

华北地台东部石炭系一二叠系优质煤储层 形成分布控制因素

金振奎, 苏妮娜, 王春生

中国石油大学(北京), 北京, 102249

内容提要: 优质煤储层在此指厚度大、分布广、储集物性好的煤层。沉积相对优质煤储层的形成和分布有重要控制作用。通过浅海和泻湖淤积填平发育起来的潮坪环境和三角洲环境是最有利的优质煤储层形成环境, 煤储层厚度大、分布广。沉积环境对煤储层中的灰分含量和镜质组含量有重要影响, 而灰分含量和镜质组含量又直接影响煤储层的储集物性。灰分充填了煤储层中的孔隙, 其含量越高, 储集物性越差; 镜质组有利于割理的形成, 其含量越高, 储集物性越好。由于在灰分含量、煤岩显微组分等方面的差异, 潮坪环境沉积的煤储层的储集物性优于三角洲的煤储层, 下三角洲平原沉积的煤储层优于上三角洲平原沉积的煤储层。海平面变化对优质煤储层的形成和分布也有重要控制作用。高位体系煤储层富集, 单层厚度大, 横向分布相当稳定, 尤其是高位体系域晚期, 是形成优质煤储层最有利的层位。而水进体系域煤储层稀少, 单层厚度小, 横向分布不稳定, 不利于优质煤储层形成。

关键词: 石炭系; 二叠系; 优质煤储层; 沉积相; 海平面变化

随着我国经济的快速发展, 对煤层气的需求也越来越大。在煤层气的勘探中, 优质煤储层的分布预测是关键之一。“优质煤储层”在此指厚度大(厚度应在 2 m 以上)、分布广(面积应在几平方千米以上)、储集物性好(孔隙度应在 10% 以上, 渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上)的煤层。3 个条件缺其一, 都不能称之为“优质煤储层”。关于煤岩的形成和分布, 已经有不少研究成果(Harpalani et al., 1990; Laubach et al., 1998; 王华等, 2001; 秦勇, 2003; 秦勇等, 2008)。但从沉积学和层序地层学的角度来研究优质煤储层形成条件的却不多。本文主要以华北地台石炭系一二叠系煤岩为例, 探讨控制优质煤储层形成的沉积因素, 为优质煤储层的分布预测提供依据。

1 地质背景

本次研究的地区位于银川—宝鸡以东、包头—北京以南、西安—郑州以北, 大致在北纬 $35^\circ \sim 40^\circ$ 、东经 $106^\circ \sim 118^\circ$ 之间, 包括山西、宁夏、内蒙古、河北、河南、山东、北京、天津等省市的全部或部分地区, 面积约 500000 km^2 。研究区内石炭系、二叠系

广泛分布。按照目前国际流行的石炭系两分和二叠系三分的划分方案, 本区石炭系仅发育上统, 缺失下统, 二叠系发育下、中、上统。煤岩主要分布于上石炭统和下二叠统中。自下而上, 上石炭统划分为本溪组和晋祠组, 下二叠统划分为太原组和山西组, 其中晋祠组相当于传统划分方案上石炭统太原组下部的晋祠段(金振奎等, 2005a)。本溪组不整合于奥陶系石灰岩之上, 其他各组之间均为整合接触。

本区上石炭统一下二叠统厚 100~200 m, 由砂、泥岩夹石灰岩和煤层组成。据露头和钻孔资料, 上石炭统和下二叠统中主要发育 16 层可采煤层, 可采煤层总厚度为 2~18 m, 一般 6~12 m。

2 沉积环境对优质煤储层形成分布的控制作用

华北地台石炭系和二叠系沉积环境多样, 有陆相、海相和海陆过渡相。发育的陆相环境包括河流、湖泊、湖泊三角洲, 海相环境包括碳酸盐台地、碎屑岩浅海、障壁岛、泻湖等, 海陆过渡相包括潮坪、三角洲等(尚冠雄, 1993; 金振奎等, 2005a)。对煤储层的

