

塔东地区下古生界 天然气成藏主控因素及勘探领域

刘卫红^{1,2}, 高先志¹, 叶信林², 冉启贵², 程宏岗²

(1 中国石油大学(北京); 2 中国石油勘探开发研究院)

摘要 利用岩心、分析化验及地球物理资料对塔东地区下古生界烃源岩和储集层进行了综合分析。研究认为寒武系—奥陶系烃源岩已处于高—过成熟阶段,原油裂解气是主要气源,并圈定裂解气有效供气范围主要集中在古城以北的地区。储层主要为颗粒灰岩和白云岩,颗粒灰岩的孔隙类型主要为裂缝及与之伴生的溶蚀孔洞,分布在古城台地边缘带和罗西台地边缘带的奥陶系中;白云岩主要发育溶蚀孔,在塔东地区广泛分布。结合区域构造演化史分析,指出古城鼻隆及其西北地区是最有利的勘探区带,其次为英东构造带及满加尔凹陷、英吉苏凹陷内的其他隆起区。

关键词 塔里木盆地; 下古生界; 碳酸盐岩; 天然气; 成藏

中图分类号: TE122.1 **文献标识码**: A

塔东地区位于塔里木盆地东部,面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在塔东地区下古生界碳酸盐岩分布广泛,但勘探程度较低,目前钻至下古生界碳酸盐岩的探井约20口。2006年古隆1井在下古生界碳酸盐岩中获工业气流,之后针对该层位的钻井多年钻探无成效。直到2012年,古城6井又获得突破,随后古城8井、古城9井以及顺南4井、顺南5井、顺南7井均获工业气流^[1]。前人针对塔东地区烃源岩和储层的研究认为:下古生界碳酸盐岩储层中天然气是原油裂解气^[2-5],储层主要为寒武系白云岩和奥陶系石灰岩^[6-10],但受钻井资料、地震资料(以二维地震为主且品质较差)的限制,有效供气范围和有利储层展布的研究难度较大,前人研究相对较少。本文在前人研究的基础上,通过实验模拟、钻井、岩心分析和地化资料分析,结合测井、地震资料以及人工井分析,将对塔东地区下古生界有效供烃范围及有利储层分布展开综合研究,并结合构造演化史指出下一步勘探领域。

1 区域地质概况

塔东地区经历了加里东、海西、印支、燕山和喜马

拉雅等多期构造活动的改造,其总体表现为早古生代拉张裂陷、晚古生代抬升剥蚀、中生代稳定沉降的特征,沉积地层厚度近万米。海西早期及印支运动造就了研究区内北东—南西向两隆夹一坳即塔北隆起和塔东隆起夹北部坳陷的构造格局(图1),印支期—燕山晚期为局部变形调整的主要时期^[11-12]。研究区发育三大断裂系统,即孔雀河断裂系统、东南断裂系统和伸展断裂系统^[13],可划分成四个二级构造单元:孔雀河斜坡、满加尔凹陷、英吉苏凹陷和塔东低凸起(图1)。

寒武纪—奥陶纪,塔里木盆地台盆区古构造—沉积格局呈近东西向展布^[14-17],沉积相带受裂陷槽、断隆、台地、斜坡带控制。塔东地区位于克拉通边缘坳陷带上,沉积相以盆地相为主,地层厚度变化大,发育东西两个碳酸盐岩台地(图2),沉积格局自西向东为台地边缘—斜坡—盆地—斜坡—台地沉积^[18-20]。台地和台地边缘相地层发育以古城4井和罗西1井为代表,地层发育情况基本上可以与塔中地层对比;盆地相以塔东2井、塔东1井为代表,为继承性的盆地(深海)相沉积;斜坡相则以米兰1井为代表,地层发育特征与盆地相类似。

收稿日期: 2016-06-08; 改回日期: 2017-03-03

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2016ZX05007)和国家重大科技专项“南大西洋两岸重要盆地层序地层格架与烃源岩和储层评价研究”(编号:2016ZX05033-001-002)资助

刘卫红:女,1979年生,工程师,博士,主要从事沉积储层及天然气成藏特征研究。通讯地址:河北省廊坊市广阳区万庄石油分院; E-mail: lweihong05@petrochina.com.cn

