

文章编号:1001-6112(2012)06-0623-06

塔里木盆地轮南地区奥陶系 岩溶缝洞充填物地球化学特征及环境意义

淡永, 梁彬, 曹建文, 张庆玉

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;

2. 国土资源部广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要:通过对塔里木盆地轮南地区奥陶系风化壳缝洞充填物的观察与分析, 识别出3类不同的充填物: 流水机械充填物、化学沉积物及重力坍塌堆积物。对其与基岩化学组分、微量元素对比研究, 表明不同充填物形成时流体性质和古水文环境不同, 其元素的迁移、富集和分馏效应也不同。因此可以利用充填物化学组分和微量元素的迁移、富集特征, 来判别轮南地区古风化壳缝洞充填过程中流体性质和古水文环境。经分析, 发现3类充填环境: 渗流—活跃潜流带的氧化性活跃淡水环境、静滞潜流淡水环境及浅埋藏压释水热水环境, 为古岩溶储层预测和评价提供依据。

关键词:古岩溶; 化学沉积物; 微量元素; 聚类分析; 潜流带

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Geochemical features and environmental significances of deposits in Ordovician karstic fractures and caves, Lunan area, Tarim Basin

Dan Yong, Liang Bin, Cao Jianwen, Zhang Qingyu

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: In the Ordovician karstic fractures and caves in Lunan area of the Tarim Basin, three types of deposits have been identified including water mechanical fillings, chemical deposits and gravity collapse debris. The comparisons of chemical and trace element compositions between deposits and bedrocks have indicated that when different deposits were formed, fluid properties and hydrological environment were different, and the migration, enrichment and fractionation of elements were also different. As a result, the chemical and trace element compositions can be used to judge the fluid properties and hydrological environment when the Ordovician karstic fractures and caves were filled. Three kinds of filling environment have been found including oxidizing active freshwater environment in seepage-active undercurrent zone, freshwater environment in stagnant undercurrent zone as well as pressure-released and hot water environment in shallow-buried zone. The study is helpful for karstic reservoir prediction and evaluation.

Key words: paleokarst; chemical deposit; trace element; cluster analysis; undercurrent zone

塔里木盆地轮南奥陶系古潜山位于塔里木盆地轮南古隆起的主体部位, 岩溶成因的溶蚀孔洞、大型溶洞和裂缝是其主要的储集空间^[1-3]。研究表明, 岩溶储层非均质性较强, 其发育受古岩溶地貌、古水文地质条件以及构造运动等多种因素的影响。而溶蚀缝洞充填物是岩溶储层形成与转化过程中的产物, 对其进行研究有助于认识岩溶的发育演化^[4]。本文对轮南地区奥陶系多口钻井岩心岩溶缝洞充填物观察及其化学组分和微量元素取

样测试分析, 应用多元统计方法对古岩溶缝洞充填物地球化学特征进行分析讨论, 为判别储层形成过程中的流体性质、古水文环境, 提供新的有关地球化学信息。

1 轮南古潜山地质概况

轮南古潜山位于塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起中部地区^[5](图1), 是加里东期和海西早期多期次构造作用的结果。轮南奥陶系潜山经历了多

