文章编号: 1000-0550(2008) 03-0426-09

阜新盆地白垩系沙海组煤层气系统①

朱志敏[1, 2] 韩 军[3] 路爱平[4] 罗丽萍[2] 周家云[2]

(1 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都 610059; 2 中国地质科学院矿产综合利用研究所 成都 610041;
3 辽宁工程技术大学资源与环境工程学院 辽宁阜新 123000; 4 东北煤田地质局 107勘探队 辽宁阜新 123000)

摘 要 煤层气系统研究能有效地指导煤层气勘探和开发。运用非常规含油气系统的理论和方法, 研究了阜新盆地沙海组煤层气地质特征。沙海组三段煤层是研究区煤层气的生储层; 沙海组四段泥岩、泥质粉砂岩作为沙海组三段煤层气的盖层, 是良好的区域性盖层; 上覆岩层是沙四段泥岩和阜新组地层; 由于喜山期辉绿岩的侵入, 沙海组煤层在古近纪末出现生气高峰, 另外, 后期盆地抬升, 地下水作用带入细菌导致煤层产生大量次生生物气; 此后, 煤层气进入保存阶段, 煤层气系统的关键时刻是古近纪末。以上表明, 盆地东梁区白垩系沙海组煤层适合进行煤层气勘探和开发, 有望成为煤层气勘探开发的接续区域。

关键词 煤层气系统 白垩系 沙海组 阜新盆地

第一作者简介 朱志敏 男 1978年出生 博士研究生 矿物学岩石学矿床学 E-mail: weah0500@163.com

中图分类号 P618.11 文献标识码 A

0 引言

含油气系统提出以来, 它在石油天然气领域减少风险、降低成本、提高勘探效益方面起着越来越重要的作用。近年来, 随着对能源需求的增长, 人们将目光投向非常规油气资源, 非常规含油气系统的研究逐渐引起人们的注意[1~6]。Ayers系统总结了北美洛基山造山带圣胡安盆地和粉河盆地煤层气系统特征[6]; Su等将煤层气系统思想成功应用到沁水盆地, 建立了沁水盆地煤层气系统并划分有利区块[7]; 通过以上研究认识到煤层气作为一种非常规天然气, 其生—储—运—聚都有别于常规油气, 煤层气系统也与常规含油气系统有所区别[6~8]。尽管如此, 煤层气系统研究仍相对薄弱, 尤其对于构造—沉积特征复杂的中国东部中新生代含煤盆地[9], 煤层气系统有其不同于构造—沉积相对简单的北美和华北沁水盆地煤层气系统的特殊性, 其研究有待深入。阜新盆地作为我国重要的煤炭基地, 煤层气地质工作开展较早。“六五”和“八五”期间, 盆地相继进行了煤层气国家科技攻关项目, 而后, 国家计委、东北煤田地质局、辽河石油管理局、美国煤层气(CBM)能源集团、阜新矿务局等国内外单位均在这里开展过煤层气勘探开发研究。目前, 盆地刘家区施工 11口煤层气井均获工业气流, 为阜新市提供日产气量 $2.0\times10^4\ m^3$以上的居民生活用气, 已成功进行商业开发。随着王营—刘家区煤层气勘探开发成功, 人们开始考虑盆地煤层气的接续区域, 于是将研究重点转向盆地煤层气资源比较丰富的东梁区沙海组煤层, 并获得不少新的认识。

1 地质概况

阜新盆地构造大致经历了三个发育阶段[10], 即盆地初始裂陷期——义县期; 盆地快速裂陷期——九佛堂、沙海、阜新组沉积期; 盆地收缩期——孙家湾期。阜新盆地沙海组沉积期后发生过两期岩浆活动, 一是阜新期末基性火山活动[11], 中心式喷发为主, 该期火山喷发活动局限, 喷发产物绝大部分已剥蚀殆尽, 仅在阜新北部碱锅地区残留一些火山通道相, 其喷发年龄约为 100.4 Ma; 二是古近纪辉绿岩侵入活动[12], 以岩床和岩墙方式沿东西向和北东向侵入盖层顶部孙家湾组, 且被新近纪更新世沉积物覆盖, 埋深在 100~200 m, 最深 600~800 m, 全盆地均有分布, 该期岩浆沿盆地内先存东西向和北东向断裂侵入沉积盖层。

东梁区位于阜新盆地中南部的东梁构造带, 面积约 40 km^2(图 1)。本区地层以太古界、元古界变质岩系为基底, 之上沉积了下白垩统义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组、孙家湾组及新近系更新统(图 2), 其中阜新组和孙家湾组遭受不同程度剥蚀, 在西北部沙海

①国家基础研究发展规划项目(编号: 2005cb221501)和中国地质调查局地调项目(编号: 1999100103 11)资助。
收稿日期: 2007-07-02 收修改稿日期: 2007-10-08

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组部分也出露地表。沙海组按其岩性特征由下而上分为四个段: 沙海一、二砂砾岩段, 夹泥岩和粉砂岩, 地层厚度 300 m左右; 沙海组三段含煤砂岩段, 主要为砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩和煤层互层, 地层厚度 500 m 左右; 沙海组四段泥岩段, 主要为暗色泥岩和粉砂岩, 厚度 400~ 700 m, 该段地层具有岩性细、厚度大、层位稳定等特点。

