

苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩储层 孔隙结构及非均质性特征

付茜¹, 段宏亮^{1,2}, 孙雅雄^{1,2}, 刘世丽^{1,2}, 杨艳¹, 周进峰¹, 李维¹, 杨保良^{1,3}

(1. 中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司, 江苏扬州 225000; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 3. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092)

摘要:为明确苏北盆地高邮凹陷阜二段(阜二段)陆相混积页岩储层特征,选取研究区典型页岩,采用扫描电镜、低温氮气吸附、高压压汞、核磁共振和 X 线衍射分析方法,确定页岩储层孔隙结构,分析研究区多重分形特征,刻画不同岩相、不同类型页岩储层孔隙结构复杂性和非均质性。结果表明:研究区阜二段发育 8 种主要岩相和 4 种页岩储层类型,页岩核磁共振 T_2 谱呈“多峰态”分布,不同类型页岩的 $T_{2, gm}$ 、 $T_{2, 35}$ 和 $T_{2, 50}$ 等孔隙结构特征参数差异明显;页岩孔隙结构具有多重分形特征,非均质性较强;IV 型至 I 型页岩孔隙度和孔隙(喉道)孔径减小,长英质体积分数减少,碳酸盐体积分数增加,多重分形参数 D_0 和 $\Delta\alpha$ 先减小后增大;II 型页岩中孔发育,孔隙结构最为简单,非均质性最弱, I 型页岩孔隙结构好,但孔隙非均质性较强。I 型高碳纹层状长英质—灰云质混积页岩和 II 型中碳纹层状长英质—灰云质混积页岩、灰云页岩为有利页岩油储层类型,纵向上发育于阜二段 II 亚段、IV 亚段中下部及 V 亚段中部。该结果为苏北盆地阜二段页岩油有利储层优选提供指导。

关键词:页岩储层;孔隙结构;非均质性;核磁共振;储层分类;多重分形;阜二段;高邮凹陷;苏北盆地

中图分类号:P618.13 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)05-0061-20

0 引言

随非常规油气资源勘探开发程度不断加深,页岩油作为非常规油气资源的重要组成,成为保障国家能源安全、推动原油增储上产的关键资源。中国页岩油资源丰富,在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和松辽盆地等含油气盆地实现重大战略突破^[1],在国家能源战略中的地位日益突出^[2-4]。作为控制油气赋存与可采性的关键因素,储层孔隙结构精细表征是开展页岩油“甜点评价”和开发方案优化的基础^[4]。

页岩储层具有强非均质性和多尺度孔隙系统,表现明显的复杂结构特征。图像法、吸附法、流体法和散射法等实验方法被应用于表征页岩孔隙结构^[5-6],如场发射扫描电镜(FE-SEM)、聚焦离子束扫描电镜(FIB-SEM)和纳米 CT 等被应用于可视化孔隙形态;低温氮气吸附、 CO_2 吸附与高压压汞实验可以提供孔径分布与孔体积信息,X 线小角散射(SAXS)、中子散射(SANS)及核磁共振(NMR)被应用于多尺度孔隙参数的定量表征^[7]。NMR 具有无损、快速和适用性广等优势,在页岩储层流体赋存状态与孔隙结构分析中被广泛应用^[8-9]。由于页岩孔隙具有高复杂性,常规参数(如孔隙度、平均孔径)难以全面反映微观结构特征。孔隙系统具有自相似与多尺度特征,适合采用分形理论进行定量刻画^[10-11]。传统分形模型通过吸附/进汞曲线计算分形维数,分析孔隙结构的复杂度与分类^[12-13],基于单一尺度或全局平均,存在分形维数一致而物理属性差异显著的局限性^[14-15]。多重分形理论在考虑局部异质性和尺度依赖性方面具有显著优势,采用广义维数、多重分形谱与奇异性指数等参数,刻画复杂孔隙的空间分布特征^[16-17],被广泛应用于 CO_2 吸附、氮气吸附及高压压汞实验数据的处理与分析^[11-12]。

基于核磁共振 T_2 谱信息开展页岩储层多重分形研究相对较少,限制在评价储层微观结构非均质性

收稿日期:2024-10-28;编辑:蔡田田

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1400100);中国石油化工股份有限公司科技开发部项目(P25161);中国石化江苏油田分公司科研课题资助项目(JS24002);中国石化江苏油田分公司科研课题资助项目(JS24038);中国石化江苏油田分公司科研课题资助项目(JD23002)

作者简介:付茜(1991—),女,硕士,副研究员,主要从事非常规油气勘探方面的研究。

通信作者:孙雅雄,E-mail:sunyaxiong2015@163.com

方面的应用^[17]。苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段(阜二段)在页岩油勘探方面取得突破性进展^[18-19]。苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩储层普遍发育微—纳米孔隙,孔隙类型多样,结构复杂^[20],可以采用多参数方法开展系统表征。综合应用扫描电镜、低温氮气吸附、高压压汞和核磁共振等测试方法,开展多重分形分析,提出页岩油储层分类方法,探讨不同岩相与储层类型的多尺度孔隙结构差异,为页岩油“甜点”优选与有利层系划分提供支持。

1 区域地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地东台坳陷中部,面积为 2 670 km²,是苏北盆地重要的含油气凹陷之一。其南以真武断层、吴堡断层与苏南隆起、吴堡低凸起相邻,北以平缓的斜坡与柘垛低凸起相接,西以菱塘桥低凸起、柳堡低凸起与金湖凹陷相隔,东接白驹凹陷^[21](见图 1),总体呈 NE—SW 走向。阜二段沉积时期,苏北盆地为湖相沉积,盆地持续下沉,水域逐渐扩大。研究区广泛发育一套厚度为 250~350 m 的半深湖—深湖相暗色泥页岩,厚度大,分布广,生烃条件有利,根据岩性、电性等特征,纵向上,阜二段自上而下划分为 5 个亚段(I~V)(见图 2),是页岩油勘探开发的重要地区和层系^[22-23]。

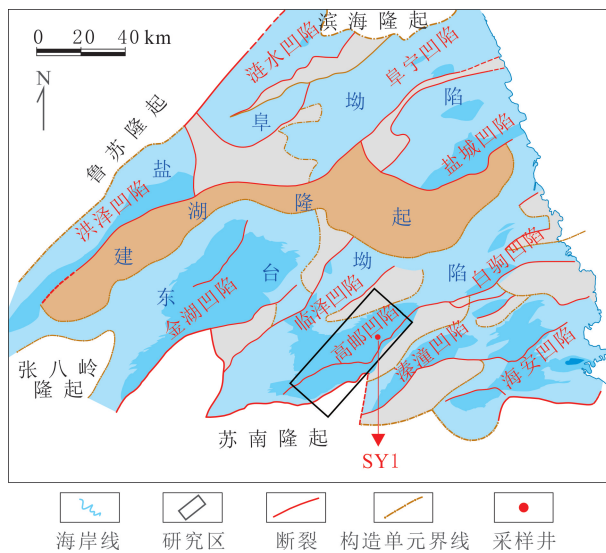


图 1 苏北盆地高邮凹陷构造位置

Fig. 1 Structural location of the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

2 样品采集与实验方法

选取苏北盆地高邮凹陷花庄地区阜二段 SY1 井的、深度范围为 3 470.0~3 690.0 m 的 25 个页岩样品,遵循平行采样原则,在无水条件下采用线切割技术,在垂直层理方向钻取直径为 2.5 cm、长度为 9.0 cm 的长柱塞样。将样品端面切割平整后,在纵向上分为两段,获得两个尺寸为 2.5 cm×3.5 cm 的短柱塞样,分别用于高压压汞(HPMI)和核磁共振(NMR)实验。岩心端面粉碎样主要用于 X 线衍射(XRD)、岩石热解(Rock-Eval)、总有机碳(TOC)、低温氮气吸附(LTN2GA)和扫描电镜(SEM)等测试分析。

岩石热解采用 Rock-Eval 7 型热解仪,样品经 100 目粉碎后,取质量 100 mg 置于热解坩埚,在 300 °C 恒温 3 min 测试常规热解参数 S₁;进行多温阶热解实验,在 200 °C 恒温 1 min 获取参数 S₁₋₁,以 25 °C/min 升温至 350、450 °C 后恒温 1 min,分别测试参数 S₁₋₂ 和 S₂₋₁。总有机碳质量分数由 CS-600 有机碳分析仪测定,按照 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳的测定》执行。X 线衍射分析采用 D/max-2500PC 衍射仪,按照 SY/T 5163—2010《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》,开展全岩与黏土矿物定性分析。扫描电镜分析使用 FEI Quanta 200F 场发射电镜,样品经过有机溶剂(体积比为 3:1 的二氯甲烷与丙酮)洗油、烘干处理后,采用氩离子束剖光,放大倍数为 200~80 000 倍,获取多尺度背散

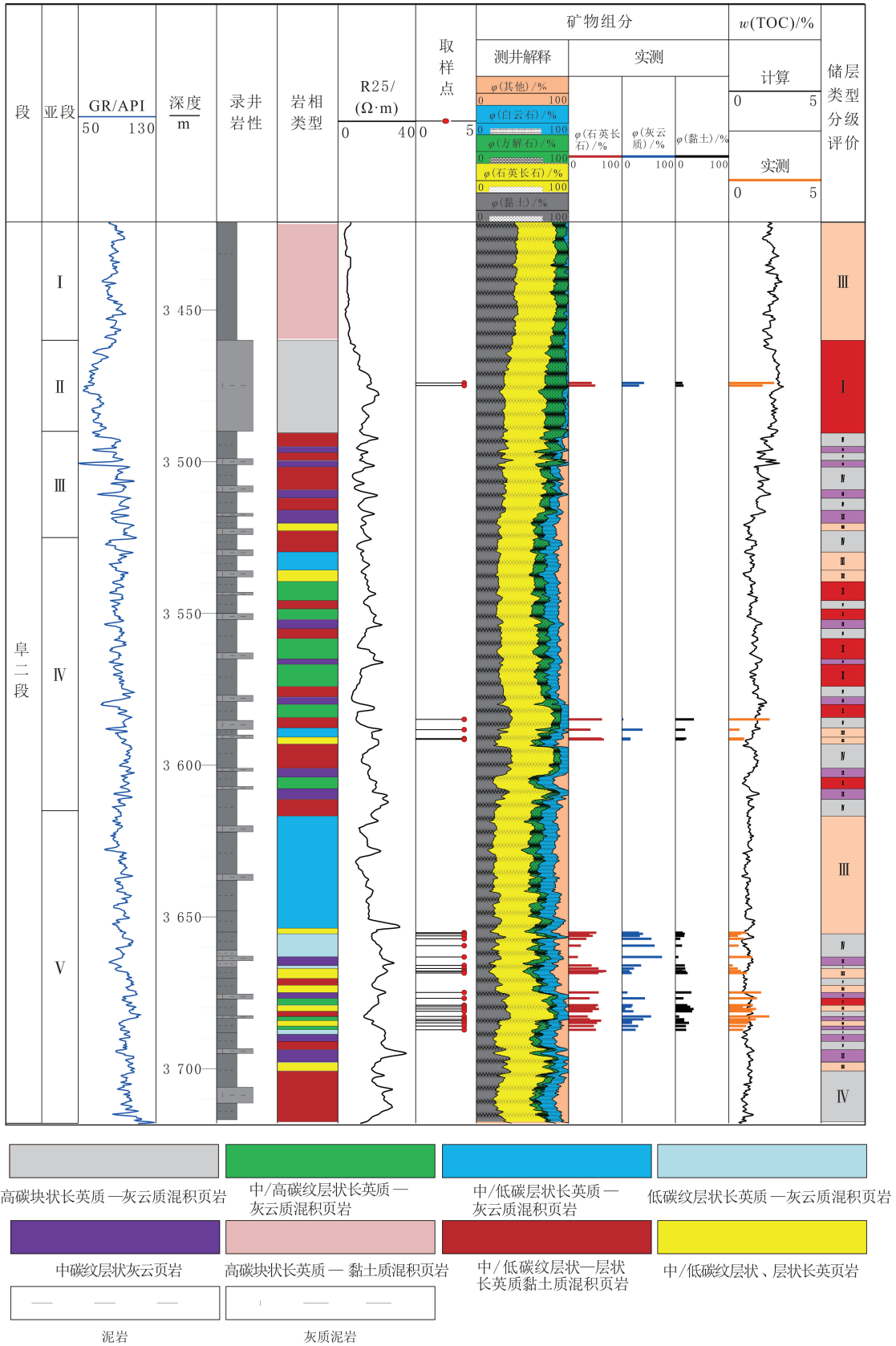


图 2 苏北盆地高邮凹陷阜二段地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Second Member of the Funing Formation in the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

