2023 年 7 月 地 球 学 报 Jul. 2023
第 44 卷 第 4 期: 599-624 Acta Geoscientica Sinica Vol.44 No.4: 599-624
www.cagsbulletin.com

中国镓矿分布规律、成矿机制及找矿方向

罗培麒, 付 勇*, 唐 波, 姚 兰, 刘国栋,
潘忠飞, 龙 珍, 刘 阳

贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州贵阳 550025

摘 要: 金属镓资源是我国优势资源, 但随着国内外需求量不断增大, 我国金属镓的后备资源逐步短缺。本文系统搜集了我国富镓矿床研究和勘查成果资料, 初步总结了我国富镓矿的分布规律、成矿机制和找矿方向。研究认为, 我国镓矿主要伴生在铝土矿、煤矿和铅锌矿之中, 以铝土矿中伴生镓最为重要。依据不同成矿作用将我国具有工业价值的富镓矿床划分为沉积型铝土矿、堆积型铝土矿、红土型铝土矿、煤矿床和碳酸盐岩型(MVT)铅锌矿等 5 种伴生镓矿床类型, 并总结了不同类型镓矿床的时空分布规律。时间上, 我国富镓矿床在元古宙、古生代、中生代和新生代均有发育, 以石炭纪—三叠纪、侏罗纪—白垩纪和第四纪为主。其中, 富镓铝土矿主要形成于石炭纪、二叠纪和第四纪, 以石炭纪最为重要; 富镓铅锌矿主要形成于震旦纪和寒武纪; 富镓煤矿主要形成于石炭纪和二叠纪。空间上, 我国富镓矿床主要分布在晋豫成矿区、右江成矿区、扬子陆块西南成矿区、川—滇—黔成矿带、湘西—鄂西成矿带、湘东—赣西成矿带和华北陆块北缘成矿区等 7 个区带中。不同类型富镓矿床的成矿机制不同, 一般在风化-沉积作用下形成富镓铝土矿, 镓与铝常以类质同象形式存在; 在生物化学沉积作用下形成富镓煤矿, 镓常以无机态、有机态和混合形式存在, 在我国多以无机态的形式赋存于勃姆石、硬水铝石等矿物中; 在热液作用下形成富镓铅锌矿, 镓可能以类质同象形式进入以闪锌矿为主的硫化矿物晶格中。根据不同镓矿的成矿作用、富集过程和地质背景, 建立了煤矿、铅锌矿和铝土矿中镓富集成矿的理想模型, 并对铝土矿、煤矿和铅锌矿中伴生镓矿进行了找矿预测, 提出了找矿方向和重点找矿区域, 其中以沉积型、堆积型铝土矿的找矿为主攻方向, 并可兼顾煤矿和铅锌矿等其他伴生镓矿床。

关键词: 镓; 铝土矿; 煤矿; 铅锌矿; 成矿区带; 找矿方向

中图分类号: P618.74 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2023.030901

Distribution, Metallogenic Mechanism and Prospecting Direction of Gallium Deposits in China

LUO Pei-qi, FU Yong*, TANG Bo, YAO Lan, LIU Guo-dong,
PAN Zhong-fei, LONG Zhen, LIU Yang

College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025;
Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550025

Abstract: Gallium metal resources are dominant resources in China, but gallium reserves in China are gradually declining with increasing global demand. This study systematically collected the research and exploration results pertaining to gallium-rich deposits in China and preliminarily summarized the distribution, metallogenic mechanisms, and prospecting directions of gallium-rich deposits in China. The results indicated that gallium ore

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2021YFC2900092)、中国地质调查局“中国矿产地质调查”项目(编号: DD20160346; DD20190379; DD20221695)、国家重点研发计划项目(编号: 2021YFC2901905)、贵州省重大科技工程项目(编号: HZ-2022-006#)和贵州省人才基地项目(编号: RCJD-2018)联合资助。

收稿日期: 2022-11-17; 改回日期: 2023-03-09; 网络首发日期: 2023-03-15。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 罗培麒, 男, 1998 年生。硕士研究生。地球化学专业。E-mail: 571136863@qq.com。

*通讯作者: 付勇, 男, 1980 年生。博士, 教授。主要从事矿床学、地球化学方面的研究。E-mail: byez1225@126.com。

in China is mainly associated with bauxite, coal, and lead-zinc mining, with gallium in bauxite being the most important. According to the different modes of mineralization, gallium-rich deposits of industrial value in China can be divided into five types of associated deposits, sedimentary bauxite, accumulative bauxite, lateritic bauxite, coal mine deposits, and Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits. The spatiotemporal distributions of these different types of gallium deposits were summarized. In terms of time, gallium-rich deposits in China developed in the Proterozoic, Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic, but mainly in Carboniferous–Triassic, Jurassic–Cretaceous, and Quaternary. Among these, gallium-rich bauxite mainly formed in the Carboniferous, Permian, and Quaternary, with the Carboniferous period being the most important. Gallium-rich lead-zinc deposits mainly formed in the Sinian and Cambrian periods. Gallium-rich coal mines mainly formed in the Carboniferous and Permian periods. Spatially, the gallium-rich deposits in China are mainly distributed in seven zones: the Jin–Yu metallogenic zone, Youjiang metallogenic zone, southwest metallogenic zone of the Yangtze landmass, Sichuan–Yunnan–Guizhou metallogenic zone, western Hunan–West Hubei metallogenic zone, eastern Hunan–West Jiangxi metallogenic zone, and the northern margin of the North China landmass. The different types of gallium-rich deposits have different metallogenic mechanisms. Generally, gallium-rich bauxite forms under weathering and sedimentation. Gallium and aluminum often exist in isomorphic forms. Gallium-rich coal mines form as a result of biochemical deposition. The gallium often exists in inorganic, organic, and mixed forms. In China, it is mainly hosted in inorganic form within boehmite, diaspore, and other minerals. Gallium-rich lead-zinc ore forms from hydrothermal fluids. Gallium in these deposits often substitutes within the lattice of sulfide minerals, dominantly sphalerite. Based on the mineralization, enrichment processes, and geological backgrounds of the different gallium deposits, this study established ideal models of gallium-rich deposits and integrated ores in coal mines, lead-zinc mines, and bauxite and considered the prospects of these deposits. Prospecting directions and key prospecting areas were proposed. The prospecting of sedimentary and accumulative bauxite should be the main direction, but other associated gallium deposits such as those of coal mines and lead-zinc mines can be considered.

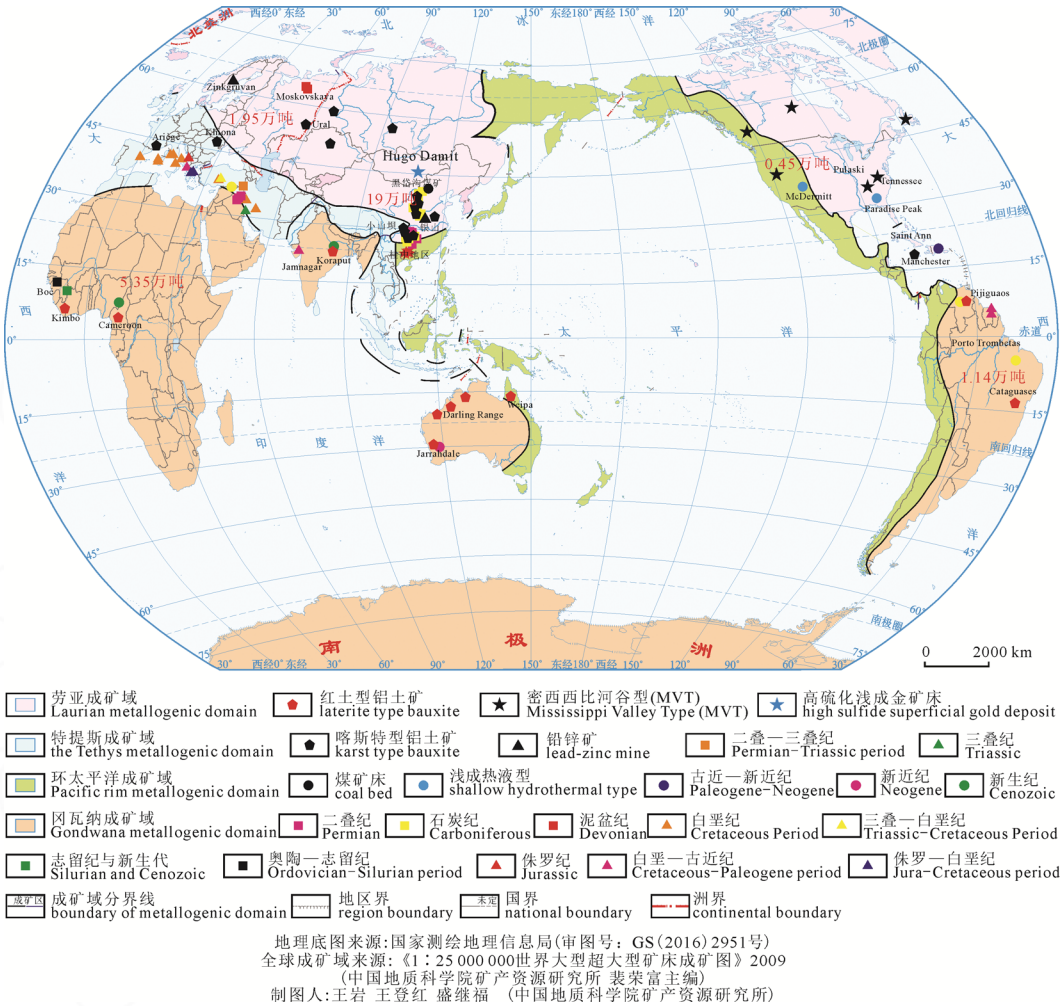
Key words: gallium; bauxite; coal mine; lead-zinc mine; mineralization zone; prospecting direction

关键金属是当今世界发展所必需的原材料，可以推动我国战略新兴产业的发展，也是目前矿产勘查工作的重点矿种。我国的关键金属大致包括稀有金属、稀散金属、稀土金属和部分其他金属(翟明国等, 2019; 文博杰等, 2019)。镓(Ga)是典型的八种稀散元素之一，具有熔点低(29.78 ℃)、沸点高(2403 ℃)的特点，是自然界中温度区间最大的金属元素。被广泛用于半导体工业、太阳能工业、磁性材料工业等领域(Frenzel et al., 2016; 赵飞燕等, 2017; 赵汀等, 2017; Lu et al., 2017)，尤其在半导体工业领域，砷化镓占全球镓消耗量的 80%(李德先和王锦, 2020)。为此，欧盟和美国先后将镓列为关键矿产。镓资源是我国战略性储备资源之一，2020年我国粗镓产量占全世界 90%以上(USGS, 2021)。镓的地壳丰度为 15×10^{-6}，在自然界极少形成独立矿物，基本以伴生形式存在于铝土矿、煤矿、铅锌矿等矿床中。前人对镓的研究大多集中在镓在铝土矿、铅锌矿和煤矿矿石之中的空间分布规律与特征等方面。而富镓矿床的成矿区(带)、成矿机制和今后的找矿方向等方面研究甚少，这极大的制约了对富镓矿床的开发与利用。鉴于此，本文拟对我国富镓矿床的成矿系列、富集规律等进行归纳总结，以期对未来找矿工作提供理论支撑。

1 镓资源概况

1.1 全球镓资源特征

全球已探明镓的储量约 23 万吨，其中，我国占比超 80%(敦妍冉等, 2019)。全球伴生镓资源远景储量超过 100 万吨。镓资源大多伴生于铝土矿之中，主要分布于非洲(32%)、大洋洲(23%)、南美洲(21%)、亚洲(18%)和其他区域(6%)(Munson, 1994; Moskalyk, 2003)。我国典型的富镓铝土矿床有杜家沟铝土矿、大竹园铝土矿和贵港铝土矿等(汤艳杰等, 2001; 王佳奇, 2013; 李沛刚等, 2014)。铅锌矿同时也是世界上最主要的镓伴生矿藏之一(USGS, 2017)，已确认伴生于铅锌矿中的 Ga 资源约 19 万吨，除南极洲尚未发现之外，另外几大洲均有铅锌矿分布(图 1)，典型矿床有美国 Central Tennessee 矿床(Bonnet et al., 2016)，瑞典 Zinkgruvan 矿床(Jansson et al., 2016)，中国凡口铅锌矿和银山铅锌矿(邓卫等, 2002)。此外，世界上煤炭资源中镓的总资源量约为 1000 万吨(Thakur, 2017)，2010 年我国在准格尔煤田发现与煤伴生的超大型镓矿床，勘探储备为 85.7 万吨(张云峰等, 2014)。



地理底图来源:国家测绘地理信息局(审图号：GS(2016)2951号)
全球成矿域来源:《1∶25 000 000世界大型超大型矿床成矿图》2009
(中国地质科学院矿产资源研究所 裴荣富主编)
制图人:王岩 王登红 盛继福 (中国地质科学院矿产资源研究所)

图 1　世界典型伴生镓矿床与镓资源分布

Fig. 1　Typical deposits associated with gallium and the distribution of gallium resources in the world

我国镓资源主要伴生在铝土矿之中，含量一般为 50×10^{-6}~250×10^{-6}，镓资源量超过总量的 50%，矿床类型以沉积型铝土矿为主(涂光炽等, 2004)。煤矿和铅锌矿也是我国伴生镓的主要来源，如在内蒙古准格尔煤田发现了超大型伴生镓矿床，其中镓的含量达到了 30×10^{-6}~70×10^{-6}(煤中镓的工业品位为 30×10^{-6})，载镓矿物主要为硬水铝石和勃姆石(代世峰等，2014)，在铅锌矿中镓主要赋存于闪锌矿中，镓含量大于 100×10^{-6}，少量镓赋存于方铅矿中(温汉捷等，2020)(铅锌矿中镓的工业品位为 100×10^{-6})。因此本文将不同类型矿床中超过其伴生镓工业品位的矿床定义为富镓矿床。

1.2　世界典型富镓矿床

镓和铝、锌、铁等元素在化学和结晶化学性质上相近，决定了他们之间密切的共存关系。不同的物理化学条件下镓的富集形式也不相同。伴生镓矿床的成矿作用主要有岩浆作用、伟晶岩作用、气成-热液作用、热液作用、风化作用、沉积作用六种(孙大中，1960；刘英俊，1982；温汉捷等，2020)。镓具有亲石、亲硫和亲铁的地球化学性质，按照镓的赋存状态可将世界上含镓矿床划分为明矾石矿床、高硫化浅成金矿、火山成因硫化物矿床、铅锌矿矿床、密西西比河谷型(MVT)、多金属沉积型、铝土矿矿床喀斯特型、铝土矿矿床红土类型、表生铁冒和煤等(表 1，USGS，2017；敦妍冉等，2019；温汉捷等，2020)。其中，以铅锌矿、铝土矿和煤矿三类矿床为主。目前，仅在非洲的(Tsumeb)Cu-Pb-Zn 金属矿床发现了唯一的原生镓矿物(硫镓铜矿)。

1.3　我国主要富镓矿床类型

镓极少独立成矿，仅在某些矿床中形成工业富集，从而形成镓含量相对较高的矿床。本文依据矿床成矿作用(热液作用、风化-沉积作用和生物化学沉积)将成因类型和工业类型进行有机融合，并根据矿床成矿地质背景、镓的富集规律等特征，将我国具有重要工业意义的富镓矿床的类型划分为 5 种，并按照主矿种进行了矿床命名(表 2，叶庆同等，1991；陈毓川和毛景文，1995；翟裕生等，1996；王登红等，2002，2020；陈毓川等，2016，2022)。此外，镓还可在沉积铁矿床、碱性伟晶岩矿床和经过气成-热液作用形成的云英岩型矿床和含铌钽矿化

表 1 世界典型伴生镓矿床

Table 1 Typical gallium-associated deposits in the world

国家	矿区或矿床	Ga/×10^{-6}	富镓矿床类型	资料来源
美国	Paradise Peak Au-Hg	84	明矾石矿床	Eng et al., 1991
美国	McDermitt	34	明矾石矿床	Schulte and Foley, 2013
蒙古	Hugo Damit porphyry copper-Gold	17	高硫化浅成金矿床	Khashgerel et al., 2008
澳大利亚	Jarrahdale	69	红土型铝土矿	Anand et al., 1991
喀麦隆	Bamboutos Mount	39	红土型铝土矿	Hieronymus et al., 2001
几内亚	Kimbo	—	红土型铝土矿	Schwarz, 1997
澳大利亚	Weipa	—	红土型铝土矿	Bárdossy and Aleva, 1990
印度	Koraput	10	红土型铝土矿	Bárdossy and Aleva, 1990
委内瑞拉	Pijiguaos	75	红土型铝土矿	Tosiani et al., 1990
巴西	Cataguases	48	红土型铝土矿	Bárdossy and Aleva, 1990
中国	扶绥东门铝土矿	41	喀斯特型铝土矿	余文超, 2017
中国	黔北大竹园铝土矿	48	喀斯特型铝土矿	李沛刚等, 2014
中国	豫西杜家沟铝土矿	52	喀斯特型铝土矿	汤艳杰等, 2001
俄罗斯	Ural 铝土矿	49.8	喀斯特型铝土矿	Zakrutkin, 1974
法国	Ariège	55	喀斯特型铝土矿	Caillère, 1976
希腊	Khiona	38	喀斯特型铝土矿	Valeton, 1983
牙买加	Saint Ann	60	喀斯特型铝土矿	Blackwood et al., 1982
中国	凡口铅锌矿	60	铅锌矿	邓卫等, 2002
中国	银山铅锌矿	52	铅锌矿	黄松等, 1998
瑞典	Zinkgruvan 铅锌矿	2.3	铅锌矿	Jansson et al., 2016
美国	Central Tennessee	67	(MVT)	Bonnet et al., 2016
美国	East Tennessee	57	(MVT)	Bonnet et al., 2016
中国	黑岱沟煤矿	44.6	煤矿床	张复新和王立社, 2009
中国	海拉尔盆地	25.8	煤矿床	麻涛等, 2015
美国	Utah APEX	—	表生铁帽型	Dutrizac et al., 1986
西班牙	Rio Tinto	—	火山成因硫化物矿床	Tornos, 2006

的碱质蚀变花岗岩矿床等矿床中富集成矿，但这些矿床在我国出露较少，且缺乏代表性矿床(温汉捷等, 2020)，所以本文暂未考虑。

(1)与风化-沉积作用有关的富镓矿床

与该成矿作用有关的富镓矿床的类型是铝土矿。镓含量较高的铝土矿多经历风化淋滤、沉积和成岩作用成矿。该类矿床共生矿产有耐火黏土、铁和煤等，同时多伴生 Li、Ga、Sc 和 REE 等三稀元素(刘英俊，1982；涂光炽等，2004；金中国等，2019)。矿体一般呈似层状、透镜状和漏斗状(高兰等, 2015; Zhu et al., 2019)。其中，古风化壳沉积型铝土矿，是目前我国最主要的铝土矿类型，分布地域广，但主要集中在华北陆块和扬子陆块之间。古风化壳沉积型铝土矿的资源量约占全国 80%，是目前我国镓金属最主要的来源之一，典型矿床有贵州大竹园、山西庞家庄、河南杜家沟等。

(2)与生物化学沉积作用有关的富镓矿床

与该成矿作用有关的富镓矿床的类型是煤矿。我国煤中镓资源主要成矿时代有华北石炭—二叠纪、华南二叠纪和西北侏罗纪(宁树正等, 2019)。煤矿在经历了不断地风化作用-剥蚀作用以及地下水腐蚀的过程，导致了富镓矿石不断的细碎屑化，并通过各阶段的高岭土和泥化作用去除了 K、Ca、Na、Mg、Si 等杂质(张复新和王立社，2009)。典型富镓煤矿床有内蒙古黑岱沟、山西平朔、重庆南武等。

