

# 应用多元信息综合分析法进行气源追踪 ——以济阳拗陷深层气气源追踪为例

向奎 樊庆真 骆光华

(胜利石油管理局地质科学研究院, 山东东营 257015)

本文利用济阳拗陷 3 个地区 5 口深井 (> 4000m) 天然气的碳同位素、氘同位素、轻烃组成和地质背景等多种信息, 采取天然气-源岩吸附气直接对比法、天然气-生油气洼陷中原生油气藏原油伴生气间接对比法、氘同位素分析法、成藏条件分析法等, 对不同地质条件下的气源进行了有效地追踪, 最后建立了各自的成藏模式。

关键词 深层气 地化特征 气源追踪 成藏模式 济阳拗陷

第一作者简介 向奎 男 35 岁 工程师 石油地质

众所周知, 从已知出气点入手, 研究天然气的地化特征及成因, 进行气源对比追踪, 是开展有效气源岩评价和成藏条件分析的关键。本文将以济阳拗陷渤南地区义 115、义 121、渤深 5 井下第三系沙四段气藏、孤西地区义 155 井石炭-二叠系气藏和桩西地区桩古 10-17 井寒武-奥陶系气藏为例, 介绍各自的气/源对比方法, 体现了在不同的复杂地质条件下, 如何应用各种信息进行综合分析, 最后确定其天然气来源并建立各自的成藏模式的研究思路。

## 1 渤南地区义 115、义 121 和渤深 5 井沙四段天然气气源追踪及成藏模式

### 1.1 基本地质概况

义 115、义 121、渤深 5 井位于济阳拗陷沾化凹陷渤南洼陷, 井间距离 1.5~3km, 产层层位为下第三系沙四段, 产层埋深从 4426.1m 到 5163.4m, 顶界与底界最大高差 737.3m, 含气层数多, 含气井段

长, 产层岩性为中-薄层粉砂岩和灰质泥岩, 圈闭为砂岩透镜体圈闭和泥岩裂缝圈闭。由于储层物性本身较差, 加之钻井过程中泥浆对储层有一定的污染, 测试工艺选择不当, 自然产能较低, 5mm 气嘴, 日产气仅 1497~3533m<sup>3</sup>。

### 1.2 天然气地化特征及成因

从表 1 可以看出, 3 口气井天然气甲烷含量占 80.83%~91.36%, 重烃含量占 0.41%~4.41%, 二氧化碳含量占 7.09%~14.19%, 甲烷系数  $C_1/(C_1-C_5)$  值为 0.95~0.99, 干燥系数  $C_1/(C_2+C_3)$  为 20.8~217, 反映为富二氧化碳、组分偏干的烃类气。甲烷及其同系物碳同位素为  $\delta^{13}C_1 = -35.90\text{‰} \sim -39.99\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2 = -21.98\text{‰} \sim -24.90\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3 = -19.32\text{‰} \sim -21.80\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_4 = -20.61\text{‰}$ , 显示出比一般油型气偏重、但比一般煤型气偏轻的特点。天然气轻烃分析苯含量较高, 苯指数为 6~15。

在  $\delta^{13}C_1 - C_1/(C_2+C_3)$  甲烷成因鉴别图上(图 1), 义 115 落在油型裂解气区, 义 121 落在油型裂解气和煤型气区, 渤深 5 井落在凝析油伴生气和煤型气区。

表 1 济阳拗陷深层天然气地化特征一览表

地区	井号	层位	井段(m)	天然气组分 (%)				$\frac{C_1}{C_1-C_5}$	$\frac{C_1}{C_2+C_3}$
				CH <sub>4</sub>	C <sub>2+</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
渤南	义 115	Es <sup>4</sup>	5144.0~5163.4	84.71	0.41	13.7	1.17	0.99	217
	义 121	Es <sup>4</sup>	4426.1~4438.4	91.36	1.55	7.09	-	0.98	62.5
	渤深 5	Es <sup>4</sup>	4491.89~4587.33	80.83	4.41	14.19	0.57	0.95	20.8
孤西	义 115	C-P	4528.8~4574.0	88.01	4.13	7.56	0.29	0.96	22.6
	义 155	C-P	4696.3~4706.7	88.31	4.17	7.53	-	0.96	22.3
桩西	桩古 10-17	O-C	4175.92~4820.05	83.59	11.75	4.15	0.51	0.88	8.3

