

我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式

刘大锰, 李俊乾

(中国地质大学(北京) 能源学院 北京 100083)

摘要: 我国煤层气分布和富集受多种地质因素控制,就煤层含气性主控地质因素的地质构造条件、煤层埋藏深度、水文地质条件、沉积环境、煤层物性和岩浆活动等 6 个方面进行了系统研究。结果显示构造沉降作用、水力封堵和水力封闭控气作用、逆断层以及向斜核部有利于煤层气赋存;构造抬升作用、水力运移逸散作用、正断层、背斜核部以及陷落柱不利于煤层气赋存;随煤层埋深增加,煤层气吸附量逐渐增加,临界埋深之后吸附量开始降低;煤层顶、底板厚度越大,岩性越致密,越有利于煤层气保存;煤层气含量与煤厚呈正相关性。根据各地质因素的影响程度,煤层气分布赋存可概括为“多因素综合控制”和“多因素影响、某一两个因素主控”2 种类型。

关键词: 煤层气; 分布赋存; 地质因素; 富集模式; 有利开发区

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2014)06-0019-06

Main Geological Controls on Distribution and Occurrence and Enrichment Patterns of Coalbed Methane in China

LIU Da-meng, LI Jun-qian

(School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The distribution and enrichment of coalbed methane (CBM) are controlled by multiple geological factors in China, which including geological tectonic, coal burial depth, hydrogeological condition, sedimentary environment, coal physical properties and magmatic intrusion. The results show that tectonic subsidence, hydraulic sealing and hydraulic jam-up processes, reverse fault and syncline axis are beneficial for CBM preservation; tectonic uplift, hydraulic migration-escape process, normal fault, anticline axis and collapse column are unfavorable factors for preserving CBM. With increasing coal burial depth, content increases but subsequently decreases starting at critical burial depth. The CBM can be more easily preserved within coals, which developing thicker and tighter roof and floor. The CBM content is positively related to coal thickness. According to the effect degree of the geological factors, the law of CBM distribution and enrichment can be summarized as comprehensively controlled by multiple factors and influenced by multiple factors, primarily controlled by one or two factors.

Key words: coalbed methane; distribution and occurrence; geological factors; enrichment patterns; favorable development area

0 引言

我国煤层气资源丰富,埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源量 36.81 万亿 m^3 ,居世界第三位。煤层气的开发利用对于煤矿安全生产、洁净能源利用和环境保护具有重要意义。我国煤层气开发利用“十二五”规划提出,“十二五”期间实现新增煤层气探明地质储量 1 万亿 m^3 ,至 2015 年煤层气地面产量达

到 160 亿 m^3 。然而,截至 2012 年底,我国探明煤层气地质储量 5 518.58 亿 m^3 ,2013 年我国煤层气产量仅 138.13 亿 m^3 ,地面产量仅为 29.26 亿 m^3 。这 2 项指标均距“十二五”规划目标尚远。目前煤层气产量主要来源于沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东南缘和阜新煤田等少数几个煤层气商业性开发基地。因此,迫切需要寻找新的煤层气富集及有利开发区域,以推动煤层气产业化进程。煤层气藏的形成除

收稿日期: 2014-03-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.06.004

基金项目: 国家自然科学基金与中国石油化工联合基金资助项目(U1262104); 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-001)

作者简介: 刘大锰(1965—),男,湖南桃源人,教授,博士生导师,博士。Tel: 010-82320892, E-mail: dmliu@cugb.edu.cn

引用格式: 刘大锰,李俊乾.我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J].煤炭科学技术,2014,42(6):19-24.

LIU Da-meng, LI Jun-qian. Main Geological Controls on Distribution and Occurrence and Enrichment Patterns of Coalbed Methane in China [J].

Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 19-24.

