

文章编号 :1000-0550(2002)01-0070-05

碳酸盐岩岩溶作用的元素地球化学表征 ——以塔河1号的S60井为例

钱一雄¹ 蔡立国¹ 李国蓉² 刘光祥¹ 韩燕英³

(1 中国石化勘探开发研究院无锡实验地质研究所 江苏无锡 214151)

2(成都理工学院 成都 610059)

3(中国石化集团公司新星石油公司西北石油局规划院 乌鲁木齐 830011)

摘要 通过对塔河地区奥陶系碳酸盐岩及其胶结物方解石的化学成分及方解石晶体微形貌研究后认为:塔河一号S60井埋深5 433.20~5 435 m发育的岩溶角砾灰岩,属于高度大于2 m的大型古岩溶洞穴沉积,而埋深5 435 m中晶洞中的方解石是地表岩溶带的早中期的淡水与海水的混合带的产物。在本文中,作者指出碳酸盐岩矿物学及地球化学可有效地应用于表生岩溶作用中的深度、强度、期次以及成岩序列及古沉积环境判别等项研究中。

关键词 方解石 元素地球化学 微形貌 岩溶作用 塔河

第一作者简介 钱一雄 男 1962年出生 硕士 高级工程师 岩石地球化学

中图分类号 P595 P642.25 文献标识码 A

1 引言

塔河油田奥陶系油气藏是以古岩溶型储集体为主体。前人研究表明^[1]:塔北古岩溶至少经历了六期,即加里东早、中期(E-Z, O₂₋₃/O₁, S₁/O₁),海西早期(C₁/D—O),海西晚期—印支期(J—T/Pz),燕山期及喜马拉雅期。其中,海西早期的岩溶作用强烈,分布面较广,较为重要。由于多期、不同规模的岩溶作用影响,在岩溶地质剖面上,可形成多期岩溶作用旋回叠加。林忠民等^①采用了全球海平面次级变化来解释多级岩溶层(带)形成的地质模式。但因本区多期次、长时间的地壳隆升,各期次的岩溶带或次级带在垂向上互相叠置,难以区分;由此造成岩溶孔洞缝网络结构十分复杂,可能存在White和Palmer^[2]指出的近地表的分岔型(Branchwork passage)网络式(Network

Maze)交织式(Anastomotic)海绵状(Spongwork Maze)或分枝状(Ramiform Maze)(图1)结构。因此,在对岩溶沉积微相的详细研究基础上,岩溶期次分带的划分及空间展布的预测对完善岩溶地质模型、并有效地指导油气勘探具有重大的现实意义。

2 塔河1号S60井的部分岩溶地质剖面

位于塔河1号构造高位的S60井,完钻井深为5 542.95 m,油气主要显示层段为5 504.0~5 542.95 m。在埋深5 527.34~5 542.95 m井段,泥浆漏失量达到1 064.1 m³,这表明地下岩溶发育规模较大。石炭系巴楚组与中上奥陶统原定分界面的埋深5 492m^②,本次通过界面上下灰岩的元素地球化学与稀土元素研究进行了重新厘定(另见文阐述)。



图1 近地表岩溶洞穴多通道分布的平面图(据 Robert G. Loucks^[2])