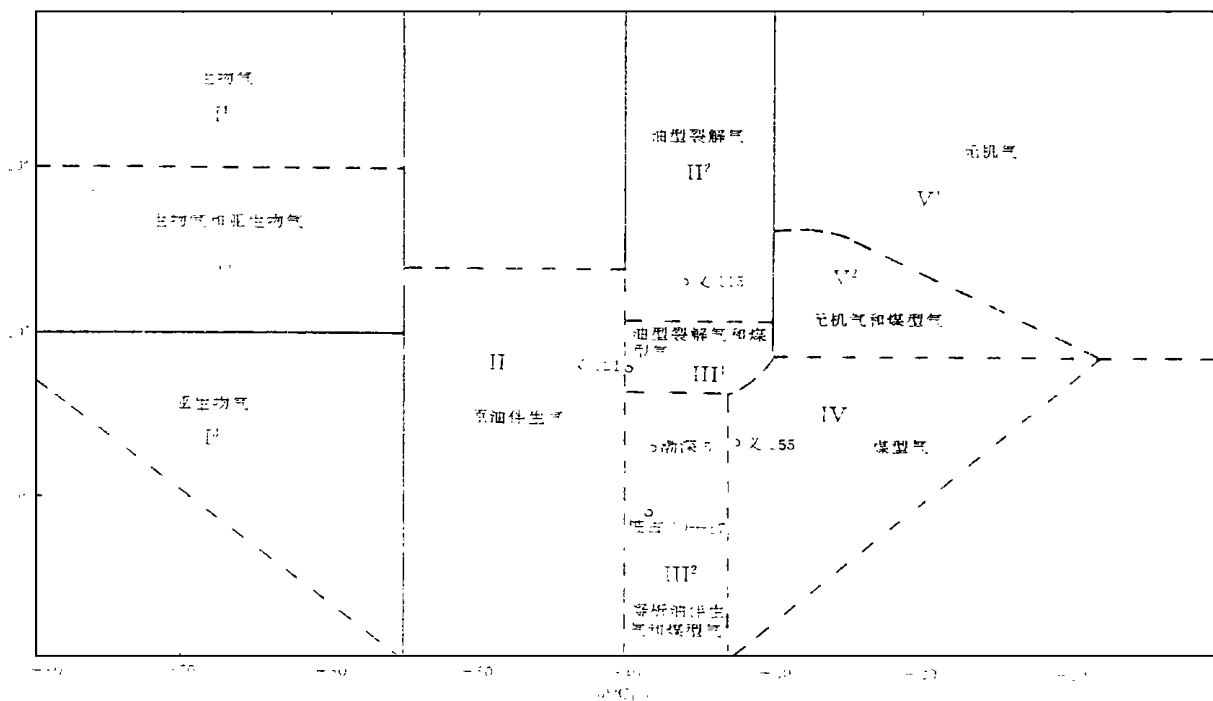


图 1  $\delta^{13}C_1 - C_1/C_{2+3}$  甲烷成因鉴别图

(据戴金星, 1989)

