

引用: 郭秋麟, 白雪峰, 何文军, 等. 页岩油资源评价方法、参数标准及典型评价实例 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(5):27-41.

Guo Qiulin, Bai Xuefeng, He Wenjun, et al. Shale oil resource assessment methods, parameter standards and typical case studies[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(5): 27-41.

页岩油资源评价方法、参数标准及典型评价实例

郭秋麟¹ 白雪峰² 何文军³ 范立勇⁴ 王 建¹ 姜文亚⁵ 柳庄小雪¹ 陈宁生¹

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油大庆油田公司勘探开发研究院; 3 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院; 4 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院; 5 中国石油大港油田公司勘探开发研究院)

摘 要: 针对中国陆相页岩非均质性强的特点, 指出夹层页岩油资源评价适宜采用小面元容积法, 纯页岩油资源评价适宜采用小面元体积法。建立 S_1 与 TOC 拟合关系曲线和轻烃恢复系数与 R_o 关系曲线, 求取原始 S_1 。确定纯页岩油资源评价的 4 个关键参数 (S_1 、TOC、 R_o 和页岩厚度)、夹层页岩油资源评价的 3 个关键参数 (夹层累计厚度、孔隙度和含油饱和度), 相应地制定参数下限标准。在统一评价方法和标准下, 分别选取松辽盆地北部白垩系青山口组页岩油、鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩油和准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩油作为典型评价实例。评价结果揭示, 青山口组一段 (青一段) 纯页岩油资源量为 $52.23 \times 10^8 \text{t}$, 其中, 轻质油 ($R_o > 1.2\%$) 为 $11.18 \times 10^8 \text{t}$; 延长组长 7₃ 亚段页岩油资源量为 $66.80 \times 10^8 \text{t}$, 其中, 夹层页岩油资源量为 $27.73 \times 10^8 \text{t}$, 纯页岩油资源量为 $39.07 \times 10^8 \text{t}$; 芦草沟组页岩油资源量为 $15.62 \times 10^8 \text{t}$, 其中, 夹层页岩油资源量为 $11.99 \times 10^8 \text{t}$, 纯页岩油资源量为 $3.63 \times 10^8 \text{t}$ 。

关键词: 页岩油; 资源评价; 参数标准; 轻烃恢复系数; 青山口组; 延长组; 芦草沟组

中图分类号: TE16 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.05.003

Shale oil resource assessment methods, parameter standards and typical case studies

Guo Qiulin¹, Bai Xuefeng², He Wenjun³, Fan Liyong⁴, Wang Jian¹, Jiang Wenya⁵, Liu-Zhuang Xiaoxue¹, Chen Ningsheng¹

(1 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 2 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Daqing Oilfield Company; 3 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company; 4 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Changqing Oilfield Company; 5 Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Dagang Oilfield Company)

Abstract: Given the strong heterogeneity of continental shales in China, small element volumetric method should be adopted for resource assessment of interlayer shale oil and small element volume method for pure shale oil. The fitting relationship curve between S_1 and TOC as well as relationship curve between light hydrocarbon recovery coefficient and R_o are established to obtain the original S_1 content. In addition, four key parameters for the evaluation of pure shale oil resources (S_1 , TOC, R_o and shale thickness) and another three for interlayer shale oil resources (cumulative thickness of shale interlayer, porosity and oil saturation) are determined, and the lower limits of these parameters are formulated accordingly. By applying the unified assessment method and standard, typical cases of shale oil resource assessment are studied, including the Cretaceous Qingshankou Formation in the northern Songliao Basin, Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, and Permian Lucaogou Formation in Junggar Basin. The evaluation results show that the geological resources of pure shale oil in the first member of Qingshankou Formation (Qing 1 member) are $52.23 \times 10^8 \text{t}$, with light oil ($R_o > 1.2\%$) of $11.18 \times 10^8 \text{t}$; The total shale oil resources in the third sub

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“陆相中高成熟度页岩油勘探开发关键技术研究与应用”(2019E-2601); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“页岩油勘探开发技术研究”(2021DJ18), “剩余油气资源空间分布技术研究”(2021DJ07)。

第一作者简介: 郭秋麟 (1963-), 男, 福建漳州人, 博士, 2008 年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 教授级工程师, 现主要从事油气资源评价及油气勘探方面的工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: qlguo@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-11-11; 修改日期: 2022-07-22

member of the seventh member of Yanchang Formation (Chang 7₃ sub member) are 66.80×10^8 t, among which the interlayer shale oil resources are 27.73×10^8 t, and the pure shale oil resources are 39.07×10^8 t; The total shale oil resources in Lucaogou Formation are 15.62×10^8 t, among which the interlayer shale oil resources are 11.99×10^8 t, and the pure shale oil resources are 3.63×10^8 t.

Key words: shale oil, resource assessment, parameter standard, light hydrocarbon recovery coefficient, Qingshankou Formation, Yanchang Formation, Lucaogou Formation

0 引言

经过近 10 年的技术攻关,页岩油在理论和技术研发上均取得了重大进展^[1-4]。在美国二叠盆地、威利斯顿盆地、西部海湾盆地和西加拿大沉积盆地等,页岩油勘探生产获得重大突破^[5-8];在中国松辽盆地^[9-11]、鄂尔多斯盆地^[12-14]、准噶尔盆地^[15]和渤海湾盆地^[16]等,页岩油勘探也取得显著成效。初步预测,中国页岩油具有巨大的资源潜力^[17],是今后潜在的石油资源接替领域。

页岩油存在广义^[18-19]和狭义^[20-22]两种定义。本文页岩油的定义采用国家标准《页岩油地质评价方法》(GB/T 38718—2020),即:赋存于富有机质页岩层系中的石油。富含有机质页岩层系烃源岩内粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩单层厚度不大于 5m,累计厚度占页岩层系总厚度比例小于 30%。无自然产能或低于工业石油产量下限,需采用特殊工艺技术措施才能获得工业石油产量。

页岩油按成熟度分为成熟页岩油和低熟原位转化页岩油两大类^[23-24],本文仅研究成熟页岩油,不涉及低熟地下原位转化页岩油。根据聚集成藏和滞留成藏的特点,将成熟页岩油划分为夹层页岩油和纯页岩油两类。前者的储层为砂岩、碳酸盐岩和混积岩等;后者的储层为页岩。

纯页岩油资源评价方法主要有两类,一是基于岩石孔隙体积的容积法,二是基于页岩 S_1 (或氯仿沥青“A”含量)的体积法。

2012 年,Modica 等^[25]提出了 PhiK 模型,并用于计算页岩有机质孔隙度,然后根据孔隙度大小评价页岩油资源量;2016 年,Chen 等^[26]提出了一种改进的页岩有机质孔隙度计算方法,并且认为西加拿大沉积盆地 Duvernay 组页岩油主要存储在有机质纳米孔隙中,并根据孔隙度容积评价了页岩油资源量;2019 年,杨维磊等^[27]通过分析页岩孔隙度,采用容积法评价了鄂尔多斯盆地安塞地区延长组长 7 段页岩油的资源潜力。

根据 S_1 计算页岩油资源量的方法比较复杂,还存在许多难题,比如总油含量、可动油含量、蒸发烃

损失量的估算等。薛海涛等^[28]对松辽盆地北部青山口组泥页岩样品抽提前、后两次热解参数进行对比,对氯仿沥青“A”含量进行轻烃补偿校正,对 S_1 进行轻烃、重烃补偿校正,以获得泥页岩总含油率参数;余涛等^[29]利用烃源岩游离烃量 S_1 ,评价了东营凹陷沙河街组页岩油资源量,研究泥页岩非均质性,预测页岩油有利区;朱日房等^[30]分别运用氯仿沥青“A”含量和热解 S_1 计算东营凹陷沙三段页岩油资源量和可动资源量,认为运用地球化学参数法很难直接获取游离油量和吸附油量,但能够确定页岩中的滞留油量和岩石对油的吸附潜量;谌卓恒等^[22]提出了一种页岩油的资源潜力及流动性评价方法,并以西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 组页岩为例,评价了页岩油原地量和可动油量;Li 等^[20-21]提出了一种计算页岩原地总油含量的计算方法,分析了渤海湾盆地沙河街组页岩可动油特征,评价了页岩油资源潜力。

夹层页岩油资源评价方法与致密油资源评价方法类似,本文不再赘述。

页岩油资源评价参数标准,即参数下限,是页岩油资源评价的难题,目前还没有统一的认识,在国家、行业和企业 3 个层次上均还没有相关标准。

本文针对中国陆相页岩非均质性强的特点,结合页岩油勘探现状,确定了页岩油资源评价关键参数,并相应地制定了相关参数的下限标准,在统一标准下采用小面元容积法评价夹层页岩油,采用小面元体积法(含油率法)评价纯页岩油。通过评价方法、参数标准及实例的研究,以期为中国页岩油资源评价和勘探规划提供参考。

1 评价方法与关键参数求取方法

1.1 资源评价方法

纯页岩油资源量主要是基于页岩可动油含量来计算的,可动油含量的确定是关键。

1.1.1 页岩可动油含量的确定

页岩可动油含量,是指每克页岩中所含的非吸附的、可动的液态烃毫克量。Jarvie^[31]提出了 S_1 /TOC 的判断方法,认为 S_1 /TOC=100mg/g 是可动油的门

限, Michael 等^[32]认为几乎所有的热解 S_1 均是可动油; 多位学者^[1-4, 33]通过改进岩石热解的测试方法, 确认 S_1 是在热解 300℃ 前释放出来的, 而可动烃是在热解 200℃ 以前释放的。可见, 可动油的计算还存在较大分歧。

