG-T80) 至奥陶系至少有三个地震层序, 分别是TG-T80反射界面、T80-T74反射界面、T74-T70反射界面, 分别代表了震旦系-寒武系、中下奥陶统和上奥陶统. 结合钻井岩性和岩相古地理恢复, 从震旦纪-寒武纪到奥陶纪, 环满加尔凹陷经历了多次海进和海退过程, 形成了多个相互叠置的斜坡带, 其中下部两个层序为碳酸盐岩沉积体系, 地震上表现为自台地内部厚度相对均匀, 内部平行弱反

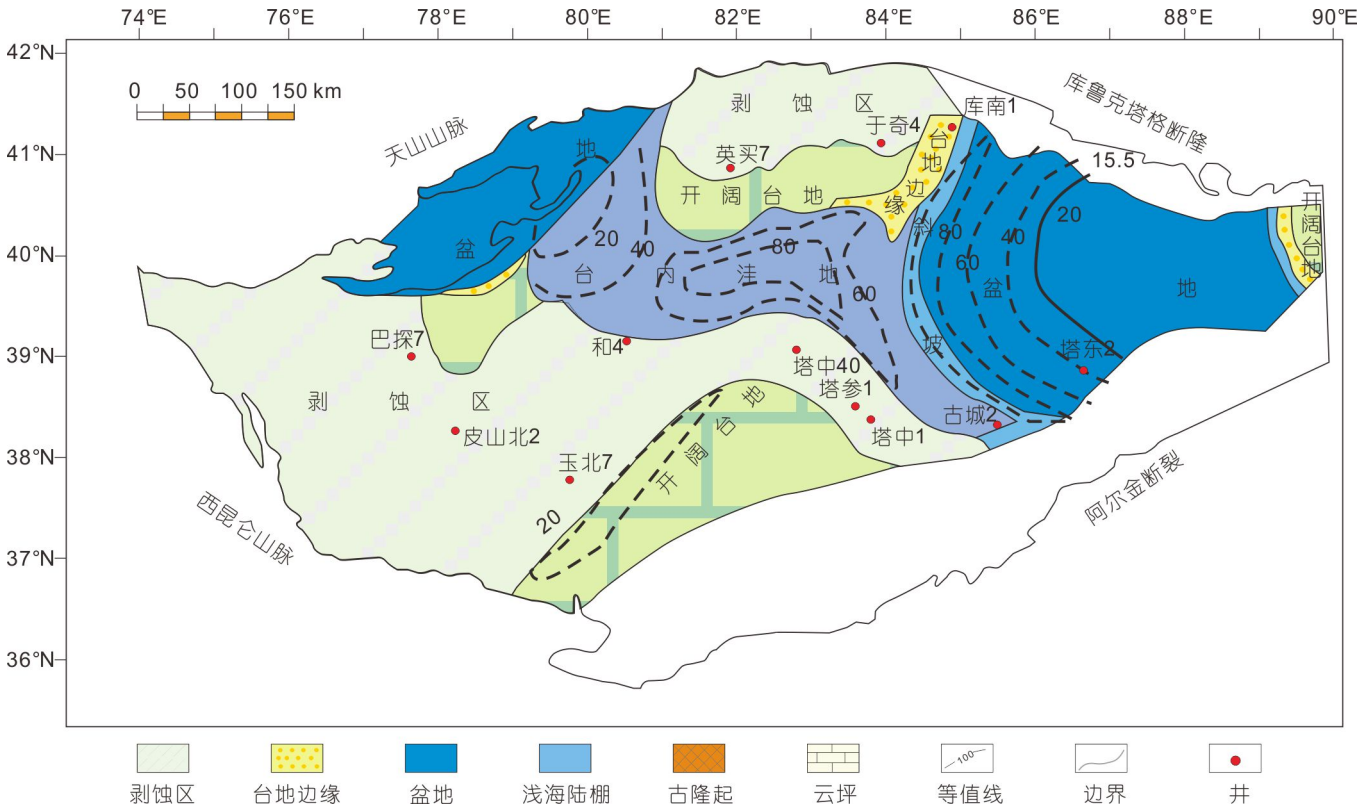

图 7　塔里木盆地中下奥陶统烃源岩分布图

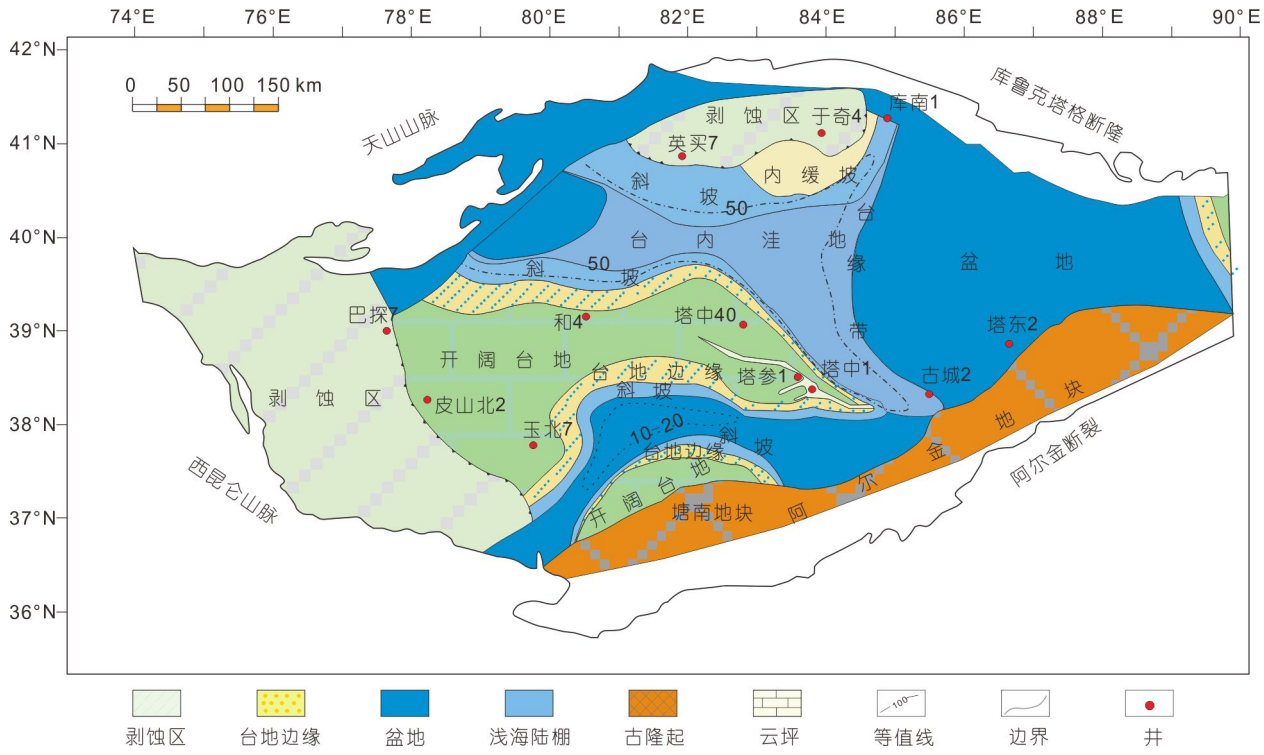

