

周家湾地区前侏罗纪古地貌恢复及油气富集规律

郭少斌, 孙绍寒

中国地质大学能源学院, 北京 100083

摘要: 前侏罗纪古地貌控制着中下侏罗统沉积发育及油气的富集规律, 精确恢复刻画古地貌形态对于侏罗系油气勘探至关重要。以鄂尔多斯盆地周家湾地区为例, 在沉积相、砂体展布、古流向物源、古厚度恢复、古水深校正等分析的基础上, 结合地质、钻井、测井等解释资料, 应用三维储层建模技术, 定性定量地对前侏罗纪古地貌进行了恢复。同时建立了三维砂体、孔隙度、渗透率模型, 从生、储、盖、圈、运、保等油气成藏条件, 直观地解释了古地貌油气富集规律。依据以上模型, 预测出油气有利储集区分布在三大斜坡储集带的河流边滩砂体和河谷内的心滩处, 为勘探开发提供了可靠依据。

关键词: 古地貌; 侏罗纪; 三维储层建模; 油气富集规律。

中图分类号: P539

文章编号: 1000-2383(2006)03-0372-06

收稿日期: 2005-07-11

Rebuilding Paleogeomorphology of Pre-Jurassic and Oil-Gas Accumulation Regulation in Zhoujiawan Area

GUO Shao-bin, SUN Shao-han

School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Pre-Jurassic paleogeomorphology controls not only the deposit and development of the Early Jurassic but also oil-gas accumulation regulation. It is important to rebuild the paleogeomorphology accurately for oil-gas exploration of the Jurassic. Taking the Zhoujiawan area in the Ordos basin as an example and using 3D reservoir modeling techniques and an interpretation of the geology, drilling and logging, this paper rebuilds the paleogeomorphology of the pre-Jurassic based on analyses of sedimentary facies, sand body, flow direction, paleoburial depth reconstruction and paleobathymetric correction. At the same time, 3D sand body, porosity and permeability models are built. Using oil-gas reservoir forming conditions such as generating, storing, covering, trapping, migrating and preserving, the model visually interprets the regulations of oil-gas accumulation. According to the above models, favorable hydrocarbon accumulation areas are forecasted. They are located on the sand body of river marginal banks and the channel bars of river valleys on the three ramp reservoir regions. The models offer reliable evidence for exploratory development.

Key words: palaeogeomorphology; Jurassic; 3D reservoir modeling; oil-gas accumulation regulation.

0 引言

三叠系末期, 鄂尔多斯盆地受印支运动的影响整体抬升, 延长组顶部遭受风化及河流侵蚀等作用, 形成水系广布、沟壑纵横、丘陵起伏的古地貌景观, 在此背景下沉积了侏罗纪。目前侏罗纪古地貌油区的勘探以“古地貌披盖河道砂圈闭”的找油模式为主, 采用“五位一体”(地震勘探、钻井、试油压裂、测

井和地质综合研究)的综合勘探方法, 突出综合录井方法绘制该区三叠纪顶面起伏图、前侏罗纪古地质图、侏罗纪底砂岩等厚图、延10顶面构造图、侏罗系早期水系图、延10期古地貌以及延10孔渗变化图(人称随钻地质分析八大件)。因此, 精细恢复古地貌形态, 建立储层地质模型, 探讨古地貌油气富集规律, 对于整个鄂尔多斯盆地的侏罗系油气勘探工作具有十分重要的意义。

前人八大图件以及古地貌的恢复大部分停留在2D或准2D平面图的绘制上,不仅不能为勘探和生产提供比较精确的物性预测数据,也不能根据实际勘探情况及时动态地完善古地貌形态。本文在前人工作基础上,以鄂尔多斯盆地周家湾地区为例,结合地质、钻井、测井等解释资料,利用精细三维地质建模技术对前侏罗纪古地貌进行了精细的恢复研究,并深入了解古地貌油气富集规律及其控制因素。

1 区域构造背景

鄂尔多斯盆地构造形态总体呈东翼宽缓、西翼狭窄,是一个不对称盆地。盆地边缘断裂褶皱发育,而内部构造相对简单,地层平缓,一般倾角不足 1° 。盆地内无二级构造,三级构造仅发育一系列幅度较小的鼻状隆起。根据盆地现今构造形态、基底性质及构造特征,鄂尔多斯盆地可划分为6个一级构造单元,即北部伊盟隆起、西缘断褶带、西部天环坳陷、中部陕北斜坡、南部渭北隆起和东部晋西挠褶带。在区域构造位置上,研究区主要位于陕北斜坡的中西部,即湖盆北缘地势平坦的斜坡带,研究区范围为:北抵郝滩,南达薛岔,西至杨井,东越新城,面积约 $4\ 200\text{ km}^2$ 。研究层位主要为鄂尔多斯盆地上三叠统一中下侏罗统(表1)。

