

中美煤层气资源分布特征和开发现状对比及启示

李登华,高 媛,刘卓亚,答 昕,郑志红,贾 君,吴家萍
(国土资源部油气资源战略研究中心,北京 100034)

摘 要:为了对我国煤层气发展前景作出较为客观的评价,在深入对比中美煤层气地质条件和资源分布特征的基础上,对两国煤层气开发现状进行了研究,提出了我国煤层气发展的战略定位。研究结果表明:美国煤层气地质条件整体优于我国,其煤层气储层渗透率一般大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,产层多数常压或超压;我国煤层气储层渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,产层大多低压。美国煤层气可采资源主要富集在前陆盆地中,新生代、中生代、古生代各占 1/3,煤阶方面,中、低煤阶各占近 1/2,高煤阶资源极少;我国煤层气可采资源主要富集在克拉通盆地中,中、古生代各占近 1/2,新生代资源极少,高、中、低煤阶各占 1/3。综合分析认为:煤层气是我国天然气生产的重要补充,预测未来煤层气地面开发年产量可望达到 $(100 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词:煤层气;资源评价;地质条件;分布特征

中图分类号: TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2018)01-0252-10

Comparison and revelation of coalbed methane resources distribution characteristics and development status between China and America

LI Denghua, GAO Xuan, LIU Zhuoya, ZAN Xin, ZHENG Zhihong, JIA Jun, WU Jiaping
(Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China)

Abstract: In order to make a relatively objective conclusion on the CBM outlook in China, based on the deep comparison of CBM geological conditions and resources distribution characteristics in China and America, the study, which is on CBM development status of two countries, was carried out, and therefore, the strategic orientation of coalbed methane development in China was put forward. The results show that the CBM geological conditions in America is better than those in China as a whole. The reservoir permeability of American CBM is generally greater than $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and producing layers are mostly normal pressure or over pressure. In contrast, the reservoir permeability in China is usually less than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, and producing layers are mostly low pressure. The technically recoverable resources of CBM in the United States are mainly concentrated in foreland basins, and resources in Cenozoic are almost equal to those in Mesozoic or in Paleozoic. While CBM resources are roughly equally split between medium and low coal rank, the high coal rank resources are few. In comparison, the technically recoverable resources of CBM in China are mostly concentrated in Craton Basins, and resources in Mesozoic and those in Paleozoic are nearly half and half, while those in Cenozoic are few. Besides, resources from low, medium and high coal rank are roughly equivalent in China. Comprehensive analysis holds that the CBM is an important supplement to the natural gas production in China, and the annual output of CBM in the future is expected to reach 10~20 billion cubic meters.

Key words: coalbed methane; resources assessment; geological conditions; distribution characteristics

0 引 言

全球煤层气资源丰富,是一种现实的非常规天

然气资源,已有近 30 个国家实施了煤层气的勘探开发^[1]。1997 年德国学者 Hans-Holger Rogner 预测全球煤层气地质资源量 $256 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在前

收稿日期:2107-10-10;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.01.036

基金项目:国土资源部重大科技专项资助项目(2015YQKYQ01)

作者简介:李登华(1972—),男,山东金乡人,副研究员,博士。Tel:18811034545, E-mail:ldh0709@petrochina.com.cn

引用格式:李登华,高 媛,刘卓亚,等.中美煤层气资源分布特征和开发现状对比及启示[J].煤炭科学技术,2018,46(1):252-261.

LI Denghua, GAO Xuan, LIU Zhuoya, et al. Comparison and revelation of coalbed methane resources distribution characteristics and development status between China and America[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 252-261.

苏联和北美地区^[2]。2014年美国煤层气委员会的MARIA Mastalerz 预测^[3]:俄罗斯煤层气资源最丰富,地质资源量 $79.92 \times 10^{12} \text{ m}^3$;其次为美国,地质资源量 $49.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (其中阿拉斯加州 $29.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$);中国排名第3,地质资源量 $31.13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。国际能源署(International Energy Agency, 简称 IEA)、美国能源信息署、加拿大国家能源董事会和澳大利亚石油产量和勘探协会统计^[4-6],截至2014年底,全球已有14个国家获得煤层气商业性产量,前5位依次为美国 $370.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、澳大利亚 $86.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、加拿大 $66.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、中国 $36.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ (地面开采量)、德国 $5.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

美国是全球煤层气开发最早也是最成功的国家,产地主要来自粉河(Powder River)、圣胡安(San Juan)和黑勇士(Black Warrior)3个盆地。20世纪70年代中期,美国开始煤层气理论认识研究和开发技术攻关。1980年12月,第1个商业煤层气田——黑勇士盆地的橡树林(Oak Grove)煤层气开发区投产,标志着美国煤层气产业进入起步阶段。之后相继在圣胡安、粉河和尤因塔等10余个盆地获得商业开发。1989年美国煤层气产量 $26 \times 10^8 \text{ m}^3$,2008年达到产量高峰,年产煤层气 $556 \times 10^8 \text{ m}^3$,2015年产量回落至 $359 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6]。

我国煤层气开发利用起步较早,前期进展缓慢,近几年呈现快速发展态势。1952年我国就开始在抚顺煤矿龙凤矿建立瓦斯抽放站,开创了煤层气开发利用的先河。20世纪80年代,受美国煤层气工业巨大成功的启发,我国政府开始重视和支持煤层气的开发利用,并于1982年将煤层气利用工程引入国家节能基本建设投资计划,1989年底开始引进现代煤层气开发技术。2003年3月辽宁省阜新刘家煤层气井组开始向居民供气,标志着我国进入煤层气商业化生产阶段。2004年我国煤层气地面开采量 $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,2009年突破 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$,2016年达到 $45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至2016年底,我国已有煤层气探矿权106个,采矿权12个,累计钻井近17000口,形成了沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘2个千亿方储量的煤层气产业基地。

