

文章编号:1004-3918(2015)06-0998-06

页岩气与煤层气成藏特征对比与共生优选

范莉红¹, 钟建华^{1,2}

(1. 中国石油大学, 山东 青岛 266555; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 通过对煤层气和页岩气成藏条件、成因机制、赋存机理、运移机理等诸多方面对比研究, 探寻煤层气和页岩气的相似性和差异性, 二者均表现为具有纳米级孔隙结构、自生自储、原地成藏、连续成藏, 成因类型都包括生物成因、热成因和混合成因。同时, 其储层岩性、成藏过程、保存条件等具有很大差异性。煤层气和页岩气具有密切联系, 并且国内多地区出现二者共生现象, 可将其作为一个系统, 结合地区特征建立系统评价标准, 考虑实现多目的层位共同勘探开发。

关键词: 页岩气; 煤层气; 成藏; 资源共生; 优选

中图分类号: TE 122.1 **文献标识码:** A

Contrast of the Reservoir Forming Characteristic Between Shale Gas and Coalbed Methane and Symbiotic Optimization

Fan Lihong¹, Zhong Jianhua^{1,2}

(1. China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The accumulation conditions, formation mechanism and occurrence mechanism, migration mechanism, preservation conditions and many aspects coalbed methane (CBM) and shale gas were studied. The results show that CBM and shale gas has a lot of similarities, as it has nanoscale pore structure, self generation and self preservation, in-situ accumulation and continuous accumulation. Genetic types include biogenic, thermogenic and mix types. Meanwhile, the reservoir lithology, accumulation process, preservation conditions and others also have a great difference. CBM and shale gas have a close contact, and appear symbiosis between them in many domestic areas. It can be served as a system and combined with the regionalism to establish system evaluation standard, considering implement multi purpose horizon of exploration and development together.

Key words: Shale gas; coalbed methane; accumulation; symbiotic resources; optimization

目前, 煤层气和页岩气开采已经在美国取得了成功, 实现了规模性商业开发^[1]。据2014年美国页岩油气产区钻井产量报告, 美国页岩油气主力产层为巴肯、马塞勒斯、海恩斯维尔、鹰滩、二叠、奈厄布拉勒和尤蒂卡, 页岩气产量 $12.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ 。中国已开始了页岩气勘探的研究和试验工作, 据我国国土资源部统计, 有利区页岩气地质资源潜力为 $12.3 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 可采资源潜力 $21.84 \times 10^{15} \text{ m}^3$ ^[2-3]。煤层气方面除美国外, 加拿大、澳大利亚和中国等国家也已形成产业。因此, 开展页岩气和煤层气的研究, 对缓解我国油气资源压力具有重大意义。

1 煤层气、页岩气基本特点

页岩气指主要以吸附或游离状态赋存于暗色泥岩、页岩的天然气, 其主要成分是甲烷^[4], 含气量等于吸

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 范莉红(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非常规油气勘探。

