

国家科技重大专项煤层气开发成果特刊

低阶煤层气富集主控地质因素与成藏模式分析

刘大锰, 王颖晋, 蔡益栋

(中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083)

摘要:针对我国低阶煤层气分布和富集受多种地质因素控制的现状,对沉积环境、构造作用及水文地质条件等关键地质因素进行了分析,结果表明:低煤化作用阶段,镜质组(腐植组)对于煤岩吸附能力具有一定的贡献作用;煤质中的水分起消极作用。沉积环境影响煤系地层厚度和总资源量,煤层顶、底板厚度越大,岩性越致密,越有利于煤层气保存;含气量与煤厚呈正相关。构造运动可能造成封盖层破坏,导致煤层气逸散,也可能形成良好的侧向封堵。水动力系统对低阶煤层气的生成和保存均有控制作用,其与低阶煤盆地中煤层气富集的利害关系必须结合水文地质与构造耦合关系加以判识。对于低阶煤层气藏,游离气含量不可忽视,在有利成藏模式选择上应重视构造动力条件的分析及构造圈闭点的评价。

关键词:低阶煤;沉积模式;构造演化;水文地质;成藏模式

中图分类号:P618

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)06-0001-08

Analysis of main geological controls on coalbed methane enrichment and accumulation patterns in low rank coals

LIU Dameng, WANG Yingjin, CAI Yidong

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

Abstract: According to the status of the low rank coalbed methane distribution and enrichment in China affected by the multi geological factor control, an analysis was conducted on the sedimentary environment, tectonic role and the hydrogeologic condition as well as other key geologic factors. The results showed that in a low coalification stage, the vitrinite (huminitite) could make a certain contribution role to the adsorption capacity of the coal and rock. The moisture content in the coal property would have a negative effect. A sedimentary environment would affect the thickness and total resource volume of the coal measure strata. A higher thickness of the seam roof and floor, the higher compact of the lithology would be more favorable to the keeping of the coalbed methane. The gas content of the seam would have a positive correlation to the seam thickness. A tectonic movement might cause a failure to the covered layer, would cause the releasing of the coalbed methane and might form a good lateral sealing. A hydrodynamic system would have a control role both to the formation and keeping of the low rank coalbed methane. The interested relation of the coalbed methane enrichment in the low rank coal basin should be distinguished with the coupling relationship between the hydrogeology and the tectonics. As for the low rank coalbed methane reservoir, the free gas content should not be ignored. On the favorable selection of the reservoir formation mode, a high attention should be made to the analysis on the tectonic dynamic condition and the evaluation of the tectonic traps.

Key words: low rank coal; sedimentary mode; tectonic evolution; hydrogeology; reservoir formation mode

0 引 言

美国粉河、澳大利亚苏拉特和加拿大阿尔伯塔

等含低阶煤盆地均实现了煤层气的大规模商业生产,引起了我国对低阶煤层气勘探开发的热潮。据我国新一轮油气资源评价结果^[1],我国低阶煤层气

收稿日期:2018-03-08;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.06.001

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05043-001);国家自然科学基金资助项目(41772160)

作者简介:刘大锰(1965—),男,湖南桃源人,教授,博士生导师,博士。Tel:010-82323971,E-mail:dmliu@cugb.edu.cn

引用格式:刘大锰,王颖晋,蔡益栋.低阶煤层气富集主控地质因素与成藏模式分析[J].煤炭科学技术,2018,46(6):1-8.

LIU Dameng, WANG Yingjin, CAI Yidong. Analysis of main geological controls on coalbed methane enrichment and accumulation patterns in low rank coals[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 1-8.

资源量约为 $16 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全国煤层气资源总量的 45.7%。我国低阶煤储层主要分布于西北部的准噶尔盆地、中部地区的鄂尔多斯盆地和宁武盆地以及东北地区的海拉尔盆地、二连盆地和阜新盆地等^[2]。这些地区煤层厚度大、煤层气资源丰富, 有利于形成大型煤层气藏。然而, 我国含煤盆地构造背景具有多期性, 与众不同的煤层气藏特点导致我国不能完全引进其他国家的勘探开发技术。因此, 关于低阶煤层气的富集机理和成藏模式的研究, 有助于解决我国低阶煤层气开发的瓶颈问题。

低阶煤是泥炭层初期煤化作用的产物, 其镜质组反射率 R_o 小于 0.70%, 主要煤种为褐煤 ($R_o < 0.5\%$) 和长焰煤 ($0.5\% < R_o < 0.65\%$), 该阶段煤层甲烷成因类型以生物成因为主和早期热成因为辅, 以轻甲烷碳同位素为标志^[2]。通常, 煤化作用会使孔隙度下降和比表面增加, 导致吸附成为煤层气主要赋存状态^[3-4], 前人通过试验和模拟得出煤吸附能力的主控物性演化机制^[5-13]。同时, 低阶煤孔隙度高, 游离气不可忽视, 但低阶煤层气赋存特征的认识依然争议很大^[12-13]。宏观地质上, 我国低阶煤储层的同一性包括单层厚度大、资源丰度高、渗透性相对较好等特征, 差异性主要体现在区域构造和水文地质上。对于低阶煤来说, 煤层气的生成机制和保存条件是煤层气勘探评价的重要指导因素, 两者主要受地质条件控制, 因此笔者对低阶煤地质控气理论进行了研究。

