科学通报 2019 年 第 64 卷 第 24 期: 2501 ~ 2513
香山科学会议专栏 论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
第630次学术讨论会·新兴关键矿产资源

中国煤中金属元素成矿区带

宁树正[1*], 黄少青[2*], 朱士飞[3], 章伟[4], 邓小利[5], 李聪聪[6], 乔军伟[6], 张建强[2], 张宁[5]

1. 中国煤炭地质总局, 北京 100038;
2. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039;
3. 江苏矿产地质设计研究院, 徐州 221006;
4. 中国煤炭地质总局浙江煤炭地质局, 杭州 310021;
5. 中国煤炭地质总局第一勘探局, 邯郸 056004;
6. 中国煤炭地质总局航测遥感局, 西安 710054

* 联系人, E-mail: nsz0321@126.com; 309859770@qq.com

2019-04-30 收稿, 2019-06-23 修回, 2019-06-25 接受, 2019-08-20 网络版发表
中国地质调查局地质调查项目(DD20160187)资助

摘要 从煤中提取锗、镓等金属已经取得实质性进展, 煤逐渐成为多种战略性金属矿产的主要来源, 但对煤中金属元素矿产资源尚缺乏系统的矿床学理论支撑. 本文在以往煤中金属元素矿产资源研究成果的基础上, 结合野外实地调查, 总结了煤中锗、镓、锂、稀土资源矿化特征, 并以丰富的煤中金属高异常点、区域构造背景及演化、地层沉积环境特征、煤层煤质特征等为依据, 将全国煤中锗、镓等金属元素矿产资源划分为7个成矿区带, 进而讨论了各成矿区带地质特征, 为煤中金属元素矿产资源研究提供地质理论依据.

关键词 煤中金属元素矿产资源, 矿化特征, 富集成矿, 成矿区带, 地质特征

煤是一种具有还原障和吸附障的有机岩矿产[1], 在一些地质条件下可以大量聚集锗、镓、铝、稀土、锂、钒、钛、钨、钡等金属元素, 有些金属元素在煤中, 特别是在煤灰中的含量有时会达到甚至高过这些金属常规矿床的品位, 达到能够提取利用的含量及规模. 随着工业、电子信息行业发展对具有特殊工艺性能的金属原材料, 如锗、镓、稀土、锂、铌等稀散金属原材料需求日益增大, 人们逐渐对煤能够成为一些重要金属原材料的重要来源达成普遍共识, 煤的概念逐渐由化石燃料转化为化石"燃料+矿床"[2].

笔者前期提出了"煤中金属元素矿产资源"概念[3], 定义为"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". 进一步研究发现, 煤中金属元素矿产资源类似于常规金属矿产资源, 受控于构造演化等因素, 同时受控于其载体——煤的性质, 在分布上呈区域状集中分布. 本文按照煤中金属元素矿化特征, 将煤中锗、镓、锂、稀土作为研究对象, 划分成矿区带, 为推进煤中金属元素综合调查评价深入开展提供理论依据.

1 煤中金属元素矿化特征

我国煤炭资源时空分布广, 各聚煤期在成煤植物、古气候、大地构造演化和古环境等方面有其差异性[4], 造就了煤中金属元素矿产资源分布的差异性. 煤中金属元素含量高异常分布点的分布是进行煤中金属元素矿产资源成矿区带划分的重要依据. 本文高异常数据主要有三方面的来源: (1) 本次采样的实测数据. 所有本次样品采集按照GB 482-1995进行, 并按GB

引用格式: 宁树正, 黄少青, 朱士飞, 等. 中国煤中金属元素成矿区带. 科学通报, 2019, 64: 2501–2513
Ning S Z, Huang S Q, Zhu S F, et al. Mineralization zoning of coal-metal deposits in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2501–2513, doi: 10.1360/N972019-00377

© 2019《中国科学》杂志社

474-1996进行了样品制备, 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对煤中锗、镓、锂、稀土等元素含量进行了测试, 测试均在中国煤炭地质总局煤系矿产重点实验室完成. (2) 收集的国内外学者研究、报道的煤中金属元素数据. (3) 大量的数据来源于煤田地质勘探报告中非孤立的煤中元素异常数据, 这些数据的测试手段可能有所差异, 数据的可靠性不如前两种, 但实际应用中却是一种实用的找矿依据.

需要说明的是本文煤中金属异常(矿化)指的是煤(灰)中该金属元素的含量大于该金属矿产常规矿床的边界品位或者实际开发中采用的数值, 其中煤中锗异常指的是煤中锗含量大于20 μg/g[5], 镓为大于30 μg/g[6], 锂为大于120 μg/g[7], 稀土为大于300 μg/g[7].

1.1 煤中锗矿化特征

我国煤中锗资源主要分布在内蒙古早白垩纪及滇西新近纪煤层, 目前开发或研究程度较高的矿床主要有云南临沧、内蒙古胜利煤田乌兰图嘎以及伊敏煤田五牧场煤-锗矿床. 在二连盆地、海拉尔盆地的早白垩低变质煤, 滇西新近纪褐煤中存在丰富的锗异常点, 云南帮买、临沧煤中锗的含量平均值分别达到了587.3[8]和423.0 μg/g[9]; 内蒙古胜利煤田6-1煤层煤中锗含量平均值达到244 μg/g[10]. 另外, 二连盆地白彦花煤田、白音霍布尔矿区、高力罕煤田、乌尼特煤田、巴其北煤田等、海拉尔盆地伊敏煤田、五九矿区、大雁矿区等存在着丰富的煤中锗异常点[3,11]. 这些煤中锗矿床(点)具有如下特点:

(1) 高锗煤主要分布在晚中生代-新生代的小型断陷聚煤盆地. 临沧锗矿床位于帮卖新近纪小型断陷盆地, 乌兰图嘎锗矿位于晚中生代二连盆地群胜利断陷盆地, 五牧场锗矿床位于海拉尔盆地群伊敏断陷盆地. 共同特点是均分布于小型断陷盆地.

(2) 热液作用是高锗煤的典型特征. 临沧锗矿含矿的N^1b^2煤层遭受热水作用影响, 富含热水成因的层状硅质岩及薄层状含碳硅质岩, 而不含矿的N^1b^4煤层则没有[12]; 乌兰图嘎富含锗的6号煤层其煤中硅质矿物主要以胞腔填充的石英为主, 具有明显的热液影响痕迹[13]; 五牧场煤中锗主要富集在热液通道周围, 热液侵入为煤中锗的富集创造了有利条件[14].

(3) 一般仅富集在很小的范围内. 以东北赋煤区为例, 以矿区(煤田)为统计单元, 主要矿区煤中锗含量平均值为1~5 μg/g, 均分布在中国煤中锗含量平均值附近. 即使在典型煤–锗矿床乌兰图嘎所在的胜利煤田和五牧场所在的伊敏煤田, 煤中锗平均值分别为2.63和3.30 μg/g, 没有明显的升高, 胜利、伊敏煤田其他井田, 煤中锗含量平均值均与中国煤中锗含量平均值相差不大, 煤中锗的富集表现为在小范围内聚集; 而乌兰图嘎、五牧场煤中锗富集范围仅为2.6和约10 km^2[11]. 这与Seredin和Finkelman[15]研究世界其他地区富锗煤得出的结论一致.

(4) 富含有机制低变质的褐煤、长焰煤是锗的主要载体: 锗是典型的亲有机质元素[1,8,16], 泥炭沼泽或者低变质的煤中富含有机质, 是锗成矿的既有利场所, 其中的腐殖质很容易将周围游离态的锗元素固定下来, 富集成矿, 目前世界发现的煤-锗矿床均赋存在褐煤、长焰煤等低变质煤中[15].

