

文章编号: 1001-1986(2016)04-0001-07

煤地质学研究进展与前沿

宋党育^{1,2}, 袁 镭¹, 白万备¹, 李永志¹, 何进亚¹

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000;
2. 中原经济区煤层(页岩)气协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要: 煤地质学是以煤的形成、组成、煤系伴生矿产、煤层瓦斯和煤层气为主要研究内容的地质学分支。近年来随着我国和世界对煤炭资源安全开采、洁净利用的要求逐渐提高, 煤及煤层气资源的勘探与开发, 煤地质学的研究重点也在逐渐发生变化。通过分析 2011—2015 年《国际煤地质学》杂志发表的 717 篇学术论文, 总结了近期煤地质学最新的研究热点与前沿。研究发现: 煤层气资源评价以及与煤层气开发关系最为紧密的煤储层物性研究是各国煤地质科技工作者最为关注的热点; 煤中的矿物质和元素地球化学一直为人们所重视; 与煤的形成、开采和利用相关的煤岩学及有机地球化学, 煤的自然、燃烧与环境, 沉积环境与煤炭演化, 地理信息系统与矿区环境监测, 矿井瓦斯, 矿井构造, 矿井水和煤的热解等方面的研究一直在持续开展; 页岩气资源评价与开发越来越受到人们重视。

关键词: 煤地质学; 煤层气; 煤岩学; 地球化学; 煤系伴生矿产; 煤的燃烧

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.04.001

Advance and frontier of coal geology

SONG Dangyu^{1,2}, YUAN Lei¹, BAI Wanbei¹, LI Yongzhi¹, HE Jinya¹

(1. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Coal geology is a branch of geology about coal formation and composition, associated minerals in coal bearing stratum, and coalbed gas. The research content of coal geology has changed gradually with safe-mining and clean utilization of coal resources, evaluation and exploitation of coalbed gas. The development frontier of coal geology was analyzed based on 717 papers published in *International Journal of Coal Geology* from 2011 to 2015. It was found that coalbed gas resources evaluation and coal reservoir physical properties research are the most attractive research fields in the world recently; minerals and trace elements in coal have been paid enough attention to; researches on coal petrology and organic geochemistry related to coal forming and utilization, environmental issues caused by coal combustion and spontaneous combustion, depositional environment and coalification, GIS (geographic information system) and environmental monitoring of mining area, coal mine gas, coal mine geological structure, coal mine water, and coal pyrolysis have been continued; resources evaluation and exploitation of shale gas have been paid more attention to.

Key words: coal geology; coalbed methane; petrology; geochemistry; associated minerals; coal spontaneous

煤地质学是应用地质学理论与方法研究煤层、含煤地层、煤盆地以及与煤共生的其他矿产的物质组成、成因、物理和化学性质及其空间展布规律的学科。经过多年的研究, 对煤的形成、组成和煤层的形态、空间展布规律及其控制因素有了系统而深

入的认识, 近年来的研究主要围绕煤的洁净利用、煤系伴生矿产(煤层气)的赋存与开发等方面。《国际煤地质学》杂志是爱思唯尔(Elsevier)公司出版的、被煤地质学领域科技工作者广泛认可的国际期刊之一, 该期刊出版的文章能在一定程度上反映出煤地

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272173, 41172141); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0133); 河南理工大学科技创新团队(T2013-2)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(41272173, 41172141); Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China(NCET-10-0133); Science and Technology Innovation Team of Henan Polytechnic University(T2013-2)

作者简介: 宋党育(1971—), 男, 河北献县人, 博士, 教授, 从事煤与煤层气地质研究。E-mail: dangyusong@hpu.edu.cn

引用格式: 宋党育, 袁镭, 白万备, 等. 煤地质学研究进展与前沿[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 1-7.

SONG Dangyu, YUAN Lei, BAI Wanbei, et al. Advance and frontier of coal geology[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 1-7.