表1 鄂尔多斯盆地上三叠统一中下侏罗统地层

Table 1 Strata of Upper Triassic-Middle and Lower Jurassic in Ordos basin

统	组	段	油层
中下 统侏罗	延安组	J _{1y}	延1,延2,⋯,延9,延10(由新到老)
	富县组	J _{1f}	
上三 叠统	延长组	T _{3y}	长1,长2,长3,⋯,长10(由新到老)

2 古地貌恢复方法研究

由于河流侵蚀强烈,研究区延长组顶部的长1地层一般地方残余厚度仅有几米到几十米,有些地方剥蚀殆尽,甚至出露长2地层。由于古河的侵蚀切割、侧向加积,发育了多支次级古河,其边滩相砂体发育,构成了研究区独特的古地貌景观,后期下侏罗统的富县、延安组正是基于这凹凸不平的不整合面而沉积的。富县组为古地貌的初期充填,延10期为

超覆河谷充填,到延10末期,前侏罗纪古地形已日趋夷平。研究区的富县组和延10两层之间没有明显的分层标志。富县+延10地层厚度及岩性差异形成的压实构造继承了延长顶面的高地形,两者构造高点较为吻合。基于以上原因,本文把富县+延10作为不可分的整体来研究。

本文古地貌的恢复坚持岩性定性、接触关系定时、上下构造定发展、古厚度定量的综合研究方法。

2.1 沉积环境及沉积相分析

富县期代表了侏罗系初期的充填沉积,在古河谷中以限制性辫状河流粗碎屑沉积为主。在此基础上,延10沉积主要发育河流占主导地位的侵蚀充填堆积沉积。由于支流水系及主河流决口改造发生扇状、带状型堆积体,富县+延10期总体为河流相沉积体系。研究区以河道、河漫滩、河漫沼泽微相发育为主。有2条主河道宽度和厚度都较大,其余河道宽度和厚度都较小。河漫滩、河漫沼泽微相范围较窄,与分流河道微相间互。

至延10后期,前侏罗纪古地形已日趋夷平,地形高差缩小,河流沉积强度和规模变小。延9期鄂尔多斯盆地地下沉,气候逐渐变得温暖潮湿,雨量增大。因而广泛发育着河湖三角洲、河湖沼泽或河流湖泊过渡型沉积体系。研究区延9沉积相主要为三角洲平原,沉积微相以分流河道、分流间洼地、微相发育为主。

2.2 岩性分析及砂体展布

富县+延10由于受急流河沉积的影响,岩性主要由粗砂岩、石英粗砂岩、中粒长石石英砂岩组成,透镜体岩层中具正粒序性,上部平行层理及斜层理发育,延10后期地层中砂岩以细砂岩、中砂岩为主,泥岩及煤层夹层明显增多。延9为深灰、灰黑色泥岩与灰白色砂岩夹煤层及碳质泥岩,砂岩以岩屑长石砂岩、岩屑长石石英砂岩为主,层内发育水平层理和斜层理,沉积层序从底部含煤沉积开始,砂泥互层沉积,电阻呈现高峰状,自然伽玛呈锯齿状,富含植物化石。

富县+延10期砂体展布明显受地貌形态控制(图1a),主要受2条古河道——宁陕古河和蒙陕古河的控制。河道砂岩构成了油气次生运移的载体和储集体。

延9期西部砂体呈北西—南东向展布,东部砂体呈北东—南西展布。延9煤系中的砂岩为河网多期叠加、沼泽化多期更替下沉积的,分别形成储盖组合,为古地貌披盖河道砂油区提供了必要条件(图1b)。

