

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019061402

东海陆架盆地丽水凹陷热演化模拟及现今地温场特征

于仲坤, 赵洪, 刁慧, 丁飞, 漆滨汶

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要: 东海陆架盆地丽水凹陷烃源岩埋深大、钻井少、油气发现少, 至今对其生油气能力具有较大的争议。为明确烃源岩热演化史, 从少量具备实测地层温度和镜质体反射率 (R_o) 资料的钻井出发, 利用正演模拟方法, 通过地温与地层深度相关性分析, 将钻井地温研究结果外推到无井区。在恢复丽水凹陷探井岩石圈结构及其演化史的基础上, 首次系统建立了丽水凹陷的区域地温场并分析其对烃源岩演化的作用。研究表明, 古新统下段月桂峰组底界 (T100) 烃源岩大部分都已成熟, 次洼中心局部过成熟; 月桂峰组顶界 (T90) 烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段, 次洼中心局部高—过成熟; 灵峰组顶界 (T85) 烃源岩处于未熟—低熟状态, 西次洼中心有成熟烃源岩。烃源岩特征及演化分析表明, 古新统下段月桂峰组烃源岩是丽水凹陷的主力生油气烃源岩。

关键词: 烃源岩热演化; 地温场; 岩石圈模型; 丽水凹陷; 东海陆架盆地

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

Thermal evolution modeling and present geothermal field of the Lishui Sag of East China Sea Basin

YU Zhongkun, ZHAO Hong, DIAO Hui, DING Fei, QI Binwen

CNOOC Limited - Shanghai Branch, Shanghai 200335, China

Abstract: Hydrocarbon source rocks are deeply buried in the Lishui Sag of East China Sea Basin, where drilling wells are rare and encountered only a few oil and gas discoveries. There are hot debates over the hydrocarbon generating capacity of the basin. Careful study has been made for this time to clarify the thermal evolutionary history of source rocks. Starting from drilling wells with measured formation temperature and vitrinite reflectance (R_o) data, using the forward simulation method, and through the correlation between temperature and stratum depth, we extrapolated the results of drilling temperature research to non-well areas. On the basis of restoring lithospheric structure and its evolution history, the regional geothermal field of the Lishui Sag has been systematically established for the first time. The impacts of geothermal field onto source rock evolution are analyzed. Data shows, most of the source rocks at the bottom of Yueguifeng Formation in the lower part of Paleocene are mature and the sub-depression center is partly over-matured; most of the source rocks at the top of Yueguifeng Formation are in the stage of low-maturity and maturity, the sub-depression center is partly high-mature to over-mature; the source rocks at the top of the Lingfeng Formation are immature to low-maturity, and there are mature source rocks at the center of the western sub-depression. According to the analysis of source rock characteristics and evolution, the source rocks in the lower Paleocene Yueguifeng Formation should be the main source rocks for hydrocarbon generation in the Lishui Sag.

Key words: thermal evolution of source rock; geothermal field; lithosphere model; Lishui Sag; East China Sea Basin

东海盆地丽水凹陷自 1984 年勘探以来, 多口探井钻遇油气显示及工业油气流^[1-2], 目前已经发现 1 个油气田及多个含油气构造^[3-5]。但与此同时, 已发现油气田充满度低且规模较小, 可动用储量少, 经济性较差, 与凹陷大规模的烃源岩发育不匹配。除了圈闭和储层等控制因素以外, 丽水凹陷的烃源岩热演化特征目前仍不明确, 限制了对其深入的勘探研究。目前对于丽水凹陷烃源岩的研究较少, 其

中李宁^[6] 通过从可溶有机质转化率、岩石热解参数、生物标志物特征和镜质体反射率等方面对丽水凹陷西次凹古新统烃源岩热演化特征进行了研究。前人的研究成果虽然从地球化学角度提出了西次凹烃源岩热演化特征规律, 但未有效指出丽水凹陷烃源岩整体热演化差异, 难以为丽水凹陷的油气勘探及中长期发展规划提供强有力的支撑。

本文首次以盆地模拟方法, 针对西次凹 10 口

资助项目: 国家科技重大专项“东海盆地天然气资源潜力评价”(2016ZX05027-001); 中海油“十三五”油气资源评价(YXKY-2018-KT-01)

作者简介: 于仲坤(1986—), 男, 硕士, 工程师, 从事盆地模拟及资源评价工作, E-mail: yuzhk3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2019-06-14; 改回日期: 2019-08-30. 蔡秋蓉编辑

井、东次凹3口井及灵峰凸起6口井岩性、测井、测试等资料进行梳理,优选盆地模型及热演化参数,结合地震资料,建立单井地史、热史模型,对热演化规律进行系统分析并对现今烃源岩成熟度进行预测,最终对烃源岩成熟度差异性进行总结,研究成果对丽水凹陷下一步的地质研究具有一定的指导意义。

1 区域地质背景

丽水凹陷位于东海陆架盆地西部坳陷带的西南部,总面积约 $1.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。凹陷呈北东—南西向展布,其东南以雁荡凸起与福州凹陷相隔,北接椒江凹陷,西邻闽浙隆起区。整体为单断式箕状断陷,是一个晚白垩世基础上发育起来以古新世—始新世为主的断陷盆地。凹陷内部又可细分为西次凹、灵峰凸起、东次凹、南次凹4个次级构造单元(图1,图2)。

丽水凹陷构造演化可以划分为裂陷期、拗陷期、沉积间断期及整体沉降期4个阶段,发育11套地层。丽水凹陷基底为中生代火山岩、花岗岩与中元古代变质岩。目前钻遇地层主要为古新近系与第四系,少数井钻遇上白垩统石门潭组。裂陷期发

育有上白垩统石门潭组^[7],古新统月桂峰组、灵峰组及明月峰组。其中古新统湖相—三角洲沉积的月桂峰组泥岩厚度分布范围为200~1400 m,滨浅海相—三角洲沉积的灵峰组最大厚度达500 m,海相含煤的明月峰组厚度分布范围为100~300 m;拗陷期发育有始新统海相沉积瓯江组、温州组;沉积间断期经历了始新世末的玉泉运动和渐新世末的花港运动,导致丽水凹陷整体缺失始新统平湖组、渐新统花港组地层沉积,并形成了一个明显的构造不整合界面(T20)^[8];整体沉降期中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组,更新统东海群组^[9-10](表1)。

前人研究表明丽水凹陷烃源岩主要发育有古新统月桂峰组与灵峰组,其中古新统月桂峰组烃源岩TOC为0.42%~4.24%,平均为1.66%,HI为33~154 mg/g TOC,平均为75 mg/g TOC,为凹陷主力烃源岩。古新统灵峰组烃源岩TOC为0.41%~2.71%,平均为1.09%,HI为15.4~505 mg/g TOC,平均为126 mg/g TOC,为凹陷次要烃源岩。

