

下扬子海相烃源结构与有效烃源

罗开平, 叶德燎, 周凌方, 彭金宁, 陆永德, 吕俊祥

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:晚印支—燕山运动是影响下扬子海相成烃—成藏最重要的构造事件。以此为界, 烃源岩的演化分为早期生烃和晚期(二次生烃)2个阶段。与此对应, 下扬子海相经历了加里东期、印支期、喜马拉雅期3期成藏, 不同成藏期烃源岩构成具有明显的差异。对于喜马拉雅期的晚期成藏, 有效烃源主要来自二叠系和志留系烃源岩的二次生烃和古油藏(灶)的裂解供烃。借助于烃源岩热史分析, 分别求取印支运动之前(T_2 末)和断陷盆地叠置之后(E 末)烃源岩的成熟度(R_o), 后期形成温度补偿且 T_2 末 R_o 较低(小于1.3%)的烃源岩范围是二次生烃的有利区。对于古油灶, 根据 T_2 末的下古生界顶面古流体势和有利储层分布范围, 推断油气的运移指向和有利聚集区, 然后结合燕山运动后志留系泥岩盖层的保存情况, 预测燕山运动后古油藏赋存的有利范围。通过上述途径实现对有效烃源的定位。临近有效烃源岩(灶)的范围是晚期成藏的有利地区。

关键词:有效烃源; 晚印支—燕山运动; 海相; 成烃—成藏; 烃源构成; 下扬子地区

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Composition and effectiveness of marine hydrocarbon sources in the Lower Yangtze area

Luo Kaiping, Ye Deliao, Zhou Lingfang, Peng Jinning, Lu Yongde, Lü Junxiang

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Tectonic activity in the Late Indosinian-Yanshanian period was the most important event for marine hydrocarbon generation and accumulation in the Lower Yangtze area. The evolution of source rocks could be classified into early and late (secondary) stages of hydrocarbon generation. Accordingly, 3 hydrocarbon accumulations in marine sequences in the Lower Yangtze area were formed in the Caledonian, Indosinian and Himalayan periods, respectively. There were obvious differences among hydrocarbon sources in the different accumulation periods. The late hydrocarbon accumulation in the Himalayan period was mainly sourced from the secondary generation of the Permian and Silurian source rocks and the thermal cracking of ancient oil pools. The thermal history of the source rocks indicates that the potential location for secondary hydrocarbon generation was limited to the area where R_o was < 1.3% at the end of the Middle Triassic. Oil and gas migration direction and possible accumulations were identified in the light of paleo-fluid potential for the top of the Lower Paleozoic sequence. Combined with the analysis of preservation conditions of the Silurian mudstone seals after the Yanshanian movement, the distribution of oil accumulations could be predicted. Therefore, the effective source rocks might be determined and the potential late accumulations that were formed in their nearby areas identified.

Key words: effective sources; late Indosinian-Yanshanian movement; marine sequence; hydrocarbon generation and accumulation; composition of hydrocarbon source; Lower Yangtze area

多期、多类型盆地叠加和多旋回构造运动造就了下扬子海相的多期生烃和多期成藏。由于晚印支—燕山运动强烈改造, 下扬子海相现存的油气聚集以晚期成藏为主^[1]。确定晚期成藏的有效烃源, 评价其生烃潜力, 是下扬子海相资源评价和勘探选区的关键问题。

1 地质背景

下扬子地区位于华北板块和华南板块之间, 北部边界为大别—苏鲁造山带, 西部以郟庐断裂与华北地台板块和中扬子块体相隔, 南部以江南隆起和华南褶皱带相邻, 东部以海岸线为界^[2](图1)。

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2015-11-30。

作者简介: 罗开平(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 从事石油地质综合研究。E-mail: luokp.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302118)和中国石化重大先导项目(G5800-13-ZS-TY)资助。

