

桂中坳陷下石炭统鹿寨组一段页岩 类型划分与测井识别*

黄玉越^{1,2} 王贵文^{1,2} 匡立春^{1,2} 覃英伦^{1,2,3} 王 松^{1,2}
党文乐^{1,2} 卓色强³ 毕少琛^{1,2} 赖 锦^{1,2}

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 广西能源集团有限公司, 广西南宁 530000

摘 要 桂中坳陷柳城区块下石炭统鹿寨组页岩气取得突破, 有望成为四川盆地以外海相页岩气的接替领域。但受地层非均质性及纵横向相变频繁的制约, 开展页岩类型识别和储集层评价存在困难。文中建立了基于“矿物组分+TOC 含量”的页岩类型划分方案, 利用元素—矿物转换最优化方程和 BP 神经网络模型分别实现页岩成分和 TOC 含量的测井识别与预测, 并采用成像测井动态切片和纽扣电极视电导率图像 2 种方法识别表征页岩纹层。通过精细刻画不同页岩类型的纹层发育程度和含气性特征, 阐明了研究区有利页岩类型及分布特征。研究表明: 鹿寨组一段发育 5 种典型页岩类型。受沉积古环境控制, 页岩分布呈现出较强的纵向非均质性。鹿寨组一段整体处于下斜坡相沉积环境, 纵向上①至⑦小层沉积水体逐渐变浅, 灰质含量减少而陆源碎屑供给增多, 总有机碳含量也逐渐降低, 页岩类型由富有机质硅质混合页岩、富有机质黏土质混合页岩逐渐相变为含有机质硅质混合页岩。其中③小层中富有机质硅质混合页岩与富有机质黏土质混合页岩的页岩组合类型有机质丰度高, 纹层组合类型及发育程度较优, 整体含气量和脆性均较高, 为研究区的有利页岩类型。

关键词 页岩类型 测井识别 纹层 BP 神经网络 鹿寨组 下石炭统 桂中坳陷

第一作者简介 黄玉越, 男, 1999 年生, 中国石油大学(北京)在读博士研究生, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学研究。E-mail: hyy990924@163.com。

通讯作者简介 王贵文, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作。E-mail: wanggw@cup.edu.cn。

中图分类号: P531 文献标志码: A

Shale type division and logging identification in the Member 1 of Luzhai Formation, Lower Carboniferous, Guizhong Depression

HUANG Yuyue^{1,2} WANG Guiwen^{1,2} KUANG Lichun^{1,2} QIN Yinglun^{1,2,3} WANG Song^{1,2}
DANG Wenle^{1,2} ZHUO Seqiang³ BI Shaochen^{1,2} LAI Jin^{1,2}

1 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

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

* 国家自然科学基金(编号: 42002133, 42072150)和中国石油—中国石油大学(北京)战略合作协议项目(编号: ZLZX2020-01-05-03)联合资助。[Cofunded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41872133, 42072150) and the strategic cooperation agreement between PetroChina and China University of Petroleum (Beijing) (No. ZLZX2020-01-05-03)]

收稿日期: 2024-05-28 改回日期: 2024-10-10

Abstract The shale gas of Luzhai Formation in Liucheng North block of Guizhong Depression has made a breakthrough and is expected to become a replacement field for marine shale gas outside Sichuan Basin. However, it is difficult to identify shale type and evaluate reservoir due to the formation heterogeneity and frequent transverse and horizontal phase transformation. In this paper, a shale type division scheme based on “mineral composition+TOC content” is established. Logging identification and prediction of shale composition and TOC content are realized by using elite-mineral conversion optimization equation and BP neural network model, respectively. The shale layers are identified and characterized by two methods: imaging logging dynamic slice and button electrode apparent conductivity image. By elaborating the stratification degree and gas bearing characteristics of different lithofacies types, the favorable shale types and distribution characteristics in the study area are described. The results show that five typical shale types are developed in the Member 1 of Luzhai Formation. Controlled by sedimentary palaeoenvironment, the shale distribution in the study area shows strong vertical heterogeneity. The member 1 of Luzhai Formation is located in the lower slope sedimentary environment as a whole, and the sedimentary water in the vertical layer (①~⑦) gradually becomes shallower, the content of gray matter decreases while the supply of terrigenous debris increases, and the total organic carbon content also gradually decreases. The shale type gradually changes from organic-rich siliceous mixed shale and organic-rich clayey mixed shale to organic-containing siliceous mixed shale. The shale assemblage types of organic-rich siliceous mixed shale and organic-rich clayey mixed shale in small layer ③ has high organic matter abundance, better laminae combination type and development degree, and higher overall gas content and brittleness, which are favorable shale types in the study area.

Key words shale type, logging identification, laminae, BP neural network, Luzhai Formation, Lower Carboniferous, Guizhong Depression

About the first author HUANG Yuyue, born in 1999, is a PhD candidate in China University of Petroleum (Beijing). He is engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: hy990924@163.com.

About the corresponding author WANG Guiwen, born in 1966, Ph.D is a professor and doctoral supervisor. He is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: wanggw@cup.edu.cn.

随着北美地区“页岩革命”的重大突破,全球范围内掀起了页岩油气等非常规油气的勘探开发热潮(Jarvie *et al.*, 2007; 邹才能等, 2022; 郭旭升等, 2023)。近年来,中国在四川盆地海相龙马溪组页岩气主力产层的规模效益开发取得成效,其地质勘探理论和评价技术体系也获得长足发展(赵建华等, 2016; 董大忠等, 2022; 何希鹏等, 2023)。实践表明,影响页岩油气井工业产能的储集层质量和工程压裂等关键因素很大程度上与页岩类型密切相关(Avanzini *et al.*, 2016; 李国欣等, 2021; 姜振学等, 2023)。因此,开展页岩类型划分与测井

识别评价,明确有利页岩类型发育特征及分布规律,对页岩储集层甜点评价和资源量有效评估具有重要意义(赖锦等, 2023; Qian *et al.*, 2023)。

页岩类型是在一定沉积环境下形成的页岩岩石特征,通常包括矿物成分、沉积构造、有机质含量等地质特征,是页岩油气勘探开发中评价储集层质量的基础(曾棒等, 2021; 刘惠民等, 2023; Han *et al.*, 2024)。大量研究表明,页岩类型在一定程度上控制着页岩的生烃潜力、储集性能与含气性,其纵向组合也与甜点分布密切相关(向克满等, 2023)。其次,不同页岩类型的矿物组分和纹层结

构对储集层可压裂性的贡献差异显著（熊周海等，2019；Huang *et al.*, 2023；武瑾等，2023）。目前普遍认为石英等脆性矿物有利于形成天然裂缝，进而在人工压裂中形成复杂缝网。此外，纹层的发育程度、延伸长度及组合类型等直接控制着岩石裂缝的扩展和分布，也是影响储集层可压裂性的关键要素（黄玉越等，2022；Pang *et al.*, 2023）。常压页岩气储集层勘探开发经验显示出地质甜点与工程甜点的重合度与一致性较低，影响水平井靶窗的选取。亟需通过页岩类型建立地质—工程双甜点耦合的桥梁，便于实现对强非均质性页岩储集层的测井评价和甜点划分。

滇黔桂地区晚古生代石炭系页岩具有沉积厚度大、有机质丰度高和热演化程度适中等特点，彰显出优越的页岩气勘探前景（覃英伦等，2022）。鹿寨组一段页岩类型多样、纵横向相变频繁、非均质性极强，制约着储集层精细评价及资源量有效评估。作者拟建立基于“矿物组分+有机质丰度”的页岩类型划分方案，通过新技术测井手段系统完成页岩类型识别与表征，精细刻画不同页岩类型的纹层发育程度和含气性等特征，最终明确研究区优势岩相类型，为高效开展海相浅层页岩气储集层评价提供科学指导。

1 区域地质概况

桂中坳陷位于扬子准地台南缘与华南加里东褶皱带的结合部位，属于华南地区滇黔桂盆地东北部的二级构造单元（图 1-a）。行政区划上属于广西壮族自治区北部，面积为 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。桂中坳陷北邻雪峰山隆起，东接桂林坳陷和大瑶山隆起，南邻大明山隆起，西接黔南坳陷、南盘江坳陷。经历 4 期构造演化，形成了现今的“四凹三凸一斜坡”构造格局：环江凹陷、宜山凹陷、红渡凹陷、象州凹陷、马山凸起、罗城凸起、柳江凸起和柳城斜坡（王祥等，2023）。

研究区所在柳城斜坡位于桂中坳陷东北缘，发育北北东向“雁列”式断裂，残留向斜在平面上沿断裂呈条带状展布（图 1-b）。区域上地层发育完整，下石炭统自下而上发育尧云岭组（ C_1y ）、鹿寨组（ C_1lz ）、黄金组（ C_1h ）、寺门组（ C_1s ）。其中鹿寨组自下而上分别为鹿一段（ C_1lz_1 ）、鹿二段（ C_1lz_2 ）和鹿三段（ C_1lz_3 ）。鹿寨组一段处于台盆相，以碳质页岩、硅质页岩和灰质页岩沉积为主。依据岩性组合和测井特征将其在纵向上进一步划分为①-⑦共 7 个小层。2021 年，滇黔桂地区页岩气战略选区勘查在桂融页 1 井石炭系鹿寨组获页岩气重要发现。钻探显示鹿寨组一段富有机质页岩具有

