Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2018, 8(3), 475-483
Published Online June 2018 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2018.83051

Hans汉斯

Low-Permeability Petroleum Resource Assessment Methods of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

Ke Wang[1], Lu Chen[2], Yalin Qi[3], Yuanhao Li[1], Jinlian Pang[3], Xin Liu[3]

[1]School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi
[2]Reservoirs Evaluation Center, China Petroleum Logging Co., Ltd., PetroChina, Xi'an Shaanxi
[3]Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an Shaanxi
Email: qiyl_cq@petrochina.com.cn

Received: May 17th, 2018; published: Jun. 4th, 2018; published: Jun. 11th, 2018

Abstract

More than 90% of the reservoirs are low-permeability in the Triassic Yanchang formation. Some newly geological understandings, such as hydrocarbon forming mechanism of quality hydrocarbon source rock of Chang 7 formation, traction flow and gravity flow genetic composite sand body of delta front in central of lake basin, the mechanism of multi-layers multiply forming poll rules, continuity of reservoir distribution law and so on, are produced in recent years, which has played significant role in oil exploration and production, and also laid the foundation for the further understanding of the potential of the oil resources of the basin. The low-permeability reservoir was different from the conventional reservoir in the aspects of accumulation mechanism, occurrence and distribution, which result in the different methods of hydrocarbon resource assessment. Because the wide-spread characteristic of the low-permeability reservoir of Triassic Yanchang formation in Ordos Basin, the detailed research about geologic conditions of hydrocarbon accumulation was made, which formed the evaluation reason of mainly the geologic analysis and secondly statistic analysis. Based on the geologic risk analysis, evaluation of efficient source rocks and fine reservoir analysis, the analogy method, genetic method and statistic method were selected to evaluate the low-permeability petroleum resource of Ordos basin, and the strategic steps of various methods were introduced. All the above evaluation methods included various aspects of the practice, such as geological analysis, mathematical statistics, exploration and production. Comprehensive assessment using multiple methods is the basis for objectively evaluating the low-permeability oil resources.

Keywords

Ordos Basin, Low Permeability, Resource Assessment, Hydrocarbon Accumulation, Tight Oil

文章引用: 王克, 陈璐, 齐亚林, 李元昊, 庞锦莲, 刘鑫. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透石油资源评价方法[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(3): 475-483. DOI: 10.12677/ag.2018.83051

鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透石油资源评价方法

王　克[1]，陈　璐[2]，齐亚林[3]，李元昊[1]，庞锦莲[3]，刘　鑫[3]

[1]西安石油大学地球科学与工程学院，西安
[2]中国石油测井有限公司油气评价中心，西安
[3]中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院，西安
Email: qiyl_cq@petrochina.com.cn

收稿日期：2018年5月17日；录用日期：2018年6月4日；发布日期：2018年6月11日

摘　要

鄂尔多斯盆地三叠系延长组90%以上的油藏属于低渗透油藏。近年来盆地三叠系延长组相继提出了长7优质烃源岩成烃机理、湖盆中部三角洲前缘牵引流及重力流复合成因砂体、多层系复合成藏规律、连续性油藏分布规律等地质新认识，对石油勘探生产作用显著，也为进一步认识盆地石油资源潜力奠定了基础。低渗透油藏与常规油藏在成藏机理、赋存状态、分布规律等方面有较大差异，其资源评价思路及方法也有所不同。针对鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透油藏大面积分布的特点，详细分析了烃源岩、储集层等成藏地质条件，明确了以地质评价为主、统计分析为辅的评价思路。在开展地质风险分析、有效烃源岩评价、精细油藏解剖的基础上优选了类比法、成因法、统计法共三大类五种较为适用的评价方法，并详细介绍了各种方法的关键步骤。上述评价方法涉及了地质分析、数理统计、勘探生产实践各个方面，开展多方法综合评价是客观评价低渗透石油资源的基础。