1.2 煤中镓矿化特征

我国煤中镓资源主要分布在华北赋煤区石炭-二叠纪、华南二叠纪以及西北侏罗纪煤中. 本次研究发现, 辽宁红阳煤田、南票煤田、山西北部的平朔矿区及南部的晋城矿区、陕西的澄合矿区、宁夏石炭井矿区、内蒙古准格尔煤田、青海木里煤田[17]以及新疆准东煤田侏罗系中统[18]煤中镓异常点丰富而且成片连续出现, 华南煤中亦有丰富的镓异常出现[19,20]. 煤中镓异常分布笔者在已发表的文章中有详细论述[3].

煤中镓赋存一般以无机物为主, 少部分赋存于有机质中, 常见于高岭石、勃姆石等含铝矿物中, 表现出随黏土矿和铝土矿层的形成, 镓和铝含量同步增加[21]. 已知的镓矿床多数以风化、沉积、成岩成矿作用机制相关的沉积成因矿床为主, 成矿环境应该具备煤形成的环境, 和铝一同富集在铝土矿物中[22]. 镓的成矿物质来源需要有稳定物源的供给、特殊的构造地质背景, 持续稳定的风化-剥蚀作用和地表水的不断活动地质过程, 创造出分阶段再沉积的古地理环境, 使含镓矿物及岩石不断细碎屑化, 经多阶段泥化-黏土化和铝土矿化及去硅钾等杂质, 各阶段产物分地质时期分解与聚集[21].

1.3 煤中锂矿化特征

我国煤中锂资源主要分布在华北石炭二叠纪以及华南晚二叠纪煤中. 本次研究发现在内蒙古南部准格尔矿区、桌子山煤田、山西北部平朔矿区、南部晋城矿区, 煤中锂异常点成片连续分布, 西南地区南武、松

藻以及扶绥等矿区煤中锂异常点也比较丰富[23]. 其中, Dai等人[24]和Sun等人[25]对内蒙古准格尔矿区煤中锂做了较为详细的研究, 官板乌素矿井煤中锂平均含量达到了263.6 μg/g; 另外中国煤炭地质总局2012年发现, 平朔矿区煤中锂含量最高达840 μg/g, 平均含量达到了212 μg/g.

煤中锂的赋存与煤中的铝硅酸盐矿物有着紧密的联系, 含量与煤灰分产率、Al_2O_3等表现为强烈的正相关性[24], SiO_2/Al_2O_3表现为强烈的负相关性, 表明煤中锂的富集、赋存可能与含铝矿物如高岭石等关系密切[25]. 煤中锂与铝关系密切, 与镓具有相似的成矿条件, 有稳定的含铝、锂物源的供给、特殊的构造地质背景, 持续稳定的风化-剥蚀作用和地表水的不断活动地质过程.

1.4 煤中稀土矿化特征

我国煤中稀土资源主要分布在西南地区二叠纪煤及东北赋煤区二连盆地早侏罗世煤中.

稀土元素进入煤中的途径可以归纳为以下4种[26]: (1) 被地表水带入的陆源碎屑型, 这是大多数稀土元素进入煤中的主要方式, 但是一般含量较低, 目前无实际价值; (2) 被火山灰带入的凝灰质型, 该种方式形成于泥炭沼泽阶段, 伴随火山的喷发与火山灰在泥炭沼泽的堆积. 一般表现为高稀土煤厚度较小, 稀土仅在凝灰岩附近5~10 cm内的煤中富集, 但是分布范围较大, 典型代表就是我国西南地区[19,27,28]及美国肯塔基州高稀土煤[29]; (3) 地下水淋滤型, 这种成矿类型以砂岩型铀矿最为典型, 该种方式形成的高稀土煤一般赋存于煤层靠近顶、底板的位置, 且厚度仅为数厘米, 无实际价值; (4) 热液型, 该种类型稀土元素被热液携带, 在泥炭期或者成煤作用早期以离子态进入煤层(泥炭沼泽), 该种类型一般在全层煤中均表现为稀土元素富集, 且稀土配分模式一般表现为重稀土富集型[15,30].

2 成矿区带划分原则、依据及方案

2.1 划分原则

本次煤中金属成矿区带划分是在前人工作的基础, 充分考虑全国三级成矿区带划分方案[31], 结合煤中金属元素自身特点进行圈定; 成矿区带原则至少包含一个赋煤构造单元[32]; 成矿区带的命名原则上以成矿区带所包含的构造单元简称和成矿元素名称进行命名; 成矿区带边界采用宁树正[32]提出的赋煤构造单元边界, 若包含多个赋煤构造单元, 则以最外面的赋煤构造单元边界作为本成矿区带边界.

2.2 划分依据

丰富的煤中金属元素高异常点是本次成矿区带划分的重要依据, 除此之外, 区域构造背景及演化, 地层沉积环境特征, 煤层煤质特征等也是本次成矿区带划分要考虑的重要依据:

煤中锗成矿区带的圈定还遵循: (1) 成矿区煤应为低变质烟煤(煤类为褐煤或长焰煤); (2) 含煤盆地基底破碎, 区域内断裂发育; (3) 区带内或周边煤系地层内有明显的热液侵入痕迹.

煤中镓成矿区带的圈定还遵循: (1) 区域内有较明确的含镓物源; (2) 物源区具有有利的物源区风化剥蚀条件; (3) 含铝-镓岩层受到较强的淋滤作用.

煤中锂成矿区带圈定还遵循: (1) 区域内有较明确的含锂物源; (2) 物源区具有有利的物源区风化剥蚀条件; (3) 含铝-锂岩层受到较强的淋滤作用.

煤中稀土成矿区带圈定还遵循: (1) 泥炭沼泽的堆积期间区域内或邻近有大规模的火山喷发, 且在含煤系地层有较多凝灰岩存在; (2) 区域在泥炭沼泽期或成煤作用早期存在热液侵入煤系地层.

2.3 划分方案

按照上述的划分原则, 本文将全国煤中锗、镓、锂、稀土等金属元素矿产资源划分为7个成矿区带(图1), 分别为: (1) 二连盆地-海拉尔盆地煤中锗、稀土成矿带; (2) 天山煤中镓成矿带; (3) 阴山南麓煤中镓-锂成矿带; (4) 太行山东煤中镓成矿带; (5) 祁连-秦岭煤中镓-锂成矿带; (6) 川滇桂煤中镓-锂、稀土成矿带; (7) 滇西三江煤中锗成矿带.

3 主要成矿区带地质特征

3.1 二连盆地-海拉尔盆地煤中锗、稀土成矿带

本成矿带位于内蒙古自治区东部, 包含二连赋煤带和海拉尔赋煤带. 二连盆地、海拉尔盆地为由小型断陷盆地组成的盆地群. 煤中锗资源主要集中在下白垩统煤中. 受燕山运动影响, 该区域白垩纪期间岩浆、热液活动频繁[33,34], 对锗元素在煤中的聚集起着至关重要的作用, 破碎的构造为热液提供了畅通的通道, 富

