

珠江口盆地白云凹陷北部深水低渗气层测井识别与分类

程梦园¹, 石磊², 余彦杉¹, 胡博宇¹, 周怡杉¹, 张泽鑫¹, 潘锡霖¹, 吴丰¹

¹西南石油大学, 地球科学与技术学院, 四川 成都

²中海石油深圳分公司, 南海东部石油研究院, 广东 深圳

收稿日期: 2023年6月12日; 录用日期: 2023年7月14日; 发布日期: 2023年7月24日

摘要

珠江口盆地白云凹陷北部区域珠江组~恩平组水深与埋藏深度较大, 气层具有低渗特征, 导致气层测井识别与分类困难, 给气层勘探开发带来很大困扰。本文在储层孔隙结构与测井响应特征分析的基础上, 采用声波时差-电阻率交会图法、补偿中子-电阻率交会图法、补偿密度-电阻率交会图法、泊松比与体积压缩系数-电阻率交会图法和纵横波速度比法共五种方法开展气层识别研究; 以渗透率为主要界限, 结合铸体薄片、核磁共振、高压压汞等实验结果, 开展了低渗气层分类研究。结果表明, 泊松比与体积压缩系数-电阻率交会图法和声波时差-电阻率交会图法效果最好; 低渗气层可分为三类, I类气层孔隙度 $\geq 10.0\%$ 、渗透率 ≥ 10.0 mD; II类气层孔隙度为 $7.0\% \sim 13.0\%$ 、渗透率为 1.0 mD ~ 10.0 mD; III类气层孔隙度为 $6.6\% \sim 10.0\%$ 、渗透率为 $0.45 \sim 1.0$ mD。研究提出的气层识别方法和分类方法均在珠江口盆地白云凹陷应用效果较好, 可为其他深水低渗气层测井评价提供参考。

关键词

低渗气层, 测井, 孔隙度, 渗透率, 珠江口盆地

Log Identification and Classification of Deep-Water Low Permeability Gas Layer in the Northern Part of Baiyun Sag of Pearl River Estuary Basin

Mengyuan Cheng¹, Lei Shi², Yanshan Yu¹, Boyu Hu¹, Yishan Zhou¹, Zexin Zhang¹, Xilin Pan¹, Feng Wu¹

¹School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

²Petroleum Research Institute of East South China Sea, Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen Guangdong

文章引用: 程梦园, 石磊, 余彦杉, 胡博宇, 周怡杉, 张泽鑫, 潘锡霖, 吴丰. 珠江口盆地白云凹陷北部深水低渗气层测井识别与分类[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(7): 722-732. DOI: 10.12677/ag.2023.137069

Abstract

The water depth and the burial depth of Pearl River Formation and Enping Formation in the northern area of Baiyun sag of Pearl River Estuary Basin are large, and the gas layer has low permeability characteristics, which leads to the difficulty of identification and classification of gas logging, which brings great trouble to the exploration and development of gas layer. Based on the analysis of reservoir pore structure and logging response characteristics, we used five methods, the acoustic transit-resistivity cross-section method, the compensation neutron-resistivity cross-section method, the compensation density-resistivity cross-section method, the Poisson's ratio and volume compressibility coefficient-resistivity cross-section method and the vertical and horizontal wave velocity ratio method, to conduct the research of layers' identification. With permeability as the main limit, combined with the experimental results of body sheet, nuclear magnetic resonance and mercury pressure, we conducted the research of layers' classification. The results showed that the Poisson's ratio and volume compressibility coefficient-resistivity cross-section method and the acoustic transit-resistivity cross-section method had the best effect; the low permeability gas layer can be divided into three categories, class I gas layer porosity greater than or equal to 10.0% and permeability greater than or equal to 10.00mD, class II gas layer porosity is 7.0%~13.0% and permeability 1.00~10.0 mD, class III gas layer porosity is 6.6%~10.0% and permeability is 0.45~1.0 mD. The gas layer identification method and classification method are well applied in Baiyun Sag of Pearl River Estuary Basin, which can provide reference for logging evaluation of other deep-water low permeability gas layers.

Keywords

Low-Permeability Gas Layer, Logging, Porosity, Permeability, Pearl River Estuary Basin

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内油气勘探开发技术的发展,中国南海油气勘探开发逐渐由浅水区转至深水区。我国南海油气勘探开发现状表明,深水气藏的勘探越来越受到重视,其比例越来越高。如今南海新增储量大部分为深水油气藏,其中珠江口盆地白云凹陷属于典型的深水区域,目前备受关注[1]。

珠江口盆地深水勘探具有储层距离烃源岩近、水深压力大、岩层比较致密和岩层非均质性较强等特点,勘探潜力大,但开发有一定的难度[2]。珠江口盆地白云凹陷北部区域珠江组至恩平组水深与埋藏深度较大,储层泥质含量重和胶结物含量较常规储层高,孔隙度较常规储层更小,孔隙结构复杂,气层具有低渗特征[3]。该类型气层和流体的性质与常规气层的性质有一定程度的不同[4]。如果按照常规气层的识别和分类方法,不会得到真实的地下信息,可能影响后续工作的勘探。目前为止也有许多学者对特殊气层进行过研究。

最近几年,为满足对天然气勘探发现的需求,对深层大中型天然气田的勘探是重点。但由于研究方法有限,目前的方法对深水低渗气层识别难度大,给气层勘探开发、储量计算等工作带来了诸多困扰[5]。

具体表现在以下几个方面：1) 对含气性认识有待进一步提高；2) 岩石低孔低渗，孔隙结构复杂导致的气层参数计算精度偏低；3) 对于深水低渗对储层物性、电性和流体性质的影响，流体性质识别方法等诸多方面仍存在较多问题[6]。因此有必要对深水低渗气层的识别方法及其分类进行研究。

