

高兆龙, 谈永, 张玺华, 等. 四川盆地不同地区二叠系茅口组缝洞粗晶方解石碳氧同位素差异及其古岩溶环境意义[J]. 中国岩溶, 2024, 43(3): 684-693.

DOI: 10.11932/karst20240309

四川盆地不同地区二叠系茅口组缝洞粗晶方解石碳氧同位素差异及其古岩溶环境意义

高兆龙¹, 谈永^{2,3}, 张玺华¹, 曹华¹, 邓敏^{2,3}, 陈聪¹, 胡罗嘉¹

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610081; 3. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 茅口组缝洞型储层是四川盆地重要的天然气产层。为认识这些缝洞的形成环境以及在盆地不同地区的差异, 通过测试和收集缝洞方解石碳氧同位素数据, 发现茅口组方解石碳氧同位素可分为4类, 分别指示4种不同流体性质的古岩溶环境: 第Ⅰ类缝洞方解石氧同位素值与茅口组灰岩或中二叠海水值基本一致, $\delta^{13}\text{C}$ 为 1.8‰~3.83‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.95‰~-4.11‰, 指示准同生岩溶环境; 第Ⅱ类缝洞方解石具有较高负偏的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值, $\delta^{13}\text{C}$ 为 -12‰~-9‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -12‰~-9‰, 指示大气淡水岩溶环境; 第Ⅲ类缝洞方解石具有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 比基岩明显负偏, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值与基岩值基本一致, $\delta^{13}\text{C}$ 为 0‰~3.83‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -12‰~-8.5‰, 主要指示埋藏岩溶环境; 第Ⅳ类缝洞方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负 (<-12 ‰), 指示高温热液环境。区域对比发现川中、川南较川北氧同位素更负偏, 而川北、川中碳同位素较川南更负偏, 认为川南地区以埋藏岩溶为主、大气淡水岩溶和准同生岩溶次之, 形成以裂缝型为主的储层; 川中地区除准同生岩溶、大气淡水岩溶外, 还发育有高温热液岩溶, 热液岩溶对川中茅口组白云岩中孔洞发育具有贡献; 川北地区以准同生岩溶、大气淡水岩溶为主, 形成了川北以溶蚀孔洞为主的储层。

关键词: 四川盆地茅口组; 碳氧同位素; 古岩溶作用; 岩溶储层; 热液岩溶

创新点: 利用四川盆地不同地区方解石碳氧同位素数据, 创新开展不同地区茅口组岩溶类型对比, 提出不同地区孔洞缝受控岩溶类型并不一致, 在不同地区茅口组储层成因及预测中需考虑此因素。

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2024) 03-0684-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

中国岩溶储层型油气田分布广泛, 在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地相继发现了一批岩溶

缝洞型碳酸盐岩油气藏, 使岩溶缝洞型碳酸盐岩储层的研究成为近年来的焦点之一, 这预示着中国碳酸盐岩岩溶型储层具有良好的勘探前景和巨大的勘探潜力^[1-9]。茅口组缝洞型储层一直是四川盆地油气

资助项目: 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项《海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究》(2023ZZ16)子课题《碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究》, 中国石油西南油气田公司科学研究与技术开发项目《四川盆地二叠系规模增储关键问题攻关研究》子课题《四川盆地二叠统资源潜力与成藏条件研究》(20220301-03), 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室开放基金资助项目(DGERA20231108)共同资助

第一作者简介: 高兆龙(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气田勘探工作。

通信作者: 谈永(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事沉积地质及古岩溶油气储层地质研究工作。E-mail: dy920@qq.com。

收稿日期: 2023-11-22

勘探的重点领域之一,继 20 世纪在蜀南地区发现缝洞型储层以来,近年又在川北元坝地区、川南云锦地区、川中蓬莱坝地区取得突破,展现了良好的勘探前景^[10-13]。对于缝洞的成因一直存在争议,一种观点认为东吴运动导致茅口组暴露,发生的表生期大气淡水岩溶是茅口组缝洞发育的主要原因^[14-17],而另一种观点认为茅口组缝洞与埋藏期构造—流体活动有关^[18-20]。但对于上述观点多基于蜀南地区的研究,需要进一步从整个四川盆地考虑,从地质现象到地球化学多方面寻找相关证据。

碳氧同位素是分析古环境、古气候的有效手段^[21-22]。利用缝洞中充填方解石进行碳氧同位素分析能有效对古岩溶环境或流体性质进行判断^[23]。方解石是后期流体对母岩改造后沉淀形成的,由于溶蚀流体性质、温压条件等溶蚀环境不同,从其中沉淀下来的方解石碳、氧同位素有不同的丰度特征,且具有后期蚀变小和良好的区域可对比性,因而分析碳、氧同位素的丰度特征成为研究和恢复岩溶古环境的良好技术手段^[24]。

由此,本文针对茅口组缝洞成因具有争议的问题,通过在四川盆地不同地区钻井进行系统取样,测试缝洞方解石碳氧同位素值,并在收集前期相关数据基础上,进行不同地区的比较,为判断不同地区茅

口组缝洞形成的古流体性质、溶蚀环境以及地区差异提供有关的地球化学信息,从而促进四川盆地茅口组缝洞储层成因机理的研究,以期为茅口组储层预测提供依据、指导油气勘探。

1 地质背景

四川盆地位于上扬子地台西北缘,根据现今盆地内的构造分布样式,可将四川盆地划分 6 个次一级构造区,为川北低缓带、川西低隆褶带、川中平缓带、川西南低陡褶带、川东高陡褶带和川南低陡褶带六个次一级构造单元(图 1)^[25]。茅口组可分为 4 段,茅口组沉积早期四川盆地遭受大规模海侵,受此影响茅一段沉积时期海平面上升,为碳酸盐岩缓坡沉积,以发育眼球—眼皮状生物灰岩为典型特征;茅口组沉积中晚期(茅二至茅三段沉积期)海平面逐渐下降,逐渐过渡为台地沉积,发育高能滩相沉积,岩性以生物碎屑灰岩、砂屑灰岩为主;茅口组沉积晚期(茅四段沉积期)海平面再次上升,以深灰色泥晶灰岩,泥质灰岩为主,受后期构造、古岩溶等影响,茅四段仅在川西南地区保存较好,川东—川南地区沉积厚度较薄甚至缺失^[25-26](图 1)。茅口组沉积后,由于东吴运动的影响,海水从东和西两个方向退出盆

