

# 中国煤型气区的构造环境、典型气藏及勘探方向

## I —— 上古生界煤型气

陶明信 徐永昌 陈践发 沈平

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

**提 要** 主要论述以上古生界为烃源岩的典型煤型气藏的地球化学特征、形成时的构造环境与气藏类型及找气前景。华北聚煤区为最有利地区,并总结出煤型气藏形成的 2 种构造环境和 4 种成藏类型:裂谷活动构造环境中的古潜山自生自储型(苏桥型)、古生新储型(文留型)和克拉通稳定构造环境中的复合型(鄂尔多斯型)及自生自储型。前述 4 种气藏类型应为今后该区煤型气勘探的主要类型。此外,还对上述两种构造环境中的煤层气问题进行了扼要讨论。

**关键词** 煤型气藏类型 构造环境 碳同位素 氢、氦同位素 上古生界 华北地块

**第一作者简介** 陶明信 男 45 岁 博士 研究员 博士生导师 气体地球化学和构造地质学

煤型气曾称煤成气,指主要由腐殖型有机质所生成的天然气,其源岩多为煤系地层。

近十余年来,我国新探明的一批大、中型气田多为煤型气气田,对此,许多学者先后做了大量的研究工作<sup>[1,2,3]</sup>。研究与实践均表明,煤型气是我国天然气资源的主要类型。在前人工作的基础上,本文着重探讨中国煤型气形成与分布的大地构造环境、典型气藏的地球化学组成特征与成藏构造类型及其相关问题。

煤系的发育与生物演化和气候密切相关,但煤层,特别是煤型气的聚集成藏与空间分布则受构造与沉积环境的控制。从中国大地构造格架的演变特征分析,可将中国煤型气形成与分布的构造环境以印支运动为界分为两大构造格局,共发育上古生界和中、新生界三大烃源岩层系。本篇讨论上古生界的煤型气及煤层气问题,有关中、新生界煤型气的问题将在下篇讨论。

### 1 地质背景与大地构造环境

中国境内在晚古生代时的大地构造格局主要由华北、扬子和塔里木三个相对稳定而较大的地块和介于其间或边缘的海槽构造活动带组成,其显著的特点是具有构造南北分异的特征。华北为海陆交互

相成煤环境,而华南(扬子)为广海相碳酸盐台地环境,塔里木则具有类似华南型的特征(扬子型),故上古生界煤系地层集中分布在华北构造区。华南二叠系也发育煤系,其中上二叠统龙潭组为主要含煤地层,但其规模与煤型气前景均远低于华北区,故本文只讨论华北区的煤型气问题。

晚古生代,华北地块南、北分别为秦岭海槽和兴蒙海槽,东以郯庐断裂带为界,西北以祁连海槽及阿尔金断裂为界。华北地区自奥陶纪末期(或可延至志留纪)隆起,经长期剥蚀而成准平原状态,至中石炭世起,在基底奥陶系夷平面上堆积了一套石炭—二叠纪海陆交互相含煤地层,其中上石炭统太原组( $C_3t$ )和下二叠统下部山西组( $P_{1s}$ )为主要含煤地层。煤系地层在上述广大区域内基本连续分布,在厚度、岩性、岩相和含煤性等方面都较稳定而可对比(图 1)。

印支运动使现中国范围内的大地构造格局由南北分异演变为东西分异。华北地区的构造格架在中、新生代也发生了显著的变化,在中部形成了北东向的太行山—吕梁山构造隆起带,其东部演变为一构造活动区(狭义的华北裂谷区),西部仍为克拉通构造稳定区(以鄂尔多斯为主体,包括阿拉善地区)。这种后期构造变化,直接影响乃至控制着天然气的形成、运移与聚集成藏。