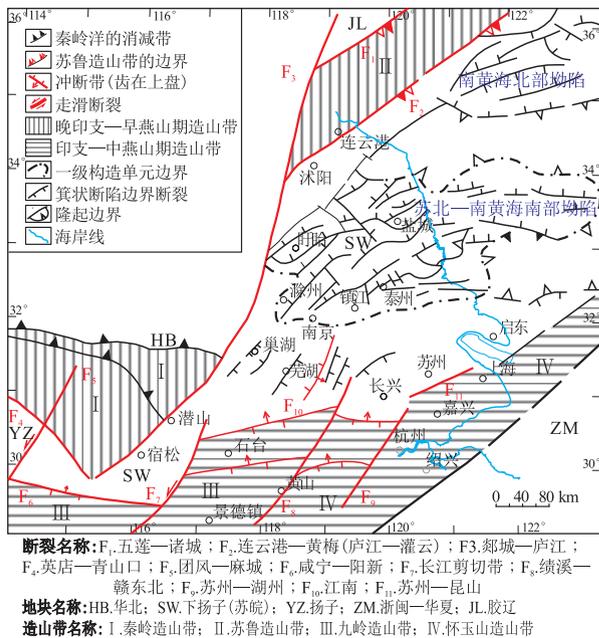


图 1 下扬子构造位置及分区
据参考文献[2]修改。

Fig.1 Tectonic location and units of Lower Yangtze area

显生宙以来,下扬子地区盆地构造演化经历了晚震旦世—志留纪(被动陆缘、克拉通盆地—前陆盆地)、泥盆纪—中三叠世(台内拗陷—台内断拗)及晚三叠世—古近纪(前陆盆地、走滑伸展—断陷盆地)3个旋回。海相层系发育了晚寒武统幕阜山组、上奥陶统五峰组—下志留统高家边组、二叠系龙潭组+大隆组+孤峰组—下三叠统下青龙组3套烃源岩。晚印支—燕山期,由大别—苏鲁造山带和江南隆起造山导致的前陆变形及郯庐断裂左行走滑导致的平移剪切,使得下扬子海相地层实体发生强烈的变形、变位^[3-9],上部地层遭受不同程度的隆升剥蚀,烃源岩的热演化进程中,使得先期形成的油气藏主体遭受破坏(如泰山古油藏)。之后,晚白垩世—第三纪伸展体制下苏北断陷盆地的叠加,重建了海相层系油气保存单元,深埋导致的热补偿使先期演化程度较低、在晚印支—燕山期处于“休眠”的海相烃源岩再次生烃,或造成残留在地层中的古油藏裂解成气(对于下古),构成后期的烃源,成就了下扬子海相的晚期成藏。多期生烃、多期成藏是下扬子海相重要的特征。

2 烃源岩演化特征

基于对下扬子地区构造—沉积演化史的分析,按照海相层系埋藏史的差异将其分为3种基本类型:(1)早期缓慢沉降—中期抬升—晚期沉降型;(2)早期缓慢沉降—中期抬升—晚期沉降—抬升

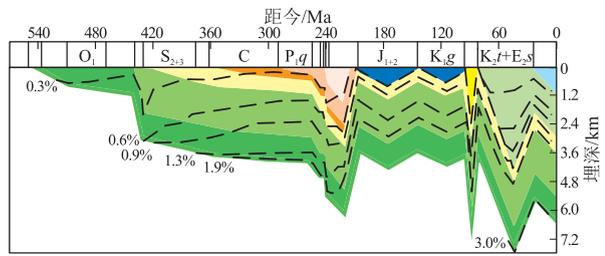


图 2 苏北盆地高邮凹陷海相烃源岩热演化史
Fig.2 Thermal evolution profile of marine sources in the Gaoyou Sag, the North Jiangsu Basin