2 单井热演化模拟参数分析

丽水凹陷除了月桂峰组与灵峰组发育两套主

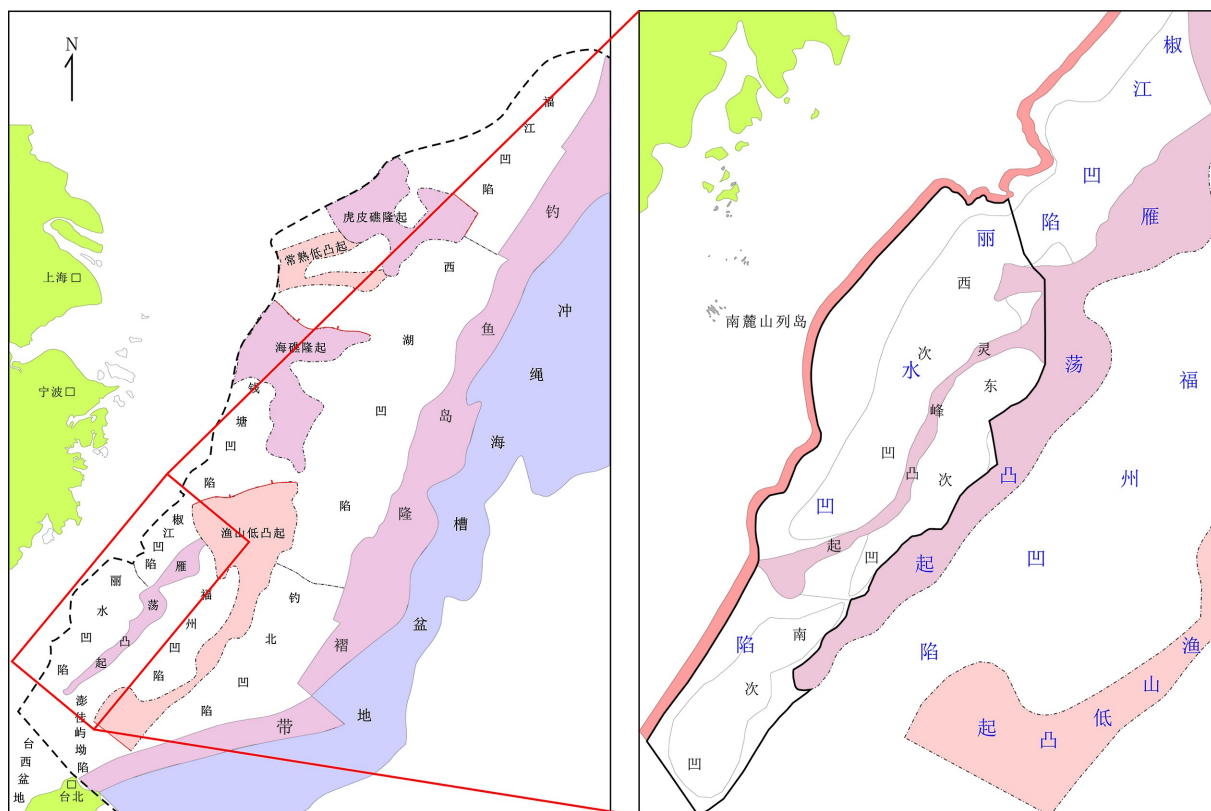


图1 丽水凹陷构造位置图

Fig.1 Tectonic location of Lishui Sag

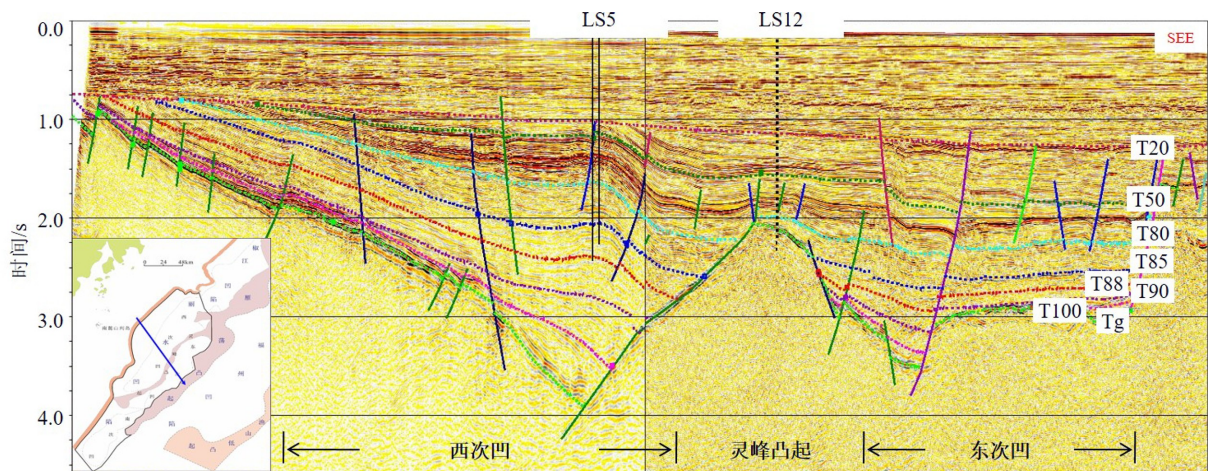


图2 丽水凹陷地震解释剖面

Fig.2 Seismic profile across Lishui Sag

表1 丽水凹陷构造演化

Table 1 Tectonic evolution of Lishui Sag

年代			地层	时间 /Ma	地震反射界面	构造特征			区域动力学背景
代	纪	世				演化阶段	盆地区域特征	构造运动	
新生代	第四纪	更新世	东海群	2.6	T0	整体沉降	进入整体沉降演化阶段。	龙井运动	菲律宾板块向琉球岛弧的俯冲及冲绳海槽盆地的形成与扩张引发第三次热事件。
		新近纪	上新世	三潭组	5.3				
	中新世		柳浪组		T12				
			玉泉组		T16				
			龙井组		T20				
	古近纪	渐新世	花港组	23.3	T20	沉积间断		花港运动	
			平湖组	32	T30				
		始新世	温州组	43	T40	拗陷沉降	裂隙作用已不明显，盆地在遭受大面积的抬升剥蚀后，转入裂后期沉降阶段。	平湖运动	
			瓯江组	49	T50				
			明月峰组	56.5	T80				
			灵峰组	59.2	T85				
		古新世	月桂峰组	61.6	T90	裂隙沉降	盆地继续受到剪张应力的控制，脊状断陷进一步加大，孤立的多沉降中心开始彼此相同，位于丽水中央的灵峰构造带发育并将盆地分割成东西两个次凹。	雁荡运动	
			石门谭组	65	T100				
	中生代	白垩纪	晚白垩世	石门谭组	83.6	Tg		盆地在前中生代基底上，形成一系列受同沉积断裂控制的半地堑式伸展盆地，多沉降中心彼此分割。沉积地层呈现东断西超，东陡西缓特征。	

力烃源岩层外，还发育多套地层，鉴于对其成熟度演化尚未有效开展，其成熟度整体差异未知，因此，本文首次利用盆地模拟方法对凹陷烃源岩成熟度演化特征进行研究，以明确多套烃源岩的有效性。

地球内部热的传播方式主要有热传导、热对流和放射性生热，其中热传导是从软流圈到岩石圈最普遍的一种方式，热对流主要发生于软流圈，局部

也可由于岩石圈的移动、沉积盆地中的热液或油气流动带来的热循环，放射性生热主要存在于地壳和沉积物放射性元素富集区。热传输的热源主要来自软流圈的热流，此外还有局部的热源，包括岩浆岩侵入、放射性元素富集区等。本文中热流指热流密度，是由于盆地中两个点之间的温度差引起的，热流值 q 的大小等于地温梯度 ∇T 与热导率 λ 的乘

积, 即 $q = \lambda \cdot \nabla T$, 单位 mW/m^2 。引用 Thomas Hantschel 三维热流模拟原理^[11], 即考虑上述 3 种热的传播方式, 根据能量守恒定律, 单位体积内的热流变化等于热传导、热对流和放射性元素生热的热流之和, 求解非稳态方程, 用下式表示:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \cdot \nabla T + \rho_p c_p \nabla \cdot (v_p T) + Q_r \quad (1)$$

λ 、 ρ 、 c 是岩石全岩的热导率 (W/mK)、密度 (kg/m^3) 和比热容 ($J/kg/K$), v_p 、 ρ_p 、 c_p 分别是孔隙流体速度、密度和比热容 (计算岩石圈对流时代表岩石圈相应参数), Q_r 是全岩的放射性生热率 ($\mu W/m^3$)。

