含煤地层流体能量分布与煤层气开发关系研究

郭 晨[1],卢玲玲[2]
(1. 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 北京奥瑞安能源技术开发有限公司,北京 100195)

摘 要: 从储层压力、水动力条件、含气性3个方面综合分析了黔西水公河向斜晚二叠世含煤地层流体能量的垂向分布特点,发现3个含煤段由于沉积环境不同,导致其间流体能量差异显著,中段能量条件最好、上段次之、下段最差,3段分别构成3个独立的含煤层气系统,相互间缺乏流体联系。依此将含煤地层划分为上、中、下3个开发层段,煤层气有序开发模式为由上至下依次对3个开发层段进行分阶段下行式开发。本区具备进行煤层气地面开发的工程地质条件,应以直井多层压裂合层排采技术为主,5^{-3}、6^{-3}、8号煤可尝试水平井技术,丛式井技术具有较好的推广前景。

关键词: 水公河向斜; 煤层气; 多煤层; 流体能量; 有序开发
中图分类号: P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)02-0045-05

Study on relationship of liquid energy distribution and coalbed methane development in coal bearing strata

Guo Chen[1], Lu Lingling[2]
(1. *School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an* 710054, *China*;
2. *Beijing Orion Energy Technology and Services Company Limited, Beijing* 100195, *China*)

Abstract: From the reservoir pressure, water dynamic condition and gas bearing aspects, a comprehensive analysis was conducted on the vertical distribution features of the liquid energy in Shuigonghe syncline Late Permian coal bearing strata of West Guizhou. Due to the sedimentary environment differences, three coal bearing sections had obvious differential in the liquid energy. The energy condition at the central section was best, the top section was second and the bottom section was poor. The three sections formed three independent coalbed methane bearing systems and there was lack of the interaction liquid connection. Thus the coal bearing stratum was divided into the top, middle and bottom development sections and the sequence development mode of the coalbed methane from the top to the bottom in sequence was applied to the three development sections with the sectional downward development. The area had the engineering geological conditions for the coalbed methane surface development and the multi strata fracturing combined mining technology with the vertical wells would be based. The horizontal well technology could be applied to No.5^{-3} seam, No.6^{-3} seam and No.8 seam and the cluster well technology would have a good promotion prospect.

Key words: Shuigonghe syncline; coalbed methane; multiple seams; liquid energy; mining in sequence

0 引 言

多煤层条件下通常发育多套流体压力系统,煤层气井多层合排采时易产生层间干扰,限制合排采井的产能效果,这一现象已被众多排采实践证实[1-3],造成多煤层地区煤层气开发困难。黔西地区煤层气资源丰富,煤层数量多,发育"多层叠置独立含煤层气系统"[4],系统间流体能量差异显著,在前期煤层气勘探开发过程中对此认识不足,选层存在盲目性,导致层间干扰显著,气井产能不理想,延缓了该区煤层气产业化进程。为此,笔者以黔西水公河向斜为例,分析含煤地层流体能量垂向分布特

收稿日期: 2015-09-30; **责任编辑:** 王晓珍 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.02.008
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: 郭 晨(1988—),男,山西晋城人,讲师,博士。Tel: 15291597017, E-mail: makaay_@126.com
引用格式: 郭 晨,卢玲玲.含煤地层流体能量分布与煤层气开发关系研究[J].煤炭科学技术,2016,44(2):45-49.
Guo Chen, Lu Lingling. Study on relationship of liquid energy distribution and coalbed methane development in coal bearing strata[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 45-49.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

征和多层流体压力系统的发育特点，探索多系统有序开发模式和适用技术，旨在为高效开发黔西地区丰富的煤层气资源提供参考。

1　地质背景

水公河向斜位于贵州省纳雍县南部，属织纳煤田，包括西翼的五轮山井田和东翼的补作井田，含煤面积约 120 km^2，煤层甲烷资源量 699.45 亿 m^3，资源丰度高达 8.04 亿 m^3/km^2[5]，远高于 1.12 亿 m^3/km^2的全国平均水平，是黔西地区重要的大型煤炭生产基地和煤层气开发前景区[6]，高效开发本区煤层气具有安全、能源、经济、环保等多重意义。

