中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 7 期: 903 ~ 920
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

“进源找油”: 论四川盆地页岩油气

邹才能, 杨智*, 孙莎莎, 赵群, 拜文华, 刘洪林, 潘松圻, 吴松涛, 袁懿琳

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: yangzhi2009@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-10-18; 收修改稿日期: 2020-01-16; 接受日期: 2020-02-20; 网络版发表日期: 2020-04-15
国家油气科技重大专项项目(编号: 2017ZX05035, 2016ZX05046)资助

摘要 四川盆地页岩油气资源丰富, 具有国内其他页岩层系不可比拟的优越地质条件, 是全面开启中国陆上未来页岩油气“进源找油”征程的理想对象. 文章整体分析了美国和中国页岩油气的资源特点, 提出成熟度对页岩油气构成有重要控制作用, 美国页岩油气中轻烃和湿气比重很高, 中国海相、海陆过渡相页岩气主要为干气, 陆相页岩油油质一般较重. 重点对四川盆地页岩油气开展了地质综合研究, 取得了3点主要认识: (1) 盆地发育三种类型多套富有机质页岩地层, 寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组-志留系龙马溪组海相、二叠系龙潭组海陆过渡相、三叠系须家河组湖泊-沼泽相、侏罗系湖相等页岩是盆地富有机质页岩的典型代表, 海相页岩气富集主要受深水陆棚相、适中热演化、富钙富硅岩石组合和封闭顶底板“四要素”控制; (2) “甜点段”一般TOC值高、含气量高、孔隙度大、脆性矿物含量多、地层压力高、页/层理及天然微裂缝发育等, “甜点区”一般富有机质页岩厚度大、热演化适中、保存条件好、埋藏深度浅等, 重点例举了五峰组-龙马溪组、龙潭组和自流井组大安寨段页岩油气; (3) 四川盆地海相、海陆过渡相、陆相页岩油气资源分别约占全国同类页岩油气地质资源量的50%、25%和30%, 资源潜力很大, 有望成为中国页岩油气工业革命的摇篮, 继东部松辽盆地大庆油田“常规石油大庆”和西部鄂尔多斯盆地长庆油田“西部油气大庆”之后, 推动建立四川盆地西南油气田“川渝天然气大庆”生产基地.

关键词 页岩油, 页岩气, 海相, 陆相, 海陆过渡相, 资源潜力, 甜点区, 甜点段, 源岩油气, 页岩油气革命, “川渝天然气大庆”

1 引言

四川盆地是中国天然气工业的摇篮, 赋存海相、海陆过渡相、湖相等多种类型丰富的页岩层系油气资源, 是中国源岩油气资源中举足轻重的组成部分, 是中国陆上未来“进源找油”的重要对象(杨智和邹才能, 2019). 笔者团队10余年来以四川盆地全层系富有机质页岩为研究对象, 始终关注不同类型页岩油气资源能否工业开发这一主题, 开展了系统的实验分析、地质评价、技术研发和战略研究, 取得了第一个发现北美以外更古老的页岩气层系和具有工业价值的纳米孔隙等一系列原创性成果(邹才能等, 2014, 2019a). 本文在阐述国内外页岩层系油气资源地位和特点的基础上, 立足四川盆地页岩段构造沉积背景, 重点介绍四川盆

中文引用格式: 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 赵群, 拜文华, 刘洪林, 潘松圻, 吴松涛, 袁懿琳. 2020. “进源找油”: 论四川盆地页岩油气. 中国科学: 地球科学, 50: 903–920, doi: 10.1360/SSTe-2019-0246
英文引用格式: Zou C, Yang Z, Sun S, Zhao Q, Bai W, Liu H, Pan S, Wu S, Yuan Y. 2020. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Shale oil and gas in Sichuan Basin. Science China Earth Sciences, 63: 934–953, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9591-5

© 2020 《中国科学》杂志社

地主要富有机质页岩段的地质特征、页岩油气富集主控因素和“甜点区段”分布规律，分析展望了盆地页岩油气潜力与前景，为支撑四川盆地页岩油气“进源找油”提供依据.

2 页岩油气资源地位及特点

2.1 全球能源大势

全球能源消费结构将持续向更低碳能源结构转型. 2018年全球能源消费构成中，石油占34%，天然气24%、煤炭27%、新能源15%. 今后一段时间，新能源将成为增长最快的能源来源，化石能源中的天然气将比石油和煤炭增长更快，预计2040年将形成石油、天然气、煤炭、新能源“四分天下”新格局，将形成有史以来最多元化的能源结构(侯启军等, 2015; 丹尼尔·耶金, 2012; BP, 2019a, 2019b). 石油和天然气仍然是未来全球一次能源消费的主体. 预计2040年前全球经济将持续增长，一次能源需求依然旺盛，化石能源仍将是世界经济发展动力的主要能量来源，石油和天然气的主体能源地位不会发生根本性改变. 预计2040年，全球一次能源需求总量达到178.7×10^{8}t油当量，其中石油和天然气需求量分别为48.6×10^{8}和46.2×10^{8}t油当量，分别占总能源比例的27%和26%(BP, 2019b).

近10年，全球油气发现以常规油气为主，非常规油气，尤其是页岩油气，已成为重要组成部分. 非常规油气已成为重要接替，1990年以来全球非常规油气新增可采储量241×10^{8}t油当量，占全球16.7%，北美非常规油气鳌领全球，占比81.3%; 2017年全球非常规油气新增可采储量11.2×10^{8}t，占当年总量43.6%. 非常规油气新发现主体为页岩层系石油和页岩气，近10年北美页岩层系石油和页岩气分别新增可采储量41.5×10^{8}和43.5×10^{8}t油当量，占北美总量43.3%; 2017年北美页岩层系石油和页岩气新增可采总量6.4×10^{8}t油当量，占比57.1%，未来占比将进一步提升(贾承造, 2017; 童晓光等, 2018; 中国石油勘探开发研究院, 2019). 页岩层系石油是全球非常规石油发现的重要部分(杨智等, 2015)，2010年以来，页岩层系石油发现主要集中在美国和加拿大. 页岩气是全球非常规天然气发现的主要战场，2007年以来，页岩气发现主要集中在美国、中国、加拿大、阿根廷等4个国家，2018年产量分别为6072×10^8、109×10^8、53×10^{8}和43×10^{8}m^3.

全球页岩层系油气勘探开发的热点在美国和中国，美国已实现规模商业开发，中国正处于工业起步阶段.

2.2 美国页岩油气

美国海相页岩油气依靠水平井体积压裂技术，实现了规模化商业生产. 美国广泛分布海相页岩，形成于具有大型稳定基底的克拉通盆地或前陆盆地，构造运动相对简单. 页岩油气主要分布于Permian、Appalachia、Bakken、Eagle Ford、Niobrara、Anadarko和Haynesville等7套页岩层系(图1)，主要分布有二叠纪、白垩纪、泥盆纪、石炭纪等4个时代的海相地层，也有寒武纪、奥陶纪、侏罗纪、中新世等时代的海相地层，整体以古生界、中生界页岩层系为主. 美国页岩层系具有先天优势特点，赋存丰富的轻质油、页岩凝析油和页岩气，相当规模页岩处于最佳生油气窗口(R_o介于0.9~2.0%)、大面积连续分布(1×10^4~7×10^{4}km^2)、孔隙性较好(孔隙度一般大于7%)、气油比高(几百至几万m^3 m^{-3})、一般超压(压力系数1.3~1.8)、单井累产大(3×10^4~10×10^{4}t油气当量)(表1). 美国“页岩革命”推动油气产量再创历史新高，2018年美国页岩层系石油产量为3.1×10^{8}t，占石油总产量的46%; 页岩气产量为6072×10^{8}m^3，占天然气总产量的73%(EIA, 2019). 2018年美国能源缺口为1.9×10^{8}t油当量(BP, 2019a)，继续主要依靠页岩油气储产量增长，预计2022年左右美国将实现“能源独立”.

美国页岩层系石油产层中轻质组分含量较高. 总体上液态烃密度小于0.825g cm^{-3}的液态烃产量占比87.8%，其中0.802~0.825、0.778~0.802和小于0.778g cm^{-3}分别占比53.4%、18.7%和15.7%(Pollastro等, 2017; He, 2017). 页岩层系石油轻质组分含量与富有机质页岩成熟度呈负关联. 以液态烃组分中最轻的天然气液(NGL)含量为例，Bakken页岩R_o为0.7~1.1%，产量组成中每万立方米天然气中含有8m^{3}NGL; Permian和Eagle Ford页岩R_o一般为0.7~1.4%，产量组成中每万立方米天然气中含有5.3m^{3}NGL. 美国页岩层系天然气组分中烃气组成变化较大，与页岩成熟度联系密切. Antrim为生物成因气，New Albany为生物成因和热成因的混合成因气，非烃气组分含量较高(Bullin和Krouskop, 2008; 邹才能等, 2017). Barnett、Fayetteville、Marcellus和Haynesville为热成因气，随成熟度增加，甲

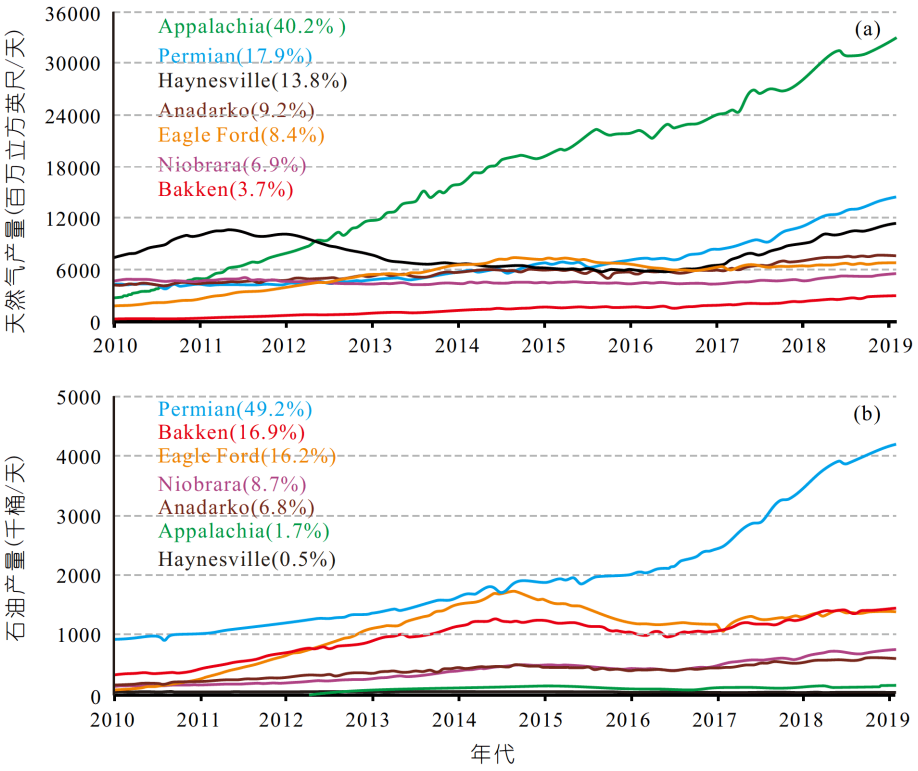


图 1　**美国主要页岩层系油气产层产量比较**

资料据EIA(2019)重新编制. 主要页岩区带油气产量数据截至2019年8月

烷含量增高, 湿气含量降低. 如Barnett页岩R_o为0.8~1.4%, 甲烷含量86.8%, 乙烷+丙烷含量8.7%; Marcellus页岩R_o为1.23~2.56%, 甲烷含量85.2%, 乙烷+丙烷含量14.2%; Haynesville和Fayetteville页岩成熟度较高, 甲烷含量超过95%(Bullin和Krouskop, 2008; 邹才能等, 2017).

