

doi: 10.12029/gc20200429001

王辉,冯明申,李聪聪,崔胜,许将,陈瑞莉,范玉海,陈香菱,贺小元. 2023. 含煤地层铝-镓共生成矿的构造沉降制约及镓有利区预测[J]. 中国地质, 50(3): 677-691.

Wang Hui, Feng Mingshen, Li Congcong, Cui Sheng, Xu Jiang, Chen Ruili, Fan Yuhai, Chen Xiangling, He Xiaoyuan. 2023. The tectonism-sedimentation constraints on Al-Ga coupling relation of coal-bearing strata and prediction of Ga favorable area[J]. Geology in China, 50(3): 677-691(in Chinese with English abstract).

含煤地层铝-镓共生成矿的构造沉降制约 及镓有利区预测

王辉^{1,2}, 冯明申³, 李聪聪², 崔胜², 许将², 陈瑞莉², 范玉海^{2,4}, 陈香菱², 贺小元²

(1. 中国煤炭地质总局广西煤炭地质局, 广西南宁 530209; 2. 中国煤炭地质总局煤航地质勘查院, 陕西西安 710100; 3. 陕西省自然资源厅矿产资源评审指导中心, 陕西西安 710065; 4. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054)

摘要:【研究目的】开展有利于铝-镓共生的聚煤盆地类型、部位及层位预测。【研究方法】首先,通过铝-镓元素共生关系和聚煤盆地中煤-铝共生关系,以铝为纽带,探讨煤-铝-镓三者的耦合关系;继而通过不同类型聚煤盆地的聚煤强度差异,结合铝矿时空分布特征,开展有利于铝-镓共生的聚煤盆地类型及层位的讨论;最后,从含煤岩系沉积期构造-沉积作用入手,结合煤中镓测试数据,在鄂尔多斯盆地南缘开展含镓有利区预测。【研究结果】在诸多聚煤盆地类型中,大型稳定克拉通盆地的聚煤强度高,铝(镓)成矿作用也明显强;华北石炭纪-二叠纪煤中镓最优,华南晚二叠世次之,北方早中侏罗世最低;在鄂尔多斯盆地南缘的蒲白矿区煤中镓含量水平相对较高,底部煤层中镓的含量一般超过 30 $\mu\text{g/g}$,其次是铜川矿区各煤层,煤中镓加权平均值为 28 $\mu\text{g/g}$,黄陇侏罗纪煤田各矿区中部分样品镓含量超过 30 $\mu\text{g/g}$,其中顶部的 2 号煤层附近镓含量相对最高,镓元素主要富集在煤层顶底板及其夹矸中,煤层本身镓含量较低;最终预测了 4 处找镓有利区。【结论】煤与铝(镓)间具有基本相同的成矿背景和密切相关的成矿条件,决定了含煤岩系中煤-铝-镓共生的内在成生联系和耦合关系,可构成煤-铝-镓同生成矿系列;不同类型、不同时代的聚煤盆地因基底稳定性和成盆机制的差异,既造成了聚煤强度的差异性,又控制了铝-镓富集程度差异性。

关键词:煤-铝-镓同生;成矿条件;聚煤盆地类型;镓有利区;矿产勘查工程;鄂尔多斯盆地南缘

创 新 点:(1)通过铝-镓元素共生关系和聚煤盆地中煤-铝共生关系,以铝为纽带,探讨煤-铝-镓三者的耦合关系,提出煤中镓研究新思路;(2)煤与铝(镓)间具有基本相同的成矿背景和密切相关的成矿条件,决定了含煤岩系中煤-铝-镓共生的内在成生联系和耦合关系,可构成煤-铝-镓同生成矿系列,揭示了煤-铝-镓共生成矿内在机制;(3)在鄂尔多斯盆地南缘新发现 4 处找镓有利区,为下一步勘查工作部署提供依据,具有一定的现实意义。

中图分类号:P612 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)03-0677-15

The tectonism-sedimentation constraints on Al-Ga coupling relation of coal-bearing strata and prediction of Ga favorable area

收稿日期:2020-04-29;改回日期:2020-10-22

基金项目:陕西省地质勘查基金项目(61201707330)和中国地质调查局项目(DD20160817)联合资助。

作者简介:王辉,男,1971年生,正高级工程师,从事基础地质、矿产地质方向研究工作;E-mail:365623326@qq.com。

通讯作者:冯明申,男,1965年生,正高级工程师,主要从事矿产地质、煤地质及盆地分析研究;E-mail:feng1399284@163.com。

WANG Hui^{1,2}, FENG Mingshen³, LI Congcong², CUI Sheng², XU Jiang²,
CHEN Ruili², FAN Yuhai^{2,4}, CHEN Xiangling², HE Xiaoyuan²

(1. Guangxi Coal Geology Bureau, China National Administration of Coal Geology, Nanning 530209, Guangxi, China; 2. China National Administration of Coal Geology ARSC Prospecting Institute, Xi'an 710199, Shaanxi, China; 3. Mineral Resources Evaluation and Guidance Center of the Department of Natural Resources of Shaanxi Province, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The type, location and horizon of coal accumulation basin conducive to aluminum–gallium symbiosis were predicted. **[Methods]** The coupling relationship between coal, aluminum and gallium is discussed through the symbiotic relationship of aluminum and coal – aluminum in coal accumulation basin. Then, based on the differences of coal accumulation strength of different types of coal accumulation basins, combined with the temporal and spatial distribution characteristics of aluminum ore, the types and horizon of coal accumulation basins conducive to the co–occurrence of aluminum and gallium are discussed. Based on the tectono–sedimentary process of coal–bearing rock series during the sedimentary period, combined with the gallium test data in coal, the prediction of gallium–bearing favorable areas in the southern margin of Ordos Basin is carried out. **[Results]** Among the basin types, the large stable craton coal accumulation basin has high coal accumulation strength and obviously strong aluminum (gallium) mineralization. Gallium is the best in the Carboniferous–Permian coal in North China, the second in Late Permian in South China, and the lowest in Early and Middle Jurassic in North China. The content of gallium in the coal of Pubai mining area in the southern margin of Ordos Basin is relatively high, and the content of gallium in the bottom coal seam generally exceeds 30 μg/g, followed by the coal seam of Tongchuan mining area, the weighted average of gallium in coal is 28 μg/g, and there are 450 pieces of gallium content over 30 μg/g in various mining areas of Huanglong Jurassic coal field. The No. 2 coal layer at the top has the highest content of gallium, and gallium is mainly enriched in the roof and floor of coal seam and gangue. The content of gallium in coal seam itself is relatively low. Finally, 4 favorable areas for finding gallium are predicted. **[Conclusions]** Coal and aluminum (gallium) have basically the same ore–forming background and closely related ore–forming conditions, which determines the internal genesis and coupling relationship of coal–aluminum–gallium symbiosis in coal–bearing rock series, and can form coal–aluminum–gallium co–forming ore series. Due to the difference of basement stability and basin formation mechanism, the coal accumulation strength of different types and different times not only causes the difference, but also controls the difference of aluminum–gallium enrichment degree.

Key words: Coal–Al–Ga contemporaneous; metallogenic condition; types of coal accumulating basins; Ga favorable area; mineral exploration engineering; Southern Ordos Basin

Highlights: (1) Based on the symbiotic relationship between aluminum and gallium and the coal–aluminum symbiotic relationship in coal accumulation basin, the coupling relationship between coal, aluminum and gallium is discussed, and a new idea for the study of gallium in coal is put forward. (2) Coal and aluminum (gallium) have basically the same ore–forming background and closely related ore–forming conditions, which determines the internal genesis and coupling relationship of coal–aluminum–gallium symbiosis in coal–bearing rock series, and can form the coal–aluminum–gallium co–forming ore series, revealing the internal mechanism of coal–aluminum–gallium symbiosis mineralization. (3) Four new gallium favorable areas were found in the southern margin of Ordos Basin, which provides a basis for further exploration deployment and has certain practical significance.

About the first author: WANG Hui, born in 1971, male, senior engineer, engaged in basic geology, mineral geology research; E–mail: 365623326@qq.com.

About the corresponding author: FENG Mingshen, born in 1965, male, senior engineer, mainly engaged in mineral geology, coal geology and basin analysis; E–mail: feng1399284@163.com.

Fund support: Supported by Shaanxi Provincial Geological Exploration Foundation Project (No.61201707330) and the project of China Geological Survey (No.DD20160817).

