



地球科学

Earth Science

ISSN 1000-2383, CN 42-1874/P

《地球科学》网络首发论文

题目：湖相碳酸盐岩天文旋回识别及优质储层发育特征和预测——以西部凹陷雷家地区沙四段为例

作者：户昶昊，席振铎，陈昌，李阳

收稿日期：2025-06-03

网络首发日期：2025-09-11

引用格式：户昶昊，席振铎，陈昌，李阳. 湖相碳酸盐岩天文旋回识别及优质储层发育特征和预测——以西部凹陷雷家地区沙四段为例[J/OL]. 地球科学.
<https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20250911.1008.002>



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

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

doi:10.3799/dqkx.2025.189

湖相碳酸盐岩天文旋回识别及优质储层发育特征和预测

——以西部凹陷雷家地区沙四段为例

户昶昊^{1, 2}, 席振铎¹, 陈昌^{2,3}, 李阳²

1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

2. 中国石油辽河油田分公司, 辽宁盘锦 124010

3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 辽河坳陷西部凹陷雷家地区沙四段发育多套湖相碳酸盐岩, 地质条件优越, 具有良好资源前景, 是目前该区的致密油勘探主要层系。为厘清优质储层特征和明确勘探目标, 基于旋回地层学、钻测录井、地震反演以及分析测试数据识别了该区的天文旋回和分析了优质储层特征, 并对优质储层“甜点”进行了预测。研究发现: (1) 沙四段存在~6个长偏心率周期, ~19个短偏心率周期, 并弄清长偏心率旋回与该区油层组之间的关系; (2) 雷家地区沙四段优质储层岩性以白云岩为主, 白云石晶粒细小, 多在 $1\sim3\mu\text{m}$ 分布, 晶间孔隙及构造缝发育, 微孔隙集中分布在 $0.3\sim0.4\mu\text{m}$, 有效喉道长度分布在 $1\sim20\mu\text{m}$, 孔隙体积主要分布在 $0.5\sim4\mu\text{m}^3$, 原油轻质组分主要赋存于裂缝和白云石晶间孔隙中, 此类岩石致密且性脆, 主要分布在杜三油层; (3) 使用多参数融合的方法对单井进行了评价, 建立储层评价标准, 结合叠前地震反演资料, 明确了优质储层“甜点”在层序格架内的分布规律, 并进行了平面预测。研究成果进一步系统梳理了西部凹陷雷家地区沙四段地层、碳酸盐岩沉积储层特征并联合叠前地震反演有效识别该区甜点分布范围, 为该区致密油勘探提供可靠的地质依据。

关键词 湖相碳酸盐岩, 天文旋回, 优质储层, “甜点”预测, 西部凹陷

中图分类号: P624

收稿日期: 2025-06-03

Identification of Astronomical Cycles and Prediction of High-Quality Reservoir Development in Lacustrine Carbonates: A Case Study of the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Leijia Area, Western Sag

Changhao Hu^{1,2}, Zhenzhu Xi¹, Chang Chen^{2,3}, Yang Li²

1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, 410083, China

2. PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin Liaoning 124010, China

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

基金项目: 辽河油田公司科技项目(2024KJZX-03); 国家科技重大专项(2024ZD1400100); 辽宁省自然科学基金计划项目(2024-BS-338)

作者简介: 户昶昊(1979-), 男, 教授级高工, 硕士, 从事油气勘探开发管理工作。E-mail: huch6@petrochina.com.cn,

ORCID: 0009-0000-8285-3821

Abstract: Multiple sets of lacustrine carbonate rocks are developed in the fourth member of the Shahejie Formation (Es₄) in the Leijia area of the western sag of the Liaohe Depression. With favorable geological conditions and promising resource potential, this interval currently serves as the primary target for tight oil exploration in the region. To clarify the characteristics of high-quality reservoirs and define exploration targets, this study integrates cyclostratigraphy, drilling, logging, seismic inversion, and analytical testing data to identify astronomical cycles and analyze reservoir properties, aiming to predict the distribution of high-quality "sweet spot" reservoirs. The main findings are as follows: (1) The Es₄ member contains approximately six long eccentricity cycles and nineteen short eccentricity cycles, and the relationship between long eccentricity cycles and oil-bearing intervals in the area is elucidated. (2) High-quality reservoirs in the Leijia area are dominated by dolomite, characterized by fine dolomite crystals (mostly 1–3 μm), well-developed intercrystalline pores and structural fractures, micropores mainly distributed in the 0.3–0.4 μm range, effective throat lengths ranging from 1 to 20 μm, and pore volumes primarily between 0.5–4 μm³. Light oil components are mainly hosted within fractures and intercrystalline pores. These tight and brittle dolomites are primarily developed within the Du-3 oil layer. (3) A single-well evaluation was conducted using a multi-parameter fusion method to establish reservoir evaluation criteria. Combined with pre-stack geological inversion data, the study clarified the distribution pattern of high-quality sweet spots within the sequence stratigraphic framework and carried out planar prediction. This research systematically refines the stratigraphy and sedimentary reservoir characteristics of lacustrine carbonates in the Es₄ member of the western sag, and effectively identifies sweet spot distribution using pre-stack seismic inversion, providing a robust geological basis for tight oil exploration in the area.

Keywords: Lacustrine carbonates, astronomical cycles, high-quality reservoir, sweet spot prediction, western sag

引言

湖相碳酸盐岩广泛发育于陆相含油气盆地, 如渤海湾盆地、柴达木盆地、苏北盆地、鄂尔多斯盆地、海拉尔盆地、坎波斯盆地和桑托斯盆地等均有发育, 湖相碳酸盐岩兼具生烃和储层双重属性, 展现出良好的油气勘探潜力(Reijmer et al, 2022; Xu and Gou, 2023; 梁狄刚等, 2011; 吴世强等, 2025; 赵贤正等, 2020)。与海相碳酸盐岩相比, 其研究起步较晚, 相关内容研究整体认知程度相对不足, 同时湖相碳酸盐岩常因受盆地规模、古地貌、构造运动及物源等因素的影响, 导致其常常具有沉积环境变化快, 岩性成分复杂多变, 储层非均质性强等特点, 制约了湖相碳酸盐岩的勘探开发(杜江民等, 2020; 刘震等, 2022; 闫伟鹏等, 2014)。辽河拗陷西部凹陷雷家地区沙河街组四段发育多套湖相碳酸盐岩, 在 2013 年杜家台油层新增预测储量 5118×10^4 t, 2014 年上报控制储量 4199×10^4 t, 2017 年高升油层新增预测储量 4711×10^4 t, “十三五”期间辽河油田资源评价表明, 该区沙四段湖相碳酸盐油气资源量可达 2.3×10^8 t, 具备极大的勘探潜力(李晓光等, 2016; 辽河油气区编纂委员会, 2022)。近年来, 关于该区地层对比、沉积环境、湖相白云岩与方沸石成因、以及碳酸盐岩成岩作用等方面的研究日益丰富。早在 1975~1977 年, 就已基于探井开展地层划分, 识别出三个关键对比标志层, 包括: ①沙三段下部莲花油层顶部的薄层油页岩与钙片页岩; ②沙四段上部的钙质页岩夹白云质石灰岩; ③杜家台与高升油层之间的低电阻泥岩段(辽河油气区编纂委员会, 2022)。此后, 陈景达、吕小东等等学者陆续对沙四段的粒屑灰岩储层类型、成藏模式及储集空间类型进行研究(陈景达, 1982; 吕小东等, 2003); 孟卫工指出, 辽河拗陷勘探程度整体较高, 隐蔽油气藏将成为下一阶段储量增长的主要方向(孟卫工等, 2010); 赵会民强调沙四段混合沉积特征及其成因环境(赵会民, 2012); 单俊峰等认为沙四晚期湖盆水体轻微咸化、强还原、封闭性好, 水体性质受早期火山岩蚀变影响显

著(单俊峰等, 2014)。宋柏荣等提出方沸石—白云岩主要受房身泡组玄武岩蚀变及湖底热液作用双重影响, 为热水沉积产物(宋柏荣等, 2015); 李铁军等通过白云岩含量与杨氏模量关系建立了储层空间预测模型(李铁军, 2016); 黄蕾、李甜等分析认为该区白云岩成因主要包括准同生白云岩化与热水沉积作用(黄蕾, 2016; 李甜等, 2022); 谌治军、方锐等则系统探讨了方沸石的三种赋存状态(纹层状、裂缝充填状与结核状), 并指出其形成与深部热液活动及盐碱湖水体的相互作用密切相关(谌治君, 2018; 方锐等, 2020); 刘晓丽研究了湖相碳酸盐岩的流体充注历史, 认为储层经历了三期油气充注与一期热液事件, 并分析了其主要成岩作用过程(压实、压溶、溶蚀、胶结与交代作用)(刘晓丽, 2020); 李阳对雷家地区沙四段进行了天文旋回识别, 识别出 6 个偏心率周期并建立了偏心率尺度的地层划分对比方案(Li et al, 2025; 李阳等, 2024)。

尽管已有大量研究对雷家地区沙四段的岩石学、沉积学和储层特征提供了丰富资料, 但当前仍缺乏针对天文旋回周期识别、碳酸盐优质储层的发育特征及其主控因素等方面的系统研究, 特别是在长偏心率控制下优质储层的分布规律尚未明确。因此, 本文基于地质与地球物理综合资料, 识别沙四段中的天文轨道信号, 探讨碳酸盐储层的空间分布特征, 构建优质储层“甜点”的评价标准, 揭示其纵横向分布规律。研究成果可为辽河拗陷西部凹陷湖相碳酸盐岩油气的精准勘探与高效开发提供科学依据与地质依据。

1 区域地质概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地的东北部, 发育于华北地台基底之上, 是受中—新生代区域性伸展构造作用控制而形成的多旋回新生代陆相裂谷盆地, 拗陷整体构造格局呈“三凸三凹”分布, 其中西部凹陷是规模最大的次级负构造单元, 呈 NE 向展布, 为东断西超、东陡西缓的狭长箕状断陷结构。雷家地区位于西部凹陷的中北部, 包括陈家洼陷一个次级沉降带。在沙四段沉积时期, 该区主要发育半深湖—深湖亚相, 晚期局部可见扇三角洲体系。沉积物组成复杂, 以碳酸盐矿物、黏土矿物和长英质碎屑为主, 部分地层中伴生方沸石矿物, 表现出典型的湖相细粒混合岩特征。沙四段可进一步划分为高升油层和杜家台油层两个主要含油层系。高升油层以泥岩、页岩及泥质碳酸盐岩沉积为主; 杜家台油层的主要产油层集中在杜三油层, 岩性以白云岩为主, 常见纹层、揉皱等细粒沉积构造特征。此外, 研究区内储层普遍富含脆性矿物, 裂缝与溶蚀孔隙较为发育, 具备良好的储集性能和油气显示, 为湖相碳酸盐岩优质储层的识别与评价提供了有利条件(黄蕾, 2016; 辽河油气区编纂委员会, 2022) (图 1)。

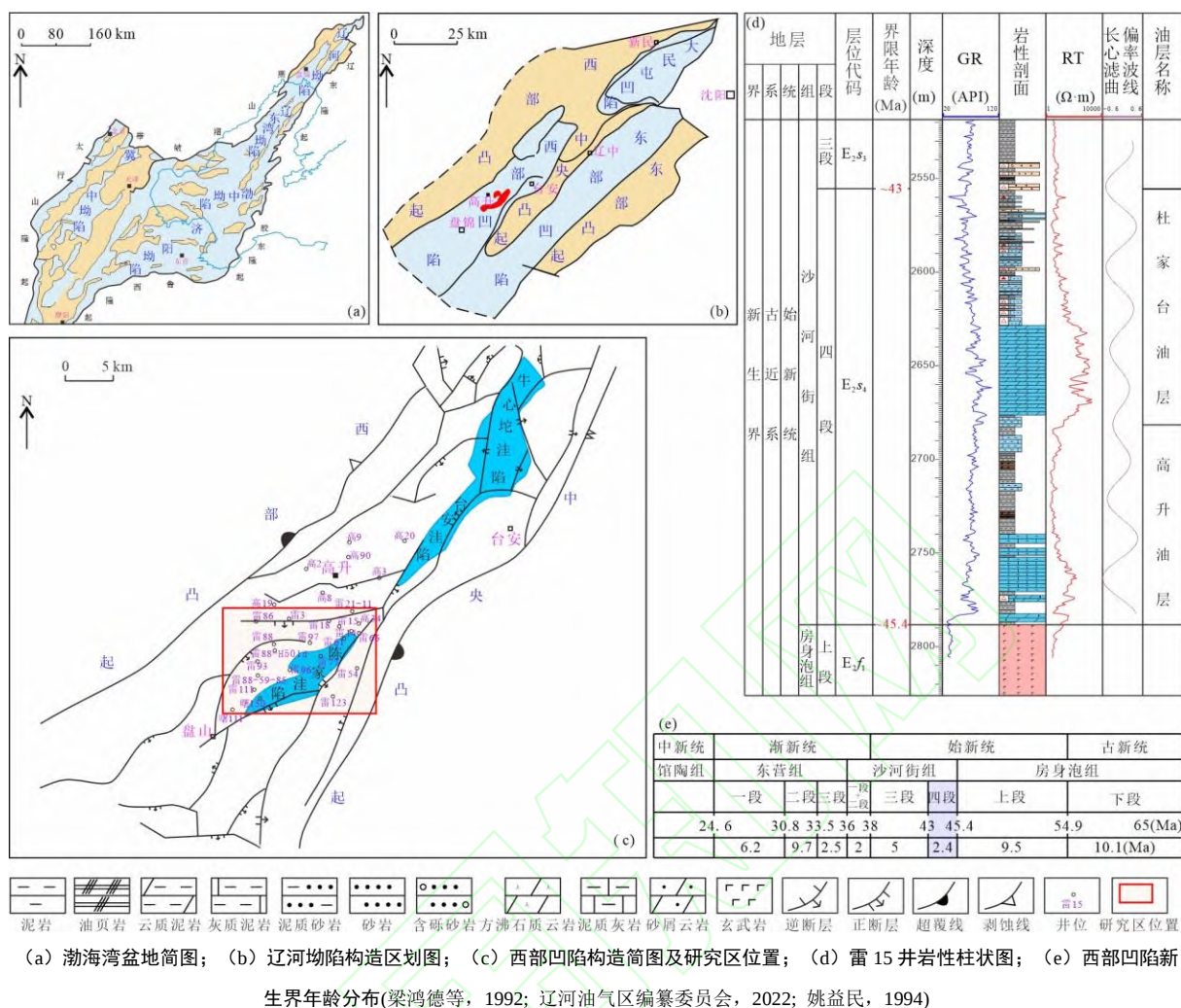


图 1 渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷综合地质背景图

Fig. 1. Comprehensive geological background map of the western sag of the Liaohe Depression in the Bohai Bay Basin

