

辽宁营口后仙峪超镁橄榄岩的地质地球化学特征及其对源区的约束

王翠芝¹ 肖荣阁¹ 刘敬党^{1,2} 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)

摘要: 辽宁营口后仙峪硼矿区的超镁橄榄岩是该区硼镁石型硼矿的主要赋存岩石, 其地质地球化学特征是: ①超镁橄榄岩呈带状、透镜体状分布, 它整合于古元古代的火山-沉积岩系中的含硼岩系富镁硼酸盐岩组中。岩石几乎由镁橄榄石组成, 具有变余的火山沉积的组构。②主量元素说明岩石化学成分具富镁、富铁的特点。③非活动性微量元素较高, 如 Zr、Hf、Ta 等, 与一般超基性岩相似; Cr、Ni 含量低, 显示岩浆为非原始岩浆; Nb* 大于 1 以及 $(La/Yb)_N - (Yb)_N$ 图解均说明岩石的幔源性。④稀土元素总量为 $7.41 \times 10^{-6} \sim 46.82 \times 10^{-6}$, 与上地幔相当, 轻、重稀土分馏不太明显, 负 Eu 异常明显, 具有与纯橄榄岩一致的“V”型稀土元素分布模式。⑤ ϵ_{Nd} 为 $-7.51961 \sim -9.0654$, 亦反映出壳幔混染的特点。由地质地球化学特征可以推测岩石为经过地壳混染的地幔橄榄岩较大程度部分熔融后而残留的富镁岩石。

关键词: 超镁橄榄岩; 硼矿; 地球化学特征; 辽宁营口

中图分类号: P588.12⁵, P591² **文献标识:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)06-1246-10

辽东、吉南是中国著名的大型硼矿分布区, 该区硼矿的脉石矿物中有大量的镁橄榄石分布, 关于它的成因, 前人没有进行系统的研究, 仅是把它当成硼矿石的一种普通的脉石矿物, 王秀璋等^[1-3]认为镁橄榄岩是镁质大理岩受岩浆热液交代的结果, 大多数人认为是富硅的镁质碳酸盐岩受区域变质作用作用的产物^[3-12]。

近年来, 笔者在辽东营口后仙峪硼矿区对镁橄榄石进行了系统研究, 发现镁橄榄石并不是区域变质作用或岩浆热液交代的产物, 而是组成一种纯橄榄岩的主要矿物。因含镁格外高, 则称该岩石为超镁橄榄岩。通过对超镁橄榄岩的矿物学、岩石学、地球化学研究, 认为它属于一种超镁铁质岩, 并经历了后期区域变质作用的强烈改造。本文旨在就超镁橄榄岩地质、地球化学特征, 来探讨其对岩石形成的源区约束。

1 区域地质背景

辽东—吉南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, 西与下辽河

断陷为邻, 东到鸭绿江断裂。这一区域古元古代时期产生近南北向拉伸而形成近东西向的张裂断陷盆地——辽吉古裂谷, 接受了一套火山—沉积建造(其中的火山岩具双峰式, 有基性的斜长角闪岩, 又有酸性的火山熔岩、凝灰岩), 习惯上称之为辽河群^[13]。吕梁运动使辽吉古裂谷闭合, 辽河群发生强烈的褶皱、倒转, 形成近东西向的线性紧密复式背、向斜, 即营口—宽甸—集安台拱区, 硼矿就分布其中(图 1)。岩石普遍遭受了绿片岩相—角闪相的区域变质作用^[14]和强烈的混合岩化作用^[15]。

2 超镁橄榄岩的地质特征

2.1 超镁橄榄岩的分布、形态、产状及其与围岩、硼矿体的关系

后仙峪硼矿床位于辽宁省营口市大石桥镇南东 50 km 处^①, 受营口—宽甸—集安台拱区的虎皮峪—翁泉沟—红石砬子复背斜的次一级构造(后仙峪背斜和冯家堡向斜)控制。硼矿赋存在辽河群里尔峪组富镁硼酸盐岩组中。该岩组分为 3 个岩性阶段, 即下部混合岩段, 为条痕状角闪混合岩; 中部

收稿日期: 2006-06-28; 改回日期: 2006-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40073013)和辽宁省国土资源厅基金项目(2005)资助。

作者简介: 王翠芝, 女, 1965 年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事地质找矿科研工作; E-mail: wcuizhi@163.com。