质学近期的研究热点。通过分析 2011—2015 年发表于《国际煤地质学》杂志上的 700 余篇相关论文,对目前国际煤地质学的研究重点、前缘与热点进行了分析与总结。

1 煤地质学进展

18 世纪后半叶,工业革命中伴随蒸气机的广泛应用对煤炭资源的需求快速增长。为了寻找新的煤炭资源,欧洲一些国家相继成立了地质调查机构进行找煤、找矿地质工作,同期逐渐发展和形成了专门的地质学科——煤地质学。19 世纪中期,随显微镜在煤炭微观研究中的应用,发现煤是从植物转变而来,证明了煤的有机成因说。19 世纪末至 20 世纪初,电力、冶金和钢铁等工业飞速发展,加速了对煤炭资源的需求,德国、波兰、澳大利亚、乌克兰和美国相继开展了大型聚煤盆地、煤田的地质调查与研究,对含煤地层、构造和煤的成因与性质的研究加速了煤地质学的发展,也形成了诸多对后期影响显著的研究成果,如 1913 年美国的 D White 等^[1]发表了《煤的起源》,1919 年英国的 M C Stopes^[2]将煤划分出四种宏观煤岩组分,1924 年德国的 R Potonié^[3]发表了《普通煤岩学概论》。20 世纪 30 年代以后,随着相关学科的迅速发展,煤地质学也得到较为全面、系统的发展,如煤岩学和煤化学在研究煤的成因、成分、物理与化学性质、工艺性质的同时,引进其他相关学科进行综合性研究,强调煤质、煤层、含煤岩系的变化和分布规律与地质因素之间的关系:用岩石学方法研究煤的物理组成和类型的学科为煤岩学;用化学方法研究煤的元素组成和工艺性质的学科为煤化学。

李增学等^[4]、张泓等^[5]提及 20 世纪初叶良辅、丁文江、冯景兰、斯行建、潘钟祥、谭锡畴、翁文灏、谢家荣等对我国部分地区的含煤地层、煤炭资源分布、含煤地层古生物、煤炭分类方法、煤岩组成等方面开展的煤地质学工作,但是系统开展煤地质研究、进行全国范围内的煤炭资源评价工作是在新中国成立之后才全面展开的。中国矿业大学与中国地质大学在 20 世纪 60—80 年代出版了《中国煤田地质学》^[6-8],此外在煤岩学、煤中微量元素地球化学方面也出版了若干学术著作^[9-11];中国煤炭地质总局系统评价了我国煤炭资源量、分布特征、煤层气资源分布^[12-14]。

2 煤地质学研究内容

经过两个多世纪的发展,煤地质学已经成为一

门相对成熟的学科,并且形成了若干分支学科和交叉学科,包括煤岩学、煤地球化学、煤层气(瓦斯)地质学和煤盆地分析。

煤岩学把煤作为有机岩石,是以光学显微方法为主研究煤的物质组成、结构、性质、成因及利用方面的学科,显微观察与观测是煤岩学的主要研究手段。《斯塔赫煤岩学教程》、《中国煤岩学》、《中国煤岩学图鉴》和《实用煤岩学》是 20 世纪末期国内外在煤岩学领域最具代表性的著作^[9,11,15-16]。

煤地球化学是煤地质学与地球化学的交叉学科,它既包含煤形成过程中有机质的演化模式和有机结构的变化规律,同时也涵盖煤中无机元素的组成、含量、赋存状态及其环境地球化学意义^[17],研究的重点是煤中硫和 Hg、As、Pb 等公认和潜在危害性微量元素分布规律、赋存状态、富集机理及其在煤炭洗选、燃烧、淋滤过程中的迁移、转化与富集规律及其环境效应^[18-19]。

煤层气(瓦斯)地质学是研究煤层气(瓦斯)的形成、赋存、吸附/解吸、运移与开发、煤与瓦斯突出预测与防治的分支学科。虽然研究对象同为煤中的甲烷气体,瓦斯地质学的目的是矿井瓦斯突出的预测与防治,是为煤矿安全生产服务的,而煤层气地质学的主要目的是非常规天然气资源的开发与利用^[20]。

煤盆地分析是指含煤地层的地质时代,地层划分,岩性、岩相组成,旋回结构以及煤层、岩层对比,含煤地层沉积环境和各种成煤模式的交叉科学。

煤地质学也广泛应用于煤炭开采过程,如高校课程《煤矿地质学》或《矿井地质学》,其核心内容不仅包括煤的形成与组成,同时也涵盖煤层厚度变化、煤炭资源评价和矿井地质图等内容^[21]。

3 煤地质学研究热点与前沿

2011—2015 年《国际煤地质学》杂志共发表学术论文 717 篇,其中综述论文 46 篇,研究论文 649 篇,此外还有 22 篇简报。按研究内容大致可以分为以下几个主要研究方向:煤层气,煤中矿物质、微量元素与地球化学,煤岩学和有机地球化学,石油、天然气与油页岩,煤的自燃、燃烧与环境,沉积环境与煤炭演化,地理信息系统与矿区环境监测,煤炭资源评价与开发,矿井瓦斯,构造与岩浆岩侵入,矿井水,煤热解,古生物和页岩气。各研究方向五年间的论文数量如表 1 所示。

