

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

张复新 王立社

(西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

提要:鄂尔多斯盆地东北缘黑岱沟太原组顶部 6 号煤层属于低等煤化程度的低硫烟煤, 其中铝土质粘土岩、煤层中超常含有勃姆铝石, 发现超富含镓、超常富集稀土, 7 段煤层平均含 Ga $44.8 \mu\text{g/g}$ 、含 $\sum\text{REE}$ $110.82\sim 467.21 \mu\text{g/g}$, 显示出铝、镓、稀土元素三者地球化学行为的相似性和共生特性。是特殊地质背景与古沉积环境下的产物。研究认为, 铝、镓、稀土元素三者有共同的来源: ①古老基底剥蚀区, 古陆富钾高铝的岩浆岩与变质岩建造; ②中奥陶统顶部风化剥蚀面产出的上石炭统本溪组粘土层及铝土层中富集的镓是重要来源; ③煤层系中粘土质砾岩中发现显量火山晶屑及火山灰, 部分提供易分解的铝-镓物源; ④下二叠统太原组海陆交互滨海-潟湖相、三角洲相、堡岛与沼湖沉积岩相古地理优越, 是煤层与铝土质粘土层发育集中富集含镓的良好沉积古环境。总之, 镓的物源具有多来源、继承性、分时期、有阶段复杂富集的特点。

关键词:太原组 6 号煤层; 煤中镓; 多来源-继承性-分时期-有阶段; 准格尔旗黑岱沟; 鄂尔多斯盆地; 内蒙古
中图分类号: P618.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)02-0417-07

镓属于分散元素中特殊的一员, 分散元素在地壳中普遍丰度低(10^{-9}), 但在分散元素家族中镓的丰度最高, 而矿物数量最少, 又能在某些类型矿床中形成工业富集, 富集具有较强的规律性。镓的极度分散性造成它不能形成独立矿床, 可从有关矿床中综合利用, 中国各类含镓矿床的工业利用标准: 铝土矿中为 20×10^{-6} , 黄铁矿矿床中为 200×10^{-6} , 闪锌矿床中为 100×10^{-6} , 煤层中为 30×10^{-6} , 明矾石中为 22×10^{-6} , 锗石中为 1000×10^{-6} , 与碱性岩有关的岩浆矿床为 100×10^{-6} , 显示了镓富集的主要矿床类型。从现有资料看, 富镓的主要矿床类型有^[1]: ①铝土矿型; ②煤矿型; ③明矾石矿型; ④铅锌矿型。最近研究发现^[2], 内蒙古准格尔黑岱沟煤田中镓富集于煤层及煤矸石中, 已构成超大型镓矿, 有关煤中镓矿及镓的赋存状态已有诸多学者的深入研究, 有关镓的物源研究相对薄弱, 本文从煤中镓矿床地质研究入手, 针对煤中

镓的物质来源进行初步探讨。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地发育在华北大陆西部, 中部以山西隆起为界, 东部为华北平原。鄂尔多斯地块基底由太古宇和古元古界变质结晶岩系组成, 形态东高西低、北高南低, 呈不对称状。其形成与古阴山及秦—祁造山带构造演化密切相关, 经历较复杂陆内多期造山与成盆作用^[3-4]。盆地自太古宙—元古宙在基底与过渡性基底形成阶段后, 经早古生代的陆缘海盆形成阶段, 该时期由于南、北两造山带相对俯冲作用, 使华北大陆持续抬升, 缺失自中奥陶世至早—中石炭世地层。进入晚古生代的内克拉通形成阶段, 该时期由于本区盆地内部与盆地边缘的差异隆升, 加强了古陆边缘肩隆与其东西两侧沉积区沉积幅度的差别, 是造成上石炭统本溪组及下二叠统太原组在

收稿日期: 2008-12-10; 改回日期: 2009-02-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2003CB214607)资助。

