

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.015

鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积充填及富气规律

陈安清^{1,2}, 陈洪德^{2*}, 侯明才², 徐胜林², 张成弓², 王俊²

1. 浙江大学海洋科学与工程学系海洋资源研究所, 浙江杭州 310058

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

摘要: 为探究鄂尔多斯盆地上古生界的富气规律, 综合野外露头 and 钻井的岩石学、沉积构造、剖面结构等资料, 分析了沉积充填过程中“源—输—汇”耦合作用与沉积物的时空聚集规律, 揭示出鄂尔多斯晚古生代克拉通坳陷盆地北部平坦宽缓的古地貌背景为多河道浅水三角洲频繁进退和侧向迁移及砂体集聚提供了空间, 从而在多物源供砂与多水系输砂作用下形成了立体网毯状砂体。对上古生界进行了系统的层序划分, 分析了盆地的构造演化和沉积充填过程, 认为海相盆地向陆相盆地转化阶段的山西超长期旋回 SLSC3 和下石盒子超长期旋回 SLSC4 的底部辫状河三角洲或曲流河三角洲形成了有利于天然气运移聚集的立体网毯状砂体, 是储层发育和分布的最有利相带, 上石盒子超长期旋回 SLSC5 的网状河三角洲与湖泊沉积的厚层泥岩铸造了区域性盖层, 加上陆表海和近海湖盆的聚煤作用, 形成了鄂尔多斯盆地天然气藏的生储盖组合, 成就了上古生界“满盆生气、过渡(层)含气、斜坡富气、岩性控气”的特点。

关键词: 物源分析; 浅水三角洲; 立体网毯状砂体; 沉积学; 充填; 油气藏; 鄂尔多斯盆地。

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0151-12

收稿日期: 2011-12-13

Late Paleozoic Sedimentary Filling and Gas Accumulation in the North Ordos Basin

CHEN An-qing^{1,2}, CHEN Hong-de^{2*}, HOU Ming-cai², XU Sheng-lin², ZHANG Cheng-gong², WANG Jun²

1. Institute of Ocean Resources, Department of Ocean Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: To reveal the nature gas accumulation regularity of Late Paleozoic in Ordos basin, based on the datum of field outcrops, drilling core, well log, seismic inversion, and sample analysis, this paper analyzes the coupling of “provenance-transportation-aggregation” and sandy accumulation in the sedimentary filling process, which shows that there were multi-provenances and several river systems during Late Paleozoic in the north of Ordos intercontinental basin and the broad and gentle slope palaeogeography and frequently migrating shallow water delta resulted in the stereoNET-blanket sand body. What's more, the sequence division of the Upper Paleozoic stratigraphy is proposed, and the history of basin evolution and sedimentary filling is analyzed, on basis of which is concluded that the stereoNET-blanket sand body formed by the distributary channels of braided river delta system or meandering river delta system benefited the gas migration and accumulation deposited in the period SLSC3-SLSC4 of Ordos basin transforming from marine to land, the mudstone of anastomosed river delta and shallow lake system founded the regional cover, and the coal of Taiyuan Formation and Shanxi Formation is the source rock. They formed the source-reservoir-cap rock association of natural gas reservoir together, resulting in such striking features as “gas generated in the whole basin, gas bearing in transitional stratum, gas enriched in ramp region, and gas controlled by lithology”.

Key words: provenance analysis; shallow water delta; stereoNET-blanket sand body; sedimentology; filling; petroleum reservoirs; Ordos basin.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 40739901); 国家重大科技专项(No. 2008ZX050441-2).

作者简介: 陈安清(1981—), 男, 博士后, 主要从事沉积学研究工作. E-mail: aqin@163.com

*** 通讯作者:** 陈洪德, E-mail: chd@cdut.edu.cn

0 引言

岩性—地层油气藏具有大面积成藏的特点,近年来,岩性—地层油气藏地质理论的建立与完善,推动了油气资源的勘探与开发,使岩性地层油气藏成为我国油气储量增长的主体(贾承造等,2007).在岩性地层油气藏地质理论的指导下,鄂尔多斯盆地油气勘探取得了显著成效,已成为我国第二大含油气盆地,在此发现和探明了苏里格、乌审旗、榆林、子洲、米脂和大牛地 6 个大型岩性地层气田.一方面,大量的研究和勘探开发实践表明,上古生界岩性地层气藏是河流三角洲成因的砂岩型气藏,具有岩性、岩相变化大、砂体展布面积大而薄、地震、测井识别难度大、低孔低渗、非均质性严重等特征(侯洪斌等,2004;侯明才等,2009;陈安清等,2010).另一方面,揭示了鄂尔多斯盆地上古生界海陆转化时期生、储、盖组合的建造,特别是南北长轴方向大型缓坡地貌上发育的多个河流三角洲系统的时空演化及控砂特点,对进一步扩大勘探领域、提高勘探开发效益至关重要.本文综合野外露头、钻测井及地震资料,试图较系统地研究鄂尔多斯盆地北部晚古生代的物源系统、沉积环境演变、浅水三角洲聚砂规律及其油气意义.

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地隶属华北地台西端的次级构造单元,其东以吕梁山为界,南接秦岭—祁连造山带,西界为贺兰山—六盘山,北邻兴蒙造山带,是一个多旋回克拉通叠合盆地(张渝昌等,1997),在复杂的动力机制下形成了多种能源矿产共存系统(邓军等,2006).晚古生代的盆地演化过程主要受西南缘的秦岭海槽及北侧的“古亚洲洋”的控制(张渝昌等,1997;李益龙等,2009),南北构造作用在时间和空间上的差异制约着盆地演化和沉积充填过程,由此可划分为 2 个大的盆地演化阶段和 4 种盆地类型:即晚石炭世至早二叠世早期以海相沉积为主的发育阶段,包括本溪期的陆表海盆地和裂陷盆地,及太原期的陆表海盆地和坳陷盆地两个次级发育阶段;早二叠世晚期至晚二叠世,进入以陆相沉积为主的发展阶段,包括早期山西组具有过渡性质的近海湖盆地和下石盒子组开始的陆内坳陷盆地(陈洪德等,2001).

2 沉积充填特征及演化

2.1 多物源—多水系供砂

研究认为晚古生代鄂尔多斯盆地北部的物源来自北缘的阿拉善—阴山古陆(陈安清等,2007,2011;罗静兰等,2010).但是输送母岩碎屑颗粒进入盆地的古水系作为沟通物源区与盆地的重要桥梁,其分布状况决定着盆地的沉积充填方式与过程.重矿物具有耐磨蚀、稳定性强、能较好地保留其母岩的特征.来自不同物源区的碎屑物通常具有不同的重矿物组合.因此,通过重矿物组合可以判断古水系的方向与分布.采自研究区钻井岩心和野外剖面的上古生界地层中的砂岩样品的重矿物分析结果显示,主要的重矿物有钛铁矿、锆石、石榴石、电气石,含少量绿帘石、磷灰石、金红石、磁铁矿等.山西组和下石盒子组的重矿物组合皆呈南北向条带状分布(图 1).山西组的重矿物组合明显分为 4 个区:西部石嘴山一带为石榴石、钛铁矿、锆石组合;中西部杭锦旗—鄂托克旗一带为钛铁矿、锆石、电气石组合;中东部为钛铁矿、锆石、磷铁矿组合;东部为锆石、石榴石、钛铁矿组合.下石盒子组与山西组基本类似:西部石嘴山一带为石榴石、钛铁矿、电气石组合;中西部杭锦旗—鄂托克旗一带为钛铁矿、锆石、电气石组合;中东部为钛铁矿、锆石、磷铁矿组合;东部为石榴石、锆石、钛铁矿、榍石、金红石组合.重矿物组合的 4 个南北向带状分区与阿拉善—阴山古陆相应地段出露的母岩有很好的对应关系.西段 2 个水系剥露的地层以富石英为特征,主要是中元古界的变质岩和沉积岩系,包括大量高石英含量的石英岩、片麻岩、变粒岩和中基性火山岩;东段 2 个水系剥露的地层以贫石英为特征,主要为太古界的酸性侵入岩、变质砂岩、片麻岩,石英含量相对较少.这揭示了物源主要通过来自北部的 4 个近平行的古水系充填至盆地.

