

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.01001

鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界 致密砂岩气藏气源对比

聂万才^{1,2}, 白玉奇³, 冯敏³, 张晨³, 张波³, 王铭伟¹

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中国石油长庆油田分公司宜黄天然气项目部, 陕西 西安 710021; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 本文通过碳同位素数据对比、常规天然气组分分析, 结合区域地质背景, 对鄂尔多斯盆地东南部气田的气源进行了研究。结果表明: 鄂尔多斯盆地东南部气田的主力烃源岩为煤层, 含气层位出现碳同位素倒转现象, 山西组山2段和本溪组主要为煤型气中混入少量油型气, 而山西组山1段和石盒子组盒8段则是成藏期经历了多期充注所致; CH_4 、 CO_2 和 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 三个指标在近源和远源层位之间分馏效应明显, 层位之内分异不明显, 这与致密砂岩近源的“幕式”充注和远源的“准幕式”充注有关。通过对气源的研究, 认为优质煤层和近源厚层砂体叠合的区域是本地区未来勘探开发的首选区域。

关键词: 运移特征; 气源对比; 致密砂岩; 东南部气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE111.2

文献标识码: A

研究区位于鄂尔多斯盆地南东部延安、宣川等地区, 勘探面积 33162 平方千米。前人对鄂尔多斯盆地开展了大量的研究, 但研究对象主要为盆地北部的苏里格、乌审旗、榆林、靖边、米脂及大牛地等气田, 对鄂尔多斯盆地东南部气田的研究较少。近几年, 随着对致密砂岩气认识的逐渐加深及开发工艺的不断改进, 大量之前被认为“贫气区”、“无气区”的区域被重新认识。鄂尔多斯盆地东南部气田自 2007 年开始勘探至今, 目前已钻探气井上千口, 探明天然气储量超过 5000 亿方, 成为继苏里格气田后又一个超千亿级大气田。

大量研究已经证实, 鄂尔多斯盆地上古生界主力烃源岩为下二叠统太原组和山西组、上石炭统本溪组的暗色泥岩和煤^[1-4]。晚三叠世末, 烃源岩开始生烃, 至早白垩世末, 伴随着地层达到最大埋深, 区内烃源岩生烃能力亦达到最强。早白垩世末后, 因鄂尔多斯盆地整体抬升, 地层温度下降, 区内烃源岩生烃能力减弱。赵林等^[5]和单秀琴等^[6]运用

流体势的概念对盆地上古生界天然气运移进行了研究, 认为三叠世—早白垩世末天然气主要向盆地北部和中部靖边气田运移, 早白垩世末后主要为就近运移成藏。闵琪等^[7]和李仲东等^[8]通过对盆地过剩压力研究, 推断了天然气的运移方向。米敬奎^[9]利用包裹体中气体的含量、捕获温度、捕获压力、流体盐度分布特点, 认为天然气的运移方向为由南向北。已有的研究成果对盆地上古生界天然气运移有了初步认识, 但前人的研究普遍忽略了砂岩致密时间与成藏时间的先后性及由此导致的运移动力的区别。

本次研究通过分析天然气的地球化学特征, 运用数值分析及相关图版确定了鄂尔多斯盆地东南部气田的天然气成因及其类型, 通过对 CH_4 、 CO_2 、 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 等多种地化指标综合对比, 对天然气运移方向进行分析研究, 确定天然气聚集的有利区域, 最终为研究区天然气勘探提供依据。

收稿日期: 2020-01-15; **改回日期:** 2020-07-15

作者简介: 聂万才(1986—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事石油与天然气地质综合研究。E-mail: 52608226@qq.com

资助项目: 国家重大科技专项课题(2016ZX05050, 2017ZX05001002)

1 地质背景

鄂尔多斯盆地东南部气田构造上位于伊陕斜坡东南侧,紧邻东部的晋西挠褶带(图1)。地势上呈东高西低,北高南低^[10]。受控于整个盆地的构造演化,区内经历了加里东期至海西中期的碰撞抬升、海西晚期至燕山期的持续沉降、喜山期的再次抬升。受构造抬升影响,上古生界奥陶系及石炭系部分地层遭受了剥蚀。目前,石炭系仅存在上统的本溪组,二叠系因未遭受剥蚀,自下而上分别发育了中统的太原组和山西组、上统的石千峰组(图1)。其中,烃源岩层位于石炭系本溪组、二叠系太原组和山西组,岩性以煤为主,其次为暗色泥岩。岩石的 R_o 值普遍大于2%,指示烃源岩已完成大规模生气。主力含气层位为石炭系的本溪组、二叠系的山西组2段和1段以及石盒子组8段^[11-12]。四个层位的含气性以本溪组

