引用格式：唐松，王宪峰，陈安清，等，2026. 中三叠世中期上扬子内克拉通古海洋环境与有机质富集模式[J]. 地质力学学报，32（1）：15−30. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025055

Citation: TANG S，WANG X F，CHEN A Q，et al.，2026. The marine environment and organic matter enrichment model of the intracontinental Upper Yangtze Craton during the Middle Triassic[J]. Journal of Geomechanics，32（1）：15−30. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025055

中三叠世中期上扬子内克拉通古海洋环境与有机质富集模式

唐　松[1,2]，王宪峰[3]，陈安清[3]，周琳琅[2]，亓　严[3]，彭　秋[2]，钱杨娇娇[2]，岳大力[1]

TANG Song[1,2]，WANG Xianfeng[3]，CHEN Anqing[3]，ZHOU Linlang[2]，QI Yan[3]，PENG Qiu[2]，QIAN Yangjiaojiao[2]，YUE Dali[1]

1. 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249；
2. 中国石油西南油气田公司川中油气矿，四川 遂宁 629018；
3. 成都理工大学沉积地质研究院，四川 成都 610059

1. *College of Geosciences*, *China University of Petroleum* (*Beijing*), *Beijing* 102249, *China*;
2. *Central Sichuan Oil and Gas District*, *PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company*, *Suining* 629018, *Sichuan*, *China*;
3. *Institute of Sedimentary Geology*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*

The marine environment and organic matter enrichment model of the intracontinental Upper Yangtze Craton during the Middle Triassic

Abstract: ［**Objective**］The exploration of marlstone reservoirs represents a current frontier for expanding oil and gas resources. The recent discovery of unconventional marine oil and gas in the Lei 3-2 sub-member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Well CT-1 reveals a new prospective area. However, the organic matter enrichment mechanisms and exploration potential of this sub-salt lagoon marlstone remain unclear, hindering further exploration. ［**Methods**］This study, focusing on Well CT-1 in the central Sichuan Basin, investigates the organic matter enrichment mechanism through rock mineralogy and paleo-oceanographic geochemical proxies. This study also characterizes the reservoir properties and distribution via reservoir characterization and sedimentary facies analysis to evaluate its potential. ［**Results**］The marlstone was deposited in an anoxic, deep-water lagoon of a carbonate platform with high paleo-productivity. The enrichment of organic matter, with an average total organic carbon (TOC) content of 1.16% (reaching up to 1.78%), was co-controlled by these reducing conditions and high productivity. Analyses (CT and SEM) of the high-quality "sweet spot" intervals show that the storage space is predominantly composed of nano- to micro-scale pores and microfractures, with porosity exceeding 3%. The reservoir developed in a deep-water, marlstone- and gypsum-rich lagoon within an epicontinental sea carbonate platform. ［**Conclusion**］The widespread distribution of deep-water lagoons during the deposition of the Lei 3-2 sub-member is associated with a maximum flooding event. Concurrently, the prevailing monsoon climate significantly enhanced weathering and nutrient input, while the overlying regressive evaporites provided a seal for long-term and efficient organic matter preservation. ［Significance］Comprehensive analysis suggests that the extensively distributed, organic-rich deep-water lagoon marlstone formed during this transgression in the intracontinental sag of the Upper Yangtze

基金项目：国家自然科学基金项目（U24A20591）；四川省科技计划创新群体项目（2023NSFSC1986）

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U24A20591) and the Innovative Group Project of Sichuan Science and Technology Program (Grant No. 2023NSFSC1986).

第一作者：唐松（1985—），男，博士，高级工程师，主要从事油气勘探、开发地质方面的研究工作。Email：tangs1@petrochina.com.cn

通信作者：陈安清（1981—），男，博士，教授，主要从事沉积学与油气勘探相关科学研究工作。Email：chaq@cdut.edu.cn

收稿日期：2025−05−21；**修回日期**：2026−01−09；**录用日期**：2026−01−09；**网络出版日期**：2026−01−13；**责任编辑**：吴芳

Received：2025−05−21；Revised：2026−01−09；Accepted：2026−01−09；Available Online：2026−01−13；Handling Editor：WU Fang

Craton is not only a viable unconventional exploration target but also likely acts as a hydrocarbon source for conventional reservoirs within the Leikoupo Formation.

Keywords: unconventional reservoirs; redox conditions; depositional environments; Leikoupo Formation; Sichuan Basin

摘　要：泥灰岩的勘探潜力是当前油气领域拓展的前沿。近期，在四川盆地充探1井中三叠统雷口坡组三段发现泥灰岩海相非常规油气，昭示了雷口坡组新的勘探领域和前景。然而目前对该套盐下潟湖泥灰岩沉积的有机质富集机制和勘探潜力不明，制约了进一步的油气勘探。以川中地区充探1井为重点研究对象，通过岩矿特征和古海洋地球化学环境指标揭示了泥灰岩的有机质富集机制，再基于储层表征和沉积相分析明确了该非常规储层的性能与发育分布，以揭示其勘探潜力。结果表明，雷口坡组泥灰岩的沉积背景为台地潟湖缺氧环境，且具有高的古生产力条件，总有机碳含量（TOC）平均为1.16%，最高可达1.78%，为还原条件和生产力双控制的有机质富集；泥灰岩“甜点段”的储层CT和SEM实验结果揭示储集空间以纳米–微米级微孔、微裂缝为主，孔隙度在3%以上；其发育背景为陆表海碳酸盐台地内的泥灰质深水潟湖、含膏质浅水潟湖。台地内广阔的深水潟湖分布与雷三段2亚段沉积期处于最大海泛期有关，同时由于当时的季风气候大大促进了风化增强及营养元素输入，上覆海退成因的蒸发岩为有机质的长期高效保存提供了保障。综合分析认为上扬子克拉通内坳陷雷三段海泛期发育广泛分布的富有机质深水潟湖相泥灰岩，既是非常规油气的勘探目标，也能为雷口坡组常规储层提供烃源。

关键词：非常规储层；氧化还原条件；沉积相；雷口坡组；四川盆地

中图分类号：P618.13　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)01−0015−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025055

0　引言

雷口坡组作为四川盆地中三叠世的重要地层单元，是该盆地最新一套全盆地范围内广泛发育的海相沉积地层。自1959年以来，四川盆地内的雷口坡组一直是油气勘探的重点层系，在盆地内油气资源中占有重要地位（王廷栋等，1989；李志高，1993；宋晓波等，2011；陈安清等，2017）。尽管在川中、川南、川东北等多个地区后续的钻探工作中均发现了天然气藏，但长期以来这些发现多为小规模气藏，呈现分散分布的特点，尚未发现大型油气田。已有研究认为四川盆地雷口坡组油气源为上覆三叠系须家河组或下伏二叠系栖霞组、茅口组、龙潭组、长兴组等（杨克明，2016；Wu et al.，2020；Liu et al.，2021）。然而，2021年在四川盆地中部的充探1井雷口坡组三段（雷三段）富有机质泥灰岩（文中将泥质灰岩与灰质泥岩统称为泥灰岩）中获得了源内油气发现（Huo et al.，2022；杨雨等，2022；汪泽成等，2023），雷三段2亚段测试获日产气10.87×10^4 m^3，并在测试期间产纯凝析油9.8 m^3（折算日产油47.04 m^3）。这不仅揭示了“盐间”海相泥灰岩有望成为一个非常规油气新领域，即其油气藏表现为与页岩油气类似的以微孔隙储集为主和源内原位成藏的特征，同时也进一步证实了雷口坡组本身具备发育优质烃源岩的条件。

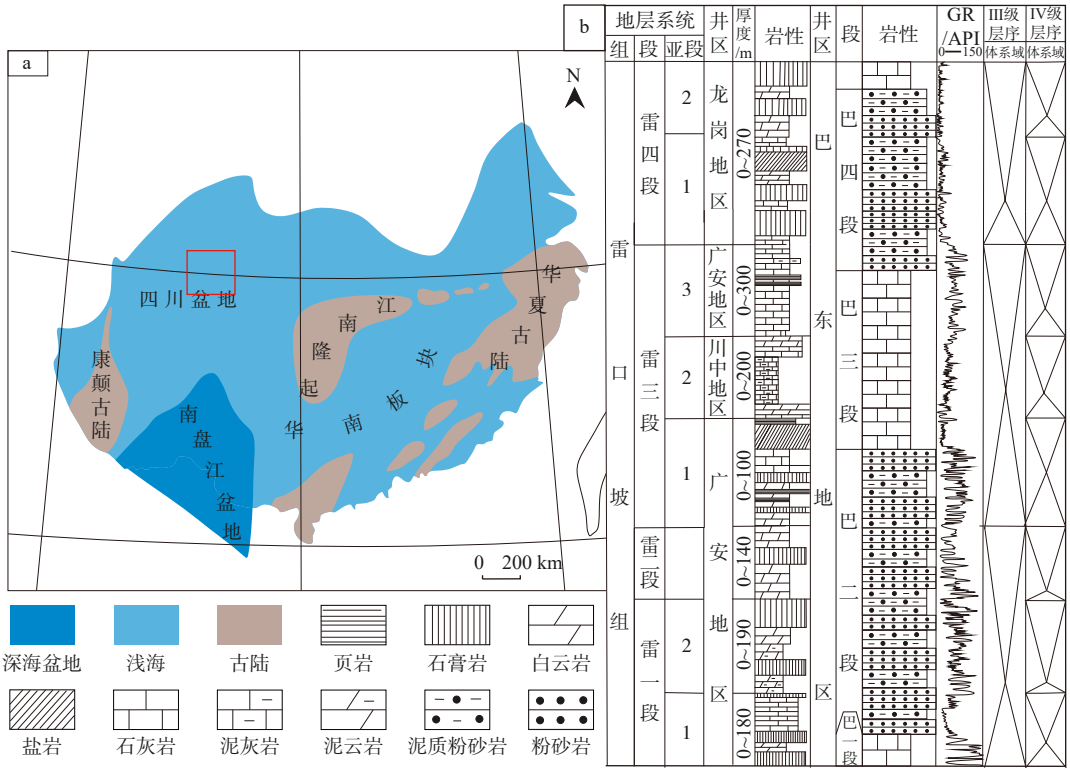
一般地，有机质富集受控于生产力和保存条件两大直接因素。水体营养物质增加会大大提高有机质生产力，从而促进有机质形成；水体的还原性增强会导致有机质氧化作用减弱，有利于有机质保存（蔡振忠等，2024；毛小平等，2024；王玉芳等，2025；刘雨航等，2025）。陆缘风化物质输入、火山活动喷发和热源活动等是水体营养物质的主要来源，即有利于生产力的提高（邱振等，2019）。气候是有机质富集的关键外部条件，既影响生产力波动，又能影响有机质的保存条件。温凉湿润的气候会促进植物的生长，有利于有机质保存和富集；而干旱炎热的气候背景的水体容易贫氧−缺氧而减少有机质的氧化分解，可以提高有机质保存率（毛小平等，2024；杨海风等，2025）。然而，对于雷口坡组的勘探研究集中在碳酸盐岩沉积模式和滩相储层或白云岩储层方面（吴世祥等，2011；陈安清等，2017），有关雷口坡组富有机质层段发育特征及其有机质富集条件的研究较为薄弱。初步的宏观分析表明，雷三段2亚段富有机质层段集中发育在泥灰岩中，在川中地区厚达50 m以上，面积约40000 km^2，总有机碳含量（TOC）平均为1.16%，最高可达1.78%，成熟度R_o值为1.76%～1.86%，生烃强度大于5×10^8 m^3/km^2，

