

文章编号 10258-7106 (2006) 06-0683-10

辽宁营口后仙峪硼矿区超镁橄榄岩的控矿作用^{*}

王翠芝¹, 肖荣阁¹, 刘敬党^{1,2}, 费红彩³, 王文武², 周红春¹, 刘敬青¹

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083 ; 2 辽宁省化工地质勘查院, 辽宁 锦州 121000 ;
3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 为了研究辽宁营口后仙峪硼矿区超镁橄榄岩与硼矿的关系, 作者通过硼矿与超镁橄榄岩两者在产出空间关系、岩石学和地球化学方面的比较, 发现: ①硼矿体与超镁橄榄岩空间关系上具一致性; ②硼矿体与超镁橄榄岩在岩石学上具继承性; ③硼矿石、超镁橄榄岩的地球化学特征具相似性, 从而得出超镁橄榄岩不仅是该区硼矿的容矿岩石, 而且对硼矿的形成有决定性的岩控作用, 进一步认为辽东硼矿的容矿岩石不全是镁质大理岩, 其他富镁岩石在一定条件下也可成为硼矿的容矿岩石。

关键词 地质学, 硼矿, 超镁橄榄岩, 控矿作用, 后仙峪, 辽宁

中国分类号: P611.1

文献标识码: A

Ore-control role of ultra-magnesium peridotite in Houxianyu boron ore district, Yingkou, Liaoning Province

WANG CuiZhi¹, XIAO RongGe¹, LIU JingDang^{1,2}, FEI HongCai³, WANG WenWu², ZHOU HongChun¹
and LIU JingQing¹

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Liaoning Geological Survey for Chemical Industry, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 3 Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in Yingkou of Liaoning Province, the Houxianyu boron deposit is of the suanite-szaibelyite type, with the host rock being the serpentinized and magnesitized ultra-magnesium peridotite. A comparison of spatial relationship, petrology and geochemistry between the boron deposit and the ultra-magnesium peridotite has led to the following conclusions: (1) the ore bodies have the same spatial relationship with the ultra-magnesium peridotite, because the boron bodies are hosted in the ultra-magnesium peridotite and magnesite marble in lamellar, lamellated and lentoid forms; (2) the ores show inheritance relationship with the ultra-magnesium peridotite in mineral formation, texture and structure. The metasomatic relict texture and the metasomatic pseudomorphic texture find expression in the metasomatic relationship of szaibelyite with forsterite, serpenite and early ore minerals. The relict structure is obvious, and such structures as the blasto-nodule structure, the blasto-ball structure, the jet brecciated structure, the blasto-banded structure, the brecciated structure, the anti-brecciated structure, the granophyric structure, and the tripod structure all have to do with the ultra-magnesium peridotite and serpentinized peridotite; (3) the ores show inheritance in geochemistry, especially in REE. The boron ores and the

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(40073013) 的资助

第一作者简介 王翠芝, 女, 1965 年生, 在读博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向为资源经济与资源环境。E-mail : wcuizhi@163.com.

收稿日期 2006-03-27 ; 改回日期 2006-06-23 ; 张绮玲编辑。

ultra-magnesium peridotite both show magnesium-rich, iron-rich and boron-rich characteristics, and also show close relationship in the evolution of rock formation. They are similar in trace elements. They have the same kinds and contents of trace elements, and their features of evolution are similar. They are consistent in REE evolution, and both have the "V" type REE pattern. It is thus held that the ultra-magnesium peridotite not only is one kind of host rocks, but also controls the characteristics of the boron ores in the boron deposit. In addition, magnesium marble is not the only host rock in eastern Liaoning-southern Jilin boron deposits- and other magnesium-rich rocks can also serve as the host rocks of boron deposits under certain conditions.

Key words: geology, boron deposit, ultra-magnesium peridotite, metallogenic activity, Houxianyu, Liaoning Province.

辽东-吉南硼矿分布在早元古代裂谷的(蔡克勤等 2000; 陈从喜等, 2002; 2003; 翟裕生等, 2002)经强烈构造变质的火山-沉积岩系中(王成文等, 1997)。大部分研究者认为容矿岩石是原岩为海相的镁质大理岩(王秀璋等, 1974; 张秋生, 1986; 姜春潮, 1987; 张景山, 1994; 彭齐鸣等, 1994; Peng et al., 1995; Peng, 2002; 邹日等, 1995; 黄作良等, 1999; 刘敬党等, 2005)。近几年来笔者在辽宁营口、凤城、宽甸地区做了大量工作, 发现这些地区的硼矿容矿岩石并不全是前人认为的镁质大理岩, 还有岩浆成因的富镁超基性岩、基性岩。本文基于营口后仙峪硼矿区矿石、容矿岩石的对比研究来说明本区的超镁橄榄岩(俗称镁橄石)不仅是硼矿的容矿岩石, 而且它对硼矿床的形成起了岩控作用。这一容矿岩石类型上的研究突破将为辽东-吉南硼矿的找矿工作打开新的局面。

1 硼矿床与超镁橄榄岩的空间一致性

后仙峪硼矿床位于辽宁省营口市大石桥镇南东 50 km 处, 受虎皮峪-翁泉沟-红石砬子复背斜的次一级褶皱构造(后仙峪背斜和冯家堡向斜)控制。矿床位于早元古代的火山-沉积岩系中含硼岩系富镁硼酸盐岩组中, 该岩组分 3 个岩性段, 即下部混合岩段, 主要为条痕状角闪混合岩; 中部变粒岩段, 为黑云变粒岩和电气石岩, 该岩段内夹有菱镁矿大理岩和蛇纹石化的镁橄石岩, 是硼矿体赋存岩段。上部浅粒岩段, 为含电气石的钠长浅粒岩。

超镁橄榄岩呈似层状、透镜状分布于黑云变粒岩中, 与菱镁矿大理岩互相过渡, 与围岩整合接触, 岩石最厚可达上百米。因受与两期褶皱构造控制在平面上呈“W”形展布(图 1)。硼矿体亦呈层状、似层状和透镜状产于超镁橄榄岩和菱镁矿大理岩中, 并

