

文章编号: 1671-1505(2025)03-0560-18 DOI:10.7605/gdtxb.2025.058

四川盆地中二叠世茅口期构造-沉积分异与 峨眉山地幔柱活动的耦合关系*

袁海锋^{1,2} 张本健³ 匡明志^{1,2} 张玺华³ 李文杰^{1,2} 彭瀚霖³
陈聪³ 肖钦仁^{1,2} 王涛^{1,2} 王炳森^{1,2} 山述娇³ 李天军³ 袁浩^{1,2}

1 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059

2 成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川成都 610059

3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610051

摘要 四川盆地中二叠统茅口组二段滩相白云岩储集层近期获得天然气勘探重大发现, 而该滩相白云岩的分布主要受茅口期沉积演化和构造-沉积分异的动力学背景控制。本研究综合野外露头、钻录测井以及牙形刺化石等资料, 梳理川中—川北地区茅口组岩石地层和生物地层的对应关系, 讨论峨眉山地幔柱活动与茅口期沉积演化的耦合关系, 限定构造-沉积分异时间。研究认为: (1) 峨眉山地幔柱火山喷发前的地壳隆升控制了茅一段—茅二下亚段沉积期南西高、北东低的碳酸盐岩缓坡沉积格局, 茅二上亚段沉积期地幔柱活动驱动碳酸盐岩缓坡演化为碳酸盐岩台地, 发生构造-沉积分异, 形成绵竹—蓬溪台洼、广元—开江陆棚以及近 400 km 长的剑阁—丰都大型台缘带; (2) 构造-沉积分异始于 *J. altudaensis* 牙形刺带, 时间为 263—262 Ma; 之后地幔柱活动增强, 广元—开江盆地相向北扩张; (3) 川西南地区茅口组沉积期可能存在火山水下喷发事件, 都江堰—简阳一带可能发育近东西向的台洼; (4) 晚二叠世长兴期绵阳—武胜陆棚以及开江—梁平海槽最晚在茅二上亚段沉积期开始出现雏形。

关键词 构造-沉积分异 沉积演化 峨眉山地幔柱 茅口组 四川盆地

第一作者简介 袁海锋, 男, 1980 年生, 教授, 主要研究方向为油气成藏动力学及储层地质学。E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Coupling of tectonic-sedimentary differentiation and Emeishan mantle plume during the Middle Permian Maokouan in Sichuan Basin

YUAN Haifeng^{1,2} ZHANG Benjian³ KUANG Mingzhi^{1,2} ZHANG Xihua³ LI Wenjie^{1,2} PENG Hanlin³
CHEN Cong³ XIAO Qinren^{1,2} WANG Tao^{1,2} WANG Bingsen^{1,2} SHAN Shujiao³ LI Tianjun³ YUAN Hao^{1,2}

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 41872130), 四川省自然科学基金青年基金项目 (编号: 2023NSFSC0759) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872130), and the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2023NSFSC0759)]

收稿日期: 2024-11-09 改回日期: 2025-03-14

Abstract Recent significant breakthroughs in natural gas exploration have been achieved in the shoal-facies dolomite reservoirs of Member 2 of the Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin. The distribution of these dolomite reservoirs is fundamentally controlled by the dynamic interplay between sedimentary evolution and tectonic-sedimentary differentiation during the Maokouan stage under the influence of the Emeishan mantle plume. Integrating field outcrops, drilling data, well logs, and conodont biostratigraphy, this study establishes the correlation between lithostratigraphic and biostratigraphic frameworks in the central-northern Sichuan Basin, investigates the coupling mechanism between Emeishan plume activity and Maokouan sedimentary evolution, and precisely constrains the timing of tectonic-sedimentary differentiation. Key findings include: (1) Pre-eruptive crustal uplift induced by the Emeishan mantle plume established a SW-high/NE-low carbonate ramp during the deposition of Member 1 to Lower Member 2 of Maokou Formation. Subsequent plume-driven tectonic activity transformed the ramp into a differentiated platform system during Upper Member 2 deposition, forming the Mianzhu-Pengxi intraplateau depression, Guangyuan-Kaijiang shelf, and the 400 km-long Jian'ge-Fengdu platform-margin belt. (2) Tectonic-sedimentary differentiation initiated within the *Jinogondolella altudaensis* conodont zone (263–262 Ma), with subsequent intensification of plume activity triggering northward expansion of the Guangyuan-Kaijiang basin facies. (3) Subaqueous volcanic eruptions likely occurred in southwestern Sichuan during the Maokouan stage, potentially developing an E-W trending intraplateau depression along the Dujiangyan-Jianyang area. (4) Prototypes of the Mianyang-Wusheng shelf and Kaijiang-Liangping intraplateau trough, characteristic of the Late Permian Changhsingian stage, were established no later than the depositional stage of the Upper Member 2 of Maokou Formation.

Key words tectonic-sedimentary differentiation, sedimentary evolution, Emeishan mantle plume, Maokou Formation, Sichuan Basin

About the first author YUAN Haifeng, born in 1980, professor, is engaged in research on hydrocarbon accumulation dynamics and reservoir geology. E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn.

0 引言

中二叠统茅口组是四川盆地天然气勘探的重要目标层系。自 20 世纪 50 年代开始,围绕茅口组岩溶缝洞型灰岩储集层,先后发现了自流井、荷包场、阳高寺、云锦、福禄场等气田或含气构造;2012 年之后,相继在涪陵、卧龙河等构造钻遇白云岩储集层,揭示出茅口组油气勘探新领域;2019 年,川北元坝构造茅三段测试获气 $105.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,首次实现了台缘浅滩领域的油气勘探重大突破(胡东风,2019);2021 年以来,磨溪—龙女寺、合川、潼南、八角场等构造多口钻井钻遇茅二段滩相白云岩储集层并获百万方工业气流(杨雨等,2021;何文渊等,2023)。近年来发现的规模性储集层显示出明显的相控特征(杨雨等,2021;文龙等,2023),表明茅口组天然气勘探具有更广阔的前景。然而,对于茅口组的沉积格局、沉积演化过程及其控储机制目前尚未达成共识,制

约了茅口组的油气勘探。

四川盆地茅口组沉积模式存在碳酸盐岩缓坡(赵宗举等,2012;张运波等,2013;郝毅等,2020)与碳酸盐岩镶边台地(胡明毅等,2012;周进高等,2016;厚刚福等,2017;郝毅等,2020)2 种不同的观点,也有学者认为茅口组沉积期经历了从碳酸盐岩缓坡向碳酸盐岩镶边台地的转换(胡东风,2019;文龙等,2023;冯许魁等,2024),但有关碳酸盐岩缓坡转换为碳酸盐岩台地的时限、演化过程与动力学背景尚未得到证实、约束和解释。不少学者将茅二段白云岩储集层成因归因于与峨眉山大火成岩省相关的热液白云石化(金振奎和冯增昭,1999;李毅等,2013;杨光等,2015;刘宏等,2016;李红等,2021),但岩石学特征却表明其原岩为高能环境下沉积的颗粒滩,储集层分布明显受相带控制(杨雨等,2021;文龙等,2023),颗粒基质的规模白云石化和孔隙形成

发生在早成岩期(肖钦仁等, 2023, 2024; 徐婷等, 2024)。也有学者提出川北元坝地区茅三段台缘浅滩相储集层受控于峨眉地裂运动(胡东风, 2019), 或者认为峨眉山玄武岩喷发前的大幅度地表隆升造成茅口顶部的普遍剥蚀和沉积缺失(He *et al.*, 2010; 程雪莹, 2017), 导致四川盆地及周缘茅口组顶部广泛发育古喀斯特及不整合面, 控制了岩溶缝洞型储集层的发育(陈宗清, 2007; 胡东风, 2019)。然而, 峨眉山大火成岩省(ELIP)内带、中带、外带的部分钻井和野外剖面均揭示茅口组发育完整的牙形刺带, 如广元上寺(Sun *et al.*, 2010)、广元西北乡(胡朝伟等, 2020)、广元朝天(Lai *et al.*, 2008)与来宾蓬莱滩(Jin *et al.*, 2006)等剖面, 表明茅口组沉积期末至峨眉山玄武岩规模喷发之前, 茅口组顶部沉积缺失或剥蚀范围可能也是有限的。总之, 尽管仍存一定争议, 但学者们已经意识到茅口组的沉积演化和储集层成因可能与峨眉山大火成岩省有密切联系。

峨眉山大火成岩省分布于中国西南部地区及越南西北部地区, 主要表现为玄武岩的大量喷发和溢流以及辉绿岩岩体的侵入, 面积约 $0.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 成因与地幔柱活动有关(侯增谦等, 1999; Shellnutt *et al.*, 2020)。峨眉山地幔柱活动始于晚志留世或泥盆纪, 强烈活动于晚二叠世, 结束于中三叠世(罗志立等, 1988; 肖龙等, 2005)。高精度同位素年代学与生物地层学表明, 峨眉山玄武岩喷发开始于 263 Ma, 至 259.1 Ma 达到顶峰, 但火山活动可能一直延续至 257.1 Ma(Sun *et al.*, 2010; Shellnutt *et al.*, 2012, 2020; Zhong *et al.*, 2014, 2020)。峨眉山地幔柱活动可能是多阶段的, 且不同阶段具有不同的地质响应, 早期为地壳的穹状隆升, 中期为水下喷发和地壳下沉, 晚期为陆上喷发(朱江, 2019)。茅口组沉积期是峨眉山地幔柱活动的鼎盛时期, 地幔柱多阶段活动对茅口组沉积演化以及成岩、成储的影响亟需探索。

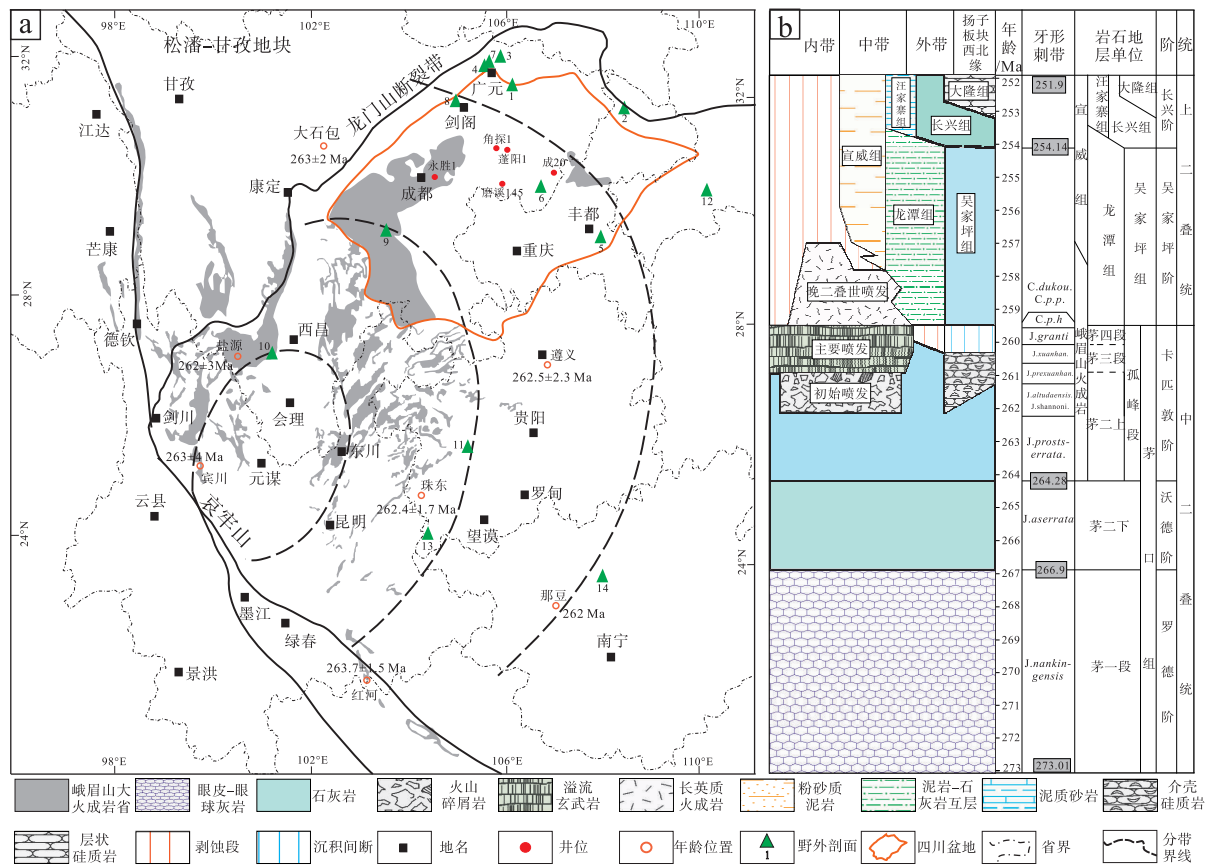
针对上述问题, 在梳理前人有关峨眉山地幔柱活动研究成果的基础上, 选择四川盆地中部与北部地区茅口组典型钻井和露头剖面, 以岩相学与牙形刺生物地层学为基础, 对茅口组岩石地层进行了等时约束; 以作者近期成果认识为基础, 修编完善前人沉积相成果认识(杨雨等, 2021; 文龙等, 2023; 冯许魁等, 2024), 通过分析茅口组沉积期沉积格局

