

地球学报

Acta Geoscientica Sinica

ISSN 1006-3021, CN 11-3474/P

《地球学报》网络首发论文

题目：北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山表生岩溶储层特征与演化模式
作者：王永辉，张友浩，高先志，宋言，王红梅，曲付涛
收稿日期：2021-12-01
网络首发日期：2022-03-24
引用格式：王永辉，张友浩，高先志，宋言，王红梅，曲付涛. 北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山表生岩溶储层特征与演化模式[J/OL]. 地球学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20220322.1719.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

北部湾盆地涠西南凹陷碳酸盐岩潜山 表生岩溶储层特征与演化模式

王永辉, 张友浩, 高先志, 宋 言, 王红梅, 曲付涛

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘 要: 潜山储层是潜山油气成藏的重要条件, 潜山领域是涠西南凹陷今后的重要勘探领域。本文综合运用岩心观察、薄片鉴定、碳-氧同位素测定、包裹体测温、钻录井及测井资料对涠西南凹陷碳酸盐岩潜山储层开展研究。研究表明, 涠西南碳酸盐岩潜山储层主要为岩溶储层, 并且发育同生-准同生期岩溶、埋藏岩溶和表生岩溶三种不同环境的岩溶作用, 其中以表生岩溶作用为主; 表生岩溶储层自上而下划分为表层岩溶带、垂直渗流带和水平潜流带; 各个岩溶带在横向上具有可对比性。工区碳酸盐岩岩溶发育程度受沉积相、古地貌及后期构造运动控制: 潮坪沉积环境下的白云岩的岩溶储层更发育; 古地貌的岩溶斜坡区岩溶更发育; 新生代断裂构造作用调整了原始岩溶储层带的分布深度, 导致现今不同潜山间的岩溶储层带分布深度有差异。

关键词: 涠西南凹陷; 潜山; 碳酸盐岩储层; 表生岩溶; 演化模式; 石炭系

中图分类号: P618.13 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.031601

Characteristics and Evolvment Model of Epigenetic Karst Reservoirs in Carbonate Buried-hill in Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin

WANG Yong-hui, ZHANG You-hao, GAO Xian-zhi,
SONG Yan, WANG Hong-mei, QU Fu-tao

College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249

Abstract: Buried hill reservoirs are important conditions for buried hill hydrocarbon accumulations. Buried hill areas are one of the important subsequent exploration areas in Weixi'nan Sag. This study comprehensively used core observation, thin section identification, carbon-oxygen isotope measurement, inclusion temperature measurement, and drilling and logging data to conduct research on carbonate buried hill reservoirs in Weixi'nan Sag. Results showed that the carbonate buried hill reservoirs in Weixi'nan were mainly karst reservoirs. There were three types of karstifications, and they included depositional-interregional karst, buried karst, and epikarst. Among them, the epikarst is the most common karstification in the work area. The epikarst reservoirs zones were vertically divided into subsurface zone, vadose zone, and lenticular phreatic zone. Each epikarst reservoirs zone can be compared horizontally. The controlling factors of carbonate karst reservoirs in the work area mainly contained sedimentary facies, paleo-geomorphic, and late tectonic movements. It was proposed that dolomites in the tidal-flat zone were a more favorable lithology for reservoirs development. The karst slopes were favorable paleo-geomorphic in the area. Cenozoic faults had adjusted the original distribution depths of the karst reservoirs zones and led to different distribution depths of the karst reservoirs zones among the different buried hills today.

Key words: Weixi'nan Sag; buried hill; carbonate reservoirs; epikarst; evolvment model; Carboniferous

本文由中海石油(中国)有限公司湛江分公司重点研究项目(编号: CCL2020ZJFN0294)资助。

收稿日期: 2021-12-01; 改回日期: 2022-03-10。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王永辉, 男, 1995 年生。博士研究生。地质资源与地质工程专业。E-mail: 2020310037@student.cup.edu.cn。

*通讯作者: 高先志, 男, 1963 年生。教授, 博士生导师。主要从事油气资源形成与分布研究。E-mail: gaioxz@cup.edu.cn。

碳酸盐岩潜山是涪西南凹陷今后的重要油气勘探领域。国内外油气勘探表明,碳酸盐岩岩溶储层是碳酸盐岩储层的重要成因类型之一。20 世纪 60—70 年代以来,国外开展了系列的古岩溶系统研究,代表性的研究可见于 Paleokarst 等专题文集(James and Choquette, 1988; Bosák et al., 1989; Fritz et al., 1993)。20 世纪 70 年代,我国任丘油田古潜山的发现,推动了国内碳酸盐岩溶储层的油气勘探,并相继发现了塔中、轮南—塔河古潜山油气田、四川普光及龙岗气田、大港千米桥奥陶系油气田等油气田;对岩溶储集层的岩溶类型与岩溶环境、岩溶储层发育控制因素的研究也取得了重要进展(杨俊杰等, 1995; 何治亮等, 2011; 师政等, 2018; 金强等, 2020; 吴丰等, 2020)。对于涪西南凹陷碳酸盐岩古潜山,近几年也开展了其储层特征、主控因素等初步研究(王红波, 1996; 陈广坡等, 2007; 程光华和王丽, 2012; 徐守立等, 2020)。但是由于涪西南凹陷针探井少,对石炭系碳酸盐岩储层的研究程度还比较低,对碳酸盐岩储层的成因和分布规律认识还不明确。本文综合运用岩心观察、薄片鉴定、碳-氧同位素测定、包裹体测温、钻录井及测井资料对涪西南凹陷碳酸盐岩潜山储层开展研究。明确了涪西南凹陷潜山储层的岩溶储层成因和储层分布规律,该认识对深化该区的碳酸岩潜山油气勘探有现实意义

1 地质背景

涪西南凹陷是北部湾盆地最北部的一个凹陷,呈北东向展布,面积约 $3.0 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。它是新生代在古生界碳酸盐岩基底上发育的新生代断陷,包括一号构造带、二号构造带、东南斜坡带和涪西南低凸

起等构造单元。作为凹陷基底的石炭系,主要包括下石炭统(孟公拗组、石磴子组、测水组、梓门桥组)和上石炭统黄龙组(赵顺兰等, 2018),岩性主要为藻灰岩、生屑灰岩、角砾灰岩、泥灰岩、硅化灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩以及结晶白云岩等开阔台地与局限台地沉积(图 1)。

作为涪西南凹陷基底的台地型石炭系碳酸盐岩,在印支期构造运动中挤压抬升遭到长时间的风化淋滤;在新生代沉积过程中,受历次断裂活动的控制,特别是珠琅运动 I 幕的断层差异活动,形成高低差异的各种断块山(图 2),导致了不同潜山碳酸岩储层发育特征的明显差异。

2 岩溶储层特征

2.1 岩溶储层储集空间特征

涪西南凹陷石炭系碳酸盐岩发育各种溶蚀孔隙。包括溶洞、溶孔和溶蚀缝。表明溶蚀作用是碳酸盐岩储层形成的重要原因。

(1) 溶洞

岩心可见钙质碎屑充填的角砾岩和方解石胶结的角砾岩填充(图 3a, b, d); 溶洞内透明方解石晶簇沿洞壁生长,因流体中矿物差异而呈现红白的“纹路”,充填方解石直径为 2~3 cm,多将缝洞完全充填。岩心亦可见小型溶孔洞(图 3c, e),直径 5~12 mm,垂向上呈现串珠状或孤立分布。

大型溶洞在钻录井过程中常出现钻井放空、泥浆漏失的现象,钻井漏失处测井曲线表现为声波时差异常高值,密度测井曲线和双侧向电阻率曲线异常低值(图 6)。据统计涪西南凹陷碳酸盐岩潜山钻井放空现象普遍存在,可以认为涪西南凹陷发育大型

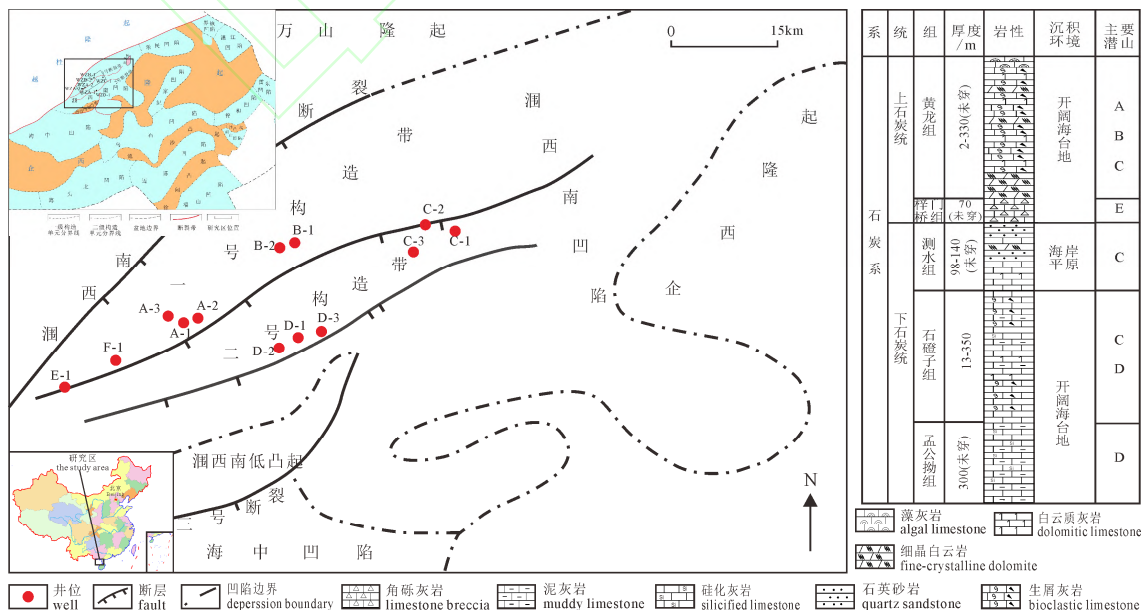


图 1 涪西南凹陷位置图(据赵顺兰等, 2018; 徐守立等, 2020 等改)