与超镁橄榄岩、菱镁矿大理岩的接触面产状基本一致, 走向或倾向上均有分叉、复合、收缩膨大现象(图 2)。王生志等(2003)对后仙峪硼矿体的含矿层等值线图、含矿层厚度等值线图以及底板等高线图进行了系统分析, 认为含矿层在倾向上具有分带性, 带与带的含矿层硼含量变化极其相似, 不同带间相应段相连呈放射性层展开, 向东开放, 向西收敛, 在走向上具有分段性, 矿体与容矿镁橄石岩的厚度成正比, 且所有含矿层即蛇纹石化镁橄石岩的厚度基本上由边部向中心逐渐增高, 含矿层硼的含量等值线也是由边部向中心逐渐增高, 显现出含矿层围绕火山口呈带状分布的特点。有的地方超镁橄榄岩厚度虽大, 但并没有矿, 这也说明了“含矿层”中的矿并不是沉积的矿层在一定范围内广泛存在, 而是后期形成(主要是含硼热液交代)的。

2 硼矿体与超镁橄榄岩的岩石学继承性

2.1 矿物特征

后仙峪硼矿的矿石和赋矿岩石超镁橄榄岩的矿物都是富镁的矿物。主要矿石矿物有透辉石、板状硼镁石、硼镁铁矿、纤维状硼镁石等, 脉石矿物有镁橄石、蛇纹石、菱镁矿和金云母等。早期矿石主要呈板状, 有交代板状镁橄石的现象, 另外还有少量磁铁矿。超镁橄榄岩是纯橄石岩, 几乎全部由镁橄石组成。镁橄石大部分呈板状, 带状分布, 具波状消光, 矿物较纯净, 不含其他矿物的残留体或杂质。镁橄石颗粒间界线清楚, 常见缝合线结构, 这明显地说明了超镁橄榄岩经历过动态重结晶。超镁橄石岩中一些镁橄石呈细粒状, 表面干净, 颗粒界线明显, 具有 120° 的平衡结构, 说明超镁橄石岩局部发生了静态重结晶。

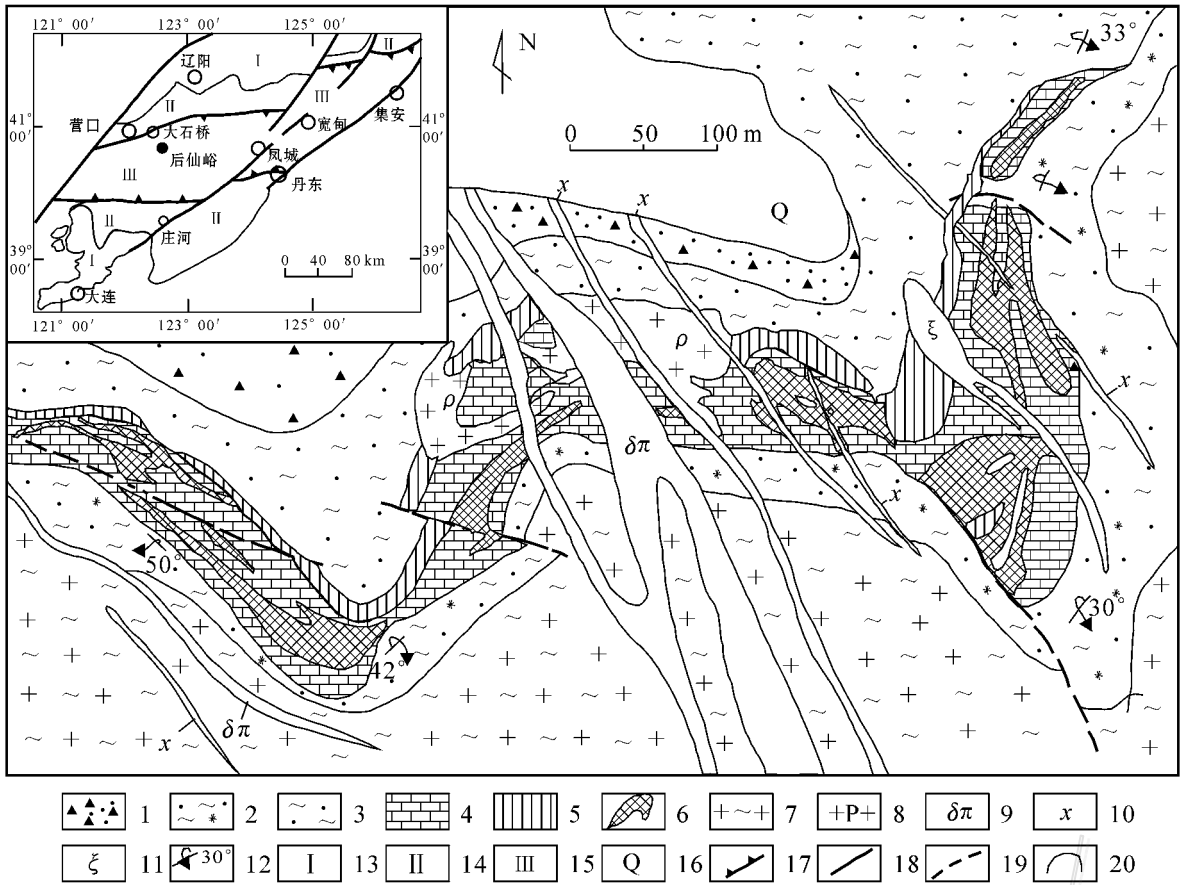


图 1 后仙峪硼矿床地质略图(据后仙峪勘探资料,1987^①)