2.2 浅水三角洲聚砂

Donaldson(1974)等通过研究美国阿巴拉契亚中部石炭系的沉积特征,认为陆表海的浅水背景是控制该时期三角洲的一个关键因素,深化了之前 Fisk 提出的浅水三角洲概念,总结出水体浅、构造稳定的地台或陆表海是浅水三角洲形成的基本条件.我国的中、新生代大型陆内坳陷湖盆往往具有水体浅、地形平缓、沉降慢的特点,浅水三角洲研究有效地指导了这些盆地的油气勘探和预测,是形成我国陆相富油盆地的一个重要因素(邹才能等,2008).

晚古生代,作为华北克拉通一部分的鄂尔多斯

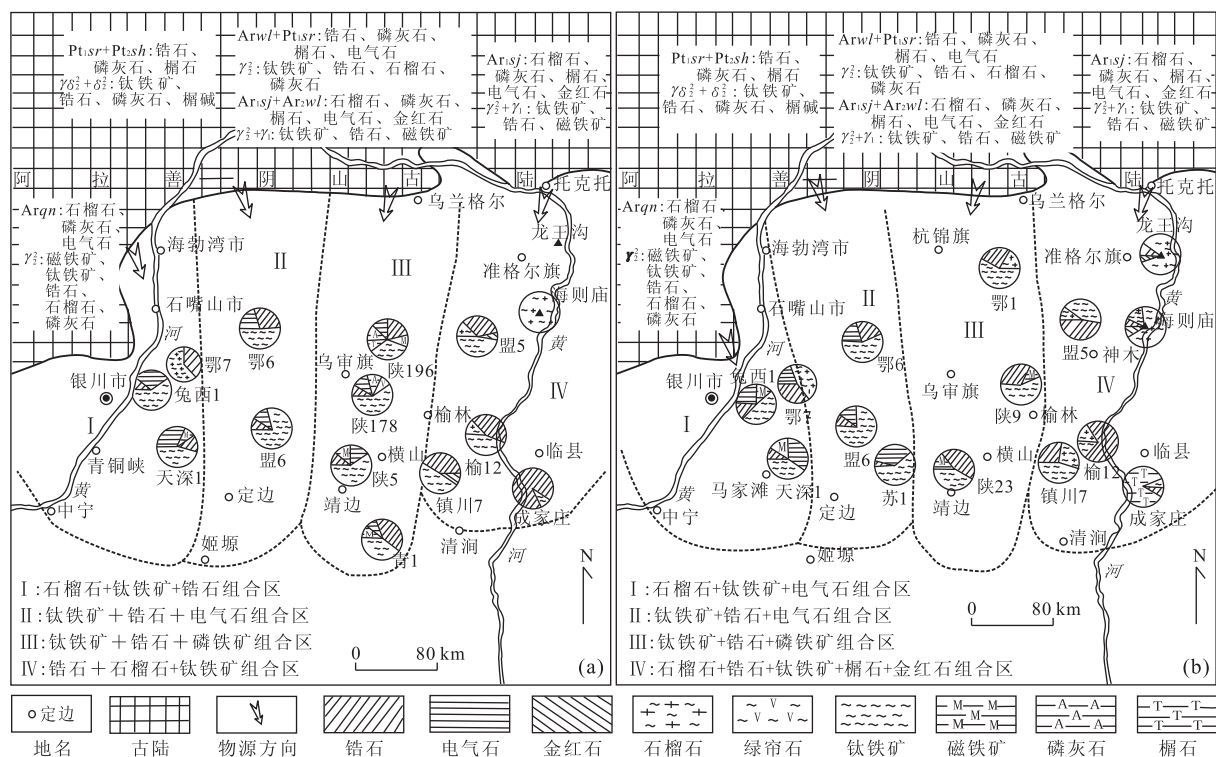


图1 鄂尔多斯盆地北部上古生界重矿物组合分区(据陈安清等,2011)

Fig. 1 Distribution of heavy minerals in Upper Paleozoic of north Ordos basin

a. 山西组; b. 下石盒子组; Arqn. 太古界千里山群; Ar₂wl. 太古界乌拉山群; Ar₁jn. 太古界集宁群; Pt₁sr. 色尔腾山群; Pt₁sr. 色尔腾山群; Pt₂sh. 什那干群; γ₁. 太古代花岗岩; γ₂. 中元古代花岗岩; γ₂δ. 中元古代花岗岩闪长岩; δ. 中元古代闪长岩

盆地具有稳定的构造背景,在古亚洲洋关闭过程中,形成了北高南低的大型缓坡地貌,水体浅,有利于浅水三角洲的形成。大量的钻井岩心和野外露头的剖面结构几乎都以加积型为特征,每个加积旋回的底部为高能分流河道砂,之上为河漫细粒沉积,这是典型的浅水三角洲层序结构,反映了沉积充填作用具有缓慢沉降、稳定物源供给的背景。各时期的砂岩等厚图揭示砂体分布面积广,没有明显的聚砂中心,这是浅水三角洲的河道水流浅急、延伸距离大、砂质长距离均衡卸载所致,因此也不大发育阻碍河道延伸的逆粒序河口坝。顺物源方向的地震剖面显示,地震相主要为平行、亚平行结构,未见由顶积层、前积层、底积层组成的吉尔伯特三角洲三褶结构。

通过研究不同时期的浅水三角洲上的河型特征,进一步分为浅水辫状河三角洲、浅水曲流河三角洲和浅水网状河三角洲。浅水辫状河三角洲主要发育于山2段和盒8段,辫状河道主要由成熟度较高的含砾粗砂岩、粗砂岩及中砂岩所组成。发育大型槽状交错层理(图2a)、块状层理、斜层理和冲刷充填构造等。山2段的三角洲由于受潮汐的冲洗作用,三角洲前缘被破坏而不大发育,可见双向交错层理(图

2b)和潮汐层理。浅水曲流河三角洲主要出现在山1段、盒7段、盒6段,分流河道具有下粗上细的“二元结构”,上段河漫沉积的泥岩或粉砂岩的厚度与下段粗粒部分相当。下段中一粗粒砂岩组成的边滩沉积,发育板状斜层理(图2c)、槽状交错层理和平行层理,偶见槽状的正粒序水下分流河道与穹窿状的逆粒序河口坝共存(图2d)。浅水网状河三角洲出现在盒5段至盒1段,分流河道由较细的中砂岩或细砂岩构成,层理规模亦较小,主要有小型板状斜层理(图2e)、小型槽状层理。野外露头上,该时期的河道砂体常呈透镜状穿插于厚层泥岩中,窄而薄(图2f),河漫沼泽、河漫湖等越岸沉积富含粘土和泥炭,厚度大,分布广。

2.3 海陆转换期富砂

鄂尔多斯盆地上古生界地层在横向和纵向上变化不大,区域地层划分和对比相对简单,基本有了统一的认识,但层序地层的划分仍存在诸多方案。本文以高分辨率层序地层学理论为指导(Cross and Lessenger, 1995; 郑荣才等, 2001; 李思田等, 2002),根据构造—沉积旋回的级别划分原则,对鄂尔多斯盆地北部晚古生界地层进行了系统的高分辨

