

doi:10.3799/dqkx.2017.047

西藏伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩预测与评价

刘一茗¹, 叶加仁¹, 曹 强^{1*}, 刘中戎², 杨宝林¹

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. 中国石化勘探分公司青藏项目部, 四川成都 610041

摘要: 伦坡拉盆地是西藏地区唯一获工业性油气流的盆地, 油气勘探前景广阔, 但其勘探和研究程度均较低, 对古近系牛堡组烃源岩的发育状况认识不清, 制约了盆地油气资源潜力评价和勘探选区。通过研究钻井、测井及相关化验测试等资料, 利用测井多参数回归和盆地数值模拟等方法技术, 分析了牛堡组主要亚段有机质丰度、类型及其展布等特征, 模拟重建了烃源岩的热成熟演化历史, 实现了对伦坡拉盆地牛堡组烃源岩的早期综合评价。研究表明: 伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩发育, 并以牛二段中亚段分布最广、厚度最大, 在蒋日阿错凹陷最厚在 400 m 以上, 其中优质烃源岩($\text{TOC} > 1.0\%$)最厚可达 170 m; 牛堡组总体上属较好级别的烃源岩, 其中牛二段上亚段较好—优质烃源岩所占比例最高, 牛二段中亚段次之; 牛堡组烃源岩有机质类型以 I 型和 II₁ 为主; 有机质成熟度总体呈中西部高、东部低的趋势, 牛二段中亚段烃源岩现今多处于中—晚期生油阶段, 牛二段上亚段和牛三段下亚段烃源岩现今多处于早期生油阶段。牛二段中亚段烃源岩为伦坡拉盆地主力烃源岩, 蒋日阿错凹陷为最重要的生烃凹陷。

关键词: 牛堡组; 烃源岩评价; 有机质丰度; 盆地模拟; 伦坡拉盆地; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2017)04-0601-12

收稿日期: 2016-11-07

Preliminary Prediction and Evaluation of Source Rocks in the Lunpola Basin, Tibet, China

Liu Yiming¹, Ye Jiaren¹, Cao Qiang^{1*}, Liu Zhongrong², Yang Baolin¹

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

2. The Tibetan Projects Department of the SINOPEC Exploration Company, Chengdu 610041, China

Abstract: As the only one basin which oil has come to the industrial standard in Tibet, it is believed that the Lunpola basin extend into rich-oil area, but exploration and investigation activities were limited, so that the development of Niubao Formation, palaeogene, is not clear, which not only limited the evaluation of oil and gas, but also the exploration strategy. Based on the drilling, logging and related laboratory test data, an integrated approach involving the logging regression equation model and basin modeling technique was used to investigate the distribution of source rock, organic matter abundance and types in main period of Niubao Formation, and to reconstruct the source rock thermal evolution history, so an evaluation system for source rocks was presented in Lunpola basin. The following conclusions can be drawn: the Lunpola basin is riched by the source rocks of Niubao Formation, and the middle of the second member of Niubao Formation is widely distributed with large thickness, the date indicates that the source rock thickness in Jiangriacuo sag can reach above 400 m, what's more, the thickness of excellent source rocks ($\text{TOC} > 1.0\%$) can reach more than 170 m; in general, the type of source rocks of Niubao Formation is good, with highest proportion of good-excellent source rock in the upper of the second member of Niubao Formation and lower proportion in the middle of the second member of Niubao Formation; parent material types of source rocks in Niubao Formation are mainly mixed type of type II₁-I and have oil-prone characteristic; the maturities of organic matters are mainly

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2016ZX05024002-003); 中国石化勘探分公司项目(No. G0800-14-KK-169)。

作者简介: 刘一茗(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事含油气盆地分析和油气成藏动力学研究。ORCID: 0000-0003-8424-7718. E-mail: skirose1207@hotmail.com

*** 通讯作者:** 曹强, ORCID: 0000-0002-4086-532X. E-mail: qcqao@cug.edu.cn

引用格式: 刘一茗, 叶加仁, 曹强, 等, 2017. 西藏伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩预测与评价. 地球科学, 42(4): 601-612.

high in the midwest and low in the east, the results indicate that the middle of the second member of Niubao Formation is middle and late mature, the upper of the second member of Niubao Formation and the bottom of the third member of Niubao Formation are immature to early mature to present-day. Therefore, in Lunpola basin, the middle of the second member of Niubao Formation is major source rock and Jiangriacuo sag is the most important hydrocarbon generating sag.

Key words: Niubao Formation; source rock evaluation; organic matter abundance; basin modeling; Lunpola basin; petroleum geology.

随着油气勘探程度的逐渐提高,在成熟探区老层位取得新进展的难度越来越大,那么,扩大勘探领域以满足国民经济增长和人民的需要,则成为我国油气勘探发展的必然趋势(胡文瑞等,2013).我国深层、深水 and 新区等低勘探程度领域油气资源丰富,探明率低,是今后油气“增储上产”的重要研究领域(刘震等,2007;曹强等,2009;雷闯等,2014;霍志鹏等,2016).西藏以其特殊的构造背景和地理位置,成为中外地质学家研究的热点地区和油气勘探的新区.构造上,西藏位于世界上最为重要的油气聚集带——特提斯构造域的东段,在该构造域上分布有波斯湾、高加索等著名的含油气区;地理位置上,西藏地处我国偏远地区,其能源供给一直依赖内地,能源的匮乏严重制约了当地经济的发展.

伦坡拉盆地是西藏地区为数众多的新生代陆相盆地中,已知油气地质条件相对较好,并唯一获得工业性油气流的盆地,但该盆地的油气勘探程度和地质研究程度仍较低,现有钻井多位于盆地边缘或构造高部位,仅有中央凹陷带 10 余口钻井钻遇揭示了古近系牛堡组烃源岩,导致对盆地烃源岩的发育状况认识不清,制约了对盆地的油气资源潜力评价和勘探选区.本文主要基于钻井、测井及烃源岩有机地

化等资料,利用测井多参数回归(王贵文等,1994;杨涛涛等,2013)和盆地数值模拟(石广仁,1994)等技术方法,评价其有机质丰度、类型及热成熟度等特征,预测伦坡拉盆地古近系牛堡组主要亚段优质烃源岩的平面分布,确定盆地主力生烃层系和生烃凹陷,以深化对该区油气前景的认识,为油气勘探选区服务.

1 地质背景

伦坡拉盆地呈东西向展布于西藏自治区班戈县境内,其南、北分别以玛拉炯—蓬错断裂和班公湖—怒江大断裂为界,大致位于 31°50′~32°05′N 和 89°30′~91°40′E,东西长约 220 km,南北宽 15~20 km,面积约 3 600 km².盆地具有“南北分带、东西分块”的构造格局(图 1),自北而南可划分为北部逆冲带、中央凹陷带和南部冲断隆起带 3 个二级构造单元,且各二级构造单元又由更次一级的单元组成,如中央凹陷带自西而东由蒋日阿错凹陷、江加错凹陷和爬错凹陷组成.盆地总体为中间低而南北两侧较高,北部沉降幅度大,沉积厚度大,向南呈斜坡状,呈不对称的箕状盆地.