1—古元古界电气石变粒岩夹黑云变粒岩 2—古元古界浅粒岩 3—古元古界变粒岩 4—古元古界蛇纹石化镁橄榄岩及镁质大理岩 5—古元古界电英岩 6—硼矿体 7—片麻状花岗岩 8—伟晶岩 9—闪长玢岩 10—斜长煌斑岩 11—闪长岩 12—地层产状 13—太古宙陆核；14—裂谷斜坡区 15—裂谷中央凹陷区 16—第四系 17—控制裂谷的深大断裂 18—古断裂 19—推测断层 20—地质界线

Fig. 1 Geological map of the Houxianyu boron deposit

1—Paleoproterozoic tourmaline granulate intercalated with biotite granulate 2—Paleoproterozoic leptynite 3—Paleoproterozoic granulite 4—Paleoproterozoic serpentinized magnesium peridotite and marble 5—Paleoproterozoic tourmaline quartzite 6—Boron body 7—Gneissic granite 8—Pegmatite 9—Diorite-porphyrite 10—Plagioclase-lamprophyre 11—Diorite 12—Attitude of strata 13—Archean nucleus 14—Sloping ground of the rift 15—Central valley of the rift 16—Quaternary 17—Rift-controlling deep fault 18—Ancient fault 19—Inferred fault 20—Geological boundary

2.2 矿石、岩石组构特征

后仙峪硼矿区经历了多次变质和形变作用的强烈改造,原有岩体、矿体的形态、产状、矿物成分都发生了重大转变,原生组构残留较少,而以强烈发育的变质-变形结构构造为主。但从局部残留组构中已足以了解本区超镁橄榄岩,它是硼矿石形成的基础,其中最有说服力的是矿石的交代、变形结构和变余、变生构造。

2.2.1 交代、变形结构

交代结构是本区矿石中最常见的结构,分为交代残余结构和交代假象结构。交代残余结构主要表

现在纤维状硼镁石交代或穿插早期形成的无水的遂安石、板状硼镁石等硼酸盐矿物和镁橄榄石或蛇纹石等脉石矿物,遂安石、板状硼镁石、镁橄榄石或蛇纹石呈残留状。交代假象结构主要表现为纤维状硼镁石完全交代了遂安石、板状硼镁石、硼镁铁矿但保留其假象;在脉石矿物中蛇纹石交代镁橄榄石而保留镁橄榄石的外形。

矿石的变形结构可分为脆性变形结构和韧性变形结构两类。脆性变形结构主要是岩石在受到张性应力时出现的碎裂结构。韧性变形结构主要表现为矿物的波状消光、变形带、扭折带、机械双晶等。如

① 全国矿产储量委员会. 1987. 硼矿床勘探类型实例附图.

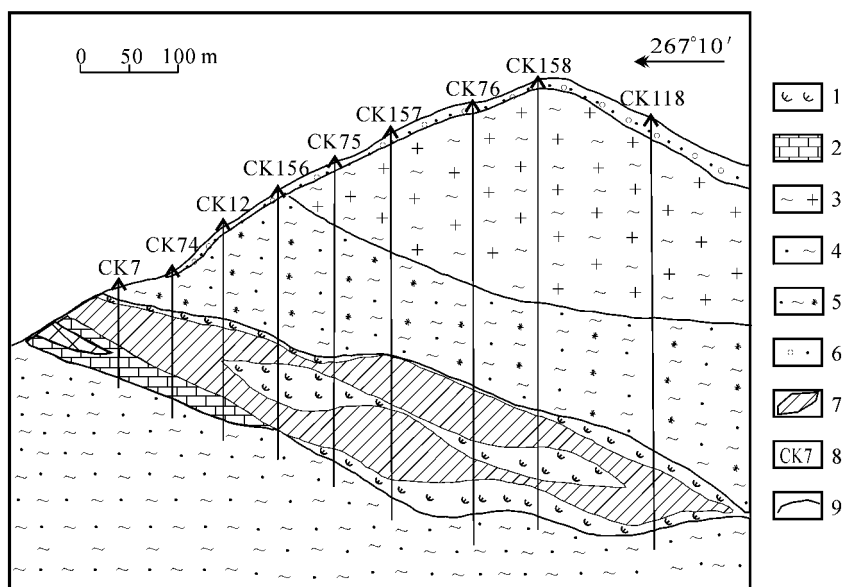


图 2 后仙峪硼矿床 20 号勘探线剖面图(据后仙峪勘探内部资料^①改编)

1—古元古界镁橄榄岩 2—古元古界镁质大理岩 3—古元古界片麻状花岗岩 4—古元古界黑云变粒岩 5—古元古界浅粒岩;
6—第四系 7—硼矿体 8—钻孔号 9—地质界线

Fig. 2 Geological section along No. 20 exploration line in the Houxianyu boron deposit

1—Paleoproterozoic magnesium peridotite 2—Paleoproterozoic magnesium marble 3—Paleoproterozoic gneissic granite 4—Paleoproterozoic biotite granulite 5—Paleoproterozoic leptynite 6—Quaternary 7—Boron body 8—Serial number of drill hole 9—Geological boundary

遂安石中有大量的调置结构、相畴结构、聚片双晶及位错排列等(王安平等,1997)。

2.2.2 变余、变生构造

矿石的变余构造主要有变余结核状、球状构造和变余喷流角砾构造。①变余结核状、球状构造:结核呈圆形、椭圆形,直径一般 1~n cm,具环带构造,在镁质大理岩中成群出现。结核或球状体由超镁橄榄岩组成,常被拉长成小的椭球体并具定向排列。这种结核、球状构造与三角格架状结构(由遂安石大晶体组成)伴生。结核的存在可能暗示着海底火山喷口附近局部的动荡环境(邹日,1993)。②变余喷流角砾构造:表现为硼镁石集合体中分布着镁橄榄岩、蛇纹岩或蛇纹石大理岩的角砾或透镜体。这种角砾与周围胶结物界线清楚,角砾及胶结物在镜下可见有粒状变晶结构和板柱状变晶结构,说明它们是变质前的产物,其原岩与火山活动有关。

