准东地区煤层气富集区预测及主控因素研究

罗 磊,汤达祯,陶 树,许 浩,李 松,尹振勇
(中国地质大学(北京) 能源学院 国家煤层气工程中心煤储层实验室,北京 100083)

摘 要: 为预测准东煤层气富集有利区,在前期调研的基础上,结合煤岩煤质和吸附能力测试,开展了准东煤层气富集区博格达山前、吉木萨尔凹陷和梧桐窝子凹陷煤层气富集因素控制下的含气性研究,确定了博格达山前地区是勘探的首选目标区。结果表明:博格达山前地区煤层气成藏条件好,含气性突出,埋深适中、煤层展布情况好、累计厚度大,是中高挥发分、低水、低灰质煤,煤岩吸附能力较强;准东煤层气富集主控因素为煤岩煤质和风氧化带深度,煤岩吸附能力与煤阶、镜质组含量呈正相关,与惰质组及水分则呈负相关,拟合优度高;风氧化带在准东地区分布具有北深南浅的特点,博格达山前地区煤层埋深均在风氧化带底界以深。

关键词: 准东煤田;煤层发育;煤岩煤质;风氧化带;富集区
中图分类号: P618.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)09-0122-07

Study on prediction and major control factors of coalbed methane enrichment zone in Zhundong Area

Luo Lei, Tang Dazhen, Tao Shu, Xu Hao, Li Song, Yin Zhenyong
(*Coal Reservoir Lab, National Coalbed Methane Engineering Center, School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to predict the coalbed methane enrichment favorable zone in Zhundong Area, based on the previous investigation, in combination with the lithotype and coal quality and adsorption capacity test, a study was conducted on the gas bearing under the control of the coalbed methane enrichment factors, front area of Bogeda Mountain of Zhundong coalbed methane enrichment zone, Jimusaer Depression and Wutongwozi Depression. The front area of Bogeda Mountain was the first selected target zone. The results showed that the front area of Bogeda Mountain had good coalbed methane formation condition, the gas bearing was obvious, the buried depth was moderate, the seam layout condition was good and the accumulated thickness was high. The seam was medium and high volatile, low moisture content and low ash quality coal. The coal and rock adsorption capacity was high. The main control factors of the coalbed methane enrichment in Zhundong Area were that the lithotype and coal quality and air oxidized zone depth, coal and rock adsorption capacity and coal grade, vitrinite content would be in a positive correlation, would be in a negative correlation to the inertinite and moisture content and the fitting optimized was high. The features of the air oxidized zone distributed in Zhundong Area would be deep in north and shallow in south. The seam in the front area of Bogeda Mountain generally would be deeper than floor line of the air oxidized zone.

Key words: Zhundong Coalfield; seam development; lithotype and coal quality; air oxidized zone; enrichment zone

0 引 言

准噶尔东部以下地区低阶煤层气尚处于勘探开发的起步阶段,而煤层厚度大、渗透性好、资源量大以及与常规油气相伴生的特点,使其具有良好的勘探开发前景[1]。由于低阶煤层气的特殊性及差异性[2],孔渗特性已经不再是评价低阶煤层气储层物性的主要方面,针对低阶煤层气成藏特征应聚焦在煤阶、煤岩煤质和保存条件上[3-5],对具体地区(准东)即是气源和风氧化带深度等。不同的煤岩组分

收稿日期: 2015-07-08; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2015.09.022
基金项目: 中国地质调查局公益资助项目(1211302108025-4)
作者简介: 罗 磊(1990—),男,安徽亳州人,硕士研究生。Tel:13269676151,E-mail:luol_90@163.com
引用格式: 罗 磊,汤达祯,陶 树,等.准东地区煤层气富集区预测及主控因素研究[J].煤炭科学技术,2015,43(9):122-128.
LuoLei, Tang Dazhen, Tao Shu, *et al*.Study on prediction and major control factors of coalbed methane enrichment zone in Zhundong Area[J]. Coal Science and Technology,2015,43(9):122-128.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

及宏观煤岩类型反映了不同的沉积环境,也表现在生气潜力、产气特征和吸附能力的差异[6]。普遍认为,壳质组吸附能力最弱,对于镜质组和惰质组对吸附能力的影响,不同学者抱有不同的观点,而关于镜质组和壳质组二者吸附能力的比较和二者对吸附能力的影响,不同的学者有不同意见[7-8],也有学者提出了镜质组和惰质组与吸附能力之间的相关关系受盆地地质特征的控制[9]。

