

辽东硼矿的成矿机制及成矿模式

王翠芝¹, 肖荣阁², 刘敬党³

1. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350108

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 辽宁省化工地质勘查院, 辽宁锦州 121000

摘要: 为了解辽东硼矿的成矿机制及建立成矿模式, 分析了含硼岩系、镁质容矿岩石、区域变质作用及混合岩化作用、构造等四大控矿因素, 发现含硼岩系具富硼特征, 容矿岩石具富镁特点并可成为硼质的沉淀剂, 含硼岩系中硼在区域变质和混合岩化过程中得到进一步活化形成含硼热液, 含硼热液在有利的构造空间交代镁质岩石即可形成镁硼酸盐型硼矿。含硼岩系、镁质容矿岩石是硼矿形成的物质基础, 区域变质及混合岩化作用、构造活动是硼矿形成的必要条件。辽东硼矿成矿模式为原始火山—沉积初始富集和部分熔融含硼热液交代镁质岩石。

关键词: 辽东地区; 硼矿; 控矿因素; 成矿机制; 成矿模式。

中图分类号: P611.5

文章编号: 1000-2383(2008)06-0813-12

收稿日期: 2007-12-12

Ore-Forming Genesis and Model of Eastern Liaoning Borate Deposits

WANG Cui-zhi¹, XIAO Rong-ge², LIU Jing-dang³

1. Zijin Mining School of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Liaoning Geological Survey for Chemical Industry, Jinzhou 121000, China

Abstract: In order to figure out the genesis and the model of eastern Liaoning borate deposits, the four main controlling factors including boron-bearing rock system, magnesian host rocks, regional metamorphism and migmatitization, and tectonism are studied. It reveals that the boron-bearing rock system is rich in boron, the host rocks of the borate deposits in magnesian and is the precipitator for boron; besides, the boron of the boron-bearing rock system has gotten more active and a lot of boron-bearing fluid formed in the course of the regional metamorphism and migmatitization of the boron-bearing rock system; while the magnesium borate deposits have formed in the metasomatism of the boron-bearing fluid with magnesian hosting rocks in favorable structural space. Thus, the boron-bearing rock system and the magnesian rocks are the foundation of the borate deposits, whereas regional metamorphism and migmatitization and tectonism are the necessary conditions. Ore-forming model of eastern Liaoning borate deposits is the primary enrichment of the eovolcanic sediment and the metamorphic hydrothermal replacement between some boron-bearing fluid and the magnesian rocks during the process of regional metamorphism and migmatitization and tectonism.

Key words: eastern Liaoning area; borate deposits; ore-controlling factors; ore-forming genesis; ore-forming model.

辽东硼矿分布于辽—吉古裂谷早期的火山沉积地层中(冯本智等, 1998), 它与吉林集安地区的硼矿构成我国著名的硼矿成矿带——辽吉硼矿带。在这一硼矿成矿带内, 目前已发现 100 多个硼矿(点)(曲

洪祥等, 2005), 且各个矿床(点)都有各自的地质特征(张景山, 1994)。关于硼矿的成因, 有多种成因观点, 有矽卡岩型(王秀璋, 1974)、混合岩化热液交代型(张秋生, 1988; 董申保, 1999)和沉积变质型。在沉

积变质型中依据沉积作用不同,又有蒸发沉积硼矿(Peng *et al.*, 1993; 彭齐鸣和许虹, 1994; Peng and Palmer, 1995, 2002; 许虹等, 2004)、热水沉积硼矿(邹日, 1993; 冯本智和邹日, 1994; 邹日和冯本智, 1995)、火山沉积—变质改造硼矿(张景山, 1994)等认识. 经近几年的研究, 笔者认为辽东硼矿的成因是复杂的, 上述几种成因观点都从不同侧面反映了辽东硼矿的成因特点, 沉积变质观点侧重成矿物源的作用; 混合岩化观点和矽卡岩型的观点侧重成矿流体的影响. 本文根据区域成矿理论的观点分析辽东硼矿的控矿因素, 建立区域成矿模式, 以期进一步指导区域找矿.

1 区域地质背景

辽吉硼矿带大地构造位置处于中朝准地台东北部, 属胶辽台隆北部之营口—宽甸—集安台拱. 这一区域古元古代时期产生近东西向的张裂断陷盆地(辽吉古裂谷), 接受了一套镁质碳酸岩建造(蔡克勤和陈从喜, 2000), 习惯上称之为辽河群(翟裕生等, 2002), 其中的里尔峪组为含硼岩组(为方便, 本研究统称辽河群为含硼岩系, 如图 1). 容矿岩石为富镁质的镁橄榄岩及蛇纹石化橄榄岩、橄榄玄武岩、镁质大理岩, 其原岩为一套古元古代裂谷环境中水下成因的具喷发、侵入特点的超基性—基性杂岩(王翠芝, 2007), 常呈层状、透镜状分布于辽河群里尔峪组的地层中. 吕梁运动使辽吉古裂谷闭合, 辽河群发生

褶皱, 岩石遭受绿片岩—角闪岩相的区域变质作用(贺高品和叶慧文, 1998)和强烈的混合岩化(张秋生, 1988).

2 控矿因素

为建立辽东硼矿的成矿模式, 分析了辽东大石桥、翁泉沟、宽甸地区几个典型硼矿的控矿因素, 虽然不同地区控矿因素类型及其作用大小有所差异^{①~④}, 但其基本控矿因素相似, 主要有硼质来源(含硼岩系)、镁质容矿岩石、区域变质及混合岩化热液交代作用、构造改造 4 个方面.

2.1 含硼岩系

含硼岩系主要由黑云母变粒岩、斜长角闪岩、浅粒岩、电气变粒岩、混合岩等变质岩组成, 这几类岩石硼含量较高, 硼富集系数在 250 以上(表 1、图 2). 由于本区区域地层中有多个含硼地层, 目前至少发现有 3 个含硼地层. 岩石中均以含电气石及硼元素背景值高为特征, 有太古宇鞍山群、古元古界辽河群(即本文的含硼岩系)及中元古界辽阳群(刘敬党等, 2007), 再加上本区岩石发生广泛的区域变质作用及混合岩化, 本区辽河群里尔峪组地层的硼含量当然会受后期变质作用过程中热液影响, 但主要还是与沉积时环境中富硼有关. 因为在辽东硼矿的地层主要是辽河群的地层, 其中的电气石变粒岩中有大量的纹层状电气石岩(图 3a). 一般认为纹层状的电气石岩是热水沉积的产物. 因此, 可以认为本区裂谷盆地沉积阶段导致硼矿物质初步富集, 成为辽东硼矿的初始矿源层. 也正是由于含硼岩系中富硼, 在后期的变质作用过程中才会形成大量的富硼热液.