① 化学工业部化学矿产地质研究院, 辽吉内生硼矿矿物学及找矿标志研究, 1993。

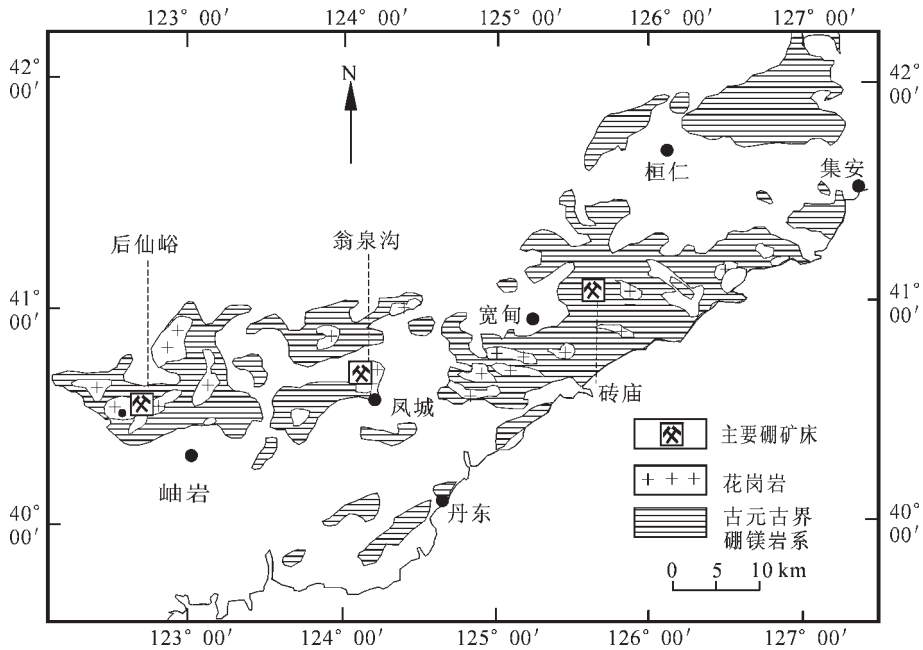


图 1 辽东吉南地区及主要硼矿区地质略图(据参考文献[3]改编)

Fig.1 Geological sketch map of the main boron district in eastern Liaoning and southern Jilin (modified from reference[3])

变粒岩段,这是赋存硼矿的岩段,为黑云变粒岩夹镁橄榄岩、菱镁矿大理岩、电气石岩;上部浅粒岩段,主要由含电气石的钠长浅粒岩组成。超镁橄榄岩呈似层状分布于黑云变粒岩段中,与菱镁矿大理岩互相过渡,与围岩整合接触,岩石厚度可达上百米,因受两期褶皱构造控制在平面上呈“W”形展布(图 2)。硼矿体呈似层状和透镜状产于超镁橄榄岩和菱镁矿大理岩中,在走向或倾向上,均有分叉、复合、收缩膨大现象。矿体与容矿镁橄榄岩的厚度成正比。

2.2 超镁橄榄岩的岩石学特征

2.2.1 矿物组成

本区的超镁橄榄岩为纯橄榄岩,主要由镁橄榄石组成,已广泛发生蛇纹石化、菱镁矿化、硼矿化。主要造岩矿物有镁橄榄石、蛇纹石、菱镁矿、金云母等,矿石矿物有透安石、硼镁石、硼镁铁矿、磁铁矿等。

2.2.2 岩石结构特征

岩石的结构可分为变余结构、变晶结构、交代充填结构。变余结构主要是在蚀变弱的超镁橄榄岩中有变余花岗结构,体现在橄榄石颗粒呈他形紧密镶嵌的近平衡结构。

变晶结构可分板状—柱状变晶结构和粒状镶嵌变晶结构。

交代结构、充填结构是岩石中最常见的组构,包括:①交代残余结构:镁橄榄石被蛇纹石交代,镁橄榄石呈孤岛状分布于蛇纹石中。②交代假像结构:蛇纹石交代镁橄榄石而保留镁橄榄石的粒状假像。③裂隙网脉状、网状结构:在弱蛇纹

石化的镁橄榄岩中,蛇纹石化以及析出的磁铁矿沿橄榄石的裂隙分布;在强蛇纹石化的镁橄榄岩中,析出磁铁矿分布于蛇纹石集合体外围,单偏光镜下,可明显看到磁铁矿呈网状,网孔可显示粒状橄榄石的外形。

2.2.3 岩石构造特征

岩石构造有变余结核状、球状构造、变余喷流角砾岩构造、变生构造。

变余结核状、球状构造:一般呈圆形、椭圆形,直径一般 1~ncm,小的称之为结核,大的称之为球粒,多由镁橄榄石组成。有些结核外围具镁质碳酸盐环带。另外,有些结核构造常与三角格架状的透安石大晶体伴生。

变余喷流角砾岩构造:表现为矿石中分布着镁橄榄岩、蛇纹岩或蛇纹石大理岩的角砾或透镜体,大小相差悬殊,从几毫米到数厘米,呈棱角状、次棱角状以及近圆形,与周围胶结物界线清楚,少数呈犬牙交错状。

