

Investigation on the Phasestate and Transformational Rule of Natural Gas in Qinshui Basin

Tengfei Yu¹, Peng Wang¹, Jianfeng Yu¹, Jianjun Liu², Weifeng Sun¹

¹Shandong University of Science and Technology, Qingdao, China, 266510

²Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield, Renqiu, China, 062550

Email: yutfei@163.com

Abstract: By analysing all the phasestate kinds and transformational rules of natural gas that comes from coal measure strata in Qinshui Basin, we summarize the accumulation rules. Natural gas of coal measure strata in this area comes from many kinds of source rocks, such as coal, dark mudstone and dark carbonate rock; Also there're many kinds of natural gas phasestates in this area like free gas and dissolved gas, as well as, the most important one, coal-bed gas. So we call that "multi-source and multi-phase state". During Indo-Chinese, Yanshanian and Himalayan periods, different phasestates of natural gas have different processes of transformation. And, of course, they're interconvertible. That is so-called "dynamic transformation", while the "unidirectionally accumulate and escape" emphasizes the irreversibility of the process of accumulation.

Keywords: Qinshui Basin; natural gas; multi-source and multi-phasestate; dynamic transformation; unidirectionally accumulate and escape

沁水盆地煤系地层天然气赋存状态与演化规律研究

于腾飞¹, 王 鹏¹, 于剑锋¹, 刘建军², 孙维凤¹

¹山东科技大学, 青岛, 中国, 266510

²华北油田勘探开发研究院, 任丘, 中国, 062550

Email: yutfei@163.com

摘 要:通过分析沁水盆地煤系地层天然气赋存状态与转化规律, 总结出了“多源多相、动态转化、定向聚散”的煤系地层天然气成藏规律。本区煤系地层天然气来源于煤岩、暗色泥岩、暗色碳酸盐岩等多种类型母岩, 同时本区煤系地层天然气赋存状态类型多样, 除游离气、水溶气等常见类型外, 尤其煤岩吸附气最具特色, 谓之“多源多相”。在印支期、燕山期和喜山期构造运动中, 不同赋存状态的天然气既有自己独特的演化历程, 其间也存在相互转化, 即“动态转化”。而“定向聚散”则强调了本区煤系地层天然气成藏过程的不可逆性。

关键词: 沁水盆地; 天然气; 多源多相; 动态转化; 定向聚散

1 盆地概况

沁水盆地位于山西省的东南部, 总体呈长轴沿北北东向延伸, 中间收缩的椭圆状。其东西宽约 120km, 南北长约 330km, 总面积约 3 万多平方公里。盆地周边为太行、王屋山、中条山及太岳山等山脉圈限, 海拔高程多在 700m 以上, 地形起伏大。

沁水盆地是一个残留型构造盆地, 是夹持在隆起之间北北东向的复式向斜, 向斜的轴部为榆社、沁县至沁水、王必一线。盆地线型构造发育, 构造线方向

基金项目: 国家重大油气专项 (2008ZX05033-04)

主要以北北东和南北向为主^[1], 经地震、电法等验证地面构造与奥陶系顶面构造之间呈平行关系。盆地内断层不太发育, 但组系、类型多。走向近南北向、近东西向、北东向、北北东向、北西向、北北西向等; 从性质上看有高角度逆断层、平移断层、高角度正断层、中低角度的逆断层等。

作为我国陆上最大的含煤盆地之一, 盆地的含煤地层主要是上石炭统太原组和下二叠统山西组, 本溪组和下石盒子组均只含薄煤层或煤线, 未发现具经济价值的可采煤层。

下二叠统山西组以 K₇ 灰岩与太原组分界, 上界为

K₈ 砂岩之底。厚度变化趋势为北厚南薄。含煤 2~7 层，由下至上有 5[#]~1[#]煤层，3[#]为主煤层（图 1）。

上石炭统太原组以 K₁ 砂岩为底，K₇ 砂岩之底为其上界，总体上呈北厚南薄的特点。含煤 4~14 层，由下至上计有 16[#]~6[#]煤层。下部 15[#]煤厚度大，横向稳定，是区内的最主要的煤层之一（图 1）。

