

文章编号: 1001-1986(2010)04-0001-06

西北地区侏罗纪煤的煤岩学特征

黄文辉^{1,2}, 唐书恒¹, 唐修义³, 陈 萍³, 赵志根³, 万 欢¹, 敖卫华^{1,2},
肖秀玲¹, 柳佳期¹, B. Finkelman⁴

(1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001;
4. The University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75083-0688)

摘要: 我国西北侏罗纪煤储量巨大, 煤质优良, 多低灰、低硫, 被称为“优质煤”。在总结前人研究成果基础上, 对其煤岩学特征及其地质控制因素进行了探讨。研究认为, 不同地质背景下形成的煤其煤岩学特征表现各异, 如新疆的艾维尔沟、阜康等矿区的煤可用于炼焦, 神华煤可直接液化, 吐哈盆地的煤具有成油潜力。西北中侏罗世煤普遍富含惰质组, 贫矿物质最为显著, 与我国东部石炭—二叠纪煤以及国外“冈瓦纳煤”均存在较大差异, 西北侏罗纪煤煤岩类型独特, 是大型内陆型盆地演化的产物, 多属低变质烟煤, 局部也有中、高变质烟煤和无烟煤, 还出现一个褐煤矿点。在煤地质学与煤岩学、煤化学等方面的深入研究, 对今后洁净、高效、合理地利用西北侏罗纪优质煤资源十分重要。

关键词: 侏罗纪; 煤岩学; 西北地区; 研究意义

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.04.001

The Jurassic coal petrology and the research significance of Northwest China

HUANG Wenhui^{1,2}, TANG Shuheng¹, TANG Xiuyi³, CHEN Ping³, ZHAO Zhigen³,
WAN Huan¹, AO Weihua^{1,2}, XIAO Xiuling¹, LIU Jiaqi¹, B. Finkelman⁴

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining(CUMTB), Beijing 100083, China; 3. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. The University of Texas at Dallas, Richardson, TX 75083-0688)

Abstract: Jurassic coal in NW China is named as “coal with good quality” with huge reserve and perfect coal quality, mostly with low ash content and low sulfur content. The coal petrology and its geological controlling factors are discussed. For example the coals in Aiweier, Fukang and other mining areas in Xinjiang Autonomous Region can be used in coking. The direct coal liquefaction has achieved success in Shenhua. Coal derived oil has been recognized in Tuha Basin. However, this type of coal has specific coal composition and chemical technological properties, especially the middle Jurassic coal is quite rich in inertinite but very poor in mineral. The kind of coal is largely different from Carboniferous-Permian coal in eastern China and foreign “Gondwanic coal”. Jurassic coal in NW China is the product of large-scale inland-type basin evolution with unique coal types. Most of Jurassic coal in NW China belongs to low-metamorphism bituminous coal, with small-scale medium and high-metamorphism bituminous coal and non-bituminous coal in local area with a mining point of lignite. The research on related coal metamorphism types should be strengthened. The further and systematic study of coal geology, coal petrology and chemistry will be very important for the future clean and high-efficiency utilization of Jurassic coal in NW China with huge reserve. The research on organic component evolution in the metamorphism process and the specialty of metamorphism type will have scientific and guiding meanings on high-efficiency and rational utilization of Jurassic coal in NW China. The research on Jurassic coal in NW China will also enrich the traditional academic viewpoints, with important meaning in the formation of realistic coal geology theories that are more suitable for the reality in China.

Key words: Jurassic; coal petrology; Northwest China; research significance

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2006CB202202); 国家自然科学基金项目(40772095, 40972106);
长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0864)

作者简介: 黄文辉(1961—), 男, 福建漳州人, 德国理学博士, 教授, 博士生导师, 从事煤地质、储层地质以及环境地质的教学与研究工作。

据第 3 次全国煤田预测资料,西北地区侏罗纪的煤炭资源量占我国各成煤时代煤炭资源总量的 39.6%^[1],且煤质优良,我国低灰、低硫、低磷的“优质煤”资源量的 90%来自西北地区侏罗纪煤^[2]。

