

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.151>



四川盆地中三叠统雷口坡组三段 古海湾演化特征及其地质意义

宋金民¹, 邵兴鹏¹, 刘树根^{1,2}, 李智武¹, 邓 宾¹, 杨 迪¹, 冯宇翔^{1,3},
叶玥豪¹, 金 鑫¹, 李泽奇¹, 任 杉¹, 杨绍海¹, 李 骆¹, 罗 平^{1,4}

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. 西华大学, 四川成都 610039
3. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000
4. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要: 为阐明中三叠统雷口坡组三段(以下简称雷三段)的沉积格局, 基于四川盆地 450 余口钻井和 11 条野外剖面, 通过沉积学、岩石学和测井资料等分析, 结合微生物岩、膏盐岩、风暴岩等特殊岩相标志, 明确雷三段的海湾相, 刻画其展布特征及演化, 探讨其地质意义。结果表明, 雷三段沉积期整体呈现“海-湾-坪”的格局, 自东向西依次为蒸发潮坪相、局限潮坪相、开阔潮坪相和海湾相。在雷三 1 亚段沉积期海平面快速上升, 海湾边界位于旺苍-蓬安-简阳-成都-丹棱-宝兴一线; 雷三 2 亚段沉积期, 海平面缓慢下降, 海湾边界收缩至立溪岩-剑阁-盐亭-温江-邛崃-宝兴一线; 雷三 3 亚段沉积期, 发生小规模海侵, 海湾边界沿旺苍-剑阁-苍溪-盐亭-成都-丹棱-天全一线。雷三段沉积期的古海湾是华北板块与上扬子板块“剪刀式”碰撞的响应; 构建了一种独特的海湾型碳酸盐岩台地类型, 为“短距离共存、窄相带突变”的沉积模式; 古海湾形成了岛链(隆)-海湾斜坡、潮下海湾(凹)-海湾边缘(隆)-潟湖(凹)的“两隆两凹”格局, 促使“源-储-源”的平面毗邻、纵向叠置, 形成旁(下)生侧(上)储和自生自储两类高效源储组合模式, 推动常-非一体的勘探进程。

关键词: 四川盆地; 雷口坡组三段; 古海湾; 海-湾-坪沉积格局; 海湾型碳酸盐岩台地; 石油地质学。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2026)07-2773-18

收稿日期: 2026-01-22

Evolution Characteristics and Geological Significances of Paleo-Bay in Third Member of Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, SW China

Song Jinmin¹, Shao Xingpeng¹, Liu Shugen^{1,2}, Li Zhiwu¹, Deng Bin¹, Yang Di¹, Feng Yuxiang^{1,3},
Ye Yuehao¹, Jin Xin¹, Li Zeqi¹, Ren Shan¹, Yang Shaohai¹, Li Luo¹, Luo Ping^{1,4}

1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Xihua University, Chengdu 610039, China
3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(No.2025ZD1400403); 国家自然科学基金重点项目(No.42230310); 国家自然科学基金面上项目(Nos.42572132, 41872150); 国家自然科学基金联合基金项目(Nos.U24B6001, U2344209)。

作者简介: 宋金民(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事碳酸盐岩沉积学与储层地质学的研究及教学工作。ORCID: 0000-0003-3225-3750。
E-mail: songjinmin2012@cdut.edu.cn

引用格式: 宋金民, 邵兴鹏, 刘树根, 李智武, 邓宾, 杨迪, 冯宇翔, 叶玥豪, 金鑫, 李泽奇, 任杉, 杨绍海, 李骆, 罗平, 2026. 四川盆地中三叠统雷口坡组三段古海湾演化特征及其地质意义. 地球科学, 51(7): 2773–2790.

Citation: Song Jinmin, Shao Xingpeng, Liu Shugen, Li Zhiwu, Deng Bin, Yang Di, Feng Yuxiang, Ye Yuehao, Jin Xin, Li Zeqi, Ren Shan, Yang Shaohai, Li Luo, Luo Ping, 2026. Evolution Characteristics and Geological Significances of Paleo-Bay in Third Member of Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, SW China. *Earth Science*, 51(7): 2773–2790.

4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

Abstract: To clarify the depositional pattern of the third member of the Middle Triassic Leikoupo Formation (referred to as Lei-3 Member), this study identifies the paleo-bay facies, delineates its distribution characteristics and evolution, and discusses its geological significances. The research integrates sedimentological, petrological, and well-logging analyses from over 450 boreholes and 11 outcrop sections in the Sichuan Basin, along with distinctive lithofacies indicators such as microbialites, gypsum-salt rocks, and tempestites. It is revealed that the ‘ocean-bay-flat’ pattern is presented during the period of the Lei-3 Member, with the evaporated tidal flat, restricted tidal flat, open tidal flat, and paleo-bay facies developing sequentially from east to west. The three subfacies of bay margin, subtidal bay and bay slope have been recognized within the paleo-bay, with microbial bank and grain bank microfacies along the bay margin, hydrostatic mudstone and microbial flat microfacies in the subtidal bay and upper slope microfacies in the bay slope. During the period of the first submember of Lei-3 Member (Lei-3-1 submember), the paleo-bay covers a larger area in the rapid transgressive phase, with the bay boundary along Wangcang-Peng’an-Jiayang-Chengdu-Danleng-Baoxing area. Into the period of the Lei-3-2 submember, the bay margin contracts westward into the Lixiyan-Jiange-Yanting-Wenjiang-Qionglai-Baoxing area related to the regression event. But the bay boundary expands along the Jiange-Cangxi-Yanting-Chengdu-Danleng-Tianquan area in the period of the Lei-3-3 submember resulting from a small-scale transgression. The paleo-bay facies of the period of Lei-3 Member could provide certain important evidences for the tectonic evolution process of ‘scissor-like’ collision between the North China Plate and the Upper Yangtze Plate during the Middle Triassic. It also constitutes such a unique type of carbonate platform never been reported before as the bay-margined platform with a depositional model of ‘short-distance coexistence and narrow facies belt variation’. Moreover, the paleogeographic pattern of ‘two highs and two lows’ such as island chain (high)-bay slope to subtidal bay (low)-bay margin (high)-lagoon (low) occurred under the control of the paleo-bay, which promotes the ‘source-reservoir-source’ configuration both horizontally and vertically and facilitates the two efficient source-reservoir combination models, i. e. the side/lower-source-and-side/upper-reservoir and self-generating-and-self-storing, thus promoting the exploration process of conventional-non-conventional integration, stimulating the hydrocarbon exploration activities on both the conventional and unconventional resources.

Key words: Sichuan Basin; Third Member of Middle Triassic Leikoupo Formation; paleo-bay; “ocean-bay-flat” depositional model; bay-margined carbonate platform; petroleum geology.

0 引言

中三叠统雷口坡组是四川盆地埋藏最浅的海相碳酸盐岩产层。历经 60 余年的勘探,先后发现了卧龙河、磨溪、龙岗、元坝、中坝、彭州等气田及多个含气构造,其中磨溪气田、卧龙河气田产层为雷口坡组一段 1 亚段,中坝气田产层为雷口坡组三段 3 亚段;龙岗气田、元坝气田和彭州气田的主力产层均为雷口坡组四段 3 亚段,储层类型主要有颗粒滩白云岩、微生物岩和岩溶缝洞灰岩等,常规气储量规模达 $3\,000\times 10^8\text{ m}^3$ (刘树根等, 2019; 孟宪武等, 2021; 邓宾等, 2024; 宋晓波等, 2024)。近年来,在川中地区雷口坡组雷三 2 亚段泥质灰岩和雷一 2 亚段泥质白云岩中亦获得工业性油气流,其中充探 1 井雷三 2 亚段泥质灰岩储层测试产气 $10.87\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,产凝析油 $47.04\text{ m}^3/\text{d}$;潼深 16 井雷一 2 亚段泥质白云岩储层测试产气 $56\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (汪泽成等, 2023; 李强等, 2026)。目前川中地区雷三段泥质灰岩估算天然气资源

量 $(2\,000\sim 3\,000)\times 10^8\text{ m}^3$ (汪泽成等, 2023)。

四川盆地雷三段沉积期主要为碳酸盐岩台地沉积模式,但台地类型莫衷一是。目前报道的有开阔台地-局限台地、局限-蒸发台地和镶边台地等 (何利等, 2023; 徐康和宫晗凝, 2023)。但最新研究表明,川西地区雷四段碳酸盐台地内呈现出蒸发岩、风暴岩和微生物岩共生的窄相带式剧变特征,这与经典的台地内宽缓渐变的相带展布模式不符,由此发现了海盆与台地之间的限制性古海湾,揭示出“海-湾-坪”的沉积格局 (宋金民等, 2024)。但目前古海湾在雷三段沉积时期的发育情况及其对沉积格局的控制作用尚不明晰。本文利用四川盆地 450 余口钻井和 11 条重点露头剖面资料,结合微生物岩、膏盐岩、风暴岩等特殊岩相标志,明确了雷三段古海湾的存在,阐明海湾相的展布特征,揭示雷三段“海-湾-坪”沉积格局,探讨其地质意义,为下一步的勘探部署提供参考。

1 地质背景

四川盆地所在的上扬子板块在中三叠世处于低纬度地区,干旱的巨型季风性气候盛行,处于高盐度和强蒸发的环境(丁婷等, 2023). 华南板块与华北板块自东向西“剪刀式”碰撞,江南古陆逐渐抬升,上扬子板块东侧的泸州-开江地区随之隆起,呈现出东高西低的古地貌特征(宋金民等, 2024). 上扬子板块西缘西邻松潘-甘孜洋、北靠古特提斯洋,受康滇古陆、龙门山岛链、天井山水下古隆起和米仓山古隆起的围限,形成半开放的沉积环境(图 1a),自西向东呈现“洋-台-隆”的格局(汪泽成等, 2022; 宋金民等, 2024).

四川盆地中三叠统雷口坡组为一套蒸发岩与碳酸盐岩的共生序列,厚度为 0~1 000 m,自西向东逐渐减薄(宋金民等, 2024; 李玉琢等, 2026). 雷口坡组底部与下三叠统嘉陵江组泥晶白云岩整合接触,顶部在川中地区与上三叠统须家河组的粉砂岩平行不整合接触,在川西地区与中三叠统天井山组的鲕粒灰岩整合接触(刘树根等, 2019; 辛勇光等, 2022; 何利等, 2023; 唐宇欣等, 2025). 根据岩-电特征,自下而上划分为雷口坡组一段-雷口

坡组四段(简称雷一段-雷四段). 雷三段厚 90~530 m,以泥晶灰岩、泥质灰岩、泥晶白云岩、膏质白云岩和膏盐岩为主,划分为三个亚段,即雷三 1 亚段、雷三 2 亚段、雷三 3 亚段(冯宇翔, 2023). 雷三 1 亚段厚 10~120 m,主要为泥晶灰岩、生屑灰岩和残余砂屑白云岩,底部为泥晶灰岩与雷二段顶部的泥晶白云岩分界,测井响应特征表现为自然伽马值突然增高,呈中值锯齿状、电阻率和声波时差降低;而顶部以泥晶灰岩、生屑灰岩与雷三 2 亚段膏质灰岩/膏岩分界,表现为自然伽马值骤减,电阻率为高值锯齿状;雷三 2 亚段厚 50~220 m,为泥晶白云岩、泥质灰岩、含泥灰岩、膏质白云岩/灰岩、膏盐岩,顶部与雷三 3 亚段泥晶灰岩分界,自然伽马值迅速增大,电阻率下降;雷三 3 亚段厚 30~190 m,主要为泥晶白云岩、残余砂屑白云岩、泥晶灰岩,顶部与雷四 1 亚段泥晶白云岩分界,测井曲线特征表现为自然伽马值整体较高,曲线形态较平缓,分界处呈尖峰状,电阻率降低(图 1b)(冯宇翔, 2023; 任杉等, 2025). 中三叠世末期印支运动导致泸州-开江古隆起核部剥蚀至嘉陵江组,向两侧剥蚀程度减弱,古隆起围斜区和川西坳陷区雷三段发育完整(张豪等, 2024; 李玉琢等, 2026).

