

文章编号: 0253-2697(2007)01-0038-05

鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析

程付启¹ 金强¹ 刘文汇² 陈孟晋³

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061; 2 中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083;

3 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要: 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳具有同时捕集上古生界煤成气和下古生界油型气的地质条件,为煤成气和油型气混源成藏。为了确定中部气田混源气的混合比例,并探讨其成藏特征,将上古生界煤成气和下古生界油型气作为2个端元,利用甲烷、乙烷碳同位素组成和体积分数与母质成熟度的经验关系式,建立了两源混合比例动态判定模型。由该模型可知,不同井中两端元气的混合比例相差很大,煤成气和油型气比率分别为22%~84%和16%~78%。这一结果表明,奥陶系风化壳气藏是由多个相互分隔的小气藏组成的;上古生界煤成气进入风化壳的方式,早期以整体顶渗为主,后期转为从侵蚀沟侧向侵入。

关键词: 鄂尔多斯盆地;中部气田;风化壳气藏;混源气;成藏过程

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

Formation of source-mixed gas reservoir in Ordovician weathering crust in the central gas-field of Ordos Basin

Cheng Fuqi¹ Jin Qiang¹ Liu Wenhui² Chen Mengjin³

(1. Faculty of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China;

3. PetroChina Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The Ordovician weathering crust of the central gas-field in Ordos Basin could capture the Upper Paleozoic coal-typed gas and the Lower Paleozoic oil-typed gas and was proved as a source-mixed gas reservoir. The volume content and stable carbon isotopic compositions of methane and ethane have the quantitative relationship with the maturities of their source rocks. By using these relationships, a model for calculating the ratio of source-mixed gas was established. According to the model, the percentages of the Upper Paleozoic coal-typed gas and the Lower Paleozoic oil-typed gas are in the range of 22% to 84% and 16% to 78%, respectively. The large ranges of ratio between the two kinds of gases suggest that the gigantic weathering crust reservoir was made up of several isolated small gas pools. It is also shown that the main way for coal-typed gas entering the crust reservoir was eroded channel.

Key words: Ordos Basin; central gas-field; weathering crust; source-mixed gas; gas reservoir formation

鄂尔多斯盆地中部气田的主要产层是奥陶系风化壳,其天然气具有煤成气和油型气混合的地球化学特征。也就是说,奥陶系风化壳具有混源成藏的地质条件,可以同时接受上古生界煤成气与下古生界油型气。长期以来,对于鄂尔多斯盆地中部气田天然气的来源问题存在很大的争议。一种观点认为天然气主要来自上古生界煤成气^[1-4];另一种观点认为主要来自下古生界油型气^[5-9]。笔者对混源气成藏地质条件进行了分析,通过建立该区煤成气和油型气的地球化学模型及混合比例估算模型来确定两种类型天然气的混合比例,并根据估算结果对风化壳气藏特征及混源成藏过程进行了研究。

1 混源成藏的地质条件

1.1 气源条件

鄂尔多斯盆地普遍发育上古生界煤系和下古生界碳酸盐岩两套气源岩。上古生界煤系气源岩直接覆盖在奥陶系风化壳侵蚀面之上,以煤、炭质泥岩和生屑灰岩为主,有机质类型为Ⅲ型;煤层总有机碳含量达78.72%,泥、灰岩总有机碳含量为0.61%~2.67%。下古生界碳酸盐岩气源岩分布在风化壳之下,岩性以泥晶灰岩、含泥灰岩、含藻云岩和泥质云岩为主,有机质类型为Ⅰ型;总有机碳含量为0.15%~0.34%,平均为0.28%,陈安定^[10]根据“物质平衡法”和“生烃热

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB209102)资助。

作者简介:程付启,男,1978年10月生,2002年获石油大学(华东)学士学位,现为中国石油大学(华东)在读博士研究生,主要从事石油地质与油气地球化学研究。E-mail:chengfuq9804@yahoo.com.cn

模试验反推法”计算其原始总有机碳含量为 0.35%~0.44%。两套气源岩均已进入高一过成熟演化阶段,都能为气藏供给大量天然气^[8,11-12]。

1.2 生储盖组合特征

上、下古生界两套气源岩分别位于风化壳的上部和下部,与风化壳岩溶孔、洞、缝等储集空间构成“夹板”式组合。马五段第五亚段黑色泥质灰岩作为风化壳储集体的底板与石炭系底部本溪组铝土质泥岩及其上覆太原组暗色泥岩相结合,对奥陶系风化壳构成“下隔上盖”的组合模式^[13]。另外,风化壳古残丘区常因地下水活动微弱导致古岩溶缝洞系统不发育,或即使有孔洞存在也被成岩晚期的自生矿物所充填,形成储层上倾方向的岩性或成岩遮挡带。因此,整个风化壳可以视为“上盖下隔内部遮挡”的储集体系。