附气、游离气、少量溶解气的总和,其中吸附气体积分数20%~85%。

煤层气指以吸附状态储存在煤层中的天然气,其主要成分是甲烷^[5]。煤层气主要以吸附状态存在煤层孔隙裂缝中,吸附量体积分数90%~95%。

页岩气和煤层气都是一种自生自储、连续成藏的天然气聚集。对于页岩气和煤层气藏的评价方法有别于常规气藏^[6]。表1罗列了对煤层气、页岩气的主要评价方法。

表1 煤层气页岩气的主要评价方法

Tab.1 The main evaluation methods of coalbed gas and shale gas

方法	结果
气体组分	指出气体中甲烷、乙烷、二氧化碳、氮气的百分比含量,确定气体纯度
岩心描述	对泥页岩通过岩心观察、结合薄片和扫描电镜,从宏观微观方面确定岩石类型;对煤通过对厚度、亮度、割理、割理填充物、灰分等方面观察,确定岩相
矿物分析	对泥页岩通过全岩分析确定矿物组分,源岩成分影响泥页岩脆性以及页岩气含量;确定煤灰分含量,灰分含量越低,煤层气含气量相对越高
岩石热解分析	通过有机碳含量等,确定有机质丰度,通过氢指数、Tmax等绘制交会图,判定有机质类型等
镜质体反射率	测定镜质体反射率(R ₀),用于确定泥页岩有机质成熟度和煤级
显微组分	分析不同显微组分类型、含量空间关系,分析煤层吸附能力和渗透率;确定泥页岩有机质类型
物性分析	脉冲法、气驱水法、高压饱和水法测定渗透率和孔隙度,做出孔渗关系图,分析储层物性
孔隙结构	通过等温吸附曲线、核磁共振、CT扫描、氩粒子抛光等确定微观孔隙结构,包括比表面积、孔径分布、孔隙形态等,描述煤层和泥页岩对气体的吸附和解析能力
含气性分析	对煤芯、泥页岩直接测定,确定源岩中天然气含量,是储量估算关键参数
测井曲线	可通过自然电位、自然伽马、电阻率测井、声波测井等识别岩性,确定岩石厚度和孔隙度,通过密度测井结合其他参数用来表征岩石厚度等。通过图像测井可去顶裂缝发育程度
三维地震	利用地震响应、叠前AVO反演、叠前弹性阻抗反演和频谱分析等技术,进行富有机质页岩岩层段识别、含气性检测、裂缝检测、岩石力学和脆性预测等

2 成藏条件

常规油气资源有“生、储、盖、圈、运、保”6大基本成藏地质条件,而页岩气、煤层气属于自生自储式非常规油气藏,成藏条件不同,两者成藏在成因、机理和分布上互有联系,在空间可伴生出现。

2.1 成藏环境

有机质含量高的暗色泥页岩、碳质泥岩是页岩气形成的良好条件,其一般分布于在饥饿性沉积盆地的沉积-沉降中心,要求深水、低水动力条件下的还原环境。根据沉积环境,可将富有机质泥页岩划分为海相、海陆交互相、陆相3种。海相泥页岩主要发育于大陆斜坡、半深水—深水陆棚相等;海陆交互相泥页岩发育于克拉通边缘沼泽相;陆相泥页岩发育于深湖、半深湖以及部分浅湖等^[4]。

煤层气源于煤层,煤是来源于沼泽和湿地中的一种有机沉积物。在成煤过程中转化成泥炭,泥炭在成煤沼泽中以高度变动的堆积速率形成厚的沉积物,被掩埋后致密成煤。煤层主要沉积背景包括冲积扇、河流、三角洲和海岸线,根据对现代泥炭沼泽的研究,可将煤层沉积环境划分为内陆泥炭沼泽、近海泥炭沼泽和海滨沼泽三大类^[5]。

2.2 源岩条件

页岩气藏的烃源岩主要是黑色、暗色泥页岩、碳质泥页岩,这里指的泥页岩是广义上的由泥级颗粒组成的碎屑沉积岩,即现在所说的细粒沉积物。细粒沉积物主要由黏土矿物、陆源碎屑矿物和碳酸盐三部分矿物组成。目前对已勘探开发的页岩气藏研究发现页岩气生产的6个条件:泥页岩有效厚度大于30 m(连续发育时,断续发育时厚度应大于50 m)、泥页岩埋深要小于4500 m、泥页岩含气性应大于0.4 m³/t、有机碳含量TOC大于2%(越高越好)、镜质体反射率介于1.1%~4.5%(成熟度高生气,成熟度低则生油)、脆性矿物含量大于30%、黏土矿物含量小于30%、孔隙度大于2%、渗透率大于1×10⁻⁵ md^[4,6]。

煤层气的烃源岩是煤层本身,成煤过程中每阶段都有气体生成,但生成的气体组成和气体含量有很大差别^[7]。高品质、高含气量、高含气饱和度及稳定分布的厚层状煤层,是煤层气藏形成的必要物质条件。一

