

Genetic Relationship and Enrichment Patterns of Natural Gas in the Upper Paleozoic of Ordos Basin

Peng Liu^{1,2}, Weifeng Wang³, Yongshi Wang¹

¹Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield, Dongying Shandong

²Working Stations for Postdoctors of Shengli Oilfield, Dongying Shandong

³School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao Shandong

Email: lpupc1987@163.com

Received: Aug. 23rd, 2018; accepted: Sep. 7th, 2018; published: Sep. 14th, 2018

Abstract

The Upper Paleozoic of Ordos Basin developed tight gas, shale gas and coal-bed methane superimposed spatially with each other, while their inner connection and enrichment patterns are lack of research. To solve these problems, according to the natural gas composition and carbon isotope characteristics, combining the spatial and temporal distribution of the Upper Paleozoic, this paper used well logging, drilling, and test data to analyze genetic relationship between tight gas, shale gas and coal-bed methane in the Upper Paleozoic. It is concluded that coal-bed methane and shale gas are both genetically related with tight gas, which composed two coexist systems including coal-bed methane-shale gas-tight gas and shale gas-tight gas system. Five different combination types were identified. The former system was mainly distributed in the northern and southern of the basin, while the latter system spread almost the whole basin with broader distribution. Natural gas mainly migrated vertically through faults and fractures developing *in situ* accumulation and near source accumulation two models.

Keywords

Ordos Basin, Natural Gas, Genetic Relationship, Coexistence Accumulation, Migration and Accumulation Pattern

鄂尔多斯盆地上古生界天然气共生富集规律

刘 鹏^{1,2}, 王伟锋³, 王永诗¹

¹中石化胜利油田勘探开发研究院, 山东 东营

²中石化胜利油田博士后科研工作站, 山东 东营

³中国石油大学(华东), 山东 青岛

摘要

鄂尔多斯盆地上古生界赋存的致密气、页岩气和煤层气在空间上呈现相互叠置特征,但各种资源之间内在联系及其共生富集规律研究薄弱。利用测井、录井和分析化验等资料,在上古生界天然气资源时空分布基础上,以天然气的组分特征、碳同位素特征为依据,分析鄂尔多斯盆地上古生界天然气成生关系,划分共生成藏系统,识别其组合类型,提出天然气运聚模式。研究表明,鄂尔多斯盆地上古生界煤层气、页岩气分别与致密气具有成生关系,具有5种共生组合类型;发育煤层气-页岩气-致密气和页岩气-致密气2个共生成藏系统,前者分布在盆地的南部和北部地区,后者展布范围更广;天然气以垂向运移为主,存在原地运聚和近距离运聚2种模式。

关键词

鄂尔多斯盆地, 天然气, 成生关系, 共生成藏, 运聚模式

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来的研究和勘探证实[1][2][3][4],鄂尔多斯盆地上古生界主要富集非常规致密砂岩气、煤层气和页岩气,是我国重要的天然气生产基地。盆地内已发现苏里格、榆林、乌审旗、子洲、大牛地与延长等6个储量均超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的上古生界致密砂岩大气田[4][5];盆地东缘煤层含气量高,一般 $8 \sim 15 \text{ m}^3/\text{t}$ [6][7];鄂页1井和镇钾1井太原组页岩已获得高产工业气流[8],此外,榆106井区山西组页岩气产能较高,具有较好的页岩气勘探潜力[9]。前人就鄂尔多斯盆地致密气成藏特征及富集规律[10]-[18]、煤层气和页岩气形成条件及其储层特征[19]-[24]进行了大量的研究,但这些矿产资源内在的富集规律和直接或间接的依存关系尚不清楚,整体研究薄弱。本文在前人研究成果基础上,开展盆地上古生界多种天然气资源的成生关系、组合类型及其共生成藏系统研究,总结其油气运聚模式,为实现鄂尔多斯盆地上古生界天然气协同勘探与开发、提高勘探开发效率、节约勘探开发成本提供依据与支撑。

