



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

“源-储-输导系统”联控煤系气富集成藏机制

——以鄂尔多斯盆地东缘为例

李 勇¹,许卫凯¹,高计县²,吴 鹏²,陶传奇³,田 阳¹,李军辉¹,张怡乐¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2. 中联煤层气有限责任公司,北京 100016; 3. 辽宁石油化工大学 土木工程学院,辽宁 抚顺 113001)

摘要:煤系气资源丰富,如何系统认识煤系多种非常规天然气富集成藏机制,是实现气藏有效开发的关键。从“源-储-输导系统”时空耦合配置角度,阐明煤系生烃—运聚—成藏的关键过程和主控因素,建立煤系气富集序列,丰富煤系气综合成藏内涵。稳定烃源岩是煤系气富集的基础,沉积微相宏观上控制优势储层展布,储层物性微观上决定成藏有效性,在输导体系影响下动态调整构成煤系综合含气系统。输导系统和储集系统受控于构造、沉积和成岩作用,生烃强度和生烃演化过程直接影响气体运移和聚集,输导系统转换是界定源内滞留和源外富集成藏的关键因素。输导系统转换界面之下,以煤系煤层和页岩内部发育的微纳米孔喉网络作为储集系统,煤系气在其中不运移或短距离运移;界面之上以砂体、裂缝和断层作为输导系统,煤系气就近或远距离运移。在此基础上,提出煤系气综合成藏序列,包括原位滞留型(包括太原组和山西组煤层气及页岩气)、近源充注型(包括山西组和下石盒子组致密气)和远源调整型(包括上石盒子组、石千峰组砂岩气和马家沟组灰岩气)的煤系气综合聚集模式,借此分析了华北地台煤系气富集规律和勘探方向,为煤系多气多层综合开发提供借鉴。

关键词:煤系非常规天然气;微相控储;物性控藏;输导系统;源内滞留;源外富集;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)08-2440-14

Mechanism of coal measure gas accumulation under integrated control of “source reservoir-transport system”: A case study from east margin of Ordos Basin

LI Yong¹, XU Weikai¹, GAO Jixian², WU Peng², TAO Chuanqi³, TIAN Yang¹, LI Junhui¹, ZHANG Yile¹

(1. School of Geoscience and Surveying, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. China United Coalbed Methane Ltd., Beijing 100016, China; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: Coal measure gas resources are abundant. Systematical understanding on the mechanism of multiple unconventional natural gases accumulation in coal measures is the key for effective development of gas reserves. From the perspective of the time-space coupling of source rock, reservoir and transport system, this paper clarifies the key processes and controlling factors of coal measure hydrocarbon generation, migration and accumulation, builds the coal measure gas accumulation series, and enriches the coal measure gas reservoiring connotation. Stable source rock is the basis of coal measure gas accumulation. Sedimentary microfacies control the distribution of main reservoirs, and physical properties microscopically determine the effectiveness of reservoir. The comprehensive coal measure gas system is

收稿日期:2021-04-30 修回日期:2021-07-01 责任编辑:常明然 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.CB21.0765

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42072194,U1910205);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066)

作者简介:李 勇(1988—),男,山东安丘人,副教授,博士生导师。E-mail:liyong@cumtb.edu.cn

引用格式:李勇,许卫凯,高计县,等.“源-储-输导系统”联控煤系气富集成藏机制——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J].煤炭学报,2021,46(8):2440-2453.

LI Yong, XU Weikai, GAO Jixian, et al. Mechanism of coal measure gas accumulation under integrated control of “source reservoir-transport system”: A case study from east margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2440-2453.



移动阅读

formed under the dynamic control of transport system. The transport system and the reservoir system are both influenced by structure, sedimentation and rock diagenesis. The hydrocarbon generation intensity and evolution directly affect gas migration and accumulation. The transformation of transport system is the key factor to define the accumulation of inside source kitchen retention and the outside source kitchen accumulation. Below the transfer interface of the transportation system, the micro-nano pore throat network developed in the coal measure source rock is the main gas storage system, and coal measure gases generally do not migrate or migrate in a short distance. Above the interface, sand bodies, fractures and faults can all play a role as the transport system, with gas migrating either nearby or by a long distance. Then, the comprehensive coal measure gas accumulation series, including in-situ retention type (e.g., coalbed methane and shale gas in the Taiyuan Formation and Shanxi Formation), the close source charging type (e.g., tight gas of in Shanxi Formation and the Xiashihezi Formation), and the near source adjustment type (e.g. tight gas of Shangshihezi and Shiqianfeng Formation and carbonate gas of Majiagou Formation), are proposed. Based on this, the enrichment law and exploration directions of coal measures on the North China platform are analyzed, providing support for the co-production of multi-gases in multi-layers within coal measures.

Key words: coal measure unconventional natural gas; microfacies control reservoir; physical properties control reservoir; transport system; inner source retention; outer source enrichment; Ordos Basin

煤系煤层气、页岩气和致密气资源丰富,实现多气综合开发有助于提高资源动用率和开发经济效益^[1-2]。鄂尔多斯盆地东缘神府—临兴区块、大宁—吉县区块和延川南区块等进行了煤层气、致密砂岩气和页岩气单独开发和共探共采试验,多口井在煤层—砂岩段压裂试气获得高产,其中临兴区块在石炭—二叠系本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组等均发现含气层系,仅致密气探明地质储量超过 1 010 亿 m³^[3]。大宁—吉县区块在山西组下段发现有利的过渡相页岩气层段,测试产气量稳定,预测鄂尔多斯盆地东缘山 2 段页岩气资源量为 1.8 万亿~2.9 万亿 m³^[4]。煤层气已在鄂尔多斯盆地东缘的保德、三交、柳林、延川南、韩城等多个区块实现商业化开发^[5]。近年来,随着煤层气开发深度增加,煤层气勘探逐渐向煤系致密气和页岩气开拓,临兴、大宁—吉县等区块分别取得了致密气和过渡相页岩气开发突破,煤系气展现了良好的综合勘探开发前景。

笔者以鄂尔多斯盆地东缘为例,综合分析和模拟煤系烃源岩生烃期次,揭示煤层气饱和和逸散过程;解剖煤系砂岩储层致密化和天然气充注顺序,查明有利致密气圈闭形成及叠置成藏过程;分析煤系页岩生烃能力及储层特征,揭示煤系泥页岩的气体生成和赋存潜力。基于以上多类型煤系天然气生成、聚散、成藏动态过程,建立煤系气综合成藏模式,阐明其动态作用机制,以期对鄂尔多斯盆地东缘煤系气综合开发和相似盆地煤系气勘探突破提供借鉴。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是发育于稳定克拉通之上的多重叠

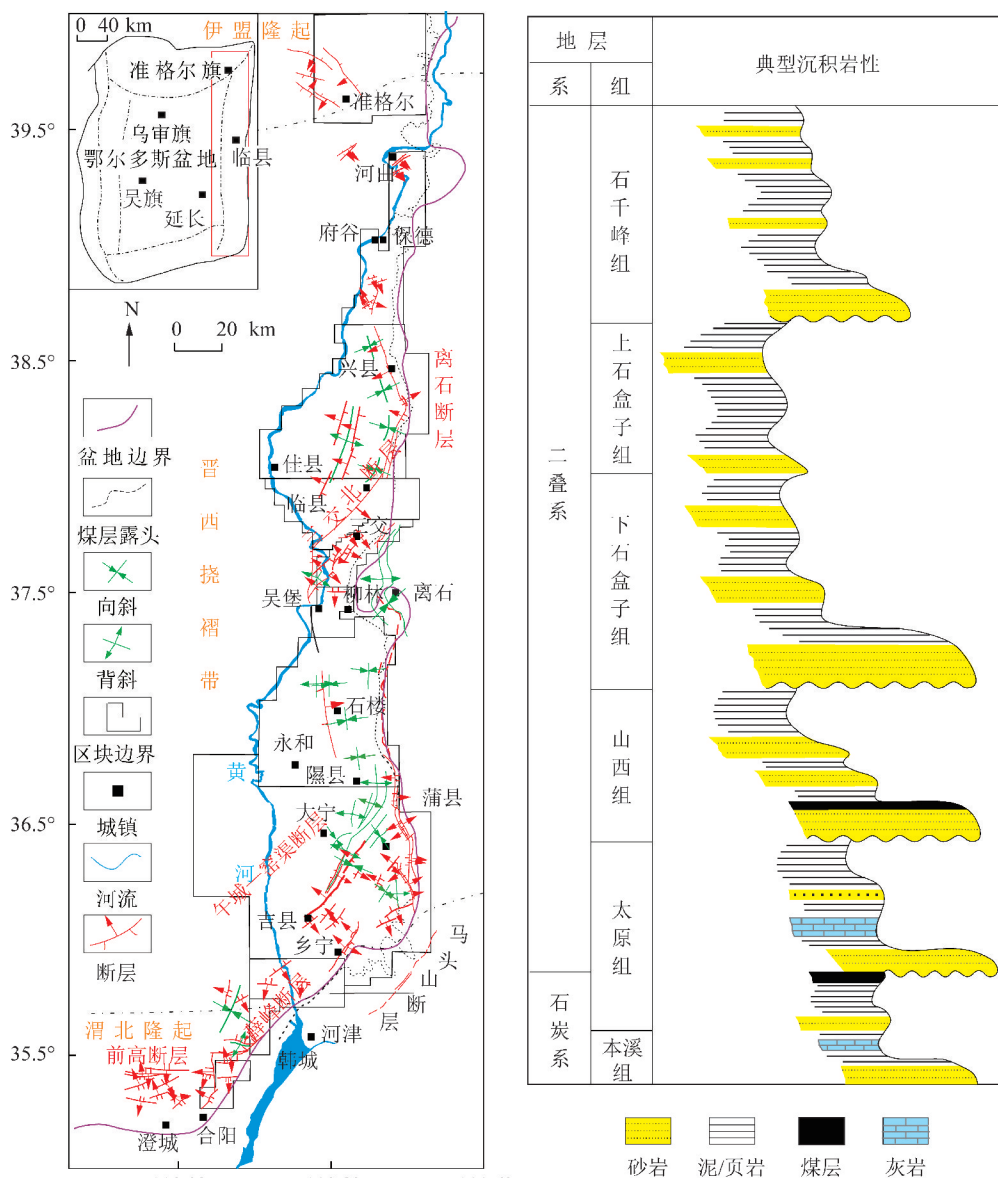
合盆地,中生代鄂尔多斯盆地叠加在大型石炭—二叠纪华北克拉通内盆地之上^[6-8]。华北克拉通在晚石炭世—二叠纪发育广泛聚煤作用,形成了相对统一的石炭—二叠纪含煤岩系^[2,9-12]。早三叠世末,受印支运动影响,华北地区东隆西拗,鄂尔多斯地块对应东升西降,形成了盆地雏形,并在三叠纪末定型^[13-14]。燕山运动时期盆地内部持续沉降,盆地边缘隆起,早白垩世晚期盆地整体抬升导致沉积缺失^[9-11]。