和山2段最好,山1段和盒8段次之。天然气中 CH_4 含量分布在87%~99%之间,大多高于95%,为干气。本溪组发育障壁岛-潮坪沉积相^[13],而二叠系则以海陆过渡相沉积为主,与盆地北部河流或三角洲平原沉积环境有明显的区别。气层埋藏深度多在1970~3500m之间,没有明显的边底水,孔隙度大多小于10%,基质渗透率普遍低于 $1 \times 10^{-3} \mu m^2$,是典型的致密砂岩气藏^[14-17]。

2 样品采集与分析

本文的数据来自区内的249口井,覆盖了整个研究区,数据具有较好的代表性,对于本文的研究起到了较好的支撑作用。其中,天然气组分测定采用气相色谱法,使用的仪器为Agilent7890A气相色谱仪,色谱柱为PONA柱(50m × 0.20mm × 0.50 μm);天然气分析条件起始温度为35℃(恒温5min),升温速率为2℃/min,至100℃,再以升温速

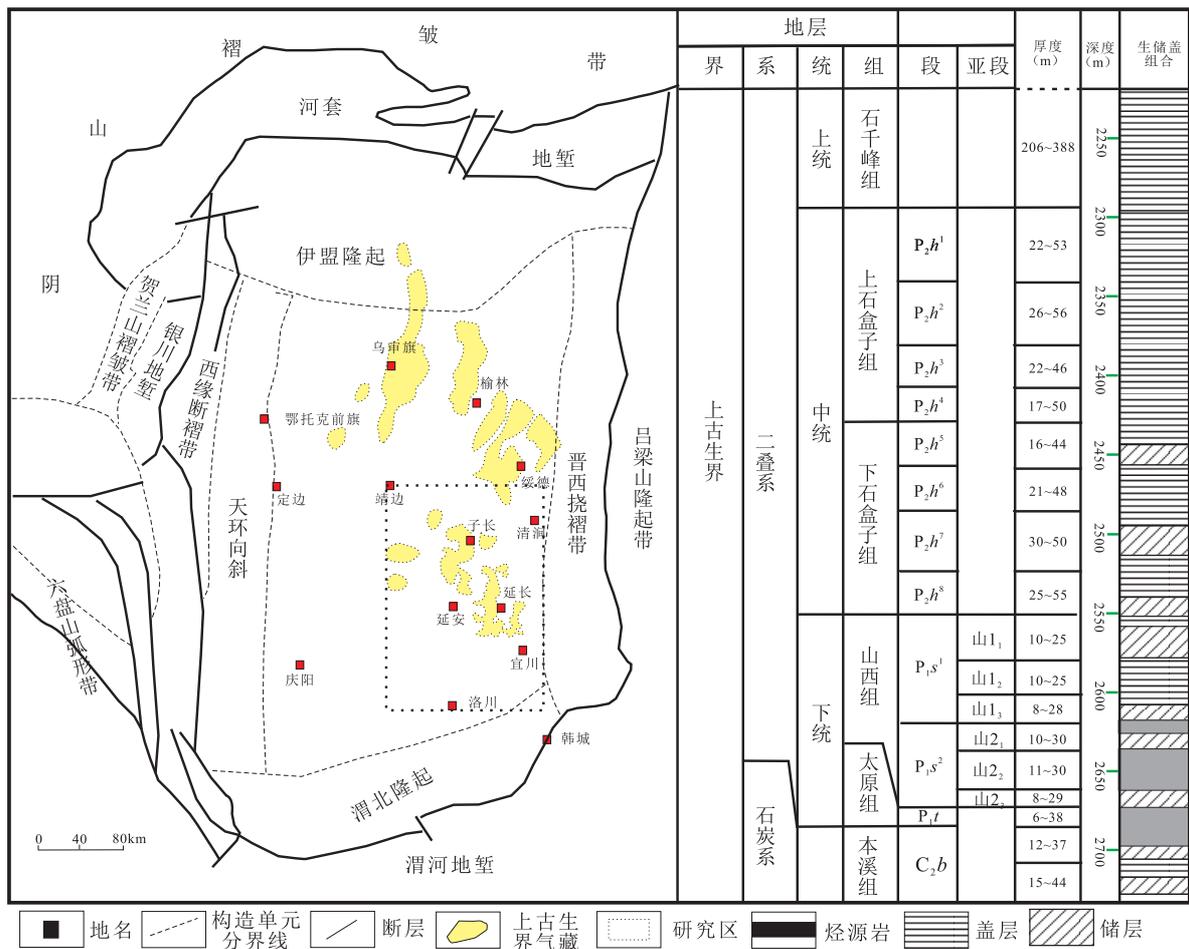


图1 鄂尔多斯盆地东南部气田区域位置及地层综合柱状图
 Fig.1 Location of Yan'an Gasfield and comprehensive stratigraphic histogram

率 6°C/min 升至 290°C, 恒温 30min。载气流速: 0.9mL/min, 线速度: 40cm/s。因研究区内部分天然气井采用液氮气举的方式反排, N₂ 指标收到污染, 对采集的数据进行了筛选, 确定 114 口井的 149 个样品数据有效。碳同位素数值则是通过 Isoprime100 同位素质谱仪测定获得, 实验质量数范围 1~82amu; 连续流灵敏度优于 1200M/I(CO₂); 分辨率为 100; H₃⁺ 因子小于 <10 × 10⁻⁶/nA。

3 天然气成因类型

3.1 天然气成因

数据分析结果表明, 研究区天然气中的甲烷含量较高, 主要分布在 86%~98% 之间, 大多高于 95%, 以干气为主。甲烷碳同位素值主要分布在 -37.5‰~-30‰ 之间, 并呈现随着甲烷含量增加而变重的趋势(图 2a)。气体中各组分含量及碳同位素值分布在一定的范围之内, 各数据之间没有明显的参数区别, 表明其成因相似。