Fig. 1 Near-surface cave geometries of multiple passages shown in plan view

① 林忠民等,2000年新疆塔里木盆地油气勘探布署会议上报告,1999,

② 中国石化集团公司新星石油公司项目,编号XYK-99-46。

收稿日期:2001-02-13 收修改稿日期:2001-04-04

在埋深 5 416.10 m 左右, S60 井钻遇的石炭系巴楚组的一部分是由浅绿色、灰色泥岩与棕色及棕褐色粉砂岩组成, 构成六个次级沉积旋回(图 2a); 往下埋深 5 433.20 m, 发育了岩溶角砾灰岩, 其中, 见有宽为 1.5~2.0 cm, 延长大于 23 cm 的一条构造裂隙, 裂隙中充填了方解石与浸染状黄铁矿, 部分油浸; 后期还有未充填的、宽约 0.1 mm 的二条构造微裂隙(图 2b); 岩溶角砾大小混杂, 粒径以 0.5~1.0 cm 为主, 角砾最大直径为 6 cm, 排列无序, 稍具圆化特征, 砾石成分主要为微晶灰岩与砂屑灰岩, 约占 65%~70%; 胶结物为灰岩及泥岩, 构成基质支撑或局部角砾支撑结构或角砾镶嵌结构(图 2c、d)。角砾岩中有两个较大的方解石晶洞; 其中一个达 5.5 cm(D)×6.0 cm(H), 晶体沿岩芯壁向上斜向生长, 构成介于团块状至放射状过渡的晶簇; 单晶主要为复三方偏三角面体为主, 少数晶体呈粒状, 而在晶洞两侧, 晶体大小不一; 一侧的单晶为 1.0~1.5 cm(H)高; 另一侧为 0.5 cm(H)高, 且以粒状晶体为主。上述差异主要受溶液流动方向及晶芽的发生部位与数量及晶体生长的自由空间等因素有关。另外, 上述晶洞中还存在与垂向取芯方向近平行的方解石脉的穿插, 推测这与上部裂隙(图 2b)为同一裂隙(图 2e、d)。在下部的角砾灰岩中, 还有一稍小的方解石晶洞, 除了充填了方解石外, 还有黄铁矿、褐红色泥质岩(图 2e), 两晶洞下方为缝合线十分发育的泥晶灰岩段, 富含腕足及腹足等生物化石, 一腹足化石大小

达 3 cm×2.5 cm(图 2f)。根据上述岩芯中沉积微相及古生物形态等初步推断, 自下而上, 基本代表了水体变深的海相沉积环境; 而由晶洞、角砾岩、崩塌沉积及网络结构等显著的岩溶作用特征则推断它属于高度大于 2 m 的大型岩溶洞穴沉积。

3 岩溶作用的地球化学表征

3.1 地质地球化学应用依据

根据上述奥陶系灰岩的溶蚀孔缝及裂隙发育状况等特征可以初步划分出: ①成岩早期淡水或大气水—海水混合溶蚀作用; ②地表型(表生期)岩溶作用; ③浅埋藏期溶蚀作用; ④深埋溶蚀作用。下面侧重讨论表生型古岩溶作用。

本区的表生古岩溶作用主要发生于海西早期。在海西早期, 奥陶系灰岩(可能还包括部分志留系)剥露于地表后, 富含 CO_2 、 SO_4^{2-} 的岩溶水沿灰岩的早先裂隙或地表断裂向下渗透, 以早期机械作用(物理)为主、中后期的化学与生物作用为主的溶蚀作用进行水(溶液)—岩反应。古岩溶洞穴的形成大致有以下程式: 物理机械作用→断裂或裂隙(缝)→化学(生物)溶蚀与沉淀→溶孔、洞、洞穴形成→物理机械破碎作用(静压大于围岩顶板抗张强度)与流水作用→崩塌角砾岩带及流水沉积物形成。因此, 在潜水面上方或附近, 往往形成富含大量方解石胶结物、复杂的裂隙带以及崩塌的角砾岩带。在上述界面附近, 由于大气水—岩石交换