型;(3)早期沉降—中期抬升型。不同地区埋藏史不同,导致烃源岩热演化的明显差异。

苏北地区以高邮凹陷为代表的新生代凹陷,海相烃源岩埋藏史属于(1)型(图2)。寒武纪—中三叠世的海相盆地阶段,下扬子地区整体较匀速缓慢沉降,只是在晚志留世的前陆盆地和早—中三叠世的断拗盆地时期表现为相对较高的沉降速率。志留纪末,下寒武统烃源岩底面和上奥陶—下志留统烃源岩底面埋深分别达到3 500 m和1 200 m左右, R₀分别达到1.3%和0.5%;中三叠世末,上述2套烃源岩及二叠系烃源岩底面埋深分别达到6 000, 3 600, 2 400 m,对应的 R₀分别达到2.5%, 1.9%, 1.3%。晚印支—燕山期的造山隆升,抬升幅度达到2 500 m左右,烃源岩的热演化进程基本“停滞”。早、中侏罗世及晚侏罗—早白垩世前陆盆地和火山岩盆地叠加,一般厚度小于1 000 m,这一阶段(T₃—K₁)烃源岩的埋深(以寒武系底面为例)在3 600~3 300 m左右“振荡”,仅二叠系烃源岩热演化程度小幅增加。晚白垩世—古近纪苏北断陷盆地的快速沉降,上述3套烃源岩底面埋深分别达到7 300, 6 500, 4 800 m,加之较高的地温梯度,烃源岩的热演化程度快速增高,寒武系和志留系烃源岩达到过成熟(R₀>2.5%~3%),二叠系烃源岩也达到高成熟(R₀=1.3%~1.9%)。之后三垛运动的抬升(幅度1 500 m左右),烃源岩热演化停止。苏北盆地金湖凹陷、盐城凹陷、阜宁凹陷烃源岩埋藏史和热演化史与高邮凹陷基本相似。

苏皖南地区和浙西地区烃源岩埋藏史和热演化史与苏北盆地主要凹陷相比,早白垩世之前的过程基本相似,差别主要在于晚白垩世之后(图3a)。苏皖南地区南陵盆地^[5]寒武系烃源岩底面埋深在古近纪曾经达到10 km,对应烃源岩的演化程度较苏北地区更高;之后与苏北地区三垛运动同步,苏皖南地区发生了大幅度的隆升,致使烃源岩演化终止。与之相似的还有无为盆地、直溪凹陷、及浙

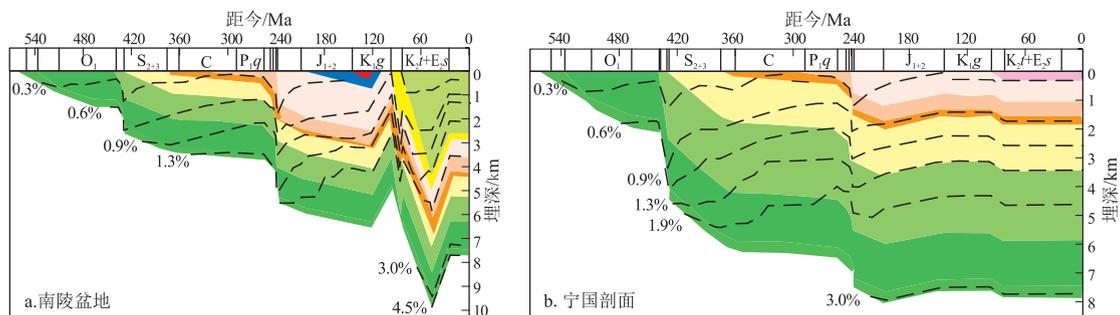


图3 苏皖南和浙西地区海相烃源岩热演化史剖面

Fig.3 Thermal evolution profile of marine sources in the southern Jiangsu and Anhui and the western Zhejiang area

表1 下扬子不同地区海相烃源岩热演化史对比

Table 1 Thermal evolution histories of marine sources in different parts of the Lower Yangtze area

