

澳大利亚波拿巴盆地 Petrel 次盆古生界页岩 有机质热演化的差异及其地质意义

段威^{1,2}, 侯宇光^{1,2}, 何生^{1,2}, 涂伟伟³, 殷世艳⁴, 权永彬^{1,2}

(1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 3. 中国石油辽河油田茨榆坨采油厂, 辽宁辽中 110206;

4. 河北联合大学矿业工程学院, 河北唐山 063009)

摘要:通过地质、地球物理、地球化学资料分析以及含油气系统模拟技术,对澳大利亚波拿巴盆地 Petrel 次盆未钻或少钻区域古生界 3 套页岩有机质演化过程进行研究。结果表明:二叠纪是石炭系页岩气生成的高峰期,二叠纪中-晚期可能是原油二次裂解气生成的高峰期,侏罗纪至今是石炭系 Milligans 组页岩气的破坏期,现今页岩层内保存的天然气可能较为有限;侏罗纪是下二叠统 Keyling 组页岩气生成的高峰期;第三纪以来上二叠统 Hyland Bay 组页岩一直处于生气高峰期,新近纪至今可能是其原油二次裂解气生成的高峰期。受区域差异沉降的控制和影响,Petrel 次盆中-北部烃源岩埋深大,有机质演化程度高,东-西部烃源岩埋深小,热演化程度相对较低。

关键词:Petrel 次盆地; 澳大利亚; 盆地模拟; 页岩油气

中图分类号:TE 122.1 **文献标志码:**A

Thermal evolution differences and its geological significances of organic matter of Paleozoic shale in Petrel subbasin, Bonaparte Basin, Australia

DUAN Wei^{1,2}, HOU Yu-guang^{1,2}, HE Sheng^{1,2}, TU Wei-wei³, YIN Shi-yan⁴, QUAN Yong-bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Ciyutuo Oil Production Plant, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Liaozhong 110206, China;

4. Faculty of Mines Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: Combining comprehensive analyses of geological, geophysical and geochemical data and modeling using petroleum system modeling technology, this study tries to restore the evolution processes of organic matter in three sets of Paleozoic shales with no or little drilling data in Petrel subbasin of Bonaparte Basin in Australia. The results show that the entire Permian is the generation peak of Carboniferous shale gas, and the Middle and Late Permian may be the generation peak of oil cracking gas. The shale gas in the Carboniferous Milligans formation may have been under destruction since the Jurassic, leaving presently limited gas in the shale. The Jurassic is the generation peak of shale gas in the Permian Keyling formation. The shale of Hyland Bay formation in the upper Permian has been at gas generation peak since the Tertiary, and the period since the late Tertiary may be the generation peak of oil cracking gas. Controlled and influenced by regional differential settlement, the source rocks in the middle and north part of Petrel subbasin are deeper with a relatively high degree of organic evolution, while in the east and west part of the basin the rocks are shallower with a relatively low degree of thermal evolution.

Key words: Petrel subbasin; Australia; basin modelling; shale oil and gas

页岩油气是一种潜在的、资源量巨大的非常规油气资源。其形成机制与常规油气藏基本相似,但属原地成藏,主要受控于盆地烃源岩热演化程度^[1-2]。根据世界页岩油气资源量分布特征最新研究进展和页岩油气资源评价标准, Petrel 次盆地的海陆过渡相页岩具有巨大的页岩油气资源潜力。Petrel 次盆地位于澳大利亚波拿马盆地东南部,是一个北西-南东走向的不对称古生代裂谷^[3-5]。最近国际石油公司在 Petrel 次盆相继发现了 Petrel 和 Tern 两个大型气田^[6],预示该区具有良好的油气勘探前景。目前研究区少数几口探井资料揭示 Petrel 次盆油气藏类型包括常规砂岩油气藏和非常规页岩油气藏,均为自生自储类型^[7-10]。由于该区勘探程度低,区域地质构造复杂,对 Petrel 次盆内勘探目的层——古生界烃源岩,尤其是对其页岩层内有机质的热演化过程、烃类的赋存状态及其空间分布特征至今仍然没有清晰的认识,这直接关系到油气勘探开发方案的制定及其经济效益的好坏。综合地质、地球物理和地球化学资料,运用含油气系统模拟技术可以揭示地质历史时期有效源岩生烃的动态演化过程,从而在时-空四维尺度呈现勘探目的层内烃类的赋存状态^[11-13],这对含油气盆地油气勘探,尤其是具有自生自储特征的页岩油气勘探具有重要指