收稿日期: 2012-03-06; 修订日期: 2012-09-10。

作者简介: 淡永(1986—), 男, 硕士, 从事古岩溶油气地质研究。E-mail: danyong@karst.ac.cn。

基金项目: 国土资源部重大专项(201211082)资助。

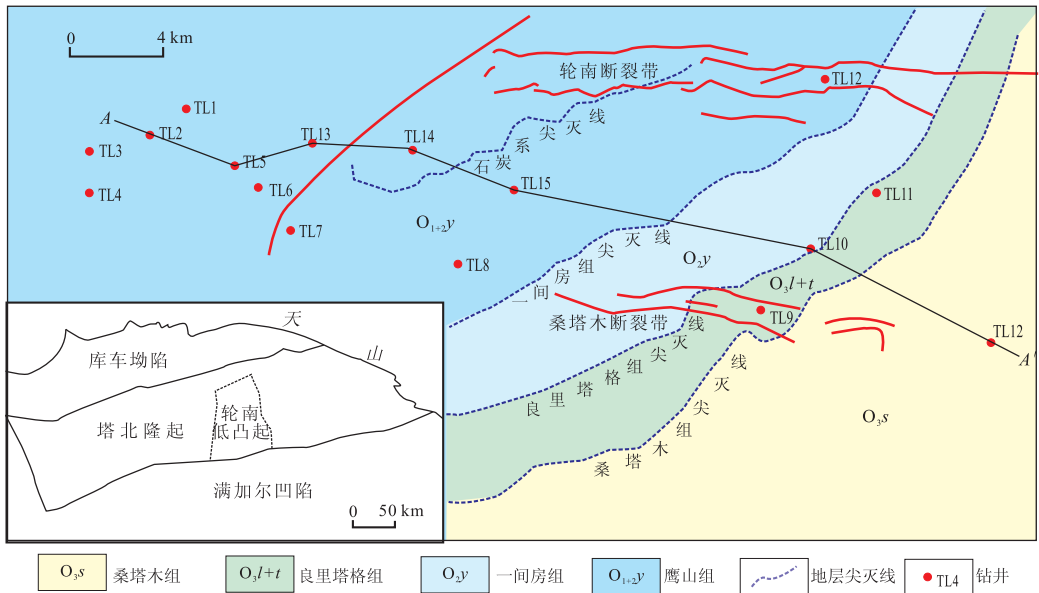


图 1 塔里木盆地轮南地区取样井位分布及前石炭纪地质略图
据陈利新^[5],有修改。

Fig. 1 Location of wells and pre-Carboniferous paleogeologic map of Lunnan area in Tarim Basin

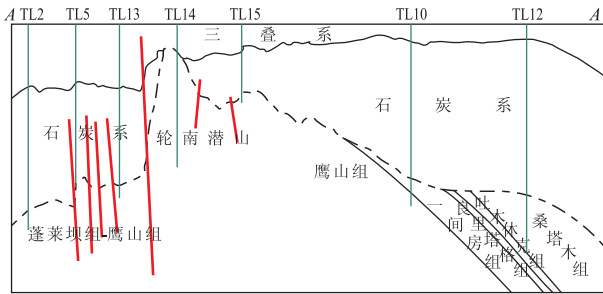


图 2 塔里木盆地轮南地区
奥陶系—三叠系东西向地层对比
据杨栓荣^[8],有修改。

Fig. 2 Stratigraphic correlation diagram of Ordovician-Triassic from east to west in Lunnan area, Tarim Basin

次暴露、埋藏,造成碳酸盐岩多期、多形式的溶解与充填^[6-7],形成了叠加的古风化壳型岩溶储层。

轮南地区奥陶系风化壳暴露时间较长,其上覆地层为三叠系或石炭系,普遍缺失了志留纪到二叠纪的地层,部分地区缺失石炭系小海子组、巴楚组和奥陶系上部地层。古风化壳地层自北西向南东地层分布为^[8](图 2):奥陶系中下统鹰山组(O_{1-2y})、中统一间房组(O_{2y})及上统吐木休克组(O_{3t})、良里塔格组(O_{3l})、桑塔木组(O_{3s})。鹰山组可分为 2 个岩性段: O_{1-2y}^1 ,岩性以褐灰色、浅褐灰色泥晶砂屑灰岩为主; O_{1-2y}^2 ,岩性为泥晶、亮晶砂屑灰岩互层,中下部含白云质。一间房组(O_{2y})岩性以生屑灰岩、砂屑灰岩为主,夹少量泥晶灰岩、粒屑泥晶灰岩。吐木休克组(O_{3t})岩性以紫红色瘤状、浅褐灰色泥晶灰岩为主。良里塔格组(O_{3l})

岩性以瘤状灰岩为主。桑塔木组(O_{3s})以杂色碎屑岩为主,夹紫褐灰色、褐灰色灰岩。除桑塔木组外,其他各组碳酸盐岩缝洞均较发育,尤其是鹰山组。本文研究重点就在此层位。