估算生烃量为 25×10^{12} m^3(汪泽成等, 2023), 是有机质高度富集的层位。但对该时期的有机质富集机制及其勘探潜力仍不明确, 影响了进一步的勘探。亟需明确雷三段 2 亚段有机质富集模式与发育分布规律, 以更有效地指导雷三段 2 亚段非常规油气“甜点”的勘探预测。据此, 文章以四川中部地区为研究区, 综合四川盆地雷三段 2亚段的岩石学、储层特征、沉积相和元素地球化学分析, 开展了初级生产力、古氧化还原、古盐度等相关有机质富集因素分析, 建立了雷三段 2 亚段的有机质富集模式, 并通过沉积相分析揭示了有利的富有机质泥灰岩发育规律, 并探讨了该套非常规泥灰岩的勘探潜力。

1　地质背景

四川盆地在印支期造山运动中隆升(Tan et al., 2014; 田瀚等, 2018; Liu et al., 2021; 刘祥柏等, 2025; 汪泽成等, 2023; 李雯等, 2025; 亓严等, 2025)。此外, 由于四川盆地周围古隆起的坡度较大, 形成了陡坡障壁, 使盆地东西两侧较浅, 中部较深(Liu et al., 2021)。雷口坡组沉积时期四川盆地所在的上扬子板块位于古特提斯洋东部(梁东星等, 2015)。四川盆地东南部为江南古陆, 西南为康甸古陆, 西部为龙门山岛链, 北部为大巴山、秦岭古陆, 向西为龙门山台地边缘斜坡、深海盆地和洋盆(Wang et al., 2013; 图 1a)。雷口坡组主要位于四川盆地内部, 代表了一套海相碳酸盐岩沉积; 而巴东组则分布在盆地东部边缘向三峡地区过渡的地带, 含有更多陆源碎屑成分。随着地理位置从盆地中心向东移动到盆地边缘, 地层由以碳酸盐岩为主的雷口坡组逐渐过渡到包含更多碎屑岩的巴东组。雷三段沉积时期发生了一次大规模的海侵, 在这次海侵中主要连接的海水从西南康甸古陆南侧的海峡进入上扬子盆地, 并从四川西南部入侵(黄东等, 2011)。

四川盆地三叠系雷口坡组是一套碳酸盐岩−蒸发岩层系, 沉积于局限—半局限的潟湖环境(Tan et al., 2014)。其下伏地层为嘉陵江组, 二者之间以著名的“绿豆岩”(水云母黏土岩)为界线; 顶部与须



a—华南板块古地理(图中红色方框为研究区位置); b—雷口坡组与巴东组地层柱状图(据李凌等, 2012; Faure et al., 2016; Zhong et al., 2020 修改)

图 1　四川盆地及邻区中三叠世地质背景

Fig. 1　Geological setting of the Sichuan Basin and adjacent areas during the Middle Triassic

(a) Paleogeography of the South China Block (the red rectangle indicates the study area); (b) Stratigraphic column of the Leikoupo and Badong formations (modified from Li et al., 2012; Faure et al., 2016; Zhong et al., 2020)

家河组不整合接触，在全盆不同地区有不同程度的地层缺失（Benton et al., 2014）。雷口坡组分为雷一、雷二、雷三、雷四段，表现为2个沉积旋回，雷一、雷三段以发育灰岩夹蒸发岩为特征，雷二、雷四段以发育白云岩和蒸发岩互层为特征。发育富有机质泥灰岩的雷三段又细分为1、2、3亚段，大致对应巴东组二段—三段部分沉积时期（图1b）。其中，雷三段2亚段为此次研究目的层，主要发育富有机质的泥灰岩，厚度约60～160 m，在川中地区埋深约2590～3610 m。

2 样品与实验方法

此次研究针对川中地区的雷三段2亚段共观察取芯井3口，分别为充探1井、遂47井及合川125井，共采集样品65件，并制作了显微薄片。通过岩芯和薄片重点关注沉积物颜色、岩性、沉积构造、颗粒结构等特征。为表征泥灰岩储层的孔隙结构和孔隙空间分布，对5件富有机质泥灰岩样品进行了扫描电镜分析，对2件样品进行了纳米CT分析。CT实验手段主要基于X射线穿透物质时的衰减程度与物体密度及厚度的关系，从而生成高分辨率的三维数字岩芯模型，直观展示储层内部孔隙和裂缝的空间分布、形态以及相互关系（董怀民等，2018）。

对获得油气发现的充探1井连续取芯段（3555～3610 m）采集了30件泥灰岩样品，以用于微量元素地球化学测试。在显微鉴定的基础上，选择其中28件样品在南京宏创地质勘查技术服务有限公司进行了微量元素分析，测试仪器为ICP-MS等离子体质谱仪，测试依据为DZ/T0223-2001《电感耦合等离子体质谱分析（ICP-MS）方法通则》，分析精度优于5%。

3 泥灰岩储层特征

勘探发现表明，川中地区雷三段2亚段泥灰岩属于海相非常规油气藏中的一个新类型，表现为泥灰岩与蒸发岩互层的源−储−盖一体的成藏组合，主要岩石类型为富含有机质的泥灰岩。显微薄片观察和微米CT分析显示，该泥灰岩的储集空间类型包括了宏观尺度的溶蚀孔洞（肉眼可见的毫米级至厘米级；图2a）以及微观尺度的粒间溶孔、粒内溶孔、粒间孔、粒内孔等，裂缝包括了溶蚀缝（图2b、2c）及微观尺度的微裂缝（图2b—2e）等，可见后期沥青充填（图2f）。

物性测试分析表明，充探1井雷三段2亚段的孔隙度及渗透率变化范围较大，分布范围分别为0.1%～8.5%（平均值为4.25%）与6.9×10^{-6}～2.63×10^{-3} μm²（平均值为1.60×10^{-3} μm²；图3）。中三叠世上扬子深水潟湖的膏盐岩−泥灰岩互层沉积形成强封闭系统，主导了该类型储层形成，同时上覆膏盐层施加静岩压力，导致雷三段2亚段发育异常高压（杨雨等，2022；汪泽成等，2023），形成了泥灰岩中发育顺层微裂缝与纳米级溶蚀微孔。

为进一步表征该泥灰岩储层性能特征，研究选择了2份充探1井具有代表性的储层岩芯进行了CT扫描实验（图4）。泥灰岩样品在CT扫描的图像中表现为顺层缝，同时缝隙中存在致密的有机孔（图4a），尽管裂缝较发育，但各顺层缝之间的连通性一般。而泥灰岩样品的微米CT扫描图像表明了有机孔非常发育（图4b），是非常规油气的主要吸附空间，其空间展布具有非均质性强的特点，CT扫描实验显示出2个样品整体上孔隙度为3.4%和5.2%，其孔隙贡献度主要来源于半径小于50 μm的孔隙和裂缝，揭示出这2类岩性都具有良好的原位储集能力，同时，揭示了灰质含量更高情况下，储层更容易形成裂缝，而泥质含量更高的情况下，有机质形成的纳米至微米级别的微孔隙是主要油气吸附储集空间。

4 富有机质泥灰岩的沉积环境

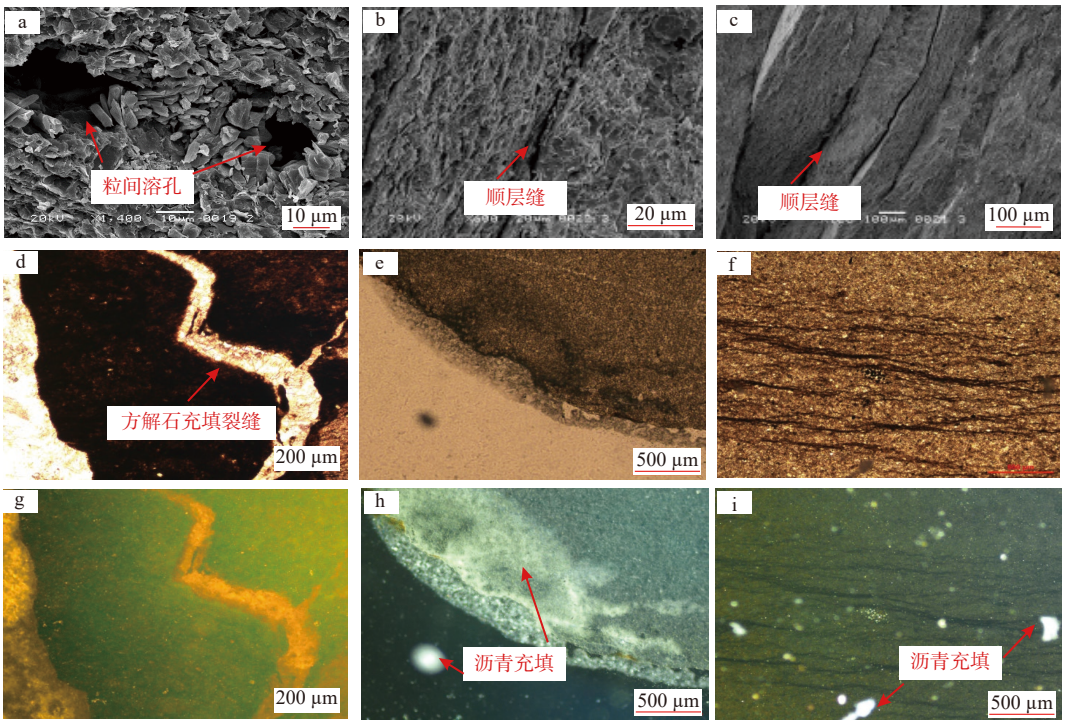
4.1 沉积相类型及特征

古地理环境重建和构造−沉积分异解析是揭示源−储物质发育分布和预测模型的基础性工作（颜宇豪等，2024；孟宪武等，2025；范萱等，2025）。

中三叠世上扬子的沉积背景表明雷口坡组雷三段2亚段主体为陆表海环境（Shi et al., 2012）。结合上扬子当时的古地理背景，川中地区在中三叠世处于克拉通内坳陷，总体以潟湖相沉积为主，但目前对应潟湖的性质仍然不明确。研究通过岩芯和薄片观察分析，在川中地区识别出深水潟湖、浅水潟湖、潮间坪、潮上坪等沉积微相，其中深水潟湖微相是已有研究中所忽略的，已经被充探1井所证实（图5），而川中地区三叠系雷三段岩性特征见图6。

