

平顶山煤田煤储层物性特征与煤层气有利区预测

姚艳斌¹, 刘大锰¹, 汤达祯¹, 唐书恒¹, 黄文辉¹, 胡宝林², 车 遥¹

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 安徽理工大学资源和环境系, 安徽淮南 232000

摘要: 通过对平顶山煤田采集煤样的煤质、煤岩显微组分、煤相、煤岩显微裂隙分析, 低温氮比表面及孔隙结构和压汞孔隙结构测试, 研究了该区的煤层气赋存地质条件、煤层气生气地质条件和煤储层物性特征。并采用基于 GIS 的多层次模糊数学评价方法计算了该区的煤层气资源量, 预测了煤层气资源分布的有利区。研究结果表明, 该区煤层气总资源量为 $786.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 煤层气资源丰度平均为 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 具有很好的煤层气资源开发潜力。其中, 位于煤田中部的八矿深部预测区和十矿深部预测区周边地区, 煤层累计有效厚度大, 煤层气资源丰度高, 煤层埋深适中, 同时由于该受挤压构造应力影响, 煤储层孔裂隙系统发育, 渗透性高, 是该区煤层气勘探、开发的最有利目标区。

关键词: 煤层气; 平顶山煤田; 储层物性; 有利目标区。

中图分类号: P618.130.2+1

文章编号: 1000-2383(2007)02-0285-06

收稿日期: 2006-05-20

Coal Reservoir Physical Characteristics and Prospective Areas for CBM Exploitation in Pingdingshan Coalfield

YAO Yan bin¹, LIU Da meng¹, TANG Da zhen¹, TANG Shu heng¹, HUANG Wen hui¹,
HU Bao lin², CHE Yao¹

1. Faculty of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Department of Resources and Environmental Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China

Abstract: Based on the elemental, maceral, micro fracture, coal facies, liquid nitrogen adsorption/desorption and mercury injection analyses, the coalbed methane (CBM) geological characteristics, coal reservoir physical characteristics, CBM resources and its exploration and exploitation prospect in Pingdingshan coalfield were systematically studied. The in place CBM resource was calculated using the fuzzy mathematics and stacking analysis of GIS (geographic information system) method. The results show that the in place CBM resources and the resources abundance in Pingdingshan coalfield are about $786.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ respectively, which are very favorable for CBM exploration and development. The optimum target areas in this coalfield are the deep prediction districts of No. 8 and No. 10 coal districts, where the coal reservoirs have higher coal thickness and CBM resource abundance, good burial depth, well connected pore cleat systems, and higher permeability resulting from the tectonic stress.

Key words: coalbed methane; Pingdingshan coalfield; coal reservoir characteristics; prospective and target area.

平顶山煤田位于河南省平顶山市, 横跨宝、叶、襄、郟 4 县。东起洛岗正断层, 西北至韩梁矿区, 东北到襄郟正断层, 南至煤层露头, 整个煤田的勘探矿区和预测区面积约 980 km^2 , 煤炭探明储量和预测储量共计 92 亿 t, 煤层气资源量 $786.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 资源丰度平均为 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 具备良好的煤层气资源潜力。同时该区也是我国煤与瓦斯突事故严重矿区, 开发利用该区的煤层气具有充分利用资源、保

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40572091); 国家重点基础研究发展计划课题 (No. 2002CB211702); 中国地质调查局资助项目 (No. 20021010004); 国家重点基础研究发展计划课题 (No. 2006CB202202)。

作者简介: 姚艳斌 (1978-), 男, 博士研究生, 从事油气及煤层气地质研究工作。E-mail: yaoyanbin@126.com

表 1 平顶山煤田煤样煤质、煤岩显微组分和煤相分析

Table 1 Elemental and maceral analyses of selected coals in Pingdingshan coalfield