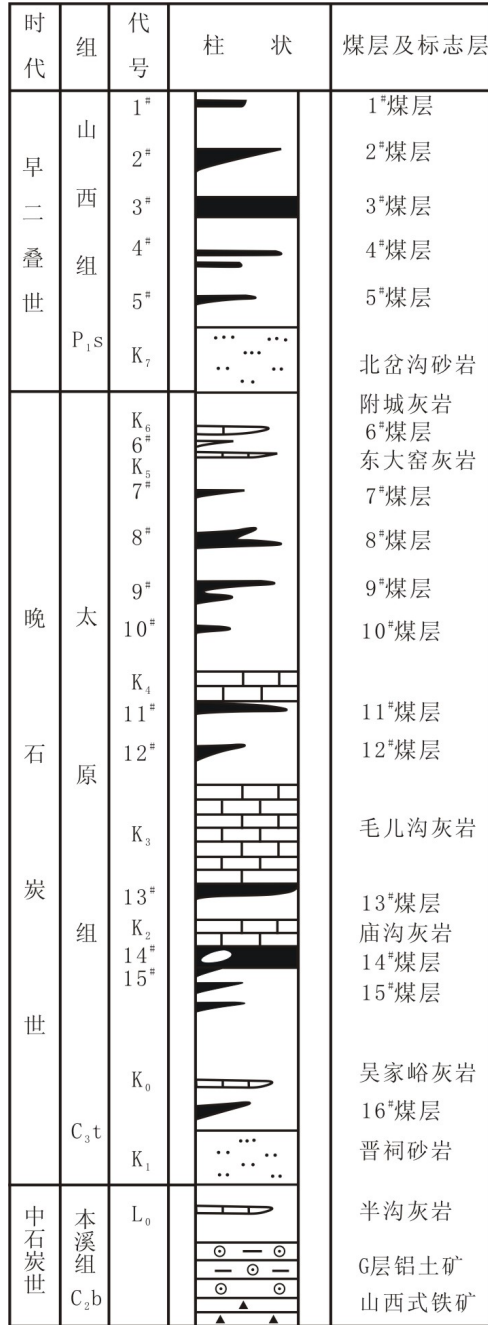


Figure 1. The Sequence of Coal Measure Strata in Qinshui Basin
图 1 沁水盆地煤系地层层序示意图

盆地内煤层埋藏深度一般小于 1000m，煤质好、热演化程度高、含气饱和度高，为沁水盆地天然气的生成提供了充足的物质基础。

2 沁水盆地煤系地层天然气多源性

沁水盆地上古生界煤系地层有 3 类气源岩，煤岩为主要气源岩，其次为暗色泥岩，再次为暗色碳酸盐岩。这 3 类气源岩中干酪根、可溶有机质均可作为天然气来源。此外，输导体系中分散状石油、油藏中富集状石油也可能成为天然气来源。由于沁水盆地目前勘探程度和研究程度均较低，仅对 3 种气源岩进行分析。

2.1 气源岩厚度

2.1.1 煤层

山西组含煤 2~9 层，厚度一般为 2~5m，大于 5m 的富煤带主要分布在盆地东南部及太原西山一带；太原组煤层较山西组发育，含煤 6~10 层厚度多在 5m 以上，北部阳泉至太原西山一带均大于 7m，最厚的可达 14.6m 和 12.82m，左权附近也可达 7~10m。

2.1.2 暗色泥岩

山西组暗色泥岩厚度在阳泉至榆社一带为 90~100m，由北向南逐渐变薄，阳城至晋城一带约为 30~50m。太原组也具有北厚南薄的特点，阳泉至榆社厚度 60m，向南逐渐变薄，阳城至晋城一带约为 10~30m。本溪组地层较薄，暗色泥岩阳泉一带最厚为 25m，阳城一带仅有 2~3m。

