

铯同位素在古岩溶研究中的应用

——以塔河油田奥陶系为例

刘存革^{1,2,4)}, 李国蓉³⁾, 张一伟^{1,2)}, 韩拥强⁴⁾, 吕海涛⁴⁾, 杨新勇⁴⁾, 崔泽宏^{1,2)}

1) 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京, 102249

2) 教育部石油天然气成藏机理重点实验室, 北京, 102249

3) 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都, 610059

4) 中石化西北分公司, 新疆乌鲁木齐, 830011

内容提要: 为探讨铯同位素在古岩溶研究中的应用, 系统分析了塔里木盆地塔河油田奥陶系岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。研究表明, 加里东中期岩溶形成的方解石以低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为特征, 其铯同位素组成主要由围岩的重溶铯控制。而海西早期岩溶形成的方解石则以高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为特征, 铯同位素组成主要由壳源铯和重溶铯控制; 同时, 不同产状的方解石铯同位素比值也不相同, 渗流岩溶带的方解石比潜流岩溶带富集 ^{87}Sr , 主要受控于岩溶系统的渗流机制和水岩反应。在平面上, 桑塔木组覆盖区比北部地区富集 ^{87}Sr , 其主要原因是来源于围岩的重溶铯比重加大。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在区域上的变化, 结合区域地质背景, 表明海西早期岩溶对北部地区和桑塔木组覆盖区均有重要的影响, 是奥陶系岩溶缝洞型储层的主要形成时期。另外, 极低的铯同位素比值可能与幔源铯有关, 早二叠纪末的火山活动是提供幔源铯的主要时期。通过塔河油田奥陶系古岩溶作用的实例研究, 铯同位素具有良好的流体示踪能力, 在划分古岩溶期次方面具有明显的优势。

关键词: 塔河油田; 奥陶系; 铯同位素; 古岩溶; 海西早期岩溶

碳酸盐岩在沉积同生期和表生期遭受大气水淋滤、溶蚀的现象相当普遍, 古岩溶作用是形成储层的重要机制之一 (Charles, 1988; Choquette and James, 1988; 郭建华, 1993; Loucks, 1999; 陈学时等, 2004; 鲍志东等, 2007)。在发育多期构造运动的地区, 碳酸盐岩地层可能发育多期古岩溶作用, 后期的岩溶作用对前期的岩溶产物进行溶蚀改造, 使区分岩溶期次的难度增大, 从而影响正确评价不同期次古岩溶作用对储层形成的贡献。

铯同位素由于其特殊的地球化学行为, 广泛应用于海相地层定年和对比、海平面变化、现代岩溶和地下水循环等众多领域 (Harris, 1995; Denison et al, 1998; McArthur and Howarth, 2001; Musgrove and Banner, 2004; Banner, 2004; Jacobson and Wasserburg, 2005)。铯同位素应用于古岩溶研究是新发展的一个领域, 目前报道的较少 (郑荣才等, 1997; 张涛等, 2005), 国外尚未见应用于此领域的报

道, 但有研究成岩作用的文献应用了铯的微量元素和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 (Montnez, 1994; Banner, 1995; Heydari, 2003)。

塔河油田位于塔里木盆地北部 (图 1), 是以奥陶系岩溶缝洞型油气藏为主体的油田, 奥陶系碳酸盐岩发育同生期、加里东中期和海西早期多期古岩溶作用, 对于不同期次古岩溶发育分布的范围和对储层形成的贡献, 仍有异议。闫相宾和张涛 (2004) 认为塔河油田在上奥陶统缺失地区发育海西早期岩溶, 至少发育 3 套区域性洞穴型储层, 在上奥陶统覆盖区则以加里东中期岩溶形成的洞穴型储层为主。徐国强等 (2005a) 认为塔里木盆地在早海西期发育 3 套洞穴层, 加里东中期岩溶在塔北不具备形成大型洞穴的条件。张涛等 (2005) 对塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石开展了铯同位素研究, 以 0.7094 做为区分加里东中期岩溶和海西早期岩溶缝洞方解石的界限, 认为上奥陶统覆盖区主要发育加里东中

注: 本文为国家“十五”科技攻关项目 (编号 2003BA613A) 和国家重点基础研究发展规划“973”项目 (编号 2005CB422108) 资助的成果。

收稿日期: 2007-03-06; 改回日期: 2007-05-28; 责任编辑: 周健。

作者简介: 刘存革, 男, 1976 年生。2001 年毕业于成都理工学院, 2004 年于成都理工大学获硕士学位, 博士研究生, 从事于碳酸盐岩沉积和储层研究。电话: 13899942672; Email: liucunge@163.com。

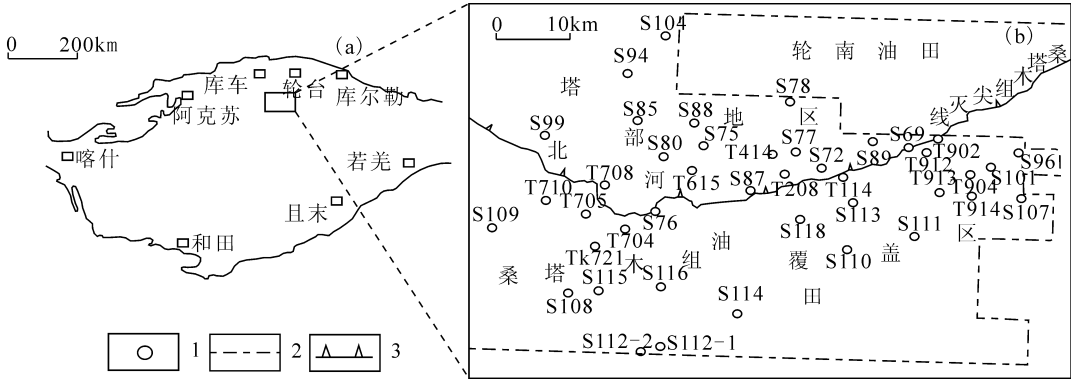


图 1 塔河油田位置图(a)和取样井点及分区图(b)