本文将正常热解 (300℃) 的 S_1 视为可动油, S_1 与蒸发烃 (轻烃) 损失量之和为原始 S_1 , 即页岩可动油含量, 其计算公式为

$$M = S_1 \times \alpha \quad (1)$$

式中 M ——页岩可动油含量, mg/g;

S_1 ——正常热解的游离烃含量, mg/g;

α ——轻烃恢复系数 (大于 1)。

1.1.2 夹层页岩油资源评价方法

考虑到陆相页岩油分布具有很强的非均质性特点, 夹层页岩油资源评价方法采用小面元容积法, 计算公式为

$$Q_{\text{sand}} = \sum_{i=1}^n (V_i \times \rho_o / B_o) \quad (2)$$

$$V_i = A_i \times h_i \times \phi_i \times S_{o,i} \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中 Q_{sand} ——夹层页岩油资源量, 10^8t ;

ρ_o ——原油密度, t/m^3 ;

B_o ——原油体积系数;

n ——评价区划分的评价单元 (也称小面元) 个数;

V_i ——第 i 个小面元中夹层页岩油体积, 10^8m^3 ;

A_i ——第 i 个小面元的夹层面积, km^2 ;

h_i ——第 i 个小面元的夹层厚度, m;

ϕ_i ——第 i 个小面元的夹层孔隙度;

$S_{o,i}$ ——第 i 个小面元的夹层含油饱和度。

1.1.3 纯页岩油资源评价方法

同样道理, 为消减非均质性的影响, 纯页岩油资源评价方法采用小面元体积法, 计算公式为

$$Q_{\text{shale}} = \sum_{i=1}^n (U_i \times T_i \times M_i \times \rho_{\text{rock}}) \times 10^{-5} \quad (4)$$

式中 Q_{shale} ——纯页岩油资源量, 10^8t ;

U_i ——第 i 个小面元的页岩面积, km^2 ;

T_i ——第 i 个小面元的页岩厚度, m;

M_i ——第 i 个小面元的页岩可动油含量, mg/g;

ρ_{rock} ——页岩密度, t/m^3 。

1.2 关键参数求取方法

本文重点研究小面元体积法涉及的 S_1 和轻烃恢复系数两个重要参数。

1.2.1 小面元 S_1 求取方法

页岩取心样品往往集中分布在少数几口井上, 页岩热解 S_1 数据的平面分布范围是有限的, 不可能覆盖研究区所有的小面元, 因此需要通过合理的计算过程获得每个小面元的 S_1 。TOC 图件作为历次油气资源评价最重要的基础性图件, 早已得到各油田公司的重视, 并且基本上均有现成的工业图件。因此, 通过空间数据插值处理, 就能得到每个小面元的 TOC 数据。只要建立 S_1 与 TOC 的关系, 就能得到小面元的 S_1 。

基于鄂尔多斯盆地长 7 段页岩数据, 统计揭示, 热解的 S_1 与 TOC 具有较好的正相关性 (图 1)。因此, 将研究区所有 S_1 与 TOC 数据进行拟合, 建立 S_1 与 TOC 关系式, 然后再通过 TOC 平面分布图, 转化得到 S_1 分布图。计算 S_1 的经验公式 (拟合公式) 为

$$S_1 = 0.1779 \text{TOC} + 0.3924 \quad (5)$$

需要说明的是, 不同页岩层系具有不同的 S_1 与 TOC 关系式。

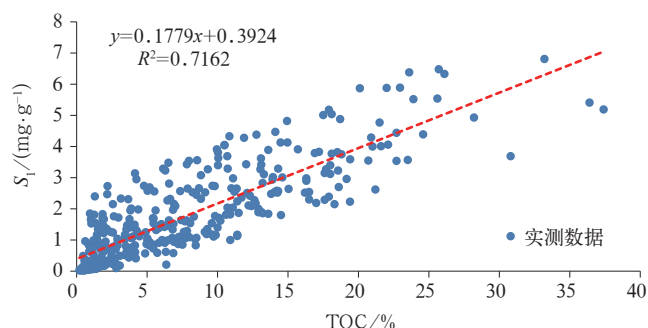


图 1 鄂尔多斯盆地长 7 段页岩 S_1 与 TOC 关系

Fig.1 Relationship between S_1 and TOC of shale in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

1.2.2 轻烃恢复系数求取方法

轻烃 (或称蒸发烃) 损失量的估算难度大。目前主要采用冷冻岩心 (或密闭岩心) 分阶段测试 S_1 的方法估算损失量。冷冻岩心测试方法为: (1) 地下岩心冷冻并密闭取心; (2) 地温密闭样品切割分组; (3) 第一组立即测试; (4) 第二、第三、第四组分别非密闭放置 24h、48h、72h 后测试, 依次得到 4 个 S_1 数据, 即 0、24h、48h 和 72h 的 S_1 。一般情况下, 将 0 和 72h 的 S_1 相比, 即 $S_1(0)/S_1(72h)$, 得到轻烃恢复系数。

Jiang 等^[34]测试得到轻烃损失量可达38%；Michael 等^[32]认为轻烃损失量与地下页岩油的密度有关，密度越轻损失量越大，反之损失量越小，指出中等密度页岩油轻烃损失量约为15%。谌卓恒等^[22]提出了一种利用地层体积系数计算样品中轻烃损失量的方法，Li 等^[4]对该方法进行了修正。郭秋麟等^[35]根据物质守恒原理，提出了一种基于页岩油密度及地层体积系数的计算方法，采用该方法计算出鄂尔多斯盆地长7段页岩油平均轻烃恢复系数为1.29，即轻烃损失29%。

本文采用基于冷冻岩心测试数据的拟合方法求取轻烃恢复系数。目前冷冻岩心测试数据还较少，随着页岩油勘探的发展，数据会越来越多，运用这种方法将更合适。图2为13个样品测试数据的轻烃恢复系数与 R_o 关系图。其中，右侧3个 R_o 大于1.0%的测点来自古龙页岩样品， R_o 由小到大分别为松页油2井、松页油1井和古页1井；左侧10个 R_o 小于1.0%的测点来自渤海湾盆地沙河街组页岩样品。尽管 R_o 大于1.0%的测试数据较少，但总体变化趋势是合理的。在新测试数据补充之前，认为图2中红色曲线还是可以使用的。在绘制评价区 R_o 平面图（油气资源评价的基础性图件）后，通过轻烃恢复系数与 R_o 关系曲线（图2），可以计算得到每个小面元的轻烃恢复系数。

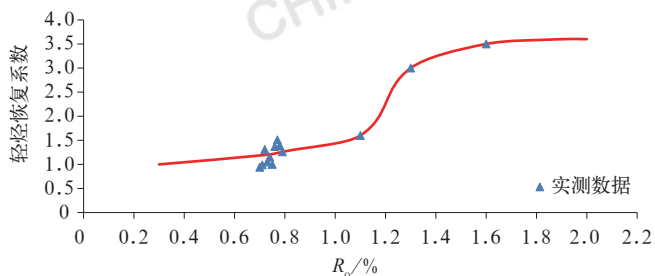


图2 冷冻岩心样品轻烃恢复系数与 R_o 关系曲线

Fig.2 Relationship curve between light hydrocarbon recovery coefficient and R_o of freezing core samples

2 资源评价参数下限标准

参数标准是页岩油资源评价的难题，目前认识还不一致，在国家、行业和企业等层次上也没有形成相关标准。本文主要基于油田现场的评价参数取值，总结前人的研究成果，结合统计数据，确定参数标准。

2.1 纯页岩油资源评价的参数下限

决定纯页岩油资源量大小的主要因素是页岩体积和 S_1 。在面积一定的前提下，页岩厚度是关键参数。 S_1 数据一般集中在少数取心井上，分布比较局限，难以形成全盆地（凹陷）平面分布图。而TOC和 R_o 数据，作为历次油气资源评价的重要基础性数据资料，主要含油气盆地的烃源岩层基本均有现成的工业图件（平面图）。因此，通过TOC和 R_o 来推算 S_1 ，再形成 S_1 平面图件，是目前页岩油资源评价的重要路径。由此得出，TOC、 R_o 和页岩厚度，是纯页岩油资源评价的关键参数。

通过研究，初步确定了页岩油资源评价的参数下限标准（表1）。

2.1.1 R_o 下限

赵文智等^[36]将成熟页岩的标准定为 $R_o \geq 1.0\%$ ；目前，大庆油田古龙页岩油研究团队初步确定 R_o 下限为0.75%，将 R_o 为0.75%~1.2%的页岩油划定为稀油，将 $R_o > 1.2\%$ 的页岩油划定为轻质油。本文建立了鄂尔多斯盆地长7段页岩氢指数与 R_o 关系（图3），从图3中得到：平均原始氢指数为700mg/g；当 $R_o=0.75\%$ 时，剩余氢指数为656mg/g，有效碳转化率为6.22%；当 $R_o=0.8\%$ 时，剩余氢指数为571mg/g，有效碳转化率为18.44%；当 $R_o=1.0\%$ 时，剩余氢指数为155mg/g，有效碳转化率为76.12%。以上有效碳转化率说明，0.75%定为 R_o 下限偏低，未大量转化为烃；1.0%定为 R_o 下限过高，早已过了50%的转化率。因此，将0.8%定为 R_o 下限。

