

高、低煤阶煤层气藏地质特征及控气作用差异性研究

王勃¹⁾, 巢海燕¹⁾, 郑贵强^{1,2)}, 李景明¹⁾, 郭志斌³⁾, 王红岩¹⁾, 刘洪林¹⁾, 李贵中¹⁾

1) 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊, 065007;

2) 中国地质大学(北京)能源学院, 北京, 100083;

3) 陕西省煤田地质局物探测量队, 西安, 710005

内容提要:高、低煤阶煤层气地质特征及控气作用差异性研究是研究煤层气富集成藏的重要组成部分,是煤层气勘探开发理论研究过程中重要的基础性研究领域之一。本文以中国沁水、阜新盆地和美国粉河盆地等典型的含气盆地为例,探讨了高、低煤阶煤层气的储层物性差异,分析了构造控气和水文地质控气作用的差异性。研究表明,高煤阶气藏含气量高,CH₄百分含量高,δ¹³C₁值大于-38.75‰,储层渗透率变化小,储层改造难,构造热事件对煤层气的生成、富集贡献大,持续的水动力使气藏遭到破坏,且破坏幅度大,现今地下水格局对气藏的形成具有一定的影响;低煤阶气藏含气量低,CH₄百分含量低,δ¹³C₁值大于-49.11‰,储层渗透率变化大,储层易改造,煤热演化史及煤阶影响着煤层气的生成、富集,在煤层气生成过程中活跃的水动力是甲烷生成的主要的水文地质条件之一,但持续的水动力使气藏遭到破坏,且破坏幅度小,而合适的地层水矿化度则是低煤阶煤层气生成的重要条件,地下水格局对气藏的调整和改造起到决定性的影响。

关键词:煤阶;煤层气藏;储层物性

据新一轮全国煤层气资源评价结果,我国高煤阶气藏煤层气资源量占煤层气总资源量的30%,低煤阶约占27.2%(王红岩等,2004)。美国、加拿大、澳大利亚等国家煤层气开发的商业性成功得益于对煤层气地质特征、勘探开发理论及技术的正确认识,形成了诸如低煤阶厚煤层低含气量评价方法、高煤阶低渗区局部高产富集带评价方法等基础理论。中国含煤盆地的地质构造背景要比美国复杂的多,多数煤田经历了不同期次、不同性质构造及其组合、应力-应变对煤储层的改造(姜波等,2005)。这些因素造成高、低煤阶煤层在含气量、渗透率、孔隙度等地质特征及构造演化、水文地质对成藏的控制作用上存在着明显的差异性,因此,结合中国煤层气资源按煤阶分布的特征,开展高、低煤阶煤层气藏地质特征及控气作用差异性研究具有非常重要的科学意义。

1 储层物性特征

1.1 含气性

高煤阶煤层气藏含气量一般远远高于低煤阶,

在以高煤阶无烟煤为主的晋城矿区,含气量可达25.13 m³/t[●];在以低煤阶褐煤和长焰煤为主的陕北、铁法、准噶尔、尤因塔和粉河等盆地,煤层含气量最小为4.0 m³/t,最大为11.2 m³/t[●];煤层含气量随煤阶的增高而增大,尤其在低煤阶阶段表现的十分明显,无论是大区或区块均呈现这种趋势,如六盘水盘关向斜(图1,图中每个数据点均是通过4个煤样的解吸数据平均所得)(张建博等,2000)。

1.2 地球化学特征

1.2.1 煤层气组分的差异性

煤层气主要由CH₄、CO₂、C₂+、N₂、H₂S、H₂、He等组成(Karweil,1969;Rice,1993),其中CH₄为最主要的成分。而表征煤层气组分的主要参数为CH₄、CO₂和N₂。

结合大量的煤层气气体组分测试数据,实验气体组分来自我国典型的含煤盆地,主要为高煤阶沁水盆地,中煤阶鄂尔多斯盆地和低煤阶吐哈盆地,样品埋深400~1000 m,代表了不同的变质程度和含煤层位。通过气体组分实验室测试分析,发现CH₄

