

苏北后生—同生断陷盆地油气成藏规律研究

刘玉瑞

(中国石化 江苏油田科技处, 江苏 扬州 225009)

摘要: 苏北盆地性质有多种不同观点, 分歧影响了油气成藏深化认识。在分析前人盆地观、论据和问题后, 根据识别先成、同生、后生盆地概念和唯一性标志, 提出泰州组—阜宁组原型为大型拗陷盆地, 经后期强烈改造成为“箕状形态”后生断陷盆地; 叠加戴南组—三垛组同生断陷盆地, 盐城组—东台组萎缩拗陷盆地, 非继承性成盆形成了后生—同生断陷盆地。根据地化理论和实验数据, 结合 30 年来勘探未熟油一无所获的事实, 认为成烃遵循源岩干酪根晚期生烃模式, 并呈现非均衡性成熟生烃和烃灶展布格局; 不存在早期的未熟—低熟生烃带、双峰生烃和未熟—低熟油。指出盆地油源总体欠丰, 源岩成熟有效供烃、断层多重性作用是控藏关键因素; 后生断陷油气以侧运为主, 油藏沿箕状烃灶呈扇形环带展布; 同生断陷油气以垂运为主, 构造油藏叠置烃灶上呈串珠状展布, 复合油藏叠合呈裙边状展布; 油气聚集呈非连续性的分布规律。

关键词: 原型拗陷; 后生—同生断陷; 未熟油; 晚期生烃; 源—断控藏; 苏北盆地

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Petroleum accumulation rules in hystero-genetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin

Liu Yurui

(Scientific and Technical Department of SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: There are different points of view about the type of North Jiangsu Basin, which affects the understanding of petroleum accumulation. According to the ideas and indicators of an eogenetic morphologic basin, hystero-genetic reconstructive basin and syngenetic rift basin, the North Jiangsu Basin was a hystero-genetic reconstructive-syngenetic rift basin which developed from a great depression during the Taizhou and Funing periods, and changed to a syngenetic rift basin of dustpan shape after strong deformation. Subsequently, the syngenetic rift basin and fading depression superimposed during the Dainan-Sanduo and Yancheng-Dongtai periods, respectively, finally forming a syngenetic-hystero-genetic rift basin. Based on geochemical theory and experimental data, and taking into consideration the fact that no success has been made in the exploration for immature oils in the past 30 years, we believe that hydrocarbon in the study area mainly developed from kerogen during the late stage, and hydrocarbon maturity and the kitchen distribution varied among areas. An early immature and low-maturity hydrocarbon generation zone, double-peak mode hydrocarbon generation, immature and low-maturity oils do not exist. Source rocks in the basin have a low abundance of organic matter. Effective mature source rocks which can provide enough hydrocarbon and multiple roles of faults are the key controls for hydrocarbon accumulation. Oil and gas migrated mainly in a lateral direction, and reservoirs distributed of fan shape along half-graben hydrocarbon kitchens in the hystero-genetic reconstructive basin. Petroleum migrated mainly in the vertical direction, structural pools lay above hydrocarbon kitchens like bead strings, and structural-lithologic oil pools superimposed and distributed on the rim of syngenetic rift basin. Petroleum accumulations are discontinuous throughout the whole basin.

Key words: prototype depression; hystero-genetic reconstructive-syngenetic rift basin; immature oil; late hydrocarbon generation; source rock and fault controlling petroleum accumulation; North Jiangsu Basin

苏北盆地是依新生界断陷及其转化为统一拗陷圈定的^[1], 呈两拗夹一隆、10 凹与 13 凸相间排列格

局(图 1a); 建造泰州组—阜宁组(K_2t-E_1f)、戴南组—三垛组(E_2d-E_2s)、盐城组—东台组($Ny-Qd$)

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-10-08。

作者简介: 刘玉瑞(1962—), 男, 教授级高级工程师, 从事油气勘探研究及管理。E-mail: Liuyr.jsyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技项目“苏北盆地构造体系特征、演化与成藏研究”(P15077)资助。

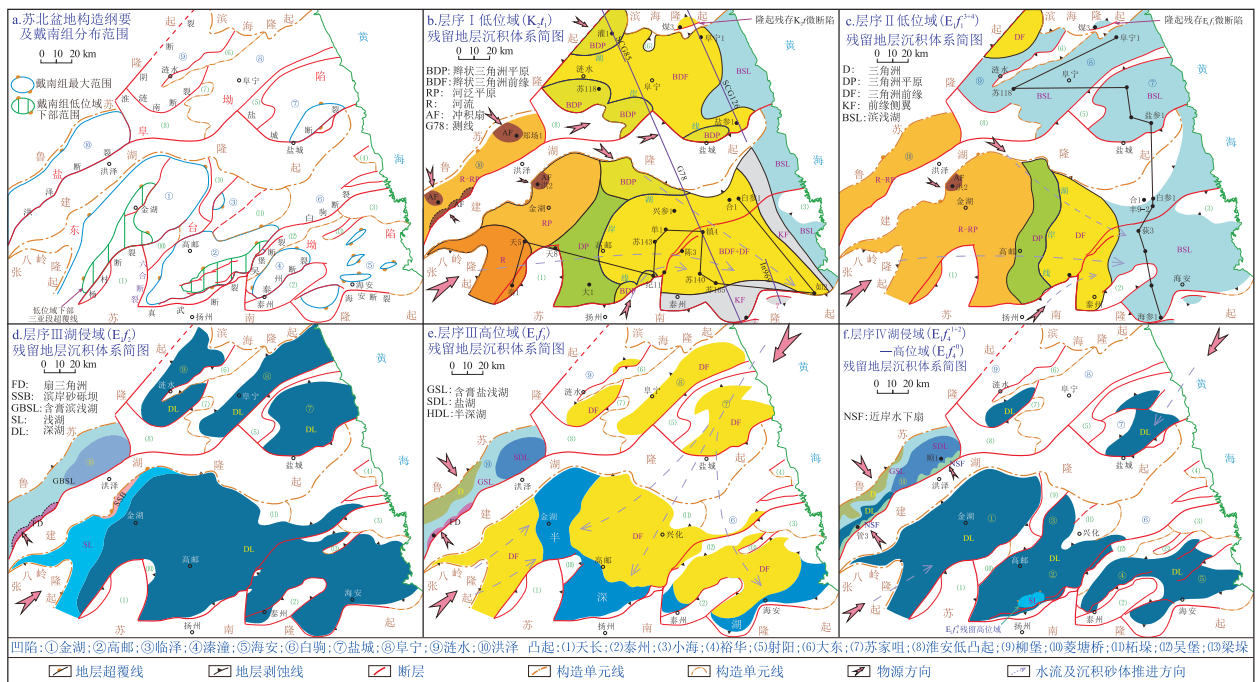


图 1 苏北盆地构造纲要及泰州组—阜宁组岩相残留图

Fig.1 Tectonic outline and residual lithofacies of Taizhou-Funing formations in North Jiangsu Basin

3套构造层,发育多套生储盖组合;1970年溱潼凹陷苏20井E₂d首获工业油流,拉开油气勘探开发会战序幕,迄今取得颇丰的储量及论著成果^[1-22]。

但是,成盆、成烃观分歧大:(1)K₂t-E₁f盆地性质无共识。有变位箕状断陷^[2],水下箕状断陷^[3],箕状断陷^[5-7],断陷盆—拗陷沉积^[8],断拗盆—拗陷沉积^[9-10];有学者用断陷模式沿凹陷周缘推定物源和描述K₂t-E₁f沉积^[23-25],但其认识与区域岩相明显矛盾;此外,渤海湾“沟扇对应”沉积模式^[26]为何在苏北失灵?(2)生烃模式无定论。1990年代的苏北盆地未熟油和双峰生烃模式^[27],虽开阔了视野,但认识颇受异议^[28],也一直未找到所谓的未熟油。

