

doi: 10.12029/gc20220607

杜芳鹏, 宁树正, 刘池洋, 乔军伟, 赵晓辰, 李聪聪, 谭富荣, 魏云迅, 苏刚, 雒铮. 2022. 中国低阶富惰质组煤的时空分布、煤质特征及清洁利用[J]. 中国地质, 49(6): 1792–1807.

Du Fangpeng, Ning Shuzheng, Liu Chiyang, Qiao Junwei, Zhao Xiaochen, Li Congcong, Tan Furong, Wei Yunxun, Su Gang, Luo Zheng. 2022. Distributions, properties and clean utilization of the low rank inertinite-rich coals in China[J]. Geology in China, 49(6): 1792–1807(in Chinese with English abstract).

中国低阶富惰质组煤的时空分布、煤质特征 及清洁利用

杜芳鹏¹, 宁树正², 刘池洋³, 乔军伟⁴, 赵晓辰⁴, 李聪聪^{4,5},
谭富荣⁶, 魏云迅², 苏刚⁷, 雒铮⁵

(1. 延安大学石油工程与环境工程学院, 陕西 延安, 716000; 2. 中国煤炭地质总局, 北京 100038; 3. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 4. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安, 710054; 5. 中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710199; 6. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 7. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:【研究目的】富惰质组煤以高惰质组含量为特征, 煤质及工艺性质随之发生相应的变化, 对清洁利用方式产生一定影响; 本文以梳理、厘定低阶富惰质组煤的时空分布、煤质特征为目的, 并在此基础上探讨西北地区低阶富惰质组煤的清洁利用方式。【研究方法】通过梳理大量前人勘查资料及研究成果, 分析、归纳其中的煤岩、煤质数据, 以此厘定中国煤富惰质组煤的时空分布特征、煤质特征, 进而结合各用途的煤岩煤质指标, 讨论西北低阶富惰质组煤的清洁潜力和用途。【研究结果】结果显示, 中国的富惰质组煤主要分布时代为早—中侏罗世, 分布区为西北地区, 以鄂尔多斯盆地延安组煤, 新疆北部诸盆地西山窑组煤为典型代表。西北地区低阶富惰质组煤具有低灰、低硫、低有害元素、低黏结性、较低氢含量、较低挥发分、较高二氧化碳反应性、高发热量等特点; 其中氢含量、黏结性、挥发分、二氧化碳反应性等明显与高惰质组含量相关。煤质特征表明西北地区侏罗纪煤具有高清洁度和高发热量, 是优质的动力用煤; 同煤阶相对低挥发分和氢含量使其不利于作为直接液化用煤; 而低灰、低硫、低黏结性、较强与二氧化碳反应性有利于其作为气化用煤, 适用于多种气化工序。此外, 以陕西北部为代表的部分低阶富惰质组煤具有较高的焦油产率, 为富油煤, 适于低温干馏热解。【结论】西北地区低阶富惰质组煤以动力用煤和气化用煤为主要清洁利用方式, 部分富油煤则应优先低温干馏热解。

关键词:富惰质组煤; 煤质特征; 侏罗纪煤; 清洁利用; 优质动力用煤; 气化用煤; 矿产勘查工程

创 新 点:(1) 系统梳理总结了我国富惰质组煤的时空分布; (2) 从富惰质组煤的角度入手, 归纳了西北地区主要低阶煤的煤质和工艺特征, 并提出了低阶富惰质组煤的清洁利用途径。

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1792-16

Distributions, properties and clean utilization of the low rank inertinite-rich coals in China

收稿日期: 2020-04-27; 改回日期: 2020-05-27

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-743, 2020JQ-746, 2021JLM-12)、中国地质调查局资源调查项目(DD20160187)、国家自然科学基金(41702144)及陕西煤业化工集团有限责任公司科学技术研究计划项目(CKH/ZXKJ-2022-003)联合资助。

作者简介: 杜芳鹏, 男, 1990年生, 博士, 讲师, 从事沉积能源矿产研究; E-mail: mrdo0911@163.com。

DU Fangpeng¹, NING Shuzheng², LIU Chiyang³, QIAO Junwei⁴, ZHAO Xiaochen⁴,
LI Congcong^{4,5}, TAN Furong⁶, WEI Yunxun², SU Gang⁷, LUO Zheng⁵

(1. School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China; 2. China National Administration of Coal Geology, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory for Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 4. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. Aerophoto grammetry & Remote Sensing Bureau, China National Administration of Coal Geology, Xi'an 710199, Shaanxi, China; 6. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 7. SHCCIG Caojiatan Mining Corporation Ltd., Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Inertinite-rich coal is characterized by the high inertinite content, and several coal properties are personalized accordingly, which affecting its clean utilization. In this paper, we focus on both the determination of the time-space distribution of the inertinite-rich coals in China and the induction of the coal properties, clean potential and utilization mode of the low rank inertinite-rich coals in Northwest China. **[Methods]** We sort out a large number of exploration data and research results, and coal macerals and coal properties data were analyzed and summarized. The determination of inertinite-rich coal's time-space distribution in China and their coal properties were based on the data. The clean potential and utilization mode of the low rank inertinite-rich coal in Northwest China were carried out along the coal properties combined with the indexes for various purposes. **[Results]** It shows that the inertinite-rich coals are mainly distributed in the Early-Middle Jurassic in Northwest China. The low rank inertinite-rich coals in Northwest China are characterized by low ash, low sulfur, low harmful elements, low cohesiveness, low hydrogen content, low volatile matter, high carbon dioxide reactivity and high calorific value, among which, the hydrogen content, cohesiveness, volatile matter and carbon dioxide reactivity are obviously related to the high inertinite content. The coal properties show that the Jurassic coals in Northwest China are of high cleanliness and high calorific value, which is a high-quality power coal. The relatively low volatile matter and hydrogen content in the same coal rank make it not conducive to be used as coal for direct liquefaction. The low ash, low sulfur, low cohesiveness, strong reactivity with carbon dioxide are conducive to being used as coal for gasification, which is suitable for a variety of gasification processes. In addition, part of the low rank inertinite-rich coals represented by the northern part of Shaanxi Province are of high tar yield, which is suitable for low temperature retorting. **[Conclusions]** The low rank inertinite-rich coals in Northwest China are suitable for power coal and gasification coal, and the tar-rich coal should be given priority to low temperature retorting.

Key words: inertinite-rich coal; coal properties; Jurassic coal; clean utilization; high-quality power coal; gasification coal; mineral exploration engineering

Highlights: (1)The temporal and spatial distribution of inertinite-rich coal in China is systematically summarized; (2)We summarized the properties of major low rank coals in Northwest China from the viewpoint of coal macerals, and the clean utilization way of the low rank inertinite-rich coal in Northwest China is proposed.

About the first author: Du Fangpeng, male, born in 1990, doctor, lecturer, engaged in research on sedimentary energy minerals; E-mail: mrdo@163.com.

Fund support: Supported by Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No.2020JQ-743, No.2020JQ-746, No.2021JLM-12), the project of China Geological Survey (No.DD20160187), and National Natural Science Foundation of China (No.41702144), Science and Technology Research Plan of Shaanxi Coal and Chemical Industry Group co.Ltd (No.CKH/ZXKJ-2022-003).

1 引言

煤岩组成是决定煤质的最重要因素之一,对煤

类、煤的利用方式和工艺的选择均产生显著影响;同时,煤岩组分特征对煤炭的生烃能力产生重大影响,是煤系烃源岩、“煤成油”、煤炭直接液化等相关

研究的基础(陈家良, 1985; 史仲武, 1991; 姚素平, 1996; 罗霞等, 2003; 刘大永, 2004; 刘全有等, 2008; 钟宁宁和陈恭洋, 2009; 杨楚鹏等, 2010; Feng et al., 2013; Jin et al., 2014)。富惰质组煤以煤岩显微组分惰质组含量高为特征,也有“高惰质组煤”、“丝炭型煤(Fusic coal)”等称谓,这是一个定性的概念,尚未有统一的定量判定(Harvey and Dillon, 2013; 李小彦, 2005),其中,李小彦(2005)在研究神东矿区煤岩组分时,将惰质组含量大于30%,镜惰比小于2的煤称为富惰质组煤。

全球范围内最典型的富惰质组煤为“冈瓦纳煤”,分布在澳大利亚、印度、南非等地,惰质组含量最高可达有机组分的100%(Hunt and Smyth, 1989; Crosdale et al., 2002; Fabiańska and Kruszewska, 2003; Farhaduzzaman et al., 2012; Hower et al., 2012),此外,北美、俄罗斯远东等地区也分布有典型富惰质组煤(Peter et al., 2002; Richardson et al., 2012)。中国西北地区中生代含煤盆地中也广泛分布富惰质组煤,如准噶尔盆地东部的准东煤田、吐哈盆地、三塘湖盆地、伊犁盆地、鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田、青海木里煤田(张井等, 1999; 黄文辉等, 2010; 李晶等, 2012; 张冀等, 2015; Dai et al., 2015)。这些区域蕴含的煤炭资源量巨大,是中国现今和未来煤炭资源开发利用的主体,新型大型能源化工基地多基于这些煤炭资源建立。因此,富惰质组煤,尤其是中国西北地区广泛发育的低阶富惰质组煤分布特征、煤质特征及其清洁利用方式的研究具有重要现实意义。

2 中国富惰质组煤时空分布

2.1 时代分布

中国高等植物聚煤作用始于中晚泥盆世,在西南地区聚集了以角质体为主的残植煤(韩德馨, 1964; 王延斌等, 1997; 权彪和韩德馨, 1998; 刘文斌等, 2008);此外,中国南方早石炭世、晚二叠世亦有部分地区聚集了以壳质组为主的残植煤或“树皮煤”(张井等, 1998; 唐跃刚等, 2011; 焦堃等, 2012),此类型煤中惰质组含量普遍较低。

