

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2017.03.002

四川盆地天然气资源潜力

郑志红¹ 李登华¹ 白森舒² 贾 君¹ 咎 昕¹ 刘卓亚¹ 高 媛¹

(1 国土资源部油气资源战略研究中心; 2 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所)

摘 要: 近年来, 四川盆地常规和非常规天然气勘探取得一系列进展和突破, 地质认识和资源潜力等不断更新, 急需对四川盆地天然气资源开展综合评价, 进一步摸清天然气资源, 为加快四川盆地天然气勘探开发提供依据。梳理总结四川盆地近 10 年来的勘探进展, 确定评价资源类型, 明确评价目标和评价方法, 评价得到常规天然气地质资源量 $20.69 \times 10^{12} \text{m}^3$, 可采资源量 $11.20 \times 10^{12} \text{m}^3$, 包括致密气地质资源量 $5.87 \times 10^{12} \text{m}^3$, 可采资源量 $2.35 \times 10^{12} \text{m}^3$; 页岩气地质资源量 $57.46 \times 10^{12} \text{m}^3$, 可采资源量 $10.01 \times 10^{12} \text{m}^3$, 并总结天然气资源分布规律, 分析评价结果与以往相比变化原因。研究结果表明, 四川盆地天然气资源丰富、潜力巨大, 勘探开发前景广阔, 未来应加强深层、超深层勘探, 推进多层系立体勘探, 加快发展非常规油气勘探, 力争实现天然气持续快速发展。要继续保持天然气勘探快速发展态势, 必须加强油气地质理论、勘探开发技术、资源调查评价和管理体制改革等多个方面研究。

关键词: 四川盆地; 天然气; 致密气; 页岩气; 资源评价; 资源潜力

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Resource potentials of natural gas in Sichuan Basin

Zheng Zhihong¹, Li Denghua¹, Bai Senshu², Jia Jun¹, Zan Xin¹, Liu Zhuoya¹, Gao Xuan¹

(1 Strategy Research Center of Oil and gas Resources, Ministry of Land and Resources; 2 Wuxi Petroleum Geology Research Institute, Sinopec Exploration & Production Research Institute)

Abstract: In recent years, a series of progress and breakthroughs have been made in the conventional and unconventional natural gas exploration in the Sichuan Basin, and the geological cognitions and resource potentials have been updated constantly. At present, it is in urgent need to assess the natural gas resources in the Sichuan Basin comprehensively, so as to figure out the natural gas resources and provide a basis for promoting the exploration and development of natural gas in this basin. In this paper, the exploration progress in the Sichuan Basin during the past decade was analyzed, the types of assessed resources were determined, and the assessment targets and methods were defined. According to the assessment, the conventional gas in place is $20.69 \times 10^{12} \text{m}^3$ (recoverable: $11.20 \times 10^{12} \text{m}^3$), including tight gas $5.87 \times 10^{12} \text{m}^3$ (recoverable: $2.35 \times 10^{12} \text{m}^3$), and shale gas $57.46 \times 10^{12} \text{m}^3$ (recoverable: $10.01 \times 10^{12} \text{m}^3$). Moreover, the distribution laws of natural gas resources were summarized, and the reasons for the differences between the current assessment results and the previous ones were illustrated. It is indicated that the natural gas resources in the Sichuan Basin are abundant with great potentials, with promising exploration and development. It is recommended to strengthen deep and ultra-deep explorations, to promote multi-formation stereoscopic exploration, and to speed up unconventional oil and gas exploration, so as to develop the natural gas resources rapidly and sustainably. In order to keep the rapid development of natural gas exploration, it is necessary to reinforce the studies on petroleum geological theories, exploration and development technologies, resource investigation and assessment, and management system reform.

Key words: Sichuan Basin, natural gas, tight gas, shale gas, resource assessment, resource potentials

四川盆地天然气资源丰富, “新一轮全国油气资源评价”结果显示, 天然气地质资源量为 $5.36 \times 10^{12} \text{m}^3$ [1]。随着 2004 年普光气田的发现, 四川盆地天然气勘探进入快速发展阶段, 相继发现了广安、元坝、合川等大型气田。为了及时准确反映盆地资源潜力, 国土资源部组织开展了“全国油气资源动态评价 (2010)”, 四川盆地天然气资源达 $9.32 \times 10^{12} \text{m}^3$,

增加了 74% [2]。“十二五”期间, 随着勘探投入的增加、地质认识的深化和技术水平的提高, 下古生界天然气、页岩气勘探取得新的突破, 其他多层系、多领域也取得新的进展, 资源潜力有了新的增长。而同期, 国际油价持续低迷、中国经济增速放缓等给天然气勘探带来新的挑战。为此, 开展四川盆地天然气资源评价, 对常规和非常规天然气资源潜力进行综合分析, 进一

基金项目: 国土资源部项目“全国油气资源动态评价 (2015)” (2015YQKYQ01)。

第一作者简介: 郑志红 (1986—), 男, 河南平顶山人, 博士, 2014 年毕业于中国矿业大学 (北京), 助理研究员, 现主要从事油气资源评价方面的研究工作。地址: 北京市西城区兵马司胡同 19 号, 邮政编码: 100034。E-mail: pds_zzh@163.com

收稿日期: 2016-12-20; 修改日期: 2017-02-21

步摸清四川盆地油气资源,对“十三五”期间四川盆地天然气勘探部署和区域经济发展显得尤为重要。

1 勘探概况

从20世纪50年代至今,四川盆地天然气工业在艰苦中创业,在探索中前进,在发展中壮大,经历了曲折的发展道路,受当时地质认识和装备技术水平的

限制,每个阶段有各自的勘探思路和重点领域,从裂缝型气藏向孔隙型气藏,从构造气藏向构造—岩性复合气藏,从中浅层向深层,每次转变都带来新的突破和发现^[3-8]。经过60多年的勘探开发,从震旦系到侏罗系的各层系均有工业气层发现,截至2015年底,共发现罗家寨、普光、元坝、安岳等132个气田,其中探明地质储量达千亿立方米以上的气田有9个(图1)。