2 岩溶缝洞充填物类型划分及特征

对于缝洞充填物的划分,国内外学者均有研究,但划分方案各有不同。在对轮南地区钻井岩心观察后,综合张美良等^[9-11]现代岩溶和塔河油田奥陶系古岩溶充填物划分方案,提出根据缝洞充填物的物质成分、沉积堆积环境以及形态组合等特征,将轮南地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物划分为流水机械充填物、化学淀积物及重力垮塌堆积物 3 类。

2.1 流水机械充填物

流水机械充填物主要是流水带入岩溶空间、在重力作用下沉积形成的充填物质,具有流水冲积和重力分异作用产生的层理以及分选性结构特征;成分复杂,以钙泥质和碳酸盐岩角砾、岩屑为主,有的还含有岩溶系统外来岩石碎屑、泥砂、高岭土等。此类充填物常见于地下河溶洞系统以及与其相联的层间溶缝、溶蚀裂缝体系,主要发育于裸露岩溶期和埋藏岩溶早期。

对轮南地区奥陶系顶部碳酸盐岩岩心观察发现,岩溶缝洞流水机械充填物较常见,如 TL2 井 5 826 ~ 5 829.3 m、TL3 井 5 835 ~ 5 843 m、TL6 井 5 540 ~ 5 557 m 等井段均有发现。充填物岩性主要为浅灰绿色或褐红色钙质粉砂岩、石英粉砂岩和含泥质细—粉

砂岩、泥岩。多见纹层状构造,水平层理、平行层理、交错层理、波状交错层理等均有发育(图 3a,b)。

2.2 化学淀积物

化学淀积充填物主要形成于水流滞缓的水动力环境,由于物源条件的不同,充填物的成分不同,大致可分为2类:

(1)在表生期和裸露岩溶期的近地表环境下,形成具有淡水岩溶特征的充填物。

(2)在埋藏深岩溶环境下,压释水和热水岩溶作用首先对早期溶缝进行改造,产生溶蚀,使原来的微孔隙、裂隙溶蚀扩大。待溶解的矿物质逐渐达到饱和、过饱和时产生沉淀,对岩溶空间形成差异性充填^[12]。充填作用主要分布于岩溶层段的下部和顶部,以及水流渗流、对流循环带的边缘,而在水流运移的主要层段则充填程度较低,形成有利的油气储集空间。

该类充填物在轮南地区各井均有发现,主要以晶形较好的方解石、白云石出现,半充填或全充填于溶缝和溶洞中(图 3c)。

2.3 重力垮塌堆积物

在表生岩溶期的岩溶作用过程中,不饱和碳酸盐的大气淡水和地下水对化学性质活泼的碳酸盐矿物、易溶的盐类矿物淋滤、渗透,使这些矿物溶解并形成溶蚀孔洞缝。溶蚀作用继续发展到一定程度,岩石会发生崩落,产生垮塌角砾岩^[9-11]。其在轮南地区 TL6 井 5 574.5 ~ 5 580.25 m、TL7 井 5 312.85 ~ 5 342.39 m 等井段有发现,角砾大小混杂,形状不规则,无分选和磨圆特征,其粒径一般为几厘米至几十厘米(图 3d)。角砾间的填隙物质

由细小的碳酸盐岩碎屑物质或由地表径流携带的渗流砂、泥质组成。

3 样品采集及测试

本文样品取自轮南地区 12 口奥陶系钻井岩心(图 1),取样层位均为中下奥陶统鹰山组,共计 26 块。其中缝洞基岩样 10 块,机械充填物 11 块,化学淀积物 4 块,溶洞垮塌角砾 1 块。由于地质样品数量多,且易于成形,故采用粉末压片法制样。用天平取颗粒小于 200 目的样品 3 g,在 105 °C 烘干,称取微晶纤维素 0.6 g,研磨均匀后在一定压力下制成直径为 32 mm 的圆片,采用 Axios X 射线荧光光谱仪对样品进行化学组分和微量元素测定。样品的测试是在国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成的。