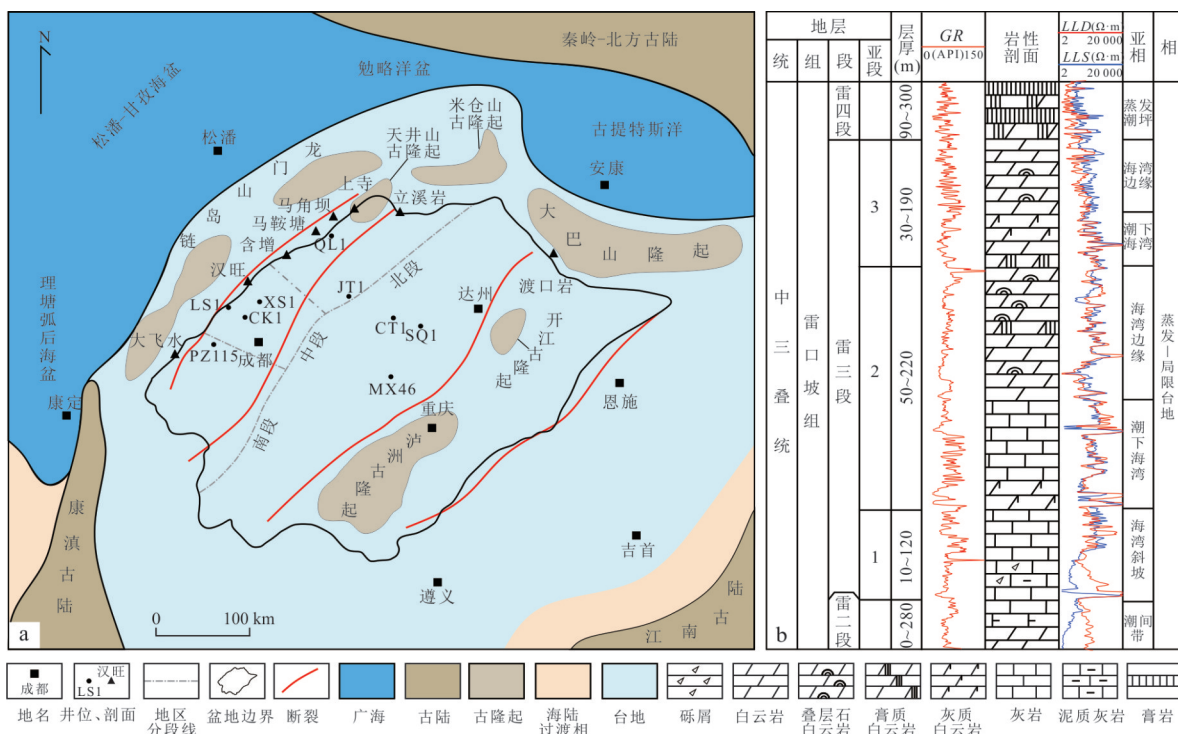


图 1 四川盆地及周缘雷口坡组构造分布图及雷三段综合柱状图(据 Xu *et al.*, 2021; 辛勇光等, 2022)

Fig.1 Tectonic map and comprehensive stratigraphic column of Lei-3 Member of the Leikoupo Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas

2 沉积相标志

2.1 沉积构造

2.1.1 反粒序结构 见于马角坝、汉旺、马鞍塘等剖面的雷三2、雷三3亚段。马角坝剖面第53层中发育三个反粒序结构(图2a),单个旋回在1~1.5 m之间,旋回底部为薄层状残余粉屑-细砂屑白云岩,向上粒度变粗,顶部为残余中-粗砂屑/鲕粒白云岩,指示海湾边缘颗粒滩沉积微相。

2.1.2 风暴沉积构造 雷三段的风暴沉积构造主要有底冲刷、风暴砾屑、粒序层理和丘状交错层理。在立溪岩、马角坝和渡口岩剖面发育,指示相对开阔的深水斜坡环境。

在立溪岩剖面雷三1亚段中,识别出底冲刷面、风暴砾屑层和平行层理等。底冲刷面起伏1~4 cm(图2b);底冲刷面之上为风暴砾屑层(图2c),砾屑呈长条状,分选中等,粒径介于0.5~2 cm之间;顶部为风暴衰减后期的平行层理段,厚约5 cm,为极薄层-薄层状泥晶白云岩(图2d),单层厚度多小于3 mm,反映低能浊流沉积(冯宇翔等, 2023)。渡口岩剖面的雷三1亚段发育7个风暴沉积旋回(图2e),每个旋回厚度在20~80 cm,总厚度3.05 m,主要发育砾屑段和平行层理段(图2f);第一个旋回厚40 cm,下部为具冲刷面的砾屑-生屑灰岩,旋回上部被覆盖;第二个旋回厚58 cm,下部为砾屑层,中部为薄层状微晶灰岩与泥质灰岩互层,上部发育平行层理段;第三个旋回厚30 cm,下部为生屑层,上部被覆盖;第四个旋回厚20 cm,下部为砾屑层,上部为泥质灰岩;第五个旋回厚21 cm,下部为黄灰色砾屑灰岩,上部为平行纹层段;第六个旋回厚82 cm,下部为砾屑层,上部为泥质灰岩;第七个旋回厚54 cm,下部为粒径较小的砾屑层,上部为泥质灰岩层。

2.1.3 滑塌堆积 风暴作用引起的微生物礁前垮塌沉积,角砾大小不一,在2~3 cm之间,呈点状分布。见于大飞水、立溪岩和渡口岩剖面。

川西北地区的立溪岩剖面雷三1亚段上部见厚达3 m的垮塌角砾白云岩,内部呈现多期垮塌堆积特征(图2g),指示相对深水的海湾斜坡环境。单个堆积体厚度介于15~50 cm之间;角砾以次棱角状为主,最大可达2 cm×5 cm,一般为2 cm×3 cm。该垮塌体下部为深灰色含灰角砾白云岩,规模为40 cm×30 cm,角砾直径0.2~2 cm(图2h);中下部为灰色-深灰色角砾白云岩,规

模为15 cm×30 cm,角砾大小2 cm×3 cm,且向上粒径逐渐变小,过渡为砂屑白云岩;顶部为薄层状泥晶白云岩,规模为10 cm×30 cm(图2i)。

川东地区渡口岩剖面的雷三段识别出四期滑塌堆积,指示风暴改造下的潮坪环境。第一期滑塌体规模为95 cm×50 cm,滑塌体后端角砾在1~10 cm之间,前端的角砾在1~3 cm之间,填隙物含量为40%~60%(图2j);第二期滑塌体呈舌状展布,规模为3.3 m×(后端1.5 m、中部1.1 m、前端0.5 m),结构较完整(图2k)。角砾成分为颗粒灰岩和泥质灰岩,角砾间为砂级填隙物,沿滑塌体轴向角砾粒径呈现分异特征,后端以12~15 cm为主(图2l),中部则为6~9 cm,前端的粒径为2~3 cm(图2m);第三期滑塌体规模为1.3 m×0.3 m,由两个小规模滑塌体构成,角砾粒径为2~3 cm(图2n);第四期滑塌体规模为2.4 m×0.7 m,发育包卷层理(图2o),粗粒的砂屑灰岩楔入泥质灰岩中,滑塌楔状体宽约45 cm,滑塌体后端为黄灰色角砾灰岩,粒径在2~5 cm之间,前端为深灰色角砾灰岩,粒径为0.5~3 cm。滑塌体沿280°方向滑动,角砾成分为泥晶灰岩和砂屑灰岩。

2.1.4 纹层叠层构造 为微生物席沉积建造,包括较平缓的纹层构造和波状起伏的叠层构造(宋金民等, 2024)(图3a)。见于汉旺剖面和LS1井中的雷三3亚段。纹层叠层构造多形成于水力较弱的还原条件下,指示潮下海湾环境。

2.2 特殊岩类标志

2.2.1 膏盐岩 雷三段膏盐岩主要包括白云质膏岩、灰质膏岩、石膏和硬石膏(图3b),局部地区见石盐和杂卤石(图3c)。

膏盐岩主要发育在雷三2亚段,呈现出三种组合类型。第一种是薄层状膏岩、白云质膏岩和白云岩组合,厚度为1~5 m,指示潮上带的膏云坪或云膏坪微相;第二种为薄-中层状石膏与厚层灰岩、灰质膏岩和泥质灰岩组合,厚度为5~10 m,以资阳-遂宁-广安-渠县-仪陇-西充地区为中心,呈北东-南西向展布,指示局限潟湖下的膏灰质潟湖微相;第三种为厚层-块状膏盐岩,累计厚度50~100 m,指示以广安、龙岗、西充为中心的牛眼式膏盐潟湖微相。

2.2.2 钙质海绵礁白云岩 钙质海绵与古石孔菌、蓝细菌等钙质微生物以包覆或黏结的方式形成生物礁(吴亚生等, 2023)。在LS1井雷三2亚段、Z46井雷三3亚段可见钙质海绵礁白云岩。LS1井中海绵礁累计厚度达1.5 m,以礁白云岩为主(图3d),其