2.2 容矿岩石——镁质岩石

辽东硼矿的容矿岩石主要是镁橄榄岩及蛇纹石化镁橄榄岩、镁质大理岩(菱镁矿大理岩、白云石大理岩、蛇纹石化大理岩等)、蛇纹石化橄榄玄武岩及含磁铁基性火山碎屑岩. 镁质容矿岩石一般呈透镜状、似层状分布于辽河群里尔峪组的黑云母变粒岩或电气石变粒岩中(图 3b). 按岩石类型可划分为

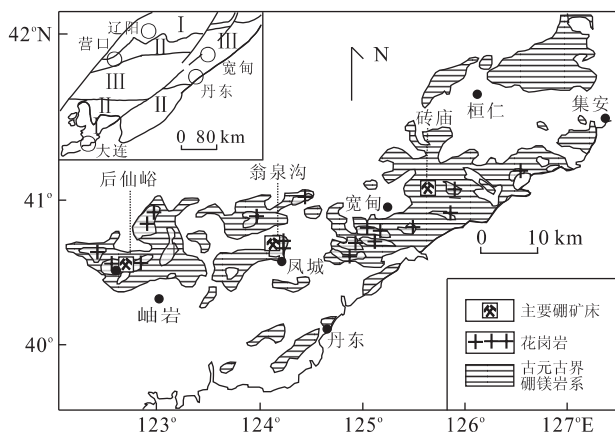


图 1 辽东吉南主要硼矿区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of boron deposits in eastern Liaoning and South Jinan areas

I. 太古宙陆核; II. 裂谷斜坡区; III. 裂谷中央凹陷区

① 辽宁省地质局丹东地质大队二队, 1976. 辽宁省凤城县翁泉沟铁硼矿床总结勘探报告.

② 化学工业部地质勘探公司辽宁地质勘探大队, 1988. 辽宁省宽甸县砖庙硼矿区栾家沟矿段勘探地质报告.

③ 化学工业部地质勘探公司辽宁地质勘探大队, 1992. 辽宁省宽甸满族自治县夹皮沟乡砖庙硼矿区二人沟矿段详查地质报告.

④ 化学工业部地质勘探公司辽宁地质勘探大队, 1993. 辽宁省宽甸满族自治县夹皮沟乡砖庙硼矿区花园沟矿段详查地质报告.

表 1 辽东硼矿含硼岩系微量元素组成和硼的富集系数(Cd 单位为 10^{-9} ;其余为 10^{-6})

Table 1 Compositions of trace elements and concentrated coefficient of boron-bearing rocks in eastern Liaoning boron deposits

岩石	Li	Be	B	F	Cl	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Ga	硼富集系数
斜长角闪岩(3)	10	4	843	2 691	575	31	2 094	144	1 155	60	393	13	421.5
黑云变粒岩(3)	15	3	507	2 485	102	10	1 861	25	42	8	14	19	253.5
浅粒岩(4)	3	4	1 769	397	148	3	1 211	17	17	5	4	19	884.5
电气石变粒岩(6)	25	2	5 065	2 613	64	7	2 770	88	48	49	8	14	2 532.5
混合岩(8)	8	3	1 049	486	111	4	1 122	10	8	3	8	19	524.5

岩石	Rb	Sr	Zr	Nb	Cd	Sn	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U	含硼岩系 平均富集
斜长角闪岩(3)	47	68	50	5	100	8	2	73	2	0.5	1.1	0.3	923.3
黑云变粒岩(3)	124	482	169	10	31	6	7	243	4	0.9	7.3	0.5	
浅粒岩(4)	56	193	288	5	121	3	1	283	18	0.4	5.0	7.1	
电气石变粒岩(6)	113	152	216	7	32	7	4	154	5	0.5	27.5	1.1	
混合岩(8)	82	191	211	15	26	4	2	442	7	1.1	20.1	2.9	

注:国土部资源部廊坊地球物理化学所分析,分析方法及精度:①ICP-OES:Be,0.2 $\mu\text{g/g}$;Li,1 $\mu\text{g/g}$;②ICP-MS: Cd,20 ng/g;Ta,0.1 $\mu\text{g/g}$;U,Hf,0.2 $\mu\text{g/g}$;Co,Cs,Ga,Sc,Th,1 $\mu\text{g/g}$;Nb,Ni,2 $\mu\text{g/g}$;③XRF:Ba,Cr,Sr,V,5 $\mu\text{g/g}$;Rb,Zr,为2 $\mu\text{g/g}$;V,5 $\mu\text{g/g}$;Ti,TiO₂,0.02%;④ISE:F,100 $\mu\text{g/g}$;⑤ES:Sn,1 $\mu\text{g/g}$.有括号的数据为多个样品的平均值,括号中数据为样品个数.

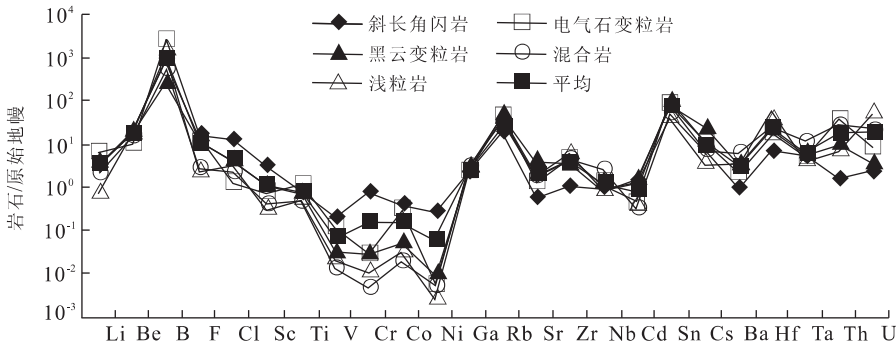


图 2 含硼岩系微量元素原始地幔标准化图解

Fig. 2 Mantle-normalized patterns of trace elements of boron-bearing rocks

3 类: 镁橄榄岩型、橄榄玄武岩型、富镁大理岩型。这 3 类岩石具有区域性,在辽东硼矿区西部的大石桥区,容矿岩石主要为镁橄榄岩及其蚀变岩(蛇纹石化镁橄榄岩、菱镁矿大理岩);中部凤城地区主要为基性火山岩(橄榄玄武岩)及基性火山碎屑岩;东部的宽甸地区则为菱镁矿大理岩、白云石大理岩及少量的镁橄榄岩。

本区容矿岩石都是富镁质岩石。镁橄榄岩及富镁大理岩 MgO 含量均在 40% 以上,具有一定的 FeO 和 Fe₂O₃ 含量,橄榄玄武岩中 MgO 明显偏低,而 FeO 和 Fe₂O₃ 含量较高,并且 TiO₂ 含量也较高(表 2)。另外不同类型的矿化岩石导致矿石矿物成分也有明显差异,镁橄榄岩及富镁大理岩等高镁岩石矿化以形成硼镁石、遂安石等硼镁矿物为主,而含磁铁矿橄榄玄武质低镁岩石则以形成硼镁铁矿物为主。

2.3 区域变质作用及混合岩化作用

含硼岩系在后期的挤压隆升地质过程中经过了角闪岩相的区域变质作用和强烈的混合岩化,形成大面积分布的混合岩(刘敬党等,2005)。杨木杆硼矿 200 m 中段斜长角闪岩的角闪石和斜长石矿物对确定该矿的变质温度为 620 $^{\circ}\text{C}$ ⑤。根据角闪石形成压力的 Al^{IV}对 Si 的变异图分析,变质压力在 0.5 GPa 线附近,并以靠近低压为主,变质温度为 620 ~ 650 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,含硼岩系普遍经受了中压角闪岩相的区域变质作用,变质带相当于角闪石—石榴子石带,局部达到麻粒岩相,变质温度为 600 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$;压力 0.5 GPa $\pm$ 。