作者简介: 张复新, 男, 1945 生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地质与地球化学、找矿勘探与成矿预测教学与科研;

E-mail: zhangfux@nwu.edu.cn。

准格尔煤田 6 号各煤层显微组分最显著特点是惰质组和壳质组含量高,镜质组含量最低。惰质组含量为 37.4%,以半丝质体和碎屑惰质体为主,平均含量分别为 18.6%、8.2%;壳质组含量为 2.3%~10.8%,均值为 7.1%,以孢子体和角质体为主;镜质组含量为 36.6%,以基质镜质体和均质镜质体为主,平均含量分别为 19.1%、10.9%^[2]。

2.3 煤岩矿物学特征

准格尔 6 号煤层剖面自上而下按矿物种类和含量明显分为 4 段,矿物学的鉴定是使用光学显微镜和 X 射线衍射分析相结合^[2]。第一段:由 6-1 分层组成,以陆源石英碎屑为主,含量 16.4%,顺层理分布特点。第二段:由 6-2、6-3 及 6-4 分层组成,以超常富集的勃姆铝石为主,在国内尚无报道,含量分别为 11.9%、13.1%和 11%;3 各分层中高岭石含量分别为 4.3%、3.6%和 4.4%,这些分层是 Ga 的富集分层。第三段:由 6-5 分层组成,以高岭石为主,含量为 11.4%,含少量勃姆铝石(3.3%)及痕量黄铁矿。第四段:由 6-6、6-7 分层组成,以高岭石为主,含量分别为 22%和 19.5%,有限的黄铁矿、石英和方解石。

2.4 煤岩中镓的含量及其来源探讨

表 1 为准格尔 6 号煤层中镓的含量,除顶部和底部分层中镓的含量较低外,其他均超出工业品位^[2],镓主要赋存于富含勃姆铝石的煤矸石层中。准格尔旗 6 号煤层镓的含量远远超过大多数中国煤层中镓的算术均值($6.64 \mu\text{g/g}$),就其原因应与物源、古沉积构造条件及古沉积环境存在直接联系。然而,针对性

表 1 准格尔 6 号煤层各分层及高温灰化物中 Ga 含量($\mu\text{g/g}$)^[2]
Table 1 Ga contents of No.6 coal seam and hyperthermic ashing mass in the Hada Gol Ga-bearing coal deposit of northeastern Ordos Basin

6 号煤各分层样品	煤中 Ga	高温灰化物中 Ga
ZG6-1	12.0	27.5
ZG6-2 (煤矸中富含勃姆铝石)	57.3	99.5
ZG6-3 (煤矸中富含勃姆铝石)	76.0	178
ZG6-4 (煤矸中富含勃姆铝石)	65.4	73.6
ZG6-5	30.1	76.6
ZG6-6 (煤矸中富含勃姆铝石)	65.4	62.2
ZG6-7	15.0	—
权衡均值 1 (ZG 6-2—ZG 6-6)	51.9	89.2
权衡均值 2 (ZG 6-1—ZG 6-7)	44.8	81.8

采样分析,盆地周缘隆起区乌拉山群、渣尔泰群富钾长英质古老岩系、海西期花岗岩及热水沉积-改造铅锌矿床、火山岩型铜矿床矿石与含矿围岩样品中镓均显示偏低的正常含量(表 2),与太原组煤层中镓的超常含量极不匹配。从矿床地质研究可知,镓的物源不可能直接来自古陆富钾岩石的碎屑沉积,从低含量的分散元素镓地球化学行为特征看,也不可能直接经搬运沉淀富集,镓的富集应从地质与构造演化的背景和多维时空因素考虑,寻找镓的一切可能来源和物源目标。

将区域样品稀土配分模式与准旗 6 号煤层对比,两组稀土数据的配分模式图总体较为相似(表

表 2 准格尔旗黑岱沟煤矿^[2]与剥蚀区稀土元素含量(10^{-6})参数对比
Table 2 REE contents and parameter comparison of the Hada Gol Ga-bearing coal deposit and the denudation area