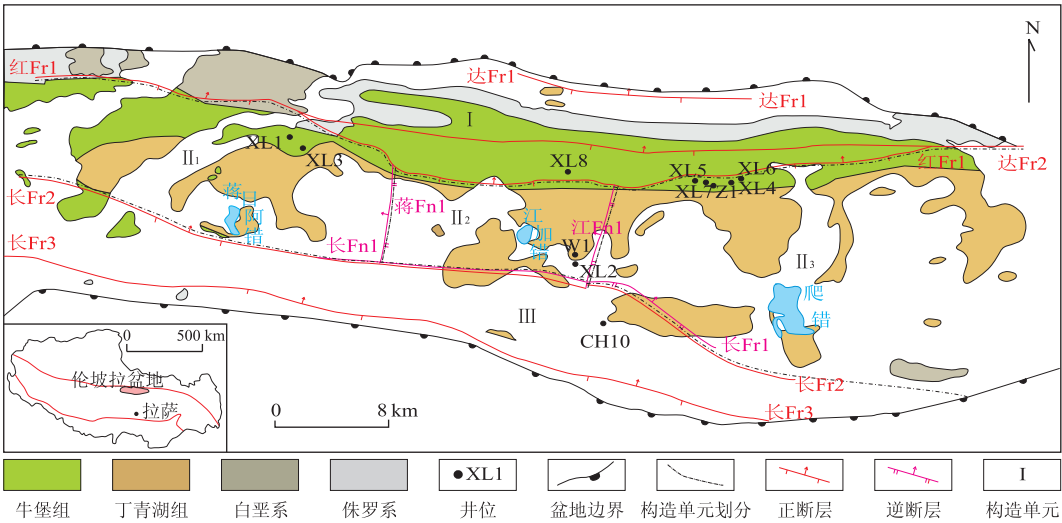


图 1 伦坡拉盆地地理位置及构造单元划分

Fig. 1 Position and division of tectonic units of Lunpola basin

I. 北部逆冲带; II₁. 蒋日阿错凹陷; II₂. 江加错凹陷; II₃. 爬错凹陷; III. 南部冲断隆起带

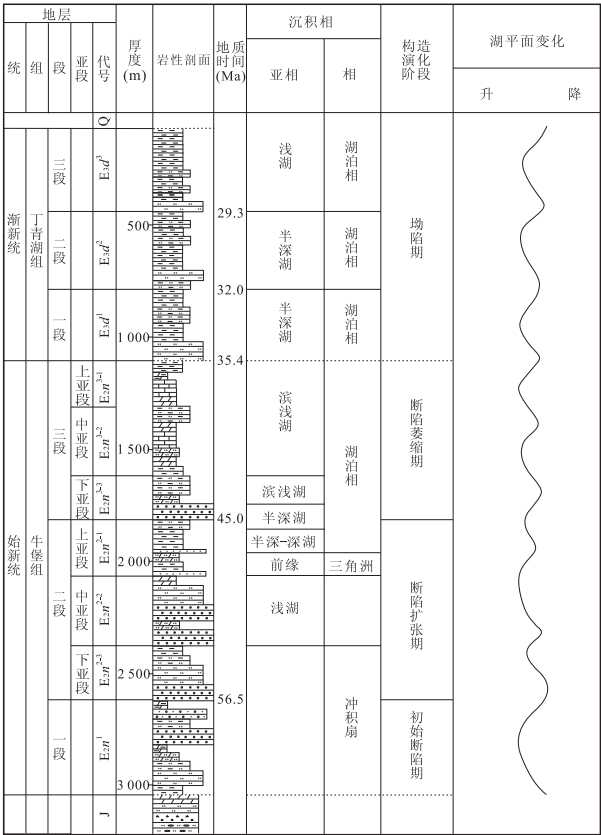


图 2 伦坡拉盆地古近系地层综合柱状图

Fig. 2 Generalized stratigraphic column for the Lunpola basin

伦坡拉盆地基底由古生界和中生界海相碳酸盐岩、碎屑岩、基性火山岩及火山碎屑岩组成。自古近系以后,盆地经历了始新世断陷期、渐新世坳陷期和中新世以后抬升期 3 大构造演化阶段(徐正余等,1983;雷清亮等,1996;艾华国等,1998;赵建成 2011)。盆地在新生代依次沉积了始新统牛堡组(E_2n)、渐新统丁青湖组(E_3d)及第四系(Q)(图 2)。其中,牛堡组(E_2n)为一套棕红色碎屑岩夹灰绿色泥页岩、灰白色泥灰岩,最大沉积厚度达 3 800 m,并自下而上可分为牛堡组一段(E_2n^1)、牛堡组二段(E_2n^2)、牛堡组三段(E_2n^3),其中牛堡组二段和牛堡组三段又可细分为 3 个亚段,构成粒度由粗—细—粗变化、颜色由红—黑—红变化的沉积旋回,在沉积环境上体现在沉积相的变化,洪积河流相—滨浅湖相—半深湖相—浅湖相,呈先变深再变浅的趋势,即是一个水进到水退变化过程;丁青湖组(E_3d)为一套以灰色、深灰色泥页岩为主夹油页岩、泥灰岩及细砂岩的沉积组合,最大沉积厚度达 1 400 m,并自下而上分别为丁青湖组一段(E_3d^1)、丁青湖组二段(E_3d^2)、丁青湖组三段(E_3d^3),构成一套由细变粗的不完整沉积旋回,沉积相主要为半深湖—浅湖相,反应一个水退的变化过程。

现有勘探和研究成果揭示(艾华国等,1998;顾忆等,1999;张克银等,2000;范小军等,2015):始新统牛堡组是伦坡拉盆地的主要烃源岩系,并以牛二段中亚段(E_2n^{2-2})、牛二段上亚段(E_2n^{2-3})及牛三段下亚段(E_2n^{3-1})最为重要,而渐新统丁青湖组由于埋藏浅,热成熟演化程度低,仅底部小部分属于有效烃源岩,多以油页岩存在(Wang *et al.*, 2011; 谢尚克等,2014; Ma *et al.*, 2015),但达不到工业开采价值,因此本文主要针对中央凹陷带牛二段中亚段(E_2n^{2-2})、牛二段上亚段(E_2n^{2-3})及牛三段下亚段(E_2n^{3-1})3 套烃源岩进行预测与评价。

2 有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩优劣的一个重要指标,通常以总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“A”和总烃含量(HC)来表达(表 1),并以 TOC 最为重要和常用。

2.1 基于地球化学资料的有机质丰度评价

由于实测 TOC 大多为现今残余值,何生(2010)指出随着热演化程度和生、排烃量的增加,用残余有机碳来评价烃源岩会引起较大偏差,因此需要对实测 TOC 进行恢复。前人根据大量的实验已发现较为普适性的恢复方法(秦建中等,2007;张辉等,2011;庞雄奇等,2014),本文基于研究区特定的地质背景,对伦坡拉盆地中央凹陷带蒋日阿错凹陷 26 个、江加错凹陷 49 个、爬错凹陷 42 个共计 117 个牛堡组烃源岩数据点,应用庞雄奇(2014)所提出的方法进行残余有机质 TOC 恢复,并采用加权平均的方法进行统计(姜福杰等,2010)。

结果表明:伦坡拉盆地牛堡组烃源岩 ω (TOC)最高可达 3.52%,平均为 0.79%;氯仿沥青“A”的平均值为 0.17%,总烃“HC”含量的平均值为 0.04%。依据烃源岩丰度评价标准(表 1),牛堡组整体上为较好类型的烃源岩。

表 1 烃源岩丰度评价标准

烃源岩类型	有机地化评价指标		
	总有机碳 TOC (%)	氯仿沥青“A” (%)	总烃“HC” (%)
优质	>1.0	>0.10	>0.05
较好	1.0~0.6	0.05~0.10	0.02~0.05
较差	0.6~0.4	0.01~0.05	0.01~0.02
非烃源岩	<0.4	<0.01	<0.01