不同地区、不同岩组混合岩化程度不同。含硼岩系的混合岩可分为均质混合岩、条带状混合岩、条痕

⑤辽宁省地质矿产局第七地质大队,1986. 辽宁省宽甸县杨木杆硼矿典型矿床研究报告。

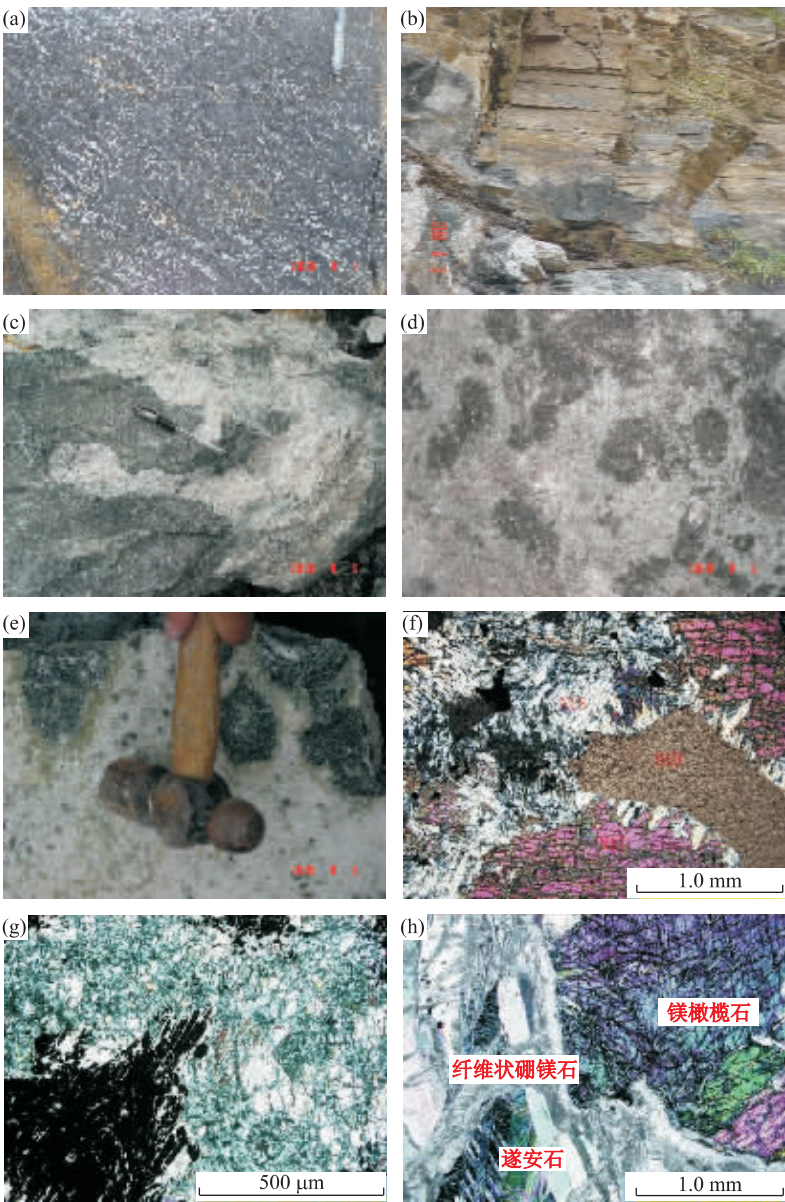


图 3 岩石、矿石照片

Fig. 3 Pictures of the rocks and ores

a. 纹层状电气石岩;b. 后仙峪硼区镁橄榄岩呈层状分布于电气石变粒岩(下部)和浅粒岩(上部)之间;c. 硼矿体脉穿插于镁橄榄岩中;d. 硼矿中镁橄榄岩残留体;e. 菱镁矿大理岩中镁橄榄岩球粒;f. 蛇纹石(N18)交代镁橄榄石(N17),蛇纹石又被菱镁矿(N19)交代,其中N17、N18、N19为电子探针号;g. 柱状的硼镁铁矿发育在橄辉玄武岩中;h. 遂安石交代镁橄榄石,遂安石又被后期的纤维状硼镁石交代

表 2 辽东硼矿镁质岩石化学组成(%)

Table 2 Major element composition of magnesian rocks in eastern Liaodong boron deposits

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	B ₂ O ₃	Los	Tatol
1	37.91	0.09	1.45	2.14	3.47	40.55	1.50	0.18	0.14	0.11	0.06	0.47	7.73	99.62
2	46.47	1.74	15.47	2.44	6.50	9.65	7.06	2.81	1.92	0.13	0.29	0.43	12.06	99.74
3	34.94	0.10	1.15	1.37	2.46	36.70	1.96	0.12	0.18	0.08	0.09	0.16	20.23	99.56
4	17.61	0.02	0.99	0.81	0.37	41.75	4.17	0.10	0.03	0.06	0.01	5.21	28.40	99.52

注:1. 大石桥镁橄榄岩(15);2. 翁泉沟玄武岩(8);3. 大石桥大理岩(7);4. 砖庙大理岩(11);数据为平均值,括号中的数字为样号数. 分析数据由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析. 分析方法及精度:①XRF:SiO₂、Al₂O₃,0.2%;Fe₂O₃,0.1%;MgO、CaO、Na₂O、K₂O,0.05%;MnO、P₂O₅、TiO₂,0.02%. ②容量法:FeO,0.1%. ③ES:B₂O₃,2μg/g. ④GR:H₂O⁺,0.1%. ⑤电位法:CO₂,0.2%.

状混合岩、眼球状混合岩与混合岩化片麻岩等。混合岩脉体多呈脉状,以注入作用为主,界限清楚。其中花岗伟晶岩脉最发育,亦有长英岩脉和石英脉局部出现。基体主要为黑云母变粒岩、电气石变粒岩、角闪变粒岩等含暗色矿物较多的岩石。基体变质岩的结构、构造和矿物成分变化不大。

混合岩化强弱与原岩组成密切相关,混合岩化作用对不同的岩性表现为不同的混合强度。如以长英质矿物为主的浅粒岩,脉体发育,形态为瘤状和不规则状,界线模糊,出现结构较细的长英岩脉;相反,角闪质岩石、片麻岩、大理岩,相对混合程度则明显减弱。由于含硼岩系原岩组成的不一致性,必然导致变质重熔过程中的不一致熔融,其中所见到的混合岩均表现为重熔作用的特点,即不同种类的沉积变质岩经混合岩化后常可形成不同类型的混合岩或混合花岗岩,如角闪质的原岩往往形成角闪质混合岩;黑云母质的则形成黑云母质混合岩;浅粒岩质的则形成相应的淡色混合岩等。这表明含硼岩系中的混合岩,尤其是层状混合岩在矿物成分和化学成分上带有继承性。

混合岩化过程中产生大量热液,含硼岩系中硼得到活化,从而形成大量含硼热液,含硼热液交代镁质岩石则形成本区镁硼酸盐型硼矿。如在后仙峪硼矿区见到硼矿脉穿插于镁橄榄岩中或蛇纹石化镁橄榄岩(图 3c),在硼矿体中亦见到大量的镁橄榄岩残留体(图 3d)。在栾家沟硼矿区,硼矿赋存于菱镁矿大理岩中,有大量已发生蛇纹岩化的镁橄榄岩球体(图 3e)。显微镜下明显能看到蛇纹石交代镁橄榄石,而蛇纹石又被菱镁矿交代(图 3f)。含硼热液交代镁铁质岩石(橄榄玄武岩)则形成硼镁铁矿,如在翁泉沟硼镁铁矿区,可见柱状的硼镁铁矿发育在橄榄玄武岩上(图 3g)。