射图像,以识别孔隙类型。低温氮气吸附实验由 Micromeritics ASAP 2460 型比表面积与孔隙度分析仪完成,按照 GB/T 21650.1—2008《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 1 部分:压汞法》测试,获得吸附—脱附等温线、比表面积、孔容和孔径分布等参数。高压压汞实验采用 Micromeritics Autopore 9520 型压汞仪,按照 GB/T 29171—2023《岩石毛管压力曲线的测定》获取进汞—退汞曲线、孔喉体积及孔径分布信息。核磁共振实验采用 MesoMR-060H- I 型低场核磁共振分析与成像仪,设置等待时间为 3 000 ms、回波间隔为 0.07 ms、回波个数为 6 000、叠加次数为 64,分别测试洗油干燥态与饱和油态样品的 T_2 谱。测试前,样品使用二氯甲烷—丙酮混合液在 80 °C 温度、0.25 MPa 条件下洗油 7 d,在 110 °C 温度条件下真空干燥 72 h,冷却至室温后进行干燥态核磁共振测试;再将干燥样品抽真空 24 h,在 10 MPa 压力下注入正十二烷 24 h,进行饱和油态测试。 T_2 谱采用去基底反演方法获取,用于定量分析储层孔隙结构。

3 岩石学特征

样品全岩、黏土矿物组成及岩性分布三端元图见图 3,页岩有机质丰度、成熟度及含油性见表 1。25 个页岩样品的 TOC 质量分数分布在 0.22%~2.46% 之间,平均为 1.08%; S_1 介于 0.05~2.88 mg/g,平均为 0.80 mg/g; $S_{1-1} + S_{1-2}$ 介于 0.10~3.37 mg/g,平均为 1.09 mg/g。长英质矿物体积分数(石英平均体积分数为 28.0%,钾长石平均体积分数为 2.7%,斜长石平均体积分数为 18.5%)分布于 17.4%~70.5%,

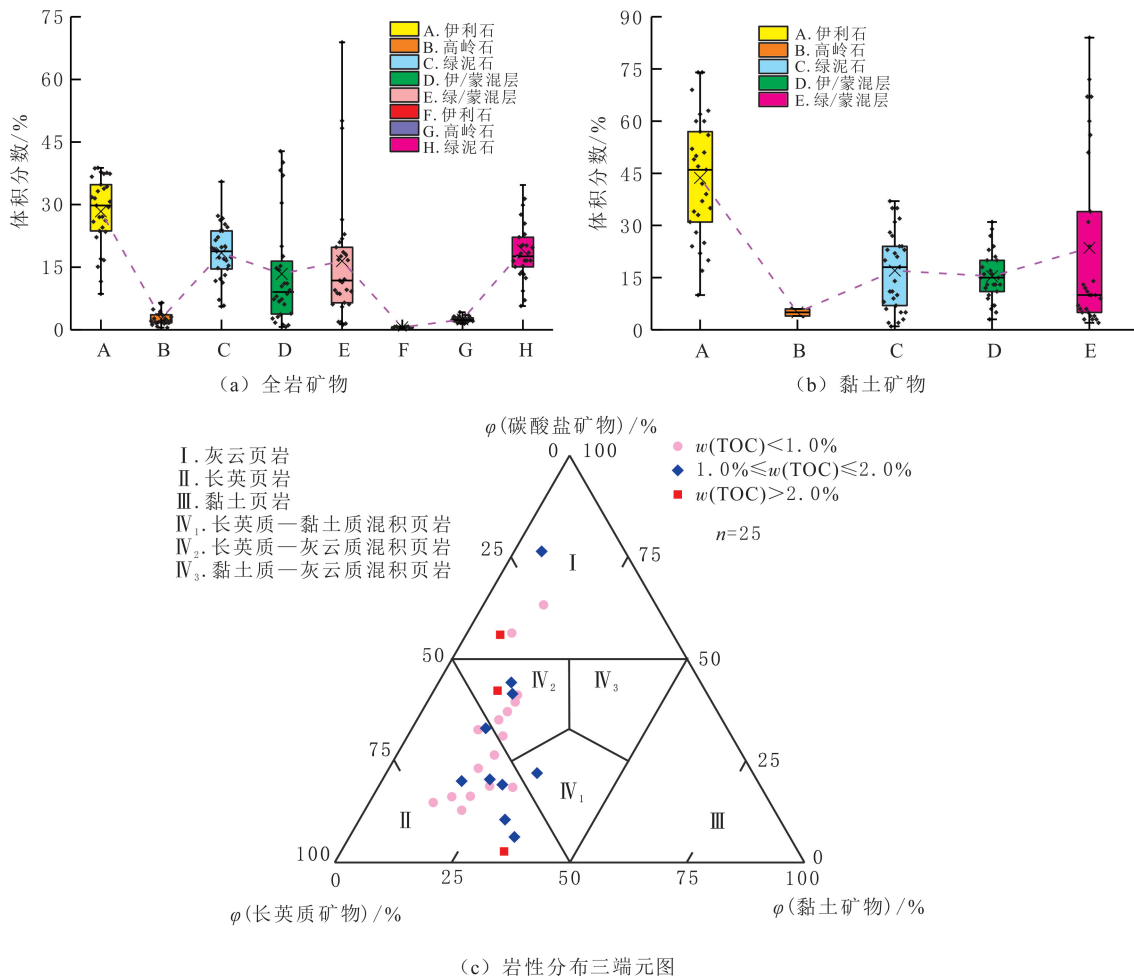


图 3 页岩样品全岩、黏土矿物组成及岩性分布三端元图

Fig. 3 Triangular diagram of whole-rock composition, clay mineral content, and lithology distribution of shale samples

平均为 48.7%;其次是碳酸盐矿物体积分数(方解石平均体积分数为 13.6%,白云石平均体积分数为 16.5%)平均为 29.6%,介于 2.7%~75.0%;黏土矿物体积分数较低(伊利石平均体积分数为 43.7%,伊/蒙混层平均体积分数为 15.4%),分布在 5.7%~34.7%之间,平均为 19.1%(见图 3(a-b))。按照三端元单一矿物组分体积分数大于 50%,划分长英页岩、灰云页岩和黏土页岩;若三端元矿物组分小于 50%,则划分为混合质页岩且体积分数最少的端元不参与命名,如将黏土矿物体积分数最少的页岩命名为长英质—灰云质混积页岩^[20,22],研究区主要发育 I、II、IV₁ 和 IV₂ 型页岩(见图 3(c))。

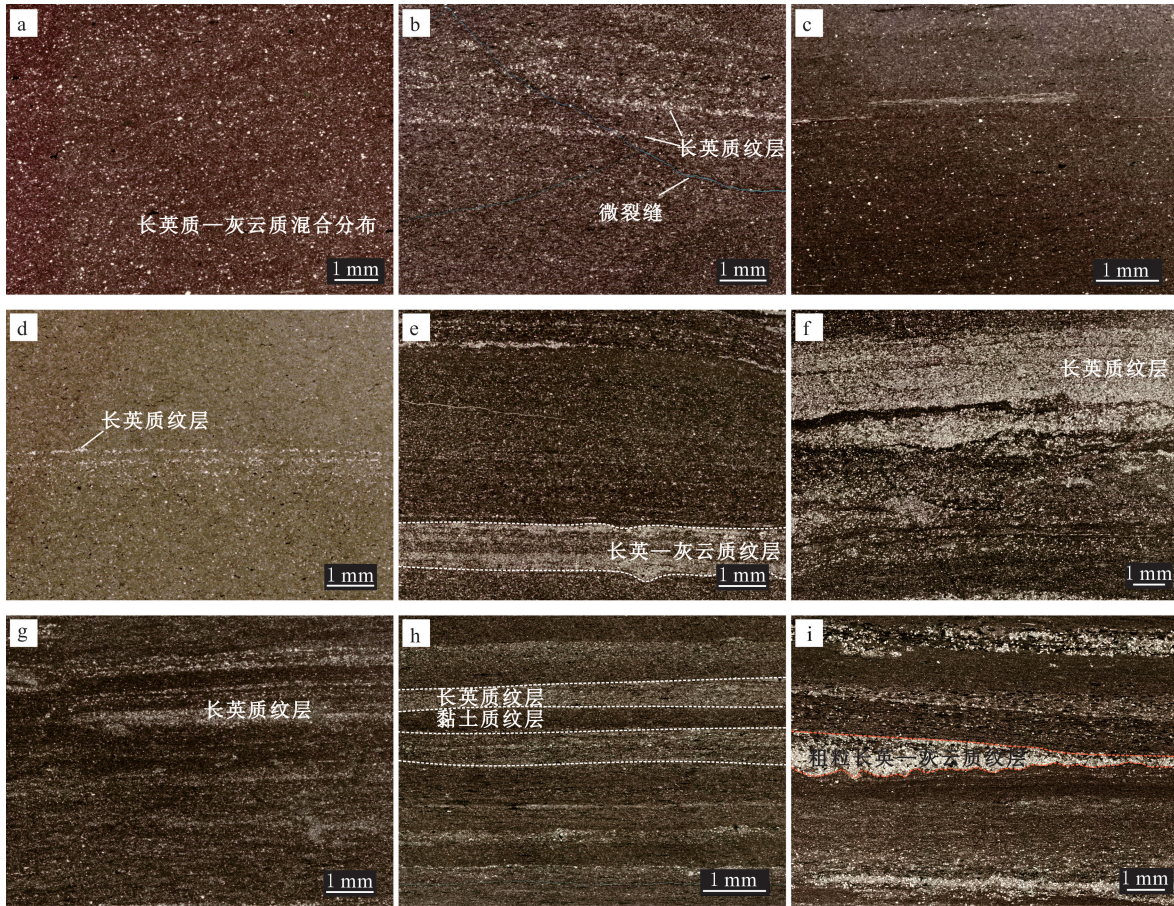
表 1 页岩样品有机质丰度、成熟度及含油性

Table 1 Organic matter abundance, maturity, and oil content of shale samples

样品编号	深度/m	岩性代码	$\omega(\text{TOC})/\%$	$S_1/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$t_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$S_{1-1}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$S_{1-2}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$S_{2-1}/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$
SY1-32	3 676.81	IV ₂	1.53	1.09	444	0.05	1.41	2.73
SY1-12	3 584.91	II ₂	2.22	0.99	450	0.04	1.16	3.79
SY1-6	3 474.05	IV ₂	2.46	2.88	451	0.24	3.13	4.10
SY1-43	3 685.96	IV ₂	1.04	1.01	427	0.05	1.17	1.77
SY1-39	3 682.80	I ₂	2.20	0.85	443	0.17	1.34	2.99
SY1-24	3 663.20	I ₁	1.29	0.77	443	0.08	1.27	1.96
SY1-16	3 591.51	II ₁	0.80	1.61	440	0.08	1.93	1.64
SY1-35	3 679.60	II ₂	0.76	0.70	441	0.08	1.10	1.25
SY1-18	3 655.20	II ₃	0.96	1.46	428	0.08	1.51	1.83
SY1-42	3 684.92	II ₂	1.06			0.05	0.83	1.57
SY1-41	3 684.20	II ₁	1.20	0.78	435	0.09	1.43	1.90
SY1-40	3 683.76	IV ₂	1.46			0.11	1.46	2.06
SY1-34	3 679.10	II ₁	1.31	1.06	447			
SY1-20	3 656.25	IV ₂	0.50	0.25	434	0.02	0.41	0.49
SY1-27	3 667.85	II ₁	0.67	0.37	432	0.03	0.51	0.99
SY1-36	3 680.35	II ₂	1.48	0.36	442	0.04	0.75	2.27
SY1-13	3 588.30	IV ₂	0.58	0.27	430	0.02	0.40	0.91
SY1-28	3 668.00	II ₁	0.53	0.45	432	0.03	0.57	0.67
SY1-37	3 681.10	IV ₁	1.29	0.81	432	0.07	1.21	2.13
SY1-19	3 655.56	IV ₂	0.66	0.35	432	0.05	0.52	0.82
SY1-44	3 687.20	II ₂	0.78			0.05	0.75	1.01
SY1-26	3 667.00	II ₁	0.49	0.20	436	0.02	0.26	0.63
SY1-23	3 659.47	I ₁	0.53	0.16	425	0.03	0.37	0.67
SY1-29	3 668.50	II ₁	0.97	0.99	434	0.05	1.15	1.45
SY1-25	3 666.00	IV ₂	0.22	0.05	423	0.01	0.09	0.19

注: t_{max} 为最高热解峰温。

样品薄片观察可见块状、层状和纹层状结构(见图 4):块状页岩所有矿物均匀分布(见图 4(a));层状页岩呈一定的成层性,可见两种不同明暗的矿物层(见图 4(b-d));纹层状页岩层理发育,暗色黏土矿物和亮色矿物(长英质矿物或碳酸盐矿物)频繁互层发育(见图 4(e-i))。根据苏北盆地高邮凹陷阜二段有机碳质量分数划分界限,高碳($\omega(\text{TOC}) > 2.0\%$)、中碳($1.0\% \leq \omega(\text{TOC}) \leq 2.0\%$)和低碳($\omega(\text{TOC}) < 1.0\%$)^[22]。基于“有机碳—沉积构造—岩性”三端元岩相划分方案,将阜二段在纵向上划分为 8 种主要岩相类型:高碳块状长英质—灰云质混积页岩、中/高碳纹层状长英质—灰云质混积页岩、中/低碳层状长英质—灰云质混积页岩、低碳纹层状长英质—灰云质混积页岩、中碳纹层状灰云页岩、高碳块状长英质—黏土质混积页岩、中/低碳纹层状、层状长英质黏土质混积页岩及中/低碳纹层状、层状长英页岩。



