中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

陕西省上古生界煤成气资源成藏规律研究

李智学[1],李明培[2,3],申小龙[3]

(1.陕西投资集团有限公司,陕西 西安 710061;
2.陕西投资集团研究院有限公司,陕西 西安 710061;
3.陕西煤田地质勘查研究院有限公司,陕西 西安 710026)

扫码移动阅读

摘 要:基于鄂尔多斯盆地煤成气开发理论与经验,为摸清陕西省煤成气赋存规律及有利区域,研究了陕西省上古生界烃源岩特征、煤成气成分和生储盖等条件,分析了陕西及周边成熟煤成气田勘探区的研究成果。结果表明:陕西省上古生界烃源岩厚度大,显微煤岩组分以镜质组、半镜质组和惰质组为主,烃源岩变质程度较高,生储盖条件较好,具备大量生烃的条件。将烃源岩厚度、镜质组最大反射率 $R_{o,max}$、生气强度、埋藏深度等作为判断陕西省煤成气藏开发潜力的经验参数,指出志丹—子长一线以南至黄陵以北的区域具有发现较好的煤成气藏的潜力。

关键词:煤成气;致密砂岩;赋存规律;上古生界

中图分类号:TE122 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2018)11-0200-07

Study on reservoir formation law of Upper Paleozoic coal-derived gas resources in Shaanxi Province

LI Zhixue[1], LI Mingpei[2,3], SHEN Xiaolong[3]

(1.*Shaanxi Investment Group Corporation Limited*, *Xi'an* 710061, *China*; 2.*Shaanxi Investment Group Research Institute*, *Xi'an* 710061, *China*;
3.*Shaanxi Coal Geological Exploration Institute Company Limited*, *Xi'an* 710026, *China*)

Abstract: Based on the development theory and experiences of the coal-derived gas in Ordos Basin, in order to find out the reservoir formation law and favorable regions of the coal-derived gas in Shaanxi Province, a study was conducted on the features of the Upper Paleozoic hydrocarbon resource rocks in Shaanxi Province, the coalbed methane composition and the reservoir cover as well as other conditions and an analysis was conducted on the study achievements of the mature coal-derived gas exploration areas in Shaanxi Province and the surrounding regions. The results showed that the Upper Paleozoic hydrocarbon resource rocks in Shaanxi Province was high in thickness and the macerals were mainly the vitrinite, semi-vitrinite and inertinite. The metamorphic degree of the hydrocarbon resource rocks was high, the reservoir cover condition was good and the condition could have high hydrocarbon generation condition. The thickness of the hydrocarbon resource rock, methane generation intensity, deposition depth and others would be the experiment indexes to judge the development potential of the coal-derived gas in Shaanxi Province. The paper pointed out that the region from the south along the Zhidan-Zichang Line to the north of Huangling would have a good potential of the coal-derived gas reservoir.

Key words: coal-derived gas; tight sandstone; reservoir formation law; Upper Paleozoic

0 引 言

煤成气是指煤层、碳质泥岩和石灰岩中所含腐植型有机物在成煤(岩)作用中产生的天然气总和[1]。根据储集方式、聚散性和运移特征,煤成气可分为煤层气和煤出气[1],前者基本未运移,后者经过运移后赋存在储集层中形成一定规模的煤型气天然气藏。

国外煤成气研究开展较早,以德国、荷兰和英国等发达国家为代表。1959 年在荷兰的格罗宁根赤

收稿日期:2017-08-17;**责任编辑**:曾康生 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2018.11.031

作者简介:李智学(1963—),男,陕西乾县人,教授级高级工程师,博士。通信作者:李明培,工程师,硕士。E-mail:snlimp@126.com

引用格式:李智学,李明培,申小龙. 陕西省上古生界煤成气资源成藏规律研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(11):200-206.

