

中国煤层气勘探开发战略接替区优选

邵龙义¹ 侯海海¹ 唐跃² 鲁静¹ 邱海峻² 王学天¹ 张家强²

1.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 2.国土资源部中国地质调查局油气资源调查中心

邵龙义等.中国煤层气勘探开发战略接替区优选.天然气工业,2015,35(3):1-11.

摘要 现阶段中国煤层气探明储量及产量的增长主要依靠沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘等几个煤层气产业基地,急需寻找一批勘探开发战略接替区。为此,基于对我国煤层气资源、生储、保存、开发基础等条件的研究成果,总结了影响中国煤层气勘探开发的 8 个普遍因素(资源丰度、煤层厚度、含气量、原始渗透率、埋藏深度、水文地质条件、煤系沉积环境和地形地貌)和 4 个关键因素(成因类型、稳定性、后期储层改造和煤体结构破坏程度)。对比分析结果表明:中国西北低煤阶区、东北中低煤阶老工业区和西南中高煤阶构造复杂区,是我国继华北地区之后煤层气产业持续发展的重点区;上述 3 个重点区的煤层气赋存主控因素分别是成因类型+煤层稳定性、成因类型+岩浆侵入对煤储层改造、煤层稳定性+煤体结构破坏程度,并以此建立了中国煤层气勘探开发战略接替区的优选评价体系。采用多层次模糊数学的方法对上述 3 个重点区的 15 个区块进行了评价,共优选出了 8 个有利接替区和 7 个较有利接替区,预测煤层气地质资源总量达 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 8 个有利区分别为西北的准东煤田五彩湾—大井地区、吐哈煤田哈密—大南湖地区和陇东煤田,东北的依兰煤田、鹤岗煤田和珲春煤田,西南的川南煤田和水城煤田,它们是近期可以进行煤层气勘探和试验开发的目标区。

关键词 中国 煤层气 勘探开发 战略接替区 有利区优选 勘探方向 主控因素 多层次模糊数学

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.03.001

Selection of strategic relay areas of CBM exploration and development in China

Shao Longyi¹, Hou Haihai¹, Tang Yue², Lu Jing¹, Qiu Haijun², Wang Xuetian¹, Zhang Jiaqiang²
(1.College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2.Oil & Gas Resource Survey Center, China Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Beijing 100029, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 35, ISSUE 3, pp.1-11, 3/25/2015. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Currently, the increase in proved reserves and production of coalbed methane mainly comes from several coalbed methane bases in the southern Qinshui Basin and the eastern margin of the Ordos Basin, so there is an urgent need of finding a batch of exploration and development strategic relay areas. Based on the research results in the resources, coal reservoir property, preservation conditions, and development conditions of CBM in China, eight general factors (resource abundance, coalbed thickness, gas content, original permeability, burial depth, hydrogeologic conditions, coalbed depositional environment and landforms) and four critical factors (origin type, stability type, later reservoir reformation and damage degree of coal structure) affecting the CBM reservoir-forming and development conditions were summarized. Comparison shows that the low coal rank area in the northwest, medium-low coal rank area in the northeast, and high coal rank complex structure area in the southwest of China are major relay areas of coalbed methane after northern China areas. Key factors affecting CBM enrichment in the three areas are genetic type & stability of coal seams, genetic type & reconstruction of the reservoir by volcanic intrusion, and stability of coal seams & damage degree of coal structure respectively. Based on these affecting factors, a system for selection and evaluation of relay strategic areas of CBM development has been established. Fifteen blocks in the above three areas have been evaluated by use of multi-layered fuzzy mathematics, out of which eight favorable areas and seven fairly favorable areas have been picked out, with total predicted CBM geological resources of 1.8 trillion m^3 . The eight favorable areas include the Wucuiwan - Dajing coal exploration area in the Zhundong (eastern Junggar Basin) coalfield, Hami-Dananhu mining area in Turpan-Hami Basin, Longdong (eastern Ningxia) coalfield, Yilan coalfield and Hegang coalfield in Heilongjiang Province, the Hunchun coalfield in Jilin Province, the southern Sichuan coalfield, and the Shuicheng coalfield in Guizhou Province. These favorable areas are CBM gas exploration and pilot development target areas in the near future.

Keywords: China; Coalbed methane; Exploration and development; Strategic relay area; Selection of CBM favorable areas; Exploration direction; Main controlling factors; Multi-layered fuzzy mathematics

基金项目:国家科技重大专项(编号:2011ZX05033-002)、中国地质调查局科研项目(编号:1212011220794)。

作者简介:邵龙义,1964年生,教授,博士生导师,《Natural Gas Industry B》编委;1989年毕业于中国矿业大学(北京)并获博士学位;主要从事沉积学和煤层气地质理论及应用的的教学和研究工作。地址:(100083)北京市海淀区学院路丁 11 号中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院。E-mail:shaol@cumt.edu.cn

1.1 西北低煤阶区

西北低煤阶区指的是贺兰山—六盘山以西的我国西北赋煤区,包括塔里木含气盆地群、天山含气盆地群、准噶尔含气盆地群、吐哈含气盆地群、柴达木含气盆地群以及河西走廊含气盆地群等。

早—中侏罗世成煤作用主要发生在我国西北地区,该区合计煤炭资源量占全国总量的 35.5%,煤层气地质资源量为 $10.35 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1],新疆准噶尔、吐哈、塔里木等盆地作为发育低煤阶煤储层典型的大型内陆盆地,含煤岩系形成于河流—三角洲—湖泊沉积体系,煤层层数多,煤层厚度大,其中在吐哈盆地沙尔湖凹陷煤层最大累计厚度达 217.7 m,最大单层煤厚逾 100 m^[9-11]。煤变质程度总体较低,主要以长焰煤为主,宏观煤岩类型以光亮煤和半亮煤为主,其次为半暗煤;煤岩成分以亮煤为主夹镜煤及暗煤,显微煤岩组分中镜质组含量介于 45.1%~88.8%,惰质组含量介于 7.0%~9.3%,壳质组含量介于 0~9.3%,煤层含气量变化较大,一般在 $0.02 \sim 12.10 \text{ m}^3/\text{t}$ 的范围内变化,甲烷浓度介于 1.67%~93.00%^[12-13]。

1.2 东北中低煤阶老工业区

东北老工业区指大兴安岭以东的地区,包括黑龙江、吉林和辽宁三省,含煤地层为上侏罗统、下白垩统和古近系,以中低煤阶为主。该地区煤炭开采历史悠久,环境破坏较严重且能源供需关系日益紧张,亟须对这些煤矿区及其外围实施资源和产业转型。