2.3　中国页岩油气

中国页岩油气在海相、海陆过渡相和陆相地层均有分布(翟光明, 2008). 目前海相页岩气已获突破, 陆相页岩油和海陆过渡相页岩气正工业探索. 四川盆地各种类型页岩油气均是中国页岩油气资源赋存和工业实践的重要组成部分(表1). 依托现有水平井体积压裂技术, 四川盆地页岩油气将在中国页岩层系油气发展进程中发挥重要引领作用.

中国海相页岩形成于由多个小陆块和造山带构成的复合型大陆, 基底稳定性差、构造活动性强, 主要分布在南方地区、塔里木盆地等, 分布在震旦系、寒武系、奥陶系、志留系等古老地层, 以古生界为主(张金川等, 2008; 邹才能等, 2010; 赵文智等, 2016; 金之钧等, 2016); 以克拉通内坳陷或边缘坳陷半深水-深水陆棚相沉积为主; 海相页岩热演化程度总体较高(R_o多介于2.5~3.5%)、分布面积较大(1万至几万km^2)、孔隙发育(孔隙度介于2~5%)、干气为主(甲烷含量多大于98%)、地层压力多变(压力系数0.9~2.0). 预测页岩气技术可采资源量约(8~10)×10^{12}m^3, 页岩气发现集中在四川盆地及周缘, 2019年海相页岩气产量153.8×10^{8}m^3, 占全国天然气总产量的8.7%, 未来比例将进一步增大, 预计可达到15%.

海陆过渡相页岩气主要分布在鄂尔多斯盆地石炭-二叠系、四川盆地三叠系、北疆地区侏罗系等, 以上古生界和中生界为主; 有机质以陆源高等植物为主, 含煤建造中富有机质页岩常与煤层共生、与砂岩互层; 海陆过渡相页岩热演化程度较高(R_o多介于1.5~2.5%)、分布面积较大(1万至几万km^2)、一般单层厚度较小、薄层交互发育、物性较差(孔隙度2~3%)、干气为主(甲烷含量多大于95%)、地层压力多变(压力系数0.9~2.0). 初步预测技术可采资源量页

表 1　美国主要盆地和四川盆地页岩气地质参数比较

页岩层系	美国页岩气层						中国页岩气区					
	Marcellus	Permian	Haynesville	Anadarko	Eagle Ford	Barnett	长宁	威远	泸州	昭通	涪陵	威荣
沉积盆地	Appalachian	Permian	Louisiana salt	Arkoma	Gulf Coast	Fort Worth	四川	四川	四川	四川	四川	四川
地层时代	泥盆纪	二叠纪	侏罗纪	石炭纪	白垩纪	石炭纪	奥陶纪-志留纪	奥陶纪-志留纪	奥陶纪-志留纪	奥陶纪-志留纪	奥陶纪-志留纪	奥陶纪-志留纪
地层名称	Marcellus	Wolfcamp	Haynesville	Fayetteville	Eagle Ford	Barnett	五峰-龙马溪组	五峰-龙马溪组	五峰-龙马溪组	五峰-龙马溪组	五峰-龙马溪组	五峰-龙马溪组
分布面积(10^4km^2)	24.3	12	2.3	2.3	3	1.55	0.8	1.5	0.6	0.7	0.7	0.7
深度(m)	600~2500	900~3100	3350~4270	330~2300	1600~4200	1980~2591	2000~3000	2000~3700	3200~4100	1000~2700	2000~4000	3550~3880
净厚度(m)	18~83	30~210	61~107	6~60	10~60	30~180	60~80	30~60	30~70	30~50	40~80	80~85
沉积环境	陆表海	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚	深水陆棚
主要岩石类型	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩	页岩
TOC(%)	4.4~9.7	2~8	0.5~4	4.0~9.8	1~8	4~5	1.9~7.3(4.0)	1.0~10.2(2.8)	1.1~6.3(3.1)	0.2~9.0(2.5)	1.5~6.1(3.5)	2.1~5.4
R_o(%)	1.23~2.56	1.1~1.8	1.8~2.5	1.0~4.0	0.5~1.75	0.8~1.4	2.3~2.8	1.8~2.4	2.1~2.4	1.7~3.1	2.2~3.1	2.2~2.8
总孔隙度(%)	9~11	2~12	8~9	2~8	3~13	4~5	3.4~8.4(5.5)	1.7~10.9(5.6)	1.6~6.9(4.4)	2.0~10.1(5.6)	3.7~8.1(5.8)	4.6~5.2
主要孔隙类型	有机质孔	有机质孔	有机质孔	有机质孔	有机质孔	有机质孔	有机质孔	有机孔、无机孔	有机孔、无机孔	有机质孔	有机质孔	有机质孔
基质渗透率($10^{-6}\mu m^2$)	0.1~0.7	0.1~0.8	0.05~0.8	0.1~0.8	0.2~0.9	0.07~0.5	0.22~1.9	0.01~7.1	0.04~0.57	0.01~44.4	0.01~5.7	0.01~0.60
含气量($m^3\ t^{-1}$)	1.70~2.83	2.10~5.70	2.83~9.34	1.70~6.23	2.20~5.40	8.50~9.91	3.1~7.8(5.3)	2.3~7.5(4.8)	2.0~10.6(5.4)	0.6~11.5(4.3)	1.3~6.3	2.3~5.1
游离气比例(%)	40~90	60~80	80	60~80	60~80	80	60~80	60~80	60~80	60~80	70~80	70~80
甲烷含量(%)	80~96	80~95	>95	>95	80~95	80~94	96~99	97~99	98~99	98~99	96~99	97~99
脆性矿物含量(%)	40~70	50~90	50~70	70~80	80~95	30~60	42~95	42~96	32~92	49~84	50~80	56~62
泊松比	0.15~0.35	0.2~0.3	0.2~0.3	0.23	0.2~0.3	0.23~0.27	0.16~0.33	0.12~0.26	0.1~0.3	0.12~0.20	0.11~0.29	0.17~0.29
压力系数	0.45~0.91	1.1~1.7	1.6~2.0	0.98	1.1~1.7	0.97~1.0	1.3~2.0	1.4~2.0	2.0~2.2	1.2~1.8	1.55	1.9~2.1
地质资源量(10^8m^3)	424700	300000	203000	14700	200000	92600	23154	45945	20675	5630	74000	21267
储量丰度($10^8m^3\ km^{-2}$)	1.73	4.75	5.07	6.3	4.6	3.16	8.3	7.4	10	5.1	10	8.7
2018年产量(10^8m^3)	2007	765	698	143	446	270	17.1	14.1	/	11.5	65.3 (含平桥南、丁山)	0.4

岩气约(1.5~3)×$10^{12}$$m^3$, 目前正在四川、鄂尔多斯等盆地工业探索.

页岩层系石油主要分布于鄂尔多斯、松辽、准噶尔(含三塘湖)、渤海湾等4个陆相盆地, 分布在三叠系、白垩系、二叠系、古近系、新近系、侏罗系等页岩层系, 以中生界、新生界为主; 主要为坳陷湖盆中央坳陷区、断陷湖盆洼陷区、前陆湖盆坳陷区浅湖-半深湖-深湖相沉积; 陆相页岩分布面积相对较小(几百至1万km^2)、孔隙度变化较大(介于3~15%)、地层压力多变(压力系数0.6~2.2), 页岩热演化程度总体较低(R_o多介于0.5~1.0%)、油质一般较重(原油密度多大于0.85g cm^{-3}), 成熟度与原油密度有较明显的负相关关系(图2). 依靠水平井体积压裂技术, 预测页岩层系石油技术可采资源量约(10~15)×10^8t, 页岩气技术可采资源量约(1~3)×$10^{12}$$m^3$, 2018年产量约150×$10^4$t, 占全国石油总产量不到1%, 发展潜力巨大.

3　四川盆地页岩油气地质特征

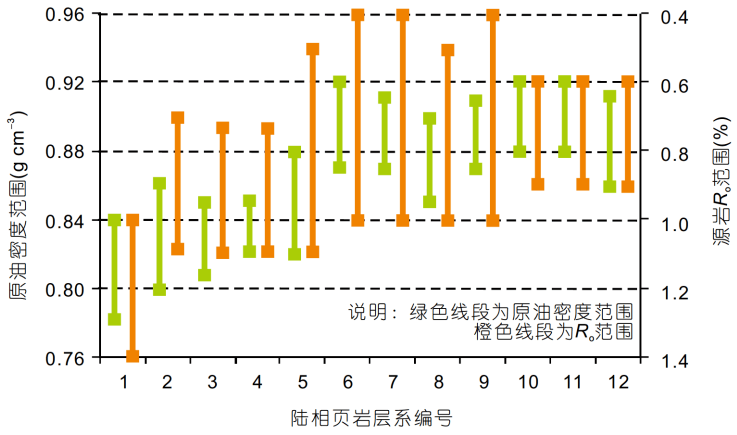
3.1　四川盆地主要富有机质页岩段构造沉积背景

四川盆地位于扬子准地台西北侧, 基底岩系为中上元古界, 大致以华蓥山和龙泉山为界, 盆地基底结构具明显三分性, 呈北东向构造展布(马永生, 2007). 盆地中部为中-基性杂岩体的刚性基底, 是相对的隆起带, 稳定性较强, 沉积厚度相对较薄; 西北和东南是由浅变质沉积岩系组成的柔性基底, 是坳陷带, 沉积厚度较大. 盆地自震旦纪以来, 总体以沉降为主, 构造运动频繁, 多旋回性沉积, 地层齐全, 总厚6000~12000m, 主要经历了三个沉积演化阶段, 形成了三种类型多套富有机质页岩地层(图3和4). 震旦系到三叠系嘉陵江组是海相沉积, 以碳酸盐岩为主, 厚度4000~7000m, 主要发育震旦系陡山沱组、寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组-志留系龙马溪组、二叠系梁山组、二叠系龙潭组等海相或海陆过渡相富有机质页岩. 中三叠世末早印支运动, 盆地整体抬升, 盆内遭受不同程度剥蚀, 大规模海侵从此结束. 三叠世晚期由浅海台地转变为内陆敞流湖盆, 厚度250~3000m, 主要发育三叠系须家河组湖泊-沼泽相富有机质页岩. 侏罗系到新近系为内陆浅湖-半深水湖相沉积, 厚度2000~5000m, 主要发育侏罗系湖相富有机质页岩.