4 充填物化学组分特征

岩心观测与分析结果表明,被充填的岩溶空间主要为溶蚀孔洞、溶缝、溶蚀构造裂隙和角砾间溶蚀缝隙等。在不同深度,化学组分的分布取决于充填物类型或岩性。

如表 1 所示:(1)不同类型碳酸盐岩基岩中其主要成分的含量极为相近,粘土矿物成分的含量极低;(2)淀积化学充填物中 CaO、MgO 含量较其他类型充填物高(图 4)。淀积化学充填物当以方解石为主时,CaO 含量最高,达到 40% 以上;但当以白云石为主时,MgO 含量增多,达到 20%,CaO 含量降低。SiO₂ 含量略高于基岩,与少量石英淀积或充填时带入少量粘土物质有关;(3)砂泥质充填物,主要有粘土矿物和铝土,Al₂O₃ 含量 10% ~ 25%(图 4),主要为裸露、半裸露和浅埋藏条件下,奥陶系风化壳顶部泥质、铝土质随水渗入岩溶缝洞空间形成(图 3a)。值得注意的是,这些机械砂泥岩充填物中同时含有高达 10% 的 CaO 成分,说明外源非饱和大气淡水在进入缝洞系统时造成了基岩的进一步溶蚀,当水达饱和时,缝洞中堆积砂泥岩也因此含有丰富的 CaO;(4)溶洞充填物含有大量基岩角砾和岩屑,夹杂泥质、铝土质粘土和钙泥,部分缝洞淀积充填有方解石、白云石和少量石英, SiO₂、Al₂O₃ 含量低于泥质充填物,而且,其成因以淡水岩溶作用过程为主,充填角砾和钙泥的灰化作用较强,碳酸盐矿物以 CaCO₃ 为主,CaO 含量为 38%,而 MgO 含量较低,为 2.8%。

次要造岩组分中,Fe、K 的含量变化较大,主要与充填物中的泥质成分的多少、风化或溶蚀作用过

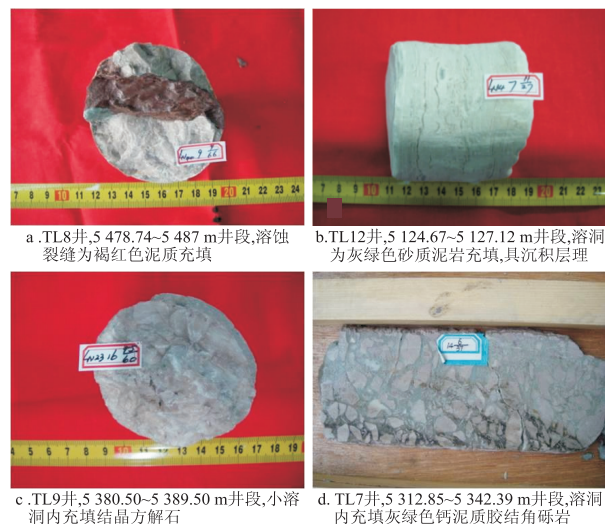


图 3 塔里木盆地轮南奥陶系岩溶缝洞充填物特征

Fig. 3 Characteristics of karstic fracture-cavity deposit in Ordovician of Lunan area, Tarim Basin

表 1 不同岩石类型和充填物的化学组分

Table 1 Chemical components of different rocks and carbonate cements

岩溶结构	岩性	样品数/块	化学组分含量平均值/%								
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	CO ₂
基岩	泥晶灰岩	9	0.763	0.111	0.170	52.824	2.161	0.141	0.120	0.087	43.129
	砂屑灰岩	1	0.046	0.040	0.110	53.330	1.850	0.031	0.100	0.050	44.330
缝洞充填物	机械砂泥岩	11	60.453	11.789	1.891	10.755	0.960	2.504	0.495	0.734	7.699
	淀积方解石	3	4.115	0.957	0.457	49.723	1.730	0.206	0.217	0.160	41.805
	淀积白云石	1	19.600	0.580	0.480	29.210	20.950	0.095	0.011	0.440	27.250
	垮塌角砾灰岩	1	17.280	4.640	0.800	38.400	2.850	1.050	0.400	0.440	33.380