注: 本文为国家重点基础研究计划“973”项目“中国煤层气成藏机理及经济开采基础研究”(编号 2002CB211700)资助成果。

收稿日期: 2008-05-07; 改回日期: 2008-09-08; 责任编辑: 周健。

作者简介: 金振奎, 男, 1963 年生。博士(后), 教授, 博士生导师。1983 年毕业于华东石油学院, 获石油地质学士学位; 1987 年毕业于加拿大 CALGARY 大学, 获沉积学硕士学位; 1992 年毕业于石油大学(北京), 获沉积学博士学位; 1994 年于中国地质科学院完成构造地质博士后研究工作。从事储层沉积学、成岩作用、层序地层学、油藏描述等方面的教学和科研工作。通讯地址: 102249, 北京昌平中国石油大学资源与信息学院; Email: cjzk@cup.edu.cn。

沉积环境研究表明,本区过渡相的潮坪和三角洲环境是最有利的聚煤环境,而在其他环境中煤储层不发育,沉积相类型控制了本区煤储层的形成和分布。

本区潮坪和三角洲之所以是最有利的聚煤环境,主要是因为潮坪和三角洲是通过浅海或泻湖的淤积填平而发育起来的,地形平坦,潜水面接近地表,极易积水而发育沼泽。

潮坪环境地势平坦而且广阔,尤其当海岸线逐渐退却时,因此形成的煤岩通常呈席状,横向分布稳定,延伸几千米、几十千米以上。在稳定沉降的地区,潮坪环境能够形成厚度大(可达 6 m)、分布广的煤储层。例如,山西太原地区的 7、8、9 号煤和沁水盆地的 15 号煤,其厚度一般 2~4 m,可达 6 m,横向可追索几十千米甚至 200 多千米。由于受海水影响,潮坪煤硫含量普遍高($>1\%$),莓状黄铁矿常见。

在三角洲中,煤储层主要形成于三角洲平原上的泥炭沼泽,三角洲前缘部位虽然也可发育,但数量少,而且规模小。三角洲平原上的泥炭沼泽通常是通过分流间湾或废弃分流河道淤积填平而形成的。由分流间湾淤积填平而形成的泥炭沼泽沉积的煤储层,其底板为分流间湾沉积的灰黑色泥岩。由废弃分流河道淤积填平而形成的沼泽沉积的煤岩,其底板为分流河道砂岩。随着三角洲不断向海推进,会形成广阔平坦的三角洲平原,其上能够发育大片的泥炭沼泽,而且三角洲地处河口,沉积速度较快,十分有利于煤储层的保存。三角洲煤岩通常呈席状,连续性强,横向延伸几千米甚至十几千米以上。在稳定沉降的地区,能够形成厚度大(可达几米)、分布广的煤储层(王仁农等,1995;秦勇等,2000)。例如,山西太原地区的 2、3 号煤层和沁水盆地的 3 号煤层都是三角洲平原沉积的,其厚度可达 7 m,一般 2~4 m,横向可追索十几千米、几十千米。由于三角洲平原基本属于淡水环境,其硫含量普遍低($<1\%$)。

总之,本区三角洲和潮坪是形成厚度大、横向分布稳定煤储层的最有利的环境。

3 沉积环境对煤储层储集物性的控制作用

沉积环境影响了煤储层中的灰分含量、煤岩组分类型等,而灰分产率和煤岩组分类型又直接影响煤储层的储集物性,因此沉积环境对煤储层储集物性有重要控制作用。

3.1 沉积环境对灰分含量的控制作用

灰分是煤中的矿物质,其成因主要包括陆源碎

屑成因、化学成因和生物成因(韩德馨,1996),以陆源碎屑成因为主。陆源碎屑成因的矿物质主要是由流水搬运到泥炭沼泽并和成煤植物一起沉积的陆源碎屑物质,主要是悬浮搬运的粘土矿物和粉砂。

扫描电镜表明,本区煤储层中的灰分主要是粘土矿物,通常分散充填于煤岩的孔隙之中,其含量多少,直接影响煤储层的储集性能。其含量越高,煤储层储集物性越差,两者存在线性定量关系(金振奎等,2005b)。灰分含量的高低能直接反映煤储层储集性能的好坏。而陆源碎屑物质的多少又与沉积环境密切相关,因此沉积环境对煤储层的储集物性有重要影响(陈钟惠等,1983)。

