

鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示*

陈洪德^{1,2} 李洁^{1,2,3,4} 张成弓^{1,2} 程立雪^{1,2} 程礼军^{3,4}

CHEN HongDe^{1,2}, LI Jie^{1,2,3,4}, ZHANG ChengGong², CHENG LiXue² and CHENG LiJun^{3,4}

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都理工大学,成都 610059

2. 成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059

3. 油气资源与探测国家重点实验室重庆页岩气研究中心,重庆 400042

4. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室,重庆地质矿产研究院,重庆 400042

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

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. Chongqing Shalegas Research Center of State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Chongqing 400042, China

4. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing, 400042, China

2011-02-01 收稿, 2011-06-28 改回.

Chen HD, Li J, Zhang CG, Cheng LX and Cheng LJ. 2011. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2213–2229

Abstract Late Paleozoic of Ordos Basin has undergone a huge change of the level, and occurred many times the transgression which, on the Benxi-Taiyuan background of epicontinental deposition by long-term studies have reached a broad consensus, while the conversion of a critical period in the sea deposition of Shanxi has a rather controversy. In view of the actual, this article was known as the starting point of previous achievement. According to the distribution of marine strata, paleontology, sedimentary structures, petrography, diagenesis and other geological basis for the reference, comprehensive calculation of boron law paleosalinity, Sr/Ba ratio and boron gallium rubidium content of the relationship between the three elements of different geochemical test results, mainly for the Early Permian Shanxi Period which is the conversions of marine-continental facies sedimentary environment for a more in-depth analysis. That Shanxi 2 is still in the context of epicontinental marine sedimentation stage Shanxi 1 is the conversions of marine-continental stage as a critical period of transition, and Xiashihezi Period before they are fully into the new evolution of continental basins stage. Establishing the geochemical proxies section of east-west and north-south in Ordos Basin. Summed up the ancient salinity and Sr/Ba ratio from south to north, from west to east, there is the general trend of decreasing. And such trends in the early and mid-Shanxi 2 were most clearly, as the latter regression continues to expand, disappeared late in the Shanxi 1. The reason can be attributed to the ancient geography of the period and what impact the two sea water level differences. On this basis, the Ordos Basin Late Paleozoic sedimentary evolution is divided into three stages, and it is base on super long-term base level cycle eventually to the establishment of the sequence stratigraphic framework.

Key words Conversions of marine-continental; Sedimentary environment; Shanxi Formation; Ordos Basin

摘要 鄂尔多斯盆地晚古生代经历了巨大的海陆变迁,并发生多次海侵。其中,关于本溪组-太原组的陆表海沉积环境经长期研究已达成广泛共识,而对处于海陆转换关键时期的山西组沉积环境问题至今存在较大争议。鉴于,本文在前人研究基础上,根据地层与古生物、沉积构造、岩性特征、成岩作用等地质依据,结合硼元素法所计算的古盐度、Sr/Ba 比值以及硼、镓、铷三元素含量关系等不同地球化学测试分析结果,对早二叠世山西期沉积环境进行了较为深入的研究。认为山西期为陆表海背景下的海陆过渡沉积演化阶段,发育大面积分布的海陆过渡三角洲体系,到下石盒子期才完全进入陆相湖盆的沉积演化阶段。通过盆地山西组东西向与南北向地球化学基干剖面的建立,呈现古盐度和 Sr/Ba 比值由南向北、自西向东、层位自下而

* 本文受国家自然科学基金重点项目(40739901)、国家重大科技专项(2008ZX05002-001)和四川省重点学科"构造地质学"建设基金项目(SZD0408)联合资助。

第一作者简介:陈洪德,男,1956年生,博士,教授,博士生导师,主要从事沉积地质学方面的教学与科研工作,E-mail: chd@cdu.edu.cn

上总体减小的变化趋势,于山1晚期这种差异性基本消失,表明鄂尔多斯盆地山西期由南向北、层位自下而上受海水影响的规模与范围愈来愈弱。在此基础之上,将晚古生代鄂尔多斯盆地划分为3大沉积演化阶段,并建立了该时期盆地的基准面旋回层序地层格架。该成果认识对扩展和深入鄂尔多斯盆地油气勘探具有重要指导意义。

关键词 海陆转换;沉积环境;山西组;鄂尔多斯盆地

中图法分类号 P534.46

关于华北板块晚古生代的研究具有较长历史,不同学者针对盆地构造演化、层序地层划分与对比、沉积层序充填过程中不同相带的时空配置关系、以及古地理变迁与沉积体系展布规律等方面都进行过相关报道(Diessel *et al.*, 2000;陈世悦和刘焕杰,1994;尚冠雄,1995;李宝芳等,1999;程爱国和魏振岱,2001;李增学等,2006;张拴宏等,2007)。从现今研究来看,海侵事件的存在已经被公认为该时期重要且具典型代表性的地质事件(何起祥等,1991;武法东等,1995;张鹏飞等,2001;吕大炜等,2009)。与此同时,作为华北地台次级单元的鄂尔多斯盆地,晚古生代同样经历了巨大的海陆变迁,并发生多次海侵(郭英海和刘焕杰,1999)。其中,关于晚石炭世-早二叠世早期(本溪期-太原期)的陆表海沉积背景经长期研究已达成广泛共识(郭英海等,1998;陈洪德等,2001)。但是,由于早二叠世晚期(山西期)处于海退背景下的海陆转换关键时期,其沉积背景的归属问题至今存在较大争议。主要观点可归结为:海盆向陆盆转换时期的海陆过渡环境(庞军刚等,2006;刘家铎等,2006;尤欢增等,2007)、间歇性海侵的陆源近海湖盆(郭英海和刘焕杰,1999;邢厚松等,2008)、陆表海浅海陆棚(叶黎明等,2008)与陆相湖盆(杨满平等,2000;聂武军等,2001;王超勇等,2007)。上述研究获得了丰富的基础资料和重要的成果认识,其中不乏具有真知灼见的观点和论著,给山西组沉积环境的研究提供了坚实基础。然而,山西组海陆过渡相环境的研究远比单一的海相或陆相环境难以进行。一方面,盆地沉积充填的主要场所形成于陆表海背景,由于其平缓的地形坡度易形成范围宽广的浅水区域,即使微小的海水动荡就能致使全盆大范围的频繁暴露与淹没(张鹏飞等,2001;李增学等,2006)。致使所形成的海相层系与陆相地层互为夹杂,又因海相夹层的厚度较薄且缺乏明显的环境指标而不易于识别;另一方面,由于海侵-海退的频率不一,影响范围与程度的截然不同,发育的海陆交互沉积相变复杂,导致横向标志层对比追踪困难;此外,海平面下降时因沉积间断造成的生物演化不连续(范炳恒等,2000),海侵大范围迁移过程中形成海相灰岩层与硅质海绵岩的缺失(吕大炜等,2009),以及陆相淡水与海相咸水相互混合后造成的古盐度环境指向灵敏度的下降。都给该套地层的环境变迁、沉积演化与古地理格局等研究增加了不同程度的困难。

近年来,随着鄂尔多斯盆地油气与煤炭等资源勘探的不断深入,发现正确认识晚古生代海盆向陆盆转换过程,特别是山西期海陆转换关键时期的厘定,对于盆地沉积演化、古地理格局以及不同气田成因与分布规律、岩性-地层气藏差异性的研究皆有重要的科学价值和实际意义(李熙喆等,2009;席胜利等,2009;陈安清等,2010)。鉴于此,本文在前人研究基础

上,根据地层与古生物、沉积构造、岩性特征、成岩作用等地质依据,结合硼元素法所计算的古盐度、Sr/Ba 比值以及硼、镓、铷3元素含量关系等不同地球化学测试分析结果。对早二叠世山西期沉积环境进行了较为深入的研究,并对盆地晚古生代海陆转换关键时期提出了新认识。通过盆地山西组东西向与南北向地球化学基干剖面的建立,总结出了古盐度和 Sr/Ba 比值由南向北、自西向东、层位自下而上的变化趋势。在此基础之上,将晚古生代鄂尔多斯盆地划分为3大沉积演化阶段,并建立了该时期盆地的基准面旋回层序地层格架。该成果对扩展和深入鄂尔多斯盆地油气勘探具有重要指导意义。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地作为华北地台西端的次级构造单元,北邻兴蒙造山带,南面秦岭造山带,西以贺兰山-六盘山为界,东以吕梁山为界(图1),是1个多旋回克拉通叠合盆地(张渝昌

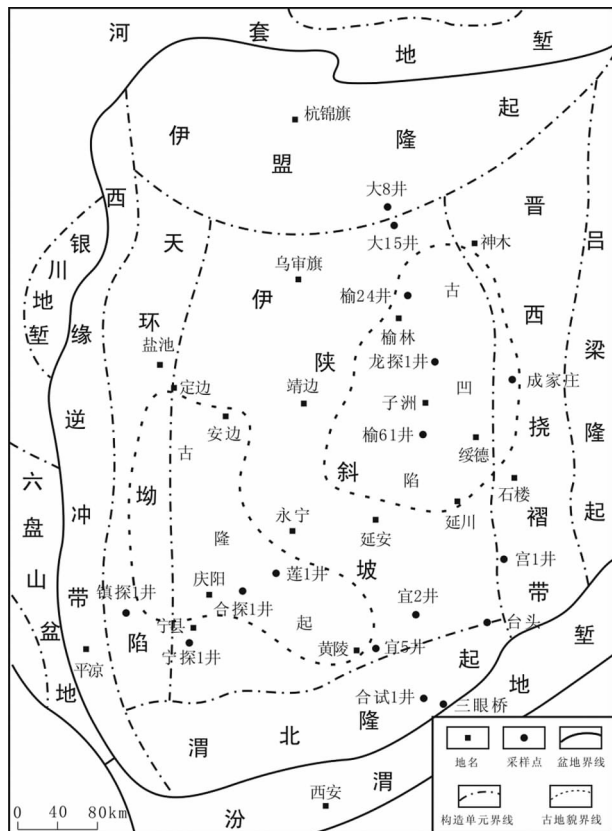


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分图及样品采集点
Fig. 1 The division of tectonic element in Ordos Basin and the sampling sites

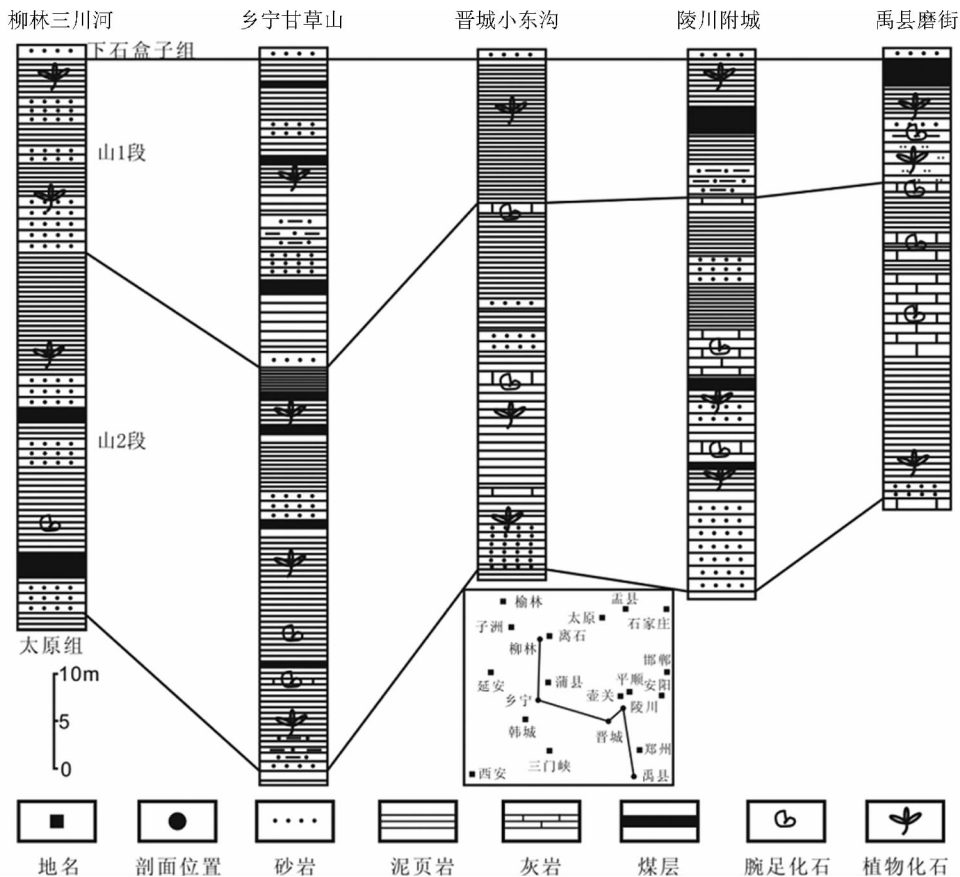


图2 鄂尔多斯盆地东南缘山西组地层对比图

Fig. 2 The comparison of stratum of Shanxi Formation in southeastern Ordos Basin

等,1997;侯洪斌等,2004)。盆地晚古生代经历了海相沉积为主的陆表海盆地、海陆过渡相沉积为主的近海湖盆以及陆相碎屑岩沉积为主的内陆拗陷湖盆的古地理演化过程(陈洪德等,2001)。自下而上发育了上石炭统本溪组、下二叠统太原组和山西组、中二叠统下石盒子组和上石盒子组、上二叠统石千峰组。其中,山西组以“北岔沟砂岩”之底为底界,与下伏太原组为区域冲刷不整合接触;又以“骆驼脖砂岩”的底为顶界,与下石盒子组为整合或冲刷不整合接触。根据岩性和沉积旋回等特征,可划分为下部的山2段与上部的山1段,进一步又可将下段与上段分别细分为山₂³、山₂²、山₂¹和山₁³、山₁²、山₁¹等6个亚段。