1 引言

镓(Ga)元素属于典型的稀有分散元素,自然界中难以形成独立矿物,更无独立矿床。其地球化学性质与铝元素相近,不论是在内生作用还是外生作用阶段,均表现出与铝元素密切共生。镓是一种低熔点高沸点的稀散金属,作为一种性能优良的半导体材料,有着广泛的应用前景(张复新和王立社,2009),被誉为“电子工业的脊梁”。近年来,随着中国对煤系矿产和煤中微量元素的重视,煤中镓等稀有微量元素富集机理逐渐成为研究热点(代世峰等,2006a;易同生等,2007;王文峰等,2011;张勇等,2014;刘帮军等,2014;刘汉斌等,2019)。目前已发现了数个与煤共(伴)生的中型、大型、超大型的镓矿床(代世峰等,2006b; Zhao et al., 2009; Sun et al., 2013),煤及煤灰已成为工业提取镓的重要原料。近年来,众多煤地质学者致力于煤中微量金属研究,成为煤地质学研究的新方向(Wang et al., 2021)。然而多数学者是从元素地球化学的角度研究煤中金属的分布特征、赋存状况及富集机理,少有学者从煤盆地的形成条件和含煤岩系沉积环境的角度,对比成煤环境和成镓环境的共性与差异,研究煤-镓共生耦合关系。煤-镓空间上密切共生,无疑是有机物源和无机物源在同一沉积环境下的沉积响应,二者必然存在内在联系。同时,由于镓的分散性特征,在某种程度上讲,与煤的聚积又存在一定差异性。本文以铝元素为纽带,在讨论镓-铝和煤-铝共生关系的基础上,试图从聚煤盆地形成条件和含煤(铝)岩系沉积作用入手,探讨煤-铝-镓三者的内在成因联系,继而对比不同聚煤盆地类型中煤-铝-镓间的差异,最后通过鄂尔多斯盆地南部石炭纪一二叠纪含煤岩系和侏罗纪含煤岩系的构造-沉积制约差异的对比分析,结合煤中镓测试数据,预测找镓有利区,从而更好地指导煤中金属找矿预测和综合评价工作,助力煤中金属综合开发与利用。

2 铝的表生作用地球化学与煤-铝共生关系

2.1 沉积物源区中铝的地球化学特征

镓元素在化学和晶体化学上与铝(锌、铁)元素的近似性,决定了镓-铝间的紧密共生关系。岩石圈中镓大部分都隐藏在各种不同成因而又广泛分

布的含铝矿物中,换言之,铝元素的地球化学行为很大程度上控制了镓的迁移与分布。表生条件下铝元素的富集是镓元素富集的必要条件,岩石中的铝元素含量是评价镓元素的潜在参数。可见,煤-铝共(伴)生机理的讨论为了解煤-镓耦合关系提供了有效的解决途径。

地壳中最主要的含铝矿物为铝硅酸盐矿物(如长石、似长石、云母、角闪石、辉石等),占含铝矿物质量的99%。表生条件下,各种原生铝硅酸盐矿物遭受风化作用,都可以转变为黏土矿物(伊利石、高岭石、蒙脱石等)(都凯,2012;李元,2014;刘亢,2016)。表生风化作用下矿物的转变过程中,绝大部分铝只是转变为新的矿物组分,被水溶液带走十分有限,因易溶组分的大量流失,铝元素得到了富集(闫宝华,2013)。一般认为,长期热带、亚热带湿润炎热的气候条件,有利于黏土矿物彻底分解,使得其中的铝和硅进一步分离,发生红土化作用(闫宝华,2013)。此阶段铝元素二次富集,在物源区甚至可达到成矿阶段,形成红土风化壳型铝土矿床。

由于在物源区岩石类型和风化程度的差异,导致在沉积物中铝的分布也很不均匀。一般情况下,在富含黏土矿物的泥岩和页岩中铝元素含量普遍较高,其他沉积岩中含量很低。虽然铝的氧化物几乎不溶于河水和海水,但可以胶体形式或与水中的腐殖质生成稳定的络合物,进行长距离的迁移,从而形成海相及湖相沉积的铝土矿。有研究表明,煤中铝主要是以无机态(高岭石、勃姆石等)存在于煤中,有机铝参与生物地球化学作用是微量的和次要的。

2.2 含煤岩系中的煤-铝共生耦合关系

中国铝土矿可分为古风化壳沉积型、堆积型和红土型(高兰等,2014)。中国北方古风化壳沉积型铝土矿按照铝土矿产出的层位,依据辽宁本溪地区建立的标准剖面,可分为A、A'、B、B'、C、D、E、F、G层,共9层。经勘探证实,在辽东地区,G层铝土矿工业价值最大,其次是B、D层铝土矿,其他铝土矿层不稳定,常过渡为铝质黏土岩。中国北方古风化壳沉积型铝土矿中,A、B、D、G层较为常见,其中G层铝土矿分布广泛、规模最大、工业价值最高,查明资源储量占全国的53%,主要分布在山西、河南、山东、河北、辽宁等地,是中国最主要的铝土矿矿层类型。古风化壳沉积型铝土矿与煤层空间关系密切,

按照铝土矿层主要富集层位与含煤岩系的空间关系,可归纳为4种空间关系:(1)在含煤岩系下伏基底的古风化壳(F、G层),可形成具有重要工业价值的铝土矿(高兰等,2014,2015);(2)在煤层的顶、底板及其附近层位(B、C、D、E层),煤层底板根土岩因高岭石含量高,可形成具有工业价值的耐火黏土;(3)富集在煤层或泥质夹矸中,虽不形成独立的铝土矿层,但可形成高铝煤(孙升林等,2014);(4)在含煤岩系上覆层位(A、B层)(表1)。煤与铝土矿空间上的密切共生关系,说明二者成矿背景一致,成因上有联系,形成条件有共同之处;虽然空间上密切共生,但二者规模却往往互为消长关系,表明二者形成条件又存在一定的差异性。

富铝沉积岩(铝质泥岩或沉积型铝土矿)的形成是多种控制因素综合作用的结果,其中物源区含(富)铝母岩在风化作用下的崩解离析和元素分异富集是关键性和基础性控制因素。温润炎热的气候条件是物源区含铝矿物产生最大程度风化分解的必要前提,长期稳定且与风化速度相匹配的缓慢的构造抬升,是保证物源区长时间遭受风化的构造条件。同时,温润炎热的气候条件适宜植物大量繁殖,一方面造成生物作用促进和加速含铝矿物的化学风化作用,另一方面,分解的大量的腐殖酸,致使介质呈酸性,只有在酸性介质中,铝才会呈胶体态迁移,并在盆缘低洼地带沉积下来。构造抬升形成

的正地形,在流水作用下,保证了物源区的风化产物向盆地方向不断搬运堆积。

造成聚煤盆地形成的决定性因素包括古构造、古地理、古气候、古植被及时间等。植物大量繁殖才可能有植物遗体大量聚集,从而为聚煤作用产生了一定的物质基础;温暖潮湿的气候是植物繁衍、植物残体泥炭化和泥炭保存的前提条件;聚煤盆地的形成是一定构造作用的结果,为泥炭堆积。聚煤作用往往发生于一场剧烈的地壳运动之后,聚煤期前强烈的构造运动可造成聚煤盆地基底经历长期的沉积间断和风化作用,也正好有利于含铝母岩的彻底分解和红土型风化壳的形成。对于巨型坳陷型盆地而言,聚煤期构造稳定,在盆地内部产生相对缓慢的沉降,形成的负地形,为泥炭沼泽的发育、泥炭层堆积和保存提供了条件;相对而言,在盆地周缘的物源区缓慢平稳的构造抬升背景下造成的相对平缓起伏的正地形,为物源区母岩遭受尽可能彻底的风化分解,提供了良好的构造条件。

含煤岩系往往是沉积盆地的一个重要组成部分,含煤沉积往往仅出现于沉积盆地演化的特定阶段和特定部位。不难看出,巨型坳陷型沉积盆地聚煤期或坳陷型聚煤盆地与富铝沉积岩(铝质泥岩或沉积型铝土矿)形成条件密切相关,相似的古气候条件、古植被条件等形成条件决定了含煤(铝)岩系中煤-铝共生的内在成生联系和空间上的密切共

表1 辽东本溪地区含铝岩系综合地层剖面(据高兰等,2014)

Table 1 Comprehensive stratigraphic profiles of aluminum-bearing rocks in the Benxi area, eastern Liaoning (after Gao Lan et al., 2014)