东北断陷陆相盆地聚煤期主要以早白垩世和古近纪为主,该地区含煤岩系沉积体系包括冲积扇—河流—三角洲—湖泊等,煤层厚度一般在 $0.7 \sim 80.0 \text{ m}$,煤层含气量变化范围介于 $1.5 \sim 18.0 \text{ m}^3/\text{t}$,甲烷浓度介于 67%~94%,含气饱和度介于 27%~79%,煤层气地质资源量约为 $0.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1],局部煤层气资源丰度较高,如抚顺古近纪煤田煤层气资源丰度达 $6.95 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[14-15]。煤类以褐煤、长焰煤、气煤和焦煤为主,宏观煤岩类型以半亮煤和半暗煤为主,暗淡型和光亮型次之;煤岩成分以镜煤和亮煤为主,显微煤岩组分中镜质组含量介于 64.0%~89.6%,壳质组含量介于 0~6.5%^[16-17]。

1.3 西南中高煤阶构造复杂区

西南中高煤阶构造复杂区位于龙门山断裂和金沙江—红河断裂带以东,包括我国云南、贵州、四川和重庆等地,煤层气含气盆地群则主要包括川渝含气盆地群、黔北含气盆地群、滇东黔西含气盆地群以及渡口

(现攀枝花)楚雄含气盆地群等,煤层气成藏条件复杂,构造煤较为发育,勘探难度相对而言更大,但仍然是我国西南地区煤层气勘探开发的重点地区。

该地区煤层气地质资源量约 $3.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1,18],含煤岩系以上二叠统龙潭组为主,东西向煤系岩相特征由海陆过渡相石灰岩到陆相碎屑岩演变,沉积体系以碳酸盐岩台地—潮坪—泻湖—河流—三角洲为主,煤层厚度一般介于 $0.5 \sim 50.0 \text{ m}$,贵州织纳煤田实测煤层含气量可高达 $23.52 \text{ m}^3/\text{t}$,含气饱和度介于 54.98%~147.14%,甲烷浓度介于 55.00%~87.11%^[7,19]。该地区煤变质程度较高,以贫煤、瘦煤和无烟煤为主,宏观煤岩类型以半亮煤和半暗煤为主,暗淡煤次之;显微煤岩组分中镜质组含量介于 41.7%~96.0%,壳质组含量介于 1.8%~16.9%^[7,18]。由于该地区煤层具有“层薄且层数多”的特点,有条件进行煤层气、页岩气、致密砂岩气等“煤系气”共同勘探开发的工程实践^[20-21]。

2 煤层气战略选区评价指标体系

2.1 评价参数的确定

对于煤层气的选区评价指标,资源丰度、煤层厚度、含气量、渗透率、埋藏深度和地形地貌等条件作为普遍影响因素是被广泛认可的^[22-25]。同时,孙平等^[26]通过总结我国低煤阶煤层气的赋存状态和成藏条件,认为存在 3 种煤层气成藏富集模式,即深部承压式超压模式、盆缘缓坡晚期生物气模式和构造高点常规圈闭水动力模式;王勃等^[27]结合阜新盆地王营—刘家区煤层气成藏富集条件,提出了水动力—岩墙封堵混合成因裂隙型煤层气富集模式。由此可见,水动力条件也是关乎煤层气成藏的普遍影响因素。含煤岩系沉积环境不仅控制着煤层的聚集条件和分布特征,而且还决定着成煤后围岩岩相组成,因而也就影响到煤层气形成的物质基础及其聚集和保存条件^[28]。因此将各接替区成煤环境也作为普遍影响因素之一来考虑。

根据上述 3 个重点区煤层气赋存主控因素和成藏特征,认为影响西北低煤阶煤层气成藏富集的关键因素是次生生物气和煤储层的稳定性;东北中低煤阶老工业区关键要素不仅包括次生生物气,而且燕山期岩浆活动对煤储层的改造同样也具有关键作用;西南地区多为中高煤阶煤储层,生气量大,吸附性强,所以寻求高渗透区是其关键,而且还应该更注重煤储层稳定性以及煤体结构的破坏程度。需要指出的是,普遍因素

和关键因素是基于区域煤层气成藏富集特点而提出的,而关键因素作为对普遍因素的补充,可能在某些评价接替区并不完全适用。因此两者在评价参数的赋值上并无区别,只是在指标权重处理方面有所差异体现。

2.2 评价参数级别的划分与赋值

针对上述 3 个重点区煤层气地质条件和主控因素,从资源条件、生储条件、保存条件和开发基础条件等方面出发,总结了影响各个地区煤层气成藏赋存的普遍因素和关键因素。结合文献调研结果^[23-25,27,29-31],对其进行综合研究,建立了煤层气战略选区评价指标体系(表 1)。

2.2.1 评价指标级别的划分

西北地区煤层气地质特征包括含煤面积大、煤层厚、含气量低、渗透率高和煤层稳定性较差等;东北地区以剩余煤层气资源量少、中厚煤层、中低含气量和中高渗透率为特征;而西南地区则以丰度高、煤层多、煤厚薄、渗透性低和煤体结构破坏程度高为特征。因此西北(东北)和西南地区资源丰度分别以 $0.5 \times 10^8 \sim$

$1.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $1.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 作为不利、较有利和有利区的界限;煤层厚度分别以 5.0~15.0 m、1.5~3.0 m 作为不利、较有利和有利区的界限;含气量分别以 $2 \sim 4 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $5 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ 作为不利、较有利和有利区的界限;原始渗透率分别以 0.5~1.5 mD、0.1~0.5 mD 作为不利、较有利和有利区的界限(表 1)。

煤层稳定性以煤层可采系数(K_m)和煤厚变异系数(ζ)来综合定量表征,西北、东北和西南 3 个重点区分别以 $\zeta \leq 30\%$ 、 $K_m \geq 0.9$ 为有利区,以 $30\% < \zeta < 70\%$ 、 $0.7 < K_m < 0.9$ 为较有利区,以 $\zeta \geq 70\%$ 、 $K_m \leq 0.7$ 为不利区。需要说明的是,薄煤层以煤层可采系数为主要指标,煤厚变异系数为辅助指标;中厚煤层以煤层厚度变异系数为主要指标,煤层可采系数为辅助指标^[35]。