矿石的变生构造可分为挤压-剪切带和张裂带中的矿石构造。①挤压-剪切带中的矿石构造:为条带状和似条带状构造,由纤维状硼镁石和蛇纹岩相间组成。在冯家堡小型矿床中还发现硼镁石围绕蛇

纹岩构造透镜体分布。蛇纹岩构造透镜体定向排列,与矿体走向、倾向一致。透镜体一般长 10~20 cm,宽 5 cm 左右,呈比较强烈的挤压现象^①(王培君等,1991)。②张裂带中的矿石构造:主要分布在褶曲轴部的虚脱部位及翼部层间剪切带的虚脱空间中。这是含硼岩石在张性力作用下,于虚脱空间发育的超镁橄榄岩的构造角砾岩,晚期混合岩化阶段所形成的热液沿这些虚脱空间进行充填交代,形成了角砾状、反角砾状、花斑状以及团块状构造。

3 矿石、岩石的地球化学相似性

3.1 矿石、岩石的主量元素特征

本区矿石与超镁橄榄岩岩石主量元素具有富镁、富铁、富硼的特点,见表 1。遂安石的三大主要组分是 MgO (w_B ,下同)为 50.94%, FeO (T) 2.9%, B_2O_3 42.09%。纤维状硼镁石的三大组分为 MgO 为 46.29%, FeO (T) 2.48%, B_2O_3 39.41%。超镁橄榄岩中 SiO_2 为 38.02%, MgO 为 47.11%, FeO (T) 为 6.69%, B_2O_3 0.60%, TiO_2 为 0.06%, Na_2O +

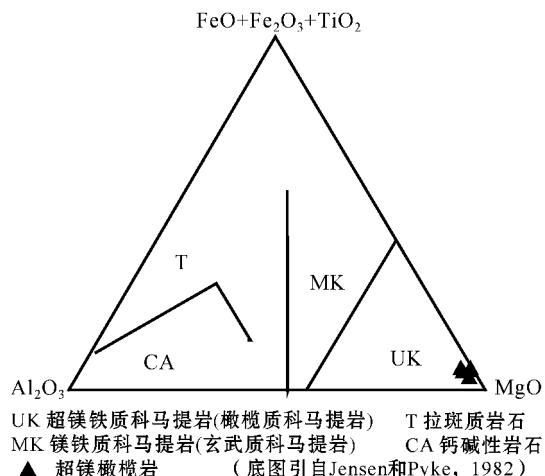


图 3 超镁橄榄岩的 Fe、Al、Mg 氧化物图解

Fig. 3 Triangular diagram showing Fe , Al , Mg oxides in ultra-magnesium peridotite

K₂O 为 0.28% ,MgO/FeO 分子比为 14.36~21.26 ; m/f 一般为 11.47~ 17.08 ,依邱家骧(1983)的划分方案 ,可以划入超基性岩的范畴。利用 Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃+FeO+TiO₂)作图(图 3) ,亦落入橄榄质科马提岩的范围(Amdt et al. ,1985 ;王中刚等 ,1989 ,转引自 Jensen et al. ,1982 的图)。

由岩石学分析 ,本区超镁橄榄岩退变质可成蛇纹岩 ,蛇纹岩又发生碳酸盐化可形成菱镁矿大理岩。图 4 显示了它们的主量元素演化上的继承性关系。由镁橄榄岩蚀变成蛇纹岩的过程中 ,主量元素 SiO₂ 变化不明显 ,MgO、FeO 明显降低 ,Fe₂O₃、H₂O⁺、CO₂ 有一定增加。在蛇纹岩的碳酸盐化的过程中 ,主量元素 SiO₂ 大量降低 ,MgO 稍有降低 ,CO₂ 明显增加 ,

H₂O⁺ 大量减少。因此 ,超镁橄榄岩的蛇纹石化、蛇纹岩的碳酸盐化这两个过程中都释放一定的 MgO ,被释放出的 MgO 与热液中的硼结合可生成遂安石、硼镁铁矿等无水富镁硼酸岩矿物 ,与 CO₂ 结合则形成菱镁矿。无水硼酸盐矿物在后期蚀变为富水的板状、纤维状硼镁石。

3.2 矿石、岩石的微量元素含量具相似性

本区遂安石-硼镁石型矿石微量元素 B、Cd、Cs、Sn、Ta 等含量明显高于克拉克值 ;Pb、Zn 含量接近克拉克值 ,其余元素含量均明显低于克拉克值。矿石的微量元素与容矿岩石的微量元素含量、种类相同 ,演化特征相似 ,见表 2、图 5。除 B 造矿元素外 ,Rb、Cs、Ta 等在容矿岩石中含量较高 ,在硼矿石中含量也较高。其他微量元素含量在矿石与容矿岩石中稍有差异 ,这与各微量元素本身的地球化学特征及矿石、岩石在变质-混合岩化热液交代成矿作用过程中 ,元素的带入、带出有关。如由镁橄榄岩蚀变成蛇纹岩的过程中 ,微量元素 Be、Sr、Ga 等活动明显增加 ,非活动元素 Ti 和 Ta 也相对富集。在蛇纹岩碳酸岩化的过程中 ,微量元素中除 Rb、Sr、Cs 明显增加外 ,其余大部分微量元素降低 ,尤其是非活动元素 Sc、Ti、V、Cs、Co、Ni、Nb、Ta 明显降低。这是因为这些元素在硅酸盐岩石中 ,可与 K、Al、Fe 等造岩元素发生广泛类质同像 ,而在硼矿石中这种可能性则小得多。总之 ,硼矿石与含硼岩系变质岩石所含微量元素种类的一致性和主要元素、微量元素分布的相似性 ,表明了它们在成因上的必然联系。相对本矿区矿石、岩石 ,区域镁质大理岩的 Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni 等非活动性微量元素较低 ,而 Sr、Nb、Cd、Ba 等大