的平面分布与演变, 限定茅口组沉积期构造-沉积分异的时限, 讨论峨眉山地幔柱活动与茅口组沉积演化的耦合关系, 以期油气勘探提供借鉴。

1 区域地质背景

四川盆地处于扬子板块西缘(图 1-a), 经历了多期构造运动, 是典型的多旋回克拉通盆地(何登发等, 2011; 刘树根等, 2011)。由于冈瓦纳大陆冰盖融化导致早一中二叠世发生海侵作用, 四川盆地再次接受沉积, 发育下二叠统梁山组以及中二叠统栖霞组和茅口组(黄涵宇等, 2017)。中二叠纪瓜德鲁普世末期, 全球发生大规模海退, 四川盆地不仅受到该海退事件的影响, 还叠加了峨眉山大火成岩省事件作用, 造成中二叠统茅口组顶部地层区域性缺失, 与上二叠统吴家坪组/龙潭组呈平行不整合接触(罗志立等, 1988; 何斌等, 2004, 2006)。从基底形成到晚期成盆, 四川盆地经历了六大沉积、构造旋回, 其中加里东旋回晚期挤压隆升—海西中晚期裂陷运动以及东吴运动对中二叠统沉积格局、储集层发育具有重要控制作用(马新华等, 2019a)。

四川盆地中二叠统总体为一套碳酸盐岩夹泥页岩和硅质岩的海相沉积, 纵向上形成了栖霞组和茅口组 2 个海侵海退的沉积旋回, 茅口组呈假整合或整合于栖霞组之上。栖霞组沉积期, 扬子地区发生大规模的海侵, 发育一套稳定的浅海碳酸盐沉积, 其中在栖霞组沉积中晚期, 川西发育缓坡型台地边缘颗粒滩沉积, 川中古隆起周缘发育台内颗粒滩相沉积。茅口组沉积早期, 受大规模海侵的影响(王成善等, 1999), 底部发育一套眼皮—眼球状泥质灰岩和泥晶灰岩组合(匡明志等, 2024), 该套岩性组合在盆地内及周缘广泛发育; 茅口组沉积中期, 海平面下降(Haq and Schutter, 2008), 沉积坡折带附近开始发育颗粒滩; 自茅口组沉积中晚期开始, 在川北—川中—川东南地区形成一系列台地边缘、台洼和台内裂陷(张玺华等, 2018; 杨雨等, 2021; 陈蟒蛟等, 2023); 至茅口组沉积期末, 海平面下降, 受东吴运动以及地幔柱强烈活动影响, 其顶部遭受大气水溶蚀, 广泛发育喀斯特, 其中上扬子西南大部分地区茅口顶部发育一套风化壳; 之后峨眉玄武岩大规模喷发(何斌等, 2004)。上二叠统龙潭组/吴家坪组沉积时期, 川西南—川



野外剖面：1-旺苍王家沟，2-双河口，3-宁强石羊栈，4-广元西北乡，5-丰都雪玉洞，6-华蓥二崖，7-广元朝天，8-剑阁上寺，9-峨边，10-宾川，11-贵州熊家场，12-猫儿山，13-坪地，14-蓬莱滩+铁桥；年龄资料来源：262±3 Ma (Guo et al., 2004)，263±4 Ma (He et al., 2008)，263±2 Ma (Zi et al., 2010)，262 Ma (侯莹玲等, 2014)，262.4±1.7 Ma (朱江, 2019)，263.7±1.5 Ma (Shellnutt et al., 2020)，262.5±2.3 Ma (Yan et al., 2020)

图 1 四川盆地茅口组剖面位置、峨眉山玄武岩分布 (a) 和中上二叠统地层柱状图 (b)
Fig. 1 Section location, distribution of Emeishan basalt (a), and stratigraphic column of the Middle-Upper Permian (b) in Sichuan Basin

东北发育陆相—海陆过渡相—海相沉积(图 1-b)，与茅口组呈不整合。

2 地层划分与对比

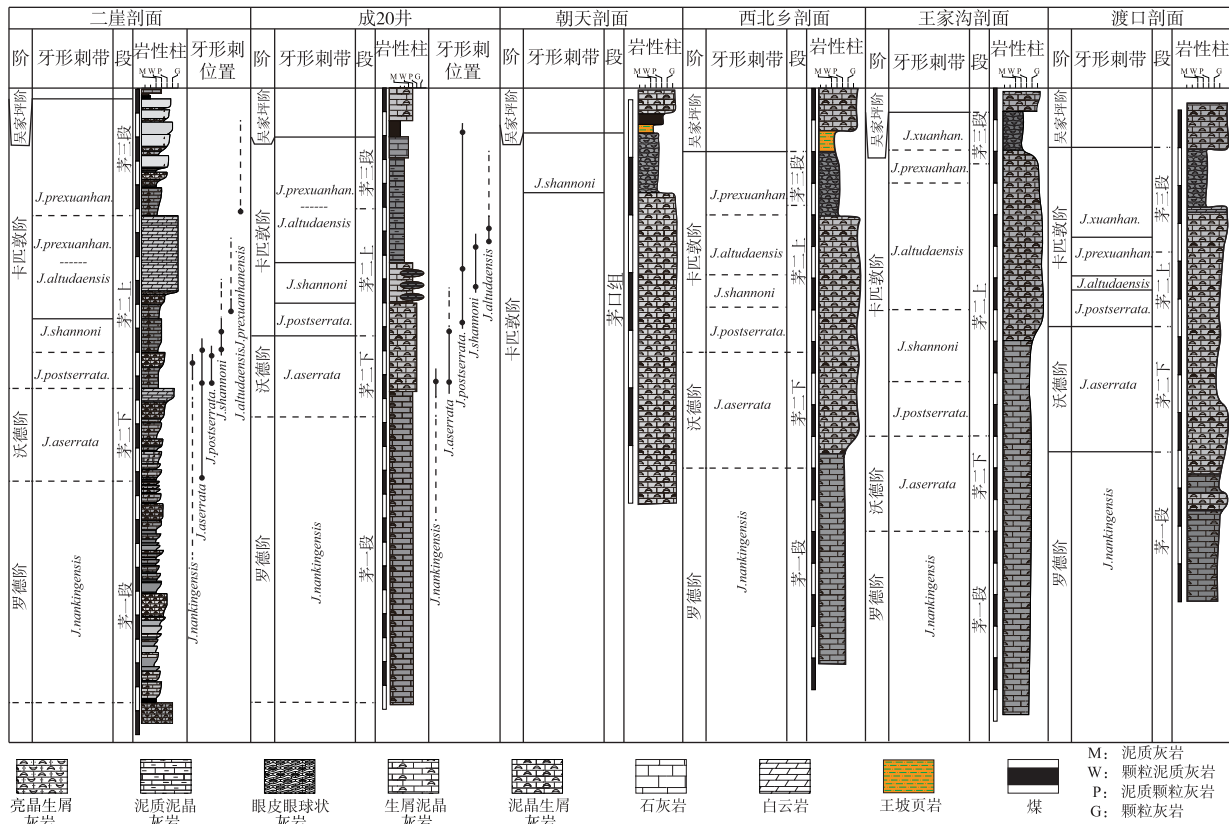
茅口组对应于国际地层系统的瓜德鲁普统 (Guadalupian)，时间跨度为 273.01—259.51 Ma，自下而上包括罗德阶 (Roadian)、沃德阶 (Wordian) 和卡匹敦阶 (Capitanian)，共发育 9 个牙形刺带 (沈树忠等, 2019)。考虑到盆地不同位置及茅口组相带变化，本次研究重点对地层出露较好的广元西北乡、华蓥二崖、旺苍王家沟以及盆地内取心资料较全的成 20 井开展牙形刺生物地层研究，梳理出茅口组各亚段的沉积时限，其中茅一段对应罗德阶 (*J. nankingensis* 带)，茅二段下亚段大致对应于沃

德阶 (*J. aserrata* 带)，茅二段上亚段 (*J. postserrata*-*J. prexuanhanensis* 带)、茅三段 (*J. prexuanhanensis*-*J. xuanhanensis* 带) 及茅四段 (*J. granti*-*C. postbitteri hongshuiensis* 带) 对应卡匹敦阶(图 2; 图 3)。

野外剖面详测的 GR 曲线形态和钻井剖面的 GR 曲线旋回可以进行横向对比(图 4)，依此初步建立上扬子北缘二叠系茅口组岩石地层和生物地层的对应关系，从而为讨论峨眉山地幔柱活动与茅口期沉积演化的关系建立了等时地层框架。

3 沉积格局及演化

四川盆地中二叠统茅口组经历了早期缓坡体系向中晚期台地—海槽沉积体系的转化，在沉积响应上具体表现为 3 个方面。首先，茅一段的厚度具有



广元朝天及渡口剖面牙形刺带据 Mei et al., 1994; Lai et al., 2008

图 2 四川盆地北部中二叠统茅口组牙形刺带对比

Fig. 2 Comparison of conodont zones of the Middle Permian Maokou Formation in northern Sichuan Basin

自南向北增大的特征 (苏成鹏等, 2021), 符合缓坡古地貌背景下的整体海侵沉积趋势, 并且该厚度变化呈现出以川西南为中心的环带状, 指示多级坡折对相带转换位置的潜在控制作用; 其次, 茅二下亚段为高位加积和进积的沉积充填, 厚度相对均一, 其中茅二下亚段上部滩体的横向分布与茅一段厚度环带状变化具有一定的耦合性, 指示晴天浪基面和风暴浪基面在坡折转换处发育缓坡滩建造; 第三, 剑阁—八角场—南充—广安—丰都一带茅二上亚段台地边缘带厚度明显增大, 而北侧的川西北—川东北地区厚度减小 (陈蟒蛟等, 2023; 冯许魁等, 2024), 岩性上表现为台地边缘带的滩相白云岩向北侧变化为盆地相的孤峰段泥灰岩、泥岩、硅质岩; 茅三段沉积期发生全球性海退, 台地沉积体系向川北扩张, 元坝地区发育台地边缘颗粒滩。

3.1 茅一段沉积期

该时期基本继承了栖霞组沉积后的古地貌格局, 发育碳酸盐岩缓坡沉积体系, 呈多级坡折地貌

的特征。茅一段沉积期为中二叠世规模最大的海侵期 (王成善等, 1999; Haq and Schutter, 2008), 发育一套海侵背景下的低能沉积, 岩性主要为泥质灰岩、含生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩, 发育“眼皮、眼球”构造。自南向北, 茅一段厚度逐渐增大, 发育内缓坡、中缓坡和外缓坡沉积 (郝毅等, 2020; 范建平等, 2022) (图 5-a), 其中内缓坡—中缓坡坡折位于盐亭—西充—磨溪—广安—合川—泸州一带, 中缓坡—外缓坡坡折位于双鱼石—剑阁—元坝—达州—云阳—梁平—綦江一带。

3.2 茅二下亚段沉积期

该阶段继承了茅一段沉积期的碳酸盐岩缓坡沉积体系, 早期持续海侵, 晚期海平面呈波动式下降 (Haq and Schutter, 2008), 川北—川东一带为外缓坡, 宣汉渡口剖面茅二下亚段 (牙形刺带为 *J. aserrata*) 发育黑色生屑泥晶灰岩、黑色页岩、薄层状硅质岩 (梅仕龙等, 1994)。茅二下亚段沉积期也是茅口组颗粒滩开始发育的时期, 平面上颗