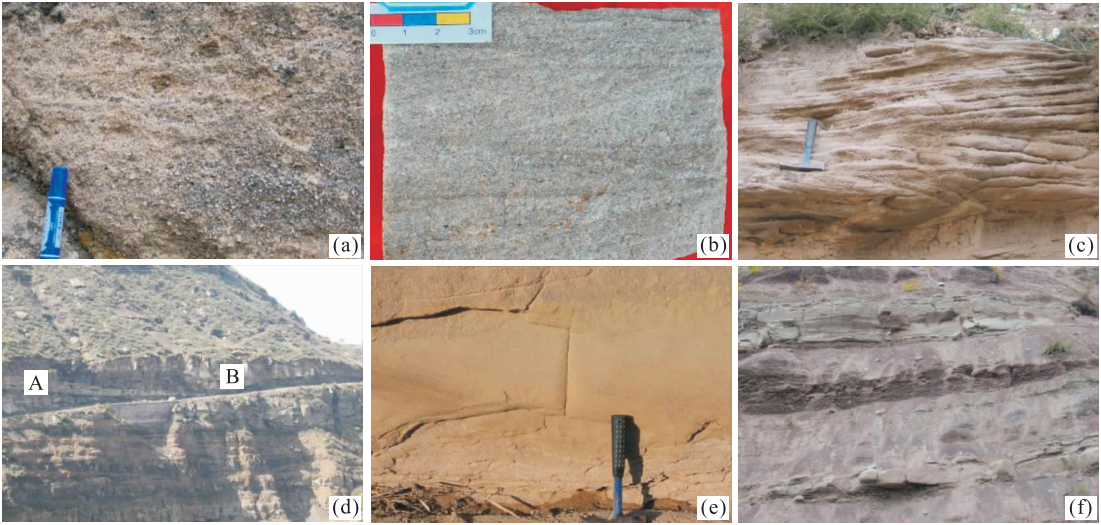


图 2 鄂尔多斯盆地北部不同类型的浅水三角洲沉积特征

Fig. 2 Typical sedimentary characters of delta environment in north Ordos basin

a. 砾质心滩沉积, 交错层理(龙王沟, 盒 8 下段); b. 受潮汐作用改造的河口坝砂岩, 双向斜层理(麒 3 井, 山 2 段); c. 曲流河三角洲分流河道中的板状斜层理(扒楼沟, 盒 7 段); d. 曲流河三角洲前缘的穹窿状河口坝砂体 A 与水下分流河道 B(成家沟, 盒 7 段); e. 网状河三角洲分流河道的细砂岩, 板状斜层理(海则庙, 盒 4 段); f. 薄层透镜状中一细粒的网状河三角洲分流河道砂岩穿插于紫红色泥岩中(扒楼沟, 盒 5 段)

率层序地层分析, 将整个晚古生界划分为 2 个二级层序: 下部为海相构造层序 SS1, 上部为陆相构造层序 SS2. 两个构造层序各包含 3 个超长期旋回层序(或称为层序组)和若干个长期旋回层序(层序), 海相构造层序由本溪层序组(SLSC1)、太原层序组(SLSC2)和山西层序组(SLSC3)构成, 各划分出 2 个长期旋回层序; 陆相构造层序由下石盒子层序组(SLSC4)、上石盒子层序组(SLSC5)和石千峰层序组(SLSC6)构成, 分别划分出 5 个、4 个、5 个长期旋回层序(图 3).

根据钻井、测井、野外露头、地震等资料, 以长期旋回为编图单元, 选择主力产气层长期旋回 LSC3(太 2 段)、LSC5(山 2 段)、LSC6(山 1 段)和 LSC7(盒 8 下段), 编制了砂体等值线图及岩相古地理图(图 4). LSC3 期, 受兴蒙海槽俯冲作用的影响, 阿拉善—阴山古陆开始向鄂尔多斯盆地北部提供物源, 形成小规模浅水三角洲, 继承于早古生代的中央古隆起潜伏在水下, 对东、西部沉积有一定的分隔作用, 且潮坪广泛分布. 这是该时期聚煤的主要沉积环境. 在北缘兴蒙海槽俯冲作用的加强和南缘秦岭海槽的对挤作用, 以及南、北造山带源源不断输入的物源的充填补齐作用下, 古隆起至 LSC5 期基本消失, 盆地底型由古隆起造成的东西分异逐渐向南北高、中间低转换, 在北部形成一个大型的缓坡地貌, 来自阿拉善—阴山古陆的物源形成了石嘴山、杭锦旗、靖边和米脂 4 大近于平行的由北而南的大型浅水河流

—三角洲系统, 海水最终由东南方向退出, 标志着海相盆地的结束. LSC7 开始, 盆地进入陆内坳陷盆地演化阶段, 下石盒子组超长期旋回 SLSC4、上石盒子组超长期旋回 SLSC5 和石千峰组超长期旋回 SLSC6 分别对应于陆内坳陷盆地的发展、成熟和萎缩阶段. 总体上, 盆地的海陆转换期, 即海相盆地与陆相盆地的叠合期是鄂尔多斯盆地晚古生代的主要富砂期.

3 油气富集规律与沉积充填的关系

自上世纪末天然气勘探战略由下古生界转到上古生界以来, 在油气勘探开发理论和成果上不断获得新的突破. 2009 年, 鄂尔多斯盆地天然气产量达 $208.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 跃升为我国最大的天然气生产基地. 目前发现的苏里格、乌审旗、榆林、子洲、米脂、大牛地等气田属大型致密砂岩岩性气藏, 包含下生上储的源顶成藏组合和自生自储的源内成藏组合两种类型, 具有大面积成藏的特点. 主力含气层段包括山 2 段、山 1 段、盒 8 下段、盒 8 上段. 东部的榆林、米脂、子洲气田主力含气层段为山 2 段, 大牛地气田为太 2 段、盒 3 至盒 7 段; 西部苏里格、乌审旗气田主力含气层段为山 1 段、盒 8 下段、盒 8 上段(图 3). 最近的勘探显示, 太原组、上石盒子组和石千峰组也有一定的勘探潜力. 气藏明显受沉积相带的控制, 主