3.2　四川盆地主要类型富有机质页岩段地质特征

3.2.1　海相富有机质页岩

四川盆地发育奥陶系五峰组-志留系龙马溪组、寒武系筇竹寺组、震旦系陡山沱组等多套海相浅水、半深水-深水陆棚相富有机质页岩(图3). 震旦系-寒武系、奥陶系-志留系两套页岩层系经历了加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅多期构造运动深埋和抬升



1.四川盆地侏罗系大安寨段
2.鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段
3.松辽盆地北部白垩系泉头组四段
4.松辽盆地南部白垩系泉头组四段
5.柴达木盆地西南古近系下干柴沟组
6.渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组四段
7.渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷沙河街组四段
8.渤海湾盆地辽河坳陷大民屯凹陷沙河街组四段
9.渤海湾盆地黄骅坳陷歧口凹陷沙河街组一段
10.准噶尔盆地东部二叠系芦草沟组
11.三塘湖盆地二叠系芦草沟组
12.三塘湖盆地二叠系条湖组

图 2　中国陆相页岩层系石油密度与成熟度关系

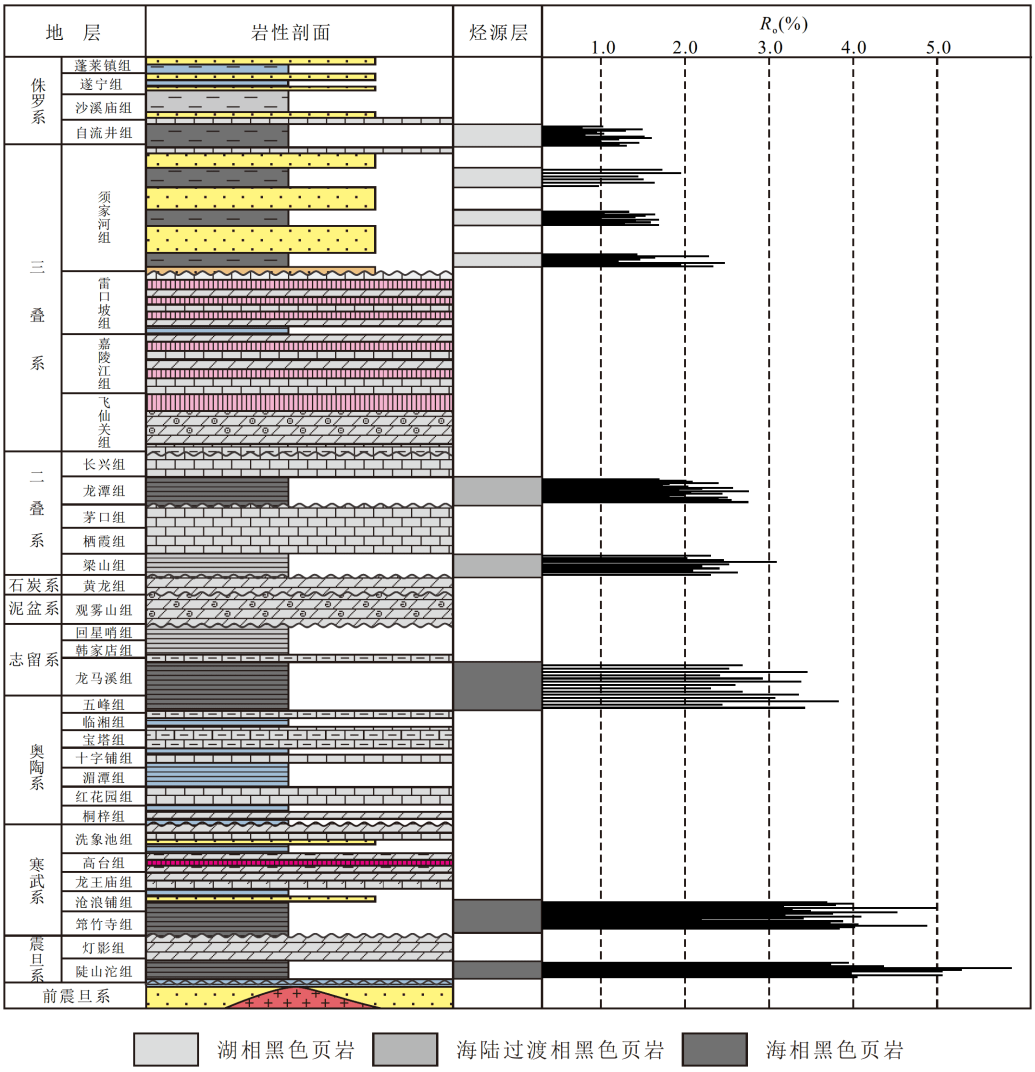


图 3　四川盆地主要页岩综合柱状图

陡山沱组、筇竹寺组、龙马溪组等海相页岩气储层, 缺乏镜质组, 成熟度较高, 选择激光拉曼光谱参数(汪洋和胡凯, 2002), 或固体沥青质体反射率R_b测试(丰国秀和陈盛吉, 1988), 并通过多个参数回归方程, 提高参数与R_o直接的相关系数, 转化计算R_o. 而龙马溪组页岩由于笔石颗粒大, 测点多, 也可以用笔石体反射率换算R_o公式计算(曹长群等, 2000). 龙潭组、须家河组等海陆过渡相-煤相煤系页岩、自流井组湖相页岩储层含镜质组, 直接用镜质组反射率R_o测试

叠加改造, 页岩气赋存具有复杂性和多样性.

奥陶系五峰组-志留系龙马溪组是目前盆地页岩气主要目的层段. 五峰组-龙马溪组沉积期, 属晚奥陶世末期-早志留世初海平面快速上升的海侵体系域沉积, 局限环境深水陆棚滞留还原环境利于形成富有机质页岩(马永生等, 2018; 马新华, 2018; 聂海宽等, 2017; 何治亮等, 2016). 区域上, 富有机质页岩分布受古陆和沉积环境控制, 层位稳定, 主要分布在蜀南、川东北和川东地区, 厚度40~70m; 向川中古隆起和黔中古陆方向, 页岩厚度逐渐变薄. 页岩TOC值0.4~9.6%, 其中底部TOC含量普遍较高, 通常大于2%. 页岩R_o值范围2.3~3.8%, 平均值2.8%, 已达过成熟干气阶段. 纵向上五峰组-龙马溪组底部优质页岩硅质、钙质等脆性矿物含量较高(一般大于60%), 向上硅质含量逐渐降低, 而黏土和钙质含量逐渐增多. 页岩孔隙度较低, 但孔隙类型多样, 包括有机质微孔、黏土矿物层间微孔、粒间孔和溶孔, 蜂窝状有机质微孔是主要孔隙类型(图4a~4d). 五峰组-龙马溪组底部页岩含气量较高,