导意义。因此,笔者运用盆地模拟技术对 Petrel 次盆古生界 3 套页岩地质历史过程中有机质的演变特征进行研究。

1 地质背景

波拿巴盆地位于澳大利亚西北大陆架的最北端,盆地自西向东可分为 7 个一级构造单元(图 1)。其内部构造格局受南部北西-南东走向的古生代构造带和北部北东-南西走向的中生代构造带控制^[14]。石炭纪以来,波拿巴盆地先后经历了石炭纪末—早二叠世克拉通裂陷阶段、晚二叠世—早三叠世大陆边缘拗陷阶段、三叠纪末构造反转阶段、早中侏罗世—早白垩世大陆边缘裂陷阶段、早白垩世晚期—晚白垩世拗陷阶段、晚白垩世末—古新世构造反转阶段和始新世至今被动大陆边缘发展阶段等七期构造运动^[5],发育了古生界和中生界两大烃源岩层系^[5-6]。古生界烃源岩主要发育于研究区波拿巴盆地东南部的 Petrel 次盆内,自下而上分别为下石炭统 Milligans 组页岩、下二叠统 Keyling 组页岩和上二叠统 Hyland Bay 组前三角洲页岩(图 2)^[14];总有机碳含量平均值分别为 0.58%、3.79% 和 1.14%,有机质类型以 III 型和 II₂ 型为主。