样品	采样点	煤层	$R_{\infty m}$ (%)	煤质分析				煤岩显微组分分析					煤相
				M_{ad} (%)	A_{ad} (%)	C_{ad} (%)	H_{ad} (%)	C/H	V (%)	I (%)	Q (%)	M (%)	
Bk1	八矿	己组	1.09	0.66	10.03	79.12	4.32	1.31	56.2	42.7	0	1.1	干燥泥炭沼泽相
Bk3	八矿	己组	1.12	0.65	12.98	76.18	4.14	1.31	70.5	29	0	0.5	潮湿森林沼泽相
Bk5	八矿	己组	1.13	0.62	10.71	77.66	4.2	1.32	57.1	40.3	0	2.6	干燥泥炭沼泽相
Bk2-1	八矿	戊组	0.98	0.84	17.92	70.91	4.02	1.26	69.9	22.6	7.2	0.3	活水泥炭沼泽相
Bk2-3	八矿	戊组	0.93	0.94	6.8	81.38	4.55	1.28	82.9	13.8	3.3	-	活水泥炭沼泽相
Gz1	高庄矿	己组	0.86	1.47	17.93	68.26	3.7	1.32	13.9	72.3	11.9	1.9	干燥泥炭沼泽相
Gz3	高庄矿	己组	0.82	1.34	8.12	77.48	4.57	1.21	55.8	31.7	10.1	2.4	干燥泥炭沼泽相
Gz5	高庄矿	己组	0.74	1.43	12.24	74.32	3.97	1.34	49.2	33.1	12.4	5.3	干燥泥炭沼泽相
Lk1	六矿	丁组	1	0.94	35.22	54.18	3.24	1.19	63.2	7.2	8.8	20.8	活水泥炭沼泽相
Lk3	六矿	丁组	0.94	1.15	37.16	51.96	3.3	1.12	7.4	25.4	9.1	58.1	活水泥炭沼泽相
Lk5	六矿	丁组	0.94	1.11	11.96	74.82	4.68	1.14	77	10.1	11.7	1.2	活水泥炭沼泽相

证煤矿安全、保护环境等多重经济效益和社会效益。

“九五”—“十五”期间, 科研工作者对该区的煤层气资源条件和煤层气资源分布特征作过一定的研究(王洪林等, 2000; 苏复义等, 2001), 同时多家单位已在该区进行过煤层气的选区评价或勘探开发试验工作, 但限于以往的认识水平及开发技术条件, 没有在该区取得煤层气开发试验的突破(张遂安, 2004)。失败的主要原因之一是对该区煤层气气藏的不均一性认识不足, 造成在井位选择和开发方案上出现了偏差。煤层气藏不均一性产生的主要原因是煤储层的不均一性, 实践证明我国的煤储层不能套用美国煤层气开发的理论, 我国的煤储层普遍存在“三低一高”的现象(汤达祯等, 2003), 从勘探选区到井网布置, 甚至到煤层气储量评价, 开展煤储层的精细定量描述工作势在必行(王生维等, 2000, 2004)。本文通过对平顶山煤田煤储层的生气地质条件、煤储层物性特征及煤层气资源量分布发育特征的研究, 评价了该区煤层气资源开发潜力, 预测了煤层气资源有利区的分布。

1 煤层气赋存地质条件

平顶山煤田总体构造形态为宽缓的复式向斜, 即李口向斜。向斜轴向 NW-SE, 向 NW 倾伏, 两翼地层基本对称, 地层走向 $290^{\circ} \sim 310^{\circ}$, 倾角 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 向斜轴部地层倾角变缓, 发育次级褶皱及 2 组断层。本区经历了印支、燕山早期、燕山晚期及喜山 4 次构造运动。煤田构造变形受秦岭褶皱带演化的控制, 煤田内均发育有由秦岭造山带指向地台内部的逆冲推覆构造。

