

# 沁水盆地向斜型水封气藏形成条件探讨

陈 刚

(西北大学地质系,陕西西安 710069)

沁水盆地具备形成古生界向斜型水封气藏的基本条件:(1)复式向斜型盆地结构;(2)复向斜主部充足的气源( $3\,458.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ )及其与盆地构造的良好时空配置;(3)复向斜边缘常规储层沿下倾方向渐变为低孔渗致密储层;(4)复向斜边翼水动力封堵与区域盖层联合构成的有效封存与圈闭条件。由此预测盆地腹部向斜轴部附近,上、下古生界当分别构成水动力圈闭条件下的两大天然气赋存系统。

关键词 沁水盆地 复向斜构造 水动力圈闭 天然气 赋存系统

作者简介 陈刚 男 32岁 博士 石油与天然气地质

沁水盆地是一个复式向斜型构造盆地,以复向斜翼部背斜为目标的古生界天然气勘探已有20多年的历史,除盆地北缘阳1井见低产气流外,其余近10口探井仅见油气显示。近年来,随着华北古生界天然气勘探在鄂尔多斯盆地获得重大突破,沁水盆地古生界天然气前景再次引起人们的极大关注。但由于对其中天然气赋存的地质规律等尚存在不尽相同的认识,很大程度上影响着该盆地天然气的勘探开发进程。本文通过对沁水盆地古生界天然气成藏的地质构造、油气地质和水动力条件的综合分析,认为该盆地具备形成向斜型水封气藏的条件,如将勘探目标转向盆地腹部向斜轴部附近,或许能有所突破。

## 1 盆地结构

沁水盆地位于山西地块中南部,四周分别被太行山、中条山、霍山和系舟山所围限,面积约 $32\,000 \text{ km}^2$ ,是华北地区中生代左行剪切挤压背景下于燕山中晚期形成的复式向斜型构造盆地<sup>[1]</sup>。盆地总体为一走向近NNE的复式向斜(图1),周缘被广泛出露的古生界所环绕,并呈环状单斜带向盆地腹部倾伏。盆地腹部被三叠系覆盖,是向斜构造最稳定和保存最完整的部分。复向斜南、北两端相对稳定,古生界虽向盆内倾伏,但坡降较小,奥陶系顶面坡度角约 $1.2^\circ$ ;东、西两翼坡降较大,奥陶系顶面东翼坡度角近 $5^\circ$ ,西翼约 $3^\circ$ 。同构造期形成的背斜构造主要分布在复向斜东、西侧翼,但其幅度大、变形强、埋藏浅、保存条件差。这可能是以往背斜钻探几经失利的重要原因。值得注意的是,位于古县-襄垣断裂和天中山断隆之间复向斜中部的沁县向斜,被奥陶系顶面-800 m高程线所圈定,面积近 $2\,000 \text{ km}^2$ ,构造稳定且完整,具备有利的保存条件,有可能成为古生界向斜型水动力圈闭天然气成藏的有利构造部位。

2 天然气生储盖条件

2.1 气源条件

沁水盆地腹部发育上、下古生界两套气源岩。下古生界碳酸盐岩气源岩的有利层位主要为中奥陶统马家沟组, 有机碳含量 0.10%~0.33%, 与鄂尔多斯盆地大致相当; 其次为寒武系中、上统。上古生界气源岩以上石炭统太原组和下二叠统山西组最为有利, 且明显优于鄂尔多斯盆地, 有机碳含量以煤系地层最高(40%~70%), 暗色泥岩和灰岩类亦相对较高, 分别为1%~3%和 0.18%~1.93%。

古生界气源岩的成烃作用虽自三叠纪晚期即已开始, 但其主要生气阶段则在中晚侏罗—早白垩世燕山运动中期异常地温梯度(6.1℃/100 m)背景下的构造热变质作用时期, 气源岩普遍达到过成熟阶段( $R_o$  2.00%~2.50%)。显然, 古生界气源岩的主生气期与向斜型盆地结构的形成近乎同步, 具有良好的时间配置关系。晚白垩世以来, 区域地温场降低至3℃/100 m, 生气作用减弱甚或停滞。如果扣除主生气期过后至今可能造成的天然气散失量, 初步估算沁水盆地古生界残余资源量仍可达 $3\,458.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 尤其是包括沁县向斜在内的盆地中北部深拗陷区占盆地总资源量的一半以上, 资源密度高达 $0.4184 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , 至少不低于鄂尔多斯盆地平均值, 具有形成向斜型水封气藏的充足气源条件。