般认为,煤层中单层厚度大于1 m,总厚度大于10 m,平面上主煤层连续稳定分布,面积大于200 km²,镜质组含量大于80%,灰分含量小于25%,中低煤阶(R_o 介于1.0%~1.7%,此煤阶煤层生气量高,割理系统发育,孔隙度大,煤层渗透率较高),含气量大于10 m³/t的烃源岩有利于进行工业性勘探开发^[8-9]. 目前来看,开发的深度一般为100~1500 m,埋深大于1500 m则由于钻井成本上升,不具有经济开发效益.

2.3 成因类型

页岩气和煤层气成因类型相同,都包括生物成因、热成因、混合成因^[10](图1).

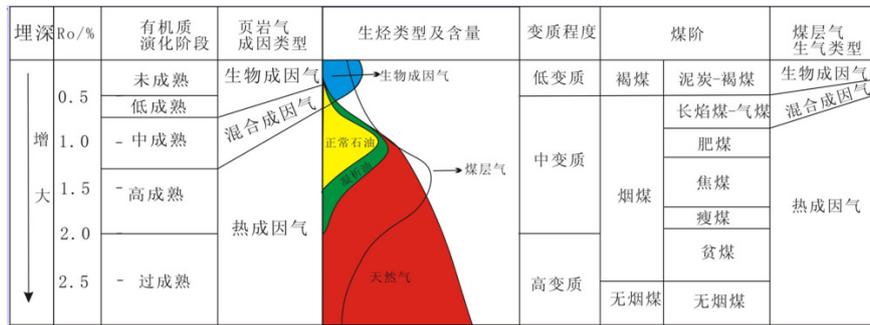


图1 煤层气与页岩气形成演化模式^[10]

Fig.1 Formation-evolution model of CBM and shale gas

2.3.1 生物成因气 分为原生生物成因气和次生物成因气. 原生生物成因气是指在早期成岩阶段,有机质经过细菌等微生物作用而产生的气体,一般埋藏浅、有机质成熟度低、演化阶段低、地层温度低,且随着有机质成熟度增大,产气量减少. 生物成因型页岩气一般 R_o 小于1%,如美国的安特里姆气田 R_o 范围是0.5%~0.75%,生物成因型煤层气处于褐煤阶段, R_o 小于0.5%.

次生物成因气是指当后期构造抬升时,煤或泥页岩抬到近地表,储集层中已存在的气体被地层水中所携带的微生物经过生物作用形成的气体.

2.3.2 热成因 通过有机质热解、原油裂解、沥青裂解而形成天然气,一般埋藏较深、地层温度较高、有机质成熟度高. 热成因型页岩气 R_o 范围是1.15%~3.0%,热成因煤层气阶段主要在中、高煤化作用阶段, R_o 范围是0.5%~6%.

2.3.3 混合成因 属于生物成因和热成因的一个过渡状态. 混合成因型页岩气 R_o 范围为0.4%~1.15%,混合成因型煤层气 R_o 范围为0.3%~0.5%.

2.4 储集条件

储层具有储存气体和疏导气体的能力,页岩气和煤层气藏是一种低孔低渗、自生自储的油气藏,页岩气储存于泥页岩及其间的砂岩夹层中,煤层气储存在煤层及其中的碎屑岩夹层中.

页岩具有多尺度孔隙结构,发育丰富纳米级孔隙,孔隙度低,连通性差,有机质多被无机矿物所包围. 储层内部具有裂缝和基质孔隙两种储集空间,其中基质孔隙为主要的储集空间,裂缝为渗流通道,一般来说,其总孔隙度小于10%,有效孔隙度小于5%,渗透率在 $0.01\sim 1\times 10^{-5}$ md^[7]. 页岩气以吸附态赋存在有机质和黏土颗粒表面、以游离态存在于天然裂缝和孔隙中,少量以溶解态存在,其中吸附气含量占20%~85%.