注:本文为国家重点基础规划“973”项目“煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(编号2002CB211705)资助成果。

收稿日期:2008-05-07;改回日期:2008-08-13;责任编辑:周健。

作者简介:王勃,男,1979年生。硕士,主要从事煤层气地质勘探开发基础研究工作。通讯地址:065007,河北省廊坊市万庄44号信箱,煤层气勘探开发研究所;Email:wangbo69@petrochina.com.cn。

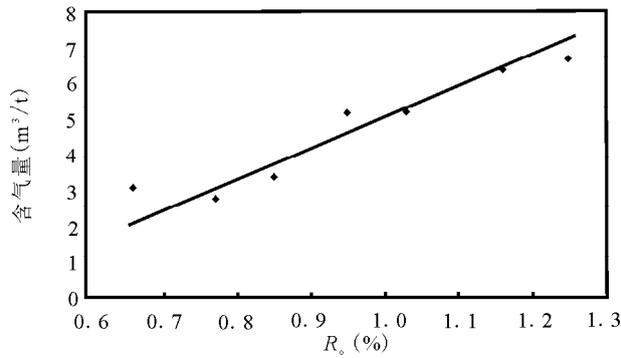


图 1 贵州六盘水盘关向斜煤层含气量与镜质组反射率关系图

Fig. 1 Relationship between gas content and vitrinite reflectance in Panguan syncline, Guizhou

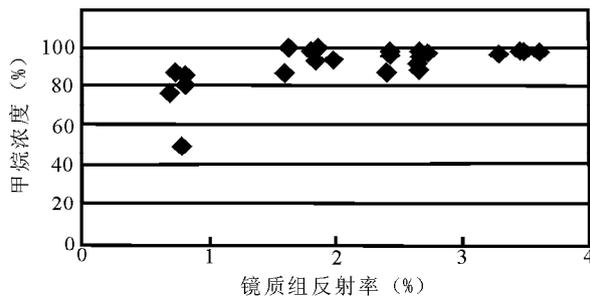


图 2 甲烷浓度与镜质组反射率关系图

Fig. 2 Relationship between methane concentration and vitrinite reflectance

组分含量随煤阶的变化并无明显的差异,一般 CH_4 浓度在 80%~100% 之间(图 2),说明我国煤层气藏中甲烷组分含量较高,具有较好的开发利用前景。随着煤变质程度的增加,甲烷浓度呈离散状态说明两者之间没有明显的相关性。

CO_2 和 N_2 组分含量随煤阶增加几乎没有较为直接的相关性。结合大量的煤层气气体组分测试数据,实验气体组分来自我国典型的含煤盆地,主要为高煤阶沁水盆地,中煤阶鄂尔多斯盆地和低煤阶吐哈盆地,样品埋深 400~1000 m,代表了不同的变质程度和含煤层位。研究表明,在无烟煤($R_0=2.5\%$)处有个界限,煤阶在无烟煤以上, CO_2 和 N_2 浓度较低, CO_2 浓度一般小于 5%, N_2 浓度一般小于 3%;煤阶在无烟煤以下, CO_2 浓度相对较大,一般小于 15%, N_2 浓度也有所增大,一般小于 15%。但对于我国大部分煤岩样品, CO_2 和 N_2 浓度之和低于 20%,未超出风氧化带界限,说明煤层气藏保存较好。

煤层气中 N_2 含量与煤层气保存条件存在着密切联系,当 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $< -55\%$ (生物气的上限值),煤层气

遭到完全破坏,生物作用强烈,生成大量的生物气,煤层气中以生物气为主,空气中 N_2 通过地下水进入煤储层中,导致煤层中 N_2 含量较高,一般要大于 10%;在保存较好的煤层气中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高($> -45\%$), N_2 含量较低,一般低于 5%(胡国艺等,2004)。

1.2.2 甲烷碳同位素的差异性

由于高、低煤阶煤层气具有不同的成因类型,而这些成因类型在形成时间、生成温压、母质和生气机理等方面的差异,导致煤层气甲烷碳同位素存在较大差异(Galimov,1980;李明宅等,1998;张建博等,2000)。