单井热演化模拟过程通常分为两部分, 一是岩石圈热模拟, 根据岩石圈模型计算来自软流圈的热源通过岩石圈传递到沉积盆地基底的热流值, 可理解为岩石圈的尺度; 二是沉积盆地的热模拟, 计算沉积物基底到地表 (或海底) 的温度或热流变化, 这一部分可理解为沉积盆地的尺度 (图 3)。

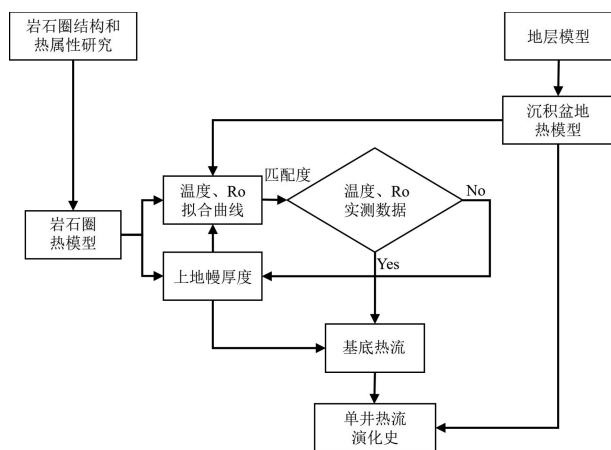


图 3 丽水凹陷正演热史模拟工作流程

Fig.3 Thermal history simulation process for Lishui Sag

2.1 岩石圈模型参数

裂陷盆地岩石圈减薄和盆地沉降具有密切的

关系^[12-13], 建立岩石圈模型的目的是为了计算盆地基底的热流值和不同地质时期的构造沉降。热流的求取跟岩石圈厚度、地质时间、拉张系数、岩石热导率等参数有关^[14]。本文采用 Mckenzie 模型, 该模型被广泛应用于陆缘裂陷盆地和弧后盆地的基底热流值计算。

一般认为软流圈顶界 (岩石圈底界) 是一个恒温面, 温度约为 $1330\text{ }^\circ\text{C}$ 。前人对东海盆地岩石圈结构和物理性质做过相应研究^[15-17], 为岩石圈模拟提供了基础参数。高德章^[18]通过空间重力异常、密度界面反演技术明确了丽水凹陷现今岩石圈底界埋深为 $\pm 80\text{ km}$; 江为为^[19]、周志远^[20]等通过重力异常、沉积层厚度和深地震揭示的莫霍面深度资料, 采用三维迭代界面反演法, 计算了丽水凹陷莫霍面深度为 $25\sim 30\text{ km}$ 。用莫霍面深度减去沉积基底深度, 即可求取结晶地壳厚度。丽水凹陷地壳厚度为 $16\sim 29\text{ km}$, 原始地壳厚度为 35 km ^[21], 因此地壳拉张系数为 $1.2\sim 2.2$ 。其中上地壳埋深 $12\sim 15\text{ km}$, 密度为 2.7 g/cm^3 , 岩性为变质岩和花岗岩, 含少量中基性岩体; 下地壳埋深 $25\sim 30\text{ km}$, 密度 2.9 g/cm^3 , 岩性为基性麻粒岩为主; 上地幔密度 3.4 g/cm^3 , 岩性为橄榄岩^[17, 22]。

岩石圈的热导率 λ 、放射性生热率 Q_r 和比热容 c 等参数取值没有实测数据, 综合前人对东海及西湖凹陷的研究成果^[17, 23-24] 进行丽水凹陷岩石圈热参数取值, 上地壳放射性生热率为 $Q_{r0}=2.8\text{ }\mu\text{W/m}^3$; 上地壳、下地壳和上地幔的热导率分别为 3.5 、 3.1 和 2.5 W/mK ; 上地壳、下地壳和上地幔的比热容值分别为 900 、 1050 和 $1200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (表 2)。

2.2 剥蚀厚度

丽水凹陷在地质历史时期经历了多期构造抬升运动, 主要在灵峰组沉积末期、明月峰组沉积末期、瓯江组沉积末期和渐新统沉积末期。其中渐新

表 2 LS5 井岩石圈模型参数

Table 2 Lithospheric modeling parameters of LS5

岩石圈原始厚度 $h_0=125\text{ km}$ ^[21]	岩石圈现今厚度 $h_c=80\text{ km}$	上地壳放射性生热率 $Q_{r0}=2.8\text{ }\mu\text{W/m}^3$
原始地壳厚度 $h_c=35\text{ km}$	现今地壳厚度 $h_c=21.5\text{ km}$	上地壳热导率 $=3.5\text{ W/mK}$
原始上地幔厚度 $h_m=90\text{ km}$	现今上地幔厚度 $h_m=52\text{ km}$	下地壳热导率 $=3.1\text{ W/mK}$
研究区现今纬度 $=27^\circ$	基底深度 $d_b=6499\text{ m}$	上地幔热导率 $=2.5\text{ W/mK}$
软流圈顶部温度 $T_b=1330\text{ }^\circ\text{C}$	上地壳密度 $\rho_{c上}=2.7\text{ g/cm}^3$	上地壳比热容 $=900\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
拉张时间 $t_s=27.1\text{ Ma}$	下地壳密度 $\rho_{c下}=2.9\text{ g/cm}^3$	下地壳比热容 $=1050\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
地壳拉张系数 $\beta_c=1.63$	上地幔密度 $\rho_m=3.4\text{ g/cm}^3$	上地幔比热容 $=1200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

统沉积末期构造运动较为强烈,最大剥蚀量可达1400 m (图4)。通过针对多条测线剥蚀厚度的对比分析及优选,本次模型剥蚀厚度采用中海油研究院研究成果^[25]。

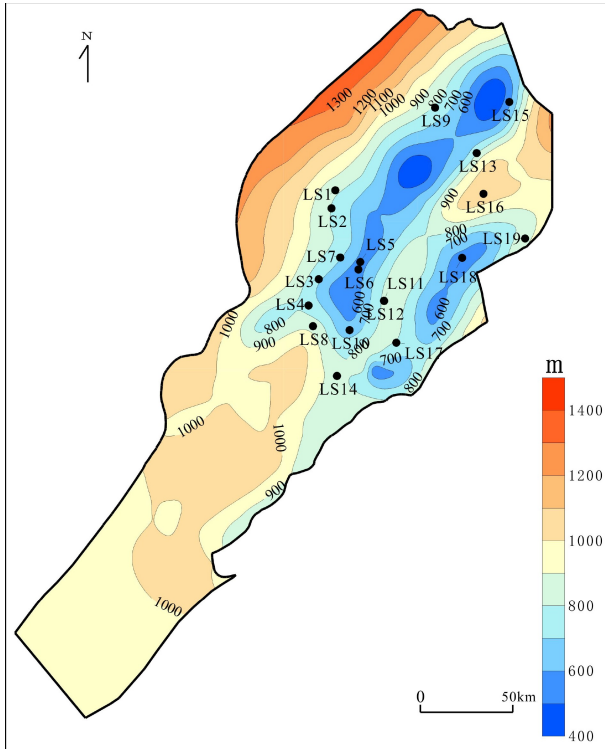


图4 丽水凹陷不整合面(T20)剥蚀厚度
Fig.4 Erosion thickness of horizon T20 in Lishui Sag

2.3 边界条件

边界条件是指基底热流为下边界、古地表(陆地)或海底(海上)温度为上边界的温度条件。本次盆地模拟首先定义出每个地质历史时期沉积盆地的热边界条件,下边界盆地基底的热流值由岩石圈

模型得到,其大小和分布受地壳和地幔的平均热导率和厚度变化控制;不同地质历史时期的上边界条件用古地表温度或古水面温度加水深校正得到^[11],本文参照 Wygrala 海平面全球平均温度数据^[26],按现今北半球东亚北纬 27° 设定地质历史的水面温度。

