临汾—运城盆地上古生界演化、改造及油气资源潜力分析

赵俊峰[1)],盛双占[1)],王栋[1)],芦建军[2)],张建伍[3)],刘刚[3)],崔海栋[4)]

1)西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系,西安,710069;

2)内蒙古第八地质矿产勘查开发院,内蒙古乌海,016000;

3)中国石油长庆油田勘探开发研究院,西安,710021;

4)中国石油青海油田勘探开发研究院,甘肃敦煌,736200

内容提要:临汾—运城盆地位于山西省中南部,属新生代汾渭地堑系的一部分。以往勘探表明,该地区新生界缺乏有效烃源岩和有利生油条件,油气资源潜力不容乐观。但近年来邻区鄂尔多斯盆地、沁水盆地等上古生界天然气勘探的持续突破,为该地区前新生界油气勘探提供了重要启示。本文通过地震、重磁资料解释,并结合近年来区内钻孔资料,较全面地刻画了盆地上古生界的赋存分布状况,指出石炭系—二叠系主要分布在临汾坳陷中—北部和峨嵋隆起区西北部。由周邻露头资料推测,该盆地上古生界煤系烃源岩较为发育,有机质达到中等—高成熟演化阶段。结合后期改造、埋藏史和生烃史模拟、保存条件分析等,认为盆地北部临汾凹陷为煤层气或常规天然气勘探的较有利选区。

关键词:上古生界;煤系烃源岩;油气资源;临汾—运城盆地;汾渭地堑(汾河—渭河地堑)

临汾—运城盆地位于山西省南部,向北与晋中、忻定、大同等盆地共同构成"多"字型的新生代山西断陷盆地群;向西南延伸,与渭河盆地相接,合称为汾渭地堑(盆地)(王同和,1995;邢作云等,2005;图1a)。临汾—运城盆地北西侧以罗云山山前断裂为界,东界为霍山断裂和大阳断裂带,东南界为中条山山前大断裂,主体呈NNE向展布,面积约1.13×10^4 km^2。根据新生界堆积厚度和构造起伏,划分为临汾坳陷、运城坳陷及峨嵋隆起3个二级构造单元,进一步分为8个凹陷和若干凸起、斜坡等次级构造单元,各凹陷的沉降起始时间从始新世—上新世不等(图1b)。

20世纪60~70年代,原地矿部等单位对山西断陷盆地开展了主要针对新生界的石油普查与勘探工作,但未取得工业突破。以往工作表明,该地区新生界缺乏有效烃源岩和其他有利成藏条件,勘探潜力不容乐观(王同和,1995)。但大量研究认为,山西中南部中生代、古生代分别为鄂尔多斯和大华北盆地的一部分,其与鄂尔多斯和沁水盆地等周邻盆地经历了相似的沉积—构造演化过程(程保洲,1992;尚冠雄,1997;Liu Chiyang et al.,2008)。鄂尔多斯盆地在中生界、上古生界均取得重大突破,东邻沁水盆地煤层气也已大规模工业开发。这为临汾—运城盆地前新生界油气勘探提供了重要启示。鉴于临汾—运城盆地中生界残留少,且缺乏有效烃源岩,故中生界勘探潜力也不大(赵俊峰等,2015❶;芦建军,2015;曹冀龙,2016),而上古生界从地层分布、沉积环境、烃源岩热演化及保存条件等方面均具有相对有利条件,值得进一步研究和勘探。

本文在露头调查、钻井资料统计、图件编制、烃源岩样品测试和埋藏史恢复等基础上,通过对研究区上古生界沉积特征,后期改造和油气地质基本条件的综合分析,提出对该区上古生界油气勘探的认识和有利选区。

1 地层分布

根据盆地内多年来积累的50余口各类钻井资料,结合新生代盆地形成构造背景,首次编制了临

注:本文为国家重点研发计划课题(编号:2017YFC0603106)、国家自然科学基金重点资助项目(编号:41330315)、中国地质调查局项目(编号:12120113039900)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费项目(编号:201210140)的成果。

收稿日期:2018-02-06;改回日期:2018-10-22;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2019.01.011

作者简介:赵俊峰,男,1975年生,副教授,博士生导师,主要从事盆地分析与沉积学研究,Email:zjf@nwu.edu.cn。

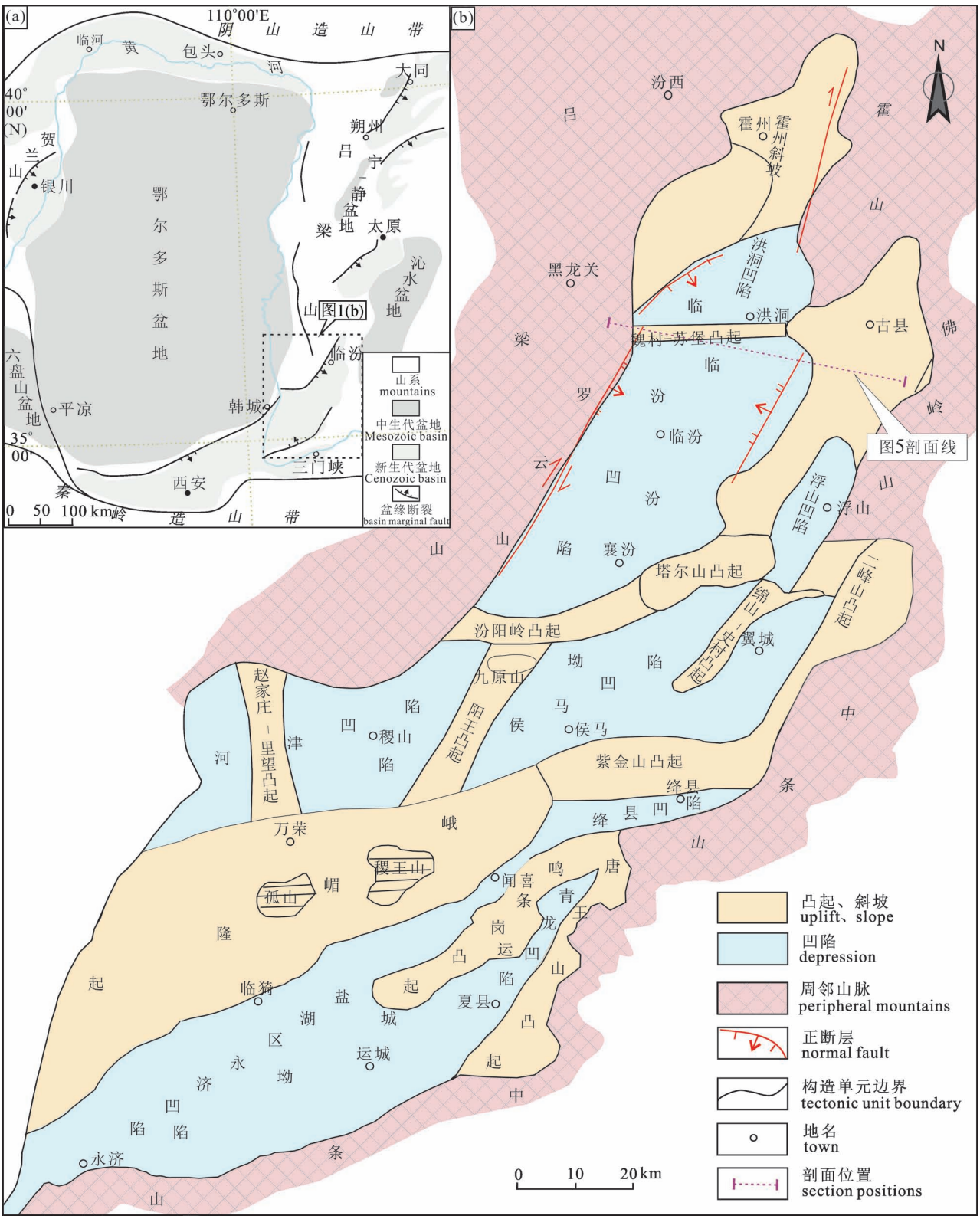
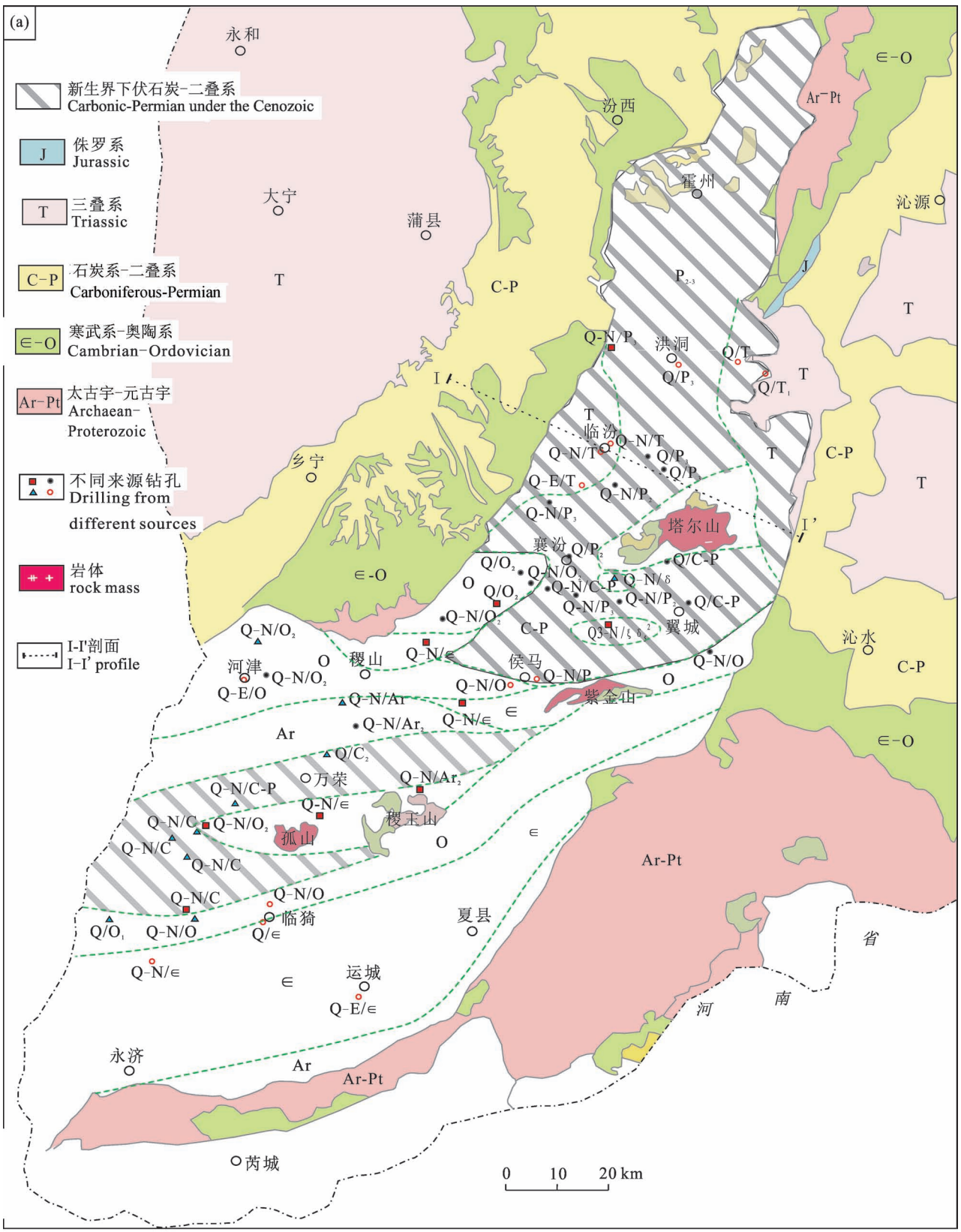