研究区由北往南跨越伊盟隆起、晋西挠褶带和渭北隆起三大构造单元^[4,15](图 1),构造上经历了由南高北低向北高南低转变的“翘板”式变化^[18]。构造多为 NE—SW 走向,区内发育 5 条较大断裂,北部构造变形程度弱于南部,北部以西倾的单斜构造为主,其上发育少量小断裂,南部断层及挤压褶皱构造较为发育。燕山期岩浆活动在临兴区块发育紫金山碱性岩体侵入^[6,19]。石炭—二叠纪煤系沉积时研究区由海陆过渡相向陆相沉积转变^[11,20]。在本溪组和太原组可见障壁岛、潟湖和开阔台地等过渡相沉积体系,进入山西组以陆相河流—三角洲为主^[21],且气候逐渐干旱。

2 煤系烃源岩

2.1 发育特征

太原组和山西组各一套主力煤层在全区发育,分别为太原组底部的 8+9 号煤层和山西组下部的 4+5 号煤层^[22-23],煤层埋深总体在 2 600 m 以浅。沿盆地边缘,埋深等值线整体呈南北向分布(图 2(a))。其中,4+5 号煤层厚 1~15 m,一般在 2.5 m 以上,连续性较好,自北往南呈现“厚—薄—厚—薄”相间分带,中部分盆(图 2(b))。8+9 号煤层厚度多在 2~20 m 变化,一般在 3.5 m 以上。

图1 鄂尔多斯盆地东缘位置及沉积体系格架^[16-17]Fig. 1 Location and sedimentary system framework of the east margin of Ordos Basin^[16-17]

一定厚度的页岩是形成具有工业开采价值页岩气藏的基本条件^[4]。研究区上古生界海陆过渡相页岩广泛发育,纵向上可见本溪组、太原组及山西组(图2(c)~(e))。本溪组页岩区域稳定性较差,中部石楼-隰县一带最厚,南北减薄;太原组页岩区域稳定性好于本溪组,厚薄相间分布,厚度一般在20~40 m,在河曲-准格尔一带最厚可达60 m以上。山西组页岩整个区域发育稳定性好,呈现南北带状分布的特点,向西逐渐减薄,在佳县-临县及石楼-大宁一带最厚可达80 m以上。总体来看,研究区页岩层数多、累厚大,可以满足页岩气勘探开发的基本要求。

2.2 生烃潜力与演化

研究区煤系页岩、炭质页岩均发育,有机碳含量(TOC)较高,但变化较大(图3(a))。总体上,TOC

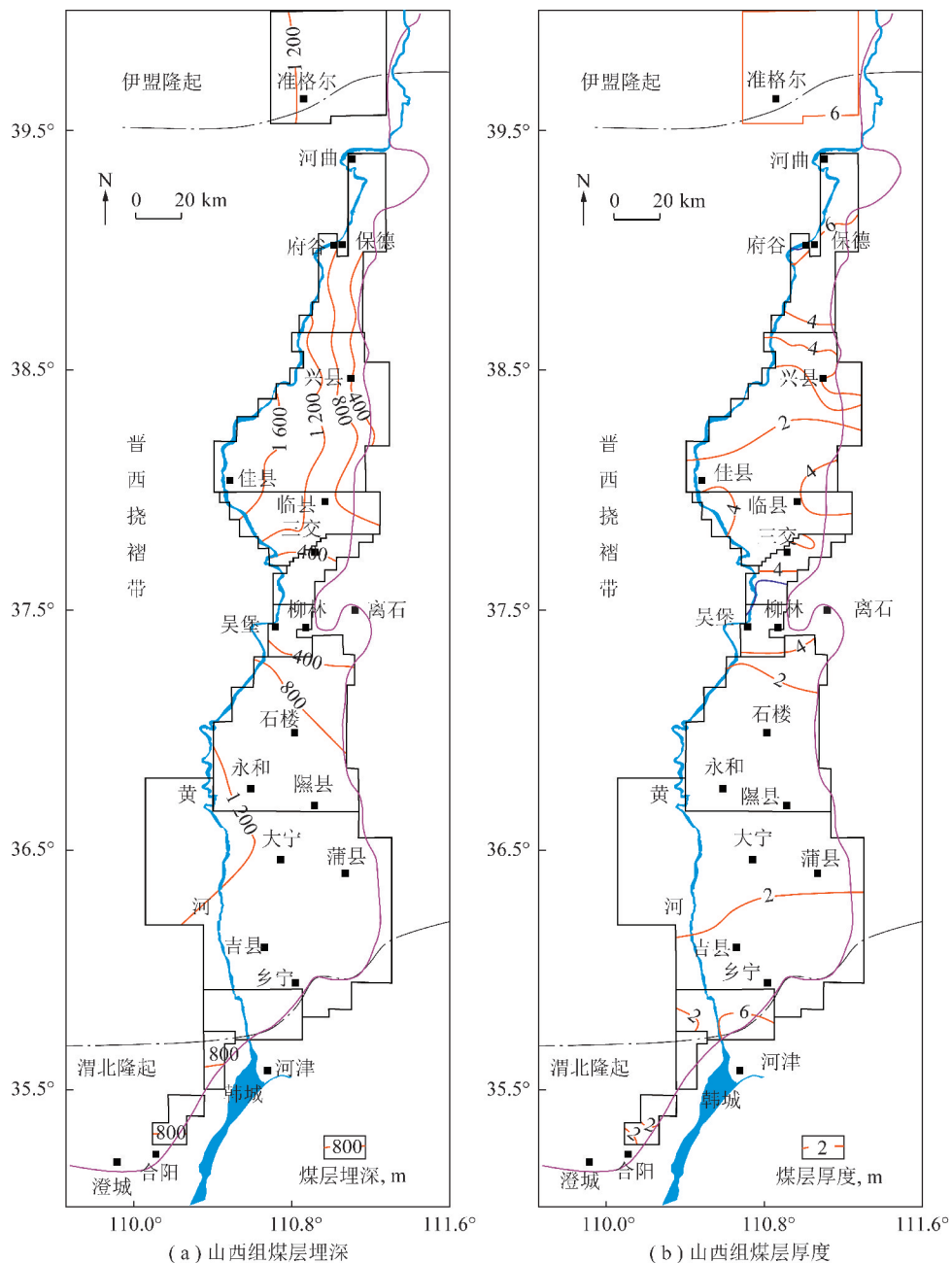
含量平均为3.40%,属于好—很好烃源岩。研究区已有的测试数据显示,山西组TOC含量在1.13%~8.62%,平均3.91%;太原组TOC含量为1.15%~12.04%,平均3.72%;本溪组TOC含量为0.95%~2.75%,平均1.83%。山西组页岩总体具有较高的TOC含量,生烃潜量好于太原组和本溪组页岩。

