

文章编号: 1000-0550(2010) 05-0969-11

塔里木盆地塔河奥陶系碳酸盐岩储层埋藏成岩和构造—热流体作用及其有效性^①

李 忠¹ 黄思静² 刘嘉庆¹ 蔡春芳¹ 李曰俊¹ 李开开¹ 韩银学¹ 赵 岩¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029 2. 成都理工大学 成都 610059)

摘 要 对层状风化壳模式的认识一度支撑着塔里木盆地下古生界深层碳酸盐岩油气勘探,但这类深层碳酸盐岩储层显示出的强烈非均质性使得勘探风险愈来愈大。研究以塔里木盆地塔河地区中—下奥陶统碳酸盐岩储层为典型实例,重点论述了成岩作用和构造—热流体复合作用对储层的制约,并结合表生岩溶等其它要素开展了储层分布综合解释。研究认识到:①奥陶系碳酸盐岩正常深埋藏成岩作用的主要效应是碳酸盐的沉淀而不是碳酸盐的溶解,建设性改造主要与表生岩溶作用(古喀斯特)或构造—热流体作用有关,并导致了碳酸盐岩储层强烈的非均质性。②从中下奥陶统到上奥陶统,下部碳酸盐岩地层热流体活动迹象明显优于上部地层。③奥陶系碳酸盐岩构造—热流体的建设性改造作用主要发生在中—晚泥盆世与二叠纪叠加改造的断裂构造交汇区,以及中—晚奥陶世、前石炭纪形成的表生岩溶发育区;有效储层与高能沉积相带关系有限。为此,提出了奥陶系碳酸盐岩构造—热流体作用与储层形成概念模式,这为进一步认识储层的形成分布规律提供了新的线索。

关键词 埋藏成岩作用 构造—热流体作用 碳酸盐岩储层 塔河油田 塔里木盆地

第一作者简介 李忠 男 1964年出生 研究员 博士生导师 沉积学与盆地动力学 E-mail: lizhong@mail.igcas.ac.cn

中图分类号 P578.6 文献标识码 A

0 引言

以往研究认识到,油气盆地碳酸盐岩高孔渗储层的形成演化与表生作用、有机酸溶解作用、白云岩化、异常高压、热流体改造以及烃类充注等作用有关^[1-10]。塔里木盆地碳酸盐岩油气勘探的突破最早始于 1984 年钻探盆地北部(塔北隆起)塔河地区奥陶系的沙参 2 井,之后的进一步勘探实践也主要基于对表生作用即层状风化壳模式的认识,并取得了较好的油气勘探成果。但是近年来的勘探实践说明,无论在塔北或塔中地区,深层碳酸盐岩储层显示出了强烈的非均质性,勘探风险增大;与此同时,该区与“热液”活动有关的储层类型被频频报导^[11-18],但目前对这类储层的认识仍然处于初期阶段。本文以塔河地区奥陶系(中下奥陶统鹰山组上段、中奥陶统一间房组为主)碳酸盐岩储层为例,通过储层各类要素的综合分析,重点论述(后期)埋藏成岩作用和构造—热流体复合作用对储层的制约,为认识储层的形成分布提供新的线索。

1 研究区构造—沉积特征

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起的阿克库勒凸起上(图 1a),其主体位于塔河鼻状背斜带上(图 1b),后者为北东—南西走向、向南西倾伏的大型鼻状背斜构造。背斜由前石炭系组成,志留系—泥盆系的背斜幅度略小于寒武系—奥陶系。志留系不整合于奥陶系之上;东河砂岩及以上地层构造变形微弱,平整地不整合于下伏地层之上,说明该大型鼻状背斜构造的雏形形成于奥陶纪末—志留纪初,东河砂岩沉积前基本定型。

目前在塔河—轮南地区地震资料上可识别出来的断裂构造有 7 期,从下到上(从老到新)分别是:(1)发育于寒武系—前寒武系的正断层,形成于南华纪—寒武纪;(2)发育于奥陶系—寒武系的冲断层,形成与中—晚奥陶世;(3)发育于 T₀ 反射层(即石炭系底界)以下的走滑断裂,形成于中—晚泥盆世;(4)发育于二叠系及其以下地层中的正断层,形成于二叠纪早—中期,是与二叠纪岩浆作用有关的断裂构造;

①国家基础研究发展规划项目(编号:2006CB202304)和国家重大专项(编号:2008ZX05008-003)资助。

收稿日期:2009-09-28 收修修改稿日期:2009-10-10

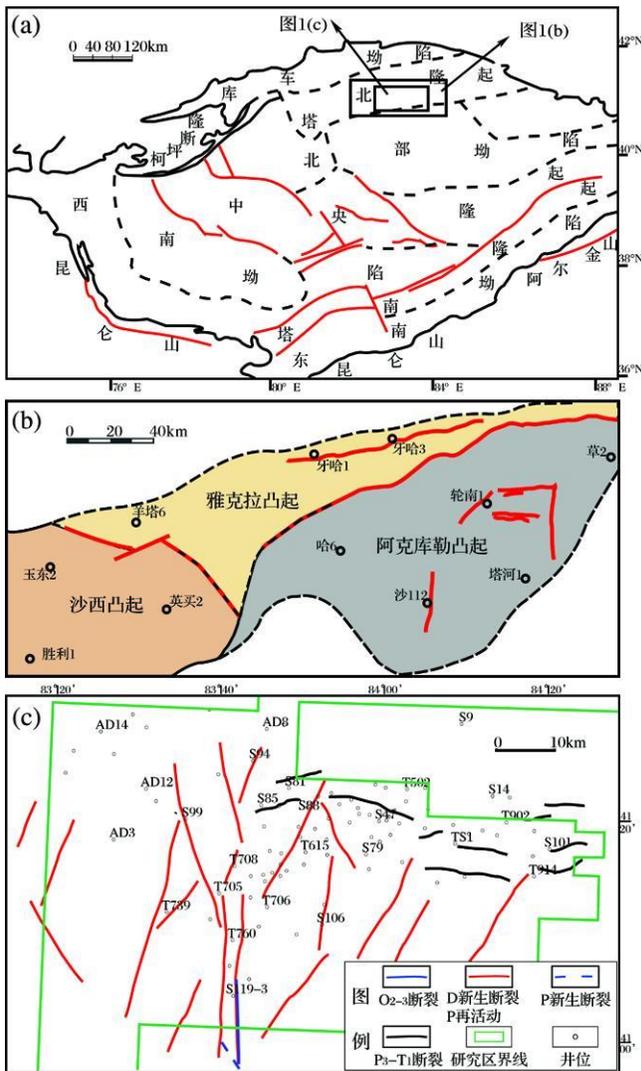


图1 塔里木盆地 (a)与塔北构造单元划分 (b)与塔河不同期次断裂分布 (c)