（1）潮上云坪

潮上云坪环境位于古地貌较高处，只有在最大高潮期海水能量才能波及。由于长期的暴露蒸发，

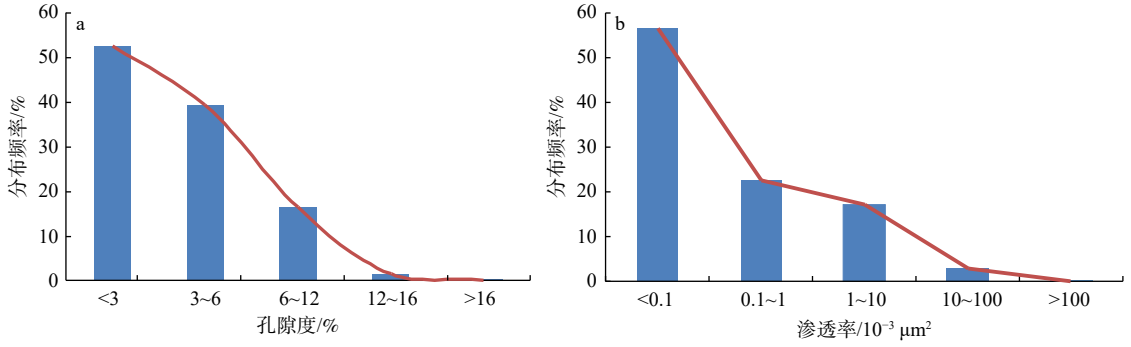


a—粒间溶孔(3531.5 m, 合川 125 井)；b—微裂缝(3600 m, 充探 1 井)；c—顺层缝(2286.5 m, 合川 125 井)；d—多期次微裂缝被石膏充填，可见纹层(3560.5 m, 充探 1 井)；e—裂缝(3567.92 m, 充探 1 井)；f—顺层微裂缝(3600.5 m, 充探 1 井)；g—荧光薄片，多期次微裂缝被石膏充填(3560.5 m, 充探 1 井)；h—荧光薄片，见沥青充填(3567.92 m, 充探 1 井)；i—荧光薄片，微裂缝，见沥青充填微孔隙(3567.92 m, 充探 1 井)

图 2　川中地区三叠系雷三段 2 亚段孔隙及裂缝特征

Fig. 2　Pore and fracture characteristics of the Lei 3-2 sub-member in the central Sichuan Basin

(a) Intergranular dissolution pore, 3531.5 m, Well HC-125; (b) Microfracture, 3600 m, Well CT-1; (c) Bedding-parallel fracture, 2286.5 m, Well HC-125; (d) Multistage microfractures filled with gypsum, showing laminae, 3560.5 m, Well CT-1; (e) Fracture, 3567.92 m, Well CT-1; (f) Bedding-parallel microfractures, 3600.5 m, Well CT-1; (g) Fluorescent thin section, multistage microfractures filled with gypsum, 3560.5 m, Well CT-1; (h) Fluorescent thin section, asphalt filling, 3567.92 m, Well CT-1; (I) Fluorescent thin section, microfractures with asphalt-filled micropores, 3567.92 m, Well CT-1



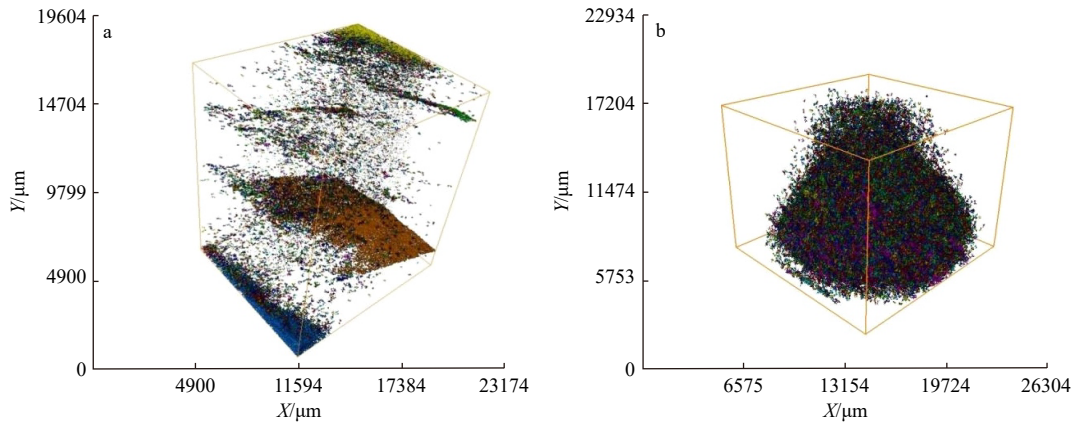
a—孔隙度特征；b—渗透率特征

图 3　川中地区充探 1 井雷三段 2 亚段物性特征

Fig. 3　Physical properties of the Lei 3-2 sub-member in Well CT-1, central Sichuan Basin

(a) Porosity; (b) Permeability

潮上坪沉积以中—薄层状膏岩、膏质白云岩为特征，同时在白云岩蒸发泵成因机制下，发育微粉晶的准同生成因的白云岩层(图 6a—6c)。潮上云坪下部环境，由于间歇性的潮汐水动力作用，常发育潮汐带来的内碎屑颗粒，如鲕粒、砂屑等，同生在白云岩渗透回流机制下形成晶粒白云岩或蒸发岩(图 7)，



a—3560 m 灰质泥岩，发育顺层缝及缝内有机孔；b—3602 m 泥质灰岩，发育有机孔

图 4 川中地区充探 1 井雷三段 2 亚段泥灰岩储层孔隙结构 CT 特征

Fig. 4 CT characteristics of pore structures in the marlstone reservoir of the Lei 3-2 sub-member in Well CT-1, central Sichuan Basin

(a) Calcareous mudstone at 3560 m, showing bedding-parallel fractures with organic pores; (b) Argillaceous limestone at 3602 m, showing densely developed organic pores

其中蒸发岩与晶粒白云岩组构见图 7a、7b。

(2)深水潟湖

潟湖是指处于平均低潮面以下的相对局限环境，而深水潟湖则是指沉积于克拉通内凹陷中心，更加深水的地区，是发育黑色富有机质泥灰岩主要沉积相带。以发育黑色富有机质泥灰岩夹蒸发岩是川中地区雷三段 2 亚段深水潟湖亚相的一个典型特征。大量有机质的富集侧面表明了该潟湖可能具有较深、水流稳定且氧含量低的特征，这有利于有机物质的保存而不被完全分解。这样的环境通常与高生产力和有限的水体交换相关联(孙豪飞等，2021)，是具有海湾性质的深水潟湖环境，水平层理和韵律层理发育良好(图 6d—6l, 图 7c—7i)。该环境背景的还原条件下，输入的营养盐得以保存，从而造成高生产力和有机质的富集，形成富有机质泥灰岩及泥页岩，期间偶见因环境高盐度而析出的薄层状膏岩沉积(图 7g、7h)。

(3)浅水潟湖

含膏质的浅水潟湖则主要位于更为浅水地区，与潮坪沉积相接触，主要发育厚层膏盐岩、膏质泥灰岩(图 7b、7e、7f)。该微相主要发育于雷三段 2 亚段的中上部。由于海平面下降，水体环境逐渐变得闭塞，同时在低纬度干热气候背景下蒸发作用增强，前期的深水潟湖从而演变成含膏质外潟湖。蒸发作用大于外海海水和降雨的补给，潟湖中的水体浓缩成异常高盐度海水，析出大量的石膏和石盐，沉积形成厚层的蒸发岩层。偶受间歇性海侵的影响，重新形成相对通畅的内潟湖环境，发育夹于蒸发岩之间的深灰色富有机质泥石灰层。富有机质的深水潟湖与含膏质的外潟湖整体组成了具有海湾性质的潟湖环境。

4.2 沉积相发育分布

通过测井曲线和岩性特征对雷三段 2 亚段进一步细分出①②③共 3 个小层，并统计了 31 口钻井的小层厚度、泥灰岩厚度、蒸发岩厚度等。基于沉积微相分类，在多条穿越川中地区的南北向和东西向连井剖面上进行了地层和沉积相对比分析。中部充探 1 井、立探 1 井沉积厚度明显增大(图 8)，处于深水潟湖环境，两侧为碳酸盐台地潮上云坪环境。以连井沉积相对比和地层厚度、泥灰岩厚度、蒸发岩厚度等单因素图为基础，重建了各亚段的岩相古地理(图 9)，沉积相连井剖面雷三段 2 亚段时期的深水潟湖达到最大规模，同时，在雷三段 2 亚段晚期至雷三段 3 亚段潟湖水体规模变浅，同时范围缩小(图 9)。

3 个小层显示的地层厚度与岩相古地理格局均揭示了川中中部地区潟湖持续扩张并向东北方向延伸的态势。在整个过程中，早期至中期的沉积物中炭泥质成分较多，这为形成泥灰质非常规油气资源创造了有利的相区条件。

在整个雷三段时期，特提斯洋北部边缘地带受季风气候影响(Prochnow et al., 2006)，降雨量丰富，气候从暖湿向半干旱半湿润转变。这直接影响了四川盆地的环境变迁，特别是川中地区，出现了大规模海侵现象，岩性上表现为由此前的白云岩转换为广泛分布的富有机质的泥灰岩。川中地区在雷

