

doi: 10.12029/gc20170203

王佟, 邵龙义, 夏玉成, 傅雪海, 孙玉壮, 孙亚军, 琚宜文, 毕银丽, 于景邨, 谢志清, 马国东, 王庆伟, 周兢, 江涛. 2017. 中国煤炭地质研究取得的重大进展与今后的主要研究方向[J]. 中国地质, 44(2): 242-262.

Wang Tong, Shao Longyi, Xia Yucheng, Fu Xuehai, Sun Yuzhuang, Sun Yajun, Ju Yiwen, Bi Yinli, Yu Jingchun, Xie Zhiqing, Ma Guodong, Wang Qinwei, Zhou Jin, Jiang Tao. 2017. Major achievements and future research directions of the coal geology in China[J]. Geology in China, 44(2): 242-262(in Chinese with English abstract).

中国煤炭地质研究取得的重大进展 与今后的主要研究方向

王佟¹ 邵龙义² 夏玉成³ 傅雪海⁴ 孙玉壮⁵ 孙亚军⁴ 琚宜文⁶ 毕银丽² 于景邨⁴
谢志清¹ 马国东¹ 王庆伟⁷ 周兢¹ 江涛⁸

(1. 中国煤炭地质总局, 北京 100038; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 西安科技大学, 陕西西安 710054; 4. 中国矿业大学, 江苏徐州 221116; 5. 河北工程大学, 河北邯郸 056038; 6. 中国科学院大学, 北京 100040; 7. 华北水利水电大学, 河南郑州 450046; 8. 中国煤炭地质总局第一勘探局, 河北邯郸 056040)

摘要: 国务院关于加强地质工作决定发布以来, 中国煤炭地质勘查技术研究与找矿取得了重大成就, 保障了国家对能源资源的需求。但当前符合科学绿色开发的煤炭产能比例仍然偏低, 在开发条件较好、已经逐渐成为煤炭主力产区的西部地区, 水资源破坏和地表生态损伤严重仍制约着西部煤炭资源的绿色开发。煤炭利用面临着大气污染控制、温室气体减排和生态环境保护的多重压力。煤炭地质科学研究仍然存在着8个方面的研究重点亟待提升。

关键词: 煤炭地质研究; 十大进展; 主要研究方向

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2017)02-0242-21

Major achievements and future research directions of the coal geology in China

WANG Tong¹, SHAO Longyi², XIA Yucheng³, FU Xuehai⁴, SUN Yuzhuang⁵, SUN Yajun⁴,
JU Yiwen⁶, BI Yinli², YU Jingchun⁴, XIE Zhiqing¹, MA Guodong¹, WANG Qinwei⁷, ZHOU Jin¹,
JIANG Tao⁸

(1. National Administration of Coal Geology in China, Beijing 100038, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 5. Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China; 7. North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China; 8. First Exploration Bureau of National Administration of Coal Geology, Handan 056040, Hebei, China)

收稿日期: 2017-02-06; 改回日期: 2017-02-18

基金项目: 中国工程院咨询项目(2015-XZ-35-03-01, 2016-ZD-14-05)、国家自然科学基金项目(41572090)及国家科技重大专项(2016ZX05041004-003)联合资助。

作者简介: 王佟, 男, 1959年生, 教授级高工, 现从事煤炭地质与勘探专业; E-mail: wangtong517@126.com。

Abstract: Since the State Council promulgated the document concerning strengthening the geological work, the research and prospecting for coal resources in China have obtained ten major achievements, which have largely ensured the national needs for energy resources. However, the proportion of the scientific and green development of coal is still very low and, in the western part of China, where the relatively favorable coal development conditions and coal production are dominated, the damage of water resources and the harm to surface ecology have already restricted the green development of coal resources. Coal utilization is facing serious pressures from air pollution control, greenhouse gas emission reduction, and ecological and environmental protection. The coal geology still has eight difficult problems which need to be studied in the future.

Key words: coal geology research; ten major achievements; major research direction

About the first author: WANG Tong, male, born in 1959, snior engineer engages in coal geological exploration. E-mail: wangtong517@126.com.

Fund support: Supported by the Consulting Program of the Chinese Academy of the Engineering (No. 2015-XZ-35-03-01, 2016-ZD-14-05); National Natural Science Foundation of China (No. 41572090); National Science and Technology Major Project (No. 2016ZX05041004-003).

1 引言

中国是世界主要煤炭资源大国,全国2000 m以浅煤炭资源总量5.82万亿t,其中保有资源量1.94万亿t,尚有预测资源量3.88万亿t(彭苏萍等,2014)。2016年《BP世界能源统计年鉴》报告显示,2015年世界煤炭产量为78.61亿t,比上年下降4%,中国煤炭产量占世界总产量的47.7%,比上年上涨0.5个百分点。产量1亿t以上的国家有10个,按数量依次排序为中国、美国(约9亿t)、印度、澳大利亚、印度尼西亚、俄罗斯、南非、德国、波兰和哈萨克斯坦。2016年2月29日国家统计局发布的《2015年国民经济和社会发展统计公报》数据显示:2015年,全国原煤产量完成37.5亿t,同比减少3.3%。煤炭在中国是名副其实的第一能源,在能源结构中占65%左右。进入21世纪以来,煤炭地质科学研究成就突出,取得了十大重要进展,保障了国家能源安全。随着地质条件简单、热值高的优质煤炭资源被大规模开发,在一些资源禀赋条件差的地区,热演化程度低、热值较低的褐煤甚至是泥炭,或者是矸较多的复杂结构煤层,煤田构造极其复杂,硫等有害元素含量较高的煤炭也不断被开发利用。煤炭的大规模生产和消费,在为经济社会发展做出重要贡献的同时,也带来了较为严重的生态环境问题,污染物排放总量和温室气体排放量也在迅速增长,煤炭利用相关的碳排放问题日益突出。近年来中国北方地区的雾霾灾害天气频发,有些人认为是煤炭的利用所引起的,这些给煤炭资源的开发利用带来了巨大挑战,煤炭地质科学技

术需要在8个方面加大研究力度。

2 煤炭地质研究十大重要进展

2.1 含煤岩系沉积学研究跨上新台阶

中国是一个煤炭大国,成煤时代主要有石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪等时段,含煤盆地星罗棋布,空间上表现为北多南少、西多东少的分布特点(图1),前人已做了很好的归纳总结。近年来,在含煤岩系沉积学研究领域有较大的进展。

2.1.1 含煤岩系层序地层学

1990年代以来,煤地质学者先后提出幕式聚煤作用(邵龙义等,1992;郝黎明等,2000),海侵过程成煤(Diessel et al.,1992)、海侵体系域成煤(李宝芳等,1999)、海侵事件成煤作用(李增学等,1996;2001)、海相层滞后阶段聚煤(邵龙义等,2009)等基于层序地层分析的成煤模式和聚煤作用理论。

研究认为,聚煤作用实际上是基准面(海平面、湖平面或潜水面)上升过程中发生的,煤层厚度受可容空间增加速率与泥炭聚集速率之间的平衡关系的控制:在靠陆盆地上倾方向以及靠陆一侧冲积平原和三角洲平原沉积环境中,厚煤层主要出现在最大海泛面或最大湖泛面位置;而靠盆地下倾方向或盆地沉积中心一侧障壁—泻湖、碳酸盐岩台地沉积环境中或陆相的滨浅湖环境,较厚的煤层主要出现在初始海泛面或初始湖泛面附近的位置,但三级复合层序中厚度最大、分布最广的煤层主要分布于可容空间增加速率最大的最大海泛面或最大湖泛面附近(图2)(邵龙义等,2008,2009)。

针对中国陆表海盆地成煤沉积充填特点,李增学等提出了陆表海聚煤盆地海侵事件成煤作用机制(李增学等,2001;吕大炜等,2015)。针对陆相聚煤盆地提出了陆相盆地古气候与沉积环境、聚煤作用关系模型,认为在盆地构造活动、基底相对稳定沉降和煤系均匀沉积过程中,气候变化通过影响盆地和流域径流深度和植被发育程度控制绝对湖面变化、物源剥蚀与沉积物供给速率,进而引起盆地内成煤沼泽与陆源碎屑沉积体系的交替演化,建立了中国西北侏罗纪陆相层序地层格架下的聚煤作用理论(Wang et al., 2012;王佟等, 2013;鲁静等, 2016)。

2.1.2 成煤系统及多元聚煤理论

成煤系统的概念是煤地质学和系统论相结合的研究成果。成煤系统在时空中表现为由若干实体组成的复杂系统,在时间上可分为物质来源子系统、物质堆积子系统与埋藏变质子系统,在空间上可以分为若干次级含煤子系统。中国学者分析了聚煤模式的多样性和聚煤作用过程与机制多元性,提出了多元成煤理论体系。各种地质因素的相互牵制、多种事件(如突发性水侵事件、构造事件、火山事件等)的影响,聚煤模式的多样性和聚煤作用过程与机制多元性等,构成了多元成煤理论体系的内核(李增学等, 2015)。

2.1.3 超厚煤层成因

在超厚煤层中识别出水进型、水退型间断面和水进型、水退型连续沉积转换面,通过对鄂尔多斯盆地南部延安组一段超厚煤层成因机制的研究,建立了多煤层叠加形成超厚煤层的成因模式,同时认为单一的异地堆积模式或多煤层叠加模式不足以描述现实中超厚煤层的成因,进而提出了超厚煤层的多元性成因模式,认为超厚煤层应该是多个层序旋回的泥炭沼泽体系的叠置而形成(王东东等, 2016)。对于断陷盆地与拗陷盆地中超厚煤层的成因,分别提出了异地堆积理论(吴冲龙等, 2006)和多层序叠置理论(王东东等, 2016)。

2.1.4 含煤岩系与地质信息

煤作为一种重要而常见的地质信息载体,蕴含着丰富的地质信息,记录了聚煤期的气候条件、沼泽类型、成煤物质、碎屑物质注入、水平面变化、营养条件、构造特征、极端事件、天体周期旋回等信息。通过沉积学、煤岩学、古生物学、地球化学、地球物理学等方

法对含煤岩系进行研究,可恢复聚煤期的构造条件、古地理、古气候、古生物及年代信息等,对重大地质事件的认识与矿产资源的勘探具有重要的指导意义。当前研究热点包括煤层丝质体含量反映古泥炭地火灾事件、大气氧含量的变化(Shao et al., 2012),以及煤层在地质历史长周期变化过程中的表现特征、古泥炭地古气候对米兰柯维奇旋回的响应及其对全球碳循环的影响(邵龙义等, 2011)和基于含煤岩系地质信息建立时间尺度等。

2.2 构造控煤与煤田滑脱构造研究

中国煤田地质的显著特点表现为聚煤盆地构造类型多样、含煤岩系后期改造强烈,从而决定了中国与构造简单的北美、欧洲相比煤炭资源开发难度更大。所以从某种意义上说,当今中国煤田构造的研究处于世界的前沿。

2.2.1 构造控煤研究

聚煤作用的发展变化主要取决于古地理和古构造因素。现在,地质学家们确认构造作用影响地表气候环境和沉积作用的变迁,因而比任何时候都更加明确了构造在控制聚煤作用中的主导作用。在这种情况下,有关构造控煤的文献日渐增多,构造控煤研究得到了普遍重视。构造控煤作用研究由早期注重于构造形迹或构造变动对煤层形变和赋存的控制,拓宽至构造作用对煤的聚集、经受改造至现在赋存状态全过程的控制(王强, 2001;陈新蔚, 2001;张敦虎等, 2010;夏玉成等, 2014, 2016;王佟等, 2016),从而将构造控煤研究引向深入。

2.2.2 控煤构造样式

控煤构造样式是指对煤系和煤层的现今赋存状况具有控制作用的一群构造或某种构造特征的总特征和风格,即同一期构造变形或同一应力作用下所产生的构造的总和。控煤构造样式的厘定,对于深入认识煤田构造发育规律、指导煤炭资源评价和煤炭资源勘查实践具有重要意义(曹代勇等, 2007;林亮等, 2008;曹代勇等, 2010)。

