

文章编号 0258-7106 (2006) 01-0083-06

辽东裂谷硼铁矿床地质及成矿作用^{*}

夏学惠 , 阎 飞 , 赵玉海 , 常文宗

(中化地质矿山总局地质研究院 , 河北 涿州 072754)

摘 要 辽东硼铁矿床是一处类型独特的超大型矿床。文章对该矿床的地质特征、矿石物质组成、矿床稀土元素和稳定同位素特征及矿化时代进行了研究。研究表明,该矿床的成矿作用主要表现为海底热水沉积成矿,区域变质混合岩化作用对矿床进行了强烈的叠加改造,使硼铁进一步富集而形成工业矿床。

关键词 地质学 硼铁矿床 地质特征 成矿作用 辽东裂谷

中图分类号 P618.31

文献标识码 : A

Geological features and ore-forming process of uranium-bearing vonsenite deposit in Liaodong rift, eastern Liaoning Province, China

XIA XueHui, YAN Fei, ZHAO YuHai and CHANG WenZong

(Geological Institute, Bureau of Geology & Mining of China Chemical Industry, Zhuozhou 072754, Hebei, China)

Abstract

The uranium-bearing vonsenite deposit in Liaodong (eastern Liaoning) is a unique and superlarge deposit. In this paper, the authors studied the ore composition, ore-forming epoch, REE characteristics and stable isotopes of this deposit based on a detailed investigation of geological features of this type of deposits. The results indicate that submarine hot water deposition is the main ore-forming process of the uranium-bearing vonsenite deposit, and that the economic deposit was formed on the basis of further enrichment of boron and iron through the superposition and transformation by regional metamorphism and migmatization.

Key words: geology, vonsenite deposit, geological features, ore-forming process, Liaodong rift

中国硼矿资源以变质、盐湖和矽卡岩 3 大类型为主,以 B_2O_3 计算,总储量逾 40×10^6 t,其中,辽东翁泉沟硼铁矿床的硼储量占全国保有总储量的 50% 以上。辽吉地区的硼镁石型硼矿床是主要开采对象,经多年开采,其资源量已所剩无几。今后,应加强对翁泉沟硼铁矿型矿床的综合研究与开发利用,该矿床至今未予开采,其主要原因在于硼镁铁矿受后期热液作用后发生分解的程度。本文系统归纳了该矿床的地质特征,并就其物质组分及成因进行了探讨。

1 成矿构造环境背景

翁泉沟硼铁矿床产于华北地台辽东古元古宙褶皱带内,其原控矿沉积构造环境为辽东裂谷。太古宙末期的鞍山运动,使辽东-吉南地区褶皱隆起成为克拉通。尔后,该古陆在经过长期剥蚀夷平的基础上,于 2 300 Ma 前的五台运动期间生成了辽东裂谷。该裂谷西起营口,向东经宽甸,转向北东至集安,又折向东进入朝鲜半岛,形成朝北东方向突出的弧形盆地。在中国境内,于鞍山-南芬-桓仁-通化以南、盖

^{*} 本文得到国家地质大调查项目(编号:1212010331002)的资助

第一作者简介 夏学惠,男,1955 年生,高级工程师,长期从事非金属矿床地质研究和勘查工作。E-mail: xxh@hgdy.com.cn

收稿日期 2005-06-09; 改回日期 2005-09-28。

县-岫岩-丹东以北的裂谷盆地中,形成了古元古宇辽河群富硼的变粒岩、浅粒岩,含硼岩系的原岩为一套海底火山喷发岩及粘土岩夹镁质碳酸盐岩建造。

辽东裂谷盆地长 400 km,宽逾 100 km。在营口—宽甸一带,该盆地呈东西走向,主断裂向北倾斜,形成箕状。沉降中心分布在主断裂北侧的虎皮峪-红石砬子一带,该带北侧为盆地的斜坡带,由太古宙基底形成的盆地,向南逐渐加深。在沉降中心,海底火山活动频繁,其变火山岩的硼含量比同类火山岩高出数十倍至数百倍,为硼矿床的形成提供了物质来源。硼矿床分布于富镁碳酸盐岩中,具有一定的层位。翁泉沟超大型硼铁矿床赋存于该裂谷的次级盆地中。