关键词

鄂尔多斯盆地，低渗透，资源评价，成藏，致密油

1. 引言

油气资源具有显著的不确定性和可探明性，勘探工作的实质就是不断揭示不确定性，使其转化为可探明性的过程。根据油藏类型划分方案[1]，储层渗透率低于 50 mD 的油藏即为低渗透油藏。就勘探程度而言，低渗透油藏尚属于勘探早期阶段，对其成藏机理及油藏分布规律的研究尚不成熟，但其与常规油藏之间存在密切联系，成藏条件的研究相对成熟，兼顾了盆地级和区带级的资源评价。近年来，随着油气工业的快速发展，油气勘探的对象日趋复杂、地层埋深更大、储层渗透率更低，低渗透油气探明储量的比重逐步提高。低渗透油藏在全球的分布十分广泛，在国外，以美国地质调查局(USGS)为代表的研究部门致力于连续型油气(主要为致密油气)资源评价，主要评价方法包括类比法、单井储量估算法、体积法等[2] [3] [4]，USGS (2008 年)评价北美威林斯顿盆地致密油资源量即高达 230 亿吨[5]。

2. 研究区概况

鄂尔多斯盆地三叠系延长组发育大型陆相河湖三角洲沉积，油藏分布受沉积相带控制明显，以岩性圈闭为主[3]，主要形成岩性尖灭或物性遮挡油藏(图 1)；油藏具有“低孔、低渗、低压”的“三低”特征，目前渗透率小于 1 mD 的储层占 89.6%，属于典型的低渗透岩性油藏。鄂尔多斯盆地先后在 1985 年、1994 年和 2002 年完成了三次系统的资源评价，有效地指导了后期的勘探进程。近年来，鄂尔多斯盆地中生界石油获得了一系列重大成果，相继发现了西峰、姬塬、华庆等大型油田；同时更加深刻和全面地认识了低渗透岩性油藏的形成条件及分布规律，相继提出了长 7 优质烃源岩成烃机理、湖盆中部三角洲前缘牵引流及重力流复合成因砂体、多层系复合成藏规律、连续性油藏分布规律等地质认识[6] [7] [8] [9] [10]，为进一步认识盆地低渗透石油资源量奠定了基础。

2.1. 烃源条件

鄂尔多斯盆地中生界发育长 7、长 9 两套烃源岩，其中长 7 烃源岩沉积时正处于湖盆发育全盛期，盆地内广大地区均有分布，为区域性主力烃源岩，其生烃量占总生烃量的 75%以上；长 9 烃源岩沉积时处于湖盆扩展期，为地区性烃源岩，主要分布于盆地东南部志丹、甘泉和富县地区。延长组烃源岩镜质体反射率(Ro)值在 0.8%~1.2%之间，有机质已达成熟阶段。延长组沉积后至早白垩世末期之前，盆地沉积了厚层的中生界地层，尽管发生了短暂的抬升剥蚀，但是对生烃过程的影响几乎可以忽略。埋藏史、生烃史恢复表明，晚侏罗世开始进入大规模生排烃期，早白垩世末期达到生排烃高峰，燕山运动 IV 幕造成盆地在早白垩世末期迅速抬升、剥蚀，烃源岩生烃基本结束。

2.2. 储集条件

延长组储集体主要包括三角洲平原分流河道砂体、三角洲前缘水下分流河道砂体、河口坝砂体、重力流复合成因砂体等；砂体平面展布面积大，以长 8 油层组为例，砂体面积达 4×10^4 km^2，有利于形成大型油藏。岩性为岩屑质长石砂岩，长石砂岩，其碎屑成分中石英平均 45%，长石平均 40%，岩屑平均 15%。填隙物主要是绿泥石、碳酸盐和浊沸石。岩石具有低成分成熟度和高结构成熟度的特征，粒级以细砂为主，碎屑颗粒的接触关系以线、点－线、点接触为主。储集空间以粒间孔隙为主，其次为长石溶孔、浊沸石溶孔以及各种微裂隙等。砂体横向厚度变化大，纵向上隔夹层较多，物性差异较大。延长组主力油层为低孔低渗储层，物性平均孔隙度 10%~14%，渗透率(0.1~2) mD。其中，长 4+5 平均渗透率(0.4~1.0) mD，长 6 渗透率平均(0.5~1.5) mD，长 8 平均渗透率(0.5~1.2) mD。

2.3. 圈闭条件

鄂尔多斯盆地共划分为六个二级构造单元[11]，分别为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、天环坳陷、伊陕斜坡、西缘逆冲带(图 2)，其中 95%的已探明油气储量位于伊陕斜坡。伊陕斜坡形成于早白垩世，呈向西倾斜的平缓单斜，以发育鼻状构造为主，断层不发育。盆地三叠系延长组属于大型陆相坳陷湖盆沉积，岩性、岩相变化大，容易形成岩性圈闭；尤其在延长组中下组合，主要位于构造稳定的伊陕斜坡上，圈闭类型较单一，以岩性圈闭及构造－岩性圈闭为主。