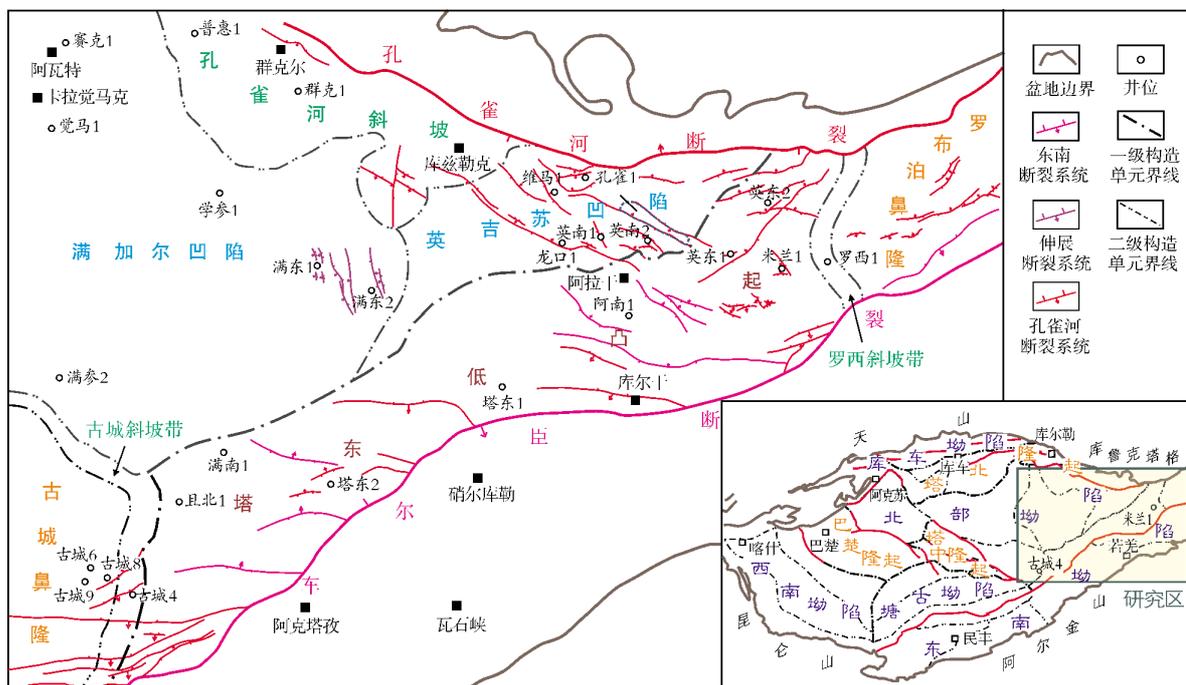


图1 塔东地区构造区划简图(据中国石油塔里木油田研究院勘探部署图修改)

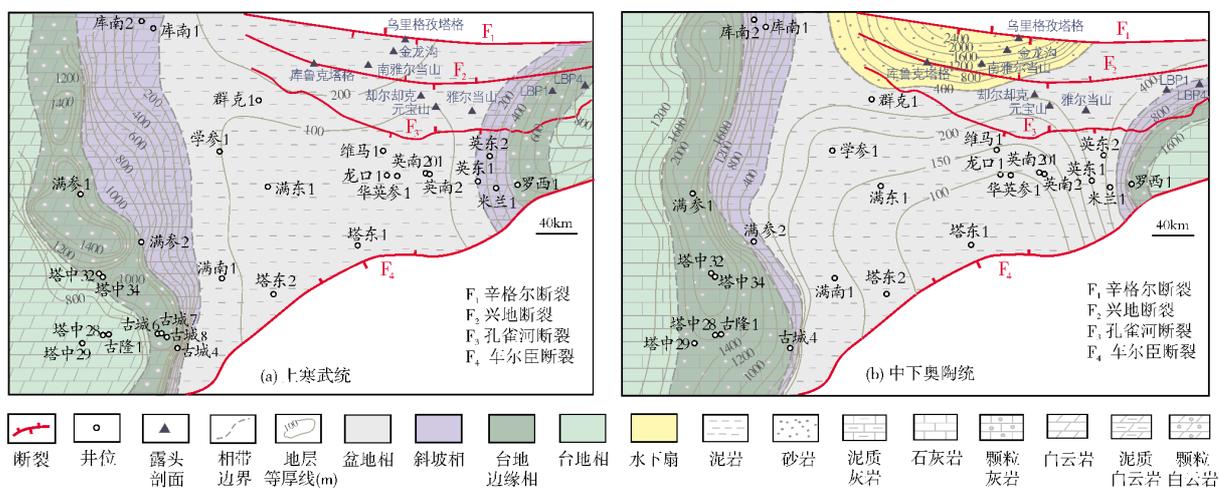


图2 塔东地区下古生界上寒武统和中下奥陶统的地层厚度及碳酸盐岩岩相古地理图

2 成藏主控因素分析

针对塔东地区下古生界碳酸盐岩天然气的成藏,本次研究对塔东地区的烃源岩和储层特征作了综合分析,结合该地区的构造特征认为:塔东地区下古生界构造格局定型早,它与早期的快速深埋共同决定了下古生界碳酸盐岩具有“早生烃,早成藏”的特点,晚期的原油裂解气的充注决定了现今有利勘探区域的分布,有利储层的发育特征决定了气藏的形态及规模。

2.1 有效的气源控制了天然气藏的分布

塔东地区烃源岩主要分布于下寒武统及下奥陶统,它为一套欠补偿盆地相与台缘斜坡相沉积的暗色泥岩和碳酸盐岩,其分布范围广,近乎遍布整个塔东地区;厚度大,约在400~600m之间;有机质类型以Ⅲ型为主,有机质丰度高,据塔里木油田研究院塔东2井单井评价中51个样品统计,寒武系黑灰色硅质泥岩和泥岩的TOC多在1%~3%,平均1.7%,下奥陶统藻

纹层泥岩的TOC在0.35%~7.62%,平均2.84%,均属于好的生油岩,但烃源岩演化程度较高,前人通过已钻井资料证实,塔东地区的天然气主要是来自于高一过成熟的寒武系—奥陶系腐泥型有机质生成的原油裂解气^[21-24]。