变生构造:变生构造主要是指在矿化带的镁橄榄岩的构造,有两种:①挤压-剪切带中的岩石构造:条带状和似条带状构造,由纤维状硼镁石和蛇纹岩相间呈条带组成。另外,在冯家堡小型矿床中还发现另一种挤压型矿石构造,硼镁石围绕蛇纹岩构造透镜体分布。蛇纹岩构造透镜体一般长 10~20 cm,宽 5 cm 左右,定向排列,与矿体走向、倾向一致。②张裂带中的岩石构造:主要分布褶曲轴部的虚脱部位及翼部层间剪切带的虚脱空间中,由镁橄榄岩以及蚀变的蛇纹岩、金云母岩和矿石组成的角砾状构造、花斑状构造。

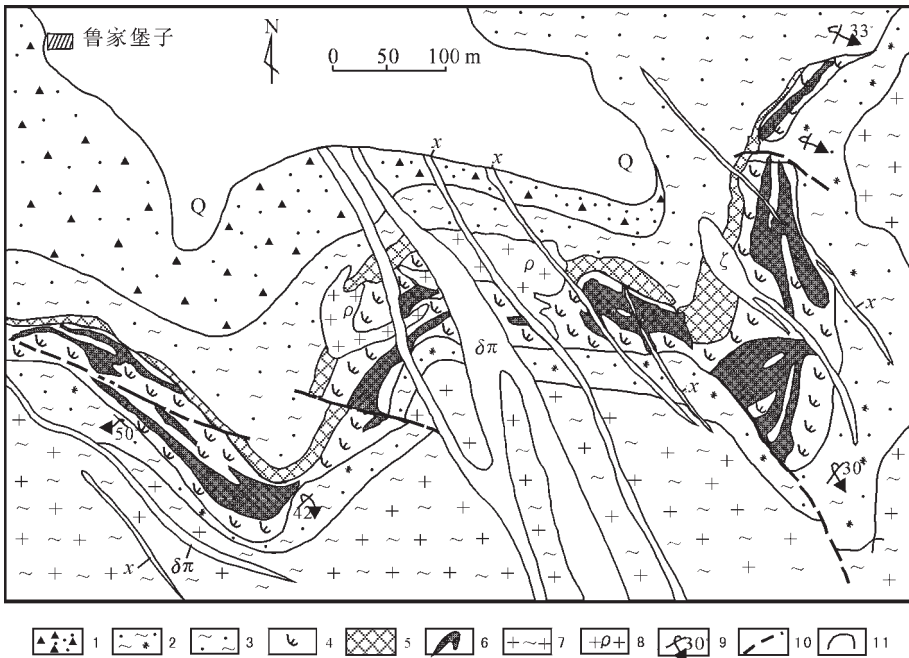


图2 后仙峪硼矿床地质略图^①

1—电气石变粒岩夹黑云变粒岩;2—浅粒岩;3—变粒岩;4—蛇纹石化镁橄榄岩及镁质大理岩;5—电英岩;6—硼矿体;7—片麻状花岗岩;
8—伟晶岩;9—地层产状;10—推测断层;11—地质界线;Q—第四系;δπ—闪长玢岩;χ—斜长煌斑岩;ξ—闪长岩

Fig.2 Geological sketch map of the Houxianyu boron deposit^①

1—Fine-grained tourmaline gneiss with fine-grained biotite gneiss;2— Fine-grained leuco-gneiss;3—Fine-grained gneiss;
4—Serpentinized magnesium peridotite and magnesium marble;5—Tourmalinite;6—Boron orebody;7—Gneissic granite;8—Pegmatite;
9—Attitude of strata;10—Inferred fault;11—Geological boundary;Q—Quaternary;δπ—Diorite-porphyrite;χ—Plagioclase lamprophyre;ξ—Diorite

3 地球化学特征

3.1 主量元素

由于岩石蚀变强烈，笔者用干组分来讨论主量元素特征(表1)。由表1的分析结果，去水、气成分后镁橄榄岩干组分具富镁、铁，而低碱(钠、钾、钙、铝都很低)的特点;SiO₂为39.60%~41.14%，平均为40.73%;MgO为50.72%~53.66%，平均为50.58%;CaO少,0.03%~0.23%;Al₂O₃低,为0.03%~0.9%;TiO₂几乎不见,仅为0.01%~0.14%;MgO/FeO分子比为14.36~21.26;Fe³⁺/Fe²⁺为0.16~0.24;m/f一般为11.47~17.08。据邱家骥^[4],可以划入超基性岩的范畴。利用(Fe₂O₃+FeO+TiO₂)—Al₂O₃—MgO图解,样品落入橄榄质科马提岩浆的范围^[15](图3)。电子探针分析结果显示本区镁橄榄石矿物化学稳定,晶体颗粒分带性不明显,Fo值为92~93。