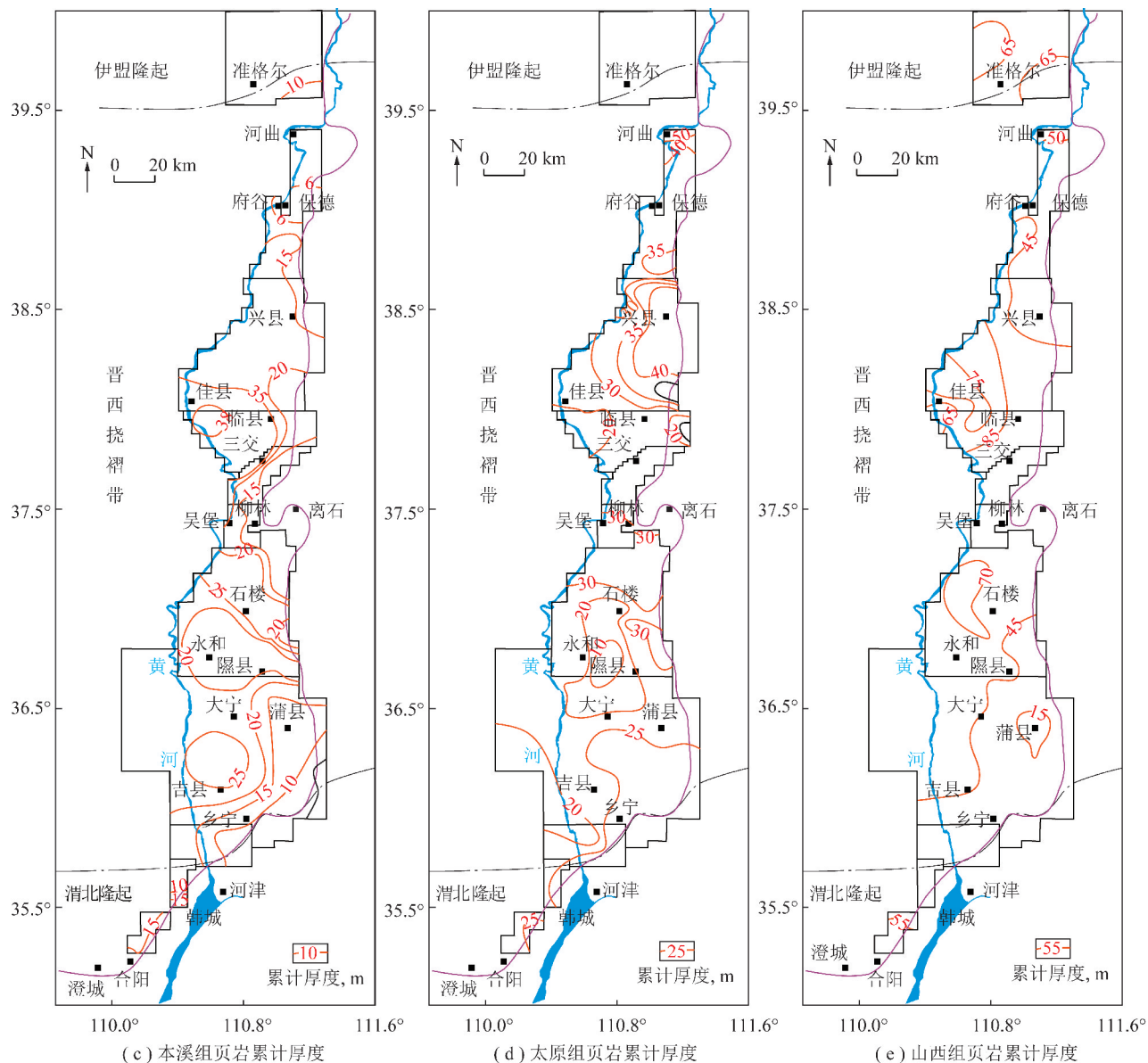
研究区4+5号煤层镜质体反射率(R_o)为0.59%~2.35%(图3(c)),8+9号煤层 R_o 为0.44%~2.11%,紫金山附近 R_o 高异常,达到4.00%以上。已测试和收集页岩 R_o 在0.82%~1.61%,平均为1.30%,主要处于成熟阶段(图3(b)),平面上呈现西高东低、南北向带状分布的特点。河曲部分页岩 R_o 低于0.6%,处于未成熟—低成熟阶段,临兴地区由于紫金山岩体侵入的影响,导致局部页岩 R_o 偏高。有机质类型为倾气型的

II₂ 型和 III 型干酪根^[25-28], 目前正处于主要生气期, 基本满足页岩气勘探开发要求^[29]。

应用 PetroMod10.0 盆地模拟软件对埋藏史和热演化史进行数值模拟, 主要输入: 地层名、现今地层顶底深、各组地层剥蚀量、沉积起止时间、剥蚀起止时间、岩性特征、古水深等参数。通过声波时差法估算白垩纪末以来地层剥蚀量约为 1 618 m。大地热流值应用 R_0 。古地标和磷灰石裂变径迹联合模拟的结果, 其中石炭—二叠纪为 64 mW/m^2 , 三叠纪为 68 mW/m^2 , 侏罗纪—早白垩世晚期为 75 mW/m^2 , 现今为 61 mW/m^2 。煤岩成熟度采用 Easy% R_0 模型, 煤岩气态烃产率基于 IES_THH_Tertiary-Coal_2C 化学动力学模型。通过埋藏史、热史和生烃史模拟(图 4),

结合天然气充注史和储层致密史^[30], 晚二叠世储层普遍致密。晚侏罗世有机质达到成熟阶段发生初次生烃, 煤层源内滞留体系中物性好的砂岩首先被充满。早白垩世盆地达到最大埋深时发生区域性的大面积二次生气, 除满足自身吸附, 天然气开始排烃运移, 超压产生的微裂缝有利于气体运移。早白垩世末期—新近纪经历了约 100 Ma 的抬升剥蚀^[30], 压力降低及冷却收缩效应造成煤系吸附气的解吸, 释放出一定数量的天然气。上古生界储层致密、超压普遍发育, 气体膨胀力作为驱使油气运移的主要动力是地层超压的主要原因; 差异隆升导致原生气藏后期调整、逸散, 最终定位形成次生气藏, 为局部构造高部位天然气的富集提供气源。



图2 研究区煤系烃源岩埋深和厚度^[24]Fig. 2 Contour shows the depth and thickness of coal measure source rock in the study area^[24]

3 煤系气储层

3.1 自源储层物性与含气性

研究区2套主力煤层主体孔隙度在2.4%~13.4%，主体渗透率在 $(0.01 \sim 15.00) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，受煤阶和埋深影响，由北向南煤岩孔渗性呈下降趋势，北部渗透率较高，中部普遍在 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，而南部普遍低于 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。孔隙度和渗透率表现出弱的正相关性(图5)，渗透率不仅与孔隙度大小有关，还与孔隙结构和孔喉连通性有关，自北向南随着煤阶增大，残余组织孔减少，气孔等次生孔隙增加。南部韩城等地区构造煤发育，煤体结构和孔隙连通性受到不同程度破坏。

页岩微纳米孔喉网络是气体富集空间和运移通

道，页岩气产能与其发育程度密切相关^[31]。扫描电镜可见众多孔隙类型，包括颗粒不完全胶结和成岩作用后期改造形成的粒间孔、矿物结晶形成的晶间孔(图6(a))、矿物晶体脱落形成的矿物铸模孔、矿物溶蚀产生的次生溶蚀孔(图6(b))及有有机植物组织孔和次生气孔(图6(b),(c))。页岩骨架矿物和黏土矿物中还发育大量呈明显锯齿弯曲状，具有较好的延展性的微裂缝，包括有机质和黏土矿物内的微裂缝(图6(d),(e))，以及连接广泛分布的有机质孔的粒缘缝(图6(f))。微裂缝的产生可能与断层和褶皱等构造运动有关，也与有机质生烃超压有关。

受不同层系、不同煤阶煤岩含气量差异的影响，煤层含气量与埋深并没有很好的相关性(图7(a))。石楼地区含气量可达 $15 \text{ m}^3/\text{t}$ ，与埋深相关性好，其他

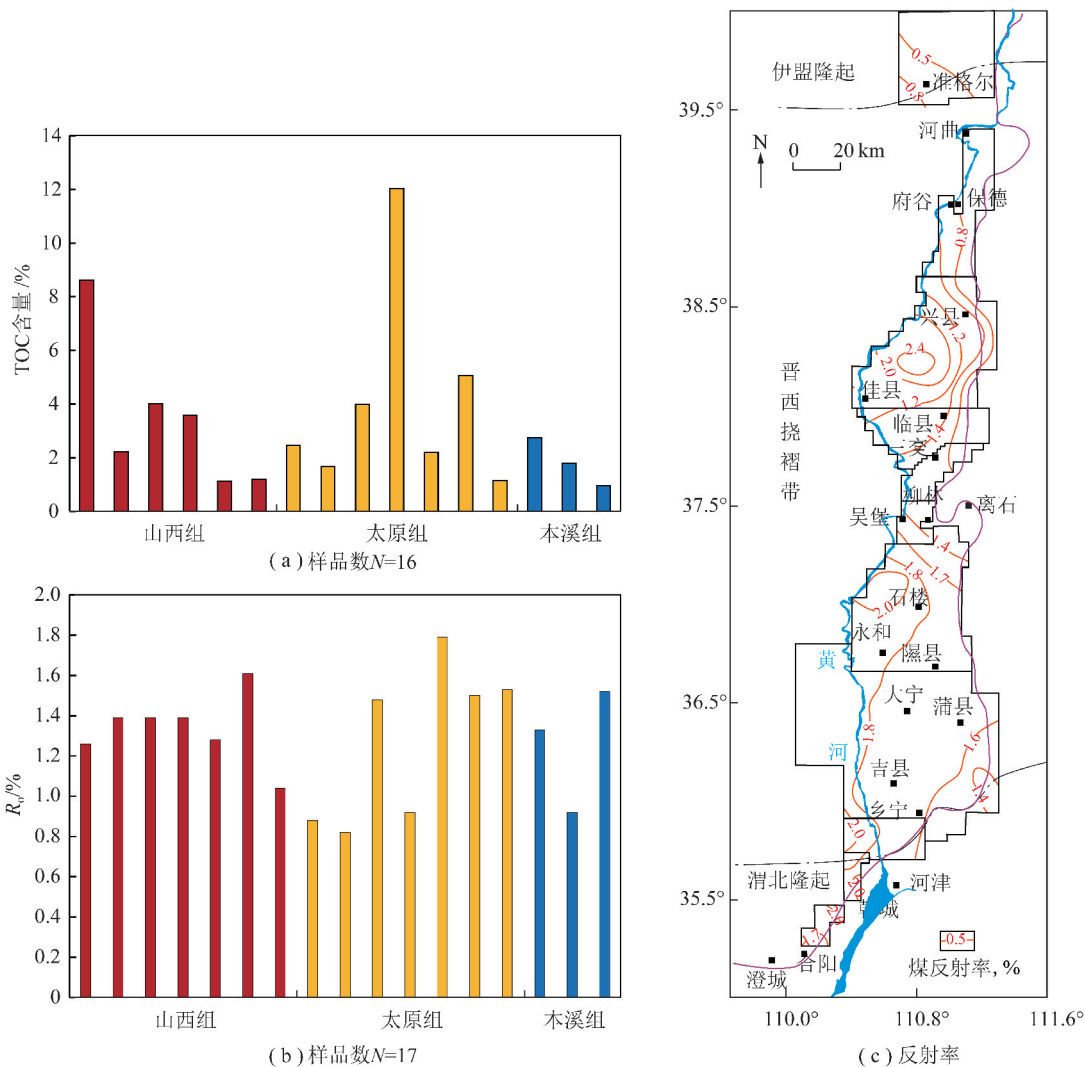


图3 鄂尔多斯盆地东缘煤系页岩有机地球化学特征

Fig. 3 Organic geochemical characteristics of coal-shale in the eastern margin of Ordos Basin