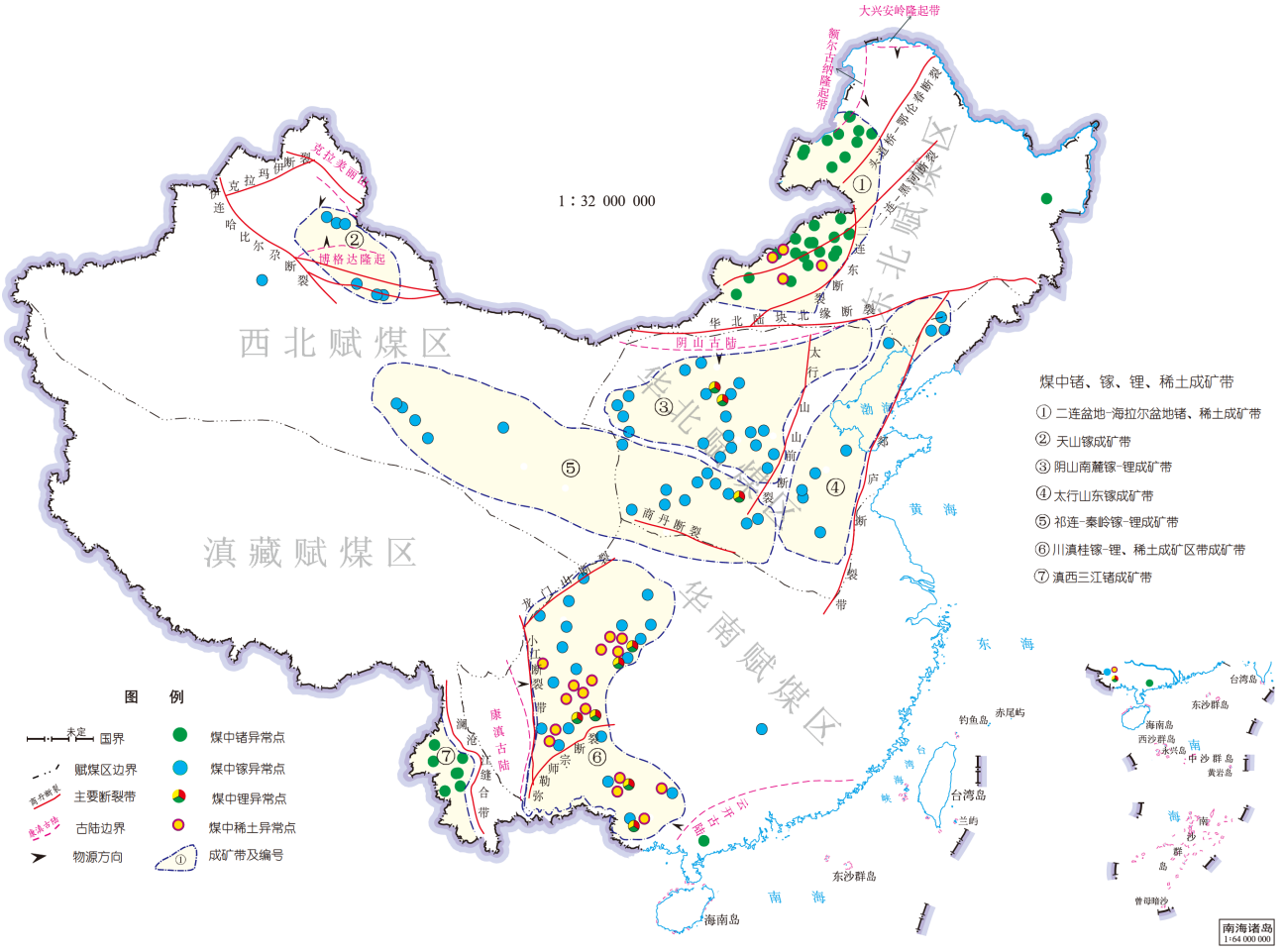


图 1 我国煤中金属元素矿产资源成矿区带划分. 据文献[3]修改
Figure 1 Metallogenic zoning of metallic element mineral resources in coal in China. After Ref. [3]

含有机质的褐煤、长焰煤为锗的聚集提供了极为有利的场所. 该区域目前发现的乌兰图嘎煤-锗矿床、五牧场煤-锗矿床占我国锗资源量的一半以上. 除此之外, 本次新发现煤中锗矿化点众多(表1), 具有良好的成矿前景.

稀土异常主要分布在二连盆地早侏罗世煤中, 其中30里矿6个样品, 最大值为305 μg/g, 平均值209 μg/g; 50里矿4个样品稀土含量最大值为269.07 μg/g, 平均206.5 μg/g; 阿木古楞煤矿10个煤样, 稀土含量最高达1416.21 μg/g, 平均含量达到545.4 μg/g, 煤中稀土的总体含量远大于世界煤平均值[35]. 根据Dai等人[36]提出的煤中微量元素富集系数CC(CC=煤样中稀土元素含量平均值/世界煤稀土元素含量平均值; 10<CC<100, 重度富集; 5<CC<10, 富集; 2<CC<5, 轻度富集; 0.5<CC<2, 正常; CC<0.5, 亏损; 世界煤中稀土含量平均值来自文献[35])(图2(a)), 中、重稀土表现为富集, 钇表现为重度富集; 用Taylor和McLennan[37]提出的上陆壳(UCC)稀土元素含量平均值对二连盆地侏罗、白垩及世界煤中及稀土元素含量平均值进行标准化, 可以看出稀土配分模式图本区域的早白垩煤稀土特征也有较大区别(表2, 图2(b)). 白垩煤与世界煤的稀土配分模式曲线类型基本一致, 且趋于重合, 表明白垩煤与世界煤稀土元素组合类型、元素含量值基本一致. 侏罗煤中稀土配分模式曲线表现为左倾, 煤中稀土元素含量约为上陆壳稀土元素的2~5倍; 内蒙古东乌旗早侏罗世煤中稀土类型特征与Seredin[30]报道的俄罗斯远东地区Luzanovka和Rakovka盆地的煤中稀土类型相似, 表现为整层煤稀土富集, 煤中稀土大于夹矸及顶底板围岩稀土含量, 重稀土相对富集. Seredin[30]认为该种类型高稀土煤热液对稀土元素在煤中的富集起了重要作用, 稀土元素在泥

表 1 二连盆地-海拉尔盆地成矿带煤中锗分布

Table 1 Germanium distribution in coal in Erlian-Hailar metallogenic belts

煤田/矿区	含煤地层	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
巴其北煤田	K_1	6, 7, 8	28	497	4.6	本次实测
白彦花煤田东区	K_1	$1_{上}$, 1, $1_{下}$	18	65.74	4	本次实测
白音华煤田	K_1	2, 3	6	29	18	本次实测
白音霍布尔矿区	K_1	6	13	115	65	本次实测
高力罕煤田	K_1	2, 5	18	57	3	本次实测
乌尼特煤田	K_1	2, 3	13	225	8.1	本次实测
五九矿区	K_1	8, 25	69	65	5	勘查报告
伊敏煤田	K_1	8, 10-1, 10-3, 12, 13-4+5	176	470	43.6	勘查报告

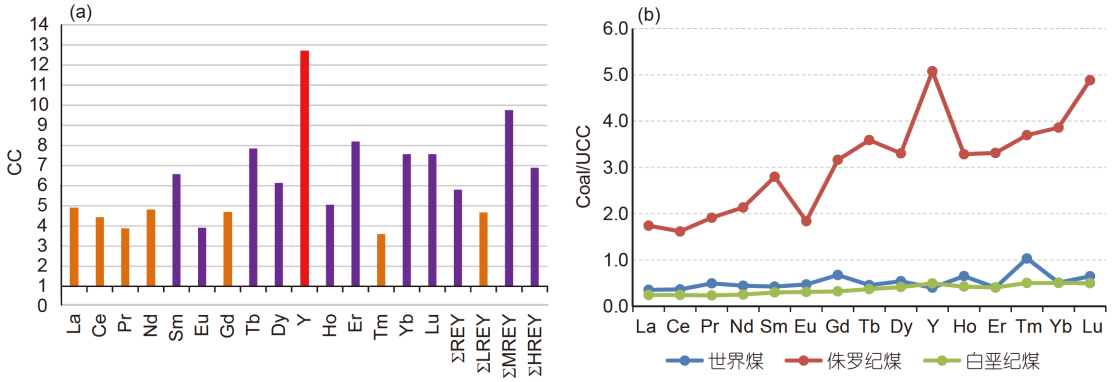


图 2 内蒙古二连盆地侏罗纪煤中稀土特征. (a) 二连盆地侏罗系煤中稀土元素富集系数(CC)图; (b) 二连盆地白垩煤、侏罗纪煤以及世界煤稀土配分模式对比图

Figure 2 Characteristics of rare earth elements in Jurassic coal of Erlian Basin, Inner Mongolia. (a) Concentration coefficient of rare earth elements in Jurassic coal in Erlian Basin (CC); (b) rare earth elements patterns in coal in Erlian Basin

炭沼泽或者成煤作用早期以溶解状态进入煤中，由于有机体对离子态金属的高效的吸附能力[38]，该类型高稀土煤有着良好的成矿前景.

