

文章编号: 1001-1986(2007) 01-0029-05

低变质煤的煤层气开发潜力 ——以鄂尔多斯盆地侏罗系为例

张培河 (煤炭科学研究总院西安分院, 陕西 西安 710054)

摘要:以鄂尔多斯盆地侏罗系为例,分析了低变质煤的煤层气地质特征、保存条件、主要储层参数的分布特征以及煤层气资源状况。鄂尔多斯盆地侏罗系煤的变质程度低,煤层发育层数多、厚度大,水文地质条件有利,煤层气资源条件优越。与美国粉河盆地对比,鄂尔多斯盆地侏罗系煤层气具有一定的开发潜力。中国低变质煤分布广泛,煤炭及煤层气资源量巨大,煤层气地质条件优越。但其勘探程度较低,应进一步加大勘探力度。

关键词:低煤级;煤层气;开发潜力;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.11 **文献标识码:**A

Coalbed methane (CBM) development potential of low rank coal: A case study from Ordos Basin

ZHANG Pei-he (Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract The low rank coal CBM geology, including reserve condition, reservoir parameters and resource, is discussed in a case of Jurassic formations in Ordos Basin. Through this study it is indicated that the Jurassic formations' coals in Ordos Basin are characterized by low rank, more coal bed targets, big thickness, favorable hydrological condition and resource. Contrasted with the CBM geological setting in Powder River basin in America, the Jurassic formations in Ordos Basin has certain development potential. It is known that the low rank coal CBM development is successful in America, and in China there is the extensive low rank coal distribution, the vast coal and CBM resource, the favorable geological condition. Therefore it is necessary to put more strength to explore CBM reservoirs in Ordos Basin.

Key words: low rank coal; CBM; development potential; Ordos Basin

低变质煤的煤层气勘探开发,在美国等国家已经取得了巨大成功。20世纪末,美国开始在粉河盆地、犹因塔盆地进行煤层气勘探开发,取得了巨大的成功,目前,又在大绿河、风河盆地进行勘探。

我国低变质煤主要分布在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、伊犁盆地、柴达木北缘以及内蒙古东部的二连盆地、海拉尔盆地等,成煤时代主要有:侏罗纪、早白垩世和古近纪等。我国低变质煤具有煤层发育层数多、厚度大、埋藏浅、煤炭及煤层气资源量大的特点(表1)。根据第3次全国煤田预测资料,我国陆上垂深2000m以浅的煤炭资源总量为55697.49亿t,其中,褐煤、长焰煤和气煤为42439.92亿t,占76.20%;最新煤层气资源量计算表明,我国陆上垂深2000m以浅的煤层气资源量为 32.56×10^4 亿 m^3 ,其中,褐煤、长焰煤和气煤为

17.67×10^4 亿 m^3 ,占54.26%。

由于低变质煤的成煤期普遍较晚,煤层遭受构造运动的破坏程度低,因此,煤层原生结构普遍较好,煤层裂隙发育,渗透率高,煤层气开发的地质条件优越。煤田勘探、油气田勘探或煤层气勘探显示,部分低变质煤区的煤层气开发潜力大。1993年,在准噶尔盆地彩南地区钻探的彩17井和彩19井对侏罗系八道湾组煤层测试,日产气2000~4000 $m^3/d^{[1]}$;新疆煤田地质局156队在淮南煤田进行煤层气勘探,实测煤层气含量为7~12 m^3/t ,渗透率2.7~18.5 $md^{[2]}$;大黄山煤矿侏罗系煤层瓦斯含量较高,排放气量达2000 $m^3/d^{[1]}$ 。辽河断陷盆地东部凹陷中段欧利坨子区古近系煤层含气量为4.63~11.07 m^3/t ,欧31井煤层孔隙度为4.6%~9.8%,渗透率为4.19~16.8 $md^{[3]}$ 。鄂尔多斯盆地黄陵矿区

收稿日期:2006-09-29

基金项目:“十五”国家重大科技攻关项目“中国煤层气富集成藏规律与勘探开发有利地区优选研究”(2001BA605A-07-01)

和“973”国家重点基础研究发展规划项目“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”(2002CB11700)资助

作者简介:张培河(1969—),男,山东胶南人,高级工程师,从事煤层气资源评价及开发技术研究

表 1 中国主要低变质煤分布区煤层气地质特征
Table 1 CBM geological characteristic of main low rank coal regions in China