LI Zhixue, LI Mingpei, SHEN Xiaolong. Study on reservoir formation law of Upper Paleozoic coal-derived gas resources in Shaanxi Province[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 200-206.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

底统发现可采储量达 2.7×10^{12} m^3的格罗宁根气田,为世界上第 1 个储量超过万亿立方米级煤成气大气田[2]。1961 年德国西北盆地发现第一个上石炭统煤系自生自储煤成气田。随后在德国西北盆地、西荷兰盆地、英吉利盆地海上部分相继发现了超过 140 个上石炭统煤成气田[2]。

中国煤成气研究始于 1979 年,戴金星院士在《成煤作用中形成的天然气与石油》一文中系统阐述了煤成气理论的核心要点[3-4]。1981 ~ 1995 年间,国家组织开展了众多重点科技攻关,形成了对天然气成因多源性认识,并将国内天然气工业从油型气的一元论扩展至油型气和煤成气二元论领域[5]。

鄂尔多斯盆地分布面积广泛的上古生界含煤地层,盆地内天然气研究较早,但因对成藏理论的认识局限性,1988 年之前仅发现 3 个大气田,而陕西省行政区划内,1979 年以前仅有直罗油型气田被发现,府谷和吴堡等地煤田勘探和水资源勘探中也会有砂岩、石灰岩含气层,气体燃烧特征与天然气相似,但是成分有明显差异;随着近年来煤成气成藏理论的逐渐丰富,相继指导发现了 6 个大型煤成气田,探明煤成气储量达到 15 708.62×10^8 m^3,占鄂尔多斯盆地探明储量的 30%。基于鄂尔多斯盆地煤成气的勘探理论和经验,笔者通过分析陕西省上古生界烃源岩特征、煤成气成分特征和生储盖条件等方面的控制因素,并分析成熟勘探区的研究成果,以期为陕西省上古生界煤成气勘探开发提供地质依据和潜在有利区。

1　上古生界烃源岩及煤成气成分特征

1.1　烃源岩厚度

陕西省石炭—二叠系烃源岩主要是大面积赋存的煤层,其次为高碳泥岩和暗色泥岩。本次研究分别统计了研究区内煤炭系统、石油系统钻探施工的 302 个钻孔的煤层厚度,绘制了研究区煤层厚度等值线图(图 1)。研究区内煤层的总厚度在 0~28.98 m,平均厚度 12.35 m,平均有机碳含量67.30%[8],总含煤面积约 8.98×10^4 km^2。总体来看,煤层总厚度由南向北逐渐变厚,靖边—吴堡一线以北平均厚度约为 15.66 m;靖边—吴堡一线以南平均厚度 8.50 m。石炭—二叠系高碳泥岩和暗色泥岩累计厚度一般在 40~120 m,平均有机碳含量 2.93%[9],其在成岩和热演化过程中亦可生成大量的气体。因此,陕西省煤成气烃源岩分布范围广、厚度大,能够为煤成气提供充足的气源。

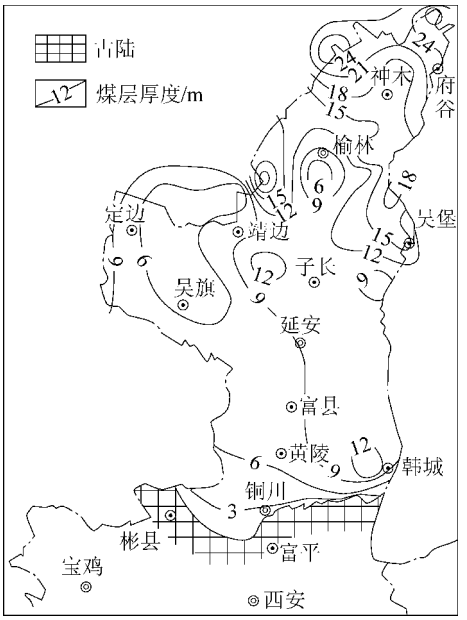


图 1　上古生界煤层累计厚度等值线

Fig.1　Contour map of coal seam accumulated thickness in Upper Paleozoic

1.2　煤的显微煤岩特征

大量试验证明,煤中的镜质组和惰质组是生气的主要成分,镜质组反射率越高,生气量也越大。石炭—二叠系煤层显微煤岩组分中镜质组含量为 31.1%~92.6%,平均为 53.41%;半镜质组一般在 0.41%~14.7%,平均含量 3.92%(府谷一带煤层几乎不含半镜质组);惰质组含量为 10.9%~57.1%,平均为 31.49%;壳质组含量较少,为 0.6%~11.6%,平均为 4.84%。镜质组、半镜质组和惰质组的平均总含量达到 88.82%,占绝对主导地位,为煤成烃提供了极好的生烃物质成分。

