

郑定业,姜福杰,刘铁树,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然气成因类型及气源分析[J].地球科学与环境学报,2018,40(2):203-214.
ZHENG Ding-ye,JIANG Fu-jie,LIU Tie-shu,et al. Genetic Types and Sources of Natural Gas in Linxing Area, the Eastern Margin of Ordos Basin,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2018,40(2):203-214.

鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然气成因类型及气源分析

郑定业^{1,2},姜福杰^{1,2*},刘铁树³,庞雄奇^{1,2},陈晓智³,
邵新荷^{1,2},李龙龙^{1,2},呼延钰莹^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与
探测国家重点实验室,北京 102249; 3. 中海油研究总院,北京 100028)

摘要:鄂尔多斯盆地东缘临兴地区致密砂岩气勘探程度低,对其天然气地球化学特征及天然气源岩的认识较为局限。通过对天然气组分和碳同位素特征分析,利用生烃动力学实验计算煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩3类烃源岩生烃强度,结合3类烃源岩生烃潜力,建立天然气源岩生气贡献率计算模型。结果表明:临兴地区烃源岩母质类型以Ⅲ型、Ⅱ₂型干酪根为主,有机质丰度高,全区烃源岩大都处于热演化成熟阶段;天然气碳同位素值较重,显示出煤型气特征;天然气碳同位素值在纵向运移过程中未发生分异作用,在平面比值变化上未发生倒转,表现出近源、持续充注的特点;天然气主要来源于本溪组—太原组煤岩,其生气贡献率分别为43.3%、43.8%;天然气与烃源岩具有良好的垂向关系,有效烃源岩区可在一定程度上控制临兴地区天然气有利区的勘探。

关键词:地球化学;致密砂岩气;生烃动力学;成因类型;气源分析;生气贡献率;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1;P618.130.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2018)02-0203-12

Genetic Types and Sources of Natural Gas in Linxing Area, the Eastern Margin of Ordos Basin, China

ZHENG Ding-ye^{1,2}, JIANG Fu-jie^{1,2*}, LIU Tie-shu³, PANG Xiong-qi^{1,2},
CHEN Xiao-zhi³, SHAO Xin-he^{1,2}, LI Long-long^{1,2}, HUYAN Yu-ying^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The exploration level of tight sandstone gas is low in Linxing area, the eastern margin of Ordos Basin, China, and the cognitions of geochemical characteristics and source rocks of natural gas are relatively limited. The natural gas components and carbon isotope characteristics were analyzed; the hydrocarbon generating intensities of coal rock, carbonaceous mudstone and dark mudstone were calculated by using the experiment of hydrocarbon generation kinetics; combined with the hydrocarbon generation potential of three source rocks, the calculation model for natural gas generation contribution rate of source rocks was established. The results show

收稿日期:2018-01-13;修回日期:2018-02-27 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41102085,41572106);国家自然科学基金联合基金重点项目(U1262205)

作者简介:郑定业(1991-),男,河南周口人,工学硕士研究生,E-mail:272024982@qq.com。

* 通讯作者:姜福杰(1979-),男,黑龙江兰西人,副教授,工学博士,E-mail:jfjhtb@163.com。

that the main parent material types of source rocks are III-type and II₂-type kerogens, the organic matter has high abundance, and the source rocks are mostly in the stage of thermal maturation; the carbon isotope values of natural gas are relatively heavy, and show the characteristics of coal-type gas; the carbon isotope values of natural gas have no differentiation in the process of vertical migration, and also no inversion in the change of plane ratio, indicating the characteristics of near source and continuous injection; the natural gas mainly derives from the coal rocks of Benxi Formation-Taiyuan Formation, and the gas generation contribution rates are 43.3% and 43.8%, respectively; the natural gas has a good vertical matching relationship with source rocks, and the effective source rocks control the exploration of favorable areas of natural gas in Linxing area.

Key words: geochemistry; tight sandstone gas; hydrocarbon generation kinetics; genetic type; gas source analysis; gas generation contribution rate; Ordos Basin

0 引言

随着常规油气勘探开发程度不断降低,具有丰富储量的非常规油气资源开始引起广泛关注。致密砂岩气作为非常规油气资源之一,具有分布广泛、资源潜力巨大等特点^[1-3]。鄂尔多斯盆地是中国第二大含油气盆地,天然气类型多样且分布广泛^[4]。自20世纪80年代,前人在鄂尔多斯盆地开展了大量勘探研究,并取得巨大成果,90年代中期将勘探重点从下古生界向上古生界碎屑岩岩性圈闭转变,陆续发现了苏里格、神木等大型致密砂岩气田^[5-6]。目前,国内外学者针对已发现的鄂尔多斯盆地大气田的天然气类型、分布特征以及气源等问题进行了大量研究,普遍认为鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气类型以煤型气为主,气源为石炭系—二叠系烃源岩,属于“自生自储”型^[7-15]。近年来,随着鄂尔多斯盆地勘探范围不断扩大,盆地边缘上古生界油气显示较为频繁,特别是盆地东缘临兴地区致密砂岩气勘探取得了一定进展,显示出巨大的勘探潜力^[16-21]。那么,盆地边缘上古生界油气类型是否符合全盆地油气显示特征?天然气-烃源岩耦合关系是否满足近源充注?这些问题的解决是对鄂尔多斯盆地边缘各地区以及整个鄂尔多斯盆地天然气勘探、认识的有益补充。基于此,本文对鄂尔多斯盆地东缘临兴地区23口井的48个组分数据及14个碳同位素数据进行系统整理分析,判别天然气地球化学特征及成因类型;通过生烃动力学实验,分析临兴地区烃源岩生烃潜力,建立天然气源岩生气贡献率计算模型,辨别气源归属,为临兴地区天然气勘探提供理论依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北陆块西部,是以古生代、

中生代陆相沉积为主体的大型内陆盆地,具有盆内稳定、盆缘活跃、南北隆升、西冲东抬的构造特征。盆地发育多套含油气系统,是一个含油气远景丰富的大型沉积盆地^[11-12]。临兴地区位于鄂尔多斯盆地东缘的临县、兴县一带,面积约2 620 km²,构造上横跨陕北斜坡和晋西挠褶带(图1),东中部有紫金山岩体侵入,呈东高西低之势。根据野外露头及钻井结果,研究区主要发育石炭系本溪组、下二叠统太原组 and 山西组,中二叠统石盒子组以及上二叠统石千峰组地层(图2)。其中,石炭系—下二叠统地层主