2. 地质概况

鄂尔多斯盆地是在太古代-元古代结晶基底的基础上发展而成的多旋回叠合的克拉通盆地,面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据现今的构造形态、基底特征,可以将鄂尔多斯盆地由伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、陕北斜坡、天环坳陷、西缘冲断带等6个一级构造单元组成(图1)。盆地现今构造格局形成于中燕山运动,发展完善于喜马拉雅运动[25],总体为一南北翘起、东翼缓而长、西翼陡而短的近南北走向不对称大向斜(图2)。盆地上古生界主要赋存致密气、页岩气和煤层气等天然气资源,致密气产量最大,其次为煤层气。平面上,上古生界致密气大部分位于伊陕斜坡的北部,页岩气主要分布在盆地的东部,煤层气有利区主要分布在盆地的东西缘(图1)。纵向上,上古生界致密气藏主力产气层段位于下石盒子组和山西

组[4] [10] [26] [27], 上古生界页岩气赋存于本溪组、太原组和山西组三套富含有机质页岩中[20] [21] [22], 煤层气主要发育在本溪组 8 号煤层和山西组 5 号煤层[19] (图 2)。

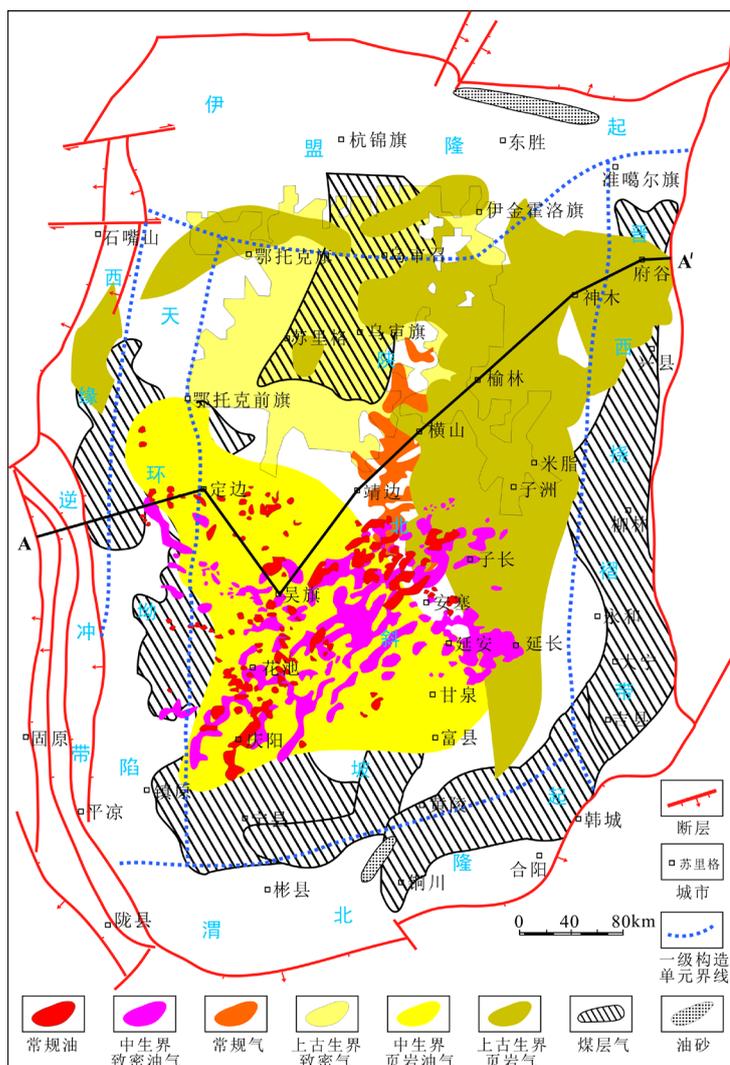


Figure 1. Distribution of different resources in Ordos Basin
图 1. 鄂尔多斯盆地多种油气类资源平面分布

