

https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.083



超级盆地成熟探区烃源岩再评价及其勘探意义： 以渤海湾盆地南堡凹陷古近系沙三段烃源岩为例

王政军^{1,2}, 马乾^{2*}, 魏亚琼², 庄东志², 刘经纬², 马健², 高永亮²

1. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国石油冀东油田公司, 河北唐山 063004

摘要: 为了研究超级盆地渤海湾盆地成熟探区南堡凹陷沙三段优质源岩的地球化学特征及其成藏贡献. 基于烃源岩有机碳、热解、有机元素、镜质体反射率等数据评价烃源岩生烃潜力, 基于烃源岩和原油 GC-MS 实验和生烃潜力评价结果, 描述源岩分子地球化学, 建立定量生标参数图版确定沙三段烃源岩成藏贡献, 根据烃源岩测井评价、地震预测结合盆地模拟确定资源潜力, 研究表明, 南堡凹陷沙三段烃源岩有机质丰度高, 为一套优质烃源岩, 有机质类型主要为 II₁ 型, 该套烃源岩现今为成熟-高成熟阶段, 以生轻质油和凝析油气为主; 运用生物标志物参数 C₂₄-四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷与 C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷图版可以较好区分南堡凹陷四套主力烃源岩. 油气源对比表明, 环林雀次凹和环曹妃甸次凹深层沙三段和古生界潜山主要来自沙三段烃源岩贡献; 高柳断层以南曹妃甸次凹和林雀次凹深层火山碎屑岩油气藏、洼槽区深层沙一段和沙三段构造岩性和岩性油气藏、奥陶系残丘潜山和寒武系内幕潜山是有利勘探领域, 另外, 南部斜坡带沙三段烃源岩埋藏和热演化适中, 发育深水咸水湖相碳酸盐纹层, 可动油含量高, 是页岩油勘探有利区带.

关键词: 南堡凹陷; 沙三段; 优质烃源岩; 油源对比; 成藏贡献; 页岩油; 油气地质.

中图分类号: P632

文章编号: 1000-2383(2026)05-1636-16

收稿日期: 2025-12-31

Re-Evaluation of Source Rocks in Mature Exploration Areas of Super Basins and Its Exploration Significance: A Case Study of Es₃ Source Rock in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

Wang Zhengjun^{1,2}, Ma Qian^{2*}, Wei Yaqiong², Zhuang Dongzhi², Liu Jingwei², Ma Jian², Gao Yongliang²

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430074, China

2. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China

Abstract: To investigate the geochemical characteristics and hydrocarbon accumulation contribution of high-quality source rocks in the Sha-3 Member of the mature exploration area in the Nanpu sag, Bohai Bay basin, a typical superimposed basin, this study evaluates the hydrocarbon generation potential of the source rocks based on data including total organic carbon (TOC), pyrolysis, organic elemental analysis, and vitrinite reflectance (R_o). Molecular geochemistry of the source rocks is characterized using GC-MS

基金项目: 油气重大专项(No.2024ZD1400100).

作者简介: 王政军(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事石油地质与油气地球化学研究与勘探工作. ORCID: 0009-0007-9616-8922. E-mail: wzjun2007@126.com

***通讯作者:** 马乾, E-mail: maqian1968@petrochina.com.cn

引用格式: 王政军, 马乾, 魏亚琼, 庄东志, 刘经纬, 马健, 高永亮, 2026. 超级盆地成熟探区烃源岩再评价及其勘探意义: 以渤海湾盆地南堡凹陷古近系沙三段烃源岩为例. 地球科学, 51(5):1636-1651.

Citation: Wang Zhengjun, Ma Qian, Wei Yaqiong, Zhuang Dongzhi, Liu Jingwei, Ma Jian, Gao Yongliang, 2026. Re-Evaluation of Source Rocks in Mature Exploration Areas of Super Basins and Its Exploration Significance: A Case Study of Es₃ Source Rock in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 51(5):1636-1651.

analysis of source rocks and crude oils, combined with hydrocarbon generation potential evaluation results. The quantitative oil-source correlation is established using biomarker parameter cross-plots to determine the accumulation contribution. Resource potential is assessed by integrating source rock logging evaluation, seismic prediction, and basin modeling. Research indicates that the E_{s_3} source rock in the Nanpu sag possesses high organic matter abundance, classifying it as a set of high-quality source rocks. The organic matter type is predominantly Type II₁. Currently, this source rock suite is in the mature to high-mature stage, primarily generating light oil and condensate. Using biomarker parameter cross-plots, specifically C_{24} tetracyclic terpane/ C_{26} tricyclic terpane versus C_{30} 4-methylsterane/ C_{29} regular sterane, effectively distinguishes the four sets of main source rocks in the Nanpu sag. Oil-source correlation demonstrates that the oil in the deep E_{s_3} and Paleozoic buried hills surrounding the Linque and Caofeidian sub-sags is primarily sourced from the E_{s_3} source rocks. Favorable exploration targets include deep volcanoclastic rock reservoirs south of the Gaoliu fault within the Caofeidian and Linque sub-sags, deep structural-lithological and lithological reservoirs in the E_{s_1} and E_{s_3} members within the trough zones, and Ordovician residual hill buried hills and Cambrian internal buried hills. Additionally, the E_{s_3} source rocks in the southern slope zone have moderate burial depth and thermal evolution, and contain developed deep-water saline lacustrine carbonate laminae with high movable oil content, making this zone a favorable play for shale oil exploration.

Key words: Nanpu sag; E_{s_3} Member; high-quality source rock; oil-source correlation; accumulation contribution; shale oil; petroleum geology.

0 引言

全球存在上千个沉积盆地,但能形成商业规模油气主要聚集在少数含油气盆地中。IHS Markit 公司根据已产出油气资源量、剩余可采油气资源量以及烃源岩基础和含油气系统规模等因素,确定了25个超级盆地(张功成等,2024),其中包括中国东部的松辽盆地和渤海湾盆地。这些超级盆地常规油气产量占全球产量的35%左右,是全球油气产量的主要贡献者。尽管这些盆地中浅层勘探程度日趋增高,但其剩余待探明资源依然丰富,除了在中浅层持续勘探隐蔽油气藏、页岩油及页岩气以外,深层油气勘探已成为全球勘探的热点。渤海湾盆地发育多套烃源岩,勘探层系多,早期形成了“源控论”和“复式油气聚集成藏理论”(朱光有等,2004;康玉柱,2010),随着勘探的深入以及地质认识创新,相继提出了“新构造运动控制油气成藏”、“浅层油气受构造脊控制”等理论(龚再升和王国纯,2001;杨海风等,2023),指导了超级盆地渤海湾盆地的油气勘探实践不断取得突破。以往研究的重点主要在中浅层,随着深层油气勘探和非常规油气勘探的深入,烃源岩的分布预测已从辅助性研究转变为勘探部署的核心依据。不同于常规油气藏的“生-储-盖”组合评价,非常规油气(尤其是页岩油、致密油)强调“源-储-盖”或“自生自储”,烃源岩的空间展布、有机质丰度及成熟度直接控制了“甜点区”的定位(贾承造等,2025),这更加要求加强成熟探区烃源岩尤其是优质烃源岩再评价与再认识。

渤海湾盆地是典型陆相断陷湖盆,陆相断陷湖盆烃源岩是油气资源勘探的核心靶区,国内外研究已取得系列进展。国外聚焦湖盆沉积演化与有机质富集关联机制,在西巴伦支海盆地等开展烃源岩分布与地球化学特征研究,明确不同成熟度烃源岩的生烃潜力;国内在渤海湾、松辽等盆地突破显著,建立多参数评价体系,明确纹层状富有机质页岩为主力烃源岩,推动页岩油国家级示范区建设(蔚远江等,2023),并发展广义 ΔlgR 等深层烃源岩评价技术(朱光有等,2003;张寒和朱光有,2007)。但研究仍存瓶颈:一是构造沉积复杂性导致烃源岩非均质性强,传统评价受样品与数据分辨率限制;二是深层烃源岩热演化模拟精度不足,成藏贡献定量表征困难。

南堡凹陷作为渤海湾盆地“小而肥”的富油气凹陷,位于超级含油气盆地渤海湾盆地北部,是渤海湾盆地典型的陆相新生代富油气断陷凹陷(Zhu *et al.*, 2013a, 2013b, 2014;董月霞等,2014)。南堡凹陷经过近40年的勘探,当前已进入高勘探程度阶段,中浅层(Nm-Ed₁)寻找规模储量的难度越来越大,而深层、超深层资源探明程度相对较低,深层、超深层油气勘探成为该区域油气勘探的主攻方向。深层沙三段烃源岩全区稳定分布,全区发育稳定分布的厚层优质烃源岩,热演化程度高,因此系统评价沙三段烃源岩特征及其成藏贡献,探讨页岩油勘探潜力,对指南堡凹陷常规与非常规油气勘探部署、提升油气资源探明储量具有重要的理论与实践意义。

1 地质概况

南堡凹陷为超级盆地渤海湾盆地北部的一个次级构造单元,其北部与燕山相连,南部和东部毗邻渤海.南堡凹陷是发育在中古生界基底之上的具有北断南超特征的单断箕状凹陷,北侧和东侧以边界断层与老王庄凸起、西南庄凸起、柏各庄凸起等相邻,南侧以缓坡与沙垒田凸起相接(图1).凹陷内自下而上发育寒武系、奥陶系、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组等地层,盆地基底为太古界花岗岩.由于盆地经历多旋回构造运动,遭受多期抬升剥蚀,导致部分地区地层纵向发育不全,横向展布变化大,接触关系复杂(李素梅等,2014; Wang *et al.*, 2023). 凹陷内部被高柳断层分割为南北2区,高柳断层以北是沙四段的沉积中心,发育柳赞、高尚堡披覆背斜构造带和拾场次凹;高柳断层以南沙河街组和东营组的沉积中心,在西南庄断层的下降盘发育了老爷庙、北堡逆牵引背斜构造带,在滩海区域自西向东发育了南堡5号、南堡1号、南堡2号、南堡3号和南堡4号构造,发育林雀和曹妃甸2大生烃次凹(图1);南堡凹陷发育中浅层、中深层和深层三大勘探领域,其中中浅层发育Nm、Ng和Ed₁三套含油气层系,中深层发育Ed₂、Ed₃和Es₃三套含油气层系,深层主要发育Es₃和Є-O两套含油气层系.

