

● 中国煤系矿产资源评价丛书 ●

中国 煤中金属元素矿产资源

中国煤炭地质总局 宁树正 等 著

Metal Element Mineral Resources
in the Coal of China



科学出版社

中国煤系矿产资源评价丛书

中国煤中金属元素矿产资源

Metal Element Mineral Resources in the Coal of China

中国煤炭地质总局 宁树正 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以煤田地质与地球化学理论为指导,对中国煤中金属元素矿产资源进行了系统研究:阐述了煤中金属元素矿产资源的概念;论述了煤中金属元素研究方法;评估了煤中金属元素(铝、锆、镓、锂、稀土元素)含量背景;分析了煤中金属元素时空分布特征;梳理了煤中金属元素富集异常点分布,对煤中金属元素矿产资源典型矿床和潜在矿点(床)进行调查与分析;建立了煤中金属元素矿产资源成矿区带划分方案,从整体上深化了对中国煤中金属元素矿产资源的认识。

本书内容丰富,资料翔实,集中体现了中国煤中金属元素矿产资源领域的最新成果,提升了我国煤中金属元素研究水平,为我国煤中金属元素矿产资源勘查评价奠定了理论基础。本书可供地质科技工作者、地质类高等院校师生参考、使用。

审图号:GS(2019)1590号

图书在版编目(CIP)数据

中国煤中金属元素矿产资源=Metal Element Mineral Resources in the Coal of China/宁树正等著. —北京:科学出版社,2019.4

(中国煤系矿产资源评价丛书)

ISBN 978-7-03-060682-2

I. ①中… II. ①宁… III. ①金属矿-矿产资源-研究-中国 IV. ①F426.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第039327号

责任编辑:吴凡洁 冯晓利/责任校对:王萌萌

责任印制:师艳茹/封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年4月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:437 000

定价:268.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国煤系矿产资源评价丛书”编写领导小组

组 长：孙升林

副 组 长：吴国强 张家强

成 员：宁树正 曹代勇 刘志逊 杨文光
 郑柏平 程爱国 吴军虎 张谷春

本书编委会

主 编：宁树正

编 委：宁树正 吴国强 邓小利 李聪聪
 秦国红 朱士飞 朱华雄 曹代勇
 张建强 乔军伟 陈 磊 袁同兴
 秦云虎 黄少青 章 伟 祁文强
 赵鲁阳 霍 婷 闻明忠 张 静

前言

煤炭资源是我国的基础能源，目前煤炭行业正处于产业缓冲期，开展煤系矿产资源综合勘查与评价成为煤炭地质行业发展新方向。近年来，煤系矿产地质勘查和研究不断在煤层中发现具有工业应用价值的锗(Ge)、镓(Ga)、锂(Li)、稀土元素(REE)等新兴战略性矿产资源，煤中金属元素成为我国“三稀”(稀有金属、稀土金属、稀散金属)矿产资源的重要来源。由于受常规以煤为主的煤炭地质勘查因素的制约，忽视了对煤中新兴战略性矿产资源的勘查评价与合理开发，造成了巨大的资源浪费。如何提高煤中金属矿产资源的综合勘查与开发利用，实现资源节约、集约和循环利用是目前煤炭地质工作急需解决的关键问题。本书基于该背景，总结“中国煤中金属元素矿产资源”专题项目成果出版。

“中国煤中金属元素矿产资源”专题属于“煤系矿产资源综合调查与评价”计划项目成果之一，计划项目实施单位为中国煤炭地质总局，项目实施时间为2014~2017年，具体研究内容划入六个工作项目：华北石炭二叠系煤中铝等共伴生矿产资源调查选区及综合利用示范、东北赋煤区煤系锂锗镓等共伴生矿产资源调查选区、鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律与资源评价、青藏高原煤系矿产资源综合调查、华南赋煤区煤系矿产资源调查评价，以及西北赋煤区煤系矿产资源综合调查。中国煤中金属元素矿产资源专题的目的任务为：对全国煤中金属元素矿产资源调查进行综合调查评价，揭示煤中金属元素矿产的赋存特征，研究煤中金属元素矿产资源成矿规律，新发现一批优质的煤中金属元素矿产资源富集区，划分出重要的成矿区带和远景工作区，为我国煤系矿产资源的综合勘查和综合开发提供科学依据。