虽然我国煤层气产业已进入规模开发阶段,但在煤层气基础地质理论、富集高产主控因素、资源潜力及勘探方向等方面仍然存在诸多难题,其直接后果是导致“十一五”和“十二五”国家规划的产量目标均未实现。尤其是2015年煤层气产量已被起步

晚几十年的页岩气超越,引起了产业界专家和学者的高度重视。笔者等对中美煤层气地质条件和资源分布特征开展了较为深入的对比研究,并分析了美国煤层气产业发展现状与趋势,以期得出一些重要启示,对我国煤层气产业发展前景做出较为客观和准确的判断。

1 中美煤层气地质条件对比

煤层气俗称“瓦斯”,是指赋存在煤层中以甲烷为主要成分、以吸附在煤基质颗粒表面为主并部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的烃类气体^[7]。煤层气是煤的一种伴生资源,其地质条件与含煤盆地的形成与演化休戚相关。美国含煤盆地主体构造简单、保存条件良好,我国则构造复杂、保存条件偏差,两者的煤层气地质条件既有相似之处,又存在明显差异。

1.1 含煤盆地基础地质条件分析

美国含煤盆地成煤时代较多,煤岩绝大多数为中、低煤阶,构造相对简单。美国地史上的聚煤期主要有8个,其中宾夕法尼亚纪(相当于晚石炭世)、白垩纪和古近纪3个时期聚煤强度最大,为主要聚煤期,煤层气资源也主要分布在这些地质时代的煤层中(图1),并且美国煤岩类型主要为褐煤~瘦煤,煤层气类型也以中、低煤阶为主(图2)^[8]。由于北美地台相对稳定,经历的构造运动次数少、强度低,因此含煤盆地整体构造简单,有利于煤层气资源的富集和保存。

我国含煤盆地成煤时代繁多,煤岩高、中、低煤阶均有分布,构造演化复杂。我国地史上的聚煤期有14个,其中早石炭世、晚石炭世、早二叠世、晚二叠世、晚三叠世、早-中侏罗世、早白垩世和古近纪-新近纪为主要聚煤期。在这8个主要聚煤期中,以晚石炭世-早二叠世、晚二叠世、早-中侏罗世和早白垩世4个聚煤期更为重要,相应煤系中赋存的煤炭资源占我国煤炭资源总量的98%以上,煤层气资源也集中于这些地质时代的煤层中(图3)^[1]。我国煤类齐全,从褐煤至无烟煤都有分布,使得煤层气类型丰富,高、中、低煤阶俱全(图4)^[9-11]。由于我国晚古生代以来经历了印支、燕山和喜山期等多期构造运动,含煤盆地大多遭受了强烈改造,不利于煤层气资源的富集和保存。

鉴于美国高煤阶煤层气分布局限,且未形成规模产量,因此只对比中、低煤阶煤层气的地质条件。

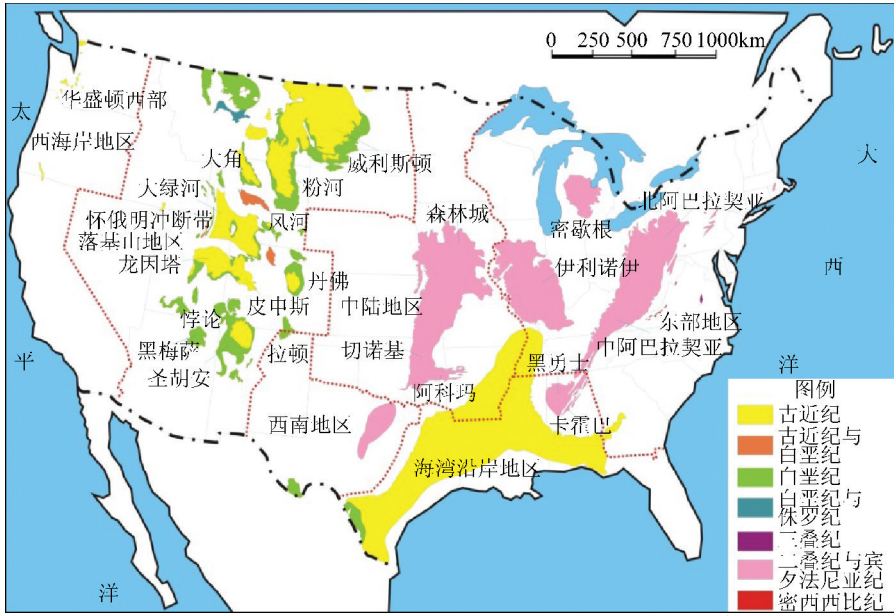


图1 美国含煤盆地地质时代分布

Fig.1 Geological time distribution of coal-bearing basins in U.S.

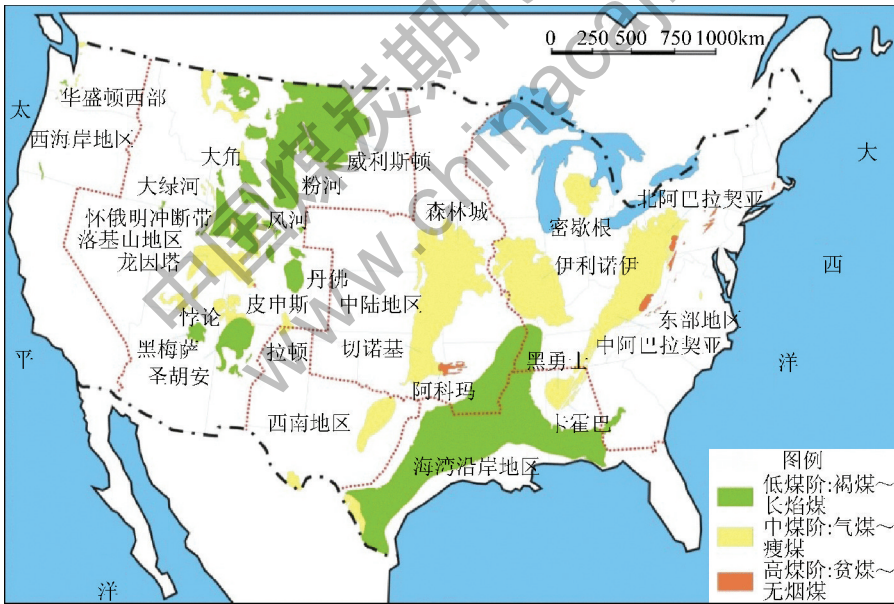


图2 美国含煤盆地煤阶分布

Fig.2 Coal rank distribution of coal-bearing basins in U.S.