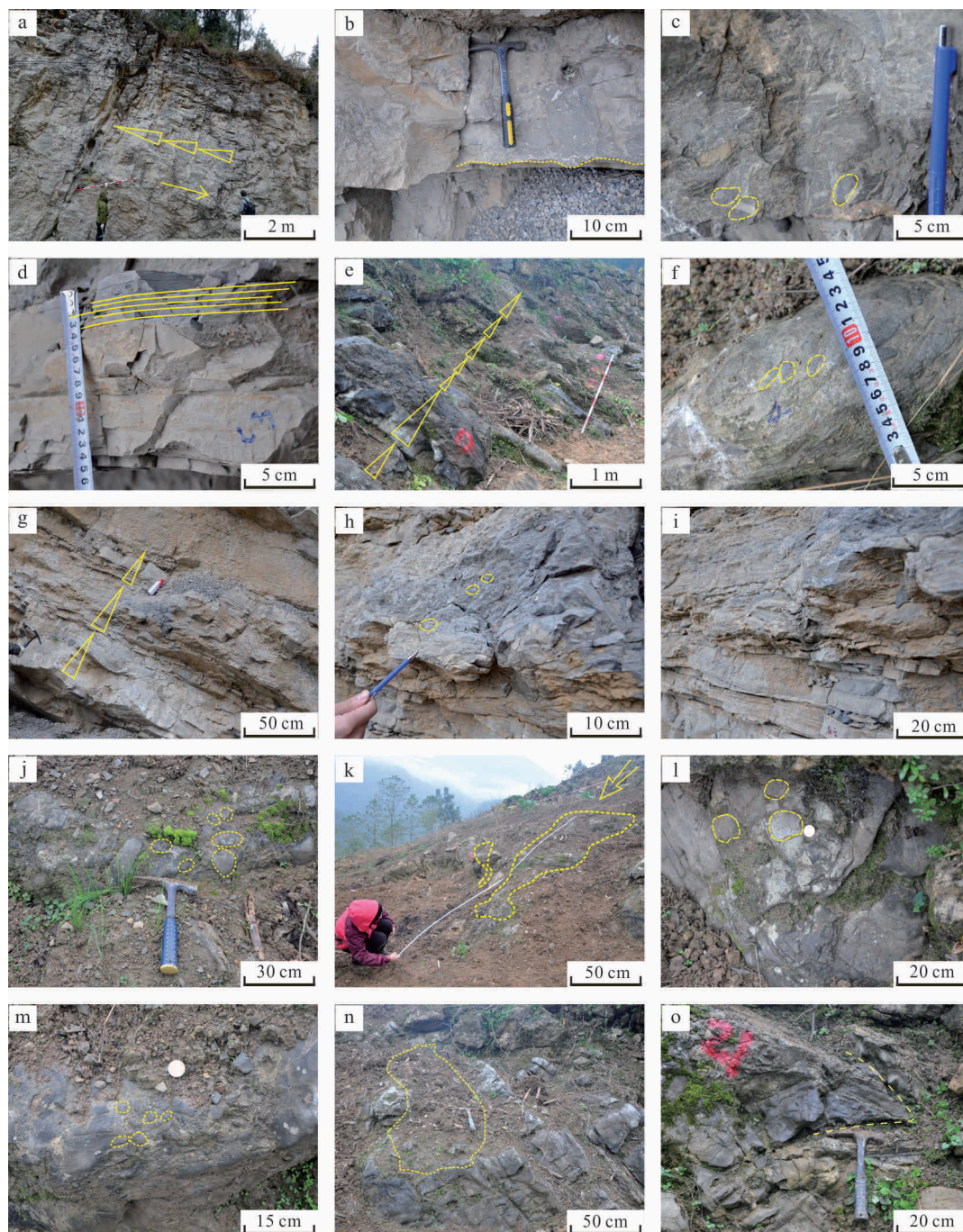


图2 四川盆地雷三段典型沉积构造

Fig.2 Typical sedimentary structure plate of Lei-3 Member in Sichuan Basin

a. 马角坝剖面,雷三1亚段,反旋回结构,黄色箭头指示顶面;b. 立溪岩剖面,雷三1亚段,底冲刷面;c. 立溪岩剖面,雷三1亚段,风暴砾屑;d. 立溪岩剖面,雷三1亚段,平行层理;e. 渡口岩剖面,雷三1亚段,7个风暴旋回;f. 渡口岩剖面,雷三1亚段,风暴砾屑;g. 立溪岩剖面,多期滑塌体;h. 立溪岩剖面,滑塌体下部,砾屑白云岩;i. 立溪岩剖面,滑塌体顶部薄层状泥晶白云岩;j. 渡口岩剖面,第一期滑塌体,砾屑向前端粒度变细,角砾灰岩;k. 渡口岩剖面,第二期滑塌体,滑塌方向280°;l. 渡口岩剖面,第二期滑塌体后端,砾屑灰岩;m. 渡口岩剖面,第二期滑塌体前端,含泥砾屑灰岩;n. 渡口岩剖面,第三期滑塌体,出露较小,角砾灰岩;o. 渡口岩剖面,第四期滑塌体,滑塌包卷构造,滑塌楔状体,灰色角砾灰岩

中造礁生物海绵为细长管状,见少量海绵骨针(杨荣军等,2009),海绵骨架间为灰泥,指示潮下海湾环境;Z46井主要为礁块白云岩,钙质海

绵被微生物包覆成礁,呈碎块状,可见双壳、介形虫等生屑碎屑,指示海湾边缘微生物滩微相。

2.2.3 灰岩 雷三段的灰岩包括泥晶灰岩、生屑灰

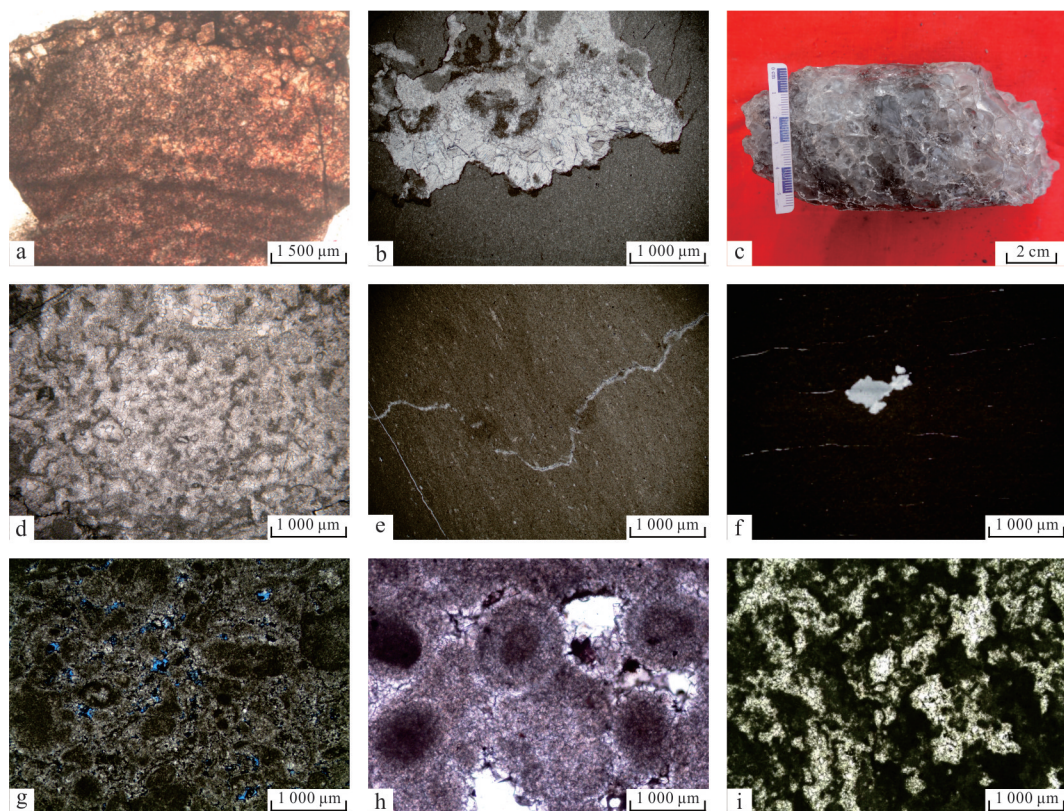


图3 四川盆地雷三段沉积标志与典型岩相图版

Fig.3 Sedimentary indicators and typical lithofacies plate of Lei-3 Member in Sichuan Basin

a. PZ115井, 6 379 m, 雷三2亚段, 纹层叠层白云岩, $\times 2.5$, 单偏光; b. SQ1井, 3 045 m, 雷三2亚段, 膏质灰岩, $\times 2.5$, 单偏光; c. SQ1井, 3 052 m, 雷三2亚段, 盐岩; d. LS1井, 6 297 m, 雷三2亚段, 海绵白云岩, $\times 2.5$, 单偏光; e. ZY2井, 2 253 m, 雷三3亚段, 泥晶灰岩, $\times 2.5$, 单偏光; f. Q1井, 3 035 m, 雷三2亚段, 泥质灰岩, $\times 2.5$, 单偏光; g. QL1井, 3 686 m, 砂屑白云岩, $\times 2.5$, 单偏光; h. Z46井, 3 091 m, 雷三3亚段, 鲕粒白云岩, $\times 2.5$, 单偏光; i. 汉旺剖面, 雷三3亚段, 凝块石白云岩, $\times 2.5$, 单偏光

岩、砂屑灰岩及泥质灰岩(图3e、3f), 在雷三1-3亚段均有发育. 薄-中层状泥晶灰岩指示相对开阔的潮下带灰坪微相; 颗粒灰岩指示相对开阔高能的颗粒滩微相; 泥质灰岩则发育于较深水的还原环境, 在川西地区为深灰色中-薄层状, 单层厚5~10 m, 指示海湾斜坡的静水泥微相; 川中地区则为深灰色-灰黑色薄层状, 单层厚10~30 m, 可见黑色泥质纹层和水平层理, 指示低能局限的泥灰质潟湖微相; 川东地区的泥质灰岩中粉砂含量达10%~20%, 指示泥灰坪沉积.

2.2.4 风暴岩 雷三段的风暴岩见于立溪岩和渡口岩剖面, 主要发育在雷三1亚段. 立溪岩剖面识别出三种风暴沉积序列: 序列I由底冲刷面及砾屑段(图2b)+粒序段(图2c)+平行层理段(图2d)构成, 形成于风暴浪基面与正常浪基面之间, 接近风暴浪基面的海湾斜坡下部的区域; 序列II由底冲刷面及砾屑段+粒序层+平行层理段+风暴浊积段构成, 处于风暴浪基面以上的位置; 序列III主要由底冲刷

面及砾屑段+粒序段构成, 指示风暴浪基面与正常浪基面之间的海湾斜坡下部环境(冯宇翔等, 2023). 渡口岩剖面则识别出7个风暴沉积旋回, 其中前两个旋回组成序列I, 包括底冲刷+砾屑段+水平层理段, 每个序列厚0.4~0.6 m, 指示正常浪基面和平均低潮面之间的高能环境; 第3个旋回为序列VI, 由粒序段组成, 厚约0.3 m; 第4个旋回为序列VII, 由砾屑段+泥质灰岩段组成, 厚约0.2 m; 第5个旋回为序列V, 由砾屑段+水平层理段组成, 厚约0.2 m; 第6和第7个旋回都为序列VII, 由砾屑段+泥质灰岩段组成, 厚0.5~0.8 m; 整体反映在风暴潮坪中风暴作用由近到远的演化过程.

2.2.5 微生物岩 雷三段的微生物岩主要为凝块石白云岩和凝块-叠层石白云岩(钱一雄等, 2019; Wang *et al.*, 2023a). 微生物岩沿着川西北段的中坝-双鱼石地区的Z46井-QL1井-ST2井, 一直到川西中段PZ115-LS1井-汉旺剖面一带展布.

凝块石白云岩由微生物相互黏结成不规则状

表 1 四川盆地雷三段沉积相划分				
Table 1 Division scheme of depositional facies of the Lei-3 Member in the Sichuan Basin				
相	亚相	微相	相标志	发育亚段
蒸发潮坪	蒸发潟湖	膏盐潟湖	厚层膏盐岩、盐岩	雷三 2
	潮上带	膏云坪/云膏坪	膏岩夹少量白云岩或膏质云岩互层	雷三 2
局限潮坪	局限潟湖	潟湖边缘滩	砂屑白云岩、鲕粒白云岩/灰岩	雷三 3
		膏灰质潟湖	厚层状膏质灰岩或膏岩与灰岩互层	雷三 2
		灰质潟湖	厚层状泥晶灰岩、含泥灰岩	雷三 3
		泥灰质潟湖	泥质灰岩、含泥灰岩	雷三 2
	潮间带	微生物坪	叠层石白云岩	雷三 3
		云坪	泥晶白云岩	雷三 2
		灰云坪	灰质白云岩	雷三 1
开阔潮坪	潮下带	云灰坪	白云质灰岩	雷三 1
		灰坪	泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、含泥灰岩	雷三 1
		泥灰坪	泥质灰岩、含泥灰岩	雷三 1
	海湾边缘	颗粒滩	厚层状残余砂屑/砾屑/鲕粒白云岩	雷三 1
海湾	潮下海湾	微生物滩	凝块石、凝块-叠层石	雷三 3
		钙质海绵礁	钙质海绵白云岩	雷三 2
		微生物坪	凝块石白云岩、纹层叠层白云岩	雷三 3
		静水泥	泥质灰岩、泥质白云岩、云质灰岩	雷三 2
	海湾斜坡	上斜坡	滑塌堆积、斜坡角砾、风暴岩	雷三 1

的凝集颗粒组成(图 3i),指示相对深水的潮下海湾环境.凝块-叠层石白云岩具有层状或丘状明暗相间的纹层结构,纹层不连续,呈现出纹层与叠层之间的过渡形态,局部显示为凝块状,指示相对高能

的潮间带上部的微生物席建造(宋金民等, 2024).

2.3 沉积相类型与沉积相带展布

四川盆地雷三段主要发育蒸发潮坪、局限潮坪、开阔潮坪和海湾等四类沉积相.局限-蒸发潮坪相主要在川东-川中地区,开阔潮坪相分布在川中-川西地区,海湾相则处于川西地区(表 1).

2.3.1 蒸发潮坪相 该相为干旱炎热的高盐度环境,以蒸发矿物大量沉淀为标志.根据与平均高潮线的位置关系,划分为潮上带和蒸发潟湖亚相,多见于雷三 2 亚段.蒸发潟湖亚相位于平均高潮线附近,为相对受限的低洼区,主要为厚层-块状膏盐岩夹盐岩,平面上呈环带状展布,为膏盐潟湖微相.潮上带亚相位于平均高潮线和最大高潮线之间,薄层状泥晶白云岩与膏岩互层产出,根据两者的占比划分为膏云坪和云膏坪微相.

2.3.2 局限潮坪相 该相为障壁滩或周缘隆起阻隔下的平均高潮线与平均低潮线之间的间歇暴露环境(宋金民等, 2024).局限潮坪相包括潮间带和局限潟湖 2 种亚相,见于雷三 2~3 亚段.局限潟湖亚相为相对低洼、水动力条件较弱的局限

环境,根据沉积物类型划分为泥灰质潟湖、灰质潟湖、膏灰质潟湖和潟湖边缘滩等 4 个微相,以厚层状泥质灰岩、泥晶灰岩、膏质灰岩和残余砂屑白云岩为主,见水平层理.潮间带亚相划分为微生物坪、云坪和灰云坪等 3 种微相,分别为叠层石白云岩、薄层状泥晶白云岩和灰质白云岩.