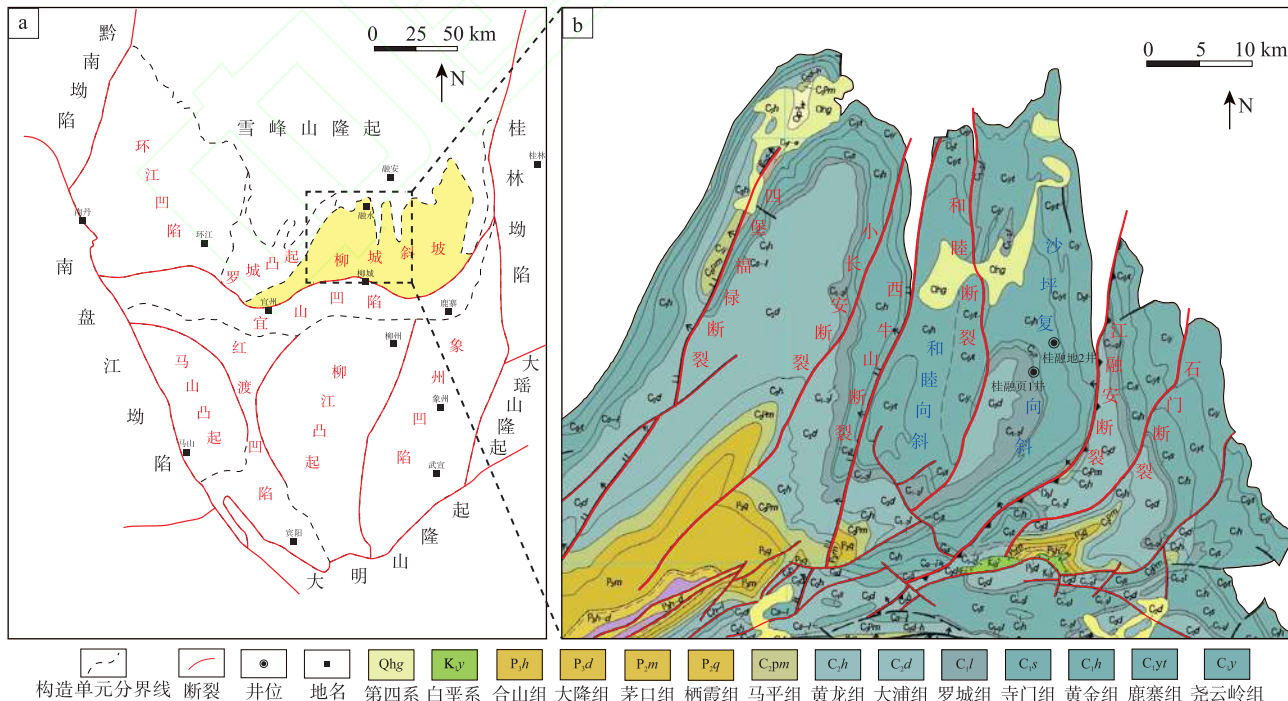


图 1 桂中坳陷及研究区构造位置

Fig. 1 Structure location of Guizhong Depression and study area

连续厚度大、有机质含量较高和气测显示良好等显著特征, 彰显出良好的页岩气勘探前景和资源潜力(覃英伦等, 2022)。

2 页岩类型划分及特征

2.1 页岩类型划分方案

目前页岩类型划分方案主要综合考虑沉积环境、矿物组分、沉积构造和有机质丰度等核心指标, 尚无统一分类标准。(黎茂稳等, 2022; 朱如凯等, 2022; 贺小标等, 2024)。其中陆相湖盆页岩通常具有纹层发育和垂向叠置关系复杂等特点, 一般采用矿物组分和沉积构造进行页岩类型划分(庞小娇等, 2023; 张益粼等, 2023)。海相页岩的有机质丰度与矿物组分通常与含气性、脆性等参数密切相关(向克满等, 2023)。因此本研究在传统岩石学命名法基础上, 遵循地质可分类、测井可识别的原则, 建立基于“矿物组分+TOC 含量”的页岩类型划分方案(操应长等, 2023; 邵龙义等, 2023)。

通过研究区 2 口井岩心观察及 XRD 全岩分析数据表明, 鹿寨组一段主要发育灰黑色硅质页岩、灰质页岩, 矿物组分呈现出内源化学沉淀(方解石、白云石)、陆源碎屑(石英、长石)和黏土矿物三分的混积特征(图 2)。按照传统岩石学命名方法, 以黏土矿物、硅质矿物和碳酸盐矿物作为三端元, 矿物质量分数大于 50% 命名为“×质页岩”, 质量分数均未大于 50% 则称为“混合页岩”, 再结

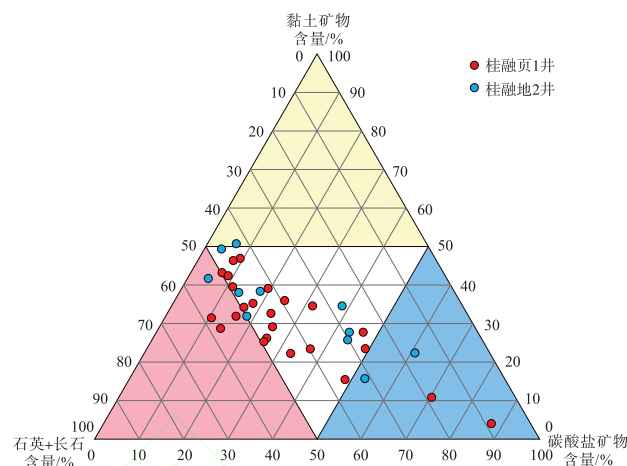


图 2 桂中坳陷鹿寨组一段页岩矿物组分三端元分布特征
Fig. 2 Three-terminal distribution characteristics of shale mineral components in the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

合鹿寨组岩性三角图投点集中在中间混合页岩区间的特征, 依据矿物组分的相对富集程度进一步划分为黏土质混合页岩、硅质混合页岩和灰质混合页岩。为便于厘定有利页岩类型与甜点评价, 针对研究区鹿一段页岩有机质丰度特征, 选取 TOC 值 2% 和 1% 为界, 确定“富有机质”、“中有机质”和“贫有机质”为页岩类型前缀。最终将其与矿物组分划分的页岩类型大类进行耦合, 从而完成研究区页岩类型划分(图 3)。

2.2 页岩类型特征

利用上述页岩类型划分方案, 将研究区鹿寨组一段页岩共划分出 6 种页岩类型大类和 18 种页岩

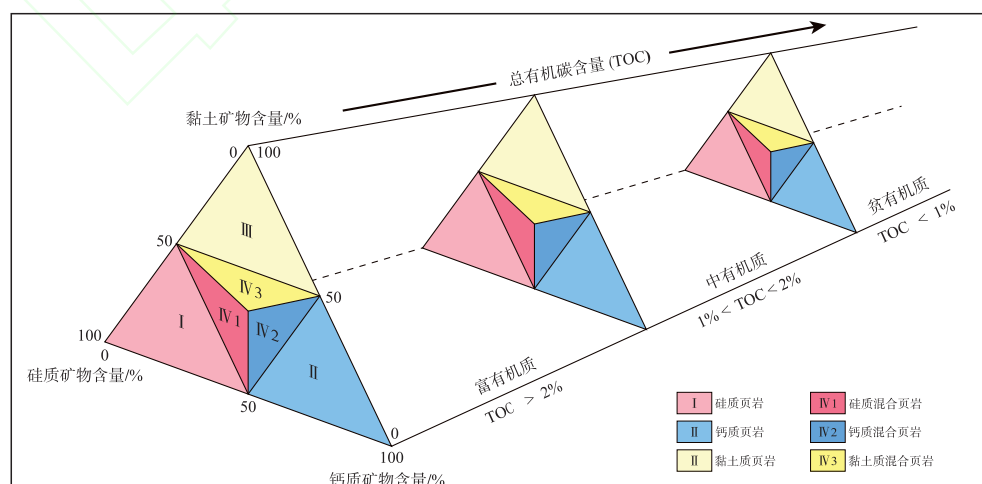


图 3 桂中坳陷鹿寨组一段页岩类型划分方案

Fig. 3 Shale types division scheme of the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

类型细分(表 1)。其中富有机质硅质混合页岩、富有机质黏土质混合页岩、含有机质硅质混合页岩、含有机质硅质页岩、贫有机质灰质混合页岩是研究区主要的 5 种页岩类型。

1) 富有机质硅质混合页岩。该页岩类型主要分布在鹿一段③、④小层。硅质矿物含量介于 33%~50%之间,黏土矿物含量中等,方解石等碳酸盐矿物含量较低。岩心颜色呈黑色,可见黄铁矿零散分布(图 4-a)。薄片观察表明泥质、砂质混合纹层与有机质纹层互层发育,少量陆源碎屑石英(粒径约 20 μm)呈零散分布在基质中,层理缝被方解石充填(图 4-b)。扫描电镜观察表明微晶石英、伊利石集合体和暗色有机质相间分布,粒间孔和黏土矿物层间孔缝发育(图 4-c)。

2) 富有机质黏土质混合页岩。该页岩类型主要分布在鹿一段③、④小层。黏土矿物含量介于 33%~50%之间,硅质矿物含量中等,方解石等碳酸盐矿物含量较低。岩心颜色呈黑色,页理较发育(图 4-d)。薄片观察表明泥质纹层和有机质纹层互层发育,层理缝被方解石充填(图 4-e)。扫描电镜观察表明有机质条带与周缘伊蒙混层发育大量层间孔缝,且有机质孔发育,多呈椭圆状和不规则状(图 4-f)。

3) 含有机质硅质页岩。该页岩类型主要分布在鹿一段③小层及⑤小层。硅质矿物含量占比超过 50%,黏土矿物和碳酸盐矿物含量均较低。岩心颜色呈灰黑色,明暗相间纹层相对发育(图 4-g)。薄片观察可见砂质纹层与泥质纹层互层,棱角状石英粒径可达 100 μm,反映硅质来源主要为陆源碎屑,与四川盆地五峰组—龙马溪组富含大量生物成因硅有显著差异(图 4-h)。扫描电镜观察表明有机质孔欠发育,主要为石英与黏土矿物之间的粒间

孔和黏土矿物层间孔缝(图 4-i)。

4) 含有机质硅质混合页岩。该页岩类型在鹿一段 7 个小层中普遍发育。硅质矿物含量介于 33%~50%之间,黏土矿物含量中等,方解石等碳酸盐矿物相较于含有机质硅质页岩增多。岩心颜色呈灰黑色,厘米级明暗相间纹层发育(图 4-j)。薄片观察可见陆源碎屑石英、泥质混合纹层与灰质纹层互层发育,且整体上灰质纹层占比增高(图 4-k)。扫描电镜观察表明整体上大孔隙欠发育,可见伊蒙混层集合体的晶间孔缝(图 4-l)。

5) 贫有机质灰质混合页岩。该页岩类型主要分布在鹿一段①小层和②小层。方解石等碳酸盐矿物占比超过 50%,黏土矿物和硅质矿物含量均较低。岩心呈灰色块状,滴盐酸强烈冒泡,可见腕足类和海百合茎等生物碎屑呈密集杂乱分布(图 4-m)。薄片观察可见陆源碎屑石英和方解石呈杂乱分布,微裂缝被方解石充填(图 4-n)。扫描电镜观察表明有机质含量偏低且有机质孔不发育,方解石含量较高且内部溶蚀孔普遍发育(图 4-o)。