煤层属于双孔隙岩层(基质孔隙和裂隙),控制了煤层气的储集、运移和产出. 此外,煤层中割理也是流体流动的重要渠道^[8]. 煤层的孔隙度总体相对泥页岩较大,一般大于1%、小于6%,渗透率一般小于1 md. 煤层气主要以吸附气形式存在,含量占90%~95%. 因此,煤层的吸附性决定了煤层气的含量,主要影响因素有煤阶、成分、显微组分、煤孔隙体积、温度和压力等^[11].

2.5 圈闭条件

常规油气藏中圈闭是必要条件之一,封闭的圈闭确保了油气不散失,而非常规气藏没有特定圈闭. 页岩气和煤层气形成并富集在烃源岩内部,气藏的分布范围主要取决于烃源岩的分布范围,无清晰的气水界面、气藏边界,属于隐性圈闭.

2.6 天然气运聚

浮力是常规油气藏运聚的主要动力,对于煤层气、页岩气藏,由于埋深大,储集层物性差,毛细管阻力大,异常压力和分子扩散等作用将代替浮力作用为油气运聚提供动力^[9]。页岩气和煤层气是原地成藏类型,没有运移或是只做很短运移就聚集成藏。

在页岩气藏中,主要的运移通道是孔隙和裂缝。页岩气运聚成藏具有复杂的多机理递变特点,除气体在孔隙水等的溶解作用外,天然气生烃初期时为吸附式聚集,大量生烃时期为活塞式运聚,生烃高峰时期为置换式运聚^[12]。页岩气运聚以非达西渗流为主,在运聚过程中,存在吸附、解吸、扩散、渗流等相态与流动机制的转化。煤层气与页岩气藏的运聚方式非常相似。在较大的孔隙中,气体的流动符合达西定律,而在微孔隙中,其主要是在浓度和密度差的作用下扩散流动,在裂缝中是在压力梯度作用下渗流流动^[8],如图2。

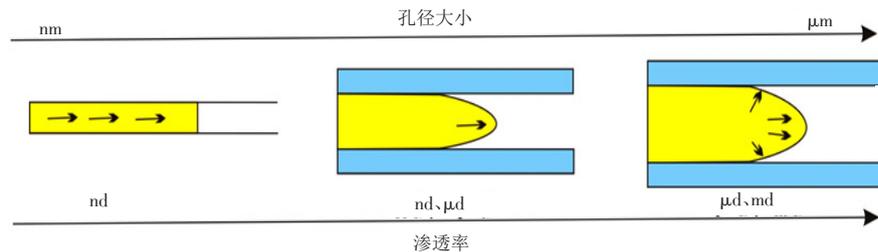


图2 气体在孔隙中渗流状态

Fig.2 Seepage state of gas in pore

2.7 保存条件

煤层气藏的形成需要良好的保存条件,包括顶底层封盖能力、水动力条件、构造运动^[10]。

煤层气主要以吸附态存在,良好的盖层可保持较高的地层压力,减少煤层气向外渗流和扩散,使其较长时间地保存在煤层中。顶底层盖层的封盖能力主要是由岩石的岩性、厚度和物性决定的。泥岩微孔发育,封盖能力强,一般来说,厚度大于5 m且连续分布的泥岩是煤层气最好的盖层。

水动力条件对煤层气保存具有双重作用,地层水可运移、封堵气体,又可溶解气体,地表水携带的细菌还有利于通过生物作用产气。一般来说,滞缓类中的封闭亚类及停滞类中的封闭亚类为最佳水文条件^[7]。

构造运动对煤层有很大影响,构造抬升可导致气体扩散损失,构造下降则有利于气体的产生和吸附保存;张性断层属于开放性断层,是煤层气运移的主要通道,不利于煤层气的保存。相反,压性、压扭性断层封闭性好,保存条件好;向斜核部、背斜的两翼常具有较高的水压力(图3),有利于煤层气的吸附和富集^[10]。