煤层埋深作为影响煤层气保存和开发的基本条件,现阶段一般以小于 1 000 m 作为有利区域;中低煤阶煤层气的富集区一般位于水文地质条件在低矿化度(小于 2 000 mg/L)和弱径流的区域,中高煤阶煤层气的富集区则位于高矿化度(超过 10 000 mg/L)和弱径

表 1 中国煤层气战略选区评价指标体系表

	参数名称	地区	参数含义	有利	较有利	不利
8 个普遍因素	资源丰度/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	A、B C	煤层气资源丰度	≥ 1.0 ≥ 2.0	0.5~1.0 1.0~2.0	≤ 0.5 ≤ 1.0
	煤层厚度/m	A、B C	煤层单层厚度	≥ 15.0 ≥ 3.0	5.0~15.0 1.5~3.0	≤ 5.0 ≤ 1.5
	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	A、B C	原地吨煤含气量	≥ 4 ≥ 8	2~4 5~8	≤ 2 ≤ 5
	原始渗透率/ mD	A、B C	表征煤层孔裂隙、 煤储层渗透性	≥ 1.5 ≥ 0.5	0.5~1.5 0.1~0.5	≤ 0.5 ≤ 0.1
	埋藏深度/ m	A、 B、C	埋深太浅甲烷逸散严重, 埋深太深渗透性和吸附性差	$\leq 1\ 000$	1 000~1 500	$\geq 1\ 500$
	水文地质条件/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	A、B C	水动力强弱和矿化度高低 高矿化度(大于 10 000), 低矿化度(小于 2 000)	低矿化度、弱径流 高矿化度、弱径流— 滞留、简单易降压	中低矿化度、弱径流—径流 中高矿化度、弱径流—径 流、排水量较大	高矿化度、水动力径流 低矿化度、水动力径流、 排水量大
	煤系沉积环境	A、B、C	含煤建造沉积体系, 煤层围岩岩性及组合类型	障壁海岸体系、 滨海三角洲、湖泊体系	无障壁海岸体系、 河流沉积体系	浅海、冲积扇体系
	地形地貌	A、B、C	表征煤层气开发的基础条件	平原、黄土塬	丘陵、戈壁	山地、沙漠
4 个关键因素	成因类型	A、B	是否有次生生物气补给和 油型气混入	有	暂未发现	无
	煤层稳定性	A、C	煤层可采指数、煤厚变异系数	$\zeta \leq 30\%$ 、 $K_m \geq 0.9$ 稳定—较稳定煤层	$30\% < \zeta < 70\%$ 、 $0.7 < K_m < 0.9$ 较稳定—不稳定煤层	$\zeta \geq 70\%$ 、 $K_m \leq 0.7$ 不稳定—极不稳定煤层
	后期储层改造 (岩浆热变质)	B	是否有岩床和岩墙对煤系 地层的侵入和改造	有	暂未发现	无
	煤体结构破坏程度	C	表征地应力、渗透性和 构造复杂程度等参数	构造简单,煤体结构 保持完整或轻度破坏	少量断层,煤体结构中 等破坏	断层发育,煤体结构 严重破坏

注:A代表西北低煤阶区;B代表东北老工业区;C代表西南构造复杂区

流一滞留的区域;媒体结构的破坏程度作为影响煤储层渗透性和后期开采的重要因素,构造简单、媒体结构保持完整或轻度破坏作为有利区的首选条件^[31]。

含煤岩系沉积环境通过聚煤特征、含煤岩系的岩性、岩相组成及其空间组合在一定程度上控制着煤层气的保存条件^[32],对于障壁海岸体系、滨海三角洲和湖泊体系的煤层气封盖能力较强,而无障壁海岸体系和河流沉积体系的煤层气封盖能力一般,冲积扇沉积体系的封盖能力最差。

对于表征煤层气开发基础条件的地形地貌而言,从地面投资成本以及勘探开发难易程度出发,将平原和黄土塬地区作为有利地区,丘陵和戈壁作为较有利区,山地和沙漠作为不利区;对于是否有次生物气补给、油型气混入和岩浆岩对煤储层的改造,以“有”为有利,“暂未发现”为较有利,“无”为不利来区分。

2.2.2 评价指标处理方法和赋值

笔者将量化指标分为了两类,一类是正相关指标,即指标值越大对评价目标层的贡献越大,包括资源丰度、煤层厚度、含气量和原始渗透率等;另一类是中性指标,即中间指标值对于评价目标层的贡献最大,如埋藏深度,分别对这两类指标进行了归一化处理。

1)正相关指标处理函数

u_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\}} \tag{1}

式中 u_{ij} 为标准化后的值; x_{ij} 为原指标值, $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$ (下同)。

2)中性指标处理函数

u_{ij} = \begin{cases} \frac{\max_i \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max_i \{x_{ij}\} - v_j} & x_{ij} > v_j \\ \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{v_j - \min_i \{x_{ij}\}} & x_{ij} < v_j \\ 1 & x_{ij} = v_j \end{cases} \tag{2}

式中 v_j 表示中性指标的理想值,本次埋藏深度的理想值取 500~800 m。

而对于难以定量的指标,如水文地质条件、煤系沉

积环境、地形地貌等,进行定性评判赋值,即对“有利”参数赋值 0.7~1.0 分,“较有利”赋值 0.3~0.7 分,“不利”赋值 0~0.3 分,同时对于少数暂无数据的参数赋值 0.3~0.4 分。

3 煤层气战略选区评价指标定量排序

在进行煤层气选区评价时,往往存在着评价参数交叉重叠的情况,如资源丰度、含气量和煤层厚度等指标相互交叉,水文地质条件又会影响到含气量和成因类型等参数。因此需对各评价指标的权重进行量化处理,笔者采用层次分析法对各指标进行定量排序,由此建立煤层气战略选区的评价决策系统。

根据多层次模糊数学的原理和算法^[33-34],建立了评价问题的递阶层次结构。考虑到煤层气在生成、运移、富集等成藏过程中的诸多影响因素以及各因素间的相互关系,总结归类并划分出资源条件、生储条件和保存条件 3 个一级评价指标。每个评价指标对于煤层气开发的影响又由多个次级的参数决定,根据这些参数的特征将其归入 3 个一级评价指标(表 2)。