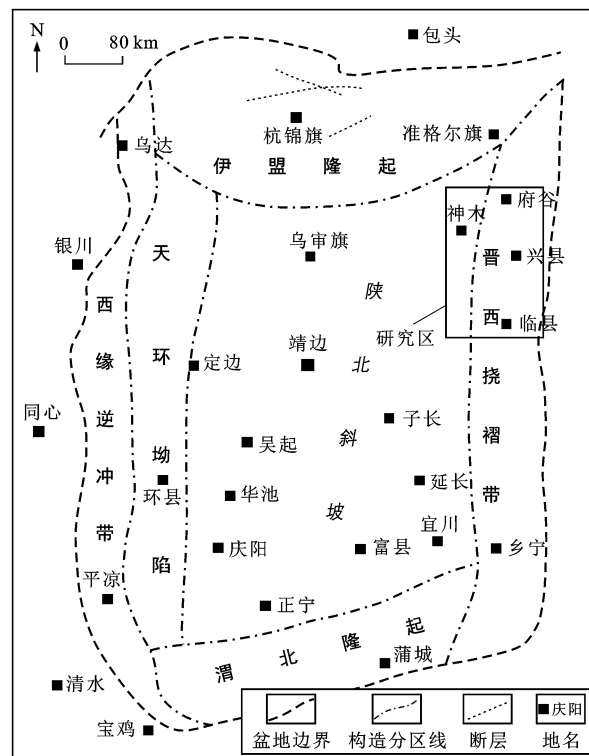


图1 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区构造简图

Fig. 1 Structural Map of Linxing Area in the Eastern Margin of Ordos Basin

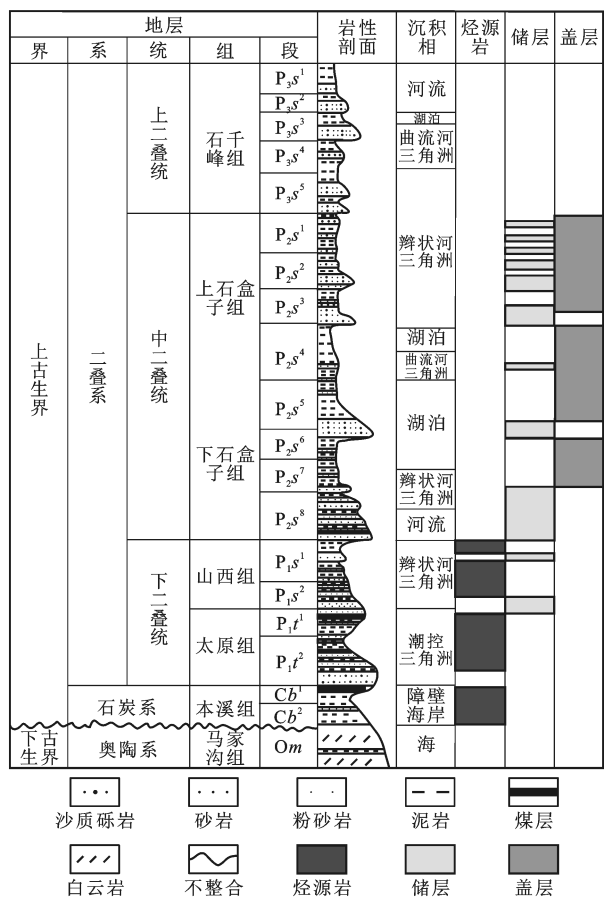


图 2 地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic Integrated Histogram

要发育煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩 3 种岩性,是研究区 3 类主要烃源层;中二叠统石盒子组地层划分为上、下石盒子组,砂泥岩互层发育,上石盒子组厚层泥岩可作为区域盖层,与下伏储集层构成多套储盖空间关系。晚古生代,研究区经历海相、海陆过渡相和陆相沉积环境的演化,并且早白垩纪末期紫金山岩浆活动剧烈,导致临兴地区烃源岩成熟度普遍较高,为该地区多套气层的发育奠定了基础。

临兴地区天然气藏具备典型的致密砂岩气藏地质特征,石盒子组地层为致密砂岩气主要储集层,发育三角洲分支河道砂体。纵向上,下石盒子组地层与下伏烃源层紧邻,可为气藏发育提供良好基础;平面上,致密砂岩广泛连续分布,整体储层物性条件差,发育天然裂缝,气水关系复杂,无明显气水层。气藏普遍负压异常,无统一的压力系统,含气饱和度差异较大,气藏分布范围较大,具有一定程度连续型、气水边界不受构造控制等特征。

2 烃源岩地球化学特征

以谢英刚等对鄂尔多斯盆地临兴地区石炭系—

二叠系 3 类烃源岩的认识^[18-20]为基础,根据本次研究所得到的烃源岩地球化学数据,认为临兴地区上古生界石炭系—二叠系发育一套海陆交互相的煤系烃源岩,主要包括煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩。其中,本溪组—山西组煤岩累计厚度为 0~40 m;碳质泥岩累计厚度为 0~50 m;暗色泥岩累计厚度为 72~176 m。临兴地区烃源岩总有机碳(TOC)变化较大(表 1)。其中,煤岩总有机碳大于 50.00%,平均为 56.64%;碳质泥岩大于 5.00%,平均为 12.69%;暗色泥岩大于 2.00%,平均为 3.88%。

表 1 烃源岩地球化学参数

Tab. 1 Geochemical Parameters of Source Rocks

岩性		煤岩	碳质泥岩	暗色泥岩
镜质体反射率/%	分布范围	0.92~3.42	0.96~4.89	0.88~4.87
	平均值	1.42	1.52	1.26
总有机碳/%	分布范围	>50.00	>5.00	>2.00
	平均值	56.64	12.69	3.88
氢指数/10 ⁻³	分布范围	5.20~399.07	2.45~575.68	0.37~873.68
	平均值	148.67	94.88	100.79
最高热解温度/℃	分布范围	447~591	312~567	312~576
	平均值	479	482	474

从氢指数(HI)与最高热解温度(T_{max})关系图[图 3(a)]可以看出:样品数据点大多数落在Ⅲ型及Ⅱ₂区域内,少数落在Ⅱ₁型、Ⅰ型区域内,且几乎全部样品的镜质体反射率(R_o)大于 0.50%,多数集中在 1.00%~1.40%之间,平均为 1.35%;最高热解温度主要集中在 430℃~490℃之间,平均为 464℃,表明该地区烃源岩演化程度较高,已进入热成熟生湿气阶段。从镜质体反射率随埋深(h)变化图[图 3(b)]可以发现,随着埋深增加,镜质体反射率增加趋势不明显。平面上,研究区东部围绕紫金山岩体部分井位烃源岩镜质体反射率普遍高于 2.00%(图 4),个别样品经检验可超过 3.00%,这是由于燕山期岩浆活动形成了紫金山岩体,该岩体呈现多阶段、多期次、多方向性,早白垩世是岩浆活动的高峰时期,岩浆活动导致烃源岩成熟加快,演化程度迅速加强。

综合分析认为,临兴地区烃源岩以Ⅲ型、Ⅱ₂型干酪根为主,有机质丰度高,全区烃源岩大都处于热演化成熟阶段,部分地区受到紫金山岩浆活动的影响,热演化程度已进入高成熟—过成熟阶段,表明该地区烃源岩生烃潜力高,可为大量天然气的生成奠定基础。