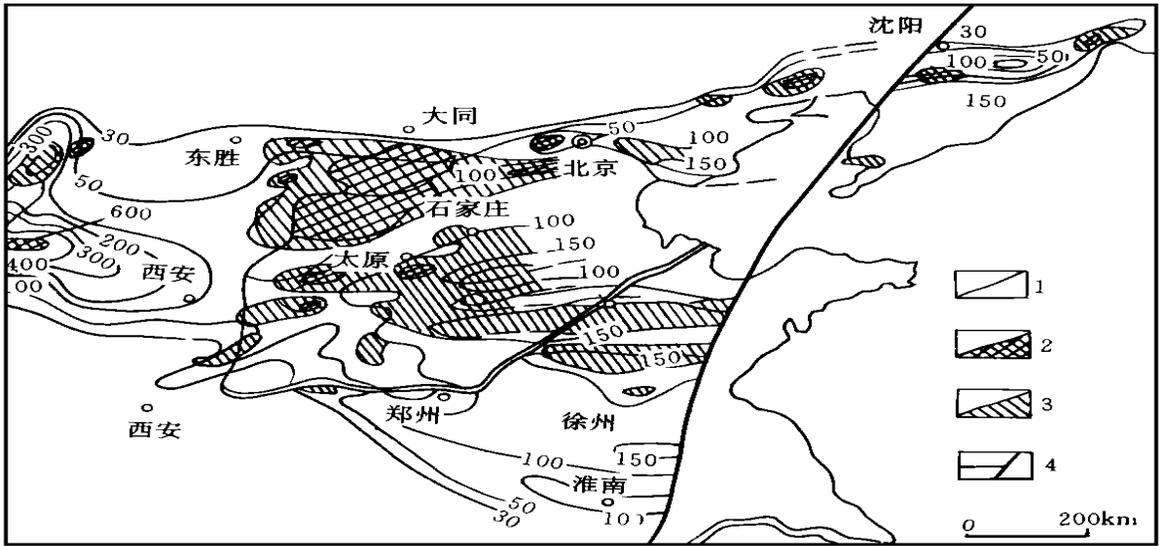


图 1 华北地块上石炭统太原组煤系分布图

(据杨起等转引自武汉地质学院, 1979, 略修改)

1. 地层等厚线; 2- 3. 表示煤厚级别 (由厚→薄); 4. 聚煤期后断裂

Fig. 1 Coal measures distribution of Taiyuan Formation (C<sub>2t</sub>) in north China

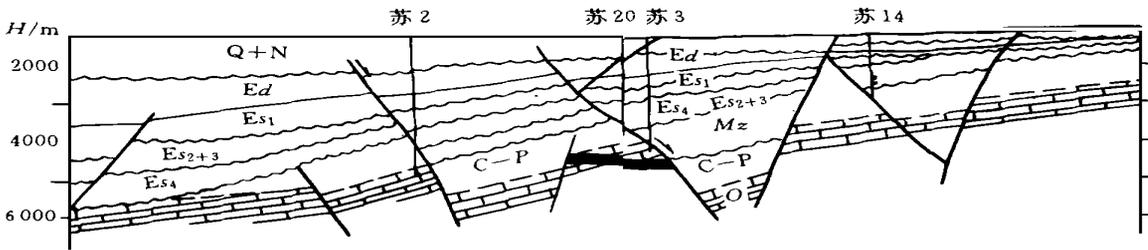


图 2 冀中苏桥油气藏剖面图

Fig. 2 The section of Suqiao oil-gas pool in Jizhong

## 2 典型气藏的地球化学特征与成藏类型

华北石炭-二叠纪煤系所形成的天然气气藏可归纳为 4 种主要类型, 即裂谷 (地堑) 构造中的古潜山自生自储型 (苏桥型)、古生新储型 (文留型) 和稳定构造区的复合型及自生自储型 (鄂尔多斯型) 气藏。

### 2.1 裂谷区古潜山自生自储型——苏桥气藏

苏桥气藏位于后期形成的华夏裂谷系内冀中拗陷的次级构造单元霸县凹陷的文安斜坡带之下, 为石炭-二叠系及奥陶系组成的古潜山凝析油气藏 (图 2)。以该气藏中的苏 20 井为例, 产气层为上二叠统上石盒子组 (P<sub>2s</sub>) 砂岩段, 其下伏地层层下二叠统山西