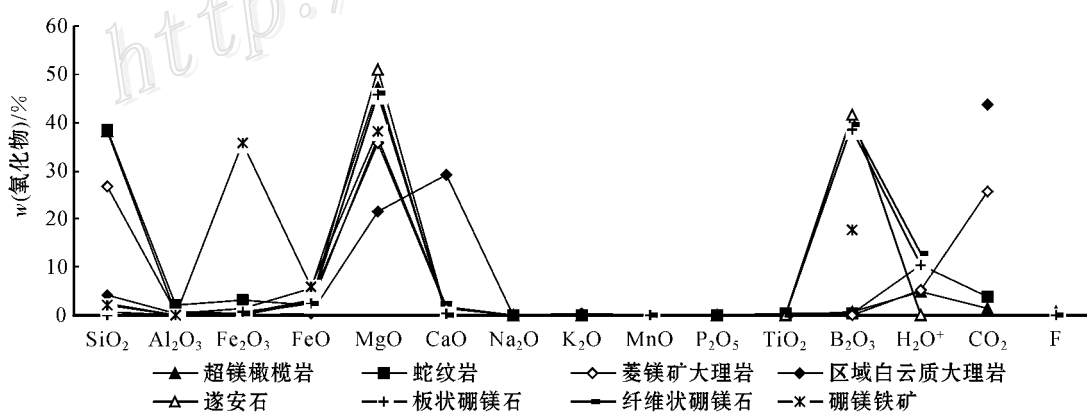


图 4 后仙峪硼矿石及容矿岩石的主要元素组成

Fig. 4 Composition of ores and host rocks in the Houxianyu boron deposit

表 1 后仙峪硼矿区容矿岩石、矿石主量化学组成及与区域镁质大理岩的对比($w_B/\%$)

Table 1 Composition of major elements of the host rocks and ores in the Houxianyu boron deposit in comparison with regional magnesium marble

序号	岩石品称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	B ₂ O ₃	H ₂ O ⁺	CO ₂	F	总和
1	超镁橄榄岩(5)	38.02	0.23	1.22	5.47	47.11	0.12	0.17	0.11	0.14	0.02	0.06	0.60	5.02	1.48		99.78
2	蛇纹岩(2)	38.47	2.04	3.02	2.05	36.90	1.84	0.15	0.02	0.09	0.01	0.31	0.30	10.56	3.72		99.49
3	菱镁矿大理岩(3)	26.67	0.86	0.30	3.07	35.68	1.49	0.09	0.30	0.10	0.08	0.02	0.14	5.07	25.75		99.62
4	白云质大理岩*	4.20	0.40	0.04	0.21	21.55	29.02	0.08	0.00	0.08	0.07			43.79		99.44	
5	透安石**	2.47	0.02	0.17	2.67	51.10	0.18			0.15		0.05	41.51	0.07		0.78	99.17
6	板状硼镁石①	0.11		0.70	2.34	45.85	0.39			0.12			38.38	10.48		0.08	98.45
7	纤维状硼镁石①	0.53	0.04	0.38	2.48	46.29	0.10			0.06		0.10	39.41	12.78		0.03	102.20
8	硼镁铁矿①	1.98	0.05	35.76	5.89	38.01							17.61				99.30

注:分析数据由中国地质科学院地球物理地球化学地质研究所分析。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、2 μ g/g。④GR: H₂O⁺、0.1%。⑤电位法: CO₂、0.2%。数据为平均值,括号中的数字为样号数。* 引自姜春潮,1987;白云质大理岩为区域上白云质大理岩; ** 引自张秋生,1986。

表 2 后仙峪硼矿区矿石、容矿岩石及的微量元素组成及与区域镁大理岩的微量元素对比($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Composition of trace elements of the host rocks and ores in the Houxianyu boron deposit in comparison with regional magnesium marble

序号	岩石名称	Li	Be	B	F	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cd*	Cs	Ba	Hf	Ta	Th	U
1	镁橄榄岩(5)	7.68	0.19	1794.39	2643.04	40.19	804.14	83.44	41.05	10.96	26.63	0.91	15.22	7.56	31.28	11.17	35.42	1.93	369.94	0.90	0.90	5.76	2.45
2	蛇纹岩(2)	4.35	3.70	925.53	3087.36	25.87	3120.55	55.65	37.73	6.74	49.08	5.75	5.25	41.35	43.9	26.57	40.2	1.22	5	1.37	3.70	6.39	1.21
3	蛇纹石大理岩(3)	9.40	5.22	463.77	4189.15	10.77	217.7	8.93	16.39		25.27	2.74	44.27	16.73	16.2	3.77	59.27	2.78	5.37	0.52	0.41	7.77	0.82
4	区域镁质大理岩(5)②	3.78	0.5	362		1.36	108.37	11.28	6.62	1.94	3.87	2.5	4.8	146.43		20.98	2.9	8.8	66.37		6.45	2.51	
5	硼镁石矿石①	6.3	0.50	85500		3	121	14	7	4.4	10.0	2.5	31	10.96		6.0	3	15	6			7.72	
6	透安石**	5.44				3.18	45.87	44.2	10.31	2.42	5.81	5		3.92		0.0							

注:岩石数据,肖荣阁、王翠芝送样,国土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 μ g/g; Li、1 μ g/g; ②ICP-MS: Cd、20 ng/g; Ta、0.1 μ g/g; U、Hf、0.2 μ g/g; Co、Cs、Ga、Sc、Th、1 μ g/g; Nb、Ni、2 μ g/g。③XRF: Ba、Cr、Sr、V、5 μ g/g; Rb、Zr、为 2 μ g/g; V、5 μ g/g; Ti、TiO₂、0.02%。④ISE: F、100 μ g/g。⑤ES: Sn、1 μ g/g。有括号的数据有多个样品的平均值,括号中的数字为样品个数; * 单位为 10⁻⁶。 ** 数据引自黄作良,1993。

