

塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征

刘存革^{1,2,4}, 李国蓉³, 朱传玲⁴, 刘国勇⁵, 卢宇峰⁴

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. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059
4. 中石化西北分公司, 新疆乌鲁木齐 830011
5. 中国石油冀东油田分公司, 河北唐山 063004

摘要: 为了探讨塔河油田中下奥陶统古岩溶产物的地球化学特征以及评价不同期次古岩溶作用的影响区域, 系统分析了中下奥陶统岩溶缝洞方解石的碳、氧、锶同位素。不同产状的方解石碳、氧同位素具有明显的大气水岩溶特征, 早期岩溶产物以富集¹³C 和低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为特征, 而海西早期岩溶产物以 $\delta^{13}\text{C}$ 分布较宽和高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为特征, 两者的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布均较宽。桑塔木组覆盖区比北部地区富集¹³C, 来自围岩的¹³C 比重加大, 另一个原因是早期岩溶产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高; 桑塔木组覆盖区岩溶产物具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值特征, 说明有壳源锶的注入, 主要是受海西早期岩溶作用的影响, 并且高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值特征比北部地区低, 其原因是来源于围岩的重溶锶比重加大。 $\delta^{13}\text{C}$ 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 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, 是塔河油田中下奥陶统碳酸盐岩的主岩溶期, 也是其储层的主要形成时期。

关键词: 塔里木盆地; 塔河油田; 中下奥陶统; 古岩溶; 碳氧同位素; 锶同位素。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2008)03-0377-10

收稿日期: 2007-08-12

Geochemistry Characteristics of Carbon, Oxygen and Strontium Isotopes of Calcites Filled in Karstic Fissure-Cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin

LIU Cun-ge^{1,2,4}, LI Guo-rong³, ZHU Chuan-ling⁴, LIU Guo-yong⁵, LU Yu-feng⁴

1. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing 102249, China
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
4. Northwest Company of SINOPEC, Urumqi 830011, China
5. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China

Abstract: For discussing the geochemistry characteristics of paleokarstic products of Lower—Middle Ordovician in Tahe oilfield, and evaluating the areas influenced by different stages of paleokarst, the carbon, oxygen and strontium isotopes of karstic fissure-cave calcites have been systematically analyzed. The carbon and oxygen isotopes of different attitude calcites are characterized by meteoric water karst, and the early paleokarstic products are featured with enriched ¹³C and lower ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios. The wide ranges of $\delta^{13}\text{C}$ and high ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios are the characteristics of early Herlynian paleokarst, and both have wide ranges of $\delta^{18}\text{O}$. The areas covered with O₃s Formation are enriched with more ¹³C than those of north areas, indicating the increased proportion of ¹³C from the host rock. And another reason is the higher $\delta^{13}\text{C}$ of early paleokarstic

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2005CB422108)。

作者简介: 刘存革(1976—), 男, 博士研究生, 从事于沉积和储层研究。E-mail: liucunge@163.com

products. Under the influence of the early Herlynian paleokarst, the strontium isotopes of different attitude calcites are heavier than the background values, indicating the join of the terrestrial strontium. The features of heavier strontium in north areas are lower than those of the areas covered with O_3s Formation, indicating the increased proportion of the dissolved strontium from the wall rock. According to the regional variations of carbon, strontium isotopes and geologic background, the early Herlynian paleokarst exerted important impact on the carbonate rocks of the Lower—Middle Ordovician in the north areas and the areas covered with O_3s Formation, and it is the main karst episode of Tahe oilfield and also the main formation episode of reservoir.

Key words: Tarim basin; Tahe oilfield; Lower-Middle Ordovician; paleokarst; carbon and oxygen isotopes; strontium isotope.

0 引言

在国内外的碳酸盐岩地层中,由于古岩溶作用形成的储层非常普遍,并在其中找到了丰富的油气资源(Kerans, 1988; Choquette and James, 1988; 郭建华, 1993; Loucks, 1999; 陈学时等, 2004). Loucks(1999)对古洞穴储层(paleocave reservoir)定义为:由岩溶作用产生的洞穴孔隙或洞穴垮塌产生的角砾岩间、裂纹和断裂孔隙构成的孔隙网络而形成的储层,并探讨了其成因、演化和空间复杂性. McMechan *et al.* (2002)和 Loucks *et al.* (2004)应用 GPR(ground-penetrating radar)对浅地表岩溶系统的反射特征及其三维展布进行了研究. Lohmann(1988)系统总结了大气水成岩体系的地球化学特征, Gonzalez and Lohmann(1988)对洞穴产物碳、氧同位素的地球化学行为进行了实例分析. 这些学者的研究成果极大地推动了古岩溶领域的研究. 锶同位素应用于古岩溶研究的报道较少(郑荣才等 1997; 张涛等, 2005),是近十几年来新发展的一个交叉学科,研究深度需进一步深入.