合理预测古水深以提高地层埋藏史和地温场的模拟精度^[27]。由于本地区古生物资料较少,古水深主要依靠古构造结合沉积相来判断。丽水凹陷现今水深图根据地震资料解释的海底深度取得。

2.4 单井热演化模拟标定及结果

目前常见的地温资料有 DST(钻杆测试)数据、BHT(测井井底温度)数据和测井温压连续测量数据。DST 测试时一般的静井时间长,其测温数据被认为是最接近实际地层温度的数据。但是海域求取 DST 数据成本较高,只有少数有良好油气显示的地层进行过 DST 测试,而且有的 DST 测试还没有测温。目前丽水凹陷几乎所有钻井均具有 BHT 数据,但由于 BHT 数据在测量时井液循环停止的时间很短,大多只有几小时,温度难以恢复到实际地层温度,所以测量温度远低于实际地层温度。测井温压连续测量数据也存在井液循环停止时间短而导致测量温度偏低的问题。

目前丽水凹陷具有 DST 温度资料的钻井仅 6 口,而具有 BHT 数据的钻井有 13 口,其中 2 口既有 DST 数据又有 BHT 数据。本文采用 Waples 法^[28-29]校正了 LS6、LS9 两口井的 BHT 温度,校正结果分别与其 DST 数据对比(图 5),可靠性较高,说明该校正方法在丽水凹陷是适用的。通过对 13 口钻井 BHT 数据的恢复,丽水凹陷具有温度资料的钻井达到 17 口,大大丰富了该区的地温场研究资料,提高

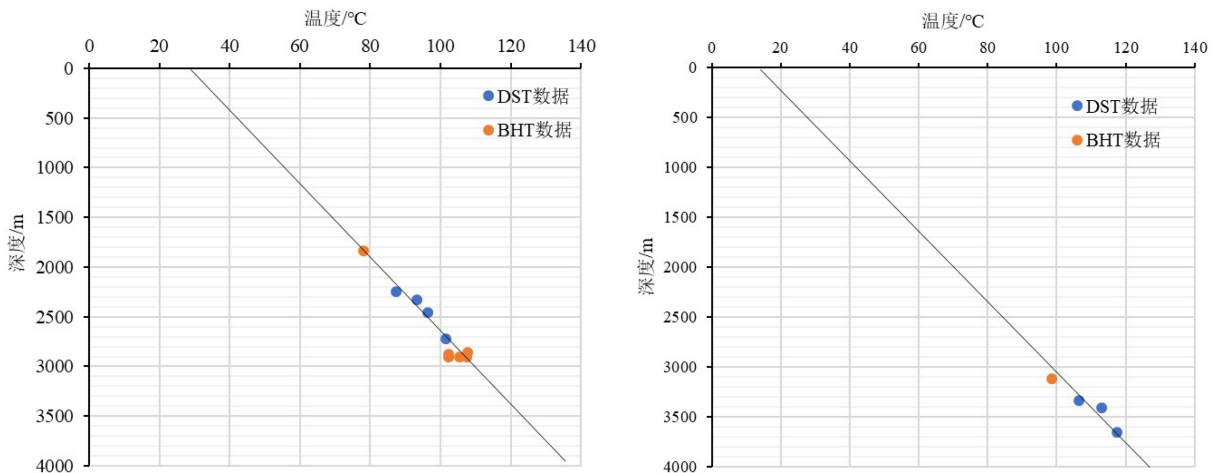


图5 丽水凹陷钻井 DST 测温与 BHT 校正数据对比图 (左: LS6, 右: LS9)
Fig.5 Contrast of DST temperature and BHT calibration data in Lishui Sag (Left: LS6, Right: LS9)

了地温场研究的质量和可靠程度。

在上述岩石圈模型建立的基础上, 本文首先模拟盆地基底热流, 再进行正演热模拟计算地温及 R_o , 以钻井实测的 13 口校正后 BHT 井底温度、6 口 DST 测试温度数据与 16 口井 R_o 测定值对模拟计算结果进行约束及校正。应用美国 Zetaware 公

司的 Genesis 盆地模拟软件, 建立丽水凹陷各单井地史、热史模型(图 6), 模拟计算各单井从盆地基底到海底的地温变化曲线(图 7)。其中沉积层热属性参数根据单一岩性参数(表 3), 以实钻井该层砂、泥岩百分含量配比计算得到。

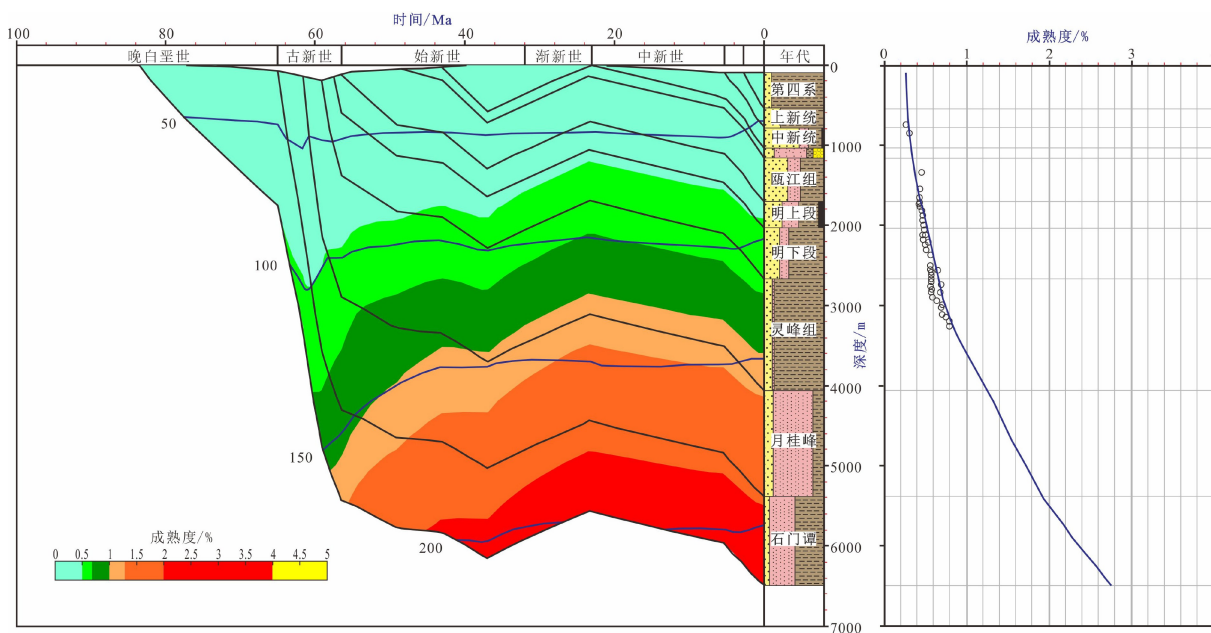


图 6 LS5 井埋藏史及热史模拟标定

Fig.6 Burial history and simulated calibration of thermal history of LS5

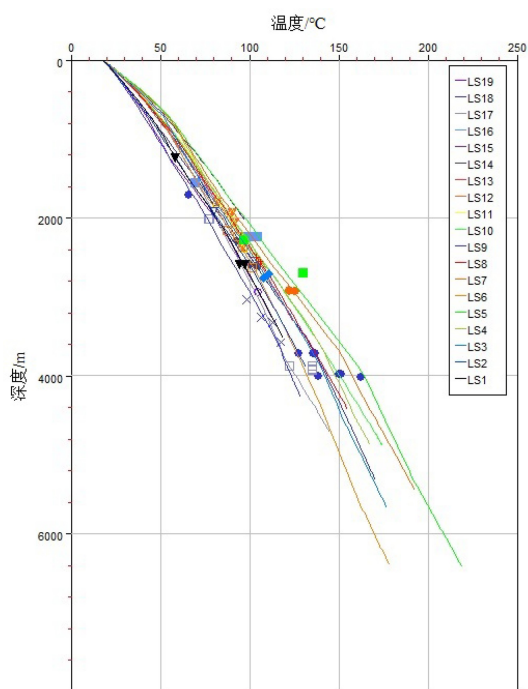


图 7 丽水凹陷钻井地温模拟曲线图

(数据点为实测数据)

