

页岩油气资源评价基本问题的讨论

周庆凡

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:页岩油气资源潜力已经成为社会关注的重点,为了更好地了解页岩油气资源潜力,需要不断完善页岩油气资源评价方法,加强资源评价工作。页岩油气属于非常规油气资源,其地质特征与常规油气有明显的不同,因此常规油气资源评价方法不完全适用于页岩油气,需要发展适合页岩油气特点的资源评价方法。一般来说,页岩油气地质资源量较大,但是采收率较低,因此页岩油气资源评价不仅要关注地质资源量,更要重视可采资源量。页岩油气资源评价基本采用成藏思路而很少采用成烃思路。目前页岩油气资源评价主流的基本方法有两类:①基于页岩油气层含油气量的地质资源量评价方法;②基于单井页岩油气EUR的技术可采资源量评价方法。影响页岩油气资源评价的因素主要有地质认识、技术进步和经济因素,地质评价是资源评价的基础和关键。

关键词:地质资源量;技术可采资源量;经济可采资源量;地质评价;资源分级;评价方法;资源评价;页岩油气

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Discussion on key issues of shale oil/gas resource assessment

Zhou Qingfan

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The potential of shale oil/gas resources has become the focus of social attention. In order to better understand the shale oil/gas resources potential, it is necessary to constantly improve the methodology and strengthen the work of shale oil/gas resources assessment. Shale oil/gas belongs to unconventional resources, the geological characteristics of which are obviously different from those of conventional oil/gas, and the assessment methods for conventional oil and gas resources are thereby not fully applicable. Developing resources assessment method suitable for shale oil/gas is a must. Shale oil and gas resources are usually large-size in place, though with quite low recovery factor. Therefore, the specific resources assessment is supposed to stress both resources in-place and recoverable resources. At present, there are two main basic methods for shale oil/gas resources assessment, namely resource in-place assessment based on shale oil/gas content per unit volume and technically recoverable resource assessment based on shale oil/gas EUR per well. The factors that affect shale oil/gas resources assessment mainly include geological understanding, technology progress and economic factors, with geological evaluation as the foundation and key.

Key words: resources in-place, technically recoverable resources, economically recoverable resources, geological evaluation, resource categorization, assessment methodology, resource assessment, shale oil/gas

引用格式:周庆凡. 页岩油气资源评价基本问题的讨论[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 26-33. DOI:10.11743/ogg20220102.

Zhou Qingfan. Discussion on key issues of shale oil/gas resource assessment [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 26-33. DOI: 10.11743/ogg20220102.

美国页岩油气(含致密油)开发取得了巨大成功^[1-2],引起人们对页岩油气资源勘探开发的极大兴趣,因此关于页岩油气资源潜力就成为社会关注的重点,国内外许多机构和学者纷纷开展了页岩油气资源

评价工作^[3-7]。然而,相比常规油气资源而言,页岩油气资源评价还处在发展阶段,关于页岩油气资源评价的一些基本问题需要进一步认识和完善^[8-11]。从资源评价角度看,页岩油气资源地质特征与常规油气的不同

收稿日期:2020-11-03;修订日期:2021-12-20。

作者简介:周庆凡(1962—),男,教授级高级工程师,石油勘探。E-mail:zhouqingfan_syky@sinopec.com。

基金项目:中国科学院咨询项目(KKBE170026)。

同对资源评价有什么影响;油气资源量有哪些分级,为什么要更重视页岩油气的可采资源量评价;主流的页岩油气资源评价方法有哪些;影响页岩油气资源评价的主要因素是什么。本文将对页岩油气资源评价所涉及的以上基本问题进行探讨,以期促进页岩油气资源评价工作的改进和完善。

1 页岩油气资源地质特征

油气资源地质特征是油气资源评价的基础,评价区油气资源地质特征的不同可能会导致其资源评价模型与方法的不同。页岩油气包括页岩油和页岩气两类资源,在自然界它们可以单独成藏,也可以伴生。页岩气的概念国内外业界基本统一,而页岩油的概念还不一致^[12],国内机构和学者大多倾向于认为页岩油与致密油是两个不同的概念,国外机构和学者常常把页岩油和致密油作为同一概念,似乎更倾向于用致密油^[13]。尽管页岩气与页岩油不同,页岩油概念也有不同认识,但是页岩气藏和页岩油(包括致密油)藏在赋存地质特征上有共同特点,它们都属于非常规连续型油气藏,赋存地质特征相似,与常规油气藏有明显差别,主要表现在:①页岩油气一般呈大面积连续型分布,常规油气通常呈不连续独立分布;②页岩油气赋存与水浮力没有直接关系,呈游离态、吸附态或溶解态,常规油气赋存与水浮力直接相关,呈游离态或溶解态(表1)。从资源评价角度看,页岩油气与常规油气最大的区别就是前者一般呈大面积连续型分布。尽管页岩油气资源评价可以借鉴常规油气资源评价的思路和方法,但是由于两种资源地质特征的差异,有些常规油气资源评价方法是不适用于页岩油气资源评价的。例如基于油气藏/田规模和数量的常规油气资源评价方法就不适用于页岩油气资源评价,包括油气藏规模序列法^[14]和美国地质调查局(USGS)的第七近似法^[15-17](the seventh approximation)等。因此需要针对页岩油气地质特点建立相应的资源评价方法,如USGS针对页岩油气藏等连续型油气藏地质特点建立的适合连续性油气藏资源评价的FORSPAN模型法等。