2.1.3 灰岩

太原组灰岩一般为 10~20m。

2.2 气源岩地球化学特征

2.2.1 有机质丰度

山西组和太原组煤的有机碳含量平均值为 73.84% 和 70.86%，煤炭储量高达 6000×10⁸t 左右，是本区最重要的气源岩。沥青“A”含量为 3257ppm 和 2029ppm，总烃含量为 1425ppm 和 1034ppm，比国内其它盆地石炭系煤的沥青“A”和总烃含量要低，这主要是因其成熟度较高所致。烃/有机碳和饱/芳比值也很低，前者为 0.16~0.24%，后者为 0.38~0.47%，与一般腐殖煤的特征相似。

本溪组暗色泥岩有机碳含量为 1.64%，地层平均

厚度只有 11m 左右, 总有机碳为 $19^7 \times 10^8 \text{t}$ 。太原组泥岩有机碳含量为 2.76%, 总有机碳为 $1145 \times 10^8 \text{t}$ 。山西组泥岩有机碳含量平均值为 3.06%, 全盆地山西组泥岩总有机碳为 $1604 \times 10^8 \text{t}$ 。因此, 山西组、太原组暗色泥岩亦是最重要的气源岩。

太原组灰岩有机碳含量多大于 0.5%, 高的可达 1.5% 以上, 平均值为 0.97%, 总有机碳为 $167 \times 10^8 \text{t}$ 。沥青“A”阳泉最低, 为 21ppm, 南部阳城、晋城一带为 26~33ppm, 盆地里一般为 50~15ppm, 介休、汾西一带最高, 可达 482~988ppm。其平均值为 200ppm, 总烃平均值为 73ppm。生烃潜量为 0.23mg/g。

综上所述, 石炭系煤、泥岩、灰岩有机碳含量比较高, 均属于好的气源岩。其总有机碳高达 $7454 \times 10^8 \text{t}$, 表明生气的物质基础非常雄厚, 是重要的气源岩。

2.2.2 有机质类型

(1) 山西组、太原组煤, 显微组分以镜质组、惰质组为主, 稳定组分低于 11.2%, 干酪根电镜扫描和显微镜鉴定均为典型腐植型(III型), 仅蒲县东河矿区一带有腐泥煤。

(2) 山西组、太原组泥岩大多数样品与煤的有机质性质相似, 主要为III类干酪根, 另外也有一部分样品稳定组分、饱和烃含量、饱/芳比值、 $2920 \text{ cm}^{-1} / 1600 \text{ cm}^{-1}$ 比值较高, 电镜扫描和显微镜鉴定为腐泥腐植型, 属于II₂类干酪根。

(3) 太原组灰岩主要为II₁—II₂类干酪根。本溪组泥岩有机质比山西组和太原组泥岩要好, 为II₂类干酪根。

2.2.3 有机质成熟度

主要成熟度参数具有两高四低的特征: (1) 镜质体反射率(R_m)高, 石炭系各组的平均值为 1.92~2.17%。(2) 热解峰温(T_{max})高, 石炭系平均值为 496~527°C。(3) H/C 原子比低, 石炭系平均值为 0.50~0.57。(4) 氢指数(HI)低, 煤的氢指数平均值为 68~86mg(烃)/g(C), 泥岩和灰岩平均值为 6~22mg(烃)/g(C)。(5) 有效碳(CP/COT%)低, 煤为 5.9~7.5%, 泥岩只有 1.6~3.0%。(6) 生烃潜量(S₁+S₂)低, 煤为 50.34~63.5mg/g, 泥岩为 0.55~1.29mg/g, 灰岩只有 0.06~0.23mg/g。