2 矿床地质特征

翁泉沟硼铁矿床主要赋存于古元古宙一套海相火山-沉积建造内,该建造受控于古元古宙辽东裂谷。成矿作用主要发生在裂谷海槽的次级火山-沉积断陷盆地中。含矿建造为辽河群里尔峪组下部的

酸性火山岩-热水沉积岩(冯本智等,1993;1995;夏学惠,1995;1997),其原岩依次为:富钠流纹岩、凝灰岩夹富铁镁的硅质岩,富硼长英质火山碎屑岩,富钾质磁铁流纹岩、凝灰岩夹条纹状磁铁硅质岩。经区域变质与热液改造作用,形成现在的一套角闪岩相变质组合,自下而上为:黑云磁铁角闪混合岩,黑云变粒岩,电气石变粒岩,黑云透辉岩,白云大理岩,蛇纹岩,金云母蛇纹岩,金云母透闪岩,角闪透辉变粒岩,浅粒岩。在浅粒岩层中,夹有磷灰石变粒岩和金红石浅粒岩等。

硼铁矿体主要赋存于钙镁硅酸盐岩层,呈稳定的层状分布在马蹄形环带的向斜中(图 1)。含矿建造随岩石组合在水平方向上相变明显,在向斜北翼,当含矿层由东部的蛇纹岩类岩石向西相变为透闪岩类岩石时,硼铁矿随蛇纹岩渐趋尖灭而消失,硼铁矿层则逐渐为磷灰石矿层所取代,形成该区独特的硼铁-磷成矿系列。在垂向上,明显反映出沉积韵律特点,含矿层内的钙镁硅酸盐岩和碳酸盐岩与浅粒岩反复交替。总之,含矿建造随岩相的变化而变化。

矿床严格受向斜构造控制。在平面上,矿体呈

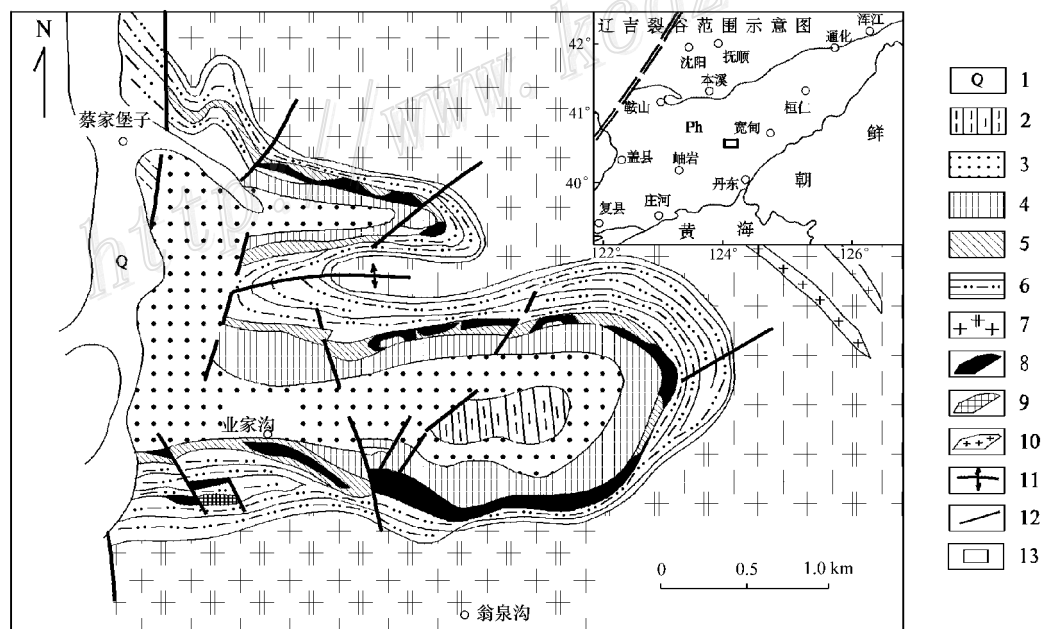


图 1 翁泉沟矿床地质简图

- 1—第四系 2—黑云透辉变粒岩 3—浅粒岩、电气石变粒岩 4—角闪透辉变粒岩 5—含硼铁矿层、大理岩、交代岩 6—黑云母变粒岩;
7—黑云角闪混合岩 8—硼铁矿层 9—磷灰石矿层 10—斜长角闪岩 11—背斜 12—断层 13—研究区