盆地(煤田)	时代	含煤面积 /10 ⁴ km ²	含煤地层	煤级	可采煤层数	可采煤层 厚度/m	解吸法实测 气含量/m ³ ·t ⁻¹	资源量* /10 ⁸ m ³
鄂尔多斯盆地	J ₂	10.7	延安组	CY,QM	5~8	5~10	1.29~6.34	79 238
吐哈盆地	J ₁₋₂	3.6	八道湾组 西山窑组	CY,QM	2~13 1~22	9~76 14~147	1.66~6.60/4.08	26 259
淮南煤田	J ₁₋₂	2.4	八道湾组 西山窑组	CY,QM	3~15 3~22	4~66 6~145	1.22~8.48/4.36	3 472
伊犁煤田	J ₁₋₂	0.76	八道湾组 西山窑组	CY,QM	3~11 3~11	4~88 9~65	/	12 191
淮东煤田	J ₁₋₂	1.52	八道湾组 西山窑组	CY,QM	1~2 9~13	0.98~6.72 27.02~72.31	/	14 532
二连盆地	K ₁	3.39	腾格尔组 赛汗塔拉组	HM HM	8~13 6~9	45~80 > 120	1.21~4.45	6 001 **
海拉尔盆地	K ₁	1.24	大磨拐河组 伊敏组	HM,CY HM,CY	19~20 20	92 110	1.20~3.57	4 449 **
抚顺煤田	E	0.004	古城子组	CY,QM	3	0.5~135/50	8.9~19.06	53.47

*煤层埋深 2 000 m 以浅; **煤炭科学研究总院西安分院内部资料。

在煤田勘探过程中,部分钻孔钻进至侏罗纪煤层时,曾发生瓦斯喷孔现象,说明这些地区瓦斯含量高、含气饱和度高。抚顺煤田发育古近纪煤系,煤级为长焰煤和气煤,煤层埋藏浅,煤层气保存条件好,气含量高,而且煤层渗透性好,是国内学者普遍公认的煤层气开发有利区。

目前我国低变质煤的煤层气勘探程度非常低,参与勘探的单位少、勘探范围局限、投入的工作量少。对低变质煤的煤层气赋存规律、储层分布特征、煤层气可采性等方面的认识较浅。因此,应加大低变质煤的煤层气勘探力度。

鄂尔多斯盆地发育晚古生代、侏罗纪和三叠纪 3 套煤系,煤炭资源量雄厚。其中,侏罗系因其煤层发育层数多、厚度大、埋藏浅以及煤层气含量高等特点,被煤层气开发者普遍看好。20 世纪 90 年代,中国石油天然气股份公司在陕西黄陵和宁县地区对侏罗系进行煤层气勘探,施工了 2 口参数井,取得了气含量等储层参数资料。本文以鄂尔多斯盆地侏罗系为例,研究低变质煤的煤层气开发潜力,以期对国内其他低变质煤区的煤层气勘探具有指导作用。

1 鄂尔多斯盆地煤层气地质条件

1.1 构造特征

鄂尔多斯盆地基底由太古界及古元古界的变质岩构成,盖层为中、新元古界的砂岩建造、下古生界的碳酸盐建造、上古生界—中生界的海相及陆相碎

屑岩建造,新生界仅在局部地区分布^[4-5]。盆地周缘被造山带和构造活动带围限,边缘构造较为复杂,内部地层平缓,构造较简单。

1.2 煤系及煤层特征

侏罗系是鄂尔多斯盆地主要含煤地层,分布在盆地中—西部的大部分地区,呈南北向展布,东西 64~330 km,南北 600 km,面积约 15.5×10⁴ km²。

侏罗系主要含煤层段为延安组,由泥岩、页岩、砂岩、泥灰岩以及煤层构成,厚度 200~400 m,含煤 10~15 层,煤层总厚度 5~48 m;可采及局部可采煤层 5~8 层,单层厚度 0~9 m,累计厚度多为 5~10 m,最大超过 30 m^[9]。受煤系沉积环境的控制,由北向南,由西向东,煤层发育程度变差。