2.3.3 开阔潮坪 该相为海侵背景下水动力较弱、盐度相对正常的平均低潮线之下的开阔环境,主要为泥晶灰岩、生屑灰岩和泥质灰岩沉积,见于雷三 1 亚段.开阔潮坪相由潮下带亚相构成,进一步划分出泥灰坪、灰坪和云灰坪等 3 种微相.泥灰坪微相形成于较深水环境,泥质含量相对较高,由泥质灰岩和含泥灰岩组成,在川东地区占主导;灰坪微相以中-厚层状泥晶灰岩和生屑灰岩为主,分布于川西地区东部;云灰坪微相的水体深度相对较小,主要为云质灰岩、灰岩夹薄层白云岩,为云坪到灰坪的过渡微相,见于川西地区的北段和川西地区南段到川中的过渡地区.

2.3.4 海湾相 该相为沿着克拉通板块边缘延伸进来形成的相对深水环境,但后期被调整改造而不再保留深水海湾特征的沉积相(安振振等, 2018; 宋金民等, 2024).雷三段古海湾是沿着上扬子板块西缘呈北西向伸入碳酸盐台地内部、靠海一侧受龙门山岛链和天井山水下古隆起遮挡的一个半开放

的较深水沉积.其存在的沉积学证据如下:①多期多点的风暴沉积,多垂直于岸线展布,在立溪岩、马角坝和渡口岩剖面中识别出多期的风暴岩,指示畅通开阔环境、有坡度的沉积地貌和自北西转向北东的环带状古海岸线(宋金民等, 2024).②广泛分布的微生物滩和微生物坪建造,微生物滩微相主要由凝块石和凝块-叠层石组成,微生物坪微相则由叠层石主导,二者相间连片分布于海湾边缘.因微生物岩多沿着海岸线展布(Jahnert *et al.*, 2012; Harris *et al.*, 2013),雷三段的微生物岩的展布自北西至北东呈环带状,亦指示古海岸线为逆时针环带状.③开阔-蒸发环境的窄相带过渡,雷三1亚段沉积期为海侵背景下的开阔环境,至雷三2亚段沉积期为海退强蒸发环境,而雷三3亚段沉积期发生小规模海侵的局限环境,由此就形成了开阔-蒸发-局限环境的纵向叠置和平面快速过渡的特征,导致灰坪、泥灰坪、风暴滩/坪、膏云坪与膏盐潟湖窄相带共存的面貌.④点状的滑塌堆积体发育,主要见于大飞水剖面、立溪岩和渡口岩剖面,滑塌角砾大小混杂,角砾成分为生屑泥晶灰岩、泥晶白云岩,指示环海湾的斜坡环境.据此推测在龙门山水下岛链、天井山水下古隆起和米仓山古隆起的围限下,古海岸线和斜坡之间发育北西-南东走向的半局限-半开阔的海湾相.

根据平均低潮线、正常浪基面和风暴浪基面的位置,海湾相进一步划分为海湾斜坡、潮下海湾和海湾边缘等三种亚相(表1).

海湾斜坡亚相位于海湾下部,处在正常浪基面和风暴浪基面之间,水体相对深,坡度较大,相区位于海盆和潮下海湾之间,主要为泥晶灰岩、泥质灰岩夹泥岩沉积,可见风暴砾屑、底冲刷面、平行层理、滑塌等沉积构造.进一步识别出上斜坡微相,主要沿大飞水-都江堰-广元一带展布.

潮下海湾亚相是位于海湾相中上部,在正常浪基面和平均低潮线之间,位于海湾斜坡和海湾边缘之间,水体相对较深且坡度较缓.为泥质灰岩、泥质白云岩、白云质灰岩、微生物白云岩和钙质海绵白云岩,进一步划分为静水泥、钙质海绵礁和微生物坪等微相.其中静水泥微相见于川西中段的CK1-XS1井等井区;微生物坪微相分布于川西南段-中段的PZ115-LS1井区,以纹层-叠层白云岩为主;钙质海绵礁微相主要见于LS1井区.

海湾边缘亚相位于平均低潮线以上,水体相对较浅、坡度平缓,相区位置在潮下海湾与潮间带之

间.主要为颗粒灰岩、残余颗粒白云岩和微生物岩,进一步划分出颗粒滩和微生物滩微相.川西南段的颗粒滩微相见于莲花山一带的LH2井-DS1井区,为残余砂屑白云岩、砂屑灰岩和残余鲕粒白云岩.川西中段-北段的颗粒滩微相则发育于含增剖面-Z46井-QL1井等地区,以残余砂屑白云岩、砂屑灰岩和鲕粒灰岩为主(图3g、3h).微生物滩微相见于川西中段-北段的马鞍塘-马角坝-上寺剖面一线,呈北东-南西向展布,以凝块石白云岩为主(图3i).

2.4 沉积相横向展布特征

通过对北西-南东向的LS1-CK1-含增剖面-GJ-JT1-SQ1-MX46井的沉积微相连井剖面分析,发现雷三段在“海-湾-坪”格局的控制下,伴随海平面的变化,沉积微相呈现出窄相带式迁移特征.

雷三1亚段沉积期,发生大规模海侵,自西向东依次为海湾、灰坪和云坪/膏云坪.在LS1井区为海湾斜坡,为泥质灰岩沉积;CK1井-含增剖面则为潮下海湾亚相,为泥晶灰岩和泥质白云岩;GJ-JT1井区为海湾边缘亚相,为颗粒滩微相;向东至川中地区的SQ1井区过渡为潮下带的灰坪微相;南东至MX46井区则为泥晶白云岩和膏质云岩,转变为潮间-潮上带的云坪/膏云坪微相.

雷三2亚段沉积期,海平面缓慢下降,处于区域性海退背景,发育两个海退旋回.在龙门山水下古隆起的围限之下,台地内部蒸发作用加剧,自西向东分别为海湾、云坪、灰坪、泥灰质潟湖、膏灰质潟湖、膏盐潟湖.第一个海退旋回内LS1-CK1井区为潮下海湾亚相,主要为泥晶灰岩、云质灰岩沉积.至含增剖面-GJ井区逐渐转变为海湾边缘亚相,为残余砂屑白云岩、叠层石白云岩;向东过渡为泥晶白云岩、膏质白云岩、泥质灰岩和膏盐岩,分别为云坪、膏云坪和泥灰质潟湖微相;至川中地区的SQ1井则演变为膏盐潟湖微相.第二个海退旋回,LS1井区为泥质白云岩、残余砾屑白云岩、叠层石白云岩和海绵礁白云岩,为海湾斜坡亚相转变为潮下海湾亚相;CK1-GJ井区为泥质白云岩和白云质灰岩,为潮下海湾亚相;含增剖面为微生物坪微相,主要为叠层石白云岩;向东至JT1-MX46井区则为泥晶灰岩和含膏灰岩,演变为灰坪-膏灰质潟湖微相.

雷三3亚段沉积期再次海侵,古海湾向东迁移,展布范围扩大,自西向东为海湾、云坪和泥灰质潟湖.LS1井区发育风暴成因的砾屑灰岩,为海湾斜坡亚相;至CK1井区则为白云质灰岩和叠层石白云

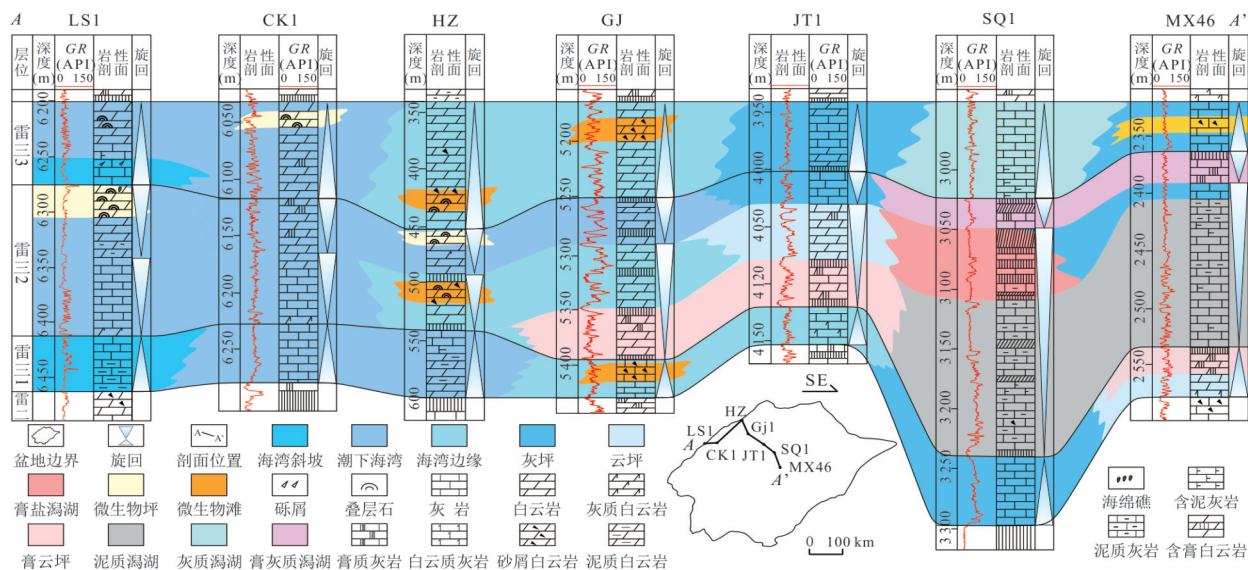


图4 四川盆地雷三段沉积相连井剖面图

Fig.4 Cross section diagram of depositional facies of Lei-3 Member in Sichuan Basin

岩,转变为潮下海湾亚相;往北东至含增剖面-GJ井区演变为残余砂屑白云岩和凝块-叠层石白云岩,指示海湾边缘亚相的颗粒滩和微生物滩微相;向东至川中地区为泥晶灰岩和含泥灰岩,逐渐转变为灰坪-灰质潟湖微相。

四川盆地雷三段以海湾相和开阔-局限-蒸发潮坪相为主。川西地区以海湾相和开阔潮坪相为主,伴随着先上升后下降再上升的海平面旋回变化,海湾-开阔潮坪-海湾的纵向叠置,呈现出海湾斜坡-潮下海湾-海湾边缘-潮下海湾-海湾斜坡的旋回特征,平面上展现出由西向东再向西复向东的迁移特征。川中地区则以局限-蒸发潮坪相为主,纵向上表现为局限潮坪-蒸发潮坪-局限潮坪的旋回演化特征,表现为泥灰质潟湖-膏灰质潟湖-灰质潟湖-膏盐潟湖-泥灰质潟湖微相叠置,局限潟湖亚相的平面展布范围表现为减小-增大-减小的演变特征。

3 海湾相特征

本文以四川盆地的450余口钻井的测井数据为基础,采用Ciflog软件进行矿物成分测井解释,辅以11条野外实测剖面,对雷三段1~3三个亚段的黏土矿物含量、方解石矿物含量、白云石矿物含量和膏盐矿物含量(下文简称为泥质含量、灰质含量、白云质含量和膏质含量)进行单因素编图,以刻画不同时期古海湾控制下的矿物组分的分布特征。

3.1 雷三1亚段沉积期

雷三1亚段的泥质含量在10%~25%之间,平均为15%,累计厚度为5~30 m(图5a)。川西地区泥质含量在20%~25%之间,为泥质白云岩和泥质灰岩,指示潮下海湾亚相中的静水泥微相;川东地区泥质含量则为30%~40%,主要为泥质灰岩,指示泥灰坪微相。

雷三1亚段的膏质含量在5%~25%之间,平均为5%,分布于川中地区的中南部,在资阳-广安一带膏质含量在20%~30%,累计厚度为5~25 m(图5b)。主要为膏质灰岩、含膏灰岩夹膏盐岩,指示蒸发潮坪亚相的膏灰坪微相。