3.2 微量元素

本区超镁橄榄岩的微量元素大部分与原始地幔相当(表1、图4),尤其是非活动微量元素,如P、Zr、Hf、Y的含量。Zr/Hf、Nb/Ta、Zr/Nb,与一般超基性岩相似(表2)。岩石又明显富集地壳中含量较高的岩浆射气元素B、F;大离子亲石元素Rb、Cs;非活动元素中的Ta、Hf;放射性元素Th、U等。

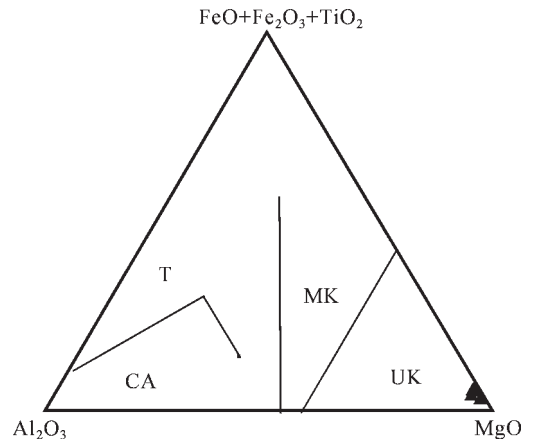


图3 超镁橄榄岩的 Fe₂O₃+FeO+TiO₂-Al₂O₃-MgO 图解^[15]
UK—超镁铁质科马提岩(橄榄质科马提岩);MK—镁铁质科马提岩(玄武质科马提岩);T—拉斑质岩石;CA—钙碱性岩石;
▲—后仙峪镁橄榄岩

Fig.3 Triangular diagram of Fe₂O₃+FeO+TiO₂-Al₂O₃-MgO of super-magnesium peridotite^[15]

UK—ultramafic komatiite (peridotitic komatiite);MK—mafic komatiite (basaltic komatiite);T—tholeiitic rock;CA—calc-alkaline rock;
▲—Houxianyu super- magnesium peridotite

①全国矿产储量委员会. 硼矿床勘探类型实例附图,1987.

表 1 后仙峪硼矿区超镁橄辉岩的主量元素、微量元素、稀土元素分析及 CaO/Al₂O₃、Na₂O + K₂O 的值
Table 1 Major, trace and REE analysis and values of CaO/Al₂O₃ and Na₂O+K₂O of super-magnesium peridotite in the Houxiannyu boron deposit

样品号	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	H ₂ O ⁺	CO ₂	总量	CaO/Al ₂ O ₃	Na ₂ O+K ₂ O					
WY13	38.62	0.14	0.03	1.58	6.02	48.87	0.12	0.18	0.01	0.158	0.021	0.615	3.20	0.59	100.13	4.00	0.19					
WY20	39.05	0.01	0.85	1.23	5.78	46.59	0.10	0.16	0.53	0.147	0.011	0.458	4.28	1.08	100.28	0.12	0.69					
WY21	41.43	0.04	0.08	1.04	5.77	46.52	0.14	0.25	0.01	0.150	0.030	0.401	3.24	0.72	99.81	1.75	0.26					
WY22	37.65	0.06	0.01	1.21	6.00	48.36	0.03	0.16	0.01	0.156	0.010	1.371	3.83	0.50	99.36	3.00	0.19					
WY33	33.36	0.05	0.20	1.04	3.79	45.21	0.19	0.12	0.01	0.110	0.020	0.148	10.55	4.53	99.33	0.95	0.13					
平均值	38.02	0.06	0.23	1.22	5.47	47.11	0.12	0.17	0.11	0.144	0.018	0.599	5.02	1.48	99.78	1.96	0.28					
样品号	Li	Be	B	F	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cd	Ba	Hf	Ta	Th	U	
WY13	6.15	0.10	1818.00	1740.92	91.58	1914.80	194.90	86.35	12.72	32.28	0.53	2.50	8.30	83.60	20.78	39.30	0.40	16.00	2.45	1.67	3.79	1.72
WY20	7.75	0.47	1354.00	2379.42	11.32	102.10	20.50	12.32	12.09	33.63	2.72	65.80	7.30	9.60	5.76	24.80	8.17	16.00	0.25	0.46	4.96	0.26
WY21	5.87	0.07	1247.00	1591.90	40.87	585.90	64.60	31.90	11.38	29.12	0.29	2.10	8.10	18.70	9.54	30.80	0.48	<5.00	0.55	0.70	17.58	9.79
WY22	5.11	0.06	4094.00	1455.48	47.21	805.90	88.60	60.17	11.28	28.79	0.25	3.10	6.00	29.60	13.21	36.40	0.32	<5.00	0.87	1.11	0.63	0.22
WY33	13.52	0.27	458.97	6047.47	9.99	612.00	48.60	14.52	7.33	9.31	0.77	2.60	8.10	14.90	6.56	45.80	0.26	<5.00	0.39	0.56	1.86	0.23
平均值	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	1.92	9.4	0.90	0.90	5.76	2.45
样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
WY13	0.981	2.781	0.431	2.076	0.636	0.048	0.704	0.141	0.863	0.218	0.907	0.244	2.539	0.794								
WY20	1.701	3.766	0.464	1.829	0.345	0.034	0.368	0.064	0.427	0.103	0.397	0.105	0.995	0.282								
WY21	1.117	3.698	0.565	2.931	0.895	0.075	1.011	0.206	1.315	0.286	0.988	0.195	1.703	0.455								
WY22	0.324	0.863	0.110	0.480	0.117	0.015	0.151	0.032	0.236	0.067	0.354	0.121	1.445	0.480								
WY33	3.466	8.044	1.144	5.250	1.317	0.065	1.554	0.324	2.614	0.635	2.275	0.477	3.653	0.770								
平均值	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								