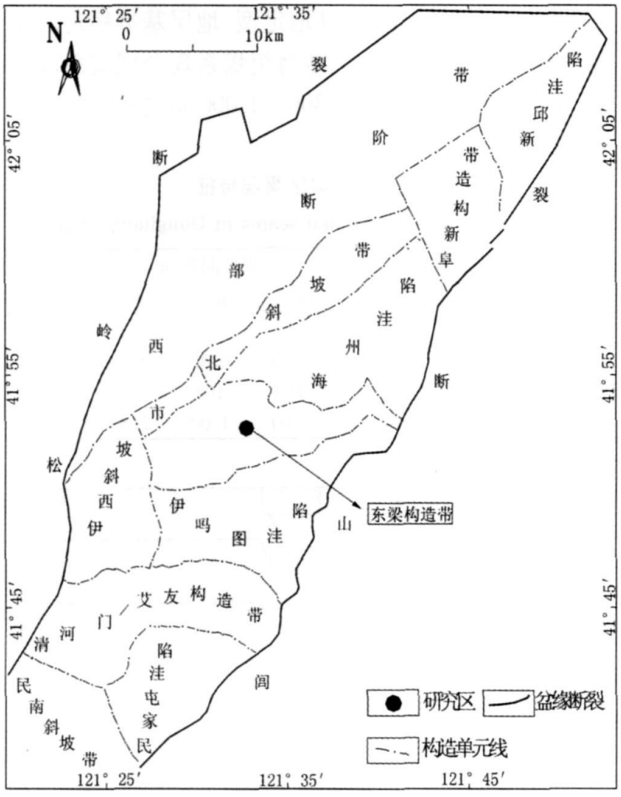

图 1　阜新盆地构造区划

Fig 1　The tectonic division in the Fuxin Basin

2　煤层及其生气

2 1　沉积环境及煤层

前人对于阜新盆地沙海组沉积环境研究比较深入[9], 认为: 阜新盆地演化进入早白垩世沙海沉积期, 出现短期的干旱型冲积扇—扇前干旱地、潮湿型冲积扇—扇前和扇间冲积谷地环境, 进而沉积了沙海组一、二段地层; 而后, 盆地两侧不断向外扩展, 盆地明显加宽, 盆缘又不断向盆内供应碎屑物质, 沉积了以扇三角洲体系为主的沙海组三段含煤建造; 至沙海组晚期, 盆地扩展到最大范围, 水域最广, 水体最深, 沉积了沙海组四段湖相沉积 (图 2)。

如表 1和图 3, 研究区沙海组可采煤层 4层, 即 1~ 4, 1~ 5, 3~ 1, 3~ 2层。以 1~ 5层为主要可采层,

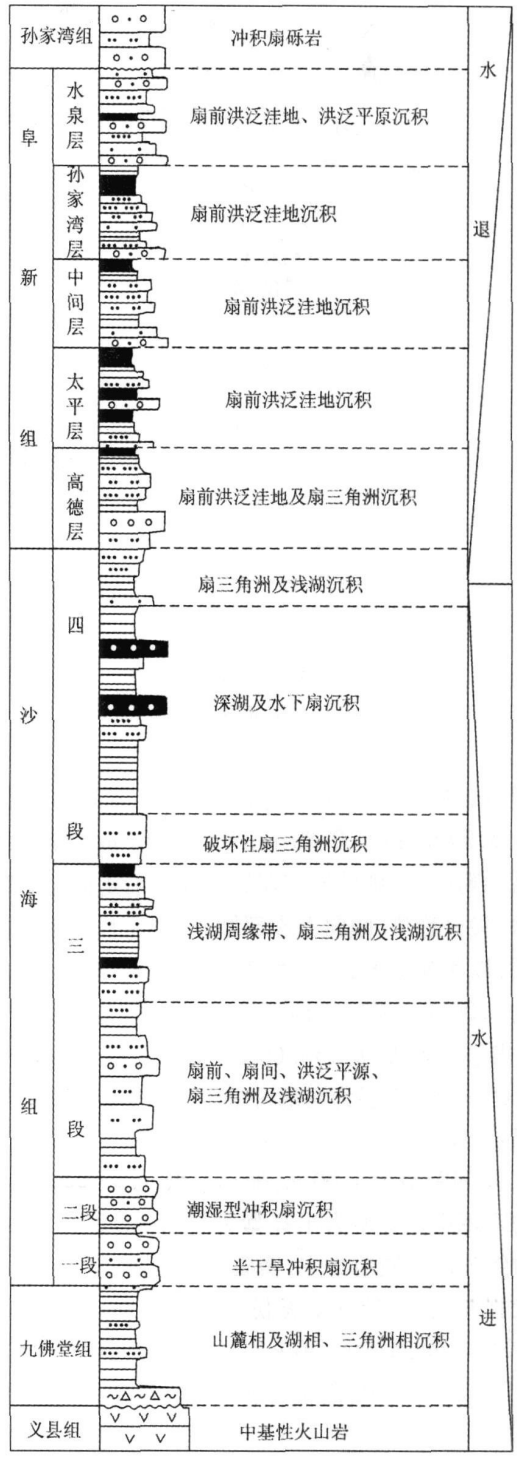

图 2　阜新盆地沉积环境及充填序列

Fig 2　Sedimentary environment and strata sequences in the Fuxin Basin

其他三层为局部可采层。1~ 4层为局部可采, 以薄至中厚煤层为主, 最大厚度 2 58 m, 最小 0 83 m, 平均 1. 45 m。煤层顶底板岩性为粉砂岩和泥岩。1~ 5层为全区可采层, 以中厚煤层为主, 最大厚度 4 13 m,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