在常规油气藏中,油气通常呈游离或溶解态存在,而在页岩油气藏中,不仅存在游离油气,还有以吸附气状态存在的页岩气,在资源评价中需要考虑。页岩气藏中的溶解气一般含量较少,资源评价中通常不予以考虑。当应用体积法评价页岩气资源量时,需要注意吸附气与游离气的不同,要建立与游离气含气量不同的测算方法^[3]。

表1 常规油气藏与页岩油气藏特征对比^[18-23]

Table 1 Comparison of characteristics between conventional and shale reservoirs^[18-23]

油气藏类型	常规油气藏	页岩油气藏
分布特征	不连续、独立分布	大面积、连续型分布
与水浮力关系	油气赋存与水的浮力直接相关	油气赋存不直接受水浮力的影响
储层特点	渗透率较高,与源岩不同层	渗透率低,与源岩同层或邻近源岩
赋存状态	游离态、溶解态	游离态、吸附态、溶解态
资源特点	资源量总体规模较小,开采相对容易,采收率较高	资源量总体规模较大,开采难度大,采收率低

页岩油气具有源-储同层和渗透率低的特点,储层需要压裂改造才能形成商业油气产量,因此页岩油气资源的评价单元和评价参数也与常规油气资源有所差异。总有机碳(TOC)含量,热成熟度(镜质体反射率 R_o)、脆性矿物含量、储层可压性和地层压力等是页岩油气资源地质评价的重要参数。

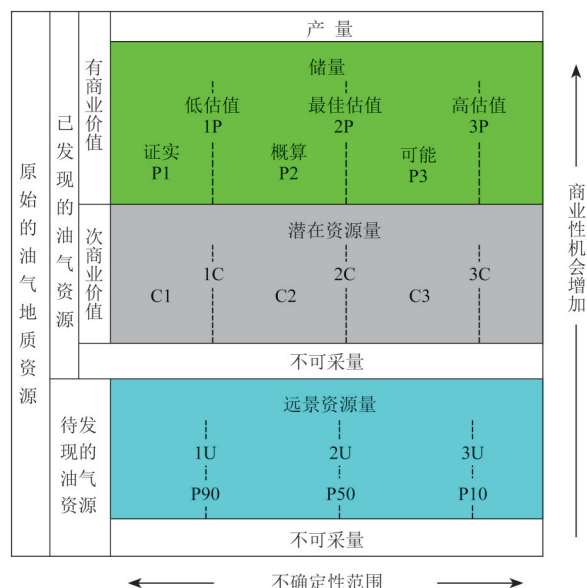
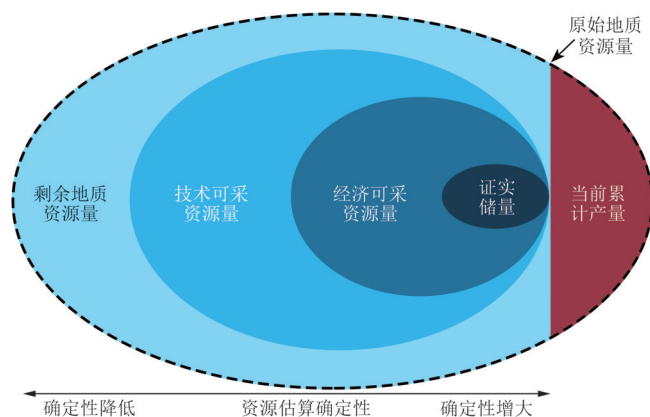
明确页岩油气资源地质特征必须做好资源地质评价,地质评价是资源评价的基础,是做好资源评价工作的前提。为了选择正确的资源评价思路和方法,必须认清评价区资源的分布特征和赋存状态。为了建立正确的地质模型、选取合理的评价参数值,必须深入了解评价区资源赋存的地质特征,要注意评价单元地质特征的不均一性以及不同评价单元地质特征的差异性。

2 页岩油气资源分级

油气资源分级分类不仅为油气资源评价提供标准,也是建立资源评价方法的前提,因为不同层级的资源量往往要求用不同的模型和方法来评价。因此开展资源评价必须了解油气资源分级分类及其相互关系,要明确评价的资源量级别。

石油工程师协会(SPE)联合美国石油地质家协会(AAPG)、世界石油理事会(WPC)和石油评价工程师协会(SPEE)于2007年发布了《油气资源管理体系》,系统定义了油气资源分类(图1),为油气资源评价和管理提供了标准,这个分类体系已得到世界大多国家认可和应用,中国油气资源分类也基本与之接轨。

