

文章编号: 0253-2697(2023)12-2033-12 DOI:10.7623/syxb202312003

中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景

王建 郭秋麟 赵晨蕾 王玉满 于京都 柳庄小雪 陈宁生

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要: 中国页岩油气资源丰富,已成为现实接替能源。但目前页岩油气分类体系、资源起评标准及评价方法存在分歧,造成其评价结果差异较大。在深入分析页岩油气内涵、分类及地质特征的基础上,通过系统总结前人的研究成果,明确了页岩油气的分类方案,并提出与之相适应且规范的资源评价方法,进而评价和分析了中国页岩油气资源潜力。评价结果表明:中国10大盆地页岩油地质资源量为 $318.99 \times 10^8 \text{t}$,技术可采资源量为 $22.78 \times 10^8 \text{t}$;中国重点盆地/地区的页岩气地质资源量为 $65.48 \times 10^{12} \text{m}^3$,技术可采资源量为 $13.23 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。页岩油资源以鄂尔多斯盆地、松辽盆地和渤海湾盆地最为富集,油藏分别集中在上三叠统、白垩系和古近系,埋深主要在4500 m以浅;页岩气资源主要赋存在四川盆地,以下古生界气藏资源最为丰富,埋深主要在2000 m以深。结合页岩油气资源评价结果和勘探实践认为:鄂尔多斯盆地陇东地区、姬塬地区、志靖—安塞地区三叠系延长组7段,松辽盆地古龙凹陷与三肇凹陷白垩系青山口组,渤海湾盆地东营凹陷与沾化凹陷古近系沙河街组、沧东凹陷古近系孔店组二段,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组和玛湖凹陷风城组是中国页岩油资源富集区;四川盆地南部长宁、威远、泸州及渝西地区为页岩气资源富集区。

关键词: 页岩油;页岩气;资源评价;地质资源量;可采资源量;资源潜力

中图分类号: TE155

文献标识码: A

Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China

Wang Jian Guo Qiulin Zhao Chenlei Wang Yuman Yu Jingdu Liu Zhuangxiaoxue Chen Ningsheng

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Shale oil-gas resources are abundant in China, which have become the real alternative energies. However, there are still disputes on hydrocarbon classification system, resource assessment criteria and methods for shale oil-gas resources, thus leading to a large difference in the assessment results. By deeply analyzing the connotation, types and geological characteristics of shale oil and gas and systematically summarizing the previous research results, the paper determines the shale oil-gas classification scheme, puts forwards corresponding standard resource assessment methods, and further evaluates and analyzes the potential of shale oil-gas resources in China. The results indicate that the geological reserves of shale oil in ten major basins of China reach $318.99 \times 10^8 \text{t}$, and the recoverable resources are estimated to be $22.78 \times 10^8 \text{t}$; while those of major basins/areas in China are $65.48 \times 10^{12} \text{m}^3$ and $13.24 \times 10^{12} \text{m}^3$, respectively. Shale oil resources are mainly enriched in Ordos Basin, Songliao Basin and Bohai Bay Basin, oil reservoirs are mainly distributed in the Upper Triassic, Cretaceous and Paleogene strata, respectively, within a depth of 4500 m. Shale gas resources primarily occurred in Sichuan Basin, most of which were in the Upper Paleozoic strata at a depth over 2000 m. Based on the assessment results and exploration practices of shale oil-gas resources, it is considered that shale oil is mainly enriched in Member 7 of Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Jiyuan area, and Zhijing-Ansai area of Ordos Basin, as well as the Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong sag and Sanzhao sag of Songliao Basin, the Paleogene Shahejie Formation in Dongying sag and Zhanhua sag and the Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag of Bohai Bay Basin, as well as Lucaogou Formation in Jimusaer sag and Fengcheng Formation in Mahu sag of Junggar Basin; shale gas is mainly accumulated in Changning, Weiyuan, Luzhou and West Chongqing areas in the south of Sichuan Basin.

Key words: shale oil; shale gas; resource assessment; geological resources; recoverable resources; resource potential

引用: 王建, 郭秋麟, 赵晨蕾, 王玉满, 于京都, 柳庄小雪, 陈宁生. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.

Cite: WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, WANG Yuman, YU Jingdu, LIU Zhuangxiaoxue, CHEN Ningsheng. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司重点科技攻关项目(2023YQX201, 2021DJ1801)资助。

第一作者: 王建, 男, 1972年10月生, 2009年获中国矿业大学矿产普查与勘探专业博士学位, 现为中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事石油地质与油气资源评价。Email: yjy_wangj@petrochina.com.cn

通信作者: 郭秋麟, 男, 1963年10月生, 2008年获中国科学院地质与地球物理研究所矿物学、岩石学与矿床学专业博士学位, 现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事油气资源评价研究。Email: qlguo@petrochina.com.cn

近年来,随着油气勘探开发技术的持续发展,非常规油气展现出巨大的资源潜力,逐渐成为我国油气行业的接替领域和未来增储上产的主力军^[1-2]。非常规油气资源主要指大面积连续分布,在现今经济技术条件下难以完全用常规技术进行经济、有效开发的油气资源,包括致密油、页岩油、致密砂岩气、页岩气及煤层气、油砂和天然气水合物等^[3-4]。

在非常规油气中,页岩油气资源丰富、开发利用可行性高,被认为是21世纪重要的接替能源^[5-6]。页岩油气的大规模开发利用推动美国实现了“能源独立”,极大影响了全球油气供应版图和地缘政治格局^[7]。中国页岩油气资源丰富,近年来在准噶尔、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、四川、三塘湖、柴达木等盆地取得重要勘探进展,建立了新疆吉木萨尔、大庆古龙等国家级陆相页岩油示范区和涪陵、威远、长宁等页岩气示范区,页岩油气展现出巨大的资源潜力^[8]。

科学客观地评价全国页岩油气资源可以为油气勘探生产需求提供有力支撑,明确未来的勘探领域与发展方向。然而,我国大地构造背景复杂,页岩油气发育的地质条件差异大,跨越高演化程度的海相层系和非均质性强的陆相沉积层系。由于起步相对较晚,我国页岩油气前期的基础研究相对薄弱,勘探和认识程度处于初级阶段,页岩油气的分类体系、资源评价方法与起评标准具有较大分歧和差异。以页岩油的资源潜力评价为例:2015年美国能源署(EIA)估算中国页岩油的技术可采资源量为 $43.7 \times 10^8 \text{ t}$;2019年中国石化石油勘探开发研究院初步估算中国页岩油的技术可采资源量为 $(74 \sim 372) \times 10^8 \text{ t}$ ^[9];2023年,中国石油勘探开发研究院评价中国页岩油的地质资源量为 $145 \times 10^8 \text{ t}$ ^[10]。不同学者或机构对中国页岩油气资源潜力和发展前景的认识存在较大争议^[11],制约了页岩油气发展战略的有效制定。

笔者通过分析梳理前人的研究成果,明确了页岩油气的分类方案,修改完善并建立了页岩油气资源评价方法体系,系统评价和总结了我国主要盆地的页岩油气资源潜力和分布特征,并分析了我国页岩油气未来的发展前景,以期对非常规油气的长远发展有所启示。

1 页岩油气内涵、分类与地质特征

页岩油和页岩气属于“源-储-运-采”型非常规油气资源,富有机质泥页岩控制着页岩油气的形成与分布。泥页岩为粒径小于 0.0039 mm 的细粒沉积物,主要形成于水动力条件微弱的沉积环境,而富有机质泥页岩的形成则需要更加苛刻的缺氧、还原环境,如海相深水陆棚、海湾、潟湖及陆相深湖—半深湖等。富有机质泥