1 煤层气富集主控地质因素

煤层气自生自储式的特点, 导致生、储、盖成为评价其资源潜力最重要的 3 个条件。如图 1 所示, 在低阶煤层气的富集机制讨论上: 沉积模式的控制作用体现在原始储物性、资源量和储盖组合上; 构造演化通过控制地层的升降、构造组合样式的展布、岩浆热液的活动和应力的变化来改造煤层气的赋存状态和保存能力; 水文地质一方面影响封堵性, 另一方



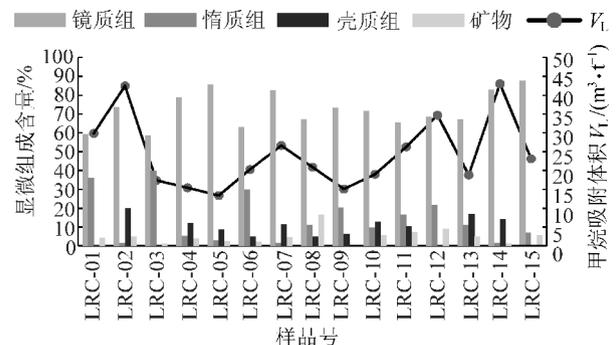
图1 低阶煤层气富集机理

Fig.1 Enrichment mechanism of low-rank CBM

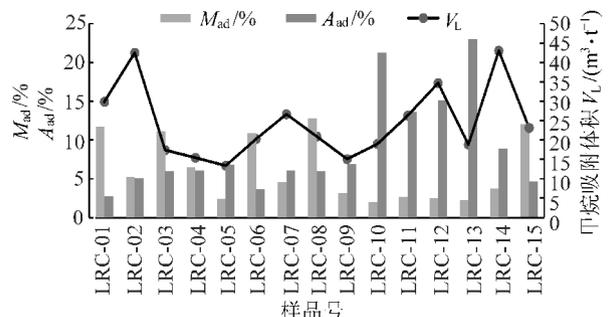
面影响产甲烷菌的活性。因此, 笔者将分别在沉积、构造和水文 3 个方面展开煤层气富集主控地质因素的讨论。

1.1 沉积模式

沉积模式是指在对一定环境中的现代沉积物的物理、化学、生物特征综合研究的基础上概括出的沉积环境及其沉积物的物化模型。沉积模式控制煤岩组成、煤岩类型、煤层厚度、储层物性、围岩组合和煤系地层叠置特征等, 是控制煤层气富集的基本条件^[14-15]。首先, 煤岩显微组分中, 壳质组生烃能力最强, 多分布于机质丰富的三角洲相带^[16]。不同显微组分间存在吸附能力的差异, 镜质组(腐植组)对甲烷吸附能力最强, 其次为惰质组, 壳质组最低^[17]。图 2a 显示了 15 个低阶煤样品(煤阶随样品顺序递增, 镜质体反射率 R_o 为 0.25%~0.65%) 甲烷等温吸附体积 V_L 与镜质组含量基本呈正相关, 这与前人研究一致。由图 2b 可以发现, 水分随煤阶升高成波状变化, 在波峰位置可观察到兰氏体积明显趋低, 在波谷位置如 LRC-02、LRC-07、LRC-12 附近, 兰氏体积明显升高。因此, 煤中水分会因占有甲烷分子的吸附位致使甲烷的吸附量降低^[18-19]。因此, 低阶煤吸附性能主要受控于煤岩结构, 其中镜质组(腐植组)起积极作用, 水分起消极作用。



(a) 煤岩显微组成与吸附能力的关系



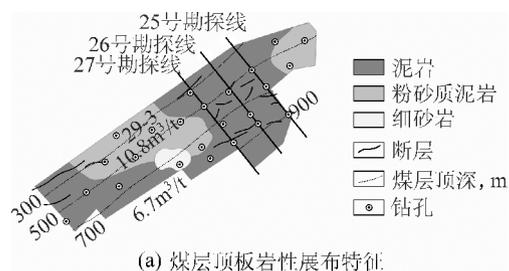
(b) 煤质含量与吸附能力的关系

图2 煤岩显微组成、煤质含量与吸附能力的关系

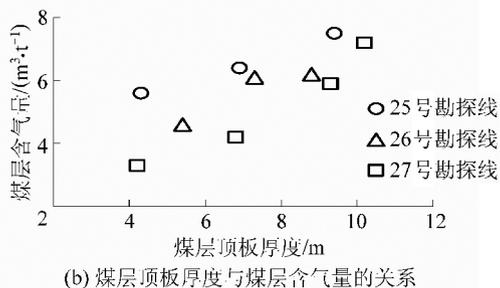
Fig.2 Relationship among macerals, coal qualities and adsorption of coal rock

