

国内外煤层气地质对比及其启示

龙胜祥,李辛子,叶丽琴,陈纯芳

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:美国、澳大利亚和中国的含煤盆地均很多,但煤层气地质条件差异很大。其中多数盆地地质条件较差,仅少数盆地煤层气资源富集,储层特征和构造、水文条件优越,勘探开发效果好。在圣胡安、沁水等勘探效果良好的盆地内,不同区带(地区)也存在巨大差异。根据煤层气地质条件、富集成藏模式以及开发技术条件,可分为中-高煤阶和低煤阶类型。利用建立的煤层气分类对比方法体系,对美国中-低煤阶型圣胡安盆地、低煤阶型粉河盆地、澳大利亚复杂煤阶型鲍温-苏拉特盆地、中国高煤阶型沁水盆地、复杂煤阶型鄂尔多斯盆地以及这些盆地中主要区带(地区)进行了对比分析,发现我国的鄂尔多斯、沁水盆地等最具潜力的盆地与圣胡安、鲍温-苏拉特盆地差异较大。樊庄、韩城、延川南、织金等区块仅与圣胡安3带等相似。因此,我国煤层气地质条件和可采性相对较差,近、中期可有效勘探开发的目标不多。从战略层面看,不宜把中、长期发展目标定得太高;从战术层面看,要重视差异性分析,预测资源甜点,优选目标,并针对性部署勘探开发工作,更要注意控制速度。

关键词:地质条件;煤层气;含煤盆地;国内外

中图分类号:TE132.2 **文献标识码:**A

Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad

Long Shengxiang, Li Xinzi, Ye Liqin, Chen Chunfang

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: America, Australia and China all have many coal bearing basins with greatly different geological conditions of coalbed methane. Among these basins, most are poor in geological conditions of coalbed methane, except for a few which have rich coalbed methane resources, excellent reservoir characteristics, structural and hydrological conditions, thus are successful in exploration and development. Even in well developed basins, such as San Juan Basin and Qinshui Basin, the geology conditions are also greatly different in different regions. According to CBM geological conditions, accumulation models and development conditions, these basins can be divided into mid-high-rank coal basins and low-rank coal basins. A CBM classification and correlation method system was established to perform comparative analysis among the mid-rank coal in San Juan Basin and low-rank coal in Powder River Basin of America, complex rank coal in Bowen/Surat Basin of Australia, high rank coal in Qinshui Basin and complex rank coal in Ordos Basin of China, as well as the main zones (areas) in these basins. It was found that the most prospective Ordos Basin and Qinshui Basin in China are greatly different with San Juan Basin, Bowen/Surat Basin. Fanzhuang, Hancheng, south Yanchuan, Zhijin and other blocks are only similar to the Zone-3 in San Juan Basin's. It is therefore concluded that the coalbed methane geological conditions and recoverability are relatively poor in the coal basins in China, and effective exploration and development targets are different to find in the near and medium terms. So from a strategic perspective, the long-term development goals should not be set too high. And from a tactical perspective, attentions should be paid to analyzing difference, forecasting resources sweet spot, picking the favorable target, arranging targeted deployment on exploration and development, and controlling development speed.

Key words: geological condition, coalbed methane, coal bearing basin, home and abroad

煤层气是一种非常规天然气,是优质洁净能源和化工原料,是21世纪重要的接替能源。美国、加拿大和澳

大利亚等国煤层气勘探开发取得了较好经济效益,2012年产量分别为 470×10^8 、 80×10^8 和 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$;我国煤

层气勘探也正在加紧进行,在沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘、辽宁阜新盆地的部分区块,煤层气勘探开发已进入小规模商业化发展阶段,2012年产量为 $26.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1-8]。但是,近几年我国煤层气勘探开发也遇到较多困难,发展成效比预期的差,要完成国家“十二五”发展任务,还面临众多困难和挑战。本文从国内外对比的角度出发,研究国内外煤层气基本地质条件和开采条件的差异,划分不同对比评价类型,明确富集主控因素,建立煤层气富集参数体系,开展盆地和区块两级对比分析,得到了相关启示,提出了相关建议。

1 国内外含煤盆地煤层气地质特征及生产差异较大

1.1 美国含煤盆地

美国具有丰富的煤层气资源,也是全球煤层气勘探开发最早、最成功的国家。据美国天然气研究所2001年评价资料(表1),在17个含煤盆地或地区中,煤层气资源量约为 $11.3 \times 10^{12} \sim 21.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1]。煤层气资源分布差异很大,西部落基山脉中、新生代含煤盆地集中了美国近85%的煤层气资源,其余15%分布在东部阿巴拉契亚和中部石炭纪含煤盆地中。各盆地煤层气地质条件差异也明显,煤层发育程度差异大,主煤层从2层到40层不等,煤层最大厚度1.8 m至60 m;煤层演化程度变化大,低到亚烟煤,高到无烟煤;

压力系统低压、正常压力、高压均有;含气量为 $2 \sim 20 \text{ m}^3/\text{t}$,单一盆地的煤层气资源量差异大,分布于 $0.08 \times 10^{12} \sim 8.89 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 之间。