新疆塔里木盆地阿克库勒凸起建有中石化和中石油的两大油田——塔河油田和轮南油田. 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. 刘小平等(2004)对轮古西地区岩溶缝洞方解石、基质和暗河沉积物进行了碳氧同位素分析,两者均偏负,认为发育风化壳岩溶. 张涛等(2005)对塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石开展了锶同位素研究,认为上奥陶统覆盖区主要发育加里东中期岩溶. 由于塔河油田中下奥陶统发育多期古岩溶作用,后期岩溶作用对前期强烈

改造,以及岩溶系统的复杂性,目前该地区中下奥陶统岩溶缝洞的碳、氧和锶同位素特征研究深度尚浅,区域上的变化规律认识薄弱. 本文主要探讨了岩溶缝洞方解石的碳、氧、锶同位素地球化学特征及其在区域上的变化规律,为评价不同期次古岩溶作用影响的区域提供地球化学依据.

1 塔河油田地质背景

塔河油田位于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—燕山和喜山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资料揭示,奥陶系地层发育较齐全,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_{1-2y})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—泥盆系被完全剥蚀,下奥陶统也遭受不同程度剥蚀,志留—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.

在多期构造运动中,有两期构造运动对塔河地区中下奥陶统碳酸盐岩有较大的影响:(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(俞仁连, 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(鲍志东等, 2006),地层抬升幅度不大,岩溶持续的时间较短(徐国强等, 2005b),无硅铝质岩石的风化剥蚀;(2)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,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。

上奥陶统桑塔木组是混积陆棚相沉积(刘文等,2002),岩性主要为一套泥岩沉积,泥岩中含有不规则的灰质条纹或斑块,夹有瘤状泥灰岩和粉—细砂岩,个别区域还夹有滑塌成因的灰岩,与中下奥陶统纯净的台地相碳酸盐岩差异巨大,实钻厚度最大超过550 m,可以有效阻止海西早期大气水的渗入,普遍认为是一套隔水层。目前,对于在桑塔木组覆盖区内中下奥陶统中岩溶缝洞的形成时期仍有争议(闫相宾和张涛,2004;徐国强等,2005a;张涛等,2005)。

2 样品采集和分类

塔河油田中下奥陶统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。根据其产状、切割关系等可进行细分,取样的井点分布全区。根据有无桑塔木组,把塔河油田分为2个区域:(1)北部地区位于塔河油田北部无上奥陶统桑塔木组的区域,中下奥陶统直接与石炭系巴楚组接触,大部分地区处于斜坡的高部位;(2)桑塔木组覆盖区主要指塔河油田南部、东部存在上奥陶统桑塔木组的围斜地区,桑塔木组与巴楚组接触,两个地区的同位素数据见表1和表2,碳氧同位素在西南油气田分公司勘探开发研究院地质实验室测试,仪器为MAT252气体同位素质谱仪;锶同位素在成都理工大学同位素室测试,仪器为MAT261同位素质谱仪。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3个亚类:①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或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。

3 岩溶缝洞方解石碳、氧同位素地球化学特征

正常海相碳酸盐岩往往比受大气水影响的碳酸盐岩和方解石胶结物富集 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,在大气水成岩环境中,碳同位素组成主要取决于 ^{13}C 的来源、水岩反应的程度、脱气作用等因素(Lohmann,1988)。 ^{13}C 如果来源于正常海相碳酸盐岩的溶解产物,那么,新形成的方解石胶结物就会具有与其相似的 $\delta^{13}\text{C}$;当有来自风化壳上有机质氧化来源的 ^{13}C 时,则会引起 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负(陈荣坤,1994;王大锐,2000;郑永飞和陈江峰,2000), $\delta^{13}\text{C}$ 偏负的程度则依赖于水岩反应的程度,反应强度大,来自围岩的 ^{13}C 比重增加,方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负程度小,反之,偏负程度大。同时,脱气作用对 $\delta^{13}\text{C}$ 也有影响,在脱气过程中,由于存在动力学分馏,水体富集 ^{13}C ,此时沉淀的方解石胶结物富集 ^{13}C 。

氧同位素组成的影响较多,在大气水成岩环境中,需要考虑大气水的性质、季节、蒸发作用等因素。在大气水成岩环境中,大气水严重贫 $\delta^{18}\text{O}$,受其影响的碳酸盐岩和方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 也严重偏负,与富集较重同位素的海相碳酸盐岩地层中造成较为强烈的反差。同时,在降雨量大的季节里形成的方解石胶结物将贫 $\delta^{18}\text{O}$ (王大锐,2000;郑永飞和陈江峰,2000),反之,则相对富集 $\delta^{18}\text{O}$ 。在蒸发过程中,气体富集 ^{16}O ,而水体富集 ^{18}O ,从而方解石胶结物相对富集 ^{18}O (Gonzalez and Lohmann,1988)。