2 雷家地区沙四段天文旋回识别

对西部凹陷雷家地区沙四段 5 口探井的自然伽马数据进行了频谱分析(雷 93 井、雷 88-H501 导井、雷 37 井、雷 97 井和雷 53 井), 通过与标准偏心率、斜率、岁差合成曲线(ETP 曲线)数据频谱分析结果进行对比, 发现该区沙四段存在明显的偏心率、斜率和岁差天文轨道参数周期(Berger, 2021; Laskar et al, 2011; Li et al, 2019; Mann and Lees, 1996; Meyers, 2015) (表 1, 图 2)。其中雷 53 井沙四段沉积较为完整, 对自然伽马曲线进行高斯带通滤波得分别得到~55.9180 m 滤波曲线(相当于 405 kyr 长偏心率周期)和~17.8938 m 滤波曲线(相当于~129 kyr 短偏心率周期)。结合 Li et al. 对该区天文旋回滤波曲线地质意义的研究(Li et al, 2025), 同时分析滤波曲线与电测曲线组合特征的对应关系, 发现滤波曲线的极小值点附近区域, 一般对应低自然伽马, 高电阻率, 同时声波时差与密度曲线交汇为红模式, 处于水体相对较浅的时刻, 极大值点附近为高自然伽马, 低电阻率, 同时声波时差与密度曲线交汇为绿模式, 此时与水体较深时对应。按照姚益民等和梁鸿德等通过辽河坳陷古近系 K-Ar 火山岩同位素年龄测定, 确定沙四段年龄约为 45.4~43 Ma, 雷家地区沙四段沉

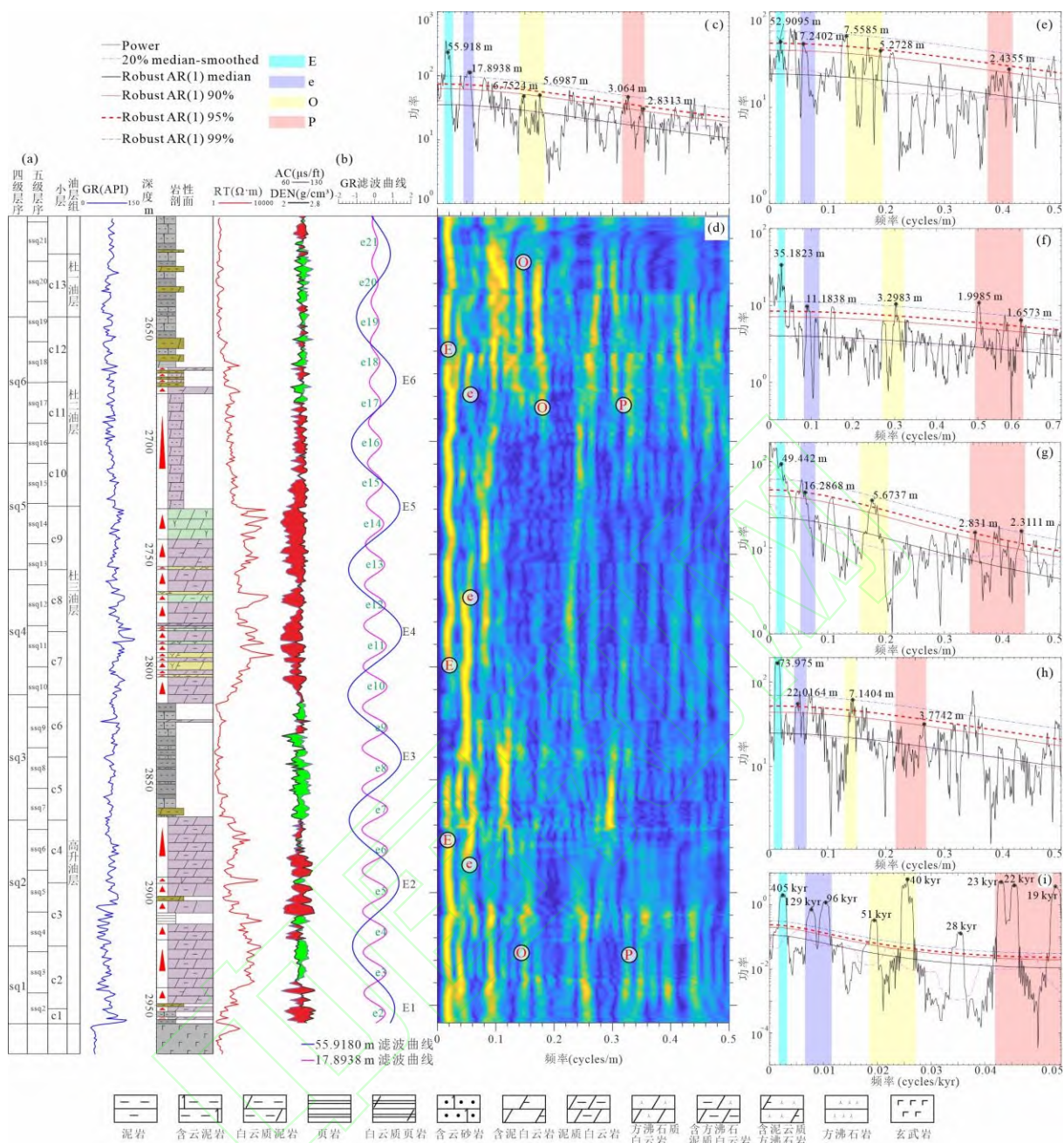
积时限~2.4 Ma(梁鸿德等, 1992; 姚益民, 1994) , 据此推算沙四段应该存在~6 个长偏心率周期 (E1~E6) , ~19 个短偏心率周期 (划分界限为滤波曲线的极小值点) 。

表 1 雷 93 井、雷 88-501 导井、雷 97 井和雷 53 井 MTM 频谱分析结果

Table 1. MTM Spectral Analysis Results for Wells Lei 93, Lei 88-501dao, Lei 97, and Lei 53

ETP	雷 93		雷 88-H501 导		雷 37		雷 97		雷 53	
置信度 超 90% 周期 /kyr	置信 度超 90% 周期 /kyr	峰值比	置信度 超 90% 周期/kyr	峰值比	置信度 超 90% 周期 /kyr	峰值比	置信度 超 90% 周期 /kyr	峰值比	置信 度超 90%周 期/kyr	峰值比
405.00	52.91	405.00	35.18	405.00	49.44	405.00	73.98	405.00	55.92	405.00
129.09	17.24	131.97	11.18	128.74	\	\	22.02	120.54	17.89	129.60
96.81	15.66	119.85	6.65	76.54	16.29	133.41	19.07	104.38	12.34	89.38
51.52	7.56	57.86	\	\	5.67	46.48	\	\	6.75	48.91
39.88	5.27	40.36	3.30	37.97	5.41	44.30	7.14	39.09	5.70	41.27
28.65	3.41	26.10	\	\	\	\	4.84	26.51	\	\
23.27	\	\	2.00	22.98	2.83	23.19	\	\	\	\
21.99	\	\	1.77	20.40	2.54	20.77	\	\	3.06	22.19
18.85	2.44	18.64	1.66	19.10	2.31	18.93	3.77	20.66	2.83	20.51

目前多数学者发现天文旋回周期与高频层序具有较好的对应关系,长偏心率周期对应四级层序,短偏心率周期对应五级层序(Bao et al, 2023; 栾旭伟等, 2024; 石巨业等, 2023) , 按照此原则,对雷家地区不同探井沙四段进行旋回地层学分析,提取 405 kyr 长偏心率信号以及相对明显的~129 kyr 的短偏心率信号。将雷家地区沙四段划分为 6 个四级层序(sq1~sq6),以每个四级层序极大值点为界,进一步将沙四段划分为 12 个小层(c1~c12)。根据辽河油田对杜家台油层和高升油层的划分特征,高升油层包括 sq1~sq3 三个四级层序,c1~c6 六个小层,杜家台油层主要包括 sq4~sq6 三个四级层序,杜三油层与 c7~c9 层对应,杜二油层和杜一油层与 c10~c12 层对应(图 2)。识别并提取雷家地区沙四段各探井中的偏心率信号为建立偏心率尺度精细地层划分对比并赋予地层格架时间属性提供了可能,同时为在层序格架内的优质储层分布规律研究提供基础(Li et al, 2025; 李阳等, 2024; 田军等, 2022) 。



(a) 雷 53 井岩性剖面、层序、小层以及油层组划分以及它们之间的对应关系；(b) 雷 53 井 GR 的偏心率滤波曲线，长偏心率滤波带宽为 0.017883 ± 0.001490 cycles/m，短偏心率滤波带宽为 0.055885 ± 0.001482 cycles/m；(c) 雷 53 井 GR 的 2π MTM 谱分析图；(d) 雷 53 井 GR 的 eFFT 分析。滑动窗口为 69.9 m；(e) 雷 93 井 GR 的 2π MTM 谱分析图；(f) 雷 88-H501 导井 GR 的 2π MTM 谱分析图；(g) 雷 37 井 GR 的 2π MTM 谱分析图；(h) 雷 97 井 GR 的 2π MTM 谱分析图；(i) 45.4 Ma~43 Ma 沉积时期的 ETP 曲线的 2π MTM 谱分析图

图 2 雷家地区沙四段旋回地层学分析结果

Fig. 2. Cyclostratigraphic analysis results of the fourth member of the Shahejie Formation in the Leijia area

3 雷家地区沙四段储层特征

3.1 沉积环境分析

西部凹陷雷家地区沙四段碳酸盐岩普遍表现出明显的 Eu 正异常，且其稀土元素分布多为平坦

型，轻一中稀土元素（LREE~MREE）富集，表明还原性条件下的沉积环境(赵彦彦等，2019)，碳酸盐岩 Eu 正异常通常与高温（大于 200 ℃）、还原性热液流体相联系，指示高温热液的存在(Bau et al, 2010; Debruyne et al, 2016; Frei et al, 2017; Robbins et al, 2016)（表 2，图 3a）。碳氧同位素数据显示，大多数样品的投点落在 $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ 交汇图的第 II 象限，且呈良好的线性关系 ($R^2=0.5472$)，说明雷家地区沙四段时期的湖盆具有半开放一半封闭型的沉积环境(Talbot, 1990; 石柱等, 2024)（图 3b）。锶同位素分析中， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值普遍高于古近系海水（约 0.7075~0.7085），说明沉积物除受陆源溶解物质输入外，还可能受到热液改造。随着泥质平台成分增加， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值呈上升趋势，反映了陆源物质与流体相互作用对区域水体化学特征的影响(张雅茹等，2024)（图 3c）。在 Sr/Ba、Sr/Cu 比值方面，Sr/Ba>0.5、Sr/Cu>10，表明沉积过程中水体受蒸发作用或高盐度流体的强烈影响。随着岩性由灰岩向白云岩及泥质白云岩过渡，上述比值逐步下降，指示沉积环境经历了由开放向更封闭、高盐度条件的化学改造(范晓杰等，2025; 吴靖等，2016)（图 3d, f）。此外，除灰岩外大部分岩性中 $V/(V+Ni)>0.5$ ，印证了广泛的贫氧—还原沉积条件；灰岩中该比值相对偏低，则显示较强的水体流通与氧气交换。高 $V/(V+Ni)$ 比值强调了还原水体对有机质保存和稀土元素分配的控制(焦梦妍等，2024; 刘姝君等，2019)（图 3e）。综上所述，沙四段沉积环境可概括为：半咸水—咸水、半潮湿—干旱、贫氧—还原、半封闭—封闭的湖泊沉积环境。

表 2 各井白云岩样品 REE+Y 经 PAAS 标准化后的数据

Table 2 PAAS-normalized REE+Y data of dolomite samples from each well

井号	深度,m	REE+Y														
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
雷 88-59-85	3504.2	0.232	0.252	0.263	0.259	0.298	0.412	0.372	0.291	0.290	0.284	0.275	0.271	0.272	0.275	0.257
雷 97	2926	0.388	0.394	0.381	0.371	0.415	0.559	0.455	0.360	0.372	0.354	0.349	0.336	0.340	0.345	0.329
雷 40	2588.55	0.272	0.289	0.264	0.263	0.322	0.418	0.326	0.307	0.322	0.337	0.313	0.311	0.305	0.290	0.270
高 34	2710.9	0.218	0.219	0.216	0.212	0.247	0.289	0.246	0.201	0.203	0.201	0.189	0.185	0.186	0.186	0.169
雷 29-15	2585	0.651	0.780	0.716	0.707	0.914	1.133	0.801	0.696	0.650	0.573	0.564	0.513	0.476	0.436	0.379
雷 14-35	2766.61	0.161	0.178	0.172	0.175	0.222	0.295	0.243	0.209	0.233	0.259	0.230	0.237	0.247	0.249	0.233
雷 37	2700.5	0.271	0.274	0.234	0.225	0.259	0.315	0.251	0.209	0.208	0.211	0.194	0.191	0.190	0.192	0.193
雷 93	3081.06	0.290	0.272	0.267	0.254	0.295	0.372	0.285	0.257	0.257	0.248	0.238	0.234	0.232	0.222	0.202
雷 88	2569.73	0.545	0.610	0.636	0.682	0.860	1.054	0.859	0.630	0.574	0.467	0.467	0.416	0.392	0.374	0.320
雷 84	2655.5	0.647	0.644	0.609	0.584	0.747	0.928	0.708	0.647	0.624	0.612	0.587	0.574	0.583	0.580	0.520