2.4 构造改造

含硼岩系构造具有多期性和复杂性特点,并且有从中深部层次变形向中、浅部层次演化的特点。这种演化大体可分如下 3 个阶段(图 4)。

第一阶段:本区在太古宙克拉通基础上于早古元代早期裂陷形成拗拉槽—沉积盆地,裂陷槽深度未超出硅铝壳的范围(2.1~2.5 Ma 槽底为半固结的硅铝壳),其上沉积了水下富钠火山岩系,火山岩系的岩性层理代表 S_0 。

第二阶段:该阶段大约在吕梁造山运动(1.9 Ma±)期间所发生的塑性流动变形作用,岩石

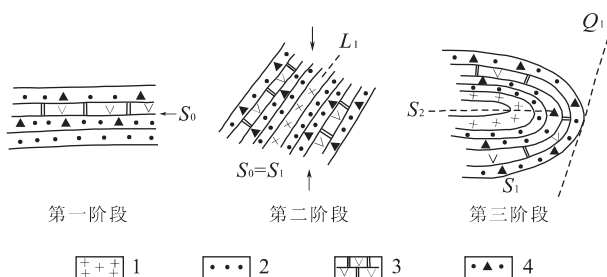


图 4 含硼岩系构造形变演化示意图

Fig. 4 Sketch map showing the evolutionary of structural deformation of boron-bearing rocks

1. 辽吉花岗岩;2. 古元古界砂岩;3. 古元古界火山沉积—镁质碳酸岩;4. 古元古界杂砂岩

发生了广泛的混合岩化作用,产生了层状的混合岩化花岗岩,并形成了具有透入性的轴面片理(穿切顺层片理)。由于强烈构造置换作用的结果使含硼岩系产生规模不等的韧性剪切带(高应变带)。这幕变形根据“辽吉花岗岩”分布、含硼岩系的褶皱转折端、勾状体而确定的包络面方向为 NE。

第三阶段:伴随吕梁运动的发展而产生的垂向叠加,改造第二阶段 NE 向褶皱而形成近东西向的倾竖褶皱和花岗岩穹窿,其褶皱变形规模、强度优于前一阶段,奠定了辽东现今构造格架,同时也是使硼矿富集重就位的阶段。该阶段构造变形特征及演化的研究对找硼矿有着非常重要的实际意义。

现今本区古元古代的变质岩系的基本构造格架是上述第三阶段变形的结果,在含硼岩系表现为一系列东西向的大型复式褶皱为主,影响硼矿体的是虎皮峪—翁泉沟—红石砬子复式褶皱。

辽东硼矿床的硼矿化明显分为两期:早期为遂安石和硼镁铁矿化,晚期则为硼镁石化。

遂安石和硼镁铁矿明显受近东西向褶皱构造控制,矿体一般位于复式背斜的两翼,尤其是倒转复背斜的两翼。如后仙峪硼矿床位于虎皮峪倒转复背斜的南翼(图 5);二台子硼矿床位于鸡冠山背斜的南翼;翁泉沟硼矿床位于翁泉沟倒转复背斜的北翼;砖庙、花园沟、二人沟、栾家沟硼矿和杨木杆硼矿分别位于砖庙和杨木杆倒转复背斜的南翼。

硼镁石化与中生代的断裂构造有关。断裂构造分为 3 组:(1)东西向断裂;(2)北东向断裂;(3)北西向断裂。东西向断裂形成最早,被北东向断裂切割,北西向与北东向为共轭断裂。三组断裂以北东向为主。北西、北东向断裂不仅切割了含硼层,而且切割了硼矿床,它对硼矿体有一定的破坏作用。在断裂附

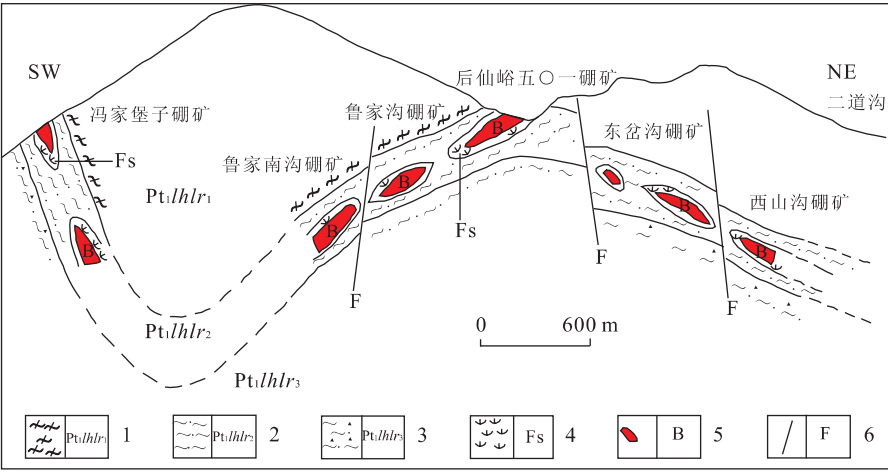


图 5 后仙峪地区 22 号勘探线剖面图(刘敬党,2006)

Fig. 5 Geolical map showing the section along No. 22 exploration line in the Houxianyu boron deposits
1. 辽河群里尔峪组一段条带状混合岩和混合质磁铁微斜浅粒岩;2. 辽河群里尔峪组二段电气石变粒岩(含镁橄榄岩和硼矿岩段);3. 辽河群里尔峪组三段浅粒岩;4. 镁橄榄岩;5. 硼矿体;6. 断层

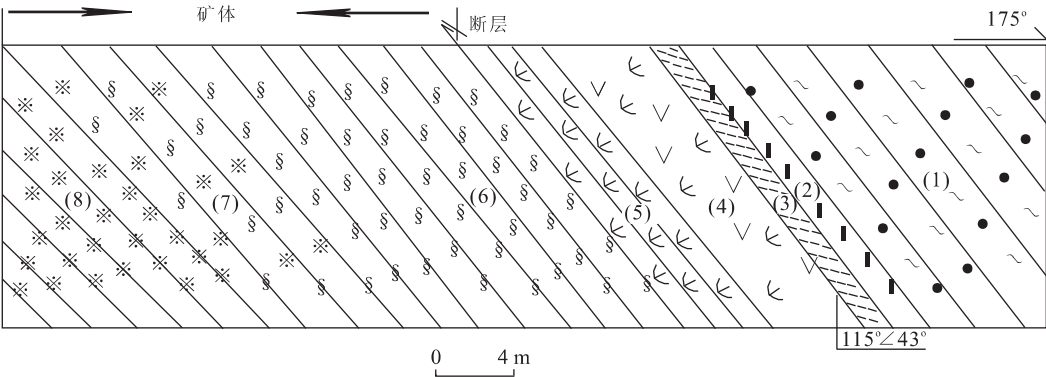


图 6 后仙峪硼矿 V 号矿体横向剖面图^⑥

Fig. 6 Sketch picture showing the cross section of V body in the Houxianyu borate deposits
(1)黑云变粒岩;(2)电英岩;(3)金云母岩;(4)透闪岩化镁橄榄岩;(5)蛇纹岩;(6)硼镁石;(7)硼镁石、透安石;(8)透安石

近,矿石、岩石发生蚀变,透安石蚀变为硼镁石(图 3h);硼镁铁矿分解为硼镁石和磁铁矿;橄榄岩蚀变成蛇纹岩(图 6),有时蛇纹岩发生碳酸岩化而形成大理岩(常常是菱镁矿大理岩)。