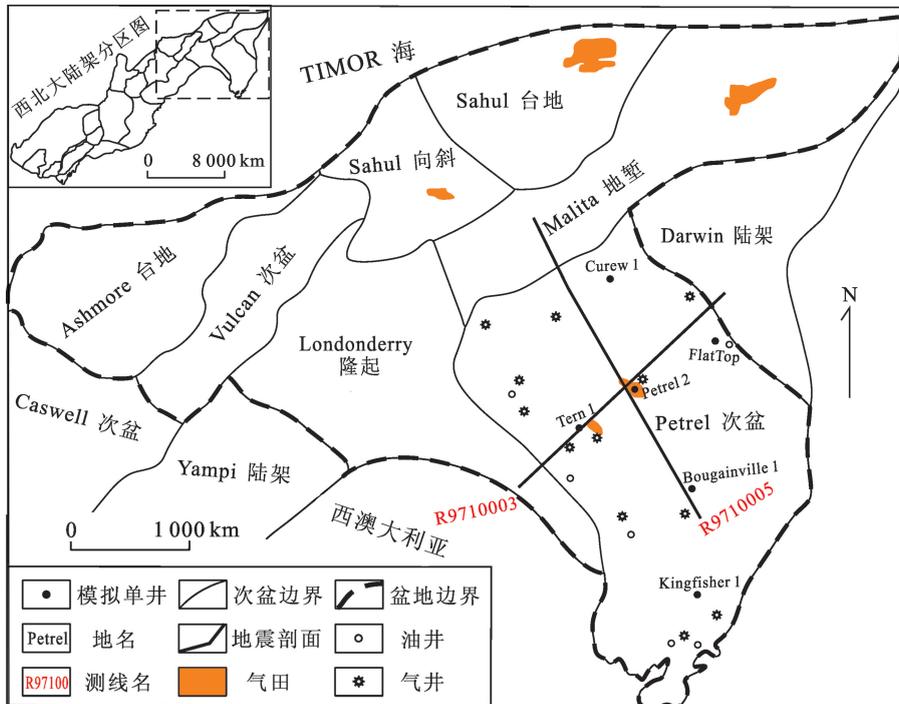


图 1 波拿巴盆地南部模拟测线和井位位置

Fig. 1 Well and modeling seismic line positions in south of Bonaparte Basin

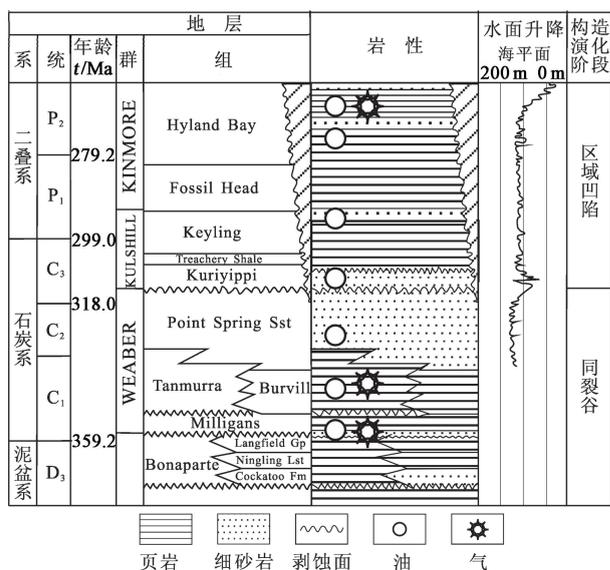
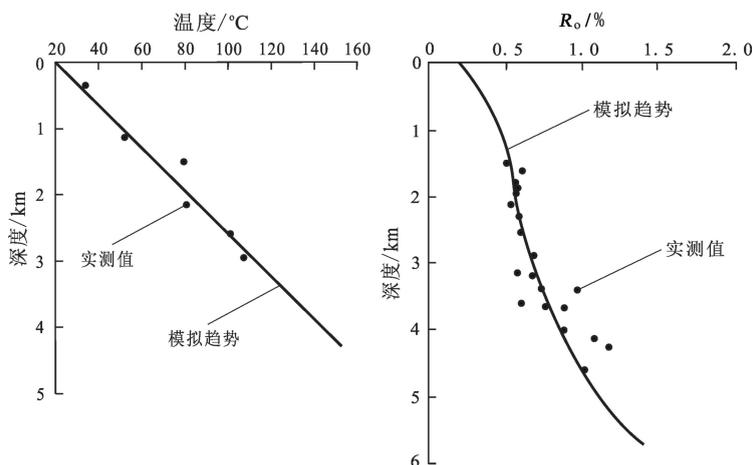


图2 波拿巴盆地南部古生界地层综合柱状图

Fig. 2 Stratum profile of Paleozoic strata in south of Bonaparte Basin

2 模型选择及参数选取

根据 Petrel 次盆区域构造和沉积特征,选择通过该次盆地沉积和沉降中心的二维地震测线 line R9710005 和 line R9710003 进行模拟。这两条测线

图3 Petrel 次盆地 Petrel 2 井模拟地温、 R_0 与实测值拟合关系Fig. 3 Relations of modeling temperature and R_0 trend and measured values of well Petrel 2 in Petrel subbasin

Petrel 次盆内页岩主要发育在下石炭统、下二叠统和上二叠统。受区域沉积-构造控制,不同层系页岩有机质热演化具有显著差异性(图4)。在测线 line R9710005 上,目前石炭系埋深一般大于 7.0 km,地层温度大于 200 °C,有机质大都处于过成熟阶段,镜质体反射率(R_0)大于 2.0%。下石炭统位于石炭系下部,地层温度多大于 360 °C, R_0 大于

地层发育完整,地层的分布形态具有代表性,且附近有可以借鉴的模拟参数资料可用。

根据区域构造-热历史状况,选用瞬变的裂谷热流模型进行区域热流史恢复^[15]。有机质成熟度计算采用目前较为流行的 EASY% R_0 模型^[16-18]。

模拟过程中所需的资料有:①地层岩性,来源于研究区内的岩性录井资料;②地层厚度,来源于地震解释资料;③岩石物性,来源于岩心分析及测井资料;④地层剥蚀厚度,根据单井声波时差测井法恢复获得;⑤岩石体积热容和热导率,采用软件提供的参数;⑥烃源岩地球化学参数,下石炭统 Milligans 组页岩、下二叠统 Keyling 组页岩和上二叠统 Hyland Bay 组前三角洲页岩 TOC 平均值分别为 0.58%、3.79% 和 1.14%,有机质类型分别为 II₂ 型、III 型和 II₂ 型;⑦古温标,实测镜质体反射率数据。

3 模拟结果

Petrel 2 井位于两条测线附近,从现今地层温度及有机质成熟度模拟结果与实测值比较(图3)来看,两者差别不大,具有较高的拟合度。这说明模型选择比较切合实际地质状况,模拟结果具有较高的实用价值。