自 2006 年以来,在准东地区陆续进行的煤层气勘探工作中,阜煤 1 井八道湾组煤层最高日产气量 1 000 m^3,彩 504 井西山窑组煤层段(2 567 ~ 2 583 m)射孔压裂后,获得日产 7 300 m^3 左右的煤层气。准东地区也存在含气量不高的地区,如沙煤 1 井和大井地区含气量大多低于 1 m^3/t[10-11]。因此,不同构造单元内含气量的差异引发了对不同次级构造单元内煤储层特征的思考,如次级构造单元内的煤层发育特征、煤岩煤质及变质程度的差异等,然而这些因素又直接影响了生气潜能。另外,该区风氧化带底界较深,大部分煤层处于风氧化带范围内,这对煤层气的保存及富集极为不利。因此,该区煤层气富集有利区严格受风氧化带分布特征控制。笔者从煤岩煤质特征为切入点,深入分析低阶煤范围下煤阶、煤质以及惰质组和镜质组对吸附能力的影响,结合风氧化带分布特征,对该区煤层气富集区进行预测。

1　地质概况

准东地区隆起区位于准噶尔盆地东部,阜康五彩湾凹陷一线以东地区,北邻卡拉麦里山、南接博格达山。包括石树沟凹陷、石钱滩凹陷、梧桐窝子凹陷、吉木萨尔凹陷、木垒凹陷和沙奇凸起等 13 个次级构造单元,如图 1 所示[12-13]。

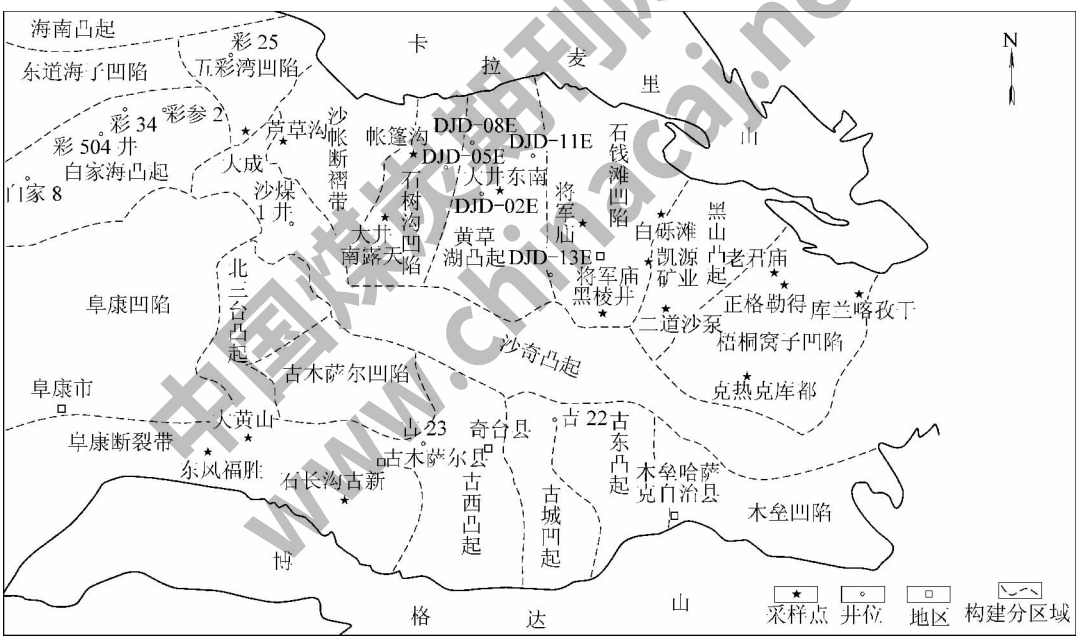


图 1　准东地区构造分区及采样点分布

Fig. 1　Structure partition and sampling point distribution in Zhundong Area

晚印支运动对准东地区进行了强烈的改造,进一步增强了准东地区隆坳相间的棋盘状构造格局,准东白垩系以下地震反射构造层呈凹凸相间、错落有致的棋盘状构造格局。克拉美丽山的隆升,为准东地区侏罗系提供了物源[14];然而燕山期大规模陆相成煤湖盆,使八道湾组(J_1b)沉积具有填平补齐的性质,仅发育局部可采煤层;西山窑组(J_2x)沉积期间盆地处于均衡沉降阶段,该区主力煤层大多赋存于该组[15]。古构造演化和沉积特征控制了准东地区煤层的差异性分布。

八道湾组煤层主要发育于盆缘,大井地区-北山煤窑-老君庙一带含煤 1 ~ 4 层,总厚 0.98 ~ 7.22 m;东部邻近巴里坤地区含煤 14 层,总厚 45.25 m;阜康大黄山地区含煤 6 ~ 19 层,总厚 54.53 m。准东地区西山窑组煤层北部比南部富集、东部比西部富集,该组准东地区分布有 3 个富煤区:将军庙以东的东黑山凸起(隆起)两侧;另一个较小的富煤区在帐篷沟凸起两侧;第 3 个富煤区在纱帐

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

和阜康凹陷以西。黑山凸起东部地区含煤 8～22 层，总厚 32～49.94 m；纱帐和阜康一线以东，可采煤层 3～8 层，总厚 25.83～69.25 m；大井至黑山凸起地区含可采煤层 2～12 层，总厚 27.03～57.75 m。