上述特征表明沁水盆地有机质热演化程度较高, 大都进入了过成熟阶段。

2.3 热动力条件

气源岩热演化生气与温度条件密切相关, 局部高温会加速源岩演化, 生成大量的天然气。在上地幔热流物质上升和局部岩浆活动形成的区域热力场作用下, 沁水盆地烃源岩热演化程度普遍较高, 晋城地区东南部, 即沁水及固县以南地区为无烟煤区, 煤阶以 3[#]无烟煤为主, 由东南向西北方向, 变质程度逐渐降低, Ro 由 5.25%降为 2.5%。在西北部地区, 即沁水及固县以北地区为贫煤区, 由东南向西北方向 Ro 由 2.5%降为 1.9%。

综上所述, 沁水盆地石炭-二叠系煤层地层具有有机质总量大、镜质组含量高、热演化程度高、生气潜力高的特点, 有利于天然气的大量生成。

3 沁水盆地煤系地层天然气主要赋存状态及其动态转化

3.1 天然气主要赋存状态

天然气具有高扩散、高渗滤能力、极不稳定的特点, 可分为分散态和富集态两大类。富集态天然气又包括常规天然气和非常规天然气, 常规天然气为储存在砂岩与碳酸盐岩孔、缝、洞等储集空间中的游离态天然气; 非常规天然气包括深盆气藏、致密砂岩气、煤层气、水溶气等。分散态天然气是指以分散状态存在于输导体系里的天然气, 即尚未聚集成藏的天然气。无论是富集状、还是分散状天然气, 其均主要表现为3种状态赋存: 游离状态、吸附状态和溶解状态。

对不同类型的气藏, 其天然气的主要赋存状态是不同的。例如常规天然气藏天然气以游离状态占绝对优势, 煤层气藏天然气以吸附状态是主要的赋存状态, 而水溶气藏得天然气以溶解状态为主。

3.2 煤系地层天然气动态转化

在地层条件下, 吸附气、游离气和溶解气处于一种动态平衡过程中, 地层埋藏过程中由于地层抬升和下埋, 地层温度、压力就会改变, 一方面岩石中的吸附气就会进一步增加或解吸, 另一方面, 地层水中的溶解气也会随着温度压力的改变出现溶解量增加或天然气出溶。这些动态变化对天然气资源会产生不同的影响。

本区在华力西期是华北巨型聚煤盆地的一部分, 构造表现为地壳的整体缓慢沉降、沉积, 形成厚度在

区域上稳定的上古生界地层。印支期的构造继承了华力西期的特点，地壳继续沉降，但沉降速率和幅度明显增大。在石炭纪到晚三叠世期间，最大埋深大于4000m（如图3），地热梯度正常（如图4），处于生物生气阶段，由于构造稳定，再加上煤岩对油气的吸附能力较强，因此，绝大部分先成天然气以吸附态滞留于煤层中未排出。

燕山早期的构造具波动性，地壳既受抬升剥蚀又有沉降、受沉积，构造的活动性进一步增强。早侏罗世，华北板块受到NW-NWW向的水平挤压应力，地层整体抬升（如图3），压力减小，而温度基本维持在100~130℃（如图4），吸附态天然气开始解吸为游离态。早、中侏罗世，沁水盆地煤系地层的温度和埋深出现波动，煤化作用进展比较缓慢。在晚侏罗世，地层压力不断因地层抬升而减小，由于岩浆热液的活动，地层温度继续增加，可达170~280℃（如图4），先成的吸附气进一步大量解吸，溶解气也部分析离为游离气；另外，由于煤化作用的进行，煤层进入二次生烃阶段（本次二次生烃作用生气量占总生气量的68%）^[2]；在早白垩世末，煤岩整个生烃过程基本完成。早白垩末~晚白垩世早期，地层温度达到热裂解气门限，开始热裂解生气。由于此时处于高温低压环境，天然气主要以游离态和溶解态存在。本阶段天然气大量生成，伴随着构造圈闭的形成，是现今沁水盆地煤系地层天然气藏形成的主要有效生排烃期。