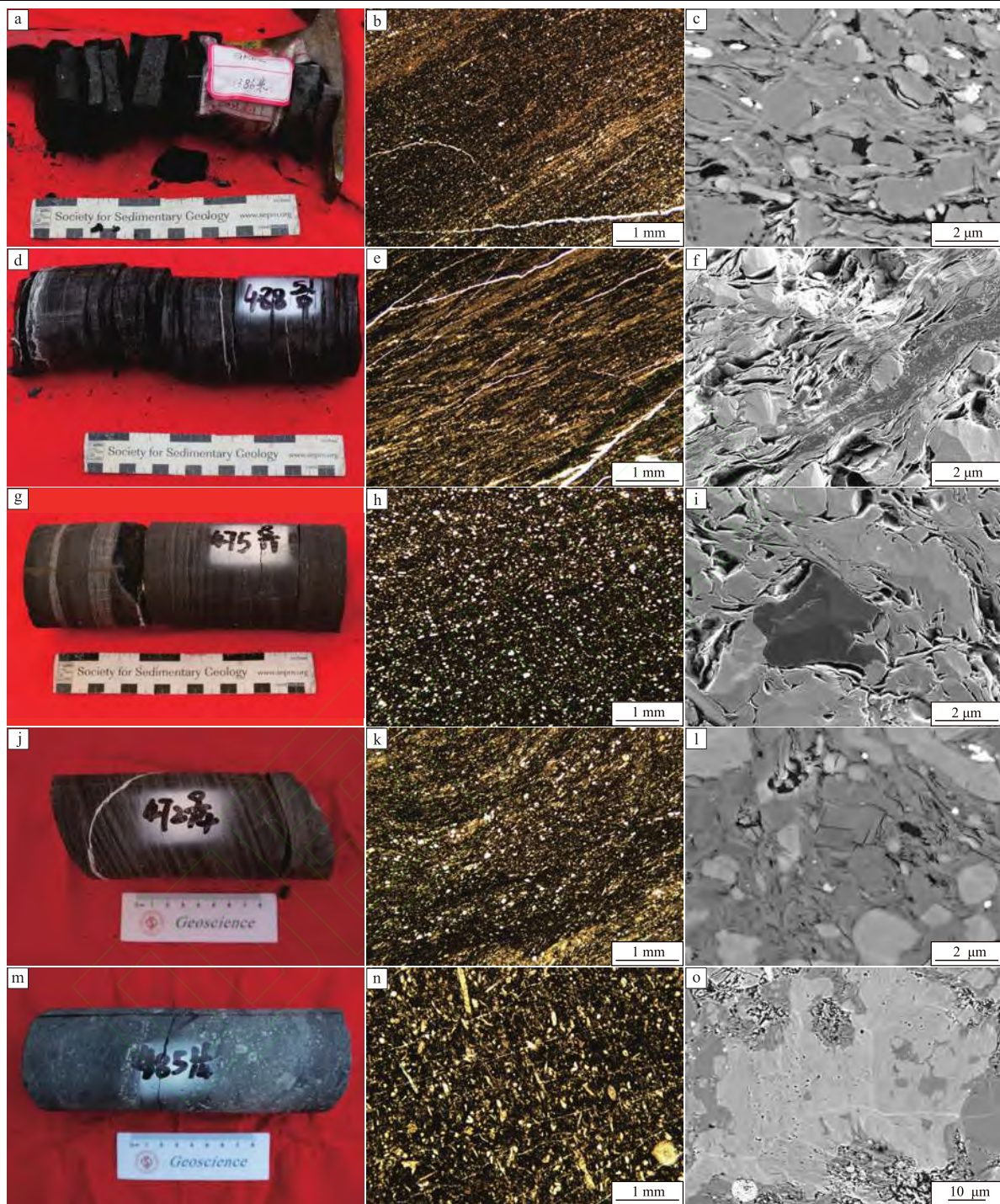
3 页岩类型测井识别

3.1 矿物组分

通过测井手段反演精细的矿物剖面是页岩类型测井识别的基础。针对鹿寨组页岩的矿物成分混积和纹层非均质性强等特征,仅通过离散的 XRD 全岩分析数据难以满足对单井纵向岩性划分的精度需求,但地层元素测井技术的不断革新与应用使其成为可能。与常见的斯伦贝谢的元素俘获能谱测井(ECS)类似,来自哈利伯顿的地层元素测井(GEM)同样能够测量铝(Al)、钙(Ca)、硅(Si)、

表 1 桂中坳陷鹿寨组一段页岩类型划分方案
Table 1 Shale types division scheme of the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

页岩类型			矿物含量/%		
			灰质(碳酸盐矿物)	硅质(石英+长石)	黏土
I	硅质页岩	富/含/贫有机质硅质页岩	< 25	≥ 50	< 25
II	灰质页岩	富/含/贫有机质灰质页岩	≥ 50	< 25	< 25
III	黏土质页岩	富/含/贫有机质黏土质页岩	< 25	< 25	≥ 50
IV ₁	硅质混合页岩	富/含/贫有机质硅质混合页岩	0~33,且<黏土	33~50,且>黏土	25~50
IV ₂	灰质混合页岩	富/含/贫有机质灰质混合页岩	33~50,且>硅质	25~50	0~33,且<硅质
IV ₃	黏土质混合页岩	富/含/贫有机质黏土质混合页岩	25~50	0~33,且<灰质	33~50,且>灰质



a—富有机质硅质混合页岩, 井深 1386.00 m; b—泥质、砂质混合纹层与有机质纹层互层发育, 井深 1385.01 m; c—粒间孔和黏土矿物层间孔缝发育, 井深 1385.50 m; d—富有机质黏土质混合页岩, 井深 1399.60 m; e—泥质纹层和有机质纹层互层发育, 井深 1399.50 m; f—有机质条带与周缘伊蒙混层发育大量层间孔缝, 井深 1400.00 m; g—含有机质硅质页岩, 井深 1363.80 m; h—砂质纹层与泥质纹层互层, 井深 1364.02 m; i—有机质孔欠发育, 井深 1359.00 m; j—含有机质硅质混合页岩, 井深 1354.25 m; k—陆源碎屑石英、泥质混合纹层与灰质纹层互层发育, 1356.17 m; l—可见伊蒙混层集合体的晶间孔缝, 井深 1382.90 m; m—贫有机质灰质混合页岩, 井深 1391.20 m; n—陆源碎屑石英和方解石呈杂乱分布, 井深 1391.13 m; o—方解石内部溶蚀孔普遍发育, 井深 1389.00 m。b, e, h, k, n 为单偏光; c, f, i, l, o 为扫描电镜

图 4 桂中坳陷 GRD2 井鹿寨组一段页岩典型页岩类型发育特征

Fig. 4 Characteristics of typical shale types of the Member 1 of Luzhai Formation in Well GRD2 in Guizhong Depression

铁(Fe)、钾(K)、镁(Mg)、锰(Mn)、硫(S)、钆(Gd)和钛(Ti)等 10 种元素的含量信息。利用元素测井计算矿物组分含量和识别岩性的原理主要是利用快中子与地层中的原子核发生非弹性散射碰撞及热中子俘获。首先通过能谱剥离分析获得元素产额，进而建立氧化物闭合模型，从而构建各元素干重与矿物组分之间的关系，并通过 XRD 全岩分析数据对计算结果进行约束，最终获得基于元素测井的反演矿物剖面（田瀚等，2023）。

XRD 全岩分析结果表明，鹿一段页岩矿物组分主要包含石英、长石、方解石、白云石、黏土矿物和黄铁矿等，以石英、方解石和黏土矿物为主。在明确矿物组分类型的基础上，基于 Techlog 软件 Quanti-Elan 模块输入常规测井中常规测井中的声波时差（AC）、补偿密度（DEN）、中子（CNL）

和深电阻率（RT）等测井曲线，以及解谱获得的元素干重共计 14 条测井曲线建立合适的元素—矿物转换最优化方程，完成矿物组分测井精确计算。依据前述的页岩类型划分方案，根据不同矿物组分含量差异完成单井页岩类型大类的纵向连续划分（图 5）。页岩类型划分和厚度统计结果显示，鹿一段页岩以硅质混合页岩为主，其次为灰质混合页岩和硅质页岩，黏土质混合页岩和灰质页岩极少。纵向上由①小层到⑦小层为开阔台地边缘下斜坡相沉积环境，沉积水体逐渐变浅，灰质含量逐渐减少而陆源碎屑供给增多，页岩类型分布呈现出较强的纵向非均质性。7 个小层各种页岩类型占比差异明显，其中①小层和②小层的碳酸盐矿物含量较高，以灰质混合页岩为主，可见滑塌沉积的生物碎屑灰岩角砾；进入③小层后，碳酸盐矿物含量减少而硅