2　煤岩物性特征

对于煤层气开发来说，煤储层物性可总结为含气性和渗透性等 2 个方面特性，其中含气性是评价煤层气富集的决定性条件[16]。煤岩煤质是生气的先导条件和物质基础，也是吸附能力的主控因素和煤层气的储集空间，其从根本上影响了煤层气的生、储条件。由于研究区富煤区煤层埋深较浅，甲烷风氧化带对煤层含气性的影响至关重要。

2.1　煤岩煤质

准东地区煤岩变质程度普遍偏低，全区煤阶分布呈现出两边高、中间低的趋势，即大井地区以褐煤为主，其余以长焰煤为主、并有少量的褐煤和气煤（采样点如图 1 所示）。宏观煤岩类型分布特征基本和煤阶分布规律相吻合，大井地区以暗淡型煤为主，偶见半亮型煤，条带状结构，其中镜煤条带中割理密度为每 5 cm 有 8～17 条（图 2）。阜康地区长焰煤多以半亮型煤为主，部分地区分布有构造煤，如大黄山矿区；煤岩中几乎不见割理发育，扫描电镜下可见有零星的微小孔发育（图 3）。

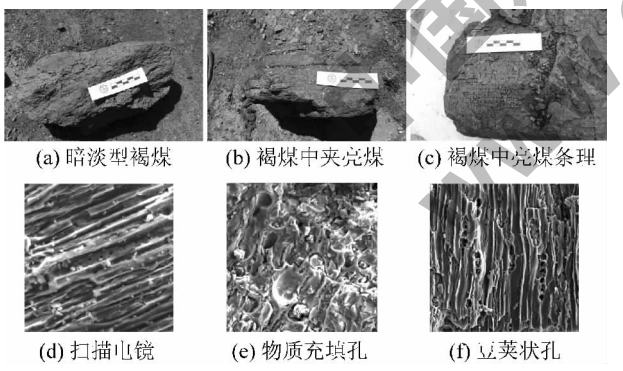


图 2　大井及大成矿区褐煤宏观及微观特征

Fig. 2　Macro and micro characteristics of lignite in Dajing and Dacheng Mining Areas

西山窑组煤岩组分以惰质组为主、镜质组次之，偶见壳质组，属中高挥发分、低中灰分、中水分煤质，总体变质程度较低（R_o = 0.42%～0.59%）。八道湾组宏观煤岩类型以半亮型和光亮型煤为主，夹少量暗煤和丝炭条带，以镜质组含量为主，属于中高挥发分、低灰分、低水分煤质，煤岩演化程度高于西山窑组，以长焰煤和气煤为主。八道湾组煤质优于西山窑组（表 1）。

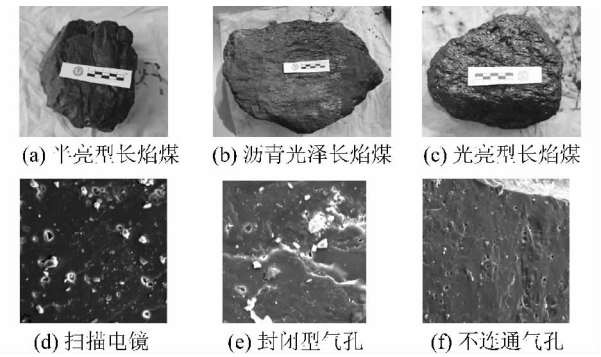


图 3　大黄山及东风福盛矿区长焰煤宏观及微观特征

Fig. 3　Macro and micro characteristics of long flame coal in Dahuangshan and Dongfengfusheng Mining Areas

表 1　准东煤田煤岩煤质

Table 1　Coal quality and petrology of Zhundong Coalfield

样品点	地层	R_o/%	显微组分含量/%			工业分析含量/%		
			镜质组	惰质组	壳质组	M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}
二道沙梁	J_2x	0.45	23.25	76.54	0.21	5.29	15.33	38.22
可热可库都	J_2x	0.42	31.03	68.90	0.07	15.32	7.98	30.53
库兰喀孜干	J_2x	0.41	20.00	78.54	1.46	7.28	3.76	29.64
老君庙	J_2x	0.47	19.38	80.13	0.49	7.02	4.18	30.30
正格勒得	J_2x	0.49	40.84	58.91	0.25	7.45	9.27	30.87
白砾滩	J_2x	0.42	24.67	75.14	0.19	22.16	8.88	17.75
将军庙	J_2x	0.48	43.83	55.99	0.18	9.21	4.23	30.18
芦草沟	J_2x	0.49	31.99	67.27	0.74	14.79	8.65	31.27
帐篷沟	J_2x	0.52	62.98	36.83	0.18	9.40	12.75	41.53
火烧山	J_2x	0.51	46.78	52.94	0.28	13.07	9.98	31.38
黑梭井	J_2x	0.43	37.53	62.24	0.23	10.41	10.91	30.32
大井东南	J_2x	0.42	15.40	84.39	0.21	9.69	6.30	30.09
南黄草湖	J_2x	0.43	32.37	67.24	0.39	15.58	8.29	32.87
大成	J_2x	0.41	51.70	45.50	2.80	8.49	8.74	31.31
凯源	J_2x	0.47	63.10	34.50	2.40	9.07	13.66	33.53
东风福盛	J_1b	0.64	75.80	18.50	1.70	5.21	9.88	33.53
吉新	J_1b	0.65	70.30	27.50	3.20	6.31	7.01	33.44
大黄山	J_1b	0.67	75.80	20.80	3.20	3.74	3.60	31.07