在这些盆地中,煤层气的勘探开发效果也各不相同。目前,落基山脉中、新生代含煤盆地群不仅是美国煤层气资源最为富集的地区,也是煤层气勘探开发最为活跃的地区。据EIA(美国能源信息署,2010)资料,美国有12个盆地生产煤层气,但对煤层气生产起重要作用的盆地为中煤阶型圣胡安盆地和低煤阶型粉河盆地,两个盆地2008年煤层气产量占美国当年煤层气总产量的85%;其次是黑勇士、拉顿、尤因塔3个盆地,其产量约占10%;其余7个盆地的煤层气产量仅占5%。产量较高的5个盆地含煤面积较大,煤层较发育,属中低煤阶,含气量中偏高,资源较丰富。

1.2 中国含煤盆地

我国含煤盆地的煤层气地质特征及生产差异也较大。9个地质资源量大于 $10\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的盆地(群)累计地质资源量为 $309\,699.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计可采资源量为 $93\,226.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占全国的84.13%和85.76%,是煤层气资源分布的主体,其余33个盆地(群)的资源量仅为总量的15%左右,是煤层气资源分布的次要部分^[9]。其中鄂尔多斯盆地地质资源量最大,达 $98\,634.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国的26.79%;地质资源量超过 $30\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的盆地(群)还有沁水、准噶尔和滇东黔西盆地,分别为 $39\,500.42 \times 10^8$ 、 $38\,268.17 \times$

表1 美国含煤盆地煤层气地质特征

Table 1 Geological characteristics of coalbed methane in coal bearing basins in U. S. A.

盆地名称	面积/km ²	煤层最大埋深/m	主煤层数	最大煤层总厚度/m	最大煤层厚度/m	最高煤级	压力类型	最大含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	煤层气资源量/(10 ¹² m ³)
圣胡安	19 500	1 200	14	30	12.0	低挥发组分煤	u,n,o	17.0	2.38
皮申斯	17 400	3 660	20	30	6.7	半无烟煤	u,n,o	12.0	>2.38
大绿河	54 600	1 830	30	29	6.0	高挥发组分烟煤 A	u,n	15.4	8.89
粉河	67 000	1 220	24	91	60.0	亚烟煤	u	2.0	1.10
拉顿	5 700	920	40	27	3.0	低挥发组分烟煤	u	14.0	0.28
西华盛顿	16 900	?	?	?	12.0	高挥发组分烟煤 B	?	2.1	0.68
温德河 ^①	21 000	3 660	6?	30	8.5	亚烟煤	n,u	??	0.06
尤因塔	24 000	920	?	?	7.6	高挥发组分烟煤 A	?	10.0	0.28
北阿巴拉契亚	11 400	610	6	6	3.7	高挥发组分烟煤 A	u	12.5	1.73
伊利诺斯	130 000	920	3	5	4.6	高挥发组分烟煤 A	u	4.2	0.55
黑勇士	15 500	1 220	5	6	2.4	低挥发组分煤	u,n	17.0	0.57
中阿巴拉契亚	1 300	760	6	5	1.8	低挥发组分煤	u	19.0	0.14
阿科马	35 000	920	2	3	2.1	低挥发组分煤	u	15.6	0.11
卡霍巴和库萨	940	3 800	25	?	?	低挥发组分煤	?	11.0	0.08
里奇蒙德	650	920	2	?	4.6	中挥发组分煤	?	8.5	0.08
宾州无烟煤盆	1 300	920	3	?	2.0	无烟煤	?	20.0	?
瓦利	160	1 220	2	?	?	半无烟煤	?	?	?

注:n. 常压;u. 低压;o. 超压。①美国天然气研究所,2001。

10^8 和 $34\,723.72 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国的 10.73%, 10.40% 和 9.43%。

我国煤层气已经步入产业化初期阶段。但勘探开发主要集中在沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东部。沁水盆地南部探明储量 $2\,007.69 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 67.08%; 鄂尔多斯盆地东部煤层气探明储量 $817.76 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 29.91%。除了上述地区以外, 目前仅在贵州织金、四川綦江、云南老厂、安徽淮北、黑龙江依兰、陕西彬县、新疆准噶尔等地区取得勘探突破。

与美国含煤盆地相比较, 我国盆地间的地质特征及煤层气生产差异更为明显。

1.3 含煤盆地差异性对比

中、美两国含煤盆地的煤层气富集成藏条件在煤层形成条件、成煤后构造改造、水文地质条件等方面差异明显。

在煤层形成条件方面, 美国主要煤层气产量贡献的圣胡安、粉河等盆地的煤层发育于白垩系—新近系, 形成时代新; 中国目前主要煤层气产量贡献的沁水盆地、鄂尔多斯盆地煤层主要发育于石炭系—二叠系, 形成时代老。美国主产煤层气盆地的煤层单层厚度大、储层压力属常压—超压、含气饱和度高、渗透率大, 而中国主产煤层气盆地的煤层单层厚度较小, 储层压力一般为低压、含气饱和度低、渗透率小。

在成煤后构造改造方面, 北美大陆从联合古陆分裂之后几乎未发生重要的陆—陆碰撞, 美国的含煤盆地未遭受强烈改造, 煤田构造比较简单。而中国大陆由众多小型陆块组成, 它们大多是散布于东特提斯洋盆的独立地壳块体, 在汇聚过程中多次发生相互之间的碰撞, 加上西太平洋沟—弧—盆系统影响, 晚古生代和中生代含煤盆地挤压变形改造强烈, 煤田构造复杂, 煤层气成藏条件复杂。

在水文地质条件方面, 美国主产煤层气盆地的地下水充沛, 储层压力以水压为主, 压力梯度为 $8.0 \sim 13.6 \text{ MPa/km}^{[10-13]}$; 而中国的煤层气勘探开发区, 特别是北方地区, 地下水位低, 有的煤层为干层或部分水饱和层, 压力梯度多数小于 8.0 MPa/km , 属于典型的低压储层, 不利于煤层气高产。