2.4. 成藏组合及配套条件

晚三叠世延长期鄂尔多斯湖盆随着湖平面的大规模周期性升降，发育了多套砂－泥岩互层的有利储盖组合，其中砂岩是油气储集的良好场所，而泥岩则是很好的盖层，为延长组大面积岩性油藏的形成奠定了基础。其中延长组主力油层围绕长 7 优质烃源岩，以下生上储和上生下储两种成藏组合类型为主、

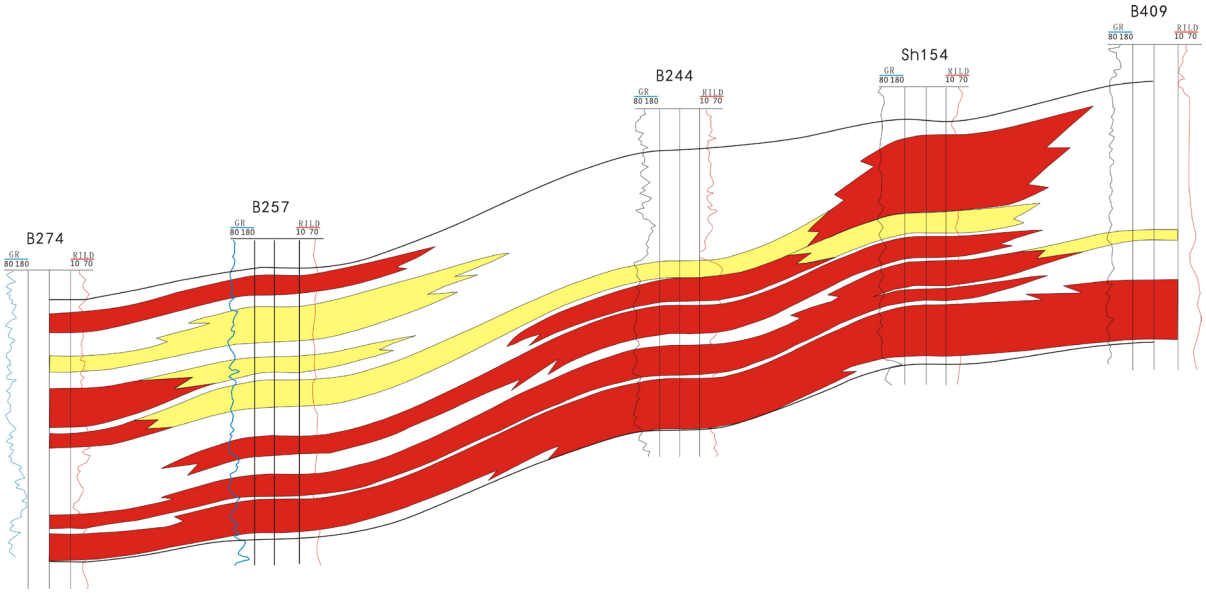


Figure 1. Reservoir section across Bai274-Bai409 of Chang 6 of Yanchang Formation
图 1. 白 274~白 409 井延长组长 6 油藏剖面图