在这个资源分类框架中,资源含义很广,不仅包含未发现资源量,也包含已发现但未采出的储量,还包含了已采出的产量。一般来说,资源评价不包括储量和产量,关于油气储量有专门的一套评价方法和标准。无论是常规还是非常规油气资源,资源评价估算

图1 SPE/WPC/AAPG/SPEE 油气资源分类框架^[24]Fig. 1 Framework of petroleum resources classification by SPE/WPC/AAPG/SPEE^[24]图2 不同层级油气资源关系示意图^[25]Fig. 2 Stylized representation of oil/gas resources categorization^[25]

的资源量均包括三级资源量:地质资源量、技术可采资源量和经济可采资源量,图2展示了这三级资源量的关系^[25]。目前国内外的油气资源评价通常是评价地质资源量和技术可采资源量,经济可采资源量评价很少涉及。

地质资源量是指依据相关理论,根据所获得地质、地球物理和分析化验等资料,运用针对性的方法估算得出的原始油气藏油气总量(包括已发现的和未发现的)。地质资源量是评价者对地下资源的估算值,不等于地下资源实际蕴藏量。估算地质资源量对于地质研究有重要意义,有助于人们研究油气资源形成与分布规律,了解不同地区和盆地油气规模与丰度,评价油气勘探开发潜力与前景。但是由于地质资源量尤其是非

常规油气地质资源量有很大一部分在可预见的未来是不可采的,对可采储量增长没有贡献,更不能转化为产量。

技术可采资源量是指在设定的技术条件下,估算用设定的技术可以开采的资源量。设定的技术条件通常是指已直接或间接证实可适用的技术,并不考虑尚未证实适用或未开发的技术。估算技术可采资源量可以通过地质资源量和采收率来换算,也可以基于开发生产数据来直接估算。技术可采资源量估算实际上是指在一定时间范围内的可采资源潜力,如果没有特别说明,有效时间范围一般在40~50 a。目前USGS开展油气资源评价通常把有效时间明确设定为30 a^[14],其评价得出的待发现资源量是代表在未来30 a内对储量增长有贡献的资源潜力。估算技术可采资源量目前已成资源评价工作一项必要的任务。

经济可采资源量是指在特定的经济条件下(主要是成本和价格),估算技术可采资源量中可以经济开采的资源量^[26],换句话说,经济可采资源量估算就是对技术可采资源量进行经济评价,评价技术可采资源量在特定的经济条件下经济的可采量。经济可采资源量对于近、中期油气产量预测更有价值。经济可采资源量评价目前没有普遍开展,很少有经济可采资源量评价结果的公开报导。USGS对1995年全美常规与非常规油气资源评价专门开展了经济评价工作,估算了不同油气价格条件下的经济可采量^[27]。USGS对2010年美国阿拉斯加北坡待发现技术可采资源量也开展过经济评价^[28]。

页岩油气资源属于非常规油气资源,与一般非常规油气资源有类似特点,地质资源量大,但是开采难度大,因此采收率普遍较低。图3显示了北美12个主要油气盆地常规油气资源与非常规气分布情况,在12个盆地中非常规气资源量大,占比都较高,最高的是沃斯堡(Fort Worth)盆地(97%),最低的是二叠(Permian)盆地(64%),常规油气仅占36%。这12个盆地页岩气资源丰富,例如在阿卡玛(Arkoma)盆地,页岩气资源占94%,页岩气资源占比最少的盆地也达到了40%^[29]。据EIA统计,美国主要页岩油/致密油区带页岩油/致密油采收率都不超过10%,最低不足1%,最高的9%。平均约3.5%(表2)。页岩气采收率比页岩油/致密油高,一般在10%~30%^[3],但也大大低于常规天然气的采收率。由于页岩油气地质资源中有很大部分是不可采资源,因此页岩油气资源评价不仅要评价地质资源量,更要评价可采资源量,可采资源量对认识页岩油气发展潜力并制定能源发展战略更有意义。

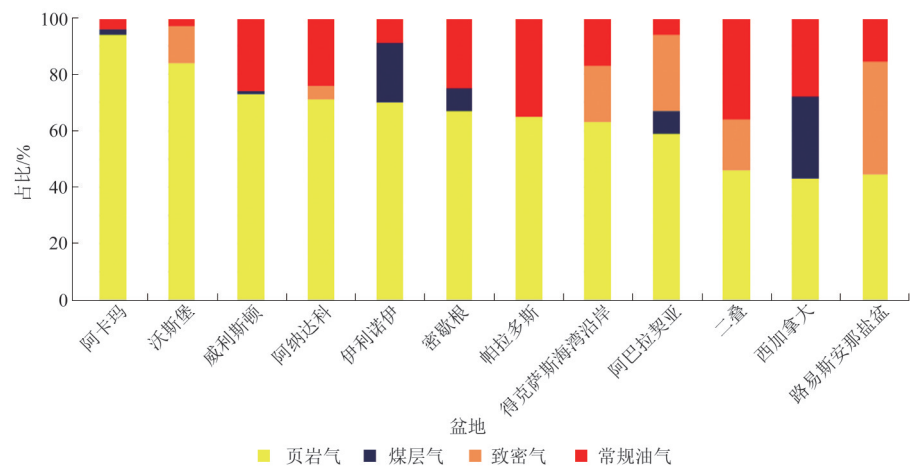


图3 北美12个盆地常规油气与非常规气技术可采资源分布^[29]