表1 《国际煤地质学》杂志2011—2015年论文统计
Table 1 Statistics of articles published in International Journal of Coal Geology between 2011-2015 /篇

研究内容	年份					合计
	2011	2012	2013	2014	2015	
煤层气	42	34	33	49	31	189
煤岩学和有机地球化学	17	15	33	24	35	124
煤中矿物质、微量元素与地球化学	7	39	10	21	10	87
石油、天然气、页岩气与油页岩	3	15	7	29	35	89
沉积环境与煤化作用	4	10	11	5	8	38
煤的自然与燃烧与环境地质统计	12	4	8	6	5	35
古生物	-	-	19	-	-	19
古生物	0	2	13	1	3	19
地理信息系统与矿区环境监测	10	3	0	-	1	14
煤炭资源评价与生产	4	5	3	7	8	27
矿井瓦斯	4	3	1	3	6	17
构造与岩浆岩侵入	3	1	0	-	-	4
矿井水	2	-	20	-	1	23
其他	-	2	-	10	20	32
合计	108	133	158	155	163	717

3.1 煤层气

五年中与煤层气相关的论文数量最多,达到189篇,占总论文数量的26.4%。煤层气的研究范围较广,涉及煤层气的生成与赋存、煤储层的孔隙特征与渗透性、煤层气的运移与开发等诸多方面。

3.1.1 气体的吸附/解吸与运移

随矿井开采深度的增加,有效应力和储层压力对气体赋存与运移的影响越发显著,所以这方面的研究较多,如煤在高压甲烷、二氧化碳及其混合物中的膨胀规律,高压环境对煤吸附能力的影响及其作用机理,升温和高压共同作用下煤对甲烷和二氧化碳吸附能力变化规律。此外,煤层气井中甲烷的非达西流效应和水平井煤层内甲烷运移模型也是研究的热点。

3.1.2 煤储层的孔隙、裂隙发育特征与渗透性

这方面的研究内容主要包括煤储层孔隙、裂隙和渗透率的测定方法和主要影响因素、排采过程中渗透率的动态变化规律。煤中孔隙的常规测定方法有压汞法和低温液氮吸附法,此外还有小角度中子散射法(SANS)和离子束剖光高分辨率扫描电子显微镜方法,对于宏观裂隙可以采用三维地震进行探测。渗透率是煤层气开发中最受关注的煤储层物性参数,但实验室内测定的渗透率一般与现场偏差较大,目前试井仍是测定储层渗透率的最准确的方法。

煤体结构、煤岩组成对煤层渗透性的影响的相关研究一直都在开展。在煤层气开采过程中储层渗透性的变化,由于渗透率受应力变化和基质收缩共同影响,不同学者在不同地质背景下的研究结果却存在差异,大部分室内试验和数值模拟结论认为随煤层气的排采,煤基质收缩,煤储层渗透率增加。

3.1.3 ECBM和CO₂的捕获与封存

CO₂等温室气体排放是全球温度上升的主要原因,燃煤排放的二氧化碳占到燃烧化石燃料总排放量的44%^[22],所以通过向煤储层中注入二氧化碳增加煤层气的产量(ECBM)是近年来全球的研究热点。主要研究内容涵盖CO₂在煤层中吸附特性及其影响因素,注入CO₂对煤储层的影响、煤储层对CO₂的封闭效果等几方面。具体包括CO₂在煤孔隙中吸附的分子学模拟,三维应力、水分和煤级对CO₂和CO₂与CH₄混合气体吸附特性的影响。煤层气井中注入CO₂后气体的流动规律与动态模拟,煤层孔隙、渗透性和地质条件对CO₂隔离与封盖效果,注入CO₂对储层的孔隙与渗透特征的影响与改变的试验和模拟研究,CO₂存储和CH₄增产效果的检验技术等。这方面所开展的工作主要集中在北美地区。

3.1.4 生物气

与生物气相关的研究工作近年开展相对较多,《国际煤地质学》杂志在2013年发表了生物气国际会议专辑,主要包括煤层中微生物群落的种类与活性,能够生成甲烷气体的微生物种类、生气量与生气环境,生物气的监测技术等几方面。如荷兰利用DNA技术研究深部煤层中嗜甲烷菌存在性与活性,利用分子生物学方法和基因技术研究煤层中微生物群落、结构,识别生物气相关的菌类群落,美国伊利诺伊盆地东部与煤层(页岩)气相关的沉积物中有机质的微生物降解及其地球化学特征,中国生物气的组成及C、H同位素范围;在生物气生成影响因素方面,部分研究成果表明从褐煤到低变质程度的烟煤,随煤级升高生物成气量逐步增加,原煤经过氧化处理在一定程度上降低了生物气的产量,而乙醇在一定程度上可以促进生物气的生成;在生气量方面,实验室的相关研究表明,中国沁水盆地无烟煤最高生物产气量可达32.4 m³/t。