对比项	苏北盆地凹陷区	苏皖南地区	浙西地区
T ₂ 末	匀速缓慢沉降, T ₂ 末€底埋深约6 km	与苏北地区相似	与苏北地区相似
埋藏史	T ₃ -K ₁ 振荡抬升, 经历南象运动、宁镇运动、黄桥运动, 抬升幅度2.5 km	T ₃ -J ₁₋₂ 前陆盆地下沉, 宁镇运动抬升, 幅度3 km	持续缓慢抬升
K ₂ -E	快速沉降, E末€底埋深7.3 km, 三垛运动抬升1.5 km	快速沉降, €底最大埋深10 km, 三垛运动大幅抬升, 幅度3.5 km	K ₂ -E略有沉降
S末	€底 R ₀ = 1.3%, S底 R ₀ = 0.5%	与苏北盆地相似	与苏北盆地相似
热演化史 (R ₀)	€底 R ₀ = 2.5%	R ₀ > 2%	R ₀ > 3%
T ₂ 末	S底 R ₀ = 1.9%	R ₀ = 1.3%	R ₀ > 2%
	P底 R ₀ = 1.3%	R ₀ ≈ 1.0%	R ₀ = 0.6% ~ 0.8%
E末	€底 R ₀ > 2%	R ₀ > 4.5%	与T ₂ 末状态相似
	S底 R ₀ > 2%	R ₀ > 3%	与T ₂ 末状态相似
	P底 R ₀ = 1.3% ~ 2%	R ₀ > 2%	与T ₂ 末状态相似

西的官林凹陷。而在浙西地区, 以宁国剖面为代表, 烃源岩的埋藏和热演化一直维持着燕山运动以后的状态, 寒武系和志留系烃源岩埋深大于6 km, 演化达到高一过成熟, 但二叠系出露地表, R₀甚至低于0.5% (图3b)。

表1概括了下扬子不同地区烃源岩埋藏史和热演化史的差异。可以看出, 在苏北地区和苏皖南地区, 燕山运动以后, 海相烃源岩 (志留系和二叠系) 都存在二次生烃。

3 主要成藏期烃源构成

通过对句容、黄桥、泰山等已发现油藏 (古油藏) 解剖, 根据成藏要素配置关系和成烃、成藏年代地球化学分析资料, 下扬子海相烃源岩 (灶) 演化及主要成藏期烃源结构见图4。

下扬子海相烃源岩演化和烃源结构具有3个显著特征: (1) 以晚印支—燕山运动事件为界, 烃源岩演化分为早期生烃和晚期 (二次) 生烃2个阶

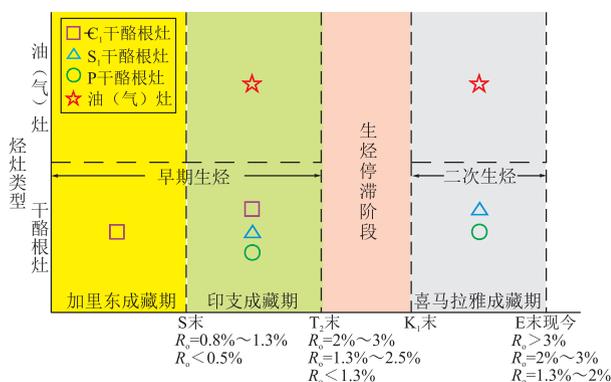


图4 下扬子海相烃源岩 (灶) 演化与烃源结构示意图

Fig.4 Evolution and structure of marine sources in the Lower Yangtze area

段; (2) 随着有机质从低熟—高熟—过熟, 烃 (源) 灶经历了从干酪根灶—油灶—气灶转化 (使得早熟、过熟烃源岩能够为晚期成藏提供有效烃源); (3) 不同成藏期烃源构成存在明显差别: 加里东成藏期, 主要的烃源来自于下寒武统烃源岩; 印支期

成藏的烃源既有来自于寒武系、志留系及二叠系的烃源岩,也有来自于先期聚集的古油藏或者储层中分散有机质(称为油灶或烃灶)热裂解而来的烃源(泰山古油藏解剖证实,在早印支期由古油藏裂解为古气藏);而喜马拉雅期成藏,烃源一部分来自于志留系和二叠系烃源岩的二次生烃(寒武系烃源岩在此之前已经达到过成熟,基本不具备二次生烃能力),另外一部分来自于古油灶的裂解供烃(主要是下古生界)。这是晚期重建型油气保存单元成烃、成藏的重要特征^[10]。

4 有效烃源

有效烃源是指对于现实油气聚集具有烃源贡献的烃源岩(灶),包括传统意义上的烃源岩(有机质干酪根)和古油藏/储层分散有机质。有效烃源具有鲜明的时效性,它是晚期成藏的关键要素^[11-12]。对于以晚期成藏为主要勘探对象的下扬子海相,有效烃源岩的评价和预测是资源评价和勘探选区的重要基础。