对不同煤阶的沁水、鄂尔多斯、准噶尔、吐哈、阜新等 5 个典型盆地 72 个煤层气样品的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 实验测试值进行系统分析,发现高煤阶煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于 -34.80% ~ -28.70% ;中煤阶煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于 -61.80% ~ -34.20% ;低煤阶 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值介于 -62.00% ~ -55.60% 。且 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R_0 之间存在着明显的对数关系(图 3,利用实验室甲烷碳同位素实测数据绘制而成),其数学表达式为:

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 7.687\ln(R_0) - 45.797 \quad r = 0.7228$$

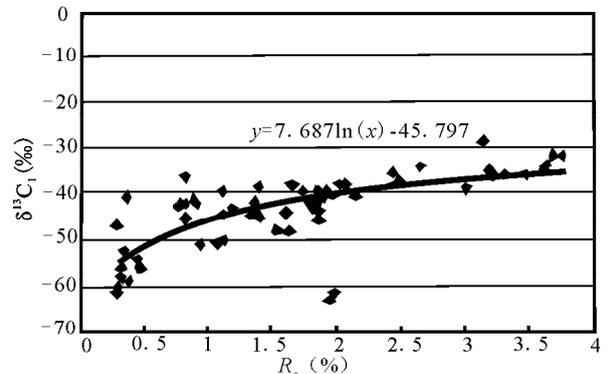


图 3 煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R_0 之间的相关性

Fig. 3 Relationship between methane isotope and vitrinite reflectance

根据以上关系式,可以获得不同煤阶煤层气在各个演化阶段的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值(表 1)。从而来判识煤储层的演化阶段和煤层气成因类型。结合 $\delta^{13}\text{C}_1$ 实测值与经验判识范围,认为高煤阶煤层气属于典型的热成因气;中煤阶煤层气主要为混合成因气;低煤阶主要为生物成因气(李晶莹等,1998;王勃等,2006)。

显然,该数学式只是在实验室测试数据汇总的基础上得到的各个盆地 $\delta^{13}\text{C}_1$ 随 R_0 的演化总体变化的趋势,对于某一个盆地而言,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R_0 之间的相关性则不一定表现出这样的规律。

表1 不同演化阶段煤层气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 分布范围表
Table 1 The $\delta^{13}\text{C}_1$ distribution of coalbed methane
in different coal rank

煤岩演化阶段	煤层气主要类型	R_o (%)	$\delta^{13}\text{C}_1$ (‰)
低煤阶	生物成因气	<0.65	<-49.11
中煤阶	生物气-热成因气	0.65~2.50	-49.11~-38.75
高煤阶	热成因气	>2.50	>-38.75

1.3 渗透性

(Harpalani et al., 1990)通过实验,进一步就有有效应力、气体滑移、体积应变等因素对煤样渗透率变化的影响程度进行研究。结果表明,在压力从 6.12 MPa 降低到 0.17 MPa 的过程中,煤样渗透率总体上增大了 17 倍,其中体积应变影响占 12 倍,气体滑移效应影响占 5 倍。

煤层气的降压会引起煤储层的基质收缩效应,而由于孔径结构的差异,低煤阶煤以基质型孔隙类型为主,降压条件下煤岩以体积应变效应为主,其次为气体滑移效应;高煤阶以割理裂隙型为主,降压条件下煤岩以气体滑移效应为主,其次为体积应变效应。表明高煤阶煤储层渗透率的改造较低煤阶难。因此,在煤层气开发过程中相同的降压幅度下,高煤阶煤层气储层渗透率变化小,排水降压困难,大部分煤层气难于解吸(傅雪海等,2004);低煤阶储层渗透率变化大,储层改造易,初期单井日产量高,生产周期短。我国沁水盆地南部樊庄区块蒲 1-X 井排采时间为 423 d,单井平均产量 2475 m^3/d 。我国东北阜新煤田刘家区煤层气田是以长焰煤为主要煤质的低煤阶煤层气藏,煤层气生产井 LJ-X 井在 2001 年 12 月 8 日~2002 年 4 月 5 日间进行井网排水采气试验,历时 119 d,平均产气量为 3081.92 m^3/d 。这些排采数据在一定程度上验证了高、低煤阶渗透率的差异性理论。因此,在高煤阶煤层气开发过程中,要求在尽量减小储层破坏的基础上进行持续排水降压开采,实施大型压裂,如利用多分支水平井开采技术;在低煤阶煤层气开发过程中,排水降压幅度较高煤阶要小,在高渗透区块可利用自卸压效应来进行开发,例如采用裸眼洞穴完井技术。