中国具有工业价值的煤层绝大部分为腐殖煤,显微煤岩组分中壳质组含量很少,以镜质组(腐殖组)和惰质组为主,不同时代煤中二者所占比例不

同。早石炭世的煤以镜质组含量高为特点,惰质组含量一般小于10%,这与全球石炭纪煤岩的特点相一致(封远汉, 1992)。大华北盆地上石炭统一二叠统太原组和山西组煤岩显微组分以镜质组为主,但在盆地北部煤中惰质组含量多分布在30%~40%,高者可达60%(去矿物基,下同),为富惰质组煤(中国煤田地质总局, 1998; 杜芳鹏等, 2018)。华南中二叠统童子岩组煤岩显微组分以镜质组为主,惰质组含量一般低于20%;主要分布于华南、西南地区的上二叠统煤也以镜质组为主,惰质组含量多集中在10%~20%,最高可达50%,但所占比例很少(中国煤炭地质总局, 2013)。晚三叠世规模较大的煤炭聚集主要分布在四川盆地和鄂尔多斯盆地,惰质组含量主要分布在10%~30%^①(王双明, 1996; 王红霞等, 2022)。侏罗纪是中国最重要的聚煤期之一,含煤地层在北方广泛分布,以西北地区最广;鄂尔多斯盆地延安组煤,准噶尔盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地、伊犁盆地西山窑组煤,柴北缘大煤沟组煤,木里煤田木里组煤,靖远煤田龙凤山组煤等惰质组富集。然而,并不是西北地区侏罗纪煤均为富惰质组煤,新疆地区下侏统八道湾组煤以镜质组(腐殖组)为主^②(黄文辉等, 2010)。白垩纪和新生代煤的煤岩显微组分以镜质组(腐殖组)占绝大部分,惰质组含量很少,一般低于10%,但也有如海拉尔盆地伊敏煤田、宝日希勒矿区等,煤中惰质组含量超过35%(中国煤炭地质总局, 2013),部分为富惰质组煤(图1,图2)。

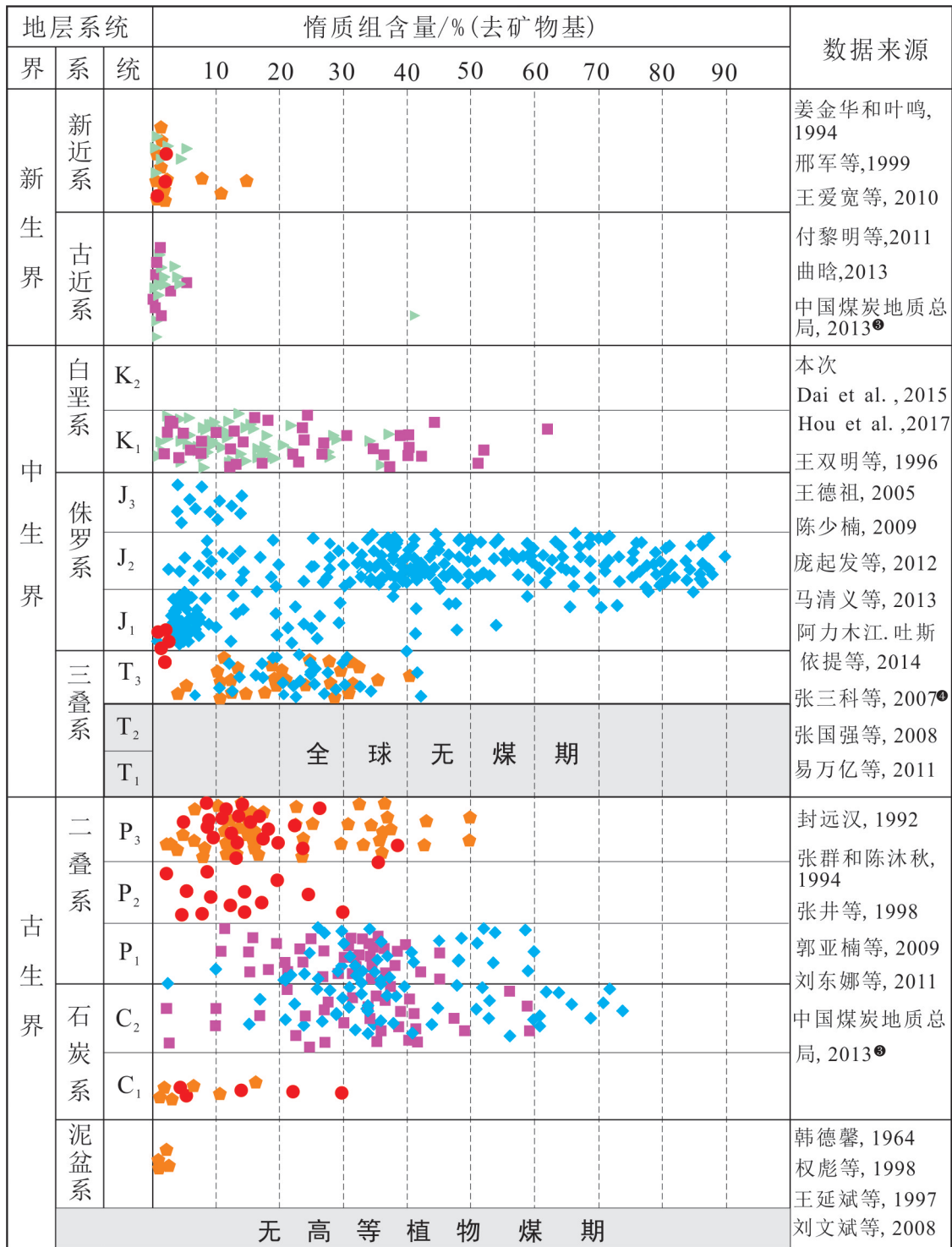
由上可知,中国富惰质组煤以西北地区侏罗纪煤最为典型,分布范围最广,资源量最大,是本次研究的主要对象。此外,华北板块北部石炭一二叠系煤、海拉尔盆地白垩纪煤部分为富惰质组煤。

2.2 空间分布

如前文所述,中国富惰质组煤的典型代表为西北地区侏罗系煤,但具体到含煤盆地、矿区、煤组,其显微煤岩特征亦有较大变化。为更加精确地厘清西北地区富惰质组煤的分布,系统梳理了西北地区各主要侏罗纪聚煤盆地内显微煤岩组分特征。

2.2.1 鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地残存的侏罗系含煤地层延安组(J_2y)在空间上分布广泛,在盆地北部、西缘和南部形成了跨内蒙古、陕西、宁夏、甘肃的赋煤区域,发育了东胜、陕北侏罗纪、黄陇侏罗纪、宁东、宁南、陇



◆ 西南地区 ● 华南地区 ◆ 西北地区 ■ 华北地区 ▲ 东北地区

图1 中国各聚煤时代煤岩惰质组含量分布图

Fig.1 Distribution of the inertinite contents in coal of different coal accumulating ages in China

东等多个煤田,分布有东胜矿区、神府矿区、鸳鸯湖矿区等国家规划矿区超过20个。全盆地延安组煤岩组分总体上呈富惰质组的特征,各大矿区惰质组含量平均值为33.4%~71.2%,镜惰比平均值介于0.37~1.99;其中仅宁南煤田王洼矿区和陕北侏罗纪煤田榆横矿区惰质组含量相对较低,镜惰比高于1.5(表1)。因此,按照李小彦(2005)富惰质组煤的划分方案,鄂尔多斯盆地延安组煤整体上均为富惰质组煤。

2.2.2 新疆中生代盆地群

新疆北部地区侏罗纪发育了多个含煤盆地,包括准噶尔盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地、伊犁盆地等,形成了托里一和什托洛盖、克拉玛依、卡姆斯特、准东、淮南、后峡、达坂城、吐鲁番、哈密、鄯善、托克逊、艾维尔沟、三塘湖—淖毛湖、伊宁、尼勒克、新源—巩留等煤田,分布有五彩湾矿区、大南湖矿区、淖毛湖矿区等国家规划矿区20多个。区内含煤地层主要为下侏罗统八道湾组(J_1b)和中侏罗统西山窑组(J_2x),八道湾组煤层多为局部发育,厚度变化大,为淮南煤田四棵树矿区、阜康矿区、哈密煤田三道岭矿区、三塘湖盆地淖毛湖矿区、伊宁煤田北部诸矿区主采煤层;西山窑组煤层层数多、分布广、厚度大且较稳定,为各盆地主要的开采煤层组。八道湾组显微煤岩组分镜质组(腐质组)含量普遍较高,一般超过有机组分的80%。西山窑组显微煤岩组分总体上以富惰质组为特征,惰质组含量一般占有有机组分50%以上,高者可达90%以上,镜惰比普遍小于1.0(表1)。尽管也存在部分煤田、矿区与之相左,如吐鲁番煤田艾丁湖矿区惰质组含量占有有机组分的11.9%^⑥,但总体上北疆诸盆地西山窑组煤为典型富惰质组煤。

南疆及中天山地区同样分布有侏罗纪含煤地层,形成了中天山、塔北、塔西南、罗布泊等赋煤带,煤炭地质及煤岩学工作程度较低。现有资料显示,中天山富煤带焉耆煤田中侏罗统塔什店组煤层惰质组平均含量为11.1%,塔西南乌恰煤田康苏组煤中惰质组含量很低,塔北温宿煤田下侏罗统塔里奇克组煤中几乎不含惰质组,库拜煤田该组煤中惰质组含量为33.9%。南疆地区可能的富惰质组煤为塔北赋煤带中侏罗统阳霞组,温宿煤田该组地层煤岩显微组分以惰质组为主,含量为20.3%~77.4%,然而,库拜煤田阳霞组显微煤岩惰质组含量平均值则为12%^⑥。

2.2.3 河西走廊地区

河西走廊地区零星分布了诸多侏罗纪煤田、矿区、煤产地,主要有柴达木盆地北缘鱼卡煤田、全吉煤田、中祁连南缘木里煤田、西宁煤田、窑天煤田,潮水盆地潮水煤田、靖远煤田等。潮水盆地中侏罗统龙凤山组显微煤岩组分以镜质组为主,惰质组含量为16.9%~42.4%,镜惰比平均值为2.5(庞起发等,2012),窑天煤田窑街组惰质组含量非常低,0.5%~7.6%,不属于富惰质组煤。柴北缘鱼卡煤田主要煤层中侏罗统大煤组F煤层煤岩显微组分惰质组含量为5.0%~93.7%,平均54.8%(姜金华和叶鸣,1994),木里煤田中侏罗统木里组显微煤岩组分惰质组含量为41.4%~89.8%,平均59.3%,镜惰比平均为0.76(Dai et al., 2015),靖远煤田龙凤山组煤中惰质组含量13.3%~70.7%,平均40.8%,由此判断其主要为富惰质煤。