图 8　塔里木盆地上奥陶统烃源岩分布图

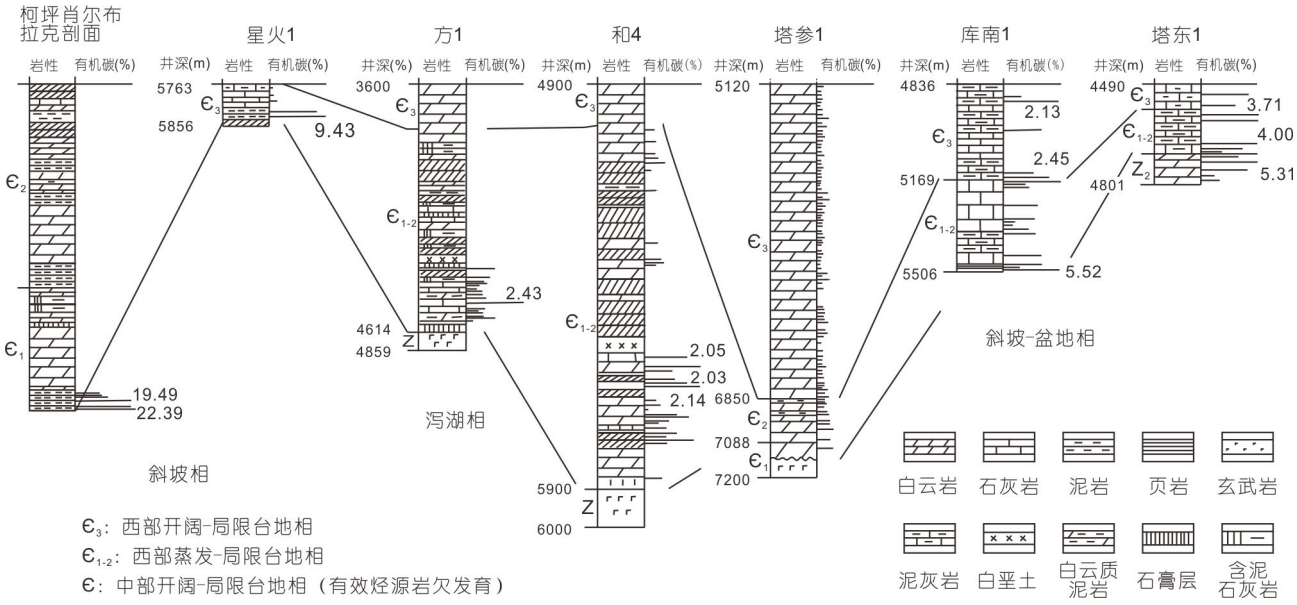

图 9　塔里木盆地寒武系钻遇井有机碳柱状连井图

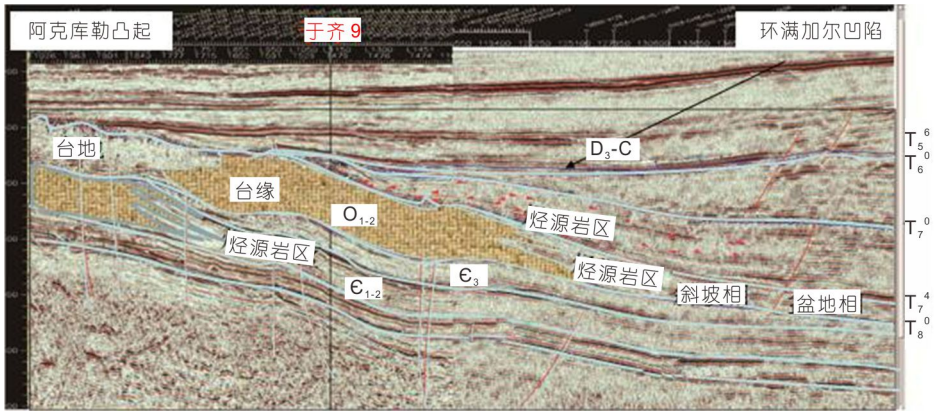

图 10　过塔河油田-环满加尔凹陷地震剖面图

射, 到台地边缘杂乱反射厚度明显增大的丘型反射特征, 向盆地方向地层厚度减小, 为平行连续的强反射, 代表了由台相稳定碳酸盐岩沉积, 到台地边缘显著生物建隆, 再到盆地区沉积补给减缓的沉积格局. 上部层序的下部为水进过程, 上部为水退过程. 最大海泛面沉积的斜坡带是优质烃源岩发育部位, 在立体上表现为不同时期多套烃源岩相互叠置(图11). 根据最新的资源量计算结果, 环满加尔凹陷石油资源量约72.39亿吨, 天然气约3.63万亿立方米(金之钧和冯建辉, 2015)[2].

4　环满加尔凹陷油气富集规律与勘探方向

目前台盆区油气发现集中于3个区域, 分别是环北部坳陷带的塔北南坡、塔中隆起北坡及北围斜区、麦盖提斜坡. 塔北南斜坡东部是油气最富集的区域, 其次是塔中隆起北坡及北围斜区. 塔北南坡早期为沉积斜坡与构造斜坡的复合区, 后期为构造枢纽带, 邻近油源, 油气疏导体系(断裂与不整合)与隆起高效匹配. 多套烃源岩生成的油气以侧向运移为主、垂向运移为辅的方式运移成藏. 塔中地区长期发育古隆起, 油