1 成盆再分析

苏北盆地系晚白垩世区域拉张深陷,叠加在仪征事件不整合面上的盆地,E₁f末吴堡事件解体统盆,E₂s末三垛事件定型断陷,形成现今格局。据石油志^[9]:基岩浅、无K₂t-E₂s为隆起;基岩浅,缺E₂d和E₁f上部为凸起,若残存E₁f上部为低凸起;拗陷以凹凸为主的负向构造区,凹陷为正向构造分割的独立负向现今构造单元。盆内3套构造层岩相迥异,E₂d-E₂s、N_y-Q_d保留原貌;K₂t-E₁f残缺不齐,图1反映K₂t-E₁f₁残留多、E₁f₂₋₄残存少,各段相序跨构造单元展布,边缘相多剥光,导致原型盆地不可恢复,产生诸多不同看法。

1.1 前人的 K₂t-E₁f 盆地观

朱夏^[1]指出,中国东部古近纪断陷向新近纪拗陷转化是一个普遍过程。张渝昌^[1-2]把苏北盆地分2期断陷:前期,边界断裂控制半地堑断陷、断凸展布和沉积,K₂t-E₁f₁半地堑彼此串通,断凸上地层红薄,E₁f₂₋₄湖盆扩大后断陷变位,边缘相多剥掉;之后沿主断裂崖缘发育众多真武组(E₁z)水下扇,吴堡事件结束本期断陷。晚期,断裂活动再现,部分调整原断陷位置使原断陷分割,在新断裂控制下,E₂d-E₂s充填超覆在老断陷不整合上。

马力、钱基等^[3-4]认为,K₂t-E₁f边界断裂控制今苏北—南黄海盆地轮廓,受拉张深陷和海侵叠加效应,断裂只控制厚度,岩相未受影响呈拗陷式沉积,盆地为水下箕状凹陷;吴堡事件使边界断裂肩部出露水面遭剥蚀,丧失边缘相。李道琪^[8]提出古近纪苏北断陷—断陷叠加盆地,K₂t-E₁f自深凹向斜坡地层减薄和缺顶少底,3次湖侵反映断陷渐次扩大特点,其大相是大型拗陷近海湖盆陆相,水体漫及鲁苏的丰沛及苏南的常州、无为、长河。

介霖^[9]指出,苏北盆地北界为准阴断裂,南界受控杨村、六合、真吴、海安4段不连续断裂;印支末北东向断裂已产生,是形成单断拗陷、凹陷的主断裂,凹凸格局显现;K₂t-E₁f强烈拗陷,湖盆北达沭阳,南到常州、南陵等地;吴堡事件解体拗陷大湖盆,E₂d-E₂s强烈断陷,凹凸箕状构造形成。杨大荣、张文昭认为,苏北盆地K₂t-E₁f断拗阶段,大型

统一拗陷湖盆岩相跨二级构造单元展布,建湖隆起仅西段露出水面呈湖岛,今面貌为改造残留盆地; E_2d-E_2s 为箕状断陷^[10-11]。

1.2 K_2t-E_1f 盆地性质辨析

1.2.1 问题分析

按照沉积与成盆时空配合关系,分地貌、沉积、构造(亦称先成、同生、后生)盆地3类。同生盆地岩相带走向、古水流方向与盆地形状、构造一致,地层厚度向盆缘减薄。后生盆地岩相带走向与古水流方向、现存构造无关。箕状断陷平面分断裂带、深凹带和斜坡带,剖面呈半地堑的充超沉积样式;体面具陡坡断裂、缓坡侵蚀坡折带,陡坡扇—缓坡洲岩相组合,层序格架必具低位域。

纵览苏北成盆文献,论据缺陷如下:①断陷或拗陷模式都欠证据。图1b-f都不符合箕状断陷的鉴别标志,更难划出与图1a相一致的断陷格局;如断陷3分带及充超在哪?事实上, K_2t_1 就呈跨区域披覆式建造(图2)。拗陷论据仅相带跨构造单元展布,显然依据不足。②有些模式值得商榷。断陷分地堑、箕状断陷2种。变位箕状断陷未交代 K_2t-E_1f 断陷构造纲要、变换位置及痕迹;水下箕状断陷概念不准确,因无水上升陷呼应;断陷或断拗盆建设拗陷沉积,本身就自相矛盾。③断陷论早期证据需修正。图1南北隆起见 $K_2t-E_1f_1$ 残留,主断裂上盘未见陡坡带边缘相; K_2t-E_1f 红层、岩相和湖岸线展布都与今断陷、断凸无关;主断裂崖缘 E_2z 水下扇^[2],实为 E_1f 再沉积的 E_2d 扇体^[15]。即所谓的控盆边界断裂、箕状充填和完善的断陷型建造都不成立。

1.2.2 原型拗陷盆地唯一性证据

苏北—南黄海盆地仅陆域西南部和海域北坳东部残留 K_2t-E_1f 边缘相,无法恢复原盆轮廓,但

可分析盆地性质。舒良树^[29]认为苏北 K_2t-E_1f 原盆为两坳—隆统一的箕状断陷,有滨海、鲁苏—大别山、张八岭和苏南隆起5处物源区,建湖隆起形成于吴堡事件。任红民^[30]指出苏北 K_2t_1 原盆呈东台、盐阜2大盆,物源来自苏南、鲁苏和建湖隆起; K_2t_2 两坳与建湖隆起统一成盆。这两文也缺唯一性证据。

(1)隆凸与坳凹分界有3种地震层序边界样式。上超式示 K_2t-E_1f 原始沉积边界,仅见于金湖、洪泽凹陷西斜坡。顶削式示 K_2t-E_1f 上部剥蚀的非原始边界,见于斜坡与隆凸边界,如滨海隆起。断截式示断层接触边界,因边缘相缺失难辨原始边界,见于陡坡带及部分缓坡带;如建湖隆起与东台拗陷分界呈顶削、断截交替式。图1地震G78、SCG126测线反映滨海、苏南隆起残留 $K_2t-E_1f_1$,煤3井钻遇161m的 K_2t 和27m的 E_1f_1 。可见,地震资料无法反映原始 K_2t-E_1f 属南断北超的箕状断陷格局。

(2)凹陷边界断裂作用。箕状断陷陡坡断裂控制盆地边界、陡坡折带及其扇体,但 K_2t-E_1f 主断裂作用与此不同。①除洪泽断裂外,主断裂不起分界和沉积边界作用。井震揭示,洪泽凹陷 K_2t-E_1f 有箕状断陷标志,如图1f管3井 E_1f_4 有断裂陡坡带水下扇砂砾岩体。其他断裂仅个别在裂陷初 K_2t_1 有坡折作用,主裂陷 E_1f 期作用消失,图1c沿海参1—阜宁1井 E_1f_1 剖面,各井岩电性对比很好,说明建湖隆起东段湮没水下,南北坳湖水畅通; E_1f_2 剖面包括地化全盆横向一致, E_1f_{3-4} 具类似特点。前人^[1-3,9]认为淮阴、杨村、海安断裂是盆地边界,现查明淮阴断裂呈断截—顶削式,如图1b地震SCG85测线边界为顶削式;海安断裂下盘有 $K_2t-E_1f_1$,东段为顶削式边界,杨村断裂下盘秦1井遇

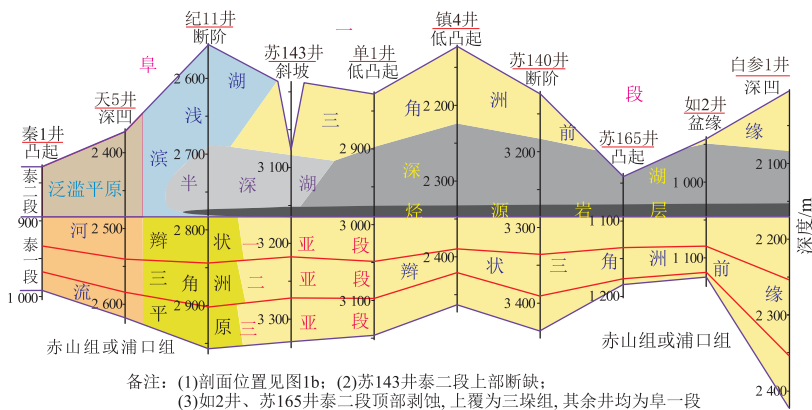


图2 苏北盆地泰州组披覆沉积岩相剖面

Fig.2 Draping deposition and lithofacies profile of Taizhou Formation in North Jiangsu Basin