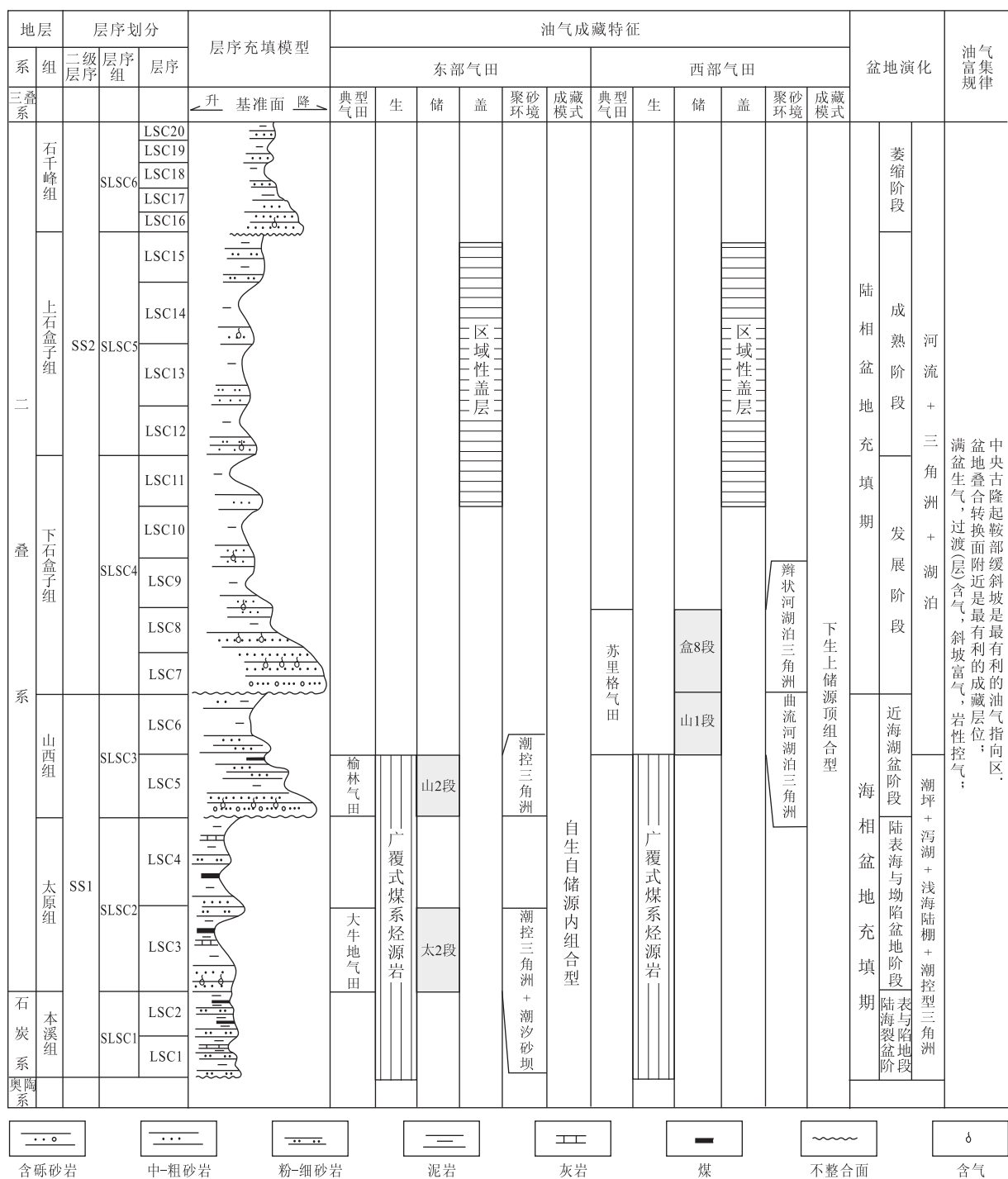


图3 鄂尔多斯盆地上古生界层序地层划分及天然气富集规律综合图解

Fig. 3 Sequence analysis and gas enriching trend of Upper Paleozoic of north Ordos basin

要发育在海相盆地向陆相盆地转化阶段的三角洲分流河道成因的中—粗粒石英砂岩和岩屑石英砂岩中。几大富气区呈近南北向带状分布,明显受物源及三角洲延伸方向的控制。并且南北向富气带上的含气层段具有南北往复迁移的特点,如北部大牛地气田的太 2 段向南上升到榆林气田的山 2 段,再向北上升到北部的盒 7、盒 6 段,这种“上楼梯”效应与基

准面升降过程中浅水缓坡背景下易造成岸线大幅度迁移有关;从榆林气田的山2段迁移至苏里格气田的山1段、盒8段的東西向“上楼梯”效应则与继承性的低幅中央古隆起对大型生烃坳陷和砂体聚集的控制有关。总之,鄂尔多斯盆地上古生界具有满盆生气的特点,盆地叠合转换面附近是最有利的成藏层位,中央古隆起鞍部宽缓斜坡是最有利的油气指向

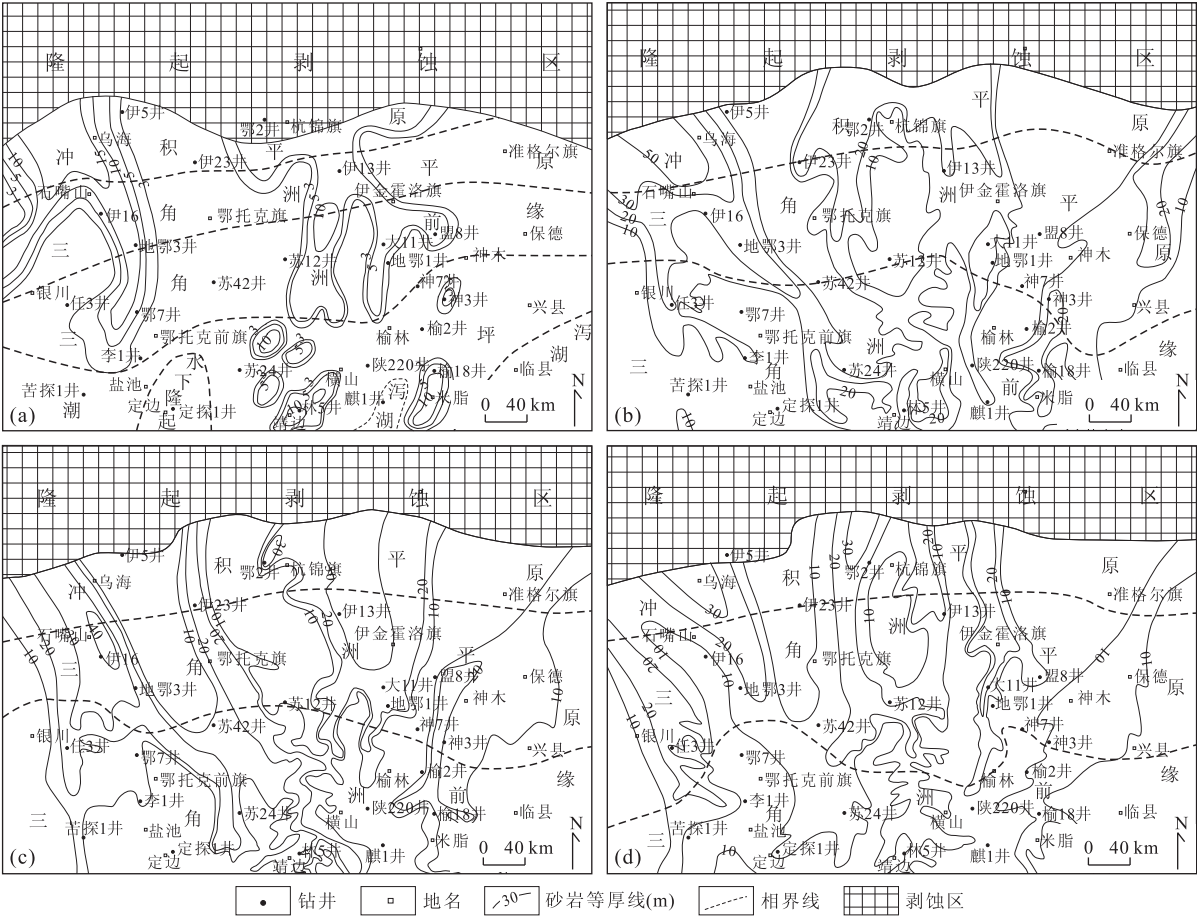


图 4 鄂尔多斯盆地北部关键时期的岩相古地理

Fig. 4 The lithofacies paleogeography of Upper Paleozoic in north Ordos basin
a. LSC3-2 2 段; b. LSC5-山 2 段; c. LSC6-山 1 段; d. LSC7-盒 8 下段

区(图 3). 通过分析沉积充填与油气的关系, 认为这种含气特点归功于广覆式煤系生烃灶、浅水三角洲成因的立体网毯状砂体和湖泛作用铸造的区域性泥岩盖层 3 大因素.