其次,在遵循客观性和评价主体的特殊性两大原则的基础上,邀请有关专家对指标进行两两比较打分,建立同指标参数间的判别矩阵。然后,利用 Matlab 软件计算判别矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量,得到各指标的权重(表 3)。为保证计算结果的可信度和相对准确性,避免一些不合理的判别矩阵可能引起的失误,故对判别矩阵进行一致性检验。本次采用随机一致性比率(C.R.)来判别矩阵的一致性,其为一致性指标(C.I.)与同阶平均随机一致性指标(R.I.)的比值。 $C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1}$, $C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$, n 为矩阵的阶数, $R.I.$ 的值为 0.52(3 阶矩阵)和 0.89(4 阶矩阵)。如果 $C.R. < 10\%$,则认为判别矩阵具有可接受的不一致性,如果 $C.R. > 10\%$,则需要重新赋值和修正计算,直至一致性通过为止。最后,利用指标层各指标的重要性系数与准则层对应的重要性系数加权综合,得到指标层相对于目标层的权重(表 4)。

表 2 煤层气勘探开发选区指标体系表

评价指标	煤层气战略选区评价体系(A)				
	资源因素(B ₁)	生储因素(B ₂)			保存因素(B ₃)
		西北(B ₂)	东北(B ₂)	西南(B ₂)	
评价参数	资源丰度(C ₁₁)	原始渗透率(C ₂₁)	原始渗透率(C ₂₁)	原始渗透率(C ₂₁)	埋藏深度(C ₃₁)
	煤层厚度(C ₁₂)	煤层气成因类型(C ₂₂)	煤层气成因类型(C ₂₂)	煤层稳定性(C ₂₂)	水文地质条件(C ₃₂)
	含气量(C ₁₃)	煤层稳定性(C ₂₃)	岩浆热变质(C ₂₃)	煤体结构(C ₂₃)	煤系沉积环境(C ₃₃)

注:A 代表接替区的煤层气开发潜力,B₁、B₂、C₁₁、C₁₂等分别代表不同层次的评价指标及参数

表 3 各指标层相对于目标层的重要性系数表

评价指标及矩阵						特征向量	最大特征根($\lambda_{\max}$)	随机一致性比率(C.R.)
A—B	A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W _B	4.005 7	0.22%
	B ₁	1.00	1.20	1.50	5.00	0.369 7		
	B ₂	0.85	1.00	1.25	4.20	0.371 02		
	B ₃	0.65	0.80	1.00	3.40	0.246 2		
	B ₄	0.20	0.24	0.30	1.00	0.073 9		
B ₁ —C ₁	B ₁	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	W _B	3.033 9	3.26%	
	C ₁₁	1.00	1.20	0.90	0.336 2			
	C ₁₂	0.85	1.00	0.80	0.288 2			
	C ₁₃	1.20	1.25	1.00	0.375 5			
西北 B ₂ —C ₂	B ₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	W _B	3.026 7	2.57%	
	C ₂₁	1.00	0.70	0.90	0.280 2			
	C ₂₂	1.40	1.00	1.30	0.399 2			
	C ₂₃	1.25	0.75	1.00	0.320 6			
东北 B ₂ —C ₂	B ₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	W _B	3.006 6	0.63%	
	C ₂₁	1.00	0.85	0.70	0.277 0			
	C ₂₂	1.20	1.00	0.85	0.331 5			
	C ₂₃	1.40	1.20	1.00	0.391 5			
西南 B ₂ —C ₂	B ₂	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	W _B	3.017 3	1.66%	
	C ₂₁	1.00	0.85	0.50	0.238 7			
	C ₂₂	1.25	1.00	0.60	0.288 5			
	C ₂₃	2.00	1.62	1.00	0.472 7			
B ₃ —C ₃	B ₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	W _B	3.023 0	2.21%	
	C ₃₁	1.00	0.80	0.90	0.295 4			
	C ₃₂	1.25	1.00	1.10	0.366 4			
	C ₃₃	1.20	0.90	1.00	0.338 2			

表 4 各层次评价指标权重总排序表

评价指标	权重		评价参数	权重
资源条件	0.37		资源丰度	0.12
			煤层厚度	0.11
			含气量	0.14
生储条件	西北	0.31	原始渗透率	0.09
			煤层气成因类型	0.12
			煤层稳定性	0.10
	东北	0.31	原始渗透率	0.09
			煤层气成因类型	0.10
			岩浆热变质	0.12
	西南	0.31	原始渗透率	0.07
			煤层稳定性	0.09
煤体结构破坏程度			0.15	
保存条件	0.25		埋藏深度	0.07
			水文地质条件	0.09
			煤系沉积环境	0.09
开发基础条件	0.07		地形地貌	0.07

4 煤层气勘探开发战略接替区优选

针对上述选区评价指标体系,通过资料调研^[7,17-18,35-43]和实验测试分析等方法,对上述我国西北、东北和西南 3 个重点区 15 个煤层气勘探开发战略

接替区所需评价参数进行了统计(表 5、6、7)。结合赋值标准和各评价指标的权重,对以上 3 个重点区内的 15 个接替区进行了优选,分别以西北、东北和西南地区的赋值加权求和值 0.5、0.6 和 0.7 作为区分有利区(Ⅰ类)和较有利区(Ⅱ类)的界限。结果表明,煤层气勘探开发战略接替Ⅰ类有利区有 8 个,Ⅱ类较有利区有 7 个。其中前者包括准东煤田五彩湾一大井地区、吐哈煤田哈密一大南湖地区、陇东煤田、依兰煤田、鹤岗煤田、珲春煤田、川南煤田和水城煤田,总面积约 $1.09\times10^4\text{ km}^2$,合计煤层气地质资源量为 $1.32\times10^{12}\text{ m}^3$;后者包括三塘湖煤田条湖—马朗凹陷、库拜煤田、潮水煤田、鸡西煤田、黔西北煤田、圭山煤田和镇威煤田,总面积约 $1.01\times10^4\text{ km}^2$,合计煤层气地质资源量为 $0.48\times10^{12}\text{ m}^3$ 。Ⅰ类有利区是近期可以进行煤层气勘探和试验开发的目标区,Ⅱ类有利区可作为中远期煤层气勘探开发的优选目标的对象。

由表 5、6、7 内的各评价参数和评价结果可知,Ⅰ类有利区基本都符合表 1 内评价指标体系中的关键因素,以下对所有Ⅰ类有利区煤层气地质条件(特别是其关键因素)进行了总结和归纳。

