川南云锦地区茅口组岩溶微地貌识别及储层特征

刘珍*，刘鹏，王鹏，刘志刚，温银宇

中国石油东方地球物理公司西南物探研究院，成都 610036

* 通信作者，E-mail：963653285@qq.com

2023-10-18 收稿；2024-02-05 修回；2024-02-19 接受

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)05-0144-09　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230576

摘　要：川南地区下二叠统茅口组岩溶储层发育，是川南常规油气勘探关键层系。表生型岩溶储层发育程度直接受控于丰富多变的岩溶微地貌，所形成的岩溶储层横向非均质性强。利用三维地震资料，结合地层厚度、梯度结构张量属性和地质体雕刻技术刻画了云锦地区东吴期岩溶微地貌特征，并通过模型正演和振幅属性，预测了表生岩溶储层有利区带。研究结果表明：①云锦地区在东吴期岩溶微地貌差异大，发育一系列岩溶塌陷体，在地震上表现为茅口组顶界地震同相轴“下拉”的特征；②利用梯度结构张量属性结合地质体雕刻技术有效刻画了云锦向斜区岩溶塌陷体，分析了其展布规律，平面上呈孤立、线状或连片 3 种展布方式；③岩溶塌陷体边缘两侧地震振幅减弱区，岩溶作用强烈，溶蚀孔洞发育，为储层发育有利区带。研究成果对后续川南云锦地区茅口组储层预测工作具有指导意义。

关键词：川南云锦向斜地区；茅口组岩溶微地貌；梯度结构张量属性；岩溶塌陷体；储层特征

四川盆地川南地区茅口组天然气广泛富集于岩溶储层之中[1-5]，经过 60 余年的勘探，已探明储量 852×10^8 m^3 [6]，是川南地区重要的产层之一，具有较大勘探潜力。早二叠世末期受东吴运动影响，茅口组顶界遭受长期大气淡水淋滤，地层遭受不同程度的剥蚀，发育表生型岩溶储层，但川南茅口组岩溶储层具有非均质性较强、缝洞充填程度较高的特点，表生型岩溶储层发育程度受控于岩溶地貌[7-10]。因此，精细刻画岩溶地貌特征，对预测茅口组表生型岩溶储层展布规律具有重要意义。前人[6-7, 10-11]对川南茅口组岩溶地貌的研究多为区域性展布规律认识，刻画了四川盆地区域范围内茅口组岩溶古地貌特征及有利区带分布特征，未深入对川南地区岩溶微地貌特征精细刻画。本次在前人研究的基础上，利用三维地震对岩溶微地貌进行精细雕刻，旨在明确储层展布特征，提高川南茅口组储层预测精度，指导该地区的勘探开发部署。

1　地质背景

云锦地区构造位于川南低陡构造带东部，为低缓的向斜构造，发育小型逆断裂，向斜面积约 240 km^2（图 1）。研究区茅口组形成于碳酸盐岩开阔台地的沉积背景之下，发育大量颗粒滩[12-15]，自下向上划分为茅一、茅二、茅三、茅四 4 个岩性段。茅口组沉积末期，东吴运动使地壳大面积抬升，茅口组出露地表，川南茅口组遭到了不同程度的剥蚀，其中，研究区整体位于川南地区岩溶缓斜坡内[16]，茅口组茅四段被完全剥蚀，茅三段出露，出露的碳酸盐岩地层经过长期的大气淡水淋滤溶蚀，发生了较强的岩溶作用[6, 17]。

2　岩溶微地貌刻画

2.1　岩溶地貌恢复方法

岩溶地貌反映了风化溶蚀的程度和面积范围，

著录信息：刘珍，刘鹏，王鹏，等. 川南云锦地区茅口组岩溶微地貌识别及储层特征［J］. 地质科技通报，2025，44(5)：144-152.
LIU Zhen, LIU Peng, WANG Peng, et al. Identification of karst micropaleogeomorphology and reservoir characteristics of Maokou Formation in the Yunjin area, southern Sichuan［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 144-152.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