3.1 聚煤作用奠定广覆式生烃的基础

石炭纪—二叠纪是鄂尔多斯盆地的一个重要聚煤期, 聚煤层位包括本溪组、太原组和山西组, 煤层累计厚度一般为 10~30 m. 煤层基本覆盖了整个盆地, 聚煤环境多样.

本溪期的陆表海盆地, 是鄂尔多斯地区晚古生代的初始海盆. 海侵分别来自东西两侧的华北海和祁连海, 盆地由于南北缘隆起以及中央隆起的存在, 被分割为东部陆表海盆地和西部裂陷盆地两个海域. 总体上, 以陆表海的潮坪—泻湖相为主, 北缘有小型三角洲相, 潮坪是聚煤的重要场所, 如分布稳定、厚度较大的 8、9 号煤层.

太原期, 中央隆起已没入水下, 天山—内蒙裂谷系的第一次拉张—挤压旋回结束, 鄂尔多斯地区形

成北升南降的格局. 造成盆地海相沉积不断向南超覆, 来自北缘隆起带的物质自北向南源源不断地向盆地充填, 形成平面上三角洲相与潮坪相交错发育和剖面上陆相碎屑岩、煤层与浅海相灰岩相互共存的特有的约代尔旋回. 潮坪仍然是聚煤的主要场所.

山西期, 结束了陆表海盆地沉积充填, 受秦岭、兴蒙海槽逐渐关闭的影响, 盆地性质由陆表海盆地演化为大型近海湖盆. 鄂尔多斯盆地东西差异沉积逐渐消失, 南北差异沉降和沉积相带分异明显, 以发育由大面积的三角洲平原为特征. 该时期盆地逐渐向陆相盆地转化, 不再有稳定的潮坪环境, 在温暖潮湿的气候背景下, 三角洲平原的大型河间沼泽成为了主要聚煤场所.

随着华北板块自赤道不断向北漂移(吴汉宁等, 1990), 气候由温暖潮湿向炎热干燥转换, 聚煤作用逐渐消失. 同时, 沉积特征表现出砂岩由灰白色逐渐变为紫红色, 成熟度指数 $Q_{石英}/(F_{长石} + R_{岩屑})$ 逐渐减小. 煤的形成与消失与石炭纪—二叠纪全球演变

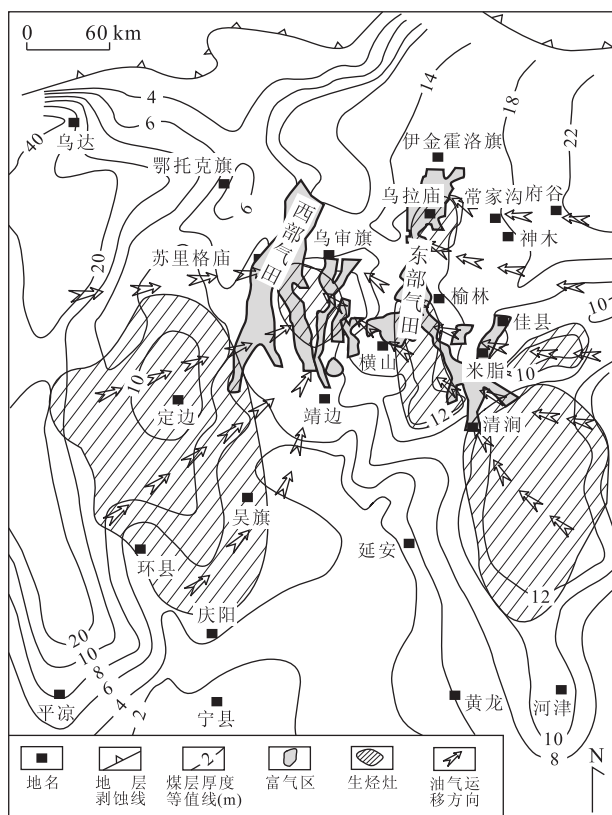


图5 鄂尔多斯盆地上古生界煤层厚度与天然气运聚方向
(煤层厚度据付金华等,2008)

Fig. 5 The isogram of coal and gas migration trend in Upper Paleozoic Ordos basin

和盆地从海相向陆相转化相吻合(Rowley *et al.*, 1985; Durante, 1995; Faure *et al.*, 1995; Retalack *et al.*, 1996),是盆地演化过程中的一种“事件”沉积(李增学等,2008). 上古生界天然气的碳同位素证实其主要来源于下伏煤系(李剑等,2005). 可见,在热带雨林气候条件下形成于陆表海和近海潮盆特殊古地理背景的煤,为上古生界天然气藏提供了广泛的生烃基础(张泓等,1999).

煤系烃源岩研究表明,鄂尔多斯盆地上古生界具备“广覆式”生烃的基础(图5)(付金华等,2008). R_o (镜质体反射率) $>1.25\%$ 的成熟烃源岩面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占现今盆地面积的72%),生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积约 $13.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (占现今盆地面积的55.2%),生气强度大于 $12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积占现今盆地面积达71.6%(李振宏等,2005). 烃源岩演化史表明,煤的生、排气高峰为晚侏罗世—早白垩世,对应于主要成藏期,最大生气速率为 $7.7 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{Ma}$,最大排气速率为 $7.2 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{Ma}$,具有“广覆式生气、持续运聚成藏”的特征(刘新社等,2000;杨华等,2004;刘建章

等,2007). 煤层厚度和生气强度的平面分布显示,古隆起东西两侧是相对的生烃中心,鞍型低幅古隆起的鞍部缓斜坡则是浅水三角洲砂体的聚集带,聚煤与聚砂在时间和空间上的耦合,使广泛分布的砂岩储层不仅“左右逢源”,而且能够“上下逢源”. 因此,广阔的古隆起鞍部成了天然气运聚的最有利指向区.

3.2 浅水三角洲形成立体网毯状砂岩骨架

鄂尔多斯晚古生代陆内坳陷盆地是在相对平坦的陆表海盆发展起来的,鄂尔多斯盆地北缘缺乏大规模的晚古生代磨拉石建造,反映造山作用相对于目前的喜马拉雅造山作用要弱得多. 因此,鄂尔多斯盆地北部当时发育的平坦宽缓的古地貌,为多物源供砂、多水系汇砂提供了广阔的空间. 本文选择盆地东北部,以中期基准面旋回为编图单元,绘编了砂体等厚图和古地理图. 另外,通过三维立体化技术(叶黎明和夏清,2007),刻画了缓坡地貌背景下浅水河流—三角洲系统的充填特点,揭示了山西组和下石盒子组两个主要聚砂期的聚砂特点(图6):山西超长期SLSC3的基准面上升早—中期,由于造山作用的增强,物源供给较之前显著增加,发育进积—加积型潮控辫状河三角洲;基准面上升晚期至下降早期,造山作用减弱,碎屑物供给减少,三角洲往北退缩;基准面下降中—晚期,由于南北挤压作用加强,海水从东南方向退出,海相盆地向陆内坳陷盆地转化,河谷下切向南延伸,潮控辫状三角洲向湖泊曲流河三角洲演化. 下石盒子超长期SLSC4的基准面上升早期,造山作用再次加强,强物源供给形成进积型河控辫状河三角洲;基准面上升中—晚期,造山作用减弱,物源供给减少,河流以侧向侵蚀迁移作用为主,演化为多河道曲流河三角洲;基准面上升降晚期,盆地在稳定的构造背景下,进入最大湖泛期,三角洲向北退缩.