3.1 北部地区岩溶缝洞方解石碳氧同位素特征

从表1和图1中可以看出,塔河油田北部地区的方解石胶结物碳氧同位素组成既有相似性,也有差异性,基本上呈正相关。相似性在于不同产状的方解石明显受到大气水的影响,贫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征明显,差异性在于不同产状的方解石贫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的幅度和数据点的多少。

微晶灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在-1.679~0.921之间,平均值为-0.45, $\delta^{18}\text{O}$ 分布在-8.64~-4.153之间,平均值为-6.7,与塔中地区塔中12井下奥陶统微晶灰岩的碳氧同位素样品相似($\delta^{13}\text{C}$ 均值为-1.08,

表 1 北部地区岩溶缝洞方解石和微晶灰岩碳、氧、锶同位素组成

Table 1 The carbon, oxygen and strontium isotopic compositions of calcites filled in fissure-cave and micrite in the north areas

产状	序号	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB,‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB,‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma(\pm)$	产状	序号	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB,‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB,‰)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma(\pm)$
洞 穴	1	-2.4	-12.881	0.709 809	0.000 056	构 造 裂 隙	34	0.02	-15.74	0.709 554	0.000 054
	2	-2.761	-12.006				35	-6.03	-13.55	0.709 085	0.000 023 5
	3	-2.494	-15.227	0.710 558	0.000 032		36	-2.584	-12.171	0.710 086	0.000 018
	4	-0.787	-7.957	0.710 49	0.000 054		37	0.312	-12.152		
	5	-5.484	-10.222	0.710 365	0.000 046		38	0.72	-5.461	0.709 883	0.000 076
	6	-1.885	-14.421	0.710 422	0.000 018		39	-0.334	-11.436	0.709 916	0.000 070
	7	-1.833	-9.523				40	-1.383	-10.726		
	8	-3.237	-14.317	0.708 221	0.000 003		41	-0.774	-8.112	0.711 838	0.000 079
	9	-2.937	-10.951	0.709 621	0.000 035		42	-2.455	-11.758	0.714 454	0.000 080
	10	-4.161	-10.05				43	-1.402	-9.955		
溶 蚀 孔 洞	11	-0.773	-7.456			44	-1.562	-10.075			
	12	-0.51	-9.912	0.708 375	0.000 003 1	45	-2.369	-14.35			
	13	-3.643	-12.751	0.709 438	0.000 003 2	46	-1.437	-11.894			
	14	-0.499	-6.261	0.709 603	0.000 009 6	47	-1.534	-12.889	0.709 912	0.000 034	
	15	-3.05	-9.96			48	-4.236	-10.851	0.709 936	0.000 033	
	16	-3.59	-14.22	0.709 147	0.000 035 7	49	-4.26	-14.58	0.708 784	0.000 048	
	17	1.05	-8.18			50	-3.316	-11.55			
	18	1.42	-9.94			51	-0.39	-11.862			
	19	5.352	-7.929			52	-6.22	-10.828	0.709 219	0.000 077	
	20	-0.87	-9.154	0.709 704	0.000 042	53	-3.236	-14.436			
	21	-1.239	-10.817			54	-1.778	-9.519	0.712 177	0.000 075	
	22	0.59	-8.517			55	-4.712	-12.266	0.713 584	0.000 132	
	23	-3.88	-8.052			56	-2.339	-11.893	0.714 462	0.000 258	
	24	-0.671	-6.697			57	-3.754	-9.942			
	25	6.389	-7.071			58	-4.591	-11.932	0.713 825	0.000 063	
	26	-0.948	-7.199	0.711 042	0.000 860	59	-4.212	-14.541	0.710 353	0.000 029	
	27	-7.3	-11.501			60	-5.3	-14.164			
	28	-2.006	-11.118			61	-1.639	-13.869	0.708 009	0.000 016	
	29	-1.149	-6.939	0.710 141	0.000 069	62	-1.579	-16.096	0.709 732	0.000 061	
构 造 裂 隙	30	-2.25	-14.16	0.709 289	0.000 083	微 晶 灰 岩	63	-1.679	-8.64		
	31	0.24	-14.02			64	-0.605	-7.314	0.708 113 3	0.000 021	
	32	-2.13	-9.45			65	0.921	-4.153	0.708 196	0.000 002	
	33	-4.14	-11.88	0.709 425	0.000 077						