表1 页岩油资源评价参数标准

Table 1 Parameter standard for shale oil resource evaluation

纯页岩油		夹层页岩油	
缺少 S_1 平面分布图	具备 S_1 平面分布图	在纯页岩油标准范围外	在纯页岩油标准范围内
TOC $\geq 2.0\%$	$S_1 > 1.0\%$ (S_1 未恢复轻烃损失量)	夹层累计厚度大于或等于5m	夹层累计厚度大于0
$R_o \geq 0.8\%$		平均孔隙度大于或等于4%	平均孔隙度大于或等于4%
页岩厚度大于或等于5m	页岩厚度大于或等于5m	含油饱和度大于或等于30%	含油饱和度大于或等于30%

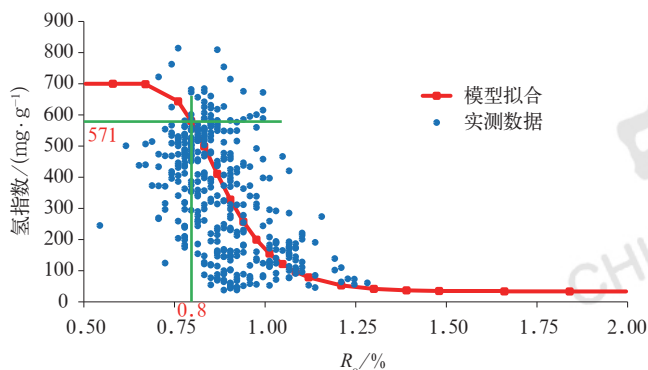
图3 鄂尔多斯盆地长7段页岩氢指数与 R_o 关系

Fig.3 Relationship between I_H and R_o of shale in the seventh member of Yanchang Formation shale in Ordos Basin

2.1.2 TOC 下限

中国历次(轮)油气资源评价均对有效烃源岩TOC下限有过探讨,但没有形成一致的结论,普遍认为下限值分布在0.5%~2.0%区间。黄东等^[37]研究四川盆地侏罗系大安寨段淡水湖相页岩的 S_1 与TOC关系,初步确定TOC下限为1.5%;卢双舫等^[38]研究松辽盆地南部青山口组成熟烃源岩的 S_1 与TOC关系,推荐2.0%作为油气富集的TOC下限。张金川^[39]依据页岩TOC、 R_o ,综合考虑埋深、含气量、页岩面积、厚度、地表条件、保存条件、可压裂性等因素,将海相页岩气核心区的TOC下限定为2.0%。本文基于松辽盆地北部青一段页岩和鄂尔多斯盆地长7段页岩的 S_1 与TOC关系(图1、图4),并综合考虑前人研究成果和目前资源评价的基本认识,将高效生烃的页岩TOC下限定为2.0%。

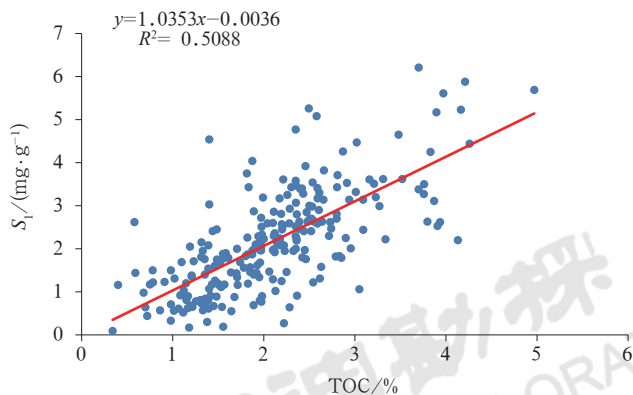
图4 松辽盆地青一段 S_1 与TOC关系

Fig.4 Relationship between S_1 and TOC of shale in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

2.1.3 页岩厚度下限

主要考虑水平井压裂所需的厚度,同时参考国家

标准《页岩油地质评价方法》^[40]。因此,确定页岩厚度下限为5m。

2.1.4 S_1 下限

卢双舫等^[38]将页岩油分散资源与低效资源的 S_1 界线定为0.3~0.8mg/g;将页岩油低效资源与富集资源的 S_1 界线定为1.1~3.8mg/g。黄东等^[37]将无效资源和低效资源的 S_1 界线定为1.0mg/g。考虑到 S_1 的轻烃损失,目前1.0mg/g的 S_1 恢复轻烃后大概在1.3~2.0mg/g之间。因此,将 S_1 下限定为1.0mg/g。

2.2 夹层页岩油资源评价的参数下限

决定夹层页岩油资源量大小的主要因素是夹层累计厚度、孔隙度和含油饱和度等参数。

在纯页岩油标准范围外,符合夹层页岩油(含混积岩页岩油)的参数标准为:夹层累计厚度大于或等于5m,平均孔隙度大于或等于4%,含油饱和度大于或等于30%(表1)。

在纯页岩油标准范围内,考虑到纯页岩油与夹层页岩油一起压裂和开采的现状,即使夹层累计厚度小于5m,只要夹层孔隙度达到4%并且含油饱和度达到30%,也应该计算页岩油资源量。

2.2.1 夹层累计厚度下限

鄂尔多斯盆地庆城油田长7段页岩油探明储量计算采用4m作为有效厚度下限。资源评价与储量计算不同,由于涉及的评价区面积大,总体勘探程度相对较低,无法确认有效厚度,通常只能采用推测的储层厚度。在评价资源量时,通过估算大概的石油充满系数后,将厚度转化为有效厚度。本文确定5m作为夹层累计厚度下限,主要依据水平井压裂所需的厚度和国家标准《页岩油地质评价方法》^[40]。

2.2.2 孔隙度下限

孔隙度下限的认识比较一致,集中在4%~6%之间。庆城油田长7段页岩油探明储量计算采用6%作为孔隙度下限。邱振等^[41-43]基于准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组含油致密储层孔隙度主要分布范围为4%~16%的统计数据,将4%定为孔隙度下限;郭秋麟等^[44]对致密储层物性进行研究,认为4%是孔隙度下限标准。鄂尔多斯盆地延长组长7段储层孔隙度与含油气性统计数据揭示,孔隙度小于4%的夹层含油性差(图5)。因此,将4%定为孔隙度下限。

2.2.3 含油饱和度下限

通常把致密储层含油饱和度下限定在50%上下^[44],庆城油田长7段页岩油探明储量计算采用55%作为

含油饱和度下限。以往的资源评价对饱和度下限研究较少,不像储量计算有明确的含油饱和度数据,资源评价时含油饱和度数据通常是个估算值。含油饱和度与含油级别的统计数据揭示:荧光级含油饱和度小于30%;油迹含油饱和度为30%~50%;油斑及以上含油饱和度大于50%。因此,将30%定为含油饱和度下限。

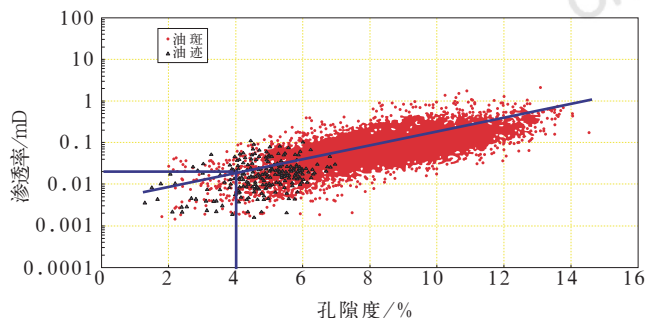


图5 鄂尔多斯盆地长7段储层孔隙度—渗透率关系图
Fig.5 Relationship between reservoir porosity and permeability in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

3 松辽盆地青一段页岩油资源潜力评价

松辽盆地北部白垩系青山口组一段(青一段)页岩油,因首次突破发生在古龙凹陷,油田习惯将青山口组页岩油称为古龙页岩油。近几年,古龙页岩油的勘探已取得显著进展^[9-11]。松页岩油1HF井、英X58井试采产量、压力稳定,表现长期稳定产油能力;古页岩油平1井成功实现纯页岩储层大规模压裂,压裂后日产油38.1m³,日产气13165m³;英页岩1H井试油也获得高产。据统计,截至2021年8月25日,大庆油田古龙页岩油探区面积达1.46×10⁴km²,2021年落实含油面积1413km²,新增石油预测地质储量12.68×10⁸t。古龙页岩油是一种主要由页岩页理储存的纯页岩油,具有轻烃含量高、产量高的特点,在全球还没有类似的页岩油。为了部署下一步规模勘探与生产,需要尽早落实页岩油资源潜力,特别是轻质油的资源潜力。

3.1 地质背景及页岩特征

松辽盆地是在海西期褶皱基底之上发育起来的晚中生代裂陷盆地。在早白垩世早期之前盆地以伸展作用为主,形成松辽盆地早期相互分割的断陷盆地。上白垩统青一段主要赋存纯页岩油,夹层页岩油相对较少。因此,本文重点评价纯页岩油资源潜力。

青一段优质页岩集中分布在齐家—古龙凹陷和三肇凹陷。古页岩1井和古页岩油平1井试油测试数据显示,

页岩油颜色为草绿色,气油比均超过1000m³/m³,具有油质轻、密度低、黏度低等特点^[9]。

青一段页岩有机质丰度高,平均TOC为2.84%,氯仿沥青“A”含量为0.42%,生油潜量为16.37mg/g,有机质类型以I型、II₁型为主,R₀最大超过1.6%,达到轻质油和凝析油阶段,非常有利于页岩油的开发。青一段有机碳含量大于2%的页岩分布范围较广(图6),按R₀>0.8%范围统计(图7),面积达到1.45×10⁴km²,在三肇凹陷和齐家—古龙凹陷一带,青一段页岩厚度一般达到40~70m(图8)。反映出青一段页岩沉积时期,湖泊藻类等水生生物一直发育,湖底始终处于厌氧环境,从而形成了这种厚度较大的大套高丰度优质页岩。

