潘庄区块煤层含气性分布规律及地质控制因素分析

张 政[1,2],秦 勇[1,2],傅雪海[1,2],吴财芳[1,2]
(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;2. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要: 基于沁水盆地南部潘庄区块主煤层的含气性特征,从煤阶、显微煤岩组分、构造、水文地质条件等 4 个方面探讨了影响该区块主煤层含气性的地质控制因素。结果表明: 区块煤层含气性具有 2 个典型特征,太原组 15 号煤层含气性好于山西组 3 号煤层,与水力逸散作用对太原组煤层气保存条件破坏相对微弱的特点相关; 含气饱和度随埋深加大呈现先减后增的变化,转折点埋深约 500 m。同时发现,该区块随煤阶增高,含气量、孔隙度、吸附性均呈先升后降的变化,认为这是第 4 次煤化作用跃变对煤层气地质条件控制效应的具体体现; 煤层含气量显现为次级向斜控气的典型特征。

关键词: 潘庄区块; 煤层气; 含气性; 地质控制因素
中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253 - 2336(2014)05 - 0098 - 05

Distribution Law of Gas - bearing Property of Coal Seams and Analysis on Geological Control Factors in Panzhuang Block

ZHANG Zheng[1,2], QIN Yong[1,2], FU Xue-hai[1,2], WU Cai-fang[1,2]
(1. *School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *China*;
2. *MOE Key Lab of Coalbed Methane Resources and Reservoiring Formation Process, Xuzhou* 221116, *China*)

Abstract: Based on the gas - bearing property of main coal seams of Panzhuang Block in southern Qinshui Basin, the geological control factors such as coal rank, coal maceral, geologic structures, and hydrogeological conditions, which have influence on the gas - bearing property, were discussed in the paper. The results showed that the gas - bearing property of main coal seams had two typical characteristics: on the one hand, the gas - bearing property of No. 15 coal seam of Taiyuan Formation was better than that of No. 3 coal seam of Shanxi Formation, which was closely related with the characteristics that the hydraulic migration - escape process relatively weakly destroyed the CBM preservation conditions of Taiyuan Formation; on the other hand, with the burial depth increasing, the gas - bearing saturation increased first and then decreased, and the turning depth was around 500 meters. It was also found that with the coal rank heightening in this block, gas content, porosity and adsorption all increase first and then decrease, which is considered to be the specific embodiment of the 4th coalification jump's control effect on CBM geological conditions. Meanwhile, the gas content displays typical characteristics of subsyncline - controlled CBM.

Key words: Panzhuang Block; coalbed methane; gas - bearing property; geological control factors

0 引 言

煤层含气性是煤层气成藏的最基本要素,是决定煤层气产能及其开发潜力的重要参数之一,包括煤层气的含量、组成、含气饱和度、含气强度(资源富集度)及其时空分布特征[1]。煤层含气性主要受到生气条件、储气条件和保存条件所控制,主要包括地质构造、煤层顶底板岩性、煤岩煤质、煤变质程度、埋深和水文地质条件等控制因素[2]。沁水盆地南部是我国目前勘探程度最高、煤层气储气条件最稳定、开发潜力最大的煤层气田,而潘庄区块是我国首个实现煤层气地面规模性开发的地区,勘探与开发资料丰富,因此其含气性特征有必要进行重点研究。前人曾对区内煤层含气性特征做过某些分析,对控气地质因素的某些方面做过研究[3-7]。笔者依据最新的煤层气勘探开发资料,在分析区块主煤层的含