准东地区自晚古生代以来一直处于非均衡的沉降状态[14]，在不同构造和改造作用的影响下，叠加形成了现今不同沉积充填构造特征和构造型式。大井-五彩湾地区西山窑组煤演化程度最低，为褐煤，该区煤受区域变质作用的影响；另外，卡拉麦里造山活动为大井地区提供了丰富的陆源碎屑，使该区形

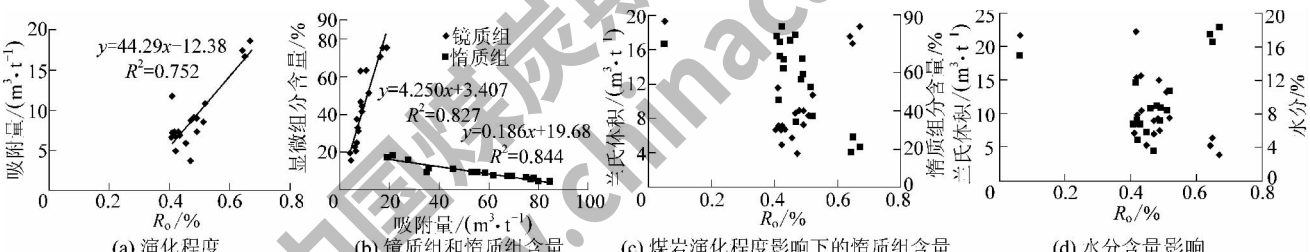
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

成高位泥炭沼泽,发育了西山窑组高惰质组含量、低灰质煤。往东西两侧煤阶稍有增高。博格达山前八道湾组多为长焰煤和气煤,煤岩变质程度略高于西山窑组,该区大黄山矿区普遍有构造煤分布,说明煤受深成变质和构造动力双重变质作用影响,煤岩以镜质组为主,煤层发育于低位泥炭沼泽相,为均衡补偿沉积,变质程度与现今煤层的埋深没有直接关系。

2.2　煤岩的吸附性

煤储层的吸附性能是评价储层含气性的重要参数,其受煤岩的变质程度、有机显微组分、水分及灰分产率等因素的综合影响。通常用等温吸附试验的兰氏(Langmuir)参数评价煤岩的吸附性能,包括兰氏体积和兰氏压力[17-19]。测试结果表明,准东煤储层对甲烷的吸附能力偏低,原煤的兰氏体积为 3.68~18.5 m^3/t,均值为 9.42 m^3/t;可燃基吸附量为 5.36~25.6 m^3/t,平均 13.21 m^3/t。不同地层的原煤的吸附能力存在一定的差异,西山窑组煤样测试值大多小于 10 m^3/t,八道湾组原煤的兰氏体积为 16.85~18.5 m^3/t;煤岩兰氏压力较为接近,分布在 2.91~7.21 MPa,均值为 4.13 MPa。说明研究区煤层气在开采过程中随着压力的降低更容易解吸出来[20-21],如果投入开发,则在前期单位压降下的产气量较大。

通过对实测的煤岩镜质组反射率 R_o 与兰氏体积 V_L 进行拟合后发现,二者呈显著的线性拟合关系,即是随着反射率的增高吸附能力增大(图 4a);对准东地区煤岩显微组分中镜质组和惰质组含量分别与原煤兰氏体积 V_L 进行拟合后发现,二者均与 V_L 呈显著的线性拟合关系,相关系数 R^2 均大于 0.83(图 4b)。由于煤阶对吸附能力影响较大,且煤岩显微组分又随着煤阶的变化而变化,因此排除煤阶对二者的影响,由图 4c 可知随着煤阶的增加惰质组含量降低,煤的吸附能力随着惰质组的增加而降低。煤中水分含量与煤阶和煤的结构有关,因此在考虑水分对吸附能力的影响时,须排除煤阶对二者的影响。结果发现,在褐煤阶段水分对吸附能力的影响不明显,而在长焰煤阶段随着水分的增加吸附能力降低(图 4d)。