对于原油裂解的温度及成熟度,目前主要的实验方法为封闭体系黄金管高压釜模拟,它最为接近地下实际情况而被国内外学者广泛应用^[25-28]。鉴于塔东地区钻井无法取到下古生界碳酸盐岩储层内原油,本次研究利用邻区轮古7-8井下奥陶统高密度原油进行模拟实验,实验由中国石油天然气集团公司天然气成藏与开发重点实验室完成。塔东地区地温梯度低,上奥陶统沉积厚度大,沉积速率快,对下伏碳酸盐岩内原油的裂解具有一定影响,为使结果更接近地下状态,模拟过程中加入碳酸盐岩,同时放入褐煤做标定,压力为50 MPa,以2℃/h的升温速率,从室温加热至610℃,结果表明,塔东地区原油裂解主要发生在 R_o 为1.5%~2.5%范围内,其中大量裂解阶段的 R_o 为2.0%~2.5%,这一阶段形成的裂解气量占总裂解气的80%(图3)。

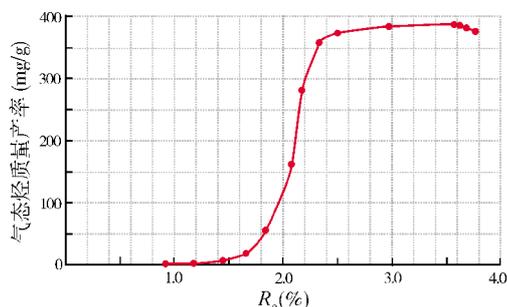


图3 塔东地区原油成熟度与气态烃产量关系

利用研究区满东1井、英南2井、英东2井、罗西1井、塔东2井和古城4井等6口探井(位置见图1,图2)的井温资料,据塔里木盆地构造演化史与热演化史的特点,采用线性递减模式预测古地温,利用Sweeney和Burnham^[29-30]推出的简单动力学模型Easy(%) R_o 法,恢复了奥陶系碳酸盐岩顶成熟度演化史,进而推断出在不同时期的原油裂解程度增加量(图4),由此可以看出不同时期增加了多少原油裂解气。奥陶纪末,仅在满加尔凹陷中部地区处于高裂解程度,数值大于80%,其余广大地区裂解程度均较低,其中在古城