4.0%。在 Petrel 次盆南部深凹区,下二叠统现今埋深多为 6.0 ~ 7.0 km,地层温度一般为 160 ~ 240 °C, R_0 为 2.0% ~ 3.0%;上二叠统现今埋深多为 5.0 ~ 6.0 km,地层温度一般为 140 ~ 200 °C, R_0 为 1.0% ~ 2.0%。在 Petrel 次盆北部,受区域构造活动影响,二叠系埋深相对较小,为 2.0 ~ 5.0 km,地层温度为 80 ~ 150 °C, R_0 为 0.5% ~ 1.3%。

在测线 line R9710003 上,在 Petrel 次盆深凹区,石炭系埋深一般大于 6.0 km,地层温度大于 160 °C, $R_o > 2.0\%$;二叠系埋深为 4.0 ~ 6.0 km,地层温度为 120 ~ 160 °C, R_o 为 1.3% ~ 2.0%。在 Petrel

次盆周缘邻近 Londonderry 隆起和 Darwin 陆架的区域,古生界页岩埋深相对较小,为 2.0 ~ 6.0 km,地层温度为 80 ~ 160 °C, R_o 为 0.5% ~ 2.0%。

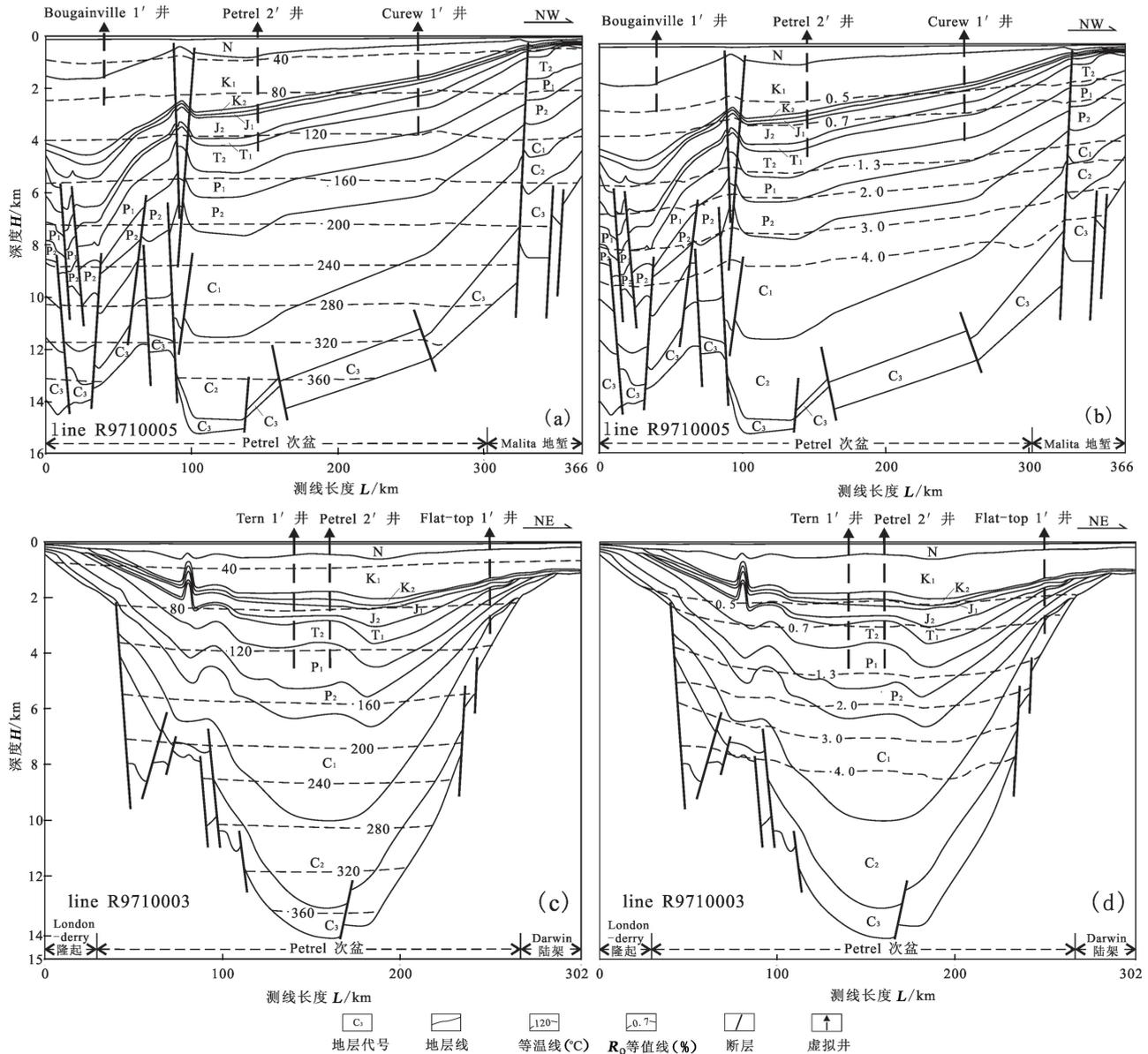


图 4 测线 line R9710005 和 line R9710003 现今二维剖面温度和成熟度分布

Fig. 4 Two-dimensional profiles of current maturity and temperature distribution along Line R9710005 and Line R9710003

与现今研究区古生界页岩热演化特征类似,地质历史过程中古生界页岩有机质的热演化同样延续了区域上的差异性(图 5)。在测线 line R9710005 上, Petrel 次盆南部石炭系 Milliigans 组、下二叠统 Keyling 组和上二叠统 Hyland Bay 组页岩进入生烃高峰期分别约为二叠纪早期 290 Ma、侏罗纪早期 195 Ma 和侏罗纪中期 167 Ma;进入高成熟演化阶段分别约为早二叠纪末 275 Ma、早侏罗纪 181 Ma 和