石炭系和二叠系地层为本区主要含煤地层, 共含煤 9 组, 计 88 层, 一般 40 余层, 总厚度近 800 m。煤层可采有效厚度一般为 6~20 m, 具有西厚东薄、南厚北薄的特点。其中主要可采煤层为山西组的二₁(己₁₆₋₁₇)煤和下石盒子组的三₉(戊₉₋₁₀)煤。二₁煤厚度为 0.14~20.54 m, 平均 4.00 m; 煤层平均埋深在 400~1 200 m, 中部埋深较大, 最深可达 1 500 m; 底板岩性主要为泥岩, 分布在李口向斜的轴部及两翼的深部, 其次为砂质泥岩和粉砂岩, 在向斜北翼浅部连续分布, 在向斜南翼呈 3 个不连续的朵状分布, 砂岩盖层以条带状伸入砂质泥岩和粉砂岩分布区, 分布范围非常有限(桑树勋等, 1999); 顶板一般为砂质泥岩和细砂岩。三₉煤厚 0~8.9 m, 平均为 1.5 m, 埋深在 200~1 200 m, 中部埋深较大, 最深可达 1 400 m; 顶板为泥岩、砂质泥岩和细砂岩, 分布规律与二₁煤类似; 底板一般为泥岩。这 2 层煤在整个煤田内发育较稳定。

从该区煤层的煤厚、埋深、煤层发育及赋存特征来看, 除部分地区由于受到构造破坏而导致煤层气的逸散外, 大部分地区有利于煤层气的富集。特别是在煤田的中部向斜轴部地区, 地层倾角较缓, 地质构造较简单, 有效覆盖层厚, 是煤层气开发选区的有利目标带。

2 煤层气生气地质条件

区内主采煤层煤岩镜质组最大反射率 $R_{\infty m}$ 一般都在 0.8%~1.2%之间(表 1), 为基本上未受叠加热场影响的深成变质煤, 煤变质程度呈自西而东, 由

南向北, 由浅部到深部逐渐增高的趋势. 整个煤田以 1/3 焦煤为主, 肥、气煤次之.

据井下观察和实验室分析测试, 区内主采煤层以光亮-半亮型煤为主, 其次为半暗型与暗淡型. 煤层结构为条带状、均一状、线理状或其他结构, 具块状及层状结构. 煤岩显微组分中以镜质组 (*V*) 为主, 一般都在 50%~80% 之间, 其次是惰质组 (*I*), 含量一般在 15%~40% 之间, 壳质组 (*Q*) 和矿物质 (*M*) 含量较少 (表 1). 总体上, 由浅到深, 由北向南, 煤岩镜质组含量逐渐增高, 煤岩类型逐渐接近于光亮煤.

元素分析结果表明, 该区碳含量较高, 一般在 50%~80% 之间, 平均 71%; 氢含量一般 3.3%~4.5%, 平均 4.1%; 碳氢原子含量比一般 1.12~1.34; 煤中水分含量一般 0.6%~1.5%, 灰分含量一般 7%~37% (表 1).

煤相分析结果表明, 该区主采煤层的煤相主要为活水泥炭沼泽相和潮湿森林沼泽相, 部分为干燥森林沼泽相, 其中山西组和下石盒子组底部煤层主要为活水泥炭沼泽相, 中部以潮湿森林沼泽相和活水泥炭沼泽相互层为主, 而顶部煤组多为干燥森林沼泽相 (表 1).

总的来看, 该区的煤岩、煤质及煤级特征与美国已经成功实现商业化开发的黑勇士盆地类似 (Hewitt, 1984; Pashin, 1998), 该区分布较多的活水泥炭沼泽相和潮湿森林沼泽相也说明该区具有良好的生气地质条件.

3 煤层气储层物性特征

3.1 煤储层显微裂隙发育特征

显微裂隙是沟通孔隙与宏观裂隙的桥梁, 其发育程度影响储层的渗透性能. 本次研究中, 采用了德国 LEITZ 公司生产的 LABORLXE 12 POL 的荧光显微镜 (50 倍物镜) 对采集的样品进行了显微裂隙研究.