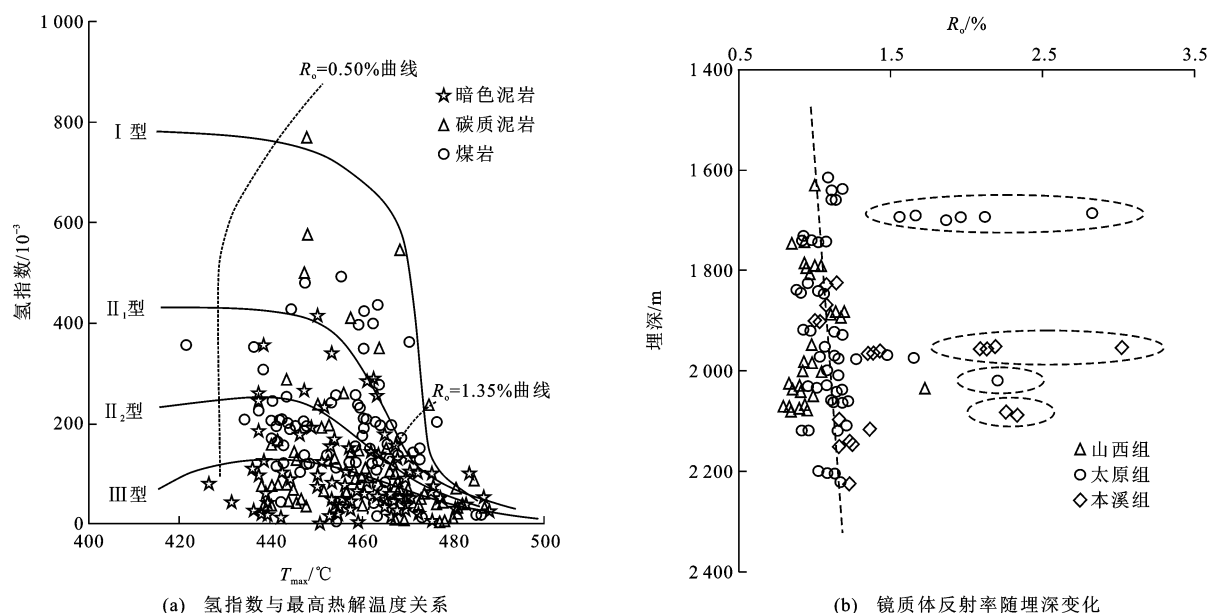


图3 烃源岩地球化学特征

Fig. 3 Geochemical Characteristics of Source Rocks

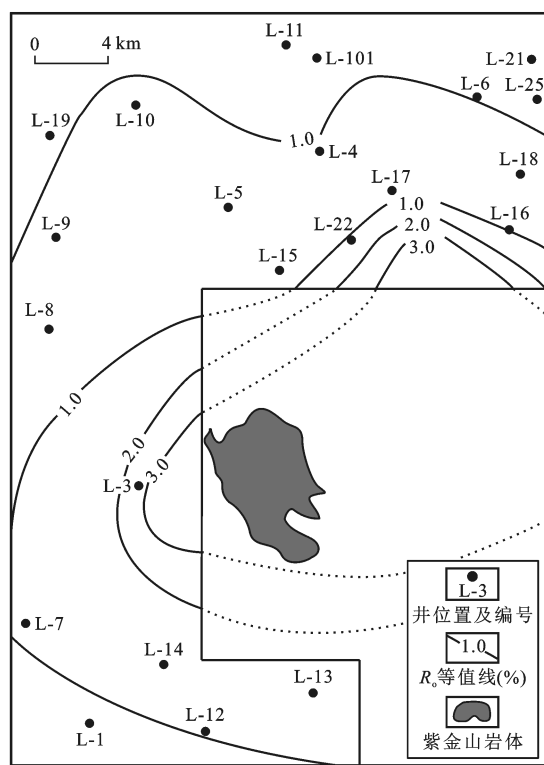


图4 太原组煤岩镜质体反射率平面分布

Fig. 4 Plane Distribution of R_o Values of Taiyuan Formation Coal Rocks

3 天然气地球化学特征与成因类型

3.1 地球化学特征

3.1.1 组分特征

通过对临兴地区井位取样分析和统计,发现天

然气组分类型多样且含量丰富(表2展示了部分样品数据)。烃类气体以甲烷为主,占天然气总含量(体积分数,下同)的86.99%~99.32%,主频率在93.00%~94.00%之间,平均为93.40%;重烃含量较低,占天然气总含量的0.21%~7.68%,主频率在3.00%~6.00%之间,平均为4.34%。天然气干燥系数(甲烷含量与重烃总含量的比值)越大,其甲烷相对含量越高,除生物成因气外,天然气热演化程度也越高。研究区天然气干燥系数为0.92~0.99,主频率为0.94~0.96,平均为0.95(越靠近紫金山岩体的井位干燥系数越高)。天然气乙烷与丙烷的含量比值(C_2/C_3)可在一定程度指示天然气的成因类型。研究区天然气 C_2/C_3 值较低,范围为1.19~8.32,主频率为2.00~3.00,平均为3.25。综合分析认为,临兴地区天然气为干、湿气并存,以湿气为主(图5)。

临兴地区天然气中非烃气体种类较多,主要包括 N_2 、 CO_2 、 He 、 H_2 等。其中, CO_2 含量为0.02%~6.90%,平均为1.42%; N_2 含量为0.96%~6.47%,平均为1.35%; He 、 H_2 含量很低,为0.01%~0.08%,平均分别为0.04%和0.01%。

3.1.2 碳同位素特征

临兴地区天然气碳同位素值具有分布范围较小及明显偏重的特征。其中,甲烷碳同位素值为-41.30‰~-33.20‰,平均为-37.94‰;乙烷同位素值为-28.90‰~-20.90‰,平均为-25.7‰;丙烷碳同位素值为-26.20‰~-19.10‰,平均为-23.58‰。

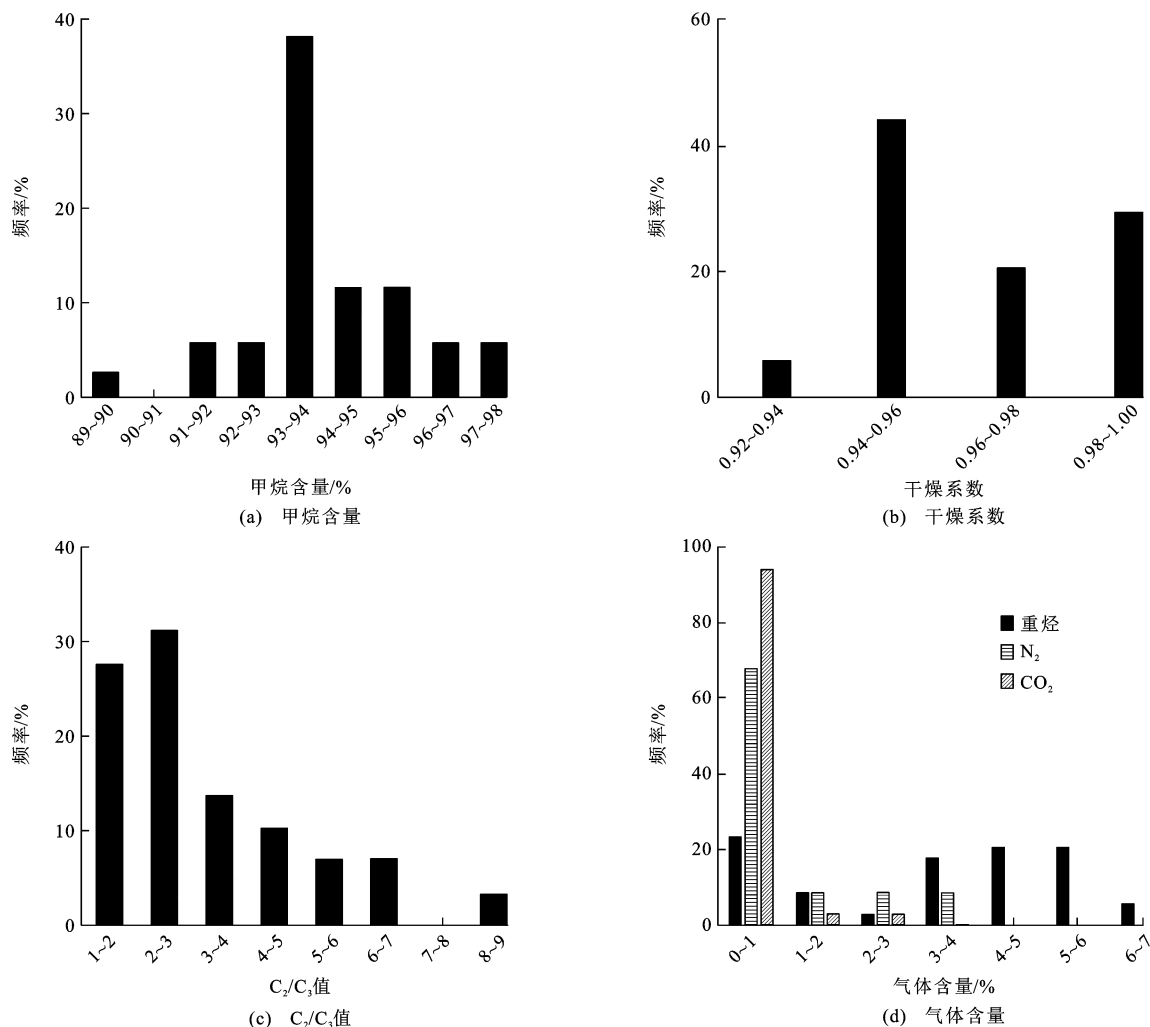


图5 天然气组分频率分布

Fig. 5 Frequency Diagrams of Natural Gas Components

3.2 成因类型

天然气的碳同位素值一般与烃源岩母质类型及成熟度有关,是划分天然气成因类型的重要依据之一。对于划分无机成因与有机成因的甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)的界限,主要有3种观点:其一为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 -20‰ ^[21-22],其二为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 -25‰ ^[23];其三为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 -30‰ ^[24-25]。本文采用戴金星等提出的以 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -30‰ 作为划分天然气无机成因和有机成因的界限^[24-25]。由表2可见,临兴地区天然气甲烷碳同位素值最大为 -33.20‰ ,说明其均为有机成因天然气。