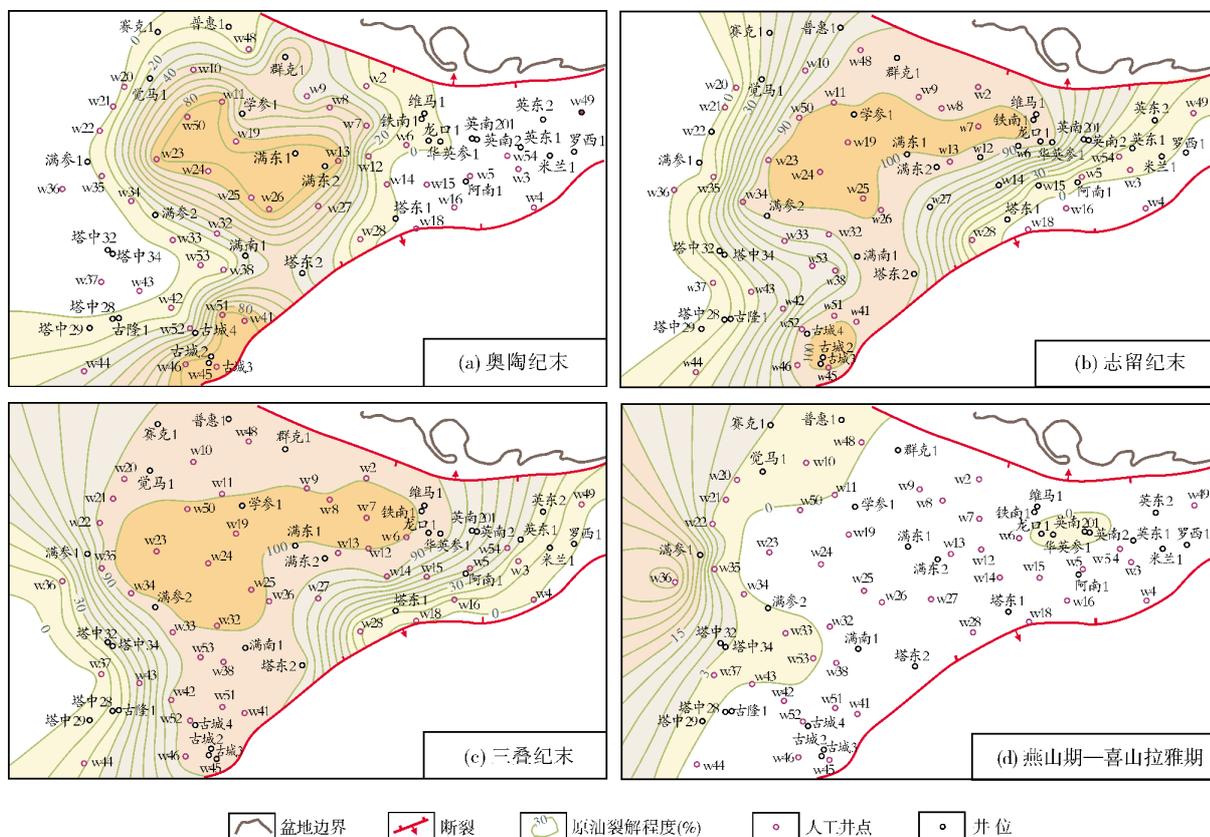


图4 塔东地区不同时期碳酸盐岩顶原油裂解程度增量图

以西和以北的地区(即古隆1井—满南1井—满参1井—一线以西)以及塔东1井—华英参1井以东的地区,还处于未裂解状态(图4a)。志留纪末,裂解范围向东西两侧扩大(图4b),晚海西期—印支期,裂解增量主要集中在古城以北的地区,其增量值可达50%,满加尔凹陷及其以东的地区未有新的裂解气产出(图4c)。燕山—喜马拉雅期,新的原油裂解气产出主要集中在古城以北和满参1井以西的地区,产出量可以达到20%,在英吉苏凹陷有少量的裂解气产出,其量小于1%(图4d)。由于油气藏的形成受烃源岩的严格制约^[31-33],且古城地区及其周缘的下古生界碳酸盐岩处于燕山—喜马拉雅期碳酸盐岩顶原油裂解增量中心以北的构造高点上,因而,塔东地区下古生界碳酸盐岩的勘探

应紧密围绕古城地区及其周缘。

2.2 有利储层的发育特征决定了气藏的形态及规模

塔东地区碳酸盐岩储层主要有两种:一是高能环境的颗粒灰岩;二是白云岩。

塔里木盆地奥陶系岩溶储层广泛分布^[34-35],但学者们对塔东地区奥陶系石灰岩储层的研究却较少,且还有学者认为奥陶系石灰岩为非储层^[7]。本次研究发现奥陶系石灰岩中发育储层,岩性主要为颗粒灰岩,储集空间主要为裂缝—孔洞。以古城台地为例,奥陶系一间房组石灰岩储集空间有粒内(粒间)溶孔(图5a),部分被有机质充填(图5b),其形成是在

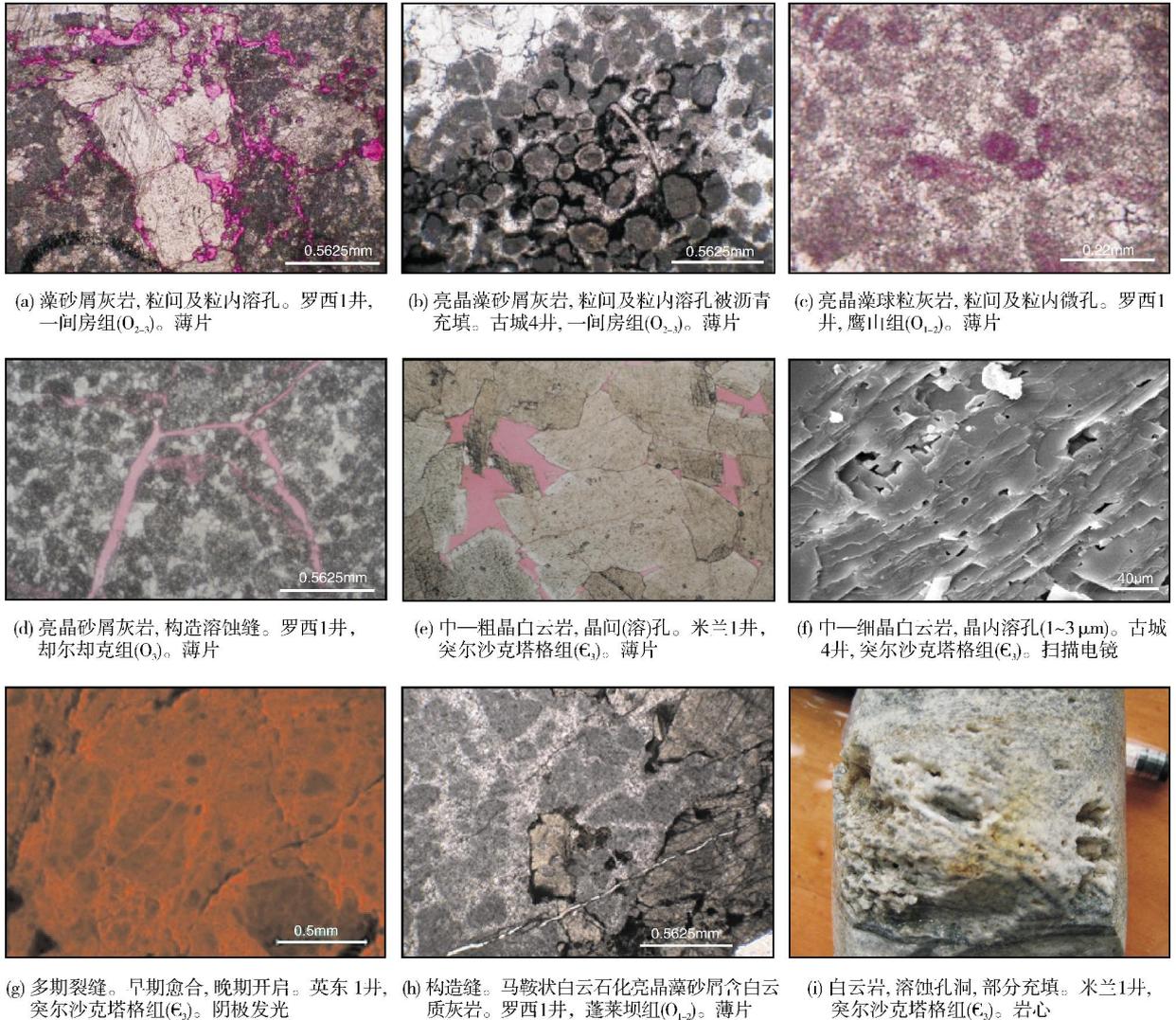
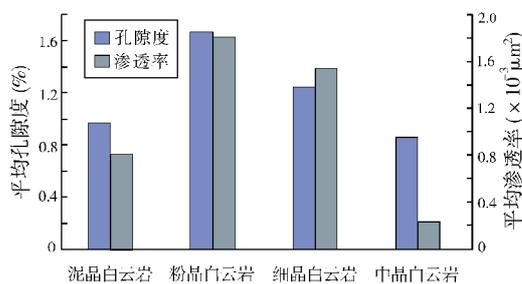