据黄第藩(1992)修改。

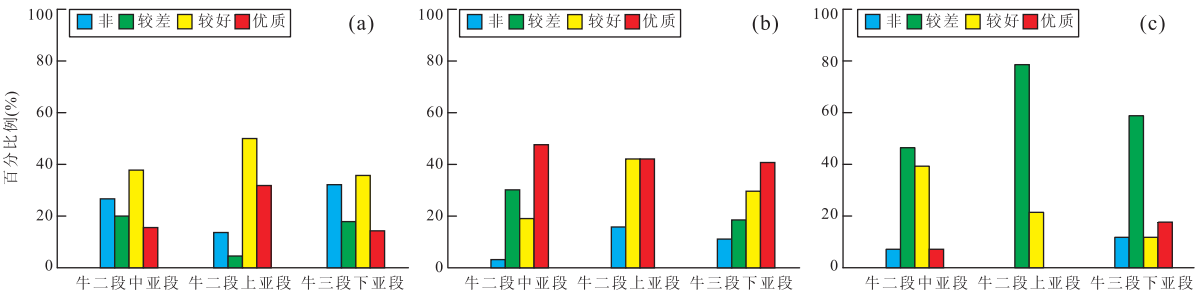


图 3 伦坡拉盆地牛堡组不同层位烃源岩有机质丰度对比

Fig. 3 Organic matter abundance contrast figure in different member of Niubao Formation of Lunpola basin
a. TOC; b. 氯仿沥青“A”; c. 总烃“HC”

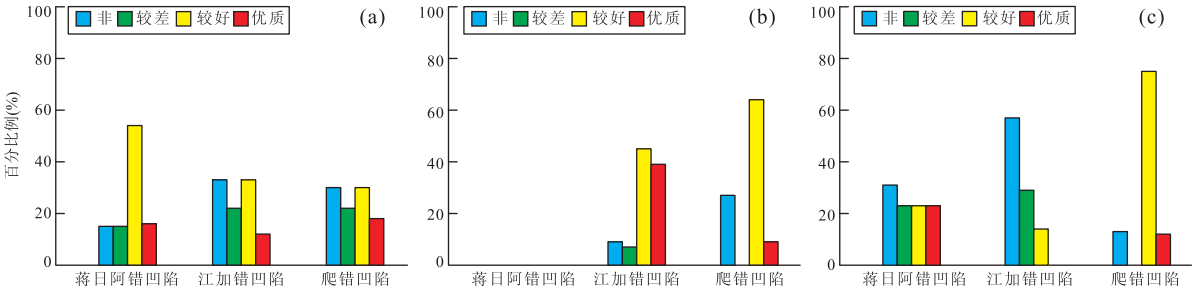


图 4 伦坡拉盆地不同凹陷牛堡组烃源岩有机质丰度(TOC)对比

Fig. 4 Organic matter abundance (TOC) contrast figure Niubao Formation in different sag of Lunpola basin
a. 牛二段中亚段; b. 牛二段上亚段; c. 牛三段下亚段

在细分层位上,从 TOC 分布来看(图 3a),牛二段中亚段 36 个数据点中非、较差、较好和优质级别烃源岩所占比例分别为 26%、20%、37%和 17%;牛二段上亚段 44 个数据点中非、较差级别所占比例有所降低,分别为 13%、6%,较好和优质级别烃源岩分别占 50%和 31%;牛三段下亚段 37 个数据点中非、较差烃源岩所占比例较高,两者合计含量高达 50%,较好和优质烃源岩分别占 35%、15%. 另外,结合氯仿沥青“A”和总烃“HC”含量综合评判(图 3b,3c),牛二段中亚段及牛二段上亚段有机质丰度较高、牛三段下亚段有机质丰度较低。

横向上,牛二段中亚段较好—优质级别烃源岩所占比例在整个中央凹陷带均较高(图 4a),并以蒋日阿错凹陷相对最高,达 69%;爬错凹陷次之,占 48%;江加错凹陷相对最低,为 44%。对牛二段上亚段烃源岩而言(图 4b),其较好—优质级别烃源岩在江加错凹陷所占比例较高,达 85%;但在爬错凹陷所占比例较低,也有 73%;蒋日阿错凹陷缺少该层段烃源岩的测试样品和资料,故不作评价。牛三段下亚段较好—优质级别烃源岩在整个中央凹陷带内差异很大(图 4c);爬错凹陷相对最高,可达 88%;蒋日阿错凹陷次之,占 46%;江加错相对最低,仅 14%。

总之,牛堡组烃源岩有机质丰度由西向东有变差的趋势。

2.2 基于测井资料的有机质丰度和优质烃源岩分布预测

测井参数对岩层有机碳含量和充填孔隙流体物理性质的差异响应是识别烃源岩和预测其有机质丰度的基础。一般地,有机碳含量越高的岩层在测井曲线上的异常越大,通过建立换算定量模型,根据测井曲线异常值就能反算出有机碳含量(许晓宏等, 1998)。伦坡拉盆地实测烃源岩 TOC 数据较少且分散,利用测井资料可计算出连续分布的烃源岩 TOC 值,为定量评价烃源岩提供依据。

目前,利用测井资料评价烃源岩有机质丰度的方法经过了单变量模型至多变量模型的演变,单变量模型有自然伽马测井法、声波时差测井法、电阻率测井法、密度测井法等,多变量模型有 $\Delta \lg R$ 技术(王艳茹等, 2013)、 I_x 指数法(赵彦超等, 1995)、CARBOLOG 法(刘俊民等, 2008)、多参数回归分析法(袁彩萍等, 2014)以及人工神经网络法(朱振宇等, 2002)等。本次研究主要利用自然伽马(GR)、电阻率(RT)、声波时差(AC)、中子孔隙度(CNL)、密度(DEN)等测井曲线的多参数回归分析法来定量

表 2 伦坡拉盆地W1井牛堡组烃源岩TOC测井预测模型优选

Table 2 TOC predication models with Well-W1 logging for mudstones in Lunpola basin

测井参数		总有机碳(TOC)定量预测模型	相关系数	回归估计标准误差
单参数模型	自然伽玛(<i>GR</i>)	TOC=0.011 7 <i>GR</i> -0.460 4	0.408 4	1.294 6
	声波时差(<i>AC</i>)	TOC=0.075 8 <i>AC</i> -4.273 0	0.513 2	1.266 7
	电阻率(<i>RD</i>)	TOC=0.152 4 <i>RD</i> +0.526 5	0.583 9	1.246 5
	密度(<i>DEN</i>)	TOC=37.134 0/ <i>DEN</i> -12.870 0	0.618 4	1.236 1
	中子(<i>CNL</i>)	TOC=0.118 8 <i>CNL</i> -1.476 4	0.483 0	1.274 8
多参数模型	Δ log <i>RD</i> 法	TOC=0.049log <i>RD</i> +0.764 <i>AC</i> -2.793	0.595 6	1.251 0
	<i>I_x</i> 指数法	TOC=0.0001 <i>I_x</i> 其中 <i>I_x</i> =(Δ <i>AC</i> -Δ <i>AC</i> 1)*(Δ <i>GR</i> -Δ <i>GR</i> 1)	0.487 4	1.273 6
	CARBOLOG法	TOC=-0.741 <i>AC</i> +0.058 <i>RD</i> -1/2-2.638	0.548 0	1.286 2
	多参数回归法	TOC= $\frac{(0.003AC+0.010GR+0.172RT+0.088CNL+15.001)}{DEN}$ -6.201	0.851 7	1.136 0

注:参数单位为 TOC(%); *GR*(API); *CNL*(%); *DEN*(g/cm³); *RD*(Ω·m); *AC*(μs/ft).

预测牛堡组烃源岩的 TOC.

以伦坡拉盆地新钻的 W1 井为例,选择牛堡组连续泥岩段共 24 个样品的 TOC 与对应深度的测井曲线参数进行的统计分析表明,牛堡组烃源岩 TOC 与声波时差(*AC*)、自然伽马(*GR*)、深侧向电阻率(*RD*)、中子孔隙度(*CNL*)4 种测井曲线参数均存在正相关关系,相关系数分别为 0. 51、0. 41、0. 58、0. 48;而与密度(*DEN*)测井曲线参数存在负相关关系,相关系数为 0. 62. 说明 TOC 与这 5 种测井参数的相关性比较接近,但总体上不高,相关系数均小于 0. 70. 为此,运用多元统计分析软件(SPSS),以 24 个牛堡组泥岩样品的 TOC 为因变量,以样品点相同深度的 *AC*、*GR*、*RD*、*CNL*、*DEN* 等测井曲线参数为自变量,进行了烃源岩 TOC 定量预测模型的优选(表 2). 显然,TOC 与多测井曲线参数的拟合效果明显优于单测井曲线参数,而且拟合效果随着测井曲线参数数量的增加而逐步提高,五元回归方程模型的相关系数最高,回归估计标准误差最小,属于最佳模型.