1~4—*J. aserrata* (Clark and Behnken, 1979), 样本号: 1. Erya-91-1 (2-0014), 2. Erya-95 (4-0004); 5~8—*J. postserrata* (Behnken, 1975), 样本号: 5. Erya-94 (3-0012), 6. Erya-94 (4-0001a), 7. C20~3398.5 m (4-0009), 8. C20~3379.21 m (4-0011); 9~10—*J. shannoni* (Wardlaw, 1994), 样本号: 9. Erya-96-1 (5-0002), 10. C20~3370.1 m (3-0013); 11~12—*J. altudaensis* (Kozur, 1992), 样本号: 11. Erya-97-2 (4-0012a), 12. C20~3364.1 m (1-0008a); 13—*J. prexuanhanensis* (Mei and Wardlaw 1994), 样本号: Erya-104 (8-0007a)。图中横线长 100 μm , 默认为口视。牙形刺分子 1, 2, 5, 6, 8, 11, 13 来自华蓥二崖剖面, 其余的牙形刺分子来自成 20 井

图 3 四川盆地茅口组牙形刺扫描电镜照片

Fig. 3 Scanning electron microscope (SEM) photographs of conodonts of the Maokou Formation in Sichuan Basin

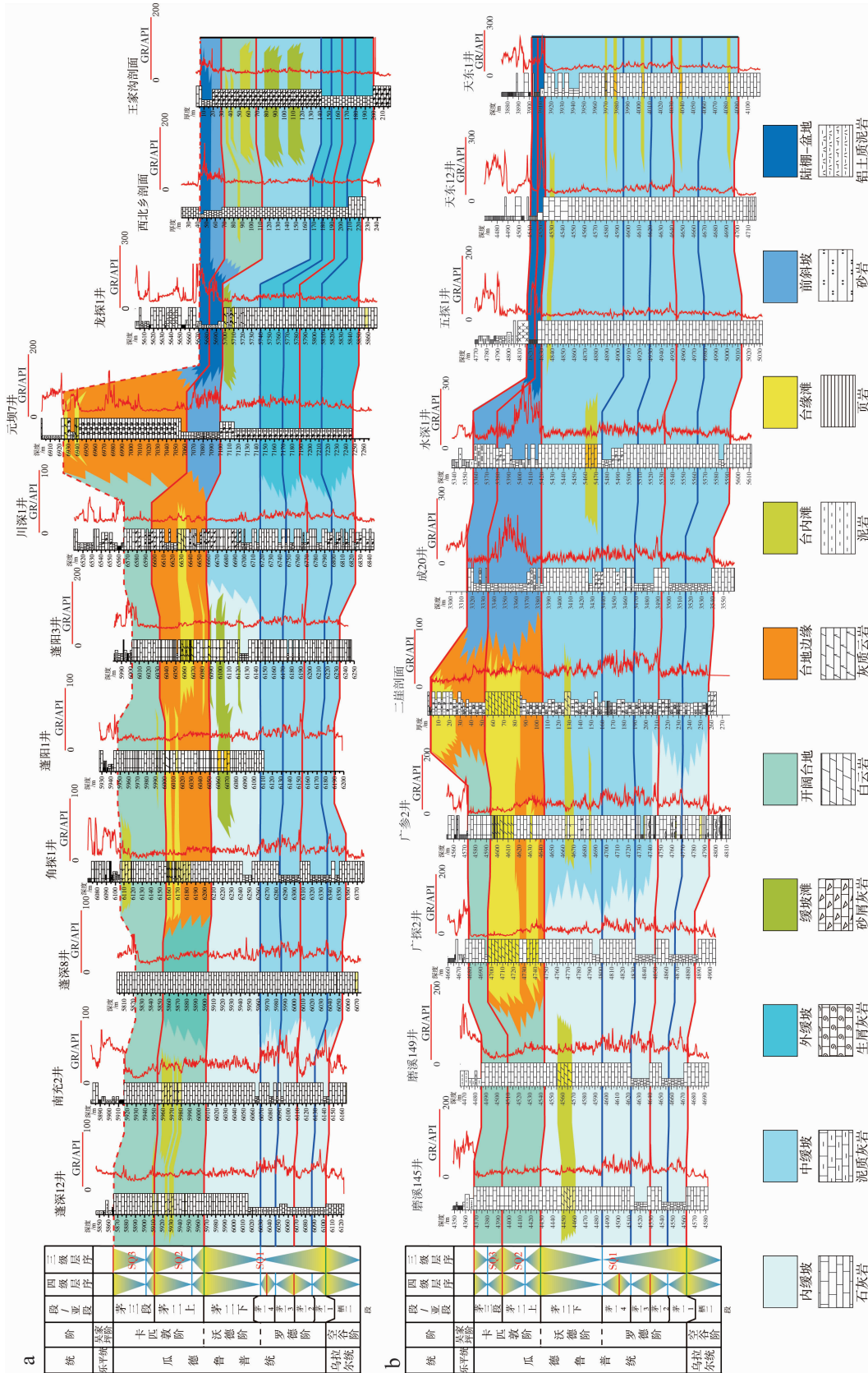
粒滩大致呈环带状沿茅一段沉积期的地貌坡折带分布(图 5-b), 尤其是位于内缓坡—中缓坡坡折带的盐亭—西充—南充—磨溪—龙女寺—合川—潼南—泸州一带最为发育, 中缓坡—外缓坡坡折带的颗粒滩规模相对较小。

内缓坡—中缓坡坡折带的多口钻井, 如磨溪—龙女寺—合川—潼南构造的蓬阳 6、磨溪 145、潼深 4 井等, 获工业气流, 发育残余颗粒白云岩、晶粒白云岩等白云岩储集层(图 6-a, 6-b), 蜀南地区荣昌—德胜场—牟家坪构造发育云化的颗粒灰岩、溶蚀孔隙型颗粒灰岩(何文渊等, 2023; 徐婷等, 2024)(图 6-c)。茅二下亚段沉积期海平面下降, 造成同生—准同生期的暴露溶蚀易发生, 同时高能颗粒滩的发育使得滩后或滩间较局限环境

易形成, 从而有利于早期白云石化作用的发生。磨溪—龙女寺构造的蓬阳 6 井等白云岩发育顺层溶蚀孔洞, 白云石化发生在同生—准同生期—浅埋藏早期(徐婷等, 2024)。中缓坡—外缓坡坡折带九龙山等构造发育云化浅滩储集层, 以(残余颗粒)细—中晶白云岩为主, 檀木场构造五探 1 井等发育岩溶缝洞、岩溶孔隙型灰岩储集层, 岩性主要为亮晶颗粒灰岩, 云化程度相对较弱。

3.3 茅二上亚段沉积期

茅二上亚段沉积期, 沉积体系由先前的碳酸盐岩缓坡转换为碳酸盐岩台地, 并一直持续到茅口组沉积晚期。该时期颗粒滩向北迁移, 由之前的环带状分布演变为呈北西—南东向展布, 并且发育北西—南东向的剑阁—丰都大型台地边缘相带(文龙



a—图 5 中黑色剖面线; b—图 5 中红色剖面线

图 4 四川盆地茅口组沉积相连井剖面

Fig. 4 Correlation of sedimentary facies of the Maokou Formation in Sichuan Basin

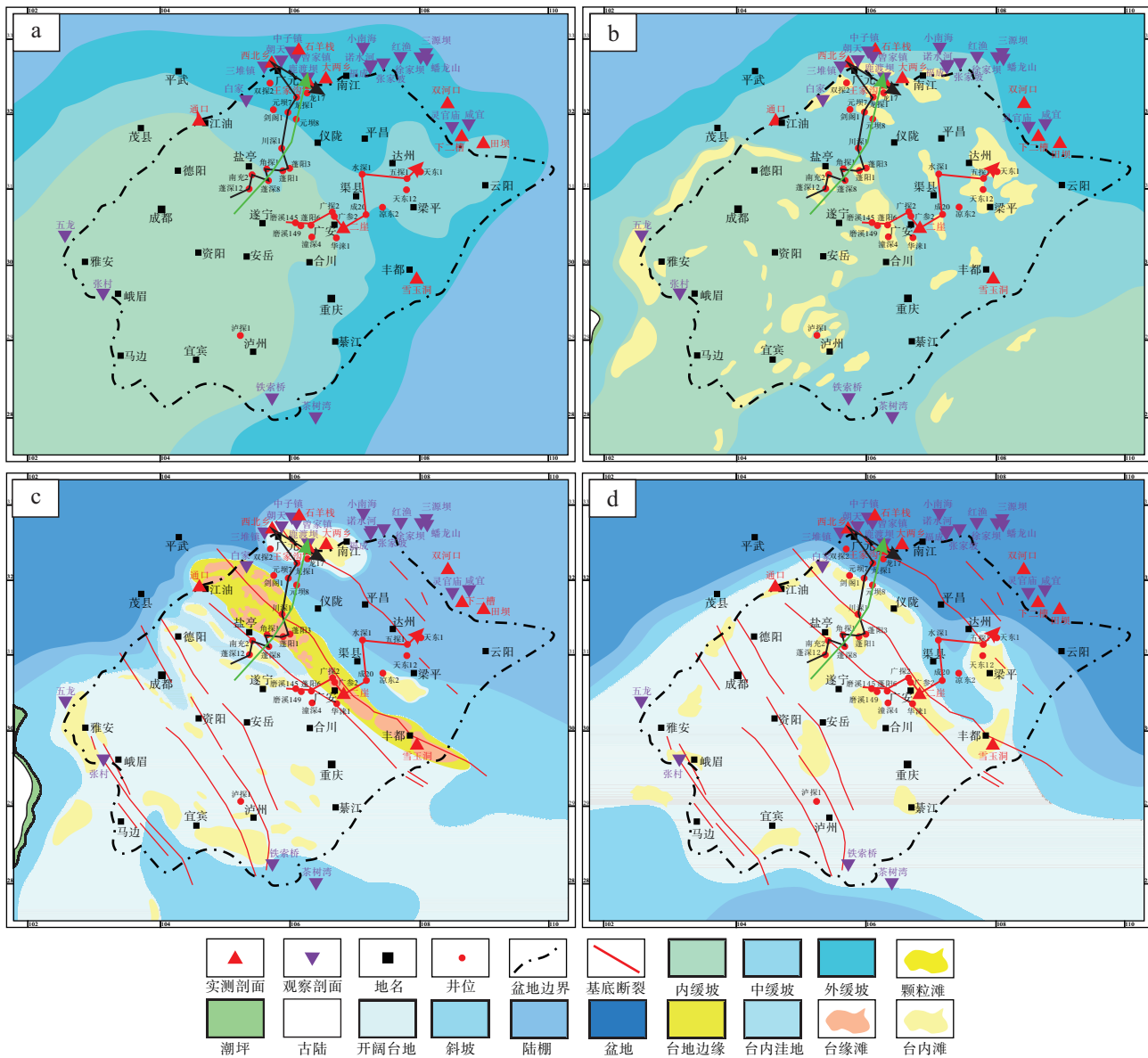


图 5 四川盆地茅口组沉积相演化 (据胡东风, 2019; 文龙等, 2023; 杨雨等, 2023; 冯许魁等, 2024; 有修改)