Fig 1 Tectonic unit division of Tarim Basin (a) and Tabei area (b) and fault distribution occurred in different periods in Tabei study area (c)

(5)发育于前中生代地层中的冲断层,形成于二叠纪末—三叠纪初,后期构造活动对上覆地层也有明显的影响;(6)沿石炭系膏盐层的顺层滑脱断层,形成于三叠纪末;(7)主要发育于中生界的正断层,向下可达石炭—二叠系,向上可以断至古近系,形成于白垩纪,持续到古近纪。第6期因规模小而忽略,因此一般认为存在6期断裂构造,而对于本文关注的塔河地区寒武系—奥陶系而言,主要见第2~5期(图1c)。

对于塔河地区奥陶系而言,纵向上早—中奥陶世、晚奥陶世沉积构成两个完整的海侵—海退沉积序列。据研究^①,塔河地区下奥陶统蓬莱坝组为弱镶边

(或近缓坡)台地建造为主,区内半局限台地—局限台地发育;中下奥陶统鹰山组仍表现为弱的镶边的碳酸盐岩台地建造,但主要以开阔台地内的台内浅滩亚相以及开阔海台坪亚相构成;中奥陶统一间房组沉积时期的沉积水体与沉积物的堆积速率处于近平衡时状态,导致镶边碳酸盐岩台地建造为主,台内代表高能的颗粒灰岩浅滩较鹰山组发育。塔河地区上奥陶统良里塔格组碳酸盐建造在海平面快速上升(淹没)背景下,晚期虽然由缓坡型碳酸盐台地演变为(弱)镶边型碳酸盐岩台地,发育高能的台地边缘相,但台地建造速度、高能相发育远不如塔中地区。

2 碳酸盐岩储集空间特征

从塔河油田奥陶系碳酸盐岩近6000个物性资料统计,碳酸盐岩基质主要显示特低孔渗的物性特征,平均孔隙度1.13%,平均渗透率 $1.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,纵向分布下部地层反而具有较好的孔渗性,即大多数的白云岩都比相应的石灰岩具有更高的孔隙度,尤其具有更高的渗透率,但总体上碳酸盐岩基质基本不具有储集性;而且基质孔隙度和渗透率的相关性较低(图2),经常出现常规样品测试物性(主要反映碳酸盐岩基质)对比与全直径样品相反的现象,说明碳酸盐岩储集空间主要为相对宏观的孔、缝、洞,其与后期构造—热流体改造作用密切相关。

塔河地区碳酸盐岩裂缝密度统计表明,塔河地区西部、北部的裂缝密度较大,鹰山组局部裂缝密度可以达到140条/m以上,而一间房组可以达到150条/m以上;而鹰山组、一间房组碳酸盐岩主力储集体放空、漏失现象普遍,发育“多层楼”式的表生岩溶带,也充分说明宏观孔、洞体系发育,是主要储集空间类型。

3 碳酸盐岩储层演化的物质基础

塔河地区作为重要储集层的一间房组和鹰山组基本上由石灰岩构成,但岩石中白云石的平均含量(介于0.77%~7.28%)总体随地层的变老和埋藏深度的增加而增加。奥陶系石灰岩中的颗粒含量平均值达到34%,颗粒/灰泥比可达到了0.58,说明高能环境的滩相沉积具有重要意义,很多岩石已构成颗粒支撑。同时,生物门类的多样化和窄盐度生物的出现也说明沉积环境相对开阔,海水盐度基本正常。

① 李忠,等.塔里木盆地构造—岩溶作用与储层形成分配.中国石化股份有限公司(研究报告).2009

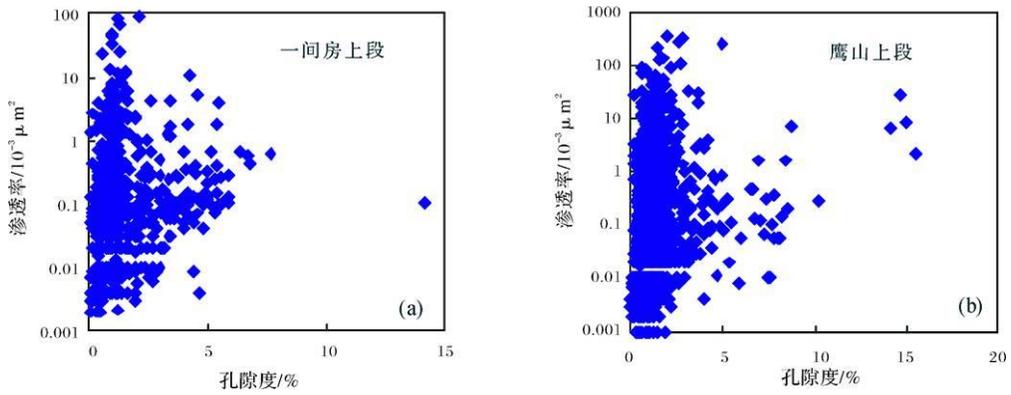


图 2 塔河地区主要碳酸盐岩储集层孔隙度和渗透率相关性投点图

a 一间房组上段; b 鹰山组上段

Fig 2 A plot showing correlation between porosity and permeability of the main carbonate reservoirs in Tahe area
a the upper member of Yijianfang Formation; b the upper member of Yingshan Formation

塔河地区奥陶系早成岩阶段(包括准同生成岩期和浅埋藏成岩期)碳酸盐的成岩作用以海水胶结成岩作用为主,且往往比较强烈。除了早期泥晶化作用发育外,在颗粒灰岩中亮晶胶结物含量多在 20% 以上,最大可达 40% 以上(图 3 之 I、III),这也是前

述碳酸盐岩基质显示特低孔渗物性特征的主要原因。早成岩阶段海水胶结作用表现为没有或仅有非常弱的阴极发光(图 3 之 II、IV)。与四川盆地三叠系飞仙关组相比,塔河地区早成岩阶段的大气淡水成岩作用较弱,相应的碳酸盐矿物溶解作用也就不发育。

