

煤成气干燥系数影响因素探讨

——以鄂尔多斯盆地北部上古生界为例

倪春华^{1,2},包建平¹,刘光祥²,朱建辉²,吴小奇²,翟常博²

[1. 长江大学 地球环境与水资源学院,湖北 武汉 430100;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214126]

摘要:干燥系数广泛应用于煤成气(天然气)地球化学特征及成因、成藏研究,而对于煤成气干燥系数影响因素的专题研究较少。通过对鄂尔多斯盆地北部东胜(杭锦旗)、大牛地、苏里格气田上古生界煤成气化学组分的测试及资料收集,分析了该区煤成气干燥系数的纵、横向分布特征,建立了“二段式”纵向分布模式,并结合区域地质背景,探讨了控制其分布的主要地质因素。研究表明:①该区上古生界煤成气干燥系数呈自盆地中心向边缘减小的平面分布特征和自下而上先减小再增大的“二段式”纵向分布特征;②煤成气干燥系数受到成熟度、地质色层作用和逸散作用等影响;③干燥系数的宏观区域分布主要受控于气源岩成熟度作用。纵向上,影响干燥系数“二段式”分布的主控因素不同,下部烃源层内为成熟度作用,而上部储集层内则是地质色层作用。局部保存条件欠佳地区干燥系数还受到逸散作用影响而减小。

关键词:干燥系数;成熟度;地质色层作用;逸散作用;煤成气;上古生界;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

A discussion on the influence factors of dryness coefficient of coal-derived gas:

A case from the Upper Paleozoic reservoir in northern Ordos Basin

Ni Chunhua^{1,2}, Bao Jianping¹, Liu Guangxiang², Zhu Jianhui², Wu Xiaoqi², Zhai Changbo²

(1. School of Earth Environment and Water Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The dryness coefficient is widely used in the studies on the geochemical characteristics, genetic types and accumulation of coal-derived gas, but only a few of them have addressed the factors affecting the dryness coefficient of coal-derived gas. The major coal-derived gas fields of the Upper Paleozoic reservoir in northern Ordos Basin, such as Dongsheng (Hangjinqi), Daniudi and Sulige, are chosen. Based on the measured and collected data of chemical components, lateral and vertical distribution characteristics of dryness coefficient of coal-derived gas are analyzed, and a two-stage vertical distribution pattern is established. The main controlling geological factors are discussed within the context of regional geological background. The results indicate that ① the dryness coefficient of the Upper Paleozoic coal-derived gas decreases from the center to the margin of the basin, and it displays a two-stage vertical distribution pattern in which the dryness coefficient firstly increases and then decreases from bottom to top. ② The dryness coefficient of coal-derived gas is influenced by maturity, geochromatograph effect and leakage effect. ③ The maturity of the Upper Paleozoic source rocks determines the regional distribution characteristics of the dryness coefficient. The main controlling factors affecting the “two-stage” vertical distribution of the dryness coefficient are different in the different depth. The source layer and geochromatograph effect the lower and upper reservoirs, respectively. The dryness coefficient is also affected by leakage effect in the areas with poor preservation conditions.

Key words: dryness coefficient, maturity, geochromatograph effect, leakage effect, coal-derived gas, Upper Paleozoic, Ordos Basin

收稿日期:2017-05-25;修订日期:2017-09-16。

第一作者简介:倪春华(1981—),男,高级工程师,油气地质与地球化学。E-mail: nichunhua_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-006)。

天然气勘探开发实践表明,煤成气储量占据了天然气总储量的3/4,在我国天然气工业中占有极其重要的地位^[1-5],如储量最大的苏里格气田、储量丰度最高的克拉2气田均为煤成气田。前人对于煤成气的研究主要集中在利用组分、碳氢同位素等地球化学特征开展成因和成藏方面^[6-13]。然而,煤成气(天然气)成藏是一个复杂的化学-物理过程,经历生烃、排烃、运移和聚集等地质过程,其地球化学特征通常会发生变化^[6,9,13-19]。研究认为碳氢同位素的影响因素主要包括分馏效应和成熟度等^[20-22],与之相比,对干燥系数($D = C_1/C_{1-5}$)等化学组分的影响因素研究较为薄弱^[23]。而干燥系数可定性反映成熟度,广泛应用于煤成气(天然气)地球化学特征及成因、成藏研究^[9-12]。