以上说明, 3 口井天然气应属高熟- 过熟油型气。

### 1.3 气源追踪

#### 1.3.1 天然气- 源岩吸附气直接对比

利用烃源岩吸附气与产层天然气对比, 即为通常所说的直接对比法。在具有烃源岩吸附气分析数据的前提下, 进行气- 气直接对比是气源对比最可靠的手段。

根据实验分析数据, 渤南洼陷沙三段暗色泥岩吸附气  $\delta^{13}C_1$  为  $-45.30\% \sim -49.20\%$ , 沙四段暗色泥岩吸附气  $\delta^{13}C_1$  为  $-33.50\% \sim -35.20\%$ , 前述义 115、义 121、渤深 5 井天然气  $\delta^{13}C_1$  为  $-35.90\% \sim -39.99\%$ , 显然与沙四段暗色泥岩吸附气比较接近, 而与沙三段相差较大。若考虑到天然气从源岩解吸出来后运移至储层时所产生的同位素分馏效应, 即储层中的天然气的碳同位素应比源岩吸附气的碳同位素略轻, 那么天然气应来源于沙四段暗色泥岩。

#### 1.3.2 $\delta^{13}C_1 - R^0 - D$ 图版对比

根据取自渤南地区不同深度的源岩样品所测定的镜质体反射率和吸附气的  $\delta^{13}C_1$  值, 可以建立该地区  $\delta^{13}C_1 - R^0 - D$  的对应关系图版, 利用该图版亦可

对义 115、义 121、渤深 5 等 3 口井的天然气进行气源追踪。由于前述 3 口井的天然气属高熟- 过熟油型气, 故在图 2 上, 把 3 口井的甲烷碳同位素值在  $\delta^{13}C_1$  轴上读出并水平投影到与曲线 C 相交, 自 3 个交点作垂直横坐标的直线与  $R_{01}$  线相交, 然后分别将交点水平投影到深度轴上, 得到义 115、义 121、渤深 5 井气源岩的埋深为 5800m、4750m 和 5300m。根据实际钻井地质分层和地震资料解释, 义 115 井钻遇沙四段顶部深度为 4821m, 推测其沙四段底界埋深为 5900m, 义 121 井钻遇沙四段顶部深度为 4400m, 钻达 4862.05m 未穿; 渤深 5 井钻遇沙四段顶部深度为 4485m, 钻达 5455.93 未穿。因此, 3 口井追溯的气源岩埋深均未超出这些井所在处沙四段的埋深范围, 天然气应来自沙四段本身, 为自生自储型气藏。

#### 1.3.3 天然气与气源岩成气特点对比

大量分析数据表明, 渤南洼陷沙三段暗色泥岩有机质类型为 I 型,  $R^0 = 0.5\% \sim 0.8\%$ , 所生的天然气应为成熟油型气; 沙四段暗色泥岩有机质类型为 II 型,  $R^0 = 0.6\% \sim 2.5\%$ , 由于沙四段暗色泥岩有机质成份较沙三段多, 有机质中杂环化合物



部倾没端,产层为二叠系石盒子组石英砂岩,圈闭为断鼻圈闭。由于储层物性本身较差,钻井过程中有一定的污染,测试也不彻底,故未能突破高产气流关。最好的一个层,即 4696.3 ~ 4706.7m, 4mm 气嘴放喷 1 小时,折算日产气量 57000m<sup>3</sup>。

### 2.2 天然气地化特征及成因

义 155 井共获得两个层的气样,分析结果见表 1,其中甲烷含量占 88.01% ~ 88.31%,重烃含量占 4.13% ~ 4.17%,二氧化碳含量占 7.53% ~ 7.56%,甲烷系数  $C_1/(C_1 + C_5)$  为 0.96,干燥系数  $C_1/(C_2 + C_2)$  为 22.3 ~ 22.6,说明天然气为含有一定的二氧化碳、组分较干的烃类气。天然气同位素分析结果: $\delta^{13}C_1$  为 -32.17‰ ~ -32.5‰,  $\delta^{13}C_2$  为 -21.98‰,  $\delta^{13}C_3$  为 -21.50‰,  $\delta^{13}C_4$  为 -20.88‰,甲烷及其同系物的碳同位素普遍较重。天然气轻烃分析苯含量非常高,苯指数高达 35。具典型煤型气特征。在图 1 中,义 155 井也恰好落在煤型气区。

### 2.3 气源对比

从成藏背景分析,义 155 井位于孤西大断层的上升盘,石炭-二叠系产层与气源岩有两种接触方式:一是通过孤西断层,其西部渤南洼陷沙三段和沙四段暗色泥岩与产层呈侧向接触,有可能提供气源;二是产层上方和下方的二叠系下石盒子组煤系地层也有提供气源的可能。那么气源究竟来自何处呢?