本书基于对“中国煤中金属元素矿产资源研究”专题研究成果的高度凝练而成。充分利用60多年来煤炭地质勘查资料4037份，并补充采样3870件，经归纳总结、综合分析和提升，将煤中金属元素概念上升至煤中金属元素矿产资源概念，从而整体上把握对中国煤中金属元素矿产资源的认识，揭示煤中金属元素分布与赋存规律，更好地服务于煤中金属元素矿产资源的勘查评价与合理开发。本书成果可以视为21世纪以来中国煤中金属元素矿产资源研究的阶段性总结，其研究进展主要体现在以下方面。

1. 提出煤中金属元素矿产资源概念，总结煤中金属元素研究方法

从富集程度、经济性角度出发，分煤中金属元素、煤中金属元素矿产资源和煤(基)型金属矿床三个层次，提出煤中金属矿产资源概念；从样品采集、测试方法和综合研究等方面，梳理总结了煤中金属元素研究方法。

2. 分析我国煤中金属元素时空分布特征

本书广泛收集和综合分析煤中金属元素测试数据，估算了我国煤中金属元素含量背景值，研究分析了我国煤中金属元素(铝、锆、镓、锂、稀土元素)的时空分布特征，以及主要成煤时代煤中金属元素富集成因。

3. 初步摸清我国煤中金属元素矿产资源家底

利用煤中金属元素综合评价参考指标作为标准，初步摸清了我国煤中铝、锆、镓、锂、REE 金属元素矿化点的分布。对我国典型煤中金属元素矿床：临沧和乌兰图嘎煤-锆矿床、准格尔煤-镓矿床、平朔煤-镓-锂矿床开展调查研究，并对具有进一步研究价值的四个煤中金属元素矿产资源重点调查区(内蒙古伊敏煤田五牧场矿区煤-锆调查区、山西晋城矿区煤-锂调查区、新疆准东煤田大井矿区煤-镓调查区和广西扶绥煤田煤-锂调查区)煤中的金属元素矿产资源富集分布特征进行研究，探讨了煤中金属元素赋存状态以及成因机制。

4. 初步估算具有成矿前景矿区的煤中金属元素矿产资源量

本书预测了伊敏煤田五牧场矿区煤中锆和准东煤田大井矿区煤中镓金属矿产资源量：五牧场矿区达到最低边界品位的锆资源量估算结果为 6903.07t，达到最低工业品位的锆资源总量为 135.38t；准东煤田大井矿区煤中镓的预计总储量为 68.81 万 t，其中贫矿储量为 3.59 万 t，富矿储量为 38.43 万 t，极富矿储量为 26.79 万 t。

5. 划分我国煤中金属元素成矿区带

结合大地构造、岩浆热液、沉积环境等控制因素，划分了八个煤中金属元素矿产资源成矿区带，圈定了十个地质工作远景区，分析地质工作远景区地质特征、煤中金属元素矿产资源分布，探讨成矿区带煤中金属元素矿产资源富集成因，为成矿区带煤中金属元素找矿提供地质理论依据。

本书由宁树正担任主编，各章节的撰写分工如下：前言由宁树正、吴国强、袁同兴撰写；第一章由宁树正、赵鲁阳、邓小利撰写；第二章由朱士飞、秦云虎、闻明忠、张静撰写；第三章由黄少青、邓小利、秦国红撰写；第四章由宁树正、秦国红、张建强、黄少青撰写；第五章由邓小利、陈磊、黄少青、祁文强、李聪聪、章伟撰写；第六章由李聪聪、曹代勇、邓小利、朱华雄、章伟、乔军伟、黄少青、祁文强撰写；第七章由吴

国强、陈磊、祁文强、邓小利、朱士飞、霍婷撰写，全书由宁树正统稿。

本书是在“煤系矿产资源综合调查与评价”计划项目工作基础上完成的，是参加煤系矿产资源综合调查与评价全体技术人员共同研究的成果，并且该专题成果获得 2017 年度中国地质学会“十大地质科技进展”。本书研究得到中国地质科学院、中国煤炭工业协会、国土资源部矿产资源储量评审中心、中国地质调查局发展研究中心、中国地质调查局油气资源调查中心、中国煤炭地质总局及各项目承担单位领导和技术人员的支持，对研究工作的顺利开展起到至关重要的促进作用。

感谢中国地质调查局发展研究中心谭永杰教授级高工，国土资源部矿产资源储量评审中心杨强研究员，中国地质学会郝梓国研究员，中国科学院大学侯泉林教授，中国矿业大学秦勇教授，河北工程大学孙玉壮教授，中国矿业大学(北京)代世峰教授、赵峰华教授，中国地质大学(北京)唐书恒教授、黄文辉教授，中国科学技术大学刘桂建教授等专家学者在专题研究、评审验收过程中给予的指导和帮助。