6 号煤各分层与蚀源区样品	ΣREE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe	Ga
ZG6-1、ZG6-4、ZG6-5	110.82	83.25	27.57	3.25	0.60	0.71	35.83
ZG6-2、ZG6-3、ZG6-6、ZG6-7	467.21	400.68	66.53	5.88	0.64	0.81	53.43
平均值	289.02	241.97	47.05	4.57	0.62	0.76	44.63
钾化蚀变岩及钾长石脉(2)	71.75	67.05	4.70	14.38	1.18	0.82	18.25
白乃庙块状硫化物铜矿石(4)	120.60	105.10	15.50	7.62	1.03	0.76	13.35
霍各乞热水沉积型铅锌矿石(1)	114.9	102.4	12.5	8.19	2.75	0.93	5.30
霍各乞热水沉积硅质岩(3)	24.13	21.90	2.23	16.55	1.47	0.96	1.05
东升庙铅锌矿石(1)	136.90	125.10	11.80	10.60	0.71	0.87	9.30
石拐石炭系煤层中研石(3)	141.37	134.90	6.47	18.87	0.47	1.02	13.57
平均值	101.61	92.74	8.87	12.70	1.27	0.89	10.14

2): 稀土总量虽然不一, 但稀土元素参数类似, 富集轻稀土、亏损重稀土, 稀土组成曲线显示右倾; δCe 均显负异常, 且显示接近, δEu 存在较大差别。一定程度上显示出区域基底岩系是镱的固定来源, 并且显示多来源的特性。而风化剥蚀、溶解搬运的地质作用, 使稀土元素分馏并出现变化与复杂性。

3 煤中镱矿的形成

镱在地壳中的含量相当高, 比其他分散元素的地壳含量高出 1~2 数量级, 镱在地球化学性质上亲石(氧)性并与铝关系密切, 由此导致镱极强的分散性。在自然界常见碱性长石与钙碱性长石为高含铝的铝硅酸盐矿物, Ga 和 Al 具有相似的地球化学性质, 相当数量的镱赋存于三大岩类的长石中。在煤形成的表生条件下, 镱的地球化学行为更加表现出与铝的密切关系, 表生风化解离出的镱即会随铝一同转移到含铝及含铁-铝的含氧盐与氧化物组分中, 使镱避免流失而沉积于粘土层与泥质层中。沉积成岩期镱会从含铝物质经脱水重结晶, 以类质同象替代铝而赋存于高岭石、勃姆铝石之中, 表现出随粘土矿和铝土矿层的形成, Ga 和 Al 同步增长。根据镱元素的分散性和与铝地球化学行为密切关系, 铝土矿层形成的特殊地质作用过程, 伴生镱矿床形成多表现为多时代继承性与叠加成矿的特征。

已知镱矿的矿床成因类型有多种, 但多数以与风化、沉积、成岩成矿作用机制密切有关的沉积成因镱矿床为主要类型。由于镱亲石性强而分散, 在自然界富集难度较大, 其形成应具备煤形成的环境, 随铝一同富集在铝土矿层中, 它们富集与形成大致经历以下作用过程:

①含有镱元素的大陆物源经长期地表风化、剥蚀、搬运和分选等一系列过程, 主要对赋含镱的长英质矿物、岩石的不断解离与分解, 转变为不同粒径的碎屑物质, 经搬运或在原地相对聚集。该阶段需要源源供给的物源地质背景和长期缓慢稳定隆升的构造条件。

②富镱组分的初步富集一般是在古风化剥蚀面上, 由于长期暴露地表, 进而经物理与化学作用分解、大气水的水解、生物化学作用、有机与无机化学分解, 这一过程使含镱的组分进一步细碎屑化—泥化、粘土化。同时在地表活动水的作用下, 导致组部分去硅、去钾-钠, 随着铝土矿化而使镱进一步富集。该过程仍需要缓慢隆升的构造背景和地表水经常活动, 同时需要一个温湿与干旱交替易分解的物理化学成矿环境。