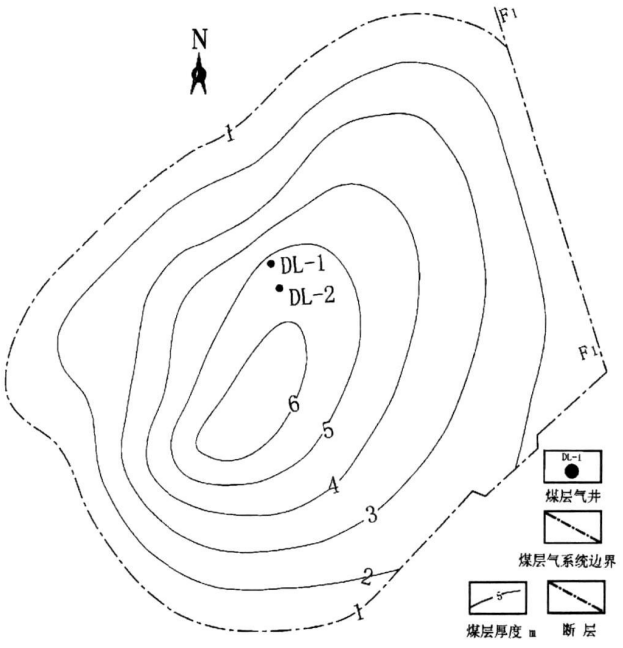

图 3 沙海组 1煤组等厚图

Fig. 3 Thickness contours of the No. 1 coal seam group

最小 0.84 m, 平均 2.32 m, 。与 1~4层间距最大 5.00 m, 最小 0.80 m, 平均 3.50 m。煤层顶板岩性为粉砂岩、细砂岩和泥岩。煤层沿走向上呈逐渐变薄、尖灭趋势, 倾向上深部增厚。3~1层为局部可采层, 以薄煤层为主, 最大厚度 1.47 m, 最小 0.81 m, 平均 1.00 m。煤层结构简单, 以单一煤层为主。与 1~5煤层间距最大 150.00 m, 最小 100.00 m, 平均 120.00 m。3~2层为局部可采层, 以薄至中厚煤层为主, 最大厚度 2.59 m, 最小 0.86 m, 平均 1.65 m。与 3~1层间距最大 4.00 m, 最小 1.00 m, 平均 2.50 m。煤的宏观煤岩类型为半亮型为主, 光亮型次之; 有机显微组分以镜质组为主, 惰质组次之, 壳质组最少, 显示较强的生气能力; 灰份含量高, 在 28.36% ~41.03% 之间, 水分 0.50% ~3.5% 之间, 硫份 0.84% ~4.2% 之间; 无机显微组分在油浸反射光下观察主要以石英及粘土矿物为主, 黄铁矿及方解石脉次之。镜煤最大反射率在 0.67~1.51% 之间, 从煤的变质规律来看, 西部以区域变质作用为主, 煤类为长焰煤和气煤; 东部由于古近纪岩浆侵入显示热力变质作用[12], 煤类为气煤、肥煤、1/3焦煤和焦煤, 东部煤变质程度远远高于西部。

2.2 埋藏史和热史

研究区沙海组煤层经历了 3个演化阶段 (图 4): 阶段Ⅰ为沉降阶段, 从白垩纪沙海期到孙家湾期, 平均沉降速度为 66.1~74.8 m/Ma, 其中沙海期沉降速度为 74.8 m/Ma, 沉降深度达到 299.61 m, 而阜新期到孙家湾期沉降缓慢, 沉降速度为 66.1 m/Ma, 沉降深度达到 1 231 m; 阶段Ⅱ为隆升阶段, 从白垩纪孙家湾期末到古近纪, 由于晚燕山运动的影响, 盆地地层大规模的隆升而遭受剥蚀, 盆地最大隆升超过 1 000 m, 平均在 500~1 000 m 之间; 阶段Ⅲ为相对稳定阶段, 从古近纪延续至今, 盆地定型, 地层基本稳定。在盆地构造—沉积控制下, 沙海组煤系现今埋藏深度均在 1 000 m以内, 一般在 300~1 000 m之间。

表 1 东梁区煤层特征

Table 1 Features of coal seams in Dongliang area

层位	煤层厚度 /m			煤层间距 /m			灰份 /%
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	平均
1~4	2.58	0.83	1.45				41.03
1~5	4.13	0.84	2.32	5.00	0.80	3.50	36.55
3~1	1.47	0.81	1.00	150	100	120	28.36
3~2	2.59	0.86	1.65	4.00	1.00	2.50	28.43

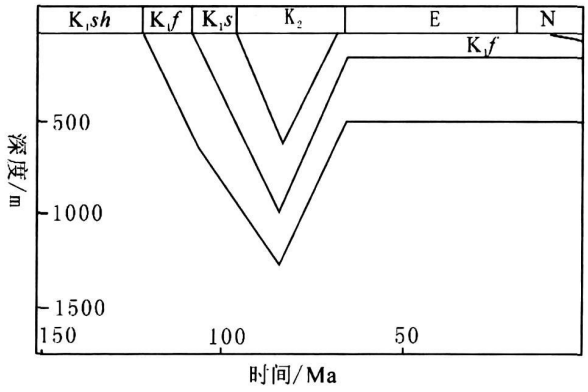

图 4 阜新盆地沙海组煤层气系统埋藏史

Fig. 4 Burial history diagram of Sahai Formation coalbed methane system in Fuxin Basin

沙海组含煤地层的热史可划分为 3个阶段: 阶段Ⅰ从白垩纪沙海期到孙家湾期末, 盆地经历先陷后升, 但古地温场基本保持一致, 地温梯度在 3.45 ℃/100m左右, 沙海组煤层镜质体反射率在 0.50% ~0.65%之间, 沙海组煤层在孙家湾期末达到最高热演化程度, 镜质体反射率达到 0.65%, 此时埋藏深度也最大 (1 400 m), 据 Meissner研究[13], 煤层热成因气大量生成始于 R_o约 0.74%, 故此阶段沙海组煤层生气量有限; 阶段Ⅱ, 从孙家湾期末到古近纪, 喜山期辉绿岩侵入煤层, 导致古地温异常, 地温梯度在 5~7 ℃/100m, 靠近辉绿岩侵入部位, 煤层变质程度大大

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

提高, 镜质体反射率最高达到 4.95%, 东梁区平均镜质体反射率 0.67% ~ 1.51%[14], 此阶段, 由于辉绿岩侵入, 煤层二次生气, 达到生气高峰; 阶段 III, 从古近纪到现今, 盆地基本稳定, 岩浆侵入结束, 古地温恢复正常, 为 3~ 3.6℃ /100m[15], 沙海组煤层保持现今状态, 煤化作用停止, 但是由于煤层埋藏较浅, 地下水以大气降水补给为主, 地下水下渗带入细菌, 使煤层次生生气。

2.3　煤层气地球化学特征

研究区煤层气组分气样均取自一煤组, 三煤组由于煤层薄而未采样。如表 2, 煤层气主要由甲烷、氮气、二氧化碳和乙烷组成, 甲烷含量在 90.0672% ~ 92.5750% 之间, 平均 91.32%; 氮气含量在 6.5126 ~ 9.0367% 之间, 平均 7.77%; 二氧化碳含量在 0~ 1.4913% 之间, 平均 0.746%; 乙烷微量, 平均 0.048%, 干燥系数达到 1 000以上。从测试数据看, 本区甲烷含量较高, DL1井甲烷随深度增加, DL2井甲烷含量在纵向上变化趋势不明显; 氮气含量较高, 且与二氧化碳、甲烷含量负相关, 可能是由于煤层解吸气样受空气混入影响所致。研究区煤层气的甲烷碳同位素在 -53.20% ~ -58.00% 之间, 平均 -56.33%, 其成因是次生生物—热解混合气[16]。