雷三1亚段灰质含量集中于20%~85%之间,平均含量为65%,累计厚度为20~100 m(图5c)。为泥晶灰岩、泥质灰岩和生屑灰岩。川西海湾的中南段、川中地区北部-东北部的含量都超过60%,分别指示潮下海湾和潮下带亚相的灰坪、泥灰坪微相。

雷三1亚段白云质含量在0~85%之间,平均含量为15%,累计厚度为5~30 m(图5d)。主要见于川西北段和南段地区,为凝块石白云岩和泥晶白云岩,分别为潮下海湾微生物坪微相和潮上带的云坪微相。

雷三1亚段沉积期处于海侵期,灰质含量较高,且与白云质含量呈现出空间毗邻、此消彼长的关系。而泥质含量在台地内表现为东西高、中部低的分布特征,指示古海湾展布范围。该时期海湾中心主要沿着汉旺-梓潼-南部一带,面积约为57 440 km²,海湾边界则位于旺苍-蓬安-简阳-成都-丹棱-宝兴一线。

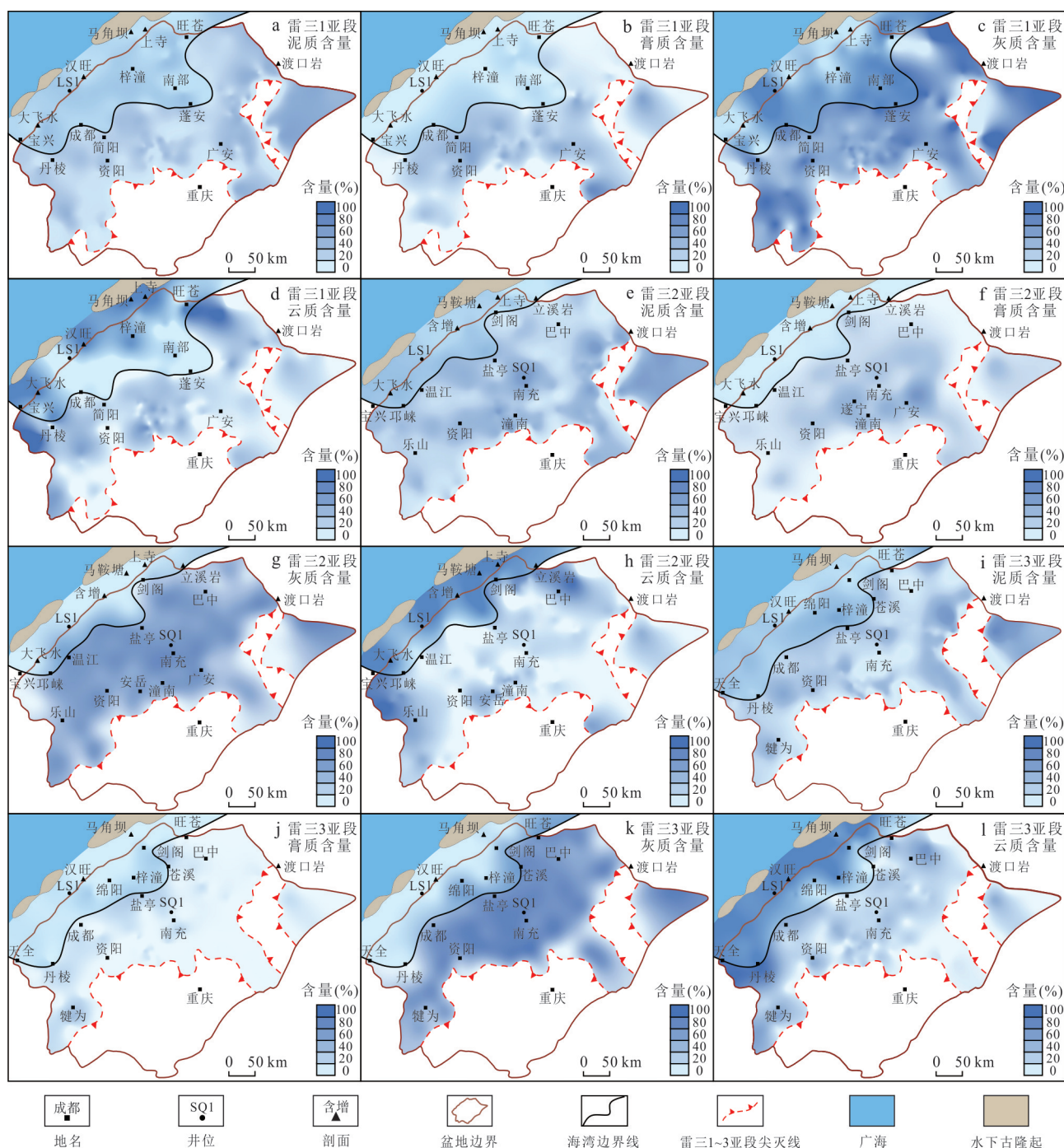


图5 四川盆地雷三1~3亚段泥质、灰质、膏质和白云质矿物含量单因素图

Fig.5 Contour maps of the single factors such as argillaceous, limy, gypsum and dolomite contents of Lei-3-1 to Lei-3-3 sub-members in Sichuan Basin

3.2 雷三2亚段沉积期

雷三2亚段的泥质含量介于10%~35%之间,平均含量为20%,累计厚度为10~30 m(图5e).主要为含泥灰岩、泥质灰岩和灰质泥岩.川西地区中段的泥质含量在15%~20%之间,指示潮下海湾亚相;川中地区的资阳-潼南-南

充-广安地区的泥质含量为20%~30%,指示泥灰质潟湖微相;川东地区泥质含量可达30%~35%,指示古隆起周缘的泥灰坪微相.

雷三2亚段的膏质含量在20%~70%之间,平均含量为40%,累计厚度为10~80 m(图5f).主要为膏盐岩、膏质灰岩与膏质白云岩.膏质岩主要分

布于川中地区,整体呈北东-南西向的环带状,在遂宁-广安地区膏质含量超过50%,并伴生石盐、杂卤石,指示蒸发潟湖亚相中的膏盐潟湖微相。

雷三2亚段的灰质含量为30%~65%,平均含量为45%,累计厚度为20~80 m(图5g)。主要为泥晶灰岩和泥质灰岩。在川西地区中段-南段、川中地区的南充一带以及川东地区的灰质含量较高,局部可达50%以上,分别指示潮下海湾的静水泥微相和局限潟湖的泥灰质潟湖微相。

雷三2亚段的白云质含量在0~80%之间,平均含量为25%,累计厚度为10~70 m(图5h)。为泥晶白云岩、残余砂屑白云岩和凝块石白云岩,广泛分布于川北、川中和川南地区,展布范围较雷三1亚段沉积期扩大;从川北地区的巴中一带逐渐向西部的古海湾延伸,指示潮下海湾微生物坪和颗粒滩微相;川西南地区主要为泥晶白云岩,指示潮上带亚相的云坪微相;川中地区则为残余砂屑白云岩,沿着安岳-潼南局限潟湖的边缘分布,指示潟湖边缘滩微相。

雷三2亚段沉积期海平面下降,灰质含量显著降低,而白云质和膏质含量明显增加,泥质、灰质与膏质含量在平面上基本重合,指示局限潟湖范围;而白云质含量则主要沿着龙门山岛链前缘分布,指示海湾边缘。海湾中心为川西地区中段的龙门山岛链的前缘区,面积约33 670 km²,海湾边界位于立溪岩-剑阁-盐亭-温江-邛崃-宝兴一线。

3.3 雷三3亚段沉积期

雷三3亚段的泥质含量为10%~30%,平均含量为15%,累计厚度为5~20 m(图5i)。主要为泥质灰岩、灰质泥岩和含泥灰岩,见于川西地区中段的梓潼-绵阳一带,含量为20%~30%,指示潮下海湾亚相的静水泥微相。

雷三3亚段的膏质含量为0~20%,平均含量为5%,累计厚度为0~20 m(图5j)。台地内的膏盐岩几乎不发育,仅在川西地区北段的盐亭-苍溪和川西南地区的乐山-犍为一带有零星发育,主要为膏质白云岩、含膏灰岩和膏质灰岩,指示潮上带亚相的膏云坪/膏灰坪微相。

雷三3亚段的灰质含量介于40%~90%之间,平均含量为50%,累计厚度为20~50 m(图5k)。为泥晶灰岩、含泥灰岩和泥质灰岩,主要见于川西地区中段、川北和川中地区,含量在50%~60%之间,分别指示潮下海湾亚相的静水泥微相和潮下带亚相的灰坪微相。

雷三3亚段的白云质含量为0~80%,平均含量30%,累计厚度为30~60 m(图5l)。为泥晶白云岩、凝块石白云岩、残余砂屑白云岩、膏质白云岩和灰质白云岩,分布于川西地区的南段和北段,含量达60%~70%,向东逐渐减小,指示海湾边缘的颗粒滩微相和潮间带的云坪微相。

雷三3亚段沉积期再次海侵,古海湾范围向东扩展。泥质含量降低,灰质和白云质含量增加,膏质含量显著降低,泥质和白云质含量指示古海湾范围,海湾内泥质含量高,海湾边缘白云质含量高,潟湖内膏质和灰质含量高。海湾中心位于汉旺-绵阳-梓潼一带,面积约42 330 km²,海湾边界沿旺苍-剑阁-苍溪-盐亭-成都-丹棱-天全一线发育。

4 雷三段海湾相演化过程

雷三段沉积期,四川盆地呈现北西-南东向的“海-湾-坪”的格局,控制着从海盆到台地的沉积相带展布(图6a)。雷三1亚段沉积期,海侵作用下古海湾范围急剧东扩,海湾中心位于汉旺-梓潼-南部一带,海湾边界在旺苍-蓬安-简阳-成都-丹棱-宝兴一线。海湾斜坡亚相沿旺苍-立溪岩剖面-LS1井-大飞水剖面一线发育,其中立溪岩剖面可见风暴沉积,而川西地区南段的大飞水剖面-LS1井一带主要发育泥质灰岩沉积;潮下海湾亚相则分布于PZ115-CK1井区一线,主要为叠层石白云岩,为微生物坪微相;海湾边缘亚相位于雅安-丹棱-成都-蓬安-旺苍地区,在川西地区南段的雅安-丹棱带为颗粒滩微相。古海湾东侧为碳酸盐岩潮坪相,依次为开阔潮坪潮下带亚相-局限潮坪潮间带亚相,分别为云坪-灰云坪-膏云坪-灰坪-泥灰坪微相。云坪微相分布于川北地区旺苍-南江和川西南地区雅安-丹棱-马边-沐川一带;灰云坪微相沿着仁寿-资阳-遂宁一线展布,膏云坪/膏灰坪微相呈环带状发育于仁寿-资阳-遂宁-潼南地区,灰坪微相分布于威远-合川-通江一线;泥灰坪微相则沿开江古隆起周缘地区分布。

雷三2亚段沉积期发生大规模海退,辅以龙门山-天井山古隆起的障壁,导致古海湾向西收缩(图6b)。海湾北段收缩至立溪岩-剑阁一带,海湾中心向西迁移至汉旺地区。海湾南段则收缩至邛崃-温江一带,海湾边界沿立溪岩-剑阁-盐亭-温江-邛崃-宝兴一线。海湾斜坡亚相沿LS1井-汉旺剖面一线分布。潮下海湾亚相则分布于PZ115-PZ1井区一线,为叠层石白云岩主导的微生物坪微相。海湾边