3.2 储层岩石类型

沙四段优质储层岩性以白云岩为主，包括泥—粉晶白云岩、含泥泥晶云岩、泥质白云岩以及方沸石质云岩等（图 4）。

3.2.1 泥—粉晶白云岩

较纯净的白云岩，仅在部分井中可见，如雷 84 井、雷 21-11 井，主要发育在 c7~c9 层，这类岩石坚硬致密，呈灰黄色，具均质结构。裂缝较发育，被方解石、方沸石或者沥青充填（图 4b, f, g）。

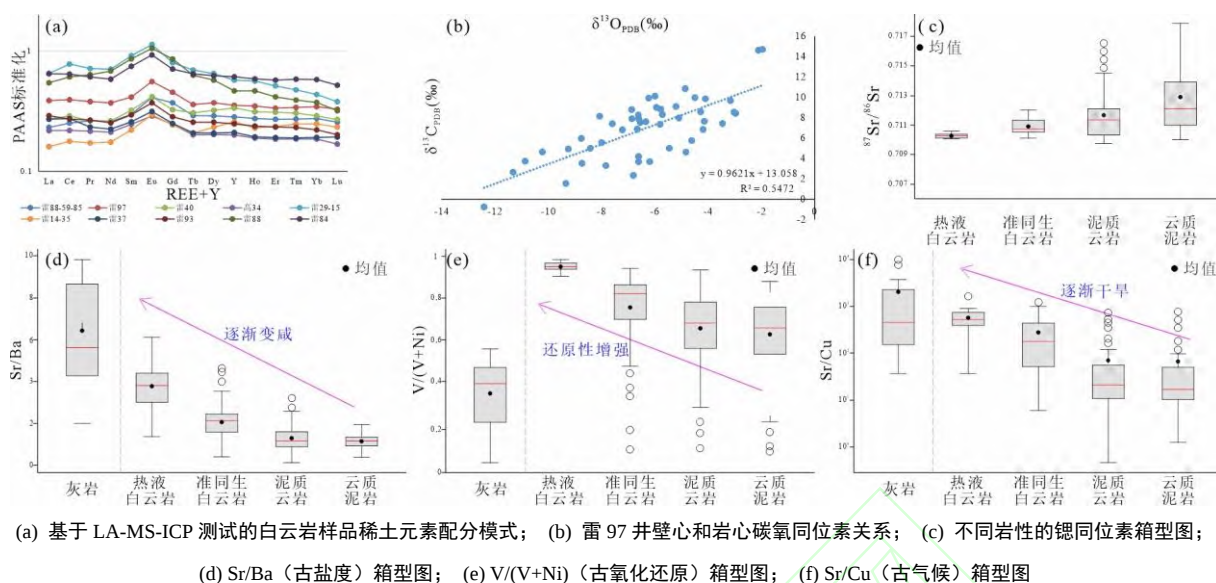


图 3 不同测试方法的古沉积环境判别指标

Fig. 3. Paleoenvironmental Discrimination Indicators Derived from Different Analytical Methods

3.2.2 含泥云岩

泥质含量在 10%~20%，平均约为 17%，白云石含量一般在 60%左右，灰—深灰色、灰黄色或褐黄色。可见纹层状构造，其中暗色纹层多为富含有机质的陆源碎屑（粘土质、长英质），含黏土矿物（95%以上为伊利石）、石英、长石、铁白云石、黄铁矿、黑云母等；而亮色纹层则为白云石纹层，含方解石和铁白云石，厚度比陆源碎屑纹层大，晶粒为微晶。此类岩石多见揉皱变形构造以及裂缝，裂缝一般被方解石或方沸石充填，含油性较好，在雷 57、雷 88、雷 37、雷 29-15 等井的 c7~c9 层中均有分布（图 4i）。

3.2.3 泥质白云岩

泥质含量在 26%~40%之间，平均约为 34%，岩心观察时可见灰黄色、浅灰色的白云岩与深灰色的泥质条带不等厚互层，常发育变形构造，白云岩也可呈结核状产于泥岩中，裂缝和溶孔发育（图 4a, c, d, e, ）。。

3.2.4 方沸石质白云岩

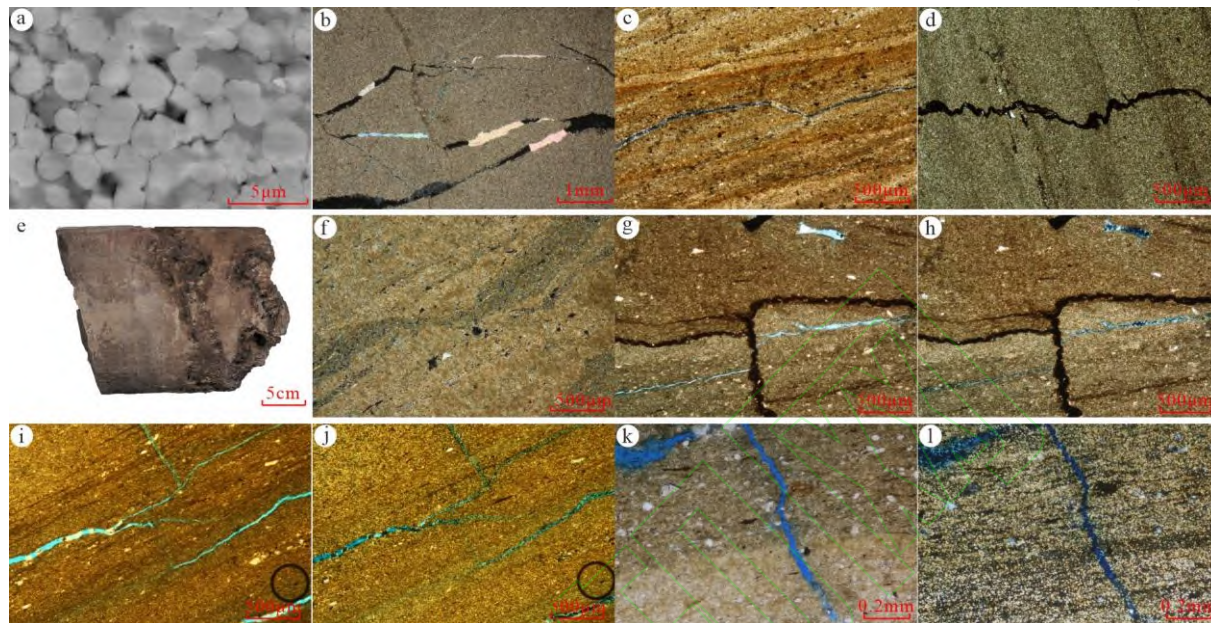
大部分发育在 c7~c9 层，灰白色或者褐灰色，纹层状或者均质块状，岩石坚硬致密、性脆，裂缝发育，并被方解石或方沸石充填，方沸石单偏光下呈亮白色，而在正交偏光下全消光。岩石方沸石含量一般在 20%~50%之间，在雷 18、雷 29-15、雷 36、雷 57 以及雷 97 等井中均有发现，具备高自然伽马和高电阻率测井曲线响应特征，常作为地层划分对比的标志层（图 4k, 1）。

3.3 储集空间

3.3.1 孔隙

原生孔隙以晶间孔隙为主，可为粘土矿物、石英、长石、白云石、方解石、方沸石、黄铁矿等矿物晶体之间的孔隙（图 5a~f）。裂缝中充填的方解石和方沸石矿物而形成的晶间孔隙较为常见，如图 5c 发育孔隙大小在 98 μm 左右的方解石晶间孔隙，图 5e 为方沸石晶间孔隙大小在 14.66~33.72 μm 之间。此外泥晶白云岩在氩离子抛光扫描电镜中可以观察到大小为 1~3 μm 的白云石颗粒组成的

细小晶间孔隙（图 4a，图 5d）。次生孔隙主要为晶内（间）溶孔和有机质孔，该区白云石晶体溶蚀形成晶间溶孔，对岩石的孔隙度、渗透性和储集能力有重要影响（图 5g，h，i），晶内溶孔常见于方解石、白云石等矿物，尤其在热液和溶解作用较强的环境下，晶内溶孔能显著影响矿物的结构和岩石的储集能力（图 5k，l）；在有机质生排烃或酸性溶蚀作用下，容易形成有机质孔（图 5j）。



(a) 纹层状泥质白云岩，白云石颗粒大小 $1\sim3\mu\text{m}$ ，晶间孔发育，雷 57 井，2355.31 m，氩离子抛光扫描电镜；(b) 泥晶白云岩，裂缝发育，被方解石、方沸石充填，雷 14 井，2766.61 m；铸体片，(+)；(c) 泥质云岩，泥质纹层与白云石纹层互层，裂缝发育，雷 37 井，2815.5 m，铸体片，(-)；(d) 泥质云岩，压溶缝，雷 97 井，3278 m，普通片，(+)；(e) 褐灰色块状泥质白云岩，溶蚀孔洞发育，雷 84 井，2649.5 m，岩心；(f) 泥晶云岩，泥质条带状富集，雷 29-15 井，2541.68 m，普通片，(+)；(g) 泥晶云岩，多期裂缝发育，见石膏晶模孔，雷 84 井，2649.5 m，铸体片，(-)；(h) 同 (g)，(+)；(i) 含泥晶云岩，裂缝被方沸石充填，雷 18 井，2444.4 m，铸体片，(-)；(j) 同 (i)，(+)；(k) 方沸石质云岩，方沸石与白云石均匀混合，可见长英质颗粒，裂缝发育，雷 37 井，2702.5 m，铸体片，(-)；(l) 同 (k)，(+)

图 4 碳酸盐岩岩心和镜下特征

Fig. 4. Core and Petrographic Characteristics of Carbonate Rocks

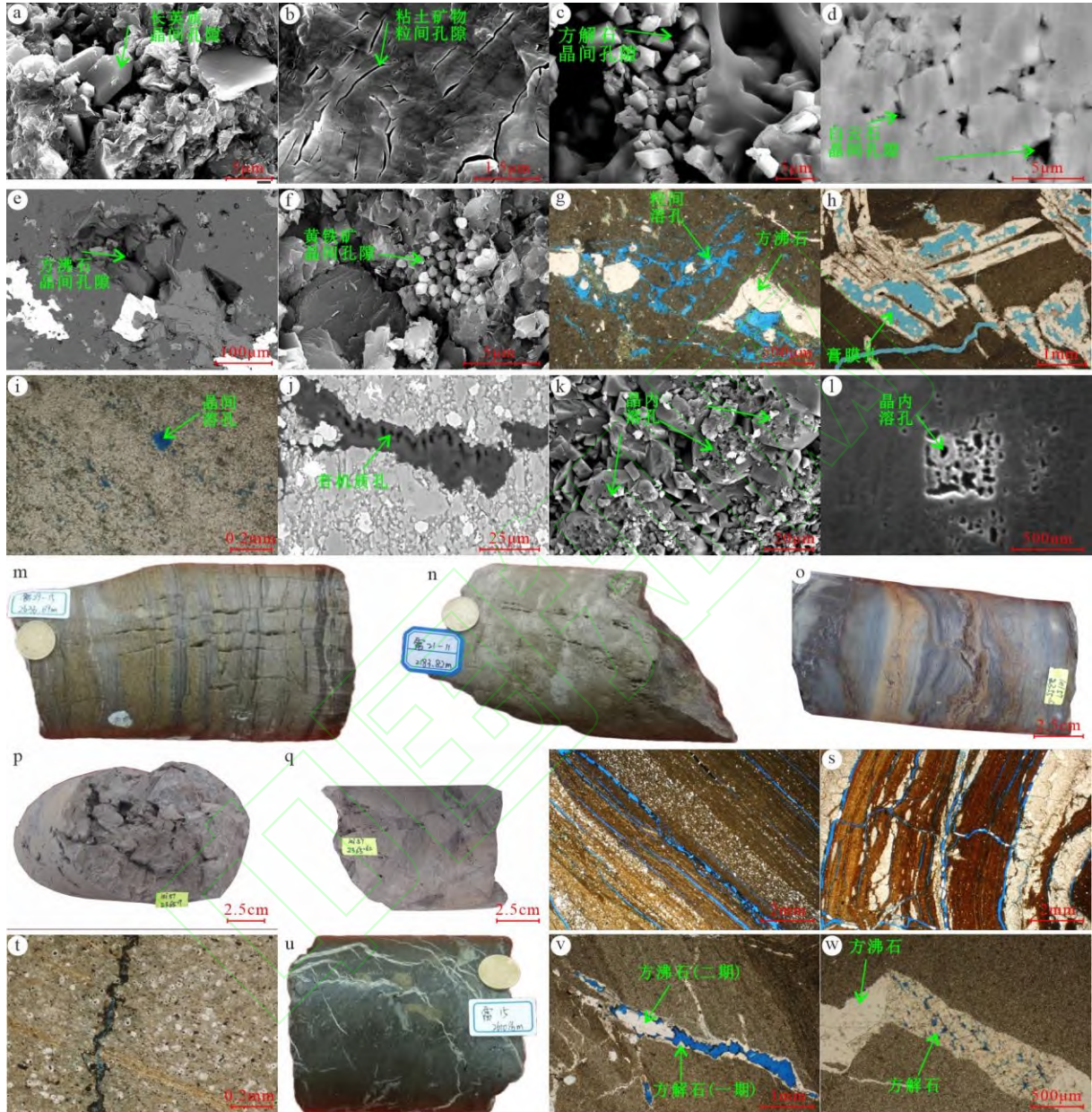
3.3.2 溶洞

通过岩心观察，雷 14、雷 18、雷 29-15、雷 57、雷 84、雷 86、雷 88 等部分井段发育溶蚀孔洞（图 5m~q）。如雷 57 井，在 2365.7 m 处溶洞发育极为密集，厚度约为 30 cm，洞径较大，在 5~15 mm 之间，大洞为主（图 5o）。从岩心观察来看，裂缝发育的位置一般具有溶洞的发育，并且溶洞一般沿着裂缝延展的方向发育，说明二者有一定的依存关系。