166 m 的 K_2t 和 175 m 的 E_1f_1 。图 1b 和图 2 秦 1—白参 1 井 K_2t 剖面跨今 5 凹 4 凸的 5 条边界断裂 6 种不同构造单元,岩相不受今边界影响,厚度变化与今凹凸不一致,如吴堡低凸起镇 4 井 K_2t 厚度接近西侧高邮凹陷最厚的纪 11 井,大于东侧溱潼凹陷苏 140 井。②主断裂不控制陡坡折带和扇体。主断裂不同程度影响 K_2t-E_1f 厚度,形成多沉降中心格局,是文献[3]认定箕状断陷的依据。有报道^[31],拗陷盆地一侧或两侧可有边界断裂,主断裂可明显影响厚度,如松辽盆地^[2]。箕状断陷沉积标识——断裂陡坡折带及其冲积扇、扇三角洲和近岸水下扇,在图 1b-f 中仅见于洪泽断裂,真武、涟南断裂 K_2t_1 期有具坡折带瓣状三角洲,其他的无坡折、无控扇作用。

(3)拗陷盆地唯一性证据。一是发育无坡折带拗陷层序。顾家裕^[31]指出,断陷湖盆具断裂坡折带,层序格架必为低位—湖侵—高位域模式;拗陷湖盆分具坡折带的低位—湖侵—高位域模式和无坡折带的湖侵—高位域模式,后者具唯一性。 K_2t-E_1f 分 4 套三级层序^[32], K_2t 、 E_1f_1 为具坡折带层序, E_1f_{2+3} 、 E_1f_4 为无坡折带层序。由图 1 可知, K_2t 坡折带主要是侵蚀地貌型,局部有断裂坡折型; E_1f_1 除洪泽凹陷外,其他地区均属侵蚀坡折型。可见, K_2t-E_1f 原盆属拗陷类型。二是 K_2t-E_1f 残留地层结构具拗陷湖盆唯一性。4 套层序原始面积大小是 $K_2t < E_1f_1 < E_1f_{2+3} < E_1f_4$, 推测 E_1f_4 超 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 残留大小是 $K_2t > E_1f_1 > E_1f_{2+3} > E_1f_4$, E_1f_4 高位域仅残存 50 km^2 半深湖相^[16], 上下大式残留地层反映原始为拗陷湖盆披覆式建造。三是拗陷湖盆以牵引流沉积为特点。箕状断陷重力流、牵引流并重,断裂陡坡带建造扇三角洲、水下扇、湖底扇体系。图 1 反映除洪泽凹陷外,其他地区以拗陷湖盆牵引流沉积为主。

综上所述,主断裂不是原盆边界,建湖隆起西段呈湖岛, K_2t-E_1f 主体原型为拗陷,洪泽断陷属主盆卫星盆地;原盆是否抵达文献[8-9]所述的丰沛、常州、无为等地,无法考证。

1.2.3 苏北后生—同生断陷盆地

(1) K_2t-E_1f 原型拗陷改造形成后生断陷格局。吴堡事件使苏北盆地全面隆升剥蚀,以 E_1f_4 残留层位最高的邵深 1 井为参照,各凹陷 E_1f_4 相对剥蚀量达 $450 \sim 650 \text{ m}$ ^[16];加之断裂强烈铲式翘倾活动,两盘差异剥蚀增强,彻底解体 K_2t-E_1f 原型拗陷,形成两拗夹一隆、10 凹 13 凸相间的箕状断陷格局。按沉积与成盆时空关系,称 K_2t-E_1f 为后生

断陷盆地,也与文献[2]后生盆地概念一致。

(2) 三垛事件结束 E_2d-E_2s 同生箕状断陷,完成苏北后生—同生断陷盆地演化。吴堡事件后,苏北区域构造应变由前期的分散伸展、整体沉降,转变为集中伸展、局部沉降,导致诸多主断裂复活,铲式翘倾增强,形成一批分隔的箕状断陷。 E_2d 期各凹陷独立成盆接受沉积,如图 1a 海安凹陷分 5 个独立微断陷。 E_2s 期断陷扩大,东台拗陷再次连成一体。晚始新世三垛事件,使全盆再次抬升剥蚀,断裂活动基本停止,结束 E_2d-E_2s 同生箕状断陷。新近纪,盆地转入热沉萎缩拗陷。

可见,苏北盆地由原型拗陷、箕状断陷和萎缩拗陷不同构造性质盆地演化叠合形成,各期迥异的非继承性成盆是后生—同生断陷的主要特征。

2 成烃再认识

苏北盆地 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 和 E_2d_1 等 4 套源岩品质及分布特征的报道较多^[9-11,15], 不予赘述;现着重讨论长期困扰勘探资源战略的未熟油问题。

2.1 未熟油和双峰生烃模式商榷

Tissot 生烃理论指源岩埋藏成岩晚期 $R_0 \geq 0.5\%$ 进入生油门限干酪根热降解生烃的模式。王铁冠^[27]将源岩生物气高峰后、干酪根晚期生油前形成的油称为低熟油,其 $R_0 = 0.2\% \sim 0.7\%$, C_{29} 甾烷 $S/(S+R) \leq 0.2$ (下称 SM) 为未熟油, $0.2 < SM \leq 0.4$ 为低熟油, $SM > 0.4$ 为成熟油;有生物类脂物等 5 种早期生烃模式,与干酪根降解油气构成双峰生烃。黄第藩^[33]统称此类油为未熟油, $SM < 0.3$ 为未—低熟油, $SM > 0.3$ 为成熟油。国内外都用甾烷参数识别油—岩成熟度,但方案差异大;不同方案归并^[11,27,33], 未熟油 $SM < 0.2 \sim 0.35$ 、低熟油 $SM = 0.2 \sim 0.42$ 、成熟油 $SM > 0.3 \sim 0.42$ 。可见,分类重叠很难统一。

1985 年,史继扬^[27]首先报道了苏北发现低熟油。黄宛平^[11]提出, K_2t_2 、 E_1f_4 和部分 E_1f_2 为淡水湖相源岩,遵循 $R_0 \geq 0.6\%$ 晚期生烃模式;金湖凹陷 E_1f_2 源岩属半咸水富含藻类型,浅埋未达成熟门限就大量生烃, $SM < 0.3$ 属低熟油,这是苏北低熟油的雏形。王铁冠等^[27]据金湖凹陷 E_1f_2 、洪泽凹陷 E_1f_4 油成熟度,建立源岩低熟、成熟双峰生油模式(图 3a)。金湖 E_1f_2 源岩前峰带属生物类脂物早期生烃,两峰带分界深 2900 m 、 $R_0 = 0.65\%$ 、 $SM \leq 0.4$ 为低熟油;洪泽 E_1f_4 源岩双峰生油带分界深 1650 m 、 $R_0 = 0.53\%$ 。这一成烃模式被选入高校教材,影响

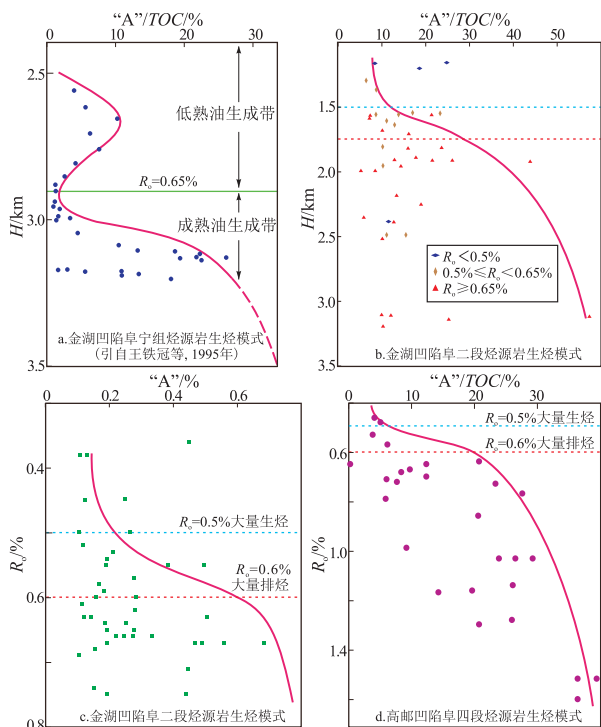


图3 苏北盆地烃源岩生烃模式

Fig.3 Hydrocarbon generation model in North Jiangsu Basin

深远。黄第藩等^[33]将双峰生烃推广,认为 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 源岩普遍存在生成未熟油的物质基础,低熟与成熟分界为 $R_o = 0.65\%$ 、 $SM \leq 0.4$,未熟 $SM \leq 0.25$ 。