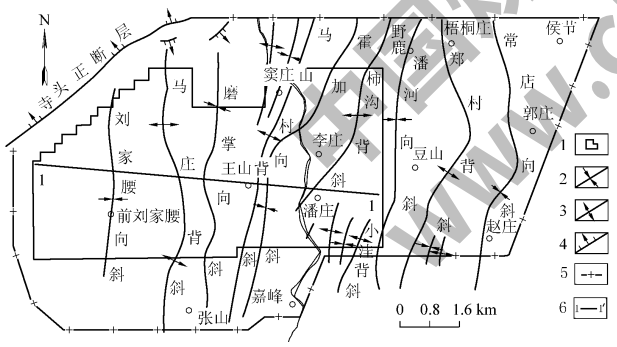
收稿日期: 2013 - 12 - 21; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2014.05.027
基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034); 国家自然科学基金重点资助项目(40730422)
作者简介: 张 政(1990—),男,河南鹤壁人,博士研究生。Tel: 15896422433, E - mail: zhangzheng0215@126.com
引用格式: 张 政,秦 勇,傅雪海,等. 潘庄区块煤层含气性分布规律及地质控制因素分析[J]. 煤炭科学技术,2014,42(5):98 - 102.
ZHANG Zheng, QIN Yong, FU Xue-hai, *et al*. Distribution Law of Gas - bearing Property of Coal Seams and Analysis on Geological Control Factors in Panzhuang Block[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(5): 98 - 102.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

气性分布规律的基础上，从埋深、煤阶、显微煤岩组分、地质构造、水文地质等条件入手，探讨了研究区含气性特征的地质控制因素，以期为区块煤层气的开发提供借鉴。

1　煤层气地质背景

潘庄区块位于沁水盆地南部仰起端，面积 150.77 km^2，煤层气探明储量为 311.01 × 10^8 m^3。区块整体上为一向北倾斜的单斜构造，发育一系列起伏平缓的 NNE、NE 和 SN 向次级褶曲，主要断裂是区块西北界的寺头正断层，区块内仅有落差小于 10 m 的小断层稀疏发育(图 1)。区内含煤地层为上古生界石炭系和二叠系，与下伏奥陶系呈平行不整合接触。主煤层为山西组 3 号煤层和太原组 15 号煤层，3 号煤厚 5.04 ~ 7.16 m，平均 6.11 m; 15 号煤厚 0.30 ~ 6.17 m，平均 3.21 m。主煤层镜质组最大反射率 $R_{o,max}$ 为 3.68% ~ 4.36%，为典型的无烟煤; 以半亮煤和半暗煤为主，其次为光亮煤和暗淡煤。3 号煤层灰分产率和全硫含量较低，属低灰 - 中灰、低硫煤; 15 号煤层灰分产率略高于 3 号煤层，全硫含量较高，为中 - 高硫煤。区块位于沁水盆地南部的地下水局部“低洼”滞留区，浅部接受地下水补给，在深部形成滞留带，水文地质条件简单[5-6]。



1—研究区; 2—向斜; 3—背斜; 4—正断层; 5—井界; 6—剖面线

图 1　沁水盆地潘庄地区构造纲要

2　煤层含气性分布规律

基于该区块 70 个钻孔煤心解吸数据可知: 3 号煤层含气量(空气干燥基甲烷含量，下同)为 8.48 ~ 23.92 m^3/t，平均 16.23 m^3/t，70% 的煤样含气量为 12 ~ 20 m^3/t; 15 号煤层含气量 9.30 ~ 30.74 m^3/t，平均 19.38 m^3/t，44% 煤样含气量大于 20 m^3/t(表 1)。煤层实测含气饱和度为 73.4% ~ 107.2%，大于 90% 的约占 50%，平均 91.6%; 总体上呈欠饱和状态，但明显高于沁水盆地 51.6% 的平均饱和度[7]。其中，15 号煤层含气量高于 3 号煤层(表 1)，这与沁水盆地乃至华北晚古生代巨型盆地中南部其他地区的情况有所不同。

表 1　潘庄区块主煤层含气性统计

煤层编号	样品数/个	CH_4 含量/($m^3 \cdot t^{-1}$) 最大	最小	平均	方差	气体组分体积分数/% CH_4	重烃	CO_2	N_2
3	80	23.92	8.48	16.23	276.64	94.21	0.025	2.44	3.33
15	71	30.74	9.30	19.38	411.91	96.37	0.100	1.23	2.30

潘庄区块 3 号煤层含气量呈现“周边低中部高、西高东低、西北部最高”的总体展布格局，西部、中南部和东部的含气量均大于 20 m^3/t，西北部达 23.92 m^3/t(图 2a); 15 号煤层含气量也具有相似的展布规律，但含气量普遍高于 3 号煤层(图 2b)。