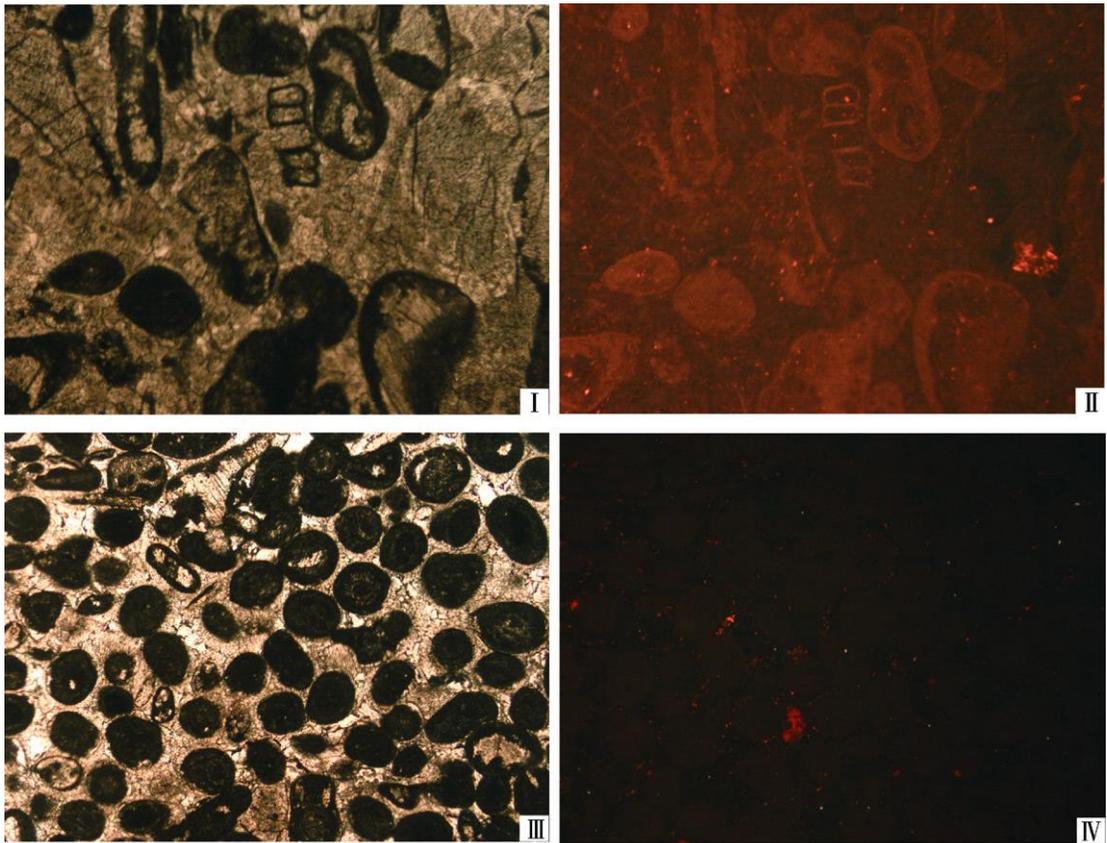


图 3 塔河地区奥陶系碳酸盐岩早期胶结物显微结构特征

I (单偏光) - II (阴极发光): 早期泥晶化作用发育, 阴极发光下泥晶套呈弱环带, S114 井, 一间房组, 6 341.39 m, 照片短边长 2 mm; III (单偏光) - IV (阴极发光): 亮晶鲕粒灰岩, 锰含量极低的海相碳酸盐胶结作用强, 阴极发光极弱, S119 井, 一间房组, 6 092.9 m, 照片短边长 4 mm

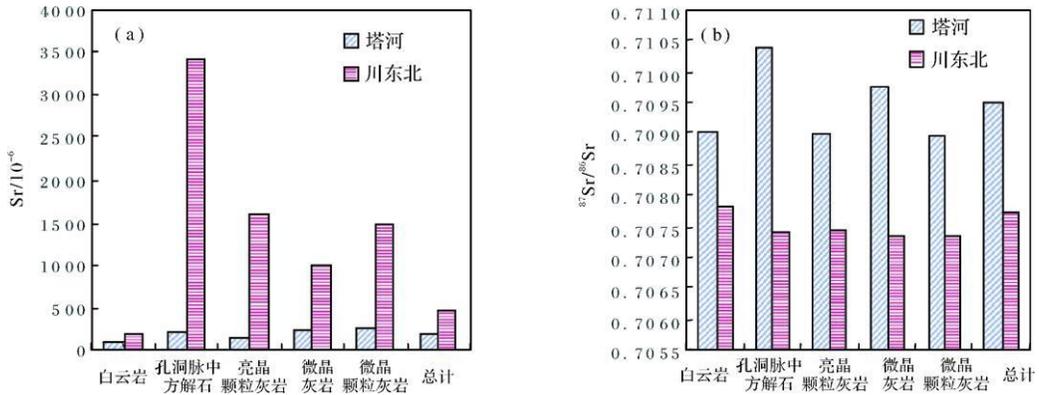


图4 塔河油田奥陶系和川东北三叠系飞仙关组碳酸盐岩(或矿物)锶含量(a)与锶同位素组成(b)对比直方图(川东北样品数据来自黄思静等[19~21];塔河样品数据来自①,不同的分析项目样品有差别,样品总数变化在130~190之间)

Fig. 4 A histogram contrasting strontium content (a) and strontium isotope composition (b) between Ordovician carbonate in Tahe Oilfield and Triassic Feixianguan Formation carbonate in northeast Sichuan

另一方面,塔河地区奥陶系碳酸盐岩(全岩)具有较高的铁、锰含量^①和较低的锶含量(图4a);在同位素组成上,塔河地区奥陶系碳酸盐的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值显著高于同期海水(图4b),而川东北三叠系飞仙关组碳酸盐岩则相对接近同期海水。这说明川东北飞仙关组碳酸盐成岩过程中海源流体的影响是主要的,而塔河地区非海相流体(包括后期表生大气水和/或可能来自深部碎屑岩的地层水)的影响显著。

4 碳酸盐岩后期改造作用及对储层的改造效应

正因为塔河油田奥陶系碳酸盐岩早成岩阶段海水胶结作用强,基质主体显示特低孔渗的物性特征,因此碳酸盐岩有效储层的形成必须依靠后期改造作用,即只能从正常深埋藏溶蚀作用、表生岩溶作用(古喀斯特)或构造—热流体作用中寻找机会。