① 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。
② 化学工业部化学矿产地质研究院, 1991. 辽东-吉南地区硼矿床构造研究。

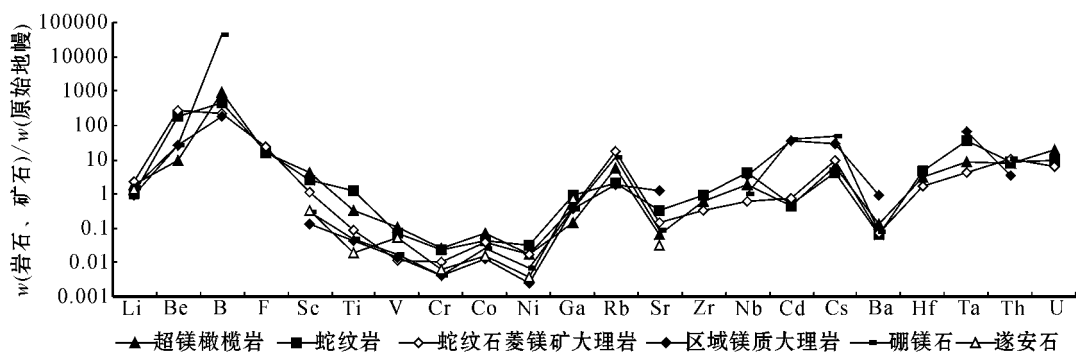


图 5 超镁橄榄岩、蛇纹岩、蛇纹石菱镁矿大理岩及矿石的微量元素标准化图

Fig. 5 Mantle-normalized trace element patterns of the ultra-magnesium peridotite , serpentinite , serpentine-magnesite marble and ores

表 3 后仙峪硼矿区矿石、容矿岩石稀土组成及与区域镁质大理岩的稀土组成对比($w_B/10^{-6}$)

Table 1 Composition of REE elements of the host rocks and ores in the Houxianyu boron deposit in comparison with regional magnesium marble

序号	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	遂安石**	0.328	0.878	0.086	0.300	0.070	0.012	0.072	0.012	0.073	0.020	0.065	0.016	0.160	0.034
2	叶蛇纹石**	0.661	1.510	0.204	0.730	0.119	0.017	0.182	0.040	0.214	0.056	0.166	0.148	0.533	0.116
3	菱镁矿(2)**	13.265	28.250	3.790	14.590	3.295	0.492	3.335	0.572	3.780	0.821	.590	0.358	2.690	0.418
4	反角砾状纤维硼镁石矿石*	5.600	18.020	2.600	13.200	5.100	0.300	6.600	1.200	7.700	1.900	4.000	0.630	4.000	0.460
5	反角砾状遂安石矿石*	1.600	3.500	0.410	1.500	0.320	0.035	0.370	0.055	0.330	0.100	0.280	0.053	0.520	0.090
6	反角砾状板状硼镁石矿石*	5.300	17.700	2.300	10.400	3.500	0.200	4.000	0.640	3.600	0.860	1.700	0.260	1.600	0.220
7	超镁橄榄岩(5)	1.518	3.830	0.543	2.513	0.662	0.047	0.758	0.153	1.091	0.262	0.984	0.228	2.067	0.556
8	蛇纹岩(2)	6.194	15.663	2.269	9.808	2.246	0.169	2.469	0.511	3.729	0.856	2.920	0.511	3.455	0.790
9	蛇纹石大理岩(3)	12.626	28.437	3.982	17.724	4.419	0.188	4.753	0.897	5.976	1.306	4.079	0.640	3.785	0.703
10	区域镁质大理岩	6.60	15.60	1.50	5.40	0.98	0.31	1.10	0.14	0.64	0.14	0.27	0.04	0.20	0.03

注 岩石数据,肖荣阁、王翠芝送样,国土部资源部廊坊地球物理化学所分析。分析方法为 ICP-MS 精度:La、Ce、1 μg/g;Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 0.1 μg/g。有括号的数据为多个样品的平均值,括号中的数据为样品个数; **数据引自黄作良,1993; *引自化学工业部化学矿产地质研究院,1991。辽东-吉南地区硼矿床控矿构造研究。

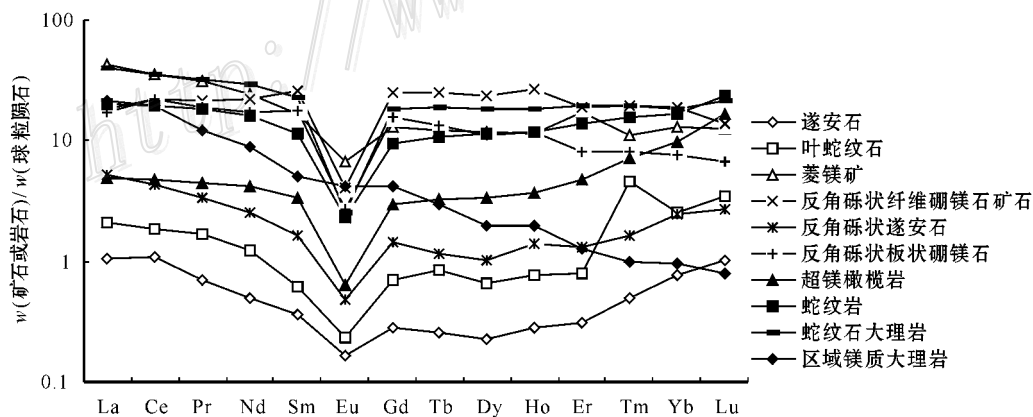


图 6 后仙峪硼矿区矿石与容矿岩石的稀土元素谱线图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of ores and host rocks in the Houxianyu boron deposit