1.2 中煤阶煤层气地质条件对比

美国中煤阶煤层气主要分布在东部和中陆地区,包括北阿巴拉契亚、中阿巴拉契亚、黑勇士、密歇根、伊利诺伊、森林城、切诺基、阿科玛等盆地。另外,落基山地区的尤因塔盆地、皮申斯盆地和圣胡安盆地的北部以及西南地区的拉顿盆地也有分布(图2)。美国中煤阶煤层气开发主要集中在圣

胡安、黑勇士、尤因塔、中阿巴拉契亚和拉顿5个盆地。

我国中煤阶煤层气主要分布在华北、南方和青藏地区,包括鄂尔多斯、四川、扎曲等盆地,另外,西北地区的准噶尔盆地和东北地区的三江-穆稜河盆地也有分布(图4)。我国中煤阶煤层气开发主要集中在鄂尔多斯盆地东缘。

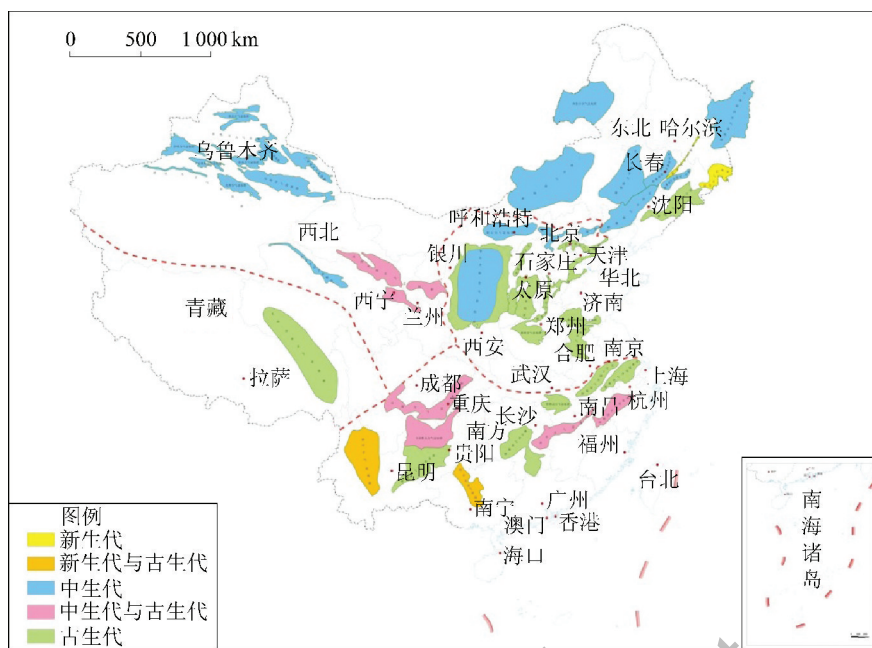


图3 中国含煤盆地地质时代分布

Fig.3 Geological time distribution of coal-bearing basins in China

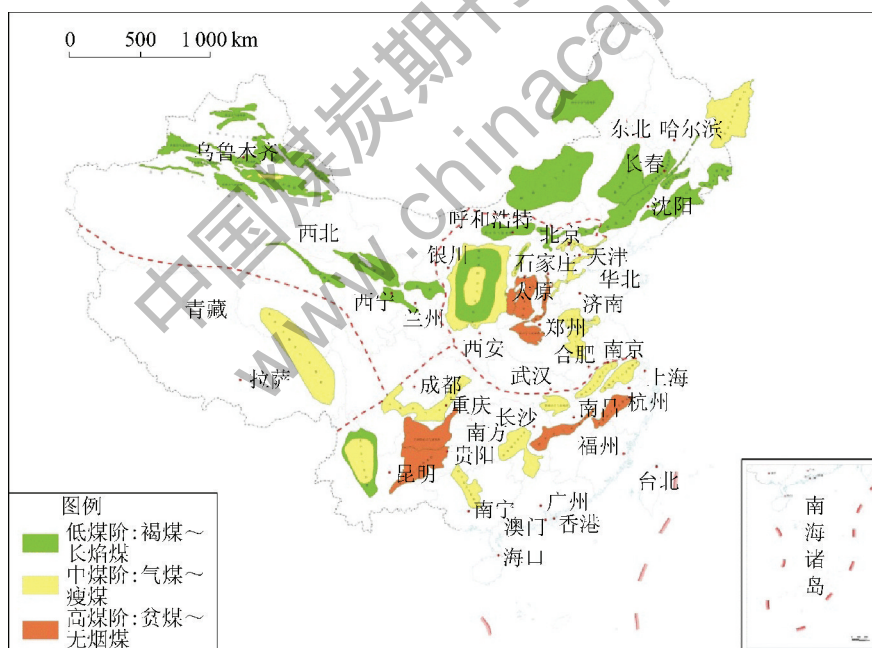


图4 中国含煤盆地煤阶分布

Fig.4 Coal rank distribution of coal-bearing basins in China

中煤阶煤层气成藏基础参数对比表明,中美煤层厚度、埋深、含气量差别不大,但美国煤层气产层渗透率一般大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,普遍为常压-超压,资源丰度一般大于 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ [12-13];而我国煤层气产层渗透率普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,绝大多数为低压,资源丰度一般小于 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (表1)[14-16]。美