注:由中国地质科学院地球物理地球化学研究所分析;分析方法: XRF(主量元素)、ICP-MS(微量、稀土元素);主量元素单位为%,微量、稀土元素为 10⁻⁶。

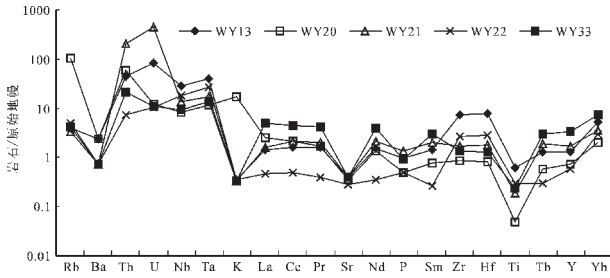


图4 超镁橄榄岩原始地幔标准化微量元素分布模式
Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element patterns for super-magnesium peridotites

表2 部分非活动微量元素在各类岩石中的丰度 (10⁻⁶)
Table 2 Abundance of part of inactive trace elements in various types of rocks (10⁻⁶)

岩石类型	Zr	Hf	Nb	Ta	Sc	Ti	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Nb
超基性岩 ^[16]	45	0.6	16	1	15	300	75	16	2.81
基性岩 ^[16]	140	2	19	1.1	30	13800	70	17.3	7.37
闪长岩 ^[16]	280	5	3.6	0.7	2.5	8000	56	5.1	77.78
花岗岩 ^[16]	200	4	21	4.2	3	2300	50	5	9.52
碱性岩 ^[16]	495	48	310	0.8			44	388	1.60
研究区	31	0.9	11	0.9	40	804	35	12.44	2.82

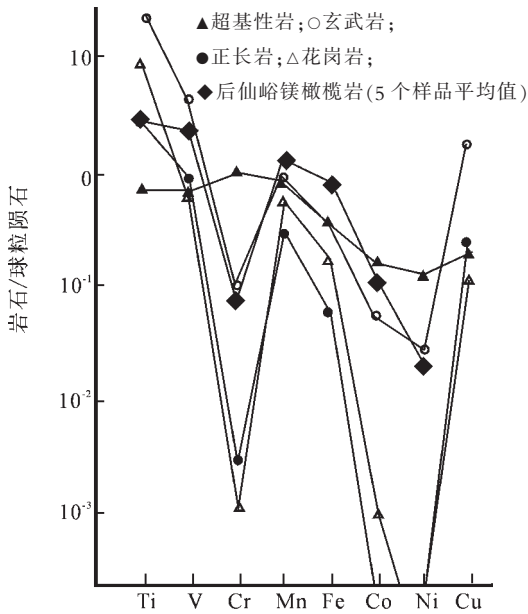


图5 不同火成岩中过渡元素球粒陨石标准化的分配型式^[16]
Fig.5 Chondrite-normalized transitional element patterns for different types of igneous rocks^[16]

相对亏损 Cr 和 Ni 等亲硫元素(图5)。由本区微量元素的特点可推测,本区超镁橄榄岩的形成过程是非常复杂的,既有幔

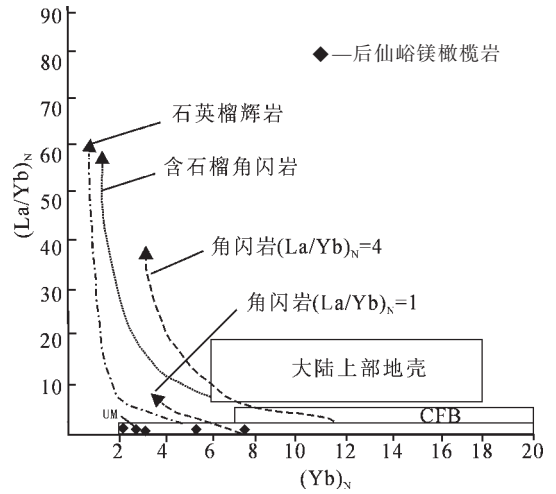


图6 镁橄榄岩的(La/Yb)_N—(Yb)_N图解^[18]