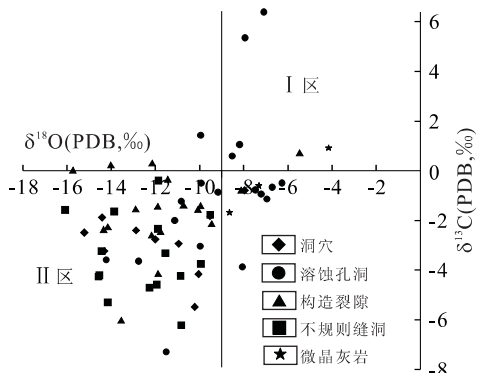


图 1 北部地区方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 1 The $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ plot of calcite cements in the north areas

$\delta^{18}\text{O}$ 均值为 -7.05 , 深度为 $5\ 172.5\sim 5\ 209.4\ \text{m}$, 4 个数据点(江茂生等, 2002)。

溶蚀孔洞方解石的碳氧同位素分布较宽, $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 $-7.3\sim 6.389$, 均值 -0.807 ; $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-14.22\sim -6.261$ 之间, 均值 -9.14 。根据 $\delta^{18}\text{O}$ 值可明显划分为两个区域。I 区的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围与微晶灰岩背景值区域相同, 但 $\delta^{13}\text{C}$ 变化较大。影响这个区域碳氧同位素组成的因素可能是溶蚀孔洞形成的期次不同, 从而其控制因素也不相同。早期溶蚀孔洞(同生期岩溶和加里东中期第一幕岩溶)方解石胶结物中 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受原岩中 ^{13}C 组成的控制, 与围岩相似, $\delta^{18}\text{O}$ 因受大气水的影响而分布相对较宽(图 2)。海西早期岩溶形成的溶蚀孔洞的 $\delta^{13}\text{C}$ 和

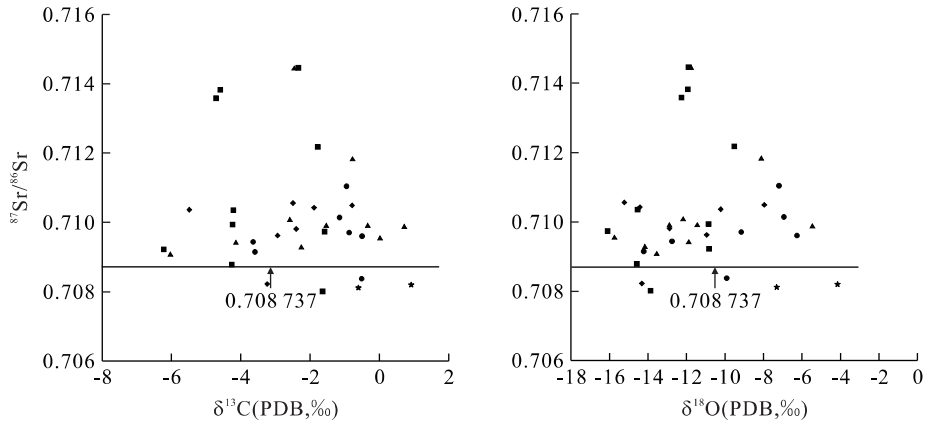


图 2 北部地区方解石胶结物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- δ^{13} C 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- δ^{18} O 关系(图例同图 1)

Fig. 2 The ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- δ^{13} C plot and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr- δ^{18} O plot of calcite cements in the north areas

表 2 桑塔木组覆盖区岩溶缝洞方解石胶结物碳、氧、锶同位素组成

Table 2 The carbon, oxygen and strontium isotopic compositions of calcites filled in fissure-cave in the areas covered with O_{3s} Formation

产状	序号	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB, ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB, ‰)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2 σ (\pm)	产状	序号	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB, ‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB, ‰)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2 σ (\pm)
洞穴	1	-2.13	-13.78				22	0.05	-11.188		
	2	-2.10	-13.51				23	-0.37	-7.208		
	3	-1.97	-13.5	0.709 235	0.000 062 9		24	0.58	-9.61	0.708 321	0.000 001 0
	4	3.08	-10.434	0.708 251	0.000 004 2		25	-2.3	-12.385	0.709 113	0.000 020 0
	5	0.36	-7.211	0.707 386	0.000 014 0		26	-1.6	-16.02	0.709 807	0.000 078 0
	6	1.2	-6.288				27	-0.43	-14.71	0.710 624	0.000 119 0
	7	0.67	-11.646				28	-0.54	-13.44	0.709 343	0.000 124 0
	8	-0.3	-6.27	0.710 942	0.000 806 0	构造裂隙	29	-6.56	-9.37	0.708 849	0.000 062 7
	9	-0.46	-8.61				30	-10.58	-13.2	0.709 152	0.000 007 6
	10	-0.69	-7.72	0.708 286	0.000 097 0		31	-1.29	-12.09		
溶蚀孔洞	11	1.74	-9.43	0.708 208	0.000 096 0		32	-1.22	-11.62	0.709 064	0.000 081 2
	12	-0.33	-4.43	0.709 672	0.000 050 2		33	-1.81	-13.7		
	13	-0.11	-14.26				34	-1.93	-14.13		
	14	4.24	-7.09	0.708 675	0.000 011 3		35	-0.81	-10.682		
	15	-0.73	-9.9				36	0.02	-15.74	0.709 554	0.000 054 0
	16	-4.15	-9.79	0.709 304	0.000 039 1		37	-6.03	-13.55	0.709 085	0.000 023 5
	17	-0.02	-7.06				38	2.09	-7.01	0.710 349	0.000 030 7
	18	-3.59	-14.22	0.709 147	0.000 035 7	不规则	39	3.83	-9.813	0.709 121	0.000 028 0
	19	1.05	-8.18				40	-2.99	-13.46		
	20	1.42	-9.94				41	-7.45	-11.46	0.705 193	0.000 005 1
	21	-1.04	-12.02	0.709 343	0.000 012 9	缝洞	42	0.45	-6.13	0.709 14	0.000 022 7
							43	-2.66	-12.154		