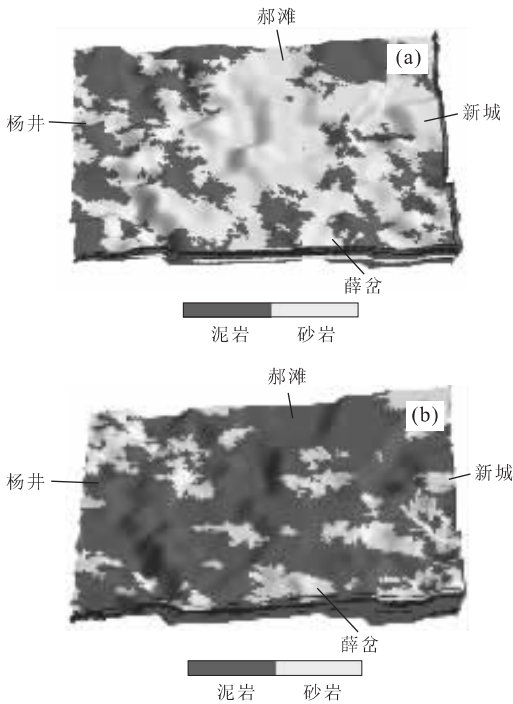


图 1 富县+延 10 砂体(a)和延 9 砂体(b)分布模型
Fig. 1 Sand body distribution models

2.3 古流向及物源分析

河流的古流向也是判别古地形的重要依据. 可以通过指向标志的测量统计、物源区分析、沉积物粒度变化趋势分析等来标定. 结合前人对古流向的分析以及所得的岩相古地理图, 研究区的蒙陕古河接近南北向展布. 宁陕古河呈西南向分布, 呈西北向东南流向, 和蒙陕古河汇合注入甘陕古河区.

根据研究区岩心重矿物资料, 延安组底部(延 9+10)重矿物主要类型为锆石、电气石、石榴子石、绿帘石和榍石. 由重矿物组合及含量平面变化趋势, 可分为二大重矿物组合, 即安边—五谷城地区的锆石+石榴子石组合区和吴旗地区的锆石+电气石组合区. 上述重矿物组合变化规律, 表明延安组底部具有两大物源方向——西北向和南北向.

2.4 古厚度恢复(去压实校正)

古地貌的恢复关键是恢复富县+延 10 时期的古海拔深度. 在考虑古海平面变化的基础上, 该时期的古海拔深度相当于海平面的水体深度(古水深)与富县+延 10 的厚度之和. 本文采用回剥法对古厚度进行去压实恢复(叶加仁等, 1995; 毛小平等, 1998).

在恢复之前须考虑该区域的地层剥蚀作用. 对剥蚀厚度恢复的方法有: 地层横剖面对比法、声波时差法、镜质体反射率法、波动分析法、沉积速率法等.

本文只是对剥蚀厚度明显的井点用地层横剖面对比法进行估算. 研究区大部分区域在该时期剥蚀不大.

地层的去压实校正依照以下假设: 沉积岩层在沉积过程中其骨架体积不变; 压实只发生在深度方向上, 不考虑对横向的作用; 压实程度由埋深决定, 具有不可逆性. 具体方法一般首先求出地层骨架厚度, 然后根据地层骨架厚度不变的假设, 利用骨架厚度计算公式推导出地层的古埋深计算式, 代入相应参数值即可得到地层的古埋深数据.

基于正常压力的孔隙度—深度关系方程, 认为孔隙度与埋深呈指数关系:

$$\phi(z) = \phi_0 \exp(-cz). \quad (1)$$

式中: $\phi(z)$ 是以地层埋深为参数的孔隙度函数; ϕ_0 是地表孔隙度; c 是压实因子(1/m); z 是地层埋深(m).

该公式是最古老的去压实公式, 适用于深层去压实校正. 本文所涉及的地区埋藏较深, 没有大的断层和褶皱作用, 岩性主要为砂泥岩, 所以采用该公式做古厚度恢复. 则地层孔隙度的演化关系式可以写成:

$$\phi(z) = p_s \phi_s(z) + p_m \phi_m(z). \quad (2)$$

式中: p_s 、 p_m 是地层中砂岩、泥岩的含量, 小数, $p_s + p_m = 1$; $\phi_s(z)$ 、 $\phi_m(z)$ 是地层中砂岩、泥岩的孔隙度关于深度的函数.

地层骨架厚度:

$$h_s = \int_{h_1}^{h_2} (1 - \phi(z)) dz. \quad (3)$$

式中: h_s 是地层的骨架厚度(m); h_1 、 h_2 是地层现今的底、顶埋深(m).