2 构造背景及演化对成藏控制的差异

2.1 区域构造特征

区域构造通过对煤层形成、埋藏史、受热史、变形史和空间赋存状态的控制作用,对煤层气的生成、保存、富集和开发条件产生影响。

中国含煤盆地的基底有地台、褶皱带和中间地

块 3 种类型。中间地块位于褶皱带内,是褶皱带的组成部分,但其基底与地台相似,发育于其上的含煤盆地与真正的褶皱之上的含煤盆地构造特征不同,故归一类。高煤阶含煤盆地为典型的地台型基底含煤盆地,其特点是构造稳定,聚煤作用发育,煤炭资源赋存条件简单,储量丰富,煤层气资源赋存丰富,是煤层气勘探开发的主要对象之一。低煤阶含煤盆地则属于中间地块型含煤盆地,该类型盆地处于不同时期的褶皱带内或周边被褶皱带所环绕,具有构造条件变化较大,从简单构造到褶皱、断裂较发育,煤层气资源受煤的热演化史和煤阶影响变化大等特点(叶建平等,1998)。

2.2 构造热事件

从古地温场、热史和生烃史的演化来看,我国绝大部分低煤阶和美国的低煤阶含煤盆地的煤变质作用以深成变质作用为主,而我国大部分高煤阶含煤盆地除了印支期的深成变质作用外,在燕山期普遍经历了异常构造热事件(杨起,1996)。

构造热事件加快了煤层的变质作用,使得煤层气的产出率随煤阶提高而提高。距侵入体不同远近的煤体,在岩浆侵入的热力作用下发生二次成气,即“叠加生烃”或“叠加成气”(杨起等,2000;张振文等,2002),促进煤层大量生烃,为煤层气藏的形成提供了丰富的气源。从沁水盆地生气量曲线图(图 4)可以看出,在燕山期经历过岩浆活动的阳泉和晋城地区的生气量远远大于岩浆未入侵的地区,如东部潞安矿区在晚侏罗世一早白垩世生气量增加的幅度很少,生气量也仅为 40 m^3/t 。中国沁水盆地煤层的含气量在 15~26 m^3/t ^①,美国黑勇士盆地石炭系煤层的含气量为 10~13 m^3/t ^②,二者相比沁水盆地煤层的含气量相对高出 5~13 m^3/t 。这表明晚侏罗世一早白垩世构造热事件对促进二次生气起了重要作用。

岩浆侵入活动产生的高温环境,一方面,增大了煤层中微观孔隙和宏观孔隙的数量,增强了煤储层的吸附能力;另一方面,当在煤层生气量大于吸附能力时,会在煤层基质中产生由里向外突破的压力,促进了裂隙的形成,促进基质中原始裂隙的继续发展,从而提高了煤层的导流能力。

深成变质成因的美国黑勇士盆地煤层 R_o 在 0.8%~1.4% 之间,埋深 500~800 m 的煤层渗透率在 $1 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。可以推测,当其 R_o 达到中国沁水盆地煤层 R_o 的 2.5%~3.5% 时,渗透率应该在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下^③,而据沁水盆地煤层渗透率实测资料显示,该区煤层的渗透率