气层识别的主要方法是根据地层的测井响应特征，通过建立气层敏感响应参数的交会图来达到识别气层的效果，通过文献调研发现，国内外现有气层识别方法主要为以下三类：1) 基于常规测井资料利用测井曲线重叠法来识别气层；2) 基于阵列声波测井资料利用纵横波时差、泊松比和纵横波速比等参数来识别气层；3) 基于核磁共振测井资料利用核磁孔隙度差和地层流体的纵向弛豫时间差来识别气层。低渗砂岩储层岩性和孔隙结构复杂，储层内油气水分布不均等特点导致国内外对深水低渗气层解释评价的精度不高[7]-[13]。

本文以珠江口盆地白云凹陷北部珠江组至恩平组的低渗气层进行研究，通过气层的孔隙结构、声波、力学参数特征，采用了声波时差 - 电阻率交会图法、补偿中子 - 电阻率交会图法、补偿密度 - 电阻率交会图法、泊松比与体积压缩系数 - 电阻率交会图法、纵横波速度比法共五种方法来对气层进行识别，均有较高的准确率，其中泊松比与体积压缩系数 - 电阻率交会图法和声波时差 - 电阻率交会图法应用效果最好。以渗透率作为主要分类界限，结合铸体薄片、核磁共振、高压压汞等实验，将所研究的气层划分成了 I、II、III 个类别，统计应用效果较好，可以为其他深水低渗气层的测井评价提供一些可靠的参考。

2. 研究区地质概况

2.1. 构造特征

珠江口盆地位于中国南海北部，面积约为 26.68 万 km²。白云凹陷位于珠江口盆地珠二坳陷中部深水地带，水深为 200~2000 m。白云凹陷被北面番禺低隆起、西南面云开低凸起、东南面云荔低隆起所包围。白云凹陷整体呈现南北方向窄，东西方向宽的形态，面积约为 2 × 10⁴ km²，具有面积大、沉积地层厚度大的特点(图 1) [14]。白云凹陷鼻状隆起带与陆架坡折耦合是形成有构造背景的岩性圈闭的最有利区带，研究区就位于这个鼻状构造带上[15] [16] [17]。

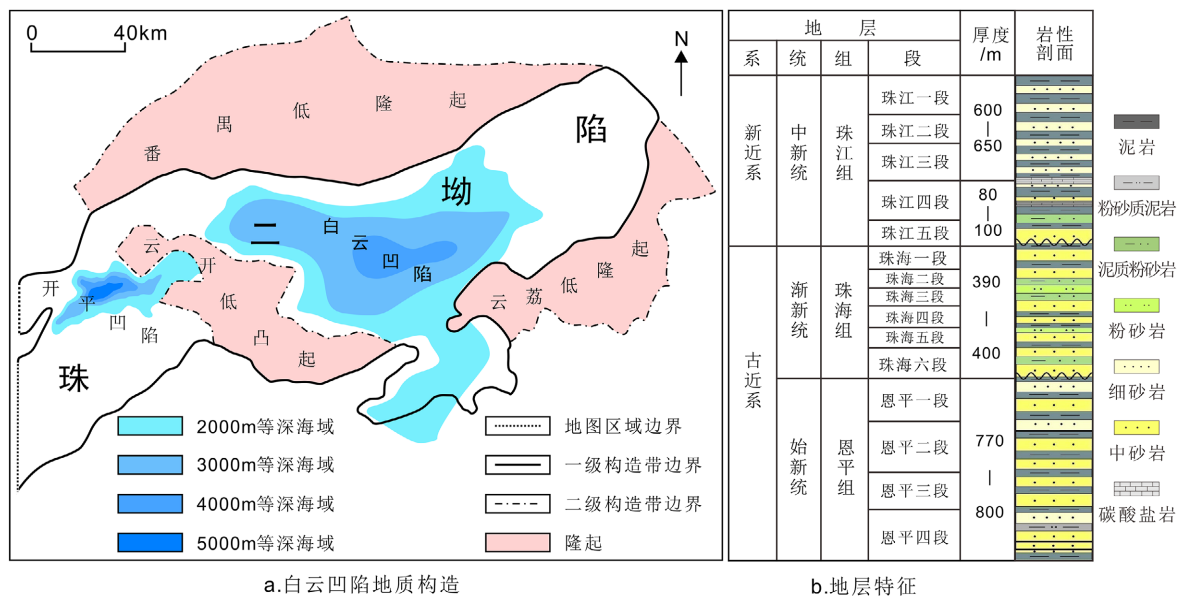


Figure 1. Structural and stratigraphic characteristics of the study area
图 1. 研究区构造特征与地层特征

2.2. 沉积相特征

研究区分为珠江组、珠海组和恩平组共三个组。珠江组发育陆架边缘三角洲-深水扇, 研究区主要发育斜坡扇沉积。珠海组整体呈海退进积型层序组合, 早期主要发育三角洲平原-三角洲前缘沉积, 沉积物粒度相对较粗; 晚期主要发育三角洲前缘沉积, 沉积物粒度相对偏细, 同时泥质含量较高。研究区基本处于三角洲外前缘-浅海, 河口坝、远砂坝沉积, 沉积物粒度较细。恩平组沉积时期湖盆宽且浅, 整体位于大型三角洲平原亚相, 含砂率较高, 分流河道比较发育。其东南侧进入下平原亚相, 分流河道及心滩连片分布[18] [19] [20]。

3. 储层特征与测井响应

3.1. 储层岩性特征

珠江组上部主要岩性为泥岩, 下部主要为中-细砂岩; 珠海组上部主要为粉细砂岩, 砂泥互层, 下部主要为粗砂岩; 恩平组颗粒粒度偏大, 主要为含砾粗砂岩和粗砂岩, 夹薄层泥岩。X 衍射分析表明, 储层矿物主要为石英, 含少量长石与粘土矿物(图 2)。