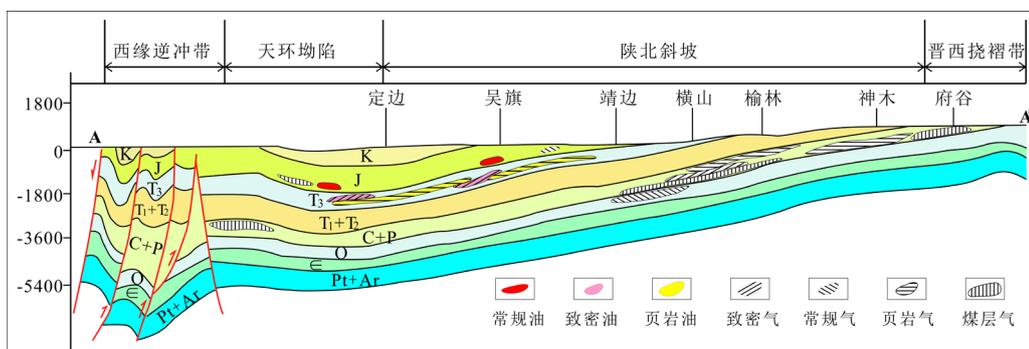


Figure 2. Profile distribution pattern of different resources in Ordos Basin
图 2. 鄂尔多斯盆地多种油气类资源剖面分布模式

3. 天然气共生关系及组合类型

3.1. 天然气共生关系

通过对比分析鄂尔多斯盆地上古生界天然气的组分特征、碳同位素特征, 结合其分布特征, 揭示相互之间的成生关系。

3.1.1. 天然气组分特征

上古生界致密气甲烷含量为 88.81%~96.37%, 多位于 92%~96%, 平均值为 92.94%, 重烃含量为 2.28%~7.51%, 大部分样品数值分布在 4%~6%, 平均值为 4.82%, 干燥系数平均为 0.95; 致密气非烃气体为 CO_2 和 N_2 , 二者含量都比较低, CO_2 含量分布在 0.49%~2.64% 之间, 大部分小于 1%, 平均值为 0.974%, N_2 含量分布在 0~2.27% 之间, 主体分布在 0~1%, 平均值为 0.939%。天然气组分特征表示, 上古生界致密气以过成熟干气为主。

3.1.2. 天然气同位素特征

据前人资料[12] [28] [29], 统计了 25 组鄂尔多斯盆地上古生界天然气碳同位素特征, 分析表明上古生界石炭 - 二叠系致密气甲烷碳同位素分布在 -35%~-29%, 大部分分布在 -35%~-33%, 平均值为 -32.98; 乙烷碳同位素分布在 -32.05%~-22.13%, 大部分分布在 -27%~-24%, 平均值为 -24.91% (图 3); 丙烷碳同位素分布在 -27.69%~-21.77%, 平均值为 -24.19%。甲烷和乙烷碳同位素分布比较集中, 表明上古生界致密气来源比较单一, 故甲烷和乙烷碳同位素可以作为鉴别致密气成因和来源的指标。

根据戴金星等[30]提出的利用碳同位素鉴别天然气成因标准(表 1), 鄂尔多斯盆地上古生界致密气为典型的煤成气, 其依据主要有三个方面: 1) 上古生界致密气甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_1$ 大部分分布在 -36%~-33%, 平均值为 -33.91%; 25 组乙烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 数据中, 除了府 5 井太原组其他 24 组 $\delta^{13}\text{C}_2$ 的值均大于 -28%。2) 依据 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R_o 的关系, 假设上古生界致密气为煤成气, 利用统计数据中的 -35% 和 -29% 作为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 的下限和上限, 推出相对应的 R_o 值范围为 0.9%~2.4%, 与实际上古生界石炭 - 二叠系烃源岩 R_o 在 1.2%~2.2% 之间是相符合的; 假设上古生界致密气为油型气, 则推出相应的 R_o 值大于 2.8%, 与实际情况不符。3) 通过最新修订的 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ - $\delta^{13}\text{C}_3$ 图版分析, 鄂尔多斯盆地上古生界天然气全部落入煤成气区域, 表明天然气为煤成气。综合天然气组分特征、碳同位素特征以及工区上下古生界烃源岩发育情况, 可以推测出其气源岩主要为石炭 - 二叠系煤系。