为了揭示不同时期河道迁移和演化特点,应用Matlab软件,在东北部下石盒子组和上石盒子组的若干中期旋回砂体等值线图上,截取了3条分别分布于北部冲积平原、中部三角洲平原和南部三角洲前缘的近垂直走向的剖面(图7). 从横截冲积平原的剖面可以看出,MSCH1、MSCH3期的剖面线以两个波峰为特征,反映当时的冲积平原发育两条主河道;MSCH5、MSCH7期,依然以两个宽大的波峰为特征,东部河道初显分化;MSCH9以后,横截剖面分异出多个波峰,揭示河流已演变成多河道的网状河.

横截三角洲平原的第2条剖面显示,各个时期

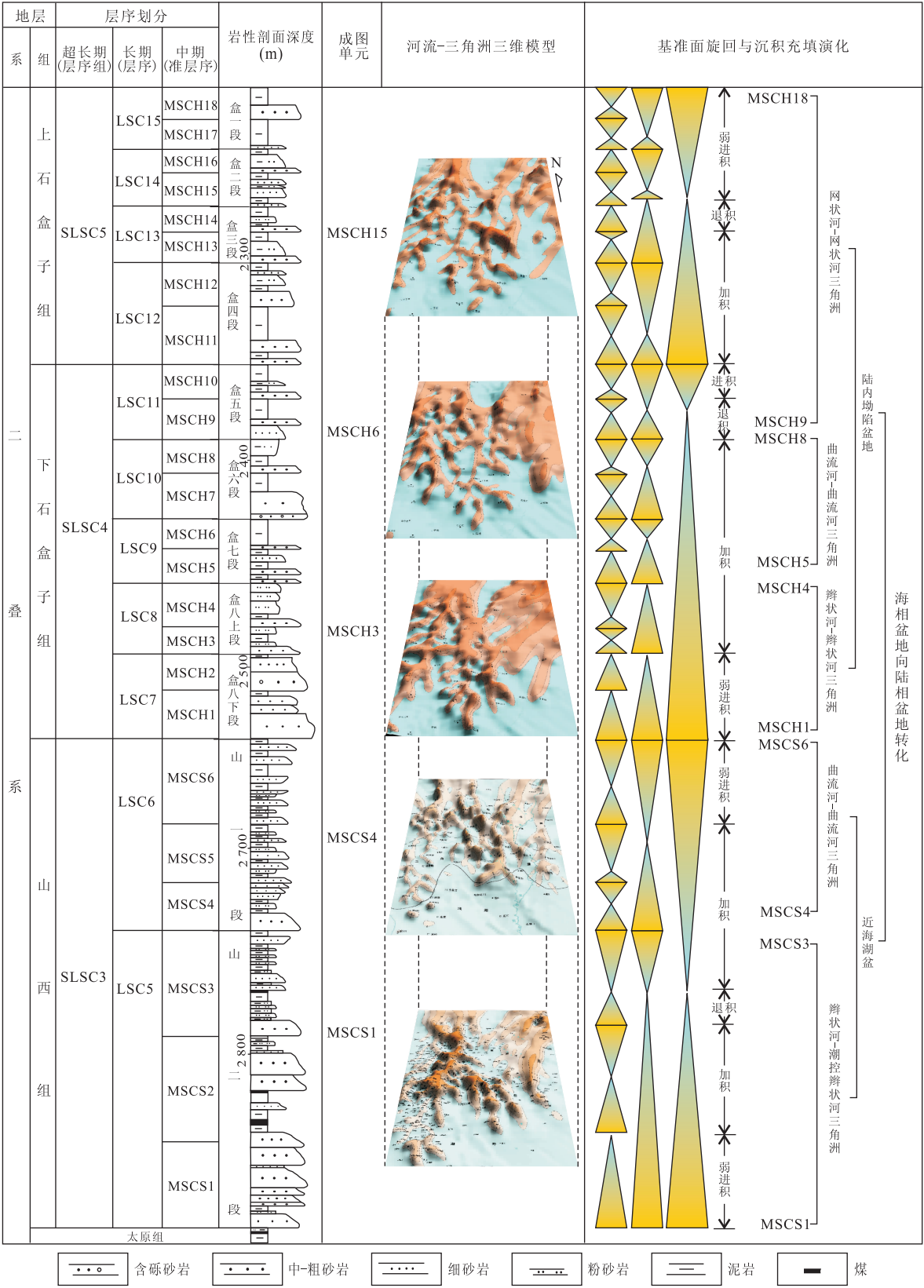


图 6 鄂尔多斯盆地晚古生代盆地叠合转换期的沉积充填特征

Fig. 6 The sedimentary filling characters in the period of Ordos basin transform from marine to land

图为砂体厚度三维模型;橙黄色区代表河道、分流河道和水下分流河道等聚砂环境;蓝色区代表泛滥平原、河间湖和浅湖(海)等聚泥环境

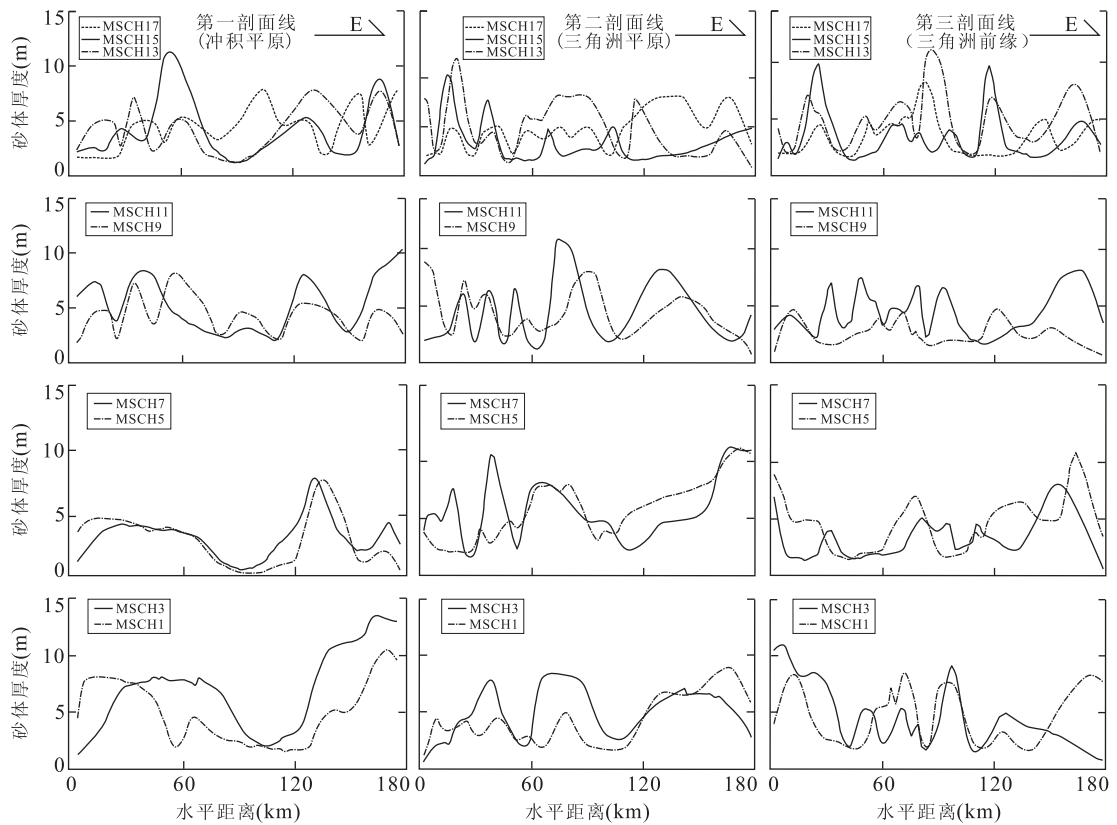


图 7 不同中期沉积旋回不同相带的东西向砂体横切剖面

Fig. 7 Transverse sections of sand body in different sedimentary cycles and different facies belts (from east to west)