Fig. 5 Palaeogeography evolution of the Maokou Formation in Sichuan Basin

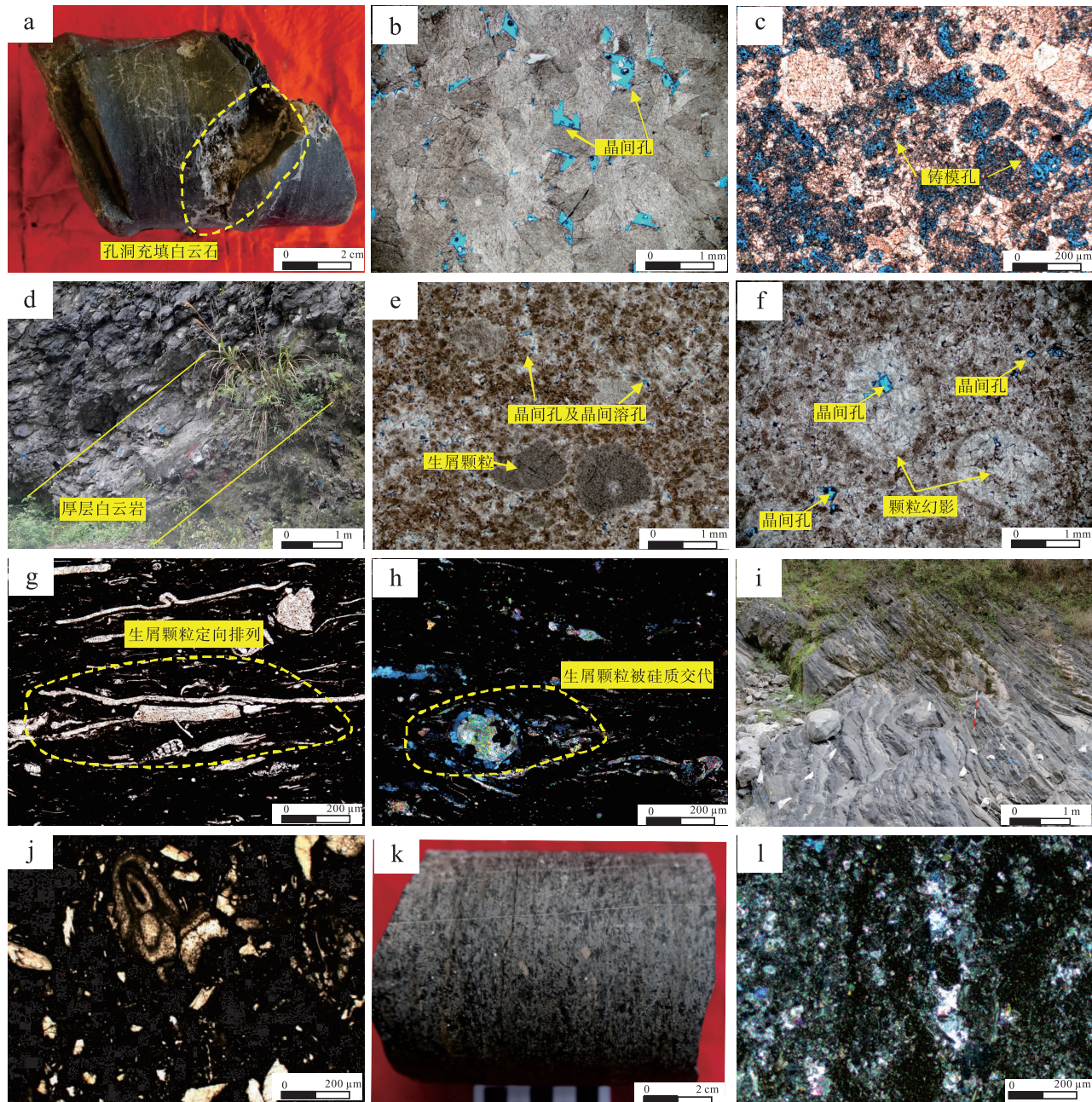
(modified from Hu, 2019; Wen *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023; Feng *et al.*, 2024)

等, 2023; 冯许魁等, 2024), 长度约 400 km (图 5-c)。

该时期全球海平面持续下降 (Haq and Schutter, 2008), 为台缘滩的发育提供了浅水高能环境, 也导致了颗粒滩体的早期频繁暴露和溶蚀作用的发生。茅二上亚段岩性主要为亮晶颗粒灰岩、残余颗粒云岩以及晶粒云岩等(图 6-d 至 6-h), 溶蚀孔洞及晶间、粒间孔隙发育。华蓥二崖、丰都雪玉洞等野外剖面发育厚层孔隙型白云岩储集层, 顺

层溶蚀孔洞发育(图 6-d)。台缘带白云岩厚度大, 规模云化时间早, 主要发生在浅埋藏早期以前 (杨雨等, 2021; 肖钦仁等, 2023, 2024)。

台缘带北侧的剑阁 1—成 20—水深 1—凉东 2—石柱冷水溪一带为斜坡相沉积, 岩性为 (泥质) 泥晶灰岩、含生屑泥晶灰岩、硅质岩等。成 20 井茅二上亚段为深灰色—黑色纹层状泥质、泥晶生屑灰岩, 生物碎片定向排列(图 6-g), 普遍发育硅化作用及硅质岩。生物地层及沉积旋回对比



a—亮晶生屑云岩，孔洞充填白云石，蓬阳 6 井，4486.97~4487.05 m，茅二下亚段；b—粗晶白云岩，晶间孔及晶间溶孔发育，蓬阳 6 井，4477.90 m，茅二下亚段，单偏光；c—亮晶生屑灰岩，生物铸模孔发育，泸探 1 井，2997.71 m，茅二下亚段，单偏光；d—厚层晶粒白云岩，丰都雪玉洞剖面，茅二上亚段；e—细一中晶白云岩，晶间孔及晶间溶孔发育，蓬阳 1 井，6001.6 m，茅二上亚段，单偏光；f—细一中晶白云岩，可见残余颗粒幻影，蓬阳 3 井，6071.35 m，茅二上亚段，单偏光；g—泥质生屑灰岩，生屑颗粒定向排列，成 20 井，3363.87 m，茅二上亚段，单偏光；h—泥质生屑灰岩，生屑颗粒被硅质交代，成 20 井，3364.78 m，茅二上亚段，正交偏光；i—灰色薄层泥质泥晶生屑灰岩，广元西北乡剖面，孤峰段；j—泥质灰岩，见棘皮类生物碎片，剑阁 1 井，茅三段，7445.50 m，单偏光；k—颗粒灰岩，元坝 8 井，茅三段，7284.50~7284.59 m；l—硅质灰岩，生屑颗粒被硅质交代，广元西北乡剖面，孤峰段，正交偏光

图 6 四川盆地二叠系茅口组野外剖面、岩心及薄片照片

Fig. 6 Photographs of field sections, cores and thin-sections of the Maokou Formation in Sichuan Basin

表明，成 20 井茅二上亚段和台缘带上的华蓥二崖剖面、角探 1 井等茅二上亚段为同期异相关系

(图 2；图 4)。

川西北广元—开江一带茅二上亚段发育陆棚

相,厚度明显减小(小于 20 m),岩性和茅二下亚段相比也有明显的突变,如龙探 1、龙 17 井等井揭示茅二上为硅质泥岩、富有机质泥岩。广元西北乡茅二上亚段上部为薄层生屑泥晶灰岩和含泥质条带的泥晶灰岩,也指示了斜坡-陆棚相沉积(图 4)。绵竹-蓬溪一带茅二上亚段为台内洼地沉积,岩性主要为(泥质)泥晶灰岩,川中-蜀南的大部分地区为开阔台地(图 5-c)。

地震剖面上,台缘带为弱反射,厚度相对较大,绵竹-蓬溪台洼茅口组内部强反射特征明显,台缘向斜坡方向坡度变陡(图 7),向北为斜坡、陆棚相带,厚度明显减小。

3.4 茅三段-茅口组沉积末期

茅三段沉积期-茅口组沉积末期,台地边缘相带向北迁移至元坝-龙岗一带(图 4;图 5-d),岩性以亮晶颗粒灰岩为主,如元坝 7 井区。其北侧为斜坡相,广元-开江一带为盆地相(图 4),如广元西北乡茅三段(孤峰段)为薄层硅质岩与硅质灰岩的韵律层(图 6-i, 6-l),九龙山构造龙探 1 井茅三段(孤峰段)的岩性为富有机质硅质泥岩,可见大量硅质放射虫及海绵骨针(张玺华等, 2018)。深水相范围向北扩张,但南部边界较茅二上亚段沉积期向北收缩(图 5-c, 5-d)(胡东风, 2019; 杨雨等, 2021; 文龙等, 2023)。

茅口组沉积期末,受东吴运动的影响,台地相区茅口组顶部暴露,暴露时间约 1~2 Ma(何斌等, 2004),发育岩溶台地、岩溶缓坡、岩溶平原和岩溶盆地等岩溶地貌单元(曾韬等, 2022)。元坝构造茅三段发育岩溶缝洞型储集层(图 6-k),元坝 7 井测试获气 $105.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (胡东风, 2019),表明

茅三段沉积期的台缘沉积可能部分遭受侵蚀。

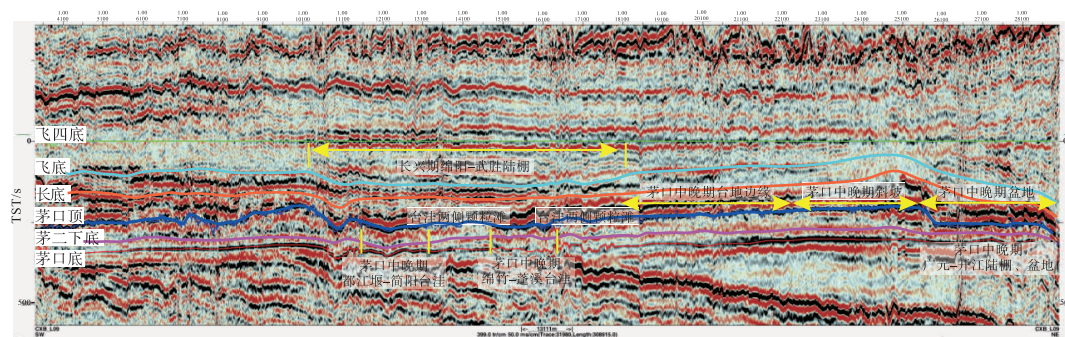
4 茅口组沉积演化与峨眉山地幔柱活动的耦合关系

4.1 茅口组沉积期构造-沉积分异时间

四川盆地茅口组沉积期发生构造-沉积分异,沉积环境由碳酸盐岩缓坡演化为碳酸盐岩台地。依据牙形刺生物地层、岩性岩相变化、沉积旋回对比等,笔者对构造-沉积分异时间进行约束。

广安构造北侧的成 20 井茅一段-茅二下亚段为碳酸盐岩缓坡沉积,岩性为生屑泥晶灰岩;茅二上亚段为斜坡相,岩性为深灰色-黑色泥质灰岩、含生屑泥质泥晶灰岩,生屑定向排列,伽马测井曲线为明显高值,对应 *J. altudaensis* 分子首现。华蓥二崖剖面茅二上亚段为台地边缘相,底部为一套深灰色薄层状泥晶灰岩(*J. altudaensis* 首现),中部为灰色薄-中层状生屑亮晶灰岩,上部为约 30 m 厚的浅灰色(残余颗粒)中晶白云岩或晶粒白云岩,发育向上变浅的旋回,与成 20 井茅二上亚段的斜坡相为同期异相沉积,生物地层的对应关系也证实了茅二上亚段沉积期台缘带的发育(图 2;图 3;图 4)。

广元西北乡茅口组茅一段-茅二下亚段为中缓坡浅滩相,岩性为浅灰色中-厚层状亮晶生屑灰岩,见珊瑚等浅水生物,发育顺层的溶蚀孔洞,指示高能滩体沉积期的暴露溶蚀。*J. altudaensis* 带对应茅二上亚段顶部斜坡相的薄层生屑泥晶灰岩,向上过渡为 *J. prexuanhanensis* 带底部的陆棚相薄层含泥质条带泥晶灰岩。茅三段下部(*J. prexuanhanensis* 带)为盆地相的硅质灰岩和硅质岩韵律层,透



长底:二叠系长兴组(P_3ch)底;飞底:三叠系飞仙关组(T_1f)底;飞四底:三叠系飞仙关组四段(T_1f^4)底

图 7 川中-川北地区地震反射剖面图(剖面位置见图 5 中绿色剖面线)

Fig. 7 Seismic reflection profiles in central and northern Sichuan Basin (profile location shown in Fig. 5 with green line)

镜状灰岩较为发育,上部(*J. xuanhanensis*带)以盆地相的黑色纹层状硅质岩为主,灰质成分和生屑含量较少。茅口组顶部为盆地相的黑色页岩(*C. postbitteri hongshuiensis*带)(胡朝伟等,2020)。该剖面形成了整体向上变深的沉积序列(图2;图3;图4)。