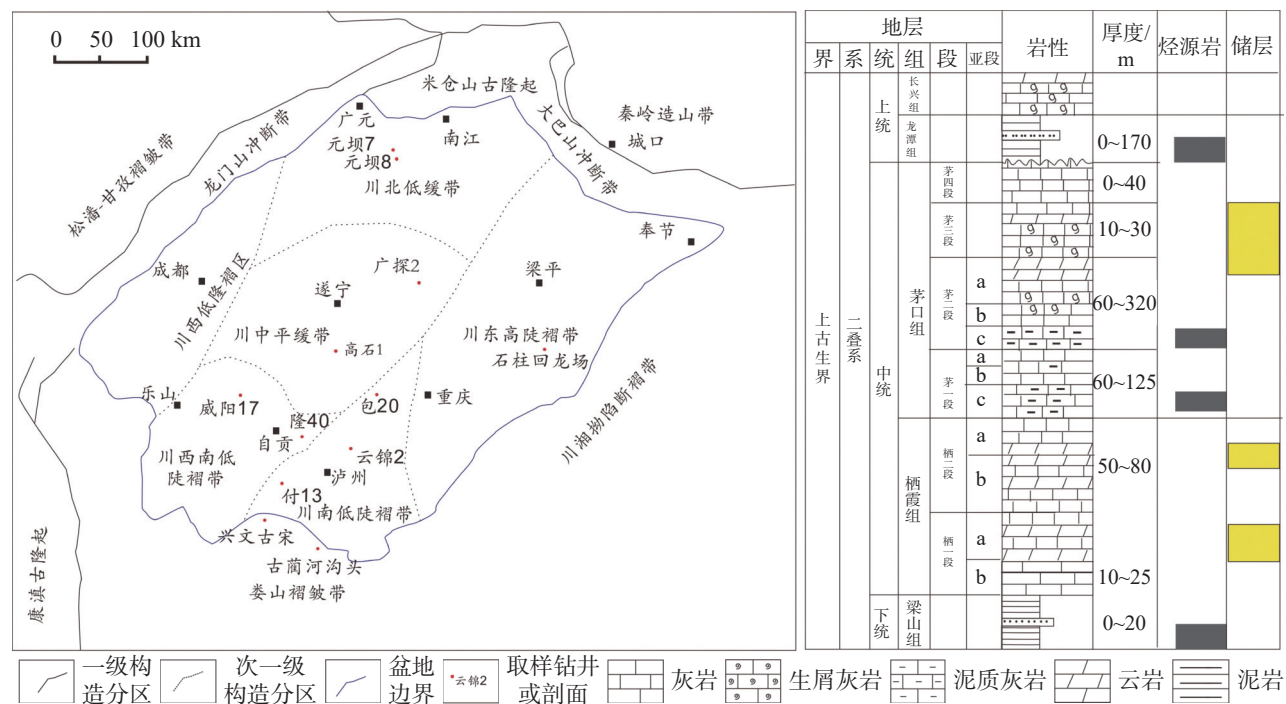


图 1 四川盆地构造分区及二叠系茅口组取样井分布(据^[26] 有修改)

Fig. 1 Structural zoning and distribution of sampling wells in the Permian Maokou Formation of the Sichuan Basin

地,使四川盆地大部分地区露出水面并遭受剥蚀,造成了中、晚二叠统之间的沉积间断,地层大范围缺失。根据研究^[14,18]茅口组暴露时间为 7~8 Ma,之后进入埋藏期,盆地内茅口组至今处于埋藏环境。

2 茅口组缝洞方解石发育特征

相比塔里木盆地奥陶系较大的缝洞空间(钻井



图 2 四川盆地茅口组粗晶方解石发育特征

a. 溶缝中方解石和沥青充填,茅四段 3 949.06~3 949.16 m,高石 1; b. 构造网裂缝极发育,泥质和方解石充填,茅三段 1 683.06~1 683.18 m,威阳 17 井; c. 构造高角度缝充填方解石,茅二 b,隆 40; d. 扩溶缝,方解石全充填,茅二 b,3 652.16~3 652.44 m,包 20; e. 扩溶缝,方解石晶体充填,茅二 b,3 630.56~3 630.73 m,包 20; f. 溶蚀孔洞,方解石晶体半充填,茅三,元坝 8; g. 溶蚀孔洞,方解石半充填,茅二 a,1 722.75~1 723.09 m,威阳 17 井; h. 溶洞,方解石半充填,茅二 b 3 652.75~3 652.84 m,包 20; i. 不整合面下发育溶洞,方解石充填,茅三,兴文古宋; j. 亮晶砂屑灰岩中发育溶蚀孔洞,方解石全充填,茅二 a,古蔺河沟头; k. 白云岩内密集发育孔洞,5~8 个·m⁻¹,方解石充填,茅二 b,重庆石柱回龙场

Fig. 2 Development characteristics of coarse-grained calcite in the Maokou Formation of the Sichuan Basin

a. dissolution joints filled with calcite and bitumen, Mao Section 4, 3949.06~3949.16 m, Gaoshi 1; b. extensive development of structural network fractures filled with mudstone and calcite, Mao Section 3, 1,683.06~1,683.18 m, Weiyang Well 17; c. high-angle structural joints filled with calcite, Mao Section 2b, uplift 40; d. widened dissolution joints fully filled with calcite, Mao Section 2b, 3,652.16~3,652.44 m, Bao 20; e. widened dissolution joints partially filled with calcite crystals, Mao Section 2b, 3,630.56~3,630.73 m, Bao 20; f. dissolution pores semi-filled with calcite crystals, Mao Section 3, Yuanba 8; g. dissolution pores semi-filled with calcite, Mao Section 2a, 1,722.75~1,723.09 m, Weiyang Well 17; h. a doline semi-filled with calcite, Mao Section 2b, 3,652.75~3,652.84 m, Bao 20; i. dissolution caves developed below unconformity surfaces, filled with calcite, Mao Section 3, Xingwengusong; j. dissolution pores developed in lustrous sand-grain limestone, fully filled with calcite, Mao Section 2a, Gulinhegoutou; k. calcite-filled pores densely developed in dolomite, 5~8 per m⁻¹, Mao Section 2b, Shizhuhuilongchang of Chongqing