依据埋藏状态及地表沉积时骨架体积不变的原则:

$$h_s = \int_{h_1}^{h_2} (1 - \phi(z)) dz = \int_0^h (1 - \phi(z)) dz. \quad (4)$$

式中: h 是沉积时底界面深度, 即古埋深(m).

最终的迭代式为:

$$h_{(i+1)} = h_s + F(h_{(i)}) - F(0) (i = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

其中, $F(h)$ 是 $\phi(h)$ 的原函数. 初值 $h_{(0)} = h_1 + h_s$, 计算直到 $|h_{(i+1)} - h_i| < 0.01$ m 停止.

针对本文研究区选取典型井, 采用声波时差法, 分别用最小二乘法做出砂、泥 2 种岩性的压实曲线 $\phi_s(z)$ 、 $\phi_m(z)$, 该区分别为:

$$\phi_s(z) = 0.38 \exp(-3.64 \times 10^{-4} z), \quad (6)$$

$$\phi_m(z) = 0.67 \exp(-7.55 \times 10^{-4} z). \quad (7)$$

从完井录井图统计出砂泥岩百分含量, 根据以上公式恢复出富县+延 10 的古厚度.

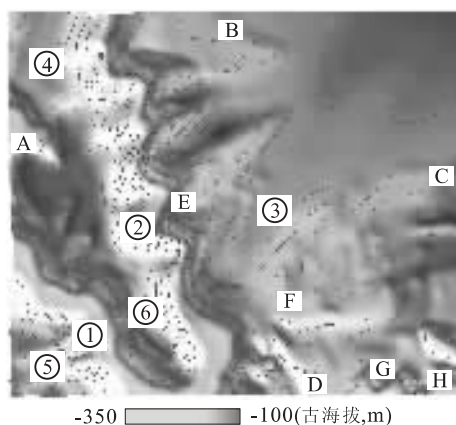


图2 周家湾地区前侏罗纪三维古地貌

Fig. 2 3D palaeogeomorphology of pre-Jurassic in Zhoujiawan area

①. 宁陕古河; ②. 蒙陕古河; ③. 靖边斜坡; ④. 定边斜坡; ⑤. 姬塬东斜坡; ⑥. 新安边梁; A. 杨井; B. 郝滩; C. 新城; D. 薛岔; E. 胡尖山; F. 五谷城; G. 巡检寺; H. 顺宁

2.5 古水深校正

盆地的古水深可以根据沉积物的分布规律、沉积构造、古生物类型及生态等多方面的标志来确定。不论哪种方法仅能对古水深进行粗略的估计。

一般情况下,湖盆的粗碎屑为浅水沉积,由浅水至深水,砂砾沉积减少,粘土质沉积递增。例如砂砾岩对应的古水深一般为1~10 m,泥质粉砂岩一般为5~20 m。沉积构造的类型变化取决于水体深浅和水动力条件变化。盆地的深水、较深水区主要形成微细水平层理,连续韵律发育;深湖浊积岩具复理石构造,槽模、沟模是其特征沉积标志;浅水地区层理类型多样,间断韵律发育,波痕、冲刷侵蚀现象较发育;干裂、雨痕、细流痕等层面构造都是反映沉积物出露水面的标志。例如波状层理、平行层理对应的水深一般为5~20 m。古生物是确定古水深的可靠标志。在缺少遗体化石的湖泊沉积环境中,可采用遗迹化石,如潜穴、爬痕以及其他生物扰动构造确定古水深。

2.6 古地貌恢复

结合沉积相、砂体展布、古流向物源、古厚度恢复、古水深校正等分析资料,以富县+延10地层古海拔深度为主,以延长组顶侵蚀面等高线法、残余厚度法、地层对比剖面图法为约束,应用三维建模技术精确地恢复研究区前侏罗纪古地貌(Magdalena and Bayer, 2003)(图2)。

2.7 古地貌单元划分

研究区古地貌格局由“三斜坡、两河谷、一梁”组

成(图2),即定边斜坡、靖边斜坡、姬塬东斜坡、宁陕古河、蒙陕古河和新安边梁。

斜坡是指地形相对较高的古地貌单元,处于河谷和高地之间的过渡地带。研究区分布3个斜坡区:姬塬东斜坡、定边斜坡和靖边斜坡。靖边斜坡较为宽缓,每公里坡降约5~6 m。因受二级河谷的冲刷和切割使斜坡前缘肢解破碎,形态为指状残丘、坡咀。斜坡的富县+延10砂体厚度约为0~100 m,向高地砂层减薄,为边滩相砂体的主要沉积场所,是古地貌油气藏的聚集区。