对西北地区侏罗纪煤的研究早已受到关注。在 20 世纪 80—90 年代,煤炭科学研究总院西安研究院就系统地研究了西北侏罗纪煤地质问题,张泓、王双明、吴传荣、李小彦等对西北地区侏罗纪煤的成煤地质条件进行了总结^[2-7];煤炭科学研究总院化工研究院研究过煤的液化性质^[8-9];石油系统多年研究吐哈盆地的煤成油问题^[10-12];炼焦界对西北侏罗纪煤的结焦性也作过研究^[13];初志民、张爱云对西北地区侏罗纪煤的生烃潜力做了深入研究^[14];2000—2004 年,杨起院士领导的课题组完成了国家地质调查局项目《西北地区煤层气资源综合评价》^[15];中国煤田地质总局袁三畏在其专著中对西北侏罗纪煤质特征作了陈述^[16];杨起和韩德馨院士都对西北侏罗纪煤作过论述^[17-18]。此外,我国其他学者也从不同方面研究了西北侏罗纪煤,包括煤岩成分^[19-35]、煤变质作用^[36-40]、煤成烃^[41]、有机岩石学^[42-44]、优质煤资源^[45-52]、微量元素^[53]、煤结构^[54-63]等。这些研究成果表明,西北侏罗纪煤的成分与性质具有明显的特色,与我国东部石炭—二叠纪煤存在很大差异;我国现有的煤地质学理论建立的主要基础是对东部石炭—二叠纪煤的研究,西北侏罗纪煤性质特殊,属于另一种类型的煤,其特殊性主要表现在以下几个方面。

1 煤岩特征

1.1 煤的有机组分特征

西北侏罗纪煤最明显的特征是富含惰性组组分。东部石炭—二叠纪煤中显微煤岩组分惰质组一般在 20%左右,宏观煤岩组分丝炭少见,以半亮煤和亮煤为主;而多数西北侏罗纪煤中惰质组超过 35%,甚至高达 60%左右,丝炭常聚集成层分布,宏观煤岩类型常以半暗煤为主。其次,与东部石炭—二叠纪煤相比较,西北侏罗纪煤中过渡性组分(半镜质组和半惰质组)较多,常达 10%~20%,壳质组组分较少,一般少于 3%~5%^[19-21, 26, 29-30, 33, 50]。当然不同地层层位和不同矿区的煤岩成分有差异。据王双明、张泓、李小彦等的研究,鄂尔多斯盆地延安组河流相的 1⁻²、5⁻² 煤比湖泊三角洲相的 2⁻²、3⁻¹、4⁻¹ 煤所含惰性组分还要高一些。另据吴传荣等的资料^[5],中侏罗世煤普遍富含惰质组组分,早侏罗世煤中惰质组则一般少于 30%。艾维尔沟矿区的早侏罗世煤中惰质组和半惰质组尚不到 10%。吴传荣等、白向飞等、张井等依据

已有成煤理论简要探讨了侏罗纪煤的沉积环境(煤相)^[7, 19-21, 33-34];王士俊和唐修义等也初步研究过哈密侏罗纪煤的几种成煤植物^[56]。

国际煤岩学界也注意到,自然界存在富含惰质组的煤。在煤岩学经典著作《Stach 煤岩学教程》(1982)中,作者特别提出,赋存在冈瓦纳大陆的煤是不同于石炭纪煤的另一类型的煤,称为“冈瓦纳煤(Gondwana coals)”,其最大特点是富含惰质组。国际煤岩学界对煤岩成分的描述源于对石炭纪煤的观察,所以在专著里用一独立章节陈述了“冈瓦纳煤”的煤岩成分^[64]。

我国西北地区侏罗纪煤虽也富含惰质组,但与“冈瓦纳煤”还有区别。二者成煤时代不同,“冈瓦纳煤”赋存在二叠纪、三叠纪与侏罗纪地层里,以二叠纪地层中最为发育^[64]。二者另一明显区别是“冈瓦纳煤”的矿物质总含量通常较高^[64],而我国西北地区侏罗纪煤以矿物质含量低而著称^[16]。

据吴传荣等著作《西北早—中侏罗世煤岩煤质与煤变质研究》^[7],西北侏罗纪低变质程度煤里出现小球体、热解碳、镶嵌体等各向异性体。这些组分是接触变质带内的具有粘结性煤的特征组分。可是在 R_{\max} 只有 0.45%的不具有粘结性的西北煤里却有出现,而且未见附近有岩浆侵入煤层。正如该书作者所述“这是以往资料中所没有报道过的”^[7]。