天然气的重烃碳同位素值不仅受成熟度影响,更受烃源岩母质的控制,且随着碳数的增加,其母质碳同位素继承效应的影响越明显,因此,乙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_2$)是区别油型气和煤型气的重要标志之一。目前,国内研究人员多以 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值为 -28‰ 或 -29‰ 作为区分腐殖型气(煤型气)与腐泥型气的标

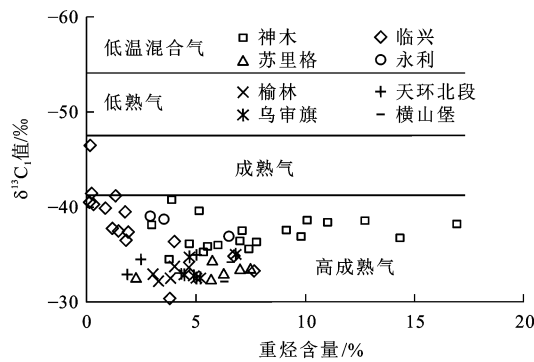
准^[26-28]。综合前人研究成果,本文采用 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值大于 -29‰ 作为煤型气的划分标准。由表2可见,临兴地区天然气的 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值都大于 -29‰ ,说明其应为煤型气。

结合邻区各大气田天然气地球化学特征,对临兴地区天然气的成因类型及母质来源进行分析。结果表明,研究区天然气主要为成熟—高成熟阶段的天然气[图6(a)]^[29],母质类型主要是腐殖型有机质(图7)^[30]。甲烷、乙烷和丙烷的含量比值自然对数关系显示, C_1/C_2 自然对数值与 C_2/C_3 自然对数值成正相关关系[图6(b)],表明该区天然气不属于原油裂解气。另外,根据前人模拟干酪根热解生气实验,发现在热解温度较低时,甲烷主要来自干酪根结上的芳香甲基与终端甲基降解,且 C_2/C_3 自然对数值变化较小,后随着 C_1/C_2 自然对数值的增大而增大。图6(b)还显示,研究区天然气 C_2/C_3 自然对数值变化较小。因此,临兴地区天然气成因类型应为

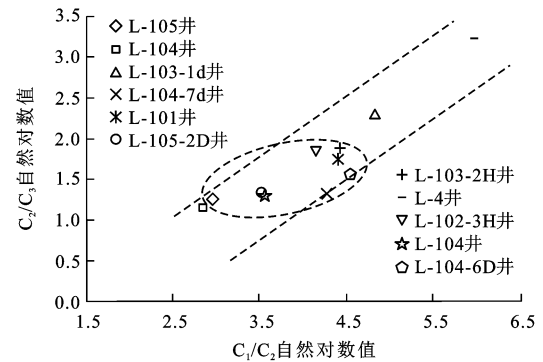
表 2 部分天然气组分及碳同位素值

Tab.2 Part Natural Gas Components and Carbon Isotope Values

井号	层位	不同天然气组分含量/%							干燥 系数	$\delta^{13}\text{C}_1$ 值/ ‰	$\delta^{13}\text{C}_2$ 值/ ‰	$\delta^{13}\text{C}_3$ 值/ ‰
		C_1	C_2	C_3	$i\text{-C}_4$	$n\text{-C}_4$	CO_2	N_2				
L-105	石盒子组(P_2s)	91.16	4.69	1.33	0.193	0.26	0.02	1.94	0.93	-34.80	-27.50	-25.30
L-104	山西组(P_1s)	90.74	5.20	1.68	0.226	0.32	0.05	1.45	0.92	-33.20	-28.10	-26.20
L-105-3d	太原组(P_1t)	92.68	6.31	0.28	0.13	0.12	0.15	0.45	0.93	-41.30	-22.30	
L-103-1d	太原组(P_1t)	96.04	0.75	0.08	0.02	0.02	2.10	0.97	0.99	-39.80	-24.10	-20.30
L-104-7d	石盒子组(P_2s)	96.82	1.35	0.36	0.06	0.07	0.02	1.20	0.98	-37.30	-27.20	-24.80
L-101	石盒子组(P_2s)	97.14	1.17	0.20	0.04	0.04	0.03	1.32	0.99	-37.50	-27.10	-24.00
L-36	石千峰组(P_3s)	99.32	0.21	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.99	-34.30	-20.90	
L-103-2H	太原组(P_1t)	93.33	0.12	0.00	0.00	0.00	0.02	6.47	0.99	-40.40	-26.50	-19.10
L-103-3H	太原组(P_1t)	94.62	1.12	0.17	0.03	0.03	1.76	0.25	0.98	-41.10	-24.80	-22.80
L-4	石盒子组(P_2s)	94.99	0.25	0.01	0.00	0.00	1.78	0.05	0.99	-41.30		
L-102-3H	太原组(P_1t)	91.82	1.42	0.22	0.04	0.04	0.59	4.28	0.98	-39.60	-24.60	-22.70
L-104	石盒子组(P_2s)	89.76	2.61	0.73	0.13	0.18	0.03	1.45	0.96	-36.40	-26.60	-24.70
L-104-6D	石盒子组(P_2s)	86.99	0.91	0.19	0.04	0.04	0.03	5.18	0.99	-37.70	-25.50	-23.50
L-104-3D	石盒子组(P_2s)	93.82	1.15	0.32	0.06	0.09	0.01	3.78	0.97	-36.50	-28.90	-26.00