早白垩纪 132 Ma;目前,石炭系 Milliigans 组页岩有机质热演化程度 R_o 大于 4.5%,下二叠统 Keyling 组页岩 R_o 为 1.0% ~ 3.0%,上二叠统 Hyland Bay 组页岩 R_o 为 0.5% ~ 3.0%。由于研究区北部地层埋深相对较浅,邻近 Malita 地堑的页岩所含有有机质热演化速率和程度相对较低,但石炭系 Milliigans 组页岩 R_o 仍然大于 4.5%,下二叠统 Keyling 组页岩 R_o 为 1.0% ~ 1.3%,上二叠统 Hyland Bay 组页岩

R_o 为 0.5% ~ 1.0%。

在测线 line R9710003 上, Petrel 次盆石炭系 Milligans 组、下二叠统 Keyling 组和上二叠统 Hyland Bay 组页岩进入生烃高峰期分别约为二叠纪早期 290 Ma、侏罗纪早期 175 Ma 和侏罗纪中期 100 Ma; 进入高成熟演化阶段分别约为早二叠纪末 275 Ma、侏罗纪末 150 Ma 和早第三纪 25 Ma。目前, 深凹区石炭系 Milligans 组页岩 R_o 大于 4.0%, 下二叠

统 Keyling 组页岩 R_o 为 1.0% ~ 2.0%, 上二叠统 Hyland Bay 组页岩 R_o 为 0.5% ~ 1.3%。

受地层差异沉降影响和控制, 邻近 Londonderry 隆起和 Darwin 陆架的地层埋深相对较浅, 页岩有机质热演化速率和程度相对较低。石炭系 Milligans 组页岩 R_o 为 1.0% ~ 3.0%, 下二叠统 Keyling 组页岩 R_o 为 0.5% ~ 1.0%, 上二叠统 Hyland Bay 组页岩 R_o 为 0.5% ~ 0.7%。