地区相关性较差。紫金山地区由于岩浆活动时的烘烤作用,高灰分含量极大制约了吸附气含量。紫金山岩浆活动发生在 136~125 Ma,延续了近 120 Ma,与其所在的华北地台早白垩世大规模岩浆活动属于相同时期和构造背景下的产物^[32]。该期岩浆活动与盆地沉降近乎一致,早白垩世沉积埋藏增温与区域岩浆活动的共同作用对于石炭—二叠系主要烃源岩系大规模油气成藏具有重要作用。大宁—吉县—韩城地区埋深达 1 000~1 200 m,煤层含气量也相对较高,一方面是这些勘探区煤层埋深相对较大,另一方面也说明了较高煤阶的储气能力相对更强。

对比 2 套主力煤层含气量与埋深关系,总体上随埋深均呈现含气量增高趋势(图 7(b),(c))。需要注意的是准格尔—紫金山地区低煤阶和高灰分煤储层的低含气量特点;柳林焦煤地区存在一定数量浅埋深—高含气的数据点,展现了良好的煤层气开发潜力。太原组总体数据相对分散,最大值分布在

20 m³/t 左右。山西组最大值仅为 15 m³/t,太原组煤层含气量总体较浅部山西组高。

3.2 相控下的砂岩储层物性

沉积相是决定储层物性优劣的基础^[33],同时影响后期成岩作用对储层的改造^[10-12]。不同沉积体系优势沉积微相不同,其中潮坪—潟湖体系潮道、三角洲体系分流河道、河流体系河床滞留和心滩等具有沉积时水体能量大、砂岩粒度粗的特点。就粒度而言,砾岩与粗砂岩岩性粗、水动力强,大量原生孔隙可以保存,物性最好。临兴区块勘探开发结果表明,优质气层主要分布于河道、潮道及砂坪的粗粒砂岩等储层。随着粒度变细,孔渗性也逐渐降低;相同孔隙度条件下,粒度越粗渗透性越好(图 8)。含砾砂岩粒度粗,矿物溶蚀易形成大孔隙,因此渗透性好,这也是含砾砂岩高产的原因。

成岩作用具有叠加性和阶段性,是打破原有物理化学体系的平衡,重建新的动态平衡的过程^[34-35],对

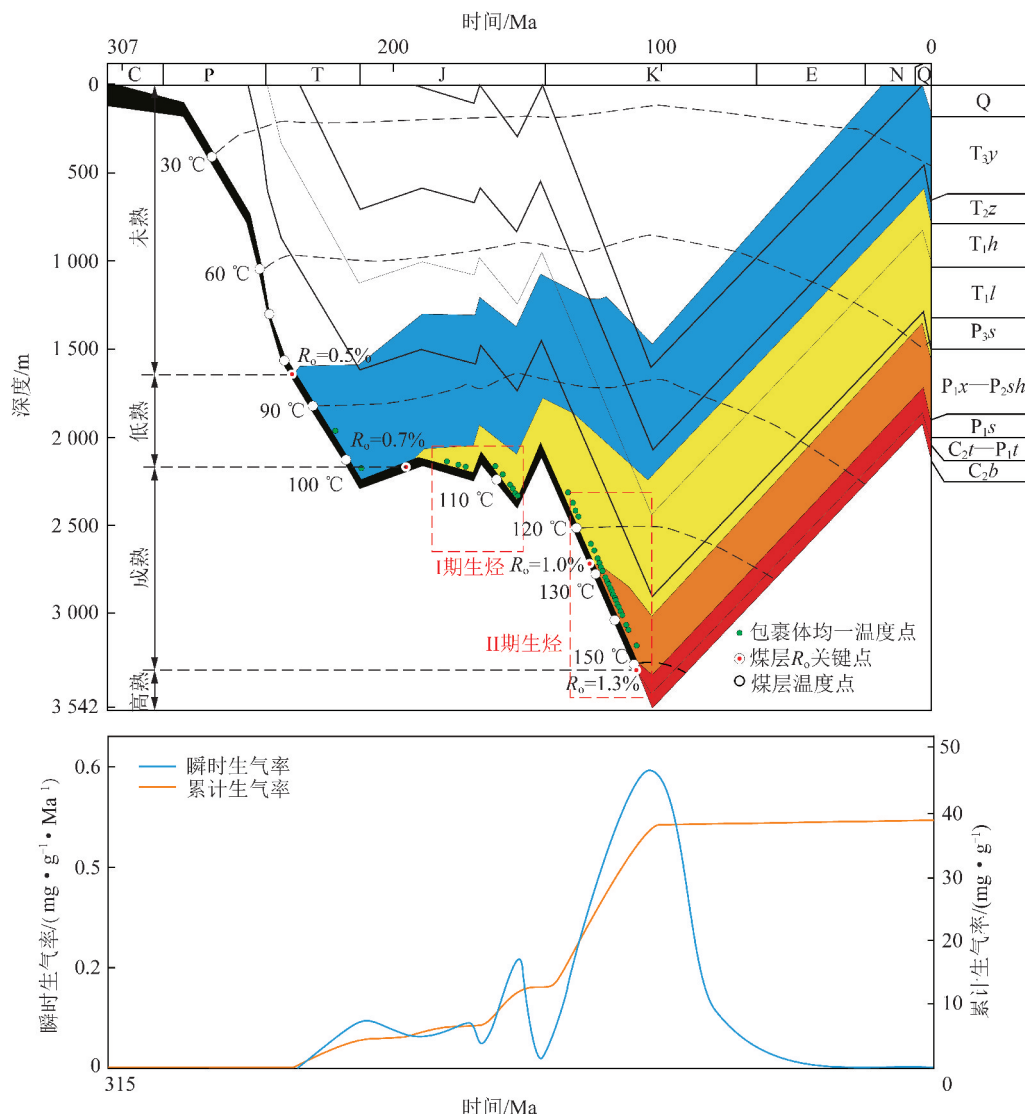


图 4 鄂尔多斯盆地东缘 LX-1 井埋藏史和热史模拟

Fig. 4 Simulation of burial history and thermal history of well LX-1 in the eastern margin of Ordos Basin

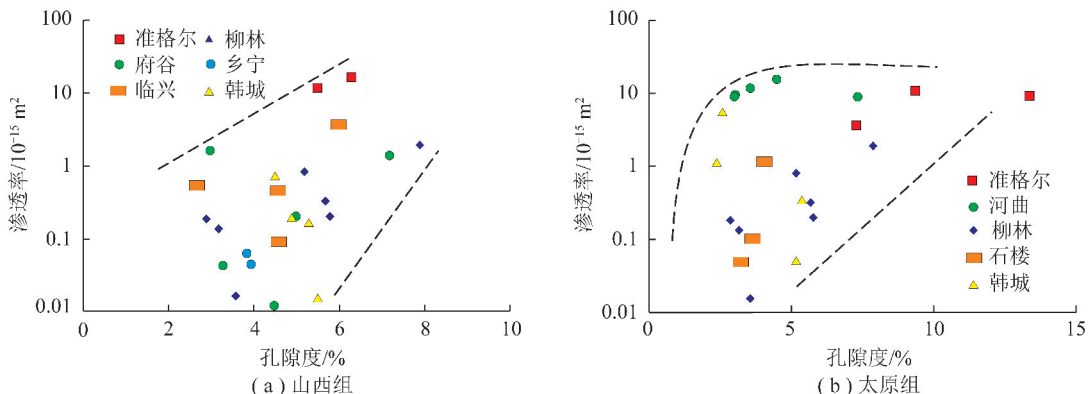


图 5 鄂尔多斯盆地东缘主力煤层孔渗关系

Fig. 5 Relationship between porosity and permeability of main coal seams in the study area

储层物性既有破坏性,也有建设性,体现在改变孔隙的数量、形态、孔喉半径及连通性^[35]。临兴地区早期强压实作用和持续胶结作用是造成储层的致密化的重要因素,减孔率可达 65%~75%^[9],而不同程度的

溶蚀作用在一定程度上改善储层的孔隙度。沉积和成岩作用双重控制下,砂岩储层经历了“先致密后成藏”过程^[36]。对于致密储层而言,物性的好坏决定着致密气的富集程度和开发效益。