前已提及,义 155 井天然气  $\delta^{13}C_1$  为 -32.17‰ ~ -32.5‰,它与弧西断层下降盘的渤南洼陷沙三段暗色泥岩吸附气  $\delta^{13}C_1 = -45.30‰ \sim -49.20‰$

和沙四段暗色泥岩吸附气  $\delta^{13}C_1 = -33.50‰ \sim -35.25‰$  比较,均比它们重,利用天然气运移过程中的同位素分馏原理,可以排除渤南洼陷中沙三段和沙四段暗色泥岩提供气源的可能性。

另外,由于义 155 井煤型气已达到中等成熟度(庚烷值为 25),因此在  $\delta^{13}C_1 - R^o - D$  关系图版上(图 2),如果将义 155 井两个天然气样的  $\delta^{13}C_1$  值 -32.50‰ 和 -32.17‰ 的其中之一在  $\delta^{13}C_1$  轴上读出,水平投射到与曲线 e 相交,过交点作垂直横坐标的直线与  $R_{o2}$  相交,然后过此交点作深度轴的垂线,得到气源岩埋深为 4800m,恰好对应于该井利用钻井和地震资料确定的石炭-二叠系埋深在 4415.0 ~ 5050.0m 的范围之内,说明气源岩应来自于石炭-二叠系含煤岩系。