(3)与热液作用有关的富镓矿床

与该成矿作用有关的富镓矿床是铅锌矿。我国富镓铅锌矿类型主要为碳酸盐岩型(MVT)。该类矿床主要受中-低温热水和盆地盐卤影响而成矿，与岩浆作用关系不大，多伴生 Ag、Cd、Au、Cu 等金属元素(涂光炽，1984；刘英超等，2008; Ding et al., 2016；唐攀科等, 2018; Zhou et al., 2022)，可以形成层状、脉状和筒状的矿体，方铅矿和闪锌矿是矿石中主要的矿物组合，且有少量黄铁矿和黄铜矿。我国该类型铅锌矿分布广泛，但超大-大型矿床主要分布于我国西北、西南和华南等地区，典型富镓矿床有广东凡口、安徽荷花山等。

2 中国富镓矿床时空分布特征

2.1 空间分布

中国的富镓矿床分布区域较广，但大-中型的富镓矿床分布相对集中。如，我国有 19 个省区市探明铝土矿资源, 29 个省区市发现了铅锌矿资源(张长青等, 2014；高兰等, 2015)。近年来，随着地质调查

项目的实施和技术的发展，在铝土矿、铅锌矿和煤矿中陆续发现一大批伴生的镓资源，使我国金属镓资源量不断增加。本文参照徐志刚等(2008)《中国成矿区带划分方案》，根据铝土矿、铅锌矿和煤矿等各类型矿床的分布特征，以及含镓物源和相应的富集成矿作用将我国富镓矿床分为 7 个成矿区带：晋豫成矿区、右江成矿区、扬子陆块西南成矿区、川—滇—黔成矿带、湘西—鄂西成矿带、湘东—赣西成矿带、华北陆块北缘成矿区。

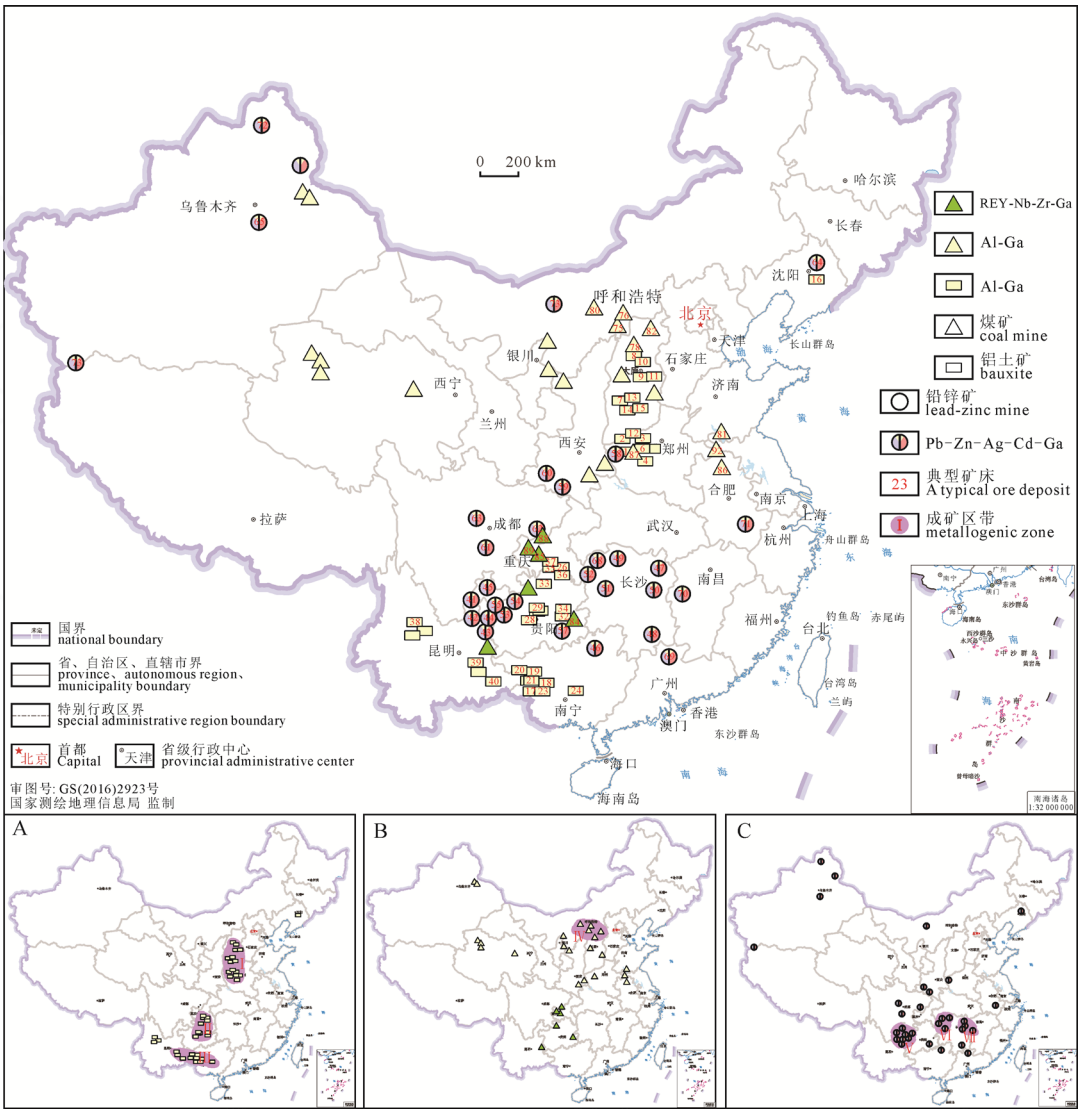
2.1.1　铝土矿中伴生镓成矿区

我国伴生镓的铝土矿的主要类型为沉积型铝土矿、其次为堆积型铝土矿，少见红土型铝土矿。因此，本文研究主要集中于沉积型铝土矿，堆积型铝土矿和红土型铝土矿作为潜在研究对象。我国铝

表 2　我国典型伴生镓矿床

Table 2　Typical gallium-associated deposits in China

成矿作用	矿床类型	典型矿床
与风化-沉积作用有关	1. 沉积型铝土矿	贵州大竹园、山西庞家庄、河南杜家沟
	2. 堆积型铝土矿	云南鹤庆、广西新圩
	3. 红土型铝土矿	广西贵港、海南蓬莱
与沉积作用有关(生物化学沉积)	4. 煤矿床	内蒙古黑岱沟、山西平朔、重庆南武
与热液作用有关(与盆地卤水作用有关)	5. 碳酸盐岩(MVT)	广东凡口、安徽荷花山



I—晋豫成矿区; II—扬子陆块西南成矿区; III—右江成矿区; IV—华北陆块北缘成矿区; V—川—滇—黔成矿带; VI—湘西—鄂西成矿带; VII—湘东—赣西成矿带。

I–Jinyu metallogenic area; II–southwest metallogenic area of Yangtze block; III–Youjiang metallogenic area; IV–mining area in the northern margin of the North China Continent; V–Sichuan–Yunnan–Guizhou metallogenic belt; VI–western Hunan–western Hubei metallogenic belt; VII–metallogenic belt of east Hunan and west Jiangxi.

图 2　我国伴生镓矿床与富镓矿床成矿区带

Fig. 2　Gallium-associated deposits and Ga-rich metallogenic belts in China

土矿中伴生镓成矿区带划分见图 2。

晋豫成矿区(I): 位于我国华北陆块, 主要涉及山西省和河南省。目前, 该成矿区已发现铝土矿中伴生镓资源占我国铝土矿中镓资源的 50%以上。Ga 主要赋存于石炭系本溪组铝土矿中, 属地台型沉积的一水硬铝石型铝土矿(汤艳杰等, 2002; 李昌盛等, 2017), 石炭系本溪组地层直接覆盖在马家沟组的碳酸盐岩之上, 本溪组之下为铝土岩地层, 区内铝土矿床含矿岩系是一套以铝铁质黏土岩为主的滨海、海湾与泻湖环境所形成的陆源碎屑沉积。其中, 河南新密市张沟—桐树园铝土矿富集区呈北东—南西向展布, 古地理环境为潟湖潮坪沼泽相及滨岸潮坪沼泽相; 另外一个铝土矿集区王沟—范坡镇铝土矿位于禹州市, 该区含矿岩系延伸超过 60 km, 矿体厚度约为 11~16 m, 受禹州向斜控制, 古地理环境为潟湖潮坪沼泽相。华北大陆受构造运动影响整体抬升成陆, 之后发生强烈的风化-剥蚀作用, Mg、K、Ca、Si、S 等元素不同程度的被淋滤出去, 镓与铝一起迁移, 在基底稳定之后富集成矿(孙莉等, 2018)。山西伴生镓铝土矿主要分布于华北陆块(克拉通)中部, 主要赋存于中奥陶系碳酸盐岩古风化壳侵蚀面之上的上古生代晚石炭世早期太原组(湖田段)底部。该区铝土矿的含矿岩系同样为晚石炭世本溪组, 岩性组合自下而上可以分为“山西式”铁矿层—铝土矿层—黏土岩层, 该成矿区北部和南部地区镓含量较低, 中部地区镓含量较高, 各类型矿石中镓含量由高到低依次为豆鲕状→土状-半土状→碎屑状→致密状(廖士范和梁同荣, 1991; 陈平和柴浩然, 1997)。

扬子陆块西南成矿区(II): 该成矿区包含渝南—黔北赋镓带和黔中赋镓带。镓主要富集在石炭系大竹园组和九架炉组地层中(刘平, 1995)。其中, 黔中赋镓带位于上扬子台褶带, 黔中隆起南部, 古地理环境为黔中泻湖海盆地(莫江平和郦今敖, 1991), 区域地壳频繁的升降运动, 对镓在铝土矿中的聚集起了巨大作用。在铝土矿成矿过程中铝和镓存在于成矿母岩之中, 随着铝土矿层形成和在受到后期沉积地层的压覆之下形成伴生镓矿床。含矿岩系包括三个主要特征岩性段: 上段为碎屑岩岩系、中段为含铝岩系、下段为含铁岩系, 其上覆地层为石炭系下统摆佐组, 下伏地层为寒武系中—上统娄山关组(刘幼平等, 2016)。矿石按照结构类型划分为土状、半土状、碎屑状和致密状, 以碎屑状铝土矿居多但镓含量低, 如修文小山坝矿石中 Ga 含量由高到低为: 豆鲕状→土状→碎屑状(叶霖等, 2007)。黔北—渝南赋镓带主要位于扬子板块中部, 扬子板块自寒武纪形成以来处于稳定的陆内环境(张启明等, 2012)。含铝岩系为上石炭统大竹园组, 上覆地层为中二叠统梁山组或栖霞组, 下伏地层为上石炭统黄龙组或下志留统韩家店组(韩忠华, 2008)。该区的铝土矿矿石类型主要为土状-半土状、碎屑状、致密状、豆鲕状矿石。该区各矿石类型富 Ga 规律与黔中修文小山坝明显不同, 如大竹园矿区各类型矿石中镓含量由高到低为: 致密状夹碎屑状→碎屑状→半土状→豆鲕状→致密状。黔北—渝南铝土矿含矿岩系沉积时代应该为中二叠世的梁山组和大竹园组。调查发现在大塘、新民、旦坪、桃园、宴溪、瓦厂坪、渝南大佛岩和武隆申基坪等地的铝土矿中存在不同程度镓富集, 其中, 黔北大竹园的伴生镓资源量可以达到 5400 t(李沛刚等, 2014)。根据该区铝土矿及其伴生镓分布特征认为, 黔北务正道地区和渝南武隆—南川一带的道真向斜、桃园向斜、安场向斜、浣溪向斜、栗园—鹿池向斜、大塘向斜、张家院向斜、新模向斜等具有较好的找镓前景(图 3; 李沛刚等, 2013; 李再会等, 2013)。

右江成矿区(III): 该区伴生镓的铝土矿主要分

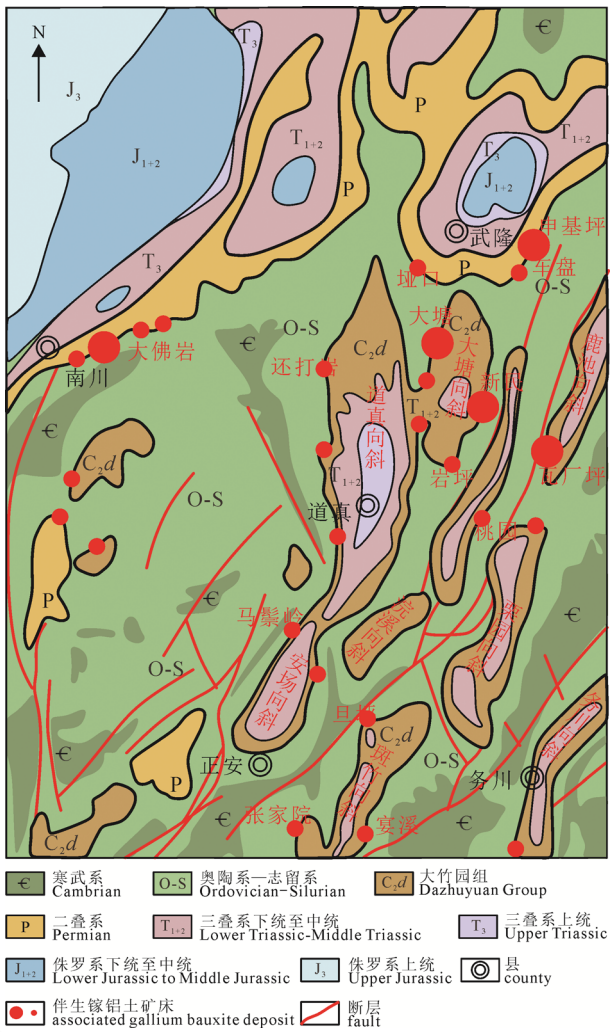


图 3 黔北—渝南成矿区伴生镓铝土矿(改自谷静等, 2021)

Fig. 3 Adjacent gallium bauxite in North Guizhou–South Chongqing mineralization area (modified from GU et al., 2021)

布于云南和广西。云南铝土矿的赋矿层位在滇东南，为晚二叠世龙潭组，滇东南晚二叠世吴家坪早期处于滨海环境，有利于铝土矿的形成。滇东南铝土矿主要为原生沉积型和次生堆积型铝土矿，沉积型铝土矿位于丘北县，文山天生桥等，堆积型铝土矿主要位于砚山县阿猛、西畴县木者—铁厂地区。伴生镓主要赋存在堆积型铝土矿中。广西是全国第二大铝土矿资源省份，含矿岩系为晚二叠世合山组。桂西一带有少量红土型铝土矿分布。桂西的铝土矿矿体大多散布于那坡—德保、靖西—田阳，包括田东县和平果县一带(覃丰等, 2019)，该区铝土矿赋存于二叠系茅口组灰岩的侵蚀面之上，二叠系合山组之下(王文鹏, 2016)，代表性矿床有靖西禄峒、桂西平果、桂西田阳、靖西大甲和靖西新圩等铝土矿。

我国的沉积型铝土矿为产于碳酸盐岩上或产于砂岩、页岩、泥灰岩、玄武岩侵蚀面上的铝土矿矿床，铝土矿层的通常伴随着富铁矿物或煤层(炭质页岩)。从上到下通常是“页岩(炭质页岩，煤)-铝-铁”结构。如，华北地台石炭系本溪组底部的铝土矿(“山西式”铝土矿)，矿层主要位于灰岩之上和铁质、炭质泥岩(劣煤，煤)共生形成了煤-铝-铁共生组合，三者在含矿系内部此消彼长，底部铁质层为黄铁矿和菱铁矿；贵州二叠系梁山组、广西上二叠统合山组(图 3)含矿层都是区域性的“煤-铝-铁”结构(水兰素和常全明, 1999; Zhang et al., 2013; 高兰等, 2015; 唐波等, 2021; 姬果等, 2021)。有学者认为“煤-铝-铁”的形成伴随着强烈的风化作用，是在强酸性-碱性转化条件下形成的，有利于发生脱硅、去铁、富铝等一系列化学反应。“煤-铝-铁”三层结构在铝土矿中明反映现了含矿岩系垂向上的岩性差别，并且铝土矿的上覆岩系和基岩之中镓的含量与其他地方相比偏低，但在含铝岩系和铝土矿层中的镓含量较高(图 4)。且不同的含铝岩系中镓的含量也存在着差别，如黔中小山坝镓在铝土矿层的中下部，富镓岩性主要为铝土矿(岩)，而在豫西杜家沟本溪组则是铝质黏土岩和下部的铝土矿。

通过对比我国主要伴生镓铝土矿成矿带，发现不同的铝土矿床中镓含量变化范围较大，如杜家沟含量 44×10^{-6}~130×10^{-6}、大竹园 12.26×10^{-6}~132.56×10^{-6}、修文小山坝 21.88×10^{-6}~72.59×10^{-6}(叶霖等, 2008; 汤艳杰等, 2001; 李沛刚等, 2014)，且同一矿床之中不同类型矿石中镓的平均含量也有明显不同，如大竹园铝土矿土状-半土状铝土矿中镓平均含量为 52.97×10^{-6}，碎屑状铝土矿中镓平均含量为 65.46×10^{-6}，致密状铝土矿中镓平均含量为 47.59×10^{-6}。

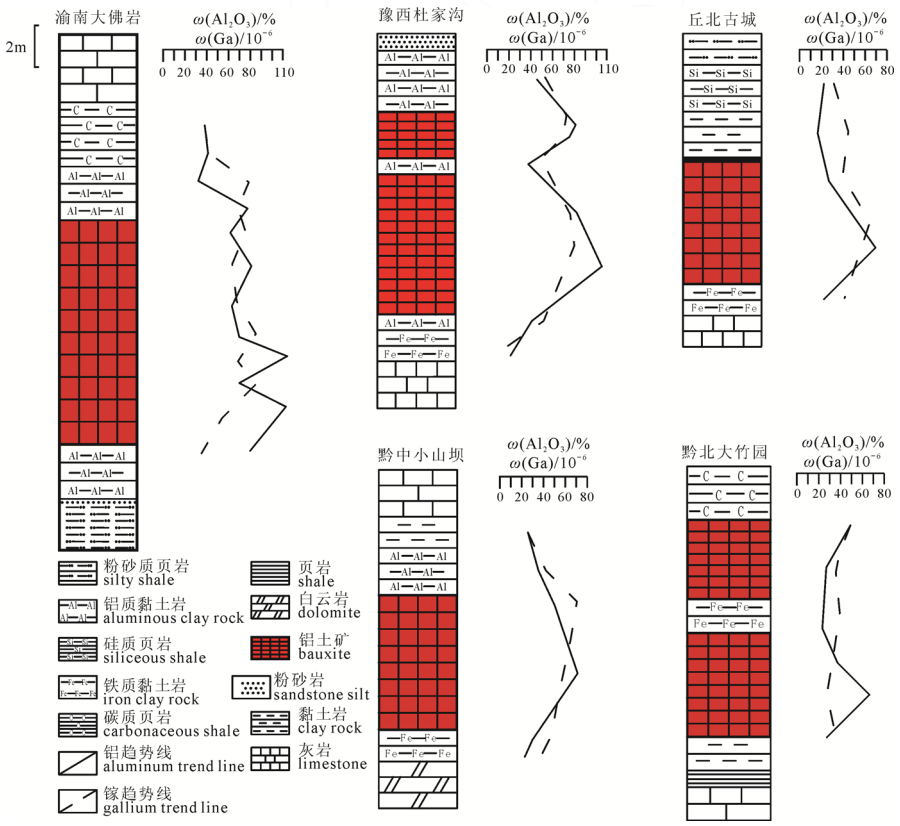


图 4　沉积型铝土矿典型剖面及镓含量变化图

(数据来源：汤艳杰等, 2001；叶霖等, 2008；于蕾, 2012；陈阳等, 2013；崔滔, 2013)

Fig. 4　Profile of sedimentary bauxite and gallium content change

(Data sources: TANG et al., 2001; YE et al., 2008; YU, 2012; CHEN et al., 2013; CUI, 2013)

2.1.2 煤矿中伴生镓成矿区

我国富镓煤矿的空间分布特征目前还不是很明显，宁树正等(2019)划分了我国煤中金属元素矿床资源带。Dai et al.(2016)把我国煤中伴生镓的元素组合分成了两类：Al-Ga 和 REY-Nb-Zr-Ga。其中，Al-Ga 主要分布于我国华北地区和西北地区，REY-Nb-Zr-Ga 主要分布于我国西南地区。