陈安定^[28]对“未熟油和双峰生烃”持异议;认为源岩遵循干酪根晚期生烃, $R_o \geq 0.5\%$ 进入大量生烃, $R_o \geq 0.6\%$ 进入大量排烃阶段;受三垛事件剥蚀地层影响,源岩有“等深不等熟、不等深等熟”现象,用 $H_{\text{今}} - “A”/TOC$ 等图版,将会有“双峰生烃”假象,把 $H_{\text{今}}$ 修正为 $H_{\text{古}}$,浅部生烃峰就消失,不存在未熟油和双峰生烃。

2.2 勘探证实不存在未熟油

前人用油岩甾萜烷参数,按 $SM < 0.25$ 未熟油、 $0.25 \leq SM \leq 0.4$ 低熟油、 $SM > 0.4$ 成熟油,认定本区存在未—低熟油(表1)。分析认为,这些研究未—低熟油仅用地化间接证据,存在诸多问题。

(1)理论有争议。①专家对未熟生烃是否存在意见不同,未熟、低熟、成熟油划分方案相差离谱。②SM分类成熟度,适合源岩增熟型埋藏区,对等深不等熟复杂区,无法定生烃SM下限值^[28]。③文献^[27]报道,苏北原油甾萜类成熟度参数值均高于源岩是原油运移效应所致,临清、黄骅拗陷源岩 $R_o - SM$ 呈曲线相关。而文献^[33]报道,苏北源岩 $R_o - SM$ 呈线性相关。可见, $R_o - SM$ 关系都难

表1 苏北盆地所谓的未熟油

Table 1 So-called immature oils in North Jiangsu Basin

凹陷	井号	产层	SM	源岩
金湖	唐5	E_1f_2	0.18	E_1f_2
	桥6	E_1f_2	0.24	E_1f_2
	李1	E_1f_2	0.2	E_1f_2
	闵18	E_1f_2	0.24	E_1f_2
	阳1	E_1f_3	0.25	E_1f_2
	石2	E_2d_1	0.24	E_1f_4
盐城	盐城1	E_1f_2	0.17	E_1f_2
洪泽	管1	E_1f_4	0.24	E_1f_4
	庄2	E_1f_2	0.25	E_1f_2
	庄5	E_1f_2	0.18	E_1f_2
	庄13	E_1f_2	0.15	E_1f_2
	临1	E_1f_3	0.17	E_1f_2
高邮	吴岔1	K_2t_1	0.09	$K_2t_2^2$
	安丰1	K_2t_1	0.06	$K_2t_2^2$
海安	安丰1	K_2t_1	0.28	$K_2t_2^2$
	安2	E_1f_2	0.18	E_1f_2

注:吴岔1井为 K_2t_1 荧光砂岩样,其他为原油。

统一,SM运移效应更难说清和消除。

(2)资料论据相矛盾。①图3a样点缺 R_o 值,图3b增补 R_o 后,发现 E_1f_2 源岩1500m的 R_o 约0.5%,1750m的 R_o 约0.6%,分别进入生烃、排烃窗口,无低熟生油带;图3c,d同样说明 E_1f_2 、 E_1f_4 源岩无双峰生烃。②文献^[27]图3a低熟生油窗2500~2900m,成熟门限 $R_o = 0.65\%$;该文 $R_o = 0.65\%$ 分区却对应西斜坡1850m、三河次凹2600m。洪泽凹陷 E_1f_4 低熟生油窗700~1650m,成熟门限 $R_o = 0.53\%$;地化数据反映,该区 R_o 值已进入成熟带(表2),即低熟生油带纯属成熟生烃带。③表1盐城1井 E_1f_2 源岩 $R_o = 0.72\% \sim 0.94\%$,裂缝原油 $SM = 0.17$;安2井 E_1f_2 源岩 $R_o > 0.65\%$,其夹层玄武岩油藏 $SM = 0.18$ 。所谓典型“未熟油”实为成熟初阶段原油。④陈安定认为源岩假“双峰生烃”是古深大于今深所致^[28],用 $H - R_o$ 、AC法等恢复 E_2s 剥蚀量校正深度,低熟生油带就消失。但是,理论证实本区剥蚀量无法恢复^[34],图3b未恢复古埋深,低熟生油带消失,说明校正欠妥。

表2 苏北盆地洪泽凹陷阜四段源岩反射率数据

Table 2 Vitrinite reflectance of the fourth member of Funing Formation in Hongze Sag, North Jiangsu Basin

井号	深度/m	$R_o/\%$	井号	深度/m	$R_o/\%$
管1井	894.3	0.55	兴隆1	2046.8	0.60
管1井	898.7	0.54	兴隆1	2097.5	0.60
管1井	900.0	0.54	兴隆1	2104.7	0.60
郑场1	883.8	0.61	郑场1	885.7	0.61

(3) 勘探实践不支持未熟油和双峰生烃模式。实践表明,源岩录井检测到油气是判别其生排烃和有效性的最可靠标志。全盆4套源岩都进入 $R_0 > 0.3\%$ 阶段,气测显示却分3种情况:①在 $R_0 \leq 0.6\%$ 地区,源岩气测全部无油气显示,说明不存在“未—低熟生油带”。②在 $0.6\% < R_0 \leq 0.7\%$ 地区,部分井源岩气测见弱油气显示,全烃升值低、组分不齐,部分井无显示。③在 $R_0 > 0.7\%$ 地区,多数井源岩气测见油气显示,全烃升值高、组分较齐;并随 R_0 增大油气显示和全烃升值快速递增,反映源岩进入成熟良好的排油气带。这3带与源岩生排烃门限带和高峰带大致相当,印证不存在未熟油。

(4) 30年勘探证实未熟油一无所获。文献[27,33]认为未熟油占苏北总资源量的31%~45%,遍布全盆。然而,预探未熟油的几十口井全部落空。为避免与前人的未—低熟油混淆,本文称 $SM \leq 0.2$ 为浅熟油、 $0.2 < SM \leq 0.3$ 为中熟油、 $SM > 0.3$ 为成熟油。①外甩源岩 $R_0 \leq 0.6\%$ 的主探区外缘、凸起和外围凹陷13个区带,除主探区外缘见成熟油油藏外,其他10个区带缺油源全空。如柘垛低凸起 $K_2t_2^2$ 、 E_1f_2 源岩18块样 $R_0 = 0.5\% \sim 0.7\%$,吴岔1井 K_2t_1 荧光砂岩 $SM = 0.09$,被文献[27,33]当作未熟生油聚集典例;据此用三维地震落实目标,先

后预探10个圈闭,无显示、无油源全空。②浅熟油见于 E_1f_2 供烃油藏,金湖东斜坡中段、高邮北斜坡西段合计8个,海安、盐城凹陷各1个,圈闭均未充满、油藏微小;金湖西斜坡、高邮北斜坡东段,探获大量的成熟油油藏,未见浅熟油。③据报道高邮凹陷 $E_1f_4^1$ 未熟油资源量排第三^[33],迄今只发现大量成熟油,未见浅熟油;金湖、溱潼凹陷 $E_1f_4^1$ 主供中熟油,也无浅熟油。由此可见,苏北盆地不存在双峰生烃和未熟油。

3 成藏特征

分析认为,苏北盆地源岩成熟有效供油和断层作用是决定成藏的2个核心要素。

3.1 源岩供油效能控藏作用

3.1.1 源岩供油效能分析

苏北盆地素有满盆黑的美誉,却未出现满盆可探油局面;相反,油源不足始终困扰勘探。

(1) 源岩成熟整体不足,总效能偏低(图4,5)。本区源岩 $R_0 \geq 0.5\%$ 和 0.6% 分别进入干酪根大量生烃、排烃阶段,参照陆相源岩成烃演化5阶段,将其分不同供烃效能区。图4、图5与图1对比可知,成熟源岩范围小,从次凹→内坡→外坡→凸起成熟度渐低,凹凹不同、坡坡有别。① $1.3\% \leq$

