

锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用

张涛¹, 云露², 邬兴威^{1,3}, 叶德胜²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 西北石油局规划院, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 塔河油田主要是与不整合面有关的奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞型油藏, 储层经历多期岩溶作用的叠加改造, 因此岩溶期次的划分识别与不同期次岩溶分布范围的确定对塔河油田下一步勘探至关重要。通过近几年的探索, 认为锶同位素比值是区分加里东中期和海西早期岩溶的一种有效方法, 其应用原理是, 地质历史中的任何时间全球范围内海水的锶同位素组成都是均一的, 海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随时间变化。结合塔河地区加里东期与海西早期岩溶地层水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值存在差异的地质背景和实验分析数据, 可以对塔河古岩溶期次进行识别预测, 探讨其分布模式, 为塔河油田外扩提供地质依据。

关键词: 锶同位素; 岩溶期次; 塔河油田; 奥陶系

中图分类号: P597.1

文献标识码: A

随着锶同位素研究的不断深入, 建立起具有全球一致性、可对比的显生宙以来海水锶同位素变化曲线背景值, 为锶同位素的应用奠定了基础, 其应用领域不仅在海相地层定年、对比, 估计沉积间断时间, 示踪岩浆及成矿热液的来源和演化, 计算晚期成岩改造作用的规模和程度等方面已趋于成熟, 并且越来越广泛运用于海平面变化、板块活动、海底扩张等方面的研究^[1]。前人曾利用锶同位素研究岩溶作用强弱, 探索古岩溶过程中的锶同位素演化特征^[2], 但是利用锶同位素特征研究古岩溶作用, 目前国内类似的报道相对较少。本文尝试利用洞穴充填方解石锶同位素特征, 结合塔河油田奥陶系地质背景, 确定划分海西早期和加里东期岩溶的地球化学指标, 总结该地区海西早期、加里东期岩溶作用的分布模式, 特别是加里东中期岩溶的发现, 向南扩大了奥陶系勘探面积, 并从纵向上加深了塔河油田勘探深度, 对上奥陶统覆盖区、中下奥陶统及上奥陶统良里塔格组碳酸盐岩的油气勘探具有重要意义。

1 地质概况及样品测试

1.1 地质概况

塔河油田位于塔里木盆地塔北隆起区南坡阿克

库勒凸起上, 是以奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞型油气藏为主, 石炭系、三叠系等多层系含油的超亿吨级油气田。目前钻井揭示的奥陶系地层有下奥陶统鹰山组、中奥陶统一间房组和上奥陶统恰尔巴克组、良里塔格组及桑塔木组, 其中上奥陶统主要分布在阿克库勒凸起的边缘。志留(泥盆系尖灭线及下石炭统巴楚组底砂岩段的沉积边界大致围绕隆起边缘分布, 隆起大部分地区的奥陶系与下石炭统不整合接触。奥陶系灰岩基质致密, 其储集空间主要有溶蚀孔洞和裂缝, 其储集类型可分为裂缝型、(裂缝)溶洞型、(裂缝)孔洞型 3 种^[3]。大裂缝和溶洞是本区奥陶系储层最主要的储渗空间, 统计表明目前近 340 口钻井的洞穴钻遇率高达 75%。奥陶系碳酸盐岩经历多期岩溶作用改造, 海西早期岩溶作用对其储层影响最为重要, 其次是加里东中期岩溶作用^[4-7]。

1.2 锶同位素测试

样品采自塔河油田 24 口井奥陶系岩心, 主要选取重结晶方解石斑块、岩溶洞穴充填方解石、裂隙方解石等类型, 纵向上样品分布于石炭系/奥陶系不整合面下不同深度, 平面上遍及整个油区, 基本满足了岩溶成因分析的需要。锶同位素样品用成都理工大学 MAT261 同位素质谱计多接收器测量, 对美国国家标准局标准样品 NBS987 的测定误差小于 0.002%。