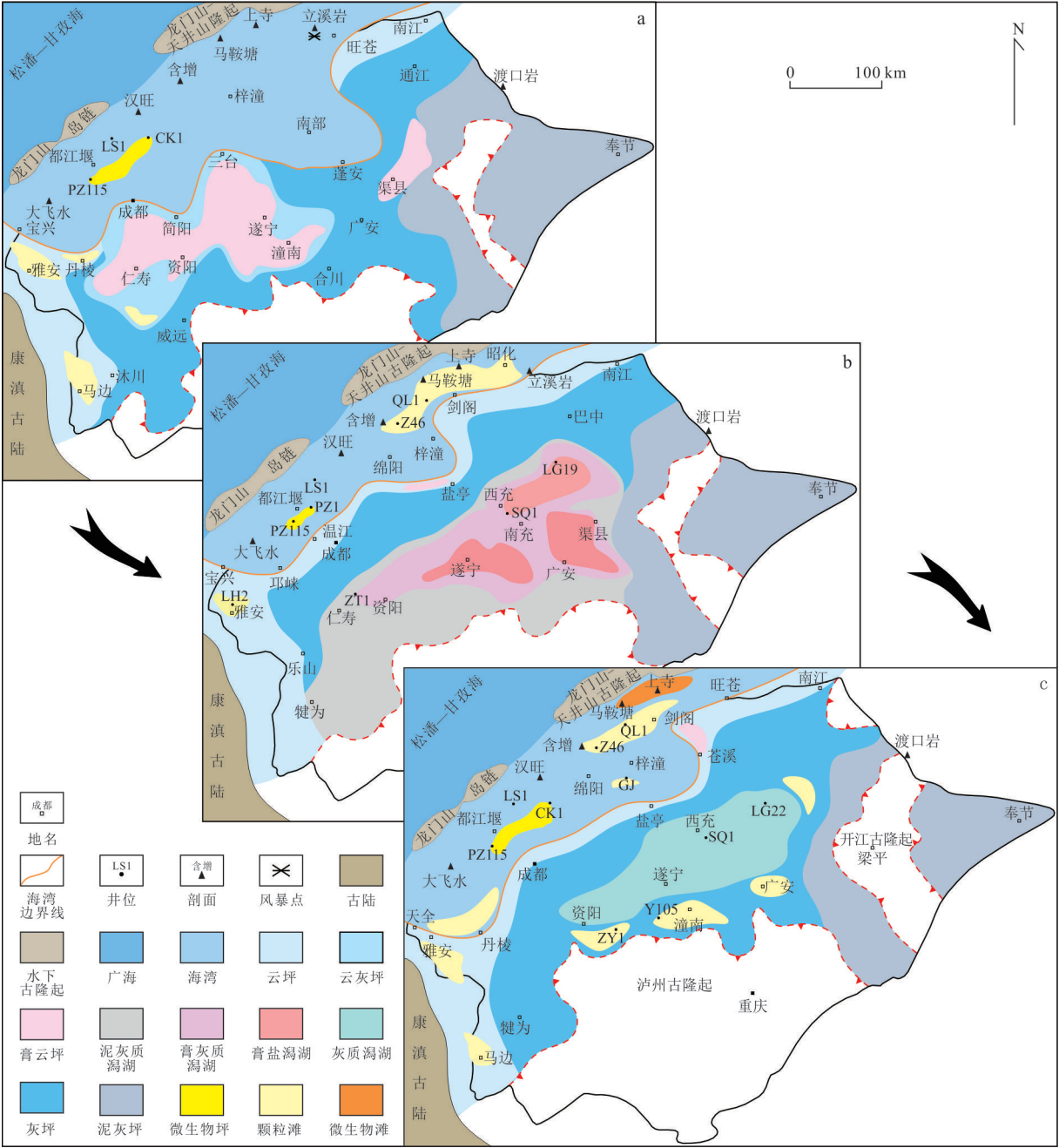


图6 四川盆地雷三1-3亚段“海-湾-坪”沉积相展布图

Fig.6 “Ocean-bay-flat” depositional facies distribution diagram of Lei-3-1 to Lei-3-3 submembers in the Sichuan Basin

缘亚相沿着宝兴-邛崃-温江-盐亭-剑阁一线展布，在含增-马鞍塘-上寺剖面一线为颗粒滩微相。海湾东侧为局限-蒸发潮坪相，依次为云坪-灰坪-泥灰质潟湖-膏灰质潟湖-膏盐潟湖-膏灰质潟湖-泥灰质潟湖-泥灰坪微相，呈带状展布。云坪微相见于海湾边缘东侧南江-盐亭-成都一带以及川西南地区雅安-乐山-马边一带；灰坪微相则沿着乐山-盐亭-巴中一线分布；潟湖微相以厚层状泥质灰岩夹膏岩为主，沿着犍为-仁寿-遂宁-渠

县呈带状展布，其中膏盐潟湖发育在遂宁-西充-LG19井区和广安-渠县地区，呈牛眼式展布。

雷三3亚段沉积期再次海侵，天井山古隆起持续隆升，古海湾向东扩展(图6c)。海湾中心位于汉旺-绵阳-梓潼地区，海湾的南段处于天全-丹棱一线，中段东迁至盐亭-苍溪一带，海湾北段迁移至旺苍-剑阁一带，海湾边界位于旺苍-剑阁-苍溪-盐亭-成都-丹棱-天全一线。海湾斜坡亚相沿着大邑-LS1井-汉旺剖面一线展布；潮下海湾亚相处于

PZ115-CK1井一线,为叠层石白云岩主导的微生物坪微相;海湾边缘亚相位于上寺-剑阁-盐亭-丹棱-天全一带,在含增-Z46井-QL1井-剑阁、丹棱地区为颗粒滩微相,马鞍塘-上寺剖面则为微生物滩微相。海湾东侧为开阔潮坪和局限潮坪相,向东依次为云坪-灰坪-灰质潟湖-灰坪-泥灰坪微相。云坪微相的范围较雷三2亚段沉积时期减小,在海湾东侧位于南江-苍溪-盐亭-成都地区,川西南段收缩至雅安-马边一带地区;膏云坪微相则散布在苍溪地区,呈零星点状分布;向东则为大面积的灰坪和灰质潟湖微相,灰质潟湖微相分布于资阳-遂宁-西充一带,呈西南-北东向的椭圆状;向东至潼南-广安-达州一线,为潟湖边缘颗粒滩微相;泥灰坪微相亦发育在环开江古隆起周缘的梁平-奉节地区,但开江古隆起的范围较雷三2亚段时期更大。

5 雷三段古海湾的地质意义

5.1 构造地质意义

四川盆地雷三段古海湾的发现,为揭示中三叠世关键地质演变过程提供了重要沉积学证据,是对华北板块与上扬子板块之间自东向西“剪刀式”碰撞过程的沉积响应(图7)。晚二叠世-中三叠世,印支运动早幕启动的板块碰撞使得上扬子板块西北缘转变为活动陆缘,引发沿龙门山走向的转换逆冲

及左旋走滑活动(Chen and Wilson, 1996; Guo *et al.*, 2024),推动龙门山岛链逐步隆升,并在雷三段沉积期形成水下古隆起(Wang *et al.*, 2023b)。中三叠世至晚三叠世早期,构造挤压作用显著增强,上扬子板块北缘形成褶皱-逆冲推覆体系(Xu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023b; Guo *et al.*, 2024; 张克信等, 2025)。上扬子板块西缘的雷三段古海湾是该构造-沉积转换期的响应。上扬子板块北缘与华北板块自东向西碰撞,导致古特提斯洋的西撤、勉略洋的关闭和秦岭造山带的逐步贴合,在“剪刀式”挤压应力作用下,岩石圈伸展产生弧后拉张作用(曹正林等, 2023; Wang *et al.*, 2023a),这为古海湾的形成提供了构造动力学条件。

5.2 沉积地质意义

古海湾的发现,构建了一种独特的碳酸盐岩台地类型——海湾型台地。区别于陆表海台地、缓坡型台地和镶边型台地的宽缓渐变的相带展布模式,海湾型台地呈现形成岛链(隆)-海湾斜坡、潮下海湾(凹)-海湾边缘(隆)-潟湖(凹)的“两隆两凹”的古地理格局,导致水体能量、循环条件和盐度等参数在相对较短的距离内发生显著变化,形成了开阔环境与局限-蒸发环境“短距离共存、窄相带突变”的沉积特征。这不仅解释了先前认识的雷三段镶边型台地边缘高能相带欠发育的现象,还阐明了风暴岩、微生物

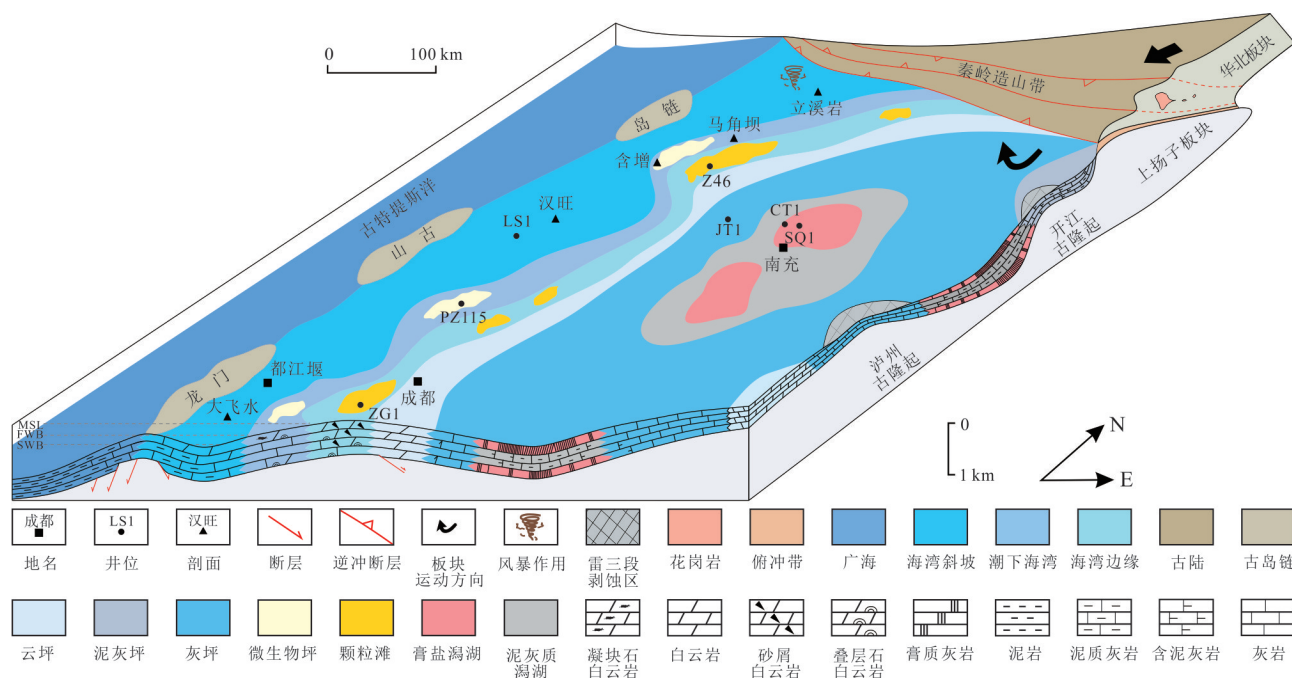


图7 四川盆地中三叠统雷三段沉积模式示意图

Fig.7 Schematic diagram of depositional model of the Middle Triassic Lei-3 Member in Sichuan Basin