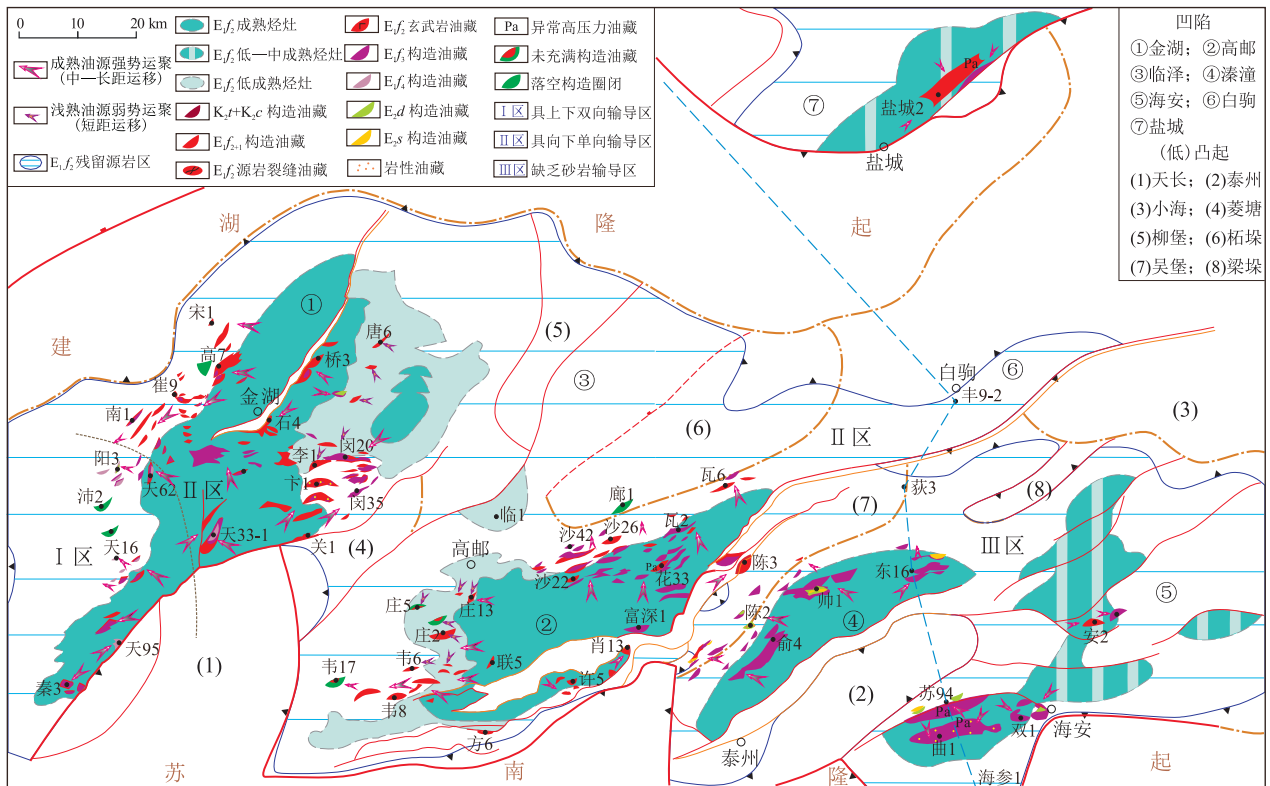


图4 苏北盆地中含油系统烃灶及油藏分布

Fig.4 Distribution of hydrocarbon kitchens and pools of middle petroleum system in North Jiangsu Basin

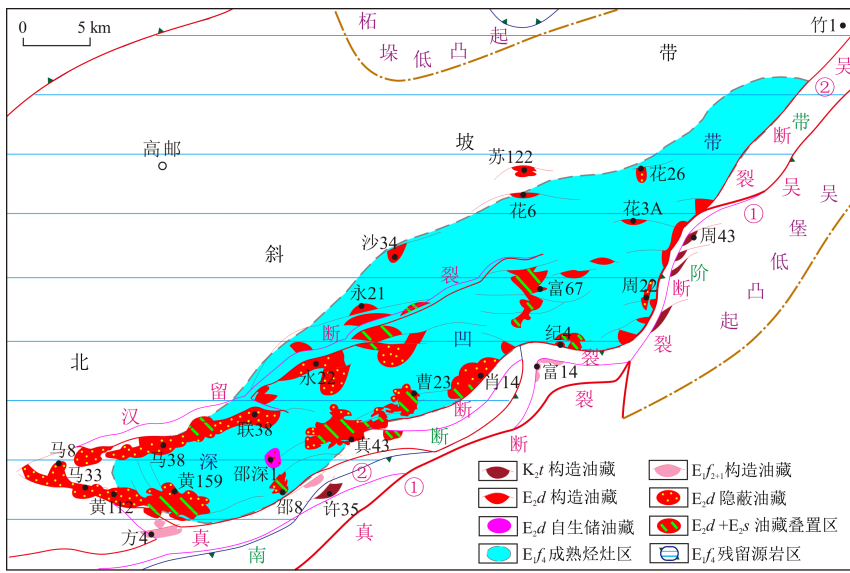


图5 苏北盆地高邮凹陷上含油系统烃灶及油藏分布

Fig.5 Distribution of hydrocarbon kitchens and pools of upper petroleum system in North Jiangsu Basin

$R_0 < 2\%$ 高熟烃灶。高邮深次凹 K_2t_2 、 E_1f_2 小部分源岩达高熟生烃。② $0.8\% \leq R_0 < 1.3\%$ 成熟烃灶,供成熟油。图4、图5所示是此类烃灶主体,高邮深凹 K_2t_2 和 E_2d_1 、溱潼深凹 K_2t_2 源岩也属此类。③ $0.6\% \leq R_0 < 0.9\%$ 低—中成熟烃灶,供浅—中熟油。海安次凹 K_2t_2 ,金湖、溱潼次凹 E_1f_4 ,以及图4外围 E_1f_2 源岩,处低—中成熟期。④ $0.5\% \leq R_0 < 0.7\%$ 低熟烃灶,供浅熟油。白驹次凹 K_2t_2 、图4局部 E_1f_2 、洪泽次凹 E_1f_4 源岩属此类。⑤ $R_0 < 0.5\%$ 未熟无效区。包括各斜坡外环带、(低)凸起及阜宁、涟水凹陷各套源岩,外围 E_1f_4 和白驹凹陷 E_1f_2 源岩。

(2)成熟源岩单向排烃和欠输导为主,效能偏低。 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 等3套源岩均无砂岩夹层,按生输隔层关系,排烃效能分3类:①上下排高效能烃灶。图4金湖I区 E_1f_2 源岩顶底有砂岩,上下双向排烃,烃灶效能良好。②单向排烃中效能烃灶。 K_2t_2 和图4II区 E_1f_2 源岩上有大套泥岩隔层,只向下砂岩输导; E_1f_4 源岩下伏是大套泥岩隔层,仅向上 E_2d_1 砂岩输导。单向排烃效能中等,因 E_1f_2 、 E_1f_4 成熟源岩厚度较大,成为最富烃灶。③欠输导或“三高”油品低效能烃灶。图1c和图4沿海参1—阜宁1剖面以东 E_1f_2 源岩最厚,但上下均无砂岩,即III区缺乏汲烃层,属低效能烃灶。另外, E_2d_1 晚熟和图4 E_1f_2 低熟源岩,生成密度、黏度和含蜡量“三高”的普通稠油,排烃效率低,烃灶效能低。

此外,海安曲塘次凹 E_1f_2 烃灶存在异常高压,有额外动力,能突破上覆泥岩隔层,排烃输导到

E_1f_3 砂岩形成高压成藏。渤海湾、泌阳、松辽等富油气盆地,不仅有最好级源岩,而且有上下式、互层式、侧交式高效排烃配置,广泛的异常高压,排烃效率、动力和效能更佳。