4.1 深埋藏成岩作用

研究将深埋藏成岩作用界定为埋藏深度增加、地温正常增大、无大规模穿层流体活动发育的成岩作用,以区别于构造抬升—剥露导致的表生岩溶作用和由于断裂以及相关的热流体活动(地温异常增大)所引发的构造热流体—岩石相互作用。

显微观测和统计表明,塔河油田奥陶系碳酸盐岩除了同生(成岩)期部分层位的选择性溶解外,基质主体显示胶结作用或多期次胶结作用为主,没有或难于观测到有效的后期正常深埋藏溶蚀作用迹象,从而总体显示特低孔渗的物性特征。

事实上,塔河地区奥陶系的埋藏历史显著不同于

川东北^[16,22],印支—燕山—喜山期盆地持续沉降造成当前埋藏深度即为最大埋藏深度,加里东—海西期古喀斯特作用之后基本上没经历重要的抬升运动,这使得与构造抬升有关的碳酸盐溶解作用(即倒退溶解模式^[22])在盆地持续沉降过程中难以实现。换言之,塔河地区正常深埋藏成岩作用(无大规模穿层流体活动)的主要效应是碳酸盐的沉淀而不是碳酸盐的溶解。因此,塔河地区奥陶系碳酸盐岩在正常深埋藏成岩作用中难于获得显著建设性改造(即溶蚀作用)的机会。

4.2 表生岩溶作用(古喀斯特)

早古生代后期(至少有三期)、晚古生代早期的古喀斯特作用是奥陶系碳酸盐岩储集空间最为重要的形成机制,这些储集空间主要分布在靠近不整合面的层段,这已经为大量的勘探实践与研究所证实,这里不多赘述。但正如前面所述,塔里木盆地深层奥陶系碳酸盐岩储层显示出了强烈的非均质性,绝非层状风化壳模式的认识所能概括。

通过对勘探井以及部分开发井的统计(图5),可以看出无论鹰山组或一间房组,比较确认的表生岩溶作用井(岩芯证据)主要都发育在上奥陶统桑塔木组尖灭线以北的塔河主体区,而在该尖灭线以南的地区,表生岩溶作用发育井相对较少,而大量的空洞发育井往往多位于断裂附近,可能与深埋改造有关。而从岩溶作用发育的层位与T₇⁴(即一间房组顶界)、T₇⁰(即奥陶系顶界)两个不整合面的距离来看,绝大部

① 李忠,等. 塔里木盆地构造—岩溶作用与储层形成分布中国石化股份有限公司(研究报告),2009

②见前页

喀斯特作用的有效深度范围应在离不整合面 110~ 130 m 之间, 远离该深度范围, 碳酸盐的溶解作用显然与其它机制有关。但在不整合重叠发育区, 以及持续断裂活动区, 上述深度范围可以扩展至 200~ 300 m。

4 3 构造—热流体作用

对塔里木盆地已开展的研究表明, 针状溶蚀是埋藏溶蚀流体在碳酸盐岩上产生的一种特殊的溶蚀现象, 并以小而密的针状孔发育为特征, 一般孔径多为 0.01~ 0.03 mm, 少数可超过 0.1 mm; 且多发育在缝合线和微裂缝附近, 如塔河油田鹰山组 and 一间房组碳酸盐岩常见。除了针状溶孔外, 埋藏溶蚀流体也可以在一些井段产生孔径较大的溶蚀孔洞, 如塔河油田 TS1 井上寒武统丘里塔格组白云岩地层中孔径可高达 1~ 2 m, 孔洞壁多发育方解石和白云石晶簇, 个别溶洞被方解石全充填。在这种埋深达 7 000~ 8 000 m、压力大于 80 MPa 的环境下, 这些溶蚀孔洞的形成显然与外源的溶蚀流体作用密切相关。热流体除了会在一些井段产生特征的溶蚀作用外, 也会在其流动性减弱时沉淀特征矿物, 如重晶石、热液石英、萤石、闪锌矿、鞍状白云石及粗晶白云石 [11, 12, 14, 16~ 18]。另外还存在丰富的黄铁矿常沿裂缝、微裂缝分布, 可能反映了热流体的活动及其运移通道。

塔河地区不同产状方解石 (构造裂缝方解石、巨晶方解石、胶结物) 以及重晶石矿物也存在相当多的高温流体包裹体 (> 120°C); 对塔河地区奥陶系不同层位流体包裹体均一温度分别进行统计 (图 6), 结果显示由中下奥陶统至上奥陶统高温包裹体所占比例逐渐减小, 这可能指示了热流体自下而上运移, 在运移过程中, 流体与围岩的相互作用程度不断深入, 流体的温度将会降低。塔河地区奥陶系储层中重晶石、萤石、方解石等自生矿物 (图 6) 以及奥陶系地层水 [17] $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于 0.708 75~ 0.714 46 间, 大多数高于碳酸盐岩全岩及同期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.706 0~ 0.709 0), 表明具有外来的、富 ^{87}Sr 的流体的贡献。事实上, 配对样品的分析, 即同时具备高温流体包裹体 (> 120°C) 和高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的脉体矿物和巨晶方解石的大量存在 (从上奥陶统至下奥陶统增加), 充分说明流体主要来源于深部富 ^{87}Sr 的热流体。

另据蔡春芳等 [17] 研究, 塔河地区奥陶系储层自生方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间具有良好的线性关系, 显示有机碳的贡献与 $\delta^{18}\text{O}$ 负值的增大存在相关关系: 有机碳贡献比例越大, 方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 负值越大; 同时,