喜山期以来，研究区构造分异进一步强烈，并重新发生局部沉降。晚白垩世末以来，煤层继续抬升（如图3），地热梯度正常，地层温度下降迅速（如图4），盆地开始冷缩。部分游离气被重新吸附，而溶解气也因温度和压力的降低开始大量析离，此时天然气主要以游离态和吸附态为主^[3,4,5,6]。

由上可知，本区上古生界煤系地层主要可以分为两个生气阶段。第一个生气阶段对应于石炭纪到晚三叠世煤层埋藏阶段，区内煤层处于生物气到湿气早期阶段。第二个生气阶段发生于晚侏罗世到早白垩世，大部分矿区煤层经历了湿气生成高峰和干气阶段，这一阶段生气量大于第一次生气量，是本区主要生气阶段。

4 天然气成藏规律

综上所述，沁水盆地煤系地层天然气成藏规律可总结为“多源多相、动态转化、定向聚散”。

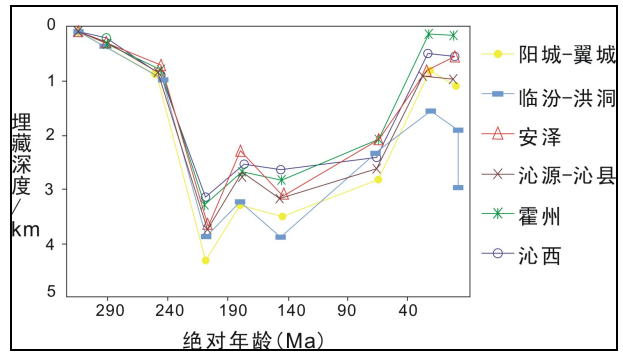


Figure 3. Burial Depth History of Neopaleozoic coal measure strata in the South of Shanxi Province

图3 山西南部上古生界煤系地层埋深演化示意图

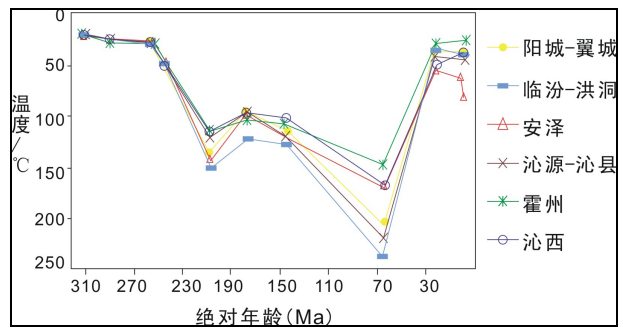


Figure 4. Thermal History of Neopaleozoic coal measure strata in the South of Shanxi Province

图4 山西南部上古生界煤系地层热史演化示意图

4.1 多源多相

沁水盆地石炭-二叠系煤系地层的煤岩、暗色泥岩、碳酸盐岩有机碳含量比较高，均为较好的气源岩。从本区煤岩较高的吸附气含量来看，气源是较为充沛的，具有形成较大规模气藏的物质基础。

天然气生成之后，首先满足煤岩吸附，形成煤层吸附气，一部分排出到输导体系，为输导体系吸附，或溶解于水形成溶解气，其余部分作为游离气，或聚集成藏或呈分散游离气存在。可见，煤系地层天然气的赋存状态是多样的。

4.2 动态转化

各种状态赋存的天然气，随着盆地的构造及热演化等条件的变化而互相转化。当压力下降或温度升高时，吸附气就会解吸，转化为游离气；同样，当温压条件变化时，溶解气与游离气、吸附气之间也会互相转换。