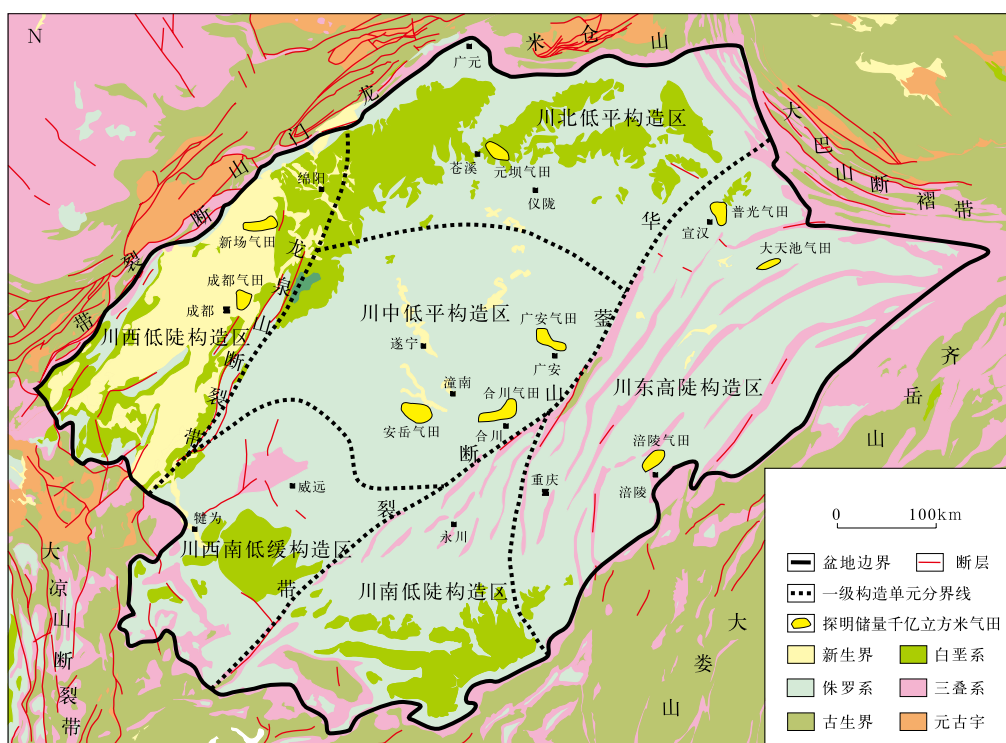


图1 四川盆地构造单元划分及主要气田分布图

四川盆地前50年的勘探发现以中小型气田为主,自2004年普光气田发现以来,四川盆地天然气勘探进入快速发展时期。近10来,四川盆地天然气勘探海相和陆相、深层和浅层、常规和非常规共同发展,多层系、多领域、多区块均取得了新的发现和突破。主要体现在4个方面:第一,震旦系—寒武系碳酸盐岩气藏勘探,川中古隆起磨溪—高石梯地区高石1井、磨溪8井先后取得重大突破,发现了震旦系—寒武系特大型海相气藏,是中国迄今为止单体规模最大的气藏,具有形成万亿立方米整装大气田的潜力^[9-12];第二,二叠系—三叠系礁滩体气藏勘探,川北元坝地区海相礁滩复合体勘探取得重大进展,诞生了又一个千亿立方米大气田,川北龙岗地区礁滩体气藏勘探再次取得新进展,潜在天然气资源量巨大^[13-14];第三,致密砂岩气藏勘探,川中、川西须家河组勘探取得一系列成果,发现了广安、合川、安岳和新场等千亿立方米大气田,川西中浅层侏罗系证实具备“满盆富砂、

满坳含气”的成藏条件,发现了马井、新都、孝泉和合兴场等4个中型气田^[15-16];第四,页岩气勘探取得丰硕成果,中国石化重庆涪陵地区焦石坝海相页岩气勘探取得了重大发现,探明首个千亿立方米整装页岩气田,中国石油建成长宁—威远、滇黔北昭通2个国家级页岩气示范区,并提交探明储量,实现了工业开采^[17-19]。综合来看,四川盆地天然气勘探呈现3个特点:向深层和超深层发展,多层系共同发展,非常规天然气迅速发展。

近年来,四川盆地天然气探明地质储量和产量不断增加,给发展带来新的动力,新增探明地质储量连续多年达千亿立方米以上(图2)。由于川中古隆起磨溪—高石梯构造勘探取得重大进展,寒武系勘探获得历史性突破,2013年新增探明地质储量 $4000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,天然气产量也稳步增长。截至2016年底,天然气累计探明地质储量约占全国的四分之一,产量约占全国的五分之一。