研究发现, 该区煤储层显微裂隙非常发育, 平均裂隙密度一般达到 2~52 条/cm², 尤其是该区的 2₁ 煤和三₉ 煤, 其裂隙密度大部分都在 17 条/cm² 以上, 有的甚至达到 50 条/cm² 以上, 这在华北其他区煤储层中是罕见的 (姚艳斌等, 2006). 从裂隙发育类型来看, 以宽度 < 5 μm 且长度 ≤ 300 μm 的裂隙最发育, 约占 54.3%~94%, 平均 76.5%; 其次是宽度 < 5 μm 且 300 μm < 长度 ≤ 1 mm 的裂隙, 约占 5.1%~46.4%, 平均 19.3%; 而宽度 > 5 μm 的宏观

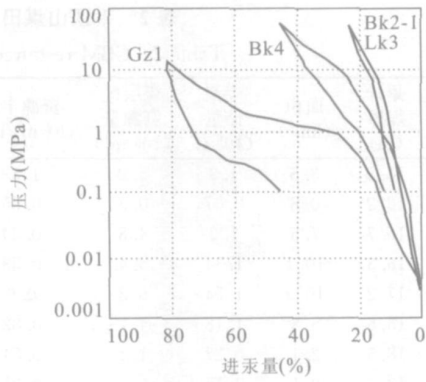


图 1 平顶山煤田煤样压汞曲线

Fig. 1 Mercury injection curves of selected coals in Pingdingshan coalfield

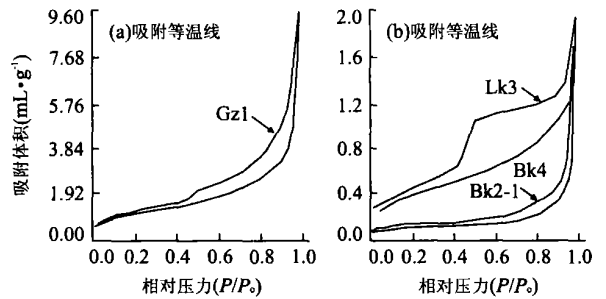


图 2 平顶山煤田煤样低温氮吸/脱附曲线

Fig. 2 Liquid nitrogen isotherm adsorption/desorption on selected coals in Pingdingshan coalfield

能辨认的裂隙较少. 该区广泛发育显微裂隙, 可能是由于煤层受后期挤压应力改造而造成的 (Li, 2001; Li and Ogawa, 2001; 郭德勇等, 2002).

3.2 煤储层孔隙系统发育特征

3.2.1 压汞孔隙特征 压汞测试由中石油廊坊分院储盖层实验室采用 SY/T 5346 1994 标准, 在 9410 型全自动压汞仪上测试获得.

据压汞孔隙度实测结果, 该区煤储层孔隙度变化较大, 一般都在 4%~10% 之间; 驱排压力在 1.65~13.62 MPa, 平均为 7.93 MPa, 退汞效率为 38.72%~89.23%, 平均为 72.95%. 从区域分布来看, 西部较东部高, 北部较南部高. 据 4 块样品的压汞实验测试曲线观察 (图 1), 孔隙结构最好的是高庄矿的 Gz1 号样, 反映了各级别孔隙均较发育, 孔隙之间的连通性好, 有利于煤层气的聚集、运移和解吸; 其次是八矿的 Bk4 号样, 孔隙类型以小孔为主, 其他孔较少, 小孔与大、中孔之间的连通性差. 该类孔隙类型对煤层气的聚集和运移的贡献为中等; 其