(a) SY1-6, 高碳块状长英质—灰云质混积页岩; (b) SY1-29, 低碳层状长英页岩; (c) SY1-36, 中碳层状长英页岩; (d) SY1-40, 中碳层状长英质—灰云质混积页岩; (e) SY1-23, 低碳纹层状灰云页岩; (f) SY1-27, 低碳纹层状长英页岩; (g) SY1-12, 高碳纹层状长英页岩; (h) SY1-18, 低碳纹层状长英页岩; (i) SY1-19, 低碳纹层状长英质—灰云质混积页岩

图 4 研究区页岩构造特征
Fig. 4 Structural characteristics of shales in the study area

4 孔隙结构特征

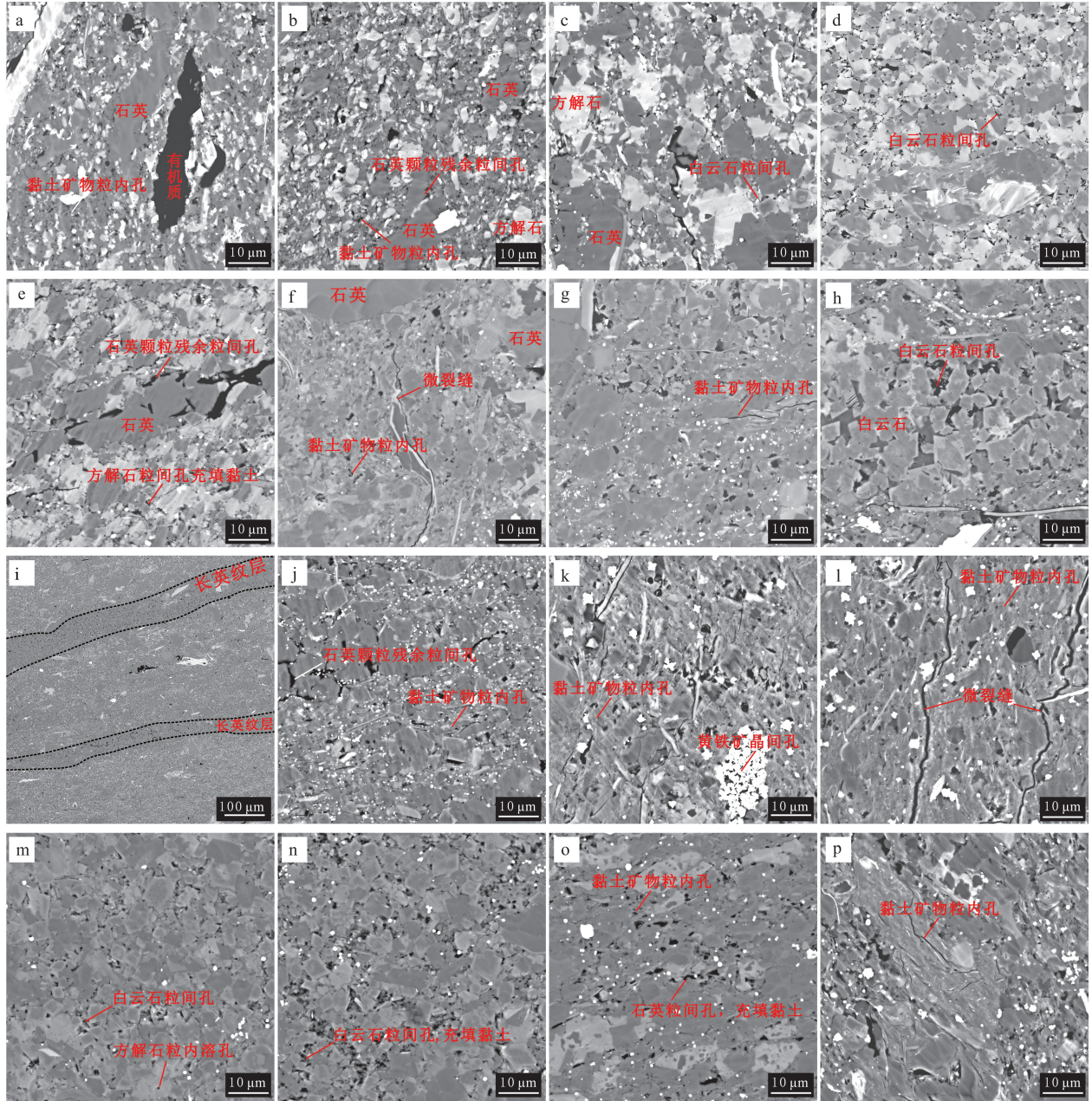
4.1 孔隙类型

页岩基质孔隙类型分为颗粒间孔隙、颗粒内孔隙和有机质孔隙 3 种,其中,颗粒间孔隙(粒间孔)和颗粒内孔隙(粒内孔)与矿物种类有关,有机质孔隙与有机质相关。研究区页岩储集空间类型主要分为粒内孔、粒间孔和裂缝(见图 5)^[24-25]。粒内孔以黏土矿物粒内孔为主,发育少量灰云质粒内溶孔和黄铁矿晶间孔(见图 5(a-j)),孔隙较小且连通性较差,以纳米级孔为主^[26]。黏土矿物粒内孔通常发育在具有复杂形态的黏土矿物聚集体中,形态不规则,多为细长楔形或边界不规则锯齿状(见图 5(f-g, j-k, p))。黄铁矿晶间孔主要发育在黄铁矿草莓状集合体中,具有多边形和三角形形态(见图 5(k))。颗粒边缘孔或粒间孔是研究区主要发育孔隙类型,包括灰云质矿物粒间孔和长英质矿物粒间孔。灰云质矿物粒间孔形状较为规则,长英质矿物粒间孔形状通常呈弯月形,相较于灰云质矿物粒间孔形状更为复杂多见,在长英质纹层中被黏土充填(见图 5(g))。研究区微裂缝是页岩渗流的有效通道,主要发育在黏土矿物内部或与脆性矿物接触处。

4.2 微孔分布

低温氮气吸附测试可以有效检测直径小于 100 nm 的纳米孔,获取比表面、孔体积和孔径分布等参数^[9]。根据 IUPAC(国际理论化学与应用化学联合会)分类,研究区页岩样品的等温吸附线为 II 型,氮吸

附过程包括 3 个阶段: 单层吸附 ($p/p_0 < 0.4$)、多层吸附 ($0.4 \leq p/p_0 < 0.8$) 和毛细管凝聚 ($p/p_0 \geq 0.8$) 阶段 (见图 6)。当 p/p_0 大于 0.4 时, 在吸附和脱附曲线之间存在迟滞环, 发育一种典型迟滞环类型 (H_2 型墨水瓶型孔) 和一种混合型迟滞环类型 (H_2-H_3 型宽平行板型—墨水瓶型孔), 研究区页岩迟滞环类型以 H_2-H_3 混合型为主 (见图 6)^[27]。



(a-b) SY1-6, 发育黏土矿物粒内孔和石英颗粒残余粒间孔; (c) SY1-24, 发育白云石粒间孔; (d-e) SY1-39, 发育白云石粒间孔和石英颗粒残余粒间孔, 方解石粒间孔充填黏土; (f) SY1-27, 发育黏土矿物粒间孔, 可见微裂缝; (g-h) SY1-34, 石英粒间孔充填黏土, 可见白云石粒间孔; (i-j) SY1-31, 碳酸盐矿物粒间孔较小, 长英质纹层内发育粒内孔呈弯月形; (k-l) SY1-36, 发育黄铁矿晶间孔、黏土矿物粒内孔, 局部发育微裂缝; (m-n) SY1-18, 部分白云石粒间孔被黏土矿物充填, 局部发育方解石粒内溶孔; (o-p) SY1-32, 发育黏土矿物粒内孔, 石英粒间孔充填黏土矿物

图 5 研究区页岩储集空间类型

Fig. 5 Types of shale reservoir spaces in the study area

研究区页岩 BET 比表面积 S_{SA} 介于 $0.89 \sim 14.72 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均为 $10.05 \text{ m}^2/\text{g}$, 平均孔径 d_{Na} 介于 $5.12 \sim 19.84 \text{ nm}$, 平均为 7.72 nm , 孔体积分布在 $(4.42 \sim 22.05) \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ 之间, 平均为 $16.15 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ (见表 2)。比表面积随孔体积的增加而线性增加, 比表面积随平均孔径的增加而呈指数降低

(见图7)。H₂型页岩孔径相对较小,但小孔发育,孔体积和比表面积相对较大。H₂—H₃型页岩孔径分布通常具有双峰或单峰分布特征,左侧呈2~3 nm的较小峰值,右侧呈30~40 nm的较大峰值(见图6),H₂—H₃型页岩发育大孔隙;H₂型页岩孔径分布具有左侧呈2~3 nm峰值的单峰分布特征(见图6(h))。

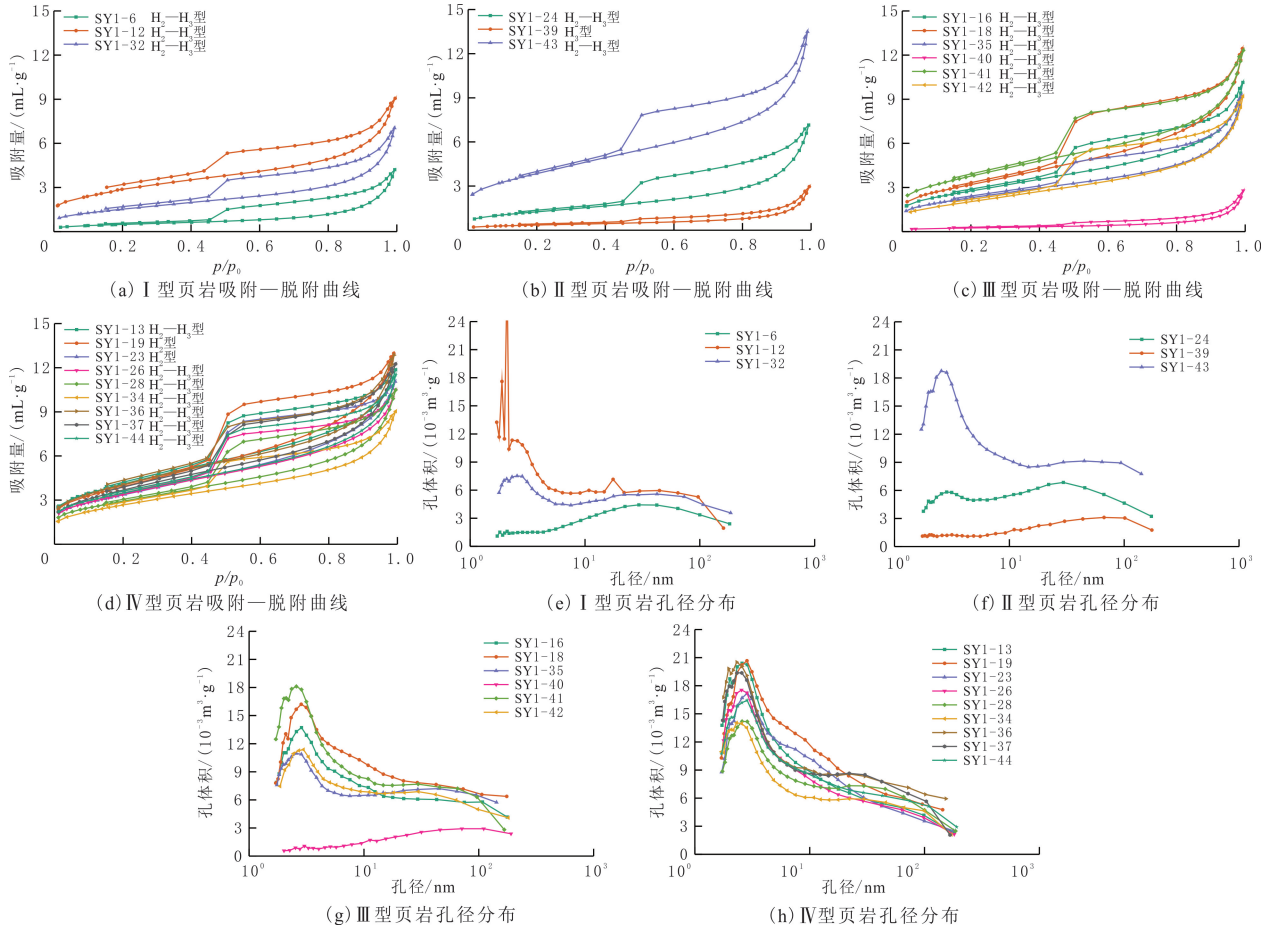


图6 研究区页岩氮气吸附—脱附曲线及孔径分布

Fig. 6 Nitrogen adsorption-desorption curves and pore size distribution of shales in the study area

