

文章编号: 1000-6524(2004)01-0037-06

前前陆盆地层系砂岩成岩环境特征及其孔隙演化 ——以鄂尔多斯盆地西缘二叠系为例

王建伟¹, 鲍志东¹, 田海芹², 郑四兵³

(1. 石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 大庆油田 技术培训中心, 黑龙江 大庆 163254)

摘要: 鄂尔多斯西缘二叠系为前前陆盆地层系, 砂岩成岩作用仍受前陆盆地构造的影响, 不同构造分区砂岩储层的成岩环境存在一定的差别。研究发现, 西缘逆冲带砂体经历了浅埋藏弱压实和溶蚀作用, 储集物性最优; 斜坡带砂岩储层不仅残留少量粒间孔隙, 而且溶蚀作用形成的次生孔隙对储集空间的改善十分明显; 压实压溶作用和胶结充填作用严重损害前渊带砂岩原生孔隙, 但后期的凝灰质溶蚀作用对储层性能有一定的改善, 仍不失为天然气的有效储层。

关键词: 鄂尔多斯西缘前陆盆地; 二叠系; 成岩环境; 孔隙演化

中图分类号: P588.21⁺2.3

文献标识码: A

The diagenetic environment of sandstone and porosity evolution of pre-foreland basin strata: a case study of Permian strata on the western Ordos foreland basin

WANG Jian_wei¹, BAO Zhi_dong¹, TIAN Hai_qin² and ZHENG Si_bing³

(1. University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Exploration and Production, CPEC, Beijing 100083, China; 3. Technological Training Center of Daqing Oil Field, Daqing 163254, China)

Abstract: The Permian strata on the western margin of Ordos belong to strata of the pre-foreland basin. On the whole, the tectonic belts of foreland basin regionally control the diagenesis of sandstone, with different belts characterized by different diagenetic dynamical environments. The Permian high quality reservoir was formed in the western thrust belt and underwent weak compaction with shallow burial and dissolution. The sandstone pores of Permian strata on the slope belt are mainly composed of secondary pores resulting from strong dissolution, with a certain quantity of relict original pores. Great losses of sandstone original pores in the geotectogene resulted from the compaction and cementation with deep burial, whereas the reservoir quality was improved by dissolution and the sandstones served as the effective gas reservoir.

Key words: foreland basin on the western margin of Ordos; Permian; diagenetic environment; porosity evolution

无论是典型的前陆盆地还是类前陆盆地, 碎屑岩储层都占有重要地位, 砂岩是前陆盆地油气的主要产层。从现有产油气的前陆盆地来看, 大多数油气产自盆地聚敛碰撞之前的大陆边缘沉积层系, 即

收稿日期: 2003-02-27; 修订日期: 2003-09-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G19990433); 教育部石油天然气成藏机理重点实验室资助项目

作者简介: 王建伟(1975-), 男, 满族, 博士, 主要从事储层地质学、沉积岩石学和层序地层学研究, 电话: (010) 89734042。

前前陆盆地层系中,如西加拿大前陆盆地和落基山前陆盆地(周新源,2002)。加强我国前前陆盆地层系砂岩储层特征研究意义重大。鄂尔多斯西缘前陆盆地北到桌子山,南到平凉,东到定边,西到贺兰山西,面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,现已发现了刘家庄和胜利井两个二叠系气田和4个工业气流构造。研究区内,从西部造山带向克拉通依次发育逆冲带、前渊带和前隆斜坡带(图1)。前人在多个局部地区如桌子山(肖建喜,2003)、横山堡、马家滩、铁克苏庙和鄂托克前旗(陈孟晋等,2002)都做过储层评价工作,但缺少系统性前陆盆地范围内储层特征研究。

二叠系为前陆盆地形成前发育的一套稳定地台层系,碎屑岩储层主要分布在二叠纪太原组、山西组和下石盒子组,发育冲积平原相、湖泊三角洲相以及湖滩相沉积砂体,砂体累积厚度达90~260 m,单层砂体最厚有40 m,平面上呈近南北向树枝状、条带状及串珠状分布,剖面上多数表现为大透镜体,底凸顶平,成层性好,但内部非均质性强(杨俊杰等,1996;魏红红等,1998)。就鄂尔多斯西缘二叠系储层形成