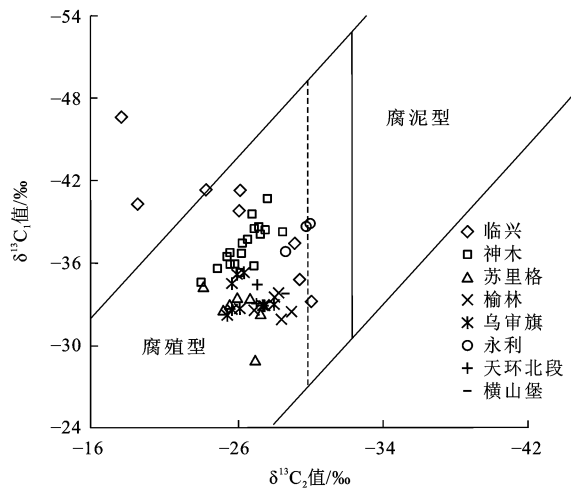
(a) 临兴地区及各大气田天然气成因类型判别图解



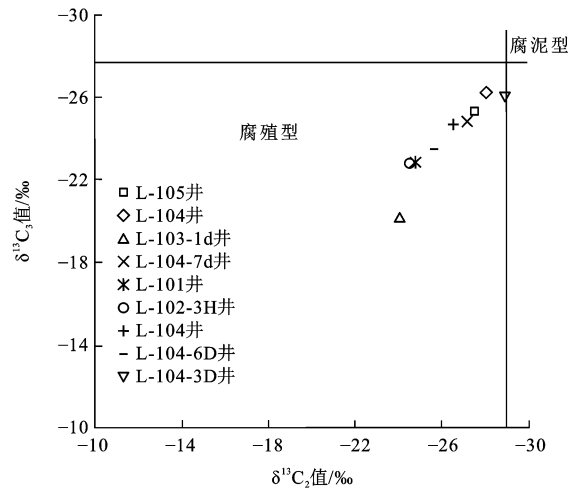
(b) 临兴地区干酪根热解气判别图解

图 6 天然气成因类型判别图解

Fig. 6 Discrimination Diagrams of Genetic Types of Natural Gas



(a) 临兴地区及各大气田天然气母质类型判别图解



(b) 临兴地区天然气母质类型判别图解

图 7 天然气母质类型判别图解

Fig. 7 Discrimination Diagrams of Parent Material Types of Natural Gas

干酪根热解气,部分具有干酪根裂解的特征^[31-32]。

4 气源分析

天然气源岩的确定是探讨天然气生成、运移以及聚集分布规律的基础。综合天然气组分和碳同位素值、烃源岩生烃潜力,结合鄂尔多斯盆地具体地质背景,对临兴地区天然气源岩进行系统分析。

4.1 天然气组分和碳同位素值

石油和天然气在长距离运移过程中会发生物理、化学性质的变化,引起这些变化的主要作用是

输导层或储集层矿物颗粒选择性吸附烃类的重组分和极性较强的组分,然后随着运移距离的增加,油气中重烃含量减少,轻烃含量相对增加^[21]。通过对临兴地区甲烷及重烃含量在纵向上的变化,发现甲烷含量随地层埋深的增加而逐渐增大[图8(a)],重烃含量随地层埋深的增加而逐渐减少[图8(b)],干燥系数随地层埋深的增加也逐渐增大[图8(c)]。在干、湿气共存的情况下,临兴地区天然气组分表现为近源充注及未发生明显分异的特点。

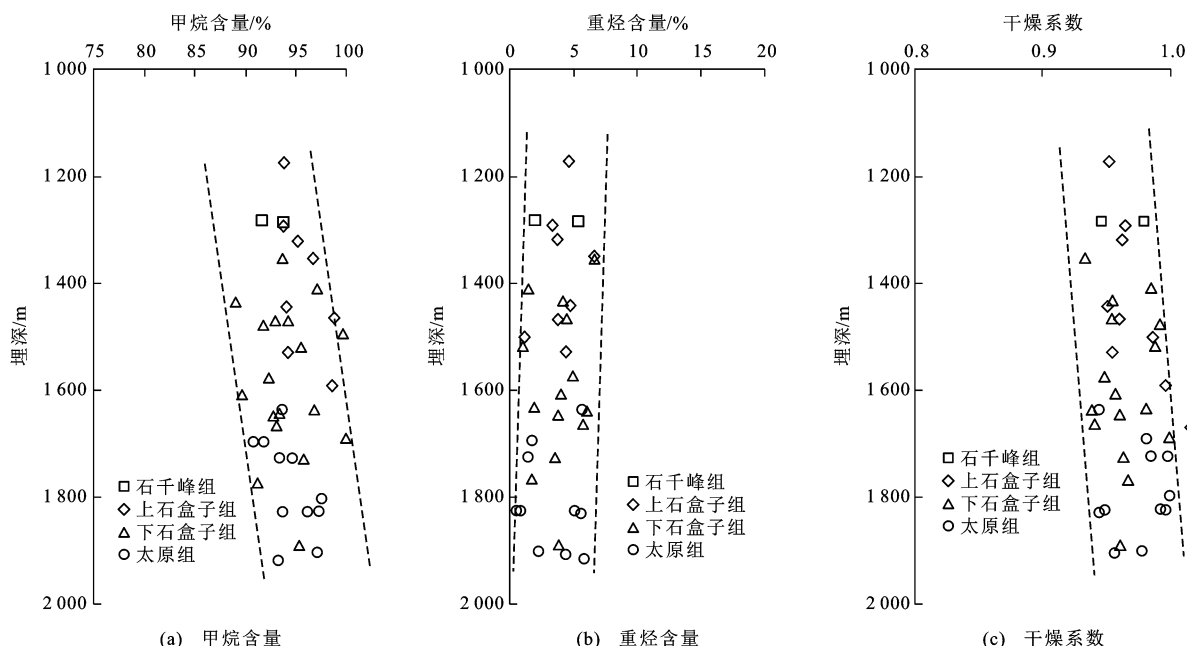


图8 天然气组分随埋深变化

Fig. 8 Variations of Natural Gas Components with Buried Depth

碳同位素值随纵向埋深及平面比值变化在一定程度可以指示天然气的来源。纵向上,通过分析临兴地区天然气碳同位素值随地层埋深的变化特征,发现甲烷、乙烷、丙烷碳同位素值在1650 m之上分异并不明显,超过1650 m的碳同位素值明显加重[图9(b)中1650 m埋深之下,虚线圈定甲烷、乙烷、丙烷碳同位素值明显增大的异常点]。结合临兴地区镜质体反射率随地层埋深的特征规律,可以得出碳同位素值与镜质体反射率具有良好的匹配关系,两者均在1650 m埋深附近发生较为明显的分异(图9)。平面上,天然气碳同位素值从小到大依次为甲烷、乙烷、丙烷,并未发生倒转^[33][图10(a)],在运移过程中并未与不同来源的天然气发生混合^[32,34-35][图10(b)]。这说明临兴地区天然气充注具有单一、持续性,只是在运移过程中由于紫金山岩体的岩浆作用导致不同成熟度的天然气混合。

临兴地区天然气充注成藏过程具有单一、持续性。致密砂岩气充注时,浮力不起作用,其充注动力主要是气体膨胀力,因此,烃源岩内及近源石盒子组致密储层中首先形成天然气聚集。此后,受紫金山岩体的活动影响,临兴地区断裂发育,远源石千峰组天然气可聚集成藏。

综上所述,临兴地区致密砂岩气藏充注模式为:煤岩主力供气→气体膨胀力驱动→烃源岩内、近源致密储层持续充注成藏(图11)。

4.2 烃源岩生烃潜力

临兴地区发育煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩3类烃源岩,探究主力烃源岩以及各层位天然气源岩生气贡献率对于识别气源问题有很大帮助,在一定程度上可为后续勘探工作的重点方向提供依据。因此,通过生烃动力学实验对研究区典型煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩样品进行封闭体系黄金管热解实验,进一

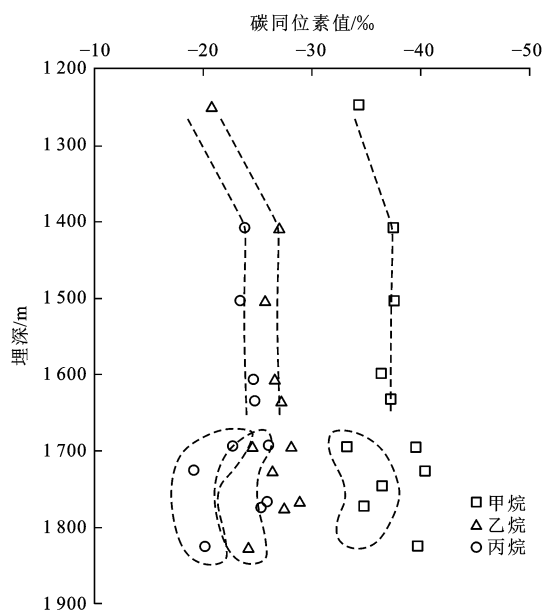
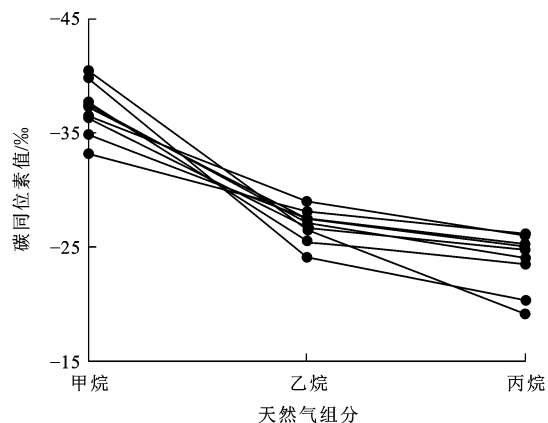