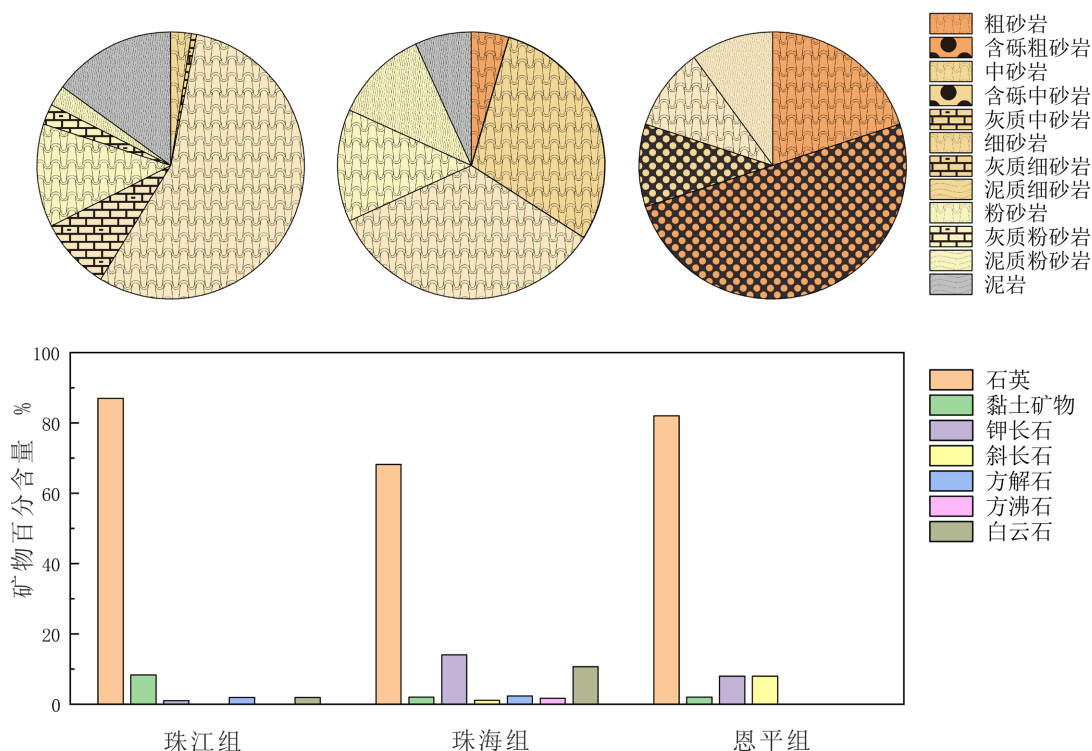


Figure 2. Lithologic characteristics of the study area
图 2. 研究区岩性特征

3.2. 储层物性特征

研究区孔隙度主要分布于 6%~15%之间, 渗透率随颗粒粒度变细而降低, 整体物性较差。珠江组、珠海组和恩平组物性范围较为相似, 但珠江组物性略优于珠海组和恩平组。珠江组岩心孔隙度主要分布于 6%~18%之间, 渗透率大于 1 mD, 孔渗相对偏高。岩心孔隙度主要分布于 6%~9%之间, 渗透率小于 0.1 mD, 孔渗相对偏低。

3.3. 储层测井响应

研究区不同层位砂岩的测井响应特征有明显差异, 随地层埋深增加其变化规律如下: 1) 由珠江组至珠海组, 砂岩自然伽马/GR 逐渐增加; 由珠海组至恩平组, 砂岩自然伽马又逐渐降低; 2) 由珠海组至恩平组, 深探测电阻率/RT 逐渐增加(图 3); 3) 由珠海组至恩平组, 声波时差/AC 逐渐增加; 4) 由珠江组至珠海组, 砂岩补偿中子/CNL 逐渐减小; 由珠海组至恩平组, 砂岩补偿中子又逐渐增大; 5) 由珠海组至恩平组, 砂岩密度/DEN 逐渐减小(图 4)。