华北陆块北缘成矿区(IV)：该区存在的伴生镓煤矿主要有黑岱沟、阿刀亥和宁武煤矿(图 5)。其中，准格尔黑代沟煤矿位于鄂尔多斯东北缘，是目前我国发现唯一的与煤伴生的超大型镓矿床，基底为奥陶统灰岩，主要含煤地层为石炭系太原组、二叠系山西组，上覆地层有上、下石盒子组、石千峰组等，黑代沟 6 号煤层是三角洲沉积体系下形成(Dai et al., 2006; 张复新和王立社, 2009; 宁树正等, 2017)。煤矿中主要矿物有碳酸盐矿物、硫酸盐矿物和黏土矿物等，其中 Ga 主要赋存于高岭石和勃姆石等矿物中(高桂梅等, 2023)。

内蒙古大青山煤田阿刀亥矿区位于阴山纬向构造中段，受强烈构造作用控制，主要赋矿地层为石炭系、二叠系栓马桩组(关腾, 2013)，上覆地层为杂怀沟组和石叶湾组，下伏地层为寒武奥陶系灰岩夹白云质灰岩(钟蓉和陈芬, 1985)，该区煤层为陆相沉积。阿刀亥矿区的矿物主要有高岭石、勃姆石、硬水铝石和磷钡铝石(邹建华等, 2012)，其中，富镓矿物以勃姆石和硬水铝石为主。煤中镓与铝土矿中镓分布规律相似，镓与铝紧密共生，因此，可以初步通过 Al_2O_3 含量去判断镓含量。

煤中伴生的镓可以赋存在有机质和无机质之中。如，准格尔黑岱沟煤矿富镓矿物主要为勃姆石和高岭石，镓与铝主要来自于准格尔盆地北偏东的本溪组铝土矿(代世峰等, 2014)，属于沉积成因。而阿刀亥煤矿中富镓矿物主要为勃姆石和硬水铝石，其形成是煤层中的三水铝石在岩浆热液的烘烤下脱水所形成的。在我国滇东煤层中，镓还可以以离子形式吸附于泥炭、腐殖酸等有机物中(Dai et al., 2010; Qin et al., 2015)。但无论镓以有机态、无机态或者混合形式存在，对其含量上的差异性还需要进一步研究(表 3)。

2.1.3 铅锌矿中伴生镓成矿带

川—滇—黔成矿带(Ⅴ)：位于我国西南扬子地台和塔里木盆地西缘。主要出露地层有震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系，次有志留系、奥陶系和三叠系。川—滇—黔成矿带遭受新生代构造活动影响较大，是成矿作用发育的主要区域之一(叶霖等, 2011)。矿床主要分布在震旦系碳酸盐岩上部(张长青等, 2013)。区内的铅锌矿经过了多期次发育、岩浆活动和构造运动的共同作用下，主要形成了岩浆型和沉积改造型铅锌矿，其中沉积改造型铅锌矿占全国总资源量的 10.6%。矿石矿物主要以闪锌矿、方铅矿和黄铁矿为主，脉石矿物有方解石、石英等。目前，在川—滇—黔成矿带发现了老厂、富乐、五指山、洞子沟、桥儿沟和大梁子等一批大-中型富镓铅锌矿床。

湘西—鄂西成矿带(VI)：位于我国扬子地台西南和北缘，是我国重要的铅锌矿成矿带，主要包括洛塔、保靖、花垣和凤凰四个铅锌矿田，已经探明了洛塔、保靖等多个大-超大型铅锌矿床(吴涛等, 2021)。成矿带内主要含矿层位为震旦系陡山沱组和寒武系清虚洞组。洛塔矿田中唐家寨铅锌矿床含镓矿物闪锌矿中平均镓含量为 $1\ 320\times10^{-6}$，远超过铅锌矿中镓工业回收的最低品位。长登坡、辰溪和花垣铅锌矿床镓含量均超过工业品位，极具开发利用价值。代表性矿床有湖南长登坡、湖南辰溪等铅锌矿床。

湘东—赣西成矿区(VII)：位于扬子地台的次级构造单元——江南台隆，区内出露地层为新元古代—第四纪。区内伴生镓矿床基底主要是由碎屑岩构成。主要矿床类型为 MVT 型铅锌矿。该区已发现的伴生镓的铅锌矿矿床较少，但在骊山和清水塘显示了一定的镓资源潜力。

从统计数据来看，我国伴生镓的铅锌矿主要分布于川—滇—黔成矿带和湘西—粤西成矿带，镓资源潜力大。在闪锌矿之中镓含量多高于其工业品位，但在黄铁矿或其他矿物之中低于地壳丰度。从根本上显示了镓的富集是由于与铅锌矿中的锌相关矿物

表 3 煤中 Ga 的赋存状态和来源(改自：Qin et al., 2015)

Table 3 Occurrence type and source of Ga in coal (modified from Qin et al., 2015)

赋存状态	Ga 含量/($\times10^{-6}$)	Ga 的载体	Ga 的来源	矿床实例	参考文献
无机态	12~76	勃姆石	陆源碎屑	准格尔黑代沟煤矿	Dai et al., 2006
	5.7~38	硬水铝石	陆源碎屑	大青山阿刀亥煤矿	Dai et al., 2012
	41.91~66.42	硅酸铝盐矿物	陆源碎屑	南武开发煤矿	李聪聪等, 2018
有机态	48	——	陆源碎屑	滇东月亮田煤矿	王佩佩, 2017
	33.0~106	离子吸附	火山作用	中国滇东煤层	Dai et al., 2010
混合形式	7.4~54	勃姆石和有机化合物	陆源碎屑	准格尔哈尔乌素煤矿	Dai et al., 2008

表 4　我国典型伴生镓矿床

Table 4　Typical gallium-associated deposits in China

编号	矿区	含矿层位	Ga 含量/($\times10^{-6}$)	数据来源
1	豫西杜家沟(铝土矿)	石炭系本溪组	44~130	汤艳杰等, 2001
2	豫西渑池贯沟	石炭系本溪组	21.5~75.4	袁爱国, 2010
	豫西渑池	石炭系本溪组	19.9~40.9	王燕茹等, 2012
3	豫西贾家洼	石炭系本溪组	75~92	汤艳杰等, 2002
4	豫西宝丰县边庄	石炭系本溪组	14.9~44.9	康微, 2013
5	豫西偃师夹沟	石炭系本溪组	67~90	汤艳杰等, 2002
	豫西偃师夹沟	石炭系本溪组	24.6~86.4	袁爱国, 2010
7	山西交口庞家庄	石炭系本溪组	0.22~27.8	孟健寅等, 2011
8	山西宁武宽草坪	石炭系本溪组	9.27~71.03	孙思磊, 2011
9	山西太原阳曲	石炭系本溪组	11.77~59.67	杨中华等, 2011
10	山西原平石墙	石炭系本溪组	18.59~38.59	杨中华等, 2011
11	山西阳泉	石炭系本溪组	17~105.5	廖士范和梁同荣, 1991
13	山西交口南岭上	石炭系本溪组	36.6~74.7	陈平和柴浩然, 1997
14	山西交口回龙	石炭系本溪组	7.18~56.41	杨中华等, 2011
15	山西上务头	石炭系本溪组	14.09~33.29	于磊, 2017
16	辽宁本溪	石炭系本溪组	20.13~47.19	高仁文和邓晓峰, 2014
17	靖西禄垌	第四系	34~40.4	张佳莉等, 2016
18	桂西平果	第四系	34~48	张佳莉等, 2016
19	桂西平果	第四系	48,50~54.60	Wei et al., 2013
20	桂西田阳	第四系	11.4~84	蔡书慧等, 2012
21	靖西大甲	第四系	17.62~37.19	俞缙等, 2009
	靖西大甲	第四系	45.2~59	Wei et al., 2013
23	靖西新圩	第四系	65.74~79.26	刘枝刚, 2005
24	广西贵港	第四系	33.63~1314	王佳奇, 2013
25	桂西平果	第四系	19.03~68.97	乔龙, 2016
26	黔北大竹园	石炭系大竹园组	12.26~96.57	李沛刚等, 2014
	黔北大竹园	石炭系大竹园组	24.21~132.56	李沛刚等, 2014
28	黔中清镇燕垅	石炭系九架炉组	47~760	廖士范和梁同荣, 1991
29	黔中小山坝	石炭系九架炉组	32.3~50.7	Wen et al., 2021
	黔中小山坝	石炭系九架炉组	40.6~61.5	Wen et al., 2021
	黔中小山坝	石炭系九架炉组	21.88~72.59	叶霖等, 2008
32	福泉高洞	石炭系九架炉组	27.6~57.1	金中国等, 2018
33	遵义老瓦山	石炭系九架炉组	12.99~37	崔滔, 2013
34	凯里苦李井	二叠系梁山组	15.19~43.17	李再会等, 2013
35	黔北新民	二叠系梁山组	25.1~120	黄智龙等, 2014
36	黔北瓦厂坪	二叠系梁山组	15.19~60.84	黄智龙等, 2014
37	南川大佛岩	二叠系梁山组	20.4~71.4	李再会等, 2013
38	云南鹤庆	三叠系中窝组	8.15~26.49	王行军等, 2018
39	丘北古城	二叠系龙潭组	12.4~50.13	于蕾, 2012
40	文山天生桥	二叠系龙潭组	9.82~48.75	焦扬, 2014
41	云南省茂租(铅锌矿)	震旦系灯影组	~100(*)	张荣伟, 2013
42	云南省麒麟场	石炭系摆佐组	23.65~53.34(*)	Han et al., 2015
43	云南省锡宜	侏罗系象山组	10.10~98.24(*)	Li et al., 2020
44	云南省富乐	二叠系茅口组	5~358(*)	司荣军等, 2011
45	渝南老厂坪	寒武系清虚洞组	10.1~234(*)	王皓宇等, 2021
46	广西省泗顶	泥盆系融县组	20~250(*)	曹江帅, 2018
47	湖南省骊山	冷家溪群	17.0~381(*)	Yu et al., 2021
48	湖南省宝山	石炭系石磴子组	700~900(*)	张天栋等, 2021
49	湖南省长登坡	寒武系清虚洞组	10.2~126(*)	张沛等, 2021
50	湖南省清水塘	寒武系清虚洞组	100~1100(*)	Liu et al., 2022
51	湖南辰溪黄泥界	震旦系陡山沱组	16.63~63.5(*)	陈佳和孔令湖, 2012
52	湖南省花垣	寒武系清虚洞组	10.07~172.21(*)	隗含涛等, 2021
53	贵州省五指山	寒武系清虚洞组	20.7~158(*)	叶太平等, 2019
54	贵州省牛角塘	寒武系清虚洞组	18.43~64.61(*)	程涌等, 2022

续表 4

编号	矿区	含矿层位	Ga 含量/(×10⁻⁶)	数据来源
55	贵州省洞子沟	寒武系清虚洞组	12.438~55.276(*)	陈翠华等, 2019
	贵州省天桥	寒武系清虚洞组	16.03~48.71(*)	李珍立等, 2016
57	贵州省龙井街	寒武系清虚洞组	43.1~45.3(*)	耿忠武, 2018
58	河南省赤土店	震旦系煤窑沟组	10.64~36.09(*)	田浩浩等, 2015
59	陕西省楠木树	震旦系灯影组	60~370(*)	尹力, 2016
60	陕西省马元	震旦系灯影组	11.18~639.6(*)	胡鹏等, 2014
61	四川省桥儿沟	震旦系灯影组	11.9~65.3(*)	孟洪振, 2016
62	四川省大梁子	震旦系灯影组	12.29~374.04(*)	Yuan et al., 2018
63	四川省银厂沟~骑骡沟	震旦系灯影组	15~37(*)	李伟, 2011
	江西银山	侏罗系	19(*)	黄松等, 1998
64	辽宁省新岭	辽河群大石桥组	14.7~426(*)	Sun et al., 2021
65	新疆哈尔达板	哈尔达板组	11.97~40.7(*)	Jiang et al., 2021
66	云南老厂	石炭系	23~69(*)	叶霖等, 2012
67	湖南省栗山	侏罗系-白垩系	11.3~186(*)	郭飞等, 2020
68	湖南洛塔唐家寨	奥陶系	~1320(*)	吴涛等, 2021
69	广东省凡口	泥盆系	74.5~550(*)	张先容, 1993
70	江西省蔡家坪	侏罗系	12.6~30.4(*)	Dai et al., 2014
71	安徽省荷花山	三叠系	600~1900(*)	Liu et al., 2018
72	新疆阿舍勒	泥盆系	——	吴玉峰等, 2016
73	新疆火烧云	侏罗系龙山组	——	袁鑫等, 2022
74	内蒙古甲乌拉	晚侏罗世—早白垩世	——	曹艳华和刘翼飞, 2020
75	准格尔哈尔乌素(煤矿)	石炭—二叠系太原组	25~70	秦勇等, 2009
76	准格尔黑岱沟	石炭—二叠系太原组	12~65.4	Dai et al., 2006
77	准格尔官板乌素	石炭—二叠系太原组	3.4~59	Dai et al., 2012
78	宁武平朔	石炭—二叠系太原组	8.27~68.22	刘帮军等, 2014
	宁武平朔	石炭—二叠系太原组	7.96~36.8	Di et al., 2022
80	大青山阿刀亥	石炭—二叠系太原组	5.7~38	Dai et al., 2012
81	藤县蒋庄	石炭—二叠系太原组	6.6~171	黄文辉等, 2011
82	大同北部	石炭—二叠系山西组	12.9~35.4	王钧漪等, 2010
83	山东滕县	石炭—二叠系山西组	~80	李春阳, 1991
84	黔东凯里	二叠系梁山组	19~44	易同生等, 2007
85	渝东南芦塘	二叠系吴家坪组	2.19~40.3	邹建华等, 2022
86	淮北芦岭	二叠系石盒子组	35.73~53.93	李影影, 2019
87	河南登封	二叠系石盒子组	3~40	杨伟林和朱绍军, 1993
88	华蓥山绿水洞	二叠系龙潭组	6.19~78.50	雒洋冰, 2014
89	重庆南武天宝	二叠系龙潭组	23.33~51.53	李聪聪等, 2018
	重庆南武开发	二叠系龙潭组	41.91~66.42	李聪聪等, 2018
91	准格尔黑岱沟	石炭—二叠系太原组	12~76	刘大锐等, 2018
92	淮北朱庄	石炭—二叠系山西组	66.5~168	李祥和李伍, 2022

注: ——表示微量元素数据较低; *表示测试方法为 ICP-MS; 1~40 铝土矿; 41~73 铅锌矿; 74~92 煤矿。

的地球化学性质相似造成的。

2.2 时间分布

我国的富镓矿床从元古宙、古生代、中生代到新生代均有形成, 以石炭纪—三叠纪、侏罗纪—白垩纪和第四纪为主(图 5)。其中, 我国富镓铝土矿形成的主要时代为石炭纪、二叠纪和第四纪, 以石炭纪最为重要, 形成的富镓铝土矿超过 70%; 富镓铅锌矿的主要成矿时代为震旦纪和寒武纪; 富镓煤矿的主要成矿时代为石炭纪和二叠纪。

不同时代形成的富镓矿床类型不同, 震旦纪—泥盆纪主要形成低温热液矿床(碳酸盐岩型); 石炭

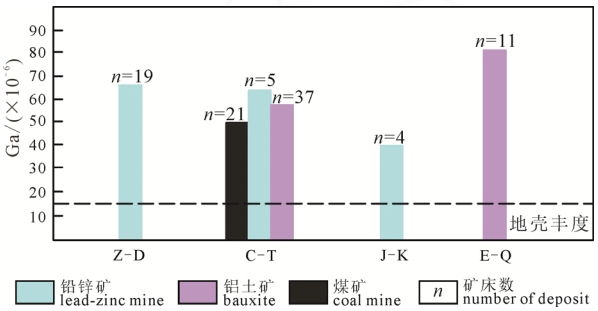


图 5 我国伴生镓矿床成矿时代矿床数量/Ga 平均含量直方图

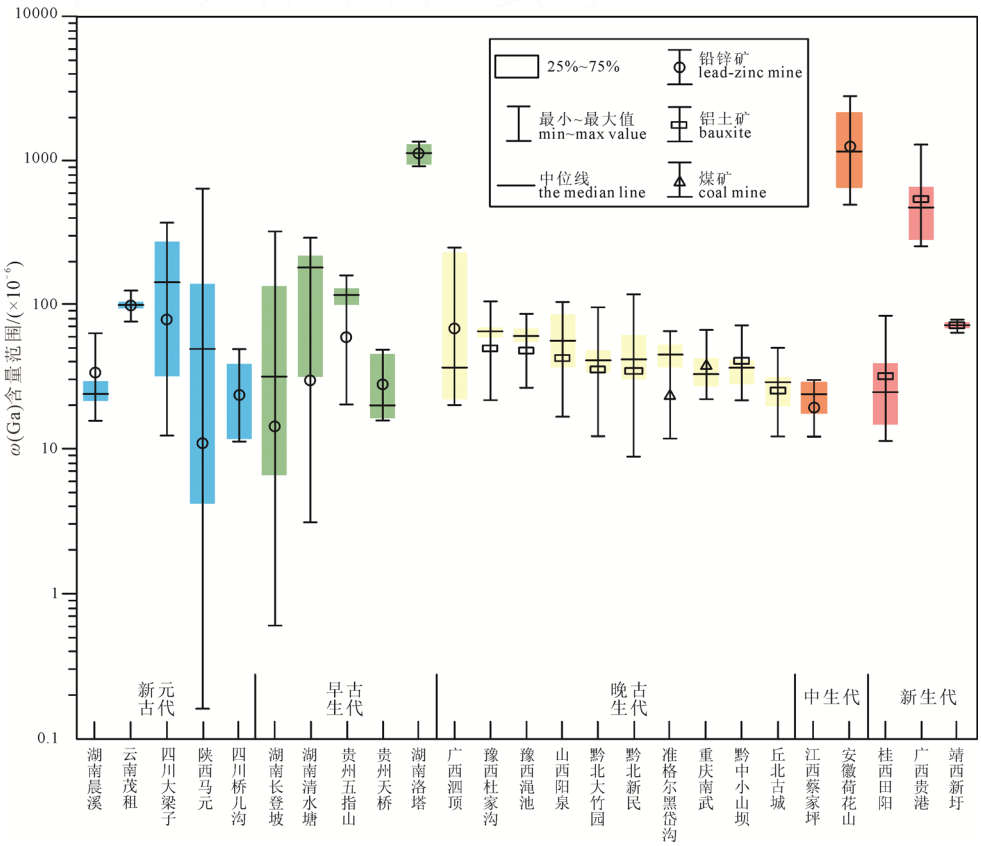
Fig. 5 Histogram of ore deposit number/average Ga content of Ga-rich ore deposits in China during the metallogenic period

纪—三叠纪主要是由风化-沉积作用所形成的富镓铝土矿和富镓煤矿；侏罗纪—白垩纪地壳趋于稳定，为铅锌矿主要成矿时代，以沉积作用为主的外生矿床为主(刘英超等, 2022)，但侏罗纪形成的铝土矿和煤矿中镓的含量都较低，未统计在内。新生代主要为铝土矿中伴生的镓矿，Ga 的平均含量高于石炭纪—二叠纪形成的铝土矿，主要分布在我国西南地区和东南沿海地区。目前，我国震旦纪—泥盆纪、石炭纪—三叠纪和新生代的富镓矿床数量、规模和含量达到 Ga 工业品位，找矿潜力巨大。

全国范围内，富镓矿床主要发育于早、晚古生代和早中生代(图 6)。新元古代的富镓矿床均为富镓铅锌矿，多分布于稳定的地台边缘，矿床形成与岩浆活动无明显关系，富镓铅锌矿多属于碳酸盐岩(MVT)型。典型矿床有云南茂租、四川大梁子、湖南辰溪和陕西马元。