Fig. 1 Location of the Weixi'an Sag (modified from ZHAO et al., 2018; XU et al., 2020)

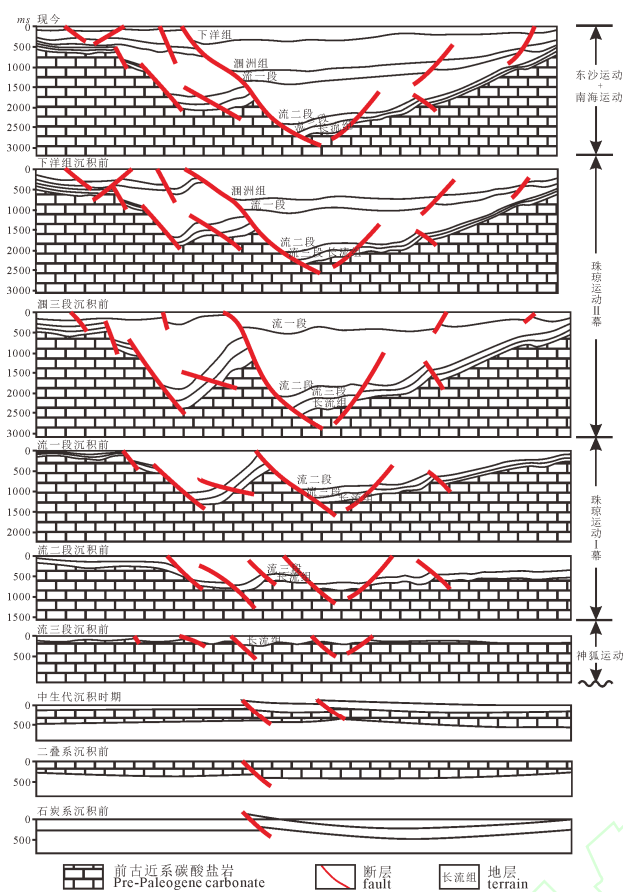


图2 涠西南凹陷碳酸盐岩潜山的形成与构造演化图
Fig. 2 Tectonic evolution profiles of the buried hills in Weixi'nan Sag

的溶洞体系。以 A 潜山为例, A1 井在 1941~1800 m 内共存在 9 处钻井放空和漏失, 合计放空漏失 29.09 m, 漏失 2195 m³ 泥浆; A2 井钻井放空漏失最多, 合计放空漏失 28 m, 漏失 14275 m³ 泥浆, 最大漏失量可达 4030 m³/天; A3 井合计钻井漏失较少, 但漏失泥浆仍可达 1481 m³。F 潜山和 D 潜山也存在钻井漏失现象, 推测潜山内部大型溶洞体系发育。

(2)溶孔

溶孔包括晶间溶孔、粒间溶孔、基质溶孔、脉溶孔以及铸模孔等。晶间溶孔主要为白云石晶间的溶蚀孔隙, 其直径为 28~200 μm, 呈多边形状、港湾状, 面孔率可达 4%(图 3f); 粒间溶孔主要发育在碎屑颗粒间, 是颗粒间的填隙物被溶蚀形成的, 其直径为 30~250 μm, 呈三角状, 面孔率为 2.5%(图 3g, h); 基质溶孔直径为 20~40 μm, 多沿裂缝分布, 亦有孤立分布, 面孔率为 0.5%(图 3i, j)。脉溶孔为后期形成方解石脉的溶孔, 其直径为 28~260 μm, 多呈港湾状, 面孔率可达 1.5%(图 3k)。铸模孔由颗粒或晶粒被完全溶蚀形成, 保留原有的颗粒或晶粒的外形, 局部可见溶蚀后的蠕类房室被方解石胶结充填(图 3l)。

(3)溶蚀缝

溶蚀缝主要表现为缝壁两侧凹凸不平, 形态

表1 涠西南凹陷石炭系裂隙充填物与围岩碳氧同位素
Table 1 Carbon-oxygen isotope of Carboniferous fissure fillings and surrounding rock in Weixi'nan Sag

井号	深度/m	取样位置	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
D1	3188.4	脉体	方解石脉	0.766	-8.334
D2	3060.6	脉体	方解石脉	-0.375	-17.643
D2	3116	脉体	方解石脉	-2.039	-12.165
D2	3292.08	脉体	方解石脉	-1.327	-10.533
D2	3312.87	脉体	方解石脉	-1.966	-10.161
D2	3325.13	脉体	方解石脉	-1.703	-11.969
D2	3338.36	脉体	方解石脉	-2.569	-13.767
D2	3061.55	脉体	方解石脉	-0.109	-20
E1	2590.44	脉体	方解石脉	1.653	-15.936
D3	3386.7	脉体	方解石脉	0.968	-19.187
F1	1594.41	脉体	方解石脉	-0.527	-10.777
A1	1551.12	脉体	方解石脉	1.812	-14.637
D1	3188.4	围岩	亮晶颗粒灰岩	1.474	-7.182
D2	3060.6	围岩	泥晶灰岩	0.473	-11.133
D2	3116	围岩	亮晶颗粒灰岩	-0.77	-12.122
D2	3292.08	围岩	泥晶灰岩	-1.769	-11.62
D2	3312.87	围岩	结晶白云岩	-1.255	-10.033
D2	3325.13	围岩	结晶灰岩	-1.692	-12.802
D2	3338.36	围岩	灰岩	-2.808	-11.731
D2	3061.55	围岩	泥晶灰岩	-0.716	-12.038
E1	2590.44	围岩	岩溶角砾岩	4.504	-9.476
D3	3386.7	围岩	亮晶石屑灰岩	0.754	-7.15
F1	1594.41	围岩	石英杂砂岩	-1.437	-13.17
A1	1551.12	围岩	泥晶灰岩	3.725	-9.534

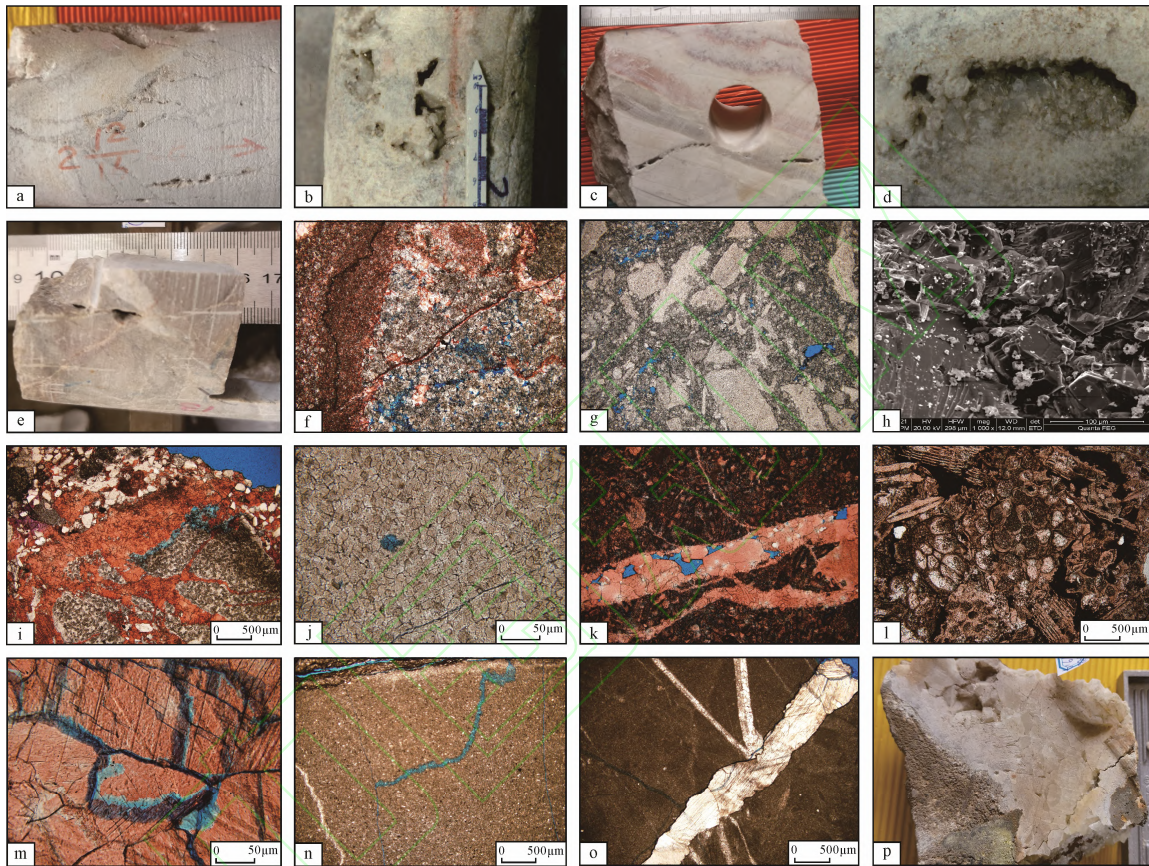
宽度变化较大且多出现分支,可见晶间溶蚀缝宽度为20~35 μm ,延伸不远,多集中分布(图3m, n),部分溶蚀缝由先前的构造裂缝溶蚀形成(图3o),但多数被方解石全充填-半充填。