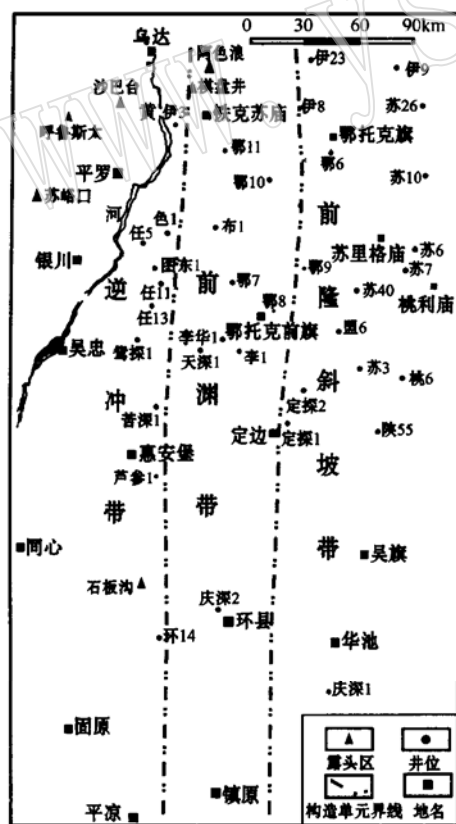


图1 鄂尔多斯西缘前陆盆地位置图

Fig. 1 Location and structural subdivision of western Ordos foreland basin

及演化而言,其西部构造演化史(汤锡元等,1992;张泓等,2000)大致可以分为古生代地台演化阶段和晚三叠世后前陆盆地演化阶段。前者控制着古生代沉积体系及岩相古地理展布特征,而前陆盆地构造运动强烈影响着二叠系成岩环境的各个主导因素演变规律,如埋藏史、热演化史、流体介质迁移及构造微裂缝发育。

1 砂岩组构特征

岩石组构特征是砂岩埋藏成岩过程的物质基础,由于受晚古生代物源区影响,鄂尔多斯西缘前陆盆地的逆冲带与前渊带及前隆斜坡带二叠系砂岩的岩石组构存在着一定的差别。

逆冲带由岩屑长石砂岩构成,石英平均含量63.3%,长石约20.9%,岩屑为15.7%,且主要为石英质岩屑;蚀变成因的高岭石、凝灰质残余、泥质及少量钙质充填于颗粒间形成填隙物,中-粗粒结构,分选中等,呈线接触及点-线接触。受同一物源区控制(樊太亮等,1999),前渊带和前隆斜坡带砂岩类型主要为石英质岩屑砂岩及石英砂岩,石英质岩屑含量很高,长石组分少($< 3\%$);填隙物主要为残余凝灰质、泥质、“脏”高岭石及钙质胶结物;粒度普遍较粗,以中-粗粒为主,含细砾,分选中等,颗粒间多见凹凸状接触及线接触关系。

2 前前陆盆地层系成岩环境及成岩模式

本区晚古生代早期遵循稳定地台型埋藏环境,但晚三叠世后前陆盆地开始形成,原有成岩环境发生改变,内部各个次级构造单元成岩作用出现较大差异。

2.1 成岩环境特征

最大古埋藏深度是压实压溶作用进行的主导因素。前陆盆地形成前,本区二叠纪一直处于一个较为均一的埋藏过程,除志丹、惠安堡、环县与庆阳地区埋藏深度略微偏大外(约3000 m),大部分地区埋藏深度处于2500 m左右(杨俊杰等,1996)。中侏罗世后,前陆盆地自西向东抬升明显,最西侧逆冲带发生剥蚀,经历的最大古埋藏深度即为剥蚀前的埋深,现今埋深尚未超过最大古埋深;前渊带抬升剥蚀幅度明显弱于逆冲带,后期经历了构造拗陷及深埋藏,