3.1.5 煤层气的组成、成藏与开采

主要包括地质条件(煤级、岩浆活动、地下水)对煤层气生成、含量、赋存与产量的影响与控制作用,煤层气资源量、开发潜力与采收率的计算方法与预测模型,生物气的碳、氢同位素组成特征,具体如四川盆地龙潭组与须家河组含煤地层中的烃类

气体、塔里木盆地煤源和油源烃类气体的碳、氢稳定同位素比较研究。

3.2 煤岩学与有机地球化学

煤岩学与有机地球化学方向的论文有 124 篇, 主要研究煤、含煤地层、富含有机质泥页岩的煤岩学组成、有机地球化学特征、生物标记物特征, 生油、生气潜力及其与沉积环境的关系。

3.2.1 煤岩学

在煤岩学组成方面主要是典型盆地或新发现煤层的煤岩学组成、成因及其地质意义, 如美国西肯塔基 Herrin 煤田锯齿形边缘有机煤岩组分的形成与来源, 美国新墨西哥州 Cerrillos 煤田 Menefee 组无烟煤、宾夕法尼亚煤中的粗粒体和真菌体的特征与成因, 肯塔基富惰质组煤的成因和形成环境, 格陵兰东北部新发现煤的煤岩组成与形成环境, 南非部分二叠纪煤中有机显微组分类型, Dunkard 群煤层孢粉学、煤岩学特征。煤岩学的地质应用与新的分析和测试手段方面, 有应用古孢粉学研究葡萄牙 Bombarral 盆地侏罗纪沉积序列及古环境, 运用傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 研究不同煤级有机组分官能团的特征, 应用高级固态 ^{13}C NMR 研究受岩浆侵入影响烟煤中干酪根的化学组成的变化, 应用固态核磁共振方法研究干酪根的特征。

3.2.2 有机地球化学

主要包括煤或岩层中有机组分的组成和地球化学特征、有机质的生烃潜力研究。如法国西南部泥炭与砂岩的腐殖质的地球化学特征, 土耳其西部 Aydin-Germencik 地区 suberinitic 煤的显微组成及有机地球化学特征, 葡萄牙 Lusitanian 盆地 Sinemurian 碳酸盐沉积的孢粉相和有机地球化学特征, 塞尔维亚 Kolubara 煤盆地褐煤的岩石学和有机地球化学组成, 波兰褐煤的有机煤岩学组成, 中国邢台煤田半无烟煤的有机地球化学特征, 格陵兰东北部 Norwegian 海滩附近典型富壳质组(树脂体)煤的有机岩石学和地球化学组成, 马来西亚东部渐新世—中新世煤的有机岩石学特征, 德国西部鲁尔盆地 Duckmantian 煤的有机地球化学特征, 煤中硫的有机地球化学特征与起源。有机质的生烃潜力方面, 如应用有机岩石学研究哥伦比亚晚第三纪亚烟煤的生烃潜力, 美国新墨西哥州圣胡安盆地南部 Mancos 和 Lewis 页岩的热成熟度与生烃潜力, 应用穿透显微红外光谱方法研究化石孢粉形态分子特征及生烃潜力的评价。

3.2.3 生物标记物

主要包括煤、含煤地层中有机质生物标记物的种类、组成及其地质应用, 如塞尔维亚褐煤中生物标记

物和微岩石学调查, 波兰 Konin 和 Turoszów 褐煤盆地近新系褐煤和矽石中生物标记物、芳香烃和极性化合物的组成, 英国不同成熟度沥青质生物标记物的热演化, 保加利亚 Bobov Dol 亚烟煤中沥青和离线热化学水解产物的有机组成及其分子标记特征, 德国晚古生代煤中脂肪族生物标记物的碳同位素比例, 不同镜质组含量的煤中生物标记物的提取特性及其对煤孔隙特征的影响。在生物标记物的应用方面, 有应用生物标记物组成对塞尔维亚中新世煤进行对比性研究, 采用生物标记物方法研究波兰 Silesian 煤盆地的热成熟度、有机质来源和沉积环境。