Fig. 1 Diagrammatic geological map of Wengquanqou deposit

- 1—Quaternary; 2—Biotite pyroxene granulite; 3—Leucogranulite; 4—Amphibole pyroxene granulite; 5—Boron-bearing iron ore bed, marble, metasomatic rock; 6—Biotite granulite; 7—Biotite amphibole migmatite; 8—Vonsentite ore bed; 9—Apatite ore bed;
10—Amphibolite; 11—Anticline; 12—Fault; 13—Study area

马蹄形环带分布。矿体倾角变化大,一般浅部较陡而深部较缓,呈层状、扁豆状产于变粒岩层中。由于受后期改造作用而使矿体叠置或拉开。围岩蚀变较明显,在靠近矿体顶板处,有金云母透闪岩交代带,其厚度变化较大,为 0.2 m 至几十米不等。

由化学成分分析可知,翁泉沟矿床是硼铁共生,伴生磷,普遍含铀、硫和稀土元素的多组分综合矿床。

根据硼酸盐矿物和磁铁矿的含量,可将矿石分为 4 种类型:硼镁铁矿-磁铁矿型、硼镁石-磁铁矿型、硼镁石-透安石-硼镁铁矿-磁铁矿型和磁铁矿型。以前 2 类为主,约占全部矿石的 85% 以上。

2.1 矿石类型及特征

(1) 硼镁铁矿-磁铁矿型矿石 是翁泉沟矿区主要矿石类型之一,在翁泉沟、业家沟、蔡家沟、东台子和周家大院等 5 个矿床内均有分布。矿石主要由硼镁铁矿、磁铁矿、硼镁石和蛇纹石、金云母等构成。主要的矿石矿物有:硼镁铁矿,含量[$w(B)$,下同]为 40%~50%;磁铁矿,含量为 3%~12%;硼镁石,含量为 1%~5%。脉石矿物主要有:蛇纹石 5%~25%;金云母 2%~15%;电气石 1%~3%;磁黄铁矿 2%~3%;橄榄石 1%~2%;还有少量晶质铀矿和金红石。

矿石主要由硼镁铁矿相互镶嵌组成,有少部分硼镁铁矿沿裂隙分解出纤维状硼镁石和细粒磁铁矿。原生硼镁铁矿通常呈柱状,粒经一般为 1.25 mm×0.35 mm。经热液作用但未完全分解的硼镁铁矿则呈不规则的残余状。磁铁矿多呈自形-半自形晶,粒经一般为 0.2~1.2 mm,与蛇纹石呈折线状相连,与橄榄石呈粒状共生。硼镁石主要呈纤维状与微细粒磁铁矿紧密镶嵌,有少量硼镁石呈板状分

布在矿石中。

此类矿石的结构构造主要有:块状构造、条带状构造、粒状镶嵌结构、交代残余结构。

矿石的化学成分见表 1。由表 1 可见,其 SiO_2 含量为 13.17%~16.67%, B_2O_3 含量为 5.58%~7.66%,其 FeO 含量低于硼镁石-磁铁矿型矿石,为 12.10%~14.67%。

(2) 硼镁石-磁铁矿型矿石 该类矿石主要是由硼镁铁矿经区域变质热液作用分解而成,在全区分布普遍,局部地段有高度富集的趋势。矿石主要由硼镁石、磁铁矿和蛇纹石、斜硅镁石构成。主要矿石矿物的含量为:硼镁石 17%~20%,磁铁矿 40%~45%。脉石矿物的含量为:蛇纹石 18%~20%,斜硅镁石 8%~10%,磁黄铁矿 3%~5%,绿泥石 2%~3%,其他矿物 1%~2%。

由于该类型矿石主要由硼镁铁矿分解而成,因而其矿物粒度细小,嵌布特征复杂。硼镁石主要呈纤维状,多呈集合体,粒经一般为 0.005~0.02 mm,与微细粒磁铁矿紧密镶嵌。部分纤维状硼镁石与纤维状蛇纹石交织在一起。有少量柱状硼镁石,粒经一般为 0.2 mm×1.3 mm,呈不均匀团块状分布在矿石中。此类硼镁石外形呈板柱状,但矿物内部则多呈纤维状,可能是早期透安石经蚀变的产物。磁铁矿主要呈形态各异的细小粒状,粒经一般为 0.005~0.02 mm,与纤维状硼镁石紧密镶嵌,构成纤维粒状变晶结构。