离子亲石元素含量较高。

3.3 矿石与岩石稀土元素演化上的一致性

后仙峪硼矿区矿石与容矿岩石具有相近的稀土元素组成,见表 3。谱线图具一致的演化趋势,都属于平坦型,具明显负 Eu 异常,如图 6,这与纯橄榄岩典型的 V 形 REE 型式(李昌年,1992;王希斌等,1996)一致,说明矿石与超镁橄榄岩的关系很密切。矿石中遂安石的稀土明显比纤维状硼镁石低,两者谱线图略有差异,遂安石曲线两端略上翘,而纤维硼镁石曲线两端略有降低。容矿岩石中由镁橄榄岩蚀变成蛇纹岩的过程中,稀土元素总量增加,轻稀土元素相对增加较快,在蛇纹岩碳酸岩化的过程中,稀土总量进一步增加,但增加量相比蛇纹岩化较小,轻稀土元素富集明显些,尤其是 Sm 明显增加,相对负 Eu 更明显。有意思的是蛇纹岩中叶蛇纹石矿物的稀土元素含量比蛇纹岩全岩的要低的多,由蛇纹石蚀变而成的菱镁矿的稀土元素含量也比蛇纹石菱镁矿大理岩的略低,这说明稀土元素主要是赋存在矿物颗粒之间而不是在矿物内。相对本矿区的矿石、岩石,区域镁质大理岩显然具有不同的 REE 分配型式,REE 谱线图呈现为一致右倾的曲线(近似直线),没有负 Eu 异常。这也有力地说明了本区硼矿的形成与超镁橄榄岩有更直接的关系。

4 讨 论

通过上述矿石学、岩石学、地球化学等方面的对比、分析,结合整个辽东硼矿的区域地质情况,对本区硼矿与超镁橄榄岩的关系方面,可以得到如下认识。

(1) 硼矿赋存在早元古代的富硼镁的火山-沉积岩系中,这套岩系经过长达 19 亿年左右的演化(路远发等,2005),经受了多期构造运动,普遍发生了峰期阶段达高角闪岩相的低压区域变质作用(贺高品等,1998)和混合岩化作用。这些过程尤其是混合岩化作用提供了含硼热液,而后含硼热液交代富镁岩石,促成了硼矿的直接形成。由于超基性岩、大理岩相比其他岩石不易受到混合岩化的影响(王仁民等,1988),在广泛发生混合化的硼矿区,超镁橄榄岩和镁质大理岩存在的可能性较大。这种情况亦符合整

个辽东-吉南硼矿区的区域地质特点^①,即以庄河—灌水一线为界,西部(指营口地区)变形小于东部(指宽甸地区),混合岩化相对较弱,因而本区的超镁橄榄岩体得到相对较好的保存;而在东部混合岩化强的宽甸地区,火成岩(可能有超基性岩)多呈残留体存在,相对来说大理岩分布较广。

(2) 有硼矿体分布的超镁橄榄岩及超镁橄榄岩的蚀变岩中,超镁橄榄岩为硼矿的形成提供了容矿空间。硼矿体的产状与超镁橄榄岩基本一致,矿体厚度与超镁橄榄岩的厚度基本成正比,但有的地方超镁橄榄岩厚度虽大但无矿,说明超镁橄榄岩是硼矿形成的基石,但原始的“硼矿层”并不存在。本区硼镁石型硼矿的形成是后期含硼热交代富镁的超镁橄榄岩的结果。

(3) 矿石和超镁橄榄岩都是由富镁的矿物组成,早期矿石矿物(主要是遂安石、板状硼镁石)与镁橄榄石矿物之间具明显的交代残余结构、交代假象结构,矿石与超镁橄榄岩形成的条带状构造、矿石中团块状的镁橄榄岩的存在,都说明了矿石的形成来自于含硼热液对富镁橄榄岩的交代。

(4) 超镁橄榄岩在蛇纹岩化、蛇纹岩在菱镁矿化的过程中都释放大量的镁质,为硼矿的形成提供了镁质沉淀剂,这在矿石与超镁橄榄岩及其蚀变岩的主量元素含量上得到体现。本区矿石与超镁橄榄岩在微量元素上具相似性;矿石的稀土元素含量与超镁橄榄岩及其蚀变岩具一致的演化特征,均说明本区矿石的形成过程与含硼热液对超镁橄榄岩的交代过程相关。

5 结 论

后仙峪硼矿区超镁橄榄岩与硼矿在产出状态、岩石学、岩石地球化学方面显示出密切的成生关系。超镁橄榄岩不仅是硼矿的容矿岩石,而且对硼矿的形成有决定性的岩控作用。在硼矿容矿石类型研究上的突破,发现辽东硼矿的容矿岩石不仅有前人认为的镁质大理岩,而且有超镁橄榄岩,使我们进一步推断,其他富镁的岩石只要能提供镁质作为硼质的沉淀剂,在一定条件下都可成为硼矿的容矿岩石。