了与气源和储集等自身条件有关外,更重要的是与后期保存条件密切相关;生储能力决定了煤层气富集状况,而保存条件则很大程度上造成了煤层气赋存的差异^[1]。我国煤层气分布赋存具有多样性特征,主要体现在含煤盆地多,含煤层系多,赋存煤种多,煤层气藏类型多等^[2];而且由于成煤期地质构造复杂,成煤环境复杂,储层非均质性强,煤层气成藏条件复杂等因素^[3],使得煤层气分布赋存规律更加难以把握。笔者在总结前人研究成果的基础上,探索了我国煤层气分布赋存特征、主控地质因素,以及煤层气富集模式和富集区特点,为寻找类似地质条件下的有利富集区提供参考。

1 煤层气分布赋存主控地质因素

煤层气主要以吸附态、游离态、水溶态和固溶态4种类型赋存于煤层内,其中吸附态煤层气为主,占90%以上。煤层气的分布和赋存受多种地质因素影响。通过对我国河南、山西、陕西、贵州、安徽、辽宁、黑龙江、重庆等省(市)的重点含煤盆地或区域的煤层气分布赋存特征进行总结^[4-26],将煤层含气性主控地质因素概括为地质构造条件(包括构造演化及构造类型)、煤层埋藏深度、水文地质条件、沉积环境、煤储层物性(包括煤变质程度、煤体结构及煤厚)和岩浆活动等6个方面。

1.1 地质构造条件

1) 构造演化。构造演化史控制含煤层系沉积埋深史和热演化史,从而控制了煤层气生成、赋存及成藏过程^[20],在盆地层次上控制着煤层气聚集区带的形成和分布。在成煤期后,构造沉降作用通过不断增加煤层上覆地层厚度,使煤变质程度和煤储层压力增加,促进煤生烃作用和煤层气吸附保存;生烃期后的构造抬升作用则使煤层上覆地层遭受剥蚀,煤储层卸压,并促使裂隙发育,导致煤层气解吸、逸散和逃脱。煤层上覆有效地层厚度,即煤层到气体生成后第一个不整合面的距离,真实地反映了煤层气大量生成后构造运动及其造成的地层抬升、剥蚀等作用对煤层气保存条件的影响,在含煤盆地或地区的地层剖面对煤层含气性起控制作用。

我国含煤盆地多经历多期次构造作用,构造抬升使煤层气藏的保存受到不同程度的破坏。通常构造抬升时间越晚且短,煤层气散失的时间就越短,对煤层气的保存越有利^[1]。在长期遭受剥蚀的隆起区,煤层气不断散失,含气量降低;后期发生沉降的

地区有利于煤层气的保存,但易造成饱和度降低。除此之外,含煤盆地的构造演化史,同时控制了含煤盆地的构造应力场变化史,从而影响含煤层系的构造展布、构造类型以及煤储层、围岩节理裂隙发育程度等,对煤层气分布赋存造成影响。

2) 构造类型。构造类型是在不同构造应力作用下产生的不同构造变形。在不同类型的地质构造形成过程中,由于构造应力场及其内部应力分布的不同,均会导致煤储层及其封盖层的产状、结构、物性和地下水径流条件等出现差异,进而影响到煤层含气性特征。总体而言,对煤层气分布赋存具有重要影响的构造类型主要包括断裂构造、褶皱及陷落柱等^[4,7,13-14,20-22]。

断裂构造对煤层气赋存的影响主要体现在断层封闭性上,取决于断层性质、断层带胶结情况、断层两侧岩性对接关系以及泥岩涂抹效应等^[4]。前人研究结果表明^[4,7,18,22]:①一般情况下,正断层多为开放型,封闭性较差而有利于气体的逸散;逆断层为压性或压扭性,封闭性较好,有利于气体的保存。在构造演化过程中,有时断层性质发生变化,对煤层气的封闭性也随之改变。②某些断层会破坏隔水层原有的连续性,缩短含水层之间、含水层与煤层的距离,使其彼此之间发生水力联系,对煤层气的保存不利。但对于落差小的断层,没有切割含水层,断层活动过程中在断层周围形成糜棱煤带,易形成煤层气富集区。③滑动构造对煤层气的赋存也会造成一定程度的影响。

褶皱构造对煤层气赋存的影响和地下水势以及储层压力有关,通常表现出向斜富气规律^[23]。在向斜核部及其附近部位,地层水位低和静水压力大导致储层压力较高,有利于煤层气吸附;而且向斜一般具有地层水向心流机制,起到水力封堵的作用,有利于煤层气保存。靠近背斜轴部,拉张应力作用下,煤层及顶板围压节理裂隙封闭性差,煤层气则易于运移逸散,煤层含气量总体较低。