现今埋藏深度平均大于 3 500 m; 前隆斜坡带是前渊带向东部地台区的过渡区, 曾经历的最大埋藏深度要小于前渊带, 但明显大于逆冲带。

热成熟度是衡量成岩作用强度的良好指标, 是沉积物埋藏时间和埋藏温度的函数, 且具有不可逆性。二叠系镜质体反射率 R_0 粘土矿物 X 衍射及自生矿物包裹体测温(表 1) 均显示出不同构造带热成熟度存在差别。西侧的逆冲带二叠系 R_0 值处于 0.6% ~ 1.0% 之间, 伊/蒙混层中蒙脱石含量不小于 25%, 包裹体测温主要在 80 °C 左右, 砂岩处于晚成岩 A 阶段早期; 前渊带 R_0 主要位于 1.7% ~ 2.0% 之间, 最高可达到 2.25%, 伊/蒙混层矿物中蒙脱石含量小于 10%, 包裹体测温最高达到 138.8 °C, 砂岩已经进入晚成岩 B 及 C 阶段; 前隆斜坡带热演化程度要略微弱于深坳带, 现砂岩主要处于晚成岩 A - B 阶段。

流体介质的移动主要受盆地沉降和隆起历史的控制, 金爱民等(2002) 把整个鄂尔多斯盆地水动力场分为北、东侧大气水下渗向心流区, 西、南侧压实

水离心流区及中间过渡带的越流漏失区。煤系地层热成熟期释放出大量的有机酸, 模拟试验 80 °C 时每克煤的产酸率 40 mg, 120 °C 时产酸率为 20 mg, 意味着二叠系砂岩储层有充足的酸性介质渗流, 形成相对发育的次生孔隙, 而盒 8 以上则缺乏这种介质条件(陈孟晋等, 2002; 谢增业等, 2002)。从本区砂岩矿物成分、结构及溶蚀强度空间展布规律也可以看出, 煤系地层水是前陆盆地区上古生界溶蚀作用的主导流体介质, 沿渗透性单元向上及盆地两侧斜坡运移。砂岩中凝灰质填隙物在酸性水环境下具有不稳定性, 容易向“脏”高岭石转化, 苦深 1 及任 13 等多口探井铸体薄片和扫描电镜下观察统计发现, 溶蚀蚀变高岭石含量与凝灰质含量随地层由深变浅呈相互消长的关系, 到达盒 5+ 7 段凝灰质保存完好, 几乎少见高岭石矿物(图 2)。处于压实水离心流区的酸性地层水主要向两侧较高部位即逆冲带和前隆斜坡带运移, 流体渗流活跃, 最终在优质疏导层如条带型河道砂岩汇聚, 如山西组苏 5—苏 10—苏 6—苏 7—苏 14 南北向呈条带性选择性溶蚀。

表 1 不同构造带包裹体均一温度表

Table 1 Homogenization temperatures of inclusions in different structural zones

井号	层位	主矿物	均一温度/ °C	盐度/ %	构造位置
图东 1	太 2	石英加大边	80.0	0~ 4.3	逆冲带
任 6	盒 9	石英加大边	78.2	0.5	
天深 1	山 1	方解石胶结物	138.8	2.7	前渊带
布 1	太 2	原生石英加大边	120.4	6.2	
苏 9	盒 9	裂缝中方解石脉	120.0	-	前隆斜坡带
桃 6	山 1	原生石英加大边	111.6	0	