2 混源气混合比例估算

2.1 混合比例估算方法

混源气是端元气的物理混合。假设混源气由 A、B 端元气组成,根据质量守恒原理,混源气中烃类气体 i 的碳同位素值可表示成端元气中 i 碳同位素值的加权平均^[5,14-16],即

$$\delta^{13}C_{i(m)} = \frac{\alpha \cdot \varphi_{i(A)} \cdot \delta^{13}C_{i(A)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{i(B)} \cdot \delta^{13}C_{i(B)}}{\alpha \cdot \varphi_{i(A)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{i(B)}}$$

式中 $\delta^{13}C_{i(m)}$ 为混源气中 i 的碳同位素值; α 为混源气中端元气 A 的比率,%; $\varphi_{i(A)}$ 和 $\varphi_{i(B)}$ 分别为端元气 A、B 中 i 的体积分数; $\delta^{13}C_{i(A)}$ 和 $\delta^{13}C_{i(B)}$ 分别为 A、B 中 i 的碳同位素值。

研究证明,甲、乙烷碳同位素值($\delta^{13}C_1$, $\delta^{13}C_2$)是判断天然气成因类型的有效指标,因此可以根据混源气的 $\delta^{13}C_{1(m)}$ 、 $\delta^{13}C_{2(m)}$ 与端元气的 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 、混合比例 α 的定量关系构建混合比例定量判别模型。又因为端元气的 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$ 与母质成熟度(R_o)存在一定的函数关系(称为端元气的地球化学模型)^[16,20],所以利用端元气的地球化学模型代替确定的数值,可以构建混源气甲烷、乙烷碳同位素值与端元气混合比例及源岩成熟度的动态定量模型^[21-22]。

2.2 估算模型及结果

2.2.1 端元气地球化学模型

根据前人研究成果^[17-20],并结合中部气田的气源岩特征,选用刘文汇等^[20]的二阶段演化模式作为上古生界煤成气甲烷碳同位素组成的地球化学模型,即

$$\begin{cases} \delta^{13}C_{1(c)} = 48.77 \lg R_{o1} - 34.1 & (R_{o1} \leq 0.9\%) \\ \delta^{13}C_{1(c)} = 22.42 \lg R_{o1} - 34.8 & (R_{o1} > 0.9\%) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\delta^{13}C_{1(c)}$ 为煤成气中甲烷碳同位素值; R_{o1} 为煤系气源岩成熟度。

煤成气的其他模型利用鄂尔多斯盆地模拟和实测参数值回归得到,即

$$\delta^{13}C_{2(c)} = 9.15 \lg R_{o1} - 26.46 \quad (2)$$

$$\varphi_{1(c)} = 28.91 \lg R_{o1} + 88.38 \quad (3)$$

$$\varphi_{2(c)} = -7.96 \lg R_{o1} + 3.43 \quad (4)$$

式中 $\delta^{13}C_{2(c)}$ 为煤成气中乙烷碳同位素值; $\varphi_{1(c)}$ 和 $\varphi_{2(c)}$ 分别为煤成气中甲、乙烷的体积分数。

下古生界碳酸盐岩生气母质以 I 型干酪根为主,其甲烷碳同位素组成的地球化学模型可利用沈平等^[17]的公式,即

$$\delta^{13}C_{1(o)} = 21.72 \lg R_{o2} - 43.3 \quad (5)$$

式中 $\delta^{13}C_{1(o)}$ 为油型气中甲烷碳同位素值; R_{o2} 为碳酸盐岩气源岩成熟度。

其他模型由鄂尔多斯盆地模拟和实测参数值回归得到,即

$$\delta^{13}C_{2(o)} = 9.01 \lg R_{o2} - 34.9 \quad (6)$$

$$\varphi_{1(o)} = 4.56 \lg R_{o2} + 94.71 \quad (7)$$

$$\varphi_{2(o)} = -1.12 \lg R_{o2} + 0.98 \quad (8)$$

式中 $\delta^{13}C_{2(o)}$ 为油型气中乙烷碳同位素值; $\varphi_{1(o)}$ 和 $\varphi_{2(o)}$ 分别为油型气中甲、乙烷的体积分数。