3.3 煤中矿物质、微量元素与地球化学特征

由于煤中矿物质、微量元素可以提供煤炭形成环境、地质演化方面的丰富信息, 对煤炭的洁净利用也至关重要, 人们对这方面的研究也非常重视。2011—2015 年共发表这方面的论文 87 篇, 2012 年 5 月《国际煤地质学》杂志出版了煤中矿物质与微量元素专辑, 主要内容涵盖了煤中矿物质与微量元素的分析方法、来源、环境效应, 燃煤过程中微量元素的迁移、转化与富集规律。

3.3.1 煤中矿物质

矿物质是原煤的重要组成, 关于煤中矿物质的研究主要集中在矿物质的分析方法、典型煤盆地及复杂地质背景下煤层中的矿物质种类、来源及其地质意义, 原煤洗选、燃烧等过程中的矿物质变化行为。例如中国西北部准格尔煤田、内蒙古大青山煤田、中国西南部广西省扶绥煤田、合山煤田、松藻煤田, 澳大利亚悉尼盆地、Bowen 盆地和 Ruhr 煤盆地、美国宾夕法尼亚 Iowa the Kalo 组、巴西 Candiota 煤田煤层中矿物质的种类、赋存特征、地球化学特征、来源及其形成机制, 煤层中特殊矿物如白土石的来源与地球化学特征。在煤中矿物质的研究与观测方法方面, 应用最为广泛的是 XRD 与扫描电镜, 一些新的技术包括 X 射线散射和 X 射线断层扫描高分辨率三维成像。煤中矿物质的变化行为包括高温处理过程中矿物质的转化行为, 燃烧过程中富铝矿物的转化行为, 工业洗选过程中矿物质和无机组分的分离, 燃煤飞灰和燃煤烟灰中碳纳米管的地球化学特征, 土耳其 Yenikoy 火电厂锅炉结渣的元素与矿物组成。在煤中矿物质对人体健康的影响方面, 用 Nd 同位素研究煤层中矿物质对井下工人肺病健康的影响。

3.3.2 煤中微量元素

具体内容包括微量元素的测定方法、丰度、赋存状态、成因类型和工业利用, 不同国家、代表性煤盆地、典型矿区煤中微量元素的地球化学特征,

煤炭加工利用过程中微量元素的迁移、转化与富集行为。如安徽淮南煤田、中国南部合山煤田、保加利亚煤田和矿井附近采矿废弃物中氟等环境潜在危害元素的含量、赋存形态与地球化学特征,稀土元素富集分配模式。在微量元素的迁移、转化与富集方面,包括煤炭燃烧过程中微量元素的分异行为,微量元素在飞灰中的浓度、捕获率和挥发率,飞灰的表面特性及其对汞的吸附特征。

3.4 石油、天然气、页岩气与油页岩

与煤相关的其他化石能源如石油、天然气和油页岩方面的论文在《国际煤地质学》杂志中也占有相当比例,五年来相关论文有 89 篇。研究内容主要是针对世界不同地区油页岩、富含有机质页岩和煤层及其顶底板岩层的矿物学、有机岩石学、地球化学特征、成熟度和孔隙特性的研究,有关页岩气的研究近两年明显增多。

具体内容包括埃及西北部沙漠地区 Shushan 盆地侏罗纪砂岩储层中固态沥青、秘鲁东北部 Bagua 盆地地面渗透油、西藏北部伦坡拉地区陆源油页岩、松辽盆地嫩江组上白垩统油页岩、准格尔盆地南部大黄山油页岩的地球化学特征,具体内容既包括富含有机质岩层的厚度、分布、有机质类型、成熟度、总有机碳含量,也包含生物标记物指纹特征、同位素含量。

富含有机质岩层的成熟度与孔隙度方面,美国 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩成熟过程中纳米级多孔沥青的形成,Woodford 页岩的热成熟度及其对有机孔隙的影响,美国东部 Marcellus 页岩储存 CO₂ 的能力和对气体增产的潜力,美国阿巴拉契亚南部 Conasauga 组(寒武纪页岩)生烃潜力,德国 Hils 地区 Posidonia 页岩成熟早期孔隙空间与形态特征,英国沿岸北海上侏罗统泥岩的孔隙成因与分布特征,加拿大 Liard 盆地泥盆系页岩地质背景对基质成熟度的控制作用,岩石的裂隙发育情况和基质的渗透率、孔隙率对页岩气生产的重要性。