表2 研究区页岩孔隙结构参数分布

Table 2 Pore structure parameter distribution of shales in study area

样品编号	氮气吸附			高压压汞		核磁共振		
	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm	孔体积/ (10 ⁻³ cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔喉半径/ nm	孔隙度/ %	T _{2,gm} / ms	T _{2,35} / ms	T _{2,50} / ms
SY1-32	5.53	8.23	11.39	602.00	3.87	6.39	16.64	3.29
SY1-12	10.33	5.52	14.27	365.00	2.44	3.90	15.34	3.29
SY1-6	1.77	15.24	6.76	13.00	0.52	1.89	3.57	1.72
SY1-43	13.70	6.29	21.53	5.00	2.28	1.51	3.29	2.03
SY1-39	1.27	14.88	4.73	6.00	0.34	1.71	2.20	1.59
SY1-24	4.56	10.22	11.64	6.00	0.25	1.36	1.87	1.35
SY1-16	9.92	6.55	16.25	8.00	4.40	0.98	1.72	0.90
SY1-35	8.33	7.12	14.82	10.00	0.52	0.81	1.59	0.83
SY1-18	11.48	7.02	20.16	8.00	1.64	0.77	1.35	0.83
SY1-42	7.54	8.01	15.09	13.00	3.70	0.72	1.25	0.65
SY1-41	13.55	5.80	19.65	6.00	1.52	0.63	1.25	0.55

续表 2

样品编号	氮气吸附			高压压汞		核磁共振		
	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm	孔体积/ ($10^{-3} \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔喉半径/ nm	孔隙度/ %	$T_{2,\text{gm}}$ / ms	$T_{2,35}$ / ms	$T_{2,50}$ / ms
SY1-40	0.89	19.84	4.42	15.00	2.54	0.58	1.06	0.43
SY1-34	9.64	6.11	14.73	15.00	2.13	0.54	0.98	0.40
SY1-20	10.78	6.84	18.44	11.00	2.62	0.68	0.98	0.65
SY1-27	9.79	6.40	15.65	6.00	1.39	0.52	0.83	0.47
SY1-36	14.48	5.65	20.45	17.00	2.50	0.73	0.71	0.37
SY1-13	14.72	5.12	18.84	8.00	3.97	0.57	0.71	0.40
SY1-28	10.53	6.36	16.76	16.00	1.05	0.49	0.71	0.40
SY1-37	13.31	5.97	19.86	13.00	2.45	0.48	0.71	0.40
SY1-19	14.13	6.02	21.26	8.00	2.28	0.44	0.71	0.40
SY1-44	12.47	5.89	18.35	11.00	1.98	0.46	0.65	0.37
SY1-26	12.15	5.54	16.82	13.00	2.96	0.48	0.51	0.29
SY1-23	12.14	5.93	18.00	10.00	2.65	0.34	0.51	0.34
SY1-29	13.63	6.39	21.78	14.00	1.70	0.36	0.47	0.29
SY1-25	14.55	6.06	22.05	7.00	2.48	0.28	0.40	0.27

注: $T_{2,\text{gm}}$ 为 T_2 的对数平均值; $T_{2,35}$ 、 $T_{2,50}$ 分别为累计孔体积曲线 35% 和 50% 对应的 T_2 。

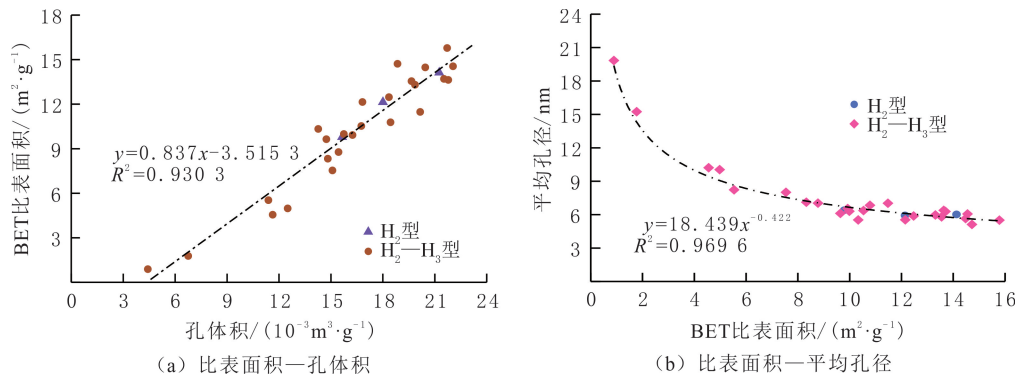


图 7 研究区页岩氮气吸附 BET 比表面积与孔体积、平均孔径关系

Fig. 7 Correlation between BET specific surface area and pore volume and average pore size from nitrogen adsorption of shales in study area

4.3 喉道分布

高压压汞测试是分析页岩微观孔喉特征的有效方法,对储层分级敏感性强,可以测试毛细管压力接近 200 MPa、最小直径为 6 nm 的喉道,从进汞—退汞曲线中获取孔喉大小分布、孔体积和压汞孔隙度等参数^[28-29]。研究区页岩普遍在 50 MPa 附近开始大量进汞(见图 8(a-d)),反映较小的孔喉分布特征。在孔喉分布上,研究区页岩平均孔喉半径 d_{Ma} 介于 5.00~602.00 nm,平均为 48.24 nm(见表 2)。页岩孔喉分布以单峰分布为主,孔喉半径主要分布小于 50 nm(见图 8(e-f)),少数样品发育较大的孔喉。

4.4 孔径分布

核磁共振测试被广泛应用于非常规油气孔隙结构表征^[28]。当饱和单一流体时,核磁共振 T_2 谱可以表征页岩孔径分布,长弛豫时间对应大孔隙,短弛豫时间对应小孔隙,不同于 IUPAC 孔隙分类方案^[30-31]。根据研究区页岩饱和油状态下的 T_2 谱特征进行分类, T_2 谱具有三峰特征(见图 9):p1 峰分布小于 0.6 ms,对应微小孔(孔径 ≤ 100 nm);p2 峰分布在 0.6~20.0 ms 之间,对应中孔(孔径为 100~1 000 nm);p3 峰分布大于 20.0 ms^[20],对应大孔(孔径 $\geq 1 000$ nm)。核磁孔隙度介于 0.25%~4.40%,平均为 2.17%(见

表2)。 $T_{2, gm}$ 是表征孔隙结构的关键参数,可以反映 T_2 谱整体分布特征,对应平均孔径^[32-33]。 $T_{2, gm}$ 介于0.28~6.39 ms,平均为1.10 ms,远低于传统致密砂岩储层的 $T_{2, gm}$,表明页岩油储层以纳米级孔隙为主。 $T_{2, 35}$ 、 $T_{2, 50}$ 分别介于0.40~16.64、0.27~3.29 ms,平均分别为2.4、0.9 ms, $T_{2, 35}$ 、 $T_{2, 50}$ 与 $T_{2, gm}$ 呈正相关关系, $T_{2, 35}$ 大于 $T_{2, gm}$ 或 $T_{2, 50}$ (见表2和图9(e))。

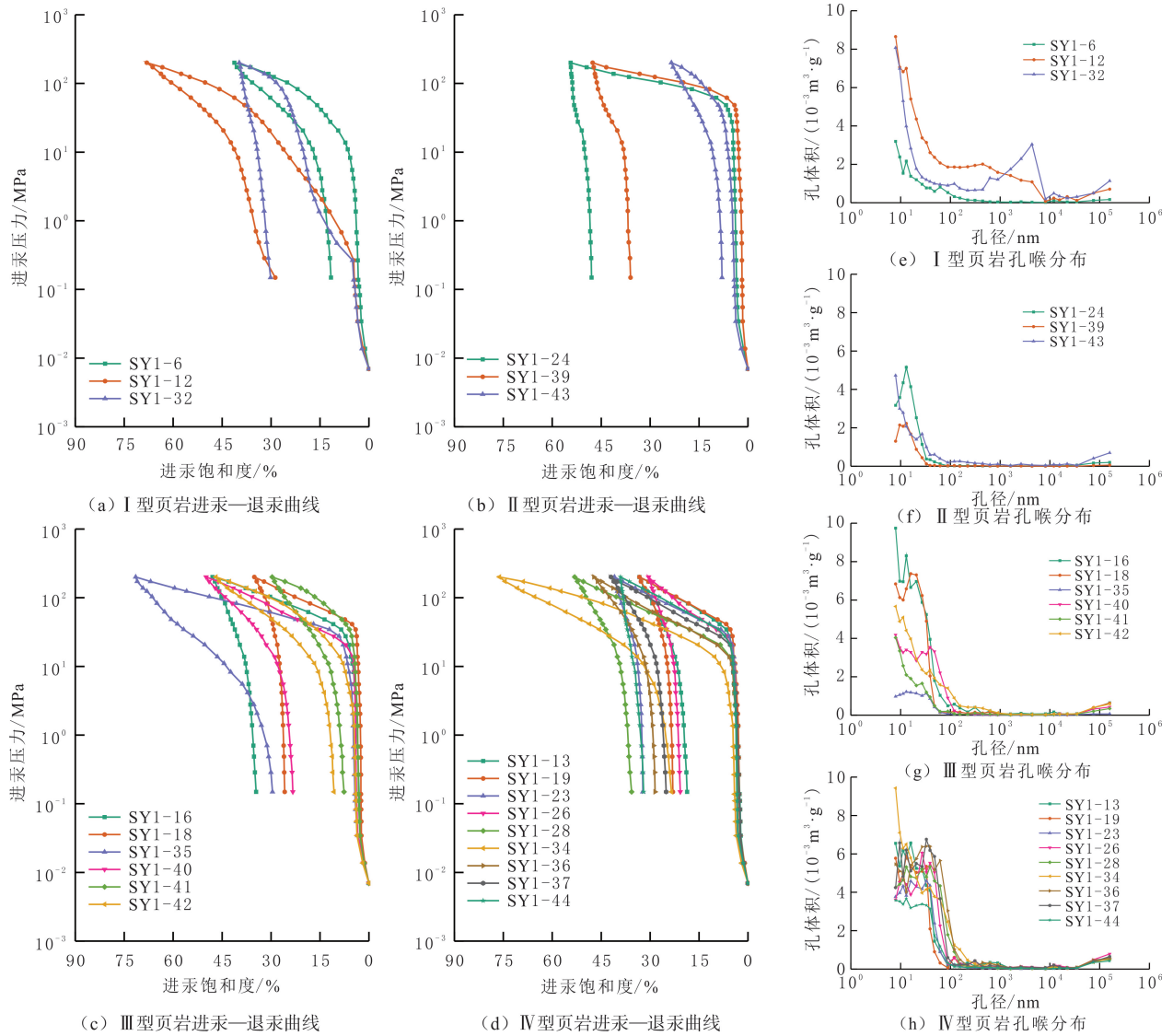
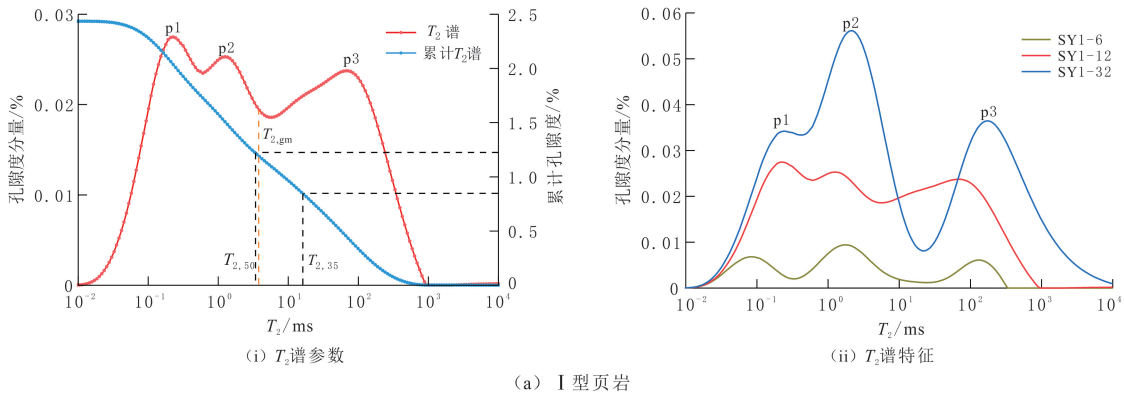


图8 研究区页岩高压汞进汞—退汞曲线及孔喉分布

Fig. 8 High-pressure mercury intrusion-extrusion curves and pore-throat size distribution of shales in the study area