2.2.2 混合比例估算模型和图版

忽略组分和同位素等参数运聚时的分馏效应,可由煤成气和油型气地球化学模型(式 1~8)直接构建混合比例判别模型,即

$$\delta^{13}C_{1(m)} = \frac{\alpha \cdot \varphi_{1(c)} \cdot \delta^{13}C_{1(c)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{1(o)} \cdot \delta^{13}C_{1(o)}}{\alpha \cdot \varphi_{1(c)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{1(o)}} \quad (9)$$

$$\delta^{13}C_{2(m)} = \frac{\alpha \cdot \varphi_{2(c)} \cdot \delta^{13}C_{2(c)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{2(o)} \cdot \delta^{13}C_{2(o)}}{\alpha \cdot \varphi_{2(c)} + (100 - \alpha) \cdot \varphi_{2(o)}} \quad (10)$$

由盆地沉积埋藏史可知,该区奥陶系与石炭系之间缺失了 1.35 亿年的地层。石炭系沉积前,奥陶系气源岩已经历了相当长的埋藏历史,经受了一定的地温作用,成熟度约为 0.3%。因此,两套源岩成熟度不连续,下古生界 R_{o2} 比上古生界 R_{o1} 高约 0.3%^[10]。石炭系沉积之后,两者同步演化。上古生界煤系在 R_{o1} 为 0.5% 时开始大量生成煤成气,并运移至风化壳储层与已有油型气混合成藏。利用式 9 和式 10 试算出不同 α (0~100,间隔为 10) 情况下 R_{o2} 、 R_{o1} 对应的 $\delta^{13}C_{1(m)}$ 和 $\delta^{13}C_{2(m)}$,并根据计算数据绘制出中部气田奥陶系风化壳煤成气与油型气混合比例估算图版(图 1)。

2.2.3 混合比例估算结果

将实测的 $\delta^{13}C_1$ 值和 $\delta^{13}C_2$ 值投到估算图版上, 就可直接读出煤成气、油型气的比例(表1)。由于图版建立的基础是端元气 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 、 $\varphi(CH_4)$ 、 $\varphi(C_2H_6)$ 与母质成熟度(R_o)的定量关系, 而这些关系均由回归

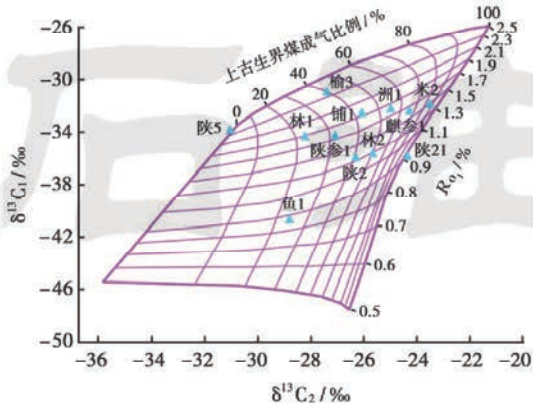


图1 鄂尔多斯盆地煤成气与油型气混合比例估算图版

Fig. 1 Estimating plate of mixing ratio of coal-type gas to oil-type gas in Ordos Basin

得到, 本身就存在一定的不确定性, 因此, 所得比例也必然存在一定误差。但是, 估算结果能有效地反映两种来源气的比例关系, 满足成藏分析的需要。

3 混源成藏过程

由表1可知, 不同井中两种天然气的混合比例变

化很大, 其中陕5井全为油型气, 陕21井全为煤成气。除这两口井外, 其他井煤成气和油型气所占比例分别为22%~84%和16%~78%。如此大的变化范围, 说明奥陶系风化壳内部并不连通, 通常所指的风化壳气藏是由多个相互不连通的小气藏组成的^[13]。

表1 奥陶系风化壳煤成气与油型气混合比例估算结果

Table 1 Mixing ratio of coal-type gas to oil-type gas in Ordovician weathering crust