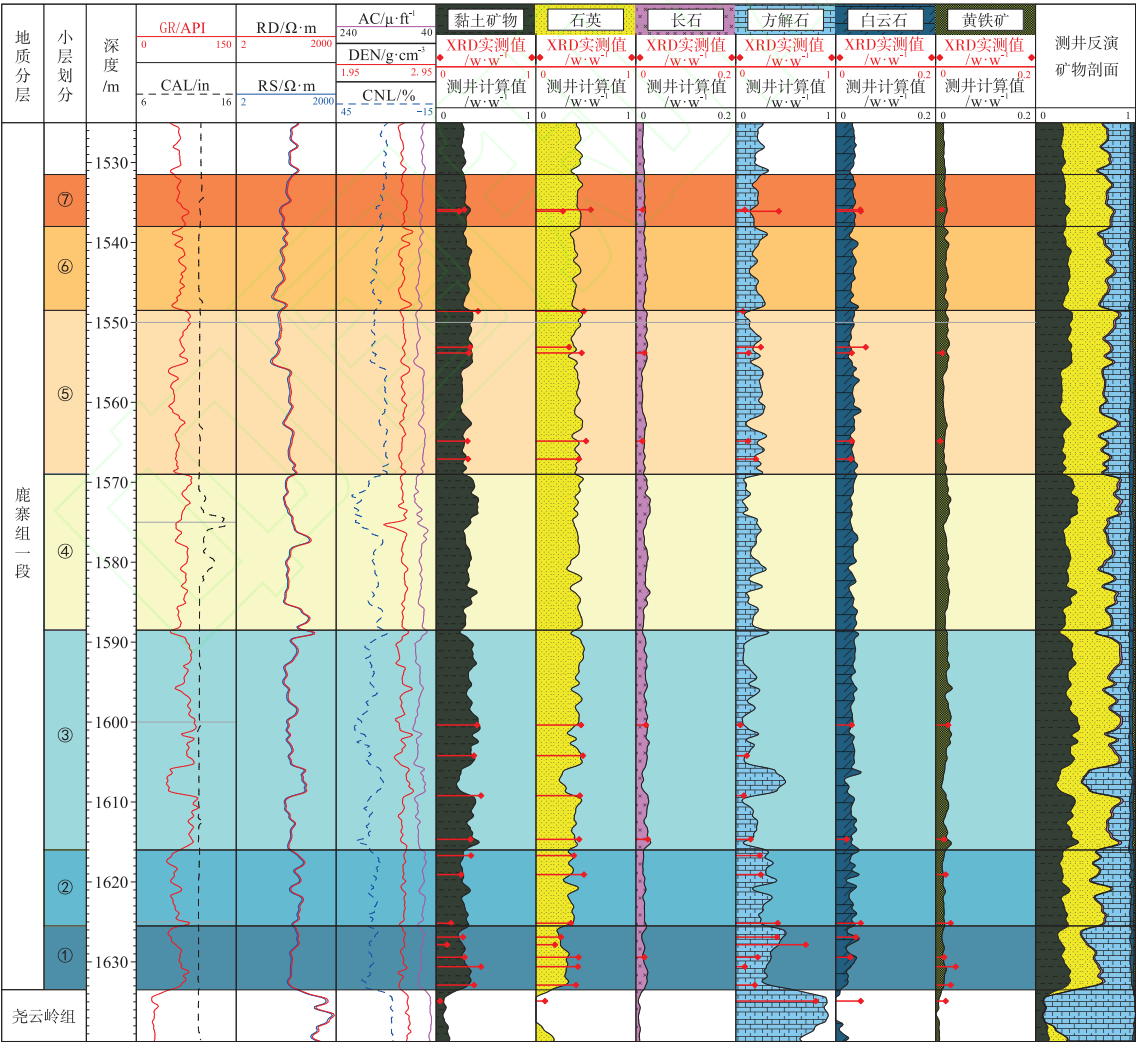


图 5 桂融页 1 井鹿寨组一段页岩矿物组分测井识别结果

Fig. 5 Well logging identification results of shale mineral components of the Member 1 of Luzhai Formation in Well GRY1

质含量逐渐增多,主要为硅质混合页岩和硅质页岩;⑤小层至⑦小层为上斜坡沉积环境,以硅质混合页岩为主,可见大量粉砂质纹层与泥质纹层互层,硅质来源主要为陆源碎屑石英(图 6)。

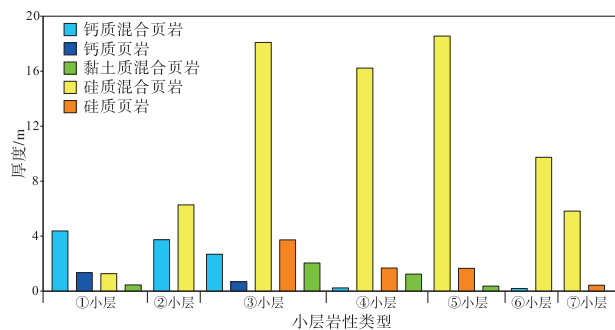


图 6 桂融页 1 井鹿寨组一段 7 个小层页岩岩性分布特征
Fig. 6 Lithologic distribution characteristics of seven-layer shale of the Member 1 of Luzhai Formation in Well GRY1

3.2 TOC 含量

TOC 含量作为反映页岩生烃潜力的重要评价参数,目前有地化实验测定和地球物理资料反演等表征手段。相较于地化实验分析烃源岩会受到岩心样品采集和数据离散性的缺陷,利用测井资料预测 TOC 含量具有纵向分辨率高和连续性强的优势,而且能够减少页岩本身强非均质性引起的精度误差。目前,TOC 含量测井计算方法主要有 $\Delta \lg R$ 法、自然伽马能谱法、岩性扫描测井法、多元线性回归拟合法和机器学习法。不同于传统方法,神经网络法能够建立难以用显式函数表达的非线性关系,在解决烃源岩有机质丰度与测井参数之间关联问题具有显著的应用优势,因此本研究采用应用较为广泛的 BP 神经网络建立 TOC 含量测井预测模型。

利用 BP 神经网络预测 TOC 含量的输入层选取都建立在 TOC 含量与各测井特征值存在一定相关性的基础上,一般采用常规测井中的声波时差 (AC)、补偿密度 (DEN)、中子 (CNL) 和自然伽马 (GR) 等测井值。然而相关性只是选取输入层的参考之一,加上相关性偏低的特征参数也有可能提高模型训练的准确度。地层元素可以挖掘页岩沉积环境变化的矿物成分含量差异,从而能够间接反映复杂岩性及 TOC 含量变化的测井曲线响应特征。本研究在此基础上增加自然伽马能谱测井获得的铀 (U)、钍 (Th)、钾 (K) 含量值,以及元素

测井解谱获得的铝 (Al)、钙 (Ca)、硅 (Si) 等元素干重值等 14 个输入变量作为该模型输入层。为获得最好的神经网络逼近效果,通过建立不同隐含层节点数的模型对比训练结果确定最佳隐含层节点数为 24。因此本研究建立了网络结构为 $14 \times 24 \times 1$ 的 BP 神经网络模型(图 7)。

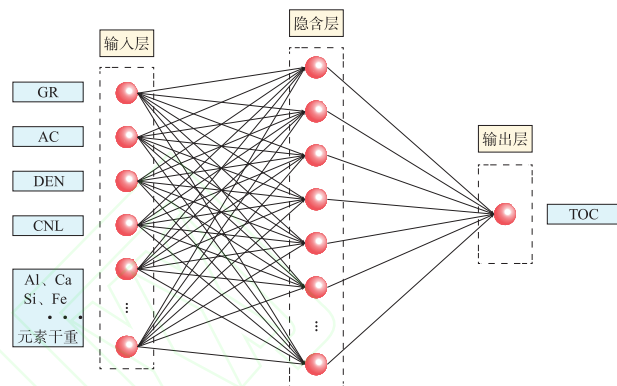


图 7 桂中坳陷鹿寨组一段 BP 神经网络预测 TOC 含量拓扑结构

Fig. 7 Prediction of TOC content topology by BP neural network of the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

以桂融页 1 井 134 组 TOC 含量实测值和测井参数值为全部样本,按照一定比例划分为训练集和验证集。随机选择 114 组数据 (全部样本的 85%) 为训练集样本,其余 20 组数据 (全部样本的 15%) 为验证集样本,用于检验模型的泛化能力。计算结果表明,训练样本、验证样本和全部样本的预测 TOC 和实测 TOC 的相关系数 R^2 分别为 0.9551、0.8605 和 0.9327,说明预测结果准确可靠。绝对误差曲线反映出低 TOC 含量层段预测效果较好,而部分高 TOC 含量层段预测的误差相对较大,整体平均相对误差为 9.8% (图 8)。整体上,鹿寨组一段页岩 TOC 含量主体介于 1%~2% 之间,极少数可达 3% 以上。

4 有利页岩类型评价

4.1 纹层发育程度

纹层是沉积岩中肉眼可识别的最小沉积单元 (武瑾等, 2023)。纹层结构及发育程度不仅会显著影响页岩的储集性能,其不同纹层组合类型还与页岩的岩石力学性质和可压裂性密切相关 (吴松涛等, 2022)。

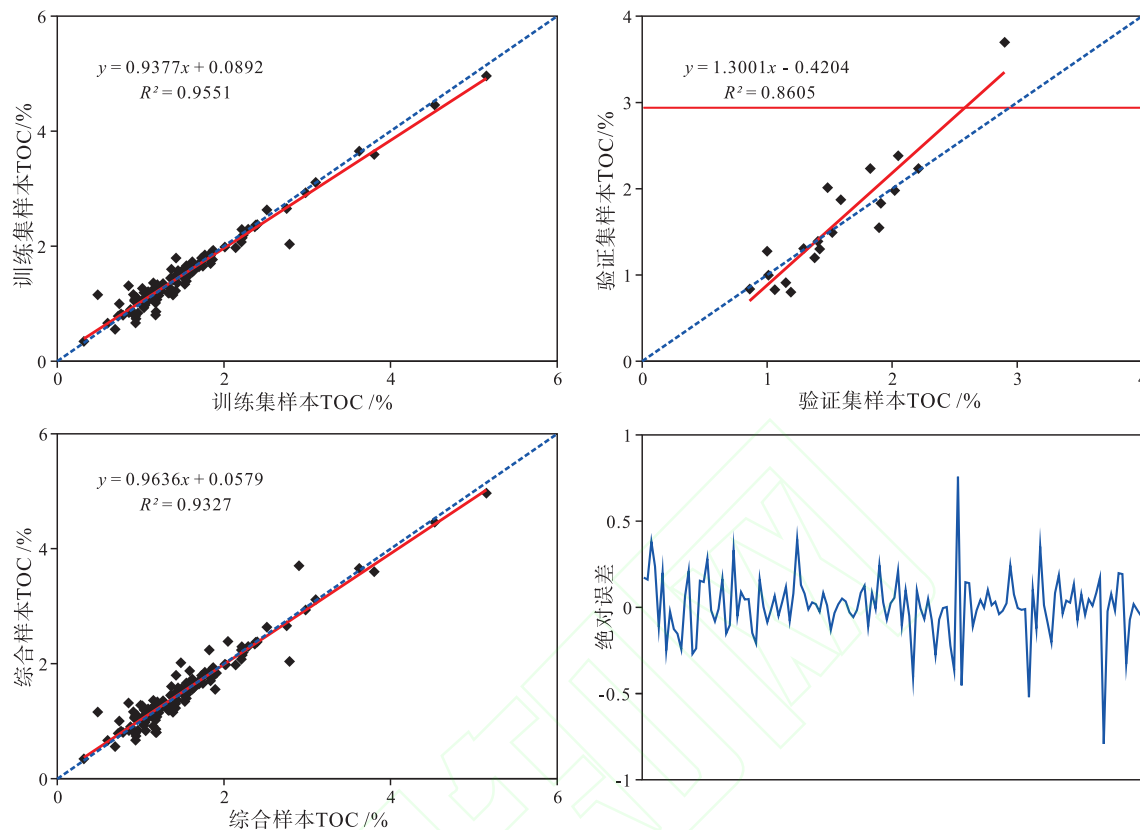


图 8 桂中坳陷鹿寨组一段预测 TOC 与实测 TOC 相关性分析及误差

Fig. 8 Correlation analysis and error between predicted TOC and measured TOC of the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