1.3　煤的变质程度

受埋深和区域变质作用的影响,东部府谷、吴堡等矿区煤的镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 一般不超过 1.43%。府谷矿区煤层镜质组 $R_{o,max}$ = 0.61% ~ 0.82%,属Ⅰ-Ⅱ变质阶段的较低变质烟煤,即长焰煤—气煤—肥煤;吴堡矿区镜质组 $R_{o,max}$ = 1.11% ~ 1.43%,属Ⅳ-Ⅴ变质阶段以中变质的焦煤为主,次为瘦煤及少量肥煤。而中部、西部和南部的延安、靖边和渭北等地镜质组 $R_{o,max}$ = 1.6% ~ 2.2%。其中,渭北矿区镜质组 $R_{o,max}$ = 1.83% ~ 2.12%,属第Ⅴ-Ⅷ变质阶段的较高变质烟煤(图 2)。

研究表明,腐植型煤及炭质泥岩、暗色泥岩"生气窗"阶段通常 $R_{o,max}$ = 0.5% ~ 1.5%,随着变质程度的增

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

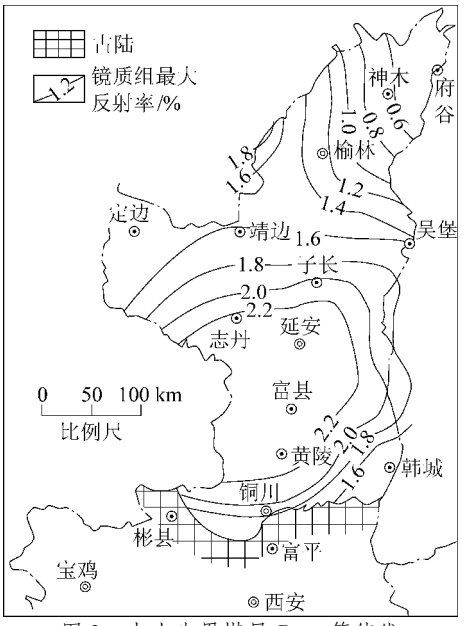


图 2　上古生界煤层 $R_{o,max}$ 等值线

Fig.2　Contour of coal $R_{o,max}$ in upper Paleozoic

高,腐植型原岩的生气量也越大,煤系地层的含气量也越多。从泥炭至无烟煤的成煤全过程中每吨煤的生气量大于 400 m^3,留存在煤层中的煤层气仅为其一小部分,大量的煤成气运移出煤层之外。结合煤层赋存特征、显微煤岩组成和煤变质程度分析,研究区石炭—二叠纪含煤地层具有较强的生烃潜力。

1.4　煤成气成分特征

结合收集的主要气田的煤成气成分资料和府谷、吴堡矿区煤田开发煤成气测试结果,研究区上古生界煤成气的气体成分主要为 CH_4,含量一般为 69.6%~98.1%,平均含量为 85.64%~95.9%,其次为 C_2H_6、C_3H_8、C_4H_{10}等重烃,平均含量为 0~12.05%,总烃含量一般为 71.16%~99.92%,平均含量为 87.85%~97.6%。N_2含量一般为 0~28.39%,平均含量为 0.03%~11.25%,CO_2含量一般为 0~7.91%,平均含量为 0~6.5%。部分气田煤成气中还含有 H_2、He、H_2S、Ar 等气体,含量甚微,可不作统计(表 1)。据气体成分及含量分析,各气田、矿区的煤成气总体来看以干气为主,少数含气层位为湿气。

表 1　陕西省上古生界部分煤成气田和煤矿区的煤成气成分含量统计

Table 1　Statistics of coal-derived gas composition in partial coal-derived gas field and mining area of Upper Paleozoic in Shaanxi