因此,本次研究选用以下模型来预测 W1 井牛堡组泥岩的 TOC 值:

$$\text{TOC} = \frac{(0.003AC+0.010GR+0.172RT+0.088CNL+15.001)}{DEN} - 6.201.$$

(1)

预测 TOC 数据与实测 TOC 数据的对比分析表明(表 3),两者间误差多小于 10%,表明本次预测模型具有较高的精度.

同样,应用该方法对中央凹陷带资料较全的 7 口井牛堡组烃源岩的 TOC 值进行了定量预测,并

表 3 伦坡拉盆地 W1 井牛堡组烃源岩 TOC 预测精度分析

Table 3 The analysis on precision of TOC predication of the Niubao Formation of Well-W1 in Lunpola basin

深度(m)	TOC 实测值	TOC 预测值	绝对误差	相对误差(%)
1 848. 2	0. 99	1. 02	0. 03	3. 0
1 848. 7	1. 57	1. 64	0. 07	4. 5
1 849. 2	0. 98	1. 01	0. 03	3. 1
1 849. 7	1. 09	1. 12	0. 03	2. 8
1 850. 1	1. 55	1. 64	0. 09	5. 8
1 850. 7	1. 05	1. 10	0. 05	4. 8
1 851. 2	0. 89	0. 94	0. 05	5. 6
1 851. 7	0. 94	0. 96	0. 02	2. 1
1 852. 7	3. 18	3. 52	0. 34	10. 7
1 853. 1	1. 15	1. 12	-0. 03	2. 6
1 853. 7	1. 30	1. 42	0. 12	9. 2
1 854. 3	0. 78	0. 91	0. 13	16. 7
1 854. 8	0. 77	0. 88	0. 11	14. 3
1 855. 1	0. 72	0. 81	0. 09	12. 5
1 855. 7	0. 64	0. 71	0. 07	10. 9
1 856. 2	0. 74	0. 76	0. 02	2. 7
1 856. 7	0. 54	0. 56	0. 02	3. 7
1 857. 1	0. 88	0. 79	-0. 09	10. 2
1 948. 2	0. 74	0. 69	-0. 05	6. 8
1 948. 6	1. 03	1. 21	0. 18	17. 5
1 949. 1	0. 76	0. 78	0. 02	2. 6
1 950. 9	1. 01	1. 13	0. 12	11. 9
1 951. 6	0. 23	0. 24	0. 01	4. 3
1 952. 1	0. 33	0. 35	0. 02	6. 1

在此基础上,结合有机质丰度的评价标准(表 1),统计了各单井牛堡组不同层位烃源岩中非、较差、较好和优质级别烃源岩的厚度及其所占比例(表 4).

结果显示(表 4),层位上,3 套烃源岩中较好—优质级别的厚度均占相应层位泥岩厚度的 95% 以上,说明伦坡拉盆地中央凹陷带烃源岩发育良好,生

表 4 伦坡拉盆地代表性单井牛堡组烃源岩厚度预测结果

Table 4 Prediction thickness of the source rocks of Niubao Formation in representative wells in Lunpola basin

凹陷	井名	层位	泥岩厚度 (m)	非烃源岩		较差烃源岩		较好烃源岩		优质烃源岩	
				厚度 (m)	比例 (%)	厚度 (m)	比例 (%)	厚度 (m)	比例 (%)	厚度 (m)	比例 (%)
蒋日阿错	XL3	E ₂ n ³⁻¹	123.11	0	0	0.33	0.27	85.46	69.42	37.32	30.31
		E ₂ n ²⁻³	168.50	0	0	0	0	67.19	39.88	101.31	60.12
		E ₂ n ²⁻²	496.32	0	0	1.31	0.26	324.74	65.43	170.26	34.30
江加错	W1	E ₂ n ³⁻¹	44.47	0	0	1.43	3.22	10.91	24.53	32.13	72.25
		E ₂ n ²⁻³	124.58	0	0	7.27	5.84	29.66	23.81	87.65	70.36
		E ₂ n ²⁻²	238.20	0	0	2.71	1.14	99.60	41.81	135.89	57.05
	XL2	E ₂ n ³⁻¹	59.09	0	0	1.52	2.57	57.58	97.44	0	0
		E ₂ n ²⁻³	74.90	0	0	6.22	8.30	68.41	91.34	0.27	0.36
		E ₂ n ²⁻²	86.04	0	0	11.33	13.17	74.71	86.84	0	0
	XL8	E ₂ n ³⁻¹	34.31	1.16	3.38	0.63	1.84	17.77	51.79	14.75	42.99
		E ₂ n ²⁻³	83.94	0.13	0.15	1.29	1.54	58.53	69.73	23.99	28.58
		E ₂ n ²⁻²	135.92	0	0	1.11	0.82	75.59	55.61	59.22	43.57
爬错	Z1	E ₂ n ³⁻¹	53.30	0	0	3.76	7.05	36.12	67.77	13.42	25.18
		E ₂ n ²⁻³	56.20	1.04	1.85	1.47	2.62	45.12	80.28	8.57	15.25
		E ₂ n ²⁻²	399.20	15.66	3.92	21.61	5.41	287.16	71.93	74.77	18.73
	XL4	E ₂ n ³⁻¹	50.87	0	0	0	0	13.16	25.87	37.71	74.13
		E ₂ n ²⁻³	130.05	2.45	1.88	7.03	5.41	57.17	43.96	63.41	48.76
		E ₂ n ²⁻²	56.98	2.14	3.76	2.21	3.88	17.99	31.57	34.64	60.79
	XL5	E ₂ n ³⁻¹	12.37	0	0	0.19	1.54	12.19	98.53	0	0
		E ₂ n ²⁻³	97.01	0	0	0.29	0.30	94.07	96.97	2.29	2.73
		E ₂ n ²⁻²	209.69	0	0	0	0	208.26	99.32	0.93	0.68

烃潜力巨大;其中,牛二段中亚段较好—优质烃源岩最厚,平均为 223 m,占该层位泥岩厚度的 95%,且优质烃源岩厚度可达 68 m;牛二段上亚段较好—优质烃源岩厚度较小,平均为 101 m,占该层位泥岩厚度的 96%,且优质烃源岩厚度可达 41 m;牛三段下亚段较好—优质烃源岩最薄,平均仅有 53 m,占该层位泥岩厚度的 97%,且优质烃源岩厚度可达 20 m. 横向上,蒋日阿错凹陷牛堡组较好—优质烃源岩最厚,达 785 m,所占比例也最高,达 99%,且优质烃源岩厚度可达 308 m;江加错凹陷次之,平均也有 282 m,占比可达 96%,且优质烃源岩厚度可达 118 m;爬错凹陷较好—优质烃源岩最薄,平均有 273 m,占比仅 77%,且优质烃源岩厚度可达 78 m. 另外,较好—优质烃源岩主要分布于靠近盆地深凹(中心)处,以江加错凹陷为例,W1 井靠近盆地中心,其较好—优质烃源岩厚度可达 395 m,而位于盆地边缘的 XL2 井的较好—优质烃源岩厚度则不足 200 m.

在上述单井烃源岩 TOC 预测和优质烃源岩所占比例统计的基础上,结合区域地质背景及沉积相分布等成果,本次研究对牛堡组优质烃源岩的平面分布进行了预测(图 5). 显然,层位上,牛二段中亚段优质烃源岩最厚(图 5a),为 100~160 m;牛二段

上亚段次之(图 5b),为 50~100 m;牛三段下亚段相对最薄(图 5c),多为 20~40 m. 横向上,蒋日阿错凹陷优质烃源岩厚度最厚,江加错凹陷次之,爬错凹陷最薄.