2.2 储层条件

古生界储集岩系主要有两类: 上古生界碎屑岩和下古生界碳酸盐岩。受中生代晚期复向斜主部沉降埋藏和异常高古地温场影响, 古生界储集岩普遍达晚成岩阶段, 储层物性变差, 尤其是复向斜边翼下倾方向绝大部分渐变为低孔渗致密储层。上古生界碎屑岩储层以盆缘环状单斜带(尤其是东西两翼露头区)相对较好, 孔隙度5%~15%, 渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 盆地腹部深拗陷区孔隙度小于5%、渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者约占90%。下古生界碳酸盐岩储层孔隙度一般小于5%, 渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 但裂缝发育者渗透率则明显提高近 $10^2 \sim 10^3$ 倍, 其中以裂缝型和风化壳岩溶型碳酸盐岩或白云岩物性条件相对较好, 同样具有盆地边缘区优于腹部深埋藏区的特点。上述储层物性特征一方面为向斜翼部边水封堵提供了条件, 同时还很大程度上抑制了盆地腹部地层水的交替和天然气的散失, 有利于向斜型水封气藏的形成和保存。

2.3 封盖条件

古生界区域盖层有两套, 一是上二叠统上石盒子组内陆河湖相泥质岩(280~360 m), 二

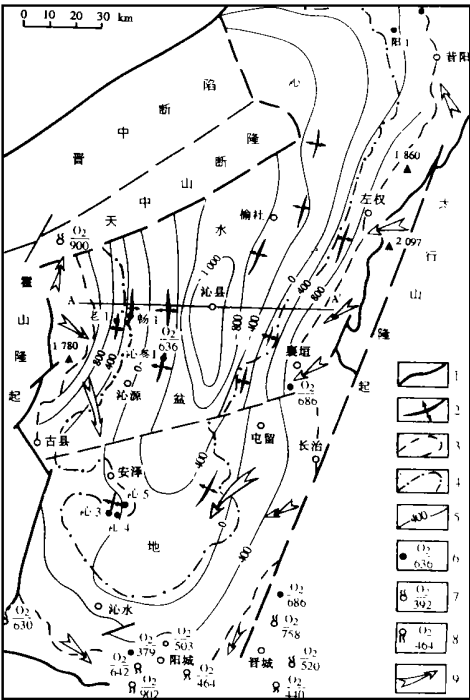


图1 沁水盆地构造格架与古生界水动力条件图

1—盆地边界; 2—背斜构造; 3—上古生界残留边界; 4—三叠系残留边界; 5—奥陶系顶高程/m; 6—钻孔层位/m; 7—上升层位/高程; 8—下降层位/高程; 9—水流方向

是上石炭统太原组下部风化壳型铝土质泥岩(50~ 100 m)。二者不仅厚度较大, 区域分布稳定, 且无裂缝泥岩样品具有较高的突破压力( 大于 5 MPa) 和极低的渗透率( 小于  $5 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ )。但在复向斜边翼古生界区域盖层埋深较浅( 小于 700 m) 的地区, 由于构造抬升和压力释放, 泥岩盖层裂缝发育, 有效封盖条件普遍较差, 尤其是其中变形较强的背斜构造, 顶板盖层往往因拱张破裂而失去有效封盖性( 表 1)。在盆缘煤矿区涌气矿井均位于向斜轴部, 如阳泉向斜轴部的阳 1 井日产气量 $1\,617\text{ m}^3$ , 而其近邻背斜高点上的阳 3 井在其相当层位则为产水层, 表明处于挤压状态的向斜核部泥岩盖层较之背斜具有相对有利的保存条件。因此, 有理由推测盆地腹部埋藏深度大于 700 m 的拗陷区, 尤其是处于挤压状态的复式向斜轴部区带, 盖层的完整性及其有效封盖性良好, 有条件构成上、下古生界两大天然气成藏系统的有效封盖层系。因此, 沁县向斜所在的盆地腹部深拗陷区具有形成水封气藏的顶板和隔板封盖条件。

表 1 复向斜翼部浅埋藏区古生界泥岩盖层物性条件

| 井号  | 埋深/m | 孔隙度/ $\%$ | 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 突破压力/MPa | 构造位置  |
|-----|------|-----------|-----------------------------|----------|-------|
| 老 1 | 158  | 2.6       | 0.7                         | 裂碎       | 老君头背斜 |
| 畅 1 | 307  | 3.7       | 0.4                         | 无测试      | 畅家沟背斜 |
| 沁 3 | 140  | 2.9       | 0.2                         | 2.0      | 冀氏高背斜 |
| 沁 4 | 644  | 0.4       | < 0.01                      | 7.4      | 冀氏低背斜 |
| 沁 5 | 696  | 3.8       | < 0.01                      | 8.5      | 冀氏东向斜 |