本书参考了大量的煤炭地质勘查成果报告资料，同时引用了煤微量元素地球化学方面许多学者的论著数据和中国煤炭地质总局历年完成的煤系矿产资源相关项目成果，在此向这些作者和煤系矿产综合调查与评价项目全体技术人员表示感谢！

借本书出版之际，作者感谢曾给予支持和帮助的所有单位和个人！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者提出宝贵意见，以便修改完善。

作者

2018 年 11 月

目录

前言

第一章 绪论	1
第一节 煤中金属元素及其矿产资源的概念	1
第二节 国内外研究历史与现状	2
第三节 煤中金属元素矿产的研究意义	5
第二章 煤中金属元素矿产研究方法	10
第一节 样品采集与评价	10
第二节 测试分析方法	16
第三节 数据统计分析方法	29
第四节 综合研究方法	37
第三章 煤中金属元素概述	41
第一节 煤中铝	41
第二节 煤中镓	43
第三节 煤中锗	45
第四节 煤中锂	48
第五节 煤中稀土	50
第四章 中国煤中金属元素时空分布	53
第一节 华北赋煤区石炭系—二叠系、侏罗系	53
第二节 东北赋煤区白垩系	67
第三节 西北赋煤区侏罗系	76
第四节 华南赋煤区二叠系	80
第五章 煤中金属元素异常分布特征	90
第一节 煤中金属元素富集异常点分布	90
第二节 煤中金属元素矿床	109
第三节 煤中金属元素潜在矿床	125
第六章 煤中金属元素矿产资源成矿区带	176
第一节 地质地球化学背景	176

第二节 成矿区带划分方案	210
第三节 主要成矿带地质特征	216
第四节 主要地质远景区地质特征	230
第七章 煤中金属元素矿产资源展望	254
第一节 煤中金属元素矿产资源利用现状	254
第二节 煤中金属元素矿产资源前景	274
第三节 建议	280
参考文献	285

绪 论

煤中金属元素种类众多,地壳中有质量分数统计的元素共 88 种(黎彤,1992),现有的测试技术已经从煤和从煤中解吸出来的气体样品中检测到 86 种元素,其中金属元素(含过渡元素)有锂、铍、钠、镁、钙、铝、镓、锗、锡、铟等共 65 种(图 1-1)(代世峰,2002;唐修义,2004;丁睿,2009;李雷等,2014)。

图 1-1 煤中金属元素种类(据唐修义和黄文辉, 2002, 有修改)

《矿产资源综合勘查评价规范》将(共)伴生矿产分为矿石矿产、矿物矿产和元素矿产三类,而且将(共)伴生元素矿产定义为含量低、呈分散状态存在、可以附带回收的(共)伴生有用组分。在开展中国地质调查局地质调查计划项目“煤系矿产资源综合调查与评价”和国家矿产资源储量标准体系建设项目“含煤岩系矿产综合勘查评价研究”的过程中,笔者对煤中金属元素的研究现状进行了系统梳理,并从富集程度、经济性角度出发,对煤中金属元素分三个层次进行了量化定义:①对于含量低、呈分散状赋存在煤中且未达到综合评价参考指标的金属元素,称为煤中金属元素;②在特定的地质作用下,对于赋存在煤中的达到综合评价参考指标,并在当前技术经济条件下可以从煤层、夹矸或煤层的围岩中开采利用的金属元素,称为煤中金属元素矿产资源(即伴生矿产);③在特定的地质作用下,对于赋存在煤中达到边界品位或工业品位,并在当前技术经济条件下可以从煤层、夹矸或煤层的围岩中开采利用的金属元素,称为煤基(型)金属矿床(即共生矿产)。通过近年来的工程实践与研究发现,常见的易形成煤中金属元素矿产资源或煤基(型)金属矿床的元素有镓、锗、锂、稀土元素(REE)、钒、铝、铋、锡等,基于目前掌握的资料,本书对上述前四种有经济价值或潜在经济价值的国家战略性矿产和煤中铝元素矿产资源进行重点研究。

第二节 国内外研究历史与现状

一、国外研究现状

国外对煤中金属元素矿产资源的研究起步较早,始于20世纪二三十年代。1927年,Ramage在研究英国Nowich煤气工厂烟尘时,在利用发射光谱研究煤的过程中,在煤中发现了锂元素。1930年,Goldschmidt首先发现煤中含有锗。同年,Goldschmidt研究了德国西部烟煤及其加工产物中的镓,认为按照镓的地球化学性质及其氧化物和硫化化合物的挥发性,煤中镓应当在煤尘中富集。Goldschmidt和Petes(1933)从英国达勒姆矿区的烟煤煤灰中检测到锗含量高达1.1%,这使得从煤灰中提炼锗成为可能。