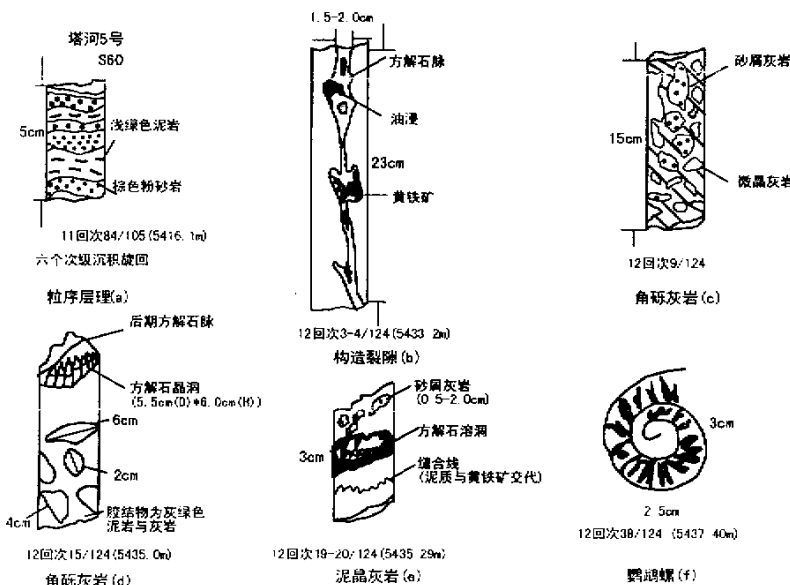


图 2 S60 井的部分岩溶地质剖面

Fig. 2 Parts of schematic section of paleocave carbonate reservoirs in Well S60

反应十分活跃,碳酸盐岩不断遭溶解,其中的易溶的微量元素进入溶液,在达到一定的溶度积后,方解石开始沉淀,微量元素(如 Mg, Sr 等)则在流体与方解石之间进行分配。上述水—岩反应过程中元素分配系数可以通过在不同的 Eh、pH 值及温压条件和溶液介质中的反应动力学实验模拟来获取,也可以利用碳酸盐岩围岩、溶蚀的碳酸盐岩及其胶结物、流体包裹体的化学成分和同位素特征变化等反馈岩石—水相互作用的过程,从而进行岩溶作用期次与强度、渗流与潜流带的划分等项研究。

深埋藏岩溶作用与地表岩溶作用明显不同,它有渗透性较差的上覆隔挡层,且基本以封闭体系中的化学和生物溶蚀作用为主,规模有限,主要与烃源岩成熟时产生的有机酸还原菌和甲烷作用有关,往往在油气注入储层后才发挥效用,它既对碳酸盐岩也对碎屑岩

产生溶蚀作用。如在轮南的 LN20、LN3、S18、S32 三叠系储层方解石胶结物中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -10.0\text{‰} \sim -17.0\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -5.0\text{‰} \sim -15.0\text{‰}$,这反映了生物有机酸参与的成岩过程。

3.2 古岩溶作用强度

从取自岩溶角砾岩中的晶洞中的方解石(晶洞大小 $5.5\text{ cm}(D) \times 6.0\text{ cm}(H)$ (图 2d), M5(埋深为 5 435 m))及微晶灰岩中的较大的溶孔中的方解石(溶孔大小 $3.0\text{ cm}(L) \times 1.5\text{ cm}(W)$, M4(埋深为 5 519 m))的化学分析表明:两者之间的常量与微量元素含量十分相似,相关系数分别为 0.999 9 与 0.994 1(表 1),这表明它们是在同一水(流体)—岩石作用环境下形成的,因而可判断属于同一期岩溶作用产物,而据两样品相对埋深差 84 m 来推断,表生溶蚀作用的深度可能超过古风化剥蚀面下 100 m。

表 1 方解石成分分析(常量元素单位 $\text{W(B)} \times 10^{-2}$,微量元素单位 $\text{W(B)} \times 10^{-6}$)

Table 1 Chemical composition of calcites

样号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	Cl ⁻	Ga
M4	4.50	0.10	0.13	1.08		51.07	0.52	0.17	0.10	0.03	0.03
M5	3.90	0.10	0.08	0.85	52.10	0.31	0.10	0.10	0.02	0.01	0.30
样号	Sr	Bi	F	Br	B	Ba	Zn	Ni	Cr	V	Cu
M4	135	0.10	108	5.4	7.0	107	19.0	3.4	7.5	10.0	53.1
M5	122	0.10	98.2	4.0	7.0	116	15.2	2.3	7.5	10.0	53.4

检测单位:国土资源部新疆维吾尔自治区中心实验室,分析批号:99Y1200;1999-11-03

表 2 方解石成分的电子探针分析(Wt%)(据林忠民^①,取其平均值)

Table 2 Chemical composition of calcites analysed by Electron microprobe(EMP)

井号	井深/m	MgO	SrO	FeO	Na ₂ O	井号	井深/m	MgO	SrO	FeO	Na ₂ O
T301	5399.0	0.149	0.000	0.000	0.007	S47	5461.0	0.215	0.029	0.057	0.014
	5476.0	0.092	0.043	0.039	0.006		5468.0	0.247	0.044	0.024	0.016
S47	5447.5	0.160	0.000	0.057	0.021		5447.9	0.135	0.043	0.032	0.014