$\delta^{18}\text{O}$ 变化较大, $\delta^{13}\text{C}$ 值因受有机质氧化来源的 ^{13}C 影响而偏负, 在脱气作用、蒸发作用和水岩反应程度等因素的共同作用下, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 具有向原岩靠近的趋势. II 区的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 明显受到大气水的影响, 与构造裂隙、不规则缝洞方解石和洞穴方解石分布区域相同, 主要为海西早期岩溶形成.

构造裂隙($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-6.03 \sim 0.72$, 均值 -1.62 ;

$\delta^{18}\text{O}$ 为 $-15.74 \sim -5.461$, 均值 -11.66)、洞穴($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-5.484 \sim -0.787$, 均值 -2.80 ; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-15.227 \sim -7.957$, 均值 -11.76) 和不规则缝洞方解石($\delta^{13}\text{C}$ 为 $-6.22 \sim -0.39$, 均值 -3.44 ; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-16.096 \sim -9.519$, 均值 -12.56) 的分布较为相似, 除 3 个数据点外, 都分布在 II 区, 明显受大气水的影响, 主要为海西早期形成. $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分布

范围相对较宽。

Ⅱ区中方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分布也具有一定的规律性, 构造裂隙 (-1.81)、溶蚀孔洞 (-2.31)、洞穴 (-3.02) 和不规则缝洞方解石 (-3.44) 贫 $\delta^{13}\text{C}$ 的幅度依次增大, 可能反映了水岩反应程度增强. 洞穴方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值没有不规则缝洞高, 主要是因为洞穴环境中水岩反应最为强烈, 来源于原岩的 ^{13}C 的比重加大; 同时, 脱气作用也造成 $\delta^{13}\text{C}$ 值增高。

3.2 桑塔木组覆盖区碳氧同位素特征

根据表 2 和图 3 所示, 该区不同产状方解石碳氧同位素的总体分布特征与北部地区相似, 溶蚀孔洞 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.15~4.24, 均值 0.13; $\delta^{18}\text{O}$ 为 -14.26~-4.43, 均值 -9.14)、不规则缝洞方解石 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -7.45~3.831, 均值 -1.764 6; $\delta^{18}\text{O}$ 为 -13.46~-6.13, 均值 -10.6)、构造裂隙 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -10.58~2.09, 均值 -1.93; $\delta^{18}\text{O}$ 为 -16.02~-7.01, 均值 -12.1) 和洞穴 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -2.13~-1.97, 均值 -2.067; $\delta^{18}\text{O}$ 为 -13.78~-13.5, 均值 -13.597) 贫 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征明显。

Ⅱ区中不同产状方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值的排序与北部地区有所不同, 溶蚀孔洞 (-0.3)、洞穴 (-2.1)、构造裂隙 (-2.3) 和不规则缝洞方解石 (-2.32) 贫 $\delta^{13}\text{C}$ 依次增强, 并且方解石胶结物相对富集 $\delta^{13}\text{C}$. 造成这些现象的原因可能有两个: (1) 来自北部地区的岩溶水顺着断裂带渗透到桑塔木组覆

盖区, 流体在地下流动的时间和距离大于北部地区, 来自围岩中 ^{13}C 的比重增加; (2) 加里东中期第一幕岩溶在该区保存得相对较好, 其缝洞方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 与围岩接近, 也是造成该区平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于北部地区的一个原因。