鄂尔多斯盆地是我国重要的煤成气产区之一,前人对煤成气的碳氢同位素组成特征及其成因、来源开展了广泛深入的研究工作^[19-21],但对其干燥系数的分布特征未进行深入探讨。因此,笔者以鄂尔多斯盆地北部东胜(杭锦旗)、大牛地、苏里格等上古生界气田为研究对象,重点分析对比该区上古生界煤成气干燥系数的纵、横向分布特征,并探讨影响其分布的主要地质因素,以为该地区煤成气地球化学研究与勘探开发生产提供有益借鉴。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地蕴藏丰富的石油和天然气,总体呈现“南油北气、上油下气”的油气资源分布格局。盆地中北部地区已发现靖边、苏里格、大牛地、东胜等大中型气田,其中苏里格气田地质储量达到 $3.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[24],充分展现了巨大的天然气勘探潜力(图1)。

研究表明,鄂尔多斯盆地是一个稳定沉降、扭动明显、拗陷迁移的多重叠合盆地^[24],晚古生代为大型内陆拗陷盆地,广泛发育太原组-山西组海陆过渡相煤系烃源岩,具有生烃潜力好、累计厚度大的特点,具备雄厚的成烃物质基础^[25]。下石盒子组、山西组总体为河流相-三角洲相沉积体系,是鄂尔多斯盆地上古生界的主要储层。但受古埋藏深度大、热演化程度高、晚成岩阶段破坏性成岩作用强等因素影响^[26],砂岩储层呈现致密化特点。形成鄂北地区上古生界大中型气田的基本成藏条件主要包括大面积分布的源-储近源配置、大范围同期生烃充注过程和良好的区域封盖条件等^[27]。

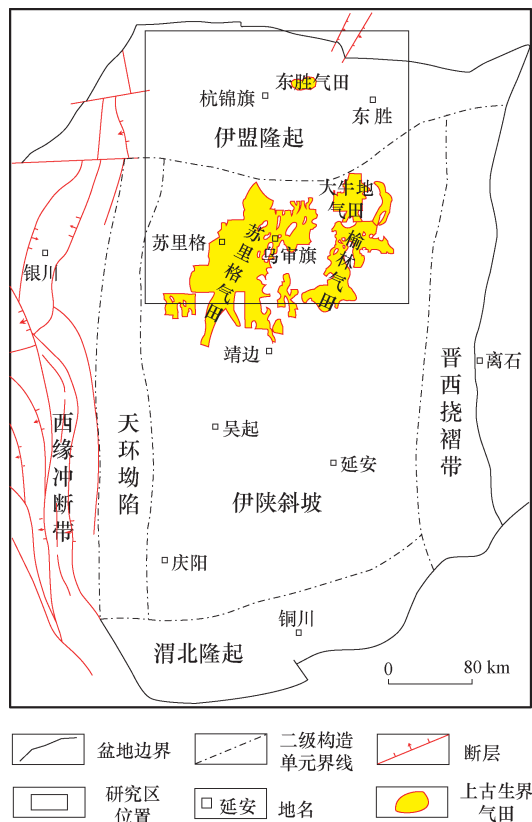


图1 鄂尔多斯盆地构造单元区划及北部主要上古生界气田分布

Fig.1 Tectonic units of the Ordos Basin and distribution of major Upper Paleozoic gas fields in the northern Ordos Basin

2 样品及分析方法

本次研究利用双阀门高压不锈钢瓶系统采集了杭锦旗地区泊尔江海子断裂北侧什股壕区带(东胜气田)23个天然气样品,采样层位包括二叠系下石盒子组1段(盒1段)、下石盒子组2段(盒2段)和下石盒子组3段(盒3段)。

天然气化学组分测试工作由中国石化油气成藏重点实验室完成,实验仪器为Agilent7890A气相色谱仪,同时配备氢火焰离子化检测器和热导检测器。气相色谱仪烘箱初始温度设定为40℃,加热5 min,然后以10℃/min的速率加热到180℃,并保持20 min。

另外,本次研究收集了大牛地气田试气取得的天然气组分数据108个、杭锦旗地区泊尔江海子断裂南侧十里加汗区带天然气组分数据42个以及苏里格气田天然气组分数据34个,涉及层位涵盖二叠系太原组、山西组和下石盒子组^[28]。