可放空几米到几十米),茅口组缝洞整体发育规模不大,一般以厘米级为主,很少至米级^[7]。通过在野外以及井下岩芯观察,粗晶方解石主要发育在溶蚀孔洞、溶缝以及构造裂缝中,即茅口组缝洞型储层的主要储集空间内均可发育方解石(图 2)。根据观察发育方解石的溶蚀孔洞又可分为以下 4 类:与不整合面相关的不规则溶洞(15~30 cm)(图 2i)、发育于高能滩上近圆形溶蚀孔洞(5~10 cm)(图 2f,图 2g,图 2j)、发育于白云岩中近圆形密集孔洞(5~10 cm)(图 2k)、与溶缝相关的不规则溶蚀孔洞(图 2h)。发育方解石的构造裂缝一般缝面平直(图 2b,图 2c),而经历过溶蚀作用的构造缝为溶缝,缝面一般弯曲,具有明显扩溶(图 2a,图 2d,图 2e),部分缝段扩溶为溶洞,形成缝洞体(图 2h)。根据岩芯观察,川北、川中、川南溶缝及相关溶蚀孔洞充填方解石井下较发育,而密集发育的溶蚀孔洞方解石主要在野外剖面中常见。缝洞伴生充填物方面,一般缝洞为方解石全充填,但也有少数是方解石与沥青,甚至黏土物质一同充填于缝洞中(图 2a,图 2b)。

3 样品采集和测试

样品采集于茅口组不整合面及其下 300 m 以内缝洞空间中充填的粗晶方解石,研究所选取粗晶方解石均大于 5 mm。根据样品的产出地层、产出位置,将缝洞充填方解石样品分为 3 类,包括茅口组溶蚀孔、洞方解石,溶缝中方解石,构造裂缝充填方解石。此外,为便于对比分析,对孔洞附近灰岩进行取样。以上样品来自川中高石 1、川南威阳 17、隆 40、包 20、付 13 钻井岩芯以及兴文古宋、重庆石柱等剖面,共 51 件样品(图 1)。

碳和氧同位素分析方法是取 30~50 mg 方解石样品与 100% 磷酸在 25 ℃ 室温真空中反应,从方解

石中分离 CO₂。再用美国菲尼根质谱公司 MAT251 质谱仪分析 CO₂ 的碳和氧同位素,所有结果采用 PDB 标准。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测量精度为 $\pm 0.1\text{‰}$,碳氧同位素测试在自然资源部岩溶地质资源环境监督检查中心完成。

为开展区域对比,收集前人川北元坝地区茅口组方解石同位素数据 14 件^[27],川中广探 2 井 8 件^[28]以及川南云锦地区 41 件方解石同位素数据^[12]、川东南水江野外剖面数据 15 件^[29](图 1),结合本次测试数据,共计 129 件。

4 不同地区缝洞方解石碳氧同位素特征

结合前人在水江剖面^[29]和本次钻井采集灰岩所做的同位素样品分析,茅口组灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 在 1.5‰~4.8‰之间变化,平均值为 3.82‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在-4.7‰~-11.4‰之间变化,平均值为-7.28‰(表 1)。大部分样品与 Veizer 等^[30]获得的二叠系腕足类化石碳氧同位素组成的变化范围一致, Veizer 等得出 $\delta^{13}\text{C}$ 在 2.5‰~5.5‰间波动,而 $\delta^{18}\text{O}$ 在 0‰~-10‰之间变化,均属于海相碳酸盐岩沉积(腕足类生物化石同位素可代表原始海水沉积时的同位素组成),少部分灰岩样品偏离,一般与成岩作用有关。

茅口组缝洞充填方解石碳氧同位素总体上比茅口组灰岩偏负(表 1),但不同区碳氧同位素值具有一定差异,川北地区缝洞方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在-2.1‰~4.71‰之间变化,平均值为 1.41‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在-9.61‰~-4.39‰之间变化,平均值为-7.08‰;川中地区缝洞方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在-2.3‰~3.0‰之间变化,平均值为 0.87‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在-13.91‰~-6.8‰之间变化,平均值为-9.97‰;川南地区缝洞方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在-1.21‰~4.9‰之间变化,平均值为 2.96‰, $\delta^{18}\text{O}$ 在-11.83‰~-5.84‰之间变化,平均值为-9.41‰。整体上,川中、川南较川北氧同

表 1 四川盆地不同地区茅口组缝洞方解石碳氧同位素测试结果统计
Table 1 Test results of carbon and oxygen isotopes of calcite from the Maokou Formation in different regions of the Sichuan Basin

样品类型	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{V-PDB})}/\text{‰}$			$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-PDB})}/\text{‰}$			样品数量
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	
川北缝洞方解石	-2.10	4.71	1.41	-9.61	-4.39	-7.08	21
川中缝洞方解石	-2.30	3.00	0.87	-13.91	-6.80	-9.97	10
川南缝洞方解石	-1.21	4.90	2.96	-11.83	-5.84	-9.41	71
茅口组灰岩基岩	1.50	4.80	3.82	-11.40	-4.70	-7.28	27
中二叠世海水 ^[30]	2.50	5.50	/	-10.00	0	/	/

表 2 四川盆地不同产出状态方解石碳氧同位素测试结果统计

Table 2 Test results of carbon and oxygen isotopes of calcite from different fractured caves of the Sichuan Basin