3.2 天山煤中镓成矿带

本成矿带位于新疆北部，主要包含了准东赋煤带，煤中镓异常点集中分布在准东煤田及邻近区域(表3). 准东煤田矿物源岩推测为其东北部的克拉美丽造山带，山体的岩体中Ga元素富集，含量在20~30 μg/g[39]，这是该区域煤中镓富集的一个重要原因. 成煤期潮湿气候一方面有利于物源区风化剥蚀，强的水动力条件能够为泥炭沼泽提供丰富的碎屑物质；另一方面使得分布在煤层上部的泥岩层受淋滤作用增强，覆水的酸性环境下, 有利于从顶板和夹矸的黏土矿物中淋滤出铝, 使下部煤层富集含铝矿物, 导致镓元素富集[18]. 准东煤田物源区岩石性质起关键作用，镓主要以细粒物质(胶体或有机络合物形式)搬运到沉积盆地，在潮湿覆水沉积条件下发生聚积, 成矿潜力巨大.

3.3 阴山南麓煤中镓-锂成矿带

本成矿带包含内蒙古自治区南部. 山西省北部以及河北省的一部分，包含华北北缘赋煤带、伊盟赋煤带、晋北赋煤带、晋西赋煤带、鄂尔多斯盆地西缘赋煤带. 煤中镓、锂主要赋存在石炭二叠纪煤中(表4, 5), 多位学者对该区域煤中镓、锂的富集及成因做了测试及研究[21,22,24,25,40,41]. 中奥陶世华北大陆整体隆升成陆, 富氧的温湿气候使得生物化学风化作用强烈，巨厚碳酸岩形成风化壳，与来自古陆的富含长石的硅酸盐类经强烈物理、化学风化作用，在淋滤中CaO, SiO_2, Fe, S被不同程度带走，使黏土矿层Al/Si比值增大，Ga, Li

表 2 二连盆地侏罗、白垩煤中稀土含量均值(μg/g)[a)]

Table 2 Average value of REYs in coal of early Cretaceous and early-middle Jurassic of Erlian basin, UCC, and world coal (μg/g)

元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REY
侏罗纪煤	53.94	101.9	13.59	57.65	13.15	1.84	12.64	2.51	12.89	106.7	2.73	7.62	1.11	7.57	1.51	397.31
白垩纪煤	7.49	15.27	1.66	6.85	1.40	0.31	1.29	0.26	1.61	10.35	0.35	0.93	0.15	0.98	0.15	49.06
上陆壳	31.00	63.00	7.10	27.00	4.70	1.00	4.00	0.70	3.90	21.00	0.83	2.30	0.30	1.96	0.31	169.10
世界煤	11.0	23.00	3.50	12.0	2.00	0.47	2.7	0.32	2.10	8.4	0.54	0.93	0.3	1.00	0.20	68.5

a) 上陆壳数据来自文献[37]; 世界煤数据来自文献[35]; 侏罗纪煤数据为本次侏罗纪煤样测试稀土含量平均值; 白垩纪煤为本次白垩纪煤样测试稀土含量平均值

表 3 天山成矿带煤中镓分布

Table 3 Distribution of gallium in coal of Tianshan metallogenic belt

煤田/矿区	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
吐哈煤田大南湖东二井田	J_2	18煤除外其他煤	774	247	35.8	勘探报告
吐哈煤田沙尔湖勘查区	J_2	A_1, B_1, C_1, D	10	94	54.0	本次实测
吐哈煤田西南湖戈壁露天矿	J_2	6, 7, 8, 9	40	60.6	29.1	本次实测
准东煤田	J_2	B_1, B_2, C_1	1161	206	33.1	勘探报告

表 4 阴山南麓成矿带煤中镓分布[a)]

Table 4 Distribution of gallium in the coal in the mineralization belt at the South Yinshan Mountain

煤田/矿区	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
准格尔煤田	C_2	6	7	76	51.9	[22]
准格尔哈尔乌素勘查区	C_2	6	\	70	39.5	[42]
平朔矿区	C_2	11	175	57.6	40	[43]
阳泉坪头勘查区	C_2	$9_{上}$	16	34.7	30.2	[42]
河东煤田北部	C_2	8, 13	201	36	\	[44]
河东煤田杨家湾勘查区	C_2	6, 8	17	35	\	[45]
平朔矿区	P_1	4	142	57.3	35.7	[41]

a) \表示对应位置的数值未收集到

随Al的聚集而富集，已在较大面积的古风化壳上具有相当含量富集的镓、锂矿层随基底再次稳定下降被保存成矿. 由于晚石炭-早二叠世华北板块与南蒙古微板块碰撞，导致华北板块北部陆缘构造带由陆缘斜坡带, 大青山造山带盆地和基底逐渐抬升，带动掀斜了鄂尔多斯克拉通盆地东北缘早古生代-晚石炭世本溪组地层(阴山古陆). 本溪组黏土岩高铝含镓、锂地层作为近源, 并在斜坡沉积构造背景下, 高铝含镓、锂物质源集中供给太原组、山西组，使得本区煤层具有较高镓、锂成矿潜力.

3.4 太行山东煤中镓成矿带

本成矿带呈南北状展布，包含了辽宁省、山东省以及安徽省北部地区，主要包含太子河-浑江赋煤带、辽西南赋煤带、鲁中赋煤带、鲁西南赋煤带以及两淮赋煤带. 本区以丰富的煤中镓异常点为特点(表6), 煤中镓主要赋存在石炭-二叠纪煤中. 本溪组高铝含镓黏土岩是作为本区含煤地层的下覆地层，成矿带西邻吕梁古陆, 北邻阴山古陆及华北陆块北缘断裂, 东临郯庐断裂, 区域地下水通道通畅, 镓离子能够在水力作用下向煤层迁移, 具备煤中镓成矿条件.

3.5 祁连-秦岭煤中镓-锂成矿带

本成矿带包含了河南西部、陕西中部、甘肃及青海，包含了嵩箕赋煤带、渭北赋煤带、鄂尔多斯盆地西缘赋煤带、祁连赋煤带、柴北赋煤带. 煤中镓异常

表 5　阴山南麓成矿带煤中锂分布[a)]

Table 5　Distribution of lithium in the coal in the mineralization belt at the South Yinshan Mountain

煤田/煤矿	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
准格尔矿区	C_2	6	33	601.1	114.3	本次实测
准格尔矿区黑岱沟矿	C_2	6	\	657	143	[46]
准格尔矿区官板乌素矿	C_2	6	\	566	264	[47]
准格尔矿区哈尔乌素矿	C_2	6	\	470	116	[24]
桌子山煤田	C_2	16	34	203.1	104.5	本次实测
平朔矿区安家岭煤矿	C_2	9	55	840.1	229.9	[48]
平朔矿区安太堡矿	C_2	9	14	\	144	[41]
平朔矿区井工一矿	C_2	9	5	\	139	[41]
平朔矿区井工二矿	C_2	9	8	\	176	[41]
平朔矿区井工三矿	C_2	9	2	\	96	[41]
平朔矿区王家岭矿	C_2	2	9	245.6	137.2	本次实测
平朔矿区安家岭煤矿	P_1	4	7	195.6	117	[40]
平朔矿区安太堡矿	P_1	4	7	141.2	141.2	[40]
平朔矿区井工一矿	P_1	4	6	199.4	140.6	[40]
平朔矿区井工二矿	P_1	4	6	211.3	112.8	[40]

a) \表示对应位置的数值未收集到

表 6　太行山东煤中镓分布[a)]