3 煤成气干燥系数分布特征

前人研究证实,鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气均属于煤成气^[3,5,7,9,13,20,29]。基于本次采样实测及收集的天然气化学组分数据,本文重点分析了研究区内苏里格、大牛地、东胜气田上古生界煤成气的干燥系数分布特征。如图2所示,三者上古生界煤成气化学组分中均以甲烷气体为主,其含量分别为91.12%~94.25%^[28],88.70%~97.52%,87.71%~93.66%,对应的干燥系数平均值分别为0.932,0.914,0.890,总体处于湿气演化阶段(<0.95),且干燥系数平面分布具有自盆地中心向盆地边缘减小的趋势。

纵向上,煤成气的干燥系数分布也表现出一定的规律性。以层系较齐、数据较多的大牛地气田为例,对比上古生界各层系的煤成气干燥系数(由下而上)。太原组2段(太2段)分布范围为0.902~0.958,平均值为0.927;山西组1段(山1段)分布区间为0.824~0.943,平均值为0.893;山西组2段(山2段)分布于0.846~0.921,平均值为0.886;盒1段分布于0.862~0.916,平均值为0.888;盒2段分布于0.947~0.968,平均值为0.947;盒3段分布范围为0.960~0.978,平均值为0.969。不难看出,大牛地气田上古生界煤成气干燥系数纵向上呈现“二段式”分布特点(图3a),且由下而上表现为先减小再增大。无独有偶,杭锦旗地区十里加汗区带上古生界煤成气干燥系数具有相近的纵向分布特征(图3b),这也暗示了影响上、下两段干燥系数分布的主控因素可能不同。

4 煤成气干燥系数影响因素

煤成气经历生烃、排烃、运移和聚集等成藏过程,其地球化学特征必然会发生一些变化,作为表征其化学组成参数的干燥系数也不例外。笔者将基于前文对于上古生界煤成气纵、横向分布特征的分析,结合研究区具体地质背景,初步探讨该地区煤成气干燥系数的影响因素。

4.1 成熟度

由图4不难看出,平面上,苏里格、大牛地和东胜气田上古生界煤成气的干燥系数平均值分别为0.932,0.914,0.890,表现为自盆地中心向盆地边缘减小趋势,与鄂尔多斯盆地北部上古生界烃源岩的镜质体反射率 R_o 总体变化趋势一致,表明该地区上古生界

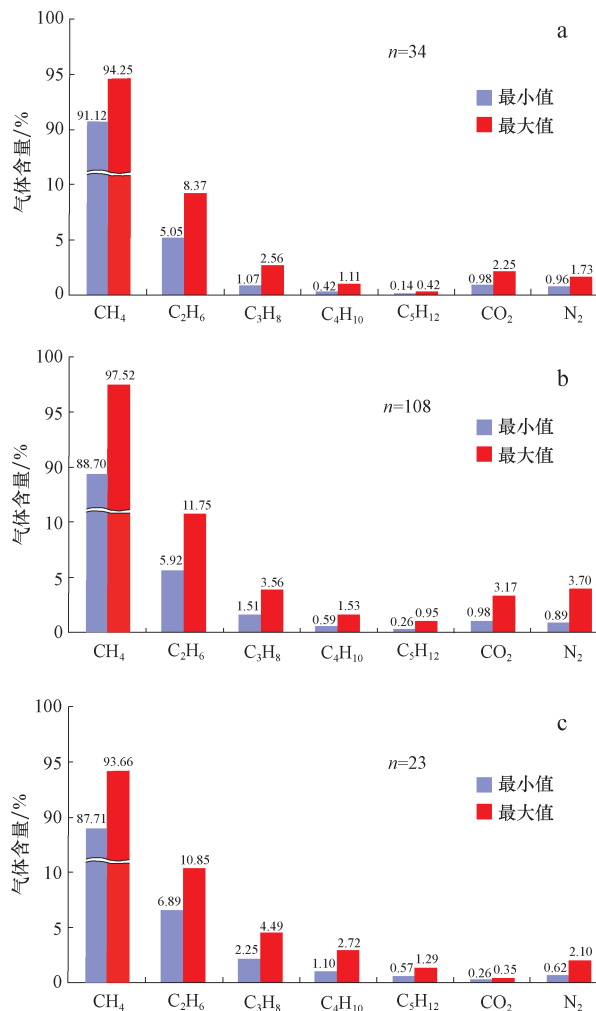


图2 鄂尔多斯盆地北部主要气田天然气组分含量分布

Fig.2 Distribution of natural gas contents in major gas fields in the northern Ordos Basin
a. 苏里格气田; b. 大牛地气田; c. 东胜气田