宏观煤岩类型上,一般光亮煤中镜质组含量较高,孔隙裂隙发育,有利于气体保存^[20-21]。同时,低阶煤层气含量明显低于高阶煤,因此厚煤层是充足气源的保证,因此可容空间变化速率与泥炭沉积速率保持平衡状态,有利于泥炭的堆积和保存^[22-24]。同时,厚煤层可以导致煤层气向顶板扩散的阻力增加而提高含气性,换言之,煤层厚度对煤层含气量的影响主要体现在煤层气运移和赋存上^[25-26]。因此,了解区域古地理背景及湖平面变化规律有利于聚煤模式的建立,从而有助于预测厚煤层的分布规律。

沉积环境对煤层气封闭能力的影响通常体现在储盖组合上,煤层的顶底板岩性、厚度和裂缝发育程度对煤层气的储运具有直接影响。以准噶尔盆地南缘硫磺沟区块低阶煤储层为例,如图3所示,研究区4-5号煤层顶板多为封闭性较好的泥岩,煤层底板均为透气性较好、封闭性一般的细砂岩。29-2井煤层顶板为细砂岩,其含气量明显低于顶板为粉砂质泥岩的29-3井。岩性致密且厚度大的泥岩或粉砂质泥岩作为煤层顶板有利于煤层气富集,由图3可见顶板厚度与煤层含气量呈明显正相关^[25]。



(a) 煤层顶板岩性展布特征



(b) 煤层顶板厚度与煤层含气量的关系

图3 煤层顶板岩性展布特征及其厚度与煤层含气量的关系^[25]

Fig.3 Distribution of the coal seam roof lithology and the relationship between coal gas content and the thickness of coal seam roof^[25]

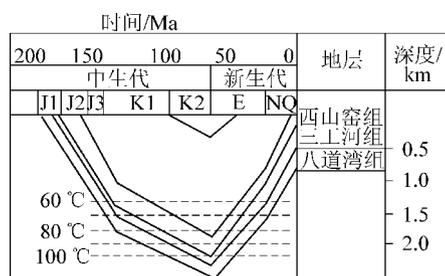
1.2 构造演化

构造直接或间接控制着从含煤地层形成至煤层气生成聚集的一系列过程,是最为重要而直接的控气因素^[27]。构造动力会导致煤储层及围岩物性的改变,打破煤层气原有平衡状态^[28],一方面可能造成封盖层破坏,导致煤层气逸散,另一方面也可形

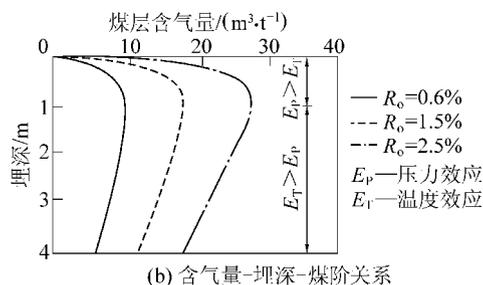
成良好的侧向封堵^[29]。对于低阶煤储层而言,聚煤期构造控制煤系地层的埋藏和分布,聚煤期后构造控制着生、储、盖层的组合特征,最终影响煤层气的勘探开发潜力。构造动力对于低阶煤层气的控制作用主要体现在以下4个方面。

1.2.1 埋深条件

当煤层在构造演化过程中未遭受热液侵入,煤层经历的最大埋深决定煤化程度,而现今埋深则是重要的煤层气的保存条件。以准噶尔南缘为例,3个主煤层中,八道湾组因深成变质作用达到热成烃门限,而三工河组和西山窑组因最大埋深较浅皆以生物成因气为主(图4)。



(a) 淮南侏罗系地层埋藏史



(b) 含气量-埋深-煤阶关系

图4 淮南侏罗系煤系地层埋藏史及含气量-埋深-煤阶关系^[29-30]

Fig.4 Buried history of coal seams in southern Junggar Basin and the correlation among CBM content, depth and coal rank^[29-30]

因受控于挤压应力,位于盆缘的侏罗系煤系地层倾角极大并直接出露地表,在一定程度上使甲烷风化带位置加深,导致煤层气逸散。因此,区域构造中背斜、向斜以及单斜等构造深部位可形成较好的煤层气保存条件,属于勘探的有利目标区。目前,埋深对于低阶煤层气的意义不仅在于影响其保存条件,还在于界定含气性或储物性在多大埋藏深度(临界点)产生转换。埋深增加到某一临界深度时,温度上升带来的负效应强于压力的正效应,煤层中吸附气会向游离气转化,总含气量降低。在理想情况下,低阶煤含气性对于深度的敏感性弱于中高阶煤,由于低阶煤本身含气量低的特点,任何埋深下含

气梯度变化都较小^[29-30]如图4所示。笔者认为,对于低阶煤来说,埋深临界点之下的温度上升虽导致含气性缓慢下降,但温度对于煤岩热演化程度提升的正效应高于其促进解吸的负效应,所以埋深对于低阶煤层富气特征的控制还需进行辩证分析。