早古生代的富镓矿床多为铅锌矿，主要为碳酸盐岩型(MVT)与少量矽卡岩型铅锌矿。川—滇—黔成矿区在晋宁运动之后产生了结晶基底和变质基底，进而在晚震旦世，区内形成了一套新的碳酸盐岩地层，主要的含矿层位是震旦系灯影组白云岩，其次为寒武系、志留系碳酸盐岩和碎屑岩(张长青等, 2013)。区内主要为中-小型矿床和矿点，超大-大型铅锌矿较少。典型矿床有湖南长登坡、湖南清水塘、贵州五指山、贵州天桥和湖南洛塔。

晚古生代形成的富镓矿床分布广泛，以华北陆块和扬子板块为主，富镓矿床类型逐渐增多，主要有沉积型铝土矿、煤矿、碳酸盐岩(MVT)型铅锌矿等，



数据来源：茂租据张荣伟, 2013；四川大梁子据 Yuan et al., 2018；陕西马元据胡鹏等, 2014；四川桥儿沟据孟洪振, 2016；湖南长登坡据张沛等, 2021；湖南省清水塘据 Liu et al, 2022；贵州省五指山据叶太平等, 2019；贵州天桥据李珍立等, 2016；湖南洛塔据吴涛等, 2021；广西泗顶据曹江帅, 2018；豫西杜家沟据汤艳杰等, 2001；豫西渑池据王燕茹等, 2012；山西阳泉据廖士范和梁同荣, 1991；黔北大竹园据李沛刚等, 2014；黔北新民据黄智龙等, 2014；准格尔黑代沟据秦勇等, 2009；重庆南武据李聪聪等, 2018；黔中小山坝据叶霖等, 2008; Wen et al, 2021；丘北古城据于蕾, 2012；江西蔡家坪据 Dai et al., 2014；安徽荷花山据 Liu et al, 2018；桂西田阳据蔡书慧等, 2012；广西贵港据王佳奇, 2013；靖西新圩据刘枝刚, 2005。

Data sources: Maozu from ZHANG, 2013; Daliangzi of Sichuan from Yuan et al., 2018; Mayuan of Shaanxi from HU et al., 2014; Qiaoergou of Sichuan from MENG, 2016; Changdengpo of Hunan from ZHANG et al., 2021; Qingshuitang of Hunan from Liu et al., 2022; Wuzhishan of Guizhou from YE et al., 2019; Tianqiao of Guizhou from LI et al., 2016; Luota of Hunan from WU et al., 2021; Siding of Guangxi from CAO, 2018; Dujiagou of west Henan from TANG et al., 2001; Mianchi of west Henan from WANG et al., 2012; Yangquan of Shanxi from LIAO and LIANG, 1991; Dazhuyuan of north Guizhou from LI et al., 2014; Xinmin of north Guizhou from HUANG et al., 2014; Heidaigou of Junger from QIN et al., 2009; Nanwu of Chongqing from LI et al., 2018; Xiaoshanba of middle Guizhou from YE et al., 2008; Wen et al., 2021; Ancient City of Qiubei from YU, 2012; Caijiaping of Jiangxi from Dai et al., 2014; Hehuashan of Anhui from Liu et al., 2018; Tianyang of west Guangxi from CAI et al., 2012; Guigang of Guangxi from WANG, 2013; Xinxu of Jingxi from LIU, 2005.

图 6　铅锌矿、煤矿和铝土矿中 Ga 富集特征

Fig. 6　Ga enrichment characteristics in lead-zinc ore, coal mines, and bauxite

以沉积型铝土矿为主, 主要分布在山西(断隆)成矿区和豫西成矿区。典型矿床有广西泗顶、豫西杜家沟、豫西渑池、山西阳泉、黔北大竹园、黔北新民、黔中小山坝和丘北古城等。

中生代是我国铅锌矿的重要形成时期。在印支期和燕山期时, 华南华北板块聚合和特提斯洋盆闭合, 主要形成陆相火山岩型和碳酸盐岩(MVT)型富镓铅锌矿。在燕山期时, 铅锌矿形成主要受太平洋板块俯冲作用的影响, 在我国东部的铅锌矿受岩浆作用影响显著, 主要形成了矽卡岩型、各类围岩脉型等铅锌矿。它们主要分布在湘东—赣西成矿带和湘西—鄂西成矿带。典型矿床有广东凡口、安徽荷花山铅锌矿等。

第四纪的富镓矿床大部分为铝土矿, 由原生沉积的铝土矿经历过后期的风化、沉积和成矿作用进一步形成品位较高、具有重要工业意义的铝土矿矿床。矿床类型以红土型铝土矿和堆积型铝土矿为主, 其中, 红土型铝土矿多分布于中国东南部沿海地区, 堆积型铝土矿主要分布于云南、广西等省份。典型的富镓矿床有桂西田阳、桂西平果、靖西新圩、丘北古城等。

3 镓的富集成矿机制

3.1 寄主矿物

沉积型铝土矿典型剖面图及镓含量变化(图 4)表明, 镓主要分布于含铝岩系中, 分布状态与铝相似, 富镓铝土矿中 Al_2O_3 和镓含量呈明显的正相关关系, 即镓的含量随 Al_2O_3 含量增加而增加(图 7)。这是由于在铝土矿形成过程中, 镓与铝紧密伴随(Ga^{3+}——0.62Å)与(Al^{3+}——0.57 Å)离子半径相近, 镓与铝之间容易发生类质同象(刘英俊, 1965; 汤艳杰等, 2002; 刘平, 2007; Schulte and Foley, 2013), 推测镓以分散状态进入含铝矿物的矿物晶格之中。

近年来, 我国学者发现了煤中镓异常富集和存在一些有巨大经济价值的富镓矿床(Dai et al., 2006, 2008, 2012, 2018; 秦勇等, 2009; 王文峰等, 2011; 宁树正等, 2019)。统计数据表明, 煤矿之中镓与铝的含量呈现正相关(图 7)。镓在煤矿中赋存形式有无机态、有机态和混合形式但在中国多以无机态为主, 载体矿物主要有勃姆石、硬水铝石等(Dai et al., 2012; 代俊峰等, 2021)。如, 黑岱沟煤矿中镓主要寄主矿物为勃姆石(代世峰等, 2006), 淮北朱庄的主要寄主矿物则为一水硬铝石和高岭石(李祥和李伍, 2022)。

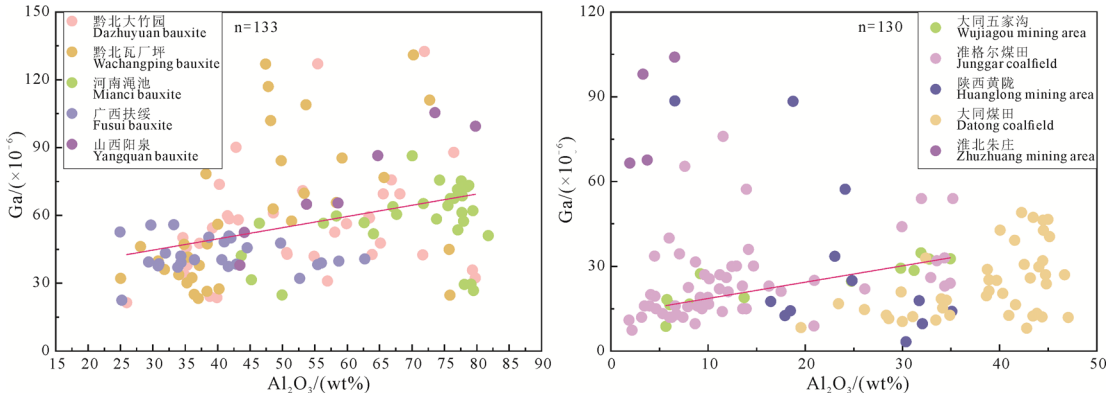
前人研究表明, 并非所有的铅锌矿床都属于富镓矿床, 与岩浆作用有关的铅锌矿床中镓含量小于与热液作用有关的铅锌矿床(Zhang, 1987)。镓具有亲硫(铜)的地球化学属性, 且 Ga^{3+}是最稳定的价态, 与 Zn^{2+}和 Fe^{2+}属于 6 配位, 推测铅锌矿中, 镓以类质同象的形式进入以闪锌矿为主的硫化矿物晶格(涂光炽等, 2004; Jansson et al., 2016)。

3.2 成矿机制

岩浆活动对铅锌矿床成矿主要有两种影响, 一是供应物质来源, 二是为成矿供应热源(李建源, 2015)。铅锌矿成矿之前, 地幔隆起导致地壳拉张, 然后基性-超基性岩侵入, 之后岩浆侵入则带入了成矿元素, 在热液作用下, 矿床与容矿层也发生了改变。

煤中镓富集过程主要分为四个: ①成矿物质准备阶段; ②成矿物质迁移阶段; ③成岩作用阶段; ④后期改造阶段(陈磊, 2019)。准格尔煤田中一水软铝石和一水硬铝石等含镓矿物的主要来源是本溪组铝土矿, 铝土矿在遭受风化剥蚀之后搬运到聚煤盆地之中, 含镓矿物释放。在第一阶段结束时, 含镓物质随着溶液进行移动, 在这一过程中镓以类质同象的形式进入含铝矿物的矿物晶格之中, 含铝物质通常以 $Al(OH)_3$ 胶体的形式存在。随后, $Al(OH)_3$ 胶体被带入煤炭沼泽之中, 在成岩作用下压实脱水后形成铝硅酸盐矿物。成煤阶段后期构造运动导致岩浆侵入, 在岩浆热液的烘烤下煤层中的镓进行再分配, 如勃姆石进一步形成硬水铝石(Dai et al., 2012)。此外, 地表水渗流使得原煤层中的镓可能被黏土矿物吸附, 或者与含铝矿物发生类质同象, 从而发生富集。

铝土矿形成可以分为三个阶段: 成矿物质形成阶段、成矿物质迁移阶段和后期改造阶段(Bárdossy and Aleva, 1990 ; Bogatyrev and Zhukov, 2009)。含矿岩系中镓的分布以及迁移富集与铝的关系密切。在成矿物质形成的过程之中, 母岩受到强烈的风化作用和淋滤作用而溶解其中的铝硅酸盐矿物, 在酸性条件下长石类岩石会溶解(樊钰超和齐永安, 2017), 其中的 Si 及大量碱性成分被排出和淋失, 镓与铝固定于残余的风化产物之中, 铝以三水铝石、勃姆石的形式与铁的氧化物、氢氧化物相对聚集, 为沉积型铝土矿的形成提供了原始的铁-铝物质。在成矿物质迁移阶段, 风化母岩之中 Si 和大部分碱性元素已经被分选出去, 部分 Fe、Al、S 留了下来, 然后海水侵入发生沉积作用, 高铁高硫铝土矿形成。随着地壳发生升降运动, 高铁高硫铝土矿由于沉积分异作用对矿物的晶体结构进行了改造, 镓以类质同象的方式, 进入一水硬铝石、一水软铝石、蒙脱石等矿物的晶体结构之中, 或者吸附在黏土矿物和铝、铁的氢氧化物表面。另外, 部分的 Fe、Al 与 Ga 则以离子的形式, 从铝土矿中淋滤出来后继续向下迁

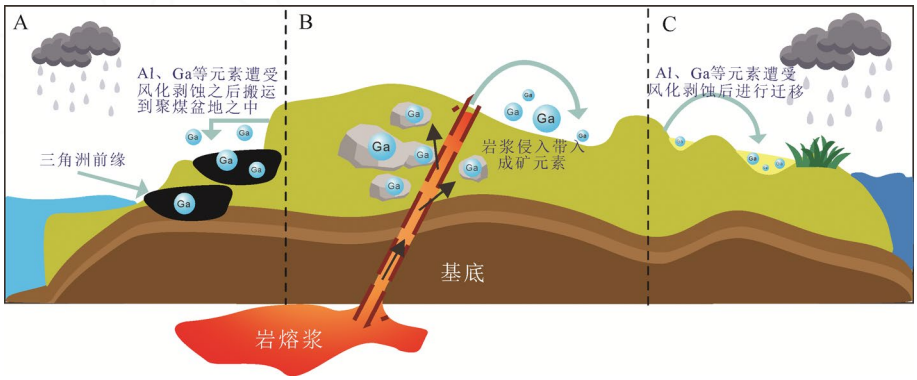


数据来源：黔北大竹园据李沛刚等, 2014；河南渑池据袁爱国, 2010；广西扶绥据余文超, 2017；山西交口据陈平和柴浩然, 1997；黔北瓦厂坪据黄智龙等, 2014；大同五家沟据李进孝等, 2020；准格尔煤田据刘大锐等, 2018；袁月, 2015; Dai et al., 2008；淮北朱庄据李祥和李伍, 2022；山西黄陇据张勇, 2013；大同煤田据 Shao et al., 2022。

Data sources: Dazhuyuan of Qianbei County from LI et al., 2014; Mianchi of Henan Province from YUAN, 2010; Fusui of Guangxi from YU, 2017; Jiaokou of Shanxi from CHEN and CHAI, 1997; Wachangping of Northern Guizhou from HUANG et al., 2014; Wujiagou of Datong from LI et al., 2020; Junggar coalfield from LIU et al., 2018; YUAN, 2015; Dai et al., 2008; Zhuzhuang of Huaibei from LI and LI, 2022; Huanglong of Shanxi from ZHANG, 2013; Datong Coalfield from Shao et al., 2022.

图 7　铝土矿、煤矿中 Ga 与 Al_2O_3 相关性图(左：铝土矿，右：煤矿)

Fig. 7　Correlation between Ga and Al_2O_3 in bauxite and coal mine (left: bauxite, right: coal mine)



A—煤矿; B—铅锌矿; C—铝土矿。

A–coal; B–lead-zinc ore; C–bauxite.

图 8　煤矿、铅锌矿和铝土矿中 Ga 富集成矿理想模型

Fig. 8　Ga enrichment in coal, lead-zinc ore, and bauxite

移，富集于底部，就构成了底部的低铁低硫型铝土矿。在后成岩作用阶段，变质作用阶段以及表生风化淋滤作用阶段，铝土矿层经过逐步的脱硫、去硅、除铁，最终形成高品质的铝土矿。镓与铝关系密切二者一起迁移、一起堆积、一起富集，但由于镓的地球化学性质比铝更活泼，在元素迁移阶段过程之中二者分离，在碱性环境之中镓优先于铝沉积下来，导致富镓层位产出的比富铝层位略低一些(图 8)。

4　找矿方向

4.1　铝土矿中伴生镓资源找矿方向

镓作为一种战略性大宗矿产，若要保障其国内资源安全，加强镓的找矿工作是必然的选择。前文已述及，全球超过 50%的镓来自铝土矿之中，其次为煤矿和铅锌矿(敦妍冉等, 2019)。这说明铝土矿是镓最主要的来源，而我国铝土矿类型超过 80%为古风化壳沉积型，其次为堆积型铝土矿(15%)，红土型铝土矿资源量占比最少(廖士范和梁同荣，1991；高兰等，2015)。因此，关于我国伴生镓资源的找矿可以以沉积型铝土矿和堆积型铝土矿做为主攻方向，兼顾煤矿和铅锌矿等其他伴生镓矿床。重点在河南、山西、广西、重庆、云南和贵州等省份开展。

4.1.1　华北地区

晋豫成矿区是我国铝土矿资源量最多的区域，其中伴生镓资源也是极其可观的。早古生代，华北板块与华南扬子板块之间的秦岭海继续存在。加里东期，华北板块继续抬升并经历长时间的风化、剥蚀与夷平。直到中石炭世，因受海西运动海侵的影响，地壳开始缓慢下降，然后进行海陆交互相沉积(刘国栋等, 2021)。古风化壳中硅、铝、铁等物质因受海泛剧烈影响，被海水冲刷到古陆附近的低洼地带富集。经过长时间的沉积构成了我国最著名的含铝岩系“山西式铁矿”。近年来，地勘基金、整装勘查以及地方单位自筹资金等各类勘查项目，华北

地区伴生镓铝土矿床找矿工作已经取得重大突破。如山西孝义发现一处特大型铝土矿床, 其中伴生镓资源量达到了4 417.71 t; 山西中阳县下枣林矿区发现特大铝土矿之中估算伴生镓资源量2 113.6 t; 在豫西礼庄寨铝土矿中发现伴生镓资源量1 041 t; 豫西新安县郁山发现伴生镓资源量1 739 t等。因此, 可以对山西省孝义、吕梁市兴县、临沂市汾西和长治市沁源, 河南省平顶山宝丰县、三门峡渑池县、陕县、郑州新密县、登封市和洛阳市偃师等地区的铝土矿开展伴生镓资源调查和勘查工作。富镓矿物以硬水铝石为主的铝土矿矿床, 其中伴生镓的含量基本上超过了工业品位(温汉捷等, 2020)。由于镓元素主要赋存于含铝矿物, 镓与铝呈强正相关关系, 所以矿区里应主要研究铝土矿中的铝含量, 如果铝土矿铝含量较高则有寻找到伴生镓矿的可能。

4.1.2 西南地区

扬子陆块西南成矿区是我重要的古风化壳沉积型铝土矿产区, 该区晚古生代全球大地构造运动再一次活跃起来, 早二叠世冰期-间冰期发生的海平面运动。在此期间, 海平面的频繁变化使我国的铝土矿成矿作用呈现加强的趋势。华南板块的古纬度位于热带辐合带内, 在冰期海平面下降, 大量基岩暴露且经历剥蚀, 同时期低地下水水位将导致垂向淋滤作用控制下的铝土矿化作用产生(余文超, 2017)。2011年以来, 尤其是在该区设立国家级整装勘查区以来, 也取得了一系列重要进展。如: 贵州大竹园铝土矿查明伴生镓金属量5 448.25 t; 新民铝土矿伴生镓远景资源储量 7 534 t(欧德琳和周静, 2010; 苏之良等, 2021)。因此, 贵州省务—正—道地区和重庆市南川区、武隆县等地区的铝土矿为扬子陆块西南成矿区Ga找矿的重点远景区。

右江成矿区是我国堆积型铝土矿主要分布带。铝土矿堆积于第四纪的岩溶洼地中, 经过岩溶作用后所形成的, 但不会在岩溶作用时终止, 在之后还会进入红土化阶段。矿石呈现出大小不一的块、砾、碎屑状堆积于松散的红土之中, 其上可能覆盖有松散红土。堆积型铝土矿剖面大致可以分为三层(刘枝刚, 2005; 张佳莉等, 2016): 底部黏土层、中部矿层和顶部黏土层(顶部或无覆盖层)。镓在矿层中上部含量较高, 在铁质岩和铝土矿中明显富集。镓作为铝土矿的伴生矿, 其平均含量已经达到了镓元素的伴生工业指标要求(表5)。如, 云南文山、砚山和丘

表5 我国伴生镓铝土矿中镓平均含量

Table 5 Average gallium content in gallium-associated bauxite in China

成矿区	成矿带(矿区)	ω(Ga)/×10^{-6}(样品数量)				
		铁质岩	铝土矿	铝土岩	铝质黏土岩	黏土岩
晋豫成矿区	交口—汾西	24.42(3)	39.9(14)	38.7(6)	32.5(7)	37.38(7)
	临县—中阳	——	45.6(3)	45.05(2)	——	43.75(2)
	沁源	——	56.2(3)	59.5(2)	——	——
	宁武—原平	25.1(7)	51.55(7)	29.1(2)	31.05(7)	36.2(6)
	朔州	——	59.45(4)	——	——	35.5(2)
	孝义—汾阳	23(2)	69.85(6)	47.76(5)	——	45.6(3)
	阳泉	——	71.86(11)	49.63(3)	——	34.05(4)
	三门峡—渑池—新安	3.61(1)	60.27(20)	38.75(8)	51.7(3)	52(1)
	汝州—宝丰—鲁山	——	60(6)	——	30.32(1)	——
	嵩箕	——	18.77(10)	28.15(2)	36.34(2)	——
	宜阳—汝阳	54.88(4)	40.12(9)	37.48(8)	37.14(8)	21.12(3)
扬子陆块西南缘	大竹园	51.02(8)	52.65(47)	45.59(12)	6.18(10)	——
	瓦厂坪	26.33(1)	64.85(18)	80.46(5)	37.77(12)	2.32(1)
	新民	55.9(2)	47.34(22)	54.11(8)	28.17(11)	3.11(1)
	小山坝	17.7(1)	22.5(2)	——	24.55(6)	17.7(1)
	凯里—瓮安—福泉	——	36.05(10)	——	22.2(7)	——
	遵义—息烽	——	22.48(4)	42.11(2)	35(2)	30(1)
	新木—宴溪	——	54.10(18)	——	31.85(8)	6.57(3)
右江成矿区	文山	31.89(7)	67.14(1)	28.6(1)	38.7(2)	——
	砚山	——	59.09(1)	——	——	——
	丘北	35.72(5)	41.62(3)	25.26(3)	32.63(10)	——
	靖西新圩	75.39(3)	70.14(5)	——	——	——
	靖西大甲	47.57(3)	25.46(21)	——	——	37.7(1)