微电阻率成像测井作为具有较高纵向分辨率（可达 5 mm）的测井新技术，能够呈现环井壁岩石 360°全方位图像信息，是目前评价层理、裂缝等井旁构造最有效的测井手段。由于鹿寨组一段页岩的非均质性较强，传统动静态图像难以有效反映页岩纹层的发育程度。本研究在对成像测井动态图像进行高斯平滑处理的基础上，利用动态切片（Slab）技术实现对纹层发育程度的精细表征，其效果与岩心纵切及 CT 扫描相当（Wang *et al.*, 2021; Pang *et al.*, 2022; 谭玉涵等, 2023）。通过对成像测井动态图像沿着某一方向进行切片处理，利用展开图像在其方向上的投影图像，从而更易直观显示井周地层岩石的纹层信息。此外，桂融页 1 井所采用的 XRFMI 电成像测井仪器包含 6 个极板，每个极板臂上有 25 个纽扣电极，共可获得 150 条反映井壁地层视电阻率的微电极曲线。在通过动静态处理及浅电阻率刻度的基础上，能够得到不同极板上各纽扣电极视电导率图像，从而同样直观反映纵向上不同纹层组合频繁叠置所导致的曲线锯齿变

化。在此基础上若统计单位窗长范围的视电导率曲线极值变化，可实现针对纹层指数的测井定量计算（刘国强等, 2023; 张益鄰等, 2023）。因此，综合成像测井动态切片和纽扣电极视电导率图像 2 种方法，不仅完成对页岩纹层的测井精细识别，还实现针对页岩垂向纹层成分类型变化及纹层发育程度的测井表征（图 9）。

一般情况下，富硅质或钙质等高阻矿物的纹层在成像测井动态切片上表现为亮色条带，富黏土矿物等低阻矿物的纹层表现为暗色条带。明暗相间条带的相交处通常反映纹层界面。此外，纹层的密集程度由纽扣电极视电导率图像的曲线锯齿变化来表征。随着纹层发育程度的降低，锯齿变化由毫米级频繁变化逐渐转变为箱状特征。结果表明，不同页岩类型的纹层组合及发育程度存在显著差异。富有机质硅质混合页岩主要分布在③小层底部，岩心可见纹层及层理缝发育且岩石破碎程度高，动态切片显示纹层极其发育，视电导率图像为频繁锯齿变化（图 10-a）。富有机质黏土质混合页岩主要分布在

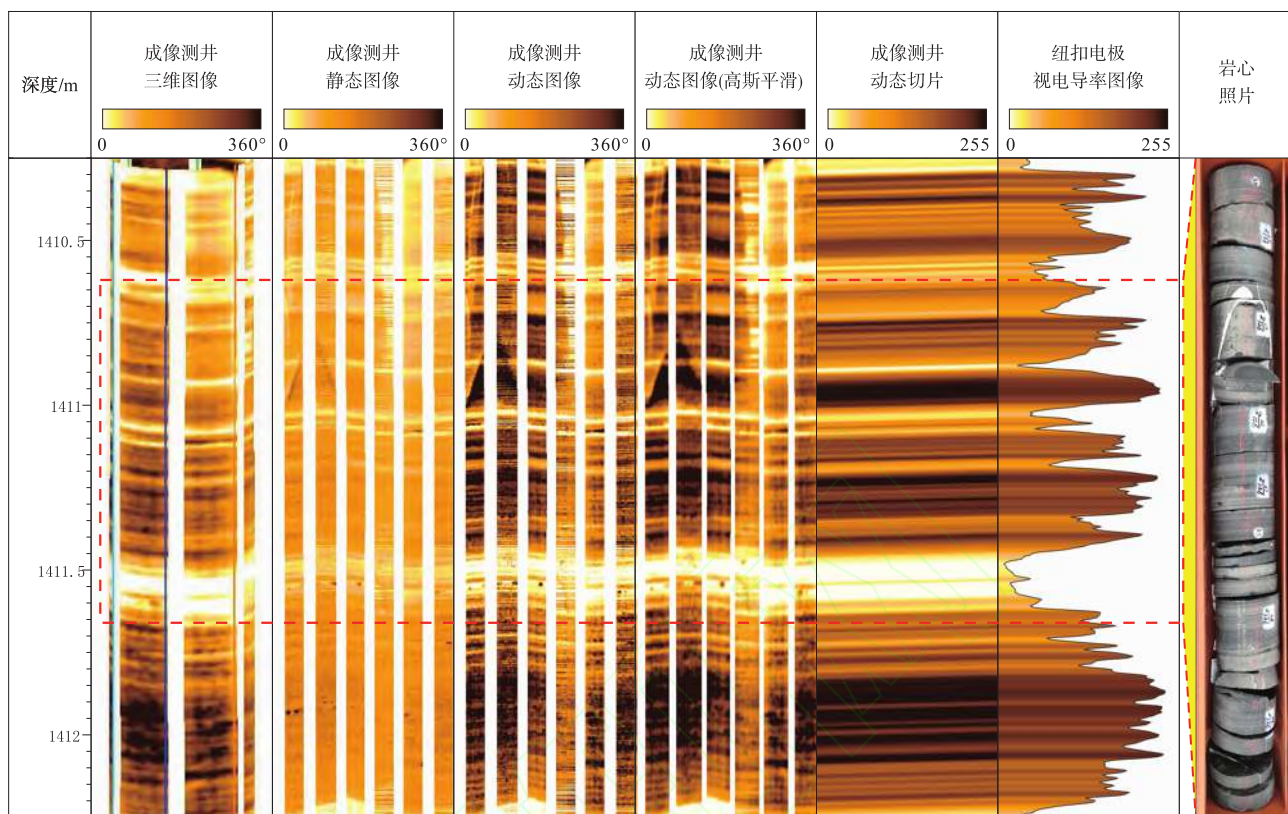


图 9 桂中坳陷桂融页 1 井基于成像测井动态切片和纽扣电极视电导率图像的页岩纹层表征

Fig. 9 Shale lamination characterization based on image logging dynamic slice and button electrode apparent conductivity images of Well GRY1 in Guizhong Depression

①小层底部, 岩心可见浊流沉积引起的富灰质角砾呈条带状或透镜状分布在黑色黏土质页岩中, 大量生物碎屑杂乱分布, 动态切片和视电导率图像显示纹层欠发育(图 10-b)。相较于含有机质硅质页岩, 含有机质硅质混合页岩的灰质纹层更为发育, 动态切片和视电导率图像呈现典型的厘米级锯齿变化(图 10-c, 10-d)。贫有机质灰质混合页岩岩心呈灰白色块状, 动态切片几乎不显示纹层, 视电导率图像呈箱状(图 10-e)。整体上随着富有机质硅质混合页岩到贫有机质灰质混合页岩中纹层发育程度逐渐减少, 视电导率图像上显示的“锯齿状”变化呈现明显降低的趋势。

4.2 含气性

页岩储集层含气性受页岩类型的有机质丰度、矿物成分及孔隙结构等控制, 不同页岩类型之间的含气性差异较大(向克满等, 2023)。含气量作为页岩气选区评价、产能预测和储量评估的关键参数, 能够有效地反映页岩的含气潜力。研究区气体解析实验统计结果表明, 整体上鹿寨组一段页岩总

含气量介于 $0.34 \sim 2.61 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均为 $1.26 \text{ m}^3/\text{t}$; 解析气含量介于 $0.15 \sim 1.21 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均为 $0.66 \text{ m}^3/\text{t}$ 。其中富有机质硅质混合页岩和富有机质黏土质混合页岩的总含气量整体最高, 平均在 $2 \text{ m}^3/\text{t}$ 左右; 含有机质硅质页岩和含有机质硅质混合页岩的总含气量居中, 平均可达 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上; 而贫有机质灰质混合页岩的含气量较低。总体看来, 含气量随着有机质含量的增加而逐渐增大, 富有机质类页岩类型的总含气量均大于含有机质类和贫有机质类页岩类型。这表明有机质含量的高低是决定页岩含气性的关键因素, 高有机质含量不仅提供页岩气生成的物质基础, 其有机质孔和黏土矿物层间孔缝还为页岩气富集提供有利储集空间。此外, 富有机质硅质混合页岩与富有机质黏土质混合页岩的总含气量差异较小, 而富含更多黏土矿物的富有机质黏土质混合页岩的解析气含量明显偏低, 反映出黏土矿物对吸附气含量的贡献占比较高(图 11)。

