第 30 卷第 3 期 地 质 与 资 源 Vol. 30 No. 3
2021 年 6 月 GEOLOGY AND RESOURCES Jun. 2021
文章编号:1671-1947(2021)03-0395-10 中图分类号:P618.13;TE155 开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.03.022 文献标志码:A

松辽盆地齐家和古龙凹陷页岩油含油性参数优选与资源量计算

肖 飞[1],杨建国[1],李士超[1],姚玉来[1],李 昂[1],张丽艳[1],黄一鸣[1],冉清昌[2,3]
1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034; 2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163318; 3. 东北石油大学 非常规油气研究院,黑龙江 大庆 163318

摘 要: 松辽盆地齐家和古龙凹陷青山口组一段页岩油资源丰富. 以往主要基于不完整的老岩心资料,以校正后的热解 S_1 或氯仿沥青"A"作为含油性参数计算页岩油资源量,校正参数的准确性受样品新鲜程度、测试手段及校正方法等多种因素影响,导致上述参数的应用存在一定的局限性. 根据最新页岩油勘探进展,对比分析了页岩油资源量计算的含油性参数(包括热解 S_1、氯仿沥青"A"和含油饱和度)的应用差异,认为含油饱和度可反映游离油和溶解烃含量,不用考虑吸附油影响,且无需进行轻烃、重烃和 NSO 化合物校正,在具有新鲜样品测试数据的条件下,更适合作为研究区页岩油资源量计算的含油性参数. 基于最新页岩油参数井钻探成果和测试数据,明确了有效泥页岩厚度、有机质丰度(TOC)、有机质成熟度(R_o)和埋深的平面分布. 通过多因素叠合法查明了齐家和古龙凹陷青山口组一段页岩油富集区面积分别为 1 957.23 km^2 和 4 509.09 km^2. 结合密闭冷冻样品的含油饱和度、页岩油密度实测数据和有效孔隙度测井解释数据,通过体积法计算出齐家和古龙凹陷青山口组一段页岩油富集区资源量分别为 19.79×10^8 t 和 27.29×10^8 t,表明研究区基质型页岩油具有很好的勘探前景.

关键词: 松辽盆地;齐家凹陷;古龙凹陷;青山口组一段;含油饱和度;页岩油;资源量

OIL-BEARING PARAMETER OPTIMIZATION AND RESOURCE CALCULATION OF THE SHALE OIL IN QIJIA AND GULONG SAGS, SONGLIAO BASIN

XIAO Fei1, YANG Jian-guo[1], LI Shi-chao[1], YAO Yu-lai[1], LI Ang[1],
ZHANG Li-yan[1], HUANG Yi-ming[1], RAN Qing-chang[2,3]
1. *Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang* 110034, *China*;
2. *Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing* 163318, *Heilongjiang Province, China*;
3. *Institute of Unconventional Oil and Gas, Northeast Petroleum University, Daqing* 163318, *Heilongjiang Province, China*

Abstract: There are abundant shale oil resources in the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags of Songliao Basin. In the past, the shale oil resources were calculated mainly based on incomplete old core data with corrected pyrolysis S_1 or chloroform asphalt "A" as oil-bearing parameters. The accuracy of corrected parameters was affected by multiple factors including sample freshness, testing means and correction method, leading to certain limitations in the application of the above parameters. According to the latest development in shale oil exploration, the paper compares the applications of different oil-bearing parameters (pyrolysis S_1, chloroform bitumen "A" and oil

收稿日期:2021-02-19;**修回日期:**2021-04-20. **编辑:**张哲.
基金项目:中国地质调查局项目"松辽盆地北部页岩油战略调查"(DD20190114);"大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价"(DD20179613).
作者简介:肖飞(1987—),男,博士,高级工程师,主要从事页岩油调查与油气地球化学研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//xiaof@mail. cgs.gov.cn
通信作者:杨建国(1967—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事页岩油调查与石油地质综合研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//yangjianguo@mail.cgs.gov.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

saturation) in shale oil resource calculation. The result shows that oil saturation can reflect the content of free oil and dissolved hydrocarbon, without considering the influence of adsorbed oil and correction of light hydrocarbon, heavy hydrocarbon and NSO compound. This parameter is more suitable for the calculation of shale oil resources under the condition of fresh sample test data. The plane distribution of effective shale thickness, TOC, organic maturity (R_o) and burial depth are determined on the basis of latest drilling results and test data of shale oil parameter well. The shale oil enrichment areas in the first member of Qingshankou Formation in Qijiahe and Gulong sags are 1957.23 km^2 and 4509.09 km^2 respectively by multifactor overlap method. Combined with the measured data of oil saturation, density and effective porosity logging interpretation data of sealed frozen samples, the resources of shale oil enriched areas in Qijia and Gulong sags are calculated as 19.79×10^8 t and 27.29×10^8 t respectively, indicating the matrix shale oil in the study area has a good exploration prospect.

Key words: Songliao Basin; Qijia sag; Gulong sag; first member of Qingshankou Formation; oil saturation; shale oil; resource calculation

0 引言

随着北美成功实现页岩油的商业开发，页岩油越来越受到石油勘探者的关注. 根据美国能源情报署(U.S. Energy Information Administration,EIA)发布的报告,中国页岩油技术可采资源量位居世界第三位[1],资源潜力巨大. 与美国页岩油主要分布在海相盆地不同,中国页岩油主要分布在松辽、渤海湾、鄂尔多斯和准噶尔等陆(湖)相盆地[2-7]. 目前,针对粉砂岩和碳酸盐岩夹层较发育湖相泥页岩层系中的页岩油，在渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组业已率先实现工业化开发[5,7],而针对湖相泥页岩基质型页岩油仍处于探索期. 近年来,在松辽盆地北部松页油 1 井、松页油 2 井、松页油 1HF 井和松页油 2HF 井上白垩统青山口组一段(青一段)泥页岩基质储层中相继获得工业和高产工业油流突破[8],证实了该类页岩油也具有很好的勘探前景. 相关研究表明，齐家和古龙凹陷是松辽盆地北部青一段最具页岩油潜力的构造单元[8-10]. 明确齐家和古龙凹陷页岩油资源量，对推进松辽盆地北部页岩油勘探开发具有重要意义.

页岩油资源评价方法分为静态法和动态法两大类. 静态法应用页岩油静态参数计算资源量，细分为成因法(体积法系列)、类比法(丰度法系列)和统计法;动态法采用页岩油开发过程中动态资料计算资源量,细分为物质平衡法、递减法和数值模拟法[11-13]. 目前,中国陆相含油气盆地的页岩油勘探开发总体处于探索阶段,大部分地区没有成熟的页岩油生产数据,因而动态法在页岩油资源评价中的应用受到限制. 在静态法中，类比法需要与具有相似地质条件并已成功开发的盆地或地区进行类比,对类比对象的要求较高,在现阶段难以实现；统计法需要研究区具有一定数量工业井或已发现页岩油气藏且油气资料丰富，适用于勘探程度较高的地区;成因法主要指体积法,直接通过单位体积泥页岩含油量与泥页岩体积的乘积计算页岩油资源量,适用于探井资料和分析化验资料较多的地区,是页岩油勘探初期资源评价应用最为普遍的一种方法.