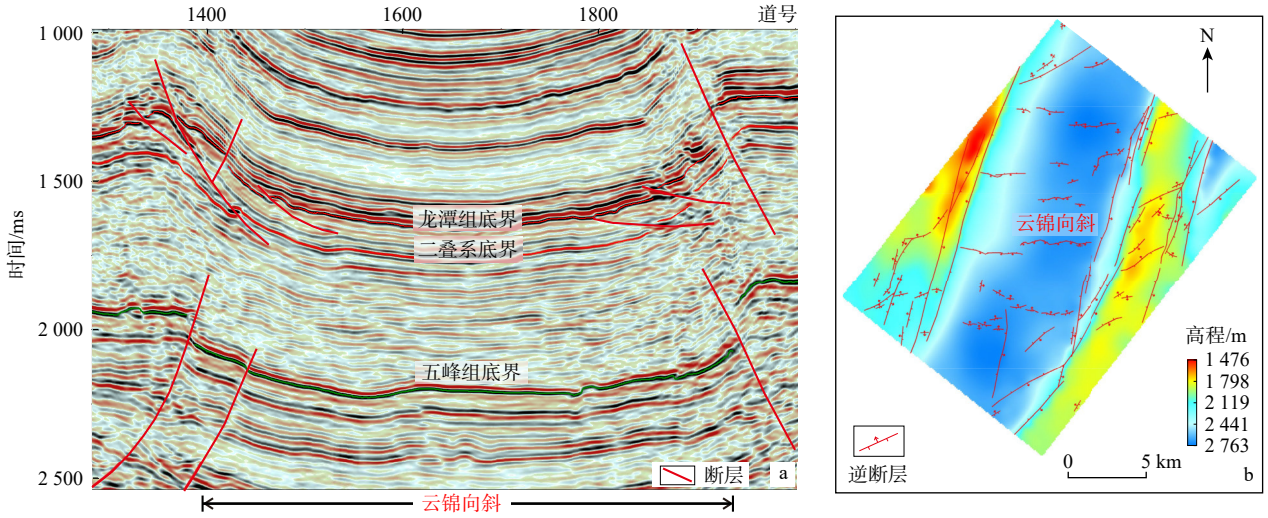


图 1　过云锦地区垂直构造方向地震剖面 (a) 及构造图 (b)

Fig. 1　Vertical structural seismic section (a) and structural map (b) in the Yunjin area

恢复地貌对认识岩溶储层的分布规律，指导勘探开发有利区具有重要意义[10, 18-20]。本次通过恢复茅口组上覆地层龙潭组沉积前古地貌，进而分析茅口组顶界岩溶微地貌特征，岩溶古地貌恢复方法目前常用的方法主要是印模法和残厚法[7, 18, 21-25]。印模法的关键在于选取目的层的上部基准面，茅口组上覆最近的标志层为龙潭组海侵泥岩，由于龙潭组厚度变化大，所以无法作为印模法的基准面。残厚法的关键在于目的层下伏基准面[7, 25-26]，研究区栖霞组为二叠系梁山组填平补齐后的整合碳酸盐岩台地沉积，厚度稳定[27]，茅一段为一套与栖霞组整合接触且稳定沉积的区域性泥质灰岩[11]，茅口组底部地貌起伏不大，可作为下伏基准面[27]，因此，选取残厚法来恢复茅口组顶界岩溶地貌特征。

2.2　岩溶微地貌特征

云锦地区茅口组时间厚度变化在 50 ~ 70 ms 范围，整体变化较小。根据残厚法绘制的岩溶地貌显示，地层时间厚度图上发育大量茅口组厚度明显减薄的岩溶塌陷体，形状为圆形或椭圆形，呈孤立、线状或连片 3 种展布方式(图 2)。

过岩溶塌陷体任意线地震剖面上(地震剖面位置见图 2)茅口组顶界地震反射同向轴有局部明显“下拉”的“V”形特征，地震振幅明显减弱(图 3)。一般形成该现象的地质成因有古岩溶塌陷、热液溶蚀塌陷及断层引起的地层下陷[28]。云锦地区岩溶塌陷体排列方式具有与断层延伸方向不一致(图 2)，且均发育在茅口组顶部的特点(图 3)，认为其成因直接受控于东吴期岩溶地貌。

剖面上地震反射时间 1 530 ms 附近茅口组顶界反射轴为区域性连续的强波峰反射，该地震剖面上茅口组顶界共存在 5 处地震同向轴明显“下拉”反射异常，为淡水淋滤、风化剥蚀引起古岩溶塌陷体，其中剖面上最左侧①号“下拉”异常与周围异常体距离较远，为独立岩溶塌陷体，②、③、④、⑤号 4 个“下拉”异常相邻发育，为连片岩溶塌陷体。

2.3　岩溶塌陷体刻画及特征

云锦地区属于岩溶缓斜坡微古地貌[16]，区域内单个岩溶塌陷体具有规模较小、平面延伸短的特征，在地震剖面上表现为同相轴小幅度“下拉”，无明显地层错断。

传统的相干属性和梯度结构张量属性是刻画岩溶塌陷的常用方法[29-30]，通过对比研究区茅口组顶界相干属性和梯度结构张量属性剖面可以看出，相干属性对断溶体立体轮廓刻画比较模糊，无法展示岩溶塌陷体的形态特征(图 4a)，而基于梯度结构张量属性对岩溶塌陷体边界轮廓刻画清晰(图 4b)。梯度结构张量属性是通过梯度矢量描述地质体的倾角和方位，用梯度张量矩阵的特征值来描述地震数据的结构特征，具有稳定性好、不易受构造影响、分辨率高、抗噪性高的特点[31-33]。因此，本次选取梯度结构张量属性进行岩溶塌陷体的雕刻。

基于梯度结构张量属性体，利用地质体三维空间雕刻技术开展岩溶塌陷体立体刻画。结果表明，研究区中部的岩溶塌陷体最为发育，且包含较多的连片岩溶塌陷体，岩溶塌陷体直径范围 100 ~ 200 m，塌陷范围深度 15 ~ 27 m，共雕刻岩溶塌陷体 98 个(图 5)，岩溶塌陷体总面积约 4 km^2，体积 2×10^7 m^3。