2.2 岩溶环境特征

不同岩溶环境形成的溶蚀储层规模不同。通过分析溶洞缝中胶结物的碳氧同位素特征和包裹体均一化温度,可以判别其形成环境。本次通过岩心取样,对石炭系碳酸盐岩裂缝中方解石胶结物进行了

分离,连同围岩分别对其碳氧同位素进行了测定(如表1),由此确定了各样品点的岩溶和胶结环境。测试工作在成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室完成。碳氧同位素分析仪器主要为激光显微微区制样装置和气体同位素质谱仪(Thermo Scientific MAT253型),测试相对误差为 $\pm 1\%$ 。

涪西南凹陷碳酸盐岩岩溶存在同生(沉积期)-准同生期(层间)岩溶、埋藏岩溶(包括中-浅埋藏岩溶环境、中深埋藏岩溶环境)和表生岩溶等岩溶环境。



a—A-1井,埋深1555.10 m,岩心,纵向上可见溶蚀缝、溶蚀洞发育,横剖面可见溶蚀缝贯穿构造缝;

b—A-1井,埋深1555.25 m,岩心,灰岩中发育的方解石裂缝和溶洞,溶洞为方解石晶体半充填;

c—A-1,埋深1555.12 m,马牙状红白相间的方解石晶粒集合体,见串珠状溶孔,岩心;

d—A-1井,1755.75 m,岩心,灰岩中方解石晶体半充填的溶洞;e—B-1井,埋深1964.5 m,可见较为连续的溶蚀缝洞,岩心;

f—A-1井,埋深1556.15 m,晶间溶孔(-);g—A-2井,埋深1917.5 m,粒间、粒内溶孔(-);

h—A-1井,埋深1555 m,粒间溶孔(SEM);i—E-1井,埋深2594 m,基质溶孔(-);j—E-1井,埋深2594 m,孤立状基质溶孔(-);

k—A-1井,1552.05 m,脉溶孔、藻间溶孔(-);l—D-1井,埋深3060.1 m,交代残余铸模孔(+),体腔被选择性溶蚀形成铸模孔,后被方解石胶结;m—D-1井,埋深3327.06 m,10x(-),发育晶间溶缝(-);n—D-1井,埋深3332.28 m,发育溶蚀缝(-);

o—D-1井,埋深3062.5 m,先期构造-溶蚀缝被充填后,再次发生溶蚀缝(-);

p—A-3井,埋深1678.5 m,风化壳砂砾岩,岩心,方解石晶簇充填,可见溶缝。

a—A-1 well, 1555.10 m, core, dissolution fractures and caves were vertically developed, and dissolution fractures that penetrated structural fractures were transversely developed; b—A-1 well, 1555.25 m, core, calcite cracks and caves were developed in limestone, and semi-filled calcite crystals were filled in the caves; c—A-1 well, 1555.12 m, horse-tooth shape, red and white calcite grain aggregates, within beaded dissolved pores and cores; d—A-1, 1755.75 m, core, semi-filled caves of calcite crystals in limestone; e—B-1 well, 1964.5 m, dissolution fractures and caves and cores; f—A-1 well, 1556.15 m, inter-crystalline dissolved pores (-); g—A-2 well, 1917.5 m, inter-granular and intra-granular dissolution pores (-); h—A-1 well, 1555 m, inter-granular dissolved pores (SEM); i—E-1 well, 2594 m, matrix dissolved pores (-); j. E-1 well, 2594 m, isolated matrix dissolved pores (-); k—A-1 well, 1552.05 m, vein dissolving pores, interalgal dissolving pores (-); l—D-1 well, 3060.1 m, replacement of residual mold holes (+), body cavity covered selective dissolution to form mold holes, then cemented using calcite; m—D-1 well, 3327.06 m, 10x (-), inter-crystalline fractures (-); n—D-1 well, 3332.28 m, dissolution fractures (-);

o—D-1 well, 3062.5 m, structure-dissolution fractures, dissolved fractures (-);

p—A-3 well, 1678.5 m, weathered crust sandy conglomerate, core, calcite crystal cluster filling, and fractures.

图3 涪西南凹陷石炭系碳酸盐岩岩溶储集空间类型

Fig. 3 Carboniferous carbonate karst reservoir space types in Weixi'nan Sag

通过碳氧同位素可以确定方解石胶结物的形成环境。不同流体性质和成岩环境下碳酸盐岩的碳氧同位素含量也不同, 涠西南凹陷碳酸盐岩方解石脉体中碳氧同位素与围岩碳酸盐岩中碳氧同位素有所不同(图 4), 方解石脉中碳氧同位素的 $\delta^{18}\text{O}$ 为中高值, $\delta^{13}\text{C}$ 为中低值; 围岩中碳氧同位素的 $\delta^{18}\text{O}$ 为中低值, $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围差异较大, 高中低值均存在。

石炭系方解石胶结物的碳氧同位素表明涠西南凹陷存在四类岩溶环境(表 3)。

第 I 类为同生-准同生期岩溶环境, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 范围与碳酸盐岩围岩的一致, 即岩溶环境与碳酸盐岩沉积环境的相似性, 反映了同生期的碳酸盐岩是在沉积后不久被暴露改造, 选择性溶蚀形成粒内溶孔或铸模孔(图 3I), 后期被方解石胶结物胶结, 属于早期沉淀的缝洞方解石特征。

第 II 类为大气淡水岩溶环境, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显负偏, $\delta^{13}\text{C}$ 值均小于 0, $\delta^{18}\text{O}$ 为 -2.56‰ ~ -0.52‰ , 整体上与构造抬升后处于开放的成岩环境, 接受了轻质的 ^{12}C 、 ^{16}O 的大气淡水淋滤有关。

第 III 类为中-浅埋藏岩溶环境, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显负偏, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 1.65‰ ~ 1.81‰ , 与围岩值基本一致, 说明方解石脉体 $\delta^{13}\text{C}$ 主要来自围岩。 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.56‰ ~ -0.52‰ , 与围岩相比负偏, 可能与温度升高 $\delta^{16}\text{O}$ 迁移到脉体有关。

第 IV 类为中深埋藏岩溶环境, 方解石脉 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -17.6‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 对温度敏感, 高温抑制其活动,

表 2 涠西南凹陷石炭系不同岩溶环境碳氧同位素特征表
Table 2 Characteristics of carbon-oxygen isotopes in different karst environments of Carboniferous in Weixi'nan Sag

发育 期次	形成环境	同位素特征/‰	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
I	同生-准同生期岩溶	0.77	-8.33
II	大气淡水岩溶	-0.53 ~ -2.57	-10.16 ~ -13.76
III	中-浅埋藏岩溶	1.65~1.81	-14.63 ~ -15.92
IV	中深埋藏岩溶	-0.37~0.97	-17.64 ~ -20.00

造成 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏严重, 为中深埋藏(2500~3500 m)或深部热液沿断层进入碳酸盐岩作用的结果。

另外, 方解石脉中的流体包裹体温度也反映胶结物形成的多期次, 反映出不同环境和埋深下的岩溶条件。包裹体均一化温度大致分为四个区间: $< 90^\circ\text{C}$ 、 90°C - 120°C 、 120°C - 150°C 、 $> 150^\circ\text{C}$, 反映涠西南凹陷石炭系碳酸盐岩岩溶储层可能存在 4 期的流体活动, 这与碳氧同位素结果相呼应。部分包裹体均一化温度大于 150°C , 甚至大于 200°C (图 5), 反映工区可能存在深部高温热液活动, 为中深埋藏岩溶环境。

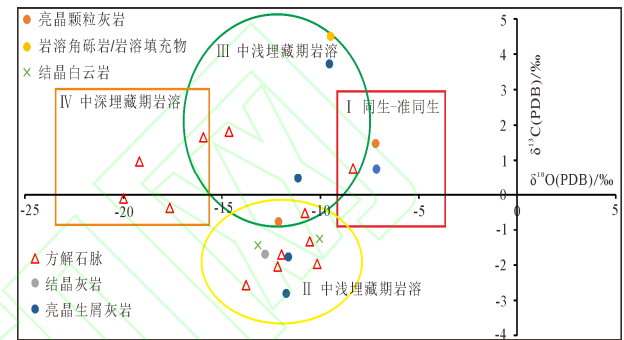


图 4 涠西南凹陷石炭系裂隙充填物与围岩碳氧同位素交汇图

Fig. 4 Carbon-oxygen isotope intersection map of carboniferous fissure fillings and surrounding rock in Weixi'nan Sag