图9 天然气碳同位素值随埋深变化

Fig. 9 Variation of Carbon Isotope Values of Natural Gas with Buried Depth

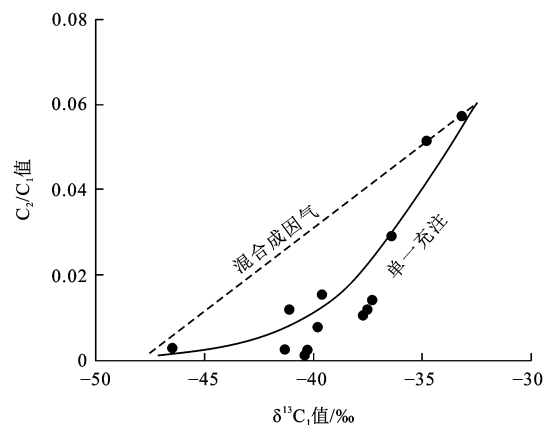
步揭示烃源岩生烃规律,比较烃源岩生烃潜力,确定主力烃源岩以及计算各层位天然气源岩生气贡献率^[36]。

临兴地区上古生界烃源岩大都处于成熟—高成



(a) 天然气碳同位素序列变化

熟阶段。在选取实验样品时,优先选取成熟度较低的样品,同时要求其有机质丰度和类型能够代表研究区烃源岩的整体特征。本次选取 L-6 井本溪组煤岩、S-14 井太原组碳质泥岩、S-19-1 井山西组煤岩以及 S-19-2 井山西组暗色泥岩 4 件样品进行实验,各样品地球化学指标见表 3。在保证挑选的烃源岩样品进行生烃动力学实验后能代表研究区 3 类烃源岩生烃能力的前提下,参照前人的低成熟样品模拟结果进行产气率结果校正,参照样品的成熟度及样品来源见表 3^[37-38]。具体校正思路由中国科学院广州地球化学研究所刘金钟等提供^[39]:①绘制参照样品产气率变化曲线,读取曲线上对应项目样品成熟度的产气率 K_1 (读取本溪组 8# 煤岩的产气率曲线 $R_o=1.08\%$ 处的产气率);②将项目样品产气率曲线 $R_o=1.08\%$ 处的原始产气率调整至 K_1 ,产气率曲线随之整体上调(将研究区本溪组煤岩的产气率曲线整体上调,使其与参照样品产气率曲线 $R_o=1.08\%$ 处的产气率相等)。通过对挑选出的岩石样品进行生烃动力学实验,得出烃源岩在达到成熟阶段后随着镜质体反射率增加的单位总有机碳产气率 (K) (图 12)。利用烃源岩生烃动力学实验可计算研究区烃源岩生烃强度,其计算公式为



(b) 天然气运移模拟

图(a)中相同线条对应不同样品

图10 天然气充注类型

Fig. 10 Charging Types of Natural Gas

表3 实验样品地球化学指标

Tab. 3 Geochemical Indexes of Experimental Samples

井号	岩性	层位	$R_o/\%$	总有机碳/ $\%$	$S_1/10^{-3}$	$S_2/10^{-3}$	参照样品
L-6	煤岩	本溪组	1.08	55.98	22.63	133.22	本溪组 8# 煤岩 ^[38]
S-14	碳质泥岩	太原组	0.94	25.3	0.42	1.80	侏罗系碳质泥岩 ^[37]
S-19-2	暗色泥岩	山西组	0.84	1.17	0.34	1.04	侏罗系暗色泥岩 ^[37]
S-19-1	煤岩	山西组	0.84	62.21	36.66	160.58	山西组 5# 煤岩 ^[38]