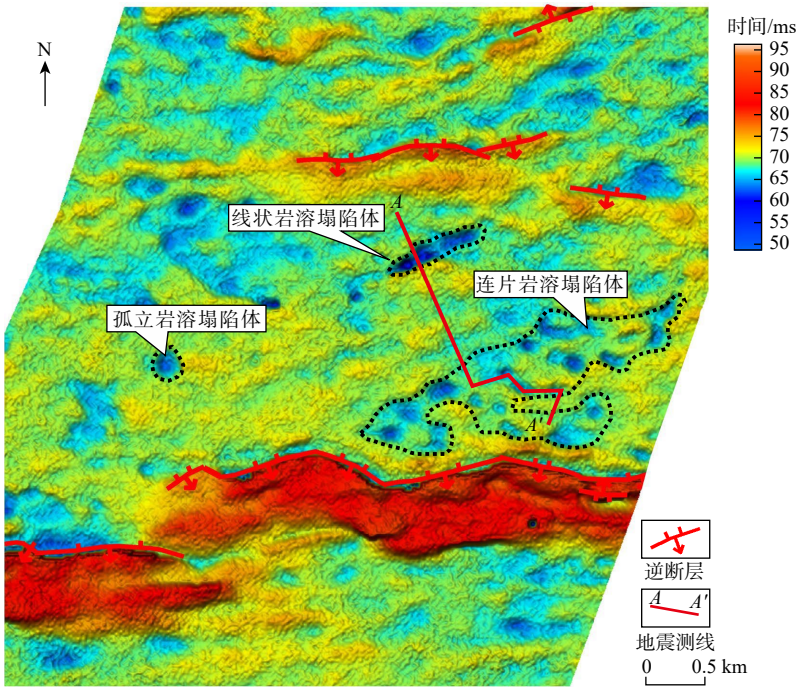


图 2　云锦地区茅口组时间厚度与断裂叠合图

Fig. 2　Temporal thickness and fault overlap map of the Maokou Formation in the Yunjin area

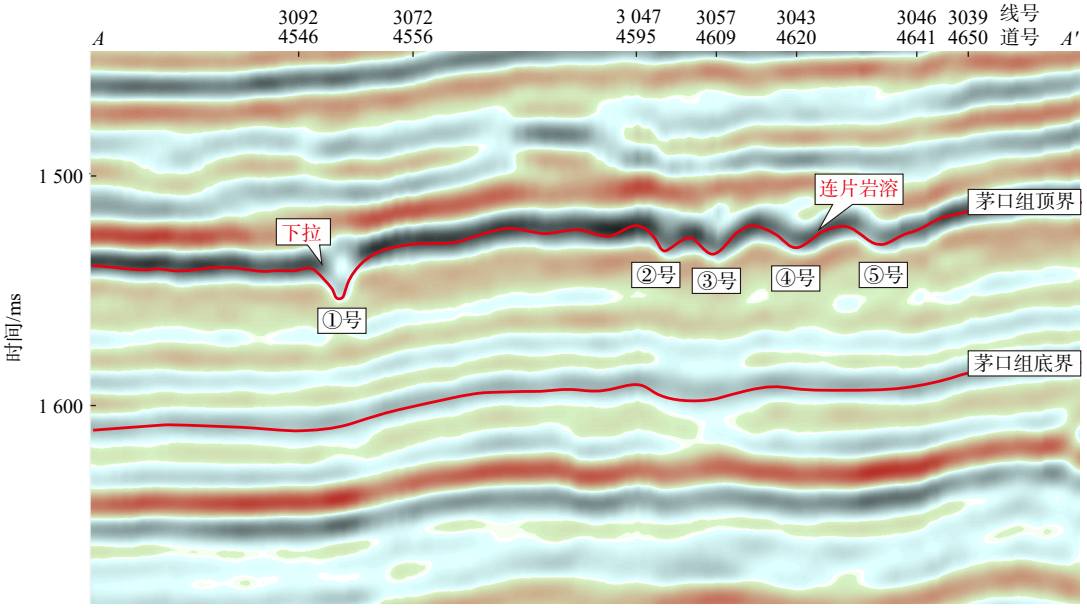


图 3　云锦地区三维地震剖面（①～⑤. 岩溶塌陷体编号，下同）

Fig. 3　3D seismic section in the Yunjin area

3　储层特征

3.1　岩溶塌陷体储层地质成因

岩溶作用与古地貌关系密切，岩溶塌陷体的顶部在该结构单元中属于岩溶高地位置，易受到风化剥蚀和大气淡水淋滤作用，由于地形较高，汇水面积小，因此溶蚀作用相对较弱；岩溶塌陷体两侧地形较陡，地貌高差大，既有地表水的下渗和地下水的侧向流动，也有地表径流的侵蚀，因此岩溶储层较为发育[11]，由于岩溶塌陷体两侧地势相对较高，龙潭组沉积期泥岩对孔洞充填作用较弱[34]；岩溶塌陷体底部长期与水体接触，溶蚀作用较强，但由于地势较低，溶蚀孔洞后期多被龙潭组泥岩充填，孔隙度较差[11]。因此，茅口组顶界岩溶塌陷体有效储层主要分布在其两侧部位。