2.2.3 煤田滑脱构造

继中国地质学家对多样化的中国东部煤田滑脱构造进行了系统分类,建立了包括“推、滑”叠加型滑脱构造在内的若干典型构造模式,在福建、河南等地取得了找煤的重要突破(王桂梁等, 1992;王佟, 1993;王文杰等, 1993)之后,滑脱构造理论被愈来愈多的地

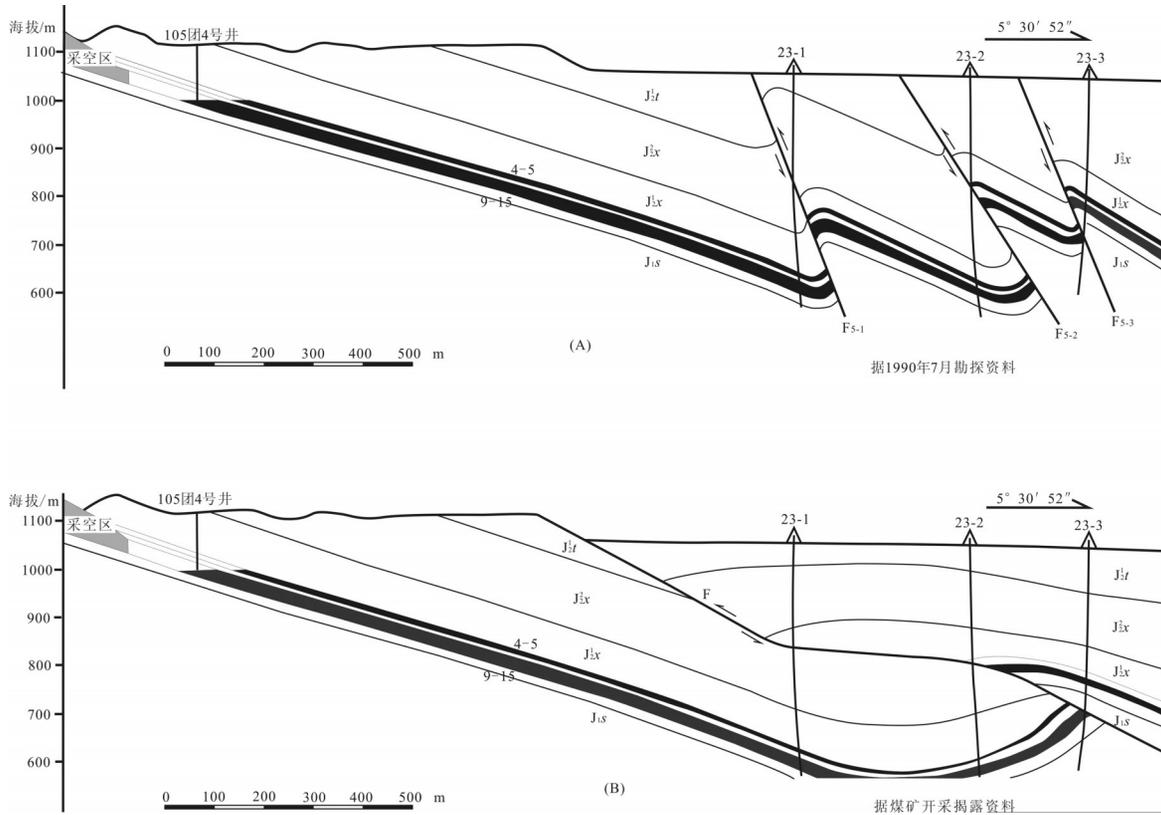


图3 乌鲁木齐煤矿推覆构造的认识过程(据王佟, 2017)

Fig. 3 A process of recognition of the thrust structure in the coal mine of Urumqi(after Wang, 2017)

质工作者接受和应用,对正确认识中国西北和西南地区复杂条件下的煤田构造规律发挥了重要作用,推覆体下找煤取得重大突破(Wang et al., 2011; Xia et al., 2011)。研究发现在新疆主要赋煤盆地的边缘地带推覆式滑脱构造具有一定的普遍性,在淮南煤田的乌鲁木齐煤矿井田范围内,经对勘探、生产资料的对比研究发现,所谓逆冲断层的叠瓦状组合实为推覆式滑脱构造,纠正了对井田断裂构造发育规律的认识,更好地服务于煤炭资源的安全高效开采(图3)。

2.3 煤系气资源综合研究与共采

王佟等(2014)从煤系烃源岩气体概念及成因联系出发,提出了煤系气概念。煤系气是由整个煤系中的烃源岩母质在生物化学及物理化学/煤化作用过程中演化生成的仍保存在煤系中的天然气,包括煤层气、页岩气、致密砂岩气,在青藏高原冻土地区还包括天然气水合物。

将煤系中的非常规天然气作为一个系统进行整体研究,其显著特点是通过地质作用过程的研究

将各地质要素联系成一个有机整体,揭示煤化作用-构造作用-地质环境条件之间的时空耦合关系,探讨区域地质背景与演化对煤系中气体形成的控制作用,形成特有的煤系气研究与资源评价路线(王佟等, 2014)。

2.3.1 煤系气的资源特点

煤系具有有机质含量高、旋回性强、Ⅲ型干酪根为主、储集层陆源物质丰富、经历多期构造运动等特征。煤系页岩气、致密砂岩气和煤层气具有同源性、伴生性、互层性、旋回性、相变性,具连续性气藏和根缘气藏特征(图4)。煤系剖面上总体表现为煤层气、页岩气、致密砂岩气多层叠置的储层群,不同沉积体系的煤系,其储层组合不同。海陆交互相煤系以清水碳酸盐 and 浊水细碎屑岩为主,华北太原组表现为页岩气与煤层气储层的多层叠置,华南的龙潭组还夹有致密砂岩储层,局部还存在煤系灰岩气;海陆过渡相煤系以中碎屑岩为主,华北山西组表现为煤层气与致密气储层的多层叠置,夹有页岩

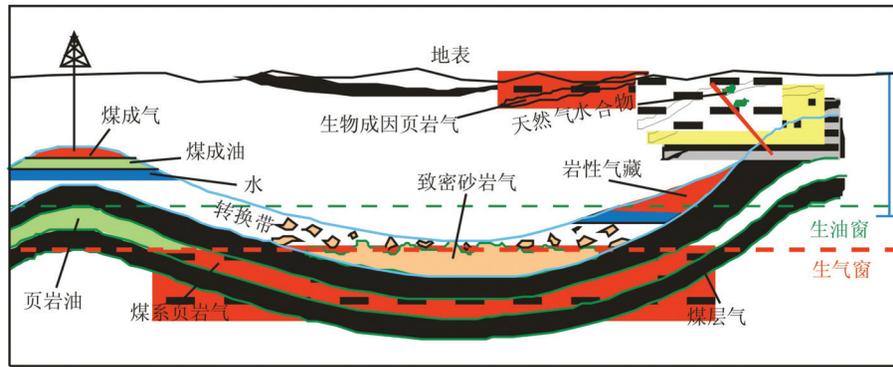


图4 煤系气系统模式图(王佟等, 2014)

Fig. 4 The system model of coal gas(after Wang et al., 2014)

气储层;陆相煤系粗碎屑岩占有较高比例,西北侏罗系以冲积扇体系、湖泊体系、河流体系(辫状河和曲流河)为主,表现为煤层气与致密气储层或常规油气储层的多层叠置,夹有页岩气储层,华北的石盒子群多为致密砂岩气储层(徐淮地区存在煤层气和页岩气储层)。煤系中煤层、煤线、炭质泥岩、泥岩、粉砂质泥岩、页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩甚至夹细砂岩,即煤-泥-砂结构系统内呈现煤层气和页岩气的混合储层(曹代勇等, 2014;傅雪海等, 2016)。

中国煤系中煤层气资源量约为 $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$;页岩气、致密气资源量分别约为 $32 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (未包括东北地区)(傅雪海等, 2016)。

2.3.2 煤层气勘探开发

中国煤层气钻井数量由2010年的5426口增加到2014年的18000口,年均增长3144口,排采井数由2010年的3995口增加到2014年的11131口,年均增加1784口,探明储量由2010年的 $2878 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到2014年的 $6196 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均增长 $829.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2015年,中国煤层气地面抽采量达到 $44.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,全国煤层气抽采总量达到了 $170.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在新疆准噶尔盆地南缘后峡、内蒙吉尔嘎朗图地区低煤级储层取得了勘探开发的技术突破。

在煤和煤层气勘探理论与技术方面,形成了煤层气地震勘探信息采集、处理和解释的理论与方法,建立了构造煤探测的理论和方法,对煤储层含气性等物质属性探测进行了有益探索,提出了基于地震多属性的煤层气主地质参数分析及有利开发区块优选理论与技术。

在开发地质方面,揭示了煤储层在原地应力、骨架支撑力和储层压力作用下,煤层气开采时的驱

动能、煤体效应和气水产出动态,建立了煤储层含气性和物性对煤层气产能影响的基础模型;构建了煤层气排采过程中煤储层含气性、渗透性及产能动态耦合数学模型,并在沁水盆地南部、鄂尔多斯盆地西南部、贵州织纳地区等不同类型煤层气井进行了初步应用。建立了基于渗透率排采诱导变化的煤层气产能预测、煤层气勘探开发技术适应性地质评价和煤储层开发动态评价与诊断理论与技术。

中国煤层气勘探开发趋势是由中高煤级向低煤级储层、由浅部向深部、由单一煤层(组)向多煤层(组)、由地面开发向井地立体式开发、由陆地向海洋、由煤层气单采向煤层气与煤成气共采方向发展(秦勇等, 2013, 2016)。

2.3.3 煤系天然气水合物研究

陆域天然气水合物在高纬度地区国外早有勘探与开发的实例,而对低纬度地区天然气水合物的研究是中国地质工作的重要发现。2008年中国在青海祁连山地区钻获天然气水合物实物样品以来,中国对陆域天然气水合物的研究取得了许多成果,一些学者对青海木里的天然气水合物研究认为,冻土带的存在为天然气水合物的形成提供了温度和压力条件,而木里地区丰富的煤炭资源在煤化进程中提供了气源基础(以干酪根Ⅲ型及3.4%重烃为标志),故称之为煤型气源天然气水合物(祝有海等, 2009; Wang, 2010)。煤系天然气水合物赋存类型为裂隙带块冰型、孔隙粉冰型、微裂隙侵染线型。木里地区天然气水合物潜在资源量约 $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.3.4 煤系气的综合开发

煤系气资源分布于煤层、煤系中,相对独立又具有不通程度成因联系与耦合关系。对煤系能源

矿产共生成藏特征的研究对实现矿产资源整体研究、立体勘探、合理开发具有重要意义(曹代勇, 2016)。中国在鄂尔多斯盆地东缘临兴、神府、横山堡南等区块进行了煤层气、致密砂岩气勘查,多口井在煤层—砂岩层段压裂试气后获得高产,大宁—吉县区块吉探1井山1段,细砂岩目标层单井日产气量为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,临兴等区块致密砂岩目标层单井日产气量介于 $6000 \sim 53000 \text{ m}^3$ (郭本广等, 2012)。

2.4 煤系锂镓等“三稀”矿产综合利用

煤中共生矿产是指与煤具有成因上共生、共同出现的其他矿产。煤中伴生矿产是指与煤不一定具成因联系的其他矿产。煤中共、伴生矿产指的是与煤在成因上共生、或不具成因联系而伴生在一起的其他矿产。

煤是一种特殊的具有还原障和吸附障性能的矿产,在特定的地质条件下,可以富集如锂、镓、锆、铀、稀土元素等金属元素,另外贵金属元素如铂族元素(PGEs)、金、银、铋、铯、钷、铷和铟等也在煤中富集,并达到可利用的程度和规模。煤中伴生矿产主要包括煤中赋存的具有工业价值的金属元素等。在中国煤中共伴生的矿产种类多、分布广,既有金属矿产,也有非金属矿产,资源相对丰富,具有很高的经济价值。

