

新西

多煤层产气潜力及
单井高效开采模式

◎ 吴财芳 姜玮 王蒙 周龙刚
王乔 李腾 姚帅 刘小磊
著



科学出版社

黔西多煤层产气潜力及 单井高效开采模式

吴财芳 姜 玮 王 蒙 周龙刚 著
王 乔 李 腾 姚 帅 刘小磊

国家科技重大专项项目（2016ZX05044）、国家自然科学基金面上项目
（41272178、41572140）及江苏省“青蓝工程”项目资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以黔西织纳煤田为研究对象,阐明了多煤层区多层叠置独立含气系统与多层统一含气系统中煤层气地质特征的层域变化规律及主控因素,优化了不同含气系统压裂方式及参数,探讨了不同含气系统煤层气排采的层间干扰机理,厘定了煤层气单井压裂/排采次序,建立了多煤层区煤层气单井高效有序压裂/排采模式。

本书可供煤层气地质工程及相关专业的研究生、教学科研和工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

黔西多煤层产气潜力及单井高效开采模式/吴财芳等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050819-5

I. ①黔… II. ①吴… III. ①煤层-地下气化煤气-地下开采-研究-贵州 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 282999 号

责任编辑:胡 凯 刘稳航 冯 钊/责任校对:王 瑞

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:18

字数:363 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着我国经济的快速发展,对能源的需求量也逐年增加,也更加注重清洁能源的发展,非常规天然气的发展将会是天然气的重要补给来源之一。其中,煤层气又是最现实可采的资源。2006年,我国完成了新一轮油气资源评价,42个主要含气盆地埋深2000m以浅煤层气地质资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{m}^3$,可采资源量为 $10.87 \times 10^{12} \text{m}^3$,仅次于俄罗斯、加拿大,居世界第三位。有计划地开发利用煤层气,将有利于我国自然资源的有效利用,对缓解国民经济发展中的能源供求矛盾、改善煤矿安全生产条件、遏制我国煤矿甲烷排放量、促进我国大气环境改善等方面具有重大的现实意义和应用价值。

目前,我国煤层气开发活动主要集中在沁水盆地南部晋城矿区、北部阳泉矿区,鄂尔多斯盆地南缘韩城矿区、东北阜新盆地等少数地区。虽然我国在低煤级煤层气开发、构造煤煤层气开发和多煤层区煤层气开发等方面取得了部分突破,但整体效果均不理想。除上述区块外,尚没有形成其他可进行商业开发的后备基地。全国《煤层气产业政策》要求:“加大新疆、辽宁、黑龙江、河南、四川、贵州、云南等地区煤层气资源勘探力度,建设规模化开发示范工程”。在我国南方,贵州省煤炭与煤层气资源最为集中、丰富,全省煤炭资源量 $2588.55 \times 10^9 \text{t}$,占南方煤炭资源总量的66.08%,占全国的4.38%。全省及邻区煤层气地质资源量 $4.44 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全国的12.07%,占南方的60%以上。

织纳煤田位于贵州省中西部,包括比德向斜、三塘向斜、阿弓向斜、珠藏向斜、关寨向斜等多个向斜单元,含煤面积约为 1016.3km^2 ,煤层气资源量为 $7611 \times 10^8 \text{m}^3$ 。此外,该区煤层气赋存条件优越,资源丰度高,含气量高,煤体结构整体完整性较好。但与沁水盆地相比,多煤层发育区的织纳煤田在压裂、排采等各方面都存在明显的差异性。目前,水力压裂的相关研究只是针对单层煤而言,对于多煤层合层压裂工艺参数的研究,鲜有报道。此外,多煤层开采过程中层间干扰严重,往往导致排采效果不佳,且在排采制度方面与单一煤层开发必然存在明显的区别。因此,解决多煤层地区煤层气井合层压裂以及工艺参数的优化问题,揭示合层排采时层间干扰产生机制、储层压降传播规律以及合采产能影响因素,建立有序高效的开采模式,对指导多煤层区煤层气开发尤为重要。

