| 第 39 卷 第 6 期 | 中国岩溶               | Vol. 39 No. 6 |
|--------------|--------------------|---------------|
| 2020年12月     | CARSOLOGICA SINICA | Dec. 2020     |

张庆玉,李景瑞,梁彬,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系古岩溶包裹体特征及古环境意义[J].中国岩溶,2020,39(6):894-899. DOI:10.11932/karst2020y61

# 塔里木盆地塔中地区奥陶系古岩溶包裹体 特征及古环境意义

# 张庆玉,李景瑞,梁彬,淡永,曹建文

(中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

**摘 要:**碳酸盐岩古岩溶型储层是油气勘探开发的重点领域,具有极强的非均质性,是世界级难题。 古岩溶发育期次的确定一直都是古岩溶储层地质建模的技术难题。现有判别古岩溶发育期次的方 法多以地表裸露古岩溶充填物特征为依据。在塔里木盆地塔中地区地质构造复杂,具有多期次古岩 溶作用的叠加改造。本次利用古岩溶充填方解石流体包裹体均一温度法,研究塔中地区奥陶系碳酸 盐岩古岩溶作用期次与古环境条件,揭示了4期古岩溶作用环境:加里东期古岩溶作用、海西晚期古 岩溶作用、印支一燕山期古岩溶作用、喜马拉雅期古岩溶作用。该研究成果对后期岩溶储层预测具 有重要意义。



# 0 引 言

深埋藏条件下的岩溶储层是海相碳酸盐岩油气 田重要的储集类型之一,一般经历了长期的地质历 史和环境变迁过程,受多种流体多期次、多成因溶 蚀一充填作用的叠加改造影响,具有埋藏深、构造复 杂、非均质性强等多种特征,造成碳酸盐岩埋藏岩溶 储层预测的难度极大。

包裹体是在成岩、成矿过程中,由于某种因素的 改变被捕获在成岩矿物中的流体介质。由于包裹体 是一个封闭体系,不受成藏后期各种作用的影响,其 中所包含的地球化学信息,如温度、压力、成分、介质 环境等,是识别成岩环境、划分油气充注期次,和剖 析油气聚集成藏过程的重要密码<sup>[1]</sup>。其均一温度测 定是直接了解古流体温度、推测盆地地温与热演化 史的重要依据,而包裹体盐度及成分的测定是了解 盆地成矿流体性质、来源的基础[2]。

在塔里木盆地,由于古岩溶缝洞充填物属于不 同期次的产物,因此可以采用岩石地球化学特征判 别古岩溶作用期次。前人在该方面做了大量的研究 工作<sup>[3]</sup>,更多的是采用碳氧稳定同位素方法解释古岩 溶作用期次<sup>[4-5]</sup>。利用充填物流体包裹体方法研究古 岩溶作用在塔中地区研究较少。本文拟利用流体包 裹体实验分析,研究塔中地区奥陶系碳酸盐岩古岩 溶作用期次及古环境,为岩溶储层预测及油气勘探 开发提供地质依据。

# 1 地质背景

塔中地区位于塔里木盆地中央隆起中部低凸起 区域,在平面上表现为一个完整的由多个次级构造 带组成的大型台地背斜构造<sup>[6-7]</sup>。可进一步划分为塔

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC0604301);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198208);国家自然科学基金(41302122);中国地质调 查局项目(DD20190562、DD20190723、DD20190342)

第一作者简介:张庆玉(1983-),男,博士,高级工程师,主要从事古岩溶储层与页岩气地质研究工作。E-mail:zhangqingyu@karst.ac.cn。 通信作者:李景瑞(1987-),男,博士研究生,助理研究员,主要从事古岩溶与油气储层研究工作。E-mail:lijingrui@karst.ac.cn。 收稿日期:2020-03-20

中 I 号断裂构造带、塔中北斜坡及中央断垒带3个构造单元(图1)。塔中地区鹰山组整体以高能砂屑滩沉积为主,纵向上多期次发育、相互叠置,横向上沿北东一南西向呈线状、带状展布,规模较大。发育的大套厚层礁滩体为鹰山组古岩溶发育提供基础。塔

中1号断裂构造带控制了塔中隆起的基本构造格局, 在早一中奥陶世塔中1号断裂构造带使塔中隆起隆 升并遭受强烈剥蚀,形成下奥陶统鹰山组顶部风化 壳,中奥陶统一间房组以及上奥陶统吐木休克组遭 受剥蚀或缺失,只在局部地区残留<sup>[8]</sup>。