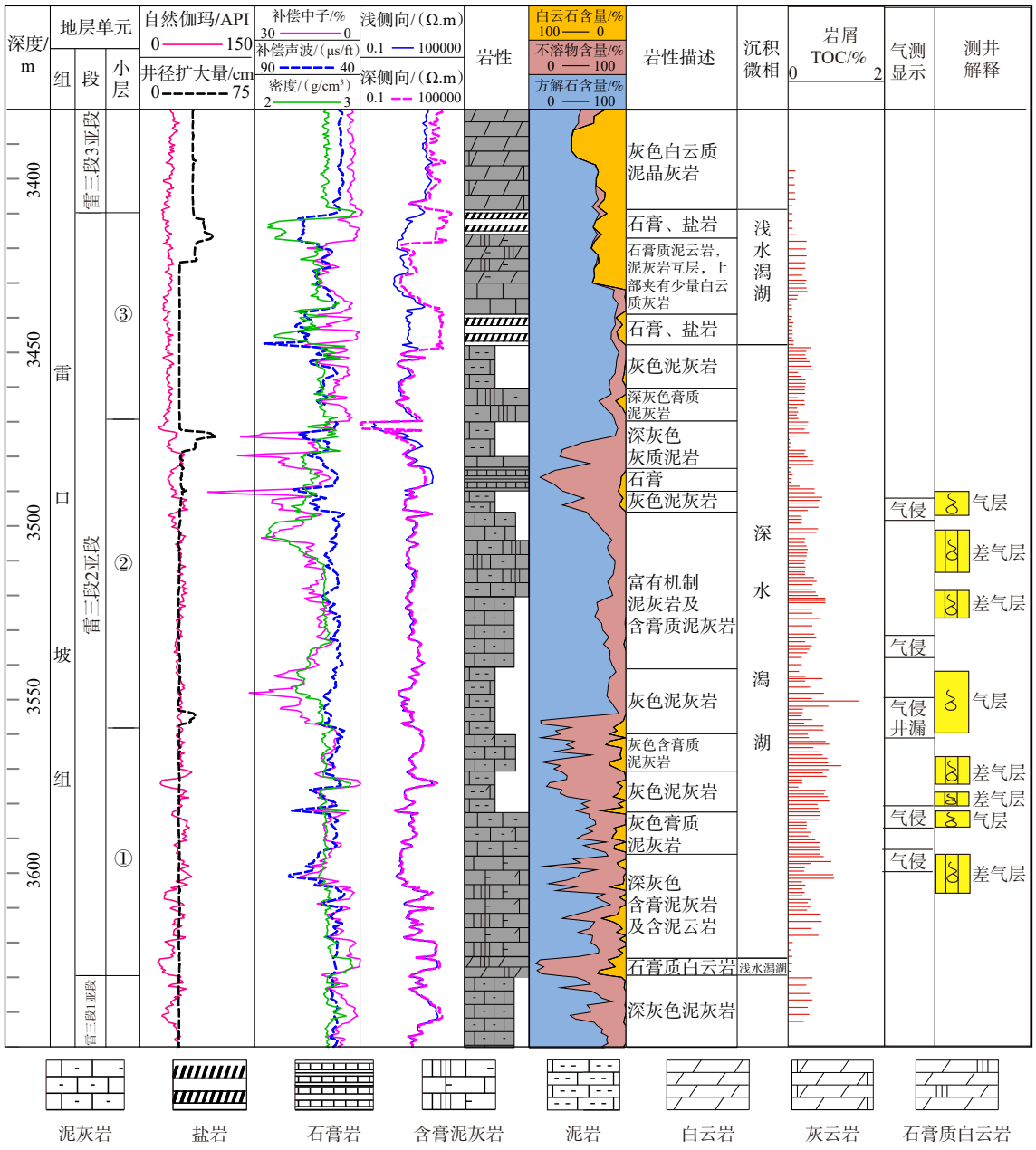


图 5　川中地区充探 1 井雷三段 2 亚段综合柱状图（TOC 数据引用自汪泽成等，2023）

Fig. 5　Comprehensive stratigraphic column of the Lei 3-2 sub-member from Well CT-1 in the central Sichuan Basin (TOC data from Wang et al., 2023)

三段 2 亚段②小层时期海侵规模达到最大，随着海平面上升和水体加深，原来相对局限的克拉通内坳陷潟湖与外部沟通更为通畅，形成了川东北巴东组沉积区沟通的潟湖环境。岩相古地理格局演变为一个朝北东方向开放式的大型深水潟湖系统，充探 1 井区附近以富含有机质的深水潟湖沉积为主，其南侧为暴露剥蚀区，而西北部则主要发育膏质灰岩和膏云岩构成的膏灰坪和膏云坪沉积。随着巴东组区域陆源碎屑物质输入的不断增多，川中地区作为与川东北沟通外海的通畅深水潟湖，可能导致了陆源营养盐的显著增加，深水潟湖的初级生产力可能随之提升。水体加深的同时，沉积环境逐渐变为有利有机质保存的还原环境，岩石类型以富含有机质的泥灰岩占主导(图 5)。

5　有机质富集机制

5.1　有机质富集的古海洋条件

研究通过古盐度、古氧化还原性、古生产力以及风化强度等地球化学指标，可进一步约束有机质



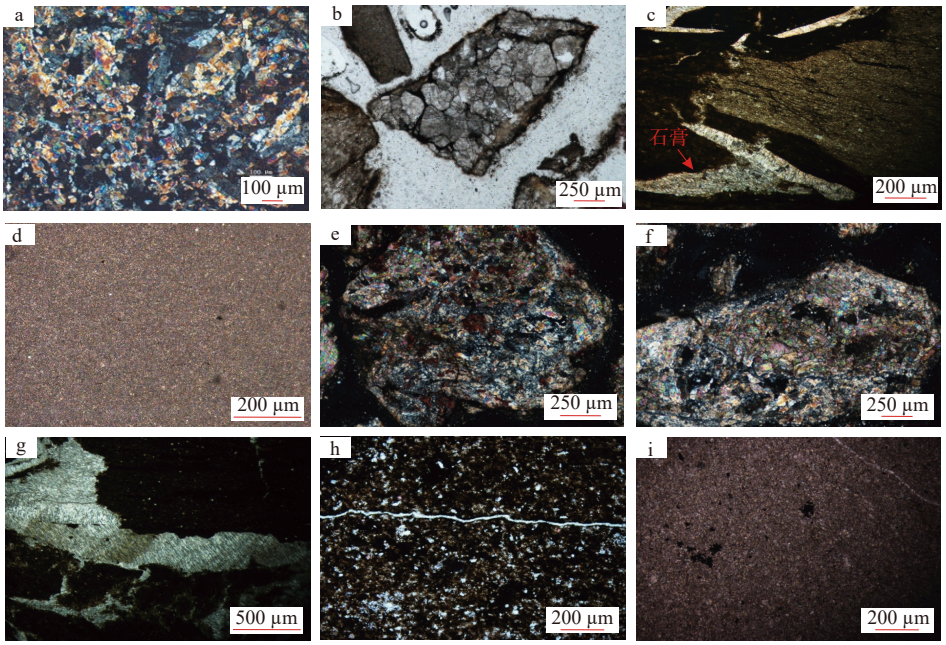
a—灰色粉晶灰岩(2328.4 m, 雷三段 3 亚段, 磨 030-H16 井); b—粉晶灰岩-裂缝充填方解石(2315.85～2316.07 m, 雷三段 3 亚段, 磨 030-H16 井); c—细粉晶白云岩(2292.79 m, 雷三段 3 亚段, 磨 030-H16 井); d—泥灰岩(2314.19-2314.26 m, 雷三段 2 亚段, 合川 125 井); e—深灰色灰泥岩(3561.3m, 雷三段 2 亚段, 充探 1 井); f—深灰色泥灰岩(3560.5m, 雷三段 2 亚段, 充探 1 井); g—泥灰岩横截面(3567.06, 雷三段 2 亚段, 充探 1 井); h—泥灰岩(3567.06 ～3567.47 m, 雷三段 2 亚段, 充探 1 井); i—泥灰岩(2291m, 雷三段 2 亚段, 合川 125 井); j—含膏灰质云岩(2540.90 m, 雷三段 3 亚段, 遂 47 井); k—粉晶云岩(2529.10 m, 雷三段 2 亚段, 遂 47 井); l—泥灰岩(3602 m, 雷三段 2 亚段, 充探 1 井)

图 6 川中地区三叠系雷三段岩性特征

Fig. 6 Lithological characteristics of the Triassic Lei 3 Member in the central Sichuan Basin

(a) Gray micritic limestone, 2328.4 m, Lei 3-3 sub-member, Well Mo 030-H16; (b) Micritic limestone with fracture-filled calcite, 2315.85–2316.07 m, Lei 3-3 sub-member, Well Mo 030-H16; (c) Fine dolomicrite, 2292.79 m, Lei 3-3 sub-member, Well Mo 030-H16; (d) Marlstone, 2314.19–2314.26 m, Lei 3-2 sub-member, Well HC-125; (e) Dark gray argillaceous limestone, 3561.3 m, Lei 3-2 sub-member, Well CT-1; (f) Dark gray argillaceous limestone, 3560.5 m, Lei 3-2 sub-member, Well CT-1; (g) Cross-section of calcareous marlstone, 3567.06 m, Lei 3-2 sub-member, Well CT-1; (h) Calcareous marlstone, 3567.06–3567.47 m, Lei 3-2 sub-member, Well CT-1; (I) Calcareous mud shale, 2291 m, Lei 3-2 sub-member, Well HC-125; (j) Gypsum-bearing calcareous dolostone, 2540.90 m, Lei 3-3 sub-member, Well Sui-47; (k) Dolomicrite, 2529.10 m, Lei 3-2 sub-member, Well Sui-47; (l) Marlstone, 3602 m, Lei 3-2 sub-member, Well CT-1