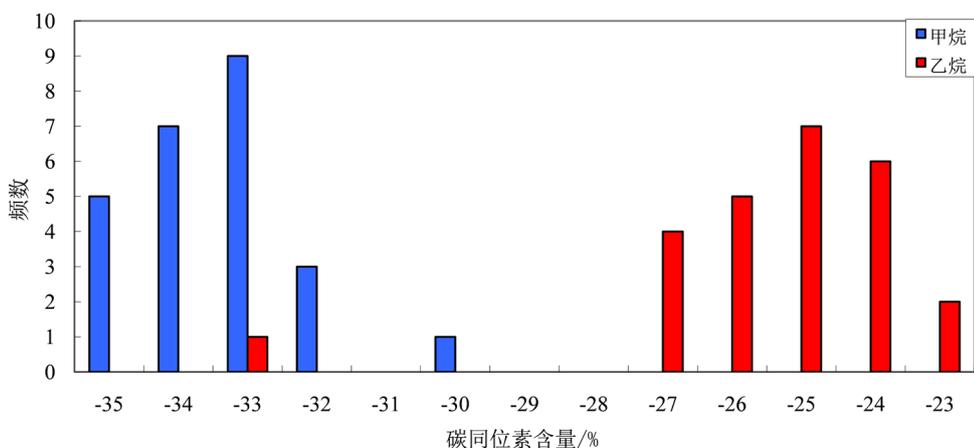


Figure 3. Methane and ethane carbon isotope content of tight gas from the Upper Paleozoic of Ordos Basin
图 3. 上古生界致密气甲烷和乙烷碳同位素含量直方分布图

Table 1. Using carbon isotope to identify genetic types of natural gas [30]**表 1.** 利用碳同位素鉴别天然气成因类型[30]

指标	油型气	煤型气
$\delta^{13}\text{C}_1/\%$	$-30 > \delta^{13}\text{C}_1 > -55$	$-10 > \delta^{13}\text{C}_1 > -43$
$\delta^{13}\text{C}_2/\%$	< -29	> -28.0
$\delta^{13}\text{C}_1\text{-Ro}$ 关系	$\delta^{13}\text{C}_1 \approx 15.8 \text{ Lg Ro} - 42.21$	$\delta^{13}\text{C}_1 \approx 14.13 \text{ Lg Ro} - 34.39$

综上,鄂尔多斯盆地上古生界致密气为煤成气,气源岩为上古生界煤系烃源岩。上古生界煤系烃源岩包括煤和暗色泥页岩,煤层为主要的烃源岩,泥页岩次之[27] [31] [32]。勘探证实,上古生界本溪组和山西组煤层中发育煤层气,太原组优质泥页岩与山西组炭质页岩内均赋存页岩气,故盆地内上古生界致密气与煤层气和页岩气都存在成生关系,且致密气与煤层气在成因上的相关性更大。关于煤层气与页岩气之间的成生关系,由于煤层气与页岩气属于自生自储的非常规气藏,因此上古生界煤层气与页岩气在成因上不存在相互关系。

3.2. 天然气共生组合类型

煤层气-页岩气-致密气成藏系统内煤层气和页岩气为气源,二者同时向致密储层供气。受沉积环境的控制,剖面上,鄂尔多斯盆地本溪组、太原组和山西组煤层、富含有机质泥页岩和致密砂岩储层相互叠置,在剖面上发育四种共生组合类型,组合模式如图 4。

根据钻井资料,识别出了每种组合类型的发育层段,如煤层气-页岩气-致密气组合在孤 1 井 1776~1784 m 层段发育(图 5(a)),致密气-煤层气-页岩气组合在陕 2 井 3216~3220 m 层段发育(图 5(b)),致密气-页岩气-煤层气组合在孤 1 井 1739.5~1749.5 m 层段发育(图 5(c)),页岩气-致密气-煤层气组合在孤 1 井 1784~1795 m 层段发育(图 5(d))。