河谷是指地形最低的古地貌单元。区内由二、三级河谷组成。按河谷形成时河流的规模可把宁陕古河、蒙陕古河定为二级古河。宁陕古河位于研究区西南部,宽度可达12 km左右,自西北向东南和蒙陕古河汇合注入甘陕古河区。蒙陕古河处于研究区中西部,宽度可达10 km左右,近南北向展布。在二级古河谷两侧发育的三级支河谷主要是沿斜坡边缘分布,将斜坡分割为众多坡咀,这些河谷规模小,河谷窄,流域面积小,坡度大。三级河谷是二级水系的分支,与二级水系构成树枝状体系。古河谷中富县+延10砂岩厚度大于100 m,砂岩中发育典型的河流充填剖面结构,充填有巨厚块状河床砂砾岩,最厚处可达150 m。河谷宽约5~10 km。三级水系下切强度小,其内充填的富县组地层较细、厚度较薄。

梁是指2条古水系所挟持的地形相对较高的长条状地貌单元。新安边梁为宁陕和蒙陕2条二级古水系挟持,呈北西向展布。

3 古地貌油气富集规律

生、储、盖、圈、运、保等条件的有机匹配是侏罗纪古地貌油气成藏的基本条件(乔永富等,2005)。

3.1 有利的生油凹陷为侏罗纪储层提供了丰富的油气资源

在三叠系时期,陕甘宁湖盆是在大型台块的基底上发生、发展的,水域广阔,基底宽平,沉积条件统一。延长组的长2和长3以三角洲平原分流河道、三角洲前缘水下分流河道为主,沉积了巨厚的深湖相暗色泥岩,构成了研究区的油源基础。

3.2 前侏罗纪深切河谷是油气运移的主要通道

侏罗纪古河是沟通下部油源,确保油气向上运移的重要保证。延长组顶部遭受长期淋滤风化剥蚀,形成了明显的侵蚀地形,加上侏罗纪早期河道对其进

一步切蚀,延安组底部甚至直接与延长组地层接触(图 3). 宁陕古河、蒙陕古河中长 2 地层都已出露,其无疑是延长组过剩压力释放的有利场所,深切河谷释放了生油层过剩压力,因而成为油气运移的主要通道. 油气通过古河谷既可发生垂向向上运移,也可沿河道砂体侧向运移,在圈闭条件好的地方聚集成藏.

3.3 斜坡带的河流边滩相砂体是最有利的储集体

主河床内滞留亚相砂体是河流相中最粗的部分,主要为一套灰白色砾粗砂岩(滞留砂岩)及中砂岩,砂岩分选性差—中等,孔隙度低,渗透率差,储层非均质性强,该相带很少发现有价值的油气藏. 斜坡带的边滩沿主河道和支河道近岸分布,是一套以中粗和中细砂岩为主的沉积,分选性好,粒度适中,储层非均质性减弱,砂岩储层物性好. 从富县+延 10 三维孔隙度模型(图 4a)和三维渗透率模型(图 4b)中可以看出,研究区的定边斜坡、靖边斜坡、姬塬东斜坡为油气富集提供了最有利的相带. 实际勘探资料证明除极个别出油井在地形低的河谷中外,其余绝大部分处于古地形较高的斜坡、台地和梁上.

3.4 压实构造和岩性遮挡是古地貌油气藏主要的圈闭条件

富县+延 10 储层属河道砂体,沉积时候受时空制约,储层连片性差,河道变化快,形成岩性圈闭的沉积条件. 同时,起伏不平的前侏罗纪古地貌形态与富县+延 10、延 9 地层沉积时的厚度差异形成压实构造的古地貌基础. 后期构造应力作用形成的鼻隆