组和上石炭统太原组为主要含煤地层。煤系地层有机质的镜质体反射率  $R_o$  为 0.6%~1.03%; 该气藏  $CH_4$  的含量多在 60%~80%;  $C_2$  的含量平均为 7.2%, 属于湿气;  $\delta^{13}C$  值 (PDB, 下同) 为 -37‰~-35‰而偏高。前人的研究表明, 在烃源岩热演化程度相当条件下, 煤型气甲烷比油型气甲烷相对富集  $^{13}C$ 。据统计, 中国煤型气甲烷的  $\delta^{13}C$  值的分布范围为 -24‰~-52‰, 主频值为 -32‰~-38‰<sup>[3]</sup>。苏 402 井的  $\delta^{13}C_2$  值为 -25.1‰, 亦属煤型气特征。稀有气体  $^{40}Ar/^{36}Ar$  比值分布于 500~642, 此值高于下第三系所生成气体的该值。因此, 可认为苏桥气藏为石炭-二叠系煤型气。此外, 该气藏的  $^3He/^4He$  值为  $(3.15 \sim 2.1) \times 10^{-7}$  (苏 20 井和苏 402 井), 显示含有少量幔源氦。这与该气藏所处的

华夏裂谷系西带(冀中和临清拗陷)中所形成气藏的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  平均值相一致<sup>[4,5]</sup>,表明苏桥气藏形成于后期的裂谷构造环境中。

该区煤系地层中仅煤层就厚达 35~55 m,炭质(暗色)泥岩厚达 200~250 m,且生烃指标(有机碳、氯仿沥青 A 和总烃含量等)均很好<sup>[1]</sup>,又具有在新生代断陷内石炭-二叠系烃源岩埋深加大而二次生气的地质构造条件,且煤系(C<sub>3</sub>-P<sub>1</sub>)与上石盒子组(P<sub>2</sub>)砂岩和其上的石千峰组(P<sub>3</sub>)泥岩共同组成配套完整的生储盖组合,故具有形成煤型气藏的良好条件。

苏桥气藏类型的特点是,气源岩层在后期裂谷构造活动中断陷沉降而埋深加大,加之裂谷为高地温构造环境,故发生二次生气过程,而该套地层本身发育良好的生储盖组合,遂形成裂谷盆地中古潜山自生自储型油气藏。

### 2.2 裂谷区古生新储型——文留气藏

文留气藏产于华夏裂谷系内临清拗陷的一个凸起构造部位。其地层组成特征为,在奥陶系风化壳之上堆积了石炭-二叠纪煤系建造,厚度在 700~1 000 m,其上为一套中生界红色砂泥岩沉积,可能属于三叠系。印支运动使本区上隆,遭受剥蚀,其后,本区发生强烈的裂谷断陷活动,沉积了巨厚的新生代地层,仅下第三系厚逾 6 000 m。其中下第三系沙河街组为一套烃源岩、砂岩、膏盐层相间的沉积建造。

文留气藏为一在古潜山背景上形成的背斜气藏。在古生界潜山(背斜)之上叠加了新生代地堑式断陷构造(图 3),气藏储层为下第三系沙河街组四段(Es<sub>4</sub>)砂岩,其上的膏盐层为盖层,组成断块-背斜复合圈闭气藏。

根据多方面的研究结果,文留气藏为典型的煤型气藏。气藏中 CH<sub>4</sub> 的浓度平均在 93% 以上。文 23 井的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值为 -28.5‰,凝析油的  $\delta^{13}\text{C}$  值为 -

24.5‰,其碳同位素组成显著富集  $^{13}\text{C}$ ;  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值达 1 175,而  $^{40}\text{Ar}$  相对于其第三系储层明显过剩;经综合分析,确认文留气藏是以石炭-二叠系为源岩的古生新储煤型气藏<sup>[6]</sup>。这进一步证明,中国东部地区自中生代末演变为裂谷活动构造环境以来,当时近地表分布的石炭-二叠纪煤系由于断陷埋深加大,加之裂谷区为一高地温构造带而发生二次生气作用,并在裂谷内有利的构造部位聚集成藏。

### 2.3 克拉通区自生自储型与复合型气藏——鄂尔多斯气藏(田)

鄂尔多斯盆地主体位于陕北、陇东和宁夏境内,故又称陕甘宁盆地,面积约 25 万平方公里,如将其周围的银川等小型盆地计算在内,则总面积可达 36 万平方公里。鄂尔多斯盆地具有长期而稳定的演化历史,在前震旦系褶皱(结晶)基底之上沉积的震旦系至第三系厚达 20 000 m 以上,除志留和泥盆系缺失外,其它各纪地层都有发育,其中上古生界为海陆交互相含煤地层沉积(古华北地块的一部分),印支运动后转入内陆盆地发展阶段。在长达逾 7 亿年的盆地沉积演化史中,盆地地层未遭受强烈造山运动的影响而地层产状平缓,沉积间断仅表现为平行不整合,盆地构造稳定、变形微弱,总体表现为一略向西倾的平缓大单斜。在东部地区,地层倾角一般为 2° 左右,在大范围的主体部分,地层倾角在 1° 左右,基本为水平岩层。盆地褶皱极不发育,仅发育一些面积小、隆起幅度小的鼻状构造。在盆地西缘发育一东翼宽缓、西翼陡窄、轴向南北的向斜。此外,在盆地边缘还发育一些局部背斜构造。因此,鄂尔多斯盆地是一个克拉通稳定盆地。