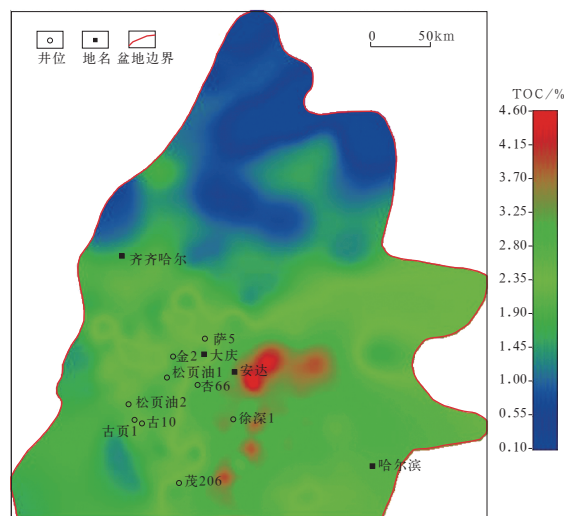


图6 松辽盆地青一段有机碳含量分布图
Fig.6 TOC distribution of shale in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

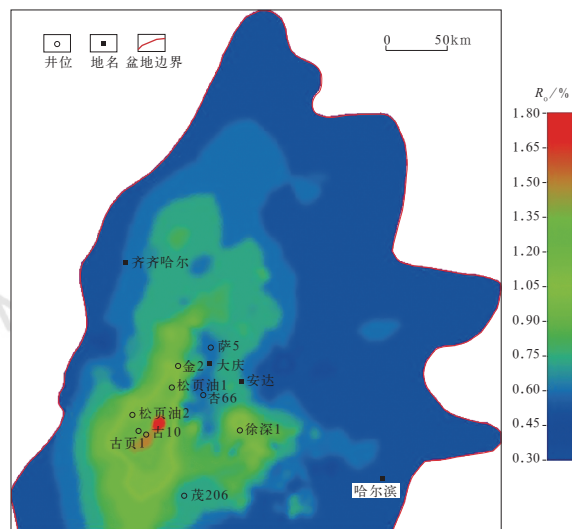


图7 松辽盆地青一段R₀分布图
Fig.7 R₀ distribution of shale in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

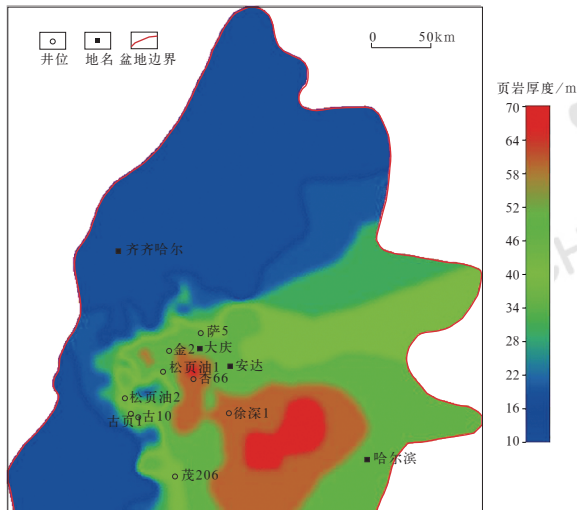


图8 松辽盆地青一段页岩厚度分布图

Fig.8 Shale thickness map of the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

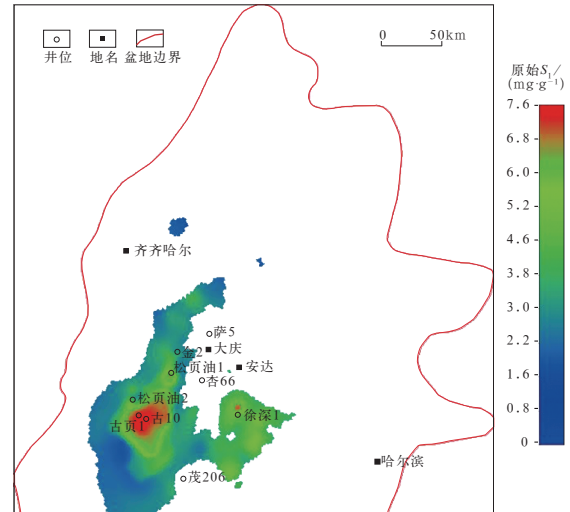
图9 松辽盆地青一段原始 S_1 分布

Fig.9 Original S_1 distribution of shale in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

青一段页岩油储层的岩石类型以页岩为主，其次为粉砂岩和细砂岩。页岩中纹层状构造发育，纹层密度多达9条/mm，有机质孔隙和粒间孔也较发育^[45]。页岩油为页理型页岩油，页岩岩性纯，主要由粒度小于0.0039mm的黏土矿物组成，岩性细腻，肉眼可见的纹层不发育，是泥级纯页岩。古龙页岩层具有与常规储层不同的独特储集空间，页理缝和与黏土矿物有关的孔隙是主要的储集空间。与常规认识不同，古龙页岩中细粒的沉积物大孔隙较为发育。王凤兰等^[46]研究18口井测试资料后建立了物性评价标准：一类储层有效孔隙度大于或等于5.0%，总孔隙度大于或等于8.0%；二类储层有效孔隙度大于或等于4.0%、小于5.0%，总孔隙度大于或等于6.0%、小于8.0%；三类储层有效孔隙度小于4.0%，总孔隙度小于6.0%。

总之，有机质丰度高、成熟度高、页岩页理缝和基质孔隙发育、地层流体压力异常高压，是轻质高产页岩油富集的关键^[10]。

3.2 青一段纯页岩油资源评价

3.2.1 原始 S_1 计算

经过拟合，青一段 S_1 与TOC具有较好相关性（图4）。根据TOC分布（图6），采用图4中的拟合公式，求出每个小面元的 S_1 ；根据有机质成熟度指标 R_o 分布（图7），采用轻烃恢复系数与 R_o 关系曲线（图2），求出每个小面元的轻烃恢复系数。将每个小面元的 S_1 与轻烃恢复系数相乘，得到小面元的原始 S_1 （图9）。

3.2.2 纯页岩油资源评价

在求得每个小面元原始 S_1 （图9）的基础上，结合青一段页岩厚度分布（图8），采用基于含油率的小面元体积法进行计算，计算范围按表1标准，页岩平均密度取 $2.5\text{t}/\text{m}^3$ 。评价结果揭示：青一段纯页岩油分布面积为 14481.31km^2 ，平均厚度为34.25m，平均资源丰度为 $36.07 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$ （图10），资源量为 $52.24 \times 10^8\text{t}$ （表2）。通过分级计算，得到 $R_o > 1.2\%$ 的资源量为 $11.18 \times 10^8\text{t}$ ，其余详见表2。

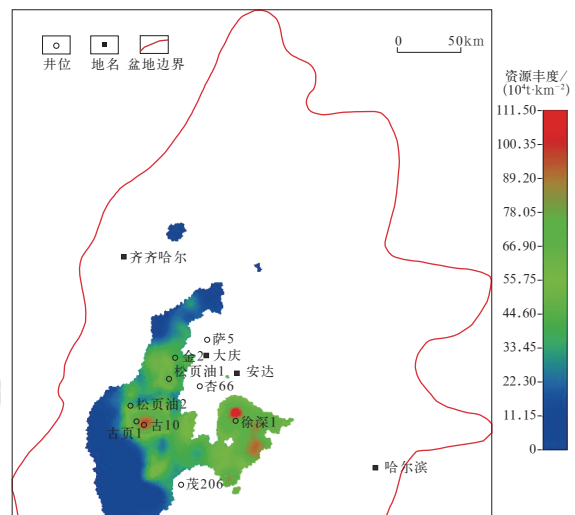


图10 松辽盆地青一段纯页岩油资源丰度

Fig.10 Resource abundance map of pure shale oil in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

表2 松辽盆地青一段页岩油资源评价结果

Table 2 Evaluation results of shale oil resources in the first member of Qingshankou Formation in Songliao Basin

$R_o/\%$	页岩油分级	平均厚度 /m	面积 /km ²	平均资源丰度 / (10 ⁴ t · km ⁻²)	资源量 / 10 ⁸ t
0.8~1.0	稀油	36.84	8247.60	34.65	28.58
1.0~1.2		33.72	3828.71	32.56	12.47
>1.2	轻质油	29.27	2405	46.51	11.19
合计 (平均)		(34.25)	14481.31	(36.07)	52.24

4 鄂尔多斯盆地长7段页岩油资源评价

2019—2021年, 中国石油在鄂尔多斯盆地湖盆中部发现了10亿吨级庆城大油田(单砂体厚度小于5m的夹层型页岩油), 长7段页岩油的勘探取得重大成效。2019年, 在华池地区东南部部署的城页1井和城页2井两口水平井, 试油分别获121.38t/d和108.38t/d的高产油流, 助推了夹层页岩油和纯页岩油的勘探进展^[13]。湖盆中半深湖—深湖区页岩分布面积广, 成熟—高成熟区面积约为 $2.6 \times 10^4 \text{km}^2$, 估算其远景资源量约为 $60 \times 10^8 \text{t}$, 是页岩油下一步攻关探索的潜在领域^[14]。在2021年松辽盆地古龙纯页岩油的勘探突破后, 长7₃亚段页岩油的资源潜力得到了重视。因此, 有必要分别评价纯页岩油和夹层页岩油的资源潜力。