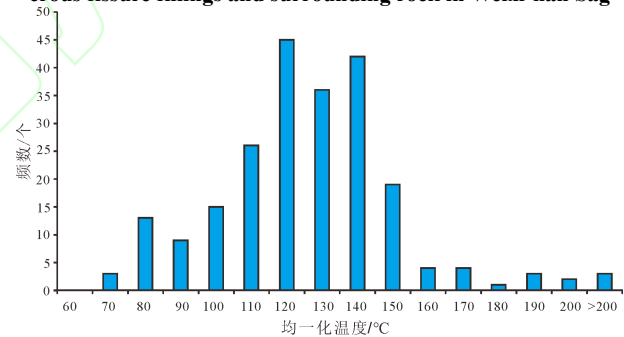


图 5 涠西南凹陷石炭系方解石脉中盐水包裹体均一化温度-频数分布直方图

Fig. 5 Homogenization temperature-frequency distribution histogram of salt-water inclusions in carboniferous calcite veins in Weixi'nan Sag

表 3 涠西南凹陷石炭系碳酸盐岩不同岩溶带储层特征

Table 3 Reservoir characteristics of carbonate rocks in different karst zones in Weixi'nan Sag

岩溶带	位置	岩溶类型	测井曲线特征	测井孔隙度
表层岩溶带	不整合附近 基岩顶面以下 0-20m	溶蚀强烈、易形成较大 孔洞	CAL 常为扩径、AC 负高值、 DEN 正高值, RT 高负偏	较高
垂直渗流带	表层岩溶带和潜水面之间的空间 基岩顶面以下 20-50m	整体以垂向岩溶为主	RD、RS 较高, 多为正异常、 AC、CNL 等均较为平直	较低
潜流带	潜水面附近 基岩顶面以下 > 50m	溶蚀的孔缝洞多呈顺 层分布	DEN 多见极低的峰值、 低 AC、低 CNL 曲线	较高

2.3 岩溶储层剖面特征

碳酸盐岩表生岩溶环境垂向一般具有分带性, 从上到下依次分为渗流带(上部渗透带和下部重力渗滤带)、潜流带(浅部潜流带和深部潜流带)(Esteban and Klappa, 1983; James and Choquette, 1989; Longman, 1980; 黄思静, 2010)。研究区也具有同样的分带性现象, 可以分为表层岩溶带、垂直渗流带和水平潜流带(图 6)。

(1)表层岩溶带主要分布在不整合附近, 溶蚀强烈、易形成较大孔洞, 随后被碎屑等充填。具有以下特征: ①基岩顶部附近含有风化型砂砾岩, 整体上发育孔洞但充填严重; 如在 A-3 井 1678.5 m 深度处, 表层岩溶带与风化壳的砂砾岩、白垩土等接触

(图 3p); ②井径曲线常表现为扩径, AC 负高值、DEN 正高值, 电阻率曲线负偏严重; ③测井孔隙度较高, 未被充填情况下, 一般均高于垂直渗流带(图 6)。

(2)垂直渗流带是表层岩溶带和潜水面之间的空间, 整体以垂向岩溶为主, 多见高角度溶缝及垂直拉伸的中小型溶蚀孔洞。具有以下特征: ①岩心上多发育垂向的溶蚀孔洞, 如 A-2 井还可见方解石晶粒集合体等溶洞充填物(图 3c); ②RD、RS 较高, 多为正异常, AC、CNL 等均较为平直, 无明显变化趋势; ③测井孔隙度较低, 整体上储集空间不甚发育(图 6)。

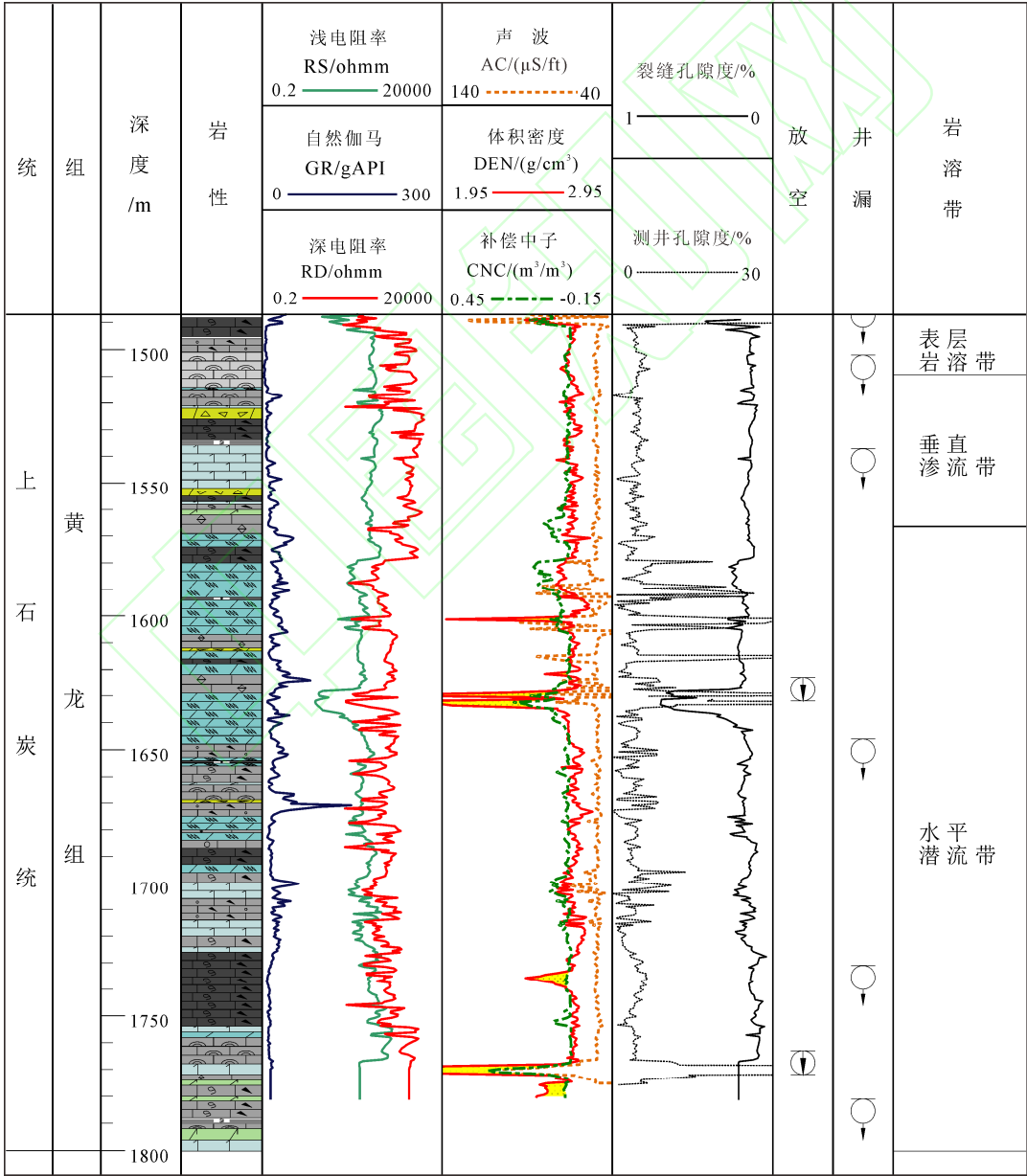


图 6 涪西南凹陷 A 潜山 A-1 井岩溶带综合柱状图
Fig. 6 Comprehensive histogram of the karst zones in Well A-1, Buried Hill A, Weixi'nan Sag

(3)潜流带一般可分为水平潜流带和深部缓流带, 研究区石炭系深度范围内主要发育水平潜流带。水平潜流带受压力梯度影响, 主要为水平方向流动, 故溶蚀的孔缝洞也多呈水平状, 多层发育, 顺层展布。具有以下特征: ①多发育地下暗河以及洞穴坍塌堆积物, 如方解石胶结的角砾岩, 砾间未见铁、泥质-等, 无后期水流改造的痕迹(图 3a), 其中角砾完全被自形的粗-巨晶方解石胶结; ②DEN 多见极低的峰值, 低 AC、低 CNL 曲线, 呈微锯齿状, 局部出现峰值; ③钻井漏失、放空现象最为明显。A-1 井潜流带发育深度段为 1566.35~1800.16 m, 厚度为 233.81 m, 多见大规模大尺度缝洞发育, 岩心上取出的透晶方解石脉为典型溶洞充填物, 反映了水体流速整体较缓慢的封闭环境; 其发育多段岩溶角砾岩也是反映了垮塌等岩溶洞穴的分布; 录井工程上存在有放空漏失现象, 为碳酸盐岩孔洞发育的典型特征(图 6)。

涠西南凹陷碳酸盐岩潜山不同岩溶带的测井孔隙度有区别, 岩溶储层发育的位置也不同。如图 7 所示, 潜山 A1 和 A2 两口井中, 表层岩溶带的测井孔隙度平均达 5.6%, 厚度为 21.96~65.44 m, 平均为 43.7 m, 岩溶储层主要发育在基岩顶面以下 10 m 范围内; 水平渗流带孔隙度 4.3%~14.5%, 平均