3.5 沉积环境与煤化作用

沉积环境与煤化作用是研究成煤过程与找煤的基础工作,也属于基础煤地质学范畴,五年来这方面的论文共 38 篇。

具体内容包括利用岩石学、地球化学方法对世界不同地区煤盆地进行沉积环境分析,如英格兰 Derbyshire 露天矿、捷克共和国 Most Basin 盆地、瑞典南部三叠系顶部沿海煤层的沉积环境分析,巴西 Bonito 煤田石炭—二叠纪含煤地层有机岩相特征,美国宾夕法尼亚中部非海相宾夕法尼亚系—下

二叠统灰岩的古沉积环境证据,美国宾夕法尼亚和西弗吉尼亚 Dunkard 群的地层学和地层命名,西班牙北部 Asturias 沿岸高位沼泽的古气候变化,晚中生代冈瓦纳大陆西部大陆性气候变暖及其植物变化,捷克共和国大陆盆地石炭纪与二叠纪分界的气候与生物变化,伊朗西南部白垩纪中期至早中新世含油地层埋藏史的恢复和热成熟度模型,煤岩组成和碳同位素分析沉积环境。生物标记物也被用于沉积环境分析,如利用分子标记物研究保加利亚 Sofia 褐煤盆地的古沉积环境,日本利用褐煤和植物化石中的生物标记物研究 Onada 煤的形成古环境。

3.6 煤的自燃、燃烧与环境

五年中与煤的自燃与火灾相关的论文有 35 篇。内容涉及火灾的远程监测与测量、燃烧过程中有害物质和温室气体的排放。在矿井火灾监测方面,如应用卫星、远距离 GIS、红外遥感图像、矿井排风中微组分和磁性矿物对矿井火灾进行监测。在火灾对环境的影响方面主要是环境潜在有害物质、温室气体的生成与排放量,如波兰南部 Silesian 盆地煤矿垃圾燃烧物中的表生硫酸盐矿物的元素与矿物组成,肯塔基 Floyd 县 Truman Shepherd 煤矿、肯塔基东部 Perry County, Ruth Mullins 煤火、波兰 Silesian 煤盆地煤矿废弃堆积物火灾释放气体的组成及升华物矿物,煤层自燃过程中多环芳烃的形成与分布,美国伊利诺伊盆地东部宾夕法尼亚煤燃烧中释放二氧化碳的变化特征,利用热流计算与地面测量相结合计算美国怀俄明州粉河盆地 Welch Ranch 煤火排放的温室气体(二氧化碳和甲烷),肯塔基 Floyd County Old Smokey 煤火中二氧化碳和一氧化碳的排放量与速率。

3.7 地质统计学

地质统计学在煤地质领域主要是采用各种数理统计方法对煤炭与煤层气储量,煤层与构造的空间展布规律,煤的地球化学组成与煤质参数进行统计分析,以查找其发育与分布的内在规律。采用较多的数学分析方法有协方差限制克里格地质统计法、球形克里格法、多变量空间块段克里格法、定向距离方程、加权变异系数法、贝叶斯最大熵方法和随机高斯模拟。具体的研究工作包括应用协方差限制克里格地质统计法预测煤炭质量的变化规律,利用地质统计法建立的印度 Jharia 煤田的煤炭勘探模型,采用定向距离方程和球形克里格法模拟多煤层的三维空间特征,土耳其 Anatolia 西部煤层的三维空间特征和资源模拟,利用三种地质统计方法量化澳大利亚昆士兰 Moranbah 北部钻孔分布对煤层资

源可信度进行量化比较，利用数值模拟图解释美国肯塔基蓝宝石煤盆地地球化学组成、元素、发热量工业分析参数的平面分布特征，褐煤采区土壤污染的时空风险评估方法。

3.8 古生物

主要研究内容是应用新的地学分析方法研究含煤地层中古生物化石的岩石学、地球化学特征、化石的分布及其地质意义。如加拿大晚二叠纪种子蕨 *Macroneuropteris scheuchzeri* 角质聚合物、美国中阿巴拉契亚盆地 Dunkard Group 中的 *Callipterid peltasperms*、捷克 Bilina 矿井残余树桩化石的岩石学与地球化学组成，加拿大宾夕法尼亚煤化后树蕨胚珠 *Trigonocarpus grandis* 的光谱化学特征，美国东北部宾夕法尼亚—二叠系界限间隔介形虫的空间分布，印度 Mangrol 煤的孢粉学与孢粉相特征、化石因子标记、官能团和蒸馏产品的同位素特征。在地质应用方面，利用古植物学方法对印度岗瓦纳煤田的煤层进行对比，对 Dunkard 组的生物地层学和生物年代学研究，应用昆虫生物地层学研究 Dunkard Group 早二叠世的年龄、晚宾夕法尼亚世—早二叠世植物转变的孢粉学记录，澳大利亚 Bowen 盆地晚二叠世煤系孢粉相变化及其对泥炭堆积的影响，保加利亚 Bobov 煤层古植物学定年。