陷落柱的发育严重影响了煤层产状的完整性,对煤层的含气性也具有不同程度的影响。由于陷落柱的发生,首先煤层气的封闭条件遭到破坏,煤层气可随地下的循环而扩散到其他空间;其次使地层压力降低,造成陷落柱内及其周围的煤层气体解吸,使煤层气含量大幅降低^[13]。根据陷落柱类型,通天柱对煤层气含量影响最大,其次为半截柱,下伏柱对煤层气逸散没有直接影响^[14]。

1.2 煤层埋藏深度

一般情况下,煤层埋深对煤层含气量的作用主要表现为如下。①随着煤层埋深增加,煤储层温度、压力逐渐增大:初期储层压力正效应强于温度负效应,使游离气向吸附气转化,有利于煤层气的吸附保存,煤层含气量逐渐增加;当埋深增大到一定深度(临界深度)时,压力正效应减弱,温度负效应增强,吸附量呈现降低的趋势^[27-28]。②煤层埋藏深度增加,煤层上覆地层厚度封盖性增强,且由于压实作用使煤层孔渗性下降、封闭性变好,对煤层气的封存比较有利^[18]。煤层埋深和煤层气含量的函数关系也不是一成不变的,有时受到构造部位的影响^[24]。

1.3 水文地质条件

煤层通常也是含水层,地下水动力场控制着煤层流体压力、气水成分及分布等^[29-33]。煤层水动力场对煤层气分布赋存的影响,主要体现于“补给-径流-排泄”水动力体系对煤层含气性的作用上,包括2个方面:煤层气藏的水力破坏和水力保护。水力破坏主要发生在水力运移逸散的过程中,这个过程导致了煤层气的逸散;水力保护主要出现于水力封闭和水力封堵过程,对煤层气的聚集比较有利^[30]。水力运移逸散作用常出现于导水性强的断层构造发育区;水力封闭控气作用出现于构造简单、断层不甚发育的宽缓向斜或单斜,水力封堵控气则常见于不对称向斜或单斜中^[33]。叶建平^[34]将煤储层与顶底板含水层,及其与煤层有水力联系的其他给水层有机联系起来,提出了封闭型、半封闭型和开放型等3种煤层气田气水两相流系统类型,其中封闭型有利于煤层气富集,开放型对煤层气富集不利。

对于一个含煤盆地,从盆缘到盆地中心依次出现水力封堵控气作用、水溶携带控气作用、径流逸散控气作用和水力封闭控气作用,煤层气含量从盆地边缘至斜坡带再至盆地中心会逐渐的增加^[35],如鄂尔多斯盆地东南缘渭北煤田^[27](图1)。根据煤层气成藏机制,地下水滞留区是中、高阶煤煤层气富集最有利场所;而缓流区多为低阶煤煤层气主要富集区^[33]。另外,在特定条件下,水动力系统和次生生物气的生成有关,可形成煤层气的一个补充来源,对低阶煤煤层气富集成藏意义重大^[36]。

1.4 沉积环境

顶、底板性质对煤层气分布赋存的影响决定于顶、底板透气和隔气性能,其与顶底板岩性、厚度及节理裂隙发育程度等密切相关。煤层顶底板越厚、

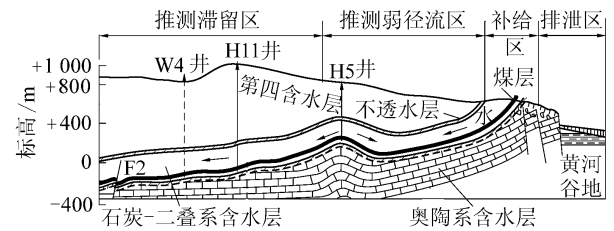


图1 渭北煤田水文地质条件及煤层含气性特征

岩性越致密,煤层含气量就会越高。砂岩类顶、底板结构相对松散,空隙大,透气性较好,对煤层气封闭程度低,煤层气容易散失;泥岩类顶、底板结构相对致密,空隙小,透气性较差,对煤层气封闭程度高,煤层气不易逸散,煤层气含量相对较高^[18]。沁水盆地南部郑庄区块勘探数据显示:煤层含气量整体上受泥岩顶板厚度的控制,同时受区域构造条件和埋藏深度的影响(图2),当泥岩顶板厚度小于9 m时,煤层含气量随顶板厚度增加而明显增加;厚度大于9 m时,对含气量影响较小^[26]。另外,泥岩中部分矿物也可以吸附甲烷,使泥岩甲烷浓度高于或等同于煤层甲烷浓度,较小的浓度差也将有效阻止煤层气逸散^[11]。