(i) T_2 谱参数

(ii) T_2 谱特征

(a) I型页岩

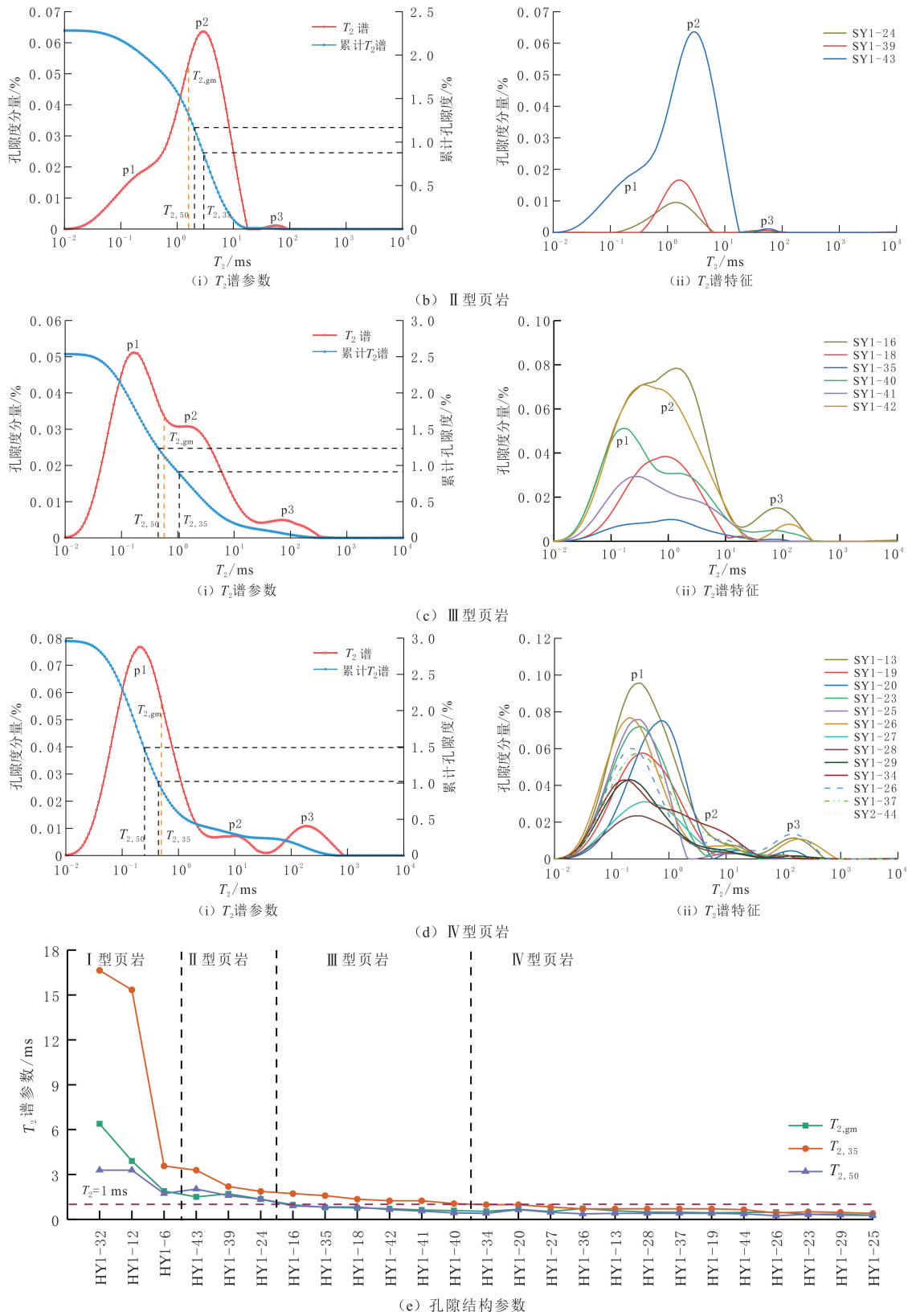


图 9 研究区页岩核磁共振 T_2 谱及孔隙结构参数分布

Fig. 9 NMR T_2 spectra and pore structure parameter distribution of shales in the study area

4.5 储层分类

页岩孔隙结构可以通过核磁共振 T_2 谱进行表征。根据 T_2 谱参数 ($T_{2,gm}$ 、 $T_{2,35}$ 和 $T_{2,50}$)，将研究区页

岩划分为 4 种类型^[28](见图 9)。

I 型页岩的 $T_{2, gm}$ 、 $T_{2, 35}$ 和 $T_{2, 50}$ 大于 1 ms, $T_{2, gm}$ 大于 $T_{2, 50}$, T_2 谱特征为显著的 p2 峰(中孔), p1 峰(微小孔)与 p3 峰(大孔)幅度相近(见图 9(a)), 表明以中孔为主, 微小孔和大孔分布相当。页岩具有最高平均 $T_{2, gm}$ (4.06 ms)、较大核磁孔隙度 (2.28%)、最大平均喉道直径 (653.40 nm) 和最高游离油含量 (2.01 mg/g), BET 比表面积最小 (5.88 m²/g) (见表 1-2、图 10)。低温氮气吸附曲线显示 H₂-H₃ 型迟滞环(见图 6(a))及双峰孔喉分布(见图 6(e))。页岩 TOC 质量分数最高(平均为 2.07%), 以中/高碳纹层状长英质—灰云质混积页岩为主, 有机质与碳酸盐矿物含量丰富(见表 1), 主要发育于阜二段 II 和 IV 亚段中部(见图 2), 为最具储层潜力的岩相类型。

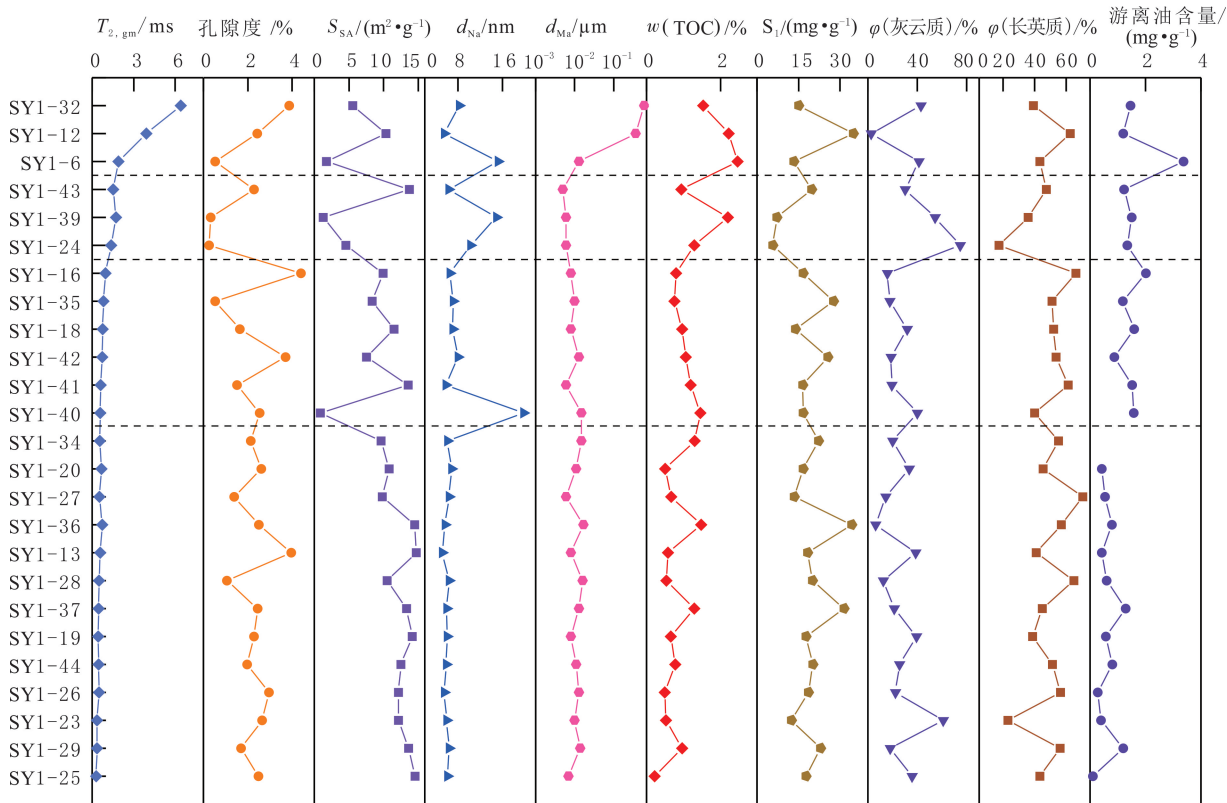


图 10 研究区页岩孔隙结构参数分布
Fig. 10 Distribution of pore structure parameters of shales in the study area

II 型页岩的 $T_{2, gm}$ 、 $T_{2, 35}$ 和 $T_{2, 50}$ 大于 1 ms, $T_{2, gm}$ 小于并接近 $T_{2, 50}$, T_2 谱呈显著 p2 峰、中等 p1 峰和极小 p3 峰的特征(见图 9(b)), 对应大量中孔、适量微小孔及极少量大孔。页岩 $T_{2, gm}$ 介于 1.36~1.71 ms (平均为 1.53 ms), 核磁孔隙度最低(平均为 0.96%), BET 比表面积较小 (6.51 m²/g) (见图 10)。低温氮气吸附表现为中孔主导的双峰孔径分布(见图 6(b)), 高压压汞显示 20 nm 附近呈单峰分布(见图 7(f))。岩性以中碳纹层状长英质—灰云质混积页岩或灰云岩为主, 纹层发育, 碳酸盐矿物(方解石、白云石)含量高, 常伴溶蚀孔发育。页岩为较有利储层, 主要分布于阜二段 III 亚段、IV 亚段底部及 V 亚段中部(见图 2)。

III 型页岩的 $T_{2, 35} > 1$ ms 且 $T_{2, gm} > T_{2, 50}$ (见图 9(c))。 T_2 谱以高幅 p1 峰、中等 p2 峰和较小 p3 峰为特征(见图 9(c)), 反映以微小孔为主、辅以中孔和少量大孔的孔隙结构。页岩 $T_{2, gm}$ 较低(平均为 0.75 ms), 核磁孔隙度高(平均为 2.39%), BET 比表面积大 (8.62 m²/g), TOC 质量分数(平均为 1.04%) 和游离油含量 (1.46 mg/g) 处于中等水平(见表 1-2、图 9(c)、图 10)。低温氮气吸附主要表现为 H₂-H₃ 型迟滞环(见图 6(c)), 孔喉尺寸偏小, 岩性以中/低碳纹层状—层状长英质页岩为主, 长英质含量高, 导致孔隙结构复杂^[31]。页岩储集性能较差, 主要发育于阜二段 I 亚段、IV 亚段顶部及 V 亚段上部(见图 2)。

IV 型页岩的 $T_{2, 35} < 1$ ms, T_2 谱以 p1 峰(微小孔)为主导(见图 9(d)), 反映大量微小孔、少量中孔和大

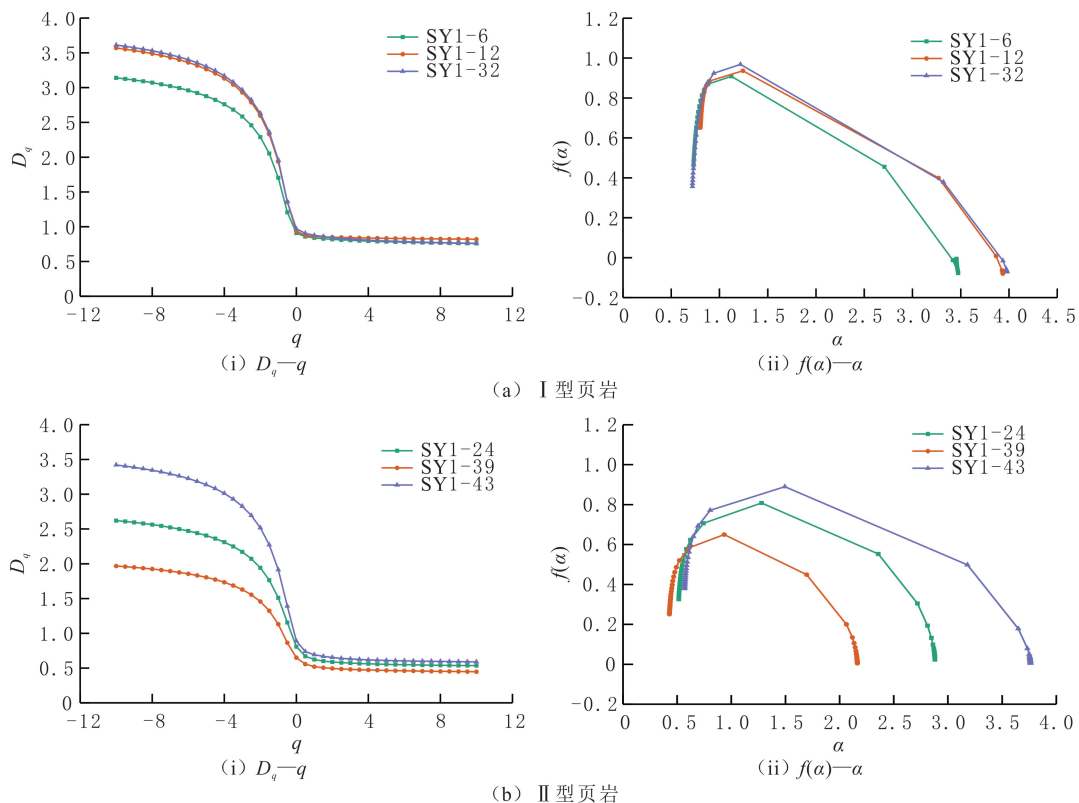
孔。页岩平均核磁孔隙度为 2.32%, $T_{2, gm}$ 最低, BET 比表面积最高(12.49 m^2/g), TOC 和游离油含量最低(分别为 0.77%、0.41 mg/g)。低温氮气吸附主要为 H_2-H_3 型及 H_2 型迟滞环, 呈以 2~3 nm 为主的单峰分布(见图 6(h)), 高压压汞孔喉呈单峰分布(见图 7(h))。页岩孔隙度较高, 但孔径小、游离油富集和流动性受限。岩性以中/低碳纹层状、层状长英质页岩或长英质—黏土质混积页岩为主, 高黏土含量是孔隙结构差的重要原因^[34], 属于储层条件最不利的类型, 主要分布于 III 亚段中部、IV 亚段顶部及 V 亚段上部(见图 2)。