Fig. 1 The map of location of Tahe oilfield (a) and the sample wells distribution and zoning (b)

1—取样井点; 2—矿区边界; 3—桑塔木组(O_{3s})尖灭线

1—Sample well; 2—borderline of orefield; 3—thin-out line of Sangtamu Formation(O_{3s})

期岩溶。本文主要探讨锶同位素在塔河油田奥陶系古岩溶中的应用, 论述了岩溶缝洞方解石锶同位素在不同区域、不同层位上的变化规律和控制因素, 为评价不同期次古岩溶作用对储层的影响提供地球化学依据。

1 锶同位素原理

锶的原子序数为 38, 原子量为 87.62, 属碱土金属, 具有 4 个稳定同位素, ⁸⁴Sr、⁸⁶Sr、⁸⁷Sr 和 ⁸⁸Sr, 其中只有 ⁸⁷Sr 是放射源的, 它是由铷 ⁸⁷Rb 经 β 衰变而来(强子同, 1998; 史忠生等, 2003; Jacobson and Wasserburg, 2005)。锶的离子半径(0.113 nm)稍大于钙的离子半径(0.099 nm), 具有相同的电价, 所以锶可以以类质同像的方式取代钙; 而 Rb 由于碳酸盐晶体结构差异的原因而不存在碳酸盐矿物中, 所以铷在碳酸盐矿物中通常忽略不计(王大锐, 2000)。

锶在海水中的滞留时间为 1.9 Ma, 比海水的混合速度(约为 1 Ka)要长的多, 在海洋中的分布是均匀的, 不受纬度、深度的影响, 在任何给定的时间内, 开阔大洋海水中的锶同位素组成为一常数; 而且, 大洋中的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值在整个显生宙发生了系统的变化, 海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值是时间的函数(强子同, 1998; 王大锐, 2000; Banner, 2004; 张萌等, 2004)。海洋中锶同位素组成受控于海底扩张速率变化引起的大洋中脊热流活动、造山运动和古地理构型、气候变化、海底沉积物的成岩作用、海平面变化等多种因素及其相互之间的影响(Banner, 2004), 在一个特定时间, 海水的锶同位素组成主要取决于 3 个来源的锶同位素组成以及由它们所提供的锶在海水中所占的

比重: ①是通过洋中脊热液或海底火山作用提供的幔源锶, 初始值较低, 一般为 0.704 左右; ②是大陆地壳古老硅铝质岩石化学风化提供的壳源锶, 初始值较高, 一般为 0.720 左右; ③是海相碳酸盐岩化学风化提供的重溶锶, 初始值为 0.708 左右(Banner, 2004; 张涛等, 2005; 史忠生等, 2003)。

Meredith 等(2002)认为矿物从流体中沉淀时 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值不发生分馏作用。而且, 碳酸盐岩矿物从流体中沉淀后, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值就在地质历史中保持不变(没有经历热液、大气水等后期流体的改造), 可反映沉淀时流体的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值, 因为其分馏作用可以忽略不计(王大锐, 2000; 朱如凯等, 2002; Banner, 2004)。

随着全球锶同位素研究的深入和数据的积累, McArthur 等(2001)使用 LOWESS(非参数回归方法)建立的 0~509 Ma 的锶同位素曲线, 是目前最为完整的锶同位素演化曲线(黄思静等, 2004; 张萌等, 2004), 图 2 为奥陶系海水锶同位素演化曲线。这项作为全球的海相碳酸盐岩研究奠定了良好的基础。

2 塔河油田地质背景

塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起西南斜坡部位。阿克库勒凸起于加里东中晚期形成凸起雏形, 海西早期受区域性挤压抬升形成向西南倾伏的北东向展布的大型鼻凸(康玉柱等, 2004), 在海西晚期形成轮南断垒带和桑塔木断垒带(徐杰等, 2002), 后经印支—燕山和喜马拉雅运动进一步改造而最终定型的长期发展的古凸起。

根据塔河油田的钻井揭示, 奥陶纪地层发育较

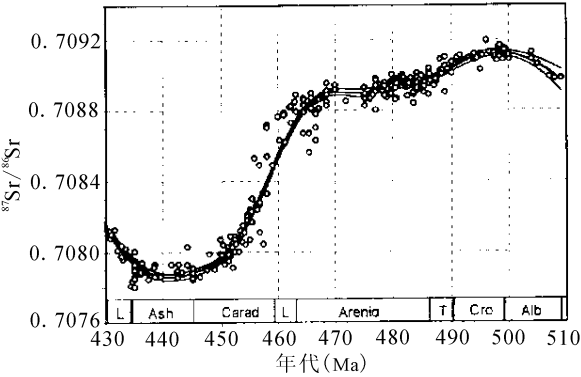


图 2 奥陶系海水锶同位素演化曲线

(据 McArthur and Howarth, 2001)

Fig. 2 The strontium isotope curve for Ordovician sea water (after McArthur and Howarth, 2001)