富集的机理与其保存条件。针对充探 1 井连续取芯段(3555～3610m)采集的 28 件泥灰岩样品进行地化分析, 所选样品基本处于深水潟湖相带, 是已有研究中具有高 TOC 含量的主要“甜点段”(Huo et al., 2022)。古生产力是有机质的物质来源。藻类是有机质的主要产生者, 藻类的产生和生长主要与水温、水动力、盐度和火山活动有关。对于古生产力的评估: P_{xs} 是古海洋初始生产力的直接可靠指标(xs 的含义为过量组分), 其沉积富集明确反映高生产力水平(Śliwiński et al., 2010); 而 Zn_{xs}、Cu_{xs} 以及 Ni_{xs} 的高含量通常伴随高生产力产生的大量有机质通量, 是古生产力水平的有效间接指标(Śliwiński et

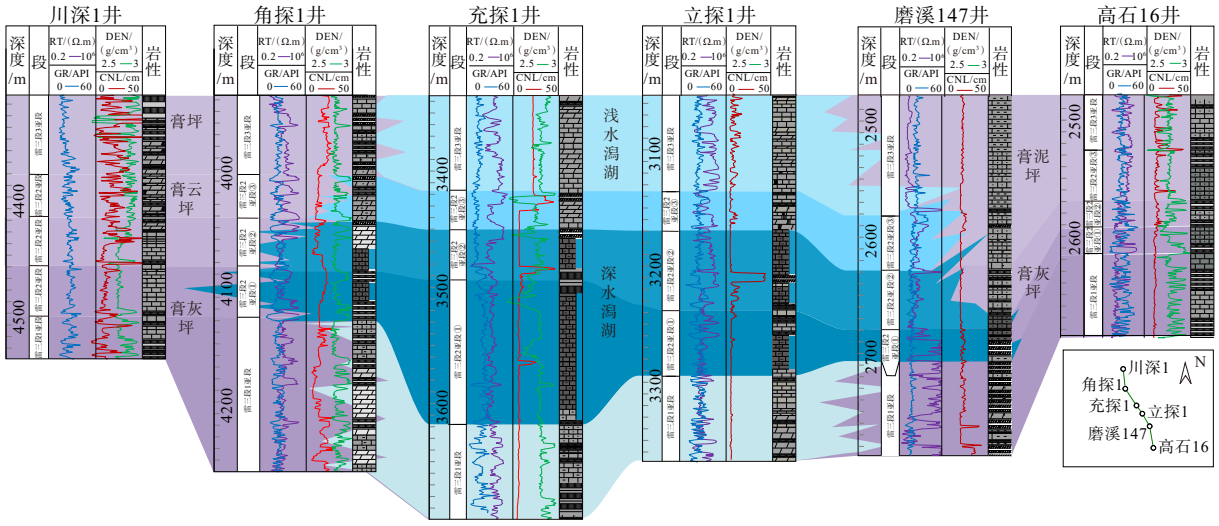


a—泥灰岩，裂缝可见石膏充填物（3560.5 m，充探 1 井）；b—膏质白云岩（3236.5 m，充探 1 井）；c—中晶含灰云岩，间溶孔+孔壁边缘见微量沥青质（3523 mm，充探 1 井）；d—泥晶云岩（2350 m，合川 125 井）；e—含灰质膏岩 (+)（3486 m，充探 1 井）；f—灰质膏岩（3490 m，充探 1 井）；g—泥晶灰岩，可见石膏晶体（3567.3 m，充探 1 井）；h—泥灰岩，见石膏，见微裂缝（3598 m，充探 1 井）；i—泥晶灰岩（3600.5 m，充探 1 井）

图 7　川中地区三叠系雷三段 2 亚段薄片微观特征

Fig. 7　Microscopic characteristics of thin sections of the Lei 3-2 sub-member in the central Sichuan Basin

(a) Marlstone with gypsum-filled fractures, 3560.5 m, Well CT-1; (b) Gypsum-bearing dolostone, 3236.5 m, Well CT-1; (c) Medium-crystalline calcareous dolostone with intercrystalline dissolution pores and minor bitumen on pore walls, 3523 m, Well CT-1; (d) Micritic dolostone, 2350 m, Well HC-125; (e) Calcareous gypsum rock (+), 3486 m, Well CT-1; (f) Gypsum-bearing limestone, 3490 m, Well CT-1; (g) Micritic limestone with gypsum crystals, 3567.3 m, Well CT-1; (h) Marlstone with gypsum and microfractures, 3598 m, Well CT-1; (I) Micritic limestone, 3600.5 m, Well CT-1



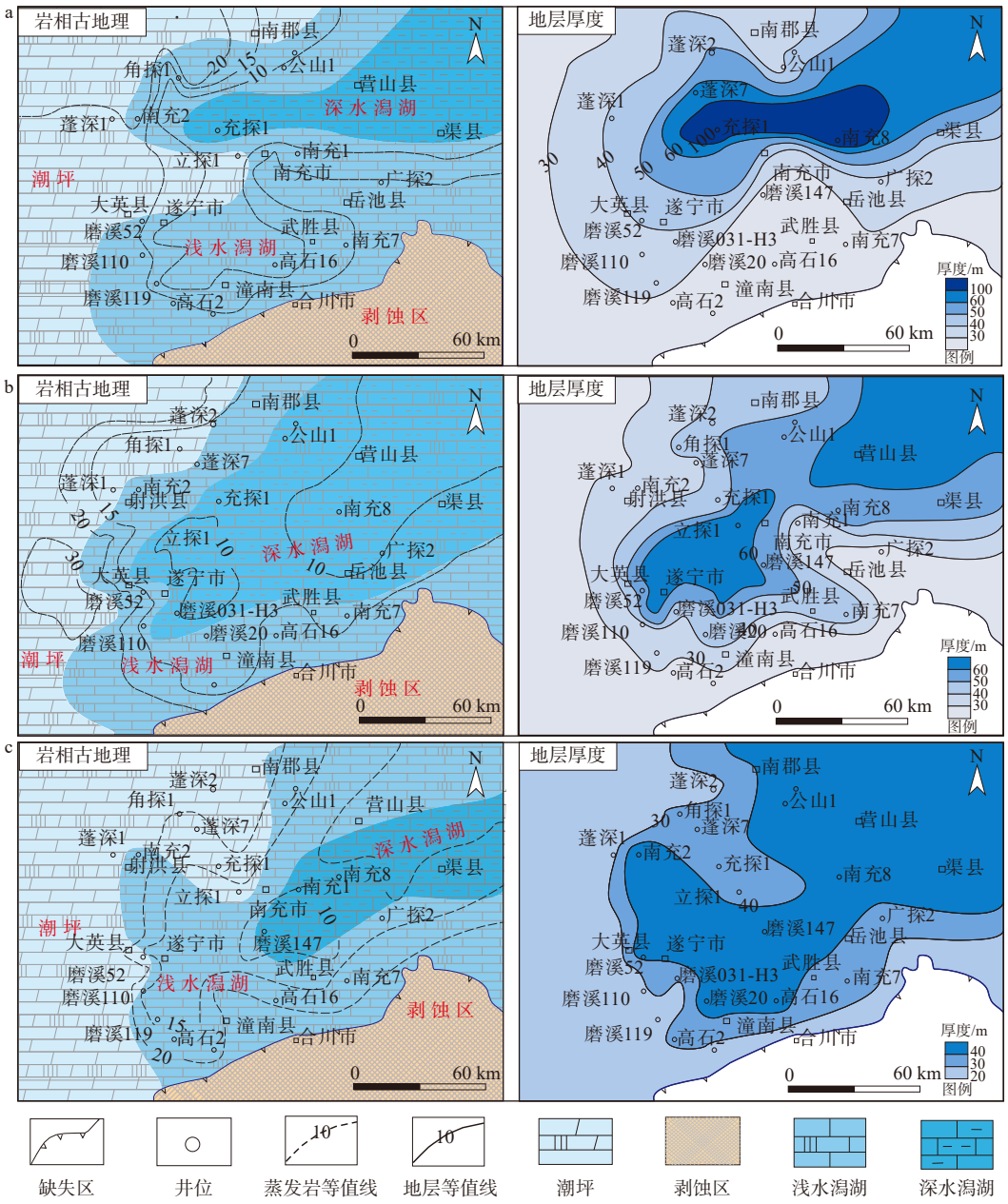
RT—电阻率；DEN—密度；GR—自然伽马；GNL—井径扩大量

岩性图例同图 5；右下角图为连井位置导航图

图 8　过充探 1 井沉积微相连井对比图

Fig. 8　Correlation profile of sedimentary microfacies across Well CT-1

Legend for lithology see Fig. 5, Inset: location map.The logging curves include resistivity (RT), density (DEN), natural gamma ray (GR), and caliper enlargement (CNL).



图中虚线为蒸发岩厚度等值线图

a—雷三段 2 亚段①小层；b—雷三段 2 亚段②小层；c—雷三段 2 亚段③小层

图 9 川中地区三叠系雷口坡组三段岩相古地理及地层厚度展布图

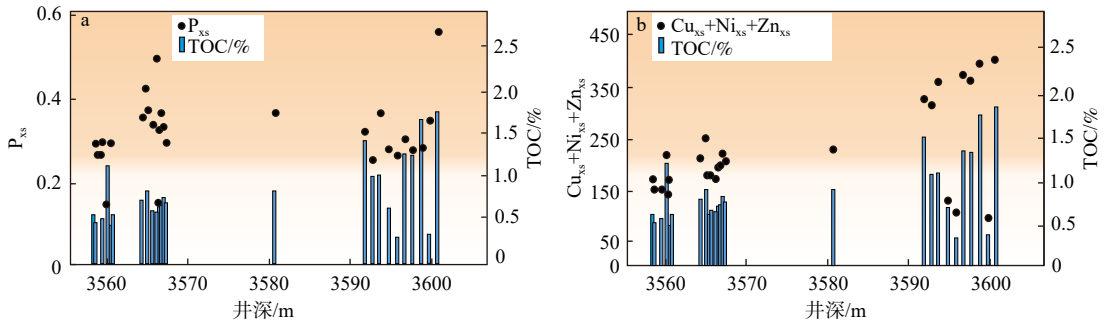
Fig. 9 Lithofacies paleogeography and stratigraphic thickness distribution of the Triassic Leikoupo Formation in the central Sichuan Basin

(a) Lei 3-2-1 sub-member; (b)Lei 3-2-2 sub-member; (c) Lei 3-2-3 sub-member

The dashed lines in the figure are isopachs of evaporite thickness.