系	统	阶	地层	矿层 编号	铝土矿层形态特征
			地层岩性特征		
二 叠 系	上 统	彩家阶	中部为砂页岩互层,上部多为杂色页岩,有时为黄褐色砂岩	A'	不连续层状,厚一般0.5 m,延长最大不超过200 m。
			中二叠统顶部为页岩,上盘夹少许页岩,与上二叠统粗砂岩呈假整合接触。	A	连续层状,厚0.3~2 m,一般0.5 m;该层稳定,可作为填图标志层
	中 下 统	上柳塘阶	页岩	B'	不连续层状,延长不超过300 m,和B层相似
			中二叠统中部页岩,上盘多数为页岩,局部地段为薄煤层	B	连续层状,较稳定铝土矿层,良好标志层
		下柳塘阶	页岩,与下伏上石炭统地层假整合接触	C	连续薄层状,延长不超过200 m,厚0.2~1.0 m
石 炭 系	上 统	黄旗阶	中部砂页岩,煤系层	D	连续薄层状,上石炭统标准地层
			顶部砂页岩夹煤线	E	连续出现,厚一般0.5 m,局部构成软硬质黏土
		本溪阶	中下部页岩层	F	连续层状,延长不超过200 m,厚一般0.8 m
			底部紫色页岩,与下伏中奥陶统灰岩地层呈假整合接触	G	连续层状,铝土页岩是石炭系底部可靠的标准层,厚0.5~8 m

(伴)生关系。聚煤盆地形成前,盆地基底含铝母岩往往遭受长期的风化作用而被分解,铝元素得以富集,富铝矿物在(近)原地大量堆积,作为盆地基底富铝岩石形成的物质基础,往往在含煤岩系底部形成古风化壳沉积型铝土矿或铝质泥岩,从而形成“上煤下铝”这一重要的矿产共生组合关系,构成了煤-铝同生成矿系列。如华北陆块古风化壳型铝土矿,主要成矿作用发生在晚石炭世本溪组沉积期,形成了重要的具有工业价值的G层铝土矿,之后便发生大规模成煤作用,形成了中国重要的石炭纪一二叠纪煤田。虽然二者空间上紧密共生,但二者的发育厚度,往往呈互为消长关系。华北陆块“上煤下铝”的空间分布规律和组合特征,为今后在河南、山西等地铝土矿找矿工作指明方向。事实上,按照上煤下铝的找矿思路,近年来的煤下铝勘查工作也取得了重要突破,河南首个煤下铝整装勘查取得重大进展,在滏池曹窑以西煤下铝已查明铝土矿资源储量2.08亿t,矿床规模达到大型,部分地段发育优质铝土矿,矿石品级可达Ⅲ级(铝硅比 ≈ 7)(佚名,2014)。

虽然二者具有基本相同的成矿背景和相似的成矿条件,但二者的成矿作用具有显著的差异。富铝沉积岩(铝质泥岩或沉积型铝土矿)显然是无机物沉积作用的结果,符合沉积学原理和沉积作用过程,物源区在适宜气候条件下的长期风化分解是关键成矿因素;而煤则是无机物活动十分微弱的背景下,在沼泽沉积环境中巨量有机物不断堆积的结果,泥炭的堆积和可容空间的长期均衡补偿关系是形成厚煤层的关键控制因素。

3 不同类型聚煤盆地煤-铝-镓关系差异

3.1 不同类型盆地聚煤强度比较

前已阐述了含煤岩系中煤-铝共生的耦合关系和内在的成因联系。然而不同的含煤盆地,因盆地所处的构造背景、盆地构造属性、盆地的规模、成盆机理的差异,导致其煤-铝空间上共生的差异性。煤的聚积具有显著的周期性和阶段性,受到古植被、古地理、古气候和古构造的系统控制。在中国有8个主要的聚煤期:早石炭世、晚石炭世、早二叠世、晚二叠世、晚三叠世、早中侏罗世、早白垩世及

古近纪一新近纪。聚煤期与全球保持一致,可进一步归纳为晚古生代、中生代、新生代3个聚煤阶段。其中华北的晚石炭世一早二叠世、华南的晚二叠世、西北的早中侏罗世、东北的早白垩世是中国重要聚煤期(程爱国和林大扬,2001)。

中国大陆主体是由众多微(中间)地块在古亚洲洋、特提斯洋和环太平洋三大动力学体制的作用下,经多次分离-拼合的复式大陆(任纪舜,1991),历经了复杂的构造演化过程,从而导致了不同聚煤盆地基底构造和聚煤作用强度的显著差异。按照板块理论和盆地基底所处大地构造部位,聚煤盆地分布局限于陆壳和过渡壳,以前者为主,且聚煤量占绝对优势;根据地洼学说,将聚煤盆地分为地台型、地槽型和地洼型,聚煤作用以前者为主,中间者次之,后者最差;程爱国和林大扬(2011)依据聚煤盆地形成的地球动力学条件,将中国聚煤盆地分为克拉通盆地、伸展断陷盆地、前陆盆地、上叠盆地或山间盆地、走滑-拉分盆地、大陆裂陷盆地、拗拉槽、主动大陆边缘盆地等8个成因类型(表2)。

由表2可看出,不同类型的聚煤盆地因基底稳定性和成盆机制的差异,聚煤强度有十分显著的差别。其中的克拉通盆地及与克拉通有关的前陆-克拉通复合盆地聚煤作用最强,聚煤量可达万亿吨级;其次是伸展断陷盆地、前陆盆地、走滑-拉分盆地、山间盆地,聚煤量一般为百亿吨一千亿吨级;位于被动陆缘的裂陷盆地或拗拉槽盆地聚煤作用较差;主动陆缘盆地因位于陆缘位置,构造活动性强,聚煤作用最弱。同一类型盆地因基底构造背景的差异,聚煤强弱的差异也很显著,如位于华北、扬子地台上的晚古生代克拉通盆地,聚煤作用前者强于后者。鄂尔多斯盆地与川滇盆地均为前陆-克拉通复合盆地(程爱国等,2001),但聚煤作用前者明显强于后者,也是与各自所处的基底的稳定性是分不开的。

3.2 不同类型聚煤盆地的煤-铝-镓关系的差异对比

中国是世界主要铝土矿生产国之一,铝土矿资源分布高度集中,主要分布于山西、河南、贵州、广西四省,其储量占全国铝土矿储量的90.9%(山西41.6%、贵州17.1%、河南16.7%、广西15.5%)(张军伟,2012),其次,在山东、云南、四川等地区也有一定储量的铝土矿。中国铝土矿产于古生界、中生界

表2 中国聚煤盆地分类(据程爱国和林大扬,2001)

Table 2 Classification of coal-accumulating basins in China (after Cheng Aiguo and Lin Dayang, 2001)

盆地类型	地壳类型	板块位置	煤层发育特征	构造稳定性	聚煤量级别	典型盆地
克拉通盆地	克拉通	板内	中—厚	极稳定	千—一亿吨级	华北盆地(C-P) 扬子亚盆地(C-P)
伸展断陷盆地	陆壳	板内	厚度变化大,有巨厚 煤层产出	不稳定—较稳定	百亿吨级	华北盆地群(K)
前陆盆地	陆壳—过渡壳	碰撞边缘	厚度变化大	较稳定	千亿吨级	川滇盆地(T-J) 鄂尔多斯盆地(T-J)
上叠盆地或山间盆地	陆壳—过渡壳	碰撞边缘	厚度变化大	不稳定	十亿—百亿吨级	吐哈盆地(J)
走滑—拉分盆地	陆壳—过渡壳	转换边缘	厚度变化大,有巨厚 煤层产出	不稳定—较稳定	百亿吨级	托云—和田(J) 东北盆地群(E)
大陆裂陷盆地	陆壳—过渡壳	被动陆缘	薄—中厚	不稳定	十亿吨级	桂湘赣(C-P)
拗拉槽	陆壳—过渡壳	被动陆缘	薄—中厚	不稳定	十亿吨级	贺兰山拗拉槽(C-P)
主动大陆边缘盆地	过渡壳	过渡壳	薄煤层	极不稳定	万吨—一亿吨级	唐北—昌都(C-P) 台湾盆地(N)

和新生界各地层之中,以石炭纪和二叠纪铝土矿分布最广。石炭纪铝土矿大多分布于华北地台上,二叠纪铝土矿则分布于扬子和华南准地台上。

根据成因类型,可将铝土矿划分为3类:古风化壳沉积型、堆积型和红土型。中国铝土矿多为沉积型(刘长龄,1987),资源储量占92.25%,主要分布在山东、河南、山西、贵州等地区;堆积型矿床储量占6.21%,主要分布在云南、广西等地区;其余为红土型矿床。沉积型铝土矿均产于古陆边缘石灰岩风化侵蚀面之上,如山东、河南、山西沉积型的“G”层铝土矿,产于奥陶系古岩溶顶界面本溪组,位于华北石炭纪—二叠纪含煤盆地底部(杨合群等,2017)。虽然中国聚煤盆地分布广泛,盆地类型复杂多样,但重要沉积型的铝(黏)土矿均产于聚煤作用最强的石炭纪—二叠纪的华北克拉通盆地和扬子克拉通亚盆地,而产于活动带上的其他聚煤盆地类型的成矿作用弱;中国煤中镓的研究表明,各聚煤盆地中,华北石炭纪—二叠纪煤中镓含量算术平均值最高,华南晚二叠世煤中镓含量次之,而北方早中侏罗世煤田中镓含量最低(任德怡等,2006),说明了聚煤作用和铝—镓成矿作用之间的耦合关系(汤艳杰等,2002a, b;赵晓东和李军敏,2014;樊钰超和齐永安,2017)。关键控矿因素是稳定构造抬升背景和温润炎热的气候条件下,长期的沉积间断造成了含铝母岩长期遭受喀斯特风化作用,一方面形成大量含铝矿物风化富集,为铝(黏)土矿提供了大量矿源物质,一方面风化剥蚀形成的准平原化,为含铝(黏)土岩系和含煤