3 成矿机制

整个含硼岩系的岩石中都富集硼质,说明硼质来自整个含硼岩系的形成环境,即火山—沉积中的水体,而不只是某种火山岩,即水下火山岩喷发出的大量硼溶解在海水里,火山活动是主导因素,这一认

识与前人的研究是一致的。对于硼岩系的变质岩,姜春潮(1987)已做了大量的原岩恢复工作,认为含硼岩系原岩为古元古代辽河裂谷内早期的火山—沉积岩,其中的火山岩具双峰式火山岩的特征,斜长角闪岩的原岩为海相玄武岩,电气石变粒岩、浅粒岩以火山沉积岩为主,其中浅粒岩的 SiO₂ 含量为 60%~78%,以酸性火山岩为主。张秋生(1988)认为,辽东各地含硼岩系的中基性火山岩原岩硼的平均含量为 606×10⁻⁶,是一般基性岩中硼平均含量的 60.6 倍。邹日(1993)认为后仙峪硼镁的硼源与火山活动有关。Xia *et al.* (2005)研究了翁泉沟硼矿石碳、硫同位素,δ¹³C 为-2.69‰~-1.04‰,为火山来源;δ³⁴S 为1.58‰~9.80‰,为深源火山硫。另外再根

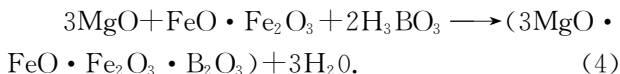
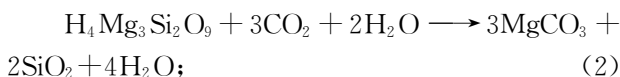
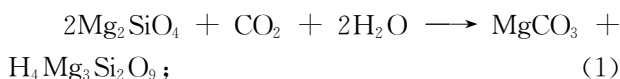
⑥化学工业部化学矿产地质研究院,1993. 辽吉内生硼矿矿物学及找矿标志研究。

据硼矿区电气石变粒岩中有纹层状电气石岩的事实,推知当时沉积环境为热水沉积。邹日(1993)、邹日和冯本智(1995)、冯本智(1998)等研究认为,辽东硼矿为热水沉积。这样具大量火山活动的热水环境里富集高含量的硼就不难理解了。

本区火山—沉积地层中富硼,这一认识与世界上有工业价值的硼矿都与火山活动有关的观点是一致的(Ozol, 1976),如美国加州及南美洲的新生代盐湖型及火山热泉型硼砂矿床,硬硼钙石—钠硼解石矿床,钠硼解石、硼砂和板硼钙石矿床(Barker and Wilson, 1975; Barker, 1980; Barker, C and Barker, J, 1985; Smith, 1985; Sieke, 1991; Crowley, 1996)土耳其地中海沿岸的火山—盐湖盆地沉积硬硼钙石、钠硼解石和白硼钙石矿床(Inan *et al.*, 1973; Helvacı and Firman, 1976; Helvacı, 1995; Helvacı and Yagmurlu, 1995)。

辽东含硼岩系的变质条件为:变质温度 600~700 °C, 变质压力 0.5 GPa±。在这一温压条件下,硅铝质矿物熔融,含水矿物黑云母、角闪石脱水形成区域变质热液(肖荣阁等, 2004; 梁婷等, 2005)。变质热液是一种高能量热流体,具有很强的活动性(Spearfs, 1993; 游振东等, 2001),不相容元素硼优先被迁移;而铁镁质矿物只是部分分解发生蛇纹石化,释放出活性镁进入溶液,这一作用过程是与混合岩化同时进行的。因为在许多情况下,混合岩形成于进变质的脱水熔融作用中,并伴随着有限的熔体分离作用(刘新秒和李长民, 2001),尤其是深熔作用(李兆麟, 2001),因此也可以称为混合岩化成矿作用或部分熔融成矿作用。

硼酸盐矿物合成实验及热液交代成因硼矿床的基质岩石调查表明,镁质岩石及含磁铁矿岩石是镁铁硼酸盐矿物结晶的主要岩石沉淀剂(王秀璋, 1974),这就为镁质岩石及含铁质岩石成为辽东硼矿的基质岩石提供了理论依据。镁质硼酸盐富集成矿,还必须使镁质岩石能充分地释放出镁质。富镁质岩石在区域变质作用形成蛇纹岩的过程中,均可释放一定的镁质(图 7),但是镁质岩石类型不同,其释放镁质的过程会有所差异。大石桥区镁橄榄岩发生蛇纹石化时(方程式 1),可释放大量的镁质,但硅质变化不大,这一过程是发生在区域变质阶段。蛇纹岩发生菱镁矿化时(方程式 2),亦释放少量镁质,这是一个脱硅的过程,生成的蛋白石则形成蛇纹岩中的骨架结构。镁质岩石经过蛇纹石化、菱镁矿化 2 个过程后,受到含硼热液交代时,形成早期的原生硼矿石——遂安石(方程式 3)、硼镁铁矿(方程式 4)。



硼酸热液与铁镁质沉淀剂的作用可以有 2 种情况:

(1) 硼酸热液交代镁质岩石及磁铁矿形成镁硼酸盐矿物和硼镁铁矿,交代作用中首先形成遂安石和硼镁铁矿。这是因为硼溶于热液中首先生成正硼酸,当遇有大量镁离子时,则形成遂安石;若同时遇

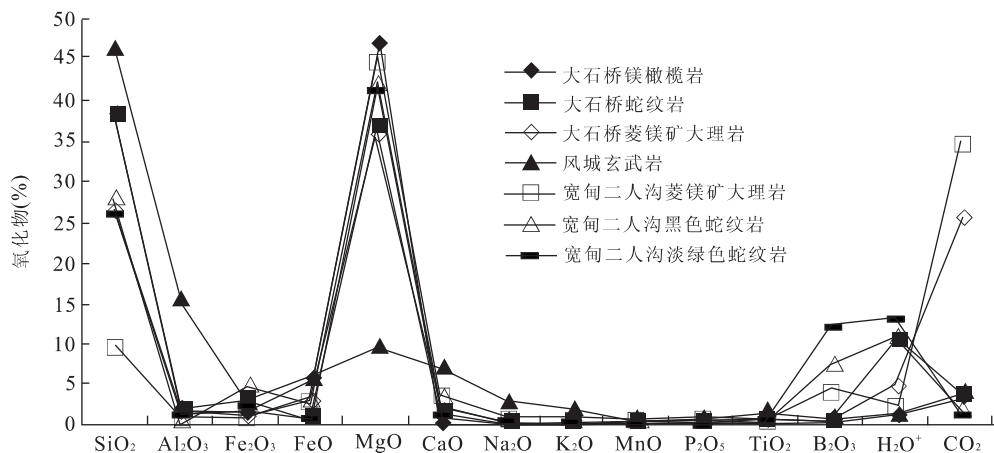


图 7 含硼岩系中各类镁质岩石的主要氧化物对比

Fig. 7 Comparison of major oxides of all kinds of magnesian rocks in boron-bearing rocks

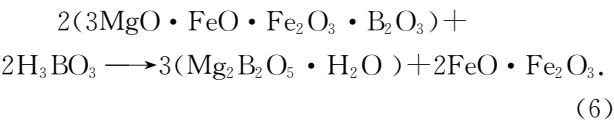
表 3 辽东硼矿床硼矿物硼同位素组成

Table 3 Boron isotopic components of boron-bearing minerals in eastern Liaodong borate deposits

采样点	矿物(样数)	分子式	$\delta^{11}\text{B}(\text{‰})$
宽甸花园沟	硼镁石	$\text{MgBO}_2(\text{OH})$	11.00
	遂安石	$\text{Mg}_2(\text{B}_2\text{O}_5)$	7.80
	镁电气石	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	1.60
	黑电气石	$\text{NaFe}_3(\text{Al},\text{Mg})_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	-3.80
凤城翁泉沟	硼镁石(3)	$\text{MgBO}_2(\text{OH})$	3.47
	硼镁铁矿(2)	$(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{Fe}(\text{BO}_3)\text{O}_2$	7.65
大石桥后仙峪	硼镁石	$\text{MgBO}_2(\text{OH})$	12.3
	遂安石	$\text{Mg}_2(\text{B}_2\text{O}_5)$	13.2
	硼镁铁矿(2)	$(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{Fe}(\text{BO}_3)\text{O}_2$	10.90

注:硼同位素来自肖荣阁等(2003).