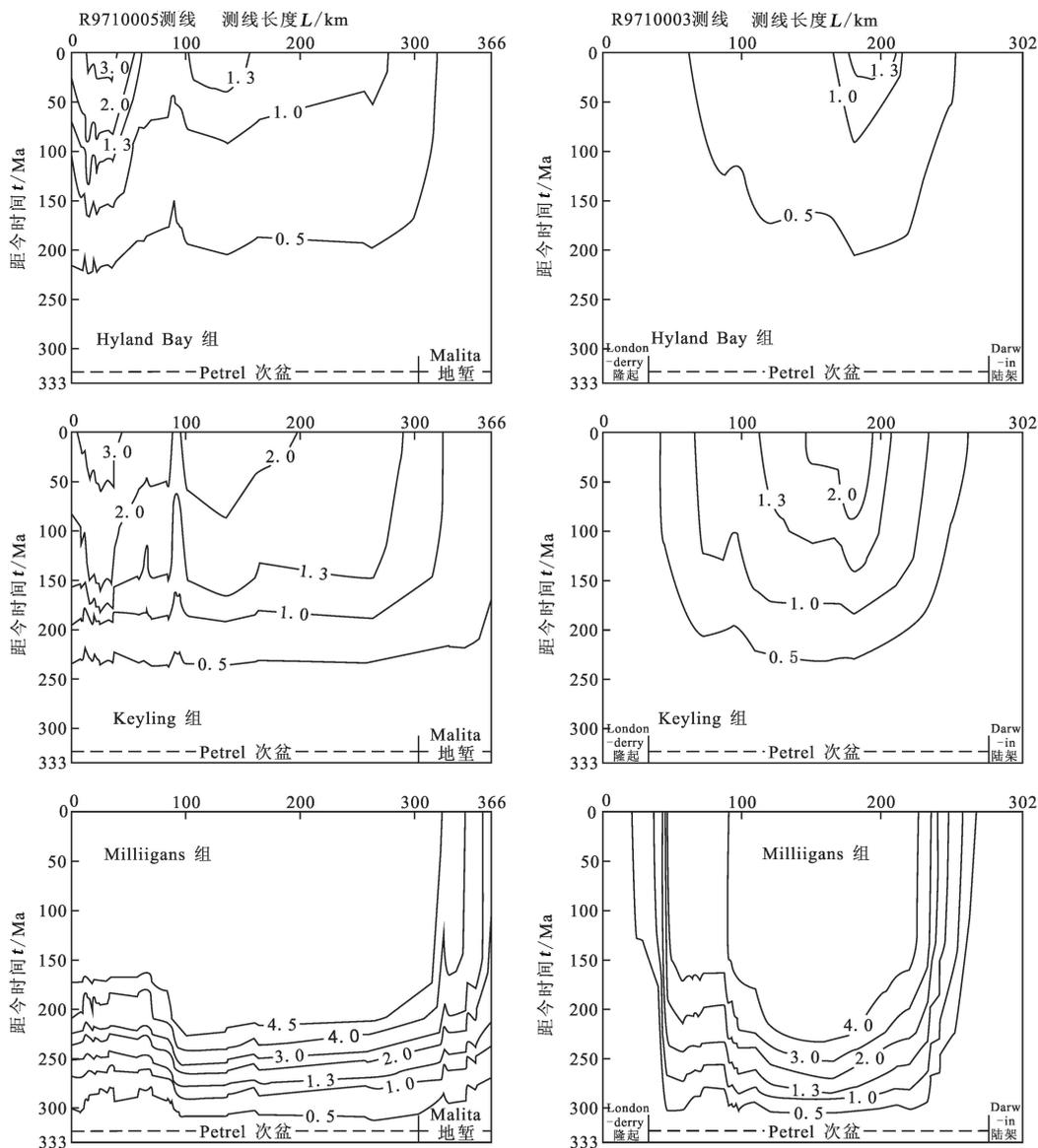


图 5 Petrel 次盆地 Hyland Bay 组、Keyling 组和 Milligans 组烃源岩成熟度 R_o 演化

Fig. 5 Maturity evolution (R_o) of Hyland Bay, Keyling and Milligans formation in Petrel subbasin

4 地质意义

美国 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气勘探取得巨大成功, 被认为是非常规热成因页岩气系统的典范^[19]。这种热成因气既有来自干酪根初次裂解生成的气体, 也有液态原油二次裂解生成的气体^[19]。

研究证实有机质演化过程中, 极性化合物的形成与其裂解同时进行, 原油二次裂解气的生成量将远远超过干酪根初次裂解气量^[20]。从 Petrel 次盆三套古生界页岩的演化历史来看, 石炭系 Milligans 组页岩在二叠纪早期进入生烃高峰期, 早二叠纪末进入高成熟演化阶段, 在三叠纪早期进入过成熟阶段, 目

前整体处于过成熟度阶段 R_o 大于 4.0%。对于含有 II₂ 型干酪根的石炭系页岩而言,这意味着二叠纪是石炭系页岩生成天然气的高峰期,二叠纪中-晚期可能是原油二次裂解气生成的高峰期,侏罗纪至今石炭系 Milligans 组页岩 R_o 大于 4.0%,如此高的演化程度对于页岩气的保存不利,这一时期初步认为是页岩气的破坏期,现今页岩层内保存的天然气可能较为有限。