(a) 演化程度　(b) 镜质组和惰质组含量　(c) 煤岩演化程度影响下的惰质组含量　(d) 水分含量影响

图 4　煤岩吸附能力的影响因素

Fig. 4　Influence factors of coal rock adsorption capacity

2.3　含气性及风氧化带特征

含气性是煤储层物性的核心参数,是煤层气富集区预测和勘探开发的根本点。准东地区煤矿瓦斯和煤层气井解吸资料显示,大井地区在 250 m 以深才出现少量的甲烷,北山煤窑 200 m 以浅煤样,瓦斯含量低于 0.10 m^3/t,气体组成以氮气和二氧化碳为主。而阜煤 1 井气测显示在 400 m 以深煤岩含气量增加明显,710 m 深处煤岩含气量达10 m^3/t[11]。煤层气井实测资料显示,大黄山地区的阜煤 1 井八道湾组含气量为 10.9 m^3/t,含气饱和度为 70.5%;该区阜参 1 井含气量为 14.28 m^3/t,含气饱和度为 60.3%。沙煤 1 井西山窑组煤层含气量小于 0.2 m^3/t,含气饱和度仅 10%左右[11]。大井地区的帐篷沟煤矿和梧桐窝子凹陷的北山煤窑西山窑组煤含气量为 0.01~0.27 m^3/t。

根据煤层气成藏边界特征,甲烷风氧化带无疑控制着准东地区煤层气的富集成藏。准东地区风氧化带影响范围广泛,且涵盖了西山窑组富煤带大部分地区。沙帐至梧桐窝子一带,仅桐 2 井区煤层气测显示异常高,气测值最大为 100 000 mg/kg,煤层埋深在 800~1 200 m,面积约为 365 km^2[11]。阜康凹陷处于准东隆起区的过渡地带,煤层埋藏较深,且煤层厚度小,勘探风险较大,暂不宜考虑[22]。

准东地区探井气测录井资料与实测数据表明,煤层含气量随深度加深而增高。考虑本区的具体情况,选取甲烷体积分数 70%或甲烷含量 2 m^3/t 作为甲烷风氧化带深度的下限[23]。准东地区风氧化带普遍偏深,根据准东地区煤层气气测值和深度的关系,大井—将军庙一带风化带深度

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

一般为 800～900 m，平均 850 m[11]（图 5a）；博格达山前地区气测值在 400—450 m 段明显上升，甲烷体积分数达 70%以上，指示甲烷风化带深度下限在 450 m 左右[17]（图 5b），该区受风氧化带影响较小，煤层埋深 1 000 m 以浅煤田瓦斯实测含气量高达 9 m^3/t，深部预测含气量可达 14 m^3/t。在煤层埋深 2 000 m 以浅地区，煤层气总资源量为 1 738.29×10^8 m^3[24-25]。

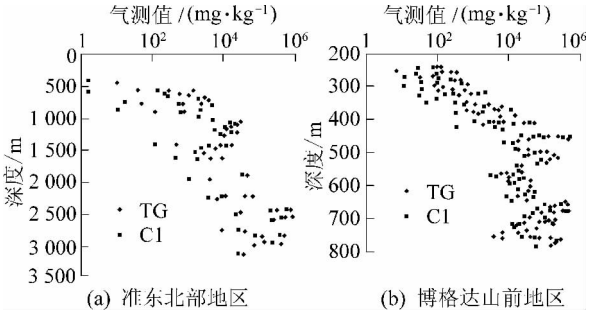


图 5　准东地区煤层气气测值和深度的关系

Fig. 5　Relationship between coalbed gas logging value and depth in Zhundong Area

目前，普遍认为影响甲烷风氧化带深度的因素有水的循环、地质构造及顶板的岩性[26-28]。分析认为准噶尔盆地低阶煤层气风氧化带分布特殊性的原因主要是气候的改变影响了水文地质条件，博格达山前地区常年有雪水的补给，气候相对湿润，水文地质条件相对稳定；而研究区北部大井地区气候干燥，煤层气成藏水文地质条件较差。

3　富集区预测

煤层气藏的形成是气源、储集条件和后期保存条件三者的有效配置。对准东煤层气地质特征的分析研究认为，风氧化带和含气量是制约煤层气富集区的 2 大关键参数[26-28]。

准东地区煤层气实测资料显示，随着深度的加深瓦斯含量增加，根据煤田风氧化带分布特征剔除不利区、筛选有利区，结合该区煤层的发育与展布特征、煤岩煤质及煤储层的含气性，对煤层气富集有利区进行预测。

准东地区煤层气富集有利区依次为博格达山前阜康地区，纱帐和五彩湾地区（图 6）。另外，准东各次级凹陷中以吉木萨尔凹陷和梧桐窝子凹陷部分地区煤层埋藏较深，且含气性较好。大井地区深度大于 800 m 区域煤层含气量变化大，且分布范围很有限。因此，博格达山前阜康地区是今后准东地区煤层气勘探的首选目标区，次为吉木萨尔凹陷、梧桐窝子凹陷等。阜康凹陷由于埋藏较深，现阶段不宜进行煤层气的勘探开发。