页岩主要由细粒碎屑、黏土矿物和有机质组成,其中有机质类型一般以I型、II型为主。

我国地质构造背景复杂,发育海相、海陆过渡相(交互相)和陆相3类富有机质页岩:①海相富有机质页岩主要发育在下古生界,以克拉通内拗陷或边缘拗陷的半深水—深水陆棚沉积为主,主要分布在四川盆地及其周边、中—下扬子区和塔里木盆地等地区,以上奥陶统一志留统的五峰组—龙马溪组为重点层段。②海陆过渡相页岩主要为形成于石炭系—二叠系碎屑岩含煤建造中的富有机质页岩,常与煤层共生、与砂岩呈互层,主要分布在四川盆地及周边、中—下扬子区、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地和塔里木盆地等地区。③陆相富有机质页岩的形成时代多样,跨越二叠纪至古近纪—新近纪,主要形成于中生代三叠纪—侏罗纪;我国东部松辽盆地和渤海湾盆地的陆相富有机质页岩主要分布于白垩系和古近系,中部鄂尔多斯盆地和四川盆地的陆相富有机质页岩主要分布在三叠系和侏罗系,西部准噶尔盆地、三塘湖盆地和柴达木盆地的陆相富有机质页岩主要分布于二叠系、侏罗系和古近系^[12-13]。

我国的页岩油资源主要赋存于陆相地层中,而页岩气资源则在海相、海陆过渡相和陆相3类富有机质页岩中均有发现^[14]。与北美地区相比^[15-18],我国3类富有机质页岩具有“一深、二杂、三多”的特点。“一深”指富有机质页岩的埋深大(埋深在 3500 m 以深的页岩约占65%);“二杂”指富有机质页岩的形成演化历史和地表条件复杂;“三多”指富有机质页岩的类型多样、页岩的形成与分布时代广泛(多期)、页岩油气富集及成藏的控制因素众多。这些特点决定了我国页岩油气的资源特征与美国广泛发育的海相页岩油气的资源特征有着显著的差别。

1.1 页岩油

1.1.1 页岩油的内涵

广义上,页岩油为富有机质页岩层中滞留的石油和多类有机物的统称,包括已经形成的石油、沥青和尚未转化的有机物;狭义上,页岩油是指已经生成但仍滞留于富有机质泥页岩微米、纳米级储集空间中的石油^[19-20]。笔者采用国家标准《页岩油地质评价方法》^[21]中的页岩油定义:页岩油指赋存于富有机质页岩层系中的石油;在富含有机质页岩层系烃源岩内,粉砂岩、细砂岩、碳酸盐岩的单层厚度不大于 5 m ,累计厚度占页岩层系总厚度的比例小于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^[21]。

1.1.2 页岩油的地质特征

我国陆相富有机质页岩主要发育在半深湖—深湖

亚相沉积环境中,有机质类型以 I 型和 II 型为主,易于生油;有机质成熟度(R_o)普遍偏低,一般小于 1%,处于生成偏轻质的石油阶段;页岩中有机质丰度较高,总有机碳(TOC)含量 $\geq 2.0\%$;矿物成分复杂,黏土矿物含量高;以微米/纳米级无机孔隙和微页理、裂缝为主要的储、渗空间,相对高孔隙度的储层“甜点区/段”在局部富集;流体黏度和密度大,地层压力和气油比(GOR)相对较低,单层页岩的厚度小且非均质性强^[22]。

1.1.3 页岩油的分类

中国页岩油类型存在多种划分体系^[6,23-25]。按照有机质成熟度,陆相页岩油可以划分为中—高成熟度页岩油和中—低成熟度页岩油 2 类。前者的有机质热演化程度高, R_o 一般大于 1.0%,已生成的液态烃数量多、油质较轻、可动油比例高,应用水平井体积压裂技术有望实现商业开采;后者的有机质热演化程度低, R_o 一般为 0.5%~1.0%,可转化资源潜力大、油质较稠、可动油比例较低,需要应用地下原位加热转化技术实现规模开发利用^[6,13]。按照储集岩性特征,页岩油可分为夹层页岩油、纯页岩油和原位转化页岩油 3 类^[26],其中,夹层页岩油的储集层为粉砂岩、细砂岩和碳酸盐岩夹层,纯页岩油和原位转化页岩油的储集层为泥页岩。从能否实现工业化开发的角度来看,目前的勘探开发主要关注中—高成熟度页岩油。笔者将中—高成熟度页岩油划分为夹层型与页岩型 2 类,而低成熟度页岩油则为地下原位转化页岩油。松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段页岩和鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段页岩的研究成果表明:当 $R_o = 1.0\%$ 时,页岩的氢指数已大幅降低,有效碳转化率超过 50.00%;当 $R_o = 0.8\%$ 时,页岩的有效碳转化率达到 18.44%。由此可见,中—高成熟度页岩的 R_o 下限应采用 0.8%^[27]。

1.2 页岩气

1.2.1 页岩气的内涵

中国国家能源局发布的《页岩气产业政策》^[26]中将页岩气定义为“赋存于富有机质泥页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气”,其覆压页岩的渗透率一般小于 0.001 mD,单井无自然产能,需通过技术措施才能获得工业气流。

从赋存状态来看,页岩气主要分为游离气和吸附气。吸附气主要被吸附在页岩有机质和黏土矿物表面,含量为 20%~85%;游离气则主要赋存于页岩孔隙和裂缝中;此外,还有少量页岩气以溶解气的状态存在,含量一般不超过 10%。页岩储层中游离气和吸附气的含量会受到岩石温度、压力和含水饱和度等因素影响。

1.2.2 页岩气的类型及地质特征

中国页岩气资源丰富,储层类型较多(海相、海陆过渡相、陆相),具有分布广泛且复杂、埋深大、资源条件不均匀的特点^[3]。

海相页岩气的形成、富集与成藏条件最为优越,主要富集在中国南方扬子地区寒武系筇竹寺组和志留系龙马溪组的富有机质页岩内。以四川盆地海相页岩为例:页岩分布均匀、构造稳定,优质页岩厚度大;总有机碳(TOC)含量高,有机质类型好,以 I—II 型为主,有机质的热演化程度处于热裂解成气阶段;页岩储层中有机质孔隙发育,石英等脆性矿物含量高,页岩气资源潜力巨大。目前,中国已建立涪陵、威远、长宁—昭通 3 个海相页岩气工业化生产示范区,实现了四川盆地页岩气勘探开发的重大突破;截至 2022 年底,示范区海相页岩气的探明地质储量为 $2.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$,页岩气累积产量为 $1159.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,在天然气储产量增长中发挥了重要作用^[7]。

海陆过渡相页岩气资源主要分布在四川盆地的二叠系和三叠系以及吐哈盆地的侏罗系等地层中。海陆过渡相页岩的岩性在纵、横向上变化频繁。此外,纵向上,海陆过渡相页岩的单层厚度小,总厚度大;横向上,页岩层的厚度不稳定或岩相变化快,常呈现叠置连片大范围分布。海陆过渡相页岩气以黏土质页岩、粉砂质页岩为有利储层,页岩的 TOC 含量不高、有机质类型以 II₂—III 型为主、热演化程度较高,页岩气保存条件好。目前,中国针对海陆过渡相页岩气开展的钻探不多,仅有少数井钻获气流,尚无工业性生产井。