样品产出状态	$\delta^{13}\text{C}_{(\text{V-PDB})}/\text{‰}$			$\delta^{18}\text{O}_{(\text{V-PDB})}/\text{‰}$			样品数量
	最小	最大	平均	最小	最大	平均	
构造裂缝方解石	-0.11	4.70	3.07	-11.28	-5.84	-9.25	56
溶缝方解石	-2.30	4.13	2.03	-11.83	-7.93	-9.97	12
溶蚀孔洞方解石	-2.13	4.71	1.54	-13.91	-4.39	-8.23	34
茅口组灰岩基岩	1.50	4.80	3.82	-11.40	-4.70	-7.28	27
中二叠世海水 ^[30]	2.50	5.50	/	-10.00	0	/	/

位素更负偏,而川北、川中碳同位素较川南更负偏。

根据方解石产出状态,构造裂缝方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-0.11\text{‰}\sim 4.7\text{‰}$ 之间变化,平均值为 3.07‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-11.28\text{‰}\sim -5.84\text{‰}$ 之间变化,平均值为 -9.25‰ ;溶缝方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-2.3\text{‰}\sim 4.13\text{‰}$ 之间变化,平均值为 2.03‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-11.83\text{‰}\sim -7.93\text{‰}$ 之间变化,平均值为 -9.97‰ ;溶蚀孔洞方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-2.13\text{‰}\sim 4.71\text{‰}$ 之间变化,平均值为 1.54‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-13.91\text{‰}\sim -4.39\text{‰}$ 之间变化,平均值为 -8.23‰ (表 2)。整体上溶蚀孔洞方解石氧同位素具有最大负偏,溶缝、溶蚀孔洞方解石碳同位素具有最大负偏。

5 讨 论

5.1 茅口组缝洞方解石碳、氧同位素负偏原因

碳酸盐岩缝洞中的沉淀方解石是后期岩溶流体对母岩改造后沉淀形成的,由于岩溶流体性质、温压条件等溶蚀环境不同,从其中沉淀下来的方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值也不同,可用其指示不同古岩溶环境,但整体上岩溶缝洞方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 比灰岩值负偏^[31-34]。

$\delta^{18}\text{O}$ 值为负值,既可以为低温淡水成因,也可以为高温盆地流体或热液流体形成^[31-33],其主要是由于方解石氧同位素值受成岩环境及后期成岩温度的影响。首先,在大气淡水低温环境中,大气淡水富集较轻的 ^{16}O ,当大气淡水在陆地降落后致使地表淡水 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负,因此在大气淡水中生长的方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的负偏特征。其次,氧同位素成岩过程中对温度敏感,当温度上升后 ^{16}O 活跃,易于进入方解石中,使得 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负^[31-33]。根据成矿温度计算公式: $1000 \ln \alpha = 2.78 \times 10^6 / T^2 - 2.89$ (α 为氧同位素分馏系数, T 为温度)计算四川盆地茅口组方解石成矿温

度^[35],认为 $\delta^{18}\text{O}$ 负偏小于 -12‰ 的方解石不可能是 $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淡水环境下沉淀的,很可能来自深埋藏条件下深部高温流体。

$\delta^{13}\text{C}$ 值与环境中盐度、后期成岩作用过程中有机质的氧化作用有关。首先,取决于介质水中 ^{13}C 的来源,即与盐度有关。Schopf 总结出如下特征^[36]:如果 $\delta^{13}\text{C}$ 来自淡水,那么此环境中沉积的淡水碳酸盐沉积物的 $\delta^{13}\text{C}$ 多介于 $-5\sim -15$ 之间;如果来自海相灰岩,则 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 $-5\sim +5$ 之间。一般淡水方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 较海水方解石中 ^{13}C 偏负。因而来源环境不同, $\delta^{13}\text{C}$ 值就差别较大。其次,后期成岩作用过程中有机质的氧化作用所产生的有机碳对其影响较大,成岩作用本身温压对其反而影响较弱。受表层有机质氧化形成 CH_4 或深部石油裂解形成 CH_4 ,常使得 $\delta^{13}\text{C}$ 为较高负值^[37]。

5.2 茅口组缝洞溶蚀形成古环境判断

对古岩溶环境的详细判断,主要依据不同环境中沉淀方解石碳氧同位素具有差异,然后利用碳氧同位素交汇图版来分区判断(图 3)。根据碳氧同位素值分布,划分 4 类不同碳氧同位值的方解石,指示出 4 类不同的古岩溶环境(表 3)。

第 I 类缝洞方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围与茅口组灰岩背景值区域相同,但 $\delta^{13}\text{C}$ 变化较大, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-8.95\text{‰}\sim -4.11\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $1.80\text{‰}\sim 3.83\text{‰}$,说明该岩溶环境与碳酸盐岩沉积环境类似,反映准同生期碳酸盐岩沉积不久后短暂的暴露岩溶,指示出准同生期岩溶环境。

第 II 类缝洞方解石具有较高负偏的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, $\delta^{18}\text{O}$ 也具有中到高的负偏值, $\delta^{13}\text{C} < 0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-12.00\text{‰}\sim -9.00\text{‰}$ (表 3,图 3); $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均具有比基岩更高负偏,指示出大气淡水岩溶环境。

第 III 类缝洞方解石具有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,比基岩明显负偏,而 $\delta^{13}\text{C}$ 值与基岩值基本一致,未有明显负

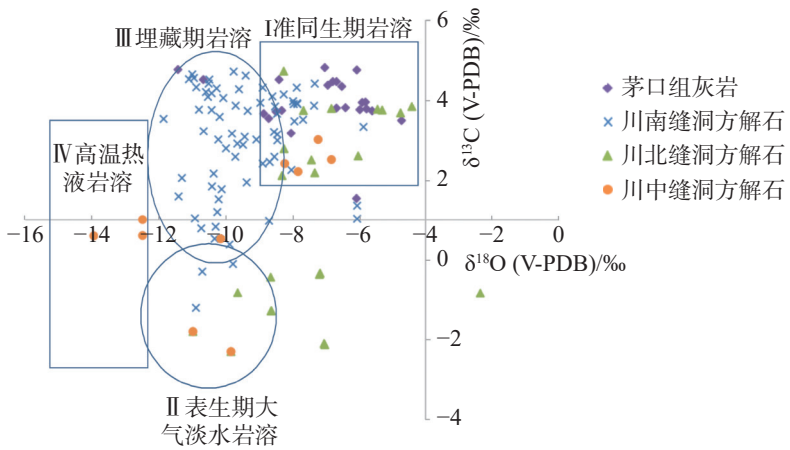


图 3 四川盆地不同地区茅口组缝洞方解石碳氧同位素交汇图

Fig. 3 Intersection of carbon and oxygen isotopes of calcite from the Maokou Formation in different regions of the Sichuan Basin