页岩气-致密气共生组合岩性以黑色、深灰色泥岩、黑色碳质页岩以及灰色中细砂岩为主,在剖面上表现为致密砂岩与泥页岩互层沉积,主要发育在山 1 段及以上地层中。此种组合类型具有成生关系,表现为泥页岩为烃源岩,致密砂岩为储层,发育上生下储、下生上储两种生储关系。利用测井、钻井资料,发现致密砂岩储层单层厚多在 3~10 m。

4. 天然气共生成藏系统

油气共生成藏系统是在一定的地质单元内,具有成因联系的常规和非常规油气成藏所需要的动态和静态要素有机集合,形成一源多藏、多源多藏和多源一藏等常规与非常规油气多层系、多类型共生成藏组合。

依据生储盖组合特征,鄂尔多斯盆地上古生界发育煤层气-页岩气-致密气和页岩气-致密气 2 个共生成藏系统。其中,煤层气-页岩气-致密气成藏系统以太原组-山 2 段煤层和泥页岩为主要烃源岩,致密砂岩为储层,具有双源供气的特征;综合考虑鄂尔多斯盆地煤层气-页岩气-致密气成藏系统烃源岩和储层条件,以山西组煤层 5 m 等值线、太原组泥页岩厚度 5 m 等值线、TOC 为 1%等值线以及山 2 段储层 5 m 等值线为界限,圈定该系统平面分布范围。研究表明,鄂尔多斯盆地存在两个煤层气-页岩气-致密气成藏系统,主要分布在盆地的北部和南部,即鄂托克前旗-靖边-柳林一线以北、定边-安塞-子长一线以南的广大地区。

页岩气-致密气成藏系统剖面上主要发育在盒 8 段-山 1 段地层中,平面上位于在盆地的北部和南部地区,苏里格气田是其中的典型代表。该系统以山 1 段泥页岩为主要烃源岩,盒 8 段-山 1 段致密砂岩为主力储层。广覆式生烃的暗色泥页岩与大面积分布的致密砂岩储集层相互叠置,天然气近距离运移、

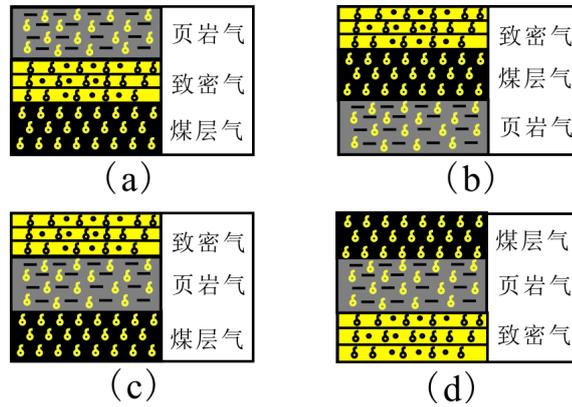
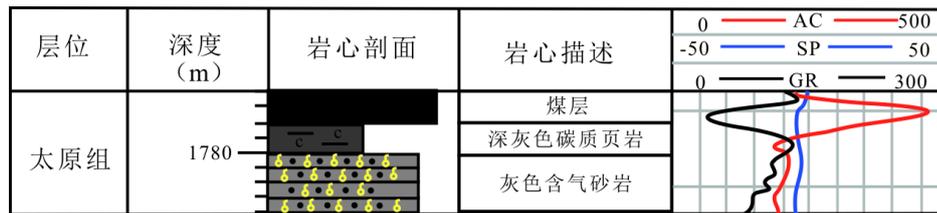
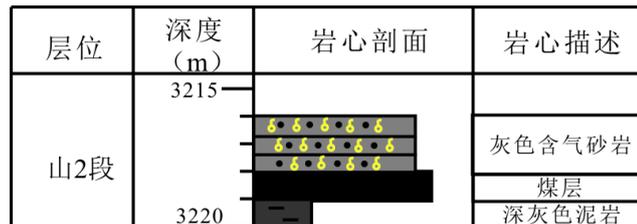