2 山西组沉积环境判别的地质依据

随着鄂尔多斯盆地漫长地史演化中的沧桑巨变,不同时期不同地区都不同程度地保留下了受海水影响的鲜明痕迹(刘家铎等,2006;叶黎明等,2008;周祺,2009),这为该时期大规模海侵事件的研究提供了有力证据。通过对山西组沉积环境判别标志的深入研究,发现在山2段留存有海相沉积的直接记录。其主要地质依据体现在如下方面:

2.1 地层与古生物

毗邻盆地东缘的山西省境内,经证实确有海相地层发育于山西组之中,并在山2段出露尤为明显(地质矿产部,1982)。该层段自下而上发育有3个海相夹层,主要由硅质岩、灰岩、含钙质泥岩与含海相化石泥岩组成。就其分布规律而言(图2),在晋东南的平顺-晋城-陵川一线以南含量最高,通常有2~3层含海相生物化石的灰岩层;而在离石-太原-孟县一线以北基本消失,海相地层总体显示由南向北逐渐减少变薄。此外,整个山西期吕梁地区与盆地东部属于同一三角洲沉积体系(郭英海等,1998;汪正江等,2002),而该时期吕梁古隆起淹没于水下,其高度不足以阻隔盆地与外海的联通,因此海水能够得以入侵盆地本部。山西期之后,随着吕梁隆起与渭北隆起的进一步抬升,致使海水从盆地东南泄水口退出(叶黎明等,2008)。

与此同时,在乡宁甘草山剖面山西组底部的硅质岩中,有大量腕足类化石发现(地质矿产部,1982);在河南境内山西组下段亦有蜓类、腕足、牙形类化石大量出现;在盆地东北部塔巴庙区块的大3井、大12井山2段中(刘家铎等,2006),发现有海百合和有孔虫(其中有始瘤虫)骨屑(图3a,

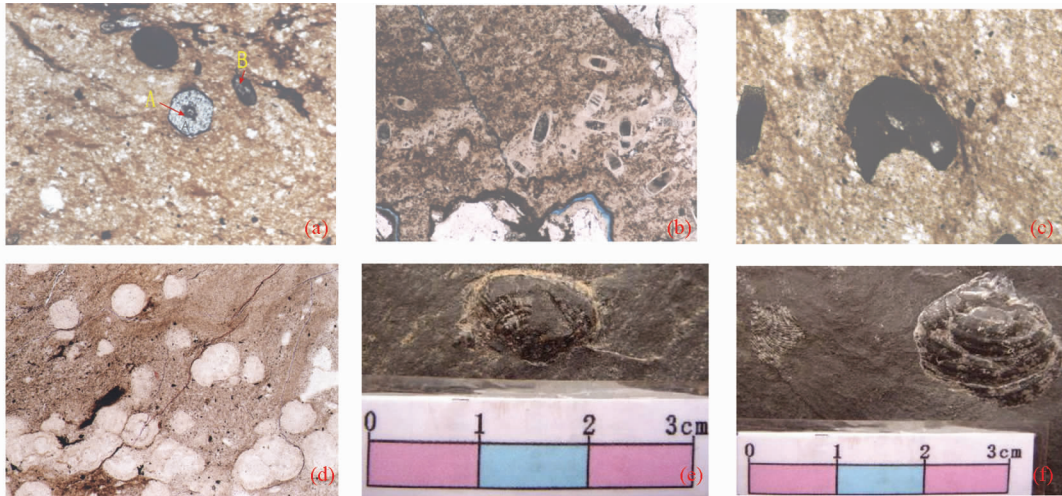


图3 山西组下部(山2段)古生物化石

(a)-大12井,2813.55m,山2段,海百合(A),有孔虫(B), $10\times 5(-)$ (据刘家铎等,2006);(b)-大3井,2829.85m,山2段,巨粒岩屑砂岩中的屑硅质岩砾石, $10\times 5(-)$; (c)-大12井,2813.55m,山2段,泥岩中的始硫虫, $10\times 10(-)$; (d)-榆31井,2918.73m,山2段,泥岩中的硅质生物(太阳虫、放射虫), $\times 400(-)$; (e)-陕212井,2874.29~2885.29m,山2段,太原网格长身贝(据周祺,2009); (f)-陕212井,2874.29~2885.29m,山2段,蒙古扁平长身贝(据周祺,2009)

Fig. 3 Fossils in the lower part of the Ordos Basin Shanxi 2

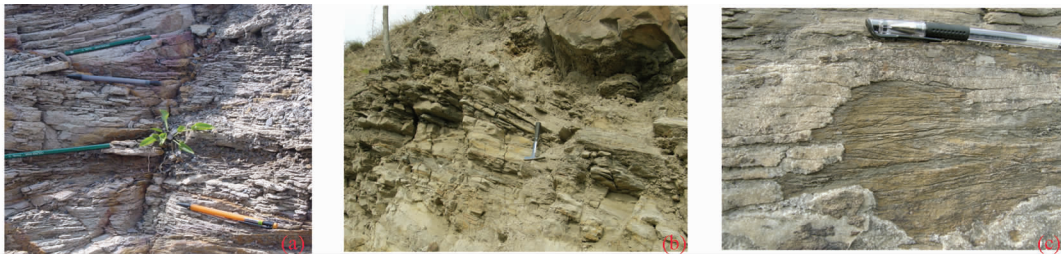


图4 山西组沉积构造

(a)-蒲县宋家沟,山2段下部,双向交错层理;(b)-白水三眼桥,山2底部,潮坪剖面结构;(c)-白水三眼桥,山1底部,羽状交错层理

Fig. 4 Sedimentary structures of Shanxi Formation

b,c);在盆地东部的榆48井山2段(深度2566~2568m)泥岩中(叶黎明等,2008),发现有棘皮类化石碎片存在;在盆地东部的榆31井山2段泥岩中,发现有硅质放射虫、太阳虫古生物化石(图3d)。此外,在近期报道中(周祺,2009),在盆地东北部长北气田的陕212井山2段(深度2874.29~255.29m)暗色泥岩中,亦发现丰富的腕足类(图3e,f)和棘皮类化石。其中,腕足类化石保存较完整,经鉴定为 *Dictyoelostus taiyuanfuensis* (太原网格长身贝) 和 *Compressoproductus mongolicus* (蒙古扁平长身贝) 2个属种(图4)。该类属种中的腕足类化石在晋东南山西组下段灰岩中非常丰富,亦在中国南方于早二叠世海相地层中也有广泛地发育。上述古生物化石的发现,无论其生态环境是原生沉积还是异地潮流搬运,都可作为盆地山2段海相地层存在的重要证据。

2.2 沉积构造

在对盆地东部白水三眼桥、蒲县宋家沟、乡宁甘草山、柳

林成家沟与太原西山柳子沟等山西组剖面进行沉积相研究的过程中,识别出大量潮汐层理、双向交错层理、羽状交错层理等原生沉积构造(图4),可确定为与典型海相沉积环境有关的识别标志。除了在白水三眼桥剖面的山1段底部发现具海相特征的羽状交错层理之外,该类沉积构造多集中于山2段。由此可见,山西早期特别是在盆地东部存在潮汐作用影响的直接证据。随着华北地台的进一步海退,到了山1期其海水的影响范围和控制程度已明显不及前一时期。

2.3 岩性特征

刘家铎等(2006)在研究盆地塔巴庙地区山西组下段沉积环境时,利用岩石学方面的诸多证据,认为山2段为海相或海陆过渡沉积环境,但其基础资料多来源于盆地东北部。事实上,在整个盆地范围内尤其是盆地东部的山2段中,皆广泛存在着该类海相环境的识别标志。一方面,在山2段赋存的成分成熟度和结构成熟度均高的石英砂岩(图5a,b),

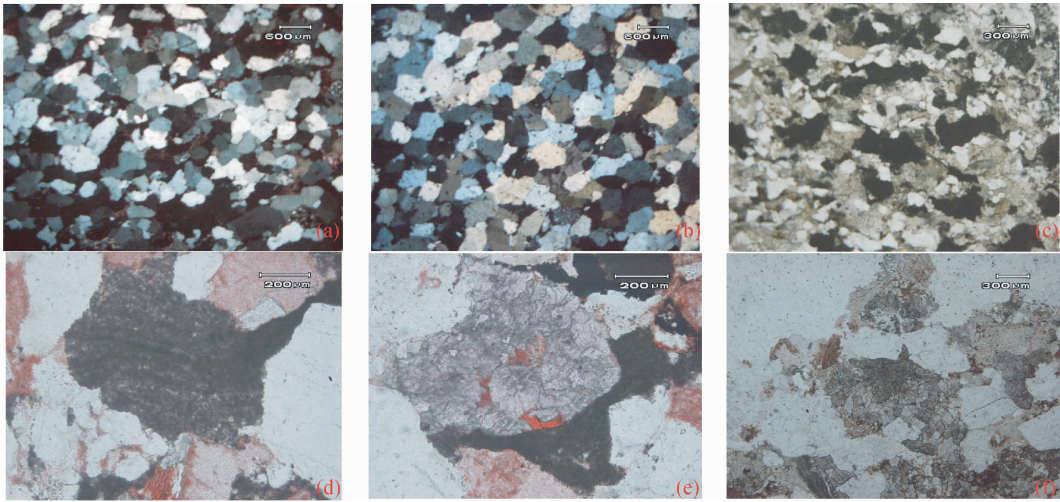


图5 山西组不同岩性特征

(a)-霍1井,2414.8m,山2-2,粗-中粒石英砂岩,分选磨圆好,2×(+);(b)-榆53井,2608.74m,山2-3,中粒岩屑石英砂岩,成分与结构成熟度均高,2×(+);(c)-绥2井,2263.15m,山2-1,中-细粒岩屑砂岩,富菱铁矿,4×(-);(d)-神15井,1898.19m,山2-2,菱铁矿砂岩层状构造,10×(-);(e)-神15井,1898.19m,山2-2,细晶白云岩岩屑,10×(-);(f)-统5井,3007.92m,山2-2,粗粒岩屑砂岩,粉晶白云岩岩屑,4×(-)

Fig.5 Different lithology characteristic of Shanxi Formation

推测为海相沉积的产物。其原因可归结于:由于该时期古地形坡度平缓,微弱海水动荡即可造成区域范围内的海岸线迁移。随着潮汐作用的淘洗,易形成横向连片性较好的成分成熟度和结构成熟度均高的石英砂岩;另一方面,在山2段的岩屑石英砂岩中含有不同程度的菱铁矿砂屑(图5c, d)。经电子探针分析结果表明菱铁矿中富镁,而镁的来源多与海水相关。而刘英俊等(1984)曾指出,海水中镁的含量约为0.13%,而淡水中镁的含量很低,一般含量小于 $1 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$,平均为 4×10^{-6} ;此外,对于在塔巴庙地区大6井山2段底部发现的铝土矿质泥岩,亦可归属于海相成因。由于沉积型铝土岩(矿)主要为海洋成因,其次才是湖泊成因。而我国许多著名的铝土矿则多产于石炭-二叠纪的海洋环境。

2.4 成岩作用

山2段碳酸盐胶结物主要集中在盆地东部,并以方解石为主,一般伴随主要胶结物高岭石作为次要胶结物出现。而在以榆林所在地区则出现了白云石高值区,且与主要胶结物高岭石归并为白云石高岭石成岩相区(图6)。该类白云石胶结物集中分布在三角洲平原与前缘的过渡带,具有显著的沉积相带专属性。因此,碳酸盐胶结物的物质来源很可能与海相沉积环境存在密切关系,相对碱性的成岩介质为碳酸盐胶结物的沉淀创造了良好条件。同时,海相地层可提供部分碳酸盐胶结物的物质来源,尤其是白云石胶结物的物质来源。因为海水是Mg离子最主要的来源,海相碳酸盐矿物新生变形丢失的Mg会进入到成岩流体中(黄思静等,2007,2008,2009,2010)。