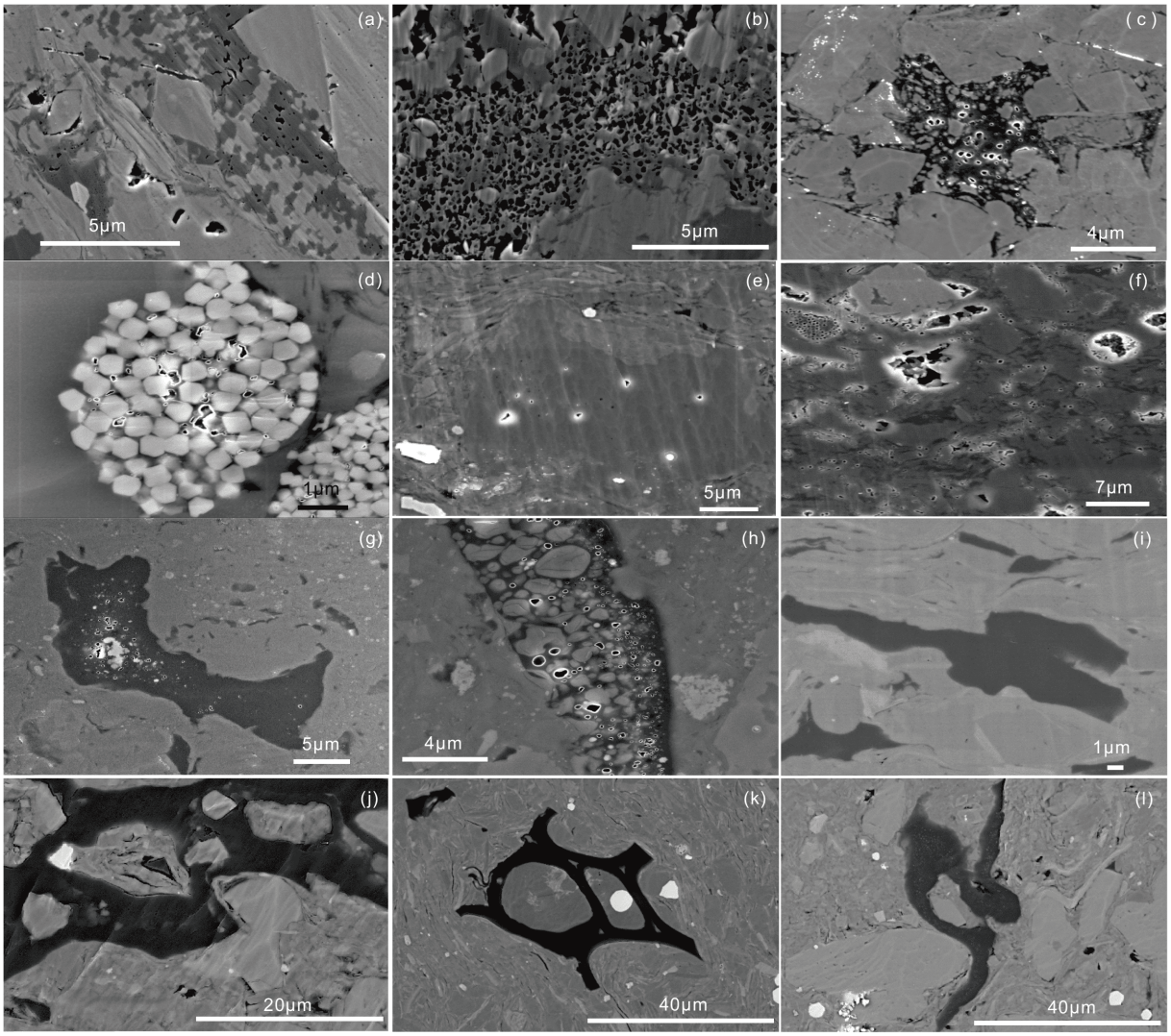


图 4　四川盆地重点层系黑色页岩微观照片

(a) 长宁双河剖面, 志留系龙马溪组黑色页岩, 有机孔和溶蚀孔发育; (b) 长宁双河剖面, 志留系龙马溪组黑色页岩, 有机孔和溶蚀孔发育; (c) 巫溪2井, 志留系龙马溪组黑色页岩, 1627.62m, 有机质孔; (d) 巫溪2井, 志留系龙马溪组黑色页岩, 1615.2m, 黄铁矿晶间孔发育; (e) 昭101井, 寒武系筇竹寺组黑色页岩, 1745m, 有机质孔、无机孔均较发育; (f) 湘西永顺县青坪镇露头, 寒武系牛蹄塘组黑色页岩, 有机孔、无机孔发育; (g) 卧004-H2井, 二叠系龙潭组黑色页岩, 4136~4144m, 有机质孔发育; (h) 大天002-4井, 二叠系龙潭组黑色页岩, 4117~4135m, 有机质孔发育; (i) 大深1井, 三叠系须家河组黑色页岩, 2010.8m, III型干酪根, 有机质孔不发育; (j) 龙浅2井, 侏罗系自流井组大安寨段黑色页岩, 2096.17m, 有机质与无机矿物间存在大量裂缝(有机质收缩缝), 有机质内孔隙零星分布, 多为中-微孔; (k) 龙浅2井, 侏罗系自流井组大安寨段黑色页岩, 2240.22m, 可见明显的丝质体细胞壁结构, 有机质与无机矿物间发育大量裂缝(有机质收缩缝), 有机质内部孔隙很少; (l) 龙浅2井, 侏罗系自流井组大安寨段黑色页岩, 2096.17m, 有机组分现不规则状的扭曲, 有机质与无机矿物交界处发育大量裂缝(有机质收缩缝), 有机质内部孔隙含量很少, 无机矿物间孔隙发育

含气量1.28~6.47m^3 t^{-1}, 平均值3.27m^3 t^{-1}.

寒武系筇竹寺组是另一套盆地重要的页岩气目的层段. 早寒武世早期, 受区域拉张构造环境与海侵事件影响, 筇竹寺组深水陆棚相富有机质页岩大面积发育(黄金亮等, 2012), 主体分布在德阳-安岳裂陷槽、蜀南及川北地区, 裂陷内暗色泥质岩厚度最大, 厚度在210~350m, 盆地其余地区厚度约120m(邹才能等, 2015). 富有机质黑色页岩一般发育在筇竹寺组底部, 厚度40~80m, 有机碳含量在0.6~12.9%, 平均值大于2%. 以腐泥组为主, 干酪根类型主要为Ⅰ型. R_o为

2.2~5.0%, 平均为3.5%, 处于过成熟干气阶段. 页岩石英含量34%, 长石含量32%, 碳酸盐矿物含量6%, 黏土矿物21%. 页岩受有机质炭化、黏土矿物结晶度高等影响, 孔隙度较低, 一般1~3%(图4e和4f). 筇竹寺组底部页岩含气量0.3~6.0m^3 t^{-1}, 平均值1.9m^3 t^{-1}.

震旦系陡山沱组是一套潜在的重要含气页岩段. 陡山沱组沉积期, 为浅海-潟湖相沉积, 目前钻探及露头资料显示, 黑色泥页岩主体局限分布在川中地区及盆地边缘川西北、川东北和蜀南地区, 厚度一般为10~30m, 有机碳含量在0.50~14.17%, 平均2.91%. 以腐泥组为主, 干酪根类型主要为Ⅰ型. R_o为2.1~5.7%, 平均为3.5%, 处于过成熟干气阶段. 页岩脆性矿物含量28.5~56%. 中国地质调查局在湖北宜昌鄂阳页2HF井震旦系陡山沱组获突破, 日产页岩气5.5×10^{4}m^3, 拓展了页岩气勘探开发领域(中华人民共和国自然资源部, 2019).

3.2.2 海陆过渡相富有机质页岩

四川盆地主要发育二叠系龙潭组和二叠系梁山组海陆过渡相富有机质页岩(图3). 海陆过渡相页岩地层岩相变化快, 单层厚度薄, 平均小于15m, 常与煤层、致密砂岩、灰岩等互层, 富有机质页岩单层厚度薄、横向变化快, 页岩中脆性矿物、黏土矿物含量高, 伊蒙混层等水敏性矿物含量高(马永生等, 2018; 郭旭升等, 2018). 单层页岩有效厚度大于10m, 累积厚度大于30m的海陆过渡相含气页岩, 可单独开发(郭少斌等, 2015).

二叠系龙潭组发育一套区域性海陆过渡相页岩地层, 煤系、页岩在全盆地广泛分布, 有机碳高, 演化程度适中, 已证实是川北礁滩等油气藏的重要烃源岩之一(郭旭升等, 2018; 郭少斌等, 2015; 魏志福等, 2015). 晚二叠世, 四川盆地受东吴运动影响, 呈现出南西高、北东低的地理格局, 海水向北东方向退却, 川中-川东南地区为龙潭组海陆交互的含煤碎屑岩沉积区, 滨岸-沼泽相、潮坪相和斜坡-陆棚相有利于富有机质页岩发育(郭旭升等, 2018), 发育两个页岩厚度中心, 川北厚度20~40m, 川中-川南厚度20~80m. 川中-川东南龙潭组纵横向岩性和岩相变化快, 富有机质页岩多与煤层、致密砂岩互层, 石英、黏土矿物含量较高, 总体表现为高TOC(1.5~6.2%)、高孔隙度(4.4~7.1%)、高含气量(2.5~3.8m^3 t^{-1})、高黏土矿物(50%左右)特征(图4g和4h).

二叠系梁山组暗色泥质烃源岩主要分布于底部, 属陆源残积相沉积, 厚度2~10m, 仅达川-南充、泸州-自贡一带及盆地的东南缘地区暗色泥质岩厚度大于10m. 泥质岩TOC在0.5~7.1%, 平均为2.9%; 有机质为腐泥腐殖型及腐殖型. R_o为1.7~3.2%, 平均值2.3%, 处于高成熟-过成熟阶段.

3.2.3 湖相富有机质页岩

四川盆地主要发育三叠系须家河组和侏罗系自流井组湖相富有机质页岩(图3). 陆相页岩韵律性强, 岩性变化快, TOC值往往与黏土矿物含量正相关, 与海陆过渡相页岩类似, 黏土矿物中伊蒙混层含量高, 具有很强的水敏性(马永生等, 2018). 富有机质页岩分布在湖盆中, 热演化程度低, 主体处于生油阶段, 盆地中心或埋深较大地区进入生气阶段.

三叠系须家河组是一套大型坳陷敞流湖盆沉积, 沉积期气温高、湿度大, 利于陆生高等植物繁茂生长(童小俊, 2016). 暗色页岩纵向上主要分布在须一、须三和须五段, 平面上全盆地展布, 西厚东薄, 西部厚300m以上, 西南部-中部-北部地区厚100~200m, 东南部厚度多小于100m. TOC为0.5~9.9%, 平均值1.8%. 暗色页岩干酪根显微组分以镜质组和惰质组为主, 母质类型主要为Ⅲ型. R_o为1.0~2.5%, 平均值1.4%, 多处于成熟-高成熟阶段, 以生气为主(戴金星等, 2009; 郑定业等, 2017). 须家河组页岩黏土矿物含量很高, 有机质孔不发育(图4i).

侏罗系为内陆浅湖-半深水湖相沉积, 发育多套富有机质黑色页岩, 川中、川北和川东地区厚度较大, 有效厚度多在50m以上, 自流井组大安寨段、东岳庙段和凉高山组是三套主力生烃页岩, 其中大安寨段生烃潜力最大. 大安寨段沉积时期, 湖盆进入大规模的湖泛期, 是黑色页岩主要发育期, 纵向上按岩性分为三个亚段, 湖盆发展经历了湖侵期、最大湖泛期、湖退萎缩期等3个阶段, 上、下两个亚段主要发育滨-浅湖高能介壳滩体, 中间二亚段浅湖-半深湖黑色页岩集中发育, 单层厚度大, 横向分布稳定连续, 夹层较少, 页岩单层厚度5~60m, 大于30m厚值区位于川中和川东(邹才能等, 2019b; 杨跃明和黄东, 2019). 大安寨段黑色页岩TOC在0.1~5%, 平均值0.9%, 有机质类型主要为Ⅱ$_1$型, R_o为0.7~1.6%, 处于成熟到高成熟阶段, 川北、川西北及川东北热演化程度相对较高, 已达到凝析油和湿气

为阶段. 大安寨段二亚段页岩发育孔隙、裂缝两类储集空间, 有机质孔、页理缝普遍发育, 发育丰富的有机质孔、溶蚀孔、黏土矿物晶间孔及微裂缝(图4j~4l).

3.3 四川盆地海相页岩气富集主控因素

四川盆地海相页岩分布范围广、层系多、厚度大, 页岩气形成与富集条件优越. 五峰组-龙马溪组页岩气勘探开发实践表明, 页岩气富集主要受沉积环境、岩相组合、热演化程度和保存条件"四要素"控制. (1) 深水陆棚沉积环境控制富有机质页岩平面分布, 富有机质页岩段横向稳定分布. 五峰组-龙马溪组底部富有机质页岩段, 有机质丰度较高, 连续厚度一般20~100m, 横向分布稳定. (2) 页岩富硅质富钙质, 发育基质孔隙和裂缝, 是页岩气储层最有利岩相组合. 五峰组-龙马溪组页岩气主力产层以生物成因或生物化学成因的硅质页岩、钙质页岩为主, 富含放射虫、海绵骨针等微体化石, 利于形成页岩基质孔隙与裂缝. (3) 页岩有机质丰度高、类型好, 成熟度适宜, 以热裂解成气为主, 可提供丰富气源. 四川盆地及周缘五峰组-龙马溪组和筇竹寺组页岩烃源参数类似, 但前者普遍含气, 后者含气性较差, 热演化程度是主要因素, 后者因热演化程度过高, 导致页岩有机质碳化、有机质孔降低, 进而对含气性产生很大影响. (4) 构造稳定及致密顶板与底板控制页岩气超压"甜点区"富集高产. 焦石坝、长宁、威远气田处于构造稳定区, 页岩含气丰度高, 是目前页岩气发现和建产的主力区, 昭通、彭水、巫溪等含气区块构造复杂, 页岩气聚集条件更加苛刻, 含气性相对较差(图5). 地层异常高压也是页岩气保存条件好的重要表现. 四川盆地内五峰组-龙马溪组压力系数均大于1.2, 页岩含气量大于3m^3 t^{-1}, 普遍好于筇竹寺组. 究其原因, 五峰组-龙马溪组产层上覆巨厚黏土质页岩, 下伏泥质含量高稳定性好的宝塔组灰岩, 封隔能力强, 有助于形成超压页岩气层; 而筇竹寺组富有机质页岩段上覆裂缝性页岩及其他渗透性砂岩及灰岩, 下伏为与灯影组的不整合面, 整体封存能力较弱, 难于形成超压页岩气层(图6).