该类矿石的结构构造比较复杂。主要有致密块状构造、条带状构造、斑杂状构造。纤维粒状变晶结构、纤维状硼镁石与粒状磁铁矿呈犬牙交错状嵌布;似文像结构:由硼镁铁矿分解形成的磁铁矿与硼镁石呈似文像结构;分解后的硼镁石与磁铁矿形成云

表 1 不同类型矿石的化学成分($w_B/\%$)

Table 1 Chemical composition of main ores($w_B/\%$)

序号	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	Fe_2O_3	FeO	B_2O_3	S	烧失量
硼镁铁矿-磁铁矿型矿石														
1	15.38	1.65	0.06	26.70	0.40	0.23	0.15	0.08	0.08	28.48	12.10	5.58	0.40	8.31
2	13.17	1.31	0.07	23.36	0.91	0.20	0.13	0.08	0.10	27.29	14.67	6.01	0.22	10.60
3	14.31	2.03	0.06	24.44	0.43	0.23	0.13	0.08	0.10	29.94	14.46	7.66	0.36	6.79
4	16.67	2.05	0.08	21.74	0.87	0.20	0.17	0.07	0.12	32.67	13.19	6.84	0.48	7.72
硼镁石-磁铁矿型矿石														
5	4.28	1.48	0.12	18.69	0.00	0.21	0.15	0.05	0.10	35.62	22.52	12.35	0.00	1.88
6	5.30	1.41	0.09	19.03	0.00	0.17	0.12	0.05	0.10	36.15	20.72	11.81	0.02	2.76
7	8.05	1.78	0.13	20.52	0.00	0.32	0.18	0.05	0.09	32.94	20.09	10.66	0.00	3.12

测试单位:中化地质矿山总局中心试验室。

雾状,网脉放射状结构,后期形成的硼镁石呈网脉放射状,假象结构。硼镁铁矿受热液作用分解形成硼镁石和磁铁矿,但仍保留原硼镁铁矿的柱状假象。

硼镁石-磁铁矿型矿石的化学成分见表 1。由表 1 可见,其硼含量($w(B_2O_3)$)为 10.66%~12.35%],高于硼镁铁矿-磁铁矿型矿石,而 SiO_2 含量(4.28%~8.05%)则明显低于前类矿石, FeO 含量(20.09%~22.52%)比前种矿石将近高一倍。这种变化是硼镁铁矿在分解过程中 B、Fe 分离的结果。

2.2 主要矿石矿物特征及形成世代

翁泉沟硼铁矿床的主要矿物为磁铁矿、硼镁石、硼镁铁矿、蛇纹石、斜硅镁石;次要矿物为遂安石、电气石、磁黄铁矿、金云母、绿泥石、方解石、水镁石、石墨、磷灰石,微量矿物有晶质铀矿、石英、橄榄石、透闪石、钠长石、金红石、黄铁矿等。每种矿物在不同类型矿石中的含量差异较大,分布亦不均匀。

磁铁矿按其生成顺序可分为 3 个世代:第 1 世代磁铁矿多呈自形晶,粒经为 0.2~1.3 mm,与橄榄石同期形成,含量很低,约占磁铁矿总量的 1%~2%;第 2 世代磁铁矿是硼镁铁矿受热液作用的分解产物,形态各异,粒度细小,与纤维状硼镁石交织共生;第 3 世代磁铁矿呈细脉状,穿插在不同类型的矿石中,含量较少。磁铁矿的电子探针分析结果见表 2。

硼镁石按其形成顺序可分为 2 个世代:第 1 世代硼镁石以板柱状为主,粒度较大,呈不均匀的团块状分布在矿石中,可能是早期遂安石的蚀变产物;第 2 世代硼镁石是由硼镁铁矿经后期热液作用分解而成,主要呈纤维状,与细粒磁铁矿紧密镶嵌,其含量占硼镁石总量的 90%左右。