鄂尔多斯盆地在漫长的演化过程中,形成了多套油气源岩。在总体上,中生界以生油为主,古生界则以生气为主,并可进一步划分为以奥陶系灰岩为主的碳酸盐岩系和石炭-二叠纪煤系为主的两大气源岩系,其中上古生界及中生界煤系地层为煤型气

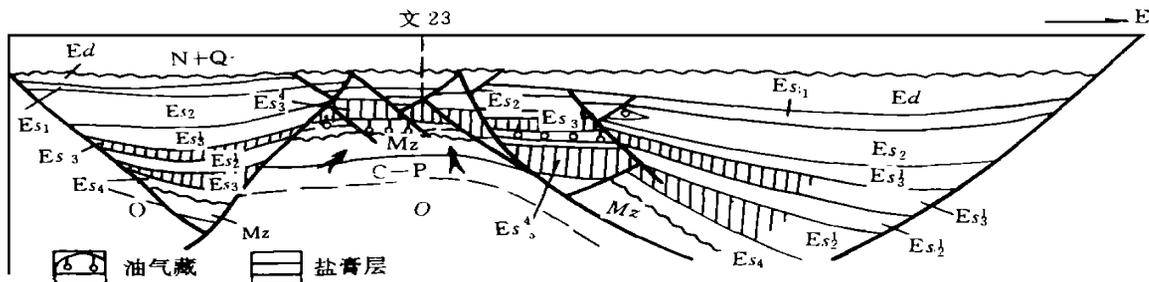


图 3 文留气藏横剖面示意图

Fig. 3 The section of Wenliu gas pool

提供了丰富的物质基础。由于鄂尔多斯盆地具有长期稳定的地球动力学环境,地温梯度偏低(2.5~3.0°C/100 m),有机质热演化进程相对漫长。另一方面,由于构造稳定,断裂不发育而盖层未遭受后期构造破坏,故该区在气源物质、有机质热演化生气及成藏保存等方面具有优越的条件。

鄂尔多斯盆地中的含煤面积约 25 万平方公里,是我国预测煤炭资源量超过 5 000 亿吨的特大型含煤盆地中的最大者。其中石炭—二叠系含丰富的煤型气母质(煤与分散有机质),煤型气资源应很丰富。

目前的研究与勘探结果表明,鄂尔多斯盆地所生成的煤型气有两种主要的聚集或成藏类型,即背斜—断层圈闭的自生自储型气藏和岩性—构造圈闭的复合型气藏

### 2.3.1 背斜—断层圈闭的自生自储型气藏

在盆地西缘断褶带已探明的胜利井、胜利北井等气藏(图 4)是这一类型的典型代表。气藏储层为二叠系,天然气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值为  $-35.9\text{‰} \sim -32.7\text{‰}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_2$  值为  $-27.4\text{‰} \sim -26.4\text{‰}$ ,  $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$  值为  $-196\text{‰} \sim -167\text{‰}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值为 537~600,表明为二叠纪煤系地层所生成。气藏的圈闭构造为平缓开阔的背斜,且为压性逆断层所切割,气藏形成于位于逆断层上盘且由逆断层封闭的断背斜中。故气藏的构造类型以背斜—断层复合圈闭为主(图 4),为上古生界煤系自生自储的煤型气藏。