图5 塔东地区下古生界碳酸盐岩储层特征

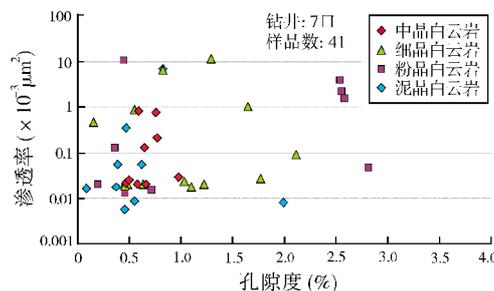
有利的沉积相带控制下的后期断裂及顺层岩溶作用叠加的结果,岩溶作用在塔里木盆地普遍存在^[26-27],塔东地区则以埋藏岩溶作用为主。

此外,石灰岩储层中细小粒间溶孔以及粒内溶孔亦较为发育(图 5c),虽连通性差,多呈孤立状,且规模较小,但该地区裂缝比较发育(图 5d),且以有效宽度小于 0.1 mm 的微裂缝为主,相应地,与裂缝相伴生的溶蚀孔洞也较发育,且在高能滩相颗粒灰岩内更为发育。



(a) 不同类型白云岩平均孔隙度和平均渗透率直方图

塔东地区白云岩储层的储集空间有晶间(溶)孔(图 5e)、晶内溶孔(图 5f)、裂缝(图 5g, 5h)、溶洞(图 5i)以及沥青收缩孔等,其中,裂缝和溶蚀孔洞为主要的储集空间。据 7 口井的 41 个样品的分析化验数据统计,白云岩储层的基质孔隙度集中在 2.5% 以下,粉晶白云岩和细晶白云岩的孔渗性较好(图 6a),泥晶白云岩的孔渗性稍差,中晶白云岩的孔渗性最差。孔隙度和渗透率相关性不大(图 6b)。



(b) 白云岩储层孔隙度-渗透率交会图

图6 塔东地区下古生界白云岩储层物性特征

关于塔东地区白云岩储层成因的研究较多^[7, 36-38],笔者较为赞同这些储层是在埋藏白云石化作用的基础上叠合了热液白云石化作用而形成的。白云岩储层的溶蚀作用,主要是与有机质演化有关的酸性流体顺断层向上运移而产生的溶蚀和热液的溶蚀,深大断裂或与之伴生的小断裂则为流体运移提供了通道,这种断裂在古城地区较为发育。古城4井白云岩储层中充填的沥青说明有机酸的溶蚀形成于油气充填之前,研究区广泛发育的鞍状白云石、石英、黄铁矿及天青石等热液矿物组合也说明该地区曾经有热液通过。从成像测井可以看出白云岩基质孔隙发育的层段裂缝比较发育,而石灰岩储层中顺层溶蚀孔洞较为发育。

综上所述,塔东地区石灰岩及白云岩储层的发育主要受沉积相和断裂控制的溶蚀作用的影响。塔东地区颗粒灰岩储层主要发育于西部的古城台地边缘带和东部的罗西台地边缘带,层位是奥陶系鹰山组。白云岩储层发育规模相对较大,相对于斜坡相白云岩,滩相白云岩的储集性能更为优越,它主要分布在古城台地边缘以西和罗西台地边缘以东的寒武系及奥陶系蓬莱坝组中。上寒武统滩相白云岩及中下奥陶统滩相石灰岩均为有利的储层发育区,而上寒武统台内滩则为潜在的储层发育区,斜坡部位由于

断裂发育,可能为潜在的热液白云岩储层发育区,据此,笔者根据不同时期台缘带展布范围预测了塔东地区有利储层展布区(图7)。

3 塔东地区天然气勘探领域

在此笔者将裂解气区、有利储层分布区和构造纲要图等三类要素叠合起来(图8),并综合评价和划分有利勘探区带如下。

3.1 古城鼻隆及其西北是最有利的勘探区

古城鼻隆及其西北(图1,图7)位于持续裂解供烃区(图4,图8),古油藏的后期裂解为气藏提供了充足的气源,古城4井高沥青含量也证实了古城地区古油藏的存在,程宏岗等^[39]通过储层中固体沥青含量初步估算的古城4井区裂解气量为 $2.11 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其北侧及东侧发育盆地相的烃源岩,也是提供后期气源的主要来源。古城4井以西的古隆1井(位置见图7)、古城6井、古城8井、古城9井(位置见图8)获得工业气流也证实该区具有有效的成藏过程。同时,古城鼻隆构造带寒武系—下奥陶统储层类型多样,既有寒武系的滩相白云岩储层,也有奥陶系鹰山组—一间房组的台缘滩相及台内滩相石灰岩储层,且它们相互叠置。此外,古城地区断裂比较发育,有机酸性水顺早