3.3.3 裂缝

裂缝在碳酸盐岩储层中起着重要的作用，该区裂缝按成因可分为构造缝、成岩缝和溶蚀缝等（图 4b~f，g~l，图 5m~w）。构造缝主要发育在泥晶云岩、方沸石质云岩以及泥质云岩中。按产状可分为水平缝、低角度缝、高角度缝以及垂直缝。构造缝一般被方沸石、方解石、微晶石英、黄铁矿、沥青等后期充填，多以半—全充填为主。裂缝宽度在 10~20 mm，如雷 29-15 井发育多组高角度、近垂直缝，发生错动，被方沸石充填（图 5m）。层理缝为一种特殊的构造缝，为在岩石的层理面或层理结构上形成的裂缝，形成于沉积物的层理结构、层与层之间的弱面，层理缝于构造缝容易形成裂缝

网络，这对于提升储层的储渗性能起着关键作用（图 5r, s）；溶蚀缝指岩石原有的裂缝在地下水的溶蚀作用下被扩大改变，以至难以分辨原裂缝的成因类型，呈漏斗状、蛇曲状、肠状、树枝状等不规则形态。如雷 57 井发育水平溶蚀缝（图 o）；成岩裂缝主要包括压溶缝，为化学压溶作用形成的锯齿状缝合面（图 4d, 图 5t）。



(a) 长英质矿物晶间孔隙，雷 88-59-85 井，3484.68 m；(b) 黏土矿物粒间孔隙，雷 21-11 井，2130.9 m；(c) 方解石晶间孔隙，雷 37 井，2700.5 m；(d) 方解石晶间孔隙，雷 37 井，2700.5 m；(e) 方沸石晶间孔隙，雷 97 井，3278 m；(f) 黄铁矿晶间孔隙，雷 15 井，2636 m；(g) 粒间溶蚀扩大孔，雷 21-11 井，2183.82 m，铸体片，(-)；(h) 晶模孔被方沸石充填，雷 36 井，2562.6 m，铸体片，(-)；(i) 白云石晶间溶孔，雷 18 井，2466.65 m，铸体片，(-)；(j) 有机质孔，曙 150 井，3712.5 m，氩离子抛光 SEM；(k) 方沸石晶内溶孔，雷 57 井，2355.31 m，SEM；(l) 白云石晶内溶孔，雷 88 井，2569.73 m，SEM；(m) 高角度构造缝和溶洞，雷 29-15 井，2585.5 m，岩心；(n) 高角度构造缝和溶洞，雷 21-11 井，2183.82 m，岩心；(o) 溶蚀缝和溶洞，雷 57 井，2355.6 m，岩心；(p) 灰白色泥质云岩，溶洞，雷 57 井，2365.7 m，岩心；(q) 灰色泥质云岩，溶洞沿裂缝走向发育，雷 57 井，2363.62 m，岩心；(r) 层理缝，雷 14 井，2771.1 m，铸体片，(-)；(s) 多期裂缝，层理缝和高角度构造裂缝，形成裂缝网络，雷 36 井，2685.47 m，铸体片，(-)；(t) 压溶缝，雷 15 井，2638.11 m，铸体片，(-)；(u) 裂缝发育，被方解石充填，雷 15 井，2610.06 m，岩心；(v) 裂缝被方解石（一期）和方沸石（二期）充填，雷 18

井, 2446.65 m, 铸体片, (-); (w) 裂缝被方解石和方沸石充填, 雷 14 井, 2766.61 m, 铸体片, (-)

图 5 储集空间类型及发育特征

Fig. 5. Types and Development Characteristics of Reservoir Spaces

3.4 孔隙结构特征

本次研究主要利用高压压汞分析和岩心纳米 CT 扫描技术来表征储层的孔隙结构发育情况，获取孔隙结果评价参数。

3.4.1 高压压汞分析

选取了研究区 7 口取心井的 21 个白云岩岩石样品进行了压汞实验(王大为等, 2024)，并进行了整理统计(图 6, 表 3)。

通过压汞数据可以看出各种类型岩石的孔喉分选性较差，孔喉分布分散。多数为细歪度，细小孔喉较为集中，并且退汞曲线多为突降型，进汞与退汞体积差异较大，云岩类孔隙相对细小，裂缝在很大程度上改善了储层储渗性能，云岩类岩石坚硬且脆性高，容易产生构造缝进而演变成溶蚀缝，裂缝的发育会使得岩石孔隙平均半径、最大汞饱和度、最大孔喉半径等增大。

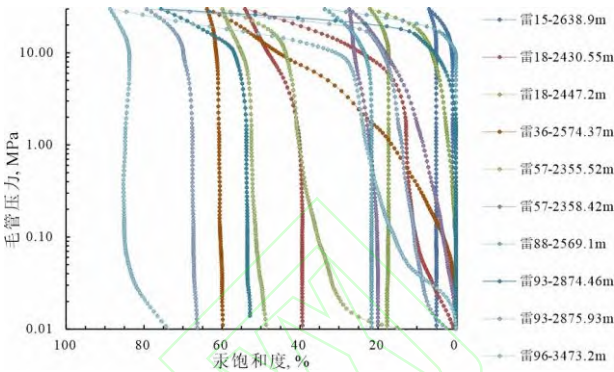


图 6 白云岩样品毛细管压力曲线

Fig. 6. Capillary Pressure Curves of Dolomite Samples

表 3 白云岩样品压汞参数统计表

Table 3. Statistical Summary of Mercury Injection Parameters for Dolomite Samples

压汞参数	平均值（最小值~最大值）
排驱压力,MPa,	3.037(0.008~20.064)
孔喉平均半径,μm	5.557(0.025~30.770)
变异系数	1.303(0.162~5.300)
最大汞饱和度,%	52.840(2.40~96.06)
最大孔喉半径,μm	32.377(0.037~92.053)
均质系数	0.267(0.031~0.790)
退汞效率,%	31.99(5.63~97.84)
峰态	6.381(1.751~26.062)
分选系数	7.644(0.004~35.345)

3.4.2 岩心纳米 CT 扫描

纳米 CT 扫描成像通过利用锥束 X 射线透过岩心样品，以无损方式获取样品内部的三维结构(关欣等, 2023)。选择雷 57 井 2355.31 m 处的纹层状泥质白云岩样品进行了岩心纳米 CT 扫描(图 7)。经纳米 CT 扫描后发现，小微孔发育，局部发育较大孔隙（绿色、红色），孔隙度 2.9121%，微孔隙分布在多个区间，峰值主要分布在 300 μm，600~3000 μm 区间，孔隙表面积双峰分布，峰值分别为 2 μm² 和 20 μm²，孔隙体积呈双峰分布，峰值分别为 0.2 μm³ 和 2 μm³，孔隙多为孤立微孔，2~3 个微孔组成的微孔体，配位数分布在 1~3，微孔隙集中分布在 0.3~0.4 μm，有效喉道长度分布在 1~20 μm，孔隙体积主要分布在 0.5~4 μm³。

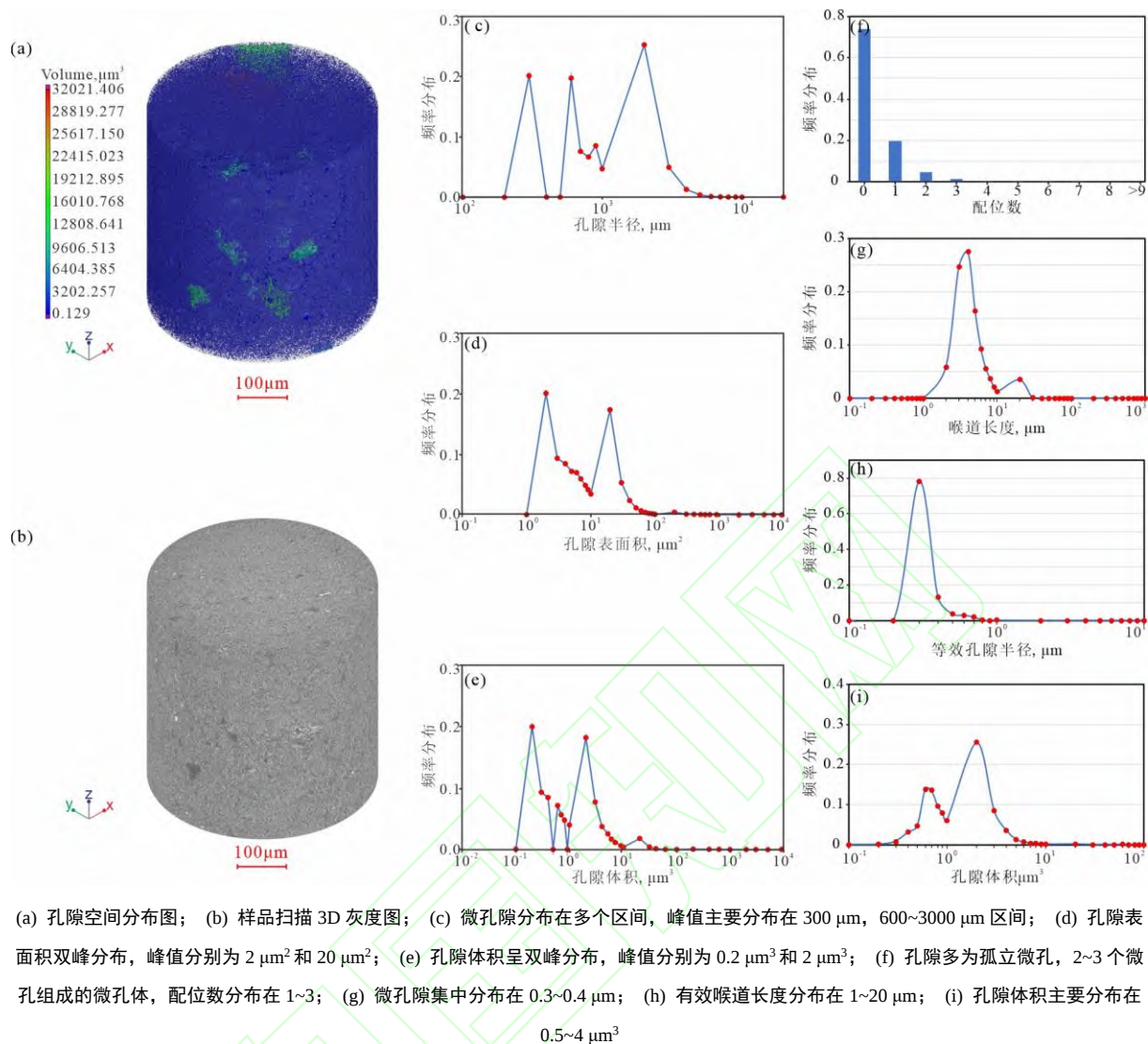


图 7 雷 57 井岩心纳米 CT 扫描结果

Fig. 7. Nano-CT Scanning Results of Core Samples from Well Lei 57

通过岩心 CT 扫描和高压压汞分析结果整体来看，该区白云岩样品晶间孔隙较为发育，储层孔隙细小、分选差、孔隙结构差，需依赖微孔隙和微裂缝发育形成有效储层。

3.5 物性特征

为了更好的研究雷家地区沙四段碳酸盐岩储层的岩心物性特征，本文选取了工区内的 12 口取心井 83 个白云岩样品进行了常规小直径物性分析测试，整理物性数据绘制了图 8，图 8 显示了不同类型白云岩的孔隙度与渗透率分布特征及其相互关系。总体来看，泥质含量对白云岩的孔隙结构与渗透能力具有显著影响。白云岩孔隙度最小，分布较集中，且渗透率稳定在 1~10 mD 范围内，表明其储层物性较差。随着泥质含量的增加，含泥白云岩与泥质白云岩的孔隙度中位值和平均值明显升高，部分样品孔隙度超过 15%，但其渗透率分布波动显著，异常值频繁出现，呈现出“高孔低渗”特征，推测与细粒泥质矿物的孔喉堵塞作用密切相关。方沸石质白云岩的渗透率范围最广，最低可低于 0.1 mD，最高接近 100 mD，反映出方沸石成岩作用对孔隙结构改造剧烈且不均一。孔隙度—渗透率散点图进一步揭示了孔渗关系，各种类型白云岩中孔渗关系较为离散，相关性较差，同时渗透