Fig. 3 Distribution of the conventional and unconventional resources technically recoverable in the 12 basins selected in North America^[29]

表2 美国主要页岩油/致密油区带采收率统计^[30]

Table 2 Statistics of oil recovery factors for shale/tight oil plays selected in the U. S. ^[30]

盆地	地层组/区带	地质年代	页岩油/致密油采收率/%
威利斯顿	Bakken ND Core	密西西比纪—泥盆纪	8.40
	Bakken ND Ext.	密西西比纪—泥盆纪	7.70
	Bakken MT	密西西比纪—泥盆纪	3.90
	Three Forks ND	泥盆纪	8.20
	Three Forks MT	泥盆纪	3.60
马弗里克	Eagle Ford Play #3A	晚白垩世	8.10
	Eagle Ford Play #3B	晚白垩世	9.00
	Eagle Ford Play #4A	晚白垩世	4.20
	Eagle Ford Play #4B	晚白垩世	5.80
沃斯堡	Barnett Combo-Core	晚白垩世	1.50
	Barnett Combo-Ext.	密西西比纪	1.80
二叠	Del. Avalon/BS (NM)	二叠纪	1.90
	Del. Avalon/BS (TX)	二叠纪	2.10
	Del. Wolfcamp (TX Core)	二叠纪—宾西法尼亚纪	3.40
	Del. Wolfcamp (TX Ext.)	二叠纪—宾西法尼亚纪	1.30
	Del. Wolfcamp (NM Ext.)	二叠纪—宾西法尼亚纪	2.40
	Midl. Wolfcamp Core	二叠纪—宾西法尼亚纪	1.90
	Midl. Wolfcamp Ext.	二叠纪—宾西法尼亚纪	1.60
	Midl. Cline Shale	宾西法尼亚纪	2.80
阿纳达科	CanaWoodford-Oil	晚泥盆世	8.40
	Miss. Lime-Central OK Core	密西西比纪	3.10
	Miss. Lime-Eastern OK Ext.	密西西比纪	0.60
	Miss. Lime-KS Ext.	密西西比纪	1.30
阿巴拉契亚	Utica Shale-Oil	奥陶纪	2.10
D-J	Niobrara Core	晚白垩世	2.10
	Niobrara East Ext.	晚白垩世	1.20
	Niobrara North Ext. #1	晚白垩世	4.60
	Niobrara North Ext. #2	晚白垩世	0.90
	Niobrara North Ext. #2	晚白垩世	0.90

3 页岩油气资源评价思路与方法

尽管目前国内外油气资源评价方法种类繁多,但是基本可归为两种不同的评价思路:①成烃思路,以成因法为代表;②成藏思路,是目前的主流评价思路。成烃评价思路是一种典型的“顺藤摸瓜”式思路,以生烃单元为评价的出发点,从生烃(量)来推算资源量。成藏评价思路则可用“按图索骥”来形容,以油气聚集单元评价为出发点,该思路评价资源量与储量计算思路类似^[31-32]。从目前国内外机构和学者在进行非常油气资源评价时所使用的具体方法来看,大多是采用成藏评价思路,评价结果也得到广泛应用。采用成烃评价思路的很少,其评价结果引用也很有限。

属于成藏评价思路的页岩油气资源评价方法种类很多^[7-8],但是目前在国内外页岩油气评价实践中采用的主流资源评价方法并不多。本文所谓的主流评价方法需要满足两个条件:①评价方法较为成熟,得到了广泛应用;②其评价结果具有权威性,得到了广泛认可和引用。按照上述两个条件,主流的页岩油气资源评价方法可归纳为两类:即基于页岩油气层含油气量的地质资源量评价方法和基于单井页岩油气 EUR (estimated ultimate recoveries) 的技术可采资源量评价方法。尽管类比法也经常应用于页岩油气资源评价^[6-8,33],但是它并不是一类基础的评价方法,而是基于上述两类主流基础方法而衍生出的一类评价方法,通常是在评价新区或相关资料数据不足的情况下通过与成熟评价区(刻度区)进行类比而估算资源量。尽管需要不断地探索油气资源评价的新方法,但是在开展页岩油气资源评价生产实践中,应当尽可能地选用主流的成熟评价方法,以保证评价方法的可靠性以及评价结果的可信度。