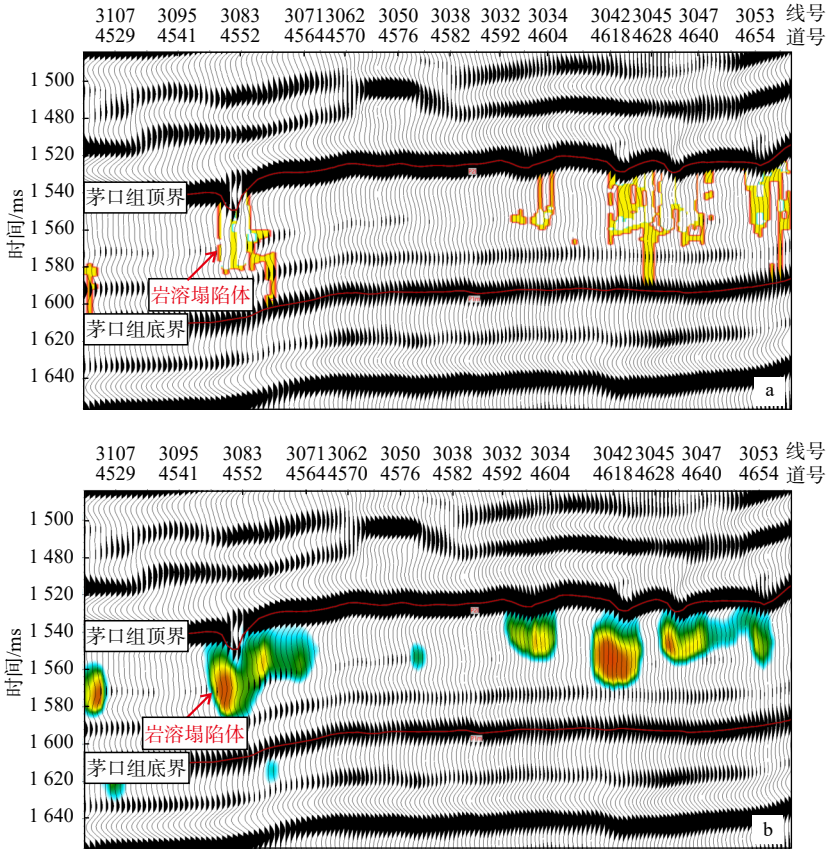


图 4　云锦地区茅口组顶界地震相干属性剖面 (a) 及梯度结构张量属性剖面 (b) 图

Fig. 4　Seismic coherence attribute section (a) and gradient structure tensor attribute section (b) at the top boundary of the Maokou Formation in the Yunjin area

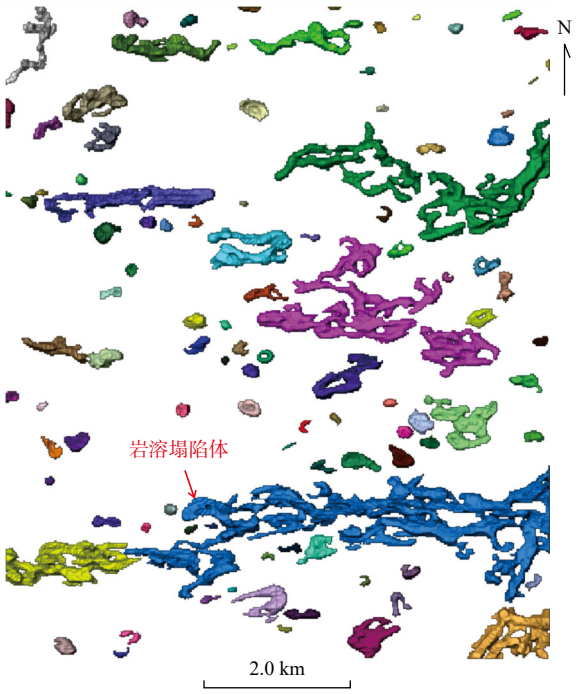


图 5　云锦地区茅口组岩溶塌陷体空间展布图

Fig. 5　Spatial distribution map of karst collapse bodies of the Maokou Formation in the Yunjin area

3.2　岩溶储层地震响应特征

储层发育程度差异引起不同的地震反射特征，川中地区经过钻井验证发现岩溶储层溶蚀越强烈，茅口组顶部地震反射振幅越弱[28]，研究区目前暂无钻井钻遇岩溶塌陷体，本次通过正演方法对比不同尺度(①、②、③和④号岩溶塌陷体)、有无储层发育的岩溶塌陷体(④号和⑤号岩溶塌陷体)的地震响应特征差异。正演模型中地层厚度和速度取自研究区实钻井，至上而下依次为龙潭组厚度 100 m，速度 4 300 m/s，茅三+茅二段厚度 100 m，速度 6 200 m/s，茅一段厚度 120 m，速度 6 000 m/s，储层速度 5 200 m/s。通过地震剖面计算岩溶塌陷体的岩溶深度和直径范围，对不同尺度的岩溶塌陷体进行储层正演，正演模型中①、②、③和④号岩溶塌陷体直径和深度均逐渐增大，岩溶储层厚度也逐渐增大，④号和⑤号塌陷体直径和深度相同(表 1，图 6a)，④号岩溶塌陷体发育储层，⑤号不发育储层。

通过正演发现②、③、④号岩溶塌陷体储层在茅口组顶界塌陷体两侧地震反射轴上振幅均有减弱现象，其中④号岩溶塌陷体地震反射振幅减弱现象

表 1　正演岩溶塌陷体发育尺度

Table 1　Scale for the development of karst collapse bodies in forward modeling

尺度	①号岩溶塌陷体	②号岩溶塌陷体	③号岩溶塌陷体	④号岩溶塌陷体	⑤号岩溶塌陷体
直径/m	40	80	120	160	160
深度/m	15	18	21	24	24

最明显，其次是③号和②号岩溶塌陷体，①、⑤号岩溶塌陷体地震反射振幅无明显变化特征(图 6b)，其中①号岩溶塌陷体储层厚度 15 m，龙潭组底界模型速度 4 300 m/s，本次正演根据地震资料选取主频 35 Hz，因此地震波长 122.85 m，地震波形能识别的最小地层厚度需大于 1/8 波长[35-38]，本次正演地震波形识别的最小地层厚度为 15.36 m，因此，龙潭组底界振幅无明显强弱变化。⑤号岩溶塌陷体无储层发育，未引起地震振幅强弱变化。因此，当岩溶塌陷体储层至少大于 15 m 时才能引起地震振幅减弱现象，且储层厚度越厚振幅减弱现象越明显。