Table 6　Gallium distribution in coal of East Taihang Mountain

煤田	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
本溪煤田	C-P	\	14	44.2	20.6	本次实测
红阳煤田	C-P	\	6	43.5	23.5	本次实测
南票煤田	C-P	6煤组	42	41.7	26.2	本次实测
滕县煤田	P_1	$3_{上}$, $3_{下}$	\	170.7	\	[49]

a) \表示对应位置的数值未收集到

点主要分布在山西南部、陕西渭北地区石炭二叠纪煤层, 以及甘肃、青海地区中侏罗煤层(表7). 煤中锂主要分布在晋城、霍西煤田一带, 其中霍西煤田生辉煤矿锂含量11个样品的锂含量最大153.8 μg/g, 平均94 μg/g, 晋城矿区15号煤层的14个样品锂含量最大值为199.2 μg/g, 平均188.1 μg/g. 山西南部、渭北地区煤以本溪组高铝含镓-锂黏土岩也是作为本区含煤地层的下伏地层, 在成煤期有吕梁古陆、中条古陆、霍山古岛等富铝-镓-锂的物源供给, 具有良好的成矿条件; 甘肃、青海地区中侏罗煤中镓富集与祁连山富镓岩体有关, 而成煤期富氧、潮湿且频繁的火山热液活动为该区域煤中镓富集的另一个重要原因[19,50].

3.6　川滇桂煤中镓-锂、稀土成矿带

本成矿带位于我国西南, 主要包括四川、重庆、广西、贵州等, 包含了龙门山逆推断陷赋煤带、川中南部隆起赋煤带、康滇断隆赋煤带、滇东褶皱赋煤带、右江褶皱赋煤带. 我国西南地区聚煤盆地主要以晚二叠世陆相和海陆过渡相沉积为主, 沉积物质主要来源于川滇古陆风化产物, 含煤岩系底部常具有一层厚度约2 m的铝土质泥岩, 煤中镓、锂的含量受控于煤中铝的含量[51]. 物源区玄武岩在湿热气候条件下风化, 硅铝酸盐中的钠、钾、钙、镁等元素以离子态被带出, 接下来铝、硅部分溶解, 在煤系地层形成一系列的黏土矿物, 随铝进入溶液的镓离子使煤系黏土矿物中的镓、锂含量增加, 形成了一系列镓(表8)、锂异常点, 其中煤中锂异常在扶绥煤田、南桐煤田、南武煤田均有发现, 本次检测的最大值分别达到了355, 170.8, 257.2 μg/g. 从该区域煤中镓、锂异常点的丰度, 结合该区域有利的煤中镓成矿条件, 区域具有较大的镓、

表 7 祁连-秦岭煤中镓分布[a)]

Table 7 Distribution of gallium in coal in Qilian-Qinling Metallogenic belt

煤田/勘查区	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
澄合矿区	C_2	11	\	31.2	\	[42]
木里煤田	J_2	M_1, M_2	296	66.2	31.5	本次实测
蒲白朱家河勘查区	C_2	11	\	\	36.9	[42]
阳泉坪头勘查区	C_2	$9_上$	16	34.7	30.2	[42]

a) \表示对应位置的数值未收集到

表 8 川滇桂成矿带煤中镓分布[a)]

Table 8 Distribution of Gallium in coal in the Sichuan-Yunnan-Guangxi Mineralization belt

煤田/矿区	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
松藻矿区	P_3	11	\	\	32	[19]
黔东凯里	P_1	梁山组煤层	\	44	31.7	[20]
贵州矿区	P_3	3号煤	3	97	41.3	《贵州省煤中伴生元素资源普查概况调查报告》
六盘水矿区	P_3	无层号	76	72.5	30.7	
六枝矿区	P_3	7号煤	46	48	29.3	
盘县矿区	P_3	27煤	3	105	37.3	
扶绥矿区	P_3	K_1	6	43.3	32.6	本次实测
南武矿区	P_3	K_1	31	105	27.9	本次实测

a) \表示对应位置的数值未收集到

锂成矿前景.

丰富的煤中稀土异常点也是本区域的重要特点(表9). 中-晚二叠期泥炭的堆积伴随火山的喷发, 富含稀土元素的火山玻璃碎屑落入泥炭沼泽, 相对漫长的泥炭堆积过程及二叠纪西南地区频繁的火山喷发, 使得富含稀土元素的火山灰在泥炭沼泽中堆积形成层状凝灰岩[28,53]. 一些学者认为后期的热液作用(图3, 燧石通常被认为是热液活动的产物)为稀土元素进入煤中提供

表 9 川滇桂成矿带煤中稀土分布[a)]

Table 9 Distribution of rare earth elements in coal in the Sichuan-Yunnan-Guangxi Mineralization belt

煤田/矿区	成煤时代	煤层	样品数(个)	含量最大值(μg/g)	平均值(μg/g)	数据来源
凯里煤矿	P_2	\	7	1380	874	[52]
大方煤矿	P_2	3	\	\	1015	[26]
六枝矿区	P_2	14	\	\	2491	[26]
松藻矿区	P_2	12	\	\	1968	[26]
逢春煤矿	P_2	11	\	\	1929	[26]
同华煤矿	P_2	8	\	\	1004	[26]
石壕煤矿	P_2	8	\	\	886	[26]
扶绥矿区	P_2	1	\	\	1180	[26]
合山矿区	P_2	4	\	\	950	[26]
马河矿区	P_2	C_{6b}	\	\	1234	[26]
双合煤矿	P_2	K_0	\	\	1241	[26]
桃树坪煤矿	P_2	K_{16b}	\	\	1061	[26]

a) \表示对应位置的数值未收集到



图 3 重庆南川上二叠统龙潭组底部凝灰岩样品中的燧石[54]
Figure 3 Flint from the bottom tuff sample of the upper Permian Longtan Formation in Nanchuan, Chongqing[54]

了另一个重要条件[54,55]. 该种类型的煤中稀土异常通常仅出现在与火山灰夹层邻近的煤中, 一般厚度只有几十厘米, 通常表现为强烈的Eu元素负异常, 且同时富集锆、铪、铌等元素[15,56], 并且以这种方式形成的富稀土煤通常分布范围较大, 具有较好的稀土成矿前景.

3.7 滇西三江煤中锗成矿带

本成矿带位于滇西三江地区, 主要包含腾冲-潞西赋煤带. 滇西三江地区分布着众多新生代小型断陷盆地[57], 如帮卖盆地、腾冲盆地、盈江盆地等. 在燕山-喜山期, 由于印度板块向北俯冲, 形成多期中-酸性岩浆活动, 以弧后陆壳重熔花岗岩为主[58]; 区域断裂构造发育, 新生代盆地受基底断层控制, 区域地层破碎, 为区域的热液活动提供了丰富的通道; 区域煤层煤类以富含有机质的褐煤为主, 具备较好的煤中锗聚集成矿条件. 该区域以开发的临沧煤-锗矿床是我国锗的重要来源之一, 近期在大田河煤矿区又发现一处具有较好工业价值的煤-锗矿床[59], 证实该区域具有良好的锗成矿前景.