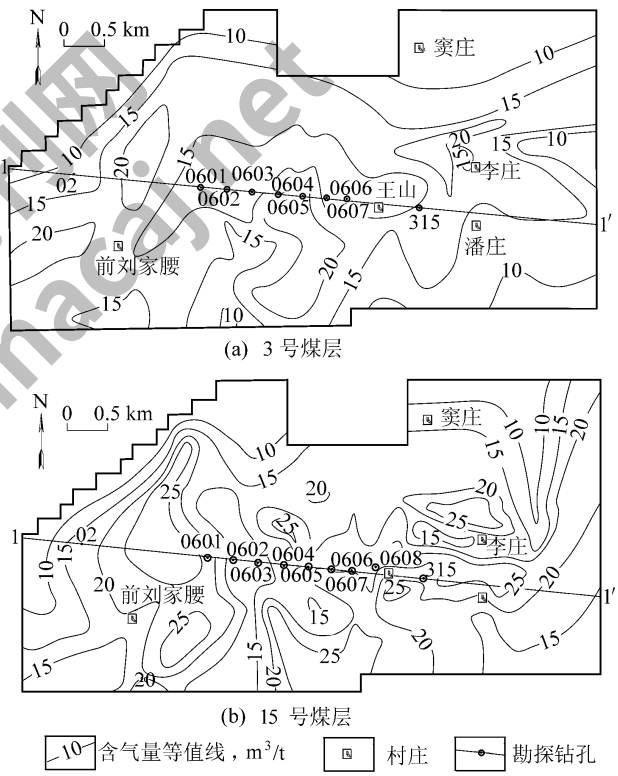
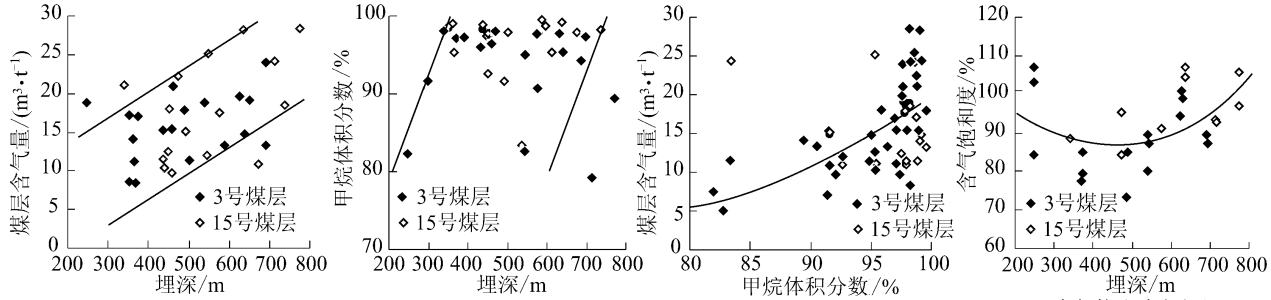


图 2　潘庄区块 3 号、15 号煤层含气量等值线

尽管煤层含气量与埋深间的关系较为离散，但两者总体上呈现正相关趋势(图 3a)。甲烷浓度随埋深增加呈增大趋势(图 3b); 除极个别钻孔的甲烷体积分数略低于 80% 外，其余均大于 80%，最高达 99.56%，平均 95.21%，且与煤层含气量呈指数正相关趋势(图 3c)。总体来看，区块内主煤层全部位于煤层气风化带以下，煤层气保存条件极好。主煤层含气饱和度随埋深呈现规律性变化(图 3d)。同等埋深下，15 号煤层的饱和度明显高于 3 号煤层; 随埋深加大，含气饱和度呈现先减小后增大的变化

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

规律，转折出现在埋深约 500 m。前人曾认为，潘庄一带煤层含气饱和度与埋深呈负相关关系[9]，这显然只是对较浅煤层的统计分析结果。这种“转折”，是地层压力与地层温度综合作用的必然结果[10]。