到镁离子和磁铁矿,则形成硼镁铁矿.遂安石在后期的水化变质过程中生成硼镁石(方程式 5),硼镁铁矿遇富硼的热液时,可以再分解生成硼镁石和磁铁矿(方程式 6).



(2)硼酸热液与铁镁溶液的混合作用形成镁硼酸盐矿物和硼镁铁矿. 镁质岩石是含硼溶液中硼的主要沉淀剂,含硼溶液只有在一定的镁质沉剂存在时,才能使镁质硼酸盐富集成矿. 根据实验,菱镁矿的分解温度最低,溶解度最大;白云石次之;方解石分解温度较高,溶解度最小;镁橄榄石的蛇纹石化蚀变也可以释放出足够量的镁离子;在酸性热液作用下铁质矿物也可以部分溶解进入溶液. 因此变质作用过程中,菱镁矿和白云石发生分解及镁橄榄石的蛇纹石化都可以释放出铁镁离子进入溶液中,形成铁镁质热液. 硼酸热液与镁质溶液的混合作用是先生成遂安石还是先生成硼镁石矿物,需要进一步研究,因为虽然在显微镜下发现有纤维状硼镁石交代遂安石现象,尚没有实验资料来验证.

在铁镁硼酸盐矿物生成同时,硼酸溶液进入高硅、高铝岩石则形成硼硅酸盐矿物(电气石). 本区的电气石变粒岩的 Al_2O_3 含量最高,电气石主要是黑电气石,且其中硼同位素的 $\delta^{11}\text{B}$ 最低(表 3). 显然这是含硼热液交代高铝、高硅岩石的结果,从而造成硼同位素的分馏,因为热液交代中硼同位素分配与硅化及水化有关(Musachi *et al.*, 1991; Chaussidon and Jambon, 1994; Roda *et al.*, 1995; Ding *et al.*, 1996; Griffin *et al.*, 1996; Chaussidon and Appel,

1997). 硅化作用中硅置换¹¹B,降低 $\delta^{11}\text{B}$ 值,而水化作用中(OH)带入¹¹B,提高 $\delta^{11}\text{B}$ 值(肖荣阁等, 2003),这亦能说明本区矿石中的 $\delta^{11}\text{B}$ 较高,而电气石中(尤其是黑电气石) $\delta^{11}\text{B}$ 较低的原因. 当然,本区电气石中 $\delta^{11}\text{B}$ 较低,还有另外一种原因,那就是本区含硼岩系为热水沉积(冯本智等, 1993; 邹日, 1993; 冯本智和邹日, 1994; 邹日和冯本智, 1995).

4 成矿模式讨论

通过含硼岩系、镁质岩石、区域变质及混合岩化热液交代作用、构造改造 4 个方面的控矿因素分析,可归纳辽东硼矿为原始火山—沉积初始富集和部分熔融含硼热液交代镁质岩石的成矿模式,即:

硼元素初始富集+镁质岩石形成→混合岩化形成硼酸热液及铁镁质热液→交代铁镁质岩石或热液混合形成铁镁硼酸盐矿物或交代硅铝质岩石形成硼硅酸盐矿物电气石.

这种模式可分为如下 4 个阶段(图 8):

(1)矿源层形成阶段:古元古代早期,由于地幔物质上涌,导致辽东古裂谷开始形成. 当同生断裂切至上地壳时,海底频繁发生中酸性的火山活动,带出的硼质溶于海水中,使海水中硼质增高,从而使辽河群火山—沉积岩建造中都富集硼,即形成含硼岩系—硼矿源层.

(2)容矿岩石形成阶段:辽东裂谷在里尔峪期中期阶段,沿控制裂谷的北缘断裂(大石桥一带)下切到上地幔,大量富铁镁的基性—超基性火山岩、富镁的碳酸岩喷发,由于当时的环境为一局限的海域,形成大量的热水沉积,导致富硼海水中的 Mg^{2+} 升高. 后来海平面下降,致使沉积海盆处于封闭一半封闭

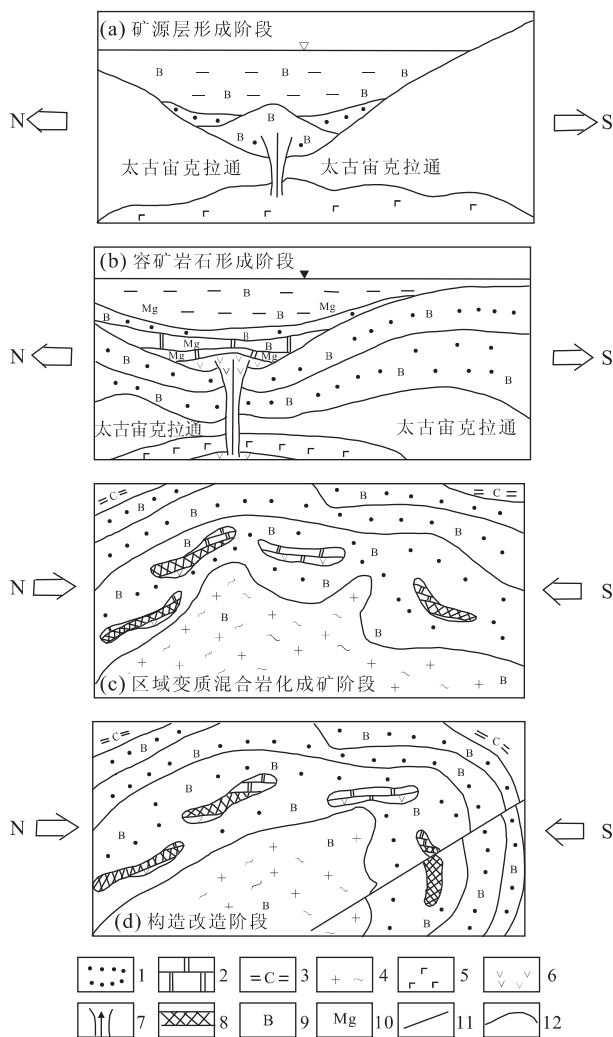


图 8 辽东硼矿成矿模式

Fig. 8 The model of ores-forming of eastern Liaodong borate deposits

1. 里尔峪组变粒岩; 2. 里尔峪组大理岩; 3. 高家峪组岩石; 4. 混合花岗岩; 5. 中酸性火山岩; 6. 基性—超基性火山岩; 7. 火山喷发通道;
8. 硼矿体; 9. 硼元素; 10. 镁元素; 11. 断裂; 12. 地质界线