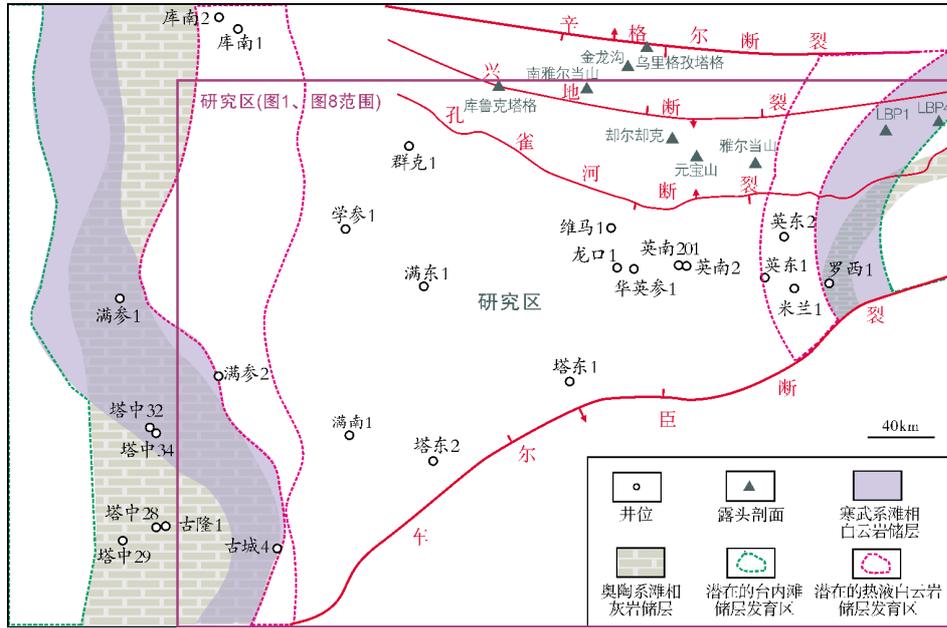


图7 塔东地区寒武系—奥陶系碳酸盐岩有利储层分布区

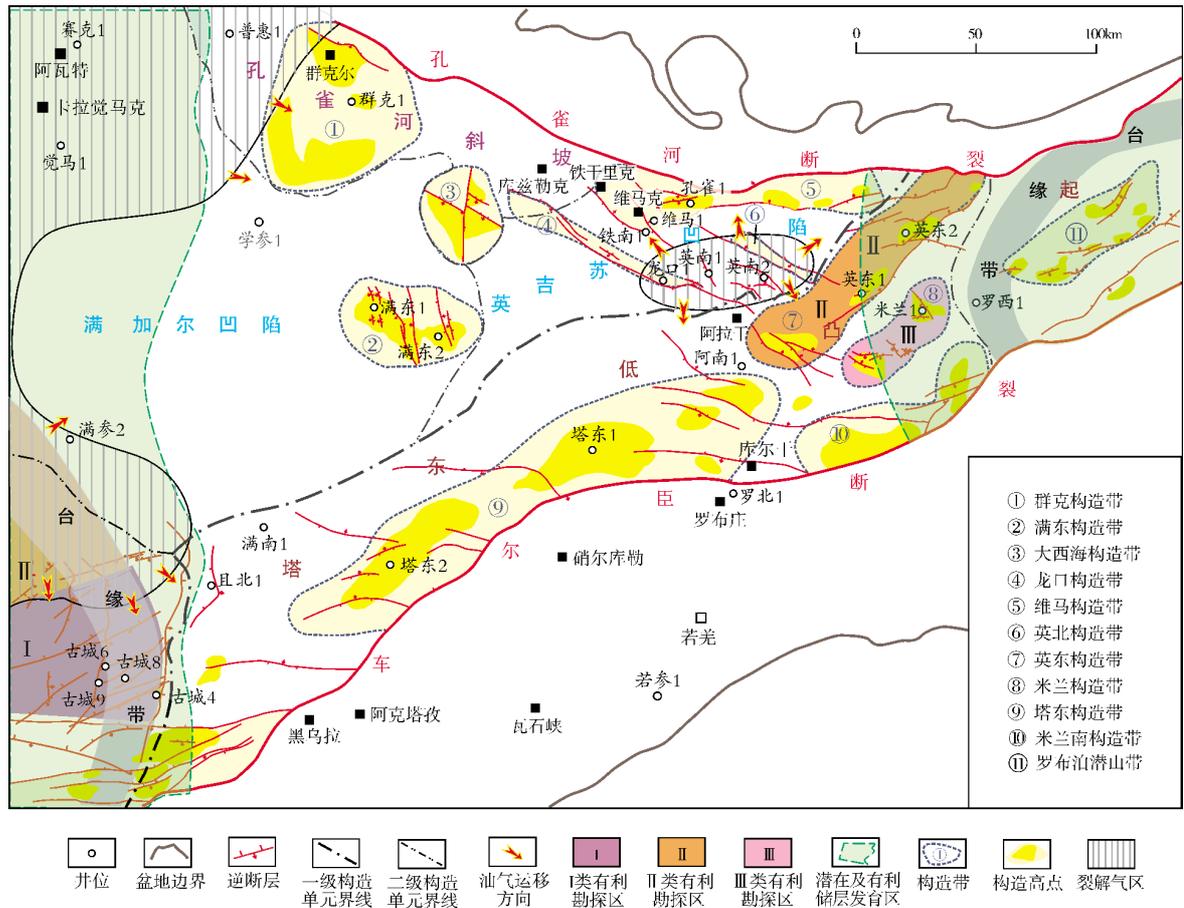


图8 塔东地区下古生界碳酸盐岩综合评价图

期的张性断裂向上运移,形成溶蚀孔洞,极大地改善了储集性能,同时又可以形成多个岩性圈闭。

3.2 英东构造带及凹陷内其他局部隆起区是潜在的勘探区

英东构造带的西侧紧邻生烃凹陷的中心(图8),烃源岩中吸附的液态烃裂解可以为成藏提供气源条件。从成熟度演化分析,原油裂解成气在侏罗系沉积前已经结束,此时英东构造带已经形成,并且后期改造不明显,因而具有形成古油气藏的条件,古油气藏的裂解可以为英东构造带提供很好的气源条件。英东构造带上已钻的英东2井在寒武系见到较好的气显示,并获得了气流。

从储集层条件上看,英东构造带上寒武统白云岩发育,属于台地边缘—台地斜坡相沉积。已钻遇的英东1井岩心及测井资料显示,上寒武统突尔沙克塔格组储层岩性为白云岩,岩心中可见多期构造裂缝,早期裂缝多为方解石、白云石及沥青质所充填,晚期裂缝则被部分充填。成像测井图上可见储层多发育垂直缝,局部见溶蚀孔洞,裂缝发育的层段,相应地孔洞也发育。

满加尔凹陷和英吉苏凹陷内的局部隆起区是潜在的勘探领域(图8),其主要原因:一是靠近烃源岩,天然气最先聚集于此;二是这些隆起通常由古隆起长期继承性发展而来,储层也较为发育;三是凹陷内的局部隆起远离边界深大断裂,形成的气藏被破坏的可能性较小。因而,凹陷内的其他隆起区,如大西海构造带、龙口构造带、英北构造带等是潜在的勘探领域。

4 结论

(1)塔东地区下古生界天然气藏的展布主要受原油裂解气的控制,晚海西期以来,有效供气范围主要集中在古城以北的地区,塔东地区下古生界碳酸盐岩的勘探应紧密围绕古城地区及其周缘。

(2)塔东地区下古生界颗粒灰岩储层主要发育于西部古城台地边缘带和东部罗西台地边缘带的奥陶系鹰山组中;白云岩储层发育规模相对较大,主要分布在古城台地边缘以西和罗西台地边缘以东的寒武系及奥陶系蓬莱坝组中。

(3)塔东地区下古生界碳酸盐岩最有利的勘探领域集中在古城鼻隆及其西北地区;其次为英东构

造带以及满加尔凹陷、英吉苏凹陷内的其他隆起区,如大西海构造带、龙口构造带、英北构造带等。

致谢:研究工作中得到了塔里木油田勘探开发研究院大力支持,特此表示诚挚的谢意,同时,审稿专家和编辑老师对论文提出了宝贵意见,深表感谢!

参考文献

- [1] 王铁冠,宋到福,李美俊,等.塔里木盆地顺南—古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J].石油与天然气地质,2014,35(6):753-762.
- [2] 黄第藩,刘宝泉,王庭栋,等.塔里木盆地东部天然气的成因类型及其成熟度判别[J].中国科学:D辑,1996,26(4):365-372.