齐全,中下奥陶统分为下奥陶统蓬莱坝组(O_1p)、中一下奥陶统鹰山组($O_{1-2}y$)和中奥陶统一间房组(O_2yj),上奥陶统分为恰尔巴克组(O_3q)、良里塔格组(O_3l)和桑塔木组(O_3s)。因受海西早期构造运动的影响,塔河油田北部地区中上奥陶统、志留系一泥盆系被完全剥蚀,下奥陶统也遭受不同程度剥蚀,志留系一泥盆系及上奥陶统主要分布在凸起南部、东部和西部等围斜地区,呈裙边状分布。

蓬莱坝组主要为局限台地相沉积,岩性以粉—细晶白云岩为主,夹微晶砂屑灰岩薄层及硅质条带,向上变为白云岩与灰岩互层状产出。鹰山组主要为开阔台地相沉积,岩性以微晶灰岩为主,夹(亮晶)砂屑灰岩、砂屑微晶灰岩以及介壳层,向下白云石化作用加强。中奥陶统一间房组下部岩性与鹰山组相似,上部由开阔台地相转变为台内浅滩、礁丘相,沉积了一套亮晶鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩、砂屑灰岩和生物礁(丘)灰岩以及藻粘结灰岩,夹微晶灰岩薄层。上奥陶统主要为较深水的混积陆棚相和潮相沉积(刘文等,2002;陈强路等,2003),岩性主要以泥岩、泥灰岩和瘤状灰岩为主,夹粉砂岩、藻粘结灰岩薄层,沉积物泥质含量较高,与中下奥陶统纯净的台地相碳酸盐岩差异巨大;特别是桑塔木组的岩性主要为一套泥岩沉积,实钻厚度最大超过 550 m。

塔河油田奥陶系碳酸盐岩发育多期构造作用和多期古岩溶作用,在多期构造运动中,有 4 期构造运动对塔河油田奥陶系碳酸盐岩存在不同程度的影响:①在中奥陶统和上奥陶统之间发生的加里东中期第一幕运动(俞仁莲,2005;张涛等,2005),该期运动直接将中下奥陶统碳酸盐岩暴露于大气水环境下,具有同生期岩溶的性质,地层抬升幅度不大,地

形高差小,岩溶持续的时间较短(徐国强等,2005b,鲍志东等,2007),无硅铝质岩石的风化剥蚀;②在上奥陶统良里塔格组和桑塔木组之间发生了加里东中期第二幕运动(俞仁莲,2005),该幕岩溶作用仍具有同生期岩溶的性质,但地层剥蚀现象明显(如 T701 井良里塔格组残厚 46 m,上覆地层为桑塔木组,南部邻井的良里塔格组在 80~100 m 之间);③发生于奥陶系和志留系之间的加里东中期第三幕运动,该幕岩溶作用由于岩性和气候的影响,风化作用可能不强烈,对中下奥陶统碳酸盐岩的影响较小;④发生于泥盆系晚期-石炭系早期的海西早期运动,该期构造运动的地层抬升幅度大,剥蚀的地层厚度大,持续的时间长(徐国强等,2005a),对中下奥陶统裂缝、孔洞、大型洞穴等储集空间形成、演化和分布影响最为强烈。由于上奥陶统桑塔木组是一套隔水层,可以有效阻止海西早期大气水的渗入(断裂不发育区),目前对于在桑塔木组覆盖区内中下奥陶统中的岩溶缝洞形成时期仍有争议。

3 样品采集和分类

塔河油田奥陶系的样品分为溶蚀孔洞方解石、构造裂隙方解石、不规则缝洞方解石和洞穴方解石 4 大类,以及作为背景值的微晶灰岩和少量(亮晶)砂屑灰岩(分布在鹰山组上部至一间房组,以及良里塔格组),岩溶缝洞方解石取样的井点分布全区。根据样品分布的层位和地区,分为 2 个层位和 2 个地区进行对比分析:①根据岩性和沉积环境的巨大差异,把中下奥陶统和上奥陶统的样品分别讨论;②根据有无桑塔木组,把塔河油田分为 2 个区域:北部地区位于塔河油田北部无上奥陶统桑塔木组的区域,中下奥陶统或上奥陶统恰尔巴克组、良里塔格组直接与石炭系巴楚组接触,大部分地区处于斜坡的高部位;桑塔木组覆盖区主要指塔河油田存在上奥陶统桑塔木组的围斜地区,桑塔木组与巴楚组或志留系接触。锶同位素统计数据见表 1,由于本文是多个科研项目的成果^{①②③},岩溶缝洞方解石样品分批在成都理工大学同位素室测试,仪器为 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 0.02‰,化学流程按国际通用规范,溶样后经阳离子交换柱分离纯化;背景值样品由核工业地质分析测试研究中心测试,仪器为 IsoProbeT 热电离质谱仪,测量精度优于 3×10^{-6} 。北部地区中下奥陶统岩溶缝洞的全部数据和桑塔木组覆盖区中下奥陶统大部分数据,已撰文公

布。各类样品的特征如下:

(1) 洞穴方解石: 指大型洞穴(高度>1 m)中的巨晶方解石, 根据产状可具体分为以下几个亚类: 以大段(长度>0.5 m)的巨晶方解石出现, 方解石上下无砂泥质, 方解石中不含或少含原岩角砾; ②作为洞穴内角砾岩的填隙物产出; ③纯净的巨晶方解石在砂泥质的下部, 或作为角砾出现在砂泥质中。

(2) 溶蚀孔洞方解石: 溶蚀孔洞中方解石的晶体呈等粒状结构或粗—巨晶结构, 溶蚀孔洞可以是方解石、方解石和砂泥质全充填, 也有半充填的, 其形态、大小也有所差异。

(3) 构造裂隙方解石: 主要指没有明显溶蚀现象的构造裂隙中的方解石, 晶体呈等粒状结构或粗—巨晶结构, 构造裂隙可以全充填, 也可半充填, 充填物为方解石或砂泥质, 两者也可同时出现。