总体上,测井资料预测的有机质丰度与地化资料评价的有机质丰度在结果上具有一致性. 综合分析表明,层位上,牛二段中亚段为较好—优质烃源岩最发育的层位;横向上,蒋日阿错凹陷优质烃源岩最厚,且分布最为广泛,为生烃潜力最大的凹陷.

3 有机质类型

何生(2010)指出烃源岩有机质类型不同,其生烃潜力、产物类型及性质也不同,生油门限值和生烃过程也有一定的差别. 本次研究基于有机地球化学资料,主要应用于酪根元素分析和显微组分分析等方法来判断有机质类型.

干酪根元素分析表明(图 6),牛二段中亚段烃源岩 H/C 原子比与 O/C 原子比分布范围均较宽,前者分布在 0.74~1.48,后者分布在 0.08~0.22,从范氏图投点结果来看,牛二段中亚段 I 型、II₁ 型、II₂ 型、III 型干酪根均有,分别占 11.1%、66.7%、11.1%、11.1%;牛二段上亚段样品 H/C 原

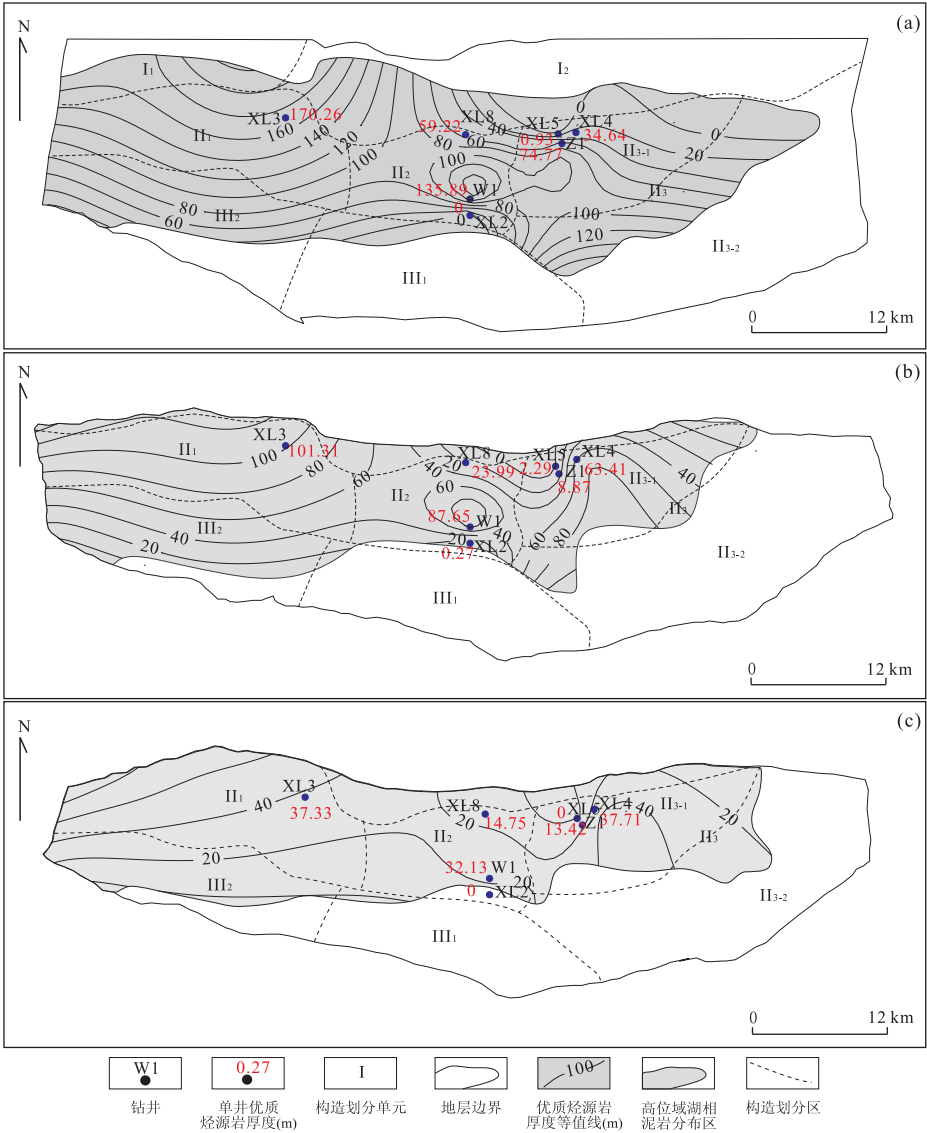


图 5 伦坡拉盆地牛堡组优质烃源岩平面分布

Fig. 5 Predicted thickness of high quality source rock of Niubao Formation in Lunpola basin
a. 牛二段中亚段; b. 牛二段上亚段; c. 牛三段下亚段

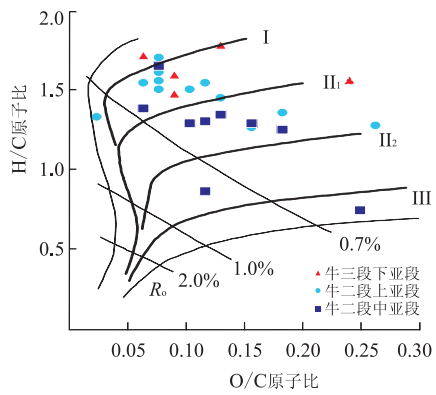


图 6 伦坡拉盆地烃源岩有机质类型判别

Fig. 6 Type of organic matter of the source rocks in the Lunpola basin

子比分布相对较为集中,但 O/C 原子比分布范围较宽,前者分布在 1.21~1.50,后者分布在 0.05~0.24,其干酪根类型以 I 型和 II₁ 型为主,且分占 41.6%和 58.4%;牛三段下亚段样品 H/C 原子比、O/C 原子比分布范围与牛二段上亚段较为相似,分别为 1.34~1.56 和 0.08~0.30,干酪根类型也以 I 型和 II₂ 型为主。

有机显微组分分析结果揭示(表 5),伦坡拉盆地牛堡组各亚段烃源岩的有机质显微组分均以腐泥组为主,且变化范围较小(80.30%~95.89%,平均为 88.32%),而其它组分含量均在 5%以下。基于干酪根显微组分相对质量分数计算出的类型指数(TI)分布范围为 65.53~95.32,反映出牛堡组烃源

表 5 伦坡拉盆地牛堡组烃源岩显微组分及有机质类型

Table 5 Microcomponents and kerogen types of the Niubao Formation in the Lunpola basin									
凹陷	井名	样品深度 (m)	层位	干酪根显微组分相对质量分数(%)				类型指数 (TI)	类型
				腐泥组	壳质组	惰性组	镜质组		
蒋日阿错	XL1	297.25	E_2n^{3-2}	94.08	1.23	1.23	3.45	90.88	I
		815.00	E_2n^{2-2}	95.43	0.21	0.87	3.48	92.05	I
		900.00	E_2n^{2-2}	85.71	2.14	5.00	7.14	76.43	II ₁
江加错	W1	1 749.90	E_2n^{3-1}	85.70	0.00	0.00	14.30	74.98	II ₁
		1 751.00	E_2n^{3-1}	84.00	0.00	0.00	16.00	72.00	II ₁
		1 752.10	E_2n^{3-1}	84.30	0.00	0.00	15.70	72.53	II ₁
		1 752.80	E_2n^{3-1}	88.00	0.00	0.00	12.00	79.00	II ₁
		1 753.80	E_2n^{3-1}	82.70	0.00	0.00	17.30	69.73	II ₁
		1 755.00	E_2n^{3-1}	84.30	0.30	0.00	15.40	72.90	II ₁
		1 756.00	E_2n^{3-1}	80.30	0.00	0.00	19.70	65.53	II ₁
		1 756.90	E_2n^{3-1}	85.30	0.30	0.00	14.40	74.65	II ₁
	XL2	940.32	E_2d	95.50	0.21	2.45	1.84	91.78	I
		1 305.00	E_2n^{3-2}	95.89	0.56	0.75	2.80	93.32	I
爬错	Z1	1 780.00	E_2n^{2-3}	93.63	1.03	1.03	4.31	89.89	I
		1 994.00	E_2n^{2-2}	89.96	0.40	2.82	6.82	82.23	I