表 2 平顶山煤田 2 000 m 以上煤层气资源量计算结果

Table 2 CBM resources above 2 000 m in Pingdingshan coalfield

矿区	累计煤厚 (m)	面积 (km ²)	煤炭储量 (10 ⁸ t)	煤层气资源量 (10 ⁸ m ³)	资源丰度 (10 ⁸ m ³ /km ²)	勘探区/预测区	累计煤厚 (m)	面积 (km ²)	煤炭储量 (10 ⁸ t)	煤层气资源量 (10 ⁸ m ³)	资源丰度 (10 ⁸ m ³ /km ²)
十一矿	15.5	3.8	1.3	5.2	1.39	韩梁勘探区	22.1	63	4.42	35.4	0.56
九矿	16.2	0.8	0.07	0.3	0.35	宝丰预测区	22	74	2.91	23.2	0.31
五矿	16.7	7.5	1.2	4.8	0.64	百牛岗预测区	14.2	48	0.57	7.1	0.15
七矿	16.3	10.1	1.34	5.4	0.53	首山预测区	7.9	140	11.67	140	1
六矿	17.2	10.3	1.54	6.2	0.6	八矿深部预测区	14.1	22	4.27	35	1.59
四矿	18.5	5.8	1.18	4.7	0.82	十矿深部预测区	14.1	22	4.37	35	1.59
二矿	18.5	2.1	0.27	1.1	0.51	一四六矿深部预测区	14.7	36	5.11	33.2	0.92
三矿	18.5	2.1	0.16	0.7	0.31	滑角一井预测区	15	63	13.29	160.8	2.55
一矿	17	12.5	2.3	9.2	0.74	滑角二井预测区	15.5	52	11.25	123.8	2.38
十矿	15.8	8.3	0.97	4	0.48	堂街预测区	5.6	120	8.48	72.9	0.61
十二矿	15.8	0.8	0.93	3.7	4.95	冢头预测区	7.3	171	4.52	18.1	0.11
八矿	15.8	40.3	5.48	32.9	0.82	九宫山井田	9.6	64	3.73	21.2	0.33
红旗矿	14.1	3.8	0.79	3.1	0.84	平顶山煤田煤层气资源量合计: 786.8 × 10 ⁸ m ³					

他 2 个样为六矿的 Lk3 号样和 Bk2 1 号样, 这 2 个样品的孔隙以微小孔为主, 小孔与大、中孔间连通性差, 不利于煤层气的聚集和扩散、运移。

3.2.2 低温氮孔隙特征 煤储层孔比表面积及孔径分布采用低温氮吸附仪 (ASAP2000 型) 测定, 测试单位为中石油廊坊分院储盖层实验室, 测试标准为 SY/T6154 1995。据测试结果, 研究区主采煤层的 BET 比表面积为 0.35 ~ 3.91 m²/g, 平均为 0.68 m²/g, BJH 总孔体积在 2.14 ~ 14.4 mL/g, 平均 5.52 mL/g。

据 4 块样品的低温氮吸附及脱附测试曲线, 该区孔隙类型主要有 3 种。第 1 种为高庄矿的 Gz1 号样 (图 2a), 特点是孔隙最大吸附量非常大, 达到 9.6 mL/g, 压力的增大开始时增长平缓, 在压力接近 P₀ 时开始迅速增加。反映孔隙类型为: 从微孔到大孔各个孔径段的孔隙均较发育且连通性较好的孔隙结构, 这种孔隙对煤层气的聚集和开发最有利。第 2 种是六矿的 Lk3 号样 (图 2b), 特点是最大吸附量约 2 mL/g, 吸附线稳定上升, 解吸线在中间压力段出现滞后环。反映的孔隙类型为: 孔隙发育以微孔为主, 微孔是开放型的“墨水瓶”孔, 这种孔隙利于煤层气的聚集, 但因为存在瓶颈孔隙, 所以对开发不利。第 3 种是八矿的 Bk4 和 Bk2 1 号样 (图 2b), 最大吸附量约 1.5 mL/g, 吸附线和解吸线平行, 在开始段几乎不上升, 在压力接近 P₀ 时才急剧上升。反映的孔隙类型是微孔 (或小孔) 发育且占绝对优势, 其他孔不发育, 多为连通性不好的死孔隙, 这种孔隙对煤层气的开发不利。