20世纪50年代以来,国外众多学者研究发现,世界上工业用锗50%以上来自煤,其余来自其他矿产(如铅锌矿床)。英国、美国、澳大利亚、日本、苏联等各国对煤中锗的调查研究尤为重视,在苏联的Angren河谷(乌兹别克斯坦)首次发现了锗富集的煤矿床,随后在俄罗斯很多地方都发现了比Angren矿床中锗含量或全锗资源更高的类似矿床。苏联检测到世界上煤中锗的含量最高值为6000 $\mu\text{g/g}$ (Seredin and Finkelman, 2008)。另外,自20世纪50年代波兰Grzymek教授以高铝煤灰为主要原料从中提取氧化铝并利用其残渣生产水泥以来,随后许多学者对粉煤灰提铝技术做了大量研究。

20世纪60年代至今,苏联/俄罗斯都把富锗煤当作锗的主要来源,从而进行了大量的研究工作。60年代到80年代,在Novikovsk矿床共开采了850t的锗,仅1987年该矿

床生产出的锆产品就高达 60t(Höll et al., 2007)。

20 世纪 70 年代以来,国外有众多学者对煤中的富铝矿物进行了研究。Ward(2002)认为在个别煤中可以存在痕量的勃姆石,但高含量的勃姆石在煤中是非同寻常的。Tatsuo(1998)在日本北海道的石狩湾煤田古近纪煤的低温灰化产物中发现了含量很少的勃姆石。

20 世纪 80 年代,越来越多的学者关注煤中微量元素的含量分布特征。1980 年,在美国地球化学委员会组织编写的《与环境质量与健康有关的煤中微量元素地球化学》一书中就列出了煤中锂含量的世界平均值为 $15.6\mu\text{g/g}$ 。自然界中绝大多数煤中锂的含量很低并且分布极不均匀,多数煤中锂的含量均值小于 $20\mu\text{g/g}$,美国煤中锂的算术均值为 $16\mu\text{g/g}$,澳大利亚出口煤中锂的算术均值为 $12\mu\text{g/g}$,苏联煤中锂的算术平均值仅为 $6\mu\text{g/g}$ 。Valkovic(1983)计算了世界煤中稀土元素含量平均值。Finkelman(1993)梳理了美国煤中的稀土元素含量。Birke 和 White(1991)对加拿大悉尼盆地煤中的稀土元素含量进行了测定。Seredin 和 Finkelman(2008)对世界各地“多金属煤”进行了详细描述,主要是煤中富集高浓度的稀有金属(锆、镓、稀土等)。Ketris 和 Yudovich(2009)统计的世界煤中镓的平均含量为 $5.8\mu\text{g/g}$,在煤燃烧后产生的飞灰中,镓的含量可达到 $100\sim 500\mu\text{g/g}$ 。

21 世纪初, Sereidin 和 Finkelman(2008)对全球的富锆煤矿床进行了综述。近年来,随着全球能源需求的转变,使得对煤系矿产资源的研究变得尤为重要,也引起了越来越多学者的关注。Wang 等(2014)对煤中的稀土元素的地球化学特征及分馏特征进行研究。Gallegos 等(2015)、Klus 等(2016)分别研究了利用双脉冲激光诱导击穿光谱分析砂岩型铀矿矿石中铀的多元方法,以及美国怀俄明砂岩型铀矿床利用持续的 U(IV)和 U(VI)在原位恢复(ISR)开采中的应用。Kumar 和 Kumar(2016)对煤系矿产资源的演化及保存条件进行了研究。Betz 等(2015)在 *Energy Economics* 发表了关于采矿、经济发展及能源矿产的研究,对现今煤炭以及(共)伴生矿产开采形式进行了研究,并对其今后的发展前景进行了思考。另外,也有众多学者对煤系矿产资源的特征进行了研究(Ahmed and McKinney, 2005; Camargo et al., 2014; Vedachalam et al., 2015; Becker et al., 2016)。

二、国内研究现状

我国对煤中金属元素矿产资源的分布与赋存特征研究相对较晚。从 20 世纪 60 年代开始,我国才开始逐步关注煤中的金属元素矿产资源,并对部分煤中金属元素矿产资源的分布与赋存等进行了相关研究。21 世纪以来,越来越多的学者、研究单位开始重视煤中的金属元素矿产资源,并先后开展了一系列研究,除了资源分布,对赋存机理的研究也日趋增多,并取得一系列的成果。