国中煤阶煤层气优越的地质条件促成圣胡安等盆地“甜点区”的直井单井平均产量一般大于 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水平井单井平均产量一般大于 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;而我国即使是最好的保德、韩城、延川南等区块的水平井单井平均产量也很难突破 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。仅高煤阶的潘庄区块,由于煤层渗透率较高, $(3.46 \sim 47.28) \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$, 产层为常压-超压, 水平井单井平均产量超过 $1.75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.3 低煤阶煤层气地质条件对比

美国低煤阶煤层气主要分布在海湾沿岸和落基山地区, 包括粉河、威利斯顿、大绿河等盆地(图2)。目前美国低煤阶煤层气开发主要集中在粉河盆地。

我国低煤阶煤层气主要分布在西北和东北地区, 包括准噶尔、吐哈、塔里木、海拉尔等盆地, 另外, 华北地区的鄂尔多斯盆地和南方地区的新生代盆地也有少量分布(图4)。目前我国低煤阶煤层气开发主要集中在阜新和准噶尔等盆地。

低煤阶煤层气成藏基础参数对比表明, 中美煤层厚度差别不大, 我国的含气量指标好于美国, 我国含气量普遍大于 $2 \text{ m}^3/\text{t}$, 美国平均含气量小于 $1 \text{ m}^3/\text{t}$ 。但美国的其他关键参数指标优于我国, 如美国煤层气产层平均深度小于 500 m , 渗透率一般大于 $30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 普遍为常压-超压, 资源丰度接近 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 而我国煤层气产层平均深度一般大于 600 m , 渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 普遍低压, 资源丰度一般小于 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (表1)。产量方面, 美国粉河盆地煤层气直井单井平均产量 $5\,660 \text{ m}^3/\text{d}$, 而我国除准噶尔盆地的阜康地区外, 直井单井平均产量普遍低于 $5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

总之, 美国煤层气地质条件具有得天独厚的优势, 关键参数指标明显好于我国, 如产层的渗透率普遍高于我国, 保存条件良好, 大多为常压-超压等, 因此资源丰度和产量均大幅高于我国。

2 中美煤层气资源分布特征对比

2.1 美国煤层气资源分布特征

2014年, 美国联邦地质调查局(U.S. Geological Survey, 简称USGS)汇总了历年的煤层气资源评价成果, 发布了美国煤层气资源量结果, 2017年初, EIA也发布了美国煤层气的资源评价结果(实际评价时间为2014年)^[17]。鉴于EIA与USGS的资源评价方法一致, 均为福斯潘模型法(Forspan Model), 作者等在EIA的评价结果的基础上, 补充了USGS评价的威利斯顿等4个盆地或地区的资源量, 最终得到美国主体48个州的煤层气待发现的技术可采资源量为 $3.54 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表2)^[18-23]。

2.1.1 大区分布

美国主体48个州按油气供应体系划分为6个

大区: 东部地区、中陆地区、海湾沿岸地区、西南地区、落基山地区和西海岸地区。落基山地区煤层气资源最丰富, 可采资源量 $1.67 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比47.2%; 其次为中陆地区, 可采资源量 $1.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比30.6%; 第三为西海岸地区, 可采资源量 $0.29 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比8.2%; 第四为西南地区, 可采资源量 $0.20 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比5.8%; 第五为海湾沿岸地区, 可采资源量 $0.18 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比5.0%; 东部地区最少, 可采资源量仅 $0.11 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比3.2%。

2.1.2 盆地分布与盆地类型

美国煤层气可采资源量主要分布在21个盆地或区带, 其中森林城盆地(Forest City Basin)资源最丰富, 可采资源量 $0.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比25.4%; 其次为粉河盆地(Powder River Basin), 可采资源量 $0.66 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比18.7%; 第3为圣胡安盆地(San Juan Basin), 可采资源量 $0.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比22.2%(图5)。

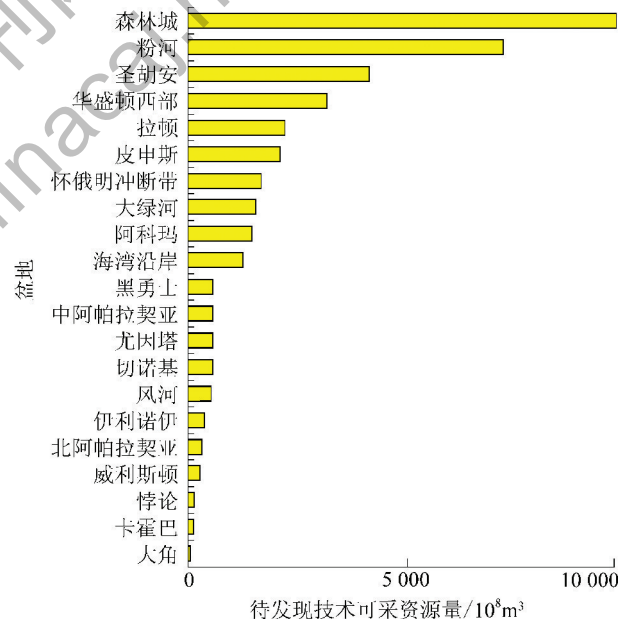


图5 美国煤层气待发现技术可采资源盆地分布

Fig.5 Basin distribution of U.S.unproved technically recoverable coalbed methane resources

列前3位的盆地累计煤层气可采资源量 $1.94 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比54.9%, 其中粉河和圣胡安盆地是美国煤层气开发的主战场, 80%以上的产量来自这2个盆地。美国煤层气盆地主要包括3大类型: 前陆盆地、克拉通盆地和弧前盆地。煤层气资源主要分布在17个前陆盆地内, 可采资源量 $2.29 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比64.7%; 3个克拉通盆地可采资源量 $0.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占

比 27.1%;1 个弧前盆地可采资源量 $0.29 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 8.2%。