织纳煤田在大地构造单元上属扬子准地台(Ⅰ级)上扬子台褶带(Ⅱ级)黔中早古拱断褶束(Ⅲ级)[7]，周缘 NW 向、WE 向、NE 向 3 条主干断裂互相衔接，构成倒立三角形并控制了织纳煤田的构造特征。水公河向斜位于织纳煤田西部，为一北部被断裂(F1)所截切的宽缓对称向斜。区内主体构造水公河向斜和加戛背斜轴部呈 NW 向展布，断裂以 NE 向高角度正断层为主，倾角一般 60°~80°，坐拱背斜、张唯背斜等次级褶曲与主褶曲方向近于垂直，区内构造主要定型于燕山期(图 1)。地表出露第四系、三叠系和二叠系地层，地层走向 NW，倾角两翼 20°~40°，轴部 5°~10°，由两翼向轴部逐渐变缓。含煤地层晚二叠世龙潭组、长兴组与底部峨眉山玄武岩组呈假整合接触，与上覆下三叠统飞仙关组呈连续沉积。

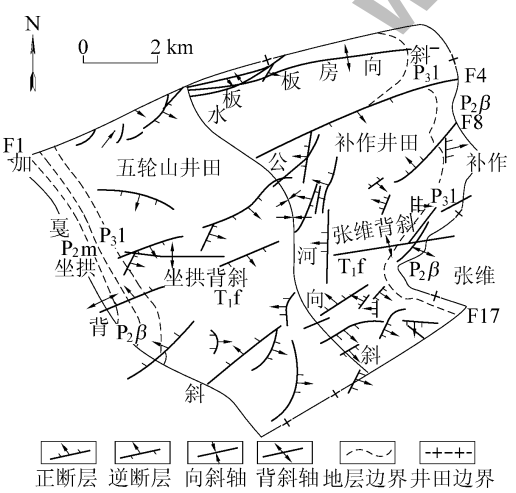


图 1　水公河向斜构造纲要图

Fig. 1　Tectonic outline map of Shuigonghe Syncline

龙潭组、长兴组厚约 344 m，埋深一般在 300~700 m，含煤 35 层，煤层总厚 24.59~41.72 m，平均 33 m，为一套以陆相细碎屑岩沉积为主、夹海相灰岩的海陆交互相含煤建造。依据沉积旋回结构和煤层赋存特征可划分为 3 个含煤段：①下段由煤系底部至 K7 灰岩顶部，平均厚 101.78 m，含煤 10 层左右，33、32 号煤层为可采煤层；②中段由 K7 灰岩顶至 K5 粉砂质泥岩底，平均 129.03 m，含煤 13 层左右，其中 20、16、14 煤层可采；③上段自 K5 底至 K2 灰岩底，平均厚 113.62 m，含煤 11 层左右，其中 9、8、6^{-4}、6^{-3}、6^{-2}、5^{-3}、5^{-2}、3 煤层可采。可采煤层厚度在上、中、下 3 段所占比例分别为 63%、19%、18%。最大镜质组反射率为 2.59%~3.76%，平均 3.02%，为典型的无烟煤。煤岩类型以半亮-半暗煤为主，显微煤岩组分以镜质组为主，次为惰质组。

由于飞仙关组一段(T_1f^1)和峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)的隔水作用，加之断层多具隔水作用，上二叠统含煤地层与上覆下伏强含水层基本无水力联系，地下水动力条件较弱。

2　含煤地层流体能量分布

水动力条件可由钻孔抽水试验获得的单位涌水量 q、渗透系数 K 和影响半径 R 三个参数予以表征，单位涌水量代表地层的富水性，渗透系数反映地层流体穿透含水层的能力，影响半径则代表水位降深的扩展能力，三者综合反映了煤层气排采过程中地层的供排水能力和压降传播效果。依据上述 3 个参数绘制地下水动力条件 K-R-q 图解(图 2)，揭示非含煤地层水动力条件明显强于含煤地层，同时表明含煤地层与周围含水层缺乏水力联系，总体为弱富水-极弱透水含水系统，这种水动力条件是煤层气在较浅埋藏条件下得以富集的主要原因之一，但给煤层气井排水降压带来困难，需打破常规，创新增产排采管理技术。