4 四川盆地页岩油气"甜点区段"分布规律

4.1 "甜点段"分布

确定页岩油气"甜点段", 就是要明确页岩富油气段的纵向分布, 即具连续厚度、高TOC、高孔隙度、高脆性矿物含量、高含气量的富有机质页岩集中段.

四川盆地海相富有机质页岩"甜点段"发育, 大多分布在各页岩地层段的中-下部, 连续厚度大, 分布稳定. 根据五峰组-龙马溪组页岩气田产层特征, 海相富有机质页岩"甜点段"WF1-LM5具有"五高"(即高TOC值、高含气量、高孔隙度、高硅质含量、高地层压力)和"两发育"(即页岩页/层理、天然微裂缝)参数标准(邹才能等, 2016; 马永生等, 2018; 马新华, 2018). 五峰组-龙马溪组"甜点段"TOC值普遍大于4.0%, 平均TOC值3.0~6.0%, 厚20~60m, 有机质显微组分以浮游藻类、疑源类、细菌和固体沥青等非动物碎屑有机质为主, 动物碎屑以叉笔石、尖笔石、轴囊笔石和冠笔石等笔石带占绝大多数; 以富含生物硅质、钙质的页岩为主, 硅质放射虫骨架、硅质海绵骨针是生物成因石英的主要来源; 黑色页岩孔隙度4.0~6.0%, 孔隙类型以有机质孔隙为主, 以10~50nm左右纳米孔为主, 孔隙连通性较好; 黑色页岩含气量3.0~8.0m^3 t^{-1}, 含气饱和度为67~77%; 压力系数普遍大于1.3(邹才能等, 2016; 马永生等, 2018; 马新华, 2018)(图7). 寒武系筇竹寺组底部TOC含量大于2.0%富有机质页岩层段厚2~180m, 区域上占页岩地层平均厚度比例为34%, "甜点段"厚度30~70m.

四川盆地海陆过渡相页岩分布范围广泛, 富有机质页岩段较发育, 横向连续性较好. 二叠系龙潭组海陆过渡相页岩纵向发育TOC大于2%的富有机质页岩段1~3个(图8), 厚度5~50m, "甜点段"具有连续厚度大于15m、TOC>1%、孔隙度>2%、脆性矿物含量>30%、含气量>1m^3 t^{-1}等评价标准.

四川盆地陆相黑色页岩分布广泛, "甜点段"发育, 横向连续性较好. 四川盆地侏罗系页岩累计厚度160~260m, "甜点段"厚度50~90m, 以自流井组大安寨段为例阐述. 相比于国内其他层段陆相页岩油气, 大安寨段二亚段页岩油气"甜点段"地质条件可与北美海相页岩油气相媲美, 具有孔隙度高(孔隙度4~6%, 普遍大于介壳灰岩1~2%的孔隙度)、成熟度高(R_o主体介于1.0~1.4%, 处于正常原油-凝析油气阶段)、脆性矿物含量高(长英质、钙质脆性矿物含量51~73%, 平均65%)、页理裂缝发育(微裂缝有构造缝、页理缝、生烃超压缝发育)、保存条件好(上下均为致密介壳灰岩, 顶底板条件良好)、埋深适中(主体1400~2500m), 非常

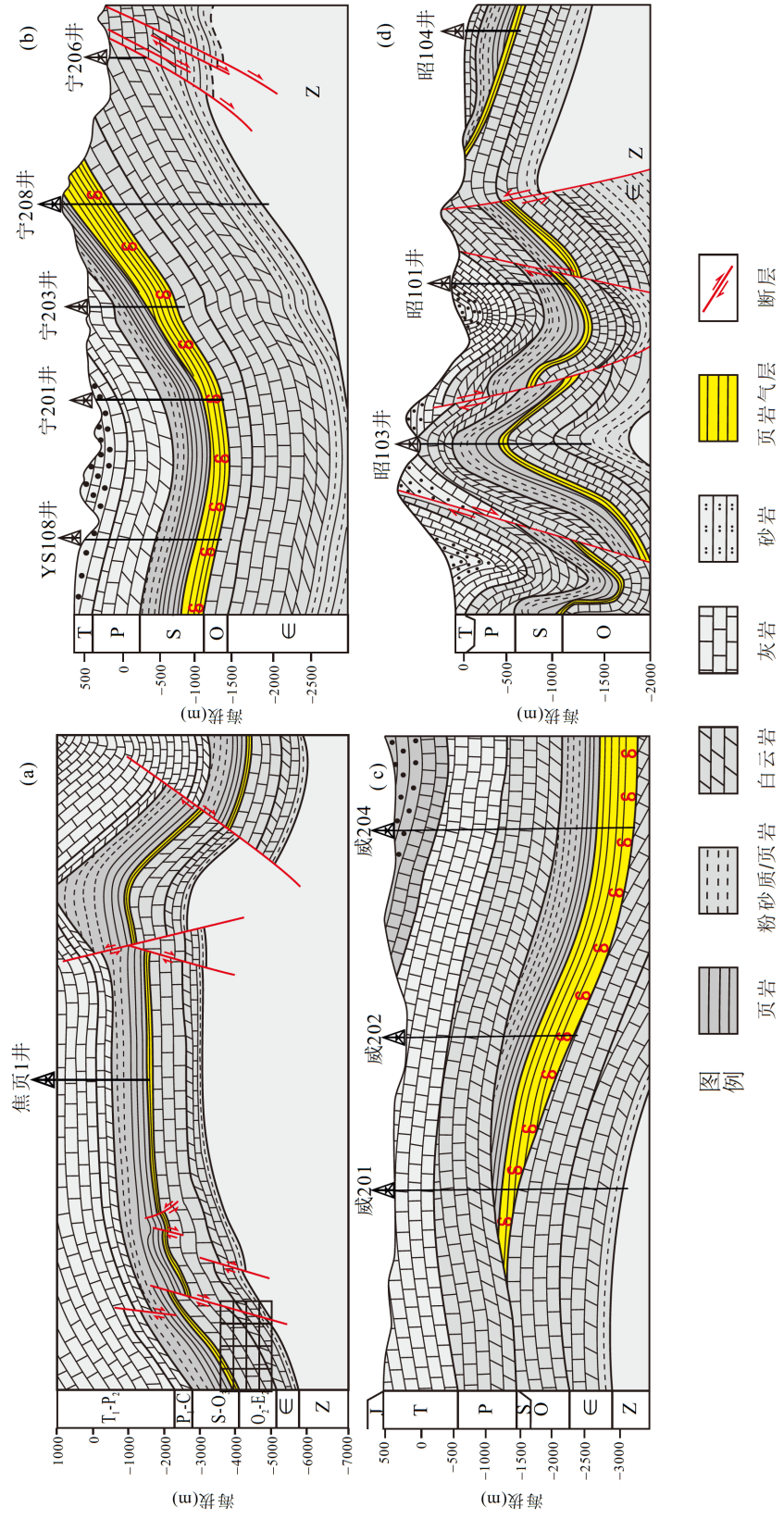


图 5　四川盆地五峰-龙马溪组不同类型海相页岩气聚集剖面示意图

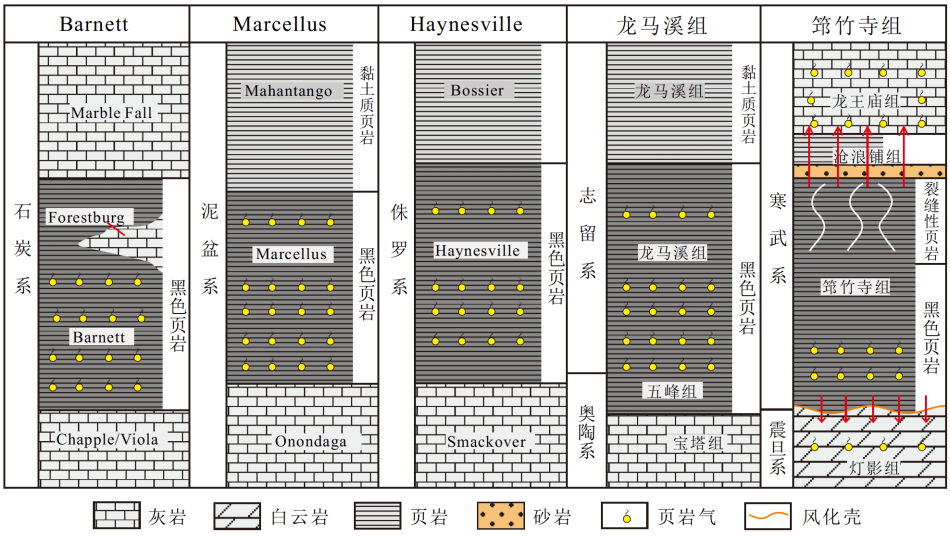


图 6　**中美海相页岩气层保存模式对比图**

据邹才能等(2014)修改

利于页岩油气源内滞留聚集(邹才能等, 2019a).

4.2　“甜点区”分布

确定页岩油气“甜点区”, 需根据“甜点段”地质特征和平面变化, 在资源有利区中优选厚度大、品质好、保存条件优的地区作为页岩油气“甜点区”. 其中井震可识别、工程可作业、经济有效益的“甜点区”是现实“甜点区”. 选准“甜点区”, 是页岩油气勘探开发取得成功的首要条件(邹才能等, 2016; 马永生等, 2018).

四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气资源有利区优选以黑色页岩厚度、TOC含量、热演化程度、脆性程度、埋深等为主要条件, 根据位于沉积相带位置、Ⅰ+Ⅱ类储层厚度、构造稳定程度、压力系数、埋藏深度等参数, 31个“甜点区”分成三个等级. Ⅰ类“甜点区”6个, 处于深水陆棚相核心相带, Ⅰ+Ⅱ类储层厚度大于35m, 位于盆内构造相对稳定地带, 压力系数大于1.5, 埋藏深度2000~4500m; Ⅱ类“甜点区”9个, 处于深水陆棚相带, Ⅰ+Ⅱ类储层厚度大于20m, 位于盆内及盆缘弱改造区, 压力系数为1.2~1.5, 埋藏深度2000~4500m; Ⅲ类“甜点区”16个, 处于深水陆棚相边缘相带, Ⅰ+Ⅱ类储层厚度小于20m, 处于盆缘及外围构造活动区, 压力系数为1~1.2, 埋藏深度小于3500m (邹才能等, 2016). 经评价, 四川盆地及周缘筇竹寺组、五峰组-龙马溪组页岩气“甜点区”29个, 面积5.78×10^4km^2, 页岩气可采资源量5.85×10^{12}m^3(邹才能等, 2016), 其中五峰组-龙马溪组是最现实页岩气开发层系, 4500m以浅页岩气“甜点区”面积2.03×10^4 km^2, 可探明地质储量9.8×10^{12}m^3, 涪陵、威远、长宁、富顺-永川等4个“甜点区”已探明页岩气储量1.7×10^{12}m^3 (图9).