图 1 临汾—运城盆地位置(a)与构造单元划分(b)图

Fig. 1 Location (a) and structural units division (b) of the Linfen—Yuncheng Basin

汾—运城盆地的前新生界地质图(图 2)。由图可知,临汾坳陷新生界下伏基岩以石炭系—二叠系为主,其次为下—中三叠统,另有上侏罗统、太古宇变质岩等零星分布(图 2、图 3)。

具体分布情况为:北部霍州一带为石炭系—二叠系,仅在霍山断裂带附近为寒武—奥陶系;西部罗云山断裂带附近为寒武—奥陶系。临汾—洪洞一带为下—中三叠统;在临汾东部有上侏罗统保存。襄汾—翼城一带基岩地层主要为石炭系—二叠系,部分钻孔揭露燕山期花岗岩。侯马凹陷基岩以石炭系—二叠系为主,南部沿东西向赋存寒武—奥陶系基岩。据钻井资料及 1∶50 万区域地质图资料推



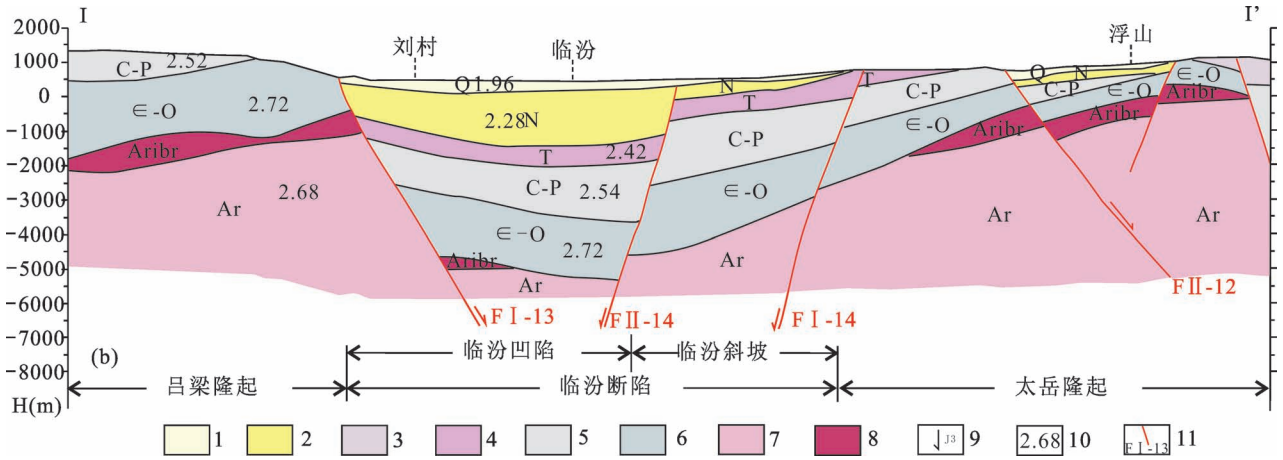


图 2 临汾—运城盆地及邻区前新生界地质图（a）与重磁解释剖面[（b），据李朝阳等,2015]

Fig. 2 Pre-Cenozoic geological map（a）and cross section based on interpretation of gravity and magnetic data [fig.（b）referred from Li Chaoyang et al., 2015)

1—第四系砂砾岩;2—新近系粉砂岩;3—中生界砂页岩;4—三叠系砂砾岩;5—二叠系—石炭系碎屑岩;6—下古生界碳酸盐岩;7—太古宇;8—太古宇磁铁石英岩;9—磁化方向;10—地层密度;11—断层及编号

1—Quaternary glutenite; 2—Neogene siltstone; 3—Mesozoic sand—shale stone; 4—Triassic glutenite; 5—Permian—Carbonferous clastic rocks; 6—Lower Paleozoic carbonate rocks; 7—Archaean; 8—Archaean magnetite-quartzite; 9—magnetization direction; 10—density of stratum; 11—fault and serial number

测,河津凹陷新生界下伏主要为寒武—奥陶系,南部靠近峨嵋隆起处为太古界变质岩。根据最新的地震勘探资料(李自红等,2014)和重磁解释成果(李朝阳等,2015❷),临汾坳陷基底反射波 Tg 到新近系反射波 TN 大概有厚度 3000 m 的沉积地层稳定分布,经钻井资料标定,进一步佐证新近系之下应该有较大范围的上古生界沉积地层。

运城坳陷新生界下伏基岩地层以寒武—奥陶系为主,其次为石炭系—二叠系。具体分布为:峨嵋隆起区西部较大范围赋存石炭系—二叠系,西北部峨嵋隆起区为寒武—奥陶系。孤山,大、小嶷山为花岗闪长岩,稽王山及其南、北两侧、台地东北部东南边缘一带为奥陶系和寒武系,稷王山东侧为太古—元古界变质岩。根据水文和石油勘探钻孔资料,推测运城凹陷区绛县、夏县、运城城区一带为寒武系;靠近中条山附近,可能有太古界分布。