4.1 二次生烃的判定

根据二次生烃理论及相关的认识^[13-18],烃源岩二次生烃强度主要取决于起始成熟度 R_0 、终了成熟度 R_0 及有机质类型。当腐殖型有机质起始 $R_0 = 0.9\%$ 和腐泥型有机质起始 $R_0 = 0.6\%$ 时,二次生烃强度最大;当起始 $R_0 > 1.8\%$ 时,腐泥型和腐殖型有机质二次生烃能力都很低;起始 $R_0 > 2\%$ 时,有机质二次生烃能力几乎为零。从前面对烃源岩热演化史的分析, T_2 末下扬子不同地区 3 套烃源岩的 R_0 (起始成熟度 R_0) 存在明显差异:寒武系烃源岩全区 $R_0 > 2\%$,志留系烃源岩 $R_0 = 1.3\% \sim 2\%$,二叠系烃源岩 $R_0 = 0.6\% \sim 1.3\%$ 。基于二次生烃模板^[15],对二次生烃强度的数值模拟表明,寒武系烃源岩基本不具有二次生烃能力;而志留系烃源岩当起始成熟度 $R_0 = 1.8\% \sim 2\%$ 时,二次生烃强度大于 30 mg/g ,其中起始 R_0 较低 ($R_0 < 1.3\%$) 的大丰西部和东台—扬中地区及建湖地区二次生烃强度达到 $120 \sim 300 \text{ mg/g}$;二叠系烃源岩在苏北地区(起始 $R_0 \approx 1.3\%$) 二次生烃强度大于 50 mg/g ,而在建湖西北部的凹陷区、大丰、海安地区、东台—扬中地区(起始 $R_0 < 1.3\%$) 二次生烃强度大于 150 mg/g 。因此, T_2 末烃源岩较低的 R_0 (笔者认为至少应低于 1.3%) 及后期的深埋(超过补偿温度的临界深度)是烃源岩二次生烃的有利必要条件。

在此认识基础上,根据晚印支—燕山期的剥蚀厚度和地层残留厚度,可以恢复 T_2 末之前烃源岩

最大埋深和最高古地温,用盆模法通过正演求取烃源岩在 T_2 末的对应的 R_0 ,以此确定“有利二次生烃的范围” ($R_0 < 1.3\%$);然后根据 T_2 末最高古地温,求取 E 末烃源岩能够形成二次生烃需要的补偿温度及对应的深度(临界深度),据此确定二次生烃“能够发生”的范围;最后,用 T_2 末的 R_0 和 E 末的埋深 2 个指标叠置 ($R_0 < 1.3\%$ 、埋深大于补偿临界深度的叠置区)可以确定二次生烃(有效烃源岩)有利范围(图 5,6)。

二叠系烃源岩二次生烃有利区主要分布在苏北地区盐阜凹陷、海安—高邮凹陷和苏皖南地区芜湖—常州及南通—如皋等沿江一带(图 5)。而志留系烃源岩二次生烃有利地区主要分布在盐城—阜宁凹陷、海安凹陷的北部及张家港—南通—如皋一带(图 6)。

4.2 古油灶范围确定

古油灶的接力供烃是以四川盆地为代表的南方海相古生界早熟、过熟烃源岩晚期供烃、晚期成藏的重要特征^[13,19]。古油灶也是下扬子海相下古生界晚期成藏的重要烃源。寒武系和志留系烃源岩早印支期前大量生排烃,并在有利部位聚集成藏。燕山运动的强烈改造,一部分古油藏受到破坏(如泰山古油藏),构成晚期有效烃源的是燕山运动后仍然能保存的部分古油藏。由于经历过运移、聚集、调整,造成古油灶与其对应的烃源岩在空间上的分离。因此,可以根据 T_2 末的下古生界顶面古