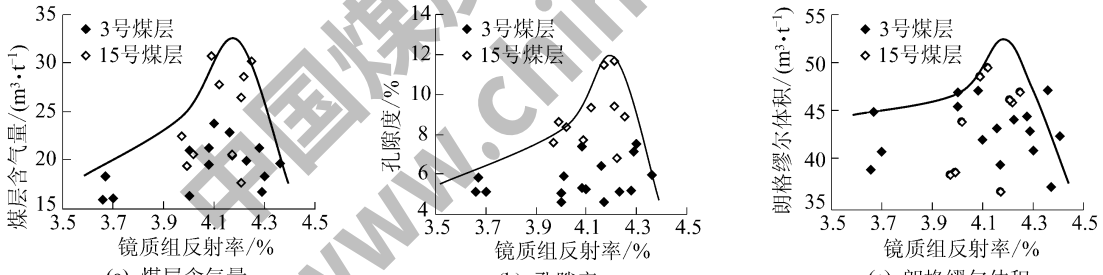


(a) 含气量与埋深　(b) 甲烷体积分数与埋深　(c) 含气量与甲烷体积分数　(d) 含气饱和度与埋深

图 3　煤层含气性与埋深的关系

3　煤层含气量分布的地质控制因素

1) 煤阶。潘庄区块晚古生代煤层经历了海西期—印支期的深成变质，后受燕山期的多热源叠加变质作用，普遍达到无烟煤煤阶[11]。因叠加变质的影响，煤层发生“二次生气”作用，为煤层含气量极高的地质因素[12]。随镜质组反射率的增高，煤层含气量、孔隙度、吸附性均呈先升高后降低的趋势，极大值大致位于镜质组反射率 4.0% ~4.2%(图 4)。镜质组最大反射率小于 5.0% 煤化作用，煤物理结构和化学结构经历过 4 次煤化作用跃变[13]。其中第 4 次煤化作用跃变发生在煤的镜质组反射率约 3.7% 时，表现为镜质组的顺磁性暂时消失，3 大显微组分组的反射率关系完成全面倒转，镜质组孔隙性、某些大分子基本结构单元参数的演化趋势发生转折，显著的生烃作用基本停止等[14]。同时，中国高煤阶煤普遍形成于异常高热地热场的作用，具有大地热流强、受热时间短等特征，煤的大分子结构调整未达到平衡，导致第 4 次煤化作用跃变出现的位置滞后到煤的镜质组反射率约 4.0%[14]。

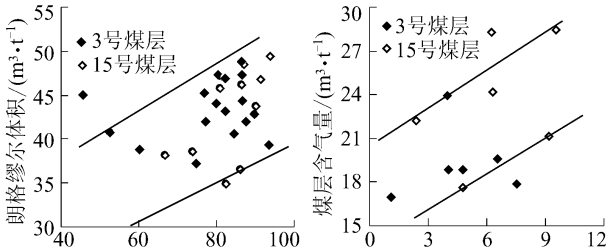


(a) 煤层含气量　(b) 孔隙率　(c) 朗格缪尔体积

图 4　煤层含气性、孔隙度与煤阶之间的关系

潘庄区块煤化作用程度正处于第 4 次煤化作用跃变点前后，孔隙度和吸附性的上述“倒转”正是该次煤化作用跃变的体现，是煤大分子结构剧烈调整的结果。由此，导致煤层含气量在煤化作用跃变点之前随镜质组反射率的增大而增高，在煤化作用跃变范围内达到最大值，然后急剧降低。

2) 显微煤岩组分。潘庄区块煤中显微组分以镜质组为主，含量在 45.9% ~ 93.8%，平均 80.13%，其次为惰质组。随镜质组含量或镜质组/惰质组比值的升高，煤的朗格缪尔体积呈增大趋势，导致煤层含气量趋于增高(图 5)。显微煤岩组分的差异，主要通过其孔隙性和吸附能力的不同而影响煤层含气量。前人研究发现，镜质组的吸附能力强于惰质组，相同煤阶富镜质组煤的吸附能力要大于富惰质组的煤[15-16]。个别学者曾认为，当镜质组最大反射率超过 2.1% 后，显微组分差异对煤岩吸附能力的影响已不明显[17]。潘庄区块上述规律表明，