1.2.2 构造热事件

构造热事件对于低阶煤层气的富集或成藏的作用分为2个方面:改变储物性和影响保存条件。一方面,岩浆活动会诱发邻近岩体的煤层产生接触变质作用,导致局部煤层生气量和含气量的增加^[31-32],此间产生大量热解甲烷气导致吸附过饱和,析出的游离气会在煤层基质中产生由里向外突破的压力,促进裂隙的形成和基质中原始裂隙的继续发展,从而提高煤层的渗透率^[28]。例如辽东拗陷古近系含煤岩系在聚煤期后经历多次火山运动,局部的附加地温场对所在盆地的煤级及气源条件都有不同程度的控制作用^[31]。另一方面,岩浆侵入后冷却形成的岩墙或岩床等对其控制范围内的煤层气储层起到一定的封闭作用,或者侵入过程中形成的低渗透糜棱煤也可以起到封闭作用。但总体上,接触热只改变局部物性和封闭机制,并不会改变整体低阶煤层气成藏的一般规律。

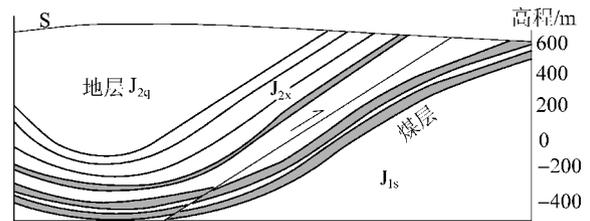
1.2.3 构造运动

构造抬升导致煤层压力和温度降低,使煤层气易于脱附,进而游离气含量增加,成藏模式改变。马行陟等(2012)通过模拟试验证明,对于低阶煤储层,吸附量在抬升过程中始终是减少的,煤层以解吸作用为主,保持饱和和状态^[33-34]。构造运动对于煤储层含气系统的改造作用极其明显,以准噶尔盆地为例:燕山运动形成了盆地内部构造格架,喜马拉雅运动促进侏罗系煤层的排烃,同时天山隆升造成山前拗陷剧烈沉降并接受巨厚盖层沉积,高地温梯度加快煤层生气能力,使山前拗陷区成为煤层气区。

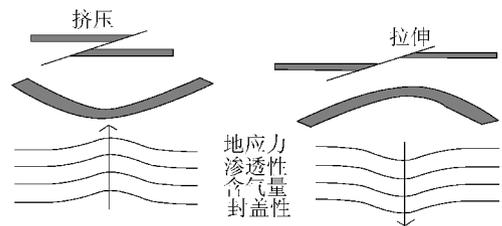
1.2.4 构造组合样式

构造组合样式是指同一区域在受到多期构造应力影响后的构造定位特征,其对煤储层最大的意义在于塑造煤层与围岩之间的相互关系和架构成藏的模式。通常,断层主要通过开合控制煤层气储层的封闭性,褶皱主要通过控制成藏部位和地下水势来影响煤层的含气性^[35]。例如淮南河东矿区,向斜轴部煤系地层出现压扭性质的逆断裂,断层面两端的岩性差异导致深部的构造应力集中带含气量较高(图5)。而拉伸构造,例如正断裂和背斜核部,往往

煤层和顶底板都易发生脆性形变,煤岩渗透性改良的同时也存在围岩封闭性下降的隐患。准东煤储层多存在急倾斜煤层且与地面连通,气液产出规律和相态分异特征与水平煤储层中有很大的不同^[36],煤层风化带深度普遍超过400 m。因此,有利的构造组合是优势低阶煤层气藏形成的关键。



(a) 淮南河东矿区煤层构造展布



(b) 不同受力机制下煤层气藏储集特征

图5 淮南河东矿区煤层构造展布及不同受力机制下煤层气藏储集特征

Fig.5 Structural distribution of coal seam in Hedong coal field, Junggar Basin and coalbed

methane reservoir quality under different in-situ stress

1.3 水文地质

不同于高阶煤盆地,低阶煤层气富集成藏要求的水动力环境并不完全遵守经验规律。例如美国粉河盆地,镜质体反射率也只有0.3%~0.4%,远未达到热成因气的生成阶段,但其东部边缘地层水矿化度较低(450~800 mg/L),该水动力条件促进了甲烷菌活性,生物成因煤层气藏被大规模开发,产气量可观。准噶尔盆地作为我国典型的低阶煤盆地,一些地区煤矿甲烷碳同位素资料表明,准噶尔盆地存在生物成因气^[36-37]。但准噶尔盆地南缘蒸发量远大于降雨量,地层水缺乏补给,盐度高,钻孔地层水矿化度高达3 300 mg/L,煤层甲烷菌繁殖能力受到阻碍,导致盆地南缘浅部煤层仅有少量生物型煤层气,热成因气占90%以上。一般地,煤层水动力场的控气性主要体现在“补给-径流-排泄”方式上^[38]。我国西部地区整体地下水补给量小、矿化度大、潜水面低及储层压力低的特性导致气体大量散失,但天山南北盆地边缘由于雪融水的持续补给,地层水的矿化度得到一定程度的稀释而有利于二次生物气的生