气田/矿区	层位	总烃/%	重烃/%	$w(CH_4)$/%	$w(C_2H_6)$/%	$w(C_3H_8)$/%	$w(N_2)$/%	$w(CO_2)$/%
大牛地气田[10]	盒 6	93.40~99.80 97.00	1.73~11.37 2.89	87.30~98.10 95.9	1.28~9.76 2.31	0.054~1.62 0.38	0.13~4.03 2.20	—
	盒 7	95.40~97.60 96.70	2.36~15.60 6.14	83.50~96.50 92.80	1.77~11.10 4.54	0.30~3.10 0.98	1.68~4.04 2.78	—
	盒 8	95~99.9 97.50	2.38~14.91 9.79	83.70~95.95 88.30	1.77~10.89 6.88	0.40~3.20 1.87	0.396~4.15 1.98	—
	山 1	94.40~98.77 96.55	3.90~13.59 9.80	84.20~94.30 88.58	3.695~9.25 6.82	0.05~2.99 1.93	0.884~4.83 2.77	—
	山 2	93.79~99.97 96.55	4.95~28.56 12.05	69.60~92.40 85.64	3.62~21.49 8.66	0.85~6.00 2.26	0~0.10 0.03	—
	太 1	93.19~99.30 95.84	3.98~19.81 8.54	77.20~92.40 88.66	3.331~14.98 6.44	0.404~3.36 1.431	0.03~4.96 2.16	—
	太 2	93.10~97.00 95.13	2.254~10.05 5.09	87.61~96.52 92.05	1.762~6.51 3.938	0.287~2.13 0.76	0.558~4.46 2.41	—
神木气田[11]	盒 8 段	92.55~98.95 96.02	5.40~10.68 6.86	82.29~92.57 89.15	4.21~7.42 5.12	0.79~2.48 1.25	2.4~6.32 4.05	0.33~0.39 0.36
	山 1 段	94.43	6.05	88.38	4.15	1.29	2.85	2.72
	山 2 段	95.73~98.45 97.60	4.74~16.96 9.46	81.07~93.65 88.14	3.59~10.57 6.59	0.75~3.68 1.88	0.42~3.43 1.59	0.46~1.45 0.88
	太原组	89.17~98.42 94.84	3.99~6.29 5.14	91.67~93.06 92.37	3.22~4.97 4.10	0.56~0.99 0.78	0.21~0.82 0.52	1.88~2.47 2.18
榆林气田	山 2 段	94.70~99.92	0.34~4.20 2.63	95.08	—	—	—	1.61
子洲气田	山西组	97.59~98.30	5.96~6.77	91.53~91.63	4.60~5.22	0.99~1.16	—	—
府谷矿区	山西组	86.60~89.10 87.85	0	86.60~89.10 87.85	0	0	5.80~5.96 5.88	5.09~7.91 6.50
吴堡矿区	山西组	71.16~97.72 88.71	0.35~0.42 0.38	70.80~97.30 88.33	0.04~0.42 0.25	0~0.32 0.13	2.62~28.39 11.25	0

注:“—”表示未查到该数据。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2　上古生界煤成气储集和封盖地质条件

2.1　储集条件

石炭—二叠系烃源岩生气之后形成 2 种气藏[8],一种是下生上储的上古生界致密砂岩气藏,另一种是上生下储的下古生界海相碳酸盐岩气藏[8]。上古生界气藏在研究区内及周边普遍发育[8,12-13],已发现苏里格、大牛地、榆林、乌审旗、子洲、神木等超千亿立方储量的大型气田(表 2)。

上古生界煤成气是典型的致密砂岩气,具有“先致密、后成藏”的特征[14-15],砂岩储集层低孔低渗,厚度一般 10~30 m,与广覆式烃源岩相互叠置,为大规模致密砂岩气藏的形成提供了基础。据统计,煤成气田的储集层主要位于山 1 和山 2 段、盒 8 段,其次为太原组(表 2)。山西组和下石盒子组储集层的岩性主要为岩屑石英砂岩和岩屑砂岩,其次为石英砂岩,反映了陆相河流—湖泊—三角洲沉积体系下形成的河道及分流河道砂体,分选、磨圆较差,平均渗透率(0.20~5.89)×10^{-3} μm^2,平均孔隙度 4.83%~8.40%。太原组和本溪组储集层多为石英砂岩和岩屑石英砂岩,为海陆过渡相三角洲和障壁沉积体系的分流河道和障壁滩(砂)坝砂体,砂岩的分选、磨圆较好、成熟度较高,平均渗透率和孔隙度相对较高。

表 2　陕西省上古生界煤成气田基本参数统计[8,16-17]

Table 2　Basic parameters statistics of coal-derived gas fields in Upper Paleozoic in Shaanxi Province