4 岩溶缝洞方解石锶同位素地球化学特征

锶在海水中的滞留时间为 1.9×10^7 a, 比海水的混合速度 (约为 10^3 a) 要长得多, 因此, 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 (江茂生等, 2002; Banner, 2004; 黄思静等, 2005; 张涛等, 2005). 碳酸盐岩中锶的组成主要受控于 3 个因素: (1) 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) 大陆地壳古老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) 海相碳酸盐岩化学风化提供的锶, 初始值为 0.708 左右 (Banner, 2004; 黄思静等, 2004). 当成岩矿物形成后, 如果没有接受后期成岩流体的改造, 其锶同位素就不随时间发生变化 (Banner, 2004). 所以, 锶同位素是研究成岩流体来源的有利工具。

4.1 北部地区锶同位素组成特征

该地区中下奥陶统微晶灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布在 0.708 113 3~0.708 196 0 之间, 平均值为 0.708 155, 比塔中地区下奥陶统微晶灰岩 (江茂生等, 2002) 样品低 (0.708 71~0.708 95, 均值 0.708 83), 与黄思静等 (2004) 根据 Qing *et al.* (1998) 和 Denison *et al.* (1998) 报道的中奥陶统数据相近 (中奥陶统 0.708 061, 22 个数据点; 下奥陶统 0.708 737, 157 个数据点). 由于本区微晶灰岩的锶同位素只做了两个样品, 与其他地区差异较大; 同时, 中下奥陶统锶同位素是变化的, 确定一个中下奥陶统的均值与不同产状的方解石胶结物进行对比非常关键. 塔里木盆地中下奥陶统沉积时, 是局限台地—开阔台地—台内浅滩 (生物礁、丘) 相沉积 (黄文辉等, 2006), 受控于全球海平面的变化 (贾振远等, 1997), 所以其他地区受全球海平面控制的中下奥陶统沉积也能代表当时海水的锶同位素组成. 本文采用 Qing *et al.* (1998) 和 Denison *et al.* (1998) 测试的数据下奥陶统 0.708 737 这个高值, 作为中下奥陶统碳酸盐岩的

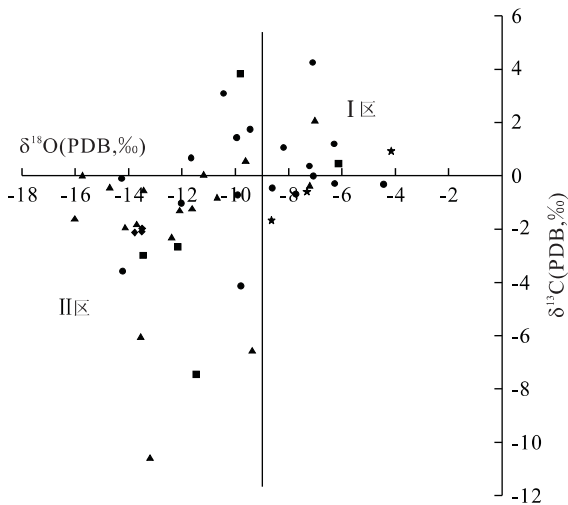


图 3 桑塔木覆盖区方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系 (图例同图 1)

Fig. 3 The $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ plot of calcite cements in the areas covered with O_3S Formation

背景值,大于这个数值,说明受到壳源锶的影响。

北部地区的溶蚀孔洞(0.708 375~0.711 042, 均值 0.709 636)、洞穴方解石(0.708 221~0.710 558, 均值 0.709 927)、构造裂隙(0.709 085~0.714 454, 均值 0.710 344)和不规则缝洞(0.708 009~0.714 462, 均值 0.711 008)⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 均值依次增高(表 1 和图 2),大于 0.708 737 这个背景值,仅有 3 个数据低于背景值,表明方解石胶结物的锶同位素受到壳源锶的影响较大。由于同生期岩溶及加里东中期第一幕岩溶发生时,无硅铝质岩层剥蚀,岩溶缝洞中方解石胶结物的锶同位素组成主要受控于围岩中的锶同位素,高于背景值的方解石胶结物主要是受到海西早期岩溶作用的影响。

4.2 桑塔木组覆盖区锶同位素组成特征

据表 2 和图 4,该地区溶蚀孔洞方解石锶同位素分布在 0.707 386~0.710 942 之间,平均值为 0.708 921;构造裂隙方解石锶同位素分布在 0.708 321~0.710 624 之间,平均值为 0.709 387;不规则缝洞方解石锶同位素分布在 0.709 121~0.709 148(去掉一个最低的数据 0.705 193),平均值为 0.709 135;洞穴方解石锶同位素为 0.709 235,仍然表现出该地区成岩流体中存在壳源锶,说明该地区也受到海西早期古岩溶作用的影响。

同时,该地区方解石胶结物的高锶程度比北部地区弱,北部地区最高为 0.714 462,主要分布在 0.708 737~0.711 000 之间,而该地区最高值为 0.710 942,主要分布在 0.708 737~0.709 500 之间,形成方解石胶结物从北部地区向桑塔木组覆盖区降低的趋势,原因主要为来源于围岩中的重溶锶的比重加大。