3 煤质特征

“冈瓦纳煤”除惰质组含量高外,另一个显著特点是其高灰分产率(Hower et al., 2012)。然而中国富惰质组煤的煤质特征因成煤时代而异。华北克拉通北部山西组富惰质组煤的煤质特征主要表现为中—高灰、低硫的特征(杜芳鹏等,2018);海拉尔盆地白垩纪部分富惰质组煤主要煤质特征则为低灰、特低硫。西北地区侏罗纪富惰质组煤普遍以“优质煤”著称,即其煤质特征普遍低灰、低硫、低有害元素。统计数据也表明,西北地区富惰质组煤为主的矿区,原煤灰分产率平均值介于8.32%~17.23%,多小于10%,为特低灰或低灰煤(图3a);全硫平均值介于0.21%~1.88%,多小于0.5%,以特低硫、低硫为主(图3c),局部地区,如鄂尔多斯盆地榆横矿区和旬耀矿区超过1.5%,达到高中硫煤,中硫煤主要是由硫铁矿含量高所引起。

西北地区侏罗系富惰质组煤低灰、低硫,这些煤质特征被关注较多;除此之外,相同煤化作用程度下,西北地区富惰质组煤氢含量、挥发分较低,这在其作为化工原料煤时是重要的考虑因素。各重点矿区原煤挥发分产率平均值介于32.58%~38.74%,普遍为中高挥发分煤(图3b),仅榆横矿区达到高挥发分。相较于所处的低煤化作用阶段,这样的挥发分产率显然是偏低的,明显受到高惰质组

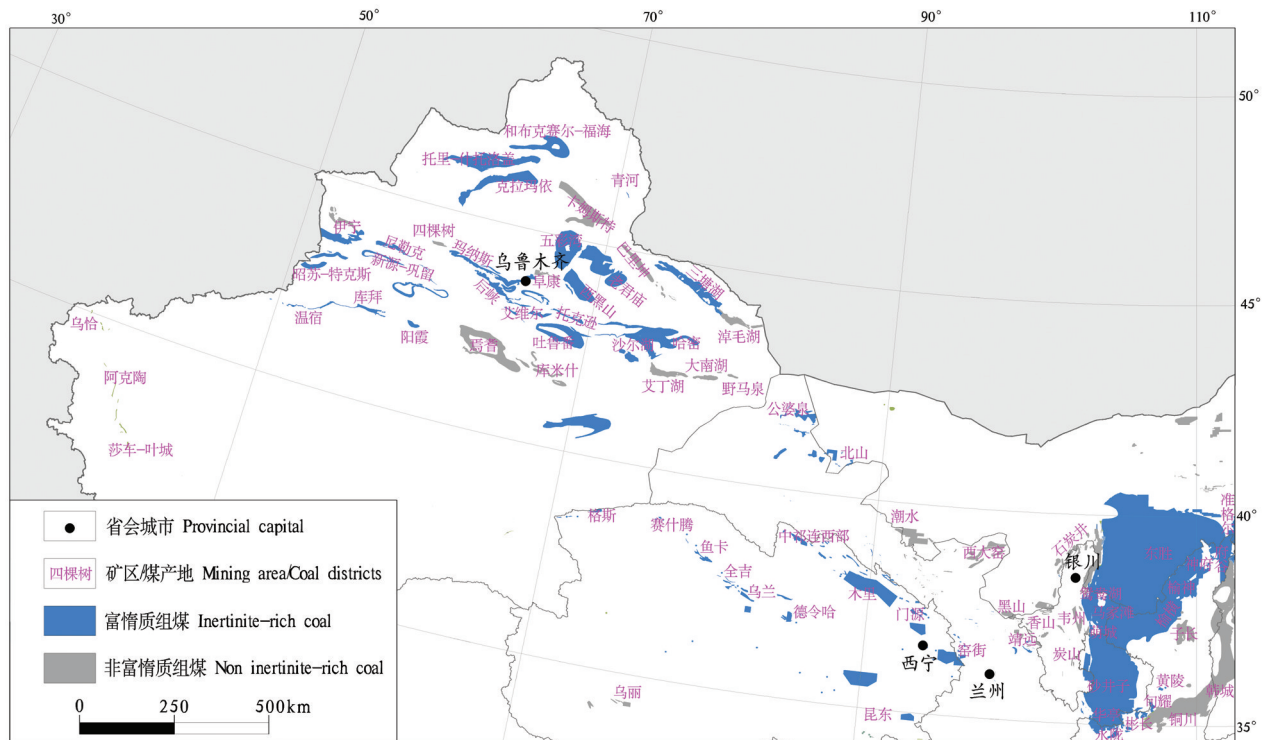


图2 中国主要富惰质组煤平面分布图

Fig.2 Horizontal distribution map of the inertinite-rich coal in China

含量的影响。与之类似,氢含量也在很大程度上受到煤岩组分的控制,各矿区H/C平均值介于0.56~0.73,大部分低于0.70,五彩湾矿区、彬长矿区惰质组含量更高的这些矿区H/C平均值低于0.6(图4d)。氢碳原子比随着镜质比的增大而增大,二者呈明显的正相关关系。镜质组(腐殖组)富含更多氢元素及脂肪烃,热解可产生更多的气体;元素组成与分子结构差异性导致了富惰质组煤具有相对较低的氢含量与挥发分产率。此外值得一提的是,通常认为镜质比和硫含量尤其是黄铁矿硫均可反映成煤环境的氧化-还原性,据此分析二者应具有一定的正相关性;这一推断与中国富惰质组煤整体低硫、特低硫的特征相符合,但西北地区富惰质组煤中并未明显显示出该特征。

4 工艺性能

工艺指标在很大程度上影响着煤炭资源的利用方式及工艺的选择。西北侏罗系富惰质组煤最突出的特点是黏结指数超低,绝大部分矿区黏结指数为0,无黏结性,仅榆横矿区黏结指数稍高,呈微黏结性(图4a)。各矿区煤的热稳定性差别较大,TS+6平均

值介于43.1%~84.8%,绝大部分介于60.0%~80.0%(图4b);即以中高热稳定性为主,也有低热稳定性矿区如西黑山、老君庙、三塘湖等矿区,高热稳定性矿区如榆神矿区和五彩湾矿区。与二氧化碳反应性是指煤与CO₂在高温条件下起反应生成CO的能力,是煤炭气化性能的重要参考指标。西北地区侏罗系富惰质组煤在950℃时,与CO₂反应性存在明显差异,鄂尔多斯盆地各矿区煤与CO₂反应性平均约在50%左右,而准噶尔盆地东部各矿区煤与CO₂反应性可达90%以上,显示出非常强的反应活性(图4d)。煤灰软化温度(ST)差别不大,各矿区平均值介于1179℃~1291℃,大部分小于1250℃(图4c),主要为较低软化温度,位于鄂尔多斯盆地南缘的黄陇侏罗系煤田各矿区相对较高,为中等软化温度。

秦志宏等(1998)研究华北地区石炭—二叠纪煤发现,同一矿区煤随着宏观煤岩组分从以镜质组为主的镜煤和亮煤变化为以惰质组为主的暗煤、丝炭时,其黏结指数从最高的85急剧降低至0。可见相同变质程度下,黏结指数与惰质组含量高度负相关。煤的黏结性是指烟煤在干馏时产生的胶质体黏结自身和惰性物料的能力,富惰质组煤黏结性差,源

表1 西北地区主要侏罗系矿区显微煤岩组分统计

Table 1 Statistical of macerals in the main Jurassic coal mining areas in Northwest China

盆地	矿区	含煤地层	去矿物质/%			镜惰比	R _{0max} /%	数据点
			镜质组(腐质组)	惰质组	壳质组			
鄂尔多斯盆地	东胜	J _{2y}	49.1	49.3	1.6	1.00	0.54	49
	万利	J _{2y}	57.2	38.4	4.4	1.49	0.35	15
	神府	J _{2y}	43.2	55.7	1.1	0.78	0.58	23
	榆神	J _{2y}	52.2	45.8	2.0	1.14	0.59	64
	榆横	J _{2y}	62.9	35.6	1.5	1.77	0.62	107
	黄陵	J _{2y}	46.0	52.2	1.8	0.88	0.73	32
	旬耀	J _{2y}	35.5	63.1	1.4	0.56	0.59	18
	彬长	J _{2y}	26.2	71.2	2.6	0.37	0.68	65
	永陇	J _{2y}	33.8	63.2	3.0	0.53	0.58	43
	鸳鸯湖	J _{2y}	36.8	60.7	2.5	0.61	0.56	59
	马家滩	J _{2y}	56.7	42.5	0.8	1.33	0.66	36
	积家井	J _{2y}	49.2	49.4	1.4	1.00	0.7	22
	王洼	J _{2y}	66.4	33.4	0.2	1.99	0.67	15
准噶尔盆地	五彩湾	J _{2x}	32.4	64.1	3.5	0.51	0.35	70
	西黑山	J _{2x}	28.1	66.4	5.5	0.42	0.44	59
	老君庙	J _{2x}	29.1	69.0	1.9	0.42	0.59	23
	将军庙	J _{2x}	28.5	69.3	2.2	0.41	0.52	17
	大井	J _{2x}	44.6	52.5	2.9	0.85	0.42	34
	托洛盖	J _{2x}	62.2	37.7	0.1	1.65	0.58	21
	卡姆斯特	J _{2x}	40.9	58.4	0.7	0.70	0.6	26
	沙湾	J _{2x}	74.8	24.4	0.8	3.07	0.59	24
	白杨河	J _{2x}	62.8	35.9	1.3	1.75	0.73	47
	硫磺沟	J _{2x}	44.4	55.1	0.5	0.81	0.62	67
	玛纳斯	J _{2x}	63.6	36.3	0.1	1.75	0.64	17
四棵树	J _{1b}	73.5	24.8	1.7	2.96	0.36	22	
吐哈盆地	沙尔湖	J _{2x}	28.4	67.8	3.8	0.42	0.3	107
	大南湖	J _{2x}	33.9	59.5	6.6	0.57	0.35	80
	三道岭	J _{1b}	26.4	73.3	0.3	0.36	0.69	28
	艾丁湖	J _{2x}	84.9	11.9	3.2	7.13	0.41	129
	库木塔格	J _{2x}	67.1	32.5	0.4	2.06	0.48	66
三塘湖盆地	三塘湖	J _{2x}	33.6	59	7.4	0.57	0.48	17
	淖毛湖	J _{1b}	90.3	8.5	1.2	10.62	0.34	43
伊犁盆地	伊宁	J _{1b}	30.3	69.2	0.5	0.44	0.64	7
木里煤田		J _{2m}	39.6	59.3	1.1	0.67	0.98	17
潮水盆地		J _{2l}	71.5	28.4	0.1	2.52	\	10
柴北缘	鱼卡	J _{2d}	43.5	54.8	1.7	0.79	0.48	29