③华北大陆中奥陶世整体隆升成陆, 温湿气候促成植物繁茂, 生物化学风化作用尤其强烈, 原地巨厚碳酸盐岩层成为古风化壳, 与来自古陆的富含长石的硅酸盐类经强烈物理、化学风化形成高岭石、蒙脱石、水云母等, 它们主要在有机酸、碳酸盐的作用下, 并在后期风化淋滤作用使泥质及粘土中的 CaO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、S 不同程度被带走。活泼组分流失, 稳定组分进而富集, 使粘土矿层 Al/Si 比值增大, 铝土品级得到提高, Ga 随 Al 的聚集而富集, 镱就在该不整合面上普遍得到工业矿化的富集(表 3)。

④已在较大面积的古风化壳上具有相当含量富集的镱矿层随基底再次稳定下降被保存成矿。由于华北板块与南蒙古微板块晚石炭世—早三叠世进入陆内碰撞造山时期^[4], 导致华北板块北部陆缘构造带由陆缘斜坡带, 随碰撞作用的持续, 大青山造山带

表 3 鄂尔多斯盆地东北、东南部上石炭统本溪组铝土矿石主量元素 (10^{-2}) 与镱含量 (10^{-6})

Table 3 Major element analyses of bauxitic ore and Ga contents of Upper Carboniferous Benxi Group in southwest and southeast Ordos Basin

本溪组及铝土矿出露区	矿石构造	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	Ga
河南巩县小关 (2)	致密状	70.80	10.51	1.16	1.50	0.06	129
河南陕县杜家沟 (3)	致密状	77.21	5.41	0.85	0.10	0.02	80.7
河南新安张窑院 (3)	致密状	73.58	6.57	1.00	0.17	0.06	227
河南新安贾家洼 (3)	致密状	69.79	8.10	2.52	0.87	0.07	97.3
山西偏关 (5)	致密状	29.31	42.42	4.67	1.74	0.04	25.5
山西保德 (4)	致密状	28.64	51.49	2.86	0.55	0.08	39.9
山西河曲 (2)	致密状	22.73	62.17	3.20	2.99	0.20	27.4