的剖面线皆以多个波峰为特征,不同时期的波形常呈异相位,反映三角洲平原发育的分流河道多,河道频繁地往复侧向迁移,即反复废弃与复活;随着时间演化,波峰增多,单个截面积有所减小,是平原网状河化、聚砂能力下降的结果。

横截三角洲前缘的第 3 条剖面,不同时期的剖面线都以波峰多而窄为特征,反映水下分流河道进入湖泊仍然有一定的延伸,三角洲以河控为主,湖泊水体浅。截面积略小于三角洲平原地区,表明三角洲前缘聚砂能力不如三角洲平原环境。

3 条横截不同相带的剖面截面积随时间推移皆呈现逐渐减小的变化趋势,反映了下石盒子超长期的上升期早期,对应着构造活跃期和强物源供应期,是最有利的聚砂期;随着物源供给的减少,聚砂能力下降,演变为以细粒沉积物为主的网状河三角洲体系。同一时期不同相带上的 3 条剖面线的截面积很接近,表明冲积平原、三角洲平原和三角洲前缘的聚砂量接近;揭示了河流—三角洲系统水浅流急,没有明显的沉积中心,河流携带的沉积物在宽缓背景下逐步卸载,砂体属长距离均衡卸载的多河道浅水三角洲成因。正是在这种沉积环境下形成了大面积网

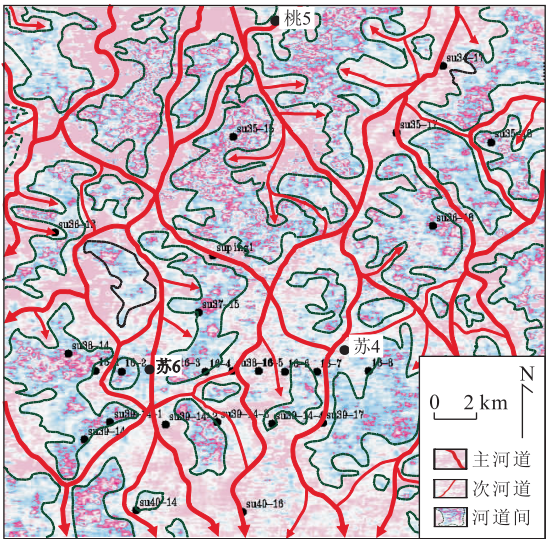


图 8 苏 6 井区 LSC7 的均方根振幅反演揭示河道砂体呈网毯状分布

Fig. 8 Network blanket channel-sand body of LSC7 of Su6 well area revealed by seismic inversion of root-mean-square amplitude

毯状砂体(图 8)。基准面升降过程中,多期网毯状砂体垂向叠置交织成大面积立体网毯状砂体。这种立

体交织的砂体紧邻煤系烃源岩,既是良好的疏导体系,又能形成大面积的岩性气藏。

3.3 湖泛作用铸造区域性泥岩盖层

上石盒子组区域性盖层形成于盆地成熟阶段,该时期由于湖泛作用,湖平面始终保持在高位水平。一方面,在缓坡地貌条件下,较小幅度的湖平面上升就能造成湖岸线向陆方向大范围迁移,甚至淹没前期的整个三角洲沉积范围,造成湖相泥岩超覆于三角洲之上。另一方面,该时期的三角洲由于物源供给相当有限,河流能量小,侵蚀能力弱,相对固定的河道网状交织,河间发育大型冲击岛和大型洼地,有如现代的赣江入湖三角洲(王随继,2002),以细粒沉积物为主,亦有利于区域性泥岩盖层的形成。

赋存于鄂尔多斯大型叠合盆地上古生界中的大面积天然气藏从晚古生代沉积充填形成生、储、盖 3 大物质基础,到含油气系统的建立,再到油气的最终定位,经历了多期次构造运动的改造与调整。几乎未受到实质性的破坏,具备良好的保存条件。这主要归功于鄂尔多斯盆地一直处于相对稳定的构造背景,上石盒子组区域性盖层没有受到抬升剥蚀、断裂作用、岩浆作用等不利因素的破坏,对油气起了整体封存的作用。这套分布在主力含气层段之上的广泛发育的河湖相泥岩厚度稳定在 100 m 左右,在大量生烃之前的中侏罗世的埋深已达 2 000 m,开始具备较好的封盖能力,现今的渗透率一般在 $10^{-10} \sim 10^{-8} \mu\text{m}^2$ 间,突破压力大于 5 MPa(付金华等,2008),具有良好的整体封存能力。

4 结论与认识

(1)鄂尔多斯晚古生代陆内拗陷盆地北部的物源主要来自阿拉善—阴山古陆的不同地段,多个物源通过多个水系输送到广阔宽缓的斜坡带,形成了高效聚砂的多河道浅水河流—三角洲系统。

(2)海相盆地向陆相盆地转化的山西超长期旋回 SLSC3 和下石盒子超长期旋回 SLSC4 的底部,对应于构造活跃期,物源供给充沛,河道往复进退和侧向迁移交错形成了鄂尔多斯盆地特有的成熟度较高、延展性较好、厚度稳定的立体网毯状砂体。

(3)下伏煤系地层广覆式生烃,中部多河道浅水三角洲立体网毯状聚砂,上覆上石盒子组的泥岩铸造区域性盖层,以及立体网状砂体和层序界面组成的高效疏导体系为大面积成藏奠定了基础,成就了鄂尔多斯盆地上古生界“满盆生气、过渡(层)含气、

斜坡富气、岩性控气”的特点。

References

- Chen, A. Q., Chen, H. D., Lin, L. B., et al., 2010. Difference of the Upper Paleozoic lithostratigraphic gas reservoirs in Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37 (2): 120—126 (in Chinese with English abstract).
- Chen, A. Q., Chen, H. D., Xiang, F., et al., 2007. Sandstone characteristic and provenance analysis of the Permian Shanxi Formation-Shangshihezi Formation in northeast of Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 34 (3): 305—311 (in Chinese with English abstract).
- Chen, A. Q., Chen, H. D., Xu, S. L., et al., 2011. Provenance and sandy accumulation regularity of Neopaleozoic in north Ordos basin. *Journal of China University of Petroleum*, 35(6): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. D., Hou, Z. J., Tian, J. C., et al., 2001. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectono-sedimentary evolution in Ordos basin during Late Palaeozoic. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 16—24 (in Chinese with English abstract).
- Cross, A. T., Lessenger, M. A., 1995. Sediment volume partitioning: rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. In: Gradstein, F. M., Sandvik, K. O., Milton, N. J., eds., Sequence stratigraphy: concepts and applications. Proceedings of the Norwegian Petroleum Society Conference, Stavanger, 1—24.
- Deng, J., Wang, Q. F., Gao, B. F., et al., 2006. Distribution and tectonic background of various energy resources in Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 330—336 (in Chinese with English abstract).
- Donaldson, A. C., 1974. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians. In: Briggs, G., ed., Carboniferous of the southeastern United States. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 148: 47—78.
- Durante, M. V., 1995. Reconstruction of Late Palaeozoic climatic changes in angaraland according to phytogeographic data. *Stratigr. Geol. Correl.*, 3(2): 123—133.
- Faure, K., Wit, M. J., Willis, J. P., 1995. Late Permian coal hiatus linked to ^{13}C -depleted CO_2 flux into the atmosphere during the final consolidation of Pangea. *Geology*, 23(6): 507—510.
- Fu, J. H., Wei, X. S., Ren, J. F., 2008. Distribution and genesis of large-scale Upper Palaeozoic lithologic gas reser-