2.4.1 煤中共伴生有益矿产勘查研究

Zhao et al. (2009)在邢台矿区发现了一中型的煤伴生Ga矿床。Sun et al. (2012a, b)指出准格尔煤田官板乌素煤矿煤中Li的含量达到了 $266 \mu\text{g/g}$,可以作为伴生矿产开发(Sun et al., 2012)。代世峰等指出准格尔煤田官板乌素煤矿煤中稀土元素的含量达到 $154 \mu\text{g/g}$ (代世峰等, 2006),黑岱沟煤矿最高达到 $255 \mu\text{g/g}$,可以综合回收利用。孙玉壮等(Sun, 2015; Sun et al., 2015, 2016)、赵存良等(Zhao et al., 2017)发现青海鱼卡煤炭中铷铯和稀土含量异常高,可以开发利用。2013年孙玉壮等在山西宁武煤田平朔矿区和准格尔煤田发现两个超大型伴生锂矿(Sun et al., 2012; 孙玉壮等, 2014),同时提出了其综合利用品位,这是一种新的成矿类型,在国内外引起了广泛关注。

2.4.2 煤中共伴生有益矿产成因研究

中国研究者从不同的角度对云南临沧帮卖大型煤伴生Ge矿床中Ge的赋存状态、矿化作用和成

因机制进行了详细的研究(张淑苓等, 1987; 戚华文等, 2003),此外还对内蒙古胜利煤田乌兰图嘎煤—锆矿床的分布规律和元素地球化学性质进行了分析(杜刚等, 2003; Huang et al., 2008; Dai et al., 2011)。研究人员在内蒙古准格尔煤田发现了超大型煤伴生Ga矿床,对其富集机理进行了研究(代世峰等, 2006),此外对煤中镓的成因和开发利用技术也进行了研究(Qin et al., 2015)。

2.4.3 煤中共伴生矿产开发利用研究

中煤地质工程总公司与孙玉壮等在地质调查项目和国家自然科学基金的联合资助下,自主研发出提取粉煤灰中锂、镓技术,成功提取出碳酸锂和金属镓,建立了煤中伴生锂和稀土元素开发利用指标体系,受到国内外专家关注。另外,神华集团、中煤平朔集团建立了从粉煤灰中提取锂和镓的中试车间,国电蒙东能源公司从粉煤灰中成功提取了锆(图5)。

2.5 煤炭开发中矿井水害防治与“保水采煤”

2.5.1 矿井突水预测方法

中国煤矿多,水文地质条件复杂,煤矿防治水研究成就突出。武强等(2000)提出的解决煤层顶板涌(突)水灾害定量评价的“三图—双预测法”被广泛应用。突水系数法一直是底板突水评价预测的主要方法,孙亚军等1989年基于GIS及多元信息拟合技术提出了进行底板突水危险性预测的“突水指数法”;武强等(2007)提出了底板突水预测的“脆弱性指数法”,并被广泛应用;白海波等(2011)提出隔水关键层的概念,并建立了复合隔水关键层的力学模型。这些理论对矿井底板突水预测评价提供了重要的理论基础和技术方法。同时,中国对于顶板覆岩破坏的探测技术也研发出很多探测方法,主要包括钻孔冲洗液法、钻孔电视法、钻孔深部基点法、超声成像及数字测井法、超声波穿透法、钻孔CT及电法、微震探测、井下仰孔注水侧漏法等。

2.5.2 矿井水害防治关键技术

中国针对煤矿顶板突水的预防方法以限厚开采及预疏降为主,在研究导水裂缝带高度及含水层富水性的基础上,采用防治方法预防顶板突水水害,已取得了很多成功的案例,形成了“大型地表水体下采煤防治水技术”等关键技术,并已获得微山湖下、淮河下、小浪底水库下、渤海湾地区水域下,

以及华东、华北、东北巨厚松散含水层下安全开采的案例。

在底板水害防治技术方面,已经形成了带压开采、疏水降压、底板改造等多项关键技术,目前已经实现了最大承压12 MPa的底板奥灰含水层上安全开采。中煤科工集团西安研究院研发的以定向钻进为基础的“顺层注浆底板加固技术”和“超高承压隐伏导水陷落柱的综合探控与预防性堵截治理”等创新性关键技术也为底板水害防治起到了重要的推进作用。

2.5.3 保水采煤关键技术

早在20世纪70年代末,美国西部就把节水、保水作为影响其煤炭资源开发的核心问题展开研究。基于保水采煤在榆神府矿区等干旱半干旱缺水矿区做了大量的基础研究和工程实践工作,目前在保水采煤技术研究方面已经形成了通过限厚开采或充填开采控制导裂带发育高度的“保水采煤”技术(范立民, 2005; 范立民等, 2015; 顾大钊, 2015; 孙亚军等, 2017)。顾大钊等在神东矿区建立了将受采动破坏影响的煤层顶板上覆含水层中的水转移至底板以下含水层的水资源“转移存贮”技术、利用采空区建立“地下水库”(图6)等多项关键技术(顾大钊, 2015; 孙亚军等, 2017),在保护西部干旱半干旱矿区可利用水资源方面取得了显著成效。

2.6 煤炭清洁利用及煤基材料综合利用

2.6.1 洁净煤地质

中国学者综合采用地质学、地球化学、矿物学、煤岩学、环境化学、选矿学、燃烧学、环境评价等学科的理论与方法,系统研究了煤中硫及有害微量元素的分布规律与赋存特征及其在煤炭加工利用过程中的迁移规律与环境效应,建立了煤炭资源洁净潜力评价体系,分析了稀土元素的分布赋存特征(唐书恒等, 2005)。

对中国煤中硫含量分布的地质原因进行了讨论,认为硫含量高低受到沉积环境的显著影响(唐跃刚等, 2015)。从层序地层学角度对煤层的煤岩煤质变化特征进行了研究,认为基准面变化控制了泥炭地的水介质条件,从而亦控制了煤质变化特征(邵龙义等, 2009)。对各矿区煤样开展一系列研究,通过洗选、燃烧、淋滤模拟实验获得煤中有害元素的脱除率、挥发率和析出率等数据,查明其迁移



图5 国电蒙东能源公司利用粉煤灰生产的单晶锗(孙玉壮)
Fig.5 Single crystal germanium produced by fly ash from Guodian (provided by Sun Yuzhuang)

转化机理和环境效应。建立了有害元素的分级方案,从有害物质种类、毒性、迁移能力以及环境标准的角度建立煤炭资源洁净潜力的评价体系(唐书恒等, 2005)。提出成煤条件从根源上控制着煤的岩石学组成、煤质和煤的工艺性质,成煤模式决定着煤的岩石组成,煤的岩石组成又决定了煤质和煤的工艺性质。进而从成煤条件出发建立优质煤的分类与评价方式,并提出煤不同分类的首选利用方式(李小彦等, 2007)。

2.6.2 煤炭清洁利用与主要加工转换研究

中国目前在煤炭清洁开发技术领域的研究主要包括煤炭地下气化技术、水煤浆气化技术、煤液化技术及洁净煤联合循环发电技术等。

水煤浆是一种以煤代油的新型燃料,由低灰分、高挥发分的煤研磨成煤粉,将其以一定比例与水混合再加入化学添加剂配制而成,中国在煤炭成浆性研究及评价、低阶煤制浆技术、级配技术、磨矿过程模拟、添加剂技术和水煤浆气流床气化技术等方面取得众多研究成果。煤液化技术是将煤炭液化脱除有害元素硫等以及灰分,由煤生产洁净优质的轻、中质运输燃料和芳烃化工原料,包括煤制油、煤制烯烃、煤制乙二醇等。洁净煤发电技术现阶段有常压循环流化床燃烧、增压流化床燃烧、整体煤气化联合循环,加脱硫脱硝装置的超临界机组等,均具有高效率、低污染的特点。煤炭地下气化技术通过控制地下煤炭的燃烧产生可燃气体与化工原料。中国在气化炉型、地下气化扩展规律、火焰工

作面移动规律、覆岩移动规律、裂隙演化规律、地下水气制氢及合成氨等方面进行了大量的研究,并针对不同煤层条件进行了模拟试验。

2.7 煤系与煤岩纳米结构及其纳米成矿成藏理论

在纳米尺度上对地学问题和现象进行深入研究,有助于揭示地球科学更本质的机理和过程,也是地球科学发展的一条必然途径(据宜文等,2016)。2013年据宜文等在北京组织以“纳米地质学及纳米成藏成矿前沿科学问题”研讨会加快了煤系与煤岩纳米结构及其纳米成矿成藏研究以及能源工业发展的步伐。近些年来煤系与煤岩纳米结构及其纳米成矿成藏研究以及相关领域的最新进展,主要体现在煤岩的大分子结构与纳米级孔隙变化及其变形特征以及天然气赋存和富集研究等方面,重点开展了以下几方面的研究,取得了显著的研究成果:从矿物与岩石微纳米结构入手,阐明了煤系地层不同地质条件下非常规储层中矿物与有机大分子和孔隙网络系统的微纳米效应(尺寸效应、表面效应和界面效应等)及其分布;从微纳米尺度,研究泥页岩、煤岩和致密砂岩储层矿物与有机质组成及微纳米孔隙结构的形成与演化过程,揭示了有机质大分子结构和微纳米孔隙结构在沉积、构造、热、有机质生烃等过程中的演化规律;研究不同变形泥页岩和煤岩微纳米尺度的变形机理,对煤岩和泥页岩构造变形与流变、纳米结构特征及赋气机理等方面也做了大量研究,证实了应力作用对于煤岩分子结构和纳米孔隙结构的重要影响,阐述了煤储层微纳米结构演化机制及其对煤层气开发和瓦斯突出的制约作用;从纳米尺度认识地球化学过程中元素组成、迁移和演化过程,阐明了纳米物质和纳米孔隙的成因和演化机制;从纳米结构演化与纳米成藏的角度,研究了非常规油气储层微纳米结构的成藏效应;从煤层气和页岩气的源岩及页岩气生成与演化特征、储集与分布特征、渗流与运移特征等方面对比研究并总结了它们的纳米结构与成藏特征,提出了非海相泥页岩储层的微纳米结构及其流体赋存问题,为煤系地层煤层气、页岩气和致密砂岩气多气共生共聚共采理论与技术以及国家多气合采示范工程设立提供了重要依据(Ju et al., 2005; 据宜文等, 2005; 姚素平等, 2011; 邹才能等, 2011; Ju et al., 2015; 据宜文等, 2016)。

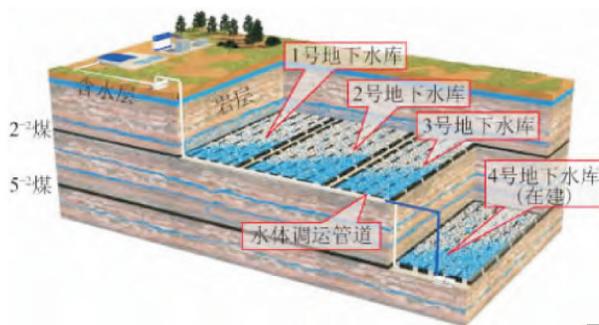


图6 神东矿区大柳塔煤矿分布式地下水库
(据顾大钊, 2015)

Fig.6 Distributed coal mine underground reservoir in the Daliuta coal mine (after Gu, 2015)

2.8 煤炭地质综合勘查理论研究与煤炭勘查中的物探及遥感技术

2.8.1 煤炭地质综合勘查理论研究

煤炭地质勘查理论与综合勘查技术研究取得了长足进步,在系统分析中国煤炭资源赋存规律和煤炭资源勘查工作特点的基础上,将传统的以资源勘查为核心的“煤田地质勘探”发展为涵盖煤炭资源调查、勘查、矿井建设、安全生产、环境保护勘查,以煤为主,煤层气和与之有一定成生关系的洁净能源及共伴生矿产资源勘查与评价的“煤炭资源综合勘查”,形成了以中国煤炭地质理论新进展为支撑,由煤炭资源遥感技术、高精度地球物理勘查技术、快速精准地质钻探技术、煤炭资源勘查信息化技术、煤矿区环境遥感监测与治理技术及煤质测试化验技术等关键技术构成的立体的信息化的煤炭地质综合勘查理论与技术新体系(王佟等,2014)。

三维地震技术迅速发展,以三维地震勘探技术为核心的高精度地球物理勘查技术的应用,极大地提高了煤炭地质综合勘查的效率和精度。煤田地球物理工作者针对中国不同地区复杂煤田地震地质条件,在炸药成孔和激发工艺、高密度数据采集和特殊观测系统设计技术、层析静校正技术、共中心点道集校正技术、大倾角叠前深度偏移成像技术等关键技术方面取得突破性进展。