于其产生胶质体的物质含量低。目前煤不同显微组分与CO₂反应性之间的关系尚不清楚(翟光华等, 2012),但赵奇(2012)研究发现,在煤岩组分活惰比低于1.9时,煤与CO₂的反应性随着活惰比增大减小,这可能因为相对较高的温度时,惰质组富集物焦的反应性大于镜质组富集物焦(忻仕河,2005)。

5 清洁潜势及利用方式

5.1 清洁潜势

煤中有害物质及元素是空气污染和土壤污染的重要污染源,然而,煤炭依旧在中国能源消费结构中占据主体地位。在此背景下,煤炭的清洁利用是保证国家能源安全,降低污染环境污染的必然选

择之一。西北地区侏罗纪低阶富惰质组煤资源量巨大,其清洁度将影响深远。

选取中国最典型富惰质组煤分布的鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田及准噶尔盆地准东煤田,梳理其中主要矿区的煤炭勘查资料的煤质数据,统计了原煤的灰分、全硫、氟、氯、砷、磷等煤中常见的有害物质及元素的平均含量,以此为主要依据来分析中国低阶富惰质组煤的清洁潜势。将统计与国家标准、行业标准的含量等级划分做比较,结果显示统计的17个矿区的6项指标,绝大部分为“特低”或者“低”这两级,仅个别矿区、个别指标为“中等”这一级(表2),足可见西北地区低阶富惰质组煤整体清洁度非常高。根据唐书恒等(2006)评价的煤炭资源五级洁

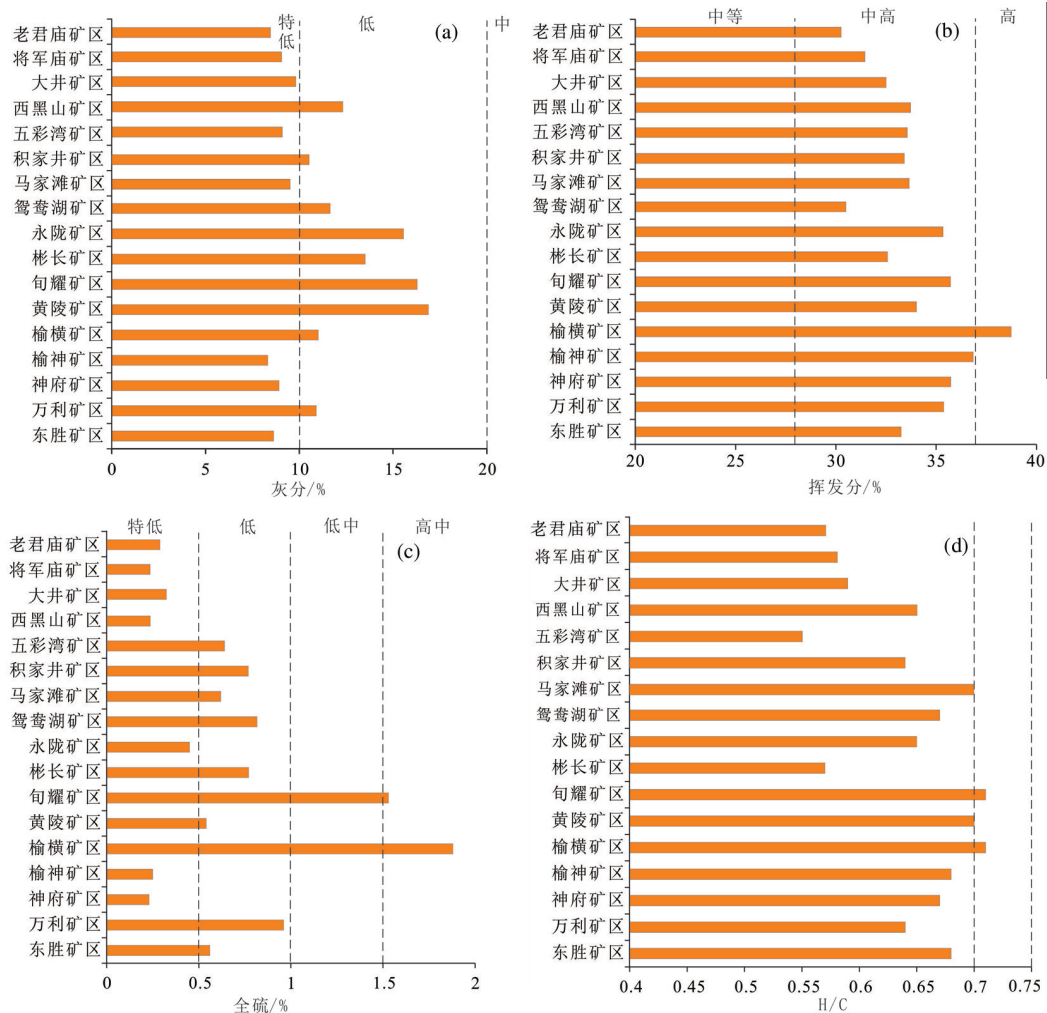


图3 西北地区侏罗纪富惰质组煤煤质直方图

Fig.3 Coal property charts of the Jurassic inertinite-rich coals in Northwest China

净等级,绝大部分侏罗纪富惰质组煤均为 I 级,是中国洁净潜势最高的煤炭资源。

5.2 优质动力用煤

西北地区侏罗纪低阶富惰质组煤的煤类普遍为不黏煤,如前文所述,是中国清洁度最高的煤炭资源。同时,这些煤普遍具有较高的发热量,统计数据表明,以鄂尔多斯盆地和准东煤田代表,统计的 17 个富惰质组煤矿区中,仅旬耀矿区和老君庙矿区高位发热量 ($Q_{gr,d}$) 略低于 25.51 MJ/kg,为中等发热量煤,其余 15 个矿区平均值高于 25.51 MJ/kg,为高热值煤。加之所具有的低灰、低硫、低有害元素的高清洁度特质,这些富惰质组煤绝大部分都是优质动力用煤(秦云虎等,2006)。事实上,相关地区已开采的煤炭资源,目前也主要作为动力用煤来利

用。因此,西北地区低阶富惰质组煤是优质的动力用煤;当然,局部区域所具有的较高硫含量仍需引起注意(杜芳鹏等,2020),脱硫处理是必要的清洁利用保障。

作为动力用煤,不断减少其有害成分的排放,是煤炭资源清洁利用的重要思路,而以转化产品来替代其作为动力用煤直接燃烧,是煤炭清洁利用的另一个重要发展方向。尤其是在全球气候变暖,碳排放量受到严格限制,以及中国的石油对外依存度过高,石油战略安全难以保障的情况下,煤炭转化为液态、气态燃料显得更加迫切。实际上,中国已经正在形成大型煤炭基地就地转化的开发利用模式,将煤炭资源在生产地即转化为电力、油品、燃气、化工产品等(陈贵锋和罗腾,2014),可替代石油

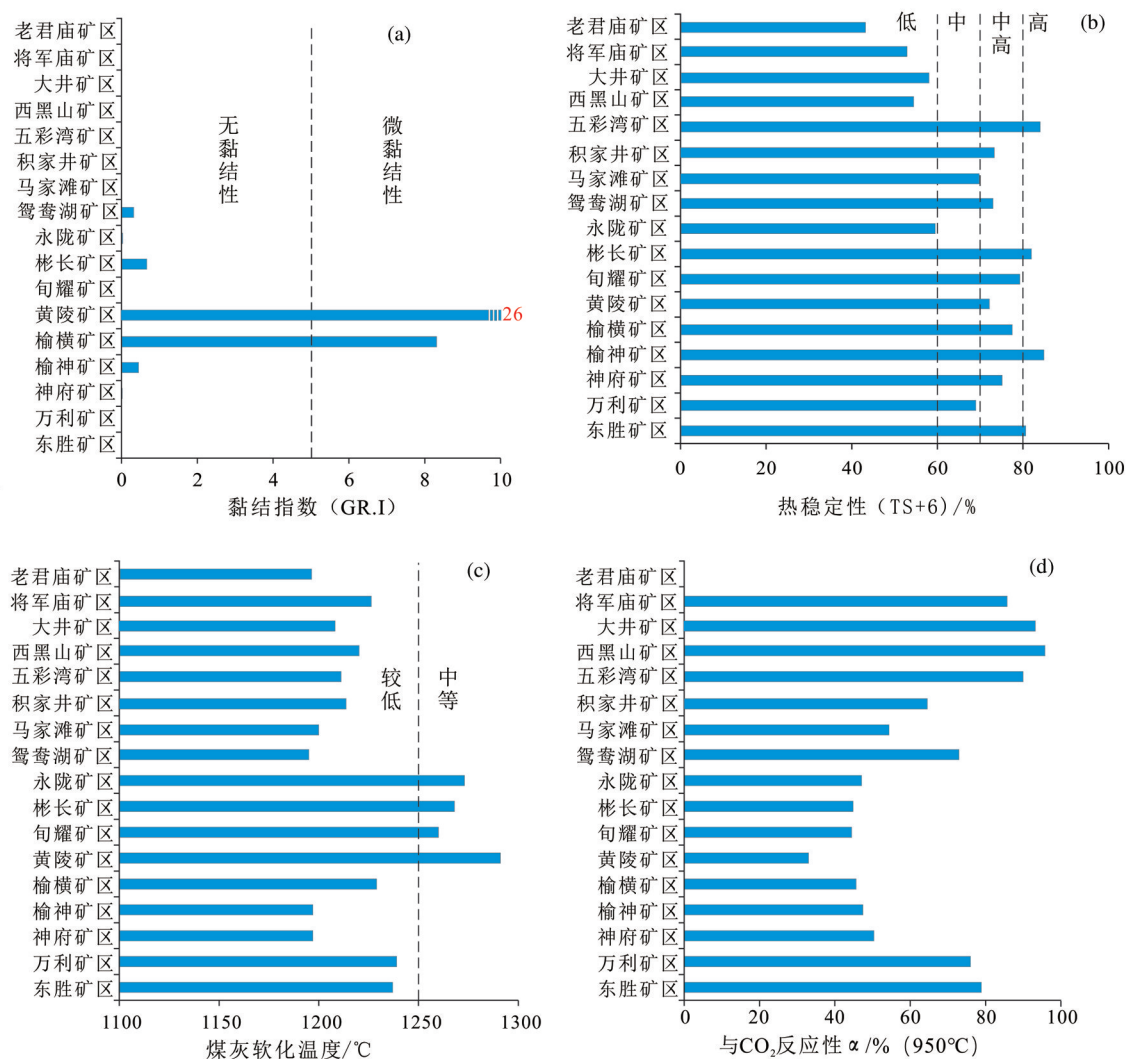


图4 西北地区侏罗系富惰质组煤工艺性能指标分布图

Fig.4 Technological function property charts of the Jurassic inertinite-rich coal in Northwest China