对于二叠系页岩而言,下二叠统 Keyling 组页岩在三叠纪末期进入生烃高峰,在晚侏罗纪进入高成熟阶段,在晚白垩纪进入过成熟阶段,现今整体 R_o 为 1.3% ~ 2.0%。对于含有 III 型干酪根的下二叠统 Keyling 组页岩来说,这可能意味着侏罗纪可能是 Keyling 组页岩生成天然气的高峰期,白垩纪至今是生成的少量液态烃发生裂解的时期,这一演化历程表明下二叠统 Keyling 组页岩可以成为该区页岩气勘探的主要目的层。上二叠统 Hyland Bay 组页岩在晚白垩纪进入生烃高峰,在古近纪末期进入高成熟阶段,现今整体 R_o 为 1.0% ~ 2.0%。这对于含有 II₂ 型干酪根的上二叠统 Hyland Bay 组页岩而言意味着第三纪以来它一直处于生气高峰期,新近纪至今可能是原油二次裂解气生成的高峰期。因此,它是该区页岩气勘探的又一主要目的层。

受区域沉积-构造影响和控制,古生界三套页岩在 Petrel 次盆周缘有机质演化程度相对于深凹区偏低。Petrel 次盆周缘现今石炭系 Milligans 组页岩 R_o 大于 1.0%,二叠系页岩 R_o 为 0.5% ~ 1.3%。这意味着 Petrel 次盆周缘尤其是邻近 Londonderry 隆起和 Darwin 陆架的区域则可能是页岩油勘探的相对有利地区。

综上所述,在 Petrel 次盆深凹区二叠系是该区页岩气勘探的主要目的层。下覆石炭系页岩由于有机质演化程度高,页岩气勘探潜力相对较为有限。在 Petrel 次盆周缘,尤其是次盆周缘邻近 Londonderry 隆起和 Darwin 陆架的区域则应是古生界页岩油勘探的相对有利地区。这一结论也已被油气勘探实践所证实。截至目前,Petrel 次盆地共有 14 口气井和 6 口油井。其中气井主要分布在研究区中-北部,二叠系页岩是主要的含气层,尤为引人注意的是,在研究区中部发现了 Petrel 和 Tern 两个二叠系大型气田;油井主要分布在东-西两侧邻近 Londonderry 隆起和 Darwin 陆架的区域。

5 结 论

(1) Petrel 次盆内古生界页岩有机质热演化历

史模拟结果显示,二叠纪是石炭系页岩生成天然气的高峰期,二叠纪中-晚期可能是原油二次裂解气生成的高峰期,侏罗纪至今是石炭系 Milligans 组页岩气的破坏期,现今页岩层内保存的天然气可能较为有限;侏罗纪是下二叠统 Keyling 组页岩生成天然气的高峰期;第三纪以来上二叠统 Hyland Bay 组页岩一直处于生气高峰期,新近纪至今可能是其原油二次裂解气生成的高峰期。

(2) 受区域差异沉降的控制和影响,Petrel 次盆中-北部烃源岩埋深大,有机质演化程度高,东-西部烃源岩埋深小,热演化程度相对较低。Petrel 次盆深凹区二叠系地层是该区页岩气勘探的主要目的层,这种页岩气是干酪根初次裂解气和原油二次裂解气的混合物;页岩油勘探则应集中在 Petrel 次盆周缘东-西部有机质热演化相对较低的区域。

参考文献:

- [1] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32.
LI Xin-jing, LÜ Zong-gang, DONG Da-zhong, et al. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry,2009,29(5):27-32.
- [2] 孟元林,赵紫桐,焦金鹤,等. 共和盆地页岩油气地球化学特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(5):32-37.
MENG Yuan-lin, ZHAO Zi-tong, JIAO Jin-he, et al. Geochemical characteristics of the shale hydrocarbon in Gonghe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2012,36(5):32-37.
- [3] 黄彦庆,白国平. 澳大利亚波拿巴盆地油气地质特征及勘探潜力[J]. 石油实验地质,2010,32(3):238-241.
HUANG Yan-qing, BAI Guo-ping. Petroleum geological features and exploration potential analyses of the Bonaparte Basin, Australia[J]. Petroleum Geology & Experiment,2010,32(3):238-241.
- [4] 卢景美,陈景阳,姜培海,等. 澳大利亚西北大陆架 Bonaparte 盆地 Sahul 区块 Elang 组成岩作用[J]. 现代地质,2011,25(1):78-84.
LU Jing-mei, CHEN Jing-yang, JIANG Pei-hai, et al. Elang sandstone diagenesis in Sahul block of Bonaparte Basin, Australia[J]. Geoscience,2011,25(1):78-84.
- [5] 周川,王英民,黄志超,等. 澳大利亚北波拿巴盆地北部地区中生界层序地层及地震相研究[J]. 海洋地质动态,2009,25(5):19-24.
ZHOU Chuan, WANG Ying-min, HUANG Zhi-chao, et al. Mesozoic sequence stratigraphy and seismic facies characteristics in northern Bonaparte Basin, Australia[J].