前人研究表明,南堡凹陷古近系从老到新可划分为4幕裂陷,南堡凹陷四套主力烃源岩形成于裂陷旋回阶段(姜福杰等,2010).其中,沙三段烃源岩沉积时期属于裂陷二幕,该期受边界断层西南庄断

层西段强烈活动,形成以林雀西次凹为主生烃洼槽,发育曹妃甸和拾场等多个次级生烃洼槽的格局.具备形成烃源岩的地质背景,沉积了以灰黑色和深灰色钙质泥岩或含钙泥岩、砂岩和薄层生物灰岩为主的沉积,而且沉积中心逐步向南迁移,这期的裂陷作用最强,此时湖盆水体深,发育大面积深湖相-半深湖相深灰色、灰黑色泥岩或钙质泥岩,且厚度大,平面上分布稳定,有效烃源岩厚度主要分布在200~500 m,优质烃源岩的厚度主要分布在100~200 m.沙三段烃源岩为一套半咸水-咸水沉积以水生生物为主,混合部分高等植物的成熟-高成熟烃源岩,生烃潜力大.

2 沙三段烃源岩有机地球化学特征

2.1 烃源岩有机质丰度

烃源岩有机质丰度是衡量烃源岩质量优劣的直接标志和衡量烃源岩生烃物质基础的重要指标.对南堡凹陷沙三段暗色泥岩279个样品有机质丰度分析表明,南堡凹陷沙三段烃源岩有机碳含量(TOC)为0.82%~3.27%,主要分布在1%~3%,其中林雀次凹TOC主要分布在0.82%~2.44%,平均值为1.44%;曹妃甸次凹TOC主要分布在0.84%~3.18%,平均值为1.85%;氯仿沥青“A”含量主要分布在0.105%~1.08%,其中曹妃甸次凹氯仿沥青“A”含量主要分布在0.109%~0.454%,平均值为0.273%,林雀次凹氯仿沥青“A”含量主要分布在0.105%~1.336%,平均值为0.24%;综合分析,南堡

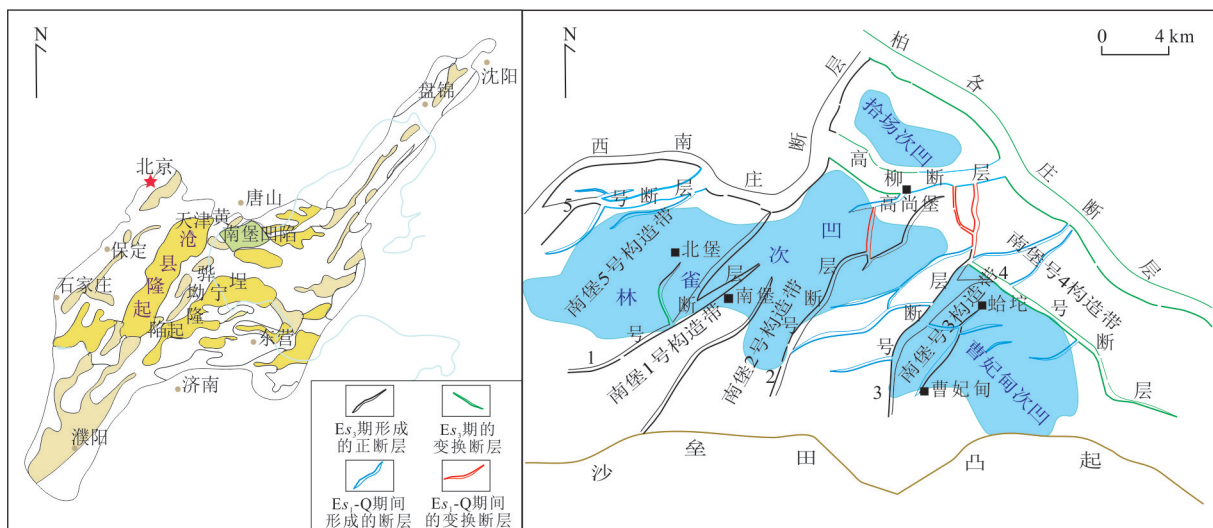


图1 渤海湾盆地南堡凹陷构造位置

Fig.1 Tectonic location map of Nanpu sag in Bohai Bay basin

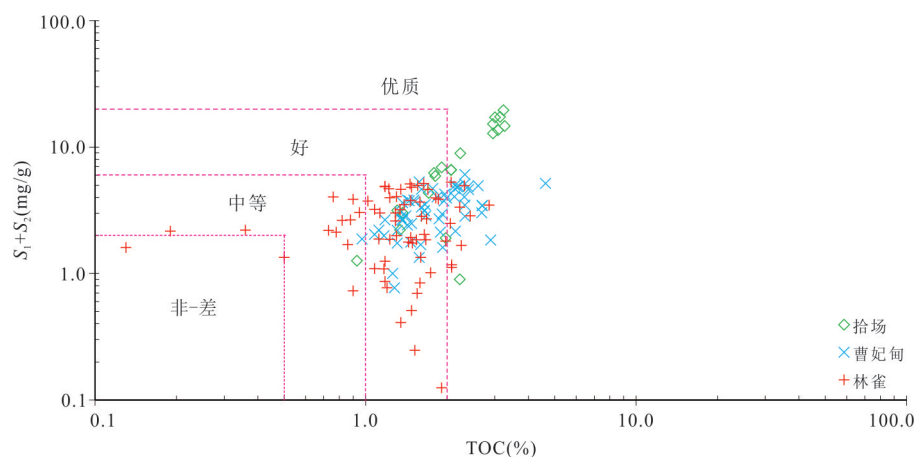


图2 南堡凹陷沙三段烃源岩总有机碳(TOC)和生烃潜量(S_1+S_2)关系

Fig.2 Correlation diagram of total organic carbon (TOC) and hydrocarbon generation potential (S_1+S_2) of the Third Member of Shahejie Formation in Nanpu sag

凹陷沙三段烃源岩主要为一套好-优质烃源岩(图2,表1).同时不同生烃次凹分析表明,南堡凹陷沙三段烃源岩丰度,曹妃甸次凹明显好于林雀次凹(图2),这可能与林雀次凹主要钻井为斜坡带井,曹妃甸次凹钻遇沙三段烃源岩井更靠近深凹带有关.

2.2 烃源岩有机质类型

不同类型的有机质生烃潜力不同且生成的产物也有差异,这主要与有机质的化学组成和结构有关(姜福杰等,2010).根据干酪根类型有机元素H/C和O/C判识图可以看出,曹妃甸次凹有机质类型以I型和II₁型为主,少量II₂型,林雀次凹有机质类型以II₁型为主,部分I型和II₂型,少量III型,拾场次凹主要为II₂型,部分III型(图3).另外,根据沙三段烃源岩显微组分分析,富氢组分(腐泥组+壳质组)占绝对优势,超过80%,其次为镜质组,主要分布在8%~10%,惰质组含量最低,低于6%,大多在4%以下.富氢组分中壳质组大多在50%以上,部分在90%以上,其次为腐泥组,由于烃源岩热演化程度较高,腐泥组主要为腐泥无定形体,藻类体含量较低,计算类型系数主要分布在40~60,有机质类型主要以II₁型为主,少量II₂型,其中,林雀次凹远离物源的生烃次凹中心含有更多的藻类体,有机质类型以II₁型为主,部分II₂型,曹妃甸次凹以II₁型为主,少量II₂型.以上资料综合表明,南堡凹陷沙三段烃源岩有机质类型以II₁型为主,少量I型和II₂型,其中林雀次凹沙三段烃源岩有机质类型以II₁型为主,少量I型和II₂型,曹妃甸次凹沙三段烃源岩有机质类型以II₁型为主,部分I型,少量II₂型.

2.3 烃源岩成熟度

烃源岩成熟度研究是揭示油气生成过程、确定资源类型与分布规律的关键,它不仅决定了烃源岩的生烃潜力和产物性质(油或气),还为评价有效烃源岩范围及预测有利勘探区带提供了核心地质依据(朱光有等,2003).通过对南堡凹陷沙三段烃源岩样品镜质体反射率(R_o)统计发现,沙三段烃源岩 R_o 分布在0.62%~1.60%,主要分布在0.8%~1.4%,为一套成熟-高成熟烃源岩,以生轻质油-凝析油气为主,该套烃源岩生烃中心最大埋深达6700m,推测在生烃中心为高-过成熟,主要生成凝析油气;从镜质体反射率(R_o)与深度关系看,南堡凹陷总体生烃门限深度约3200m,同时南堡凹陷受古地温影响,存在由西向东成熟门限深度降低的趋势.南堡凹陷沙三段埋深普遍大于3200m,因此,烃源岩处于成熟-高成熟阶段,生烃洼槽区已达过成熟阶段.另外发现,曹妃甸次凹成熟度明显高于林雀次凹沙三段烃源岩,即相同深度,曹妃甸次凹沙三段烃源岩热演化程度比林雀次凹高,林雀次凹烃源岩成熟度(R_o)主要分布在1.0%~1.5%,曹妃甸次凹 R_o 主要分布在0.9%~1.4%,拾场次凹沙三段烃源岩成熟度相对较低, R_o 主要分布在0.4%~1.0%(图4,表1).但根据原油成熟度,曹妃甸次凹寒武系潜山原油主要为凝析油气藏,气油比高,气油比大多在1000以上;而林雀次凹来自沙三烃源岩原油主要为成熟-高成熟轻质油,气油比相对较低,拾场次凹为低成熟-成熟原油,含少量天然气(朱光有等,2011;王政军等,2012;Zhu *et al.*, 2013a, 2013b, 2014; Wang *et al.*, 2023),表明林雀次凹深凹带生成高气