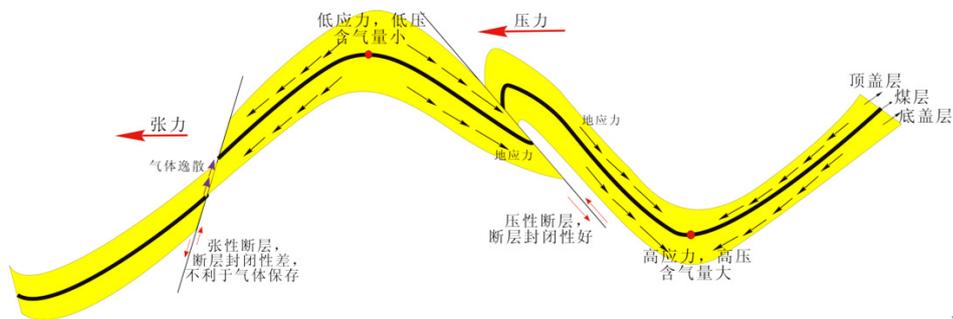


图3 煤层气藏构造保存条件

Fig.3 Tectonic condition of coalbed methane reservoir

页岩气存储在低孔低渗的泥页岩内,本身是良好的盖层,其富集不需要其他盖层和特定的水动力条件,其成藏受构造活动限制不明显。页岩气成藏通常位于或接近于盆地的沉降、沉积中心,有利区主要集中于盆地向斜中心、构造底部,盆地中心偏斜坡处与煤层气相同。

3 成藏机理

页岩气藏自生自储、原地成藏,其成藏机理具有混合型特征,主要表现为典型吸附机理、活塞式排驱富集机理^[10,12]。气体在页岩微孔中顺序填充,在中孔中多层吸附至毛细管凝聚,在大孔中以溶解态赋存。

页岩气成藏分为两个阶段:第一阶段在成藏初期,生成的气体吸附在有机质和黏土矿物颗粒表面,此阶段与煤层气成藏机理相同;第二阶段在生烃高峰期,页岩气大量产生,有机质和黏土矿物颗粒表面提供的最大吸附量无法满足天然气聚集,吸附气量达到饱和状态,继续产生的气体使地层压力增加导致岩石薄弱部位产生小规模裂缝,页岩气就以游离态就近赋存在裂缝中^[13],如图4。在此阶段页岩气不受浮力影响,受异常压力推动成藏,由于页岩孔隙微小,游离态页岩气以活塞式整体排驱富集机理对地层水进行排驱富集。页岩气成藏过程就是吸附机理与活塞式运聚机理共同作用控制气藏中不同赋存状态气体比例变化的过程。