前人对松辽盆地北部青一段页岩油资源量评价采用的计算方法均为体积法,差异主要在于含油性参数选取的不同，以及是否进行过含油性参数值的校正[10,14-16]. 柳波等[14]认为氯仿沥青“A”代表的组分相对于热解 S_1 更接近页岩油,并直接以氯仿沥青“A”为含油性参数，计算出松辽盆地北部青一段页岩油资源量为 158.25×10^8 t;吴河勇等[10]利用轻烃校正后的热解 S_1 计算出页岩油资源量为 72.89×10^8 t；薛海涛等[15-16]分别对氯仿沥青“A”和热解 S_1 进行了轻烃补偿校正和轻、重烃补偿校正,利用校正后的两项参数分别计算出页岩油资源量为 223.77×10^8 t 和 216.58×10^8 t. 由此可见，不同学者计算出的松辽盆地北部青一段页岩油资源量迥异，这一方面是由于采用的含油性参数及参数校正方法不同，另一方面也与含油性参数测试样品的新鲜程度、测试手段等因素有关. 鉴于此,本文在最新页岩油参数井钻井、测井、录井、试油及分析测试资料的基础上,结合老井相关资料,首先对常用的页岩油含油性参数进行对比和优选，然后查明齐家和古龙凹陷

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

页岩油富集区,最后重新计算页岩油资源量,以期为评价研究区页岩油资源潜力提供有益参考.

1　页岩油含油性参数对比与优选

泥页岩中页岩油的赋存状态主要为游离态、吸附态和溶解态[17],当前工程技术条件下可被开采的部分主要为游离态页岩油(游离油)和少量溶解态页岩油[18],因此页岩油资源量评价的对象主要指游离油[11,13]. 利用体积法求取页岩油资源量时,有效泥页岩的体积是一定的,因而含油性参数是决定资源量计算结果的关键,主要包括氯仿沥青"A"、热解 S_1 和含油饱和度. 其中,氯仿沥青"A"和热解 S_1 的使用最为广泛,这主要是由于这两个参数相对更容易获取,但是这两个参数同时也存在先天的不足,即不能完全反应泥页岩中游离油的含量.

氯仿沥青"A"是指使用氯仿从沉积物或岩石中直接抽提出来的可溶有机质,经过族组分分离可以得到石油烃类(饱和烃、芳烃)与 NSO 化合物(非烃、沥青质)(图 1),与页岩油组成最为接近[14-15]. 然而,由于氯仿抽提过程中轻烃挥发性很强,导致页岩油中 C_{6-13} 的轻烃部分损失殆尽(图 1). 因此,在使用氯仿沥青"A"计算页岩油资源量之前,必须对其进行轻烃校正. 基于化学动力学原理,通过对低成熟度泥页岩样品的岩石热解(rock-eval)和热解色谱(PY-GC)实验,结合对应轻质油的金管裂解实验,可以获取不同成熟度时不同碳数烃类组分的分布,进而建立不同演化阶段的轻烃恢复系数图版[15-16],最后依据图版进行轻烃校正. 应该指出的是,泥页岩样品原始轻烃组成受选取泥页岩样品的有机质丰度、生烃母源及样品新鲜度等因素影响,较难保证轻烃恢复系数图版的普适性. 此外,由于采取的是溶剂抽提的方式,氯仿沥青"A"包含了部分吸附油,必须进行吸附油去除校正. 宋国奇等[11]提出排烃门限对应的"A"/TOC 可以表征泥页岩的最大吸附能力,即吸附系数,以此估算吸附油量. 但是,利用吸附系数求取的吸附油含量,实际上是泥页岩的最大吸附油量,而氯仿沥青"A"中仅含有部分吸附油,这样进行吸附油去除后的氯仿沥青"A"显然比正常值偏低.

热解 S_1 代表 rock-eval 实验中温度在 90~300 ℃之间从泥页岩样品中挥发出来的热释烃,对应由有机质生成并残留于岩石中的碳数分布约为 C_{7-32} 液态游离烃[19]. 热解 S_1 表征的组分属于页岩油中石油烃类的一部分,仅从实验流程看,对于同一块新鲜样品,热解 S_1 的轻烃损失少于氯仿沥青"A",C_{10+} 轻烃仍能得到保留(图 1). 然而,由于泥页岩岩心从井底到地表、岩心长期放置和实验碎样处理等过程中,都存在着轻烃挥发损失[20],也会造成 C_{10-13} 轻烃的大量损失. 对于热解 S_1 的轻烃校正,可以采取与氯仿沥青"A"轻烃校正相同的方法,但轻烃恢复系数图版是在假定热解 S_1 中 C_{6-13} 的轻烃全部损失的情况下建立的[16],而实际上不同样品热解 S_1 的轻烃损失程度各异,这样就会造成轻

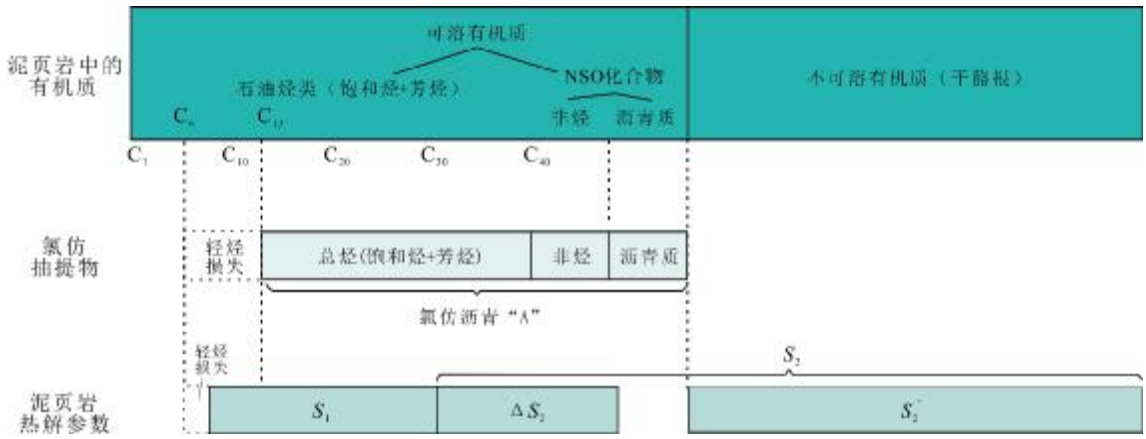

图 1　氯仿沥青"A"和热解 S_1 组分对比示意图

(改编自文献[15])

Fig. 1　Comparison between components of chloroform bitumen "A" and pyrolysis S_1

(Modified from Reference [15])

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

烃校正量偏高. 热解 S_1 中缺失高碳数重烃（存在于热解 S_2 中），以及非烃和沥青质组分（NSO 化合物）[14]（图 1），必须进行重烃和 NSO 化合物校正. 薛海涛等[16]采用氯仿抽提前后热解 S_2 的差值表征热解 S_1 中缺失的重烃和 NSO 化合物组分，在一定程度上解决了热解 S_1 参数校正的问题，但氯仿抽提前后热解 S_2 差值表征的是高碳数烃类和 NSO 化合物的裂解烃，无法直接反映页岩油中 NSO 化合物，因而校正出来的结果存在一定偏差.