3 古生界水动力圈闭条件

复式向斜型沁水盆地古生界露头区海拔高于1 000 m, 并以西缘霍山、东缘太行山和北缘系舟山为主要供水区; 盆地南缘阳城地区古生界多有泉水涌出, 泉口高程集中在 300~ 600 m, 为主要泄水区; 被供、泄水区所围限的盆地腹部奥陶系顶面高程降低为- 400~ - 1 000 m, 构成复向斜盆地的承压区。据部分钻井资料分析, 复向斜翼部浅埋藏区奥陶系水头标高在向斜东翼襄垣地区为 686 m, 向斜北端阳泉地区为 477 m, 南端阳城地区为 379~ 503 m。尤其是复向斜西翼较深埋藏区的沁参 1 井, 据其下石盒子组砂岩地层压力( 5.6 MPa) 和中奥陶统裂缝灰岩地层压力( 7.14 MPa) 折算, 上古生界水头标高在 600 m 左右, 下古生界水头标高不低于 636 m。显然, 盆地腹部古生界地层水落入承压区, 且承压水位当不低于泄水区最低泉口高程。由此推测向斜核部气藏圈闭区处于被边缘水压势头所围限良好的封存状态。此外, 沁参 1 井地层压力测试资料表明, 上、下古生界压力梯度明显不同, 二者当属被奥陶系顶风化壳铝土质泥岩层相对分隔的不同流体压力系统。

由此认为, 沁水盆地在燕山期形成的复式向斜结构控制下, 盆地腹部( 至少沁县向斜) 古生界深埋藏区具有形成水动力圈闭的条件: (1) 向斜主体位于盆地中段束状紧缩带, 东、西分别为目的层落差大、地表水和裂隙潜水供给充分的两大隆起, 向斜边翼下行水流产生一种阻止深部天然气上浮的回压<sup>[2]</sup>, 形成边侧水动力封堵; (2) 盆地腹部的低孔渗致密储层在很大程度上限制了盆缘地表水和裂隙潜水向盆地腹部渗流, 一方面在复向斜边翼下倾方向可以形成水堵, 另一方面向斜核部高含气致密储层中水的相对渗透率接近于零使之不能形成可动水而驱气<sup>[2]</sup>; (3) 盆缘供水区地表潜水在沿环状单斜带向下倾方向流动过程中, 向斜核部古生界流体则向上倾方向渗流, 二者在折算地层水位近乎相等的地下分水线<sup>[3]</sup>( 或称折算压力平衡带) 相遇, 分

水线以上的古生界地层水和地表潜水将沿其水位降低方向流向泄水区。总之, 盆缘地表水和裂缝潜水在势能作用下虽向盆内汇聚, 但却难以渗入到地下分水线( 尤其是气水过渡带) 以下向斜核部高含气饱和度的低孔渗致密储层区, 形成向斜型水封气藏的水动力圈闭条件。

4 天然气赋存系统

向斜型水封气藏又称之为“深盆气圈闭”<sup>[2,4]</sup>或“水动力圈闭”<sup>[5]</sup>。这种气藏圈闭类型具以下特征<sup>[6]</sup>: (1) 向斜核部具备充足的气源条件; (2) 受控于( 复式) 向斜型盆地结构; (3) 含气层总体属于低孔渗致密储层; (4) 气藏位于向斜轴部深埋藏区, 常具异常压力, 且表现为“下气上水”的气水倒置关系; (5) 边侧水动力封堵与区域盖层联合构成的良好封存条件。关于向斜型水封气藏的成藏机理, 多数学者目前倾向于这种认识: 在向斜边翼下倾方向储层物性变差的背景下, 向斜核部气源岩生成的天然气不断注入储层, 并以非润湿相沿上倾方向驱替低孔渗储层中的水, 气水界面随之向上倾方向推进, 当推进到物性较好的某个部位时, 由于孔喉变大, 浮力成为主导因素, 气体穿过界面而逸散, 气藏达到最大规模。由于致密储层的传导性差, 气的逸散与补给处于动态平衡而最终圈闭成藏。主生气期过后, 水封气藏可能通过气水界面的下倾移动或气藏由高压向低压的转换而得以平衡。实际上, 即使主生气期已过, 由于气水界面以下不存在可动水驱气, 气藏仍可以处于相对静平衡状态。