尽管目前区内钻穿上古生界的钻井较少,但依据钻遇上古生界的具体层位(图 3),结合周邻露头资料和最新重磁解释成果(李朝阳等,2015❷;图 2b),也可推测盆内上古生界的大致厚度,总体呈北厚南薄的特点。具体分布情况为,临汾、洪洞地区分布最广,厚度为 500~900 m;襄汾—翼城地区呈东西向分布,厚度为 300~500 m;侯马凹陷局部残存,厚度约为 150 m;万荣一带呈 NEE 向展布,厚度 200 m 左右。

2　沉积特征与演化

通过对盆地东、西两侧的古县圪堆和洪洞三交河等剖面进行观测,并与太原西山、乡宁台头、垣曲窑头等上古生界典型剖面(程保洲,1992;孔宪桢等,1996;王香增等,2017;苏东旭等,2017)对比表明(图 4、图 5),盆地两侧上古生界各组岩性组合、沉积序列等,具有基本一致特征和演变规律,故周邻露头可指示盆内上古生界的岩性和沉积相特征。根据露头岩性及其组合、粒度特征、沉积构造、古生物化石标志等,对研究区上古生界各时期沉积相进行分析。

研究区及周邻地区本溪组沉积厚度数 0~30 m,其中垣曲窑头—王茅最薄,这与当时的沉积环境有关。上石炭统本溪组沉积期,海水从五台、盂县一带自东北侵入山西地区,当时中条山地区推测为隆起古陆;该时期山西中南部为陆表海障壁—潟湖环境,其中沿襄汾东西线以南为潟湖环境;以北包括临汾地区为障壁岛、潮坪环境。晋祠组厚度数 0~30 m,平均厚度 15 m,与本溪组沉积期类似,物源来自中条山古隆起。

太原组厚度 30~110 m,一般为 70~90 m。该时期为海侵方向的转换期,由先前的山西北东方向侵

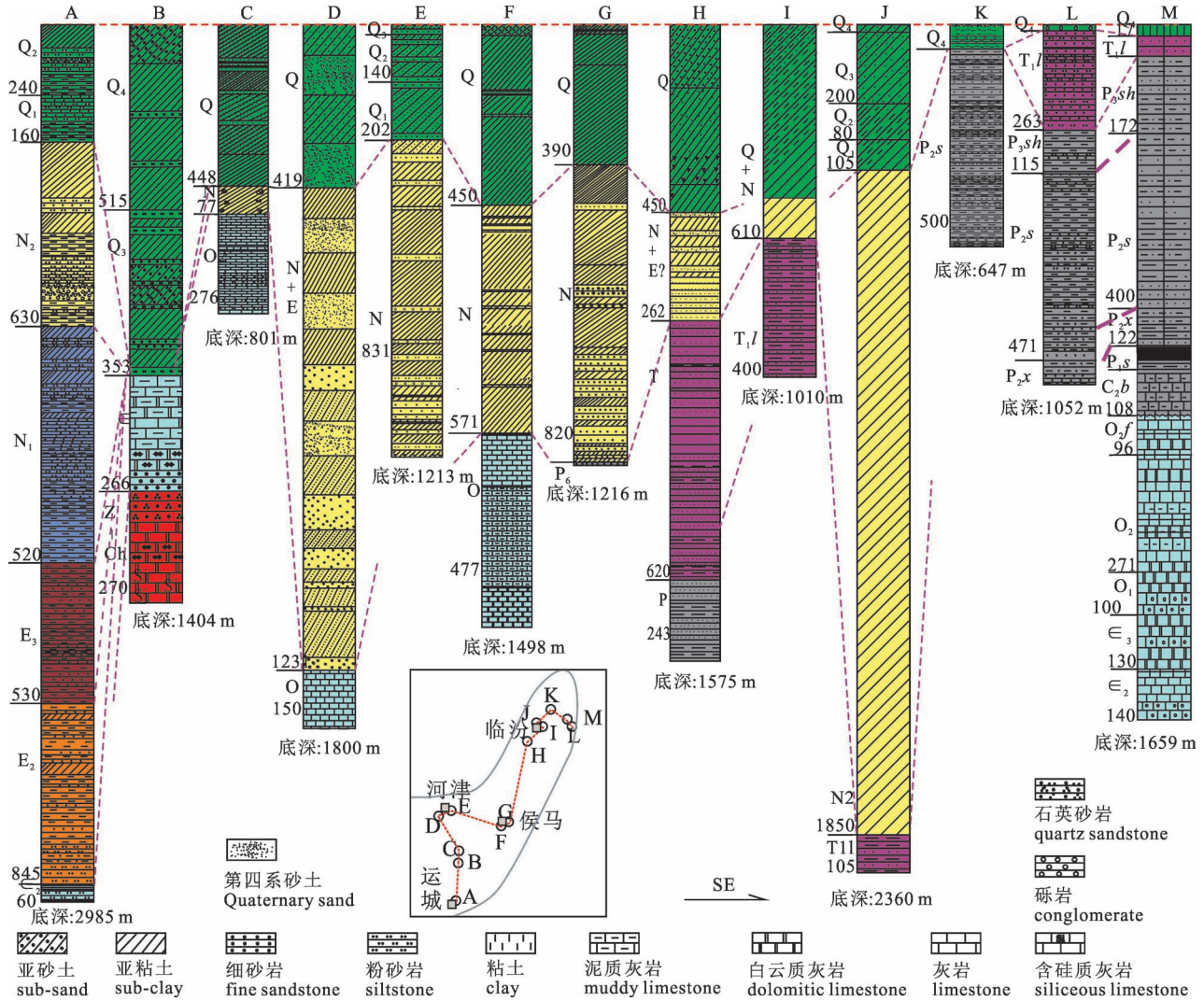


图 3 临汾—运城盆地钻至新生界基底钻孔柱状对比图

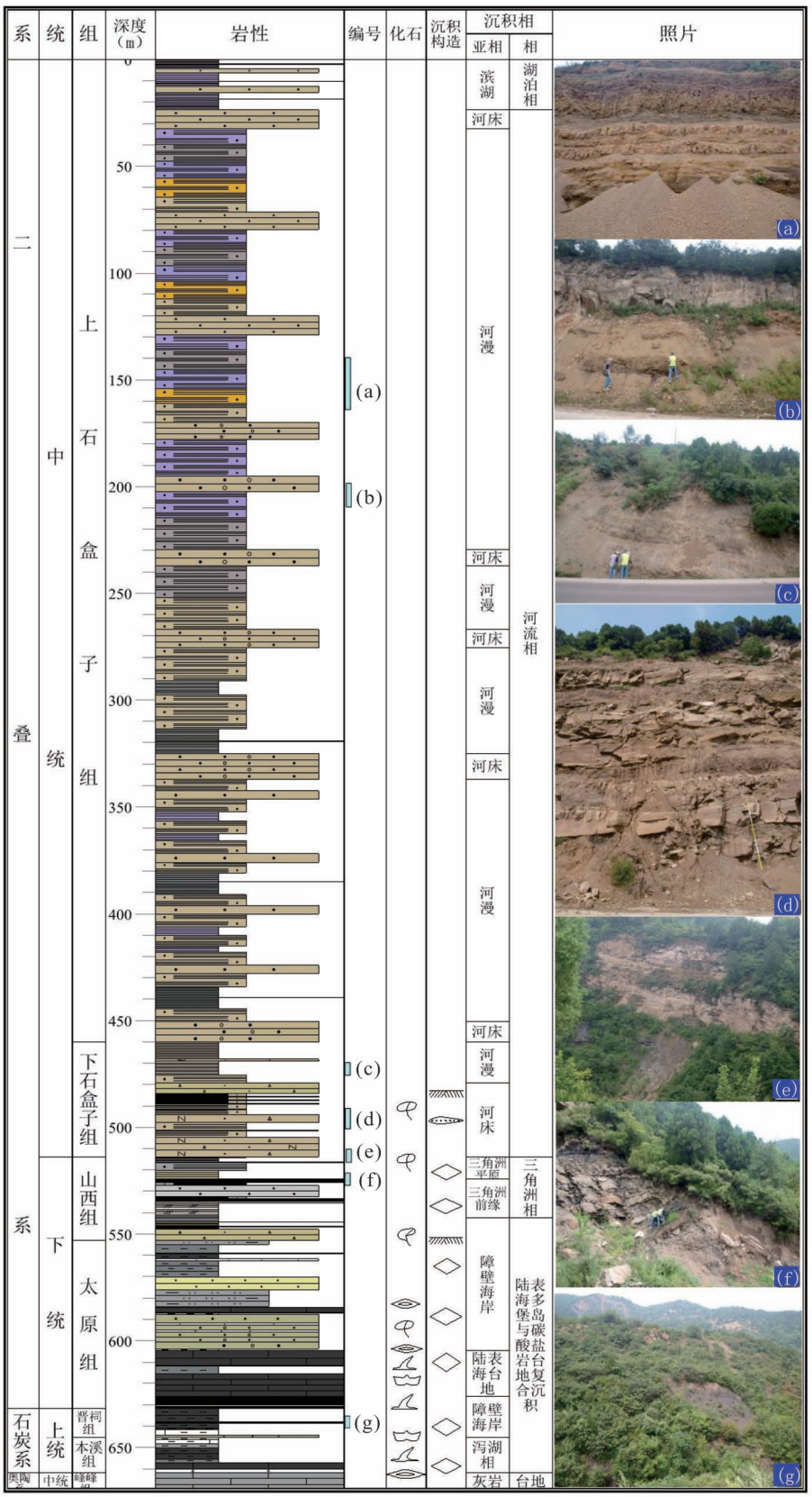
Fig. 3 Statigraphic columnar correlation based on boreholes penetrated basement of Cenozoic strata in the Linfen—Yuncheng Basin