综上所述，无论是氯仿沥青“A”，还是热解 S_1，在计算页岩油资源量之前必须进行相应的校正，文献已报道的轻烃、重烃、NSO 化合物校正以及吸附油去除方法，都存在一些难以有效解决的问题，且复杂的校正流程增加了人为主观因素干扰，参数校正的有效性难以保证（表 1）. 含油饱和度在内涵上包括泥页岩中潜在可采的游离油和溶解烃，接近于页岩油组成. 与氯仿沥青“A”、热解 S_1 相比，含油饱和度参数不受轻烃、重烃、NSO 化合物缺失及吸附烃影响，无需进行轻烃、重烃、NSO 化合物恢复和吸附油去除，从而避免了不同学者采用不同恢复系数和吸附系数，对页岩油资源量计算结果造成的较大影响（表 1）. 从研究区勘探现状看，齐家凹陷松页油 1 井和古龙凹陷松页油 2 井在目的层具有完整的岩心资料，且针对重点层段进行了密闭取心和液氮冷冻取样，获取了大量可靠的测试数据，基本消除了含油饱和度测试中对样品要求较高的不利因素（表 1）. 因此优选含油饱和度为研究区页岩油资源量计算的最佳含油性参数.

2 页岩油富集区评价与优选

根据页岩油发育的地质条件，结合前人划分标准[11,13,17]，明确了泥页岩厚度、有机质丰度、有机质成熟度和目的层埋深，作为研究区页岩油富集区评价与优选的 4 项关键参数. 页岩油富集区须同时满足有效泥页岩厚度大于 30 m（泥地比大于 60%，夹层厚度小于 3 m）、总有机碳 TOC>2.0%、镜质体反射率 R_o>0.7% 和目的层埋深小于 5 000 m. 有效泥页岩厚度数据通过新钻页岩油参数井和钻穿目的层的老井资料统计得到，TOC 数据通过建立测井评价模型和综合老井测井资料获取，R_o 数据通过建立新井岩心实测 R_o 与埋深关系公式结合老井泥页岩埋深获取，目的层埋深数据通过老井分层数据和青一段顶面构造地震解释资料获取.

表 1 页岩油资源量计算含油性参数综合评价表

Table 1 Comprehensive evaluation of oil-bearing parameters for shale oil resource calculation

含油性参数	计算公式	关键参数	适用性	有利因素	不利因素	研究区情况	可信度
氯仿沥青“A”	$Q=S\times h\times\rho\times(A+K_{轻}\times A-\mathrm{TOC}\times K_{吸})$ Q：页岩油资源量，t； S：泥页岩面积，km^2； h：泥页岩厚度，m； ρ：泥页岩密度，g/cm^3； TOC：总有机碳，%	A：氯仿沥青“A”，‰； $K_{轻}$：轻烃校正系数； $K_{吸}$：吸附系数	适合氯仿沥青“A”数据较多地区的页岩油资源评价	①比较接近页岩油组分；②参数获取技术成熟	①抽提过程中 $C_{6\text{-}13}$ 轻烃损失殆尽，需进行轻烃校正；②含有部分吸附烃，需去除；③受样品热演化程度影响大；④实验所需样品量较大	氯仿沥青“A”分析化验资料较少	中等，受轻烃校正和吸附烃去除准确性影响
热解 S_1	$Q=S\times h\times\rho\times(S_1+K_{轻}\times S_1+K_{重}\times S_1)$ Q：页岩油资源量，t； S：泥页岩面积，km^2； h：泥页岩厚度，m； ρ：泥页岩密度，g/cm^3； TOC：总有机碳，%	S_1：热解 S_1，10^{-3}； $K_{轻}$：轻烃校正系数； $K_{重}$：重烃校正系数（包含 NSO 化合物裂解烃）	适合热解数据较多地区的页岩油资源量评价	①基本属于游离油组成；②参数获取技术成熟；③实验所需样品量小	①损失 $C_{6\text{-}13}$ 轻烃，需进行轻烃校正；②缺失高碳数重烃和 NSO 化合物，需进行校正；③受样品热演化程度影响大	热解 S_1 分析化验资料较多	中等，受轻烃、重烃和 NSO 化合物校正准确性影响
含油饱和度	$Q=S\times h\times\Phi\times S_o\times\rho_{oil}$ Q：页岩油资源量，t； S：泥页岩面积，km^2； h：泥页岩厚度，m； ρ_{oil}：页岩油密度，g/cm^3	S_o：含油饱和度，%； Φ：有效孔隙度，%	适合具有密闭取心岩心样品地区的页岩油资源量评价	①主要参数获取方法成熟；②含油饱和度代表游离油和溶解烃，无需进行轻烃、重烃校正及吸附烃去除	①测试方法对岩心样品大小、样品纹层或裂缝发育程度以及后期保存情况要求较高；②需进行密闭取心获取实验样品	新钻页岩油井密闭取心测试数据齐全	较高，主要反映了潜在可采的游离油组分

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

2.1　有效泥页岩厚度分布特征

对研究区钻穿青一段探井的岩性资料进行了详细统计，分别绘制了齐家和古龙凹陷青一段有效泥页岩厚度等值线图(图 2). 结果表明,齐家和古龙凹陷青一段有效泥页岩厚度大、分布稳定. 齐家凹陷青一段有效泥页岩厚度为 28.8~77.1 m,平均厚度 50.32 m,厚度大于 30 m 的有效泥页岩分布面积为 2 048.83 km^2(图 2a);古龙凹陷(这里指广义的古龙凹陷,包括狭义的古龙凹陷和龙虎泡-大安阶地) 青一段有效泥页岩厚度为 27.9~67.0 m,平均厚度 55.69 m,厚度大于 30 m 的有效泥页岩分布面积为 4 933.69 km^2(图 2b).

2.2　TOC 分布特征

泥页岩测井响应特征表明,随有机碳含量增加,电阻率升高,声波时差增大[21]. 因此,选取对泥页岩 TOC 响应最敏感的深侧向电阻率和声波时差曲线，以松页油 1 井和松页油 2 井岩心 TOC 实测数据进行标定,分别建立齐家和古龙凹陷青一段 TOC 测井评价模型.

采用松页油 1 井 121 个和松页油 2 井 105 个样本点的测井和岩心分析资料,通过岩心刻度测井方法,分别建立了齐家和古龙凹陷 TOC 测井评价模型.