表 1 南堡凹陷烃源岩有机地球化学参数

Table 1 Organic geochemical parameters of source rocks in the Nanpu sag

生烃 次凹	井号	层系	深度 (m)	TOC (%)	S ₁ (mg/g)	S ₂ (mg/g)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	S ₁ / (S ₁ +S ₂)	HI	OSI	R _o (%)	C ₂₃ TT/ C ₂₄ TeT	C ₂₄ TeT/ C ₂₆ TT	C ₃₀ */ C ₃₀ H	MST	γ/ C ₃₀ H	Pr/ Ph
林雀	NP*-80	Es ₃	3 688.8	0.86	0.17	0.39	0.56	0.30	45	20		2.67	0.52	0.16	0.19	0.85	0.94
林雀	NP*-L1	Es ₃	5 899	1.67	0.63	2.59	3.22	0.20	155	38	1.45	2.33	0.47	0.08	0.20	0.14	2.18
林雀	NP*-11	Es ₃	4 184	1.68	0.78	2.35	3.13	0.25	140	46	1.09						
林雀	NP*-4	Es ₃	4 340	1.82	1.03	8.01	9.04	0.11	440	57		4.35	0.68	0.08	0.27	0.25	1.75
林雀	NP*-4	Es ₃	4 108.6	2.44	1.84	8.55	10.39	0.18	350	75							
林雀	NP*-58	Es ₃	4 845	1.71	1.41	3.02	4.43	0.32	176	83	1.33						
曹妃甸	NP*-80	Es ₃	4 011.50	1.60	0.98	2.07	3.05	0.32	129	62		2.73	0.45	0.31	0.17	0.36	1.40
曹妃甸	NP*-80	Es ₃	4 011.87	2.70	0.94	2.51	3.45	0.27	93	35	1.06						
曹妃甸	NP*-80	Es ₃	4 216	1.37	0.57	2.11	2.68	0.21	154	42	0.97	2.99	0.37	0.44	0.25	0.16	0.97
曹妃甸	NP*-80	Es ₃	4 246	1.69	0.82	2.30	3.12	0.26	136	48	0.99	3.47	0.32	0.62	0.35	0.21	0.89
曹妃甸	NP*-08	Es ₃	4 522.44	2.43	1.84	2.57	4.41	0.42	106	76	1.13						
曹妃甸	NP*-08	Es ₃	4 530.5	2.32	1.48	1.99	3.47	0.43	86	64	1.17						
曹妃甸	NP*-82	Es ₃	4 730.0	2.21	0.95	3.96	4.91	0.19	179	43	0.98	4.91	0.27	1.38	0.45	0.38	0.73
曹妃甸	NP*-82	Es ₃	4 706.0	2.13	0.46	3.60	4.06	0.11	169	22	0.92	5.39	0.31	0.85	0.38	0.20	1.59
曹妃甸	NP*-88	Es ₃	4 478	2.9								2.86	0.59	0.07	0.21	0.36	1.41
曹妃甸	NP*-88	Es ₃	4 372	1.58	0.32	1.02	1.90	0.24	65	20	0.91	1.34	0.20	0.22	0.19	0.08	1.26
曹妃甸	NP*-88	Es ₃	4 421	2.33	0.94	2.53	3.27	0.27	109	40	0.94	1.20	0.26	0.14	0.27	0.07	1.29
曹妃甸	NP*-1	Es ₃	3 869	2.33	1.76	4.31	4.09	0.29	185	76	0.87	2.86	0.59	0.07	0.26	0.11	1.56
曹妃甸	NP*-G2	Es ₃	5 106	2.15	0.50	1.66	2.65	0.23	77	23	1.37	3.67	0.74	0.10	0.21	0.15	1.32
拾场	G*-9	Es ₃	4 440	1.03	0.30	1.91	1.33	0.14	185	29	0.67	3.85	0.61	0.06	0.28	0.26	0.77
拾场	G*-9	Es ₃	4 570	1.11	0.25	1.96	1.36	0.11	177	23	0.69	3.54	0.52	0.08	0.35	0.28	0.94
拾场	G*-10	Es ₄	4 046	4.09	3.34	22.13	25.47	0.13	541	82		1.33	1.03	0.04	0.95	0.04	0.84
拾场	G*-9	Es ₄	4 657	4.71	1.42	24.33	25.75	0.06	517	30	0.68	1.24	1.33	0.10	0.64	0.05	0.56
林雀	G*-21	Es ₁	4 107.53	1.73	1.64	3.61	5.25	0.31	209	95		0.74	1.36	0.29	0.14	0.09	1.62
林雀	NP*-5	Es ₁	3 799	1.14	0.25	2.92	3.17	0.08	256	22	0.68	1.11	1.18	0.11	0.11	0.08	1.93
曹妃甸	NP*-G2	Es ₁	4 418	2.51	1.06	3.90	4.96	0.21	155	42	1.14	2.08	1.28	0.61	0.19	0.14	2.24
林雀	NP*-65	Ed ₃	4 198.89	1.79	2.12	8.65	10.77	0.20	483	118	0.74	0.52	1.96	0.09	0.14	0.04	1.87
林雀	NP*-21	Ed ₃	4 506.22	1.58	1.05	5.27	6.32	0.17	334	66	0.96	0.39	2.05	0.07	0.20	0.03	1.78
曹妃甸	NP*-57	Ed ₃	4 100	1.98	1.20	7.02	8.22	0.15	355	61	0.97	0.81	3.62	0.07	0.18	0.08	1.07
曹妃甸	NP*-57	Ed ₃	4 295	2.36	1.20	7.99	9.19	0.13	339	51	1.05	0.87	2.17	0.09	0.22	0.10	1.05

油比高成熟油气有待发现。

2.4 烃源岩生物标志物特征

南堡凹陷古近系发育沙四段、沙三段、沙一段和东三段四套主力烃源岩。其中沙三段烃源岩饱和烃气相色谱主峰碳以 C₂₁ 或 C₂₃ 为主峰,姥植比(Pr/Ph)大多小于 1,奇偶优势值(OEP)在 1.0 左右,表明沙三段烃源岩主要形成于强还原沉积环境,烃源岩有机质类型以水生生物为主,为一套成熟-高成熟烃源岩(图 5,表 1)。根据烃源岩萘烷质量色谱图可以看出,与东三段烃源岩和沙一段烃源岩明显不同的是,沙三段烃源岩三环萘烷丰度较高,三环萘烷

和四环萘烷中,低碳数三环萘烷呈正态分布,以 C₂₁ 或 C₂₃ 三环萘烷呈主峰,C₂₂ 三环萘烷丰度最低,四环萘烷中 C₂₄ 四环萘烷丰度低,C₂₄ 四环萘烷/C₂₆-三环萘烷值大多小于 1.0,高碳数三环萘烷 C₂₈ 三环萘烷和 C₂₉ 三环萘烷丰度相当;五环三萘烷中以 C₃₀ 藿烷丰度最高,三降藿烷 Ts 丰度高于 Tm, Ts/(Ts+Tm)大多在 0.55 以上,升藿烷系列随碳数增加丰度逐渐降低。甾烷类中,孕甾烷、升孕甾烷丰度较高,C₂₇ 重排甾烷丰度中等-高,规则甾烷呈偏“V”字型或“L”型,C₂₇ 规则甾烷占优势,规则甾烷异构化程度较高,αααC₂₉S/(S+R)大多在 0.45 以上,C₂₉ββ/

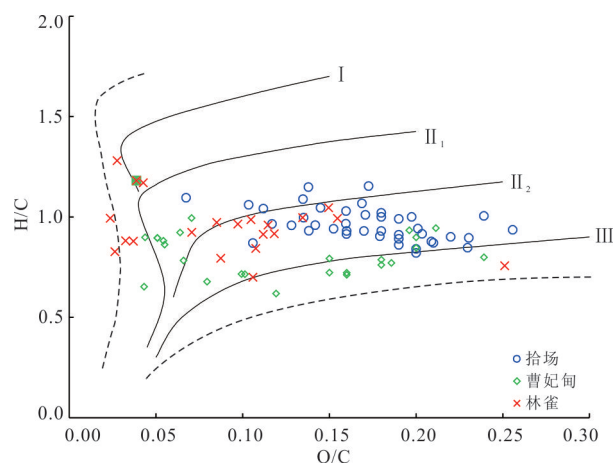


图 3 南堡凹陷沙三段烃源岩干酪根类型有机元素 H/C 和 O/C 判识

Fig. 3 Diagram for identifying kerogen types of source rocks in the Third Member of Shahejie Formation in Nanpu sag based on organic elemental H/C and O/C ratios

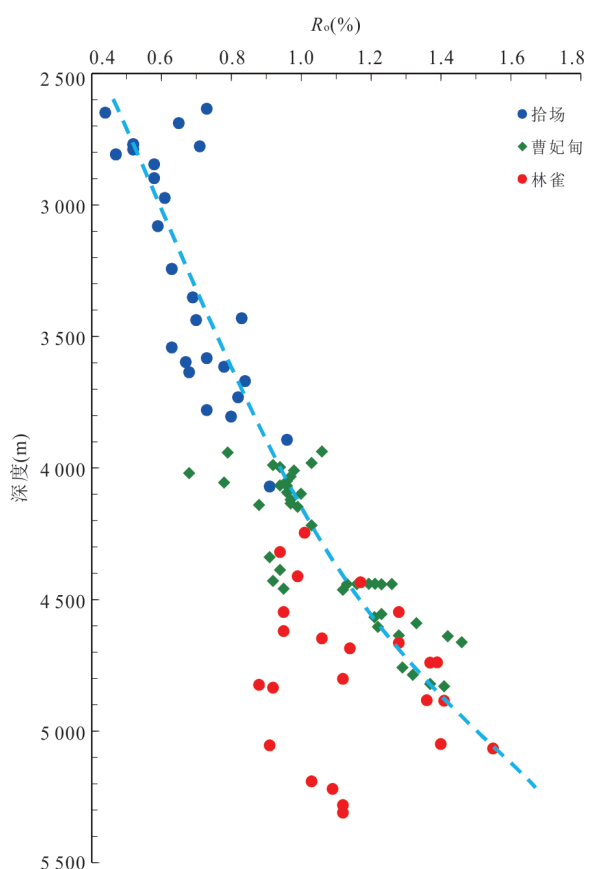


图 4 南堡凹陷沙三段烃源岩成熟度(R_a)与深度关系

Fig.4 Relationship of maturity and depth of the Es₃ source rocks in Nanpu sag

($\alpha\alpha + \beta\beta$) 大多在 0.50 以上, 4-甲基甾烷含量中等(图 5, 表 1)。以上表明沙三段烃源岩有机质为水生生物和陆源植物混合来源, 水生生物来

源为主, 这与烃源岩有机质类型以 II₁ 型为主相符合, 成熟度中等-高, 为成熟-高成熟烃源岩。

根据典型生物标志化合物谱图, 结合定量生标参数发现, 运用 C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷和 C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷能有效区分南堡凹陷四套主力烃源岩(图 6a)。沙三段烃源岩 C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷比值小于 1.0, C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷大于 0.2 而小于 0.5。沙四段烃源岩以 C₃₀ 4-甲基甾烷丰度高为典型特征, 具有 C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷大于 0.5, C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷小于 1 特征, 沙一段烃源岩 C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷比值大于 1 而小于 1.5, C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷小于 0.2, 东三段烃源岩 C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷比值大于 1.5, C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷大多小于 0.2。根据烃源岩 C₂₄ 四环萜烷/C₂₆ 三环萜烷和 C₃₀ 4-甲基甾烷/C₂₉ 规则甾烷判识图版(图 6b), 发现来自沙三段烃源岩生成油气主要分布在环林雀次凹古生界潜山、南堡 5 号深层-老爷庙地区和南堡 1 号、南堡 2 号构造深大断裂发育区中浅层, 环曹妃甸次凹深层沙三段和古生界寒武系内幕潜山, 高柳地区部分浅层, 这类原油主要为凝析油气或轻质油(Zhu *et al.*, 2013a, 2023b, 2014; Wang *et al.*, 2023)。