入转换为由东南方向晋城一带侵入;该时期乡宁—龙门山地区为障壁岛—潟湖环境;乡宁东北为潮坪环境;侯马—绛县一线以东及其侯马南北向沿线东部为台地相;其余地区为潟湖环境。整体表现为陆表海障壁岛—潟湖体系。

山西组厚度 20~60 m。山西中南部该期为三角洲环境,其中乡宁—龙门山及其以西地区和洪洞东南小部为河口砂坝亚相;洪洞北部为三角洲平原分流河道、沼泽微相;其余部分为分流间湾。物源来自北部和南部均有。

下石盒子组厚度从 50~140 m,总体上呈南厚北薄趋势,沉积环境已转变为陆上河流环境,局部为湖泊环境。洪洞、临汾、襄汾、塔儿山及其以东地区为边滩亚相;乡宁及其以西地区为深、浅湖,小部地区为滨湖三角洲环境;龙门山—河津地区和夏县及其以北至马头山东侧为分流河道亚相;其余为泛滥盆地环境(图 4)。上石盒子组厚度变化较大且厚度最大,达 320~460 m,总的变化趋势是南厚北薄;石千峰组厚度 80~200 m,大多地区现今保存不完整。上石盒子—石千峰组以氧化性质的黄绿色、紫红色为主,为干旱气候下的陆相环境为主。

总体而言,研究区及邻区晚古生代本溪—太原组沉积期为陆表海障壁—潟湖环境,山西组沉积期为三角洲环境,下石盒子—石千峰组沉积期为陆上河流环境并有短暂的湖泊出现。晚古生代,由早期到晚期经历了滨海环境向陆相环境的演变,古气候



水平层理
horizontal bedding

波状层理
wavy bedding

交错层理
cross bedding

冲刷面
scour surface

透镜体
lentoid sandbody

䗴
fuzulinid

腕足动物
brachiopod

牙形刺石
conodonts

植物碎片
plant debris

菱铁矿
siderite

照片说明：a，b：上石盒子组灰白色砂岩与杂黄绿色泥岩组合；c～e：下石盒子组浅黄绿、灰白色砂岩与泥岩互层；f：山西组煤系地层；g：晋祠组碳质泥岩与石英砂岩

Outcrop photo caption: a, b: Grey-white sandstone interbedded with yellow-green mudstone in Shangshihezi Formation; c~e: Light yellow-green and grey-white sandstone interbedded with mudstone in Xiashihezi Formation; f: coal-bearing strata in Shanxi Formation; g: Carbonaceous mudstone and quartz sandstone in Jinci Formation

图 4 临汾—运城盆地西侧洪洞三交河上古生界沉积柱状图

Fig. 4 Sedimentary column of Upper Paleozoic sourced from Sanjiao River section in western Hongtong county, the Linfen—Yuncheng Basin

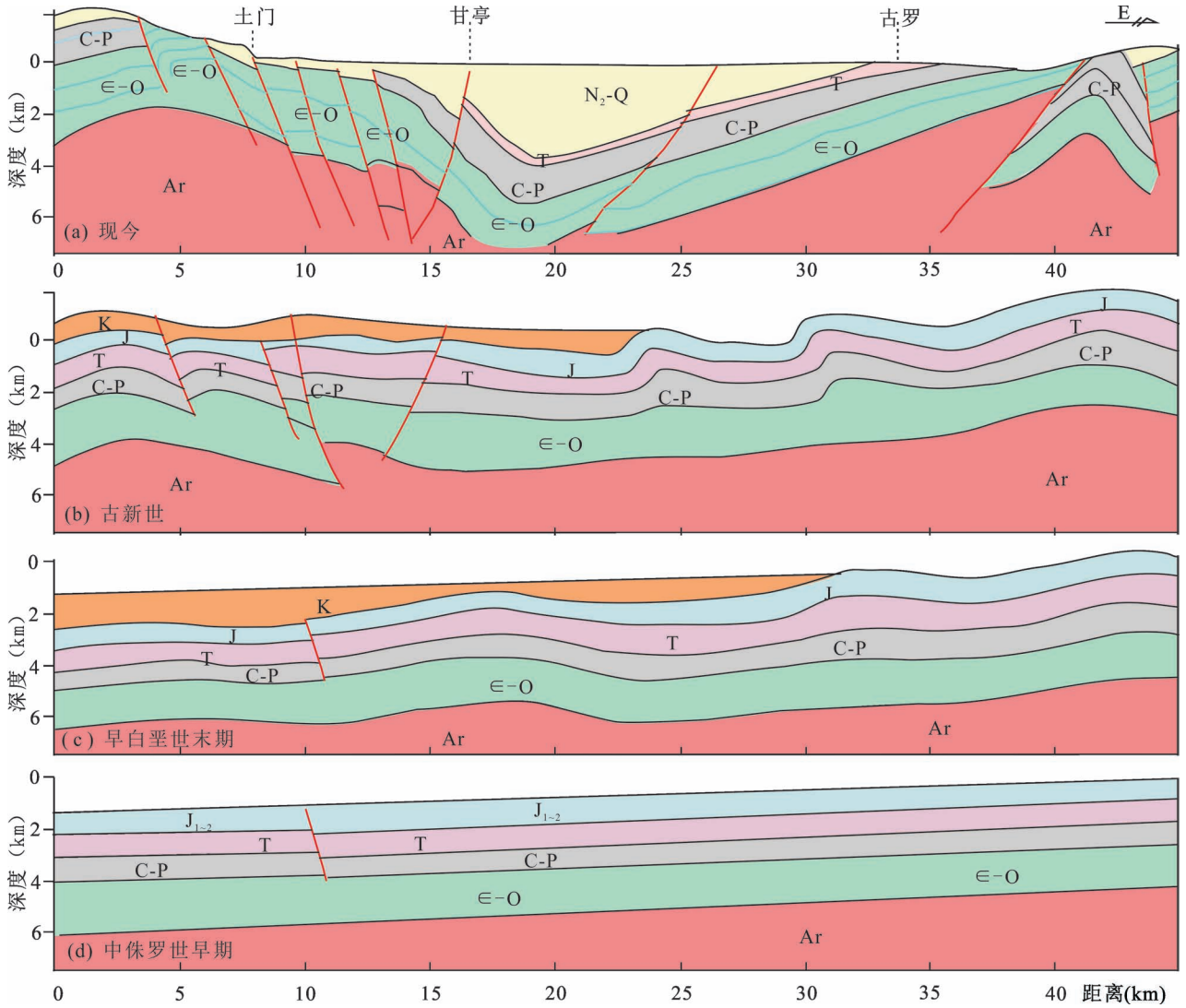


图 5 临汾坳陷中—新生代构造演化示意图

Fig. 5 Schematic sections showing tectonic evolution from Mesozoic to Cenozoic of the Linfen depression

由温暖湿润变为炎热干旱。

3 后期改造

通过对周邻构造变形观察，结合样品裂变径迹热年代学分析（刘武生等，2008；Zhao Junfeng et al.，2016），初步恢复了临汾—运城盆地上古生界构造演化史（图 5）。研究区主要经历了印支期（T_3 末）、燕山中—晚期（J_3、K_2）、喜山期的（E_{1-3}—N_1）的后期改造。