延安组主力煤层埋深多在 1 500 m 以浅,主要分布于煤系东部。盆地自东向西,煤层埋藏深度逐渐增大,在盆地中西部煤层最大埋深超过 2 000 m,但分布范围局限。

1.3 煤的变质程度

侏罗系煤的变质程度低,煤级多为长焰煤、气煤。煤的演化主要受深成变质作用的控制,随着煤层埋藏深度的变化,煤的变质程度基本上呈 SN 向向盆地中心递增,局部地区受侵入岩浆的影响,煤的变质程度增高,如盆地西部汝箕沟一带,受隐伏岩体的影响,侏罗系煤的演化已达到无烟煤阶段。

1.4 煤层气保存条件

侏罗系煤的变质程度低,煤的生气能力及吸附

能力也较低。通常条件下,煤层气含量低,煤层气富集成藏的难度就大。侏罗系沉积后经历的燕山运动和喜马拉雅构造运动,对煤的演化及煤层气的保存影响显著。综合分析认为,侏罗系煤的生气及煤层气保存条件较好,主要表现在以下方面:

a. 盆地内部构造破坏程度低。侏罗纪煤系沉积后,经历了燕山运动和喜马拉雅构造运动,造成煤层气原始地质条件破坏。但从现今盆地构造分布情况看,在盆地边缘地区,构造相对复杂,地层抬升幅度大,剥蚀程度高;在盆地内部的大部分地区,构造比较简单,构造运动的影响程度相对较小,对煤层气地质条件的改造程度低。

b. 沉积对煤的生气及煤层气的保存有利。延安组沉积期及沉积后的一段时间,燕山运动强度小,地壳处于相对稳定状态,在延安组之上连续沉积了中侏罗世直罗组和安定组。延安组地层中细碎屑岩比例平均为 48%,最大超过 75%,主要目标煤层顶、底板多为泥岩,对煤层气的保存非常有利;直罗组和安定组主要为湖泊、河流、三角洲以及泛滥平原沉积,沉积物以粉砂岩、泥岩、页岩为主,沉积物较细,厚度大。因此,沉积作用对延安组煤的演化及煤层气的生成和保存创造了有利条件。

c. 岩浆侵入活动加速了煤的变质演化,使煤的生气量增大,吸附能力增强。根据孙少华等人的研究,鄂尔多斯盆地在中—新生代主要发生了 2 次明显的构造热事件,时间分别为 135 Ma、72 Ma 左右^[7]。构造运动使盆地抬升,地层褶皱、断裂的同时,伴随的岩浆侵入活动使区域地温增高,加速了这些区域煤的演化速度和演化程度,使煤的生气能力及吸附能力增强,有利于煤层气的储集。

1.5 煤的吸附性

根据煤的等温吸附实验,侏罗系煤的空气干燥基 Langmuir 体积 (V_L) 变化较大,为 13.62 ~ 25.01 m^3/t ,干燥无灰基 Langmuir 体积为 15.14 ~ 29.61 m^3/t ; Langmuir 压力 (P_L) 为 6.39 ~ 11 MPa(表 2),与中—高变质程度煤比较,Langmuir 压力较大、Langmuir 体积较小。

表 2 侏罗系煤的等温吸附实验数据表

Table 2 Isotherm adsorption data of Jurassic coal

地区	煤层	$R_{max}/\%$	$V_L/m^3 \cdot t^{-1}$		P_L/MPa
			空气干燥基	干燥无灰基	
布尔洞沟矿	6	0.55	14.94 ~ 17.57	16.96 ~ 19.54	9.91 ~ 9.97
华亭矿	5		13.62 ~ 16.80	15.14 ~ 18.62	6.39 ~ 11.0
宁县地区		0.79	23.42 ~ 25.01	26.61 ~ 29.61	9.0 ~ 10.38

2 鄂尔多斯盆地煤层气资源状况

2.1 煤层气含量

侏罗系实测煤层气含量为 1.29 ~ 6.34 m^3/t ,预测深部区域煤层气含量可达 8 m^3/t 以上(图 1)。与我国其他同时代煤田比较,该区煤层气含量明显高。



图 1 延安组 4 号煤煤层气含量等值线

Fig. 1 Gas content isoline of the 4[#] coal bed in Yanan Formation
1——侏罗系边界; 2——煤层沉积边界; 3——气含量等值线