齐家凹陷:

$$TOC=7.31\times\lg(RLLD)+0.077\times DT-12.24 \quad (1)$$

古龙凹陷:

$$TOC=4.49\times\lg(RLLD)+0.011\times DT-2.98 \quad (2)$$

式中,RLLD 为深侧向电阻率,Ωm; DT 为声波时差,μs/ft.

应用公式(1)和公式(2)分别对松页油 1 井(图 3a)和松页油 2 井(图 3b)进行了连续处理解释,测井解释的 TOC 与岩心实测 TOC 一致性较好.

基于测井解释模型，利用老井测井数据计算获取了各凹陷单井青一段 TOC,分别绘制了齐家和古龙凹陷青一段 TOC 等值线图(图 4). 结果表明:齐家凹陷青一段 TOC 为 1.0%~4.3%，平均值 2.21%;TOC 大于 2.0%的分布面积为 2 256.27 km^2，平均值 2.48%(图 4a). 古龙凹陷青一段 TOC 为 1.7%~4.7%，平均值 2.63%;TOC 大于 2.0%的分布面积为 4 764.99 km^2,平

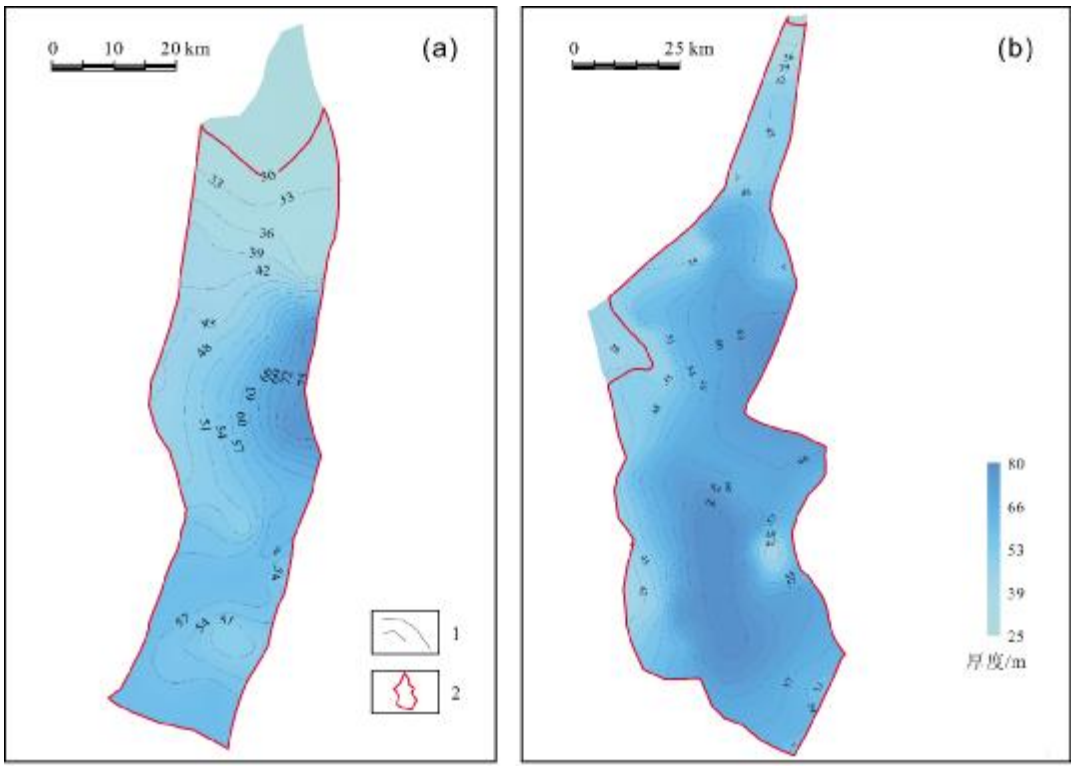

图 2　齐家凹陷和古龙凹陷青一段有效泥页岩厚度等值线图

Fig. 2　Contour map for effective shale thickness of the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags

a—齐家凹陷(Qijia sag); b—古龙凹陷(Gulong sag); 1—泥页岩厚度等值线(thickness contour of shale); 2—有效泥页岩厚度大于 30 m 的界限(boundary of effective shale thickness more than 30 m)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

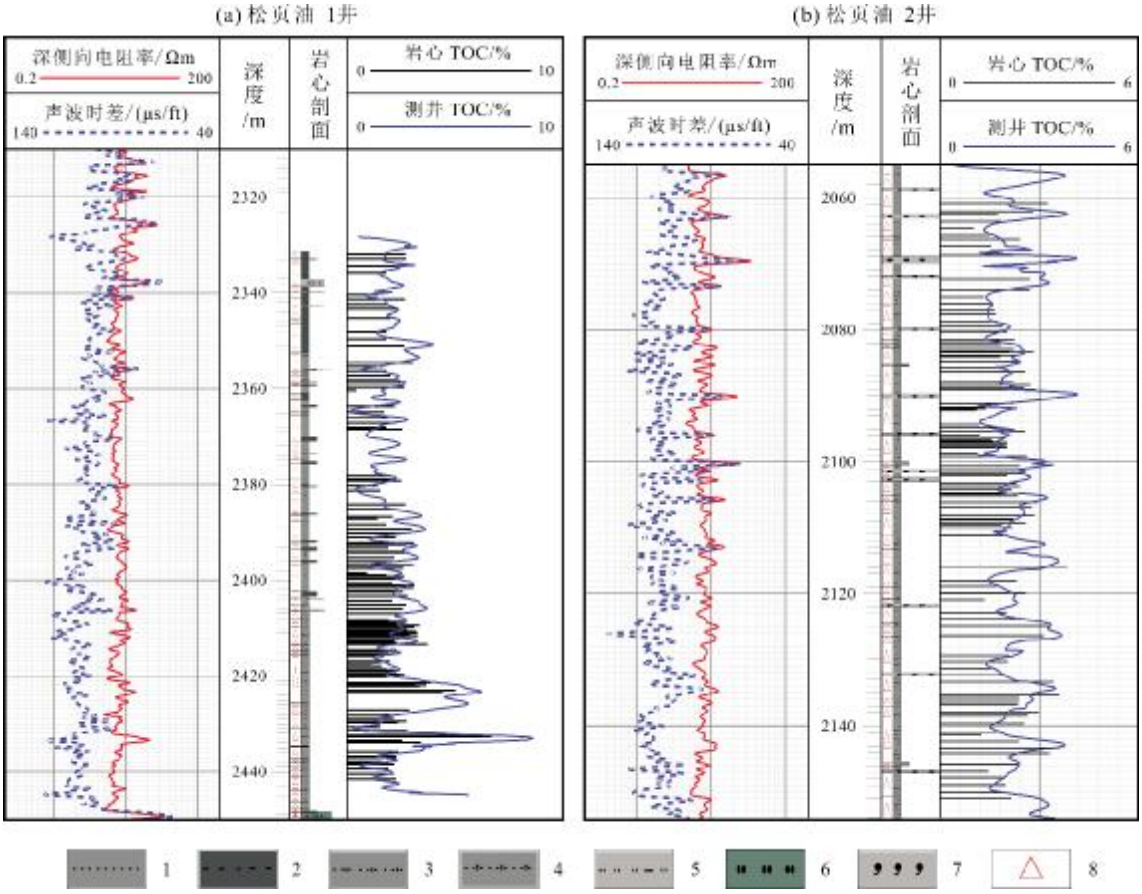

图 3 松页油 1 井和松页油 2 井青一段 TOC 测井解释成果图

Fig. 3 TOC logging interpretation for the first member of Qingshankou Formation in SYY1 and SYY2 wells