表 2　阜新盆地沙海组煤层气组分

Table 2　Composition of Sahai Formation coalbed methane in the Fuxin Basin

样品号	气体组分			
	CH_4	CO_2	N_2	C_2H_6
DL1-1	90.0672	0.8961	9.0367	0.000
DL1-2	91.3628	0.7850	7.8522	0.000
DL1-3	92.5750	0.6117	6.8133	0.000
DL1-4	91.0656	0.0000	8.9344	0.000
DL1-5	91.2824	0.5333	8.1843	0.000
DL1-6	92.5484	0.5359	6.9157	0.000
DL2-1	91.9961	1.4913	6.5126	0.000
DL2-2	92.1743	1.1155	6.7102	0.000
DL2-3	92.2562	1.0982	6.6456	0.000
DL2-4	90.3485	0.0000	9.6515	0.0922
DL2-5	91.1496	0.0000	8.8313	0.0665
DL2-6	91.1687	0.0000	8.8313	0.0665

2.4　煤层气生气机理

目前流行的两种煤层气生成机制为: 生物成因和热成因[17], 生物气成因煤层气可进一步分为原生生物气和次生生物气[17~19]。

沙海组煤层埋藏最深也仅 1 400 m, 深成变质作用对煤层生气影响有限, 而现今煤层含气性较好 (含气量 9.73~ 10.6 m^3 /t之间), 原因有三: 一是次生生物气的加入: 煤层气的组分、同位素、热演化程度及构造特征等研究表明, 研究区有大量生物成因气存在[16]。阜新盆地具有高沉积速率特点[20] ——义县组为 570 m / Ma, 九佛堂组为 101.8 m / Ma, 沙海组为 152.9 m / Ma, 阜新组为 444.4 m / Ma, 这种高沉积速率不仅提供了巨厚的气源岩, 而且使沉积有机质避免了浅表层大量分解, 为后期次生生物气的形成创造有利物质条件; 盆地地层水水型为 $NaHCO_3$型, 而且矿化度较大, 如梁 2井 800~ 900 m井段矿化度为 5 000~ 12 100 mg /L[21], 表明有利于形成滞流高盐度地下水环境, 盐度较高的水体环境一方面阻止了沉积有机质在浅埋阶段的过早氧化和分解, 另一方面, 也有效的抑制了甲烷菌对沉积有机质的分解作用而减缓原生生物气的生成; 盆地地下水以大气降水补给为主, 这非常有利于先期形成的煤层在构造抬升并剥蚀到近地表, 含菌地表水下渗灌入煤层, 在相对低的温度下, 使煤化过程中产生的湿气、正烷烃及其它有机物经细菌降解和代谢作用而生成次生生物气而大量保留下来[17, 22]。同时, 盆地早期生成的原生生物成因煤层气生成量有限, 且由于原生生物气的形成环境距地表较近, 形成的气体易通过岩石孔隙而导致扩散散失, 即使保存到孙家湾期, 也由于构造抬升而散失。因此, 现今保存下来的生物气主要是次生生物成因气, 原生生物气所占分额甚小; 二是岩浆活动导致的二次生气: 由于深变质最多形成长焰煤, 与实际变质程度相差甚远, 我们推测沙海沉积期后的两期岩浆活动可能是研究区煤层生气的主要热动力来源。考虑到阜新期末岩浆活动局限 (现今仅在阜新北部碱锅地区发现), 而古近纪岩辉绿岩在研究区广泛分布, 因此我们认为古近纪岩辉绿岩侵入应是煤层生气的最主要热动力来源, 这也与 Cooper等对 Raton盆地岩浆侵入活动促进煤层生气的研究一致[23]。岩浆为地下深处高温高压富含挥发性组分的硅酸盐熔融体, 岩浆活动对煤层产生接触变质和区域热力变质作用。在温度和压力的作用下, 煤的分子组成发生变化, 芳香族稠环的缩合程度提高, 烷基侧链及含氧官能团脱落分解, 煤的物理化学性质发生改变, 镜质组反射率提高, 挥发分降低, 煤的变质程度提高, 烃气生成量增加。研究区正常的镜质组反射率在 0.50% ~ 0.65% 之间 (低成熟阶段), 由于成煤后两次岩浆活动尤其是辉绿岩侵入, 靠近辉绿岩处镜质组反射率最高达到

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 95%, 平均 0 67% ~ 1 51%, 已经进入到热成熟阶段[14]。据估算[14], 生成 1 t天然焦的同时可生成大约 504 m^3甲烷气体。三是动力生烃: 盆地阜新期末开始受到区域挤压应力作用[11, 24], 构造应力使煤中有机质直链化合物和侧链化合物基团断裂和脱落、导致分子量降低, 直接改变煤大分子的化学组成, 在低、中级煤化阶段作用明显, 表现为"动力生烃", 曹代勇等称之为应力降解[25]。所以, 次生生物生气、岩浆二次生气、构造运动导致的动力生气共同弥补了盆地煤层深成热解生气作用的不足。总之, 研究区以次生生气为主, 但也混有部分热成因气, 盆地煤层气是多源混合成因的。