成。在我国东北地区,例如海拉尔盆地和二连等含煤盆地群,煤层浅埋且水补给迅速,导致煤系地层次生生物气明显,煤层含气性较高,浅部富集成藏^[39]。

2 低阶煤层气成因及成藏

2.1 生气模式

借鉴天然气成因分类,煤层气成因包括原生生物成因、次生生物成因、热降解成因、热裂解成因和混合成因等^[43-46]。由于上覆地层沉积时间短且地层温压较低,导致热成因气含量普遍较低,因此对生物成因气及其气源补充特征的研究对于低阶煤层气资源评价具有重要意义。原生生物成因气的源煤层一般为褐煤,其处于煤化作用早期,主要通过醋酸发酵及产甲烷菌还原 CO_2 形成。聚煤初期孔隙易被地层水充填,吸附气量极低,上覆盖层封闭性差,总体含气量低。因此,原生生物气对于低阶煤层气总资源量贡献处于弱势地位,寻找次生生物气源或确定其补充特征是低阶煤成藏研究的一个重点问题。目前,普遍认为利于生物成气的环境包括:煤层埋藏浅、温度相对较低,强还原环境、酸碱度为中性-弱碱性、较低的地下水矿化度、煤层孔隙空间以大孔-裂隙为主、较高渗透率、地下水为活跃径流态,较高沉积速率等^[2]。因此,对于低阶煤次生生物气生成及保存,水文环境和构造耦合作用至关重要。

2.2 成藏模式

孙平等^[13]将中国低阶煤层气成藏模式分为深部承压式超压成藏模式、盆缘缓坡晚期生物气成藏模式及构造高点常规圈闭水动力成藏模式3种。对于深部低阶煤层气藏来说,温度对含气量临界深度的影响相对显著,且游离气量对于含气量的贡献十分重要,溶解气量不占主导地位。深部煤层气不等同于深盆气,深盆气成藏过程为储层致密化→气体充注→聚集成藏,气体充注的前提是底部具有充足的气源,而低阶煤储层未到达热生烃门限,因此所谓深部承压式超压模式在成藏机制上与深盆气有所不同。该成藏模式包括热成因气和后期次生生物成因气的补给。盆地边缘水补给并携带甲烷菌向盆地中心富集,在适宜位置降解煤层产生次生生物气。而向斜轴部的热成因气和次生生物气在超压地层中被隔水层封闭,同时处于滞留区,类似于水动力圈闭机制^[13],如图6所示。因此,该模式具有优越的煤层气成藏效果,实例见于中国新疆五彩湾地区,该区某井产气量稳定在约 $7\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$,说明超压煤储层中除吸附气外还存在着大量的游离气。

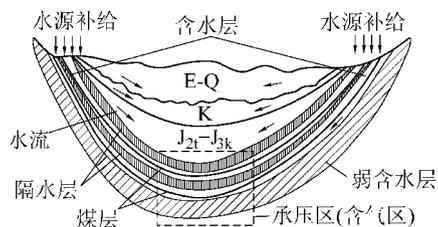


图6 深部承压式超压成藏模式示意^[13]

Fig.6 Sketch of deep confined over pressure reservoir pattern^[13]

后2种成藏模式本质同属浅埋低阶煤层,甲烷菌由高势区运移至低势区,与深部成藏区别在于是否存在有效隔水层。由于低势区甲烷菌的持续供给,同时低压导致部分煤层气解吸成为游离气,所以盖层特性成为成藏主控因素^[13],类似于常规背斜圈闭聚气效应(图7)。

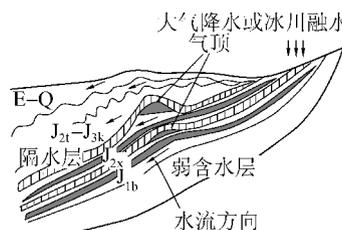


图7 构造高点常规圈闭水动力成藏模式示意^[13]

Fig.7 Sketch of conventional high structural hydrodynamically trapped CBM reservoir^[13]

类似于构造高点常规圈闭水动力成藏的还有宽缓褶皱煤层气成藏模式,清水河、呼图壁以及昌吉等地区均形成主要由伴生发育的断背斜与向斜构造组成的常规圈闭样式^[43]。如图8所示,该种成藏模式大多发育由于构造挤压作用而形成的逆断、推覆或走滑等封堵性质的断层,可以有效抑制气体逸散。而背斜形成的天然圈闭是形成大规模天然气藏的前提,向斜构造翼端接受冰川融水的补给,核部为地下水滞留区又为水动力圈闭提供必要条件。

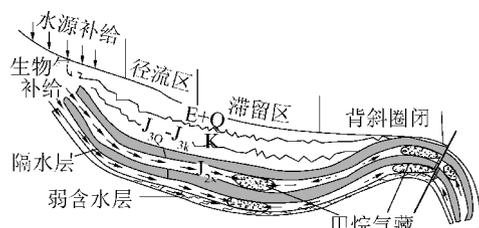


图8 宽缓褶皱成藏模式示意^[43]