井号	混源气碳同位素组成/‰		估算结果	
	$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	煤成气/油型气	R_{o1} /%
陕5	-33.84	-31.33	0/100	2.40
陕参1	-34.26	-27.22	32/68	1.76
林1	-34.31	-28.32	22/78	1.89
陕2	-35.87	-26.49	40/60	1.35
林2	-35.62	-25.85	50/50	1.29
陕21	-36.01	-24.48	100/0	0.92
榆3	-30.94	-27.52	40/60	2.35
麒参1	-32.30	-24.48	65/35	1.64
洲1	-32.17	-25.20	55/45	1.85
米2	-31.86	-23.75	84/16	1.50
铺1	-32.56	-26.23	42/58	1.94
鱼1	-40.55	-28.90	24/76	0.88

* 同位素数据来自文献[1]。

对上古生界煤成气进入风化壳的方式有两种不同的观点: ①煤成气以整体顶渗的方式垂直向下渗入^[3]; ②从奥陶系顶部侵蚀沟处侧向侵入^[5]。从图2可以看

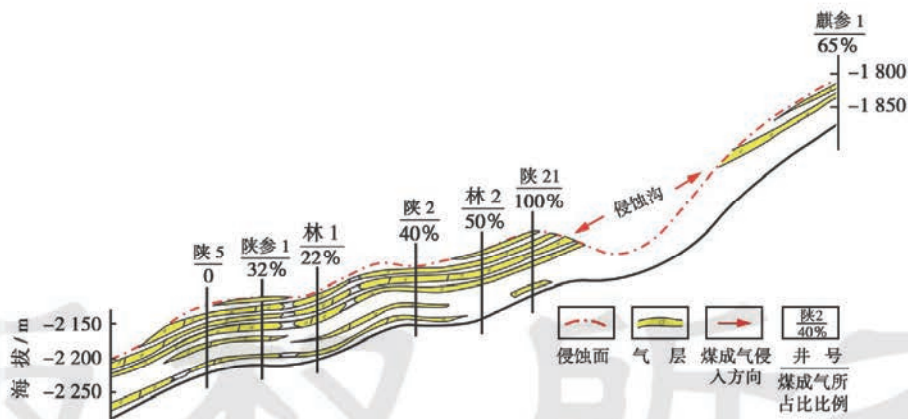


图2 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳气藏剖面

Fig. 2 Profile of Ordovician weathering crust reservoir in the central gas-field of Ordos Basin

出, 混源气中煤成气比例向侵蚀沟处增加, 说明煤成气主要是从侵蚀沟处进入风化壳的。又因为煤成气在相互分隔的小气藏中普遍存在, 所以推知煤成气曾整体向下渗入风化壳储层, 并且这种运移方式应发生在圈闭形成的早期。

根据研究区沉积埋藏史、圈闭形成史和生排烃史, 将风化壳混源成藏过程概括如下:

(1) 圈闭形成期, 即加里东运动中晚期—海西运动中晚期。在加里东运动中晚期, 受中央古隆起控制, 盆地中部奥陶系顶部遭受风化剥蚀, 形成了分布广泛的岩溶孔、洞、缝储集网络。至海西运动中晚期, 经历了约100Ma风化剥蚀的风化壳开始埋藏, 并和下部碳酸盐岩以及上古生界煤系地层形成“夹板”式组合。方解石胶结作用增强了储集空间外围的封闭性, 也构成

了储集空间的内部遮挡,因此形成了由许多独立储集体组成的古地貌一岩性圈闭系统[图3(a)]。

(2) 混源成藏初始期,即印支运动初期,两套气源岩普遍生烃,并向圈闭充注。由于圈闭顶部泥岩封隔层封闭性不强,上古生界煤成气以整体下渗的方式进入风化壳,并与下古生界油型气混合成藏。此时圈闭刚刚形成,两套气源岩生气量也很小,因而形成气藏的规模也不大[图3(b)]。

(3) 混源成藏高峰期,即燕山运动期,两套气源岩

均达到生气高峰,圈闭也已完全形成。由于风化壳上部铝土岩盖层封闭强度增加,上古生界煤成气主要从侵蚀沟处侧向侵入风化壳,并和下古生界油型气混合成藏[图3(c)]。

(4) 调整定型期,即燕山运动期后,盆地东部抬升,中部演变为西倾大单斜,气藏定型为目前的形态。由于后期构造活动平缓,且岩溶台地的侵蚀充填带能够有效阻止天然气向上遗失,因而气藏中天然气组成变化不大[图3(d)]。