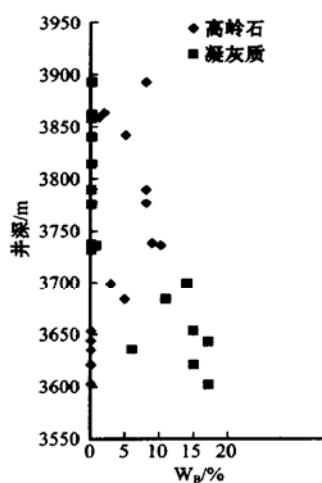


图 2 高岭石与凝灰质含量变化图

Fig. 2 Relationship between kaolinite and tuff with depth

从逆冲带到前渊带及斜坡带, 前前陆盆地系砂岩储层构造微裂缝均十分发育, 一方面改善了砂岩物性, 另一方面沟通了下部煤系地层水而使砂岩容易发生溶蚀蚀变作用。

2.2 成岩作用模式

前陆盆地砂岩经历的主要成岩作用有: 压实压溶作用、胶结作用、溶蚀蚀变作用及构造微裂缝化作用, 且不同构造带这些成岩作用存在一定的差异。

晚三叠世, 鄂尔多斯西缘进入了前陆盆地构造演化阶段, 早期均一埋藏成岩环境开始发生改变, 逐步呈现出前陆盆地区上古生界东西分带的成岩动力环境格局。晚白垩世成为另一个关键时刻, 前陆盆地区逆冲带发生了较大规模的抬升剥蚀(杨俊杰等, 1996)。根据逆冲带二叠系 R_0 值(0.6% ~ 1.0%) 和