目前国内外普遍采用 Bernard 图版对天然气成因类型分类^[18-19], 该图版主要依据不同成因类型的天然气在同位素比值和化学组成上存在区别而设计。图版将 C₁/(C₂+C₃) 比值和甲烷中 δ¹³C₁ 数值作为参数, 在综合考虑有机质类型和成熟度这两个参数的影响后, 将 C₁/(C₂+C₃) 比值小于 50 且 δ¹³C₁ 介于 -35‰~-50‰ 的区域定义为热成因区。根据鄂尔多斯盆地东南部气田相关数值分布, 可以看出研究区 C₁/(C₂+C₃) 比值大多大于 10(图 2b); δ¹³C₁ 介于 -30‰~-35‰ 之间, 碳同位素较重。数据表明, 研究区天然气碳同位素数值主要分布在 III 型有机质演化程度高的区域, 数据分布区域集中, 指示各层位天然气的热演化程度变化不大。

3.2 天然气类型

目前, 国内外学者普遍认为有两种原因导致碳同位素发生倒转, 一是油型气和煤型气的混合, 二是同源不同期或同型不同源气的混合^[20]。从天然气碳同位素连线特征来看, 鄂尔多斯盆地东南部气田各气层表现出碳同位素单项性倒转, 即 δ¹³C₁ > δ¹³C₂(图 2c)。戴金星^[21]在综合国内外气田的基础上, 编制了烷烃气成因的图版(图 2d)。图版中, 鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界天然气样品数值主要分布在 III₁ 和 III₂ 区域。其中, 含气层本溪组和山西组的数据点主要分布在以煤型气和油型气混合为主的 III₁ 区域, 盒 8 段天然气主要分布在同源不

同期的煤型气混合为主的 III₂ 区域, 以上两种类型是导致碳同位素出现倒转的主要原因。与图 2b 的分析结果相结合, 可以推断鄂尔多斯盆地东南部气田主要以热演化程度高的煤型气为主, 混入少量油型气。

总之, 鄂尔多斯盆地东南部气田天然气主要来源于本地区的煤层, 天然气类型主要为煤型气。部分油型气为早期生成的原油伴随着地层埋深加大和地层温度升高裂解而成, 但此类气体多分布于山西组和本溪组。山 1 和盒 8 段虽然远离生烃层, 含气性不如近源的山西组和本溪组, 但从碳同位素倒转原因推测, 它们在地质历史中亦受到过多次充注, 因此也呈现出较好的含气性。