川北九龙山—川东檀木场等构造茅二下亚段—茅二上亚段的岩性有明显的突变,龙探1井等钻井揭示,茅二下亚段为中缓坡相的残余颗粒灰质云岩、亮晶颗粒灰岩,茅二上亚段为陆棚相的硅质岩、硅质泥岩、富有机质泥岩等,两者之间为整合接触,但高能生屑滩沉积突变为深水沉积,这种相序的不连续或突变是发生拉张、裂陷等构造事件的沉积响应。广元—开江一带茅三段为盆地相的富有机质硅质泥岩,可见大量硅质放射虫及海绵骨针(张玺华等,2018),表明水体持续加深。由于广元—开江一带茅二上亚段—茅三段的整体厚度较小,为5~20 m,因此也有学者将其称之为孤峰段(付小东等,2021)。

上述特征表明,剑阁—丰都台缘带、广元—开江陆棚、绵竹—蓬溪台洼最晚于茅二上亚段沉积期开始发育,指示了茅口期构造-沉积分异的时间起始于*J. altudaensis*带。值得注意的是,川北地区茅二上亚段—茅口组顶部的岩相变化指示沉积水体逐渐变深,这和该时期的全球海平面下降并不一致(Haq and Schutter, 2008),说明川北地区在该时期发生了拉张、裂陷等构造事件,从而致使沉积水体相对加深(图5-c)。上扬子台地内部的拉张、裂陷的发育或基底断裂/隐伏断裂的重新活动是沉积水体变深的主要原因(吴永宏等,2025),而该时期峨眉山地幔柱的强烈活动可能是主要诱因。

4.2 火山水下喷发时间

峨眉山玄武岩喷发开始于263 Ma,至259.1 Ma达到顶峰(Sun *et al.*, 2010; Shellnutt and Lizuka, 2012; Shellnutt *et al.*, 2012, 2020; Zhong *et al.*, 2014, 2020)。国内外学者通过位于ELIP不同位置野外剖面的生物化石、沉积相变化、年代学研究以及茅口组灰岩和火山岩的接触关系,发现了峨眉山大火成岩省早期火山水下喷发的证据(He *et al.*, 2003; Wignall *et al.*, 2009a, 2009b)。

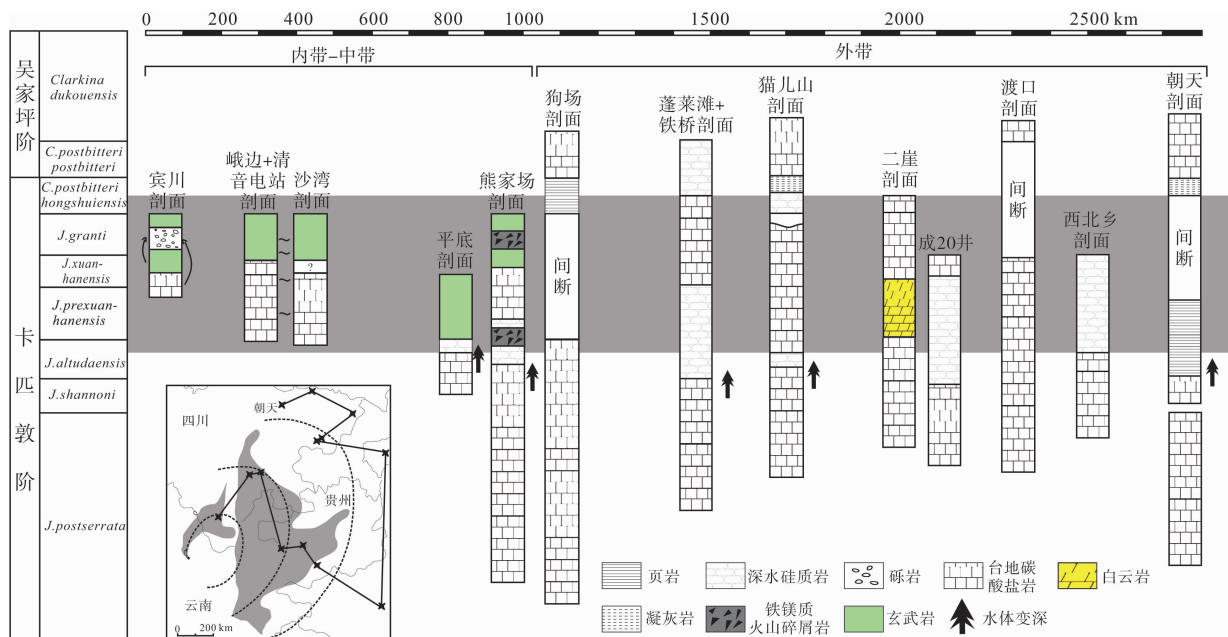
云南大理、川西宝兴大石包及盐津—昭觉一带

可见枕状玄武岩夹层状灰岩和沉凝灰岩(Zhu *et al.*, 2014),美姑—柳洪—甘洛一带茅口组下部常见海相生屑灰岩以夹层或透镜体的形式出现在火山岩中(熊绍云等,2022),这些证据指示火山岩早期喷发于海相环境。通过枕状玄武岩及与之有关的火山碎屑岩的高精度年龄、茅口组的牙形刺带等,可以将火山作用开始的时间限定在卡匹敦阶,且早于~261 Ma有孔虫的消失(Lai *et al.*, 2008; Wignall *et al.*, 2009a, 2009b; Sun *et al.*, 2010)。扬子地块西部松潘—甘孜地块二叠系海相玄武岩(大石包组)的SHRIMP锆石U-Pb加权平均年龄为 263 ± 2 Ma(Zi *et al.*, 2010)(图1-b),遵义地区中晚二叠世深水锰矿床底部的黏土岩(源于早期火山喷发的铁镁质凝灰岩)的年龄为 262.5 ± 2.3 Ma(He *et al.*, 2008); ELIP中心区域峨眉山熔岩序列最上部的熔结凝灰岩年龄为 263 ± 5 Ma(Zhou *et al.*, 2002; He *et al.*, 2008);西昌盐源县下泥盆统灰岩中侵入的超镁铁质—镁铁质岩脉中锆石的年龄为 262 ± 3 Ma(Guo *et al.*, 2004);贵州珠东茅口组灰岩之上的峨眉山玄武岩底部熔结凝灰岩锆石的年龄为 262.4 ± 1.7 Ma(朱江, 2019);贵州熊家场茅口组灰岩中发育的厚约70 m玄武岩夹层,对应于*J. altudaensis*带(Sun *et al.*, 2010)。越来越多的证据表明火山水下喷发开始于卡匹敦阶*J. altudaensis*带,结合年代学数据可以将早期火山水下喷发的时间大致限定在263—262 Ma(He *et al.*, 2003, 2010; Shellnutt *et al.*, 2020)(图1;图8)。

ELIP的内带和中带不同剖面茅口组碳酸盐岩相序的变化及其与火山岩的接触关系、对应的牙形刺生物地层学特征(图8)表明,早期火山水下喷发或沉积相突变主要开始于卡匹敦阶*J. altudaensis*带,时间为263—262 Ma,这与茅口组由碳酸盐岩缓坡转换为碳酸盐台地的时间相一致。扬子板块西缘ELIP内带和中带茅口组石灰岩厚度及沉积相变化与断裂的活动关系密切(Wu *et al.*, 2016),峨眉山地幔柱活动诱导先存断裂活化、同沉积断裂发育及地壳沉降,是茅口组沉积期构造-沉积分异的主要诱因,从碳酸盐缓坡演化为碳酸盐台地正是峨眉山地幔柱活动的沉积响应。

4.3 沉积演化与地幔柱活动的耦合关系

峨眉山玄武岩大规模喷发之前的地幔柱活动会



宾川剖面: Wignall *et al.*, 2009b; 峨边+清音电站剖面和平底剖面: Lai *et al.*, 2008; 贵州熊家场剖面 and 狗场剖面: Wignall *et al.*, 2009b; 蓬莱滩+铁桥剖面: Jin *et al.*, 2006; 猫儿山剖面: Xia *et al.*, 2005; 宜汉渡口剖面: 梅仕龙等, 1994; 广元朝天剖面: Lai *et al.*, 2008

图 8 上扬子地区典型剖面及钻井卡匹敦阶牙形刺带及岩相特征对比

Fig. 8 Correlation profile of the Capitanian conodont zones and lithofacies successions from typical sections and well in Upper Yangtze Block

导致地壳穹状隆升(何斌等, 2006; He *et al.*, 2010)。数值模拟结果、碳酸盐岩地层厚度以及其与上覆火山岩接触关系等沉积记录(Rainbird, 1993; Campbell *et al.*, 2007)表明, 峨眉山幔柱岩浆作用之前地壳开始隆升的时间大约在 285—275 Ma(李宏博等, 2011), 滇东北乌蒙山峨眉山玄武岩锆石年龄为 273.1±3.4 Ma(张宏辉等, 2022), 对应于栖霞组沉积期; 地幔柱快速隆升的开始时间约在 266—263 Ma(Guo *et al.*, 2004; Liu and Zhu, 2009), 对应于茅口组沉积早期; 位于 ELIP 中带和外带交界处的川西南地区古生代烃源岩在 270 Ma 迅速生烃、260 Ma 左右进入过成熟状态、250 Ma 左右迅速降温(朱传庆等, 2010), 表明火山岩喷出之前, 峨眉山幔柱处于较为活跃的状态。

从上述分析可以发现, 峨眉山幔柱活动和茅口期沉积演化有着较好的耦合关系(图 9), 具体表现为 3 个阶段:

1) 峨眉山幔柱火山水下喷发之前的穹状隆升, 控制了上扬子区茅一段—茅二下亚段沉积期碳酸盐岩缓坡的沉积格局。海侵背景下沉积的茅一段是对古地貌的填平补齐, 表现为“南西高、北东低”的碳酸盐岩缓坡沉积地貌。茅二下亚段沉积期为短

暂的海退, 颗粒滩的发育和分布受控于茅一段沉积期后多级地貌坡折, 其分布为围绕川西南地区(ELIP 中带)呈近似同心圆的环带状展布(图 5-a, 5-b)。

2) 峨眉山幔柱强烈活动驱动碳酸盐岩缓坡演化为碳酸盐岩台地, 发生构造-沉积分异。茅二上亚段沉积期(*J. postserrata*-*J. prexuanhanensis*带), 峨眉山幔柱活动较之前增强, 卡匹敦阶 *J. altudaensis* 带开始出现小规模火山水下喷发。受此影响, 上扬子区发育拉张、裂隙以及地壳沉降, 发生构造-沉积分异, 碳酸盐岩缓坡演化为碳酸盐岩台地(图 4; 图 5-c), 形成广元—开江陆棚、绵竹—蓬溪台洼以及剑阁—丰都近 400 km 长的大型台缘带。茅三段—茅口组沉积晚期(*J. prexuanhanensis*-*C. postbitteri hongshuiensis*带), 峨眉山幔柱活动持续增强, 该时期较发育更强的拉张、裂隙及沉降, 川北广元—开江一带发育较大面积的盆地相, 并向北扩张(图 4; 图 5-d), 而川西南雅安—资阳—宜宾一带形成地貌洼地, 被低能沉积的茅四段所充填, 且该区域分布的溢流相玄武岩也可能与此有关。

3) 峨眉山玄武岩规模喷发前的地壳大幅度隆升造成相对海平面下降, 茅口组顶面暴露, 发育广泛的岩溶作用。茅口组沉积期末, 峨眉山地幔柱活动几乎达到鼎盛时期, 地壳隆升幅度大, 海平面下降, 茅口组顶部大面积暴露, 风化壳普遍发育, 形成岩溶缝洞型储集层, 茅口组沉积晚期发育的台缘沉积可能部分遭受侵蚀。

对比发现, 茅二段上亚段沉积期开始发育的“广元—开江”陆棚和“绵竹—蓬溪”台洼与晚二叠世长兴期的“开江—梁平”海槽(王一刚等, 1998)、“绵竹—中江”拗拉槽(罗志立, 2009)或“绵竹—蓬溪—武胜”拉张槽(罗志立等, 2012)是有成因联系的, 只是前者规模相对较小。峨眉山地幔柱活动和扬子板块西北缘潜伏的基底断裂复活是主控因素(罗志立等, 2012), 推测晚二