气田	主要含气储层	储层岩性	生气强度/(10^8 m^3 · km^{-2})	渗透率(平均)/(10^{-3} μm^2)	孔隙度(平均)/%	探明储量/10^8m^3
大牛地	盒 2 段、盒 3 段、山 1 段	岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	5~40	0.001~58.15 1.46	0.20~18.69 8.40	4 545.63
神木	盒 8 段、山 2 段、太 2 段	石英砂岩、岩屑石英砂岩	28~35	0.10~1.00 0.63	4~10 7.80	934.99
榆林	山 2 段	石英砂岩、岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	20~40	0.5~31.94 5.89	1.77~10.04 5.09	1 807.50
子洲	盒 8 段	岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	30~40	0.01~0.40 0.31	0.58~14.79 5.32	1 151.97
	山 2 段			0.05~10 1.05	2~8 4.83	
米脂	盒 8 段、山 1 段、山 2 段	岩屑石英砂岩、岩屑砂岩、石英砂岩	36~40	—	—	358.48
靖边	盒 8 段、山 1 段	岩屑石英砂岩、岩屑砂岩		0.10~0.50 0.40	4~10 7.20	6 910.05
富县探区	盒 1 段、山 2 段	岩屑砂岩、岩屑石英砂岩	10~25	0.004~1.181 0.20	0.10~17.40	—
延长探区	盒 8 段、山 1 段	岩屑石英砂岩	10~45	0.56~0.57 0.565	5.01~5.41 5.21	—
	山 2 段、本溪组	石英砂岩、岩屑石英砂岩		1.153~7.06 4.11	4.44~5.59 5.02	—

注:靖边气田的探明储量含下古生界煤成气资源量,统计时未扣除。

2.2　封盖条件

上古生界沉积后,鄂尔多斯盆地稳定下沉,除盆地的东缘和西缘构造发育外,盆地内部构造稳定,煤成气藏得以保存。煤成气藏圈闭类型以岩性圈闭和地层—岩性圈闭为主[8],上石盒子组和石千峰组的厚层湖相泥岩、致密粉砂岩形成了煤成气藏的地层—岩性圈闭,厚度 240~440 m;煤系内部致密砂体上部厚层泥岩、粉砂岩等形成气藏的岩性圈闭。从研究区内煤成气藏的圈闭类型来看,气藏的盖层具有多层次、多体系性,地层、岩性等盖层条件优越,气藏保存条件好[11,18](图 3)。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

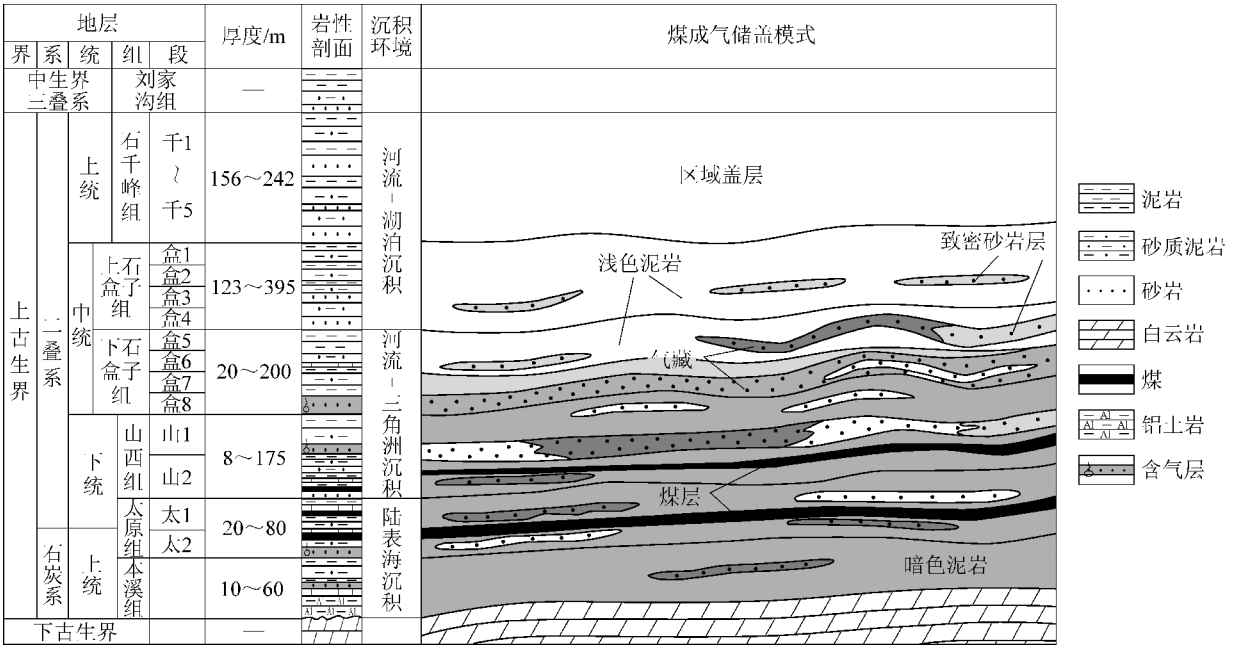
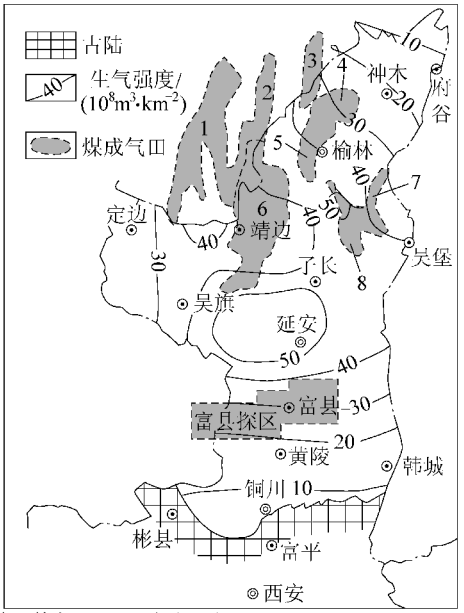