(a) 朗格缪尔体积　(b) 煤层含气量

图 5　含气性与显微煤岩组分之间的关系

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.com

即使在典型的无烟煤阶段,显微组分差异仍然对煤的孔隙性、吸附性乃至含气量具有显著影响。

3) 次级构造。潘庄区块内部断裂不发育,煤层含气量高低受次级褶皱控制,高含气量带沿次级向斜轴部呈“串珠状”分布,15 号煤层这一规律更为显著,从图 1 和图 2 可看出。如 15 号煤层,西部刘家腰向斜轴部存在 2 个含气量高于 25 m^3/t 的富气带,中部磨掌山向斜、东部霍家山向斜轴部也发育若干含气量高于 20 m^3/t 的富气带,随向斜轴呈 NE、NNE 向分布。相反,次级背斜轴部则发育相对贫气带,如马庄背斜轴部含气量低于 15 m^3/t,局部甚至小于 10 m^3/t。

在剖面上,煤层含气量变化趋势与褶曲形态基本一致,明显看出受到次级褶曲构造的影响(图 6) 。煤层含气量在向斜轴部明显高于两翼地层,出现含气量曲线波峰点,相反,在背斜的轴部出现含气量曲线的波谷点,这一规律在马庄背斜尤为明显。该背斜地层倾角在区内最大,西翼 0601 钻孔 15 号煤层含气量为 24. 24 m^3/t,轴部 0603 钻孔煤层含气量仅为 11. 19 m^3/t,差异显著。

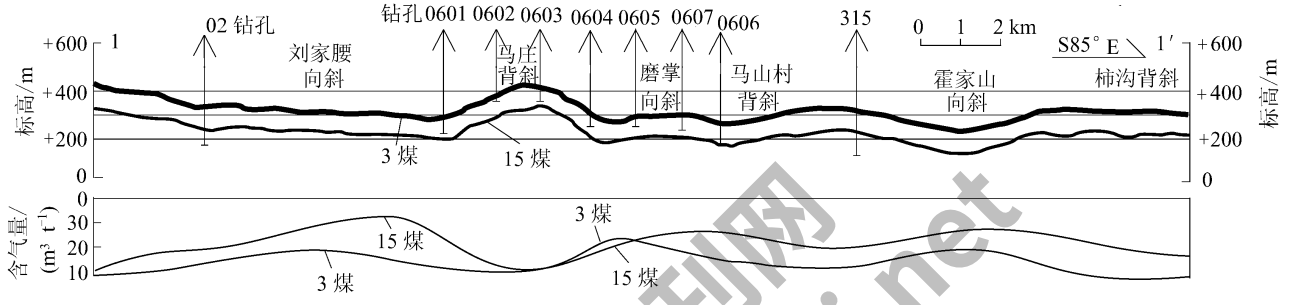
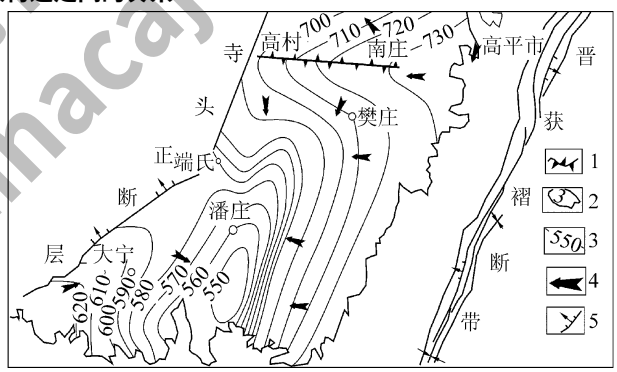


图 6　煤层含气量与褶皱构造之间的关系

4) 水文地质条件。在潘庄区块,太原组 15 号煤层含气量明显高于山西组 3 号煤层。然而,华北地区太原组煤层顶板多为灰岩岩溶裂隙含水层,山西组煤层顶底板以泥岩 - 粉砂岩隔水层为主,导致山西组煤层含气量高于太原组煤层[18]。潘庄区块 3 号煤层底板主要为泥岩,顶板多为泥岩和粉砂岩,渗透系数 0. 001 0 ~ 0. 007 3 m/d。15 号煤层一般发育薄层泥岩伪顶,直接顶为 K_2 灰岩,底板为泥岩,渗透系数在 0. 000 034 ~ 48. 400 000 m/d。也就是说,区内煤层顶底板发育特征与华北多数矿区没有实质性差别,但太原组与山西组煤层含气量关系却明显不同,表明煤层气保存另有主导性因素。