基于页岩油气层含油气量的地质资源量评价方法以体积法(包括容积法)为代表,在国内外有广泛的应用,如美国 EIA/ARI 的体积法^[34-35],张金川的概率体积法^[36]和 CNPC 的小面元法^[37-38],这些方法不能直接评价技术可采资源量,需要通过采收率(国内常用资源可

采系数)转换为技术可采资源量。基于单井页岩油气 EUR 的技术可采资源量评价方法以美国 USGS 的 FORSPAN 模型法^[39-42]为代表,该方法直接评价出技术可采资源量,其中 EUR 是评价的关键参数,主要依据开发生产数据来获取^[43]。USGS 应用 FORSPAN 模型法在世界范围内开展了大量的页岩油气资源评价,同时也评价了中国四川盆地、渤海湾盆地辽河拗陷、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地等地区的页岩油气技术可采资源量^[44-47]。Olea 等的随机模拟法^[48]和 CNPC 的 EUR 类比法^[49-50]也属于基于单井页岩油气 EUR 的技术可采资源量评价方法,但是这两种方法成熟度较低,应用有限。基于页岩油气层含油气量的地质资源量评价方法和基于单井页岩油气 EUR 的技术可采资源量评价方法在国内外页岩油气资源评价中得到广泛应用,各有优势和不足(表3),实际中应用那种方法取决于评价资料和评价目的。

4 影响页岩油气资源评价的主要因素

影响页岩油气资源评价的因素很多,不同级别的资源量影响因素有所不同。地质资源量受地质因素控制,随着地质认识变化,地质资源量也会发生变化。影响技术可采资源量的有地质因素和技术因素,地质认识的变化和技术条件的改善都可能导致技术可采资源量的变化。相对技术可采资源量,经济可采资源量更易于变化,因为除地质和技术因素外,经济因素直接影响经济可采资源量,只要勘探开发成本和油气价格等发生变化,经济可采资源量就会变化。以往资源评价表明,对于同一地区或盆地页岩油气资源评价结果往往会有很大差异(表4),产生这种差异的原因显然有对评价区认识的不同。不同评价者或同一评价者在不同时期对同一评价区的认识往往不同,因此评价参数取值就有变化,就会导致评价结果的差异。同时,用不同评价方法来评价同一评价区的资源量,其评价结果也会有较大差异,这种资源评价结果差异究竟有多少是因不同评价方法影响,同一评价区的不同方法评价结果是否有可比性?为了回答这个问题,德国地球科

表3 两类主流页岩油气资源评价方法对比^[34-35,40,51]

Table 3 Comparison of two main methods for shale oil/gas resources assessment^[34-35,40,51]

评价方法	优点	缺点
基于页岩油气层含油气量的地质资源量评价方法	适用范围广,也适用勘探开发不成熟的新区;地质资料 and 科技进步因素易于反映到评价中	不能直接计算可采资源量;因需通过采收率转换,增加了可采资源评价结果的不确定性
基于单井页岩油气 EUR 的技术可采资源量评价方法	直接计算可采资源量,避免因估算可采系数不确定性的影响;评价结果更符合生产实际	通常需要大量生产数据;没有考虑未来技术进步因素的影响;不能直接用于勘探开发程度低的新区

学与自然资源联邦研究院和美国地质调查局的专家联合开展了一项对比研究,选择成熟的美国阿卡玛盆地 Woodford 页岩区带以及尚未开发的阿拉斯加北坡 Shublik 和 Brookian 页岩区带作为评价案例,分别应用体积法和 USGS 的 FORSPAN 法开展评价。为了消除地质因素对评价结果差异的影响,这两种不同方法建立的评价区地质模型和评价单元完全相同,选取相关的地质参数(TOC 、面积、厚度、孔隙度和地层压力等)也一致。

表4 四川盆地及周缘页岩气资源评价结果对比^[6,34-35,44]

Table 4 Shale gas resources assessment results in the Sichuan Basin and on its periphery, China^[6,34-35,44]

时间	机构	方法	评价层系	技术可采资源量/ ($10^{12}t^3$)
2011	EIA/ARI	体积法	下寒武统筇竹寺组、 下志留统龙马溪组	692.0
2013	EIA/ARI	体积法	下寒武统筇竹寺组、 下志留统龙马溪组、 二叠系	625.9
2015	USGS	FORSPAN 法	下寒武统筇竹寺组、 下志留统龙马溪组、 二叠系龙潭组	23.9
2012	国土资源部	体积法	寒武系、志留系、二叠系、 三叠系、侏罗系	227.4
2015	国土资源部	体积法	寒武系、志留系、二叠系、 三叠系、侏罗系	398.3

通过分析这项对比研究的评价结果(表5)可知,在相同的地质模型和参数条件下,同一评价对象的两种不同方法评价结果具有可比性,同时也反映两种方法因所采用的评价思路和参数类型等方面不同而产生的内在不确定性和固有差异。阿拉斯加北坡两种方法评价结果差异大于阿卡玛盆地评价结果,说明评价区勘探开发程度的提高以及地质和生产数据的增多有助于减少评价结果的不确定性,增加不同方法评价结果的可比性。这项对比研究结果也表明,地质评价(地质