5.85%, 厚度一般为 57.15~94.24 m, 平均为 75.7 m, 岩溶储层主要发育在基岩顶面以下 120~150m 范围; 垂直渗流带孔隙度最小 3.6%~5.8%, 平均 2.84%, 厚度一般为 189.83~233.81m, 平均为 210.3 m, 岩溶储层主要发育在基岩顶面以下 300~320 m 范围。在垂向上相同岩溶带内或不同岩溶带间均发育有低孔隙度的致密段, 阻碍不同岩溶带的连通, 可以认为纵向上各个岩溶带是不连通的。在横向上, 在各潜山范围内, 岩溶带具有可对比性, 不同井岩溶带储层厚度相似、孔隙度相近, 横向上具有可对比性。

3 岩溶储层的控制因素

3.1 沉积相的控制

涠西南凹陷石炭系的沉积亚相主要包括潮坪、泻湖、浅滩和开阔海等, 潮坪环境主要发育白云岩、生屑灰岩。从岩心可见, 潮坪环境下的白云岩相带, 岩溶程度强烈。一号构造带和二号构造发育的潮坪环境, 其岩溶现象明显(图 6)。分析原因, 可能与白云石化的增孔作用有关。生屑灰岩在交代为白云岩的过程中(图 8a), 岩石颗粒体积变小, 晶间孔隙变大(图 8b, c, d), 在与地下水接触时, 由于增孔作用导致与地下水的接触面积变大, 从而溶蚀更易发生。

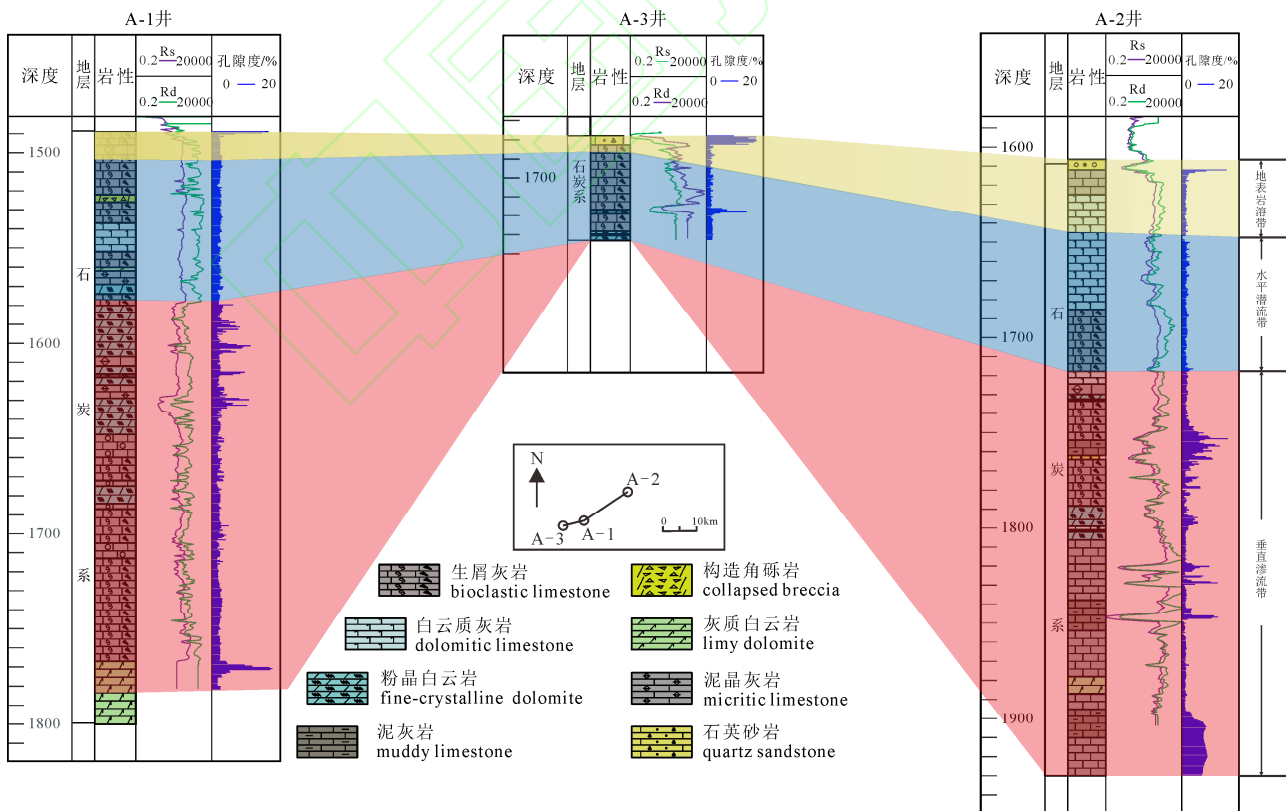
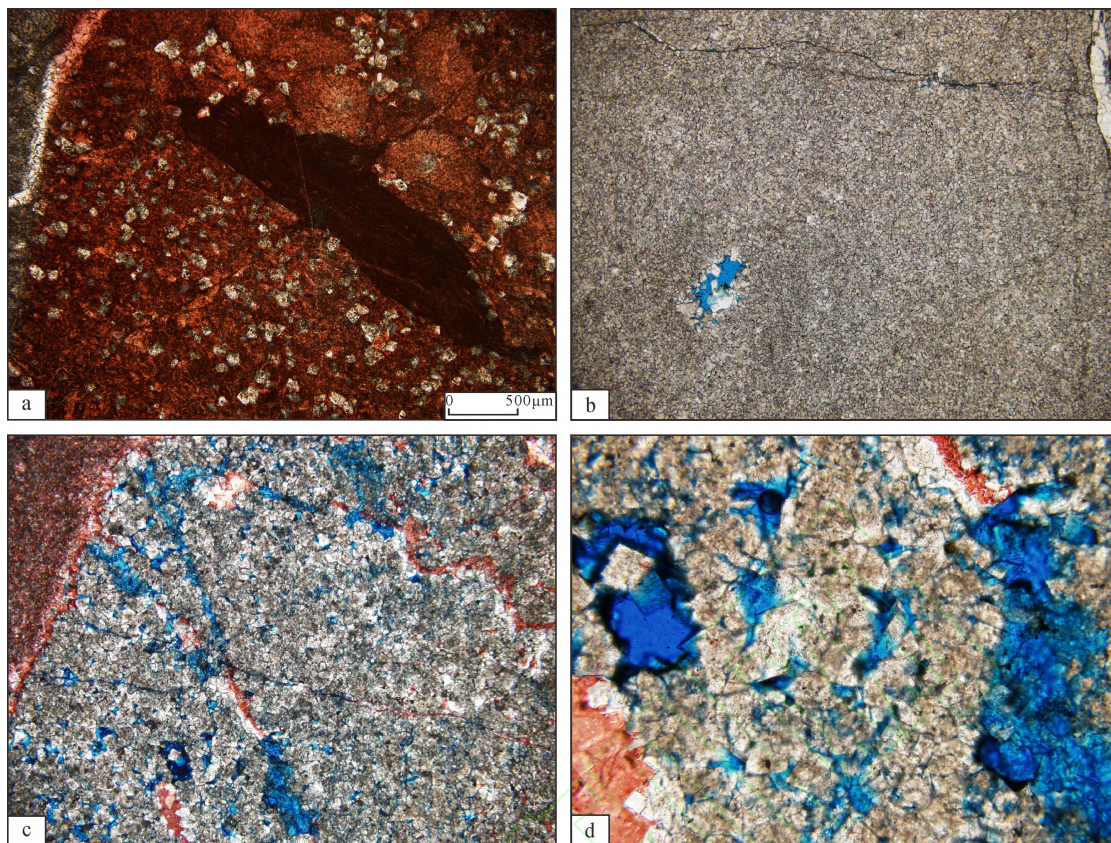


图 7 涠西南凹陷 A 潜山连井剖面对比
Fig. 7 Cross-well profile of a Buried Hill in in Weixi'nan Sag



a—A-1井, 埋深1555.02 m, 可见棘皮类、腕足类生物滩, 零星被块状白云石交代, 20x(-); b—F-1井, 埋深1642.26 m, 可见晶间溶孔, 20x(-); c—A-1井, 埋深1556.15 m, 发育大量晶间溶孔, 20x(-); d—A-1井, 埋深1556.15 m, 发育大量晶间溶孔, 图c的放大, 50x(-)。
a—A-1 Well, 1555.02 m, echinoderms and brachiopods scattered by massive dolomite, 20x(-); b—F-1 Well, 1642.26 m, inter-crystalline pores, 20x(-); c—A-1 Well, 1556.15 m, quantities of inter-crystalline dissolved pores, 20x(-); d—A-1 Well, 1556.15 m, quantities of inter-crystalline dissolved pores, zoomed in Fig 8 c, 50x(-).