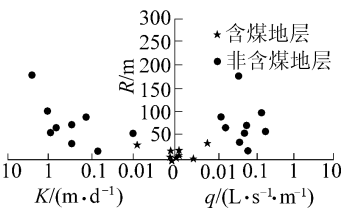


图 2　水公河向斜地下水动力条件 K-R-q 图解

Fig. 2　Groundwater dynamic conditions K-R-q diagram in Shuigonghe Syncline

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

本区缺乏煤层气试井资料,而煤储层压力通常与地下水动力条件密切相关,水头大小是储层压力和地层流体势能的直接反映。统计五轮山井田 15 个观测层段的水头数据,发现中段水头最高。钻孔煤心煤层气解吸数据统计显示,上段平均含气量 15.57 m^3/t,中段 20.26 m^3/t,下段 17.57 m^3/t,可见 3 个含煤段水头与含气性呈正相关,同时揭示 3 个含煤段不属于一个统一的流体压力系统,中段较高的水头代表着较高的储层压力,有利于煤层气富集高产,较高的含气量与之相符。

3　地质控因与煤层气开发方案

3.1　流体能量差异分布的成因

本区龙潭组为海陆交互相含煤地层,海平面的变化直接控制沉积体系的空间展布,同时也控制煤的聚积[8]。龙潭组早期是一个不等幅脉动式的海侵时期,形成了潟湖-潮坪沉积环境(煤系底部~K_7灰岩),K_7灰岩形成时期为一次规模较大的海侵;之后开始大规模海退,K_7灰岩顶~K_2灰岩底发育受潮汐影响,以河控为主的三角洲沉积体系,其中又以 14 煤层为界,其下为三角洲发育阶段,以河控为主的三角洲向海推进,为晚二叠世最大海退期,其上为三角洲废弃阶段,海水作用逐渐增强,三角洲向西部陆地收缩;自 K_2灰岩开始,海岸线进一步向西迁移,为黔西晚二叠世最大海侵超覆期,发育潟湖-潮坪-台地相。3 个含煤段由下至上经历了海侵-海退-海侵的海平面升降旋回(图 3),依次对应潟湖-潮坪阶段、三角洲建设阶段和三角洲废弃阶段。

据此,结合同一沉积环境具有相似物性的合理推测,海水进退控制下的沉积环境演变应是导致各含煤段流体能量差异的主要因素(图 3、表 1)。下段的潟湖-潮坪相以较闭塞型海湾或泻湖充填为特征,沉积环境能量较低,岩性总体较为致密,加之埋深普遍较大,不利于地下水赋存和渗流,导致水动力条件较差;中段三角洲建设阶段,陆相河流影响显著,沉积物供应较充足,发育陆相沉积,砂岩含水层厚度较大,富水性和导水性较强,流体动力条件最好,但含煤层数较少,煤层间距较大;上段三角洲废弃阶段受海水影响增强,沉积水体加深,沉积环境逐渐向较闭塞的弱还原环