煤成气干燥系数的区域分布特征主要受控于上古生界烃源岩的成熟度。

纵向上,上古生界不同层系烃源岩的成熟度也控制了煤成气干燥系数的分布特征,太原组烃源岩的成熟度高于其上部的山西组烃源岩,故纵向上随烃源岩成熟度的升高,煤成气的干燥系数也相应增大,如大牛地气田山2段、山1段和太2段煤成气干燥系数平均值分别为0.886,0.893,0.927(图3a)。杭锦旗地区十里加汗区带山2段和山1段煤成气干燥系数也表现为类似特征(图3b)。由此分析,“二段式”下段(源内)干燥系数主要受控于烃源岩的成熟度。

4.2 地质色层作用

运移模拟实验及天然气成藏实例均已证实,天然

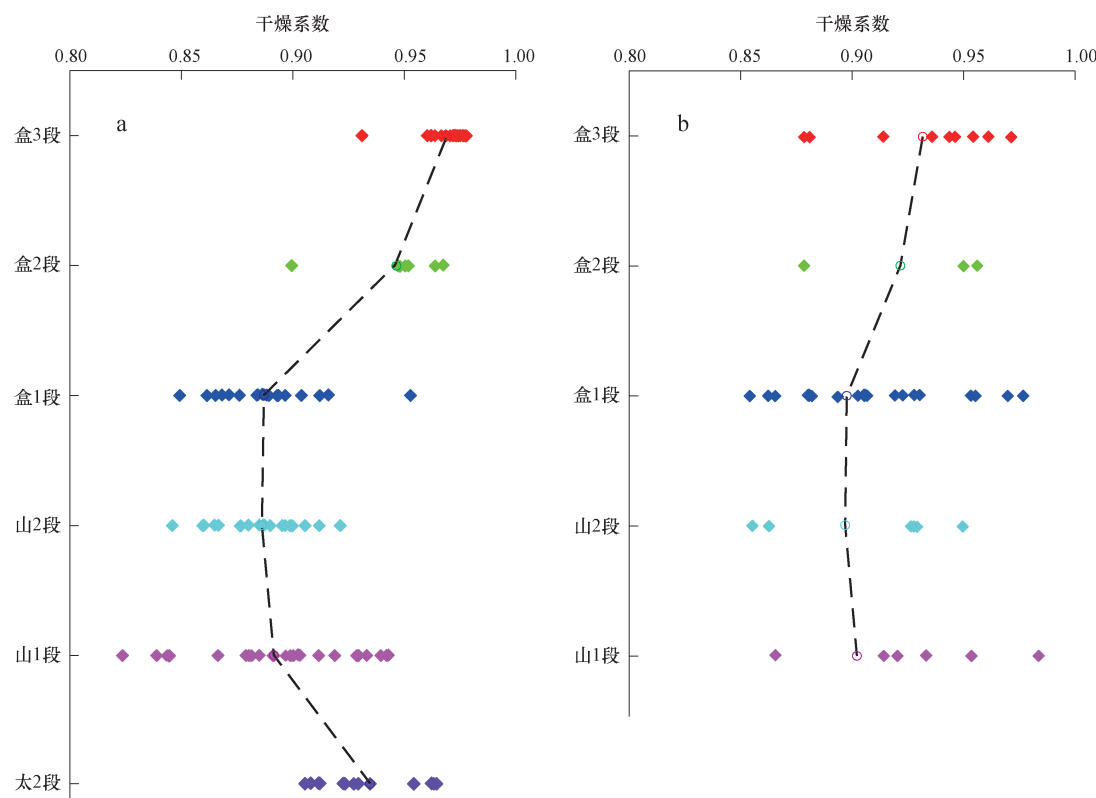


图 3 鄂尔多斯盆地北部上古生界不同层系天然气干燥系数纵向分布

Fig. 3 Vertical distribution of dryness coefficient of natural gas in different layers of the Upper Paleozoic in the northern Ordos Basin

a. 大牛地气田;b. 十里加汗区带

(菱形为散点值,圆圈为平均值,虚线为各层系干燥系数平均值连线。)