2) 金之钧, 冯建辉. 2015. 海相碳酸盐岩大中型油气田分布规律及勘探评价. 国家重大专项报告

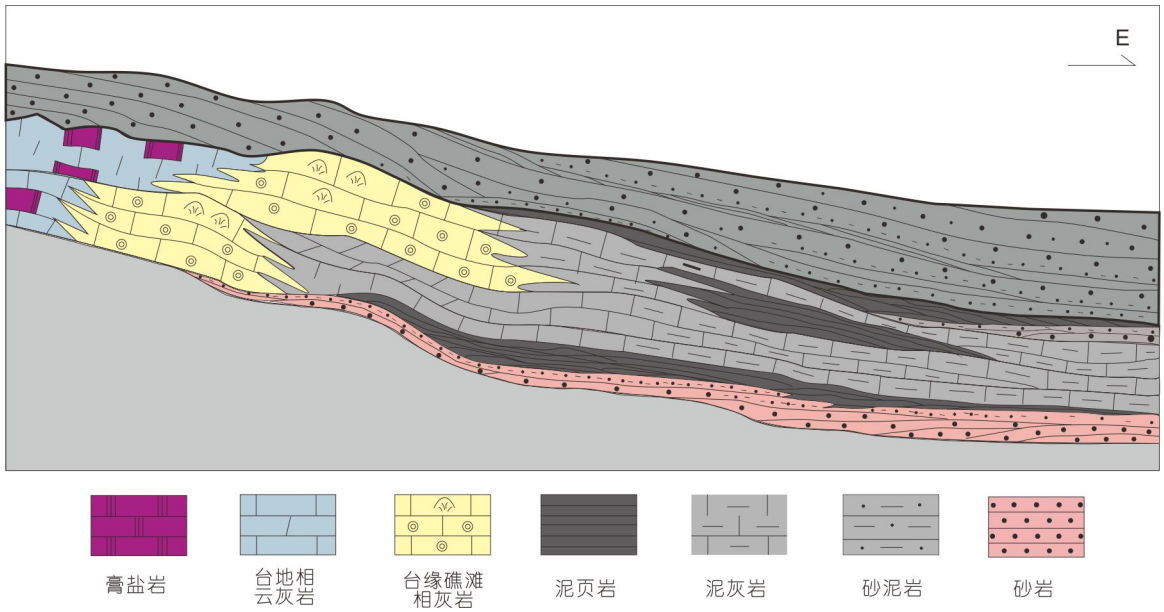

图 11　塔里木盆地环满加尔凹陷海相烃源岩发育模式图

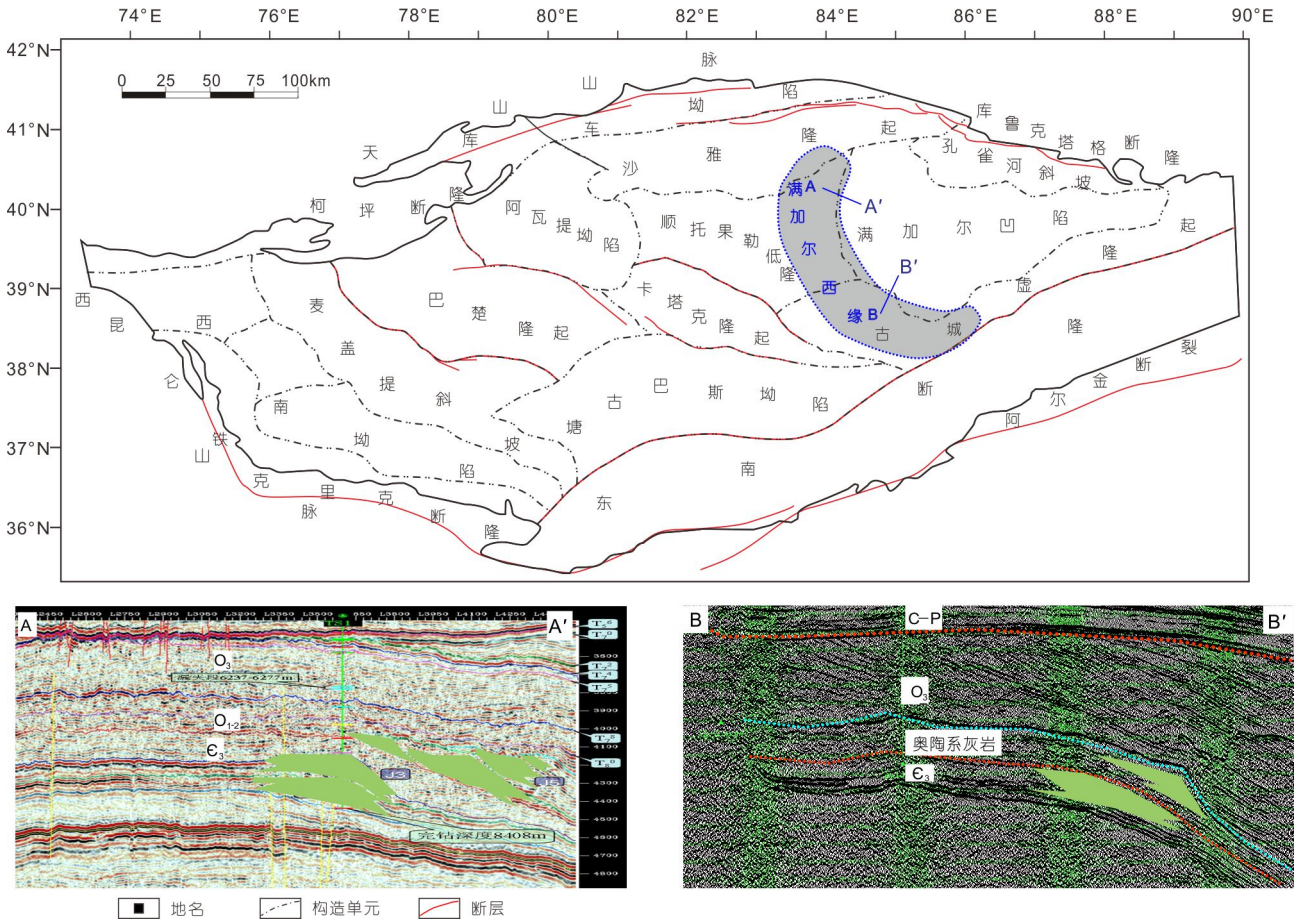

图 12　塔里木盆地环满加尔凹陷有利区

源相对较远, 油气疏导体系(断裂)与隆起断裂匹配较差. 顺托低隆长期发育台地相, 东北邻近烃源岩区, 甚至本身为烃源岩区. 同时, 北东向断裂带发育, 特别是顺9-顺西、顺南两个断裂带. 它们与白云岩、颗粒滩相结合形成断层控制的断片(块段)含油气区. 因此, 环满加尔凹陷的塔北南坡和塔中北坡(塔中北围斜区-顺托-古城地区)将是油气勘探的重要战场, 也是近年来发现大中型油气田的最可行的有利区(图12).

5 结论