al., 2010; Schoepfer et al., 2015; Huo et al., 2022)。文章通过微量元素测试结果计算了 Zn_{xs}+Cu_{xs}+Ni_{xs} 和 P_{xs} 指标，并结合 TOC 含量绘制了组合图(图 10)，以评估雷三段 2 亚段沉积期的古生产力水平，结果表明 Zn_{xs}+Cu_{xs}+Ni_{xs} 和 P_{xs} 指标与 TOC 含量演化趋势相一致，良好的反映了沉积时期海洋初级生产力，并且雷三段 2 亚段大部分样品均处于高生产力环境(图 10)。

Cu、Mo、Zn 等微量元素间的比值是判别氧化还原环境的重要指标(Jones and Manning, 1994)，(Cu+Mo)/Zn 比值小于 0.75 指示氧化环境，大于 0.75 指示缺氧环境。V/(V+Ni)在泥质含量较高的环境中用来判别氧化还原环境较为常见，当沉积环境为缺氧或者无氧时，V 相对于 Ni 更容易以有机络合物的形



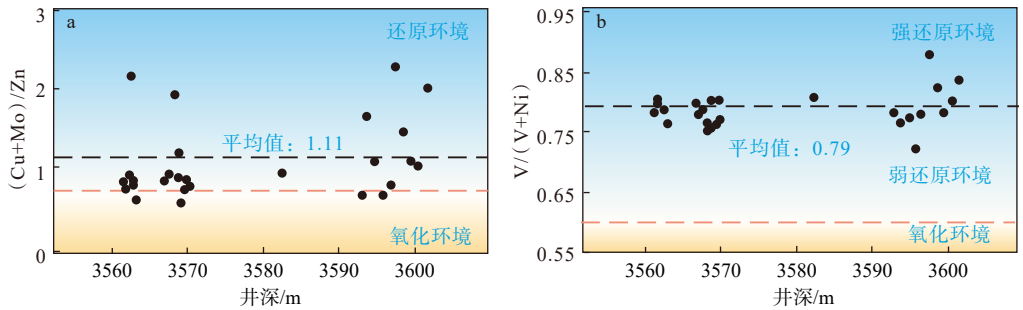
a—雷三段 2 亚段 P_{XS} 与 TOC 综合图；b—雷三段 2 亚段 $Cu_{XS}+Ni_{XS}+ZN_{XS}$ 与 TOC 综合图

图 10　富有机质泥灰岩的古生产力指标散点图

Fig. 10　Scatter plot of paleoproductivity indicators of organic-rich marlstone

(a) Integrated P_{XS} and TOC profile of the Lei 3-2 sub-member; (b) Integrated profile of Cu_{XS} + Ni_{XS} + ZN_{XS} and TOC of the Lei 3-2 sub-member

式富集在沉积物中，使得 V/(V+Ni)比值增高，若该比值大于 0.6，则指示缺氧环境，反之则表示富氧环境(孙豪飞等，2021；Huo et al.，2022)。川中充探 1 井雷三段 2 亚段 28 件泥灰岩样品测试结果所计算的(Cu+Mo)/Zn 平均值为 1.11，大于 0.75，表示为还原环境；V/(V+Ni)平均比值为 0.79 介于 0.54 ～ 0.82 间为弱还原环境(图 11)。这表明雷三段 2 亚段沉积期的水体主要为还原条件，有利于有机质保存。



a—雷三段 2 亚段(Cu+Mo)/Zn 散点图；b—雷三段 2 亚段 V/(V+Ni)散点图

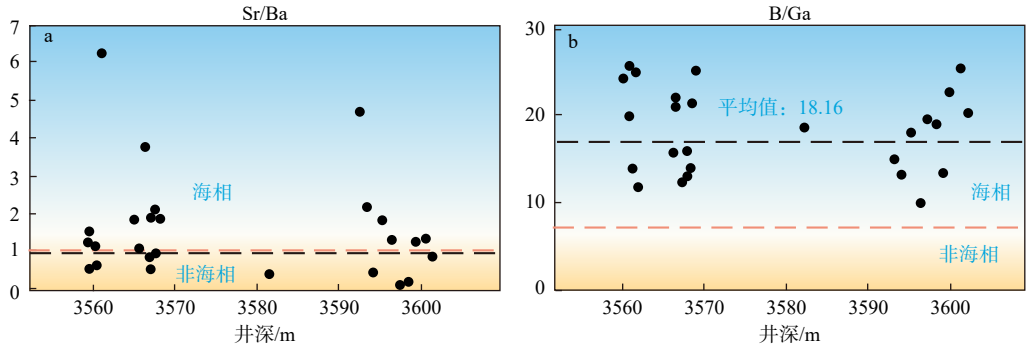
图 11　富有机质泥灰岩的氧化还原指标散点图

Fig. 11　Scatter plot of redox indicators from organic-rich marlstone

(a) Scatter plot of (Cu + Mo)/Zn for the Lei 3-2 sub-member; (b) Scatter plot of V/(V + Ni) for the Lei 3-2 sub-member

B/Ga、Sr/Ba 比值对古盐度的变化有明显响应，是反映古盐度的良好指标(文华国等，2008；Wei and Algeo，2020)。B/Ga 比值的灵敏性源于硼酸盐和 Ga 在水体中的溶解度和迁移性差异：硼酸盐具有较大的溶解度，能在水体中长距离迁移，仅在水分蒸发浓缩后才会沉淀出来；而 Ga 的活性较低，易于早期沉淀。因此，随着水体盐度增加，B/Ga 比值也会相应增大(李成凤和肖继风，1988)。B/Ga 比值基本大于 7，平均值 18.16，垂向上由下向上递增，说明盐度递增。Ba 在高盐度中易形成 $BaSO_4$ 沉淀而极度亏损，而 Sr 在海高盐中溶解度高且稳定，并能较容易地进入碳酸钙晶格(尤其文石)，导致同期形成的原生碳酸盐岩中 Sr 含量较高(Śliwiński et al.，2010；Wei and Algeo，2020)，因此，Sr/Ba 比值是指示古海洋盐度的可靠代理，Sr/Ba>0.5 表示海洋咸水环境，0.5～0.2 表示微咸水环境，<0.2 表示淡水环境(Wei and Algeo，2020)。充探 1 井雷三段 2 亚段的样品所计算的 Sr/Ba 比值平均值为 0.97，分布范围为 0.6 ～ 1.8，整体表现为高盐度咸化潟湖的环境(图 12)。Sr/Ba 和 B/Ga 比值等古盐度替代指标均显示出盐度向上递增的趋势，这与水体还原性变化是一致的。高古盐度有助于形成咸化层和缺氧环境，这对水柱底部有机质的保存十分有利(Hu et al.，2018)。

在氧化还原条件、生产力、古盐度等多个指标分析的基础上，结合当时古气候背景(Shi et al.，2012)，充探 1 井雷三段 2 亚段时期富有机质泥灰岩发育的古沉积环境主要为干旱炎热古气候背景下的咸化海侵环境(黄东等，2011；李凌等，2012)，有机



a—雷三段 2 亚段 Sr/Ba 散点图；b—雷三段 2 亚段 B/Ga 散点图

图 12 富有机质泥灰岩的古盐度指标散点图

Fig. 12 Scatter plot of paleosalinity indicators from organic-rich marlstone

(a) Scatter plot of Sr/Ba for the Lei 3-2 sub-member; (b) Scatter plot of B/Ga for the Lei 3-2 sub-member

质生产力显著增加，水体呈现较强的还原性。同时，强烈的克拉通盆地内的蒸发作用可能导致水体分层现象加剧，进而形成川中海湾区的无氧或缺氧环境，这对于有机质保存埋藏尤为有利。具体表现为高生产力、缺氧和盐卤保存效应，为雷三段 2 亚段时期有机质富集创造了条件。

5.2 有机质富集因素与发育模式

总体上，上扬子地区在中三叠世海平面下降和与印支早期运动形成了相对局限的陆表海环境（黄东等，2011）。沉积相展布特征表明，四川盆地雷三段 2 亚段时期处于上扬子的最大海侵作用时期，原来以蒸发岩沉积为主体的克拉通内坳陷潟湖转变成了深水潟湖。雷三段 2 亚段海泛期，相对海平面上升，淹没早期存在的障壁，在川东北形成了一条与外海通畅连通的通道，因此巴东组的陆源物质能够较通畅地输入川中地区。岩石学及地球化学特征显示，川中地区在该时段的沉积岩性特征介于雷口坡组碳酸盐岩和巴东组富有机质碎屑沉积之间，更接近巴东组的特征（图 1b），即充探 1 井所揭示的富有机质泥灰岩。次一级的海平面升降，会导致深水潟湖在局限和相对通畅之间变换，形成了多套膏盐岩与黑色富有机质泥石灰的互层沉积（图 13）。

地球化学指标显示，雷三段 2 亚段有机质的富集受初级生产力与保存条件共同控制，而这两大关键因素根本上受制于当时的海平面升降与气候变化。该时段的早期相对海平面的上升，局限潟湖变为通畅的深水潟湖，陆源物质能够较通畅地输入到川中坳陷，提高了营养盐的含量，促进生产力的提高，同时，由于当时的季风气候进一步地促进了风化增强及营养元素输入（Prochnow et al., 2006; Wang et al., 2026）。暖湿季风气候带来了新鲜的淡水与之前台地潟湖内部的盐度较高的水体产生了明显的盐度差，使得较深的水体由于盐度分层在潟湖底部处于缺氧条件 (Wei and Algeo, 2020)，非常有利于有机质保存。随着海平面的再次下降，深水潟湖重新关闭，变成局限浅水潟湖，初级生产力降低，水体氧化性增强，沉积有机质明显降低，取而代之的是形成一套广泛分布的蒸发岩，这为有机质的长期保存提供了绝佳的条件

5.3 富有机质泥灰岩勘探潜力

针对川中地区雷三段 2 亚段“盐间”海相非常规油气藏，地球化学指标揭示了其有机质富集的生产力−保存条件双控模式，储层表征和岩相古地理重建则进一步明确了这套海相非常规油气藏的储集性能和深水潟湖相泥灰岩分布。Huo et al.（2022）通过生物标志化合物以及天然气甲烷碳同位素证实了该相带发育的泥灰岩具有独特的“源储一体”属性。同时，汪泽成等（2023）综合岩芯、岩屑、测井资料分析，泥灰岩厚达 50 m 以上，TOC 平均为 1.16%，最高可达 1.78%（图 5），面积约 40000 km^2，平均生烃强度大于 5×10^8 m^3/km^2，并与蒸发岩交替产出，顶、底界面均被膏岩层有效封堵，共同构成了一个极具勘探前景的海相泥灰岩非常规油气成藏系统。众所周知，非常规油气已成为四川盆地的重点勘探领域（Liang et al., 2012; 郭彤楼，2016）。上述有机质富集机制和储层性能分析表明，川中地区雷三段 2 亚段富有机质泥灰岩层具有发育海相非常规新类型的潜力，也进一步证实了雷口坡组自身发育相对优质的烃源岩。沉积相分布揭示了有利其发育的深水潟湖环境的分布、为烃源岩及生烃强度展布