2.2 煤层气资源量及分布

侏罗系煤层发育,煤层总厚度及单层厚度大,而且煤层气含量较高,不仅煤层气资源富集,而且资源量大。据计算,埋深 300 ~ 2 000 m 的煤层气资源量为 79 238.25 $\times 10^8 m^3$,其中,埋深 300 ~ 1 200 m 范围的煤层气资源量为 24 019 $\times 10^8 m^3$,占 30.3%;煤层气富集区位于盆地北缘,资源丰度平均为 0.93 $\times 10^8 m^3/km^2$,最高达 1.43 $\times 10^8 m^3/km^2$ 。不同地区侏罗系煤层气资源量分布状况见表 3、图 2。

表 3 侏罗系煤层气资源分布状况表

Table 3 CBM resource distribution of Jurassic coal formations

地点	区块编号	深度 /m	面积 /km ²	资源量 /10 ⁸ m ³	资源丰度 /10 ⁸ m ³ ·km ⁻²
黄陇煤田	J1	300 ~ 1 200	4 262.98	1 040.61	0.24
盆地西部	J2	300 ~ 2 000	30 569.87	19 311.11	0.63
陕北煤田	J3	300 ~ 2 000	19 421.53	10 991.41	0.57
盆地北缘	J4	300 ~ 2 000	51 382.08	47 625.34	0.93
沙井子、王洼	J5	300 ~ 1 000	1 204.35	269.78	0.22
合计		300 ~ 2 000	106 840.81	79 238.25	0.74

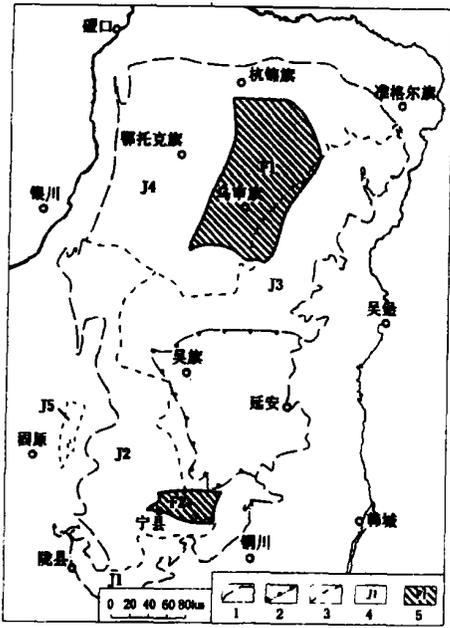


图 2 侏罗系煤层气资源分布及开发评价图

Fig. 2 CBM resource distribution and exploitation assessment map of Jurassic coal formations

1——侏罗系边界; 2——煤层沉积边界; 3——资源量计算区块边界; 4——资源量计算区块; 5——煤层气开发有利区

3 鄂尔多斯盆地煤层气开发潜力

煤层气的产出是通过排水降压, 使吸附在煤孔隙内表面的甲烷因压力降低而解吸, 通过微孔内的扩散运移到达自然裂隙, 然后, 以渗流方式流入压裂裂缝, 以近乎无限导流的方式运移到井筒而产出。因此, 从煤层气产出机理分析, 煤层气开发不仅受煤层气资源状况、资源丰度的影响, 而且还受到煤储层压力、煤层渗透性、煤层埋藏深度以及水文地质条件等方面的制约。

3.1 煤储层压力

晚古生代煤层气勘探程度较高, 试井测试资料多, 对侏罗系煤储层参数的分析可借助晚古生代煤层进行。晚古生代煤储层压力为 7.56~14.76 MPa, 压力梯度为 0.67~1.31 MPa/hm, 基本为静水压力储层, 据此分析, 侏罗系的煤储层压力较高。

3.2 煤层渗透性

晚古生代煤层测试渗透率为 0.003~59 md(表 4)。根据煤层渗透率影响因素分析, 侏罗系煤层的渗透率应较晚古生代煤层高。其原因是: a. 侏罗系煤层形成晚, 遭受的构造运动期次少, 破坏程度低, 煤层的原生结构及裂隙系统保存较好; b. 侏罗系煤层变质程度低, 多为低变质的长焰煤、气煤, 煤的孔隙、裂隙比较发育; c. 侏罗系煤层埋藏浅, 地层压力