砂岩中一定量原生孔隙得到保存可以说明:晚白垩世砂岩普遍处于晚成岩 A₁ 期,压实作用尚未进行彻底,前陆盆地构造运动对二叠系砂岩的后继成岩作

用有很大影响。结合各个构造带多口单井成岩作用研究成果,归纳总结出研究区二叠系砂岩成岩作用模式(图3)。

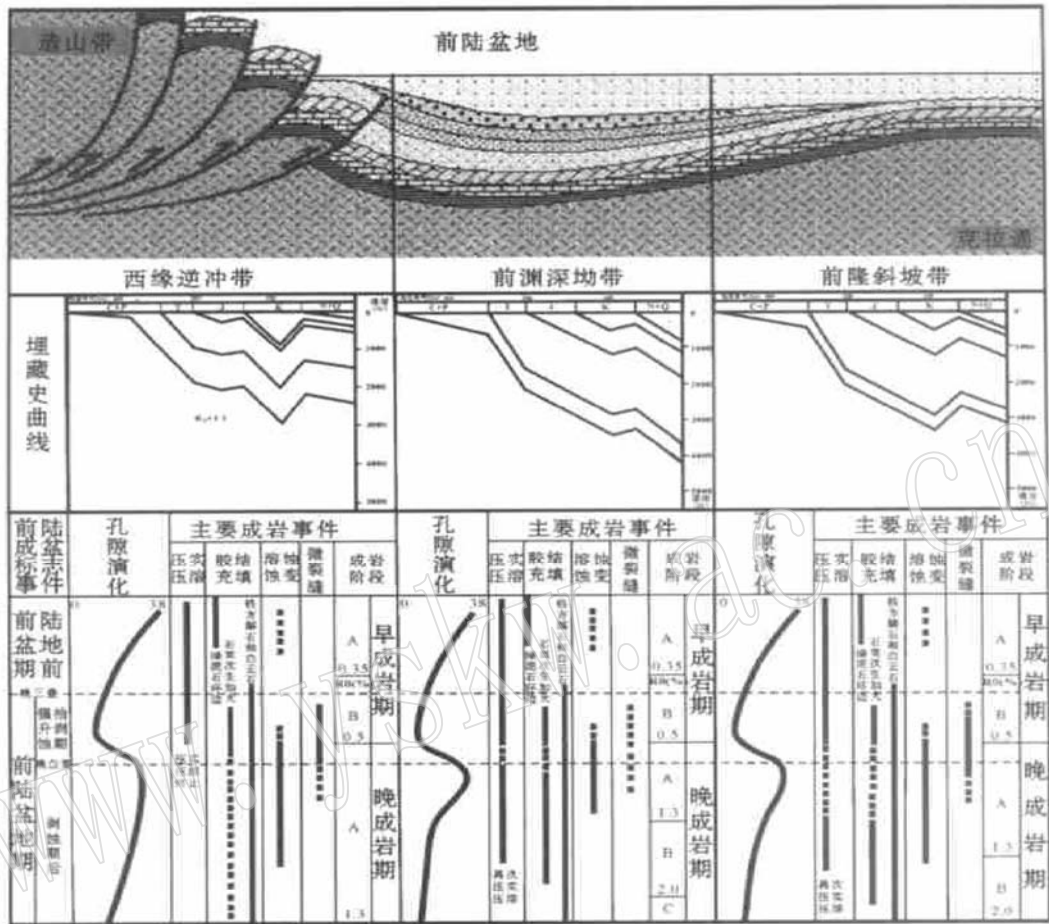


图3 鄂尔多斯西缘前陆盆地区二叠系砂岩成岩模式图

Fig. 3 Diagenetic model of Permian sandstone in the western Ordos foreland basin

逆冲带二叠系砂岩在晚白垩世抬升剥蚀前经历了最大古埋藏深度(约 2 500 m)后,埋藏史曲线表现为多次抬升剥蚀型,现今埋藏深度小于最大古埋藏深度,压实压溶作用近于终止,颗粒间以点线接触为主,少含凸凹接触;在晚白垩世末,与压溶作用密切相关的石英次生加大作用也相对变得很弱;酸性地层水在早成岩 B 阶段至晚成岩 A₁ 阶段十分有效,溶蚀作用发生的时间窗较宽,铸体薄片下普遍见到溶蚀孔隙及溶蚀产物如高岭石;前陆盆地构造运动使前前陆盆地层系产生了大量的构造微裂缝,改善了储层物性。砂岩孔隙的类型以复合孔为主,残余粒间孔隙和溶蚀孔隙十分普遍。

前渊带经历了短暂的抬升剥蚀期后,埋藏史曲线表现出持续沉降型,深埋藏促使了压实压溶作用

的再次发生,石英次生加大十分发育,颗粒间以线凸凹接触为主;由于前渊带埋藏深度大,砂岩较早达到晚成岩 B 阶段甚至晚成岩 C 阶段,酸性地层水作用的时间窗相对较窄,地层水交替能力弱,溶蚀作用较弱,部分凝灰质填隙物得到了较好保存;孔隙不甚发育,含有蚀变晶间孔隙及少量溶蚀孔隙。

前隆斜坡带成岩动力环境介于逆冲带和前渊带之间,当沉积砂体类型有利时,在该成岩动力环境下可以形成较好的砂岩储层,以溶孔-晶间孔复合型孔隙结构为主。

3 成岩作用对砂岩储集性的改造

通过铸体薄片、阴极发光、扫描电镜、孔隙图像

分析及压汞等多种测试方法对研究区砂岩的成岩作用及储集特征进行研究。储集特征主要受压实压溶、胶结充填和溶蚀作用的影响, 其中压实压溶和胶结充填作用严重损害了储层物性特征, 而溶蚀作用从一定程度上使储层物性得到了改善。前陆盆地区不同构造带, 由于上古生界砂岩经历的成岩环境不同, 导致储层孔隙含量及构成差别明显。

3.1 压实压溶作用明显降低了原始粒间孔隙

压实压溶作用是砂岩储层物性变差的主要因素之一, 铸体薄片显示颗粒接触关系多为凸凹接触及线接触, 一些塑性页岩岩屑和云母矿物碎片被挤入颗粒间隙。利用压实率来表征压实强度, 其计算公式为: 压实率 = (原始孔隙体积 - 压实后孔隙体积) / 原始孔隙体积 × 100%。根据 Beard 等(1973)经验公式(原始孔隙度 = 20.9 + 22.91/S₀, S₀ 是分选系数)初步把二叠系砂岩平均原始孔隙度厘定为 38%。压实后粒间体积根据铸体薄片的鉴定统计获得, 其中包括残余粒间孔隙、充填胶结物和粘土杂基占有的孔隙体积。本区压实率分布在 21.6% ~ 60.5% 之间, 处于不同构造位置砂岩的压实率也不同。逆冲带储层经历的最大埋深较小 (< 2 500 m), 后期的逆冲抬升终止了压实作用的进行, 因此骨架颗粒呈点线接触关系, 存在 5% 左右的粒间孔隙, 压实率低于 40%。而前渊带持续沉降, 岩石致密, 含残余粒间孔隙少(1%), 压实率通常大于 45%。