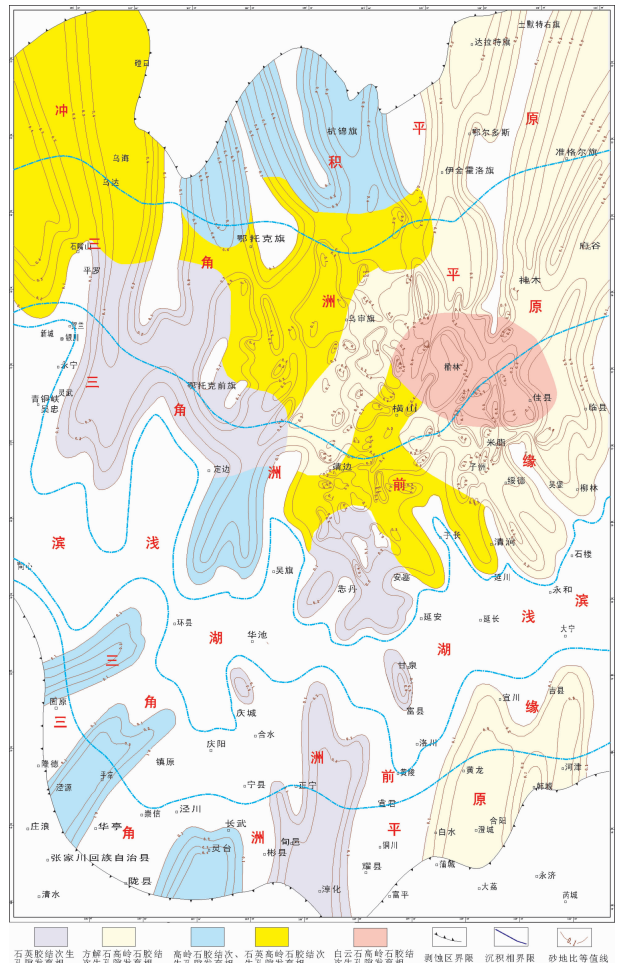


图6 鄂尔多斯盆地上古生界山2段成岩相图
Fig.6 The diagenetic phase diagram of Upper Paleozoic of Ordos Basin, Shan2

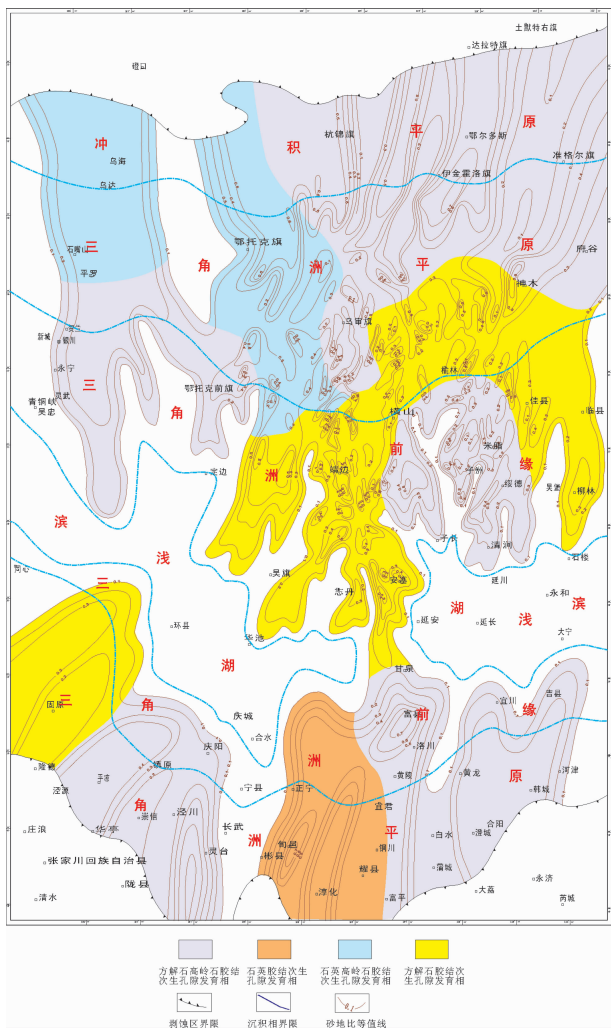


图7 鄂尔多斯盆地上古生界山1段成岩相图

Fig. 7 The diagenetic phase diagram of Upper Paleozoic of Ordos Basin, Shanli

然而,山1段方解石胶结物分布较广(胡宗全,2003),并主要作为次要胶结物与高岭石共生产出形成方解石高岭石胶结相,其次则作为主要胶结物直接产出形成方解石胶结相(图7)。方解石胶结相主要分布于盆地中东部的三角洲前缘及其与三角洲平原交接处,以及盆地西南部的环县-固原三角洲沉积区。山1段方解石胶结物的物质来源不同于太原组与山2段,更多表现为晚成岩阶段的产物,这与成岩流体由碱性向酸性转变存在直接关系。由于煤系地层酸性水因大量铝硅酸盐溶解消耗了大量的 H^+ ,从而造成成岩流体中pH值的缓冲,以及Ca、K、Na离子的富集和方解石的沉淀。因此,海源流体已经不能作为解释山1段方解石胶结物的物质来源。

综上所述,山2段成岩演化与太原组类似,具有明显的继承性。盆地东部早期成岩阶段明显受到了更多海源流体的影响,以碳酸盐胶结为主;而山1段成岩阶段则更多受到

了煤系地层酸性水的影响。与此同时,在盆地东部众多钻井中山2段均有粉晶白云岩、泥晶白云岩岩屑出现(图5e, f),而该类岩屑的形成可归结于海水提供较多的Mg离子,促使白云石矿物的形成。

3 山西组沉积环境判别的地化指标

地球化学标志是反映沉积环境最重要的指标(Paikaray and Banerjee, 2008; Amorosi *et al.*, 2009; 张金亮和张鑫, 2007; 刘建国等, 2007)。为了进一步深入论证鄂尔多斯盆地晚古生代(主要针对山西期)海陆过渡环境,对盆内东部、南部及西北部13口钻井岩芯、3个野外剖面中的泥岩样品进行了矿物学和地化分析测试(表1)。分别建立了盆内东西向与南北向的地球化学基干剖面,并对不同地区不同层位的测试结果进行了对比分析。

3.1 硼元素法

根据硼元素和黏土矿物成分所计算出的古盐度,是判断沉积环境最直观的指标。Walker and Price(1963)率先将古盐度从定性分析转为定量计算;而后,Adams *et al.*(1965)和 Couch(1971)相继通过经验公式将古盐度的定量计算精度进一步提高。众多研究成果表明(郑荣才和柳梅青,1999; 文华国等,2008),在古盐度计算公式中,由于科奇(Couch)公式不仅排除了非黏土矿物的影响,而且考虑了多种黏土矿物的存在及其吸附能力的差别,还具有较广的古盐度适用范围。因此,选取该公式来测定研究区的古盐度。其表达式为:

$$S_p = 10^{(\lg B^* - 0.11)/1.28}$$

式中 S_p 为古盐度(‰), B^* 为“校正硼”含量(单位:%, 计算古盐度时需换算成 $\times 10^{-6}$)。

然而,运用Couch公式必须对泥岩样品硼含量进行能适用于古盐度计算的校正。鉴于研究区泥岩样品中含有伊利石、蒙脱石、高岭石等黏土矿物,成分较复杂,故选择科奇Couch校正公式进行“校正硼”含量计算。其校正公式为:

$$B^* = B_{\text{样品}} / (4x_i + 2x_m + x_k)$$

式中 x_i 、 x_m 、 x_k 分别代表样品中实测伊利石、蒙脱石和高岭石的含量,系数代表各类黏土矿物对硼的吸收强度,以系数越大吸收越强为特征。

古盐度计算结果显示(表1),太原组-下石盒子组底部具有明显降低的变化趋势(图8)。其中,太原组变化范围为5.79‰~44.61‰,平均24.18‰;整个山2段,山23亚段为8.32‰~39.78‰,平均18.45‰。山22亚段为4.52‰~15.00‰,平均9.74‰。山21亚段为2.41‰~12.92‰,平均9.46‰。其古盐度整体变化趋势为减小,说明山2段存在一个古盐度旋回性变化;整个山1段,山13亚段为6.39‰~30.80‰,平均10.63‰。山12亚段为5.79‰~27.64‰,平均10.30‰。山11亚段为6.58‰~14.22‰,平均9.52‰。显示山1段同样存在一个古盐度旋回性变化;下石盒子组为

表1 黏土矿物分析数据、微量元素和“相当硼”含量及古盐度计算数据

Table 1 The data of clay minerals, the calculated data of trace element and “equivalent boron” content and paleosalinity

样品号	深度 (m)	层位	Sr ($\times 10^{-6}$)	Ba ($\times 10^{-6}$)	Sr/Ba	Ca ($\times 10^{-6}$)	Rb ($\times 10^{-6}$)	B ($\times 10^{-6}$)	黏土矿物含量(%)				校正黏土 矿物含量(%)			校正硼 ($\times 10^{-6}$)	古盐度值 Sp(‰)		
									I		L/S		K	Ch	I			S	K
L1011	3361.1	H7	186.08	652.23	0.29	34.62	133.95	39.47	30	36(20)	14	20	58.8	7.2	14	14.97	6.80		
L1010	3368.8	H7	285.24	794.29	0.36	40.68	115.85	39.47	30	33(20)	26	11	56.4	6.6	26	14.91	6.77		
L1008	3425.2	H8	237.57	521.15	0.46	44.97	121.43	43.81	22	30(20)	48	—	46	6	48	17.95	7.83		
L1009	3427.3	H8	171.27	486.51	0.35	44.08	131.51	51.13	25	14(10)	46	15	37.6	1.4	46	25.67	10.35		
Y2001	2376.0	H8	324.00	841.75	0.38	50.87	120.09	35.52	37	21(10)	27	15	55.9	2.1	27	13.94	6.43		
Y2002	2377.2	H8	240.05	749.44	0.32	34.72	144.77	63.45	42	20(10)	27	11	60	2	27	23.41	9.64		
Y2003	2378.0	H8	269.40	807.38	0.33	42.64	184.69	48.79	42	31(10)	19	8	69.9	3.1	19	16.01	7.16		
L1006	3429.2	山11	206.26	619.74	0.33	47.53	164.84	57.27	34	29(10)	23	14	60.1	2.9	23	21.27	8.94		
L1005	3430.8	山11	178.37	486.00	0.37	39.26	123.46	79.66	30	6(10)	64	—	35.4	0.6	64	38.52	14.22		
L1004	3432.7	山11	215.16	624.52	0.34	49.69	157.36	63.09	38	16(10)	32	13	52.4	1.6	32	25.77	10.39		
LT1001	2348.6	山11	299.25	877.54	0.34	38.33	213.05	56.74	50	25(10)	17	8	72.5	2.5	17	18.19	7.91		
LT1002	2350.1	山11	225.68	668.07	0.34	42.53	130.20	48.78	36	12(10)	51	—	46.8	1.2	51	20.27	8.61		
LT1003	2352.0	山11	288.95	1108.20	0.26	43.78	177.22	70.65	50	20(15)	21	9	67	3	21	23.95	9.81		
S23801	3976.6	山11	193.24	591.97	0.33	41.48	166.77	38.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
S23802	3978.7	山11	196.31	544.51	0.36	46.89	93.03	57.46	18	23(5)	42	17	39.9	1.2	42	28.21	11.15		
Y2004	2379.0	山11	202.16	529.38	0.38	43.35	116.24	48.34	41	17(10)	32	10	56.3	1.7	32	18.55	8.03		
Y2005	2379.9	山11	222.25	742.92	0.30	54.63	137.76	56.39	44	15(10)	35	6	57.5	1.5	35	21.04	8.87		
Y24001	2683.6	山11	247.08	619.40	0.40	59.76	239.03	127.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
成-9		山11	256.34	495.22	0.52	35.65	182.12	76.35	63	21(15)	12	4	80.9	3.2	12	22.34	9.29		
台-14		山11	138.85	486.12	0.29	38.60	165.07	70.31	37	25(15)	32	6	58.3	3.8	32	25.80	10.40		
台-15		山11	105.10	714.93	0.15	35.05	175.17	49.71	36	56(25)	6	3	78	14	6	14.37	6.58		
D15001	2769.2	山12	211.81	589.66	0.36	49.91	185.67	80.99	54	18(10)	21	7	70.2	1.8	21	26.52	10.62		
D15002	2771.2	山12	155.05	414.82	0.37	33.56	141.22	60.95	44	31(10)	14	12	71.9	3.1	14	19.80	8.45		
D8001	2639.0	山12	190.79	489.20	0.39	38.22	152.33	76.75	43	28(15)	19	10	66.8	4.2	19	26.05	10.48		
D8002	2645.8	山12	388.72	583.18	0.67	43.83	104.94	54.83	25	30(25)	36	8	47.5	7.5	36	22.75	9.42		
DB001	3753.3	山12	149.83	406.20	0.37	43.28	66.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
DB002	3757.7	山12	244.44	519.30	0.47	41.44	75.90	33.78	40	15(10)	30	15	53.5	1.5	30	13.68	6.33		
DB003	3771.9	山12	187.88	566.56	0.33	52.79	179.37	44.75	39	26(10)	35	—	62.4	2.6	35	15.44	6.96		
DB004	3774.4	山12	167.87	637.89	0.26	40.23	154.19	69.34	51	10(15)	22	17	59.5	1.5	22	26.37	10.57		
HS1001	774.1	山12	170.76	374.10	0.46	37.22	83.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
HS1002	775.6	山12	230.59	596.97	0.39	53.01	161.03	65.69	35	15(20)	39	11	47	3	39	28.19	11.14		
HS1003	776.9	山12	245.78	583.77	0.42	47.46	161.52	70.57	20	30(20)	40	10	44	6	40	30.95	11.99		
HS1004	778.3	山12	323.90	510.80	0.63	47.57	152.46	65.83	40	20(10)	40	—	58	2	40	23.85	9.78		
S23803	3992.8	山12	217.13	608.97	0.36	45.81	175.86	43.43	44	27(10)	20	9	68.3	2.7	20	14.54	6.64		
S23804	3996.5	山12	162.77	448.88	0.36	40.18	101.02	42.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Y24002	2688.0	山12	172.76	460.71	0.37	31.84	135.70	47.79	34	41(15)	13	12	68.9	6.2	13	15.89	7.12		
Y24003	2690.5	山12	175.78	409.36	0.43	42.31	94.22	34.99	47	20(10)	23	10	65	2	23	12.19	5.79		
Y24004	2691.3	山12	190.32	600.62	0.32	40.37	180.79	67.12	48	27(10)	12	14	72.3	2.7	12	21.89	9.14		
ZT001	4380.1	山12	192.39	760.75	0.25	45.36	203.50	92.23	50	27(10)	19	4	74.3	2.7	19	28.68	11.29		
ZT002	4435.8	山12	143.16	530.42	0.27	36.88	112.48	195.8	33	10(10)	47	10	42	1	47	90.21	27.64		
白-10		山12	277.43	310.15	0.89	45.99	190.17	75.12	25	28(20)	39	8	47.4	5.6	39	31.33	12.10		
成-12		山12	150.46	531.41	0.28	35.21	177.00	78.29	53	26(15)	17	4	75.1	3.9	17	24.07	9.85		
D15003	2780.1	山13	159.32	860.08	0.19	36.87	110.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
D15004	2782.4	山13	194.86	1478.03	0.13	42.28	202.79	92.07	76	16(10)	3	5	90.4	1.6	3	25.03	10.15		
D15005	2789.5	山13	129.97	386.66	0.34	68.30	96.45	178.2	24	—	76	—	24	—	76	103.61	30.80		
HT1001	3699.1	山13	211.05	917.48	0.23	51.85	252.30	120.9	62	28(10)	7	3	87.2	2.8	7	33.45	12.74		
HT1002	3700.5	山13	148.13	593.43	0.25	36.05	191.55	82.6	56	26(15)	12	6	78.1	3.9	12	24.86	10.10		
HT1003	3701.3	山13	158.26	525.98	0.30	33.12	159.08	58.41	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
L1007	3463.8	山13	166.92	505.52	0.33	40.45	143.66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
L1002	3464.7	山13	207.32	799.34	0.26	41.25	217.07	60.13	51	30(10)	12	7	78	3	12	18.22	7.92		
LT1004	2380.1	山13	231.98	681.57	0.34	37.88	150.43	67.28	42	31(15)	13	14	68.4	4.7	13	22.75	9.42		
LT1005	2381.1	山13	253.74	641.77	0.40	32.33	134.25	42.29	30	42(20)	15	13	63.6	8.4	15	14.78	6.73		
LT1006	2382.2	山13	220.20	756.55	0.29	32.97	155.38	65.3	46	18(15)	17	19	61.3	2.7	17	24.40	9.95		
LT1007	2383.6	山13	230.56	678.00	0.34	33.87	153.18	61.58	39	33(15)	13	15	67.1	5	13	21.15	8.90		
NT001	3657.1	山13	193.91	622.99	0.31	44.03	174.67	71.17	36	27(15)	25	12	59	4.1	25	26.47	10.61		
NT002	3658.2	山13	167.51	556.16	0.30	45.41	185.45	55.9	33	22(15)	25	20	51.7	3.3	25	23.45	9.65		
NT003	3660.0	山13	183.57	508.80	0.36	43.73	140.71	71.57	25	24(15)	27	23	45.4	3.6	27	33.16	12.65		
S23805	3997.8	山13	199.44	605.30	0.33	40.93	178.90	40.79	39	34(15)	13	14	67.9	5.1	13	13.84	6.39		
S23806	3998.3	山13	197.35	593.45	0.33	48.54	132.39	47.23	31	17(10)	40	13	46.3	1.7	40	20.66	8.74		
Y2006	2417.0	山13	378.22	1070.33	0.35	59.20	249.93	109.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Y2007	2418.5	山13	234.57	935.04	0.25	39.91	200.17	74.18	55	26(10)	15	4	78.4	2.6	15	22.22	9.25		
Y5001	2201.8	山13	125.02	407.87	0.31	45.11	218.47	59.21	59	19(15)	18	5	75.2	2.9	18	18.26	7.94		
Y5002	2202.2	山13	138.40	316.97	0.44	41.86	165.92	67.78	37	19(20)	22	22	52.2	3.8	22	28.99	11.39		