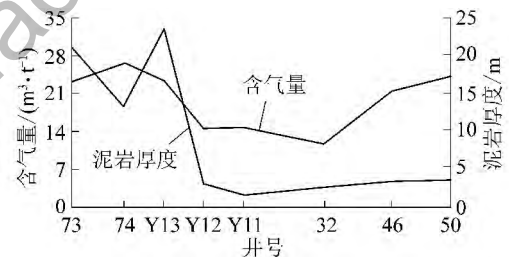


图2 郑庄区块3号煤层顶板泥岩厚度与含气量分布

除了封盖作用,煤层顶、底板组成的良好隔水层,能有效阻隔煤层与上下含水层之间的水力联系,使煤层形成独立的煤层气藏;反之,则沟通煤层与上下含水层地下水系统,不利于煤层气保存。相对于泥岩,灰岩作为岩溶裂隙含水层,则为不利的岩性类型。例如大宁-吉县地区8号煤较5号煤埋藏深且变质程度高,但含气性比5号煤差。这主要由于5号煤多为泥岩顶板,封盖性强于8号煤的灰岩顶板;且8号煤受奥灰水的影响,不利于煤层气赋存^[5]。

1.5 煤储层物性

影响煤层气分布赋存的煤物性因素主要包括煤变质程度、煤体结构和煤层厚度等。①煤变质程度不仅影响煤的生气量,而且还影响煤的孔隙特征和吸附性能,从而影响煤层气的分布和赋存。方爱民等^[37]认为煤变质作用对煤层气赋存的影响体现其

对煤储层孔-裂隙系统形成发育的情况。因此,含煤盆地的煤阶分布规律对煤层含气量的分布会有一定程度的影响,例如重庆市煤层气资源分布主要受中、高煤阶煤分布范围的控制^[19]。②煤岩力学性质较弱,易受构造应力改造而产生运动和煤体结构变化,引起煤层中煤层气体的运移和分布非均质性。在构造应力作用下,不同变形机制的构造煤发生动力变质作用,有烃类产物生成,形成超量煤层气^[38]。煤层气勘探和井下瓦斯突出等表明,通常在糜棱煤带中易形成煤层气富集区^[4]。③煤层气含量与煤层厚度呈正相关关系^[17],厚煤带一般也是煤层气富集带。例如大宁-吉县地区中-中西部为一单斜构造(埋深700~1000 m),发育NE向展布的厚煤带,形成与之展布方向一致的高含气带,含气量普遍大于 $15\text{ m}^3/\text{t}$;区内西北部埋深1000~1500 m,由于煤层较薄,含气量小于 $10\text{ m}^3/\text{t}$ ^[5]。

1.6 岩浆活动

岩浆活动等构造热导致煤储层物性改造、煤变质程度提高及发生二次生烃作用,对煤层含气性造成影响^[39-40]。煤层改造和变质程度强弱与侵入体产状、规模以及距侵入体远近有关,距热源由远及近呈环带状逐渐出现天然焦、高变质碎裂煤、高变质煤及节理煤。岩浆侵入的热作用既有有利一面,也存在破坏煤储层储集能力不利的一面。因此,岩浆侵入带来的煤层气赋存条件改善区域,应给与重点考虑。例如我国阜新煤田刘家区由于辉绿岩体的侵入,煤层受岩体烘烤发生了叠加变质作用,对煤层气含气量及其赋存状态均产生了影响^[6];安阳矿区双全井田二、煤层,遭受燕山晚期岩浆侵入,使远离岩浆岩区段煤变质程度由无烟煤到瘦煤呈环带状分布,影响了煤层气的分布规律^[4];三交-柳林单斜地区,中部8号煤层含气量较高,是因该部位靠近岩浆岩体,煤变质程度加深,使生气量增加的结果^[5]。目前的勘探开发实践表明,我国存在较多的煤层气富集区,地质历史上经历过岩浆侵入引起的叠加热变质作用,提高了煤层含气水平,改善了煤储层渗透性,成为重点煤层气开发区域^[39],如沁水煤层气田。