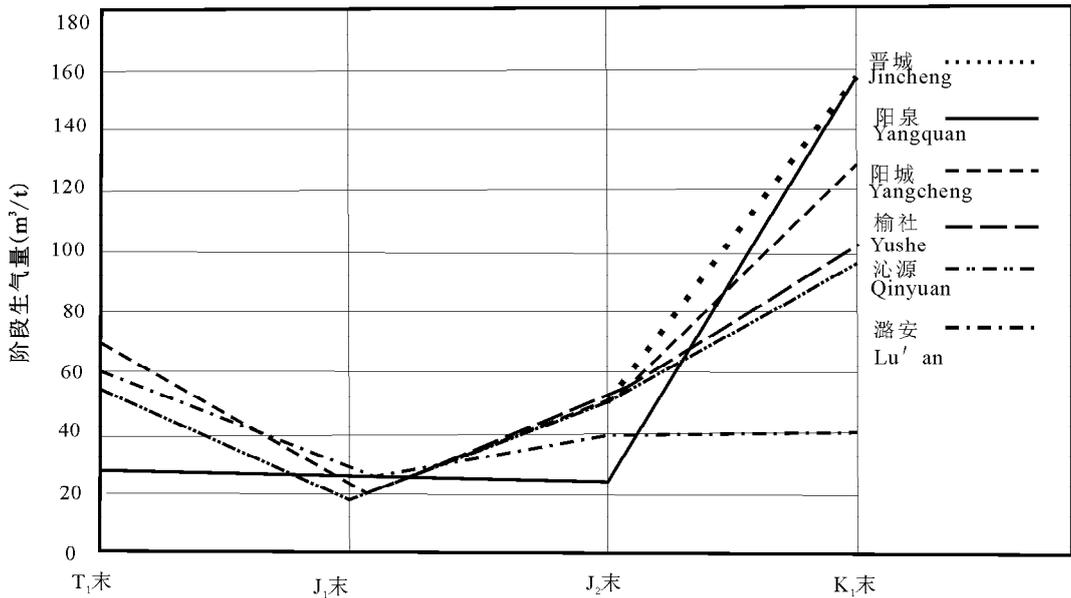


图 4 沁水盆地阶段生气量图

Fig. 4 The methane production of in mifferent stage of Qinsui basin

基本在 $1 \times 10^{-3} \sim 0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,这与构造热事件对该盆地煤层物性的改造是分不开的(王红岩等,2004)。

3 水文地质控气作用的差异性

由于高、低煤阶煤层气成因的差异性,导致了水文地质条件对煤层气生成及保存控制作用的差异性。低煤阶煤层气的水文地质条件不仅影响着煤层气的生成,也对煤层气的保存有重要影响;高煤阶煤层气藏的水文地质控气作用则体现在对煤层气的保存上。

3.1 煤层气生成

低煤阶煤层气主要以生物气成因为主(Scott, 1993),在煤层气生成过程中活跃的水动力是甲烷生成的主要地质营力,而合适的地层水矿化度则是低煤阶煤层气生成的重要条件。水动力携带产甲烷菌运移到所含的氧、硝酸盐和绝大部分硫酸盐被还原之后的介质当中,甲烷菌才能生长并生成(王勃等, 2007a)。Bryant(1979)认为甲烷菌只有在氧化还原电位小于 -330 mV 的严格厌氧条件下才能生存,最适宜的氧化还原电位值为 $-540 \sim -590 \text{ mV}$ 。大量的模拟试验表明:①甲烷菌产甲烷最适宜的温度为 $36 \sim 42^\circ\text{C}$ 。②甲烷菌的代谢受水介质 pH 值的制约,最合适的 pH 值是 $7.0 \sim 7.2$ 。pH 值在 6.2 以下,大部分甲烷菌停止生长或不产甲烷;pH 值接近 8.8 时, CO_2 的溶解度接近 0 ,大部分甲烷菌不能

生存。③地层水的矿化度对低煤阶煤层气成藏也有重要影响。据测定,水介质盐度小于 $0.4 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 时,甲烷菌最活跃,产气率最高,盐度太高或太低对甲烷菌的生长发育都不利。另外,随着地层水盐度的增加,天然气溶解度明显降低(李本亮,2003)。而且,从地下水化学场模拟实验可以看出,高矿化度不利于煤层气的生成和保存,最终造成了低煤阶煤储层吸附能力的降低。