4 天然气运移特征

目前国内外用于天然气运移示踪的地球化学指标多达十余种, 这些指标可进一步归纳为 4 大类, 即“常规组分指标”、“轻烃组分指标”、“稀有气体指标”和“碳同位素指标”^[22]。本文从常规组分和碳同位素入手, 对延安气田上古生界天然气运移的规律有了初步的认识。

鄂尔多斯盆地东南部气田已发现的 4 个主要产气层是物性较低的致密砂岩储层, 它们的运移动力主要为持续生烃产生的异常压力, 浮力在天然气的运移中发挥的作用较小^[5,7,8]。受储层物性和运移动力的影响, 本地区天然气多呈游离相态运移。在运移相态的影响下, CH₄ 和 iC₄/nC₄ 两个指标随着运移距离增大而增大, 由近源层位(山 2 段和本溪组)向远源层位(山 1 段和盒 8 段)其含量或者比值总体呈现增高的趋势(图 3a、b), 而 CO₂ 含量则呈现与之相反的趋势(图 3c)。

晚三叠世, 由于盆地的快速沉降, 区内烃源岩层进入生烃期。晚侏罗世至早白垩世, 主力烃源岩进入了生气高峰, 此时上古生界储层进入储层致密化演化阶段^[23]。鄂尔多斯盆地东南部气田位于伊陕斜坡中部, 区内的构造运动主要以整体抬升和沉降为主, 缺乏纵向断层等垂向输导系统, 因此, 区内天然气的运移呈现出近距离幕式充注的特征。赵文智等认为集群式成藏是天然气大型化成藏的主要样式^[25], 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏具备此特征且其充注方式呈现多组分集群式快速充注的特点, 而初次运移方式也多以近源充注为主, 这与高孔渗气层的充注持续时间长和运移距离远的

特征有很大的区别。受此影响,致密砂岩气层内的天然气很难发生因长距离运移而产生分馏效应,因此,近源层内各项常规组分指标分异性不强。

早白垩世末,受燕山运动的影响,盆地整体抬升。近源气层因前期天然气持续充注累积了足够的地层压力而突破泥岩隔层,一部分气体向上运移至远源的山1段和盒8段储层。此时,烃源岩层—近源气层—远源气层进入一个动态平衡模式,即烃源岩多次充注,近源气层压力不断升高,当近源气层压力足够突破泥岩隔层时,天然气在近源和远源

气层之间进行一次运移,伴随着充注,近源气层压力下降,充注停止,如此循环,直至烃源岩供烃能力减弱或者停止供烃。总体上,气体对远源气层的充注呈现类似于近源气层的“准幕式”充注。二者主要的区别在于远源的“准幕式”充注需要经历一段运移距离,而近源的幕式充注距离却很短。因此,远源层位和近源层位之间常规组分指标分馏效应明显,但远源层位之间的分异却不是很明显。