2 我国煤层气分布赋存特征

根据上述主要地质因素对煤层气分布赋存的影响程度,将煤层气分布赋存概括为“多因素综合控制”和“多因素影响、某一两个因素主控”2种类型。

1) 多因素综合控制型。煤层气的分布赋存特

征是多种(3种及以上)地质因素综合作用的结果,各种地质因素在煤层气赋存中均起到一定作用。例如,河南荥巩煤田二、煤(影响因素包括煤层埋深、煤厚、煤层围岩及地质构造)^[18]、河南焦作煤田二、煤(煤厚、煤层上覆有效地层厚度、煤层割理发育程度及顶底板围岩性质)^[9]、陕西鄂尔多斯盆地南部彬长矿区4号煤(地质构造、煤层埋深、煤厚、顶底板围岩性质及水文地质条件)^[17]、安徽淮北煤田孙庄勘探区(煤层埋深、煤变质程度、煤厚、盖层和地质构造)^[8]、贵州六盘水煤田马依东二井田(煤层埋深、煤厚、煤层割理发育程度、顶底板围岩和地质构造)^[15]等。对于该类型的煤层气区,煤层气富集区是多种有利地质因素合理配置下的结果,富集区的圈定需要根据多种地质因素进行综合考虑。

2) 多因素影响,某一两个因素主控型。在一个煤层气富集区域,多种地质因素决定了该地区煤层总体含气水平,但区域上煤层气分布非均质性常受某一两个主导因素控制,在影响区域内煤层气富集程度起决定性作用。例如,水文地质条件主控型:山西沁水盆地潞安目标区^[12]、山西沁水盆地晋城地区^[10];埋深和水文地质条件主控型:河南安阳矿区双全井田^[4];褶曲构造和埋深主控型:河南平顶山矿区二、煤^[16];构造和水文地质条件主控型:沁水盆地晋城地区郑庄区块^[20];沉积环境和构造条件主控型:沁水盆地晋城地区樊庄区块^[21]。

3 煤层气富集模式及有利区预测

在分析煤层气分布赋存主控地质因素的基础上,寻找煤层气有利富集区,为煤层气开发部署提供地质依据。国内学者针对典型含煤盆地总结了煤层气富集模式^[40-43]。傅小康等^[45]基于美国粉河盆地和我国铁法盆地煤层气富集规律,提出了低阶煤层气富集的5种模式,即背斜富集模式、构造-水动力富集模式、构造-岩性富集模式、岩性-水动力富集模式和岩性富集模式。孙平等^[42]总结了3种低阶煤层气富集成藏模式:深部承压式超压富集模式、盆缘缓坡晚期生物气富集模式及构造高点常规圈闭水动力富集模式。王勃等^[43]根据阜新盆地王营-刘家区煤层气富集区的形成机制,提出了水动力-岩墙封堵混合成因裂隙型煤层气富集模式。康玉国等^[44]基于依兰煤田煤层气富集成藏主控因素,提出了依兰矿区水力封堵-逆断层型富集模式。宋岩等^[29]根据沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地东缘和淮

北地区高丰度煤层气区富集区形成机制,建立了中高煤阶高丰度煤层气富集区形成模式,即斜坡区含气量和渗透率优势叠合富集模式和脆韧性叠加带煤层气富集模式。

另有学者对我国煤层气富集区发育部位或发育特征进行了总结。赵庆波等^[45]、翟光明等^[2]总结了我国煤层气主要富集区类型,即区域含煤区构造高点、直接盖层稳定分布的上斜坡区、凹中隆构造的火山岩活动区、浅层封闭条件好的低煤阶与厚煤层发育区和断裂活动次生割理发育区。李五忠等^[46]基于大宁-吉县地区煤层气富集规律,认为河间湾沼泽相、构造宽缓部位以及地应力低值区为煤层气最有利富集区。