的环境,再加上当时古地理位置在 35° 以南的低纬度地区(冯本智等,1998),古气候异常干燥炎热,海水不断地浓缩、沉淀,形成大量镁质碳酸盐岩,同时硼质进一步增加,大量的硼质随火山—沉积物亦大量沉淀。这种含硼质的富镁碳酸盐岩或火山沉积岩便是容矿岩石,但此时容矿岩石硼矿物质未能达到工业品位。

(3)区域变质、混合岩化阶段:在古元古代吕梁构造旋回挤压作用下(主要在本区构造演化的第一、二阶段),含硼岩系经过普遍的角闪岩相的区域变质作用和强烈的混合岩化作用,经过强烈的变质、变形,同时产生的大量富硼热液就位于有利的构造部

位聚集,这种含硼热液交代富镁的岩石就可形成遂安石矿石;交代富镁、铁质岩石就可形成硼镁铁铁矿石;交代铝硅质岩石则形成富电气石岩石。

(4)构造改造阶段:这是本区构造演化的第三阶段,伴随吕梁运动的发展而产生垂向叠加,形成近东西向的倾竖褶皱和花岗岩穹窿、断裂构造,同时产生大量的热液活动,使原生的遂安石硼镁石化、硼镁铁矿物分解成磁铁矿和硼镁石。中生代的断裂构造又促使原生的矿石进一步硼镁石化。

5 结论

含硼岩系、镁质岩石、区域变质及混合岩化热液交代作用和构造改造是辽东硼矿形成的主要控矿因素,其中含硼岩系、镁质容矿岩石是硼矿形成的物质基础,区域变质及混合岩化作用、构造改造活动是硼矿形成的必要条件。硼矿的形成分为原始火山—沉积初始富集和部分熔融含硼热液交代镁质岩石 2 个主要过程。

References

- Barker, C. E., 1980. Geology of the Terry borate deposit. *California Geology*, 33(8): 181—189.
- Barker, C. E., Barker, J. M., 1985. Borate deposits, Death Valley, California. In: Barker, J. M., Lefond, S. J., eds., *Borates: Economic geology and production*. Soc. Min. Eng, AIMMPE, New York, 103—135.
- Barker, J. M., Wilson, J. L., 1975. Borate deposits in the Death Valley region. In: *Guidebook: Las Vegas to Death Valley and return*. Nevada Bureau of Mines and Geology, Report 26, 23—32.
- Cai, K. Q., Chen, C. X., 2000. Mineralization system of paleoproterozoic magnesian non-metallic deposits in eastern Liaoning Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 346—351 (in Chinese with English abstract).
- Chaussidon, M., Appel, P. W. U., 1997. Boron isotopic composition of tourmalines from the 3.8 Ga-old Isua supracrustals, West Greenland: Implications on the $\delta^{11}\text{B}$ value of Early Archean seawater. *Chemical Geology*, 136: (3—4) 171—180.
- Chaussidon, M., Jambon, A., 1994. Boron content and isotopic composition of oceanic basalts: Geochemical and cosmochemic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 121: 277—291.

- Crowley, J. K. , 1996. Mg- and K-bearing borates and associated evaporites at Eagle Borax Spring, Death Valley, California: A spectroscopic exploration. *Economic Geology*, 91: 622—635.
- Ding, T. P. , Jiang, S. Y. , Wan, D. F. , et al. , 1996. Silicon isotope geochemistry. Geological Publishing House, Beijing, 125.
- Dong, S. B. , 1999. A general account on the metamorphic mineral deposits. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 231—242 (in Chinese with English abstract).
- Feng, B. Z. , Lu, J. W. , Zou, R. , et al. , 1998. Ore-forming conditions for the Early Proterozoic large-superlarge boron deposits in Liaoning and Jilin provinces, China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 28(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Feng, B. Z. , Zou, R. , 1994. The features and genesis of Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning. *Earth Science Frontiers*, 1(3—4): 235—237 (in Chinese with English abstract).
- Feng, B. Z. , Zou, R. , Xie, H. Y. , 1993. The hot water deposit formation and boron deposits in the Paleoproterozoic rift in Liaoning and Jilin area. In: Deposit Geological Committee of Geological Society of China, ed. , Conference proceedings of the fifth symposium of deposit geology in China. Geological Publishing House, Beijing, 512—515 (in Chinese).
- Griffin, W. L. , Slack, J. F. , Ramsden, A. R. , et al. , 1996. Trace elements in tourmaline from massive sulfide deposits and tourmalinites: Geochemical controls and exploration applications. *Economic Geology*, 91: 657—675.
- He, G. P. , Ye, H. W. , 1998. Two types of Early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 152—162 (in Chinese with English abstract).
- Helvacı, C. , 1995a. Stratigraphy, mineralogy and genesis of the Bigadic borate deposits, western Turkey. *Economic Geology*, 90: 1237—1260.
- Helvacı, C. , Yagmurlu, F. , 1995b. Geological setting and economic potential of the lignite and evaporite-bearing Neogene basins of western Anatolia, Turkey. *Israel Journal of Earth Sciences*, 44: 91—105.
- Helvacı, C. , Firman, R. J. , 1976. Geological setting and mineralogy of Emet borate deposits, Turkey. *Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, Sect. B*, 85: 142—152.
- Inan, K. , Dunham, A. C. , Esson, J. , 1973. Mineralogy, chemistry and origin of Kirka borate deposits, Eskisehir Province, Turkey. *Institution of Mining and Metallurgy, Transactions, Sect. B*, 82: 114—123.
- Jiang, C. C. , 1987. Precambrian geology of eastern Liaoning-Jilin. Liaoning Science and Technological Press, Shenyang (in Chinese).
- Liang, T. , Gao, J. G. , Zhu, W. G. , 2005. A summary on the types of ore-forming fluids and research methods. *Journal of Xi'an University of Arts & Science (Nat. Sci. Ed.)*, 8(4): 36—42.
- Liu, J. D. , 2006. The ore-controlling model, exploration and evaluation of magnesium borate deposits of Paleoproterozoic in East Liaoning [Dissertation]. China University of Geosciences, Beijing, 110 (in Chinese).
- Liu, J. D. , Xiao, R. G. , Wang, C. Z. , et al. , 2005. Genesis of the Dashiqiao granite and its significance in borate mineral exploration. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(6): 714—719 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. D. , Xiao, R. G. , Wang, W. W. , et al. , 2007. Regional metallogenesis of borate deposit in eastern Liaoning, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, X. M. , Li, C. M. , 2001. Study progress of forming model of migmatite. *Progress in Precambrian Research*, 24(4): 237—246 (in Chinese).
- Li, Z. L. , 2001. Some thoughts on relationships between metamorphic anatexis and petrogenesis-mineralization. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 29—38 (in Chinese with English abstract).
- Musachi, M. , Oi, T. , Ossaka, T. , et al. , 1991. Natural boron isotope fractionation between hot spring water and rock in direct contact. *Isotopenaxis*, 27: 163—166.
- Ozol, A. A. , 1976. Basic characteristics of boron geochemistry and formation conditions for volcanic-sedimentary type boron deposits. *USSR, Litol. Polezn. Iskop.*, 3: 60—74.
- Peng, Q. M. , Palmer, M. R. , 2002. The Paleoproterozoic Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin provinces, Northeast China. *Economic Geology*, 97: 93—108.
- Peng, Q. M. , Feng, B. Z. , Liu, J. D. , et al. , 1993. Geology of the Early Proterozoic boron deposits in eastern Liaoning, northeastern China. *Resources Geology*, 15: 343—350.
- Peng, Q. M. , Palmer, M. R. , 1995. The Paleoproterozoic bo-