的液化产品和燃气是煤炭转化的主导产品。近年来煤制气产量迅速回暖、煤制油生产量也不断上升,并带动了煤化工的迅猛发展。根据“十三五”能源发展规划,依托大型煤炭生产基地,中国建成和规划建设的煤化工项目遍布新疆准东、新疆伊犁、内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、宁夏宁东、山西大同、贵州毕节等城镇,煤制气、煤制油以及相应的醇、烯等下游产品是其主要的化工产品。

5.3 富油煤低温干馏热解

将低阶煤在隔绝空气的低温(500~700°C)条件下进行干馏,生产出半焦、焦油、煤气等固态、液态、气态产品,其中焦油可进一步深加工为汽油、柴油等产品,增加煤炭附加值的同时,也增加了其利用

的清洁度(曾凡虎等, 2013; 罗腾, 2017)。然而,不同的煤质,焦油产率差异显著;根据《矿产资源工业要求手册(2014修订版)》,依据低温干馏焦油产率($T_{ar,d}$)将煤炭划分为含油煤($T_{ar,d} \leq 7\%$)、富油煤($7\% < T_{ar,d} \leq 12\%$)和高油煤($T_{ar,d} > 12\%$),实际工作中常将“富油煤”和“高油煤”统称富油煤。

统计数据显示,新疆准东煤田各矿区富惰质组煤的焦油产率普遍较低,平均值均低于5%(表3),为含油煤;鄂尔多斯盆地西部的马家滩矿区、鸳鸯湖矿区、积家井矿区以及盆地北部的东胜矿区、万利矿区等富惰质组煤平均焦油产率均低于7%,为含油煤;而神府、榆神、榆横、旬耀、彬长、永陇等矿区富惰质组煤的焦油产率平均值高于7%,为富油

表2 污染物及有害元素分级标准及西北地区部分侏罗系矿区煤对照统计

Table 2 Classification standard of pollutants and harmful elements and comparison statistics of coal in some Jurassic mining areas in Northwest China

来源	GB/T 15224-2018		MT/T 966-2005	GB/T 20475.1-2006		
污染物	Ad/%	S/%	F/10 ⁻⁶	As/10 ⁻⁶	Cl/%	P/%
特低	≤10	≤0.5	≤80	≤4	≤0.050	≤0.01
低	10~20	0.5~1	80~130	4~25	0.05~0.15	0.01~0.05
中	20~30	1.0~2.0	130~200	25~80	0.15~0.30	0.05~0.10
中高	\	2.0~3.0	\	\	\	\
高	30~40	>3.0	>200	>80	>0.30	>0.10
万利矿区	10.91	0.96	106	2.2	0.019	0.0355
东胜矿区	8.64	0.56	193	1.5	0.0199	0.0061
神府矿区	8.92	0.23	77	4.5	0.0301	0.0405
榆神矿区	8.32	0.25	85	1.3	0.0358	0.0382
榆横矿区	11.01	1.88	123	4.7	0.0494	0.0211
黄陵矿区	16.89	0.54	179	3.9	0.0923	0.0695
旬耀矿区	16.29	1.53	112	10.1	0.0508	0.0326
彬长矿区	13.52	0.77	78	3.1	0.0402	0.0185
永陇矿区	15.56	0.45	84	3.2	0.0449	0.0261
鸳鸯湖矿区	11.68	0.82	\	1.3	0.0256	0.0138
马家滩矿区	9.5	0.62	110	1.9	0.0319	0.0276
积家井矿区	10.57	0.77	126	2.0	0.0415	0.0319
五彩湾矿区	9.09	0.64	31	1.4	0.0696	0.0079
西黑山矿区	12.34	0.24	59	1.7	0.0912	0.0221
将军庙矿区	9.09	0.24	57	1.4	0.0741	0.0161
大井矿区	9.84	0.33	25	1.8	0.0810	0.0035
老君庙矿区	8.46	0.29	49	0.89	0.0713	0.0498

煤。根据以上含油煤和富油煤的划分,判断神府、榆神、榆横、旬耀、彬长、永陇等矿区富油煤具有较高的低温干馏制油潜力,而其他矿区暂不推荐该利用方式。

5.4 直接液化

煤的直接液化是指将煤研磨后混合于溶剂中,在加温、加压、加氢(或不加)、加催化剂的情况下,使部分煤的大分子发生裂解,形成溶于溶剂的液态产品;自1911年首次将煤液化为重质油以来,多国曾先后进行了大规模煤直接液化开发研究,工艺流程不断更新(吴春来,2005;陈鹏,2007)。中国于20世纪70年代开始进行煤炭直接液化制油的相关研究,神华直接液化工艺已有多年的发展,技术工艺国际领先(周俊虎等,2005;赵仕华等,2009;韩克明,2014)。

煤炭直接液化的油产率与煤岩显微组分关系密切,已有多项实验和研究表明煤岩有机显微组分中壳质组液化生油能力最强,其次为镜质组,惰质组液化能力差(姚素平,1996;刘大永,2004;钟宁宁和陈恭洋,2009;Jin et al.,2014),相同变质程度下,煤炭液化产率与煤岩中活性组分含量高度正相

关。镜质组中,以基质镜质体液化生烃能力最强,其次为均值镜质体;惰质组中,半丝质体具有一定生烃能力,而氧化丝质体、火焚丝质体等基本不具有液化生烃能力。

生烃能力的差异主要缘于各煤岩显微组分间结构的差异以及氢元素含量的差别(舒新前等,1996;Feng et al.,2013)。壳质组中含有较多脂肪结构,具荧光性、相当于烃源岩有机质类型中的II型干酪根;镜质组以芳香结构为主,脂肪结构很少,惰质组几乎不含脂肪结构。对应地,相同变质程度下,壳质组中氢元素含量最高而惰质组氢元素含量最低。富碳、贫氢是煤炭相对于原油最突出的元素特征,对于“加氢”煤炭直接液化的关键工艺,表征氢元素富集程度的氢碳原子比这一指标是判断煤炭直接液化能力的重要指标。不同学者关于这一指标下限的划分方案不同(王生维,1986;戴和武和马治邦,1988;秦云虎等,2009,2017),主要有0.7、0.75、0.8三种划分方案,可以确定的是,随着工艺的进步,指标的限制将会变得宽松。直接液化用煤目前仍处于探索阶段,存在诸如投资成本高、耗水量大等弊端(相宏伟等,2014),在中国尚未推广。

表3 煤炭清洁利用指标要求与西北地区部分矿区低阶富惰质组煤质指标平均值及清洁利用方式
 Table 3 Index of coal clean utilization requirements and the average coal property values with clean utilization suggestions of low rank inertinite-rich coals in Northwest China

矿区/利用方式	Q_{grd}	$T_{\text{mad}}/\%$	水分/%	灰分/%	挥发分/%	全硫/%	H/C	GRI	ST/ $^{\circ}\text{C}$	FT/ $^{\circ}\text{C}$	(TS+6)/%	CO_2 反应性	清洁利用方式
优质动力用煤	≥ 25.51	≥ 7	≤ 30	≤ 25	> 35	≤ 2	> 0.7	< 50	< 1250	< 1450	> 60	> 60	直接液化
富油煤				< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1350			低温干馏
直接液化				< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1450			直接液化
固定床				< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1450			低温干馏
流化床				< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1450			直接液化
水煤浆气流床			< 10	< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1450			直接液化
干粉气流床			< 10	< 25	> 35			< 35	> 1050	< 1450			直接液化
万利矿区	26.6	3.52	10.28	10.91	35.37	0.96	0.64	0	1239	1263	69	76.2	含油
东胜矿区	27.1	5.49	6.34	8.64	33.26	0.56	0.68	0	1237	1258	80.7	78.8	含油
神府矿区	29.29	9.1	8.21	8.92	35.73	0.23	0.67	0	1197	1273	75.17	50.5	富油
榆神矿区	29.79	11	6.66	8.32	36.84	0.25	0.68	0.4	1197	1235	84.9	47.5	富油
榆横矿区	29.64	10.13	5.93	11.01	38.74	1.88	0.71	8.4	1229	1262	77.5	45.8	富油
黄陵矿区	29.36	\	2.74	16.89	34.02	0.54	0.7	26	1291	1296	91.3	33	\
旬耀矿区	24.98	8.62	7.1	16.29	35.72	1.53	0.71	0	1260	1289	79.3	44.5	富油
彬长矿区	29.52	7.76	4.53	13.52	32.58	0.77	0.57	0.7	1268	1312	82	44.8	富油
永陇矿区	26.48	7.7	8.31	15.56	35.34	0.45	0.65	0	1273	1306	59.5	47.2	富油
鸳鸯湖矿区	27.45	4.09	6.12	11.68	30.44	0.82	0.67	0	1193	1218	61.4	73.1	含油
马家滩矿区	28.4	5.34	5.55	9.5	33.67	0.62	0.7	0	1200	1221	69.6	54.5	含油
积家井矿区	27.7	4.62	6.94	10.57	33.44	0.77	0.64	0	1215	1244	73.8	64.7	含油
五彩湾矿区	27.29	2.4	11.61	9.09	33.51	0.64	0.55	0	1192	1241	42.8	90.2	含油
西黑山矿区	27.33	3.76	8.96	12.34	33.72	0.24	0.65	0	1193	1231	55.9	95.9	含油
将军庙矿区	27.38	4.18	10.68	9.09	31.49	0.24	0.58	0	1165	1227	54	93.33	含油
大井矿区	29.11	4.28	9.1	9.84	32.63	0.33	0.59	0	1193	1209	58.2	85.91	含油
老君庙矿区	25.11	4.3	7.19	8.46	30.27	0.29	0.57	0	1193	1245	68.4	\	含油