综合前述, 沁水盆地复式向斜型的盆地结构、充足的古生界气源和低孔渗非常规致密储层条件, 以及区域盖层与边侧水压势头联合构成的良好封存条件, 足以在盆地腹部的沁县向斜区带形成水动力圈闭条件下的天然气聚集。并可进一步将其划分为上古生界碎屑岩和下古生界碳酸盐岩两大水动力圈闭天然气赋存系统( 图 2)。其划分依据主要有三: (1) 上、下古生界具有各自独立且类型有别的生、储、盖岩系; (2) 石炭系太原组铝土质泥岩不仅是下古生界的顶板盖层, 同时也构成分隔上、下古生界的致密隔板; (3) 上、下古生界具有相互独立、彼此有别的地质压力及其相应的水动力圈闭系统。沁水盆地古生界水动力圈闭天然气赋存系统的关键时刻发生在早白垩世烃类气体大规模生成的时刻, 推测大部分烃类气体最终圈闭成藏的结束时刻为晚白垩世末, 新生代以来该系统处于保存时间段。

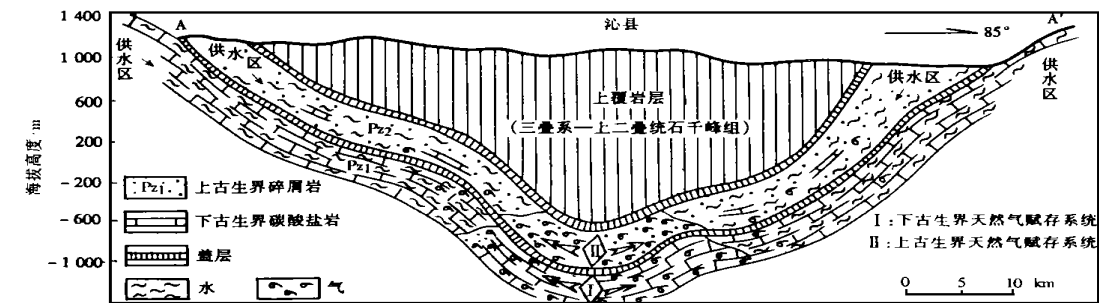


图 2 沁水盆地腹部古生界向斜型水动力圈闭天然气赋存系统剖面图

沁水盆地上、下古生界两大水动力圈闭天然气赋存系统的论证和提出, 不仅回答了该盆地过去以向斜边翼高幅度、强变形背斜构造为钻探目标的古生界天然气勘探何以屡遭失利, 更为重要的是, 理当坚信沁水盆地有望找到具相当规模的工业气藏。这就要求我们, 在勘探思路 and 有利勘探目标选择上, 应着眼于盆地腹部向斜型水封气藏的大背景, 选择盆地腹部沉降埋藏

深、生储盖和保存条件相对有利的沁县向斜为突破口,并借鉴北美洛基山盆地群向斜型水封气藏的勘探经验,在向斜型水动力圈闭区寻找物性条件相对有利的储集区块,或具有稳定保存的低幅度背斜构造作为钻探目标。

致谢:本文承蒙赵重远教授审阅并指导,在此深表谢意;同时特别感谢冯乔副教授和本文编辑提出的诸多建设性意见和建议。

### 参 考 文 献

- 1 赵重远,刘池阳.华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存.西安:西北大学出版社,1990.1~10
- 2 Master J A. Deep basin gas trap, Western Canada. AAPG Bulletin, 1979, 63(2): 152~181
- 3 刘方槐,颜婉荪.油气田水文地质学原理.北京:石油工业出版社,1991.117~120
- 4 Gies R M. History for a major Alberta deep basin trap: The cadom in formation. AAPG Memoir, 1984, (38): 1~35
- 5 陈荣书.石油与天然气地质学.武汉:中国地质大学出版社,1994.92~94
- 6 陈刚.鄂尔多斯盆地腹部下古生界天然气赋存系统.西北大学学报(自然科学版),1995,25(5): 503~506