对于三角洲上的沼泽来说,陆源碎屑物质主要是通过洪水期河流泛滥带来的。距离分流河道越近,沼泽中的陆源碎屑物质越多,灰分产率就越高,煤储层的储集物性就越差。从河口所处的三角洲的顶端到末端,由于距离河口越来越远,灰分产率总体上降低,煤储层的储集物性总体上变好。例如,内蒙古乌达矿区上三角洲平原 13 煤中,粘土含量为 17%,而下三角洲平原 9 煤中则为 3.2%,上三角洲平原沼泽形成的煤中灰分总体上比下三角洲平原沼泽多。又如,在山西太原矿区距离物源更近的北部地区,山西组 3 号煤中的灰分产率总体上比距离物源更远的南部地区高。

总之,上三角洲平原的煤中灰分产率总体比下三角洲平原的高;分流河道附近的煤中灰分产率总体比远离分流河道的高。因此,下三角洲平原煤储层的储集物性比上三角洲平原的好,远离分流河道的煤储层的储集物性比靠近分流河道的好。

对于潮坪上的沼泽来说,陆源碎屑物质主要是通过涨潮或风暴海水带入。因此,靠海侧的沼泽中,陆源碎屑物质多,形成的煤岩灰分产率高,储集物性差;而离海岸较远的沼泽中,陆源碎屑物质少,形成的煤岩灰分产率低,储集物性好。在海退过程中,可导致高灰分产率的煤岩与低灰分产率的煤呈带状交替出现,并平行海岸分布。例如,山西太原矿区的 8 号煤,为潮坪沉积,从北向南,东西向高灰分带与低灰分带交替,条带宽 10~15 km。高灰分带中,灰分产率在 20%以上,可达 30%多;低灰分带中,灰分产率在 20%以下,多为 10%~15%。

就三角洲煤和潮坪煤来说,由于三角洲上分流河道发育,分流河道附近形成的煤灰分产率要比远离分流河道的高,因此煤灰分产率在平面上变化大,非均质性较强。而潮坪上,尽管有些情况下也有潮

汐水道,但水道少甚至不发育,因此煤灰分产率在平面上变化较小,非均质性比三角洲煤弱。例如,山西太原矿区三角洲沉积的 2 号和 3 号煤,其灰分产率低的在 20% 以下,高的则达 60% 多,相差 40% 左右,灰分产率横向变化梯度达 15%/km。而潮坪沉积的 8 号煤,其灰分产率低的在 15% 以下,高的则只有 30% 左右,相差 15% 左右,灰分产率横向变化梯度仅 5%/km 左右。

另外,由于缺乏河流注入,潮坪煤的灰分产率总体比三角洲的低。如山西太原矿区三角洲沉积的 3 号煤,其灰分产率一般为 30%~50%,高的则达 60% 多;而潮坪沉积的 8 号煤,其灰分产率一般为 15%~20%,高的则只有 30% 左右。

因此,从灰分产率上看,潮坪煤的储集物性比三角洲煤的好。

3.2 沉积环境对煤岩显微组分的作用

华北地区石炭系—二叠系宏观煤岩类型多样,以光亮煤、半亮煤为主,也有半暗煤和暗煤。不同类型的煤岩中,其显微组分不同。煤岩显微组分在一定程度上影响煤储层的储集物性。镜质组含量越高,越有利于割理的形成,从而大大提高煤储层的孔渗性(Hucka, 1989; Puri et al., 1991; 傅雪海等, 2001)。本次根据矿井下的观察,沁水盆地石炭系—二叠系的煤中,镜质组含量高的亮煤中,割理密度为 5~7 条/cm,而镜质组含量低的暗煤中,割理不发育,其密度低于 1 条/cm。其他地区也有类似的规律(周家尧等, 1995; 宁正伟, 1997; 顾成亮, 2001; 王一兵等, 2004)。因此,镜质组含量高的煤储层是优质储层。

不同的沉积环境,形成的煤岩显微组分有所不同。覆水、还原环境下形成的煤储层,镜质组含量高,有利于割理发育,煤岩的储集物性好。

对于三角洲上的沼泽,处于三角洲不同部位,其还原性不同。上三角洲平原上的沼泽,基本不受海水影响,地势也相对较高,不容易覆水,还原性差些,形成的煤中镜质组含量相对较低。下三角洲平原的沼泽,常受潮汐海水影响,还原性较强,形成的煤中镜质组含量相对较高。因此,下三角洲平原煤储层的储集物性比上三角洲平原的好。