T_2 谱可以有效识别页岩油储层类型。从 IV 型至 I 型页岩, 孔隙度及孔隙(喉道)孔径逐渐增大, 长英质与石英体积分数下降, 碳酸盐矿物体积分数与游离油含量上升。 T_2 谱参数与低温氮气吸附、高压压汞测试结果基本一致(见图 10), 说明核磁共振在页岩分类与优质储层识别中具有良好适用性。纹层状中/高碳长英质—灰云质混积页岩及灰云页岩表现为最佳的储层特征, 是最具开发潜力的岩相类型。

5 非均质性特征

对于具有非均匀和奇异性的分形体, 一个维数无法描述全部特征, 需要利用多重分形参数表示。多重分形模型推导过程参考文献^[35]。基于核磁共振 T_2 谱, 计算页岩储层孔隙结构的多重分形参数, 包括广义分形维数谱和多重分形奇异谱^[36]。 T_2 谱弛豫时间点数设置为 $256(2^8, k=8)$, 阶距 q 以 0.5 的间隔从 -10 变化到 10, 广义分形维数谱 D_q 的最小和最大值分别为 $D_{min}=D_{-10}$ 和 $D_{max}=D_{10}$ 。在 (-10, 10) 范围内, q 增大, 曲线单调递减(见图 11)。广义分形维数谱函数 D_q-q 表现两种变化趋势: 当 $q < 0$ 时, 随 q 增大, D_q 迅速减小; 当 $q > 0$ 时, 随 q 增大, D_q 略有减小。这种现象与致密砂岩或页岩气藏具有相似性^[36], 曲线的弯曲程度越大, 孔隙分布异质性越强, 且左分支广义谱 $D_{min}-D_0$ 宽度偏大, 与孔径分布低概率区有关。

多重分形参数 D_0 、 D_1 和 D_2 分别表示容量维数、信息维数和关联维数, D_0 越小, 表征储层类型越好, 孔隙结构复杂性越低, 孔径分布范围越窄, 各分区域的体积占比在各尺度上呈均匀分布, 孔隙分布越均匀^[28, 33, 37-38]。所有样品 T_2 谱多重分形参数分布显示相同的趋势, 即 $D_0 > D_1 > D_2$ (见表 3), 表明 T_2 谱具



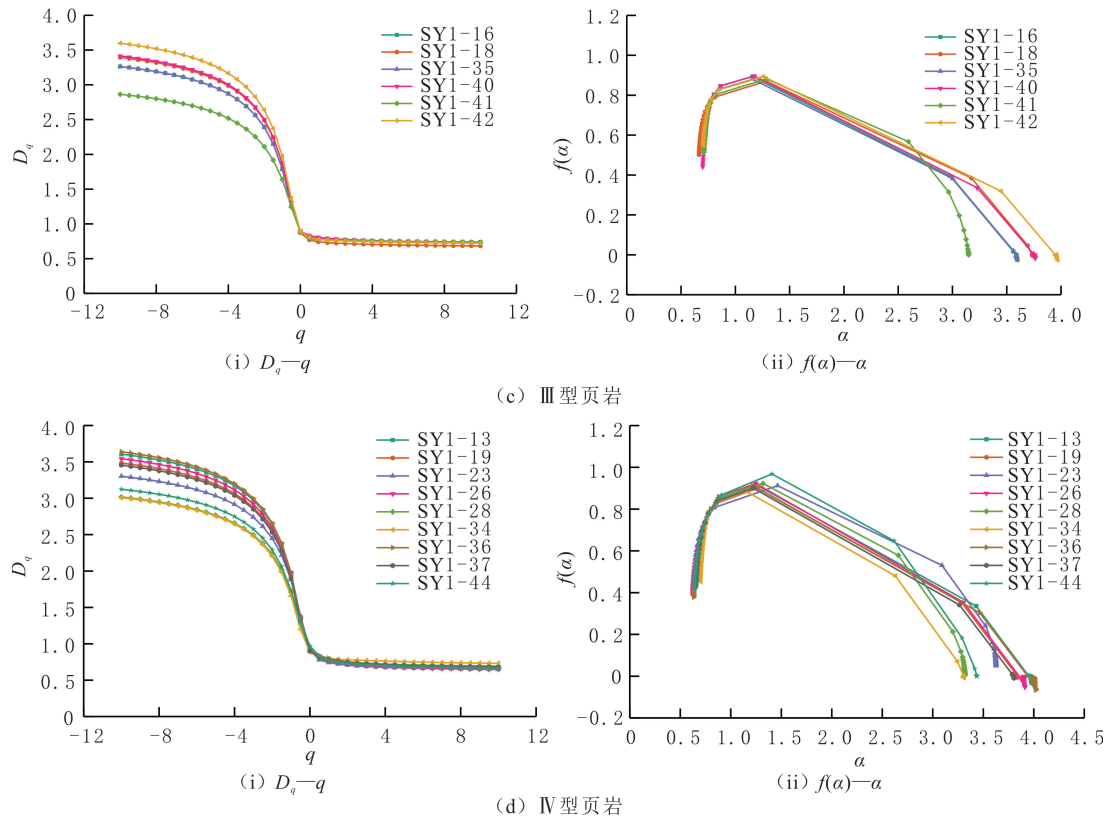


图 11 研究区页岩广义分形维数谱和多重分形奇异谱
Fig. 11 D_q and $f(\alpha)$ of shales in the study area

有多重分形特征。 D_0 在 0.65~0.97 之间,平均为 0.90,表明页岩的孔隙结构复杂。 D_1 介于 0.52~0.88 (平均为 0.77), D_2 介于 0.49~0.85(平均为 0.74)。平均 D_{\min} 、 D_{\max} 分别为 1.97~3.64(平均为 3.28)和 0.45~0.82(平均为 0.68)。 D_1/D_0 表示孔隙度相对于孔径的分散程度,比值越大,说明不同孔径孔隙含量差异逐渐减小,孔径分布由单一孔径占比较高的单峰逐渐向各种尺度孔隙含量均一的多峰分布,研究区 D_1/D_0 介于 0.77~0.92(平均为 0.85),表明页岩中存在不同孔径的孔隙。

表 3 核磁共振 T_2 谱多重分形参数分布

Table 3 Multifractal parameters distribution of NMR T_2 spectrum

样品编号	D_{\min}	D_0	D_1	D_2	D_{\max}	D_1/D_0	α_{\min}	α_{\max}	α_0	$\Delta\alpha$	A
SY1-32	3.61	0.97	0.88	0.84	0.76	0.91	0.72	3.98	1.22	3.26	0.18
SY1-12	3.57	0.94	0.86	0.85	0.82	0.92	0.80	3.93	1.24	3.13	0.16
SY1-6	3.14	0.91	0.84	0.82	0.76	0.92	0.73	3.46	1.12	2.73	0.17
SY1-43	3.42	0.89	0.69	0.65	0.59	0.78	0.57	3.76	1.49	3.19	0.41
SY1-39	1.97	0.65	0.52	0.49	0.45	0.80	0.43	2.16	0.93	1.74	0.41
SY1-24	2.62	0.81	0.62	0.59	0.54	0.77	0.51	2.88	1.28	2.37	0.48
SY1-16	3.26	0.89	0.80	0.78	0.74	0.90	0.73	3.59	1.16	2.86	0.18
SY1-35	3.26	0.88	0.79	0.77	0.73	0.90	0.71	3.59	1.16	2.88	0.18
SY1-18	3.39	0.87	0.74	0.72	0.68	0.85	0.66	3.73	1.29	3.07	0.25
SY1-42	3.60	0.89	0.78	0.76	0.72	0.87	0.71	3.96	1.26	3.25	0.21
SY1-41	2.86	0.88	0.77	0.77	0.73	0.88	0.71	3.15	1.29	2.44	0.31
SY1-40	3.41	0.90	0.81	0.78	0.73	0.90	0.70	3.76	1.17	3.06	0.18

续表 3

样品编号	D_{\min}	D_0	D_1	D_2	D_{\max}	D_1/D_0	α_{\min}	α_{\max}	α_0	$\Delta\alpha$	A
SY1-34	3.61	0.97	0.88	0.84	0.76	0.91	0.72	3.98	1.22	3.26	0.18
SY1-20	3.35	0.89	0.74	0.69	0.63	0.83	0.60	3.69	1.26	3.08	0.27
SY1-27	3.01	0.93	0.78	0.75	0.69	0.83	0.67	3.32	1.42	2.64	0.40
SY1-36	3.64	0.91	0.80	0.75	0.66	0.88	0.63	4.00	1.22	3.37	0.21
SY1-13	3.61	0.91	0.78	0.74	0.67	0.86	0.65	3.97	1.26	3.32	0.23
SY1-28	3.02	0.92	0.78	0.75	0.69	0.85	0.67	3.32	1.32	2.65	0.33
SY1-37	3.45	0.90	0.78	0.74	0.68	0.87	0.66	3.80	1.22	3.14	0.22
SY1-19	3.48	0.90	0.76	0.72	0.67	0.84	0.65	3.83	1.27	3.19	0.24
SY1-44	3.12	0.97	0.77	0.73	0.67	0.80	0.64	3.44	1.41	2.80	0.38
SY1-26	3.54	0.92	0.78	0.73	0.65	0.85	0.62	3.90	1.25	3.28	0.24
SY1-23	3.30	0.91	0.74	0.71	0.65	0.81	0.62	3.63	1.46	3.00	0.39
SY1-29	3.35	0.91	0.77	0.73	0.66	0.85	0.64	3.69	1.26	3.05	0.26
SY1-25	3.30	0.93	0.71	0.67	0.61	0.77	0.59	3.63	1.44	3.04	0.39

多重分形奇异谱可以表征页岩孔隙、孔径分布的多重分形特征。 α 为奇异指数, $f(\alpha)$ 为多重分形奇异谱, 多重分形奇异谱函数 $f(\alpha)-\alpha$ 呈连续凸曲线的特征(见图 11)。谱图的左侧部分对应 $q < 0$, $f(\alpha)$ 随 α 的增加而增加; 谱图的右侧部分对应 $q > 0$, $f(\alpha)$ 随 α 的增加而减小。各组曲线表现非对称性, 呈左钩状, 说明不同类型页岩孔径分布曲线具有多重分形特征, 且高概率子集处于主导地位^[39]。多重分形谱的宽度与奇异性强度有较好的对应性。另一个多重分形参数为 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, $\Delta\alpha$ 表征分形体结构在不同区域、不同条件、不同层次上的特征, 可以反映整个分形体分布的非均匀程度, $\Delta\alpha$ 越大, 孔隙大小及分布的非均匀程度越高。由表 3 可知, $\Delta\alpha$ 在 1.74~3.37 之间, 平均为 2.95, 表明研究区页岩孔隙具有非均质性的结构。 A 为多重分形谱偏度, $A = (\alpha_0 - \alpha_{\min}) / (\alpha_{\max} - \alpha_0)$, 在 0.16~0.48 之间变化(平均为 0.27), 小于 1, 表明多重分形谱偏度只有轻微的波动^[34]。

在 IV 型至 I 型页岩中, D_0 和 $\Delta\alpha$ 呈先减小后增大的趋势, 二者越大, 孔隙结构复杂性或非均质性越强, II 型页岩比 I 型和 III 型页岩的孔隙结构更均匀。I 型和 IV 型页岩的 D_0 和 $\Delta\alpha$ 相对较大, D_0 范围分别为 0.91~0.97(平均为 0.94)和 0.89~0.97(平均为 0.92), $\Delta\alpha$ 的范围分别为 2.73~3.26(平均为 3.04)和 2.64~3.37(平均为 3.06)(见表 3 和图 12), 表明具有复杂的孔隙结构。I 型页岩孔隙结构呈“三峰态”分布, 发育大量中孔、大孔及相对少量的微孔, 孔径分布范围广, 孔隙结构复杂性和非均质性最高, 平均 D_1/D_0 最大为 0.91, 说明中孔、大孔含量差异不大, 孔隙结构最佳, 构成高孔隙度的孔隙多为中大孔, 储层类型最好; IV 型页岩微小孔最为发育, D_1/D_0 (平均为 0.84)较低, D_0 和 $\Delta\alpha$ 相对较大, 分别为 0.92 和 3.06, 储层非均质性强, 为最不利页岩类型; II 型页岩的平均 D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 D_1/D_0 分别为 0.78、2.43 和 0.78, 具有中孔发育、孔隙结构简单等特点, 为较有利储层类型; III 型页岩的平均 D_0 、 $\Delta\alpha$ 和 D_1/D_0 分别为 0.89、2.93 和 0.88, 发育中等微孔、中孔和少量大孔(见表 3 和图 12)。