国外学者也注意到富含惰质组和过渡性组分煤的特征。据文献^[57]和^[64],捷克 M.科辛娜和 J.霍恩西尔对捷克褐煤研究后指出,富惰性组煤仍然是目前煤岩学研究的一个热门课题,这种煤具有一些特点,其中最重要的是在镜质组和惰性组之间存在着过渡性组分,其“过渡性质”与煤的结构与反射率存在关系。另外,对澳大利亚富惰性组煤的研究所获得的结果表明,具有可识别的开放细胞结构的半丝质组是不可溶的^[58]。在所获得研究结果的基础上,可根据反射率确定可溶和不可溶显微组分之间的界限,即反射率大约比各自的镜质组反射率高 0.2%~0.3%的显微组分被认为是不可溶的。根据这种划分,除少量弱反射率的半丝质组外,大多数惰性组应划归不可溶显微组分。富惰性组煤的结焦性不仅取决于惰性组的含量和煤化程度,而且还取决于惰性组的粒度及其在可溶物质中的分散程度。分散程度大致可由显微煤岩类型的分析来说明。在澳大利亚惰性组煤的影响结焦力的其他成因特征中,特别提到的是有镜质组的不同成因类型(即镜质组 A 和 B)的存在。另外,在一些加拿大煤^[58]和其他一些地方煤中,却发现弱反射半丝质组具有明显的可溶性^[64-68]。

富惰性组煤的显微组分的强烈变化,以及在反射率和结构上存在着过渡现象,给显微组分的鉴别

带来了困难。在很多国家使用的镜质组和惰性组显微组分的命名术语,只适用于典型的以镜质组为主的石炭纪煤,而对于表现出不同的过渡类型以及惰性组显微组分较高的富惰性组煤来说,这种划分方案实际应用就有些困难了。1977年,在国际煤岩学会实验室中对捷克富惰性组煤进行显微组分识别鉴定时,就出现了困难。由此可见,国外对富惰性组分和过渡类型组分的研究同样存在一些未决问题。

1.2 煤中矿物质特征

我国煤地质界采用“优质煤”一词表示低灰(<15%)、低硫(<1%)、低磷(<0.05%)的煤。我国优质煤总量的90%分布于西北侏罗纪地层中。这类优质煤的原煤灰分产率可能低于或接近10%,达到东部一般原煤经洗选后的精煤标准^[2,16, 47-48, 50]。当然,西北侏罗纪并不全是“优质煤”,有些矿区部分煤的灰分产率也达20%~30%,但高灰煤往往易洗选^[8]。煤的灰分产率只能近似表征煤中矿物质含量的多少。据曾凡桂报道,神府大柳塔2-2煤层中的矿物以粘土类为主,常见有高岭石与伊利石,偶见蒙脱石;其次是石英和充填在裂隙里的方解石^[30]。

近年来,我国煤中微量元素受到重视,通过对西北地区侏罗纪煤中微量元素的研究表明,其有害微量元素含量甚低。Chandra解释“冈瓦纳煤”中矿物含量较高的原因有:a.短暂的或者局部的高速间歇性沉降;b.聚煤盆地中或其附近地形起伏相当大;c.煤层沉积后进入的矿物质^[64]。我国西北地区侏罗纪煤系属陆相煤系,可是煤中矿物质却较少,这与西北地区大型内陆盆地发育的沼泽长期稳定的环境和比较单一的酸性水陆源供给有关。而东部石炭-二叠纪煤系主要形成于滨海三角洲,煤系厚度较小,煤层层数较少,煤层在纵向与横向上的变化较小,地形起伏不大,海水的不断侵入和陆源物质随水流入侵泥炭沼泽,使得东部煤中矿物和硫分普遍较高。

2 煤的变质程度

西北地区侏罗纪煤中,约90%的变质程度处于低变质烟煤阶段,由于惰质组含量高,导致煤的挥发分析出率和粘结性降低,以致不少煤的工业牌号被划归弱粘煤或不粘煤。可用于炼焦的中变质烟煤的资源量仅占总资源量的5.5%,高变质无烟煤资源量更少,只占0.29%^[7,17]。更值得注意的是,炼焦煤和无烟煤的分布比较广而零星。已知炼焦煤矿点多达75处,资源条件较好的有:新疆的艾维尔沟、阜康、野马泉、尼勒尔、库车、拜城、他什店、巴里坤,青海的热水、大茶、石浪,甘肃的天祝、炭山岭等。最著名的无烟煤矿区是宁夏的汝箕沟,在

甘肃的九条岭、红沟、高桥,青海的大滩,内蒙古大青山等地都赋存有无烟煤。贫煤的分布也很零散,除在艾维尔沟、九条岭、汝箕沟、大青山有少量分布外,贫煤还零星分布在青海的热水、大头羊、元宝山、石峡,甘肃的早峡、沙婆泉,新疆的温宿等地^[7]。总之,在低变质烟煤分布的大范围内,零星散布着中、高变质程度煤。西北地区这样的煤级分布特征显然不同于东部煤级成片分带的状况。