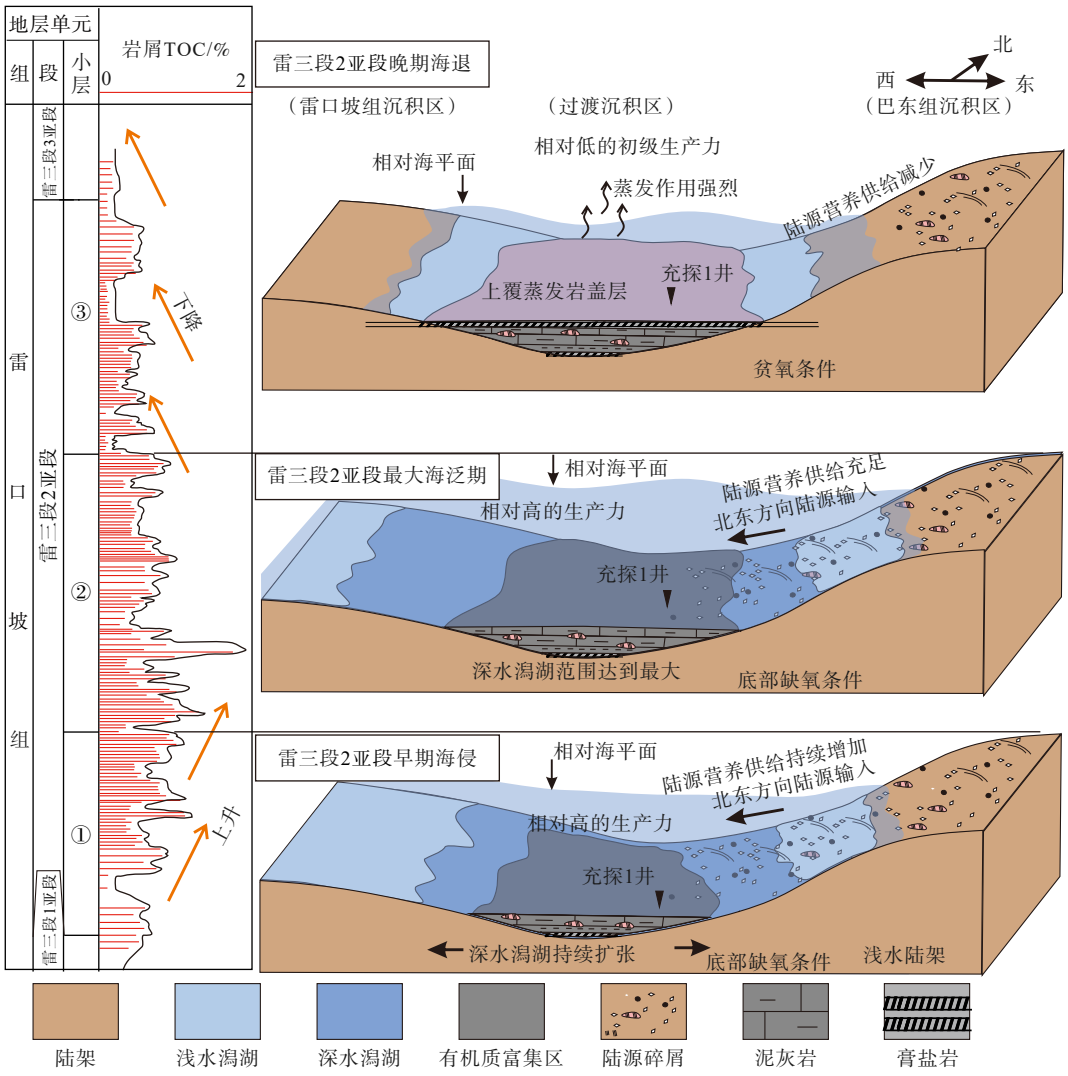


图 13　川中地区雷三段有机质富集沉积模式

Fig. 13　Organic matter enrichment and sedimentary model of the Lei 3 Member in the central Sichuan Basin

分析提供基础、并指出了深水潟湖沉积相带是高勘探潜力的区域。研究成果为进一步勘探预测指明了方向，对四川盆地雷三段 2 亚段的非常规油气的勘探具有重要意义。

6　结论

（1）综合岩芯观测、薄片鉴定以及 CT 扫描等储层分析相关技术手段，揭示了川中雷三段 2 亚段发育富有机质泥灰岩海相非常规储层，储集空间主要以纳米–微米级微孔、微裂缝为主，明确了雷三段^{2}亚段的泥灰岩是良好勘探新层系。

（2）根据沉积相分析揭示，川中地区中三叠统雷口坡组雷三段 2 亚段发育为潟湖、潮上云坪等沉积环境，其中台地相可以分为含膏质外潟湖、浅水潟湖以及富有机质深水潟湖等，明确了雷三段 2 亚段时期深水潟湖分布区是有利的勘探方向。

（3）海侵作用被确定为川中内克拉通坳陷转变为通畅富有机质深水潟湖环境的主要因素。富有机质深水潟湖具有较高的初级生产力和良好的有机质保存条件，缺氧还原条件和高生产力共同促进了有机质富集，由此建立了川中雷三段 2 亚段海相非常规储层有机质富集模式。

作者贡献声明：唐松、王宪峰、陈安清负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；周琳琅、亓严、王宪峰、陈安清参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；唐松、彭秋、钱杨娇娇、岳大力参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: TANG Song, WANG Xianfeng and CHEN Anqing conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; ZHOU Linlang, QI Yan, WANG Xianfeng and CHEN Anqing participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; TANG Song, PENG Qiu, QIAN Yangjiaojiao and YUE Dali were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BENTON M J, ZHANG Q Y, HU S X, et al., 2014. Reprint of "Exceptional vertebrate biotas from the Triassic of China, and the expansion of marine ecosystems after the Permo-Triassic mass extinction"[J]. Earth-Science Reviews, 137: 85-128.

CAI Z Z, XU F, YANG G, et al., 2024. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Yuertusi Formation and the organic matter enrichment model in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 38(5): 1258-1269,

CHEN A Q, YANG S, CHEN H D, et al., 2017. The sedimentary filling model of epeiric platform and new inspiration of innercratonic carbonate for oil & gas exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1243-1256. (in Chinese with English abstract)

DONG H M, SUN J M, LIN Z Z, et al., 2018. Quantitative characterization and characteristics analysis of microscopic pore structure in natural gas hydrate based on CT scanning[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 42(6): 40-49. (in Chinese with English abstract)

FAURE M, LIN W, CHU Y, et al., 2016. Triassic tectonics of the southern margin of the South China Block[J]. Comptes Rendus Géoscience, 348(1): 5-14.

GUO T L, 2016. Discovery and characteristics of the Fuling shale gas field and its enlightenment and thinking[J]. Earth Science Frontiers, 23(1): 29-43. (in Chinese with English abstract)

FAN X, CHEN A Q, ZHENG D Y, et al. , 2025. Intelligent Identification for Carbonate Logging Sedimentary Facies based on Machine Learning: An Example from the Upper Permian Changxing Formation of Yuanba Area in northeastern Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. DOI: 10.14027/j. issn. 1000-0550.2025. 058. (2025-11-04)[2025-11-11]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.058.

HU T, PANG X Q, JIANG S, et al., 2018. Impact of paleosalinity, dilution, redox, and paleoproductivity on organic matter enrichment in a saline lacustrine rift basin: a case study of Paleogene organic-rich shale in Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Energy & Fuels, 32(4): 5045-5061.

HUANG D, ZHANG J, YANG G, et al., 2011. The discussion of stratum division and stratum for the Leikoupo formation of middle Triassic in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 33(3): 89-95. (in Chinese with English abstract)

HUO F, WEN H G, LI L, et al., 2022. Influence of the depositional environment on the formation of organic-rich marine shale: a case study of the first discovery of Anisian shale in the Sichuan Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 214: 110577.

JONES B, MANNING D A C, 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 111(1-4): 111-129.

LI C F, XIAO J F, 1988. The application of trace element to the study on paleosalinities in Shahejie Formation of Dongying Basin, Shengli Oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(4): 100-107. (in Chinese with English abstract)

LI L, TAN X C, ZHOU S Y, et al., 2012. Sequence Lithofacies paleography of Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 34(4): 13-22. (in Chinese with English abstract)

LI W, CHEN A Q, ZHANG X H, et al., 2025. Permian paleogeographic differentiation evolution and platform margin model comparison in Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 99(12): 4105-4119. (in Chinese with English abstract)

LI Z G, 1993. Surveying gas prospects of Leikoupo Formation in West Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 13(2): 28-33, 2. (in Chinese with English abstract)

LIANG C, JIANG Z X, YANG Y T, et al., 2012. Shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng–Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 39(6): 736-743.

LIANG D X, HU S Y, GU Z D, et al., 2015. Formation and evolution process of Kaijiang paleohigh in the Sichuan Basin and its controlling effects on gas pool formation[J]. Natural Gas Industry, 35(9): 35-41. (in Chinese with English abstract)

LIU Y H, QIANG W, DANG X, et al., 2025. Study on the pore structure characteristics of interbedded shale oil and formation mechanisms of high-quality shale oil reservoirs in the Chang 7 Member, Yanchang Formation, Ansai Oilfield[J]. Journal of Geomechanics, 31(3): 506-521. (in Chinese with English abstract)

LIU X B, TAO S Z, YANG D L, et al., 2025. Breakthrough in exploration of helium rich natural gas in Well Datan 1 of Sichuan Basin and main control factors for reservoir formation[J]. Earth Science Frontiers, 32(5): 258-277. (in Chinese with English abstract)

LIU S G, YANG Y, DENG B, et al., 2021. Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China[J]. Earth-Science Reviews, 213: 103470.