(4) 不规则缝洞方解石: 裂缝被大气水溶蚀改造, 造成裂缝扩大以及在裂缝壁上形成溶蚀孔洞, 方解石以粗—巨晶结构为主。

4 塔河油田奥陶系岩溶缝洞方解石锶同位素地球化学特征

4.1 奥陶系沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值分析

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩地层为海相沉积, 受控于全球海平面的变化, 其锶同位素演化曲线应与全球的锶同位素演化曲线相一致。塔河油田中下奥陶统碳酸盐岩沉积时⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值, 由桑塔木组覆盖区的两口系统取心井的全岩分析获得(S114 井和 S110 井, 取样层位为中奥陶统一间房组顶部至中下奥陶统鹰山组上部, 涉及岩心长度 244 m), 去掉异常点后, 有 43 个数据点分布于 0.708673~0.708889 之间, 平均值为 0.7087696(表 1)。该结果低于江茂生等(2002)公布的 TZ12 井下奥陶统

锶同位素(8 个数据点, 0.70871~0.70891, 平均值为 0.708873), 其原因为地层时代不一致所造成; 而且, 数据分布区间与 Denison 等(1998)、Hairuo Qing 等(1998)和图 2 的同时期海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值相似。所以, 本文中采用 0.708673~0.708889 这个分布区间作为本地区中下奥陶统沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 即中下奥陶统重溶锶的分布区间。

塔河油田上奥陶统沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值, 由东部的 T901 井获得(层位为良里塔格组, 涉及岩心长度 59 m), 主要代表了上奥陶统良里塔格组沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值, 分布区间为 0.708242~0.708829, 平均值为 0.7086045(表 1)。该分析数据与图 2 的上奥陶统下部至中奥陶统上部数据相近, 区间上限偏高。

4.2 北部地区中下奥陶统岩溶缝洞锶同位素组成特征

由图 3 和表 1 可知, 北部地区岩溶缝洞方解石大多数样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值大于中下奥陶统碳酸盐岩沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值, 明显受到了壳源锶的影响。对塔河油田奥陶系碳酸盐岩有较大影响的多期古岩溶作用中, 锶同位素的控制因素是不同的: ①加里东中期第一幕岩溶发生时无硅铝质岩石的风化剥蚀, 无壳源锶的来源, 岩溶缝洞方解石主要由围岩的重溶锶控制, 其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值应于围岩的重溶锶相近; ②加里东中期第二幕和第三幕岩溶虽然部分剥蚀了含有泥质的碳酸盐岩, 但这两幕岩溶具有同生期岩溶的性质, 泥质中由 Rb 衰变提供的⁸⁷Sr 极其有限; 同时, 上奥陶统沉积时海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值低于中下奥陶统, 所以该幕岩溶形成的岩溶缝洞方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值由围岩的重溶锶控制, 而且其值可能低于第一幕岩溶缝洞方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值; ③海西早期岩溶作用剥蚀了志留系、泥盆系和上奥陶统碎屑

表 1 塔河油田奥陶系岩溶缝洞方解石和微晶灰岩锶同位素组成特征

Table 1 The strontium isotopic composition characteristics of fissure-cave calcites and limestones of the Ordovician in the Tahe oilfield					
产状	洞穴巨晶方解石	溶蚀孔洞方解石	构造裂隙方解石	不规则缝洞方解石	微晶灰岩和少量(亮晶)砂屑灰岩
北部地区中下奥陶统	0.7099266(7)	0.7096357(7)	0.7103442(10)	0.7110081(10)	0.7087696(43)
	0.708221~0.710558	0.708375~0.711042	0.709085~0.714454	0.708009~0.714462	
桑塔木组覆盖区 中下奥陶统	0.709235(1)	0.7088675(11)	0.7092747 (17)	0.7078207(3)	0.708673~0.708889
		0.707386~0.710942	0.708321~0.710624	0.705193~0.709148	
桑塔木组 覆盖区 上奥陶统	良里塔格组	0.7083418(5)	0.7098256(12)	0.7098379(8)	0.7086045(12)
		0.707211~0.709683	0.708328~0.712287	0.707382~0.712064	0.708242~0.708829
	桑塔木组		0.709247(1)	0.709138(3)	
				0.708824~0.709545	

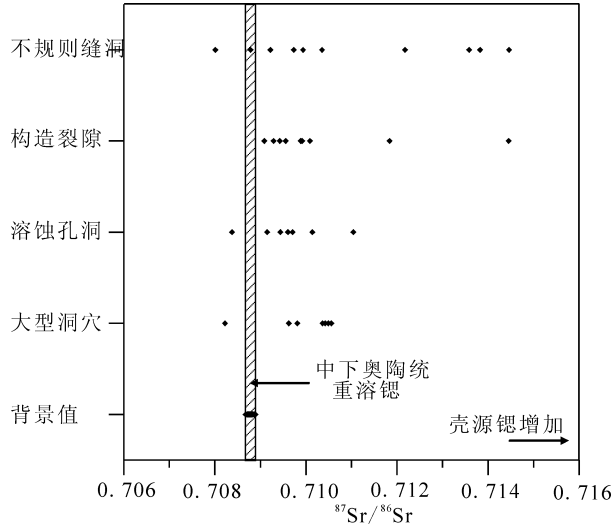


图 3 北部地区中下奥陶统岩溶缝洞方解石
锶同位素分布图

Fig. 3 The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distribution map of calcites
filled in fissure-cave of Lower—Middle Ordovician
in the northern areas