续表 1

Continued Table 1

样品号	深度 (m)	层位	Sr ($\times 10^{-6}$)	Ba ($\times 10^{-6}$)	Sr/Ba	Ga ($\times 10^{-6}$)	Rb ($\times 10^{-6}$)	B ($\times 10^{-6}$)	黏土矿物含量(%)				校正黏土 矿物含量(%)			校正硼 ($\times 10^{-6}$)	古盐度值 Sp(‰)
									I	I/S	K	Ch	I	S	K		
白-9		山 13	107.82	353.99	0.30	43.14	171.08	67.94	22	37(25)	41	—	49.8	9.3	41	26.28	10.55
台-13		山 13	114.93	468.37	0.25	30.95	119.34	55	31	41(20)	24	4	63.8	8.2	24	18.61	8.05
D15006	2801.1	山 21	244.13	819.96	0.30	43.09	152.60	62.27	66	8(5)	22	4	73.6	0.4	22	19.63	8.40
HS1012	794.7	山 21	180.12	507.59	0.35	42.27	140.55	54.83	46	13(10)	34	7	57.7	1.3	34	20.50	8.69
HS1005	797.9	山 21	240.76	537.07	0.45	43.08	195.79	79.59	52	23(15)	19	6	71.6	3.5	19	25.50	10.30
HS1006	805.4	山 21	153.11	505.07	0.30	44.44	196.44	73.58	50	17(10)	27	6	65.3	1.7	27	25.23	10.22
HT1004	3705.6	山 21	173.27	554.86	0.31	35.47	163.94	38.74	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HT1005	3706.7	山 21	250.81	772.42	0.32	45.91	219.59	93.49	55	25(15)	12	7	76.3	3.8	12	28.81	11.33
HT1006	3708.3	山 21	238.18	835.30	0.29	51.95	223.60	59.68	55	34(10)	6	4	85.6	3.4	6	16.80	7.44
L1001	3466.6	山 21	247.27	1114.32	0.22	51.34	337.81	101.7	65	30(10)	2	3	92	3	2	27.04	10.78
L1003	3467.2	山 21	220.88	1009.26	0.22	46.03	266.62	106.1	60	35(10)	2	3	91.5	3.5	2	28.29	11.17
S23807	4014.1	山 21	284.09	817.05	0.35	39.19	79.40	11.49	11	70(35)	15	4	56.5	25	15	3.96	2.41
S23808	4016.8	山 21	244.97	1021.68	0.24	44.10	151.87	43.74	20	30(20)	38	12	44	6	38	19.35	8.31
Y5003	2203.9	山 21	195.25	234.83	0.83	48.86	86.65	45.73	15	20(15)	47	18	32	3	47	25.27	10.23
Y5004	2204.4	山 21	122.36	425.24	0.29	44.82	201.26	90.42	49	21(15)	24	6	66.9	3.2	24	30.37	11.81
Y5005	2205.8	山 21	135.47	367.22	0.37	39.81	173.32	58.66	49	15(20)	26	11	61	3	26	21.25	8.94
白-12		山 21	56.37	211.96	0.27	35.31	91.59	98.79	39	27(15)	34	—	62	4.1	34	34.08	12.92
白-7		山 21	124.16	253.17	0.49	39.77	126.16	76.49	27	23(15)	50	—	46.6	3.5	50	31.46	12.14
成-7		山 21	128.34	403.81	0.32	32.67	139.63	75.19	46	36(20)	15	3	74.8	7.2	15	22.88	9.47
台-12		山 21	135.92	676.60	0.20	15.81	88.41	33.99	40	49(25)	11	—	76.8	12	11	13.55	6.29
D8003	2669.0	山 22	210.03	488.42	0.43	36.27	142.53	46.84	32	31(20)	30	7	56.8	6.2	30	17.37	7.63
D8004	2671.3	山 22	85.81	226.93	0.38	59.49	15.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DB005	3787.2	山 22	166.21	614.24	0.27	39.23	215.78	56.06	48	33(10)	11	8	77.7	3.3	11	17.07	7.53
DB006	3791.4	山 22	136.48	660.44	0.21	31.74	138.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
g1001	942.8	山 22	223.27	563.70	0.40	36.45	129.39	73.09	47	13(15)	33	6	58.1	2	33	27.16	10.82
g1002	957.2	山 22	223.69	536.22	0.42	36.60	123.76	77.74	44	12(15)	38	5	54.2	1.8	38	30.09	11.72
HS1007	806.6	山 22	241.24	591.30	0.41	48.00	205.20	99.1	56	16(10)	23	5	70.4	1.6	23	32.20	12.36
HS1008	810.7	山 22	184.04	385.91	0.48	30.26	91.47	23.41	45	12(10)	38	6	55.8	1.2	38	8.88	4.52
HS1009	815.6	山 22	225.76	528.47	0.43	37.23	125.77	34.68	49	13(10)	32	6	60.7	1.3	32	12.50	5.90
LT1008	2429.5	山 22	332.93	1286.41	0.26	50.59	201.76	82.55	73	14(10)	8	5	85.6	1.4	8	23.37	9.62
LT1009	2431.8	山 22	262.84	691.75	0.38	40.50	19.12	39.97	—	—	100	—	—	—	100	39.97	14.64
Y24005	2737.4	山 22	275.84	616.07	0.45	37.79	129.85	47.18	39	49(20)	10	2	78.2	9.8	10	13.78	6.37
Y24006	2739.1	山 22	156.97	477.69	0.33	52.38	101.49	69.18	21	7(10)	72	—	27.3	0.7	72	37.89	14.04
Y24007	2744.9	山 22	102.19	189.29	0.54	63.56	13.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y61001	2534.4	山 22	301.13	286.94	1.05	69.76	16.38	27.95	32	5(10)	53	10	36.5	0.5	53	13.98	6.44
Y61002	2538.9	山 22	320.00	531.56	0.60	52.60	110.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
台-11		山 22	62.85	217.49	0.29	40.98	80.22	60.6	15	7(15)	61	17	21	1.1	61	41.25	15.00
D15007	2823.2	山 23	241.28	433.35	0.56	77.28	180.84	121.7	44	7(10)	38	11	50.3	0.7	38	50.57	17.59
D15008	2831.0	山 23	151.00	417.12	0.36	66.27	82.37	162.1	23	—	77	—	23	—	77	95.92	29.00
D15009	2847.6	山 23	292.82	522.33	0.56	45.34	120.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
g1003	961.4	山 23	209.72	686.29	0.31	41.77	140.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
g1004	967.4	山 23	180.88	319.76	0.57	23.82	51.31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HS1010	827.8	山 23	178.68	493.53	0.36	44.09	80.78	153.7	19	—	81	—	19	—	81	97.92	29.47
HS1011	829.0	山 23	76.96	110.86	0.69	8.72	24.32	23.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y20010	2455.1	山 23	269.04	782.93	0.34	29.88	134.97	63.21	62	16(10)	17	5	76.4	1.6	17	19.40	8.32
Y2008	2451.9	山 23	170.10	590.77	0.29	49.45	100.68	77.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y2009	2453.3	山 23	237.97	650.02	0.37	30.72	133.33	69.93	55	17(10)	22	6	70.3	1.7	22	22.81	9.44
Y61003	2544.0	山 23	241.06	400.41	0.60	45.97	87.03	78.09	45	9(10)	40	6	53.1	0.9	40	33.25	12.67
Y61004	2553.6	山 23	254.37	451.58	0.56	34.86	107.25	79.82	39	11(10)	42	8	48.9	1.1	42	33.65	12.80
ZT004	4439.4	山 23	73.64	137.97	0.53	53.68	65.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZT004	4442.0	山 23	89.30	112.33	0.79	75.11	39.61	143.8	—	—	100	—	—	—	100	143.75	39.78
白-3		山 23	162.44	416.36	0.39	42.33	172.42	101.8	54	9(10)	35	5	62.1	0.9	35	35.70	13.40
白-5		山 23	56.37	211.96	0.27	35.31	91.59	100.1	21	17(15)	55	6	35.5	2.6	55	49.60	17.32
台-9		山 23	135.70	383.22	0.35	34.70	95.80	90.2	37	19(15)	40	4	53.2	2.9	40	34.92	13.17
Y24008	2769.4	太 1	369.51	851.80	0.43	47.36	196.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y24009	2774.4	太 1	386.18	736.55	0.52	33.22	82.54	30.36	43	9(5)	42	6	51.6	0.5	42	12.19	5.79
ZT005	4443.9	太 1	132.37	137.83	0.96	78.41	46.32	166.4	—	—	100	—	—	—	100	166.42	44.60
ZT006	4446.7	太 1	126.31	185.60	0.68	57.22	82.96	196	6	—	94	—	6	—	94	166.42	44.54
成-4		太 1	230.75	341.09	0.68	38.42	84.29	87.84	43	4(10)	45	8	46.6	0.4	45	37.83	14.02
台-7		太 1	136.12	333.49	0.41	37.01	109.99	76.22	40	12(15)	43	5	50.2	1.8	43	30.81	11.94