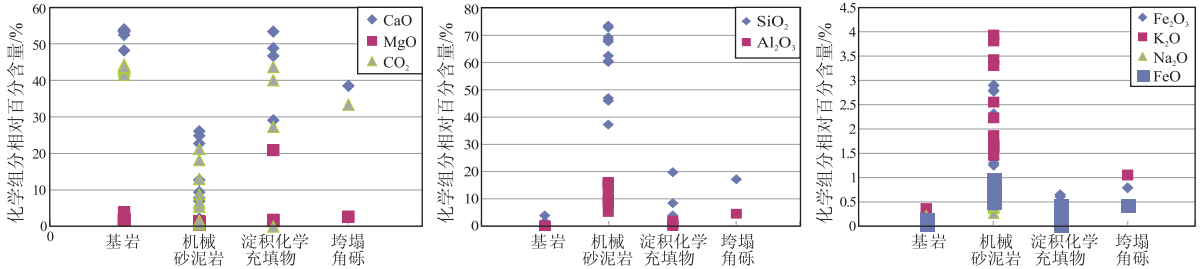


图 4 风化壳基岩与充填物组分分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of chemical components for karstic rocks and fracture-cavity deposits

程中 Fe 在溶余物中聚积有关(图 4)。因此 Fe₂O₃、K₂O 在泥质充填物中的含量最高,在溶洞角砾充填物中次之,在淀积充填物中普遍较低。当压释水或热水作用较强时,可产生较富 Fe 的碳酸盐矿物,如本次取的一块淀积白云石,可能就受此影响(表 1)。

5 充填物微量元素富集机理

利用多元统计方法对庞大的数据进行处理,可以将微量元素数据按数量、行为、特征上的联系进行归纳,由果及因地推出比较客观的成因线索,提供序列变化趋势,以导出合理的推论^[6]。本文主要采用相关性分析和聚类分析 2 类方法对微量元素数据进行分析。

不同元素间的相关性分析,可以揭示元素间的伴生关系,进而判断元素的可能来源^[13]。为了分析的方便,把 26 块样品中反映碳酸盐岩造岩组分的 CaO 和反映砂泥岩造岩组分的 SiO₂ 与微量元素一起进行相关性分析。结果表明(表 2):(1) CaO 与 SiO₂ 相关系数为-0.991,说明两者极不相关,印证了它们不是不同物质来源:砂泥岩和碳酸盐岩。(2) SiO₂、P、Cr、Ba、Co、Ni 彼此相关系数大于 0.8,说明微量元素 P、Cr、Ba、Co、Ni 与 SiO₂ 一样富集在砂泥岩中,而碳酸盐岩中这些微量元素很少。(3) Zn、Cd、Pb 微量元素也具有较高的相关系数,相关系数大于 0.8,与上一个组合呈负相关性,说明与上类组合具有不同富集机理。(4) 反映碳酸盐岩的

CaO 与微量元素 Sr 相关性也较好,相关系数为 0.746,说明 Sr 在碳酸盐岩中不易迁移。

元素组合和迁移贫化或富集规律,与温暖潮湿气候带碳酸盐岩化学风化过程中的地球化学行为基本一致^[14-16]。然而因溶蚀强度、方式、溶蚀对象和流体性质的不同,且往往叠加有外来因素的干扰,各类基岩和充填物的微量元素地球化学特征有较大差异性(表 3)。基于上述 3 类相关性较好微量元素组合,对各类基岩和充填物的微量元素差异、元素迁移规律及原因进行讨论。

(1) 两类基岩对比,泥晶灰岩较砂屑灰岩明显更富集亲泥的 P、Cr、Ba、Co、Ni 微量元素组合,这样的富集作用主要受岩石形成时的沉积环境影响,不同沉积环境背景下形成的岩石显然微量元素不同。此外,另外一组重金属微量元素 Zn、Cd、Pb、Cu 表现出了相同的富集规律,可能原因是在浅埋藏成岩条件下,含泥较高的沉积物压释水和热水中易于迁移的重金属微量元素与 S 发生反应,因此泥晶灰岩中亲 S 重金属微量元素富集程度高于高能的砂屑灰岩。