图 3　上古生界煤成气藏储盖模式

Fig.3　Coal-derived gas reservoir and cap model in Upper Paleozoic

2.3　烃源岩生气强度

研究区烃源岩丰富,保存较好,成熟度普遍较高,生气强度大,除渭北的旬邑—铜川和府谷以北至陕晋蒙交界一带以外,其他地区均超过 10×10^8 m^3/km^2,黄陵以北—神木以南的区域生气强度为(20～50)×10^8 m^3/km^2。生气强度中心集中于甘泉—延安—志丹—子长—榆林一带,生气强度达到(40～50)×10^8 m^3/km^2(图 4)。



1—苏里格气田; 2—乌审旗气田; 3—大牛地气田; 4—神木气田; 5—榆林气田; 6—靖边气田; 7—米脂气田; 8—子洲气田

图 4　生气强度与主要气田叠合

Fig.4　Superposition diagram of gas intensity and major gas fields

2.4　致密砂岩气藏埋深

致密砂岩气藏的埋深与地层构造形态关系密切,气藏埋深沿地层倾向由东至西逐渐加深。府谷矿区、吴堡矿区和渭北矿区为主的煤产地,气藏埋深多在 800 m 以浅,神木—吴堡—黄陵一线埋深多在 800～1 600 m,榆林—子长—延安以东气藏埋深多在 1 600～2 400 m,该线以西至靖边—志丹一线和定边一带埋深多在 2 400～3 200 m,定边—靖边—志丹一带以南则为埋深中心,深度达到 3 200 m 以深。根据已勘探发现的大型致密砂岩气藏的分布位置来看,气藏分布、规模大小与埋深具有密切的关系,大型气田多分布在气藏埋深 2 400～3 200 m 的区域,其次分布在埋深 1 600～2 400 m 的区域(图 5)。

3　陕西省煤成气藏赋存规律

煤成气成藏主要受烃源岩厚度、变质程度、储层渗透率、孔隙度、生气强度、埋藏深度等多因素综合控制,定边—靖边—子长—吴堡以北是勘探煤成气较早的区域,并已发现多个大型煤成气藏。该区域煤成气藏关键参数:烃源岩厚度为 12～21 m、$R_{o,max}$ = 0.8%～1.6%、生气强度(30～50)×10^8 m^3/km^2、埋藏深度 1 600～ 3 200 m,为研究区内煤成气藏勘探提供了一定的地质数据和经验参考。