图 8 涪西南凹陷滩相与白云化岩溶储层

Fig. 8 Beach facies and dolomitized karst reservoirs in Weixi'nan Sag

孔隙度大小与白云石含量有关, 通过统计 A 潜山内井的白云石含量与总孔隙度大小之间的关系可见(图 9), 白云石含量与总孔隙度大小具有一定的正相关性, 即白云石含量越高, 总孔隙度越大。可以认为在深埋藏条件下, 白云石含量对溶蚀孔隙的产生起到促进作用。已有实验室模拟埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程也证实了这一观点(杨俊杰等, 1995)。

3.2 古地貌的控制

岩溶作用强弱很大程度上受先存古地貌的影响与控制。图 10 为恢复的研究区古地貌平安面分布图。可见岩溶高地(厚度 ≥ 200 m)、岩溶斜坡(溶丘附近等值线密集区)、岩溶台地(150 m < 厚度 < 200 m)以及岩溶洼地(厚度 ≤ 150 m)等地貌单元。岩溶高地主要分布在研究区的北部以及西南部, 由于地形较高, 地势较平缓, 水流较慢, 不利于流水汇集, 溶蚀作用较弱。岩溶斜坡区是岩溶储层的有利发育区, 其地势较高, 是水流的运动“通道”, 古水系尤为发育, 遭受垂向的淋滤溶蚀作用最为显著, 如 A 潜山的上部岩溶孔洞发育显著(参见图 3p)。岩溶斜坡向

外是地势更为平缓的岩溶台地, 水流更为缓慢, 改造能力弱。岩溶洼地主要位于研究区的东南部, 整体面积较大, 为泄水聚集区, 水体多为稳定状态, 溶蚀作用非常微弱, 胶结作用强烈, 如 D 潜山多以先存储层的胶结充填为主(参见图 3l), 岩溶储层不发育。

3.3 构造作用的控制

构造作用的影响表现在两个方面, 一是岩溶期导致潜水面的波动和岩溶带厚度的变化, 形成多期的“渗流带-潜流带”相叠加; 二是埋藏期断层作用导致不同潜山岩溶带分布深度的不同(如图 11)。在上述两种作用的综合影响下, 导致现今不同潜山碳酸盐岩岩溶储层的厚度和现今分布深度存在明显差异。如图 12 所示, 一号构造带 A-1 潜山溶储层发育在基岩顶面以下 100~150 m, 现今埋深 1591~1641 m; A-2 潜山岩溶储层发育在基岩顶面以下 175~250 m, 现今埋深 1787~1862 m; C-1 潜山岩溶储层发育在基岩顶面以下 0~75 m, 现今埋深 1889~1964 m; 二号构造带 D-1 潜山岩溶储层发育在基岩顶面以下 300 m 以下现今埋深 3353 m 以下。

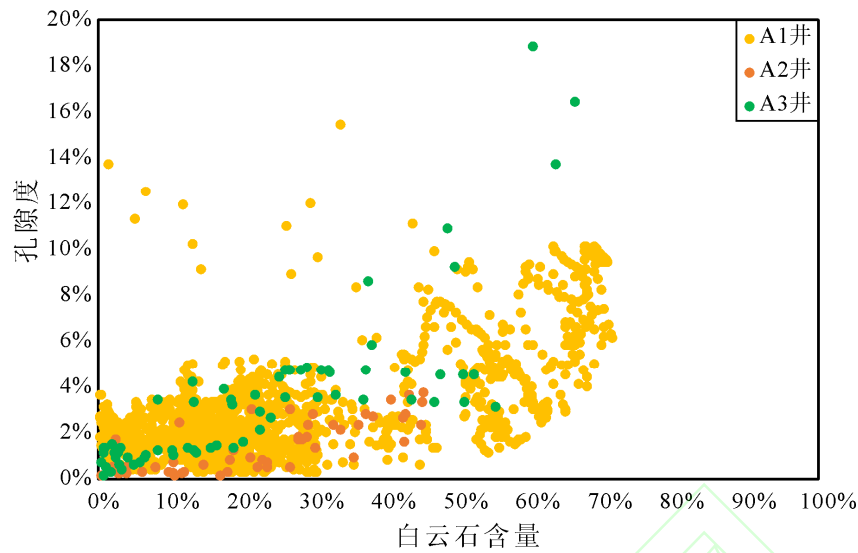


图 9 涠西南凹陷碳酸盐岩潜山白云石含量与孔隙度交会图
Fig. 9 Crossplot of dolomite contents and porosity of carbonate buried hill in the Weixi'nan Sag

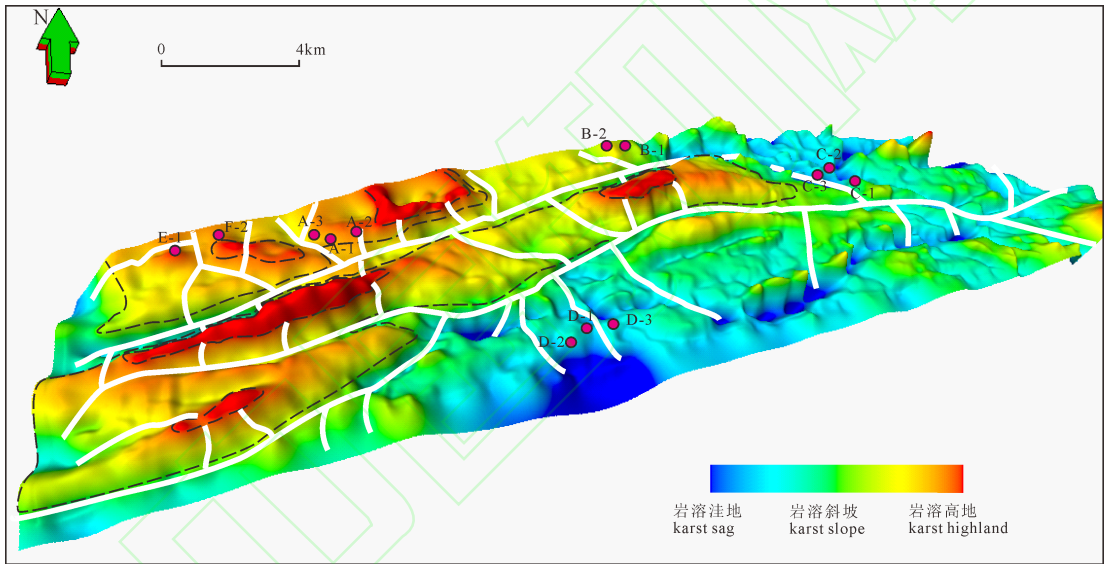


图10 涠西南凹陷前古近系地貌
Fig.10 Landform of Pre-Paleogene in Weixi'nan Sag

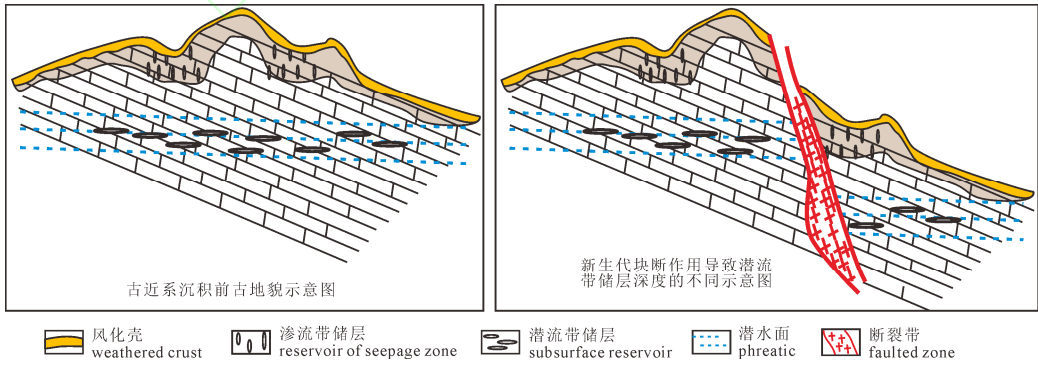


图11 涠西南凹陷构造运动对岩溶储层分布的控制作用示意图
Fig.11 Diagram of the control mode of tectonic movement on karst reservoirs distribution in Weixi'nan Sag

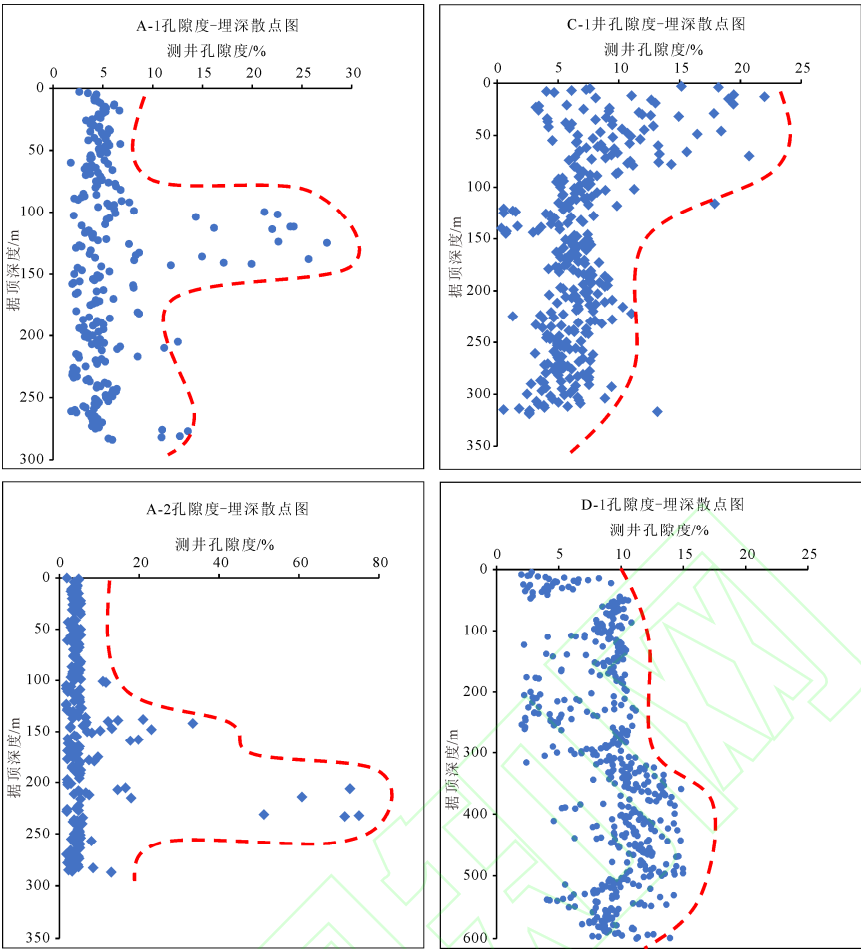


图 12 涠西南凹陷不同潜山碳酸盐岩岩溶储层发育段的厚度与发育深度对比图

Fig. 12 Relationship between the porosity and depth of the Karst reservoir development section of typical wells in Weixi'nan Sag