1—泥岩(mudstone); 2—粉砂质泥岩(silty musdtone); 3—砂质泥岩(sandy mudstone); 4—含介形虫泥岩(ostracoda-bearing mudstone); 5—泥质粉砂岩(argillaceous siltstone); 6—粉砂岩(siltstone); 7—介形虫层(ostracoda layer); 8—荧光(fluorescence)

均值 2.67%(图 4b). 齐家和古龙凹陷青一段富有机质泥页岩分布面积广、厚度大,为页岩油富集提供了雄厚的生烃物质基础.

2.3 R_o 分布特征

泥页岩中有机质热演化的化学反应符合阿伦尼乌斯方程反映的演化规律,地层 R_o 值随埋藏深度增加呈指数方式递增[22]. 利用松页油 1 井 11 个和松页油 2 井 13 个岩心实测 R_o,分析 R_o 与埋藏深度关系(图 5),回归得到了齐家和古龙凹陷 R_o 测井计算模型.

齐家凹陷: $R_o=0.1609e^{0.0009H}$ (3)

古龙凹陷: $R_o=0.4021e^{0.0005H}$ (4)

式中, H 为地层深度, m.

基于计算模型,利用老井目的层埋深数据,计算获取了各凹陷单井青一段 R_o, 分别绘制了齐家和古龙凹陷青一段 R_o 等值线图(图 6). 结果表明:齐家凹陷青一段 R_o 为 0.5%~1.5%, R_o 大于 0.7%的面积为 2 178.15 km^2 (图 6a); 古龙凹陷青一段 R_o 在 0.5%~1.5%之间, R_o 大于 0.7%的分布面积为 4 998.73 km^2 (图 6b). 可以看出, 齐家和古龙凹陷青一段泥页岩整体都处于主生油期,十分有利于页岩油的滞留富集.

2.4 目的层埋深特征

基于研究区地震处理和解释结果, 利用测井资料进行了井震标定, 分别绘制了齐家和古龙凹陷青一段顶面埋深等值线图(图 7). 结果表明:齐家凹陷青一段泥页岩层系埋深为 1 188~2 419 m (图 7a);古龙凹陷整体略深,埋深为 1 108~2 462 m (图 7b). 齐家和古龙凹陷青一段泥页岩层系整体上埋藏条件适中, 上覆地层较厚;同时,均处于构造相对稳定区,无岩浆活动,无规模性通天断裂,保存条件较好.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

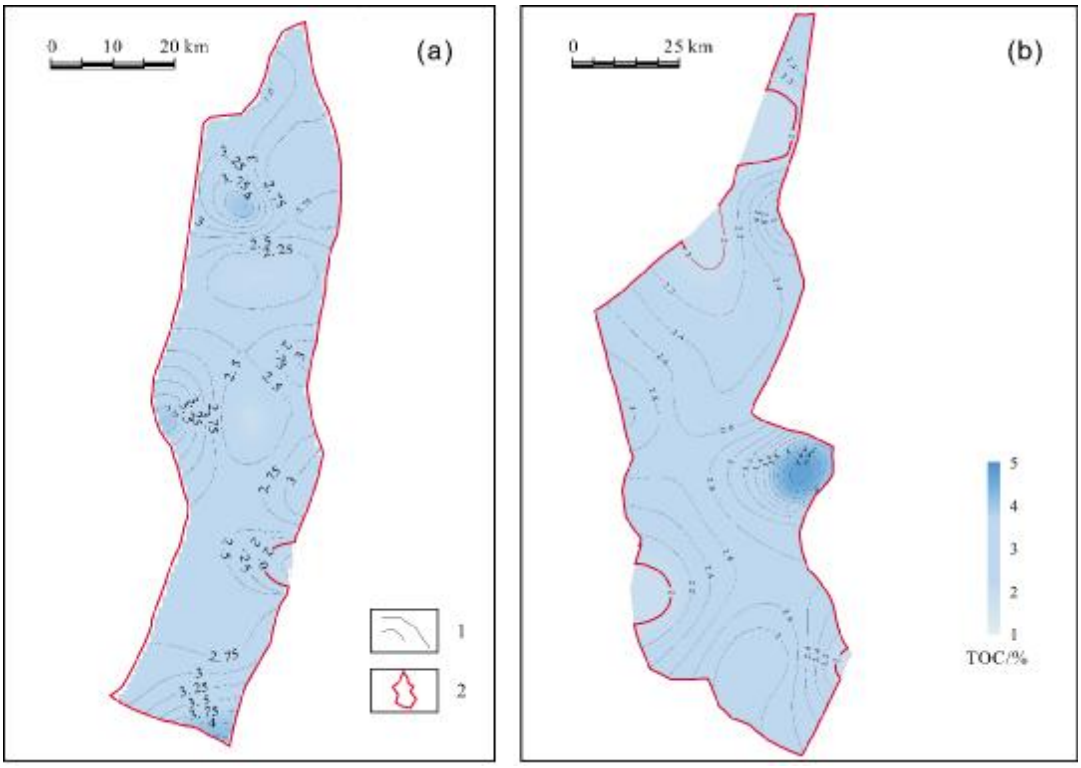

图 4　齐家凹陷和古龙凹陷青一段 TOC 等值线图

Fig. 4　TOC contour maps for the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags

a—齐家凹陷(Qijia sag); b—古龙凹陷(Gulong sag); 1—TOC 等值线(TOC contour line); 2—TOC>2.0%的界限(boundary of TOC more than 2.0%)