3.1.2 油气二次运移特征

(1)油相静浮力是油气二次运移主动力。苏北盆地输导层压力系数一般1.0左右,仅曲塘次凹有异常高压,浮力是油气运移主动力。据此计算出克服输导层毛管阻力所需的连续油相临界长度(表3),反映 E_1f_2 浮力克服阻力的油相临界为4~236 m,远小于区内油藏带宽度,后者是前者几十倍;唐港最小为2.2倍,西斜坡达到145倍。

(2)油气成藏时间。据 K_2t_2 - E_2s 油藏包裹体研究,高邮、金湖、溱潼凹陷 E_1f_4 供源, E_2d_1 主成藏期41~35 Ma, E_2d_2 和 E_2s 主成藏期37~28 Ma; E_1f_2 和 K_2t_2 供源, E_1f 和 K_2t 主成藏期44~36 Ma。同层系源,金湖、溱潼凹陷成藏期比高邮凹陷略晚。高邮凹陷 E_2d_1 和外围源岩新近纪成熟供烃,主成藏期22~5 Ma。

(3)油气侧向、垂向二次运移及有效供烃范围。 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 、 E_2d_1 等4套源岩分别构成下、

表3 苏北盆地 E_1f_2 输导层成藏油相临界条件

Table 3 Critical geologic conditions for oil accumulation of E_1f_2 reservoir in North Jiangsu Basin

地区	地层倾角/°	毛管阻力/Pa	油相临界长度/m
西斜坡	4~11	3 920~4 920	12~35
卞冈杨	13	1 770~4 420	4~11
石港—唐港	3~6	14 200~17 400	81~236

中、上、顶 4 个含油系统。中、下含油系统 K_2t_1 、 E_1f_{2+1} 、 E_1f_3 储层属大型岩相(图 1), 砂体大规模连片, 上覆都有区域盖层; 尽管断裂发育, 甚至贯穿盖层, 但错位很少。因此, 后生断陷受区域盖层抑制, 油气以砂岩格架侧向运移为主, 断层起侧运渠管、横向桥梁和层位调整作用。上含油系统 E_1f_4 油源排入 E_2d 砂层后, 因 E_2d-E_2s 缺乏大套盖层, 砂岩较为发育, 局部盖层易被断层错位而泄漏; 故同生断陷由丰富砂体与众多断层构成发达输导格架, 油气以垂向运移为主。顶含油系统 E_2d_1 源岩成熟晚, 油气仅局限其紧邻砂岩运移。

(4) 后生—同生断陷有不同供源半径和运聚效能烃灶。①充沛油源长运能烃灶, 供烃具侧运 20 km 或垂运 3 km 高效能。图 4 E_1f_2 和图 5 E_1f_4 成熟源岩属此类, E_2s 末生成大量成熟油, 油源较足。金湖、高邮凹陷 E_1f_2 烃灶油气沿斜坡侧运可达 20 km^[14], 高邮 E_1f_4 供烃 E_2d-E_2s 成藏, 垂向运距超 2 km, 控凹断裂运移更远。②低充沛油源中运能烃灶, 供烃具侧运 10 km 内或垂运 1 km 内的中低效能。高邮、溱潼凹陷 K_2t_2 源岩厚度小, 所产成熟油总量欠丰, 侧运半径不足 10 km; 金湖、溱潼 E_1f_4 源岩中等成熟, 以中熟油为主, 砂岩过度发育, 油气汇流差、逸散强, 油源丰度偏低, 垂向运距在 1 km 内。③不充沛油源短运能烃灶, 供烃具侧运 5 km 内或垂运 0.5 km 内的低效能。图 4 一部分 E_1f_2 源岩处低—中成熟, 洪泽 E_1f_4 、白驹—海安 K_2t_2 源岩 N_y 期进入低—中成熟, 都生成“三高”浅—中熟油, 油源丰度低、运距极短。

3.2 断层多重性控藏作用

苏北盆地受一、二级断裂切割呈 23 个凹凸相间排列、33 个次凹格局, 主断裂带和斜坡区密集断层成为构造主要形迹, 对成藏起关键作用。

(1) 主断裂控制同生断陷构造格局、沉积状况, 进而控制源岩埋藏热演化程度及生烃规模; E_2d-E_2s 越厚, 源岩越熟, 烃灶范围越大, 尤其 E_2d 影响显著。一、二级断裂控制形成了以次凹为油气资源发散中心, 与斜坡区同岩同灶或同岩异灶, 以及多层系异灶的油气供给格局。

(2) 除洪泽凹陷外, K_2t-E_1f 原型体系域跨凹凸展布, 砂体巨大; 如图 1e 东台坳陷 E_1f_3 三角洲前缘横跨 6 凹 3 凸, 残留面积 7 200 km², 单砂体宽约 4~25 km、长达 16~80 km, 后期被众多断层切割, 断块规模远小于单砂体面积, 变为大量“切糕”状砂体。同生断陷期, 主断裂控制凹陷、坡折和扇体,

沉积了近物源、小规模、快变多样砂体^[15]; 如 E_2d 发育宽 300~500 m、长 1~3 km 的小型单砂体, 与断层配合, 有利于形成复合圈闭。

(3) 断层控制圈闭形成与分布, 无断层则无圈闭。后生断陷局部构造与“切糕”状砂体结合, 主要形成断鼻、断块 2 种圈闭^[35], 个别断截砂体上倾歼灭、源岩裂缝圈闭也是断层作用产物。同生断陷小砂体与局部构造结合, 形成断鼻、断块、断层—岩性、岩性—断层及断截砂体上倾尖灭 5 种圈闭^[36]。

(4) 断层起油气运移通道及封堵圈闭成藏作用。按断层活动与成藏关系, 分早期、同期断层 2 类, 前者起油气运移分隔槽和封堵作用, 后者具通封双重作用^[37], 此评价技术迄今效果很好。一、二级断裂控制次凹成熟烃灶范围及展布, 控制油气垂向运移和聚集层位。斜坡区沟通成熟烃灶的盆倾式、斜列式三级同期断层, 是油气沿断面墙向斜坡上倾长距运移的重要渠道, 并在沿途圈闭聚集成藏。图 4 马家嘴、三河 E_1f_2 烃灶分别形成了韦庄、高集—南湖富集油藏群。斜坡区三、四级同期断层具有沟通断块体、调整油气运移层位作用, 反向断层向上、向临块新层位调整油气, 顺向断层向上新层位、向临块新老层位调整油气; 这样可向非汲烃砂岩, 如 K_2t_1 和 E_1f_1 中下部, E_1f_3 供烃成藏。早期断层具良好的分隔槽作用, 促使油气汇流更集中, 形成富集油藏, 如高集油田。

3.3 油气富集分布规律

苏北盆地成盆复杂, 形成了后生断陷成烃和成藏并举, 同生断陷成藏为主的油气分布规律。

(1) 后生断陷油气分布特点。 E_1f_2 、 K_2t_2 烃灶是主源, 主断裂带、金湖西南部和洪泽凹陷有 E_1f_4 油源。①构造油藏占绝对优势。图 4 中含油系统是盆地资源最丰、储量最多、油藏分布最广的, 下含油系统居第三; 已发现油藏, 除曲塘次凹 1 个 E_1f_3 上倾砂体尖灭圈闭外, 其余均为断鼻、断块。这是后生断陷“切糕”状砂体和复杂断块结合的产物。②后生断陷受“箕状”结构、广泛连通砂体和大套区域盖层制约, 油气以盖层下伏 K_2t_1 、 E_1f_{2+1} 和 E_1f_3 砂岩作侧向运移为主, 在斜坡沿途构造高的断鼻、断块聚集成藏。如图 4 油藏围绕箕状成熟烃灶呈扇形环带分布, 盖层下伏砂岩断层侧向封闭最有利, 油层相对集中于此产出^[37]。控凹断裂沟通 E_1f_2 、 E_1f_4 富有烃灶良好、垂运较强, 在断阶带油气沿断面墙运移遇侧向封堵合适就能聚集成藏, 油层分布纵跨大、相对分散; 如陈堡油田, 含油主层段 K_2t_1 、 E_1f_1 、