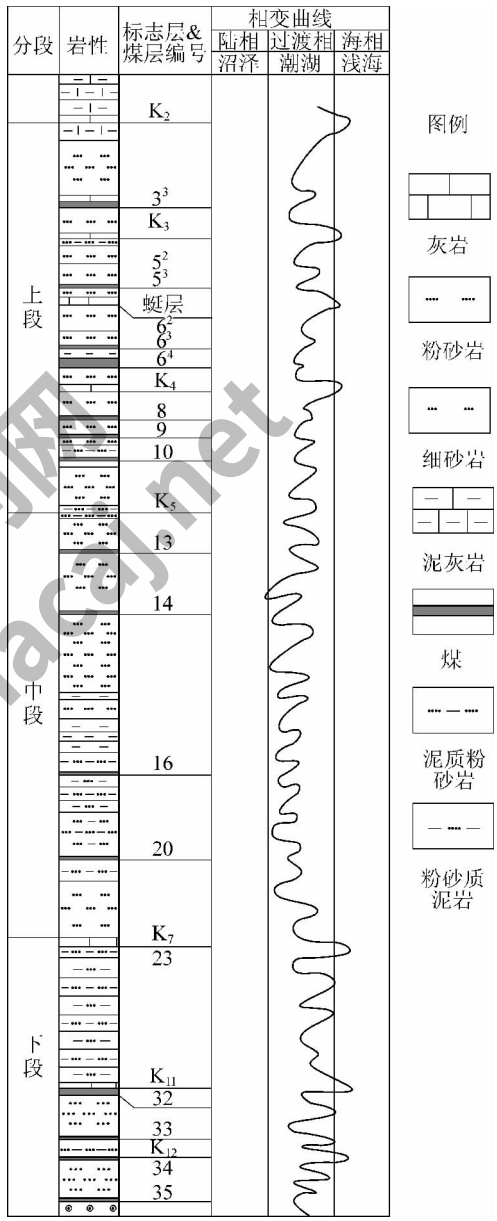


图 3　水公河向斜含煤地层柱状图及海水进退曲线

Fig. 3　Coal bearing strata columnar map and marine transgression-regression curve of Shuigonghe Syncline

表 1　水公河向斜流体动力参数分段统计

Table 1　Fluid dynamic parameters of different coal bearing sections in Shuigonghe Syncline

含煤段	H/m	q_m/($m^3 \cdot t^{-1}$)	P/MPa	q/($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)	K/($m \cdot d^{-1}$)	R/m
上段	13.9	15.57	0.87	0.000 458	0.000 826	18.5
中段	9.5	20.26	1.58	0.005 534	0.005 734	34.5
下段	9.6	17.57	1.21	0.000 003	0.000 012	5.9

注: H 为煤层总厚; q_m 为平均含气量; P 为视储层压力,视储层压力依据水头高度换算; q 为单位涌水量; K 为渗透系数; R 为影响半径。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

境转变，沉积物粒度趋于变细，岩相变化更加频繁，孔渗性变差，流体动力条件弱于中段，但强于下段。总体上每个含煤段内部由于受同一沉积环境控制而具有相似的储层物性条件和流体能量条件，并且煤层分布较为集中，适合于合层开发，但下段极弱的流体动力条件不利于排水降压的实施，必须采取更为有效的煤储层改造措施。

3.2　开发层段划分与有序开发方案

黔西上二叠统具有煤层数量多，煤层成组赋存、富水性弱，单一煤层较薄的特点[9]，地面井开发单一煤层难以获得理想的产气能力，因此需要进行多煤层合层开采，但合层开采时因储层压力、供水能力、渗透率等因素的差异，容易造成层间能量干扰，已被织纳煤田多口煤层气试验井所证实，为尽量降低这种干扰造成的产能损失，应根据流体能量分布和开发工程地质条件选择适合进行合层排采的层位，划分开发层段，以实现多煤层的递进开发。

为保证开发效果，结合上述流体能量垂向分布分析，将含煤地层上、中、下三段确定为 3 个开发层段(图 3、表 1)，上段主要开发目标层位为 3、5^{-2}、5^{-3}、6^{-3}、8、9 号煤，中段为 14、16、20 号煤，下段则包括 32、33、34、35 号煤。上段煤层众多，主要可采煤层大多位于本段，可采煤层总厚度大，煤层间距小，总资源量大且解吸率较高[9]，这种集中分布的煤层组合具有良好的产能潜力。至此，认为本区最佳的煤层气有序开发模式应为由上至下依次对 3 个开发层段进行分阶段下行式开发，这样既可有效避免系统间能量干扰给产能带来的不利影响，同时在含煤地层弱富水的前提下，保证了下部煤层组有足够的水源进行排采降压，同时可保护下煤组的开发工程地质条件。