矿物或岩石中的锶同位素组成,由沉积时带入的初始锶和矿物形成以来铷(Rb)衰变产生的放射成因锶两部分组成。

因此,一般而论,在利用锶同位素资料解决地质问题时需要根据矿物中的 Rb 含量或 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值对矿物锶同位素测定值进行初始化校正。然而,由于晶体的化学习性,Rb 很难进入碳酸盐矿物晶格,纯碳酸盐中的 Rb 含量较低,对于纯碳酸盐矿物的锶同位素资料应用可免去这一校正过程。本次测试样品 Rb 含量极低,均小于 5×10^{-6} ,样品锶同位素测定结果没有校正,基本上代表了矿物形成时进入碳酸盐矿物的初始值。

2 锶同位素在塔河古岩溶中应用原理

瑞典地质学家 Wickman (1948) 提出锶同位素地质学^[8],其原理是锶在海洋中存留时间至少在百万年以上,而海洋的混合时间只有一千年,故认为锶在海洋中的分布是均匀的,不受纬度、深度的影响^[9]。大洋中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在整个显生宙发生了统一的变化,但在某一时期,这一比值在开阔的大洋中都基本一致(图 1)。由此可见,在地质历史中海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是时间的函数^[10],这为地质作用精确示踪提供理论依据。

海洋中的锶主要有两个来源,一是由大陆古老的硅铝质岩石化学分化作用通过河流或地下水排入海洋的高放射成因锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7119$),二是由洋中脊热液交换及海底玄武岩的热液蚀变供应的低放射成因锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.703$)^[3,11]。研究表明海洋中的锶同位素比值的明显上升主要是大陆河流排放的放射成因锶通量上升所引起的^[12]。另外碳酸

盐岩的重溶也是来源,其比值为 $0.708 \sim 0.001$ 。因此岩溶缝洞、风化裂隙充填方解石锶同位素值主要受流经硅质岩石的地下水和碳酸盐岩重溶这两个锶来源影响比例的控制。

塔河地区加里东期与海西早期岩溶地层水存在区别。早奥陶世,包括塔河油田在内的塔里木广大地区是一个规模巨大的陆表海碳酸盐岩台地^[13],早奥陶世末为受加里东中期运动第一幕控制的岩溶作用发生时期,塔北地区地表直接出露的是一套岩性非常纯的正常海相碳酸盐岩。在此种背景下,岩溶水介质及岩溶缝洞方解石中的锶同位素组成将主要受下奥陶统海相碳酸盐岩重溶锶来源的控制,与下奥陶统海相碳酸盐岩的锶同位素组成相近,应显相对低值特征。

海西早期的褶皱运动和剥蚀,使得陆源碎屑岩和奥陶系碳酸盐岩同处暴露环境,渗滤通过大陆硅铝质岩石区或岩层的地下水可进一步进入到奥陶系或下奥陶统碳酸盐岩中,并对它们的岩溶作用及岩溶缝洞方解石的沉淀作用产生影响^[7],由此造成岩溶缝洞方解石可能具有明显高于下奥陶统碳酸盐岩的锶同位素组成。

正是上述该区的特殊地质背景及锶同位素值特征,可以为塔河地区奥陶系岩溶期次划分提供重要的微观依据。

3 塔河奥陶系样品锶同位素分析

本次重点选取与岩溶作用有关的微晶灰岩、重结晶方解石及岩溶缝洞充填方解石三类样品,以便对比分析。

3.1 重结晶方解石斑块及微晶灰岩

研究区奥陶系碳酸盐岩中重结晶方解石斑块的锶同位素值较低(图 2),为 $0.709352 \sim 0.708196$,与早奥陶世海洋的锶同位素组成($0.7077 \sim 0.7094$)范围相近,揭示了重结晶方解石斑块形成过程中成岩溶液中的锶同位素主要受早奥陶系本地层的碳酸盐岩控制。

3.2 岩溶洞穴、风化裂隙充填方解石

样品产状:样品取自岩溶洞穴、风化裂隙充填方解石,洞穴大小不一,如 T904 井为巨晶方解石,单个洞穴厚度达 60 cm,累计厚度可达 4 m,为大型洞穴充填巨晶方解石。

岩溶洞穴、风化裂隙充填方解石的锶同位素比值变化范围较宽,在 $0.710000 \sim 0.718266$ 范围内变化,明显较早奥陶纪海洋的锶同位素比值高,表明