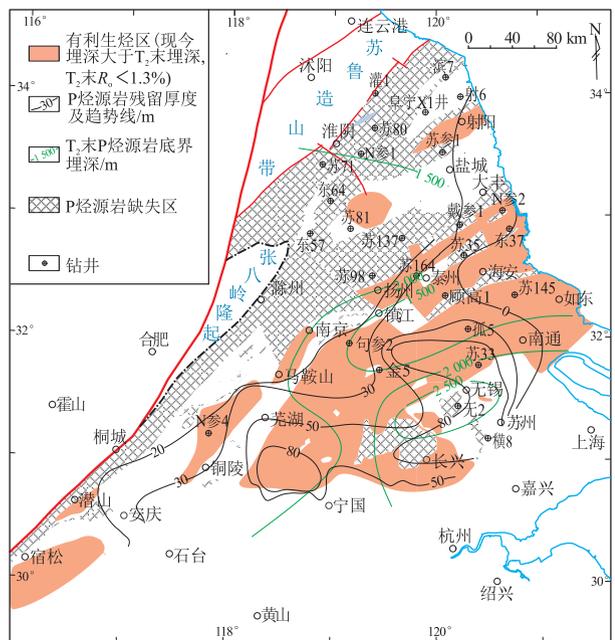


图 5 下扬子地区二叠系烃源岩二次生烃有利区预测分布
Fig.5 Predicted favorable zones for secondary hydrocarbon generation of Permian sources in the Lower Yangtze area

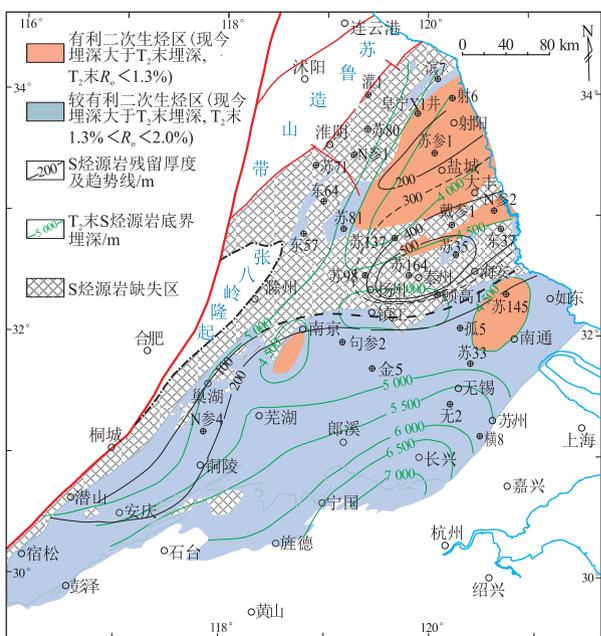


图6 下扬子地区志留系烃源岩二次生烃有利区预测分布
Fig.6 Predicted favorable zones for secondary hydrocarbon generation of Silurian sources in the Lower Yangtze area

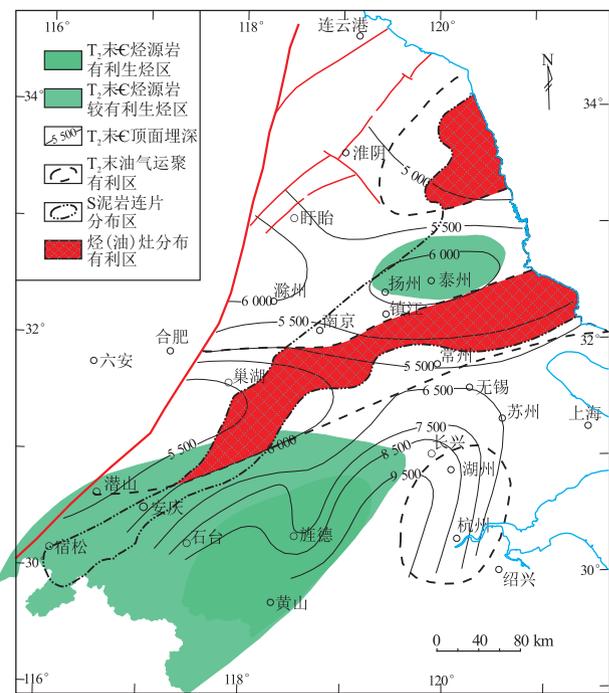


图7 下扬子区下古生界烃灶分布有利区
Fig.7 Favorable zones for the Lower Paleozoic hydrocarbon kitchen in the Lower Yangtze area