UM—上地幔;CFB—洋壳
Fig.6 (La/Yb)_N—(Yb)_N diagram of super-magnesium eridotite^[18]
UM—upper mantle;CFB—oceanic crust

源的超基性岩的特征,又有在地壳中一般较富集元素的特点。

Alligre 等(1973)在研究了地球上主要岩石过渡族元素球粒陨石标准化的分配型式后发现,从超基性的橄榄岩到酸性花岗岩,其分配型式更趋“W”的形状^[16]。本区岩石的过渡元素分配型式与玄武岩相似(图5),Cr、Ni 相对一般超基性岩来说较低,相对原始岩浆(Cr>1000×10⁻⁶,Ni>400×10⁻⁶~500×10⁻⁶)^[17]更低。

5个超镁橄榄岩的 Nb* (Nb* = NbN / [(K_N + La_N / 2])) 有4个大于1,只有 WY20 的 Nb* < 1(可能与其强烈金云母化有关),据李昌年^[9]的研究,本区超镁橄榄岩为幔源,这与 (La/Yb)_N—(Yb)_N 图解所揭示的岩石的幔源性是一致的^[18](图6)。

3.3 稀土元素

超镁橄榄岩稀土总量为 7.41×10⁻⁶~46.82×10⁻⁶, 平均为 21×10⁻⁶, LREE/HREE 为 0.66~2.97, La/Lu 为 0.072~0.646, 稀土配分形式为轻稀土弱亏损型, (La/Sm)_N 为 1.930, (La/Yb)_N 为 0.529, 负 Eu 异常明显。研究区超镁橄榄岩与阿尔卑斯型的地幔橄榄岩的“U”或“V”型的稀土元素分布模式^[16, 19-22]和低 Ti 的科马提岩^[23]相似,但稀土总量较高(图7~8)。

3.4 同位素

本次研究利用超镁橄榄岩的全岩样进行了 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年工作。由于超镁橄榄岩普遍发生蛇纹石化、碳酸盐岩化、硼镁石化等蚀变,获得的数据点较离散,未能获得等值线年龄。从 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值来看,数据值域变化范围大 (0.511626~0.512300), ε_{Nd} 为 -7.51961~9.0654, 说明本区幔源物质形成受到强烈的地壳混染。

4 讨论

由本区超镁橄榄岩与围岩的整合接触关系可以推测它为一透镜状地质体。岩石几乎全部由镁橄榄石组成,成分单

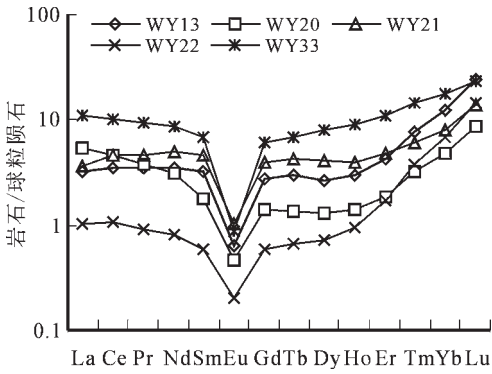


图 7 超镁橄榄岩的稀土元素分配图

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns for super-magnesium peridotite

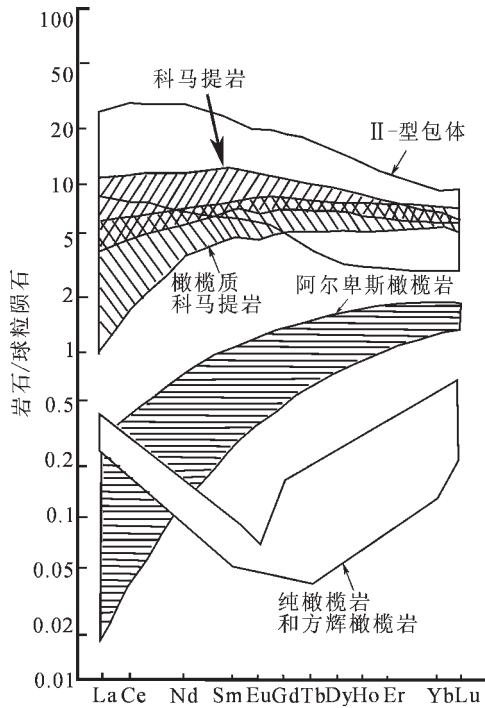


图 8 科马提岩与阿尔卑斯橄榄岩稀土分配图^[6]

Fig.8 REE distribution patterns for komatiite and Alpine peridotites^[6]

一,矿物颗粒一般纯净,见不到碳酸盐矿物或其他矿物以及杂质的被交代的残留体,颗粒之间界线清楚,显然镁橄榄石晶体不是交代其他矿物而形成的变斑晶,再结合岩石厚达百米,可推测岩石应为岩浆岩(因为区域变质作用不可能使含硅的碳酸盐岩变成厚达百米的纯橄榄岩;岩浆交代作用也不可能形成如此厚的纯橄榄岩)。岩石结构主要为镶嵌粒状变