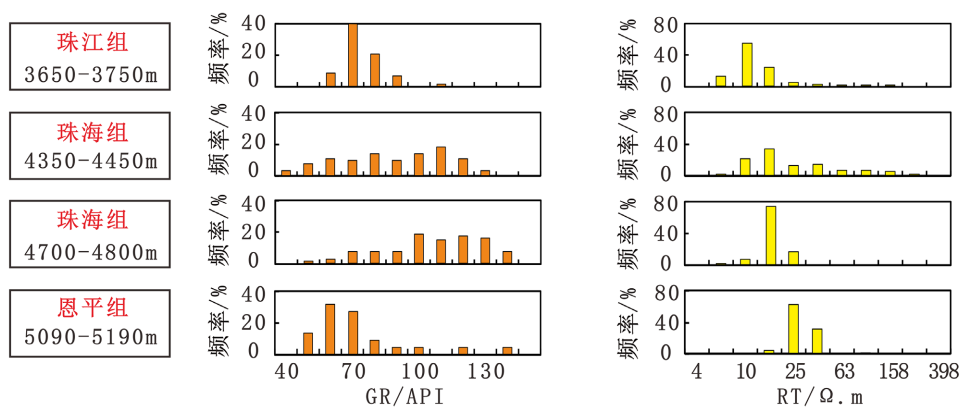


Figure 3. GR and RT log response characteristics in the study area

图 3. 研究区 GR 和 RT 测井响应特征

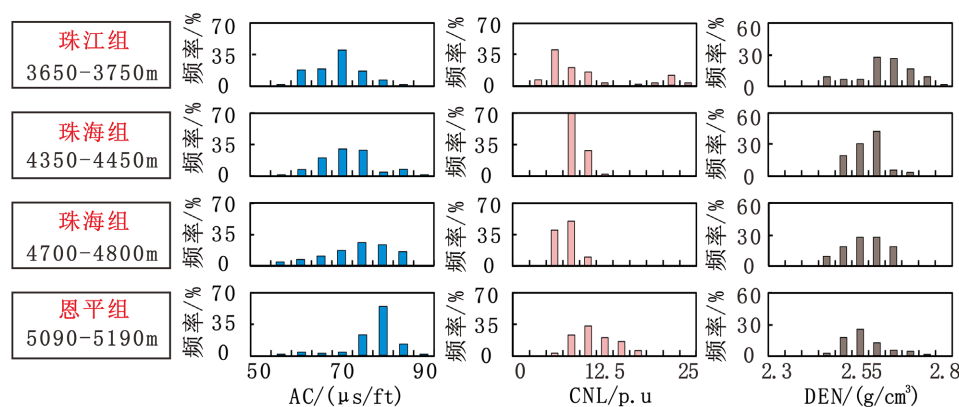


Figure 4. AC, CNL and DEN log response characteristics in the study area

图 4. 研究区 AC、CNL 和 DEN 测井响应特征

4. 气层识别方法

4.1. 声波时差 - 电阻率交会图法

声波时差曲线能较好反映储层物性, 同时能在一定程度上反映含气性, 对气层具有一定的敏感性。电阻率曲线能较好反映储层流体性质, 不同的流体具有不同的响应特征[21] [22]。相比水层, 储层含气导致声波增大, 电阻率升高。随地层埋深增加, 一方面储层物性变差, 另一方面地层孔隙压力增加导致含气饱和度有一定程度增加, 因此电阻率随层位更深, 深度和地层压力增加, 可以划分出低渗气层区域。以珠江组和珠海组为例, 珠江组和珠海组 AC-RT 交会图(图 5(a))可以明显区分水层、干层、气层, 其中珠海组干层与水层分界线以及干层与气层分界线均比珠江组要小。图版珠江组共计 32 个测试层, 其中