Fig.8 Broad fold accumulation model^[43]

综上,虽然低阶煤以基质孔隙为主,且盆地的构造运动相对简单,对其物性改造较小,但游离气在低阶煤层气中占据比例较大,应重视构造动力条件的

分析及构造圈闭点的寻找^[40]。另外,低阶煤同时赋存生物成因气和热成因气,因此生气条件与保存条件同为低阶煤层气富集成藏的关键。沉积模式控制了烃源岩的有机质类型和丰度,从而基本限定了煤层气开发的资源量。同样是自生自储,但区别于致密砂岩和页岩,煤岩强度低、易变形,割理发育易诱发构造裂缝的形成,地层抬升可能导致气体逸散,使甲烷浓度降低。同时,在一定程度上,该特性又有利于外源天然气的渗入补给,而其综合效应受封盖条件影响极大。对于低阶煤储层而言,构造演化不仅会通过控制煤系地层的断褶组合来影响封盖系统的开合,还会宏观制约气藏分布。水型、矿化度、补给方式和水动力状态在一方面控制甲烷菌活性,另一方面影响气体富集。因此,低阶煤层气富集规律并不完全受控于某单一因素,最佳量化指标的选取需要具体情况具体讨论。

3 结 论

1) 沉积环境控制着煤厚、煤质组成和顶底板。镜质组(腐植组)对煤岩吸附能力起积极作用,水分起消极作用;厚煤层含气量一般较高;顶板-煤-底板的储盖组合样式控制了煤层气的保存条件,厚层致密泥岩封闭性最强。

2) 构造多期作用和其组合形式会造成不同应力大小及应力场分布特征,均会导致煤储层和封盖层的相互关系发生变化;含气性存在临界深度并在该点产生相反递变趋势;岩浆活动主要通过改变物性和封闭性影响甲烷气富集和成藏。挤压构造部位煤层气的保存条件优于拉伸构造。

3) 水文地质条件不仅影响着低阶煤层气的生成,而且还对煤层气的保存有重要影响,水动力系统在中低阶煤盆地中与煤层气富集的利害关系必须结合实际地质条件进行相关性分析。

4) 游离气在低阶煤层气中占据比例较大,应重视构造动力条件的分析及构造圈闭点的寻找。控制低阶煤储层富气规律的某单一因素也未必遵守单调递变趋势,所以最佳成藏模式的量化指标选取需结合水文地质与构造耦合关系加以判别。

参考文献(References):

[1] 刘成林,朱杰,车长波,等.新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J].天然气工业,2009,29(11):130-132.
LIU Chenglin, ZHU Jie, CHE Changbo, *et al.* Methodologies and re-

sults of the latest assessment of coalbed methane resources in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(11): 130-132.

- [2] 王博洋,秦勇,申建,等.我国低阶煤煤层气地质研究综述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, *et al.* Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 170-179.
- [3] CROSDALE P J, BEAMISH B B, VALIX M. Coalbed methane sorption related to coal composition [J]. *Int J Coal Geol*, 1998, 35: 147-158.
- [4] 相建华,曾凡桂,梁虎珍,等.不同变质程度煤的碳结构特征及其演化机制[J].煤炭学报,2016,41(6):1498-1506.
XIANG Jianhua, ZENG Fangui, LIANG Huzhen, *et al.* Carbon structure characteristics and evolution mechanism of different rank coals [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1498-1506.
- [5] 刘志钧.关于煤的吸附甲烷容量的研究[J].煤矿安全,1988,18(10):8-15.
LIU Zhijun. Study on the adsorption capacity of coal [J]. *Safety in Coal Mines*, 1988, 18(10): 8-15.
- [6] 钟玲文,张新民.煤的吸附能力与其煤化程度和煤岩组成间的关系[J].煤田地质与勘探,1990,18(4):29-35.
ZHONG Lingwen, ZHANG Xinmin. The relationship between coal's adsorption capacity and its degree of coal and its composition [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1990, 18(4): 29-35.
- [7] DAN YEE, SEIDLE J P, HANSON W B. Gas sorption on coal and measurement of gas content. El discurso civilizador en Derecho Internacional: Cinco estudios y tres comentarios [C]. Instituto Fernando el Católico. IFC, 1993: 166-170.
- [8] 崔永君,张庆玲,杨锡禄.不同煤的吸附性能及等量吸附热的变化规律[J].天然气工业,2003,23(4):130-131.
CUI Yongjun, ZHANG Qingling, YANG Xilu. The adsorption performance of different coal and the change rule of adsorption heat in equal amount. [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(4): 130-131.
- [9] 陈向军,刘军,王林,等.不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J].煤炭学报,2013,38(2):294-300.
CHEN Xiangjun, LIU Jun, WANG Lin, *et al.* Influence of pore size distribution of different metamorphic grade of coal on adsorption constant [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(2): 294-300.
- [10] 卢守青,王亮,秦立明.不同变质程度煤的吸附能力与吸附热力学特征分析[J].煤炭科学技术,2014,42(6):130-135.
LU Shouqing, WANG Liang, QIN Liming. Analysis on adsorption capacity and adsorption thermodynamic characteristics of different metamorphic degree coals [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(6): 130-135.
- [11] SCOTT A R. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico - implications for coalbed gas producibility [J]. *AAPG Bull*, 1994, 78(8): 1186-1209.
- [12] LI Y, CAO D, WU P, *et al.* Variation in maceral composition and gas content with vitrinite reflectance in bituminous coal of the