4 结论

总结归纳了我国主要煤中金属元素矿产的分布规律以及煤中金属富集主要控制因素: 煤中锗成矿主要受盆地类型、热液、煤化程度等因素的影响; 煤中镓、锂的成矿主要与铝的含量密切相关, 受风化壳的影响较大. 能形成有价值矿床的煤中稀土可分为两个类型: (1) 在泥炭沼泽期或者成煤阶段早期热液流体将稀土元素以离子形式带入, 在煤中堆积, 形成富集. (2) 在泥炭沼泽的堆积阶段, 同期喷发且持续时间较长的火山带来的富含稀土的火山灰是煤中稀土富集的另一个重要形式.

将异常点空间分布, 结合矿化特征、赋存特征、富集控制因素为划分依据, 以为煤中金属矿产资源研究、保护、开发提供理论参考为目的, 在全国划分出7个煤中金属元素矿产资源成矿区带: (1) 二连盆地-海拉尔盆地锗、稀土成矿带; (2) 天山镓成矿带; (3) 阴山南麓镓-锂成矿区带; (4) 太行山东镓成矿带; (5) 祁连-秦岭镓-锂成矿带; (6) 川滇桂镓-锂、稀土成矿带; (7) 滇西三江锗成矿带.

煤中锗矿产资源主要分布在内蒙古自治区二连、海拉尔盆地以及云南滇西三江地区的低变质煤中, 岩浆热液影响是其在煤中聚集的重要控制因素. 煤中镓矿产资源主要分布在华北赋煤区石炭二叠纪煤层、西北赋煤区侏罗纪煤层, 华南赋煤区晚二叠煤中, 煤中镓的富集与含铝矿物密切相关. 煤中锂矿产资源主要分布在内蒙古准格尔煤田、山西平朔矿区、晋城煤田以及华南赋煤区部分煤田, 与煤中镓类似, 其在煤中的含量也主要受控于煤中含铝矿物. 煤中稀土主要分布于内蒙古二连盆地早侏罗世煤中以及华南晚二叠煤中, 其中二连盆地煤中稀土很可能是以离子状态在泥炭沼泽期或成煤早期阶段进入煤中, 华南煤中稀土主要与泥炭沼泽同步堆积的富含稀土火山灰关系密切.

致谢 图1涉及的中国地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2019)3322号.

参考文献

1 Dai S F, Ren D Y, Zhou Y P, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation (in Chinese). J China Coal Soc, 2014, 39: 1707−1715 [代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价. 煤炭学报, 2014, 39: 1707−1715]
2 Sun S L, Wu G Q, Cao D Y, et al. Mineral resources in coal measures and development trend (in Chinese). Coal Geol China, 2014, 26: 1−11 [孙升林, 吴国强, 曹代勇, 等. 煤系矿产资源及其发展趋势. 中国煤炭地质, 2014, 26: 1−11]
3 Ning S Z, Deng X L, Li C C, et al. Research status and prospect of metal element mineral resources in China (in Chinese). J China Coal Soc, 2017,

42: 2214–2225 [宁树正, 邓小利, 李聪聪, 等. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望. 煤炭学报, 2017, 42: 2214–2225]
4 Ren D Y, Zhao F H, Dai S F, et al. Trace Elements Geochemistry of Coal (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学. 北京: 科学出版社, 2006]
5 Dai S F. Geological-geochemical Habits and enrichment models of associated elements in coal (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Mining & Technology, 2002 [代世峰. 煤中伴生元素的地质地球化学习性与富集模式. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2002]
6 Huang W H, Zhao J Y. Germanium and gallium in coal of China (in Chinese). Coal Geol China, 2002, 14: 64–69 [黄文辉, 赵继尧. 中国煤中的锗和镓. 中国煤炭地质, 2002, 14: 64–69]
7 Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal (in Chinese). J China Coal Soc, 2014, 39: 744–748 [孙玉壮, 赵存良, 李彦恒, 等. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨. 煤炭学报, 2014, 39: 744–748]
8 Zhuang H P, Liu J Z, Fu J M, et al. Some characteristics of organic matter and mineralization of Lincang surper-large germanium deposit in Yunnan Province, China (in Chinese). Geochimica, 1997, 26: 44–52 [庄汉平, 刘金钟, 傅家谟, 等. 临沧超大型锗矿床有机质与锗矿化的地球化学特征. 地球化学, 1997, 26: 44–52]
9 Zhang M Y, Xu S P. The distribution and utilization plan on Ge in coal bed (in Chinese). China Min Mag, 2012, 21: 54–56, 60 [张明燕, 徐胜平. 煤系中锗元素的分布及利用规划. 中国矿业, 2012, 21: 54–56, 60]
10 Du G, Tang D Z, Wu W, et al. Preliminary discussion on genetic geochemistry of para genetic germanium deposit in Shenli Coalfield, Inner Mongolia (in Chinese). Geoscience, 2003, 17: 453–458 [杜刚, 汤达祯, 武文, 等. 内蒙古胜利煤田共生锗矿的成因地球化学初探. 现代地质, 2003, 17: 453–458]
11 Huang S Q, Zhang J Q, Zhang H L. Distribution and controlling factors of enrichment of germanium in coal-bearing region of Northeast China (in Chinese). Coal Geol Exp, 2018, 46: 6–10 [黄少青, 张建强, 张恒利. 东北赋煤区煤中锗元素分布特征及富集控制因素. 煤田地质与勘探, 2018, 46: 6–10]
12 Qi H W, Hu R Z, Su W C, et al. Affirm of hydrothermal sedimentary genesis of Lincang superlarge germanium deposit, western Yunnan (in Chinese). Miner Depos, 2002, 21: 824–826 [戚华文, 胡瑞忠, 苏文超, 等. 临沧超大型锗矿床热水沉积成因的厘定. 矿床地质, 2002, 21: 824–826]
13 Dai S F, Wang X B, Seredin V V, et al. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications. Int J Coal Geol, 2012, 90: 72–99
14 Huang S Q, Zhang J Q, Huo C, et al. Discussion on germanium enrichment in coal impacted by hydrothermal solution in Wumuchang minefield (in Chinese). Coal Geol China, 2017, 29: 12–17 [黄少青, 张建强, 霍超, 等. 热液对五牧场矿区煤中锗富集影响的探讨. 中国煤炭地质, 2017, 29: 12–17]
15 Seredin V V, Finkelman R B. Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types. Int J Coal Geol, 2008, 76: 253–289
16 Hu R Z, Bi X W, Ye Z J, et al. The genesis of Lincang germanium deposit: A preliminary investigation (in Chinese). Acta Mineral Sin, 1996, 16: 97–102 [胡瑞忠, 毕献武, 叶造军, 等. 临沧锗矿床成因初探. 矿物学报, 1996, 16: 97–102]
17 Pei S, Wang W F, Chen L, et al. Distribution, occurrence, and enrichment of gallium in the Middle Jurassic coals of the Muli Coalfield, Qinghai, China. J Geochem Exp, 2018, 185: 116–129
18 Chen L, Shao P, Xiong W H, et al. Discussion on distribution and occurrence mechanism of gallium in the Middle Jurassic coal-bearing strata of the eartern Junggar coalfield, Xinjiang (in Chinese). Geosci Front, 2018, 25: 76–85 [陈磊, 邵培, 熊武候, 等. 新疆准东煤田中侏罗统煤系镓元素的分布特征及赋存机理探讨. 地学前缘, 2018, 25: 76–85]
19 Dai S F, Zhou Y P, Ren D Y, et al. Geochemistry and mineralogical characteristics of Late Permian coal in Songzao mining area of Chongqing and its cause (in Chinese). Sci China Ser D Earth Sci, 2007, 37: 353–362 [代世峰, 周义平, 任德贻, 等. 重庆松藻矿区晚二叠世煤的地球化学和矿物学特征及其成因. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37: 353–362]
20 Yi T S, Qin Y, Wu Y Y, et al. Gallium accumulation and geological controls in coal seam and its floor from Liangshan Formation, Kaili, Eastern Guizhou, China (in Chinese). J China Univ Mining Technol, 2007, 36: 330–334 [易同生, 秦勇, 吴艳艳, 等. 黔东凯里梁山组煤层及其底板中镓的富集与地质成因. 中国矿业大学学报, 2007, 36: 330–334]
21 Zhang F X, Wang L S. The formation and material sources of the superlarge Hada Gol Ga-bearing coal deposit in Jungar Banner, Inner Mongolia (in Chinese). Chin Geol, 2009, 36: 417–423 [张复新, 王立社. 内蒙古准格尔黑岱沟超大型煤型镓矿床的形成与物质来源. 中国地质, 2009, 36: 417–423]
22 Dai S F, Ren D Y, Li S S. Discovery of superlarge gallium deposits in Inner Mongolia, Jungar (in Chinese). Chin Sci Bull, 2006, 51: 177–185 [代世峰, 任德贻, 李生盛. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现. 科学通报, 2006, 51: 177–185]
23 Zhao L, Ward C R, French D, et al. Major and trace element geochemistry of coals and intra-seam claystones from the Songzao Coalfield, SW China. Minerals, 2015, 5: 870–893
24 Dai S, Jiang Y, Ward C R, et al. Mineralogical and geochemical compositions of the coal in the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China:

Further evidence for the existence of an Al (Ga and REE) ore deposit in the Jungar Coalfield. Int J CoalGeol, 2012, 98: 10–40
25 Sun Y, Zhao C, Qin S, et al. Occurrence of some valuable elements in the unique “high-aluminium coals” from the Jungar coalfield, China. Ore Geol Rev, 2016, 72: 659–668
26 Seredin V V, Dai S F. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. Int J Coal Geol, 2012, 94: 67–93
27 Dai S F, Ren D Y, Li D, et al. Mineralogical anomalies and their influences on elemental geochemistry of the main workable coal beds from the Dafang Coalfield, Guizhou, China (in Chinese). Acta Geol Sin, 2006, 80: 589−597, 617 [代世峰, 任德贻, 李丹, 等. 贵州大方煤田主采煤层的矿物学异常及其对元素地球化学的影响. 地质学报, 2006, 80: 589−597, 617]
28 Dai S F, Ren D Y, Shao L Y, et al. Variation of coal geochemistry and special textures of Late Permian coals in western Guizhou Province and their volcanic origin (in Chinese). Geochimica, 2003, 32: 239−247 [代世峰, 任德贻, 邵龙义, 等. 黔西晚二叠世煤地球化学性质变异及特殊组构的火山灰成因. 地球化学, 2003, 32: 239−247]
29 Hower J C, Ruppert L F, Eble C F. Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the Fire Clay coal bed, Eastern Kentucky. Int J Coal Geol, 1999, 39: 141–153
30 Seredin V V. Rare earth element-bearing coals from the Russian Far East deposits. Int J Coal Geol, 1996, 30: 101–129
31 Xu Z G, Chen Y C, Wang D H, et al. Classification Scheme of China Metallogenic Zone (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2008 [徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 中国成矿区带划分方案. 北京: 地质出版社, 2008]
32 Ning S Z. The Coal Occurrence Tectonic Units and Coal Controlling Characteristics in China (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Mining & Technology, 2013 [宁树正. 中国赋煤构造单元与控煤特征. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2013]
33 Li X P, Zhao S H, Li L B, et al. Coupling of faulted sags to basement in the Early Cretaceous Erlian Basin (in Chinese). Chin J Geol, 2015, 50: 88−99 [李先平, 张少华, 李林波, 等. 二连盆地早白垩世断陷及基底构造的耦合性. 地质科学, 2015, 50: 88−99]
34 Meng Q R. What drove late Mesozoic extension of the northern China—Mongolia tract? Tectonophysics, 2003, 369: 155−174
35 Ketris M P, Yudovich Y E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals. Int J Coal Geol, 2009, 78: 135−148
36 Dai S, Graham I T, Ward C R. A review of anomalous rare earth elements and yttrium in coal. Int J Coal Geol, 2016, 159: 82–95
37 Taylor S R, McLennan S H. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985
38 Zubovic P, Stadnichenko T, Sheffey N B. Distribution of Minor Elements in Coal Beds of the Eastern Interior Region. Washington: United States Government Printing Office, 1964
39 Yang G X, Li Y J, Wu H G, et al. A tentative discussion on the genesis of Huangyangshan granite body in Kalamaili orogen, East Junggar (in Chinese). Acta Geosci Sin, 2010, 31: 170−182 [杨高学, 李永军, 吴宏恩, 等. 东准噶尔卡拉美丽黄羊山花岗岩岩石成因探讨. 地球学报, 2010, 31: 170−182]
40 Li H, Xu X, Yang K. Lithium and gallium resources metallogenic geological characteristics in coal No. 4, Pingshuo mining area, Shanxi (in Chinese). Coal Geol China, 2014, 26: 17−19 [李华, 许霞, 杨恺. 山西平朔矿区4号煤中锂、镓资源成矿地质特征研究. 中国煤炭地质, 2014, 26: 17−19]
41 Liu B J, Lin M Y. Enrichment mechanism and material sources of lithium in Li-bearing coal seam No. 9 from Pingshuo Mining District of Shanxi Province (in Chinese). Coal Tech, 2015, 34: 115−117 [刘帮军, 林明月. 山西平朔矿区9#煤中锂的富集机理及物源研究. 煤炭技术, 2015, 34: 115−117]
42 Qing Y, Wang W F, Cheng A G, et al. Study of ore-forming potential of gallium in coal for the first group of state programmed mining districts (in Chinese). Coal Geol China, 2009, 21: 17−21, 26 [秦勇, 王文峰, 程爱国, 等. 首批煤炭国家规划矿区煤中镓的成矿前景. 中国煤炭地质, 2009, 21: 17−21, 26]
43 Zhou J F, Wang J X, Bai G L, et al. Distribution characteristics and enrichment factor Ga in coal seam 11# from Pingshuo Mining in Shanxi (in Chinese). Coal Tech, 2014, 33: 82−84 [周建飞, 王金喜, 白观累, 等. 山西平朔矿区11#煤中镓的分布特征及富集因素. 煤炭技术, 2014, 33: 82−84]
44 Gao Y, Guo H Y. Distribution characteristics and occurrence mechanism analysis of gallium in the north Hedong coalfield (in Chinese). Energy Tech Manag, 2012, (1): 111−113, 153 [高颖, 郭英海. 河东煤田北部煤中镓的分布特征及赋存机理分析. 能源技术与管理, 2012, (1): 111−113, 153]
45 Huang T, Zhang Q H, Qu X R. Occurrence and enrichment causes of gallium in coal of Yangjiawan exploration in Baode (in Chinese). China Coal, 2013, 39: 61−66 [黄婷, 张庆辉, 屈晓荣. 保德杨家湾勘查区煤中镓的赋存及富集成因. 中国煤炭, 2013, 39: 61−66]
46 Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Further information of the associated Li deposits in the No. 6 coal seam at Jungar Coalfield, Inner Mongolia, Northern China. Acta Geol Sin, 2013, 87: 801−812
47 Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam 6# from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, northern China. Energy Explor Exploit, 2012, 30: 109−130
48 Yi S, Wang J X. Lithium occurrences and enrichment factor law in No. 9 coal seam of Anjialing Mine. Coal Chem Ind, 2014, 37: 7−10 [衣姝, 王金