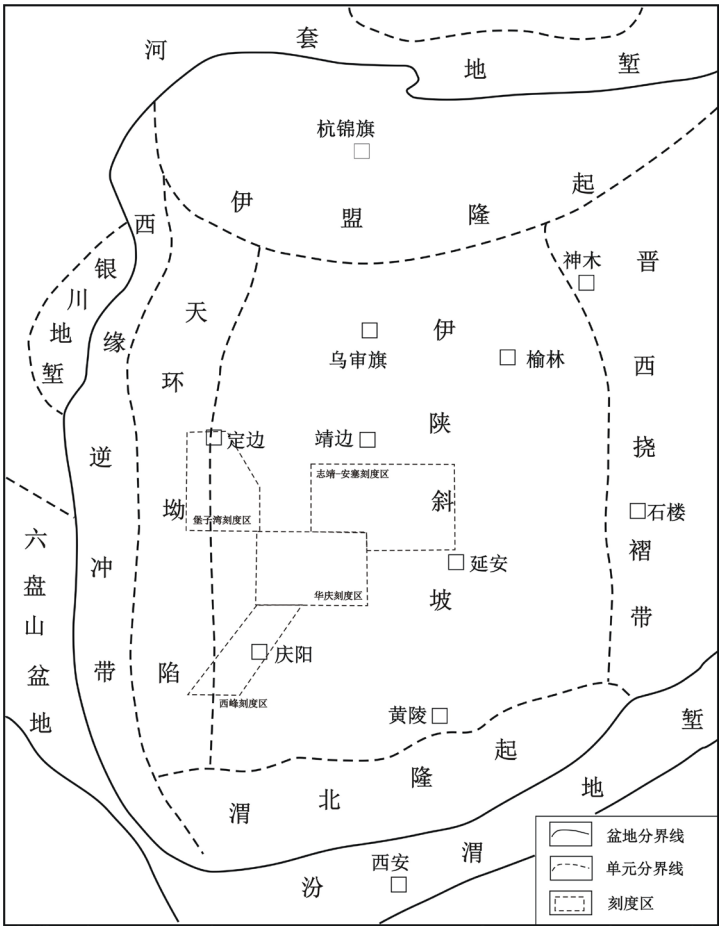


Figure 2. Regional area division and scale area location in Ordos Basin
图 2. 鄂尔多斯盆地构造区划及刻度区位置图

部分地区发育自生自储式成藏组合。主力油层延长组以三角洲砂岩为主要的储集体，长 7 上覆地层中长 6 三角洲前缘沉积发育，长 4+5 发育退覆式三角洲砂体，下伏长 8 三角洲前缘分流河道砂体发育，在生排烃高峰期，长 7 优质烃源岩生成的烃类在高排烃动力的作用下向长 8、长 6－长 4+5 等储层供烃，形成了下生上储、上生下储的成藏组合。同时，长 7 本身发育一定规模的浊积体，烃类优先充注在这类储集体中，形成自生自储成藏组合[12]。

3. 评价方法及思路

近年来针对成藏机理及成藏规律方面的研究成果表明，延长组油藏大部分属于连续型油藏。这类油藏主要发育在稳定的构造背景，断层、褶皱发育程度较弱，储层横向大面积层状分布、储量规模大[11]。鄂尔多斯盆地三叠系主力烃源岩、储层相对明确，具备应用地质成因法的条件；资源丰度低、油藏分布面积大，适宜应用体积法及地质类比法；盆地内主力探区探井平面分布均匀，较为适宜应用饱和勘探法。针对上述特点确定了鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透石油资源评价的主要思路：立足成藏地质条件研究，以地质成因分析和类比分析为主合理描述连续型油藏的规模，结合数理统计，综合评价盆地低渗透岩性油藏资源量。

3.1. 成因法

低渗透油藏成藏地质条件的研究程度相对较高，利用计算机模拟含油气盆地烃类的生成、运移和聚集过程，进一步估算油气资源潜力。由于实际地质条件十分复杂，模拟结果半定量描述油气运聚方向、资源分布情况等；模拟所涉及的关键边际条件包括地温梯度、有机质丰度、沉积相展布、油层厚度及物性分布等，在与实际油藏分布之间进行反复拟合之后得到最终资源量。图 3 是利用 PetroMod 软件完成的 HS-TW 地区 Layer2 油层组盆地模拟成果图，图中红色线条和团块分别表示油气运移路径和聚集单元，Ning42 等块状聚集单元与该区的有利区基本吻合，Zhuang51 等其它聚集单元也被实际钻探结果所证实，针对该区域长 6 油层组盆地模拟结果显示其聚集量为 6850 万吨。