3.2.3 孔隙结构类型 压汞法一般用于测量孔径大于 3.75 nm 以上范围内的孔隙结构特征, 低温氮法所测定的孔径范围为 1.7 ~ 300 nm 之间。为了精确得出该区煤储层的孔隙结构特征, 笔者将这 2 种方法相结合, 分析得出了该区的孔隙结构分布特征。该区煤储层的孔隙结构特征区域非均质性较大, 在煤田西南部的六矿以微孔为主, 约占 64%; 小孔其次, 约占 30%; 在煤田中南部的八矿以小孔为主, 约占 76%; 微孔其次, 约占 13%; 而位于西北部的高庄矿以小孔为主 (微孔 20%, 小孔 50%, 中孔 24%, 大孔 6%), 而各级别孔隙均发育。从孔隙结构来看, 高庄矿最有利, 八矿和六矿相对稍差。

3.3 煤储层渗透率

据研究区 12 件煤岩样品实验室渗透率测定结果, 该区的煤储层的渗透率值级差较大, 其中三₁煤层渗透率为 (0.806 ~ 27.7) × 10⁻³ μm², 平均为 5.7 × 10⁻³ μm²; 二₁煤为 (0.001 ~ 10.02) × 10⁻³ μm², 平均 5.08 × 10⁻³ μm²。由于测试样品较少, 不能完全确定该区的渗透率好坏, 但从几个样品的测试来看, 确实存在一部分高渗透率区域。

从井下观察来看, 该区的煤岩体结构类型多为原生 - 破裂结构, 糜棱煤少见。顺层构造滑动造成该区的构造煤呈层发育, 在剖面上形成特征的硬煤 - 软煤 - 硬煤“三层结构”即“两硬夹一软”的特征 (Li, 2001; 郭德勇等, 2002)。煤层中间的软煤带 (又称碎裂煤) 是瓦斯高突煤层。同时由于受构造及挤压应力的作用, 煤层甲烷含量高、孔裂隙系统发育、渗透性强。这些软煤带除部分受构造破坏严重而形成

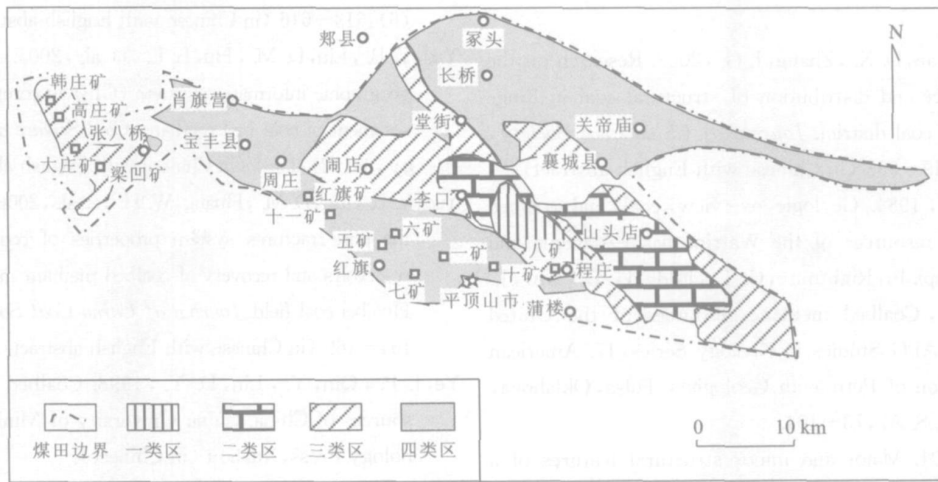


图 3 平顶山煤田煤层气勘探开发有利区分布区块

Fig. 3 Prospective and target areas for CBM exploitation and exploration in Pingdingshan coalfield

糜棱煤外, 均是煤层气开发的有利目标层 (Li, 2001; Li and Ogawa, 2001).