(2) 机械充填的砂泥岩与基岩对比,机械砂泥岩具有极高的 P、Cr、Ba、Co、Ni 微量元素组合,说明机械砂泥岩的来源主要为裸露、半裸露和浅埋藏条件下,奥陶系风化壳顶部富含 P、Cr、Ba、Co、Ni 微量元素的砂泥质随流水渗入岩溶缝洞空间形成。然而,另一方面机械砂泥岩重金属微量元素 Cu 达最大

表 2 元素相关性分析

Table 2 Correlation analysis of elements

$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{CaO})$	$\omega(\text{P})$	$\omega(\text{Mn})$	$\omega(\text{As})$	$\omega(\text{Ba})$	$\omega(\text{Cd})$	$\omega(\text{Co})$	$\omega(\text{Cr})$	$\omega(\text{Cu})$	$\omega(\text{Ni})$	$\omega(\text{Pb})$	$\omega(\text{Sr})$	$\omega(\text{Zn})$	$\omega(\text{Mo})$	
$\omega(\text{SiO}_2)$	1.000														
$\omega(\text{CaO})$	-0.991	1.000													
$\omega(\text{P})$	0.867	-0.846	1.000												
$\omega(\text{Mn})$	-0.367	0.308	-0.319	1.000											
$\omega(\text{As})$	0.002	-0.027	-0.087	-0.261	1.000										
$\omega(\text{Ba})$	0.828	-0.861	0.851	-0.158	-0.031	1.000									
$\omega(\text{Cd})$	-0.442	0.443	-0.381	-0.100	0.041	-0.418	1.000								
$\omega(\text{Co})$	0.901	-0.887	0.830	-0.407	0.168	0.725	-0.332	1.000							
$\omega(\text{Cr})$	0.936	-0.926	0.913	-0.325	0.024	0.887	-0.427	0.859	1.000						
$\omega(\text{Cu})$	0.710	-0.723	0.501	-0.262	0.517	0.615	-0.258	0.661	0.752	1.000					
$\omega(\text{Ni})$	0.921	-0.914	0.853	-0.408	0.209	0.823	-0.399	0.939	0.927	0.772	1.000				
$\omega(\text{Pb})$	-0.659	0.651	-0.577	0.121	0.090	-0.571	0.864	-0.537	-0.614	-0.367	-0.592	1.000			
$\omega(\text{Sr})$	-0.792	0.746	-0.698	0.192	0.060	-0.608	0.441	-0.699	-0.773	-0.625	-0.738	0.602	1.000		
$\omega(\text{Zn})$	-0.425	0.423	-0.374	-0.111	0.078	-0.401	0.995	-0.307	-0.415	-0.230	-0.376	0.877	0.446	1.000	
$\omega(\text{Mo})$	0.580	-0.585	0.491	-0.268	-0.074	0.439	-0.249	0.559	0.380	0.210	0.512	-0.420	-0.338	-0.233	1.000

表 3 不同岩石类型和充填物微量元素含量

Table 3 Trace element contents of different rocks and carbonate cements

岩溶结构	岩性	样品数/块	微量元素含量平均值/ 10^{-6}												
			P	Mn	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	Zn	Mo
基岩	泥晶灰岩	9	61.211	94.478	6.456	19.656	0.500	2.978	0.106	6.500	4.633	100.656	190.856	308.944	0.411
	砂屑灰岩	1	55.800	142.200	6.700	2.400	0.200	0.800	0.050	6.100	4.000	77.200	153.500	78.100	0.250
缝洞充填物	机械砂泥岩	11	501.718	63.564	6.173	249.964	0.114	26.427	58.227	16.291	29.627	53.845	77.564	48.827	1.336
	淀积方解石	3	73.567	354.500	6.200	28.467	0.167	4.567	2.367	8.067	6.700	81.767	138.600	83.133	0.250
	淀积白云石	1	100.000	511.600	4.600	169.200	0.200	3.600	0.050	3.200	4.300	87.300	236.100	124.000	1.400
	垮塌角砾灰岩	1	183.400	345.700	4.700	291.600	0.100	4.300	19.700	8.300	10.000	62.900	130.800	29.500	0.250