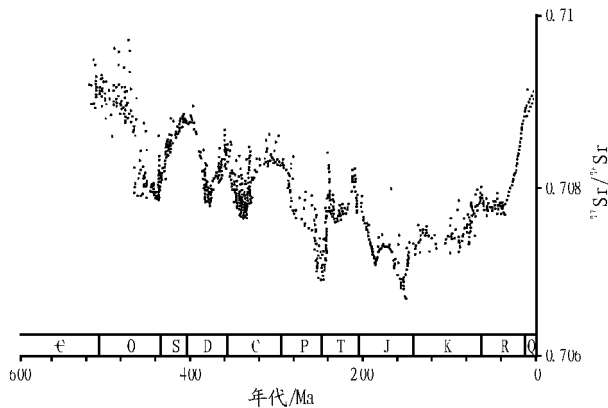


图 1 显生宙以来 4 055 个样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据的演化曲线(据 Veizer 等,1999)

Fig. 1 The evolutionary curve of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data of 4 055 samples since Phanerozoic Eon

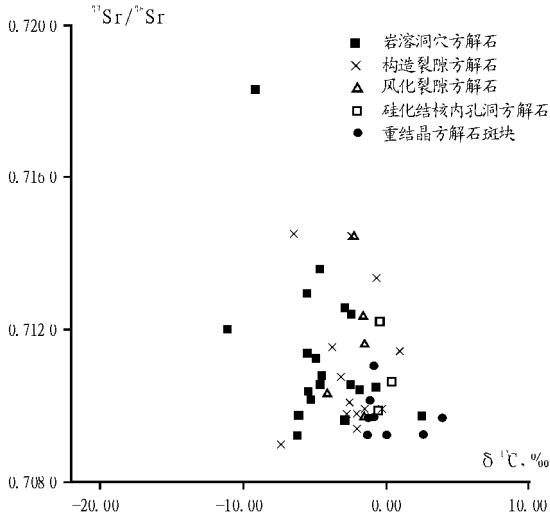


图 2 塔河油田奥陶系样品 D¹³C-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 组成特征

Fig. 2 The compositional characteristics of D¹³C-⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of Ordovician carbonate cements samples in Tahe Oil field

大陆硅铝质岩石来源的锶同位素组成对岩溶地下水产生了重要影响,即渗滤通过大陆硅铝质岩石区或岩层的地下水参与了对奥陶系或下奥陶统碳酸盐岩岩溶作用的改造。

3.3 塔河油田锶同位素平面分布特征

塔河油田岩溶缝洞方解石的锶同位素组成在平面上有明显的变化。南部岩溶缝洞方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.709 730~ 0.718 266, 平均为 0.712 313; 塔河油田北部⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值亦较高, 为 0.711 236~ 0.714 507, 平均 0.712 489; 塔河油田中部岩溶缝洞方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值较低, 为 0.709 219~ 0.710 561, 平均 0.710 063, 显示出塔河油田南部和北部相对高, 中部相对低的特征(图 3), 可能反映中部地区岩溶流体相对多地受到下奥陶统本地层碳酸盐岩锶同位素来源的影响, 而南北两侧奥陶系碳酸盐岩岩溶作用受流经大陆硅铝质岩石或岩层的地下水影响较多。

4 岩溶期次划分

塔河地区奥陶系碳酸盐岩经历多期构造运动, 发生了多期岩溶改造, 其中主要是海西早期和加里东期。岩溶作用一般在不整合面下 0~ 350 m 的深度内。受海西早期基准面下降和构造影响, 海西早期岩溶至少形成三套区域性洞穴型储层^[5, 6]; 从牙形刺缺失、地震剖面上超间断特征等证实加里东中期岩溶的存在^[7, 14]。加里东期岩溶储层较海西早期的岩溶储层分布范围广, 涉及深度更大。由于加里东期洞穴与海西早期洞穴在剖面上的位置、宏观特征相似, 给准确识别带来一定困难。