表 2 美国煤层气待发现技术可采资源量

Table 2 U.S.coalbed methane unproved technically recoverable resources

大区	盆地或区带	盆地类型	产层时代	产层煤阶	待发现可采资源/ 10^8 m^3	备注
东部	中阿巴拉契亚	前陆	石炭纪	中、高	509.4	
	北阿巴拉契亚	前陆	石炭纪	中、高	283.0	
	伊利诺伊	克拉通	宾夕法尼亚纪	中、高	339.6	
	小计				1 132.0	
海湾沿岸	黑勇士	前陆	宾夕法尼亚纪	中	509.4	
	卡霍巴	前陆	宾夕法尼亚纪	中	113.2	
	海湾沿岸	前陆	晚白垩-古新世	低	1 148.7	USGS 评价
	小计				1 771.3	
中陆	森林城	克拉通	宾夕法尼亚纪	中	8 999.4	
	阿科玛	前陆	宾夕法尼亚纪	中、高	1 330.1	
	切诺基	前陆	宾夕法尼亚纪	中	509.4	
	小计				10 838.9	
西南	拉顿	前陆	晚白垩-古新世	中	2 037.6	
	小计				2 037.6	
落基山	大绿河	前陆	晚白垩-古新世	低	1 415.0	
	皮申斯	前陆	白垩纪	低	1 924.4	
	粉河	前陆	晚白垩-古新世	低	6 622.2	
	圣胡安	前陆	晚白垩世	中、低	3 792.2	
	尤因塔	前陆	白垩纪	中	509.4	
	风河	前陆	晚白垩-古新世	低	481.1	
	大角	前陆	晚白垩-古新世	低	36.8	USGS 评价
	悖论	前陆	晚白垩	中	127.4	USGS 评价
	威利斯顿	克拉通	古近系	低	249.6	USGS 评价
	怀俄明冲断带	前陆	晚白垩-古新世	低	1 528.2	
小计				16 686.3		
西海岸	华盛顿西部	弧前	古近纪	低	2 914.9	
	小计				2 914.9	
合计				35 381		

2.1.3 产层时代分布

美国煤层气可采资源量在时代上大致各占1/3。新生代可采资源量 $1.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 35.7%; 中生代可采资源量 $1.02 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 28.7%; 古生代可采资源量 $1.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 35.6%。

2.1.4 煤阶分布

美国煤层气可采资源量在煤阶上大致中、低煤阶各占 1/2, 高煤阶资源极少。低煤阶可采资源量

$1.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 48.4%; 中煤阶可采资源量 $1.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 48.2%; 高煤阶可采资源量仅 $0.12 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占比 3.4%。

2.2 中国煤层气资源分布特征

2015 年国土资源部主要采用体积法和资源丰度类比法, 完成了我国 41 个重点盆地(群)的煤层气资源评价, 测算煤层气地质资源量 $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 技术可采资源量 $12.50 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 3)。

表3 中国重点盆地(群)煤层气资源量
Table 3 Coalbed methane resources of key basins in China

大区	盆地(群)个数	产层时代	产层煤阶	地质资源量/ 10^{12} m^3	可采资源量/ 10^{12} m^3
东北	11	新生代、中生代	低、中、高煤阶	2.91	1.29
华北	12	中生代、古生代	低、中、高煤阶	13.91	5.07
西北	7	中生代、古生代	低、中、高煤阶	7.77	3.83
南方	10	新生代、中生代、古生代	低、中、高煤阶	5.46	2.31
青藏	1	古生代	高煤阶	0.004 4	—
合计	41	新生代、中生代、古生代	低、中、高煤阶	30.05	12.50

2.2.1 大区分布

本次资源评价将全国划分为5个大区:东北、华北、西北、南方和青藏。华北地区煤层气资源最丰富,可采资源量 $5.07 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比40.6%;第2为西北地区,可采资源量 $3.83 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比30.6%;第3为南方地区,可采资源量 $2.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比18.5%;第4为东北地区,可采资源量 $1.29 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比10.3%;青藏地区由于地表条件差,本次未计算可采资源量。

2.2.2 盆地分布与盆地类型

鄂尔多斯盆地资源最丰富,可采资源量 $2.80 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比22.4%;其次为沁水盆地,可采资源量 $1.53 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比12.2%;第3为滇东黔西盆地(群),可采资源量 $1.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比11.0%。列前10位的盆地(群)累计煤层气可采资源量 $10.98 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比87.8%,是我国煤层气开发的主战场(图6)。我国煤层气盆地主要包括3大类型:克拉通盆地、前陆盆地和裂谷盆地,其中克拉通盆地资源最丰富,可采资源量 $7.36 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比58.9%;其次为前陆盆地,可采资源量 $3.83 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比30.6%;裂谷盆地资源最少,可采资源量 $1.31 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比10.5%。

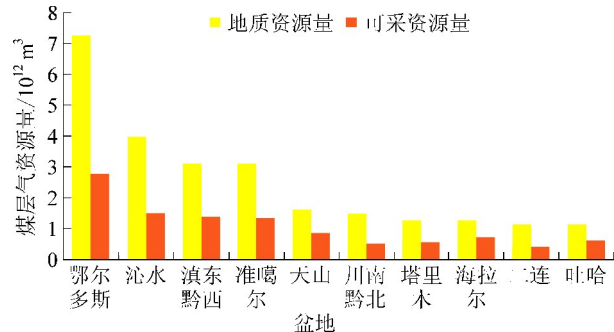


图6 中国重点盆地(群)煤层气资源分布

Fig.6 Distribution of coalbed methane resource of main basins in China

2.2.3 产层时代分布

我国煤层气主要富集在中、古生代。中生代资源最丰富,可采资源量 $6.72 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比53.8%;其次为古生代,可采资源量 $5.76 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比46.1%;

新生代最少,可采资源量 $0.01 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比0.1%。

2.2.4 煤阶分布

我国煤层气可采资源量在煤阶上大致低、中、高煤阶各占1/3。低煤阶可采资源量 $4.59 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比36.7%;中煤阶可采资源量 $4.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比34.8%;高煤阶可采资源量 $3.56 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占比28.5%。