潮坪沼泽由于常被海水淹没,多为覆水沼泽,还原性强,形成的煤中镜质组含量高,储集物性好。

与三角洲相比,潮坪沼泽的还原性总体上比三角洲的强,因此镜质组含量高,煤储层的储集物性更好。例如,在山西太原矿区潮坪煤中,凝胶化组分

(最终形成镜质组)含量平均为 80%,而三角洲煤的凝胶化组分含量平均为 61%。

无论从灰分产率还是煤岩显微组分看,潮坪煤比三角洲煤的储集物性更好。在沁水盆地,潮坪煤(15 号)的孔隙度平均为 8.9%,渗透率平均为 $4.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而三角洲煤(3 号)的孔隙度平均为 5%,渗透率平均为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

华北地区太原组煤储层以潮坪沉积为主,山西组煤储层则以三角洲沉积为主。在大港油田,太原组煤储层的含硫量比山西组的高,前者平均 1% 左右,而后者平均 0.4% 左右。这说明太原组的煤受海水影响比山西组的大。与煤岩互层的泥岩的微量元素也反映了这一点。太原组泥岩的 Sr/Ba 值为 1.26,山西组泥岩为 0.2~0.9,可见太原组沉积时受海水影响大,古盐度值偏高;而山西组时受海水影响小,古盐度值偏低。

煤岩的凝胶化指数(GI)和森林指数(WI)能反映沼泽的覆水程度和植物类型。

$GI = (\text{镜质体} + \text{粗粒体}) / (\text{丝质体} + \text{半丝质体} + \text{碎屑惰性体})$,是凝胶化组分与非凝胶化组分之比,高值表示泥炭沼泽相对潮湿,水位高;低值表示相对干燥,水位低。

$WI = \text{组织镜质体} / \text{碎屑镜质体}$, >0.5 为森林沼泽, <0.5 草本沼泽。

山西组煤岩的 GI 为 2.208~5.206,平均 3.302;太原组煤岩的 GI 为 2.014~7.056,平均 4.563,比山西组的高,说明太原组沼泽覆水比山西组严重,还原性强。山西组煤岩的 WI 为 0.403~2.567,平均 1.029。太原组煤岩的 WI 为 0.362~1.404,平均 0.747,均大于 0.5,说明均以树沼为主,草沼也有,但少(表 1)。

总之,太原组煤储层储集物性比山西组煤储层的好。

4 海平面升降对优质煤储层形成分布的控制作用

在晚石炭世—早二叠世,本区发生了多次海侵—海退,形成了多个级别不等的沉积旋回。根据层序地层分析,本区上石炭统—二叠统可划分为两个层序,每个层序又进一步划分为水进体系域和高位体系域(赵省民等, 1997; 钟蓉等, 1998; 陈世悦等, 2000; 金振奎等, 2005a, 2007)。