值,可能原因是在埋藏条件下,压释水和热水中易于迁移的重金属微量元素在溶蚀缝洞充填物中含量较高,明显高于基岩,甚至与 S 结合形成黄铁矿。

(3) 淀积方解石与基岩对比,相关性较高,但具有富集 Mn 而贫 Sr 的特征,前人研究认为 Sr、Na、Mg 在海水中比淡水中高出 100 ~ 1 000 倍,而 Mn、Fe 仅有淡水的几分之一^[16]。当有淡水参与方解石沉淀时,显然其 Sr 平均值较基岩降低, Mn 值富集。因此本文采集的方解石富集 Mn 而贫 Sr,表明其应是在大气淡水中沉淀。

(4) 淀积白云石与基岩对比,具有更高的 Mn 含量,在次要造岩矿物中还表现出较高的 Fe 含量(表 1)。这也与淀积方解石一样,是由于大气淡水的参与造成的。淀积化学充填物与机械砂泥岩相比,明显具有贫 P、Cr、Ba、Co、Ni 的特征。

(5) 垮塌角砾灰岩与基岩对比,P、Cr、Ba、Co、Ni 微量元素含量更高,但低于机械砂泥岩充填物;另一方面 Fe、Mn 值较基岩升高,但低于淀积白云石,而 Sr 平均值低于基岩,高于机械砂泥岩。这些

值的出现与角砾灰岩岩石结构有关,由于角砾是洞顶基岩的垮塌物,其微量元素与基岩应一致,而砾间钙泥质胶结物显然与机械砂泥岩微量元素特征一致。所以这类不同性质的微量元素综合正是垮塌角砾灰岩的微量元素特征。

为检验上述元素的组合和迁移贫化或相对富集规律分析的可靠性,以分类样品为样本,微量元素为变量,进行 Q 型聚类分析(图 5),结果表明:(1) 不同类型缝洞充填物,亲缘性较差,各自独立。(2) 各类化学淀积物之间相关密切($R \leq 1$)。(3) 化学淀积物与基岩中砂屑灰岩相关密切,而与泥晶灰岩相关较差,甚至不如垮塌角砾灰岩,说明化学淀积物物质成分可能来自较纯基岩。(4) 随着缝洞充填物或岩石结构中泥质含量的增加,与淀积化学充填物的聚集程度越差。Q 型聚类分析结果与上述分析结果较好的拟合。

6 指示环境意义

综合上述各类基岩和充填物的化学组分和微

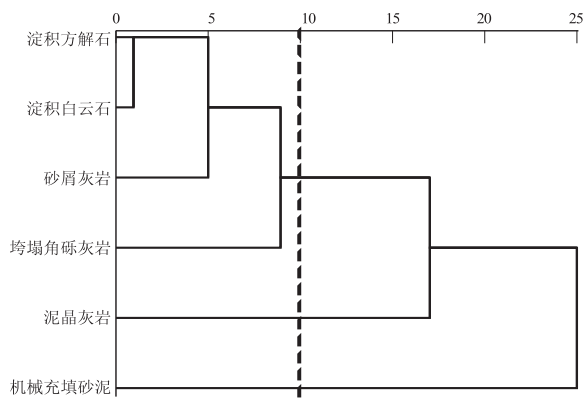


图5 不同基岩与充填物微量元素Q型聚类分析谱系图
Fig. 5 Pedigree chart of Q-mode fuzzy cluster analysis for different rocks and fracture-cavity deposits

量元素特征,轮南古岩溶储层经历了以下几个环境。

(1) 渗流—活跃潜流带的氧化性活跃淡水环境。在岩溶过程中,伴随大气淡水渗入地下缝洞中,地表粘土或铝土也一起带入缝洞中,形成机械砂泥岩堆积物,造成了 Fe、K、Ti、P、Cr、Ba、Co、Ni 微量元素富集在机械砂泥岩中。此外在此环境中的溶洞长期受到大气淡水溶蚀,溶洞顶部垮塌,在溶洞内形成的溶洞垮塌角砾堆积物,一方面保留基岩的微量元素特征,但另一方面受砾间胶结物的影响,导致角砾堆积物微量元素特征具有大气淡水作用的“痕迹”。