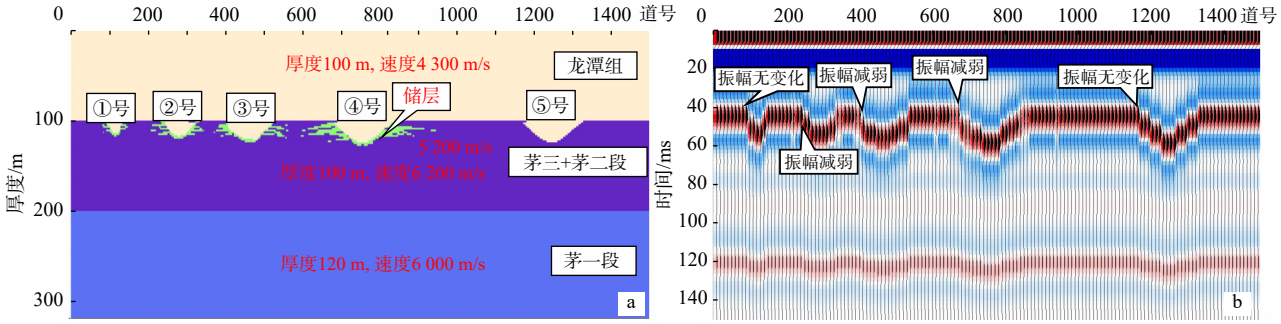


图 6　不同尺度岩溶塌陷体储层正演模型 (a) 及储层地震反射特征 (b) 图

Fig. 6　Forward modeling of karst collapse reservoirs at different scales (a) and seismic reflection characteristics of reservoirs (b)

根据正演结果沿茅口组顶界提取地震均方根振幅属性并叠合梯度结构张量属性(图 7)，通过振幅属性预测岩溶塌陷体储层有利区范围，图中暖色调为均方根振幅低值区，预测储层较为发育；冷色调预测岩溶储层厚度较薄或岩溶储层不发育。因此，均方根振幅低值区及岩溶塌陷体两侧储层发育叠合带为云锦地区茅口组岩溶储层勘探有利区。

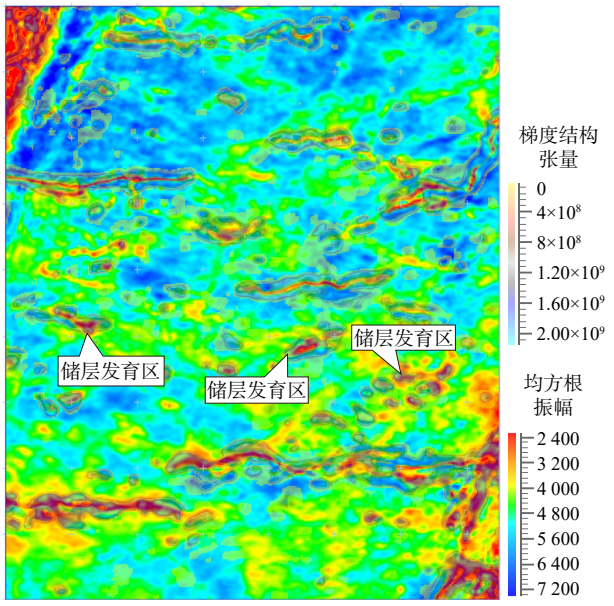


图 7　云锦地区茅口组顶界均方根振幅属性与梯度结构张量属性叠合平面图

Fig. 7　Overlapping plan of root mean square amplitude and gradient structure tensor attribute at the top boundary of the Maokou Formation in the Yunjin area

4　勘探意义

川南茅口组受东吴运动影响广泛发育表生型岩溶储层[39]，受东吴运动影响云锦向斜地区茅口组顶界广泛发育岩溶塌陷体，两侧为较好表生型岩溶储层。同时，茅口组岩溶塌陷体两侧储层具有较好的气源条件，早二叠世初期，地壳全面下沉，发生大面积海侵，龙潭组发育了一套海侵泥岩[40]，总有机碳含量 w(TOC)分布在 0.72% ~ 6.35%，烃源岩厚度一般在 50 ~ 100 m[41]，为良好的烃源岩，和下伏茅口组顶界岩溶塌陷体储层形成“上生下储”、“侧生旁储”的气源关系，同时龙潭组泥岩还可作为岩溶塌陷体储层的盖层[42]，因此茅口组顶界岩溶塌陷体具有良好的成藏条件，该发现同时可推广应用于川南云锦向斜邻区茅口组表生型岩溶储层勘探，拓展了川南茅口组岩溶储层勘探开发领域，具有较大勘探潜力。

5　结 论

(1)川南云锦地区茅口组经过长期的风化淋滤

作用，广泛发育岩溶塌陷体，但单个岩溶塌陷体规模小，溶蚀强度较弱，在地震反射轴上表现为茅口组顶界“下拉”异常。

（2）应用梯度结构张量属性刻画了云锦地区岩溶塌陷体，平面上具有孤立、线状或连片 3 种展布特征。

（3）岩溶塌陷体有效储层主要分布在两侧位置，储层发育厚度大于 15 m 可引起茅口组顶界地震反射振幅减弱，茅口组岩溶塌陷体储层具有良好成藏条件，在川南云锦向斜区广泛发育，勘探潜力大。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 桑琴，未勇，程超，等. 蜀南地区茅口组气藏气水分布特征及其控制因素 [J]. 中国地质，2012，39(3)：634-644.
SANG Q, WEI Y, CHENG C, et al. Gas-water distribution characteristics and control factors of Maokou Formation in Shunan (south Sichuan) area[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 634-644. (in Chinese with English abstract)