研究表明,煤储层在层序格架中的分布具有明显的规律(图 1~3)。

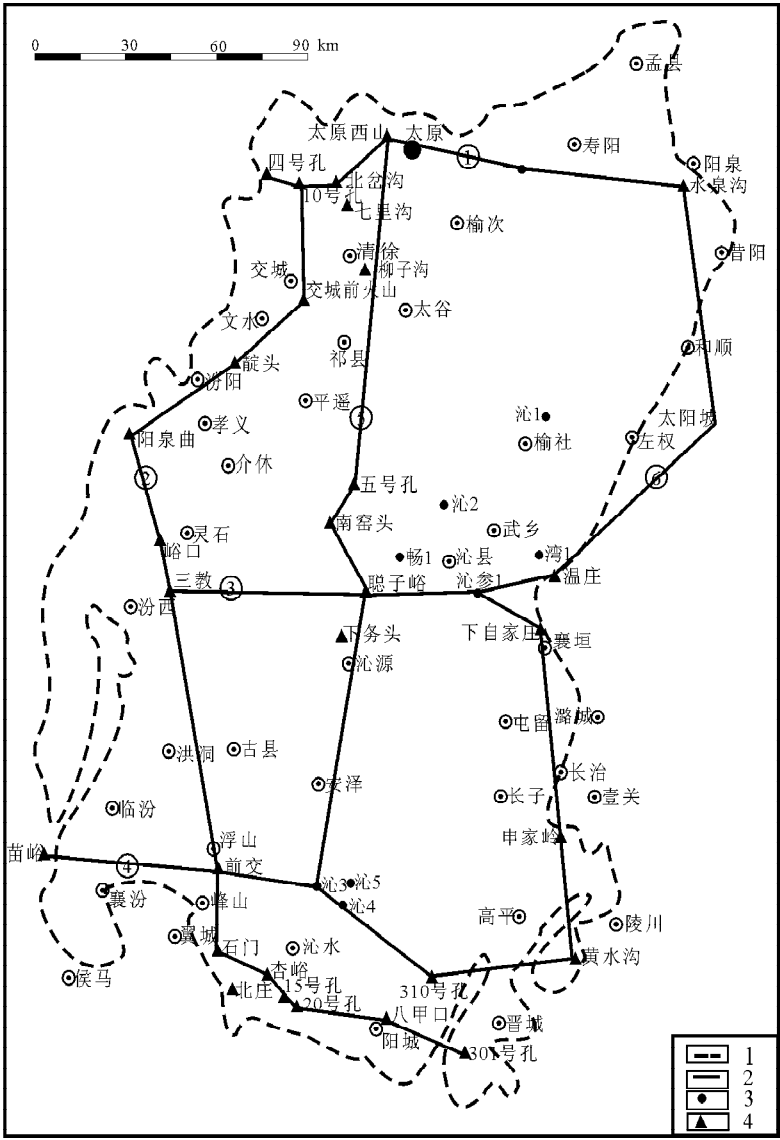


图 1 沁水盆地上石炭统一下二叠统地层层序对比剖面位置图

Fig. 1 Location of Carboniferous and Permian stratigraphic sequence correlation profiles in the Qinshui Basin

1—盆地边缘;2—剖面连线;3—探井位置;4—露头剖面位置

1—Basin margin; 2—correlation profile; 3—borehole location; 4—outcrop succession location

水进体系域,沉积速度小于海平面上升速度,水体普遍加深,发生海侵,碳酸盐台地、碎屑岩浅海、泻湖等沉积相广布,而有利于聚煤的潮坪和三角洲环境发育程度差,因此煤储层不但稀少,而且厚度小,横向分布不稳定,如层序Ⅰ中的 12 号煤、层序Ⅱ中的 7 号煤。

高位体系域,沉积速度大于海平面上升速度,水体普遍变浅,发生海退,浅海、泻湖不断淤积填平,潮坪和三角洲环境广泛发育,尤其是高位体系域晚期,因此优质煤储层发育。如太原地区层序Ⅰ高位体系域晚期的 8、9 号煤和层序Ⅱ高位体系域晚期的 2、3 号煤都是各层序中最厚、最稳定的煤储层。

5 结论

本次研究主要取得了如下结论:

(1)沉积相对优质煤储层的形成和分布有重要控制作用。通过浅海和泻湖淤积填平发育起来的潮坪环境和三角洲环境是最有利的优质煤储层形成环境,煤储层厚度大、分布广。

(2)沉积环境对煤储层中的灰分含量和镜质组含量有重要影响,而灰分含量和镜质组含量又直接影响煤储层的储集物性,因此沉积环境对煤储层的储集物性有重要影响。灰分含量越高,储集物性越差;镜质组含量越高,储集物性越好。由于在灰分含