鉴于我国煤层气开发现状,《黔西多煤层产气潜力及单井高效开采模式》选择黔西织纳煤田珠藏向斜的少普井田及阿弓向斜的文家坝井田为研究对象,综合运

用煤田地质学、构造地质学、煤层气地质学等理论与方法,基于大量煤田地质勘探、煤层气井生产、测井等资料,以煤层气活性水压裂工艺及合层排采技术为核心,在系统研究各含气系统的煤层气地质特征及其主控因素的基础上,依据水力压裂致裂机理以及煤层气排采机理,采用物理模拟与数值模拟方法,优选煤层气井压裂方式及工艺参数。同时,查明各含气系统产气潜力及产能贡献,揭示系统间以及层间的干扰机制,提出不同含气系统压裂/排采方案,建立多煤层区煤层气单井高效开采模式,为多煤层条件下煤层气资源高效经济开发提供依据,以期对我国煤层气开发提供理论指导,推动我国煤层气产业的发展。

本书共分八章,可分为四部分:第一部分,主要分析了研究意义、国内外研究现状、存在问题、研究方法以及织纳煤田煤层气赋存的地质背景;第二部分,研究了多层统一含气系统和多层独立含气系统的煤层气地质条件和储层物性特征;第三部分,通过物理模拟和数值模拟,优化了煤层气单井水力压裂工艺参数,分析了两种含气系统单井排采层间干扰主控因素及合层排采可行性;第四部分,建立了多煤层区煤层气单井有序高效开发模式。

研究工作得到了中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室和贵州省煤田地质局的大力支持和帮助。硕士研究生梁冲冲、赵凯、王聪、姜伟和杨庆龙等参与了本书相关材料的整理,在此一并致以衷心谢意!笔者引用了大量国内外参考文献,借此机会对这些文献的作者表示感谢。

本书由国家科技重大专项项目(2016ZX05044)、国家自然科学基金面上项目(41272178、41572140)及江苏省“青蓝工程”项目资助。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者不吝批评指正!

吴财芳

2016年8月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究意义	1
第二节 研究现状	3
一、织纳煤田煤层气地质研究现状	3
二、多煤层含气系统	7
三、水力压裂技术	9
四、煤层气排采技术	22
五、煤层气储层数值模拟	29
第三节 存在问题	31
第四节 研究方案	32
一、研究思路与目标	32
二、研究内容	32
三、拟解决的关键问题	33
四、研究流程与技术方法	33
第二章 黔西织纳煤田煤层气地质背景	35
第一节 地理及交通位置	35
第二节 区域构造	36
一、主要褶皱	39
二、主干断裂	39
第三节 区域地层	41
一、石炭系	41
二、二叠系	41
三、三叠系	42
四、侏罗系	43
五、白垩系	43
六、古近系	44
七、第四系	44
第四节 含煤地层及煤层	44

一、龙潭组含煤性	44
二、长兴组含煤性	46
第五节 岩浆活动	48
第六节 水文地质特征	49
第三章 多层统一含气系统煤层气地质条件	51
第一节 文家坝井田地质概括	51
一、含煤地层	51
二、煤层分布特征	53
三、煤质与煤级特征	53
四、井田构造特征	55
五、水文地质条件	56
第二节 多层统一含气系统煤储层物性特征	56
一、煤岩力学性质	56
二、煤储层孔裂隙特征	59
三、煤储层渗透性特征	65
四、煤层气化学组分特征	68
五、煤储层含气量特征	70
六、储层压力特征	72
七、吸附性特征	76
第四章 多层独立含气系统煤层气地质条件	78
第一节 少普井田地质概括	78
一、含煤地层	78
二、煤层分布特征	78
三、煤质与煤级特征	81
四、井田构造特征	83
五、水文地质条件	84
第二节 各含气系统煤储层物性特征	85
一、煤岩力学性质	85
二、煤储层孔裂隙特征	88
三、煤储层渗透性特征	97
四、煤层气化学组分特征	99
五、煤储层含气量特征	101
六、煤储层压力特征	103
七、煤储层吸附/解吸特征	107