[2] 王雷，纪学武，屈卫华，等. 蜀南自贡地区茅口组岩溶储层成因及地震预测方法 [J]. 石油物探，2024，63(2)：437-448.
WANG L, JI X W, QU W H, et al. Genesis and seismic prediction of Maokou karst reservoirs in Zigong, southern Sichuan[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(2): 437-448. (in Chinese with English abstract)

[3] 江青春. 川中–蜀南地区茅口组岩溶储层油气成藏条件与有利区带预测 [J]. 大庆石油地质与开发，2024，43(4)：48-58.
JIANG Q C. Hydrocarbon accumulation conditions of karst reservoirs of Maokou Formation in central-southern Sichuan Basin and favorable plays prediction[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 48-58. (in Chinese with English abstract)

[4] 韩冰，朱斗星，刘冬民，等. 蜀南地区茅口组断溶模式及储层地震预测 [J]. 石油地球物理勘探，2022，57(增刊 1)：110-116.
HAN B, ZHU D X, LIU D M, et al. Fault-karst model and prediction based on seismic data of Maokou Formation in southern Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(S1): 110-116. (in Chinese with English abstract)

[5] 桑琴，黄静，程超，等. 蜀南地区茅口组古岩溶地貌与缝洞系统发育关系研究 [J]. 中国岩溶，2012，31(2)：212-219.
SANG Q, HUANG J, CHENG C, et al. Research on the relation between the ancient karst landform and the development features of fissure-cavity system in the Maokou Formation in Shunan region[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(2): 212-219. (in Chinese with English abstract)

[6] 黄士鹏，江青春，冯庆付，等. 川南地区中二叠统茅口组岩溶储集层类型与分布规律 [J]. 石油勘探与开发，2019，46(2)：281-289.
HUANG S P, JIANG Q C, FENG Q F, et al. Type and distribution of Mid-Permian Maokou Formation karst reservoirs in southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 281-289. (in Chinese with English abstract)

[7] 聂国权，淡永，徐亮，等. 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 G Q, DAN Y, XU L, et al. Characteristics and characterization of karst paleo-geomorphology and paleo-water system on the top of the Maokou Formation in the Z area in southern Sichuan Basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 911-917. (in Chinese with English abstract)

[8] 淡永，邹灏，梁彬，等. 塔北哈拉哈塘加里东期多期岩溶古地貌恢复与洞穴储层分布预测 [J]. 石油与天然气地质，2016，37(3)：304-312.
DAN Y, ZOU H, LIANG B, et al. Restoration of multistage paleogeomorphology during Caledonian Period and paleokarst cavernous reservoir prediction in Halahatang area, northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 304-312. (in Chinese with English abstract)

[9] 江青春，胡素云，汪泽成，等. 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 Q C, HU S Y, WANG Z C, et al. 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. (in Chinese with English abstract)

[10] 张坦，贾梦瑶，孙雅雄，等. 四川盆地南部中二叠统茅口组岩溶古地貌恢复及特征 [J]. 岩性油气藏，2024，36(1)：111-120.
ZHANG T, JIA M Y, SUN Y X, et al. Restoration and characteristics of karst paleogeomorphology of Middle Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 111-120. (in Chinese with English abstract)

[11] 张亚，陈双玲，张晓丽，等. 四川盆地茅口组岩溶古地貌刻画及油气勘探意义 [J]. 岩性油气藏，2020，32(3)：44-55.
ZHANG Y, CHEN S L, ZHANG X L, et al. Restoration of paleokarst geomorphology of Lower Permian Maokou Formation and its petroleum exploration implication in Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(3): 44-55. (in Chinese with English abstract)

[12] 徐祖新. 川东地区中二叠统茅口组天然气成因及气源 [J]. 特种油气藏，2019，26(2)：16-22.
XU Z X. Genesis and source of gas in Middle Permian Maokou Formation of eastern Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 16-22. (in Chinese with English abstract)

[13] 胡明毅，胡忠贵，魏国齐，等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测 [J]. 石油勘探与开发，2012，39(1)：45-55.
HU M Y, HU Z G, WEI G Q, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 45-55. (in Chinese with English abstract)

[14] 周进高，姚根顺，杨光，等. 四川盆地栖霞组–茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带 [J]. 天然气工业，2016，36(4)：8-15.
ZHOU J G, YAO G S, YANG G, et al. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 8-

15.（in Chinese with English abstract）

[15] 何钊, 高兆龙, 李国蓉, 等. 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 Z, GAO Z L, LI G R, et al. Dissolution stage and pattern of reservoirs in Maokou Formation in Yunjin area, southern Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(5): 537-545.（in Chinese with English abstract）

[16] 刘冉, 罗冰, 李亚, 等. 川西地区二叠系火山岩展布与茅口组岩溶古地貌关系及其油气勘探意义 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 575-585.
LIU R, LUO B, LI Y, et al. Relationship between Permian volcanic rocks distribution and karst paleogeomorphology of Maokou Formation and its significance for petroleum exploration in western Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 575-585.（in Chinese with English abstract）