### 2.3.2 岩性—构造圈闭复合型气藏

在鄂尔多斯盆地中部靖边、横山及乌审旗一带探明了我国目前最大的整装气田。气田储层为下奥

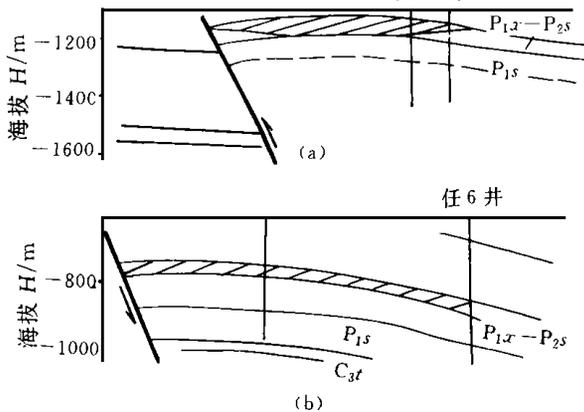


图 4 鄂尔多斯盆地西北缘煤型气藏剖面  
(a)胜利北井气藏剖面 (b)胜利井气藏剖面

Fig. 4 The section of coal-type gas pool in the northwest Ordos Basin

陶统下马家沟组( $O_1m$ )碳酸盐岩,系由加里东运动形成的古岩溶风化壳层。气田含气层在横向上分布稳定,基本连片而可在大范围内对比。气田的区域性盖层为在下奥陶统侵蚀面之上堆积的石炭—二叠系泥岩类,特别是中石炭统本溪组( $C_3b$ )下部的铝土质泥岩为其直接盖层而最为重要。气田所处的构造背景是一西倾大单斜,角度极为平缓。但在晚古生代,该区为一相对隆起区(中央古隆起),其东侧为一拗陷区,堆积了较厚的石炭系泥岩类建造,从而构成了本气田储层上倾方向的岩性圈闭封挡层(图 5)。

该区天然气中的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值均为  $10^{-8}$  量级,表明为典型的壳源气;  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值变化范围很宽,为 606~2 141,平均值为 1 095,相对于奥陶系储层多数明显偏低,表明复合了储层上部烃源岩层(主要为石炭—二叠系)所生成的气体。根据本区烃源岩层有机质的热演化程度与甲烷的  $\delta^{13}\text{C}$  值特征分析,下奥陶统气源岩的  $R_o$  值相当于 2.0% 时,所形成天然气的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值约为  $-37\text{‰}$ 。如榆 12 井的甲烷碳同位素的组成特征;烃源岩  $R_o$  值相当于 2.3% 时,其相应的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值约为  $-35.5\text{‰}$ ,应为奥陶系自生自储油型气,如陕 7 和陕 5 井。而该区石炭—二叠系烃源岩的  $R_o$  值为 2%~2.2%,相应的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值约为  $-30\text{‰}$ 。将油型气  $\delta^{13}\text{C}_1 = -35\text{‰}$  和煤型气  $\delta^{13}\text{C}_1 = -30\text{‰}$  作为两个端元值,可用二元复合模式计算。计算结果,天然气中油型气约占 70%,煤型气约占 30%,表明该区天然气主要来自下奥陶统,这与天然气中稀有气体同位素组成特征的研究结果相吻合。

气田中煤型气的复合率有可能更高( $> 30\%$ )。因为如前所述,气田储层之上的石炭—二叠系具有丰富的生烃物质而天然气资源量很大,而介于奥陶系与中石炭统之间的区域不整合面则构成天然气运移的区域性通道,其上、下烃源岩层所生成的气体均可沿此通道运移至有利圈闭部位聚集或成藏。

综上所述,可以认为,鄂尔多斯中部大气田为一以岩性—构造圈闭为主的多源复合型气藏,尽管以油型气为主,但做为一个大型整装气田,煤型气的贡献也是很大的。

## 3 煤层气

华北地区石炭—二叠系煤层中还含有丰富的煤层气资源。煤层气指煤层中自生自储的以甲烷为主的气体,故又称煤层甲烷。煤层气和煤型气在气源岩和母质类型方面是相同或相似的,即煤层同为二者