与海相和海陆过渡相页岩气资源相比,陆相页岩气的资源量小,主要原因是陆相烃源岩/页岩中有机质的热演化程度不高,大部分正处于大量生油高峰期,只有在埋深大的地区才具有形成页岩气资源的条件,如渤海湾盆地的沙河街组。除准噶尔盆地二叠系陆相页岩外,其他盆地的陆相页岩总体形成时间晚。陆相页岩 TOC 含量差异大,根据有机质来源可进一步划分为湖相与湖沼相页岩,其中,湖相页岩的有机质主要来源于低等浮游生物,有机质类型以 I—II 型为主,而湖沼相页岩中陆源高等植物较多,有机质类型以 III 型为主;陆相页岩的岩相类型主要为黏土质页岩,其成岩作用和有机质的热演化程度低,以生成液态烃类为主,黏土矿物中高岭石、蒙脱石含量高。陆相页岩气的富集成藏具有富有机质页岩厚度大、有机质类型多样、保存条件好的优势,但也存在着有机质热演化程度低、黏土矿物含量高、储集空间不发育、生气范围小等劣势^[28]。目前,中国陆相页岩气的勘探开发主要集中在鄂尔多斯盆地和四川盆地,已有近百口井获得工业气流,但初始产气量差异大、递减快,尚未形成工业产能。

与北美地区相比,中国页岩气的勘探开发总体上具有3个特点:①海相页岩的热演化程度高(R_o 为2.5%~5.0%),但地质构造活动较强,地层露头 and 断裂破坏区不利于页岩气的保存;②陆相页岩的热演化程度低且页岩分布的非均质性强,需要具备针对性的技术才能达到页岩气有效开发;③地表环境复杂,页岩储层埋深大(3 000~6 000 m),需要采用适用技术降低勘探开发成本^[14]。

2 页岩油气资源评价方法

与常规油气资源相比,目前针对页岩油气开展的资源评价在方法上还不够成熟,在科学研究和勘探生产中仍需不断发展和完善^[28-32]。李建忠等^[33]指出,在生产实践中,对泥页岩中赋存的页岩油气资源的评价需要考虑有机质丰度、有机质类型、热演化程度、储集空间、富有机质集中层段的厚度、脆性矿物与黏土矿物含量、地层压力和保存条件等多项因素。

目前,页岩油气资源评价方法可以归纳为类比法、统计法和成因法3大类。不同地区由于地质条件复杂且页岩油气资源的勘探开发程度不同,不能笼统地采用同一种资源量计算方法,应根据各地区的具体情况选择其中1种或多种资源评价方法,对评价结果进行交叉验证,以提高评价结果的可靠性^[34-35]。

根据页岩油气资源评价方法的优选原则,针对地质勘探资料较少的大区域,页岩油气资源评价一般采

用体积法或容积法;针对页岩油气目标层系,往往采用资源丰度类比法、估算最终可采储量(EUR)类比法和小面元法3种(表1)。

表1 页岩油气资源评价方法

Table 1 Assessment methods of shale oil-gas resources

目标范围	勘探程度	主要评价方法
大区域	低—中(新区)	体积法或容积法
目的层系	中—高	资源丰度类比法 小面元法(有部分勘探井) EUR类比法(有部分生产井)

2.1 页岩油资源评价方法

在评价页岩油的地质资源量时,由于夹层型和页岩型页岩油的赋存状态不同,为了得到更为客观科学的评价结果,通常采用不同的评价方法体系^[36-39](表2)。夹层型页岩油一般采用资源丰度类比法和基于储层孔隙度的容积法计算地质资源量;纯页岩型页岩油地质资源量常用的估算方法包括基于页岩内游离烃(S_1)含量的体积法、基于氯仿沥青“A”含量的体积法等。考虑到页岩油资源的可动性(仅估算赋存于页岩孔隙中可动油,不包含吸附油),目前应用较为广泛的为基于 S_1 含量的体积法。对于页岩油勘探程度较高的地区,体积法又可利用小面元法进行细化评价,重点解决地质参数在二维平面空间上的分布问题。这里所说的体积法是以岩石体积为计算对象,而容积法则以岩石中的孔隙容积作为计算对象。

表2 页岩油地质资源量评价方法

Table 2 Assessment methods of geological resources of shale oil

页岩油类型	评价方法	适用范围	计算式	关键参数
夹层页岩油	资源丰度类比法	低—中勘探开发程度区	$Q_{\text{inplace}} = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot Z_{oi} \cdot a_i) / n$	评价单元的基础地质条件
	基于储层孔隙度的容积法	低勘探程度、数据资料少的地区或层系	$Q_{\text{inplace}} = 100 S_o \cdot H \cdot A \cdot \phi \cdot \rho (1/B_o)$	夹层(储层)厚度、孔隙度、含油饱和度;具体参数下限标准见文献 ^[36-37]
	小面元法(基于储层孔隙度的容积法)	中—高勘探程度、数据资料较多的地区或层系	$Q_{\text{inplace}} = \sum_{i=1}^n (100 S_{oi} \cdot H_i \cdot A_i \cdot \phi_i \cdot \rho / B_o)$	
纯页岩油	基于游离烃含量的体积法	低勘探程度、游离烃含量数据资料少的地区或层系	$Q_{\text{inplace}} = 0.1 A \cdot H \cdot \rho_{\text{rock}} \cdot S_1 \cdot k_{sl}$	游离烃含量、总有机碳含量、成熟度、页岩体积(厚度);具体参数标准见文献 ^[37-39]
	基于氯仿沥青“A”含量体积法	低勘探程度、数据资料较少的地层或层系	$Q_{\text{inplace}} = 100 K_a \cdot A \cdot H \cdot \rho_{\text{rock}}$	
	小面元法(基于游离烃含量的体积法)	中—高勘探程度、游离烃含量数据资料较多的地区或层系	$Q_{\text{inplace}} = \sum_{i=1}^n (0.1 A_i \cdot H_i \cdot \rho_{\text{rock}i} \cdot S_{1i} \cdot k_{sl_i})$	

鉴于目前页岩油开发生产井较少,笔者推荐夹层页岩油和纯页岩油的可采资源量评价采用EUR类比法和可采系数统计法(表3)。EUR类比法利用生产区的单井EUR值,根据单井泄油气面积来预测评价单元所需的钻井数,并结合钻井成功率来估算待评价区的页岩油气资源量。

2.2 页岩气资源评价方法

目前,中国页岩气的勘探开发主要集中在四川盆

表3 页岩油可采资源量评价方法

Table 3 Assessment methods of recoverable resources of shale oil

评价方法	适用范围	计算式	关键参数
EUR类比法	生产井相对较多的地区	$Q_{rc} = R \cdot P \cdot A / D$	开发井的平均EUR值,通常提供参数分布形式
可采系数统计法	没有生产井或生产井稀少的地区	$Q_{rc} = Q_{\text{inplace}} \cdot k_{rc}$	可采系数,一般通过统计地质条件相似或相近的页岩油开发区获得

地及其邻区的筇竹寺组、五峰组—龙马溪组,在其余地区或页岩层系,可用于页岩气资源潜力预测的资料有限。基于上述情况,页岩气的资源评价需要在区域地质研究的基础上,综合运用露头、地震、钻井、取心及分析测试等资料,查明评价区富有机质页岩的空间展布特征,落实页岩气富集与成藏的基本地质条件,依据页岩气成藏的关键因素,优选页岩气富集有利区^[28]。李延钧等^[40]提出:在进行页岩气藏评价选区时,对于构造演化复杂、地理条件差、开采难度大的地区,应首先将页岩的埋深作为重要的