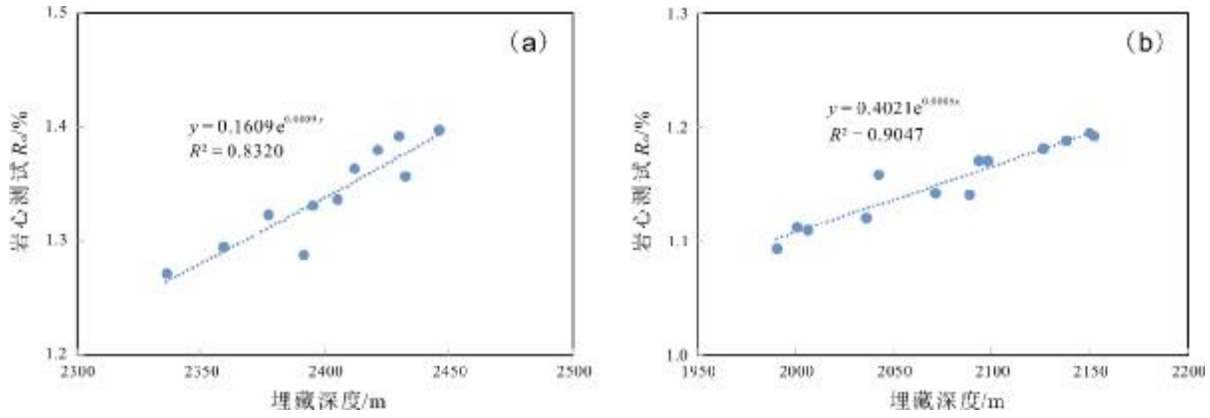

图 5　松页油 1 井和松页油 2 井青一段岩心测试 R_o 与埋藏深度相关关系图

Fig. 5　Plots of core testing R_o vs. buried depth for the first member of Qingshankou Formation in SYY1 and SYY2 wells

a—松页油 1 井(SYY1 well); b—松页油 2 井(SYY2 well)

2.5　页岩油富集区面积

综合上述页岩油富集地质条件，基于多因素综合分析法，对松辽盆地北部齐家和古龙凹陷青一段有效泥页岩厚度、TOC、R_o 和目的层埋深等值线图进行了叠合，最终优选出齐家凹陷青一段页岩油富集区面积为 1 957.23 km² (图 8a)，古龙凹陷青一段页岩油富集区面积为 4 509.09 km² (图 8b).

3　页岩油富集区资源量计算

齐家和古龙凹陷页岩油富集区面积分别为

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

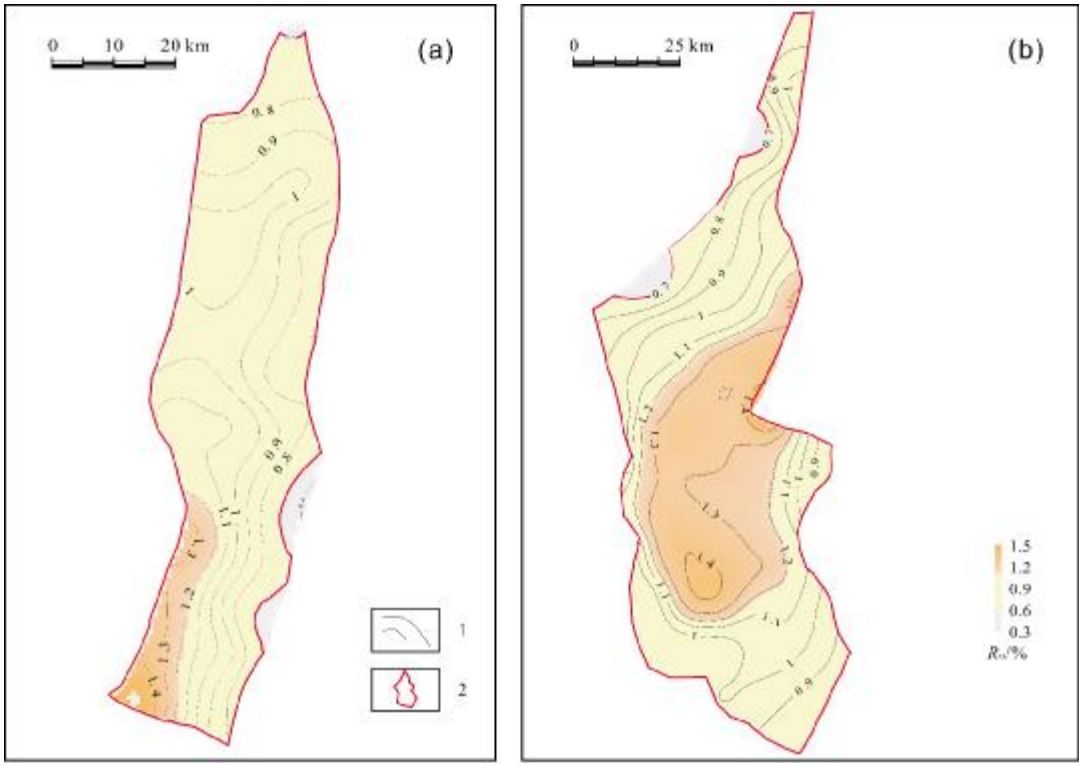

图 6 齐家凹陷和古龙凹陷青一段 R_o 等值线图

Fig. 6 R_o contour maps for the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags

a—齐家凹陷(Qijia sag); b—古龙凹陷(Gulong sag); 1—R_o 等值线(R_o contour line); 2—R_o>0.7%的界限(boundary of R_o more than 0.7%)

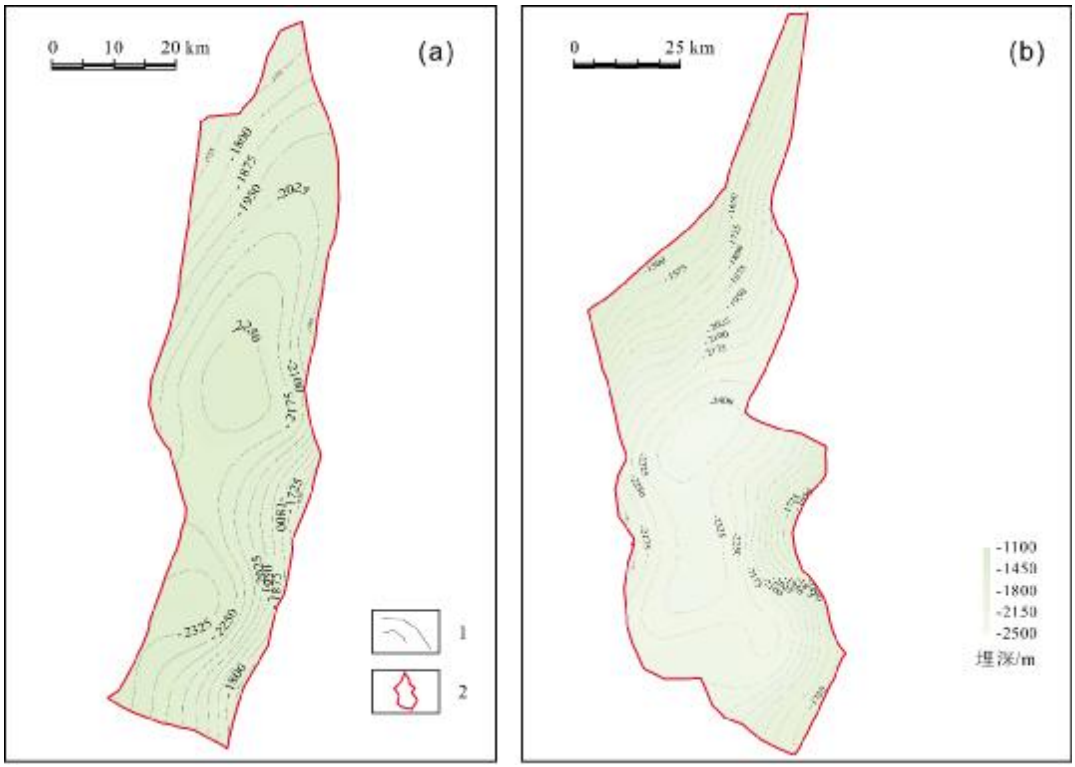

图 7 齐家凹陷和古龙凹陷青一段顶面埋深等值线图

Fig. 7 Contour maps for roof burial depth of the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags

a—齐家凹陷(Qijia sag); b—古龙凹陷(Gulong sag); 1—埋深等值线(contour line of burial depth); 2—埋深小于 5000 m 的界限(boundary of burial depth less than 5000 m)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

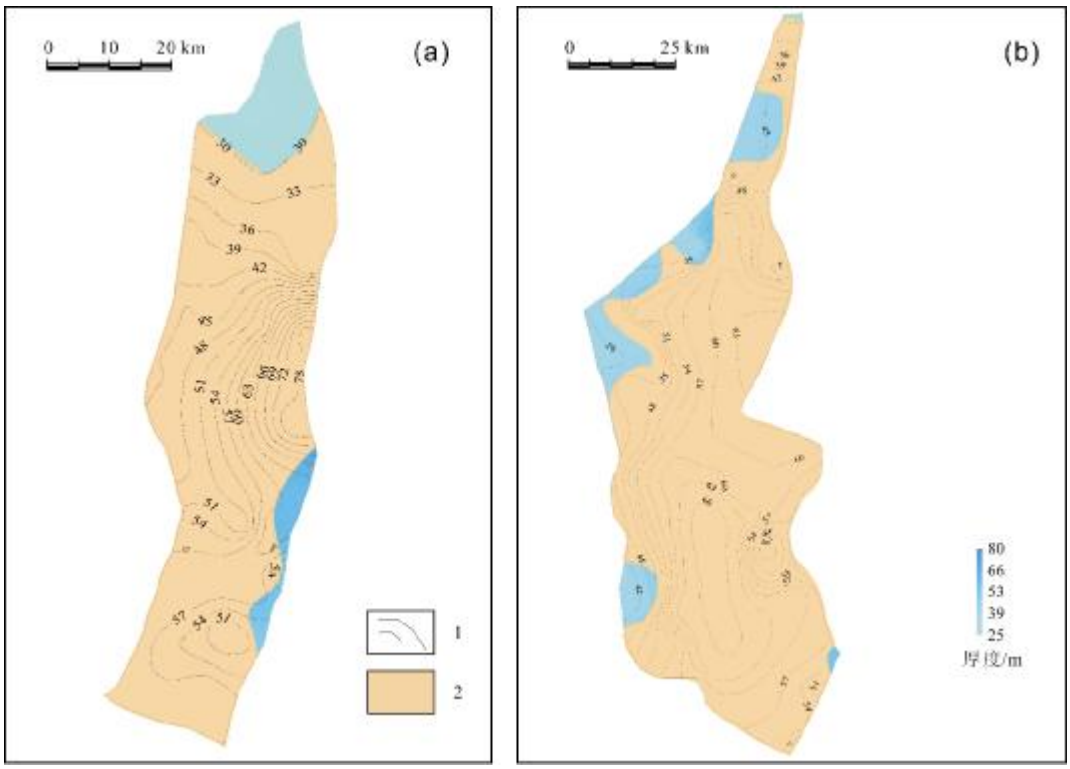

图 8　齐家凹陷和古龙凹陷青一段页岩油富集区综合评价图

Fig. 8　Comprehensive evaluation maps for shale oil enriched area of the first member of Qingshankou Formation in Qijia and Gulong sags

a—齐家凹陷(Qijia sag); b—古龙凹陷(Gulong sag); 1—泥页岩厚度等值线(shale thickness contour); 2—页岩油富集区(shale oil enriched area)

1 957.23 km^2 和 4 509.09 km^2,富有机质泥页岩层段平均厚度分别为 50.32 m 和 55.69 m,平均有效孔隙度分别为 6.90%和 5.56%,实测页岩油密度分别为 0.8200 t/m^3 和 0.8432 t/m^3，平均含油饱和度分别为 35.51%和 23.18%. 根据下列公式计算齐家和古龙凹陷青一段页岩油资源量:

$$Q=S\times h\times \Phi\times S_o\times \rho_{oi} \tag{5}$$

式中,Q 为页岩油资源量，t; S 为页岩油富集区面积，km^2; h 为富有机质泥页岩层段平均厚度，m; Φ 为平均有效孔隙度,%,来源于齐家凹陷松页油 1HF 井(松页油 1 井“直改平”水平井)和古龙凹陷松页油 2 井核磁测井解释有效孔隙度数据(松页油 2HF 井为松页油 2 井“直改平”水平井,由于工程原因,未对松页油 2HF 井进行核磁测井，故采用松页油 2 井核磁测井孔隙度数据); S_o 为平均含油饱和度,%，来源于松页油 1 井和松页油 2 井核磁含油饱和度数据（密闭取心冷冻取样); ρ_{oi} 为页岩油密度，t/m^3，来源于松页油 1HF 井和松页油 2HF 井试油取样实测数据. 计算结果表明，齐家凹陷和古龙凹陷青一段页岩油资源量分别为 19.79×10^8 t 和 27.29×10^8 t.

4　结论

1)相对于氯仿沥青“A”和热解 S_1,含油饱和度参数更能完整地表征潜在可采的页岩油，不受轻烃、重烃、NSO 化合物缺失及吸附油影响，在具有新鲜样品测试数据时，更适合作为页岩油资源量计算的含油性参数.

2)基于有效泥页岩厚度、TOC、R_o 和目的层埋深 4 项关键参数，通过多因素叠合法查明了齐家和古龙凹陷青一段页岩油富集区面积分别为 1 957.23 km^2 和 4 509.09 km^2.

3)利用体积法作为计算方法、含油饱和度作为含油性参数，计算出齐家和古龙凹陷青一段页岩油富集区资源量分别为 19.79×10^8 t 和 27.29×10^8 t,表明研究区基质型页岩油具有广阔的勘探前景.

参考文献(References):

[1]US Energy Information Administration. Technically recoverable shale

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [EB/OL]. http://www.eia.gov/analysis/ studies/worldshalegas/pdf/overview.pdf, 2013.

[2]张林晔,李钜源,李政,等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展,2014,29(6):700-711.
Zhang L Y, Li J Y, Li Z, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.