- eastern Ordos basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2016, 149: 114-125.
- [13] 孙平, 王勃, 孙粉锦, 等. 中国低阶煤层气成藏模式研究 [J]. *石油学报*, 2009, 30(5): 648-653.
- SUN Ping, WANG Bo, SUN Fenjin, *et al.* Research on reservoir patterns of low-rank coal-bed methane in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 648-653.
- [14] 赵庆波, 孔祥文, 赵奇. 煤层气成藏条件及开采特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(4): 552-560.
- ZHAO Qingbo, KONG Xiangwen, ZHAO Qi. Coalbed methane accumulation conditions and production characteristics [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(4): 552-560.
- [15] 甘华军, 王华, 严德天. 高、低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.
- GAN Huajun, WANG Hua, YAN Detian. Differential impact on high and low rank coal by the main factors of coalbed gas enrichment [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(1): 56-60.
- [16] 刘德汉, 傅家谟, 肖贤明, 等. 煤成烃的成因与评价 [J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 137-141.
- LIU Dehan, FU Jiamo, XIAO Xianming, *et al.* Origin and appraisal of coal derived gas and oil [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 137-141.
- [17] HILDENBRAND A, KROOSS B M, BUSCH A, *et al.* Evolution of methane sorption capacity of coal seams as a function of burial history: a case study from the Campine Basin, NE Belgium [J]. *Int J of Coal Geol*, 2006, 66(3): 179-203.
- [18] LAXMINARAYANA C, CROSDALE P J. Role of coal type and rank on methane sorption characteristics of Bowen Basin, Australia coals [J]. *Int J of Coal Geol*, 1999, 40(4): 309-325.
- [19] WENIGER P, FRANC J, HEMZA P, *et al.* Investigations on the methane and carbon dioxide sorption capacity of coals from the SW Upper Silesian Coal Basin, Czech Republic [J]. *Int J of Coal Geol*, 2012, 93(1): 23-39.
- [20] 薄冬梅, 赵永军, 姜林. 煤储层渗透性研究方法及其主要影响因素 [J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(1): 18-21.
- BO Dongmei, ZHAO Yongjun, JIANG Lin. Study on permeability of coal reservoir and its main influencing factors [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(1): 18-21.
- [21] O'KEEFE J M K, BECHTEL A, CHRISTANIS K, *et al.* On the fundamental difference between coal rank and coal type [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 118(3): 58-87.
- [22] HORNE J C, FERM J C, CARUCCIO F T, *et al.* Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian region [J]. *Am Assoc Pet Geol Bull*, 1978, 62(12): 2379-2411.
- [23] FIELDING C R. Coal depositional models for deltaic and alluvial plain sequences [J]. *Geology*, 1987, 15(7): 661-664.
- [24] DIESSEL C, BOYD R, WADSWORTH J, *et al.* On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their sequence-stratigraphic significance [J]. *Int J of Coal Geol*, 2000, 43(1-4): 143-186.
- [25] 周三栋, 刘大锰, 孙邵华, 等. 准噶尔盆地南缘硫磺沟煤层气富集主控地质因素及有利区优选 [J]. *现代地质*, 2015(1): 179-189.
- ZHOU Sandong, LIU Dameng, SUN Shaohua *et al.* Relationship of coal reservoir thickness and its permeability and gas-bearing property [J]. *Geoscience*, 2015(1): 179-189.
- [26] 秦勇, 叶建平, 林大扬, 等. 煤储层厚度与其渗透性及含气性关系初步探讨 [J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(1): 24-27.
- QIN Yong, YE Jianping, LIN Dayang, *et al.* Relationship of coal reservoir thickness and its permeability and gas-bearing property [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2000, 28(1): 24-27.
- [27] 宋岩, 秦胜飞, 赵孟军. 中国煤层气成藏的两大关键地质因素 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 545-553.
- SONG Yan, QIN Shengfei, ZHAO Mengjun. Two key geological factors controlling the coalbed methane reservoir in China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 545-553.
- [28] 王红岩, 万天丰, 李景明, 等. 区域构造热事件对高煤阶煤层气富集的控制 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(5): 364-369.
- WANG Hongyan, WAN Tianfeng, LI Jingming, *et al.* The control of tectonic thermal events on the concentration of high coal-rank coalbed methane [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 364-369.
- [29] 王勃, 李景明, 张义, 等. 中国低阶煤层气地质特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(1): 30-34.
- WANG Bo, LI Jingming, ZHANG Yi, *et al.* Geological characteristics of low rank coalbed methane, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 30-34.
- [30] 秦勇, 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.
- QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, *et al.* Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 48-54.
- [31] 王宇林, 郭强, 赵忠英, 等. 裂陷盆地岩浆活动对煤层气的富集作用: 以辽河、阜新盆地为例 [J]. *天然气工业*, 2009, 29(7): 119-122.
- WANG Yulin, GUO Qiang, ZHAO Zhongying, *et al.* Effects of magmatism on the enrichment of coalbed gas in rifted basins in East China: Examples from the Fuxin and Liaohe basins [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(7): 119-122.
- [32] 张慧, 郑玉柱. 铁法盆地煤变质作用及煤层气生成特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 1999, 27(4): 30-33.
- ZHANG Hui, ZHENG Yuzhu. The coalmetamorphism and coalbed gas generation in Tiefsa Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1999, 27(4): 30-33.
- [33] 马行陟, 宋岩, 柳少波, 等. 构造抬升过程中煤储层吸附能力的耦合效应及控制因素 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 307-313.
- MA Xingzhi, SONG Yan, LIU Shaobo, *et al.* The coupling effect and controls of tectonic uplift on adsorption capacity of coal reservoir [J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 19(4): 307-313.