4.1 地质背景及页岩特征

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组是一套陆相碎屑岩沉积地层, 南厚北薄, 最大厚度超过1000m, 自上而下划分为长1—长10共10个油层组(段), 其中致密油、页岩油位于第7个油层组, 简称长7段。长7段又可细分为3个亚组(亚段), 从上到下依次为长7₁、长7₂和长7₃亚段。长7段分布面积约为 $10 \times 10^4 \text{km}^2$, 埋深在600~2900m之间, 厚度为70~130m, 是一套深湖、半深湖、浅湖、三角洲前缘沉积。其中, 长7₁和长7₂亚段均发育厚层细砂岩、薄层粉砂岩和泥质粉砂岩; 长7₃亚段岩性以厚层黑色页岩和深灰色泥岩为主, 也发育部分薄层粉砂岩和泥质粉砂岩, 有机质类型主要为I型和II型, 正处于大量生油阶段, 生烃潜力大, 为优质烃源岩^[47]。

本文重点评价长7₃亚段夹层页岩油和纯页岩油两部分。

4.2 长7₃亚段夹层页岩油资源评价

夹层以砂体为主, 单层厚度小于5m, 集中段厚度主要分布在5~15m之间, 最大超过20m。403个孔隙度实测数据表明, 约78%的样品孔隙度小于8% (图11)。

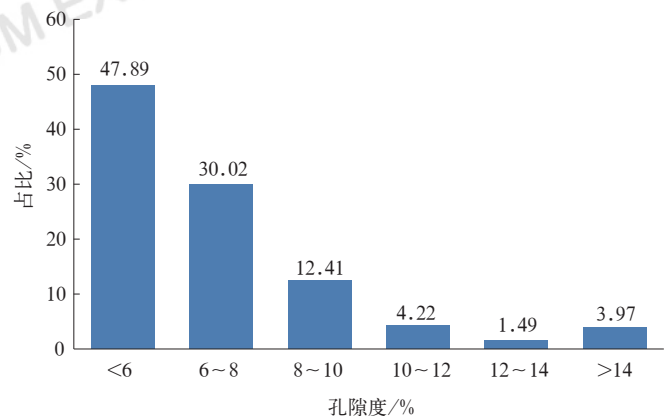


图11 鄂尔多斯盆地长7₃亚段实测砂岩孔隙度分布
Fig.11 Statistics diagram of the measured porosity of sandstone reservoir in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

夹层页岩油采用小面元容积法进行评价, 主要参数包括: 砂岩夹层厚度(图12)、孔隙度(图13)、含油饱和度、原油密度、原油体积系数等。其中, 含油饱和度取70%, 原油密度取 0.84t/m^3 , 原油体积系数取1.26, 净储比(净储层厚度与夹层厚度之比)取0.5。计算范围按表1标准。评价结果揭示: 长7₃亚段夹层页岩油分布面积为 17006km^2 , 平均厚度为8.27m, 平均资源丰度为 $16.31 \times 10^4 \text{t/km}^2$, 资源量为 $27.74 \times 10^8 \text{t}$ (图14、表3)。

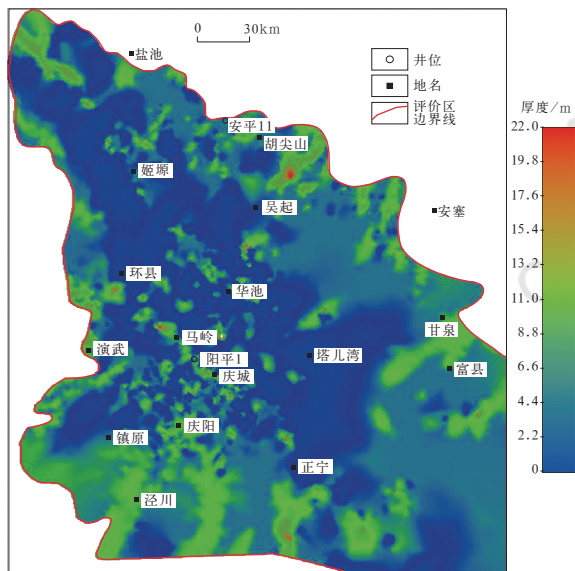


图 12 鄂尔多斯盆地长₇亚段砂岩夹层厚度分布图
Fig.12 Interlayer sandstone thickness map of the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

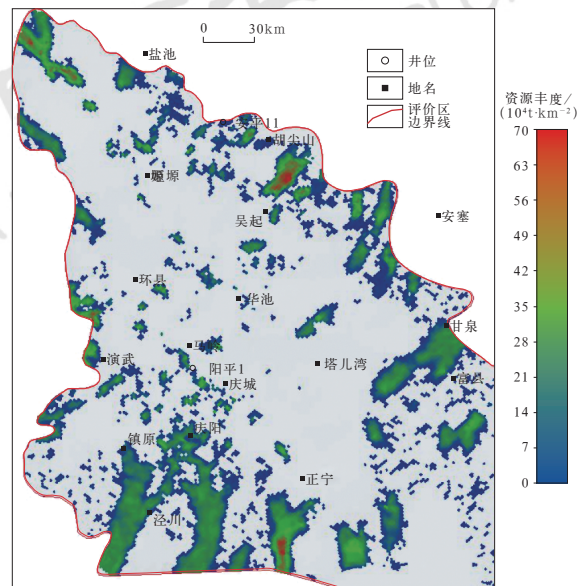


图 14 鄂尔多斯盆地长₇亚段砂岩夹层页岩油资源丰度分布图
Fig.14 Resource abundance map of interlayer shale oil in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

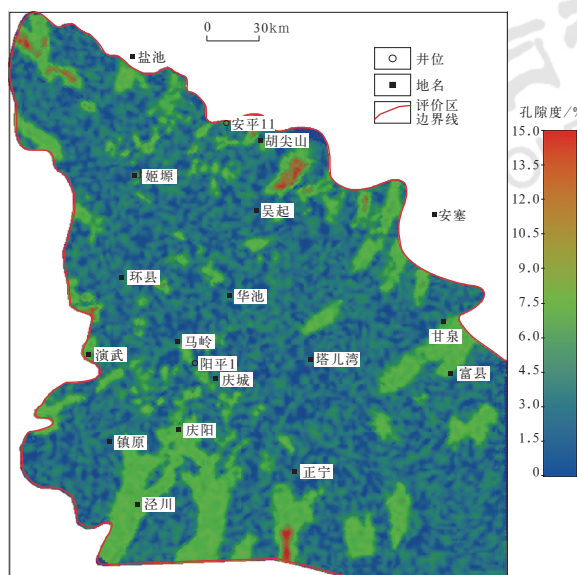


图 13 鄂尔多斯盆地长₇亚段砂岩夹层孔隙度分布图
Fig.13 Porosity distribution of interlayer sandstone in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

4.3 长₇亚段纯页岩油资源评价

纯页岩油采用基于含油率的小面元体积法进行计算, 主要参数包括: 有机碳含量(图 15)、有机质成熟度(图 16)、页岩厚度(图 17)和页岩含油率(即原始 S_1)。采用上文提到的方法, 即公式 (5) 和图 1 计算 S_1 , 采用图 2 中的曲线计算轻烃恢复系数。评价范围按表 1 标准, 页岩平均密度取 $2.5\text{t}/\text{m}^3$ 。评价结果揭示: 长₇亚段纯页岩油分布面积为 24724km^2 , 平均厚度为 32.58m , 平均资源丰度为 $15.80 \times 10^4\text{t}/\text{km}^2$, 资源量为 $39.06 \times 10^8\text{t}$ (图 18、表 3)。

5 准噶尔盆地芦草沟组页岩油资源评价

据统计, 截至 2021 年 6 月 19 日, 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组下甜点 58 号平台 8 口水平井投产 30 天, 日产油达 340t, 单井平均日产油 42.5t, 单井最高日产 61.5t。芦草沟组页岩油主要赋

表 3 鄂尔多斯盆地长₇亚段页岩油资源评价结果

Table 3 Evaluation results of shale oil resources in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

页岩油类型	面积 / km^2	平均厚度 /m	资源丰度 /($10^4\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)	资源量 / 10^8t
夹层型 (砂岩)	17006	8.27	16.31	27.74
纯页岩型	24724	32.58	15.80	39.06
合计				66.80

存在单层厚度小于5m的砂岩夹层集中段,上、下两个集中段分别被称为上甜点和下甜点。目前,勘探和生产的焦点是如何准确圈出甜点的分布范围,落实甜点区页岩油资源潜力。

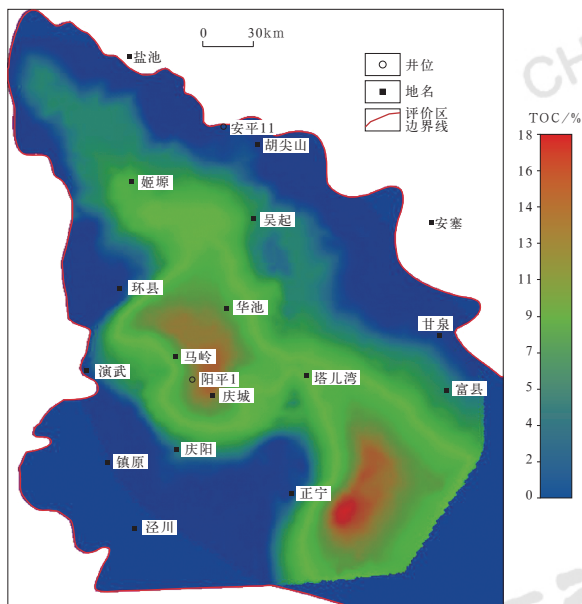


图 15 鄂尔多斯盆地长₇亚段 TOC 分布图

Fig.15 TOC distribution of shale in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