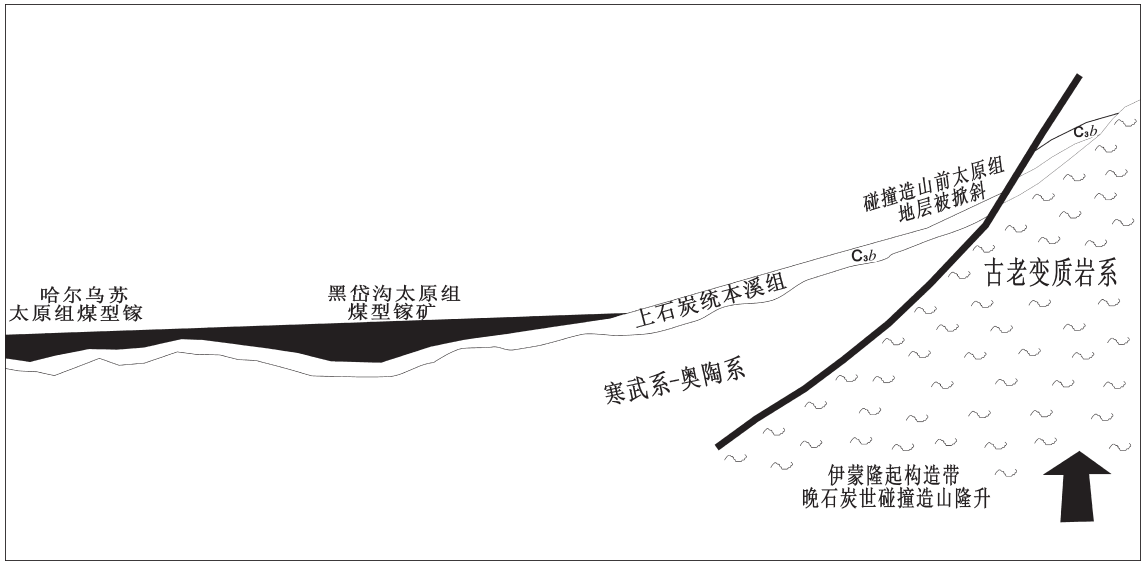


图 2 准格尔旗黑岱沟太原组煤型铝-镓矿沉积构造背景

Fig.2 Sedimentary tectonic setting of the Hada Gol coal type Al-Ga deposit in Taiyuan Formation, Jungar Banner

盆地和基底逐渐抬升,带动掀斜了鄂尔多斯克拉通盆地东北缘早古生代—晚石炭世本溪组地层。本溪组粘土岩高铝含镓地层作为近源,并在斜坡沉积构造背景下,高铝含镓物质源集中供给海湾三角洲相的太原组沉积区(图 2)。

⑤含镓层位经深埋沉积成岩作用,含镓组分及矿物发生一些变化,铝土矿脱水结晶为主要含镓的矿物勃姆铝石,大量成岩高岭石形成,相当的镓进入其中,矿物中的镓均以类质同象替代铝存在于勃姆铝石和高岭石中。由此可以看出,煤中镓主要赋存于粘土、铝土质层位中,表现出镓-铝亲密的地球化学关系。

4 煤中镓的多种、继承性与分阶段来源

上述沉积镓矿的形成分析,不难得知分散元素镓的成矿物质来源需要有稳定物源的供给、特殊的构造地质背景,持续稳定的风化-剥蚀作用和地表水的不断活动地质过程,创造出分阶段再沉积的古地理环境,使含镓矿物及岩石不断细碎屑化,经多阶段泥化-粘土化和铝土矿化及去硅钾等杂质,各阶段产物分地质时期分解与聚集。总之,镓的物源具有多来源、继承性、分时期、有阶段,经复杂地质作用富集的特点^[5,8]。

据以上研究,认为准格尔 6 号煤层中镓可能有以下来源:

①准格尔旗黑岱沟太原组 6 号煤层超常富集铝、镓和稀土,与北部阴山造山带古老岩系及海西期花岗岩系列的岩石地球化学近一致。古老基底剥蚀区主要由碱性、钙碱性长石质岩石系列组成,是铝、镓、稀土元素丰度相对稳定富集的有利岩系(表 2),一系列样品含镓一般($5.30\sim 18.25\mu\text{g/g}$),也证实了镓、铝沉积聚集不是一次和简单的地质成矿作用过程。它们源源不断供给基底上覆的陆源沉积层,特别在沉积间断面上部沉积建造中富集。该物源较为早期,可能先经浅海潟湖的海相沉积,隆升后又转为陆相再聚集,已遭多次破坏和转移。

②鄂尔多斯盆地周缘由于南、北两造山带相对俯冲作用^[6],自中奥陶世华北整体持续隆升处于强烈风化剥蚀环境,马家沟组及其下伏巨厚的碳酸盐岩系不乏夹互泥质层,泥质大多原地保留并分解,使古风化壳上本溪组按成分划分为底部含菱铁矿结核或条带的铁铝质粘土层,中部铝质层,上部为碳泥质层,自然获得镓与稀土的相当富集,为上覆沉积的太原组 6 号煤层准备了二次搬运的物质基础和矿源层。