Fig.7 Modeling temperature curves of the wells in Lishui Sag

(Data points are measured data)

表 3 丽水凹陷岩石密度和热属性参数

Table 3 Density and thermal properties of rocks encountered in Lishui Sag

岩性	密度 /(g/cm ³)	热导率 /(W/mK)	生热率 /(μW/m ³)	比热容 /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
砾岩	2.7	4.18	0.85	820
砂岩	2.65	3.85	0.7	855
粉砂岩	2.65	3.35	0.96	910
泥岩	2.72	1.62	1.5	860
煤	1.6	0.46	0.38	1 300

通过对丽水凹陷 19 口探井的一维热模拟, 发现各井的地温梯度明显不同, 同一深度的地温相差可达 40 °C(图 7)。平均地温梯度最大约达 3.7 °C/100 m, 最小则约为 2.6 °C/100 m(表 4)。总体上靠近凹陷中心探井的地温梯度相对较低, 凹陷周边及凸起区探井的地温梯度相对较高。由于丽水凹陷长期处于热沉降期的裂谷盆地中, 其软流圈已渐渐恢复到原始状态, 深部传导的热量与隆起区的相近, 但凹陷中心原始地壳由于裂谷期的拉张减薄, 现今地壳的放射性生热量减小。总体上凹陷中心的热流

表4 丽水凹陷热流值及相关参数

Table 4 Heat flow values and related parameters in Lishui Sag

井号	测温深度/m	平均地温梯度/(°C/100 m)	基底热流/(mW/m ²)
LS1井	2 665.8	2.78	48.26
LS2井	2 000.5	3.17	50.16
LS3井	2 798	2.96	49.06
LS4井	2 801	3.14	53.95
LS5井	2 791	3.21	56.08
LS6井	2 902.7	2.59	48.53
LS7井	3 022.4	3.43	54.86
LS8井	2 574~2 587.5	2.60	54.30
LS9井	3 117	2.69	41.78
LS10井	—	3.24	54.88
LS11井	2 032.67	3.26	58.53
LS12井	2 467.26	3.27	56.81
LS13井	—	3.26	53.39
LS14井	2 698.1	3.33	53.48
LS15井	1 050	3.65	62.79
LS16井	2 325	3.21	61.46
LS17井	4 015	2.72	55.56
LS18井	3 803	2.78	47.55
LS19井	3 040	2.95	44.76

小于凹陷周边及凸起区的热流,因此靠近凹陷中心探井的地温梯度相对凹陷周边及凸起位置的地温梯度要低。

3 丽水凹陷热演化史及现今地温场特征

裂谷盆地的形成过程中伴随着岩石圈的减薄、盆地的沉降和软流圈的上隆作用,而且它们之间还具有定量关系^[11-13]。盆地形成过程中软流圈顶界深度的变化直接决定着盆地的热流量和地温场的分布特征。盆地裂陷阶段,软流圈上隆、盆地沉降,软流圈顶界深度与地层深度呈负相关关系。因此,地层深度间接反映着盆地的热流量和地温场的分布特征。

针对丽水凹陷钻井资料少的特点,利用地温与地层深度的相关性,以各井所在位置月桂峰组底的温度和丽水凹陷月桂峰组底界 T100 作相关图,发现二者呈线性正相关关系(图 8)。把钻井热史研究结果外推到无井区域,建立东海丽水凹陷的区域地

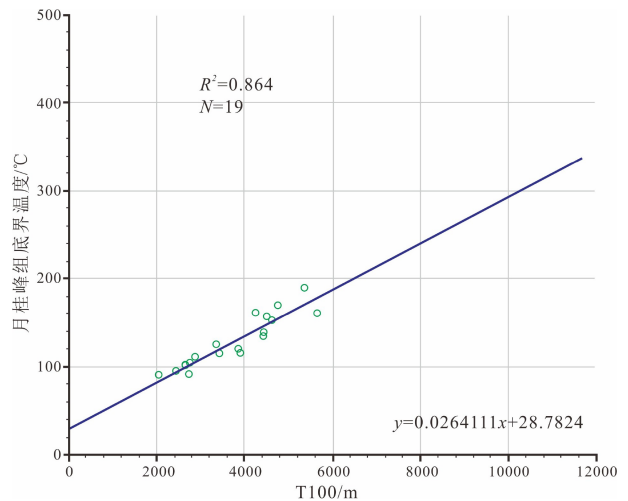


图 8 丽水凹陷钻井月桂峰组底界温度与 T100 埋深关系图
Fig.8 Diagram of the relationship between the bottom temperature of Yueguifeng Formation from wells and the buried depth of T100 in Lishui Sag

温场,将其相关关系应用到 T100 深度图上,可以得到丽水凹陷的 T100 温度图(图 9),并绘制出丽水凹陷的平均地温梯度分布图(图 10)。从丽水凹陷平均地温梯度的平面分布来看(图 10),现今凹陷边缘地温梯度较高,凹陷中部的地温梯度较低。其中丽水凹陷西次凹、东次凹地温梯度相对较低,最低地温梯度不到 2.7 °C/100 m。