表 5 西北低煤阶区煤层气评价参数及结果表

序号	接替区名称	含煤地层	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ · km ⁻²)	总煤层厚/m	含气量/ (m ³ · t ⁻¹)	原始渗透率/mD	有无次生生物气	煤层稳定性	埋深/m	水文地质条件	煤系沉积环境	地形地貌	赋值加权求和	综合评价等级
1	准东煤田五彩湾一大井地区	J ₁₋₂	1.04	7.0~37.0	0.2~12.1	0.09~9.33	有	较稳定—不稳定	500~1 500	弱径流—径流	辫状河三角洲—湖泊	丘陵—戈壁	0.726	I
2	三塘湖煤田条湖—马朗凹陷	J ₁₋₂	0.80	5.0~55.0	2.1~2.7	—	暂未发现	较稳定—不稳定	500~2 000	弱径流—径流	冲积扇—扇三角洲	丘陵—戈壁	0.441	II
3	库拜煤田	J ₁₋₂	0.99	5.7~61.7	3.0~7.0	—	暂未发现	不稳定—极不稳定	200~2 000	弱径流—径流	扇三角洲	丘陵—戈壁	0.464	II
4	吐哈煤田哈密一大南湖地区	J ₁₋₂	1.05	11.2~169.0	0.9~3.0	5.00~9.47	有	较稳定—不稳定	300~2 000	弱径流—径流	辫状河三角洲—湖泊	戈壁—荒漠	0.689	I
5	潮水煤田	J ₁₋₂	0.04	1.4~15.3	0.4~0.7	—	有	稳定—较稳定	400~2 000	径流	扇三角洲—湖泊	山地—戈壁	0.353	II
6	陇东煤田	J ₂	0.45	0.2~45.6	0.7~4.1	0.04~3.43	暂未发现	稳定—较稳定	800~1 200	弱径流—径流	三角洲—湖泊	黄土塬	0.519	I

注：“—”表示无资料，下同

表 6 东北中低煤阶老工业区煤层气评价参数及结果表

序号	接替区名称	含煤地层	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ · km ⁻²)	总煤层厚/m	含气量/ (m ³ · t ⁻¹)	原始渗透率/mD	有无次生生物气	有无岩浆热变质	埋深/m	水文地质条件	煤系沉积环境	地形地貌	赋值加权求和	综合评价等级
1	依兰煤田	E ₂	1.06	9.5~30.0	2.5~12.0	3.87~5.52	有	有	600~1 000	弱径流	扇三角洲—湖泊	平原—丘陵	0.695	I
2	鸡西煤田	K ₁	0.38	0.7~14.0	1.8~14.6	0.02~0.10	暂未发现	有	500~1 000	弱径流—径流	辫状河三角洲—湖泊	平原—山地	0.571	II
3	鹤岗煤田	K ₁	1.65	2.0~20.0	7.0~16.0	0.10~0.40	暂未发现	有	100~1 500	弱径流	河流—三角洲	山地—丘陵	0.617	I
4	珲春煤田	E	2.92	7.4~34.5	2.0~6.0	2.65~4.38	暂未发现	有	400~1 200	弱径流—径流	扇三角洲—湖泊	平原—山地	0.701	I

表 7 西南中高煤阶构造复杂区煤层气评价参数及结果表

序号	接替区名称	含煤地层	资源丰度/ (10 ⁸ m ³ · km ⁻²)	总煤层厚/m	含气量/ (m ³ · t ⁻¹)	原始渗透率/mD	煤层稳定性	煤体结构破坏程度	埋深/m	水文地质条件	煤系沉积环境	地形地貌	赋值加权求和	综合评价等级
1	黔西北煤田	P ₃	0.35	0.5~11.1	0.2~16.8	0.005~0.20	不稳定—极不稳定	中等—严重	300~2 000	弱径流—滞留	滨海三角洲	山地—丘陵	0.509	II
2	川南煤田	P ₃	1.28	4.5~10.0	5.2~22.2	0.01~0.37	较稳定—不稳定	少量—中等	500~2 000	弱径流—滞留	障壁海岸体系	山地—丘陵	0.710	I
3	水城煤田	P ₃	2.57	0.8~12.4	5.6~15.5	0.02~0.61	较稳定—不稳定	少量—中等	300~2 000	弱径流—滞留	障壁海岸体系	山地—丘陵	0.778	I
4	圭山煤田	P ₃	0.93	0.6~6.0	0.3~19.7	—	较稳定—不稳定	中等—严重	500~1 500	弱径流—径流	浅海型	山地—丘陵	0.515	II
5	镇威煤田	P ₃	0.71	7.0~14.0	0.3~22.0	0.51	较稳定—不稳定	中等—严重	260~2 000	弱径流—径流	滨海三角洲	山地	0.565	II

4.1 西北低煤阶区

1)准东煤田五彩湾一大井地区是准东煤田的富煤带之一,西山窑组煤层倾角一般介于15°~30°,局部地区小于10°,由大井地区甲烷碳、氢同位素测定结果可知 δ¹³C₁ 介于-72.8‰~-39.2‰,δ_D 介于-211‰~

-245‰,是以二氧化碳还原型为主的次生生物气^[36],符合表 1 中的有次生生物气成因和煤层较为稳定等条件。

2)吐哈煤田哈密一大南湖地区以长焰煤和气煤为主,据地震勘探解释结果显示大南湖凹陷区域构造相

对平稳,受天山雪融水的补给,在一定深度可以形成低盐度、低矿化度的地层水,适合产甲烷菌在煤层中繁殖,其中大南湖凹陷大煤 4 井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 $-66.5\text{‰} \sim -71.7\text{‰}$,为次生生物成因气^[40],符合表 1 中的有次生生物气成因和煤层较为稳定等条件。

3) 陇东煤田位于鄂尔多斯盆地西缘,煤层倾角一般小于 10° ,煤厚变异系数为 19.6% ,主要含煤地层为侏罗系延安组,主要勘探层位为 5 号煤、8 号煤,镜质体反射率最高为 0.83% ,甲烷平均浓度为 79.91% ,平均渗透率为 0.32 mD ,平均储层压力为 11.48 MPa ,压力梯度介于 $0.83 \sim 1.07\text{ MPa}/100\text{ m}$,属于欠压—正常压力梯度范围^[42],虽暂未证实有次生生物气成因,但也符合煤层稳定型这一关键因素。

4.2 东北中低煤阶老工业区

1) 依兰盆地含煤地层为古近系达连河组,构造较为简单,煤类为长焰煤和气煤,主煤层底部为酸性花岗岩,直接顶板为厚 100 m 左右的油页岩,煤储层中不排除有油型气的混入,具有良好的封盖条件^[31,36],符合岩浆岩对储层的改造和油型气混入等关键因素。