从研究区和整个大华北盆地看，三叠系与上古生界之间不存在明显的构造运动（Liu Chiyang et al.，2008）。三叠系在研究区连续沉积，且残存地层亦分布较广。但晚三叠世印支运动发生整体抬升，造成侏罗系下覆地层的不均匀剥蚀。早—中侏罗世，研究区与其西部的鄂尔多斯盆地同步升降，接受较稳定的地层沉积。晚侏罗世，研究区发生以挤压、抬升作用为主的强烈构造改造，造成晚侏罗世沉积的普遍缺失以及 J_2/K_1 之间的不整合接触（王守义，1981；张岳桥等，2006；Liu Chiyang et al.，2008）。早白垩世，华北中西部又处于伸展阶段，研究区可能与西部的鄂尔多斯盆地为一体，接受了少量沉积（赵俊峰等，2008；翁望飞等，2009）。但晚白垩世—古近纪早期，又遭受了强烈的挤压抬升，使得中生界和部分上古生界遭受剥蚀。在大同盆地西缘，可见太古界片麻岩逆冲于下白垩统之上；寒武—奥陶系逆冲于中侏罗统之上（刘光勋，1985；孟宪梁等，1986），这表明挤压构造的形成应在早白垩世末—晚白垩世末期。

始新世以来,由渭河盆地向北,依次发生断陷,接受沉积;研究区北部的临汾凹陷直至上新世才开始发生断陷,接受沉积。盆地东、西两侧的霍山、中条和吕梁山,伴随盆地的沉降持续抬升,而盆内上古生界再次经历深埋作用(图 5)。

无论是晚侏罗世还是晚白垩世的构造运动,对此前地层的改造均十分强烈,新生代汾渭地堑的控盆断裂多是沿燕山期的逆断层反转形成(王同和,1995)。综合分析认为,现今新生代地堑中缺失中生代地层的地区,应是燕山运动中晚期抬升剥蚀改造所致,并非原始沉积缺失。

4　油气地质条件分析

4.1　烃源岩

如前所述,晚古生代山西中南部时期经历了由陆表海向陆相沉积环境的转变,在海陆过渡地带的三角洲平原、前缘以及潟湖、潮坪环境,均为烃源岩有利发育地区。上古生界烃源岩主要包括太原组和山西组的煤层、碳质页岩及暗色泥岩。

(1)有机质丰度。由于盆地内部大多数地区被新生界覆盖,本次共采集露头烃源岩样品 6 个进行岩石热解实验。得到评价有机质丰度数据参数为有机碳(TOC),残留烃(S_1)、热解烃(S_2)和生烃潜量 S_1+S_2(mg/g)以及氢指数 IH(mg/g)。本实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

煤样有机碳含量高,其含量介于 24.98% ~ 37.46%;残留烃与热解烃较低,生烃潜量介于 8.07 ~ 134.76 mg/g;氢指数中等,变化较大,介于 32 ~ 335。2 个碳质页岩样品有机碳含量变化较大,其含量分别为 4.62%和 18.00%;残留烃与热解烃很低,生烃潜量分别为 2.71 mg/g 和 0.66 mg/g;氢指数低,分别为 34 和 4。对照煤系地层生烃潜力标准(黄第藩等,1996),煤样有机质丰度中等—较好,是盆地内最好的烃源岩;碳质页岩有机质丰度中等,具有一定的生烃能力。由于所采样品均为露头样品,经历了长时间的表生作用,导致烃源品质变差,有机质丰度降低。通过与沁水盆地(吕建伟,2012)和鄂尔多斯盆地上古生界煤样有机质丰度(周进松等,2014)对比,表明研究区与鄂尔多斯盆地烃源岩有机质丰度大致相当。

(2)有机质类型。前人对研究区北部霍西煤田煤岩显微组份分析表明,上古生界煤岩主要由镜质组和惰质组组成,腐泥组和壳质组含量低。镜质组+惰质组为 89.6% ~ 97.0%,腐泥组为 2.9% ~ 9.8%,壳质组含量最少,介于 0 ~ 7.6%。总体反映有机质类型以Ⅲ型为主(马鹏程等,2016),与沁水盆地与鄂尔多斯盆地干酪根类型一致。

(3)有机质成熟度。通常用最高热解峰温来判断岩石中有机质成熟的高低,其中最高热解峰温值(T_{max})为热解过程中出现 P2 峰时的温度。由热解实验可得最高峰温 T_{max}(℃),根据有机质成熟度标准可知样品 AJ-01、AJ-02 和 ZZ-01 为成熟,样品 SJ-

表 1 临汾—运城盆地周邻露头潜在烃源岩岩石热解结果

Table 1 Pyrogenation results of the potential source rocks in the adjacent area of the Linfen—Yuncheng basin

样品编号	采样地点	岩性	地层	有机碳(TOC)(%)	残留烃(S_1)(mg/g)	热解烃(S_2)(mg/g)	生烃潜量(S_1+S_2)(mg/g)	烃指数(IHC)(mg/g)	氢指数(IH)(mg/g)	最高峰温 Tmax(℃)
AJ-01	古县安吉	2 号煤	山西组	33.5	1.83	87.93	89.76	5.46	262	479
AJ-02	古县安吉	碳质页岩	太原组	4.62	1.12	1.59	2.71	24.24	34	473
ZZ-01	古县张庄	2 号煤	山西组	25.57	0.79	34.68	35.47	3.09	136	458
SJ-01	洪洞三交河	2 号煤	山西组	24.98	0.15	7.92	8.07	0.6	32	444
SJ-02	洪洞三交河	碳质页岩	山西组	18	0.03	0.63	0.66	0.17	4	502
SJ-03	洪洞三交河	2 号煤	山西组	37.46	9.3	125.46	134.76	24.83	335	445

表 2 临汾—运城盆地及周缘露头有机质成熟度数据表

Table 2 Summary of organic maturity data sourced from samples in the Linfen—Yuncheng Basin and adjacent outcrops

地 区		霍州矿区	蒲县吉县	古县永乐	襄汾矿区	万荣矿区
Ro(%)	最小值~最大值	0.86~1.21	1.32~3.17	1.85~2.02	5.39~5.59	1.12~2.76
	平均值(数量)	1.04 (2)	1.79 (21)	1.94 (4)	5.49 (2)	1.48 (2)
文献来源		秦勇等,1997	巢海燕等,2016	杜春林等,2016	成学忠,2017	周安朝[3]

01、SJ-03 号为低成熟,样品 SJ-02 达高成熟阶段。

汇总前人对盆地及邻区上古生界煤岩镜质体反射率数据(秦勇等,1997;巢海燕等,2016;杜春林等,2016;成学忠,2017;周安朝[3])表明(表 2):盆地北部霍州矿区处于成熟阶段,盆地其它地区 *Ro* 普遍大于 1.3%,处于高成熟—过成熟阶段;在襄汾矿区 *Ro* 最大,达到 5.49%,推测是受燕山期侵入岩的接触变质作用所致(杨瑶等,2017)。

对比鄂尔多斯东部(任战利等,2006)和沁水盆地(宋党育等,1998)上古生界已有数据可知,研究区上古生界热演化程度低于沁水盆地,与鄂尔多斯盆地南部大致相当。

(4)热演化史模拟。结合该地区上古生界演化与改造过程,以邻区实测 *Ro* 数据为约束,对盆地不同凹陷 9 口井进行了埋藏—热演化史恢复。模拟表明,襄汾、侯马、临汾和万荣等地区在中侏罗世末—晚侏罗世成熟度就已超过 1.3%,进入生气阶段。经过早白垩世—古近纪抬升降温之后,在新近纪—第四纪以来又经历了埋藏增温作用(图 6)。

4.2 储层

研究区潜在的储集岩为太原和山西组中的碎屑岩和煤层。根据前人对西侧大宁、蒲县、吉县露头区的物性分析,显示这些地区山西组砂岩孔隙度为 0.76%~7.96%,平均值为 3.12%;渗透率为 0.060×10^{-3}~0.964×10^{-3} μm²,平均值为 0.390×10^{-3} μm²。为特低孔特低渗储层(马航,2014)。储层孔隙类型主要为溶蚀作用形成的次生孔隙。与鄂尔多斯东南部上古生界天然气储层物性特征(周进松等, 2014)基本一致。