结合二叠系龙潭组海陆过渡相页岩气“甜点段”评价标准, 平面上优选R_o>1.1%、埋深1000~4500m、异常高地层压力等参数, 优选出两个Ⅰ类“甜点区”, 其中川东南泸州-重庆页岩气“甜点区”面积1×10^4km^2、资源3.15×10^{12}m^3, 川东北垫江-云阳页岩气“甜点区”面积0.6×10^4km^2, 资源量1.26×10^{12} m^3(图10).

借鉴北美Eagle Ford、Permian等海相页岩油气“甜点区”评价经验, 结合四川盆地侏罗系页岩油气地质要素, 优选黑色页岩热演化程度(R_o>1.0%)、富有机质页岩规模(TOC>1%的黑色页岩厚度大于20m)、埋藏深度(小于2500m)作为大安寨段页岩油气“甜点区”评价3个最重要参数. 经评价, 大安寨段大二亚段页岩油气“甜点区”富有机质页岩厚度20~50m, 面积超过2×10^4km^2, 目的层埋深1400~2500m(图11)(邹才能等, 2019b).

5　四川盆地页岩油气潜力与前景

四川盆地是中国常规-非常规天然气工业的摇篮. 作为世界上最早开发利用天然气的地区, 四川盆地

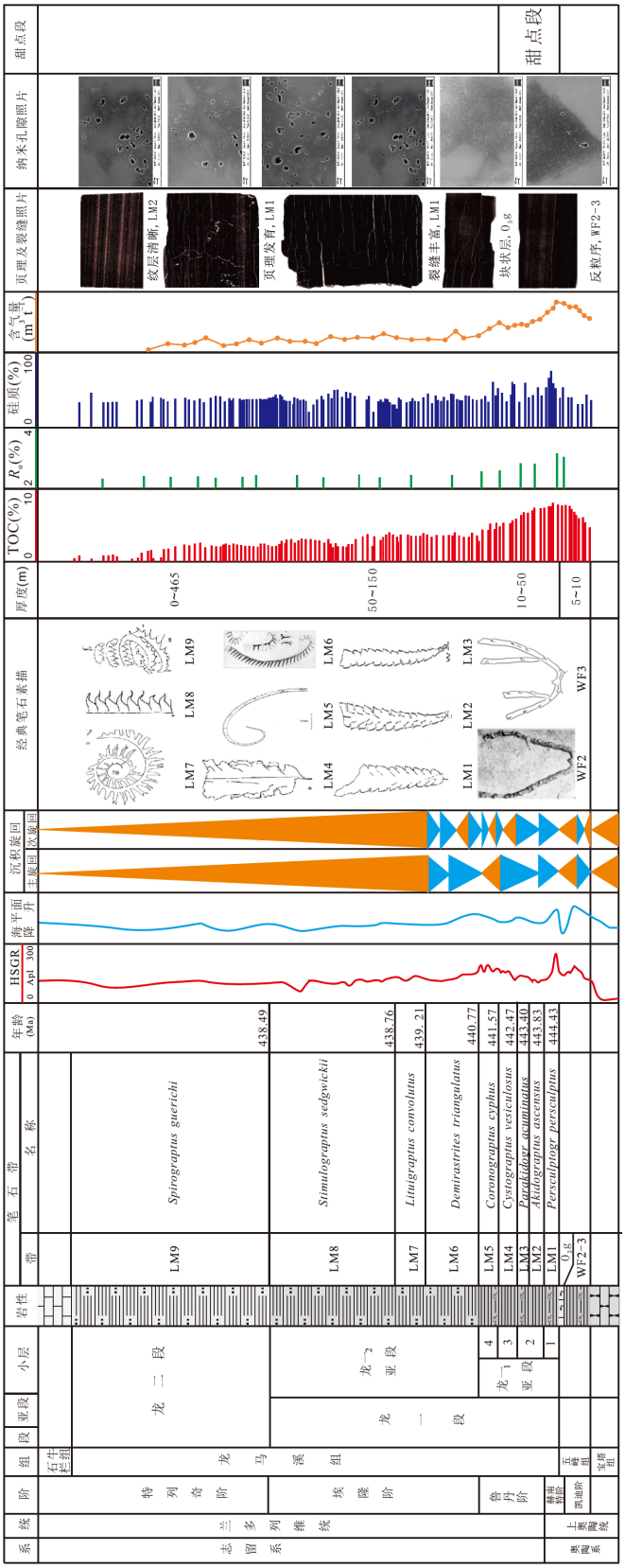


图 7　四川盆地奥陶系五峰组-志留系龙马溪组海相页岩气“甜点段”评价综合柱状图

据邹才能等(2015)重新编图

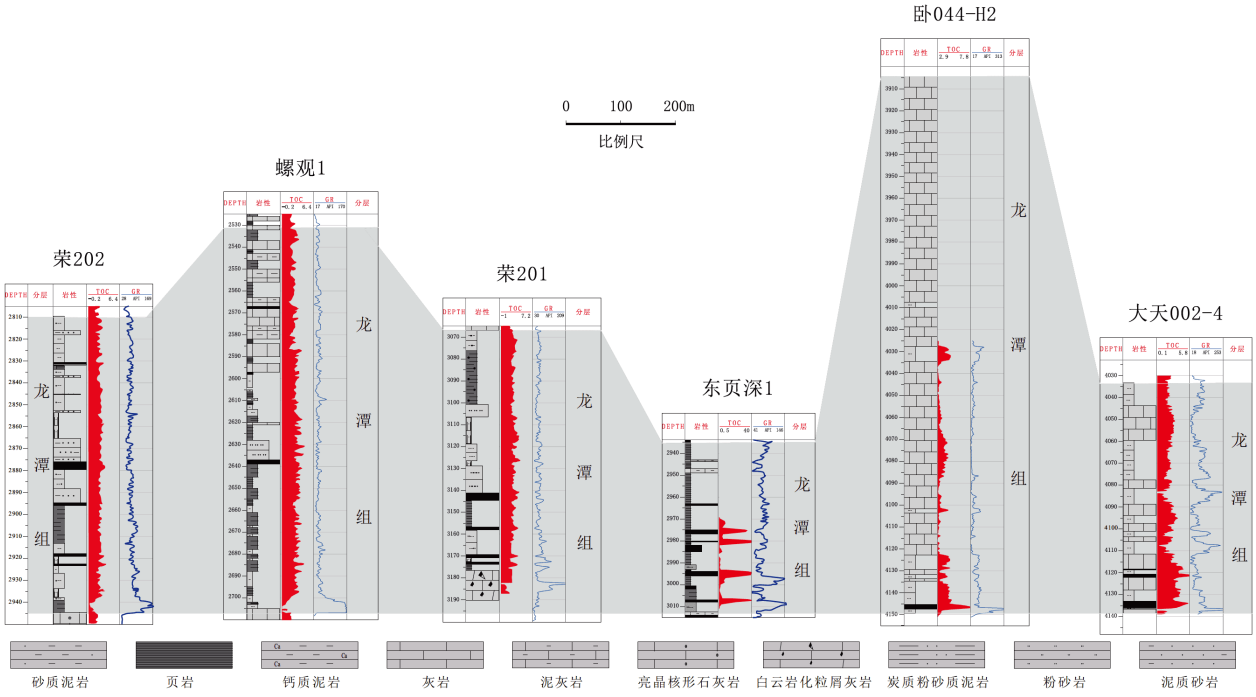


图 8　四川盆地二叠系龙潭组页岩层系连井剖面

剖面位置见图11

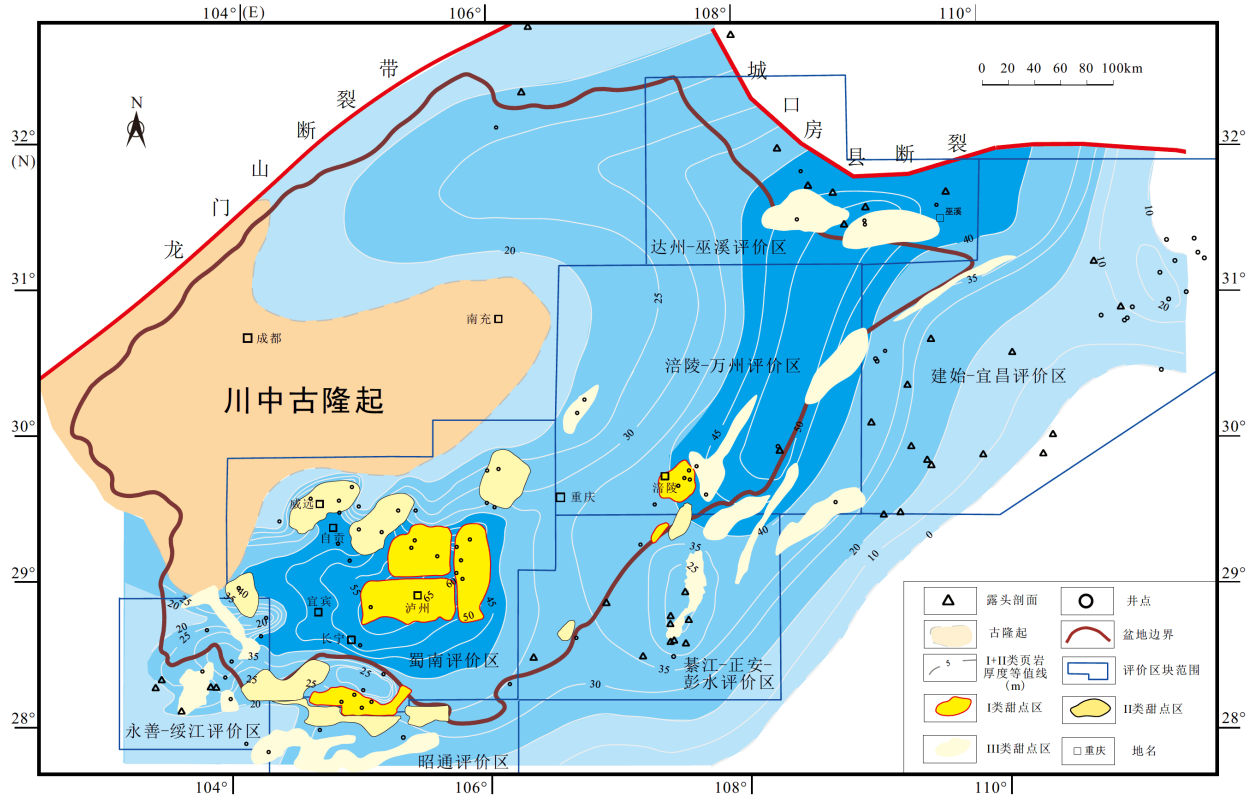


图 9　四川盆地及周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气“甜点区”评价图

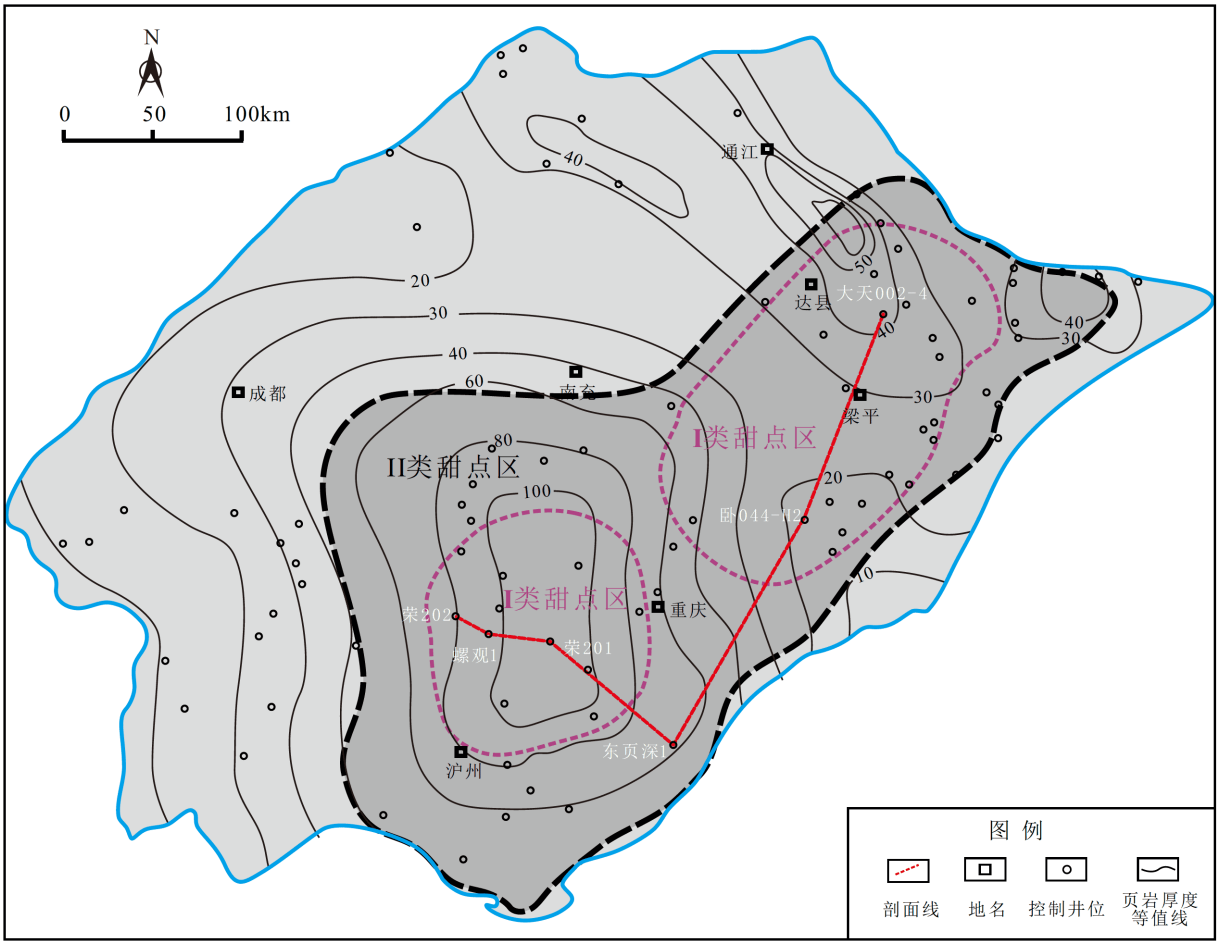


图 10　四川盆地二叠系龙潭组页岩气甜点区评价图

1835年钻成世界上第一口超千米井, 井深1001.4m. 新中国成立后, 第一次石油大会战就在四川盆地, 1965年发现中国第一个大气田威远气田, 开启了新中国天然气工业时代. 作为环青藏高原构造体系中最重要的天然气资源基地之一, 四川盆地勘探面积22×10^{4}km^2, 总资源量61.7×10^{12}m^3, 居全国首位(图12), 新世纪以来天然气增储上产取得重大进展, 展现出良好发展前景, 普光、安岳、元坝等常规碳酸盐岩领域大气田规模发现, 涪陵、长宁、威远等非常规页岩气领域大气区规模发展, 常规-非常规天然气实现储产量高峰增长(马永生, 2007; 马新华, 2017; 邹才能等, 2018; 马新华等, 2019).