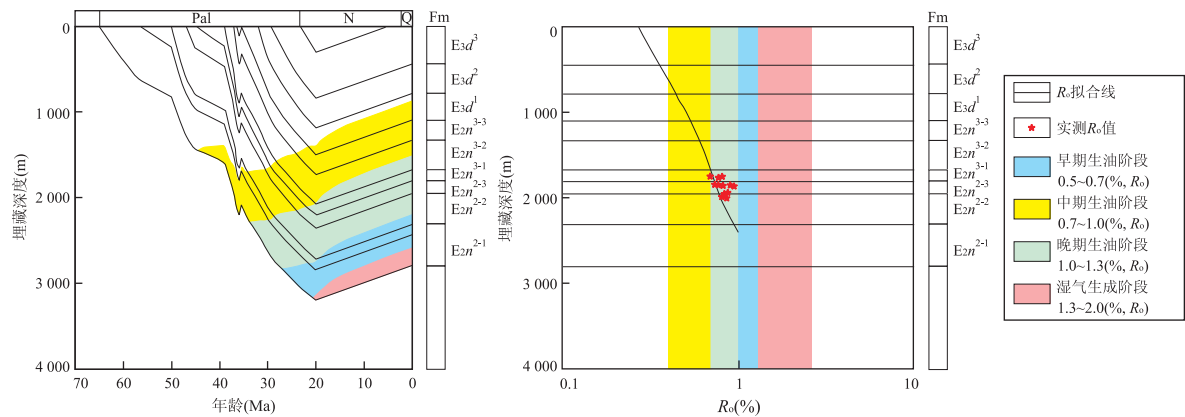


图 7 伦坡拉盆地 W1 井烃源岩成熟度模拟

Fig. 7 The maturity modeling of Well W1 in Lunpola basin

a. 成熟度演化史; b. 模拟值与实测值对比

岩有机质类型以生油的 I 型和 II₁ 型为主。

4 烃源岩成熟度

成熟度是有机质在地质历史演化过程中对时、温增加的综合效应。烃源岩只有在埋藏到一定深度、经历一定热演化后才能进入生油窗,生成油气。衡量烃源岩成熟度的指标有很多(Suzuki *et al.* , 1993; Kontorovich *et al.* , 2013; Bouaziz *et al.* , 2015)。本次研究在地层埋藏史与热史定量恢复的基础上(林松,2012; 马鹏飞等, 2013),选用 Basin Mod 软件 EASY%R_o 模型模拟重建了伦坡拉盆地 12 口钻井和 8 口虚拟井牛堡组烃源岩的热成熟演化历史。

以 W1 井为例,牛二段中亚段烃源岩在始新世

末期(37.5 Ma)开始进入早期生油阶段($R_o = 0.5\%$)(图 7a),在渐新世中期(29 Ma)开始进入中期生油阶段($R_o = 0.7\% \sim 1.0\%$),在中新世初期(19 Ma)底部开始进入晚期生油阶段($R_o = 1.0\% \sim 1.3\%$),现今大部分仍均处于中期生油阶段;牛二段上亚段烃源岩在渐新世中期(30.5 Ma)开始进入早期生油阶段,在渐新世末期(23 Ma)开始进入中期生油阶段,现今仍处于该阶段;牛三段下亚段烃源岩在渐新世中期(约 30 Ma)开始进入早期生油阶段,在中新世初期(22 Ma)开始进入中期生油阶段,现今仍处于该阶段。对比该井烃源岩镜质体反射率(R_o)模拟值与实测值(图 7b),二者拟合效果良好,表明本次模拟具有较高的精度。以前述 20 口单井热成熟度模拟为基础,结合 20 条二维地震剖面烃源岩

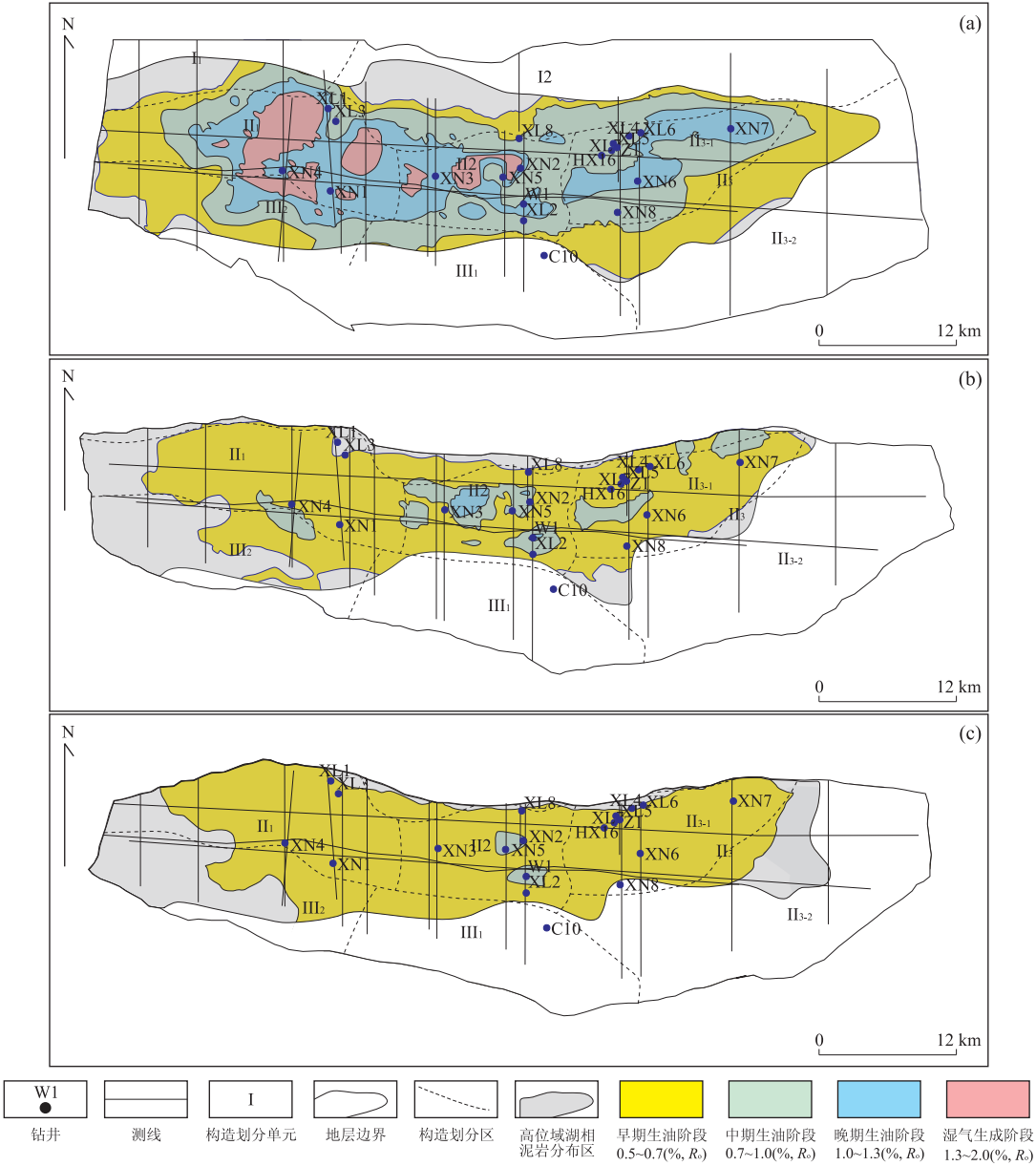


图 8 伦坡拉盆地牛堡组烃源岩(底界)有机质现今成熟度平面分布
Fig. 8 The maturity prediction on major source rocks in Lunpola basin
a. 牛二段中亚段; b. 牛二段上亚段; c. 牛三段下亚段

成熟度模拟结果,本次研究刻画了牛堡组 3 套主要烃源岩的成熟度平面分布(图 8).