叠世长兴期的开江—梁平海槽和蓬溪—武胜台洼在茅口中晚期(*J. altudaensis*)已经开始发育雏形。

4.4 川西南地区茅二上亚段沉积期是否发育拉张

茅二上亚段沉积中晚期, 峨眉山地幔柱诱发的拉张伸展作用形成了广元—开江陆棚以及绵竹—蓬溪台洼。该期拉张作用在川西南地区是否也有发育? 近期勘探发现, 四川盆地西南部发育大面积的溢流相玄武岩, 川西南地区永探1、永胜1等多口井钻遇, 火山喷发在时间序列上具有多旋回性, 多个喷发体系沿断裂呈串珠状分布(马新华等, 2019b)。

沉积旋回对比表明, 川西南永胜1—永探1井区茅口组仅发育茅一段—茅二下亚段厚约155 m的

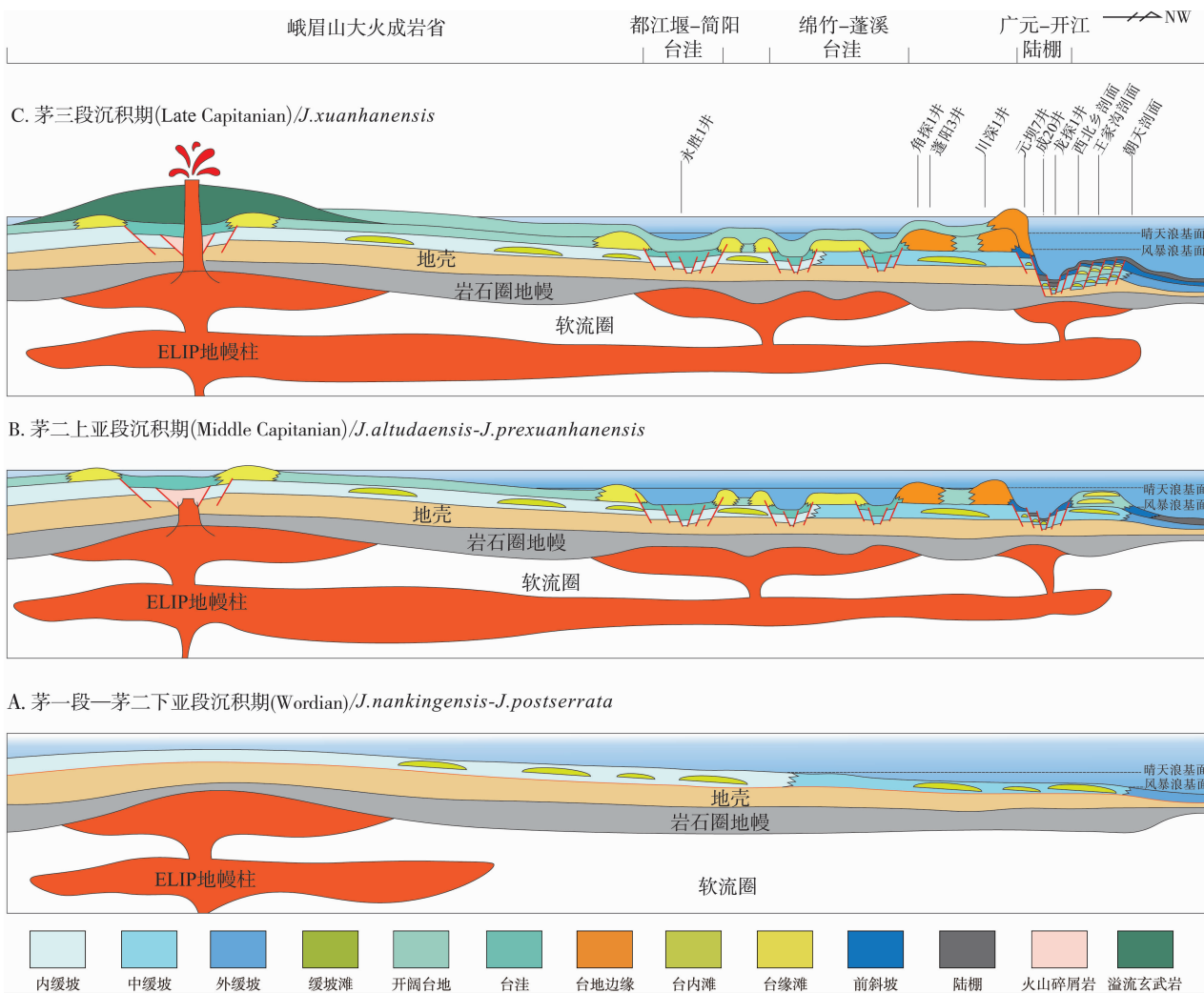
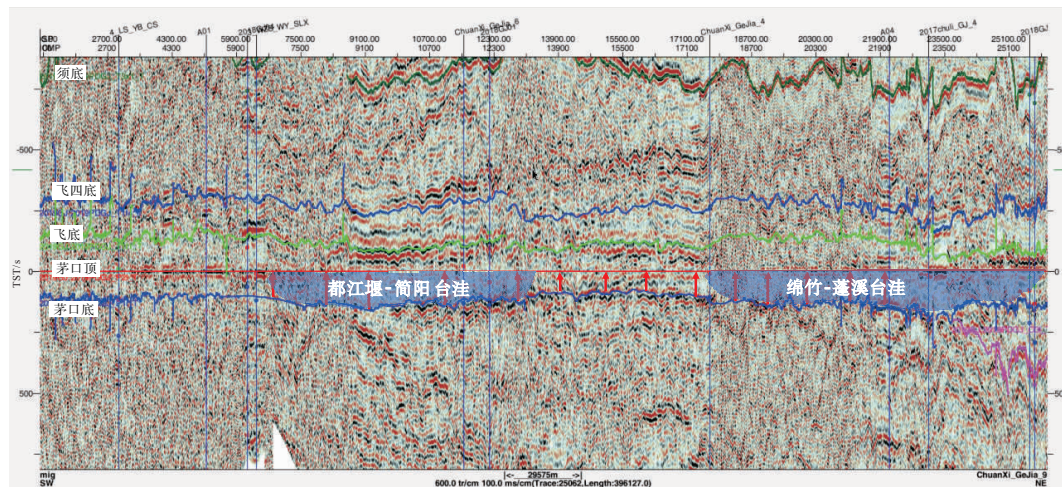


图 9 四川盆地中二叠统茅口组沉积演化模式

Fig. 9 Sedimentary evolutionary models of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin



飞底：三叠系飞仙关组 (T_{1f}) 底；飞四底：下三叠统飞仙关组四段 (T_{1f}^4) 底；须底：上三叠统须家河组 (T_{3x}) 底

图 10 川西地区格架线地震剖面图 (茅口组顶拉平, 剖面位置见图 5 中绿色剖面线)

Fig. 10 Seismic profile of frame line in western Sichuan Basin

碳酸盐岩, 之上为火山岩段, 依次为辉绿岩侵入体、角砾凝灰岩、泥晶灰岩、凝灰岩、玄武岩以及角砾凝灰岩等, 泥晶灰岩与上覆和下伏火山岩呈整合接触, 表明火山喷发时仍有碳酸盐沉积, 指示茅二上亚段沉积期可能存在火山的水下喷发和岩浆侵位。过都江堰—简阳一带南北向的地震剖面显示, 中二叠统总体厚度较大, 可能发育北西—南东向的台洼, 但较同时期形成的绵竹—蓬溪台洼、广元—开江陆棚规模相对较小(图 10)。基于这些证据, 有理由推测都江堰—简阳一带可能发育茅二上亚段沉积期因峨眉山地幔柱活动诱发的拉张伸展作用而形成的裂隙或台洼, 环台洼边缘可能发育高能颗粒滩体(图 5-c; 图 9; 图 10)。该时期的拉张作用在上扬子其他区域是否存在, 有待进一步研究。

5 结论

1) 基于典型钻井与野外剖面的岩相旋回及牙形刺生物地层, 重点厘定了川中—川北地区中二叠统茅口组岩石地层的具体时限, 认为茅一段对应罗德阶, 茅二下亚段对应沃德阶, 茅二上亚段及之上地层对应卡匹敦阶。

2) 峨眉山地幔柱活动控制茅口组沉积期的构造-沉积分异, 影响到该时期的沉积演化及储集层分布: (1) 峨眉山地幔柱早期地壳隆升控制茅一段—茅二下亚段沉积期“南西高、北东低”的碳酸盐岩缓坡沉积格局, 主要发育孔隙、孔洞型滩相颗

粒灰岩及云岩储集层, 大致呈环带状展布; (2) 茅二上亚段沉积期, 峨眉山地幔柱活动诱发构造-沉积分异, 驱动碳酸盐岩缓坡演化为碳酸盐岩台地, 形成广元—开江陆棚、绵竹—蓬溪台洼以及剑阁—丰都近 400 km 的大型台缘带, 发育厚层滩相孔洞、孔隙型白云岩储集层, 分布范围大; (3) 茅三段—茅口组沉积晚期, 峨眉山地幔柱活动增强, 广元—开江盆地向北扩张; (4) 茅口组沉积期末, 台地相区茅口组顶部暴露, 发生岩溶作用, 发育岩溶缝洞型灰岩储集层。

3) 茅口组岩性、岩相组合及牙形刺带对比表明, 茅口组构造-沉积分异发生于卡匹敦阶 *J. altu-daensis* 带。结合年代学数据, 将构造-沉积分异的时间限定在 263—262 Ma。

4) 茅二上亚段沉积期形成的广元—梁平陆棚以及绵竹—蓬溪台洼, 分别是晚二叠世长兴期开江—梁平海槽以及蓬溪—武胜陆棚的雏形; 川西南地区茅口组沉积期可能发生了火山水下喷发事件, 因拉张伸展作用形成近东西向的都江堰—简阳台洼, 环台洼边缘可能发育高能颗粒滩。

致谢 本文在撰写的过程中得到了中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司专家的指导和帮助, 并提供了部分资料; 中国石油华北油田公司张放高级工程师以及南京地质古生物研究所在牙形刺鉴定方面提供了支持, 在此一并致谢!

参考文献 (References)