4.3 优势岩相类型

明确有利页岩组合类型的分布特征是桂中坳陷

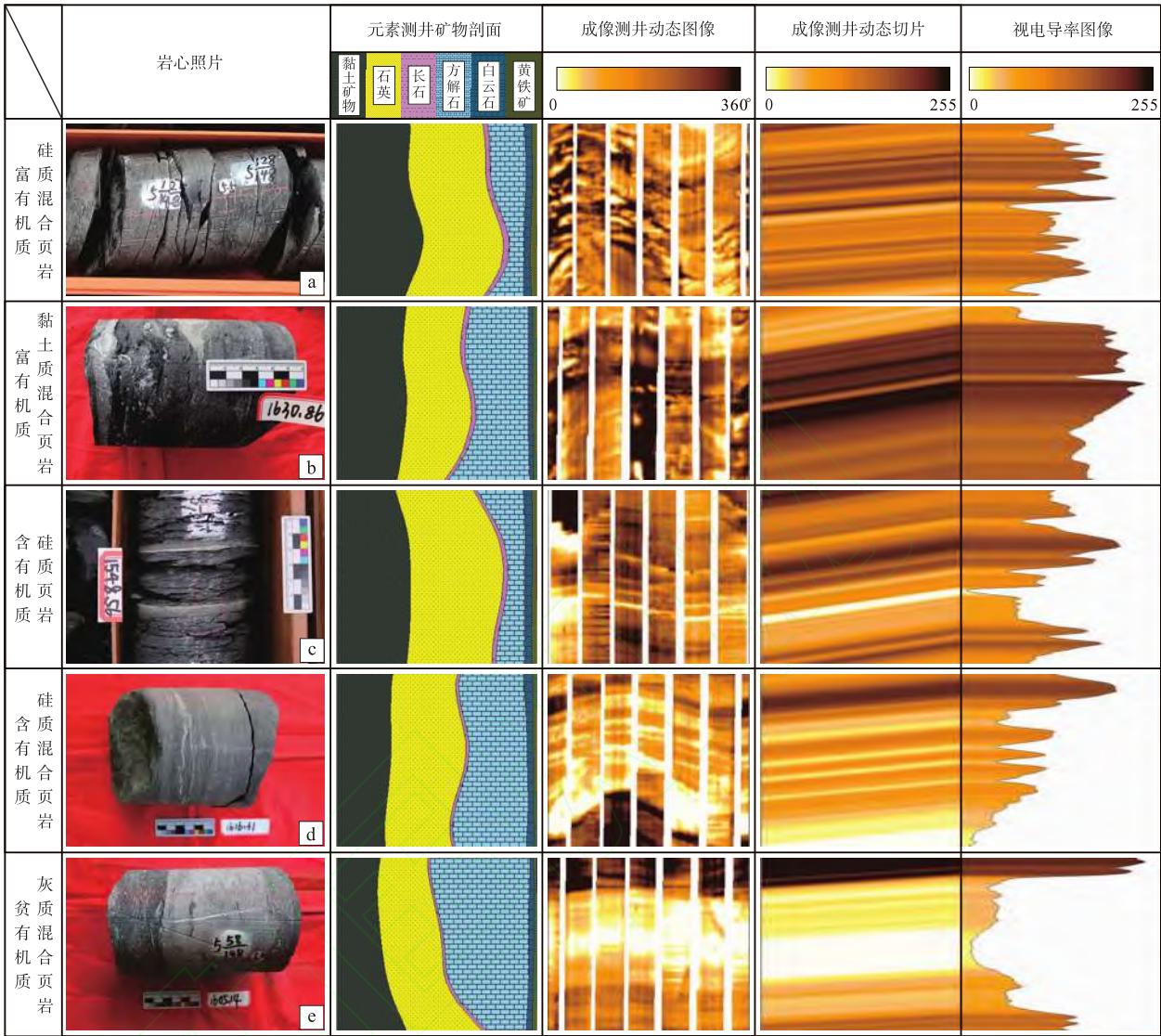


图 10 桂中坳陷桂融页 1 井鹿寨组一段页岩典型页岩类型纹层发育特征

Fig. 10 Characteristics of typical shale types lamination of the Member 1 of Luzhai Formation of Well GRY1 in Guizhong Depression

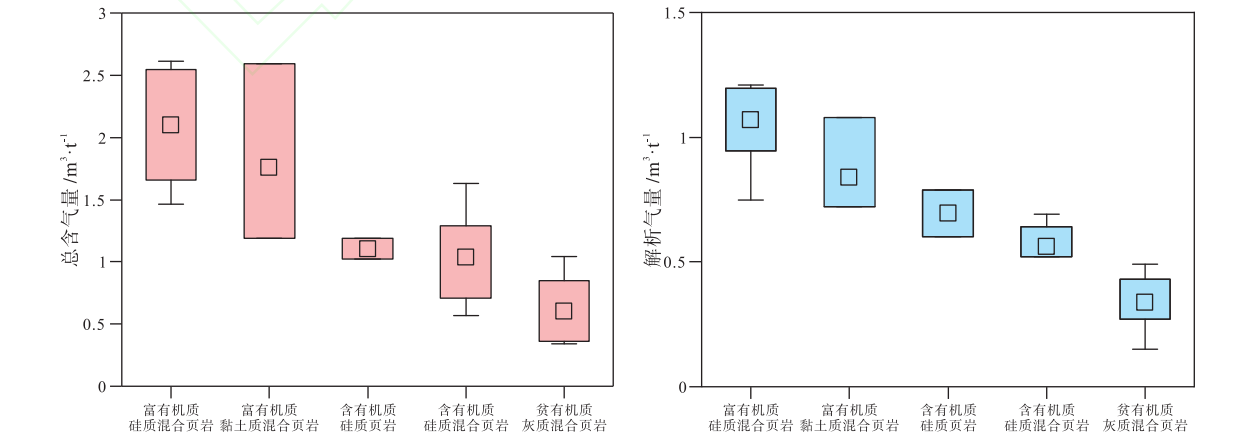


图 11 桂中坳陷鹿寨组一段页岩典型页岩类型含气量特征

Fig. 11 Gas content characteristics of typical shale types of the Member 1 of Luzhai Formation in Guizhong Depression

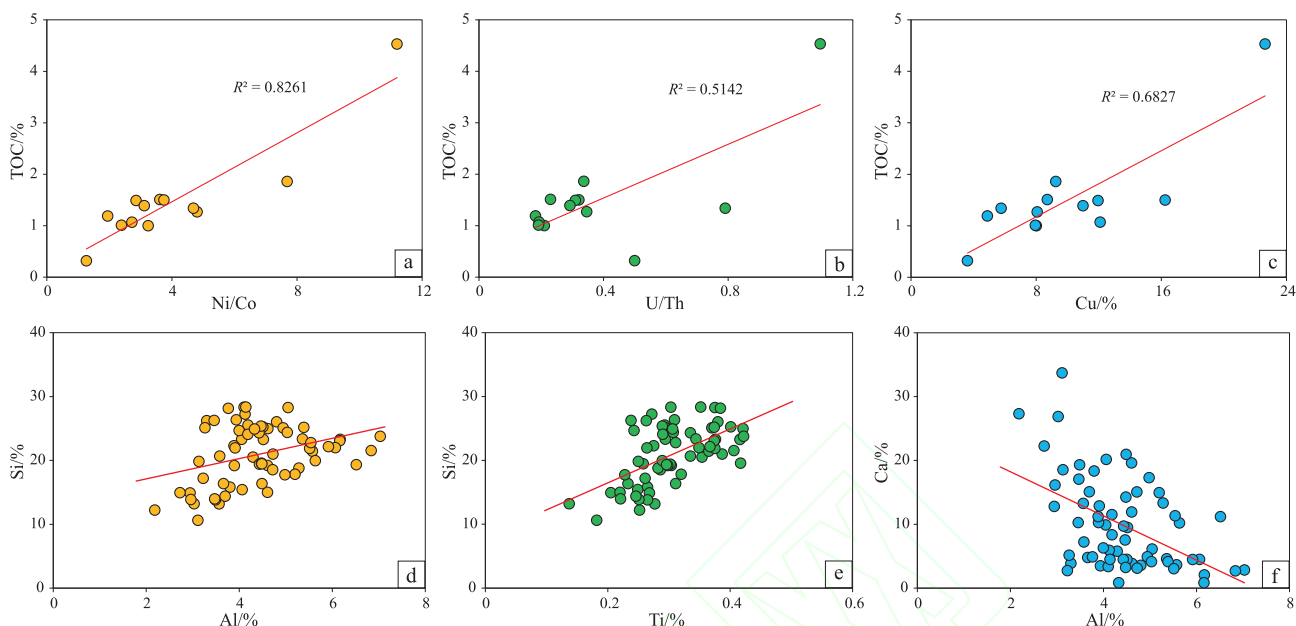


图 12 桂融页 1 井古环境、氧化还原条件指标交会图

Fig. 12 Intersection diagram of palaeoenvironment and REDOX conditions of Well GRY 1

进行页岩气储集层评价和资源评估的重要前提(庞小娇等, 2023; 于洲等, 2023; 邢浩婷等, 2024)。页岩层系不仅会受物源供给、沉积古环境及水动力影响而导致成分、结构和构造存在差异, 还在沉积旋回调控下形成强非均质性的纵向叠置规律(刘惠民等, 2023)。研究区位于复杂构造背景下的台盆相沉积环境, 其纵向岩性变化、相变频繁的特征与沉积环境演化的关系较为密切。桂融页 1 井取心段微量元素测试结果表明, ①小层至③小层底部的 U/Th 值和 Ni/Co 值相对较高, 反映出相对缺氧环境, 往上逐渐过渡为相对贫氧和有氧环境。此外, Si 与陆源指标 Al 和 Ti 呈较好的相关性, 反映硅质主要来源于陆源碎屑输入, 仅在③小层中含有部分生物成因硅。碳酸盐指标 Ca 与 Al 存在明显负相关, 则反映研究区陆源碎屑供给与内源化学沉淀呈现出此消彼长的特征(图 12)。纵向来看, 鹿寨组一段①小层至③小层沉积水体较深, 为缺氧还原环境, 硅质矿物含量较高且为陆源和生物成因混合; ④小层至⑦小层沉积水体逐渐变浅, 转变为相对贫氧和有氧环境, 陆源碎屑供给逐渐增多。受沉积古环境控制, 桂融页 1 井鹿寨组一段自下而上 TOC 含量也呈现出逐渐降低的变化趋势, 页岩类型逐渐由富有机质硅质混合页岩、富有机质黏土质混合页岩逐渐相变为含有机质硅质混合页岩(图 13)。

综合有机质丰度、纹层发育程度、含气性及脆

性矿物含量等关键评价指标, 结合沉积环境演化特征, 认为鹿寨组一段③小层底部整体处于较深的沉积水体和缺氧环境, 具备有机质富集的先决条件。此外, 适量的陆源碎屑输入能够携带一定的营养物质, 促进生物勃发而提高整体的古生产力。再根据前述不同页岩类型特征分析结果可知, ③小层中富有机质硅质混合页岩与富有机质黏土质混合页岩的页岩组合类型有机质丰度高, 纹层组合类型及发育程度较优, 整体含气量较高, 且具有一定的脆性矿物含量, 为鹿寨组一段的优势岩相类型。而贫有机质灰质混合页岩各项参数均较低, 难以形成优质储集层, 为桂中坳陷较差的页岩类型。

5 结论

1) 针对桂中坳陷北部鹿寨组一段建立了基于“矿物组分+TOC 含量”的页岩类型划分方案, 明确研究区 5 种典型页岩类型为富有机质硅质混合页岩、富有机质黏土质混合页岩、含有机质硅质混合页岩、含有机质硅质页岩和贫有机质灰质混合页岩。