表 3 四川盆地茅口组缝洞方解石同位素特征判别形成环境

Table 3 Environment identified by calcite isotope characteristics in the Maokou Formation of the Sichuan Basin

发育期次	形成环境	同位素特征	
		$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})/\text{‰}$
I	准同生期岩溶环境	1.80~3.83	-8.95~-4.11
II	表生期大气淡水岩溶环境	<0	-12.00~-9.00
III	埋藏期岩溶环境	0~3.83	-12.00~-8.50
IV	高温热液岩溶环境	/	<12.00

偏, $\delta^{13}\text{C}$ 为 0~3.83‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -12.00‰~-8.50‰, 主要出指示埋藏期岩溶环境。封闭埋藏环境条件下, 方解石沉淀物 ^{13}C 的来源主要是碳酸盐岩围岩, 因此方解石沉淀物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与基岩相当, 而氧同位素对温度敏感, 当埋藏温度上升后 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负。研究区绝大部分缝洞方解石(无论溶孔, 还是构造缝方解石)同位素值落入该区, 反映出漫长的埋藏成岩期是方解石沉淀的主要时期。

第Ⅳ类缝洞方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负 ($<-12\text{‰}$), 指示出高温热液岩溶环境。依据 5.1 节计算, $\delta^{18}\text{O}<-12.0\text{‰}$ 不可能为低温大气淡水中形成, 而可能反映方解石的形成与热液作用相关, 但相关样品主要集中在川中地区广探 2 井白云岩溶蚀孔洞中, 反映该类方解石沉淀仅在局部发育, 不具有普遍性, 且其发育可能与高孔渗的白云岩发育有关。

5.3 不同地区茅口组缝洞方解石成因差异

由图 3 可知, 川南缝洞方解石碳氧同位素主要属于Ⅲ类, 反映方解石主要在埋藏期岩溶环境下形成, 其次为Ⅰ类准同生期岩溶环境, 也有少数几个点在Ⅱ类表生大气淡水岩溶环境中形成, 这表明川南

地区经历了准同生期岩溶、大气淡水岩溶及埋藏期岩溶, 未发现高温热液岩溶。川中地区缝洞方解石碳氧同位素交汇点分布较分散, 但主要属于Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ类, 反映川中地区除准同生期岩溶、大气淡水岩溶外, 还发育高温热液岩溶, 而埋藏期岩溶较少, 可能与该区构造较川南弱, 构造裂缝发育较少有关。川北地区缝洞方解石碳氧同位素交汇点分布主要集中在Ⅰ、Ⅱ类, 反映川北地区以准同生期岩溶、大气淡水岩溶为主, 高温热液岩溶和埋藏期岩溶较少。

图 3 川南缝洞方解石碳氧同位素主要属于Ⅲ类, 在此基础上图 4 进一步按方解石按产出状态投点显示在Ⅲ类区以裂缝、溶缝的方解石为主, 反映埋藏期构造产生裂缝是川南的主要储层, 而方解石的充填可能是裂缝产生后下伏地层流体进入裂缝, 与缝周围碳酸盐岩发生溶蚀反应, 当构造活动停止, 下伏流体不再进入裂缝, 原裂缝中流体碳酸盐岩就很快达到饱和, 方解石缓慢生长。图 4 显示溶蚀孔洞方解石主要发育在准同生期、表生期和高温热液岩溶环境。依据孔洞方解石样品来源, 发现川中与白云岩相关的溶蚀孔洞方解石主要与准同生期和高温热液岩溶有关, 川南不整合面以下溶洞方解石以及与泥混合充填的溶

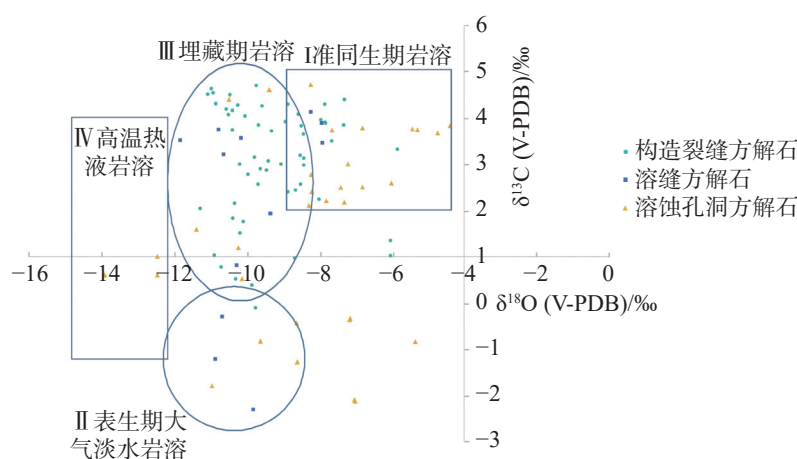


图4 四川盆地茅口组不同产出状态方解石碳氧同位素交汇图

Fig. 4 Intersection of carbon and oxygen isotopes of calcite from different fractured caves in the Maokou Formation of the Sichuan Basin

缝方解石落入Ⅱ区,反映了大气淡水岩溶特征。

6 结 论

(1)四川盆地茅口组缝洞以中小型溶蚀孔洞、裂缝、溶缝为主,方解石形成环境主要为:Ⅰ类准同生期岩溶环境;Ⅱ类表生期大气淡水岩溶环境;Ⅲ类埋藏期岩溶环境;Ⅳ类高温热液岩溶环境,并确定了判别这些环境的碳氧同位素分布范围。