3 南堡凹陷沙三段烃源岩发育特征及其勘探意义

3.1 南堡凹陷沙三段烃源岩发育特征

烃源岩总有机碳(TOC)含量是评价有机质丰度的主要指标。岩心或岩屑有机地球化学分析测试仅能获得离散的 TOC 含量数据。同时, 南堡凹陷沙三段烃源岩埋深大, 大多埋深超过 4 500 m, 获取足够数量连续的钻井取心样品难度大, 依赖实验室地球化学分析测试总有机碳含量定量评价受到限制, 很难获得连续的有机碳数据及实现烃源岩的三维定量评价。目前, 准确预测烃源岩有机质丰度及其分布主要依赖测井与地震两大手段。基于测井资料的 $\Delta \lg R$ 法及其广义改进模型, 通过整合电阻率、声波时差及自然伽马数据, 有效解决了深层强压实环境下有机碳含量预测的难题。在地震预测方面, 基于岩石物理模型的非线性反演技术实现了对深层优质烃源岩空间展布的精细刻画, 使得在复杂断陷湖盆中圈定有效烃源岩的体积及平面分布成为可能, 显著降低了勘探风险(朱光有等, 2003; 张寒和朱光有, 2007; 石创等, 2025)。

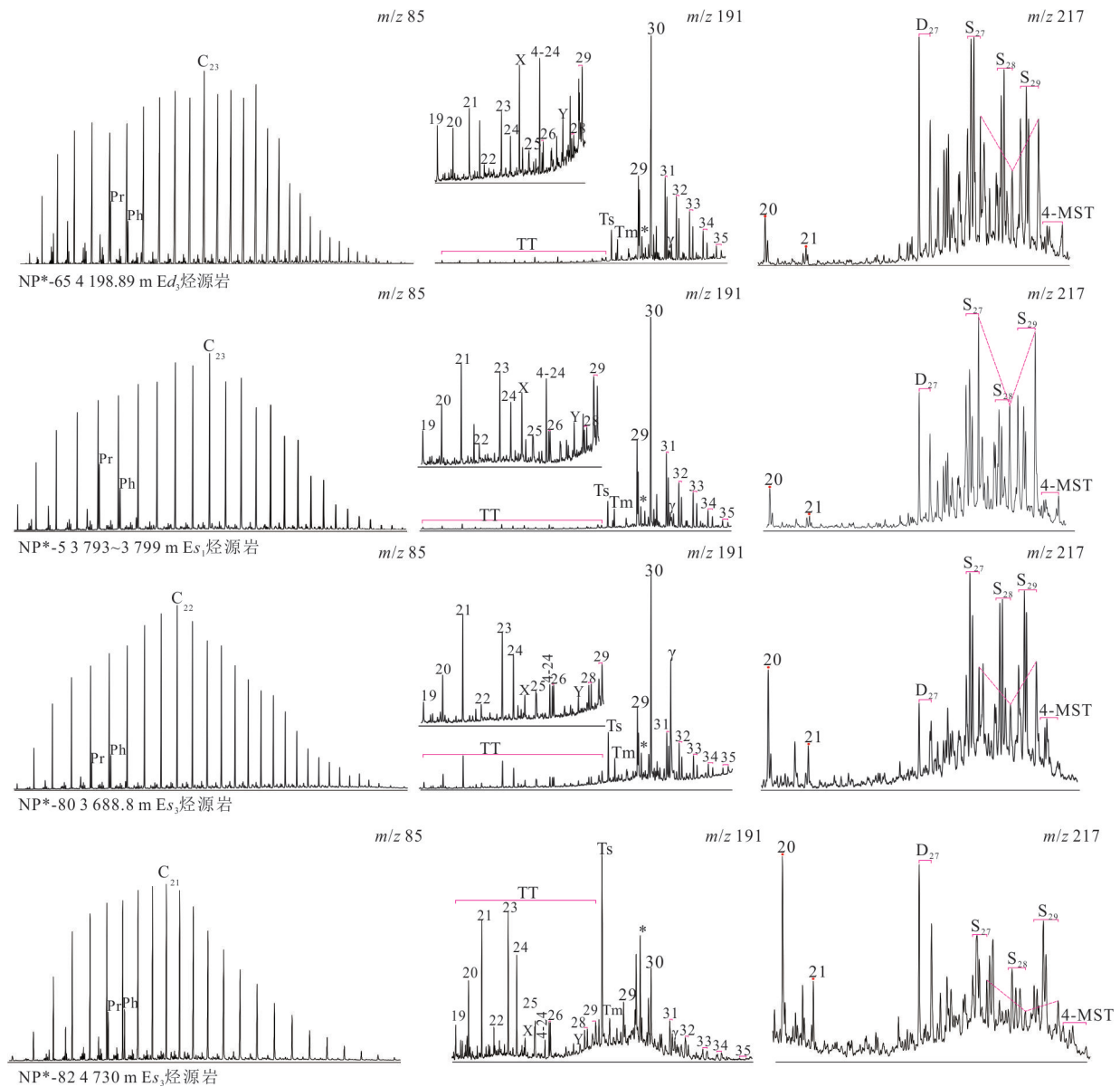


图5 南堡凹陷主力烃源岩甾烷、萜烷特征

Fig.5 Characteristics of steranes and terpanes of source rocks in Shahejie Formation, Nanpu sag

TT=三环萜烷(C₁₉-C₂₉); Ts=18 α ,-22,29,30-三降藿烷; Tm=17 α ,-22,29,30-三降藿烷; 29=17 α ,21 β -30-降藿烷; 30=17 α (H),21 β (H)-藿烷; 31~35=C₃₁-C₃₅17 α (H),21 β (H)-藿烷; γ =伽马蜡烷; 20=孕甾烷; 21=升孕甾烷; D₂₇=C₂₇重排甾烷; S₂₇=C₂₇规则甾烷, S₂₈=C₂₈规则甾烷, S₂₉=C₂₉规则甾烷

由于测井资料容易获取并且在纵向上具有较好的连续性,国内外多位学者利用测井资料定量评价烃源岩有机碳含量,提出了多种烃源岩有机碳含量的测井评价方法,并且在多个油田均取得了较好的应用效果(朱光有等,2003;张寒和朱光有,2007;石创等,2025)。鉴于此,本文基于文献调研,系统归纳总结了国内外常用的烃源岩有机碳含量评价方法的原理及局限性,为了获取总有机碳含量的有效信息,本次采用了比较成熟的改进的 $\Delta \lg R$ 模型烃源岩有

机碳含量测井评价方法,改进后的 $\Delta \lg R$ 模型为:

$$\Delta \lg R = \lg R + \lg(R_{\max}/R_{\min}) /$$

$$(AC_{\max} - AC_{\min})(AC - AC_{\max}) - \lg R_{\min}, \quad (1)$$

R_{\max} (AC_{\max}) 和 R_{\min} (AC_{\min}) 分别为声波时差和电阻率曲线叠合时电阻率(声波时差)曲线刻度的最大、最小值。

由式(1)可以看出:改进后的 $\Delta \lg R$ 法,可以不需要确定声波时差测井曲线基值和电阻率测井曲线基线值,只需要读取声波时差测井曲线的最大值、

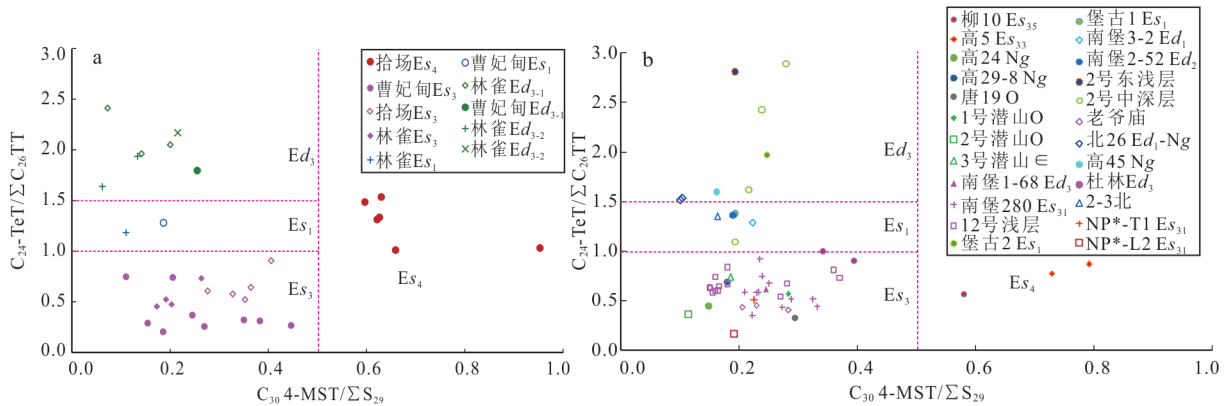


图 6 南堡凹陷烃源岩(a)与油藏(b)C₂₄四环萜烷/C₂₆三环萜烷与C₃₀ 4-甲基甾烷/ΣC₂₉规则甾烷交汇图

Fig.6 Cross-plot of C₂₄-tetracyclic terpane/C₂₆-tricyclic terpane and C₃₀ 4-methylsterane/ΣC₂₉ regular sterane between source rocks (a) and reservoirs (b) in Nanpu sag

C₂₄TeT/C₂₆TT: C₂₄四环萜烷/C₂₆三环萜烷; C₃₀ 4-MST/ΣS₂₉: C₃₀ 4-甲基甾烷/ΣC₂₉规则甾烷

最小值和电阻率测井曲线的最大值、最小值，就可以求出 ΔlgR 值。如果在实测 TOC 数据点较多的情况下，实测 TOC 与求得的 ΔlgR 绘制散点图，两者之间具有较好的相关性。故可以建立两者的线性关系式，为：

$$TOC = A \Delta \lg R + B, \quad (2)$$

式中，A、B 分别为拟合公式的系数，无量纲。

利用该方法对钻遇沙三段优质烃源岩的 NP*-LT1、NP*-80 等 10 口探井进行预测，NP*-L1 井沙三段烃源岩 TOC 最大可达 2.3%，平均值为 1.4%，为好-优质烃源岩；NP*-80 井沙三段烃源岩 TOC 最大可达 3.0%，平均值为 1.53%，为优质烃源岩，总体预测结果与实测结果吻合，符合率 85% 以上(图 7)。

洼槽区勘探程度低，钻井资料少，单纯地质方法难以准确预测该套烃源岩的分布，而地球物理信息中蕴含着烃源岩的大量信息，基于层序地层的划分，应用体系域分析法识别出优质烃源岩发育段，通过建立优质烃源岩地震响应特征。在测井评价单井烃源岩基础上，井震结合，精细标定烃源岩，明确有效烃源岩、优质烃源岩地震响应特征，结果表明，纵向上沙三段湖侵体系域地震反射特征表现为斜坡带中弱振幅、较连续地震反射特征，而在中央洼陷带表现为中高频、中强振幅、连续、平行反射，精细井震标定是优质烃源岩发育的有利层段，横向追踪确定烃源岩的平面分布范围，并利用地震速度岩性分析法预测优质烃源岩厚度。在此基础上，优选敏感属性，分层系建立 GR 及 TOC 曲线与波阻抗关系，开展岩性及 TOC 反演，准确预测泥岩和 TOC 展布规律及预测有效烃源岩与优质烃源岩平面分布。