3 煤储层特征

3 1 渗透率和孔隙性

根据 DL1井测井资料估算沙海组煤层渗透率 0 72×10^{-3} μm^2, 孔隙率平均为 5 3%, 相比于盆地阜新组煤层渗透率 (0 323 × 10^{-3} ~ 0 469 × 10^{-3} μm^2)和孔隙率 (4 7%)均偏高[26]。我们认为原因是研究区为一背斜构造, 呈波状起伏, 且该区后期构造抬升最强烈, 煤层上覆岩层遭受剥蚀去顶也最强烈, 盆地经历了拉张—挤压—拉张多期构造应力作用形成了多组外生构造裂隙, 现今大多处于引张状态, 增大了煤储层运移及储集空间。影响煤层渗透性最重要的因素是煤层的割理特征[27], 而现今煤层隔理发育和开合主要受控于煤层有效应力[28, 29], 并最终体现为最小主应力越小且垂直最小主应力方向割理发育、开启性最好, 煤层渗透率最大[28, 30]。从 DL1井和 DL2井的煤岩芯样及矿井观察来看, 煤层割理形态以矩形和平行网状为主, 平行层面面割理规模较大, 可达 1. 5 m 以上, 密度一煤组 8 ~ 12 条 /5 cm, 三煤组 9 ~ 13条 /5 cm, 而端割理密度及规模均较小, 一煤组 6 ~ 8条 /5 cm, 三煤组 8 ~ 10条 /5 cm。从现今地应力资料看, 阜新盆地最小主应力在 10 76 ~ 17. 79 MPa之间, 平均 13 41 MPa, 方位角 195°[24], 大于 Bowen 盆地 (平均 7MPa)而小于 Albert盆地 (平均 15Ma)[28], 井下观察割理方向斜交于最小主应力, 所以研究区渗透率较低。

3 2 煤储层解—吸附特性

煤层气主要以物理吸附形式赋存于煤的微孔隙中, 通常用吸附等温线来表示, 而其吸附理论模式主要有兰氏模式、BET 模式、位能模式及综合模式[31]。从目前获得的大量煤的吸附等温线来看, 大多数可以用以下简化的兰氏模式来描述:

$$V = \frac{V_L P_R}{P_L + P_R}$$

式中, V——吸附量, V_L——Langmuir 体积, P_L——Langmuir压力, P_R——储层压力。

如表 3, 研究区沙海组一煤组在 DL1井 922 ~ 938 m 储层压力为 9 20 MPa, 在 DL2井 1 009 ~ 1 022 m 储层压力 10 07 MPa, 储层压力较高, 但还属于正常压力范围, Langmuir体积在 18 95 ~ 20 5 m^3 / t之间, 饱和吸附量在 12 3 ~ 14 5 m^3 / t, 表明煤层吸附性中等。控制煤层吸附特性的因素既有内在因素, 如灰分、煤岩组分、水分、煤级等, 也有外在因素, 如温度和压强等[32]。煤储层吸附能力随压力升高而升高, 随温度降低而升高[6]。煤对水的亲和力强, 水表现为侵占煤层气赋存空间——煤层裂隙系统, 因此煤储层吸附能力随水分增加而降低; 灰份对于甲烷基本无吸附能力, 因此煤储层吸附能力随灰份增加而降低; 有水分存在时, 煤级升高, 水分降低, 吸附能力升高, 所以此时煤储层吸附能力随煤级升高而升高; 煤岩组分中镜质组的吸附能力最强, 壳质组次之, 惰性组最差。研究区煤的灰分高 (28 36% ~ 41 03%), 水分中等 (0 50% ~ 3 5%), 煤级中等 (R_o 在 0 67% ~ 1 51%), 有机显微组分以镜质组为主, 惰质组次之, 壳质组最少, 同时由于后期煤层由于构造抬升压力降低等因素导致煤层吸附性降低, 即使多次生气条件下煤储层也未能形成异常高压, 而构造抬升后的煤层冷却事件导致煤层欠饱和。

随着储层压力的降低, 当低于临界解吸压力时, 煤层气将解吸, 因此煤层气开采主要通过排水降压而

表 3 阜新盆地沙海组煤层储层参数

Table 3 Parameters for coalbed methane of Sahai Formation reservoir in the Fuxin Basin

井号	深度 /m	V_L /(m^3 / t)	L /(m^3 / t)	P_L /MPa	P_R /MPa	P_C /MPa	含气量 /(m^3 / t)	饱和度 /%
DL1	922 ~ 938	18 95	12 3	4 88	9. 20	3 36	9 73	64. 90
DL2	1009 ~ 1022	20 50	14 5	4 13	10. 07	5 77	10 60	87. 51

V_L = Langmuir体积, L = 饱和吸附量, P_L = Langmuir压力, P_R = 储层压力, P_C = 临界解吸压力

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

达到解吸[33]。临界解吸压力越大越有利于煤层气解吸, 通常临界解吸压力大于 0. 8MPa认为是有利解吸的储层[31]。煤层解吸特征通过影响煤层气的产能而成为评价煤层气勘探开发有利区的重要因素[33, 34], 其对产能的影响主要体现在含气饱和度和 Langmuir压力两个方面, 二者共同制约煤层气产出的难易和气体产出的速率。含气饱和度低, 很难或无法获得产能, 一般含气饱和度大于 80% 的预测区具有高产条件; Langmuir压力制约开采的难易程度, 一般 Langmuir压力大于 3MPa具有高产条件。另外, 煤层气解吸导致体积增大, 煤基质收缩, 煤层割理增大, 最终提高煤层渗透率, 增加煤层气的产能[34]。研究区煤层气饱和度在 64. 9% ~ 87. 51% 之间, Langmuir压力 4. 13~ 4. 88MPa, 临界解吸压力 3. 36~ 5. 77MPa, 从煤层解吸条件来看, 该区具有煤层气高产的有利条件。

4　煤层气的保存条件

4. 1　构造运动

构造升降运动可以改变地层的温、压条件, 打破原有煤层气吸附平衡, 使吸附气与游离气相互转化, 从而影响煤层气的保存[6]。如前所述, 东梁区处于盆地构造反转隆升最严重的地区, 沙海组上部的阜新组地层大多隆升遭受剥蚀去顶 (剥蚀量在 708. 8~ 1 080m), 煤层压力降低, 煤层吸附性降低, 煤层气大量解吸出来而成为游离气散失, 同时煤层发生冷却事件导致欠饱和储层形成。另外, 在现今应力 (北西西—近东西向挤压应力)作用下, 盆地内北北东和近南北向断裂受近垂直走向的压应力作压性逆冲运动, 北西西向断裂受垂直走向的张应力作张扭性活动, 北东、北东东向断裂受平行走向的右旋剪切力作张扭性活动, 北西、北北西向断裂受平行走向的左旋剪切力作张扭性活动[24], 所以煤层气沿张性、张扭性断裂散失, 对于煤层气的保存不利。但是研究区是一个背斜构造, 所以沙海组三段煤层由于上覆地层的卸压产生大量的裂隙, 提高了煤层的孔渗性能, 与邻区煤储层条件相比, 沙海组三段储集条件比较优越, 利于煤层气开采。另外, 研究区现今应力为北西西—近东西向挤压应力, 这种构造运动有可能导致动力生气而弥补了散失的煤层气。