19 口井的一维模拟结果表明,各井的基底热流

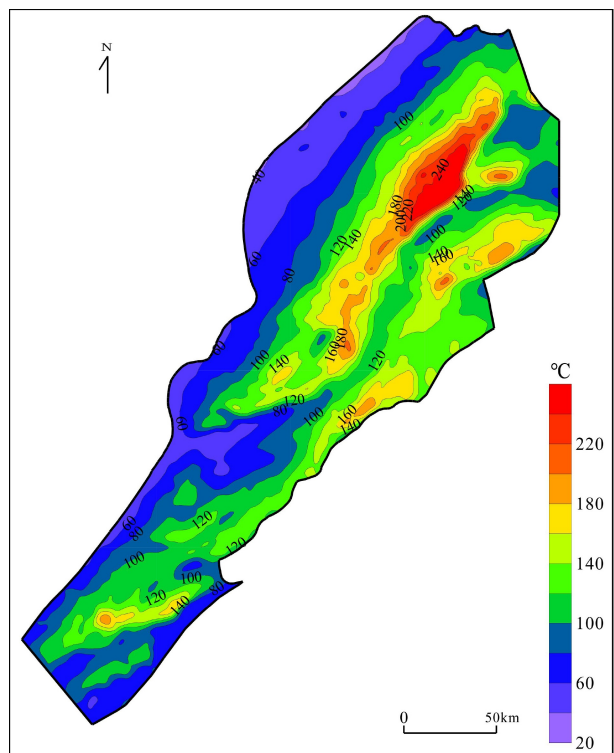


图 9 丽水凹陷 T100 地温分布图
Fig.9 Geothermal distribution of T100 in Lishui Sag

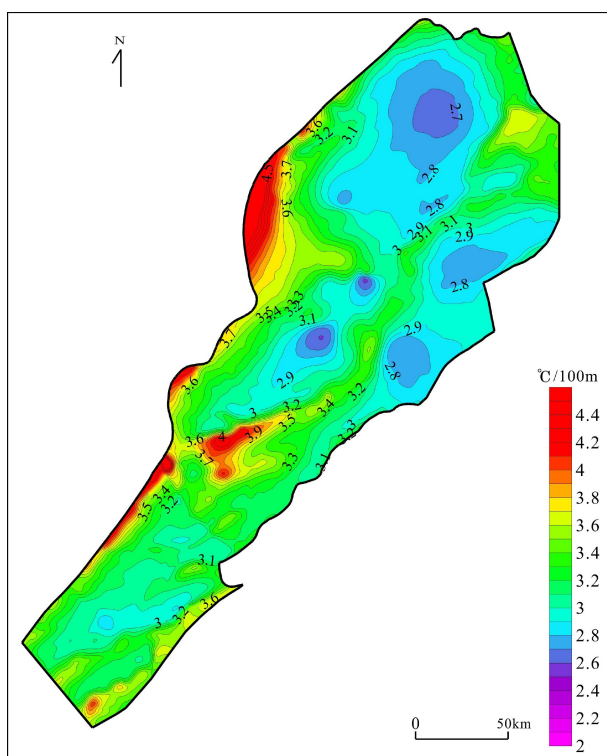


图 10 丽水凹陷平均地温梯度分布
Fig.10 Average geothermal gradient in Lishui Sag

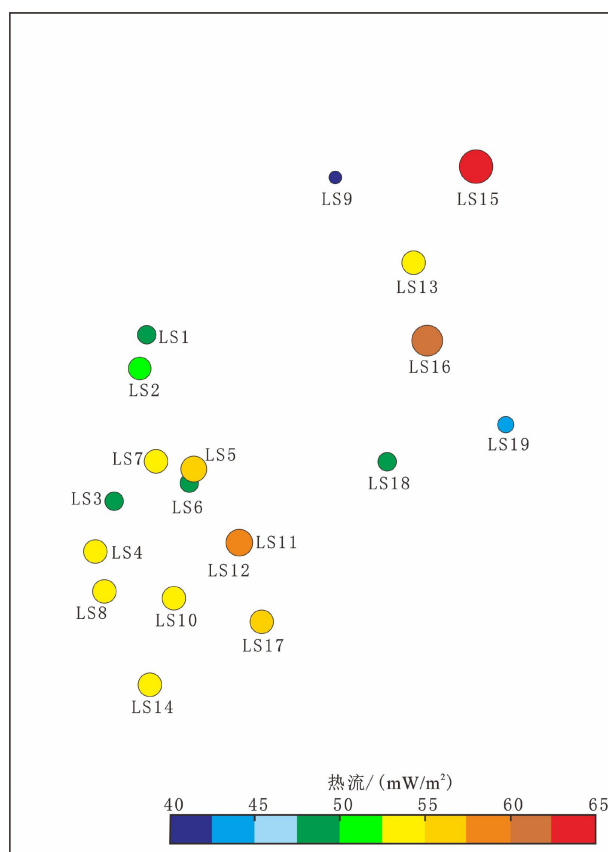


图 11 丽水凹陷钻井基底热流值
Fig.11 Heat flow of wells in Lishui Sag

各不相同, 最大值不超过 65 mW/m^2 , 最小值不低于 40 mW/m^2 (表 4, 图 11)。把上述钻井基底热流与基底埋深的关系应用到 T_g 深度图上, 可以得到丽水凹陷的基底热流分布图 (图 12)。总体上凹陷中心的基底热流值相对较低, 凹陷周边及凸起位置热流较高。分析表明沉积基底的热流一方面与所在地区的软流圈深度、地壳厚度有关。软流圈深度越浅, 岩石圈的宏观平均地温梯度就越大, 从地球深部输出的热流量就越大。地壳厚度越大, 上地壳的放射性生热量就越大。另一方面与盆地沉积物的厚度大小和沉积物的热导率有关, 如果盆地沉积物总体热导率较大, 那么该区的热流量较大, 否则热流量小。丽水凹陷长期处于热沉降期的裂谷盆地中, 其软流圈已渐渐恢复到原始状态, 深部传导的热流量与隆起区的相近, 但凹陷中心原始地壳由于裂谷期的拉张减薄, 现今地壳的放射性生热量减小, 而且由于基底热导率一般比沉积层高, 沉积层的热披覆效应有利于热传输, 导致热更易流向低阻的基底高区。因此总体上凹陷中心的基底热流小于凹陷周边及凸起区的热流。

4 有机质成熟度分布特征

烃源岩有机质的热演化过程直接受盆地在整

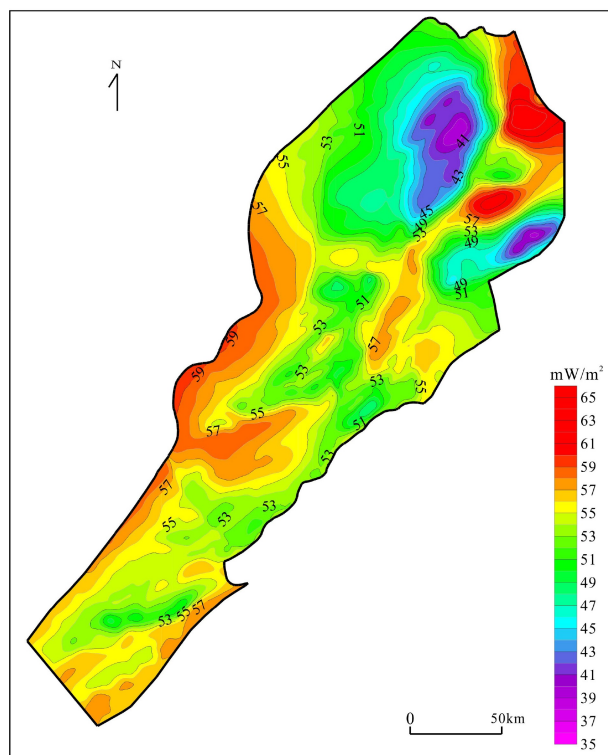


图 12 丽水凹陷基底热流值分布图
Fig.12 Distribution of heat flow in Lishui Sag

个地质历史时期地温场的控制,而不同时期的地温场又受控于盆地的沉积充填与深部岩石圈结构。因此,本文以现今地温和镜质体反射率作为约束条件,通过恢复盆地各个时期的沉积埋藏史、沉降史、岩石圈结构的变化过程,模拟分析盆地的地温演化和烃源岩有机质成熟历史^[30]。

利用19口探井的一维热模拟结果和烃源岩层在各时期古深度图的相关关系,制作了各时期烃源岩的地温场分布图,然后在地质历史过程中,模拟计算出丽水凹陷烃源岩在三维空间的热演化程度。模拟结果表明,古新统下段月桂峰组底界烃源岩大部分都已成熟,在凹陷中心特别是西次凹,已经达到过成熟。月桂峰组顶界(灵峰组底界)烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段,在西次凹中心处于高成熟—过成熟状态。灵峰组顶界烃源岩处于未熟—低熟状态,仅在西次凹沉积中心,少部分烃源岩成熟(图13,图14,图15)。从现今烃源岩的成熟状态来看,古新统下段月桂峰组烃源岩应是丽水凹陷的主力烃源岩。