低; d. 鄂尔多斯盆地现代地应力较低, 有利于煤层裂隙开启, 使煤层保持较好的渗透性。

表 4 晚古生代煤层渗透率测试数据统计表

Table 4 Permeability data of late Paleozoic coal

试验区	渗透率/md		
	最小	最大	平均
韩城地区	0.010 2	16.17	3.29
大宁—吉县	0.016 1	> 1.0	0.31
离石—柳林	0.003	59.00	6.79
吴堡地区	0.010	0.245	0.128

3.3 煤层埋藏深度

煤层埋藏深度是影响煤层气开发的重要因素之一, 目标煤层的深度越大, 煤层气开发越不利, 主要表现在: a. 钻井、压裂及排采等作业成本增高; b. 排水降压难度增大; c. 煤层渗透性低, 气井产能低。根据国内外煤层气勘探开发的实际经验, 理想的煤层气开发深度为 1 200 m 以浅, 鄂尔多斯盆地侏罗系煤层埋深 300~1 200 m 的面积约 $5.57 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占侏罗系分布面积的 70%。因此, 煤层埋藏浅是该区侏罗系煤层气勘探开发的一大优势。

3.4 水文地质条件

鄂尔多斯盆地水文地质条件简单。地下水的主要补给来源是大气降水和地表水, 地下水自盆地边缘向内部迳流, 强度逐渐减弱, 矿化度增高, 水质类型由重碳酸盐为主变为硫酸盐及氯化物为主(表 5)。

表 5 延安组煤层水质分析统计表

Table 5 Water property of Yanan Formation's coal

地区	西部→东部		
	盆地西缘	庆阳地区	安塞地区
矿化度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	7.7~19.3	13.5~109	3.8~66.9
水质类型	$\text{NaHCO}_3 - \text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{CaCl}_2$	NaHCO_3

侏罗系发育多层泥岩、粉砂岩, 阻断了含水层间的水力联系。水质分析结果显示, 自上而下煤层水矿化度增高, 含水层类型由 NaHCO_3 型过渡为 CaCl_2 型。隔水层在阻断地下水迳流的同时, 也阻止了煤层气的逸散。含水层不仅在区域上为煤层气的保存提供了有利的上覆封闭遮挡, 而且在一定深度范围, 因地下水承压使煤储层压力增高, 同时造成煤层气侧向封堵。

3.5 与粉河盆地地质条件对比

粉河盆地位于美国的怀俄明州和蒙大纳州之间, 面积约 $73\ 800 \text{ km}^2$ 。盆地构造简单, 发育古近纪煤系, 主要含煤段是 Tongue River, 由砂岩、粉砂岩、砾岩、灰岩和煤层构成。其可采煤层分布面积约占

表 6 鄂尔多斯盆地(侏罗系)与粉河盆地(古近系)煤层气地质条件比较

Table 6 CBM geological contrast between Ordos Basin and Powder basin

盆地名称	含煤面积 / 万 km ²	成煤时代	构造状况	煤阶	含煤层数	煤层埋深 / m	单煤层厚度 / m	实测气含量 / m ³ ·t ⁻¹	煤层渗透性	煤层气资源量 / 亿 m ³	水文地质条件	产气层
鄂尔多斯	155	J	较简单	长焰、气煤	5~7	0~2 000	0~9	1.29~6.34	较好	7.92	简单	煤层
粉河	3.70	E	简单	褐煤	5	0~1 000	7~22	1.1~3.4	非常好	1.73	简单	煤层及砂岩层

盆地面积的 1/2, 煤级为未变质的褐煤, 煤层气资源量约为 $1.73 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[8-9]。煤层气开发采用裸眼洞穴完井方式进行。据 2004 年资料, 该盆地已施工煤层气井 16 120 口, 其中, 生产井 12 155 口井, 平均单井煤层气产量达到 $2 023 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

粉河盆地煤层气开发的主要优势在于煤层埋藏浅、厚度大、渗透率高。Tongue River 段含主要煤层 7 层, 单层厚度 7~22.3 m, 钻探深度 70~740 m; 煤层裂隙渗透率 35~500 md; 储层压力梯度为 0.77 MPa / km。煤层气含量低, 为 $1.1 \sim 3.4 \text{ m}^3/\text{t}$, 但由于煤层厚度大, 煤层气资源丰度较高^[8-9]。粉河盆地煤层气开发气井初始产水量都比较大, 在 1999 年, 每口井的产水量是 $63 \text{ m}^3/\text{d}$, 2000 年降低到 $43 \text{ m}^3/\text{d}$, 2001 年仅为 $28 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[9], 两年时间产水量降低了 55.3%。气井产水量的大幅度降低说明该区水文地质条件简单。