鄂尔多斯盆地东南部气田天然气的 $C_1 \sim C_4$ 烷烃碳同位素总体上呈现下轻上重的特征。其中,石

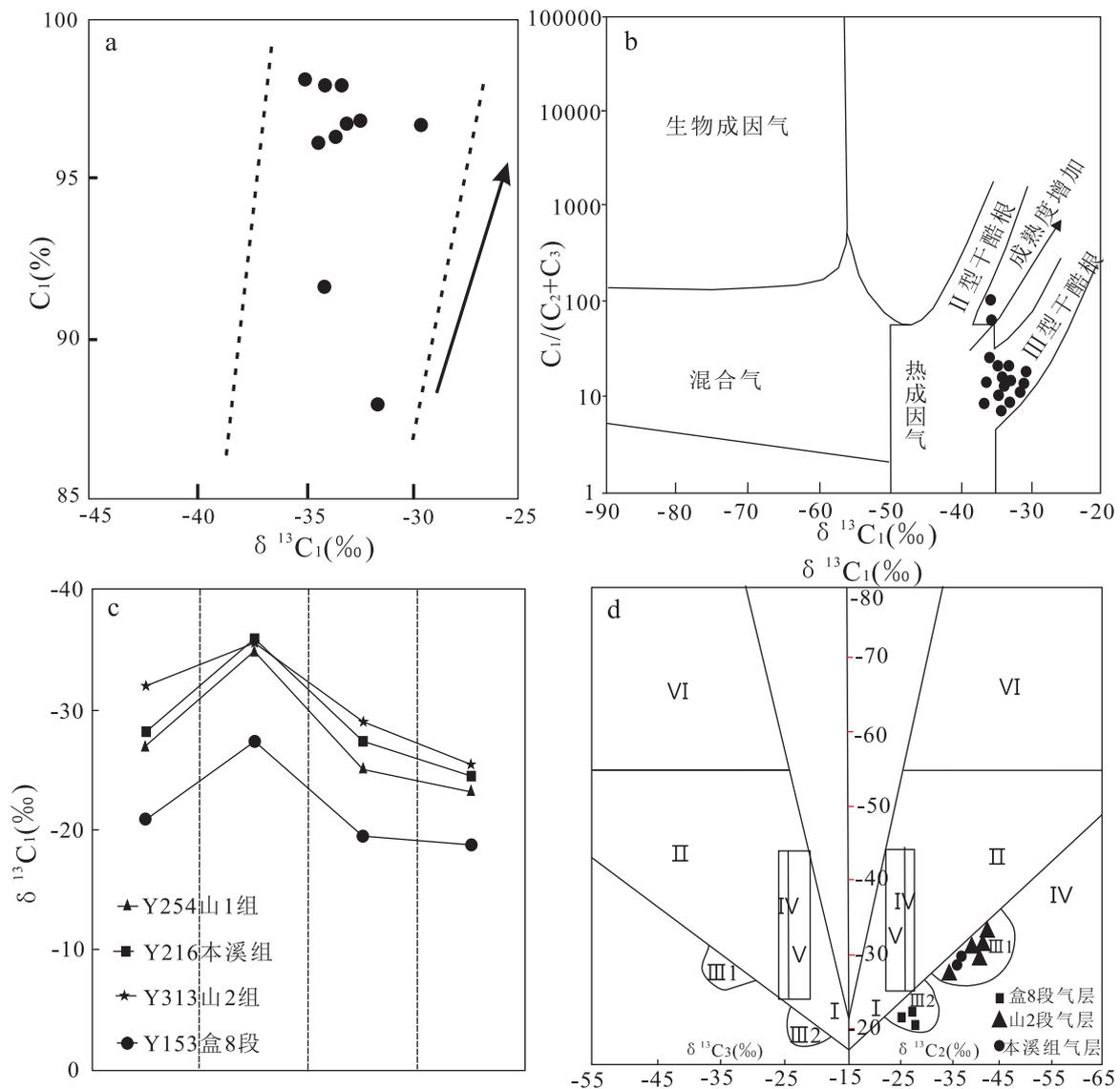


图2 鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界天然气成因图版

a. 天然气甲烷含量与碳同位素分布图; b. 天然气成因 Bernard 分类图版; c. 天然气碳同位素特征图; d. 天然气成因 $\delta^{13}C_1$ - $\delta^{13}C_2$ - $\delta^{13}C_3$ 分类图版; I 煤型气区; II 油型气区; III 碳同位素系列倒转混合气区; V 煤型气油型气和混合气区; VI 生物气和混合气区; IV 煤型气和油型气区