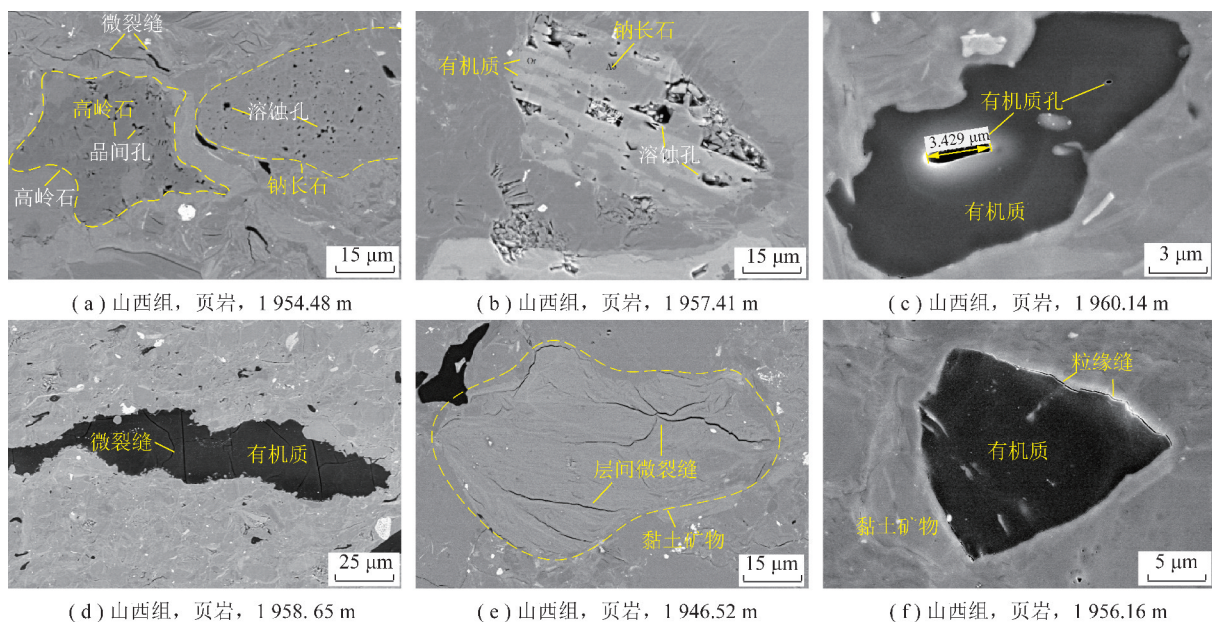


图 6 扫描电镜下页岩微纳米孔喉网络

Fig. 6 Pore-fracture system of shale under SEM

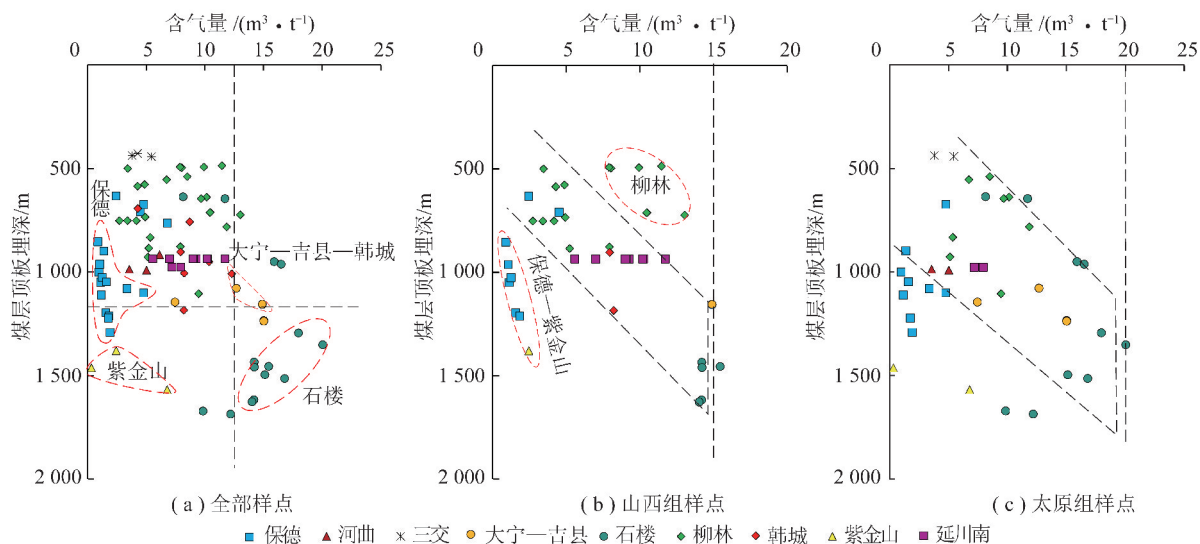


图 7 煤储层实测含气量(空气干燥基)的区域性变化规律

Fig. 7 Scatter plot shows the regional variation law of measured gas content (air dry basis) in coal reservoir

4 煤系气输导系统与源储关系

源储空间配置关系对煤系气富集具有重要的控制作用^[37]。常规油气源岩与储层可划分为自生自储、上生下储和下生上储 3 种类型^[38]。然而勘探实践证明,源储组合关系并不能直接决定油气藏的形成,而是取决于各种成藏要素的时空配置。参考陆相石油源内聚集地质认识及源储组合关系分析^[39],提出煤系气源内滞留、近源充注和远源调整 3 种成藏类型,进一步依据输导系统配置,将煤系气源储组合关系划分为 7 种亚型(图 9)。

源内滞留型略区别于以往的自生自储型组

合,可进一步细分为原位滞留、三明治式源内扩散和间互式源内扩散 3 亚型。原位滞留型中气体分子基本不发生运移,烃源岩生烃后即富集于微纳米孔喉网络中原位成藏。三明治式源内扩散型是气体生烃后直接充注到被烃源岩包夹的砂岩中,纵向上短距离运移,源内成藏。间互式源内扩散型是烃源岩和砂岩储层多层叠置,大面积紧密接触,发生短距离运移后源内成藏。源内 3 种亚型中,气体分子主要在烃源岩内部的微纳米孔隙网络中滞留或扩散,以吸附态和游离态滞留于烃源岩内部或紧邻烃源岩。

源外富集包括近源充注和远源调整型,按输导系

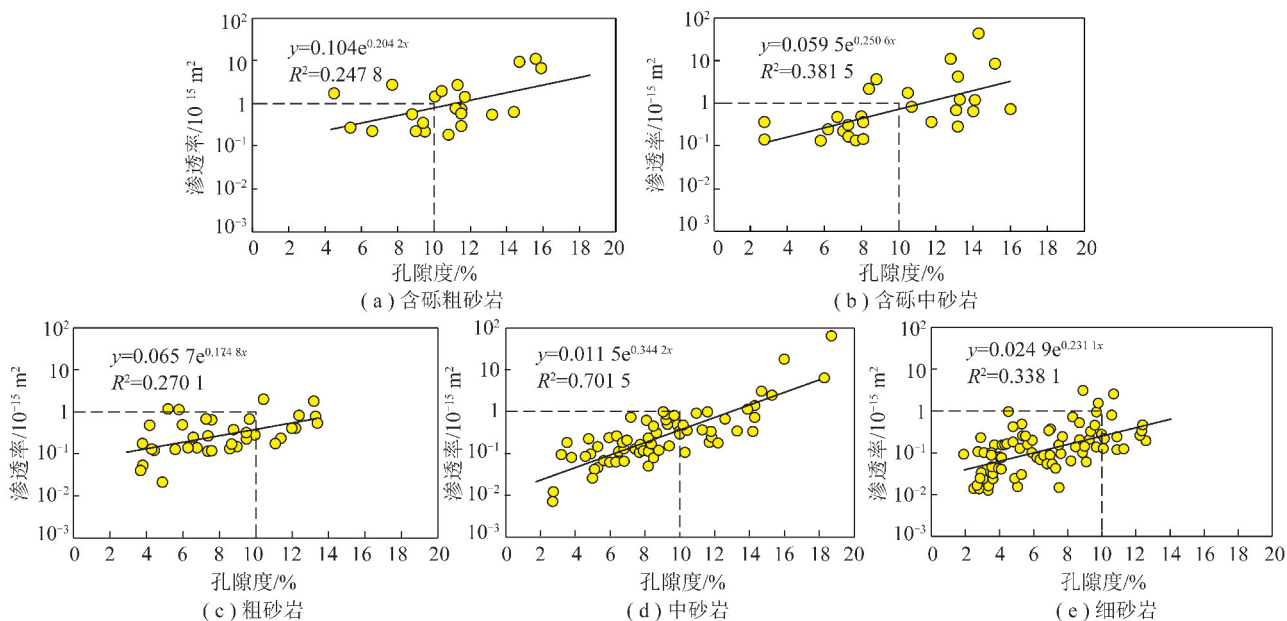
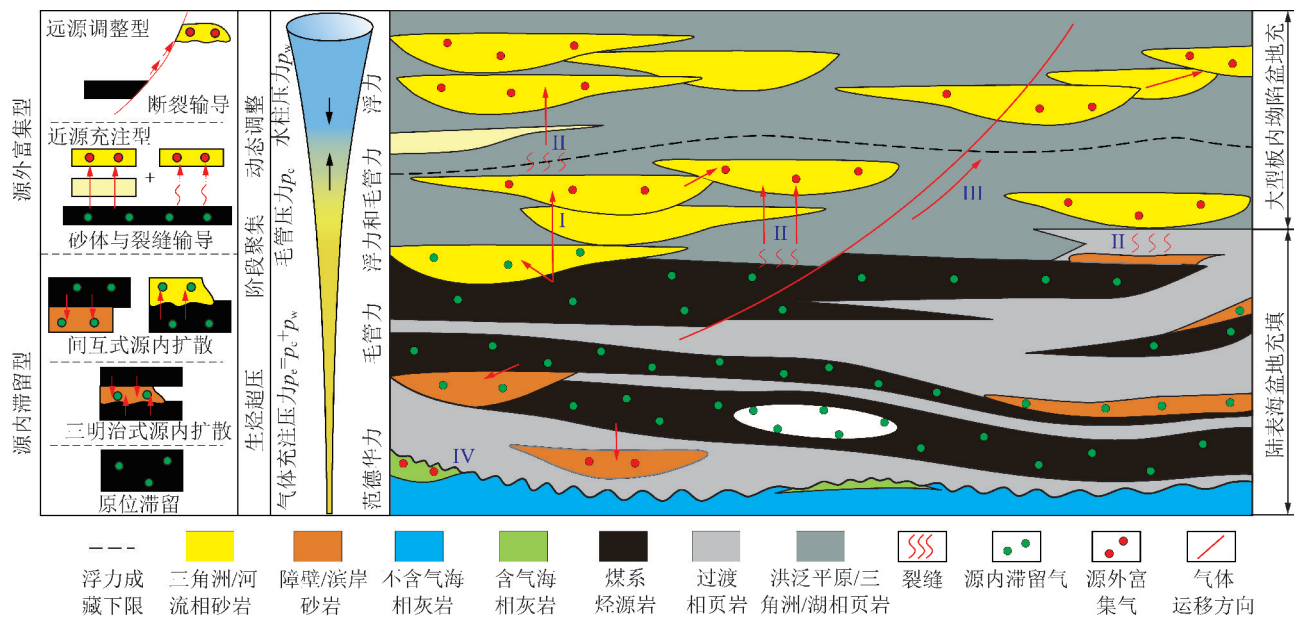