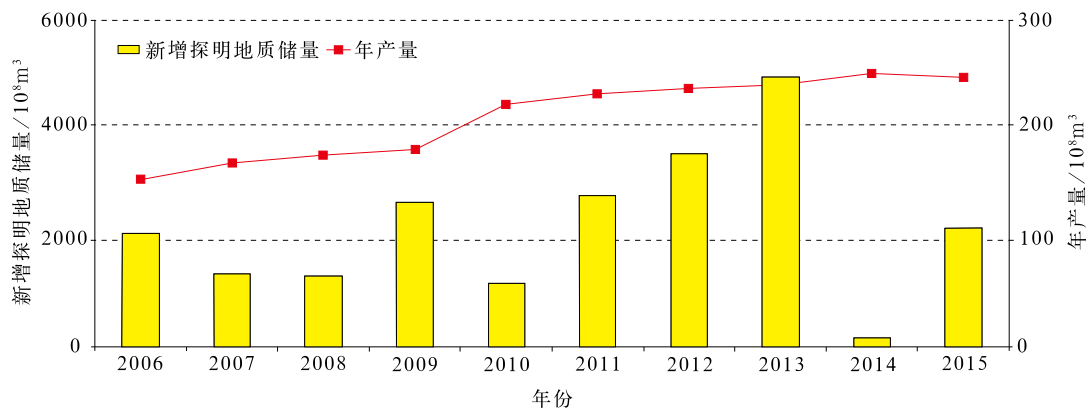


图2 四川盆地近10年来天然气新增探明地质储量及产量统计

2 资源评价

四川盆地天然气勘探取得的一系列进展，揭示了常规和非常规天然气资源的巨大潜力。为此，再次组织开展了四川盆地油气资源评价，重点对天然气资源进行评价。

2.1 资源类型

四川盆地是中国的两大致密气区之一，同时也是页岩气勘探开发最有利的地区，因此，除了对常规天然气藏进行评价外，本次还对致密气和页岩气资源进行了评价，是对四川盆地天然气资源潜力的一次全面系统的评价。值得注意的是，页岩气是典型的非常规天然气，致密气在大多数国家也被看作是非常规天然气，而中国传统上则是将致密气划分到常规天然气当中，将其与常规天然气放在一起勘探、统计，事实上致密气已是中国天然气产量中的主力军之一。本次评价首次将致密气作为单独类别进行评价，但在文中评价结果表述时，致密气仍包含于常规天然气之中。

2.2 评价目标

2.2.1 评价单元

自震旦纪以来，四川盆地以沉降为主，但构造运动频繁，经历了多期和多向的深断裂活动，受盆地周缘断裂和褶皱限制，形成了现今呈北东向延展的菱形盆地。盆地边界在演化过程中不断发生变化，现今以侏罗系沉积分布为界，北部为米仓山—大巴山断褶带，西部为龙门山断裂带，南部和东部被大凉山、大娄山和齐岳山等高山环绕^[20]。结合区域地质特征及油气分布特点，四川盆地划分出6个一级构造单元（图1），即川东高陡构造区、川中低平构造区、川南低陡构造

区、川西南低缓构造区、川西低陡构造区和川北低平构造区，作为基本评价单元。

2.2.2 评价层系

由于地质情况的复杂性，常规气、致密气和页岩气三者之间的界限并不十分清晰，本次评价依据《致密砂岩气地质评价方法》（GB/T 30501—2014）和《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》（DZ/T 0254—2014）中的定义和标准^[21-22]，结合勘探开发实践，划分评价层系。地质研究和实验测试结果表明，四川盆地上三叠统须家河组和川西侏罗系储层为典型的低孔低渗储层^[23-24]，盆地发育多套区域性富有机质页岩，其中寒武系及上奥陶统一志留统发育两套重要的海相页岩，有机质含量高、演化程度高、埋藏浅，有良好的勘探前景^[25-29]，陆相和海陆过渡相页岩气资源勘探尚未取得突破，资源可采性需进一步探讨。

综合分析，本次评价了四川盆地侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系、志留系、奥陶系、寒武系及震旦系等8个层系天然气资源，包括上三叠统须家河组和川西侏罗系的致密气，以及海相页岩气资源。

2.3 评价方法

四川盆地主要由中国石油和中国石化两家公司从事勘探开发工作，由于各自区块地质条件、勘探程度等方面的差异，导致其对盆地天然气资源潜力的认识也有所不同，在评价过程中需要区别对待。充分考虑以往评价方法、气藏类型、勘探程度等因素，本次评价分两步优选评价方法，首先，根据不同气藏类型选取各自适合的方法；其次，根据不同矿权区块勘探程度差异，综合考虑确定各自评价方法。

评价过程中采用了统计法、类比法、成因法等三大类多种方法对常规和非常规油气资源进行了评价（表1），常规天然气的评价以盆地模拟法和面积丰

度类比法为主，在对磨溪—高石梯、龙岗等地区进行刻度区解剖过程中采用了油气藏规模序列法等适用于中—高勘探程度的统计法；致密气评价以面积丰度类比法、小面元容积法和体积法为主，其中川西地区新场构造带勘探程度较高，故采用油气藏规模序列法估算了侏罗系和上三叠统致密气资源量，再用面积丰度类比法估算了川西地区致密气资源量；页岩气资源探明程度较低，总体以体积法为主、含气量类比法为辅，对于资料相对丰富的中—高勘探程度区，主要以体积法为主，对于勘探程度较低的地区，运用含气量类比法进行资源量计算；EUR 类比法主要用于致密气、页岩气可采资源量的计算。

表 1 资源评价方法体系

类型	常规油气资源			非常规油气资源		
	评价方法	适用对象	勘探程度	评价方法	适用对象	勘探程度
成因法	盆地模拟法	盆地 / 凹陷	中—高	盆地模拟法	致密气	中—高
类比法	面积丰度类比法	区带	中—低	面积丰度类比法	致密气、页岩气	中—低
				含气量类比法	页岩气	中—低
				EUR 类比法	致密气、页岩气	高
统计法	油气藏规模序列法	区带	中—高	油气藏规模序列法	致密气	高
	油气藏发现过程法			小面元容积法	致密气、页岩气	中—高
	广义帕莱托法			体积法	致密气、页岩气	中—高

3 评价结果

3.1 评价结果及分布

3.1.1 常规天然气（包括致密气）

四川盆地常规天然气地质资源量为 $20.69 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，可采资源量为 $11.20 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，包括致密气地质资源量 $5.87 \times 10^{12} \text{m}^3$ 、可采资源量 $2.35 \times 10^{12} \text{m}^3$