3.2 胶结充填作用严重损害原始粒间孔隙

砂岩储层主要填隙物为伊利石、凝灰质、高岭石、硅质和钙质, 压实压溶损失了相当数量的原生孔隙, 而胶结充填作用严重损害了这些剩余的原生孔隙, 因此压实压溶和胶结充填作用是本区原生孔隙损害的主要因素。从压实作用与胶结作用影响孔隙发育的相对关系图(图 4)可以看出: 逆冲带和前隆斜坡带砂岩压实作用弱于前渊带; 现今储层粒间原生孔隙平均小于 3%, 但西缘逆冲带明显偏高; 胶结充填作用强于压实压溶作用对砂岩原始孔隙度的损害。

3.3 溶蚀蚀变作用一定程度地改善储层物性

含有丰富的凝灰质等可溶组分和煤系酸性地层水的充足补给是本区砂岩储层溶蚀蚀变作用进行有利因素, 高岭石晶间孔隙和溶蚀孔隙的出现大大提高了砂岩储集性能。对 20 多口井数百块铸体薄片面孔率进行统计分析, 前隆斜坡带溶蚀蚀变作用对储层改善作用最为明显, 可以提供砂岩储层近 70%

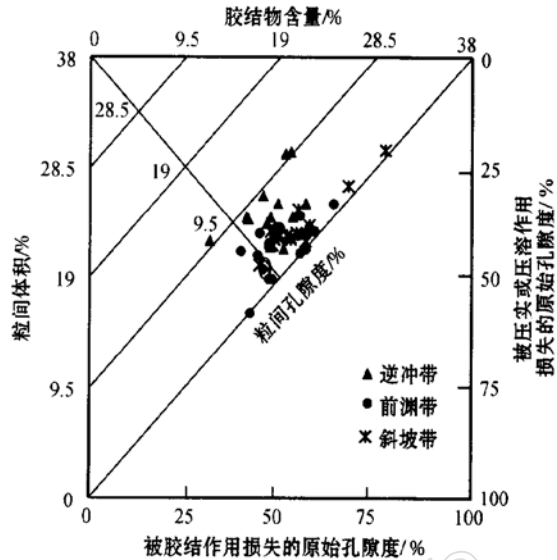


图 4 压实作用与胶结作用对砂岩原始孔隙损害关系图(转引自庄松生等, 1998)

Fig. 4 Relative effects of compaction and cementation upon the evolution of pores

的储集空间, 物性分析得到孔隙度 10.22%, 渗透率 $0.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 逆冲带砂岩的残余粒间孔隙和溶蚀蚀变次生孔隙都很发育, 孔隙度 12.4%, 渗透率 $1.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 总体上前渊带宏观面孔率低, 而且主要由次生高岭石晶间孔所构成, 孔隙度 7.3%, 渗透率 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4 结论与认识

(1) 前前陆盆地系砂岩储层的成岩动力环境受前陆盆地构造的影响, 但影响程度与“关键时刻”来临的早晚密切相关, 只有处于较早成岩作用阶段的层系受后继前陆盆地构造的影响才明显;

(2) 鄂尔多斯西缘前陆盆地区不同构造带二叠纪砂岩成岩环境存在着差别: 逆冲带砂岩经历了浅埋藏相对弱压实和溶蚀作用, 砂岩储集物性好; 而前渊带(如天环地区)砂岩埋藏深度大, 压实压溶和充填胶结作用强烈, 原始粒间孔隙几乎遭到完全损害, 储集空间以蚀变高岭石晶间孔为主要构成; 前隆斜坡带是深渊带向地台区的过渡带, 埋藏深度较大, 但溶蚀作用强烈, 存在好的天然气储层;