第五章 多煤层区单井水力压裂物理模拟及工艺优化	114
第一节 多煤层区水力压裂影响因素	114
一、煤储层物性特征的影响	114
二、压裂施工工艺参数的影响	118
第二节 水力压裂物理模拟实验	119
一、物理模拟理论基础	119
二、水力压裂物理模拟实验	122
三、压裂前后围岩及煤层中裂缝参数对比	139
四、水力压裂裂缝的主要影响因素	147
第三节 多煤层单井水力压裂工艺优化及模拟	152
一、压裂方法的选择	152
二、压裂层段的划分	153
三、射孔参数的优化	158
四、煤体及顶底板力学性质对研究区水力压裂的影响	161
五、地应力因素对研究区水力压裂的影响	167
六、水力压裂泵注参数对压裂效果的影响	170
七、参数优化后压裂模拟结果分析	174
第六章 多煤层区煤层气单井排采优化及模拟	183
第一节 单层排采与多层合采异同点	183
一、相同点	183
二、不同点	184
第二节 煤层气合层排采干扰机理	185
一、渗透率对合采的影响	186
二、储层压力梯度对合采的影响	190
三、临储压力比对合采的影响	195
四、地层供液能力对合采的影响	199
五、煤层埋深差对合采的影响	204
六、煤层厚度对合采的影响	208
七、兰氏压力、兰氏体积对合采的影响	209
八、裂隙孔隙度对合采的影响	210
第三节 多层独立含气系统排采模拟及合采可行性	210
一、煤层气井排采特征分析	210
二、煤层气井排采历史拟合	213
三、不同含气系统的产能特征	216
四、不同含气系统合采可行性分析	224

第四节 多层统一含气系统排采模拟及合采可行性	227
一、煤层气井排采特征分析	227
二、煤层气井排采历史拟合	228
三、多层统一含气系统产能特征	229
四、多层统一含气系统合采可行性分析	234
第七章 多煤层区煤层气单井有序高效开发模式	237
第一节 多煤层区单井高效压裂模式	237
一、多层叠置独立含气系统单井高效压裂模式	237
二、多层统一含气系统单井高效压裂模式	239
第二节 多煤层区单井递进有序排采模式	242
一、不同含气系统递进有序排采模式	242
二、多层统一含气系统递进有序排采模式	252
第八章 结论	261
参考文献	265
彩图	

第一章 绪 论

第一节 研究意义

目前,我国的煤层气开发活动主要集中在沁水盆地、鄂尔多斯盆地东南缘、阜新盆地等少数地区。作为主力地区的沁水盆地,经过近 20 多年的规划开发,其有利区块的煤层气井已经接近饱和。除此之外,其他地区的煤层气后备基地几乎没有开拓和形成,尤其是我国西南部的黔西、川南、滇东等煤层气资源富集区。我国现有煤层气井开采对象大多为单一煤层,受资源量限制,致使煤层气单井开采时间较短,一些直井生产 3~5 年左右,气产量就几乎衰竭。我国第一口水平井 DNP2 井平均日产气量接近 $2 \times 10^5 \text{m}^3$,也只排采 4 年就枯竭。然而我国较早的潘庄井组,多煤层排采,部分井已排采 10 余年,现产气量仍维持在 $1000 \text{m}^3/\text{d}$ 左右。虽然由于一些原因导致部分合采井产能低于单层排采井,但同时这种情况也充分说明,如果能够解决某些关键技术问题,多煤层区域煤层气开发将具有巨大的前景。

多煤层在我国许多地区含煤地层中普遍发育,特别是西南地区的上二叠统龙潭组(杨起和韩德馨,1980)。贵州省是我国南方的产煤大省,煤层气资源丰富,主要分布于黔西地区,全省煤层气资源量约为 $3.15 \times 10^{12} \text{m}^3$,约占全国同标准资源量的 22%左右(叶建平等,1999;易同生,1997),位列全国第二,仅次于山西,但利用率仅为 16%(黄培,2011)。贵州省煤层气的赋存特征和地质条件复杂,具有“一弱”(含煤地层富水性弱)“两多”(构造类型多、煤层多)“三高”(含气量高、资源丰度高、储层压力及地应力高)和“四大”(资源量大、煤级变化大、渗透率变化大、地质条件垂向变化大)的特点(高弟等,2009)。以织纳煤田为代表,前人基于对水公河向斜不同煤层含气性、含气梯度和视压力系数的研究,初步提出和论证了“多层叠置独立含煤层气系统”的学术观点(秦勇等,2008;熊孟辉,2006)。之后许多学者对该观点进行了进一步论证,以煤层群垂向层位含气量波动性强弱和含气量梯度大小作为划分煤层群含气系统类型的指标,将织纳煤田比德—三塘盆地划分为 3 类煤层气系统(杨兆彪等,2011a),认为含煤地层的沉积条件奠定了“多层叠置独立含煤层气系统”的物质及物性基础,层序地层格架特点限定了含气单元间含气性的连通性(沈玉林等,2012),最终指出多层叠置独立含气系统是沉积-水文-构造条件耦合控气作用的产物。前人对多煤