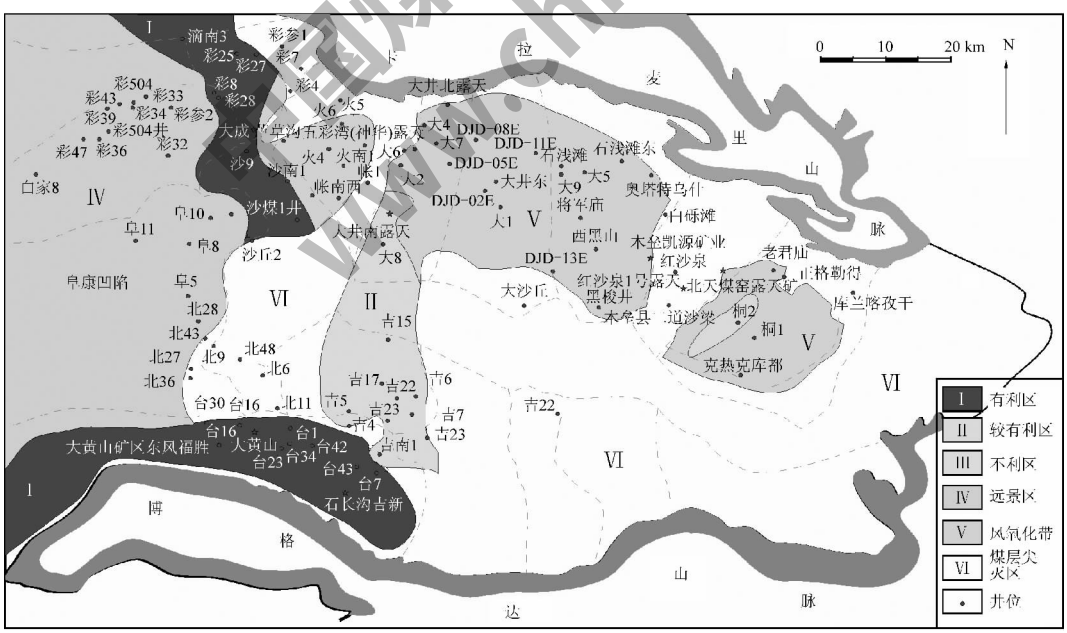


图 6　准东地区煤层气富集区预测

Fig. 6　Prediction of coalbed gas enrichment zone in Zhundong Area

4　结　　论

1）准东地区西山窑组煤层分布范围广、发育厚度大。该区发育 3 个富煤区：将军庙以东的东黑山凸起（隆起）两侧、帐篷沟凸起两侧、纱帐和阜康凹陷以西，可采煤层厚度为 26～70 m。八道湾组煤层

主要发育于盆缘,大井-北山煤窑-老君庙一带可采煤层厚度较薄,南缘阜康地区厚度可达 55 m 左右。

2) 准东地区煤岩演化程度低。西山窑组多为褐煤,煤岩类型为暗淡型煤和半暗型煤,夹有少量的亮煤条带,煤岩组分惰质组为主、镜质组次之,偶见少量壳质组,属于中高挥发分、低中灰分、中水分煤质; 八道湾组多以长焰煤为主,煤岩类型以半亮型煤为主,偶见光亮煤,以镜质组含量为主,属于中高挥发分、低灰分、低水分煤质。

3) 准东地区西山窑组煤样兰氏体积均小于 10 m^3/t,八道湾组煤样兰氏体积测试结果为 16.85 ~ 18.5 m^3/t; 煤层气井实测含气量也存在相似的规律: 八道湾组含气量较高。该区煤层含气量受控于风氧化带,该区南北风氧化带底界深度存在差异,南部相对较浅,在 420 m 左右; 研究区北部大部分煤层在风氧化带范围内。

4) 根据准东地区甲烷风氧化带分布和含气量特征,认为阜康地区是煤层气勘探的首选目标区,次为吉木萨尔凹陷、梧桐窝子凹陷等。

参考文献:

[1] 叶　欣,陈纯芳,姜文利,等.我国低煤阶煤层气地质特征及最新进展[J].煤炭科学技术,2009,37(8):111-115.
Ye Xin,Chen Chunfang,Jiang Wenli,*et al*.Geological characteristics and new development progress of low rank seam coalbed methane in China[J].Coal Science and Technology,2009,37(8):111-115.

[2] 晋香兰,张培河,吴敏杰.鄂尔多斯盆地低煤阶煤储层孔隙特征及地质意义[J].煤炭科学技术,2012,40(10):22-26.
Jin Xianglan,Zhang Peihe,Wu Minjie.Pore features and geological significance of low rank coal reservoirs in Erdos Basin[J].Coal Science and Technology,2012,40(10):22-26.

[3] Formolo M,Martini A,Petsch S.Biodegradation of sedimentary organic matter associated with coalbed methane in the Powder River and San Juan Basins,U S A.[J].International Journal of Coal Geology,2008,76(1):86-97.