Fig.1 Map showing geology and sampling wells in Tazhong area, Tarim basin

塔中地区奥陶系地层主要为下奥陶统蓬莱坝组 (O<sub>1</sub>*p*)、鹰山组(O<sub>1</sub>*y*)及上奥陶统良里塔格组(O<sub>2</sub>*l*)、桑 塔木组(O<sub>3</sub>*s*)。对比塔北地区地层层系<sup>[9-10]</sup>,在塔中地 区缺失了中奥陶统一间房组及上奥陶统吐木休克组 地层(图2),奥陶系鹰山组碳酸盐岩岩溶发育。勘探 表明,下奥陶统鹰山组发育有大型岩溶缝洞储集体, 是该地区碳酸盐岩重要的油气产层<sup>[11]</sup>。

# 2 样品与试验

试验样品主要取自塔中地区奥陶系鹰山组 (O<sub>1-2</sub>y)碳酸盐岩古岩溶充填方解石。取样深度为 5 553.5~6 472.5 m,主要为奥陶系古风化壳面以下 0.8~162 m范围。在样品采集时,充分考虑样品在平 面和垂向上分布的均匀性,以确保测试结果在整个 塔中地区具有代表性和有效性。进行包裹体分析的 8块样品取自8口井,选择有代表性的方解石包裹体 260个,选用英国Linkam公司THMSG600型冷热台进 行测试,测量温度范围-190~600℃,均一温度重现 误差<2℃,冰点温度重现误差<0.2℃。

# 3 包裹体特征

测试分析表明灰岩缝洞方解石充填物中发育多 种类型的流体包裹体,常见有盐水包裹体和烃类包 裹体两大类。盐水包裹体包括单相盐水包裹体 (WL)、气液两相盐水溶液包裹体(WL+V)。烃类包 裹体包括单相气态烃包裹体(OV)、单相液态烃包裹 体(OL)、气液两相烃包裹体(OL+OV)、气液烃+盐水 包裹体(WL+OL+OV)。由于烃类包裹体或含烃包裹 体受烃类影响,对判断古岩溶充填物形成时的温度、 盐度会产生误差<sup>[9]</sup>,本文主要利用单相盐水包裹体、 气液两相盐水包裹体对充填物成岩环境进行测试并 探讨(表1)。

#### 3.1 包裹体物理特征

单相盐水包裹体形态一般呈圆形、方形、椭圆 形、多边形或不规则状,在方解石矿物中成群分布、 均匀分布或成带状分布,少数沿方解石矿物愈合微 裂隙与烃质包裹体伴生,呈线状或带状分布。单液 相包裹体中没有气泡,属于准稳定液相包裹体,一般



Fig.2 Sketch of NS-trending geologic profile A-A' through uplift in Tazhong area

|  | 表1 | 气液两相盐水包裹体测试结果 |  |
|--|----|---------------|--|
|--|----|---------------|--|

Table 1 Test results of inclusions in salt water of gas-fluid phase

| 编号 | 样品  | 井位   | 层位         | 深度/m         | 有效包裹体<br>数据/个 | 气液比/vol%    | 冰点温度/℃             | 均一温度/℃             | S/wt. %NaCl   |
|----|-----|------|------------|--------------|---------------|-------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1  | 方解石 | T201 | $O_{1-2}y$ | 5460.7       | 19            | $5 \sim 10$ | $-1.5 \sim -14.1$  | $49 \thicksim 116$ | 2.57~17.87    |
| 2  | 方解石 | T452 | $O_{1-2}y$ | 6 461.0      | 37            | 5~10        | $-1.1 \sim -11.0$  | $79 \sim 119$      | 1.91 ~ 14.97  |
| 3  | 方解石 | Z106 | $O_{1-2}y$ | $6\ 074.\ 4$ | 24            | <5          | $-18.4 \sim -20.1$ | 66 ~ 90            | 21.26~22.38   |
| 4  | 方解石 | Z171 | $O_{1-2}y$ | 6 493.0      | 26            | $5 \sim 10$ | $-0.5 \sim -20.0$  | $56 \sim 106$      | 0.88~22.38    |
| 5  | 方解石 | Z503 | $O_{1-2}y$ | $5\ 942.\ 4$ | 38            | $5 \sim 10$ | $-19.4 \sim -20.0$ | $63 \sim 111$      | 21.96~22.38   |
| 6  | 方解石 | Z512 | $O_{1-2}y$ | 5 484.3      | 34            | $5 \sim 10$ | -6.8 ~ -20.0       | $78 \sim 125$      | 10.24 ~ 22.38 |
| 7  | 方解石 | Z512 | $O_{1-2}y$ | 5 582.5      | 39            | 5~10        | -16.0~-20.0        | $68 \sim 100$      | 19.53 ~ 22.38 |
| 8  | 方解石 | Z512 | $O_{1-2}y$ | 5 587.6      | 43            | $5 \sim 10$ | -12.4 ~ -20.0      | $75 \sim 113$      | 16.34 ~ 22.38 |