层区含煤层气系统理论方面做了大量的研究,但是针对多煤层叠置独立含气系统煤层气开发的研究寥寥无几,在不同含气系统对煤层气开发的控制和影响方面更缺乏足够的认识。

煤储层物性不同于一般油气储层,除了渗透率远低于一般油藏储层外,煤层还具有以下特点:杨氏模量比一般的砂岩或石灰岩储层低,而压缩系数高;气水共存;气藏压力低;储层易损害;裂缝发育。因此在煤层气开发过程中,必须通过储层改造措施,提高煤层气井产量(Gayer and Harris, 1996; Weishauptova and Medek, 1998; 倪小明等, 2008)。国内外 30 余年煤层气勘探开发历程,形成了多种煤层气储层改造工艺技术,这些新兴技术在我国均有应用或尝试,但除了水力压裂技术外,其他许多技术应用效果不甚理想,或尚未得到广泛应用(秦勇和程爱国, 2007)。水力压裂具有经济、有效、技术较为完善的特点,因此得以在国内外煤层气开发过程中广泛使用。美国 14000 余口煤层气井中,有 90%以上的煤层是通过水力压裂改造获得商业化产量的。在中国 20 余年来的煤层气勘探开发实践中,几乎所有产气量 $1000\text{m}^3/\text{d}$ 以上的煤层气井均是由压裂改造而达到增产目的的(李安启等, 2004)。然而,目前水力压裂的相关研究只是针对单层煤而言,对于多煤层合层压裂工艺参数的研究鲜有报道。因此,解决多煤层地区煤层气井合层压裂以及工艺参数的优化问题,对指导多煤层区煤层气开发尤为重要。

综上所述,如何建立适合多煤层条件的煤层气井压裂/排采模式,成为实现多煤层区域煤层气有效开发亟待解决的问题。为此,本书选择黔西织纳煤田珠藏向斜的少普井田及阿弓向斜的文家坝井田为研究对象,以煤层气活性水压裂工艺及合层排采技术为核心,在系统研究各含气系统的煤层气地质特征及其主控因素的基础上,依据水力压裂致裂机理以及煤层气排采机理,采用物理模拟及数值模拟的方法,优选煤层压裂方式及工艺参数。同时,查明各含气系统产气潜力及产能贡献,揭示系统间以及层间的干扰机制,提出不同含气系统压裂/排采方案,建立多煤层区煤层气单井高效开采模式,为多煤层条件下煤层气资源高效经济开发提供依据。

本书在理论和实践上具有如下两个方面的意义。

第一,我国多煤层地区具有可观的煤层气开发潜力,煤层气开发前景巨大。因此,煤层气开采从以单层排采模式为主走向多层合采模式势在必行。本书通过研究,建立多煤层区煤层气单井高效开采模式,不仅能够为此趋势提供理论依据,而且可以为我国的煤层气开发基地向多煤层区域的拓展提供基础。

第二,多煤层区在层域上存在多个含气系统,每个含气系统中可能存在多个煤储层。在煤层气产出过程中,必然与单一煤层煤层气开发具有明显区别。例如,各系统煤储层特征、系统间的干扰机制、系统间压裂/排采次序厘定以及方案优选等。本书通过优化多煤层区煤层气井压裂方式及参数,依据各含气系统的产能贡

献,提出压裂/排采最优方案。不仅可以为多煤层区煤层气开发工程设计提供依据,而且能够为探索一套高效的多煤层区煤层气开采理论与技术奠定基础。

第二节 研究现状

一、织纳煤田煤层气地质研究现状

织纳煤田位于贵州省中西部,主要包括比德向斜、三塘向斜、阿弓向斜、珠藏向斜、关寨向斜等多个向斜单元,含煤面积约为 1016.3km^2 ,区内煤田地质工作程度高,除煤炭预测及预查区外,煤炭勘查面积达 695.64km^2 ,煤炭总资源量为 $90.33 \times 10^8\text{t}$ 。据贵州省煤田地质局 1996 年提交的“贵州省煤层气资源评价报告”,织纳煤田煤层气资源量为 $7611 \times 10^8\text{m}^3$ (黄文等, 2013)。