率与裂缝开度相关性较好，结合上文所述，造成这种现象是与裂缝发育有直接关系的，储集性能受裂缝影响较大。

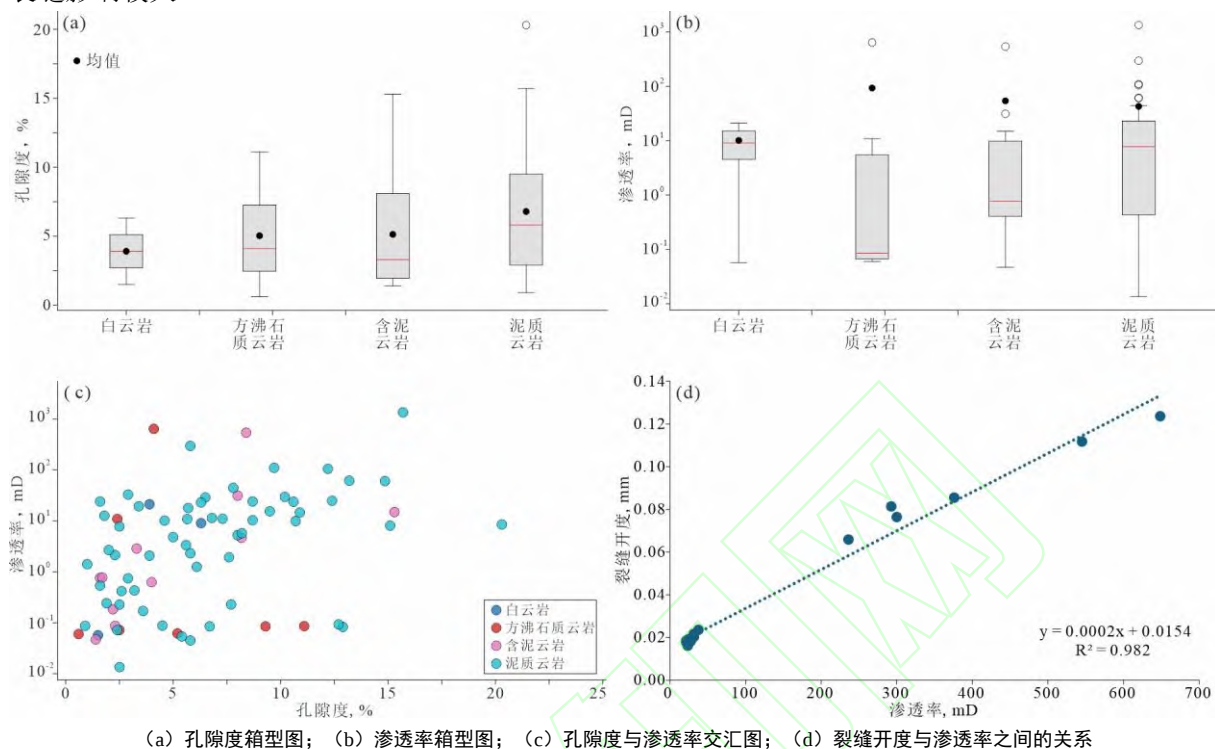


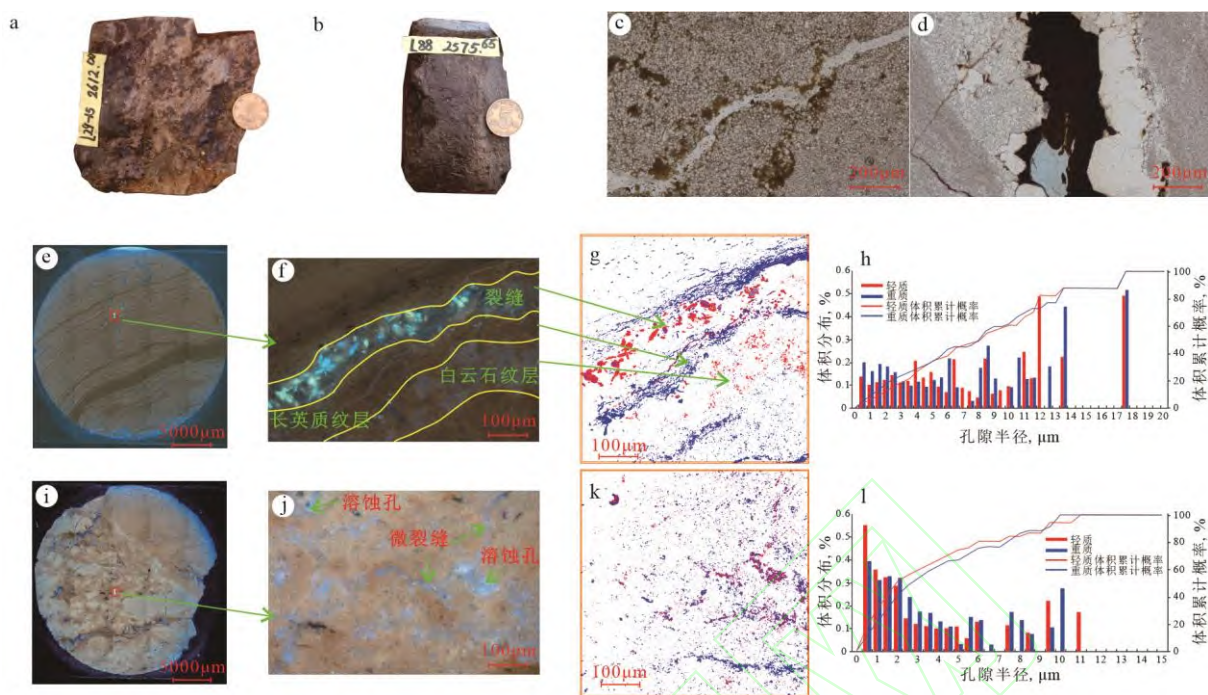
图8 白云岩样品物性统计相关图件

Fig. 8. Correlation and Statistical Diagrams of Physical Properties in Dolomite Samples

3.6 含油气性

该区很多井具有较好的油气显示，油气常赋存在孔隙和裂缝—溶洞中（图9）。原油在岩心中分布比较均匀，在雷21-11井、雷57井、雷86井和雷88井中均发现了部分含油的取心段，油气的储集空间基本以晶间孔隙、晶间溶孔以及裂缝为主，主要为泥质云岩。因为饱含油或者富含油，一般呈棕褐色或者黄棕色，具有油脂感，可嗅油味，滴水呈圆珠状，不渗入岩心（图9a, b）。

为了更好的研究原油在储层中的赋存情况，对两块泥质云岩（纹层状和块状）样品进行了激光共聚焦分析。雷57井2355.21 m的岩石样品为纹层状泥质白云岩，经激光共聚焦测试后发现，原油总量8.44%，其中轻质组分3.95%，重质组分4.49%，轻重比0.88。轻质组分赋存孔隙平均半径8.20 μm ，重质8.01 μm 。原油主要赋存于裂缝、溶蚀孔、白云石晶间孔中，轻质组分向裂缝、溶蚀孔富集，其中轻质油主要赋存与裂缝和白云石晶间孔中，而重质油主要赋存于泥质或长英质的粒（晶）间孔中（图9e~h）。雷21-11井的2183.82 m处的样品为块状泥质白云岩，激光共聚焦测得原油总量6.03%，其中轻质组分2.87%，重质组分3.16%，轻重比0.91。轻质组分赋存孔隙平均半径3.38 μm ，重质3.77 μm ，原油主要赋存于裂缝、溶蚀孔、白云石晶间孔中（图9i~l）。



(a) 灰黄色白云岩，油斑，雷 29-15 井，2612 m，岩心；(b) 灰褐色泥质云岩，富含油，雷 88 井，2575.65 m，岩心；(c) 白云岩，原油赋存与晶间孔和溶蚀孔中，雷 84 井，2647.3 m，铸体片，(-)；(d) 方沸石质云岩，棕褐色为原油赋存于裂缝中，曙 99 井，3038.38 m，铸体片，(-)；(e) 雷 57 井 2355.21 m 样品的荧光全貌；(f) 雷 57 井 2355.21 m 样品的荧光薄片；(g) 雷 57 井 2355.21 m 样品的激光共聚焦；(h) 雷 57 井 2355.21 m 样品的轻重组分赋存孔隙分布；(i) 雷 21-11 井 2183.82 m 样品的荧光全貌；(j) 雷 21-11 井 2183.82 m 样品的荧光薄片；(k) 雷 21-11 井 2183.82 m 样品的激光共聚焦；(l) 雷 21-11 井 2183.82 m 样品的轻重组分赋存孔隙分布

图 9 白云岩样品原油赋存状态及激光共聚焦分析结果

Fig. 9. Crude Oil Occurrence States and Laser Confocal Microscopy Results in Dolomite Samples

3.7 脆性特征

储层岩石成分中的脆性矿物含量决定了后期压裂改造的效果，并直接影响油气产量。通常具有高石英、碳酸盐以及方沸石矿物含量的岩石脆性一般较高，脆性高的岩石在压裂过程中可产生剪切破坏并有利于形成复杂的网状缝，通过采用体积压裂技术、实现大面积泄油，从而提高单井产量(李泉辉等，2023)。大多数井在 c7~c9 层均含有较高的脆性矿物，以白云石和方沸石矿物为主。针对雷家地区沙四段储层，对雷 29-15 井 2572.2~2588.0 m 取心段进行了岩石单轴压缩、三轴压缩变形试验，抗拉强度试验，并对所获得的数据进行整理分析，分别使用式 1 和式 4 计算了工区内的含方沸石泥质云岩、含云泥质方沸石岩、含方沸石云质泥岩以及云质泥岩四种不同岩石的脆性指数（行业标准 NB/T 10248-2019）。

$$BI = (YM_BRIT + PR_BRIT) / 2 \quad (1)$$

$$YM_BRIT = (YMC - YM_{min}) / (YM_{max} - YM_{min}) \times 100\% \quad (2)$$

$$PR_BRIT = (PRC - PR_{max}) / (PR_{min} - PR_{max}) \times 100\% \quad (3)$$

式中 YMC 和 PRC — 计算的杨氏模量 (GPa) 和泊松比
 YM_{max} 和 YM_{min} — 杨氏模量 (GPa) 的最大值和最小值
 PR_{max} 和 PR_{min} — 泊松比的最大值和最小值

YM_BRIT 和 PR_BRIT —杨氏模量和泊松比计算的脆性

BI —岩石脆性指数

$$BI = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \tag{4}$$

式中 σ_c —单轴抗压强度, MPa

σ_t —单轴抗拉强度, MPa

BI —岩石脆性指数

利用杨氏模量和泊松比, 计算了含方沸石泥质云岩、含云泥质方沸石岩、含方沸石云质泥岩以及云质泥岩四种不同岩石的脆性, 分别为 83.88%、73%、58.52%和 48.91%; 同时根据单轴力学压缩试验所得出的单轴抗压强度和单轴抗拉强度, 利用公式 4 计算了以上四种不同岩石的脆性指数, 分别为 83.32%、81.98%、78.86%和 68.99%。通过以上两种方法计算岩石脆性指数的结果可知, 总体上方沸石岩和云岩的脆性相对较大, 且在相同的应力条件下, 随着泥质含量的增加, 岩石产生裂缝由易变难, 依次为: 含方沸石泥质云岩—含云泥质方沸石岩—含方沸石云质泥岩—云质泥岩(图 10)。

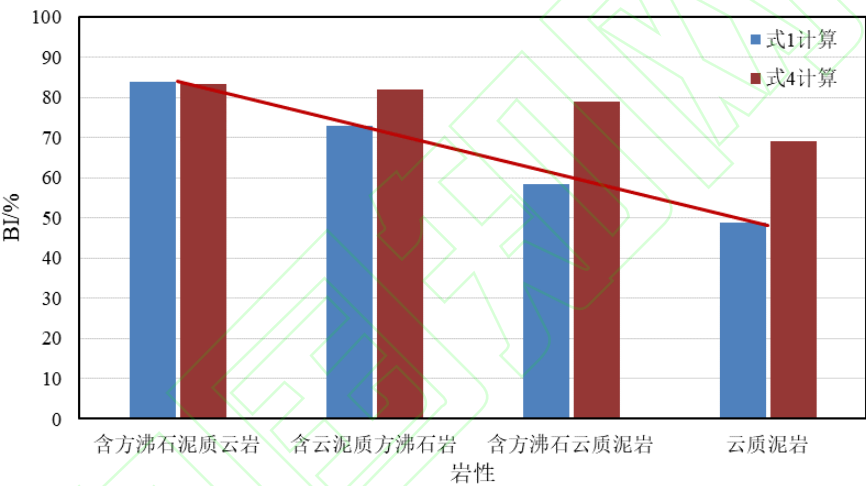


图 10 不同岩性脆性指数对比

Fig. 10. Comparison of Brittleness Index Among Different Lithologies

4 优质储层分布规律及预测

4.1 优质储层发育控制因素分析

白云岩储层岩性按照产状可分为纹层状白云岩和块状白云岩, 主要分布在 c7~c10 层中。纹层状白云岩一般表现为白云石纹层与黏土纹层或长英质纹层频繁互层, 常见较好的油气显示, 具备源—储分离和源—储共生的特征, 多口钻井取心具有此特征, 如雷 57、雷 88、雷 37、雷 29-15 等井; 块状白云岩厚度多在 2~30 cm 之间, 可以看作是广义的“夹层型”页岩油储层, 油气源—储耦合类型为源—储分离。

白云岩沉积时一般陆源碎屑供给减小, 处于咸水、干旱、贫氧—还原半深湖环境, 常发育泥云(灰)质湖底微相。储层岩性主要为白云岩、泥质白云岩, 脆性大, 含油气性较好, 岩石晶间孔隙、溶蚀孔隙以及裂缝发育, 孔隙度和渗透率相关性差, 孔隙多为孤立微孔或 2~3 个微孔组成的微孔体, 集中分布在 0.3~0.4 μm , 有效喉道长度分布在 1~20 μm , 储层类型以孔隙—裂缝型为主。白云石化作

用的“减体积”效应增加储层孔隙空间，构造作用产生裂缝，并沿裂缝发育溶孔和溶洞，从而增加储层储渗性能。白云岩储层主要集中分布在该区北部（雷 15 井、雷 84 井、雷 53 井、雷 37 井及雷 88 等井）的 c7~c10 层中。

4.2 “甜点”评价标准及预测

“甜点”评价是非常规油气勘探的重点工作，指引评价井与开发井的精确部署(邓达振等, 2025; 谭伏霖等, 2024)。研究从单井评价入手，使用储层岩性、物性、含油气性以及工程品质中的多种参数，并对这些参数进行融合计算，进而对单井进行合理的评价。综合各单井评价标准，得到适用于西部凹陷雷家地区非常规油气勘探的储层综合评价标准。在单井评价的基础上，在偏心率尺度的层序地层格架内对比多井的储层评价结果，进而分析“甜点”在层序格架内横向的分布和变化规律。结合叠前地震反演结果，对 c7~c10 时期白云岩储层的“甜点”发育范围进行了预测。

4.2.1 基于多属性信息融合的单井评价

从储层岩性、物性、含油气性和工程品质出发，并对不同参数分配权重，构建储层综合评价指数（Reservoir Quality Index, RQI），并对 ROI 使用 k-means 聚类分析划分储层类型，评价结果更加全面。