指示较低的捕获温度<sup>[10]</sup>,在透光下呈无色、透明无 色、浅灰色、淡褐色,无荧光显示。包裹体大小一般 为2~20 µm,部分能达到50 µm。单相盐水包裹体数 占包裹体总数32%~55%,甚至更多些。

气液两相盐水包裹体形态呈圆形、多边形、长方 形,少量不规则状,在方解石矿物中成群分布、均匀 分布或带状分布,少数沿方解石矿物愈合微裂隙与 烃质包裹体伴生,呈线状或者带状分布。WL相在透 光下呈透明无色、淡褐色,无荧光显示,大小一般为 2~50 μm(图3a-i)。

# 3.2 气液两相盐水包裹体化学特征

气液两相盐水包裹体盐度、冰点温度和均一温 度测定结果表1所示。本次测温共计8个样品,260 个流体包裹体,取得了260个有效数据。方解石包裹 体的化学相平衡体系具有 NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O、NaCl-Mg-Cl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、和 MgCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O 四种 类型。通过建立单个包裹体均一温度分布直方图, 利用其峰值可以确定出包裹体平均均一温度 值(图4)。

# 4 古岩溶作用期次分析

#### 4.1 包裹体均一温度与埋藏史分析

流体包裹体是矿物结晶过程中捕获的显微级液态或气态封闭流体体系,作为地下岩石在地质历史时期流体信息的载体和一个相对封闭的地球化学体系,溶蚀孔洞和溶蚀裂缝充填物中,不同期次的流体 包裹体反映出不同期次的矿物充填作用<sup>[12]</sup>。

研究表明,塔中地区奥陶系气液两相盐水包裹



图3 方解石中流体包裹体形态与分布特征

#### Fig.3 Forms and distribution features of fluid inclusions in calcite

a.包裹体成带状分布、呈浅灰色一透明无色的含烃盐水包裹体 b.包裹体成带状分布、呈浅灰色一透明无色的含烃盐水包裹体 c.包裹体成群分 布、呈浅灰色的含烃盐水包裹体 d.包裹体均匀分布、呈深灰色的气体包裹体、深褐色的液烃包裹体 e.包裹体成群分布、呈深灰色的气体包裹 体、深褐色的液烃包裹体 f.包裹体成群分布、呈浅灰色一透明无色的含烃盐水包裹体 g.包裹体均匀分布、呈深灰色的气体包裹体与呈浅灰色 或透明无色的盐水包裹体 h.包裹体成带分布、呈褐黄色的液烃包裹体,显示黄绿色荧光 i.包裹体沿灰岩溶缝方解石充填物微裂隙面分布、呈透 明无色一灰色的含烃盐水包裹体。



Fig.4 Histogram of homogeneous temperature of inclusions in Ordovician ancient karst in Tazhong area

体测温范围在49~125 ℃之间(表1)。不同钻井之间 奥陶系包裹体温度不同,且同一钻井不同深度段取 样,包裹体温度也具有一定差异,如1号、2号样品和 3号样品包裹体,包裹体最高温分别为116 ℃、 119 ℃,和90 ℃。而且,即使是同一钻井的样品,气液 相不同包裹体之间也存在差异,如6号样品气液相包 裹体和7号样品气液相包裹体均一温度分别为78~ 125 ℃、68~100 ℃,处在不同温度段。表明塔中地区 奥陶系碳酸盐岩经历了不同温度下多期岩溶的充填 改造作用。

从均一温度直方图(图4)可见,均一温度分布范 围主要集中在:49~65 ℃,72~80 ℃,85~105 ℃,110~ 128 ℃。其中85~105 ℃数据最多。可以看出塔中地 区可以分4个古岩溶缝洞方解石充填作用期次,对应 有4期不同的流体包裹体温度段。