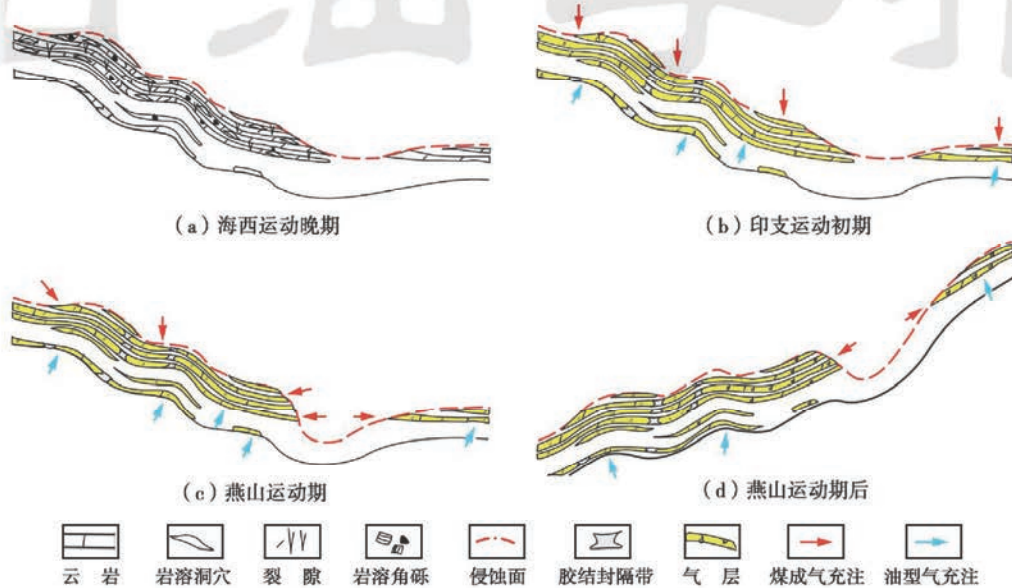


图3 中部气田奥陶系风化壳混源成藏过程

Fig.3 Formation process of Ordovician weathering crust source-mixed gas reservoir in the central gas-field of Ordos Basin

4 结论

(1) 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳具有上古生界煤成气和下古生界油型气混合成藏的地质条件,气藏中两种来源天然气的混合比例变化很大。煤成气和油型气所占比例分别为22%~84%和16%~78%,显示了风化壳本身及成藏过程的复杂性。

(2) 气藏形成早期,上古生界煤成气以垂直顶渗方式进入奥陶系风化壳储层,但供气量不大。随着上古生界盖层致密性的增强,上古生界煤成气只能从侵蚀沟处侧向侵入风化壳储层,混合比例变化较大,甚至出现煤成气比例超过油型气的现象。

(3) 甲烷、乙烷组分和碳同位素组成是判识混源气、估算混合比例的有效参数,除受母质类型与成熟度的控制外,它们还受到运聚过程的影响。但中部气田天然气运移距离短,成藏之后天然气组成变化小,因而建立模型时忽略了成藏作用的影响。

参 考 文 献

[1] 关德师,张文正,裴戈.鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系产层的油

气源[J].石油与天然气地质,1993,14(3):191-199.

Guan Deshi, Zhang Wenzheng, Pei Ge. Oil-gas sources of Ordovician reservoir in gas field of central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1993, 14(3): 191-199.

[2] 张士亚.鄂尔多斯盆地天然气气源及勘探方向[J].天然气工业,1994,14(3):1-4.

Zhang Shiya. Natural gas source and explorative direction in Eerduosi Basin[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(3): 1-4.

[3] 夏新宇,赵林,李剑锋,等.长庆气田天然气地球化学特征及奥陶系气藏成因[J].科学通报,1999,44(10):1116-1119.

Xia Xinyu, Zhao Lin, Li Jianfeng, et al. Geochemical characteristics of natural gas and formation of Ordovician gas reservoir of the Changqing Gas Field[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(10): 1116-1119.

[4] 戴金星,李剑,罗霞,等.鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J].石油学报,2005,26(1):18-25.

Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, et al. Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin[J]. Acta petrolei Sinica, 2005, 26(1): 18-25.

[5] 陈安定.陕甘宁盆地中部气田奥陶系天然气的成因及运移[J].石油学报,1994,15(2):1-9.