总体上,伦坡拉盆地牛堡组各亚段烃源岩成熟度具有中西部高、东部低的趋势(图 8). 其中,牛二段中亚段烃源岩有机质成熟度总体较高(图 8a),在中央凹陷带均已进入了成熟生烃门限($R_o = 0.5\%$),现今多处于中—晚期生油阶段($R_o = 0.7\% \sim 1.3\%$),其中在西部蒋日阿错凹陷和中部江加错凹陷的中心部位已进入湿气生成阶段($R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$);牛二段上亚段烃源岩和牛三段下亚段烃源岩由于埋藏较浅且经历的热演化时间较短,

其有机质成熟度总体较低(图 8b, 8c),在中央凹陷带现今多处于早期生油阶段,但在爬错凹陷东南侧和蒋日阿错凹陷西侧至今尚未进入生油门限($R_o = 0.5\%$),而在江加错凹陷中部牛二段上亚段烃源岩局部已达晚期生油阶段.

5 结论

(1) 伦坡拉盆地始新统牛堡组烃源岩发育,并以牛二段中亚段分布最广、厚度最大,在蒋日阿错凹陷最厚在 400 m 以上,其中优质烃源岩($TOC >$

1.0%)最厚可达 170 m. 牛堡组总体上属较好级别的烃源岩,其中牛二段中亚段和牛二段上亚段较好—优质烃源岩所占比例较高,牛三段下亚段次之.

(2)牛堡组烃源岩有机质类型以 I 型和 II₁ 为主;有机质成熟度总体呈中西部高、东部低的趋势,牛二段中亚段烃源岩现今多处于中—晚期生油阶段,牛二段上亚段和牛三段下亚段烃源岩现今多处于早期生油阶段.

(3)综合评价表明,牛二段中亚段烃源岩为伦坡拉盆地主力烃源岩,蒋日阿错凹陷为中生代生烃凹陷.

(4)测井多参数回归及盆地模拟技术的综合利用是预测和评价西藏伦坡拉盆地烃源岩分布和成熟度的一种可行的方法,为研究低勘探程度烃源岩的早期预测与评价提供了新思路,可以推广应用到其他低勘探程度区域.

References

- Ai, G. H., Lan, L. Y., Zhu, H. Q., et al., 1998. The Forming Mechanism and Petroleum Geology of Tertiary Lunpola Basin, Tibet. *Acta Petrolei Sinica*, 19(2): 32—38 (in Chinese with English abstract).
- Bouaziz, A., Asmi, A. M. E., Skanji, A., et al., 2015. A New Borehole Temperature Adjustment in the Jeffara Basin (South-East Tunisia): Inferred Source Rock Maturation and Hydrocarbon Generation via 1D Modelin. *AAPG Bulletin*, 99(9): 1649—1669. doi: 10.1306/03091514148
- Cao, Q., Ye, J. R., Shi, W. Z., et al., 2009. Preliminary Prediction and Evaluation of Source Rocks in Low-Exploration Basins: A Case Study on the Northeast Sag of the Northern South Yellow Sea Basin in China. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 523—529 (in Chinese with English abstract).
- Fan, X. J., Pan, L., Li, F., et al., 2015. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Play Fairways of the Paleogene in Lunpola Basin, Tibet. *Oil & Gas Geology*, 36(3): 362—369 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Y., Shao, Z. B., Ye, D. L., et al., 1999. Characteristics of Source Rocks and Resource Prospect in the Lunpola Basin, Tibet. *Experimental Petroleum Geology*, 21(4): 340—345 (in Chinese with English abstract).
- He, S., 2010. Oil and Natural Gas Geology. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Hu, W. R., Bao, J. W., Hu, B., 2013. Trend and Progress in Global Oil and Gas Exploration. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 409—413 (in Chinese with English abstract).
- Huo, Z. P., Jiang, T., Pang, X. Q., 2016. Evaluation of Deep Carbonate Source Rocks with Low TOC and Contribution to Oil-Gas Accumulation in Tazhong Area, Tarim Basin. *Earth Science*, 41(12): 2061—2074 (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).
- Kontorovich, A. E., Burshtein, L. M., Malyshev, N. A., et al., 2013. Historical-Geological Modeling of Hydrocarbon Generation in the Mesozoic-Cenozoic Sedimentary Basin of the Kara Sea (Basin Modeling). *Russian Geology & Geophysics*, 54(8): 917—957. doi: 10.1016/j.rgg.2013.07.011
- Lei, Q. L., Fu, X. Y., Lu, Y. P., 1996. Petroleum Geological Features of Tertiary Terrestrial Lunpola Basin, Xizang (Tibet). *Earth Science*, 21(2): 168—173 (in Chinese with English abstract).
- Lei, C., Ye, J. R., Wu, J. F., et al., 2014. Dynamic Process of Hydrocarbon Accumulation in Low-Exploration Basins: A Case Study of Xihu Depression. *Earth Science*, 39(7): 837—847 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., 2012. Provenance and Subsidence Analysis for Lunpola Basin in Central Tibet (Diserrtation), China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Shan, H. Q., Li, J. H., et al., 2007. A Review of Indicators of Thermal Evolution of Source Rocks. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(3): 379—384 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. M., Peng, P. A., Huang, K. Q., et al., 2008. An Improvement in CARBOLOG Technique and Its Preliminary Application to Evaluating Organic Carbon Content of Source Rocks. *Geochimica*, 37(6): 581—586 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z., Chang, M., Zhao, Y., et al., 2007. Method of Early Prediction on Source Rocks in Basins with Low Exploration Activity. *Earth Science Frontiers*, 14(4): 159—167 (in Chinese with English abstract).
- Ma, P., Wang, L., Wang, C., et al., 2015. Organic-Matter Accumulation of the Lacustrine Lunpola Oil Shale, Central Tibetan Plateau: Controlled by the Paleoclimate, Provenance, and Drainage System. *Coal Geology*, 11(2): 58—70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.011>
- Ma, P. F., Wang, L. C., Ran, B., 2013. Subsidence Analysis of the Cenozoic Lunpola Basin, Central Qinghai-Tibetan

- Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 990—1002.
- Pang, X. Q., Li, Q. W., Chen, J. F., et al., 2014. Recovery Method of Original TOC and Its Application in Source Rocks at High Mature-Over Mature Stage in Deep Petroliferous Basins. *Journal of Palaeogeography*, 16(6): 769—789 (in Chinese with English abstract).
- Qing, J. Z., Zheng, L. J., Teng, G. E., 2007. Study on the Restitution Coefficient of Original Total Organic Carbon for High Mature Marine Hydrocarbon Source Rocks. *Earth Science*, 32(6): 853—860 (in Chinese with English abstract).
- Rao, S., Zhu, C. Q., Wang, Q., et al., 2013. Thermal Evolution Patterns of the Sinian-Lower Paleozoic Source Rocks in the Sichuan Basin, Southwest China. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(5): 1549—1559 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., 1994. Numerical Methods of Petroliferous Basin Modeling. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Suzuki, N., Matsubayashi, H., Waples, D. W., 1993. A Simpler Kinetic Model of Vitrinite Reflectance. *AAPG Bulletin*, 77(9): 1502—1508. doi: 10.1306/BDF8ECA—1718—11D7—8645000102C1865D
- Tong, Z. G., Zhao, Z. G., Yang, S. C., et al., 2012. 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. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(3): 319—324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. W., Zhu, Z. Y., Zhu, G. Y., et al., 1994. Logging Identification and Evaluation of Cambrian-Ordovician Source Rocks in Syncline of Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 29(4): 50—52 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Wang, C., Li, Y., et al., 2011. Sedimentary and Organic Geochemical Investigation of Tertiary Lacustrine Oil Shale in the Central Tibetan Plateau: Palaeolimnological and Palaeoclimatic Significances. *Coal Geology*, 11(6): 254—265.
- Wang, Y. R., Liu, L. F., Yang, L. P., et al., 2013. Logging Evaluation of Organic Carbon Content of Chang 7 Source Rocks in Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 25(4): 78—82 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. F., Yang, S. C., Zhang, G. C., et al., 2013. Geothermal History and Thermal Evolution of the Source Rocks in the Deep-Water Area of the Northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(1): 170—180 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. K., Du, B. W., Wang, J., et al., 2014. Geochemical Characteristics of Oil Shale Member of Dingqinghu Formation in Lunpola Basin of Tibet and Their Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 503—510 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Y., Rao, K. M., Lian, Y. Q., et al., 1983. Geotectonic Attributes and Tectonic Evolution of the Lunpola Area, Xizang (Tibet). *Regional Geology of China*, 3(1): 90—98 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. H., Huang, H. P., Lu, S. N., 1998. A Quantitative Relationship between Well Logging Information and Organic Carbon Content. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 20(3): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. T., Fan, G. Z., Lü, F. L., et al., 2013. The Logging Features and Identification Methods of Source Rock. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 414—422 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C. P., Xu, S. H., Xue, L., 2014. Prediction and Evaluation with Logging of Main Source Rocks in Huizhou Sag. *Pearl River Mouth Basin, Petroleum Geology & Experiment*, 36(1): 110—116 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Peng, P. A., 2011. Study on the Recovery of Original Organic Carbon Content of Source Rock. *Geochimica*, 40(1): 56—62 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. Y., Mou, Z. H., Zhu, H. Q., et al., 2000. Analysis of the Dynamic System for Forming Reservoirs in Lunpola Basin (Tibet). *Xinjiang Petroleum Geology*, 21(2): 93—96 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. C., 2011. A Study on the Structural Characters of the Lunpoia Basin in Tibet (Dissertration). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. C., Ma, Z., Yao, G. Q., 1995. Using Waxman-Smith Equation to Evaluate Source Rock: Overlay and Dual Porosity Methods. *Earth Science*, 20(3): 306—313 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. Y., Wang, G. W., Zhu, G. Y., 2002. The Application of Artificial Neural Network to the Source Rocks Evaluation. *Progress in Geophysics*, 17(1): 137—140 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 艾华国, 兰林英, 朱宏权, 等, 1998. 伦坡拉第三纪盆地的形成机理和石油地质特征. *石油学报*, 19(2): 32—38.
- 曹强, 叶加仁, 石万忠, 等, 2009. 低勘探程度盆地烃源岩早期评价——以南黄海北部盆地东北凹为例. *石油学报*, 30

- (4): 522—529.
- 范小军, 潘磊, 李凤, 等, 2015. 西藏伦坡拉盆地古近系油藏成藏机理及有利区带预测. 石油与天然气地质, 36(3): 362—369.
- 顾忆, 邵志兵, 叶德燎, 等, 1999. 西藏伦坡拉盆地烃源岩特征及资源条件. 石油实验地质, 21(4): 340—345.
- 何生, 2010. 石油及天然气地质学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 胡文瑞, 鲍敬伟, 胡滨, 2013. 全球油气勘探进展与趋势. 石油勘探与开发, 40(4): 409—413.
- 霍志鹏, 姜涛, 庞雄奇, 2016. 塔中地区深层低丰度碳酸盐岩有效烃源岩评价及其对油气藏贡献. 地球科学, 41(12): 2061—2074.
- 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.
- 雷闯, 叶加仁, 吴景富, 等, 2014. 低勘探程度盆地成藏动力学过程: 以西湖凹陷中部地区为例. 地球科学, 39(7): 837—847.
- 雷清亮, 付孝悦, 卢亚平, 1996. 伦坡拉第三纪陆相盆地油气地质特征分析. 地球科学, 21(2): 168—173.
- 李鑫, 尚鸿群, 李继宏, 等, 2007. 烃源岩热演化指标研究现状. 新疆石油地质, 28(3): 379—384.
- 林松, 2012. 西藏伦坡拉盆地物源区与沉降史研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 刘俊民, 彭平安, 黄开权, 等, 2008. 改进评价生油岩有机质含量的 CARBOLOG 法及其初步应用. 地球化学, 37(6): 581—586.
- 刘震, 常迈, 赵阳, 等, 2007. 低勘探程度盆地烃源岩早期预测方法研究. 地学前缘, 14(4): 159—167.
- 马鹏飞, 王立成, 冉波, 2013. 青藏高原中部新生代伦坡拉盆地沉降史分析. 岩石学报, 29(3): 990—1002.
- 庞雄奇, 李倩文, 陈践发, 等, 2014. 含油气盆地深部高过成熟烃源岩古 TOC 恢复方法及其应用. 古地理学报, 16(6): 769—789.
- 秦建中, 郑伦举, 腾格尔, 2007. 海相高演化烃源岩总有机碳恢复系数研究. 地球科学, 32(6): 853—860.
- 饶松, 朱传庆, 王强, 等, 2013. 四川盆地震旦系一下古生界烃源岩热演化模式及主控因素. 地球物理学报, 56(5): 1549—1559.
- 石广仁, 1994. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社.
- 全志刚, 赵志刚, 杨树春, 等, 2012. 低勘探程度盆地烃源岩热演化及排烃史研究——以东海椒江凹陷为例. 石油实验地质, 34(3): 319—324.
- 王贵文, 朱振宇, 朱广宇, 等, 1994. 烃源岩测井识别与评价方法研究. 石油勘探与开发, 29(4): 50—52.
- 王艳茹, 刘洛夫, 杨丽萍, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩有机碳测井评价. 岩性油气藏, 25(4): 78—82.
- 吴景富, 杨树春, 张功成, 等, 2013. 南海北部深水盆地热历史及烃源岩热演化研究. 地球物理学报, 56(1): 170—180.
- 谢尚克, 杜佰伟, 王剑, 等, 2014. 西藏伦坡拉盆地丁青湖组页岩地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 33(3): 503—510.
- 徐正余, 饶克敏, 连玉秋, 1983. 西藏伦坡拉地区的大地构造属性与构造演化. 中国区域地质, 3(1): 90—98.
- 许晓宏, 黄海平, 卢松年, 1998. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究. 江汉石油学院学报, 20(3): 11—15.
- 杨涛涛, 范国章, 吕福亮, 等, 2013. 烃源岩测井响应特征及识别评价方法. 天然气地球科学, 24(2): 414—422.
- 袁彩萍, 徐思煌, 薛罗, 2014. 珠江口盆地惠州凹陷主力烃源岩测井预测及评价. 石油实验地质, 36(1): 110—116.
- 张辉, 彭平安, 2011. 烃源岩有机碳含量恢复探讨. 地球化学, 40(1): 56—62.
- 张克银, 牟泽辉, 朱宏权, 等, 2000. 西藏伦坡拉盆地成藏动力学系统分析. 新疆石油地质, 21(2): 93—96.
- 赵建成, 2011. 西藏伦坡拉盆地构造特征研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 赵彦超, 马正, 姚光庆, 1995. Waxman-Smith 方程在生油岩评价中的应用: 重叠法和双孔隙度法. 地球科学, 20(3): 306—313.
- 朱振宇, 王贵文, 朱广宇, 2002. 人工神经网络法在烃源岩测井评价中的应用. 地球物理学进展, 17(1): 137—140.