2) 利用地层元素测井技术完成鹿寨组一段页岩矿物含量测井精确计算。其中①小层和②小层的碳酸盐矿物含量较高; 进入③小层后, 碳酸盐矿物含量减少而硅质含量逐渐增多; ⑤小层至⑦小层可见大量粉砂质纹层与泥质纹层互层, 硅质来源主要

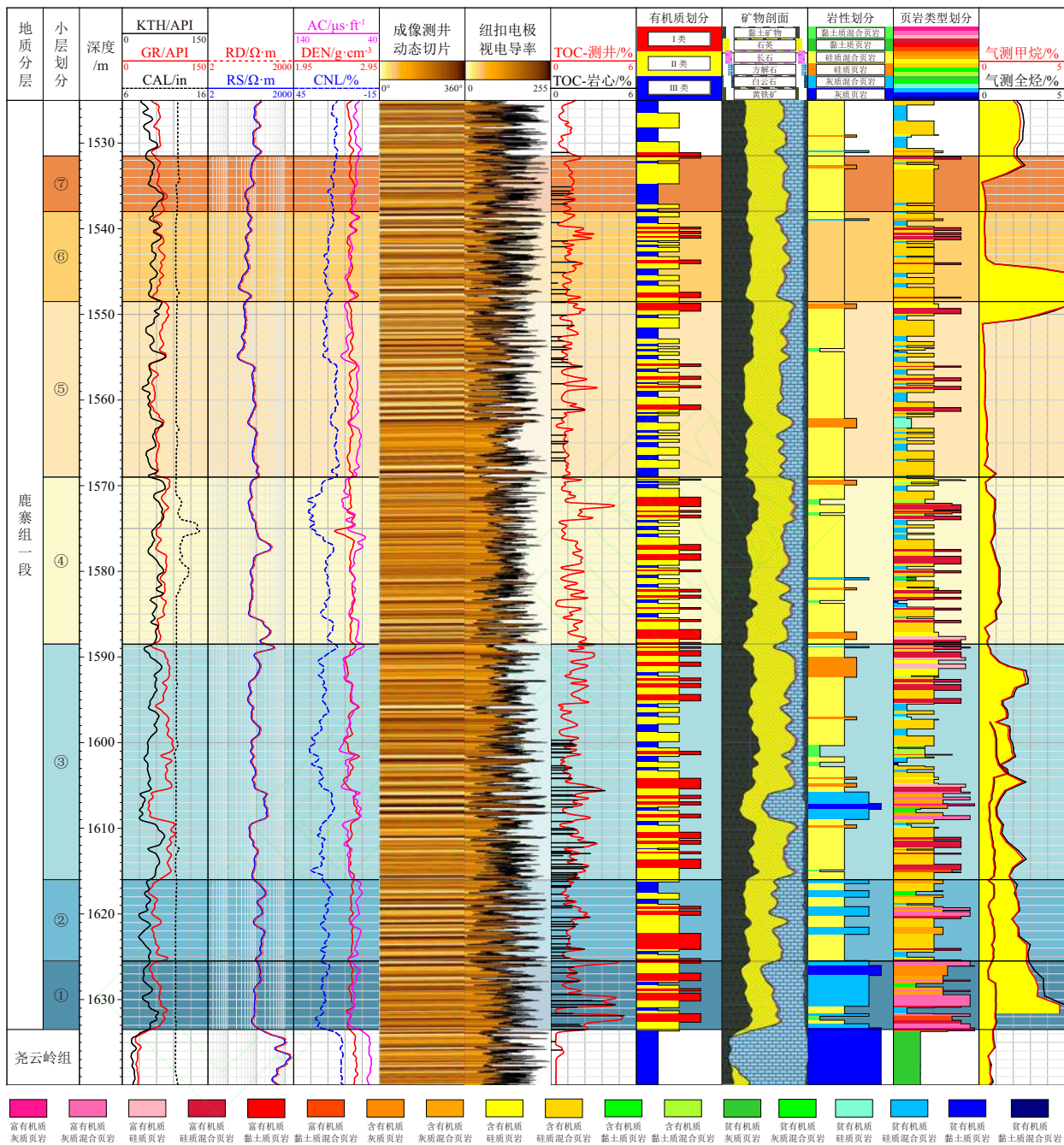


Fig. 13 Distribution characteristics of shale types of the Member 1 of Luzhai Formation in Well GRY1

为陆源碎屑石英。通过 BP 神经网络建立 TOC 含量测井预测模型，结果显示鹿寨组一段页岩 TOC 含量介于 1%~2% 之间，极少数可达 3% 以上。将二者耦合实现单井纵向页岩类型的连续识别与划分。

3) 采用成像测井动态切片和纽扣电极视电导率图像 2 种方法，完成对页岩纹层的测井精细识别和页岩垂向纹层成分类型变化及纹层发育程度的测井表征。结合含气性和沉积环境演化等因素认为，

③小层中富有机质硅质混合页岩与富有机质黏土质混合页岩的页岩组合类型有机质丰度高，纹层组合类型及发育程度较优，整体含气量较高且具有一定的脆性矿物含量，为鹿寨组一段优势岩相类型。

参考文献 (References)

操应长,梁超,韩豫,慈克来,王俊然,籍士超,梅俊芳. 2023. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨. 古地理学报,

- 25(4): 729–741. [Cao Y C, Liang C, Han Y, Xi K L, Wang J R, Ji S C, Mei J F. 2023. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis. *Journal of Palaeogeography*, 25(4): 729–741]
- 董大忠, 梁峰, 管全中, 蒋裕强, 周尚文, 于荣泽, 谷一凡, 张素荣, 漆麟, 刘延. 2022. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气优质储层发育模式及识别评价技术. *天然气工业*, 42(8): 96–111. [Dong D Z, Liang F, Guan Q Z, Jiang Y Q, Zhou S W, Yu R Z, Gu Y F, Zhang S R, Qi L, Liu Y. 2022. Development model and identification evaluation technology of Wufeng-Longmaxi Formation quality shale gas reservoirs in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 42(8): 96–111]
- 郭旭升, 胡宗全, 李双建, 郑伦举, 朱东亚, 刘君龙, 申宝剑, 杜伟, 俞凌杰, 刘增勳, 皇甫瑞麟. 2023. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望. *石油科学通报*, 8(4): 461–474. [Guo X S, Hu Z Q, Li S J, Zheng L J, Zhu D Y, Liu J L, Shen B J, Du W, Yu L J, Liu Z Q, Huangfu R L. 2023. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata. *Petroleum Science Bulletin*, 8(4): 461–474]
- 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 张龙胜, 贺庆, 张培先, 王伟, 黄小贞. 2023. 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向. *天然气工业*, 43(6): 1–14. [He X P, He G S, Gao Y Q, Zhang L S, He Q, Zhang P X, Wang W, Huang X Z. 2023. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and developmen. *Natural Gas Industry*, 43(6): 1–14]
- 贺小标, 罗群, 李鑫, 李映艳, 邓远, 邱兆轩, 韦波. 2024. 陆相混积页岩不同岩相孔隙差异特征及影响机制: 以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. *中国矿业大学学报*, 53(1): 141–157. [He X B, Luo Q, Li X, Li Y Y, Deng Y, Qiu Z X, Wei B. 2024. Characteristics of pore differences between different lithofacies of continental mixed shale and the influencing mechanism: an example from the Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Depression. *Journal of China University of Mining & Technology*, 53(1): 141–157]
- 黄玉越, 王贵文, 宋连腾, 王松, 张益鄰, 黄立良, 赖锦. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩储集层裂缝测井识别与有效性分析. *古地理学报*, 24(3): 540–555. [Huang Y Y, Wang G W, Song L T, Wang S, Zhang Y L, Huang L L, Lai J. 2022. Fracture logging identification and effectiveness analysis of shale reservoir of the Permian Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(3): 540–555]
- 姜振学, 梁志凯, 申颖浩, 唐相路, 吴伟, 李卓, 薛子鑫, 石学文, 郭婕. 2023. 川南泸州地区页岩气甜点地质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向. *地球科学*, 48(1): 110–129. [Jiang Z X, Liang Z K, Shen Y H, Tang X L, Wu W, Li Z, Xue Z X, Shi X W, Guo J. 2023. Coupling key factors of shale gas sweet spot and research direction of geology engineering integration in southern Sichuan. *Earth Science*, 48(1): 110–129]
- 赖锦, 李红斌, 张梅, 白梅梅, 赵仪迪, 范旗轩, 庞小娇, 王贵文. 2023. 非常规油气时代测井地质学研究进展. *古地理学报*, 25(5): 1118–1138. [Lai J, Li H B, Zhang M, Bai M M, Zhao Y D, Fan Q X, Pang X J, Wang G W. 2023. Advances in well logging geology in the era of unconventional hydrocarbon resources. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1118–1138]
- 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 李志明, 蒋启贵, 吴世强, 李政, 徐祖新. 2022. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义. *石油与天然气地质*, 43(1): 1–25. [Li M W, Ma X X, Jin Z J, Li Z M, Jiang Q G, Wu S Q, Li Z, Xu Z X. 2022. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China. *Oil & Gas Geology*, 43(1): 1–25]
- 李国欣, 刘国强, 侯雨庭, 赵先然, 吴金龙, 李伸专, 鲜成刚, 刘合. 2021. 陆相页岩油有利岩相优选与压裂参数优化方法. *石油学报*, 42(11): 1405–1416. [Li G X, Liu G Q, Hou Y T, Zhao X R, Wu J L, Li S Z, Xian C G, Liu H. 2021. Optimization method of favorable lithofacies and fracturing parameter of continental shale oil. *Acta Petrolei Sinica*, 42(11): 1405–1416]
- 刘国强, 赵先然, 袁超, 李伸专, 刘忠华. 2023. 陆相页岩油宏观结构测井评价及其甜点优选. *中国石油勘探*, 28(1): 120–134. [Liu G Q, Zhao X R, Yuan C, Li S Z, Liu Z H. 2023. Logging evaluation of macro-structure of continental shale oil reservoir and sweet spots selection. *China Petroleum Exploration*, 28(1): 120–134]
- 刘惠民, 张顺, 王学军, 张鹏飞, 李军亮, 王勇, 魏晓亮, 银燕, 朱德燕. 2023. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳拗陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例. *地球科学*, 48(1): 30–48. [Liu H M, Zhang S, Wang X J, Zhang P F, Li J L, Wang Y, Wei X L, Yin Y, Zhu D Y. 2023. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: a case study from upper Sub-Member of Es4 in Dongying sag, Jiyang Depression. *Earth Science*, 48(1): 30–48]
- 庞小娇, 王贵文, 匡立春, 赵飞, 李红斌, 韩宗晏, 白天宇, 赖锦. 2023. 沉积环境控制下的页岩岩相组合类型及测井表征: 以松辽盆地古龙凹陷青山口组为例. *古地理学报*, 25(5): 1156–1175. [Pang X J, Wang G W, Kuang L C, Zhao F, Li H B, Han Z Y, Bai T Y, Lai J. 2023. Logging evaluation of lithofacies and their assemblage under control of sedimentary environment: a case study of the Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1156–1175]
- 覃英伦, 雷雨, 蒋恕, 张仁, 张鲁川, 岑文攀, 卢炳雄. 2022. 桂中坳陷北部下石炭统鹿寨组一段页岩气成藏条件与资源潜力评价. *石油科学通报*, 7(2): 139–154. [Qin Y L, Lei Y, Jiang S, Zhang R, Zhang L C, Cen W P, Lu B X. 2022. Shale gas accumulation conditions and resource potential evaluation of member 1 of the Lower Carboniferous Luzhai Formation in the northern Guizhong depression. *Petroleum Science Bulletin*, 7(2): 139–154]
- 邵龙义, 张天畅. 2023. 泥质岩定义及分类问题的探讨. *古地理学报*, 25(4): 742–751. [Shao L Y, Zhang T C. 2023. Discussion on definition and classification of mudrock. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(4): 742–751]
- 谭玉涵, 张凤生, 姚亚彬, 吴恒, 年涛. 2023. 页岩纹层的测井评价方法研究: 以川南五峰组—龙马溪组为例. *地质科技通报*, 42(6): 281–296. [Tan Y H, Zhang F S, Yao Y B, Wu H, Nian T. 2023. Logging evaluation of shale laminae: a case study from the Wufeng-Longmaxi Formations in the southern Sichuan Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(6): 281–296]
- 田瀚, 闫伟林, 武宏亮, 闫学洪, 李潮流, 郑建东, 冯周. 2023. 一种陆相页岩油岩相测井定量识别方法. *地球物理学进展*, 38(5): 2122–2134. [Tian H, Yan W L, Wu H L, Yan X H, Li C L, Zheng J D, Feng Z. 2023. Logging quantitative identification method for lithofacies of continental shale oil. *Progress in Geophysics*, 38(5): 2122–2134]
- 王祥, 赵迎冬, 岑文攀, 张美玲, 黄文芳, 黄恒, 陈海武, 王来军, 陈基瑜. 2023. 滇黔桂盆地桂中坳陷下石炭统鹿寨组页岩气勘探潜力. *天然气地球科学*, 34(9): 1515–1534. [Wang X, Zhao Y D, Cen W P, Zhang M L, Huang W F, Huang H, Chen H W, Wang L J,