评价方法主要包括评价参数选择、综合评价指数计算、评价指数聚类分析和评价参数整理并建立单井评价标准四个步骤（图 11）。评价参数选择涉及储层的岩性、物性、含油气性和工程品质，岩性可选用长英质、碳酸盐、黏土及黄铁矿等矿物指标，物性可选用孔隙度、渗透率等指标，含油气性可选用 S_1 、TOC 和含油饱和度等指标，工程品质可选用脆性、杨氏模量、泊松比、最小水平应力差和最小应力差等指标，每种参数中的不同指标使用熵权法进行权重分析，即可分别将岩性、物性、含油气性和工程品质处理形成一组数据，以备综合评价指数计算使用。

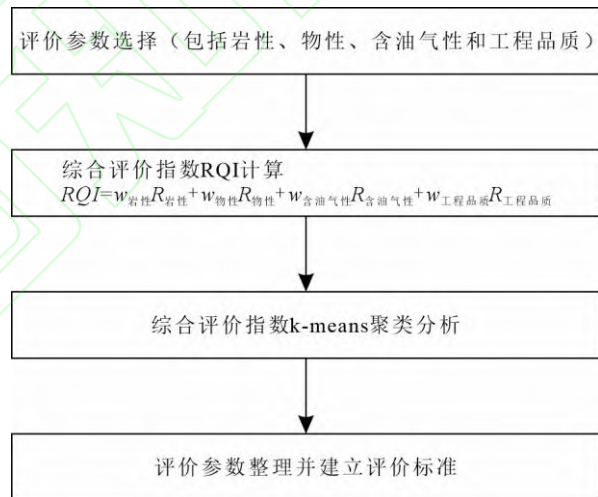


图 11 单井储层评价流程图

Fig. 11. Single-Well Reservoir Evaluation Flowchart

综合评价指数的计算使用专家打分法得到岩性、物性、含油气性和工程品质的权重分别为 0.1，0.2，0.5 和 0.2，计算公式如式 5。对综合评价指数进行 k-means 聚类分析(M. et al, 2023; Shuxin and Xiangdong, 2021; 王森等, 2022)，并筛选不同类型储层对应的参数进行整理建立评价标准。

$$RQI = 0.1 \cdot R_{\text{岩性}} + 0.2 \cdot R_{\text{物性}} + 0.5 \cdot R_{\text{含油气性}} + 0.2 \cdot R_{\text{工程品质}} \quad (5)$$

4.2.2 单井评价效果

基于上述单井评价方法对雷 88-H501 导井和雷 97 井两口井进行了评价（图 12a）。雷 88-H501 导井针对 c7~c10 层进行了约 131 m 的连续取心，具备岩性、物性、含油气性和工程品质相关的分析

测试资料，为纵向上评价储层提供了丰富的数据。雷 88-H501 导井储层评价分析井段 2792~2923 m，c7~c10 层，参与计算的储层参数指标为方沸石、黏土、长英质和碳酸盐矿物，孔隙度，渗透率，TOC，S₁，泊松比，杨氏模量，脆性矿物含量。I 类储层主要分布在 c7 和 c9 层中，岩性泥质白云岩为主，泥云质湖底微相；雷 97 井储层评价分析井段 2970~3328 m，c4~c13 层，储层参数指标包括方沸石、黏土、长英质和碳酸盐矿物，孔隙度，TOC，S₁，泊松比，杨氏模量，脆性矿物含量。I 类储层主要分布在 c4 层和 c7~c9 层中，岩性主要为泥质白云岩、方沸石质白云岩，泥云质湖底微相，其中 c7~c9 层已经试油，试油井段为 3116.7~3210 m，日油 6.99 t；此外 c12 层中亦见 I 类储层，岩性以灰质泥页岩为主，泥质湖底微相。综合井单井储层评价的结果，结合地质品质和工程品质关键参数，构建了该区“甜点”评价标准（表 4）。

表 4 西部凹陷雷家地区沙四段储层“甜点”评价标准

Table 4. Evaluation Criteria for Reservoir “Sweet Spots” in Es₄, Leijia Area, Western Sag

储层 类型	地质品质					工程品质		
	含油 饱和度,%	TOC,%	S ₁ ,mg/g	孔隙度,%	优势 岩性 厚度 ,m	脆性矿物 含量,%	杨氏模量,GPa	地层 压力 系数
I 类	≥60	≥3	≥4	≥6	≥30	≥60	≥30	1.2
II 类	40~60	1.5~3	2~4	3~6	10~30	40~60	20~30	1~1.2
III 类	< 40	< 1.5	< 2	< 3	< 10	< 40	< 20	< 1

4.2.3 层序格架内的优质储层分布规律

碳酸盐岩的发育与天文旋回有着重要的联系，雷家地区位于北半球中低纬度地区，气候的周期性变化主要受长偏心率和岁差共同控制。研究发现长偏心率滤波曲线与日照量曲线的变化幅度具有较好的耦合关系，极大值点附近区域，地球轨道更扁，日照量变化大，季节对比和季风作用增强，雨水丰富，陆源输入大，还原的沉积环境，容易沉积泥页岩，如 sq3 和 sq6 期，不利于形成优质的白云岩储层；极小值点附近区域，地球轨道接近圆形，日照量变化幅度减弱，季风作用减弱，陆源输入小，盐度大，弱氧化-氧化的沉积环境，容易沉积碳酸盐岩，如 sq4 和 sq5 期中的 c7 层和 c9 层（长偏心率周期 E4 和 E5 的下半个周期），水体由浅变深，沉积了多套灰岩，经后期的白云石化作用，形成现在优质的白云岩储层（图 12、图 13）。

在单井评价结果的基础上，结合各探井试油结果，在已建立的偏心率尺度的层序格架内分析了“甜点”（I 类储层）纵横向的分布规律（图 13a）。整体来看，白云岩储层的“甜点”主要分布在 c7~c8 层和 c9~c10 层中，印证了优质储层在层序格架内分布规律的合理性。在 c7~c8 层中，由于该区北部雷 88-H501 导井-雷 37 井-雷 97 井-雷 53 井等井区发育碳酸盐岩，而南部的雷 93 井-雷 99 井-雷 88-59-85 井-雷 111 井-曙 150 井主要发育云（灰）质泥岩、泥页岩，发生较为明显相变，结合试油以及单井储层评价结果，该单元中“甜点”主要发育在北部的白云岩储层中，由于碳酸盐岩逐渐向南减少，雷 37 井（日油 7.08 t）、雷 88-H501 导井的“甜点”主要分布在五级层序的 ssq10~ssq11 中，而在雷 93 井、雷 88-59-85 井以及曙 50 井等南部井区，“甜点”发育减少或者不发育。在 c9~c10 层

中，该单元“甜点”较为发育，并且横向上也较为连续，具备较好的勘探潜力。但需要注意的是由于该区南北岩性的差异，使得该单元储层类型具备多元性，北部雷 88-H501 导井-雷 37 井-雷 97 井-雷 53 井等井区为碳酸盐岩储层，主要分布在五级层序 ssq13、ssq14 以及 ssq15 上半旋回中；而在雷 93 井-雷 99 井-雷 88-59-85 井-雷 111 井-曙 150 井等井区，“甜点”主要发育在五级层序 ssq13 上半旋回、ssq14、ssq15 以及 ssq16 下半旋回中。雷 93 井、雷 99 井和雷 53 井取得了较好的试油成果，其中雷 93 井日油 13.38 t，雷 99 井日油 11.64 t，雷 53 井日油 4.89 t。

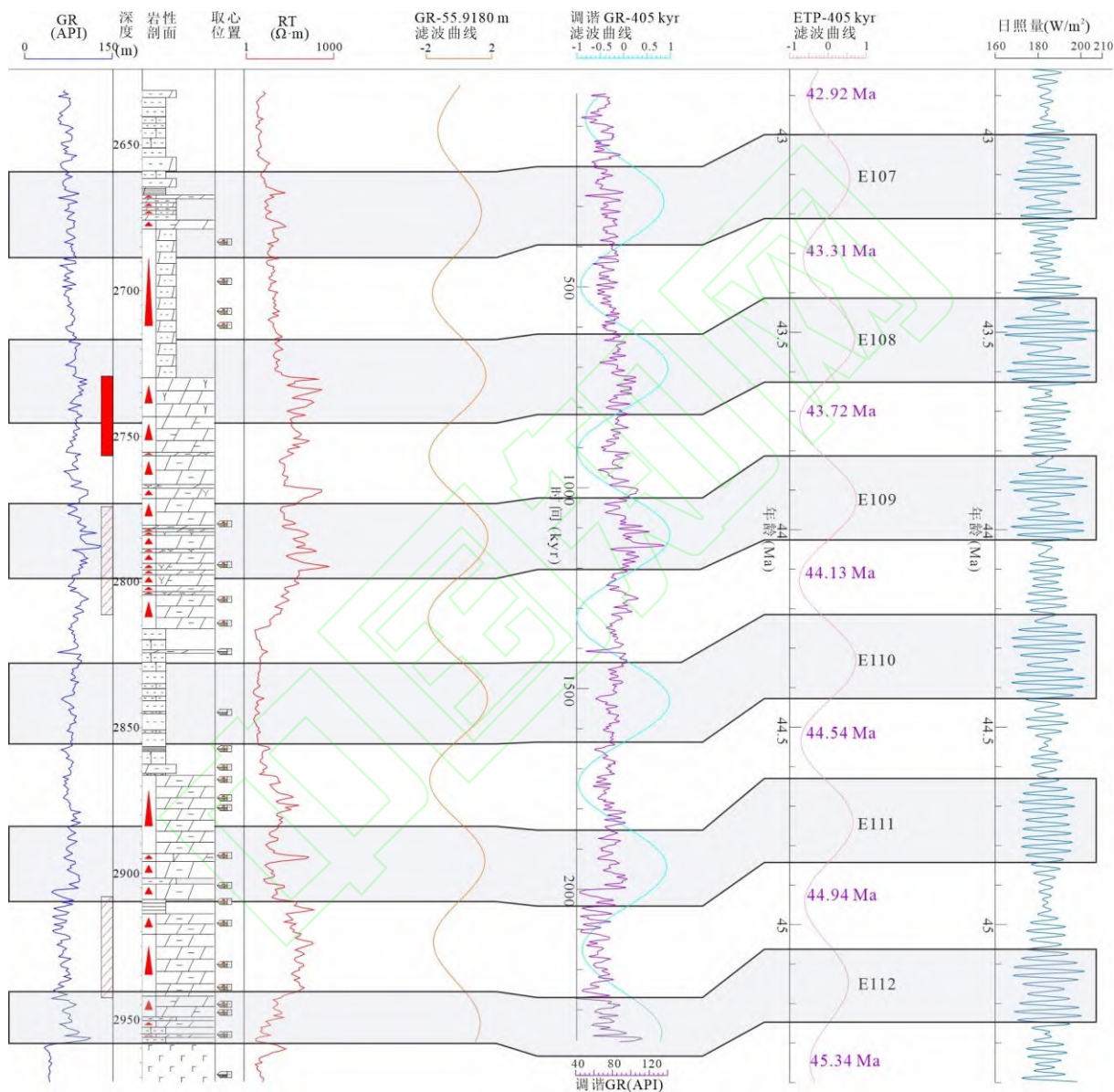
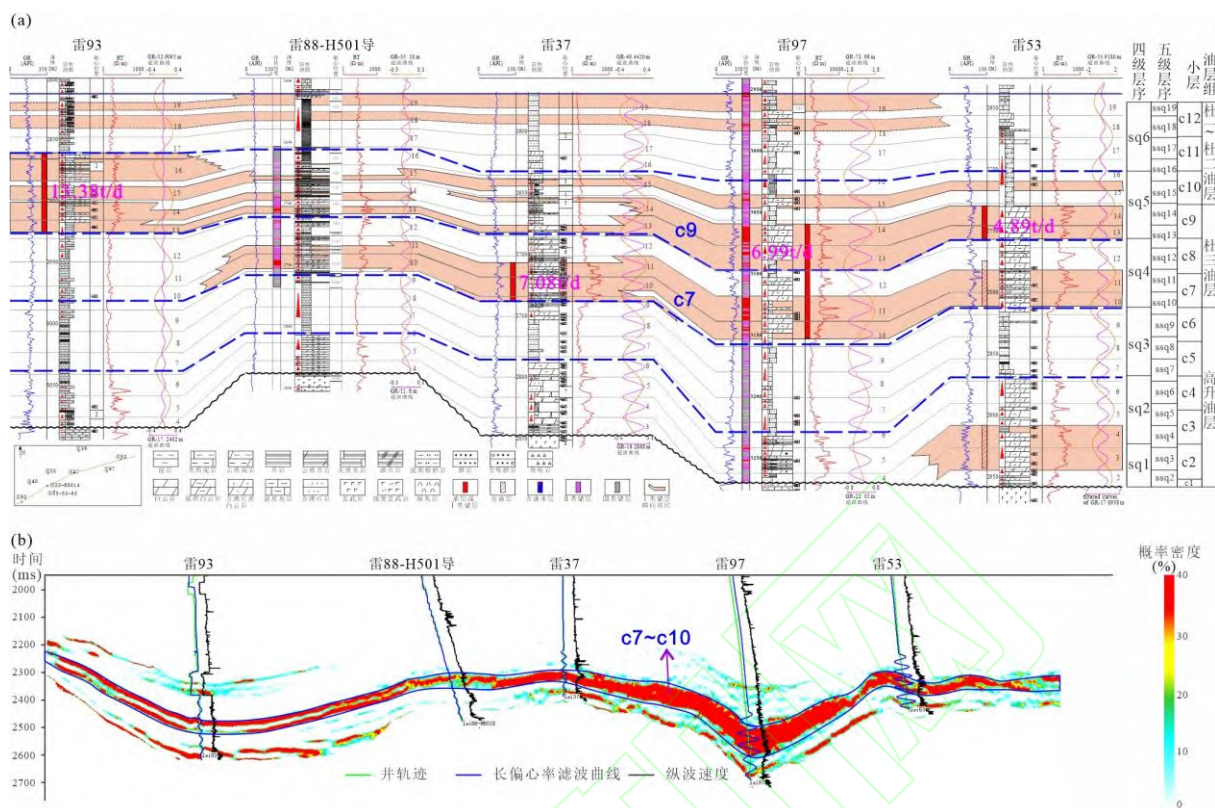