3 美国煤层气开发现状与趋势分析

虽然中美煤层气的地质条件和分布特征存在较大差异,但是美国煤层气产业发展历程和趋势对我国煤层气的发展具有重要的借鉴意义。美国煤层气产业发展经历了4个阶段:第1阶段(1975—1980年),理论探索期;第2阶段(1981—1988年),技术攻关期;第3阶段(1989—2008年),规模应用期;第4阶段(2009—现今),萎缩衰退期(图7)。

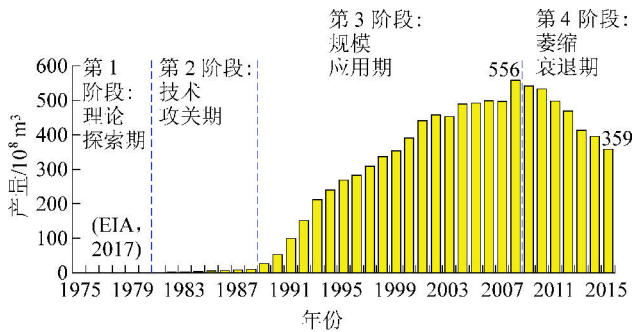


图7 美国煤层气产业发展历程

Fig.7 Development history of American coalbed methane industry

1980年12月,美国第1个煤层气田投入开发,2008年高峰产量达到 $556 \times 10^8 \text{ m}^3$,其后产量持续下降^[6]。综合分析认为,美国煤层气产量先扬后抑主要受以下3个因素影响:

1) 早期政府提供了有效的政策扶持,极大激励了煤层气的商业开发。美国煤层气勘探开发实践证明,财税政策是成功推行煤层气资源商业化开采的重要因素。例如,美国1980年出台的《原油暴利税法》规定,从1980年起,美国本土钻探的非常规天然

气可享受每桶油当量3美元的补贴,而1980年美国平均油价为每桶21.59美元,该政策后来又两次延期至1992年;1990年的《税收分配的综合协调法案》和1992年的《能源税收法案》均扩展了非常规能源的补贴范围;1997年颁布的《纳税人减负法案》延续了对非常规能源的税收补贴政策;2005年出台的《能源政策法案》规定,增加了对非常规油气开发的补贴力度,2004年全美非常规油气生产补贴约6亿美元,2007年扩大到45亿美元,对煤层气等非常规能源的开发起到了极大的促进作用^[24-26]。除联邦政府出台的一系列产业政策外,拥有非常规油气资源的州政府也相继颁布了一些鼓励政策。这些补贴政策与联邦政府的政策并不冲突,对非常规油气资源的开发起到了推波助澜的作用。另外,在20世纪90年代后期,美国还专门设立了非常规油气资源研究基金,为煤层气等非常规资源的开发提供了有力的科技支撑^[27]。

2)后期单井平均日产量持续降低,经济效益下滑。20世纪90年代中后期,圣胡安盆地的规模开发使得美国煤层气单井平均日产量达到高峰,超过 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;其后随着其他盆地的规模开发,煤层气井数迅速从90年代末的不足10000口增至2008年的近40000口,年产量大幅增长,但单井平均日产量却大幅降低至2008年的不足 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,经济效益下降^[12]。

3)天然气价格大幅下跌,投资动力锐减。随着页岩气产量大幅提升和经济危机爆发,美国天然气价格大幅降低,天然气井口价由2008年7月的0.38美元/ m^3 锐减至2009年9月的0.11美元/ m^3 ,虽然后期有所回调,但最高仅0.20美元/ m^3 ,最低下探至0.07美元/ m^3 ^[28]。天然气价格的大幅递减使得投资煤层气的资金锐减,新增钻井数急剧下降,年产量开始持续减少。

2015年美国煤层气产量 $359 \times 10^8 \text{ m}^3$,占其天然气总产量的3.7%。2016年美国能源信息署(EIA)预测,未来煤层气产量占比将继续减小,页岩气产量占比将持续增加,致密砂岩气产量占比维持稳定,2020年煤层气产量占比降至3.5%,2030年煤层气产量占比降至2.9%^[29]。

4 煤层气开发启示

4.1 我国煤层气开发利用前景展望

1)煤层气是我国天然气生产的重要补充。美

国煤层气产业发展历程和趋势表明,在有效的政策扶持下,煤层气产量可以有较大的规模。我国煤层气资源丰富,据国土资源部2015年全国动态评价最新成果:我国天然气地质资源量 $242.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,煤层气占比12.4%;天然气技术可采资源量 $84.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,煤层气占比14.8%。近几年煤层气产量有一定的增长,2016年煤层气产量约 $45 \times 10^8 \text{ m}^3$,占我国天然气总产量的3.3%。因此,煤层气具有良好的资源基础,也形成了一定的产量规模,可以作为我国天然气生产的重要补充。

2)煤层气发展要坚持井下抽采和地面开发“两条腿走路”。煤层气作为我国非常规油气资源中的一个重要组成部分,具有形成规模产业发展的诸多有利条件,对优化能源结构,实现科学、绿色、低碳能源战略具有重要作用。同时,煤层气是煤炭的伴生资源,煤矿区如不尽快大规模开发利用煤层气,这部分煤层气将随煤炭开采而逸散到大气中,资源浪费极大,也给环境保护造成巨大压力。此外,煤层气开发利用是降低煤矿瓦斯事故的重要途径。在过去相当长的一段时期内,我国煤矿一次死亡10人以上的特大事故中,瓦斯事故占到80%以上,造成很大的人员伤亡、经济损失和社会负面影响。因此,对煤层气开发采取集井下、地面于一体的“两条腿”开发模式,并通过不断努力进一步发展成为以地面预抽或开发为主,辅以井下抽采,实现煤层气的有序开发利用^[30]。