5 讨论

前期丽水凹陷的热演化研究较少,李宁通过可

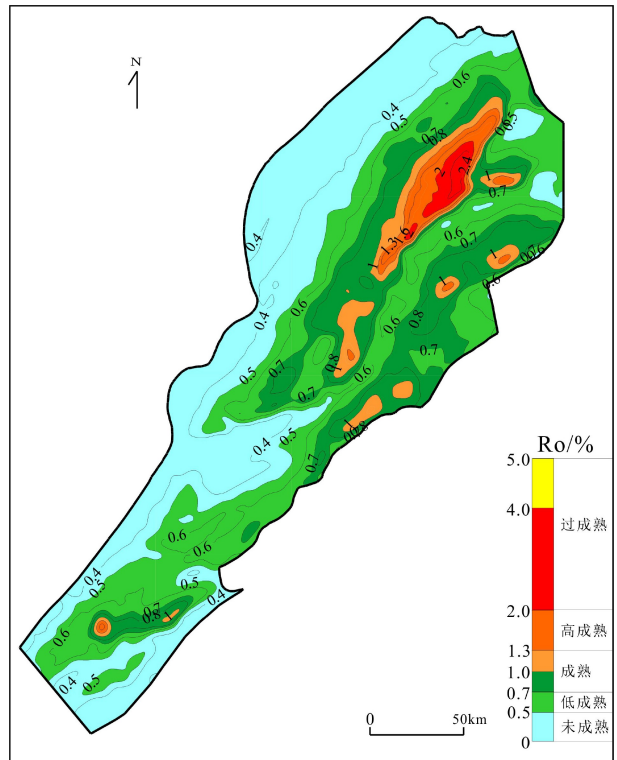


图14 丽水凹陷月桂峰组顶界成熟度图

Fig.14 Maturity of source rocks at the top of Yueguifeng Formation in Lishui Sag

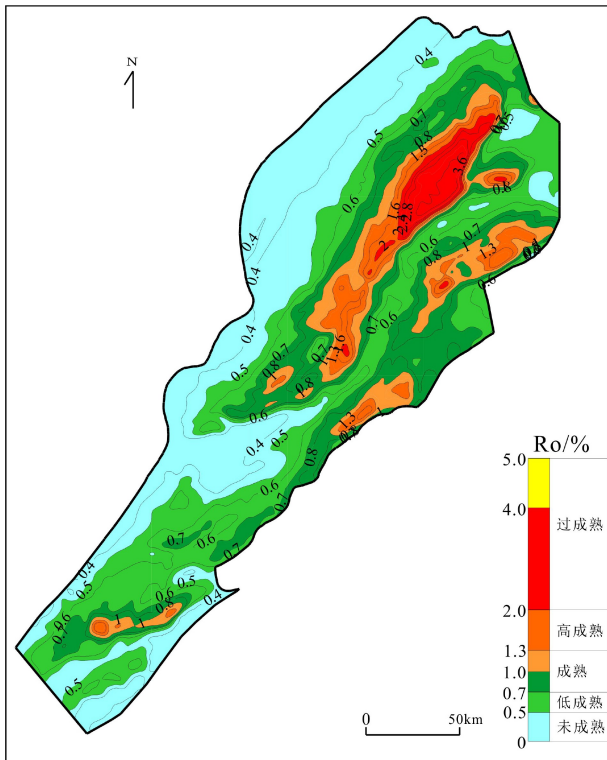


图13 丽水凹陷月桂峰组底界成熟度图

Fig.13 Maturity of source rocks at the bottom of Yueguifeng Formation in Lishui Sag

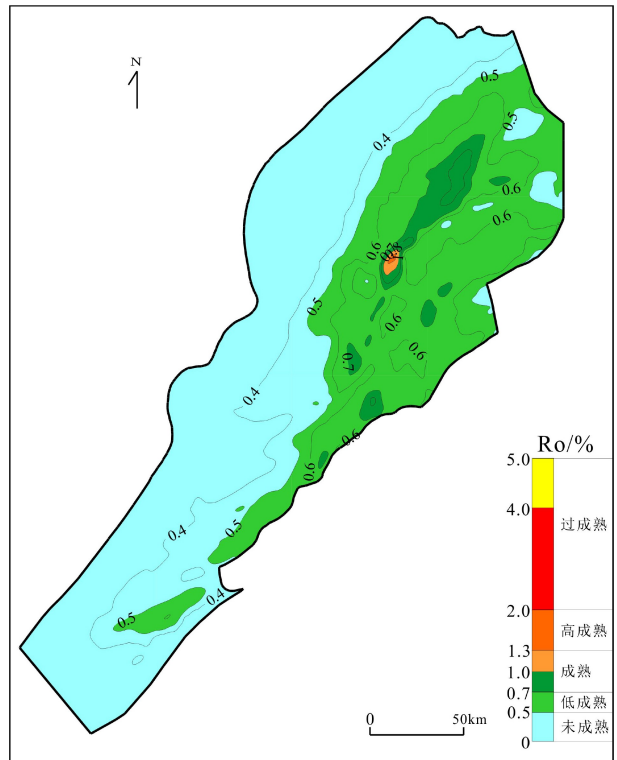


图15 丽水凹陷灵峰组顶界成熟度图

Fig.15 Maturity of source rocks at the top of Lingfeng Formation in Lishui Sag

溶有机质转化率、岩石热解参数、生物标志物特征及镜质体反射率等地球化学参数仅对丽水西次凹X井进行了古近系烃源岩热演化特征研究,指出了西次凹灵峰组上段为低熟—成熟,灵峰组下段处于成熟演化阶段。本文研究发现丽水凹陷西次凹灵峰组上段烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段,但局部有高成熟度烃源岩。同样西次凹灵峰组下段烃源岩大部分处于成熟—高成熟阶段,次洼中心局部过成熟;除此之外,近年来丽水的勘探研究过程中对于东次洼与南次洼的烃源岩成熟度有较多的争议,本文通过系统的热演化研究落实了东次洼与南次洼烃源岩热演化特征。丽水凹陷东次洼灵峰组上段烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段,灵峰组下段烃源岩大部分处于成熟阶段,月桂峰组烃源岩大部分处于成熟—高成熟阶段;丽水凹陷南次洼灵峰组上段烃源岩大部分处于未熟—低熟阶段,灵峰组下段烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段,月桂峰组烃源岩大部分处于低熟—成熟阶段,洼陷中央有高成熟烃源岩。

本次研究表明月桂峰组烃源岩大部分都已成熟,可以成为丽水凹陷可靠的油气来源,但截至目前丽水凹陷少有商业规模的油气田被发现。针对丽水凹陷的综合地质研究推测因为主生烃期(56 Ma)与断裂输导体主要发育期(37 Ma)匹配关系不明,加之油气砂岩输导体特征与圈闭有效性研究未完全明确是导致目前少有大型油气田被发现的主要原因。本文综合研究表明丽水凹陷西次凹的中北部烃源岩厚度大,月桂峰组烃源岩成熟度高,生烃强度大,下一步应加强西次凹中北部成藏主控因素研究,以期有更多规模化油气田的发现。

6 结论

(1)研究区钻井BHT(测井井底温度)数据不能直接用于盆地地温场的研究,需要选用合理方法进行校正后才能使用。Waples方法适用于丽水凹陷BHT数据的校正。

(2)丽水凹陷各井所在位置月桂峰组底的温度和丽水凹陷月桂峰组底界T100呈线性正相关关系。现今凹陷边缘地温梯度较高,凹陷中部的地温梯度较低。其中丽水凹陷西次凹、东次凹地温梯度相对较低,最低地温梯度还不到2.7 °C/100 m。

(3)古新统下段月桂峰组底界烃源岩大部分都已成熟,月桂峰组顶界(灵峰组底界)烃源岩大部分

处于低熟—成熟阶段,灵峰组顶界烃源岩处于未熟—低熟状态,仅在西次凹沉积中心,少部分烃源岩成熟。

参考文献 (References)