岩系的充填提供了可容空间。

在华北石炭纪—二叠纪聚煤盆地的不同沉积部位,铝(黏)土矿的沉积成矿作用差异显著,其分布范围远远小于煤的聚积范围。铝(黏)土矿产于近古陆海盆边缘的滨海沼泽地带,具有海陆交替相沉积序列(王庆飞等,2012)。本溪组含铝岩系顶平底不平,说明了铝(黏)土矿的富集和矿体形态规模与古岩溶地理环境关系密切,矿体多充填于奥陶系古风化面上的低洼地带(岩溶洼地、岩溶漏斗)(图1)。铝(黏)土矿层的层数、厚度与含铝岩系的厚度呈正相关关系(王庆飞等,2012),可见,本溪组含铝岩系是华北巨型聚煤盆地形成初期充填的结果。在本溪组含铝岩系填平补齐的基础上,随后广泛发育的泥炭沼泽则决定了煤的聚积作用,形成了“上煤下铝”的矿产组合类型(李彦恒,2007;孙泽飞,2016;徐浩,2017)。

由于成煤条件和铝土矿的成矿条件密切相关,造成煤层和铝土矿层或铝质泥岩空间上密切共生,而镓元素地球化学性质又与铝元素相近,二者密切共生关系,铝土矿层常常伴生镓元素,这就决定了聚煤盆地煤—镓空间上的共生关系。换言之,聚煤盆地中铝的堆积量一定程度上暗示了镓的富集程度,铝元素含量是评价镓元素的潜在参数和找镓的指示元素。在华北石炭纪—二叠纪重要聚煤区内的晋中北、豫西、鲁中、辽南及晋北等地上石炭统本溪组均蕴藏着含铝岩系,其中的G层铝土矿矿层,形成了中国重要的铝土矿矿层类型和“煤下铝

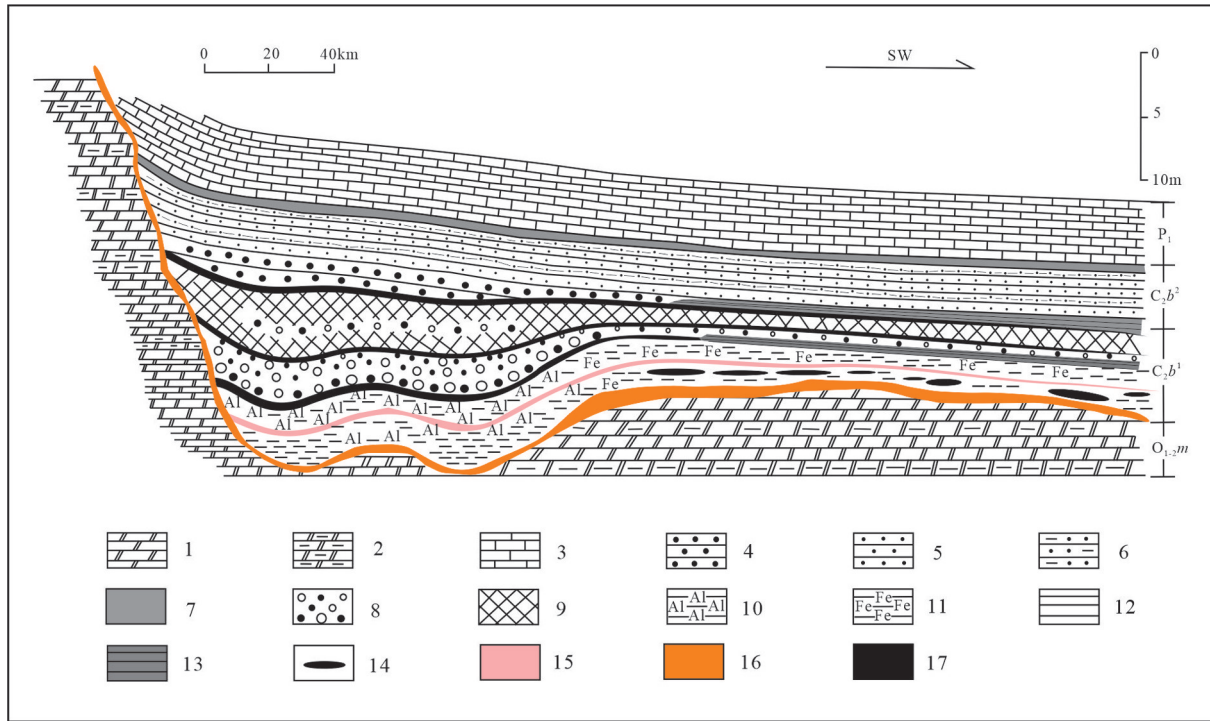


图1华北溶洼型铝土矿层序组成示意图

1—白云岩;2—泥质白云岩;3—灰岩;4—粗砂岩;5—砂岩;6—泥砂岩;7—泥页岩;8—豆鲕状铝土矿;9—块状铝土矿;10—铝质黏土;11—铁质黏土;12—炭质泥岩;13—杂色泥页岩;14—铁锰质团块;15—铝质泥岩;16—铁质风化壳;17—煤层

Fig.1 Schematic diagram of sequence composition of karst type bauxite in the North China

1-Dolostone;2-Muddy dolostone;3-Limestone;4-Gritstone;5-Sandstone;6-Siltstone;7-Clay-shale;8-Beansoolit bauxite;9-Massive bauxite;10-Aluminum clay;11-Irony rock;12-Carbonaceous mudstone;13-Variiegated clay shale;14-Mass of iron and manganese;15-Aluminum mudstone;16-Irony weathering;17-Coal seam

“镓”矿产组合类型。除本溪组G层铝土矿外,在上覆的太原组、山西组重要含煤岩系也发育多层铝土矿(铝质黏土岩),宏观上暗示了华北石炭纪—二叠纪含煤岩系中镓的良好成矿前景,构成了“煤中铝(镓)”组合类型。镓元素常常赋存于煤层及煤层顶底板中,其中可采煤层中镓元素可作为重要伴生元素的可综合利用,为工业提取镓提供了新原料和新途径。煤中镓分布不均,变化极大,基于5079件煤样实测数据的统计分析,对分布于山西、陕西、内蒙古三省区的19个首批国家煤炭规划矿区煤中镓研究与评价结果表明,侏罗系煤中镓算术平均含量为5.15 μg/g,石炭系—二叠系煤中镓算术平均含量为17.19 μg/g,石炭系—二叠系煤中镓的成矿潜力和综合利用前景明显大于侏罗系;太原组和山西组煤中镓远景资源量占比为79.84%和20.16%,太原组煤中镓含量明显占据优势;煤中镓含量在华北晚古生代聚煤盆地北缘的准格尔、大同规划区及南缘的渭北规划区最优,在中部的西山古交规划区、阳泉规

划区次之,其他地区相对较低;估算的煤中镓远景资源总量为102.85万t(秦勇等,2009)。

4 鄂尔多斯盆地南缘找镓有利区预测

4.1 煤中铝-镓的构造-沉积制约

鄂尔多斯盆地南部发育晚古生代和中生代2套含煤岩系,分别形成陕西省渭北石炭纪—二叠纪煤田和陕西省黄陇侏罗纪煤田。石炭纪—二叠纪含煤岩系属板内稳定型近海含煤碎屑夹碳酸盐岩沉积建造,是华北石炭纪—二叠纪克拉通盆地沉积建造的有机组成部分,上石炭统太原组和下二叠统山西组为主要含煤地层;侏罗纪延安组含煤岩系属板内稳定型内陆开阔盆地河湖含煤碎屑岩沉积建造,是鄂尔多斯前陆-克拉通复合盆地沉积建造的重要组成部分。太原组聚煤强度最高,延安组次之,山西组最差。