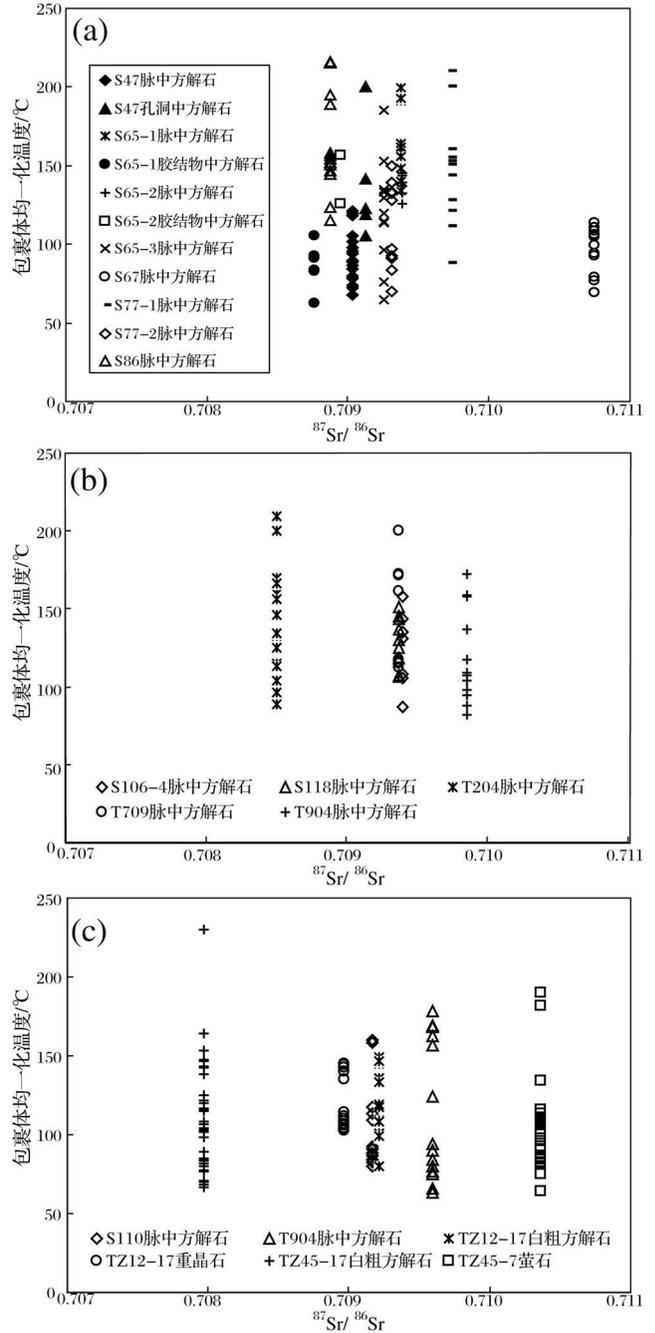


图 6 塔河地区奥陶系不同层位脉体矿物与巨晶方解石 Sr 同位素与流体包裹体均一温度关系 (塔河样品数据来自前页注①) a 鹰山组; b 一间房组; c 良里塔格组

Fig. 6 Sr isotope and homogenization temperatures of fluid inclusions from fracture-filling calcite and macrocrystalline calcite of Ordovician carbonate, Tahe area a Yingshan Formation b Yijianfang Formation c Lianglitag Formation

塔河地区奥陶系地层水 HCO_3^- 的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

与方解石类似, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 负相关表明 TSR 来源的有机 CO_2 与富 ^{87}Sr 的外来流体为同一来源。仅仅根据 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 资料, 可能存在大气淡水影响的机理解释, 即油气的生物降解作用越强, 产生的 CO_2 越多, HCO_3^- 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 越发生负偏移。但根据上述 Sr-C-O 同位素与流体包裹体均一温度配对样品的分析结果, 本文更倾向于解释为: 来自深部的热流体携带热化学硫酸盐还原作用产生的有机 CO_2 向上运移并影响储层中次生矿物与地层水的形成演化。

综合矿物学、流体包体学和地球化学等依据, 可以厘定中下奥陶统鹰山组、中奥陶统一间房组、上奥陶统的良里塔格组等各层系碳酸盐岩热流体明显影响的井位; 进一步以不同层位碳酸盐岩基质孔隙度的平均值(取 2.5%)为基准, 与上述不同井位、不同层位中具有热流体改造证据的碳酸盐岩的物性作对比, 将那些高于基准的样品区圈定为热流体建设性改造范围或建设性埋藏岩溶分布范围, 反之为热流体非建设性改造范围(图 7)。

对比分析认识到, 热流体在塔河地区奥陶系平面上以及纵向上存在以下特征: ①从中下奥陶统鹰山组、中奥陶统一间房组、到上奥陶统的良里塔格组

(图 7), 热流体发育的井位数迅速减少, 反映热流体自下而上运移的特征, 下部地层热流体活动迹象明显优于上部地层。②西部井区(高 H_2S 浓度井区)及北、中部井区(S76—S106 等井区)热流体显示程度高于东部及东南部井区, 这可能与热流体运移方向存在着一定关系。③热流体倾向于发育在不同方向断层的交汇地带, 西南部及北部热流体活动井区主要分布在西部北东—南西向断裂与近南北向断裂交汇处以及北部北东—南西向轮南断裂与近南北向断裂交汇处。

应该指出, 目前尚没有可信的有关重晶石、石英、萤石、闪锌矿、鞍状白云石及粗晶白云石等热流体矿物的年代学数据。但根据热流体作用的矿物学—地球化学记录与断裂活动期次匹配分析, 推测主要热流体活动区应与形成于中—晚泥盆世、二叠纪早—中期又重新活动(与岩浆作用有关)并伴有明显叠加改造迹象的断裂构造有关, 另一部分则与早期表生岩溶发育区有关(如图 8(a)北部井区)。