随着国家对锆资源的重视,也有很多学者对煤中锆进行了深入研究。汪本善(1963)在研究我国煤中锆的成矿条件时提出,含煤锆一般堆积在大地构造稳定地块与活动带之间的过渡地区,煤系沉积时构造活动状况也会影响煤中锆的聚集,异地生成的煤一般比原地生成的煤含锆高。张淑苓等(1984)研究云南帮卖盆地煤中锆的存在形式时认为主要

有三种存在形式：①与有机质呈紧密的化学结合，常以腐殖酸锆络合物及锆有机化合物；②呈吸附状态，部分有机质、黏土矿物及褐铁矿吸附锆；③极少部分呈类质同象形式存在。戚华文(2002)对临沧超大型锆矿床热水沉积成因进行研究时指出矿床的成因。研究表明，临沧锆矿床第二含煤段(N_1b^4)的无矿煤形成于正常沉积的泥炭沼泽相环境，第一含煤段含矿煤(N_1b^2)形成于快速沉降的泥炭沼泽环境，含矿煤遭受了热水作用的影响； N_1b^2 中的层状硅质岩和薄层含炭硅质灰岩属热水沉积成因；煤中锆来自于基底的二云母花岗岩，形成锆矿化的 N_1b^2 煤层可见丰富的电热水溶液带入的层状硅质岩和含炭硅质灰岩。黄文辉和赵继尧(2002)在研究内蒙古胜利煤田煤-锆矿床元素地球化学性质时指出，锆元素的富集与碱性元素的相对富集呈正相关，轻稀土元素(LREE)、重稀土元素(HREE)分异度较大，轻稀土元素较为富集，随锆含量的递增，轻稀土元素由富集逐渐减弱，重稀土元素逐渐出现较弱富集；锆含量与稀土元素、轻稀土元素负相关，锆含量与灰分指数呈负相关关系。成煤沼泽中比较平静停滞的水文条件有利于溶液中的锆被有机质充分吸附。煤-锆矿床的稀土元素地球化学特征具有继承性，稀土主要来自物源区的无机物质，胜利煤田西南部盆缘的岩石富含锆，可能就是煤-锆矿床中锆的原始来源。锆源母岩区锆的供给和锆进入成煤沼泽后的水文地质条件对锆在泥炭中的富集具有控制作用。

对于我国煤中镓的赋存机理，众多学者对其进行了探讨。代世峰等(2006a, 2006b)在研究内蒙古准格尔超大型镓矿床时对主采6号煤层的矿物学和地球化学进行了研究。结果表明，镓在全层煤样中的含量均值和在主采分层(亦是镓富集的分层)中的含量远超出煤中镓的工业品位。煤的高温(550℃)灰化产物中镓亦显著富集。煤中超常富集的勃姆石是镓的主要载体。刘新花等(2009)在研究古交邢家社勘探区煤中镓的分布及其地质影响因素时指出，研究区煤中镓的加权平均质量分数要比全球平均值要高0.5~3倍；煤层层位降低，镓含量呈明显的递减趋势。同时，煤中镓含量与灰分产率、灰分组成、硫含量及煤层厚度也有明显的相关关系。这些特征表明，区内煤中镓的矿物载体主要为黏土矿物，水动力较强和还原性较弱的泥炭沼泽条件可能有利于镓在煤中富集，且成煤期地壳的稳定程度也可通过一定方式影响到煤中镓的富集。黄婷等(2013)在研究保德杨家湾勘查区煤中镓时指出，煤中镓含量与灰分、灰成分氧化铝含量正相关，与灰成分氧化钙、氧化硫、氧化铁含量负相关，表明煤中镓的主要载体是黏土矿物和铝的氢氧化物，而黄铁矿、磷灰石等原生矿物中贫镓，镓的主要来源是北部阴山的中酸性火成岩。还原性较弱、水体动荡的沼泽环境利于煤中镓富集。

李华等(2014)在研究山西平朔矿区4号煤中锂、镓资源成矿地质特征时，发现区内4号煤锂的平均含量远大于中国煤中锂含量的平均值。4号煤中锂、镓富集可能是与矿区位于不畅通的海湾地带，海水作用较小有关，同时物源供给丰富，后期适宜的古气候条件，风化、剥蚀、搬运、溶蚀、淋滤等作用使黏土中钙、硫等流失，铝、硅、锂、镓等富集。刘帮军和林明月(2015)在研究山西平朔矿区9号煤中锂的富集机理及物源时，通过逐级化学提取表明，锂的富集主要与高岭石、勃姆石、绿泥石族矿物及无定形黏土状