国内学者利用甲烷菌开展了低煤阶煤层气成藏物理模拟实验,证实了在我国西北伊犁地区存在大量的产甲烷菌,也证实了该地区存在大量的低煤阶煤层气资源(刘洪林等,2006)。

3.2 煤层气保存

模拟实验表明,低煤阶以游离和吸附气为主,水动力作用为溶解、水中有机质对甲烷的吸附和携带游离气的运移;高煤阶煤层气主要以吸附状态为主,在水力冲洗作用下,水对气体的主要作用是溶解,溶解气会被水力运移带走;“溶解—运移—再溶解—再运移”的过程持续发生。直至煤层气藏遭到破坏(王勃等,2007b)。

现今的地下水格局对高煤阶煤层气藏的影响主要体现在与含气量的关系上,研究表明,水径流强度与煤储层含气量具有一定的负相关性。以沁水盆地为例,沁水盆地南部从盆缘到盆地深部,水动力条件不断减弱(傅雪海,2001),煤层含气量则呈现不断增大的趋势。

现今的地下水的补给、运移、排泄和滞流对低煤阶煤层气藏的调整和改造起着决定作用(李景明等, 2006), 是控制煤层气成藏的关键。美国粉河盆地为典型的低煤阶盆地, 地下水沿含水层向西或向北流动, 在上下页岩的封闭或顶板网络状渗滤形成的水力封堵作用下, 对煤层气藏形成水动力封闭。煤层气藏从煤层的形成直至现今都有气的生成, 都对煤层气藏的气体组分和同位素特征有影响。

4 结 论

结合高、低煤阶煤层气藏地质特征及主控因素的差异性, 认为高、低煤阶煤层气藏的优势的差异性主要表现在: 高煤阶煤生气量大, 含气量高; 构造热事件促进煤层气大量生成, 改善了储层物性; 滞流水和高矿化度区域煤层气保存条件好, 有利于煤层气保存; 多利用多分支水平井来提高煤层气产量。低煤阶在活跃的低矿化度的水动力条件下易携带甲烷菌形成生物成因的煤层气藏, 如有外来气源的补给, 可形成多气源煤层气藏, 开发过程中可能取得较原地资源量更高的煤层气累计产量; 煤储层基质疏松, 储层渗透率高且易改造, 易于降压解吸采气; 多利用裸眼洞穴完井来提高煤层气产量。

注 释

① 王红岩, 等. 2007. 晋城矿区含气量测试报告.

② 赵庆波, 等. 2000. 赴美煤层气考察报告.

参 考 文 献

傅雪海. 2001. 沁水盆地中—南部水文地质控气特征. 中国煤田地质, 13(1): 31~34.

傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 2004. 高煤级煤储层煤层气产能“瓶颈”问题研究. 地质论评, 50(5): 507~511.

胡国艺, 关辉, 蒋登文, 等. 2004. 山西沁水煤层气田煤层气成藏条件分析. 中国地质, 31(2): 213~217.

姜波, 秦勇, 琚宜文, 等. 2005. 煤层气成藏的构造应力场研究. 中国矿业大学学报, 34(5): 564~569.

李本亮. 2003. 地层水盐度对生物气运聚成藏的作用. 天然气工业, 23(5): 16~20.

李晶莹, 陶明信. 1998. 国际煤层气组成和成因研究. 地球科学进展, 13(5): 467~473.

李景明, 王勃, 王红岩, 等. 2006. 煤层气成藏过程研究. 天然气工业, 26(9): 37~39.

李明宅, 张辉. 1998. 煤的厌氧降解产气作用. 天然气工业, 18(2): 10~12.

刘洪林, 王红岩, 李景明, 等. 2006. 低煤阶煤层气的成藏模拟实验研究. 见: 中国煤炭学会煤层气专业委员会编. 中国煤层气勘探开发利用技术进展. 北京: 地质出版社, 197~199.