3)加强煤层气技术与管理创新。虽然我国煤层气地质条件不如美国优越,但是也建成了沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘2个千亿方煤层气产业基地。当前的主要问题是成本高、产量低,部分企业寄希望于国家加大补贴和政策扶持力度。实践证明,等、靠、要绝对不行。应该借鉴我国页岩气开发的成功经验,加强技术和管理创新,研发一套适合中国国情的核心技术和装备,不断优化管理机制,降本增效,开创煤层气发展的新天地^[31]。

4)加快油气矿权体制改革和管网第3方准入。开展煤层气勘探开发首先需要获得矿权,而我国煤层气的有利区大多分布在煤炭企业矿权区。以前由于国家能源供应需要,煤炭矿权区不断扩大,使得近10年很少新增煤层气矿权区。近2年,国家持续加大供给侧结构性改革力度,压减煤炭产量,并着手油气行业矿权体制改革,应该借此良机,积极引入社会资本,新增一批煤层气矿权区,为煤层气产业发展奠定坚实基础^[32]。另外,部分企业生产的煤层气由于

运输渠道不畅,不得不白白燃烧,因此需要加快实现天然气管网的第3方准入,使得中小企业生产的煤层气资源合理入网销售^[33]。

5)严格和规范的监管是可持续发展的保障。引入社会资本,放开煤层气勘探开发业务,一定要强化和规范监管。开发主体多、开发节奏快,一定要避免走“先污染、后治理”的老路。“既要金山银山,也要绿水青山”,环境问题应作为煤层气的监管重点。借鉴美国环境监管方面的成功经验,结合我国特点,及时出台有效的法律法规和管理办法,积极推进生态文明建设,建立全生命周期的环境监管体系,做到严格监管,保证有序开发。另外,需要规范监管体系,避免个别地方政府的短视行为,给各类煤层气企业创造公平、公正的发展环境。

4.2 我国煤层气产量发展规模预测

根据我国煤层气地质条件、资源潜力、勘探形势及技术发展趋势,综合预测未来我国地面开采煤层气存在3种发展情景(表4):①低情景,维持现有技术水平,增加沁水和鄂尔多斯盆地的煤层气矿权区,产量缓慢上升;②中情景,技术水平有大幅提升,实现了提高产量、降低成本,在沁水和鄂尔多斯盆地推广应用,产量较快增长;③高情景,不仅技术水平大幅提升,而且在新疆、滇黔桂等地区发现了新的产能建设区,产量大幅增长。

表4 中国煤层气地面开采量规模预测

Table 4 Surface development forecasting production of coalbed methane in China

情景	产量与占比	2020年	2025年	2030年
低情景	年产量/ 10^8 m^3	60	80	100
	天然气总产量占比/%	4	4.5	5
中情景	年产量/ 10^8 m^3	80	100	120
	天然气总产量占比/%	4.5	5	5.5
高情景	年产量/ 10^8 m^3	100	150	200
	天然气总产量占比/%	5.5	6.5	8

因此,我国煤层气2030年生产规模有望达到 $(100 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3$,约占届时我国天然气总产量的5%~8%,成为我国天然气生产的重要补充。

5 结 论

1)美国含煤盆地构造相对简单,主聚煤期为宾夕法尼亚纪、白垩纪和古近纪,煤岩以中、低煤阶为主,煤层气产层渗透率高,普遍大于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主

体为常压-超压。

2)中国含煤盆地(群)构造复杂,主聚煤期为晚石炭世-早二叠世、晚二叠世、早-中侏罗世和早白垩世,煤岩低、中、高煤阶均有分布,煤层气产层渗透率低,普遍小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,绝大多数呈现低压。

3)美国煤层气可采资源平面上主要分布在落基山地区,主要富集在森林城、粉河和圣胡安3个盆地,盆地类型主体为前陆盆地,时代上新生代、中生代、古生代各占1/3,煤阶上中、低煤阶各占1/2,高阶煤资源极少。

4)中国煤层气可采资源平面上主要分布在华北地区,主要富集在鄂尔多斯、沁水等10个盆地,盆地类型主体为克拉通盆地,时代上中、古生代各占半边天,新生代资源极少,煤阶上高、中、低阶煤各占1/3。

5)中国煤层气发展要坚持井下抽采和地面开发“两条腿走路”,近期需要加快油气矿权体制改革和第3方管网准入,同时加强技术和管理创新及严格监管,未来地面开发煤层气年产量可望达到 $(100 \sim 200) \times 10^8 \text{ m}^3$,成为天然气生产的重要补充。

致谢:研究过程中,得到郭本广、赵庆波、王少春、朱杰、李富兵、李树新、门相勇等专家和同事的大力支持与帮助,同时,中石油、中石化、中联煤层气、中国矿业大学(北京)等也提供了大量基础数据并参与了国内煤层气资源评价工作,特致以真诚的感谢。

参考文献(References):

- [1] 穆福元,仲伟志,朱杰,等.中国煤层气产业进展与思考[M].北京:石油工业出版社,2017:89.
- [2] ROGNER H. An assessment of world hydrocarbon resources[J]. Annual Review Energy the Environment, 1997, 22(1): 217-262.
- [3] MASTALERZ M. Coal bed methane: reserves, production and future outlook[M]. 2nd Edition. New York: Elsevier, 2014: 45-158.
- [4] International Energy Agency. Unconventional gas production database [EB/OL]. (2017-03-01) [2017-08-27]. <http://www.iea.org/ugforum/ugd/>.
- [5] National Energy Board. Canada's Energy Future 2016 Update[R]. Canada: National Energy Board, 2016.
- [6] US Energy Information Administration. US Coalbed methane production. [EB/OL]. (2016-12-14) [2017-08-27]. https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngr52nus_1a.htm.
- [7] 赵庆波,孙粉锦,李五忠.煤层气勘探开发地质理论与实践[M].北京:石油工业出版社,2011:1-11.
- [8] EAST J A. Coal fields of the conterminous United States-national coal resource assessment updated version; U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1205 [EB/OL]. (2012-12-05) [2017-