模型建立、评价单元定义和地质参数值确定)比评价方法更能影响资源评价结果。页岩油气资源评价的差异主要是由于地质评价的不同和输入数据的不同,而不是因为评价方法不同而产生的。因此提高页岩油气资源评价的确定性和可靠性,地质评价是基础也是关键。地质评价是研究油气成藏规律,弄清油气藏过程,认识资源地质特点,建立评价地质模型,确定资源评价地质参数。如果地质评价做不好,关键评价参数取不准,资源评价就失去了基础,那么无论用什么先进评价方法或采用多少种评价方法,都不能提升资源评价的准确度,其结果也都是不可信的。

5 结论与建议

资源是发展页岩油气产业的基础,页岩油气资源评价是制定能源发展战略、指导页岩油气勘探开发的重要依据,评价资源潜力是开发页岩油气资源的重要环节。页岩油气与常规油气具有不同的地质特征,需要建立适应页岩油气特点的资源评价方法,页岩油气资源评价更要重视可采资源量的评价。目前国内外用于页岩油气资源评价的主流方法有两类:①基于页岩油气层含油气量的地质资源评价方法;②基于单井页岩油气 EUR 的可采资源评价方法。两类方法各有优势和不足。因不同资源评价方法的固有差异,会导致不同评价方法评价结果的差异。但是在地质模型和参数标准相同的情况下,不同方法评价结果具有可比性。地质评价比资源评价方法更能影响资源评价结果,地质评价是资源评价的基础和关键。

建议加强以生产数据为基础的可采资源评价方法的开发,探索经济可采资源评价方法,完善页岩油气资源评价体系,形成适合中国特点的页岩油气资源评价主流方法。加大页岩油气区地质评价力度,深化对中国页岩油气地质特征的认识,加强页岩油气开发规律研究,完善地质评价程序,夯实资源评价的基础。建立和完善对中国资源评价工作的第三方审核制度,以保

表5 阿卡玛盆地和阿拉斯加北坡页岩气资源评价结果^[51]

Table 5 Assessment results of shale gas resources in the Arkoma Basin and Alaska North Slope in the U. S. ^[51]

页岩区带	FORSPAN				体积法							
	技术可采资源量				地质资源量				技术可采资源量			
	F95	F50	F5	均值	P95	P50	P5	均值	P95	P50	P5	均值
Woodford	6.06	10.16	17.04	10.68	347.0	148.0	49.5	171.3	34.70	14.80	4.95	17.13
Shublik	0	36.60	72.20	38.40	1186.0	293.0	56.5	413.0	118.60	29.30	5.65	41.30
Brookian	0	2.12	4.37	2.18	117.0	36.0	36.0	43.0	11.70	3.60	3.60	4.30

注:表中所有资源量单位为 $10^{12}t^3$ 。地质资源量转为技术可采资源量采用 10% 的采收率。

障资源评价方法科学,评价程序合理,资料数据可靠,评价结果可信。随着地质认识提高、技术进步和经济条件变化,动态开展国家层面页岩油气资源评价,并及时公开发布评价成果,更好地服务于政府、企业和公众。