- ron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporate. *Precambrian Research*, 72: 185—197.
- Peng, Q. M., Xu, H., 1994. The paleoproterozoic metaevaporitic and boron deposits in eastern Liaoning and southern Jinan. Northeast Normal University Press, Changchun (in Chinese).
- Qu, H. X., Guo, W. J., Zhang, Y., et al., 2005. Genesis study and prospective prediction for boron deposits in eastern Liaoning. *Geology and Resources*, 14(2): 131—138 (in Chinese with English abstract).
- Roda, E. R., Pesquera, A., Velasco, F., 1995. Tourmaline in granitic pegmatites and their country rocks, Fregeneda area, Salamanca, Spain. *The Canadian Mineralogist*, 33: 835—848.
- Sieke, J. W., 1991. The boron open pit mine at the Kramer borate deposit: The diversity of mineral and energy resources of southern California. *Soc. Econ. Geol. Guidebook Series*, 12: 4—15.
- Smith, G. I., 1985. Borate deposits in the United States; Dissimilar in form, similar in geologic setting. In: Barker, J. M., Lefond, S. J., eds., *Borates, economic geology and production*. Soc. Min. Eng., AIMMPE, New York, 37—51.
- Spearfs, 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Mineralogical Society of America, Washington D. C., 19: 673—708.
- Wang, C. Z., 2007. Petrogenesis of magnesian rocks of Paleoproterozoic and their ore-control role on borate deposits in East Liaoning [Dissertation]. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Wang, X. Z., 1974. The mineral composition and deposit genesis of north-east inner boron deposits. Science Press, Beijing, 1—218 (in Chinese).
- Xia, X. H., Yan, F., Zhao, Y. H., et al., 2005. Geological features and mineralization of the uranium-bearing von-senite deposit in the Liaodong rift. Mineral deposit research: Meeting the global challenge. The 8th Beinnial SGA Meeting.
- Xiao, R. G., Takao, O., Fei, H. C., et al., 2003. Sedimentary-metamorphic boron deposits and their boron isotopic compositions in eastern Liaoning Province. *Geoscience*, 17(2): 137—142 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, R. G., Yuan, Z. L., Liu, J. D., et al., 2004. The formation and evolution of regional ore-forming fluid. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 461—469 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Peng, Q. M., Martin, R. P., 2004. Origin of tourmaline-rich rocks in a paleoproterozoic terrane (N. E. China): Evidence for evaporite-derived boron. *Geology in China*, 31(3): 240—253 (in Chinese).
- You, Z. D., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., 2001. The role of fluid flow during regional metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 157—164 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Peng, R. M., et al., 2002. The metallogenic system of old continental margin. Geological Publishing House, Beijing, 1—416 (in Chinese).
- Zhang, J. S., 1994. Geological characteristics and mineralization of szaibelyite-type boron deposits in East Liaoning. *Liaoning Geology*, 4: 289—324 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. S., 1988. The early crust and deposits of East Liaoning Peninsula. Geological Publishing House, Beijing, 1—574 (in Chinese).
- Zhou, R., 1993. Features of boron-rich hydrothermal sedimentary formation and genesis of boron deposits within boron bearing series of Early Proterozoic in Hupiyu area, Yingkou, Liaoning Province [Dissertation]. Changchun University of Earth Sciences, Changchun (in Chinese).
- Zou, R., Feng, B. Z., 1995. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning. *Geochimica*, 24(Suppl.): 46—54 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡克勤, 陈从喜, 2000. 辽东古元代镁质非金属成矿系统研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(4): 346—351.
- 董申保, 1999. 变质作用矿床概述. *地学前缘*, 6(2): 231—242.
- 冯本智, 卢静文, 邹日, 等, 1998. 中国辽吉地区早元古代大型—超大型硼矿床的形成条件. *长春科技大学学报*, 28(1): 1—15.
- 冯本智, 邹日, 1994. 辽宁营口后仙峪硼矿床特征及成因. *地学前缘*, 1(4): 235—237.
- 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. 见: 中国地质学会矿床地质专业委员会编, 第五届全国矿床地质论文集. 北京: 地质出版社, 512—515.
- 贺高品, 叶慧文, 1998. 辽东—吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义. *岩石学报*, 14(2): 152—162.
- 姜春潮, 1987. 辽吉东部前寒武纪地质. 沈阳: 辽宁科学技术

- 出版社.
- 李兆麟, 2001. 关于变质深熔作用与成岩成矿关系的思考. 地质前缘, 8(3): 29—38.
- 梁婷, 高景刚, 朱文戈, 2005. 成矿流体类型及研究方法综述. 西安文理学院学报(自然科学版), 8(4): 36—42.
- 刘敬党, 2006. 辽东地区下元古界镁硼酸盐矿床控矿模型及其勘查与评价研究[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 110.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王翠芝, 等, 2005. 辽宁大石桥花岗质岩石成因分析及其在硼矿勘查中的意义. 吉林大学学报(地球科学版), 6: 714—719.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 等, 2007. 辽东硼矿区域成矿模型. 北京: 地质出版社.
- 刘新秒, 李长民, 2001. 混合岩形成模式的研究进展. 前寒武纪研究进展, 24(4): 237—246.
- 彭齐鸣, 许虹, 1994. 辽东—吉南地区早元古宙变质蒸发岩系及硼矿床. 长春: 东北师范大学出版社.
- 曲洪祥, 郭伟静, 张永, 等, 2005. 辽东地区硼矿床成因探讨与硼矿远景区预测. 地质与资源, 14(2): 131—138.
- 王翠芝, 2007. 辽东古元古界镁质岩石成因及其对硼矿成矿控制作用[博士学位论文]. 北京: 中国地质大学.
- 王秀璋, 1974. 东北内生硼矿床的矿物组成和矿床成因研究. 北京: 科学出版社, 1—218.
- 肖荣阁, 大井隆夫, 费红彩, 等, 2003. 辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究. 现代地质, 17(2): 137—142.
- 肖荣阁, 原振雷, 刘敬党, 等, 2004. 区域成矿流体的形成与演化. 地质前缘, 11(2): 461—469.
- 许虹, 彭齐鸣, Martin, R. P., 2004. 辽宁古元古代地体中富电气石岩石的成因: 蒸发岩硼源的证据(英文). 中国地质, 31(3): 240—253.
- 游振东, 钟增球, 周汉文, 2001. 区域变质作用中的流体. 地质前缘, 8(3): 157—164.
- 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等, 2002. 古陆边缘成矿系统. 北京: 地质出版社, 1—416.
- 张景山, 1994. 辽东硼镁石型硼矿床地质特征及成矿作用. 辽宁地质, 4: 289—324.
- 张秋生, 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社, 1—574.
- 邹日, 1993. 营口虎皮峪地区早元古代含硼岩系中热水沉积建造特征及硼矿成因[博士学位论文]. 吉林: 长春地质学院.
- 邹日, 冯本智, 1995. 营口后仙峪硼矿容矿火山—热水沉积岩系特征. 地球化学, 24(增刊): 46—54.