注： Q_{grd} 单位为MJ/kg； CO_2 反应性温度为950 $^{\circ}\text{C}$ ；“\”代表未获得数据或无法判断。

西北地区各矿区富惰质组煤 H/C 平均值介于 0.56~0.73, 大部分矿区低于 0.70, 而挥发分产率平均值也大都低于 37%, 甚至 35%。相比于同一煤化程度的富镜质组煤, 这两项参数较低, 这使得西北地区低阶富惰质组煤在直接液化生烃能力相对较低, 不利于其作为直接液化用煤的原料煤(图 3b、d)。前文统计煤质数据的诸矿区, 仅榆横矿区镜质组含量相对较高、氢含量及挥发分产率相对较高, 矿区内部分区域达到液化用煤要求, 其余矿区仅零星区域可达到液化用煤要求。

5.5 气化/间接液化

与煤的直接液化相对应的是煤的间接液化, 是煤炭气化生成合成气的基础上, 再在催化剂作用下经费托合成反应生成液态烃、蜡、气态轻烃和部分有机含氧化合物(相宏伟等, 2014)。直、间接液化的先决条件是煤炭的气化, 煤炭气化则是在特定的设备内, 在一定温度和压力下使煤中有机质与气化剂(蒸汽、空气或氧气)发生一系列化学反应, 将固态煤转化为含有一氧化碳、氢气及甲烷等可燃气体和二氧化碳、氮气等非可燃气体的过程。煤炭气化有多种工艺, 主要包括固定床气化、流化床气化、水煤浆气流床气化、干粉气流床气化等(乔军伟等, 2019)。不同工艺技术对煤质要求有所不同, 一方面在于气产量要求, 另一方面在于设备的运行及保护要求。但总体而言, 低阶煤具有更高的反应生气能力, 理想的气化用煤应具有较低水分产率、较低灰分产率、低黏结指数、高热稳定性、高二氧化碳反应性等其中某几项指标。煤灰熔融性关乎排渣方式, 低熔融温度对固定床和流化床有利, 但对于水煤浆气流床不利。

西北地区低阶富惰质组煤变质程度低, $R_{o_{max}}$ 一般小于 0.65%, 反应生气能力强, 另外低灰、无(微)黏结性、中高热稳定性、较高 CO_2 反应性及较低煤灰熔融性等特点使其成为优质的气化原料用煤, 这也是中国新规划的大型煤炭气化、间接液化项目集中部署在鄂尔多斯盆地、北疆诸盆地富惰质组煤生产基地的重要原因。

综上所述, 煤岩煤质特征决定西北地区低阶富惰质组煤清洁利用选择主要为动力用煤及气化用煤或间接液化用煤, 而部分具有特殊煤质特征的煤田、矿区, 如陕北侏罗纪煤田的富油煤, 则推荐优先选择低

温干馏热解制油作为其利用方式。相对而言, 绝大部分低阶富惰质组煤, 不建议作为直接液化用煤。

6 结 论

(1) 中国富惰质组煤主要分布在西北地区鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、三塘湖盆地、伊犁盆地、柴达木盆地北缘、木里煤田、靖远煤田等侏罗系中, 在华北克拉通北部石炭—二叠系、东北地区下白垩统也有所分布, 但以西北地区侏罗系富惰质组煤最为典型, 分布最广, 资源量最大。

(2) 西北地区侏罗纪低阶富惰质组煤的煤质特点主要为低灰、低硫、低有害元素、低灰熔融性、高发热量, 且较同煤阶其他煤具有明显的低氢含量、较低挥发分、较低黏结性以及较强的与二氧化碳反应性, 其中氢含量、挥发分、黏结性、与二氧化碳反应性与富惰质组具有明显相关性, 是富惰质组煤的重要煤质特征。

(3) 西北地区低阶富惰质组煤的煤岩、煤质特征显示其清洁度极高, 同时具有高发热量, 是优质的动力用煤; 尽管变质程度适合, 但相对低挥发分和氢含量不利于其作为直接液化用煤; 而低灰、低硫、低黏结性、较强与二氧化碳反应性使其具有气化用煤的工艺特性。部分低阶富惰质组煤为较高焦油产率的富油煤, 适于低温干馏热解。综合建议低阶富惰质组煤以动力用煤和气化用煤为主要清洁利用方式, 陕北地区为代表的富油煤则优先推荐低温干馏热解。

注 释

① 易万亿, 陈波, 贾志刚. 2011. 陕西省陕北三叠纪煤田子长矿区蟠龙至高家屯勘查区煤炭详查报告[R]. 西安: 陕西鸿升实业发展有限公司, 1-189.

② 张国强, 闫连群, 李万军. 2008. 新疆伊吾县淖毛湖煤田广汇露天矿勘探报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆煤田地质局一六一煤田地质勘探队, 1-96.

③ 中国煤炭地质总局. 2013. 全国煤炭资源潜力评价[R]. 北京: 中国煤炭地质总局.

④ 张三科, 成永康, 吕光罗. 2007. 陕西省黄陵侏罗纪煤田彬长矿区文家坡勘探地质报告[R]. 西安: 陕西省煤田地质局一八六队, 1-204.

⑤ 王军礼, 李玺, 贾新民. 2015. 新疆吐哈煤田吐鲁番市艾丁湖三勘查区煤炭详查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆煤田地质局一五六煤田地质勘探队, 1-169.

⑥ 王俊民, 阿不里提甫·肉孜, 李瑞明. 2011. 新疆维吾尔自治区

区煤炭资源潜力评价[R]. 乌鲁木齐:新疆煤田地质局, 1-562.

References

- Alimujiang · Tusiyiti, Zhuang xinguo, Zhao Yawen, Aibibaier · Maimaiti, Pan Lichuan. 2014. Coal petrology and Coal facies analysis of Xiaoxigou Mine in southern Junggar Coalfield, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 34(4): 525-529(in Chinese with English abstract).
- Chen Guifeng, Luo Teng. 2014. Development patterns and technology requirements of clean coal utilization[J]. Clean Coal Technology, 20(2): 99-103(in Chinese with English abstract).
- Chen Jialiang. 1985. Effect of Songwe-Kiwira Coalfield's maceral composition on the chemico-technological property and industrial utilization of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 4: 89-101(in Chinese with English abstract).
- Chen Peng. 2007. Nature, Classification and Utilization of Coal in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1-679(in Chinese).
- Chen Shaonan. 2009. Analysis of sedimentary environment of Didao Group coal-bearing stratum in Jixi Basin[J]. Coal Technology, 6: 147-148(in Chinese with English abstract).
- China National Administration of Coal Geology. 1998. Evolution and Coal Accumulation Regularity of Coal Bearing Basins in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1-186 (in Chinese).
- Crosdale P J, Sorokin A P, Woolfe K J, Macdonald D I M. 2002. Inertinite-rich Tertiary coals from the Zeya-Bureya Basin, Far Eastern Russia[J]. International Journal of Coal Geology, 51: 215-235.
- Dai Hewu, Ma Zhibang. 1988. Study on characteristics of bituminous coal suitable for direct liquefaction[J]. Journal of China Coal Society, 13(2): 80-86(in Chinese with English abstract).
- Dai Shifeng, Hower James C, Ward Colin R, Guo Wenmu, Song Hongjian, O'Keefe Jennifer M K, Xie Panpan, Hood Madison M, Yan Xiaoyun. 2015. Element and phosphorus minerals in the middle Jurassic inertinite-rich coals of the Muli Coalfield on the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Coal Geology, 144-145: 23-47.
- Du Fangpeng, Li Congcong, Qiao Junwei, Wei Yunxun, Zhang Guangchao, Luo Zheng, Tan Furong. 2018. Discussion on the potential and way of clean utilization of coal resources in Fugu mining area, northern Shaanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 46(3): 11-14(in Chinese with English abstract).
- Du Fangpeng, Luo Zheng, Qiao Junwei, Zhao Xiaochen, Tan Furong, Li Congcong, Fan Qi. 2020. Petrographic, quality characteristics and clean & efficient use of Jurassic coal in Ningdong Coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 48(2): 71-77(in Chinese with English abstract).
- Fabińska M J, Kruszewska K K J. 2003. Relationship between petrographic and geochemical characterisation of selected South African coals[J]. International Journal of Coal Geology, 54(1/2): 95-114.
- Farhaduzzaman M, Abdullah W H, Islam M A. 2012. Depositional environment and hydrocarbon source potential of the Permian Gondwana coals from the Barapukuria Basin, Northwest Bangladesh[J]. International Journal of Coal Geology, 90-91: 162-179.
- Feng Jie, Li Jun, Li Wenying. 2013. Influences of chemical structure and physical properties of coal macerals on coal liquefaction by quantum chemistry calculation[J]. Fuel Processing Technology, 109: 19-26.
- Feng Yuanhan. 1992. The characteristics of the coal seams of Simen age of early Carboniferous in Guangxi[J]. Geology of Guangxi, 5(2): 57-66(in Chinese with English abstract).
- Fu Liming, Zhuang Xinguo, Li Jianfu, Pang Qifa. 2011. The analysis on coal facies of coal seams in early Cretaceous Wujianfang coal basin, Inner Mongolia[J]. Coal Geology & Exploration, 39(3): 1-6, 13(in Chinese with English abstract).
- Guo Yanan, Zhao Bo, Xie Xichao, Wang Fengjuan, Yang Shuopeng, Su Yufei, Tang Yuegang. 2009. Coal facies features and comparative study of southern China Late Permian bark coal[J]. Coal Geology of China, 21(12): 19-23(in Chinese with English abstract).
- Han Dexin. 1964. Preliminary study on the petrology of the Devonian Liptobioliths in Luquan, Yunnan[J]. Journal of China Coal Society, 1(1): 95-99(in Chinese with English abstract).
- Han Keming. 2014. Direct Liquefaction Behaviors of Shenhua Coal and its Macerals [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1-61(in Chinese with English abstract).
- Harvey R D, Dillon J W. 2013. Maceral distribution in Illinois coals and their paleoenvironmental implications[J]. International Journal of Coal Geology, 5(1/2): 141-165.
- Hou Haihai, Shao Longyi, Li Yonghong, Li Zhen, Wang Shuai, Zhang Wenlong, Wang Xuetian. 2017. Influence of coal petrology on methane adsorption capacity of the Middle Jurassic coal in the Yuqia Coalfield, northern Qaidam Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149: 218-227.
- Hower J C, Wagner N J, O'Keefe J M K, Drew J W, Stucker J D, Richardson A R. 2012. Maceral types in some Permian southern African coals [J]. International Journal of Coal Geology, 100: 93-107.
- Huang Wenhui, Tang Shuheng, Tang Xiuyi, Chen Ping, Zhao Zhigen, Wan Huan, Ao Weihua, Xiao Xiuling, Liu Jiaqi, B.Finkelman. 2010. The Jurassic coal petrology and the research significance of Northwest China[J]. Coal Geology & Exploration, 38(4): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Hunt J W, Smyth M. 1989. Origin of inertinite-rich coals of Australian cratonic basins[J]. International Journal of Coal Geology, 11(1): 23-46.
- Jiang Jinhua, Ye Ming. 1994. Coal and rock feature and correlation in Longfeng coal mine in Fushun[J]. Coal Technology of Northeast China, 2: 49-51(in Chinese with English abstract).
- Jiao Kun, Yao Suping, Zhang Ke, Hu Wenxuan. 2012. An atomic force