图 8 不同粒级砂岩孔隙度和渗透率关系

Fig. 8 Relationship between porosity and permeability of sandstone with different grain sizes



I—砂体型输导系统; II—裂缝+砂体型输导系统; III—断层输导系统; IV—古地貌-地层输导系统

图 9 源岩-储层-输导系统综合配置模式

Fig. 9 Comprehensive configuration mode of source rock-reservoir-transportation system

统细分为砂体型、砂体+裂缝型、断层型和不整合型 4 种亚型。砂体型输导系统(I)是研究区上古生界最主要的输导配置,源岩生烃超压产生源储压差,气体克服毛细管力沿着砂体内连通性孔隙向外运移成藏。裂缝+砂体型输导系统(II)是油气运移过程中裂缝与砂体共同发挥输导作用,其输导能力强于单独的砂体或裂缝。如研究区盒 8 段砂体与山 2 段砂体垂向上不叠加,山 1 段内发育的裂缝网络作为输导系统。这种裂缝网络与两套或多套砂体垂向或侧向上相互配套形成裂缝+砂体型输导系统,大大提高了输

导能力,延长了输导距离。断层输导系统(III)由断裂系统作为输导通道,研究区断裂整体欠发育,在中南部相对集中,结合差异压实形成的裂缝网络,连接的地层厚度较大,运输距离较长。奥陶系马家沟组受加里东运动形成古地貌-地层输导系统(IV),燕山期上部源岩和下部源岩普遍生烃,沿侵蚀沟侵入古风化壳可以形成混源气藏^[40]。源外 4 种类型中,气体分子依靠不同输导系统运移,主要以游离态富集于储层,构成砂岩或灰岩气藏。

5 煤系气综合聚集模式及启示

5.1 煤系气综合聚集模式

气藏聚集模式具有 2 个方面的内涵：一方面包括生烃演化运移的关键过程，另一方面包括决定气藏特征的关键地质因素^[7,35,41-42]。石炭—二叠纪沉积速率与地壳沉降速率相对一致^[11-12,43]，为煤系生烃演化提供稳定条件。沉积有机质达到一定厚度，经历埋深发生一次生烃，对于以吸附气为主的煤层气和吸附气占较大比例的页岩气，生气量超过了储集能力，理论上可以形成较高饱和度的非常规气藏。最大埋深和构造热事件引起的二次生烃作用形成相当规模的煤系气藏，后期构造活动和气藏调整奠定现今格局。这一系列过程中，区域稳定地层、源储空间配置和输导系统有效性是控制气藏形成的地质基础。二次生烃过程经历的构造热异常，构造抬升和再沉降导致的气藏调整是气藏形成的关键地质因素。

源内滞留体系中煤系气原位聚集，主要以吸附态滞留于烃源岩中，广泛发育的微纳米孔喉网络是煤系气富集的主要因素，构成原位滞留型聚集模式。源外充注富集体系构成了研究区主要的气藏类型，输导系统的复杂性和特殊性使得煤系气重新分配。这一体系中包括大面积“连续”近源充注型致密气和局部“圈闭”远源调整型致密气^[44]。煤系气在宏观断层、不整合面等和微观孔隙、裂缝等微纳米网络中运移，形成源外近源充注型和远源调整型聚集模式。

煤系宏观上箱式封存，箱体内部具有封闭的水动力系统 and 物理化学动态平衡（图 9）。煤系有机质以倾气型干酪根为主，具有相当的厚度且普遍达到生烃门限，构成成藏的基本要素。微相控储，优势沉积微相宏观上控制着优质储层的展布。根据输导系统将成藏箱体划分为源内滞留体系和源外富集体系，两者的界线取决于输导系统配置转换。物性控藏，储层物性是决定成藏下限最直接的指标，物性好坏直接决定了成藏的有效性，是否具有工业开采价值的产能。总的来说，鄂尔多斯盆地东缘煤系非常规天然气聚集规律可概括为生烃膨胀、幕式排烃；微相控储、阶段聚集；箱内聚散、调整定位；物性控藏、择优富集。

5.2 区域性煤系沉积规律与勘探方向

研究区煤系砂岩、碳酸盐岩和页岩均广泛发育，发育有碳酸盐台地、障壁—潟湖、浅水三角洲、湖泊、曲流河、辫状河及其对应的三角洲等多种沉积体系，各体系在不同时空内的叠加发育，为煤系气的富集提供了丰富的物质基础。沉积体系受北部阿拉善—阴山古陆、西南陇西古陆和南部秦岭—大别古陆物源的

共同控制，不同物源水系在南部汇聚。伴随来自北东向的初期海侵，本溪组沉积于奥陶系风化面上，对下部地层起填平补齐的作用（图 10）。太原期存在南北两个物源，北部发育三角洲体系，三角洲前缘仅延伸到保德地区，南部韩城—合阳地区仅有三角洲前缘局部发育。至山西期，保德—兴县地区河漫沼泽发育，是有利的成煤环境。三交—石楼地区位于三角平原上，分流间湾淤积形成平原沼泽成煤环境。大宁—吉县地区是南北物源交汇地带，属于三角洲前缘—浅湖环境，为有利的聚煤环境，中部含气性好，说明物源交汇的汇水区有利于煤层气的富集。南部韩城合阳地区山西期三角洲规模较小，主要为三角洲前缘，煤层呈透镜状分布。山西期北面地势隆起明显，由北向南的古河流发育，形成了厚层的砂体沉积。其中兴县和临县地区地层较厚，大宁到韩城地层均相对较薄。上、下石盒子组广泛沉积了河流相的砂体，其中盒八段是重要的天然气储集砂体。与太原组沉积一致，在临县—兴县和大宁—乡宁地区沉积厚度极大，均是天然气聚集的有利富集区。另外，大宁—吉县地区山西期是鄂尔多斯盆地海水最后退出的区域，平面上表现为汇水浅湖和局限海湾，垂向上厚层的过渡相页岩局部叠置发育，具有良好的页岩气富集潜力，是未来过渡相页岩气勘探的有利目标区。

鄂尔多斯盆地作为华北地台的一部分，地层组合具有相似性，早二叠世山西期整个华北地台发生区域性海退，浅水三角洲沉积体系广泛发育。石炭—二叠纪煤系烃源岩的生烃条件具有区域相似性，但已发现的煤系气藏区域分布极不平衡。探明储量主要分布在鄂尔多斯盆地陕北斜坡，沁水盆地和渤海湾盆地也有重要发现，但尚未形成规模化产能。源岩—储层—输导系统的综合影响控制着煤系气的富集成藏，是制约华北地台煤系气区域性差异成藏的主要因素。

华北地台石炭—二叠系埋藏史总体可分为沉降—抬升和沉降—抬升—再沉降 2 种类型，不同类型决定了生烃阶段和输导系统的差异，源—汇系统决定了区域储层展布^[10,13]。鄂尔多斯盆地属于抬升—沉降型克拉通盆地，受南北物源控制在庆城—延安—韩城一带形成汇水区（图 11），具有相当厚度的烃源岩，有利于源内滞留气的富集。北部榆林—定边河道砂体广泛发育，下伏煤系烃源岩具有一定厚度且普遍生烃，有利于近源充注型煤系气富集，往往形成大型的致密气田，如苏里格和大牛地气田等。北部靠近物源区冲积扇体系，烃源岩条件较差，如果输导条件有利可以形成大型致密气田，如杭锦旗气田，含砾砂岩往往是煤系气富集的主要场所。沁水盆地也属于沉