(3) 前前陆盆地系良好的油气储层主要分布在逆冲带和前隆斜坡带, 砂岩储集空间由残余粒间孔隙和次生孔隙构成, 而前渊带砂岩主要发育高岭

石晶间孔隙, 储集性能相对较差。

References

- Beard D C and Weyl P K. 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 57(2): 349~ 369.
- Chen Mengjin, Liu Rui'e, Sun Fenjin, *et al.* 2002. Preliminary approach on the elastic reservoir's pore textures of upper Paleozoic in the northwest Ordos basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 639~ 643(in Chinese with English abstract).
- Fan Tailiang, Guo Qijun and Wu Xianshun. 1999. Features of sequence stratigraphy and distribution regularities of reservoir in upper Paleozoic of north Ordos basin [J]. *Geosciences*, 13(1): 32~ 36(in Chinese with English abstract).
- Jin Aimin, Lou Zhanghua, Zhu Rong, *et al.* 2002. A study on present hydrodynamics and properties of fluids in upper palaeozoic reservoir of the Ordos basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 334~ 343(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Liu Jiajun and Gu Xuexiang. 1997. Basin fluids and their related ore eoposits [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(4): 341~ 352(in Chinese with English abstract).
- Tang Xiyuan and Guo Zhongming. 1992. *Tectonic Characteristics and Petroleum Exploration of the Western Thrust Belt, Shan Gan Ning (Ordos) Basin* [M]. Xi'an: Publishing House of Northwest University (in Chinese).
- Wei Honghong, Peng Huiqun and Li Jingqun. 1998. Sedimentary and reservoir characters of Permo-Carboniferous in Ordos basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 19(2): 136~ 141 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jianxi. 2003. Characteristics of the reservoir porosity structures and their controlling factors from the Upper Paleozoic in the northern part of west margin, Ordos basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 33(2): 201~ 204 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zengye, Jiang Zhusheng, Zhang Ying, *et al.* 2002. Novel method of whole rock pyrolysis and application to the evaluation of source rock [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 510~ 514 (in Chinese with English abstract).
- Yang Junjie and Pei Xigu. 1996. *Gas Geology of China (Vol. 4)* [M]. Beijing: Oil Industry Publishing House (in Chinese).
- Zhang Hong, Meng Zhaoping and He Zonglian. 2000. Study on the tectonic stress fields in the Ordos coal basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 25(sup.): 1~ 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinyuan. 2002. *Occurrence of Oil and Gas in Foreland Basin* [M]. Beijing: Oil Industry Publishing House, 269~ 272 (in Chinese).
- Zhuang Songsheng, Zuo Yanchun and Li Qiong. 1998. Diagenesis and predicting secondary pore for second member of Dainan formation in Qintong depression of north Jiangsu Province [J]. *J. mineral Petrol*, 18(4): 64~ 71 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈孟晋, 刘锐娥, 孙粉锦, 等. 2002. 鄂尔多斯盆地西北部上古生界碎屑岩储层的孔隙结构特征初探 [J]. *沉积学报*, 20(4): 639~ 643.
- 樊太亮, 郭齐军, 吴贤顺. 1999. 鄂尔多斯盆地北部上古生界层序地层特征与储层发育规律 [J]. *现代地质*, 13(1): 32~ 36.
- 金爱民, 楼章华, 朱荣, 等. 2002. 鄂尔多斯盆地上古生界储层现今地下水动力场及流体特征 [J]. *高校地质学报*, 8(3): 334~ 343.
- 刘建明, 刘家军, 顾雪祥. 1997. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用 [J]. *岩石矿物学杂志*, 16(4): 341~ 352.
- 汤锡元, 郭忠铭. 1992. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探 [M]. 西安: 西北大学出版社.
- 魏红红, 彭惠群, 李静群. 1998. 鄂尔多斯盆地石炭二叠系沉积特征与储集条件 [J]. *石油与天然气地质*, 19(2): 136~ 141.
- 肖建喜. 2003. 鄂尔多斯盆地西缘北段上古生界储集层研究 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 33(2): 201~ 204.
- 谢增业, 蒋助生, 张英. 2002. 全岩热模拟新方法及其在气源岩评价中的应用 [J]. *沉积学报*, 20(3): 510~ 514.
- 杨俊杰, 裴锡古. 1996. *中国天然气地质学 (卷四) (M)*. 北京: 石油工业出版社.
- 张泓, 孟召平, 何宗莲. 2000. 鄂尔多斯煤盆地构造应力场研究 [J]. *煤炭学报*, 25(增刊): 1~ 5.
- 周新源. 2002. *前陆盆地油气分布规律* [M]. 北京: 石油工业出版社, 269~ 272.
- 庄松生, 左燕春, 黎琼. 1998. 苏北溱潼凹陷戴南组二段成岩作用与次生孔隙预测 [J]. *矿物岩石*, 18(4): 64~ 71.