在地震数据采集方面,针对西部复杂地震地质条件的特点,通过采集设备、技术方法和措施等试验攻关,总结出了一套西部山区、沙漠区、黄土塬区、高原戈壁区等复杂条件地区系列采集技术,使西部复杂地区煤炭三维地震野外记录甲级率由原

来的50%左右提高到80%以上。采集的高密度三维地震数据具有高密度、宽方位、高覆盖次数优点,高密度地震数据方位角和偏移距分布更加均匀和广泛,高覆盖次数有效弥补了黄土对地震波能量的吸收,大幅提高叠加数据的信噪比。

高密度地震数据加密了空间采样,对非假频噪音的压制更有效,提高纵、横向分辨率,保护有倾角地层的反射波。宽方位角分布的地震波射线,可以求取准确的偏移算子,克服假频,改善偏移成像质量。高密度地震数据增加覆盖次数,减小面元尺寸,偏移距分布更加均匀广泛,能够求取更加准确的地表一致性算法的算子,拓展频带宽度,减少采集脚印,提高断陷点绕射波能量和构造的清晰度。宽方位角高密度地震数据可以检测和补偿地层各向异性,得到更加准确的裂缝方向和密度信息;高密度地震数据增大最大炮检距,增加速度分析灵敏度,改善多次波压制效果,更好地保持地震波的振幅特征和地层的各向异性。

在地震数据处理方面,研究推广应用叠前深度域偏移成像技术,将地震成像、模型模拟融于一体,相当于时间偏移与折射校正和时深转换的总和,克服了时间域的固有缺点,能够获得准确的偏移归位效果,其成像点与地质模型绕射点位置完全一致,成像位置准确,还能够解决速度横向复杂变化问题和克服上覆地层对下伏地层的不利影响。

在地震数据解释方面充分研究利用垂直剖面、双极性剖面、水平剖面、沿层切片、平行层位切片和相方差属性、频谱属性、振幅属性等各种信息,开展煤矿三维地震可视化解释和反演技术,提高了地震技术解决小构造的能力,在淮南等条件好的地区达到查明断距 ≥ 3 m断层的勘探精度,在条件较差的矿区达到查明断距 ≥ 5 m断层的勘探精度(彭苏萍等,2008)。复杂地区三维地震地质成果准确率由原来的30%~50%提高到80%以上,可以查明落差大于5 m的断层和直径大于20 m的陷落柱,定量解释厚度0.5 m以上煤层,较准确地圈定采空区、岩浆岩侵入体和煤层冲刷带分布范围。如图7所示,利用垂直时间剖面和水平切片,能快速、直观、准确地解释出陷落柱,为安全高效大型矿井设计和综合机械化采煤提供了可靠的地质保障。

2.8.2 遥感技术广泛应用于煤炭资源勘查与矿区环境调查监测

经过20多年的不断探索、创新与发展,遥感技术广泛应用于煤炭资源调查、矿区环境调查与动态监测等领域,已形成了相对完善的技术体系。

(1)建立了以遥感为先导的综合找煤模式

经过长期实践,形成了“遥感扫面、物探先行、钻探验证”的综合找煤模式:广泛收集分析区域地质资料,确定含煤远景区;对主要含煤远景区开展1:25万~1:10万的遥感地质调查,初步了解调查区地质背景和煤系发育特征,确定重点调查区;对重点调查区开展1:10万~1:5万的遥感地质填图,调查了解含煤盆地和聚煤规律、含煤地层分布、构造演化和控煤构造,确定有利含煤区;选取有利含煤区开展1:5万煤田地质填图,布置一定量的电法和地震等物探工程,以及槽探等山地工程,调查了解煤系和煤层赋存特征,对资源潜力较大、赋存有利的区段布置适量的钻探工程验证,最后综合分析各种资料,对煤炭资源潜力做出总体评价,确定有利勘查区,为进入勘查阶段(预查或普查)提供依据。以遥感为先导的综合找煤模式被广泛应用于煤炭地质勘查实践中,取得了很好的效果。

(2)矿区环境遥感调查监测迈向量化、动态化

随着遥感信息源的光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率的不断提高,遥感技术广泛应用于矿区的环境调查与监测,逐渐迈向量化与动态化,形成了从遥感数据源选取—图像处理—专题信息提取—图件制作到综合分析研究完整的技术体系。

2.9 煤矿地质保障与灾害救援技术

2.9.1 矿山灾害救援钻探工程关键技术

近年来,中国矿山灾害救援钻探技术方面的最新进展主要体现在新研发的地面快速垂直孔钻进技术、救援钻孔定向钻进技术、救援钻孔护壁技术、救援孔准确定位技术,能适用于矿井突水灾害、瓦斯灾害、水灾和冒顶等灾害的救援孔施工,有效解决了在地下含水层、破碎地层、矿山采空区、松散地层及流沙层、坚硬砂砾岩层等各种复杂地质条件下,快速、准确、安全钻进及成孔问题。但中国的矿山灾害钻孔救援还仅处在小孔径救援方面,缺乏对大孔径钻孔救援关键技术和实施方案方面的研究,

缺乏大口径钻孔救援装备配套应用技术的研究,没有形成系统、整体的救援作战能力,影响了钻孔救援技术在重大矿山事故应急救援中的实际效果。

2.9.2 地面多分支水平井注浆加固煤层底板技术

中国煤炭地质总局特勘中心针对华北地区石炭系下部奥陶系灰岩为巨厚层含水层,水头压力高,裂缝、陷落柱发育,困扰石炭系下组煤炭资源开采问题,研发裂隙发育区和破损带水平井眼轨迹控制和成孔技术、水平井取心和加固效果评价等技术,采用多分支水平井钻井技术沿煤层底板实施多条水平钻孔,通过地面进行高压注浆堵漏,从而高效、安全的实现了加固底板、隔离奥灰水的目的,实现了地面水平井定向钻井技术在煤矿水灾害主动预防与治理中的成功应用,解决了地面直井注浆方式和巷道钻孔注浆方式在陷落柱治理和底板加固方面存在的施工效率低、成本高和治理效果有限的问题。

2.9.3 煤矿大口径工程井钻井技术

煤矿井径 1000 mm 以内的排水井、通风井等煤矿安全地质工程基本以开挖为主,施工周期长,难以满足煤矿应急需要。1996 年中国煤炭地质总局 129 勘探队研发了采用煤田勘探钻机施工煤矿大口径工程井技术,根据钻井规格优化钻具组合,并依据地层变化随钻调整钻进和泥浆参数,正循环泥浆钻进,一次性成井和下管固井的大口径钻孔快速施工技术,基本满足了煤矿地质保障工程快速施工的要求,在煤矿生产中得到广泛应用。随后于 1996 年在河北显德汪煤矿采用地勘钻机施工通风井,开创了国内勘探钻机施工大口径孔的先例;2001 年又在河南永煤进行排水井钻探施工,最大终孔孔径达到 660 mm(王佟等, 2008)。以后煤矿大口径钻孔施工技术取得了新的进展,主要是煤矿大口径工程井钻井技术集定向钻进、气动潜孔锤钻进、分级扩孔、大

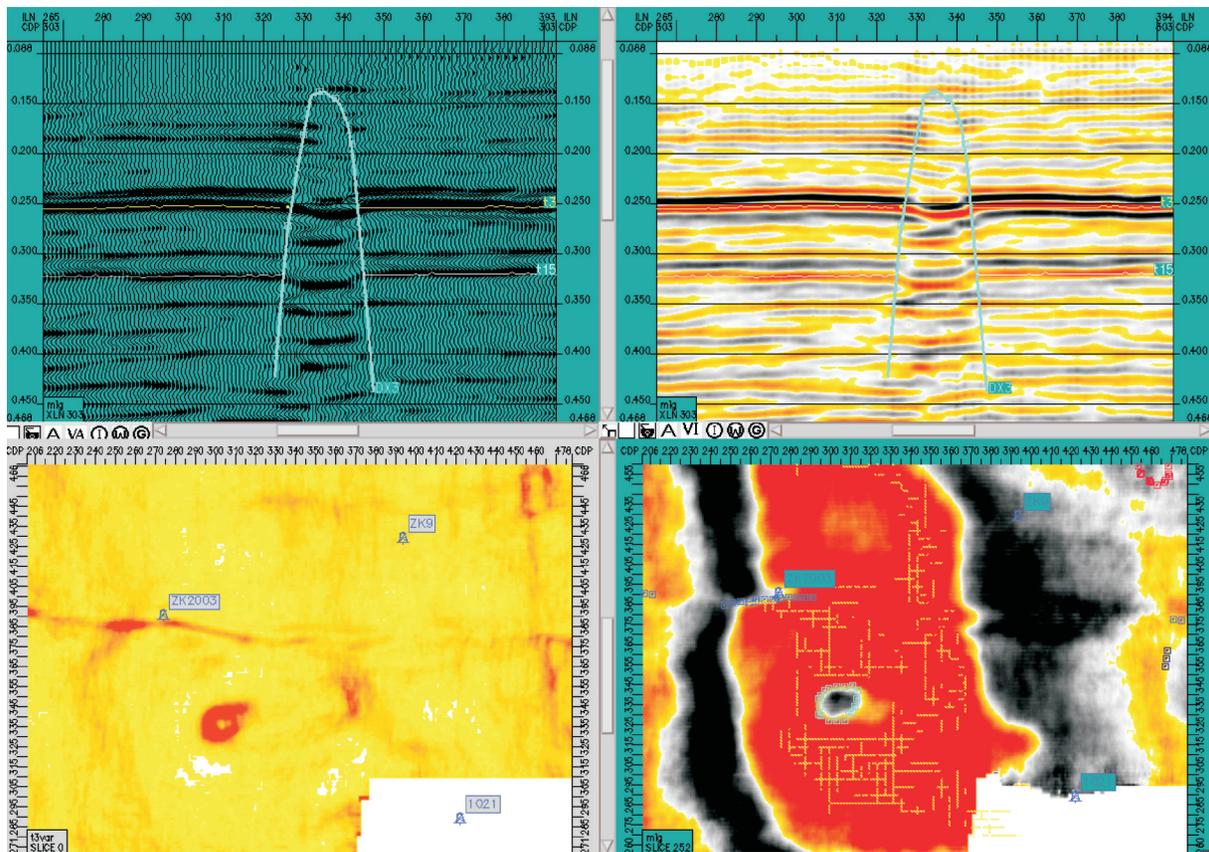


图7 利用垂直时间剖面(上)和水平切片联合解释陷落柱(据王佟, 2013)

Fig.7 Joint interpretation of collapse column by vertical time section and horizon slice section(after Wang, 2013)

口径井固井完井等技术为一体,解决了工程井直径大、垂直度要求高、中靶点位范围小等技术难点。与反井法相比,其对施工设备和工程条件要求不高,具有适用范围广、施工成本低等特点。中国煤炭地质总局等单位利用该技术施工煤矿大口径工程井,主要用于通风、瓦斯抽放、矸石填充、应急排水、注氮气灭火等方面,确保了煤矿的安全生产(杜兵建, 2009; 季学庭, 2009; 王永全等, 2009; 王玉春, 2013; 杨富春, 2014)。但该项技术存在着扩孔钻头机械破岩能量不足和钻井液携岩能力弱等问题,应加强优化扩孔分级、气举反循环和集束式潜孔锤施工煤矿大口径工程井等方面的研究(袁志坚等, 2014; 周兢, 2016)。

2.9.4 煤层气(瓦斯)高效开发钻完井技术

将超直井快速钻进、水平对接井、多分支水平井等钻井技术与储层保护技术有机结合,形成一套行之有效的煤层气高效开发钻完井技术体系。提高了超薄煤层的导向技术水平,以往煤层气水平井煤层厚度一般5 m以上,新技术实现了在煤层厚度为2.5 m以下的超薄煤层中完成水平段长度超过1000 m的水平井施工。实现了大位移水平井的突破,以往煤层气水平井水平位移基本都在1000 m左右,现在煤层气水平井位移长度增加到1500 m左右(水垂比1:3.8,以往水垂比1:2.5)。高效的钻完井技术有效贯通煤储层的裂隙系统,增加气、水导流能力,大幅度提高单井产气量和降低钻井施工成本,是开发低压、低渗地区煤层气资源的有效手段。