4.3 圈闭与保存条件

研究区盖层类型为泥质岩类,主要包括页岩、泥岩和粉砂质泥岩。盆地被新生界所覆盖,第四系和新近系岩性为松散层,无法保存油气,古近系已成岩,三叠系剥蚀较严重,局部地区有所保留,若其直接覆盖石炭系—二叠系烃源岩,则保存条件较好。根据研究区前新生界底界埋深图(图 7)和石炭系—二叠系分布(图 2a),认为临汾、洪洞、襄汾等地区盖层条件好,而侯马和万荣地区盖层条件较为不利。

5 有利选区

作为有利含油气区,应至少具备三个基本条件,首先应具有较厚的烃源岩层作为生烃物质基础;其次,有机质成熟度应该达到大规模生油或生气阶段;此外,后期的构造演化与生烃史相匹配并有利于烃类保存的圈闭条件。由前述可知,研究区上古生界具有与鄂尔多斯、沁水盆地类似的烃源岩物质基础,但 3 个地区后期经历的沉积—构造演化及埋藏史不同。鄂尔多斯盆地内部整体构造活动较弱,中生界沉积厚度较大,经历了较长时间的持续生烃过程,主力烃源岩在早白垩世晚期大规模成藏之后发生整体抬升(任战利等,2006;周进松等, 2014)。沁水盆地晚古—古近纪与研究区经历了相似的沉积—构造演化演化过程,但中生代特殊的构造—热事件(宋党育等,1998),应是其煤型气富集的主要因素。与周邻地区比较,研究区的显著特点是中生代经历了多期构造改造,晚新生代发生了断陷沉降,又接受沉积。

研究区北部临汾坳陷石炭系—二叠系分布较

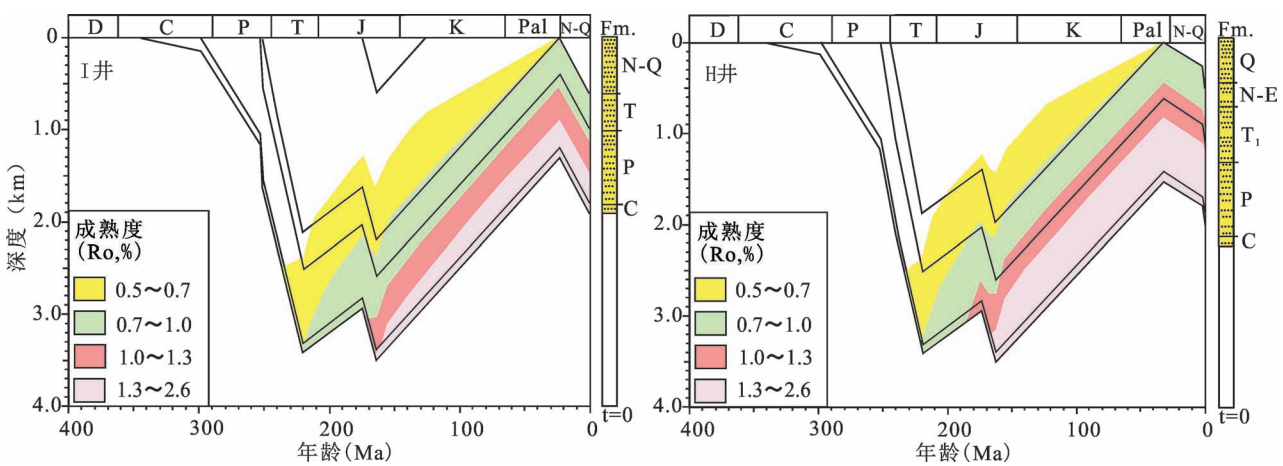


图 6 临汾—运城地区典型钻井埋藏生烃史模拟结果

Fig. 6 Modelling results of burial and hydrocarbon-generation histories sourced from typical boreholes in the Linfen—Yuncheng Basin

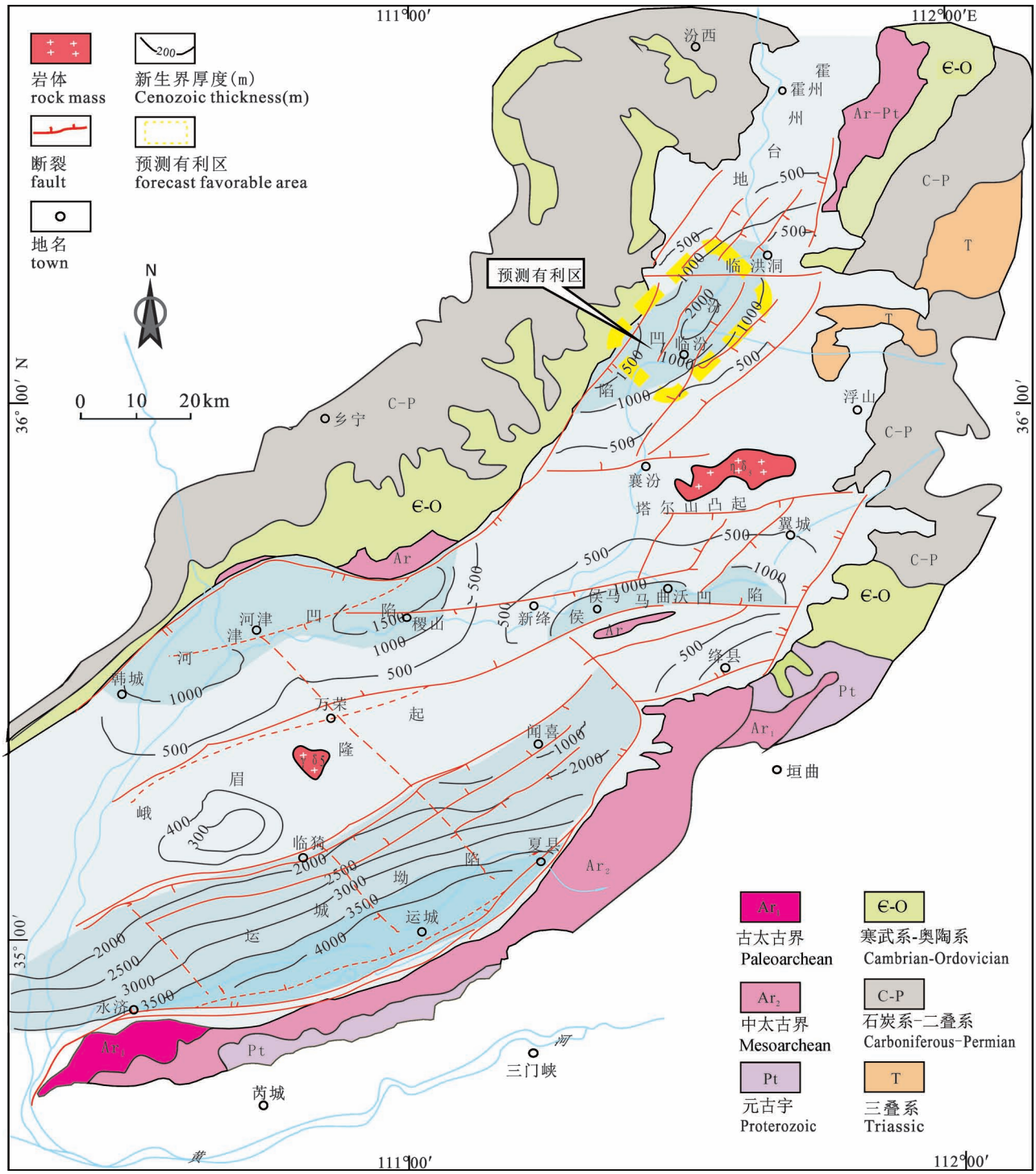


图 7 临汾—运城盆地新生界底界埋深和有利区预测图

Fig. 7 Distribution of the Cenozoic bottom depth and favorable area for hydrocarbon exploration in the Linfen—Yuncheng basin

广,太原组、山西组以滨海三角洲、障壁岛—潟湖相等有利于烃源岩发育的相带为主,同时不乏多种类型的储集砂体。从成熟度角度看,洪洞、临汾一带,已进入中等成熟—高成熟阶段,襄汾、侯马地区热演化程度更高,具备一定的生烃物质基础和生烃能力。埋藏史—热演化史恢复表明,襄汾、侯马、临汾地区在中侏罗世末—晚侏罗世已达生烃高峰。之后虽经白垩纪—古近纪抬升剥蚀和降温,但这些地区石炭系—二叠系保存尚好,靠北部还有三叠系覆盖,之上还有新近系—第四系覆盖。临汾凹陷西北部新生界