（表 2）。从资源量的地区分布来看，整体呈现中间多、南北少的格局，川中地区资源最为丰富，地质资源量达 $5.88 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占资源总量的 28%，川东和川西地质资源量均超过 $4 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，三者合计占资源总量的 71%；川南和川西南资源量较少，二者合计 $2.99 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，仅占资源总量的 14%。致密气主要分布在川西和川中地区，占致密气资源总量的 79%。

表 2 四川盆地天然气资源评价结果及地区分布

气藏类型	资源序列	川东	川中	川南	川西南	川西	川北	全盆地
常规天然气	地质资源量 / 10^{12}m^3	4.68	5.88	1.50	1.49	4.05	3.09	20.69
	可采资源量 / 10^{12}m^3	2.77	3.21	0.87	0.82	1.82	1.71	11.20
致密气	地质资源量 / 10^{12}m^3	0.15	1.58	0.13	0.38	3.07	0.56	5.87
	可采资源量 / 10^{12}m^3	0.06	0.63	0.05	0.15	1.23	0.23	2.35

从沉积相来看，常规天然气（包含致密气）资源以海相层系为主，地质资源量达 $14.63 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占资源总量的 71%；而陆相层系地质资源量仅为 $6.06 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占 29%。从资源量的层系分布来看（图 3），以三叠系为主，地质资源量为 $9.39 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 45%；其次为二叠系，达 $3.93 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 19%；震旦系地质资源量为 $2.54 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 12%；下古生界地质资源量合计 $2.36 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 11%。此外，四川盆地常规天然气资源量埋藏较深，超深层（大于 4500m）约占总资源量的 39%，深层（3500~4500m）占 29%，中深层（2000~3500m）占 27%，浅层（小于 2000m）分布很少。

结合地区分布和层系分布来看，石炭系和侏罗系分布集中，石炭系主要分布在川东地区，侏罗系主要分布在川西地区；二叠系和三叠系分布较为广泛，其中，上三叠统以川西和川中为主，二叠系和中—下三叠统具有相似的分布特征，主要分布在川东和川北地区（图 4）。川西地区以陆相的致密气为主，包括上三叠统和侏罗系，合计占比达 75%；川中地区资源丰富，各个层系储层都较为发育，震旦系和寒武系合计占川中的 50%，上三叠统约占 27%；川北地区以二叠系和三叠系礁滩气藏为主，合计占 66%；川南和川西南资源量最少，各层系分布相对分散。

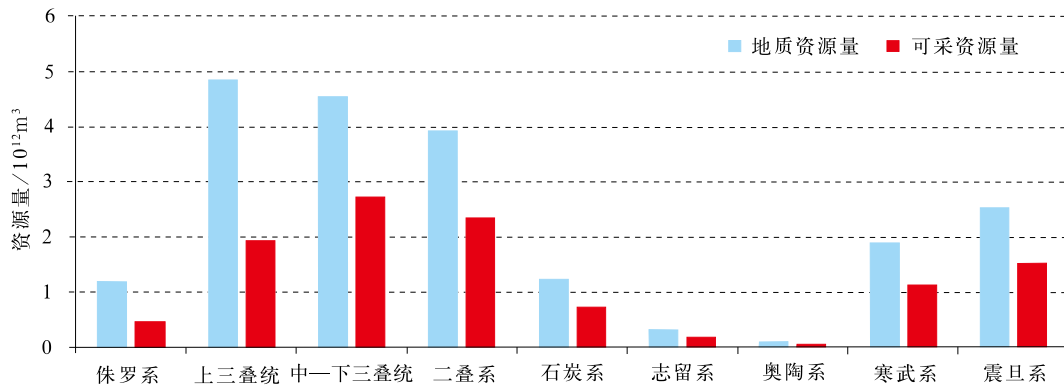


图3 常规天然气（包括致密气）资源层系分布

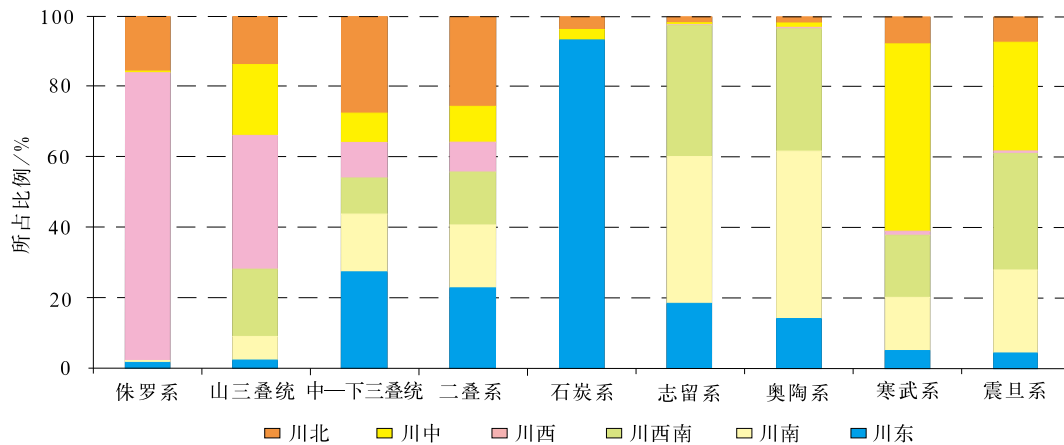


图4 各层系常规天然气（包括致密气）资源的区域分布

3.1.2 页岩气

四川盆地海相页岩气地质资源量为 $32.59 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，可采资源量为 $6.57 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中，上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气地质资源量为 $26.90 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 83%，可采资源量为 $5.51 \times 10^{12} \text{m}^3$ ；寒武系筇竹寺组页岩气地质资源量为 $5.69 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占总资源量的 17%，可采资源量为 $1.06 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。从分布地区来看，页岩气资源主要分布在川东、川南和川西南地区，五峰组—龙马溪组页岩气资源主要分布在川东涪陵地区、彭水地区，筇竹寺组页岩气资源主要分布在川西南威远和宜宾地区^[30-31]。此外，页岩气埋藏深度也相对较深，本次评价仅对 4500m 以浅页岩气资源进行了评价，埋深 3000~4500m 页岩气资源占半数以上。