研究者曾试图揭示少数几个矿区炼焦煤和无烟煤形成的地质因素。例如在新疆吐哈盆地西段艾维尔沟很醒目地出现一片炼焦煤^[18,37]。在长约24 km,宽约2 km的很小的长条型地区内,自东向西有序地排列有气煤、肥煤、焦煤、瘦煤和贫煤。至今人们还难以解释为什么在如此小的范围内会出现这么一片煤种齐全的炼焦煤。杨起院士在他主编的《中国煤变质作用》一书中认为,这“与博罗科努-阿其克库都克深大断裂有关”^[17]。张慧等曾提出设想,深大断裂有利于隐伏热异常形成,它的多次活动可为地下水深循环从地壳内部获得热量提供通道,热水也可造成煤的变质^[39]。周继兵等应用此类设想讨论过新疆阜康一带侏罗纪八道湾组的煤局部进入中变质烟煤(气肥煤)阶段的原因,该矿煤中镜质组反射率升高到0.5%~0.8%^[40,52]。另外,汝箕沟煤的变质程度比相邻矿区突出地高出许多,属无烟煤,镜质组反射率高达3.5%左右。20世纪90年代人们认为,这是热液变质作用的产物,推测深部有隐伏岩体^[7,17,36]。2003年高山林等提出,该区早白垩世晚期玄武岩的发育是引起该区煤变质的最直接和主要原因^[36]。探讨西北侏罗纪煤变质作用最详文献还属吴传荣等的专著^[7],以及李小彦,王双明等的专著和论文。吴传荣曾认为,深成变质首先使煤变质成为广泛分布的低变质烟煤,后来叠加上的岩浆热变质作用使局部地区的煤变质程度升高。此论点符合杨起院士提出的理论,即中国煤变质作用是“多阶段多热源叠加变质作用”^[17]。该理论主要基于对华北石炭-二叠纪煤和华南二叠纪煤的研究。可是与华北、华南相比,在西北的矿区里均没有发现明显的岩浆活动。吴传荣等力求探寻隐伏岩体存在的“地面标志”,如脉岩、矿物包裹体、岩石蚀变、热变质煤岩显微组分等均还未能直接找到。尽管书中提出的岩浆热变质作用标志尚待更充分论证,但吴传荣等所作大量工作还是为研究西北侏罗纪煤变质作用打下了很好的基础。

在甘肃大滩还发现煤变质程度很低的褐煤。其最高内在水分为30.77%,含最高内在水分的无灰基

高位发热量为 22 646 J/g, 原煤可燃基高位发热量为 28 575 J/g, 精煤挥发分为 50% 左右, 碳的质量分数为 70.94%, 目测透光率为 40.8%, 镜质组反射率(R_{\max})为 0.30%~0.41%。值得注意的是, 此褐煤与一般褐煤相比, 氧含量较高(20.05%), 氢含量较低(5.04%)^[5]。侏罗纪之所以能够保持这种褐煤, 可能与泥炭长期未能达到一定埋藏深度有关。

煤岩学方法已被地质学者愈来愈多地用以阐明古地理学、构造学和地温学问题^[64]。煤化作用程度受控于地热史, 即岩石的温度, 特别是最高温度, 以及受热的持续时间。煤的有机物质相对煤中矿物, 对受热敏感得多。并且, 煤化作用是不可逆的, 不太受 Ph、Eh、水的局部压力、间隙溶液的离子浓度等条件的影响。因此, 煤被认为是一种较好的地质温度计。这种情况一直到低变质阶段都是有效的。由于时间对煤化作用的影响, 因而难以把某一煤化程度同准确的温度联系起来。在通常情况下, 煤级随着埋藏深度和岩石温度的增加而增高。所以, 借助于煤级可以研究埋藏曲线的问题。高地温梯度导致高煤化梯度, 即煤级(例如, 镜质组反射率)随深度增加而增高。这就可能从煤化梯度反推出古地温梯度。已有一些作者曾推导出多种数学模式, 以明确煤级与其受热史的相互关系^[64-71]。