- 陈蟒蛟,谭开俊,文龙,乐幸福,姚军. 2023. 四川盆地中二叠统天然气成藏特征及巨大勘探前景. 地学前缘,30(1): 11-19. [Chen M J, Tan K J, Wen L, Le X F, Yao J. 2023. Natural gas accumulation characteristics and great exploration potential of the Middle Permian in the Sichuan Basin. Earth Science Frontiers,30(1): 11-19]
- 陈宗清. 2007. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探. 中国石油勘探,12(5): 1-11. [Chen Z Q. 2007. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan Basin. China Petroleum Exploration,12(5): 1-11]
- 程雪莹. 2017. 川东地区中二叠统茅口组岩溶特征及发育模式. 西南石油大学硕士学位论文. [Cheng X Y. 2017. Karst characteristics and development model of Maokou Formation of Middle Permian in eastern Sichuan Basin. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 范建平,宋金民,江青春,刘树根,叶玥豪,黄土鹏,王佳蕊,苏旺,李立基,金鑫,冯宇翔. 2022. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式. 石油与天然气地质,43(6): 1413-1430. [Fan J P, Song J M, Jiang Q C, Liu S G, Ye Y H, Huang S P, Wang J R, Su W, Li L J, Jin X, Feng Y X. 2022. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 Member in eastern Sichuan Basin. Oil & Gas Geology,43(6): 1413-1430]
- 冯许魁,杨雨,朱亚东,崔永平,陈辉,巫芙蓉,臧殿光,倪华玲,吴育林,徐宝亮,郭海洋. 2024. 四川盆地二叠纪礁滩体发育特征、分布模式及有利勘探区带. 沉积与特提斯地质,44(2): 278-294. [Feng X K, Yang Y, Zhu Y D, Cui Y P, Chen H, Wu F R, Zang D G, Ni H L, Wu Y L, Xu B L, Guo H Y. 2024. Development characteristics, distribution patterns and favorable exploration zones of Permian reef shoals in Sichuan Basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,44(2): 278-294]
- 付小东,陈娅娜,罗冰,李文正,张建勇,王小芳,邱玉超,吕学菊,姚倩颖. 2021. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义. 地质学报,95(6): 1903-1920. [Fu X D, Chen Y N, Luo B, Li W Z, Zhang J Y, Wang X F, Qiu Y C, Lü X J, Yao Q Y. 2021. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica,95(6): 1903-1920]
- 郝毅,姚倩颖,田瀚,谷明峰,余敏,王莹. 2020. 四川盆地二叠系茅口组沉积特征及储层主控因素. 海相油气地质,25(3): 202-209. [Hao Y, Yao Q Y, Tian H, Gu M F, She M, Wang Y. 2020. Sedimentary characteristics and reservoir-controlling factors of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology,25(3): 202-209]
- 何斌,王雅玫,姜晓玮. 2004. 上扬子西部茅口组灰岩顶部古喀斯特地貌的厘定及地质意义. 中国地质,31(1): 46-50. [He B, Wang Y M, Jiang X W. 2004. Paleo-karst landforms on top of limestone of the Maokou Formation in the west of the Upper Yangtze platform and its geological significance. Chinese Geology, 31(1): 46-50]
- 何斌,徐义刚,肖龙,王雅玫,王康明,沙绍礼. 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义. 地质论评,52(1): 30-37. [He B, Xu Y G, Xiao L, Wang Y M, Wang K M, Sha S L. 2006. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications. Geological Review,52(1): 30-37]
- 何文渊,白雪峰,蒙启安,王显东,田小彬,鞠林波. 2023. 碳酸盐台内斜坡认识突破与重大发现: 以川中地区中二叠统茅口组二段气藏勘探为例. 中国石油勘探,28(1): 59-70. [He W Y, Bai X F, Meng Q A, Wang X D, Tian X B, Ju L B. 2023. New understanding and significant discovery in the inner slope of carbonate platform: a case study of gas exploration in the second member of Maokou Formation in central Sichuan Basin. China Petroleum Exploration, 28(1): 59-70]
- 何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. Chinese Journal of Geology,46(3): 589-606]
- 侯莹玲,何斌,钟玉婷. 2014. 桂西二叠系喀斯特型铝土矿成矿物质来源的新认识: 来自合山组碎屑岩地球化学证据. 大地构造与成矿学,38(1): 181-196. [Hou Y L, He B, Zhong Y T. 2014. New perspective on provenance of the Permian karstic bauxite in the western Guangxi: geochemical evidence of clastic rocks of the Heshan Formation. Geotectonica et Metallogenia,38(1): 181-196]
- 侯增谦,卢仁记,汪云亮,夏林圻,李红阳,国连杰. 1999. 峨眉火成岩省: 结构、成因与特色. 地质论评,45(S1): 885-891. [Hou Z Q, Lu J R, Wang Y L, Xia L Q, Li H Y, Guo L J. 1999. Emei large igneous province: characteristics and origin. Geological Review, 45(S1): 885-891]
- 厚刚福,周进高,谷明峰,姚倩颖,杨柳,潘立银,郝毅. 2017. 四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向. 海相油气地质,22(1): 25-31. [Hou G F, Zhou J G, Gu M F, Yao Q Y, Yang L, Pan L Y, Hao Y. 2017. Lithofacies paleogeography and exploration realms of the Middle Permian Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 22(1): 25-31]
- 胡朝伟,胡广,张玺华,陈聪,彭翰霖,高兆龙,廖志伟,庞谦,游杰. 2020. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价. 石油实验地质,42(2): 202-214. [Hu C W, Hu G, Zhang X H, Chen C, Peng H L, Gao Z L, Liao Z W, Pang Q, You J. 2020. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan. Petroleum Geology & Experiment,42(2): 202-214]
- 胡东风. 2019. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示. 天然气工业,39(3): 1-10. [Hu D F. 2019. Breakthrough in natural gas exploration in the platform margin shoal at the Maokou Fm in the Yuanba area, Sichuan Basin, and its implications. Natural Gas Industry,39(3): 1-10]
- 胡明毅,胡忠贵,魏国齐,杨威,刘满仓. 2012. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测. 石油勘探与开发,39(1): 45-55. [Hu M Y, Hu Z G, Wei G Q, Yang W, Liu M C. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin. Petroleum Exploration and Development,39(1): 45-55]
- 黄涵宇,何登发,李英强,王贝. 2017. 四川盆地及邻区二叠纪梁山一栖霞组沉积盆地原型及其演化. 岩石学报,33(4): 1317-1337.

- [Huang H Y, He D F, Li Y Q, Wang B. 2017. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1317-1337]
- 金振奎, 冯增昭. 1999. 滇东-川西下二叠统白云岩的形成机理: 玄武岩淋滤白云化. *沉积学报*, 17(3): 383-389. [Jin Z K, Feng Z Z. 1999. Origin of dolostones of the Lower Permian in East Yunnan-West Sichuan: dolomitization through leaching of basalts. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3): 383-389]
- 匡明志, 张小兵, 袁海锋, 陈聪, 张玺华, 彭瀚霖, 徐婷, 肖钦仁, 李天军, 山述娇. 2024. 川中地区茅口组碳酸盐岩层序地层及沉积相特征. *古地学报*, 26(5): 1201-1220. [Kuang M Z, Zhang X B, Yuan H F, Chen C, Zhang X H, Peng H L, Xu T, Xiao Q R, Li T J, Shan S J. 2024. Sequence stratigraphy and sedimentary facies characteristics of the Maokou Formation carbonate rocks in central Sichuan. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(5): 1201-1220]
- 李红, 王良军, 柳益群, 曾韬, 张冬冬, 李文厚, 周鼎武, 杨康, 董杨坤, 彭毅峰. 2021. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征. *古地学报*, 23(1): 153-174. [Li H, Wang L J, Liu Y Q, Zeng T, Zhang D D, Li W H, Zhou D W, Yang K, Dong Y K, Peng Y F. 2021. Hydrothermal activities in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(1): 153-174]
- 李宏博, 张招崇, 吕林素, 汪云峰, 寇彩化, 李永生, 廖宝丽. 2011. 栖霞组和茅口组等厚图: 对峨眉山地幔柱成因模式的指示意义. *岩石学报*, 27(10): 2963-2974. [Li H B, Zhang Z C, Lü L S, Wang Y F, Kou C H, Li Y S, Liao B L. 2011. Isopach maps of the Qixia and Maokou Formations: implication for mantle plume model of the Emeishan large igneous province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2963-2974]
- 李毅, 沈浩, 石学文, 汪华, 陈莎, 袁小玲. 2013. 川东-川中地区茅口组白云岩成因初探及“热次盆”概念的提出. *天然气勘探与开发*, 36(4): 1-3. [Li Y, Shen H, Shi X W, Wang H, Chen S, Yuan X L. 2013. Distribution and origin of dolomites in Maokou Formation, eastern and central Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration & Development*, 36(4): 1-3]
- 刘宏, 马腾, 谭秀成, 曾伟, 胡广, 肖笛, 罗冰, 山述娇, 苏成鹏. 2016. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因: 以四川盆地中部中二叠统茅口组为例. *石油勘探与开发*, 43(6): 916-927. [Liu H, Ma T, Tan X C, Zeng W, Hu G, Xiao D, Luo B, Shan S J, Su C P. 2016. Origin of structurally controlled hydrothermal dolomite in epigenetic karst system during shallow burial: an example from Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6): 916-927]
- 刘树根, 李智武, 孙玮, 邓宾, 罗志立, 王国芝, 雍自权, 黄文明. 2011. 四川含油气叠合盆地基本特征. *地质科学*, 46(1): 233-257. [Liu S G, Li Z W, Sun W, Deng B, Luo Z L, Wang G Z, Yong Z Q, Huang W M. 2011. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Geology*, 46(1): 233-257]
- 罗志立. 2009. 峨眉地裂运动和四川盆地天然气勘探实践. *新疆石油地质*, 30(4): 419-424. [Luo Z L. 2009. Emei taphrogenesis and natural gas prospecting practices in Sichuan Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(4): 419-424]
- 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 赵锡奎. 1988. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动. *地质论评*, 34(1): 11-24. [Luo Z L, Jin Y Z, Zhu K Y, Zhao X K. 1988. On Emei taphrogenesis of the upper Yangtze Platform. *Geological Review*, 34(1): 11-24]
- 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 王睿婧. 2012. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨. *地学前缘*, 19(6): 144-154. [Luo Z L, Sun W, Han J H, Wang R J. 2012. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in middle-upper Yangtze area. *Earth Science Frontiers*, 19(6): 144-154]
- 马新华, 杨雨, 文龙, 罗冰. 2019a. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向. *石油勘探与开发*, 46(1): 1-13. [Ma X H, Yang Y, Wen L, Luo B. 2019a. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized Marine carbonate gas fields in Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 1-13]
- 马新华, 李国辉, 应丹琳, 张本健, 李亚, 戴鑫, 范毅, 曾云贤. 2019b. 四川盆地二叠系火成岩分布及含气性. *石油勘探与开发*, 46(2): 216-225. [Ma X H, Li G H, Ying D L, Zhang B J, Li Y, Dai X, Fan Y, Zeng Y X. 2019b. Distribution and gas-bearing properties of Permian igneous rocks in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 46(2): 216-225]
- 梅仕龙, 金玉玕, Wardlaw B R. 1994. 四川宣汉渡口二叠纪“孤峰组”牙形石序列及其全球对比意义. *古生物学报*, 33(1): 1-15. [Mei S L, Jin Y G, Wardlaw B R. 1994. Succession of conodont zones from the Permian “Kuhfeng” Formation, Xuanhan, Sichuan and its implication in global correlation. *Acta Palaeontologica Sinica*, 33(1): 1-15]
- 沈树忠, 张华, 张以春, 袁东勋, 陈波, 何卫红, 牟林, 林巍, 王文倩, 陈军, 吴琼, 曹长群, 王玥, 王向东. 2019. 中国二叠纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 62(1): 160-193. [Shen S Z, Zhang H, Zhang Y C, Yuan D X, Chen B, He W H, Mou L, Lin W, Wang W Q, Chen J, Wu Q, Cao C Q, Wang Y, Wang X D. 2019. Permian integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica Terrae*, 62(1): 160-193]
- 苏成鹏, 李蓉, 石国山, 贾霍甫, 宋晓波. 2021. 四川盆地及周缘中二叠统茅口组一段储集层特征及对油气勘探的启示. *石油勘探与开发*, 48(6): 1150-1161. [Su C P, Li R, Shi G S, Jia H F, Song X B. 2021. Reservoir characteristics of the first member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and its periphery and inspirations to petroleum exploration, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(6): 1150-1161]
- 王成善, 李祥辉, 陈洪德, 覃建雄. 1999. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件. *沉积学报*, 17(4): 536-541. [Wang C S, Li X H, Chen H D, Qin J X. 1999. Permian sea-level changes and rising-falling events in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 536-541]
- 王一刚, 文应初, 张帆, 杨雨, 张静. 1998. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律. *天然气工业*, 18(6): 10-15. [Wang Y G, Wen Y C, Zhang F, Yang Y, Zhang J. 1998. Distribution law of the organic reefs in Changxing Formation of Upper Permian in East Sichuan. *Natural Gas Industry*, 18(6): 10-15]
- 文龙, 张本健, 陈骁, 徐亮, 马华灵, 彭瀚霖. 2023. 四川盆地二叠、三叠系构造-沉积特征及有利勘探区带. *天然气勘探与开发*,