- [1] 葛和平, 陈志勇, 方来富, 等. 丽水凹陷油气成藏期次探讨[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 44-50. [GE Heping, CHEN Zhiyong, FANG Laifu, et al. A discussion on hydrocarbon accumulation periods in Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 17(1): 44-50.]
- [2] 孙玉梅, 席小应. 东海盆地丽水凹陷油气源对比与成藏史[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 24-28. [SUN Yumei, XI Xiaoying. Petroleum reservoir filling history and oil-source correlation in the Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 24-28.]
- [3] 陈志勇, 吴培康, 吴志轩. 丽水凹陷石油地质特征及勘探前景[J]. 中国海上油气: 地质, 2000, 14(6): 384-391. [CHEN Zhiyong, WU Peikang, WU Zhixuan. Petroleum geology and exploration potential of Lishui Sag [J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2000, 14(6): 384-391.]
- [4] 陈斯忠. 东海盆地主要地质特点及找气方向[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 6-13, 19. [CHEN Sizhong. Main geological characteristics and gas exploration directions in East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 17(1): 6-13, 19.]
- [5] 郭永华, 于水, 葛玲. 东海盆地丽水凹陷LS36-1构造成藏机理研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 29-31. [GUO Yonghua, YU Shui, GE Ling. Formation of the LS36-1 oil and gas structure in the Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 29-31.]
- [6] 李宁. 丽水凹陷西次凹古近系烃源岩热演化特征研究[J]. 长江大学学报: 自科版, 2013, 10(10): 46-48. [LI Ning. Study on the thermal evolution characteristics of hydrocarbon source rocks in Paleogene system of Lishui Sag [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2013, 10(10): 46-48.]
- [7] 冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 33-37. [FENG Xiaojie, CAI Dongsheng, WANG Chunxiu, et al. The meso-cenozoic tectonic evolution in East China Sea Shelf Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2003, 17(1): 33-37.]
- [8] 张田, 张建培, 张绍亮, 等. 平衡剖面技术在东海丽水凹陷构造演化研究中的应用[J]. 上海国土资源, 2014, 35(1): 92-96. [ZHANG Tian, ZHANG Jianpei, ZHANG Shaoliang, et al. An application of the balanced cross-section technique: the tectonic evolution of Lishui Sag, the East China Sea Shelf Basin [J]. Shanghai Land & Resources, 2014, 35(1): 92-96.]
- [9] 田兵, 李小燕, 庞国印, 等. 叠合凹陷盆地沉积体系分析——以东海丽水-椒江凹陷为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 696-705. [TIAN Bing, LI Xiaoyan, PANG Guoyin, et al. Sedimentary systems of the

- superimposed rift-subsidence basin: Taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(4): 696-705.]
- [10] 陈国俊, 李超, 梁建设, 等. 东海陆架盆地瓯江凹陷明月峰组沉积相及沉积特征分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(5): 760-769. [CHEN Guojun, LI Chao, LIANG Jianshe, et al. Sedimentary facies of Mingyuefeng formation in Oujiang Sag, East China Sea Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(5): 760-769.]
- [11] Kauerauf A I, Hantschel T. *Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009: 1-476.
- [12] Lin C S, Zhang Y M, Li S T, et al. Quantitative modelling of multiphase lithospheric stretching and deep thermal history of some tertiary rift basins in eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 324-330.
- [13] He Z Y, Crews S G, Corrigan J. *Rifting and heat flow: Why the McKenzie model is only part of the story*[C]//*Basin Modeling Perspectives: Innovative Developments and Novel Applications*. Hague, Netherlands: AAPG, 2007.
- [14] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2004. [SHI Guangren. *Approaches of Petroleum Basin Modeling*[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- [15] 郝天珧, 徐亚, 胥颐, 等. 对黄海-东海研究区深部结构的一些新认识[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 458-468. [HAO Tianyao, XU Ya, XU Yi, et al. Some new understandings on deep structure in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(2): 458-468.]
- [16] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国大陆及邻区岩石圈地壳三维结构与动力学型式[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 543-557. [CAI Xuelin, ZHU Jieshou, CAO Jiamin, et al. 3D structure and dynamic types of the lithospheric crust in continental China and its adjacent regions [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 543-557.]
- [17] 周海廷, 姜效典, 李德勇, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷岩石圈热流变性质[J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(3): 481-490. [ZHOU Haiting, JIANG Xiaodian, LI Deyong, et al. Thermal-rheological property of lithosphere beneath Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2017, 41(3): 481-490.]
- [18] 高德章, 赵金海, 薄玉玲, 等. 东海及邻近地区岩石圈三维结构研究[J]. *地质科学*, 2006, 41(1): 10-26. [GAO Dezhang, ZHAO Jinhai, BO Yuling, et al. A study on lithosphere 3D structures in the East China Sea and adjacent regions [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(1): 10-26.]
- [19] 江为为, 刘少华, 郝天珧, 等. 应用重力资料估算东海冲绳海槽地壳厚度[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 35-41. [JIANG Weiwei, LIU Shaohua, HAO Tianyao, et al. Using gravity data to compute crustal thickness of East China Sea and Okinawa Trough [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(1): 35-41.]
- [20] 周志远, 高金耀, 吴招才, 等. 东海莫霍面起伏与地壳减薄特征初步分析[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(1): 16-25. [ZHOU Zhiyuan, GAO Jinyao, WU Zhaoai, et al. Preliminary analyses of the characteristics of Moho undulation and crustal thinning in East China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, 31(1): 16-25.]
- [21] 全志刚, 赵志刚, 杨树春, 等. 低勘探程度盆地地源岩热演化及排烃史研究——以东海椒江凹陷为例[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(3): 319-324, 329. [TONG Zhigang, ZHAO Zhigang, YANG Shuchun, et al. Research on thermal evolution and hydrocarbon expulsion history of source rocks in low-exploration basins: a case study on Jiaojiang Sag, East China Sea Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(3): 319-324, 329.]
- [22] 方银霞, 刘建华. 东海的地壳结构特征[J]. *东海海洋*, 2004, 22(3): 9-17. [FANG Yinxia, LIU Jianhua. The crustal structure character of East China Sea [J]. *Donghai Marine Science*, 2004, 22(3): 9-17.]
- [23] 栾锡武, 高德章, 喻普之, 等. 我国东海陆架地区新生代地层的热导率[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(2): 151-159. [LUAN Xiwu, GAO Dezhang, YU Puzhi, et al. Thermal conductivity of the Cenozoic layer of East China Sea Shelf [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(2): 151-159.]
- [24] 栾锡武, 赵一阳, 秦蕴珊, 等. 我国东海陆架地区新生代地层岩石生热率研究[J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 634-639. [LUAN Xiwu, ZHAO Yiyang, QIN Yunshan, et al. Heat generation of the cenozoic layer of East China Sea Shelf [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 634-639.]
- [25] 全志刚, 杨树春, 郝建荣. 盆地模拟技术应用与发展(内部资料). 2011. [TONG Zhigang, YANG Shuchun, HAO Jianrong. Application and development of basin simulation technology(Internal data), 2011.]
- [26] Wygrala B P. *Integrated study of an oil field in the Southern Po Basin, Northern Italy*[D]. Doctor Dissertation of University of Cologne, Germany, 1989.
- [27] 王斌, 赵永强, 罗宇, 等. 塔里木盆地草湖凹陷热演化与生烃史——基于IES软件盆地模拟技术[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(6): 605-609. [WANG Bin, ZHAO Yongqiang, LUO Yu, et al. Thermal evolution and hydrocarbon generation in the Caohu Sag of the Tarim Basin—based on IES basin simulation technology [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(6): 605-609.]
- [28] Waples D W, Ramly M. A statistical method for correcting log-derived temperatures [J]. *Petroleum Geoscience*, 2001, 7(3): 231-240.
- [29] Waples D W, Pacheco J, Vera A. A method for correcting log-derived temperatures in deep wells, calibrated in the Gulf of Mexico [J]. *Petroleum Geoscience*, 2004, 10(3): 239-245.
- [30] 全志刚, 贺清, 何仕斌, 等. 东海西湖凹陷地温场及其对烃源岩的作用[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(5): 466-471, 484. [TONG Zhigang, HE Qing, HE Shibin, et al. Geothermal field and its effect on source rock in the Xihu Sag, the East China Sea Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(5): 466-471, 484.]