四川盆地有望成为中国页岩油气工业的引擎. 2010年, 四川盆地威201井2840m龙马溪组试获工业气流, 是中国第一口页岩气井, 开启了中国页岩气工业新时代. 四川盆地页岩油气资源潜力很大, 重新评估页岩油气总资源量约64×10^{12}m^{3}油气当量(表2), 具有国内其他页岩层系不可比拟的优越地质条件, 有望引领中国页岩油气工业持续增储上产. 四川盆地海相、海陆过渡相、陆相等各种类型页岩油气资源均在全国页岩油气资源构成中占有重要地位, 大致分别占到地质资源量的50%、25%和30%, 大致分别占到技术可采资源的60%、25%和40%. 四川盆地海相页岩气资源主要富集在志留系龙马溪组、寒武系筇竹寺组等富有机质页岩内, 海陆过渡相页岩气资源主要富集在二叠系龙潭组等, 陆相煤系页岩气主要富集在三叠系须家河组, 陆相湖相页岩油气主要富集在侏罗系自流井组大安寨段等(表2).

四川盆地未来将长期成为中国最大天然气产区. 未来20年, 中国天然气产量将快速增长, 四川盆地很可

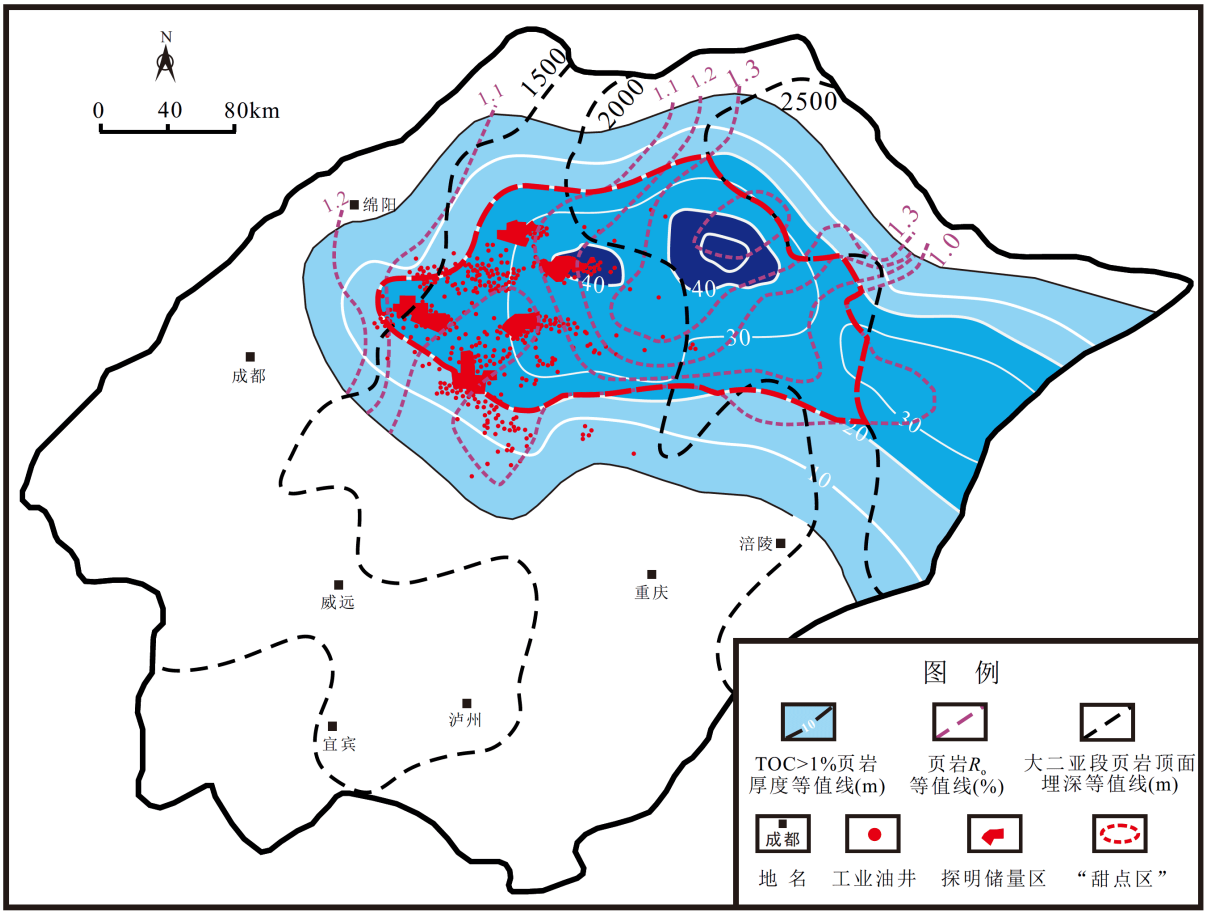


图 11　四川盆地侏罗系大安寨段页岩油气甜点区评价图

据邹才能等(2019b)修改

表 2　四川盆地页岩油气资源潜力预测[a)]

页岩类型	地层	页岩面积(10^4km^2)	页岩厚度(m)	TOC(%)	有机质类型	R_o(%)	脆性矿物含量(%)	地质资源量(10^{12}m^3)	全国大致占比(%)	甜点区面积(10^4km^2)	甜点厚度(m)	技术可采资源量(10^{12}m^3)	全国大致占比(%)
海相	震旦系陡山沱组	10	10~30	0.5~14.2	Ⅰ	3.7~5.7	28.5~56	30	50	4.9	40~80	5.1	60
	寒武系筇竹寺组	15	20~250	0.6~12.9	Ⅱ	2.2~5.0	28~78						
	奥陶系五峰组-志留系龙马溪组	18	20~300	0.4~9.6	Ⅱ	2.3~3.8	35~79						
海陆过渡相	二叠系梁山组+龙潭组	18	20~170	1.5~6.2	Ⅱ+Ⅲ	1.7~3.2	35~60	8	25	3.5	20~80	0.5	25
陆相	三叠系须家河组	4	50~300	1.0~2	Ⅲ+Ⅱ$_2$	1.2~2.5	36~55	6	30	1	5~50	0.5	40
		4.5	20~100	1.5~4	Ⅲ	1.0~1.7							
		6.4	10~200	1.0~4	Ⅲ	1.0~1.9							
	侏罗系自流井组	9	40~180	0.1~5.0	Ⅰ+Ⅱ$_1$	0.7~1.6	20~75	20(其中页岩油14, 页岩气6)		2	20~80	1.5	

a) 技术可采资源量指依靠水平井体积压裂等现有技术可采出的页岩油气资源量, 自流井组地质资源量、技术可采资源量包括页岩气和页岩油

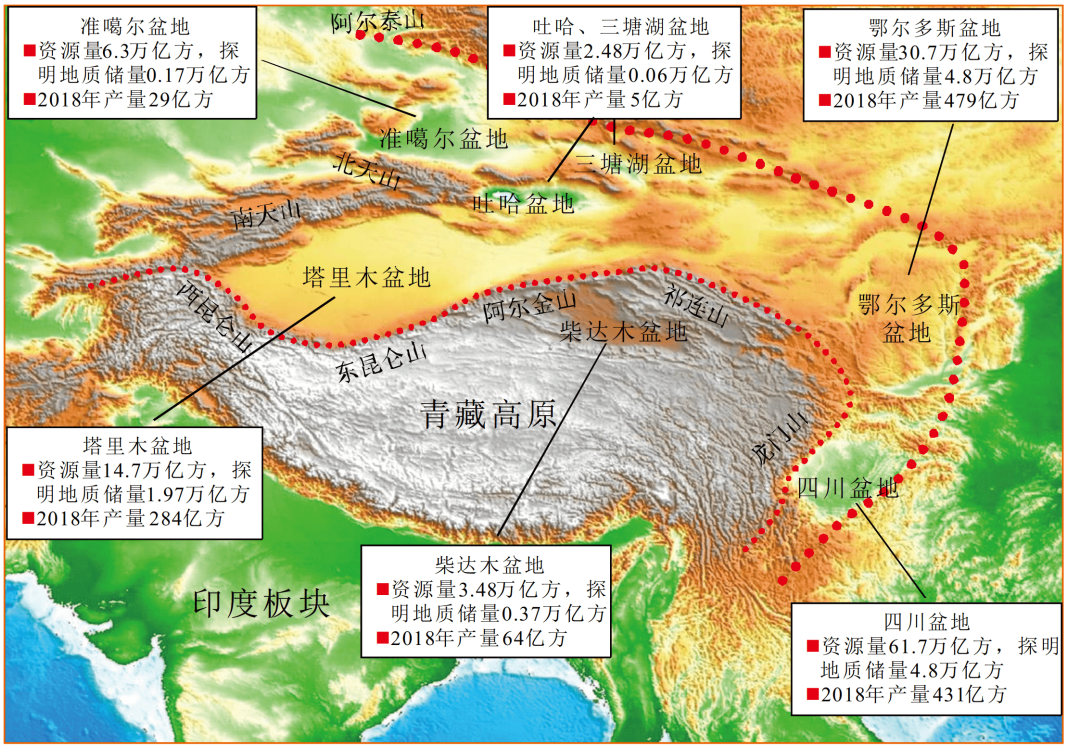


图 12　环青藏高原构造体系天然气资源、探明储量与2018年产量情况

能贡献50~60%以上的增量, 页岩气将是主要的增长部分. 四川盆地侏罗系页岩油气处于轻质油-凝析油气窗口, 面积广、资源大、埋深浅, 很可能继中国“海相页岩气革命”之后, 开启中国“陆相页岩油气革命”, 前景值得期待. 继东部松辽盆地大庆油田“常规石油大庆”和西部鄂尔多斯盆地长庆油田“西部油气大庆”之后, 页岩油气将推动建立四川盆地西南油气田“川渝天然气大庆”生产基地.

6　结论

(1) 提出成熟度对页岩油气组分构成有重要的控制作用, 美国页岩油气中轻烃和湿气比重很高, 中国海相、海陆过渡相页岩气主要为干气, 陆相页岩油油质一般较重.

(2) 四川盆地发育三种类型多套富有机质页岩地层, 寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组-志留系龙马溪组海相、二叠系龙潭组海陆过渡相、三叠系须家河组湖泊-沼泽相、侏罗系湖相是盆地富有机质页岩的典型代表, 页岩气富集主要受沉积环境、热演化程度、岩相组合和保存条件“四要素”控制.

(3) 以五峰组-龙马溪组、龙潭组和大安寨段为例, 阐述了四川盆地页岩油气“甜点段”和“甜点区”的主要评价标准参数, 四川盆地海相、海陆过渡相、陆相页岩油气资源分别占到全国页岩油气地质资源量的50%、25%和30%, 资源潜力很大.

致谢　本文在撰写和研究中得到中国科学院戴金星院士、贾承造院士、中国工程院赵文智院士等的指导和帮助, 以及中国石油勘探与生产分公司、西南油气田分公司领导和专家的支持, 研究团队王红岩、董大忠、施振生、武瑾、黄金亮等参与完成了部分工作, 在此一并致谢.

参考文献

曹长群, 尚庆华, 方一亭. 2000. 探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用. 古生物学报, 39: 151–156

戴金星, 倪云燕, 邹才能, 陶士振, 胡国艺, 胡安平, 杨春, 陶小晚. 2009. 四川盆地须家河组煤系烷烃气碳同位素特征及气源对比意义. 石油与天然气地质, 30: 519–529

丹尼尔·耶金. 2012. 能源重塑世界. 见: 朱玉犇, 阎志敏, 译. 北京: 石油工业出版社. 660

丰国秀, 陈盛吉. 1988. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系. 天然气工业, 8: 20–25

郭少斌, 付娟娟, 高丹, 李贺洋, 黄家国. 2015. 中国海陆交互相页岩气研究现状与展望. 石油实验地质, 37: 535–540

郭旭升, 胡东风, 刘若冰, 魏祥峰, 魏富彬. 2018. 四川盆地二叠系海陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力. 天然气工业, 38: 11–18

何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 2016. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析. 地学前缘, 23: 8–17

侯启军, 朱兴珊, 王武. 2015. 提高天然气竞争力是优化中国能源结构的关键问题. 国际石油经济, 6: 20–22

黄金亮, 邹才能, 李建忠, 董大忠, 王社教, 王世谦, 程克明. 2012. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力. 石油勘探与开发, 39: 69–75

贾承造. 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义. 石油勘探与开发, 44: 1–11

金之钧, 胡宗全, 高波, 赵建华等. 2016. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. 地学前缘, 23: 1–10

马新华. 2017. 四川盆地天然气发展进入黄金时代. 天然气工业, 37: 1–10

马新华. 2018. 四川盆地南部页岩气富集规律与规模有效开发探索. 天然气工业, 38: 1–10

马新华, 胡勇, 王富平. 2019. 四川盆地天然气产业一体化发展创新与成效. 天然气工业, 39: 1–8

马永生. 2007. 四川盆地普光超大型气田的形成机制. 石油学报, 28: 9–144

马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践. 石油勘探与开发, 45: 561–574

聂海宽, 金之钧, 马鑫, 刘忠宝, 林拓, 杨振恒. 2017. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征. 石油学报, 38: 160–174

童小俊. 2016. 四川盆地中部须家河组气、源地化特征及烃源岩生烃能力综合评价. 硕士学位论文. 成都理工大学

童晓光, 张光亚, 王兆明, 温志新, 田作基, 王红军, 马锋, 吴义平. 2018. 全球油气资源潜力与分布. 石油勘探与开发, 45: 1–10

汪洋, 胡凯. 2002. 应用激光拉曼特征参数反映有机碳质的成熟度. 矿物岩石, 22: 57–60

魏志福, 王永莉, 吴陈君, 吴保祥, 孙则鹏, 李生喜, 魏威. 2015. 四川盆地上二叠统龙潭组烃源岩的地球化学特征及对有机质来源和沉积环境的指示意义. 天然气地球科学, 26: 1613–1618

杨跃明, 黄东. 2019. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识. 天然气工业, 39: 22–33

杨智, 侯连华, 陶士振, 崔景伟, 吴松涛, 林森虎, 潘松圻. 2015. 致密油与页岩油形成条件与“甜点区”评价. 石油勘探与开发, 42: 555–565

杨智, 邹才能. 2019. “进源找油”: 源岩油气内涵与前景. 石油勘探与开发, 46: 173–184

翟光明. 2008. 关于非常规油气资源勘探开发的几点思考. 天然气工业, 28: 1–3

张金川, 聂海宽, 徐波, 姜生玲, 张培先, 汪宗余. 2008. 四川盆地页岩气成藏地质条件. 天然气工业, 28: 151–156

赵文智, 李建忠, 杨涛, 王淑芳, 黄金亮. 2016. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义. 石油勘探与开发, 43: 499–510

郑定业, 庞雄奇, 张可, 刘昭婷, 李慧. 2017. 四川盆地上三叠系须家河组油气资源评价. 特种油气藏, 24: 67–72

中国石油勘探开发研究院. 2019. 全球油气勘探开发形势及油公司动态(2019年). 北京: 石油工业出版社

中华人民共和国自然资源部. 2019. 中国矿产资源报告. 北京: 地质工业出版社

邹才能, 等. 2014. 非常规油气地质学. 北京: 地质出版社

邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. 石油勘探与开发, 37: 641–653

邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2016. 中国页岩气特征、挑战及前景(二). 石油勘探与开发, 43: 166–178

邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一). 石油勘探与开发, 42: 689–701

邹才能, 杨智, 何东博, 位云生, 李剑, 贾爱林, 陈建军, 赵群, 李易隆, 李君, 杨慎. 2018. 常规-非常规天然气理论、技术及前景. 石油勘探与开发, 45: 575–587

邹才能, 杨智, 王红岩, 董大忠, 刘洪林, 施振生, 张斌, 孙莎莎, 刘德勋, 李贵中, 吴松涛, 庞正炼, 潘松圻, 袁懿琳. 2019b. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田. 地质学报, 93: 1551–1562

邹才能, 杨智, 张国生, 陶士振, 朱如凯, 袁选俊, 侯连华, 董大忠, 郭秋麟, 宋岩, 冉启全, 吴松涛, 白斌, 王岚, 王志平, 杨正明, 才博. 2019a. 非常规油气地质学建立及实践. 地质学报, 93: 12–23

邹才能, 赵群, 董大忠, 杨智, 邱振, 梁峰, 王南, 黄勇, 端安详, 张琴, 胡志明. 2017. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景. 天然气地球科学, 28: 1781–1796

BP. 2019a. Statistical Review of World Energy 2019. London: BP Distribution Services

BP. 2019b. BP World Energy Outlook 2019. London: BP Distribution Services

Bullin K, Krouskop P. 2008. Bryan Research and Engineering Inc. Composition Variety Complicates Processing Plans for US Shale

Gas. Bryan Research and Engineering Inc. https://www.bre.com/PDF/Composition-Variety-Complicates-Processing-Plans-for-US-Shale-Gas.pdf

EIA (U.S. Energy Information Administration). 2019. Drilling Productivity Report: For key tight oil and shale gas regions, July 2019. Washington DC: EIA Independent Statistics & Analysis. www.eia.gov/petroleum/drilling/pdf/dpr-full.pdf

He D. 2017. Thermal Maturity, Composition, and Origin of the Hydrocarbon Gases of the Eagle Ford Shale in Texas, USA. Bachelor’s thesis, Ohio State University

Pollastro R M, Roberts L N R, Cook T A. 2017. Geologic Assessment of Technically Recoverable Oil in the Devonian and Mississippian Bakken Formation U.S. Reston: Geological Survey Digital Data Series DDS-69-W

(责任编委: 刘全有)