[4] Ulrich G,Bower S.Active methanogenesis and acetate utilization in Powder River Basin Coals,United States[J].International Journal of Coal Geology,2008,76(1):25-33.

[5] 晋香兰,张　泓.鄂尔多斯盆地侏罗系成煤系统[J].煤炭学报,2014,39(S1):191-197.
Jin Xianglan,Zhang Hong.Jurassic coal system in Ordos Basin[J].Journal of China Coal Society,2014,39(S1):191-197.

[6] 李振涛,姚艳斌,周鸿璞,等.煤岩显微组成对甲烷吸附能力的影响研究[J].煤炭科学技术,2012,40(8):125-128.
Li Zhentao,Yao Yanbin,Zhou Hongpu,*et al*.Study on coal and rock maceral composition affected to Methane Adsorption Capacity[J] Coal Science and Technology,2012,40(8):125-128.

[7] Chalmers G R L,Bustin R M.On the effects of petrographic composition on coalbed methane sorption[J].International Journal of Coal Geology,2007,69(4):288-304.

[8] Faiz M,Saghaf A,Sherwood N,*et al*.The influence of petrological properties and burial history on coal seam methane reservoir characterization,Sydney Basin,Australia[J].International Journal of Coal Geology,2007,70(1/3):193-208.

[9] Bustin R M,Clarkson C R.Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content[J].International Journal of Coal Geology,1998,38(1/2):3-26.

[10] 刘得光,吴晓智,赵铮亚,等.准噶尔盆地煤层气资源潜力及勘探选区[J].新疆石油地质,2007,28(3):272-274.
Liu Deguang,Wu Xiaozhi,Zhao Zhengya,*et al*.The Potential and prospect areas of coalbed gas resource in Junggar Basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2007,28(3):272-274.

[11] 刘得光,罗晓静,万　敏,等.准噶尔盆地东部煤层气成藏因素及勘探目标[J].新疆石油地质,2010,31(4):349-351.
Liu Deguang,Luo Xiaojing,Wan Min,*et al*.Coalbed mathane accumulation factors and explorative target in Eastern Junggar Basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2010,31(4):349-351.

[12] 杨海波,陈　磊,孔玉华.准噶尔盆地构造单元划分新方案[J].新疆石油地质,2004,25(6):686-688.
Yang Haibo,Chen Lei,KongYuhua.A novel classification of structural units in Junggar Basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2004,25(6):686-688.

[13] Zhou J B,Zhuang X G,Alastuey A,*et al*.Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal field in the Junggar Basin,Xinjiang,China[J].International Journal of Coal Geology,2010,82(1):51-67.

[14] 卢苗安.天山东段盆山构造格局的多期演变[D].北京: 中国地震局地质研究所,2007.

[15] 李　晶,庄新国,周继兵,等.新疆准东煤田西山窑组巨厚煤层煤相特征及水进水退含煤旋回的判别[J].吉林大学学报: 地球科学版,2012,42(S2):104-114.
Li Jing,Zhuang Xinguo,Zhou Jibing,*et al*.Coal facies characteristic and identification of transgressive /regressive coal-bearing cycles in a thick coal seam of Xishanyao Formation in Eastern Junggar Coalfield,Xinjiang[J].Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2012 42(S2):104-114.

[16] 姚艳斌.煤层气储层精细定量表征与综合评价模型[D].北京: 中国地质大学(北京),2008.

[17] 孙钦平,孙　斌,孙粉锦,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 Qinping,Sun Bin,Sun Fenjin,*et al*.Accumulation and geological controls of low rank coalbed methane in southeastern Junggar Basin[J].Geological Journal of China Universities,2012,18(3):460-464.

[18] 杨曙光,田继军.准噶尔盆地东部地区煤层气储层特征[J].中国煤层气,2011,8(2):20-23.
Yang Shuguang,Tian Jijun.Characteristics of CBM reservoir in eastern part of Junggar Basin[J].China Coalbed Methane,2011,8

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

(2):20-23.

[19] 傅小康.中国西部低阶煤储层特征及其勘探潜力分析 [D].北京:中国地质大学(北京),2006.

[20] 蔚远江.准噶尔盆地低煤阶煤储层及煤层气成藏初步研究 [D].北京:中国地质大学(北京),2002.

[21] 李　松,汤达祯,许　浩,等.贵州省织金、纳雍地区煤储层物性特征研究 [J].中国矿业大学学报,2012,41(6):951-958.
Li Song,Tang Dazhen,Xu Hao,*et al*.Characteristics of coal reservoirs in Zhijin Region and Nayong Region,Guizhou,China [J].Journal Of China University of Mining & Technology,2012,41(6):951-958.

[22] 谭开俊,张　帆,赵应成,等.准噶尔盆地侏罗系煤层气勘探潜力与有利区预测 [J].天然气勘探与开发,2009,32(2):1-3.
Tan Kaijun,Zhang Fan,Zhao Yingcheng,*et al*.Exploration potential and favorable target prediction of Jurassic coalbed gas in Junggar Basin [J].Natural Gas Exploration & Development,2009,32(2):1-3.