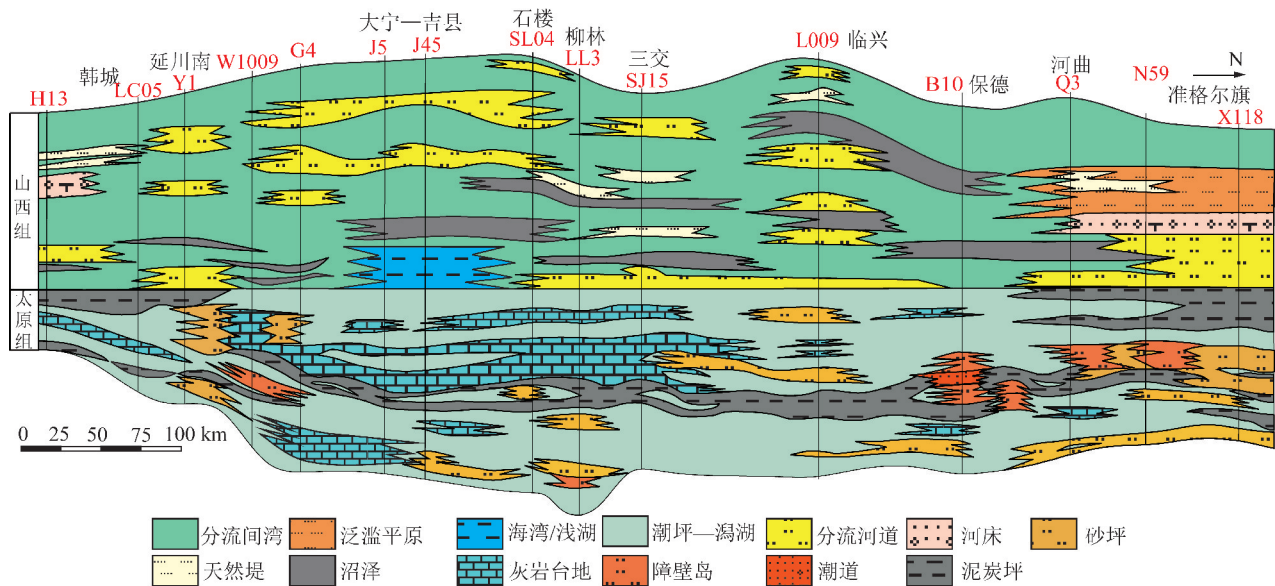


图 10 鄂尔多斯盆地东缘煤系沉积剖面

Fig. 10 Sedimentary section of coal measures in the eastern margin of Ordos Basin

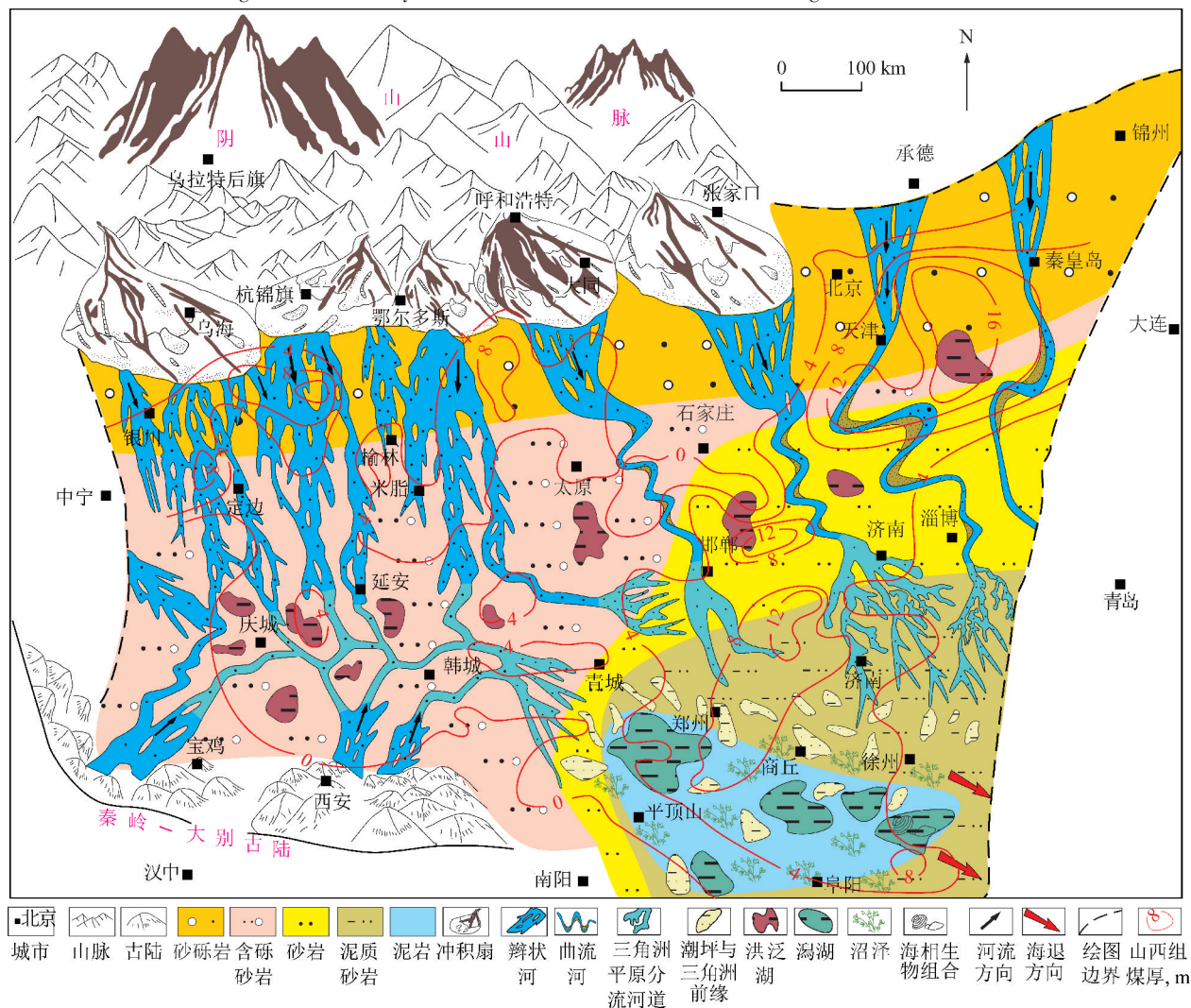


图 11 泛华北晚古生代盆地沉积古地理格局(盒 8 段沉积期)(参考文献[45]修改)

Fig. 11 Sedimentary paleogeographic pattern of Late Paleozoic basins in North China (sedimentary period of He 8 member)

(modified after Reference[45])

降—抬升型,沉积上处于物源交汇后的过水区,烃源岩条件优越,然而河道砂体不发育,有利于源内滞留气的富集。渤海湾盆地属于沉降—抬升—再沉降型,受中生代构造活动控制,不同地区沉降和抬升时期不同,对应主要生烃阶段不同,加之复杂大断裂发育,不利于煤系气富集。南华北盆地是海水最后退出的区域,大面积潟湖连片发育,具有优越的煤系烃源岩条件。然而由于区域构造复杂,仅以晚期生烃为主型且“生烃期晚、生烃潜力大”的地区有利于煤系气富集。

综上所述,对于区域稳定发育的盆地,源岩—储层—输导系统的时空耦合关系是决定煤系气能否富集的关键因素。未来的勘探方向需要厘清深埋期、生烃期、成藏期和调整期的耦合关系,围绕“一井多层”、“多气合采”寻找煤系气综合富集区。而对于复杂构造发育的盆地,煤系气的富集取决于盆地构造演化历史、多期次沉积物的叠加和断裂的发育情况。未来的勘探方向需要结合区域构造演化史,围绕喜马拉雅期等构造运动期次注重保存条件的研究,寻找源内滞留气富集区。

6 结 论

(1)煤系烃源岩是煤系气富集的物质基础,研究区广泛发育煤层和过渡相页岩,区域稳定性相对较好,普遍达到生烃门限,煤层总体含气量较高,煤层和页岩生烃潜力和热演化程度满足气体生成和富集要求。

(2)煤系气储层分为源内和源外储层,受控于埋深和热演化程度,储层相对致密;页岩储层主要受岩矿组成和成岩作用控制,微纳米孔喉网络是煤系气富集的空间和运移通道;优势沉积微相和后期成岩作用直接影响砂岩储层物性,决定了煤系致密气成藏有效性。源内气体分子受范德华力和毛管力作用,源外受毛管力和浮力作用为主。

(3)依据源岩、储层和输导系统的配置关系将煤系气划分为源内滞留、近源充注和远源调整三大类,其中源内滞留包括原位滞留、三明治式源内扩散和交互式源内扩散,近源充注包括砂体输导型和砂体+裂缝输导型,远源调整包括断层输导型和古地貌—地层输导型。微纳米孔喉网络中气体原位滞留或扩散,砂体、微裂缝和断裂系统作为宏观输导系统延长了煤系气的运移距离,扩展了煤系气成藏空间。

(4)源岩—储层—输导系统时空配置决定了煤系非常规天然气的富集潜力,形成了煤系连续成藏序列。对于区域稳定的叠合盆地,其内涵在于源岩—储层—输导系统的有效配置下有利于规模化煤系气成藏,核心是关键要素配置和关键时期耦合;对于多期

构造叠加的复杂盆地,其内涵在于多期构造叠加和断裂系统发育,需重点落实煤系气保存条件。

参考文献(References):