- [3] 张水昌,赵文智,王飞宇,等.塔里木盆地东部地区古生界原油裂解气成藏历史分析——以英南2气藏为例[J].天然气地球科学,2004,15(5):441-451.
- [4] 肖中尧,黄光辉,卢玉红,等.塔里木盆地塔东2井原油成因分析[J].沉积学报,2004,22(增刊):66-72.
- [5] 张敏,黄光辉,王祥,等.原油裂解气的地球化学特征、形成条件与资源评价——以塔里木盆地台盆区为例[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2009,31(6):38-44.
- [6] 胡九珍,刘树根,冉启贵,等.塔东地区寒武系—下奥陶统成岩作用特征及对优质储层形成的影响[J].成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(2):138-146.
- [7] 邵龙义,韩俊,马锋,等.塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J].沉积学报,2010,28(5):953-961.
- [8] 朱长见,肖中尧,张宝民,等.塔里木盆地古城4井区上寒武统—奥陶系储集层特征[J].石油勘探与开发,2008,35(2):175-181.
- [9] 田雷,崔海峰,陈永权,等.塔里木盆地中下寒武统白云岩储层分布特征及勘探意义[J].天然气地球科学,2015,26(增刊1):130-138.
- [10] 刘伟,黄擎宇,王坤,等.塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J].天然气工业,2016,36(3):14-21.
- [11] 刘玉魁,胡剑风,闵磊,等.塔里木盆地英吉苏凹陷成藏机理分析[J].天然气工业,2004,24(10):6-9.
- [12] 李磊,马培领,王贵重,等.塔东2号构造断裂系统形成演化及对碳酸盐岩油气成藏的影响[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2009,31(2):187-192.
- [13] 卢华复,王胜利,罗俊成,等.塔里木盆地东部断裂系统及其构造演化[J].石油与天然气地质,2006,27(4):433-441.
- [14] 郑家凤,穆曙光.塔里木盆地震旦纪—奥陶纪岩相古地理[J].西南石油学院学报,1994,17(4):1-5.
- [15] 贾承造,魏国齐.塔里木盆地构造特征与含油气性[J].科学通报,2002,47(增刊):1-8.
- [16] 许效松,汪正江,万方,等.塔里木盆地早古生代构造古地理演化与烃源岩[J].地学前缘,2005,12(3):49-57.
- [17] 何登发,周新源,张朝军,等.塔里木地区奥陶纪原型盆地类型及其演化[J].科学通报,2007,52(增刊1):126-135.
- [18] 张月巧,贾进斗,靳久强,等.塔东地区寒武—奥陶系沉积相与沉积演化模式[J].天然气地球科学,2007,18(2):229-234.