矿物等无机物有关,只有约 5.5%的锂具有有机亲和力,在含锂煤层中,锂可能被黏土矿物吸附。据古地理资料推断,9 号煤中锂的最初来源可能是阴山古陆,盆地北部本溪组中的铝土矿是锂的直接来源。

Dai 等(2012a)报道了中国煤中微量元素的含量。Tang 等(2013)研究了原煤及粉煤灰中微量元素的分布特征。代世锋等(2014)以煤-锆、煤-镓、煤-铀、煤-铋、煤-稀土元素等煤型稀有金属矿床为例,论述了煤金属矿床的地质成因、赋存状态和利用评价方法。随着对煤中金属元素研究的愈加深,也有很多学者对煤中金属元素的赋存状态、富集机理、迁移过程中的副产物等进行了研究。此外,随着内蒙古准格尔超大型镓矿床、云南临沧和内蒙古乌兰图嘎煤-锆矿床、平朔矿区煤伴生超大型锂镓矿床的报道与研究,越来越多的学者发现,煤是一种具有还原障和吸附障性能的有机岩和矿产,在特定的地质条件下,可以成为煤中金属元素共存富集的载体,并达到可利用的程度和规模。

2008 年,中国煤炭地质总局、中国矿业大学对“首批煤炭国家规划矿区煤中镓的成矿前景”进行了研究,对分布于山西、陕西、内蒙古三省(区)19 个首批煤炭国家规划矿区煤中镓进行了资源调查,预测了煤中镓的资源状况及其分布规律,初步讨论了煤中镓矿床的规模和成矿前景。

2010~2013 年,中国煤炭地质总局开展了“中国煤系共伴生矿产资源评价”,分析了主要矿种在时间上和空间上的分布特征。2014 年,中国地质调查局地质调查项目和国家自然科学基金开展了“煤系伴生的锂镓等‘三稀’金属元素富集机理及综合开发利用”研究,揭示了宁武煤田超大型煤矿中伴生的锂-镓矿和准格尔煤田超大型煤矿中伴生的锂矿床的分布规律,创建了成矿模式。

第三节 煤中金属元素矿产的研究意义

21 世纪以来,面对不断攀升的矿产资源需求和生态环境的压力,世界各国一方面积极寻求降低能耗、减少排放的途径;另一方面加大矿产资源综合勘查开发力度,优化矿产资源生产和消费,促进生态社会发展。习近平总书记在十九大报告中也明确指出:“必须坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针,形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式,还自然以宁静、和谐、美丽。”人类生态文明已经进入节约集约利用资源、保护生态环境为核心的新阶段,大资源观从保障资源供给向促进资源节约、提高综合利用转变,推进多种资源的综合勘查,促进能源资源利用减量化。国际能源合作“一带一路”最新构想的重要内容,也要求加大煤炭、油气、金属矿产等传统能源资源勘探开发合作,促进“一带一路”沿线国家煤炭产业绿色综合发展。

煤炭是我国最主要的一次性能源,且未来若干年内,煤炭作为主导能源的地位不会改变。近几年由于资源需求对煤炭研究程度的转变,发现煤炭是一种特殊的具有吸附障和还原障性能的矿产,在特殊的地质条件下,可以富集如锂、镓、锆、铀、稀土、金、

银、铋、铯等金属元素，并达到可利用的程度和规模，并且目前发现的煤中锗、镓等矿产资源已在其总资源量中占有重要的比例，综合开发利用富集金属元素的煤炭资源具有巨大的潜在经济价值和战略意义。

一、满足煤炭资源绿色开发和资源综合利用的要求

2014年以来，《关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》《工业领域煤炭清洁高效利用行动计划》《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020年)》相继出台。2016年3月16日，科学技术部发布了《关于发布国家重点研发计划高性能计算等重点专项2016年度项目申报指南的通知》，公布了10个重点专项2016年度项目申报指南，“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”位列其中。