### 2.4 天然气成藏模式

义 155 井石炭-二叠系的煤型气来自其本身的煤系地层,所生成的煤型气运移至断鼻圈闭中形成了自生自储型气藏。

## 3 桩西地区桩古 10-17 井寒武-奥陶系天然气气源追踪及成藏模式

### 3.1 基本地质概况

桩古 10-17 井位于济阳拗陷沾化凹陷桩西潜山披覆构造带东南部,产层为奥陶系马家沟组灰岩,圈闭为潜山风化壳圈闭。裸眼测试,15mm 气嘴,

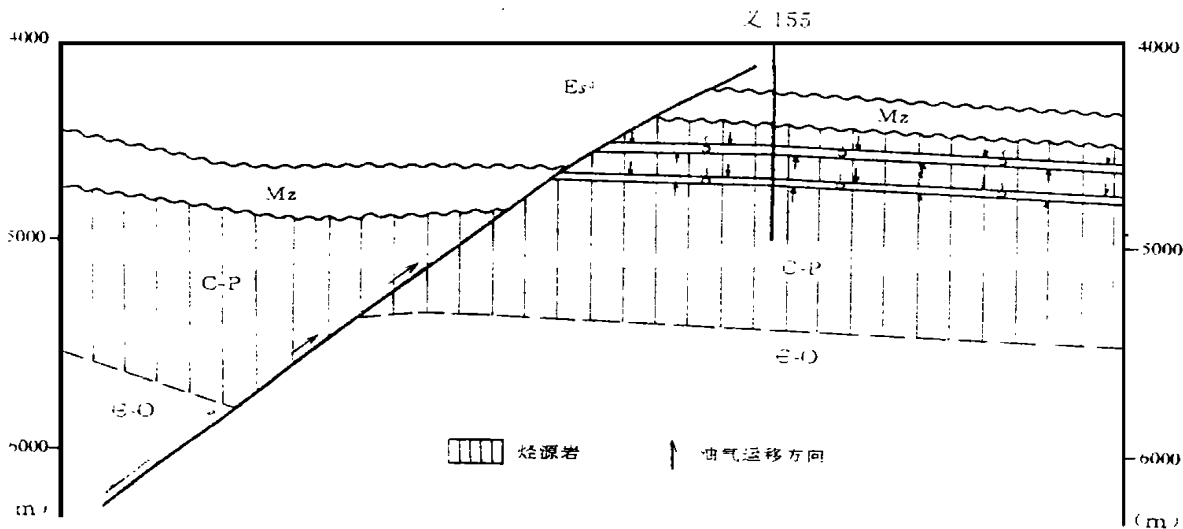


图 4 弧西地区义 155 井石炭-二叠系天然气藏成藏模式图

稳定日产气  $23.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 日产凝析油 158t。是济阳坳陷深层唯一一口获工业气流的井。

### 3.2 天然气及凝析油地化特征及成因

桩古 10-17 井气样分析结果表明(表 1), 甲烷含量占 83.59%, 重烃含量占 11.75%, 二氧化碳含量占 4.15%, 甲烷系数  $C_1/(C_1+C_2)$  为 0.88, 干燥系数  $C_1/(C_2+C_3)$  为 8.3, 属组分偏湿的烃类气。天然气的碳同位素和轻烃特征为:  $\delta^{13}C_1$  为  $-38.20\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_2$  值  $-25.16\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_3$  为  $-24.39\text{‰}$ ,  $\delta^{13}C_4$  为  $-25.03\text{‰}$ , 苯指数含量低, 为 2, 具过熟油型气特征。

凝析油烷烃色谱碳数分布范围为  $C_6-C_{27}$ , 以低碳占优势, 主峰碳为  $C_3$ , 也具有过熟特点。

在  $\delta^{13}C_1-C_1/(C_2+C_3)$  甲烷成因鉴别图上(图 1), 桩古 10-17 井落在凝析油伴生气和煤型气区, 但与原油伴生气区相隔较近, 而与煤型气区相隔较远。

综合以上分析, 桩古 10-17 井的天然气与前两个地区的天然气相比, 二氧化碳含量明显减少(低 1~2 倍), 重烃含量增加(甲烷系数低, 8%~11%), 苯含量变低(低 1~17 倍), 应属过熟油型气。

### 3.3 气源追踪

桩西潜山披覆构造带是一个北西-南东走向的继承性低隆起, 西北与埕北凹陷相接, 东与桩东凹陷相连, 南以桩西断层为界与五号桩洼陷相邻。由于潜山地层呈北东倾向, 除西南部高部位紧靠桩西断层附近缺失石炭-二叠系而直接被下第三系沙三段和沙四段覆盖之外, 潜山冀部均有石炭-二叠系煤系地层覆盖形成垂向封堵, 因而西北部的埕北凹陷和东部的桩东凹陷不可能向潜山内幕下古生界碳酸盐岩风化壳提供油气。相反, 西南部五号桩洼陷沙三段和沙四段暗色泥岩通过桩西断层或不整合面直接或间接地与潜山上的下古生界产层接触, 具备提供油气源的条件。那么, 桩古 10-17 井的天然气究竟来自五号桩洼陷的哪套层系呢?

#### 3.3.1 天然气-源岩吸附气碳同位素直接对比

桩古 10-17 井天然气  $\delta^{13}C_1$  为  $-38.20\text{‰}$ , 位于桩西断层下降盘五号桩洼陷的桩 62 井沙三段暗色泥岩吸附气  $\delta^{13}C_1$  为  $-37.2\text{‰}$ , 两者差别不大, 并根据天然气运移后的同位素分馏原理, 说明沙三段很可能是其主要气源。