潘庄区块煤层含气量高低显著受到地下水动力场条件的控制。区块位于沁水盆地南部含煤地层地下水头等值线“低洼“地带(图 7) ,径流缓慢甚至呈滞流状态[19]。据钻孔抽水试验资料,与 3 号煤层有水力联系的 K_8 砂岩含水层单位涌水量仅 0. 000 4 ~ 0. 011 0 L/(s · m) ,渗透系数小于 0. 34 m/d; 与 15 号煤层顶板 K_2 灰岩含水层单位涌水量最高的只有 0. 056 L/(s · m) ,富水性也及其微弱。含煤地层底部的上石炭统本溪组铝土质泥岩为一隔水层,导致下伏奥陶系灰岩含水层与上覆石炭 - 二叠纪含煤地层形成两套相对独立的水文地质单元。

上述水文地质条件可知,因水力逸散作用对研究区太原组煤层气保存条件的破坏相对微弱,是下部太原组煤层含气量高于上部山西组煤层含气量的重要地质原因。



1—地下分水岭; 2—3 煤露头线; 3—等水位线,m; 4—地下水径流方向; 5—断层

图 7　晋城矿区山西组含水层地下水流场示意[18]

4　结　　论

1) 潘庄区块煤层甲烷浓度高、含气量高和含气饱和度高。煤层含气性在此“三高”背景上还显现出 2 个特征,一是太原组 15 号煤层含气性好于山西组 3 号煤层,二是含气饱和度随埋深加大呈现先减小后增大的变化趋势,转折出现在埋深 500 m 左右。研究认为,前者受控于研究区含煤地层的特殊水文地质条件,水力逸散作用对太原组煤层气保存条件的破坏相对微弱; 后者是地层压力与地层温度综合作用的必然结果。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2) 研究发现，潘庄区块煤层含气量、孔隙度、吸附性随变质程度增高均呈现先升高后降低的变化趋势。分析认为，该区块煤化作用程度正处于第 4 次煤化作用跃变点前后，孔隙度和吸附性的上述“倒转”正是该次跃变的体现，是煤大分子结构剧烈再度调整的结果。进一步而言，潘庄区块作为一个难得的天然实验室，蕴含着丰富的第 4 次煤化作用跃变及其对煤储层性质影响的地质 - 地球化学信息，值得今后深入研究。

3) 随镜质组含量的升高，潘庄区块煤层含气量和煤的朗格缪尔体积均呈增大趋势，表明显微组分差异即使在无烟煤阶段仍对煤的孔隙性、吸附性乃至含气性具有显著影响。同时，次级褶曲明显影响到煤层气富集的格局，高含气量条带沿次级向斜轴部呈串珠状，显示出次级向斜控气的典型特征。

参考文献:

[1] 秦　勇，刘焕杰，桑树勋，等. 山西南部上古生界煤层含气性研究 I - 推定区煤层含气性评价 [J]. 煤田地质与勘探，1997，25(4)：25 - 30.

[2] 孟召平，田永东，李国富. 煤层气开发地质学理论与方法 [M]. 北京：科学出版社，2010.

[3] 李贵红，张　泓，张培河，等. 晋城煤层气分布和主导因素的再认识 [J]. 煤炭学报，2010，35(10)：1680 - 1684.

[4] 李贵中，王红岩，吴立新，等. 煤层气向斜控气论 [J]. 天然气工业，2005，25(1)：26 - 28.

[5] 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.

[6] 叶建平，武　强，叶贵钧，等. 沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究 [J]. 地质评论，2002，48(3)：319 - 322.

[7] 郭　晨，秦　勇，韦重韬. 潘庄区块煤层气井网优化设计与产能预测 [J]. 煤炭科学技术，2011，39(8)：104 - 106.

[8] 杨兆彪，秦　勇，王国玲，等. 安阳矿区双全井田煤层气可采潜力分析 [J]. 天然气工业，2009，29(10)：121 - 123.

[9] 高和群，韦重韬，申　建，等. 沁水盆地南部含气饱和度特征及控制因素分析 [J]. 煤炭科学技术，2011，39(2)：94 - 97.