注:微量元素测试样品 123 件, B 元素测试样品 102 件, 在中科院海洋海洋地质与环境重点实验室完成, 执行标准: 电感耦合等离子质谱(ICP-MS, 美国 PE 公司生产, 型号 DR II), 方法通则为 DZ/T0223-2001; 黏土矿物含量分析样品 102 件, 在成都理工大学材料与化学化工学院完成, 测试仪器为 X 射线衍射仪(设备型号 DMAX-3C), 检测依据为 SY/T-6210-1996

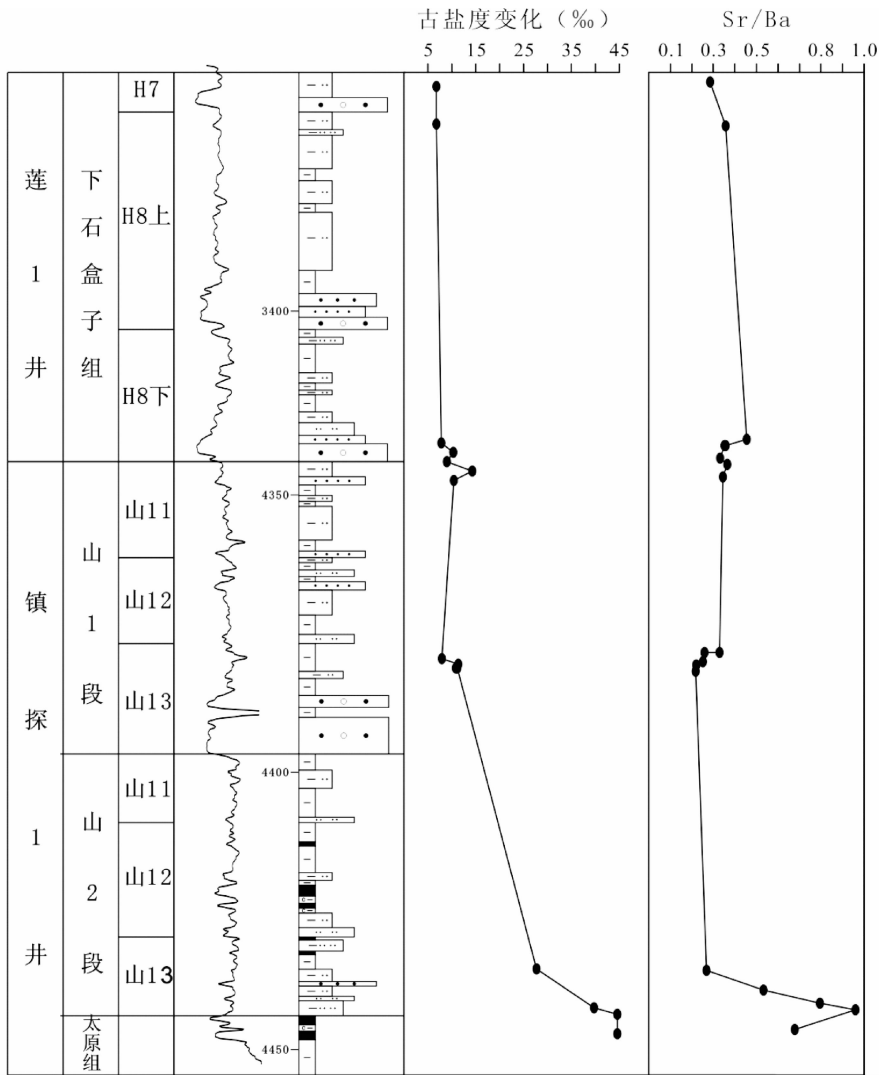


图8 研究区地球化学分析综合柱状图

Fig.8 The histogram of comprehensive geochemical analysis in the study area

6.43‰~10.36‰,平均7.85‰。其古盐度变化范围和平均值都不及前一时期,并与下伏地层存在一个古盐度突变面。

根据古盐度大于35‰为超咸水,25‰~35‰为咸水,10‰~25‰为半咸水,小于10‰为微咸水-淡水的标准(吕炳全和孙国志,1997;陶晓风和吴德超,2007),太原组-山西组水体以混合水为主,而下石盒子组水体则以微咸水-淡水为主。以现代海水正常盐度35‰作为参照,太原组与山23亚段都存在海相证据的不争事实(最大值分别为44.61‰与39.78‰)。而值得一提的是,前人曾指出华北晚古生代陆表海介质为半咸水-咸水条件,并非完全归结于正常浅海沉积,具有淡化海水的性质(尚冠雄,1995;张鹏飞等,2001)。因此,山13亚段与山12亚段同样存在淡化海水影响的可能性(最大值分别为30.80‰与27.64‰)。上述特征说明,在海退背景下的山西组确实存在着间歇性的海侵,并发生与之相伴的海湖沟通事件。该时期明显存在2个较大级次的海

侵-海退旋回,且山1期的海侵规模较山2期所有减小。而从下石盒子期开始,海水整体退出鄂尔多斯盆地,进入了陆相湖盆的沉积演化阶段。

根据山西组不同地区不同层位古盐度的对比分析。整个山西组由南向北、自西向东显示古盐度总体减小的变化趋势(图9、图10),这种差异性山2段相对山1段表现得更为明显,且于山1段上部地层基本消失。同时,该类现象在山2段与山1段中均表现为自下而上差异性趋于不明显的特点,尤其是在各段的下部地层差异性较强,而上部地层则趋于均一。

3.2 Sr/Ba 比值

Sr/Ba 比值可作为古盐度判别的灵敏标志,且与古盐度呈明显的正相关关系(郑荣才和柳梅青,1999)。我国海底样品的研究表明,泥岩中的 Sr/Ba 为0.8~1;而鄂尔多斯

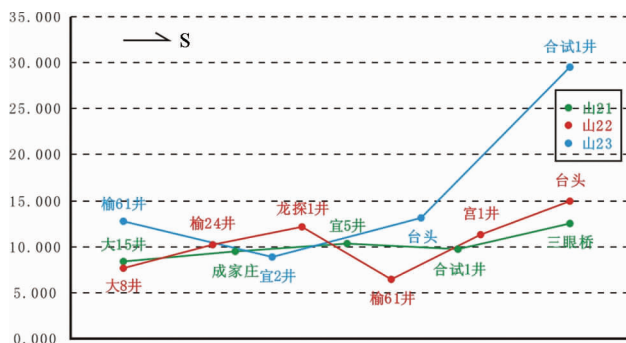


图9 盆地东部地区山西组各小层古盐度变化趋势(由北向南)

Fig. 9 The small layer of Shanxi Formation ancient salinity trend in the eastern Ordos Basin (from north to south)

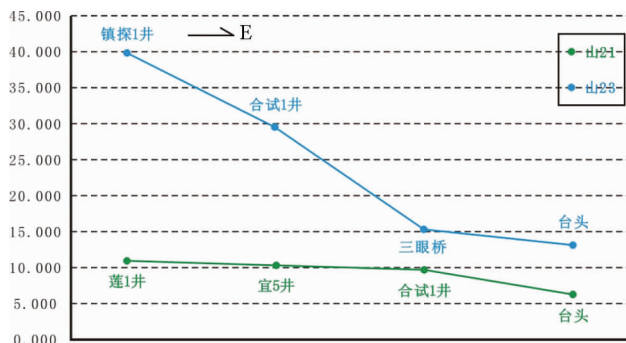
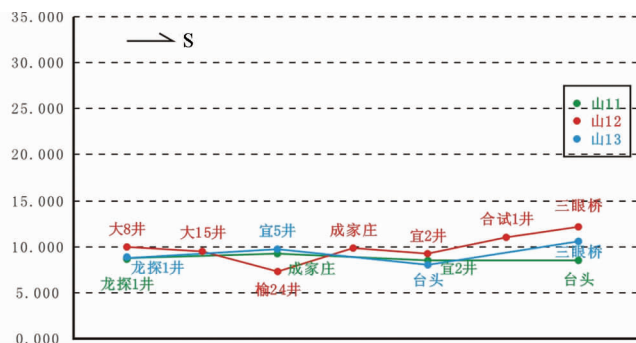


图10 盆地南部地区山西组各小层古盐度变化趋势(自西向东)

Fig. 10 The small layer of Shanxi Formation ancient salinity trend in the southern Ordos Basin (from west to east)

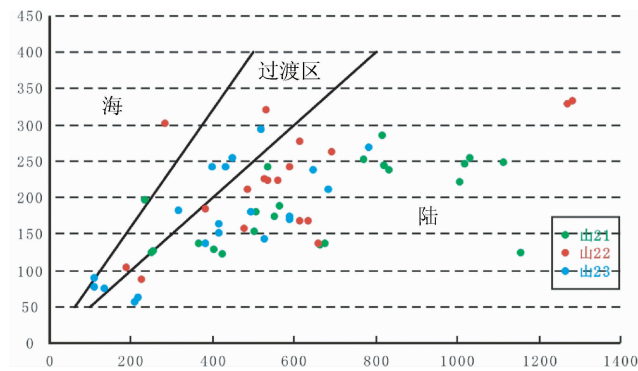
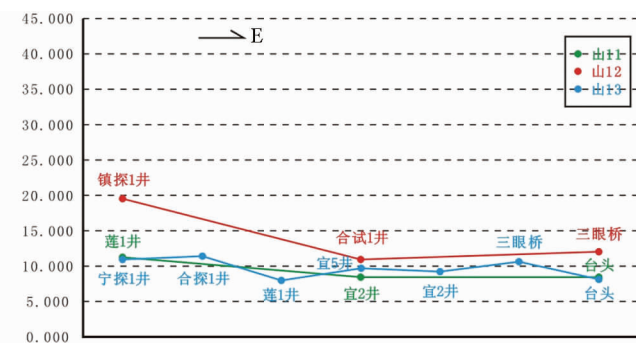
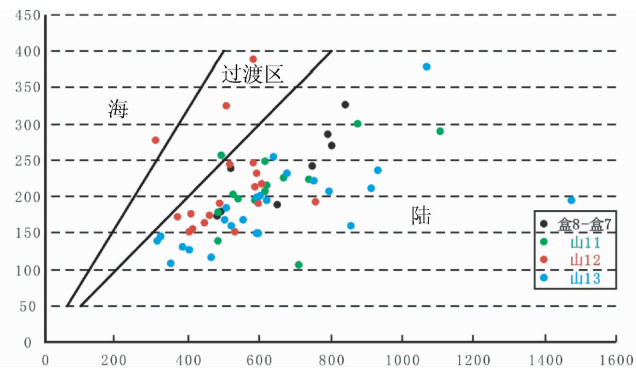


图11 研究区锶、钡含量关系图

Fig. 11 The relationship of strontium, barium content in the study area



中生代陆相地层 Sr/Ba 为 0.54 左右。利用 Sr/Ba 划分沉积环境的常用标准(郑才和柳梅青,1999;文华国等,2008),并结合本次实际。厘定 Sr/Ba 大于 0.8 为海水,0.5~0.8 为混合水,小于 0.5 为淡水。同时,Sr/Ba 含量关系图显示(图 11),山西组均有数据投点位于海相与过渡相区,而下石盒子组底部的则完全分布于陆相区。垂向演化序列显示,山 2 段→山 1 段→下石盒子组底部,整体由海相逐渐向过渡相,最终演化为陆相的变化趋势(图 8)。上述特征同样说明,山西盆地有受海水影响的明显痕迹,而下石盒子期开始海水

已经完全退出,盆地进入陆相湖盆的演化阶段。

然而,随着沉积环境变迁与古地理演化的控制和影响,山西组内部各小层投点数据的变化趋势又略有不同。就山 2 段投点数据而言,从山 23 亚段开始到山 22 亚段逐渐向海相区和过渡区增加,且在山 22 亚段整体最多,而直至山 21 亚段又开始减小;同样,在山 1 段各小层投点数据亦显示出上述变化规律。该特征的出现与次一级海侵-海退沉积旋回的变化有关,因为无论是山 2 期还是山 1 期最大洪泛面均出现在各时期的中晚期。