E_1f_3 , 下伏 K_2c 、上覆 E_2d 、 E_2s_1 也见油层。 K_2t_2 油源丰度不足, 沿大断裂垂运微弱, 油藏分布斜坡区。③烃灶性质控制油气运移波及边界和圈闭充满度。成熟烃灶是油源主供地, 具长运异地聚集效能^[38]。图4高邮凹陷沿马家嘴—韦庄、樊川—沙埕、花庄—瓦庄, 金湖凹陷沿三河—南湖、龙岗—卜闵, 溱潼凹陷沿戴南—台兴、帅垛—茅山、仓场—华港, 都有油气长运路线, 沿途属地、异地富集成藏, 油源波及半径可达20 km。内坡—中坡带油源丰足, 聚集正常油品, 圈闭全充满; 中坡带局部构造发育, 储盖性能好, 油藏最多最富; 内坡砂岩物性差、油藏品位低; 外坡带距源远供烃不足, 保存条件变差, 油气运移水洗氧化强烈, 多形成普通稠油油藏, 圈闭普遍不充满, 如图4韦庄西、沙埕北、东阳—泥沛等。低熟烃灶只供属地成藏, 圈闭都不充满, 油品具“三高”特点。此外 K_2t_2 源岩体积小, 无论成熟度高低, 资源欠丰, 为不充沛短运—低充沛中运能烃灶, 属地就近成藏, 圈闭全部不充满, 以紧临烃灶首排圈闭成藏最有利, 二排次之, 第三排目标风险极高。④由烃灶直接供源形成的原生油藏遵循油气差异聚集规律, 即原油密度、黏度随运距增大而递增; 由油藏沿断面顶溢, 在上覆再聚集成藏的遵循重力分异聚集规律, 呈上覆油藏组分轻、下伏油藏组分重特点。

(2) 同生断陷油气分布特点。以 E_1f_4 油源为主, E_2d_1 源岩油藏仅1个。① E_1f_4 源岩成烃与 E_1f 保剥、 E_2d 建造密切相关。高邮凹陷 E_2d 沉积厚度大, 泥岩相对发育, 使得深凹带 E_1f_4 源岩完全成熟, 形成充沛油源长运高效能烃灶; E_2d 有凹缘富泥、凸缘富砂扇和众多小水道砂体, 形成了多样性复合圈闭^[15]。故此, 高邮油气最富, 聚集层位有 E_2d_1 、 E_2d_2 、 E_2s_1 , 甚至 E_2s_2 ; 断鼻、断块油藏较多, 深凹带中西部 E_2d 复合油藏颇丰, 紧贴控凹控扇坡折带呈叠合“裙边状”展布。金湖、溱潼凹陷 E_2d 较薄且富砂, E_1f_4 源岩处低—中成熟, 生成烃易逸散、难汇流, 形成低充沛短—中运能烃灶。金湖油气主要见于 E_2d_1 , 溱潼在 E_2d — E_2s_1 , 都是微型油藏。海安曲塘次凹见个别 E_1f_2 供烃 E_2d 、 E_2s_1 油藏, 其他凹陷无 E_2d — E_2s 油藏。可见, 各凹陷 E_1f_4 源油气贫富悬殊。②环绕深凹成熟烃灶, 油气以大断裂及低序次同期断层通道垂运为主, 沿途成藏呈串珠状展布。图5反映 E_2d — E_2s 油藏叠置烃灶上, 断层参与形成圈闭或起通源作用, 如 E_2d_1 砂体上倾尖灭圈闭, 靠下倾断层沟通烃灶供源, 即无断层不成藏。 E_2d — E_2s 为局部盖层, 断层遮挡层段具随机性, 封

堵性较差, 油层紧贴断面呈分散状展布, 油藏含油带狭窄, 油水系统复杂。③图5构造油藏多见于真武、永安、黄珏、联盟庄断背斜和富民断鼻三级构造的断块群, 说明三级构造控制复杂断块油藏群富集区。 E_2d 复合油藏多见于深凹带中西部, 真武、汉留断裂分别控制南部马黄邵、北部马联永 E_2d 凹缘富泥扇体^[15], 砂岩含量5%~25%左右, 单砂体长宽形态与断层配合, 最有利于形成复合圈闭, 复合油藏最多。④圈闭油气充满度偏低。后生断陷 K_2t — E_1f 圈闭断层封堵条件优于同生断陷 E_2d — E_2s 圈闭, 前者圈闭幅度与构造幅度常一致, 后者圈闭幅度普遍小于其构造幅度, 油气普遍不充满圈闭, 且自 E_2d 到 E_2s 充满度逐渐降低, 油品全部为轻—中质, 未见指示油气运移边界的稠油带, 反映油源欠丰。

(3) 与渤海湾、松辽盆地及泌阳凹陷相比, 苏北后生—同生断陷油藏分布独具特点。①成盆演化的非继承性, 导致圈闭发育类型的非连续性, 总计仅2大类6种; 而前者盆地有3大类几十种。②后生断陷强烈改造与同生断陷演化差异叠加, 形成了非均衡性的成烃和烃灶展布格局, 源岩成熟不完整, 油源总体不足, 油藏全部位于最深烃灶面之上, 既无前者盆地丰足油气运移到盆缘形成的大量特稠油和浅层油气藏; 也不像渤海湾、松辽盆地存在高压烃灶, 油气沿断层能向下倒注上百米成藏。③油藏以小断块、小砂体单独成藏为特征, 规模微小, 呈非连续性分布, 缺乏广泛连续分布油藏。

4 结论

(1) 苏北盆地由 K_2t — E_1f 原型拗陷改造成的后生断陷, 叠合 E_2d — E_2s 同生断陷和 Ny — Qd 萎缩拗陷成盆, 形成了非继承性的后生—同生断陷盆地。

(2) 理论实践证实, 苏北盆地源岩遵循干酪根晚期生烃, 不存在早期未—低熟生烃带和未—低熟油, 而呈非均衡性的成熟生烃和烃灶展布格局。

(3) 成熟烃灶有效供源、断层多重性作用是控制后生—同生断陷油气运聚成藏及富集规律的关键因素。后生断陷油气以侧向运移为主, 油藏沿箕状供烃灶呈扇形环带展布; 同生断陷油气以垂向运移为主, 构造油藏叠置在烃灶上呈串珠状展出, 复合油藏叠合呈裙边状分布。烃灶格局、油品性质、油藏类型和聚集规模呈非连续性的油气展布特点。

参考文献:

- [1] 朱夏, 徐旺. 中国中生代沉积盆地[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.