Chen Anding. Origin and migration of natural gas in Ordovician

- reservoir in Shangaming Basin central gas field[J]. *Acta Petroli Sinica*, 1994, 15(2): 1-9.
- [6] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 186.
Xu Yongchang. Genetic theory of natural gas and its approach [M]. Beijing: Science Press, 1994: 186.
- [7] 黄第藩, 熊传武, 杨俊杰, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田气源判识和天然气成因类型[J]. *天然气工业*, 1996, 16(6): 1-5.
Huang Difan, Xiong Chuanwu, Yang Junjie, et al. Gas source discrimination and natural gas genetic types of central gas field in E' erduosi Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1996, 16(6): 1-5.
- [8] 陈安定. 论鄂尔多斯盆地中部气田混合气的实质[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(2): 33-38.
Chen Anding. Feature of mixed gas in central gas field of Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(2): 33-38.
- [9] 刘文汇, 孙明良, 徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气同位素特征及气源示踪[G] // 徐永昌. 天然气地球化学文集. 北京: 地质出版社, 2002: 335-340.
Liu Wenhui, Sun Mingliang, Xu Yongchang. Isotopic characteristics of natural gas in Ordos Basin and tracing source[G] // Xu Yongchang. Collected papers on geochemistry of natural gas. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 335-340.
- [10] 陈安定. 陕甘宁盆地奥陶系源岩及碳酸盐岩生烃的有关问题讨论[J]. *沉积学报*, 1996, 14(增刊): 90-99.
Chen Anding. Carbonate source rocks of the Ordovician in Shaan-Gan Ning Basin and discussion on the hydrocarbon generation of carbonates[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(sup.): 90-99.
- [11] 孙冬敏, 秦胜飞, 李先奇. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳产层天然气来源分析[M] // 戴金星, 傅诚德, 关德范. 天然气地质研究新进展. 北京: 石油工业出版社, 1997: 46-54.
Sun Dongmin, Qin Shengfei, Li Xianqi. Origin of natural gases of Ordovician weathering crust reservoir in Ordos Basin[M] // Dai Jinxing, Fu Chengde, Guan Defan. Advance in natural gas geology. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 46-54.
- [12] 汪泽成, 陈孟晋, 王震, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界克拉通拗陷盆地煤成气成藏机制[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 8-12.
Wang Zecheng, Chen Mengjin, Wang Zhen, et al. Simulation analysis on formation mechanism of coal-formed gas reservoir in intercratonic depression of the Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2006, 27(1): 8-12.
- [13] 郝石生, 高耀斌, 黄志龙. 鄂尔多斯中部大气田聚集条件及运聚动平衡[J]. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(6): 488-492.
Hao Shisheng, Gao Yaobin, Huang Zhilong. Accumulation condition and migration-accumulation kinetic balance of big gas field in the Central Ordos Basin[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(6): 488-492.
- [14] Jenden P D, Drazan D J, Kaplan I R. Mixing of thermogenic natural gases in northern Appalachian Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 77(6): 980-998.
- [15] 夏新宇, 李春园, 赵林. 天然气混源作用对同位素判源的影响[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(3): 89-90.
Xia Xinyu, Li Chunyuan, Zhao Lin. Influence of mixture on isotope indices in gas source discrimination[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(3): 89-90.
- [16] Berner U, Faber E. Maturity related mixing model for methane, ethane and propane, based on carbon isotopes[J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13(1/3): 67-72.
- [17] 沈平, 徐永昌, 王先彬, 等. 气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 1-243.
Shen Ping, Xu Yongchang, Wang Xianbin, et al. Studies on geochemical characteristics of gas-source rock and natural gas and mechanism of genesis of natural gas[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 1-243.
- [18] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学(卷一)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 386.
Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. Natural gas geology in China (volume 1)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 386.
- [19] Berner U, Faber E. Empirical carbon isotope/maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous organic matter, based on dry, open system pyrolysis[J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(10): 947-955.
- [20] 刘文汇, 徐永昌. 煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J]. *地球化学*, 1999, 28(4): 359-365.
Liu Wenhui, Xu Yongchang. A two-stage model of carbon isotopic fractionation in coal-gas[J]. *Geochimica*, 1999, 28(4): 359-365.
- [21] 金强, 程付启, 刘文汇. 混源气藏及混源比例研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(2): 22-24.
Jin Qiang, Cheng Fuqi, Liu Wenhui. Study on source-mixed gas reservoirs and source-mixed ratios[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(2): 22-24.
- [22] 程付启, 金强. 两元混合天然气定量研究新方法[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3): 554-558.
Cheng Fuqi, Jin Qiang. A novel approach for quantitative study on two-source mixed natural gas reservoirs[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 554-558.

(收稿日期 2006-01-09 改回日期 2006-03-27 编辑 王 秀)