30 个符合, 2 个不符合, 符合率 93.75%; 珠海组共计 37 个测试层, 其中 34 个符合, 3 个不符合, 符合率 91.89%。

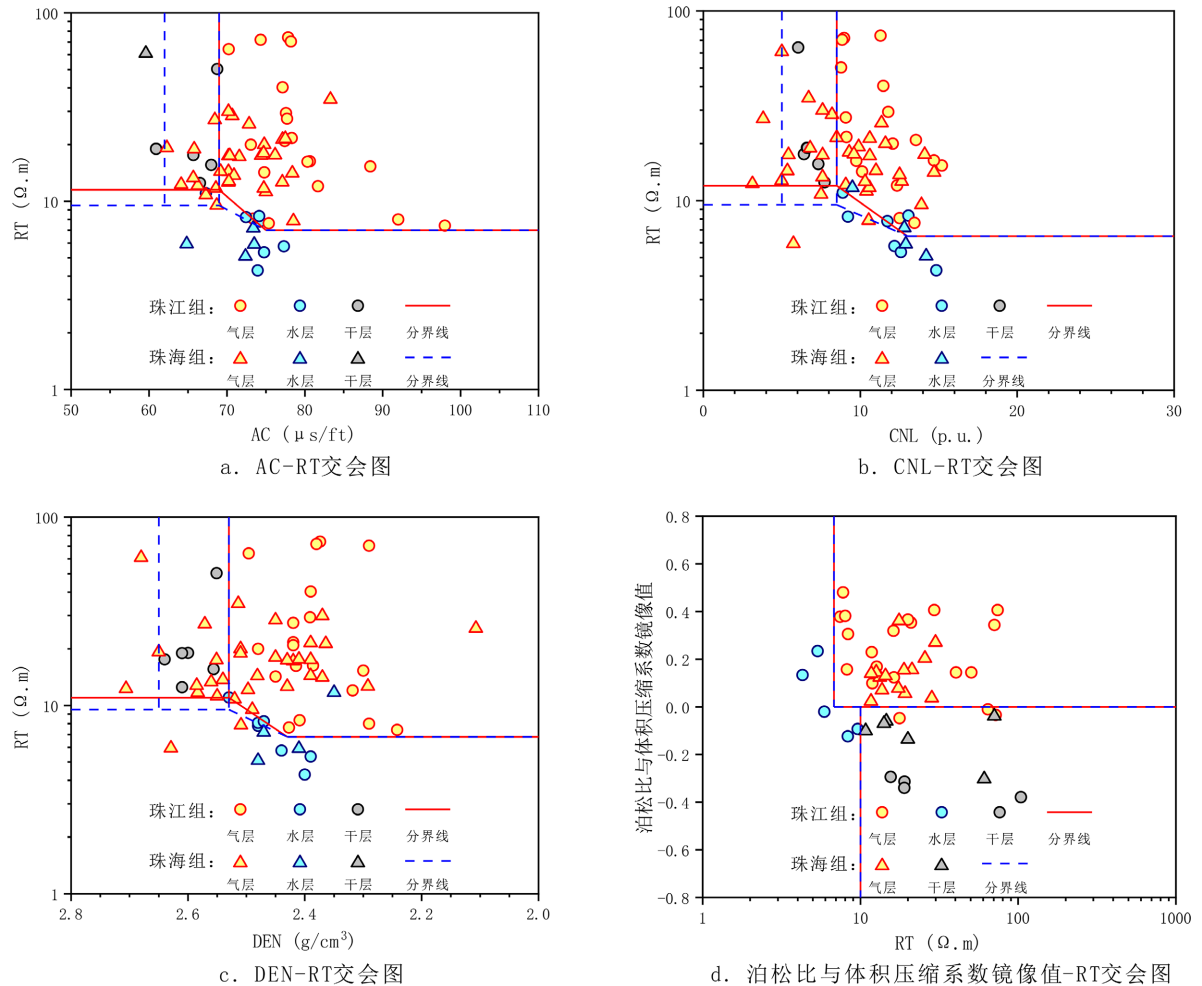


Figure 5. Cross-sections of the Pearl River Group and Zhuhai Group

图 5. 珠江组和珠海组交会图

4.2. 补偿中子 - 电阻率交会图法

补偿中子测井主要反映孔隙流体中含氢量的变化, 当地层含气时, 由于气体的挖掘效应, 中子测井值减小。埋深增加, 地层压力增大, 导致气体密度增大, 气体挖掘效应增强, 中子测井值减小[23] [24] [25]。相比水层, 地层含气导致电阻率增高, 可以用来判别储层流体性质。因此气层电阻率较高, 中子测井值较低, 水层与之相反[26] [27]。以珠江组和珠海组为例, 珠江组和珠海组 CNL-RT 交会图(图 5(b))可以明显区分水层、干层、气层, 其中珠海组干层与水层分界线以及干层与气层分界线均比珠江组要小。图版珠江组共计 32 个测试层, 其中 28 个符合, 4 个不符合, 符合率 87.50%; 珠海组共计 37 个测试层, 其中 34 个符合, 3 个不符合, 符合率 91.89%。

4.3. 补偿密度 - 电阻率交会图法

在纯水地层中, 当密度测井响应值增加(减小)时, 电阻率值呈减小(增加)趋势, 即电阻率与密度测井

响应值呈一定的负相关；在纯气地层中，当密度测井值增加时，孔隙度呈减小趋势，电阻率也相对降低，即电阻率与密度测井响应值也呈现一定的负相关[28]。随深度增加，地层压力变大，地层更致密导致密度变大，电阻率则变小。以珠江组和珠海组为例，珠江组和珠海组 DEN-RT 交会图(图 5(c))可以明显区分水层、干层、气层，珠海组干层与气层分界线密度值变大，而干层与水层分界线电阻率值减小。图版珠江组共计 32 个测试层，其中 30 个符合，2 个不符合，符合率 93.75%；珠海组共计 37 个测试层，其中 34 个符合，3 个不符合，符合率 91.89%。

4.4. 泊松比与体积压缩系数 - 电阻率交会图法

泊松比主要反映了岩石的压缩能力和变形能力。不同岩性和流体地层的泊松比存在一个经验值，它反映泊松比对岩性和含油气情况的敏感程度，一般来说，泥岩泊松比在 0.15~0.40 之间，含气砂岩泊松比在 0.10~0.15 之间，骨架砂岩泊松比为 0.15~0.32，含水砂岩泊松比为 0.32~0.40。当地层含天然气时，泊松比降低，体积压缩系数增大，电阻率增大[29] [30]。以珠江组和珠海组为例，珠江组和珠海组泊松比与体积压缩系数镜像值-RT 交会图(图 5(d))可以明显区分水层、干层和气层，随深度增加，分界线没有变化。图版珠江组共计 22 个测试层，20 个符合，1 个基本符合，1 个不符合，符合率 95.5%；珠海组共计 4 个测试层，4 个符合，0 个不符合，符合率 100%。

4.5. 纵横波速度比法

气体的密度和弹性都较低，会明显抑制纵波的传播，因此纵波速度对气异常敏感，少量的气就会使纵波速度明显降低；而横波速度对气不敏感，地层含气仅使横波速度略微降低。纯水层中，波速度没有受到气体的影响，纵横波速度比相对较大，因此含气地层的纵横波速度比要远远小于饱和水层的[31] [32]，这一特性可用来判别储层流体性质。通过分析纵横波在水层、气层的响应特征，可以找出一条理论的纵横波速度比曲线(一般指水层)，将该曲线与实测纵横波速度比曲线相比较，交线以下为气层(图 6)，此方法可用来辅助识别气层。

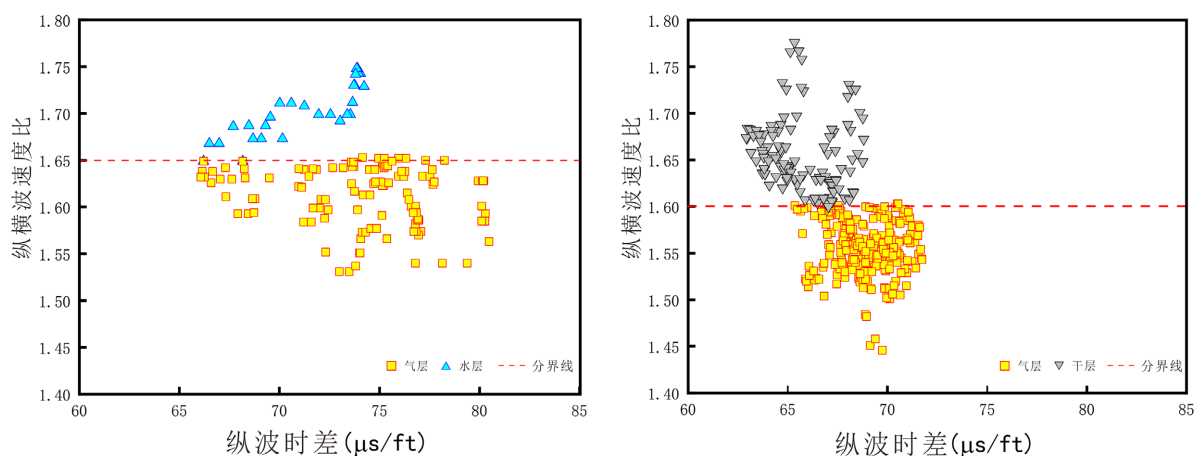


Figure 6. Longitudinal and transverse wave velocity ratio gas layer identification dividing line