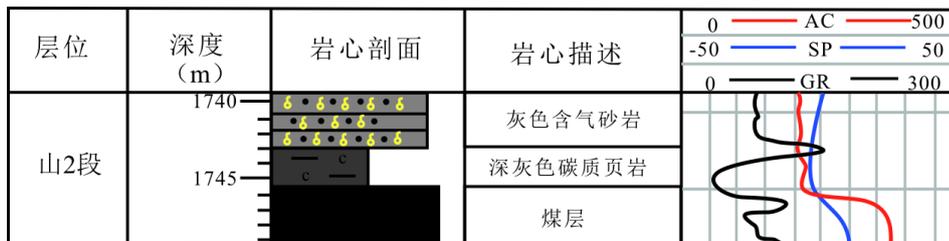
Figure 4. Coal-bed methane-shale gas-tight gas combination patterns in Ordos Basin
图 4. 鄂尔多斯盆地煤层气 - 页岩气 - 致密气成藏系统组合模式图



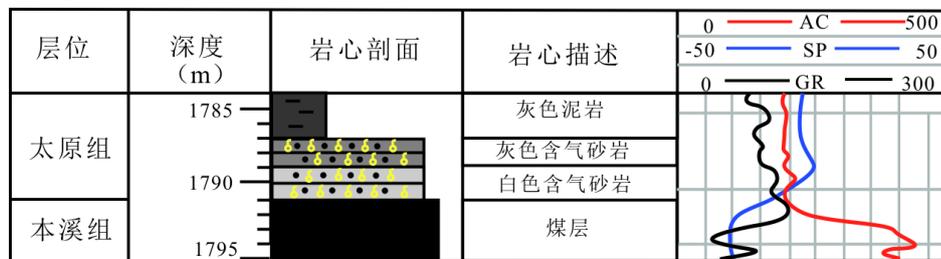
(a) 孤 1 井煤层气 - 页岩气 - 致密气组合实例



(b) 陕 2 井致密气 - 煤层气 - 页岩气组合实例



(c) 孤 1 井致密气 - 页岩气 - 煤层气组合实例



(d) 孤 1 井页岩气 - 致密气 - 煤层气组合实例

Figure 5. Coal-bed methane-shale gas-tight gas combination types in Ordos Basin
图 5. 鄂尔多斯盆地煤层气 - 页岩气 - 致密气成藏系统组合类型实例

大面积成藏。综合考虑鄂尔多斯盆地页岩气-致密气成藏系统烃源岩和储层条件,以山西组泥页岩厚度10 m等值线、TOC为1%、Ro为0.6%等值线以及砂岩储层5 m等值线为界限,圈定该系统平面分布范围。研究表明,页岩气-致密气成藏系统分布在盆地的中东部,即靖边-吴旗-庆阳一线以东地区。

5. 天然气共生成藏模式

煤层气-页岩气-致密气成藏系统存在两种运聚模式,一种是太原组-山2段煤系烃源岩生成的天然气向紧邻的致密储层中聚集成藏,以垂向运移为主,运移距离较短;一种是煤系烃源岩生成的天然气未经过二次运移储集在煤层和泥页岩中,形成煤层气藏和页岩气藏(图6)。

页岩气-致密气成藏系统天然气运聚模式与煤层气-页岩气-致密气成藏系统相同,页岩气是有机质生成的天然气未经过二次运移储集在泥页岩中聚集形成,致密气是烃源岩生成的天然气经过近距离垂向运移,在紧邻的致密砂岩储层中聚集形成(图7)。页岩气和致密气分布均不受区域构造控制,无统一气水界面,呈大面积连续性含气、局部地区含水的特征,气藏分布在一定范围内相对独立,互不连通。