- microscopy study on "Barkinite" Liptobiolith[J]. *Geological Review*, 58(4): 775–782(in Chinese with English abstract).
- Jin Lijun, Han Keming, Wang Jianyou, Hu Haoquan. 2014. Direct liquefaction of Bulianta coal and its macerals[J]. *Fuel Processing Technology*, 128: 232–237.
- Li Xiaoyan. 2005. Conditions of inertinite-rich coal generation, Shendong mining area: Significance of fungal alternating origin of inerts[J]. *Coal Geology & Exploration*, 33(5): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Liu Dayong. 2004. Vitrinites in Typical Coal-bearing Basins of China: The Molecular Characterization and their Kinetic Studies on the Hydrocarbon Generation and Carbon Isotope Fractionation[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–99(in Chinese with English abstract).
- Liu Dongna, Zhou Anchao, Ma Meiling. 2011. Coal Facies Characteristics of No.5 Coal Seam in Baidong Mine Area, Datong Coalfield[J]. *Coal Geology of China*, 23(5): 1–4, 52(in Chinese with English abstract).
- Liu Quanyou, Krooss M Bernhard, Jin Zhijun, Wang Yi, Jan Hollenstein, Ralf Littke, Liu Wenhui. 2008. Comparison of the gas compound generation of Tarim coal and its macerals in open system non-isothermal pyrolysis with ultra-high temperature[J]. *Natural Gas Geoscience*, 19(6): 748–753(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenbin, Hu Kai, Qin Jianzhong, Lu Xiancai, Li Zhiming, Yao Suping. 2008. Organic geochemistry and hydrocarbon potential of liptobiolite in Luquan, Yunnan province[J]. *Geochimica*, 37(1): 68–76(in Chinese with English abstract).
- Luo Teng. 2017. Study on quality based utilization industrial chain and comprehensive evaluation of low rank coal[J]. *Coal Economic Research*, 8: 43–47(in Chinese with English abstract).
- Luo Xia, Li Jian, Hu Guoyi, Wu Damao, Li Zhisheng, Zhang Ying, Yao Jianjun. 2003. An experiment of generation and expulsion of oil from the Jurassic coals and its implication of coal generated oil in the Ordos basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 25(1): 76–80(in Chinese with English abstract).
- Ma Qingyi, Li Jiaolong, Chu Yingjun. 2013. Petrographic characteristics and peat environments of Gashun Mine[J]. *Coal and Chemical Industry*, 10: 22–25, 49(in Chinese with English abstract).
- Pang Qifa, Zhuang Xinguo, Li Jianfu, Fu Liming, Gangtemue, Xu Yong. 2012. Petrographical, chemical and geochemical characteristics of Jurassic coal in western Chaoshui Basin, Inner Mongolia[J]. *Geological Science and Technology Information*, 31(1): 27–32(in Chinese with English abstract).
- Qiao Junwei, Ning Shuzheng, Qin Yunhu, Zhang Ning, Li Congcong, Zhang Jianqiang, Wei Yingchun, Zhu Shifei, Zhu Kaijia. 2019. The research progress and work prospect of special purpose coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 47(1): 53–59(in Chinese with English abstract).
- Qin Yunhu, Qin Yong, Li Zhuangfu, Gao Feng. 2006. Classification and the composition of high-quality environment-friendly steam coal in China[J]. *Energy Technology and Management*, 6: 83–85(in Chinese).
- Qin Yunhu, Li Zhuangfu, Wang Shuangmei, Gao Feng. 2009. Assessment Indices and general constituting of coals for liquefaction in east China[J]. *Coal Geology of China*, 21(6): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yunhu, Wang Yanjun, Hu Ronghua, Wang Shuangmei, Xu Xiaoqin. 2017. Discussion on index system classification of coal for direct liquefaction and application assessment[J]. *Coal Geology of China*, 29(9): 7–10(in Chinese with English abstract).
- Qin Zhihong, Yuan Xinhua, Zong Zhimin, Wang Yongzhi, Zhang Yu, Wei Xianyong. 1998. Coking and non-coking compositions in coals[J]. *Coal Conversion*, 21(3): 47–50(in Chinese with English abstract).
- Qu Han. 2013. Study on coal macerals of Tertiary coals in Northeast China[J]. *Technology Innovation and Application*, 27: 136, 137(in Chinese).
- Quan Biao, Han Dexin. 1998. Fossil communities of coal-bearing formation (Givetian, Middle Devonian) in Luquan, Yunnan—Analysis of origin of Cutinitic Liptobiolith[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 27(3): 298–301 (in Chinese with English abstract).
- Richardson A R, Eble C F, Hower J C, O'Keefe J M K. 2012. A critical re-examination of the petrology of the No. 5 Block coal in eastern Kentucky with special attention to the origin of inertinite macerals in the splint lithotypes[J]. *International Journal of Coal Geology*, 98: 41–49.
- Shu Xinqian, Wang Zurui, Xu Jingqiu, Ge Lingmei. 1996. Structural characteristics and differences among lithotypes[J]. *Journal of Fuel Chemistry & Technology*, 24(5): 432–433(in Chinese with English abstract).
- Tang Shuheng, Qin Yong, Jiang Yaofa. 2006. *Clean Coal Geology in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–242 (in Chinese).
- Tang Yuegang, Guo Yanan, Wang Shaoqing. 2011. The Chinese typical coal type—bark coal: A review[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 3: 154–163(in Chinese with English abstract).
- Wang Aikuan, Qin Yong, Lan Fengjuan, Yang Song. 2010. Geochemical characteristics of Neogene lignite in Zhaotong Basin, Yunnan [C]// *Theory and technology of coalbed methane exploration and development*, 122–127(in Chinese).
- Wang Dezu. 2005. A study on No.5 coal seam facies, Huating Mining area[J]. *Coal Geology of China*, 17(4): 6–8, 17(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongxia, Liu Yonggang, Ma Sibi. 2022. The first discovery of large coking coal in Triassic strata of Jingtai Basin, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 49(4): 1355–1356(in Chinese).
- Wang Shengwei. 1986. Advance of coal petrology and the resources assessment for the liquefaction coal[J]. *Geology Science and*

- Technology Information, 5(3): 140–148(in Chinese with English abstract).
- Wang Shuangming. 1996. Coal Accumulation and Coal Resource Evaluation in Ordos Basin[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1–437(in Chinese).
- Wang Yanbin, Han Dexin, Mao Heling. 1997. Maceral and origin of Cutinitic Liptobiolith in Middle Devonian in Damaidi Area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 26(4): 38–41 (in Chinese with English abstract).
- Wu Chunlai. 2005. Development perspective of coal liquefaction in China[J]. Earth Science Frontiers, 2(3): 309–313(in Chinese with English abstract).
- Xiang Hongwei, Yang Yong, Li Yongwang. 2014. Indirect coal-to-liquids technology from fundamental research to commercialization[J]. Scientia Sinica Chimica, 12: 1876–1892(in Chinese with English abstract).
- Xin Shihe. 2005. Study on Coal CO₂-Gasification of Coal Macerals[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 1–71(in Chinese with English abstract).
- Xing Jun, Liu Guangxiang, Xu Guangquan. 1999. Coal Facies of the huge thick coal seams in Xiaolongtan Formation, Xianfeng Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 27: 1–4(in Chinese).
- Yang Chupeng, Yao Yongjian, Li Xuejie, Liao Zewen. 2010. Oil-generating potential of Cenozoic coal-measure source rocks in Zengmu Basin, the southern South China Sea[J]. Acta Petroleologica Sinica, 31(6): 920–926(in Chinese with English abstract).
- Yao Suping. 1996. Advances in organic petrology of oil derived from coals[J]. Advance in Earth Science, 5: 439–445(in Chinese with English abstract).
- Zeng Fanhu, Chen Gang, Li Zehai, Huang Xuequn. 2013. Technical progress for pyrolysis/upgrade of low rank coal in China[J]. Chemical Fertilizer Design, 2: 4–10(in Chinese with English abstract).
- Zhai Guanghua, Duan Lijiang, Tang Shuheng, Xiao Chaohui. 2012. Experimental study on CO₂-coal interactions[J]. Journal of China Coal Society, 37(5): 788–793(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ji, Wei Bo, Tian Jijun, Feng Shuo. 2015. Characteristics of coal quality and coal facies of Middle-Lower Jurassic coal seam in large ready coalfield of the Santanghu Basin, Hami, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 89(5): 917–930 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Yu Bing, Tang Jiexiang, Guo Yingting. 1998. Petrographic characteristics and depositional environment of Upper Permian “Bark coals” in south China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 27(2): 176–180 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jing, Yu Bing, Tang Jiexiang. 1999. The petrologic characteristics and facies of coal in No. Ya-8 seam of Yining Coalfield, Xinjiang[J]. Coal Geology of China, 11(1): 30–32(in Chinese).
- Zhang Qun, Chen Muqiu. 1994. Coal facies of Liliu mining area in Hedong Coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 1: 5–9(in Chinese).
- Zhao Qi. 2012. Relationship between carboxy reactivity of coal and properties of raw coal[J]. Clean Coal Technology, 18(3): 74–77(in Chinese with English abstract).
- Zhao Shihua, Song Yinuo, Zheng Heng. 2009. Study on the hydrogenation kinetics of Shenhua coal liquefaction distillation residue [J]. China Chemicals, 3: 26–28(in Chinese with English abstract).
- Zhong Ningning, Chen Gongyang. 2009. Key controls of the gas and oil preferences of China's major coal-bearing sequences[J]. Petroleum Exploration and Development, 36(3): 331–338(in Chinese with English abstract).
- Zhou Junhu, Fang Lei, Cheng Jun, Liu Jianzhong, Xiao Haiping, Cen Kefa. 2005. Study on pyrolysis property of Shenhua coal liquefaction residual[J]. Journal of China Coal Society, 30(3): 349–352(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阿力木江·吐斯依提, 庄新国, 赵亚汶, 艾比拜尔·买买提, 潘力川. 2014. 新疆淮南煤田小西沟矿区煤的煤岩学及煤相分析[J]. 新疆地质, 34(4): 525–529.
- 陈贵锋, 罗腾. 2014. 煤炭清洁利用发展模式与科技需求[J]. 洁净煤技术, 20(2): 99–103.
- 陈家良. 1985. 坦桑尼亚某煤田煤岩特征对煤化学工艺性质和工业利用的影响[J]. 中国矿业学院学报, 4: 89–101.
- 陈鹏. 2007. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1–679.
- 陈少楠. 2009. 鸡西盆地含煤地层滴道组沉积环境分析[J]. 煤炭技术, 6: 147–148.
- 戴和武, 马治邦. 1988. 适合直接液化的烟煤特性研究[J]. 煤炭学报, 13(2): 80–86.
- 杜芳鹏, 李聪聪, 乔军伟, 魏云迅, 张光超, 雒铮, 谭富荣. 2018. 陕北府谷矿区煤炭资源清洁利用潜势及方式探讨[J]. 煤田地质与勘探, 46(3): 11–14.
- 杜芳鹏, 雒铮, 乔军伟, 赵晓辰, 谭富荣, 李聪聪, 范琪. 2020. 宁东煤田侏罗纪煤岩、煤质特征及清洁高效利用[J]. 煤田地质与勘探, 48(2): 71–77.
- 封远汉. 1992. 广西早石炭世寺门时煤质特征[J]. 广西地质, 5(2): 57–66.
- 付黎明, 庄新国, 李建伏, 庞起发. 2011. 内蒙古早白垩世五间房含煤盆地煤层煤相分析[J]. 煤田地质与勘探, 39(3): 1–6, 13.
- 郭亚楠, 赵博, 解锡超, 王凤娟, 杨翔鹏, 苏育飞, 唐跃刚. 2009. 华南晚二叠世树皮煤的煤相特征及对比研究[J]. 中国煤炭地质, 21(12): 19–23.
- 韩德馨. 1964. 云南禄泥盆纪角砾质残植煤的煤岩研究[J]. 煤炭学报, 1(1): 95–99.
- 韩克明. 2014. 神华煤显微组分加氢液化性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1–61.
- 黄文辉, 唐书恒, 唐修义, 陈萍, 赵志根, 万欢, 敖卫华, 肖秀玲, 柳佳期, Finkelman B. 2010. 西北地区侏罗纪煤的煤岩特征[J]. 煤田地质与勘探, 38(4): 1–6.