3.9 其他研究方向

3.9.1 地理信息系统与矿区环境监测

研究内容包括利用地理信息系统(GIS)、卫星或遥感方法发现潜在煤炭资源，监测矿井火灾、矿区地面沉陷、矿井水污染、采矿期及矿井关闭对环境和地表植被的影响。

3.9.2 煤炭资源评价与生产

包括煤炭资源评价、远景储量和产量的展望，长壁开采工作面冲击地压评估、采空区顶板卸压高度预测，煤柱和采区边界附近的应力分布，煤矿开

采过程中巷道稳定性评价及地球物理学在煤炭开采过程中的应用，地面通风孔对瓦斯释放和抽采利用率研究。

与煤矿生产相关的环境问题方面，如波兰西南部晚 Silesian 盆地 Nowa Ruda 废弃矿井近地表土壤中甲烷和二氧化碳的含量、分布及其来源特征，土耳其 Zonguldak 煤矿可吸入颗粒物浓度、石英含量与尘肺病关系。煤及与煤相关材料结构研究，半石墨、天然焦的微观结构，低煤阶煤在热解过程中微晶结构的变化规律研究，天然、合成和半石墨的微观结构研究，土耳其东部与煤相似的黑宝石的岩石学特征。

4 煤地质学研究热点区域

分析所有论文作者来源可以发现，论文的第一作者分别来自 40 个国家(图 1)，不同国家和地区发表的论文数量差异很大，美国与中国最多，达到 150 篇左右，最少的只有 1 篇。这些国家大致可以分为三个层次：第一层次包括美国、中国和澳大利亚、波兰、加拿大、德国、印度和土耳其 8 个国家，发表的论文数量在 26~166 篇。源于美国的论文不仅数量最多，其研究涵盖煤地质各个方向，一些相对较新的方向像煤层气增产、CO₂ 地质储存、页岩气、致密砂岩油气这方面的论文大多也来自美国。来自中国的论文多集中在煤中矿物质与微量元素、煤层气吸附/解吸与地质资源评价方面，此外煤炭生产与安全方面的论文绝大多数来自中国。第二层次包括巴西、英国、葡萄牙等 14 个国家，发表的论文数量分布在 5~17 篇。论文主要源于每个国家较为固定的高校或研究机构，研究方向也较少。第三层次包括新西兰、奥地利、阿根廷等 18 个国家，每个国家发表的论文数量不足 5 篇。