(2)四川盆地不同地区方解石形成环境具有差异:川中、川南较川北氧同位素更负偏,而川北、川中碳同位素较川南更负偏;川南地区方解石碳氧同位素分布在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类,指示该区以埋藏期岩溶为主、表生期大气淡水岩溶和准同生期岩溶次之,其中埋藏期形成裂缝、溶缝是主要储层,表生期大气淡水溶蚀孔洞次之;川中地区方解石碳氧同位素属于Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ类,指示川中地区除准同生期岩溶、表生期大气淡水岩溶外,还发育高温热液岩溶,热液岩溶对川中白云岩孔洞发育具有贡献;川北地区方解石碳氧同位素属于Ⅰ、Ⅱ类,反映川北地区准同生期岩溶、表生期大气淡水岩溶形成了溶蚀孔洞储层。

参考文献

- [1] 陈学时,易万霞,卢文忠.中国油气田古岩溶与油气储层[J].*沉积学报*,2004,22(2):244-254.
CHEN Xueshi, YI Wanxia, LU Wenzhong. The palaeokarst reservoirs of oil/gas fields in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 244-254.
- [2] 贾疏源.中国岩溶缝洞系统油气储层特征及其勘探前景[J].*特种油气藏*,1997,4(4):1-5,9

- JIA Shuyuan. Characteristics and exploration potential of hydrocarbon reservoirs of karst slot and cave system in China[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 1997, 4(4): 1-5, 9
- [3] 贾振远,蔡忠贤.碳酸盐岩古风化壳储集层(体)研究[J].*地质科技情报*,2004,23(4):94-104.
JIA Zhenyuan, CAI Zhongxian. Carbonate paleo-weathered crust reservoirs (body)[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 94-104.
- [4] 王招明,张丽娟,孙崇浩.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩溶分类、期次及勘探思路[J].*古地理学报*,2015,17(5):635-644.
WANG Zhaoming, ZHANG Lijuan, SUN Chonghao. Classification, period and exploration for carbonate karst in the Ordovician, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2015, 17(5): 635-644.
- [5] 夏日元,唐建生,邹胜章,梁彬,金新峰,姚昕.碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J].*地球学报*,2006,27(5):503-509.
XIA Riyuan, TANG Jiansheng, ZOU Shengzhang, LIANG Bin, JIN Xinfeng, YAO Xin. Palaeo-karst research of the carbonate oil-gas field and its application to oil-gas exploration and development[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 503-509.
- [6] 朱东亚,张殿伟,李双建.四川盆地地下组合碳酸盐岩多成因岩溶储层发育特征及机制[J].*海相油气地质*,2015,20(1):33-44
ZHU Dongya, ZHANG Dianwei, LI Shuangjian. Development genesis and characteristics of karst reservoirs in lower assemblage in Sichuan basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 33-44
- [7] 淡永,梁彬,曹建文.塔里木盆地轮南奥陶系岩溶缝洞充填物地球化学特征及环境意义[J].*石油实验地质*,2012,34(6):623-628.
DAN Yong, LIANG Bin, CAO Jianwen. Geochemical features and environmental significances of deposits in Ordovician karstic fractures and caves, Lunnan area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(6): 623-628.
- [8] 郭旭升,李宇平,魏全超.川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,2012,

- 34(6): 1-8.
- GUO Xusheng, LI Yuping, WEI Quanchao. Palaeokarst reservoirs and exploration areas of Maokou Formation in the south-east of Sichuan basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, 34(6): 1-8.
- [9] 杨海军, 韩剑发, 孙崇浩, 王福煥, 正岩, 吉云刚. 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层发育模式与油气勘探[J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 199-205.
- YANG Haijun, HAN Jianfa, SUN Chonghao, WANG Fuhuan, ZHENG Yan, JI Yungang. A development model and petroleum exploration of karst reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong palaeouplift[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 199-205.
- [10] 杨雨, 谢继容, 赵路子, 黄平辉, 张玺华, 陈聪, 张本健, 文龙, 汪华, 高兆龙, 山述娇. 四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示: 以川中北部地区JT1井天然气立体勘探为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(2): 1-9.
- YANG Yu, XIE Jirong, ZHAO Luzi, HUANG Pinghui, ZHANG Xihua, CHEN Cong, ZHANG Benjian, WEN Long, WANG Hua, GAO Zhaolong, SHAN Shujiao. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan basin and its enlightenment: A case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(2): 1-9.
- [11] 张宇, 曹清古, 罗开平, 李龙龙, 刘金连. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 610-620.
- ZHANG Yu, CAO Qinggu, LUO Kaiping, LI Longlong, LIU Jinlian. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan basin and enlightenment obtained[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 610-620.
- [12] 何钊, 高兆龙, 李国蓉, 何赛, 莫国宸, 田家奇, 李肖肖. 川南云锦地区茅口组储集层溶蚀期次及模式[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(5): 537-545.
- HE Zhao, GAO Zhaolong, LI Guorong, HE Sai, MO Guochen, TIAN Jiaqi, LI Xiaoxiao. Dissolution stage and pattern of reservoirs in Maokou Formation in Yunjin area, southern Sichuan basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(5): 537-545.
- [13] 诸丹诚, 喻雅敏, 黎霆, 张雷, 李让彬, 杨明磊, 邹华耀. 四川盆地北部元坝地区茅口组岩溶: 发育特征与分布模式[J]. *古地理学报*, 2023, 25(3): 701-714.
- ZHU Dancheng, YU Yamin, LI Ting, ZHANG Lei, LI Rangbin, YANG Minglei, ZOU Huayao. Karst development and distribution pattern of the Maokou Formation in Yuanba area, northern Sichuan basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(3): 701-714.
- [14] 聂国权, 淡永, 徐亮, 梁彬, 李景瑞. 蜀南Z工区茅口组顶岩溶古地貌、古水系特征与刻画[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 911-917.
- NIE Guoquan, DAN Yong, XU Liang, LIANG Bin, LI Jingrui. Characteristics and characterization of karst palaeo-geomorphology and palaeowater system on the top of Maokou Formation in the Z area in southern Sichuan basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 911-917.
- [15] 王国锋, 张大伟, 邓守伟, 杨光, 宋文礼. 四川盆地自贡区块茅口组岩溶储层发育特征及其主控因素[J]. *天然气工业*, 2022, 42(9): 63-75.
- WANG Guofeng, ZHANG Dawei, DENG Shouwei, YANG Guang, SONG Wenli. Development characteristics and main controlling factors of Maokou Formation karst reservoirs in Zigong block of the Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(9): 63-75.
- [16] 曹华, 陈延贵, 陈聪, 高兆龙, 山述娇, 李天军, 胡罗嘉, 谢静平. 四川盆地东北部茅口组岩溶储层控制因素[J]. *天然气勘探与开发*, 2022, 45(3): 1-10.
- CAO Hua, CHEN Yanguai, CHEN Cong, GAO Zhaolong, SHAN Shujiao, LI Tianjun, HU Luoia, XIE Jingping. Controlling factors of karst reservoir in Maokou Formation, northeastern Sichuan basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2022, 45(3): 1-10.
- [17] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 池英柳, 杨雨, 鲁卫华, 王海真, 李秋芬. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 949-960.
- JIANG Qingchun, HU Suyun, WANG Zecheng, CHI Yingliu, YANG Yu, LU Weihua, WANG Haizhen, LI Qiufen. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan basin and selection of exploration regions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 949-960.
- [18] 明盈, 徐亮, 周刚, 周红飞, 李毅, 戴鑫. 四川盆地南部地区茅口组古岩溶缝洞充填演化特征[J]. *天然气勘探与开发*, 2021, 44(1): 46-54.
- MING Ying, XU Liang, ZHOU Gang, ZHOU Hongfei, LI Yi, DAI Xin. Evolution characteristics of paleo-karst fracture and vug filling in Maokou Formation, southern Sichuan basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2021, 44(1): 46-54.
- [19] 胡修权, 施泽进, 田亚铭. 川东南地区茅口组断裂多重分形特征及意义[J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2014, 41(4): 476-482.
- HU Xiuquan, SHI Zejin, TIAN Yaming. Multifractal feature and significance of Maokou Formation faults in the southeast of Sichuan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(4): 476-482.
- [20] 施泽进, 夏文谦, 王勇, 田雪松, 王长城. 四川盆地东南部茅口组古岩溶特征及识别[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 622-630.
- SHI Zejin, XIA Wenqian, WANG Yong, TIAN Xuesong, WANG Changcheng. Characteristics and identification of paleokarst in the Maokou Formation in the southeastern Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 622-630.
- [21] Arthur M A, Dean W E, Pratt L M. Geochemical and climatic effects of increased marine organic carbon burial at the Cenomanian/Turonian boundary[J]. *Nature*, 1988, 335: 714-717.
- [22] Scholle P A, Arthur M A. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum

- exploration tool[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64: 67-87.
- [23] 刘存革, 李国蓉, 朱传玲, 刘国勇, 卢宇峰. 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[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(3): 377-384.
- LIU Cunge, LI Guorong, ZHU Chuanling, LIU Guoyong, LU Yufeng. Geochemistry characteristics of carbon, oxygen and strontium isotopes of calcites filled in karstic fissure-cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 377-384.
- [24] 孔兴功. 石笋氧碳同位素古气候代用指标研究进展[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 165-170.
- KONG Xinggong. Advance in study of oxygen and carbon isotope variations in cave stalagmites as palaeo-climate proxies[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2): 165-170.
- [25] 魏魁生, 徐怀大, 叶淑芬. 四川盆地层序地层特征[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(2): 151-157.
- WEI Kuisheng, XU Huaida, YE Shufen. Sequence stratigraphic characteristics of Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(2): 151-157.
- [26] 廖芸, 张建勇, 鲁鹏达, 李泽奇, 李文正, 田腾振, 吴娟, 孙玮, 刘树根, 邓宾. 川中北斜坡中二叠统茅口组多期流体活动与成藏过程研究[J/OL]. 天然气地球科学: 1-16[2023-11-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20230713.1404.004.html>.
- LIAO Yun, ZHANG Jianyong, LU Pengda, LI Zeqi, LI Wenzheng, TIAN Tengzhen, WU Juan, SUN Wei, LIU Shugen, DENG Bin. Multi-stage fluid activity and accumulation process of the Middle Permian Maokou Formation in the northern slope of central Sichuan[J/OL]. Natural Gas Geoscience: 1-16[2023-11-22]. [Http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20230713.1404.004.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20230713.1404.004.html).
- [27] 曾韬, 柳昊, 夏文谦, 田亚铭, 邓剑, 施泽进. 四川盆地元坝地区茅口组方解石充填物特征及指示意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 474-481.
- ZENG Tao, LIU Hao, XIA Wenqian, TIAN Yaming, DENG Jian, SHI Zejin. Characteristics and indicative significance of calcite fillings in Maokou Formation, Yuanba area, Sichuan basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(4): 474-481.
- [28] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 谷明峰, 潘立银, 姚倩颖, 杨雨然, 娄雪. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 67-78.
- ZHOU Jingao, HAO Yi, DENG Hongying, GU Mingfeng, PAN Liyin, YAO Qianying, YANG Yuran, LOU Xue. Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, central-western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(4): 67-78.
- [29] 田雪松. 川东南地区茅口组碳酸盐岩储层地球化学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- TIAN Xuesong. The geochemical study on the carbonate reservoir of the Maokou Formation in southeastern Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [30] Veizer J, Fritz P, Jones B. Geochemistry of brachiopods: Oxygen and carbon isotopic records of Paleozoic oceans[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(8): 1679-1696.
- [31] Dan Y, Lin L, Liang B, Zhang Q, Cao J, Li J. Geochemistry of the fracture-cave calcite of the ordovician Yingshan Formation and its paleokarst environment in the Tazhong area, Tarim Basin, China[J]. Carbonates & Evaporites, 2019, 34(4): 1511-1524.
- [32] 淡永, 梁彬, 张庆玉, 李景瑞, 聂国权. 碳酸盐岩早成岩岩溶作用与油气储层预测[M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [33] 董红琪, 张庆玉, 梁嘉鹏, 梁彬, 李景瑞, 淡永, 聂国权, 季少聪. 岩溶缝洞充填物碳氧同位素特征及环境意义: 以塔河油田奥陶系鹰山组为例[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 863-874.
- DONG Hongqi, ZHANG Qingyu, LIANG Jiapeng, LIANG Bin, LI Jingrui, DAN Yong, NIE Guoquan, JI Shaocong. Carbon and oxygen isotopic characteristics of karst fracture-cavity fillings and environmental significance: A case study of Ordovician Yingshan Formation in Tahe oilfield[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(4): 863-874.
- [34] 董红琪, 张庆玉, 梁嘉鹏, 淡永, 梁彬, 聂国权, 季少聪. 广西环江凹陷深部岩溶缝洞充填物碳氧同位素特征及古环境意义[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 838-846, 837.
- DONG Hongqi, ZHANG Qingyu, LIANG Jiapeng, DAN Yong, LIANG Bin, NIE Guoquan, JI Shaocong. Carbon and oxygen isotope characteristics and paleoenvironmental significance of deep karst fracture-cave fillings in Huanjiang sag, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 838-846, 837.
- [35] 蔡春芳, 李开开, 李斌, 蔡缪璐, 姜磊. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2399-2404.
- CAI Chunfang, LI Kaikai, LI Bin, CAI Liulu, JIANG Lei. Geochemical characteristics and origins of fracture-and vug-fillings of the Ordovician in Tahe oilfield, Tairm Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25 (10): 2399-2404.
- [36] Schopf T J M. Paleooceanography[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1980: 106-107.
- [37] 张正红, 淡永, 梁彬, 张庆玉, 李景瑞, 郝彦珍. 塔中Ⅱ区鹰山组岩溶缝洞充填物碳氧同位素特征及环境意义[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 159-164.
- ZHANG Zhenghong, DAN Yong, LIANG Bin, ZHANG Qingyu, LI Jingrui, HAO Yanzhen. Characteristics of oxygen and carbon isotopes of karst fissure-cave fillings in the Yingshan Formation, Tazhong II area, Tarim Basin and their implications for environment[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 159-164.