2.10 煤矿环境治理与生态修复技术

2.10.1 采矿对地表生态环境影响的预测与诊断技术

重点研发基于地表生态环境的特点,进行保护性的开采布局和时序的设计;研发减轻地表损伤的充填开采、条带开采、协调开采、超大工作面开采等减损开采技术,在减损开采工艺、装备和材料上都有所突破;研究矿区环境容量与合理的开发强度、各种配采方案及其环境效应、资源与环境相协调的开采新技术新方法。研究采矿岩层移动规律与不同地形的耦合关系、采矿沉陷耕地损害边界的预计方法、高强度快速开采的沉陷预计方法、深部开采的采煤沉陷预计、沙漠化地区采煤沉陷预计方法、内蒙古草原下采煤的沉陷预计方法等,研究复杂矿区生态保护与恢复的信息支持问题。提出矿区沉

陷变形、GPS/InSAR/数字近景摄影/三维激光扫描等监测关键技术,提出一套实时、自动、精准提取矿区植被退化、土地覆被变化、水资源变化等生态环境灾害信息的技术方法,建立矿区生态环境灾害预警、生态保护与恢复决策支持系统。

2.10.2 酸性废石堆的治理技术

毕银丽等系统监测并分析酸性煤矸石产酸机理与过程(毕银丽等, 2007),进行了煤矸石的微生物治理方法理论研究。从酸性煤矸石中分离筛选出两种高效脱硫的微生物,通过组合两种微生物的优势配比,利用微生物高效的可氧化硫的能力和作用,从煤矸石中淋溶出含硫化合物,利用碱性粉煤灰进行基质的中和,结合菌根真菌等微生物修复技术进行煤矸石山的综合生态治理与改良的理论研究。胡振琪等研究了地表土壤替代材料的土壤修复理论(胡振琪等, 2013)。酸性废石堆的治理是在探讨矿山废石堆酸性产生机理的基础上,研发形成脱硫微生物脱硫、防治及脱硫微生物与菌根联合改良煤矸石的工艺,形成了煤矸石山的生态修复关键微生物技术。

2.10.3 矿区生态修复关键技术

(1) 高强度开采的植被保育修复技术

针对西部高强度开采产生的植被退化、土地资源破坏、水土流失加剧等生态破坏问题,研究植被品种筛选与快速繁育、矿区植被快速恢复、生物多样性的稳定等技术;针对东部矿区潜水位较高,大面积塌陷积水区湿地生态恢复经济及技术问题,研究防止洪涝侵袭、控制沉陷水位的塌陷积水区规划与疏浚技术;塌陷积水区水污染控制工程与技术;塌陷积水区水生生态群落选育、构建工艺与关键技术;塌陷积水区的生态、旅游开发模式和利用技术等立体化修复技术。

(2) 微生物复垦关键技术体系

从生态系统最基础的微生物为出发点,构建较好的微生物群落及根际生活环境,促进植被生长发育的良性循环,从微生物选育培养、强化定殖、与植物互惠互利共生、生物多样性、生态持续稳定性等良性循环进行了系统研究,形成了微生物复垦关键技术体系。考虑生态的自我恢复能力,减少人工干预的强度与频度,发挥植被与自然环境容量的相互适应性功效,实现生态的自我演替,建立相关制约

模型,研发区域性治理技术。

(3)生态修复的土壤有机生物改良关键技术与材料

生态修复中土壤改良是关键和基础。重点研究地表生态环境治理的土壤改良有机生物材料;开发酸性自燃煤矸石山治理的材料。研发治理质量参数的野外实时监测与传输的技术与材料装备;开发相应的评估系统,建立复垦验收标准化;精确、客观地反映生态修复后期生态持续稳定效应,研发本领域特有知识产权的技术与关键生物材料。

3 煤炭地质今后需要重点突破的几个研究方向

3.1 深地资源勘查理论与开采地质条件评价方法研究

煤炭资源的埋深在全世界差别很大,世界上主要产煤国家美国、俄罗斯、乌克兰、印度等国家煤炭地质条件相对简单,埋藏深度较浅,世界第二产煤大国美国基本以露天开发为主。中国煤炭地质条件复杂,以井工开发为主,开发最深的煤矿是山东临沂煤田孙庄矿,其开发深度1500 m,创造了世界上煤矿开发的最深记录。在国外开发较深的是乌克兰的煤矿,平均开发深度达700 m,其中顿涅茨煤田的矿井开发深度达1000 m。由于深部地质构造及岩石赋存状态与地表相比,发生巨大变化,如何合理、有效、安全开发利用深部煤炭资源,是全世界关注的热点,也是人类又一个需要攀登的科学制高点。

世界各大国对深地资源的研究都十分重视。中国对深地资源的勘查开发深度,金属矿产3000 m,石油为8000 m,煤炭为3000~5000 m。但深部地质构造与岩石赋存状态都还是一个全新的课题。深部煤炭资源的勘查开发不同于浅部,针对深部的煤炭资源勘查可能一方面是基于在浅部煤炭资源聚集模式和构造样式研究的基础上建立深部三维地质预想模型,开展以物探为主结合钻探进行验证,理论模型要先行,创新具有透视功能的地球物理科学(袁亮,2017)。另一方面是勘查技术和勘查装备的研究,包括深部物探、钻探和随钻成像等测井技术的研究以及特殊的深部样品采集与分析技术。其核心是通过创新和研发全新的勘查技术与工艺、科学的勘查施工方式的基础上开展;针对深部煤炭资源的开发也势必将采用煤炭深层地下液

化、气化、水煤浆化等不同于浅部传统开发方式的新型的流体开发方式。而这些对地质勘查理论研究和科技进步都是一个全新的研究领域。

3.2 煤炭资源开发与水资源保护的关系研究

中国是世界上严重缺水国家,保护水资源是煤炭开发的一个重要约束条件。为了在合理开发利用煤炭资源的同时对生态潜水实施有效保护,首先必须从煤田特殊的煤层-地下水空间组合关系出发,深入研究煤炭高效开采在上覆岩层中产生的导水裂隙带的发育规律、裂隙带对含(隔)水层稳定性的影响、由于隔水层破坏而引起的生态潜水流场径流方向及水位的改变,从而科学地揭示煤炭高效开采对生态潜水流场的扰动规律,既包括在垂向上冒裂带发育高度与煤炭开采强度之间的关系以及由此而引起的地下水流场的垂向变动规律,也包括由于某采区地下水流场垂向变动而引起的相邻区域地下水流场的侧向变动规律。在此基础上,以生态水位保护和煤炭资源开采“双赢”为目标,研究提出生态流场的优化调控策略及减缓地下水流失灾害的关键技术参数(夏玉成,2016),建立节水-配水-保水一体化的节水技术(彭苏萍等,2014)。这既是当前煤矿开采与环境保护领域亟待解决的难题,也是绿色煤炭资源评价与开发技术研究的发展趋势。

3.3 绿色煤炭资源评价与开发研究

彭苏萍等在中国工程院咨询项目煤炭资源强国战略研究课题(2015-XZ-35-03-01)中对绿色煤炭资源及其开发潜力做了深入的研究。王佟等(2017)对中国的绿色煤炭资源进行了初步评价,揭示了中国绿色煤炭资源的良好勘查开发前景。加大绿色煤炭资源的开发与利用是解决中国煤炭资源利用中的一些负面问题的有效途径。今后若干年内,中国的绿色煤炭资源评价与精细勘查技术研究将主要围绕以下5个方面进行:①建立科学的评价体系,研究煤炭资源聚集模式、赋存形态与控煤构造样式的关系;②研究煤炭质量与适宜的开发技术条件、研究环境指标和经济指标等,评价绿色等级、评价资源量;③研究含水层与隔水层的特性、不同含水层的水力联系、煤水关系,评价水资源量;④研究煤系多能源与煤系共伴生矿产资源聚集规律及其与煤的成藏关系;⑤研究不同地区绿色煤炭资源的精准勘查技术。绿色煤炭资源开发与利用方面主要是研究绿色

煤炭资源开发方式与环境保护、生态修复建设、煤炭资源与水资源的配置及结合不同的煤种煤质特点和适用性,精准设计分级分质利用等煤炭资源开发利用模式等方面。

3.4 煤炭资源安全开采的地质保障技术研究

煤炭安全开采地质保障主要是对煤矿隐蔽致灾地质因素的探测。20世纪,美国、英国、德国与法国等发达国家开展了煤田地震勘探;前苏联在直流电法、重磁法、瞬变电磁法等领域取得了一系列成果;前苏联率先开展了煤矿井下电法勘探研究;与此相适应的物探仪器也取得了重要发展,法国SERCEL公司的地震仪、加拿大V8多功能电法仪和美国的GDP32电法工作站等仪器得到推广;国内中国矿业大学(北京)、中国矿业大学、中煤科工集团、中国煤炭地质总局等先后开展煤矿地质保障技术研究,主要是借助于现代地球物理技术对隐蔽致灾地质因素的探测与预测。今后研究的重点一方面是对目前的井下物探技术进一步研究,同时开展以采煤机为震源的试验。井下瞬变电磁、直流电法、地质雷达、无线电坑透、音频电透视、槽波、瑞雷波等成套技术的应用与装备研发,特别是微震监测、动态电法、随采地震等方面开展探索性研究。

3.5 煤系及煤盆地矿产资源的综合勘查与利用评价技术研究

近年来,美国、俄罗斯、加拿大、澳大利亚等国家的众多学者都对各自国家煤中微量元素的分布规律、赋存状态进行了研究,对元素异常富集的成因机制进行了探讨。近几年来,俄罗斯对远东地区煤中的Ge和稀土元素进行了开发利用。

煤系及煤盆地矿产协同勘查理论的核心是由煤与其共伴生多能源矿产及其他矿产控制因素的识别、含煤盆地及聚集规律研究、成因机制分析、矿产组合类型与聚集单元划分、资源评价、生态环境保护等研究内容构成。协同勘查实践由多能源矿产与煤系其他共伴生矿产快速精细整装勘查、勘查技术与方法优化、技术与经济综合评价、生态环境保护及可持续开发资源保障等组成。含煤盆地煤和其它非常规天然气资源、煤系“三稀”矿产呈共伴生产出,在探煤的同时,实现煤系矿产资源的系统评价与多能源矿产协同勘查开发,避免了单矿种勘查造成的工作重复和部分资源被遗漏。

煤系及煤盆地以煤炭资源为主,兼顾与煤炭资源有紧密联系的煤层气、页岩气、天然气水合物和煤系共伴生矿产等多种能源与资源的多位一体的系统评价与协同勘查技术研究。重点进行煤炭与煤系煤盆地包括能源矿产与其他资源时空量分布特征、煤质煤类特征、煤系煤盆地中共伴生矿产赋存特征、成藏模式和资源潜力等研究工作,以期为煤系、煤盆地多种能源矿产、其他共伴生矿产的综合评价、协同勘查开发提供理论支撑和实践指导。

3.6 煤矿区地质环境承载能力与矿山环境治理及生态修复技术研究

煤矿区地质环境承载能力是指在一定生态环境质量目标下,煤矿区可以承受的地下开采强度的最大值,可用导致煤矿区生态环境发生灾变时的地下开采强度临界值予以量化。由于煤矿区构造环境的差异,地下开采对地质环境产生的扰动强度和环境效应是不同的。如果扰动强度已经达到或超过了地质环境的最大承受能力,则必然对人居环境、生态环境及矿区可持续发展产生灾难性后果。煤矿区地质环境承载能力是大型煤矿区合理确定开采强度、对煤炭地下开采诱发的地质灾害进行准确预测预报的理论根据。特定煤矿区地质环境承载能力的评价结论可以成为该矿区制定控制采煤沉陷技术措施的理论依据。将地下开采强度控制在该煤矿区地质环境可承受的范围内,才能变“损害后治理”为“损害前防范”。同时,随着一些煤矿的关井,废弃矿井的再利用问题也日益显现。在矿山环境治理与生态修复技术方面要研发基质改良、表土覆盖和优化配置技术;研发物理碾压的方法与施工技术及装备,研究最佳碾压强度和不同介质的不同碾压方法,同时研发相应的施工设备。研发污染原位控制与生态恢复的一体化技术,重点研究污染原位治理技术与生态恢复的耦合关系,在污染原位控制的基质上如何构建植被恢复介质以及如何快速恢复植被的关键技术。