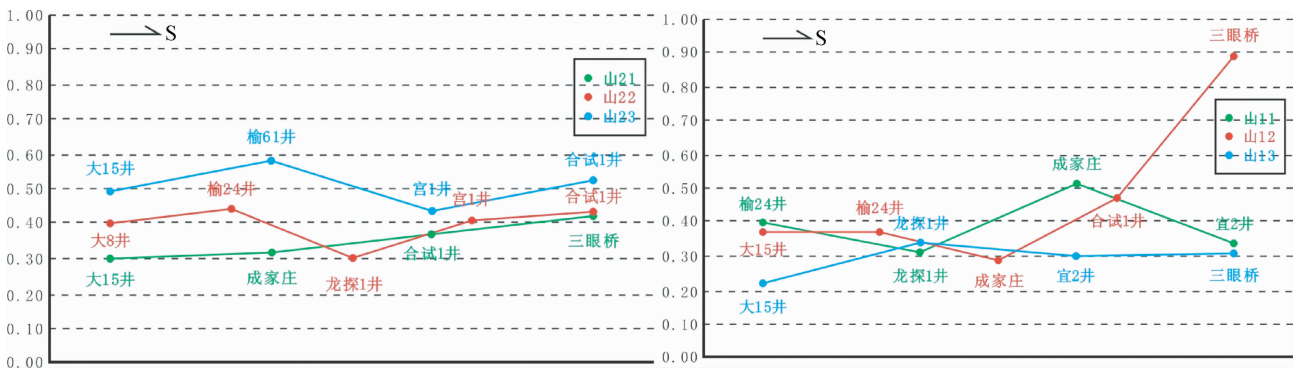


图 12 盆地东部地区山西组各小层 Sr/Ba 变化趋势(由北向南)

Fig. 12 The small layer of Shanxi formation Sr/Ba trend in the eastern Ordos Basin (from north to south)

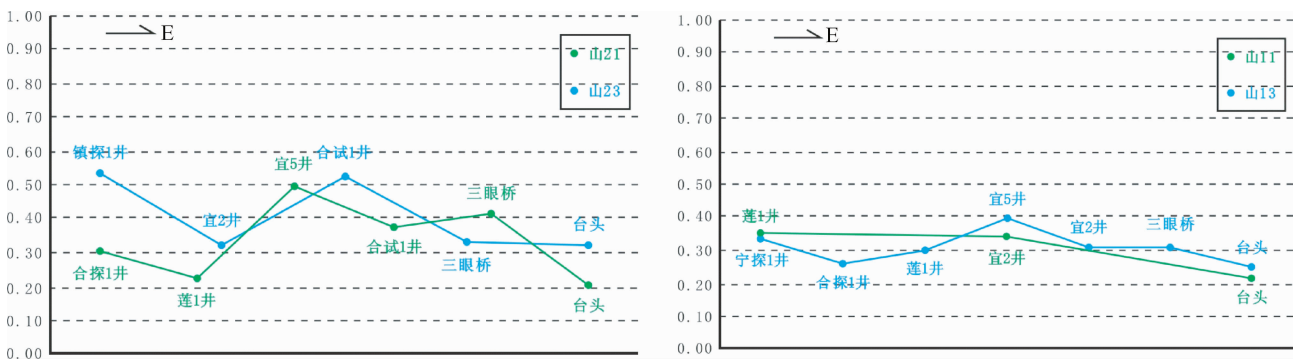


图 13 盆地南部地区山西组各小层 Sr/Ba 变化趋势(自西向东)

Fig. 13 The small layer of Shanxi formation Sr/Ba trend in the southern Ordos Basin (from west to east)

根据山西组不同地区不同层位 Sr/Ba 的对比分析。整个山西组由南向北、自西向东显示 Sr/Ba 总体减小的变化趋势(图 12、图 13),这种差异性山 2 段相对山 1 段表现得更为明显,且于山 1 段上部地层基本消失。同时,该类现象在山 2 段与山 1 段中均表现为自下而上差异性趋于不明显的点,尤其是在各段的下部地层差异性较强,而上部地层则趋于均一。总体而言,Sr/Ba 的变化趋势与古盐度存在一定的相似性。

3.3 硼、镓、铷 3 元素含量关系

随着沉积环境的不同,黏土矿物结晶格架中的硼(B)、镓(Ga)、铷(Rb) 3 个元素的相对含量发生有规律的变化(严钦尚等,1979)。将泥岩样品中该类元素分析结果进行投点(图 14),山西组各层段均有投点数据点明显位于海相沉积区,再次说明该时期有受海水影响的鲜明痕迹;而下石盒子组底部则有部分投点数据位于过渡相区,其原因可能是由于气候干热导致浅湖相区因蒸发量较大而局部咸化。上述表征随着沉积环境的变迁,山 2 段→山 1 段→下石盒子组底部,整体显示由海相逐渐向过渡相,最终演化为陆相的变化趋势。其中,就山 2 段各小层投点数据而言,山 23→山 22→山 21 海相区投点数据逐渐减少,而过渡相和陆相区投点数

据逐渐增加,具有明显的海退特征;就山 1 段而言,海相区域投点数据整体上较山 2 段少,说明海退规模进一步扩大。而各小层投点数据仍然显示山 13→山 12→山 11 海相区投点数据逐渐减少,而过渡相和陆相投点数据逐渐增加的特征。

4 地质启示

4.1 海陆转换关键时期的厘定

根据地层与古生物、沉积构造、岩性特征、成岩作用等地质依据,有力地佐证了盆地山西期沉积环境是在继承太原期陆表海沉积背景的基础上发展起来的,特别是山 2 期有更为明显的海相沉积特征。结合硼元素法所计算的古盐度、Sr/Ba 比值以及硼、镓、铷 3 元素含量关系等不同地球化学测试分析结果。首先,山西期均有处于海相环境的地球化学表征,显示该时期盆地确实存在海水影响的痕迹,且山 2 期受海水影响的规模和程度较山 1 期更为明显。从下石盒子期开始,古盐度与前期呈明显的突变关系,总体处于微咸水-淡水沉积环境,并区别于山西期的混合水沉积环境。整个太原期到下石盒子期的时间演化序列,自下而上古盐度和 Sr/Ba 比值具有明显降低的变化趋势,表明受海水影响的规模与范围愈来愈弱,直到最终消失;其次,就山西期内部的地球化学

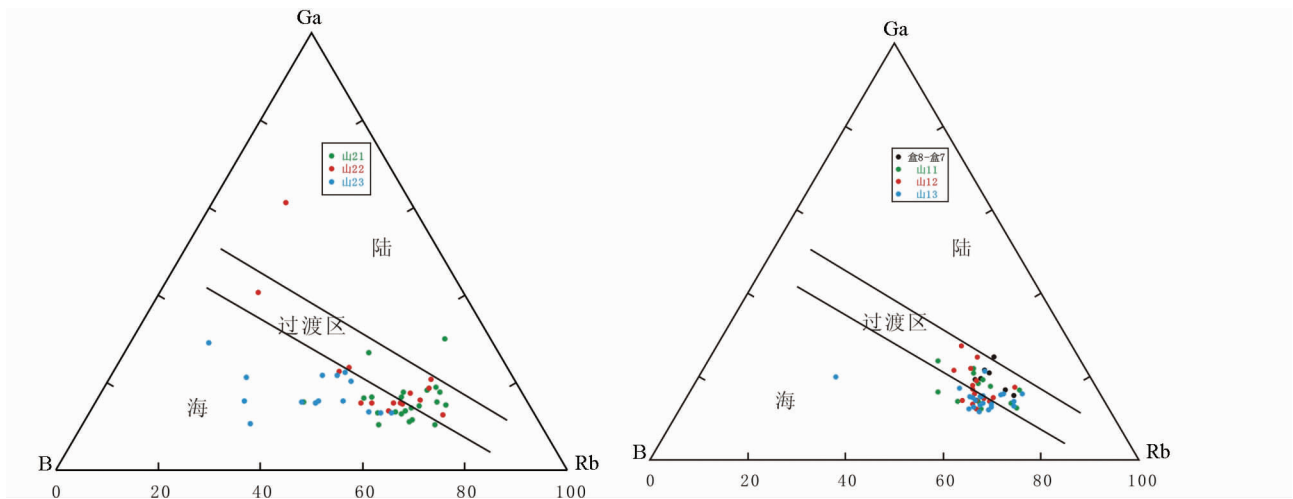


图 14 硼、镓、铷含量关系图

Fig. 14 Triangle of boron, gallium, rubidium content

指标来看,因其变化范围较大而表现为不同时期海水进退规模和程度不一的间歇性海侵特征。该时期存在两个较大级别的海侵-海退旋回,分别对应于山 2 期和山 1 期。其中,山 2 期古盐度整体变化为逐次减小的趋势,其最大海泛期出现在山 2 晚期,表明该时期处于陆表海背景下的缓慢海侵-快速海退演化阶段。然而,山 1 期古盐度整体变化为在山 1 中期增高后又逐次降低的趋势,其最大海泛期出现在山 1 中期,表明该时期处于海陆过渡背景下缓慢海侵-缓慢海退的均衡演化过程。综上所述,认为山西期为陆表海背景下的海陆过渡沉积演化阶段,发育大面积分布的海陆过渡三角洲体系,到下石盒子期才完全进入陆相湖盆的沉积演化阶段。

此外,根据山西组不同地区不同层位古盐度和 Sr/Ba 比值的对比分析。一方面,古盐度和 Sr/Ba 比值由南向北显示总体减小的变化趋势。这是由于山西期北隆南倾的区域构造格局下发育由北向南大面积展布的河流-三角洲相沉积,导致陆相淡水的注入方向是由北向南并控制了盆地中北部广大区域。同时,该时期华北海海侵方向是由南华北呈东南向侵入鄂尔多斯盆地,且影响范围也相对有限并主要集中于盆地东南部。因此,该类差异性的出现,是由来自于不同方向且具有不同性质的两种水体发生混合而造成的,亦可说明山西期由南向北受海水影响的规模与范围愈来愈弱;另一方面,古盐度和 Sr/Ba 比值自西向东同样显示总体降低的变化趋势。其原因在于华北陆表海较西缘祁连海的海侵规模和波及范围广,纵然较小级别的海平面变化也能致使海水迅速向西蔓延,从而侵入到鄂尔多斯盆地西南部并融汇于祁连海当中。而前人研究也曾指出(彭格林等,1999),盆地西缘祁连海的海侵时间除相对东部华北海较早之外,其次一级海水进退的频率也远高于盆地东部。因此,整个山西期灌入了华北陆表海水的祁连海对盆地西南部的影响程度始终较仅受华北海影响的盆地东南部强。总之,该类变化趋势无论是

东西差异还是南北变化,都表现为山 2 期相对山 1 期显得更为明显,并随着后期海退规模的持续扩大,于山 1 晚期基本消失。同时,该类现象在山 2 期与山 1 期中均表现为随着时间推移差异性趋于不明显的特点,尤其是在各时期的早中期阶段差异性较强,而晚期则趋于均一。

4.2 盆地沉积演化阶段的划分

根据海陆转换关键时期的厘定,并结合华北地台的区域构造背景,以及晚古生代鄂尔多斯盆地的构造演化过程,将该时期盆地沉积演化划分为 3 大阶段(图 15):

4.2.1 晚石炭世-早二叠世早期(本溪期-太原期)的受限陆表海盆地发育阶段

晚石炭世本溪期,盆地西缘贺兰坳拉槽发生横向拉张复活,形成狭窄的裂陷盆地,祁连海沿该裂陷带入侵盆地。与此同时,盆地东部随着华北地台的持续沉降,华北海呈北东方向侵入。两大海域受横亘南北中央古隆起分隔,并随着后期规模的扩大逐步沿中央古隆起超覆,在盆地北部融会贯通;早二叠世早期太原期,由于贺兰坳拉槽的停止活动及填平补齐,盆地西缘转化为裂后拗陷,成为相对陆表海沉积中的拗陷带。随着盆地南北应力场的转变,盆地东部的华北海则改由南东方向侵入。东西两缘海水侵入范围继续扩大,并超覆中央古隆起而形成统一陆表海。该时期盆地东西差异明显,呈现陆表海-障壁海岸-浅水三角洲复合沉积体系在时空上共存的古地理格局。

4.2.2 早二叠世晚期(山西期)的残余陆表海-近海湖盆发育阶段

早二叠世山西期,华北地块整体抬升。海水从盆地东西两侧开始逐渐退出,对其控制和影响程度也趋于减弱。山西早期,海相沉积特征仍然明显。由于潮汐作用的影响,发育残余陆表海背景下的河控-潮控浅水辫状河三角洲;山西晚