4.1 加里东中期岩溶期的确定

上述早期重结晶方解石斑块的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.709 352~ 0.708 196, 与早奥陶世海洋的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值 0.707 7~ 0.709 4 (Veizer 等, 1999) 范围相近, 因此, 加里东中期与洞穴形成同期充填方解石沉淀过程中成岩溶液中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值主要受奥陶系本地层的碳酸盐岩控制, 锶同位素值较低, 取其上限值 0.709 400。测试的洞穴方解石锶同位素值小于该值, 说明该洞穴是加里东中期形成的。

4.2 海西早期岩溶期的确定

海西早期以后的构造格局决定了该期及其之后洞穴充填作用必然受到大陆硅铝质岩石区或岩层地下水的影 响, 充填方解石⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值必然大于 0.709 400。但是, 由于塔河油田奥陶系碳酸盐岩经历多期岩溶作用叠加改造, 伴随岩溶洞穴的形成与充填也是多期的, 特别是方解石充填时间可能与洞穴形成同时进行, 也可能在其之后某几个时期对先期形成的洞穴进行充填。为此, 本项研究中测试了方解石中包裹体烃类的成熟度(以荧光作大致判别)、均一温度作为辅助指标, 进一步判别洞穴形成时期(图 4)。

若洞穴充填方解石的包体烃类成熟度、均一温度、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值(< 0.709 400) 都较低, 则表明是加里东中期形成的洞穴。

若洞穴充填方解石的包体烃类成熟度中等、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值高(> 0.709 400), 则表明是海西早期形成的洞穴。

若洞穴充填方解石的包体烃类成熟度、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值都较高, 则表明是海西期之后充填的方解石, 但由

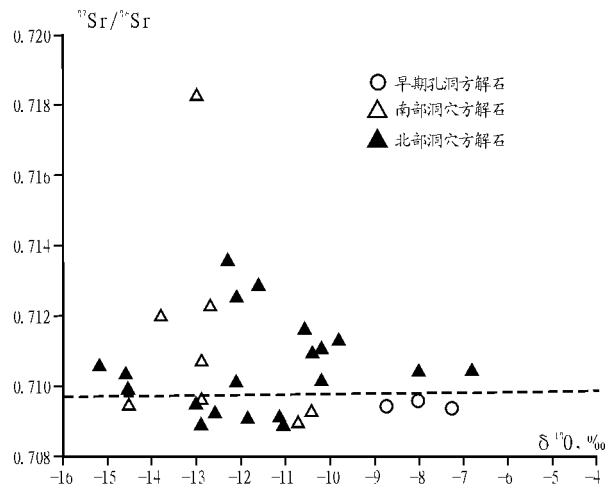


图 3 塔河油田奥陶系岩溶产物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- D¹⁸O 组成分布特征

Fig. 3 The compositional characteristics of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- D¹⁸O of samples from Ordovician Karstification products in Tahe Oil field

Ordovician Karstification products in Tahe Oil field

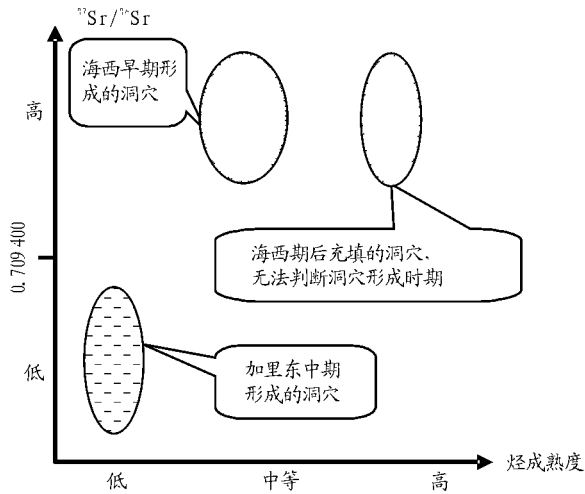


图 4 洞穴充填方解石含烃盐包裹体烃类成熟度、锶同位素值匹配关系示意图

Fig. 4 The sketch map showing the relationship between hydrocarbon maturity of hydrocarbonaceous salt water inclusions and strontium isotopes in cave-filling samples