数据来自: 廖士范和梁同荣, 1991; 陈平和柴浩然, 1997; 刘枝刚, 2005; 叶霖等, 2008; 袁爱国, 2010; 孟健寅等, 2011; 孙思磊, 2011; 王燕茹等, 2012; 于蕾, 2012; 崔滔, 2013; 冯跃文, 2013; 康微, 2013; 李再会等, 2013; 李玉娇等, 2013; 田茂军, 2013; 王佳奇, 2013; Wang et al., 2012; 邓国仕等, 2014; 黄智龙等, 2014; 李沛刚等, 2014; 焦扬, 2014; Yu et al., 2014; 程琰勋等, 2015; 赵晓东等, 2015; 乔龙, 2016; 温静静等, 2016; 樊钰超和齐永安, 2017; 余文超, 2017; 负孟超等, 2017; 白俊豪等, 2018; 金中国等, 2018; 王行军等, 2018。

北县等地, 广西大甲、新圩、平果和德保等地区的铝土矿均有可能形成伴生镓矿。

4.2　煤矿中伴生镓资源找矿方向

我国煤矿中伴生镓资源找矿应重点从华北地区和西北地区入手, 华北地区和西北地区的煤中伴生镓资源量高于西南, 且通过统计数据可以发现华北地区煤中伴生镓含量高于西南地区(表 4)。其中准格尔 6 号煤层中 Al_2O_3 的含量为 28. 54%~64. 9%, 平均含量为 40.76%, 且镓的含量为~92×10^{-6}(张复新和王立社, 2009; 伍泽广等, 2013; 代俊峰等, 2021)。准格尔煤田中大部分矿井中伴生镓元素超过了煤中伴生镓工业品位。准格尔煤田黑岱沟煤矿位于鄂尔多斯东北缘, 区内断层规模不大, 矿床受到小型的褶曲构造影响。在黑岱沟煤矿之中发现火山晶屑和火山灰, 二者提供了易分解的铝、镓物源, 铝和镓在煤层或夹矸之中富集。黑岱沟煤田是在三角洲沉积体系中形成的巨厚煤层, 三角洲平原有利于泥炭沼泽化, 容易形成巨厚煤层, 导致铝元素更容易富集在煤田之中, 形成高铝煤炭, 而镓与铝共同迁移, 所以在三角洲体系下的煤层更容易发现伴生镓资源。

4.3　铅锌矿中伴生镓资源找矿方向

不是所有类型的铅锌矿床都是富镓的。我国富镓矿床大多数为碳酸盐岩(MVT)型, 该类矿床很少发育在裂谷之中, 多形成于造山带前陆盆地和褶皱之中, 且矿床形成与岩浆活动无明显关系, 主要受到中-低温热液作用形成矿床(宋玉财等, 2017; Liu et al., 2018), 伴生镓含量较高的铅锌矿床多为低温热液型和经过沉积改造的矿床(袁莹等, 2011; 温汉捷等, 2020)。铅锌矿中镓主要与闪锌矿有关, Ga 以类质同象的形式取代 Zn 进入闪锌矿的矿物晶格之中。统计数据显示, 湘东—粤东矿集区的铅锌矿矿床之中伴生的 Ga 含量明显高于其他区域(表 4)。

5　结论

(1)经过对前人研究分析和对比, 本文总结划分出了五个富镓矿床类型, 依次为: 沉积型铝土矿型、堆积型铝土矿型、红土型铝土矿型、煤矿型、碳酸盐岩(MVT)型。在上述富镓矿床类型之中, 已知赋存其他成矿元素有 Sc、Li、Cd、In、REE 等。目前对开发新矿山的限制导致了寻找替代资源, 常规矿床中金属储量的减少, 以及这些有价值金属在现代技术中的应用日益增多, 可以把目光投入到矿床中提取以及利用稀散金属元素。

(2)我国镓矿床均为伴生矿, 根据其赋存矿床划分成矿带可划分为: 晋豫成矿区、右江成矿区、扬子陆块西南成矿区、川—滇—黔成矿带、湘西—鄂西成矿带、湘东—赣西成矿带、华北陆块北缘成矿区。成矿作用类型有风化-沉积、生物化学沉积、热液作用等。富镓矿床主要成矿于石炭纪、二叠纪、侏罗纪和第四纪。风化-沉积作用形成的富镓矿床主要成矿时代为石炭系。晋豫成矿区、右江成矿区、扬子陆块西南成矿区可以成为风化-沉积型 Ga、Li、Sc、REE 等稀有金属找矿远景区。湘西—鄂西成矿带、湘东—赣西成矿带和川—滇—黔成矿带为碳酸盐岩(MVT)型 Ga、Cd、In 等稀有元素找矿远景区。

(3)我国富镓矿床分布广泛, 形成时期较多, 主要形成时期为早、晚古生代和中生代。在空间分布上也相对集中于川—滇—黔地区、湘粤地区和晋豫等地区。我国伴生镓资源的找矿可以以沉积型铝土矿和堆积型铝土矿做为主攻方向, 兼顾煤矿和铅锌矿等其他伴生镓矿床。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (Nos. 2021YFC2900092 and 2021YFC2901905), China Geological Survey (Nos. DD20160346, DD20190379, and DD20221695), and Guizhou Province (Nos. HZ-2022-006# and RCJD-2018).

参考文献:

白俊豪, 祝朝辉, 苏凯峰, 张宏伟, 张震. 2018. 河南省荥巩煤田下部铝土矿床及其含矿岩系锂元素分布规律研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(6): 1123-1132.

蔡书慧, 刘学飞, 孟健寅, 孙思磊. 2012. 桂西田阳堆积型铝土矿矿物学及地球化学[J]. 地质与勘探, 48(03): 460-470.

曹江帅. 2018. 广西泗顶铅锌矿床成矿流体及成矿机制研究[D]. 南宁: 广西大学.

曹艳华, 刘翼飞. 2020. 内蒙古甲乌拉银铅锌矿床成矿斑岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成矿意义[J]. 地质通报, 39(Z1): 353-364.

陈翠华, 宋志娇, 杨玉龙, 杨德平, 辜鹰, 陈宵杰. 2019. 贵州习水洞子沟铅锌矿床闪锌矿微量元素特征与成因[J]. 矿物学报, 39(05): 485-493.

陈佳, 孔令湖. 2012. 湖南辰溪黄泥界铅锌矿微量元素地球化学特征[J]. 西部探矿工程, 24(10): 103-105.

陈磊. 2019. 煤中镓元素的赋存特征与富集机理——以青海木里和新疆准东煤田为例[D]. 成都: 成都理工大学.

陈平, 柴浩然. 1997. 山西地块石炭纪铝土矿沉积地球化学研究[M]. 太原: 山西科学技术出版社.

陈阳, 程军, 任世聪, 李军敏, 陈威, 陈莉. 2013. 渝南大佛岩铝土矿伴生镓的分布规律研究[J]. 稀有金属, 37(01): 140-148.

陈毓川, 毛景文. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 南宁: 广西科学技术出版社.

陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2016. 矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 37(05): 519-527.

陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报, 96(01): 123-130.

程琰勋, 王正江, 田瑜峰, 段海川, 张春波, 王慧平, 王正堂. 2015. 会泽大黑山铝土矿成矿物质来源与控矿因素分析[J]. 四川地质学报, 35(S1): 32-37.

程涌, 崔苗, 许赛华, 卢萍, 聂琪, 刘聪, 文义明, 伍伟, 蹇龙. 2022. 贵州都匀大亮锌矿床闪锌矿稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 地质与勘探, 58(03): 465-474.

崔滔. 2013. 黔北地区铝土矿成矿环境分析[D]. 武汉: 中国地质大学.

代俊峰, 李增华, 许德如, 邓腾, 赵磊, 张鑫, 王水龙, 张健, 孔令涛, 尚培. 2021. 煤型关键金属矿产研究进展[J]. 大地构造与成矿学, 45(05): 963-982.

代世峰, 任德贻, 周义平, VSEREDIN V, 李大华, 张名泉, HOWER J C, WARD C R, 王西勃, 赵蕾, 宋晓林. 2014. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 39(8): 1707-1715.

代世峰, 任德贻, 李生盛. 2006. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. 科学通报, 51(2): 177-185.

邓国仕, 李军敏, 杨桂花, 赵晓东, 陈莉, 陈阳, 吕涛. 2014. 渝南水江板桥铝土矿区锂的分布规律及其影响因素研究[J]. 中国矿业, 23(3): 72-79.

邓卫, 刘侦德, 阳海燕, 刘瑞弟. 2002. 凡口铅锌矿锗和镓资源与回收[J]. 有色金属, (01): 54-57.

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(02): 106-111.

翟裕生, 姚书振, 崔彬. 1996. 成矿系列研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.

敦妍冉, 荆海鹏, 洛桑才仁, 张万益, 宋泽峰. 2019. 全球镓矿资源分布、供需及消费趋势研究[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 9-15, 25.

樊钰超, 齐永安. 2017. 禹州地区本溪组铝土矿中镓的分布及控制因素[J]. 矿业研究与开发, 37(4): 103-108.

冯跃文. 2013. 河南三门峡铝土矿成矿带地质与地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

高桂梅, 松丽涛, 曹坤, 王宏宾, 丁华, 周琦, 白向飞. 2023. 黑岱沟露天矿 6 号煤层煤中微量元素赋存特征[J]. 煤炭转化, 46(1): 10-18.

高兰, 王登红, 熊晓云, 齐帅军, 易承伟, 夹少辉. 2015. 中国铝土矿资源特征及潜力分析[J]. 中国地质, 42(04): 853-863.

高仁文, 邓晓峰. 2014. 辽宁本溪地区本溪组地层中镓矿床的地质特征[J]. 产业与科技论坛, 13(07): 120-122.

耿忠武. 2018. 贵州龙井街铅锌矿床成因研究[D]. 贵阳: 贵州大学.

谷静, 黄智龙, 金中国. 2021. 黔北务—正—道地区新木—宴溪铝土矿含矿岩系底部稀土元素富集机制[J]. 矿物学报, 41(Z1): 413-426.

关腾. 2013. 阿刀亥矿区石炭二叠纪煤中微量元素研究[D]. 邯郸: 河北工程大学.

郭飞, 王智琳, 许德如, 于得水, 董国军, 宁钧陶, 康博, 彭尔柯. 2020. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义[J]. 地学前缘, 27(04): 66-81.

韩忠华. 2008. 贵州道真县大塘铝土矿沉积相特征[J]. 矿产与地质, 22(05): 428-432.

胡鹏, 吴越, 张长青, 胡明月. 2014. 扬子板块北缘马元铅锌矿床闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素特征与指示意义[J]. 矿物学报, 34(04): 461-468.

黄松, 周卫宁, 张锦章. 1998. 江西银山铅锌矿床中镉镓铟的赋存状态及综合评价[J]. 桂林工学院学报, 18(01): 22-27.

黄文辉, 敖卫华, 肖秀玲, 万欢. 2011. 鄂尔多斯盆地侏罗纪含煤岩系生烃潜力评价[J]. 煤炭学报, 36(03): 461-467.

黄智龙, 金中国, 向贤礼, 谷静, 武国辉, 陈兴龙, 苏之良, 赵远由, 叶霖, 邹林. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M]. 北京: 科学出版社.

姬果, 李宁, 杨骁, 裴中朝, 张宇, 李中明, 钟江文, 姬清海. 2021. 河南省铝土矿床地质特征及成矿规律[J]. 金属矿山, 50(05): 140-148.

焦扬. 2014. 云南文山天生桥矿区晚二叠世铝土矿沉积古地理特征与成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

金中国, 刘玲, 黄智龙, 刘辰生, 郑明泓, 谷静, 邹林, 王林. 2019. 贵州务-正-道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力[J]. 地质学报, 93(11): 2847-2861.

金中国, 郑明泓, 刘玲, 骆军, 董光贵, 陈兴龙. 2018. 贵州福泉高洞铝土矿床成矿地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 54(03): 522-534.

康微. 2013. 河南宝丰铝土矿田地质特征与成矿环境[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

李昌盛, 刘汉斌, 李森. 2017. 河东煤田煤中镓的分布规律和工业前景分析[J]. 山东国土资源, 33(5): 25-29.

李春阳. 1991. 滕县煤田石炭二叠纪煤系锗镓分布特征[J]. 中国煤田地质, 3(1): 30-36.

李聪聪, 宁树正, 乔军伟, 魏云迅. 2018. 重庆南武矿区煤中镓赋存规律及控制因素[J]. 煤田地质与勘探, 46(3): 15-20.

李进孝, 张珂, 王珍珍, 高鹏鹏, 张绍韡, 赵存良. 2020. 五家沟矿区 5 号煤中伴生元素地球化学特征[J]. 西北地质, 53(02): 163-171.

李德先, 王锦. 2020. 镓——一种新兴的战略矿产资源[J]. 国土资源科普与文化, (04): 20-22.

李建源. 2015. 岫岩红旗铅锌矿成矿模式与找矿模型研究[D]. 沈阳: 东北大学.

李沛刚, 王登红, 赵芝, 雷志远, 翁申富, 杜芳应, 叶德书, 顾文鳌, 高兰, 熊星. 2014. 贵州大竹园铝土矿矿床地质、地球化学与成矿规律[M]. 北京: 科学出版社.

李沛刚, 赵芝, 刘新星, 顾文鳌, 翁申富, 雷志远. 2013. 贵州务正道铝土矿区域成矿规律及其对整装勘查的意义[J]. 岩矿测试, 32(5): 832-839.

李伟. 2011. 四川省宁南县银厂沟-骑骡沟铅锌矿地球化学特征及矿床成因初探[D]. 成都: 成都理工大学.

李祥, 李伍. 2022. 淮北煤田朱庄煤矿煤中微量元素地球化学特征[J]. 煤炭科学技术, https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0417.

李影影. 2019. 淮北矿区煤中微量元素分布特征与地质意义[D]. 南昌: 东华理工大学.

李玉娇, 张正伟, 周灵洁, 吴承泉. 2013. 贵州省苦李井铝土矿地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(5): 558-566.

李再会, 朱同兴, 尹福光, 吕涛. 2013. 渝南与黔北铝土矿含矿岩系沉积时代探讨[J]. 地层学杂志, 37(4): 499-504.

李珍立, 叶霖, 黄智龙, 念红良, 周家喜. 2016. 贵州天桥铅锌矿床闪锌矿微量元素组成初探[J]. 矿物学报, 36(2): 183-188.

廖士范, 梁同荣. 1991. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.

刘帮军, 林明月, 褚光琛. 2014. 山西平朔矿区 4#煤中镓的分布

规律与富集机理[J]. 中国煤炭, 40(11): 25-29.
刘大锐, 高桂梅, 池君洲, 王永旺, 郭昭华. 2018. 准格尔煤田黑岱沟露天矿煤中稀土及微量元素的分配规律[J]. 地质学报, 92(11): 2368-2375.
刘国栋, 付勇, 何伟, 唐波, 龙珍, 杨颖, 龙克树. 2021. 中国铝土岩系中伴生钪资源富集规律及富集机制初探[J]. 地质论评, 67(04): 952-972.
刘平. 1995. 五论贵州之铝土矿黔中—川南成矿带铝土矿含矿岩系[J]. 贵州地质, 12(03): 185-203.
刘平. 2007. 贵州铝土矿伴生镓的分布特征及综合利用前景——九论贵州之铝土矿[J]. 贵州地质, (02): 90-96.
刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 宋玉财, 杨志明, 王召林, 李政. 2008. 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床：认识与进展[J]. 矿床地质, 27(2): 253-264.
刘英超, 侯增谦, 岳龙龙, 马旺, 唐波浪. 2022. 中国沉积岩容矿铅锌矿床中的关键金属[J]. 科学通报, 67(Z1): 406-424.
刘英俊. 1965. 我国某些铝土矿中镓的若干地球化学特征[J]. 地质论评, 23(01): 42-49.
刘英俊. 1982. 中国含镓矿床的主要成因类型[J]. 矿床地质, 1(01): 51-60.
刘幼平, 周文龙, 程国繁, 崔滔, 龙汉生. 2016. 贵州铝土矿含矿岩系特征与成矿规律研究[J]. 矿物学报, 36(02): 289-294.
刘枝刚. 2005. 广西靖西县新圩铝土矿矿石物质组分研究[J]. 南方国土资源, (11): 30-32.
雒洋冰. 2014. 川东川南晚二叠世煤及凝灰岩中微量元素地球化学研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京).
麻涛, 张建强, 张亮. 2015. 海拉尔盆地煤中镓、锗元素分布特征研究[J]. 中国煤炭地质, 27(07): 26-28, 47.
孟洪振. 2016. 四川桥儿沟铅锌矿地质特征及成矿条件研究[D]. 绵阳：西南科技大学.
孟健寅, 王庆飞, 刘学飞, 孙思磊, 李德胜, 赵增益, 杨中华, 武建斌. 2011. 山西交口县庞家庄铝土矿矿物学与地球化学研究[J]. 地质与勘探, 47(04): 593-604.
莫江平, 郦今敖. 1991. 黔中铝土矿的成矿环境[J]. 地质与勘探, (11): 12-18.
宁树正, 邓小利, 李聪聪, 秦国红, 张建强, 朱士飞, 乔军伟, 陈磊, 章伟. 2017. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 42(09): 2214-2225.
宁树正, 黄少青, 朱士飞, 章伟, 邓小利, 李聪聪, 乔军伟, 张建强, 张宁. 2019. 中国煤中金属元素成矿区带[J]. 科学通报, 64(24): 2501-2513.
欧德琳, 周静. 2010. 务川大竹园地区探明大型铝土矿[N]. 贵州日报.
乔龙. 2016. 右江盆地及其周缘地区构造演化及铝土矿成矿作用[D]. 北京：中国地质大学(北京).
秦勇, 王文峰, 程爱国, 刘新花, 赵建岭. 2009. 首批煤炭国家规划矿区煤中镓的成矿前景[J]. 中国煤炭地质, 21(01): 17-21, 26.
水兰素, 常全明. 1999. 华北地台 G 层铝土矿赋存规律[J]. 中国矿业, 8(05): 65-68.
司荣军, 顾雪祥, 肖淳, 于海涛, 王中伟, 陈彦交, 邱宁. 2011. 云南省富乐铅锌矿床闪锌矿中微量元素地球化学特征——兼论深色闪锌矿富集 Cd 的原因[J]. 矿物岩石, 31(03): 34-40.
宋玉财, 侯增谦, 刘英超, 张洪瑞. 2017. 特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床[J]. 中国地质, 44(04): 664-689.
苏之良, 杜蔺, 巩鑫, 衮民汕, 文愿运, 李阳. 2021. 黔北道真新民铝土矿含铝岩系中关键金属富集特征与资源潜力[J]. 矿物学报, 41(Z1): 400-412.
孙大中. 1960. 镓的地球化学及其找矿意义[J]. 合肥工业大学学报, (02): 27-34.
孙莉, 肖克炎, 娄德波. 2018. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘, 25(03): 82-94.
孙思磊. 2011. 山西宁武县宽草坪铝土矿床地质与地球化学特征研究[D]. 北京：中国地质大学(北京).
覃丰, 孟祥仑, 尹本纯. 2019. 桂西沉积型铝土矿分布特征及控矿条件分析[J]. 世界有色金属, (09): 92-94.
汤艳杰, 贾建业, 刘建朝. 2001. 豫西杜家沟铝土矿中镓的分布规律及控制因素浅析[J]. 地质与勘探, 37(06): 9-12.
汤艳杰, 贾建业, 刘建朝. 2002. 豫西地区铝土矿中镓的分布规律研究[J]. 矿物岩石, (01): 15-20.
唐波, 付勇, 龙克树, 龙珍, 王天顺, 刘阳, 杨颖. 2021. 中国铝土矿含铝岩系伴生稀土资源分布特征及富集机制[J]. 地质学报, 95(08): 2284-2305.
唐攀科, 王春艳, 梅友松, 郝玉军, 吴碧娟, 管友飞, 段建良. 2018. 中国铅锌矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘, 25(03): 31-49.
田浩浩, 张寿庭, 曹华文, 韩江伟, 吕鹏瑞, 张云辉. 2015. 豫西赤土店铅锌矿床闪锌矿微量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(02): 334-342.
田茂军. 2013. 云南省文山县天生桥铝土矿矿床地质特征及成因探讨[D]. 昆明：昆明理工大学.
涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京：地质出版社.
涂光炽. 1984. 中国层控矿床地球化学(第一卷)[M]. 北京：科学出版社: 1-354.
王登红, 陈毓川, 徐志刚, 黄凡, 王岩, 裴荣富. 2020. 矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 94(1): 18-35.
王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究[M]. 北京：原子能出版社.
王皓宇, 叶霖, 胡宇思, 韦晨, 李珍立, 黄智龙, 双燕. 2021. 渝东南老厂坪铅锌矿床闪锌矿微量元素组成特征[J]. 矿物学报, 41(06): 623-634.
王佳奇. 2013. 桂中三水铝土矿矿床地质特征与成矿规律研究[D]. 北京：中国地质大学(北京).
王钧漪, 王文峰, 李健, 秦勇. 2010. 元素锗镓铀在大同煤田北部煤中的赋存特征[J]. 煤炭科学技术, 38(02): 117-121, 85.
王佩佩. 2017. 滇东黔西晚二叠世煤中矿物及微量元素富集分异机理[D]. 北京：中国矿业大学(北京).
王文峰, 秦勇, 刘新花, 赵建岭, 王钧漪, 吴国代, 刘炯天. 2011. 内蒙古准格尔煤田煤中镓的分布赋存与富集成因[J]. 中国科学：地球科学, 41(02): 181-196.
王文鹏. 2016. 桂西二叠纪铝土矿地质特征与成矿物质来源[D]. 北京：中国地质大学(北京).
王行军, 王梓桐, 王根厚, 周洁, 崔银亮, 张道红, 李伟清, 范良军. 2018. 滇东南广南县砂子塘铝土矿床地球化学特征研究[J]. 西北地质, 51(04): 166-183.
王燕茹, 王庆飞, 刘学飞, 李中明. 2012. 河南渑池铝土矿成矿区地球化学背景[J]. 地质与勘探, 48(3): 526-532.
隗含涛, 邵拥军, 叶周, 周皓迪. 2021. 湘西花垣铅锌矿田闪锌矿痕量元素地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(02): 142-153.
温汉捷, 朱传威, 杜胜江, 范裕, 罗重光. 2020. 中国镓锗铊镉