图 12 雷 53 井北纬 65 度日照量对照关系(Laskar et al, 2011; Li et al, 2025)

Fig. 12. Relationship between solar insolation at 65°N and Well Lei 53 (Laskar et al, 2011; Li et al, 2025)



(a) 层序格架内“甜点”分布规律，单井柱状图右边为偏心率滤波曲线；(b) 叠前 AVO 反演剖面

图 13 雷 93 井-雷 88-H501 导井-雷 37 井-雷 97 井-雷 53 井甜点发育规律

Fig. 13. Distribution Pattern of Reservoir Sweet Spots Along Wells Lei 93 – Lei 88-H501D – Lei 37 – Lei 97 – Lei 53

4.2.4 “甜点”发育有利区预测

上文通过单井资料研究了优质储层在层序格架内的分布规律，在此基础上使用雷家地区“两宽一高”叠前 AVO 反演地震资料对此结果进行了验证，地震反演结果与地质预测结果较为相符，如在雷 97 井 c7~c10 层的 I 类储层厚度大，在雷 93 井中井震结果均显示在 c7~c10 层的上部发育 I 类储层（图 13b）。鉴于此，基于叠前地震反演，对西部凹陷雷家地区沙四段 c7~c10 层的“甜点”发育有利区域进行了预测，雷家地区 c7~c10 层甜点集中发育在中斜坡带，呈北东走向分布，并被北东向的断裂分隔成多个独立的区域，如雷 93-雷 88-H501 导井区，雷 97-雷 53-雷 84-雷 29-15 井区（图 14）。根据预测结果，优先在雷 93-雷 88-H501 导井区部署雷 88-H209 水平井，该井水平段长 1527 m，I 类甜点层 1081.1 m/34 层，II 类甜点层 385.4 m/32 层，两类甜点钻遇率 84.9%。对雷 88-H209 井实施 25 段体积压裂，累计注入压裂液 57452 m³，支撑剂 4437 m³，该井 2024 年 11 月 3 日放喷，压后采用 3.5 mm 油嘴生产，稳定日产油 20 t，阶段累产油 1738 t，取得较好效果。

5 结论

(1) 西部凹陷雷家地区沙四段中存在明显的天文轨道周期信号，通过对自然伽马数据使用 MTM 频谱分析，可知沙四段中存在 6 个长偏心率周期（相当于四级层序），~19 个短偏心率周期（相当于五级层序）。沙四段共划分 c1~c12 12 个小层。高升油层包括 c1~c6 6 个小层，杜三油层与 c7~c9

层对应，杜二油层和杜一油层与 c10~c12 层对应。

(2) 白云岩储层岩性主要为泥—粉晶白云岩、含泥泥晶云岩、泥质白云岩以及方沸石质云岩，白云石颗粒小，晶内（间）溶孔发育，溶蚀孔隙（溶洞）常沿着裂缝发育；储层孔喉细小、分选差、孔隙结构差，需依赖微孔隙和微裂缝发育形成有效储层；油气常赋存于白云石晶内（间）溶孔和裂缝中；方沸石质岩石和白云岩整体脆性较高，易于形成裂缝。

(3) 在 c7~c8 层中，“甜点”主要发育在该区北部，分布在五级层序的 ssq10~ssq11 中；在 c9~c10 层中，北部雷 88-H501 导井-雷 37 井-雷 97 井-雷 53 井等井区分布在五级层序 ssq13、ssq14 以及 ssq15 上半旋回中，在雷 93 井-雷 99 井-雷 88-59-85 井-雷 111 井-曙 150 井等井区，“甜点”主要发育在五级层序 ssq13 上半旋回、ssq14、ssq15 以及 ssq16 下半旋回中。

(4) 雷家地区 c7~c10 层甜点集中发育在中斜坡带，呈北东走向分布，并被北东向的断裂分隔成多个独立的区域，主要分布在雷 93-雷 88-H501 导井区和雷 97-雷 53-雷 84-雷 29-15 井区。

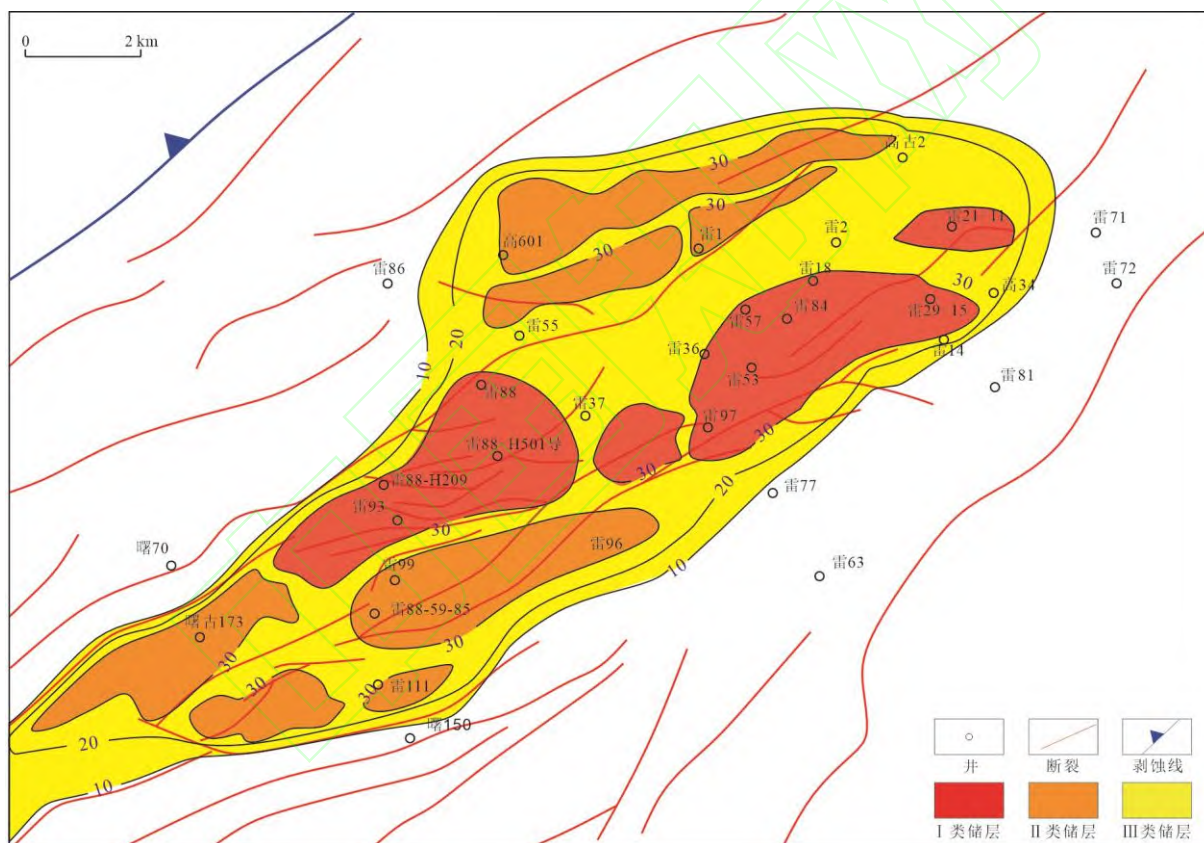


图 14 西部凹陷雷家地区沙四段 c7~c10 层甜点评价

Fig. 14. Sweet Spot Assessment for c7-c10 Layers in Es₄, Leijia Area, Western Sag

References

- Bao, R., Sheng, X., Meng, X., et al., 2023. 100 Ky Pacing of the East Asian Summer Monsoon Over the Past Five Glacial Cycles Inferred From Land Snails. *Geology*, 51(2): 179—183. <https://doi.org/10.1130/G50243.1>
- Bau, M., Balan, S., Schmidt, K., et al., 2010. Rare Earth Elements in Mussel Shells of the Mytilidae Family as Tracers for Hidden and Fossil High-Temperature Hydrothermal Systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 299(3–4): 310—316. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.011>
- Berger, A., 2021. Milankovitch, the Father of Paleoclimate Modeling. *Climate of the Past*, 17(4): 1727—1733. <https://doi.org/10.5194/cp-17-1727-2021>
- Chen, J. D., 1982. Block Faulting Differential Activities and Subtle Traps. *Petroleum Geology & Experiment*, 4(04): 254—262. (in Chinese with English abstract)
- Chen, Z. J., 2018. Characteristics and Genetic Analysis of Analcime-Bearing Rocks in the Fourth Member of the Shahejie Formation, Western Sag of the Liaohe Depression. [D]. Southwest Petroleum University. (in Chinese with English abstract)
- Deng, D. Z., Zhao, Y. H., Riel, B., et al., 2025. Quantification and Unsupervised Clustering Analysis of Morphological Characteristics of Seamounts in South China Sea Basin. *Earth Science*, 50(01): 217—233. (in Chinese with English abstract)
- Debruyne, D., Hulsbosch, N., Muchez, P., 2016. Unraveling Rare Earth Element Signatures in Hydrothermal Carbonate Minerals Using a Source–Sink System. *Ore Geology Reviews*, 72: 232—252. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.07.022>
- Du, J. M., Long, P. Y., Yang, P., et al., 2020. Characteristics of Carbonate Reservoir and Its Forming Conditions in Continental Lake Basin of China. *Advances in Earth Science*, 35(01): 52—69. (in Chinese with English abstract)
- Editorial Committee of Liaohe Oil and Gas Area, 2022. *Petroleum Geology of China (Vol. 4): Liaohe Oil and Gas Area*. [M]. Petroleum Industry Press. (in Chinese with English abstract)
- Fan, X. J., Teng, X. H., Wang, C. L., et al., 2025. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment Mechanism of the Lower Member of the Xingouzui Formation in the Jiangnan Basin During the Early Eocene. *Earth Science*, 50(05): 1953—1967. (in Chinese with English abstract)
- Fang, R., Dai, Z. Y., Chen, Z. J., et al., 2020. Characteristics and Genesis of Analcites in Different Occurrence States: A Case Study of the Fourth Member of Shahejie Formation in the Leijia Area of the Western Liaohe Depression. *Acta Mineralogica Sinica*, 40(06): 734—746. (in Chinese with English abstract)
- Frei, R., Døssing, L. N., Gaucher, C., et al., 2017. Extensive Oxidative Weathering in the Aftermath of a Late Neoproterozoic Glaciation—Evidence From Trace Element and Chromium Isotope Records in the Urucum District (Jacadigo Group) and Puga Iron Formations (Mato Grosso do Sul, Brazil). *Gondwana Research*, 49: 1—20. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.003>
- Guan, X., Liu, Y. W., Ren, Z. Y., et al., 2023. Characterization and Comparison of Pore Structure and Connectivity of Anthracite Based on CT Three-Dimensional Reconstruction. *Unconventional Oil & Gas*, 10(01): 69—76. (in Chinese with English abstract)
- Huang, L., 2016. Reservoir Characteristics and Genetic Mechanism of Lacustrine Carbonate—A Case Study of the Fourth Member of the Shahejie Formation, Western Sag, Liaohe Depression. [D]. Southwest Petroleum University. (in Chinese with English abstract)
- Jiao, M. Y., Yuan, Y. J., Wang, J., et al., 2024. Impacts of Major Geologic Events on Sedimentary Paleoenvironments and Organic Matter Enrichment of Shales During the Ordovician–Silurian Boundary: A Case Study of Shales of the Wufeng–Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangtze Regions.

- Unconventional Oil & Gas, 11(05): 82—94. (in Chinese with English abstract)
- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., et al., 2011. La2010: A New Orbital Solution for the Long-Term Motion of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 532: A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- Li, M., Hinnov, L., Kump, L., 2019. Acycle: Time-Series Analysis Software for Paleoclimate Research and Education. *Computers & Geosciences*, 127: 12—22. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.02.011>
- Li, Q. H., Xiao, H., Liang, C. Y., et al., 2023. Study on Compressibility Evaluation of Shale Oil Reservoir in Fu-2 Section. *Unconventional Oil & Gas*, 10(05): 134—144. (in Chinese with English abstract)
- Li, T., Dai, Z. Y., Li, Y., et al., 2022. Genesis of Lacustrine Dolomites of the Fourth Member of Paleogene Shahejie Formation in the Leijia Area, Western Liaohe Depression. *Lithologic Reservoirs*, 34(02): 75—85. (in Chinese with English abstract)
- Li, T. J., 2016. Discussion on Lithology Prediction Methods for Tight and Complex Reservoirs: A Case Study of Dolomite in the Fourth Member of the Shahejie Formation, Leijia Area, Western Sag of the Liaohe Depression. *Petroleum Geology and Engineering*, 30(04): 71—74. (in Chinese)
- Li, X. G., Jin, K., Zhou, Y., 2016. Lacustrine Carbonate Reservoir Properties of the Sha-4 Member in the Leijia Area. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 23(04): 25—28. (in Chinese with English abstract)
- Li, Y., Li, X. G., Zhang, T. S., et al., 2024. Identification of Astronomical Cycles in Fine-Grained Rocks and Their Application in High-Resolution Stratigraphic Division: A Case Study of the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Leijia Area, Western Sag of the Liaohe Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024: 1—19. (in Chinese with English abstract)
- Li, Y., Li, X., Zhang, T., et al., 2025. Identification of Astronomical Cycles in Fine-Grained Rocks and Their Application in High-Resolution Stratigraphic Correlation: A Case Study of the Fourth Member of the Shahejie Formation in the Leijia Area, Western Sag of the Liaohe Depression, China. *Geological Journal*, 60(6): 1515—1531. <https://doi.org/10.1002/gj.5140>
- Liang, D. G., Ran, L. H., Dai, D. S., et al., 2011. Re-recognition of the Prospecting Potential of Jurassic Large-Area and Unconventional Oil in the Central-Northern Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(01): 8—17. (in Chinese with English abstract)
- Liang, H. D., Shen, S. W., Liu, X. T., et al., 1992. The Age of the Volcanic Rocks and Their Geological Time in the Liaohe Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 13(02): 35—41. (in Chinese with English abstract)
- Liu, S. J., Cao, Y. C., Liang, C., 2019. Lithologic Characteristics and Sedimentary Environment of Fine-Grained Sedimentary Rocks of the Paleogene in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography*, 21(03): 479—489. (in Chinese with English abstract)
- Liu, X. L., 2020. Fluid Charging Periods of Lacustrine Carbonate Rock for the Leijia Area in the Liaohe Western Depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 27(04): 432—437. (in Chinese with English abstract)
- Liu, Z., Zhang, J. H., Wang, J., et al., 2022. Review and Prospect of Research on Lacustrine Carbonate Rocks. *Oil Geophysical Prospecting*, 57(02): 487—497. (in Chinese with English abstract)
- Luan, X. W., Kong, X. X., Zhang, J. L., et al., 2024. Astronomical Forcing of Origins of Eocene Carbonate-Bearing Fine-Grained Sedimentary Rock in Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(02): 688—700. (in Chinese with English abstract)
- Lv, X. D., Tong, G. H., Wang, P. H., 2003. Reservoir Characteristics and Prediction for the South of Gaosheng Oilfield. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 10(06): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- M. I., A., E. E., A., Laith, A., et al., 2023. K-Means Clustering Algorithms: A Comprehensive Review, Variants Analysis, and Advances in the Era of Big Data. *Information Sciences*, 622: 1—25. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139>
- Mann, M. E., Lees, J. M., 1996. Robust Estimation of Background Noise and Signal Detection in Climatic