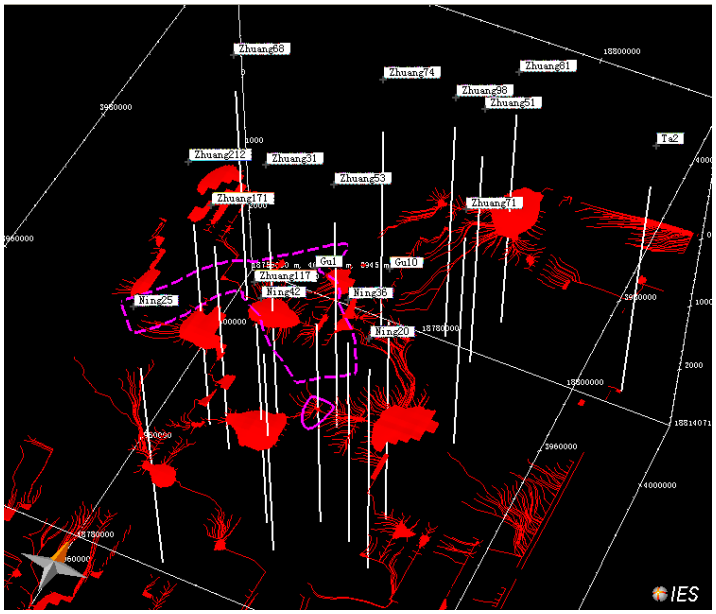


Figure 3. Simulation map of hydrocarbon accumulation of Chang 6 in HS-TW Block
图 3. HS-TW 地区长 6 模拟油气运聚成果图

3.2. 类比法

类比法是采用由已知区推未知区的方法之一，也是 USGS 近年来开展油气资源评价的核心方法。类比法的方法有多种，既有单一地质因素的类比，也有多项成藏条件的综合类比。

1) 地质类比法

针对鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透油藏，通过分析其成藏主控因素，综合主力烃源岩、成藏动力及沉积相展布特征将盆地划分为 14 个评价单元，按照“勘探程度高、地质认识程度高、资源探明程度高”的原则从中优选了志靖－安塞、姬塬、华庆、西峰四个刻度区(图 2)。计算公式如下[13] [14]：

$$Q=\sum_{i=1}^{n}\left(S_i\times K_i\times\alpha_i\right) \tag{1}$$

式(1)中：Q——评价区的石油资源量(10^8 t)；i——评价区子区的个数；S_i——评价区类比单元的面积(km^2)；K_i——刻度区石油资源丰度(10^4 t/km^2)；α_i——评价区类比单元与刻度区的类比相似系数，由下式计算得到：$\alpha_i=\frac{\text{评价区地质类比总分}}{\text{刻度区地质类比总分}}$。通过对刻度区和评价区烃源条件、储层条件、圈闭条件、保存条件、配套史条件共五大类评价参数进行综合评分、对比，得到评价区与刻度区的相似系数(表 1)，并计算出各评价区石油资源面积丰度，进而得到最终评价结果。

2) 体积类比法

体积类比法是目前国际上广泛使用的油气资源评价方法，最早是美国地质调查所 R.A. Crovelli 和 R.H. Baly (1987)应用在他们研制的 FASPUM 资源评价系统软件中。鄂尔多斯盆地三叠系低渗透石油大面积富集，更加适合于利用该方面进行资源评价。

其基本计算公式如下[15]：

$$Q=A\times H\times\phi\times\rho\times S_o\times F\times B \tag{2}$$

式(2)中：Q——油气资源量(10^8 t)；A——圈闭面积(m^2)；H——有效储层厚度(m)；ϕ——储层孔隙度；ρ——原油密度；S_o——含油饱和度；F——圈闭充注率，表示圈闭孔隙空间中捕获烃类占体积百分比的可能变化范围；B——原油地层体积系数；公式中的各项参数均取自相邻油藏。通过公式(2)计算得到各层系石油资源量，全盆地总资源量为各层系的累加(表 2)。

3.3. 统计法

1) 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法也称作随机抽样技术或统计实验方法。首先根据已有数据建立一个符合地质过程的概率模型，然后通过对模型的抽样试验来计算所求参数的统计特征，最后求出具有特定期望值的近似解，而解的精确度可用估计值的标准误差来表示，计算公式：

$$E(Q)=E\left(S\times h\times TOC\times p\times k\right) \tag{3}$$

式(3)中：E——数学期望；Q——资源量(10^8 t)；S——烃源岩面积(km^2)；h——烃源岩厚度(m)；TOC——有机质丰度(%)；p——烃产率(mg 烃/gTOC)；k——运聚系数，小数。