2 同一盆地不同地区煤层气富集条件存在差异

国内外含煤盆地内部各地区间对比研究表明, 煤层气具有较强的非均质性特征, 富集条件存在较大差异, 高产富集区一般是煤层气资源富集和渗透率较高区的叠合区^[10]。本文分别以圣胡安盆地和沁水盆地为例说明如下。

2.1 美国圣胡安盆地

在圣胡安盆地中, Menefee 组和 Fruitland 组均拥有丰富的煤层气, 目前主要是 Fruitland 组煤层气投入商业生产。就 Fruitland 组而言, 在不同地区的单井煤层气产量以及天然气组分也存在明显的差异, 可分为 3 个区带, 其中区带 1 又可进一步分为 A、B、C 3 个次级单元。尽管盆地中钻探 Fruitland 组煤层气的钻井数超过 3 100 口, 但大部分煤层气都产自区带 1 中的井, 该有利区呈长条状。从地质条件看, 各区带差异很大 (图 1; 表 2)^[14]。

从资源条件看, 区带 1 煤层更发育, 其总厚度普遍大于 10 m, 最厚达 21 m, 而区带 2 和区带 3 煤层厚仅 9 ~ 15 m; 煤演化程度各区带差不多, 但区带 1 煤层含气量高, 特别是区带 1A 高达 $15.6 \text{ m}^3/\text{t}$, 而区带 2 和区带 3 大多数均小于 $4.7 \text{ m}^3/\text{t}$ 。上述条件决定了区带 1 资源丰度在 $1.64 \times 10^8 \sim 3.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 之间, 而区带 2 和区带 3 只有 $0.33 \times 10^8 \sim 1.64 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

从水文背景看, 区带 1 属自流超压区, 具有向上下流动的能力, 生产能量足; 而区带 2 和区带 3 是低压区, 生产能量较小。加之区带 1 水型主要为 NaHCO_3 型水, 淡水至半咸水, 低氯, 有利于产生次生生物气, 对煤层气形成补充, 而区带 2 和区带 3 地下水为 NaCl 型水, 矿化度相对较高, 不利于产生次生生物气。

从煤层储层特征看, 各区带均发育裂缝, 但区带 1 储层渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 比其他区带好, 其中区带 2 渗透率为 $5 \times 10^{-3} \sim 25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 区带 3 渗透率小于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

在上述 3 大因素影响下, 3 个区带开发效果差异很大, 区带 1 单井最高产气量 $1\,415 \sim 169\,800 \text{ m}^3/\text{d}$ 、最高产水量 $16 \sim 48 \text{ m}^3/\text{d}$, 而区带 2 单井最高产气量 $849 \sim 14\,150 \text{ m}^3/\text{d}$ 、最高产水量 $0 \sim 16 \text{ m}^3/\text{d}$, 区带 3 单井最高产气量小于 $1\,415 \text{ m}^3/\text{d}$, 最高产水量小于 $4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在区带 1 中, 1A 区最大净煤厚度可达 21 m; 煤层含气量高, 一般大于 $14 \text{ m}^3/\text{t}$; 储层渗透率大, 最高可达 $60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 该区为地下水滞留区, 储层压力高, 压力梯度超过 113 MPa/km , 为超高压区; 最高产气量可达 $28\,000 \sim 168\,000 \text{ m}^3/\text{d}$, 是圣胡安盆地的“甜点”地区。

2.2 中国沁水盆地

沁水盆地位于山西省东南部, 含煤面积约 $42\,000 \text{ km}^2$ 。从煤层气形成地质条件看, 沁水盆地以中—高变质的烟煤和无烟煤为主, 煤层含气量高, 煤层气资源量大, 开发条件较好。但勘探开发实践表明, 沁水盆地平面上煤层气地质条件和开发效果均有较大变化。