采用 α_0-D_0 关系确定页岩的非均质性和多重分形特征(见图 13)。若孔隙结构均匀, 表明 α_0-D_0 点落在同一条 45° 线上; 若二者远离 45° 线, 表明页岩油储层孔隙结构为多重分形体, 距离越远, 孔隙结构分布越不均一。 α_0 和 D_0 之间的距离表示异质性的程度, 与使用单分形模型相比, 多重分形谱可以更好表征孔隙结构的均匀性^[36]。

岩石学参数(黏土矿物、碳酸盐矿物、长英质体积分数与 TOC 质量分数)与典型多重分形参数(D_0 和 $\Delta\alpha$)之间的关系见图 14。黏土矿物体积分数与 D_0 、 $\Delta\alpha$ 呈显著正相关关系(见图 14(a))。原因是黏土矿物抗压强度低, 在成岩演化过程中发生转化时易产生体积收缩, 从而形成大量层片间孔隙及收缩缝隙^[32]。高黏土矿物体积分数通常伴随较多的微小孔隙(见图 14(e、h)), 孔隙结构趋于复杂, 非均质性增强, 表现

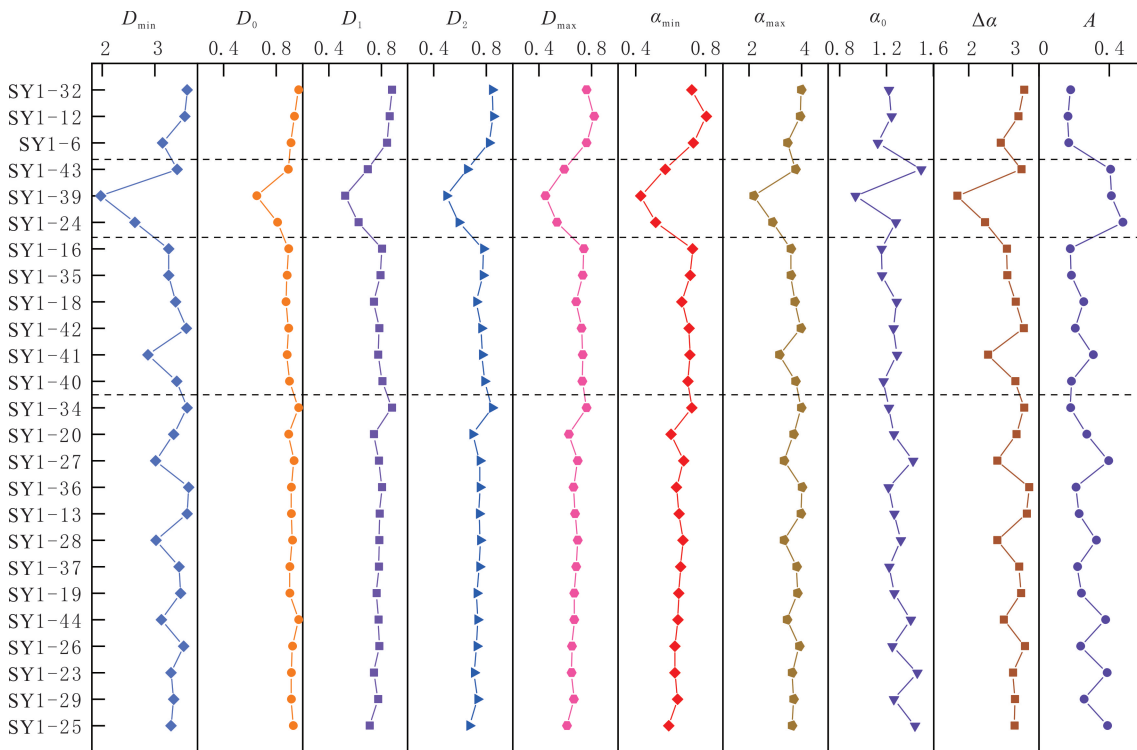


图 12 多重分形参数分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of multifractal parameters

分形维数增大。长英质体积分数与 D_0 、 $\Delta\alpha$ 表现一定的正相关关系(见图 14(c))。这是因为研究区的长英质矿物与黏土矿物共生发育,长石与石英的粒间孔常被黏土矿物充填,发育大量微小的粒内孔,对应 T_2 谱中的 p1 峰占比较高。这类微小孔系统增强孔隙结构的复杂性, D_0 升高,与黏土矿物的影响趋势一致^[33];碳酸盐体积分数的增加通常伴随 D_0 降低, $\Delta\alpha$ 略有增加后趋于下降(见图 14(b))。碳酸盐矿物(白云石和方解石)有助于孔隙的保存,研究区粒间孔与溶蚀孔相对发育,形成以中孔为主的较大孔隙结构(见图 5),对应 T_2 谱中 p2 峰占比较高(见图 9(d)、图 14(f、g))。由于这类孔隙结构较为规则且分布均匀,导致多重分形参数 D_0 和 $\Delta\alpha$ 降低,说明孔隙系统复杂性与非均质性减弱。

D_0 、 $\Delta\alpha$ 与 TOC 质量分数呈弱负相关关系(见图 14(d))。较高的有机质含量可能通过生烃增压作用促进孔隙的生成与保存^[40]。TOC 质量分数与中孔、大孔占比呈正相关关系(见图 14(d、h、i)),反映对降低孔隙非均质性具有一定贡献。TOC 质量分数对多重分形特征的影响有限,结合碳酸盐矿物发育情况,二者协同作用可以有效降低孔隙结构的复杂性。

I 型高碳纹层状长英质—灰云质混积页岩具有孔隙度较大、孔径大及孔隙结构多样的特征。II 型中碳纹层状长英质—灰云质混积页岩和灰云页岩具有孔径大、孔隙结构简单的特征。两种岩相是研究区有利页岩储层类型。

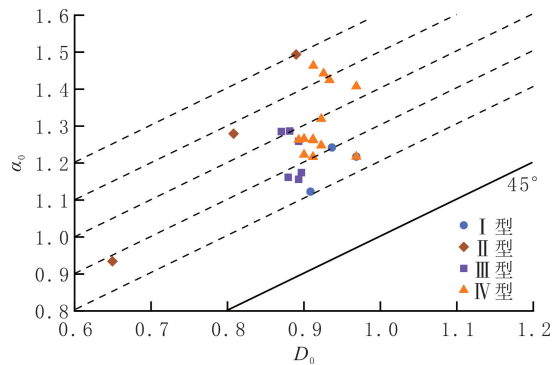


图 13 不同类型页岩 D_0 与 α_0 关系

Fig. 13 Relationship between D_0 and α_0 of different types of shales

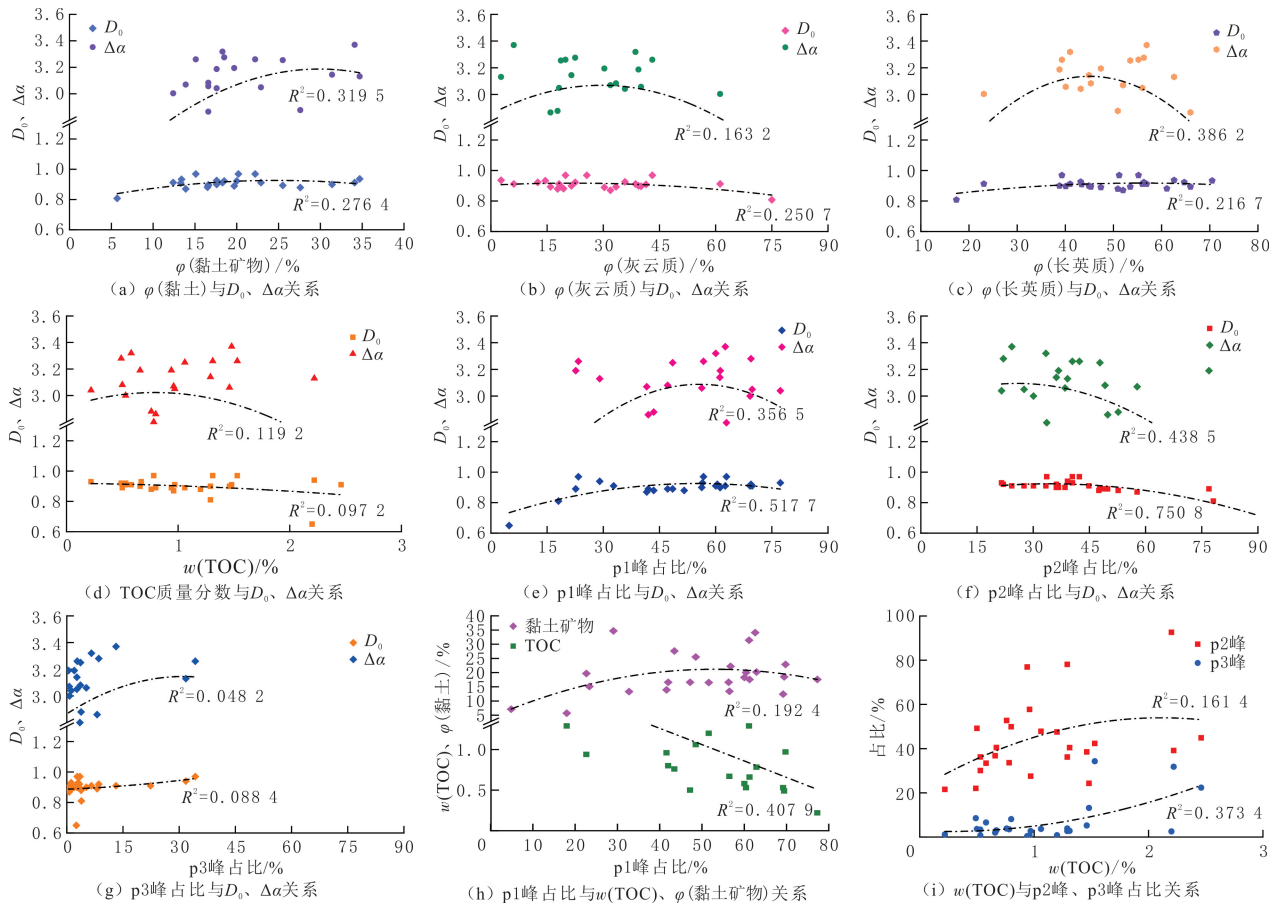


图 14 研究区页岩多重分形参数影响因素
Fig. 14 Factors influencing the multifractal dimension of shales in study area

6 结论

(1) 苏北盆地高邮凹陷阜二段发育 8 种主要岩相, 孔隙类型以长英质矿物粒间孔、碳酸盐矿物粒间孔和溶蚀孔及黏土矿物粒内孔为主, 低温氮气吸附—脱附迟滞环类型多为 H_2-H_3 型, 孔隙连通性较好, 孔隙结构呈“多峰态”分布, 喉道直径多小于 50 nm。

(2) 研究区 I 型页岩的 T_2 谱特征为显著的 p1 峰(中孔), p2 峰(微小孔)与 p3 峰(大孔)幅度相近, $T_{2, gm}$ 、 $T_{2, 35}$ 和 $T_{2, 50}$ 大于 1 ms, $T_{2, gm} > T_{2, 50}$; II 型页岩 T_2 谱以显著的 p2 峰、中等的 p1 峰和极小的 p3 峰为特征, $T_{2, gm}$ 小于并接近于 $T_{2, 50}$ 。I 型至 IV 型页岩孔隙度和孔隙(喉道)孔径逐渐减小, 长英质矿物体积分数增加, 碳酸盐矿物体积分数逐渐减少, T_2 谱参数与低温氮气吸附及高压压汞测试结果基本一致, 核磁共振在页岩分类与优质储层识别中具有良好适用性。

(3) 研究区碳酸盐矿物含量越高, 孔隙结构特征越好, 非均质性越弱。 D_0 在 0.65~0.97 之间(平均为 0.90), 孔隙结构具有复杂性; $\Delta\alpha$ 在 1.74~3.37 之间(平均为 2.95), 孔隙结构非均质性较强。

(4) 中/高碳纹层状长英质—灰云质混积页岩和中碳纹层状灰云页岩具有较大的孔隙度、孔隙(喉道)孔径和较好的孔隙结构, 是有利的页岩储层类型, 纵向上发育在阜二段 II 亚段、IV 亚段中下部及 V 亚段中部, 为高邮凹陷阜二段有利储层。

参考文献 (References):

[1] 金之钧, 张谦, 朱如凯, 等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-818.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil &

- Gas Geology, 2023,44(4):801-818.
- [2] 赵文智,朱如凯,张婧雅,等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探,2023,28(4):1-13.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, ZHANG Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(4):1-13.
- [3] 何文渊,柳波,张金友,等. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索[J]. 地球科学,2023,48(1):49-62.
HE Wenyuan, LIU Bo, ZHANG Jinyou, et al. Geological characteristics and key scientific and technological problems of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Scientific Journal of Earth Science, 2023,48(1):49-62.
- [4] 王民,马睿,李进步,等. 济阳拗陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. 石油勘探与开发,2019,46(4):789-802.
WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(4):789-802.
- [5] LI J, LU S, CAI J, et al. Adsorbed and free oil in lacustrine nanoporous shale: atheoretical model and a case study[J]. Energy Fuels, 2018,32:12247-12258.
- [6] 朱炎铭,王阳,陈尚斌,等. 页岩储层孔隙结构多尺度定性—定量综合表征:以上扬子海相龙马溪组为例[J]. 地质前缘,2016,23(1):154-163.
ZHU Yanming, WANG Yang, CHEN Shangbin, et al. Qualitative-quantitative multiscale characterization of pore structures in shale reservoirs: a case study of Longmaxi Formation in the Upper Yangtze Area[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(1):154-163.
- [7] 曹琰,金之钧,朱如凯,等. 富有机质泥页岩孔隙结构研究进展及展望[J]. 沉积与特提斯地质,2024,44(2):231-252.
CAO Yan, JIN Zhijun, ZHU Rukai, et al. Progress and prospects in the research on pore structures of organic-rich mud shales[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024,44(2):231-252.
- [8] 邹才能,杨智,何东博,等. 常规—非常规天然气理论、技术及前景[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):575-587.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):575-587.
- [9] 杨峰,宁正福,孔德涛. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. 天然气地球科学,2013,24(3):450-455.
YANG Feng, NING Zhengfu, KONG Detao. Pore structure of shales from high pressure mercury injection and nitrogen adsorption method[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(3):450-455.
- [10] 曾宏斌,王芙蓉,罗京,等. 基于低温氮气吸附和高压压汞表征潜江凹陷盐间页岩油储层孔隙结构特征[J]. 地质科技通报,2021,40(5):242-252.
ZENG Hongbin, WANG Furong, LUO Jing, et al. Characterization of pore structure of intersalt shale oil reservoir by low-temperature nitrogen adsorption and high-pressure mercury pressure methods in Qianjiang Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021,40(5):242-252.
- [11] 安成,柳广弟,孙明亮,等. 基于氮气吸附实验与分形 FHH 模型分析页岩孔隙结构特征:以鄂尔多斯盆地华池地区长7段为例[J]. 石油实验地质,2023,45(3):576-586.
AN Cheng, LIU Guangdi, SUN Mingliang, et al. Analysis of shale pore structure characteristics based on nitrogen adsorption experiment and fractal FHH model: a case study of 7th member of Triassic Yanchang Formation in Huachi Area, Ordos[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023,45(3):576-586.
- [12] 郭春华,周文,林璠,等. 页岩气储层毛管压力曲线分形特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6):773-777.
GUO Chunhua, ZHOU Wen, LIN Pan, et al. Fractal characteristics of capillary pressure curve in shale gas reservoirs[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2014,41(6):773-777.
- [13] ZHANG P F, LU S F, LI J Q, et al. Petrophysical characterization of oil-bearing shales by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018,89:775-785.
- [14] LU J, YANG L, ZHUY, et al. Pore structure and multifractal characteristics of overmature continental shale: a case study from the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, China[J]. Geofluid, 2022,2022:1-13.
- [15] 芮晓庆,周圆圆,李志明,等. 苏北盆地阜宁组源储特征及页岩油勘探方向探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质,2020,40(6):133-145.
RUI Xiaqing, ZHOU Yuanyuan, LI Zhiming, et al. Characteristics of source rocks and reservoirs of the Funing Formation in the Subei Basin and their bearing on future shale oil exploration[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020,40(6):133-145.
- [16] 龙海岑,李绍鹏. 泥页岩层系非均质性及其控制因素研究:以苏北盆地阜二段为例[J]. 非常规油气,2022,9(4):78-90.
LONG Haicen, LI Shaopeng. The research on the heterogeneity of shale formations and its controlling factors: a case study of the second member of Funing Formation in Subei Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022,9(4):78-90.
- [17] 王民,焦晨雪,李传明,等. 东营凹陷沙河街组页岩微观孔隙多重分形特征[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):72-79.
WANG Min, JIAO Chenxue, LI Chuanming, et al. Multi-fractal characteristics of micro-pores of Shahejie Formation shale in Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019,26(1):72-79.

- [18] 付茜,刘启东,刘世丽,等.苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油成藏条件分析[J].石油实验地质,2020,42(4):625-631.
FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Shale oil accumulation conditions in the second member of Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):625-631.
- [19] 付茜,刘启东,刘世丽,等.中国“夹层型”页岩油勘探发现现状及前景[J].石油钻采工艺,2019,41(1):63-70.
FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Exploration & development status and prospect of sandwich-type shale oil reservoirs in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019,41(1):63-70.
- [20] 付茜,段宏亮,刘世丽,等.高邮凹陷花庄地区阜二段页岩储层孔喉结构特征研究[J].复杂油气藏,2024,17(2):131-138.
FU Qian, DUAN Hongliang, LIU Shili, et al. Study on pore throat structure characteristics of shale reservoirs in the second member of Funing Formation in the Huazhuang Area of Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024,17(2):131-138.
- [21] 翟光明.中国石油地质志 卷八:苏浙皖闽油气区[M].北京:石油工业出版社,1992:215.
ZHAI Guangming. Petroleum geology of China, Vol. 8[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:215.
- [22] 朱相羽,段宏亮,孙雅雄.苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(8):1206-1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Petroleum Sinica, 2023,44(8):1206-1221.
- [23] 钟志国,于雯泉,段宏亮,等.苏北盆地中低 TOC 复杂断块页岩油勘探进展与攻关方向[J].油气藏评价与开发,2025,15(1):11-18.
ZHONG Zhiguo, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025,15(1):11-18.
- [24] 林子智,卢双舫,常象春,等.陆相页岩微观孔隙结构及分形特征:以徐家围子断陷沙河子组为例[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):151-160.
LIN Zizhi, LU Shuangfang, CHANG Xiangchun, et al. Micro-pore structure and fractal characteristics of terrestrial shales: a case study of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression[J]. Coal Geology and Exploration, 2021,49(1):151-160.
- [25] 刘毅,林承焰,林建力,等.东海盆地西湖凹陷深层低渗一致密砂岩孔隙结构特征及成因分析[J].天然气地球科学,2024,35(3):405-422.
LIU Yi, LIN Chengyan, LIN Jianli, et al. Pore structure characteristics and genesis analysis of deep tight sandstone in Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024,35(3):405-422.
- [26] LOUCKS R, REED R, RUPPEL S, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012,96:1071-1098.
- [27] 郝乐伟,王琪,唐俊.储层岩石微观孔隙结构研究方法理论与综述[J].岩性油气藏,2013,25(5):123-128.
HAO Lewei, WANG Qi, TANG Jun. Research progress of reservoir microscopic pore structure[J]. Lithologic Reservoirs, 2013,25(5):123-128.
- [28] 张鹏飞.基于核磁共振技术的页岩油储集、赋存与可流动性研究[D].东营:中国石油大学(华东),2019:60-66.
ZHANG Pengfei. Research on shale oil reservoir, occurrence and movability using nuclear magnetic resonance[D]. Dongying: China University of Petroleum(East China), 2019:60-66.
- [29] 吴泽宇,孙梦迪,蒋恕,等.鄂西地区深层页岩气储层岩相孔隙结构特征差异及其控制因素:以 TY1 和 YT3 井五峰—龙马溪组页岩为例[J].东北石油大学学报,2023,47(1):15-29.
WU Zeyu, SUN Mengdi, JIANG Shu, et al. Characteristics and controlling factors of pore structure in different lithofacies of deep shale gas reservoirs: a case study of Wufeng-Longmaxi Formation shales from wells YT1 and YT3 in Western Hubei[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023,47(1):15-29.
- [30] 张奎华,孙中良,张关龙,等.准噶尔盆地哈山地区下二叠统风城组泥页岩优势岩相与页岩油富集模式[J].石油实验地质,2023,45(4):593-605.
ZHANG Kuihua, SUN Zhongliang, ZHANG Guanglong, et al. Shale dominant lithofacies and shale oil enrichment model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hasha Area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023,45(4):593-605.
- [31] 李晓慧,姜振学,黄立良,等.玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素及有利富集层段[J].东北石油大学,2022,46(2):33-44.
LI Xiaohui, JIANG Zhenxue, HUANG Liliang, et al. Main controlling factors of shale oil enrichment and optimization of favorable enrichment intervals of Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(2):33-44.
- [32] 王子萌,蒋裕强,付永红,等.基于核磁共振表征渝西地区五峰组一龙一₁亚段页岩储层孔隙结构及非均质性[J].地球科学,2022,47(2):490-504.
WANG Zimeng, JIANG Yuqiang, FU Yonghong, et al. Characterization of pore structure and heterogeneity of shale reservoir from Wufeng Formation-Sublayers Long-1₁ in Western Chongqing based on nuclear magnetic resonance[J]. Earth Science, 2022,47(2):490-504.
- [33] ZHANG Pengfei, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Characterization of shale pore system: a case study of Paleogene Xin'gouzui

- Formation in the Jiangnan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,79:321-334.
- [34] ZHANG Pengfei, YINYajie, LU Shuangfang, et al. Insights into pore structures and multifractal characteristics of shale oil reservoirs: a case study from Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Energy Fuels*, 2022,36:8224-8237.
- [35] 余旭东,康志宏,周磊,等.核磁共振技术在页岩孔隙表征中的应用[J].*煤炭技术*,2018,37(5):129-131.
YU Xudong, KANG Zhihong, ZHOU Lei, et al. Application of nuclear magnetic resonance in shale pore characterization[J]. *Coal Technology*, 2018,37(5):129-131.
- [36] 祝汉京,张军建.基于低场核磁共振技术和多重分形理论的高阶煤样孔裂隙分维特征[J].*煤炭工程*,2024,56(6):158-162.
ZHU Hanjing, ZHANG Junjian. Study on pore and fracture heterogeneity of high rank coal samples based on NMR technology and multi-fractal theories[J]. *Coal Engineering*, 2024,56(6):158-162.
- [37] 梁志凯,李卓,李连霞,等.松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩孔径多重分形特征与岩相的关系[J].*岩性油气藏*,2020,32(6):22-35.
LIANG Zhikai, LI Zhuo, LI Lianxia, et al. Relationship between multifractal characteristics of pore size and lithofacies of shale of Shahezi Formation in Changling fault depression, Songliao Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020,32(6):22-35.
- [38] 陈惠,冯春珍,赵建鹏,等.基于分形与核磁共振测井的储层孔隙结构表征与分类[J].*测井技术*,2021,45(1):50-55.
CHEN Hui, FENG Chunzhen, ZHAO Jianpeng, et al. Pore structure characterization and classification based on fractal theory and nuclear magnetic resonance logging[J]. *Well Logging Technology*, 2021,45(1):50-55.
- [39] 王金满,张萌,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J].*农业工程学报*,2014,30(4):230-238.
WANG Jinman, ZHANG Meng, BAI Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine-dump in loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(4):230-238.
- [40] 张顺,刘惠明,宋国奇,等.东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J].*石油学报*,2016,37(12):1495-1507.
ZHANG Shun, LIU Huiming, SONG Guoqi, et al. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying Sag[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 2016,37(12):1495-1507.

.....

(上接第44页)

- [28] 孔垂显,巴忠臣,崔志松,等.火山岩油藏压裂水平井应力敏感产能模型[J].*岩性油气藏*,2021,33(4):166-175.
KONG Chuixian, BA Zhongchen, CUI Zhisong, et al. Stress-sensitive productivity model of fractured horizontal wells in volcanic reservoirs[J]. *Lithological Reservoirs*, 2021,33(4):166-175.
- [29] DONALDSON E C, ALAM W, BEGUM N. Hydraulic fracturing explained: evaluation, implementation, and challenges[M]. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 2014:47-76.
- [30] LIU A, LIU S, LIU P, et al. The role of sorption-induced coal matrix shrinkage on permeability and stress evolutions under replicated in situ condition for CBM reservoirs[J]. *Fuel*, 2021,294(15):120530.
- [31] 姜瑞忠,沈泽阳,崔永正,等.双重介质低渗油藏斜井压力动态特征分析[J].*岩性油气藏*,2018,30(6):131-137.
JIANG Ruizhong, SHEN Zeyang, CUI Yongzheng, et al. Dynamical characteristics of inclined well in dual medium low permeability reservoir[J]. *Lithological Reservoirs*, 2018,30(6):131-137.
- [32] ZHONG X, ZHU Y, LIU L, et al. The characteristics and influencing factors of permeability stress sensitivity of tight sandstone reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020,191:107221.
- [33] 成友友,郭春秋,陈鹏羽,等.碳酸盐岩气藏应力敏感特征及微观机理[J].*石油勘探与开发*,2023,50(1):152-159.
CHENG Youyou, GUO Chunqiu, CHEN Pengyu, et al. Stress sensitivity of carbonate gas reservoirs and its microscopic mechanism [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023,50(1):152-159.
- [34] MCKEE C, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988,3:81-91.