- [34] 据宜文,王桂梁.煤层流变及其与煤矿瓦斯突出的关系:以准北海孜煤矿为例[J].地质论评,2002,48(1):96-105.
JU Yiwen, WANG Guiliang. Rheology of coal seam sand their relation with gas out bursts [J]. Geological Review, 2002, 48(1):96-105.
- [35] 刘大猛,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 Dameng, LI Junqian. Main geological controls on distribution and occurrence and enrichment patterns of coalbed methane in China. Coal Science and Technology, 2014, 42(6):19-24.
- [36] 王生维,王峰明,侯光久,等.新疆阜康白杨河矿区急倾斜煤层的煤层气开发井型[J].煤炭学报,2014,39(9):1914-1918.
WANG Shengwei, WANG Fengming, HOU Guangjiu, et al. CBM development well type for steep seam in Fukang Baiyanghe mining area, Xinjiang [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9):1914-1918.
- [37] 孙钦平,孙斌,孙粉锦,等.准噶尔盆地东南部低阶煤层气富集条件及主控因素[J].高校地质学报,2012,18(3):460-464.
SUN Qinpings, SUN Bin, SUN Fenjin et al. Accumulation and geological controls of low-rank coalbed methane in Southeastern Junggar Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(3):460-464.
- [38] 王勃,巢海燕,郑贵强,等.高、低阶煤层气藏地质特征及控气作用差异性研究[J].地质学报,2008,82(10):1396-1401.
WANG Bo, CHAO Haiyan, ZHENG Guiqiang, et al. Differences of coalbed methane geological characteristics and gas-controlling function between low rank coal and high rank coal [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10):1396-1401.
- [39] 李景明,王勃,王红岩,等.煤层气藏成藏过程研究[J].天然气工业,2006,26(9):37-39.
LI Jingming, WANG Bo, WANG Hongyang, et al. Research on CBM reservoir process [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9):37-39.
- [40] 刘洪林,李景明,王红岩,等.浅议我国低煤阶地区的煤层气勘探思路[J].煤炭学报,2006,31(1):50-53.
LIU Honglin, LI Jingming, WANG Hongyan, et al. Discussion on finding coalbed methane in low rank coal in China [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1):50-53.
- [41] 徐忠美,叶欣.低阶煤层气成藏条件及主控因素分析[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2011,13(1):10-12.
XU Zhongmei, YE Xin. Reservoir forming conditions and main controlling factors of Low-rank coalbed methane [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 13(1):10-12.
- [42] 申建,杜磊,秦勇,等.深部低阶煤三相态含气量建模及勘探启示:以准噶尔盆地侏罗纪煤层为例[J].天然气工业,2015,35(3):30-35.
SHEN Jian, DU Lei, QIN Yong, et al. Three-phase gas content model of deep low-rank coals and its implication for CBM exploration: a case study from the Jurassic coal in the Junggar Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(3):30-35.
- [43] 伏海蛟,汤达祯,许浩,等.淮南中段煤层气富集条件及成藏模式研究[J].煤炭科学技术,2015,43(9):94-98.
FU Haijiao, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Study on enrichment condition and reservoir formation model of coalbed methane in the middle of the Southern Junggar Basin [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9):94-98.
- [44] 秦勇.国外煤层气成因与储层物性研究进展与分析[J].地学前缘,2005,12(3):289-298.
QIN Yong. Advances in overseas geological research on coalbed gas: Origin and reservoir characteristics of coalbed gas [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):289-298.
- [45] SONG Yan, LIU Shaobo, ZHANG Qun, et al. Coalbed methane genesis, occurrence and accumulation in China [J]. Petroleum Science, 2012, 9(3):269-280.
- [46] 据宜文,李清光,颜志丰,等.煤层气成因类型及其地球化学研究进展[J].煤炭学报,2014,39(5):806-815.
JU Yiwen, LI Qingguang, YAN Zhifeng, et al. Origin types of CBM and their geochemical research progress [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5):806-815.