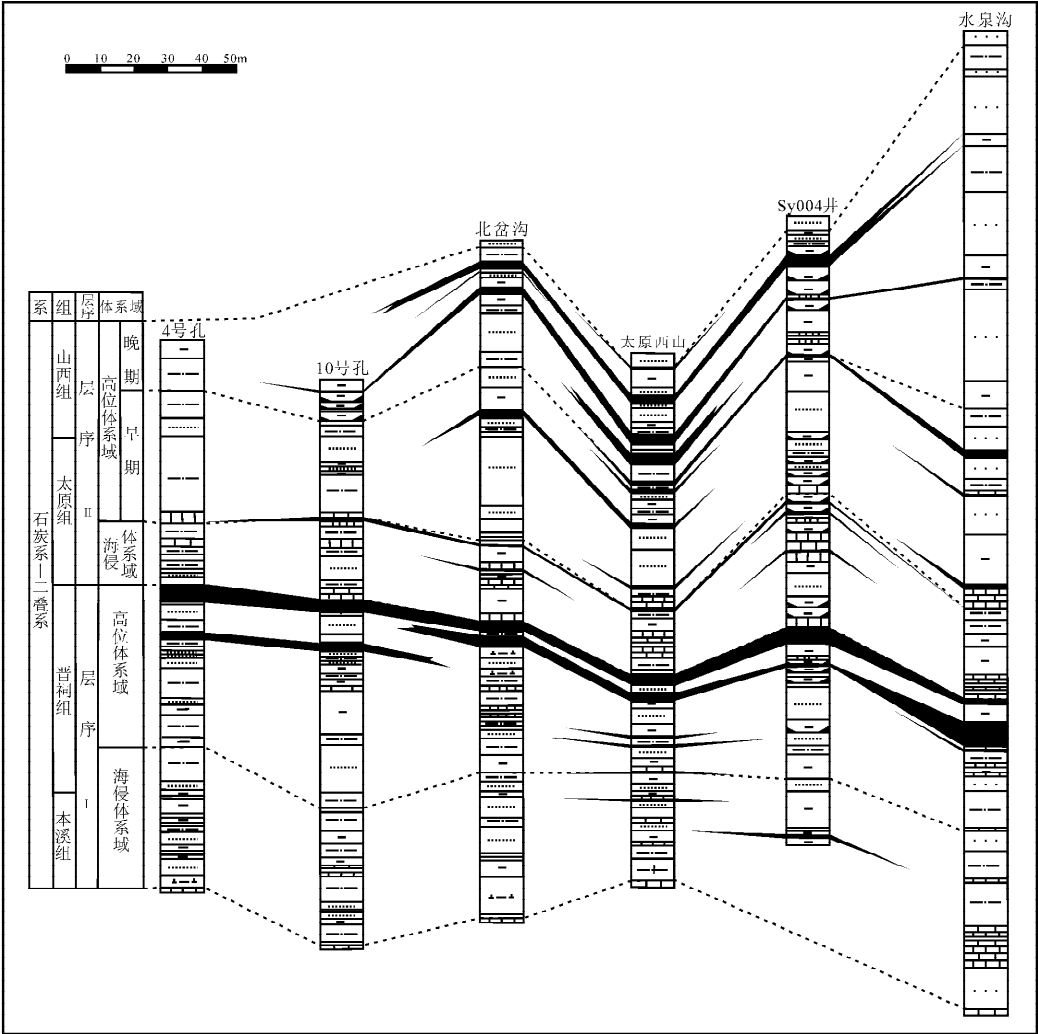


图 2 沁水盆地上石炭统一下二叠统图 1 中①号剖面层序格架及煤层分布
Fig. 2 Carboniferous and Permian sequence framework and distribution of coal beds
of correlation profile ① in Fig. 1, Qinshui Basin

表 1 石炭系—二叠系煤岩学指数统计表			
Table 1 Parameters of coal rocks of the Carboniferous and Permian			
井号	层位	GI	WI
孔古 4	山西组	2.208	0.403
	山西组	2.664	0.594
	太原组—晋祠组	4.077	0.655
	太原组—晋祠组	4.524	1.404
乌深 1	太原组—晋祠组	2.014	0.848
	太原组—晋祠组	4.873	0.362
	太原组—晋祠组	5.733	0.396
徐 14	山西组	2.917	2.567
沧参 1	山西组	5.206	0.517
	太原组—晋祠组	7.056	0.674
歧古 1	山西组	3.517	1.065
	太原组—晋祠组	3.221	0.921
板深 1X1	太原组—晋祠组	5.007	0.737

量、煤岩显微组分等方面的差异,潮坪环境沉积的煤储层的储集物性优于三角洲的煤储层,下三角洲平原沉积的煤储层优于上三角洲平原沉积的煤储层。

(3)海平面变化对对优质煤储层的形成和分布有重要控制作用。高位体系域煤储层富集,单层厚度大,横向分布相当稳定,尤其是高位体系域晚期,是形成优质煤储层最有利的层位。而水进体系域煤储层稀少,单层厚度小,横向分布不稳定,不利于优质煤储层形成。

致谢:本次研究过程中,中国地质大学的汤达祯教授、刘大猛教授、唐书桓教授给予了大力支持;淮南矿业学院的唐修义教授给予了大力支持,并提出了不少建设性意见。在此对他们表示衷心的感谢。