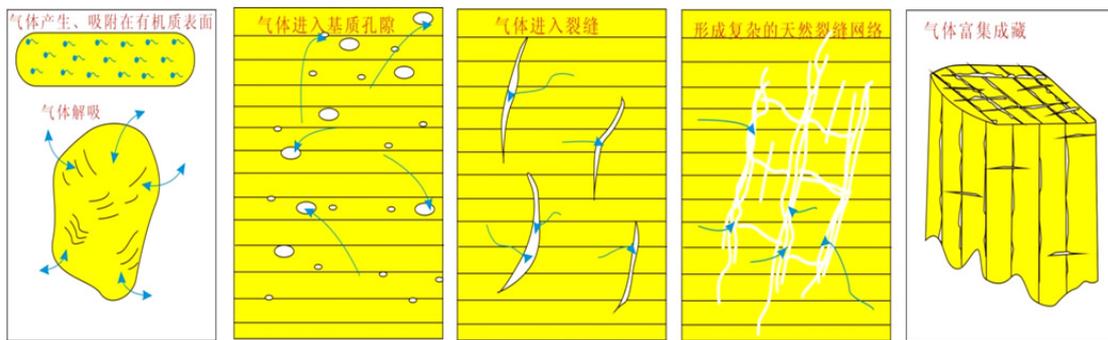


图4 页岩气藏成藏过程

Fig.4 Accumulation process of shale gas reservoir

煤层气主要通过吸附作用将天然气聚集起来,以吸附态赋存在孔隙、裂隙之中,为典型吸附成藏机理。煤层气生成后首先以吸附态赋存于煤表面,当煤层气的产出量超过煤层的吸附能力后,气体达到饱和状态,多余的气体就以游离态赋存于煤孔隙中。煤层气吸附属于物理吸附,当煤层温压条件发生变化时,煤层气的赋存状态随之改变,使其处于游离态和吸附态之间动态平衡。

4 煤层气、页岩气共生

沁水煤层气田南部,山西组、太原组、下石盒子组具有页岩气测显示普遍,具有页岩气的勘探潜力^[14];准噶尔盆地南缘柴窝堡拗陷、贵州六盘水煤田东部的晴隆向斜群内存在煤层气、页岩气良好的成藏和保存条件^[15-16];上扬子川南自贡、资阳及重庆、云南东部地区龙潭组与大隆组地层和下扬子句容盆地大隆组、龙潭组、孤峰组地层等煤层气资源丰富,且具有形成页岩气藏的良好地质条件,并存在页岩气和煤层气资源的重叠组合^[17-18]。

由此可以看出,我国海陆交互相和中新生代陆相煤系地层广泛发育,在煤系中广泛发育有与煤层共生的多种资源,如图5。在多数地区为富含有机质泥页岩,有机质丰度高,演化程度处于生气高峰,具有煤层气和页岩气共同成藏的地质条件,并且泥页岩层与煤层在层位上紧密共生、互层产出,单层厚度不大,不具有独立开采的价值。对此,前人认为如果煤层气和页岩气地层相邻或相距很近,就可能会形成两个相邻或相近的气体储层,甚至可能出现煤层气和页岩气的混合储层^[19-20]。

因此,在充分了解页岩气和煤层气成藏条件、成因机制、赋存机理、运移机理、保存条件等诸多方面的共性和差异性后,针对不同地区,确定该区域埋深、地层厚度、有机碳含量、镜质组反射率、孔隙度、渗透率等关键评价参数,建立煤层气、页岩气综合评价标准,从而加强对煤层气页岩气共生组合规律的研究,确定油气有利区,开展多资源综合评价,进行页岩气、煤层气等多目的层多层合采,从而提高资源开发利用率,对我国将有重大意义。

5 结论

页岩气和煤层气都是非常规天然气,在研究方法、成藏条件、成藏机理上等有很多共性及差异性。

1)页岩气和煤层气都是自生自储、低孔低渗、原地成藏的连续型油气藏。煤层气形成于沼泽、湿地环境中,页岩气形成于大陆斜坡、台地凹陷、深湖、半深湖等环境中;成因类型都包括生物成因、热成因和混合成因,但演化阶段不同。

2)页岩气和煤层气藏开采商业生产条件有:泥页岩有效厚度大于30 m、埋深小于4500 m、脆性矿物含量大于30%、有机碳含量大于2%、 R_o 介于1.1%~4.5%、孔隙度大于2%、渗透率大于 1×10^{-5} md、含气性应大于 $0.4 \text{ m}^3/\text{t}$;煤层气商业生产条件有单层煤层厚度大于1 m,埋深小于1500 m,连续分布面积大于 200 km^2 ,镜质组含量大于80%,灰分含量小于25%, R_o 介于1.0%~1.7%,且含气量大于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

3)煤层气保存要有良好的顶底盖层条件、水动力条件和构造条件,而页岩气的富集不需要。页岩气成藏机理具有混合型特征,表现为典型吸附机理、活塞富集机理;煤层气为典型的吸附富集机理。