2) 鹤岗煤田主要含煤地层为下白垩统城子河组,煤类以气煤和肥煤为主,煤田内岩浆活动较频繁,对煤储层的改造较大,岩浆岩侵入地区煤变质程度达到了贫煤和无烟煤阶段,镜质组含量介于 $52.2\% \sim 82.3\%$,惰质组含量介于 $2.3\% \sim 26.3\%$,壳质组含量为 $0.2\% \sim 6.2\%$ ^[36],符合岩浆岩侵入对储层的改造这一关键因素。

3) 珲春煤田含煤地层为古近系珲春组,煤类主要为褐煤和长焰煤,基底为石炭—二叠系变质岩和侏罗系火山碎屑岩,在八连城一带有古近纪辉绿岩侵入煤系,对煤储层有一定的改造作用,主要勘探目标层位为 19 号煤,该煤层顶板岩性以粉砂岩及粉砂质泥岩为主,具有较好的封盖能力,也符合岩浆岩侵入对煤储层改造这一关键因素。

4.3 西南中高煤阶构造复杂区

1) 川南有利区含煤地层为上二叠统龙潭组,最高镜质体反射率大于 2.5% ,可采煤层为 1~8 层,其中 C_{19} 和 C_{25} 属稳定—较稳定煤层,内生裂隙发育,煤体结构简单—中等,镜质组含量在古叙矿区平均为 79.38% ,试井资料表明,该地区煤储层压力梯度介于 $0.96 \sim 1.29\text{ MPa}/100\text{ m}$,为常压—略超压储层^[39],煤体结构以碎裂—碎粒为主,符合煤体结构少量破坏和煤层较稳定的关键因素。

2) 水城矿区含煤地层为上二叠统龙潭组,含煤层数最高可达 39 层,宏观煤岩类型以半暗煤、半亮煤和

光亮煤为主,煤体结构以碎裂煤为主,部分地区可见原生结构煤层,镜质组含量为 $57.24\% \sim 97.20\%$,平均孔隙度为 $3.52\% \sim 9.48\%$,煤储层压力梯度介于 $0.4 \sim 1.0\text{ MPa}/100\text{ m}$,为欠压—正常压力储层^[38],在大河和神仙坡煤矿井下对主采煤层进行煤体结构分层描述,结果表明煤体结构主要为原生和碎裂结构,其中原生结构占 27.2% ,碎裂结构占 72.8% ,也基本符合煤体结构少量破坏的关键因素。

5 结 论

1) 在收集西北低煤阶区、东北中低煤阶老工业区和西南中高煤阶构造复杂区煤层气地质资料基础上,总结了影响煤层气成藏的资源条件、生储条件、保存条件以及开发基础条件等 4 个方面共计 8 个普遍因素和 4 个关键因素,其中 8 个普遍因素分别为资源丰度、煤层厚度、含气量、原始渗透率、埋藏深度、水文地质条件、煤系沉积环境和地形地貌,4 个关键因素包括成因类型(西北和东北)、稳定性(西北和西南)、后期储层改造(东北)和煤体结构破坏程度(西南)。由此建立了中国煤层气战略接替区评价指标体系,并通过多层次模糊数学的方法,对上述 3 个重点区评价体系内各指标的权重进行了定量排序。

2) 对上述 3 个重点区 15 个煤层气勘探开发战略接替区进行了评价和优选。结果表明:Ⅰ类有利区共计 8 个,总面积约 $1.09 \times 10^4\text{ km}^2$,煤层气地质资源量为 $1.32 \times 10^{12}\text{ m}^3$;Ⅱ类较有利区共计 7 个,总面积约 $1.01 \times 10^4\text{ km}^2$,煤层气地质资源量为 $0.48 \times 10^{12}\text{ m}^3$ 。其中Ⅰ类区包括准东煤田五彩湾一大井地区、吐哈哈密一大南湖地区、陇东煤田、依兰煤田、鹤岗煤田、珲春煤田、川南煤田和水城煤田,是近期可以进行煤层气勘探和试验开发的目标区。

参 考 文 献

- [1] 国土资源部油气资源战略研究中心.全国煤层气资源评价[M].北京:中国大地出版社,2009:71-83.
Strategic Research Center of Oil & Gas resources of National Ministry of Land and Resources. Resources evaluation of coalbed methane in China [M]. Beijing: China Land Press, 2009: 71-83.
- [2] 叶建平.我国煤层气产业发展报告[C]//2011 年全国煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:3-9.
Ye Jianping. China's coalbed methane industry development report [C] // The Annual Workshop of Coalbed Methane in 2011. Beijing: Geology Publishing House, 2011: 3-9.
- [3] 秦勇,袁亮,胡千庭,叶建平,胡爱梅,申宝宏,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,