根据地震预测，南堡凹陷沙三段烃源岩有机质丰度高，有机质类型好，热演化程度高，以生轻质油或凝析油为主，为一套成熟-高成熟、好-优质烃源岩，沙三段有效烃源岩厚度大多在 200~400 m 稳定分布，最大厚度超过 500 m(图 8a)，优质烃源岩厚度大多在 200 m 以上。

3.2 南堡凹陷高柳以南油气主要来自沙三段烃源岩贡献

油源对比表明，南堡凹陷环拾场次凹的高柳地区和周边凸起油源主要来自沙四段油页岩贡献(Zhu *et al.*, 2013a, 2013b; 王政军等, 2015b)，高柳断层以南中浅层除南堡 3 号和 4 号构造带油气源主要来自沙三段烃源岩贡献(王政军等, 2012; Zhu *et al.*, 2013a, 2013b)，主要为构造油气藏；高柳断层以南中-深层主要来自沙三段烃源岩，主要为构造-岩性油气藏、地层岩性油气藏和岩性油气藏，油藏主要分布在不整合界面上下(图 9)，从生烃次凹中心向边缘，沙三段烃源岩形成油气藏分布表现出由岩性油气藏向构造油气藏、原油性质逐渐变差、富集层系逐渐变浅的有序变化。

另外，南堡沙三段烃源岩有机质丰度高(TOC > 1.5% 面积约 1 000 km²)，厚度大(有效烃源岩厚度 200~500 m)，热演化程度高(成熟度 R₀ 主要分布在 1.0%~2.5%)(图 8b)，通过沙三段烃源岩生烃盆地模拟，南堡凹陷沙三段烃源岩经历沙三²沉积末期-东营组沉积期成熟度快速增加阶段，导致烃源岩在东营组末期快速生成油气，主要生烃洼槽区林雀次凹和曹妃甸次凹生油强度大于 400 × 10⁴ t/km²，生气强度超过 30 × 10⁸ m³/km²(图 10)。根据辽东湾地

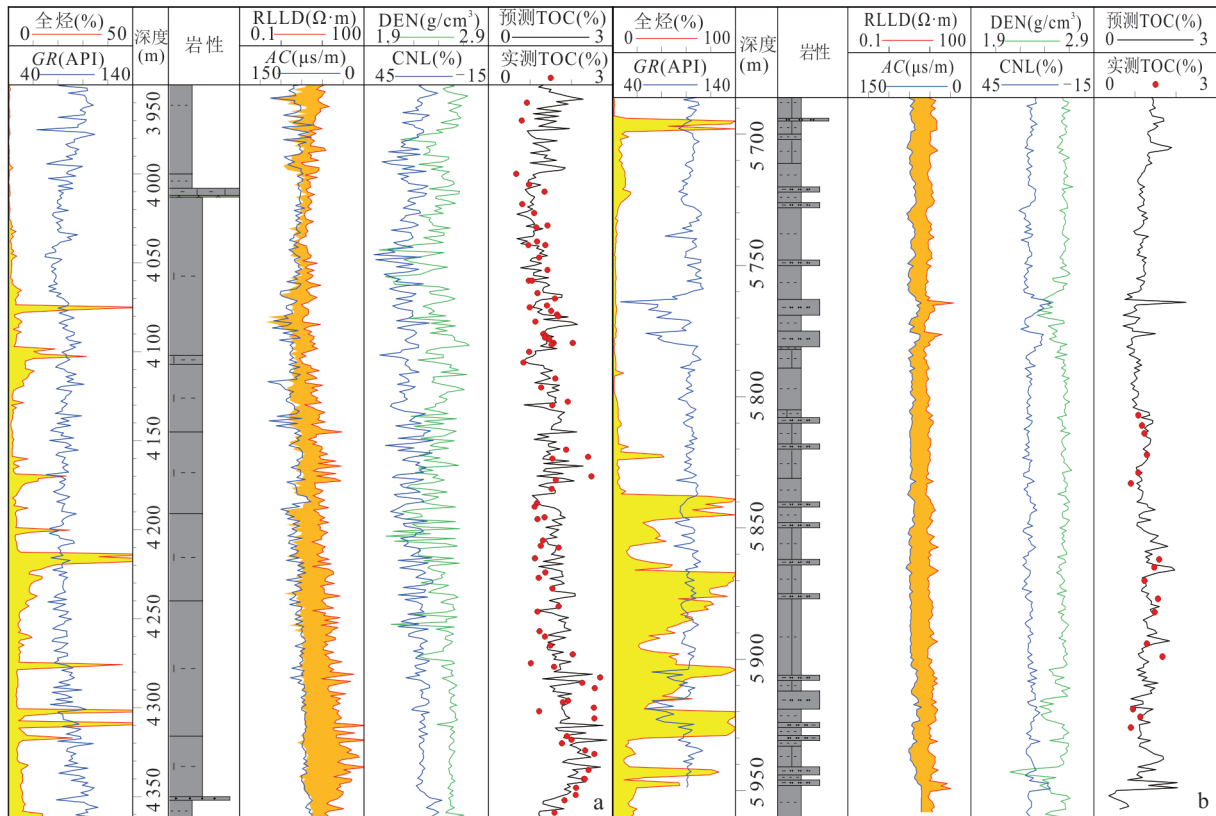


图7 南堡凹陷沙三段烃源岩 TOC 测井预测

Fig.7 TOC logging prediction of source rocks in the Third Member of the Shahejie Formation in Nanpu sag

a. 曹妃甸次凹 NP*-80 井烃源岩 TOC 预测结果; b. 林雀次凹 NP*-L1 井烃源岩 TOC 预测结果

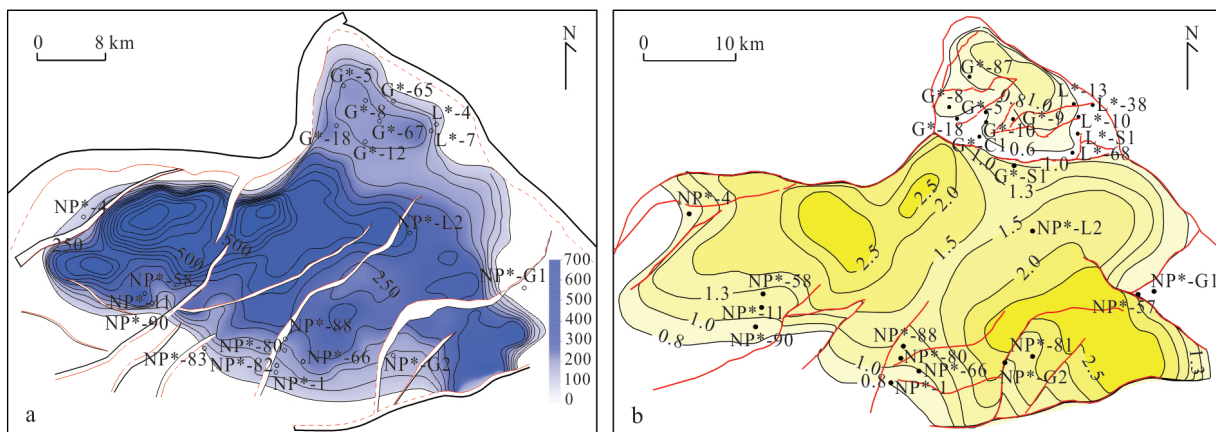


图8 南堡凹陷沙三段烃源岩有效烃源岩厚度等值线图(a)与成熟度(R_o)等值线(b)

Fig.8 Contour maps of effective source rock thickness (a) and source rock maturity (R_o) (b) of the Third Member of the Shahejie Formation in Nanpu sag

区生油强度与储量关系,研究认为生油强度大于 $25 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$ 的烃源岩可形成储量规模大于 $500 \times 10^4 \text{t}$ 油田,为有效烃源岩,生油强度大于 $200 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$ 的烃源岩可形成储量规模大于 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 油田,为优质烃源岩(金强等,2019);根据大中型气田生气强度统计,生气强度超过 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 可形成大中

型气田(戴金星等,2007).表明南堡凹陷沙三段烃源岩具有形成大中型油田和大中型气田的烃源基础.