Differences of carbon and oxygen isotopes in coarse-grained calcite from the Permian Maokou Formation in different regions of Sichuan Basin and their significance in paleokarst environment

GAO Zhaolong¹, DAN Yong^{2,3}, ZHANG Xihua¹, CAO Hua¹, DENG Min^{2,3}, CHEN Cong¹, HU Luojia¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Key Laboratory of Sedimentary

Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract Oil and gas fields in karst carbonate reservoirs are widely distributed in China. A number of karst fracture-vuggy reservoirs have been found in the Tarim Basin, the Ordos Basin and the Sichuan Basin. Therefore, research of reservoirs in karst fractured caves has become one of the focuses in recent years, which indicates a promising future and huge potential for exploring karst carbonate reservoirs in China. Reservoirs in fractured caves of the Maokou Formation have always been one of the key areas for oil and gas exploration in the Sichuan Basin. Since the last century when reservoirs in fractured caves in the southern Sichuan region were discovered, breakthroughs have been made in this field in the Yuanba area of northern Sichuan, Yunjin area of southern Sichuan, and the Penglaiba area of central Sichuan, demonstrating good exploration prospects. However, there has always been controversy over the origin of fractured caves. One view suggests that the exposure of the Maokou Formation caused by the Dongwu Movement and the occurrence of freshwater karst are the main reasons for the development of fractured caves in the Maokou Formation, while another view suggests that fractured caves in the Maokou Formation are related to the tectonic fluid activity during the burial period. these two views are mostly based on research in the southern Sichuan region, and further consideration of the entire Sichuan Basin is needed to search for relevant evidence from geological phenomena to geochemistry.

To understand the causes and differences of these fractured caves, we systematically sampled calcite for data of carbon and oxygen isotopes from outcrop profiles or from drilling fractured caves in different areas of the Sichuan Basin, in order to determine the paleokarst environment in which fractured caves were developed. Study results show that fractured caves of the Maokou Formation in this basin are mainly composed of small-and-medium-sized dissolution pores, fractures, and dissolution fractures. The carbon and oxygen isotopes of calcite in the Maokou Formation can be divided into four types, indicating four types of paleokarst environment with different fluid properties. Type I is the quasi syngenetic karst environment in which the oxygen isotope values of calcite in fractured caves are basically consistent with the values of limestone or of Middle Permian seawater in the Maokou Formation, with $\delta^{13}\text{C}$ ranging from 1.80‰ to 3.83‰ and $\delta^{18}\text{O}$ ranging from -8.95‰ to -4.11‰. Type II is the freshwater karst environment in which high negative $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values are present in calcite of fractured caves, with $\delta^{13}\text{C}$ < 0‰ and $\delta^{18}\text{O}$ ranging from -12.00‰ to -9.00‰. Type III is the buried karst environment in which lower $\delta^{18}\text{O}$ values are significantly negative compared to the values of bedrock. However, $\delta^{13}\text{C}$ values are basically consistent with those of bedrock, with $\delta^{13}\text{C}$ ranging from 0‰ to 3.83‰ and $\delta^{18}\text{O}$ ranging from -12.00‰ to -8.50‰. Type IV is the high-temperature hydrothermal environment in which $\delta^{18}\text{O}$ values are significantly negative (< -12.00‰).

Regional comparison shows that the oxygen isotopes in central and southern Sichuan are more negative than those in northern Sichuan, while the carbon isotopes in northern and central Sichuan are more negative than those in southern Sichuan. Research suggests that buried karst is the main type in southern Sichuan, followed by freshwater karst and quasi syngenetic karst, all together forming reservoirs dominated by fractures. In addition to quasi syngenetic karst and freshwater karst, high-temperature hydrothermal karst is also developed in central Sichuan. The high-temperature hydrothermal karst has formed dissolution pore reservoirs related to dolomite. The northern Sichuan is mainly characterized by quasi syngenetic karst and freshwater karst, forming reservoirs mainly composed of dissolution pores.

Key words the Maokou Formation in Sichuan Basin, carbon and oxygen isotopes, paleokarst, karst reservoir, hydrothermal karst

(编辑 黄晨晖)