- 46(4): 1-12. [Wen L, Zhang B J, Chen X, Xu L, Ma H L, Peng H L. 2023. Permian and Triassic in Sichuan Basin: tectono-sedimentary characteristics and favorable exploration belts. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(4): 1-12]
- 吴永宏, 陶夏妍, 赵忠宇, 唐青松, 黄天俊, 刘嘉伟, 冯亮, 邹光辉. 2025. 四川盆地开江—梁平海槽走滑断层的发现与启示. *地质通报*, 44(1): 117-128. [Wu Y H, Tao X Y, Zhao Z Y, Tang Q S, Huang T J, Liu J W, Feng L, Wu G H. 2024. Discovery and significance of the strike-slip faults in Kaijiang-Liangping Trough of the Sichuan Basin. *Geological Bulletin of China*, 44(1): 117-128]
- 肖龙, 徐义刚, 何斌. 2005. 试论地幔柱构造与川滇西部古特提斯的演化. *地质科技情报*, 24(4): 1-6. [Xiao L, Xu Y G, He B. 2005. Mantle plume tectonics and Tethyan evolution: a preliminary interpretation in Sichuan and western Yunnan Provinces. *Geological Science and Technology Information*, 24(4): 1-6]
- 肖钦仁, 袁海锋, 叶子旭, 陈聪, 张玺华, 徐婷. 2023. 川中北部地区八角场构造二叠系茅口组白云岩储层成因机制. *天然气地球科学*, 34(7): 1218-1236. [Xiao Q R, Yuan H F, Ye Z X, Chen C, Zhang X H, Xu T. 2023. Genetic mechanism of dolomite reservoir in Permian Maokou Formation in Bajiaochang structure in North Central Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 34(7): 1218-1236]
- 肖钦仁, 袁海锋, 谌辰, 李跃杰, 陈聪, 张玺华, 匡明志, 徐婷, 叶子旭, 王涛, 王炳森, 李正勇. 2024. 川中北部地区茅口组白云岩成因分析: 来自岩石学、原位地球化学及年代学证据. *天然气地球科学*, 35(7): 1160-1186. [Xiao Q R, Yuan H F, Chen C, Li Y J, Chen C, Zhang X H, Kuang M Z, Xu T, Ye Z X, Wang T, Wang B S, Li Z Y. 2024. Analysis of dolomite genesis in the Maokou Formation, northern slope area of central Sichuan, China: petrologic, in situ geochemical, and chronological evidence. *Natural Gas Geoscience*, 35(7): 1160-1186]
- 熊绍云, 史志伟, 王尉, 张豪, 刘冉, 苏旺, 李亚, 姚倩颖, 张建勇, 江青春. 2022. 川西南地区二叠纪火山岩储层类型及其主控因素分析. *天然气地球科学*, 33(6): 899-916. [Xiong S Y, Shi Z W, Wang W, Zhang H, Liu R, Su W, Li Y, Yao Q Y, Zhang J Y, Jiang Q C. 2022. Permian volcanic reservoir types and main controlling factors in Southwest Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 33(6): 899-916]
- 徐婷, 袁海锋, 陈聪, 张玺华, 山述娇, 匡明志, 谌辰, 叶子旭, 李天军, 阳聪. 2024. 川中磨溪—龙女寺构造中二叠统茅口组白云岩成因分析. *天然气地球科学*, 35(1): 13-29. [Xu T, Yuan H F, Chen C, Zhang X H, Shan S J, Kuang M Z, Chen C, Ye Z X, Li T J, Yang C. 2024. Genesis of dolomite reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of the Moxi-Longnusi structure, central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(1): 13-29]
- 杨光, 汪华, 沈浩, 杨雨然, 贾松, 陈文, 朱华, 李毅. 2015. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向. *天然气工业*, 35(7): 10-16. [Yang G, Wang H, Shen H, Yang Y R, Jia S, Chen W, Zhu H, Li Y. 2015. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoir in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(7): 10-16]
- 杨雨, 钟原, 李林娟. 2021. 开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系礁滩组合分布与成因. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 48(6): 683-690. [Yang Y, Zhong Y, Li L J. 2021. Distribution and genesis of Permian-Triassic reef-shoal combination around Kaijiang-Liangping trough in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(6): 683-690]
- 杨雨, 文龙, 周刚, 战薇芸, 李海涛, 宋泽章, 张晶, 陶佳丽, 田兴旺, 苑九涛, 金世贵, 史国梁. 2023. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 44(12): 2045-2069. [Yang Y, Wen L, Zhou G, Zhan W Y, Li H T, Song Z Z, Zhang J, Tao J L, Yuan J T, Jin S G, Shi G L. 2023. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2045-2069]
- 曾韬, 季少聪, 夏文谦, 张庆玉, 巴俊杰, 董红琪, 聂国权. 2022. 川北元坝地区茅口组顶面古地貌恢复与岩溶发育特征. *中国岩溶*, 41(6): 860-868. [Zeng T, J S C, Xia W Q, Zhang Q Y, Ba J J, Dong H Q, Nie G Q. 2022. Reconstruction of karst paleo-geomorphology and paleo-water system on the top of Maokou Formation in Yuanba area, northern Sichuan Basin. *Carsologica Sinica*, 41(6): 860-868]
- 张宏辉, 吴亮, 李鸿, 余杨忠, 袁永盛, 张沥元, 李仕忠, 赵见波, 潘江涛, 詹华思, 石海涛, 陈贵仁. 2022. 滇东北乌蒙山地区峨眉地幔柱活动与火山—沉积盆地的响应关系. *现代地质*, 36(1): 225-243. [Zhang H H, Wu L, Li H, Yu Y Z, Yuan Y S, Zhang L Y, Li S Z, Zhao J B, Pan J T, Zhan H S, Shi H T, Chen G R. 2022. Relation between the Emeishan mantle plume activity and Wumengshan volcanic-sedimentary basin in northeastern Yunnan. *Geoscience*, 36(1): 225-243]
- 张玺华, 陈聪, 张亚, 文龙, 罗冰, 陈双玲, 王丽英, 李亚, 杨雨然. 2018. 川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义. *天然气勘探与开发*, 41(3): 42-50. [Zhang X H, Chen C, Zhang Y, Wen L, Luo B, Chen S L, Wang L Y, Li Y, Yang Y R. 2018. Geological characteristics of trough facies, Maokou Formation, northwestern Sichuan Basin: implications for geology. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(3): 42-50]
- 张运波, 王根厚, 余正伟, 赵宗举, 王明健, 孙衍鹏. 2013. 四川盆地中二叠统茅口组米兰科维奇旋回及高频层序. *古地理论*, 15(6): 777-786. [Zhang Y B, Wang G H, Yu Z W, Zhao Z J, Wang M J, Sun Y P. 2013. Milankovitch cycles and high-frequency sequences of the Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(6): 777-786]
- 赵宗举, 周慧, 陈轩, 刘银河, 张运波, 刘玉娥, 杨雨. 2012. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带. *石油学报*, 33(S2): 35-51. [Zhao Z J, Zhou H, Chen X, Liu Y H, Zhang Y B, Liu Y E, Yang Y. 2012. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(S2): 35-51]
- 周进高, 姚根顺, 杨光, 谷明峰, 姚倩颖, 江青春, 杨柳, 杨雨然. 2016. 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. *天然气工业*, 36(4): 8-15. [Zhou J G, Yao G S, Yang G, Gu M F, Yao Q Y, Jiang Q C, Yang L, Yang Y R. 2016. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 36(4): 8-15]
- 朱传庆, 田云涛, 徐明, 饶松, 袁玉松, 赵永庆, 胡圣标. 2010. 峨眉地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响. *地球物理学报*, 53(1): 119-127. [Zhu C Q, Tian Y T, Xu M, Rao S, Yuan Y S, Zhao Y Q, Hu S B. 2010. The effect of Emeishan supper mantle

- plume to the thermal evolution of source rocks in the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(1): 119-127]
- 朱江. 2019. 峨眉山大火成岩省地幔柱动力学及其环境效应研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Zhu J. 2019. A study of mantle plume dynamics and its environmental effect in the Emeishan Large Igneous Province. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- Campbell J L. 2007. Why would corporations behave in socially responsible ways? an institutional theory of corporate social responsibility. *Academy of Management Review*, 32(3): 946-967.
- Guo F, Fan W, Wang Y J, Li C W. 2004. When did the Emeishan mantle plume activity start? geochronological and geochemical evidence from ultramafic-mafic dikes in southwestern China. *International Geology Review*, 46(3): 226-234.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322(5898): 64-68.
- He B, Xu Y G, Chung S L, Xiao L, Wang Y M. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 213: 391-405.
- He B, Xu Y G, Huang X L, Luo Z Y, Shi Y R, Yang Q J, Yu S Y. 2008. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3): 306-323.
- He B, Xu Y G, Zhong Y T, Guan J P. 2010. The Guadalupian-Lopingian boundary mudstones at Chaotian (SW China) are clastic rocks rather than acidic tuffs; implication for a temporal coincidence between the end-Guadalupian mass extinction and the Emeishan volcanism. *Lithos*, 119(1): 10-19.
- Jin Y G, Shen S Z, Henderson C M, Wang X D, Wang W, Wang Y, Cao C Q, Shang Q H. 2006. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian Stage (Permian). *Episodes*, 29: 253-262.
- Lai X L, Wang W, Wignall P B, Bond D P G, Jiang H S, Ali J R, John E H, Sun Y D. 2008. Palaeoenvironmental change during the end-Guadalupian (Permian) mass extinction in Sichuan, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 269(1-2): 78-93.
- Liu C Y, Zhu R X. 2009. Geodynamic significances of the Emeishan basalts. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 52-69.
- Rainbird R H. 1993. The sedimentary record of mantle plume uplift preceding eruption of the Neoproterozoic Natkusiak flood basalt. *The Journal of Geology*, 101: 305-318.
- Shellnutt J G, Lizuka Y. 2012. Oxidation zonation within the Emeishan large igneous province: evidence from mantle-derived syenitic plutons. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54: 31-40.
- Shellnutt J G, Denyszyn S W, Mundil R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China). *Gondwana Research*, 22: 118-126.
- Shellnutt J G, Pham T T, Denyszyn S W, Yeh M W, Tran T A. 2020. Magmatic duration of the Emeishan large igneous province: insight from northern Vietnam. *Geology*, 48: 457-461.
- Sun Y D, Lai X L, Wignall P B, Widdowson M, Ali J R, Jiang H S, Wang W, Yan C B, Bond D P G, Védérine S. 2010. Dating the onset and nature of the Middle Permian Emeishan large igneous province eruptions in SW China using conodont biostratigraphy and its bearing on mantle plume uplift models. *Lithos*, 119(1): 20-33.
- Wignall P B, Védérine, Bond D P G, Wang W, Lai X L, Ali J R, Jiang H S. 2009a. Facies analysis and sea-level change at the Guadalupian-Lopingian Global Stratotype (Laibin, South China), and its bearing on the end-Guadalupian mass extinction. *Journal of the Geological Society*, 166: 655-666.
- Wignall P B, Sun Y D, Bond D P G, Lzon G, Newton R J, Védérine S, Widdowson M, Ali J R, Lai X L, Jiang H S, Cope H, Bottrell S H. 2009b. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China. *Science*, 324(5931): 1179-1182.
- Wu P, Liu S F, He B H, Dou G X. 2016. Stratigraphic records of the dynamic uplift of the Emeishan large igneous province. *International Geology Review*, 58(1): 112-130.
- Xia W C, Zhang N, Kakuwa Y, Kakuwa L. 2005. Radiolarian and conodont biozonation in the pelagic Guadalupian-Lopingian boundary interval at Dachongling, Guangxi, South China, and mid-upper Permian global correlation. *Stratigraphy*, 2(10): 217-238.
- Yan H, Pi D H, Jiang S Y, Hao W D, Mänd K, Robbins L J, Li L, Konhauser K O. 2020. New constraints on the onset age of the Emeishan LIP volcanism and implications for the Guadalupian mass extinction. *lithos*, 360: 105441.
- Zhong Y T, He B, Mundil R, Xu Y G. 2014. CA-TIMS zircon U-Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: implications for the termination age of Emeishan large igneous province. *Lithos*, 204: 14-19.
- Zhong Y T, Mundil R M, Chen J, Yuan D X, Denyszyn S W, Jost A B, Payne J L, He B, Shen S Z, Xu Y G. 2020. Geochemical, biostratigraphic, and high-resolution geochronological constraints on the waning stage of Emeishan Large Igneous Province. *GSA Bulletin*, 132: 1969-1986.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Leshner C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 113-122.
- Zhu B, Guo Z J, Liuu R C, Liu D D, Du W. 2014. No pre-eruptive uplift in the Emeishan large igneous province: new evidences from its 'inner zone', Dali area, Southwest China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 269: 57-67.
- Zi J W, Fan W M, Wang Y J, Cawood P A, Peng T P, Sun L H, Xu Z Q. 2010. U-Pb geochronology and geochemistry of the Dashibao basalts in the Songpan-Ganzi Terrane, SW China, with implications for the age of Emeishan volcanism. *American Journal of Science*, 310(9): 1054-1080.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 余文超)