(2) 潜流静滞淡水环境。此环境长期处于静滞,饱和的淡水不易交换,易于化学淀积方解石或形成白云石。由于它们的主要成分均来自基岩,因此保留了基岩主要成分,但受大气淡水的影响,造成 Sr 流失及 Fe、Mn 富集。

(3) 浅埋藏环境。古风壳形成后,当再次埋入地下后,随环境温度、压力变化,压释水形成并流动,压释水和热水中易于迁移的重金属微量元素 Zn、Cd、Pb、Cu 与 S 发生反应,在这样的环境中再次导致它们形成富集。

7 结论

1) 基于对轮南地区多口井岩心观察和前人对现代岩溶缝洞的认识,将轮南奥陶系风化壳缝洞充填物分为 3 大类:流水机械充填物、化学淀积物、重力垮塌充填物。

2) 利用多元统计方法对奥陶系风化壳基岩和充填物的造岩化学组分及微量元素进行对比分析。结果表明,在岩溶过程中化学组分发生了迁移、富集作用,大气淡水对基岩溶蚀,CaO、MgO、CO₂、Sr、Ba 等元素溶于水,在特定的岩溶空间和环境,再次形成淀积物,因此淀积物比基岩更富集了大气淡水中的

Fe、Mn,却贫化了 Sr。在近地表环境下,随大气淡水渗入缝洞系统中的粘土或铝土,增加了缝洞系统中 SiO₂、Al₂O₃ 及 Fe、K、Ti、P、Cr、Ba、Co、Ni 等微量元素。此外,后期构造作用让风化壳被埋藏,此时压释水和热水也导致了元素的迁移和贫化,尤其是硫化反应造成了重金属元素 Zn、Cd、Pb、Cu 在充填物中的富集。

3) 在综合基岩和缝洞充填物化学组分和微量元素富集和迁移特征后,总结轮南奥陶系缝洞充填物主要形成于 3 个环境中:渗流—活跃潜流带的氧化性活跃淡水环境、潜流静滞淡水环境及浅埋藏压释水热水环境。

参考文献:

- [1] 郭建华. 塔里木盆地古岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 1993, 12(2): 60.
- [2] 顾乔元, 韩剑发, 张耀堂. 轮南地区奥陶系断裂及储集层裂缝分形特征[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(4): 287-290.
- [3] 杨宁, 吕修祥, 陈梅涛. 塔里木盆地轮南、塔河油田碳酸盐岩储层特征研究: 以沙 107 井和轮古 40 井为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 247-251.
- [4] 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.
- [5] 陈利新, 潘文庆, 梁彬, 等. 轮南奥陶系潜山表层岩溶储层的分布特征[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 327-332.
- [6] 范小林, 邱蕴玉, 鲍新毅. 塔里木盆地轮南—阿克库勒地区地质结构及油气成藏与勘探目标关系[J]. 石油实验地质, 1999, 21(2): 132-136.
- [7] 龚福华, 刘小平. 塔里木盆地轮古西地区断裂对奥陶系古岩溶的控制作用[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 313-317.
- [8] 杨栓荣, 潘文庆, 韩剑发, 等. 轮南奥陶系碳酸盐岩储集体控油机理探讨[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 84-88.
- [9] 张美良, 冉景丞. 贵州荔波岩溶洞穴发育特征[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 13-20.
- [10] 肖玉茹, 何峰煜. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究: 以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 75-80.
- [11] 徐微, 蔡忠贤, 贾振远, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 287-293.
- [12] 王恕一, 陈强路, 马红强. 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.
- [13] 成艾颖, 余俊清, 张丽莎, 等. 托素湖岩心 XRF 元素扫描分析及多元统计方法的应用[J]. 盐湖研究, 2011, 19(1): 20-25.
- [14] 郑荣才, 陈洪德. 川东黄龙组古岩溶储层微量和稀土元素地球化学特征[J]. 成都理工学院学报, 1997, 24(1): 1-7.
- [15] 成都地质学院沉积研究所. 微量元素在沉积学研究中的应用(1)[J]. 岩相古地理, 1988(3/4): 108-116.
- [16] 成都地质学院沉积研究所. 微量元素在沉积学研究中的应用(2)[J]. 岩相古地理, 1988(5): 51-58.
- [17] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2010.