埋深相对更深,达到 1000~2000 m。故综合考虑,认为该地区为上古生界较为有利的选区(图 7)。但据前人研究(孟令超,2011),该地区新生代断层较发育,这些断层是否沟通下伏古生界地层,在天然气成藏和圈闭保存过程中起何种作用,有待进一步研究关注。

6 结论

(1)依据各类钻探资料和地震、重磁等解释资料,首次较全面地编制了临汾—运城盆地前新生界地质图,显示临汾—运城盆地上古生界主要赋存于北部的洪洞、临汾、襄汾和侯马一带,部分地区上古生界之上还有三叠系保留。目前上古生界的赋存状态是印支、燕山及喜山期多期构造作用改造的结果。

(2)研究区上古生界烃源岩为太原—山西组的煤层、碳质页岩和暗色泥岩,以 III 型干酪根为主,已达到中等—高成熟阶段。综合考虑上古生界的沉积环境、烃源岩热演化史和圈闭保存条件等,认为研究区北部临汾凹陷为上古生界较为有利,可作为煤层气或常规天然气的勘探选区。

致谢:感谢中国地质调查局西安地质调查中心卢进才、李玉宏教授级高工,西北大学刘池阳教授在研究工作中给予的指导与帮助;感谢山西省地勘局 213 地质队、214 地质队、第二水文地质队和山西物探化探研究院,以及山西煤炭地质局 144 煤田地质勘查院的有关领导和专家,在野外工作中提供的帮助。

注 释 / Notes

❶ 赵俊峰, 芦建军, 曹冀龙. 2015. 山西临汾—运城盆地油气资源远景调查. 西北大学: 1~90.

❷李朝阳, 陈社教, 李婧. 2015. 山两断陷盆地群重磁资料综合处理解释.陕西省地质矿产勘查开发局第二综合物探大队;1~120.

❸ 周安朝. 2013. 山西地堑系诸盆地油气资源远景调查. 太原理工大学:1~120.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

曹冀龙. 2016. 临汾—运城盆地上古生界沉积演化及资源潜力分析. 导师: 赵俊峰. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~74.

巢海燕, 王延斌. 2016. 鄂尔多斯盆地东南缘临汾区块煤层气成因及其影响. 煤炭学报, 41(7): 1769~1777.

成学忠. 2017. 山西霍西煤田襄汾矿区大邓勘查区煤炭资源评价. 华北国土资源, (3):48~49

程保洲. 1992. 山西晚古生代沉积环境与聚煤规律. 太原: 山西科学技术出版社, 1~253.

杜春林,王峰, 段康. 2016. 山西省沁水煤田古县永乐南详查区资源开发评价. 华北国土资源, (1):73~75.

黄第藩,熊传武. 1996. 含煤地层中石油的生成、运移和生油潜力评价. 勘探家, 1(2): 6~11.

孔宪祯,许惠龙,李润兰,常江林,刘陆军,赵修祜,张遴信,牛怀诚. 1996. 山西晚古生代含煤地层和古生物群. 太原: 山西科学技术出版社: 1~280.

李自红, 刘保金, 袁洪克. 酆少英, 陈文, 李稳, 寇昆朋. 2014. 临汾盆地地壳精细结构和构造地震反射剖面结果. 地球物理学报, 57(5): 1487~1497.

刘光勋. 1985. 汾渭地堑边缘挤压构造带及其地质意义. 构造地质论丛, (4):61~70.

刘武生, 秦明宽, 漆富成,肖树青,王志明. 2008. 运用磷灰石裂变径迹分析鄂尔多斯盆地周缘中新生代沉降隆升史. 铀矿地质, 24(4):221~227.

吕建伟. 2012. 沁水盆地及左权区块烃源岩评价. 导师: 唐书恒. 北京: 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1~61.

芦建军. 2015. 临汾—运城盆地中生界沉积特征与资源潜力分析. 导师: 赵俊峰. 西安:西北大学硕士学位论文: 1~72.

马航. 2014. 临汾山西组致密砂岩储层成因及控制因素研究. 导师: 胡明. 成都: 西南石油大学硕士学位论文: 1~73.

马鹏程, 邹雨, 李超. 2016. 霍西煤田 9#煤和 10#煤的煤岩学和煤质特征. 煤炭技术, 35(10):135~137.

孟令超. 2011. 山西断陷盆地地裂缝成因机理研究. 导师: 彭建兵.西安: 长安大学博士学位论文: 1~329.

孟宪梁, 于慎谔. 1986. 山西临汾盆地东缘挤压构造的发现及其意义. 华北地震科学, (3):72~73.

秦勇,刘焕杰,范秉恒,曾勇,桑树勋,张有生. 1997. 山西南部上古生界煤层含气性研究Ⅱ.推断区及预测区煤层含气性预测. 煤田地质与勘探, 25(6):18~22.

任战利,张盛,高胜利,崔军平,刘新社. 2006. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨. 地质学报, 80(5): 674~684.

尚冠雄.1997. 华北地台晚古生代煤地质学研究. 太原: 山西科学技术出版社: 25~80.

宋党育, 秦勇. 1998. 晋南晚中生代古地热场特征及其热源探讨. 中国煤田地质,10(4):32~34.

苏东旭,于兴河, 李胜利, 单新,周进松. 2017. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组障壁海岸沉积特征与展布规律. 天然气工业, 37(9): 48~56.

王守义. 1981. 晋西北的早白垩世砾石层及其成因之探讨.地质论评, 27(1):40~44.

王同和. 1995. 晋陕地区地质构造演化与油气聚集. 华北地质矿产杂志, (3):283~398.

王香增, 周进松. 2017. 鄂尔多斯盆地东南部下二叠统山西组二段物源体系及沉积演化模式. 天然气工业, 37(11): 9~17.

翁望飞, 刘池洋, 赵红格, 王建强, 张蓉蓉, 陈洪, 桂小军.2009. 鄂尔多斯盆地早白垩世剥蚀地层厚度恢复研究. 地层学杂志, 33(4): 373380.

邢作云, 赵斌, 涂美义,邢集善. 2005. 汾渭裂谷系与造山带耦合关系及其形成机制研究. 地学前缘, 12(2):247~262.

杨瑶, 赵俊峰,刘池洋, 薛锐, 闫占冬. 2017.山西南部塔儿山岩体年代学、地球化学及其地质意义. 地质论评, 63(3):809~821.

张岳桥, 廖昌珍, 施炜,胡博.2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景. 高校地质学报, 12(3): 285~297.

赵俊峰,刘池洋, 喻林,王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义.地质学报, 82(4): 540~552.

周进松, 王念喜, 赵谦平,银晓,林桂芳,曹跃,李园园,韩小琴. 2014. 鄂尔多斯盆地东南部延长探区上古生界天然气成藏特征. 天然

气工业, 34(2):34~41.

Cao Jilong. 2016&. Analysis of Sedimentary Evolution and Hydrocarbon Resources Potential of the Upper Paleozoic in Linfen—Yuncheng Basin. Supervisor: Zhao Junfeng. Xi'an: Master degree thesis of Northwest University: 1~74.

Chao Haiyan, Wang Yanbin. 2016&. Origin of coalbed methane and its influence in LinfenOrdos Basin. Journal of China Coal Society, 41(7): 1769~1777.

Cheng Baozhou. 1992&. Sedimentary Environments and Coal Accumulation Patterns in Late Paleozoic,Shanxi Province. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House: 1~253.

Cheng Xuezhong. 2017#. Coal resources evaluation of the Dadeng area in Xiangfen mining area of Huoxi Coal Field, Shanxi Province. Land and Resources of North China, (3):48~49.

Du Chunlin, Wang Feng, Duan Kang. 2016#. Evaluation for resouece development in the Yongle survey area in Gu county of Qinshui Coal Field, Shanxi Province.Land and Resources of North China, (1): 73~75.

Huang Difan, Xiong Chuanwu. 1996&. , migration and evaluation of hydrocarbon generation potential of oil formed in coal-bearing strata. Explortionist, 1(2): 6~11.

Kong Xianzhen, Xu Huilong, Chang Jianglin, Liu Lujun, Zhao Xiuhu, Zhang linxin, Niu Huaicheng. 1996&. Coal-bearing and Palaeobiota of Late Paleozoic in Shanxi Province. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House: 1~280.

Li Zihong, Liu Baojin Yuan Hongke, Feng Shaoying, Chen Wen, Li Wen, Kou Kunpeng. 2014&. Fine crustal structure and tectonics of Linfen Basin- from the results of seismic reflection profile. Chinese Journal of Geophysics, 57(5):1487~1497.