3 煤的还原程度

有些研究者认为, 西北侏罗纪煤属于“弱还原程度煤”, 白向飞等著文对此也作过论述^[19-21, 61]。煤的“还原性”是前苏联学者维达夫斯基于 20 世纪 40 年代针对顿巴斯石炭纪煤提出的一个概念。我国研究者应用其概念讨论过由苏北到鲁西南一带太原组和山西组煤的质量差异, 赵师庆等还提出“还原程度”是影响煤成分与性质的“第三成因因素”^[55]。煤地质学界认为“煤岩成分”和“变质程度”是影响煤成分与性质的两大成因因素。至于“还原程度”是不是与之并列的“第三成因因素”, 学术界有不同见解。白向飞等在文章的开始就指出, 目前对煤还原程度概念的认识还不很清晰, 但认为西北地区侏罗纪煤中惰质组含量普遍较高, “与其成因上的弱还原性关系密切”^[21]。这里所指的“还原性”与维达夫斯基提出的“还原性”的涵义似乎不同。苏北—鲁西南一带太原组和山西组煤的“还原程度”差异不表现在惰质组含量的多少上, 而是反映在煤中镜质组是否属“富氢镜质组”。太原组煤被认为属“强还原程度煤”, 因其镜质组中有“富氢镜质组”; 山西组煤还原程度弱, 因其镜质组中缺“富氢镜质组”^[55]。

西北侏罗纪煤中镜质组含量偏低, 惰性组含量偏高, 过渡性组分也偏高, 按以上观点应归属于弱还原程度煤, 但是这与东部二叠纪山西组的弱还原程度煤还不能简单对比, 因为其形成环境存在巨大差异。对比石炭—二叠纪, 西北侏罗纪煤形成于相对干燥的气候条件, 这可能是造成了煤层中氧化丝质组含量偏高的原因之一。

4 煤的化学工艺性质

西北侏罗纪煤的化学工艺性质有 3 点特殊性:

第一, 西北侏罗纪煤的结焦性不同于东部石炭—二叠纪煤。多数西北侏罗纪煤属动力用煤, 冶金系统对为数不多的炼焦煤特别关注, 尤其重视距乌鲁木齐较近的艾维尔沟矿区和阜康矿区的炼焦煤。经以周师庸为首的课题组研究, 得到如下结论, 这两个矿区的煤是“不明原因, 性质反常的炼焦煤”。2005 年出版的《炼焦煤性质与高炉焦炭质量》一书指出, “按目前煤质指标分类的牌号与它在配煤炼焦中的作用不相吻合。艾维尔沟煤属中变质程度强粘结性煤, 但在配煤中只能配用 10% 以下; 否则所得焦炭质量不能用于大型高炉。阜康煤属低变质程度弱粘结性煤, 在配煤炼焦中配用 30% 以上, 所得焦炭仍可用于大型高炉。其真实原因还有待研究。”^[13]。这里所谓“性质反常”指西北侏罗纪煤与东部石炭—二叠纪煤相比而言的。人们对煤结焦性的认识基于对东部石炭—二叠纪煤的研究, 至今对艾维尔沟和阜康的炼焦煤具有的特征及其地质成因尚无明确认识, 因而称之为“不明原因, 性质反常的炼焦煤”^[13]。

第二, 煤炭直接液化工艺对煤质有要求, 其中两条要求是: 煤的元素组成中的氢含量要高, H/C 原子比要大于 0.8; 煤的煤岩成分中惰质组含量要低, 一般低于 20% 为好^[9]。富含惰质组的西北侏罗纪煤并不符合此要求, 而我国自主开发的“神华煤直接液化工艺”已获得成功。从煤岩学角度如何看待神华煤的液化性能, 尚待深入研究。过度性组分半镜质组或半惰性组是否还存在活性, 也有待进一步研究。

第三, 汝箕沟的无烟煤具有特低灰、特低硫、特低磷, 高发热量、高比电阻、高机械强度、高精煤回收率、高块煤率和高二氧化碳转化率等“三低、六高”特性。这种煤在我国独一无二, 世界罕见, 可能唯有越南鸿基矿的煤可与之媲美。形成这种优质煤的前提条件首先是要有稳定的高位成煤沼泽环境, 理想的构造与气候背景, 茂盛快速的植物生长环境, 使得带入的物源碎屑物质极少; 另一方面, 本区煤层经受的热演化作用较强, 到无烟煤变质阶

段,煤的结构排列更加有序,同时一些矿物质会由于温度升高而溶解析出。直接的岩浆作用会使煤中矿物质增多,但是这种情况并没有发生,这就导致在汝箕沟形成了这种世界上少有的特低灰煤。目前汝箕沟煤已经开发出许多高价值产品。