4)我国多地区存在煤层气和页岩气可以共同成藏、保存的地质条件,可以将其作为一个系统,建立综合评价标准,同时对煤层气和页岩气多目的层位进行共同勘探开发,从而提高经济效益。

参考文献:

- [1] 李世臻,曲英杰.美国煤层气和页岩气勘探开发现状及对我国的启示[J].中国矿业,2010,19(12):17-21.
- [2] 赵靖舟.非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(3):393-406.
- [3] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质学[M].北京:地质出版社,2014:1-51.
- [4] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
- [5] 郑得文.煤层气资源储量评估方法与理论研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [6] 据宜文,颜志丰,李朝锋,等.我国煤层气与页岩气富集特征与开采技术的共性与差异性[C]//叶建平.2011年煤层气学术研讨会论文集.北京:地质出版社,2011:470-477.
- [7] 姜文利,赵素平,张金川,等.煤层气与页岩气聚集主控因素对比[J].天然气地球科学,2010,21(6):1057-1060.
- [8] 张 硕,陈永进,吕丽新.非常规天然气成藏特征[J].复杂油气藏,2012,5(4):14-18.
- [9] 宋 岩,姜 林,马行陟.非常规油气藏的形成及其分布特征[J].古地理学报,2013,15(5):605-613.
- [10] 邵珠福,钟建华,于艳玲,等.从成藏条件和成藏机理对比非常规页岩气和煤层气[J].特种油气藏,2012,19(4):21-24.
- [11] 张文静,据宜文,卫明明,等.不同变质变形煤储层吸附/解吸特征及机理研究进展[J].地学前缘,2015,22(2):232-242.
- [12] 徐 波,郑兆慧,唐 玄,等.页岩气和根缘气成藏特征及成藏机理对比研究[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2009,31(1):26-30.
- [13] 聂海宽,张金川,薛 会,等.油气成藏及分布序列的连续聚集和非连续聚集[J].天然气工业,2010,30(9):9-14.
- [14] 秦 勇,梁建设,申 建,等.沁水盆地南部致密砂岩和页岩的气测显示与气藏类型[J].煤炭学报,2014,39(8):1559-1565.
- [15] 余琪祥,曹 倩,路清华,等.准噶尔盆地非常规油气资源分布特征及勘探前景[J].油气藏评价与开发,2011,1(4):66-72.
- [16] 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.
- [17] 陈尚斌,朱炎铭,李 伍,等.扬子区页岩气和煤层气联合开发的地质优选[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,35(5):672-676.
- [18] 黄籍中.四川盆地页岩气与煤层气勘探前景分析[J].岩性油气藏,2009,21(1):116-120.
- [19] 张金川,唐 玄,姜生玲,等.碎屑岩盆地天然气成藏及分布序列[J].天然气工业,2008,28(12):11-17.
- [20] Schmoker J W. US geological survey assessment concepts for continuous [M/CD]//USGS Southwestern Wyoming Province Assessment Team. Petroleum accumulations. US Geological Survey Digital Data Series DDS-69-D: Petroleum systems and geologic assessment of oil and gas in the southwestern Wyoming Province, Wyoming, Colorado, and Utah. Tulsa: USGS, 2005: 1-9.

(编辑 孟兰琳)

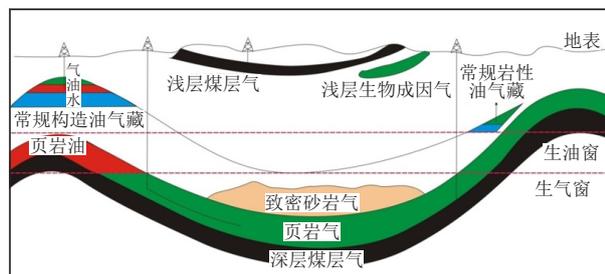


图5 页岩气藏与煤层气藏空间分布

Fig.5 Space distribution of shale gas reservoir and coalbed methane reservoir