通过相似条件分析的方法,并考虑到研究区上古生界砂岩储层致密性相似的条件,研究认为志

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

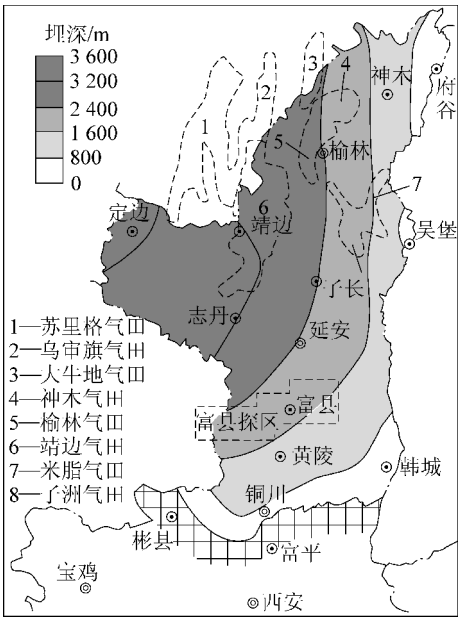


图 5　煤成气藏埋深与主要气田叠合图

Fig.5　Superposition diagram of coal-derived gas reservoir buried depth and major gas fields

丹—子长一线以南至黄陵以北的区域煤层平均厚度约 9 m,虽不及上述已发现的气藏烃源岩厚度,但是镜质组 $R_{o,max}$ 达到 2.2%以上,烃源岩处于过成熟阶段,已生成大量干气;同时,生烃潜力[19]为(20~50)×10^8 m^3/km^2,气藏埋深为 1 400~3 200 m。因此,该区域具有发现较好的煤成气藏的潜力,可作为研究区内煤成气藏开发的接替资源区。

定边—靖边—志丹一带以南埋深大、煤层平均厚度 6 m 左右、生烃潜力约 30×10^8 m^3/km^2,具有一定的找气前景,但煤成气藏埋深大、开发的技术难度较大;神木—府谷一带、吴堡、渭北地区因气藏埋深浅,或暴露、或风化剥蚀严重,生烃潜力较小,不具备发现大型气藏的潜力。

4　结　　论

1)以往在陕北地区勘探开发煤炭资源、水资源钻遇非煤层岩层时,由于认识水平和工作手段的限制,经常对孔内可燃气体喷出现象和这些资源“选择性”忽略。通过分析可燃气体及其生储层的性质、特征,认为这种可燃气体资源应为煤成气。在这一基本认识下,煤成气的开发能够为勘探队伍业务转型、“煤—油—气”资源综合开发利用提供一些思路。

2)陕西上古生界煤系烃源岩平均厚度大、显微煤岩组分以镜质组、半镜质组和惰质组为主,烃源岩变质程度绝大部分为中等—高变质,具备大量生烃的条件,成藏区煤成气以干气为主,少数含气层位为湿气。通过分析大型气田的烃源岩特征、气藏储集条件、封盖条件、生气强度与埋藏深度的耦合关系,得出志丹—子长一线以南至黄陵以北的区域具有发现较好的煤成气藏的潜力,开发价值较大。

参考文献(References):

[1]　戴金星.煤成气涵义及其划分[J].地质评论,1982,28(4):370-372.
DAI Jinxing.Coal-derived gas implication and its division[J].Geological Review,1982,28(4):370-372.

[2]　戴金星,倪云燕,黄士鹏,等.煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J].天然气地球科学,2014,25(1):1-22.
DAI Jinxing, NI Yunyan, HUANG Shipeng, *et al*. Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(1):1-22.

[3]　戴金星.成煤作用中形成的天然气和石油[J].石油勘探与开发,1979,16 (3):10-17.
DAI Jinxing. Natural gas and oil formation during coal-forming process[J]. Petroleum Exploration and Development, 1979, 16 (3):10-17.

[4]　赵文智,王红军,钱　凯.中国煤成气理论发展及其在天然气工业发展中的地位[J].石油勘探与开发,2009,36(3):280-289.
ZHAO Wenzhi , WANG Hongjun , QIAN Kai. Progress of coal-formed gas geological theory and its status in natural gas industry in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36 (3):280-289.

[5]　戴金星,胡安平,杨　春,等.中国天然气勘探及其地学理论的主要新进展[J].天然气工业,2006,26(12):1-5.
DAI Jinxing,HU Anping,YANG Chun,*et al*.Newest achievements on gas exploration and its geo-scientific theories in China[J].Natural Gas Industry,2006,26(12):1-5.

[6]　邵龙义,董大啸,李明培,等.华北石炭-二叠纪层序-古地理及聚煤规律[J].煤炭学报,2014,39(8):1725-1734.
SHAO Longyi,DONG Daxiao,LI Mingpei,*et al*.Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous-Permian in the North China Basin[J].Journal of China Coal Society,2014,39(8):1725-1734.