- Zhu Xia, Xu Wang. The Meso-Cenozoic sedimentary basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [2] 朱夏. 中国中生代盆地构造和演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- Zhu Xia. The structure and evolution of Meso-Cenozoic basins in China [M]. Beijing: Science Publishing House, 1983.
- [3] 马力, 钱基, 穆曰孔, 等. 苏北—南黄海盆地的构造演化和烃类形成 [J]. 南京大学学报(地球科学), 1993, 5(2): 148-163.
- Ma Li, Qian Ji, Mu Yuekong, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon occurrence in North Jiangsu-South Yellow Sea basin [J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences), 1993, 5(2): 148-163.
- [4] 钱基. 苏北盆地油气田形成与分布: 与渤海湾盆地比较研究 [J]. 石油学报, 2001, 22(3): 12-16.
- Qian Ji. Oil and gas fields formation and distribution of Subei basin; Research compared to Bohai Bay Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2001, 22(3): 12-16.
- [5] 毛凤鸣, 陈安定, 严元锋, 等. 苏北盆地复杂小断块油气成藏特征及地震识别技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 827-840.
- Mao Fengming, Chen Anding, Yan Yuanfeng, et al. Hydrocarbon pooling features and seismic recognizing technologies of small complex fault blocks in Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 827-840.
- [6] 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉. 断陷—拗陷原型迭加系统的生烃史: 以苏北盆地溱潼凹陷为例 [J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 225-230.
- Xu Xuhui, Jiang Xingge, Zhu Jianhui. Hydrocarbon-generation history of fault subsidence-depression prototype superimposition system: A case study of Qintong sag in the North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 225-230.
- [7] 江夏, 周荔青. 苏北盆地富油气凹陷形成与分布特征 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 319-325.
- Jiang Xia, Zhou Liqing. Characteristics of formation and distribution of prolific sags in the Northern Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(4): 319-325.
- [8] 李道琪. 苏北箕状凹陷地质特征与油气聚集 [M]. 北京: 地质出版社, 1981: 100-104.
- Li Daoqi. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation in Subei half sag [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 100-104.
- [9] 介霖. 中国石油地质志(卷八) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- Jie Lin. Petroleum geology of China (Vol.8) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [10] 邱中建, 龚再升. 中国油气勘探(卷三) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 788-830.
- Qiu Zhongjian, Gong Zaisheng. Petroleum exploration in China (Vol.3) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 788-830.
- [11] 毛凤鸣, 戴靖. 复杂小断块石油勘探开发技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- Mao Fengming, Dai Jing. The technologies of petroleum exploration & development in small complex fault blocks [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [12] 刘玉瑞. 利用油气显示频度优化勘探选区 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(5): 407-410.
- Liu Yurui. Optimization of exploration target areas by using oil-gas showing probability [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(5): 407-410.
- [13] 姚洪生, 张勇, 蒋永平, 等. 苏北盆地溱潼凹陷新生代侵入岩蚀变带油藏地质特征 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(2): 153-159.
- Yao Hongsheng, Zhang Yong, Jiang Yongping, et al. Geologic features of reservoirs in Cenozoic intrusive rock metamorphic zone, Qintong Sag, Northern Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 153-159.
- [14] 徐健. 高邮凹陷北斜坡韦码地区阜宁组油气富集差异分析 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 164-171.
- Xu Jian. Petroleum accumulation diversity of Funing Formation in Weima area, Northern Slope Belt of Gaoyou Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 164-171.
- [15] 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷戴南组物源—坡折控扇研究 [J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 23-31.
- Liu Yurui. Sediment sources and slope belt controlling fan systems in the Dainan Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 23-31.
- [16] 刘玉瑞. 苏北后生断陷阜四段高位域的发现及其意义 [J]. 复杂油气藏, 2011, 4(2): 9-13.
- Liu Yurui. Discovery and significance of E_1f_4 highstand systems tracks in Subei epigenetic-faulted basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(2): 9-13.
- [17] 刘敬寿, 杜全伟, 戴俊生. 金湖凹陷阜二段断裂信息维特征与油气藏分布 [J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 42-45.
- Liu Jingshou, Du Quanwei, Dai Junsheng. Information dimension features of faults and reservoir distribution in Fu 2 Member in Jinhu Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3): 42-45.
- [18] 王新新, 戴俊生, 马洪坤. 金湖凹陷石港断裂带构造特征及控油作用 [J]. 断块油气田, 2015, 22(6): 686-691.
- Wang Xinxin, Dai Junsheng, Ma Hongkun. Structural characteristics and its control on oil and gas of Shigang fault zone in Jinhu Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(6): 686-691.
- [19] 刘金华, 廖光明, 奥立德, 等. 高邮凹陷真武油田转换式沉积演化模式 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 6-9.
- Liu Jinhua, Liao Guangming, Ao Lide, et al. Study on transformation style of sedimentary evolution model in Zhenwu oilfield, Gaoyou sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 6-9.
- [20] 王力, 胡斌, 廖文婷, 等. 高邮凹陷断阶带古新统断裂特征与形成机制 [J]. 特种油气藏, 2014, 21(6): 28-32.
- Wang Li, Hu Bin, Liao Wenting, et al. Features and forming mechanisms of Paleocene faults in the southern fault terrace zone of Gaoyou Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 28-32.
- [21] 吴林, 束宁凯, 陈清华, 等. 高邮凹陷真武断裂构造演化特征 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 37-41, 62.
- Wu Lin, Shu Ningkai, Chen Qinghua, et al. Tectonic evolution of Zhenwu fault in Gaoyou sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 37-41, 62.

- [22] 姜生玲, 聂海宽, 荆铁亚, 等. 高邮凹陷阜宁组烃源岩特征及油源对比[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 66-69.
Jiang Shengling, Nie Haikuan, Jing Tiewa, et al. Characteristics and oil source comparison of the Funing Formation hydrocarbon source rock in the Gaoyou sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 66-69.
- [23] 姜辉, 于兴河, 陈永峤, 等. 东营凹陷和高邮凹陷古近系沉积特征对比研究[J]. 资源与产业, 2006, 8(6): 102-106.
Jiang Hui, Yu Xinghe, Chen Yongqiao, et al. The comparative study on depositional characteristics of Dongying Depression and Gaoyou Depression in Palaeogene[J]. Resources & Industries, 2006, 8(6): 102-106.
- [24] 张金亮, 司学强, 林辉. 金湖凹陷阜三段沉积相分析[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(4): 535-539.
Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Lin Hui. Sedimentary facies analysis of the 3rd member of the Funing Formation in the Jinhu Depression[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(4): 535-539.
- [25] 胡望水, 江秋菊, 李相明, 等. 高邮凹陷花庄油田阜三段沉积相研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(3): 19-21.
Hu Wangshui, Jiang Qiuju, Li Xiangming, et al. Sedimentary facies of the third member of Funing Formation of Huazhuang oilfield in Gaoyou Sag[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2011, 8(3): 19-21.
- [26] 刘军钊, 解习农, 孟涛, 等. 沾化凹陷埕南北部陡坡带深层扇体控砂机理及储层评价[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 122-127.
Liu Jun'ao, Xie Xinong, Meng Tao, et al. Mechanism of sand-control and quantitative evaluation of reservoir effectiveness in the northern steep slope of Chengnan area in the Zhanhua Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(1): 122-127.
- [27] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
Wang Tieguan, Zhong Ningning, Hou Dujie, et al. Formation mechanism and distribution of low mature oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [28] 陈安定. “未熟油”与“未熟生烃”异议[J]. 地质论评, 1998, 44(5): 470-477.
Chen Anding. Dissent over “immature oil” and “generation of hydrocarbon by immature source rocks”[J]. Geological Review, 1998, 44(5): 470-477.
- [29] 舒良树, 王博, 王良书, 等. 苏北盆地晚白垩世—新近纪原型盆地分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 534-543.
Shu Liangshu, Wang Bo, Wang Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin from late Cretaceous to Neogene[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 534-543.
- [30] 任红民, 陈丽琼, 王文军, 等. 苏北盆地晚白垩世泰州期原型盆地恢复[J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 52-57.
Ren Hongmin, Chen Liqiong, Wang Wenjun, et al. Restoration of prototype basins of late Cretaceous Taizhou period in the Northern Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(1): 52-57.
- [31] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 11-15.
Gu Jiayu, Guo Bincheng, Zhang Xingyang. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 11-15.
- [32] 张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等. 苏北盆地高邮凹陷第三系—上白垩统层序地层格架特征[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 393-399.
Zhang Xilin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, et al. The character of sequence framework of Tertiary and Upper Cretaceous in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 393-399.
- [33] 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
Huang Dipan, Zhang Dajiang, Wang Peirong, et al. Genetic mechanism and accumulation condition of immature oil in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [34] 刘玉瑞. 声波时差法计算地层剥蚀量问题的斧正[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(2): 1-6.
Liu Yurui. Correction of erosion thickness of strata calculated by acoustic time difference[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(2): 1-6.
- [35] 邱旭明. 苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 371-374.
Qiu Xuming. Classification of fault-block traps and characteristics of petroleum reservoiring in Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 371-374.
- [36] 刘玉瑞. 苏北盆地油藏类型与成因机制探讨[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 6-9.
Liu Yurui. Feature and genesis of reservoir fluid distribution in Subei epigenetic-faulted basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 6-9.
- [37] 刘玉瑞. 苏北盆地断层封堵类型及定量评价[J]. 石油实验地质, 2009, 31(5): 531-536.
Liu Yurui. Quantitative evaluation of fault sealing mode and capacity in the Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(5): 531-536.
- [38] 陈安定. 苏北盆地第三系烃源岩排烃范围及油气运移边界[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 630-636.
Chen Anding. Range of hydrocarbon expulsion from the Tertiary source rocks and hydrocarbon migration boundary in Subei Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 630-636.

(编辑 徐文明)