0.705 193 这个极低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值可能指示了存在幔源锶的来源(如果样品受到采样时的污染,那么⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 应该升高),0~509Ma 期间海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(McArthur *et al.*, 2001)均远远高于此值;同时,该值高于幔源锶 0.704,可能是受到围岩重溶锶的缓冲。相应的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布为 -11.46 和 -7.45,分别受温度和有机来源的¹³C 的影响(陈荣坤, 1994; Montnez, 1994; Heydari, 2003)。陈强路等(2003)认为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 °C 之间,平均值为 213.6 °C,也说明该地区存在幔源锶。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。

5 结论

(1)塔河油田中下奥陶统同生期岩溶和加里东中期第一幕岩溶发生时,无壳源锶的注入,岩溶缝洞方解石⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值受其围岩控制;而海西早期岩溶时期有壳源锶的注入,岩溶缝洞方解石的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值较高,所以在塔河油田可以用锶同位素来区分岩溶缝洞形成的期次。

(2)海西早期古岩溶时期形成的岩溶缝洞方解石具有贫 $\delta^{13}\text{C}$ 和高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值特征, $\delta^{18}\text{O}$ 分布较宽,并且 $\delta^{13}\text{C}$ 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值从北部地区向桑塔木组覆盖区降低。同生期岩溶和加里东中期第一幕岩溶形成的岩溶缝洞方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值与原岩相近, $\delta^{18}\text{O}$ 分布较宽。

(3)通过塔河油田北部地区和桑塔木组覆盖区

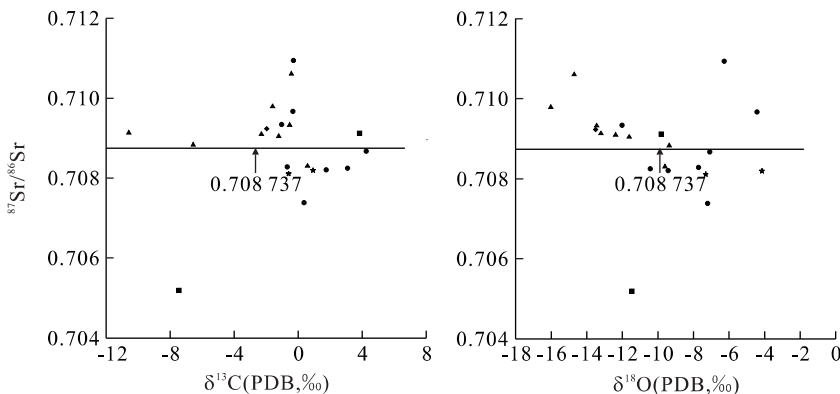


图 4 桑塔木组覆盖区方解石胶结物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr— $\delta^{13}\text{C}$ 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr— $\delta^{18}\text{O}$ 关系(图例同图 1)

Fig. 4 The ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr— $\delta^{13}\text{C}$ plot and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr— $\delta^{18}\text{O}$ plot of calcite cements in the areas covered with O₃s Formation

方解石碳、氧、锶的地球化学对比分析,表明海西早期古岩溶作用在桑塔木组覆盖区依然存在,可能是北部地区的大气水沿着断裂发育带延伸至桑塔木组覆盖区。由于该区水岩反应强烈,来自围岩的 ^{13}C 和重溶锶的比重加大,造成 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值从北部地区向桑塔木组覆盖区降低的现象。

(4)0.705 193 这个极低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,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。