喜. 安家岭矿9号煤中锂的赋存状态和富集因素分析. 煤炭与化工, 2014, 37: 7–10]
49 Li C Y. Distribution characteristics of germanium and gallium in Permian carboniferous coal measures in Tengxian Coalfield (in Chinese). Coal Geol China, 1991, (3): 34–40 [李春阳. 滕县煤田石炭二叠纪煤系锗镓分布特征. 中国煤田地质, 1991, (3): 34–40]
50 Dai S, Hower J C, Ward C R, et al. Elements and phosphorus minerals in the middle Jurassic inertinite-rich coals of the Muli Coalfield on the Tibetan Plateau. Int J CoalGeol, 2015, 144-145: 23–47
51 Zhou Y P, Ren Y L. Gallium distribution in coal of Late Permian coalfields, Southwest China, and its geochemical characteristics in oxidation zones of coal beds (in Chinese). Geol Rev, 1982, 28: 47–59 [周义平, 任友谅. 西南晚二叠世煤田煤中镓的分布和煤层氧化带内镓的地球化学特征. 地质论评, 1982, 28: 47–59]
52 Wu Y Y, Qin Y, Yi T S. Enrichment of rare earth elements in high sulfur coal of Liangshan Formation from Kaili, Guizhou, China and geological origin (in Chinese). Acta Geol Sin, 2010, 84: 280–285 [吴艳艳, 秦勇, 易同生. 贵州凯里梁山组高硫煤中稀土元素的富集及其地质成因. 地质学报, 2010, 84: 280–285]
53 Dai S F, Zhou Y P, Ren D Y, et al. Geochemistry and mineralogy of the Late Permian coals from the Songzo Coalfield, Chongqing, southwestern China. Sci China Ser D-Earth Sci, 2007, 50: 678–688
54 Tian H M, Dai S F, Li D H, et al. Geochemical features of the Late Permian tuff in Nanchuan District, Chongqing, Southwestern China (in Chinese). Geol Rev, 2014, 60: 169–177 [田和明, 代世峰, 李大华, 等. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征. 地质论评, 2014, 60: 169–177]
55 Wang P P. Enrichment and differentiation mechanism of minerals and trace elements in the Late Permian coals from eastern Yunnan and western Guizhou Province. Doctor Dissertation. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017 [王佩佩. 滇东黔西晚二叠世煤中矿物及微量元素富集分异机理. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2017]
56 Dai S, Zhang W, Ward C R, et al. Mineralogical and geochemical anomalies of late Permian coals from the Fusui Coalfield, Guangxi, southern China: Influences of terrigenous materials and hydrothermal fluids. Int J Coal Geol, 2013, 105: 60–84
57 Zhao B G, Cheng Y L, Yao Y F, et al. The depositional feature of Neozoic Basins in the western Yunnan Province and the minerotgenetic conditions of sandstone-type uranium deposits (in Chinese). J Mineral Petrol, 2003, 23: 11–15 [赵宝光, 陈友良, 姚毅峰, 等. 滇西新生代盆地沉积特征及砂岩型铀矿成矿条件. 矿物岩石, 2003, 23: 11–15]
58 Deway J F, Burke R M, Ceng C. The tectonic evolution of the Tibetan (Xizang) Plateau. Phil Trans Roy Soc Lond, 1998, A327: 379–416
59 Xiong S B, Li Y H, Qu L, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements in Ge-bearing coalsfrom Datianhe coal mine, Lincang County, Yunnan Province, China (in Chinese). Acta Mineral Sin, 2018, 38: 313–320 [熊树斌, 李杨浩, 瞿亮, 等. 云南临沧大田河锗煤矿床稀土元素地球化学特征. 矿物学报, 2018, 38: 313–320]

Summary for “中国煤中金属元素成矿区带”

Mineralization zoning of coal-metal deposits in China

Shuzheng Ning[1*], Shaoqing Huang[2*], Shifei Zhu[3], Wei Zhang[4], Xiaoli Deng[5], Congcong Li[6], Junwei Qiao[6], Jianqiang Zhang[2] & Ning Zhang[5]

[1] *China National Administration of Coal Geology (CNACG), Beijing 100038, China;*
[2] *Prospecting Institute, China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China;*
[3] *Jiangsu Geology and Mineral Resources Design and Research Institute, Xuzhou 221006, China;*
[4] *Zhejiang Bureau of Coal Geological Exploration, China National Administration of Coal Geology, Hangzhou 310021, China;*
[5] *First Exploration Bureau, China National Administration of Coal Geology, Handan 056004, China;*
[6] *Aerophotogrammetry & Remote Sensing Bureau, China National Administration of Coal Geology, Xi'an 710054, China*
* Corresponding authors, E-mail: nsz0321@126.com; 309859770@qq.com

Substantive progress has been made in extracting germanium, gallium, rare earth elements (REEs), lithium, and other metals from coal. Coal deposits are becoming important sources of many strategic metal resources. However, ore deposit theory study for coal-metal resources has not been systematic. This paper summarizes the mineralization characteristics of germanium, gallium, lithium, and REEs in coal on the basis of previous research results and field investigations, including those on seven metallogenic zones of coal metal deposits in China.

Coal-germanium deposits, products of magmatic hydrothermal activity, mainly occur in low rank coal in the areas of Erlian, the Hailaer Basin, Inner Mongolia, and the Sanjiang district in the Yunnan Province. Occasionally, rich-germanium-coal can be found in other areas. Coal-gallium deposits are mainly in the Permian coal of North China, Jurassic coal of Northwest China, and late-Permian coal of South China. The accumulation of gallium in coal is closely related to aluminum-containing minerals. Coal-lithium deposits mainly occur in the Zhungeer coal field, Inner Mongolia, the Pingshuo coal field, and the Jingcheng coal field in the Shanxi Province, and some coal fields in South China. Similarly to gallium, the accumulation of lithium in coal is also closely related to aluminum-containing minerals. Coal-REE deposits mainly occur in the Early Jurassic coal of the Erlian Basin and Inner Mongolia, and Late Permian coal in South China. REEs of Erlian basin coal likely entered in ionic forms in early stages of coal or peat bog formation. REEs of South China coal are likely associated with REE-rich trass volcanic ash which deposited synchronously with peat bog accumulation.

Abundant abnormal metal elements in coal are important for classification of metallogenic zones. Regional tectonic background and evolution, characteristics of stratigraphic sedimentary environment, and coal quality are also important factors.

(1) Delineation of germanium metallogenic zones in the coal follows the principles that: coal in the coal area should be low-metamorphic bituminous (long-flame) coal; the basement of the coal-bearing basin was broken and faults developed in the region; and there are obvious traces of hydrothermal intrusion in or around the coal measures in the zone.

(2) Delineation of gallium metallogenic zones in coal is based on these traits: an obvious gallium source should exist in the region; the provenance area has favorable weathering and denudation conditions; and an aluminum-gallium formation under strong leaching is contained within.

(3) Delineation of lithium metallogenic zones in coal requires: relatively clear sources of lithium in the zones; favorable weathering and denudation conditions in the provenance area; and aluminum-lithium containing rocks under strong leaching.

(4) Delineation of rare earth mineralization zones in coal is based on: large scale volcanic eruptions in or near peat bogs during the accumulation period, with tuff in the coal-bearing strata; and hydrothermal intrusion into coal-measure strata during the peat bog period or early coal-forming period.

According to the principles above, seven coal-metal metallogenic zones were identified, including: (1) the Erlian Basin-Hailaer Basin coal-germanium and REE deposit zone; (2) the Tianshan coal-gallium deposit zone; (3) the South-Yinshan coal-gallium-lithium deposit zone; (4) the East-Taihang Mountain coal-gallium deposit zone; (5) the Qilian-Qinling coal-gallium-lithium deposit zone; (6) the Sichuan-Yunnan-Guangxi coal-gallium-lithium and REE deposit zone; and (7) the Sanjiang (west Yunnan Province) germanium deposit zone.

mineral resources of metallic elements in coal, characteristics of mineralization, enrichment, metallogenic belts, geologic characteristic

doi: 10.1360/N972019-00377