流体势和有利储层分布范围,大致推断油气的运移指向和有利聚集区,然后结合燕山运动后志留系泥岩盖层的保存情况,预测燕山运动后古油藏赋存的有利区,也就是喜马拉雅期成藏的有效烃灶范围(图7)。从图7可以看出,下古生界烃灶主要分布在阜宁凹陷的东部及沿江地区芜湖—南京—常

州—南通一带。临近二次生烃和古油灶分布的范围对应于晚期成藏的有效地区。

5 结论

(1)下扬子海相具有多期生烃、多期成藏的特点。印支—燕山运动的隆升和中、新生代断陷沉降造成了海相烃源岩生烃过程的不连续和二次生烃。加里东、早印支、喜马拉雅3期成藏的烃源结构具有明显的差异,晚期成藏的有效烃源主要来自于二叠系和志留系烃源岩的二次生烃和古油藏(灶)的裂解供烃。

(2)二叠系烃源岩二次生烃有利区主要分布在苏北地区盐阜凹陷、海安—高邮凹陷和苏皖南地区芜湖—常州及南通—如皋等沿江一带;志留系烃源岩二次生烃有利地区主要分布在盐城—阜宁凹陷、海安凹陷的北部及张家港—南通—如皋一带;而下古生界油灶主要分布在阜宁凹陷东部及沿江地区芜湖—南京—常州—南通一带。临近有效烃源岩(灶)地区是晚期成藏的有效区带。

参考文献:

[1] 张建球.下扬子区中、古生界构造演化与油气藏形成史[J].石油与天然气地质,1996,17(2):146-149.
Zhang Jianqiu. Tectonic evolution and hydrocarbon pool forming history of Meso-Paleozoic in Lower Yangtze Region [J]. Oil & Gas of Geology, 1996, 17(2): 146-149.

[2] 叶舟,马力,梁兴,等.下扬子独立地块与中生代改造型残留盆地[J].地质科学,2006,41(1):81-101.
Ye Zhou, Ma Li, Liang Xing, et al. The independent lower Yangtze block and Mesozoic reformed residual basins [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(1): 81-101.

[3] 朱光,徐嘉炜,刘国生,等.下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J].中国区域地质,1999,1(1):73-79.
Zhu Guang, Xu Jiawei, Liu Guosheng, et al. Tectonic pattern and dynamic mechanism of the foreland deformation in the Lower Yangtze Region [J]. Regional Geology of China, 1999, 1(1): 73-79.

[4] 朱光,刘国生, Dunlap W J, 等. 郯庐断裂带同造山走滑运动的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学证据[J].科学通报,2004,49(2):190-198.
Zhu Guang, Liu Guosheng, Dunlap W J, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological constraints on syn-orogenic strike-slip movement of Tan-Lu fault zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(5): 499-508.

[5] 丁道桂,王东燕,刘运黎.下扬子地区古生代盆地的改造变形[J].地质前缘,2009,16(4):61-73.
Ding Daogui, Wang Dongyan, Liu Yunli. Transformation and deformation of the Paleozoic basins in lower Yangtze areas [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 61-73.

[6] 徐旭辉,周小进,彭金宁.从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J].石油实验地质,2014,36(5):523-531.