注: S_1 为岩石中残留烃类的热解参数; S_2 为岩石中干酪根在热解过程中新生成烃类的热解参数。

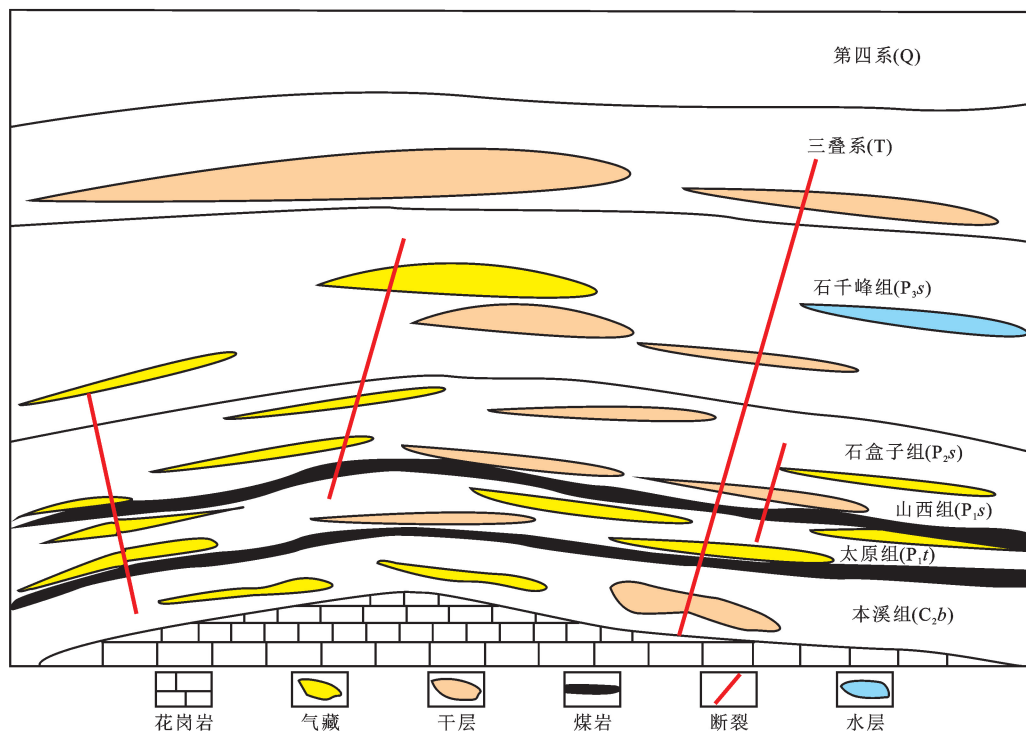


图 11 天然气充注模式

Fig. 11 Charging Pattern of Natural Gas

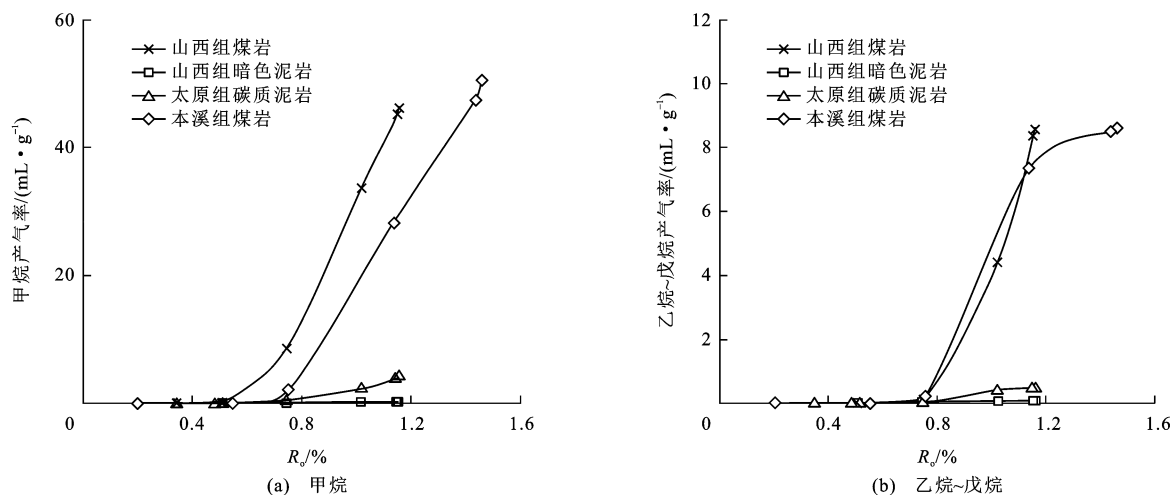


图 12 天然气组分产气率随镜质体反射率的变化

Fig. 12 Variation of Gas Generation Rate of Natural Gas Components with R_o

$$E_K = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho H K dR_o \quad (1)$$

式中: E_K 为单位总有机碳产气率下的生烃强度; ρ 为烃源岩密度; H 为有效烃源岩厚度; R_{\min} 为镜质体反射率最小值; R_{\max} 为镜质体反射率最大值。

利用式(1)并结合烃源岩地球化学特征,对临兴地区煤岩、碳质泥岩、暗色泥岩生烃强度进行计算,然后对生烃强度积分可得 3 类烃源岩生烃潜力,计算公式为

$$A = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \rho H S dR_o \quad (2)$$

式中: A 为生烃潜力; S 为有效烃源岩面积。

通过 3 类烃源岩的生烃潜力分析,可计算各类烃源岩生气贡献率,即某一烃源岩的生烃潜力与 3 类烃源岩的生烃潜力之和的比值。经计算,煤岩生烃潜力为 $1.115 \times 10^{12} \text{ m}^3$,碳质泥岩为 $0.177 \times 10^{12} \text{ m}^3$,暗色泥岩为 $0.005 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。由此可见,煤岩是临兴地区的主力烃源岩,是煤型气的主要贡献者,其生气贡献率为 86%。

通过本溪组—山西组 3 个层位煤岩的生烃强度和生烃潜力分析,可得到各层位煤岩生气贡献率,即

某一层位煤岩的生烃潜力与3个层位煤岩的生烃潜力之和的比值,计算结果见表4。

表4 各层位煤岩生烃潜力和生气贡献率

Tab. 4 Hydrocarbon Generation Potentials and Gas Generation Contribution Rates of Coal Rocks in Different Formations

层位	生烃潜力/ 10^{12} m ³	生气贡献率/%
山西组	0.144	12.9
太原组	0.488	43.8
本溪组	0.482	43.3

从本溪组—山西组各层位煤岩生气贡献率的分布关系可以看出,临兴地区天然气属于近源充注,并且主要来自于本溪组—太原组烃源岩(表4)。因此,临兴地区储集层中天然气充注结果与下伏烃源岩有着良好的对应关系,天然气运移主要以垂向运移为主。

5 结 语

(1)鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然气具有干、湿气并存及以湿气为主的特点;天然气类型表现出煤型气的特征,临兴地区大部分为煤型热解气,局部为煤型裂解气。

(2)利用天然气组分和碳同位素值在纵向埋深及平面比值的变化关系,得出临兴地区天然气具有近源、持续充注的特点。

(3)利用烃源岩生烃动力学实验建立临兴地区天然气源岩生气贡献率计算模型。临兴地区天然气主要来自于本溪组—太原组煤岩,其生气贡献率分别为43.3%、43.8%;天然气在储层中的充注结果与下伏烃源岩具有良好的垂向关系。生烃动力学实验是通过恒温热解模拟得出产气率,未考虑实际地质背景,因此,研究区有效烃源岩生气能力只可在一定程度上对天然气成藏产生影响。

参考文献:

References:

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Cheng-zao, ZHENG Min, ZHANG Yong-feng. Unconventional Hydrocarbon Resources in China and the Prospect of Exploration and Development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开

发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.

DAI Jin-xing, NI Yun-yan, WU Xiao-qi. Tight Gas in China and Its Significance in Exploration and Exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.

- [3] 邹才能,陶士振,袁选俊,等.“连续型”油气藏及其在全球的重要性:成藏、分布与评价[J].石油勘探与开发,2009,36(6):669-682.

ZOU Cai-neng, TAO Shi-zhen, YUAN Xuan-jun, et al. Global Importance of “Continuous” Petroleum Reservoirs: Accumulation, Distribution and Evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.

- [4] 杨俊杰,裴锡古.中国天然气地质学卷四:鄂尔多斯盆地[M].北京:石油工业出版社,1996.

YANG Jun-jie, PEI Xi-gu. Natural Gas Geology in China, Volume 4: Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.

- [5] 杨华,刘新社,闫小雄,等.鄂尔多斯盆地神木气田的发现与天然气成藏地质特征[J].天然气工业,2015,35(6):1-13.

YANG Hua, LIU Xin-she, YAN Xiao-xiong, et al. The Shenmu Gas Field in the Ordos Basin: Its Discovery and Reservoir-forming Geological Characteristics[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6): 1-13.

- [6] 杨华,付金华,刘新社,等.鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J].石油勘探与开发,2012,39(3):295-303.

YANG Hua, FU Jin-hua, LIU Xin-she, et al. Accumulation Conditions and Exploration and Development of Tight Gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295-303.

- [7] 戴金星.我国煤系地层含气性的初步研究[J].石油学报,1980,1(4):27-37.

DAI Jin-xing. Preliminary Research on Natural Gas in Coal Series in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 1(4): 27-37.

- [8] DAI J X, LI J, LUO X, et al. Stable Carbon Isotope Compositions and Source Rock Geochemistry of the Giant Gas Accumulations in the Ordos Basin, China[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1617-1635.

- [9] 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 Shi-ya. Natural Gas Source and Explorative Direction in Eerduosi Basin[J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(3): 1-4.