与粉河盆地比较(表 6)发现, 鄂尔多斯盆地侏罗系与粉河盆地古近系同属于低煤阶煤系, 且在构造发育状况、储层压力、水文地质条件等方面具有相似性; 在气含量方面, 鄂尔多斯盆地较粉河盆地具有优势; 煤层发育情况方面, 鄂尔多斯盆地不如粉河盆地, 但煤层气开发的目标煤层数多, 单煤层厚度大, 能够满足煤层气开发的需要; 在渗透性方面, 鄂尔多斯盆地的煤层渗透性不及粉河盆地, 但也具有一定优势。综合分析认为, 鄂尔多斯盆地侏罗系煤层气开发具有一定潜力。

3.6 煤层气开发有利区

鄂尔多斯盆地侏罗系具有煤层发育层数多, 分布范围广, 目标煤层厚度大, 埋藏浅, 渗透性好, 储层压力高, 水文地质条件较优越以及煤层气资源量大且富集的特点, 煤层气开发具有一定潜力。综合分析煤层气开发的有利区是 F1 和 F2 区块(图 2)。

F1 区块 位于盆地北部的乌审旗地区, 面积 $15 979 \text{ km}^2$ 。煤级为长焰煤, 煤层埋深 600~1 200 m, 含主要可采煤层 4 层, 单层厚度大于 3 m, 最大超过 7 m; 煤层气含量在 $3 \sim 6 \text{ m}^3/\text{t}$; 煤层气资源量 $13 510 \times 10^8 \text{ m}^3$; 煤层渗透性好, 储层压力高。

F2 区块 位于盆地南部的宁县东北部, 面积

$2 255 \text{ km}^2$ 。煤级为长焰煤、气煤; 煤层埋深 600~1 200 m, 含可采煤层 2 层, 单层厚度分别为 1~3 m 和 3~5 m; 煤层气含量为 $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{t}$; 煤层气资源量为 $1 262 \times 10^8 \text{ m}^3$; 煤层的渗透性好, 储层压力较高。

4 结语

鄂尔多斯盆地侏罗系煤层发育层数多、厚度大、埋藏浅, 煤层气资源量雄厚。与粉河盆地比较, 在煤层发育状况、煤层埋深、储层压力、水文地质条件以及煤的变质程度方面, 具有相似性。虽然煤层渗透率不如粉河盆地, 但在气含量方面具有优势。综合分析认为, 侏罗系煤层气开发具有一定潜力, 煤层气开发的有利地区是乌审旗地区和宁县东北部。

中国低变质煤分布广泛, 煤炭资源量及煤层气资源量巨大, 煤层气地质条件优越, 煤层气开发潜力大, 但目前的勘探程度较低, 应加大勘探力度。

参考文献

- [1] 王屿涛, 谢 妹, 刘全艳, 等. 准噶尔盆地低阶煤煤层气资源及勘探潜力分析[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 3(14): 5-7.
- [2] 李瑞明, 尹淮新. 淮南煤田乌鲁木齐河东、河西矿区煤层气资源评价[C] // 2006 年煤层气学术研讨会论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 275-280.
- [3] 王国勇, 付晓云. 小龙湾地区煤层气地质特征分析[J]. 特种油气藏, 2001, 8(3): 22-24.
- [4] 张 进, 张庆龙, 任文军, 等. 断层相关褶皱—鄂尔多斯盆地中的新构造样式[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 61-65.
- [5] 张 泓, 何宗莲, 晋香兰, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化与成煤作用——1:500 000 地质构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [6] 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [7] 孙少华, 欧阳沙怀, 张 军. 鄂尔多斯残留地台盆地构造热演化与油气成藏[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [8] 冯三利, 胡爱梅. 美国低煤阶煤层气资源勘探开发新进展[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 124-126.
- [9] Advanced Resources International, Inc. Powder River Basin coalbed methane development and produced water management study[R]. U. S.: DOE/NETL 2003.