[3]柳波,石佳欣,付晓飞,等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发,2018,45(5):828-838.
Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 828-838.

[4]宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):1-12.
Song M S. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 1-12.

[5]赵贤正,周立宏,赵敏,等. 陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):589-600.
Zhao X Z, Zhou L H, Zhao M, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: A case study on Kong-2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 589-600.

[6]杨华,牛小兵,徐黎明,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2016,43(4):511-520.
Yang H, Niu X B, Xu L M, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 511-520.

[7]支东明,唐勇,杨智峰,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):524-534.
Zhi D M, Tang Y, Yang Z F, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 524-534.

[8]杨建国,李士超,姚玉来,等. 松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破[J]. 地质与资源,2020,29(3):300.
Yang J G, Li S C, Yao Y L, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao Basin [J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 300.

[9]崔宝文,蒙启安,白雪峰,等. 松辽盆地北部石油勘探进展与建议[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(3):1-9.
Cui B W, Meng Q A, Bai Y F, et al. Petroleum exploration progress and suggestions for north Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 1-9.

[10]吴河勇,林铁锋,白云风,等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析[J]. 大庆石油地质与开发,2019,38(5):78-86.
Wu H Y, Lin T F, Bai Y F, et al. Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in North Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 78-86.

[11]宋国奇,张林晔,卢双舫,等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘,2013,20(4):221-228.
Song G Q, Zhang L Y, Lu S F, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 221-228.

[12]陈小慧. 页岩油赋存状态与资源量评价方法研究进展[J]. 科学技术与工程,2017,17(3):136-144.
Chen X H. Advances in the research on the occurrence state and resources assessment of shale oil [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(3): 136-144.

[13]朱日房,张林晔,李政,等. 陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价——以东营凹陷沙三段下亚段为例[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):129-136.
Zhu R F, Zhang L Y, Li Z, et al. Evaluation of shale oil resource potential in continental rift basin: A case study of Lower Es_3 member of Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 129-136.

[14]柳波,何佳,吕延防,等. 页岩油资源评价指标与方法——以松辽盆地北部青山口组页岩油为例[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):3846-3852.
Liu B, He J, Lv Y F, et al. Parameters and method for shale oil assessment: Taking Qinshankou Formation shale oil of Northern Songliao Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 3846-3852.

[15]薛海涛,田善思,王伟明,等. 页岩油资源评价关键参数——含油率的校正[J]. 石油与天然气地质,2016,37(1):15-22.
Xue H T, Tian S S, Wang W M, et al. Correction of oil content—One key parameter in shale oil resource assessment [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 15-22.

[16]薛海涛,田善思,卢双舫,等. 页岩油资源定量评价中关键参数的选取与校正——以松辽盆地北部青山口组为例[J]. 矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):70-78.
Xue H T, Tian S S, Lu S F, et al. Selection and verification of key parameters in the quantitative evaluation of shale oil: A case study at the Qingshankou Formation, Northern Songliao Basin [J] Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 70-78.

[17]张金川,林腊梅,李玉喜,等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘,2012,9(5):322-331.

(下转第 305 页/Continued on Page 305)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

[21]柳波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2):280-285.
Liu B, Lü Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.

[22]李吉君,史颖琳,黄振凯, 等. 松辽盆地北部陆相页岩孔隙特征及其对页岩油赋存的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 27-34.
Li J J, Shi Y L, Huang Z K, et al. Pore characteristics of continental shale and its impact on storage of shale oil in northern Songliao Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4) : 27-34.

[23]黄文彪,邓守伟,卢双舫, 等. 页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以松辽盆地南部青一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5):704-711.
Huang W B, Deng S W, Lu S F, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation — A case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):704-711.

[24]李士超,张金友,公繁浩, 等. 松辽盆地北部青一段一、二段泥岩七性特征及页岩油有利区优选[J]. 地质论评, 2017, 63(S1): 71-72.
Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The seven properties characteristics of mudstone in the first and second member of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin[J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 71-72.

[25]秦梦华, 王中鹏. 松辽盆地长岭坳陷上白垩统页岩油有利区优选及资源潜力[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31):209-215.
Qin M H, Wang Z P. Optimization of the favorable area and analysis of the resource potential for the Upper Cretaceous shale oil in Changling Depression, Songliao Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31):209-215.

(上接第 376 页/Continued from Page 376)

[20]Khoshnoodkia M, Mohseni H, Rahmani O, et al. TOC determination of Gadvan Formation in South Pars gas field, using artificial intelligent systems and geochemical data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011,78(1): 119-130.

[21]董宁, 许杰, 孙赞东, 等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(S1): 69-74.
Dong N, Xu J, Sun Z D, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(S1): 69-74.

[22]Fillippone W R. Estimation of formation parameters and the prediction of overpressures from seismic data[R]. SEG 0502, Dallas, Texas: SEG, 1982.

[23]马海. Fillippone 地层压力预测方法的改进及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 56-61.
Ma H. Pore pressure prediction with seismic interval velocity by the modified Fillippone method [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 56-61.

[24]张磊夫, 董大忠, 孙莎莎, 等. 三维地质建模在页岩气甜点定量表征中的应用——以扬子地区昭通页岩气示范区为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1332-1340.
Zhang L F, Dong D ZH, Sun S S, et al. Application of 3D geological modeling in quantitative characterization of shale gas sweet spots: Case study of Zhaotong national demonstration area of Yangtze region [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1332-1340.

[25]胡华锋, 胡起, 林正良. 页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J]. 石油物探, 2018, 57(3): 362-368.
Hu H F, Hu Q, Lin Z L. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2018, 57(3): 362-368.

(上接第 404 页/Continued from Page 404)

Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 9(5): 322-331.

[18]宁方兴,王学军,郝雪峰,等. 济阳坳陷页岩油赋存状态和可动性分析[J]. 新疆石油天然气,2015,11(3):1-5.
Ning F X, Wang X J, Hao X F, et al. An analysis in occurrence state and mobility of shale oil in Jiyang Depression [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(3): 1-5.

[19]卢双舫,张敏. 油气地球化学[M]. 北京:石油工业出版社,2008: 19-20.
Lu S F, Zhang M. Petroleum geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 19-20. (in Chinese)

[20]肖飞,杨建国. 湖相泥页岩密闭冷冻测试与现场地化录井热解参数对比研究[C]. 福州:第十二届全国石油地质实验技术学术会议,2020.
Xiao F, Yang J G. Comparative study of the pyrolysis parameters between laboratory test of airtight freezing samples and geochemical mud logging in the well site [C]. Fuzhou: The 12th National Academic Conference of Petroleum Geology Experimental Technology, 2020. (in Chinese)

[21]李延钧,张烈辉,冯媛媛,等. 页岩有机碳含量测井评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学,2013,24(1):169-175.
Li Y J, Zhang L H, Feng Y Y, et al. Logging evaluation method and its application for measuring the total organic carbon content in shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 169-175.

[22]Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 79-99.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn