

中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策

邹才能^{1,2,3},董大忠^{1,2},熊伟^{1,2},傅国友^{3,4},赵群^{1,2},刘雯¹,孔维亮¹,张琴¹,蔡光银¹,
王玉满¹,梁峰¹,刘翰林¹,邱振^{1,2}

[1. 中国石油勘探开发研究院,北京100083;2. 国家能源页岩气研发(实验)中心,北京100083;
3. 中国石油大学(北京),北京102249;4. 中国石油天然气集团有限公司科技管理部,北京100007]

摘要:近年来,中国页岩气聚焦“三新”(尚未开展工作或工作程度低的新区带、新层系及新类型)领域,加大理论攻关与勘探力度,页岩气增储上产再上新台阶。基于中国页岩气“三新”领域理论与勘探新进展,分析其勘探特点、变化趋势和发展前景,探索中国特殊页岩气地质理论,明确页岩气发展挑战与对策。结果表明:中国在四川盆地及邻区创新建立了五峰组-龙马溪组特色的高-过成熟度海相页岩气富集理论,累计发现页岩气田9个,探明页岩气地质储量近 $3\times 10^{12}\text{ m}^3$,形成了 $450\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 的页岩气产能,年产页岩气 $250\times 10^8\text{ m}^3$ 。明确了近年来中国页岩气“三新”领域勘探具三大特点:①四川盆地及邻区五峰组-龙马溪组在深层、极浅层勘探取得重大新发展;②四川盆地筇竹寺组和吴家坪组等多个新层系实现新突破;③鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组获得新发现,东缘山西组取得新突破。页岩气“三新”领域的勘探实现了三大战略性转变:①目标由单一类型、单一盆地和单一层系转变为多类型、多盆地和多层系;②选区由盆内或盆缘为主转变为盆内、盆缘兼顾盆外弱改造区;③思路由纯粹富有机质页岩转变为富有机质页岩系统。通过梳理中国页岩气“三新”领域勘探挑战,指出“三新”领域是中国页岩气可持续发展的方向,并提出了下一步发展对策。

关键词:勘探思路转变;发展前景;发展对策;新区带;新层系;新类型;页岩气;中国

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China

ZOU Caineng^{1,2,3}, DONG Dazhong^{1,2}, XIONG Wei^{1,2}, FU Guoyou^{3,4}, ZHAO Qun^{1,2}, LIU Wen¹, KONG Weiliang¹,
ZHANG Qin¹, CAI Guangyin¹, WANG Yuman¹, LIANG Feng¹, LIU Hanlin¹, QIU Zhen^{1,2}

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Beijing 100083, China; 3. China University of Petroleum (China), Beijing 102249, China; 4. Science and Technology Management Department, PetroChina, Beijing 100007, China]

Abstract: In recent years, China has shifted its focus of shale gas exploration to underexplored plays, sequences and new types (collectively referred to as the “three new fields”). This shift has led to intensified efforts in addressing theoretical challenges and enhanced exploration, elevating both the reserves and production of shale gas to new levels. Based on new advances in theoretical research and exploration in the three new fields, we analyze the characteristics, trends, and prospects of shale gas exploration in these fields, explore theories on the unique shale gas geology in China, and identify challenges in shale gas exploration and corresponding countermeasures. The results indicate that China has developed innovative theories on the enrichment of highly- to over-mature marine shale gas with distinct characteristics of shales in the Wufeng-Longmaxi formations within the Sichuan Basin and its surrounding areas. A total of nine shale gas fields have been discovered in China with proven geological reserves of approximately $3\times 10^{12}\text{ m}^3$, resulting in a shale gas productivity of $450\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$, and an annual shale gas production of $250\times 10^8\text{ m}^3$. Furthermore, we ascertain three major

收稿日期:2024-03-22;修回日期:2024-04-06。

第一作者简介:邹才能(1963—),男,博士、中国科学院院士,常规-非常规油气地质学理论研究与实践、新能源与能源战略。E-mail:zen@petrochina.com.cn。

通信作者简介:邱振(1984—),男,博士、高级工程师,非常规油气沉积学与勘探评价。E-mail:qiuzhen316@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42222209);中国石油天然气集团公司项目(2023ZZ0801,2021yjcg02);贵州省重大科技专项(2022-ZD005);贵州能源产业研究院有限公司页岩气院士工作站项目(2021-45-2);贵州页岩气勘探开发科技创新基地项目(2022-4024)。

characteristics of the shale gas exploration in the three new fields in China: (1) significant progress in deep and extremely shallow strata for shale gas exploration of the Wufeng-Longmaxi formations within the Sichuan Basin and its surrounding areas; (2) breakthroughs in multiple underexplored units, such as the Qiongzhusi and Wujiaping formations in the Sichuan Basin; and (3) discoveries and breakthroughs in the Wulalike and Shanxi formations located on the western and eastern margins of the Ordos Basin, respectively. Three major strategic shifts have been achieved: (1) a shift in exploration target from a single type, basin, and unit to multiple types, basins, and units; (2) a shift of target area selection from focusing on the interiors or peripheries of basins to including basins' exterior with weak tectonic modification; (3) a shift in the exploration philosophy from pure organic-rich shales to organic-rich shale systems. Analyzing challenges in shale gas exploration in the three new fields in China leads to the conclusion that these fields both represent the direction for the sustainable development of shale gas in China and need corresponding countermeasures for their progress.

Key words: shift in exploration philosophy, prospect, countermeasure for progress, underexplored play, underexplored sequence, new type, shale gas, China

引用格式: 邹才能, 董大忠, 熊伟, 等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 309–326. DOI: 10.11743/ogg20240201.

ZOU Caineng, DONG Dazhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 309–326. DOI: 10.11743/ogg20240201.

油气勘探中, 尚未开展工作或工作程度低的新区带、新层系及新类型为勘探的“三新”领域。中国页岩气勘探处于起步阶段, “三新”领域是中国未来页岩气勘探的重点。北美1821年发现页岩气, 2000年掀起页岩气革命, 2019年美国实现油气能源独立, 2022年美国页岩气产量为 $8\,069\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1]。中国1965年在四川盆地发现页岩气, 2009年在四川盆地实现页岩气井产量工业突破, 后陆续在四川盆地、渝东鄂西、滇东黔北等地区的五峰组–龙马溪组发现页岩气并获工业气流^[2–6], 至2023年底在四川盆地及周缘五峰组–龙马溪组探明8个大型页岩气田及1个小型页岩气田(图1), 探明页岩气地质储量 $2.96\times 10^{12}\text{ m}^3$, 建成页岩气产能 $450\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$, 年产页岩气 $250\times 10^8\text{ m}^3$ ^[7]。其中川南地区的威远页岩气田年产量 $40.58\times 10^8\text{ m}^3$, 长宁页岩气田年产量 $52.13\times 10^8\text{ m}^3$, 泸州页岩气田年产量 $24.58\times 10^8\text{ m}^3$, 渝西页岩气田年产量 $10.87\times 10^8\text{ m}^3$, 黄金坝页岩气田年产量 $11.40\times 10^8\text{ m}^3$, 太阳–大寨页岩气田年产量 $6.07\times 10^8\text{ m}^3$ 。勘探实践表明五峰组–龙马溪组是页岩气资源非常富集的层系, 具有普遍含气、甜点区大面积分布和单井高产稳产的特点。

中国发育海相、海–陆过渡相和陆相3类富含有机质页岩, 页岩气地质资源量 $105.7\times 10^{12}\text{ m}^3$, 分布在前寒武系–新生界的10余套地层中。迄今, 除四川盆地五峰组–龙马溪组外, 随着页岩气地质理论认识的深化与勘探评价技术的进步以及页岩气规模效益开发经验的不断积累和成熟, 中国页岩气勘探不断在四川、鄂尔多

斯等盆地, 湖北宜昌、贵州安场等地区的“三新”领域中取得突破(图1; 表1)^[8–23], 初步形成了“海–陆并举、盆–山并进”的页岩气勘探新格局。中国页岩气勘探领域广、资源潜力大, 正逐渐凸显出良好发展前景, 页岩气勘探也逐渐进入多层系和多地区发展的新阶段。

本文在中国页岩气地质理论新认识及勘探开发实践基础上, 通过近年来页岩气“三新”领域突破, 对其勘探特点和地质认识转变作系统梳理, 进一步揭示中国页岩气勘探发展前景和面临挑战, 提出页岩气勘探的关键问题及发展对策, 以期为页岩气“三新”领域勘探共性及特殊问题的超前研究和页岩气勘探提供理论技术引导。

1 页岩气“三新”领域勘探三大重要特点

1.1 四川盆地深层–超深层、浅层–超浅层五峰组–龙马溪组获重大发现, 拓宽了页岩气勘探新领域

近年来, 中国在四川盆地泸州、南川深层–超深层, 叙永、正安浅层–超浅层页岩气等勘探领域不断获得重要新发现。

以四川盆地泸州地区泸203井为典型代表, 实现了中国深层页岩气勘探的新突破, 拓展了四川盆地页岩气有利建产深度^[3–5, 7, 21, 24–30](表1)。中国页岩气地质条件复杂程度远超美国, 深层页岩气更是如此。

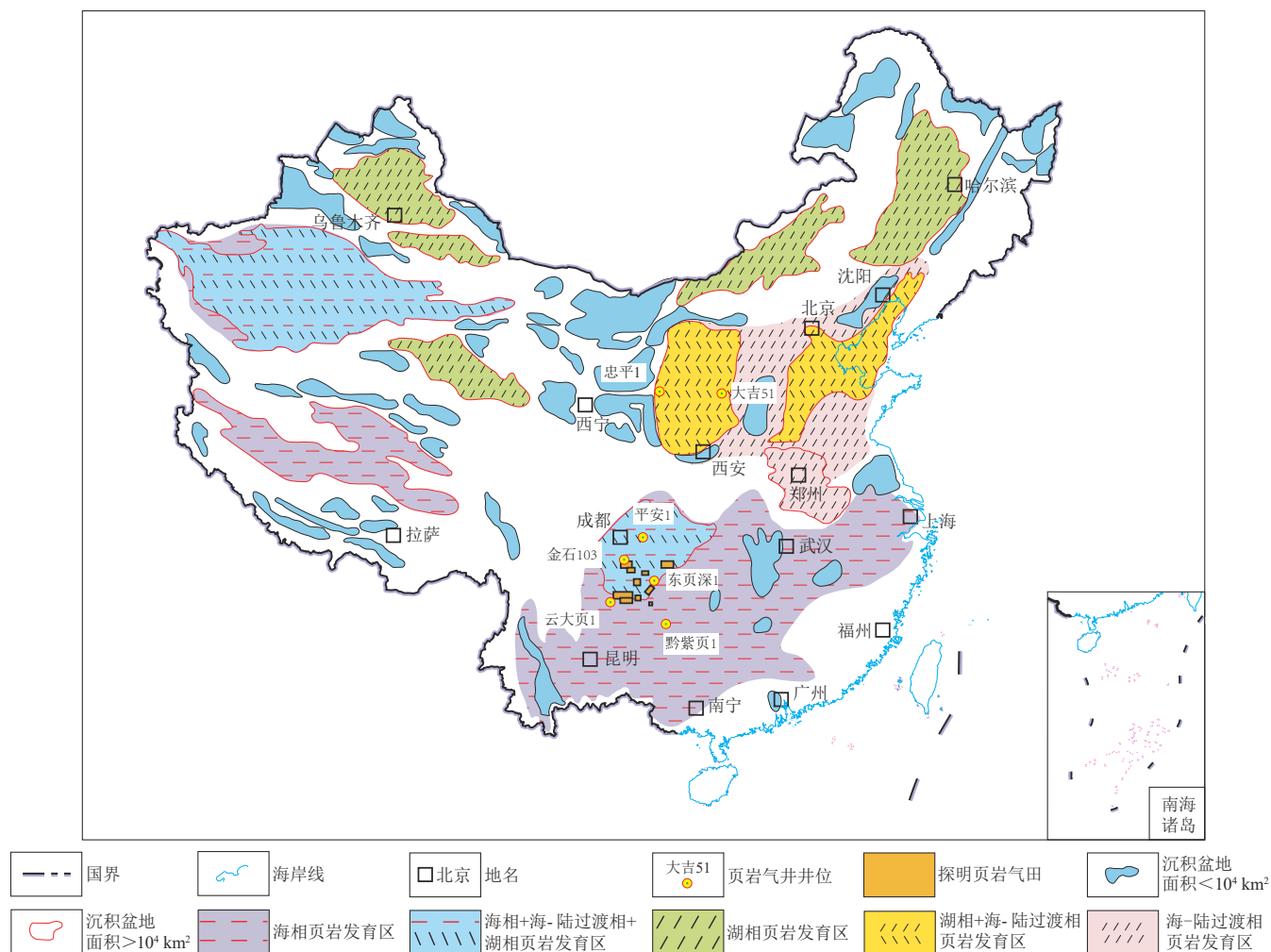


图1 中国陆上探明页岩气田与页岩气“三新”领域主要发现井分布示意图(据文献[23]修改)

Fig. 1 Schematic diagram showing the distribution of major discovery wells in onshore proven shale gas fields and areas bearing shales/shale gas in the three new fields, China (modified after reference [23])

深层页岩地层温度、地层压力、地应力和应力差均呈现异常高值特征,深层页岩储层有机质孔隙、无机矿物孔隙和裂缝复合发育。但是,深层页岩气有良好勘探前景一直是共识。2009年壳牌公司、2016年BP公司等先后在富顺-永川、荣昌北等区块探索,均未能实现突破。2019年3月泸203井(垂深3 866.70 m,水平段长1 021.84 m),压后测试获日产气 $137.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,刷新了中国页岩气单井最高测试产量纪录,是深层页岩气勘探的标志性突破。

浅层页岩气是指页岩气储层埋深小于2 000 m的页岩气,超浅层则是埋深小于500 m^[29]。浅层-超浅层页岩气与深层相反,储层埋深小,地层温度、地层压力和资源丰度均低,勘探潜力一直被质疑。2017年4—6月中国石油浙江油田分别对太阳背斜的Y1井和Y102井两口浅层井压裂试气,获日产页岩气 $0.59 \times 10^4 \sim 1.10 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了中国浅层页岩气勘探的重大突

破。此后,又在埋深更小的YQ11井超浅层获突破,尤其是2021年1月在海坝背斜的YS153H1井组(共3口井)测试中获日产页岩气为 $4.5 \times 10^4 \sim 6.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产气流,从而取得盆地外浅层-超浅层页岩气勘探重大突破,证实了四川盆地外复杂构造区浅层-超浅层页岩气良好的勘探前景,拓宽了中国页岩气勘探领域。

五峰组-龙马溪组深层-超深层页岩气资源潜力巨大^[30](表2)。据预测,四川盆地五峰组-龙马溪组埋深3 500~5 000 m的深层-超深层页岩面积达 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,页岩气剩余资源量约 $11.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占五峰组-龙马溪组页岩气总剩余资源量的51%,为重要接替领域。其中,泸州地区深层页岩气有利面积1 630 km²、页岩气资源量 $1.14 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表2),为中国“十四五”页岩气持续上产奠定了扎实的资源基础。五峰组-龙马溪组浅层-超浅层页岩气同样具有巨大的资源

表1 中国陆上页岩气“三新”领域勘探新发现统计

Table 1 Statistics of discoveries in shale gas exploration in the three new fields within onshore regions of China

盆地或区域	“三新”类型	地区/构造	井号	井深/m	层位	测试产量/(10 ⁴ m ³ /d)
四川盆地	新层系、新类型	井研—键为地区	金石 103HF	4 683.00	筇竹寺组	25.86
		威远地区	资 201	6 600.00	筇竹寺组	73.88
	新领域、新区带	威荣地区	威页 1	3 500.00 ~ 4 500.00	五峰组—龙马溪组	17.50
		泸州地区	泸 203	3 866.70	五峰组—龙马溪组	137.90
		渝西地区	足 202H1	3 925.50	五峰组—龙马溪组	45.67
			黄 202	4 086.10	五峰组—龙马溪组	22.37
		永川地区	永页 1 等 6 口井	3 700.00 ~ 4 300.00	五峰组—龙马溪组	8.00 ~ 14.00
		丁山—东溪区带	东页深 1HF 等 4 口井	3 800.00 ~ 4 500.00	五峰组—龙马溪组	5.00 ~ 31.20
		太阳—大寨背斜	Y1	976.20 ~ 986.00	五峰组—龙马溪组	1.10
			Y102	768.50 ~ 778.80	五峰组—龙马溪组	0.59
		海坝背斜	Y153H1 平台	480.00 ~ 560.00	五峰组—龙马溪组	4.50 ~ 6.10
		华蓥山区带	华地 1	1 288.80 ~ 1 337.20	龙马溪组	0.30 ~ 0.50
		宣汉—达县地区	雷页 1	4 000.00	大隆组	42.66
		七里峡构造	罐 36	3 631.00	吴家坪组	1.20
		梁平地区	大页 1	6 037.00	吴家坪组	32.06
		红星地区	红页 1HF—红页 4HF	3 300.00	吴家坪组	8.90 ~ 15.20
			红页 1 平台	3 300.00	茅口组—吴家坪组	6.08
			红页茅 1HF	5 727.00	茅口组	6.45
	新层系、新类型	南江区块	乐坝 1	5831.00	大隆组	6.17
		普光气田	普陆页 1	3 190.00 ~ 3 460.00	千佛崖组	10.40
		拔山寺向斜	泰页 1	2 386.00 ~ 2 624.00	凉高山组	7.50
		平昌地区	平安 1	2 850.00 ~ 3 015.00	凉高山组	11.45
		元坝区带	元坝 21	4 010.00 ~ 4 033.00	自流井组大安寨段	50.70
		龙岗区块	龙浅 2	2 128.00 ~ 2 146.00	自流井组大安寨段	0.30
		涪陵区块	涪页 HF-1	3 570.00 ~ 3 722.00	自流井组大安寨段	1.70
		建南地区	建页 HF-1	1 777.77	自流井组东岳庙段	1.20
	新层系、新类型、新区带	马家滩区块	忠平 1	4 165.00 ~ 4 285.00	乌拉力克组	26.48
			李 99	4 432.41 ~ 4 434.55	乌拉力克组	4.20
		大宁—吉县地区	大吉 51(吉平 1H)	2 265.50 ~ 2 302.50	山西组	7.97
其他地区	新层系、新区带	正安向斜	安页 1	2 302.00 ~ 2 325.48	石牛栏组	10.22
					五峰组—龙马溪组	100 ~ 2.36
		狮溪向斜	狮溪 1	1356.00	五峰组—龙马溪组	1.19 ~ 2.86
		湄焉复向斜	瑞溪 1、瑞溪 2	426.00 ~ 762.00	五峰组—龙马溪组	1.06 ~ 2.37
		大关—永善地区	云大页 1	1 998.00 ~ 2 088.00	五峰组—龙马溪组	0.53
	新层系、新类型、新区带	宜昌区块	鄂宜页 1、鄂阳页 1HF 等 6 口井	1 874.00 ~ 2 389.00 3 343.00 ~ 5 179.00	陡山沱组—水井沱组—龙马溪组	5.53 ~ 7.83
		丹寨区块	贵丹地 1	535.00 ~ 1 080.00	乌训组—陡山沱组	—
		玉皇洞向斜	黔水地 1	2 500.00	打屋坝组	1.10
		黔南坳陷	黔紫页 1	2 664.00 ~ 2 983.00	打屋坝组	—
		柳城北区块	桂融页 2-1HF	1 857.00 ~ 3 657.00	鹿寨组	—

注:“—”为无数据。

潜力。据估算^[26],四川盆地周缘五峰组—龙马溪组埋深小于 2 000 m 的浅层—超浅层面积达 15×10⁴ km²,页岩气剩余资源量在 1.56×10¹² m³ 以上,占五峰组—龙马溪组页岩气总剩余资源量的 20%,是不可忽视的重要领域。

1.2 四川盆地新层系页岩气勘探实现新突破,有望成为页岩气增储上产接替领域

持续创新新层系页岩气地质认识,加大页岩气战略接替新层系探索,成为发现页岩气规模资源的

表2 四川盆地“三新”领域页岩气有利区资源统计

Table 2 Statistics of resources within shale gas play fairways in the three new fields within the Sichuan Basin

“三新”类型	区带	层位	面积/ km ²	资源量/ (10 ⁸ m ³)
新类型	自210井区	五峰组-龙马溪组	220	1 100
	宜202井区		260	1 300
	自205井区		200	1 200
	泸州中区		790	7 000
	足202-203井区		160	800
新层系-新类型	威远构造东翼	筇竹寺组	3 000	20 000
	井研-犍为区块		600	3 878
	龙门潜伏构造	吴家坪组	30 000	60 000
	宣汉-达县地区	大隆组	4 220	12 000
	红星地区	吴家坪组-茅口组	9 480	47 600
新层系-新区带	马家滩-银洞子地区	乌拉力克组	9 000	10 000
	宜昌地区	五峰组-龙马溪组	3 039	15 000
	道真地区		368	1 914
	遵义地区		695	200 ~ 300
	大木杆-寿山地区	鹿寨组、 榴江组	333	1 400
	柳城北、鹿寨地区		122	2 100

重要途径。四川盆地发育多层系富有机质页岩, 前古生界陡山沱组, 古生界筇竹寺组、五峰组-龙马溪组、吴家坪-大隆组和龙潭组, 中生界须家河组和自

流井组-凉高山组^[9, 31-36]。迄今仅五峰组-龙马溪组实现页岩气规模化开发, 其他层系勘探程度低, 尚处在探索评价阶段。为打破中国页岩气勘探开发五峰组-龙马溪组唯一经济层系限制, 各油气公司致力全盆地, 加大页岩气新层系勘探评价。以富有机质页岩厚度大、有机质丰度高和埋深适度等指标为特征依据, 开展页岩气成藏富集条件研究、资源潜力评价及“甜点区”优选, 实施预探和风险钻探评价, 陆续在德阳-安岳裂陷槽寒武系筇竹寺组、开江-梁平海槽二叠系吴家坪组、城口-鄂西海槽二叠系大隆组等新层系获得突破(表1), 证实了四川盆地各新层系页岩具有良好的含气性, 进一步勘探评价将有望成为页岩气增储上产接替新领域。

四川盆地及周缘下寒武统筇竹寺组发育巨厚海相页岩, 早在1966年钻探的威5井就在筇竹寺组发现页岩气流, 2009年威201井、2010年威201-H3井以及2014年金页1井和金页1HF井等已先后在筇竹寺组获日产 $1.08 \times 10^4 \sim 8.00 \times 10^4$ m³页岩气流^[7, 28, 33]。但早期评价认为筇竹寺组页岩“先天不足”——页岩演化程度高, 富有机质页岩连续厚度和品质比不上五峰组-龙马溪组。通过精细研究和重新认识, 2022年金石103HF井、2023年资201井分别在筇竹寺组取得勘探新突破。金石103HF井在寒武系筇竹寺组粉砂质页岩储层压裂测试(图2a)^[13], 获日产页岩气 25.86×10^4 m³, 落实页

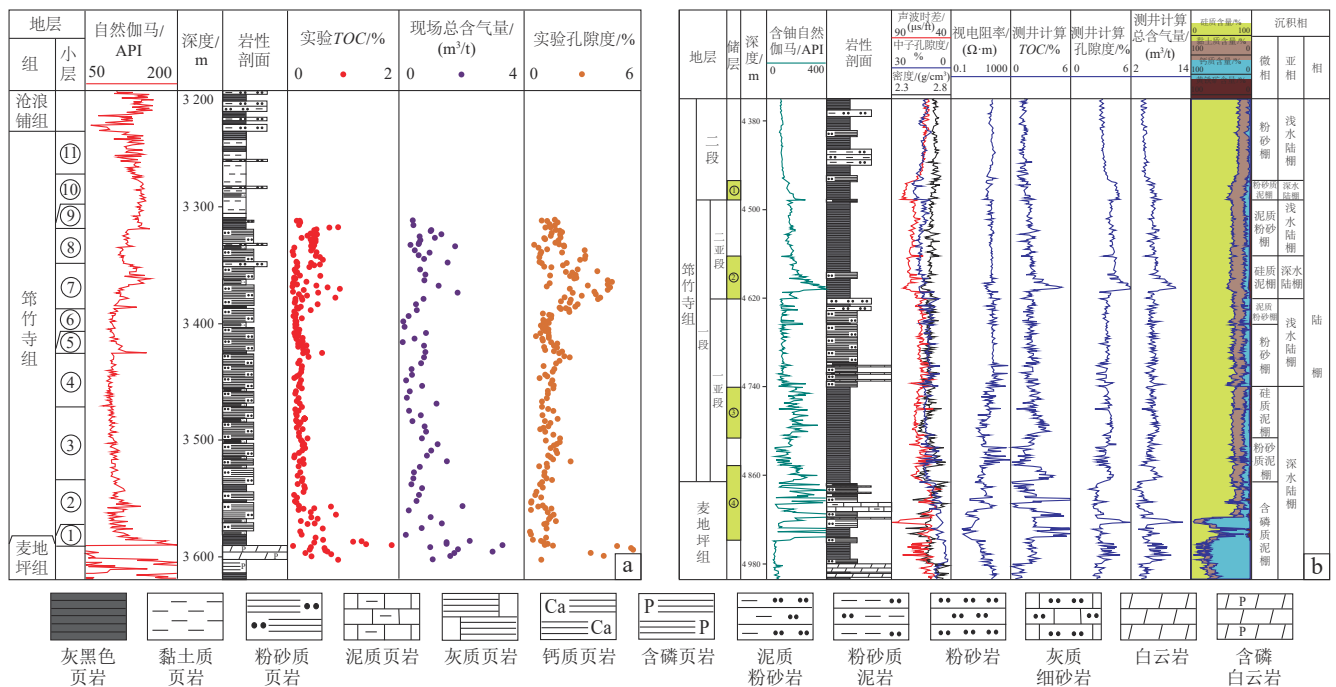


图2 四川盆地金石103HF井^[13](a)和Z201井^[28](b)筇竹寺组页岩气储层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic columns of the Qiongzhusi Formation shale gas reservoirs in wells JS 103HF^[13] (a) and Z201^[28] (b) in the Sichuan Basin

页岩气资源量约 $3.878 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。资201井在筇竹寺组一段③号富有机质页岩储层压裂测试(图2b),获稳定日产页岩气 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、计算无阻流量 $164.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产页岩气流,落实有利页岩储层面积 $3\,000 \text{ km}^2$ 、页岩气资源量约 $2.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。筇竹寺组页岩气是迄今全球页岩气勘探发现的地层最老和测试产量较高的一套页岩储层。初步认为筇竹寺组页岩连续储层厚度大、总有机碳含量(TOC)、孔隙度和总含气量高,预测页岩气资源量为 $5.69 \times 10^{12} \sim 12.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

除筇竹寺组和五峰组-龙马溪组外,四川盆地二叠系是另一个重要的页岩发育层系,在川东北开江-梁平海槽和城口-鄂西海槽等地区发育吴家坪组、大隆组 and 龙潭组等富有机质页岩。开江-梁平海槽和城口-鄂西海槽发育深水陆棚相页岩,横向稳定大面积连续分布,页岩储层品质具有TOC高、孔隙度高、脆性高、含气量高和压力系数高等“五高”特征。2022年川东北开江-梁平海槽的大页1井^[16]和雷页1井^[37]在吴家坪组和大隆组获新突破,吴家坪组三段和大隆组一段测试获日产页岩气分别为 $32.06 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $42.66 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2020年鄂西渝东的红星-复兴地区的HY1井在吴家坪组和茅口组发现优质富有机质页岩^[38],吴家坪组二段压裂测试获日产页岩气 $8.90 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。此后,对吴家坪组和茅口组进一步评价勘探,测试页岩气日产量 $11.60 \times 10^4 \sim 15.20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。至2021年底该区块已提交页岩气预测地质储量 $1\,051 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。综合评价认为,二叠系吴家坪组、茅口组和大隆组页岩气勘探的突破初步打开了四川盆地东部二叠系海相页岩气勘探新局面,填补了二叠系4 000 m以深页岩气勘探空白。通过大量老井复查及深化研究,初步揭示了二叠纪海西期构造-沉积演化特征,重新厘定了二叠系深水陆棚相沉积展布范围(图3)、富有机质页岩发育与分布规律,锁定了二叠系吴家坪组、茅口组和大隆组有利区,预测了页岩气资源潜力。

众所周知,四川盆地还广泛发育三叠系和侏罗系陆相黑色页岩,是页岩气勘探的重要后备领域^[8-9]。中国自页岩气勘探以来,一直在对陆相页岩气进行探索和评价。迄今在川北元坝、川东北普光、川东涪陵、川中平昌等地区陆续有突破,最高测试页岩气产量 $11.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2020年11月川中平昌地区平安1井在侏罗系凉高山组粉砂质页岩层段,压裂测试日产页岩气 $11.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、油 112.80 m^3 。根据平安1井钻探成果^[8],精细地层厘定认为凉高山组上段发育3套富有机质页岩,以湖相长英质富有机质页岩为主,储层孔隙度2.06%,粒间孔、晶间孔和微裂缝发育,TOC为

0.64%~1.35%,镜质体反射率(R_o)为1.51%~1.66%,脆性矿物含量50.4%~54.8%,储层保存条件好,地层超压。2021年11月川东北普光气田的普陆页1井^[9],侏罗系千佛崖组一段压裂试气,发现 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产页岩气层,试采稳定页岩气产量 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。初步评价认为,川东北地区侏罗系千佛崖组为湖泊-三角洲沉积,千佛崖组一段发育半深湖黑色页岩,TOC为1.01%~2.39%,平均为1.42%; R_o 为1.95%~2.09%,平均为2.06%;石英平均含量29.3%;孔隙度平均5.37%;含气量平均 $2.06 \text{ m}^3/\text{t}$;综合预测千佛崖组一段页岩气有利区资源量 $4\,239.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1.3 鄂尔多斯盆地页岩气勘探新突破,是增储上产重要接替领域

鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统乌拉力克组页岩气勘探突破,是中国页岩气勘探在北方地区的首次突破^[39-41]。乌拉力克组海相页岩发育在鄂尔多斯盆地西部地区,是盆地下古生界较优质的一套烃源岩。2017年始,忠4井在乌拉力克组发生气侵,直井中途测试获日产页岩气 $4.18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。经对乌拉力克组老井复查,发现乌拉力克组普遍含气。2019年开展水平井试验,忠平1井压裂测试获日产页岩气 $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2022年以来,对乌拉力克组页岩气储层分布特征及富集规律深入研究,优选出马家滩和棋盘井2个页岩气甜点区,马家滩地区的李86井(直井)试气获日产页岩气 $15.22 \times 10^4 \text{ m}^3$,李99井(直井)试气获日产页岩气 $4.24 \times 10^4 \text{ m}^3$,证实马家滩地区为页岩气有利区。棋盘井地区的棋探10井(直井)试气获日产页岩气 $10.19 \times 10^4 \text{ m}^3$,证实棋盘井地区也为页岩气富集区。

鄂尔多斯盆地乌拉力克组产层位于中、下段(以乌拉力克组三段为主),具有“有机质丰度低、埋深大、低压-常压”等特征^[39-42](图4),其TOC为0.60%~1.70%,平均0.86%; R_o 为1.50%~1.90%;储层埋深3 700~4 500 m,局部超过5 000 m;地层压力系数0.96~1.00;含气量0.94~2.21 m^3/t ,游离气占比37.6%~76.3%;硅质矿物含量54.0%,高硅质页岩厚度20~40 m,脆性指数75.0%。据统计,乌拉力克组57口井中的24口井试气,获工业油气流井6口,单井日产页岩气 $4.24 \times 10^4 \sim 26.48 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中13口直井获低产页岩气流,单井页岩气日产量 $0.10 \times 10^4 \sim 0.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。综合认为,乌拉力克组大面积含气、局部富集。页岩气成藏富集有三大主控因素:硅质页岩规模发育是其物质基础,良好的顶、底板是其必要条件,稳定的构造条件和极其发育的裂缝孔隙是其关键。

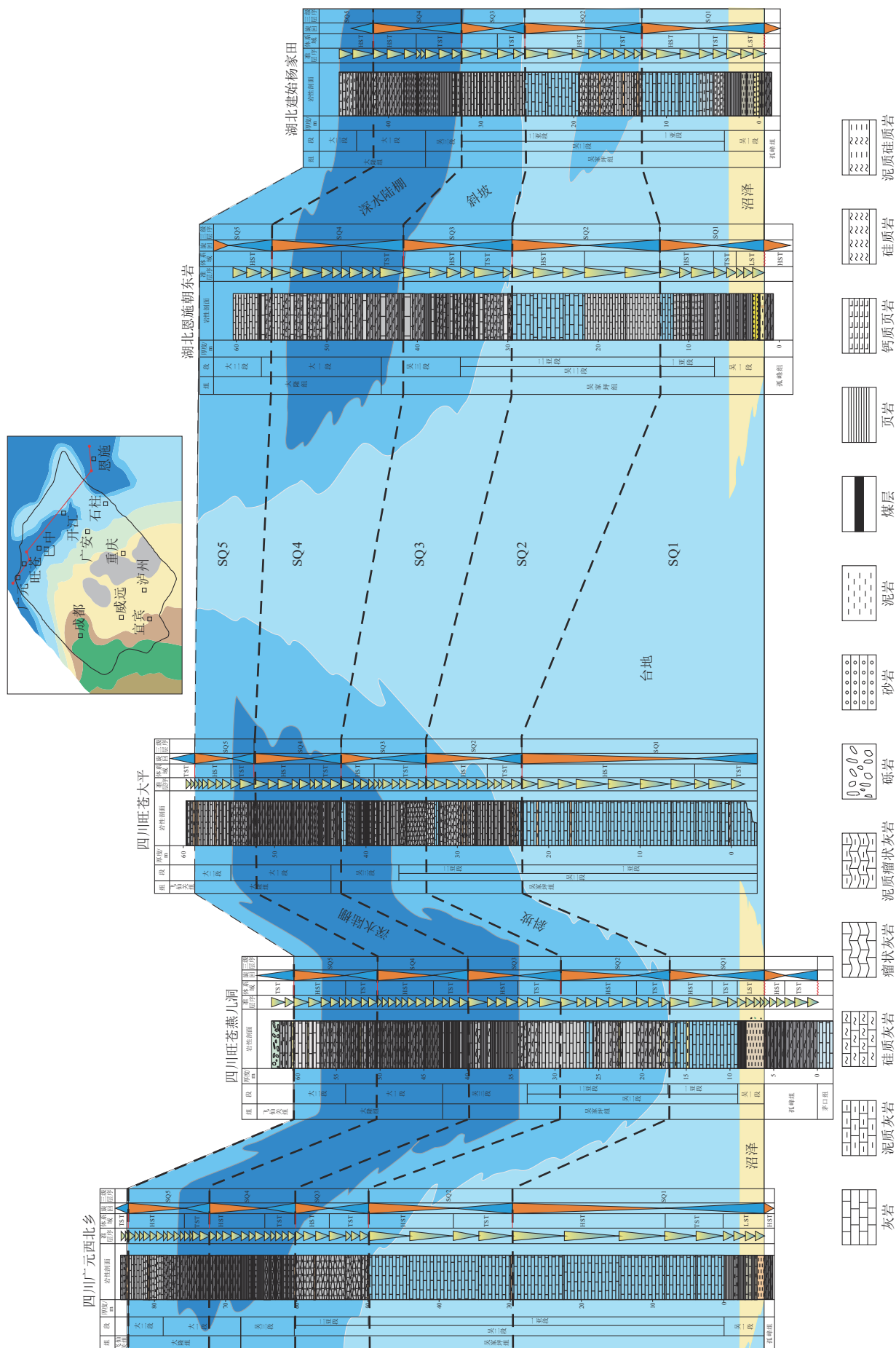


图3 四川盆地及周缘广元西北乡—旺苍燕儿洞—旺苍大平—恩施朝东岩—建始杨家田剖面吴家坪组层序地层对比(SQ1—SQ5)

Fig. 3 Sequence stratigraphic correlation of the Wujiaping Formation on the profile crossing outcrops in Xibei Town in Guangyuan, Yan' erdong in Wangcang, Daping in Wangcang, Chaodongyan in Enshi, and Yangjiajian in Jianshi within the Sichuan Basin and its periphery (SQ1 to SQ5)

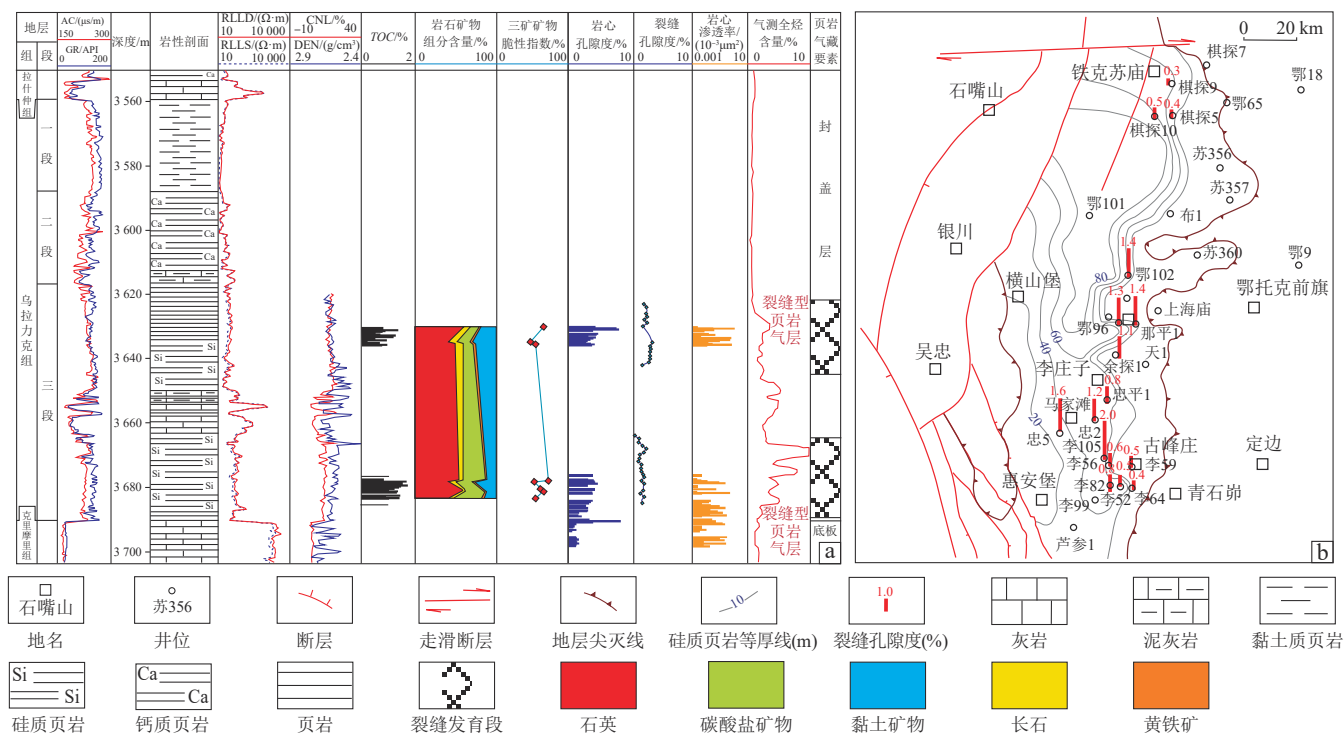


图4 鄂尔多斯盆地鄂102井乌拉力克组综合柱状图(a)和乌拉力克组下段硅质页岩厚度及重点井裂缝孔隙度平面分布(b)
(据文献[42]修改)

Fig. 4 Composite stratigraphic column of the Wulalike Formation in well E 102 within the Ordos Basin (a) and siliceous shale isopach map with shale's fracture porosity in major wells overlaid for the lower member of the Wulalike Formation in the basin (b) (modified after reference [42])

同四川盆地一样,鄂尔多斯盆地也发育多套不同类型富有机质页岩,除乌拉力克组外,石炭系-二叠系发育海-陆过渡相富有机质页岩^[10-11, 43-46]。鄂尔多斯盆地海-陆过渡相页岩层段岩性组合多、横向变化快、储层厚度小,页岩、煤层及粉砂岩互层叠置。石炭系-二叠系海-陆过渡相页岩段多口井投入生产,DJ3-4井山西组2段3亚段(山₂亚段)初期日产页岩气1.70×10⁴ m³,前6个月平均日产气0.93×10⁴ m³。JP1H井山₂亚段试采20余月,平均日产页岩气3.30×10⁴ m³,最高日产量7.97×10⁴ m³,估算单井EUR(单井最终可采储量)可达4 600×10⁴ m³。DJ-P61直井山₂亚段试采近一年,平均日产气1.70×10⁴ m³,估算EUR为1 737×10⁴ m³,若按水平段长1 500 m折算,该井EUR可达4 100×10⁴ m³。迄今,鄂尔多斯盆地东缘石炭系-二叠系海-陆过渡相页岩段累计33口井发现页岩气,最高测试产量8.00×10⁴ m³/d。2018年大吉51井直井试气最高产量1.08×10⁴ m³/d,吉平1H井水平段1 760 m,最高日产7.97×10⁴ m³,稳定日产5.00×10⁴ m³。试采井11口,其中直井6口、水平井5口,直井产量0.60×10⁴~1.80×10⁴ m³/d,水平井产量0.50×10⁴~8.00×10⁴ m³/d。

鄂尔多斯盆地在海相和海-陆过渡相初步试采形成稳定页岩气产量,预测页岩气资源丰富,是中国页岩气未来勘探增储上产的重要接替领域。

1.4 四川、鄂尔多斯两大盆地以外多地区、多层系获勘探新发现,新区带、新层系勘探前景广阔

中国不仅在四川、鄂尔多斯两大盆地内进行页岩气勘探,而且在盆地外复杂构造区,尤其是南方海相页岩区也做了积极探索^[14, 19, 46-50],实现了多层系页岩气勘探突破,展现新区带新层系勘探方兴未艾。

在云贵地区多层系实现了页岩气发现与工业化开发。贵州北部安场向斜的安页1井^[46-47],2016年5月压裂试气,在石牛栏组获日产常规天然气10.22×10⁴ m³,五峰组-龙马溪组发现优质页岩储层20 m,含气量4.50 m³/t(图5)。2018年五峰组-龙马溪组安页2HF、安页3HF和安页4HF等井,测试获日产页岩气2.80×10⁴~5.80×10⁴ m³。目前安场向斜探明含气面积25 km²、页岩气地质储量50.35×10⁸ m³,2023年页岩气产量2.20×10⁸ m³。2020年道真向斜的真页1HF井水平段长1 869 m,五峰组-龙马溪组初始页岩气产量7.49×

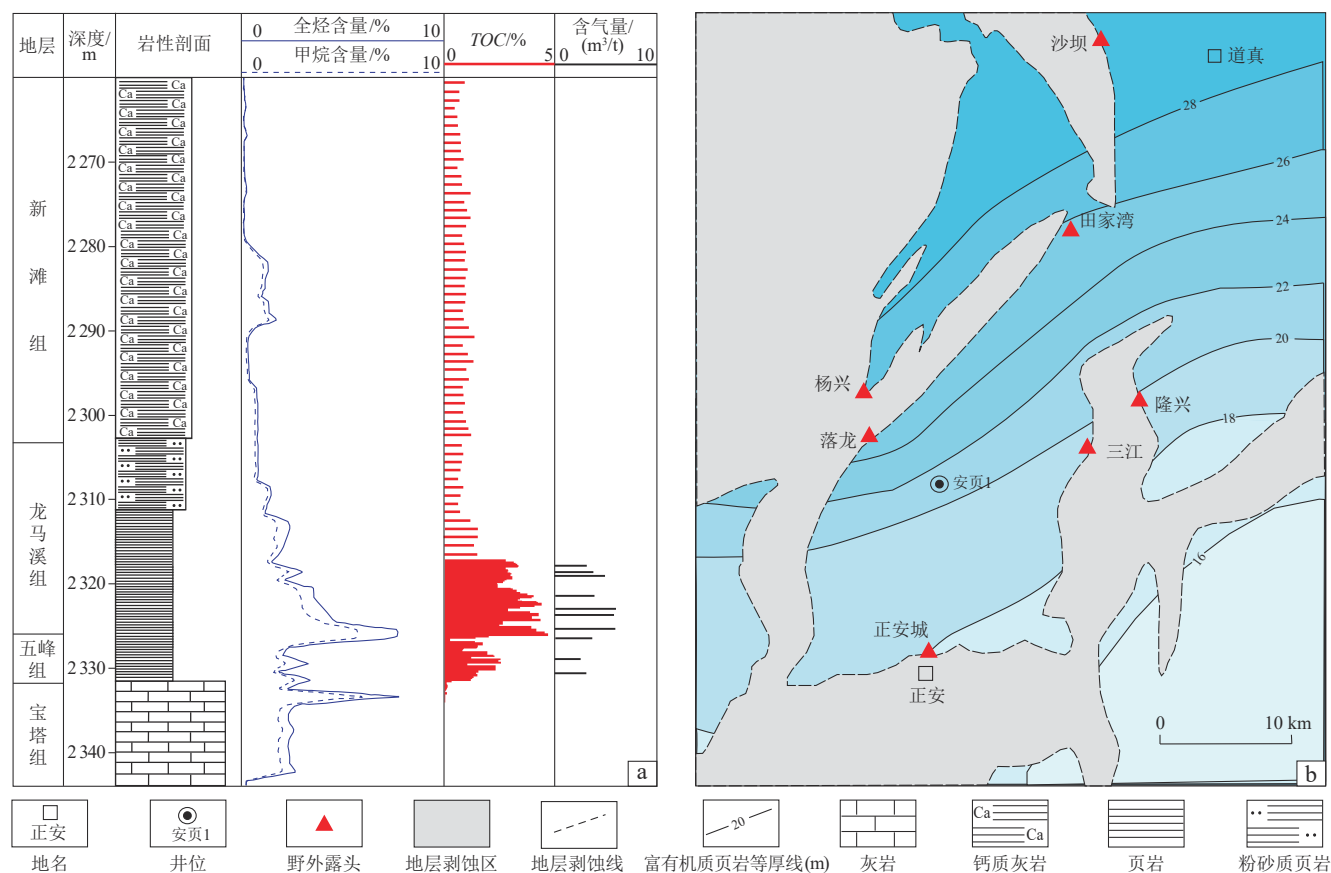


图5 贵州北部安页1井龙马溪组综合柱状图^[46](a)和井位地理位置(b)^[48]

Fig. 5 Composite stratigraphic column of the Longmaxi Formation in well Anye 1^[46] in northern Guizhou (a) and a map showing the well location^[48] (b)

10⁴ m³/d。同年,云南大关县云大页1井^[47]发现五峰组-龙马溪组富有机质页岩厚71 m、含气量4.90 m³/t,直井压裂龙马溪组获页岩气日产量5 280 m³,拓展了四川盆地外复杂构造区五峰组-龙马溪组页岩气勘探领域。

贵州水页1井和黔水地1井^[49-51]在石炭系打屋坝组发现页岩气流。2013年贵州煤田局在六盘水市水城红桥新区的水页1井井深2 399 m,钻遇石炭系打屋坝组页岩层厚312.5 m,未经压裂情况下获日产页岩气1.00×10⁴ m³。2022年六盘水市钟山区的黔水地1井钻遇石炭系打屋坝组优质页岩层厚近600.0 m,直井压裂获日产页岩气1.10×10⁴ m³。同期贵州凯里黔南坳陷的贵丹地1井^[49],钻揭寒武系牛蹄塘组和乌训组等多套页岩,现场解析气量0.30~2.10 m³/t,预测页岩气资源量牛蹄塘组1 934×10⁸ m³、乌训组6 424×10⁸ m³。上述新发现展现了四川盆地外多层系页岩气良好勘探前景。

湘、鄂、陕地区富有机质页岩层系多,湖北宜昌地区实现了页岩气工业开采^[52]。2018年宜探1井龙马溪组发现优质页岩层厚13.6 m、含气量4.00 m³/t,测试日产页岩气4.00×10⁴~5.00×10⁴ m³;秭归-长阳区块鄂宜页1井水井沱组水平段长1 875 m,测试日产页岩气6.02×

10⁴ m³。汉南古隆起南缘的陕镇页1井牛蹄塘组水平段长1 000 m、含气量6.04 m³/t,测试日产页岩气2.10×10⁴ m³。2020年湖南娄底市湘新页1井^[50]泥盆系余田桥组泥灰岩与钙质页岩段,测试日产页岩气3 880 m³。迄今,湖北宜昌探区陡山沱组、水井沱组和五峰组-龙马溪组圈定页岩气有利区面积3 039 km²,估算页岩气资源量1.455×10¹² m³。

2 新区带、新层系、新类型页岩气勘探实现了三大战略性转变

“三新”领域的勘探突破,推动了中国页岩气地质认识及勘探实践三大战略性“转变”:①勘探目标由单一类型、单一盆地和单一层系转变为多类型、多盆地和多层系;②勘探选区由以盆内或盆缘为主转变为盆内、盆缘兼顾盆外弱改造区;③勘探思路由只在优质富有机质页岩中寻找页岩气转变为优质富有机质页岩、富有机质页岩、富有机质粉砂质页岩及“富气”贫有机质层段兼顾,即由纯粹的富有机质页岩转变为富有机质页岩系统。

2.1 勘探目标由单一类型、单一盆地和单一层系向多类型、多盆地和多层系转变

近年来,中国页岩气勘探目标正在发生重大转变^[3,7,13],转变的重要标志是从以四川盆地海相五峰组-龙马溪组为重点的单一类型、单一盆地和单一层系,正逐步演变为更加多元化的多类型、多盆地和多层系。由上统计,中国页岩气勘探目标在海相、海-陆过渡相和陆相三大类型上,在四川、鄂尔多斯两大盆地中的筇竹寺组、五峰组-龙马溪组、吴家坪组/茅口组/大隆组、凉高山组、乌拉力克组和山西组等层系上,实现了页岩气勘探重大突破和发现。

2.2 勘探“甜点区”选区由以盆内或盆缘为主向盆内、盆缘兼顾盆外弱改造区转变

同勘探目标发生重大转变一样,勘探战略选区也已经发生了重大转变。近20年来中国页岩气勘探主要集中在四川盆地盆内或盆地边缘地区,实现了海相页岩气规模有效勘探开发,成为中国天然气的重要增长部分^[53]。随着四川盆地五峰组-龙马溪组勘探的不断深入,页岩气地质认识不断丰富,勘探开发关键技术的日臻成熟,勘探选区也逐渐从盆内或盆缘向盆外弱改造区大幅跨越,在四川盆地外的云、贵、桂、鄂等地区多层系多领域获勘探突破和发现,明确了一批有利页岩气区(表2)。盆外弱改造区页岩气勘探突破和发现,增进了中国页岩气地质理论和资源潜力认识,增强了中国页岩气大发展信心。

2.3 勘探思路由纯粹的富有机质页岩向富有机质页岩系统转变

自2005年中国开始页岩气勘探开发以来,勘探思路主要是寻找富有机质页岩层,有机质富集被认为是

页岩气形成富集的主要条件^[31]。从这一思路出发,中国页岩气勘探在四川盆地五峰组-龙马溪组取得显著成功,推动了富有机质页岩层系/区块页岩气勘探开发,实现了四川盆地海相五峰组-龙马溪组页岩气规模有效发展。然而,这种狭隘的视角导致对其他潜在页岩气资源被忽视,限制了对页岩气资源潜力的整体认识。实践证实,随着中国页岩气地质理论认识的不断深化,中国页岩气勘探的思路已逐渐从单纯的富有机质页岩层转向了寻找富有机质页岩层兼顾“富气”贫有机质层段^[13],正着眼于全页岩层系。这一重大转变是对页岩气资源的全面认识,发现即便是有机质相对较贫的页岩层段,仍可能蕴藏着丰富的页岩气资源,成为页岩气勘探的有利层段甚至是要寻找的“甜点段”。当然,页岩气勘探技术的创新也使得对贫有机质页岩层段的页岩气开发变得更为可行,实现了从富有机质黑色页岩中找页岩气的传统观念的转变(表3)。

综上所述,中国页岩气勘探的三大转变标志着中国对页岩气资源的整体性、多元化认识有了跨越式发展,三大转变为中国页岩气勘探带来了新的发展机遇,同时也表明在未来的页岩气勘探实践中应更加全面地考虑中国特殊的页岩气地质条件和资源特征。

3 页岩气“三新”领域勘探前景、挑战 and 对策

3.1 勘探前景

中国海相页岩气已实现储量、产量快速增长,相继发现了9个海相页岩气田,探明页岩气地质储量 $2.96\times 10^{12}\text{ m}^3$,2023年页岩气产量 $250.00\times 10^8\text{ m}^3$ 。随着中国页岩气地质理论不断创新和勘探技术不断进步,中国

表3 四川盆地外围重点地区页岩气区带特征及资源规模

Table 3 Characteristics and resource potential of shale gas plays in key areas on the periphery of the Sichuan Basin

有利层段类型	地区	典型井	层位	岩石类型	TOC/%	R_o /%	含气量/ (m^3/t)	测试产量/ ($10^4\text{ m}^3/\text{d}$)
富有机质页岩层段	川南	宁201 泸203	五峰组-龙马溪组	富有机质页岩	2.50~8.50	2.50~3.80	2.00~6.00	15.00~137.90
	涪陵	焦页1	五峰组-龙马溪组	富有机质页岩	2.00~8.00	2.65	1.30~6.30	20.30
	乐山-龙女寺	金石103	筇竹寺组	页岩夹粉砂岩	<2.00	3.15~3.26	0.13~3.30	25.86
“富气” 贫有机页岩层段	仪陇-平昌	平安1 普陆页1	凉高山组	页岩夹粉砂岩、 细砂岩	0.57~2.56 (1.35)	1.51~1.61 (1.55)	0.53~3.38 (1.58)	10.40~11.45
	马家滩南	忠4 忠平1	乌拉力克组	裂缝型灰质 页岩	0.12~1.32 (0.63)	0.80~2.50 (1.83)	0.76~2.46 (1.65)	26.48

注:表中括号内数据为平均值。

页岩气资源潜力将会进一步被释放。不仅在四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩气富集区,而且在盆外广大复杂构造区的弱改造区都将会有更多潜在页岩气资源被不断发现;不仅实现海相页岩气勘探突破,也将海-陆过渡相和陆相页岩气勘探中获得更多发现和突破,推动中国页岩气储量、产量持续增长。

四川盆地及邻区五峰组-龙马溪组仍是当前及今后相当长时期中国页岩气增储上产的主力,据马新华等(2023)研究^[7],在四川盆地海相五峰组-龙马溪组中浅层页岩气稳产基础上,积极推动盆内深层五峰组-龙马溪组实现页岩气规模开发,盆缘及盆外复杂构造区五峰组-龙马溪组常压页岩气形成规模产量,新增页岩气探明地质储量 $5\times 10^{12}\text{ m}^3$,2030年中国页岩气总产量将达 $500\times 10^8\text{ m}^3$ 。在此基础上,进一步突破筇竹寺组、吴家坪/龙潭组及其他海-陆过渡相和陆相页岩气新层系、新类型等新领域(表4),力争再新增页岩气探明地质储量 $5\times 10^{12}\text{ m}^3$,2040年前后实现中国页岩气产量 $800\times 10^8\sim 1\,000\times 10^8\text{ m}^3$,为中国能源安全及“双碳目标”实现提供支撑。

3.2 面临挑战

研究认为,中国富有机质页岩沉积-构造背景、盆地大小、后期保存条件等地质特征均与美国富有机质页岩存在明显不同(表5)^[16,40,54-56]。美国产气海相页岩时代相对较晚,沉积背景构造稳定,沉积环境以海相克拉通盆地和前陆盆地为主,页岩厚度大,展布面积广,分布稳定,后期保存好;页岩有机质富集,有机碳含量(TOC)高,有机质类型好,热成熟度(R_o)适宜,正处在有机质生气高峰阶段,具备优越的页岩气形成的物质基础;页岩储层脆性好,孔隙度高,含气饱和度大,含气性好,地层压力总体为超压(表5)。中国海相页岩总体呈现“一老一小”(时代老,规模小)的特征,经历了多期复杂构造改造,页岩热演化程度高,处在有机质生

气后期阶段,保存条件差,含气性差。

中国新区带、新层系、新类型“三新”页岩气勘探领域众多,且勘探程度、地质认识程度低,成藏机理和富集规律认识不清,富集“甜点区”的形成条件和评价参数、评价标准尚未建立,优质页岩气资源分布区与资源富集“甜点段”不易发现和落实,未建立起页岩气资源战略准备、战略接替、战略突破领域和重点目标的有序接替,页岩气“三新”领域的勘探仍面临诸多挑战。

1)“三新”领域页岩沉积环境复杂,有机质差异富集与保存机理面临挑战。“三新”领域页岩构造背景和沉积环境类型多样,进而有机质富集与保存机理存在差异^[31,57]。深水陆棚相、潟湖相-海湾相、半深湖-深湖相控制着海相、海-陆过渡相和陆相页岩有机质富集,其页岩有机质类型、含量和演化特征差异不仅控制着生气(烃)强度大小,还决定了不同类型优质页岩形成机理和页岩气富集模式。

2)“三新”领域页岩储层储集空间类型多样,优势储集空间类型、特征及其定量表征是页岩储层评价中的面临的重要挑战。有机质孔隙是页岩气储层重要的孔隙构成,有机孔发育有利于形成优质储层,但不是所有类型页岩有机质孔隙都发育,倾油型有机质通常有机孔发育,而倾气型有机质有机孔相对较差。四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩气甜点选区评价中过度强调高有机孔,是“三新”领域页岩气成藏机理与富集规律的认识误区,明确优势储集空间类型,精细刻画储集空间特征是“三新”领域页岩储层评价中的面临的重要挑战。

3)页岩“甜点”评价优选是页岩气勘探中的重要挑战^[58-59]。页岩气“甜点”评价优选包括甜点段和甜点区的评价与优选,页岩气“甜点”评价优选是页岩气规模效益勘探开发和提高单井产量的关键环节。确定页岩储层甜点的指标很多(表6),主要指标包括构造背景、页岩厚度、TOC、 R_o 、岩石矿物组成、储层物性、含气

表4 中国主要盆地新领域页岩气资源量统计

Table 4 Statistics of shale gas resources in the three new fields in China's major basins

盆地	类型	层系	资源量/(10^8 m^3)	可采资源量/(10^8 m^3)
四川盆地	陆相	侏罗系	6 600. 80	990. 12
	海-陆过渡相/海相	吴家坪组/龙潭组	34 440. 00	8 610. 00
	海相	五峰组-龙马溪组	埋深 $\leq 4\,500\text{ m}$	126 648. 08
			埋深 $> 4\,500\text{ m}$	66 753. 70
		筇竹寺组	埋深 $\leq 4\,500\text{ m}$	24 353. 01
			埋深 $> 4\,500\text{ m}$	23 985. 00
				4 797. 00
鄂尔多斯盆地	海-陆过渡相	山西组	16 000. 00~26 000. 00	2 400. 00~3 900. 00
	海相	乌拉力克组	10 000. 00	1 500. 00

表5 中美主要页岩气地质特征对比
Table 5 Comparison of geological characteristics of typical shales between China and the United States

主要地质特征	主要页岩名称											
	Marcellus 页岩	Utica 页岩	Barnett 页岩	Eagle Ford 页岩	Fayetteville 页岩	Haynesville 页岩	Woodford 页岩	Duvernay 页岩	五峰组-龙马溪组页岩	筇竹寺组页岩	吴家坪组页岩	乌拉力克组页岩
盆地	阿巴拉契亚盆地	阿巴拉契亚盆地	福特沃斯堡盆地	西墨西哥湾盆地	阿科马盆地	路易斯安那盆地	阿纳达科阿科马盆地	西加拿大盆地	四川盆地	四川盆地	四川盆地	鄂尔多斯盆地
盆地类型	早古生代前陆盆地	早古生代前陆盆地	晚古生代弧后前陆盆地	克拉通盆地	弧形地槽	—	克拉通盆地	稳定克拉通盆地	克拉通盆地	裂陷槽	海槽	克拉通盆地
页岩时代	D ₂	O ₃	C ₁	K ₃	C ₁	I ₃	D ₃ -C ₁	D ₃	O ₃ -S ₁	E ₁	P ₃	O ₃
页岩气发现年份	1880	2010	1981	2008	2004	2004	2003	2012	2010	2019	2021	2019
气田面积/(10 ⁴ km ²)	24.60	24.60	1.30	3.00	0.69	2.33	2.85	2.43	4.94	1.00	3.00	2.50
构造特征	简单,宽缓斜坡	简单,宽缓斜坡	前陆斜坡	宽缓大斜坡	复杂构造	大型负向构造	简单-复杂	简单	多期构造叠合	多期构造叠合	多期构造叠合	多期构造叠合
断裂特征	主体无大断裂	—	—	—	正断层为主	—	—	—	盆缘断裂发育	—	—	断裂发育区
气层埋深/m	914~2 600	1 350~2 800	1 000~2 600	1 200~4 300	450~2 590	3 300~5 300	1 830~3 350	3 100~4 100	500~6 000	3 250~5 500	3 000~4 500	3 700~4 500
地层厚度/m	0~274	—	90~152	富生物钙质页岩	黑色页岩	10~120	>60	33~55	0~650	300~500	50~140	40~140
岩相类型	黑色页岩	钙质页岩	硅质页岩	富生物钙质页岩	黑色页岩	硅质、钙质页岩	钙质、硅质纹层状页岩	富沥青质页岩	硅质、钙质页岩	粉砂质页岩	钙质页岩	硅质、钙质页岩
储层厚度/m	15~60	15~60	15~60	15~152	15~170	10~120	36~67	9~50	20~90	60~135	20~60	20~40
TOC/%	3.00~15.00	1.00~8.00	4.00~8.00	2.00~12.00	4.04	0.28~6.20	5.01~14.81	2.00~11.00	2.00~5.00	4.00~8.00	2.80~7.48	0.43~1.52
有机质类型	I-II	I	II	II-III	III-IV	II	I-II	II-III	I	I-II ₁	I-II ₁	I-II ₁
R _f /%	1.50~3.50	0.50~4.93	0.70~1.70	0.56~1.40	—	2.20~3.20	1.10~2.45	1.10~1.60	2.10~4.00	3.20~5.00	2.00~2.80	0.80~3.50
脆性矿物含量/%	>50.00	>50.00	—	40.00~85.00	55.00~70.00	50.00~70.00	84.00	32.30~93.50	45.00~75.00	51.50~85.00	69.00~94.00	70.00~75.00
孔隙类型	粒间孔、微裂缝、有机质孔	矿物孔、晶间孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒内孔、有机质孔	粒间孔、粒内孔、有机质孔	粒间孔、微裂缝、粒间孔、微裂缝、有机质孔	粒间孔、微裂缝、有机质孔	微裂缝、有机质孔
孔隙度/%	6.00~10.00	2.00~8.00	3.00~6.00	3.40~14.60	—	8.00~9.00	3.00~9.00	2.50~6.50	3.00~7.00	0.92~1.91	3.50~6.80	0.21~7.89
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	5.000~50.000	0.000 1~1.970	—	0.040~13.000	—	0.005~8.000	—	1.000~5.000	<0.100	—	—	0.002~4.610
含气饱和度/%	55~80	20~60	75	—	—	65~75	—	—	40~70	—	—	—
含气量/(m ³ /h)	1.70~2.83	—	8.50~9.91	—	1.70~6.20	2.83~9.34	5.60~8.50	—	1.70~8.40	0.80~4.26	0.50~16.16	0.93~2.21
吸附气含量/%或(m ³ /h)	40%~60%	1.98~2.12 m ³ /h	2.97~3.26 m ³ /h	0.28~1.42 m ³ /h	50%~70%	20%~26%	44%	—	40%~65%	—	20%~55%	25%~62%
地层压力/MPa	2.80~28.00	—	20.86~27.58	—	—	—	—	—	30.00~110.00	—	—	—
地层温度/℃	—	—	65.50~177.00	78.00~180.00	—	—	—	—	40.00~140.00	—	—	—
压力系数	0.92~1.38	1.00~1.46	0.99~1.02	1.10~1.85	1.38~1.84	1.61~2.07	1.35~1.85	0.90~1.60	0.90~2.20	—	1.15~1.85	0.96~1.00
资源量/(10 ¹² m ³)	42.48	9.04~22.15	1.53~5.72	3.44	—	20.30	17.00	23.22	18.48	3.50	6.00	1.00
储量丰度/(10 ⁸ m ³ /km ²)	1.73	0.37~0.90	1.17~4.40	1.14	—	8.70	5.97	9.55	3.74	3.50	2.00	0.41

注:“—”为未收集到数据。

表6 四川盆地海相五峰组-龙马溪组主要页岩气甜点关键指标统计
Table 6 Statistics of key indicators of major shale gas sweet spots in the marine Wufeng-Longmaxi formations within the Sichuan Basin

关键参数	气田位置			
	宁201井区	威202-204井区	威213井西区	自201井区
气田面积/km ²	465.00	178.13	9.24	271.00
构造特征	单斜构造,地层倾角3°~9°	构造相对平缓	NW向单斜构造,地层倾角3°~7°	“断盒”相间较窄低陡背斜与宽缓向斜构造
断裂特征	中、小断裂为主,裂缝发育	中、小断裂为主	零星小断层	发育一些Ⅱ级和Ⅲ级小断层
地层埋深/m	1 500~4 500	2 000~4 000	1 500~4 000	2 000~4 000
地层厚度/m	252.00~370.00	—	43.90~54.80,平均46.40	—
岩石类型	炭质页岩、硅质页岩、泥质粉砂岩、粉砂质页岩	黑色炭质页岩、硅质页岩	黑色炭质页岩、硅质页岩	黑色炭质页岩、粉砂质页岩
储层厚度/m	29.50~50.00	29.50~46.40	10.00~30.00	10.00~34.00
TOC/%	1.00~4.50	3.10~6.20	3.00~3.60	2.20~5.90
R ₁ /%	2.60~3.20	2.60~3.20	1.78~2.26	2.10~2.50
脆性指数/%	42.50~82.30	61.00~86.00	43.10~75.00	58.00~88.00
孔隙类型	有机孔、粒间孔、晶内溶孔、裂缝	有机孔、粒间孔、晶内溶孔、裂缝	有机孔、粒间孔、晶内溶孔、裂缝	有机孔、粒间孔、晶内溶孔、裂缝
孔隙度/%	2.00~10.90	4.20~7.30	2.30~7.00	5.10~6.80
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	0.71~1.48	—	0.11~6.02	0.11~6.14
含气饱和度/%	50.00~70.00	50.00~70.00	32.70~84.60	53.70~76.40
含气量/(m ³ /h)	2.00~12.16	4.00~9.30	2.34~7.50	3.30~6.90
地层压力/MPa	18.41~61.02	31.57~49.88	35.13~73.31	13.79~73.31
地层温度/℃	75.00~110.60	—	99.90~133.90	71.8~133.92
压力系数	1.20~2.03	1.20~2.00	>1.20	>1.20
储量丰度/(10 ⁸ m ³ /km ²)	5.24~7.52	5.14	3.68~6.29	3.47
关键参数	气田位置			
气田面积/km ²	165.00	158.20	363.10	85.00
构造特征	“断盒”低陡背斜	背斜与向斜,构造简单	压扭构造背景,地层倾角较平缓	复背斜构造,三隆两凹构造格局
断裂特征	发育Ⅰ级、Ⅱ级、三四级断裂	Ⅱ级及以下级别断层,逆断层	少量Ⅲ级、Ⅳ级小逆断层	发育逆断层和走滑断层
地层埋深/m	3 550~4 000	3 500~4 200	3 500~4 500	2 50~2 200
地层厚度/m	500~600	450~650	370~480	200~253.5
岩石类型	下层系硅质炭质页岩;上层系钙质页岩	下层系硅质炭质页岩;上层系钙质页岩	黑色硅质页岩、粉砂质页岩	炭质、硅质页岩、粉砂质页岩
储层厚度/m	30.00~65.00	35.00~65.00	20.00~39.00	33.00~35.00
TOC/%	2.80~5.70	3.00~3.60	1.90~4.60	3.03
R ₁ /%	2.50~3.40	2.50~3.40	>2.00	2.30~2.60
脆性指数/%	60~77	65~73	70~78	55
孔隙类型	有机孔、无孔发育	有机孔、无孔和裂缝	有机孔、无孔和裂缝	有机孔、无孔、微裂缝
孔隙度/%	4.30~6.90	4.00~5.55	2.80~5.50	4.50
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	4.07~9.81	4.07~9.81	—	—
含气饱和度/%	60~76	55~70	62~67	—
含气量/(m ³ /h)	3.60~8.70	4.50~6.50	3.30~6.70	3.65
地层压力/MPa	97.50	69.10~96.51	77.00~91.00	—
地层温度/℃	133~143	120~140	110~125	95
压力系数	1.94~2.42	2.07~2.25	1.85~2.07	1.60~1.80
储量丰度/(10 ⁸ m ³ /km ²)	8.16~9.50	8.60~11.26	4.42~5.09	3.27

注:“—”为未收集到数据。

量、硅质矿物含量、地层压力系数、地应力场和资源丰度等^[58-62]。“三新”领域页岩气地质特征与四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气有较大差异,已有的页岩气甜点评价优选指标难以满足新区新领域的需要。

3.3 发展对策

围绕四川盆地和鄂尔多斯盆地,主攻海相,突破海-陆过渡相,评价陆相。海相页岩气:①持续评价川南川东五峰组-龙马溪组海相中深层-深层;②持续评价四川盆地外围五峰组-龙马溪组海相新区;③加快评价川南裂陷槽寒武系筇竹寺组;④加快评价川东北吴家坪组和孤峰组(茅口组上段)等海相页岩层系;⑤加快评价鄂西缘奥陶系乌拉力克组海相新层系。海-陆过渡相页岩气:①加快突破鄂东缘山西组等海-陆过渡相页岩层系;②突破川东南龙潭组等海-陆过渡相页岩层系。陆相页岩气:积极探索川中-川东北侏罗系陆相页岩层系。

1) 立足川南-川东海相成熟区认识,推动五峰组-龙马溪组新区突破,落实规模新“甜点区”。以川南-川东五峰组-龙马溪组已规模效益开发的海相页岩气田理论认识为指导,针对川东-川东北、川南深层-超深层页岩气,进一步加强深部页岩优质储层形成与保持机制、深层页岩气甜点形成与分布规律、深层页岩气甜点区评价与勘探目标优选。力争落实2~3个 $3\,000\times 10^8\sim 5\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 规模储量甜点区。针对盆缘、盆外云贵和湘鄂等地区,深化页岩气储层关键参数特征、页岩气富集机理及成藏模式研究、页岩气甜点区评价与勘探目标优选,力争评价1~2个 $3\,000\times 10^8\sim 5\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 资源量接替区。

2) 以海相五峰组-龙马溪组成功经验为依据,拓展新层系新类型页岩气评价。重点包括四川盆地筇竹寺组和吴家坪组海相新层系新类型。筇竹寺组围绕德阳-安岳裂陷槽,精细厘定各层段沉积特征与分布规律,精细评价页岩储层和粉砂质页岩储层特征与有利层段分布,建立新的页岩气甜点区/段评价与勘探目标优选方法和参数,力争落实1~2个 $3\,000\times 10^8\sim 5\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 规模资源量甜点区。吴家坪组以川东北-鄂西为重点,开展吴家坪组-大隆组层序地层划分与区域对比,明确页岩储层类型、控制因素与有利层段,建立页岩气甜点区评价与勘探目标优选方法和参数,力争落实1~2个 $3\,000\times 10^8\sim 5\,000\times 10^8\text{ m}^3$ 规模储量甜点区。

3) 积极开展风险井钻探,实现新区新层系新类型“三新”领域页岩气勘探取得一批新突破。围绕中国“十四五”-“十五五”或更长时期页岩气发展规划,以

“加强前期,注重基础,突出重点,积极有效”为原则,立足四川盆地和鄂尔多斯盆地两个重点盆地及周缘,开展页岩气关键成藏地质条件与有利区优选评价研究,优选资源规模大、突破前景好的有利区,开展风险井部署和实施,力争页岩气在“三新”领域勘探取得一批新突破。

4) 加强国家级页岩气示范区或试验区建设,形成新的页岩气规模建产区。在海相页岩气勘探开发中,中国设立了涪陵、长宁-威远和昭通3个国家级页岩气示范区,有效推动了四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩气的勘探开发。为推动新区新领域页岩气勘探开发,建议进一步设立多个国家级页岩气示范区或试验区,加快页岩气建产区评价优选,形成“三新”领域页岩气勘探开发核心技术,推动页岩气持续增储上产,保障国家能源安全。

4 结论

1) 页岩气“三新”领域尚未实现页岩气规模商业开发,四川盆地及周缘、扬子板块其他地区、鄂尔多斯盆地等已有层系和区块获得页岩气工业气流井,进一步加强富集高产页岩气勘探开发先导试验可形成有效的接替领域。

2) 四川盆地筇竹寺组(及邻区相同层系)在绵阳-长宁拗拉槽深部和拗拉槽斜坡发育优质海相页岩和富气粉砂质页岩,二叠系吴家坪组(及大隆组等相同层系)、孤峰组等在川东和川东北深水陆棚相发育优质海相页岩,鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组海相富白云质页岩等,是未来中国页岩气勘探重点突破和发展的新领域。

3) 南方地区石炭系和泥盆系等海相页岩层系发现良好页岩气显示或已获得页岩气流,应进一步开展钻井评价,明确有利层段,探索地质甜点评价方法和有效开发技术。

4) 四川盆地自流井组和须家河组陆相页岩气及其他盆地海相页岩气是未来进一步评价和研究准备领域。

参 考 文 献

- [1] EIA. Drilling productivity report: For key tight oil and shale gas regions [Z]. Washington, D. C.: EIA Independent Statistics & Analysis, 2023.
- [2] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica,

- 2020, 38(1): 1-29.
- [3] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 中国海相页岩气主要特征及勘探开发主体理论与技术[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 1-13.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. The main characteristics of marine shale gas and the theory & technology of exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 1-13.
- [4] 邹才能, 赵群, 丛连铸, 等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 1-14.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [5] 邹才能, 龚剑明, 王红岩, 等. 笔石生物演化与地层年代标定在页岩气勘探开发中的重大意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 1-6.
ZOU Caineng, GONG Jianming, WANG Hongyan, et al. Importance of graptolite evolution and biostratigraphic calibration on shale gas exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 1-6.
- [6] 张金川, 李振, 王东升, 等. 中国页岩气成藏模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(8): 78-95.
ZHANG Jinchuan, LI Zhen, WANG Dongsheng, et al. Shale gas accumulation patterns in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 78-95.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 冯动军. 川东南二叠系龙潭组海-陆过渡相页岩气甜点评价及意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 778-788.
FENG Dongjun. Sweet spot assessment and its significance for the marine-continental transitional shale gas of Permian Longtan Fm. in southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 778-788.
- [10] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [11] 郭为, 高金亮, 李海, 等. 中国海陆过渡相页岩气地质开发特征——以鄂尔多斯盆地东缘山西组和四川盆地龙潭组页岩气为例[J]. 矿产勘查, 2023, 14(3): 448-458.
GUO Wei, GAO Jinliang, LI Hai, et al. The geological and production characteristics of marine-continental transitional shale gas in China: Taking the example of shale gas from Shanxi Formation in Ordos Basin and Longtan Formation in Sichuan Basin [J]. Geotechnical Engineering World, 2023, 14(3): 448-458.
- [12] 王同, 熊亮, 董晓霞, 等. 川南地区筇竹寺组新层系页岩储层特征[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 443-451.
WANG Tong, XIONG Liang, DONG Xiaoxia, et al. Characteristics of shale reservoir in new strata of Qiongzhusi Formation in southern Sichuan [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 443-451.
- [13] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.
- [14] 金军, 秦勇, 易同生, 等. 威宁地区下石炭统样组: 一个潜在的薄互层煤系气新层系[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1879-1891.
JIN Jun, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Lower Carboniferous Xiangbai Formation in Weining area: A potential new formation of thin interbedded coal measures gas [J]. Geological Review, 2023, 69(5): 1879-1891.
- [15] 孙豪飞, 罗冰, 文龙, 等. 四川盆地雷口坡组富有机质页岩的发现及盐下勘探新领域[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 233-247.
SUN Hao-fei, LUO Bing, WEN Long, et al. The first discovery of organic-rich shale in Leikoupo Formation and new areas of sub-salt exploration, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 233-247.
- [16] 杨雨, 汪华, 谢继容, 等. 页岩气勘探新领域: 四川盆地开江—梁平海槽二叠系海相页岩气勘探突破及展望[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 19-27.
YANG Yu, WANG Hua, XIE Jirong, et al. Exploration breakthrough and prospect of Permian marine shale gas in the Kaijiang-Liangping Trough, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 19-27.
- [17] 李军. 页岩气开发新区上市储量评估方法研究与实践[J]. 企业科技与发展, 2022(3): 89-91.
LI Jun. Research and practices on evaluation methods of marketable reserves for shale gas development in new area [J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2022(3): 89-91.
- [18] 杨平, 余谦, 牟传龙, 等. 四川盆地西南缘山地复杂构造区页岩气富集模式及勘探启示: 一个页岩气新区[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 42-54.
YANG Ping, YU Qian, MOU Chuanlong, et al. Shale gas enrichment model and exploration implications in the mountainous complex structural area along the southwestern margin of the Sichuan Basin: A new shale gas area [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(5): 42-54.

- [19] 陶士振, 刘德良, 李昌伟, 等. 华北陆块新区新层页岩气潜在勘探新领域——南华北下寒武统马店组烃源岩及其含气系统[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1767-1780.
- TAO Shizhen, LIU Deliang, LI Changwei, et al. Exploration frontiers of unexplored shale layer in new district, North China block: Source rock and its gas system of Madian Formation of Lower Cambrian in the southern part of North China block (SNCB) [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1767-1780.
- [20] 董大忠, 邱振, 张磊夫, 等. 海陆过渡相页岩气层系沉积研究进展与页岩气新发现[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 29-45.
- DONG Dazhong, QIU Zhen, ZHANG Leifu, et al. Progress on sedimentology of transitional facies shales and new discoveries of shale gas [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 29-45.
- [21] 王红岩, 周尚文, 赵群, 等. 川南地区深层页岩气富集特征、勘探开发进展及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1430-1441.
- WANG Hongyan, ZHOU Shangwen, ZHAO Qun, et al. Enrichment characteristics, exploration and exploitation progress, and prospects of deep shale gas in the southern Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1430-1441.
- [22] 邱振, 窦立荣, 吴建发, 等. 川北-鄂西地区中二叠统层序岩相古地理演化及页岩气勘探潜力[J]. 地球科学, 2024, 49(2): 712-748.
- QIU Zhen, DOU Lirong, WU Jianfa, et al. Lithofacies palaeogeographic evolution of the Middle Permian sequence stratigraphy and its implications for shale gas exploration in the northern Sichuan and western Hubei provinces [J]. Earth Science, 2024, 49(2): 712-748.
- [23] 邹才能, 杨智, 董大忠, 等. 非常规源岩层系油气形成分布与前景展望[J]. 地球科学, 2022, 47(5): 1517-1533.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, DONG Dazhong, et al. Formation, distribution and prospect of unconventional hydrocarbons in source rock strata in China [J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1517-1533.
- [24] 郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 172-182.
- GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in southern China: Review and prospects[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172-182.
- [25] 郭彤楼. 深层页岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 1-6.
- GUO Tonglou. Progress and research direction of deep shale gas exploration and development [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 1-6.
- [26] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
- LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [27] 李敏, 刘雅利, 冯动军, 等. 中国海相页岩气资源潜力及未来勘探方向[J]. 石油实验地质, 2023, 45(6): 1097-1108.
- LI Min, LIU Yali, FENG Dongjun, et al. Potential and future exploration direction of marine shale gas resources in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(6): 1097-1108.
- [28] 姜鹏飞, 吴建发, 朱逸青, 等. 四川盆地海相页岩气富集条件及勘探开发有利区[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 91-109.
- JIANG Pengfei, WU Jianfa, ZHU Yiqing, et al. Enrichment conditions and favorable areas for exploration and development of marine shale gas in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 91-109.
- [29] 梁兴, 张介辉, 张涵冰, 等. 浅层页岩气勘探重大发现与高效开发对策研究——以太阳浅层页岩气田为例[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 21-37.
- LIANG Xing, ZHANG Jiehui, ZHANG Hanbing, et al. Major discovery and high-efficiency development strategy of shallow shale gas: A case study of Taiyang shale gas field [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 21-37.
- [30] 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.
- [31] 邱振, 邹才能, 王红岩, 等. 中国南方五峰组—龙马溪组页岩气差异富集特征与控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 163-175.
- QIU Zhen, ZOU Caineng, WANG Hongyan, et al. Discussion on characteristics and controlling factors of differential enrichment of Wufeng-Longmaxi formations shale gas in South China [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 163-175.
- [32] 张琴, 赵群, 罗超, 等. 有机质石墨化及其对页岩气储层的影响——以四川盆地南部海相页岩为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 25-36.
- ZHANG Qin, ZHAO Qun, LUO Chao, et al. Effect of graphitization of organic matter on shale gas reservoirs: Take the marine shales in the southern Sichuan Basin as examples [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 25-36.
- [33] 梁峰, 姜巍, 戴赞, 等. 四川盆地威远—资阳地区筇竹寺组页岩气富集规律及勘探开发潜力[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(5): 755-763.
- LIANG Feng, JIANG Wei, DAI Yun, et al. Enrichment law and resource potential of shale gas of Qiongzhusi Formation in Weiyuan-Ziyang areas, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(5): 755-763.
- [34] 梁峰. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气富集模式及有利区优选评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- LIANG Feng. The research on shale gas enrichment pattern and the favorable area optimizing of Wufeng-Longmaxi shale in middle and upper Yangtze region [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [35] 张金川, 陶佳, 李中明, 等. 中国页岩剖面区域分布及其页岩气地质意义[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 29-46, 57.

- ZHANG Jinchuan, TAO Jia, LI Zhongming, et al. Regional distribution of field shale outcrop in China and its shale gas significance [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 29–46, 57.
- [36] 张金川, 史森, 王东升, 等. 中国页岩气勘探领域和发展方向[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 69–80.
- ZHANG Jinchuan, SHI Miao, WANG Dongsheng, et al. Fields and directions for shale gas exploration in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 69–80.
- [37] 胡东风, 魏志红, 王威, 等. 四川盆地东北部雷页1井上二叠统大隆组页岩气勘探突破及其启示[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 28–39.
- HU Dongfeng, WEI Zhihong, WANG Wei, et al. Breakthrough of shale gas exploration in Dalong Formation of Upper Permian by Well Leiye 1 in the northeastern Sichuan Basin and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 28–39.
- [38] 胡德高, 周林, 包汉勇, 等. 川东红星地区HY1井二叠系页岩气勘探突破及意义[J]. *石油学报*, 2023, 44(2): 241–252.
- HU Degao, ZHOU Lin, BAO Hanyong, et al. Breakthrough and significance of Permian shale gas exploration of Well HY1 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(2): 241–252.
- [39] 付锁堂, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(2): 33–44.
- FU Suotang, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(2): 33–44.
- [40] 席胜利, 刘新社, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉拉克组页岩油气富集条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 12–22.
- XI Shengli, LIU Xinshe, HUANG Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 12–22.
- [41] 席胜利, 莫午零, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉拉克组页岩气勘探潜力——以忠平1井为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(8): 1235–1246.
- XI Shengli, MO Wuling, LIU Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1 [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(8): 1235–1246.
- [42] 王玉满, 周尚文, 黄正良, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘奥陶系乌拉拉克组裂缝孔隙表征[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(7): 1146–1162.
- WANG Yuman, ZHOU Shangwen, HUANG Zhengliang, et al. Fracture pore characterization of the Ordovician Wulalike Formation in the northwestern margin of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(7): 1146–1162.
- [43] 张琴, 邱振, 张磊夫, 等. 海陆过渡相页岩气储层特征与主控因素——以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块二叠系山西组为例[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(3): 396–407.
- ZHANG Qin, QIU Zhen, ZHANG Leifu, et al. Reservoir characteristics and its influence on transitional shale: An example from Permian Shanxi Formation shale, Daning-Jixian blocks, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(3): 396–407.
- [44] 刘雯, 赵群, 邱振, 等. 鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气成藏条件研究现状与展望[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(5): 868–887.
- LIU Wen, ZHAO Qun, QIU Zhen, et al. Research status and prospect of accumulation conditions of transitional facies shale gas in the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 868–887.
- [45] 刘洪林, 王怀厂, 张辉, 等. 鄂尔多斯盆地东部山西组页岩气成藏特征及勘探对策[J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 905–915.
- LIU Honglin, WANG Huaichang, ZHANG Hui, et al. Geological characteristics and exploration countermeasures of shale gas in the Shanxi Formation of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 905–915.
- [46] 卢树藩, 何犇, 陈祎, 等. 贵州复杂构造背景下的页岩气勘探存在问题探讨[J]. *贵州地质*, 2023, 40(1): 1–12.
- LU Shufan, HE Ben, CHEN Yi, et al. Discussion on problems of shale gas exploration under complex background in Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 2023, 40(1): 1–12.
- [47] 李刚权, 李龙, 吴松, 等. 黔北地区石牛栏组气藏特征分析与开展展望[J]. *地球科学前沿*, 2021, 11(5): 635–645.
- LI Gangquan, LI Long, WU Song, et al. Gas reservoir characteristics analysis and development prospects of Shiniulan Formation in northern Guizhou area [J]. *Advances in Geosciences*, 2021, 11(5): 635–645.
- [48] 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 等. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. *中国地质*, 2017, 44(1): 1–12.
- ZHAI Gangyi, BAO Shujing, PANG Fei, et al. Reservoir-forming pattern of “four-storey” hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province [J]. *Geology in China*, 2017, 44(1): 1–12.
- [49] 包书景, 陈科, 周志, 等. 南方公益性页岩气调查研究进展[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(6): 1–12.
- BAO Shujing, CHEN Ke, ZHOU Zhi, et al. Progress of investigation and research on public welfare shale gas in Southern China [J]. *Geological Survey of China*, 2023, 10(6): 1–12.
- [50] 姜秉仁, 邓恩德, 杨通保, 等. 黔西地区石炭系页岩气成藏地质特征及含气性影响因素[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(4): 629–638, 646.
- JIANG Bingren, DENG Ende, YANG Tongbao, et al. Geological conditions and controls of gas content of Carboniferous shale gas reservoirs in western Guizhou [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(4): 629–638, 646.
- [51] 易同生, 陈捷. 黔西石炭系页岩气赋存特征与勘探潜力[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(1): 82–94.
- YI Tongsheng, CHEN Jie. Occurrence characteristics and

- exploration potential of Carboniferous shale gas in western Guizhou [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(1): 82–94.
- [52] 包书景, 李世臻, 徐兴友, 等. 全国油气资源战略选区调查工程进展与成果[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(2): 1–17.
BAO Shujing, LI Shizhen, XU Xingyou, et al. Progresses and achievements of the national oil and gas resource strategic constituency survey project [J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(2): 1–17.
- [53] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J]. *石油科技论坛*, 2021, 40(3): 72–79.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps China increase oil and gas reserves and production [J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021, 40(3): 72–79.
- [54] 孙健, 易积正, 胡德高. 北美主要页岩层系油气地质特征[M]. 北京: 中国石化出版社, 2018: 1–332.
SUN Jian, YI Jizheng, HU Degao. Key geological characteristics of shale formations in North America [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018: 1–332.
- [55] 窦立荣, 黄文松, 孔祥文, 等. 西加盆地 Duvernay 海相页岩油气富集机制研究[J/OL]. *地学前缘*: 1–15 [2023–10–30]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.36>. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.9.36.
DOU Lirong, HUANG Wensong, KONG Xiangwen, et al. Hydrocarbon enrichment mechanism of Duvernay marine shales in the Western Canada Basin[J/OL]. *Earth Science Frontiers*: 1–15 [2023–10–30]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.36>. DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.9.36.
- [56] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(6): 695–706.
JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(6): 695–706.
- [57] 邱振, 卢斌, 陈振宏, 等. 火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1296–1308.
QIU Zhen, LU Bin, CHEN Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1296–1308.
- [58] 张琳琳, 王孔杰, 赖枫鹏, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组海相页岩气储层甜点分类评价[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(1): 191–201.
ZHANG Linlin, WANG Kongjie, LAI Fengpeng, et al. Classification and evaluation of sweet spots of marine shale gas reservoir in Ordovician Wulalike Formation on the western margin of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(1): 191–201.
- [59] 周从业. 中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术研究[J]. *石化技术*, 2023, 30(8): 106–108.
ZHOU Congye. Study on comprehensive evaluation technology for sweet spot of shale gas reservoirs in marine complex mountainous areas in southern China [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(8): 106–108.
- [60] 聂海宽, 党伟, 张珂, 等. 中国页岩气研究与发展20年: 回顾与展望[J]. *天然气工业*, 2024, 44(3): 20–52.
NIE Haikuan, DANG Wei, ZHANG Ke, et al. Two decades of shale gas research & development in China: Review and prospects [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(3): 20–52.
- [61] 王鹏威, 陈筱, 刘忠宝, 等. 海相富有机质页岩储层压力预测方法——以涪陵页岩气田上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 467–476.
WANG Pengwei, CHEN Xiao, LIU Zhongbao, et al. Reservoir pressure prediction for marine organic-rich shale: A case study of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Fuling shale gas field, NE Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 467–476.
- [62] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 川东南盆缘复杂构造区綦江页岩气田的发现与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1418–1429.
HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Discovery of the Qijiang shale gas field in a structurally complex region on the southeastern margin of the Sichuan Basin and its implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1418–1429.

(编辑 张亚雄)