资源[J]. 科学通报, 65(33): 3688-3699.
温静静, 梁涛, 卢仁, 王莉. 2016. 河南省嵩箕地区铝土矿 Li、Ti、Zr、Ga、Nb 和 LREE 的矿化分析[J]. 矿产与地质, 30(2): 216-222.
文博杰, 陈毓川, 王高尚, 代涛. 2019. 2035 年中国能源与矿产资源需求展望[J]. 中国工程科学, 21(01): 68-73.
吴涛, 黄智龙, 叶霖, 周家喜, 韦晨, 胡宇思, 向震中. 2021. 湘西发现镓超常富集铅锌矿床[J]. 矿床地质, 40(06): 1357-1362.
吴玉峰, 杨富全, 刘锋. 2016. 新疆阿舍勒铜锌矿区潜玄武安山岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(01): 65-80.
伍泽广, 孙俊民, 张战军, 石松林, 刘钦甫. 2013. 准格尔煤田高铝煤炭资源特征初探[J]. 煤炭工程, 45(10): 115-118.
徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区代划分方案[M]. 北京: 地质出版社.
杨伟林, 朱绍军. 1993. 登封煤田主要煤层中镓的赋存规律及综合利用[J]. 中国煤田地质, 5(01): 34-36.
杨中华, 孙思磊, 孟建寅. 2011. 山西铝土矿分散金属元素镓富集特征[J]. 资源与产业, 13(06): 106-109.
叶霖, 高伟, 杨玉龙, 刘铁庚, 彭绍松. 2012. 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报, 28(05): 1362-1372.
叶霖, 高伟, 杨玉龙, 刘铁庚. 2011. 云南澜沧老厂铅锌矿床闪锌矿微量元素初步研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会论文集: 258.
叶霖, 潘自平, 程曾涛. 2007. 贵州铝土矿中伴生元素综合利用前景[J]. 矿物学报, (Z1): 388-392.
叶霖, 潘自平, 程增涛. 2008. 贵州修文小山坝铝土矿中镓等伴生元素分布规律研究[J]. 矿物学报, 28(2): 105-111.
叶庆同, 石桂华, 叶锦华, 杨崇秋. 1991. 怒江澜沧江金沙江地区铅 锌矿床成矿特征和成矿系列[M]. 北京: 北京科学技术出版社.
叶太平, 王小娟, 黄苑龄. 2019. 贵州五指山铅锌矿田闪锌矿分散元素组成及其地质意义[J]. 矿产勘查, 10(02): 274-280.
易同生, 秦勇, 吴艳艳, 李壮福. 2007. 黔东凯里梁山组煤层及其底板中镓的富集与地质成因[J]. 中国矿业大学学报, (03): 330-334.
尹力. 2016. 陕西马元地区楠木树铅锌矿床矿物学特征及其成因意义[D]. 成都: 成都理工大学.
于磊. 2017. 浅析稀散元素镓在山西的富集特征[J]. 西部探矿工程, 29(02): 112-113, 116.
于蕾. 2012. 滇东南地区晚二叠世沉积型铝土矿矿床成因与成矿规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
余文超. 2017. 华南黔桂地区铝土矿沉积-成矿作用[D]. 武汉: 中国地质大学.
俞缙, 李普涛, 于航波. 2009. 靖西三合铝土矿微量元素地球化学特征与成矿环境研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 28(03): 289-293.
负孟超, 王凤宇, 林伟, 李英奎. 2017. 山西平陆县东部与铝土矿共伴生的“三稀”矿产特征[J]. 矿产勘查, 8(5): 772-781.
袁爱国. 2010. 河南省铝土矿资源分布与开发策略[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
袁鑫, 吴越, 段登飞, 朱江, 欧阳荷根, 曹亮, 周豹. 2022. 新疆火烧云超大型铅锌矿床闪锌矿微量(稀散)元素组成特征与指示意义[J]. 地质与勘探, 58(03): 545-560.
袁莹, 祝新友, 王艳丽. 2011. 我国铅锌矿床伴生稀散元素分布与赋存状态研究综述[J]. 矿物学报, 31(S1): 316-317.
袁月. 2015. 准格尔煤田唐公塔 6#煤中伴生元素地球化学特征[D]. 邯郸: 河北工程大学.
张复新, 王立社. 2009. 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[J]. 中国地质, 36(02): 417-423.
张佳莉, 张青伟, 阳纯龙, 高攀, 缪秉魁, 皮桥辉, 李社宏. 2016. 桂西铝土矿中稀有和稀散元素地球化学特征[J]. 桂林理工大学学报, 36(01): 153-159.
张沛, 吴越, 段登飞, 曹亮, 周豹, 朱金, 刘文文. 2021. 湖南花垣矿田长登坡铅锌矿床闪锌矿微量元素组成与指示意义[J]. 资源环境与工程, 35(02): 269-276.
张启明, 江新胜, 秦建华, 崔晓庄, 刘才泽. 2012. 黔北—渝南地区中二叠世早期梁山组的岩相古地理特征和铝土矿成矿效应[J]. 地质通报, 31(04): 558-568.
张荣伟. 2013. 云南茂租铅锌矿矿床地球化学特征与矿床成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学.
张天栋, 刘忠法, 邸洪飞, 张俊柯, 陈可, 邵拥军. 2021. 湘南宝山铜铅锌多金属矿床闪锌矿元素地球化学特征及其对成矿的制约[J]. 矿产勘查, 12(08): 1716-1726.
张先容. 1993. 广东凡口铅锌矿床单矿物中微量元素的地球化学特征[J]. 桂林冶金地质学院学报, 13(01): 68-75.
张勇. 2013. 黄陵矿区 2#煤中镓的地球化学特征[D]. 邯郸: 河北工程大学.
张云峰, 郭昭华, 池君洲, 王永旺, 陈东. 2014. 金属镓的资源分布情况及应用现状[J]. 中国煤炭, 40(S1): 36-38.
张长青, 芮宗瑶, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 娄德波. 2013. 中国铅锌矿资源潜力和主要战略接续区[J]. 中国地质, 40(01): 248-272.
张长青, 吴越, 王登红, 陈毓川, 芮宗瑶, 娄德波, 陈郑辉. 2014. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2252-2268.
赵飞燕, 张小东, 郭昭华, 王永旺, 陈东, 张云峰. 2017. 金属镓的分布、生产及应用前景[J]. 轻金属, (03): 1-3.
赵汀, 秦鹏珍, 王安建, 王高尚, 李建武, 刘超, 刘毅飞. 2017. 镓矿资源需求趋势分析与中国镓产业发展思考[J]. 地球学报, 38(01): 77-84.
赵晓东, 胡昌松, 凌小明, 李军敏. 2015. 重庆南川—武隆铝土矿含矿岩系稀土元素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(6): 1691-1701.
钟蓉, 陈芬. 1985. 大青山煤田栓马桩群及其与上覆、下伏地层接触关系的讨论[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, (5): 75-93, 202.
邹建华, 李大华, 刘东, 程礼军, 朱长生, 任世聪. 2012. 内蒙古阿刀亥矿晚古生代煤中矿物的赋存状态及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(02): 135-138.
邹建华, 王冰峰, 王慧, 田和明, 李甜. 2022. 重庆芦塘矿晚二叠世煤中微量元素和稀土元素的地球化学特征[J]. 煤炭学报, 47(08): 3117-3127.

References:

ANAND R R, GILKES R J, ROACH G I D. 1991. Geochemical and mineralogical characteristics of bauxites, Darling Range, Western Australia[J]. Applied Geochemistry, 6(3): 233-248.
BAI Jun-hao, ZHU Chao-hui, SU Kai-feng, ZHANG Hong-wei, ZHANG Zhen. 2018. Study on the Distribution of Lithium in the Bauxite Orebody and Bauxite-Bearing Rocks Underneath

the Coal Bed of the Xinggong Coalfield, Henan Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(6): 1123-1132(in Chinese with English abstract).

BÁRDOSY G, ALEVA G J J. 1990. Lateritic bauxites: Amsterdam[C]//Developments in Economic Geology, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier Science Publishers: 624.

BLACKWOOD A, GREENAWAY A M, LANCASHIRE R J, MAGNUS K E. 1982. Gallium levels of Jamaican bauxites[J]. Journal of the Geological Society of Jamaica, 5: 77-82.

BOGATYREV B A, ZHUKOV V V. 2009. Bauxite provinces of the world[J]. Geology of Ore Deposits, 51(5): 339-355.

BONNET J, MOSSER-RUCK R, CAUMON M C, ROUER O, ANDRE-MAYER A S, CAUZID J, PEIFFERT C. 2016. Trace Element Distribution (Cu, Ga, Ge, Cd and Fe). In Sphalerite From the Tennessee MVT Deposits, USA, By Combined EMPA, LA-ICP-MS, Raman Spectroscopy, and Crystallography[J]. The Canadian Mineralogist, 54(5): 1261-1284.

CAI Shu-hui, LIU Xue-fei, MENG Jian-yin, SUN Si-lei. 2012. Mineralogy and Geochemistry of the Tianyang Accumulated-type Bauxite in Western Guangxi Province[J]. Geology and Exploration, 48(03): 460-470(in Chinese with English abstract).

CALLIÈRE S, MAKSIMOVIC Z, POBEGUIN T. 1976. Les elements en traces dans quelques bauxites karstiques de L'Ariege et du Var[J]. Travaux of the International Committee for Study of Bauxite Alumina and Aluminum (ISCOBA), 13: 233-252.

CAO Jiang-shuai. 2018. The study on metallogenic fluid and mechanism of siding lead zinc ore field, Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University(in Chinese with English abstract).

CAO Yan-hua, LIU Yi-fei. 2020. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and metallogenic significance of ore-bearing porphyry of the Jiawula Ag-Pb-Zn Deposit in inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 39(Z1): 353-364(in Chinese with English abstract).

CHEN Cui-hua, SONG Zhi-jiao, YANG Yu-long, YANG De-ping, GU Ying, CHEN Xiao-jie. 2019. Characteristics of trace elements of sphalerite and genesis of the Dongzigou lead-zinc deposit in Xishui County, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(05): 485-493(in Chinese with English abstract).

CHEN Jia, KONG Ling-hu. 2012. Trace element geochemical characteristics of Huangnijie lead-zinc deposit in Chenxi, Hunan[J]. West-China Exploration Engineering, 24(10): 103-105(in Chinese).

CHEN Lei. 2019. Occurrence characteristics and enrichment mechanism of germanium and gallium in coal-A case study of Muli Coalfield in Qinghai and Zhundong Coalfield in Xinjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).

CHEN Ping, CHAI Hao-ran. 1997. Sedimentary geochemistry of Carboniferous bauxite in Shanxi block[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press(in Chinese).

CHEN Yang, CHENG Jun, REN Shi-cong, LI Jun-min, CHEN Wei, CHEN Li. 2013. Distribution of Ga in Dafoyan Bauxite Mining Area, Southern Chongqing[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 37(01): 140-148(in Chinese with English abstract).

CHEN Yu-chuan, MAO Jing-wen. 1995. Metallogenic series and historical evolution of ore deposits in northern Guangxi[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press(in Chinese).

CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2016. Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series(V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(05): 519-527(in Chinese with English abstract).

CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits(VIII)[J]. Acta Geologica Sinica, 96(01): 123-130(in Chinese with English abstract).

CHENG Yan-xun, WANG Zheng-jiang, TIAN Yu-feng, DUAN Hai-chuan, ZHANG Chun-bo, WANG Hui-ping, WANG Zheng-tang. 2015. Analysis on source of ore forming materials and ore controlling factors of Huize Daheishan bauxite[J]. Acta Geologica Sichuan, 35(S2): 32-37(in Chinese).

CHENG Yong, CUI Miao, XU Sai-hua, LU Ping, NIE Qi, LIU Cong, WEN Yi-ming, WU Wei, JIAN Long. 2022. Trace Element Geochemical Characteristics of Sphalerite from the Daliang Zinc Deposit in Duyun City of Guizhou Province and Their Indicative Significance[J]. Geology and Exploration, 58(03): 465-474(in Chinese with English abstract).

CUI Tao. 2013. Analysis on metallogenic environment of bauxite in Northern Guizhou[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

DAI Jun-feng, LI Zeng-hua, XU De-ru, DENG Teng, ZHAO Lei, ZHANG Xin, WANG Shui-long, ZHANG Jian, KONG Ling-tao, SHANG Pei. 2021. Coal-hosted Critical Metal Deposits: A Review[J]. Geotectonica et Metallogenia, 45(05): 963-982(in Chinese with English abstract).

DAI Shi-feng, JIANG Yao-fa, WARD C R, GU Landing, SEREDIN V V, LIU Hui-dong, ZHOU Dao, WANG Xi-bo, SUN Yu-zhuang, ZOU Jian-hua, REN De-yi. 2012. 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[J]. International Journal of Coal Geology, 98: 10-40.

DAI Shi-feng, LI Dan, CHOU Chen-lin, ZHAO Lei, ZHANG Yong, REN De-yi, MA Yu-wen, SUN Ying-ying. 2008. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: New insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Coal Geology, 74(3-4): 185-202.

DAI Shi-feng, REN De-yi, CHOU Chen-lin, LI Sheng-sheng, JIANG Yao-fa. 2006. Mineralogy and geochemistry of the No. 6 Coal (Pennsylvanian) in the Junger Coalfield, Ordos Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 66(4): 253-270.

DAI Shi-feng, REN De-yi, LI Sheng-sheng. 2006. Discovery of super large gallium deposit in Junge, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 51(2): 177-185(in Chinese).

DAI Shi-feng, REN De-yi, ZHOU Yi-ping, VSEREDIN V, LI Da-hua, ZHANG Ming-quan, HOWER J C, WARD C R, WANG Xi-bo, ZHAO Lei, SONG Xiao-lin. 2014. Coal-hosted

rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 39(8): 1707-1715(in Chinese with English abstract).

DAI Shi-feng, YAN Xiao-yun, WARD C R, HOWER J C, ZHAO Lei, WANG Xi-bo, ZHAO Li-xin, REN De-yi, FINKELMAN R B. 2018. Valuable elements in Chinese coals: A review[J]. International Geology Review, 60(5-6): 590-620.

DAI Shi-feng, ZHOU Yi-ping, ZHANG Ming-quan, WANG Xi-bo, WANG Jun-min, SONG Xiao-lin, JIANG Yao-fa, LUO Yang-bing, SONG Zhen-tao, YANG Zong, REN De-yi. 2010. A new type of Nb (Ta)–Zr (Hf)–REE–Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, southwestern China: Possible economic significance and genetic implications[J]. International Journal of Coal Geology, 83(1): 55-63.

DAI Shi-feng, YAN Xiao-yun, WARD C R, HOWER J C, ZHAO Lei, WANG Xing-bo, ZHAO Li-xin, REN De-yi, FINKELMAN R B. 2016. Valuable elements in Chinese coals:a review[J]. International Geology Review, 60(5-6): 590-620.

DAI Yan-pei, YU Xin-qi, ZHANG Lian-chang, CAO Wen-tao, ZHU Yu-di, LI Chun-lin. 2014. Geology, isotopes and geochronology of the Caijiaping Pb-Zn deposit in the North Wuyi area, South China: Implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. Ore Geology Reviews, 57: 116-131.

DENG Guo-shi, LI Jun-min, YANG Gui-hua, ZHAO Xiao-dong, CHEN Li, CHEN Yang, LÜ Tao. 2014. Distribution law of Lithium and influencing factors in Shuijiangbanqiao bauxite mining area, Southern Chongqing[J]. China Mining Magazine, 23(3): 72-79(in Chinese with English abstract).

DENG Wei, LIU Zhen-de, YANG Hai-yan, LIU Rui-di. 2002. Resource and recovery of Ge and Ga in fankou lead-zinc mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, (01): 54-57(in Chinese with English abstract).

DI Shao-bo, DAI Shi-feng, NECHAEV V P, ZHANG Shao-wei, FRENCH D, GRAHAM I T, SPIRO B, FINKELMAN R B, HOU Yong-jie, WANG Yu-chuan, ZHANG Rui. 2022. Granite-bauxite provenance of abnormally enriched boehmite and critical elements (Nb, Ta, Zr, Hf and Ga) in coals from the Eastern Surface Mine, Ningwu Coalfield, Shanxi Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 239: 107016.

DING Teng, MA Dong-sheng, LU Jian-jun, ZHANG Rong-qing, ZHANG Shi-tao. 2016. S, Pb, and Sr isotope geochemistry and genesis of Pb–Zn mineralization in the Huangshaping polymetallic ore deposit of southern Hunan Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 77: 117-132.

DUN Yan-ran, JING Hai-peng, LUOSANG Cai-ren, ZHANG Wan-yi, SONG Ze-feng. 2019. Current Situation and Utilization Trend of the Global Gallium Resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 39(5): 9-15, 25(in Chinese with English abstract).