经济开采性参数,根据埋深划分出不同的评价单元,对每个单元内页岩的 TOC 含量、 R_o 、脆性矿物含量、孔隙度和厚度分别评分,计算出总的地质评价系数,并将其作为各单元资源潜力大小和排序的依据;页岩气资源评价首先估算的是有利区范围内的资源量,最终再将各有利区块的资源量汇总至盆地或地区的资源量中。

页岩气资源评价主要采用资源丰度类比法、容积法和体积法(页岩含气量法),各方法的适用范围、计算式和关键参数等信息见表 4。

表 4 页岩气资源量评价方法

Table 4 Assessment methods of shale gas resources

评价方法	适用范围	计算式	关键参数
资源丰度类比法	中—高勘探开发程度区	$Q_g = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot Z_{gi} \cdot a_i) / n$	评价单元基础地质条件
容积法	低—中勘探程度、数据资料少的地区或层系	$Q_g = 0.01A \cdot H(\phi \cdot S_g + \rho_{rock} \cdot G_f)$	孔隙度、含气饱和度、吸附气含量
体积法	适用于资料较少的新区	$Q_g = 0.01A \cdot H \cdot \rho_{rock} \cdot C_t$	实测页岩含气量、岩石体积
小面元法(基于储层孔隙度的容积法)	中—高勘探程度、数据资料较多的地区或层系	$Q_g = \sum_{i=1}^n [0.01A_i \cdot H_i(\phi_i \cdot S_{gi} + \rho_{rock} \cdot G_{fi}) / B_g]$	储层厚度、孔隙度、含气饱和度和、吸附气含量

资源丰度类比法的原理是由已知推测未知,主要根据各类待评价区与刻度区页岩气地质条件的相似性,由刻度区的页岩气面积(体积)资源丰度推测待评价区的页岩气资源丰度^[41]。

容积法是中国页岩气资源评价早期最常用的方法之一,即利用泥页岩储集空间内的含气性(含气饱和度),计算其气体体积或重量^[41]。容积法可以根据储层中含气量获取方式的不同,直接计算页岩气的资源量,也可以根据页岩气赋存方式的不同,计算游离气或吸附气的含量。

体积法(页岩含气量法)主要依据实测含气量数据计算资源量。若缺乏含气量实测数据,可依据待评价区页岩气的地质条件与刻度区的相似性,以及刻度区的页岩气含气量推测待评价区的含气量,进而应用页岩体积估算页岩气资源量。

与页岩油类似,页岩气资源量评价也可以利用小面元法计算,即在容积法基础上进一步细化评价单元,以体现页岩气非均质性分布的特征。

3 页岩油气资源评价结果

为得到科学可靠的页岩油气资源量,在利用上述方法计算资源量的基础上,笔者采用特尔菲法对计算结果进行综合分析,对不同计算方法根据其置信程度赋予不同的权重系数,加权处理后得到最终的油气资源量。

Wang 等^[42]采用该资源评价方法对鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地和四川盆地的页岩油气资源

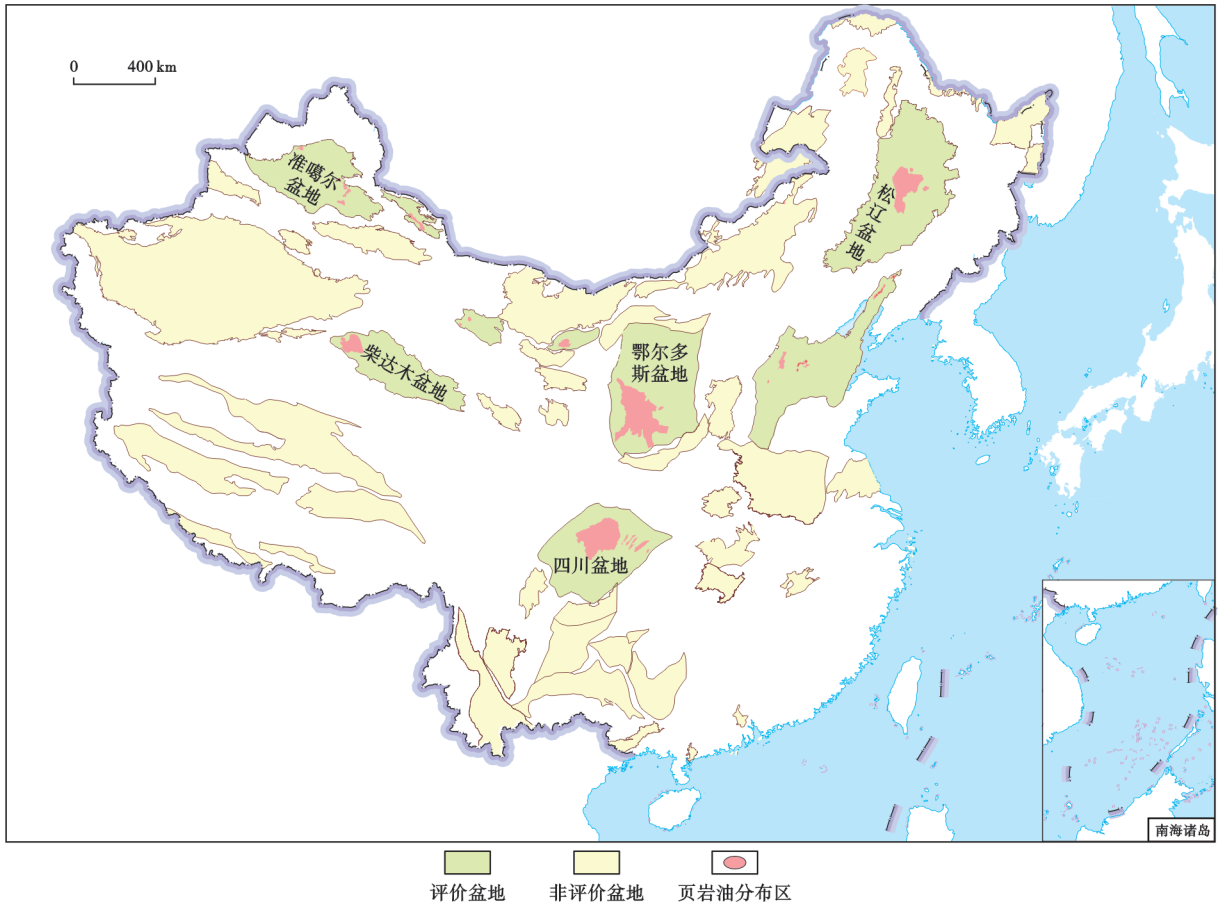
潜力进行了评价。同时,参考近年来其他盆地页岩油气资源量的相关研究成果^[43-47],笔者最终获得了中国重点盆地/地区页岩油气的资源量与分布情况。

3.1 页岩油资源评价结果

中国陆相盆地页岩油资源丰富,在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、柴达木、渤海湾、四川、三塘湖、酒泉等盆地均有分布(图 1)。

全国 10 大盆地的页岩油地质资源总量为 $318.99 \times 10^8 \text{ t}$,技术可采资源总量为 $22.78 \times 10^8 \text{ t}$ (表 5)。鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地和四川盆地 5 大盆地的页岩油地质资源量均超过 $20 \times 10^8 \text{ t}$,在页岩油地质资源量中的总占比为 95.88%。其中,鄂尔多斯盆地的页岩油地质资源量为 $107.30 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 33.64%,技术可采资源量为 $10.26 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 45.04%;松辽盆地的页岩油地质资源量为 $77.28 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 24.23%,技术可采资源量为 $3.82 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 16.77%;渤海湾盆地的页岩油地质资源量为 $75.19 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 23.57%,技术可采资源量为 $4.51 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 19.80%;准噶尔盆地页岩油地质资源量为 $25.14 \times 10^8 \text{ t}$,占比 7.88%,技术可采资源量为 $1.81 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 7.95%;四川盆地页岩油地质资源量为 $20.93 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 6.56%,技术可采资源量为 $1.43 \times 10^8 \text{ t}$,占比为 6.28%。页岩油富集盆地的类型从东部新生界断陷盆地群到古生界克拉通盆地均有涵盖,揭示中国页岩油资源分布广泛。