王勃, 姜波, 王红岩, 等. 2006. 高低煤阶煤层气成因对比研究. 天然气工业, 26(增刊 A): 40~41.

王勃, 姜波, 王红岩, 等. 2007a. 低煤阶煤层气藏水文地质条件的物理模拟研究. 煤炭学报, 32(3): 258~260.

王勃, 李谨, 张敏. 2007b. 煤层气成藏地层水化学特征研究. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 29(5): 66~68.

王红岩, 刘洪林, 赵庆波, 等. 2004. 中国煤层气富集成藏规律. 北京: 石油工业出版社, 88~90, 98~101.

杨起, 汤达祯. 2000. 华北煤变质作用对煤层含气量和渗透率的影响. 地球科学—中国地质大学学报, 25(3): 273~278.

杨起. 1996. 中国煤变质作用. 北京: 煤炭工业出版社, 5~25.

叶建平, 秦勇, 林大扬. 1998. 中国煤层气资源. 徐州: 中国矿业大学出版社, 8~15.

张建博, 王红岩, 赵庆波, 等. 2000. 中国煤层气地质. 北京: 地质出版社, 24~25.

张振文, 蒋福兴, 王慧敏. 2002. 岩浆活动对煤层气成藏的作用. 中国煤炭, 8: 35~38.

Bryant M P. 1979. Microbial methane production — theoretical aspects. JWPCF, 48: 193~201.

Galimov E M. 1980. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in kerogens. In: Durand B, ed. Kerogen. Paris: Technip, 198~211.

Harpalani S, Shraufnagel R A. 1990. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal. Fuel, 69: 551~556.

Karweil J. 1969. Aktuelle problem der geochemie der kohle. In: Schenk P A, Havarnaar I, eds. Advances in Geochemistry. Oxford: Pergamon Press, 59~84.

Rice D D. 1993. Composition and origins of coalbed gas. In: Law B E, Rice D D, eds. Hydrocarbons from Coal. AAPG Studies in Geology 38, Tulsa, OK, 159~184.

Scott A R. 1993. Composition and origin of coalbed gases from selected basins in the United States. In: Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium, 209~222.

Differences of Coalbed Methane Geological Characteristics and Gas-Controlling Function between Low Rank Coal and High Rank Coal

WANG Bo¹⁾, CHAO Haiyan¹⁾, ZHENG Guiqiang^{1,2)}, LI Jingming¹⁾, GUO Zhibin³⁾,
WANG Hongyan¹⁾, LIU Honglin¹⁾, LI Guizhong¹⁾

1) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development (Langfang Branch), CNPC, Langfang, Hebei, 065007;*

2) *Energy Resources School, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

3) *Geophysical Exploration Team of Shaanxi Coal Geology Bureau, Xi'an, Shaanxi, 710005*

Abstract

The differences of Coalbed Methane (CBM) geological characteristics and gas-controlling function between low rank coal and high rank coal, which is an important portion of the CBM reservoir research and the CBM development and exploration theory research. Based on some CBM basins, such as Qinshui, Fuxin and Power River Basin in America, physical property differences of reservoirs between high and low coal ranks were discussed, gas-controlling differences between structure and hydrologic geology were analyzed. The reservoirs with the high rank coal have high gas content, with $\delta^{13}\text{C}_1$ value over -38.75% , poor permeability. Reservoir reformation is difficult. Tectonic thermal event contributes mainly to CBM generation and enriching. Everlasting hydrodynamic force would destroy CBM reservoir seriously. The reservoirs with the low rank coal have low gas content, with $\delta^{13}\text{C}_1$ value $< -49.11\%$, good permeability. Reservoir reformation is comparatively easy. CBM generation and enriching are influenced by coal thermal evolution history and coal rank. During the CBM generating process, stirring hydrodynamic force is taken as the main geological agent, but everlasting hydrodynamic force would destroy CBM reservoir slightly, and proper formation water salinity is an important factor of low rank CBM generating.

Key words: coal rank; coalbed methane (CBM) reservoir; physical property