4 煤层气资源量评价

煤层气的勘探开发, 首先要求勘探区煤层中赋存足够的煤层气资源作保证. 因此, 煤层气资源量成为勘探开发决策的重要依据之一. 前人(叶建平等, 1998; 张新民等, 2002)对该区的煤层气资源评价均建立在大区评价的基础上, 这样的煤层气资源量计算结果对于单个矿区来看显得精度不够, 不能够指导研究区内煤层气资源勘探开发选区, 因此笔者对该区的资源量进行了重新计算. 本次资源评价在原来煤田内各矿区、勘探区和预测区的基础上, 又进行了进一步的网格细分, 采用 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 划分单元网格, 在地理信息系统的数字平台下(采用美国 MAPInfo 公司的桌面地理信息系统软件 MAPInfo Professional 7.0)进行了网格叠加计算(姚艳斌等, 2005), 求得了该区内各矿区(井田)、勘探区、预测区的资源量、资源丰度等数据(表 2).

平顶山煤田(包括韩梁矿区)煤层气资源量共计约 $786.8 \times 10^8\text{ m}^3$, 资源量最大的地区分布在中部的首山预测区、滑一井预测区等地区; 该区煤层气资源丰度约 $(0.3 \sim 4.9) \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$, 平均 $1.05 \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$, 高丰度区也主要分布在矿区的中部地区.

5 煤层气资源有利区预测

从该区煤层气赋存条件、煤层气生气地质条件、煤层气储层物性特征、煤层气资源量等 4 项条件来看, 该区的大部分开发条件虽然比我国目前进入商业化试开发的沁水盆地南部地区略差, 但是相对华北其他区域较好, 从治理瓦斯事故同时开发利用煤层气的角度, 应该加快投入煤层气资源的开发.

为了在平顶山煤田确立合理的目标区, 笔者采用“基于 GIS 的多层次模糊数学方法”, 从煤储层地质特征、煤储层物性特征、煤层气封盖特征三大项, 煤厚、煤级、孔隙度、渗透率、埋深、构造地质条件等 12 小项, 对该区煤层气有利区域进行了综合评价和预测(姚艳斌等, 2005). 预测结果表明, 该区最有利的地区为煤田中南部(李口向斜的南部)的十矿和八矿深部预测区周围, 较有利区主要分布在煤田东南部首山预测区及煤田中部的滑一井预测区的东部地带; 其他为较不利区和不利区(图 3).

选择八矿和十矿深部预测区作为最有利的目标区, 主要有以下原因: 第一, 该区位于李口向斜的南部, 地质条件稳定, 地层倾角小, 有效煤厚一般为 $11 \sim 15\text{ m}$, 具备良好的煤层气赋存条件; 第二, 煤变质条件中等, 镜质组最大反射率约 1.3% , 煤岩以镜煤为主, 镜质组含量约 68% 左右, 具备良好的生气潜力; 第三, 煤层甲烷含量高, 煤层气资源丰度高, 具备良好的资源条件. 最后, 目标区煤层埋深适中, 两主采煤层一般都在 $600 \sim 800\text{ m}$ 之间, 且煤层孔裂隙系统发育, 渗透性好, 是该区煤层气资源开发的最有利地带.