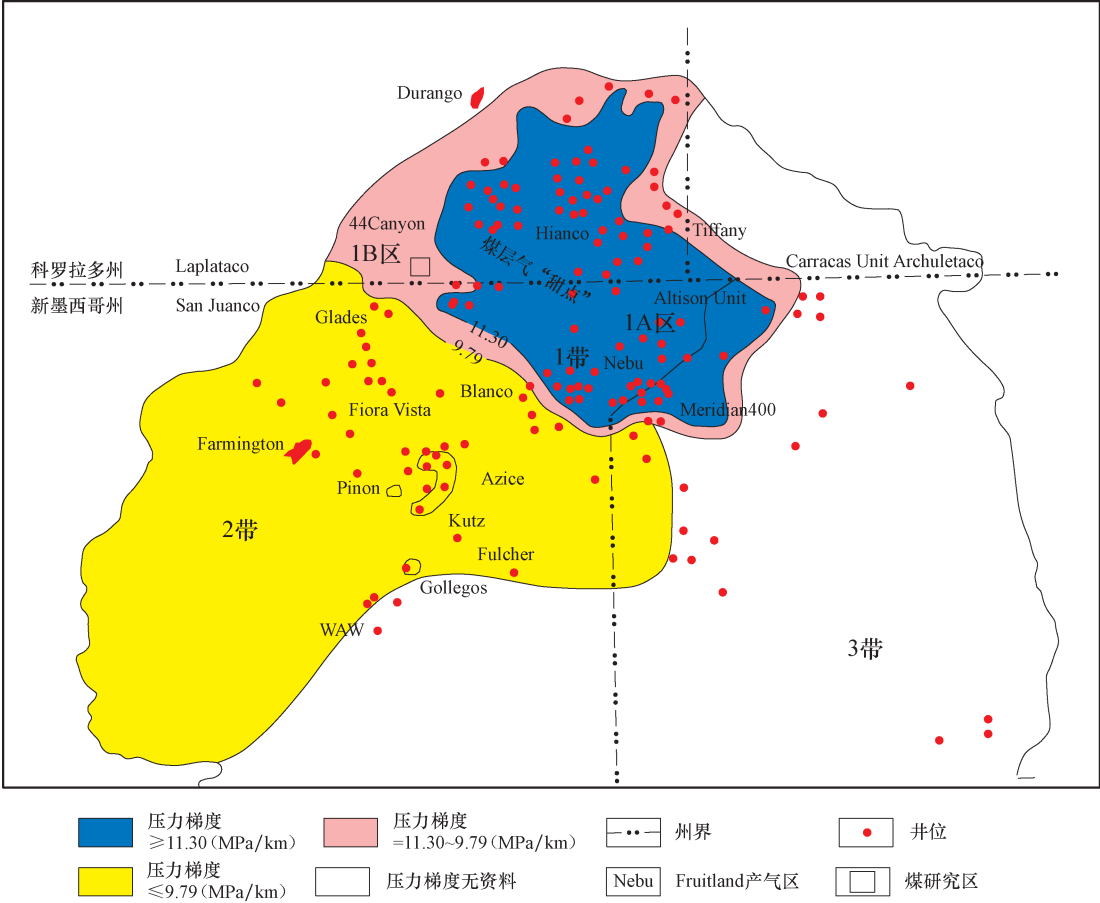


图 1 美国圣胡安煤层气盆地地区带差异分布^[14]

Fig. 1 Distribution of coalbed methane zones in San Juan Basin, U. S. A^[14]

表 2 美国圣胡安盆地各区带的煤层气特征及生产特征^[14]

Table 2 Coalbed methane characteristics and production performance of different zones in San Juan Basin, U. S. A^[14]

参数	区带 1A	区带 1B 和 1C	区带 2	区带 3
煤层总厚度/m	15 ~ 21	10 ~ 20	9 ~ 15	9 ~ 15
煤演化程度	高挥发 A 到中挥发组分沥青	高挥发 B 到中挥发组分沥青	高挥发组分 B 沥青质或更低	主体高挥发组分 B 沥青质或更低
含气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	通常 > 15.6 (饱和)	7.8 ~ 12.5 (未饱和)	大多数 < 4.7 (未饱和)	大多数 < 4.7 (未饱和)
资源丰度/($10^8 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	1.64 ~ 3.28	1.64 ~ 2.73	0.33 ~ 1.64	0.33 ~ 1.64
甲烷比例($\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$)	> 0.97	> 0.97	0.89 ~ 0.98	0.89 ~ 0.98 (?)
CO_2 含量/%	3 ~ 13	1 ~ 6	< 1.5	< 1.5
水文背景	自流超压区,具向上流动的能力	自流超压区,具向下流动的能力	低压区	低压区
水质	主要为 NaHCO_3 型水,低氯	NaHCO_3 型水,淡水至半咸水,露头处低氯	NaCl 型水,总矿化度为 14 400 ~ 42 000 mg/L	NaCl 型水,总矿化度为 14 400 ~ 42 000 mg/L
主裂缝方向	北西和北东(?)	北西	北东	北和北东
渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	15 ~ 60	10 ~ 35	5 ~ 25	< 5 (数据少)
最高产量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	28 300 ~ 169 800	1 415 ~ 14 150	849 ~ 14 150	< 1 415
最高产水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	16 ~ 48 (局部更高)	16 ~ 48 (局部更高)	0 ~ 16	0 ~ 4 (?)

沁水盆地含煤地层主要是上石炭统太原组和下二叠统山西组,是一套近海海陆交互相含煤沉积,煤层总厚度在 1.2 ~ 23.6 m,主力煤层为 3[#]和 15[#]煤层,其中南部发育 3[#]和 15[#]煤层(厚度分别为 2 ~ 6 m 和 2 ~

4 m),北部仅发育 15[#]煤层(厚 2 ~ 6 m)。

收集沁水盆地大量实测含气量数据,并进行统计表明(表 3),南部樊庄井田、潘庄区块、郑庄区块和大宁 2 号井区 3 号煤层平均含气量都在 15 m^3/t 以上,

表 3 沁水盆地主要矿区或井田主煤层实测气含量统计
Table 3 Statistics of measured gas content of coalbed methane in the main blocks or gas fields in Qinshui Basin, China

矿区或井田	3 号煤层含气量/(m ³ ·t ⁻¹)			15 号煤层含气量/(m ³ ·t ⁻¹)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
汾孝矿区	6.75	1.50	4.13	5.26	2.83	3.92
霍州矿区	15.92	0.07	5.59	14.51	0.02	3.91
沁源矿区	10.41	1.68	4.30	8.14	2.27	4.93
樊庄井田	27.21	6.63	17.21	29.88	11.08	19.38
潘 1 井田	28.71	4.10	14.96	38.70	9.56	21.00
屯留井田	20.69	4.11	12.12	20.36	3.47	11.38
赵庄区块	21.89	0.76	10.09	24.14	0.46	10.54
大宁 2 号	36.61	6.11	16.74	27.37	7.23	16.18
柿庄区块	17.40	11.00	13.80	19.42	7.11	12.97
寿阳区块	25.24	3.62	12.52	24.14	4.59	12.50
阳泉矿区	16.80	0.82	8.23	9.92	0.49	4.24
和顺区块	18.75	6.34	10.84	16.54	4.63	10.49