《全国矿产资源规划(2016—2020年)》规定“强化对钨锡、铜、铅锌、铝、煤等矿产中共伴生稀散金属资源的综合评价与开发利用，实现有用组分梯级回收”，“加强焦煤肥煤等稀缺和特殊煤种、晶质石墨、稀有稀散金属等战略性新兴产业矿产的保护，明确资源开发利用效率准入条件，确保优质优用”，“在资源分布集中地区，探索优势资源勘查、保护与合理利用新模式。对当前无法合理利用的矿产和尾矿资源，严格限制开发，避免资源破坏和浪费”。国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)会同有关部门制定的《循环发展引领行动》(发改环资[2017]751号)强调“开展金属矿产综合开发利用试点示范”，要求“继续推进煤矿、高岭土、铝矾土、磷矿等共伴生非金属矿产资源综合利用”。

煤炭是我国最重要的基础能源和原料，在我国一次能源结构中，煤炭将长期作为主要能源。将煤炭开发好、利用好是从实际出发、尊重我国能源禀赋特点的最现实选择，尤其更要重视煤中金属元素勘查开发利用：一是要明确开发和利用的空间布局和时序，明确勘查、保护和储备的范围；二是要依规划科学调控开采总量和矿业权投放总量；三是在资源管理和开发程序上，对高有益元素煤实行保护性开采，要求矿权所有人充分考虑高有益元素富集成矿的事实，在煤炭使用消耗时，能够实现共同开发煤及煤中有益元素的综合利用，制定符合保护性开发要求的针对性措施；四是要考虑高有害元素煤炭在开发、加工、利用过程中会释放出大量的有害物质，对环境造成程度不等的污染，从而破坏了人们赖以生存的环境条件。上述问题得以妥善解决的前提是必须从源头上考虑特殊高元素煤资源的综合勘查、综合利用。

二、缓解锗、镓、锂等战略性矿产的供需矛盾

煤炭不仅具有能源属性，同时还是一种复杂特殊的多孔还原性介质，具有很强的吸附功能，使煤炭成为锗、镓、锂等稀有元素的载体，并在有利的成矿条件下富集成矿。例如，目前已经发现并已经开发利用的内蒙古乌兰图嘎、云南临沧煤-锗矿床、准格尔黑岱沟煤-镓矿床。

西方发达国家将锗、镓、铀、锂、稀土等新兴战略性矿产资源视为21世纪的战略物

资,已经加以资源保护和战略储备。国外政府机构、发达矿业大国、国际学术组织和科研机构相继出台了一系列针对“三稀”矿产资源的战略规划和研发计划。例如,2009年德国发布了《新兴技术对资源的需求》,预测和制定了到2030年未来新兴产业对分散金属资源需求和应对策略;2012年,美国地质调查局发布了《能源和矿产资源科学战略(2013—2023)》(USGS,2012),报告重视对新兴能源和高技术型矿产的需求,把锗、镓、锂、铯、稀土等新兴产业所需的矿种作为研究重点,加强对这些矿种的资源分布、成矿条件、地质演变和矿床类型等方面的研究。

随着世界工业的发展、国防的加强和战略物资储备的增加,导致战略性金属矿产供需形势紧张。我国战略性矿产资源储量在世界上占有较大比例,目前我国是世界上战略性金属矿产资源的供应大国,也是战略性金属资源的消费大国,为应对国际战略性矿产资源供需形势,通过“十三五”国家科技创新规划明确提出了“研究稀有金属、稀土元素及分散元素构成的矿产资源保护性开发技术”,将战略性矿产资源的研究和利用上升到国家战略层面。因此,如何加快战略性矿产资源找矿突破、增强战略性金属作为战略性矿产资源的保障能力,已成为国内外关注的焦点。

随着新兴产业与清洁能源的发展,我国对锗、镓、锂和稀土等金属的需求很大,现有产量远不能满足发展的需要。煤中赋存锂、镓和稀土等矿产资源潜力巨大,然而,长期以来,我国对煤中伴生战略性金属的富集规律和开发利用并未得到应有的重视,导致富含战略性元素的煤炭在我国正以每年数亿吨的速度被当作燃料消耗,煤中这些宝贵的可利用元素多被废弃。已经发现并开发利用的煤中元素富集成矿仅有屈指可数的几处:乌兰图嘎煤-锗矿床、云南临沧煤-锗矿床,准格尔黑岱沟煤-镓-稀土矿床、山西平朔矿区煤-锂-镓矿床(点)和柴北缘赋煤带中铷-铯异常富集区。

因此,如何加快这些特殊元素高富集的煤炭资源找矿突破,掌握煤中金属元素资源量,评价煤中金属元素成矿潜力,也是对战略性矿产资源的有益补充,所以开展煤中金属元素资源调查迫在眉睫。