- 2012,40(10):1-6.
- Qin Yong, Yuan Liang, Hu Qianting, Ye Jianping, Hu Aimei, Shen Baohong, et al. Status and development orientation of coalbed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10):1-6.
- [4] 孙钦平, 孙斌, 孙粉锦, 杨青, 陈刚, 杨敏芳, 等. 准噶尔盆地东南部低煤阶煤层气富集条件及主控因素[J]. 高校地质学报, 2012, 18(3):460-464.
- Sun Qiping, Sun Bin, Sun Fenjin, Yang Qing, Chen Gang, Yang Minfang, et al. Accumulation and geological controls of low-rank coalbed methane in southeastern Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 18(3):460-464.
- [5] 刘大锰, 李俊乾. 我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6):19-23.
- Liu Dameng, Li Junqian. Main geological controls on distribution and occurrence and enrichment patterns of coalbed methane in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6):19-23.
- [6] 桑树勋, 秦勇. 陆相盆地煤层气地质——以准噶尔、吐哈盆地为例[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001:143-159.
- Sang Shuxun, Qin Yong. Geology of coalbed methane in the continental basin—a case of Junggar and Turpan-Hami Basin[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2001:143-159.
- [7] 秦勇, 高弟, 吴财芳, 易同生, 洪愿进. 贵州省煤层气资源潜力预测与评价[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- Qin Yong, Gao Di, Wu Caifang, Yi Tongsheng, Hong Yuanjin. The potential and evaluation of coalbed methane in Guizhou Province[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2012.
- [8] 邵龙义, 肖正辉, 唐书恒, 曹代勇, 鲁静. 中国南方煤层气资源潜力及勘探方向[C]//煤层气勘探开发理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 2007:29-37.
- Shao Longyi, Xiao Zhenghui, Tang Shuheng, Cao Daiyong, Lu Jing. The potential and prospect of coalbed methane in southern China[C]//The Annual Workshop of Coalbed Methane in 2007. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:29-37.
- [9] 叶建平, 秦勇, 林大杨. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998:186-195.
- Ye Jianping, Qin Yong, Lin Dayang. Coalbed methane resources of China[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1998:186-195.
- [10] 刘洪林, 王红岩, 赵群, 林英姬, 桑树勋, 雍洪. 吐哈盆地低煤阶煤层气地质特征及成藏控制因素研究[J]. 地质学报, 2010, 84(1):133-136.
- Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhao Qun, Lin Yingji, Sang Shuxun, Yong Hong. Geological characteristics of coalbed methane and controlling factors of accumulation in the Tuha Coal Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1):133-136.
- [11] 杨起, 刘大锰, 黄文辉, 车遥, 胡宝林, 蔚远江. 中国西北煤层气地质与资源综合评价[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Yang Qi, Liu Dameng, Huang Wenhui, Che Yao, Hu Baolin, Wei Yuanjiang. Synthetical Appraisal on Geology and Resource of CBM, Northwest in China[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2005.
- [12] 宁正伟, 苏复义, 蔡云飞, 郭友. 西北地区侏罗系煤层气资源前景研究[J]. 天然气工业, 2003, 23(3):11-15.
- Ning Zhengwei, Su Fuyi, Cai Yunfei, Guo You. Research on the prospect of coalbed methane resources in Jurassic in the northwest China[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(3):11-15.
- [13] 王佟, 田野, 邵龙义, 鲁静. 新疆准噶尔盆地早—中侏罗世层序—古地理及聚煤特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1):114-119.
- Wang Tong, Tian Ye, Shao Longyi, Lu Jing. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the early and middle Jurassic in the Junggar Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1):114-119.
- [14] 刘洪林, 王红岩, 杨帆, 李贵中, 赵国良. 我国东北地区煤层气地质特征及资源分布[J]. 特种油气藏, 2004, 11(5):8-11.
- Liu Honglin, Wang Hongyan, Yang Fan, Li Guizhong, Zhao Guoliang. Geologic characteristics and distribution of coalbed gas in northwest China[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2004, 11(5):8-11.
- [15] 高迪, 邵龙义, 李柱. 三江盆地早白垩世层序古地理与聚煤作用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 42(5):746-751.
- Gao Di, Shao Longyi, Li Zhu. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Early Cretaceous in Sanjiang Basin, northeastern China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 42(5):746-751.
- [16] 张宏. 沈阳南部红阳煤田煤层气赋存规律研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- Zhang Hong. Research on the distribution and occurrence of coalbed methane in Hongyang Coalfield, southern Shenyang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [17] 黑龙江省煤田地质局. 黑龙江省东部煤层气资源评价报告[R]. 哈尔滨: 黑龙江省煤田地质局, 2000.
- Heilongjiang Administration of Coal Geology. Resource evaluation of coalbed methane in the eastern Heilongjiang Province[R]. Harbin: Heilongjiang Administration of Coal Geology, 2000.
- [18] 中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司. 中国南方煤层气资源评价[R]. 昆明: 中国石化勘探南方分公司, 2005.
- Sinopec Exploration Southern Company. Resource evaluation of coalbed methane in southern China[R]. Kunming: Sinopec Exploration Southern Company, 2005.
- [19] 邵龙义, 高彩霞, 张超, 汪浩, 郭立君, 高彩红. 西南地区晚二叠世层序—古地理及聚煤特征[J]. 沉积学报, 2013, 31(5):856-866.
- Shao Longyi, Gao Caixia, Zhang Chao, Wang Hao, Guo Lijun, Gao Caihong. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Late Permian in southwestern China[J]. Ac-