而中北部阳泉矿区、霍州矿区和汾孝矿区含气量则相对较低,其中又以汾孝矿区最低,平均含气量仅为 4.13 m³/t;15 号煤层平均含气量以潘庄区块和郑庄区块最高,达 20 m³/t 以上,而在中北部的霍州、汾孝和阳泉矿区最低,平均含气量都在 4.3 m³/t 以下,和顺区块也较低(10.49 m³/t)^[15-18]。

纵观整个盆地,渗透率值绝大多数小于 1×10⁻³ μm²,高值区位于南部阳城北潘庄-樊庄以及阳泉-寿阳附近区域,盆地中部较低。相对而言,南部区块又优于北部,如 3[#]煤层基质渗透率最高值在潘庄 1 号 7-3 孔(可达 9.82×10⁻³ μm²);15[#]煤层渗透率最高值也在潘庄 1[#]的 5-3 孔和潘庄 2[#]的 0807 孔(分别为 9.30×10⁻³ μm 和 9.53×10⁻³ μm²)。

平面上储层压力梯度在各区也有一定的区别,北部阳泉地区平均储层压力梯度为 6.6 MPa/km,东部潞安地区平均储层压力梯度为 6.4 MPa/km;南部郑庄区块测试的煤储层压力梯度较大,平均为 9.1 MPa/km。

沁水盆地以南部樊庄、潘庄地区煤层含气饱和度为最高,两个地区 3[#]煤层平均含气饱和度分别为 71.8%与 56.8%,15[#]煤层平均含气饱和度分别为 60.7%与 69.7%。含气饱和度相对最低的地区有盆地北部的阳泉-寿阳矿区、中部沁源矿区以及东部长治区块,含气饱和度变化范围分别为 30.0%~70.0%,20.0%~30.0%和 27.5~45.8%。

从构造特征看,沁水盆地南部和北缘都呈向斜构造形态,向斜部位含气量明显高于两翼。南部地层宽阔平缓,地层倾角平均只有 4°左右,区内低缓、平行褶皱普遍发育,背斜轴部含气量低(5~15 m³/t),而向斜

轴部和翼部煤层含气量高(均高于 15 m³/t)。北部,特别是和顺等矿区,构造相对复杂,断裂多,加上大量陷落柱的存在,导致煤层连续性变差,局部含气量降低。

沁水盆地由多个水文地质单元构成,特别是地下分水岭的存在,不仅导致若干水文地质单元并存,而且造成煤层气井气、水产能动态复杂化。盆内地下水与煤层气之间的关系主要表现为水力运移逸散和水力封闭两种作用类型。前者分布广泛,后者仅仅局限于南部、东部和西北部的局部地带。总体而言,北部地下水动力较强,煤层气保存条件不如南部。

进一步研究表明,高丰度煤层气富集区形成于含气量和渗透率的优势耦合区域,在这个平衡带内煤层气富集和高产^[19]。寻找含气量和渗透率的叠合较高区,是确保单井煤层气高产和开发区整体效益的关键措施。

3 我国最有利煤层气盆地比国外最有利盆地地质条件差

我国地质最有利且开发较为成功的沁水盆地和鄂尔多斯盆地,与美国地质最有利且开发最成功的圣胡安盆地粉河盆地和澳大利亚的鲍温-苏拉特盆地相比,在煤层气地质特征和生产条件上差异明显。为了更进一步对比国内外煤层气差异性,我们选择了盆地类型相近的叠合盆地——鄂尔多斯盆地与鲍温-苏拉特盆地为例进行说明(表 4),这类盆地在所属国均为最有利煤层气盆地。

1) 聚煤期沉积环境相近

两盆地均为含有 C₂-P₁ 海陆过渡相和 J₂ 河湖沼泽相两套含煤层系,但盆地构造有差异。鲍温-苏拉

表 4 鄂尔多斯盆地与鲍温-苏拉特盆地对比
Table 4 Comparison between Ordos Basin, China and Bowen/Surat Basin, U. S. A.

煤层	鲍温 P 煤	鄂尔多斯盆地东缘 C—P 煤	苏拉特 J 煤	鄂尔多斯盆地 J 煤
煤阶	中、高煤阶	中、高煤阶	低煤阶	(中)低煤阶
累计净煤厚/m	6~18	0~30	10~50	5~45
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	8~20	6~22	1~8	0~6.7
含气饱和度/%	60~100	30~90	50~100	30~80
储层压力	正常	低压	正常(部分超高压)	低压
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	1~500	0.1~42.0	1~1 600	1~10
井距/km	1.0~1.5	0.30~0.35	0.75	0.30~0.35
单井产量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	0.30~1.28	0.05~0.70	0.40~16.00	1.80