[7]　姚海鹏,李　玲,周晓刚.鄂尔多斯盆地上古生界煤系非常规天然气赋存特征[J].煤炭科学技术,2017,45(4):102-109,132.
YAO Haipeng,LI Ling,ZHOU Xiaogang.Deposition features of unconventional natural gas in upper Paleozoic coal measures of Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 102-109,132.

[8]　杨　华,刘新社.鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J].石油勘探与开发,2014,14(2):129-137.
YANG Hua,LIU Xinshe.Progress of Paleozoic coal-derived gas ex-

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

ploration in Ordos Basin [J].Petroleum Exploration and Development,2014,14(2):129-137.

[9] 刘新社,席胜利,付金华,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气生成[J].天然气工业,2000,20(6):19-23.
LIU Xinshe,XI Shengli,FU Jinhua,*et al*.Natural gas generation in the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Natural Gas Industry,2000,20(6):19-23.

[10] 侯瑞云,刘忠群.鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J].石油与天然气地质,2012,33(1):118-128.
HOU Ruiyun, LIU Zhongqun. Resevoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2012,33(1):118-128.

[11] 杨　华,刘新社,闫小雄,等.鄂尔多斯盆地神木气田的发现与天然气成藏地质特征[J].天然气工业,2015,35(6):1-13.
YANG Hua,LIU Xinshe,YAN Xiaoxiong,*et al*.The Shenmu gas field in Ordos Basin:its discovery and reservoir forming geological characteristics[J].Natural Gas Industry,2015,35(6):1-13.

[12] 周进松,王念喜,赵谦平,等.鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层特征及控制因素分析[J].石油天然气学报,2014,36(2):27-33.
ZHOU Jinsong,WANG Nianxi,ZHAO Qianping,*et al*.Analysis of sandstone reservoirs characteristics and controlling factors in the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Journal of Oil and Gas Technology,2014,36(2):27-33.

[13] 魏新善,彭宇慧,罗顺社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩储层金字塔结构[J].非常规油气,2016,3(5):1-7.
WEI Xinshan, PENG Yuhui, LUO Shunshe, *et al*. Pyramid structure of tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Unconventional Oil & Gas,2016,3(5):1-7.

[14] 赵　林,夏新宇,戴金星.鄂尔多斯盆地上古生界天然气的运移与聚集[J].地质地球化学,2000,28(3):48-53.
ZHAO Lin,XIA Xinyu,DAI Jinxing.Migration and accumulation of natural gases in Upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Geology-Geochemistry,2000,28(3):48-53.

[15] 汪泽成,陈孟晋,王　震,等.鄂尔多斯盆地上古生界克拉通坳陷盆地煤成气成藏机制[J].石油学报,2006,27(1):8-12.
WANG Zecheng,CHEN Mengjin,WANG Zhen,*et al*.Simulation analysis on formation mechanism of coal-formed gas reservoir in intercratonic depression of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2006,27(1):8-12.

[16] 王桂成,王秀林,莫小国,等.鄂尔多斯盆地富县探区上古生界天然气运移模式[J].石油勘探与开发,2004,31(3):30-33.
WANG Guicheng, WANG Xiulin, MO Xiaoguo, *et al*. Gas migration pattern of Upper Paleozoic in the Fuxian Exploration Area,Ordos Basin[J].Petroleum Exploration and Development,2004,31(3):30-33.

[17] 周进松,王念喜,赵谦平,等.鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征[J].天然气工业,2014,34(2):34-41.
ZHOU Jinsong,WANG Nianxi,ZHAO Qianping,*et al*.Natural gas accumulation characteristics in the Upper Paleozoic in the Yanchang exploration block of southeastern Ordos Basin[J].Natural Gas Industry,2014,34(2):34-41.

[18] 蒙晓灵,张宏波,冯强汉,等.鄂尔多斯盆地神木气田二叠系太原组天然气成藏条件[J].石油与天然气地质,2013,34(1):37-41.
MENG Xiaoling,ZHANG Hongbo,FENG Qianghan,*et al*.Gas accumulation conditions of the Permian Taiyuan formation in Shenmu Gas Field,Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology,2013,34(1):37-41.

[19] 戴金星,邹才能,陶士振,等.中国大气田形成条件和主控因素[J].天然气地球科学,2007,18(4):473-484.
DAI Jinxing,ZOU Caineng,TAO Shizhen,*et al*.Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China[J].Natural Gas Geoscience,2007,18(4):473-484.