DUTRIZAC J E, JAMBOR J L, CHEN T T. 1986. Host minerals for the gallium-germanium ores of the Apex Mine, Utah[J]. Economic Geology, 81(4): 946-950.

ENG T, RAINES G L, LISLE R E, SCHAFER R W, WILKINSON W H. 1991. Geology and mineralization of the Freedom Flats gold deposit, Borealis mine, Mineral County, Nevada[C]//RAINES G L, LISLE R E, SCHAFER R W, WILKINSON W H. Geology and Ore Deposits of the Great Basin. Reno: Geologic Society of Nevada: 995-1019.

FAN Yu-chao, QI Yong-an. 2017. Distribution and Controlling Factors of Gallium in Benxi Formation of Yuzhou Bauxite Mining Area[J]. Mining Research and Development, 37(04): 103-108(in Chinese with English abstract).

FENG Yue-wen. 2013. Geological and geochemical studies of bauxite metallogenic belt of Sanmenxia, Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

FRENZEL M, HIRSCH T, GUTZMER J. 2016. Gallium, germanium, indium and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type-A meta-analysis[J]. Ore Geology Reviews, 76: 52-78.

GAO Gui-mei, SONG Li-tao, CAO Kun, WANG Hong-bin, DING Hua, ZHOU Qi, BAI Xiang-fei. 2023. Occurrence characteristics of trace elements in No.6 coal seam of Heidaigou open-pit mine[J]. Coal Conversion, 46(1): 10-18(in Chinese with English abstract).

GAO Lan, WANG Deng-hong, XIONG Xiao-yun, QI Shuai-jun, YI Cheng-wei, JIA Shao-hui. 2015. Analysis on Characteristics and Potential of Bauxite Resources in China[J]. Geology in China, 42(04): 853-863(in Chinese with English abstract).

GAO Ren-wen, DENG Xiao-feng. 2014. Geological characteristics of gallium deposits in Benxi Formation strata in Benxi area, Liaoning Province[J]. Industrial & Science Tribune, 13(07): 120-122(in Chinese).

GENG Zhong-wu. 2018. Genesis of Pb-Zn deposit in Longjing Street, Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University(in Chinese with English abstract).

GU Jing, HUANG Zhi-long, JIN Zhong-guo. 2021. The REE enrichment mechanism in the bottom layer of ore- bearing rocks of the Xinmu-Yanxi bauxite deposit in the Northern Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(Z1): 413-426.

GUAN Teng. 2013. Study on Trace Elements of C~P Coal Seam in ADaoHai Mine[D]. Handan: Hebei University of Engineering(in Chinese with English abstract).

GUO Fei, WANG Zhi-lin, XU De-ru, YU De-shui, DONG Guo-jun, NING Jun-tao, KANG Bo, PENG Er-ke. 2020. Trace element characteristics of sphalerite in the Lishan Pb-Zn-Cu polymetallic deposit in Hunan Province and the metallogenic implications[J]. Earth Science Frontiers, 27(04): 66-81(in Chinese with English abstract).

HAN Run-sheng, CHEN Jin, WANG Feng, WANG Xue-kun, LI Yuan. 2015. Analysis of metal–element association halos within fault zones for the exploration of concealed ore-bodies—A case study of the Qilinchang Zn–Pb–(Ag–Ge) deposit in the Huize mine district, northeastern Yunnan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 159: 62-78.

HAN Zhong-hua. 2008. Sedimentary facies characteristics of the Datang bauxite deposit in Daozhen County, Guizhou[J]. Mineral Resources and Geology, 22(05): 428-432(in Chinese with English abstract).

HIERONYMUS B, KOTSCHOUBEY B, BOULÈGUE J. 2001.

Gallium behaviour in some constrasting lateritic profiles from Cameroon and Brazil[J]. Journal of Geochemical Exploration, 72(2): 147-163.

HU Peng, WU Yue, ZHANG Chang-qing, HU Ming-yue. 2014. Trace and Minor Elements in Sphalerite from the Mayuan Lead-Zinc Deposit, Northern Margin of the Yangtze Plate: lmplications from LA-ICP-MS Analysis[J] Acta Mineralogica Sinica, 34(04): 461-468(in Chinese with English abstract).

HUANG Song, ZHOU Wei-ning, ZHANG Jin-zhang. 1998. The occurring state and comprehensive utilization assessment of Cd, Ga and In in the yingshan Pb-Zn deposit, Jiangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 18(01): 22-27(in Chinese with English abstract).

HUANG Wen-hui, AO Wei-hua, XIAO Xiu-ling, WAN Huan. 2011. The assesment of the capacity for producing hadrocarbon in the Jurrasic coal and associate rocks in Ordos basin[J]. Journal of China Coal Society, 36(03): 461-467(in Chinese with English abstract).

HUANG Zhi-long, JIN Zhong-guo, XIANG Xian-li, GU Jing, WU Guo-hui, CHEN Xing-long, SU Zhi-liang, ZHAO Yuan-you, YE Lin, ZOU Lin. 2014. Metallogenic theory and prediction of Wuzhengdao bauxite deposit in northern Guizhou[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

JANSSON N F, MALMSTRÖM L, ZETTERQVIST A, ALLEN R L. 2016. A comment on the occurrence of gallium and germanium in the Zinkgruvan Zn-Pb-Ag-(Cu) sulphide deposit, Bergslagen Sweden[J]. GFF, 138(4): 533-535.

JI Guo, LI Ning, YANG Xiao, PEI Zhong-chao, ZHANG Yu, LI Zhong-ming, ZHONG Jiang-wen, JI Qing-hai. 2021. Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of Bauxite Deposits in Henan Province[J]. Metal Mine, 50(05): 140-148(in Chinese with English abstract).

JIANG Zong-sheng, ZHANG Zuo-heng, DUAN Shi-gang, LV Cheng-shuai, DAI Zhi-hui. 2021. Genesis of the sediment-hosted Haerdaban Zn-Pb deposit, Western Tianshan, NW China: Constraints from textural, compositional and sulfur isotope variations of sulfides[J]. Ore Geology Reviews, 139: 104527.

JIAO Yang. 2014. Study on the Late Permian sedimentary palaeogeography and mineralization of bauxite ores in Tianshengqiao mining area, Wenshan County, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

JIN Zhong-guo, LIU Ling, HUANG Zhi-long, LIU Chen-sheng, ZHENG Ming-hong, GU Jing, ZOU Lin, WANG Lin. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou Province[J]. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2847-2861(in Chinese with English abstract).

JIN Zhong-guo, ZHENG Ming-hong, LIU Ling, LUO Jun, DONG Guang-gui, CHEN Xing-long. 2018. Geological and Geochemical Characteristics of Mineralization in the Gaodong Bauxite Deposit, Fuquan, Guizhou Province[J]. Geology and Exploration, 54(03): 522-534(in Chinese with English abstract).

KANG Wei. 2013. Geologoical characteristics and Metallogenic environment of Baofeng bauxite field, Henan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

KHASHGEREL B E, KAVALIERIS I, HAYASHI K. 2008. Mineralogy, textures, and whole-rock geochemistry of advanced argillic alteration: Hugo Dummett porphyry copper–gold deposit, Oyu Tolgoi mineral district, Mongolia[J]. Mineralium Deposita, 43(8): 913-932.

LI Chang-sheng, LIU Han-bin, LI Miao. 2017. Distribution Rule and Industrial Prospect Analysis of Gallium in Coal in Hedong Coalfield[J]. Shandong Land and Resources, 33(5): 25-29(in Chinese with English abstract).

LI Chun-yang. 1991. Distribution characteristics of germanium and gallium in Carboniferous Permian coal measures in Tengxian coalficld[J]. Coal Geology of China, 3(01): 30-36(in Chinese).

LI Cong-cong, NING Shu-zheng, QIAO Jun-wei, WEI Yun-xun. 2018. Occurrence regularity and controlling factors of gallium in coal of Nanwu mining area, Chongqing[J]. Coal Geology & Exploration, 46(3): 15-20(in Chinese with English abstract).

LI Jin-xiao, ZHANG Ke, WANG Zhen-zhen, GAO Peng-peng, ZHANG Shao-wei, ZHAO Cun-liang. 2020. Geochemical Characteristics of Associated Elements in No.5 Coal of Wujiagou Coalfield[J]. Northwestern Geology, 53(02): 163-171(in Chinese with English abstract).

LI De-xian, WANG Jin. 2020. Gallium - a new strategic mineral resource[J]. Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources, (04): 20-22(in Chinese with English abstract).

LI Jian-yuan. 2015. Researches on Metallogenic Model and Prospecting Model of Hongqi Pb-Zn Ore Deposit in Xiuyan[D]. Shenyang: Northeastern University(in Chinese with English abstract).

LI Ji-lin, CHEN Zheng-le, ZHOU Tao-fa, GU Xue-xiang, WHITE N C, GAO Hai-jun. 2020. Genesis of the Xiyi Pb–Zn deposit, Yunnan Province, SW China: Evidence from trace element and fluid inclusion data[J]. Ore Geology Reviews, 119: 103348.

LI Pei-gang, WANG Deng-hong, ZHAO Zhi, LEI Zhi-yuan, WENG Shen-fu, DU Fang-ying, YE De-shu, GU Wen-ao, GAO Lan, XIONG Xing. 2014. Geology, geochemistry and metallogenic regularity of Dazhuyuan bauxite deposit in Guizhou[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

LI Pei-gang, ZHAO Zhi, LIU Xin-xing, GU Wen-ao, WENG Shen-fu, LEI Zhi-yuan. 2013. Metallogeny of the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Bauxite Orefield and lts Significance for Uncompartmentalized Prospecting in Guizhou, China[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 832-839(in Chinese with English abstract).

LI Wei. 2011. The Geochemical Characteristics and the Cause of Ore Deposit Formation in Yinchanggou-Qiluogou Lead-zinc Deposit, Ninnan, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).

LI Xiang, LI Wu. 2022. Geochemical Characteristics of Trace Elements in Zhuzhuang Coal Mine of Huaibei coalfield[J]. Coal Science and Technology, https://doi.org/10.13199/

j.cnki.cst.2022-0417(in Chinese with English abstract).

LI Ying-ying. 2019. Distribution characteristics and geological significance of trace elements in coal in Huaibei mining area[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).

LI Yu-jiao, ZHANG Zheng-wei, ZHOU Ling-jie, WU Cheng-quan. 2013. Geochemical Feature and Genesis of the Kulijing Bauxite Deposit, Guizhou Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(5): 558-566(in Chinese with English abstract).

LI Zai-hui, ZHU Tong-xing, YIN Fu-guang, LÜ Tao. 2013. A tentative discussion on the age of bauxite-bearing rock series in the southern chongqing-northern Guizhou area[J]. Journal of Stratigraphy, 37(4): 499-504(in Chinese with English abstract).

LI Zhen-li, YE Lin, HUANG Zhi-long, NIAN Hong-liang, ZHOU Jia-xi. 2016. Primary Research on Trace Elements in Sphalerite from Tianqiao Pb-Zn Deposit, Northwestern Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 36(2): 183-188(in Chinese with English abstract).

LIAO Shi-fan, LIANG Tong-rong. 1991. Bauxite Geology of China[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press(in Chinese).

LIU Bang-jun, LIN Ming-yue, CHU Guang-chen. 2014. Distribution law and enrichment mechanism of Ga in 4# coal seam in Pingshuo mining area in Shanxi province[J]. China Coal, 40(11): 25-29(in Chinese with English abstract).

LIU Da-rui, GAO Gui-mei, CHI Jun-zhou, WANG Yong-wang, GUO Zhao-hua. 2018. Distribution Rule of Rare Earth and Trace Elements in the Heidaigou Openpit Coal Mine in the Junggar Coal Field[J]. Acta Geologica Sinica, 92(11): 2368-2375(in Chinese with English abstract).

LIU Guang-xian, YUAN Feng, DENG Yu-feng, JOWITT S M, SUN Wei-an, WHITE N C, YANG Di, LI Xian-suo, ZHOU Tao-fa, HUIZENGA J M. 2018. The genesis of the Hehuashan Pb–Zn deposit and implications for the Pb–Zn prospectivity of the Tongling district, Middle–Lower Yangtze River Metallogenic Belt, Anhui Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 101: 105-121.

LIU Guo-dong, FU Yong, HE Wei, TANG Bo, LONG Zhen, YANG Ying, LONG Ke-shu. 2021. Enrichment mechanism and regularity of associated scandium resources in bauxite series of China[J]. Geological Review, 67(04): 952-972(in Chinese with English abstract).

LIU Ping. 1995. On the Bauxite in Guizhou Province—V: The Bauxite-bearing Rock Series in Central Guizhou—Southern Sichuan Ore-forming Zone[J]. Guizhou Geology, 12(03): 185-203(in Chinese with English abstract).

LIU Ping. 2007. Characteristics of Associate Gallium Distributed in the Bauxite in Guizhou and lts Prospects for Comprehensive Utilization: Nine Treatments of Bauxite Ores[J]. Guizhou Geology, (02): 90-96(in Chinese with English abstract).

LIU Shan, ZHANG Yu, AI Guo-liang, XUE Xi-lin, LI Hong-bin, SHAH S A, WANG Nai-hui, CHEN Xi. 2022. LA-ICP-MS trace element geochemistry of sphalerite: Metallogenic constraints on the Qingshuitang Pb–Zn deposit in the Qinhang Ore Belt, South China[J]. Ore Geology Reviews, 141: 104659.

LIU Ying-chao, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, TIAN Shi-hong, SONG Yu-cai, YANG Zhi-ming, WANG Zhao-lin, LI Zheng. 2008. Some insights and advances in study of Mississippi Valley-type(MVT) lead-zinc deposits[J]. Mineral Deposits, 27(2): 253-264(in Chinese with English abstract).

LIU Ying-chao, HOU Zeng-qian, YUE Long-long, MA Wang, TANG Bo-lang. 2022. Critical metals in sediment-hosted Pb-Zn deposits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 67(Z1): 406-424(in Chinese with English abstract).

LIU Ying-jun. 1965. Some geochemical characteristics of gallium in some bauxite deposits in China[J]. Geological Review, 23(01): 42-49(in Chinese).

LIU Ying-jun. 1982. Chief genetical types of gallium-bearing deposits in China[J]. Mineral Deposits, 1(01): 51-60(in Chinese with English abstract).

LIU You-ping, ZHOU Wen-long, CHENG Guo-fan, CUI Tao, LONG Han-sheng. 2016. A Research on Characteristics of Ore-bearing rock Series and Mineralization Principles of Bauxite from Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 36(02): 289-294(in Chinese with English abstract).

LIU Zhi-gang. 2005. Study on ore material composition of Xinxu bauxite in Jingxi County, Guangxi[J]. Southern Land and Resources, (11): 30-32(in Chinese).

LU Fang-hai, XIAO Tang-fu, LIN Jian, NING Zeng-ping, LONG Qiong, XIAO Li-hua, HUANG Fan, WANG Wan-kun, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, CHEN Hai-yan. 2017. Resources and extraction of gallium: A review[J]. Hydrometallurgy, 174: 105-115.

LUO Yang-bing. 2014. The study of trace elements geochemistry in Late Permian coal and tuff samples from east and south Sichuan province, China[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing)(in Chinese with English abstract).

MA Tao, ZHANG Jian-qiang, ZHANG Liang. 2015. Distribution features of gallium and germanium elements in coal in Hailar Basin[J]. Coal Geology of China, 27(07): 26-28, 47(in Chinese with English abstract).

MENG Hong-zhen. 2016. Research on geological characteristics and metallogenic conditions of Qiaoergou lead-zinc ore in Sichuan[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).

MENG Jian-yin, WANG Qing-fei, LIU Xue-fei, SUN Si-lei, LI De-sheng, ZHAO Zeng-yi, YANG Zhong-hua, WU Jian-bin. 2011. Mineralogy and Geochemistry of the Pangjiazhuang Bauxite Deposit in Jiaokou County, Shanxi Province[J]. Geology and Exploration, 47(04): 593-604(in Chinese with English abstract).

MO Jiang-ping, LI Jin-ao. l991. Metallogenic environment of bauxite in central Guizhou[J]. Geology and Exploration, (11): 12-18(in Chinese with English abstract).

MOSKALYK R R. 2003. Gallium: the backbone of the electronics industry[J]. Minerals Engineering, 16(10): 921-929.

MUNSON M C. 1994. Events and trends in metal and mineral commodities[J]. JOM, 46(4): 30-36.

NING Shu-zheng, DENG Xiao-li, LI Cong-cong, QIN Guo-hong,

ZHANG Jian-qiang, ZHU Shi-fei, QIAO Jun-wei, CHEN Lei, ZHANG Wei. 2017. Research status and prospect of metal element mineral resources in China[J]. Journal of China Coal Society, 42(09): 2214-2225(in Chinese with English abstract).

NING Shu-zheng, HUANG Shao-qing, ZHU Shi-fei, ZHANG Wei, DENG Xiao-li, LI Cong-cong, QIAO Jun-wei, ZHANG Jian-qiang, ZHANG Ning. 2019. Mineralization zoning of coal-metal deposits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 64(24): 2501-2513(in Chinese with English abstract).

OU De-lin, ZHOU Jing. 2010. Large Bauxite Proved in Dazhuyuan Area of Wuchuan[N]. Guizhou Daily(in Chinese).

QIAO Long. 2016. Tectonic evolution and bauxite metallogenesis in the Youjiang Basin and adjacent area[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

QIN Feng, MENG Xiang-lun, YIN Ben-chun. 2019. Distribution Characteristics and Ore-Controlling Conditions of Sedimentary Bauxite Deposits in Western Guangxi[J]. World Nonferrous Metals, (09): 92-94(in Chinese with English abstract).

QIN Shen-jun, SUN Yu-zhuang, LI Yan-heng, WANG Jin-xi, ZHAO Cun-liang, GAO Kang. 2015. Coal deposits as promising alternative sources for gallium[J]. Earth-Science Reviews, 150: 95-101.

QIN Yong, WANG Wen-feng, CHENG Ai-guo, LIU Xin-hua, ZHAO Jian-ling. 2009. Study of Ore-forming Potential of Gallium in Coal for the First Group of State Programmed Mining Districts[J]. Coal Geology of China, 21(01): 17-21, 26(in Chinese with English abstract).

SCHULTE R F, FOLEY N K. 2013. Compilation of gallium resource data for bauxite deposits[R]. Washington DC: US Geological Survey Open-File Report 2013-1272.

SCHWARZ T. 1997. Distribution and genesis of bauxite on the Mambilla Plateau. SE Nigeria[J]. Applied Geochemistry, 12(2): 119-131.

SHAO Pei, HOU Hong-jian, WANG Wen-long, QIN Ke-min, WANG Wen-feng. 2022. Distribution and enrichment of Al-Li-Ga-REEs in the High-Alumina coal of the Datong Coalfield, Shanxi Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 140: 104597.

SHUI Lan-su, CHANG Quan-ming. 1999. Concentration law of bauxite in G-layer of North China Platform[J]. China Mining Magazine, (05): 65-68(in Chinese with English abstract).

SI Rong-jun, GU Xue-xiang, XIAO Chun, YU Hai-tao, WANG Zhong-wei, CHEN Yan-jiao, QIU Ning. 2011. Geochemical character of trace elements in sphalerite from Fule Pb-Zn deposit, Yunnan Province[J]. Mineralogy and Petrology, 31(03): 34-40(in Chinese with English abstract).

SONG Yu-cai, HOU Zeng-qian, LIU Ying-chao, ZHANG Hong-rui. 2017. Mississippi Valley-type(MVT) Pb-Zn deposits in the Tethyan domain: A review[J]. Geology in China, 44(04): 664-689(in Chinese with English abstract).

SU Zhi-liang, DU Lin, GONG Xin, GUN Min-shan, WEN Yuan-yun, LI Yang. 2021. Characteristics of the critical metal enrichment and the resource potential for bauxite-bearing rocks in the Xinmin bauxite deposit in Daozhen County, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(Z1): 400-412(in Chinese with English abstract).

SUN Da-zhong. 1960. Geochemistry of gallium and its prospecting significance[J]. Journal of Hefei University of Technology, (02): 27-34(in Chinese).