岩和含泥质的碳酸盐岩地层,钾长石、云母和粘土矿物的风化是高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的主要原因(Banner, 1995; Harris, 1995),这些被剥蚀的地层是 ^{87}Sr 的主要来源;综上所述,提供壳源锶的时期主要是海西早期。海西早期岩溶形成的岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,主要由壳源锶和碳酸盐岩的重溶锶控制,其比值高于或接近中下奥陶统围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。

海西早期古岩溶作用形成的不同产状方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布范围和均值也不相同,洞穴方解石(0.709621~0.710558,均值为0.7102108)、溶蚀孔洞方解石(0.709147~0.711042,均值为0.7098458)、构造裂隙方解石(0.709085~0.714454,均值为0.7103442)和不规则缝洞方解石(0.709219~0.714462,均值为0.711661),主要由岩溶系统的渗流机制和水岩反应控制。构造裂隙和不规则缝洞为渗流带的产物,是流体流动的通道,流体的滞留时间短,水岩反应较弱,方解石沉淀的速率快,快的沉淀速率将导致Sr-Ca的分配系数增高,矿物相将富集Sr(Banner, 1995; Heydari, 2003, Musgrove and Banner, 2004)。渗流岩溶带的水岩反应较弱,导致来自围岩的重溶锶比重较小,对壳源锶的缓冲作用较弱,从而造成渗流带中方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较高。潜流带中的各种反应过程与渗流带相反,造成方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值向围岩漂移。溶蚀孔洞方解石的锶同位素分布机理可能介于两者之

间。钱一雄等(2004)对该地区中下奥陶统岩溶缝洞方解石做了31件元素全分析,获得了28个锶的微量元素数据;其中,潜流岩溶带16个数据($53.3 \times 10^{-6} \sim 198 \times 10^{-6}$,平均值为 120.04×10^{-6}),渗流岩溶带12个($73.2 \times 10^{-6} \sim 228 \times 10^{-6}$,平均值为 146.62×10^{-6}),说明渗流岩溶带方解石比潜流岩溶带方解石富集Sr。

4.3 桑塔木组覆盖区中下奥陶统岩溶缝洞方解石
锶同位素组成特征

据表1和图4可知,桑塔木组覆盖区中下奥陶统中大多数岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也受到壳源锶的影响,为海西早期岩溶形成。而且,该地区岩溶缝洞方解石的锶同位素比值明显低于北部地区,尤其是渗流带的岩溶缝洞和裂隙方解石。其主要因为北部地区是补给区,也是壳源锶的主要来源区,来自北部的地下水沿着断裂(带)进入桑塔木组覆盖区进行溶蚀改造,流体运移的距离增长,造成桑塔木组覆盖区的水岩反应强烈,来自围岩的重溶锶比重增加,尤其是渗流带的重溶锶缓冲作用增强,从而造成岩溶缝洞方解石的比值降低。Barnaby等(2004)研究了美国新墨西哥州宾夕法尼亚系碳酸盐岩油藏的油田水,认为大气水沿着深大断裂进入宾夕法尼亚系碳酸盐岩地层中,地层中高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的原因是大气水溶蚀了上覆地层中的膏岩,也存在油田水离深大断裂越远,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值越低的现象。

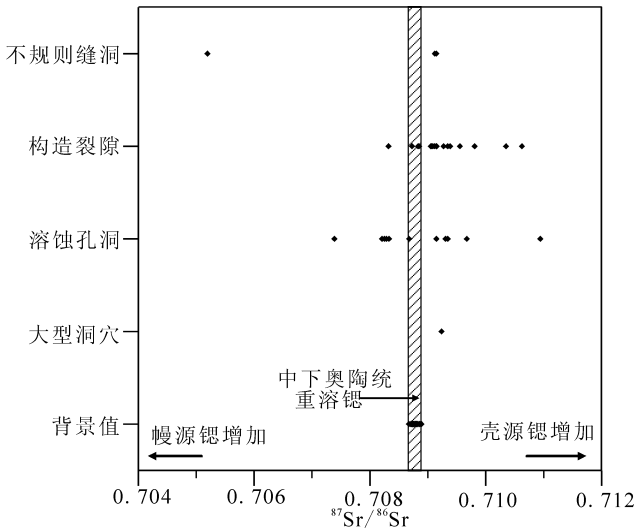


图 4 桑塔木组覆盖区中下奥陶统岩溶缝洞
方解石锶同位素分布图

Fig. 4 The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distribution map of calcites
filled in fissure-cave of Lower—Middle Ordovician in the area
covered with O_3s Formation

Jacobson and Wasserburg(2005)研究了美国南达科他州西部的 Madison 含水层,认为随着地下水运移距离的增加, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值从补给区降低。这两个例子可能也反映了距补给区距离增大,流体中围岩的重溶锶比重增大,缓冲作用增强。

0.705193 这个极低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可能指示了存在幔源锶的来源(如果样品受到采样时的人为污染,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值应该升高),0~509 Ma 期间海水最低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值时期为中—上侏罗统(McArthur and Howarth,2001),也远远高于此值,该值又高于幔源锶 0.704,可能是受到围岩重溶锶缓冲作用的影响。陈强路等(2003)认为塔河油田奥陶系碳酸盐岩存在岩浆期后的热水作用,成岩表现为萤石化、绿泥石化和褪色作用,萤石中盐水包体均一温度分布在 208.5~218.5℃ 之间,平均值为 213.6℃,也说明该地区存在幔源流体。钱一雄等(2004)做的 31 件元素全分析中,少数样品中出现了 Cu、Zn、F、Ba 等微量元素的异常,反映了深部流体的作用。塔里木盆地早二叠纪末的火山活动(张景廉等,2001;王嗣敏等,2004),可能是提供幔源锶的主要时期。