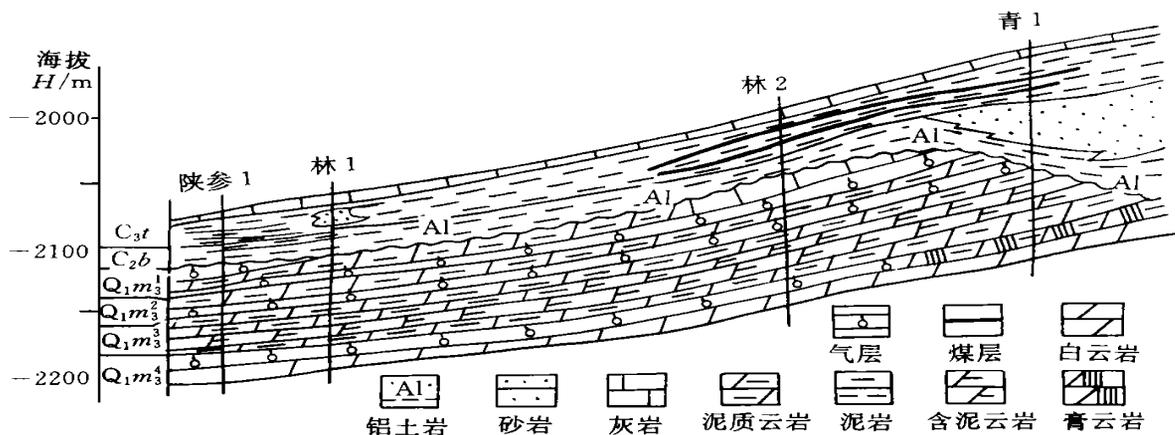


图 5 鄂尔多斯盆地靖边—横山气藏剖面 (据汤显明, 1992)

Fig. 5 The section of Jingbian-Hengshan gas pool in the Ordos Basin

的气源岩层。此外,煤型气的气源母质还包括煤系中的分散有机质。因此,二者在气源岩和生气条件方面具有一致性或相似性,故笔者认为,从气源或母质类型的角度,可将煤层气视为广义的煤型气的组成部分。二者的主要差别在于煤层气自生自储于煤层中,且烃类主要呈吸附状态附着在煤层孔隙的内表面。煤层是一种非常规的储层,煤层气则为一种非常规天然气资源,故在开发工艺方面,煤层气与储集于常规储层(如砂岩层等)中的煤型气有很大的差别。

华北地区煤层气的研究与开发工作已取得显著的进展。其中,在属于克拉通构造稳定区的鄂尔多斯盆地东缘的河东煤田区,针对石炭—二叠系煤层施工的 6 口煤层气开发实验井均获得工业性气流<sup>①</sup>。河东煤田位于鄂尔多斯大单斜构造的翘起端,石炭—二叠系被抬升到近地表,煤层气的含量具有沿单斜构造的倾向方向,随煤层埋深加大而增高的总趋势。其中柳林—三交矿区煤层甲烷的平均含量为 6.49~8.9 m<sup>3</sup>/t<sup>②</sup>可燃物,甲烷的浓度平均为 52.6%~87.2%;吴堡区太原组煤层甲烷的平均含量达 11.19 m<sup>3</sup>/t<sup>②</sup>可燃物,甲烷的浓度平均达 93.5%<sup>②</sup>。

在东部裂谷区冀中坳陷内已发现大城煤层气气藏。该气藏储层为太原组(C<sub>2</sub>f)和山西组(P<sub>1</sub>s)煤层,煤层气含量达 11.33 m<sup>3</sup>/t,单井日产气量最高达 5 735 m<sup>3</sup><sup>②</sup>。该区石炭—二叠系之上直接为上第三系及第四系以角度不整合所覆盖,构成裂谷内的凸起构造,即石炭—二叠系组成一古背斜构造,而煤层在背斜翼部保存完整,是煤层气聚集和勘探的有利构造部位。

上述特征表明,华北地区上古生界的煤层气也具有很大的资源潜力。由于煤层气储集的吸附特点而勘探目的层的埋深不宜过大,故在克拉通构造稳定区,其有利勘探部位为区域性隆起较高而煤层埋深较小的构造部位(如鄂尔多斯单斜上倾方向的构造翘起部位)。在东部裂谷区,上古生界煤系地层在负向构造(如向斜或伸展断层的下降盘)部位保存较好,在这些地区,构造位置相对较高的部位(如向斜与背斜之间的翼部)则为有利勘探区。

## 4 结语

中国古生界煤型气主力烃源岩层系为石炭—二叠系,且在华北地块最为发育而煤型气潜力最大。华北地块区内由石炭—二叠系烃源岩所生成的煤型气藏,形成于两种构造环境,具有 4 种成藏类型。