[10] 秦　勇，申　建，王宝文，等. 深部煤层成藏效应及其耦合关系 [J]. 石油学报，2012，33(1)：48 - 54.

[11] 杨　起，汤达祯. 华北煤变质作用对煤含气量和渗透率的影响 [J]. 地球科学—中国地质大学学报，2000，25(3)：273 - 276.

[12] 秦　勇，宋党育，王　超. 山西南部晚古生代煤的煤化作用及其控气特征 [J]. 煤炭学报，1997，22(3)：230 - 235.

[13] 秦　勇，傅雪海，叶建平，等. 中国煤储层岩石物理学因素控气地质特征及其机理 [J]. 中国煤层气，1999(2)：29 - 33.

[14] 秦　勇. 中国高煤级煤显微岩石学特征及结构演化 [M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1994.

[15] 张　群，杨锡禄. 平衡水分条件下煤对甲烷的等温吸附特性研究 [J]. 煤炭学报，1999，24(6)：566 - 570.

[16] Crosdale P J，Beamish B B，Valix M. Coalbed Methane Sorption Related to Coal Composition [J]. International Journal of Coal Geology，1998(3)：147 - 158.

[17] 傅雪海，秦　勇，李贵中，等. 特高煤级煤平衡水条件下的吸附实验 [J]. 石油实验地质，2002，24(2)：177 - 180.

[18] 刘焕杰，秦　勇，桑树勋. 山西南部煤层气地质 [M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1998.

[19] 傅雪海，秦　勇，王文峰，等. 沁水盆地中—南部水文地质控气特征 [J]. 中国煤田地质，2001，13(1)：31 - 34.

(上接第 97 页)

成藏，8 + 9 号煤层为水压封闭型成藏。对于 8 + 9 号煤层，开发过程中应避免压裂施工，优先采用多分支水平井和 U 型对接井等井型，或临时避开 8 号煤层，实现柳林矿区煤层气的最优化产出。

参考文献:

[1] 桑树勋，刘焕杰，李贵中，等. 煤层气生成与煤层气富集 [J]. 煤田地质与勘探，1997，25(6)：14 - 17.

[2] 连承波，赵永军，李汉林，等. 煤层含气量的主控因素及定量预测 [J]. 煤炭学报，2005，30(6)：726 - 729.

[3] Ayers W B. Coalbed Gas Systems，Resources，and Production and a Review of Contrasting Cases from the San Juan and Powder River Basins [J]. AAPG Bulletin，2002，86(11)：1853 - 1890.

[4] Song Y，Zhao M，Hong F，*et al*. Pool - forming stages and enrichment models of medium - to high - rank coalbed methane [J]. ACTA Geologica Sinica，2010，84(6)：1539 - 1546.

[5] Su X，Zhang L，Zhang R. The abnormal pressure regime of the Pennsylvanian No. 8 coalbed methane reservoir in Liulin - Wupu District，Eastern Ordos Basin，China [J]. International Journal of Coal Geology，2003，53：227 - 239.

[6] 苏现波，张丽萍，林晓英. 煤阶对煤的吸附能力的影响 [J]. 天然气工业，2005，25(1)：19 - 21.

[7] 熊孟辉，秦　勇. 五轮山矿区煤层气赋存规律及其资源潜力 [J]. 煤炭科学技术，2007，35(9)：79 - 82.

[8] 秦　勇. 国外煤层气成因及储层物性研究进展与分析 [J]. 地学前缘，2005，12(3)：289 - 296.

[9] 孟召平，田永东，雷　旸. 煤层含气量预测的 BP 神经网络模型及应用 [J]. 中国矿业大学学报，2008，37(4)：456 - 461.

[10] 常会珍，秦　勇. 黔西红梅勘探区主煤层含气性及其地质影响因素 [J]. 煤炭科学技术，2012，40(2)：107 - 110.

[11] 金裕科. 影响煤层含气量若干因素初探 [J]. 天然气工业，1995，15(5)：1 - 5.

[12] 陈钟惠，张年茂，张守良，等. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系沉积体系和聚煤作用的时空演化 [J]. 地球科学，1989，14(4)：357 - 366.

[13] 秦　勇. 中国煤层气成藏作用研究进展与述评 [J]. 高校地质学报，2012，18(3)：405 - 418.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net