5 煤的成油潜力

人们对煤成油能否形成具商业价值的油田尚有不同意见,至今被论证为煤成油的油田也不多。被我国有机地球化学界比较肯定的是,吐哈盆地赋存有具工业价值的煤成油,西山窑组的煤是主要生油源岩之一^[10-12]。煤岩学界关心吐哈盆地煤中哪些煤岩组分是主要生油母质。壳质组里的木栓质体曾被认为是生油的主要组分,含有超微类脂组分的基质镜质体也被当成生油的主要贡献者^[10-12]。金奎励教授和他的学生们在吐哈、准噶尔、塔里木等盆地都做过研究,认为壳质组(包括藻类体、沥青质体)和具有荧光性的基质镜质体是主要产烃组分^[41-46]。但是,西北侏罗纪煤的一般特征是贫壳质组(又称类脂组)。吴传荣等还指出“西北早-中侏罗世腐植煤里未见低等生物残体输入,这一点与海陆交互的晚古生代煤截然不同”^[7]。而我国东部和西南地区石炭-二叠纪太原组和龙潭组都富含具生油潜能的煤岩组分,可是至今发现具工业价值的煤成油却在西北,并提出侏罗纪西山窑组的煤是生油源岩。西北侏罗纪这种高惰性组分煤的各种组分在煤成油过程中所起的作用还需做进一步的定量研究。在最主要的生油母质类脂组含量很低的情况下,过渡性组分的贡献如何确定,以及煤层形成煤成油藏的机制问题还需做进一步的深入研究。

6 结论

a. 西北地区侏罗纪煤属于一种全新的成煤类型,既不同于我国东部石炭-二叠纪煤,也不同于欧洲和北美洲的石炭纪煤以及澳大利亚与印度的“冈瓦纳煤”,是大型河流相和湖泊相沉积体系下发育起来的高位泥炭沼泽的产物。

b. 西北侏罗纪煤的显著特征是富含惰性组分,多数超过35%,甚至高达60%左右;其次,煤岩组分中的过渡性组分(半镜质组和半惰质组)较多,常达10%~20%;壳质组分较少,一般少于3%~5%。另外,本区侏罗纪煤中的矿物质含量较少,多为低灰、低硫的优质煤,占据了我国优质煤总量的90%以上。

c. 西北侏罗纪煤约90%的变质程度处于低变质烟煤阶段;中变质烟煤的资源量仅占总资源量的5.5%;高变质无烟煤资源量更少,仅占0.29%。只

有少数受岩浆作用叠加的煤层变质程度升高。

d. 煤岩学、煤化学和煤工艺学等方面的特质表明,本区部分侏罗纪煤仍具有较强的生烃能力,也适合于气化和液化,对不同成因侏罗纪煤的煤化学特点及其工艺性质等方面的进一步研究,将具有重要的意义。

参考文献

- [1] 毛节华, 许惠龙. 中国煤炭资源分布现状和远景预测[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(3): 1-4.
- [2] 李小彦, 晋香兰, 李贵红. 西部煤炭资源开发中“优质煤”概念及利用问题的思考[J]. 中国煤田地质, 2005, 17(3): 5-8.
- [3] 王双明, 张玉平. 鄂尔多斯侏罗纪盆地形成演化和聚煤规律[J]. 地学前缘, 1999, 6(增): 147-155.
- [4] 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.
- [5] 张泓, 白清昭, 张笑薇, 等. 鄂尔多斯聚煤盆地形成与演化[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [6] 张泓, 李恒堂, 熊存卫, 等. 中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律[J]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [7] 吴传荣, 张慧, 李小彦, 等. 西北早-中侏罗世煤岩煤质与煤变质研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [8] 李文华, 霍卫东, 舒歌平. 马家塔煤及其显微组分的加氢液化特征[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(2): 104-107.
- [9] 吴春来. 煤炭液化在中国的发展前景[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 309-313.
- [10] 程克明, 熊英, 曾晓明, 等. 吐哈盆地煤成烃研究[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 13-17.
- [11] 赵长毅, 何忠华, 程克明, 等. 吐-哈盆地煤中基质镜质体生烃潜力与特征[J]. 科学通报, 1994, 39(21): 1979-1981.
- [12] 赵长毅, 程克明, 王飞宇. 吐哈盆地煤成烃主要贡献组分剖析[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 95-99.
- [13] 周师庸. 炼焦煤性质与高炉焦炭质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [14] 初志民, 张爱云. 灵武煤田延安组不同沉积相源岩的生烃潜力[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(2): 25-28.
- [15] 杨起, 刘大锰, 黄文辉, 等. 中国西北煤层气地质与资源综合评价[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [16] 袁三畏. 中国煤质论评[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 73-74, 272.
- [17] 杨起, 吴冲龙, 汤达祯, 等. 中国煤变质作用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996: 13-25, 191-197.
- [18] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1996: 146-148, 195.
- [19] 白向飞, 李文华. 大同侏罗纪 10-11 煤煤质特征及其控制因素[J]. 煤炭转化, 2001, 24(4): 21-24.
- [20] 白向飞, 李文华, 张寿禄, 等. 神东矿区侏罗纪 2-2#煤煤质特征研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(3): 87-88.
- [21] 白向飞, 李文华, 陈文敏, 等. 我国西部弱还原程度煤分布及煤质特征研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 502-506.
- [22] 陈洪博, 李文华, 姜英, 等. 神东煤显微组分与基本结构特征研究[J]. 煤炭转化, 2006, 29(1): 6-10.