- ta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 856-866.
- [20] 郭本广, 许浩, 孟尚志, 张文忠, 刘一楠, 罗皓菡, 等. 临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(5): 110-112.
- Guo Benguang, Xu Hao, Meng Shangzhi, Zhang Wenzhong, Liu Yinan, Luo Haohan, et al. Geology condition analysis for unconventional gas co-exploration and concurrent production in Linxing area [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(5): 110-112.
- [21] 徐宏杰. 贵州省薄—中厚煤层群煤层气开发地质理论与技术[D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- Xu Hongjie. Geological theory and technology for coalbed methane development with thin and medium coal seam zones in Guizhou [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.
- [22] 陈晓智, 汤达祯, 许浩, 曲英杰, 张彪, 何伟. 低、中煤阶煤层气地质选区评价体系[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(增刊 2): 115-120.
- Chen Xiaozhi, Tang Dazhen, Xu Hao, Qu Yingjie, Zhang Biao, He Wei. Geological evaluation system of potential coalbed methane exploration and development blocks with low and medium coal ranks [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(S2): 112-120.
- [23] 赵庆波, 张公明. 煤层气评价重要参数及选区原则[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(2): 23-26.
- Zhao Qingbo, Zhang Gongming. Important parameters in the evaluation of coal-bed gas and principles for screening exploration target [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(2): 23-26.
- [24] 李五忠, 田文广, 陈刚, 孙钦平. 不同煤阶煤层气选区评价参数的研究与应用[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 45-47.
- Li Wuzhong, Tian Wenguang, Chen Gang, Sun Qiping. Research and application of appraisal variables for the prioritizing of coalbed methane areas featured by different coal ranks [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 45-47.
- [25] 王一兵, 田文广, 李五忠, 赵庆波, 田立志. 中国煤层气选区评价标准探讨[J]. 地质通报, 2006, 25(9-10): 1104-1107.
- Wang Yibing, Tian Wenguang, Li Wuzhong, Zhao Qingbo, Tian Lizhi. Criteria for the evaluation of coalbed methane area selection in China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9-10): 1104-1107.
- [26] 孙平, 王勃, 孙粉锦, 郑贵强, 李贵中, 王红岩, 等. 中国低煤阶煤层气成藏模式研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 648-652.
- Sun Ping, Wang Bo, Sun Fenjin, Zheng Guiqiang, Li Guizhong, Wang Hongyan, et al. Research on reservoir patterns of low-rank coal-bed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 648-652.
- [27] 王勃, 李贵中, 王一兵, 杨焦生, 陈艳鹏, 邓泽, 等. 阜新盆地王营—刘家煤层气富集区的形成模式[C]//2011 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2011: 82-89.
- Wang Bo, Li Guizhong, Wang Yibing, Yang Jiaosheng, Chen Yanpeng, Deng Ze, et al. Accumulation model of Wangying-Liujia coalbed methane enrichment area in Fuxin Basin [C]//The Annual Workshop of Coalbed Methane in 2011. Beijing: Geology Publishing House, 2011: 82-89.
- [28] 尹国勋, 张祖银. 华南龙潭组煤层中的瓦斯含量与沉积环境的关系[J]. 煤田地质与勘探, 1987, 15(3): 5-10.
- Yin Guoxun, Zhang Zuyin. The relationship between gas content and depositional systems of Longtan Formation in southwestern China [J]. Coal Geology & Exploration, 1987, 15(3): 5-10.
- [29] 白鸽, 张遂安, 张帅, 冀敏俊, 张慧. 煤层气选区评价的关键性地质条件——煤体结构[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(5): 26-29.
- Bai Ge, Zhang Sui'an, Zhang Shuai, Ji Minjun, Zhang Hui. A crucial geological condition—coal mass texture in CBM exploration target optimization [J]. Coal Geology of China, 2012, 24(5): 26-29.
- [30] 宁宁, 张建博. 煤层气地质选区评价方法研究[J]. 天然气工业, 1999, 19(3): 34-35.
- Ning Ning, Zhang Jianbo. A research on the method of geological regional selection evaluation of coalbed gas [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(3): 34-35.
- [31] 翟光明, 何文渊. 中国煤层气赋存特点与勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 1-3.
- Zhai Guangming, He Wenyuan. Occurrence features and exploration orientation of coalbed methane gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 1-3.
- [32] 秦勇, 傅雪海, 岳巍, 林大杨, 叶建平, 焦思红. 沉积体系域煤层气储盖特征之关系探讨[J]. 古地理学报, 2000, 2(1): 77-83.
- Qin Yong, Fu Xuehai, Yue Wei, Lin Dayang, Ye Jianping, Jiao Sihong. Relationship between depositional systems and characteristics of coalbed gas reservoir and its caprock [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1): 77-83.
- [33] 唐书恒, 岳巍, 崔崇海, 蔡一民. 用模糊数学方法评价煤层气的可采性[J]. 地质论评, 2000, 46(增刊): 284-287.
- Tang Shuheng, Yue Wei, Cui Chonghai, Cai Yimin. Assessment of coalbed methane workability through fuzzy mathematics [J]. Geological Review, 2000, 46(Suppl.): 284-287.
- [34] 韩俊, 邵龙义, 肖建新, 肖正辉, 冉茂云, 于晓辉. 多层次模糊数学在煤层气开发潜力评价中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(3): 32-36.
- Han Jun, Shao Longyi, Xiao Jianxin, Xiao Zhenghui, Ran Maoyun, Yu Xiaohui. Application of multi-layered fuzzy mathematics in assessment of exploration potential of coalbed methane resources [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(3): 32-36.
- [35] 姚艳斌, 刘大锰. 煤储层精细定量表征与综合评价模型[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 139-140.
- Yao Yanbin, Liu Dameng. Advanced quantitative characterization and comprehensive evaluation model of coalbed methane reservoirs [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2013: 139-140.
- [36] 孙斌. 准噶尔盆地东南缘低煤阶煤层气成藏富集规律研究

- [D].北京:中国矿业大学,2008.
- Sun Bin. A study of low-rank coalbed methane pool-forming and enriching law in the southeast of Junggar Basin[D].Beijing:China University and Mining and Technology,2008.
- [37] 黄卫东,李新宁,李留中,于法政,王瑞英,陈晓红,等.三塘湖盆地煤层气资源勘探前景分析[J].天然气地球科学,2011,22(4):733-737.
- Huang Weidong, Li Xinning, Li Liuzhong, Yu Fazheng, Wang Ruiying, Chen Xiaohong, et al.Prospect of coalbed methane exploration in Santanghu Basin[J].Natural Gas Geoscience,2011,22(4):733-737.
- [38] 柳蓉,刘招君,柳世友,刘冬青,李宝毅,杨小红,等.依兰盆地煤与油页岩赋存特征及成矿规律研究[J].煤炭学报,2012,37(5):776-781.
- Liu Rong, Liu Zhaojun, Liu Shiyu, Liu Dongqing, Li Baoyi, Yang Xiaohong, et al.Coal and oil shale occurrence characteristic and metallogenic regularity in Yilan Basin [J].Journal of China Coal Society,2012,37(5):776-781.
- [39] 赵玉集.三江—穆棱河含煤区煤层气富集规律及开发潜力评价[D].北京:中国地质大学,2012.
- Zhao Yuji. Preliminary evaluation of gas enrichment and exploitation potential of coalbed methane in Sanjiang - Mulinghe coal-bearing area[D].Beijing:China University of Geosciences,2012.
- [40] 中国石油勘探开发研究院廊坊分院.吐哈盆地煤层气勘探现状及资源潜力[R].廊坊:中国石油勘探开发研究院廊坊分院,2009.
- Langfang Branch of Research Institute of PetroChina Petroleum Exploration and Development.Current situation of exploration and resource potential of coalbed methane in Turpan-Hami Basin [R]. Langfang: Langfang Branch of Research Institute of PetroChina Petroleum Exploration and Development,2009.
- [41] 中国石油勘探开发研究院廊坊分院和中国矿业大学(北京).潮水盆地煤层气资源评价与目标优选研究报告[R].廊坊:中国石油勘探开发研究院廊坊分院和中国矿业大学(北京),2011.
- Langfang Branch of Research Institute of PetroChina Petroleum Exploration and Development and China University of Mining and Technology (Beijing).Resource evaluation and prospect area optimization of coalbed methane in Chaoshui Basin [R]. Langfang: Langfang Branch of Research Institute of PetroChina Petroleum Exploration and Development and China University of Mining and Technology (Beijing),2011.
- [42] 甘肃省煤田地质研究所.甘肃省陇东煤层气赋存状况评价报告[R].兰州:甘肃省煤田地质研究所,2013.
- Research Institute of Coal Geology of Gansu Province.Resource evaluation of coalbed methane of the Longdong coalfield in Gansu Province[R].Lanzhou:Research Institute of Coal Geology of Gansu Province,2013.
- [43] 云南省煤田地质局.云南省煤层气资源潜力评价报告[R].昆明:云南省煤田地质局,2011.
- Yunnan Administration of Coal Geology.Resource evaluation of coalbed methane in Yunnan Province [R]. Kunming:Yunnan Administration of Coal Geology,2011.

(来稿日期 2015-02-10 编辑 居维清)