油气源对比分析表明, 塔里木盆地台盆区奥陶系原油主要为寒武系和奥陶系海相烃源岩形成的混合原油, 从塔北南坡向塔中北坡寒武系烃源岩贡献逐渐增加. 斜坡带是优质海相烃源岩主要发育部位, 而地质历史时期古隆起及其斜坡带的迁移导致不同区域烃源岩空间分布、纵向叠置形式存在差异, 其中环满西斜坡带构成了寒武系、中下奥陶统和上奥陶统多套烃源岩空间上叠置分布. 塔北古隆起是多期地质历史时期沉积斜坡与构造斜坡的复合区、隆起和凹陷转换过程中形成的构造枢纽带, 油气聚集、保存条件最有利; 其次环满西斜坡带的塔中北围斜区顺托果勒-古城地区, 无论是沉积期, 还是后期始终为相对稳定的平台区, 向南为塔中隆起, 东北临近烃源岩发育区, 北东向断裂体系发育, 是油气聚集的有利区域. 因此, 塔中北围斜区-顺托-古城地区必将成为油气勘探的重要战场, 也是近期大中型油气田发现的最现实的有利区.

致谢 感谢中国石化西北油田分公司技术支持和样品采集, 同时感谢页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室对天然气地球化学和同位素测试.