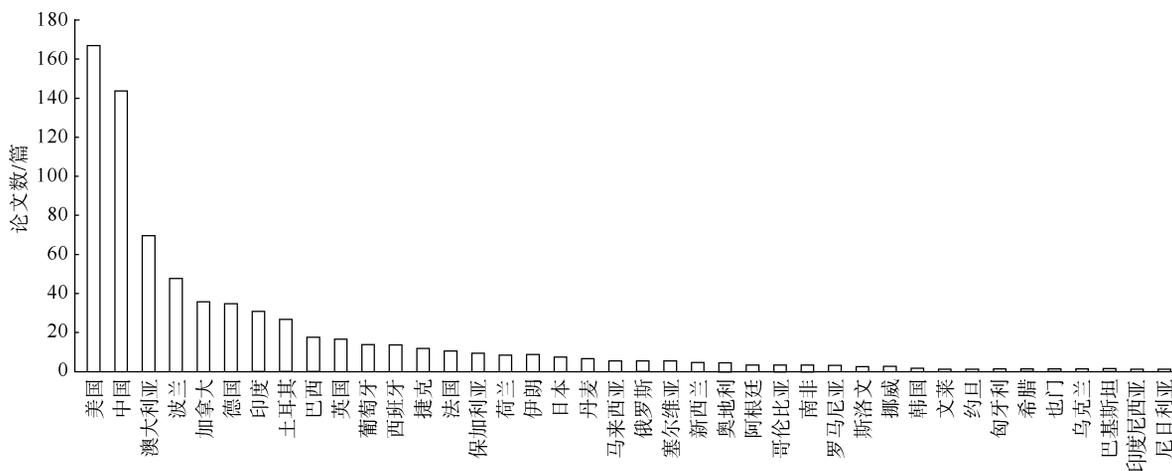


图 1 论文第一作者的区域分布

Fig.1 Regional distribution of the first authors

进一步分析可以发现,论文来源与原煤产量和消耗量的区域分布存在一定的关联。根据英国BP公司的最新能源统计资料,2014年全球煤炭产量排在前几位的国家分别是中国、美国、澳大利亚、印度、印度尼西亚、俄罗斯、哈萨克斯坦、哥伦比亚、波兰、德国和乌克兰,煤炭消耗量最高的国家是中国、美国、印度、俄罗斯、德国、南非、日本、澳大利亚、朝鲜和乌克兰^[23],其中尤为突出的是中国,其煤炭生产和消耗量占全球产量和消耗量的近一半。在产量和消耗量前十位的国家中,只有哈萨克斯坦、哥伦比亚、朝鲜和乌克兰四个国家在三年中没有发表相关论文。中国、美国和澳大利亚既是原煤产量最多的三个国家,也是煤地质研究工作开展最多的国家。

5 结论

a. 与煤地质相关的清洁能源——煤层气方面的研究仍然是煤地质学主流方向,其研究内容主要集中在深部高压条件下煤体的变形、煤层气的赋存与运移特征,二氧化碳的地质封存与煤层气增产等方向,煤储层渗透率的数值模拟、煤层气开发过程中的动态变化及煤层气的微观运移规律及机理是煤层气方向的研究热点。

b. 近年来煤中矿物质、微量元素与地球化学,煤岩学和有机地球化学,石油、天然气、页岩气仍是煤地质学的主要研究方向,与煤炭清洁利用相关的煤中矿物质与有害组分研究一直都在展开,与煤炭相关的其他非常规能源、页岩气、油页岩方面的研究越来越受到煤地质学领域研究者重视。

c. 开展煤地质学研究的国家与地区与主要煤炭生产和消耗国家基本一致。中国、美国、澳大利亚既是煤炭生产和消费大国,也是开展煤地质学研究最多的国家,尤其是美国在煤地质学领域不仅开展的研究工作最为丰富,而且对油页岩和页岩气等非常规资源的研究更为重视。

参考文献

- [1] WHITE D, REINHARDT T, CHARLES A D. The origin of coal, Washington[M]. DC: USGPO, 1913.
- [2] STOPES M C. On the four visible ingredients of banded bituminous coal[J]. Proceedings of the Royal Society B, 1919, 90: 470-487.
- [3] POTONIE R. Einführung in die allgemeine Kohlenpetrographie[M]. Berlin: Borntraeger, 1924.
- [4] 李增学, 魏久传, 刘莹, 等. 煤地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [5] 张泓, 张群, 曹代勇, 等. 中国煤田地质学的现状与发展战略[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 343-352.
ZHANG Hong, ZHANG Qun, CAO Daiyong, et al. Status and development strategy of coal geology in China[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 343-352.
- [6] 北京矿业学院地质系, 北京地质学院煤田地质教研室, 煤炭科学研究院地质研究所. 中国煤田地质学(一、二、三册)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1961.
- [7] 杨起, 韩德馨. 中国煤田地质学(上册)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.
- [8] 韩德馨, 杨起. 中国煤田地质学(下册)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980.
- [9] 韩德馨. 中国煤岩学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [10] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] 中国煤田地质总局. 中国煤岩学图鉴[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [12] 中国煤田地质总局. 中国聚煤作用系统分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [13] 中国煤田地质总局. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [14] 张新民, 庄军, 张遂安, 等. 中国煤层气地质与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 赵师庆. 实用煤岩学[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [16] STACH E, MACKOWSKY M T H, TEICHMULER M, et al. Stach's textbook of coal petrology[M]. Berlin-Stuttgart: Cebmder Bomtraeger, 1982.
- [17] 傅家谟. 有机地球化学进展[J]. 中国科学院院刊, 1993(4): 290-292.
FU Jiamo. Advances in organic geochemistry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1993(4): 290-292.
- [18] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 唐书恒, 秦勇, 姜尧发, 等. 中国洁净煤地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [20] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [21] 李增学. 煤矿地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [22] International Energy Agency. CO₂ emissions from fuel combustion highlights(2013 Edition)[EB/OL]. (2013-12-25) [2016-03-17]. <http://www.iea.org/publications/Freepublications/publication/>
- [23] BP statistical review of world energy[EB/OL]. (2015-06-01) [2016-03-18]. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.