- [10] 夏新宇. 碳酸盐岩生烃与长庆气田气源[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- XIA Xin-yu. Carbonate Hydrocarbon Generation and Natural Gas Source in Changqing Gas Field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2000.
- [11] 戴金星,宋岩,张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学:D辑,地球科学,1996,26(6):481-487.
- DAI Jin-xing, SONG Yan, ZHANG Hou-fu. Main Factors Controlling the Foundation of Medium-giant Gas Fields in China[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences,1996,26(6):481-487.
- [12] 姜福杰,庞雄奇,武丽. 致密砂岩气藏成藏过程中的地质门限及其控气机理[J]. 石油学报,2010,31(1):49-54.
- JIANG Fu-jie, PANG Xiong-qi, WU Li. Geological Thresholds and Its Gas-controlling Function During Forming Process of Tight Sandstone Gas Reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(1):49-54.
- [13] 戴金星,夏新宇. 长庆气田奥陶系风化壳气藏、气源研究[J]. 地学前缘,1999,6(增):195-203.
- DAI Jin-xing, XIA Xin-yu. Research on Source Rock Correlation of the Ordovician Reservoir, Changqing Gasfield[J]. Earth Science Frontiers,1999,6(S):195-203.
- [14] 何自新,付金华,席胜利,等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. 石油学报,2003,24(2):6-12.
- HE Zi-xin, FU Jin-hua, XI Sheng-li, et al. Geological Features of Reservoir Formation of Sulige Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica,2003,24(2):6-12.
- [15] 胡安平,李剑,张文正,等. 鄂尔多斯盆地上、下古生界和中生界天然气地球化学特征及成因类型对比[J]. 中国科学:D辑,地球科学,2007,37(增2):157-166.
- HU An-ping, LI Jian, ZHANG Wen-zheng, et al. Geochemical Characteristics and Origin of Gases from the Upper, Lower Paleozoic and the Mesozoic Reservoirs in Ordos Basin, China[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences,2007,37(S2):157-166.
- [16] 郭明强. 鄂尔多斯盆地东北缘临兴—神府地区烃源岩特征[J]. 中国煤层气,2016,13(3):13-17.
- GUO Ming-qiang. Source Rock Characteristics of Linxing-Shenfu Region in the Northeast Edge of Ordos Basin[J]. China Coalbed Methane,2016,13(3):13-17.
- [17] 傅宁,杨树春,贺清,等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J]. 石油学报,2016,37(增1):111-120.
- FU Ning, YANG Shu-chun, HE Qing, et al. High-efficiency Reservoir Formation Conditions of Tight Sandstone Gas in Linxing-Shenfu Blocks on the East Margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(S1):111-120.
- [18] 谢英刚,孟尚志,万欢,等. 临兴地区煤系地层多类型天然气储层地质条件分析[J]. 煤炭科学技术,2015,43(9):71-75,143.
- XIE Ying-gang, MENG Shang-zhi, WAN Huan, et al. Analysis on Geological Conditions of Multi Type Natural Gas Reservoir in Coal Measure Strata of Linxing Area[J]. Coal Science and Technology,2015,43(9):71-75,143.
- [19] 谢英刚,秦勇,叶建平,等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. 煤炭学报,2016,41(1):181-191.
- XIE Ying-gang, QIN Yong, YE Jian-ping, et al. Accumulation Conditions of Tight Gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(1):181-191.
- [20] 顾娇杨,张兵,郭明强. 临兴区块深部煤层气富集规律与勘探开发前景[J]. 煤炭学报,2016,41(1):72-79.
- GU Jiao-yang, ZHANG Bing, GUO Ming-qiang. Deep Coalbed Methane Enrichment Rules and Its Exploration and Development Prospect in Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(1):72-79.
- [21] 柳广弟,张厚福. 石油地质学[M]. 4版. 北京:石油工业出版社,2009.
- LIU Guang-di, ZHANG Hou-fu. Petroleum Geology [M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press,2009.
- [22] 徐永昌. 天然气成因理论及应用[M]. 北京:科学出版社,1994.
- XU Yong-chang. Genetic Theory and Application of Natural Gas[M]. Beijing: Science Press,1994.
- [23] HOWELL D G, WIESE K, FANELLI M, et al. The Future of Energy Gases [M]. Washington DC: United States Government Printing Office,1993.
- [24] 戴金星. 中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J]. 天然气工业,1995,15(3):22-27.
- DAI Jin-xing. Abiogenic Gas in Oil-gas Bearing Basins in China and Its Reservoirs[J]. Natural Gas Industry,1995,15(3):22-27.
- [25] 戴金星,石昕,卫延召. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略[J]. 石油学报,2001,22(6):5-10.
- DAI Jin-xing, SHI Xin, WEI Yan-zhao. Summary of the Abiogenic Origin Theory and the Abiogenic Gas Pools (Fields)[J]. Acta Petrolei Sinica,2001,22(6):5-10.

- [26] 张士亚, 郜建军, 蒋泰然. 利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法[M]//地质矿产部石油地质研究所. 石油与天然气地质文集:第1集, 中国煤成气研究. 北京:地质出版社, 1988:48-59.
- ZHANG Shi-ya, GAO Jian-jun, JIANG Tai-ran. A New Method for Identifying Natural Gas Types Using Carbon Isotope of Methane and Ethane[M]//Institute of Petroleum Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. Selected Papers on Petroleum and Natural Gas Geology: Volume 1, Humic Type Gas Study in China. Beijing: Geological Publishing House, 1988:48-59.
- [27] 伊培荣, 彭峰, 韩云. 天然气地质学的新发展[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(4):1-7.
- YI Pei-rong, PENG Feng, HAN Yun. New Development of Natural Gas Geology[J]. Natural Gas Geoscience, 1997, 8(4):1-7.
- [28] 刚文哲, 高岗, 郝石生, 等. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2):164-167.
- GANG Wen-zhe, GAO Gang, HAO Shi-sheng, et al. Carbon Isotope of Ethane Applied in the Analyses of Genetic Types of Natural Gas[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(2):164-167.
- [29] BERNARD B B, BROOKS J M, SACKETT W M. Light Hydrocarbon in Recent Texas Continental Shelf and Slope Sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(C8):4053-4061.
- [30] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2/3):1-40.
- DAI Jin-xing. Hydrocarbon Isotope Characteristics and Identification of Various Types of Natural Gas[J]. Natural Gas Geoscience, 1993, 4(2/3):1-40.
- [31] 耿新华, 耿安松. 海相碳酸盐岩干酪根热解成气过程及其碳同位素演化特征[J]. 海相油气地质, 2013, 18(1):53-58.
- GENG Xin-hua, GENG An-song. Gaseous Hydrocarbon Generation and Carbon Isotope Evolution of Pyrolytic Kerogen in Marine Carbonate Source Rock[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(1):53-58.
- [32] PRINZHOFER A A, HUC A Y. Genetic and Post-genetic Molecular and Isotopic Fractionations in Natural Gases[J]. Chemical Geology, 1995, 126(3/4):281-290.
- [33] 戴金星, 夏新宇, 秦胜飞, 等. 中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1):1-6, 11.
- DAI Jin-xing, XIA Xin-yu, QIN Sheng-fei, et al. Causation of Partly Reversed Orders of $\delta^{13}\text{C}$ in Biogenic Alkane Gas in China[J]. Oil and Gas Geology, 2003, 24(1):1-6, 11.
- [34] PRINZHOFER A A, PERNATON E. Isotopically Light Methane in Natural Gas: Bacterial Imprint or Diffusive Fractionation? [J]. Chemical Geology, 1997, 142(3/4):193-200.
- [35] STAHL W J. Carbon and Nitrogen Isotope in Hydrocarbon Research and Exploration[J]. Chemical Geology, 1977, 20:121-149.
- [36] 戴箫, 关平, 韩定坤, 等. 聚集体煤系烃源岩天然气贡献率定量计算:以川东北元坝地区须家河组为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(增1):64-70.
- DAI Xiao, GUAN Ping, HAN Ding-kun, et al. Quantitative Analysis for the Contribution Rate of the Natural Gas from Accumulated-organic Matter-type Coal-measure Source Rocks: Taking the Triassic Xujiahe Formation in Yuanba Area, Northeastern Sichuan Basin as an Instance[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(S1):64-70.
- [37] 毛榕, 米敬奎, 张水昌, 等. 不同煤系源岩生烃特征的黄金管热模拟实验对比研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6):1127-1134.
- MAO Rong, MI Jing-kui, ZHANG Shui-chang, et al. Study on the Hydrocarbon Generation Characteristics of Different Coaly Source Rocks by Gold-tube Pyrolysis Experiment[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6):1127-1134.
- [38] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏理论[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- YANG Hua, XI Sheng-li, WEI Xin-shan, et al. Accumulation Theory of Large Area Tight Sandstone Gas in Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [39] 刘金钟, 唐永春. 用干酪根生烃动力学方法预测甲烷生成量之一例[J]. 科学通报, 1998, 43(11):1187-1191.
- LIU Jin-zhong, TANG Yong-chun. Prediction of Methane Generation by Kerogen Hydrocarbon Kinetic Method [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(11):1187-1191.