4.4 上奥陶统岩溶缝洞方解石锶同位素组成特征

由表 1 和图 5 可知,上奥陶统良里塔格组中大多数岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于背景值区间,良里塔格组的构造裂隙和不规则缝洞方解石高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征尤为突出,仍然受到海西早期岩溶作用的影响。低于背景值区间的岩溶缝洞方解石

形成可能与加里东中期第三幕运动有关,晚奥陶世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值处于奥陶系的最低时期(Denison et al, 1998; Qing et al., 1998; McArthur et al., 2001),在此背景下形成的岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值是加里东中期运动中最低的。

由于岩性和取心的原因,没有得到该地区上奥陶统桑塔木组沉积时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,但根据前人对全球奥陶系海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值研究的结果,桑塔木组沉积时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值应低于良里塔格组。桑塔木组岩溶缝洞的数据点较少,但均大于良里塔格组沉积时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,说明受到壳源锶的影响,为海西早期岩溶作用形成。但不规则缝洞和构造裂隙方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于良里塔格组相同产状的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,其原因可能存在以下两种情况:①由于岩心和取样的局限,数据点较少,没有反映高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值部分;②桑塔木组岩溶缝洞的渗流机制可能与良里塔格组有较大的差异。就图中的数据点而言,本文认为渗流机制可能是主要原因,这几个样品点均是较大的断裂系统,在岩心上的宽度超过 4 cm,方解石中间夹有泥质层或泥质角砾,泥质上具有明显擦痕。这些缝洞系统可能是桑塔木组覆盖区的泄水口,北部地区大气水沿着断裂系统进入桑塔木组覆盖区后,经过长时间的溶蚀,形成了目前众多的未充填洞穴,水体中壳源锶也受到围岩重溶锶强烈的缓冲作用,在数百米高差的地形下,水体沿断裂带以泉水的形式排泄,水体在上流过程中沉淀下来的方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值具有与中下奥陶统背景值相似或略高的特征。

5 讨论

(1)加里东中期岩溶作用形成的岩溶缝洞方解石具低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征,主要受围岩溶解产生的重溶锶控制;海西早期岩溶作用是提供壳源锶的主要时期,所形成的岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值受壳源锶和来自围岩的重溶锶控制,具高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征;桑塔木组覆盖区中下奥陶统岩溶缝洞方解石大部分数据点的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比背景区间高,表明海西早期岩溶对该地区仍有较大的影响;同时,渗流带岩溶缝洞方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比潜流带的高,受控于岩溶系统的渗流机制和水岩反应。

(2)在平面上,中下奥陶统渗流带方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值从北部地区到桑塔木组覆盖区降低,主要原因是流体在地下的滞留时间和流动距离增加,水岩反应比北部地区强烈,来自围岩的重溶锶比重

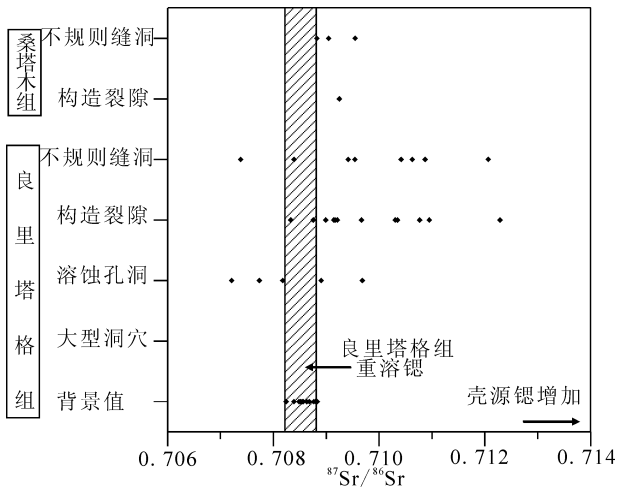


图 5 桑塔木组覆盖区良里塔格组(O_3L)和桑塔木组(O_3S)岩溶缝洞方解石锶同位素分布图
Fig. 5 The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distribution map of calcites filled in fissure-vug of Lianglitage Formation (O_3L) and Sangtamu Formation (O_3S) in the area covered with O_3S Formation

加大而造成的。

(3)0.705193 这个极低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值,指示存在幔源锶的注入,塔里木盆地早二叠纪末的火山活动可能是提供幔源锶的主要时期。

(4)通过塔河油田奥陶系古岩溶作用的研究,表明锶同位素具有突出的流体示踪能力,在划分古岩溶期次方面的能力是其他同位素所不具备的,在古岩溶和储层研究中具有广阔的应用前景。

注 释

- ① 李国蓉,刘存革,徐国强,等. 2002. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用研究. 中石化石油勘探开发研究院成果报告.
- ② 李国蓉,徐国强,刘家铎. 2003. 卡塔克隆起外围区油气地质条件评价与勘探靶区研究. “十五”国家科技攻关成果报告.
- ③ 李国蓉,陈惠超,俞仁莲. 2004. 塔里木盆地阿克库勒凸起奥陶系碳酸盐岩岩溶作用及成藏机制. 中石化西北分公司成果报告.

参 考 文 献

鲍志东,齐跃春,金之钧,等. 2007. 海平面波动中的岩溶响应——以塔里木盆地牙哈—英买力地区下古生界为例. 地质学报,81(2): 205~211.

陈强路,钱一雄,马红强,等. 2003. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化. 石油实验地质,25(6):729~734.

陈学时,易万霞,卢文忠. 2004. 中国油气田古岩溶与油气储层. 沉积学报,22(2):244~253.