3.2 变化原因及分析

本次评价结果与上次评价结果相比，资源量有较大变化（表 3）。地质资源量增加 $11.37 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，增幅达到 122%。二叠系资源量增长最多，增加 $2.58 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，震旦系和上三叠统资源量都增加

$2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上。增幅最大的是寒武系气藏，增幅达到 1810%；其次是震旦系气藏，增幅达到 1395%，志留系和二叠系增幅也较大。此外，从地区来看，增长最多的是川中地区和川北地区。

综合分析，资源量大幅增长主要得益于勘探工作的突破、地质认识的深化和工程技术的进步 3 个因素。首先，川中磨溪—高石梯地区震旦系—寒武系丘滩气藏、川北龙岗地区长兴组—飞仙关组礁滩气藏、川西和川中上三叠统须家河组致密砂岩气藏等获得重大突破，发现了安岳、龙岗、广安、合川等一系列大中型气田，探明储量快速增长，以增幅最大的震旦系—寒武系气藏为例，自磨溪—高石梯地区 2013 年取得突破以来，3 年累计探明地质储量已经超过 $6500 \times 10^8 \text{m}^3$ ，远远超过上次评价时的资源量，这必然导致资源量的增加。其次，对川中下古生界含油气地质条件及成藏主控因素、二叠系—三叠系礁滩体气藏分布规律、须家河组叠覆型致密砂岩气藏的主控因素等方面的地质认识不断深化创新，使得勘探领域不断扩展，以增长最多的二叠系—三叠系礁滩气藏为例，岩相古地理的认识不断深入，发现“两缘、两带、一

滩”古地貌格局,使得礁滩气藏勘探从川东北拓展到川中,进一步明确盆地礁滩发育的 5 个有利相带,即龙岗台缘带、川东北台缘带、鄂西—城口海槽(西侧)台缘带、遂宁台内高带、广安台内高带,结合三维地震解释,发现大量有利目标。此外,物探、钻井等工

程技术领域的进步,包括高分辨率三维地震采集技术、地震连片处理解释技术、储层地震预测技术、地震多波技术、水平井钻探技术、水平井体积压裂技术等的应用,提升了勘探效率,是四川盆地资源量大幅提高的技术保障。

表 3 四川盆地油气资源动态评价结果对比

层系	地质资源量 /10 ¹² m ³		增长 /10 ¹² m ³	增幅 /%
	2010 年	2015 年		
侏罗系	0.65	1.21	0.56	86
上三叠统	2.84	4.85	2.01	71
中一下三叠统	3.23	4.55	1.32	41
二叠系	1.35	3.93	2.58	191
石炭系	0.79	1.25	0.46	58
志留系	0.09	0.34	0.25	274
奥陶系	0.09	0.12	0.03	30
寒武系	0.10	1.91	1.81	1810
震旦系	0.17	2.54	2.37	1395
合计	9.32	20.69	11.37	122

2011 年,国土资源部油气资源战略研究中心在全国油气资源战略选区项目中,设置了“全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选”项目,对中国主要盆地和地区页岩气资源进行了评价。本次评价与当时相比,资源量减小近 $10 \times 10^{12} \text{m}^3$,结果偏保守,但是可靠程度增加,主要是由于勘探实践引起认识的变化。上奥陶统一下志留统资源量小幅增长,这是由于五峰组—龙马溪组的勘探突破使资源量相对较为落实,埋深、含气量、页岩有效厚度等关键评价参数可靠程度较高,含气量平均值明显高于 2011 年的评价,造成资源量的增加^[29];下寒武统筇竹寺组尽管在个别井获得工业气流,但至今尚未建成产能,研究认为该套页岩成熟度过高,储集条件和含气性明显不如五峰组—龙马溪组,造成寒武系资源量大幅减少。

4 前景分析

4.1 资源潜力

2015 年全国油气资源动态评价结果显示,四川盆地天然气资源丰富,常规天然气(包括致密气)地质资源量为 $20.69 \times 10^{12} \text{m}^3$,页岩气地质资源量为 $57.46 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

尽管经历了长期的勘探开发活动,四川盆地资源探明程度依旧不高,未来勘探潜力可观。截至 2015 年底,天然气累计探明地质储量 $3.45 \times 10^{12} \text{m}^3$,待探明天然气地质资源量为 $17.24 \times 10^{12} \text{m}^3$,探明率仅 16.67%,处于勘探早期;页岩气累计探明地质储量 $5441.29 \times 10^8 \text{m}^3$,探明率不足 1%。从层系上来看,探明储量主要分布在中生界,如广安、合川、成都、新场等气田,占探明储量的一半以上,其次是上古生界,如普光、元坝长兴组礁滩气藏及川东石炭系气藏等,下古生界自从磨溪—高石梯地区震旦系—寒武系碳酸盐岩气藏突破后快速发展,探明储量快速增长,已接近上古生界;待探明资源量也主要分布在川西和川中地区中生界。从深度来看,待探明资源主要分布在深层和超深层,二者合计占待探明资源总量的 70%,虽然近年来深层探明储量快速增长,但是探明率依然较低。目前页岩气探明储量分布在五峰组—龙马溪组,它是中国页岩气资源量最丰富且勘探最有利的层系,具有较大的资源潜力。