三、煤中锗、镓、锂等元素矿产综合利用前景广阔

近年来,煤中(共)伴生多种矿产之间的成因联系已越来越引起学者的重视,成为新的研究热点。煤中铝和镓矿床的发现及实验工厂的实施,让煤中有益金属元素的提炼、传统或替代能源选择的向前迈出了重要一步。煤型金属矿产资源找矿进展及其开发利用,使煤型金属元素在其矿产资源类型中所占分量越来越重。历史上,煤和金属生产工业基本没有联系,但是曾经有两个重要的成功实例,它们促进了这两个工业和经济的发展。第一个成功的实例是从煤中提取铀,成为美国和苏联在第二次世界大战后核工业发展和建立的基础;第二个成功的实例是从煤中提取锗。现今,从煤中提取的锗是世界上锗工业的主要来源,世界上锗消耗量的一半以上来自煤。

我国煤中发现了大量具有经济价值的伴生金属元素,有些已经达到矿床规模并且已经开发利用。1974年,内蒙古乌兰图嘎发现煤层中共生有较高品位的锗矿产,并

于后续多次勘探中获得锗资源/储量 1690.31t。在云南临沧帮卖、腊东、沧源芒回、潞西四个矿区内,根据煤田勘探估算锗储量共计 2177t,其中帮卖的大寨和中寨储量约 1620t。2010 年,我国内蒙古准格尔发现了一个世界上独特的与煤伴生的超大型镓矿床,据估算该矿床镓的保有储量为 85.7 万 t,这一发现造成金属镓的全球储量巨变,中国镓资源/储量上升至世界总量的 95%以上。2013 年,中国煤炭地质总局特种技术勘探中心“山西平朔地区煤中锂镓资源调查评价”项目取得重大成果,首次和平朔煤炭生产基地发现伴生超大型锂矿,估算平朔矿区煤中锂的资源量为 107.25 万 t,镓资源量为 16.52 万 t。

另外,我国对煤中锗、镓、稀土等的工业提取已进入一个新的发展阶段,部分地区已形成一定的产能。2015 年,六盘水市国内首条可以综合提取铝、硅、铁、钛、镁等有价值元素的煤矸石资源化利用生产线实现投料生产,目前可年处理煤矸石 5000t。经过一期项目近两年的试运行,验证了工艺流程均能按实验标准运行,铝收率可达 92%、铁收率可达 97%。2004~2017 年,神华准能集团有限责任公司创建了粉煤灰中有价元素盐酸法协同溶出、分离纯化及高值化利用工艺技术体系,攻克了盐酸浸出分离纯化、适应工艺的材料和设备、环保重大技术难题,在世界首次研发出了粉煤灰中有价元素高值化利用的“一步酸溶法”工艺技术,主导建成了世界首个粉煤灰盐酸浸出法每年生产 4000t 氧化铝及配套镓工业化中试装置,正在筹建工业化示范项目。

正在建设的煤炭绿色开采及伴生资源综合利用示范基地,目前还未进入全面达产阶段,一旦粉煤灰中提取锂、镓、稀土达到产业化程度,国家相关的产业政策会有一些的变化,将会有力地推动这一行业的发展,这就要求我们开展相应的重点调查区煤中锂、镓等金属资源验证调查工作,查明煤中富集锂、锗、镓等元素成矿的可能性,进一步摸清高元素煤矿产资源/储量“家底”,为我国煤中(共)伴生矿产资源产业的发展提供支撑。

四、煤中金属元素矿产资源调查满足矿产资源保护开发的要求

煤炭作为我国基础能源的地位较长时间不可能改变,加大能源结构调整,控制煤炭消费总量是我国能源发展战略的必然选择,但从我国能源资源赋存特点来看,在今后较长时期内,煤炭仍是我国主体能源。

近年来的煤炭地质勘查和研究中,不断在煤层中发现具有工业应用价值的锗、镓、锂、稀土等新兴战略性矿产资源,但是由于受常规以煤为主的煤炭地质勘查因素的制约,忽视了对煤中锂、镓等金属元素富集成矿的勘查,导致相关矿产资源的勘查评价与合理开发没有得到重视,造成了资源的巨大浪费。造成煤中金属矿产资源浪费的原因一方面是对富含锂、锗、镓等金属元素的煤炭资源开发利用工作没有形成具体规划;另一方面是针对类似特殊高元素煤的资源勘查工作没有实质性开展。随着工业的发展,锂、锗、镓等矿产资源的经济价值越来越高、战略意义越来越大。如何加强煤中金属元素矿产资源的综合勘查与开发利用,实现资源节约和循环利用是目前煤炭资源勘查工作急需解决