- 08-27].<https://pubs.usgs.gov/of/2012/1205/>.
- [9] 李景明,巢海燕,李小军,等.中国煤层气资源特点及开发对策[J].天然气工业,2009,29(4):9-13.
LI Jingming, CAO Haiyang, LI Xiaojun, *et al.* Characteristics of coalbed methane resource and the development strategie [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4):9-13.
- [10] 王博洋,秦勇,申建,等.我国低煤阶煤层气地质研究综述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.
WANG Boyang, QINYong, SHEN Jian, *et al.* Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):170-179.
- [11] 卢军灵,李淑畅.寺河矿区煤层气藏富集主控地质因素研究[J].中州煤炭,2015(11):118-121.
LU Junling, LI Shuachang. Study on enrichment controlling geological factors of CBM reservoir in Sihe Mine [J]. Zhongzhou Coal, 2015(11):118-121.
- [12] THAKUR P, SCHATZEL S, AMINIAN K. Coalbed methane from prospect to pipeline [M]. Boston: Elsevier Inc, 2014: 31-61, 311-349.
- [13] 龙胜祥,李辛子,叶丽琴,等.国内外煤层气地质对比及其启示[J].石油与天然气地质,2014,35(5):696-703.
LONG Shengxiang, LI Xinzi, YE Liqin, *et al.* Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):696-703.
- [14] 宋岩,柳少波,马行陟,等.中高煤阶煤层气富集高产区形成模式与地质评价方法[J].地学前缘,2016,23(3):1-9.
SONG Yan, LIU Shaobo, MA Xingzhi, *et al.* Research on formation model and geological evaluation methon of the middle to high coal rank coalbed methane enrichment and high production area [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3):1-9.
- [15] 王哲,徐礼贵,付晶,等.鄂尔多斯盆地东缘BD区块煤层气富集沉积控制作用及有利区预测[J].天然气地球科学,2016,27(2):387-396.
WANG Zhe, XU Ligui, FU Jing, *et al.* Sedimentary controls of coalbed methane accumulation and prediction of favorable area in BD area, eastern margin of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2):387-396.
- [16] 李勇,曹代勇,魏迎春,等.准噶尔盆地南缘中低煤阶煤层气富集成藏规律[J].石油学报,2016,37(12):1472-1482.
LI Yong, CAO Daiyong, WEI Yingchun, *et al.* Middle to low rank coalbed methane accumulation and reservioring in the southern margin of Jungger Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12):1472-1482.
- [17] US Energy Information Administration. Chapter 9 Oil and gas supply module [EB/OL]. (2017-01-01) [2017-08-27]. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/oilgas.pdf>.
- [18] US Energy Information Administration. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2016 [R]. Washington: U. S. Energy Information Administration, 2017.
- [19] US Geological Survey. Assessment of undiscovered oil and gas resources in the Paradox Basin Province, Utah, Colorado, New Mexico, and Arizona, 2011 [EB/OL]. (2016-11-29) [2017-08-27]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3031/FS12-3031.pdf>.
- [20] US Geological Survey. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Bighorn Basin Province, Wyoming and Montana, 2008 [EB/OL]. (2016-11-29) [2017-08-27]. https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3050/pdf/FS08-3050_508.pdf.
- [21] US Geological Survey. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Williston Basin Province of North Dakota, Montana, and South Dakota, 2008 [EB/OL]. (2016-11-29) [2017-08-27]. https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3092/pdf/FS08-3092_508.pdf.
- [22] US Geological Survey. Assessment of undiscovered oil and gas resources in tertiary strata of the Gulf Coast, 2007 [EB/OL]. (2016-11-29) [2017-08-27]. https://pubs.usgs.gov/fs/2007/3006/FS07-3006_508.pdf.
- [23] PASHIN J C. Stratigraphy and structure of coalbed methane reservoirs in the United States: an overview [J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4):209-240.
- [24] SHERLOCK M F. Energy tax policy: historical perspectives on and current status of energy tax expenditures [R]. Washington D C: U S Senate, 2011.
- [25] US Department of energy. Public law 109-58, energy policy act of 2005 [R]. Washington D C: US Congress, 2005.
- [26] 瞿静川,徐安宁,段凌云,等.促进致密油非常规油气资源开发的财税政策研究[J].经济研究参考,2015,26(33):13-20.
QU Jingchuan, XU Anning, DUAN Lingyun, *et al.* Research on fiscal and tax policies to promote the development of tight oil and other unconventional oil & gas resources [J]. Review of Economic Research, 2015, 26(33):13-20.
- [27] 赵国泉.国外页岩气产业政策及其对我国的启示[J].中国煤炭,2013,39(9):23-27.
ZHAO Guoquan. Foreign shale gas industrial policies and their enlightenment to our country [J]. China Coal, 2013, 39(9):23-27.
- [28] US Energy Information Administration. US Natural gas wellhead price [EB/OL]. (2017-04-28) [2017-08-27]. <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/n9190us3m.htm>.
- [29] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2016 with projections to 2040 [R]. Washington: EIA, 2016.
- [30] 穆福元,仲伟志,朱杰,等.中国煤层气产业进展与思考[M].北京:石油工业出版社,2017:128-134.
- [31] 王志刚.涪陵焦石坝地区页岩气水平井压裂改造实践与认识[J].石油与天然气地质,2014,35(3):425-430.
WANG Zhigang. Practice and cognition of shale gas horizontal well fracturing stimulation in Jiaoshiba of Fuling Area [J]. Oil & gas geology, 2014, 35(3):425-430.
- [32] 中共中央国务院.关于深化石油天然气体制改革的若干意见 [EB/OL]. (2017-05-21) [2017-08-27]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/21/content_5195683.htm.
- [33] 国家发展和改革委员会,国家能源局.能源发展“十三五”规划 [EB/OL]. (2016-12-26) [2017-08-27]. http://www.nea.gov.cn/135989417_14846217874961n.pdf.