- Xu Xuhui, Zhou Xiaojin, Peng Jinning. Exploration targets in southern Yellow Sea through analysis of tectono-depositional evolution and hydrocarbon accumulation of marine basin in Yangtze area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(5): 523-531.
- [7] 彭金宁, 张敏, 刘光祥, 等. 下扬子区上古生界构造作用与油气保存条件分析 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(4): 430-438.
Peng Jinning, Zhang Min, Liu Guangxiang, et al. Tectonic effects and hydrocarbon preservation conditions in Upper Paleozoic, lower Yangtze region [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(4): 430-438.
- [8] 高先志, 李浩, 刘启东. 高邮凹陷断层控油气作用的多样性 [J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(1): 20-28.
Gao Xianzhi, Li Hao, Liu Qidong. Various effects of faults on generation, migration and accumulation of oil/gas in Gaoyou Sag [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(1): 20-28.
- [9] 徐政语, 姚根顺, 梁兴, 等. 扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析 [J]. *石油实验地质*, 2015, 37(4): 407-417.
Xu Zhengyu, Yao Genshun, Liang Xing, et al. Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze block [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(4): 407-417.
- [10] 刘树根, 马永生, 蔡勋育, 等. 四川盆地震旦系一下古生界天然气成藏过程和特征 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(4): 345-354.
Liu Shugen, Ma Yongsheng, Cai Xunyu, et al. Characteristic and accumulation process of the natural gas from Sinian to Lower Paleozoic in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2009, 36(4): 345-354.
- [11] 罗开平, 丁道桂, 吕剑虹, 等. 南方海相油气勘探中的烃源条件分析: 以江汉平原区为例 [J]. *石油实验地质*, 2008, 30(2): 133-137.
Luo Kaiping, Ding Daogui, Lü Jianhong, et al. Analysis of hydrocarbon source conditions in marine facies petroleum exploration in South China: A case study in the Jianghan Plain Region [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(2): 133-137.
- [12] 刘光祥, 金之钧, 罗开平, 等. 下扬子区黄桥、句容地区油—源对比研究 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 359-364.
Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Luo Kaiping, et al. Oil and source correlation in Huangqiao and Jurong areas, Lower Yangtze region [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 359-364.
- [13] 钟宁宁, 赵拈, 李艳霞, 等. 论南方海相层系有效供烃能力的主要控制因素 [J]. *地质学报*, 2010, 84(2): 149-158.
Zhong Ningning, Zhao Zhe, Li Yanxia, et al. An Approach to the main controls on the potential of efficient hydrocarbon supply of marine sequences in South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(2): 149-158.
- [14] 陈安定, 刘东鹰, 刘子满. 江苏下扬子区海相中、古生界烃源岩晚期生烃的论证与定量研究 [J]. *海相油气地质*, 2001, 6(4): 27-33.
Chen Anding, Liu Dongying, Liu Ziman. Demonstration and quantitative study of late hydrocarbon generation of Mesozoic-Palaeozoic marine source rock in Lower Yangtze Area, Jiangsu province [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2001, 6(4): 27-33.
- [15] 秦勇, 朱炎铭, 范炳恒, 等. 沉积有机质二次生烃理论及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2001: 13-69.
Qing Yong, Zhu Yanming, Fan Bingheng, et al. Secondary hydrocarbon generation theory of sedimentary organic matter and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 13-69.
- [16] 张有生, 秦勇, 刘焕杰, 等. 沉积有机质二次生烃热模拟实验研究 [J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 273-280.
Zhang Yousheng, Qin Yong, Liu Huanjie, et al. Investigation on the Hydrocarbon Regeneration from sedimentary organic matters by pyrolytic simulation [J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 273-280.
- [17] 袁玉松, 郭彤楼, 付孝悦, 等. 下扬子地区热历史与海相烃源岩二次生烃潜力 [J]. *现代地质*, 2006, 20(2): 283-290.
Yuan Yusong, Guo Tonglou, Fu Xiaoyue, et al. Thermal history and secondary hydrocarbon generation intensity of marine source rocks in Lower Yangtze Area [J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 283-290.
- [18] 辛艳朋, 邱楠生, 秦建中, 等. 塔里木盆地奥陶系烃源岩二次生烃研究 [J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(3): 261-267.
Xin Yanpeng, Qiu Nansheng, Qin Jianzhong, et al. Study on Secondary Hydrocarbon Generation of Ordovician Hydrocarbon Source Rock in Tarim Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(3): 261-267.
- [19] 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理 [J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 708-718.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Yigang. Formation mechanism of highly effective gas pools in the Feixianguan Formation in the NE Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 708-718.

(编辑 黄娟)