参考文献

- [1] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报,2020,41(1): 1-12.
Zou Caineng, Pan Songqi, Jing Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [2] 周庆凡,金之钧,杨国丰,等. 美国页岩油勘探开发现状与前景展望[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3): 469-477.
Zhou Qingfan, Jin Zhijun, Yang Guofeng, et al. Shale oil exploration and production in the US: Status and outlook [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 469-477.
- [3] U. S. Energy information administration (EIA). World shale resource assessments [OL]. [2015-09-24]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>.
- [4] U. S. Geological Survey (USGS), U. S. Geological Survey assessments of continuous (unconventional) oil and gas resources, 2000 to 2011, national and global petroleum assessment [R/OL]. 2015. <https://www.usgs.gov/publications/us-geological-survey-assessments-continuous-unconventional-oil-and-gas-resources-2000>.
- [5] Dong Z, Holditch S A, McVay D A, et al. Global unconventional gas resource assessment [R/OL]. 2012, SPE 148356. <https://onepetro.org/EM/article-abstract/4/04/222/198278/Global-Unconventional-Gas-Resource-Assessment?redirectedFrom=fulltext>.
- [6] 国土资源部油气资源战略研究中心. 页岩油气资源动态评价[M]. 北京:地质出版社,2015.
Strategic Research Center of Oil and Gas Resources. Dynamic evaluation of shale oil and gas resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [7] 国土资源部油气资源战略研究中心. 致密油气资源动态评价[M]. 北京:中国大地出版社,2015.
Strategic Research Center of Oil and Gas Resources. Dynamic evaluation of tight oil and gas resources [M]. Beijing: China Land Press, 2015.
- [8] 邱振,邹才能,李建忠等. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. 天然气地球科学,2013,24(2):238-245.
Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-245.
- [9] 王社教,蔚远江,郭秋麟,等. 致密油资源评价新进展[J]. 石油学报,2014,35(6):1095-1105.
Wang Shejiao, Yu Yuanjiang, Guo Qiulin, et al. New advance in resources evaluation of tight oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1095-1105.
- [10] 王世谦. 页岩气资源开采现状、问题与前景[J]. 天然气工业, 2017, 37(6):115-130.
Wang Shiqian. Shale gas exploitation: Status, issues and prospects [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(6): 115-130.
- [11] 宋振响,徐旭辉,王保华,等. 页岩气资源评价方法研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质,2020,41(5): 1038-1047.
Song Zhenxiang, Xu Xuhui, Wang Baohua, et al. Advances in shale gas resource assessment methods and their future development [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1038-1047.
- [12] 金之钧,白振瑞,高波,等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3): 451-458.
Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gao Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [13] 周庆凡,杨国丰. 致密油与页岩油的概念与应用[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4): 541-570.
Zhou Qingfan, Yang Guofeng. Definition and application of tight oil and shale oil terms [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 541-570.
- [14] 姜福杰,庞雄奇,姜振学,等. 应用油藏规模序列法预测东营凹陷剩余资源量[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(1):54-63.
Jiang Fujie, Pang Xiongqi, Jiang Zhenxue, et al. The principle and the application of predicting hydrocarbon resource by reservoir size sequence [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(1): 54-63.
- [15] James W S, Timothy R K. U. S. Geological Survey assessment model for undiscovered conventional oil, gas and NGL resources; the seventh approximation [R/OL]. Bulletin 2165, U. S. Geological Survey, 1999. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/b2165>.
- [16] James W S, Timothy R K. U. S. Geological Survey assessment concepts for conventional petroleum accumulations [R/OL]. U. S. Geological Survey Digital Data Series DDS-69-D, 2005. https://pubs.usgs.gov/pp/pp1713/24/pp1713_ch24.pdf.
- [17] Liu Chenglin, Che Changbo, Zhu Jie, et al. Comparison of petroleum resource assessments of China by the U. S. Geological Survey and the China National Petroleum Assessment Team [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(8):1415-1427.
- [18] James W S. U. S. Geological Survey Assessment concepts for continuous petroleum accumulations [R/OL]. U. S. Geological Survey Digital Data Series DDS-69-D, 2005, <http://www.usgs.gov/pubprod>.
- [19] Ahmed U, Meehan D N. Unconventional oil and gas resources: exploitation and development [M]. Boca Raton: RC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [20] Larue D K, Smithard M, Mercer M. Three deep resource plays in the San Joaquin Valley compared with the Bakken Formation [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(2):195-243.
- [21] 邹才能,陶士振,袁选俊,等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发,2009,36(6): 669-681.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-681.
- [22] 邹才能,赵群,董大忠,等. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. 天然气地球科学,2017,28(12):1781-1796.
Zou Caineng, Zhao Qun, Dong Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [23] 杨智,邹才能,付金华,等. 大面积连续分布是页岩层系油气的标志特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(4):459-474.
Yang Zhi, Zou Caineng, Fu Jinhua, et al. Characteristics and “sweet area(section)” evaluation of continuous tight & shale oil and gas in Ordos Basin, North-central China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(4): 459-474.
- [24] Society of Petroleum Engineers (SPE), American Association of Petroleum Geologists, World Petroleum Council, and Society of Petroleum Evaluation Engineers, Petroleum Resources Management