硼镁石的化学成分见表 2。由表 2 可见,早期硼镁石与晚期硼镁石在化学成分上差异不大。

硼镁铁矿主要为暗绿色至黑色,呈自形-半自形

的柱状、针状,粒经一般为 1.25 mm×0.35 mm~0.8 mm×0.3 mm,不透明,无解理。其化学成分见表 2。

硼镁铁矿是翁泉沟硼矿床中早期形成的主要矿石矿物,在后期区域变质与热液作用下,大部分发生分解。其分解程度的高低,是影响该区硼矿综合利用的直接原因。硼镁铁矿分解程度高的地段,硼矿石的利用率也较高。因此,查清该矿床中硼镁铁矿的分解率,按分解指标重新圈定矿体,是解决翁泉沟硼铁矿床综合利用的关键。

3 硼铁矿床稀土元素特征

辽东裂谷含硼岩系中矿石的稀土元素特征列于表 3。由表 3 可见,各类型硼矿石的稀土元素含量都很低, ΣREE 为 $4.30 \times 10^{-6} \sim 34.79 \times 10^{-6}$,平均 18.31×10^{-6} ,比该区正常海相沉积变粒岩、大理岩的稀土元素总量低 6~10 倍。各类型硼矿石的 δEu 值都小于 1,变化于 0.24~0.77 之间。 Eu/Sm 值均小于 3.5。稀土元素配分模式在 Eu 处呈谷状,属 Eu 亏损型。其稀土元素分配模式曲线大致呈“W”形,在 Eu 和 Er 处形成两个波谷。该特征与热水沉积岩(夏学惠,1995)具有一定的相似性,反映出它们有成因上的内在联系,可见其矿体与热水沉积岩经历了相似的地质作用过程,表明该硼铁矿床是富硼、硅的热水沉积产物。

4 硼铁矿床稳定同位素特征

4.1 碳同位素特征

由该区矿石与围岩(镁质大理岩)的碳同位素分析结果(谢宏远,1998)可见,两者之间存在比较明显的差别,矿石的 $\delta^{13}C$ 为-2.69‰~-10.4‰,与火山

表 2 几种主要矿物化学成分($w(B\%)$)
Table 2 Chemical composition of main minerals ($w(B\%)$)

矿物名称	Fe_2O_3	FeO	MgO	B_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MnO	H_2O^+
磁铁矿	69.33	31.15	0.68	—	—	—	—	0.27	—
磁铁矿	67.69	30.41	2.35	—	—	—	—	0.17	—
硼镁铁矿	31.31	35.45	16.58	15.15	1.45	0.20	0.00	0.07	0.31
硼镁铁矿	35.75	28.75	17.93	16.45	0.00	0.00	0.00	0.03	—
纤维状硼镁石	2.79	2.36	44.97	37.64	0.39	0.01	—	—	—
柱状硼镁石	4.95	—	43.72	38.51	0.36	0.19	0.28	0.25	10.49

测试单位:原化工部化学矿产地质研究院中心试验室。“—”为低于检出限。

表 3 辽东地区含硼岩系硼矿石的稀土元素
分析结果($w_B/10^{-6}$)

Table 3 REE analyses of boron ores from boron-bearing rocks in Liaodong area($w_B/10^{-6}$)					
	硼镁石 矿石	磁铁矿-硼 镁石矿石	磁铁矿-纤维 硼镁石矿石	硼镁铁 矿矿石	硼镁铁矿-硼 镁石矿石
La	3.2	3.6	5.9	0.677	0.882
Ce	8.1	9.7	13.4	1.394	2.015
Pr	0.77	1.1	1.6	0.156	0.213
Nd	2.7	3.7	5.0	0.632	0.737
Sm	0.56	0.75	1.1	0.151	0.171
Eu	0.089	0.06	0.10	0.027	0.043
Gd	0.63	0.82	1.0	0.148	0.172
Tb	0.09	0.11	0.14	0.022	0.016
Dy	0.46	0.67	0.70	0.123	0.105
Ho	0.11	0.14	0.15	0.03	0.024
Er	0.26	0.40	0.33	0.065	0.049
Tm	0.041	0.086	0.069	0.011	0.010
Yb	0.29	0.76	0.43	0.103	0.101
Lu	0.038	0.16	0.071	0.017	0.016
Y	2.9	5.0	4.8	0.741	0.624
ΣREE	20.24	27.06	34.79	4.30	5.18
ΣCe/ΣY*	3.2	2.32	3.53	2.41	2.636
La/Yb*	11.03	4.74	13.72	6.572	8.732
Sm/Nd*	0.21	0.20	0.22	0.239	0.232
Eu/Sm*	0.16	0.08	0.09	0.179	0.251
δEu	0.46	0.24	0.29	0.552	0.77