在后期的勘探开发中,根据已有的煤层气富集模式和富集区发育特征,通过地质条件类比,可寻找类似的煤层气富集区,作为煤层气开发的有利目标区。然而,煤层气富集区并非就是煤层气高渗区,因此也未必是煤层气开发的最有利区。考虑到煤层气开采的经济技术条件,通常从资源条件、可采性和开发利用条件等方面对有利区进行综合评价和优选。目前,国内常用的优选煤层气目标区的评价方法主要包括基于地理信息系统(GIS)的多层次模糊数学法^[47-54]、模糊物元法^[55-56]、灰色类聚法^[57-59]、加权平均法^[60]、综合突变理论和模糊数学法^[61]等。在勘探阶段,这些方法行之有效,特别是层次分析法,通过比较判断两指标间的重要程度来确定权重,能够很好地处理难以完全用定量来分析的复杂问题^[57]。然而由于评价指标众多,一些指标之间的相对重要性主要靠经验来确定,主观性较强,可能影响最终的评价效果。

4 结 论

控制煤层气分布赋存的主要地质因素包括地质构造条件、煤层埋藏深度、水文地质条件、沉积环境、煤层物性和岩浆活动等6个方面。构造沉降作用有利于煤层气赋存;构造抬升则相反。逆断层、向斜核部为有利构造类型;正断层、背斜核轴部和陷落柱为不利构造类型。随煤层埋深增加,煤层气吸附量增加;临界埋深之后,煤层气吸附量降低。水力运移逸散具有破坏煤气藏作用;水力封堵和水力封闭控气则具有保护作用。煤层顶、底板越厚、岩性越致密,对煤层气保存越有利。糜棱煤带易于富集煤层气;煤层气含量和煤厚呈正相关性。岩浆侵入影响煤层

气含量和分布赋存特征。根据主要地质因素的影响程度,煤层气分布赋存可概括为“多因素综合控制”和“多因素影响、某一两个因素主控”2种类型。我国煤层气富集区及富集模式具有多样性,通过地质条件类比,可进行煤层气有利富集区预测。

参考文献:

- [1] 杨 起,刘大锰,黄文辉,等.中国西北煤层气地质与资源综合评价[M].北京:地质出版社,2005.
- [2] 翟光明,何文渊.中国煤层气赋存特点与勘探方向[J].天然气工业,2010,30(11):1-3.
- [3] 饶孟余,杨陆武,冯三利,等.中国煤层气产业化开发的技术选择[J].特种油气藏,2005,12(4):1-4,14.
- [4] 刘大锰,姚艳斌,刘志华,等.华北安鹤煤田煤储层特征与煤层气有利区分布[J].现代地质,2008,22(5):787-793.
- [5] 王琳琳,姜 波,屈争辉.鄂尔多斯盆地东缘煤层含气量的构造控制作用[J].煤田地质与勘探,2013,41(1):14-24.
- [6] 张俊宝,何玉梅.阜新煤田刘家辉绿岩活动规律及对煤层气赋存的影响[J].煤矿开采,2003,8(3):21-22.
- [7] 张小东,卢耀东,王利丽.古汉山井田煤层气赋存特征[J].河南理工大学学报:自然科学版,2007,26(1):27-31.
- [8] 樊爱英.淮北煤田孙庄勘探区煤层气赋存规律及影响因素分析[J].中国煤田地质,2006,18(5):25-27.
- [9] 李元建.焦作煤田煤层气赋存地质特征与有利区块分析[J].煤,2010,19(5):8-10,33.
- [10] 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.
- [11] 陈 润,秦 勇,陈良立.梁北二井煤层气赋存特征[J].中国煤层气,2009,6(3):12-14.
- [12] 叶建平.潞安目标区煤层气赋存和生产的地质因素分析[J].煤田地质与勘探,2005,33(3):29-32.
- [13] 张同兴,闫东育,马建民,等.煤系地层陷落柱特征与煤层气分布浅析[J].断块油气田,2003,10(1):22-24.
- [14] 司淑平,马建民,胡德西.煤系地层陷落柱成因机理与分布规律研究[J].断块油气田,2001,8(2):15-18.
- [15] 唐显贵.盘县马依东二井田煤层气赋存特征与开发利用前景[J].中国煤炭地质,2008,20(1):17-20.
- [16] 刘庆献.平顶山矿区煤层气赋存特征及影响因素分析[J].中国煤炭地质,2008,20(3):31-34.
- [17] 龙 玲,王 兴.陕西彬长矿区煤层气赋存特征及资源利用[J].中国煤田地质,2005,17(5):44-46.
- [18] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等.华北石炭-二叠系煤的孔渗特征及主控因素[J].现代地质,2010,24(6):1198-1203.
- [19] 刘大锰,姚艳斌,蔡益栋,等.煤层气储层地质与动态评价研究进展[J].煤炭科学技术,2010,38(11):10-16.
- [20] 王 猛,朱炎铭,李 伍,等.沁水盆地郑庄区块构造演化与煤层气成藏[J].中国矿业大学学报,2012,41(3):425-431.
- [21] 刘燕红,李梦溪,杨 鑫,等.沁水盆地樊庄区块煤层气高产富集规律及开发实践[J].天然气工业,2012,32(4):29-32.
- [22] Liu Da-meng, Yao Yan-bin, Tang Da-zhen et al. Coal Reser-