References

- Banner, J. L., 2004. Radiogenic isotopes: Systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 65: 141–194.
- Bao, Z. D., Jin, Z. J., Sun, L. D., et al., 2006. Sea-level fluctuation of the Tarim area in the Early Paleozoic response from geochemistry and karst. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 366–373 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Q. L., Qian, Y. X., Ma, H. Q., 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, R. K., 1994. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(4): 11–21 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. S., Yi, W. X., Lu, W. Z., 2004. The paleokarst reservoirs 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. Springer-Verlag, New York.
- Denison, R. E., Koepnick, R. B., Burke, W. H., et al., 1998. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve. *Chemical Geology*, 152: 325–340.
- Gonzalez, L. A., Lohmann, K. C., 1988. Controls on mineralogy and composition of spelean carbonates; Carlsbad caverns, New Mexico. In: Choquette, P. M., James, N. P., eds., Paleokarst. Springer-Verlag, New York.
- Guo, J. H., 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).
- Heydari, E., 2003. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation. *AAPG Bulletin*, 87(11): 1779–1797.
- Huang, S. J., Liu, S. G., Li, G. R., 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).
- Huang, S. J., Shi, H., Zhang, M., et al., 2005. Strontium isotope age calibration of Rudist Bivalves from Late Cretaceous section in southern Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 437–442 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. H., Yang, M., Yu, B. S., et al., 2006. Strontium isotope composition and its characteristics analysis of Cambrian—Ordovician carbonate in Tazhong district, Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 839–845 (in Chinese with English abstract).
- Jia, Z. Y., Yang, J. L., Li, Z. M., et al., 1997. Sequence stratigraphy and sea level changes on Early Paleozoic paleocontinents and their margins in China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(5): 544–551 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, M. S., Zhu, J. Q., Chen, D. Z., 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): 36–42 (in Chinese).
- Kang, Y. Z., 2004. Tahe giant oil and gas field in Tarim basin, China—On commemoration of twenty anniversary on Shacan 2 well oil-gas discovery. Xinjiang Science Technology Publishing House, Urumqi, 1–187 (in Chinese).
- Kerans, C., 1988. Karst-controlled reservoir heterogeneity in Ellenburger Group carbonates of West Texas. *AAPG Bulletin*, 72(10): 1160–1183.
- Liu, W., Li, Y. H., Zhang, T., 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).
- Liu, X. P., Wu, X. S., Zhang, X. Z., 2004. Geochemistry characteristics of carbon and oxygen isotopes of Ordovician carbonate palaeokarst reservoir in the western region of Lungu, Talimu basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 19(4): 69–71,

- 76 (in Chinese with English abstract).
- Lohmann, K. C., 1988. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. In: Choquette, P. W., James, N. P., eds., Paleokarst. Springer-Verlag, New York.
- Loucks, R. G., 1999. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modification, spatial complexity, and reservoir implications. *AAPG Bulletin*, 83(11): 1795—1834.
- Loucks, R. G., Mescher, P. K., McMechan, G. A., 2004. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas. *AAPG Bulletin*, 88(5): 545—564.
- McArthur, J. M., Howarth, R. J., 2001. Strontium isotope stratigraphy: Lowess version 3; Best fit to the marine Sr isotope curve for 0—509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *Journal Geology*, 109: 155—170.
- McMechan, G. A., Loucks, R. G., Mescher, P., et al., 2002. Characterization of a coalesced, collapsed paleocave reservoir analog using GPR and well-core data. *Geophysics*, 67(4): 1148—1158.
- Montnez, I. 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.
- Qing, H. R., Barnes, C. R., Buhl, D., et al., 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.
- Wang, D. R., 2000. Stable isotopic geochemistry of oil and gas. Petroleum Industry Press, Beijing, 123—145 (in Chinese).
- Wang, S. M., Jin, Z. J., Xie, Q. L., 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, G. Q., Li, G. R., Liu, S. G., et al., 2005a. 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, G. Q., Liu, S. G., Li, G. R., et al., 2005b. Comparison of tectonic evolutions and petroleum geological conditions in Tazhong and Tabei palaeohighs in Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 114—119, 129 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Li, T., Cheng, G. G., 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).
- Yan, X. B., Zhang, T., 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, R. L., 2005. Characteristics and significance of the Caledonian karst in the Tahe oil field, the Tarim basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(5): 468—472, 478 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Jin, Z. J., Yang, L., 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, T., Yun, L., Wu, X. W., 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, R. C., Chen, H. D., Zhang, S. N., 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).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Geochemistry of stable isotopes. Science Press, Beijing, 143—217 (in Chinese).

附中文参考文献

- 鲍志东, 金之钧, 孙龙德, 等, 2006. 塔里木地区早古生代海平面波动特征: 来自地球化学及岩溶的证据. *地质学报*, 80(3): 366—373.
- 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.
- 陈荣坤, 1994. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用. *沉积学报*, 12(4): 11—21.
- 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)*, 31(1): 1—7.
- 黄思静, 石和, 张萌, 等, 2005. 西藏南部晚白垩世厚壳蛤的锶同位素年龄标定. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(4): 437—442.

- 黄文辉,杨敏,于炳松,等,2006.塔中地区寒武系—奥陶系碳酸盐岩 Sr 元素和 Sr 同位素特征.地球科学——中国地质大学学报,31(6):839—845.
- 贾振远,杨家驂,李志明,等,1997.中国古大陆及其边缘早古生代层序地层及海平面变化的基本特征.地球科学——中国地质大学学报,22(5):544—551.
- 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,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.
- 刘小平,吴欣松,张祥忠,2004.轮古西地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层碳、氧同位素地球化学特征.西安石油大学学报(自然科学版),19(4):69—71,76.
- 王大锐,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层.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—119,129.
- 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.
- 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—472,478.
- 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.
- 郑永飞,陈江峰,2000.稳定同位素地球化学.北京:科学出版社,143—217.