3.3 常规油气勘探有利领域

根据精细油源对比,高柳断层以南,除了南堡1号、南堡2号构造中浅层由于深大断裂发育沟通沙三段烃源岩有部分来自沙三烃源岩贡献外,沙三段

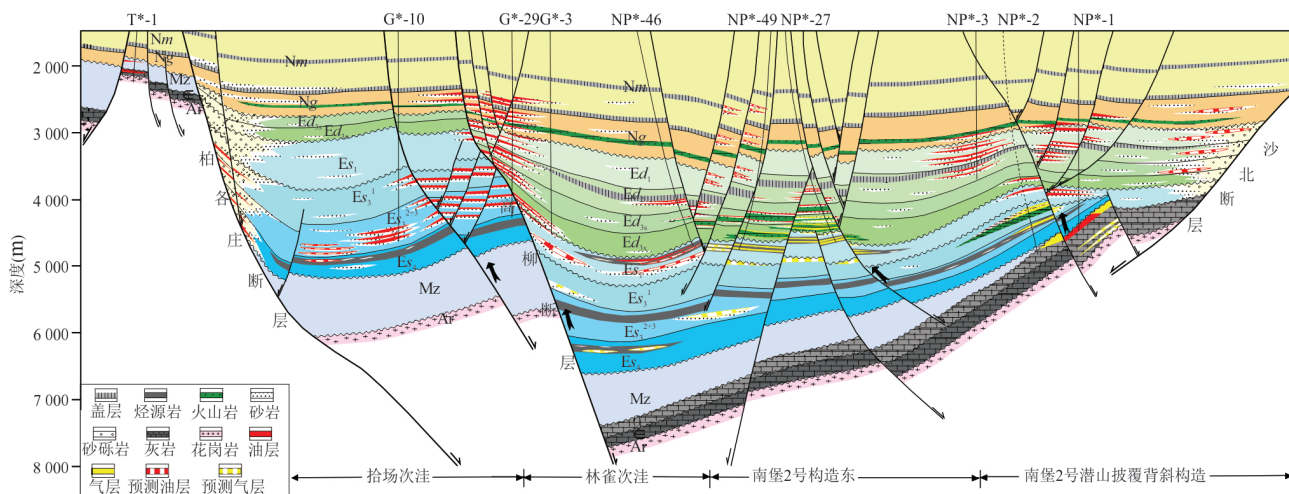


图 9 南堡凹陷油气成藏模式

Fig.9 Hydrocarbon accumulation model map of Nanpu sag

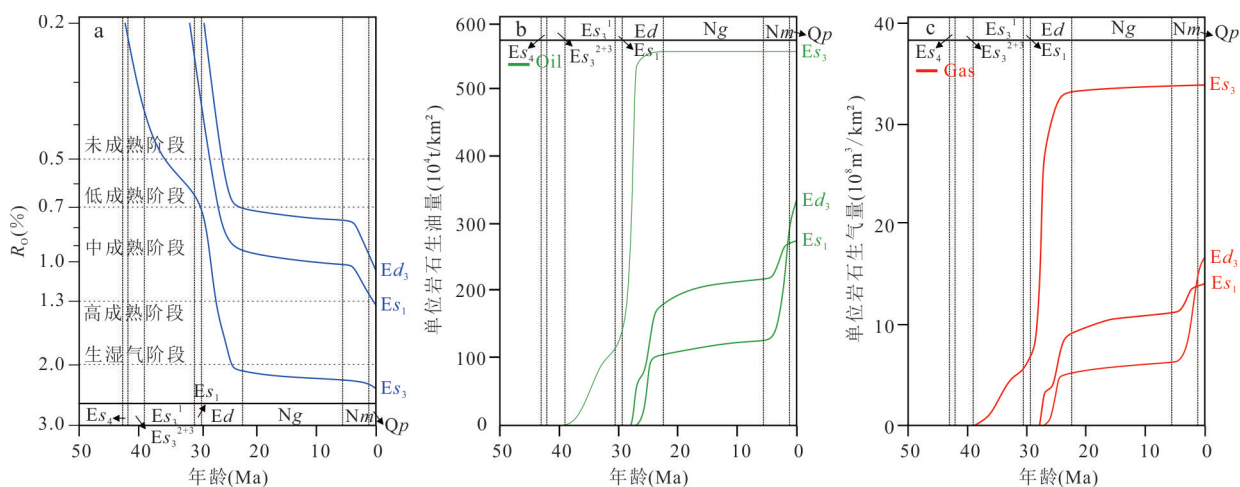


图 10 南堡凹陷沙三段烃源岩热演化史与生烃史

Fig.10 Thermal evolution and hydrocarbon generation history of source rocks in the Third Member of Shahejie Formation in Nanpu sag

a. 烃源岩热演化史; b. 烃源岩生油史; c. 烃源岩生气史

烃源岩生成油气主要分布在深层沙三段和寒武-奥陶系潜山,这主要是由于沙三段烃源岩在全区稳定分布,厚度大多分布在 200~500 m,同时,沙一段烃源岩为一套成熟-高成熟、好-优质烃源岩,对沙三段油气形成烃浓度封闭,沙三段烃源岩生成油气很难突破沙一烃源岩这套优质烃源岩兼盖层.

同时,沙三段烃源岩生烃形成超压,促进油气运移成藏.南堡凹陷发育南北 2 大物源体系,北部陡坡带深层主要发育扇三角洲,南部斜坡带深层主要发育辫状河三角洲,南堡凹陷南部地区紧邻沙垒田凸起,缓坡带具有较好的岩性油气藏成藏背景(图 10).依据南堡凹陷深层压力系数展布特征与已有油气发现的空间位置关系,显示现今油气发现主体分

布于超压及压力过渡区(压力系数等值线在 1.3~1.1 附近)(王政军等,2015a;汤建荣等,2016).

渤海湾盆地虽然整体勘探程度较高,但仍然存在低勘探程度区与低勘探领域(徐田武等,2026).南堡凹陷主体浅层和中深层勘探程度相对较高,但浅层海域、深层低斜坡和洼槽区勘探程度低,深层由于埋藏深度大,勘探成本高,整体资源探明率不足 20%,勘探潜力巨大.根据沙三段油源断裂叠合沙三段有效烃源岩及来自沙三段段油气分布面积可以看出,沙三段烃源岩生成油气主要分布在环林雀次凹、环曹妃甸次凹深层沙三段和古生界碳酸盐岩潜山,生烃洼槽区优质烃源岩与碎屑岩储层叠置分布,烃源岩生烃形成超压、构造和生烃形成构造裂

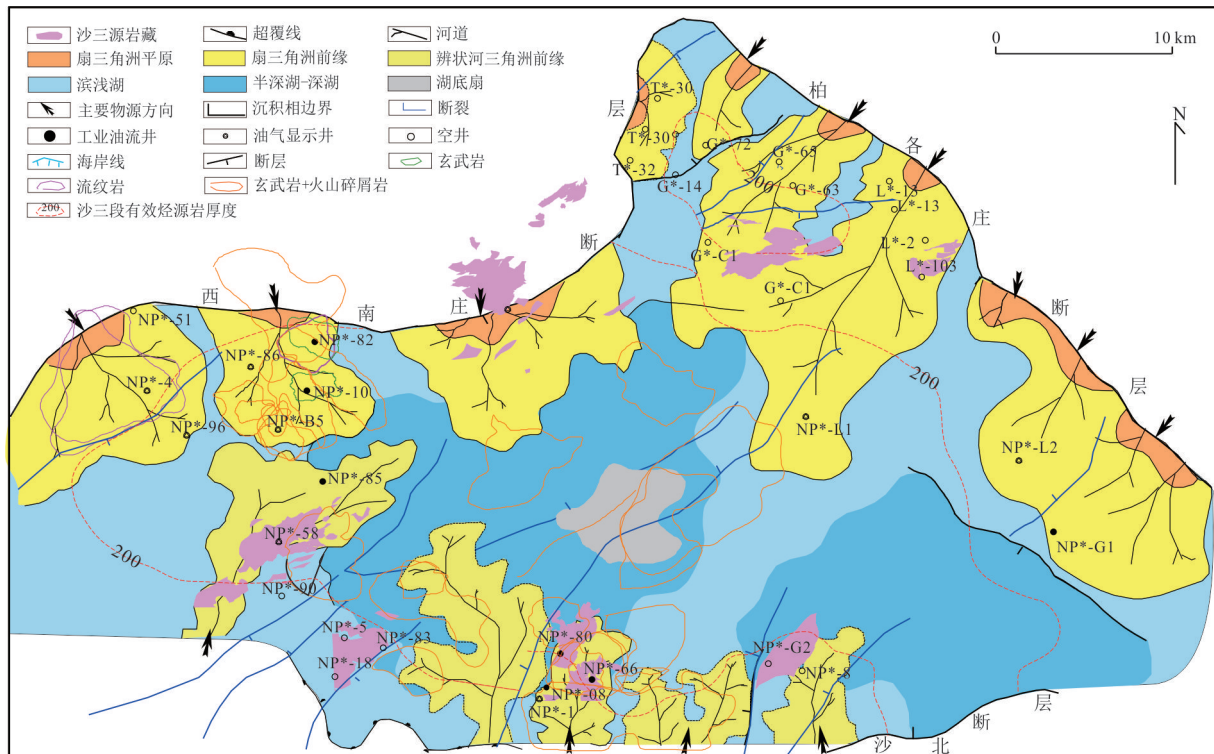


图 11 南堡凹陷深层油气有利勘探领域分布

Fig.11 Distribution map of favorable exploration areas for deep oil and gas in the Nanpu sag

缝或微裂缝、有机酸溶蚀改造等多种作用形成碎屑岩优势储层(王政军等, 2015a), 三角洲前缘、扇三角洲前缘河道和河口坝砂、湖底扇与沙三段优质烃源岩具有较好储盖组合(董月霞等, 2014; 夏景生等, 2017), 风险探井 NP*-T1 井在生烃洼槽区沙三段和沙一段取得勘探突破证实生烃洼槽区是深层油气勘探重要领域(图 11)。其次, 斜坡带和洼槽区深层火山碎屑岩为一套发育在中基性火山熔岩之上的凝灰质砂岩或凝灰岩(Zhao *et al.*, 2023), 储层刚性颗粒含量高, 抗压实作用相对较强, 有效储层分布范围较大, 且与优质烃源岩叠置分布, 勘探效益好且稳产时间长, 在斜坡带沙三段、沙一段和洼槽区东三段及沙一段已获得两个千万吨级效益储量区, 展现出南堡凹陷深层火山碎屑岩油气藏较好勘探前景, 是深层规模增储和效益开发建产的主攻领域(图 9 和图 11); 另外, 南堡凹陷下古生界碳酸盐岩潜山具有产量高, 稳产时间长优点, 多口单井累计油气当量超过 5 万吨, 受多期岩溶作用产生的断裂裂缝-表生岩溶和裂缝-埋藏岩溶形成优势储层控制富集高产, 奥陶系残丘潜山和具有供烃窗口的寒武系内幕潜山勘探程度低, 通过成藏条件的综合评价, 分析认为, 南堡 1 号、南堡 2 号

构造带斜坡区和洼槽区奥陶系残丘潜山、南堡 2 号和南堡 3 号构造带寒武系内幕潜山是下步重要勘探方向(杨晓利等, 2022; Wang *et al.*, 2023)。

3.4 斜坡带页岩油和深凹带页岩气

全油气系统理论的提出深化了对烃源岩尤其是优质烃源岩核心地位的认识。该理论强调常规油气、致密油气与页岩油气在“源-储耦合”控制下的有序分布, 烃源岩既是油气的生成者, 其本身及邻近层系又是非常规油气的有效储层。因此, 准确预测高有机质丰度烃源岩的分布边界与热演化程度, 是识别“滞留烃”聚集区、划分流体动力场(束缚动力场与自由动力场)以及建立“常规-非常规”序列成藏模式的前提(贾承造等, 2025)。综上所述, 烃源岩分布预测为非常规油气勘探从“寻找圈闭”向“寻找优质源岩”的战略转变提供了关键的技术支撑与地质依据。

高勘探程度陆相断陷湖盆常规油气勘探空间收窄, 页岩油已成为增储上产核心接替领域, 渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷和黄骅坳陷沧东凹陷孔二段及歧口凹陷沙河街组页岩油的突破证实其巨大潜力与战略价值(赵贤正等, 2023; 孙焕泉等, 2025)。南堡凹陷沙三段南部斜坡带碳酸盐岩纹层页