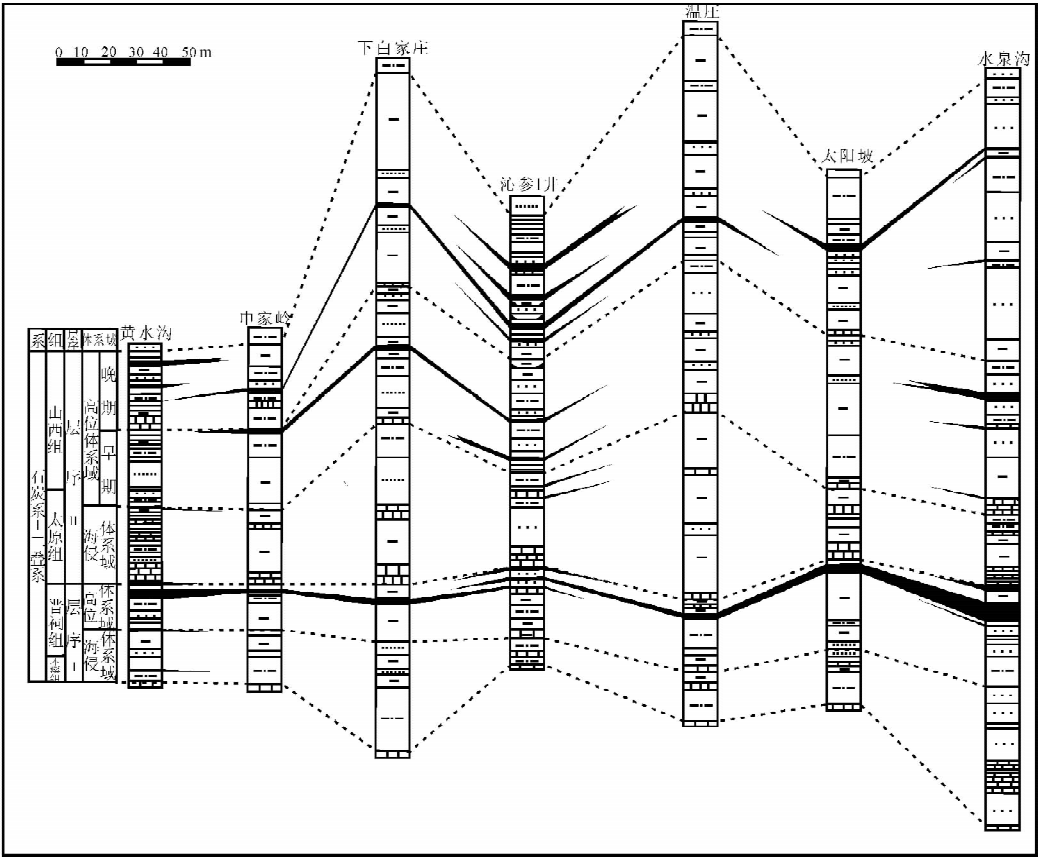


图 3 沁水盆地上石炭统一二叠统图 1 中⑥号剖面层序格架及煤层分布
Fig. 3 Carboniferous and Permian sequence framework and distribution of coal beds
of correlation profile ⑥ in Fig. 1, Qinshui Basin

参 考 文 献

陈世悦, 刘焕杰. 2000. 华北晚古生代层序地层与聚煤规律. 东营: 石油大学出版社, 18~45.

陈钟惠, 彭格林, 陆汝纶, 马晋贤. 1983. 贺兰山北段及桌子山区太原组的沉积和聚煤环境. 地质论评, 29(4): 351~357.

傅雪海, 秦勇, 姜波, 王文峰, 李贵中. 2001. 煤割理压缩实验及渗透率数值模拟. 煤炭学报, 26(6): 573~577.

顾成亮. 2001. 滇东—黔西地区晚二叠世煤岩与煤层气储层物性分析. 贵州地质, 18(3): 163~167.

韩德馨. 1996. 中国煤岩学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 468~476.

金振奎, 王春生. 2005a. 山西太原地区石炭系—二叠系海平面升降对煤储层的控制作用. 石油勘探与开发, 7(1): 137~144.