比德—三塘盆地作为织纳煤田的主要组成部分,盆地面积 1692km^2 ,预测含煤面积约 1000km^2 。盆地是一个复式向斜的残留高地,由比德向斜、水公河向斜、加戛背斜、三塘向斜、白泥菁向斜、阿弓向斜、珠藏向斜等构成,西缘是新寨背斜,北缘边界和毕节北东向构造带相邻,东南边界为黔南断陷。区内地势东南低、西北高。前人对该地区的煤层气地质条件进行了较多研究,涉及构造、沉积和水文等条件对煤层气成藏和富集的控制作用,以及该地区的含煤性和煤储层物性等,并划分出了不同的含气系统。

(一) 构造地质

以板块构造学说为基础,结合地质力学分析,一大批学者投入到贵州及邻区的构造研究之中,取得了一些重大成果。一致认为,本区经历了加里东运动的上穹隆起,海西运动的裂谷裂陷,形成海西期—印支期沉积盆地,特别是燕山运动的强烈改造奠定了现今的构造格局(汤良杰等, 2008; 王钟堂, 1990; 徐政宇等, 2010)。

但是关于燕山期构造变形特征及其演化存在较大的争议,对燕山期构造应力场、变形期次的认知分歧较大。陈学敏(1994, 2008, 2009)运用地质力学观点研究了黔西地区构造特征,认为燕山期欧亚板块、太平洋板块以及印度洋板块相对运动产生了正、反扭动构造复杂叠加,是黔西煤田后期改造的主要控制因素,正、反两次扭动构造与经向构造、纬向构造相互复合,联合奠定了现今复杂的构造形态;乐光禹等(1991, 1994)对六盘水及邻区多组不同方向的构造带的研究认为,贵州中西部的基底交叉断裂控制盖层中方向各异的褶皱断裂带,组合为弧形、菱形和三角形等各种构造型式,该构造格局是由一种统一的区域构造应力场

在复杂边界条件控制下形成的；而刘丽萍等（2010）对雪峰山西侧贵州地区燕山期构造变形研究后认为，研究区中生代先后经历 NW-SE 和 EW 两个方向应力场，发生了三幕褶皱变形、两幕逆冲和三幕走滑，形成顺序依次为近 EW 向褶皱和 EW 向走滑断层活动、NE 向褶皱和 EW 向走滑断层右行走滑、NS 向褶皱和逆冲断层；窦新钊（2012）在分析和总结前人研究的基础上，深入研究了黔西地区构造变形特征及不同区域构造发育的差异性，进而讨论了构造演化的动力学机制，得出燕山中晚期先后经历了 NE-SW 向挤压、近 NS 向挤压、NW-SE 向挤压、区域性伸展，形成了 NW 向褶皱和逆冲断层、近 EW 向褶皱和逆冲断层、NE 向褶皱和逆冲断层、部分逆断层反转为正断层和发生左行走滑运动的构造变形序列。

结合区域构造特征，不同学者运用构造控制理论对织纳煤田和盆地内不同井田的构造发育特征进行了系统的分析。根据含煤地层隆起幅度、煤层埋深相对大小，将煤田构造划分为 3 个大区和 8 个小区（唐显贵，2013）；五轮山井田（朱炎铭等，2008）、肥田二号井田（孙启来，2008）和大冲头井田（周国正，2009）内褶曲和断裂构造受燕山运动及后期运动的影响，具有多期次的历史，构造形迹属顺序生成和依次诱导派生，具有成生联系，初次应力作用形成主褶曲、二次应力作用形成走向主断裂和次级褶曲、三次应力作用形成倾向断裂，属华夏系构造体系。

（二）煤层气地质

贵州煤层气地质条件具有“一弱、两多、三高、四大”的特点，这严重制约了贵州省煤层气的勘探开发进程。对此，李兴平（2005）、陈富庆和郁钟铭（2005）从勘探程度、资金投入、地质条件、技术和经验等方面分析了该地区煤层气勘探开发失利的原因，并提出若干建议，认为贵州煤层气资源丰富，勘探开发前景依然广阔。