前人研究表明,塔中地区奥陶系碳酸盐岩包裹 体均一温度变化较大,为70~310℃,包裹体均一温度 最高温可达310℃,表明存在一期高温流体包裹体, 推测塔中地区奥陶系碳酸盐岩地层经历了岩浆一火 山作用或者深部热液流体作用改造,但是作用范围 有限<sup>[13-15]</sup>。

大量分布的单液相包裹体形成原因较多<sup>[16]</sup>,研 究区古岩溶缝洞充填方解石晶体中存在大量自由分 布的单液相包裹体,1号样品检测出均一温度为49℃ 的包裹体,可能有部分单液相包裹体形成于温度低 于49℃的低温环境中,这些低温单液相包裹体属加 里东期奥陶系碳酸盐岩裸露大气淡水古岩溶所致。

流体包裹体的均一温度代表了古流体被捕获时 的最小温度,如果把与同期盐水包裹体相伴生的各 期流体包裹体均一温度"投影"到附有古地温演化的 埋藏史图中<sup>[17]</sup>,就可以运用包裹体方法间接确定出 各期方解石的充注时期。

塔中地区经历了复杂的地热史,李慧莉等[19-20]利

用磷灰石裂变径迹与镜质体反射率反演计算塔中地 区3口井的地热历史。寒武纪一早奥陶纪古地温梯 度为32~35℃·km<sup>-1</sup>,此后地温梯度显著下降,石炭纪 古地温略有上升。二叠纪古地温梯度为30℃·km<sup>-1</sup>, 中生代末古地温梯度为25℃·km<sup>-1</sup>,现今地温梯度 22℃·km<sup>-1</sup>。

# 4.2 古岩溶作用期次分析

对包裹体形成温度进行计算,并投在本区埋藏 史图上(图5),主要在4个温度段,即:49~65℃,属于 加里东期大气淡水古岩溶作用;72~80℃,属于晚海 西期浅埋藏古岩溶作用;85~105℃,属于印支一燕山 期中埋藏岩溶作用;及110~128℃,属于喜马拉雅期 深埋藏岩溶作用,表明研究区存在4次较大规模古岩 溶作用及充填期次。





# 5 结 论

古岩溶缝洞充填物中广泛分布着流体包裹体, 并且在流体包裹体中蕴藏着大量古环境演化的重要 信息。本次通过采取能代表全区典型的古岩溶缝洞 充填方解石和钙泥质样品,运用流体包裹体均一温 度方法,识别塔中地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用 期次及古环境条件。

(1)古岩溶缝洞充填物流体包裹体均一温度分 析表明:古岩溶作用古温度环境条件分布范围主要 集中在49~65 ℃、72~80 ℃、85~105 ℃、110~128 ℃范 围,其中85~105℃古岩溶化学沉淀充填作用最强;

(2)结合埋藏史条件,反映了该区存在加里东期 裸露风化壳大气淡水古岩溶作用环境、海西晚期浅 埋藏期古岩溶作用环境、印支-燕山期中埋藏古岩溶 作用环境、喜马拉雅期深埋藏4次较大规模的古岩溶 作用及古环境条件,对岩溶储层预测具有重要意义。

#### 参考文献

[1] 冯乔,马硕鹏,樊爱萍.鄂尔多斯盆地上古生界储层流体包裹体特征及其地质意义[J].石油与天然气地质,2006,27(1): 27-32.