鄂尔多斯盆地南部2套含煤岩系厚度小,堆积速率小;而非含煤岩系厚度很大,堆积速率大。说明含煤岩系沉积期间构造活动平稳,地势平坦,物

源供给不足,侵蚀搬运能力差,沉积作用弱;相反,非含煤岩系沉积期间构造活动相对强烈,地形高差加大,侵蚀搬运能力增强,物源供给充分,碎屑沉积作用活跃。太原组—山西组含煤岩系无机碎屑岩堆积速率小于延安组堆积速率,同样说明太原组—山西组沉积期碎屑沉积作用较延安组沉积期弱。

以王双明院士为代表的众多地质学者,通过鄂尔多斯盆地含煤岩系沉积学和岩石矿物学特征分析,研究其指示的构造环境和沉积学意义,揭示了盆地内不同时代含煤岩系的共性和差异(王双明,1996)。研究结果表明,鄂尔多斯盆地南缘太原组沉积期为海相沉积环境,构造环境相对最稳定,物源区古地形平缓,侵蚀作用相对最弱,化学风化程度相对最高,沉积区陆源碎屑物供给匮乏,碎屑沉积作用相对最弱;山西组沉积期为近海陆相沉积环境,构造环境次稳定,物源区古地形相对平缓,侵蚀作用相对较弱,化学风化程度较高,沉积区陆源碎屑物供给较充分,碎屑沉积作用相对较活跃;延安组沉积期为陆相沉积环境,构造环境相对不稳定,物源区古地形趋于复杂,侵蚀作用相对强烈,化学风化程度最低,沉积区陆源碎屑物供给充分,碎屑沉积作用最为活跃。可以看出晚古生代聚煤期构造条件稳定,既有利于煤层的聚积,又有利于物源区母岩的遭受强烈风化,从而为铝—镓成矿作用提供必要的物质条件,可以看出晚古生代含煤岩系的铝—镓成矿条件优于中生代含煤岩系。

4.2 煤岩中镓的赋存状态与富集特征

研究表明(曹代勇和魏迎春,2017),渭北石炭纪—二叠纪煤田和黄陇侏罗纪煤田煤中镓元素的赋存状态均主要为无机态,载镓矿物主要为黏土矿物,仅有少部分以有机质吸附态存在。煤的灰分产率与镓元素含量呈正相关关系。渭北石炭纪—二叠纪煤田太原组煤层灰分产率变化在16.59%~34.06%,以中灰煤为主,富灰煤次之;山西组煤层灰分产率在25%以上,属高灰煤;黄陇侏罗纪煤田延安组煤层灰分产率大部分在15%以上,属中灰煤,推断晚古生代煤中镓含量应高于中生代煤中镓。

综上,鄂尔多斯盆地南缘晚古生代含煤岩系的煤—铝—镓成矿条件优于中生代含煤岩系(徐浩,2017);结合不同聚煤期聚煤作用强弱,进一步判断太原组煤—铝—镓成矿条件优于延安组,延安组的煤—

铝—镓成矿条件优于山西组。从构造—沉积角度和煤—铝—镓成矿条件入手,结合岩石学和煤岩学特征,对鄂尔多斯盆地南缘含镓有利区进行了宏观预测,为在该区域含煤岩系中开展找镓工作指出了方向。

4.3 鄂尔多斯盆地南缘煤中镓分布规律

研究表明(秦勇等,2009),鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤田煤中 Al_2O_3 普遍较高,如在盆地东北部准格尔煤田、河东煤田中部、盆地南部渭北石炭纪—二叠纪煤田及盆地西缘贺兰山煤田石炭井、沙巴台矿区及宁东煤田红墩子矿区等(徐浩,2017), Al_2O_3 可达到边界或工业品位,而盆地内的侏罗纪煤田,如东胜煤田、宁东煤田、宁南煤田、陇东煤田、贺兰山煤田及黄陇侏罗纪煤田等煤中 Al_2O_3 含量总体偏低,均未达到边界品位。鄂尔多斯盆地煤中镓元素与煤中 Al_2O_3 分布态势一致,煤中镓元素异常范围小,均落在 Al_2O_3 高异常区内。鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤中镓较侏罗纪明显增高,前者含量范围为0.73~45 $\mu g/g$,均值为15.90 $\mu g/g$,其中20~25 $\mu g/g$ 、25~30 $\mu g/g$ 以及40~45 $\mu g/g$ 含量范围内分布频率均为9%;后者煤中镓含量在0.40~20.30 $\mu g/g$,均值为2.67 $\mu g/g$,侏罗纪煤中镓含量96%均分布在0~5 $\mu g/g$ 含量范围内,只有4%的镓含量落在20~25 $\mu g/g$ 含量范围内。鄂尔多斯盆地南缘的渭北石炭纪—二叠纪煤田镓含量较高,接近甚至超过边界品位(30 $\mu g/g$),且太原组煤中镓含量较山西组含量高;黄陇侏罗纪煤田镓含量明显下降(徐浩,2017)。

研究区以往投入了大量的煤地质勘查工作,勘查程度普遍较高,同时对煤中伴生镓等有益矿产,也进行了有限的采样测试和初步评价。测试分析数据表明,鄂尔多斯盆地南缘煤中镓呈现东高西低的趋势(图2)。在研究区发现3个煤中镓高值区,分布在铜川矿区西部(韩古庄、演池井田)、蒲白矿区(东坡煤矿、朱家河煤矿)及黄陵矿区(一号井田和二号井田)(表3,表4)。3个镓元素高值异常区分别来自于上石炭统太原组和中侏罗统延安组,下二叠统山西组煤层层数少,煤层薄,多不具工业开采价值,伴生的镓含量也较低,这一点与前述的分析和推断是基本一致的。

4.3.1 渭北石炭纪—二叠纪煤田镓元素分布规律

蒲白矿区煤中镓含量水平相对较高,各煤层镓平均含量变化范围8.33~36.90 $\mu g/g$,多在15~25 $\mu g/g$,尤

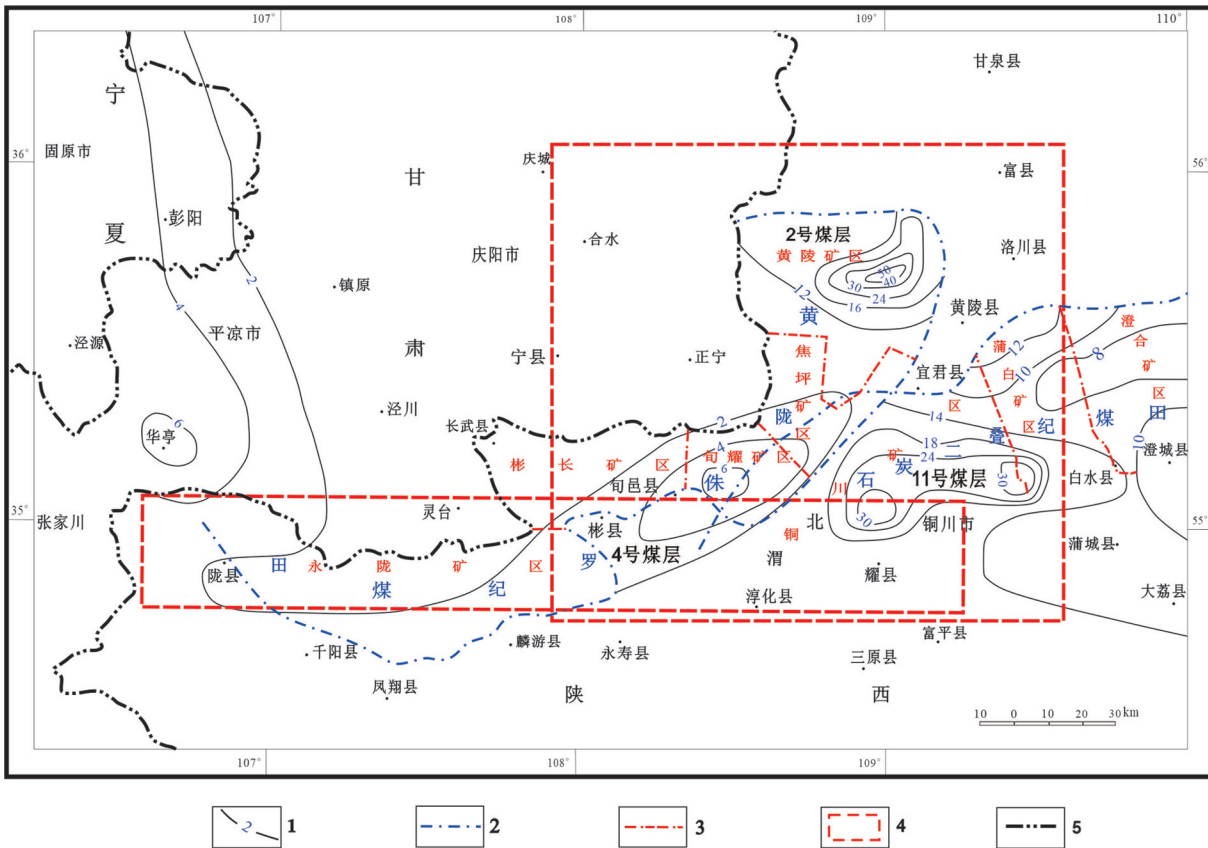


图2 鄂尔多斯盆地南部煤中Ga含量等值线图

1—镓元素等值线;2—煤田边界;3—矿区边界;4—研究区边界

Fig.2 Contour map of Ga content in coal in the southern Ordos Basin

1—Gallium polymetallic isoline; 2—Coalfield boundary; 3—Mine boundary; 4—Study area boundary