5 储层改造模式与讨论

前已述及, 塔河油田奥陶系碳酸盐岩早成岩阶段海水胶结成岩作用强, 有效储层的形成必须依靠后期

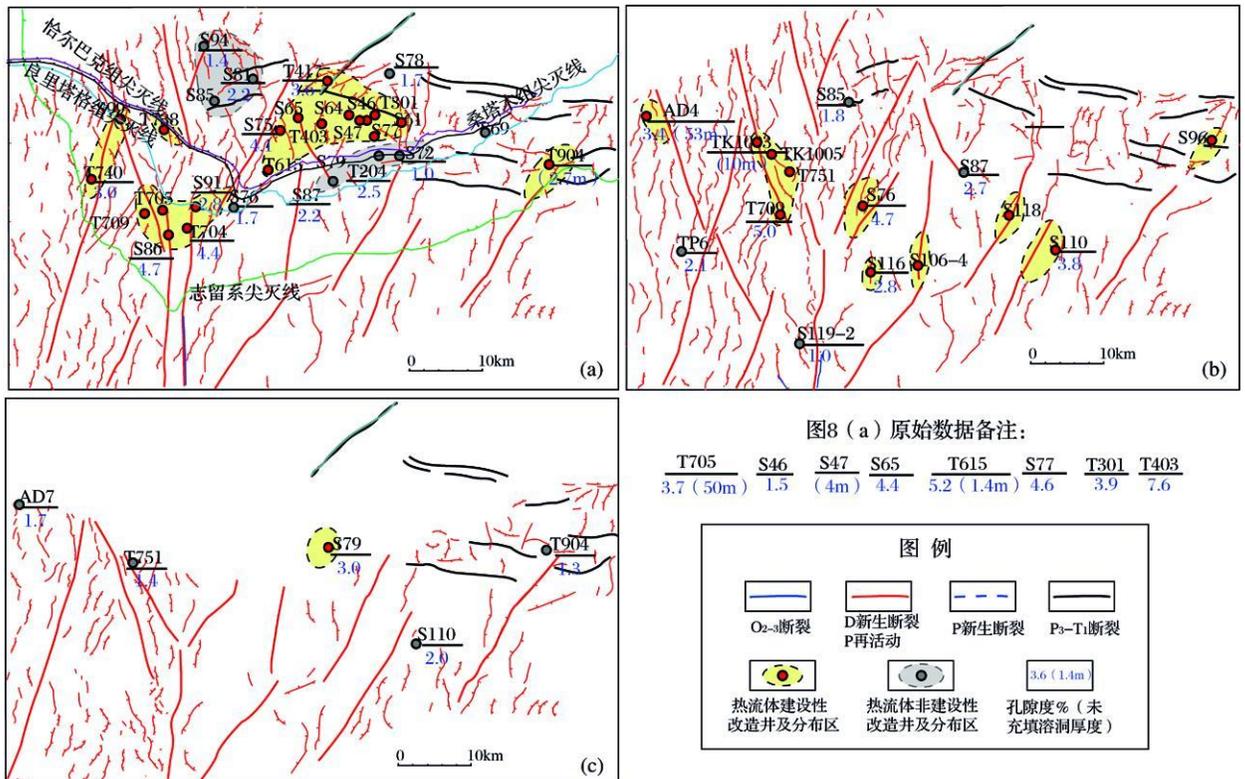


图 7 塔河地区奥陶系构造—热流体改造的碳酸盐岩储层类型平面分布图
a 鹰山组; b 一间房组; c 良里塔格组

改造作用。而该区正常深埋藏成岩作用(无大规模穿层流体活动)的主要效应是碳酸盐的沉淀而不是碳酸盐的溶解,建设性改造(即溶蚀作用)主要与表生岩溶作用(古喀斯特)和/或构造—热流体作用有关。

表生岩溶作用形成层状风化壳型储集体,而在塔北或塔中地区深层碳酸盐岩储层显示出了强烈的非均质性则是表生岩溶作用与构造—热流体作用复合的结果。从图 7 不难看出,构造—热流体对储层的建设性改造作用主要发生在中—晚泥盆世与二叠纪叠加改造的断裂构造交汇区,以及中—晚奥陶世、前石炭纪形成的表生岩溶发育区。

基于对塔河地区奥陶系碳酸盐岩埋藏断裂构造、成岩作用、热流体作用矿物学—地球化学等实际资料的综合分析,并充分考虑了勘探资料所揭示的有利储层分布,本文提出塔河地区奥陶系碳酸盐岩构造—流体作用与储层分布概念模式(图 8)。

该模式的构成要点有:

①塔河地区奥陶系(主要涉及中下奥陶统鹰山组上段、中奥陶统一间房组)碳酸盐岩有效储层的形

成主要依赖于后期表生岩溶作用(古喀斯特)和构造—热流体作用,总体上表生岩溶作用在前,构造—热流体作用在后。除了断裂—裂隙构造系统外,决定构造—热流体作用分布发育的输导空间主要还与早期表生岩溶系统密切相关,与高能沉积的礁滩体(台内滩为主)的残留孔隙系统也有一定关系(图 8),这与 Davies 和 Smith^[5]的模式不同。而断裂构造交汇区、中—晚奥陶世和前石炭纪形成的表生岩溶区、与建设性热流体作用的叠加区正是有利储层分布发育地区。

②由于压力势差,并可能受到热力的诱导,热流体发生了较大尺度的活动并与岩石发生化学作用。研究表明^[17]热流体源于前奥陶纪乃至前寒武纪碎屑岩,曾流经深部寒武系及下奥陶统石膏层,在有烃类介入下发生热化学硫酸盐还原作用,产生了 CO₂和 H₂S 等酸性物质;本文认为热流体在向上运移过程中依次发生储层溶蚀(或扩溶)、胶结(充填)作用。从这个意义上说,考虑质量平衡,则深部溶蚀(或扩溶)发育区的上部 and 邻区,胶结(充填)作用应该较强。