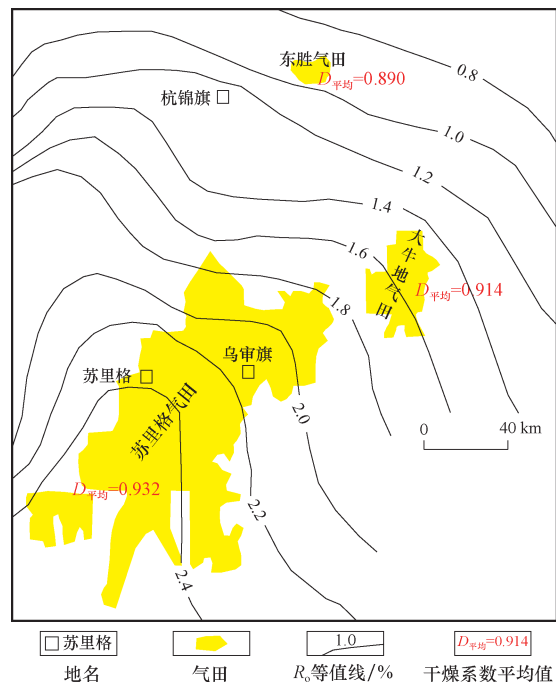


图 4 鄂尔多斯盆地北部上古生界煤成气干燥系数与上古生界烃源岩 R_v 分布(底图据文献[28]修改)

Fig. 4 Distribution of dryness coefficient of coal-derived gas and the vitrinite reflectance of the Upper Paleozoic source rocks in northern Ordos Basin(Base map modified from reference[28])

气横向或垂向运移过程中会发生组分分异作用(地质色层作用),其地球化学特征会发生变化^[29-31]。

对比发现,杭锦旗地区泊尔江海子断裂南、北两侧盒 1 段、盒 2 段和盒 3 段天然气干燥系数均具有“南小北大”的特点,而断裂两侧上古生界烃源岩成熟度则呈现“南高北低”的分布格局^[27],天然气与烃源岩的成熟度明显不匹配,如果仅根据成熟度的影响很难解释这一现象。故泊尔江海子断裂以南十里加汗区带的天然气可能向北进行了大规模的横向运移,在此过程中由于地质色层作用的影响,天然气的化学组成发生分异,运移至断裂以北什股壕区带成藏的天然气由于甲烷相对含量增加,故干燥系数有所增大。进一步对比可以看出,泊尔江海子断裂两侧以盒 1 段干燥系数的变化最大,反映其可能是天然气横向运移的主要输导层。

另外,从图 5 不难看出,杭锦旗地区十里加汗区带下石盒子组煤成气干燥系数由下而上呈增大趋势,反映其存在垂向运移。丁烷异构体 iC_4/nC_4 值这一地球化学指标能够有效表征天然气运移^[14,32-33],且表现为随运移距离增加,该比值增大。据此,十里加汗区带内 8 口钻井不同产层天然气 iC_4/nC_4 值由下往上均呈增

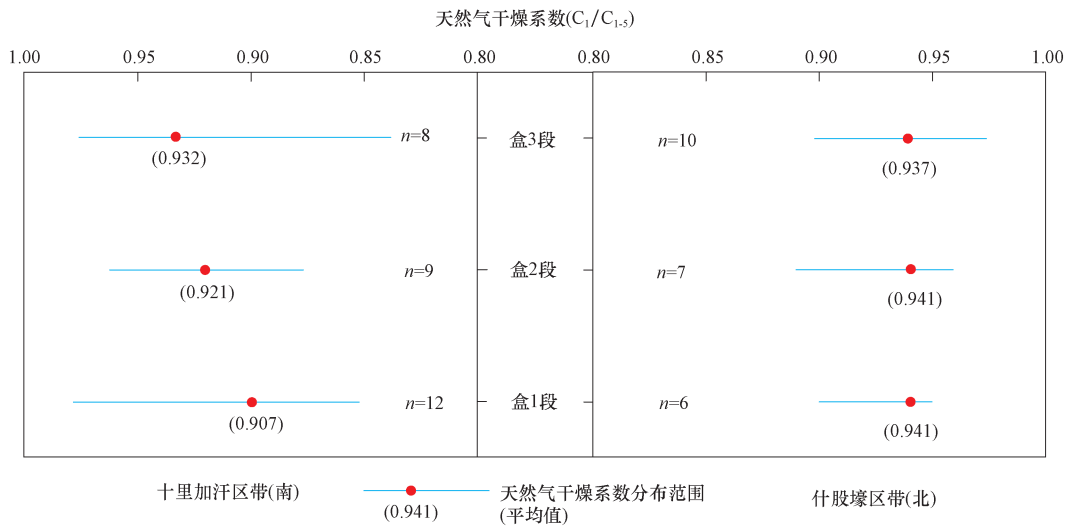


图5 杭锦旗地区泊尔江海子断裂两侧下石盒子组不同层段天然气干燥系数对比

Fig. 5 Comparison of dryness coefficients of natural gas from different layers of the Lower Shihezi Formation on both walls of Boerjianghaizi Fault in Hangjinqi area