MAO X P, CHEN X R, WANG Z J, et al., 2024. Relationship between organic matter enrichment degree of black shale and paleoclimate: Taking the shale of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze region as an example[J]. Chinese Journal of Geology, 59(5): 1151-1172. (in Chinese with English abstract)

MENG X W, CHEN A Q, LI W, et al., 2025. Platform margin tectono-sedi-

mentary differentiation and reservoir control effects of the Permian Maokou Formation, southern margin of Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu U niversity of Technology (Science & Technology Edition), 52(1): 94-107.

PROCHNOW, S J, NORDT, L C, ATCHLEY, S C, et al., 2006. Multi-proxy paleosol evidence for middle and late Triassic climate trends in eastern Utah[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 232(1): 53-72.

QI Y, CHEN A Q, WEN L, et al. , 2025. Lithofacies paleogeographic differentiation and the paleo-uplifts expansion during the salt-bearing Lower Triassic Jialingjiang Formation, Sichuan Basin[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition): 1-24. DOI: 10.12474/cdlgzrkx. 2025091902. (2025-12-27)[2026-01-04]. https://doi.org/10.12474/cdlgzrkx.2025091902.

QIU Z, LU B, CHEN Z H, et al., 2019. Discussion of the Relationship between Volcanic Ash Layers and Organic Enrichment of Black Shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(6): 1296-1308. (in Chinese with English abstract)

SCHOEPFER S D, SHEN J, WEI H Y, et al., 2015. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. Earth-Science Reviews, 149: 23-52.

WANG Y F, ZHAI G Y, SHI W Z, et al., 2025. Factors controlling enrichment and accumulation of Devonian–Carboniferous shale gas in the Yaziluo rift trough in the Yunnan–Guizhou–Guangxi region[J]. Journal of Geomechanics, 31(2): 248-266. (in Chinese with English abstract)

SHI H, LI Z X, YANG Y Y, et al., 2022. The factors influencing the enrichment of organic matters in the Carboniferous source rocks, Ounan depression, eastern Qaidam basin[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 203-216. (in Chinese with English abstract)

SHI Z S, XIE W R, MA S Y, et al., 2012. Transgression sedimentary records of the members 4-6 of upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan basin[J]. J Palaeogeogr, 5: 583-595.

ŚLIWIŃSKI, M G, WHALEN, M T, DAY, J, 2010. Trace element variations in the Middle Frasnian Punctata Zone (Late Devonian) in the western Canada sedimentary basin—Changes in oceanic bioproductivity and paleoredox spurred by a pulse of terrestrial afforestation?[J]. Geologica Belgica, 13(4): 459-482.

SONG X B, LIU S R, WANG Q X, et al., 2011. Main controlling factors of hydrocarbon accumulation of Middle-Lower Triassic in western margin of western Sichuan Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 23(1): 67-73. (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[J]. Natural Gas Geoscience, 32(2): 233-247. (in Chinese with English abstract)

TAN J Q, HORSFIELD B, FINK R, et al., 2014. Shale gas potential of the major marine shale formations in the upper Yangtze platform, South China, Part III: mineralogical, lithofacial, petrophysical, and rock mechanical properties[J]. Energy & Fuels, 28(4): 2322-2342.

TIAN H, TANG S, ZHANG J Y, et al., 2018. Characteristics and formation conditions of carbonate reservoir in Leikoupo Formation of western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 29(11): 1585-1594. (in Chinese with English abstract)

WANG T D, ZHENG Y J, LI S J, et al., 1989. From geochemical characteristics of Oil and gas to discuss the gas source of Lei-3 reservoir Zhongba gas field, in north-west Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 9(5): 20-26. (in Chinese with English abstract)

WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. Gondwana Research, 23(4): 1273-1305.

WANG X F, LI S X, CHEN A Q, et al., 2026. A Middle Triassic oceanic anoxic event expanded to shallow carbonate intraplatform: Evidence from the organic-rich shale of Upper Yangtze Craton[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 683: 113450.

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[J]. Petroleum Exploration and Development, 50(5): 950-961. (in Chinese with English abstract)

WEI W, ALGEO T J, 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 341-366.

WEN H G, ZHENG R C, TANG F, et al., 2008. Reconstruction and analysis of paleosalanity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan Region, Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 28(1): 114-120. (in Chinese with English abstract)

WU S X, LI H T, LONG S X, et al. , 2011. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 32(4): 542-550, 559. (in Chinese with English abstract)

WU X Q, CHEN Y B, ZHAI C B, et al., 2020. Gas source and exploration direction of the middle Triassic Leikoupo formation in the Sichuan basin, China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 5(6): 317-326.

YAN Y H, CHEN A Q, ZHANG B J, et al., 2024. Evolution of the Ordovician sedimentary system and paleogeographic reconstruction in the Sichuan Basin, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 600-612. (in Chinese with English abstract)

YANG H F, FANG Z, WANG F L, et al., 2025. Influence of deep hydrothermal fluid on organic matter enrichment and its activity mode in Shahejie Formation and Dongying Formation of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(6): 1089-1107.

YANG K M, 2016. Hydrocarbon potential of source rocks in the Middle Triassic Leikoupo Formation in the Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 38(3): 366-374. (in Chinese with English abstract)

YANG Y, XIE J R, ZHANG J Y, et al., 2022. Characteristics and exploration potential of unconventional Middle Triassic Lei3^2 reservoirs in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(12): 12-22. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G C, WANG Y J, HUANG B C, et al., 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. Earth-Science Reviews, 186: 262-286.

ZHONG Y S, WANG L C, XU Y, et al., 2020. Microfacies and multi-isotope records of Anisian sequences from the Upper Yangtze Block: possible re-

sponses to tectonics and climate-driven relative sea-level change[J]. International Journal of Earth Sciences, 109(2): 489-509.

附中文参考文献

蔡振忠，徐帆，杨果，等，2024. 塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组沉积特征及有机质富集模式[J]. 现代地质，38(5)：1258-1269,

陈安清，杨帅，陈洪德，等，2017. 陆表海台地沉积充填模式及内克拉通碳酸盐岩勘探新启示[J]. 岩石学报，33(4)：1243-1256.

董怀民，孙建孟，林振洲，等，2018. 基于CT扫描的天然气水合物储层微观孔隙结构定量表征及特征分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，42(6)：40-49.

范萱，陈安清，郑栋宇，等. 2025. 基于机器学习的碳酸盐岩测井沉积相智能识别：以川东北元坝地区上二叠统长兴组为例[J/OL]. 沉积学报. DOI：10.14027/j. issn. 1000-0550.2025. 058.（2025-11-04）[2025-11-11]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2025.058.

郭彤楼，2016. 涪陵页岩气田发现的启示与思考[J]. 地学前缘，23(1)：29-43.

黄东，张健，杨光，等，2011. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层划分探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，33(3)：89-95.

李成凤，肖继风，1988. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度[J]. 沉积学报，6(4)：100-107.

李凌，谭秀成，周素彦，等，2012. 四川盆地雷口坡组层序岩相古地理[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，34(4)：13-22.

李雯，陈安清，张玺华，等，2025. 四川盆地二叠纪两类典型碳酸盐台地边缘及古地理分异格局[J]. 地质学报，99(12)：4105-4119.

李志高，1993. 川西雷口坡组找油气前景[J]. 天然气工业，13(2)：28-33, 2.

梁东星，胡素云，谷志东，等，2015. 四川盆地开江古隆起形成演化及其对天然气成藏的控制作用[J]. 天然气工业，35(9)：35-41.

刘祥柏，陶士振，杨岱林，等，2025. 四川盆地大探1井富氦天然气勘探突破及成藏主控因素[J]. 地学前缘，32(5)：258-277.

刘雨航，强微，党鑫，等，2025. 安塞油田延长组7段夹层型页岩油储层孔隙结构特征及优质储层成因机制研究[J]. 地质力学学报，31(3)：506-521.

毛小平，陈修蓉，王志京，等. 黑色页岩有机质富集程度与古气候的关系：以中上扬子五峰–龙马溪组页岩为例[J]. 地质科学，2024，59(5)：1151-1172.

孟宪武，陈安清，李雯，等. 四川盆地南缘二叠系茅口组构造-沉积分异及控储效应[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)：2025，52(1)：94-107.

亓严，陈安清，文龙，等. 2025. 四川盆地下三叠统嘉陵江组含盐层系岩相古地理分异与古隆起扩展演化[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版)：1-24. DOI：10.12474/cdlgzrkx. 2025091902.（2025-12-27）[2026-01-04]. https://doi.org/10.12474/cdlgzrkx.2025091902.

邱振，卢斌，陈振宏，等，2019. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨：以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J]. 沉积学报，37(6)：1296-1308.

宋晓波，刘诗荣，王琼仙，等，2011. 川西坳陷西缘中下三叠统油气成藏主控因素[J]. 岩性油气藏，23(1)：67-73.

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[J]. 天然气地球科学，32(2)：233-247.

田瀚，唐松，张建勇，等，2018. 川西地区中三叠统雷口坡组储层特征及其形成条件[J]. 天然气地球科学，29(11)：1585-1594.

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[J]. 石油勘探与开发，50(5)：950-961.

王玉芳，翟刚毅，石万忠，等，2025. 滇黔桂地区垭紫罗裂陷海槽泥盆系—石炭系页岩气富集成藏主控因素[J]. 地质力学学报，31(2)：248-266.

王廷栋，郑永坚，李绍基，等，1989. 从油气地化特征探讨川西北中坝雷三气藏的气源[J]. 天然气工业，9(5)：20-26.

文华国，郑荣才，唐飞，等，2008. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石，28(1)：114-120.

吴世祥，李宏涛，龙胜祥，等，2011. 川西雷口坡组碳酸盐岩储层特征及成岩作用[J]. 石油与天然气地质，32(4)：542-550, 559.

颜宇豪，陈安清，张本健，等，2024. 四川盆地奥陶纪沉积体系演化与古地理格局重建[J]. 沉积与特提斯地质，44(3)：600-612.

杨海风，房舟，王飞龙，等，2025. 渤海湾盆地沙河街组—东营组深部热液对有机质富集的影响及模式[J]. 石油学报，46(6)：1089-1107.

杨克明，2016. 四川盆地西部中三叠统雷口坡组烃源岩生烃潜力分析[J]. 石油实验地质，38(3)：366-374.

杨雨，谢继容，张建勇，等，2022. 四川盆地中部中三叠统雷三^{2}亚段非常规储层特征及勘探潜力[J]. 天然气工业，42(12)：12-22.