③据岩相古地理研究,由于盆地古陆边缘与盆地内部边缘地区的差异构造沉降活动^[7],致使 6 号煤

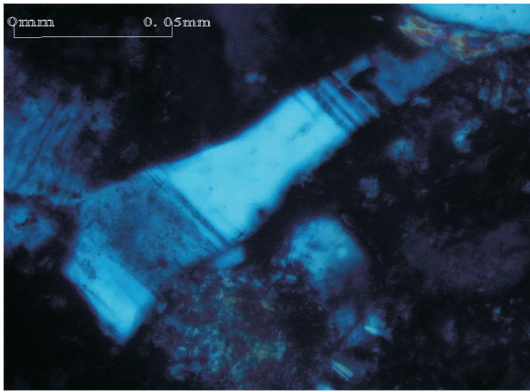


图3 黑岱沟煤矿砾状粘土岩层中斜长石晶屑薄片(+)

Fig.3 Plagioclase crystals in pebble clay rocks of the Hada Gol Ga-bearing coal deposit of northeastern Ordos Basin. Thin section(+)

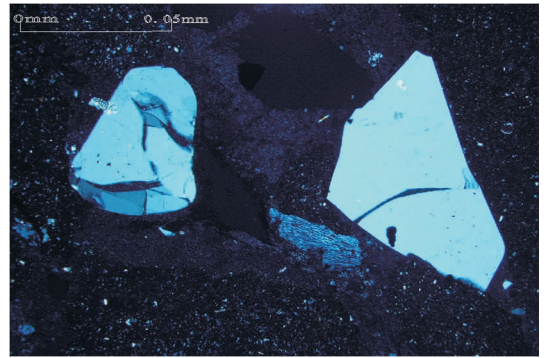


图4 黑岱沟煤矿砾状粘土岩层中石英晶屑中冷凝收缩纹薄片(+)

Fig.4 Quartz crystal cooling fissures in pebble clay rocks of the Hada Gol Ga-bearing coal deposit of northeastern Ordos Basin. Thin section(+)

层所在下二叠统太原组,相当部分的物源是由当时处于海陆交互的斜坡沉积带的上石炭统本溪组作为陆源区提供的。晚二叠世太原期古沉积环境温湿、植被繁盛、生物发育,具有强烈的分解与去硅-钾能力,将富含镓、稀土元素的陆源物质进而粘土矿化、铝土矿化,从而使镓、稀土元素原地聚集保留。

④在黑岱沟煤层系中粘土质砾岩中发现显量火山晶屑及火山灰(图3~4),前人研究太原组也大量发现了夹含微薄火山凝灰岩层^[4],火山凝灰、火山晶屑可能是盆地边缘华北与南蒙古板块造山活动带火山活动飘逸的产物,是铝、镓及黏土物质的另一补充来源。

综上所述认为,鄂尔多斯盆地基底岩系及阴山造山带属于6号煤层中镓、铝、稀土物质的基础来源,本溪组高铝沉积岩系等下伏岩系可能是6号煤层中镓、铝、稀土的直接物源,这是在特殊的大地构造背景和造山带演化与沉积环境变迁的沉积成矿条件下,较为精细的分时期将铝、镓、稀土分阶段、分环境聚集与富集。富集成矿的地质作用较为复杂,地质作用过程有一定时间间隔,在海陆交互与湖沼环境下,伴随风化-剥蚀-水解-原地或近距离搬运沉积的地质过程有规律地、可持续继承下完成的。

参考文献(References):

- [1] 涂光炽,等.分散元素地球化学及成矿机制[M].北京:地质出版社,2004:368-380.
Tu Guangchi, et al. The Geochemistry and Ore-forming

Mechanism of the Dispersed Elements [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 368-380(in Chinese).