#### 3.3.2 天然气与生油气洼陷中原生油气藏原油伴生气间接对比

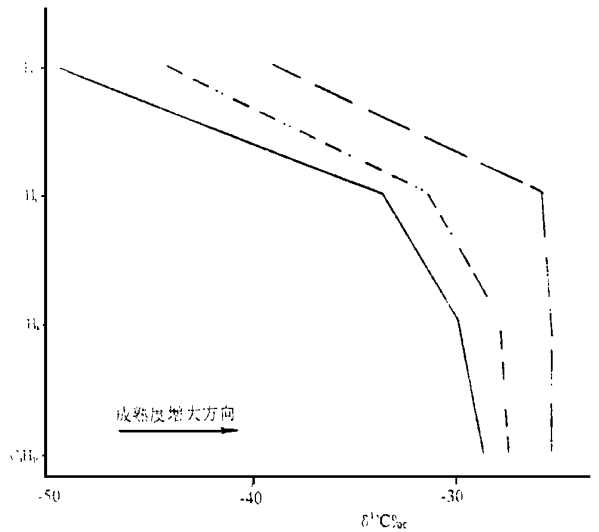


图 5 桩 52E<sup>3</sup>s、桩古 25O-C、桩古 10-17O-C 天然气碳同位素类型曲线图  
——为桩 52E<sup>3</sup>s 原油伴生气; - - -为桩古 25O-C 原油伴生气; — · —为桩古 10-17O-C 凝析气

1,3-反二甲基环戊烷  
1,2-反二甲基环戊烷

环己烷  
甲基环戊烷

2-甲基戊烷  
3-甲基戊烷

正庚烷  
2-甲基己烷

3-甲基戊烷  
正己烷

3-甲基己烷  
正庚烷

2,4-二甲基戊烷  
正己烷

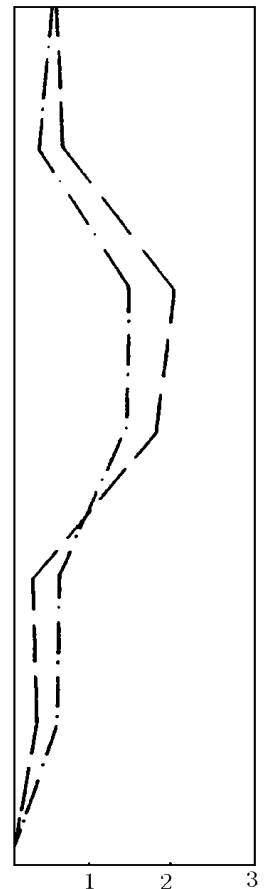


图 6 桩古 10-17 井天然气与五号桩洼陷源岩吸附气轻烃配对对比图  
——为桩古 10-17 井奥陶系天然气; - - -为桩 62 井沙三段源岩吸附气

图 5 描绘了桩西潜山桩古 25 井原油伴生气、桩

古 10- 17 井过熟油型气和与桩西潜山毗邻的生油气洼陷中桩 52 井原生油藏原油伴生气的碳同位素分布曲线, 图上反映出从下第三系生油气洼陷至下古生界潜山, 随着地温梯度的增加, 油气的热成熟作用也越来越强, 甲烷及其同系物的碳同位素同步加重, 但曲线类型十分相似, 说明三者有较好的可比性, 都来源于五号桩洼陷下第三系沙三段暗色泥岩。

### 3. 3. 3 天然气与源岩吸附气轻烃对比

图 6 为桩古 10- 17 井天然气与五号桩洼陷桩 62 井沙三段源岩吸附气轻烃配对对比图, 该图反映两者的轻烃组成极为相似, 有良好的亲缘关系, 说明桩古 10- 17 井的天然气应来源于五号桩洼陷沙三段暗色泥岩。

### 3. 3. 4 利用<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 确定气源

从表 2 可看出, 桩古 10- 17 井天然气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值与本地区沙三段原生油气藏伴生气和东濮、冀中地区来自第三系的油型气指标大体一致, 具有相同的年代累积效应, 说明它也应来自于第三系烃源岩, 为前面论证其气源岩为下第三系沙三段暗色泥岩提供了旁证。