其是在底部煤层中的平均含量一般超过 30 μg/g;其次是铜川矿区,各煤层(4、5、9、10上、10)中Ga的含量介于 17~38 μg/g,加权平均值为 28 μg/g。

垂向上(图3),镓的含量总体上表现为从上向下增大的趋势,镓相对富集于下部煤层和煤层底板。澄合矿区太原组镓平均含量在底部的 11 和 11 下煤层中最高;铜川矿区 10 上、10 号煤层、夹矸及其顶底板中镓含量均超过了边界品位,其中 10 号煤层的顶板和底板个别样品镓含量甚至达到了工业品位。两个矿区中上部 5 下和 6 号煤层中镓的含量次之。就单个煤层而言,镓元素在煤层底板及夹矸中较煤层中更为富集。

4.3.2 黄陇侏罗纪煤田镓元素分布规律

对黄陇侏罗纪煤田各矿区煤质测试资料中镓元素的梳理和统计结果显示:煤田内 5 个矿区,总计 450 件样品出现镓元素含量超过 30 μg/g。镓元素主要赋存在延安组 2、4 号煤层附近。随着煤层层位的

降低,煤中镓含量具有逐渐降低的总体分布趋势,并表现出波动式变化的特征。镓元素主要富集在煤层顶底板及夹矸中的分布特征与渭北石炭纪—二叠纪煤田基本相同。

4.4 鄂尔多斯盆地南缘找镓有利区圈定

以镓含量 15 μg/g 为高值异常下限,进一步预测和圈定了以下 4 处找镓有利区(图4)。

4.4.1 蒲白矿区东坡—朱家河有利区(I)

蒲白矿区东坡—朱家河找镓有利区位于蒲白矿区西部的东坡煤矿—朱家河煤矿一带,面积约 166 km²。根据现有资料显示,该有利区主要含镓层位为上石炭统太原组 4 煤层、5 煤层、6-1 煤层、10 煤层、11 煤层和 11 下煤层。煤中镓含量变化范围 32.50~55 μg/g,平均 41.32 μg/g,厚度 0.8~2.1 m,煤层顶板、底板及其夹矸中镓含量尚未获取。就镓元素成矿规律看,11 煤层顶底板及夹矸中存在富集可能极大,是最可能实现找镓突破的有利区。

表3 渭北石炭—二叠纪煤田各矿区Ga异常点汇总

Fig.3 Summary of Ga anomalies in various mining areas of Carboniferous-Permian coalfield in north of Weihe river

矿区	井田	异常层位	样品编号	Ga/($\mu\text{g/g}$)30 平均值	数据来源	
铜川矿区	韩古庄—演池勘探区	10上号煤层		31	张永强等,2019; 陕西省煤田地质局物探 测量队,2016 ^①	
	韩古庄—演池勘探区	10号煤层		33		
	韩古庄—演池勘探区	4号煤层顶板		28		
	韩古庄—演池勘探区	4号煤层夹矸		37		
	韩古庄—演池勘探区	4号煤层底板		33		
	韩古庄—演池勘探区	5号煤层底板		41		
	韩古庄—演池勘探区	9号煤层顶板		31		
	韩古庄—演池勘探区	9号煤层底板		36		
	韩古庄—演池勘探区	10上号煤层顶板		38		
	韩古庄—演池勘探区	10上号煤层底板		43		
	韩古庄—演池勘探区	10号煤层顶板		38		
	韩古庄—演池勘探区	10号煤层夹矸		38		
	韩古庄—演池勘探区	10号煤层底板		38		
	耀西普查区	5号煤层	普7-5-1/2	31.9		陕西煤田地质局一九四 队,1983 ^②
	耀西普查区	5号煤层	普13-5矸-1/2	30		
	耀西普查区	5号煤层	普14-5-1/1	30.9		
	耀西普查区	5号煤层	普14-5顶1/1	30		
耀西普查区	5号煤层	普14-5底1/1	42.5			
耀西普查区	5号煤层	普20-5-3/3	38.4			
深部远景区	5号煤层	普7	30			
深部远景区	5号煤层	普25	31.3			
深部远景区	5号煤层	普39	47.5			
东坡煤矿	11号煤层		34	陕西煤田地质局一三九 队,1983 ^②		
蒲白矿区	朱家河井田	11号煤层		36.9	陕西煤田地质局一三九 队,1985 ^②	
	朱家河井田	11下号煤层	10-9钻孔	55		
	朱家河井田	6-1号煤层	10-9钻孔	32.5		
	朱家河井田	10号煤层	7-10钻孔	41.9		
	朱家河井田	10号煤层	8-8钻孔	45.6		
	朱家河井田	10号煤层	707钻孔	36		
高阳井田	10号煤层	8-8钻孔	45.6	陕西煤田地质局一三九 队,2004 ^②		

4.4.2 铜川矿区韩古庄—演池有利区(II)

铜川矿区韩古庄—演池找镓有利区分布于韩城矿区西部韩古庄—演池井田范围内,面积约152 km²。根据目前资料显示(张永强等,2019),铜川矿区韩古庄—演池找镓有利区内主要含镓层位为上石炭统太原组4煤层顶底板及夹矸、5煤层底板、9煤层顶底板、10上煤层及其顶底板夹矸、10煤层及其顶底板夹矸和11煤层。4煤层顶底板及夹矸中镓含量28~37 $\mu\text{g/g}$,5煤层底板镓含量41 $\mu\text{g/g}$,9煤层顶底板镓含量31~36 $\mu\text{g/g}$,10上煤层顶底板夹矸中

镓含量31~43 $\mu\text{g/g}$,10煤层及其顶底板夹矸中镓含量33~38 $\mu\text{g/g}$,11煤层镓含量32~45 $\mu\text{g/g}$ 。随着煤层层位的降低,镓含量有明显的增多趋势。

4.4.3 黄陵矿区一、二号井有利区(III)

黄陵矿区找镓有利区范围主要以黄陵一号井和二号井为核心区,涵盖周边的仓村井田、党家河井田、四家岔井田,面积约1018 km²。根据目前资料显示(张勇,2013;赵存良,2015),黄陵矿区主要含镓层位为侏罗纪延安组2号煤层及其顶底板。2号煤层中镓含量3.32~398.50 $\mu\text{g/g}$,平均162.85 $\mu\text{g/g}$ (个别样

表4 黄陵矿区煤中Ga异常点汇总
Fig.4 Summary of Ga anomalies of coal species in Huangling mining area