- [19] 林畅松,杨海军,蔡振中,等. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩台地的层序结构演化及其对盆地过程的响应[J]. 沉积学报, 2013,31(5): 907-919.
- [20] 李江海,周肖贝,李维波,等. 塔里木盆地及邻区寒武纪—三叠纪构造古地理格局的初步重建[J]. 地质论评,2015,61(6): 1225-1234.
- [21] 钱玲,李江海,卢玉红,等. 塔东地区古城4井和罗西1井油气成藏差异性分析[J]. 天然气地球科学,2011,22(4): 628-634.
- [22] 冉启贵,程宏岗,肖中尧,等. 塔东地区构造热事件及其对原油裂解的影响[J]. 现代地质,2008,22(4): 541-548.
- [23] 唐友军. 塔里木盆地塔东2井寒武系稠油地球化学特征与成藏[J]. 沉积学报,2009,27(6): 1208-1215.
- [24] 纪贤伟,王再强,张金刚,等. 塔东地区古生界源岩评价及成烃史分析[J]. 内蒙古石油化工,2008,(11): 46-48.
- [25] Hill R J, Tang Yongchun, Kaplan I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. *Organic Geochemistry*, 2003,34(12): 1651-1672.
- [26] 陈建平,赵文智,王招明,等. 海相干酪根天然气生成成熟度上限与生烃潜力极限探讨——以塔里木盆地研究为例[J]. 科学通报,2007,52(增刊): 95-100.
- [27] Tian Hui, Xiao Xianming, Wilkins R W T, et al. An experimental comparison of gas generation from three oil fractions: Implications for the chemical and stable carbon isotopic signatures of oil cracking gas[J]. *Organic Geochemistry*, 2012,46(1): 96-112.
- [28] 房忱琛,熊永强,李芸,等. 原油易挥发组分对后期裂解中金刚烷演化特征的影响[J]. 中国科学: 地球科学,2015,45(10): 1448-1456.
- [29] Sweeney J J, Burnham A K. Evolution of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990,74(10): 1559-1570.
- [30] Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance[J]. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1989,53(10): 2649-2657.
- [31] 胡朝元,张一伟,查全衡,等. 油气田勘探及实例分析[M], 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [32] 黄籍中. “源控论”再认识——以四川盆地天然气勘探为例[J]. 海相油气地质, 1998,3(2): 1-5.
- [33] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005,25(10): 1-7.
- [34] 陈景山,李忠,王振宇,等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. 沉积学报,2007,25(6): 858-868.
- [35] 赵文智,沈安江,潘文庆,等. 碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义——以塔里木盆地岩溶储层为例[J]. 岩石学报,2013,29(9): 3213-3222.
- [36] 刘永福,殷军,孙雄伟,等. 塔里木盆地东部寒武系沉积特征及优质白云岩储层成因[J]. 天然气地球科学,2008,19(1): 126-132.
- [37] 金振奎,余宽宏. 白云岩储集层埋藏溶蚀作用特征及意义——以塔里木盆地东部下古生界为例[J]. 石油勘探与开发,2011,38(4): 428-434.
- [38] 金振奎,杨有星,余宽宏,等. 塔里木盆地东部地区寒武系白云岩成因类型[J]. 古地理学报,2012,14(6): 747-756.
- [39] 程宏岗,冉启贵,王宗礼,等. 塔东地区下古生界原油裂解气资源评价[J]. 天然气地球科学,2009,20(5): 707-711.

编辑: 黄革萍

Conditions for Gas Accumulation and Potential Areas in Lower Paleozoic Eastern Tarim Basin

Liu Weihong, Gao Xianzhi, Ye Xinlin, Ran Qigui, Cheng Honggang

Abstract: By means of drilling core and analysis data, as well as logging data and seismic data, the source rock and reservoir rock of the Lower Paleozoic in eastern Tarim Basin are comprehensively evaluated. It is indicated that, the source rock within the Lower Paleozoic from Cambrian to Ordovician is in high and over mature stage, therefore providing hydrocarbon in the form of oil-cracking gas. It is pointed out that the effective cracking gas-bearing targets are concentrated in the northern Gucheng area. The primary reservoir is in two forms as follows: The granular limestone with fracture and dissolution pores mainly distributed in the west platform edge of Gucheng and in the east Luoxi platform; The dolomite with dissolution pores mainly distributed in the platform of eastern Tarim Basin. Combined with the analysis of regional tectonic evolution history, it is proposed that the nose structure of Gucheng and its north-west area are the most favorable areas, and Yingdong structure belt and other uplifts in the sag are the secondary favorable areas.

Key words: Carbonate; Natural gas; Accumulation; Lower Paleozoic; Tarim Basin

Liu Weihong: PhD. Add: PetroChina Research Institutes of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei, 065007, China