晶结构,局部具板柱状、带状变晶结构和具平衡点的细粒结构,说明岩石的结构主要为岩浆岩的堆晶结构,在其形成之后又发生过强烈的变形和动态重结晶作用。相对一般火成岩而言,岩石 SiO₂ 含量较低,平均 40.73%;MgO 高,平均 50.58%;CaO 少,为 0.13%;Al₂O₃ 低,只有 0.25%;TiO₂ 几乎不见,仅为 0.06%,可以划入超基性岩的范畴。MgO/FeO 分子比为 14.36~21.26,m/f 一般为 11.47~17.08,据邱家骧^[4]的研究,岩石应属于镁质超基性岩结晶的产物(MgO/FeO 分子比大,一般大于 6~7),而不可能是玄武岩浆分异的产物(MgO/FeO 分子比小,一般小于 7)。岩石 Fe³⁺/Fe²⁺ 较低(0.16~0.24),其 Fe₂O₃/FeO 比值为 0.08~0.12,远比基性岩的 Fe₂O₃/FeO 的平均值 0.54 低得多,也比典型的东格陵兰斯盖嘎辉长岩体的 Fe₂O₃/FeO(0.16~0.25)低,这说明岩体是在处于构造封闭的强还原条件下形成的^[2]。由于岩石 Mg[#] 较高,为 0.84~0.88,Fo 为 92~93,比较稳定,且晶体分带性不明显,可显示岩石难熔性较大,从而可推测岩石具有来自地幔岩深度熔融后难熔残余相的可能性。

本区岩石的稀土元素显示与阿尔卑斯地幔纯橄榄岩一致的“V”型稀土分配模式,可能是部分熔融程度较大时富含稀土元素的主要矿物相(石榴子石、单斜辉石等)已全部进入熔体,从而导致残余相稀土元素总量和轻稀土亏损。但相对阿尔卑斯地幔纯橄榄岩而言,本区超镁橄榄岩的稀土总量较高,可能与本区岩石的蛇纹石化和强烈的地壳物质混染有关(包括富硼、氟、硅流体的交代)。

微量元素中非活动元素具幔源特征,活动元素又富集地壳中常有的元素,同位素显示幔壳混染的特点。说明岩石来源于地幔,又受到地壳物质的改造。但岩石的 Cr、Ni 含量较低,平均值分别为 41×10⁻⁶ 和 26.6×10⁻⁶,这种特征似乎与幔源的一般超基性岩富集 Cr、Ni 等相容微量元素的特征相悖。主要元素的难熔性和 REE 的“V”模式,不难得出岩石并非来自原始岩浆,可能来自经过熔融程度较大地幔岩的残余相的重熔岩浆。

Niu 等(1997)通过对现代大洋的地幔橄榄岩和玄武岩的研究发现,地幔橄榄岩和玄武岩不是简单的互补关系,即玄武岩浆均不是原始岩浆,而是原始岩浆在上升过程中经过了分离结晶作用形成的产物。在工作区也的确发现在镁橄榄岩层上部有斜长角闪岩层,一般 6~10 m,其中富含 V、Cr、Ni、Co、Cu 等亲硫元素,其含量与原始地幔相似。姜春潮^[1]、王培君^①等人对矿区的正变质成因的斜长角闪岩进行过原岩恢复,认为属于拉斑玄武岩。实验证明,成分同超基性岩相似的熔体可以溶解百分之几的 FeS,硫化物液相熔离的温度在 1 600~1 000℃。当含有大约 n% 的 FeS 的超基性岩岩浆开始结晶时,首先晶出的是镁橄榄石,随着 Mg 的消耗,熔浆中 Ca、SiO₂、碱的成分增高,FeS 的溶解度降低,终致使 FeS 等硫化物呈单独液相从硅酸盐熔体中分离出来。硫化物相从硅酸

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

盐熔体中的熔离,使岩浆中的亲硫元素集中于硫化物熔体相中,如 Fe、Cu、Ni、Co、Mo、Ag、Pt 等^[24]。这样在相应的硅酸盐熔体中,这些亲硫元素的含量就减少,硫化物愈多、岩浆分异度愈大,硅酸盐熔体中的这些亲硫元素愈少。那么在辽东硼矿区镁橄辉岩分布区是否有富铁、铜等硫化物相存在?