Liu Chiyang, Zhao Hongge, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, Yang Minghui. 2008. Temporo - spatial coordinates of evolution of the Ordos and its mineralization responses. Acta Geologica Sinica(English Edition), 82(6), 1229 - 1243.

Liu Guangxun. 1985&. Discovery and its implication of compressional structure around the Fenwei Graben. Review of Geological Structure, (4):61~70.

Liu Wusheng, Qin Mingkuan, Qi Fucheng, Xiao Shuqing, Wang Zhiming. 2008&. Analysis the Meso—Neozoic subsidence and uplift history of the periphery of Ordos using apatite fission track. Uranium Geology, 24(4):221~227.

Lu Jianwei. 2012&. Evaluation of Source Rocks in Qinshui Basin and Zuoquan Block. Supervisor: Tang Shuheng. Beijing: Master degree thesis of China University of Geosciences(Beijing), 1~61.

Lu Jianjun. 2015&. Analysis of Sedimentary Evolution and Hydrocarbon Resources Potential of the Mesozoic Strata in Linfen—Yuncheng Basin. Supervisor: Zhao Junfeng. Xi'an: Master degree thesis of Northwest University: 1~72.

Ma Hang. 2014&. Forming and Controls of the Tight Sandstone Reservoir in Shanxi Formation of Linfen Area. Supervisor: Hu Ming. Chengdu: Master degree thesis of Southwest Petroleum University, 1~73.

Ma Pengcheng, Zou Yu, Li Chao. 2016&. Coal and of No.9 and No.10 in Huoxi Coalfield. Coal Technology, 35(10): 135~137.

Meng Lingchao. 2011&. Formation of Ground Fissures in Shanxi Fault Basin. Supervisor: Peng Jianbing. Xi'an: Doctoral degree thesisChang'an University, 1~329.

Meng Xianliang, Yu Shen'e. 1986&. Discovery and its implication of compressional structure in eastern margin of Linfen Ba sin, Shanxi Province.North China Earthquake Sciences, (3):72~73.

Qin Yong, Liu Huanjie, Fan Bingheng, Zeng Yong, Sang Shuxun, Zhang Yousheng. 1997&. The studies on gas-bearing characteristics of the Upper Paleozoic coal seams in the southern Shanxi, China: Ⅱ. prediction of gas-bearing seams in the inferred and predicted areas. Coal Geology and Exploration, 25(6):18~22.

Ren Zhanli, Zhang sheng, Gao Shengli, Cui Junping, Liu Xinshe. 2006&. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos basin. Acta Geologica Sinica, 80(5): 674~684.

Shang Guanxiong. 1997&. Coal of the North China in Late Paleozoic. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House: 25~80.

Song Dangyu, Qin Yong. 1998&. Characteristics and mechanism of late Mesozoic paleo-geothermal field in southern Shanxi Province. Coal Geology of China, 10(4):32~34.

Su Dongxu, Yu Xinghe, Li Shengli, Shan Xin, Zhou Jinsong. 2017&. Sedimentary characteristics and distribution laws of Benxi Fm barrier coast in SE Ordos Basin. Natural Gas Industry, 37(9): 48~56.

Wang Shouyi. 1981&.reliminary study on the origin of early Cretaceous conglomerate bed in Northwestern Shanxi. Geological Review, 27(1):40~44.

Wang Tonghe. 1995&. Evolution of geological structure and oil—gas accumulation in Shanxi—Shaanxi area. Journal of Geology and Minerals in North China, (3):283~398.

Wang Xiangzeng, Zhou Jinsong. 2017&. Provenance system and sedimentary evolution model of the second Member of Lower Permian Shanxi Fm. in the southeastern Ordos Basin. Natural Gas Industry, 37(11): 9~17.

Weng Wangfei, Liu Chiyang, Zhao Hongge, Wang Jianqiang, Zhang Rongrong, Chen Hong, Gui Xiaojun. 2009&. Denudation thickness restoration of Cretaceous strata in the Ordos basin. Journal of Stratigraphy, 33(4): 373~380.

Xing Zuoyun, Zhao Bin, Tu Meiyi, Xing Jishan. 2005&. The formation of the Fenwei rift valley. Earth Science Frontiers, 12(2): 247 - 262.

Yang Yao,Zhao Junfeng,Liu Chiyang,Xue Rui, Yan zhandong. 2017&. Geochronology, geochemistry and their geological implications of Ta'ershan intrusions, southern Shanxi. Geological Review, 63(3): 809~821.

Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Hu Bo. 2006&. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos Basin and geodynamic setting. Geological Journal of China Universities, 12(3):285~297.

Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Nigel. Mountney, Lu Jianjun, Cao Jilong, Yang Yao, Xue Rui. 2016. Timing of uplift and evolution of the Luliang Mountains, North China Craton. Science China: Earth Sciences, 59(1): 58~69.

Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Wang Xiaomei. 2008&. Migration of depocenters and accumulation centers and its indication of subsidence centers in the Mesozoic Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 82 (4), 540~552.

Zhou Jinsong, Wang Nianxi, Zhao Qianping, Yin Xiao, Lin Guifang, Cao Yue, Li Yuanyuan, Han Xiaoqin. 2014&. Natural gas accumulation characteristics in the Upper Paleozoic in the Yanchang exploration block of southeastern Ordos Basin. Natural Gas Industry, 34(2): 34~41.

Analysis on Evolution, Modification and Hydrocarbon Resources Potential of the Upper Paleozoic in the Linfen—Yuncheng Basin

ZHAO Junfeng[1)], SHENG Shuangzhan[1)], WANG Dong[1)], LU Jianjun[2)], ZHANG Jianwu[3)], LIU Gang[3)], CUI Haidong[4)]

1) *State Key Laboratory of Continental Dynamics / Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi*, 710069;

2) *Eighth Geological Mineral Exploration Institute of Inner Mongolia Autonomous Region; Wuhai, Inner Mongolia*, 016000;

3) *Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Company of PetroChina, Xi'an, Shaanxi*, 710021;

4) *Exploration and Development Research Institute, Qinghai Oilfield Company of PetroChina, Dunhuang, Gansu*, 736200

Objectives: The aim of this study is to examine the favorable target area for hydrocarbon exploration of Upper Paleozoic in the Linfen—Yuncheng Basin. Previous exploration demonstrates the Cenozoic hydrocarbon resources potential is not optimistic for lack of effective source rocks as well as other favorable conditions for reservoir forming. Whereas recent continuous breakthroughs of natural gas exploration in Upper Paleozoic strata of adjacent areas such as the Ordos Basin and Qinshui Basin etc. provide significant implication for pre-Cenozoic exploration in the Linfen—Yuncheng Basin.

Methods: Based on gravity and magnetic data, combined with plenty of data from borehole drilling in recent years, the distribution pattern of Upper Paleozoic beneath Cenozoic strata is reconstructed. The quality of potential source rock was evaluated by pyrolysis experiment and maturity data.

Results: It shows the Carboniferous— Permian systems mainly developed in the central—northern part of the Linfen depression and northwestern part of E'mei uplift. Inferred from neighboring outcrops, the hydrocarbon source rocks are well developed in this basin. The maturity of organic material generally reaches middle—high thermal evolutionary stages.

Conclusions: Integrated analysis of post-sedimentary modification, burial history, hydrocarbon- generating history and preservation conditions and so on, the Linfen sag located in the northern part of this basin is selected as a relative favorable area for coalbed methane or conventional natural gas exploration.

Keywords: Upper Paleozoic; Coal-measure source rock; Hydrocarbon resources; Linfen—Yuncheng Basin; Fenwei Graben(Fenhe River—Weihe River graben)

Acknowledgements: This research is jointly supported by National Key R&D Program Project (No. 2017YFC0603106), National Natural Science Foundation (No. 41330315), Key Project of China Geological Survey(No. 12120113039900) and MOST Special Funds from the State Key Laboratory of Continental Dynamics (No. 201210140). We would like to thank professor Lu Jincai and Li Yuhong from Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Professor Liu Chiyang from Northwest University for their cordial guidance. Directors and experts from the No. 213, 214 Geological Team, the Second Hydrogeological Team and Institute of Geophysical and Geochemical Exploration of Shanxi Geological Survey Bureau are sincerely appreciated for their help in the field

First author: ZHAO Junfeng, Male, born in 1975, associate Professor, doctoral supervisor, engaged in basin analysis and sedimentology; Email: zjf@nwu.edu.cn

Manuscript received on: 2018-02-06; Accepted on: 2018-10-22; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.011