本区上古生界煤系地层热演化经历了四个阶段，有两期生气过程，各种状态赋存的天然气之间发生了复杂的动态转化过程。石炭纪到晚三叠世的生物生气阶段，天然气主要以煤层吸附气存在。到早侏罗世，因燕山运动地温升高，吸附状态下的天然气开始解吸，转化为游离气。在晚侏罗世，地层温度继续增加，先成吸附气进一步解吸，溶解气也析离成为游离气；此外，煤层进入二次生烃阶段并大规模产气，在早白垩世末期，基本上完成整个生烃过程。不过，在早白垩末~晚白垩世早期，温度达到热裂解门限温度，液态烃开始裂解。由于温度高，压力低，天然气主要以游离气和溶解气的形式存在。本阶段伴随着构造圈闭的大量形成，因此也是现今沁水盆地煤系地层天然气藏形成的主要有效生排烃期。晚白垩世末至今，煤层仍然继续抬升，地层温度快速下降，盆地冷缩，部分游离气重新被吸附，溶解气大量析离，最终主要以游离气和吸附气的状态赋存。

4.3 定向聚散

油气生成后，在源岩层的相对高压下排出，向压力和烃浓度小的方向运移，由于源岩中的烃浓度和压力较输导层要高很多，因此油气只会选择向输导层运移，而不会再次回到源岩中。同样，在输导体系中，油气是从高势区向低势区运移的，并在位于低势区的圈闭中聚集成藏，除非构造运动改变区域流体势场分布，否则这个过程是不可逆的。

不仅是天然气的运移过程，天然气的散失也是一个定向不可逆的过程，天然气一旦散失或被氧化、分解之后也不可能再重新回到气藏中被保存起来。

因此总结起来，在地质条件稳定的情况下，天然气的整个生、运、聚、散过程是一个定向不可逆过程。

致 谢

本文的完成离不开我的导师林玉祥教授的悉心指导，从开始的资料收集阶段一直到文章的编写修改阶段，林老师均给予了极大地支持和帮助。在此，对林老师表示衷心的感谢。

同时，感谢华北油田勘探开发研究院梁宏斌院长以及钱铮主任等人在文章编写中给予的指导和帮助。

References (参考文献)

- [1] Chen Gang, Liu Yulin, Palaeozoic Trap condition analysis of Natural Gas in Qinshui Basin[J], *Northwestern Geology*, 1998, 19(4), P34-38(Ch).
陈刚, 刘林玉, 沁水盆地古生界天然气圈闭条件分析[J], *西北地质*, 1998, 19(4), P34-38.
- [2] Liu Huanjie et al., *Geology of Coalbed Methane in Southern Shanxi, China* [M]. Xuzhou: China University of Mining And Technology Press, 1998.
刘焕杰等, 山西南部煤层气地质[M], 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [3] Ren Zhanli, Han Shaoming et al., Determination of Mesozoic tectonic heat event in Qinshui Basin[J], *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 31(3), P30-31(Ch).
任战利, 肖晖等, 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定[J], *石油勘探与开发*, 2003, 32(1), P43-47.
- [4] Ren Zhanli, Xiao Hui, Determination of Cenozoic Uplift-cooling Event in Qinshui Basin[J], *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1), P109-113(Ch).
任战利, 肖晖等, 沁水盆地新生代抬升冷却事件的确定[J], *石油与天然气地质*, 2005, 26(1), P109-113.
- [5] Li Wei, Zhang Zhihuan et al., The History Analysis of Hydrocarbon Expulsion from the Coal Beds in the Carboniferous-Permian in Qinshui Basin[J], *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2), P337-344(Ch).
李伟, 张枝焕等, 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), P337-344.
- [6] Cheng Jin, Wang Xinwen et al., The Thermal History of the Qinshui Basin in Shanxi Province[J], *Geoscience*, 2009, 23(6), P1093-1099(Ch).
承金, 汪新文等, 山西沁水盆地热史演化特征[J], *现代地质*, 2009, 23(6), P1093-1099.