图 6. 纵横波速度比气层识别划分线

5. 气层分类方法

以渗透率/PERM 为主要界限，结合铸体薄片、核磁共振、高压压汞等实验[33] [34] [35]，将深水低渗气层划分为 I、II、III 类(图 7)。

I类储层: PERM ≥ 10.00 mD; 孔隙类型主要为粒间孔, 孔径主要分布于 0.20~0.58 mm 之间; 核磁 T_2 谱峰值约 460.0 ms; 孔隙度/POR $\geq 10.0\%$; S_w 分布于 21.0%~35.0%之间; 高压压汞进汞饱和度分布于 90.0%~99.0%之间; 喉道半径分布于 15.0~30.0 μm 之间。

II类储层: PERM 分布于 1.00~10.00 mD 之间; 孔隙类型主要为粒内溶孔和粒间孔, 孔径主要分布于 0.1~0.2 mm 之间; 核磁 T_2 谱峰值约 70.0 ms; POR 分布于 7.0%~13.0%之间, S_w 分布于 30%~45%之间; 高压压汞进汞饱和度分布于 85.0%~90.0%之间; 喉道半径分布于 4.0~15.0 μm 之间。

III类储层: PERM 分布于 0.45~1.00 mD 之间; 孔隙类型主要为次生粒间孔, 孔径主要分布于 0.1~0.15 mm 之间; 核磁 T_2 谱偏左, 主峰值约 20 ms; POR 分布于 6.6%~10%之间; S_w 分布于 42%~60%之间; 高压压汞进汞饱和度分布于 80%~85%之间; 喉道半径分布于 0.5~0.6 μm 之间。

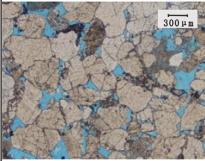
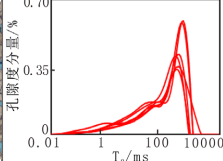
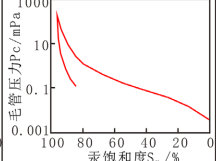
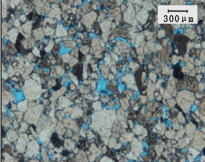
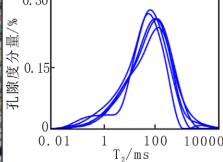
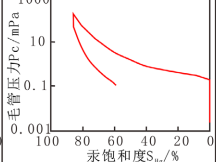
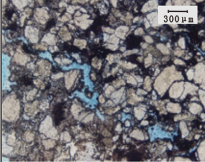
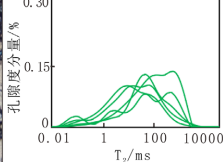
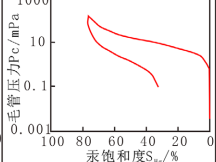
分类	薄片特征	核磁特征	压汞特征	AC ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	CNL (p.u.)	DEN (g/cm^3)	POR (%)	PERM (mD)	S_w (%)
I类				75 ~ 80	7.6 ~ 9.4	2.33 ~ 2.4	≥ 10	≥ 10	21 ~ 35
	孔隙半径0.2-0.58mm, 孔隙较发育分布不均匀	核磁 T_2 谱偏右, 峰值为460ms左右	最大汞饱和度95.80%, 喉道半径15-30 μm						
II类				73 ~ 77.5	9.8 ~ 11	2.37 ~ 2.4	7 ~ 13	1 ~ 10	30 ~ 45
	孔隙半径0.1-0.2mm, 连通性好分布较均匀	核磁 T_2 谱居中, 峰值为70ms左右	最大汞饱和度86.53%, 喉道半径4-15 μm						
III类				67 ~ 70	6 ~ 6.4	2.5 ~ 2.54	6.5 ~ 10	0.45 ~ 1	42 ~ 60
	孔隙半径0.1-0.15mm, 连通性差分布不均匀	核磁 T_2 谱偏左, 峰值为20ms左右	最大汞饱和度80.77%, 喉道半径0.5-0.6 μm						

Figure 7. Evaluation criteria for gas layer classification

图 7. 气层分类评价标准

6. 应用实例

以研究区 A 井和 B 井为例(图 8), 根据气层分类标准, 可以划分出 I、II、III 类储层以及其测井曲线变化特征。

I 类储层(如图 8 中珠江组 3350~3388m1 号层段所示)的常规测井曲线表现为 GR 低值; AC 大幅度增大, 分布于 75.0~80.0 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 之间; CNL 略微增大, 分布于 7.6~9.4 p.u.之间; DEN 大幅度降低, 分布于 2.33~2.40 g/cm^3 之间。研究区珠江组主要发育此类储层。

II 类储层(如图 8 中珠江组 3388~3400m2、3 号层段和珠江组 3948~3968m5 号层段所示)的常规测井曲线表现为 GR 中低值; AC 大幅度增大, 分布于 73.0~77.5 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 之间; CNL 略微增大, 分布于 9.8~11.0 p.u.之间; DEN 小幅度降低, 分布于 2.37~2.40 g/cm^3 之间。研究区珠江组主要发育此类储层。

III类储层(如图8中恩平组5138~5159m7号层段所示)的常规测井曲线表现为GR中值; AC略微增大, 分布于67~70 μs/ft之间; CNL不变, 分布于6~6.4 p.u.之间; DEN小幅度降低, 分布于2.5~2.54 g/cm³之间。研究区恩平组主要发育此类储层。