井名	锦86	锦98	锦90	锦7	锦32	锦77	锦94	锦51
iC_4/nC_4	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70	0.50 0.60 0.70
盒3段								
盒2段								
盒1段								
山2段								
山1段								

图6 杭锦旗地区十里加汗区带上古生界天然气 iC_4/nC_4 值剖面

Fig. 6 Profile of iC_4/nC_4 ratios of the natural gas in the Upper Paleozoic reservoir in Shilijiahan Play in Hangjinqi area

大趋势(图6),表明泊尔江海子断裂南侧天然气也曾发生过一定的垂向运移。

4.3 逸散作用

气藏形成是天然气聚集与逸散的动态平衡过程,前人对天然气的逸散也开展了一些研究^[34~38]。杭锦旗地区什股壕区带所处的伊盟隆起位于鄂尔多斯盆地

边缘,受后期构造运动的影响,地层发生抬升剥蚀^[24],早期形成的上古生界油气藏遭受一定程度的改造破坏,从而导致天然气发生逸散,乌兰格爾凸起区白垩系油苗便是由天然气逸散至地表凝析而成^[39]。

Prinzhofer 研究发现^[40],甲、乙烷碳同位素差值($\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$)与甲、乙烷含量比值对数 $\ln(C_1/C_2)$ 同步增大,反映成熟度趋势;而逸散作用导致残留气藏天

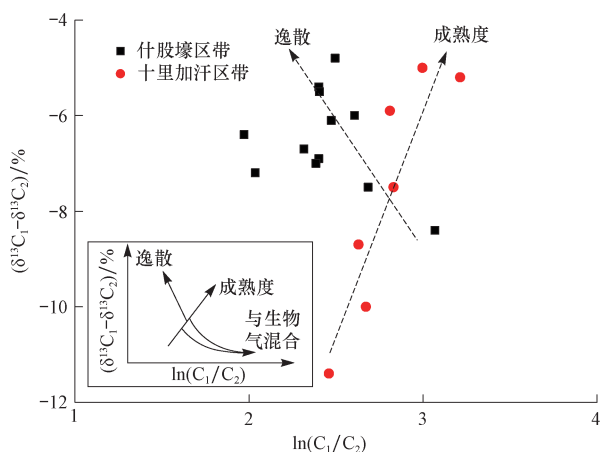


图7 杭锦旗地区上古生界天然气($\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$)— $\ln(C_1/C_2)$ 关系^[40]

Fig. 7 Correlation between $\delta^{13}\text{C}_1 - \delta^{13}\text{C}_2$ and $\ln(C_1/C_2)$ values of the natural gas in the Upper Paleozoic in Hangjinqi Area^[40]

然气中甲烷含量降低的同时,碳同位素值增大,因而甲、乙烷含量比值减小,甲、乙烷碳同位素差值增大。杭锦旗地区泊尔江海子断裂北侧什股壕区带上古生界煤成气甲、乙烷含量比值与甲、乙烷碳同位素差值表现出负相关性,明显受到逸散作用的影响,导致其甲烷相对含量降低、干燥系数减小(图7)。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地北部东胜(杭锦旗)、大牛地、苏里格气田上古生界煤成气干燥系数总体呈现由盆地中心向盆地边缘减小的平面分布特征;纵向上表现为“二段式”分布特征,由下而上具有先减小再增大的趋势。

2) 鄂尔多斯盆地北部地区上古生界煤成气干燥系数受到成熟度、地质色层作用和逸散作用等影响。干燥系数的宏观区域分布主要受控于气源岩成熟度。纵向上,影响干燥系数“二段式”分布的主控因素不同,下部烃源层内为成熟度作用,而上部储集层内则是地质色层作用。局部保存条件欠佳地区,如泊尔江海子断裂以北什股壕区带上古生界煤成气干燥系数受到逸散作用而减小。

致谢:样品采集与资料收集工作得到了中国石化华北油气分公司的大力支持和帮助,在此表示感谢!衷心感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

参 考 文 献

[1] 戴金星.我国煤成气资源勘探开发和研究的重大意义[J].天然气工业,1993,13(2):7-12.