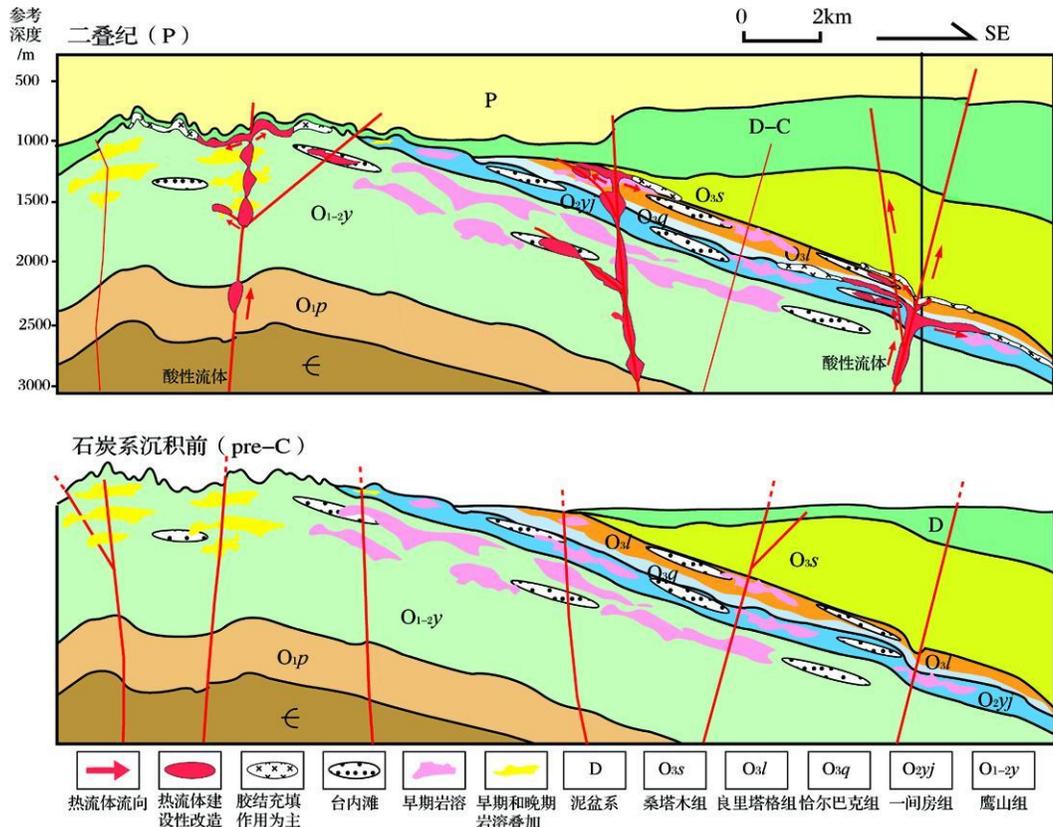


图 8 塔河地区奥陶系碳酸盐岩构造—流体作用与储层分布概念模式

早期岩溶:指中奥陶世末—志留纪岩溶(加里东期);早期和晚期岩溶叠加:指中奥陶世末—志留纪岩溶(加里东期)和泥盆纪末岩溶(海西期)叠加

Fig 8 A conceptual model showing structural-geological processes and related reservoir

③模式反映了多期构造—多源流体叠加改造、多种作用机制在奥陶系碳酸盐岩储层中的复合特点,其中深部热流体在中—晚泥盆世、二叠纪沿断裂构造的活动、沿岩溶界面/不整合界面以及台内滩等高能沉积体(原始储集性有保存)的侧向活动和溶蚀作用具有重要意义;当然本文并不否认表生流体在中—晚奥陶世、前石炭纪(中—晚泥盆世?)对奥陶系碳酸盐岩的岩溶改造效应,即分别对应“早期岩溶”和“晚期岩溶”(图8);相反,这种建设性的改造作用不仅造就了“层状”风化壳储集体,而且也为后期深部热流体的活动提供了输导空间。

该模式的不确定性在于:

①表生岩溶作用与构造—热流体作用对奥陶系碳酸盐岩储层物性影响的差异和重要性评判尚难确定;此外,尽管模式初步考虑到了质量平衡,即溶蚀(或扩溶)、胶结(充填)作用的对立统一,但质量平衡定量问题及分布发育机理问题仍然有待厘定,其中各类作用类型的精细判别与相关实验和数值模拟研究亟待开展。

②考虑到断裂构造与热流体作用的矿物学—地球化学等实际资料,认为二叠纪岩浆活动或隐伏岩体的热力作用为热流体活动提供了主要动力,但改造奥陶系碳酸盐岩储层的热流体主体并没有与岩浆热液发生直接交换,即储层改造流体的地球化学示踪参数(如锶同位素)并不直接反映与岩浆源有关。但由于缺乏可信的热流体矿物的年代学数据和流体来源示踪,其不确定性尚有待进一步研究。

6 主要认识

(1)塔河油田奥陶系碳酸盐岩早成岩阶段(准同生期和浅埋藏期)碳酸盐胶结作用极强,有效储层的形成必须依靠后期改造作用。而该区正常深埋藏成岩作用(无大规模穿层流体活动)的主要效应是碳酸盐的沉淀而不是碳酸盐的溶解,建设性改造(即溶蚀作用)主要与表生岩溶作用(古喀斯特)或构造—热流体作用有关。

(2)塔河油田奥陶系碳酸盐岩构造—热流体的建设性改造作用主要发生在中—晚泥盆世与二叠纪叠加改造的断裂构造交汇区,以及中—晚奥陶世、前石炭纪形成的表生岩溶发育区。

(3)塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层强烈的非均质性主要是表生岩溶作用与构造—热流体作用复合的结果,但原始台内滩等高能沉积体的(残留)孔隙

空间对后期流体活动和输导的影响也不容忽视;而厘定表生岩溶、构造、热流体等不同作用机制的相对重要性、作用期次(年代学)的研究亟待深入和细化。

结语与致谢 刘宝珺院士是我国沉积成岩作用研究^[23~25]的主要开拓者和倡导者之一,在此特辑出版之际,谨以本文浅谈塔里木盆地碳酸盐岩成岩作用关注问题,借此对先生八十华诞暨从事地质工作60周年表示恭贺,也感谢先生所给予作者的诸多教诲!

感谢何起祥教授针对本文提出的宝贵修改建议!感谢李阳、许卫平、王国力、黄太柱、王毅、张俊、邬兴威等专家在项目研究中给予的支持和具体帮助!

参考文献 (References)

- 1 Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S *et al*. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73: 1-23
- 2 A+Asm I, Ionnet J, Clarke J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: examples from middle Devonian carbonates of the western Canadian Basin [J]. *Journal of Geotechnical Exploration*, 2000, 69-70: 11-15
- 3 Davies G R, Berger Z. Shelfmargin hydrothermal to inboard shallow burial dolomitization of the Mississippian Deboit Formation, NEBC: Sikkani to Blüeberry [C]// McAuley R, ed. *Dolomites—The spectrum: Mechanisms, models, reservoir development*. Canadian Society of Petroleum Geologists Seminar and Core Conference, 2004, January 13-15, 2004, Calgary, Extended Abstracts
- 4 Davies G R, Wendte J. Major dolomite reservoir types: outcrop and subsurface analogues, western Canada: Distinct types or continuum? *American Association of Petroleum Geologists, Canadian Society of Petroleum Geologists, Joint Convention, Calgary, Field Trip Guidebook*, 2005: 84
- 5 Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1641-1690
- 6 Gasparini M, T. Bechstadt, Boni M. Massive hydrothermal dolomites in the southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the Late Variscan evolution [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 543-568
- 7 范嘉树. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 21-30 [Fan Jiasong. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 21-30]
- 8 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 1113-1122 [Li Zhong, Chen Jingshan, Guan Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 1113-1122]
- 9 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式 [J]. 岩