郭建华. 1993. 塔里木盆地轮南地区奥陶系潜山古岩溶及其所控制的储层非均质性. 沉积学报,11(1):56~64.

黄思静,刘树根,李国蓉,等. 2004. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响. 成都理工大学学报(自然科学版),2004, 31(1):1~7.

江茂生,朱井泉,陈代钊,等. 2002. 塔里木盆地奥陶纪碳酸盐岩碳、锶同位素特征及其对海平面变化的响应. 中国科学(D 辑), 32(1):36~42.

康玉柱,等. 2004. 中国塔里木盆地塔河大油田——纪念沙参 2 井油气重大突破 20 周年. 乌鲁木齐:新疆科学技术出版社,1~187.

刘文,李永宏,张涛,等. 2002. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩沉积相及地层学研究. 石油实验地质, 24(2):104~109.

钱一雄,陈跃,马宏强,等. 2004. 新疆塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞、裂隙中方解石胶结物元素分析与成因. 沉积学报,22(1):6~12.

强子同. 1998. 碳酸盐岩储层地质学. 山东东营:石油大学出版社, 125~135.

史忠生,陈开远,何胡军,等. 2003. 锶同位素在沉积环境分析方面的应用. 石油与天然气地质,24(2):187~190.

王大经. 2000. 油气稳定同位素地球化学. 北京:石油工业出版社, 123~145.

王嗣敏,金之钧,解启来. 2004. 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. 地质论评,50(5):543~547.

徐杰,李涛,陈国光,等. 2002. 塔里木盆地轮南潜山构造特征. 石油学报,23(5):14~18.

徐国强,李国蓉,刘树根,等. 2005a. 塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴. 地质学报,79(4):557~568.

徐国强,刘树根,李国蓉,等. 2005b. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比. 石油与天然气地质, 26(1):114~129.

闫相宾,张涛. 2004. 塔河油田碳酸盐岩大型隐蔽油藏成藏机理探讨.

地质论评,50(4):370~376.

俞仁连. 2005. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义. 石油实验地质,27(5):468~478.

张景廉,金之钧,杨雷,等. 2001. 塔里木盆地深部地质流体与油气藏的关系. 新疆石油地质,22(5):371~375.

张萌,黄思镜,谢国刚,等. 2004. LOWESS 在锶同位素地层学中的应用. 地质科学与环境学报,26(2):1~5.

张涛,云露,邬兴威,等. 2005. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用. 石油实验地质,27(3):299~303.

郑荣才,陈洪德,张哨楠,等. 1997. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质. 地球科学—中国地质大学学报,22(4):424~428.

朱如凯,罗平,罗忠. 2002. 塔里木盆地石炭系碳酸盐岩同位素地球化学特征. 新疆石油地质,23(5):382~384.

Banner Jay L. 1995. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis. Sedimentology, 42:805~824.

Banner Jay L. 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. Earth-Science Reviews, 65:141~194.

Bao Zhidong, Qi Yaochun, Jin Zhijun, et al. 2007. Karst development response to sea-level fluctuation: a case from the Tarim area in the Early Paleozoic. Acta Geologica Sinica, 81(2): 205~211 (in Chinese with English abstract).

Barnaby Roger J, Oetting Gregg C, Gao Guoqiu. 2004. Strontium isotopic signatures of oil-field waters: applications for reservoir characterization. AAPG Bulletin,88(12):1677~1704.

Charles Kerans. 1988. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of West Texas. AAPG Bulletin, 72(10):1160~1183.

Chen Qianglu, Qian Yixiong, Ma Hongqiang, et al. 2003. Diagenesis and porosity evolution of the Ordovician carbonate rocks in Tahe oilfield, Tarim Basin. Petroleum Geology & Experiment,25(6): 729~734(in Chinese with English abstract).

Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. 2004. The paleokarst reservoir of oil/gas fields in China. Acta Sedimentologica Sinica,22(2):244~253(in Chinese with English abstract).

Choquette P W, James N P. 1988. Paleokarst. New York: Springer-Verlag.

Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. 1998. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr curve. Chemical Geology, 152:325~340.

Heydari Ezat. 2003. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation. AAPG Bulletin, 87(11):1779~1797.

Huang Sijing, Liu Shugen, Li Guorong, et al. 2004. Strontium isotope composition of marine carbonate and the influence of diagenetic fluid on it in Ordovician. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 31(1):1~7(in Chinese with English abstract).

Guo Jianhua. 1993. Burial hill palaeokarst and its controlled reservoir heterogeneity in Ordovician, Lunnan Region of Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica,11(1): 56~64 (in Chinese with English abstract).

Jacobson A D, Wasserburg G J. 2005. Anhydrite and the Sr isotope evolution of groundwater in a carbonate aquifer. Chemical Geology, 214:331~350.