- System[R/OL]. 2018. https://netherlandsewell.com/wp-content/uploads/2018/12/SPE_Petroleum_Resources_Management_System_2018.pdf.
- [25] U. S. Energy information administration (EIA), Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: United Arab Emirates [R/OL]. 2014. https://www.eia.gov/analysis/studies/world-shalegas/pdf/UAE_2014.pdf.
- [26] Al-Madani H S, Holditch S A. A methodology to determine both the technically recoverable resource and the economically recoverable resource in an unconventional gas play [R/OL]. 2011, SPE141368-MS. <https://onepetro.org/SPEMEOS/proceedings/11-MEOS/All-11MEOS/SPE-141368-MS/148164>.
- [27] Emil D A. Economics and the 1995 national assessment of united states oil and gas resources, U. S. Geological Survey Circular [R/OL]. 1998. <https://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1145/c1145.pdf>.
- [28] Emil D A, Freeman P A., Economic analysis of the 2010 U. S. Geological Survey assessment of undiscovered oil and gas in the national petroleum reserve in Alaska [R/OL]. Open - File Report 2011-1103, 2011. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1103/ofr2011-1103.pdf>.
- [29] Cheng K, Holditch S A, Ayers W B, et al. Assessment of the distribution of technically-recoverable resources in North American basins [R/OL]. 2010, SPE 137599. <https://onepetro.org/SPEUR-CC/proceedings-abstract/10CURIPC/All-10CURIPC/SPE-137599-MS/104610>.
- [30] U. S. Energy information administration (EIA). Shale gas and shale oil resource assessment methodology, EIA/ARI world shale gas and shale oil resource assessment [R/OL]. 2013. <https://www.eia.gov/conference/2013/pdf/presentations/kuuskras.pdf>.
- [31] 周庆凡, 张亚雄. 油气资源量含义和评价思路的探讨[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 474-480.
- Zhou Qingfan, Zhang Yaxiong, A discussion on petroleum resource concepts and assessment approaches [J], Oil & Gas Geology, 2011, 32(3): 474-480.
- [32] 傅成玉. 非常规油气资源勘探开发 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2015: 1-37.
- Fu chengyu. Exploration and development for unconventional hydrocarbons [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015: 1-37.
- [33] 陈斐然, 段金宝, 张汉荣, 等. 页岩气“压力系数”分级资源评价方法——以川东南上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组为例 [J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 405-414.
- Chen Feiran, Duan Jinbao, Zhang Hanrong, et al. Shale gas resource evaluation based on pressure coefficient: A case study of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi formations in southeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3), 405-414.
- [34] U. S. Energy information administration (EIA), World Shale Gas Resources: An initial assessment of 14 regions outside the United States [R/OL]. 2011. <https://www.eia.gov/analysis/pdfpages/worldshalegasindex.php>.
- [35] U. S. Energy information administration (EIA), Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States [R/OL]. 2013. https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/China_2013.pdf.
- [36] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.
- [37] 郭秋麟, 李峰, 陈宁生, 等. 致密油资源评价方法、软件及关键技术 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1566-1575.
- Guo Qiulin, Li Feng, Chen Ningsheng, et al. Methodology, new software system and key technology for tight oil resources assessment [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1566-1575.
- [38] 王社教, 李峰, 郭秋麟, 等. 致密油资源评价方法及关键参数研究 [J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1576-1582.
- Wang Shejiao, Li Feng, Guo Qiulin, et al. Tight oil resource assessment methods and key parameters [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1576-1582.
- [39] James W S. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [40] Charpentier R R, Cook T A, Improved USGS methodology for assessing continuous petroleum resources [R/OL]. 2012. <https://pubs.usgs.gov/ds/547/downloads/DS547v2.pdf>.
- [41] Crovelli R A, Charpentier R R. Analytic resource assessment method for continuous (unconventional) oil and gas accumulations—The “ACCESS” method [R/OL]. Reston, Virginia: 2012. <https://pubs.usgs.gov/of/2012/1146/OF12-1146.pdf>.
- [42] Klett T R, Charpentier R R. FORSPAN model users guide [R/OL]. 2003. <http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-354>.
- [43] Cook T A. Procedure for calculating estimated ultimate recoveries of Bakken and three forks formations horizontal wells in the Williston Basin [R/OL]. Reston, Virginia: 2013. <https://pubs.usgs.gov/of/2013/1109/OF13-1109.pdf>.
- [44] U. S. Geological Survey (USGS). 2011 assessment of potential unconventional carboniferous-permian gas resources of the Liaohe Basin Eastern Uplift, Liaoning Province, China [R/OL]. 2012. <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3018/>.
- [45] U. S. Geological Survey (USGS). 2015 assessment of Paleozoic shale gas resources in the Sichuan Basin of China [R/OL]. 2015. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20153053>.
- [46] U. S. Geological Survey (USGS). 2015 assessment of undiscovered continuous gas resources of the Ordos Basin Province, China [R/OL]. 2016. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20153087>.
- [47] U. S. Geological Survey (USGS). 2018 assessment of Paleozoic shale-oil and shale-gas resources in the Tarim Basin of China [R/OL]. 2019. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20193011>.
- [48] Olea R A, Cook T A, Coleman J L. A methodology for the assessment of unconventional (continuous) resources with an application to the greater natural buttes gas field, Utah [J]. Natural Resources Research, 2010, 19(4): 237-251.
- [49] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究 [J]. 中国油气勘探, 2013, 18(2): 67-76.
- Guo Qiulin, Chen Ningsheng, Wu Xiaozhi et al. Method for assessment of tight oil resources [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(2): 67-76.
- [50] 苟红光, 赵莉莉, 梁桂宾, 等. EUR 分级类比法在致密油资源评价中的应用——以三塘湖盆地芦草沟组为例 [J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 27-33.
- Gou Hongguang, Zhao Lili, Liang Guibin et al. Application of EUR distribution analogous method to tight oil assessment: A case study from Lucaogou Formation in Santanghu Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 27-33.
- [51] Stueck H, Houseknecht D, Franke D, et al. Shale-gas assessment: Comparison of gas-in-place versus performance-based approaches [J]. Natural Resources Research, 2016, 25: 315-329.