于充填前有多期洞穴存在, 究竟充填的是哪一期洞穴, 无法判断。

从同一洞穴充填巨晶方解石不同部位分别取样, 若同时出现低成熟度、低锶同位素值和中高成熟度、高锶同位素值, 则说明洞穴在加里东中期形成, 但存在多期充填, 既有同期充填, 又有晚期充填。如 T904 井, 5 892~5 900 m 井段为巨晶方解石充填洞穴, 样品¹ 反映加里东中期形成洞穴, 样品⁰ 由于包裹体与锶同位素测试不是严格意义的同一块样品, 出现锶同位素值低而烃类成熟度高的特征, 样品² 的锶同位素值高, 烃类成熟度也高。由于这三个样品取自同一洞穴, 由样品¹ 已判断出该洞穴是加里东中期形成, 而该样品地化特征又说明为后期充填, 因此该洞穴是加里东中期形成, 后期又经历了多期充填胶结的洞穴(图 5)。

5 加里东中期、海西早期岩溶分布

塔河油田主体区(桑塔木尖灭线以北地区)下奥陶统碳酸盐岩直接暴露于海西早期不整合面下, 钻井洞穴充填方解石的锶同位素值较高(如 S75、S71、S72、S66、T601、T501、T414、T314 等井), 明显高于早奥陶世海相碳酸盐岩的锶同位素组成, 且距海西早期不整合面距离较近, 是海西早期岩溶作用的产物。同时也有部分样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值小于 0.709 400, 说明仍残存有加里东期洞穴充填物。

由于上奥陶统桑塔木组为台缘斜坡-混积陆棚相沉积^[13, 15], 岩石组合为灰绿色、深灰色致密泥岩、

钙质泥岩、粉砂质泥岩夹灰岩透镜体, 在无断裂沟通的情况下, 地表水很难渗透到下伏中下奥陶统较纯的碳酸盐岩地层中。因此在上奥陶统覆盖较厚的地区, 下伏中下奥陶统地层中发育的洞穴多在加里东中期形成。如 S69 井在 5 680 m 见巨晶方解石充填, 样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值小于 0.709 400, 为加里东中期岩溶的产物; T904、T739、S112 等井中下奥陶统岩溶型储层都是该期岩溶作用形成的。

综合海西早期和加里东中期岩溶作用的剖面结构、旋回分析及锶同位素平面展布特征, 认为塔河主体区(桑塔木组尖灭线以北)是多期岩溶叠加改造的地区, 以海西早期岩溶洞穴分布为主, 其发育的范围南部边界应在上奥陶统桑塔木组尖灭相附近, 但仍残存有加里东期岩溶洞穴。加里东中期岩溶产物在塔河主体多数被改造, 主要是在上奥陶统覆盖区的中下奥陶统中保存, 且分布于塔河外围地区。

6 结论

1) 利用锶同位素分布随时间变化的特点和锶来源控制因素, 结合塔河地区的加里东中期、海西早期不同岩溶环境, 可以把⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值作为识别塔河奥陶系加里东中期岩溶作用的有效地化指标。

2) 洞穴充填方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值小于 0.709 400, 则该洞穴是加里东中期形成的。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值大于 0.709 400, 是海西早期以后对先期洞穴充填的产物, 可借助洞穴充填方解石含烃包裹体烃类成熟度, 判断其充填时期。海西早期洞穴的判断主要依据桑

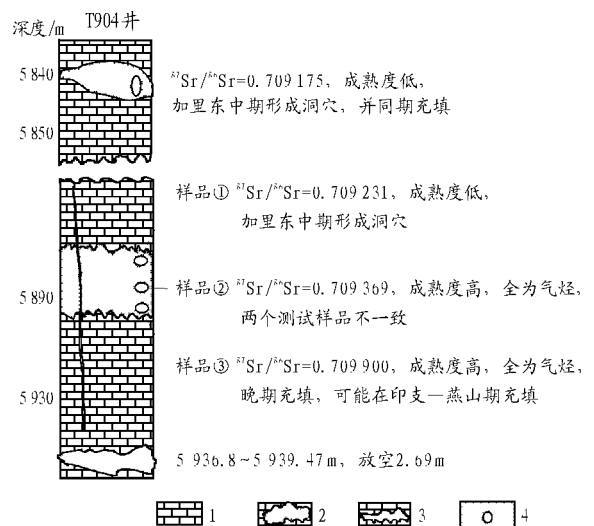


图 5 T904 井洞穴形成、充填时期分析图

1. 基质灰岩; 2. 巨晶方解石; 3. 未充填洞穴; 4. 样品位置

Fig. 5 The analysis plot of cave forming and cave-filling period of samples from well T904