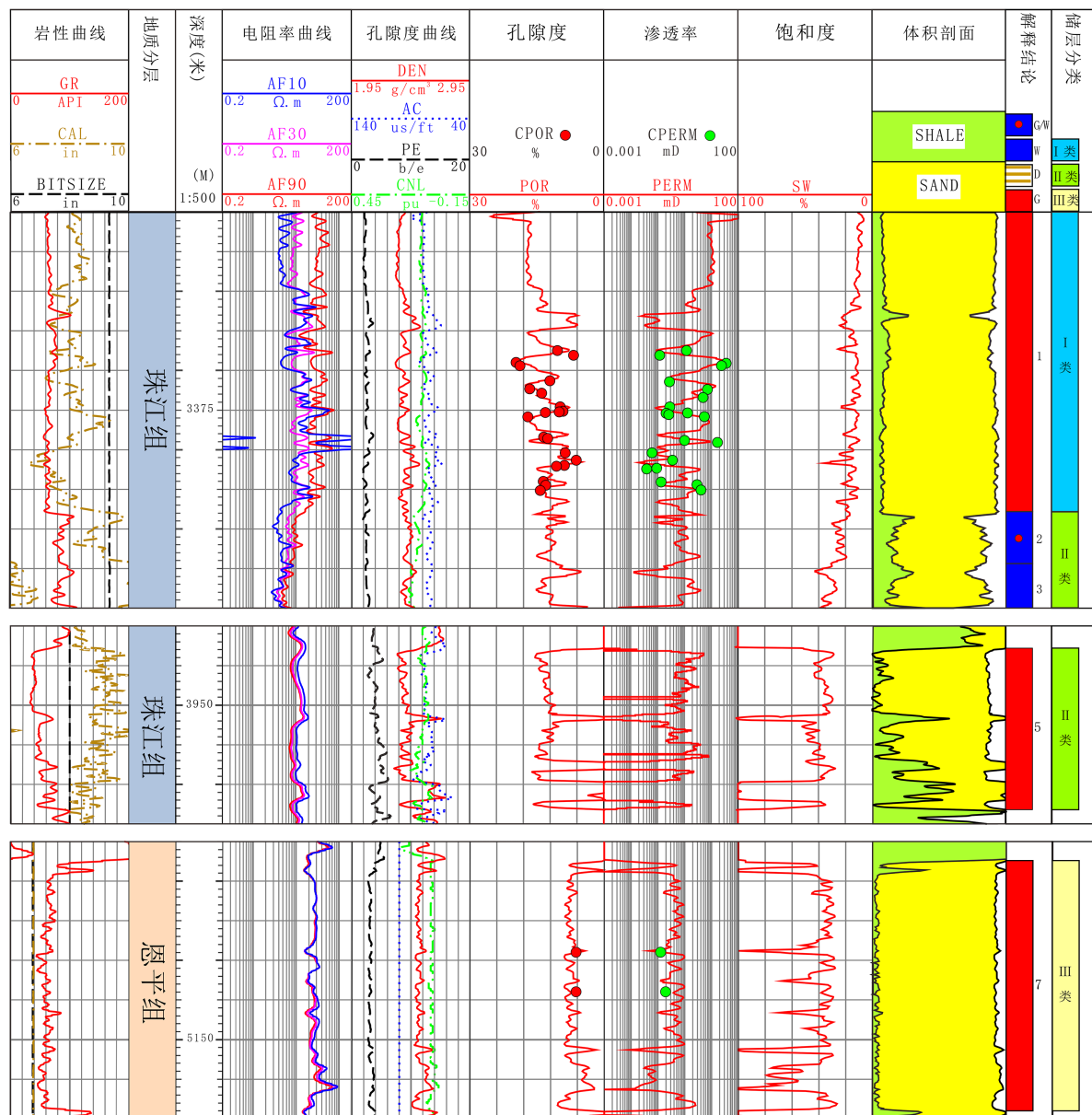


Figure 8. Characteristics of conventional logging curves for class I, II and III reservoirs

图 8. I、II、III 类储层常规测井曲线特征

7. 结论

1) 白云凹陷北部深水砂岩整体孔隙度与渗透率较低, 珠江组物性略优于珠海组和恩平组。由珠江组至恩平组, 测井响应特征受物性与含气性的共同影响。随地层埋深增加, 砂岩自然伽马先增加再降低, 深探测电阻率逐渐增加, 声波时差逐渐增加, 补偿中子先减小再增加, 密度逐渐减小。

2) 论文提出了 5 种深水低渗气层识别方法, 进一步提高了研究区深水低渗气层识别准确率。其中泊松比与体积压缩系数 - 电阻率交会图法效果最好(准确率为 96.43%~100.00%), 其次是声波时差 - 电阻率交会图法(准确率为 91.89%~93.75%)和补偿密度 - 电阻率交会图法(准确率为 90.60%~91.89%)。

3) 论文以渗透率为主要界限, 将深水低渗气层划分为 I、II、III 类, 明确并细化了深水低渗气层的分类标准: I 类气层孔隙度 $\geq 10.0\%$ 、渗透率 ≥ 10.0 mD; II 类气层孔隙度为 7.0%~13.0%、渗透率为 1.0 mD~10.0 mD; III 类气层孔隙度为 6.6%~10.0%、渗透率为 0.45~1.0 mD。