SUN Guo-tao, ZENG Qing-dong, ZHOU Jia-xi, ZHOU Ling-li, CHEN Pei-wen. 2021. Genesis of the Xinling vein-type Ag-Pb-Zn deposit, Liaodong Peninsula, China: Evidence from texture, composition and in situ S-Pb isotopes[J]. Ore Geology Reviews, 133: 104120

SUN Li, XIAO Ke-yan, LOU De-bo. 2018. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(03): 82-94(in Chinese with English abstract).

SUN Si-lei. 2011. Geological and geochemical characteristics of Kuancaoping bauxite deposit in Ningwu County, Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

TANG Bo, FU Yong, LONG Ke-shu, LONG Zhen, WANG Tian-shun, LIU Yang, YANG Ying. 2021. Distribution characteristics and enrichment mechanism of associated rare earth elements resources in aluminum-bearing rock series in bauxite deposits of China[J]. Acta Geologica Sinica, 95(08): 2284-2305(in Chinese with English abstract).

TANG Pan-ke, WANG Chun-yan, MEI You-song, HAO Yu-jun, WU Bi-juan, GUAN You-fei, DUAN Jian-liang. 2018. Study on metallogenic characteristics and potential assessment of lead-zinc mineral resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(03): 31-49(in Chinese with English abstract).

TANG Yan-jie, JIA Jian-ye, LIU Jian-chao. 2001. Preilmnary study on occurrence state of gallium Dujiagou bauxite deposits and its controling factors in the western areas of Henan Province[J]. Geology and Prospecting, 37(06): 9-12(in Chinese with English abstract).

TANG Yan-jie, JIA Jian-ye, LIU Jian-chao. 2002. Study on distribution laws of gallium in bauxite deposits in the western area of Henan Province[J]. Mineralogy and Petrology, (01): 15-20(in Chinese with English abstract).

THAKUR P. 2017. Global reserves of coal bed methane and prominent coal basins[C]//THAKUR P. Advanced Reservoir and Production Engineering for Coal Bed Methane. Houston: Gulf Professional Publishing: 1-15.

TIAN Hao-hao, ZHANG Shou-ting, CAO Hua-wen, HAN Jiang-wei, LÜ Peng-rui, ZHANG Yun-hui. 2015. Geochemical Characteristics of Trace Elements of Sphalerite in the Chitudian Pb-Zn Deposit, West Henan Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 34(02): 334-342(in Chinese with English abstract).

TIAN Mao-jun. 2013. Research on Geological characteristics and genesis of of bauxite deposit in Wenshan-Tianshengqiao, Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).

TORNOS F. 2006. Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulfides: The Iberian Pyrite Belt[J]. Ore Geology Reviews, 28(3): 259-307.

TOSIANI D T, LO MONACO S, RAMIREZ A. 1990. Geochemistry of major and trace elements in Los Pijiguaos bauxite ore, Venezuela: Geochemistry of the Earth's Surface and of Min-

eral Formation[C]//2d International Symposium: 137-138.

TU Guang-chi, GAO Zhen-min, HU Rui-zhong, ZHANG Qian, LI Chao-yang, ZHAO Zhen-hua, ZHANG Gui-gui. 2004. Dispersed element geochemistry and metallogenic mechanism[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

TU Guang-chi. l984. Geochemistry of stratabound deposits in China (Volume I)[M]. Beijing: Science Press: 1-354(in Chinese).

USGS. 2017. Mineral commodity summaries 2017[R]. Reston: U.S. Geological Survey.

USGS. 2021. Mineral commodity summaries 2021[R]. Reston: U.S. Geological Survey.

VALETON I. 1983. Palaeoenvironment of lateritic bauxites with vertical and lateral differentiation[J]. Geological Society, London, Special Publications, 11(1): 77-90.

WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, HUANG Fan, WANG Yan, PEI Rong-fu. 2020. Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series(VI)[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1): 18-35(in Chinese with English abstract).

WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang, LI Tian-de, FU Xu-jie. 2002. Study on metallogenic series and metallogenic regularity of Altai metallogenic province[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).

WANG Hao-yu, YE Lin, HU Yu-si, WEI Chen, LI Zhen-li, HUANG Zhi-long, SHUANG Yan. 2021. Trace element characteristics in sphalerites from the Laochangping Pb-Zn deposit in the Southeastern Chongqing[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(06): 623-634(in Chinese with English abstract).

WANG Jia-qi. 2013. The study on mineralization regularity and geological of gibbsite in central Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

WANG Jun-yi, WANG Wen-feng, LI Jian, QIN Yong. 2010. Deposit Features of Ge, Ga and U Elements in Northern Part of Datong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 38(02): 117-121, 85(in Chinese with English abstract).

WANG Pei-pei. 2017. Enrichment and Differentiation Mechanism of Minerals and Trace Elements in the Late Permian Coals from Eastern Yunnan and Western Guizhou Province[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing)(in Chinese with English abstract).

WANG Wen-feng, QIN Yong, LIU Xin-hua, ZHAO Jian-ling, WANG Jun-yi, WU Guo-dai, LIU Jiong-tian. 2011. Distribution, occurrence and enrichment origin of gallium in coal in Zhungeer Coalfield, Inner Mongolia[J]. Scientia Sinica(Terrae), 41(02): 181-196(in Chinese).

WANG Wen-peng. 2016. The Geological Characteristics and Material Sources of Permian Bauxite in Western Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

WANG Xing-jun, WANG Zi-tong, WANG Gen-hou, ZHOU Jie, CUI Yin-liang, ZHANG Dao-hong, LI Wei-qing, FAN Liang-jun. 2018. Geochemical Characteristics of the Shazitang Bauxite Deposit in Guangnan County, Southeast Yunnan[J]. Northwestern Geology, 51(04): 166-183(in Chinese with English abstract).

WANG Yan-ru, WANG Qing-fei, LIU Xue-fei, LI Zhong-ming. 2012. Geochemical Background of the Mianchi Bauxite Mineralization area, Henan Province[J]. Geology and Exploration, 48(3): 526-532(in Chinese with English abstract).

WEI Han-tao, SHAO Yong-jun, YE Zhou, ZHOU Hao-di. 2021. Geochemical characteristics of trace elements of sphalerite from Huayuan Pb-Zn ore field, western Hunan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 48(02): 142-153(in Chinese with English abstract).

WEI Xiao, JI Hong-bing, LI Dao-jing, ZHANG Feng-lei, WANG Shi-jie. 2013. Material source analysis and element geochemical research about two types of representative bauxite deposits and terra rossa in western Guangxi, southern China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 133: 68-87.

WEN Bo-jie, CHEN Yu-chuan, WANG Gao-shang, DAI Tao. 2019. China's Demand for Energy and Mineral Resources by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 21(01): 68-73(in Chinese with English abstract).

WEN Han-jie, ZHU Chuan-wei, DU Sheng-jiang, FAN Yu, LUO Chong-guang. 2020. Gallium(Ga), germanium(Ge), thallium(TI) and cadmium(Cd) resources in China[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3688-3699(in Chinese with English abstract).

WEN Jing, ZHANG Yu-xu, WEN Han-jie, LING Kun-yue, ZHU Chuan-wei, FAN Hai-feng, SHEN Neng-ping. 2021. Gallium isotope fractionation in the Xiaoshanba bauxite deposit, central Guizhou Province, southwestern China[J]. Ore Geology Reviews, 137: 104299.

WEN Jing-jing, LIANG Tao, LU Ren, WANG Li. 2016. Mineralization of Li, Ti, Zr, Ga, Nb and LREE of bauxite deposits in Songji area of Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 30(2): 216-222(in Chinese with English abstract).

WU Tao, HUANG Zhi-long, YE Lin, ZHOU Jia-xi, WEI Chen, HU Yu-si, XIANG Zhen-zhong. 2021. Discovery of Ga extremely enriched Pb-Zn deposit in western Hunan[J]. Mineral Deposits, 40(06): 1357-1362(in Chinese with English abstract).

WU Yu-feng, YANG Fu-quan, LIU Feng. 2016. Geochemical characteristics of basaltic andesite subvolcanic rocks in the Ashele Cu-Zn deposit and their geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(01): 65-80(in Chinese with English abstract).

WU Ze-guang, SUN Jun-min, ZHANG Zhan-jun, SHI Song-lin, LIU Qin-fu. 2013. Discussion on Features of High Alumina Coal Resources in Zhungeer Coalfield[J]. Coal Engineering, 45(10): 115-118(in Chinese with English abstract).

XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LI Hou-min. 2008. Scheme for generation division of metallogenic provinces in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

YANG Wei-lin, ZHU Shao-jun. 1993. Occurrence law and comprehensive utilization of gallium in main coal seams of Dengfeng Coalfield[J]. Coal Geology of China, 5(01): 34-36(in Chinese).

YANG Zhong-hua, SUN Si-lei, MENG Jian-yin. 2011. Enrichment features of gallium in Shanxi's bauxite deposites[J]. Re-

sources & Industries, 13(06): 106-109(in Chinese with English abstract).

YE Lin, GAO Wei, YANG Yu-long, LIU Tie-geng, PENG Shao-song. 2012. Trace elements in sphalerite in Laochang Pb-Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(05): 1362-1372(in Chinese with English abstract).

YE Lin, GAO Wei, YANG Yu-long, LIU Tie-geng. 2011. Preliminary study on trace elements of sphalerite from Laochang lead-zinc deposit in Lancang, Yunnan[C]//Proceedings of the 13th Annual Academic Conference of the Chinese Society of Mineral and Petrology Geochemistry: 258(in Chinese).

YE Lin, PAN Zi-ping, CHENG Zeng-tao. 2007. The prospects of comprehensive utilization of associated elements in bauxites from Guizhou[J] Acta Mineralogica Sinica, (Z1): 388-392(in Chinese with English abstract).

YE Lin, PAN Zi-ping, CHENG Zeng-tao. 2008. The regularities of distribution of associated elements in Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 28(2): 105-111(in Chinese with English abstract).

YE Qing-tong, SHI Gui-hua, YE Jin-hua, YANG Chong-qiu. 1991. Metallogenic characteristics and series of lead-zinc deposits in Nujiang Lancang Jinshajiang area[M]. Beijing: Beijing Scicnce and Technology Press(in Chinese).

YE Tai-ping, WANG Xiao-juan, HUANG Yuan-ling. 2019. Geological significance of dispersed elements composition in Sphalerite in the Wuzhishan lead-zinc ore field, Guizhou Province[J]. Mineral Exploration, 10(02): 274-280(in Chinese with English abstract).

YI Tong-sheng, QIN Yong, WU Yan-yan, LI Zhuang-fu. 2007. Gallium Accumulation and Geological Controls in Coal Seam and Its Floor from Liangshan Formation, Kaili, Eastern Guizhou, China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, (03): 330-334(in Chinese with English abstract).

YIN Li. 2016. Mineralogical characteristics and significance of Mayuan Pb-Zn deposit[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).

YU De-shui, XU De-ru, WANG Zhi-lin, XU Ke, HUANG Qin-yi, ZOU Shao-hao, ZHAO Zhao-xia, DENG Teng. 2021. Trace element geochemistry and O-S-Pb-He-Ar isotopic systematics of the Lishan Pb-Zn-Cu hydrothermal deposit, NE Hunan, South China[J]. Ore Geology Reviews, 133: 104091

YU Jin, LI Pu-tao, YU Hang-bo. 2009. Analysis on trace-element geochemical characteristics and ore-forming environment of bauxite mine in Sanhe town of Jingxi county[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 28(03): 289-293(in Chinese with English abstract).

YU Lei. 2012. Genesis and Metallogenic Regularity of Late Permian Sedimentary Bauxite Deposit, Southeast Yunnan[D] Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

YU Lei. 2017. Analysis of the enrichment characteristics of rare element gallium in Shanxi[J]. West-China Exploration Engineering, 29(02): 112-113, 116(in Chinese with English abstract).

YU Wen-chao. 2017. Sedimentological and metallogenic study of bauxite deposits in Guizhou and Guangxi Provinces, South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).

YU Weng-chao, WANG Rui-hu, ZHANG Qi-lian, DU Yuan-sheng, CHEN Yue, LIANG Yu-ping. 2014. Mineralogical and geochemical evolution of the Fusui bauxite deposit in Guangxi, South China: From the original Permian orebody to a Quarternary Salento-type deposit[J]. Journal of Geochemical Exploration, 146: 75-88.

YUAN Ai-guo. 2010. Resource distribution and exploitation strategy of the bauxite deposits in the Henan Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing)(in Chinese with English abstract).

YUAN Bo, ZHANG Chang-qing, YU Hong-jun, YANG Yao-min, ZHAO Yue-xia, ZHU Chao-cheng, DING Qing-feng, ZHOU Yu-bin, YANG Ji-chao, XU Yue. 2018. Element enrichment characteristics: Insights from element geochemistry of sphalerite in Daliangzi Pb–Zn deposit, Sichuan, Southwest China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 186: 187-201.

YUAN Xin, WU Yue, DUAN Deng-fei, ZHU Jiang, OUYANG He-gen, CAO Liang, ZHOU Bao. 2022. Trace (Dispersed) Elements in Sphalerite from the Giant Huoshaoyun Lead-Zinc Deposit, Xinjiang and Their Geological Implications[J]. Geology and Exploration, 58(03): 545-560(in Chinese with English abstract).

YUAN Ying, ZHU Xin-you, WANG Yan-li. 2011. Overview of research on distribution and occurrence state of associated rare elements in lead-zinc deposits in China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(S1): 316-317(in Chinese).

YUAN Yue. 2015. The geochemical characteristics of the associated elements in No.6 coal from Tanggongta Mine[D]. Handan: Hebei University of Engineering(in Chinese with English abstract).

YUN Meng-chao, WANG Feng-yu, LIN Wei, LI Ying-kui. 2017. Characteristics of three types of rare earth mineral resources associated with bauxite deposit in the eastern Pinglu, Shanxi[J]. Mineral Exploration, 8(5): 772-781(in Chinese with English abstract).

ZAKRUTKIN V Y. 1974. Forms of occurrence of gallium in boehmite and gibbsite from bauxites of southern Timan[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 217(4): 923-925.

ZHAI Ming-guo, WU Fu-yuan, HU Rui-zhong, JIANG Shao-yong, LI Wen-chang, WANG Ru-cheng, WANG Deng-hong, QI Tao, QIN Ke-zhang, WEN Han-jie. 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(02): 106-111(in Chinese with English abstract).

ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, CUI Bin. 1996. Research on metallogenic series[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).

ZHANG Chang-qing, RUI Zong-yao, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LOU De-bo. 2013. The main successive strategic bases of resources for Pb-Zn deposits in China[J]. Geology in China, 40(01): 248-272(in Chinese with English abstract).

ZHANG Chang-qing, WU Yue, WANG Deng-hong, CHEN

Yu-chuan, RUI Zong-yao, LOU De-bo, CHEN Zheng-hui. 2014. Brief Introduction on Metallogeny of Pb-Zn Deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2252-2268(in Chinese with English abstract).

ZHANG Fu-xin, WANG Li-she. 2009. The formation and material sources of the superlarge Hada Gol Ga-bearing coal deposit in Jungar Banner, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 36(02): 417-423(in Chi-nese with English abstract).

ZHANG Jia-li, ZHANG Qing-wei, YANG Chun-long, GAO Pan, MIAO Bing-kui, PI Qiao-hui, LI She-hong. 2016. Geochemical characteristics of the rare metal and rare-scattered elements of bauxite in western Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(01): 153-159(in Chinese with English abstract).

ZHANG Pei, WU Yue, DUAN Deng-fei, CAO Liang, ZHOU Bao, ZHU Jin, LIU Wen-wen. 2021. Trace Element Composition and Indication Significance of Sphalerite in Changdengpo Lead-zinc Deposit in Huayuan Ore Field, Hunan Province[J]. Resources Environment & Engineering, 35(02): 269-276(in Chinese with English abstract).

ZHANG Qian. 1987. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 6(2): 177-190.

ZHANG Qi-ming, JIANG Xin-sheng, QIN Jian-hua, CUI Xiao-zhuang, LIU Cai-ze. 2012. Lithofacies paleogeography of the early Middle Permian Liangshan Formation in northern Guizhou-southern Chongqing area its bauxite ore-forming effect[J]. Geological Bulletin of China, 31(04): 558-568(in Chinese with Engl-ish abstract).

ZHANG Rong-wei. 2013. Study on geochemical characteristics and genesis of Maozu lead-zinc deposit in Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).

ZHANG Tian-dong, LIU Zhong-fa, DI Hong-fei, ZHANG Jun-ke, CHEN Ke, SHAO Yong-jun. 2021. Geochemical characteristics of sphalerite from the Baoshan deposit in southern Hunan and its implications for Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic oreforming mechanism[J]. Mineral Exploration, 12(08): 1716-1726(in Chinese with English abstract).

ZHANG Xian-rong. 1993. The geochemical characteristics of the trace elements within monominerals in Fankou Pb-Zn deposit, Guangdong[J]. Journal of Guilin College of Geology, 13(01): 68-75(in Chinese with English abstract).

ZHANG Yong. 2013. The geochemical characteristics of gallium in Huangling mine[D]. Handan: Hebei University of Engineering(in Chinese with English abstract).

ZHANG Yun-feng, GUO Zhao-hua, CHI Jun-zhou, WANG Yong-wang, CHEN Dong. 2014. Resource distribution and application status of gallium[J]. China Coal, 40(S1): 36-38(in Chinese).

ZHANG Zheng-wei, ZHOU Ling-jie, LI Yu-jiao, WU Cheng-quan, ZHENG Chao-fei. 2013. The “coal–bauxite–iron” structure in the ore-bearing rock series as a prospecting indicator for southeastern Guizhou bauxite mines[J]. Ore Geology Reviews, 53: 145-158.

ZHAO Fei-yan, ZHANG Xiao-dong, GUO Zhao-hua, WANG Yong-wang, CHEN Dong, ZHANG Yun-feng. 2017. Distribution, production and application prospects of gallium[J]. Light Metals, (03): 1-3(in Chinese with English abstract).

ZHAO Ting, QIN Peng-zhen, WANG An-jian, WANG Gao-shang, LI Jian-wu, LIU Chao, LIU Yi-fei. 2017. An Analysis of Gallium Ore Resources Demand Trend and the Thinking concerning China's Gallium Industry Development[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(01): 77-84(in Chinese with English abstract).

ZHAO Xiao-dong, HU Chang-song, LING Xiao-ming, LI Jun-min. 2015. REE Characteristics and Its Geological Significance of the Bauxite Deposits in Nanchuan-Wulong Area, Chongqing[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 45(6): 1691-1701(in Chinese with English abstract).

ZHONG Rong, CHENG Fen. 1985. The Shuanmazhuang Group of Daqingshan Coal Field and a Discussion Its Contact with the Underlying and Overlying Strata[J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics Chinese Academy of Geological Sciences, (5): 75-93, 202(in Chinese with English abstract).

ZHOU Jia-xi, YANG Zhi-mou, AN Yun-lin, LUO Kai, LIU Chun-xue, JU Yi-wen. 2022. An evolving MVT hydrothermal system: Insights from the Niujiaotang Cd-Zn ore field, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 237: 105357.

ZHU Kang-yu, SU Hui-min, JIANG Shao-yong. 2019. Mineralogical control and characteristics of rare earth elements occurrence in Carboniferous bauxites from western Henan Province, north China: A XRD, SEM-EDS and LA-ICP-MS analysis[J]. Ore Geology Reviews, 114: 103144.

ZOU Jian-hua, LI Da-hua, LIU Dong, CHENG Li-jun, ZHU Chang-sheng, REN Shi-cong. 2012. The Occurrences and Genesis of Minerals in Late Paleozoic Coal from Adaohai Mine, Inner Mongolia[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(02): 135-138(in Chinese with English abstract).

ZOU Jian-hua, WANG Bing-feng, WANG Hui, TIAN He-ming, LI Tian. 2022. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the late Permian coals from the Lutang Mine, Chongqing[J]. Journal of China Coal Society, 47(08): 3117-3127(in Chinese with English abstract).