近几年，不同学者对黔西煤层气地质做了大量研究，取得了丰硕的成果。研究认为，构造和沉积格局影响和控制着晚二叠世含煤地层的发育（窦新钊等，2012；熊孟辉，2006），织纳煤田煤层裂隙系统指数、煤层压力系统指数和煤层裂隙开合系数 3 个系数分布显示煤层气富集和开采的有利区位于西南部比德向斜南段—白果寨以及西北端水公河向斜为中心的地带（Wu et al., 2014；姜玮和吴财芳，2011）；五轮山矿区的煤层气地质条件有利于煤层气赋存，该区是我国潜在的高煤级煤层气开发基地（熊孟辉和秦勇，2007；熊孟辉等，2007）；在煤层群发育区，煤层间距小、砂泥比低、整体煤岩封闭性好导致煤层之间叠加封闭，是煤层气保存的有利条件，依据含气量的波动性程度和含气量的梯度大小，可将研究区划分为 3 类煤层气系统（杨兆彪等，2011a，2011b）；蔡佳丽等（2011）、周龙刚和吴财芳（2012）、

常会珍等(2012)通过压汞测试、低温氮吸附测试、扫描电镜等技术手段,分别对黔西、比德—三塘盆地、珠藏向斜的孔隙特征和渗流能力进行了系统研究;黄文等(2013)依据煤田地地质钻孔、煤层气参数井获取的详实资料对煤层气资源进行了估算和预测。

研究区晚二叠世含煤地层经历了多期构造运动改造,具有复杂的构造-埋藏史、受热史和煤有机质成熟史,不同学者依据软件模拟取得了大量的成果。黔西格目底向斜上二叠统含煤地层的构造-埋深史及热演化史模拟(陶树等,2010)显示出煤层埋深在侏罗纪末,在深成变质作用下达达到现今的焦煤—瘦煤阶段,并未考虑燕山中期普遍存在的构造-热事件对煤层变质的影响;针对水公河向斜上二叠统煤层,鲍园等(2012)根据实测煤的镜质组最大反射率、古地温梯度、沉积环境和地层残余厚度等资料,运用 Petromod 1D 模拟软件对 8 煤层“三史”演化过程进行研究,将地质演化史划分为 3 个阶段;窦新钊(2012)采用 BasinMod-1D 盆地模拟软件对向斜东翼煤储层埋藏史和成熟度演化史进行恢复,研究表明上二叠统煤共经历了两期沉降埋藏、两期抬升剥蚀和三期生烃作用;曹佳等(2012)在前人研究成果的基础上进行二次开发,研制了适合多层叠置条件下的煤层气藏史数值模拟软件,对向斜西翼的 1-4 钻孔进行了模拟研究,根据 16 煤累积生气量和含气量演化曲线将演化分为 3 个阶段,并指出在 9、14 煤层和 20、32 煤层之间存在两个散失通道。

此外,在煤田地地质勘探过程中经常出现异常高压显示。水公河向斜五轮山井田 1610 孔泥浆水与瓦斯气体从孔口逸出;阿弓向斜 2051 孔 8 天喷出煤层气 $5.6 \times 10^4 \text{ m}^3$;比德—三塘向斜 2003 孔从 1981 年 6 月至 1982 年 2 月连续喷气,最高日喷煤层气 1210 m^3 ;3202 孔从 1980 年 5 月喷至 1981 年 1 月,最高日喷煤层气量达 16100 m^3 ;织金文家坝 1003 孔、1036 孔和 1059 孔,最大喷出煤层气量达 $1290 \text{ m}^3/\text{d}$ 。钻孔试验单位涌水量虽小,但在瓦斯压力作用下却发生了孔内涌气现象。近年来,矿井煤与瓦斯突出等级鉴定的结果显示,龙潭组煤层存在高压现象。在相邻勘探区内,煤炭资源勘探钻孔发生喷井的现象也屡见不鲜。据现有勘探资料统计,发生水、气井喷的钻孔在格目底向斜有 21 口,在盘关向斜有 18 口,在土城向斜有 4 口(秦勇等,2012),这些现象反映研究区内的确存在异常高压。

(三) 含煤地层

盆地内出露地层为震旦系、寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、下中侏罗统、上白垩统、古近系及第四系。其中分布范围最广地层为二叠纪地层,占总面积的 90%。除了沉积岩外,还有二叠纪基性火山岩及少量辉绿岩侵入体。

盆地内主要含煤地层为上二叠统龙潭组和长兴组。龙潭组为盆地内最主要含煤地层,地层厚度变化范围 196~320m,由南向北逐渐变薄。主要由灰黄色细砂

岩、粉砂岩、粉砂质泥岩以及泥岩组成,含煤层数 9~44 层,由西北向东南延伸,灰岩层数与厚度逐渐增大,但煤层数减少,含煤性逐渐变差。

长兴组与下龙潭组为连续沉积地层,厚度变化范围 64~165m,主要由粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩以及泥质灰岩组成。含煤层数 2~14 层,由西北向东南方向延伸,灰岩厚度逐渐增大,但含煤层数减少,含煤性逐渐变差。