- [23] 段旭琴, 陈志刚, 祁威, 等. 神府煤惰质组与镜质组的富集和可浮性研究[J]. 选煤技术, 2004 (4): 26-29.
- [24] 范立民, 寇贵德, 侯飞龙. 榆神低硫煤中硫含量特征及成因探讨[J]. 中国煤田地质, 2003, 15(2): 12-13.
- [25] 李丽. 神府煤各种煤岩组分吸附性能的测定[J]. 煤炭技术, 2001, 20(11): 50-51.
- [26] 李文华, 陈亚飞, 陈文敏, 等. 中国主要矿区煤的显微组分分布特征[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(9): 31-34.
- [27] 李小彦. 神东矿区富惰质组煤的形成条件研究—惰质组分的真菌交替成因意义[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 1-4.
- [28] 李小彦, 王杰玲, 赵平. 陕甘宁盆地优质煤资源的分类与评价[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(4): 1-4.
- [29] 孙庆雷, 李文, 李东涛, 等. 神木煤有机显微组分的结构特征与热转化性质的关系[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(2): 97-102.
- [30] 曾凡桂. 神府大柳塔 2-2 煤层煤岩学特征[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(3): 25-27.
- [31] 曾勇. 中国西部地区特殊煤种及其综合开发与利用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(4): 237-340.
- [32] 宋党育, 秦勇, 张军营, 等. 西部煤中有害痕量元素的洗选脱除特性[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 255-259.
- [33] 张井, 于冰, 唐家祥. 新疆伊宁煤田 Ya-8 煤的煤岩特征及煤相[J]. 中国煤田地质, 1999, 11(1): 30-32.
- [34] 张井, 王士俊, 唐家祥. 新疆伊犁盆地侏罗纪煤岩特征及煤相[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(3): 21-26.
- [35] 张秀仪, 童元贞, 肖达先, 等. 黄陵烛煤的成因探讨. 中国煤田地质[J], 1996(增刊): 10-16.
- [36] 高山林, 李芳, 李天斌, 等. 汝箕沟晚中生代玄武岩的确定与煤变质作用关系简论[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 8-10.
- [37] 张慧, 李小彦, 吴传荣, 等. 新疆艾维尔沟煤变质作用研究[J]. 新疆地质, 1993, 11(3): 238-245.
- [38] 张慧. 西北中生代煤系粘土矿物与煤变质关系[J]. 中国煤田地质, 1994, 6(4): 44-47.
- [39] 张慧, 吴传荣, 李小彦. 西北中生代煤系岩脉发育特征与煤变质关系[J]. 煤炭学报, 1995, 20(2): 218-222.
- [40] 周继兵, 李锋, 李向革, 等. 新疆阜康大黄山煤矿煤变质作用探讨[J]. 新疆地质, 2004, 22(2): 183-186.
- [41] 刘大锰, 金奎励, 毛鹤龄, 等. 塔里木盆地陆相烃源岩在机组分的分类及其岩石学特征[J]. 中国煤田地质, 1996(1): 9-14.
- [42] 魏辉, 金奎励, 张纪易. 准噶尔盆地侏罗纪煤有机岩石学研究[J]. 新疆石油地质, 1998, 19(1): 22-26.
- [43] 魏辉, 金奎励, 姚素平. 准噶尔盆地侏罗系生烃特征有机岩石学研究[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 18-22.
- [44] 姚素平, 张景荣, 金奎励, 等. 新疆侏罗系煤基质镜质体的岩石学特征及成烃性[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(3): 14-20.
- [45] 姚素平, 魏辉, 金奎励. 准噶尔盆地侏罗纪煤成油研究[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 78-85.
- [46] 姚素平, 毛鹤龄, 金奎励, 等. 噶尔盆地侏罗系西山窑组沉积有机相研究及烃源岩评价[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(11): 60-64.
- [47] 曹代勇, 赵峰华. 重视我国优质煤炭资源特性的研究[J]. 中国矿业, 2003 12(10): 21-23.
- [48] 李恒堂, 田希群. 西北地区煤炭资源综合评价及开发潜力分析[J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(增刊): 1-4.
- [49] 刘天绩, 鞠崎. 加强对西部优质煤炭资源的研究[J]. 青海国土经略, 2003(2): 1-2.
- [50] 薛炎荣. 论东胜煤田弓家塔精煤矿区特优煤炭资源的利用与保护[J]. 内蒙古煤炭经济, 2002(5): 6-8.
- [51] 张汝桢, 程万. 大西北—中国能源 21 世纪能源输出基地[J]. 电网技术, 1995, 19(8): 13-16.
- [52] 周继兵, 曾宪军, 樊涛. 新疆淮南煤田阜康一带煤炭资源分布区地质特征[J]. 新疆地质, 2005, 23(2): 146-151.