页岩油的主要分布层系按照地层从新到老依次为新近系、古近系、白垩系、侏罗系、上三叠统和二叠



注:底图据自然资源部标准地图基准绘制。

图 1 中国陆相页岩油分布
Fig. 1 Distribution of continental shale oil in China

表 5 中国重点盆地页岩油资源评价结果

Table 5 Assessment results of shale oil resources in main basins of China

排序	盆地	页岩油类型	地质资源量/ 10 ⁸ t	技术可采资源量/ 10 ⁸ t	地质资源量 占比/%	技术可采资源量 占比/%
1	鄂尔多斯	夹层型	68.23	7.51	33.64	45.04
		页岩型	39.07	2.75		
2	松辽	夹层型	12.20	0.84	24.23	16.77
		页岩型	65.08	2.98		
3	渤海湾	夹层型	54.79	3.40	23.57	19.80
		页岩型	20.40	1.11		
4	准噶尔	夹层型	23.19	1.73	7.88	7.95
		页岩型	1.95	0.08		
5	四川	夹层型	10.62	0.78	6.56	6.28
		页岩型	10.31	0.65		
6	柴达木	夹层型	5.93	0.45	1.86	1.98
7	三塘湖	夹层型	3.95	0.20	1.24	0.88
8	雅布赖	夹层型	1.64	0.11	0.51	0.48
9	酒泉	夹层型	1.37	0.17	0.43	0.75
10	开鲁	夹层型	0.26	0.02	0.08	0.09
总计			318.99	22.78	100.00	100.00

系(图 2),其地质资源量分别为 2.55×10^8 t、 78.57×10^8 t、 78.91×10^8 t、 22.57×10^8 t、 107.30×10^8 t 和 29.09×10^8 t,技术可采资源量分别为 0.18×10^8 t、

4.78×10^8 t、 4.01×10^8 t、 1.54×10^8 t、 10.26×10^8 t 和 2.01×10^8 t。页岩油资源主要集中在白垩系、上三叠统和古近系。

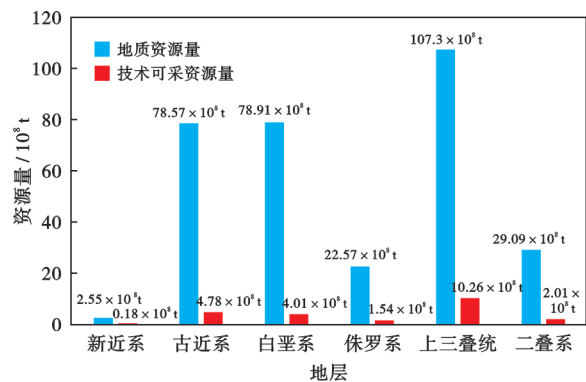


图 2 中国重点盆地页岩油资源的分布层系

Fig. 2 Stratigraphic distribution of shale oil resources in main basins of China

中国重点盆地的页岩油资源主要富集在浅层(埋深 < 2000 m)和中—深层(埋深为 $2000 \sim 3500$ m)页岩中,其地质资源量和技术可采资源量分别为 61.74×10^8 t、 3.31×10^8 t 和 107.68×10^8 t、 8.53×10^8 t(图 3)。

3.2 页岩气资源评价结果

中国海相页岩气主要分布在南方扬子地台的下古

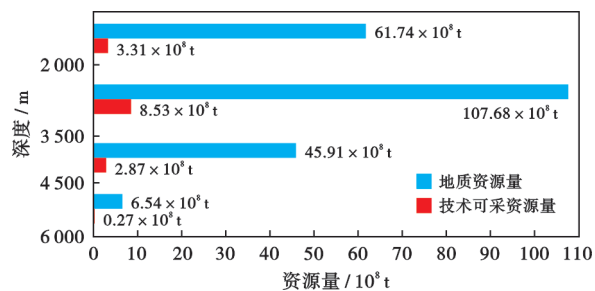
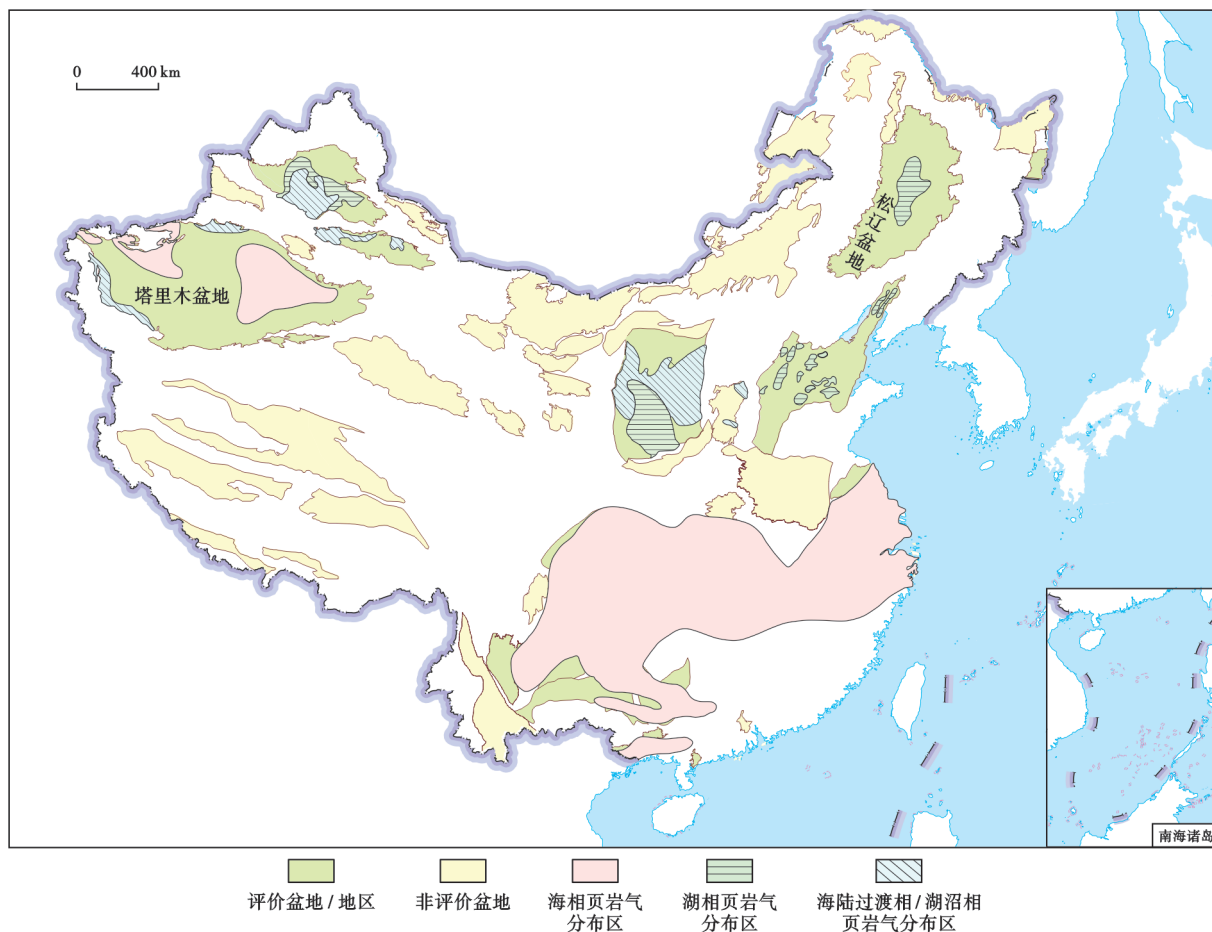