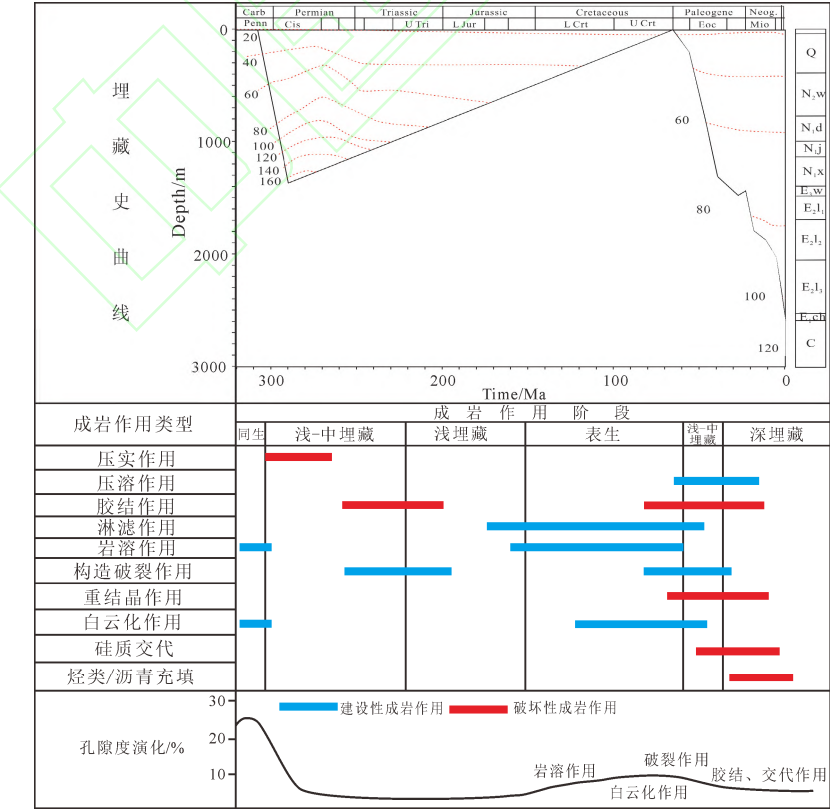


图 13 涠西南凹陷石炭系碳酸盐岩成岩环境及孔隙演化

Fig. 13 Diagenetic environment and pore evolution of carboniferous carbonate rocks in Weixi'nan Sag

4 岩溶储层演化模式

涠西南凹陷碳酸盐岩潜山岩溶储层经历了准同生-埋藏期的岩溶作用、抬升期的风化淋滤表生岩溶作用和再埋藏期的断裂差异升降改造作用等不同的阶段(图 14), 并发生了溶蚀作用、胶结作用、交代作用、重结晶作用、构造破裂化作用等复杂的成岩作用(图 13)。

石炭纪沉积时期, 全区地层相对稳定, 主要以准同生岩溶为主, 受微古地貌影响, 局部高部位发生溶蚀作用, 形成了早期溶蚀孔洞, 但往往由于被充填难以保存, 局部地区发生白云岩化作用和压实作用。在海西-印支运动期间, 全区整体抬升, 构造破裂作用明显, 剥蚀淋滤改造严重, 形成了风化壳岩溶, 其潜水面上下溶蚀缝洞发育较为显著, 初步

形成了渗流带和潜流带, 带内胶结作用充填部分溶蚀孔隙。在印支-燕山运动期, 研究区进一步遭受风化剥蚀淋滤, 岩溶程度进一步增加, 随着构造断裂的形成以及地块差异抬升, 导致了断裂两侧潜水面高低的变化, 进而形成了渗流带与潜流带的差异分布。在中生代白垩纪, 东部火山多发, 发生埋藏热液岩溶作用, 硅化明显(图 13); 到晚白垩纪, 由于地层继续暴露, 形成了大规模的风化壳型古岩溶, 同时, 早期断裂带附近, 可形成断溶体。新生代断裂活动和断块翘倾作用导致各个潜山高低差异持续强化, 同时沉积过程地表水的汇流和湖平面的波动改变了潜水面的位置, 并对下伏的碳酸盐岩岩溶带进一步改造; 建设性成岩作用和破坏性成岩作用的共同影响下, 造成不同潜山岩溶带发育的厚度和分布的深度明显不同(图 14)。

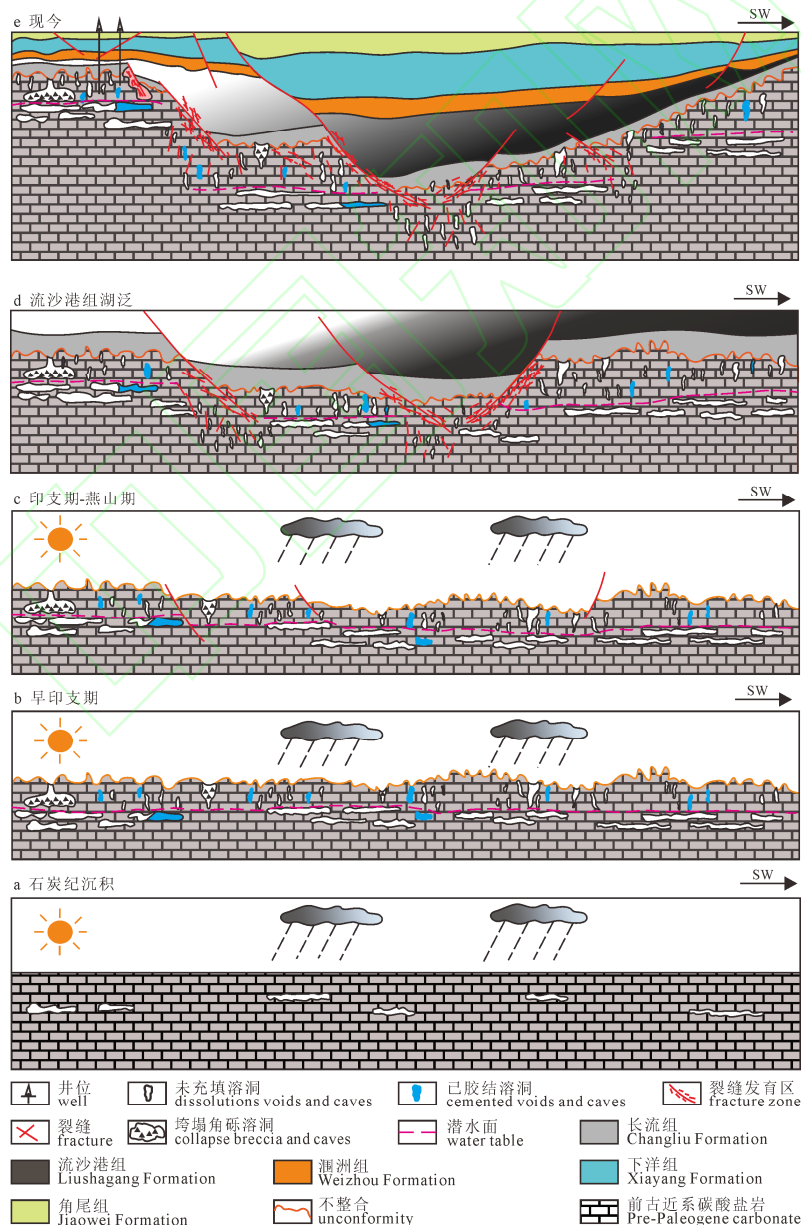


图 14 涠西南凹陷岩溶储层发育模式

Fig. 14 Development pattern of karst reservoirs in Weixi'nan Sag

5 结论

(1) 涪西南凹陷发育同生-准同生期岩溶、埋藏岩溶和表生风化壳岩溶三种岩溶环境, 以表生风化壳岩溶为主。表生岩溶储层具有分带性, 自上而下划分为表层岩溶带、垂直渗流带和水平潜流带; 涪西南凹陷各岩溶带在横向上具有可对比性。

(2) 涪西南凹陷碳酸盐岩潜山岩溶发育程度受沉积相、古地貌及后期构造运动控制。潮坪沉积环境下的白云岩的岩溶储层更发育; 古地貌的岩溶斜坡区岩溶更发育; 新生代断裂构造作用调整了原始岩溶储层带的分布深度, 导致现今不同潜山间的岩溶储层带分布深度有差异。

Acknowledgements:

This study was supported by China National Offshore Oil Corporation (No. CCL2020ZJFN0294).