- Chen J Y. 2023. Exploration potential of Lower Carboniferous Luzhai Formation shale gas in Guizhong Depression, Dian-Qian-Gui Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(9): 1515–1534]
- 吴松涛, 朱如凯, 罗忠, 杨智, 姜晓华, 林敏捷, 苏玲. 2022. 中国中西部盆地典型陆相页岩纹层结构与储层品质评价. *中国石油勘探*, 27(5): 62–72. [Wu S T, Zhu R K, Luo Z, Yang Z, Jiang X H, Ling M J, Su L. 2022. Laminar structure of typical continental shales and reservoir quality evaluation in central-western basins in China. *China Petroleum Exploration*, 27(5): 62–72]
- 武瑾, 李海, 杨学锋, 赵圣贤, 郭伟, 孙玉平, 刘永畅, 刘兆龙. 2023. 深层海相页岩纹层类型、组合及其对储层品质的影响: 以四川盆地南部泸州区块龙马溪组一段一亚段为例. *石油学报*, 44(9): 1517–1531. [Wu J, Li H, Yang X F, Zhao S X, Guo W, Sun Y P, Liu Y Y, Liu Z L. 2023. Types and combinations of deep marine shale laminae and their effects on reservoir quality: a case study of the first submember of Member 1 of Longmaxi Formation in Luzhou block, south Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(9): 1517–1531]
- 向克满, 史洪亮, 王幸蒙, 赵勇, 董晓霞, 庞河清, 张烨毓. 2023. 川南地区深层页岩气储层特征及含气性主控因素. *东北石油大学学报*, 47(3): 44–55. [Xiang K M, Shi H L, Wang X M, Zhao Y, Dong X X, Pang H Q, Zhang Y Y. 2023. Reservoir characteristics and main controlling factors of gas content of deep shale gas in Southern Sichuan Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 47(3): 44–55]
- 邢浩婷, 匡立春, 伍坤宇, 张静, 张娜, 张梦麟, 邓立本, 陆振华, 李亚锋, 张庆辉. 2024. 柴达木盆地英雄岭页岩岩相特征及有利源储组合. *中国石油勘探*, 29(2): 70–82. [Xing H T, Kuang L C, Wu K Y, Zhang J, Zhang N, Zhang M L, Deng L B, Lu Z H, Li Y F, Zhang Q H. 2024. Lithofacies characteristics and favorable source rock-reservoir combination of Yingxiongling shale in Qaidam Basin. *China Petroleum Exploration*, 29(2): 70–82]
- 熊周海, 操应长, 王冠民, 梁超, 石晓明, 李明鹏, 付尧, 赵寿强. 2019. 湖相细粒沉积岩纹层结构差异对可压裂性的影响. *石油学报*, 40(1): 74–85. [Xiong Z H, Cao Y C, Wang G M, Liang C, Shi X M, Li M P, Fu Y, Zhao S Q. 2019. Influence of laminar structure differences on the fracability of lacustrine fine-grained sedimentary rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 40(1): 74–85]
- 于洲, 黄正良, 李维岭, 李靖, 曹斌凤, 吴东旭, 胡琮, 吴兴宁, 朱文博. 2023. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组海相页岩岩相类型及优质储层发育特征. *天然气工业*, 43(3): 23–33. [Yu Z, Huang Z L, Li W L, Li J, Cao B F, Wu D X, Hu Z, Wu X N, Zhu W B. 2023. Lithofacies types and high-quality reservoir development characteristics of marine shale in the Middle Ordovician Wulalike Formation, Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 43(3): 23–33]
- 曾棒, 刘小平, 刘国勇, 王绍春, 李国永. 2021. 陆相泥页岩层系岩相测井识别与预测: 以南堡凹陷拾场次洼为例. *地质科技通报*, 40(1): 69–79. [Zeng B, Liu X P, Liu G Y, Wang S C, Li G Y. 2021. Logging identification and prediction of lithofacies of lacustrine shale system in Shichang Sub-Sag, Nanpu Depression. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(1): 69–79]
- 张益麟, 王贵文, 宋连腾, 包萌, 黄玉越, 赖锦, 王松, 黄立良. 2023. 页岩岩相测井表征方法: 以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例. *地球物理学进展*, 38(1): 393–408. [Zhang Y L, Wang G W, Song L T, Bao M, Huang Y Y, Lai J, Wang S, Huang L L. 2023. A logging identification method of shale lithofacies: a study of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin. *Progress in Geophysics*, 38(1): 393–408]
- 赵建华, 金之钧, 金振奎, 温馨, 耿一凯, 颜彩娜, 聂海宽. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境. *石油学报*, 37(5): 572–586. [Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Wen X, Geng Y K, Yan C N, Nie H K. 2016. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 572–586]
- 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 张素荣, 蔡毅, 曹琰, 康缘. 2022. 细粒沉积学研究进展与发展方向. *石油与天然气地质*, 43(2): 251–264. [Zhu R K, Li M Y, Yang J R, Zhang S R, Cai Y, Cao Y, Kang Y. 2022. Advances and trends of fine-grained sedimentology. *Oil & Gas Geology*, 43(2): 251–264]
- 邹才能, 赵群, 王红岩, 熊伟, 董大忠, 于荣泽. 2022. 中国海相页岩气主要特征及勘探开发主体理论与技术. *天然气工业*, 42(8): 1–13. [Zou C N, Zhao Q, Wang H Y, Xiong W, Dong D Z, Yu R Z. 2022. The main characteristics of marine shale gas and the theory & technology of exploration and development in China. *Natural Gas Industry*, 42(8): 1–13]
- Avanzini A, Balossino P, Brignoli M, Spelta E, Tarchiani C. 2016. Lithologic and geomechanical facies classification for sweet spot identification in gas shale reservoir. *Interpretation*, 4(3): SL21–SL31.
- Han Z, Wang G, Wu H, Feng Z, Tian H, Xie Y, Wu H. 2024. Lithofacies characteristics of Gulong shale and its influence on reservoir physical properties. *Energies (Basel)*, 17(4): 779.
- Huang Y, Wang G, Zhang Y, Xi J, Huang L, Wang S, Zhang Y, Lai J, Jiang C. 2023. Logging evaluation of pore structure and reservoir quality in shale oil reservoir: the Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, China. *Marine and petroleum geology*, 156: 106454.
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475–499.
- Pang X, Wang G, Kuang L, Lai J, Gao Y, Zhao Y, Li H, Wang S, Bao M, Liu S, Liu B. 2022. Prediction of multiscale laminae structure and reservoir quality in fine-grained sedimentary rocks: the Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin. *Petroleum Science*, 19(6): 2549–2571.
- Pang X, Wang G, Mountney N P, Kuang L, Zhao X, Zhao Y, Li H, Han Z, Tian H. 2023. Prediction of lamina structure and reservoir quality in shale using well logs: the Cretaceous Qingshankou Formation, Gulong Sag, Songliao Basin, China. *Geoenergy Science and Engineering*, 227: 211827.
- Qian C, Li X, Zhang Q, Shen W, Guo W, Lin W, Han L, Cui Y, Huang Y, Pei X, Yu Z. 2023. Reservoir characteristics of different shale lithofacies and their effects on the gas content of Wufeng-Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, China. *Geoenergy Science and Engineering*, 225: 211701.
- Wang S, Wang G, Huang L, Song L, Zhang Y, Li D, Huang Y. 2021. Logging evaluation of lamina structure and reservoir quality in shale oil reservoir of Fengcheng Formation in Mahu Sag, China. *Marine and Petroleum Geology*, 133: 105299.

(责任编辑 郑秀娟)