表 2 桩古 10- 17 井天然气与其它地区天然气<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 值对比表

氩同位素	东濮第三系油型气	冀中第三系油型气	济 阳	
			桩古 10- 17 天然气	沙三段原生油藏伴生气
<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	243 ~ 626	298 ~ 896	396. 4	327 ~ 349

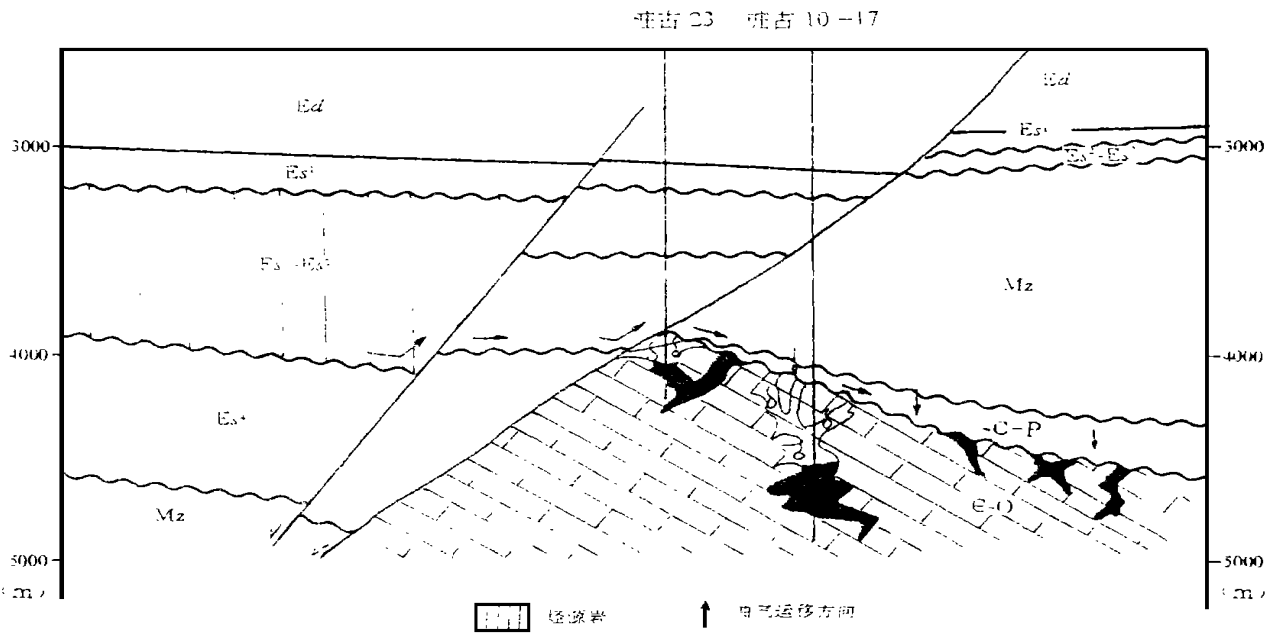


图 7 桩西地区桩古 10- 17 井寒武- 奥陶系天然气藏成藏模式图

### 3. 4 天然气成藏模式

与桩西潜山毗邻的五号桩洼陷沙三段暗色泥岩所生的天然气, 通过桩西断层, 运移至桩西潜山聚集成藏, 并在潜山相对较高的地温影响下, 天然气热成熟作用进一步加剧, 形成了桩古 10- 17 井过熟凝析油气藏。

### 参 考 文 献

- 1 刘文汇, 徐永昌. 天然气的混合类型及其判识. 天然气地球科学, 1992(1): 18 ~ 24
- 2 向奎. 济阳拗陷天然气地质特征及勘探方向. 天然气工业, 1992(5): 13 ~ 19

(收稿日期: 1996 年 9 月 26 日)

(下转 209 页)