矿区	井田	异常层位	样品编号	Ga/($\mu\text{g/g}$)30	数据来源
				平均值	
黄陵矿区	四家岔井田	2号煤层顶板		32.7	陕西煤田地质局一九四队, 1995 ^①
	四家岔井田	2号煤层底板		34.87	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-511(普2钻孔)	30	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-902(普5钻孔)	35	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1148(四2钻孔)	36	
	四家岔井田	2号煤层夹矸	71-1149(四2钻孔)	39	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-1150(四2钻孔)	50	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1276(四4钻孔)	31	
	四家岔井田	2号煤层夹矸	71-1277(四4钻孔)	40	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1479(普7钻孔)	33.5	
	四家岔井田	2号煤层夹矸	71-1459(四1钻孔)	32.5	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-1458(四1钻孔)	35	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1457(四1钻孔)	32.5	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-1455(四1钻孔)	35	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1151(四3钻孔)	30	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-1153(四3钻孔)	40	
	四家岔井田	2号煤层顶板	71-1447(四7钻孔)	40	
	四家岔井田	2号煤层底板	71-1448(四7钻孔)	40	
	四家岔井田	3号煤层底板	71-1450(四7钻孔)	30	
	四家岔井田	1号煤层顶板	71-1273(四4钻孔)	30	
	香坊详查区	2号煤层	F15矸-1	33	
	香坊详查区	2号煤层	稀F17-2矸	30	
	香坊详查区	2号煤层	FX8-底-1/1	40	
	香坊详查区	2号煤层	FX24-底-1/1	40	
	香坊详查区	2号煤层	FX25-矸1-1/1	30	
	香坊详查区	2号煤层	FX25-底-1/1	31	
	香坊详查区	2号煤层	FX27-2矸-4/4	35	
	香坊详查区	2号煤层	FX27-2底-1/1	35	
	香坊详查区	2号煤层	FX31-2底-1/1	31	
	香坊详查区	2号煤层	FX40-2矸-1/1	30	
	1号煤矿	2号煤层顶板	1-R	33.96	中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 2015 ^② ;中国煤炭地质总局, 2016 ^③
	1号煤矿	2号煤层	HL1-1	146.44	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-2	88.51	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-3	338.31	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-4	238.18	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-5	366.39	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-6	1179.53	
	1号煤矿	2号煤层	HL1-7	398.5	
	1号煤矿	2号煤层夹矸	HL2-R	77.26	
	1号煤矿	2号煤层	HL2-1	88.37	
	1号煤矿	2号煤层	HL2-5	57.31	
	1号煤矿	2号煤层	HL2-6	33.52	
1号煤矿	2号煤层	HL2-11	55.1		
1号煤矿	2号煤层	HL2-12	92.23		
1号煤矿	2号煤层	HL-2-B	37.61		
曹家峪煤矿	2号煤层	CCK-j	33.31		
曹家峪煤矿	2号煤层	CJY-d	122.4		
曹家峪煤矿	2号煤层	CJY-j2	33.99		
曹家峪煤矿	2号煤层夹矸		45.25(均值)		
瑞能煤矿	2号煤层	RN1	104.7		
瑞能煤矿	2号煤层	RN-j1	82.32		
瑞能煤矿	2号煤层	RN-j2	71.83		
瑞能煤矿	2号煤层夹矸		51.49(均值)		
仓村煤矿	2号煤层夹矸		33.31(均值)		

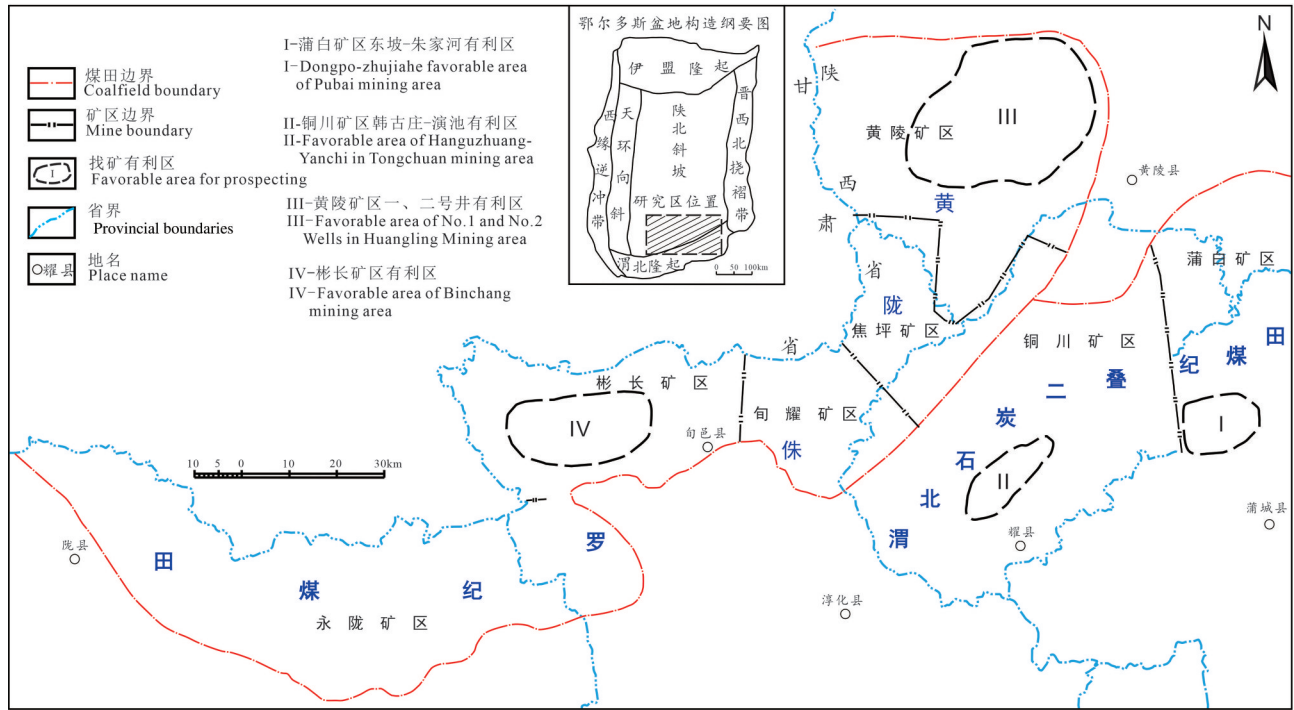


图4 鄂尔多斯盆地南部找镓有利区预测图
Fig.4 Prediction of the favorable area for finding gallium in the southern Ordos Basin

突破和综合利用。

致谢:感谢项目组全体成员的帮助和支持;成文后中国地调局西安地质调查中心杨合群教授对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

注释

- ① 陕西省煤田地质局物探测量队. 2016. 陕西省渭北石炭二叠纪煤田铜川矿区韩古庄—演池勘查区普查地质报告[R].
- ② 陕西煤田地质局一九四队. 1983. 渭北石炭二叠纪煤田铜川矿区耀(县)西(原)普查找煤地质报告[R].
- ③ 陕西煤田地质局一三九队. 1983. 陕西省渭北石炭二叠纪煤田铜川矿区石柱勘查区预查地质报告[R].
- ④ 陕西煤田地质局一三九队. 1985. 陕西省渭北煤田蒲白矿区朱家河井田精查补充勘探地质报告[R].
- ⑤ 陕西煤田地质局一三九队. 2004. 陕西省渭北石炭二叠纪煤田蒲白矿区高阳井田煤炭资源/储量说明书[R].
- ⑥ 陕西煤田地质局一九四队. 1995. 陕北侏罗纪煤田黄陵店头矿区双龙井田勘探地质报告[R].
- ⑦ 陕西煤田地质局一九四队. 1995. 陕西省黄陵矿区香坊详查地质报告[R].
- ⑧ 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心. 2015. 陕西省黄陵煤田煤中伴生金属资源调查评价[R].
- ⑨ 中国煤炭地质总局. 2016. 全国煤系矿产资源潜力调查评价[R].

Reference

Anonymous. 2014. Achievements of the Coal under aluminum project west of Cao Kiln [J]. China Mining Engineering, 43(2): 63-64 (in Chinese with English abstract).

Cao Daiyong, Wei Yingchun. 2017. Occurrence Law and Resource Evaluation of Coal Measure Minerals in Ordos Basin [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

Cheng Aiguo, Lin Dayang. 2001. Systematic Analysis of Coal Accumulation in China [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press (in Chinese).

Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2006a. A discovery of extremely-enriched boehmite from coal in the Junger coalfield, the Northeastern Ordos[J]. Acta Geologica Sinica, (2): 294-300, 315-316 (in Chinese with English abstract).

Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2006b. Discovery of the Junger super-large gallium deposit in Inner Mongolia [J]. Science Bulletin, (2): 177-185 (in Chinese with English abstract).

Du Kai. 2012. Geochemistry of Weathering of Cenozoic Basalt in Eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).

Fan Yuchao, Qi Yong'an. 2017. Distribution and controlling factors of gallium in Benxi Formation of Yuzhou Bauxite mining area[J]. Mining Research and Development, 37(4): 103-108 (in Chinese).