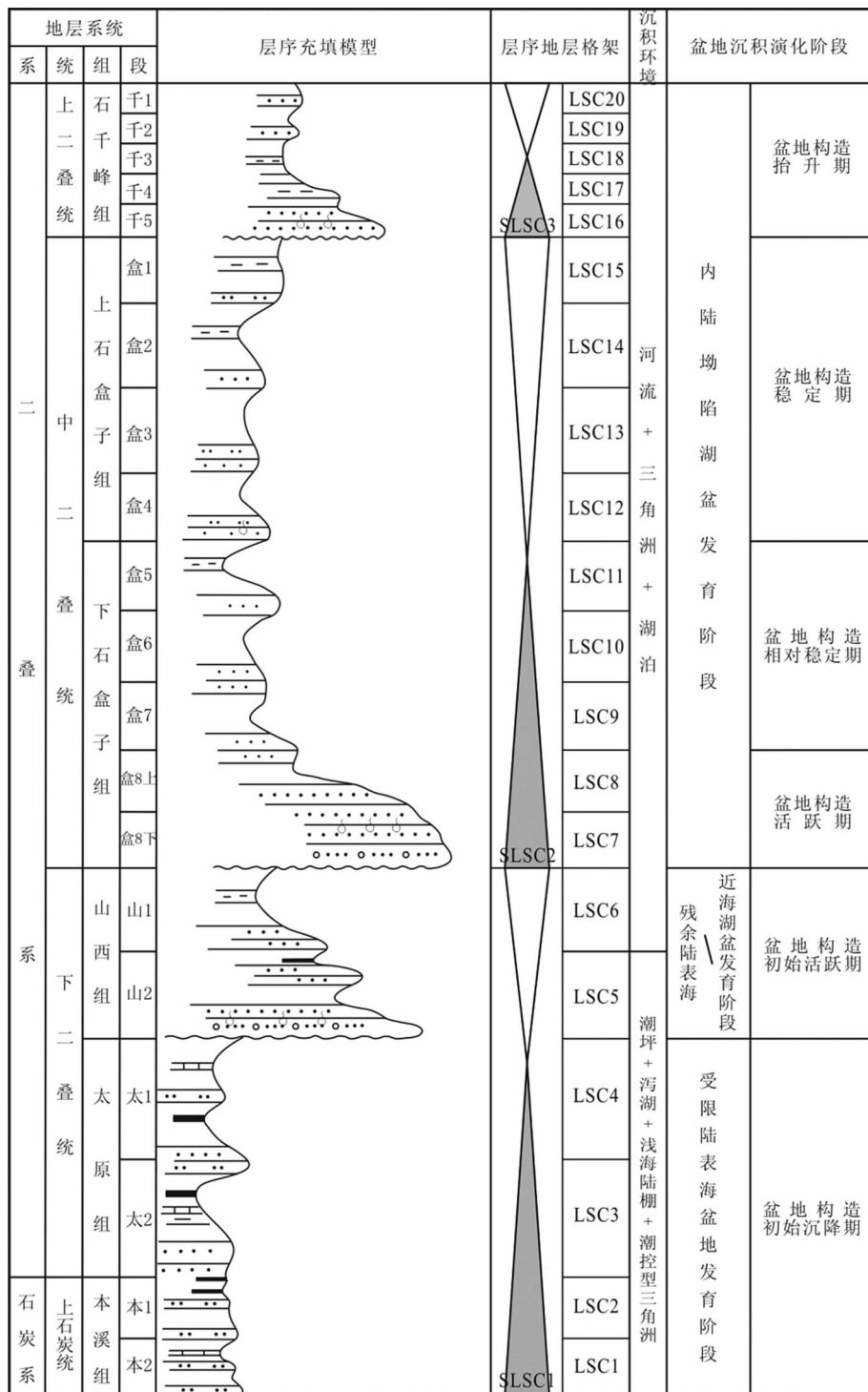


图 15 鄂尔多斯盆地上古生界沉积演化阶段与层序地层格架

Fig. 15 The sedimentary evolution and sequence stratigraphy framework of Upper Paleozoic in Ordos Basin

期,伴随区域构造格局的变迁,海水进一步退却,仅存在较小规模的间歇性海侵。伴随次一级构造活动的趋于稳定以及前一阶段的填平补齐,发育近海湖盆背景下的浅水曲流河三角洲。该时期随着中央古隆起的进一步消亡变缓,盆地东西差异基本消失,而南北差异升降开始逐渐增强。

4.2.3 中晚二叠世(下石盒子期-石千峰期)内陆拗陷湖盆发育阶段

中二叠世下石盒子期,海水从盆地本部完全退出,进入了内陆拗陷湖盆的全新演化阶段。中央古隆起彻底消亡,盆地东西差异完全消失,而南北差异沉降和相带分异不断增

强。早期以发育进积型-加积型浅水辫状河三角洲为特征,而随着后期物源区构造活动的减弱以及坡降梯度的减小,形成退积型浅水曲流河三角洲;上石盒子期,盆地南北地形差异逐渐缩小,河流-三角洲沉积体系萎缩,湖泊向北扩展且面积增大;此后,晚二叠世石千峰期,华北地台进一步加剧抬升,海水撤出大华北盆地,盆地沉积环境也完全转化为大陆体制。

4.3 层序地层格架

根据海陆转换关键时期的具体厘定,以及盆地沉积演化阶段的划分,以地层过程-响应沉积动力学为理论基础,运用以基准面旋回为参照面的高分辨率层序地层学理论及其技术方法(Cross, 1988; Cross and Lessenger, 1996; Lin *et al.*, 2008; 邓宏文等, 1996, 2000; 郑荣才等, 2000, 2001), 将鄂尔多斯盆地上古生界划分为3个超长期旋回层序。

4.3.1 SLSC1 超长期旋回层序

该超长期旋回层序主要对应本溪组-山西组。层序底界清晰,为本溪组与下奥陶统呈构造不整合接触的长期暴露侵蚀面,界面上发育残积成因的铝土质页岩、铁质页岩矿层;其顶界面为海盆与陆盆的重要转换面,具平行不整合界面性质。基准面上半旋回主要由本溪组与太原组中下部构成,相当于海侵体系域。以发育滨浅海-有障壁海岸沉积体系为主,代表盆地构造初始沉降期的受限陆表海充填阶段;基准面下降半旋回则主要由太原组顶部与山西组构成,相当于高位体系域。代表盆地构造初始活跃期的残余陆表海-近海湖盆充填阶段;最大洪泛面出现在太原组太1段中上部的灰黑色泥岩、灰岩及薄煤层。

4.3.2 SLSC2 超长期旋回层序

该超长期旋回层序主要对应下石盒子组与上石盒子组。层序底界面为海盆与陆盆转换面,为含砾砂岩组成的河道沉积对下伏泥岩进行较强下切侵蚀作用形成的岩性、岩相突变面,具渐进超覆的不整合界面性质。基准面上半旋回主要由下石盒子组构成,相当于湖盆扩张体系域。代表盆地由构造活跃期转向构造相对稳定期的内陆拗陷湖盆发展充填阶段;基准面下降半旋回则主要由上石盒子组构成,相当于湖盆收缩体系域。代表盆地构造稳定期的内陆拗陷湖盆成熟充填阶段;最大洪泛面出现在下石盒子组顶部盒5段中上部的桃花泥岩中。

4.3.3 SLSC3 超长期旋回层序

该超长期旋回层序主要对应石千峰组。层序底界面为构造体制转换面,具有明显起伏不平的冲刷界面或上超界面,并向盆内逐渐演变为与之相对应的整一界面。该超层序代表盆地构造抬升期的内陆拗陷湖盆萎缩充填阶段,为干燥气候背景下以紫红色碎屑岩沉积建造组成的河流、三角洲与湖泊相沉积为充填特征。基准面上半旋回主要由石千峰组中下部构成,相当于湖盆扩张体系域;基准面下降半旋回则主要由石千峰组上部构成,相当于湖盆收缩体系域;最大

洪泛面出现在石千峰组千3段中上部的紫红色砂质泥岩中。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地山西期沉积环境是在继承太原期陆表海沉积背景的基础之上发展起来的,整个山西期均存在海水影响的痕迹。太原期到下石盒子期的时间演化序列,古盐度和 Sr/Ba 比值具有明显降低的变化趋势。认为山西期为陆表海背景下的海陆过渡沉积演化阶段,发育大面积分布的海陆过渡三角洲体系,到下石盒子期才完全进入陆相湖盆的沉积演化阶段。就整个山西期而言,古盐度和 Sr/Ba 比值由南向北、自西向东、层位自下而上总体减小的变化趋势,于山1晚期这种差异性基本消失。表明鄂尔多斯盆地山西期由南向北、层位自下而上受海水影响的规模与范围愈来愈弱。

(2)将盆地晚古生代沉积演化划分为3大阶段:晚石炭世-早二叠世早期(本溪期-太原期)的受限陆表海盆地发育阶段、早二叠世晚期(山西期)的残余陆表海-近海湖盆发育阶段、中晚二叠世(下石盒子期-石千峰期)内陆拗陷湖盆发育阶段。

(3)建立了鄂尔多斯盆地上古生界以超长期基准面旋回为周期的层序地层格架:① SLSC1 超长期旋回层序对应本溪组-山西组沉积,代表盆地构造初始沉降期的受限陆表海向盆地构造初始活跃期的残余陆表海-近海湖盆演化的充填阶段;② SLSC2 超长期旋回层序对应下石盒子组与上石盒子组沉积,代表盆地由构造活跃期转向相对稳定期及稳定期的内陆拗陷湖盆发展到成熟充填阶段;③ SLSC3 超长期旋回层序对应石千峰组沉积,代表大陆体制下盆地构造抬升期的内陆拗陷湖盆萎缩充填阶段。

References

- Adams TD, Haynes JR and Walker CT. 1965. Boron in Holocene illites of the dovey estuary, wales, and its relationship to paleosalinity in cyclothem. *Sedimentology*, 4:189 - 195
- Amorosi A, Lucechi MR, Rossi V *et al.* 2009. Climate change signature of small-scale parasequences from Late glacial Holocene transgressive deposits of the Arnovalley fill. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 273(1-2): 142 - 152
- Chen AQ, Chen HD, Lin LB, Xu SL, Zhu ZJ and Li J. 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 HD, Hou ZJ, Tian JC, Liu WJ and Zhang JQ. 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)
- Chen SY and Liu HJ. 1994. Carboniferous Permian sequence stratigraphy in north China. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 14(5): 11 - 19 (in Chinese with English abstract)
- Cheng AG and Wei ZD. 2001. Research on relationship between sequence strata and coal-accumulation of Late Palaeozoic coal-accumulating basin in northern China. *Coal Geology of China*, 13

- (2); 7-11 (in Chinese with English abstract)
- Couch EL. 1971. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. *AAPG*, 55(10):1829-1837
- Cross TA. 1988. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, western Interior, U. S. A. In: Wilgaus CK *et al.* (eds.). *Sea-level Changes; An Intergrated Approach*. SEPM Special Publication, 42:371-380
- Cross TA and Lessenger MA. 1996. Sediment volume partitioning: Rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. Publication in Norwegian Petroleum Forening Conference Volume, 1-24
- Deng HW, Wang HL and Li XZ. 1996. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-levels and their application. *Oil and Gas Geology*, 17(3):177-184 (in Chinese with English abstract)
- Deng HW, Wang HL and Ning N. 2000. Sediment volume partition principle: Theory basis for high-resolution sequence stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 7(4):305-313 (in Chinese with English abstract)
- Diessel C, Boyd R and Wadsworth J. 2000. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, western Canada, and their sequence-stratigraphic significance. *International Journal of Coal Geology*, 43:143-186
- Fan BH, He XL and Zhang H. 2000. Research on Permo-Carboniferous brachiopods and their biogeography in north China platform. *Journal of Palaeogeography*, 2(2):46-53 (in Chinese with English abstract)
- Guo YH and Liu HJ. 1999. Transgression of Late Paleozoic era in Ordos area. *Journal of China University of Mining & Technology*, 28(2):126-129 (in Chinese with English abstract)
- Guo YH, Liu HJ, Quan B, Wang ZC and Qian K. 1998. Late Paleozoic sedimentary system and paleo-geo-graphic evolution of Ordos area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3):44-52 (in Chinese with English abstract)
- He QX, Ye ZZ, Zhang MS and Li H. 1991. Transgression model of restricted epicontinental sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(1):1-10 (in Chinese with English abstract)
- Hou HB, Mou ZH and Zhu HQ. 2004. *Gas-Pool Forming Conditions and Exploration Directions of the Upper Paleozoic Gas Reservoirs in the Northern Ordos Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract)
- Hu ZQ. 2003. Calcite cements in Upper Palaeozoic sand reservoir of Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 24(4):40-43 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Qing HR, Hu ZW, Zhou ML, Feng WL, Wang CM, Gao XY and Wang QD. 2007. Closed-system dolomitization and the significance for petroleum and economic geology: An example from Feixianguan carbonates, Triassic NE Sichuan basin of China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11):2955-2962 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Wang CM, Huang PP, Zhou ML, Wang QD and Gao XY. 2008. Scientific research frontiers and considerable questions of carbonate diagenesis. *Journal of Chengdu University of Technology*, 35(1):1-10 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Tong HP, Liu LH, Hu ZW, Zhang XH, Huan JL and Huang KK. 2009. Petrography, geochemistry and dolomitization mechanisms of Feixianguan dolomites in Triassic, NE Sichuan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10):2363-2372 (in Chinese with English abstract)
- Huang SJ, Liang R, Huang KK and Lan YF. 2010. Saddle dolomite cements in Upper Paleozoic clastic reservoir rocks from Ordos basin and their effect on reservoir properties. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37(4):366-376 (in Chinese with English abstract)
- Li BF, Wen XD and Li GD. 1999. High resolution sequence stratigraphy analysis of the Permo-Carboniferous in North China platform. *Earth Science Frontiers*, 6(Suppl.):81-94 (in Chinese with English abstract)
- Li XZ, Zhang ML and Xie WR. 2009. Controlling factors for lithologic gas reservoir and regularity of gas distribution in the Upper Paleozoic of Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(2):168-175 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Wang MZ, Yu JF, Han ML, Li JT and Lv DW. 2006. Sequence stratigraphy of Late Paleozoic coal-bearing measures and the transgressive coal-formed features in Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6):834-839 (in Chinese with English abstract)
- Lin CS, Yang HJ, Liu JY *et al.* 2009. Paleogeomorphology of the Paleozoic central up lift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin. *Science in China (Series D)*, 52(6):823-834
- Liu JD, Tian JC, Zhang X, Zhang SN, Nie YS, Zhao Q and Wei DX. 2006. Depositional markers of marine transition facies and its evolution of member 1 of Shanxi Formation, Tabamiao area in North Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(1):36-43 (in Chinese with English abstract)
- Liu JG, Chen Z, Yan W, Chen MH and Yin XB. 2007. Geochemical characteristics of rare earth elements in the fine-grained fraction of surface sediment from South China Sea. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11):2963-2980 (in Chinese with English abstract)
- Liu YJ, Cao LM and Li ZL. 1984. *Elementary Geochemistry*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Lu BQ and Sun GZ. 1997. *Marine Environment and Geology*. Shanghai: Tongji University Press (in Chinese)
- Lv DW, Li ZX, Liu HY, Guo JB, Liu BB and Meng ZL. 2009. The sea-level change and its response to the Late Paleozoic sequence stratigraphy in North China. *Geology in China*, 36(5):1079-1085 (in Chinese with English abstract)
- Ministry of Geology and Mineral Resources. 1982. *Geological Record in Shanxi Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Nie WJ, Liu DM, Yuan FZ and Yang B. 2001. Sedimentary facies division and paleogeographic evolution of gas-bearing intervals in Lower Permian in Northern Erdos basin. *Natural Gas Industry*, 21(S):45-50 (in Chinese with English abstract)
- Paikaray S and Banerjee S. 2008. Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implication on provenance, tectonics and paleoweathering. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32:34-48
- Pang JG, Li WH, Guo YQ, Wang QC, Chen QH and Liang JW. 2006. Sedimentary environment of Permian Shanxi Formation in Zizhou region northern Shanxi. *Coal Geology and Exploration*, 34(5):5-8 (in Chinese with English abstract)
- Peng GL, Zhong R and Tang WZ. 1999. The relationship between the coal accumulating process and the Late Carboniferous-early Early Permian marine transgression-regression on the western margin of the north china platform. *Journal of Palaeogeography*, 1(2):18-27 (in Chinese with English abstract)
- Shang GX. 1995. An outline of basining structures of North China Late Paleozoic coal accumulation basin. *Coal Geology of China*, 7(2):1-6 (in Chinese with English abstract)
- Tao XF and Wu DC. 2007. *General Geology*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Walker CT and Price NB. 1963. Departure curves for computing paleosalinity from boron in illites and shales. *AAPG*, 47(5):833-841
- Wang CY, Chen MJ, Wang ZC and Guo YH. 2007. Sedimentary facies of the Shanxi Formation and Member 8 of Xiashihezi Formation of Permian in southern Ordos basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(4):369-378 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZJ, Chen HD and Zhang JQ. 2002. The Late Paleozoic sedimentary systems and humic gas pools in the Ordos basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(2):18-24 (in Chinese with English abstract)
- Wen HG, Zheng RC, Tang F, Zheng AP, Sang TY, Chen SC, Li GL and Li LX. 2008. Reconstruction and analysis of paleosalinity and

- paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1):114–120 (in Chinese with English abstract)
- Wu FD, Chen ZH, Zhang SL and Ge LG. 1995. Transgressions during Permo-Carboniferous period in North China. *Geoscience*, 9(3):284–292 (in Chinese with English abstract)
- Xi SL, Li WH, Wei XS, Meng PL and Feng JP. 2009. Study on the characteristics of quartz sandstone reservoir of the Neopaleozoic of two gas-fields in Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(2):221–229 (in Chinese with English abstract)
- Xing HS, Xiao HP, Sun FJ, Xiao JX, Liu RE, Zhang CL and Lin J. 2008. Sedimentary facies of member 2 of Shanxi Formation of Lower Permian in the middle-eastern Ordos basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(4):345–351 (in Chinese with English abstract)
- Yan QS, Zhang GD, Xiang LS, Wang HZ, Wu BY, Dong RX, Wang YY and Guo WY. 1979. Transgression and sedimentary environment of Funing Group in Jinghu Sunken North Jiangsu Province. *Acta Geologica Sinica*, (1):74–83 (in Chinese with English abstract)
- Yang MP, Wang ZX, Li L, Zhou SX and Yu ZP. 2000. A study of the sedimentary facies of Shanxi Formation Injiaxian-Zizhou area. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 22(4):14–17 (in Chinese with English abstract)
- Ye LM, Qi TJ and Peng HY. 2008. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in eastern Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(2):202–210 (in Chinese with English abstract)
- You HZ, Zhao JX, Chen HD, Dong GY, Li L and Luo Y. 2007. Depositional characteristic and depositional model of Shanxi Formation to Xiashilhezi Formation in the Daniudi gas field, Ordos basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 34(4):401–406 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JL and Zhang X. 2007. Element Geochemistry of sandstones in the Silurian of central Tarim basin and the significance in provenance discrimination. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11):2990–3002 (in Chinese with English abstract)
- Zhang PF, Shao LY and Dai SF. 2001. Dissions on the transgression model of the Late Paleozoic in the north China platform. *Journal of Palaeogeography*, 3(1):15–24 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Liu J, Hu JM, Chen ZL, Li M, Pei JL, Chen ZY and Zhou JX. 2007. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3):625–638 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YC, Zhang H and Sun ZC. 1997. Prototype Analysis of Petroliferous Basins in China. Nanjing: Nanjing University Press (in Chinese)
- Zheng RC and Liu MQ. 1999. Study on palaeosalinity of chang-6 oil reservoir set in Ordos basin. *Oil and Gas Geology*, 20(1):20–25 (in Chinese with English abstract)
- Zheng RC, Yin SM and Peng J. 2000. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3):369–375 (in Chinese with English abstract)
- Zheng RC, Peng J and Wu ZR. 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)
- Zhou Q. 2009. Comprehensive study of high-resolution sequence stratigraphy and storage sandbody of the second member of Shanxi Formation in Ordos Basin. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English summary)
- 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
- 陈世悦, 刘焕杰. 1994. 华北石炭二叠纪层序地层学研究的特点. *岩相古地理*, 14(5):11–19
- 程爱国, 魏振岱. 2001. 华北晚古生代聚煤盆地层序地层与聚煤作用关系的探讨. *中国煤田地质*, 13(2):7–11
- 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 1996. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用. *石油与天然气地质*, 17(3):177–184
- 邓宏文, 王洪亮, 宁宁. 2000. 沉积物体积分配原理-高分辨率层序地层学的理论基础. *地质前缘*, 7(4):305–313
- 地质矿产部. 1982. 山西省区域地质志. 北京:地质出版社
- 范炳恒, 何锡麟, 张华. 2000. 华北地台石炭二叠纪腕足动物群及生物地理研究. *古地理学报*, 2(2):46–53
- 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 汪泽成, 钱凯. 1998. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化. *沉积学报*, 16(3):44–52
- 郭英海, 刘焕杰. 1999. 鄂尔多斯地区晚古生代的海侵. *中国矿业大学学报*, 28(2):126–129
- 何起祥, 业治铮, 张明书, 李浩. 1991. 受限陆表海的海侵模式. *沉积学报*, 9(1):1–10
- 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
- 胡宗全. 2003. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层方解石胶结物特征. *石油学报*, 24(4):40–43
- 黄思静, Qing HR, 胡作维, 邹明亮, 冯文立, 王春梅, 郜晓勇, 王庆东. 2007. 封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义——以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例. *岩石学报*, 23(11):2955–2962
- 黄思静, 王春梅, 黄培培, 邹明亮, 王庆东, 郜晓勇. 2008. 碳酸盐成岩作用的研究前沿和值得思考的问题. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 35(1):1–10
- 黄思静, 咚宏鹏, 刘丽红, 胡作维, 张雪花, 郁金来, 黄可可. 2009. 川东北飞仙关组白云岩的主要类型、地球化学特征和白云化机制. *岩石学报*, 25(10):2363–2372
- 黄思静, 梁瑞, 黄可可, 兰叶芳. 2010. 鄂尔多斯盆地上古生界碎屑岩储层中的鞍形白云石胶结物及其对储层的影响. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 37(4):366–376
- 李宝芳, 温显端, 李贵东. 1999. 华北石炭、二叠系高分辨率层序地层分析. *地质前缘*, 6(增):81–94
- 李熙喆, 张满郎, 谢武仁. 2009. 鄂尔多斯盆地上古生界岩性气藏形成的主控因素与分布规律. *石油学报*, 30(2):168–175
- 李增学, 王明镇, 余继峰, 韩美莲, 李江涛, 吕大炜. 2006. 鄂尔多斯盆地晚古生代含煤地层层序地层与海侵成煤特点. *沉积学报*, 24(6):834–839
- 刘家铎, 田景春, 张翔, 张哨楠, 聂永生, 赵强, 韦东晓. 2006. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区山西组一段海相、过渡相沉积标志研究及环境演化分析. *沉积学报*, 24(1):36–43
- 刘建国, 陈忠, 颜文, 陈木宏, 殷学博. 2007. 南海表层沉积物中细粒组分的稀土元素地球化学特征. *岩石学报*, 23(11):2963–2980
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学. 北京:科学出版社
- 吕炳全, 孙国志. 1997. 海洋环境与地质. 上海:同济大学出版社

附中文参考文献

- 陈安清, 陈洪德, 林良彪, 徐胜林, 朱志军, 李洁. 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
- 陈洪德, 侯中键, 田景春, 刘文均, 张锦泉. 2001. 鄂尔多斯地区晚

- 吕大炜,李增学,刘海燕,郭建斌,刘彬彬,孟召磊. 2009. 华北晚古生代海平面变化及其层序地层响应. 中国地质, 36(5):1079-1085
- 聂武军,刘棣民,袁芳政,杨波. 2001. 鄂北下二叠统含气层段沉积相划分及古地理演化. 天然气工业, 21(增刊):45-50
- 庞军刚,李文厚,郭艳琴,王起琮,陈全红,梁积伟. 2006. 陕北子洲地区二叠纪山西组沉积环境. 煤田地质与勘探, 34(5):5-8
- 彭格林,钟蓉,唐伟忠. 1999. 华北地台西缘晚石炭世-早二叠世早期海水进退及其与聚煤作用的关系. 古地理学报, 1(2):18-27
- 尚冠雄. 1995. 华北晚古生代聚煤盆地构造构造述略. 中国煤田地质, 7(2):1-6
- 陶晓风,吴德超. 2007. 普通地质学. 北京:科学出版社
- 汪正江,陈洪德,张锦泉. 2002. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积体系演化与煤成气藏. 沉积与特提斯地质, 22(2):18-24
- 王超勇,陈孟晋,汪泽成,郭英海. 2007. 鄂尔多斯盆地南部二叠系山西组及下石盒子组盒8段沉积相. 古地理学报, 9(4):369-378
- 文华国,郑荣才,唐飞,郑爱萍,桑廷元,陈守春,李瑰丽,李联新. 2008. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析. 矿物岩石, 28(1):114-120
- 武法东,陈钟惠,张守良,葛立刚. 1995. 华北石炭二叠纪的海侵作用. 现代地质, 9(3):284-292.
- 席胜利,李文厚,魏新善,孟培龙,冯娟萍. 2009. 鄂尔多斯盆地上古生界两大气田不同石英砂岩储层特征对比研究. 沉积学报, 27(2):221-229
- 邢厚松,肖红平,孙粉锦,肖建新,刘锐娥,张春林,蒯洁. 2008. 鄂尔多斯盆地中东部下二叠统山西组二段沉积相. 石油实验地质, 30(4):345-351
- 严钦尚,张国栋,项立嵩,王慧中,吴邦毓,董荣鑫,王益友,郭文莹. 1979. 苏北金湖凹陷阜宁群的海侵和沉积环境. 地质学报, (1):74-83
- 杨满平,王兴志,李凌,周树勋,于忠平. 2000. 佳县-子洲地区山西组沉积相研究. 西南石油学院学报, 22(4):14-17
- 叶黎明,齐天俊,彭海燕. 2008. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析. 沉积学报, 26(2):202-210
- 尤欢增,赵俊兴,陈洪德,董桂玉,李良,罗媛. 2007. 大牛地气田东北地区山西组-下石盒子组沉积特征及发育模式. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(4):401-406
- 张金亮,张鑫. 2007. 塔中地区志留系砂岩元素地球化学特征与物源判别意义. 岩石学报, 23(11):2990-3002
- 张鹏飞,邵龙义,代世峰. 2001. 华北地台晚古生代海侵模式刍议. 古地理学报, 3(1):15-24
- 张拴宏,赵越,刘健,胡健民,陈正乐,李森,裴军令,陈振宇,周剑雄. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. 岩石学报, 23(3):625-638
- 张渝昌,张荷,孙肇才. 1997. 中国含油气盆地原型分析. 南京:南京大学出版社
- 郑荣才,柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 20(1):20-25
- 郑荣才,尹世民,彭军. 2000. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析. 沉积学报, 18(3):369-375
- 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
- 周祺. 2009. 鄂尔多斯盆地长北气田山西组二段高分辨率层序地层和储集砂体综合研究. 博士学位论文. 成都:成都理工大学