- voirs on Yi-Shaan Slope, *Petroleum Exploration and Development*, 35(6): 664—667 (in Chinese with English abstract).
- Hou, H. B., Mou, Z. H., Zhu, H. Q., 2004. Gas-pool forming conditions and exploration directions of the Upper Paleozoic gas reservoirs in the northern Ordos basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hou, M. C., Dou, W. T., Chen, H. D., et al., 2009. Study on diagenesis of the He8 member and Shan1 member in north of the Sulige gas field, Ordos basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(4): 66—74 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., Zhao, W. Z., Zou, C. N., et al., 2007. Geological theory and exploration technology for lithostratigraphic hydrocarbon reservoir. *Petroleum Exploration and Development*, 34(3): 257—272 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Luo, X., Shan, X. Q., et al., 2005. Natural gas accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 54—59 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in Lacustrine fault basins: sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., et al., 2009. Collision processes of North China and Siberian plates: evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 931—938 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Han, M. L., Wei, J. C., et al., 2008. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy and coal accumulation law of Upper Paleozoic erathem in Ordos basin. *Journal of China University of Petroleum*, 32(1): 5—12 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Xi, S. L., Liu, X. S., 2005. Formed pool of natural gas in Upper Paleozoic of Ordos basin. *World Geology*, 24(2): 174—181 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Z., Chen, H. H., Li, J., et al., 2007. Using fluid inclusion thermodynamic modeling to study paleo-fluid potential and natural gas migration and accumulation of the No. 2 member of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope, Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 93—98 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. S., Xi, S. L., Fu, J. H., 2000. Natural gas generation in the Upper Paleozoic in Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Luo, J. L., Wei, X. S., Yao, J. L., et al., 2010. Provenance and depositional facies controlling on the Upper Paleozoic excellent natural gas-reservoir in northern Ordos basin, China. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 811—820 (in Chinese with English abstract).
- Retallack, G. J., Veevers, J. J., Morante, R., 1996. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 108(2): 195—207. doi: 10.1130/0016-7606
- Rowley, D. B., Raymond, A., Parrish, J. T., 1985. Carboniferous palaeogeographic phytogeographic and palaeoclimatic reconstruction. *Int. J. Coal Geol.*, 5(1—2): 7—42.
- Wang, S. J., 2002. Study of the anastomosing fluvial system on the delta plain of the Ganjiang River. *Scientia Geographica Sinica*, 22(2): 202—207 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. N., Zhu, R. X., Liu, C., 1990. Paleomagnetic observations in North China block: from Late Paleozoic to triassic. *Chinese Journal of Sinica*, 33(6): 694—701 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Zhang, W. Z., Li, J. F., et al., 2004. Geochemical study of the Upper Paleozoic gas in the northern Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(S1): 39—44 (in Chinese with English abstract).
- Ye, L. M., Xia, Q., 2007. Three-dimensional modeling and multi-layer section cutting of lithofacies palaeogeographic map: a case study of the Shanxi Formation in the eastern Ordos basin. *Journal of Stratigraphy*, 31(4): 395—399 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. C., Zhang, H., Sun, Z. C., et al., 1997. Prototype analysis of petroliferous basins in China. Nanjing University Press, Nanjing, 276 (in Chinese).
- Zhang, H., Shen, G. L., He, Z. L., 1999. Control of palaeoclimatic change on Late Palaeozoic accumulation of the North China plate. *Acta geologica sinica*, 73(2): 131—139 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Peng, J., Wu, Z. R., 2001. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 249—255 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sand bodies in large open depression lake basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813—825 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安清,陈洪德,林良彪,等,2010.鄂尔多斯盆地上古生界东、西部岩性—地层气藏的差异性.成都理工大学学报(自然科学版),37(2): 120—126.
- 陈安清,陈洪德,向芳,等,2007.鄂尔多斯东北部山西组—上石盒子组砂岩特征及物源分析.成都理工大学学报(自然科学版),34(3): 305—311.
- 陈安清,陈洪德,徐胜林,等,2011.鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源体系及聚砂规律.中国石油大学学报(自然科学版),35(6): 1—7.
- 陈洪德,侯中键,田景春,等,2001.鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化研究.矿物岩石,21(3): 16—24.
- 邓军,王庆飞,高帮飞,等,2006.鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布及其构造背景.地球科学——中国地质大学学报,31(3): 330—336.
- 付金华,魏新善,任军峰,2008.伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因.石油勘探与开发,35(6): 664—667.
- 侯洪斌,牟泽辉,朱宏权,2004.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气成藏条件与勘探方向.北京:石油工业出版社.
- 侯明才,窦伟坦,陈洪德,等,2009.鄂尔多斯盆地苏里格气田北部盒 8、山 1 段成岩作用及有利储层分布.矿物岩石,29(4): 66—74.
- 贾承造,赵文智,邹才能,等,2007.岩性地层油气藏地质理论与勘探技术.石油勘探与开发,34(3): 257—272.
- 李剑,罗霞,单秀琴,等,2005.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏特征.石油勘探与开发,32(4): 54—59.
- 李思田,潘元林,陆永潮,等,2002.断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究.地球科学——中国地质大学学报,27(5): 592—598.
- 李益龙,周汉文,钟增球,等,2009.华北与西伯利亚板块的对接过程:来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据.地球科学——中国地质大学学报,34(6): 931—938.
- 李增学,韩美莲,魏久传,等,2008.鄂尔多斯盆地上古生界高分辨率层序划分与煤聚积规律分析.中国石油大学学报(自然科学版),32(1): 5—12.
- 李振宏,席胜利,刘新社,2005.鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏.现代地质,24(2): 174—181.
- 刘建章,陈红汉,李剑,等,2007.伊—陕斜坡山 2 段包裹体古流体势恢复及天然气聚集条件.地球科学——中国地质大学学报,32(1): 93—98.
- 刘新社,席胜利,付金华,2000.鄂尔多斯盆地上古生界天然气生成.天然气工业,20(6): 19—23.
- 罗静兰,魏新善,姚涇利,等,2010.物源与沉积相对鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气优质储层的控制.地质通报,29(6): 811—820.
- 王随继,2002.赣江入湖三角洲上的网状河流体系研究.地理科学,22(2): 202—207.
- 吴汉宁,朱日祥,刘椿,1990.华北地块晚古生代至三叠纪古地磁研究新结果及其构造意义.地球物理学报,33(6): 694—701.
- 杨华,张文正,李剑锋,等,2004.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究.沉积学报,24(S1): 39—44.
- 叶黎明,夏清,2007.岩相古地理图的三维化和多层剖面提取——以鄂尔多斯盆地东部山西组地层为例.地层学杂志,31(4): 395—399.
- 张泓,沈光隆,何宗莲,1999.华北板块晚古生代古气候变化对聚煤作用的控制.地质学报,73(2): 131—139.
- 张渝昌,张荷,孙肇才,等,1997.中国含油气盆地原型分析.南京:南京大学出版社,262—293.
- 郑荣才,彭军,吴朝容,2001.陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义.沉积学报,19(2): 249—255.
- 邹才能,赵文智,张兴阳,等,2008.大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布.地质学报,82(6): 813—825.