Fig. 2 Genesis charts of natural gas of the Upper Paleozoic in Yan'an Gasfield

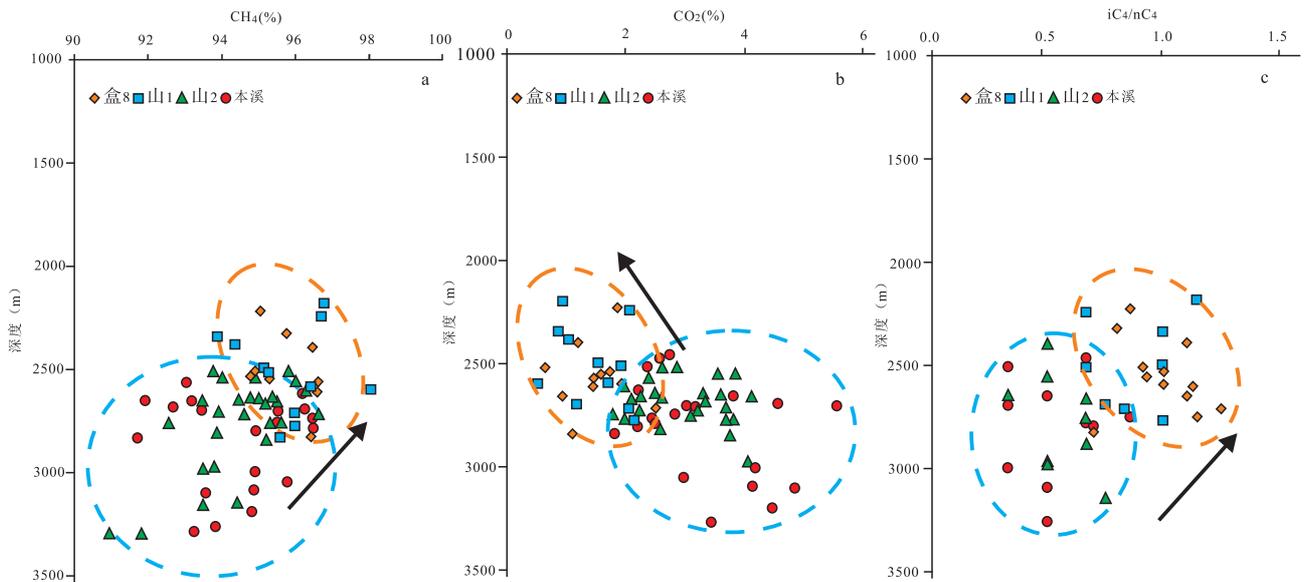


图3 鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界天然气组分垂向分布图

Fig. 3 Vertical distribution of gas composition of the Upper Paleozoic in Yan'an Gasfield

盒子组最重,山1段居中,本溪组 and 山2段最轻(图2d),而这种现象的出现与鄂尔多斯盆地东南部气田天然气扩散运移有一定关系^[24]。

5 天然气聚集有利区

鄂尔多斯盆地东南部气田上古生界发育了本溪组、山西组、石盒子组和石千峰组等多套砂体,但仅在本溪组、山西组2段和1段以及石盒子组8段发现工业气藏(图1),石千峰组砂体虽有天然气显示,但总体上含气性很差,不具备开发价值。这主要是因为本地区断层构造不发育,砂体大多为致密砂岩,天然气不可能大规模长距离运移,天然气主要以近源成藏为主。因此,靠近煤层的山2段和本溪组是天然气聚集的优选区域,山1段和盒8段虽有天然气充注,但由于远离煤层,其含气性远不如近源的层位。因此,在鄂尔多斯盆地上石盒子组区域盖层普遍存在,气藏保存条件较好的背景下,优质煤层和近源厚层砂体叠合的区域是本地区未来开发的优选区域;而山1段和盒8段除了寻找靠近煤层的区域外,与烃源岩层之间微裂缝发育的区域、泥岩隔层较少的区域也是未来本地区勘探和开发的后备区。

6 结论

(1)鄂尔多斯盆地东南部气田天然气主要来源于本地区的煤层,为煤型气。山2段和本溪组及山

1段和盒8段分别因为混入油型气和同源多期充注而出现碳同位素倒转现象。

(2)受致密砂岩运移动力和运移相态的影响,天然气中 CH_4 和 $i\text{C}_4/n\text{C}_4$ 指标随着运移距离增大而增大, $\text{C}_1 \sim \text{C}_4$ 烷烃碳同位素总体上呈现下轻上重的变化趋势。区内天然气的运移以近距离的幕式充注和远源的“准幕式”充注为主。

(3)靠近煤层的山2段和本溪组是天然气聚集的优选区域,而在微裂缝发育或泥岩隔层较少的区域,山1段和盒8段是未来勘探开发的备选区域。

参考文献:

- [1] 于强,任战利,王宝江,等. 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史[J]. 地质论评,2012,58(2):303-308.
- [2] 甘华军,米敬奎,肖贤明,等. 鄂尔多斯盆地中北部上古生界气田天然气气源与运聚研究[J]. 石油天然气学报,2007,29(1):16-22.
- [3] XIAO X M, ZHAO B Q, THU Z L, et al. Upper Paleozoic petroleum system, Ordos Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005,22: 945-963.
- [4] GONG S, PENG P, SHUAI Y, et al. Primary migration and secondary alteration of the Upper Paleozoic gas reservoir in Ordos Basin, China — Application of fluid inclusion gases [J]. Science in China D: Earth Science, 2008, 51(1):165-173.
- [5] 赵林,夏新宇,戴金星. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气的运移与聚集[J]. 地质地球化学,2000,28(3):48-53.
- [6] 单秀琴,陈红汉,罗霞,等. 利用包裹体分析鄂尔多斯盆地上古生界油气充注史与古流体势[J]. 岩石学报,2007,23(9):2303