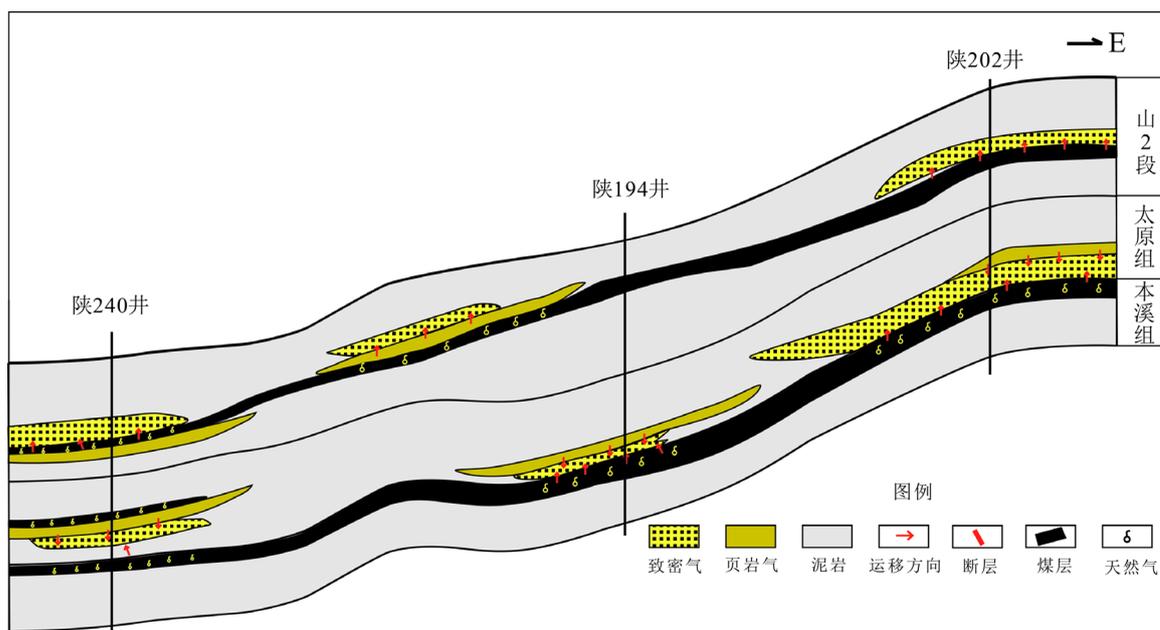


Figure 6. Migration and accumulation pattern of CBM-shale gas-tight gas coexistence system of Ordos Basin

图6. 鄂尔多斯盆地煤层气-页岩气-致密气成藏系统运聚模式图

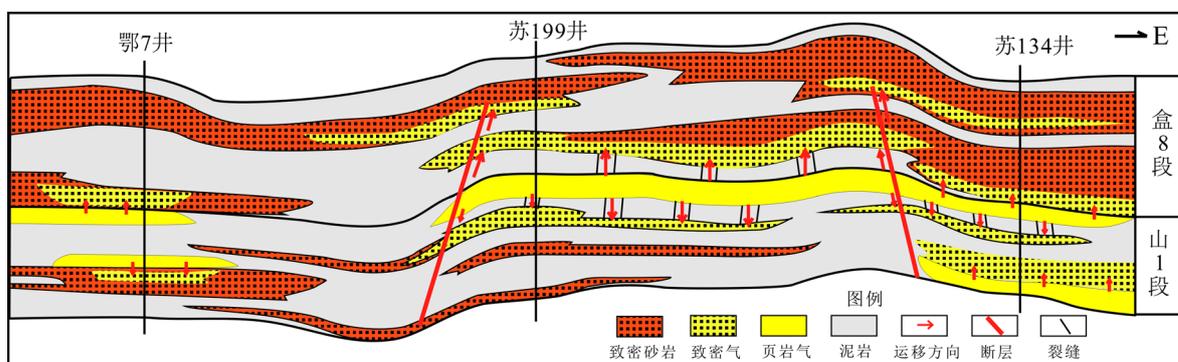


Figure 7. Migration and accumulation pattern of shale gas-tight gas coexistence system of Ordos Basin

图7. 鄂尔多斯盆地页岩气-致密气成藏系统运聚模式图

6. 结论

1) 通过分析天然气的组分特征和碳同位素特征, 认为鄂尔多斯盆地上古生界煤层气、页岩气均与致密气具有成生关系, 且煤层气与致密气成生关系更加密切。

2) 鄂尔多斯盆地上古生界发育煤层气-页岩气-致密气和页岩气-致密气 2 个成藏系统。前者分布在鄂托克前旗-靖边-柳林一线以北、定边-安塞-子长一线以南地区, 后者分布在靖边-吴旗-庆阳一线以东地区。