3.3 成岩与古岩溶序列的化学判断

与塔河三号的 S47、T301 的潜流岩溶带的方解石成分相比(表 2),S60 方解石中的镁、锶、铁及钠元素含量均要高,这可能表明后者的侧向缓慢生长,存在淡水与海水的混合,同时也反映它所在的上部岩溶旋回发生的时期要早。

3.4 古岩溶作用强度的辅助判断

将反映的淡水—海水渗滤混合成因的方解石与位于相同带中碳酸盐岩(如 S61 井的 M10)进行岩石化学分析对比表明:两者在 Cu、V、Cr、Ni、Zn、B、Bi、Ga 含量上有惊人的相似性(表 2、3,图 3);而在与成岩深度、介质古盐度、泥质含量等相关因素的 Sr、F、Br、Ba

上则存在较大的差异。一方面,不同元素在淡水—海水渗滤带具有不同的地球化学行为;另一方面,也反映大气渗水带的水(溶液)—岩反应使原岩成分发生带入与带出的改变。而处于相同带中的泥灰岩(S60 井的 M7)受影响程度较小(表 3)。因此,岩溶强度与碳酸盐岩的成分及其渗透性有关。

3.5 方解石晶体的微形貌

塔河 1 号中的 M5 方解石基本呈复三方偏三角面体、少量等粒状,晶簇沿洞壁向上生长(图 2c)。这种生长环境既可在渗流带也可在潜流带,主要出现于过饱和溶液的自由面上,一般在成岩的中晚期。古岩溶的成因矿物学研究表明:古洞穴往往以短纤维状或长

表 3 碳酸盐岩中成分分析(常量元素单位 $W(B) \times 10^{-2}$, 微量元素单位 $W(B) \times 10^{-6}$)

Table 3 Chemical composition of carbonates

样号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	Cl ⁻	Ga
S60-M7	48.01	4.27	2.45	12.39	11.36	5.25	3.34	1.25	0.11	0.11	25.62
S64-M9	14.97	0.69	0.53	3.59	39.53	1.21	1.11	0.22	0.04	0.05	8.02
S61-M10	7.86	0.10	0.10	1.77	47.14	0.46	0.41	0.10	0.03	0.03	1.62
样号	Sr	Bi	F	Br	B	Ba	Zn	Ni	Cr	V	Cu
S60-M7	248	0.12	634	2.4	62.4	479	59.9	23.1	48.7	71.8	29.0
S64-M9	187	0.10	223	0.6	8.2	190	28.3	7.5	9.5	15.7	48.6
S61-M10	194	0.10	177	2.8	7.2	306	19.0	4.3	7.5	10.0	56.2

检测单位: 国土资源部新疆维吾尔自治区中心实验室, 分析批号: 99Y1200; 1999-11-03

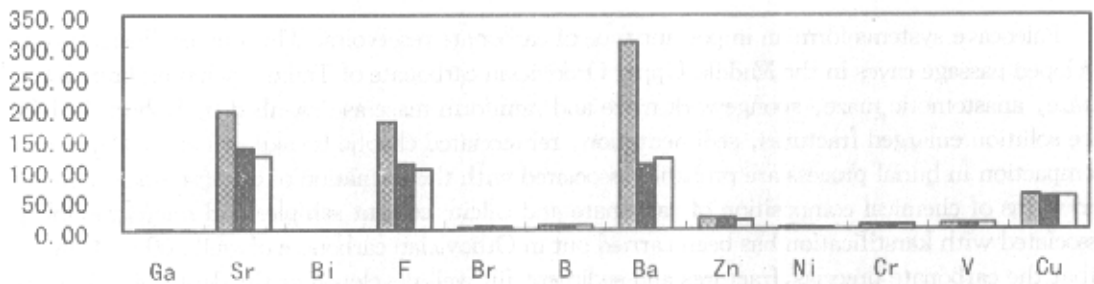


图 3 方解石与碳酸盐岩中的微量元素含量对比图解(从左至右分别为 M10、M4 和 M5)

Fig. 3 Comparative diagram of chemical composition between calcites and carbonate