- with English abstract).
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Qi Shuaijun, Yi Chengwei, Jia Shaohui. 2015. Characteristics and potential analysis of bauxite resources in China [J]. *Geology of China*, 42(4): 853–863 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, Yi Chengwei. 2014. Summary of metallogenic regularities of aluminum deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2284–2295 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanheng. 2007. Study on the Relationship between Organic Matter and Uranium Mineralization in Ordos Basin [D]. Handan: Hebei University of Engineering (in Chinese with English abstract).
- Li Yuan. 2014. Composition of Clay Mineral in Grassland Soil and its Environmental Significance [D]. Guangzhou: Sun Yat– Sen University (in Chinese with English abstract).
- Liu Bangjun, Lin Mingyue, Zhu Guangchen. 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 Changling. 1987. Genetic types of bauxite in China [J]. *Science in China (part B: chemical biology, agronomy, medical geoscience)*, (5) : 535–544 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hanbin, Ma Zhibin, Guo Yanxia, Wu Fangqin. 2019. Distribution characteristics and development and utilization prospect of lithium gallium aluminum in Shanxi coal system[J]. *Clean Coal Technology*, 25(5): 39–46 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kang. 2016. Study on the Characteristics of the Symbiotic Combination of Coal Measures and Mineral Resources in the Western Margin of Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Qin Yong, Wang Wenfeng, Cheng Aiguo, Liu Xinhua, Zhao Jianling. 2009. Metallogenic prospects of gallium in coal in the first coal state–planned mining areas [J]. *China Coal Geology*, 21(1): 17–21, 26 (in Chinese with English abstract).
- Ren Deyi, Zhao Fenghua, Dai Shifeng, Zhang Junying, Luo Kunli. 2006. Trace Element Geochemistry of Coal [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Ren Jishun. 1991. Basic characteristics of lithospheric structure in China [J]. *China Regional Geology*, (4): 289–293 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shenglin, Wu Guoqiang, Cao Daiyong, Ning Shuzheng, Qiao Junwei, Zhu Huaxiong, Han Liang, Zhu Shifei, Miao Qi, Zhou Jing, Liu Kang, Li Congcong, Chen Hanyong, Cai Xumei. 2014. Coal measure mineral resources and their development trend [J]. *China Coal Geology*, 26(11): 1– 11 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y Z, Zhao C, Zhang J, Yang J J, Zhang Y Z, Yuan Y, Xu J, Duan D J. 2009. Concentration of valuable elements of the coals from the Pingshuo mining district, ningwucoalfield, northern China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 31(5): 727.
- Sun Zefei. 2016. Geological Assessment of Feasibility of Co– exploitation of Unconventional Gas in Coal Measures in Linxingblock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).
- Tang Yanjie, Jia Jianye, Liu Jianchao. 2002a. Study on the distribution of gallium in bauxite in western Henan [J]. *Mineral Rocks*, (1): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yanjie, Liu Jianchao, Jia Jianye. 2002b. Study on occurrence state of gallium in the bauxite deposits of western Henan Province[J]. *Journal of Xi 'an Engineering University*, (4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinxi, Fu Zhiheng, Hu Yafan, Yang Zhen, Ma Jialiang, Sun Yuzhuang. 2021. Geochemical characteristics of REY, Li, Ga trace elements in the No. 9 coal seam of the Daheng mine, Ningwu coalfield, Shanxi Province, China[J]. *China Geology*, 4: 266–273.
- Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, Zhang Qizuan, Li Zhongming, Kang Wei, Cai Shuhui, Li Ning. 2012. Progress in research on geology and Genesis of Bauxite deposits [J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 430–448 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenfeng, QinYong, Liu Xinhua, Zhao Jianling, Wang Junyi, Wu Guodai, Liu Jiongtian. 2011. The distribution occurrence and enrichment genesis of gallium in coal in junger coalfield, Inner Mongolia [J]. *Chinese Science: Earth Science*, 41(2): 181–196 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hao. 2017. Structural Control of the Occurrence Law of Coal Measure Mineral Resources in Ordos Basin [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).
- Yan Baohua. 2013. Element Characteristics of Miocene Sediments in the Northeast Qaidam Basin and Chemical Weathering in the Source Region [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Jang Hanbing, Tan Wenjuan, Zhao Guobin, Yang Letian, Li Ying. 2017. Introduction to Important Mineral Resources in Northwest China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese).
- Yi Tongsheng, Qin Yong, Wu Yanyan, Li Zhongfu. 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*, 36(3): 331–334 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuxin, Wang Lishe. 2009. The formation and material sources of the superlarge Hada Gol Ga– bearing coal deosit in Jungar Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 36(2): 417–423 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Junwei. 2012. Bauxite resource situation and countermeasures in China [J]. *Value Engineering*, 31(21): 4– 6 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Yong, Qin Shenjun, Yang Jingjing, Zhang Jianya. 2014. Progress in geochemistry of gallium in coal [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 33(5): 166–169, 175 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong. 2013. Geochemical Characteristics of Gallium in Coal 2 ~ # in Huangling Mining Area [D]. Handan: Hebei University of Engineering (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongqiang, Xue Haijun, Chang Yufei, Hou Dinggen. 2019. Distribution features of gallium from coal-bearing rock series in Hangzhuang Yanchi exploration area [J]. Coal Science and Technology, 47(3): 195–199 (in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Qin S, Yang Y. 2009. Concentration of gallium in the Permian-carboniferous coal of China[J]. Energy Exploration & Exploration, 27(5): 333.
- Zhao Cunliang. 2015. Distribution and Enrichment Mechanism of Polymetallic Elements Associated with Coal in Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiaodong, Li Junmin. 2014. Analyses on distribution characteristics and controlling factors of gallium in bauxite-bearing rock series in the southeastern limb of the Chepan Syncline, Chongqing[J]. Geochemical Bulletin of Mineral Rocks, 33(6): 893–899 (in Chinese with English abstract).
- 曹代勇, 魏迎春. 2017. 鄂尔多斯盆地煤系矿产赋存规律与资源评价[M]. 北京: 科学出版社.
- 程爱国, 林大扬. 2001. 中国聚煤作用系统分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 代世峰, 任德怡, 李生盛. 2006a. 鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田煤中超高富集勃姆石的发现[J]. 地质学报, (2): 294–300, 315–316.
- 代世峰, 任德怡, 李生盛. 2006b. 内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J]. 科学通报, (2): 177–185.
- 都凯. 2012. 中国东部新生代玄武岩风化作用地球化学研究[D]. 南京: 南京大学.
- 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.
- 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(4): 853–863.
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 易承伟. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2284–2295.
- 李彦恒. 2007. 鄂尔多斯盆地有机质与铀矿化关系研究[D]. 邯郸: 河北工程大学.
- 李元. 2014. 草原土壤粘土矿物组成及其环境意义[D]. 广州: 中山大学.
- 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.
- 刘汉斌, 马志斌, 郭彦霞, 程芳琴. 2019. 山西煤系锂镓铝分布特征和开发利用前景[J]. 洁净煤技术, 25(5): 39–46.
- 刘亢. 2016. 鄂尔多斯盆地西缘煤系矿产资源共生组合特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- 刘长龄. 1987. 中国铝土矿的成因类型[J]. 中国科学(B辑化学地学), (5): 535–544.
- 秦勇, 王文峰, 程爱国, 刘新华, 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(1): 17–21, 26.
- 任德怡, 赵峰华, 代世峰, 张军营, 雒昆利. 2006. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[J]. 中国区域地质, (4): 289–293.
- 孙升林, 吴国强, 曹代勇, 宁树正, 乔军伟, 朱华雄, 韩亮, 朱世飞, 苗琦, 周兢, 刘亢, 李聪聪, 陈寒勇, 蔡旭梅. 2014. 煤系矿产资源及其发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 26(11): 1–11.
- 孙泽飞. 2016. 临兴区块煤系非常规天然气共采可行性地质评价[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 汤艳杰, 贾建业, 刘建朝. 2002a. 豫西地区铝土矿中镓的分布规律研究[J]. 矿物岩石, (1): 15–20.
- 汤艳杰, 刘建朝, 贾建业. 2002b. 豫西铝土矿中镓的赋存状态研究[J]. 西安工程学院学报, (4): 1–5.
- 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 张起钻, 李中明, 康微, 蔡书慧, 李宁. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. 地质与勘探, 48(3): 430–448.
- 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(2): 181–196.
- 徐浩. 2017. 鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律的构造控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 闫宝华. 2013. 柴达木盆地东北部中新世沉积物元素特征与源区化学风化[D]. 兰州: 兰州大学.
- 杨合群, 姜寒冰, 谭文娟, 赵国斌, 杨乐田, 李英. 2017. 西北地区重要矿产概论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 佚名. 2014. 曹窑以西煤下铝项目取得成果[J]. 中国矿山工程, 43(2): 63–64.
- 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, 36(3): 331–334.
- 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(2): 417–423, 7.
- 张军伟. 2012. 中国铝土矿资源形势与对策[J]. 价值工程, 31(21): 4–6.
- 张永强, 薛海军, 常宇飞, 侯丁根. 2019. 铜川矿区韩古庄-演池勘探区含煤岩系中镓分布特征[J]. 煤炭科学技术, 47(3): 195–199.
- 张勇, 秦身钧, 杨晶晶, 张健雅. 2014. 煤中镓的地球化学研究进展[J]. 地质科技情报, 33(5): 166–169, 175.
- 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.
- 赵存良. 2015. 鄂尔多斯盆地与煤伴生多金属元素的分布规律和富集机理[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- 赵晓东, 李军敏. 2014. 重庆车盘向斜南东翼铝土矿含矿岩系中镓的分布特征及控制因素分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(6): 893–899.