- [1] 秦勇,吴建光,李国璋,等.煤系气开采模式探索及先导工程示范[J].煤炭学报,2020,45(7):2513-2522.
QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, et al. Progress in research and thinking on coal measures gas (CMG) paragenetic system based on paragenesis theory [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2513-2522.
- [2] 李勇,王延斌,孟尚志,等.煤系非常规天然气合采地质基础理论进展及展望[J].煤炭学报,2020,45(4):1406-1418.
LI Yong, WANG Yanbin, MENG Shangzhi, et al. Theoretical basis and prospect of coal measure unconventional natural gas co-production [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1406-1418.
- [3] 杜佳,朱光辉,吴洛菲,等.临兴地区致密气“多层系准连续”成藏模式与大气田勘探实践[J].天然气工业,2021,41(3):58-71.
DU Jia, ZHU Guanghui, WU Luofei, et al. “Multi-series and quasi-continuous” tight gas accumulation pattern and giant gas field exploration practice in Linxing area [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 58-71.
- [4] 匡立春,董大忠,何文渊,等.鄂尔多斯盆地东缘海陆过渡相页岩气地质特征及勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2020,47(3):435-446.
KUANG Lichun, DONG Dazhong, HE Wenyuan, et al. Geological characteristics and development potential of transitional shale gas in the east margin of the Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 435-446.
- [5] 钟建华,刘闯,吴建光,等.鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气共生藏特征[J].煤炭学报,2018,43(6):1517-1525.
ZHONG Jianhua, LIU Chuang, WU Jianguang, et al. Symbiotic accumulation characteristics of coal measure gas in Linxing Block, eastern Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1517-1525.
- [6] 任战利,祁凯,刘润川,等.鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J].岩石学报,2020,36(4):1213-1234.
REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [7] 陈安清,陈洪德,侯明才,等.鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积充填及富气规律[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(S1):151-162.
CHEN Anqing, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. Late Paleozoic sedimentary filling and gas accumulation in the North Ordos Basin [J]. Journal of Earth Science, 2012, 37(S1): 151-162.
- [8] 冉新权,付金华,魏新善,等.鄂尔多斯盆地奥陶系顶部形成演化与储集层发育[J].石油勘探与开发,2012,39(2):154-161.
RAN Xinquan, FU Jinhua, WEI Xinsan, et al. Evolution of the Ordovician top boundary and its relationship to reservoirs' development, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(S1): 151-162.

- [9] LI Y, XU W K, WU P, et al. Dissolution versus cementation and its role in determining tight sandstone quality: A case study from the Upper Paleozoic in northeastern Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 78, 103324.
- [10] 邵龙义, 董大啸, 李明培, 等. 华北石炭—二叠纪层序—古地理及聚煤规律 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1725–1734.
SHAO Longyi, DONG Daxiao, LI Mingpei, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous-Permian in the North China Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1725–1734.
- [11] 鲁静, 邵龙义, 孙斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠纪煤系层序—古地理与聚煤作用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 747–754.
LU Jing, SHAO Longyi, SUN Bin, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the Eastern Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 747–754.
- [12] 李勇, 汤达祯, 牛鑫磊. 鄂尔多斯盆地东缘可容纳空间变化控制的 C—P 煤系沉积特征 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1828–1838.
LI Yong, TANG Dazhen, NIU Xinlei. Sedimentary features of C—P coal bearing strata controlled by variation of accommodation spaces in east margin of Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1828–1838.
- [13] 彭深远, 杨文涛, 张鸿禹, 等. 华北盆地三叠纪物源特征及其沉积—构造演化——来自碎屑锆石年龄的指示 [J/OL]. *沉积学报*: 1–29 [2021–02–10]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>.
PENG Shenyuan, YANG Wentao, ZHANG Hongyu, et al. Provenance characteristics and sedimentary-tectonic evolution of the North China Basin in the Triassic: Indications from detrital zircon ages [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1–29 [2021–02–10]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>.
- [14] 张倚安, 李士祥, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段深水重力流沉积类型 [J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 297–309.
ZHANG Yian, LI Shixiang, TIAN Jingchun, et al. Sedimentation types of deep-water gravity flow, Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 297–309.
- [15] 沈玉林, 秦勇, 申建, 等. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界煤系叠置含气系统发育的沉积控制机理 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(11): 29–35.
SHEN Yulin, QIN Yong, SHEN Jian, et al. Sedimentary control mechanism of the superimposed gas bearing system development in the Upper Paleozoic coal measures along the eastern margin of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(11): 29–35.
- [18] 李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 鄂尔多斯盆地东缘“翘板”支点影响下的含煤地层发育特征 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(S2): 378–382.
LI Yong, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Characterization of coal bearing strata under influence of “seesaw” fulcrum in east margin of Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(S2): 378–382.
- [19] 曹代勇, 聂敬, 王安民, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气富集的构造—热作用控制 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1526–1532.
CAO Daiyong, NIE Jing, WANG Anmin, et al. Structural and thermal control of enrichment conditions of coal measure gases in Linxing block of eastern Ordos Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1526–1532.
- [20] LI Y, TANG D Z, WU P, et al. Continuous unconventional natural gas accumulations of Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Linxing area, northeastern Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 36: 314–327.
- [21] LI Y, TANG D Z, XU H, et al. Geological and hydrological controls on water co-produced with coalbed methane in Liulin, eastern Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2015, 99(2): 207–229.
- [16] LI Y, CAO D Y, WU P, et al. Variation in maceral composition and gas content with vitrinite reflectance in bituminous coal of the eastern Ordos basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 149: 114–125.
- [17] 路媛媛. 临兴气田上古生界致密砂岩储层发育特征及主控因素 [J]. *非常规油气*, 2021, 8(1): 43–50.
LU Yuanyuan. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir of upper Paleozoic in Linxing gas field [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(1): 43–50.
- [22] 李明培, 邵龙义, 李智学, 等. 华北地区石炭—二叠纪下煤组聚煤期岩相古地理 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2399–2410.
LI Mingpei, SHAO Longyi, LI Zhixue, et al. Lithofacies palaeogeography of lower coal group accumulation period of Carboniferous Permian in North China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2399–2410.
- [23] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 54–63.
WANG Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 54–63.
- [24] LI Y, YANG J H, PAN Z J, et al. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: A discussion of Upper Paleozoic Coal Bearing strata in the East Margin of the Ordos Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, 2019, 93(1): 111–129.
- [25] QI Y, JU Y W, TAN J Q, et al. Organic matter provenance and depositional environment of marine-to-continental mudstones and coals in eastern Ordos Basin, China—Evidence from molecular geochemistry and petrology [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 217: 103345.
- [26] HATCHER P G, CLIFFORD D J. The organic geochemistry of coal: From plant materials to coal [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5): 251–274.
- [27] 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(S1): 111–120.
FU Ning, YANG Shuchun, 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.
- [28] LI Y, WANG Z S, WU P, et al. Organic geochemistry of Upper Paleozoic source rocks in the eastern margin of the Ordos Basin, China: Input and hydrocarbon generation potential[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106202.
- [29] 李延钧, 刘欢, 张烈辉, 等. 四川盆地南部下古生界龙马溪组页岩气评价指标下限[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(7): 1088-1095.
- LI Yanjun, LIU Huan, ZHANG Liehui, et al. Lower limits of evaluation parameters for the lower Paleozoic Longmaxi shale gas in southern Sichuan Province[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(7): 1088-1095.
- [30] 程付启, 金强, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析[J]. *石油学报*, 2007, 28(1): 38-42.
- CHENG Fuqi, JIN Qiang, LIU Wenhui, et al. Formation of source-mixed gas reservoir in Ordovician weathering crust in the central gas-field of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 38-42.
- [31] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979-1007.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979-1007.
- [32] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3731-3741.
- CHEN Gang, DING Chao, XUE Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3731-3741.
- [33] 孙雨, 于海涛, 马世忠, 等. 致密砂岩储层物性特征及其控制因素——以松辽盆地大安地区白垩系泉头组四段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(4): 809-819.
- SUN Yu, YU Haitao, MA Shizhong, et al. Physical property of tight sandstone reservoir and its controlling factors: A case study of the fourth member of Cretaceous Quantou formation in Da'an area of Songliao basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(4): 809-819.
- [34] LI Y, GAO X D, MENG S Z, et al. Diagenetic sequences of continuously deposited tight sandstones in various environments: A case study from upper Paleozoic sandstones in the Linxing area, eastern Ordos Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(11): 2757-2783.
- [35] 罗静兰, 李弛, 雷川, 等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与热点问题讨论[J]. *古地理学报*, 2020, 22(6): 1021-1040.
- LUO Jinglan, LI Chi, LEI Chuan, et al. Discussion on research advances and hot issues in diagenesis of clastic-rock reservoirs[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(6): 1021-1040.
- [36] 赵靖舟, 曹青, 白玉彬, 等. 油气藏形成与分布: 从连续到不连续——兼论油气藏概念及分类[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 145-159.
- ZHAO Jingzhou, CAO Qing, BAI Yubin, et al. Petroleum accumulation from continuous to discontinuous: Concept, classification and distribution[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(2): 145-159.
- [37] 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, 41(2): 129-137.
- YANG Hua, LIU Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 129-137.
- [38] 戴金星, 邹才能, 陶士振, 等. 中国大气田形成条件和主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 473-484.
- DAI Jinxing, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and main controlling factory of large gas fields in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 473-484.
- [39] 焦方正, 邹才能, 杨智, 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1067-1078.
- JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1067-1078.
- [40] 郑定业, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界致密气成藏特征及物理模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 744-754.
- ZHENG Dingye, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Characteristics and physical simulation of the Upper Paleozoic tight gas accumulation in Linxing area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 744-754.
- [41] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 37-52.
- ZHAO Jingzhou, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S1): 37-52.
- [42] 邹才能, 杨智, 何东博, 等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 575-587.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 575-587.
- [43] 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*, 2015, 22(3): 174-183.
- YANG Hua, LIU Xinshe, YAN Xiaoxiong. 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.
- [44] 邹才能, 杨智, 黄土鹏, 等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 433-442.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 433-442.
- [45] 肖红平, 刘锐娥, 张福东, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系盒 8 段沉积模式重建及其勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(2): 268-280.
- XIAO Hongping, LIU Ruie, ZHANG Fudong, et al. Sedimentary model reconstruction and exploration significance of Permian He 8 Member in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 268-280.