注：由原化工部化学矿产地质研究院中心试验室完成。
* 单位为 1。

岩、火山气体的碳同位素非常接近,表明矿石中碳质

表 4 不同类型矿石与容矿岩石中硫同位素特征
Table 4 Sulfur isotope characteristics of different host rocks and ores

	硼镁铁矿矿石	硼镁铁矿-磁铁矿矿石	硼镁石-磁铁矿矿石	硼镁石矿石	翁泉沟变粒岩	浅粒岩	蛇纹岩
测试矿物	磁黄铁矿	磁黄铁矿	磁黄铁矿	黄铁矿	黄铁矿	黄铁矿	黄铁矿
δ ³⁴ S/‰	1.58	2.37	4.16	9.80	-0.58~-3.20	8.9~10.9	6.9~9.2

制样单位：原化工部化学矿产地质研究院；测试单位：中国地质科学院矿产资源研究所同位素室。

表 5 电气石、遂安石和硼镁石的硼同位素特征(刘敬党,1996)
Table 5 Boron isotope characteristics of tourmaline, suanite and saibelyit(Liu,1996)

样品号	样品类型	矿物	δ ¹¹ B/‰		样品号	样品类型	矿物	δ ¹¹ B/‰	
			1*	2*				1*	2*
501-5-2	电气石变粒岩	电气石	+6.9±0.4	+6.7±0.3	501-1-7	矿体	遂安石	+10.9±0.3	+11.1±0.3
501-5-10	电气石变粒岩	电气石	+6.7±0.4	+7.0±0.4	2R-16	矿体	硼镁石	+10.3±0.2	+9.6±0.4
K5-16	电气石变粒岩	电气石	+3.9±0.3	+4.5±0.3	501-4-6	矿体	硼镁石	+10.2±0.3	+10.1±0.2
K9-6-4	电英岩	电气石	+9.7±0.3	+9.5±0.3	采-2	矿体	遂安石	+12.767	
M-3	电英岩	电气石	+9.4±0.2	+9.2±0.4	Hy-9	电英岩	电气石	6.835	
501-1-4	电英岩	电气石	+7.9±0.4	+8.3±0.3	408-32	矿体	硼镁石	8.318	

* 为不同测试单位的测试结果。

的来源与火山活动密切有关。而镁质大理岩(围岩)的 δ¹³C 为 -2.6‰~+2.69‰,平均为 0.29‰,与元古代海相白云岩的碳同位素接近。

4.2 硫同位素特征

辽东裂谷硼矿床的矿体和围岩中,都出现含量不等的硫化物,特别是黄铁矿和磁黄铁矿。在局部地段含硼岩系的上部,形成了海底喷气沉积硫化物矿床(夏学惠,1997)。

由表 4 可见,辽东裂谷元古代含硼岩系各类岩石的 δ³⁴S 变化很小,为 -3.2‰~10.9‰;不同类型硼矿石中硫化物的 δ³⁴S 为 1.58‰~9.8‰。由此可见,容矿岩石和不同类型矿石中硫化物的硫同位素组成与深源硫接近,其 δ³⁴S 变化范围很窄。

与不同地质环境内硫化物的硫同位素对比可以看出,该区硫同位素组成与火山源硫同位素接近。结合该硼矿床成矿构造环境进行分析,该矿床形成早期主要受火山喷气-热水沉积作用影响,硫源主要由海底火山喷硫提供,后期变化作用使硫同位素进一步均一化。

4.3 硼同位素特征

将表 5 中列出的遂安石、硼镁石、电气石的 δ¹¹B 值(刘敬党,1996)与地壳中流体和固体硼源的 δ¹¹B 值数据(Spivack et al.,1987)对比,这些矿物的硼同位素值主要落在海底热流体范围内,反映出硼主要来自地壳深部。