4. 2　封盖层

煤层气的封盖层是煤层气保存重要的因素, 良好的盖层条件可以形成与煤层渗透率反差减缓煤层气的散失而间接抑制煤层气的解吸[35]。封盖层由煤层顶底板构成, 东梁区沙海组三段煤层顶板为沙海组四段泥岩、粉砂岩, 致密均一, 厚度平均在 250~ 450 m之间, 全区发育, 沉积稳定, 最大孔喉 0. 0382 μm, 排替压力 3. 14 MPa, 是煤层上部良好的区域性盖层[36]; 东梁区沙海组三段煤层底板为泥岩、砂泥岩, 孔隙度 6. 8%, 煤层顶底板封存性能较好, 有利于煤层气的保存。

4. 3　岩浆活动

研究区沙海组煤层埋藏最深 1 400 m, 深成变质作用对煤层生气影响有限, 所以两期岩浆活动可能是研究区煤层生气的主要热动力来源, 考虑到阜新期末岩浆活动局限 (现今仅在阜新北部碱锅地区发现), 而古近纪岩辉绿岩全盆地广泛分布。因此, 我们认为古近纪岩辉绿岩侵入应是煤层生气的最主要热动力来源。需要注意的是, 局部地区也存在岩浆侵入含煤岩系, 其高温烘烤、高压挤压, 改变了煤层气的原始地质条件, 破坏已形成煤层气藏。

4. 4　水动力

研究区水动力条件简单, 沙海组含水层主要为裂隙含水层, 但含水性较差, 煤系水主要来自大气降水, 水型为 $NaHCO_3$型, 矿化度较大 (梁 2井 800~ 900 m井段矿化度为 5 000~ 12 100 mg/L)[19]。据研究[37], $NaHCO_3$型煤系地层水是煤层气藏存在的良好指示条件, 所以研究区地下水型预示了煤层气成藏的可能性。由于盆地构造抬升, 并且研究区沙海组三段煤层及上覆岩层处于东梁背斜构造上层, 导致整个煤系及上覆岩石完整性差, 广泛发育裂隙含水带, 厚度达 84~ 260 m, 地表降水的下渗对沙海组向上扩散运移的煤层气有一定封堵作用, 含菌地表水下渗灌入煤层, 在相对低的温度下, 使煤化过程中产生的湿气、正烷烃及其它有机物经细菌降解和代谢作用生成次生生物气。从煤层气地球化学特征来看, 研究区煤层气“既干又轻” (干燥系数 1 000以上, 甲烷碳同位素在 - 53. 20‰~ - 58. 00‰之间, 平均 - 56. 33‰), 具有生物—热解混合成因气的特征[16]。

正是以上煤层气生—储—保存条件综合制约, 形成了研究区煤层气的现今保存状态, 煤层气地质因素中最重要的两项指标表现为现今煤层气含量在 9. 73~ 10. 60 m^3/t之间, 煤层渗透率 0. 72×10^{-3} μm^2。

5　结论

煤层气系统研究的一个显著特点就是通过地质

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

作用过程的研究将各地质要素连结成一个有机的整体。在这方面,关键时刻作为一个重要的参数实现这一联系。煤层气系统的关键时刻为煤层气大量生成或者散失的时刻,由于煤层气主要以吸附状态赋存于煤中,所以煤层气系统关键时刻即为煤层中煤层气吸附最多或者最少的时刻。又由于影响确定煤层吸附特性的主要因素为温度和压力条件,所以煤层气系统关键时刻表现为地质历史上煤层大量生气并被煤层吸附及此后煤层埋藏最浅的时刻(煤层气大量解吸而散失)。其中,地质历史上煤层大量生气并被煤层吸附的时刻往往是煤层气埋藏最深(深成变质作用生气最强烈)和区域岩浆强烈活动的时刻(煤层热变质生气最强烈)。从图 4可看出,东梁区沙海组煤层在孙家湾期达到最大埋深 1 400 m,仅达到形成长焰煤,从生气量来看,此阶段仅生成少量热成因煤层气,所以此时刻不应为煤层气系统的关键时刻。因此,研究区煤层气系统关键时刻是古近纪末大规模辉绿岩侵入时刻。

综上所述,阜新盆地白垩系沙海组煤层气系统特征如下(图 5,图 6):沙海组三段煤层是煤层气的生储层;沙海组四段泥岩、粉砂岩作为沙三段煤层气的盖层,为区域性盖层;喜山期辉绿岩的侵入导致沙海组煤层到达生气高峰,镜质体最大反射率平均达到 1.51%,局部靠近岩浆侵入位置达到 4.95%,另外,盆地构造反转后,地下水的作用带入细菌导致煤层产生大量次生生物气,弥补了构造剥蚀引起的煤层气散失;此后,煤层气进入保存阶段,煤层气系统关键时刻是古近纪。需要强调的是,由于系统所处环境的改变,导致煤层气系统转变成开发体系,重点表现为由于强烈的构造—热事件影响,外来流体(岩浆热液、大气降水)和能量(构造动力、热动力)的加入使煤层气藏的形成或调整(破坏)。

从目前盆地煤田地质条件来看,沙海组煤层仅在盆地中南部东梁区、艾友—清河门区探明,而中北部广大区域阜新组煤层以下预测还有储量巨大的沙海组煤层,其中蕴藏着丰富的煤层气资源,所以应加快对盆地沙海组煤层气勘探,将其作为下阶段煤层气勘探工作的重点。