[17] 桑琴, 未勇, 程超, 等. 蜀南地区二叠系茅口组古岩溶地区水系分布及岩溶地貌单元特征 [J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 393-402.
SANG Q, WEI Y, CHENG C, et al. Distribution of palaeokarst water system and palaeogeomorphic unit characteristics of the Permian Maokou Formation in southern Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography（Chinese Edition）, 2012, 14(3): 393-402.（in Chinese with English abstract）

[18] 熊晓军, 陈容, 袁野, 等. 四川盆地卧龙河构造茅口组岩溶储层地震预测 [J]. 石油学报, 2021, 42(6): 724-735.
XIONG X J, CHEN R, YUAN Y, et al. Seismic prediction of karst reservoirs of the Maokou Formation in Wolonghe structure of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(6): 724-735.（in Chinese with English abstract）

[19] 杨帆, 刘立峰, 冉启全, 等. 四川盆地磨溪地区灯四段风化壳岩溶储层特征 [J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 43-53.
YANG F, LIU L F, RAN Q Q, et al. Characteristics of weathering crust karst reservoir of Deng 4 Member in Moxi area, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(2): 43-53.（in Chinese with English abstract）

[20] 拜文华, 吕锡敏, 李小军, 等. 古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画: 以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例 [J]. 现代地质, 2002, 16(3): 292-298.
BAI W H, LÜ X M, LI X J, et al. The mode of palaeokarstification and the fine recon struction of the palaeogeomorphology in the karst basin: Taking Ordovician karst in eastern Ordos Basin for example[J]. Geoscience, 2002, 16(3): 292-298.（in Chinese with English abstract）

[21] 胡修权, 施泽进, 田亚铭, 等. 川东南地区茅口组岩溶古地貌恢复及特征 [J]. 地质通报, 2014, 33(6): 874-882.
HU X Q, SHI Z J, TIAN Y M, et al. The restoration of karst ancient landform of the Maokou Formation in southeastern Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(6): 874-882.（in Chinese with English abstract）

[22] 樊婷婷, 周梦影, 郭远智, 等. 鄂尔多斯盆地胡尖山地区前侏罗纪古地貌特征与油气成藏模式 [J]. 能源与环保, 2024, 46(7): 1-7.
FAN T T, ZHOU M Y, GUO Y Z, et al. Pre-Jurassic palaeogeomorphology characteristics and oil and gas reservoir-forming mode in Hujianshan area of Ordos Basin[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(7): 1-7.（in Chinese with English abstract）

[23] 毛飞跃, 侯长冰, 苟幸福, 等. 鄂尔多斯盆地镇原油田侏罗系古地貌与油成藏关系分析 [J]. 岩性油气藏, 2013, 25(5): 44-48.
MAO F Y, HOU C B, GOU X F, et al. Relation between Jurassic paleogeomorphology and hydrocarbon accumulation in Zhenyuan Oilfield, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 44-48.（in Chinese with English abstract）

[24] 朱正平, 罗文军, 潘仁芳, 等. 川中高石梯–磨溪地区灯四段古地貌恢复及其对储层的控制作用 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 730-738.
ZHU Z P, LUO W J, PAN R F, et al. The paleogeomorphology restoration of Sinian Deng 4 Member and its control on reservoir formation in the Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 730-738.（in Chinese with English abstract）

[25] 冯磊, 刘宏, 谭磊, 等. 岩溶古地貌恢复及油气地质意义: 以四川盆地泸州地区中二叠统茅口组为例 [J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 60-69.
FENG L, LIU H, TAN L, et al. Karst paleogeomorphology restoration and hydrocarbon geological significance: A case study of Middle Permian Maokou Formation in Luzhou area of Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(1): 60-69.（in Chinese with English abstract）

[26] 贾浪波, 刘海锋, 薛云龙, 等. 靖边气田东侧陕X区块古地貌和气水分布规律 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5022-5032.
JIA L B, LIU H F, XUE Y L, et al. Paleo-geomorphology and gas-water distribution law in Shaan X Block on the east side of Jingbian gas field[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 5022-5032.（in Chinese with English abstract）

[27] 胡明毅, 魏国齐, 胡忠贵, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组层序: 岩相古地理 [J]. 古地理学报, 2010, 12(5): 515-526.
HU M Y, WEI G Q, HU Z G, et al. Sequence-lithofacies palaeogeography of the Middle Permian Qixia Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography（Chinese Edition）, 2010, 12(5): 515-526.（in Chinese with English abstract）

[28] 戴晓峰, 冯周, 王锦芳. 川中茅口组岩溶储层地球物理特征及勘探潜力 [J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(5): 1049-1058.
DAI X F, FENG Z, WANG J F. Geologic and geophysical characteristics and exploration potential of karst reservoirs at Maokou Formation in the central Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(5): 1049-1058.（in Chinese with English abstract）

[29] RANDEN T, MONSEN E, SIGNER C, et al. Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis[C]//Anon. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2000. [S. l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2000: 668-671.

[30] BAKKER P. Image structure analysis for seismic interpretation[M]. Nethelands: Technische Universiteit Delft, 2003.