- [2] 代世峰,任德贻,李生盛.内蒙古准格尔超大型镓矿床的发现[J].科学通报,2006,51(2):177-185.
Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. The discover of superlarge Ga deposit Jungar Banner, Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 177-185(in Chinese with English abstract).
- [3] 车自成,刘良,罗金海.中国及其邻区区域大地构造学[M].北京:科学出版社,2002:296-302.
Che Zhicheng, Liu Liang, Luo Jinhai. Regional Geotectology China and Its Close Neighbourhoods[M]. Beijing: Science Press. 2002: 296-302 (in Chinese).
- [4] 周安朝.华北地块北缘晚古生代盆地演化及盆山耦合关系[M].北京:煤炭工业出版社,2002:9-18.
Zhou Anchao. Basin Tectonic Evolution in Upper Paleozoic Era and Couple of Basin-range Structure North China Platform [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002: 19-68.
- [5] 张复新.砂岩型铀矿与浅成低温热液矿床[M].北京:科学出版社,2005:164-171.
Zhang Fuxin. Sandstone-hosted Uranium Deposit and Epithermal Deposit [M]. Beijing: Science Press, 2005: 248-254(in Chinese).
- [6] 周鼎武,李文厚,张云翔,等.区域地质综合研究的方法与实践[M].北京:科学出版社,2002:248-254.
Zhou Dingwu, Li Wenhou, Zhang Yunxiang, et al. The Method and Practice of Regional Geological Research [M]. Beijing: Science Press. 2002: 248-254(in Chinese).
- [7] 何自新,等.鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社,2003:66-83.
He Zixin, et al. The Tectonic Evolution and Gas-oil Accumulation in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 66-83.
- [8] 张复新.内蒙古东胜砂岩型铀矿床形成条件与成矿作用[J].地质学报,2006,80(5):733-739.

Zhang Fuxin. The metallogenic condition and epigenetic alteration mineralization of Dongsheng uranium deposit in the Inner

Mongolia [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 733–739 (in Chinese with English abstract).

The formation and material sources of the superlarge Hada Gol Ga-bearing coal deposit in Jungar Banner, Inner Mongolia

ZHANG Fu-xin, WANG Li-she

(State Key Laboratory of Continental dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The No. 6 coal seam lies in the upper part of Taiyuan Formation within the Hada Gol Ga-bearing coal deposit of northeastern Ordos Basin. This coal seam is a low sulfidation type of bituminous coal with low coalification. Due to the special geological background and paleosedimentary environment, the bauxitic clay stone and the coal seam are extremely enriched in boehmite, Ga and REE. The average content of Ga is $44.8 \mu\text{g/g}$, and the $\sum\text{REE}$ values vary from $110.82 \mu\text{g/g}$ to $467.21 \mu\text{g/g}$ in seven coal segments, suggesting that Al, Ga and REE have similar geochemical behaviors and coexistence features. It is considered that Al, Ga and REE were derived from the same sources: ① the erosion area of paleobasement, where there existed igneous rocks and metamorphic rocks with high K and Al; ② clay stone and bauxite in Upper Carboniferous Benxi Formation overlying Middle Ordovician might have been an important provenance of Ga; ③ clayey glutenite in coal measure strata is characterized by volcanic crystal fragments and volcanic ash, implying that they partly provided dissolvable Al and Ga materials; ④ Lower Permian Taiyuan Formation comprises such continental-marine interactive deposits as offshore coastal deposit, lagoonal deposit, delta deposit, barrier island deposit and lake-marsh sedimentary system. Such lithofacies paleogeography served as an advantage sedimentary environment of coal seams and bauxite strata for the accumulation of Ga. It is thus known that the origin of Ga in coal is characterized by multi-sources, inheritance, multiple periods and certain steps, suggesting that the accumulation process of Ga was very complicated.

Key words: The No. 6 coal seam of Taiyuan Formation; Ga deposit in coal seam; multisource-inheritance-multiple periods-certain steps; Hada Gol in Jungar Banner; Ordos Basin; Inner Mongolia

About the first author: ZHANG Fu-xin, male, born in 1945, professor, director of doctors, engages in the teaching and research of mineral deposits and geochemistry, mineral exploration and metallogenic prognosis; E-mail: zhangfux@nwu.edu.cn.