图 3 中国重点盆地页岩油资源的深度分布

Fig. 3 Depth distribution of shale oil resources in main basins of China

生界寒武系筇竹寺组和志留系龙马溪组;海陆过渡相/湖沼相地层中的页岩气资源主要分布在鄂尔多斯盆地上古生界石炭系—二叠系、塔里木盆地和准噶尔盆地中生界侏罗系以及四川盆地中生界三叠系和侏罗系;湖相页岩气主要分布在鄂尔多斯盆地中生界三叠系、准噶尔盆地上古生界二叠系、松辽盆地中生界白垩系以及渤海湾盆地古近系中(图 4)。



注:底图据自然资源部标准地图基准绘制。

图 4 中国页岩气资源分布

Fig. 4 Distribution of shale gas in China

资源评价结果显示,中国重点盆地/地区的页岩气地质资源总量为 $65.48 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $13.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表6)。页岩气资源主要集中在四川盆地,其地质资源量达 $44.03 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比为 67.24%;技术可采资源量为 $9.82 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比为

74.23%。其次分布在塔里木盆地和鄂尔多斯盆地,其页岩气地质资源量分别为 $7.92 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $7.78 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比分别为 12.10%和 11.88%;可采资源量分别为 $1.41 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $0.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比分别为 10.66%和 6.80%。

表6 中国重点盆地/地区页岩气资源评价结果

Table 6 Assessment results of shale gas resources in main basins or regions of China

排序	主要盆地/地区	页岩气类型	地质资源量/ 10^{12} m^3	技术可采资源量/ 10^{12} m^3	地质资源量 占比/%	技术可采资源量 占比/%
1	四川	海相	35.55	8.55	67.24	74.23
		海陆过渡相	6.59	0.99		
		陆相	1.89	0.28		
2	塔里木	海相	2.03	0.39	12.10	10.66
		陆相	5.89	1.02		
3	鄂尔多斯	海陆过渡相	6.23	0.75	11.88	6.80
		陆相	1.55	0.15		
4	松辽	陆相	0.89	0.09	1.36	0.68
5	渤海湾	陆相	0.32	0.04	0.49	0.30
6	准噶尔	陆相	0.80	0.08	1.22	0.60
7	吐哈	陆相	0.30	0.03	0.46	0.23
8	滇黔北地区	海相	2.87	0.72	4.38	5.44
9	中扬子地区	海相	0.57	0.14	0.87	1.06
总计			65.48	13.23	100.00	100.00

从页岩气资源的分布层系上看(图5),下古生界页岩气资源量最为丰富,地质资源量约为 $45.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量约为 $10.65 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其次分布在上古生界,页岩气地质资源量约为 $13.25 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量约为 $1.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

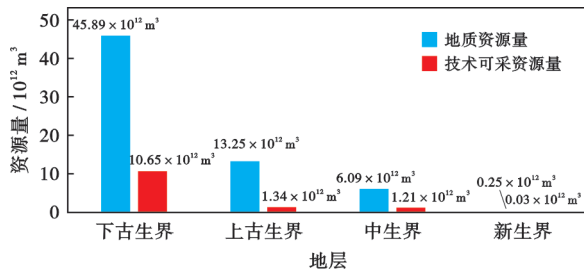


图5 中国重点盆地/地区页岩气资源的分布层系

Fig. 5 Stratigraphic distribution of shale gas resources in main basins or regions of China

中国页岩气资源主要分布在 2000 m 以深的地层中(图6)。深层(埋深在 3500~4500 m)页岩气资源量最大,约为 $23.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量约为 $4.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$;其次为中—深层(埋深在 2000~3500 m)页岩气和超深层(埋深在 4500~6000 m)页岩气,其地质资源量均约为 $19.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量分别约为 $3.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $4.57 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

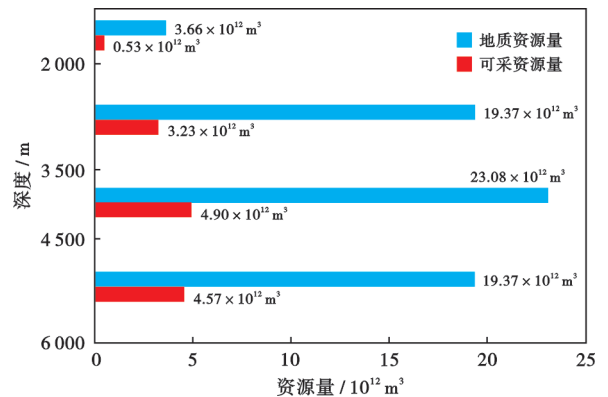


图6 中国重点盆地/地区页岩气资源的深度分布

Fig. 6 Depth distribution of shale gas resources in main basins or regions of China

4 页岩油气有利区优选

中国页岩油气有利区的优选应主要参考油气资源的富集程度,同时兼顾当前页岩油气勘探开发的实际效果。

4.1 页岩油有利区优选

目前,中国页岩油有利区的优选主要针对勘探开发效果较好的“甜点区”进行选择,邹才能等^[47]、赵文智等^[48]均对其优选方法及主要参考标准进行过论述。但由于中国陆相页岩油的成藏条件过于复杂,不同地

区的源岩、储层、保存条件及工程技术手段等差异较大,难以形成统一的划分标准。笔者主要通过页岩油的资源量大小及目前的勘探进展来进行优选。

鄂尔多斯盆地、松辽盆地和渤海湾盆地是中国页岩油资源最重要的潜力区。在渤海湾盆地,济阳拗陷东营凹陷与沾化凹陷古近系沙河街组为页岩油的有利勘探目标区,2019 年底以来,东营凹陷的博兴洼陷、牛庄洼陷和沾化凹陷的渤南洼陷 3 个洼陷在 YYP1 井、FYP1 井、BYP5 井、NY1-2HF 井、牛斜 124 井和 FY1-1HF 井 6 口专探井和评价井中相继取得重大突破,峰值产油量均超过 100 t/d^[49];此外,黄骅拗陷沧东凹陷孔店组二段页岩油目前已实现工业化开发,建立了 10 万吨级页岩油效益开发示范平台^[50];岐口凹陷古近系沙河街组的页岩油勘探也获得了重大突破^[51]。在鄂尔多斯盆地陇东地区、姬塬地区和志靖—安塞地区延长组 7 段,页岩油最为富集,已发现庆城十亿吨级规模页岩油储量区^[24]。在松辽盆地北部,青山口组页岩油在古龙凹陷和三肇凹陷取得了重大战略性突破,其中,古龙凹陷纯页岩层段预测页岩油储量为 12.68×10^8 t,已成为增储上产的现实领域^[52]。在准噶尔盆地,吉木萨尔凹陷芦草沟组 2023 年的页岩油产量达到 100×10^4 t,玛湖凹陷风城组玛页 1 井、玛页 2 井相继取得页岩油勘探突破,展现出陆相深层(埋深在 5 000 m)页岩油巨大的勘探潜力^[53-54]。在四川盆地,川中—川北地区的侏罗系具备较大的页岩油勘探潜力,其中,川北地区凉高山组、自流井组大安寨段和东岳庙段 3 套页岩层系普遍含油气,凉高山组平安 1 井在试油中获得了近百吨工业油流^[55]。上述页岩油发育区将是近期重点勘探方向,有望成为增储上产的重要接替领域。