- Marine Geology Development, 2009, 25(5):19-24.
- [6] 段威,侯宇光,何生,等. 澳大利亚波拿巴盆地侏罗系烃源岩热史及成熟史模拟[J]. 地质科技情报, 2011, 30(3):65-72.
- DUAN Wei, HOU Yu-guang, HE Sheng, et al. Jurassic source rock thermal and maturity history modelling in the Bonaparte Basin of Australia[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(3):65-72.
- [7] WEST B, MIYAZAKI S. Potential seen on Australia Bonaparte exploration acreage [J]. Oil & Gas Journal, 1994, 92(37):97-99.
- [8] MIYAZAKI S. Australia's southeastern Bonaparte Basin has plenty of potential[J]. Oil & Gas Journal, 1997, 95(16):78-81.
- [9] LINDNER A W. Oil and gas developments in Australia in 1989[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10):183-200.
- [10] WELTE D H. Petroleum origin and accumulation in basin evolution: a quantitative model[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(8):1387-1396.
- [11] NAKAYAMA K, VANSICLIN D C. Simulation model for petroleum exploration[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(7):1230-1255.
- [12] BEAUMONT C, BOUTILIER R, MACKENZIE A S. Isomerization and aromatization of hydrocarbons and the paleothermometry and burial history of the Alberta Foreland Basin[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(4):546-566.
- [13] CAO S, LERCHE I. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of Navarin Basin Cost No. 1 well, Bering Sea, Alask [J]. Petroleum Geology, 1989, 12(3):325-352.
- [14] HAGGAS S, MARSHALL E, RHEINBERG P, et al. Offshore exploration and development of the Browse and Bonaparte Basins: a review[J]. APPEA Journal, 2006, 46(1):666-667.
- [15] 王民,卢双舫,董奇,等. 有机质生烃动力学模型对比[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(3):12-18.
- WANG Min, LU Shuang-fang, DONG Qi, et al. Comparison on hydrocarbon generation kinetic models [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(3):12-18.
- [16] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10):1559-1570.
- [17] BURNHAM A K, SWEENEY J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(10):2649-2656.
- [18] 苏玉平,付晓飞,卢双舫,等. EASY% R_o 法在滨北地区热演化史中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(2):528.
- SU Yu-ping, FU Xiao-fei, LU Shuang-fang, et al. Application of EASY% R_o model to the research of thermal evolution in Binbei[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(2):528.
- [19] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas system [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [20] WAPLES D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data, and from thermodynamics [J]. Organic Geochemistry, 2000, 31:553-575.

(编辑 徐会永)

(上接第 16 页)

- [29] HUNT J M. Petroleum geology and geochemistry [M]. 2nd ed. San Francisco: Freeman Company, 1996:743.
- [30] 郝芳,李思田,龚再升,等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(6):471-476.
- HAO Fang, LI Si-tian, GONG Zai-sheng, et al. The mechanics of the diapir and the fluid episodic in filling of Yinggehai Basin [J]. Science in China (Ser D), 2001, 31(6):471-476.
- [31] 解习农,李思田,胡祥云,等. 莺歌海盆地底辟带热流体输导系统及其成因机制[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(3):247-256.
- XIE Xi-nong, LI Si-tian, HU Xiang-yun, et al. Genetic mechanisms of the diapir and the fluid guide economy in Yinggehai Basin[J]. Science in China (Ser D), 1999, 29(3):247-256.
- [32] 邹华耀,周心怀,鲍晓欢,等. 渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式[J]. 石油学报, 2010, 31(6):885-893.
- ZOU Hua-yao, ZHOU Xin-huai, BAO Xiao-huan, et al. Controlling factors and models for hydrocarbon enrichment/depletion in Paleogene and Neogene, Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6):885-893.

(编辑 徐会永)