- 2308.
- [7] 闵琪,付金华,席胜利,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征[J].石油勘探与开发,2000,27(4):26-29.
- [8] 李仲东,惠宽洋,李良,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移特征及成藏过程分析[J].矿物岩石,2008,28(3):77-83.
- [9] 米敬奎.鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏的运聚特征[D].广州:中科院广州地球化学研究所,2003:14-19.
- [10] 付金华,段晓文,姜英昆.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法[J].中国石油勘探,2001,6(4):68-75.
- [11] 陈义才,张胜,魏新善,等.苏里格气田下二叠统盒8段异常低压成因及其分布特征[J].天然气工业,2010,30(11):1-4.
- [12] 李振宏,席胜利,刘新社.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏[J].世界地质,2005,24(2):1-5.
- [13] 屈红军,马强,高胜利,等.物源与沉积相对鄂尔多斯盆地东南部上古生界砂体展布的控制[J].沉积学报,2011,29(5):825-834.
- [14] YANG H, FU J H, LIU X S, 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.
- [15] 李良,袁志祥,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268-271.
- [16] 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):18-26.
- [17] 付少英,彭平安,张文正,等.鄂尔多斯盆地上古生界煤的生烃动力学研究[J].中国科学(D辑),2002,32(10):812-818.
- [18] 王奇,邹华耀,周心怀,等.渤海海域烃源岩的生气潜力与天然气成因分析[J].高校地质学报,2017,23(2):304-314.
- [19] 田金强,邹华耀,徐长贵,等.辽东湾地区天然气成因类型[J].新疆石油地质,2011,32(4):345-347.
- [20] 黄第藩,熊传武,杨俊杰,等.鄂尔多斯盆地中部气田气源认识和天然气成因类型[J].天然气工业,1996,16(6):1-6.
- [21] 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,1993,2:1-40.
- [22] 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有效性分析—以川西坳陷侏罗系天然气为例[J].天然气地球科学,2015,26(3):1147-1155.
- [23] 米敬奎,李新虎,刘新华,等.利用生烃动力学研究鄂尔多斯盆地抬升后上古生界源岩生气作用结束时间[J].地球化学,2004,33(6):561-566.
- [24] 李军,赵靖舟,凡元芳,等.鄂尔多斯盆地上古生界连续型气藏天然气运移机制[J].石油与天然气地质,2013,34(5):592-599.
- [25] 赵文智,王红军,卞从胜,等.我国低孔渗储层天然气资源大型化成藏特征与分布规律[J].中国工程科学,2012,(6):31-39.

Sources of tight sandstone gas and its migration in the Upper Paleozoic, Yan' an Gasfield

Nie Wancai^{1,2}, Bai Yuqi³, Feng Min³, Zhang Chen³, Zhang Bo³, Wang Mingwei¹

(1. State key laboratory of reservoir geology and development engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 2. Yihuang natural gas project department, PetroChina Changqing oilfield company, Xi'an 710021, Shanxi, China; 3. Research institute of exploration and development, PetroChina Changqing oilfield company, Xi'an 710021, Shanxi, China)

Abstract: In this paper, the gas source of Yan' an Gasfield in southeastern Ordos Basin is studied through the comparison of carbon isotope data, the analysis of components of natural gas, and the consideration of regional geological background. The results show that the main source rocks in Yan' an Gasfield are coal seams. The carbon isotope inversion occurs in the gas-bearing strata, mainly caused by the mixing of a small amount of oil-type gas in the second number of Shanxi Formation and Benxi Formation or caused by multiple gas fillings in the first number of Shanxi Formation and the eighth number of Shihezi Formation. The fractionation effects of CH₄, CO₂ and iC₄/nC₄ between near-source rocks and far-source rocks are obvious while the differentiation within a layer is not obvious, which is related to the distances of episodic fillings in tight sandstone. Through the study of gas source, it is considered that the overlapping area of high quality coal seam and thick sandstone is the preferred area for future exploration in the region.

Key words: migration; gas source contrast; tight sandstone; southeastern gas field; Ordos basin