总体而言,本区含煤地层厚度 300~450m,发育煤层约 25~57 层,煤层总厚度为 20~40m。其中:可采煤层为 3~17 层,可采煤层总厚约 9.4~23.35m,主要可采煤层埋深不超过 2000m,一般小于 1300m。

(四) 煤岩储层物性

研究区煤岩类型以半亮型为主,显微煤岩组分中镜质组含量变化范围为 65.24%~78.43%。比德—三塘盆地煤级较单一,主要以无烟煤为主,其中在盆地西缘的比德向斜西翼 NW 向呈条带状分布有贫煤和瘦煤。煤灰分产率变化范围为 16.02%~32.57%,以中灰煤为主。比德向斜煤岩中灰分产率较高,硫分变化范围为 1.58%~5.23%,自西向东逐渐增高,挥发分产率变化范围为 7.35%~10.17%。比德向斜煤岩中挥发分产率较高,但总体属于超低挥发分或低挥发煤。

对研究区中部水公河向斜五轮山井田的研究结果表明,煤层以原生结构煤占优势,偶见碎裂煤~碎粒煤,煤层渗透性应远远高于黔西其他地区,与晋城地区有可比之处,可能适合煤层气地面抽采。煤层中构造裂隙较发育,主煤层中发育主次两组裂隙,相互之间交角在 80°左右(熊孟辉等, 2007; 秦勇等, 2008)。

据秦勇等(2008)对研究区中部水公河向斜五轮山井田煤层的研究结果,主煤层的平均孔隙率变化不大,分布于 4.79%~5.84%。煤样压汞总比表面积、中值孔径、平均孔径存在较为明显的差别。从孔径结构来看,以过渡孔为主,微孔占有较大比例,大孔和中孔的比例较低。与晋城相比,五轮山煤样的总孔容略低,但总比表面积明显较高,煤的储气能力相对略低,但吸附能力相对较强,这可能导致五轮山煤储层含气量较高,但解吸能力相对较弱。

(五) 地温特征

地层温度是影响煤储层压力系统的重要因素之一。整个盆地地层温度变化随埋深的增大而升高,变化曲线离散小,与埋深相关性较强,但是盆地内地温梯度变化范围较大。

加戛背斜五轮山勘查区的地温梯度变化范围为 1.36~5.10℃/100m,平均地温梯度为 3.34℃/100m,且部分地区的地温钻孔出现非常高的地温,如勘探区中 14-3

孔地温梯度就高达 $5.10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，在埋深 400m 处，地层温度就达到了 38°C 。王家营勘查区平均地温梯度为 $1.97^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，中岭—坪山勘查区地温梯度为 $2.84^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，肥田勘查区地温梯度约为 $2.78^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。总体表明，盆地中各勘探区地温梯度均属于正常地温场（杨兆彪，2011）。

（六）多煤层发育特征

前人对多煤层尚无确切定义，这里参考有关煤层群的概念。我国许多地区煤系地层中普遍发育煤层群，如华北晚古生代盆地南带的石炭—二叠纪含煤地层、西南地区的上二叠统龙潭组等（杨起和韩德馨，1980）。煤层群是在相对稳定的构造格局和古地理环境下，有利成煤环境在同一沉积部位反复出现的结果（Bohacs and Suter, 1997; Diessel et al., 2000; Hartley, 1993; 王定武和王运泉, 1995）。煤层群的概念在煤炭安全开采相关学科多有提及（Beaton et al., 2006; Xie et al., 2011; 郝雁斌, 2012; 吕志强等, 2009; 汪东生, 2011），但对煤层群的确切定义尚不统一（尹中山, 2009）。尹中山（2009）在研究川南煤田古叙矿区煤层气地质条件时提出煤层群（组）的概念，即含煤地层在纵向上煤层层数多，相对集中，特征明显，易于对比，且物性差异不大，层间距在 10m 以内，同时，这些煤层在横向上有一定的分布范围。杨兆彪等（2011c）认为，煤层群是以可采煤层层数多为特征，且煤层纵向间距一般较小（ $<50\text{m}$ ），横向分布广泛，形成于同一聚煤地质时期。通过前人研究成果，可以将我国多煤层区总体划分为三种沉积背景。