特为向斜盆地,煤层气开发成功项目位于冀部。鄂尔多斯中东部为一西倾单斜,煤层气开发成功项目位于东部晋西挠褶带。

2) 煤层气评价指标差异

鲍温-苏拉特盆地含气饱和度、压力和渗透率、单井产能优于鄂尔多斯盆地。鄂尔多斯盆地 C_2-P_1 主要煤层气评价指标为:含气饱和度低(30%~90%),压力为低压,渗透率低($0.1 \times 10^{-3} \sim 40 \times 10^{-3} \mu m^2$),直井产能低($<7\,000\text{ m}^3/\text{d}$)。鲍温-苏拉特 C—P 主要煤层气评价指标为:含气饱和度高(60%~100%)、压力属正常-超高压、渗透性好(鲍温 $1 \times 10^{-3} \sim 500 \times 10^{-3} \mu m^2$,直井产能高($0.30 \times 10^4 \sim 1.28 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)。鄂尔多斯盆地煤层含气饱和度也较低(30%~90%),压力为低压;渗透率低($1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu m^2$),直井产能低($1.80 \times 10^4\text{ m}^3$)。而苏拉特盆地含气饱和度高(50%~100%),压力为常压且部分超常压,渗透率好($1 \times 10^{-3} \sim 1\,600 \times 10^{-3} \mu m^2$),直井产能高($0.40 \times 10^4 \sim 16.00 \times 10^4\text{ m}^3$)。

3) 水动力条件的差异

鲍温-苏拉特含水系统相对统一,矿化度(平均 $3\,000 \times 10^{-6}$)适宜甲烷菌生成生物气。鄂尔多斯盆地4个含水层系统叠置和对接,局部与地表水系联系;矿化度较大,不利于次生生物成因气^[17,20-22]。

综上所述,鄂尔多斯盆地东缘石炭系-二叠系煤层厚度、煤质、含气量与鲍温盆地二叠系煤层相近,但含气饱和度、压力、渗透率等较差。鄂尔多斯盆地侏罗系煤层厚度、埋深与苏拉特盆地侏罗系煤层相似,但煤阶高,含气量、含气饱和度、压力、渗透率等较差(表4)。

4 我国有利煤层气区块仅相当于国外较有利区块

4.1 建立煤层气富集评价参数分析方法

为了进行定量对比,我们在煤层气富集条件对比参数研究结果基础上,建立煤层气分类对比方法体系,将煤层气富集参数类型划分为区域地质、含煤性、含气性和可采性等4大类,根据煤层气富集条件的经验分析和煤层气勘探开发重要性评判,将上述4类参数的权重分别赋值为0.20,0.25,0.25,0.30,并进一步将这4大类参数细分为9项34小项,再根据具体地质条件逐一小项进行权重赋值。

国内外各盆地和地区的不同参数的取值以实测和参考文献引用为准,如果没有实测值,则根据所处盆地不同部位的地质条件进行类比和推测。对于数据处理方法,如果一个富集参数有多个数据,则使用蒙特卡洛法计算

求取概率值,如果一个富集参数只有两个数据,则取平均值。如果某个富集参数在多个盆地或地区均没有数据评价,则假设该项富集参数在各个盆地或地区取值相同。

实际工作中,选取国内外煤层气勘探开发成功的盆地和地区按照中-高阶煤型(10个)和低阶煤型(6个)分类,以煤层气平均单井产量为纵坐标,区域地质系数、含煤性系数、含气性系数和可采性系数等为横坐标,建立相关系数图,进行分类对比研究。

4.2 中-高煤阶型煤层气富集条件对比结果

根据上述对比方法,发现中国主要盆地中-高煤阶型煤层气地质条件比美国、澳大利亚要复杂,尤其是可采性差异明显。具体表现如下:

1) 区域地质差异明显

中国沁水盆地等石炭纪-二叠纪聚煤,经多期强烈改造,多数盆地构造较复杂。而美国圣胡安盆地晚白垩世聚煤,后期改造弱,构造简单,区域地质条件比沁水盆地优越。

2) 含煤性差异不明显

和顺、圣胡安3带的含煤性相对较差。和顺区块含煤性系数低与陷落柱发育有关;圣胡安3带含煤性系数低与煤层累厚变化大和灰分含量高有关。

3) 含气性差异明显

圣胡安1带鲍温含气性最好,而圣胡安3带含气性较差。

4) 可采性差异明显

中国主要区块储层压力低,以低压为特征,渗透率普遍低于国外同类型盆地,水动力条件复杂,造成可采性差。

圣胡安、鲍温盆地比鄂尔多斯、沁水盆地条件相对优越。圣胡安盆地1带最有利;3带富集条件与我国韩城等区块相当。我国沁水盆地南部樊庄优于北部和顺(图2)。

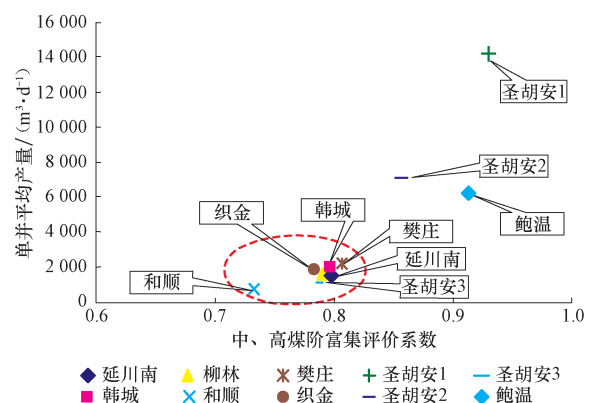


图2 中、高煤阶煤层气富集条件对比结果

Fig. 2 Comparison of enrichment conditions of coalbed methane in mid-high rank coal basins