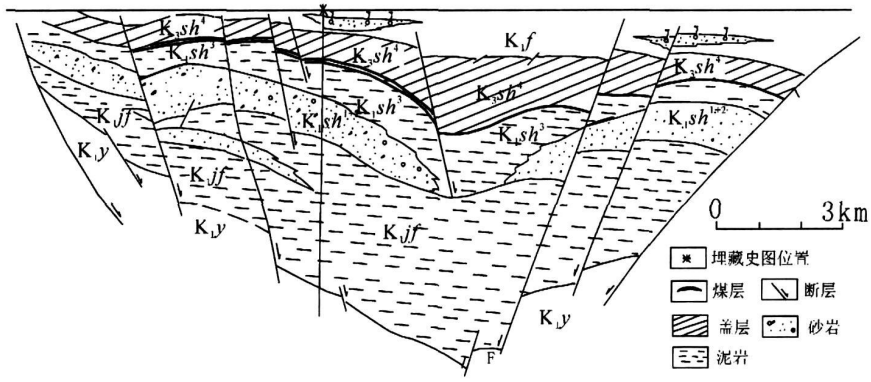

图 5 沙海组煤层气系统关键时刻地质剖面图

Fig. 5 Section map of Sahai Formation coalbed methane system in the critical moment

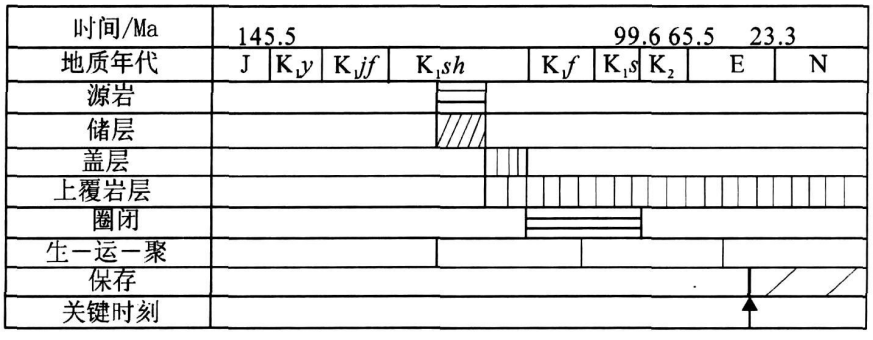

图 6 阜新盆地白垩系沙海组煤层气系统事件

Fig. 6 Events chart for the Sahai Formation coalbed methane system in the Fuxin Basin

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

致谢　本文受益于与中国石油化工股份公司华北石油局孙万禄教授的讨论, 论文写作中得到东北煤田地质局王秀茹教授级高工的帮助, 初稿承蒙中国矿业大学秦勇教授修改并提出诸多建设性意见, 审稿人及本文编辑提出宝贵的修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意。

参考文献 (References)

1 Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852

2 Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993-1999

3 Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938

4 Law B E. Basin-centered gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1891-1919

5 Shurr G W, Ridgley J L. Unconventional shallow biogenic gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1939-1969

6 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

7 Xianbo Su, Xiaoying Lin, Mengjun Zhao, *et al*. The upper Paleozoic coalbed methane system in the Qinshui basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(1): 81-100

8 朱志敏, 沈冰, 闫剑飞, 等. 煤层气系统: 一种非常规含油气系统 [J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 30-33 [Zhu Zhimin, Shen Bing, Yan Jianfei, *et al*. Coalbed methane system: an unconventional petroleum system[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(4): 30-33]

9 李思田. 断陷盆地分析与煤聚集规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 14-44 [Li Sitian. Fault Basin Analysis and Coal Accumulation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 14-44]

10 王桂梁, 马杏垣, 云武, 等. 间歇侧移式的裂陷与递进跳跃式的反转: 以阜新煤盆地为例 [J]. 高校地质学报, 1996, 2(3): 284-294 [Wang Guiliang, Ma Xingyuan, Wang Daqing, *et al*. Intermittently lateral transferred fitting and progressive leaping inversion: a case study from the Fuxin Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 1996, 2(3): 284-294]

11 张宏福, 郑建平. 华北中生代玄武岩的地球化学特征与岩石成因: 以辽宁阜新为例 [J]. 科学通报, 2003, 48(6): 603-609 [Zhang Hongfu and Zhen Jianping. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China Craton: a case study in Fuxin, Liaoning Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 603-609]

12 朱志敏, 闫剑飞, 沈冰, 等. 从"构造热事件"分析阜新盆地多能源矿产共存成藏 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(5): 468-479 [Zhu Zhimin, Yan Jianfei, Shen Bing, *et al*. Co-existing formation of multi-energy resources in the Fuxin basin: analysis from tectonic-thermal events[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(5): 468-479]

13 Meissner F F. Cretaceous and lower Tertiary coals as sources for gas accumulations in the Rocky Mountain area[C]// Woodward J, Meissner F F, Clayton J L. Hydrocarbon source rocks of the greater rocky mountain region. Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, 1984

14 张振文, 蒋福兴, 王慧敏. 岩浆活动对煤层气的成藏作用 [J]. 中国煤炭, 2002, 28(8): 35-37 [Zhang Zhenwen, Jiang Fuxin, Wang Huimin. On the impact of magmatic activities on coalbed methane deposit formation[J]. China Coal, 2002, 28(8): 35-37]

15 张俊宝. 阜新盆地东梁区地热资源赋存条件分析 [J]. 中国煤田地质, 2003, 15(6): 37-39 [Zhang Junbao. Geothermal resource hosting condition analysis, Dongliang district, Fuxin basin[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(6): 37-39]

16 朱志敏, 沈冰, 崔洪庆, 等. 阜新盆地煤层气成因分析 [J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 67-70 [Zhu Zhimin, Shen Bing, Cui Hongqing, *et al*. Genetic analysis of coal-bed methane in Fuxin Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(3): 67-70]

17 Scott A R, Kaiser W R, Ayers W B Jr. Thermogenic and secondary biogenic gases, San Juan Basin, Colorado and New Mexico-Implications for coalbed gas productivity [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(8): 1186-1209

18 王万春, 陶明信, 张小军, 等. 李雅庄煤矿煤岩中 C_{25}、C_{30}等无环类异戊二烯烷烃的检出及其地球化学意义 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 897-900 [Wang Wanchun, Tao Mingxin, Zhang Xiaojun, *et al*. C_{25}, C_{30} and other acyclic isoprenoid alkanes in the coal rock of the Liyazhuang coalmine and their geochemical significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 897-900]