3) 煤层气-页岩气-致密气和页岩气-致密气成藏系统均存在 2 种运聚模式, 一种是煤系烃源岩生成的天然气向紧邻的致密储层中聚集成藏, 以垂向运移为主, 运移距离较短; 一种是煤系烃源岩生成的天然气未经过二次运移储集在煤层和泥页岩中, 形成煤层气藏和页岩气藏。

基金项目

国土资源部“十三五”重点项目“油气资源综合评价与区划”(编号: 12120115055701)。

参考文献

- [1] 邹才能, 董大忠, 杨桦, 等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业, 2011, 31(12): 26-39.
- [2] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- [3] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
- [4] 杨华, 刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. 石油勘探与开发, 2014(2): 129-137.
- [5] 王香增. 延长探区天然气勘探重大突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 1-9.
- [6] 冯三利, 叶建平, 张遂安. 鄂尔多斯盆地煤层气资源及开发潜力分析[J]. 地质通报, 2002, 21(10): 658-662.
- [7] 李贵红, 张泓. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气成藏地质模型[J]. 天然气地球科学, 2015(1): 160-167.
- [8] 张培河, 刘云亮, 贾立龙. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤系页岩气藏特征及勘探方向[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 54-58.
- [9] 兰朝利, 郭伟, 王奇, 等. 鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组页岩气成藏条件与有利区筛选[J]. 地质学报, 2016, 90(1): 177-188.
- [10] 付金华, 魏新善, 任军峰. 伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 664-667.
- [11] 张水昌, 米敬奎, 刘柳红, 等. 中国致密砂岩煤成气藏地质特征及成藏过程——以鄂尔多斯盆地上古生界与四川盆地须家河组气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(03): 320-330.
- [12] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 苏里格大型致密砂岩气藏形成条件及勘探技术[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 27-36.
- [13] 曹青, 赵靖舟, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏气源条件[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 584-591.
- [14] 周进松, 王念喜, 赵谦平, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 5.
- [15] 唐玄, 张金川, 丁文龙, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界海陆过渡相页岩储集性与含气性[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 147-157.
- [16] 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.
- [17] 孙六一, 赵靖舟, 李军, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2029-2038.
- [18] 李军, 王禹诺, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 180-188.
- [19] 郭小军. 鄂尔多斯盆地石炭-二叠纪聚煤规律与煤层气勘探有利区优选[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大

- 学(华东), 2010.
- [20] 付金华, 郭少斌, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013(2): 382-389.
- [21] 张丽霞, 姜呈馥, 郭超, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界页岩气勘探潜力分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2012, 2(1): 23-28.
- [22] 郭少斌, 王义刚. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组页岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 445-452.
- [23] 郭少斌, 赵可英. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界页岩特征及含气量[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 1-9.
- [24] 代旭光, 王猛. 鄂尔多斯东南缘海陆交互相页岩储层特征及含气性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 26-32.
- [25] 党犇. 鄂尔多斯盆地构造沉积演化与下古生界天然气聚集关系研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2003.
- [26] 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.
- [27] 胡维强, 赵靖舟, 李军, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界烃源岩特征及其对天然气藏形成与分布的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1068-1075.
- [28] 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(S2): 157-166.
- [29] 米敬奎, 王晓梅, 朱光有, 等. 利用包裹体中气体地球化学特征与源岩生气模拟实验探讨鄂尔多斯盆地靖边气田天然气来源[J]. 岩石学报, 2012(3): 859-869.
- [30] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 1-22.
- [31] 钱强. 鄂尔多斯盆地上古生界烃源岩沉积、沉降、抬升剥蚀及生烃性、含烃性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2014.
- [32] 李浩, 任战利, 高海仁, 等. 延长气田上古生界烃源岩评价及生排烃特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 33-39.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org