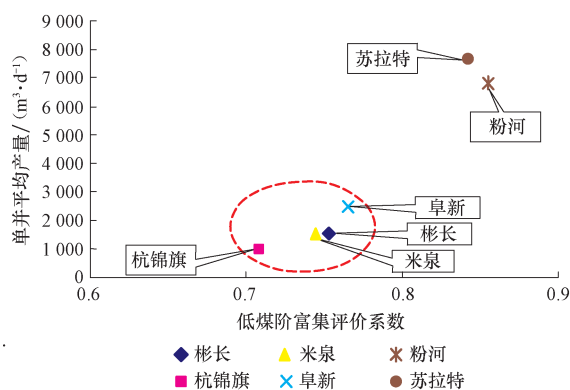


图3 低煤阶煤层气富集条件对比结果

Fig. 3 Comparison of enrichment conditions of coalbed methane in low rank coal basins

4.3 低煤阶型煤层气富集条件对比结果

粉河、苏拉特盆地比鄂尔多斯、准噶尔盆地侏罗系低煤阶型煤层系富集条件优越。粉河、苏拉特盆地存在资源丰度高、渗透率高、压力大、高产的甜点区。其它地区富集条件变差,产量下降(图3)。具体表现如下:

1) 区域地质差异明显

中国低煤阶盆地主要形成于早侏罗世—白垩纪,经历多次强烈构造事件。粉河盆地形成于白垩纪—新近纪,苏拉特盆地形成于晚侏罗世,它们的构造均较简单。

2) 含煤性差异不明显

粉河、阜新和米泉等地区煤层发育,单层厚度12~50 m,累计厚度最大处可达100 m以上,而苏拉特、杭锦旗等地区煤层一般较薄,累计厚度也相对较小。

3) 含气性差异较明显

中国低煤阶盆地与粉河盆地相似,含气量低,比苏拉特盆地差。杭锦旗地区干旱缺水,不利于晚期生物成因气的生成,后期补充少,故含气量低。

4) 可采性差异明显

中国主要区块压力低,以低压为主,渗透率普遍低于国外同类型地区,导致可采性较低。

5 启示与建议

5.1 启示

1) 我国煤层气资源条件总体比美国、澳大利亚差一个等级,虽计算的地质资源量达到 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,但按现有认识和技术经济条件看,近中期可有效勘探开发的目标不多,所以从战略层面看,不宜把中长期发展目标定得太高。

2) 盆地间甚至盆地(区块)内部地质特征、资源品

质差异很大,尤其在我国的构造煤约占1/3,西部低阶煤因地层老、构造改造强而含气量低,华北高阶煤存在断裂、陷落柱影响,所以从战术层面看,要重视差异性分析,预测资源甜点,优选目标,并针对性部署勘探开发工作。更要注意控制速度,盲目加快势必造成一些不必要的失误和浪费。

5.2 建议

1) 制定国家煤层气中长期发展规划时,遵循积极、稳妥的原则,在深入分析近期可利用资源量及其品质、技术适应性及发展趋势基础上,制定科学、合理、可行的奋斗目标和方案。

2) 以国家某机构牵头,组织相关专家一起工作,开展大量基础研究,统一思路、统一方法、统一标准,进行新一轮煤层气资源评价,着重对资源品质、目前技术经济资源、有利目标进行评价,为国家战略决策提供科学依据。

3) 设立专项基金,支持煤层气开发利用的基础理论研究和科技攻关,积极发展适用的工程工艺技术,提高产量、降低成本,提高煤层气开发经济效益。

4) 利用技术服务、专家咨询、学术会议、公开信息及其他手段,打破单位界限,做到资料、理论、技术和经验、教训充分共享,避免重复工作,节约人力、物力和财力。

参 考 文 献

- [1] 王新民,傅长生,石璟,等. 国外煤层气勘探开发研究实例[M]. 北京:石油工业出版社,1998:1-506.
Wang Xinmin, Fu Changsheng, Shi Jin, et al. The study case of development of coal methane in foreign countries[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1-506.
- [2] 冯三利,龙宝林. 美国低阶煤煤层气资源勘探开发新进展[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 124-126.
Feng Sanli, Long Baolin. The low-rank coal bed methane exploration and development of new progress in U. S[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 124-126.
- [3] 员争荣,韩玉芹,李建武,等. 中外低阶煤盆地煤层气成藏及资源开发潜力对比分析——以中国吐哈盆地和保德河盆地为例[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(5): 27-29.
Yuan Zhengrong, Han Yuqin, Li Jianwu, et al. Analogy on CBM reservoir formation and its exploration potential in low rank coal bearing basins in China and other parts of world: An example of Tuha Basin in China and Powder River Basin in USA[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(5): 27-29.
- [4] 张新民,庄军,张遂安. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京:科学出版社, 2002: 32-46.
Zhang Xinmin, Zhuang Jun, Zhang Suian. Geology and resource assessment of CBM in China[M]. Beijing: Science Press, 2002: 32-46.
- [5] 李五忠,赵庆波,吴国干,等. 中国煤层气开发与利用[M]. 北京:

- 石油工业出版社,2008:1-234.
- Li Wuzhong,Zhao Qinbo,Wu Guogan,et al. The development and utilization of CBM in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:1-234.
- [6] 樊生利. 沁水盆地南部煤层气勘探成果与地质分析[J]. 天然气工业,2001,21(4):35-38.
- Fan Shengli. Exploration result and geological analysis of coalbed gas in the south part of Qinshui basin [J]. Natural Gas Industry. 2001,21(4):35-38.
- [7] 朱志敏,宋文杰,崔洪庆. 阜新煤田王营-刘家区煤层气向斜控气研究[J]. 天然气地球科学,2004,15(6):673-675.
- Zhu Zhimin,Song Wenjie,Cui Hongqing. The study of syncline controlling coalbed methane in Wangying-Liujia district in Fuxin Coal Field [J]. Natural Gas Geoscience. 2004,15(6):673-675.
- [8] 孙万禄,陈召佑,陈霞,等. 中国煤层气盆地地质特征与资源前景[J]. 石油与天然气地质,2005,26(2):141-146.
- Sun Wanlu,Chen Zhaoyou,Chen Xia,et al. Geological features and resource potentials of coalbed methane basins in China [J]. Oil & Gas Geology,2005,26(2):141-146.
- [9] 车长波,杨虎林,李富兵,等. 我国煤层气资源勘探开发前景[J]. 中国矿业,2008,17(5):1-4.
- Che Changbo,Yang Hulin,Li Fubing,et al. Exploration and development prospects of coal bed methane (CBM) resources in China [J]. China Mining Magazine,2008,17(5):1-4.
- [10] 杜志敏,付玉,伍勇. 低渗透煤层气产能影响因素评价[J]. 石油与天然气地质,2007,28(4):516-527.
- Du Zhimin,Fu Yu,Wu Yong. Evaluation of factors affecting productivity of low-permeability coalbed methane reservoirs. [J]. Oil & Gas Geology,2007,28(4):516-527.
- [11] 赵庆波,孔祥文,赵奇. 煤层气成藏条件及开采特征[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):552-560.
- Zhao Qingbo,Kong Xiangwen,Zhao Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics [J]. Oil & Gas Geology,2012,33(4):552-560.
- [12] 陈信平,陈富怡. 以预测为指导的中国煤层气勘探开发技术模式探讨[J]. 中国海上油气,2013,25(5):31-34.
- Chen Xinping,Chen Fuyi. A discussion on the technical model guided by prediction in CBM exploration and development in China [J]. China Offshore Oil and Gas,2013,25(5):31-34.
- [13] 李辛子,颜保亮,关达,等. 煤层气非均质分布特征及富集规律探讨[C]//傅雪海,秦勇,Geoff G X Wang,等. 煤层气储层与开发工程研究进展(上). 徐州:中国矿业大学出版社,2009:338-348.
- Li Xinzi,Xie Baoliang,Guan Da,et al. Review of coalbed methane-heterogeneity; implications for enrichment process [C]//Fu Xuehai, Qin Yong,Geoff G X Wang,et al. Advances on CBM reservoir and developing engineering. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,2009:338-348.
- [14] Walter B,Ayers Jr. Coalbed methane in the Fruitland Formation, San Juan Basin, Western United States: giant unconventional gas play [C]// Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999. AAPG Memoir 2003,78:159-188.
- [15] 刘洪林,李贵中,王广俊,等. 沁水盆地煤层气地质特征与开发前景[M]. 北京:石油工业出版社,2009:1-110.
- Liu Honglin,Li Guizhong,Wang Guangjun,et al. Geological characteristic and development prospect of CBM in Qinshui basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2009:1-110.
- [16] 赵靖舟,时保宏. 沁水盆地煤层气富集单元划分[J]. 科学通报,2005,50(S1):126-130.
- Zhao Jingzhou, Shi Baohong. The CBM-enriched units division of Qinshui Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (S1): 126-130.
- [17] 王红岩,张建博,李景明,等. 中国煤层气富集成藏规律[J]. 天然气工业,2004,24(5):11-13.
- Wang Hongyan,Zhang Jianbo,Li Jingming,et al. Enrichment and reservioring law of The coalben methane in China [J]. Natural Gas Industry,2004,24(5):11-13.
- [18] 刘洪林,赵国良,王红岩. 中国高煤级地区的煤层气勘探理论与实践[J]. 石油实验地质,2004,26(5):411-414.
- Liu Honglin,Zhao Guoliang,Wang Hongyan. Coalbed methane exploration theory and practice in the high coal rank areas of China [J]. Petroleum Geology & Experiment. 2004,26(5):411-414.
- [19] 宋岩,柳少波,据宜文,等. 含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J]. 石油学报,2013,34(3):417-426.
- Song Yan,Liu Shaobo,Ju Yiwen,et al. Coupling between gas content and permeability controlling enrichment zones of high abundance coal bed methane [J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(3):417-426.
- [20] Reeves S R. A technical and economic evaluation of Coalbed Methane Production Projects in the Bowen and Sydney Basin of Australia [M]. Townsville; Australia (November,1992):53.
- [21] 叶建平,武强,王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. 煤炭学报,2001,26(5):459-462.
- Ye Jianping, Wu Qiang, Wang Zhihe. Controlled characteristics of hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (5): 459-462.
- [22] 宋岩,张新民. 煤层气成藏机制及经济开采理论基础[M]. 北京:科学出版社,2005:1-46.
- Song Yan,Zhang Xinmin. Accumulation mechanism and economical development theory basis of coalbed methane [M]. Beijing: Science Press,2005:1-46.
- [23] Walter B,Avers Jr. Coalbed methane in the Fruitland Formation, San Juan Basin, Western United States: giant unconventional gas play [C]// Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999. AAPG Memoir,2003,78:159-188.

(编辑 高岩)