Jiang Maosheng, Zhu Jingquan, Chen Daizhao, et al. 2002. Carbon

- and strontium isotope variations and responses to sea level fluctuations in the Ordovician of the Tarim Basin. *Science in China (Series D)*, 32(1): 32~42 (in Chinese).
- Kang Yuzhu, et al. 2004. Tahe Giant Oil and Gas Field in Tarim Basin, China — on Commemoration of Twenty Anniversary on Sachan 2 well Oil-Gas Discovery. Urumqi, Xinjiang Science Technology Publishing House, 1~187 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wen, Li Yonghong, Zhang Tao, et al. 2002. Study on the sedimentary facies and sequence stratigraphy of the Ordovician carbonate rock in Tahe oilfield. *Petroleum Geology & Experiment*, 24 (2): 104 ~ 109 (in Chinese with English abstract).
- Loucks Robert G. 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modification, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bulletin*, 83(11): 1795~1834.
- Musgrove MaryLynn, Banner Jay L. 2004. Controls on the spatial and temporal variability of vadose dripwater geochemistry: Edwards Aquifer, central Texas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(5): 1007~1020.
- McArthur J M, Howarth R J. 2001. Strontium isotope stratigraphy : lowess version 3; best fit to the marine Sr isotope curve for 0~509Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *Journal Geology*, 109: 155~170.
- Montnez Isabel P. 1994. Late diagenetic dolomitization of Lower Ordovician Upper Knox carbonates: a record of the hydrodynamic evolution of the Southern Appalachian Basin. *AAPG Bulletin*, 78(8): 1210~1239.
- Harris Nigel. 1995. Significance of weathering Himalayan metasedimentary rocks and leucogranites for the Sr isotope evolution of seawater during the Early Miocene. *Geology*, 23 (9): 795~798.
- Qian Yixiong, Chen Yue, Ma Hongqiang, et al. 2004. Chemical analysis and origin of calcite filled in and cave with in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 6~12 (in Chinese with English abstract).
- Qiang Zitong. 1998. Carbonate Reservoir Geology. Dongying, Shangdong: Press of University of Petroleum, 125 ~ 135 (in Chinese).
- Qing H, Barnes C R, Buhl D, Veizer J. 1998. The strontium isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: relationships to geological events and implications for coeval seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(10): 1721~1733.
- Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, He Hujun, et al. 2003. Application of Sr isotope to sedimentary environment analysis. *Oil & Gas Geology*, 24(2): 187~190 (in Chinese with English abstract).
- Wang Darui. 2000. Stable isotopic Geochemistry of Oil and Gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 123~145 (in Chinese).
- Wang Simin, Jin Zhijun, Xie Qilai. 2004. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the well TZ45 region. *Geological Review*, 50(5): 543~547 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Li Tao, Cheng Guoguang, et al. 2002. Structural features of the buried hill in Lunnan area of Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 23(5): 14~18 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guoqiang, Li Guorong, Liu Shugen, et al. 2005. Multiple karst Cave horizons in the Early Hercynian weathering crust in the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 557~568 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guoqiang, Liu Shugen, Li Guorong, et al. 2005. Comparison of tectonic evolutions and petroleum geological conditions in Tazhong and Tabei palaeohighs in Tarim Basin. *Oil & Gas geology*, 26(1): 114~129 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xiangbin, Zhang Tao. 2004. Discussion on forming mechanism of the large-scale carbonate rock subtle reservoir in the Tahe oilfield. *Geological Review*, 50(4): 370~376 (in Chinese with English abstract).
- Yu Renlian. 2005. Characteristics and significance of the caledonian karst in the Tahe oil field, the Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(5): 468~478 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinlian, Jin Zhijun, Yang Lei, et al. 2001. A relation between the deep geofluids and reservoir in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 22(5): 371~375 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Meng, Huang Sijing, Xie Guogang, et al. 2004. Application of LOWESS fit to strontium isotope stratigraphy. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 26(2): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Yun Lu, Wu Xingwei, et al. 2005. The application of strontium isotopes in division of paleokarst stages in Tahe oil field. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(3): 299~303 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Chen Hongde, Zhang Shaonan, et al. 1997. Stable isotopic characteristics of karst-reservoirs in Huanglong Formation from Eastern Sichuan. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 424~428 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rukai, Luo Ping, Luo Zhong. 2002. The isotope geochemistry characteristics of carbonate rocks in carboniferous in Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(5): 382~384 (in Chinese with English abstract).

Application of Strontium Isotope to the Study of Paleokarst
——An Case from Ordovician in the Tahe Oilfield, Tarim Basin

LIU Cunge^{1,2,4)}, LI Guorong³⁾, ZHANG Yiwei^{1,2)}, HAN Yongqiang⁴⁾,
LÜ Haitao⁴⁾, YANG Xinyong⁴⁾, CUI Zehong^{1,2)}

- 1) *Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing, 102249*
2) *Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing, 102249*
3) *State Key of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, 610059*
4) *Northwest Company of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011*

Abstract

For application of strontium isotope to study of paleokarst, the paper has systematically analyzed the calcites filled in fissure-cave of the Ordovician carbonate rocks in the Tahe oilfield, Tarim Basin. The research results indicated that lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios are a character of calcites formed in the karst during the Middle Caledonian, and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of calcites are controlled by those of host rocks. However, the calcites of Early Herlynian paleokarst have higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, which are controlled by the terrestrial strontium and the dissolved strontium from the wall rocks. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of different attitude calcites differ; the products of vadose zone are enriched in ^{87}Sr than phreatic zone, which mainly result from the seepage mechanism of the karstic system and water-rock interaction. Furthermore, the area covered with O_3s Formation has higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios than the north area, and mainly contributes to an increased proportion of strontium isotope of the host rocks. Regional variations of strontium isotope and geologic backgrounds may indicate that the Early Hercynian paleokarst has important influences on the Ordovician carbonate rocks in the north area and the areas comprising the O_3s Formation, and it is the main formation episode of karstic fissure-cave reservoir in the Tahe oilfield. In addition, the extremely low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios may be an indicator of mantle source, and the volcanism of Early Permian is a main period of providing mantle-derived strontium. The study on the Ordovician paleokarst in the Tahe oilfield suggests that strontium isotope is of a better ability in indicating fluid's provenance, and therefore, it has distinct advantages in the division of paleokarst stages.

Key words: Tahe Oilfield; Ordovician; strontium isotope; paleokarst; karst of Early Herlynian