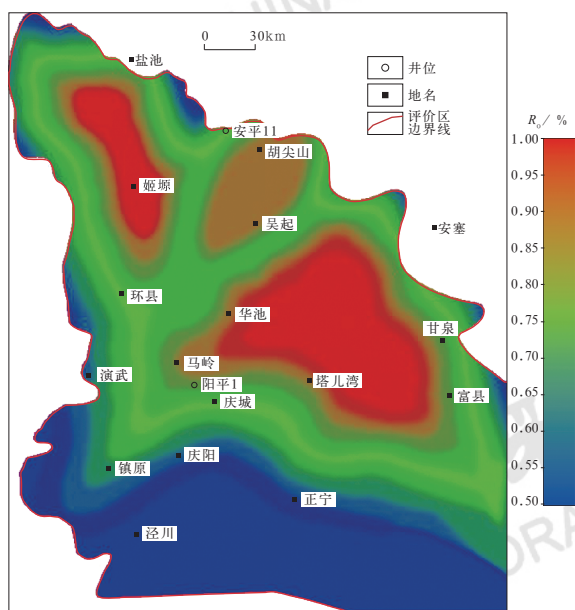


图 16 鄂尔多斯盆地长₇亚段页岩 R_o 分布图

Fig.16 R_o distribution of shale in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

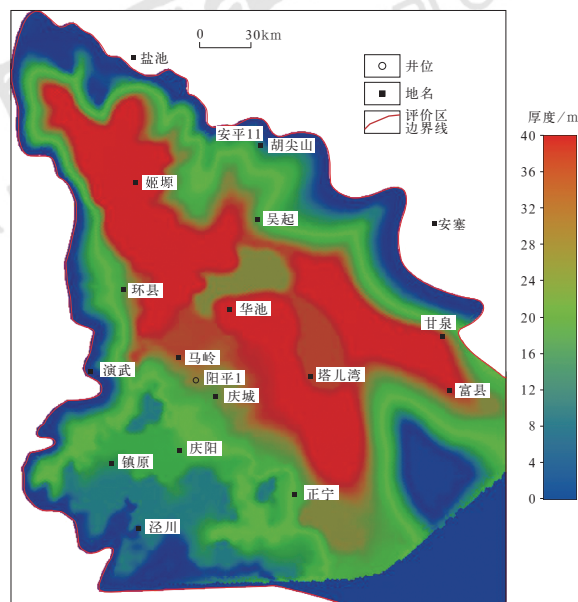


图 17 鄂尔多斯盆地长₇亚段页岩厚度分布图

Fig.17 Shale thickness map of the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

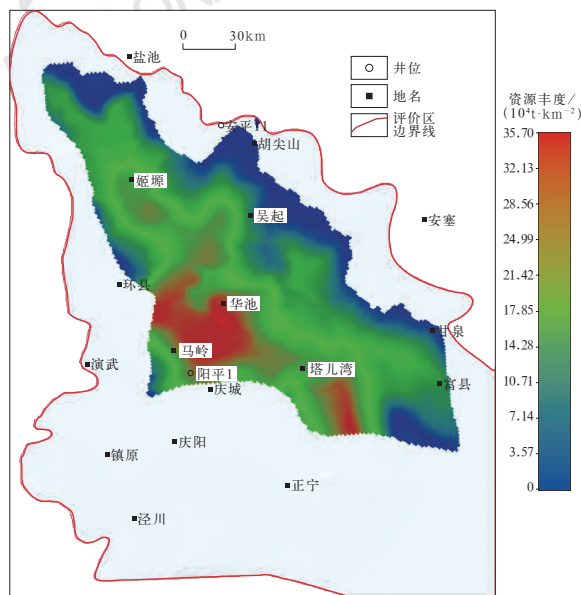


图 18 鄂尔多斯盆地长₇亚段纯页岩油资源丰度分布图

Fig.18 Resource abundance map of pure shale oil in the third sub member of the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin

5.1 地质背景及页岩特征

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部隆起的西南部,以前二叠系褶皱为基底,现今构造为一个相对独立的西断东超的箕状凹陷,面积约为1278km²。

二叠系芦草沟组整体呈现南厚北薄、西厚东薄的趋势,平均厚度为200~300m,最大厚度可达

350m。吉木萨尔凹陷沉积中心位于凹陷南部，烃源岩厚度在 100~250m 之间，其中芦草沟组二段烃源岩厚度大于 50m，面积为 887km²；芦草沟组一段烃源岩厚度大于 100m，面积为 1097km²。芦草沟组烃源岩母质类型总体偏好，主要为 I 型、II₁ 型、II₂ 型，其中泥岩类、石灰岩类和白云岩类有机质类型最好，以 II 型和 I 型为主。泥岩类有机质 TOC 值最高可达 15.51%，平均为 3.62%，热解生烃潜量（S₁+S₂）大于 6.0mg/g 的样品数占 66%，最高可达 176.65mg/g，平均为 17.95mg/g，氯仿沥青“*A*”含量平均为 0.2738%，属于优质烃源岩^[44]。

根据岩性、电性和核磁共振测井特征将芦草沟组划分为芦草沟组二段（P₂l₂）和芦草沟组一段（P₂l₁）两套砂泥岩组合。本文评价上甜点（芦草沟组二段砂岩段）、下甜点（芦草沟组一段砂岩段）和纯页岩段三部分。

5.2 夹层页岩油资源评价

砂岩夹层单层厚度小于 5m，通常小于 1m，集中段夹层高频出现，形成上、下两个甜点。

5.2.1 上甜点夹层页岩油资源评价

上甜点砂岩累计厚度平均为 12.65m（图 19），孔隙度分布情况见图 20，含油饱和度取 70%，原油密度取 0.88t/m³，原油体积系数取 1.06。计算范围按表 1 标准。采用小面元容积法进行评价，结果揭示：上甜点夹层型页岩油分布面积为 518.27km²，平均资源

丰度为 92.49×10⁴t/km²，资源量为 4.79×10⁸t（图 21、表 4）。

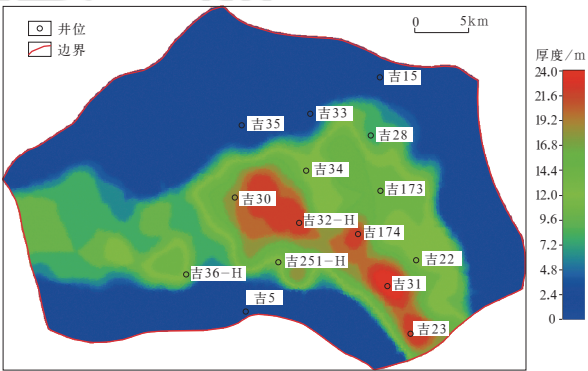


图 19 吉木萨尔凹陷芦草沟组上甜点砂岩厚度分布图
Fig.19 Sandstone thickness map of the upper sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

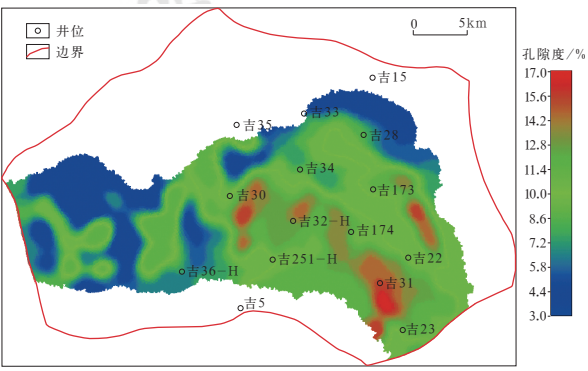


图 20 吉木萨尔凹陷芦草沟组上甜点砂岩孔隙度分布图
Fig.20 Sandstone porosity distribution of the upper sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

表 4 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油资源评价结果
Table 4 Evaluation results of shale oil resource in Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin

页岩油类型	TOC>2.0% 且 R _o >0.8% 范围		资源丰度 / (10 ⁴ t · km ⁻²)	资源量 /10 ⁸ t
	面积 /km ²	平均厚度 /m		
夹层型（上甜点）	518.27	12.65	92.49	4.79
夹层型（下甜点）	909.90	14.47	79.11	7.20
纯页岩型	827.53	204.71	43.80	3.63
合计				15.62

5.2.2 下甜点夹层页岩油资源评价

下甜点砂岩厚度平均为 14.47m（图 22），孔隙度分布情况见图 23，含油饱和度取 70%，原油密度取 0.88t/m³，原油体积系数取 1.06。计算范围按表 1

标准。采用小面元容积法进行评价，结果揭示：下甜点夹层型页岩油分布面积为 909.90km²，平均资源丰度为 79.11×10⁴t/km²，资源量为 7.20×10⁸t（图 24、表 4）。