4.2 页岩气有利区优选

页岩气资源评价结果显示,四川盆地及其周缘地区的页岩气资源最为丰富,占全国页岩气地质资源总量的 67.24%,其次为鄂尔多斯和塔里木盆地。前人曾对中国南方地区中一小型盆地群的页岩气进行过资源评价^[56-60],虽然评价结果认为页岩气资源整体规模很大,但鉴于盆地数量较多,资源比较分散。

四川盆地发育海相、海陆过渡相和陆相 3 类共 6 套富有机质页岩层系:以海相页岩气资源潜力最大,主要分布在奥陶系五峰组—志留系龙马溪组、寒武系筇竹寺组和震旦系陡山沱组中;海陆过渡相页岩气资源主要赋存于二叠系龙潭组;三叠系须家河组和侏罗系自流井组主要发育陆相富有机质页岩,是中国陆相页岩气勘探开发的重要潜力层系之一^[5]。目前,在四川盆地南部长宁、威远、泸州及渝西地区,页岩气勘探开发成效最好,是页岩气资源最有利的勘探区带,尤其是

埋深在 3 500~4 500 m 的深层页岩气资源已成为最现实的天然气接替领域。泸州中北部地区已落实深层页岩气三级储量 2×10^{12} m³,其他区块的探明页岩气地质储量约为 1.04×10^{12} m³。

5 结论与启示

(1) 页岩油采用夹层页岩油、纯页岩油和原位转化页岩油的分类体系,有利于中国陆相页岩油资源评价的统一对比分析。

(2) 不同勘探阶段、不同类型(夹层页岩油、纯页岩油、海相页岩气、海陆过渡相页岩气和陆相页岩气)的页岩油气资源量具有与之相适应的评价方法,对现有评价体系进行划分与归纳,可为规范页岩油气资源评价方法提供有力支撑。

(3) 页岩油气资源评价结果表明:中国 10 大主要盆地的页岩油地质资源总量为 318.99×10^8 t,技术可采资源总量为 22.78×10^8 t;9 个重点盆地/地区的页岩气地质资源总量为 65.48×10^{12} m³,技术可采资源总量为 13.23×10^{12} m³。中国页岩油气资源潜力巨大,前景广阔。

(4) 结合资源评价结果和目前的页岩油气勘探进展认为:在鄂尔多斯盆地陇东地区、姬塬地区和志靖—安塞地区延长组 7 段,松辽盆地北部古龙凹陷和三肇凹陷青山口组,渤海湾盆地东营凹陷、沾化凹陷和岐口凹陷古近系沙河街组、沧东凹陷古近系孔店组二段,准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组和玛湖凹陷风城组以及四川盆地川中—川北地区侏罗系,页岩油资源富集;在四川盆地南部长宁地区、威远地区、泸州地区及渝西地区,页岩气资源丰富。这些盆地/地区是中国页岩油气资源增储上产的有利区。

符号注释: Q_{inplace} —评价区页岩油地质资源量, t; A_i —第 i 个评价区的页岩面积, km²; Z_{oi} —第 i 个刻度区的页岩油资源丰度, t/km²; a_i —评价区与第 i 个刻度区类比的相似系数; n —刻度区个数; S_o —储集层平均含油饱和度; H —有效页岩储层厚度, m; A —含油/气(有效)页岩面积, km²; ϕ —平均有效孔隙度; ρ —平均原油密度, t/m³; B_o —平均原油体积系数, m³/m³; n —评价区划分的评价面元个数; S_{oi} —第 i 个评价面元的含油饱和度; H_i —第 i 个评价面元的页岩储层有效厚度, m; A_i —第 i 个评价面元的含油/气面积, km²; ϕ_i —第 i 个评价面元的平均有效孔隙度; ρ_{rock} —页岩岩石密度, t/m³; S_1 —页岩热解的游离烃含量, mg/g; k_{st} —轻烃恢复系数, 大于 1; K_a —氯仿沥青“A”含量; $\rho_{\text{rock}i}$ —第 i 个评价面元的页岩岩石密度, t/m³; S_{1i} —第

i 个评价面元页岩热解的游离烃含量, mg/g ; k_{s1i} —第 i 个评价面元的轻烃恢复系数; Q_{rc} —页岩油可采资源量, t ; R —开发井的平均 EUR, t ; P —钻井成功率; D —平均井控面积, km^2 ; k_{rc} —可采系数; Q_g —评价区页岩气地质资源量, m^3 ; Z_{gi} —第 i 个刻度区页岩气资源丰度, m^3/km^2 ; S_g —页岩含气饱和度; G_f —吸附气含量, m^3/t ; C_t —实测页岩含气量, m^3/t ; S_{gi} —第 i 个评价面元的含气饱和度; G_{fi} —第 i 个评价面元吸附气含量, m^3/t ; B_g —气体积系数, m^3/m^3 。

参 考 文 献

- [1] 窦立荣, 李大伟, 温志新, 等. 全球油气资源评价历程及展望[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1035-1048.
DOU Lirong, LI Dawei, WEN Zhixin, et al. History and outlook of global oil and gas resources evaluation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1035-1048.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 王社教. 中国非常规油气地质特征与资源潜力[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
WANG Shejiao. Geological characters and resource potential of unconventional oil and gas in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [4] 赵政璋, 杜金虎. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
ZHAO Zhengzhang, DU Jinhui. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [5] 王红军, 马锋, 童晓光, 等. 全球非常规油气资源评价[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 850-862.
WANG Hongjun, MA Feng, TONG Xiaoguang, et al. Assessment of global unconventional oil and gas resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 850-862.
- [6] 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.
- [7] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [8] 李剑, 王晓波, 侯连华, 等. 四川盆地页岩气地球化学特征及资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(8): 1093-1106.
LI Jian, WANG Xiaobo, HOU Lianhua, et al. Geochemical characteristics and resource potential of shale gas in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1093-1106.
- [9] 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.
- [10] 郭秋麟, 米石云, 张倩, 等. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 402-412.
GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(3): 402-412.
- [11] 马永生, 冯建辉, 牟泽辉, 等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 22-30.
MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in SINOPEC[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(6): 22-30.
- [12] YANG Zhi, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Formation, distribution and resource potential of the "sweet areas (sections)" of continental shale oil in China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 48-60.
- [13] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [14] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [15] CURTIS M E. Structural characterization of gas shales on the micro- and nano-scales[R]. SPE 137693, 2010.
- [16] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [17] KUSKE S, HORSFIELD B, JWEDA J, et al. Geochemical factors controlling the phase behavior of Eagle Ford Shale petroleum fluids[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(4): 835-870.
- [18] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas; part 2—shale-oil resource systems[M]//BREYER J A. Shale reservoirs—Giant resources for the 21st century. Tulsa, Oklahoma: AAPG, 2012: 89-119.
- [19] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [20] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3-17.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 3-17.
- [21] 国家市场监督管理总局, 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 of the People's Republic of China, Standardization Administration