3.3　适用开发技术

煤厚、埋深、煤层间距、煤体结构、煤层结构、煤层稳定性等构成多煤层地区煤层气地面开发的主要工程地质约束因素。本区煤层埋深较浅，主煤层原生结构总体上保存完好，以原生结构煤和碎裂煤为主，煤体强度较高，可保证工程稳定性，且多数煤层分布较为稳定，煤层结构较为简单，总体具备煤层气地面开发的工程地质条件。煤层气地面开发应以直井分层压裂合层排采技术为主，分层压裂一般要求单煤层厚度不小于 1 m，含气系统内部厚度较薄且层间距较小(< 10 m)的煤层可尝试合层压裂(表 2)，若煤层顶底板中存在甲烷资源，合层压裂更有利于产能的提升，而贵州龙潭组多煤层条件下已被证实同时存在煤层气、页岩气以及致密气资源[10-11]，未来应着力实施“三气”共探共采；因地层富水性弱，压降传播较困难，单井控制面积较小，井间距不宜过大，据数值模拟结果，以 200 m 为宜[12]；个别厚度较大(>1.8 m)，稳定分布且煤层结构简单，

表 2　水公河向斜主煤层煤层气开发工程地质条件与适用开发技术

Table 2　CBM development engineering geological condition and applicable technology in Shuigonghe Syncline

煤层	工程地质条件					开发技术适配性		
	煤厚/m	煤层间距/m	煤层结构	煤体结构	稳定性	分层压裂	合层压裂	水平井
3	1.65		较简单	原生	较稳定	√		
5^{-2}	1.16	27.44	较简单	原生/碎裂	不稳定	√		
5^{-3}	1.95	5.48	较简单	原生/碎裂	较稳定	√	√	√
6^{-2}	0.91	18.66	简单	碎裂/碎粒	较稳定			
6^{-3}	2.09	2.29	复杂	原生/碎裂	较稳定	√	√	√
6^{-4}	1.34	6.86	较简单	碎裂/碎粒	稳定	√		
8	2.10	22.45	较简单	原生/碎裂	稳定	√		√
9	0.92	6.37	简单	原生/碎裂	不稳定		√	
14	1.12	40.46	较简单	原生/碎裂	不稳定	√		
16	1.35	47.29	较简单	原生/碎裂	较稳定	√		
20	1.21	35.12	较复杂	原生/碎裂	不稳定	√		
32	1.03	68.86	较简单	原生/碎裂	不稳定	√	√	
33	1.84	6.15	复杂	原生/碎裂	较稳定	√		

注：√表示相应煤层适合采用该开发技术。

煤体强度较大的煤层可尝试水平井技术,例如 5^{-3}、6^{-3}、8 号煤,并可运用多分支对接水平井技术实现多煤层的统一排采; 可尝试连续油管压裂技术进行多层压裂作业,但该技术在国内煤层气开发中尚未成熟运用,需进一步依据本区地质条件加强技术攻关; 因单一煤层较薄、渗透率较低、供水能力较差而不宜采用裸眼/洞穴完井技术; 受山区地形条件所限,难以布置大规模井网,丛式井占地面积较小,且抽采波及范围大,易形成井间干扰,加之本区煤体结构符合定向井施工条件,推测该技术在水公河向斜乃至织纳煤田具有较为广阔的应用前景。

4　结　　论

1) 本区上二叠统含煤地层与其他含水层缺乏流体联系,总体富水性弱,导水能力差,采用常规措施难以取得理想效果,必须打破常规,创新增产排采管理技术。

2) 从含气性、水动力条件、储层压力 3 个方面综合表征了水公河向斜含煤地层流体能量的垂向分布特征,发现受控于沉积环境,龙潭组上、中、下三段间流体能量差异显著,中段能量条件最好,其次为上段和下段,形成 3 个独立叠置含煤层气系统,依此将上二叠统含煤地层划分为 3 个开发层段,并结合煤层赋存特点、资源潜力以及开发工程实施条件,认为最佳的煤层气递进开发顺序应为由上至下依次对 3 个开发层段进行分阶段下行式开发。

3) 本区具备煤层气地面开发的工程地质条件,分层压裂合层排采是主要的直井开发模式,部分煤岩层组合适于进行合层压裂,5^{-3}、6^{-3}、8 号煤层可尝试水平井技术,同时应推广丛式井技术。

参考文献(References) :

[1] 秦　勇,张　政,白建平,等.沁水盆地南部煤层气井产出水源解析及合层排采可行性判识[J].煤炭学报,2014,39(9):1892-1898.
Qin Yong,Zhang Zheng,Bai Jianping,*et al*.Source apportionment of produced water and feasibility discrimination of commingling CBM production from wells in Southern Qinshui Basin[J].Journal of China Coal Society,2014,39(9):1892-1898.