[31] 张军华, 董猛, 周振晓, 等. 基于GST的相干体方法研究及应用 [J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊1): 381-383.
ZHANG J H, DONG M, ZHOU Z X, et al. Research and applica-

tion of coherent volume method based on GST[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(S1): 381-383. (in Chinese with English abstract)

[32] 张晟, 李亚林, 肖又军, 等. 利用梯度结构张量刻画碳酸盐岩缝洞体边界 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 907-915.
ZHANG S, LI Y L, XIAO Y J, et al. Research and application of carbonate fracture-cavity boundary characterization method based on gradient structure-tensor[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 907-915. (in Chinese with English abstract)

[33] 崔正伟, 程冰洁, 徐天吉, 等. 基于构造导向滤波与梯度结构张量相干属性的储层裂缝预测方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3): 555-563.
CUI Z W, CHENG B J, XU T J, et al. Reservoir fracture prediction method and application based on structure-oriented filtering and coherent attributes of gradient structure tensor[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(3): 555-563. (in Chinese with English abstract)

[34] 李笑天, 潘仁芳, 鄢杰, 等. 四川盆地灯四段岩溶古地貌精细刻画及油气勘探意义 [J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 191-195.
LI X T, PAN R F, YAN J, et al. Karst paleogeomorphology features of the Fourth Member of Dengying Formation in Sichuan Basin and the significance of oil and gas exploration[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(3): 191-195. (in Chinese with English abstract)

[35] WIDESS M B. How thin is a thin bed?[J]. Geophysics, 1973, 38(6): 1176-1180.

[36] KALLWEIT R S, WOOD L C. The limits of resolution of zero-phase wavelets[J]. Geophysics, 1982, 47(7): 1035-1046.

[37] 李敏. 薄层地震响应特征及预测方法研究 [D]. 湖北荆州: 长江大学, 2023.
LI M. Study on seismic response characteristics and prediction method of thin layer[D]. Jingzhou Hubei: Yangtze University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[38] 潘蓓, 顾汉明. 碎屑岩储层模型的转换波正演模拟波场特征及其分辨率分析 [J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 186-191.
PAN B, GU H M. Analysis of wave field characteristics and resolution of converted wave forward modeling based on clastic reservoir model[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(2): 186-191. (in Chinese with English abstract)

[39] 杨柳, 朱亚东, 刁永波, 等. 川南荷包场地区茅口组油气地质条件新认识 [J/OL]. 天然气地球科学: 1-16[2025-01-08]. http: //kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20230901.1559.011.html.
YANG L, ZHU Y D, DIAO Y B, et al. New understanding of the oil and gas geological conditions of the Maokou Formation in the Hebaochang area of southern Sichuan Basin[J/OL]. Natural Gas Geoscience: 1-16[2025-01-08]. http: //kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20230901.1559.011.html. (in Chinese with English abstract)

[40] 肖笛, 谭秀成, 郗爱华, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组碳酸盐岩岩溶特征: 古大陆环境下层控型早成岩期岩溶实例 [J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 457-476.
XIAO D, TAN X C, XI A H, et al. Palaeokarst characteristics of carbonate rocks of the Middle Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin: Example of strata-bound eogenetic karst in palaeo-continental settings[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2015, 17(4): 457-476. (in Chinese with English abstract)

[41] 张宏光. 川南地区茅口组岩溶缝洞群气藏成藏主控因素 [J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(1): 21-26.
ZHANG H G. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in fractured-vuggy karst gas reservoirs of Maokou Formation, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2020, 14(1): 21-26. (in Chinese with English abstract)

[42] 黎荣, 胡明毅, 杨威, 等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 369-379.
LI R, HU M Y, YANG W, et al. Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 369-379. (in Chinese with English abstract)

Summary for “川南云锦地区茅口组岩溶微地貌识别及储层特征”

Identification of karst micropaleogeomorphology and reservoir characteristics of Maokou Formation in the Yunjin area, southern Sichuan

LIU Zhen*, LIU Peng, WANG Peng, LIU Zhigang, WEN Yinyu

BGP Inc., China National Petroleum Corporation Southwest Geophysical Research Institute, Chengdu 610036, China

* Corresponding author, E-mail: 963653285@qq.com

Abstract: [**Objective**] The development of karst reservoirs in the Maokou Formation of the Lower Permian in southern Sichuan Province is critical for conventional oil and gas exploration in this region. The development level of supergene karst reservoirs is directly controlled by the rich and diverse karst microgeomorphology, leading to strong lateral heterogeneity within these reservoirs. [**Methods**] In this study, 3D seismic data, combined with strata thickness, gradient structure tensor attributes, and geological body carving techniques, were employed to characterize the microgeomorphic features of the Dongwu karst in the Yunjin area. Moreover, favourable zones for surface karst reservoirs were predicted through model forward modeling and amplitude attributes. [**Results**] The results suggested that significant differences in karst microgeomorphology existed during the Dongwu period in the Yunjin area, where a series of karst caves developed. These caves exhibit a seismic feature of a "pull-down" in the seismic event axis at the top boundary of the Maokou Formation. ② The distribution pattern of karst collapse bodies in the Yunjin syncline area was effectively characterized using gradient structure tensor attributes combined with geological body carving technology. The karst collapse bodies exhibit three distinct distribution patterns: Isolated, linear, or contiguous distributions. ③ The seismic amplitude on both sides of the karst collapse bodies is weakened, indicating strong karstification and the development of karst caves, which are favorable zones for reservoir development. [**Conclusion**] This research provides guidance for the subsequent prediction and exploration of reservoirs of the Maokou Formation.

Key words: Yunjin synclinal area in southern Sichuan; Maokou Formation karst microgeomorphology; gradient structure tensor attribute; karst collapse body; reservoir characteristic

Received: 2023-10-18; Revised: 2024-02-05; Accepted: 2024-02-19

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230576