第一种类型，海陆过渡相的三角洲-潮坪-潟湖环境。这种环境曾在我国广泛发育，煤层厚度大且稳定，同时也能发育煤层群，如晚古生代的华北盆地南带、华南黔西地区等（Wang et al., 2011; 李思田等, 1993）。

第二种类型，河流-滨湖三角洲-湖泊沉积环境（Hamilton and Tadros, 1994; Pashin, 1998），如中生代的鄂尔多斯盆地、准格尔盆地、吐哈盆地、阜新盆地、舒兰盆地以及新生代的滇东盆地群。准格尔盆地乌鲁木齐—阜康一带，西山窑组可采煤 2~35 层，可采总厚 151.94m，单层最大厚度可达 50m。

第三种类型，海陆过渡相和陆相交替发育的沉积环境。典型代表是三江—穆棱盆地群，煤层层数多，厚度薄，稳定性较好。

二、多煤层含气系统

（一）多层统一含煤层气系统

在同一构造单元同一含煤地层中，如果多个煤层处于一个统一的流体压力系

统,则压力梯度基本一致,流体压力随层位降低而增高,煤层含气量呈现递增趋势。符合这一基本规律的多煤层含煤层气系统,称之为“多层统一含煤层气系统”(杨兆彪等,2011b)。

国内外不乏多层统一含煤层气系统的实例。例如,Piceance 盆地为美国煤层气开发成功的煤层气盆地,发育多个煤层,煤层群组间由于发育了海相砂岩,渗透性好,相互之间存在流体动力联系,整个下白垩统含煤地层处于一个统一的流体压力系统(Diessel, 2006; 林晓英, 2005)。再如,阜新盆地刘家勘探区下白垩统阜新组分为三个煤层群(安震, 2003),煤储层压力和实测含气量随煤层层位的降低而增高。该区阜新组主要含水层为砂砾岩层和煤层,辉绿岩岩墙十分发育,各含水层之间缺乏区域性隔水层,辉绿岩岩墙切穿含煤地层并与地表贯通,沟通了所有含水层,使得所有煤层处于同一流体动力单元,构成了多层统一含煤层气系统。在多层统一含煤层气系统中,不仅储层压力、含气量与埋深之间呈单调递增关系(在临界深度之内),而且煤层渗透率也有减小趋势(傅雪海等, 2007)。当然不排除由于沉积/成煤环境变化造成含煤地层中不同煤层之间物理/化学性质差异对煤储层特性的影响,即沉积环境通过对煤物质组成的控制,在一定程度上也影响着煤储层的吸附性、含气性和其他物理特性(Pashin, 2010)。

(二) 多层叠置独立含煤层气系统

国内外关于多层叠置独立含煤层气系统的研究甚少,国外迄今为止尚无报道,而国内则主要集中在贵州省织纳煤田。前人依据比德—三塘盆地水公河向斜单一煤层含气性和储层压力在层位上的分布规律,认为龙潭组煤层群可能在垂向上存在三套独立含气系统,首次提出了“多层叠置独立含煤层气系统”的学术观点。同时认为三套相对独立的含煤层气系统即 1~9 煤层、10~22 煤层、23~35 煤层,分别被限定在对应的二级层序地层格架内,是沉积-水文-构造条件耦合控气作用的产物(秦勇等, 2008)。随后以层序地层学为主线,耦合分析比德—三塘盆地层序地层结构与煤层含气性和物性之间的关系,区分出多层叠置独立和多层统一两类含煤层气系统,认为水公河向斜及三塘向斜发育 4 套以上的多层叠置独立含煤层气系统,珠藏向斜发育 4 套独立叠置含煤层气系统,阿弓向斜和比德向斜发育多层统一含煤层气系统,垂向上独立含煤层气系统与三级层序相对应(杨兆彪, 2011)。另外有学者研究发现,老厂矿区龙潭组第三段由 4 个含煤层气系统组成,各系统间相互独立,其岩性分段具备完整的生储盖层,含煤地层与上覆、下伏含水层之间缺乏水力联系,形成了多层叠置独立含煤层气系统(李伍等, 2010)。含煤地层的沉积条件奠定了“多层叠置独立含煤层气系统”的储层物性基础,层序地层格架特点限定了含煤层气单元间含气性的连通性。含煤岩系中低渗透岩层的