基金项目

2022 年四川省大学生创新训练计划项目“南海东部油田低渗储层岩石物理实验与压裂后储层有效厚度下限研究”(编号 S202210615162)。

参考文献

- [1] 张强, 吕福亮, 贺晓苏, 等. 南海近 5 年油气勘探进展与启示[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 54-61.
- [2] 谢玉洪, 袁全社. 中国近海深水深层油气地球物理勘探实践与展望[J]. 石油物探, 2023, 62(2): 183-193.
- [3] 陈一鸣, 谢明英, 闫正和, 等. 珠江口盆地恩平凹陷海相高泥质砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(1): 14-19.
- [4] 张文昭, 张厚和, 李春荣, 等. 珠江口盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 346-352+363.
- [5] 张蕾, 成志刚, 冯春珍, 等. 致密砂岩气层识别方法研究及应用效果分析[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 648-652.
- [6] 江同文, 孙雄伟. 中国深层天然气开发现状及技术发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 610-621.
- [7] Johnston, J.L. and Lee, W.J. (2019) Identification of Productive Layers in Low-Permeability Gas Wells. *Journal of Petroleum Technology*, **44**, 1240-1248. <https://doi.org/10.2118/21270-PA>
- [8] Drummond, C.N. (2023) On the Classification of Sandstones. *Earth Sciences History*, **42**, 215-232. <https://doi.org/10.17704/1944-6187-42.1.215>
- [9] Gao, Y., Li, T., Zhang, Z., Yu, J., Zhang, Y., Li, X. and Zhao, H. (2023) Research on Fluid Mobility in Tight-Sandstone with a NMR Fractal Theory Pore Classification Method. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article 1035702. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1035702>
- [10] Wang, H., Kou, Z., Bagdonas, D.A., Phillips, E.H.W., Alvarado, V., Johnson, A.C., Jiao, Z., McLaughlin, J.F. and Quillinan, S.A. (2022) Multiscale Petrophysical Characterization and Flow Unit Classification of the Minnelusa Eolian Sandstones. *Journal of Hydrology*, **607**, Article ID: 127466. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127466>
- [11] Garzanti, E. (2019) Petrographic Classification of Sand and Sandstone. *Earth-Science Reviews*, **192**, 545-563. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.014>
- [12] 胡向阳, 吴健, 陈嵘, 等. 南海珠江口盆地文昌 A 凹陷低孔低渗油气层测井识别方法及应用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(6): 46-50. <https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2012.06.004>
- [13] 宁从前, 谭廷栋, 李宁. 核磁共振测井在天然气勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(2): 42-49.
- [14] 张伟, 关利军, 李纪智, 代槿, 吴丰. 高温高压气层的钻井液伤害室内定量评价方法[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(12): 1599-1610. <https://doi.org/10.12677/AG.2021.1112154>
- [15] 龙祖烈, 陈聪, 马宁, 等. 珠江口盆地深水白云凹陷油气成因来源与成藏特征[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 36-45.
- [16] 吴静. 珠江口盆地恩平凹陷北部隆起区油气远源富集与主控因素[J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 117-124.
- [17] 张功成, 杨海长, 陈莹, 等. 白云凹陷——珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 11-25.
- [18] 朱明, 张向涛, 黄玉平, 等. 珠江口盆地烃源岩特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2019, 40(S1): 53-68.
- [19] 李成海, 王家豪, 柳保军, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系沉积相类型[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1162-1170.
- [20] 张晶玉, 范廷恩, 王海峰, 等. 海相薄砂岩储层精细描述及地震沉积学认识——以南海珠江口盆地 H 油田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 680-687. <https://doi.org/10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.003>
- [21] 李松林, 练斌, 金力钻, 等. 砂岩气层测井定性识别新方法[J]. 石化技术, 2020, 27(2): 111-112.

- [22] 王安龙. 基于常规测井资料综合评价延川南致密砂岩气层[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(2): 75-79+82. <https://doi.org/10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2019.02.016>
- [23] 吴述林, 陈雪姣, 陈梅, 等. 致密砂岩气层识别技术方法研究[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(2): 205-209.
- [24] 张威, 贾会冲, 孙晓. 鄂尔多斯盆地定北区块太2段致密砂岩气层识别[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(1): 48-54.
- [25] 刘笑伟. 利用常规测井资料识别致密砂岩气层[J]. 辽宁化工, 2017, 46(4): 340-342.
- [26] 沈慧萍, 史振勤, 乔国安, 易明新. 深层气层识别方法研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 71-72+12.
- [27] 李霞, 石玉江, 王玲, 胡松. 致密砂岩气层测井识别与评价技术——以苏里格气田为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 62-68.
- [28] 魏志鹏, 冯青, 杨浩, 杜少波. 致密气藏气层识别方法综合应用研究[J]. 石油化工应用, 2017, 36(8): 110-116.
- [29] 桂俊川, 夏宏泉, 杨双定, 弓浩浩. 利用泊松比和流体压缩系数重叠包络线法识别气层[J]. 测井技术, 2015, 39(1): 114-118. <https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2015.01.023>
- [30] 弓浩浩, 夏宏泉, 崔丽香, 高飞龙. 基于测井推演的岩石力学参数识别致密砂岩气层[J]. 测井技术, 2015, 39(4): 496-500. <https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2015.04.020>
- [31] 郑志威. 多极子阵列声波测井在致密砂岩气层识别的应用[J]. 石化技术, 2016, 23(4): 167-168.
- [32] 张丽华, 潘保芝, 单刚义, 雷健. 基于纵横波速度的致密砂岩气层定性识别与定量计算方法研究[J]. 非常规油气, 2017, 4(6): 13-18.
- [33] 常宇, 刘明洁, 张庄, 叶素娟, 杨映涛, 伍玲, 张玲, 南红丽, 谭秀成, 曾伟, 连承波. 四川盆地川西坳陷须三段砂岩储层致密化过程定量模拟[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 311-323.
- [34] 廖明光, 李仕伦, 谈德辉. 根据压汞曲线估算储集层渗透率的模型[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(6): 503-505+456.
- [35] 卢振东, 刘成林, 臧起彪, 吴育平, 杨熙雅, 阳宏, 曾晓祥, 李闻达. 高压压汞联合分形理论分析致密砂岩孔隙结构: 以鄂尔多斯盆地合水地区为例[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 264-273.