- 石学报, 2006, 22(8): 2183-2194 [Zhu Guangyou, Zhang Shucang, Liang Yingba *et al.* Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: an important type of deep buried high quality carbonate reservoirs in Siduan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2006, 22(8): 2182-2194]
- 10 黄思静, 佟宏鹏, 刘丽红, 等. 川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制 [J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2363-2372 [Huang Sijing, Tong Hongpeng, Liu Lihong *et al.* Petrography, geochemistry and dolomitization mechanism of Feixianguan dolomite in Triassic, NE Sichuan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2009, 25(10): 2363-2372]
- 11 张兴阳, 顾家裕, 罗平. 塔中 45 井萤石成因与油气成藏 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 479-482 [Zhang Xingyang, Gu Jiayu, Luo Ping. Fluorite origin and petroleum reservoirs in Well TZ45 in Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 25(5): 479-482]
- 12 张兴阳, 顾家裕, 罗平. 塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2220-2228 [Zhang Xingyang, Gu Jiayu, Luo Ping. Genesis of the fluorite in the Ordovician and its significance to the petroleum geology of Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2006, 22(8): 2220-2228]
- 13 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 284-296 [Lv Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qilai *et al.* Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 284-296]
- 14 金之钧, 朱东亚, 胡文瑛, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响 [J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245-253 [Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxian *et al.* Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica* 2006, 80(2): 245-253]
- 15 朱东亚, 金之钧, 胡文瑛, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响 [J]. 地质论评, 2008, 54(3): 348-357 [Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wen *et al.* Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim Basin [J]. *Geological Review*, 2008, 54(3): 348-357]
- 16 李开开, 蔡春芳, 蔡缪璐, 等. 塔中地区上奥陶统热液流体与热化学硫酸盐还原作用 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 217-222 [Li Kaikai, Cai Chunfang, Cai Liulu, *et al.* Hydrothermal fluid activity and thermochemical sulfate reduction in the Upper Ordovician Tazhong area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 217-222]
- 17 蔡春芳, 李开开, 蔡缪璐, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析 [J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2399-2404 [Cai Chunfang, Li Kaikai, Cai Liulu *et al.* Geochemical characteristics and origins of fracture- and vug-fillings of the Ordovician in Tazhong oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2009, 25(10): 2399-2404]
- 18 潘文庆, 刘永福, Dickson J A D, 等. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩热液岩溶的特征及地质模型 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 983-994 [Pan Wenqing, Liu Yongfu, Dickson J A D, *et al.* The geological model of hydrothermal activity in outcrop and the characteristics of carbonate hydrothermal karst of lower Paleozoic in Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2009, 27(5): 983-994]
- 19 黄思静, 张萌, 孙治雷, 等. 川东 L2 井三叠系飞仙关组碳酸盐样品的锶同位素年龄标定 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006a, 32(2): 111-116 [Huang Sijing, Zhang Meng, Sun Zhilei *et al.* Age calibration of carbonate samples from the Triassic Feixianguan Formation, Well Luoja 2, Eastern Sichuan by strontium isotope stratigraphy [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2006a, 32(2): 111-116]
- 20 黄思静, Qing Hairuo, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云石化流体 [J]. 岩石学报, 2006b, 22(8): 2123-2132 [Huang Sijing, Qing Hairuo, Pei Changrong *et al.* Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, Eastern Sichuan of China [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2006b, 22(8): 2123-2132]
- 21 黄思静, Qing Hairuo, 胡作维, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组硫酸盐还原作用对碳酸盐成岩作用的影响 [J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 815-824 [Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zuwei *et al.* Influence of sulfate reduction on diagenesis of Feixianguan carbonate in Triassic, NE Sichuan Basin of China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2007, 25(6): 815-824]
- 22 黄思静, 黄培培, 黄可可, 等. 碳酸盐退溶解模式的化学热力学基础——与 H₂S 有关的溶解介质及其与 CO₂ 的对比 [J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 1-9 [Huang Sijing, Huang Peipei, Huang Keke *et al.* Chemical thermodynamics foundation of retrograde solubility for carbonate solution media related to H₂S and comparing to CO₂ [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2010, 28(1): 1-9]
- 23 刘宝珺. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1980: 59-79 [Liu Baojun. *Sedimentary Rocks* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 59-79]
- 24 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992 [Liu Baojun, Zhang Jinquan. *Sedimentary Diagenesis* [M]. Beijing: Science Press, 1992]
- 25 刘宝珺. 沉积成岩作用研究的若干问题 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 787-791 [Liu Baojun. Some Problems on the study of sedimentary diagenesis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2009, 27(5): 787-791]

Buried Diagenesis Structurally Controlled Thermal Fluid Process and Their Effect on Ordovician Carbonate Reservoirs in Tahe, Tarim Basin

LIZhong¹ HUANG Si-jing² LIU Jia-qing¹ CAI Chun-fang¹ LI Yue-jun¹
LI Kai-kai¹ HAN Yin-xue¹ ZHAO Yan¹

(¹ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

² Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract The understanding for layered weathering crust model once sustained oil and gas exploration of the Lower Paleozoic deep-buried carbonate in the Tarim Basin. However, strong heterogeneous characteristics of the carbonate reservoir types increases exploration risk in the study area. As a case study, The Middle-Lower Ordovician carbonate reservoirs of Tahe area, Tarim basin, are studied in this paper, with focuses on superposition effect of burial diagenesis and structurally controlled thermal fluid on reservoir formation. Finally, combined with other elements including epigenetic karst process and so on, a comprehensive explanation on reservoir distribution is given in this research. The main recognition includes: ① Normal deep-buried diagenesis of Ordovician carbonates mainly resulted in precipitation rather than dissolution, and constructive modification primarily related to the epigenetic karstification (paleo-karst) or structurally controlled thermal fluid flow and led to strong heterogeneity of carbonate reservoirs. ② From the Lower Ordovician to Upper Ordovician, thermal fluid flow evidence in the lower carbonate strata is stronger than that of the upper carbonate strata. ③ The constructive modification of structural thermal fluid flow in Ordovician carbonate mainly occurred in structural intersection of superimposed faults developed during Middle-Late Devonian and Permian, respectively, and the strong pre-existed epigenetic karstification area formed at Middle-Late Ordovician and pre-Carboniferous periods. The most efficient carbonate reservoirs have limited genetic relation with high-energy depositional facies in the study area. This paper puts forward a conceptual model about structural-geofluid processes and related reservoir formation for the Ordovician carbonates in Tahe area, which provides a new clue for further understanding formation and distribution of the studied reservoirs.

Key words burial diagenesis; structurally controlled thermal fluid flow; carbonate reservoir; Tahe oilfield; Tarim Basin