- voir Characteristics and Coalbed Methane Resource Assessment in Huainan and Huaibei Coal Fields, Southern North China [J]. International Journal of Coal Geology 2009, 79:97-112.
- [23] 宋岩,柳少波,赵孟军,等.煤层气与常规天然气成藏机理的差异性[J].天然气工业 2011, 31(2):47-53.
- [24] 赵丽娟,秦勇,林玉成.煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素[J].煤炭学报 2010, 35(7):1165-1168.
- [25] 李俊乾,刘大锰,姚艳斌,等.郑庄区块煤层气富集主控地质因素及开发前景分析[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社 2011:187-195.
- [26] Li Jun-qian, Liu Da-meng, Yao Yan-bin, et al. Geological Controls of the Coalbed Methane (CBM) Enrichment in the Zhengzhuang Coal Zone, Southern Qinshui Basin, China [J]. Advanced Materials Research 2013, 616-618:234-239.
- [27] Yao Yan-bin, Liu Da-meng, Yan Tao-tao. Geological and Hydrogeological Controls on the Accumulation of Coalbed Methane in the Weibei Field, Southeastern Ordos Basin [J]. International Journal of Coal Geology 2014, 121:148-159.
- [28] 申建,王宝文,等.深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J].石油学报 2012, 33(1):48-54.
- [29] 宋岩,柳少波,琚宜文,等.含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J].石油学报 2013, 34(3):417-426.
- [30] 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.
- [31] Ayers W B Jr. 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.
- [32] Lamarre R A. Hydrodynamic and Stratigraphic Controls for a Large Coalbed Methane Accumulation in Ferron Coals of East-Central Utah [J]. International Journal of Coal Geology 2003, 56:97-110.
- [33] 吴鲜,廖冲,叶玉娟,等.水文地质条件对煤层气富集的影响[J].重庆科技学院学报:自然科学版 2011, 13(5):78-80.
- [34] 叶建平.水文地质条件对煤层气产能的控制机理与预测评价研究[D].北京:中国矿业大学(北京) 2002.
- [35] 傅雪海,秦勇,韦重韬,等.沁水盆地水文地质条件对煤层含气量的控制作用[C]//煤层气勘探开发理论与实践.北京:石油工业出版社 2007:61-69.
- [36] 刘洪林,李景明,王红岩,等.水文地质条件对低煤阶煤层气成藏的控制作用[J].天然气工业 2008, 28(7):20-22.
- [37] 方爱民,侯泉林,雷家锦,等.煤变质作用对煤层气赋存和富集的控制:以沁水盆地为例[J].高校地质学报 2003, 9(3):378-384.
- [38] 侯泉林,李会军,范俊佳,等.构造煤结构与煤层气赋存研究进展[J].中国科学:地球科学 2012, 42(10):1487-1495.
- [39] 甘华军,王华,严德天.高、低煤阶煤层气富集主控因素的差异性分析[J].地质科技情报 2010, 29(1):56-60.