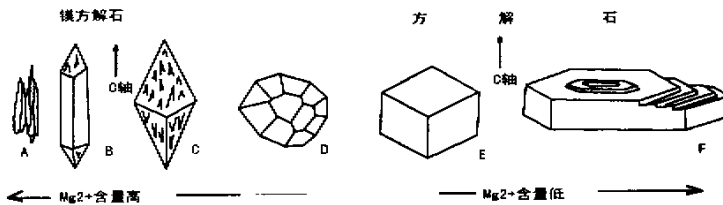


图 4 方解石的晶体习性受 Mg/Ca 比值的控制(据 Folk^[3], 1974)

Fig. 4 The diagram shows crystal habit of calcite being controlled by the ratio of Mg/Ca in solution

条方头晶体, 而放射状粗晶是渗流胶结物的特殊标志; 方解石的晶体习性主要受溶液中的 Mg/Ca 比值^[3]等因素制约(图 4)。

4 结论

研究认为, 塔河 1 号 S60 井埋深为 5 433. 20 ~ 5 435 m 发育的角砾灰岩, 属于高度大于 2 m 的大型岩溶洞穴沉积, 而埋深为 5 435 m 晶洞中的方解石是地表岩溶早中期的淡水与海水的混合带的产物。

根据碳酸盐岩围岩、岩溶改造碳酸盐岩及方解石胶结物的化学成分对比可用于推断岩溶作用强度及深度, 并可为成岩序列与环境的恢复提供定量的化学判别指标。在岩溶作用中, 碳酸盐岩中 CaO、Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃、Ba 和 Mn 的含量主要与沉积环境或原岩岩性有关, 而 SiO₂、MgO、Sr 和 Na 含量主要与成岩作

用有关。

碳酸盐岩岩石学、矿物学和地球化学的研究可以深化了成岩过程的认识; 与裂隙(断裂) 运动学与动力学、岩石学结构、流体包裹体、碳与氧同位素特征分析以及水(溶液)—岩石的反应动力学实验模拟等方法相结合, 必将大大加深对岩溶地质过程的认识, 从而为进行碳酸盐岩储层空间展布及非均质等预测奠定坚实的地质基础。

参 考 文 献

- 1 陈洪德, 张锦泉, 叶德胜等. 新疆塔里木盆地北部古岩溶储集体特征及控油作用 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 27~77
- 2 Robert G. l. Paleocave carbonate reservoirs: Origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG, 1999, 83(99):1795~1831
- 3 M. W. 朗曼. 碳酸盐岩成岩作用控制的地层圈闭 [M]. 北京: 石油工

业出版社,1990.39-78

成都 成都科技大学出版社,1990.1-50

4 成都地质学院,长庆勘探开发研究院译编.古岩溶与油气储层[M].

Element Geochemical Implications for Carbonate Karstification Interpretation ——Taking Well S60 in Taihe as an example

QIAN Yi-xiong¹ CAI Li-guo¹ LI Guo-rong²

LIU Guang-xiang¹ HAN Yan-ying³

1 (Research Institute Of Experimental Geology, CNSPC, Box916, Wuxi Jiangsu 214151)

2 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

3 Institute of North-West Bureau, CNSPC, Urumqi 830011)

Abstract Paleocave systems form an important type of carbonate reservoirs. The studies illustrates that there are widely developed passage caves in the Middle-Upper Ordovician carbonate of Taihe, including branchwork passage, network maze, anastomotic maze, spongework maze and ramiform maze as described by Robert. G. I (1999), and near-surface solution enlarged fractures, sedimentation, rebrecciated chaotic breakdown and collapse as well as mechanical compaction in burial process are probably associated with the formation of collapsed-paleocave system. The approach in terms of chemical composition of carbonate and calcite cement samples and micrographology of calcite crystals associated with karstification has been carried out in Ordovician carbonate of well S60 in Taihe. The results indicates that the carbonate breccias, fractures and sediment fill well developed at the depth of 5 433.20 m~5 435 m belonging to a large-scale paleocave system sedimentation with more than 2 m in height; while the calcites grown in caves at the depth of 5 435m are the products of mixed zone of hypergen fresh water and seawater at the early-middle stage of near-surface karst terrain. Moreover, The author believe that the mineralogic and geochemical studies on carbonate karst process have an important implication for the uncovering the effective depth, periods and intensity of epigenic karst process as well as diagenetic sequence and sedimentary environment.

Key words calcite, element geochemistry, micrographology, karstification, Taihe