- [53] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 3-11.
- [54] 张承兆. 柴达木盆地煤炭资源及其开发潜力分析[J]. 中国煤田地质, 1997, 9(2): 80-81.
- [55] 赵师庆. 实用煤岩学[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 68-90.
- [56] 王士俊, 唐修义. 新疆哈密侏罗纪的几种成煤植物[J]. 新疆地质, 1994, 12(2): 172-174.
- [57] 方克定, 译. 煤岩学译文集[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [58] 陈洪博, 李文华, 姜英, 等. 神东煤显微组分与基本结构特征研究[J]. 煤炭转化, 2006, 29(1): 6-10.
- [59] 舒新前, 王祖谟, 徐精求, 等. 神府煤煤岩组分的结构特征及其差异[J]. 燃料化学学报, 1996, 24(5): 426-433.
- [60] 段旭琴, 王祖谟, 曲剑午. 神府煤惰质组与镜质组的结构性质研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(2): 19-23.
- [61] 白向飞, 李文华, 罗隽飞, 等. 中国西部弱还原性煤的结构特征初步研究[J]. 煤炭转化, 2006, 29(4): 22-27.
- [62] 段旭琴, 陈志刚, 祁威, 等. 神府煤惰质组与镜质组的富集和可浮性研究[J]. 选煤技术, 2004(4): 26-29.
- [63] 舒新前, 朱书全, 王祖谟, 等. 神府煤煤岩组分的表明电位研究[J]. 中国科学(E 辑), 1996, 26(4): 335-340.
- [64] STACH E, MACKOWSKY M T H, TEICHMULLER M, et al. Stach's textbook of coal petrology[M]. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1982: 177-197.
- [65] YANG Qi, PAN Zhigui, TANG Dazhen, et al. Study of coal structure using STM and AFM[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(11): 941-944.
- [66] Hiroguki Nakagawa, Akio Namba, Marc Bohlmann, et al. Hydro thermal dewatering of brown coal and catalytic hydrothermal gasification of the organic compounds dissolving in the water using a novel Ni/carbon catalyst[J]. FUEL, 2004, 83(6): 719-725.
- [67] KON Kidena, Yasufumin Tani, Satoru Murata, et al. Quantitative elucidation of bridge bonds and side chains in brown coals. FUEL, 2004, 83(11-12): 1697-1702.
- [68] Kwaser Jamil, Jun-ichiro Hayashi, Chun-Zhu Li. Pyrolysis of a victorian brown coal and gasification of nascent char in CO₂ atmosphere in a wire-mesh, reactor[J]. FUEL, 2004, 83(7-8): 833-843.
- [69] ZHUANG Xinguo, QUEROL X, PLANA F, et al. Determination of elemental affinities by density fractionation of bulk coal samples from the Chongqing coal district, Southwestern China[J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 55: 103-115.
- [70] DAI Shifeng, REN Deyi, HOU Xiaoqiang, et al. Geochemical and mineralogical anomalies of the late Permian coal in the Zhi-jin coalfield of southwest China and their volcanic origin[J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 55: 117-138.
- [71] DAI Shifeng, CHOU Chenlin, YUE Mei, et al. Mineralogy and geochemistry of a Late Permian coal in the Dafang Coalfield, Guizhou, China: influence from siliceous and iron-rich calcic hydrothermal fluids[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 61: 241-258.