[23] 刘洪林,李景明,李贵中,等.浅议我国低煤阶地区煤层气的成藏特点—从甲烷风化带的角度 [J].天然气地球科学,2007,18(1):125-128.
Liu Honglin,Li Jingming,Li Guizhong,*et al*.Discussion on low rank coalbed methane between China and U.S.A..from the methane oxidation zone [J].Natural Gas Geoscience,2007,18(1):125-128.

[24] 崔思华,刘洪林,王　勃,等.准噶尔盆地低煤阶煤层气成藏地质特征 [J].现代地质,2007,21(4):719-724.
Huo Sihua,Liu Honglin,Wang Bo,*et al*.Trapping characteristics of coalbed methane in low-rank coal of Jungar Basin [J]. Geoscience,2007,21(4):719-724.

[25] 王屿涛,钱玉祥,何云生,等.准噶尔盆地低阶煤煤层气资源及勘探潜力分析 [J].河南石油,2002,16(5):1-3.
Wang Yutao,Qian Yuxiang,He Yunsheng,*et al*.Low step coal-seam gas resources in Jungar basin and exploration potential analysis [J].Henan Petrolum,2002,16(5):1-3.

[26] 宋　岩,秦胜飞,赵孟军.中国煤层气成藏的两大关键地质因素 [J].天然气地球科学,2007,18(4):545-553.
Song Yan,Qin Shengfei,Zhao Mengjun.Two key geological factors controlling coalbed methane reservoirs in China [J].Natural Gas Geoscience,2007,18(4):545-553.

[27] 侯海海,邵龙义,唐　跃,等.我国低煤阶煤层气成因类型及成藏模式研究 [J].中国矿业,2014,23(7):66-69.
Hou Haihai,Shao Longyi,Tang Yue,*et al*.Study on coal bed methane genetic types and formation models of low rank coal in China [J].China Mining Magazine,2014,23(7):66-69.

[28] Lin B,Li H,Yuan D,*et al*. Development and application of an efficient gas extraction model for low-rank high-gas coal beds [J]. International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(1):76-83.

(上接第 52 页)

Sun Xiaoming,He Manchao,Yang Xiaojie.Research on nonlinear mechanics design method of bolt-net-anchor coupling support for deep soft rock tunnel [J].Rock and Soil Mechanics,2006,27(7):1061-1065.

[10] He Manchao.Physical modeling of an underground roadway excavation in geologically 45° inclined rock using infrared thermography [J].Engineering Geology,2011,121:165-176.

[11] 刘泉声,张　伟,卢兴利,等.断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析 [J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1954-1962.
Liu Quansheng,Zhang Wei,Lu Xingli,*et al*.Safety monitoring and stability analysis of large-scale roadway in fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(10):1954-1962.

[12] 黄新贤,周　钢,祁和刚,等.高应力破碎岩巷注锚支护技术 [J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):527-531.
Huang Xinxian,Zhou Gang,Qi Hegang,*et al*.Grouting and bolt support technology for high-stressed and cracked rock roadway [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(4):527-531.

[13] 常庆粮,周华强,李大伟,等.软岩破碎巷道大刚度二次支护稳定原理 [J].采矿与安全工程学报,2007,24(2):169-172,177.
Chang Qingliang,Zhou Huaqiang,Li Dawei,*et al*.Stability principle of extremely rigid secondary support for soft and broken rock roadway [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2007,24(2):169-172,177.

[14] 彭文斌.FLAC^{3D}实用教程 [M].北京:机械工业出版社,2007.

[15] 何满潮,景海河,孙晓明.软岩工程力学 [M].北京:科学出版社,2002.

[16] He Manchao,Su Yonghua,Sun Xiaoming,*et al*.Study of models of stability reliability for surrounding rock in underground roadway [C]//Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century.Rotterdam:A A Balkema,2001:307-310.

[17] 张国锋,曾开华,张　春,等.旗山矿倾斜煤夹层巷道破坏机理及支护设计研究 [J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):22-27.
Zhang Guofeng,Zeng Kaihua,Zhang Chun,*et al*.Failure mechanism and support design of interclated roadway surrounding inclined coal seam in Qishan Coal Mine [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(1):22-27.

[18] 王卫军,侯朝炯.软岩巷道支护参数优化与工程实践 [J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):647-650.
Wang Weijun,Hou Chaojiong.Optimum of supporting parameter of soft-rock roadway and engineering practice [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000,19(5):647-650.

[19] 王连国,李明远,王学知.深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究 [J].岩石力学与工程学报,2005,16(4):2889-2893.
Wang Lianguo,Li Mingyuan,Wang Xuezhi.Study on mechanisms and technology for bolting and grouting in special soft rock roadways under high stress [J].Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering,2005,16(4):2889-2893.

[20] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例 [M].北京:中国水利水电出版社,2005.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net