- 姜金华, 叶鸣. 1994. 抚顺龙凤矿煤岩特征与对比[J]. 东北煤炭技术, 2:49-51.
- 焦堃, 姚素平, 张科, 胡文瑄. 2012. 树皮煤的原子力显微镜研究[J]. 地质论评, 58(4): 775-782.
- 李晶, 庄新国, 周继兵, 何云龙. 2012. 新疆准东煤田西山窑组巨厚煤层煤相特征及水进水退含煤旋回的判别[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(增刊2): 104-113.
- 李小彦. 2005. 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, 33(5): 1-4.
- 刘大永. 2004. 中国典型含煤盆地镜质组结构特征及生烃、同位素动力学研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1-99.
- 刘东娜, 周安朝, 马美玲. 2011. 大同煤田白洞矿区5号煤层煤相特征[J]. 中国煤炭地质, 23(5): 1-4, 52.
- 刘全有, Bernhard M Krooss, 金之钧, 王毅, Jan Hollenstein, Ralf Littke, 刘文汇. 2008. 塔里木盆地煤及其显微组分超高温开放体系热模拟实验气态产物对比研究[J]. 天然气地球化学, 19(6): 748-753.
- 刘文斌, 胡凯, 秦建中, 陆现彩, 李志明, 姚素平. 2008. 云南禄劝残植煤的有机地球化学特征及其石油地质意义[J]. 地球化学, 37(1): 68-76.
- 罗腾. 2017. 低阶煤分质利用产业链和综合评价研究[J]. 煤炭经济研究, 8: 43-47.
- 罗霞, 李剑, 胡国艺, 伍大茂, 李志生, 张英, 姚建军. 2003. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤生、排油能力实验及其形成煤成油可能性探讨[J]. 石油实验地质, 25(1): 76-80.
- 马清义, 李娇龙, 楚英军. 2013. 嘎顺矿煤的煤岩学特征和成煤环境研究[J]. 煤炭与化工, 10: 22-25, 49.
- 庞起发, 庄新国, 李建伏, 付黎明, 钢特穆尔, 徐永. 2012. 内蒙古潮水盆地西部侏罗系煤的岩石学、矿物学及地球化学特征[J]. 地质科技情报, 31(1): 27-32.
- 乔军伟, 宁树正, 秦云虎, 张宁, 李聪聪, 张建强, 魏迎春, 朱士飞, 祝铠甲. 2019. 特殊用煤研究进展及工作前景[J]. 煤田地质与勘探, 47(1): 53-59.
- 秦云虎, 秦勇, 李壮福, 高峰. 2006. 中国优质环保型动力煤类型划分及总体构成[J]. 能源技术与管理, 6: 83-85.
- 秦云虎, 李壮福, 王双美, 高峰. 2009. 华东地区液化煤资源评价指标及总体构成[J]. 中国煤炭地质, 21(6): 14-16.
- 秦云虎, 王彦君, 胡荣华, 王双美, 徐晓琴. 2017. 直接液化用煤指标体系分级探讨及应用评价[J]. 中国煤炭地质, 29(9): 7-10.
- 秦志宏, 袁新华, 宗志敏, 王永志, 张玉, 魏贤勇. 1998. 煤中致黏组分和不粘组分[J]. 煤炭转化, 21(3): 47-50.
- 曲哈. 2013. 东北地区第三纪煤的煤岩学特征研究[J]. 科技创新与应用, 27: 136, 137.
- 权彪, 韩德馨. 1998. 云南禄劝中泥盆世含煤岩系化石生态群落[J]. 中国矿业大学学报, 27(3): 298-301.
- 舒新前, 王祖训, 徐精求, 葛岭梅. 1996. 神府煤煤岩组分的结构特征及其差异[J]. 燃料化学学报, 5: 426-433.
- 唐书恒, 秦勇, 姜尧发. 2006. 中国洁净煤地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 1-242.
- 唐跃刚, 郭亚楠, 王邵清. 2011. 中国特殊煤种——树皮煤的研究进展[J]. 中国科学基金, 3: 154-163.
- 王爱宽, 秦勇, 兰凤娟, 杨松. 2010. 云南昭通盆地新近系褐煤地球化学特征[C]// 煤层气勘探开发理论与技术, 122-127.
- 王德祖. 2005. 华亭矿区5号煤层煤相研究[J]. 中国地质, 17(4): 6-8, 17.
- 王红霞, 柳永刚, 马思弼. 2022. 甘肃景泰盆地三叠系发现大型焦煤[J]. 中国地质, 49(4): 1355-1356.
- 王生维. 1986. 液化煤的煤岩学研究进展及液化煤资源的评价和预测[J]. 地质科技情报, 15(3): 140-148.
- 王双明. 1996. 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, 1-437.
- 王延斌, 韩德馨, 毛鹤龄. 1997. 大麦地中泥盆统角质残植煤的物质组成及成因[J]. 中国矿业大学学报, 26(4): 38-41.
- 吴春来. 2005. 煤炭液化在中国的发展前景[J]. 地学前缘, 12(3): 309-313.
- 相宏伟, 杨勇, 李永旺. 2014. 煤炭间接液化:从基础到工业化[J]. 中国科学:化学, 12: 1876-1892.
- 忻仕河. 2005. 煤岩显微组分与CO₂的气化反应特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1-71.
- 刑军, 刘光祥, 许光泉. 1999. 先锋盆地小龙潭组巨厚煤层煤相特征[J]. 煤田地质与勘探, 27: 1-4.
- 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 廖泽文. 2010. 南海南部曾母盆地新生界煤系烃源岩生油条件[J]. 石油学报, 31(6): 920-926.
- 姚素平. 1996. 煤成油有机岩石学研究进展[J]. 地球科学进展, 5: 439-445.
- 曾凡虎, 陈钢, 李泽海, 黄学群. 2013. 我国低阶煤热解提质技术进展[J]. 化肥设计, 2:4-10.
- 翟光华, 段利江, 唐书恒, 肖朝辉. 2012. 二氧化碳与煤作用机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 37(5): 788-793.
- 张冀, 韦波, 田继军, 冯烁. 2015. 新疆哈密三塘湖特大整装煤田中一下侏罗统煤层煤质及煤相特征[J]. 地质学报, 89(5): 917-930.
- 张井, 唐家祥, 郑雪萍, 郭英廷. 1998. 华南晚二叠世“树皮煤”的煤岩特征及沉积环境[J]. 中国矿业大学学报, 27(2): 176-180.
- 张井, 于冰, 唐家祥. 1999. 新疆伊宁煤田Ya-8煤的煤岩特征及煤相[J]. 中国煤田地质, 11(1): 30-32.
- 张群, 陈沐秋. 1994. 河东煤田离柳矿区煤相研究[J]. 煤田地质与勘探, 1: 5-9.
- 赵奇. 2012. 煤对CO₂的化学反应性与原煤性质的关系[J]. 洁净煤技术, 18(3): 74-77.
- 赵仕华, 宋宜诺, 郑衡. 2009. 神华煤液化蒸馏残渣加氢液化动力学研究[J]. 化工文摘, 3: 26-28.
- 中国煤田地质总局. 1998. 中国含煤盆地演化和聚煤规律[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1-186.
- 钟宁宁, 陈恭洋. 2009. 中国主要煤系倾气倾油性主控因素[J]. 石油勘探与开发, 36(3):331-338.
- 周俊虎, 方磊, 程军, 刘建忠, 肖海平, 岑可法. 2005. 神华煤液化残渣的热解特性研究[J]. 煤炭学报, 30(3): 349-352.