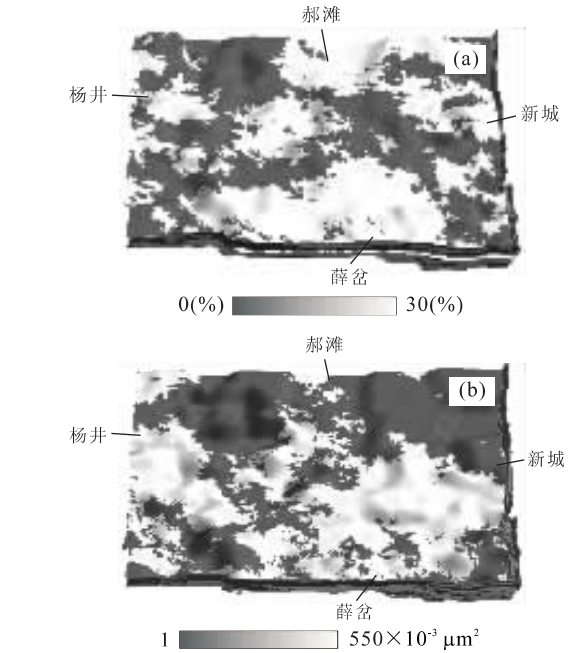


图 4 富县+延 10 孔隙度(a)和渗透性(b)模型
Fig. 4 Porosity (a) and permeability (b) models of Fuxian Formation and Yan10 oil-bearing bed

构造为油气提供了有利指向和良好圈闭.

3.5 上覆河湖沼泽相煤系地层及泥岩淤积层为油气聚集起到封堵作用

通过对延 9 岩性分析,结合延 9 沉积相以及延 9 期砂体展布模型(图 1b),发现延 9 期末研究区大面积沼泽化,普遍形成一套灰黑色泥岩、普遍发育的湖沼泥岩、炭质泥岩、煤层和成岩致密带、砂体侧边带,形成圈闭良好的封盖条件.

4 结论

(1)在研究区地震勘探资料相对缺乏的情况下,进行大量的古地质古构造、岩相古地理、古流向物源等定性分析是成功恢复古地貌的基础. (2)结合丰富的地质、钻井、测井等解释资料,应用精细三维建模技术,进行古厚度恢复、古水深校正等定量分析是精确恢复古地貌的保证. (3)建立岩相、孔隙度、渗透率等三维模型为解释古地貌油气藏富集规律及其控制因素提供了有利的佐证. 依据以上模型,在三大斜坡带的河流边滩相砂体和河谷内的心滩处成功预测出有利油气聚集区. (4)古地貌模型不仅可以据实际勘探情况及时动态地修改完善,而且可以为勘探开发提供可靠依据,指导井位部署,降低勘探风险.

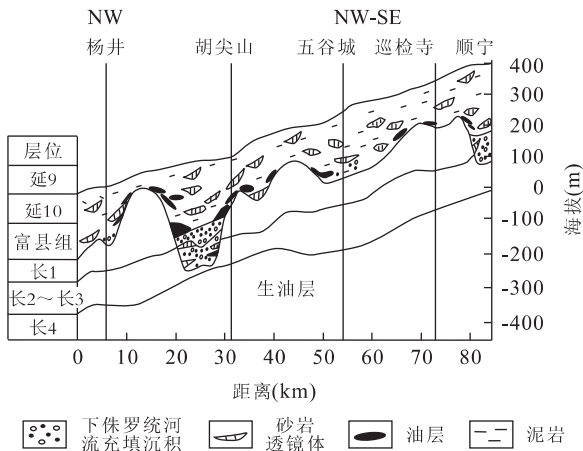


图 3 延安组储集层与延长组生油层接触关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the contact between reservoir bed of Yan'an Formation and petroleum source bed of Yanchang Formation

图中地名位置按图 2 所示

References

- Magdalena, S., Bayer, U., 2003. Salt redistribution during extension and inversion inferred from 3D backstripping. *Tectonophysics*, 373(1-4): 55-73.
- Mao, X. P., Li, S. H., Liu, G., et al., 1998. A backstripping inversion method in complex condition—Maximum depth method. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(3): 277-280 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y. F., Mao, X. P., Xin, G. Z., 2005. Quantitative simulation of hydrocarbon migration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 617-622 (in Chinese with English abstract).
- Ye, J. R., Lu, M. D., Zhang, Z. C., 1995. Geohistory modeling and hydrocarbons accumulation of Lower Paleozoic strata in Ordos basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(3): 342-348 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毛小平, 李绍虎, 刘刚, 等, 1998. 复杂条件下的回剥反演方法——最大深度法. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(3): 277-280.
- 乔永富, 毛小平, 辛广柱, 2005. 油气运移聚集定量化模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(5): 617-622.
- 叶加仁, 陆明德, 张志才, 1995. 鄂尔多斯盆地下古生界地层地史模拟与油气聚集. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(3): 342-348.