19 张小军, 陶明信, 解光新, 等. 淮南煤田次生生物成因气的比例及资源意义 [J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 314-318 [Zhang Xiaojun, Tao Mingxin, Xie Guangxin, *et al*. Studies on resources significance and mixing proportion of secondary biogenic gas in coalbed gases, Huainan Coalfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 314-318]

20 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 辽西医巫闾山的隆升历史 [J]. 地球学报, 2000, 21(3): 245-253 [Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Wu Ganguo, *et al*. Uplift history of the Yiwulushan mountains in west Liaoning[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(3): 245-253]

21 王伟锋, 陆诗阔, 谢向阳, 等. 阜新盆地的油气保存条件 [J]. 新疆石油地质, 1998, 19(3): 202-206 [Wang Weifeng, Lu Shikuo, Xie Xiangyang, *et al*. Evaluation of hydrocarbon preservation conditions in Fuxin basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(3): 202-206]

22 李伟, 张枝焕, 朱雷, 等. 山西沁水盆地石炭—二叠系煤层生排烃史分析 [J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 337-345 [Li Zhi, Zhang Zhihuan, Zhu Lei, *et al*. The gistory analysis of hydrocarbon expulsion from the coal beds in the carboniferous-permian in Qinshui Basin, Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 337-345]

23 Jennifer R Cooper, John C Crelling, Susan M Rimmer, *et al*. Coal metamorphism by igneous intrusion in the Raton Basin, CO and NM: implications for generation of volatiles[J]. International Journal of

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Coal Geology, 2007, 71(1): 15-27
24 韩军, 张宏伟, 朱志敏, 等. 阜新盆地构造引力场演化对煤与瓦斯突出的控制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 934-938[Han Jun, Zhang Hongwei, Zhu Zhimin, *et al*. Controlling of tectonic stress field evolution for coal and gas outburst in Fuxin Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 934-938]
25 曹代勇, 李小明, 张守仁. 构造应力对煤化作用的影响——应力降解机制与应力缩聚机制[J]. 中国科学(D), 2006, 36(1): 59-68[Cao Daiyong, Li Xiaoming, Zhang Shouren. The effect of tectonic stress on coalification: stress degradation and stress polycondensation [J]. Science in China (Series D), 2006, 36(1): 59-68]
26 安震. 刘家勘探区煤储层特征及煤层气开发条件研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(2): 183-185[An Zhen. Properties of target coal reservoirs and conditions of coalbed methane development in Liujia CBM-prospecting district[J]. Journal of Chinese Mining University, 2003, 32(2): 183-185]
27 Kaiser W R, Hamilton D S, Scott A R, *et al*. Geological and hydrological controls on the producibility of coalbed methane[J]. Journal of the Geological Society, 1994, 151(3): 417-420
28 Bell J S, Bachu S. In situ stress magnitude and orientation estimates for Cretaceous coal-bearing strata beneath the plains area of central and southern Alberta[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2003, 51(1): 1-28
29 尹尚先, 王尚旭. 不同尺度下岩层渗透率与地应力的关系及机理[J]. 中国科学(D), 2006, 36(5): 472-480[Yin Shangxian, Wang Shangxu. The relationship and mechanism between permeability and stress of rock in different scale[J]. Science in China (Series D), 2006, 36(5): 472-480]
30 Stefan Bachu, Karsten Michael. Possible controls of hydrogeological and stress regimes on the producibility of coalbed methane in Upper Cretaceous - Tertiary strata of the Alberta basin, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(11): 1729-1754
31 苏现波, 陈江峰, 孙俊民, 等. 煤层气地质学与勘探开发[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 48-54[Su Xianbo, Chen Jiangfeng, Sun Junmin, *et al*. Coalbed Methane Geology and Exploratory Development[M]. Beijing: Science Press, 2001: 48-54]
32 Chikatamarla Laxminarayana, Peter J Crosdale. Controls on methane sorption capacity of Indian coals[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 201-212
33 高波, 马玉贞, 陶明信, 等. 煤层气富集高产的主控因素[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 345-349[Gao Bo, Ma Yuzhen, Tao Mingxin, *et al*. Main controlling factors analysis of enrichment condition of coalbed methane[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 345-349]
34 Xiaojun Cui, Marc R Bustin. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(8): 1181-1202
35 洪峰, 宋岩, 赵孟军, 等. 沁水盆地盖层对煤层气富集的影响[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 34-36[Hong Feng, Song Yan, Zhao Mengjun, *et al*. Cap rock influence on coalbed gas enrichment in Qinshui basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 34-36]
36 朱志敏, 崔洪庆, 宋文杰. 阜新盆地东梁区浅层天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 18-20[Zhu Zhimin, Cui Hongqing, Song Wenjie. The reservoiring characteristics of shallow gas in Dongliang area in Fuxin Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4): 18-20]
37 Wayne A, Van Voast. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(4): 667-676

Coalbed Methane System of Cretaceous Sahai Formation in Fuxin Basin

ZHU Zhi-min[1,2] HAN Jun[3] LU Ai-ping[4] LUO Li-ping[2] ZHOU Jia-yun[2]

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;
2. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041;
3. College of Resource and Environment, Liaoning Technical University, Fuxin Liangning 123000;
4. No. 107 Prospecting Team, Northeast Geological Bureau of Coalfield, Fuxin Liaoning 123000)

Abstract The investigation on the coalbed methane system is a guide to the exploration and development of coalbed methane. Using the theory and method of unconventional petroleum system, the Sahai Formation coalbed methane system was studied. The source and reservoir rock is the third coal seams of Sahai Formation. The Sahai Formation coalbed methane is sealed by the roof comprising mudstone and lutite of the fourth Sahai Formation. The overburden is the fourth Sahai Formation and Fuxin Formation deposits. The dolerite intrusion during the Himalayan orogeny enhanced the coal maturity and caused a peak of hydrocarbon generation. In addition, the underwater brought many bacteria generating second biogenic methane. Then the coalbed methane is reserved and a critical moment of the coalbed methane system is at the end of the Late Tertiary. In summary, the Sahai Formation coal seams are favorable for coalbed methane exploration and the Dongliang district will to be a promising area for coalbed methane exploration.

Key words coalbed methane system, Cretaceous, Sahai Formation, Fuxin Basin

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net