金振奎, 王春生. 2005b. 煤层灰分对其储集性能的影响. 天然气工业, 25(1): 55~57.

金振奎, 王春生, 王濮, 张彦龙. 2007. 华北地区石炭系—二叠系煤岩储集性能的控制因素. 石油勘探与开发, 34(5): 534~540.

宁正伟. 1997. 华北地区石炭—二叠系煤岩与煤层气储层物性分析. 石油实验地质, 19(1): 76~80.

秦勇. 2003. 中国煤层气地质研究进展与述评. 高校地质学报, 9(3): 339~358.

秦勇, 傅雪海, 岳巍, 林大扬. 2000. 沉积体系与煤层气储盖特征之关系探讨. 古地理学报, 2(1): 77~79.

秦勇, 王文峰, 李壮福, 夏筱红. 2008. 海侵作用影响下的高分辨煤相序列及其古泥炭沼泽发育模式——以山西北部安太堡上石炭统太原组 11 号煤层为例. 地质学报, 82(2): 234~246.

尚冠雄. 1993. 华北晚古生代层序地层研究. 北京: 地质出版社, 117~151.

王华, 陈钟惠, 陆永潮. 2001. 山西河东煤田保德矿区太原组砂体特征及与煤聚集的关系. 地质学报, 75(4): 562~569.

王仁农, 李桂春. 1995. 中国含煤盆地的聚煤规律. 地质论评, 41(6): 487~498.

王一兵, 赵双友, 刘红兵. 2004. 中国低煤阶煤层气勘探探索——以沙尔湖凹陷为例. 天然气工业, 24(5): 21~23.

赵省民, 郑浚茂. 1997. 山西大同晚古生代含煤地层的沉积特征及其层序地层意义. 地质论评, 43(1): 85~90.

钟蓉, 傅泽明. 1998. 华北地台晚石炭世—早二叠世海水进退与厚煤带分布关系. 地质学报, 72(1): 64~75.

周家尧, 关德师. 1995. 煤储集层特征. 天然气工业, 15(5): 6~10.

Harpalani S, Schraufnagel R A. 1990. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal. Fuel, 69: 551~556.

Hucka B P. 1989. Analysis of cleat in Utah coal seams. Utah

Geological and Mineral Survey Open-file Report 154.

Jin Zhenkui, Wang Chunsheng. 2005. Sedimentary conditions for good coal reservoir development in the Carboniferous and Permian, Qinshui Basin. Chinese Science Bulletin, 50(suppl.): 17~23.

Laubach S E, Marrett R A, Olson J E, et al. 1998. Characteristics and origins of coal cleat a review. Internal Journal of Coal Geology, 35(1~2):175~207.

Puri R, Evanoff J C, Brugler M L. 1991. Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics. SPE 21491, 93~103.

Controlling Factors of Reservoir of Coal Rocks
in Carboniferous—Permian, North China

JIN Zhenkui, SU Nina, WANG Chunsheng
*Education Ministry Key Lab of Hydrocarbon Generating and Accumulating
of China University (Beijing), Changping, Beijing, 102249*

Abstract

The reservoir ability of coal rocks is controlled by both sedimentary facies and diagenesis. Sedimentary facies controls the content of ash and microcomponents of coal rocks, which further affect the reservoir ability of coal beds. There exists quantitative relation between the ash production rate and the porosity and permeability of coal. The more the ash, the lower the porosity and permeability of the coal. Among microcomponents of coal rocks, vitrinite is favorable to formation of cleat, which can enhance the permeability of the coal. The more the vitrinite in the coal, the higher the porosity and permeability. The content of vitrinite and ash are different in different types of coals. From dull coal to bright coal, vitrinite tends to increase, the ash tends to decrease, and the porosity and permeability tend to increase. In the study area, coals were deposited in tidal flats and delta environments. Due to difference in ash content and micro components, coals formed in tidal flats show higher porosity and permeability than those formed in deltas, and those formed in lower delta plain show higher porosity and permeability than those formed in upper delta plain. In addition, due to dissolution of the calcite cement filling fissures, cleats and pores, coal rocks in the vadose and phreatic zones show better reservoir ability, while deeply buried coal beds, due to cementation and compaction, show poor reservoir ability.

Key words: Carboniferous; Permian; high-quality coal rocks; sedimentary facies; sea level change