① 化学工业部化学矿产地质研究院,1991. 辽东—吉南地区硼矿床控矿构造研究。

Reference

- Lu Y F, Chen Y C, Li H Q, Xue C J and Chen F W. 2005. Metallogenic chronology study of boron deposits in early proterozoic rift in east Liaoning[J]. *Acta Geologica sinica*, 79(2):287.
- Cai K Q and Chen C X. 2000. Mineralization system of paleoproterozoic magnesian non-metallic deposits in eastern Liaoning Province, China[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)* 25(4):346~351 (in Chinese with English abstract).
- Chen C X, Cai K Q and Zhang S H. 2002. Characteristics of nonmetallic minerogenetic series related to magnesium-rich carbonate formations[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(6):521~526 (in Chinese with English abstract).
- Chen C X, Jiang S Y, Cai K Q and Ma B. 2003. Metallogenic conditions of magnesite and talc deposits in early proterozoic Mg-rich carbonate formations, eastern Liaoning Province[J]. *Mineral Deposits*, 22(2):166~176 (in Chinese with English abstract).
- He G P and Ye H W. 1998. Two types of early proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern liaoning and southern jilin area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2):152~162 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Wang P and Feng B Z. 1999. Mineralogy of Liaoning-Jilin boron deposits[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~150 (in Chinese).
- Jiang C C. 1987. Precambrian geology of eastern Liaoning-Jilin[M]. Shenyang: Liaoning Technological Press. 1~321 (in Chinese).
- Li C N. 1992. Petrology of igneous Trace elements[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press. 1~195 (in Chinese).
- Liu J D, Xiao R G, Wang S Z and Wang C Z. 2005. Geological characteristics and exploration of Zhuanniao borate deposit, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 14(2):126~131 (in Chinese with English abstract).
- Arndt N T and Nisbet E G. 1985. Yan B G, Wang B X and Bai W J, translated. Komatiites[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Peng Q M. 2002. The Paleoproterozoic Mg-Fe Borate Deposits Of Liaoning and Jilin Provinces, Northeast China[J]. *Econ. Geol.*, 97:93~108.
- Peng Q M and Palmer M R. 1995. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning, China: A metamorphosed evaporite[J]. *Precambrian Research*, 72:185~197.
- Peng Q M and Xu H. 1994. The paleoproterozoic metaevaporitic and boron deposits in eastern Liaoning and southern Jinan[M]. Changchun: Northeast normal university Press (in Chinese).
- Qiu J R. 1983. Igneous petrology[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~340 (in Chinese).
- Wang A P, Yao J and Cao L. 1997. Microstructure and its geologic implication of Suanite in the boron deposit on east of Liaoning Province[J]. *World Geology*, 16(4):27~30 (in Chinese with English abstract).
- Wang C W, Liu Y J and Li D T. 1997. New evidences on the correlation of liaohelitho group between the southern and the northern regions in eastern liaoning province[J]. *J. Changchun Univ. Earth Sciences* 27(1):17~24 (in Chinese with English abstract).
- Wang R M, You Z D and Fu G Q. 1988. Metamorphic petrology[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~240 (in Chinese).
- Wang S Z, Xu D D and Zhang Q. 2003. A discussion of the geology and genesis of the boron deposits in Houxianyu ore-field[J]. *Geology and Resources*, 12(4):221~227 (in Chinese with English abstract).
- Wang X B, Bao P S and Rong H. 1996. Rare earth elements geochemistry of the mantle peridotite in the ophiolite suites of china[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Supp.):24~41 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z G, Yu X Y, Zhao Z H, et al. 1989. REE Geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 1~497 (in Chinese).
- Wang X Z, Xu X Y, Wang T D, et al. 1974. The mineral composition and deposit genesis of north-east inner boron deposits[M]. Beijing: Science Press. 1~218 (in Chinese).
- Zhai Y S, Deng J, Peng Y M, et al. 2002. The metallogenic system of old continental margin[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~416 (in Chinese).
- Zhang J S. 1994. Geological characteristics and mineralization of saibelyite-type boron deposits in east liaoning[J]. *Liaoning Geology* 4:289~324 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q S. 1988. The early crust and deposits of eastern Liaoning peninsula[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 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 (doctor candidate paper)[D]. Supervisor: Feng B Z. Changchun: Changchun University of Earth Sciences. 26p.
- Zou R and Feng B Z. 1995. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning[J]. *Geochimica*, 24(Supp.):46~54 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Amdt N T and Nisbet E G. 1985. 科马提岩[M]. 颜秉纲, 王炳熙, 白文吉, 等译. 北京: 地质出版社.
- 蔡克勤, 陈从喜. 2000. 辽东古元代镁质非金属成矿系统研究[J]. *地球科学*, 25(4):346~351.
- 陈从喜, 蔡克勤, 章少华. 2002. 与镁质碳酸盐岩建造有关的非金属矿床成矿系列[J]. *地球学报*, 第23(6):521~526.
- 陈从喜, 蒋少涌, 蔡克勤, 马冰. 2003. 辽东早元古代富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿和滑石矿床成矿条件[J]. *矿床地质*, 22(2):166~176.
- 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[J]. *岩石学报*, 14(2):152~162.
- 黄作良, 王濮, 冯本智. 1999. 辽吉硼矿床矿物学[M]. 北京: 地质出版社.

- 出版社. 1~150.
- 姜春潮. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社. 1~321.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1~195.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王生志, 王翠芝. 2005. 辽宁宽甸砖庙硼矿区成矿地质特征及找矿[J]. 地质与资源, 14(2): 126~131.
- 路远发, 陈毓川, 李华芹, 薛春纪, 陈富文. 2005. 辽东古元古代裂谷中硼矿床成矿年代学研究[J]. 地质学报(英文版), 79(2): 287.
- 彭齐鸣, 许虹. 1994. 辽东-吉南地区早元古宙变质蒸发岩及硼矿床[M]. 1~122.
- 邱家骧. 1983. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社. 1~340.
- 王安平, 姚杰, 曹林. 1997. 辽东硼矿中透闪石的微结构研究及其地质意义[J]. 世界地质, 16(4): 27~30.
- 王成文, 刘永江, 李东涛. 1997. 辽河岩群南北区域对比的新证据[J]. 长春地质学院学报, 27(1): 17~24.
- 王仁民, 游振东, 富公勤. 1988. 变质岩石学[M]. 北京: 地质出版社. 1~240.
- 王生志, 徐大地, 张琦. 2003. 后仙峪硼矿区硼矿地质特征及其成因探讨[J]. 地质与资源, 12(4): 221~227.
- 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 1996. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学[J]. 岩石学报, 11(增): 24~41.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1~497.
- 王秀璋, 徐学炎, 王昕渡, 等. 1974. 东北内生硼矿床的矿物组成和矿床成因研究[M]. 北京: 科学出版社. 1~218.
- 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等. 2002. 古陆边缘成矿系统[M]. 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[J]. 辽宁地质, 4: 289~324.
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 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[学位论文][D]. 导师: 冯本智. 长春: 长春地质学院. 110页.
- 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[J]. 地球化学, 24: 46~54.