3.7 煤系资源综合利用研究

纳米地球科学是近年来地球科学与纳米科学技术交叉发展起来的国际前沿领域,大大扩展了地球科学各个领域的应用前景;正如美国地球化学与矿物学家 Hochella 教授指出:“Nanoscience and technology: the next revolution in the Earth Sciences”。由此,我们

也认识到:纳米地球科学的兴起将会为21世纪地球科学的发展带来革命性的飞跃,从而获得地球科学在超微观尺度上的重大突破。

宏观角度煤系成藏条件的研究还应继续深入,研究煤系资源的成藏模式、研究成煤条件与煤的岩石学组成、研究煤质和煤的工艺性质,研究煤炭资源在开采及利用过程中产生的废弃物包括煤泥、煤矸石、炉渣、煤灰等,研究煤矸石综合利用、燃煤烟气CO₂捕集和提纯利用、富氧燃烧、煤化工高纯CO₂地质封存、驱油(EOR)和增采煤层气(ECBM)等方面的技术并进行工业示范。

不仅煤系资源评价,特别是煤系与煤盆地资源的综合利用研究是今后绿色煤炭资源开发和利用的主要研究内容,从纳米尺度研究煤系纳米结构研究正面临着全新的战略机遇和革命性挑战。在未来煤系和煤岩纳米结构研究过程中,将借助纳米科学和地球科学研究手段、经验和成果,进一步厘清煤系和煤岩纳米结构的基本内涵以及主要研究方向,包括从纳米尺度深入探讨:纳米岩矿与表面效应及岩石成因;天然纳米微粒和纳米孔隙的形成演化机制;纳米变形特征及其形成机制;纳米地球化学过程及其行为;纳米成藏成矿效应及其机理及纳米地学与灾害和环境问题,从超微尺度详细解读地质演化和地球发展的信息。现阶段应充分发挥多学科交叉的优势,广泛开展国内外合作,全面促进煤系和煤岩纳米结构及纳米成藏成矿科技项目攻关,系统研究并集中解决煤系和煤岩纳米结构的重大和关键科学问题,从而丰富和发展煤系和煤岩纳米结构理论和方法,为能源与矿产资源勘探开发以及环境保护和灾害预测等地质保障方面提供重要理论基础。

3.8 煤炭地质工作的信息化与智能化技术研究

随着以大数据、云计算为代表的信息技术迅猛发展,中国煤炭地质工作逐渐迈向信息化与智能化。发展趋势主要集中在以下4个方面:(1)系统的集成化,包括数据集成,将各种形式的数据按照统一标准录入到统一的煤炭资源勘查数据平台上,采用多元信息的复合、融合处理技术和数据挖掘技术对数据进行处理;系统技术集成,将系统建设中实现某一功能的多种技术有机结合起来,共同实现某项功能要求;系统网络集成,实现信息共享和功能

共享;系统应用集成,实现系统的功能集成和操作集成。(2)智能化,针对煤炭资源勘查信息具已知信息的有限性、信息的隐蔽性、灰色性和不确定性,及各种信息间关系主要是非线性的等特点,采用各种非线性的智能化辅助决策评价来解决煤炭资源勘查中的复杂评价问题。(3)云计算,由于煤炭行业信息资源分散,利用程度低,且由于地质对象的不确定性、模糊性和复杂性,云计算在煤炭行业仍处于研究阶段,但由于云计算具有“低成本、低功耗、高质量、快响应”的优势,必将在煤炭行业得到广泛应用,大幅度推动煤炭行业的信息化进步。(4)三维可视化,将虚拟现实、动态模拟、三维建模等技术紧密结合,实现“数字煤炭资源勘查”的三维可视化。

4 结 论

(1)随着中国地质、物探、遥感、采矿、选矿和煤炭精细化工技术水平的全面提高,煤炭地质行业近20年来取得了全方位的发展。在煤炭地质与综合勘查理论领域:含煤岩系层序地层学、超厚煤层成因、构造推覆体下找煤、滑脱构造控煤等研究走在了世界的前列,建立了空天地一体的立体的信息化的煤炭地质综合勘查理论与技术新体系;在煤炭开发地质保障领域:煤矿大口径工程井钻井技术、矿井水害防治关键技术、矿山灾害救援钻探工程关键技术、矿区生态修复关键技术等都有巨大的发展;在煤炭与煤系矿产协同勘查与开发利用方面:煤炭清洁利用与加工、煤系锂镓等“三稀”矿产勘探开发、煤系天然气水合物勘探、煤变油技术、煤岩纳米结构与工业开发利用等引领了学科和行业的发展。

(2)中国的能源禀赋注定在相当长的时间内以煤炭为主。煤炭的勘探—开发—加工—利用各个环节的科技创新国际上其他国家不会投入很大精力来研究,指望从国际上拿回成熟技术解决中国煤炭的绿色开采和利用是不可能的,对此,我们必须有清醒的认识。未来,中国煤炭地质理论与勘查技术的研究,要重点围绕500~5000 m深部煤炭资源的勘探与开发地质保障、煤炭清洁利用理论与技术的研究和攻关开展工作,包括煤系及煤盆地多能源矿产、共伴生金属及非金属矿产系统评价及协同勘查技术研究;煤炭资源开发与水资源的赋存关系、水资源利

用与保护的研究;强化煤炭资源安全开采的地质保障技术研究和绿色矿山建设及生态修复技术研究,实现矿山零排放、零污染;要加强煤炭资源综合利用工作,特别是煤炭作为新型化工材料的开发研究,以弥补中国石油天然气资源的不足,可喜的是中国煤变油企业生产的汽油成本已与国际石油价格近似,展现了很好的煤炭开发利用前景。

(3)当前,《联合国气候变化框架公约》已得到200多个国家和地区的支持,对煤炭资源的开发利用提出了严峻的挑战。发达国家主体能源是石油天然气,类似煤变油这类煤的清洁利用技术他们不会高度关注,只有我们自己解决。如果中国煤炭的开发能够有序的转向以开发那些开发条件适宜、煤质优良、对环境影响小的绿色煤炭资源为主,在煤炭的利用环节加大对排放物的控制和再利用,实现碳和有害物质近零排放,煤炭一定是最清洁的能源,也是最珍贵的资源。希望社会各界关注煤炭行业的创新发展,关注煤炭地质科技进步,让煤炭这一资源为中国国民经济的发展做出更大的贡献。

References

- Bai Haibo. 2011. Seepage characteristic of top stratum of Ordovician system and its application study as key aquifuge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(6): 1298 (in Chinese with English abstract).
- Bi Yinli, Wu Wangyan, Liu Yinping. 2007. Application of Arbuscular Mycorrhizas in land reclamation of coal spoil heaps[J]. Acta Ecologica Sinica, 27(9): 3738–3743 (in Chinese with English abstract).
- Cao Daiyong, Zhan Wenfeng, Zhang Jun, Yang Sencong, Zhang Lusuo, Fan Heping, Huang Pei, Qiao Jun, Liu Demin, Chang Minghua. 2007. Neotectonic character of Handan–Fengfeng Mining Area and its significance for coal resource exploitation[J]. Journal of China Coal Society, 32(2): 141–145 (in Chinese with English abstract).
- Cao Daiyong, Sun Hongbo, Sun Junfei. 2010. Coal–controlled structural styles and looking for coal resources in Muli Coalfield, northeastern Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(11): 1696–1703 (in Chinese with English abstract).
- Cao Daiyong, Yao Zheng, Li Jing. 2014. Evaluation status and development trend of unconventional gas in coal measure[J]. Coal Science and Technology, 42(1): 89–92 (in Chinese with English abstract).
- Cao Daiyong, Liu Kang, Liu Jincheng, et al. 2016. Combination characteristics of unconventional gas in coal measure in the west margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 41(2): 277–285.
- Chen Xinyu. 2001. Coal control by structure in Shagou–Baiyanghe Area of Zhunnan Coal–field[J]. Coal Geology of China, 13(2): 12–13 (in Chinese with English abstract).
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2006. The discovery of extra–Large Gallium ore deposit in Zhungeer, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 51(2): 177–185 (in Chinese).
- Dai Shifeng, Wang Xibo, Seredin Vladimir, Houwer Jamesc, Ward Colinr, O’Keefe Jen, Huang Wenhui, Li Tian, Li Xiao, Liu Huidong, Xue Weifeng, Zhao Lixin. 2011. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge–rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications[J]. International Journal of Coal Geology, (S90–91): 72–99.
- Diessel C F K. 1992. Coal–bearing depositional System–coal Facies and Depositional Environments: 8–coal formation and Sequence Stratigraphy. New York, Springer–Verlag, p465–514.
- Du Bingjian. 2009. Probe into Large Diameter Direct Drainage Borehole construction technology in North China Type coalmines[J]. Coal Geology of China, 21(S1): 76–78 (in Chinese with English abstract).
- Du Gang, Tang Dazhen, Wu Wen, Sun Peicheng, Bai Yunlai, Xuan Yanqin, Huang Jun. 2003. Preliminary discussion on genetic geochemistry of paragenetic Germanium deposit in Shengli Coalfield, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 17(4): 453–458 (in Chinese with English abstract).
- Fan Limin. 1992. Environmental Geology in Shenmu Mining Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (6): 37–40 (in Chinese with English abstract).
- Fan Limin. 2005. Discussing on coal mining under water–containing condition[J]. Coal Geology & Exploration, 33(5): 53–56 (in Chinese with English abstract).
- Fan Limin, Ma Xiongde, Ji Ruijun. 2015. Progress in engineering practice of water–preserved coal mining in western eco–environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 40(8): 1711–1717 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xuehai, Jianatayi Deleqjati, Zhu Yanming, Shen Jian, Li Gang. 2016. Resources characteristics and Separated Reservoirs’ Drainage of conventional gas in coal measures[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences(Beijing); Peking University), 23(3): 36–40 (in Chinese with English abstract).
- Gu Dazhao. 2015. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 40(2): 239–246 (in Chinese with English abstract).
- Guo Benguang, Xu Hao, Meng Shangzhi, Zhang Wenzhong, Liu Yinan, Luo Haohan, Li Yong, Shen Wenmin. 2012. Geology