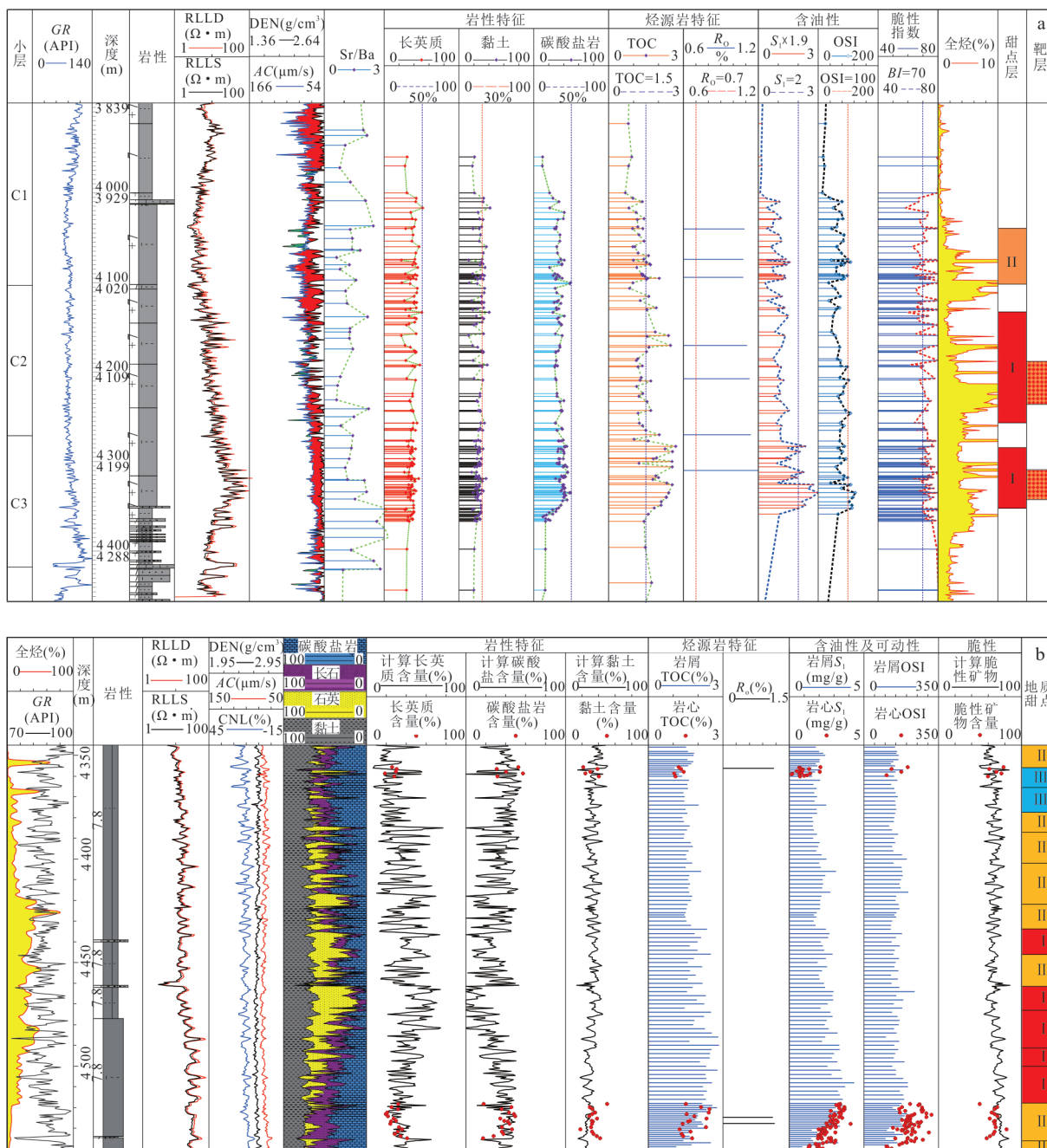


图12 南堡凹陷井沙三段页岩油综合评价

Fig.12 Comprehensive evaluation map of shale oil in the Es₃ Membe of Shahejie Formation, Nanpu sag
a.NP*-80井;b. NP*-08井

岩段岩心热解分析可动油(S_1)主要分布在1.03~3.39 mg/g, 甜点段平均值为2.45 mg/g, 根据黄骅坳陷歧口凹陷沙三段可动油恢复系数, 结合分析样品热演化程度、放置时间和样品类型, 取恢复系数1.9, 恢复后可动油 S_1 可达2.7~8.8 mg/g, 恢复后OSI主要分布在197~340 mg/g.TOC; 页岩油段石英、长石含量为25.6%~27.1%, 方解石、白云石含量为39%~44.4%, 粘土矿物含量为

26.2%~31.8%, 粘土矿物中以伊利石和伊蒙混层为主, 占总量的80%~90%, 高岭石和绿泥石含量低, 不含蒙脱石, 脆性矿物含量超过70%(图12). 根据薄片和扫描电镜, 储集空间主要为残余粒间孔、粒内孔, 部分晶间孔, 并且发育微裂缝, 微裂缝沟通孔隙, 储层物性和连通性大大增加, 另外该套厚层优质页岩层系大量生烃导致普遍发育超压, 压力系数在1.3以上(汤建荣等, 2016).

综合地质甜点和工程甜点评价,该套页岩油纵向可划分为三套甜点层(图 12a),连井对比结合地震特征分析认为甜点段在平面上连续性较好,分布范围广,甜点厚度为 170~200 m,并且甜点段发育碳酸盐岩纹层,浅褐色泥质与含有机质暗色泥质明暗交替,水平层理泥岩与条带状方解石互层,为咸水沉积环境形成碳酸盐岩纹层($Sr/Ba > 1$) (Hemmati *et al.*, 2025). 选取与岐口凹陷沙三段及溱潼凹陷阜二段获得工业开发具有相似地质条件的南堡 2 号构造斜坡带作为南堡凹陷页岩油勘探突破的首选区带(高玉巧等, 2024; 余文端等, 2024; 薛冈等, 2025; 杨保良等, 2026), 埋深为 4 000~4 200 m, 页岩油甜点面积为 170 km², 资源规模近 2 亿吨. 2024 年针对 C3 甜点层钻探大斜度井 NP*-08 井, 钻遇了良好的油气显示, 共解释一类页岩油甜点 68 m, 二类页岩油甜点 126 m, 展示了沙三段页岩油具有较好勘探前景(图 12b). 另外, 林雀次凹 NP*-L1 和曹妃甸次凹 NP*-G2 井热演化程度高, 成熟度 $R_o > 1.3\%$ (图 8a), 气测全烃 100%, 表明深凹带页岩气可能是另一个重要勘探领域.

4 结论

(1) 沙三段烃源岩有机质丰度较高, TOC 大多大于 2%, 有机质以 II₁ 型为主, 为一套优质烃源岩, 饱和烃生物标志物中三环萜烷含量高, 运用生物标志物参数 C_{24} -四环萜烷/ C_{26} -三环萜烷与 C_{30} -4-甲基甾烷/ C_{29} -规则甾烷图版可以将沙三段烃源岩与其他主力烃源岩很好区分开. C_{24} -四环萜烷/ C_{26} -三环萜烷小于 1.0, 伽马蜡烷/ C_{30} -藿烷大于 0.2, 规则甾烷异构化程度高, 成熟度参数指示为成熟-高成熟烃源岩, 为一套咸水沉积且以水生生物为主的成熟-高成熟烃源岩. 这套烃源岩的成熟度 (R_o) 斜坡带 0.8%~1.6%, 预测生烃洼槽区为高-过成熟, 腐殖无定形体是烃源岩中有机质的重要来源, 含较高含量藻类体. 裂隙作用较强, 此时湖盆水体深, 发育大面积半深湖-深湖相深灰色、灰黑色碳酸质纹层页岩, 沙三段有效烃源岩厚度大多在 200 m 以上, 生烃中心厚度超过 500 m, 优质烃源岩的厚度在 200 m 左右, 纵向和平面分布稳定, 生烃潜力较大.

(2) 南堡凹陷沙三段烃源岩主要遭受了沙一段、东营组两期的抬升剥蚀事件和经历了沙河街组沉积期 (4.8~5.4 °C/100 m) 和东营组沉积早期 (4.5~5.2 °C/100 m) 两期地温梯度高峰期;

明确了沙三段烃源岩在沙三中段沉积末期、东营组沉积期有两期成熟度快速增加阶段. 主要生烃次凹曹妃甸次凹和林雀次凹生油强度大于 500×10^4 t/km², 生气强度超过 30×10^8 m³/km², 具备形成大中型油田和中大型气田的烃源基础.

(3) 沙三段烃源岩生烃形成超压, 有利于储层油气聚集和储层孔隙保存, 同时, 经历 2 次大规模排烃, 早期油气充注有利于储层孔隙保存, 抑制孔隙压实, 同时沙三段烃源岩在热解过程中产生大量有机酸溶蚀储层中长石及方解石等, 形成次生孔隙, 沙三段烃源岩是南堡凹陷深层、超深层优质储层形成的重要因素.

(4) 油源对比证实南堡凹陷高柳断层以南中浅层及中深层油气主要为沙三段烃源岩贡献, 沙三段与沙三 1 段、下古生界潜山为不整合接触, 南堡凹陷深层油气主要分布在该不整合界面上下, 同时, 沙三段烃源岩大量生烃形成超压有利排烃聚集成藏, 现今油气发现主体分布于超压及压力过渡区; 环林雀次凹和曹妃甸次凹的深层火山碎屑岩油气藏、洼槽区深层沙一段和沙三段构造-岩性和岩性油气藏、奥陶系残丘潜山和寒武系内幕潜山是有利勘探领域; 另外, 低斜坡带沙三段烃源岩埋藏和热演化适中, 可动油含量高且纹层发育, 脆性矿物含量高, 是页岩油勘探重要层系与有利区带.

References

- Dai, J. X., Zou, C. N., Tao, S. Z., et al., 2007. Formation Conditions and Main Controlling Factors of Large Gas Fields in China. *Natural Gas Geoscience*, 18(4): 473–484 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. X., Yang, S., Chen, L., et al., 2014. Braided River Delta Deposition and Deep Reservoirs in the Bohai Bay Basin: A Case Study of the Paleogene Sha 1 Member in the Southern Area of Nanpu Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 41(4): 429–436 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y. Q., He, X. P., Cheng, X., et al., 2024. Discussion on High Hydrocarbon Generation Efficiency of Saline Lacustrine Source Rocks with Low TOC: A Case Study of the Second Member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 14(5): 678–687 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Z. S., Wang, G. C., 2001. Neotectonism and Late Hydrocarbon Accumulation in Bohai Sea. *Acta Petrolei Sini-*