虽然四川盆地天然气待探明资源量巨大,但是必须认识到待探明天然气资源以致密气藏和深层气藏为主,勘探目标埋藏深、厚度薄、物性差,勘探难度大,勘探开发成本高。此外,四川盆地也是中国典型高含

硫气藏的分布地区,如普光、元坝和龙岗等地区的飞仙关组礁滩气藏 H_2S 含量在 5% 以上,部分地区高达 10% 以上,对勘探开发提出了高要求^[32]。

4.2 勘探方向

“十一五”和“十二五”期间四川盆地油气勘探取得了快速发展,为“十三五”及未来更长时间的勘探开发工作奠定了坚实的基础。回顾四川盆地的勘探历程,结合勘探新进展和地质新认识,未来勘探以 3 个方向为主。

4.2.1 强化深层、超深层勘探

资源评价结果显示,四川盆地深层、超深层天然气资源丰富,深层天然气勘探具有雄厚的物质基础;勘探进展显示,新发现的大气田目的层埋深大都超过 3500m,如川西新场气田气藏埋深为 4500~5200m,川北元坝气田气藏平均埋深为 6800m,川中安岳气田气藏埋深为 4500~6000m;深层、超深层勘探开发技术日趋成熟,深层天然气勘探目标广阔,前景乐观。今后应继续强化深层、超深层天然气勘探,主要目标包括川北—川东地区二叠系—三叠系礁滩复合体、川西—川中上三叠统一侏罗系致密砂岩气藏和川中古隆起震旦系—寒武系丘滩。

4.2.2 推进多层系立体勘探

四川盆地是典型的叠合盆地,纵向上发育多套生储盖组合,具有“层系多、类型多、领域多”的天然气资源赋存地质特征。川北普光、元坝等气田除长兴组—飞仙关组主力气层外,在雷口坡组、须家河组、自流井组等层系也取得突破;川中磨溪—高石梯地区除龙王庙组、灯影组和须家河组外,下二叠统勘探也取得新发现,揭示栖霞组勘探潜力;川西地区除须家河组和侏罗系气藏外,龙门山前雷口坡组海相气藏勘探也取得重要发现。这些新的发现和突破,展现了四川盆地多层系立体勘探的巨大潜力,未来应按照“主力层系优先探明,其他层系分步展开”的思路推进多层系立体勘探。

4.2.3 加快发展非常规天然气勘探

四川盆地是中国两大致密气产区之一,也是页岩气勘探开发最有利和最重要的地区,未来应加快发展非常规天然气勘探开发。受资源分布限制,致密气勘探未来主要集中在川西和川中地区,以须家河组和侏罗系为勘探重点;页岩气勘探主要集中在川东、川南、川西南地区,以上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为勘探重点,下寒武统筇竹寺组为准备领域。

5 思考与启示

四川盆地天然气资源丰富,油气地质条件复杂,决定了天然气勘探工作的曲折性,尽管近期在一些重点领域、区带和层系取得突破,处于快速发展阶段,但是面临资源品质整体降低、企业与地方关系复杂、国际油价低位徘徊、中国经济增速放缓等内外部条件的制约^[33-35]。未来要继续保持快速发展态势,必须加强油气地质理论、勘探开发技术、资源调查评价和管理体制改革等多个方面研究。

5.1 加大勘探投入,强化技术攻关,实现自主创新

加大有利目标区的投入,继续推进川中—川西震旦系—寒武系台缘丘滩、川北二叠系—三叠系台缘礁滩、川中—川西致密气和川东—川南 3500m 以下页岩气勘探,开展川西泥盆系和中三叠统雷口坡组勘探,争取获得新发现,实现新突破;加强地表复杂、埋藏超深地区的地震采集和处理、致密储层“甜点”预测、海相 3500m 以深页岩气勘探开发等关键技术研究,提高勘探成功率,强化水平井和体积压裂技术攻关,实现具有自主知识产权的配套技术和装备工具^[34]。

5.2 深化地质研究,丰富成藏理论,夯实发展基础

油气地质条件复杂化和资源隐蔽性加剧,需进一步深化地质理论研究,重点加强川中古隆起台缘丘滩、礁滩天然气富集机理和川中—川西低丰度大面积连续型致密储层“甜点”形成规律研究,深化海相页岩气富集主控因素研究,推进川东盐下深层天然气成藏机理研究等,夯实发展理论基础,指导勘探实践,推进四川盆地及周缘油气勘探持续发展。

5.3 加强基础调查,细化资源评价,查明资源潜力

为了更好地指导勘探开发布局,挖掘四川盆地天然气资源潜力,需要加强基础地质调查工作,重点开展四川盆地下古生界海相页岩气基础地质调查,进行龙马溪组战略选区调查,优选有利区;细化评价单元,实施资源分类分级评价,拓展资源评价内涵,进行评价结果经济性分析,积极探索生态评价;查明油气资源潜力及分布,为勘查开发规划目标实现和能源供应提供基础保障。

5.4 稳步推进改革,促进开放竞争,增强市场活力

国家鼓励国有企业、私营企业、外资企业等主体

投资页岩气探矿权,四川盆地是中国页岩气勘探开发最有利的地区,应总结前两轮页岩气招标经验,稳步推进油气资源市场化改革,加快油气上游开放,引入更多社会资本,增强市场活力,形成竞争有序、充满干劲的勘探开发新局面,市场化运作模式下,必然会为地方政府带来大量投资、提供较多的就业机会,带动区域经济发展。

致谢:成文过程中得到了中国石油勘探开发研究院、中国石化勘探开发研究院无锡石油地质研究所及其他单位专家的指导帮助,在此致以衷心感谢!