Dai Jinxing. Significance of exploration and development of coal-formed gas resource and study in China[J]. Natural Gas Industry, 1993,13(2):7-12.

[2] 戴金星.我国天然气资源及其前景[J].天然气工业,1999,19(1):3-6.

Dai Jinxing. Resource and prospects of natural gas in China[J]. Natural Gas Industry,1999,19(1):3-6.

[3] 戴金星,杨春,胡国艺,等.煤成气是中国天然气工业的主角[J].天然气地球科学,2008,19(6):733-740.

Dai Jinxing, Yang Chun, Hu Guoyi, et al. Coal-formed gas plays a significant role in the natural gas industry of China[J]. Natural Gas Geoscience,2008,19(6):733-740.

[4] 赵文智,王红军,钱凯.中国煤成气理论发展及其在天然气工业发展中的地位[J].石油勘探与开发,2009,36(3):280-288.

Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, Qian Kai. Progress of coal-formed gas geological theory and its status in natural gas industry in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2009,36(3):280-288.

[5] 戴金星,吴伟,房忱琛,等.2000年以来中国大气田勘探开发特征[J].天然气工业,2015,35(1):1-9.

Dai Jinxing, Wu Wei, Fang Chenchen, et al. Exploration and development of large gas fields in China since 2000[J]. Natural Gas Industry,2015,35(1):1-9.

[6] 戴金星,戚厚发.我国煤成烃气的 $\delta^{13}\text{C}-\text{Ro}$ 关系[J].科学通报,1989,34(9):690-692.

Dai Jinxing, Qi Houfa. $\delta^{13}\text{C}-\text{Ro}$ relationship of coal derived gas in China[J]. Chinese Science Bulletin,1989,34(9):690-692.

[7] 戴金星,夏新宇,洪峰,等.中国煤成大中型气田形成的主要控制因素[J].科学通报,1999,44(22):2455-2464.

Dai Jinxing, Xia Xinyu, Hong Feng, et al. Main controlling factors of forming large-middle gas fields derived by coal in China[J]. Chinese Science Bulletin,1999,44(22):2455-2464.

[8] 戴金星,胡安平,杨春,等.中国天然气勘探及其地学理论的主要新进展[J].天然气工业,2006,26(12):1-5.

Dai Jinxing, Hu Anping, Yang Chun, et al. Newest achievement on gas exploration and its geo-scientific theories in China[J]. Natural Gas Industry,2006,26(12):1-5.

[9] 戴金星.中国煤成气研究30年来勘探的重大进展[J].石油勘探与开发,2009,36(3):264-279.

Dai Jinxing. Major developments of coal-formed gas exploration in the last 30 years in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(3):264-279.

[10] 侯读杰,肖中尧,唐友军,等.柯克亚油气田混合来源天然气的地球化学特征[J].天然气地球科学,2003,14(6):474-479.

Hou Dujie, Xiao Zhongyao, Tang Youjun, et al. Geochemical characterization of mixing natural gas in Kekeya Field, Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience,2003,14(6):474-479.

[11] 包建平,朱翠山,张秋茶,等.塔里木盆地库车坳陷不同构造单元天然气地球化学特征[J].石油与天然气地质,2007,28(5):664-669.

Bao Jianping, Zhu Cuishan, Zhang Qiucha, et al. Geochemical characteristics of natural gas from different structural units of the Kuqa Depression, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology,2007,28(5):664-669.