- [40] Yao Yan-bin, Liu Da-meng, Huang Wen-hui. Influences of Igneous Intrusions on Coal Rank, Coal Quality and Adsorption Capacity in Hongyang, Handan and Huaibei coalfields, North China [J]. International Journal of Coal Geology 2011, 88:135-146.
- [41] 傅小康,霍永忠,叶建平.低阶煤层气富集模式初探[J].中国石油勘探 2006, 3(3):73-75.
- [42] 孙平,王勃,孙粉锦,等.中国低煤阶煤层气成藏模式研究[J].石油学报 2009, 30(5):648-653.
- [43] 王勃,李贵中,王一兵,等.阜新盆地王营-刘家煤层气富集区的形成模式[C]//2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社 2011:82-89.
- [44] 康玉国,阎伟,马立军.依兰矿区煤层气成藏模式研究[J].中国煤层气 2013, 10(4):33-37.
- [45] 赵庆波,陈刚,李贵中.中国煤层气富集高产规律、开采特点及勘探开发适用技术[J].天然气工业 2009, 29(10):13-19.
- [46] 李五忠,陈刚,孙斌,等.大宁-吉县地区煤层气成藏条件及富集规律[J].天然气地球科学 2011, 22(2):352-360.
- [47] 胡宝林,杨起,刘大锰,等.鄂尔多斯盆地煤层气资源多层次模糊综合评价[J].中国煤田地质 2003, 15(2):16-19.
- [48] 吴欣松,韩德馨,张金强.华北地区煤层气聚集带评价与优选[J].天然气工业 2004, 24(4):4-6.
- [49] 姚艳斌,刘大锰,胡宝林,等.地理信息系统在煤层气资源综合评价中的应用[J].煤炭科学技术 2005, 33(12):1-4.
- [50] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.平顶山煤田煤储层物性特征与煤层气有利区预测[J].地球科学-中国地质大学学报, 2007, 32(2):285-290.
- [51] 李贵中,吴立新,王红岩,等. GIS支持下的煤层气有利勘探目标区优选[J].天然气工业 2005, 25(9):7-9.
- [52] 李贵中,白建梅,习铁宏,等. GIS支持下的煤层气目标区模糊综合评价模型[J].现代地质 2008, 22(1):103-107.
- [53] Yao Yan-bin, Liu Da-meng, Tang Da-zhen, et al. A Comprehensive Model for Evaluating Coalbed Methane Reservoirs in China [J]. Acta Geologica Sinica 2008, 82(6):1253-1270.
- [54] 许浩,汤达祯,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地西部侏罗系煤储层特征及有利区预测[J].煤田地质与勘探 2010, 38(1):26-28.
- [55] 邵龙义,文怀军,李永红,等.青海省天峻县木里煤田煤层气有利区块的多层次模糊数学评判[J].地质通报 2011, 30(12):1896-1903.
- [56] 刘人和,刘飞,周文,等.沁水盆地煤岩储层特征及有利区预测[J].油气地质与采收率 2008, 15(4):16-19.
- [57] 王勃,孙粉锦,李贵中,等.基于模糊物元的煤层气高产富集区预测:以沁水盆地为例[J].天然气工业 2010, 30(11):22-25.
- [58] 姚纪明,于炳松,车长波,等.中国煤层气有利区带综合评价[J].现代地质 2009, 23(2):353-358.
- [59] 熊德华,唐书恒,朱宝存,等.晋陕蒙地区煤层气勘查潜力综合评价[J].天然气工业 2011, 31(1):32-36.
- [60] 郑贵强,唐书恒,张静平,等.霍西盆地煤层气资源勘查潜力评价[J].资源与产业 2012, 14(1):53-57.
- [61] 康园园,邵先杰,石磊,等.煤层气开发目标区精选体系与方法研究[J].岩性油气藏 2011, 23(1):62-66.
- [62] 陈茂谦,师俊峰,金娟.突变评价法在煤层气评价和选区中的应用[J].石油钻探技术 2009, 37(2):74-77.