- condition analysis for unconventional gas co-exploration and concurrent production in Linxing Area[J]. *China Coalbed Methane*, 9(4): 3–6 (in Chinese with English abstract).
- Hao Liming, Shao Longyi, Shi Zongbo, Zhang Pengfei. 2000. The application of depositional cycle frequency curve to Episodic Coal Accumulation: With an example from the Upper Permian in Southwest China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2(4): 14–21 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wenhui, Wan Huan, Du Gang, Sun Lei, Ma Yanying, Tang Xiuyi, Wu Wen, Qin Shengli. 2008. Research on Element Geochemical Characteristics of Coal-Ge Deposit in Shengli Coalfield, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 56–64.
- Hu Zhenqi, Wei Beilei, Lin Shan, Yang Jie, Li Yao. 2013. Selection of topsoil alternatives from overburden of surface coal mines[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(19): 209–214 (in Chinese with English abstract).
- Ji Xueting. 2009. Discussion of the construction technology of Large Diameter Gas Drainage Wells[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, (S1): 204–206 (in Chinese with English abstract).
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, Wang Guiliang. 2005. Relationship between nano-scale deformation of coal structure and metamorphic-deformed environments[J]. *Chinese Science Bulletin*, (16): 114–125.
- Ju Yiwen, Jiang Bo, Hou Quanlin, Wang Guiliang, Fang Aimin. 2005. Structural evolution of nano-scale Pores of tectonic coals in Southern North China and its mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 269–285 (in Chinese with English abstract).
- Ju Yiwen, Lu Shuangfang, Sun Yan, Tan Fengqi, Wang Guochang, Han Ku, Bao Yuan, Li Qingguang. 2015. Nano-Geology and unconventional oil and gas[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, (S1): 192–193.
- Ju Yiwen, Sun Yan, Wan Quan, Lu Shuangfang, He Hongping, Wu Jianguang, Zhang Wenjing, Wang Guochang, Huang Cheng. 2016. Nano Geology: A revolutionary challenge in Geosciences[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Li Baofang, Wen Xianduan, Li Guidong. 1999. High resolution sequence stratigraphy analysis on the Permo-Carboniferous in North China Platform[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geoscience, Beijing)*, 6(S1): 81–94 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyan, Wang Jiuling, Zhao Ping. 2007. Classification and evaluation of the high quality coal in Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 35(4): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Wang Mingzhen, Li Shouchun. 1996. Sequence stratigraphic framework and sea-level changes in the Late Paleozoic epicontinental basin in North China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(5): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Li Zengxue, Sun Yuzhuang, Yu Jifeng and Liu Deyong. Marine Transgression 2001. “Event” in Coal Formation from North China Basin[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 19(6):559–567.
- Li Zengxue, Lu Dawei, Wang Dongdong, Liu Haiyan, Wang Pingli, Liu Ying. 2015. The Multiple Coal-forming theoretical system and its model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(3): 271–282 (in Chinese with English abstract).
- Lin Liang, Cao Daiyong, Peng Zhengqi, Li Guangming, Wu Yide, Tan Jieqing, Liu Deng. 2008. Coalfield structural framework and coal controlling structure styles in Northeastern Hunan[J]. *Coal Geology of China*, 20(10): 47–49 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jing, Yang Minfang, Shao Longyi, Chen Shucong, Li Yonghong, Zhou Kai, Wang Wanqing. 2016. Paleoclimate change and sedimentary environment evolution, coal accumulation: A Middle Jurassic terrestrial[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(7): 1788–1797 (in Chinese with English abstract).
- Lu Dawei, Li Zengxue, Wang Dongdong, Liu Haiyan, Jia Qiang, Wang Pingli, Yu Deming, Wu Xiaoyan. 2015. Discussion on Micro-characteristics of Transgressive Event Deposition and Its Coal-forming Mechanism in the Late Paleozoic Epicontinental Sea Basin of North China. *Acta Sedimentologica Sinica*. 33(4):633–640.
- Peng Suping, Du Wenfeng, Zhao Wei, Shi Suzhen, He Dengke. 2008. 3D coalfield Seismic Integrated Interpretation Technique in complex geological condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(S1): 2760–2765 (in Chinese with English abstract).
- Peng Suping, Zhang Bo, Wang Tong, Meng Zhaoping. 2014. Coal and Water Resource[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Qi Huawen, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qi Liang, Feng Jiayi. 2003. Terrestrial hydrothermal-origin siliceous rock and the formation of extra-large Germanium deposits[J]. *Science in China(Series D)*, 33(3): 236–246 (in Chinese).
- Qian Minggao, Xu Jialin, Mou Xiexing. 2003. Coal Mine Green Mining Technology[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 32(4): 5–10 (in Chinese).
- Qin Shenjun, Sun Yuzhuang, Li Yanheng, Wang Jinxi, Zhao Cunliang, Gao Kang. 2015. Coal deposits as promising alternative sources for gallium[J]. *Earth Science Reviews*, (150): 95–101.
- Qin Yong, Fu Xuehai, Wei Zhongtao, Hou Quanlin, Jiang Bo, Wu Caifang. 2013. Control of dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Qin Yong, Shen Jian, Shen Yulin. 2016. Joint mining compatibility of Superposed Gas-bearing Systems: A general geological problem for extraction of Three Natural Gases and Deep CBM in coal series[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(1): 14–23 (in Chinese with English abstract).

- Shao Longyi, Zhang Pengfei, Liu Qinfu, Zheng Maojie. 1992. The Lower Carboniferous Ceshui Formation in Central Hunan, South China: Depositional sequences and episodic coal accumulation[J]. *Geological Review*, 38(1): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, Zhang Pengfei. 2009. Developments of coal measures Sequence Stratigraphy in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 904–914 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, Zhang Pengfei, Han Dexin. 2008. Advances in sedimentology and sequence stratigraphy of paralic coal measures[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 561–570 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Wang Hao, Large D J. 2011. Net primary productivity and its control of the Late Permian peatlands in Southwestern China[J]. *Journal of Paleogeography*, 13(5): 473–480 (in Chinese with English abstract).
- Shao Longyi, Wang Hao, Yu Xiaohui, Lu Jing, Zhang Mingquan. 2012. Paleo-fires and atmospheric oxygen levels in the Latest Permian: Evidence from maceral compositions of coals in Eastern Yunnan, Southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 801–840.
- Sun Yajun, Zhang Mengfei, Gao Shang, Xu Zhimin, Shao Feiyan, Jiang Su. 2017. Water-preserved mining technology and practice in typical highintensity mining area of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 42(1): 56–65 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yuzhuang. 2015. China Geological Survey Proved the existence of an extra-large coal associated lithium deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 311.
- Sun Yuzhuang, Yang Jingjing, Zhao Cunliang. 2012. Minimum mining grade of associated Li deposits in coal seams[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 30(2): 167–170.
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, Wang Jinxi, Liu Shiming. 2012. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam 6# from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, Northern China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 30(1): 109–130.
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, Wang Jinxi. 2014. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(4): 744–748 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, Wang Jinxi. 2015. Anomalous concentrations of rare metal elements, rare-scattered (dispersed) elements and rare earth elements in the coal from Iqe coalfield, Qinghai Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 229–241.
- Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Qin Shenjun, Lin Xiao, Li Zhongsheng, Lin Mingyue. 2016. Occurrence of some valuable elements in the Unique 'High-aluminium coals' from the Jungar Coalfield, China[J]. *Ore Geology Reviews*, (70): 659–668.
- Tang Shuheng, Qin Yong, Jiang Yaofa, Wang Wenfeng, Song Dangyu, Liu Zhanyong, Gao Feng, Cheng Aiguo, Yang Yongguo, Tang Yuegang, Chen Chunlin, Zhou Guoqing, Dai Shifeng. 2005. *Geological Study on Clean Coal of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Tang Yuegang, He Xin, Cheng Aiguo, Li Weiwei, Deng Xiujie, Wei Qiang, Li Long. 2015. Occurrence and sedimentary control of Sulfur in coals of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 40(9): 1977–1988 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongdong, Shao Longyi, Liu Haiyan, Shao Kai, Yu Deming, Liu Bingqiang. 2016. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 41(6): 1487–1497 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiliang, Yan Shouxun, Jiang Bo. 1992. The compound extension structure system of Meso-Cenozoic in West Shandong Province[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 21(3): 4–15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang. 2001. Analysis of the existing feature and cause of the formation of Western Beijing' coal[J]. *Coal Technology*, 20(5): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong. 1993. Some new understandings of the structural features and the direction of tracing coal in Linru Coalfield[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, (3): 242–247 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Wang Suizheng. 2008. Coalmine drainage borehole construction techniques in Yongcheng mining area[J]. *Coal Geology of China*, 20(2): 65–66 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong. 2010. Gas hydrate resource potential and its exploration and development prospect of the Muli coalfield in the northeast Tibetan Plateau[J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 28(3): 147–158.
- Wang Tong, Xia Yucheng, Cao Daiyong. 2011. Analysis on Coal-control Structural Style in coal regions of Northwest China[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, (3): 29–36.
- Wang Tong, Shao Longyi, Tian Yue, Lu Jing, Wang Wenlong. 2012. Sequence stratigraphy of the Jurassic coal measures in Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 86(3): 769–778.
- Wang Tong. 2013. *New Architecture of Integrated Coal Resource Exploration Technology in China*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Tong, Shao Longyi. 2013. *The Generation and Potential of Jurassic Coal Resource in Northwestern China*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

- Wang Tong, Wang Qingwei, Fu Xuehai. 2014. The significance and the systematic research of the unconventional gas in coal measures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 42(1): 24–27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Feng Fan, Jiang Tao, Wang Qingwei, Xia Yucheng, Wei Bo, Yang Shuguang. 2016. Fundamental structural framework and cognition of Jungar Coal Basin, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 628–638 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Xia Yucheng, Wei Bo. 2017. Structural styles and their control effect on Jurassic coalfield in Xinjiang[J]. *Journal of China Coal Society*, 42(2): 436–443 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tong, Zhang Bo, Wang Qingwei, Jiangtao. Green coal resources in China: Concept, characteristics and assessment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 17, 45(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjie, Wang Xin. 2013. The study of Thrust– Detachment Tectonics and Searching for Coal Deposits in the Eastern Part of China[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press (in Chinese).
- Wang Yongquan, Cui Xiuzhong, Gong Jianyu. 2009. Construction technology of Large Diameter Gas Drainage Wells[J]. *Coal Geology of China*, 21(1): 65–66 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuchun. 2013. Research and Practice of Drilling Technology Application[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press (in Chinese).
- Wu Chonglong, Li Shaohu, Wang Genfa, Liu Gang, Kong Chunfang. 2006. Genetic model about the extra thick and high quality coalbed in Xianfeng Basin, Yunnan Province, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qiang, Huang Xiaoling, Dong Donglin, Yin Zuoru, Li Jianmin, Hong Yiqing, Zhang Houjun. 2000. "Three maps–two predictions" method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 25(1): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan, Ma Jifu. 2007. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: The Vulnerable Index Method[J]. *Journal of China Coal Geology*, 32(11): 1121–1126 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yucheng, Wang Tong, Zhao Kerong, Sun Xueyang, Du Rongjun, Xiao Liang. 2011. Styles and coal–controlling effects of detachment structure in some coalfields of Southeast China[J]. *Peocidia Earth and Planetary Science*, (3): 86–94.
- Xia Yucheng, Sun Xueyang, Wang Tong, Wei Bo, Yang Shuguang, Du Rongjun, Wang Yue, Wang Chaoping, Chen Cong. 2014. Xinjiang Jurassic Paleotectonics and its controlling on coal–accumulation basins[J]. *Coal Geology of China*, 26(8): 20–23 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yucheng, Wang Tong, Wang Chuantao, Wei Mangmang. 2016. Synsedimentary structures of Early–Middle Jurassic coal–accumulating period and their control on in Xinjiang[J]. *Coal Geology & Exploration*, 44(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yucheng, Du Rongjun, Sun Xueyang, et al. 2016. Countermeasures of ecologic phreatic water protection and mine water disaster prevention in northern Shaanxi Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 44(8): 39–45.
- Yang Fuchun. 2014. Super large diameter drilling technology[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(4): 25–30 (in Chinese with English abstract).
- Yao Suping, Jiao Kun, Zhang Ke, Hu Wenxuan, Ding Hai, Li Miaochun, Pei Wenming. 2011. Atomic force microscopy study of nano–pore structure of coal[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(22): 1820–1827 (in Chinese).
- Yuan Zhijian, Xiong Liang. 2014. Discussion on optimization of reaming grading design of Large Diameter Gas Drainage Well construction[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 41(11): 17–19 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Liang. 2017. Scientific conception of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1–7.
- Zhao Cunliang, Liu Bangjun, Xiao Lin, Li Yanheng, Liu Shiming, Li Zhongsheng, Zhao Bin, Ma Jialiang, Chu Guangchen, Gao Pengpeng, Sun Yuzhuang, Sun Yuzhuang. 2017. Significant Enrichment of Ga, Rb, Cs, REEs and Y in the Jurassic No. 6 coal in the Iqe Coalfield, northern Qaidam Basin, China—A Hidden Gem[J]. *Ore Geology Reviews*, (83): 1–13.
- Zhao Cunliang, Qin Shenjun, Yang Yinchao, Li Yanheng, Lin Mingyue. 2009. Concentration of Gallium in the Permo–Carboniferous Coals of China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 27(5): 333–344.
- Zhang Dunhu, Sun Shunxin, Li Congcong, Zhang Guangchao, Niu Junqiang. 2010. Tectonic control of coal–bearing formations in Altay region and its adjacent areas, Xinjing[J]. *Geology in China*, 37(5): 1410–1418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuling, Wang Shuying, Yin Jinshuang. 1987. The study of Germanium ore in Uranium–bearing coal of the Bangmai Basin, Lincang region, Yunnan Province[J]. *Uranium Geology*, 3(5): 267–275 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jing. 2016. Study on coalmine Large Diameter Engineering Well drilling[J]. *Coal Geology of China*, 28(1): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, Lu Zhenquan, Jia Zhiyao, Li Yonghong, Li Qinghai, Liu Changling, Wang Pingkang, Guo