- [12] 刘全有,金之钧,刘文汇,等. 四川盆地东部天然气地球化学特征与 TSR 强度对异常碳、氢同位素影响[J]. 矿物岩石地球化学通报,2015,34(3):471-480.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Liu Wenhui, et al. TSR impact on abnormal carbon and hydrogen stable isotopes in sour natural gas from marine carbonate gas fields in the Eastern Sichuan Basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(3):471-480.
- [13] 戴金星,倪云燕,张文正,等. 中国煤成气湿度和成熟度关系[J]. 石油勘探与开发,2016,43(5):675-677.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Zhang Wenzheng, et al. Relationships between wetness and maturity of coal-derived gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5):675-677.
- [14] 王廷栋,杨远聪. 地质色层作用与川中上三叠统天然气的运移[J]. 天然气工业,1986,6(1):15-21.
Wang Tingdong, Yang Yuancong. Geological chromatograph and natural gas migration in Upper Triassic in the Central part of Sichuan [J]. Natural Gas Industry, 1986, 6(1):15-21.
- [15] 赵孟军,潘文庆,张水昌,等. 成藏过程对天然气地球化学特征的控制作用[J]. 沉积学报,2004,22(4):683-688.
Zhao Mengjun, Pan Wenqing, Zhang Shuichang, et al. The effect on the geochemical characteristics of natural gas by filling process[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4):683-688.
- [16] Clayton C. Carbon isotope fractionation during natural gas generation from kerogen[J]. Marine and Petroleum Geology, 1987, (8):232-240.
- [17] Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(5):649-661.
- [18] Bernard B B, Brooks J M, Sackett W W. Natural gas seepage in the Gulf of Mexico[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 31(1):48-54.
- [19] 陈敬轶,贾会冲,李永杰,等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):205-209.
Chen Jingyi, Jia Huichong, Li Yongjie, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic of the Yimeng Uplift, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):205-209.
- [20] 冯乔,耿安松,廖泽文,等. 煤成天然气碳氢同位素组成及成藏意义:以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 地球化学,2007,36(3):261-266.
Feng Qiao, Geng Ansong, Liao Zewen, et al. Carbon and hydrogen isotopic compositions of coal-genetic natural gases and their applications in accumulation in Upper Paleozoic, Ordos Basin [J]. Geochimica, 2007, 36(3):261-266.
- [21] 邹艳荣,帅燕华,孔枫,等. 煤成甲烷碳同位素演化的数学模型与应用[J]. 天然气地球科学,2003,14(2):92-96.
Zou Yanrong, Shuai Yanhua, Kong Feng, et al. Mathematic models of stable carbon isotope composition of coal-derived methane and their applications[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2):92-96.
- [22] 廖玉宏,耿安松,刘德汉,等. 煤生烃过程中成熟度引起的碳同位素分馏效应[J]. 石油实验地质,2007,29(6):583-588.
Liao Yuhong, Geng Ansong, Liu Dehan, et al. Carbon isotopic fractionation effect caused by maturity during the generation of coal-pyrolysis hydrocarbons[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(6):583-588.
- [23] 帅燕华,邹艳荣,彭平安. 运移、扩散、水洗对鄂尔多斯盆地中部上古生界煤成气影响的模拟研究[J]. 科学通报,2004,49(增刊 I):86-92.
- [24] 杨华,刘新社,闫小雄. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学),2015,22(3):174-183.
Yang Hua, Liu Xinshe, Yan Xiaoxiong, et al. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3):174-183.
- [25] 康玉柱. 中国致密岩油气资源潜力及勘探方向[J]. 天然气工业,2016,36(10):10-18.
Kang Yuzhu. Resource potential of tight and oil & gas and exploration orientation in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10):10-18.
- [26] 丁晓琪,张哨楠,周文,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J]. 石油与天然气地质,2007,28(4):491-496.
Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Zhou Wen, et al. Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4):491-496.
- [27] 郝蜀民,李良,张威,等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系-二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):149-154.
Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):149-154.
- [28] Dai Jinxing, Ni Yunyan, Gong Deyu, et al. Geochemical characteristics of gases from the largest tight sand gas field (Sulige) and shale gas field (Fuling) in China. Marine and Petroleum Geology, 2017, 79:426-438.
- [29] 吴志勇,罗斌杰. 天然气运移地质色层效应机理和指标探讨[J]. 沉积学报,1992,10(2):119-125.
Wu Zhiyong, Luo Binjie. Migrational geochromatograph of natural gas and discussion on the mechanism and indices [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(2):119-125.
- [30] Nagy B. The sedimentary strata as a chromatographic column[C]. General Petroleum Chemistry Symposium during the World Petroleum Congress, New York, 1959, 43-47.
- [31] Seifert W K, Moldovan J M. Paleoreconstruction by biological markers [J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1981, 45:783-794.
- [32] 王鹏,刘四兵,沈忠民,等. 地球化学指标示踪天然气运移机理及其有效性分析——以川西拗陷侏罗系天然气为例[J]. 天然气地球科学,2015,26(6):1147-1155.
Wang Peng, Liu Sibing, Shen Zhongmin, et al. Mechanism and effectiveness of geochemical index trace natural gas migration: A case study of Jurassic natural gas in western Sichuan Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6):1147-1155.