- Time Series. *Climatic Change*, 33(3): 409—445. <https://doi.org/10.1007/BF00142586>
- Meng, W. G., Chen, Z. Y., Zhao, H. M., 2010. Main Factors Controlling Hydrocarbons and Distribution of Subtle Reservoirs in the Shuguang–Leijia Area, Western Sag of the Liaohe Oilfield. *China Petroleum Exploration*, 15(03): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- Meyers, S. R., 2015. The Evaluation of Eccentricity-Related Amplitude Modulation and Bundling in Paleoclimate Data: An Inverse Approach for Astrochronologic Testing and Time Scale Optimization. *Paleoceanography*, 30(12): 1625—1640. <https://doi.org/10.1002/2015PA002850>
- Reijmer, J. J., Blok, C. N., El Hussein, A., et al., 2022. Petrophysics and Sediment Variability in a Mixed Alluvial to Lacustrine Carbonate System (Miocene, Madrid Basin, Central Spain). *The Depositional Record*, 8(1): 317—339. <https://doi.org/10.1002/dep2.158>
- Robbins, L. J., Lalonde, S. V., Planavsky, N. J., et al., 2016. Trace Elements at the Intersection of Marine Biological and Geochemical Evolution. *Earth-Science Reviews*, 163: 323—348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.013>
- Shan, J. F., Huang, S. Q., Li, L., 2014. Sedimentary Environment of Lacustrine Carbonate Rocks in Leijia Area in West Sag of Liaohe Depression. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 21(05): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- Shi, J. Y., Jin, Z. J., Liu, Q. Y., et al., 2023. Application of Astronomical Cycles in Shale Oil Exploration and in High-Precision Stratigraphic Isochronous Comparison of Organic-Rich Fine-Grained Sedimentary Rocks. *Earth Science Frontiers*, 30(04): 142—151. (in Chinese with English abstract)
- Shi, Z., Xia, G. Q., Hao, X. W., et al., 2024. Carbon and Oxygen Isotopic Composition and Paleoenvironmental Characteristics of Eocene–Miocene Lacustrine Carbonate Rocks in the Tuotuohe Basin, Qinghai–Tibet Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024: 1—16. (in Chinese with English abstract)
- Shuxin, L., Xiangdong, L., 2021. Research on Density-Based K-Means Clustering Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 2137(1): 012058. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2137/1/012071>
- Song, B. R., Han, H. D., Cui, X. D., et al., 2015. Genesis of Lacustrine Analcime Dolomite in the Fourth Member of the Shahejie Formation, Paleogene, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography*, 17(01): 33—44. (in Chinese with English abstract)
- Talbot, M. R., 1990. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 80(4): 261—279. [https://doi.org/10.1016/0168-9622\(90\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0168-9622(90)90009-2)
- Tan, F. L., Sun, X. M., Cao, J. Z., et al., 2024. Petrogenetic Analysis of Lacustrine Analcite Dolostone in the Fourth Member of the Paleogene Shahejie Formation, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 11(06): 67—74. (in Chinese with English abstract)
- Tian, J., Wu, H. C., Huang, C. J., et al., 2022. Revisiting the Milankovitch Theory From the Perspective of the 405 ka Long Eccentricity Cycle. *Earth Science*, 47(10): 3543—3568. (in Chinese with English abstract)
- Wang, D. W., Li, J. Y., Liu, D., et al., 2024. Characterization of Capillary Pressure Curve and Pore-Throat Distribution Based on Reservoir Physical Parameters. *Unconventional Oil & Gas*, 11(04): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- Wang, S., Liu, C., Xing, S. J., 2022. Review on K-Means Clustering Algorithm. *Journal of East China Jiaotong University*, 39(05): 119—126. (in Chinese with English abstract)
- Wu, J., Jiang, Z. X., Tong, J. H., et al., 2016. Sedimentary Environment and Control Factors of Fine-Grained Sedimentary Rocks in the Upper Fourth Member of the Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag.

- Acta Petrolei Sinica, 37(04): 464—473. (in Chinese with English abstract)
- Wu, S. Q., Guo, L. B., Xu, S., et al., 2025. Lithofacies Types and Reservoir Characteristics of Lacustrine Carbonate Rocks in the Third Member of the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag. China Petroleum Exploration, 30(02): 42—53. (in Chinese with English abstract)
- Xu, S., Gou, Q., 2023. The Importance of Laminae for China Lacustrine Shale Oil Enrichment: A Review. Energies, 16(4): 1661. <https://doi.org/10.3390/en16041661>
- Yan, W. P., Yang, T., Li, X., et al., 2014. Geological Characteristics and Hydrocarbon Exploration Potential of Lacustrine Carbonate Rock in China. China Petroleum Exploration, 19(04): 11—17. (in Chinese with English abstract)
- Yao, Y. M., 1994. The Bohai Gulf Basin, Vol. 4: Tertiary in Petroliferous Regions of China. [M]. China Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- Zhang, Y. R., Zhang, G. L., Yang, J., et al., 2024. Characteristics of Mixed Sedimentation in the Member 4 of Shahejie Formation of Paleogene at Leijia Area of Western Sag of Liaohe Oilfield. Journal of Palaeogeography, 26(06): 1498—1515. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, H. M., 2012. Mixed Sedimentary Characteristics of the Fourth Member of the Shahejie Formation, Leijia Area, Western Sag of the Liaohe Depression. Acta Sedimentologica Sinica, 30(02): 283—290. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, X. Z., Zeng, J. H., Han, G. M., et al., 2020. Charging Characteristics and Accumulation Process of Deep Low-Permeability (Tight) Sand Gas Reservoirs in Banqiao Sag, Huanghua Depression. Oil & Gas Geology, 41(05): 913—927. (in Chinese with English abstract)
- Zhao, Y. Y., Li, S. Z., Li, D., et al., 2019. Rare Earth Element Geochemistry of Carbonates and Their Paleoenvironmental Implications. Geotectonica et Metallogenia, 43(01): 141—167. (in Chinese with English abstract)

中文参考文献

- 陈景达, 1982. 块断运动与隐蔽圈闭——以辽河西部凹陷为例[J]. 石油实验地质, 4(04): 254—262。
- 谌治君, 2018. 辽河西部凹陷沙四段含方沸石岩类特征及其成因分析[D]. 西南石油大学。
- 单俊峰, 黄双泉, 李理, 2014. 辽河坳陷西部凹陷雷家湖相碳酸盐岩沉积环境[J]. 特种油气藏, 21(05): 7—11。
- 邓达振, 赵阳慧, Riel Bryan, 等, 2025. 南海海盆海山形态特征的定量化和无监督聚类分析[J]. 地球科学, 50(01): 217—233。
- 杜江民, 龙鹏宇, 杨鹏, 等, 2020. 中国陆相湖盆碳酸盐岩储集层特征及其成藏条件[J]. 地球科学进展, 35(01): 52—69。
- 范晓杰, 滕晓华, 王春连, 等, 2025. 早始新世江汉盆地新沟嘴组下段沉积环境与有机质富集机理[J]. 地球科学, 50(05): 1953—1967。
- 方锐, 代宗仰, 谌治君, 等, 2020. 不同赋存状态方沸石的特征与成因——以辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段为例[J]. 矿物学报, 40(06): 734—746。
- 关欣, 刘育伟, 任重阳, 等, 2023. 基于CT三维重构的无烟煤孔隙结构及连通性特征对比表征[J]. 非常规油气, 10(01): 69—76。
- 黄蕾, 2016. 湖相碳酸盐岩储层及成因机理研究[D]. 西南石油大学。
- 焦梦妍, 袁玉洁, 王俊, 等, 2024. 奥陶纪/志留纪之交时期重大地质事件对沉积古环境及页岩有机质富集的影响——以中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. 非常规油气, 11(05): 82—94。
- 李泉辉, 肖晖, 梁朝阳, 等, 2023. 阜二段页岩油储层可压性评价研究[J]. 非常规油气, 10(05): 134—144。
- 李甜, 代宗仰, 李阳, 等, 2022. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段湖相白云岩成因[J]. 岩性油气

- 藏, 34(02): 75—85。
- 李铁军, 2016. 致密复杂储层岩性预测方法探讨——以辽河西部凹陷雷家地区沙四段白云岩为例[J]. 石油地质与工程, 30(04): 71—74。
- 李晓光, 金科, 周艳, 2016. 雷家地区沙四段湖相碳酸盐岩油气藏特征分析[J]. 特种油气藏, 23(04): 25—28。
- 李阳, 李晓光, 张廷山, 等, 2024. 细粒岩天文旋回识别及在精细地层划分上的应用——以辽河西部凹陷雷家地区沙四段为例[J]. 沉积学报, 2024: 1—19。
- 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 等, 2011. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 32(01): 8—17。
- 梁鸿德, 申绍文, 刘香婷, 等, 1992. 辽河断陷火山岩地质年龄及地层时代[J]. 石油学报, 13(02): 35—41。
- 辽河油气区编纂委员会, 2022. 中国石油地质志(卷四)·辽河油气区[M]. 石油工业出版社。
- 刘姝君, 操应长, 梁超, 2019. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩特征及沉积环境[J]. 古地理学报, 21(03): 479—489。
- 刘晓丽, 2020. 辽河西部凹陷雷家地区湖相碳酸盐岩流体充注期次[J]. 断块油气田, 27(04): 432—437。
- 刘震, 张军华, 王静, 等, 2022. 湖相碳酸盐岩研究进展及展望[J]. 石油地球物理勘探, 57(02): 487—497。
- 栾旭伟, 孔祥鑫, 张金亮, 等, 2024. 天文旋回约束下东营凹陷中始新统含碳酸盐细粒沉积岩成因分析[J]. 沉积学报, 42(02): 688—700。
- 吕小东, 佟国辉, 王佩虎, 2003. 高升油田南部储层特征及储层预测[J]. 特种油气藏, 2003(06): 26—29。
- 孟卫工, 陈振岩, 赵会民, 2010. 辽河西部凹陷曙光—雷家地区隐蔽油气藏主控因素及分布规律[J]. 中国石油勘探, 15(03): 1—7。
- 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等, 2023. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J]. 地学前缘, 30(04): 142—151。
- 石柱, 夏国清, 郝夏炜, 等, 2024. 青藏高原沱沱河盆地始新世—中新世湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征与古环境意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2024: 1—16。
- 宋柏荣, 韩洪斗, 崔向东, 等, 2015. 渤海湾盆地辽河坳陷古近系沙河街组四段湖相方沸石白云岩成因分析[J]. 古地理学报, 17(01): 33—44。
- 谭伏霖, 孙晓梦, 曹健志, 等, 2024. 基于因子分析的页岩油储层“甜点”预测与主控地质因素分析[J]. 非常规油气, 11(06): 67—74。
- 田军, 吴怀春, 黄春菊, 等, 2022. 从40万年长偏心率周期看米兰科维奇理论[J]. 地球科学, 47(10): 3543—3568。
- 王大为, 李金宜, 刘东, 等, 2024. 基于储层物性参数的毛管压力曲线和孔喉分布表征[J]. 非常规油气, 11(04): 1—9。
- 王森, 刘琛, 邢帅杰, 2022. K-means聚类算法研究综述[J]. 华东交通大学学报, 39(05): 119—126。
- 吴靖, 姜在兴, 童金环, 等, 2016. 东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段细粒沉积岩沉积环境及控制因素[J]. 石油学报, 37(04): 464—473。
- 吴世强, 郭丽彬, 徐尚, 等, 2025. 潜江凹陷潜江组三段湖相碳酸盐岩岩相类型及储层特征[J]. 中国石油勘探, 30(02): 42—53。
- 闫伟鹏, 杨涛, 李欣, 等, 2014. 中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 19(04): 11—17。
- 姚益民, 1994. 中国油气区第三系IV·渤海湾盆地油气区分册[M]. 石油工业出版社。
- 张雅茹, 张广璐, 杨俊, 等, 2024. 南海不同沉积环境黄铁矿的矿物学及原位微区地球化学研究[J].

古地理学报, 26(06): 1498—1515。

赵会民, 2012. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段混合沉积特征研究[J]. 沉积学报, 30(02): 283—290。

赵贤正, 曾溅辉, 韩国猛, 等, 2020. 渤海湾盆地黄骅坳陷板桥凹陷深层低渗透(致密)砂岩气藏充注特征及成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 41(05): 913—927。

赵彦彦, 李三忠, 李达, 等, 2019. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 43(01): 141—167。