899

- [2] 刘洪营,熊敏,刘德汉,等.莱阳凹陷烃源岩中的石油包裹体 及油气初次运移研究[J].沉积学报,2008(1):167-171.
- [3] 陈瑞银,赵文智,王红军.塔中地区奥陶系油气充注期次的流体包裹体证据[J].石油勘探与开发,2010,37(5):537-542.
- Zhang Q, Bin L, Fengrui Q, et al. Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Significance of the Ordovician Paleokarst Reservoir in the Maigaiti Slope of Tarim Basin [J]. Earth Sciences Research Journal, 2016, 20(1):1-10.
- [5] Ainsaar L, Kaljo D, Martma T, et al.Middle and upper Ordovician carbon isotope chemostratigraphy in Baltoscandia: A correlation standard and clues to environmental history. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 294 (3): 189-201.
- [6] Han J F, Zhang H Z, Yu H F, et al. Hydrocarbon accumulation characteristic and exploration on large marine carbonate condensate field in Tazhong Uplift. Acta Petrologica Sinica, 2012,28(3):769-782(in Chinese).
- [7] 李景瑞,梁彬,于红枫,等.中古8井区断裂与鹰山组岩溶储层 成因关系[J].中国岩溶,2015,34(2):147-153.
- [8] 倪新锋,沈安江,潘文庆,等.优质碳酸盐岩缝洞型储集层地 质建模:以塔中北斜坡及塔北南缘奥陶系为例[J].石油勘探 与开发,2013,40(4):414-422.
- [9] 刘可禹, Julien Bourdet,张宝收,等.应用流体包裹体研究油 气成藏:以塔中奥陶系储集层为例[J].石油勘探与开发, 2013,40(2):171-180.
- [10] Zajacz Z, Seo J H, Candela P A, et al. Thesolubility of copper in high-temperature magmatic vapors: A quest for the significance of various chloride and sulfide complexes. Geochimica et Cosmochimic Acta, 2011,75(10): 2811-2827.

- [11] 张庆玉,梁彬,淡永,等.塔中北斜坡奧陶系鹰山组岩溶储层 特征及古岩溶发育模式[J].中国岩溶,2016,35(1):103-113.
- [12] 夏日元,唐建生,邹胜章,等.塔里木盆地北缘古岩溶充填物 包裹体特征[J].中国岩溶,2006,25(3):246-249.
- [13] 王嗣敏,金之钧,解启来.塔里木盆地塔中45井区碳酸盐岩储 层的深部流体改造作用[J].地质论评,2004,50(5): 543-547.
- [14] 尤东华,曹自成,徐明军,等.塔里木盆地奥陶系鹰山组多类
  型白云岩储层成因机制[J].石油与天然气地质,2020,41(1):
  92-101.
- [15] 刘春晓,李铁刚,刘城先.塔中地区深部流体活动及其对油气 成藏的热作用[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2): 280-285
- [16] Loucks R G, Mescher P K, McMechan G A. Three-dimensional architecture of a coalesced collapsed—paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group central Texas. AAPG Bulletin, 2004,88(4):545-564.
- [17] 叶德胜,王根长,林忠民,等.塔里木盆地北部寒武一奥陶系 碳酸盐岩特征及油气远景[M].成都:四川大学出版社,2000: 88-147.
- [18] 陈瑞银,赵文智,王红军.塔中地区奥陶系油气充注期次的流体包裹体证据[J].石油勘探与开发,2010,37(5):537-542.
- [19] 李慧莉,邱楠生,金之钧,等.塔里木盆地塔中地区地质热历 史研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2004(4):36-39.
- [20] 李慧莉,邱楠生,金之钧.利用磷灰石裂变径迹研究塔里木盆 地中部地区的热历史[J].地质科学,2005(1):129-132.
- [21] 易金,曾乔松,李鹏春,等.塔中奥陶系碳酸盐岩流体包裹体 特征及其对成岩作用和深部流体作用的指示意义[J].矿物学 报,2011,31(3);425-433.

# Characteristics and paleoenvironmental significance of Ordovician karst inclusions in the Tazhong area ,Tarim basin

ZHANG Qingyu, LI Jingrui, LIANG Bin, DAN Yong, CAO Jianwen (Institute of Karst Geology, CAGS / Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Carbonate rock paleokarst-type reservoirs in carbonate rock are a key field of oil and gas exploration and development, which have strong heterogeneity, remaining a difficult problem throughout the world. In this aspect, the determination of palaeokarst periods is always a technical barrier in geological modeling of the palaeokarst reservoirs. At present, the methods to distinguish the development periods of ancient karst are mainly based on the characteristics of exposed ancient karst fillings. The geological structure in the Tazhong area, Tarim basin is complex, with multiple-period superimposed reformation of palaeokarstification. This work uses the honogenization temperature method on fluid inclusions filled in calcite of ancient karst to study the periods and environment of ancient karst in Ordovician carbonate rock of the Tazhong area. Four periods of ancient karstification are revealed, i.e. Caledonian, late Hercynian, Indosinian to Yanshanian and Himalayan times. The research results are of great significances to the prediction of karst reservoirs in the future.

Key words fluid inclusion, palaeokarst period, ancient environment, carbonate rock, Tarim basin

(编辑 张玲)