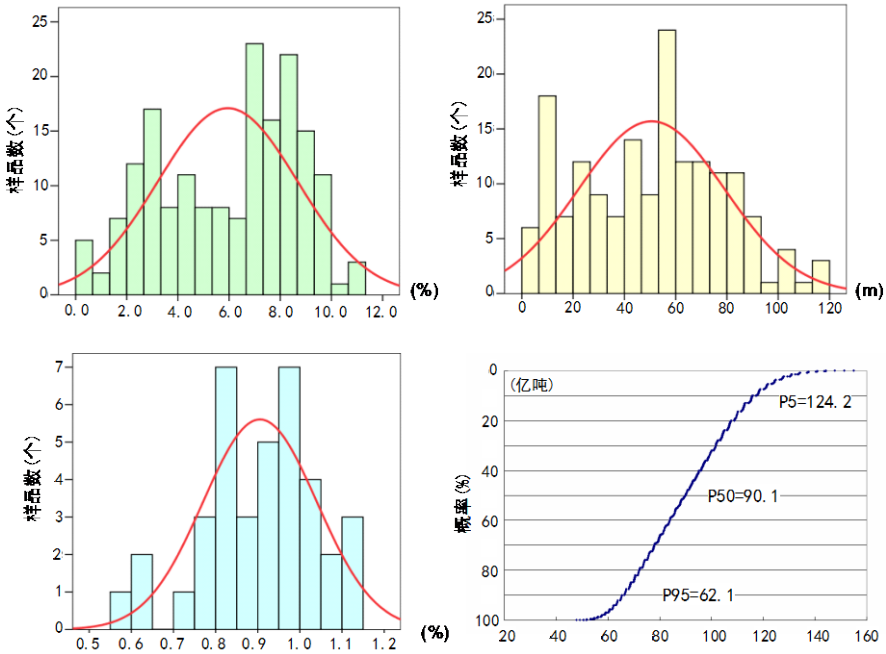
应用蒙特卡罗方法解决实际问题的关键步骤为：首先建立概率模型，然后产生符合要求的抽样随机数，最后用随机数对已知分布的地质随机参数进行抽样，计算待求值。图 4 针对鄂尔多斯盆地三叠系长 7 主力烃源岩利用蒙特卡罗法计算资源量，分别研究烃源岩厚度、有机质丰度、热演化程度的分布特征(烃产率与热演化程度关系密切，运聚系数来自盆地模拟的手段)，最后得到不同概率的资源量分布情况，在本次资源评价中选取 50%概率的值作为蒙特卡罗法的计算结果。

Table 1. Similarity coefficient calculation table in Zhenbei-Huanjiang Block
表 1. 镇北－环江地区相似系数计算表

参数类型	参数名称	权重值	西峰刻度区			镇北-环江评价区			风险系数		相似系数
			参数评分	权重评分	类型评分	参数评分	权重评分	类型评分	西峰	镇北-环江	
油源及输导条件	源岩厚度	0.05	0.15	0.008	0.45	0.2	0.01	0.47	0.076	0.055	0.73
	生烃强度	0.5	0.3	0.150		0.33	0.165				
	运移距离	0.3	0.6	0.180		0.65	0.195				
	输导条件	0.15	0.75	0.113		0.65	0.0975				
储层条件	储层沉积相	0.25	0.75	0.188	0.52	0.5	0.125	0.36			
	储层平均厚度	0.1	0.48	0.048		0.35	0.035				
	储层百分比	0.25	0.7	0.175		0.5	0.125				
	储层孔隙度	0.2	0.38	0.076		0.28	0.056				
	储层渗透率	0.2	0.15	0.030		0.1	0.02				
盖层条件	盖层厚度	0.5	0.15	0.075	0.33	0.15	0.075	0.33			
	盖层岩性	0.5	0.5	0.250		0.5	0.25				

Table 2. Volumetric evaluation of geological resources of key layer of Yanchang Formation
表 2. 体积法评价的延长组重点层位地质资源量结果

层位	面积 (km^2)	有效储层平均厚度(m)	孔隙度 (%)	含油饱和度 (%)	原油密度 (10^3 kg/m^3)	体积系数	圈闭充注率	资源量 (10^8 t)
Layer1	7578.66	8.2	11.5	56	0.854	1.212	0.496	14.00
Layer2	14224.16	12.3	11.0	54	0.851	1.201	0.642	47.28



左上：延长组长 7 烃源岩有机质丰度分布直方图；右上：延长组长 7 烃源岩厚度分布直方图。左下：延长组长 7 烃源岩 Ro 分布直方图；右下：延长组长 7 烃源岩蒙特卡罗法资源量计算结果

Figure 4. Calculation parameters and results of Monte Carlo method
图 4. 蒙特卡罗法计算参数及结果