References

- Guo, D. Y., Han, D. X., Zhang, J. G., 2002. Research on the occurrence and distribution of structural coal in Pingdingshan coal district. *Journal of China Coal Society*, 27(3): 249–253 (in Chinese with English abstract).
- Hewitt, J. L., 1984. Geologic overview, coal, and coalbed methane resources of the Warrior basin Alabama and Mississippi. In: Rightmire C. T., Eddy, G. E., Kiw, J. N., eds., Coalbed methane resources of the United States, AAPG Studies in Geology Series 17. American Association of Petroleum Geologists Tulsa, Oklahoma, 74101, U. S. A., 73–104.
- Li, H. Y., 2001. Major and minor structural features of a bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield, northern China. *International Journal of Coal Geology*, 47: 101–113.
- Li, H. Y., Ogawa, Y., 2001. Pore structure of sheared coals and related coalbed methane. *Environmental Geology*, 40: 1455–1461.
- Li, W. Y., Xia, B., Li, D. X., 2006. Structural geochemical study of the Yuxi fold thrust belt in the southern North China plate. *Journal of China University of Geosciences*, 17(2): 95–102.
- Pashin, J. C., 1998. Stratigraphy and structure of coalbed methane reservoirs in the United States: An overview. *International Journal of Coal Geology*, 35: 209–240.
- Sang, S. X., Fan, B. H., Qin, Y., 1999. Conditions of sealing and accumulation in coal bed gas. *Oil & Gas Geology*, 20(2): 104–107 (in Chinese with English abstract).
- Su, F. Y., Ning, Z. W., Guo, Y., 2001. Prospective study on coalbed gas resources in Carboniferous Permian, West Henan. *Petroleum Exploration and Development*, 2(23): 23–25 (in Chinese with English abstract).
- Tang, D. Z., Qin, Y., Hu, A. M., 2003. Advances and tendencies in geological reservoirs on coalbed methane. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(6): 644–647 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. L., Tang, S. H., Lin, J. F., 2000. Assessment on coal reservoirs of North China. China University of Mining & Technology Press Xuzhou (in Chinese).
- Wang, S. W., Duan, L. X., Chen, Z. H., et al., 2004. Reservoir evaluation for exploration and development of coal bed gas. *Natural Gas Industry*, 24(5): 82–84 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. W., Duan, L. X., Zhang, M., et al., 2000. Parameters and flow chart for coalbed methane pool analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(6): 613–616 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. B., Liu, D. M., Hu, B. L., et al., 2005. Application of geographic information system (GIS) to comprehensive assessment of coal bed methane. *Coal Science and Technology*, 33(12): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. B., Liu, D. M., Huang, W. H., et al., 2006. Research on the pore fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery of coalbed methane in Huainan and Huaibei coal field. *Journal of China Coal Society*, 31(2): 164–169 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. P., Qin, Y., Lin, D. Y., 1998. Coalbed methane resources of China. China University of Mining & Technology Press Xuzhou (in Chinese).
- Zhang, S. A., 2004. Analysis of misleading theories in the progress of coalbed methane exploration. *China Coalbed Methane*, 1(2): 7–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. M., Zhuang, J., Zhang, S. A., 2002. Coalbed methane geology and resource evaluation in China. Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 郭德勇, 韩德馨, 张建国, 2002. 平顶山矿区构造煤分布规律及成因研究. *煤炭学报*, 27(3): 249–253.
- 桑树勋, 范炳恒, 秦勇, 1999. 煤层气的封存与富集条件. *石油与天然气地质*, 20(2): 104–107.
- 苏复义, 宁正伟, 郭友, 2001. 豫西石炭—二叠系煤层气资源前景研究. *石油勘探与开发*, 2(23): 23–25.
- 汤达祯, 秦勇, 胡爱梅, 2003. 煤层气地质研究进展与趋势. *石油实验地质*, 25(6): 644–647.
- 王洪林, 唐书恒, 林建法, 2000. 华北煤层气储层研究与评价. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 王生维, 段连秀, 陈钟惠, 等, 2004. 煤层气勘探开发中的煤储层评价. *天然气工业*, 24(5): 82–84.
- 王生维, 段连秀, 张明, 等, 2000. 煤层气藏分析的参数与流程. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(6): 613–616.
- 姚艳斌, 刘大锰, 胡宝林, 等, 2005. 地理信息系统在煤层气资源综合评价中的应用. *煤炭科学技术*, 33(12): 1–4.
- 姚艳斌, 刘大锰, 黄文辉, 等, 2006. 两淮煤田煤储层孔—裂隙系统与煤层气产出性能研究. *煤炭学报*, 31(2): 164–169.
- 叶建平, 秦勇, 林大扬, 1998. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 张遂安, 2004. 有关煤层气勘探过程中的理论误导剖析. *中国煤层气*, 1(2): 7–8.
- 张新民, 庄军, 张遂安, 2002. 中国煤层气地质与资源评价. 北京: 科学出版社.