[2] 李国彪,李国富.煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J].煤炭学报,2012,37(8):1354-1358.
Li Guobiao,Li Guofu.Study on the differences and mian controlling factors of the coalbed methane wells between single layer and multi-layer drainage[J].Journal of China Coal Society,2012,37(8):1354-1358.

[3] 傅雪海,葛燕燕,梁文庆,等.多层叠置含煤层气系统递进排采的压力控制及流体效应[J].天然气工业,2013,33(11):35-39.
Fu Xuehai,Ge Yanyan,Liang Wenqing,*et al*.Pressure control and fluid effect of progressive drainage of multiple superposed CBM systems[J].Natural Gas Industry,2013,33(11):35-39.

[4] 秦　勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统: 以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质论评,2008,54(1):65-70.
Qin Yong,Xiong Menghui,Yi Tongsheng,*et al*.On unattached multiple superposed CBM-bearing system: in a case of Shuigonghe syncline,Zhina coalfield,Guizhou[J].Geological Review,2008,54(1):65-70.

[5] 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.
Xiong Menghui,Qin Yong.Law of preservation of coal bed methane in Wulunshan mining area and itsresource potential[J].Coal Science and Technology,2007,35(9):79-82.

[6] 秦　勇,高　弟,吴财芳,等.贵州省煤层气资源潜力及其预测评价[M].徐州: 中国矿业大学出版社,2012: 12-18.

[7] 朱炎铭,赵　洪,闫庆磊,等.贵州五轮山井田构造演化与煤层气成藏[J].中国煤炭地质,2008,20(10):38-41.
Zhu Yanming,Zhao Hong,Yan Qinglei,*et al*.Tectonic evolution and CBM reservoir formation in Wulunshan mine field,Guizhou[J].Coal geology of China,2008,20(10):38-41.

[8] 解习农,程守田.贵州织纳煤田晚二叠世海进海退旋回及煤聚集[J].煤田地质与勘探,1992,20(5):1-6.
Xie Xinong,Cheng Shoutian.Transgressive-regressive cycles and coal accumulation of Upper Permian,Zhina coalfield in Guizhou[J].Coal Geology & Exploration,1992,20(5):1-6.

[9] 熊孟辉,秦　勇.五轮山矿区煤层含气性与煤层气理论抽采率[J].中国煤炭地质,2009,21(5):1-3.
Xiong Menghui,Qin Yong.Coal seam gas-bearing properties and theoretical CBM recoverable ratios in Wulunshan Mine area,Guizhou[J].Coal Geology of China,2009,21(5):1-3.

[10] 高　为,田维江,秦　文,等.贵州省煤层气与页岩气共探共采的地质优选[J].断块油气田,2014,21(1):36-38.
Gao Wei,Tian Weijiang,Qin Wen,*et al*.Geological optimization of coalbed methane and shale gas co-exploration and concurrent production in Guizhou Province[J].Fault-block Oil and Gas Field,2014,21(1):36-38.

[11] 李　娟,于炳松,夏响华,等.黔西北地区上二叠统龙潭组泥页岩储层特征[J].地学前缘,2015,22(1):301-311.
Li Juan,Yu Bingsong,Xia Xianghua,*et al*.The characteristics of the Upper Permian shale reservoir in the northwest of Guizhou Province,China[J].Earth Science Frontiers,2015,22(1):301-311.

[12] 郭　晨.多层叠置含煤层气系统及其开发模式优化: 以黔西比德-三塘盆地上二叠统为例[D].徐州: 中国矿业大学,2015: 94-106.
Guo Chen.Multi-layer Superposed CBM system and drainage model optimization: in the case of the upper permian Bide-Santang Basin[D].Xuzhou: China University of Mining and Technology,2015: 94-106.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net