5 硼铁矿矿床的成矿作用

辽东古元古宙裂谷是在太古宙花岗岩绿岩地体的基础上发展起来的,经历了拉伸、裂隙、沉积、挤压、褶皱、消亡的发展历史。在裂谷发展过程中,伴随有大量火山物质、热水沉积物质的喷流。含硼岩系是在这一过程中形成的一套以富钠、铁、硼为特征的火山岩-热水沉积岩组合。从矿石物质组构分析可以看出,形成硼铁矿床的成矿作用可分为 2 个阶段:

(1) 在古元古宙裂谷环境下的次级火山-沉积断陷盆地中,来自深源的地幔富硼流体(硫、碳、硼同位素分析已证明),在火山活动的间歇期间,沿同生断裂喷溢进入沉积盆地。由于物理化学条件的改变,水体中的 Mg^{2+} 与硼酸络阴离子结合形成镁、铁的硼酸盐,沉积后形成原始矿层。

(2) 吕梁运动时期,该区经历了角闪岩相的区域变质作用和两期变形作用的改造。由于含水矿物和硫化物在层间活化以及与侵入岩有关的热液作用下,使该区发生了强烈的热液蚀变作用。硼铁矿层的顶板出现金云母透闪岩交代带,就是热液作用的有力证据。在区域变质作用和混合岩化热液作用下,热水沉积硼矿床或矿源层发生了强烈的叠加改造,使硼、铁进一步富集,矿床重新定位,形成现在的工业矿床。

References

Feng B Z, Zou R and Xie H Y. 1993. B deposit and B-bearing hot-water depositional formation in the Proterozoic rift zone of Liaoning and Jinlin Provinces [A]. Collected Papers of the Fifth Deposit Conference of China [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 512~514 (in Chinese).

- Feng B Z, Peng Q M, Xue L F, Zou R, Ming H L and Xie H Y. 1995. Boron deposit model of sedimentary rocks as host rocks in valley trough of carton [A]. In: Pei R F, ed. Deposits model of China [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 83~86 (in Chinese).
- Liu J D. 1996. Ore genesis and geology feature of szaibelyite type boron deposit of the Proterozoic in eastern part of Liaoning-southern part of Jilin area [J]. Geology of Chemical Minerals, 18(3): 208~211 (in Chinese with English abstract).
- Spivack A J and Edmond J M. 1987. Boron isotope exchange between seawater and the oceanic crust [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 51: 1033~1043.
- Xia X H. 1995. Geochemistry feature of REE of hot-water depositional tourmaline rocks [J]. Geology and Geochemistry, 6: 56~59 (in Chinese with English abstract).
- Xia X H. 1997. Occurring order of tourmaline rocks associated with pyrite deposit in east Lianing: an indicator of hot-water deposition at sea bottom [J]. Acta Petrologica Sinica, 13(2): 215~225 (in Chinese with English abstract).
- Xie H Y, Feng B Z, Zou R and Ju Y T. 1998. Geological and geochemistry characteristics of Yangmugan boron deposit, Liaoning Province [J]. Mineral Deposits, 17(4): 355~362 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯本智, 邹日, 谢宏远. 1993. 辽吉早元古宙裂谷带内含硼热水沉积建造与硼矿床 [A]. 第五届全国矿床会议论文集 [C]. 北京: 地质出版社. 512~514.
- 冯本智, 彭齐鸣, 薛林富, 邹日, 明厚利, 谢宏远. 1995. 克拉通内裂谷海槽中以沉积为容矿岩石的硼矿床模式 [A]. 见: 裴荣富, 主编. 中国矿床模式 [C]. 北京: 地质出版社. 83~86.
- 刘敬党. 1997. 辽东-吉南地区古元古代硼镁石型硼矿床地质特征及矿床成因 [J]. 化工矿产地质, 18(3): 208~211.
- 夏学惠. 1995. 热水沉积电气石岩稀土元素地球化学特征 [J]. 地质地球化学 (6): 56~59.
- 夏学惠. 1997. 辽东地区硫化物矿床中电气石岩热水沉积结构序列 [J]. 岩石学报, 13(2): 215~225.
- 谢宏远, 冯本智, 邹日, 琚宜太. 1998. 辽宁杨木杆硼矿床地质地球化学特征 [J]. 矿床地质, 17(4): 355~362.