- Xingwang. 2009. Gas hydrates in the Qilian Mountain Permafrost, Qinghai, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1762–1771 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, Yang Zhi, Wu Songtao, Su Ling, Dong Dazhong, Li Xinjing. 2011. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1857–1864 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白海波. 2011. 奥陶系顶部岩层渗流力学特性及作为隔水关键层应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 30(6): 1298.
- 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 2007. 丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中的应用[J]. *生态学报*, 27(9): 3738–3743.
- 曹代勇, 古文峰, 张军, 杨森丛, 张路锁, 范和平, 黄佩, 乔军, 刘德民, 常明华. 2007. 邯鄲—峰峰矿区新构造特征及其煤炭资源开发意义[J]. *煤炭学报*, 32(2): 141–145.
- 曹代勇, 孙红波, 孙军飞. 2010. 青海东北部木里煤田控煤构造样式与找煤预测[J]. *地质通报*, 29(11): 1696–1703.
- 曹代勇, 姚征, 李靖. 2014. 煤系非常规天然气评价研究现状与发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 42(1): 89–92.
- 曹代勇, 刘亢, 刘金城, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地西缘煤系非常规共生组合特征[J]. *煤炭学报*, 41(2): 277–285.
- 陈新蔚. 2001. 淮南煤田沙沟—白杨河区构造控煤作用浅析[J]. *中国煤田地质*, 13(2): 12–13.
- 代世峰, 任德贻, 李生盛. 2006. 内蒙古准格尔超大型铀矿床的发现[J]. *科学通报*, 51(2): 177–185.
- 杜兵建. 2009. 华北型煤矿施工大孔径直排孔的工艺探讨[J]. *中国煤炭地质*, 21(S1): 76–78.
- 杜刚, 汤达祯, 武文, 孙培城, 白云来, 玄艳琴, 黄俊. 2003. 内蒙古胜利煤田共生锆矿的成因地球化学初探[J]. *现代地质*, 17(4): 453–458.
- 范立民. 1992. 神木矿区的主要环境地质问题[J]. *水文地质工程地质*, (6): 37–40.
- 范立民. 2005. 论保水采煤问题[J]. *煤田地质与勘探*, 33(5): 53–56.
- 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 2015. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. *煤炭学报*, 40(8): 1711–1717.
- 傅雪海, 德勒恰提·加娜塔依, 朱炎铭, 申建, 李刚. 2016. 煤系非常规天然气资源特征及分隔合采技术[J]. *地学前缘*, 23(3): 36–40.
- 顾大钊. 2015. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. *煤炭学报*, 40(2): 239–246.
- 郭本广, 许浩, 孟尚志, 张文忠, 刘一楠, 罗皓菡, 李勇, 申文敏. 2012. 临兴地区非常规天然气合探共采地质条件分析[J]. *中国煤层气*, 9(4): 3–6.
- 郝黎明, 邵龙义, 时宗波, 张鹏飞. 2000. 旋回频率曲线在幕式聚煤作用研究中的应用——以西南地区上二叠统为例[J]. *古地理学报*, 2(4): 14–21.
- 胡振琪, 位蓓蕾, 林衫, 杨洁, 李耀. 2013. 露天矿上覆岩土层中表土替代材料的筛选[J]. *农业工程学报*, 29(19): 209–214.
- 季学庭. 2009. 大口径瓦斯排放孔施工工艺探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, (S1): 204–206.
- 据宜文, 姜波, 侯泉林, 王桂梁, 方爱民. 2005. 华北南部构造煤纳米级孔隙结构演化特征及作用机理[J]. *地质学报*, 79(2): 269–285.
- 据宜文, 孙岩, 万泉, 卢双舫, 何宏平, 吴建光, 张文静, 王国昌, 黄骋. 2016. 纳米地质学: 地学领域革命性挑战[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(1): 1–20.
- 李宝芳, 温显端, 李贵东. 1999. 华北石炭、二叠系高分辨层序地层分析[J]. *地学前缘*, 6(S1): 81–94.
- 李彦, 王杰玲, 赵平. 2007. 鄂尔多斯盆地优质煤的分类与评价[J]. *煤田地质与勘探*, 35(4): 1–4.
- 李增学, 魏久传, 王明镇, 李守春. 1996. 华北南部晚古生代陆表海盆地层序地层格架与海平面变化[J]. *岩相古地理*, 16(5): 1–11.
- 李增学, 吕大伟, 王东东, 刘海燕, 王平丽, 刘莹. 2015. 多元聚煤理论体系及聚煤模式[J]. *地球学报*, 36(3): 271–282.
- 林亮, 曹代勇, 彭正奇, 黎光明, 伍意德, 谭节庆, 刘登. 2008. 湘东北地区煤田构造格局与控煤构造样式[J]. *中国煤炭地质*, 20(10): 47–49.
- 鲁静, 杨敏芳, 邵龙义, 陈恕聪, 李永红, 周凯, 王万青. 2016. 陆相盆地古气候变化与环境演化、聚煤作用[J]. *煤炭学报*, 41(7): 1788–1797.
- 吕大伟, 李增学, 王东东, 刘海燕, 贾强, 王平丽, 于得明, 吴晓燕. 2015. 华北晚古生代陆表海盆地海侵事件微观沉积特征及成煤探讨[J]. *沉积学报*, 33(4): 633–640.
- 彭苏萍, 杜文凤, 赵伟, 师素珍, 何登科. 2008. 煤田三维地震综合解释技术在复杂地质条件下的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 27(S1): 2760–2765.
- 彭苏萍, 张博, 王佟, 孟召平. 2014. 煤炭与水资源[M]. 北京: 科学出版社.
- 戚华文, 胡瑞忠, 苏文超, 漆亮, 冯家毅. 2003. 陆相热水沉积成因硅质岩与超大型锆矿床的成因——以临沧锆矿床为例[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 33(3): 236–246.
- 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 2003. 煤矿绿色开采技术[J]. *中国矿业大学学报*, 32(4): 5–10.
- 秦勇, 傅雪海, 韦重韬, 侯泉林, 姜波, 吴财芳. 2013. 煤层气成藏动力条件及其控藏效应[M]. 北京: 科学出版社.
- 秦勇, 申建, 沈玉林. 2016. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. *煤炭学报*, 41(1): 14–23.
- 邵龙义, 张鹏飞, 刘钦甫, 郑茂杰. 1992. 湘中地区下石炭统测水组沉积层序及幕式聚煤作用[J]. *地质论评*, 38(1): 52–59.
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 张鹏飞, 韩德馨. 2008. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展[J]. *古地理学报*, 10(6): 561–570.
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 张鹏飞. 2009. 中国含煤岩系层序地层学研究进

- 展[J]. 沉积学报, 27(5): 904-914.
- 邵龙义, 汪浩, Large D. J. 2011. 中国西南地区晚二叠世泥炭地净初级生产力及其控制因素[J]. 古地理学报, 13(5): 473-480.
- 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 徐智敏, 邵飞燕, 姜素. 2017. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 42(1): 56-65.
- 孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 王金喜. 2014. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨[J]. 煤炭学报, 39(4): 744-748.
- 唐书恒, 秦勇, 姜尧发, 王文峰, 宋党育, 刘占勇, 高峰, 程爱国, 杨永国, 唐跃刚, 陈春琳, 周国庆, 代世峰. 2005. 中国洁净煤地质研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 唐跃刚, 贺鑫, 程爱国, 李薇薇, 邓秀杰, 魏强, 李龙. 2015. 中国煤中硫含量分布特征及其沉积控制[J]. 煤炭学报, 40(9): 1977-1988.
- 王东东, 邵龙义, 刘海燕, 邵凯, 于得明, 刘炳强. 2016. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. 煤炭学报, 41(6): 1487-1497.
- 王桂梁, 燕守勋, 姜波. 1992. 鲁西中新生代复合伸展构造系统[J]. 中国矿业大学学报, 21(3): 4-15.
- 王强. 2001. 京西煤田煤层赋存特征及成因分析[J]. 煤炭技术, 20(5): 46-50.
- 王佟. 1993. 临汝煤田构造特征及找煤方向的新认识[J]. 西安矿业学院学报, (3): 242-247.
- 王佟, 王遂正. 2008. 永城矿区煤矿排水钻孔施工技术[J]. 中国煤炭地质, 20(2): 65-66.
- 王佟. 2013. 中国煤炭地质综合勘查理论与技术新体系[M]. 北京: 科学出版社.
- 王佟, 邵龙义. 2013. 西北地区侏罗纪煤炭资源形成条件及资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 196.
- 王佟, 王庆伟, 傅雪海. 2014. 煤系非常规天然气的系统研究及其意义[J]. 煤田地质与勘探, 42(1): 24-27.
- 王佟, 冯帆, 江涛, 王庆伟, 夏玉成, 韦波, 杨曙光. 2016. 新疆准噶尔含煤盆地基本构造格架与认识[J]. 地质学报, 90(4): 628-638.
- 王佟. 2017. 新疆侏罗纪煤田构造样式及其控煤效应[J]. 煤炭学报, 42(2): 436-443.
- 王佟, 张博, 王庆伟, 江涛. 2017. 中国绿色煤炭资源概念和内涵及评价[J]. 煤田地质与勘探, 45(1): 1-8.
- 王文杰, 王信. 1993. 中国东部煤田推覆、滑脱构造与成煤研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 王永全, 崔秀忠, 巩建雨. 2009. 大口径瓦斯抽放井施工工艺[J]. 中国煤炭地质, 21(1): 65-66.
- 王玉春. 2013. 钻探技术应用研究与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 吴冲龙, 李绍虎, 王根发, 刘刚, 孔春芳. 2006. 先锋盆地超厚优质煤层的异地成因模式[J]. 沉积学报, 24(1): 1-9.
- 武强, 黄晓玲, 董东林, 殷作如, 李建民, 洪益清, 张厚军. 2000. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 25(1): 62-67.
- 武强, 张志龙, 张生元, 马积福. 2007. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II——脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 32(11): 1121-1126.
- 夏玉成, 孙学阳, 王佟, 韦博, 杨曙光, 杜荣军, 王悦, 王超平, 陈聪. 2014. 新疆侏罗纪古构造及其对聚煤盆地的控制[J]. 中国煤炭地质, 26(8): 20-23.
- 夏玉成, 王佟, 王传涛, 韦忙忙. 2016. 新疆早一中侏罗世聚煤期同沉积构造及其控煤效应[J]. 煤田地质与勘探, 44(2): 1-7.
- 夏玉成, 杜荣军, 孙学阳, 等. 2016. 陕北煤田生态潜水保护与矿井水害预防对策[J]. 炭科学技术, 4(8): 39-45.
- 杨富春. 2014. 超大口径钻孔施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(4): 25-30.
- 姚素平, 焦望, 张科, 胡文瑄, 丁海, 李苗春, 裴文明. 2011. 煤纳米孔隙结构的原子力显微镜研究[J]. 科学通报, 56(22): 1820-1827.
- 袁亮. 2017. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 42(1): 1-7.
- 袁志坚, 熊亮. 2014. 大口径瓦斯抽排井施工扩孔分级设计优选探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(11): 17-19.
- 张敦虎, 孙顺新, 李聪聪, 张光超, 牛军强. 2010. 新疆阿勒泰地区及其邻近地段构造控煤特征[J]. 中国地质, 37(5): 1410-1418.
- 张淑苓, 王淑英, 尹金双. 1987. 云南临沧地区帮卖盆地含铀煤中锆矿的研究[J]. 铀矿地质, 3(5): 267-275.
- 周兢. 2016. 煤矿大口径工程井钻井技术研究[J]. 中国煤炭地质, 28(1): 58-62.
- 祝有海, 张永勤, 文怀军, 卢振权, 贾志耀, 李永红, 李清海, 刘昌岭, 王平康, 郭星旺. 2009. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 83(11): 1762-1771.
- 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 2011. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 27(6): 1857-1864.