2) 饱和勘探法

饱和勘探法是通过钻井数或钻井进尺与油气资源之间的关系而建立的油气资源评价方法。主要是对一定勘探时间、范围的全部勘探结果进行统计，成功地预测盆地最终勘探潜力的一种方法，计算公式有两种：一是基于探井进尺和储量的关系，一种是基于探井井数与储量的关系。即：

$$Q=\int_0^h (\mathrm{d}Q/\mathrm{d}h)\cdot \mathrm{d}h \tag{4}$$

$$Q=\int_0^w (\mathrm{d}Q/\mathrm{d}w)\cdot \mathrm{d}w \tag{5}$$

式(4)、式(5)中：Q——评价区油气资源量(10^8 t)；h——探井进尺(m)；w——探井井数(口)。

由全盆地探井单井(单位进尺)发现的油气资源量和评价区与全盆地的探井成功率相似系数，评价各评价区内探井单井(单位进尺)可发现的油气资源量；根据现有钻探现状，可以给定一个饱和单井(单位进尺)控制面积，从而可以推算出各评价区饱和钻井状态下可以达到的井数(进尺数)。本方法主要统计盆地钻探、储量数据的基础上进行，在此不进行详细介绍。

上述方法中，成因法、地质类比法和体积类比法的评价参数主要来自于地质认识，勘探工程风险及开发技术水平对其影响较小；蒙特卡罗法以地质认识为基础，偏重于数学分析；饱和勘探法主要受勘探生产的影响。为了更客观的评价盆地资源量，应该有机结合上述多种方法开展综合评价。

4. 结论

1) 按照储集类型划分标准，鄂尔多斯盆地三叠系延长组 90%以上的油藏属于低渗透油藏。近年来盆地三叠系延长组在沉积、储层、成藏等方面取得的新认识对石油勘探生产作用显著，也为进一步认识盆地石油资源潜力奠定了基础。

2) 延长组烃源岩在鄂尔多斯盆地广泛分布、厚度大、丰度高，为延长组低渗透油藏提供了充足的油源；大面积分布的低渗透砂体提供了丰富的储集空间，有利的成藏空间配置组合形成了大规模的低渗透岩性油藏。

3) 低渗透石油资源评价的基本思路应以地质评价为主、统计分析为辅，评价过程中应充分考虑现有开发技术水平的影响；

4) 针对鄂尔多斯盆地低渗透油藏大面积分布的特点，以地质类比法、体积类比法和成因法为主，有机结合蒙特卡罗法、饱和勘探法在数理统计和勘探生产实践方面的优势，对盆地低渗透石油资源潜力进行系统评价。

参考文献

[1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-13.

[2] Schmoker, J.W. (2002) Resource-Assessment Perspectives for Unconventional Gas Systems. *AAPG Bulletin*, **86**, 1993-1999.

[3] Olea, R.A., Cook, T.A. and Coleman, J.L. (2010) A Methodology for the Assessment of Unconventional (Continuous) Resources with an Application to the Greater Natural Buttes Gas Field, Utah. *Natural Resources Research*, **19**, 237-251. https://doi.org/10.1007/s11053-010-9127-8

[4] Salazar, J., Mcvay, D.A. and Lee, W.J. (2010) Development of an Improved Methodology to Assess Potential Gas Resources. *Natural Resources Research*, **19**, 253-268. https://doi.org/10.1007/s11053-010-9126-9

[5] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 25-30.

[6] 杨华, 刘显阳, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组低渗透岩性油藏主控因素及分布规律[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 1-6.

[7] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.

[8] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. 古地理学报, 2011(4): 443-455.

[9] 姚泾利, 王克, 宋江海, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组石油运聚规律研究[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 32-37.

[10] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 324-329.

[11] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 39-86.

[12] 杨智峰, 曾溅辉, 冯晓, 等. 源储岩性组合对致密油聚集的影响——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 段为例[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 389-393.

[13] 周总瑛, 唐跃刚. 我国油气资源评价现状与存在问题[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(5): 554-556.

[14] 杨娇, 赵雄虎. 运用油田规模序列法进行油气资源评价——以珠江口盆地惠州西含油气系统为例[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(5): 588-590.

[15] 杨登维, 周庆凡, 郭宝申, 等. 油气资源地质风险分析与管理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 99-132.