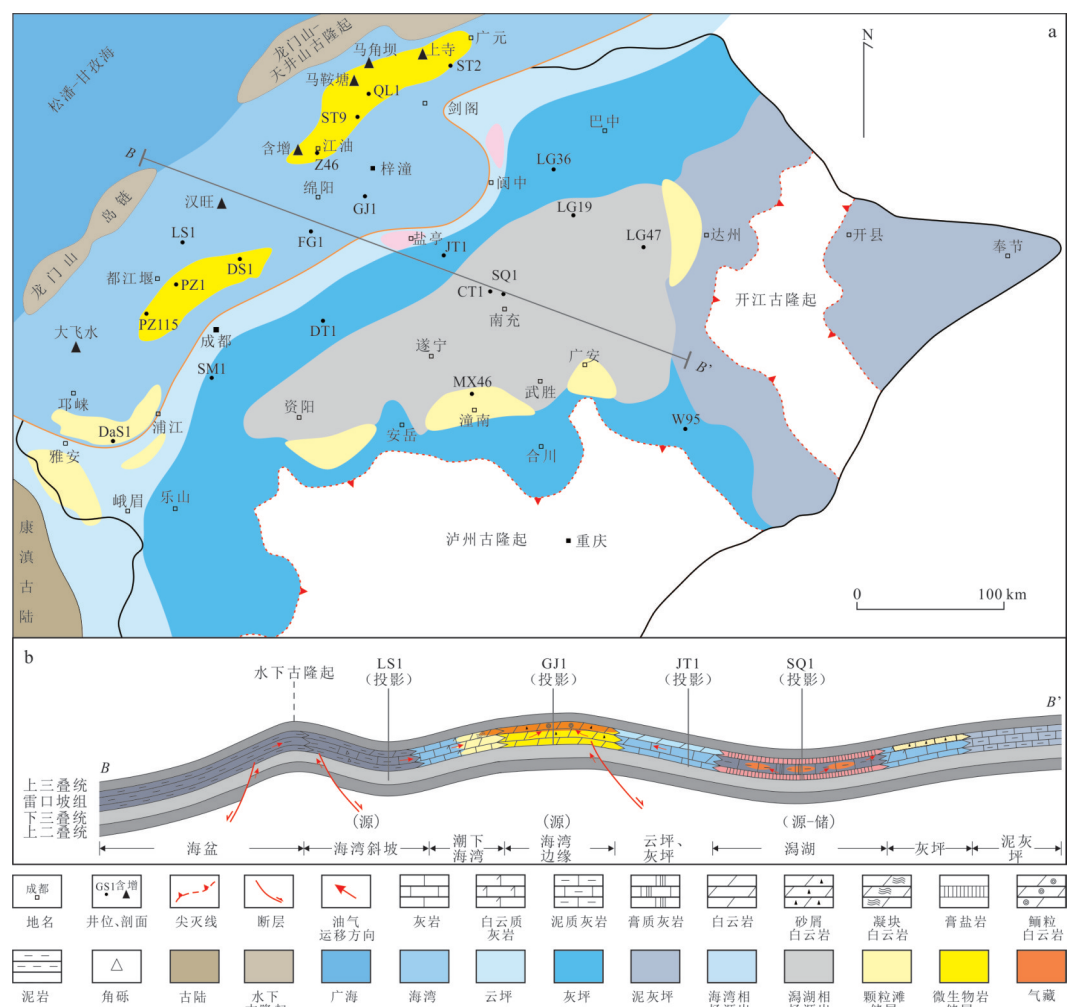


图 8 四川盆地雷三段古海湾平面展布及剖面源储模式配置

Fig.8 Planar distribution diagram of paleo-bay and cross section of source-reservoir assemblage model of Lei-3 Member in Sichuan Basin

岩与蒸发岩侧向迅速迁移、短距离快速过渡的分布特征,由此形成了一种新型的碳酸盐岩台地向海盆的边缘过渡类型,丰富了碳酸盐岩沉积学的理论体系.

中三叠世,上扬子板块在开江-泸州古隆起、龙门山岛链、天井山古隆起和米仓山古隆起的围限下,逐渐形成限制性海湾环境(Song *et al.*, 2019; 冯宇翔, 2023; 宋金民等, 2024).雷三段沉积期的古海湾呈逆时针环带状展布,从川东北-川北再扩展至川西地区,呈现出“海-湾-坪”的沉积相带展布格局.这与已报道的雷四段古海湾相似(宋金民等, 2024),二者在展布范围和时序上具有继承性.海湾内相对水体较深,发育向北西倾的斜坡带,对应海湾斜坡和潮下海湾亚相.在水下古隆起障壁下微生物坪和颗粒滩微相广泛发育于潮下海湾和海湾边缘亚相,构成古海湾的主要微相组合类型.向南东

方向,广大的碳酸盐岩台地内为开阔-局限-蒸发湖坪相(图 8),依次为云坪、灰坪、膏云坪微相,到泸州-开江古隆起西缘低洼区为局限潟湖亚相,为环带状的泥灰质潟湖与膏盐潟湖微相.这种海湾型台地内的窄相带分布模式为雷口坡组沉积期的储集微相预测提供了新的视角.

5.3 油气地质意义

四川盆地雷三段古海湾的发现,揭示出碳酸盐岩台地内隆凹格局的控制下新的沉积体系,更新了对于雷三段油气与源储配置的认识,由此构建了自生自储和旁(下)生侧(上)储两种源储组合模式(图 8).

前期研究认为雷口坡组烃源岩主要为下伏上二叠统龙潭组及上覆上三叠统须家河组(李书兵等, 2016; 廖九军等, 2022),最近的研究表明雷三段自身的泥质碳酸盐岩亦具备生烃潜力(汪泽成

等, 2023; 张本健等, 2023)。在古海湾控制下, 四川盆地自西向东呈现出“两隆两凹”的地貌格局, 古海湾作为海盆与台地的连接体, 具备较好的生烃潜力。海湾斜坡内的薄层状泥岩和泥质碳酸盐岩, 处于深水还原环境, CK1 井的泥岩、泥质灰岩厚 50~100 m, 为 II 型有机质, R_o 大于 2.19%~2.54%, TOC 为 0.06~1.30%, 为中等-较好的烃源岩(缪九军等, 2022); 同时海湾东侧局限-蒸发潟湖中高盐度、深水还原条件促使微生物繁盛, 形成富有机质的泥质灰岩, 辅以石膏催化有机质生烃(Warren, 2006; Hu *et al.*, 2024; 李丹等, 2024; Doner, 2026), 使其成为新的烃源岩类型, CT1 井的泥质灰岩、灰质泥岩厚度为 50~150 m, 亦为 II 型有机质, R_o 为 1.1%~2.3%, TOC 为 0.11%~1.47%, 显示为较好的烃源岩(孙豪飞等, 2021; 阮蕴博等, 2022; 汪泽成等, 2023; 张本健等, 2023)。这两类烃源岩为雷口坡组近源成藏及自生自储提供了物质基础。

同时, 四川盆地雷三段在古海湾控制下的隆凹相间的古地貌控制着优质储层的分布。海湾边缘和潟湖边缘是储层有利发育区。沿潮下海湾、海湾边缘带状展布的微生物坪、微生物滩及颗粒滩储层, 主要为叠层石/凝块石白云岩和残余砂屑白云岩, 厚度为 20~40 m, 孔隙度为 2%~8%, 渗透率为 $(0.052\sim23.12)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ (辛勇光等, 2022; 冯宇翔, 2023)。潟湖边缘的颗粒滩储层以残余砂屑白云岩为主, 厚度为 20~40 m, 孔隙度为 2%~8%, 渗透率为 $(0.001\sim1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ (辛勇光等, 2022)。川中地区的泥灰质潟湖中的泥质灰岩则为微孔-微裂缝型储层, 厚 20~60 m, 孔隙度为 2.00%~8.51%, 渗透率为 $(0.007\sim1.68)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ (汪泽成等, 2023; 张豪等, 2023)。由此雷三段内形成了常规-非常规的碳酸盐岩储层体系和自生自储、旁(下)生侧(上)储的含油气系统。

6 结论

在沉积相标志和单因素分析的基础上, 发现四川盆地雷三段古海湾, 呈现为“海-湾-坪”沉积格局, 发育海湾、开阔潮坪、局限潮坪、蒸发潮坪等 4 类沉积相, 其中海湾相划分为海湾斜坡、潮下海湾和海湾边缘沉积亚相。

雷三 1 亚段沉积期, 海湾中心位于汉旺-梓潼-南部地区, 海湾边界位于旺苍-蓬安-简阳-成都-丹棱-宝兴一带; 雷三 2 亚段沉积期, 受海退

影响海湾中心收缩至龙门山岛链前缘地区, 海湾边界为立溪岩-剑阁-盐亭-温江-邛崃-宝兴一带; 雷三 3 亚段沉积期, 在海侵背景下海湾中心东扩至汉旺-绵阳-梓潼地区, 海湾边界位于旺苍-剑阁-苍溪-盐亭-成都-丹棱-天全一带。

雷三 1 亚段沉积期出现北西-南东向的海-湾-坪沉积格局, 在海湾南段为潮下海湾微生物坪和海湾边缘颗粒滩微相, 向东过渡为云坪-灰云坪-膏云坪-灰坪-泥灰坪微相; 雷三 2 亚段沉积期海-湾-坪格局继续保持, 在海湾南段彭州地区发育潮下海湾微生物坪微相, 海湾北段为海湾边缘颗粒滩微相, 向东依次发育云坪-灰坪-泥灰质潟湖-膏灰质潟湖-膏盐潟湖-泥灰坪微相, 局限潟湖呈南西-北东环带状展布; 雷三 3 亚段沉积期海平面上升, 海-湾-坪沉积格局持续东扩, 海湾中段为潮下海湾微生物坪微相, 海湾南段为海湾边缘颗粒滩微相, 海湾北段则为颗粒滩和微生物滩微相, 向东发育云坪-灰坪-灰质潟湖-泥灰坪微相, 灰质潟湖呈南西-北东向展布, 潟湖边缘发育颗粒滩微相。

中三叠世雷三段沉积期的海湾为海盆与潮坪之间的过渡相带, 其形成既是印支期华北地块与上扬子板块碰撞的间接响应, 亦是龙门山古岛链、泸州-开江古隆起以及西秦岭造山带协同的产物。古海湾塑造出独特的海湾型碳酸盐岩台地类型, 呈现“短距离共存、窄相带突变”的相带分布模式; 雷三段古海湾形成岛链(隆)-海湾斜坡、潮下海湾(凹)-海湾边缘(隆)-潟湖(凹)的“两隆两凹”的古地理格局, 促成海湾/潟湖内烃源岩与储集层平面毗邻、纵向叠置的配置关系, 进而形成旁(下)生侧(上)储、自生自储两类高效源储组合模式。

References

- An, Z. Z., Li, G. X., Ding, D., et al., 2018. Depositional Characteristics of the Paleo-Gulf off Northeastern Taiwan since the Last Glacial Maximum. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(2): 38-51 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Z. L., Deng, B., Hu, X., et al., 2023. Tectonic Chronology and Sedimentary Response Characteristics of the Late Triassic Source-Sink System in the Northwestern Margin of Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(11): 1871-1886 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. F., Wilson, C. J. L., 1996. Emplacement of the Longmen Shan Thrust-Nappe Belt along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Structural Ge-*