### 裂谷活动构造环境

① 自生自储——古潜山型 以冀中苏桥气藏为代表,系裂谷沉积层之下基底中的石炭—二叠系残留体(潜山)在裂谷构造环境中形成的自生自储气藏。

② 古生新储——断块背斜型 以临清坳陷中的文留气藏为代表,系裂谷沉积层之下的石炭—二叠系气源岩在裂谷环境中二次生成的气体沿伸展断层向上运移至地堑系上部的有利圈闭构造中聚集成

① 孙万禄. 煤层气将是中国跨世纪的一种新能源. 煤层气开发与利用会议论文集(A), 1995. 170~173

② 梁生正. 论大城煤层气藏的发现. 中国煤层气, 1995, (1): 21~

藏。

### 克拉通稳定构造环境

以鄂尔多斯盆地为代表且前景最好,亦有 2 种类型:

① 自生自储——背斜-断层圈闭型 此种类型主要发育在盆地边缘断褶带地区,以盆地西缘的胜利井等气藏为代表。此种类型主要受控于背斜或断层-背斜圈闭构造,属典型的煤型气。但鄂尔多斯为构造稳定区,除上述边缘地区外,背斜类型的圈闭构造不发育,故此类型气藏在该区不占主导地位。

② 复合储集——岩性-构造圈闭型气藏 以鄂尔多斯盆地中部靖边—横山大气田为代表。此类气藏中虽以油型气为主,但复合了煤型气,而且由于气田是在构造简单(平缓)背景上形成的大面积连片的大型整装气田,煤型气的绝对数量与贡献是很大的,因之具有重要的意义。此类气藏应是该区的主要类型。

对上述成藏的构造环境与聚集圈闭分类,需做如下说明:天然气的生成是一个持续而漫长的过程,而且当盆地发生抬升运动时,早期形成的气藏将因遭受剥蚀破坏而气体逸散;当盆地再次发生沉降而早期烃源岩因埋深加大、地温增高而可能二次或再次生气并聚集成藏。因此,早期形成的烃源岩可在后期新的构造环境中再次生气或早期形成的气藏因构造变动再次发生运移和重新聚集而形成新的气藏。

苏桥和文留气藏所处的地质构造环境及其气体

地球化学特征均表明,太行山以东地区的石炭—二叠纪煤系在后期进入裂谷构造演化阶段时,曾发生二次或再次生气作用,而由石炭—二叠系构成的古潜山及古潜山之上的背斜或断块等正向构造是捕集气体的有利构造部位,也应是该区进一步寻找深层(源)气的优选靶区。

本文所用气体样品的测试分析均在气体地球化学国家重点实验室有关仪器上完成。其中稳定同位素测试主要由文启彬研究员、邵波工程师等完成,氦同位素测试由孙明良研究员完成,氩同位素测试由申建中研究员、刘文汇研究员和李立武工程师等完成,特此表示诚挚的谢意!

### 参 考 文 献

- 1 中国石油学会地质委员会编.天然气勘探.北京:石油工业出版社,1986. 1-203
- 2 《煤成气地质研究》编委会主编.煤成气地质研究.北京:石油工业出版社,1987. 1-260
- 3 徐永昌.天然气成因理论及应用.北京:科学出版社,1994. 206-310
- 4 徐永昌,沈平,陶明信,孙明良.中国含油气盆地天然气中氦同位素分布.科学通报,1994,39(16): 1505-1508
- 5 陶明信.中国天然气资源的构造地球化学分区、类型与潜力.资源、环境与持续战略.北京:中国环境科学出版社,1995. 66-70
- 6 徐永昌,沈平.中原、华北油气区煤型气地化特征初探.沉积学报,1985,3(2): 37-45
- 7 张胜利,李宝芳.鄂尔多斯东缘石炭—二叠系煤层气分布规律及影响地质因素.石油实验地质,1996,18(2): 182-189

## The Tectonic Environment, Typical Gas Pools and Exploration Direction of Coal-type Gas Provinces in China I —— Coal-type Gas of the Upper Paleozoic

Tao Mingxin Xu Yongchang Chen Jianfa Shen Ping

(State Key Laboratory of Gas-Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

The paper mainly discusses the geochemical characteristics and types of the typical coal-type gas pools of the Upper Paleozoic, the tectonic environments and exploration prospects in China. North China coal-accumulating area is the most favourable area.

Two kinds of tectonic environments and four types of coal-type gas pools have been concluded, self-generated self-reservoired type of ancient burial hill (Suqiao type) and paleogenerated

(Continued on page 37)