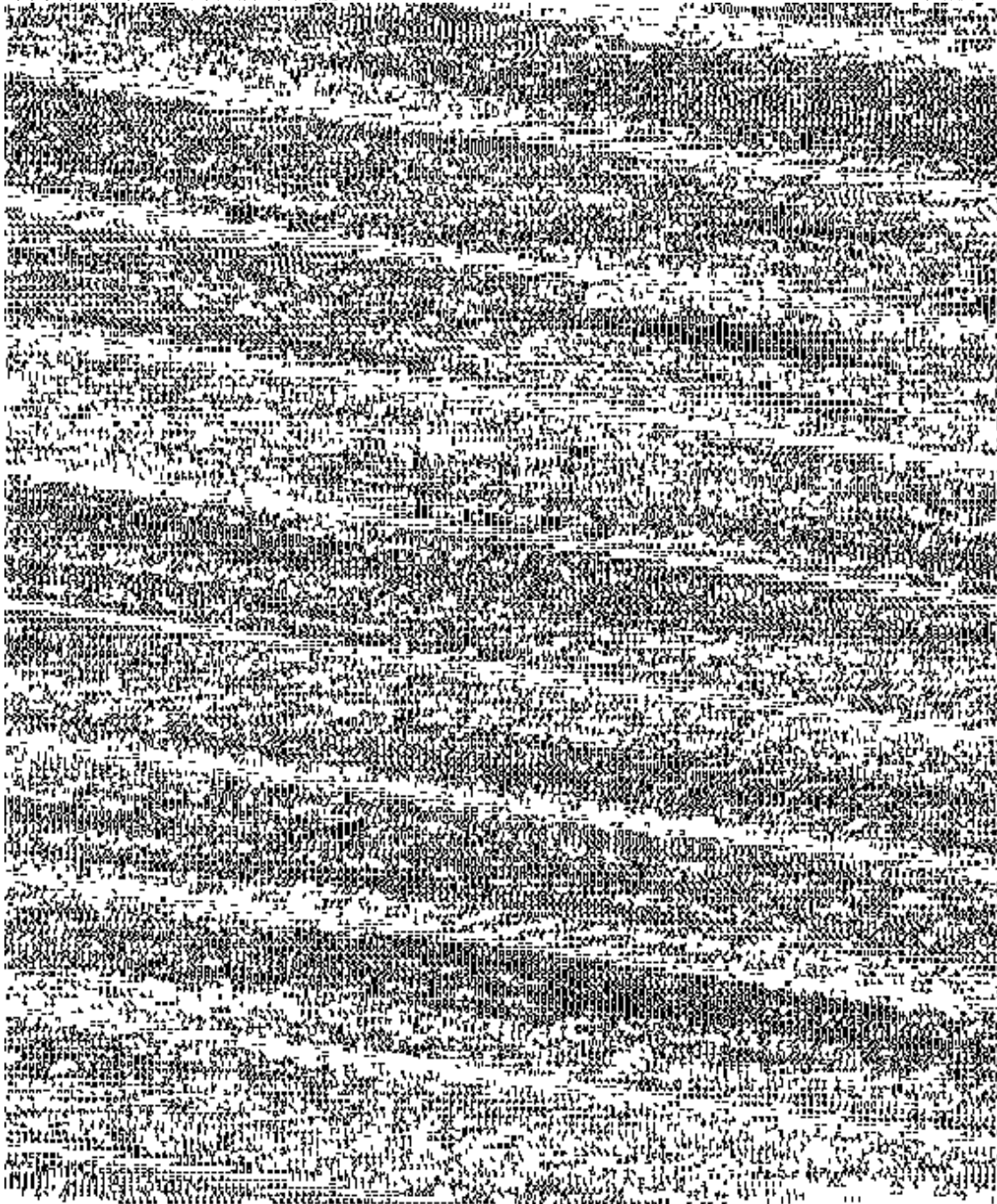
## FORMATION CONDITION OF SYNCLINAL HYDROSEALED GAS POOLS IN QINSHUI BASIN

Chen Gang

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi)

### Abstract

Qinshui Basin is considered to have the basic condition of forming of hydrodynamic sealed Paleozoic synclinal gas pools. The formation of hydrosealed gas pools is the result of the synthetic interaction of 4 essential geological factors: 1, a synclinorium structure of the basin; 2, abundant gas resources( $3458.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) in the synclinal center matched well with the structural conditions in time-space of the basin; 3, low porosity-low permeability tight reservoir rock in downdip structural location; 4, updip water block and fine regional caprocks. It is predicted that the occurrence of the Paleozoic natural gas in Qinshui Basin is in two gas systems, i.e. the natural gas system of the Lower Paleozoic and the natural gas system of the Upper Paleozoic.



1. 煤层裂隙孔。白家庄矿, 3 号煤。扫描电镜,  $\times 15$ 。
2. 煤层裂隙孔。西山官地矿, 6 号煤。扫描电镜,  $\times 20$
3. 煤层粒间孔。王庄矿, 3 号煤。扫描电镜,  $\times 500$
4. 煤层植物残体胞腔孔。常村矿, 3 号煤。扫描电镜,  $\times 500$
5. 煤层木质纤维缝状孔(线状孔)。西曲, 2 号煤。扫描电镜,  $\times 300$
6. 煤层微孔(基质孔)。凤凰山矿, 3 号煤。扫描电镜,  $\times 400$ 。