参考文献

顾忆. 2000. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制. 石油实验地质, 22: 307–312

顾忆, 黄继文, 邵志兵. 2003. 塔河油田奥陶系油气地球化学特征与油气运移. 石油实验地质, 25: 746–750

金之钧. 2005. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题. 地学前缘, 12: 15–22

金之钧, 云金表, 周波. 2009. 塔里木斜坡带类型、特征及其与油气聚集的关系. 石油与天然气地质, 30: 127–135

金之钧. 2011. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律. 中国科学: 地球科学, 41: 910-926

康玉柱. 1996. 中国塔里木盆地油气地质特征及资源评价. 北京: 地质出版社

李素梅, 王铁冠, 张水昌. 2004. 塔北轮南地区油气成因与成藏探讨. 西安石油大学学报(自然科学版), 19:13–23

梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 万飞宇. 2000. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. 地学前缘, 7: 534–547

吕修祥, 金之钧, 皮学军, 李启明. 1999. 塔里木盆地下古生界碳酸盐岩油气聚集与分布. 中国科学 D辑: 地球科学, 29: 358–361

史鸿祥, 徐志明, 林峰, 王延栋. 2005. 塔里木盆地轮南油田油源分析及勘探前景. 新疆石油地质, 26: 623–626

云金表, 金之钧, 解国军. 2014. 塔里木盆地下古生界主力烃源岩分布. 石油与天然气地质, 35: 827–838

张水昌. 2004. 塔里木盆地海相油气的生成. 北京: 石油工业出版社. 433

赵孟军, 潘文庆, 韩剑发, 柳少波, 秦胜飞, 张宝民. 2007. 塔里木盆地轮西地区奥陶系潜山油藏成藏过程及聚集模式. 科学通报, 52: 174–184

赵宗举, 周新源, 陈学时, 吴兴宁, 范国章. 2006. 塔中地区中晚奥陶世古潜山岩溶储集层特征. 新疆石油地质, 27: 660–663

Cai C, Zhang C, Cai L, Wu G, Jiang L, Xu Z, Li K, Ma A, Chen L. 2009. Origins of Palaeozoic oils in the Tarim Basin: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers. Chem Geol, 268: 197–210

Grantham P J, Lijmbach G W M, Posthuma J, Clarke M W H, Willink R J. 1988. Origin of crude oils in Oman. J Pet Geol, 11: 61–80

Jinggui L, Philp P, Zifang M, Wenhui L, Jianjing Z, Guojun C, Mei L, Zhaoyun W. 2005. Aromatic compounds in crude oils and source rocks and their application to oil–source rock correlations in the Tarim basin, NW China. J Asian Earth Sci, 25: 251–268

Li M, Wang T G, Lillis P G, Wang C, Shi S. 2012. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic steroids and dinosteroids in oils and Cambrian–Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China. Appl Geochem, 27: 1643–1654

Li S, Amrani A, Pang X, Yang H, Said-Ahmad W, Zhang B, Pang Q. 2015. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin. Organic Geochem, 78: 1–22

Ma A, Zhang S, Zhang D. 2008. Ruthenium-ion-catalyzed oxidation of asphaltenes of heavy oils in Lunnan and Tahe oilfields in Tarim Basin, NW China. Organic Geochem, 39: 1502–1511

Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rock. AAPG Bull, 69: 1255–1268

Sun Y, Xu S, Lu H, Cuai P. 2003. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim Basin, NW China: Implications from aryl isoprenoids in crude oils. Organic Geochem, 34: 629–634

Palacas J G, Monopolis D, Nicolaou C A, Anders D E. 1986. Geochemical correlation of surface and subsurface oils, western Greece. Organic Geochem, 10: 417–423

Peters K E, Moldowan J M, Sundararaman P. 1990. Effects of hydrous pyrolysis on biomarker thermal maturity parameters: Monterey phosphatic and siliceous members. Organic Geochem, 15: 249–265

Tian Y, Zhao J, Yang C, Liao Z, Zhang L, Zhang H. 2012. Multiple-sourced features of marine oils in the Tarim Basin, NW China —Geochemical evidence from occluded hydrocarbons inside asphaltenes. J Asian Earth Sci, 54-55: 174–181

Wang T G, He F, Wang C, Zhang W, Wang J. 2008. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China. Organic Geochem, 39: 1637–1646

Wang T G, Li S M, Zhang S C. 2004. Oil migration in the Lunnan region, Tarim Basin, China based on the pyrrolic nitrogen compound distribution. J Pet Sci Eng, 41: 123–134

Zhang S, Huang H. 2005. Geochemistry of Paleozoic marine petroleum from the Tarim Basin, NW China: Part 1. Oil family classification. Org Geochem, 36: 1204–1214

Zhang S C, Hanson A D, Moldowan J M, Graham S A, Liang D G, Chang E, Fago F. 2000. Paleozoic oil-source rock correlations in the Tarim basin, NW China. Organic Geochem, 31: 273–286