参考文献:

- 程光华, 王丽. 2012. 涪西南凹陷石炭系储集体岩溶特征识别[J]. 内蒙古石油化工, 38(13): 147-148.
- 陈广坡, 徐国盛, 贾义蓉, 陈志宏. 2007. 南海石炭系潜山储层特征及地震识别[J]. 天然气工业, 27(10): 42-45, 134.
- 吴丰, 习研平, 张亚, 陈双玲, 姚聪, 杨雨然. 2020. 川东—川南地区茅口组岩溶储层分类识别及有效性评价[J]. 岩性油气藏, 32(2): 90-99.
- 何治亮, 魏修成, 钱一雄, 鲍征宇, 范明, 焦存礼, 彭守涛, 陈冬. 2011. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. 石油与天然气地质, 32(4): 489-498.
- 何治亮, 马永生, 张军涛, 朱东亚, 钱一雄, 丁茜, 陈代钊. 2020. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 41(1): 1-14.
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 焦立波, 杨希冰, 邓勇, 赵顺兰, 赵亚卓, 冯士信. 2018. 涪西南凹陷构造演化特征及潜山裂缝预测[J]. 长江大学学报(自然科学版), 15(7): 9-13, 4.
- 金强, 张三, 孙建芳, 魏荷花, 程付启, 张旭栋. 2020. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶相形成和演化[J]. 石油学报, 41(5): 513-525.
- 明盈, 徐亮, 周刚, 周红飞, 李毅, 戴鑫. 2021. 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, 44(1): 46-54.
- 师政, 陆建林, 王晔磊. 2018. 渤海湾盆地南堡地区碳酸盐岩内幕储层特征及测井识别[J]. 世界地质, 37(4): 1187-1196.
- 王大锐, 白志强. 1995. 广西及邻区泥盆系碳酸盐岩碳、氧同位素组成特征及意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 31(4): 460-467.
- 王红波. 1996. 北部湾盆地碳酸盐岩古潜山油气藏地质录井体会浅谈[J]. 中国海上油气(地质), 10(5): 346-348.
- 文华国, 陈浩如, 温龙彬, 周刚, 冯青平, 李爽. 2014. 四川盆地

- 东部石炭系古岩溶储层成岩流体: 来自流体包裹体、微量元素和C、O、Sr同位素的证据[J]. 岩石学报, 30(3): 655-666.
- 吴丰, 习研平, 张亚, 陈双玲, 姚聪, 杨雨然. 2020. 川东—川南地区茅口组岩溶储层分类识别及有效性评价[J]. 岩性油气藏, 32(2): 90-99.
- 徐守立, 尤丽, 代龙, 毛雪莲, 吴仕玖, 钟佳. 2020. 北部湾盆地涪西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(1): 94-103.
- 杨俊杰, 黄思静, 张文正, 黄月明, 刘桂霞, 肖林萍. 1995. 表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J]. 沉积学报, 13(4): 49-54.
- 赵顺兰, 赵亚卓, 杨希冰, 焦立波, 陈传福. 2018. 北部湾盆地涪西南凹陷碳酸盐岩潜山储层特征与主控因素分析[J]. 海洋学报, 40(9): 43-53.
- 张宝民, 刘静江. 2009. 中国岩溶储集层分类与特征及相关的理论问题[J]. 石油勘探与开发, 36(1): 12-29.

References:

- BOSÁK P, FORD D C, GLÁZEK J, HORÁČEK I. 1989. Paleokarst: A systematic and regional review[M]. New York: Elsevier.
- CHEN Guang-po, XU Guo-sheng, JIA Yi-rong, CHEN Zhi-hong. 2007. Reservoir characteristics and seismic identification in Carboniferous buried hill in South China Sea[J]. Natural Gas Industry, 27(10): 42-45, 134(in Chinese with English abstract).
- CHENG Guang-hua, WANG Li. 2012. Research on Karst characteristics of Carboniferous Reservoirs of Weixi'nian Sag[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 38(13): 147-148(in Chinese with English abstract).
- ESTEBAN M, KLAPPA C F. 1983. Subaerial exposure environment[C]//SCHOLLE P A, MOORE C H. 1983. Carbonate Depositional Environments. Tulsa, Okla, USA: AAPG (American Association of Petroleum Geologists): 1-54.
- FRITZ R D, WILSON J L, YUREWICZ D A. 1993. Paleokarst related hydrocarbon reservoirs[M]. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Core Workshop Note, 18.
- HE Zhi-liang, MA Yong-sheng, ZHANG Jun-tao, ZHU Dong-ya, QIAN Yi-xiong, DING Qian, CHEN Dai-zhao. 2020. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J]. Oil & Gas Geology, 41(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- HE Zhi-liang, WEI Xiu-cheng, QIAN Yi-xiong, BAO Zheng-yu, FAN Ming, JIAO Cun-li, PENG Shou-tao, CHEN Dong. 2011. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 32(4): 489-498(in Chinese with English abstract).
- HUANG Si-jing. 2010. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- JAMES N P, CHOQUETTE P W. 1988. Paleokarst[M]. New York: Springer-Verlag.
- JAMES N P, CHOQUETTE P W. 1989. Diagenesis 9. Lime-

- stones—The meteoric diagenetic environment[C]//SCHOLLE P A, JAMES N P, READ J F. Carbonate Sedimentology and Petrology.
- JIAO Li-bo, YANG Xi-bing, DENG Yong, ZHAO Shun-lan, ZHAO Ya-zhuo, FENG Shi-xin. 2018. The characteristics of structural evolution and fracture prediction of buried hill in Weixi'nan Sag[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 15(7): 9-13, 4(in Chinese with English abstract).
- JIN Qiang, ZHANG San, SUN Jian-fang, WEI He-hua, CHENG Fu-qi, ZHANG Xu-dong. 2020. Formation and evolution of karst facies of Ordovician carbonate in Tahe oilfield[J]. Acta Petrologica Sinica, 41(5): 513-525(in Chinese with English abstract).
- LONGMAN M W. 1980. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments[J]. AAPG Bulletin, 64(4): 461-487.
- MING Ying, XU Liang, ZHOU Gang, ZHOU Hong-fei, LI Yi, DAI Xin. 2021. Evolution characteristics of paleo-karst fracture and vug filling in Maokou Formation, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 44(1): 46-54(in Chinese with English abstract).
- SHI Zheng, LU Jian-lin, WANG Ye-lei. 2018. Characteristics and logging identification of carbonate inner reservoirs in Nanpu area, Bohai Bay Basin[J]. Global Geology, 37(4): 1187-1196(in Chinese with English abstract).
- VEIZER J, ALA D, AZMY K, BRUCKSCHEN P, BUHL D, BRUHN F, STRAUSS H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 161(1-3): 59-88.
- WANG Da-rui, BAI Zhi-qiang. 1995. Stable isotopic composition and significances of Devonian carbonates in Guangxi and adjacent areas, South China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 31(4): 460-467(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-bo. 1996. A Brief research on Geological Logging of Carbonate Buried Hill Oil and Gas Reservoirs in Beibu Gulf Basin[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 10(5): 346-348(in Chinese with English abstract).
- WEN Hua-guo, CHEN Hao-ru, WEN Long-bin, ZHOU Gang, FENG Qing-ping, LI Shuang. 2014. Diagenetic fluids of paleokarst reservoirs in Carboniferous from eastern Sichuan Basin: Some evidences from fluid inclusion, trace element and C-O-Sr isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 655-666(in Chinese with English abstract).
- WU Feng, XI Yan-ping, ZHANG Ya, CHEN Shuang-ling, YAO Cong, YANG Yu-ran. 2020. Classification and effectiveness evaluation of karst reservoirs of Maokou Formation in eastern and southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 32(2): 90-99(in Chinese with English abstract).
- XU Shou-li, YOU Li, DAI Long, MAO Xue-lian, WU Shi-jiu, ZHONG Jia. 2020. Characteristics of limestone buried-hills and their distribution in the Weixinan Depression of the Beibu Gulf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 40(1): 94-103(in Chinese with English abstract).
- YANG Jun-jie, HUANG Si-jing, ZHANG Wen-zheng, HUANG Yue-ming, LIU Gui-xia. 1995. Experimental simulation of dissolution for carbonate with different Ccomposition under the conditions from epigenesis to burial Ddiagenesis Eenvironment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 13(4): 49-54(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-min, LIU Jing-jiang. 2009. Classification and characteristics of karst reservoirs in China and related theories[J]. Petroleum Exploration and Development, 36(1): 12-29(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Shun-lan, ZHAO Ya-zhuo, YANG Xi-bing, JIAO Li-bo, CHEN Chuan-fu. 2018. An analysis on the characteristics and main controlling factors of reservoir in carbonate buried hill in the Weixi'nan Sag, Beibuwan Basin[J]. Haiyang Xuebao, 40(9): 43-53(in Chinese with English abstract).