- ology, 18(4): 413–430. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00096-V](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00096-V)
- Deng, B., Liu, S. G., Yao, G. S., et al., 2024. Distribution Pattern and Main Controlling Factors of Paleozoic Giant and Medium-sized Gas Fields of the Sichuan Super Gas Basin in Southwest China. *Natural Gas Industry*, 44(7): 54–76 (in Chinese with English abstract).
- Ding, T., Yuan, M., Liu, C. L., et al., 2023. Characteristics of Strontium Isotope and the Significance for the Evaporites of Early and Middle Triassic in the Eastern Region of Sichuan Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 42(6): 868–877 (in Chinese with English abstract).
- Doner, Z., 2026. Elemental Geochemistry of Upper Campanian Shales in the Western Pontides (Türkiye): Sedimentary Environment Controls on the Organic Matter Accumulation and Source Rock Potential. *Journal of Earth Science*, 37(2): 642–670. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-0309-z>
- Feng, Y. X., 2023. Characteristics and Petroleum Geological Significance of the Ancient Bay in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. X., Song, J. M., Liu, S. G., et al., 2023. Sedimentary Characteristics and Geological Significance of Tempestites in the Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(3): 661–672 (in Chinese with English abstract).
- Guo, P., Han, Z. J., Zhan, Y., et al., 2024. Structural Geometry and Active Faulting along the Southern Segment of the Longmenshan Thrust Belt: Insights Into the Seismotectonics of the 1327 Tianquan and 2013 Lushan Earthquakes (Eastern Tibetan Plateau, China). *Tectonophysics*, 871: 23–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230179>.
- Harris, P. M. M., Ellis, J., Purkis, S. J., 2013. Assessing the Extent of Carbonate Deposition in Early Rift Settings. *AAPG Bulletin*, 97(1): 27–60. <https://doi.org/10.1306/06121212003>
- He, L., Liu, J. Q., Long, K., et al., 2023. New Understanding of Sedimentary Facies of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Northwestern Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 28(4): 371–380 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z. Y., Li, W. Q., Hohl, S. V., et al., 2024. Evaporite Sequences as Archives for Mg Isotope Compositions of Seawater—Evidence from a Tethys Marginal Shelf Basin in the Anisian. *Chemical Geology*, 668: 122346. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122346>
- Jahnert, R. J., Collins, L. B., 2012. Characteristics, Distribution and Morphogenesis of Subtidal Microbial Systems in Shark Bay, Australia. *Marine Geology*, 303–306: 115–136. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.02.009>
- Li, D., Cheng, T., Yin, C., et al., 2024. Potential of Lacustrine Source Rock in the Pre-Salt Depression Stage and Its Geological Significance in Santos Basin, Brazil. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 44(4): 145–154 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Shi, J. B., Xin, Y. G., et al., 2026. Hydrocarbon Accumulation Conditions and Exploration Direction of Argillaceous-Dolomite Unconventional Gas Reservoirs in the 2nd Submember of the First Member of Leikoupo Formation in Hechuan-Tongnan Area of Sichuan Basin. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 45(1): 19–26 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. B., Xu, G. M., Song, X. B., 2016. Forming Conditions of Pengzhou Large Gas Field of Leikoupo Formation in Longmenshan Piedmont Tectonic Belt, Western Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(3): 74–82 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Z., Liu, L., Feng, J. R., et al., 2026. Characteristics of Symbiotic System of Dolomitic Evaporites in the Triassic Leikoupo Formation, Northwestern Sichuan Basin, and Reconstruction of the Paleogeography. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(2): 542–556 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., Sun, W., Song, J. M., et al., 2019. The Key Geological Problems of Natural Gas Exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 30(2): 151–167 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. W., Liu, Y., Shi, G. S., et al., 2021. The Structural Evolution of the Middle Section of the West Sichuan Depression in the Sichuan Basin Controlled the Hydrocarbon Accumulation in the Middle Triassic Leikoupo Formation. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6): 986–995, 1014 (in Chinese with English abstract).
- Miao, J. J., Wu, X. Q., Song, X. B., et al., 2022. Effectiveness of Marine Carbonate Source Rocks: A Case Study of Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(2): 241–250 (in Chinese with English abstract).
- Qian, Y. X., Wu, H. Z., Zhou, L. F., et al., 2019. Characteristic and Origin of Dolomites in the Third and Fourth Members of Leikoupo Formation of the Middle Triassic in NW Sichuan Basin: Constraints in Mineralogical, Petrographic and Geochemical Data. *Acta Petrologica Sinica*, 35(4): 1161–1180 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Ren, S., Song, J. M., Li, K. R., et al., 2025. Prediction of the Distribution of Marly Limestone Reservoirs in the Second Sub-Member of the Third Member of the Leikoupo Formation, Central Sichuan Basin, Based on Machine Learning. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 52(5): 914—930 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, Y. B., Zhou, G., Huo, F., et al., 2022. Source-Reservoir Characteristics and Configuration of the Third Member of Middle Triassic Leikoupo Formation in Central Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 34(5): 139—151 (in Chinese with English abstract).
- Song, J. M., Liu, S. G., Li, Z. W., et al., 2019. Porosity in Microbial Carbonate Reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation (Anisian Stage), Sichuan Basin, China. *Journal of Sedimentary Research*, 18(2): 5—23. <https://doi.org/10.2110/sepmsp.112.06>
- Song, J. M., Liu, S. G., Li, Z. W., et al., 2024. Characteristics and Hydrocarbon Geological Significances of Paleobay in the Fourth Member of Middle Triassic Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1291—1303 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. B., Liu, Y., Long, K., et al., 2024. Gas Source of the Middle Triassic Leikoupo Formation Gas Reservoir in Xinchang Area of Western Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 35(12): 2121—2131 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H. F., Luo, B., Wen, L., et al., 2021. The First Discovery of Organic-Rich Shale in Leikoupo Formation and New Areas of Sub-Salt Exploration, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(2): 233—247 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. X., Xiao, D., Zhao, L. K., et al., 2025. Natural Gas Accumulation Mechanisms and Exploration Directions of Ancient Reservoirs in the Sichuan Basin under Multi-Stage Tectonic Backgrounds. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 47(5): 49—61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Yong, Z. Q., Song, J. M., et al., 2023a. Microbialite Textures and Their Geochemical Characteristics of Middle Triassic Dolomites, Sichuan Basin, China. *Processes*, 11(5): 1541. <https://doi.org/10.3390/pr11051541>
- Wang, Y. C., Shi, K. B., Liu, B., 2023b. Sedimentary Structures of Microbial Carbonates in the Fourth Member of the Middle Triassic Leikoupo Formation, Western Sichuan Basin, China. *Scientific Reports*, 13(1): 2300. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28211-0>
- Wang, Z. C., Shi, Y. Z., Wen, L., et al., 2022. Exploring the Potential of Oil and Gas Resources in Sichuan Basin with Super Basin Thinking. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5): 847—858 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Xin, Y. G., Xie, W. R., et al., 2023. Petroleum Geology of Marl in Triassic Leikoupo Formation and Discovery Significance of Well Chongtan1 in Central Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 950—961 (in Chinese with English abstract).
- Warren, J. K., 2006. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer - Verlag Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32344-9>.
- Wu, Y. S., 2023. Classification of Biolith (Biogenic Rocks). *Journal of Palaeogeography*, 25(3): 511—523 (in Chinese with English abstract).
- Xin, Y. G., Wen, L., Zhang, H., et al., 2022. Study on Reservoir Characteristics and Exploration Field of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 91—102 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Li, L., Tan, X. C., et al., 2021. Middle Triassic Sedimentary Evolution in the Upper Yangtze Region with Implications for the Collision between the South and North China Blocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 222: 104974. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104974>
- Xu, K., Gong, H. N., 2023. Lithofacies Palaeogeographic Characteristics and Favorable Reservoir Facies of the Leikoupo Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 25(4): 841—855 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. J., Liu, S. G., Wu, X. C., et al., 2009. Distribution and Controlling Factors of Siliceous Sponge Reefs in Western Sichuan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(2): 227—234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. J., Sun, H. F., Luo, Q., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Origin of Leikoupo Formation Platform Lagoon Facies Shale in Central Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 43(6): 15—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Xin, Y. G., Ma, H. L., et al., 2024. Study on the Fine Prediction of a Marlstone Reservoir in the Lei32 Sub-Member in Chongxi Area, Central Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 51(2): 247—257 (in Chinese

with English abstract).

- Zhang, H., Xin, Y. G., Xu, C., et al., 2023. Influential Factors and Prospects of Calcareous Reservoirs of Lei32 Submember, Central Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(4): 123–132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., X., Song B.W., He, W.H., et al., 2025. Distribution and Evolution of the Tethyan OPS in the Central-Southern Qinghai-Xizang Region. *Earth Science*, 50(3): 1162–1200 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 安振振, 李广雪, 丁咚, 等, 2018. 台湾东北部古海湾沉积特征. *海洋地质与第四纪地质*, 38(2): 38–51.
- 曹正林, 邓宾, 胡欣, 等, 2023. 川西北缘晚三叠世源-汇体系构造年代学与沉积响应特征. *天然气地球科学*, 34(11): 1871–1886.
- 邓宾, 刘树根, 姚根顺, 等, 2024. 四川超级含气盆地古生界大中型气田分布规律及其主控因素. *天然气工业*, 44(7): 54–76.
- 丁婷, 袁苗, 刘成林, 等, 2023. 四川盆地东部地区早中三叠世蒸发岩的锶同位素特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 42(6): 868–877.
- 冯宇翔, 2023. 川西地区雷口坡组古海湾特征及其油气地质意义(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 冯宇翔, 宋金民, 刘树根, 等, 2023. 川西地区雷口坡组风暴沉积特征及其地质意义. *沉积学报*, 41(3): 661–672.
- 何利, 刘建清, 隆轲, 等, 2023. 川西北地区中三叠统雷口坡组沉积相再认识. *海相油气地质*, 28(4): 371–380.
- 李丹, 程涛, 尹川, 等, 2024. 巴西桑托斯盆地盐下拗陷期湖相烃源岩发育条件及其地质意义. *海洋地质与第四纪地质*, 44(4): 145–154.
- 李强, 师江波, 辛勇光, 等, 2026. 四川盆地合川-潼南地区雷口坡组一段 2 亚段泥质白云岩非常规气藏形成条件及勘探方向. *大庆石油地质与开发*, 45(1): 19–26.
- 李书兵, 许国明, 宋晓波, 2016. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件. *中国石油勘探*, 21(3): 74–82.
- 李玉琢, 刘磊, 冯佳睿, 等, 2026. 川西北三叠系雷口坡组白云岩-蒸发岩共生体系特征及古地理重建. *沉积学报*, 44(2): 542–556.
- 刘树根, 孙玮, 宋金民, 等, 2019. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探的关键地质问题. *天然气地球科学*, 30(2): 151–167.
- 孟宪武, 刘勇, 石国山, 等, 2021. 四川盆地川西坳陷中段构造演化对中三叠统雷口坡组油气成藏的控制作用. *石油实验地质*, 43(6): 986–995, 1014.
- 缪九军, 吴小奇, 宋晓波, 等, 2022. 海相碳酸盐岩烃源岩有效性探讨——以川西坳陷中三叠统雷口坡组为例. *石油实验地质*, 44(2): 241–250.
- 钱一雄, 武恒志, 周凌方, 等, 2019. 川西中三叠统雷口坡组三段-四段白云岩特征与成因——来自于岩相学及地球化学的约束. *岩石学报*, 35(4): 1161–1180.
- 任杉, 宋金民, 李柯然, 等, 2025. 基于机器学习的川中地区雷口坡组三段二亚段泥质灰岩储层分布预测. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 52(5): 914–930.
- 阮蕴博, 周刚, 霍飞, 等, 2022. 川中地区中三叠统雷口坡组三段源储特征及配置关系. *岩性油气藏*, 34(5): 139–151.
- 宋金民, 刘树根, 李智武, 等, 2024. 川西地区中三叠统雷口坡组四段古海湾特征及其油气地质意义. *石油勘探与开发*, 51(6): 1291–1303.
- 宋晓波, 刘勇, 隆轲, 等, 2024. 川西新场地区中三叠统雷口坡组气藏天然气来源. *天然气地球科学*, 35(12): 2121–2131.
- 孙豪飞, 罗冰, 文龙, 等, 2021. 四川盆地雷口坡组富有机质页岩的发现及盐下勘探新领域. *天然气地球科学*, 32(2): 233–247.
- 唐宇欣, 肖笛, 赵立可, 等, 2025. 多期构造背景下四川盆地古老天然气成藏机制与勘探方向. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 47(5): 49–61.
- 汪泽成, 施亦做, 文龙, 等, 2022. 用超级盆地思维挖掘四川盆地油气资源潜力的探讨. *石油勘探与开发*, 49(5): 847–858.
- 汪泽成, 辛勇光, 谢武仁, 等, 2023. 川中地区三叠系雷口坡组泥灰岩油气地质特征及充探 1 井发现意义. *石油勘探与开发*, 50(5): 950–961.
- 吴亚生, 2023. 生物岩的分类. *古地理论*, 25(3): 511–523.
- 辛勇光, 文龙, 张豪, 等, 2022. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征与勘探领域探讨. *中国石油勘探*, 27(4): 91–102.
- 徐康, 宫晗凝, 2023. 四川盆地雷口坡组岩相古地理特征及有利储集相带. *古地理论*, 25(4): 841–855.
- 杨荣军, 刘树根, 吴熙纯, 等, 2009. 川西上三叠统海绵生物礁的分布及其控制因素. *地球学报*, 30(2): 227–234.
- 张本健, 孙豪飞, 罗强, 等, 2023. 川中雷口坡组台地潟湖相烃源岩地球化学特征及油气来源. *天然气工业*, 43(6): 15–29.
- 张豪, 辛勇光, 马华灵, 等, 2024. 川中充西地区雷三 2 亚段泥灰岩储层精细预测研究. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 51(2): 247–257.
- 张豪, 辛勇光, 徐唱, 等, 2023. 川中地区雷三 2 亚段“灰质岩类”储层主控因素及有利区预测. *天然气勘探与开发*, 46(4): 123–132.
- 张克信, 宋博文, 何卫红, 等, 2025. 青藏中-南部特提斯洋板块地层分布与演化. *地球科学*, 50(3): 1162–1200.