塔木组尖灭线。

3) 塔河主体区是多期岩溶叠加改造的地区, 以海西早期岩溶洞穴分布为主, 以上奥陶统桑塔木组尖灭线为其南部边界, 加里东中期岩溶产物在塔河主体多数被改造, 主要是在中上奥陶统覆盖区的中下奥陶统地层中保存, 分布于塔河外围地区。

致谢: 在研究过程中, 得到了成都理工大学李国蓉教授、中国石化石油勘探开发研究院无锡实验地质研究所王恕一教授的指导, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

- 1 向芳, 王成善. 锶同位素在沉积学中的应用新进展[J]. 地质地球化学, 2001, 29(1): 79~ 82
- 2 郑荣才, 陈洪德, 张峭楠. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1997, 22(4): 424~ 428
- 3 王敦则, 黎玉战, 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田下奥陶统油藏特征及成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 122~ 128
- 4 顾忆. 塔里木盆地北部塔河油田油气藏成藏机制[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 307~ 311
- 5 闫相宾, 韩振华, 李永宏. 塔河油田奥陶系油藏的储层特征和成因机理探讨[J]. 地质论评, 2002, 48(6): 619~ 626

- 6 王恕一. 塔里木盆地塔河油田下奥陶统碳酸盐岩的深埋溶蚀作用及其对储集体的影响[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 557~ 561
- 7 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥等. 塔河油田及邻区地层水成因探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 57~ 60
- 8 Wickman F E. Isotope ratios: a clue to the age of certain marine sediments[J]. Geol, 1948, (56): 61~ 66
- 9 Hodel D A, Mead G A, Mueller P A. Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8Ma to present): implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to the oceans[J]. Chem Geol (Isot Geosci Sect), 1990, (80): 291~ 307
- 10 黄思静, 石和, 刘杰等. 锶同位素地层学研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 194~ 200
- 11 Palmer MR, Elderfield H. Sr isotopic composition of sea water over the past 75 a[J]. Nature, 1985, 314: 526~ 528
- 12 Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. Nature, 1992, 359: 117~ 122
- 13 刘文, 李永宏, 张涛. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究[J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 104~ 109
- 14 叶德胜, 王根长, 林忠民等. 塔里木盆地北部寒武-奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气前景[M]. 成都: 四川大学出版社, 2000. 50~ 51
- 15 马红强. 盐水包裹体在成岩作用中的应用-以塔河油田下奥陶统碳酸盐岩为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 601~ 606

THE APPLICATION OF STRONTIUM ISOTOPES IN DIVISION OF PALEOKARST STAGES IN TAHE OIL FIELD

Zhang Tao¹, Yun Lu², Wu Xingwei^{1,3}, Ye Desheng²

(1. Research Institute of Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Design and Planning Institute of Northwest Petroleum Bureau, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Tahe oilfield is an Ordovician carbonate rock fissure vug oil pool which is mainly related to unconformity. Its reservoir rock is reformed by superimposition of multistages karstification, so it is very important to identify paleokarstification stages and confirm distribution of different stage of karstification reservoir for further exploration. Through recent years exploration, it is thought that the ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ is an effective indicator distinguishing middle Caledonian stage of karstification reservoir from early Hercynian stage of karstification reservoir. Its theory is that strontium isotope composition in the global ocean water at any one time in geologic history is homogeneous, that is, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value in ocean water changes timely. Combined with the geological setting that $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value in Caledonian stage of karstification reservoir is different from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ value in Hercynian stage of karstification reservoir and the experimental data, Paleokarstification reservoir stages is identified and predicted, and distribution pattern in Tahe oilfield is discussed in the paper, which provides geological evidence for further petroleum exploration in Tahe oilfield.

Key words: Strontium isotope; Paleokarstification stages; Tahe oilfield; Ordovician