参考文献

- [1] 国土资源部油气资源战略研究中心.新一轮全国油气资源评价[M].北京:中国大地出版社,2009.
Strategic research center of oil and gas resources, MLR. New round of hydrocarbon resource assessment in China [M]. Beijing: China Land Press, 2009.
- [2] 国土资源部油气资源战略研究中心.全国油气资源动态评价(2010)[M].北京:中国大地出版社,2011.
Strategic research center of oil and gas resources, MLR. Dynamic assessment of hydrocarbon resource in China [M]. Beijing: China Land Press, 2011.
- [3] 盘昌林,刘树根,马永生,胡东风,黄仁春.川东北地区须家河组天然气成藏主控因素分析[J].断块油气田,2011,18(4):418-423.
Pan Changlin, Liu Shugen, Ma Yongsheng, Hu Dongfeng, Huang Renchun. Analysis on main controlling factors of gas accumulation in Xujiache Formation of northeast Sichuan Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011,18(4):418-423.
- [4] 李鹭光.四川盆地天然气勘探开发技术进展与发展方向[J].天然气工业,2011,31(1):1-6.
Li Luguang. Technical progress and developing orientation in natural gas exploration and development in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(1):1-6.
- [5] 马永生,蔡勋育,赵培荣,罗毅,张学丰.四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J].石油学报,2010,31(3):347-354.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, Luo Yi, Zhang Xuefeng. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(3):347-354.
- [6] 沈平,张健,宋家荣,洪海涛,唐大海,王小娟,等.四川盆地中二叠统天然气勘探新突破的意义及有利勘探方向[J].天然气工业,2015,35(7):1-9.
Shen Ping, Zhang Jian, Song Jiarong, Hong Haitao, Tang Dahai, Wang Xiaojuan, et al. Significance of new breakthrough in and favorable targets of gas exploration in the Middle Permian system, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(7):1-9.
- [7] 沈浩,汪华,文龙,马华灵,李毅,张本健.四川盆地西北部上古生界天然气勘探前景[J].天然气工业,2016,36(8):11-21.
Shen Hao, Wang Hua, Wen Long, Ma Hualing, Li Yi, Zhang Benjian. Natural gas exploration prospect in the Upper Paleozoic strata, NW Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016,36(8):11-21.
- [8] 李伟,张志杰,汪洋,张朝军.川东石炭系尖灭带天然气聚集特征与勘探潜力[J].中国石油勘探,2015,20(2):9-17.
Li Wei, Zhang Zhijie, Wang Yang, Zhang Chaojun. Characteristics and exploration potential of natural gas accumulations in Carboniferous pinchout belts in East Sichuan [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(2):9-17.
- [9] 罗冰,周刚,罗文军,夏茂龙.川中古隆起下古生界—震旦系勘探发现与天然气富集规律[J].中国石油勘探,2015,20(2):18-29.
Luo Bing, Zhou Gang, Luo Wenjun, Xia Maolong. Discovery from exploration of Lower Paleozoic-Sinian system in central Sichuan palaeo-uplift and its natural gas abundance law [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(2):18-29.
- [10] 金民东,曾伟,谭秀成,李凌,李宗银,罗冰,等.四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J].石油勘探与开发,2014,41(6):650-660.
Jin Mindong, Zeng Wei, Tan Xiucheng, Li Ling, Li Zongyin, Luo Bing, et al. Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(6):650-660.
- [11] 赵文智,汪泽成,胡素云,潘文庆,杨雨,包洪平,等.中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征[J].石油学报,2012,33(增刊2):1-10.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Hu Suyun, Pan Wenqing, Yang Yu, Bao Hongping, et al. Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(Suppl.2):1-10.
- [12] 何治亮,金晓辉,沃玉进,李慧莉,白振瑞,焦存礼,等.中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J].中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, Li Huili, Bai Zhenrui, Jiao Cunli, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(1):3-14.
- [13] 胡东风.普光气田与元坝气田礁滩储层特征的差异性及其成因[J].天然气工业,2011,31(10):17-21.
Hu Dongfeng. Differences in reef-bank reservoir features between Puguang and Yuanba gas fields and their reasons [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(10):17-21.
- [14] 黄福喜,杨涛,闫伟鹏,郭彬程,马洪.四川盆地龙岗与元坝地区礁滩成藏对比分析[J].中国石油勘探,2014,19(3):12-20.
Huang Fuxi, Yang Tao, Yan Weipeng, Guo Bincheng, Ma Hong. Comparison and analysis of reef-bank gas reservoirs in Longgang and Yuanba areas in Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2014,19(3):12-20.
- [15] 龙胜祥,肖开华,李秀鹏,武晓玲,李宏涛,袁玉松,等.四川盆地陆相层系天然气成藏条件与勘探思路[J].天然气工业,2012,32(11):10-17.
Long Shengxiang, Xiao Kaihua, Li Xiupeng, Wu Xiaoling, Li Hongtao, Yuan Yusong, et al. Gas accumulation conditions and exploration strategies of Mesozoic terrestrial strata in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2012,32(11):10-17.
- [16] 杨晓萍,邹才能,陶士振,汪泽成,李军.四川盆地上三叠统一侏罗系含油气系统特征及油气富集规律[J].中国石油勘探,2005,10(2):15-22.
Yang Xiaoping, Zou Caineng, Tao Shizhen, Wang Zecheng, Li Jun. Characteristics of upper Triassic-Jurassic oil and gas system in Sichuan Basin and oil and gas abundance law [J].