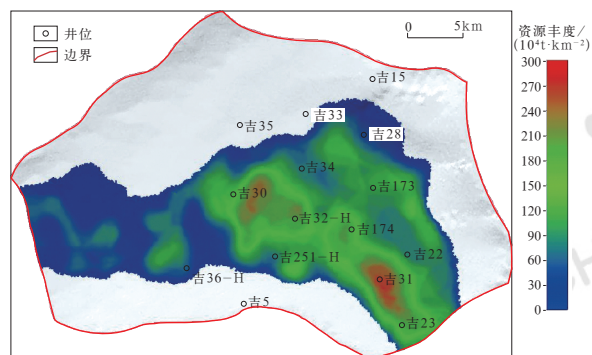


图 21 吉木萨尔凹陷芦草沟组上甜点页岩油资源丰度分布图
Fig.21 Resource abundance map of shale oil in the upper sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

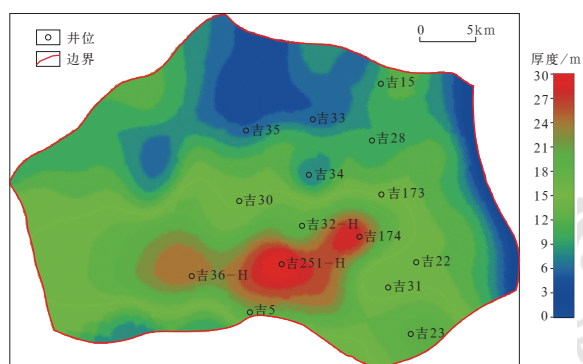


图 22 吉木萨尔凹陷芦草沟组下甜点砂岩厚度分布图
Fig.22 Sandstone thickness map of the lower sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

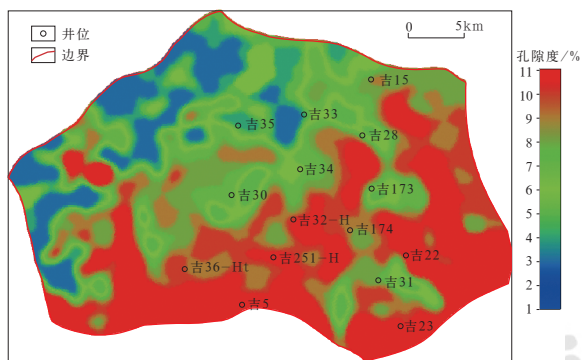


图 23 吉木萨尔凹陷芦草沟组下甜点砂岩孔隙度分布图
Fig.23 Sandstone porosity distribution of the lower sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

5.3 纯页岩油资源评价

同样采用基于含油率的小面元体积法评价芦草沟组纯页岩油, 主要参数包括: TOC (图 25)、 R_o (图 26)、页岩厚度 (图 27) 和页岩含油率 (即原始 S_1 含量)。其中,

S_1 平均值为 0.68mg/g , 轻烃恢复系数取 1.3。计算范围同样按表 1 标准, 页岩平均密度取 2.42t/m^3 。评价结果揭示: 纯页岩油分布面积为 827.53km^2 , 平均资源丰度为 $43.80 \times 10^4\text{t/km}^2$, 资源量为 $3.63 \times 10^8\text{t}$ (图 28、表 4)。

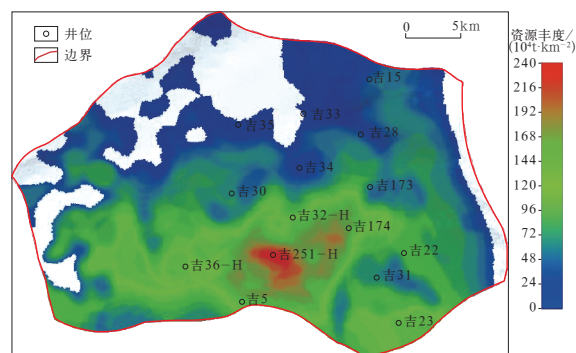


图 24 吉木萨尔凹陷芦草沟组下甜点页岩油资源丰度分布图
Fig.24 Resource abundance map of shale oil in the lower sweet spot interval in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

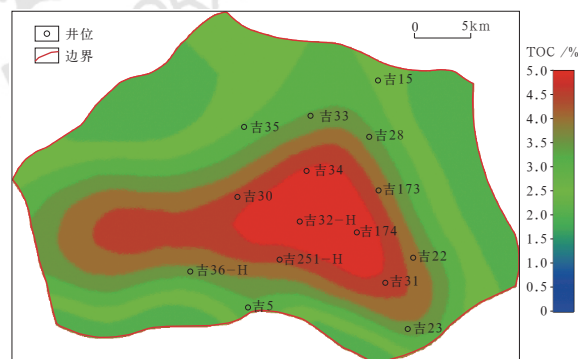


图 25 吉木萨尔凹陷芦草沟组 TOC 分布图
Fig.25 TOC distribution of shale in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

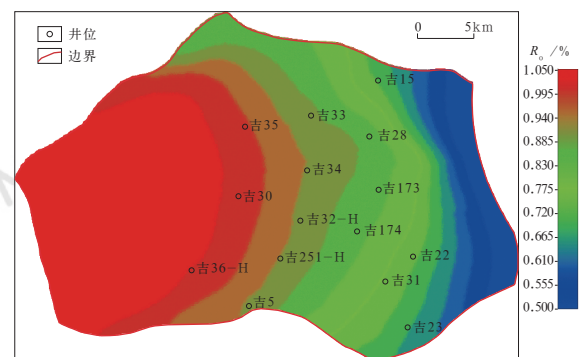


图 26 吉木萨尔凹陷芦草沟组 R_o 分布图
Fig.26 R_o distribution of shale in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

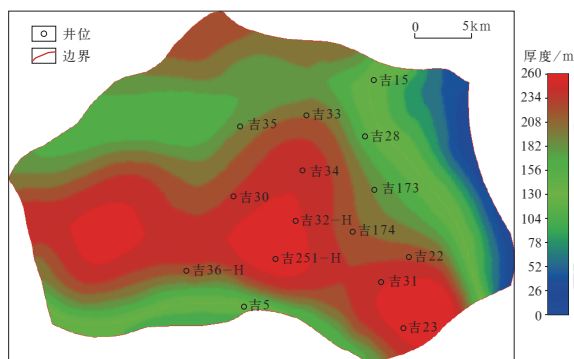


图 27 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩厚度分布图

Fig.27 Shale thickness map of Lucaogou Formation in Jimsar Sag

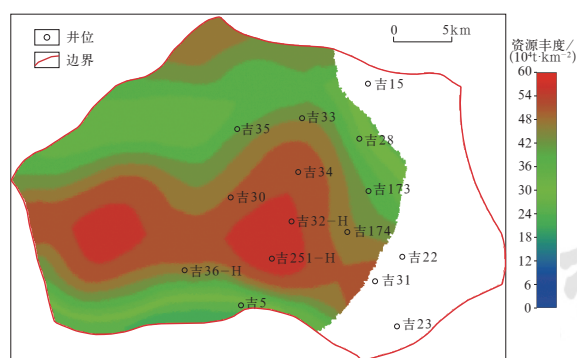


图 28 吉木萨尔凹陷芦草沟组纯页岩油资源丰度分布图

Fig.28 Resource abundance map of pure shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

6 结论

(1) 目前,页岩油,特别是纯页岩油,资源评价还处于探讨阶段。研究认为,现阶段中国夹层页岩油评价适宜采用小面元容积法,纯页岩油评价适宜采用小面元体积法(含油率法)。

(2) 轻烃损失量的恢复,是纯页岩油资源评价的关键。本文通过建立 S_1 与 TOC 拟合关系式、轻烃恢复系数与 R_o 关系曲线,求取小面元原始 S_1 ,为纯页岩油资源评价奠定基础。

(3) 页岩油资源评价关键参数及参数取值下限标准,是资源评价的核心技术。本文确定的关键参数及参数下限标准,可为中国页岩油资源评价提供参考。

(4) 中国页岩油资源潜力大,是油气勘探的重要战略领域。

参考文献

[1] Romero-Sarmiento M. A quick analytical approach to estimate both free versus sorbed hydrocarbon contents in liquid-rich

source rocks[J]. AAPG, 2019,103(9):2031-2043.

- [2] Li J B, Wang M, Chen Z H, *et al.* Evaluating the total oil yield using a single routine Rock-Eval experiment on as-received shales [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019,144:104707.
- [3] Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Liuzhuang Xiaoxue, *et al.* Evaluation method for resource potential of shale oil in the Triassic Yanchang Formation of the Ordos Basin, China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2020,38(4):841-866.
- [4] Li M W, Chen Z H, Qian M H, *et al.* What are in pyrolysis S_1 peak and what are missed? Petroleum compositional characteristics revealed from programmed pyrolysis and implications for shale oil mobility and resource potential[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 217:103321.
- [5] EIA. Drilling productivity report for key tight oil and shale regions[R]. Report, Energy Information Administration, U.S., 2017.
- [6] Han Y, Horsfield B, Mahlstedt N, *et al.* Factors controlling source and reservoir characteristics in the Niobrara shale-oil system, Denver Basin[J]. AAPG, 2019,103(9):2045-2072.
- [7] Kuske S, Horsfield B, Jweda J, *et al.* Geochemical factors controlling the phase behavior of Eagle Ford Shale petroleum fluids[J]. AAPG, 2019,103(4):835-870.
- [8] 杨雷, 金之钧. 全球页岩油发展及展望 [J]. 中国石油勘探, 2019,24(5): 553-559.
Yang Lei, Jin Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):553-559.
- [9] 孙龙德. 古龙页岩油(代序) [J]. 大庆石油地质与开发, 2020,39(3): 1-7.
Sun Longde. Gulong shale oil[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(3):1-7.
- [10] 何文渊, 蒙启安, 张金友. 松辽盆地古龙页岩油富集主控因素及分类评价 [J]. 大庆石油地质与开发, 2021,40(5):1-12.
He Wenyan, Meng Qi'an, Zhang Jinyou. Controlling factors and their classification - evaluation of Gulong shale oil enrichment in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):1-12.
- [11] 冯子辉, 霍秋立, 曾花森, 等. 松辽盆地古龙页岩有机质组成与有机质孔形成演化 [J]. 大庆石油地质与开发, 2021,40(5):40-55.
Feng Zihui, Huo Qiuli, Zeng Huasen, *et al.* Organic matter compositions and organic pore evolution in Gulong shale of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):40-55.
- [12] 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展 [J]. 中国石油勘探, 2019,24(5): 601-614.
Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Tan Weidong, *et al.* The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang 7 member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):601-614.
- [13] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践 [J]. 石油勘探与开发, 2020,47(5):870-883.

- Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, *et al.* Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(5):870–883.
- [14] 付金华, 刘显阳, 李士祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段页岩油勘探发现与资源潜力[J]. *中国石油勘探*, 2021,26(5):1–11.
- Fu Jinhua, Liu Xianyang, Li Shixiang, *et al.* Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(5):1–11.
- [15] 支东明, 唐勇, 郑梦林, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷凤城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):615–623.
- Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, *et al.* Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):615–623.
- [16] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 等. 中国石化页岩油勘探实践与展望[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):569–575.
- Sun Huanquan, Cai Xunyu, Zhou Dehua, *et al.* Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):569–575.
- [17] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):560–568.
- Du Jinhua, Hu Suyun, Pang Zhenglian, *et al.* The types, potentials and prospects of shale oil in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):560–568.
- [18] Clarkson C R, Pedersen P K. Production analysis of Western Canadian unconventional light oil plays[R]. SPE-149005, 2011.
- [19] Guo Q L, Wang S J, Chen X M. Assessment on tight oil resources in major basins in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019,178(7):52–63.
- [20] Li M W, Chen Z H, Ma X X, *et al.* A numerical method for calculating total oil yield using a single routine Rock–Eval program: a case study of the Eocene Shahejie Formation in Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018,191:49–65.
- [21] Li M W, Chen Z H, Ma X X, *et al.* Shale oil resource potential and oil mobility characteristics of the Eocene–Oligocene Shahejie Formation, Jiyang Super–Depression, Bohai Bay Basin of China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019,204:130–143.
- [22] 湛卓恒, 黎茂稳, 姜春庆, 等. 页岩油的资源潜力及流动性评价方法: 以西加拿大盆地泥盆统 Duvernay 页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019,40(3):459–468.
- Chen Zhuoheng, Li Maowen, Jiang Chunqing, *et al.* Shale oil resource potential and its mobility assessment: a case study of Upper Devonian Duvernay shale in Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,40(3):459–468.
- [23] Guo Qiulin, Chen Xiaoming, Wang Jian, *et al.* An improved hydrocarbon generating model of source rocks and its application: a case study of shale oil in-situ transformation of the Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2021,39(3):63–87.
- [24] 郭秋麟, 米敬奎, 王建, 等. 改进的生烃潜力模型及关键参数模板[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(5):661–669.
- Guo Qiulin, Mi Jingkui, Wang Jian, *et al.* An improved hydrocarbon generation model of source rocks and key parameter templates[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(5):661–669.
- [25] Modica C J, Lapierre S G. Estimation of kerogen porosity in source rocks as a function of thermal transformation: example from the Mowry Shale in the Powder River Basin of Wyoming[J]. *AAPG*, 2012,96(1):87–108.
- [26] Chen Z, Jiang C. A revised method for organic porosity estimation in shale reservoirs using Rock–Eval data: example from Duvernay Formation in the Western Canada Sedimentary Basin[J]. *AAPG*, 2016,100(3):405–422.
- [27] 杨维磊, 李新宇, 徐志, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区长 7 段页岩油资源潜力评价[J]. *海洋地质前沿*, 2019,35(4):48–54.
- Yang Weilei, Li Xinyu, Xu Zhi, *et al.* Shale oil resources assessment for the member Chang 7 in Ansai area of Ordos Basin[J]. *Marine Geology Frontier*, 2019,35(4):48–54.
- [28] 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 Haitao, Tian Shansi, Wang Weiming, *et al.* Correction of oil content: one key parameter in shale oil resource assessment[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016,37(1):15–22.
- [29] 余涛, 卢双舫, 李俊乾, 等. 东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J]. *断块油气田*, 2018,25(1):16–21.
- Yu Tao, Lu Shuangfang, Li Junqian, *et al.* Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag[J]. *Fault–Block Oil & Gas Field*, 2018,25(1):16–21.
- [30] 朱日房, 张林晔, 李政, 等. 陆相断陷盆地页岩油资源潜力评价: 以东营凹陷沙三下亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2019,26(1):129–137.
- Zhu Rifang, Zhang Linye, Li Zheng, *et al.* Evaluation of shale oil resource potential in continental rift basin: a case study of Lower Es₃ member in Dongying Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019,26(1):129–137.
- [31] Jarvie D M. Shale resource systems for oil and gas: part 2–shale–oil resource systems[C]// Breyer J A, (ed.), *Shale reservoirs–giant resources for the 21st century*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 2012,97:89–119.
- [32] Michael G E, Packwood J, Holba A. Determination of in-situ hydrocarbon volumes in liquid rich shale plays[R]. Denver, Colorado, USA: Unconventional Resources Technology Conference, 2013.
- [33] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. *石油实验地质*, 2016,38(6):842–849.
- Jiang Qigui, Li Maowen, Qian Menhui, *et al.* Quantitative characterization of shale oil in different occurrence state and its application[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016,38(6):842–849.
- [34] Jiang C Q, Chen Z H, Mort A, *et al.* Hydrocarbon evaporative loss from shale core samples as revealed by Rock–Eval and thermal desorption–gas chromatography analysis: its geochemical and geological implications[J]. *Marine and*

- Petroleum Geology, 2016,70:294–303.
- [35] 郭秋麟, 王建, 陈晓明, 等. 页岩油原地量与可动油量评价方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2021,42(6):1451–1463.
- Guo Qiulin, Wang Jian, Chen Xiaoming, *et al.* Discussion on evaluation method of total oil and movable oil in-place[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(6):1451–1463.
- [36] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(4):537–545.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(4):537–545.
- [37] 黄东, 段勇, 李育聪, 等. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 中国石油勘探, 2018,23(6):38–45.
- Huang Dong, Duan Yong, Li Yucong, *et al.* Study on the TOC lower limit of shale oil and gas of freshwater lake facies: a case study on the Jurassic Da'anzhai member in the Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(6):38–45.
- [38] 卢双舫, 黄文彪, 陈芳文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012,39(2):249–256.
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, *et al.* Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):249–256.
- [39] 张金川. 页岩气有利区优选标准[R]. 贵州: 全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选会议, 2011.
- Zhang Jinchuan. Favorable zone optimization standard of shale gas[R]. Guizhou: Symposium on Investigation and Evaluation of National Shale Gas Resources Potential and Favorable Zone Optimization, 2011.
- [40] 国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration of Market Supervision and Administration and State Committee for Standardization Administration. Evaluation method of shale oil geology: GB/T 38718—2020 [S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [41] 邱振, 吴晓智, 唐勇, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油资源评价[J]. 天然气地球科学, 2016,27(9):1688–1698.
- Qiu Zhen, Wu Xiaozhi, Tang Yong, *et al.* Resource assessment of tight oil from the Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(9):1688–1698.
- [42] 梁世君, 罗劝生, 康积伦, 等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探1井风险勘探突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021,26(4):72–83.
- Liang Shijun, Luo Quansheng, Kang Jilun, *et al.* Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(4):72–83.
- [43] 高阳, 叶义平, 何吉祥, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践[J]. 中国石油勘探, 2020,25(2):133–141.
- Gao Yang, Ye Yiping, He Jixiang, *et al.* Development practice of continental shale oil in the Jimsar Sag in the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):133–141.
- [44] 郭秋麟, 曹宏, 吴松涛, 等. 致密油“甜点区”预测[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- Guo Qiulin, Cao Hong, Wu Songtao, *et al.* “Sweet Zone” prediction of tight oil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [45] 张安达, 王继平, 王永超, 等. 松辽盆地古龙页岩储集空间类型及油赋存状态[J]. 大庆石油地质与开发, 2021,40(5):68–76.
- Zhang Anda, Wang Jiping, Wang Yongchao, *et al.* Reservoir space types and oil occurrence of Gulong shale in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):68–76.
- [46] 王凤兰, 付志国, 王建凯, 等. 松辽盆地古龙页岩油储层特征及分类评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2021,40(5):144–155.
- Wang Fenglan, Fu Zhiguo, Wang Jiankai, *et al.* Characteristics and classification evaluation of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021,40(5):144–155.
- [47] 郭秋麟, 武娜, 陈宁生, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段致密油资源评价[J]. 石油学报, 2017,38(6):658–665.
- Guo Qiulin, Wu Na, Chen Ningsheng, *et al.* Assessment of tight oil resource in seventh member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017,38(6):658–665.