- tion of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil; GB/T 38718-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [22] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142.
- [23] 宁方兴. 济阳拗陷不同类型页岩油差异性分析[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 6-9.
NING Fangxing. Difference analysis on different types of shale oils in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 6-9.
- [24] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1702-1716.
FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1702-1716.
- [25] 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 continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
- [26] 国家能源局. 页岩气产业政策[EB/OL]. (2013-10-22)[2023-10-28]. https://www.gov.cn/zw/gk/2013-10/30/content_2517985.htm.
National Energy Administration. Shale gas industry policy[EB/OL]. (2013-10-22)[2023-10-28]. https://www.gov.cn/zw/gk/2013-10/30/content_2517985.htm.
- [27] 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.
- [28] 董大忠, 王玉满, 黄旭楠, 等. 中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1583-1601.
DONG Dazhong, WANG Yuman, HUANG Xunan, et al. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1583-1601.
- [29] 郭秋麟, 周长迁, 陈宁生, 等. 非常规油气资源评价方法研究[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 12-19.
GUO Qiulin, ZHOU Changqian, CHEN Ningsheng, et al. Evaluation methods for unconventional hydrocarbon resources[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 12-19.
- [30] 郭秋麟, 陈宁生, 刘成林, 等. 油气资源评价方法研究进展与新一代评价软件系统[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1305-1314.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, LIU Chenglin, et al. Research advance of hydrocarbon resource assessment method and a new assessment software system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1305-1314.
- [31] 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): 238-246.
QIU Zhen, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Unconventional petroleum resources assessment: progress and future prospects[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 238-246.
- [32] 吴晓智, 柳庄小雪, 王建, 等. 我国油气资源潜力、分布及重点勘探领域[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 146-155.
WU Xiaozhi, LIUZHUANG Xiaoxue, WANG Jian, et al. Petroleum resource potential, distribution and key exploration fields in China[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 146-155.
- [33] 李建忠, 郑民, 陈晓明, 等. 非常规油气内涵辨析、源-储组合类型及中国非常规油气发展潜力[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 521-532.
LI Jianzhong, ZHENG Min, CHEN Xiaoming, et al. Connotation analyses, source-reservoir assemblage types and development potential of unconventional hydrocarbon in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 521-532.
- [34] 柳广第, 刘成林, 郭秋麟. 油气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 152-165.
LIU Guangdi, LIU Chenglin, GUO Qiulin. Petroleum resource assessment[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 152-165.
- [35] 赵迎冬, 赵银军. 油气资源评价方法的分类、内涵与外延[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2019, 41(2): 64-74.
ZHAO Yingdong, ZHAO Yinjun. Classification, content and extension of evaluation methods for oil and gas resources[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2019, 41(2): 64-74.
- [36] 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 Jimusar sag, Junggar Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1688-1698.
- [37] 郭秋麟, 王建, 陈晓明, 等. 页岩油原地量和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.
- [38] 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 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): 129-136.
- [39] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 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.
- [40] 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 28-34.
LI Yanjun, LIU Huan, LIU Jiexia, et al. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(2): 28-34.
- [41] 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 evolution[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1038-1047.
- [42] WANG Jian, GUO Qiulin, CHEN Xiaoming, et al. Geological

- characteristics and resource potential of shale oil in major basins of China [J/OL]. *Petroleum Science and Technology*, 2023 [2023-06-28]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10916466.2022.2147544>.
- [43] 李建忠, 郑民, 郭秋麟, 等. 第四次油气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
LI Jianzhong, ZHENG Min, GUO Qiulin, et al. Fourth assessment for oil and gas resource[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [44] 马新华, 陈更生, 陆家亮, 等. 页岩气勘探开发概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
MA Xinhua, CHEN Gengsheng, LU Jialiang, et al. Introduction to shale gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [45] 马新华, 张晓伟, 熊伟, 等. 中国页岩气发展前景及挑战[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(4): 491-501.
MA Xinhua, ZHANG Xiaowei, XIONG Wei, et al. Prospects and challenges of shale gas development in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(4): 491-501.
- [46] 张素荣, 董大忠, 廖群山, 等. 四川盆地南部深层海相页岩气地质特征及资源前景[J]. *天然气工业*, 2021, 41(9): 35-45.
ZHANG Surong, DONG Dazhong, LIAO Qunshan, et al. Geological characteristics and resource prospect of deep marine shale gas in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(9): 35-45.
- [47] 邹才能, 朱如凯, 毛治国, 等. 中国陆相致密油页岩油形成机理与富集规律[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, MAO Zhiguo, et al. Formation mechanism and enrichment regularity of continental tight/shale oil in China[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [48] 赵文智, 胡素云, 朱如凯, 等. 陆相页岩油形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, ZHU Rukai, et al. Formation and distribution of nonmarine shale oil in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [49] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(1): 1-20.
YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: a case study of Jiyang depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 1-20.
- [50] 周立宏, 陈长伟, 杨飞, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 24-33.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, YANG Fei, et al. Research and breakthrough of benefit shale oil development in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 24-33.
- [51] 赵贤正, 蒲秀刚, 金凤鸣, 等. 黄骅坳陷页岩型页岩油富集规律及勘探有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 158-175.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIN Fengming, et al. Enrichment law and favorable exploration area of shale-type shale oil in Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 158-175.
- [52] 朱国文, 王小军, 张金友, 等. 松辽盆地陆相页岩油富集条件及勘探开发有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 110-124.
ZHU Guowen, WANG Xiaojun, ZHANG Jinyou, et al. Enrichment conditions and favorable zones for exploration and development of continental shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 110-124.
- [53] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 99-110.
XIE Jianyong, CUI Xinjiang, LI Wenbo, et al. Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 99-110.
- [54] 金之钧, 梁新平, 王小军, 等. 玛湖凹陷风城组页岩油富集机制与甜点段优选[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 631-639.
JIN Zhijun, LIANG Xiping, WANG Xiaojun, et al. Shale oil enrichment mechanism and sweet spot selection of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 631-639.
- [55] 何文渊, 何海清, 王玉华, 等. 川东北地区平安1井侏罗系凉高山组页岩油重大突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 40-49.
HE Wenyuan, HE Haiqing, WANG Yuhua, et al. Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 40-49.
- [56] 胡琳, 朱炎铭, 陈尚斌, 等. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩气资源潜力分析[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(11): 1871-1877.
HU Lin, ZHU Yanming, CHEN Shangbin, et al. Resource potential analysis of shale gas in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Middle & Upper Yangtze region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11): 1871-1877.
- [57] 张金川, 陶佳, 李振, 等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 15-28.
ZHANG Jinchuan, TAO Jia, LI Zhen, et al. Prospect of deep shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 15-28.
- [58] 焦方正, 冯建辉, 易积正, 等. 中扬子地区海相天然气勘探方向、关键问题与勘探对策[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(2): 1-8.
JIAO Fangzheng, FENG Jianhui, YI Jizheng, et al. Direction, key factors and solution of marine natural gas exploration in Yangtze area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(2): 1-8.
- [59] 黄正清, 周道容, 李建青, 等. 下扬子地区寒武系页岩气成藏条件分析与资源潜力评价[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(1): 94-98.
HUANG Zhengqing, ZHOU Daorong, LI Jianqing, et al. Shale gas accumulation conditions and resource potential evaluation of the Cambrian in the Lower Yangtze area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(1): 94-98.
- [60] 肖贤明, 王茂林, 魏强, 等. 中国南方下古生界页岩气远景区评价[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(8): 1433-1445.
XIAO Xianming, WANG Maolin, WEI Qiang, et al. Evaluation of Lower Paleozoic shale with shale gas prospect in South China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(8): 1433-1445.

(收稿日期 2023-07-31 改回日期 2023-10-28 编辑 雷永良)