- China Petroleum Exploration, 2005,10(2):15–22.
- [17] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 李宇平, 魏祥峰. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016,21(3):24–37.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Zhihong, Li Yuping, Wei Xiangfeng. Discovery and exploration of Fuling shale gas field [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(3):24–37.
- [18] 谢军, 张浩森, 余朝毅, 李其荣, 范宇, 杨扬. 地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J]. 中国石油勘探, 2017,22(1):21–28.
- Xie Jun, Zhang Haomiao, She Chaoyi, Li Qirong, Fan Yu, Yang Yang. Practice of geology–engineering integration in Changning State Shale Gas Demonstration Area [J]. China Petroleum Exploration, 2017,22(1):21–28.
- [19] 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 李响. 地质—工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J]. 中国石油勘探, 2015,20(4):1–23.
- Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, Li Xun. Geoscience–to–production integration ensures effective and efficient south China marine shale gas development [J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(4):1–23.
- [20] 刘树根, 李智武, 孙玮, 邓宾, 罗志立, 王国芝, 等. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. 地质科学, 2011,46(1):233–257.
- Liu Shugen, Li Zhiwu, Sun Wei, Deng Bin, Luo Zhili, Wang Guozhi, *et al.* Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China [J]. Chinese Journal of Geology, 2011,46(1):233–257.
- [21] 全国石油天然气标准化技术委员会. GB/T 30501—2014 致密砂岩气地质评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- China natural gas standardization technology committee. GB/T 30501—2014 Geological evaluating methods for tight sandstone gas[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [22] 全国国土资源标准化技术委员会. DZ/T 0254—2014 页岩气资源/储量计算与评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- National land resources standardization technology committee. DZ/T 0254—2014 Regulation of shale gas resources/reserves estimation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [23] 谢继容, 张健, 李国辉, 唐大海, 彭军. 四川盆地须家河组气藏成藏特点及勘探前景[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008,30(6):40–45.
- Xie Jirong, Zhang Jian, Li Guohui, Tang Dahai, Peng Jun. Exploration prospect and gas reservoir characteristics of Xujiache Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008,30(6):40–45.
- [24] 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 王毓俊, 蒋婵, 罗明生. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2010,30(3):22–26.
- Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, Wang Yujun, Jiang Chan, Luo Mingsheng. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(3):22–26.
- [25] 张金川, 聂海宽, 徐波, 姜生玲, 张培先. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008,28(2):151–156.
- Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, Jiang Shengling, Zhang Peixian. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(2):151–156.
- [26] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 管全中, 王淑芳, 王玉满. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014,34(12):1–15.
- Dong Dazhong, Gao Shikui, Huang Jinliang, Guan Quanzhong, Wang Shufang, Wang Yuman. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014,34(12):1–15.
- [27] 要继超, 王兴志, 罗兰, 胡曦, 李可. 渝东地区龙马溪组页岩气成藏地质条件研究[J]. 特种油气藏, 2016,23(4):77–80.
- Yao Jichao, Wang Xingzhi, Luo Lan, Hu Xi, Li Ke. Geology of Longmaxi shale gas accumulation in Eastern Chongqing [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016,23(4):77–80.
- [28] 尉鹏飞, 张金川, 隆帅, 彭建龙, 邓恩德, 吕艳南, 等. 四川盆地及周缘地区龙马溪组页岩微观孔隙结构及其发育主控因素[J]. 中国石油勘探, 2016,21(5):42–51.
- Wei Pengfei, Zhang Jinchuan, Long Shuai, Peng Jianlong, Deng Ende, Lu Yannan, *et al.* Characteristics and controlling factors of microscopic pore structure of Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(5):42–51.
- [29] 王玉满, 董大忠, 杨桦, 何伶, 王世谦, 黄金亮, 等. 川南志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2014,44(6):1348–1356.
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Yang Hua, He Ling, Wang Shiqian, Huang Jinliang, *et al.* Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, southern Sichuan, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014,44(6):1348–1356.
- [30] 汤济广, 李豫, 汪凯明, 齐泽宇. 四川盆地东南地区龙马溪组页岩气有效保存区综合评价[J]. 天然气工业, 2015,35(5):15–23.
- Tang Jiguang, Li Yu, Wang Kaiming, Qi Zeyu. Comprehensive evaluation of effective preservation zone of Longmaxi Formation shale gas in the Southeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(5):15–23.
- [31] 武瑾, 梁峰, 拜文华, 吝文, 赵嵘. 渝东北地区下志留统龙马溪组页岩气勘探前景[J]. 特种油气藏, 2015,22(6):50–55.
- Wu Jin, Liang Feng, Bai Wenhua, Lin Wen, Zhao Rong. Exploration prospect of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas in Northeastern Chongqing City [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015,22(6):50–55.
- [32] 刘文汇, 腾格尔, 高波, 张中宁, 张建勇, 张殿伟, 等. 四川盆地大中型天然气田(藏)中H₂S形成及富集机制[J]. 石油勘探与开发, 2010,37(5):513–522.
- Liu Wenhui, Tengger, Gao Bo, Zhang Zhongning, Zhang Jianyong, Zhang Dianwei, *et al.* H₂S formation and enrichment mechanisms in medium to large scale natural gas fields (reservoirs) in the Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(5):513–522.
- [33] 潘继平, 胡建武, 安海忠. 促进中国非常规天然气资源开发的政策思考[J]. 天然气工业, 2011,31(9):1–6.
- Pan Jiping, Hu Jianwu, An Haizhong. Policies for promoting the development of unconventional natural gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(9):1–6.
- [34] 杜金虎, 杨涛, 李欣. 中国石油天然气股份有限公司“十二五”油气勘探发现与“十三五”展望[J]. 中国石油勘探, 2016,21(2):1–15.
- Du Jinhu, Yang Tao, Li Xin. Oil and gas exploration and discovery of PetroChina Company Limited during the 12th Five–Year Plan and the prospect during the 13th Five–Year Plan [J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(2):1–15.
- [35] 陆家亮, 赵素平. 新常态下中国天然气勘探开发战略思考[J]. 天然气工业, 2015,35(11):1–8.
- Lu Jialiang, Zhao Suping. China's natural gas exploration and development strategies under the new normal [J]. Natural Gas Industry, 2015,35(11):1–8.