- ca, 22(2): 1—7, 119 (in Chinese with English abstract).
- Hemmati, M., Ahmadi, Y., Vaferi, B., et al., 2025. Surveying Organic Matter, Thermal Maturity Level, and Paleo-Environmental Conditions by Considering Biomarker and Stable Carbon Isotopic Analysis. *Journal of Earth Science*, 36(2): 428—440. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-1984-x>
- Jia, C. Z., Jiang, L., Zhao, W., 2025. Research Progress in the Whole Petroleum System Theory. *Acta Petrolei Sinica*, 46(7): 1217—1234, 1307 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, F. J., Pang, X. Q., Jiang, Z. X., et al., 2010. The Quality Evaluation and Hydrocarbon-Expulsion Characters of Source Rocks in the 3rd Member of Shahejie Formation in the Bohai Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 31(6): 906—912 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Hou, Q. J., Cheng, F. Q., et al., 2019. Evaluation Method of Effective Source Rock in Mature Exploration Area: A Case Study of Liaodong Bay. *Acta Petrolei Sinica*, 40(3): 257—267 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Y. Z., 2010. Establishment of China's Theory of Oil and Gas Geology. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1231—1274 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.M., Dong, Y.X., Wang, Z.J., et al., 2014. Characteristics and Origin of Crude Oils from Buried Hills in Nanpu Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 376—384 (in Chinese with English abstract).
- Ma, G., Zhao, Z.X., et al., 2012. Natural Gas Origin and Gas Accumulation Model for Deep Volcanic Rocks in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 33(5): 772—780 (in Chinese with English abstract).
- Shi, C., Peng, G. R., Long, Z. L., et al., 2025. Characteristics of Deep Hydrocarbon Source Rocks and Prediction of Effective Source Kitchen Distribution in Enping 17 Sub-Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 50(12): 4604—4616 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.144>
- Sun, H.Q., Lü, Q., Fang, J.C., et al., 2025. Development Technology and Direction of Shale Oil in Continental Rift Basins. *Acta Petrolei Sinica*, 46(8): 1589—1601 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.R., Wang, H., Meng, L.J., et al., 2016. Pressure Evolution and Its Effect on Petroleum Accumulation in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 41(5): 809—820 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.068>
- Wang, Z.J., Yang, Y.S., Zhao, L.L., et al., 2015a. Characteristics and Main Controlling Factors of High-Quality Reservoirs in Deep Structural-Lithologic Oil and Gas Pools in Nanpu Sag: A Case Study of Sha-1 Member in Nanpu No. 3 Structure. *Geological Review*, 61(S1): 283—284 (in Chinese).
- Wang, Z.J., Zhao, L.L., Zhang, J., et al., 2015b. Characteristics and Exploration Significance of High-Quality Source Rocks in Gaoliu Area, Nanpu Sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, S1: 923—924 (in Chinese).
- Wang, Z.J., Zhao, S.E., Ma, Q., et al., 2023. Main Control Factors of Hydrocarbon Accumulation and Exploration Direction of Deep Carbonate Buried Hills in Nanpu Sag. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 6193—6208. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1964-2_531
- Wei, Y. J., Wang, H. Y., Liu, D. X., et al., 2023. Development Status and Feasibility Evaluation Index System of Continental Shale Oil Demonstration Area in China. *Earth Science*, 48(1): 191—205 (in Chinese with English abstract).
- Xia, J.S., Liu, X.H., Wang, Z.J., et al., 2017. Sedimentary Characteristics of Sandy Debris Flow in the 3rd Member of Dongying Formation and the 1st Member of Shahejie Formation of the Western Nanpu Sag, Bohai Bay Basin and Its Significance in Hydrocarbon Exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 38(4): 399—413 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T.W., Duan, J.B., Zhang, C.F., et al., 2026. Significant Oil and Gas Discoveries and Inspirations in Underexplored Areas of Old Oil Fields: A Case Study of the Southwest Depression in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Xue, G., Chen, H.H., Ma, X.D., et al., 2025. Oil Correlation for Whole Petroleum System in Qintong Sag, Subei Basin. *Earth Science*, 50(12): 4652—4670 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B.L., Yu, W.Q., Duan, H.L., et al., 2026. Characteristics and Evaluation of Lithofacies Combination of Fine-Grained Sedimentary Rocks: A Case Study of Deep Second Member of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 16(1): 153—161 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. F., Qian, G., Xu, C. Q., et al., 2023. Sandstone Distribution and Reservoir Characteristics of Shahejie Formation in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 48(8): 3068—3080 (in Chinese with English abstract).

- Yang, X.L., Wang, Z.J., Gao, W.Z., et al., 2022. Geological Characteristics and Exploration Practice of Deep Carbonate Buried Hills in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3):425–432 (in Chinese with English abstract).
- Yu, W.D., Gao, Y.Q., Zan, L., et al., 2024. Distribution of Oil Bearing and Shale Oil-Rich Strata in the Second Member of Funing Formation in Qintong Sag. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 14(5): 688–698 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Tong, D. J., Chen, K., et al., 2024. Tectonic Evolution and Source Rocks Development of the Super Oil-Rich Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(5): 1165–1182 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Zhu, G. Y., 2007. Using Seismic and Log Information to Predict and Evaluate Hydrocarbon Source Rocks: An Example from Rich Oil Depressions in Bohai Bay. *Petroleum Exploration and Development*, 34(1): 55–59 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. E., Wang, Z. J., Ma, Q., et al., 2023. The Hydrocarbon Accumulation Conditions of Pyroclastic Sedimentary Rocks and Its Significance for Petroleum Exploration in Nanpu Sag—A Case Study of E₃¹ Sub-Member in Block NP280. In: Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2022. Springer Nature, Singapore, 1293–1307. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1964-2_111
- Zhao, X. Z., Pu, X. G., Jin, F. M., et al., 2023. Enrichment Law and Favorable Exploration Area of Shale-Type Shale Oil in Huanghua Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 44(1): 158–175 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Zhang, L. Y., 2003. Using Log Information to Analyse the Geochemical Characteristics of Source Rocks in Jiyang Depression. *Well Logging Technology*, 27(2): 104–109, 146–177 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Zhang, S. C., et al., 2004. Study on Complex Hydrocarbon Accumulation and Reservoir Formation in the Rift Lacustrine Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 25(2): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Wang, Z. J., Cao, Z. H., 2014. Origin and Source of the Cenozoic Gas in the Beach Area of the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 32(1): 93–111. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.32.1.93>
- Zhu, G.Y., Wang, Z.J., Su, J., 2013a. Geochemical Characteristics of High-Quality Hydrocarbon Source Rocks in the Nanpu Sag in the Bohai Bay Basin, China. *Oil Shale*, 30(2): 117–135.
- Zhu, G. Y., Wang, Z. J., Wang, Y. J., et al., 2013b. Origin and Source of Deep Natural Gas in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(4): 1081–1096. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12111>
- Zhu, G. Y., Zhang, S. C., Wang, Y. J., et al., 2011. Forming Condition and Enrichment Mechanism of the Nanpu Oilfield in the Bohai Bay Basin, China. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 97–113 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 戴金星, 邹才能, 陶士振, 等, 2007. 中国大气田形成条件和主控因素. *天然气地球科学*, 18(4): 473–484.
- 董月霞, 杨赏, 陈蕾, 等, 2014. 渤海湾盆地辫状河三角洲沉积与深部储集层特征: 以南堡凹陷南部古近系沙一段为例. *石油勘探与开发*, 41(4): 385–392.
- 高玉巧, 何希鹏, 程熊, 等, 2024. 陆相咸化湖盆“低 TOC”烃源岩高生烃效率探讨: 以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩为例. *油气藏评价与开发*, 14(5): 678–687.
- 龚再升, 王国纯, 2001. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏. *石油学报*, 22(2): 1–7, 119.
- 贾承造, 姜林, 赵文, 2025. 全油气系统理论研究进展. *石油学报*, 46(7): 1217–1234, 1307.
- 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等, 2010. 渤海海域沙三段烃源岩评价及排烃特征. *石油学报*, 31(6): 906–912.
- 金强, 侯庆杰, 程付启, 等, 2019. 成熟探区有效烃源岩的评价方法: 以辽东湾地区为例. *石油学报*, 40(3): 257–267.
- 康玉柱, 2010. 中国油气地质新理论的建立. *地质学报*, 84(9): 1231–1274.
- 李素梅, 董月霞, 王政军, 等, 2014. 南堡凹陷潜山原油特征与成因探讨. *沉积学报*, 32(2): 376–384.
- 石创, 彭光荣, 龙祖烈, 等, 2025. 珠江口盆地恩平 17 洼深层烃源岩特征及有效烃源灶分布预测. *地球科学*, 50(12): 4604–4616.
- 孙焕泉, 吕琦, 方吉超, 等, 2025. 陆相断陷盆地页岩油开发技术与发展方向. *石油学报*, 46(8): 1589–1601.
- 汤建荣, 王华, 孟令箭, 等, 2016. 渤海湾盆地南堡凹陷地层压力演化及其成藏意义. *地球科学*, 41(5): 809–820.
- 王政军, 马乾, 赵忠新, 等, 2012. 南堡凹陷深层火山岩天然气成因与成藏模式. *石油学报*, 33(5): 772–780.
- 王政军, 杨玉山, 赵莉莉, 等, 2015a. 南堡凹陷深层构造岩性油气藏优质储层特征及形成主控因素——以南堡 3 号构造沙一段为例. *地质论评*, 61(S1): 283–284.

- 王政军,赵莉莉,张健,等,2015b.南堡凹陷高柳地区优质烃源岩特征及其勘探意义.吉林大学学报(地球科学版),S1: 923—924.
- 蔚远江,王红岩,刘德勋,等,2023.中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系.地球科学,48(1): 191—205.
- 夏景生,刘晓涵,王政军,等,2017.渤海湾盆地南堡凹陷西部东营组三段-沙河街组一段砂质碎屑流沉积特征及油气勘探意义.石油学报,38(4): 399—413.
- 徐田武,段金宝,张成富,等,2026.老油田低勘探区油气重要发现与启示--以渤海湾盆地东濮凹陷西南洼为例.地球科学,1—15.
- 薛冈,陈红汉,马晓东,等,2025.苏北盆地溱潼凹陷全油气系统油源对比.地球科学,50(12): 4652—4670.
- 杨保良,于雯泉,段宏亮,等,2026.细粒沉积岩岩相组合特征及评价:以苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段深层为例.油气藏评价与开发,16(1): 153—161.
- 杨海风,钱赓,徐春强,等,2023.渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展布规律与储层发育特征.地球科学,48(8): 3068—3080.
- 杨晓利,王政军,高文中,等,2022.渤海湾盆地南堡凹陷深层碳酸盐岩潜山地质特征与勘探实践.石油实验地质,44(3): 425—432.
- 余文端,高玉巧,管灵,等,2024.溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩含油性及其富集层段分布.油气藏评价与开发,14(5): 688—698.
- 张功成,佟殿君,陈凯,等,2024.渤海湾超级油盆构造演化及其烃源岩发育.石油勘探与开发,51(5): 1008—1023.
- 张寒,朱光有,2007.利用地震和测井信息预测和评价烃源岩:以渤海湾盆地富油凹陷为例.石油勘探与开发,34(1): 55—59.
- 赵贤正,蒲秀刚,金凤鸣,等,2023.黄骅坳陷页岩型页岩油富集规律及勘探有利区.石油学报,44(1): 158—175.
- 朱光有,金强,张林晔,2003.用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究.测井技术,27(2): 104—109, 146—177.
- 朱光有,金强,张水昌,等,2004.陆相断陷盆地复式成烃及成藏系统研究:以济阳坳陷沾化凹陷为例.石油学报,25(2): 12—18.
- 朱光有,张水昌,王拥军,等,2011.渤海湾盆地南堡大油田的形成条件与富集机制.地质学报,85(1): 97—113.