王秀璋等人^[2]在研究东北内生硼矿时,在包括后仙峪硼矿区内的许多硼矿区内发现大量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物。曹德成^[1]在研究辽东丹东硼矿时发现,在与本区相同层位的里尔峪组硼矿层上部为铁、铜(钴)硫化物的变粒岩建造。据最近野外工作,在超镁橄辉岩顶部发现大量具熔离结构的硼镁铁矿和镍黄铁矿。

为了进一步了解镁橄辉岩的成因,将之与临区的毗芦寺超基性杂岩和北秦岭松树沟两类不同成因的纯橄辉岩(地幔岩部分熔融的残余相和堆晶岩)进行了对比,发现它们之间有许多相同之处。陈树良系统研究了辽东地区古元古代构造岩浆大陆动力学演化规律,将辽东古元古代的岩浆划分为造山前、造山期和造山后 3 种构造环境下的岩浆岩。根据 Ni-Ce 之间的相关关系,本区超镁橄辉岩的特征可与陈树良所划分造山前的侵喷超基性-基性杂岩中的毗芦寺超基性杂岩相似^[18](图 9),应属于造山前的产物。将本区镁橄辉岩、斜长角闪岩、毗芦寺超基性杂岩与张泽军^[25]研究的北秦岭松树沟超镁铁质中的两种纯橄辉岩(地幔橄辉岩和堆晶橄辉岩)相比,在 La/Sm-La 变异图(图 10)上呈显:本区超镁橄辉与斜长角闪岩分布的趋势与原始地幔分异线基本平行,超镁橄辉岩落在与松树沟堆晶橄辉岩大体一致的区域,而斜长角闪岩落在近似与松树沟的斜长角闪岩相同的位置,只是 La/Sm 稍高一点。据张泽军分析,松树沟的斜长角闪岩是地幔橄辉岩近 30%部分熔融的拉斑玄武岩岩浆形成的,地幔橄辉岩(A)为残余相;堆晶橄辉岩(B)是残余相的地幔橄辉岩(A)再次熔融(<20%)而形成的富铁低铝低碱的麦美奇岩浆或科马提岩浆结晶而成的。本区由于没有找到明显的具残余结构的地幔橄辉岩,其熔融程度还不便与之对比。

为了解形成本区超镁橄辉岩的原始地幔的熔融程度,将之与 C.R.L.Friend 等^[24]所研究的 Southern West Greenland 的大于 3 800 Ma 的深成橄辉岩中的地幔岩残余相——纯橄辉岩的进行了对比。结果发现两者有着惊人的相似,矿物成分几乎都是镁橄辉石,晶体颗粒分带性不明显, Fo 相近,只是本区的 Fo 稍高 1%~2%;主量元素含量基本一致, Mg/Si~Al/Si 协同变化图上分布具同一趋势(图 11)。另外,两者微量元素特征相似,稀土元素配分模式相同, LREE 略显亏损,负 Eu 明显,只是本区的负 Eu 异常稍大些,说明本区的岩石是经过比 Southern West Greenland 的地幔橄辉的熔融程度(<20%)更大的富镁的残余相。

因些,笔者推测本区的超镁橄辉岩可能是地幔岩经过较大程度的部分熔融(可能近 30%),分离出的拉斑玄武岩浆,

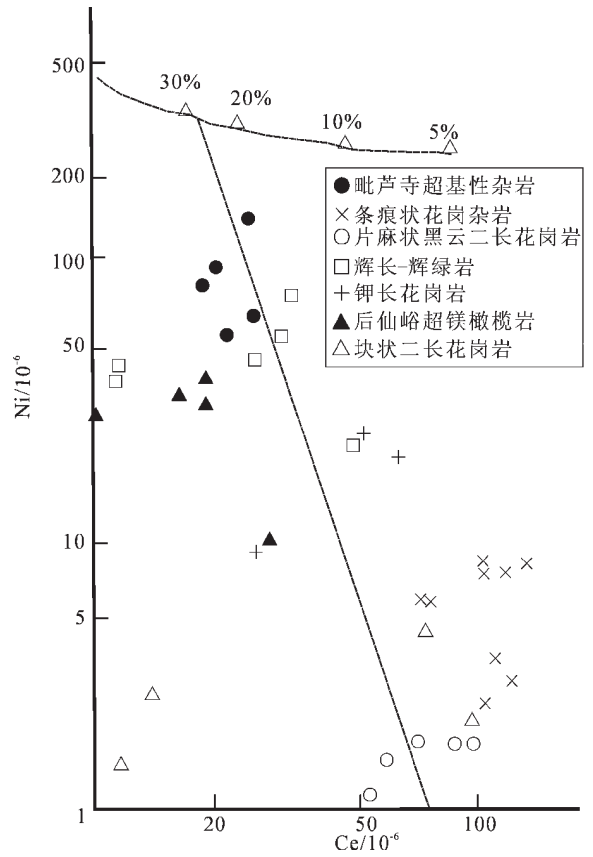


图 9 后仙峪超镁橄辉岩、斜长角闪岩与毗芦寺超基性杂岩的 Ni-Ce 变异对比图^[18]

Fig.9 Comparison diagram of Ni-Ce variations of super-magnesium peridotite and amphibolite in the Houxianyu area with the Pilusi ultramafic complex^[18]

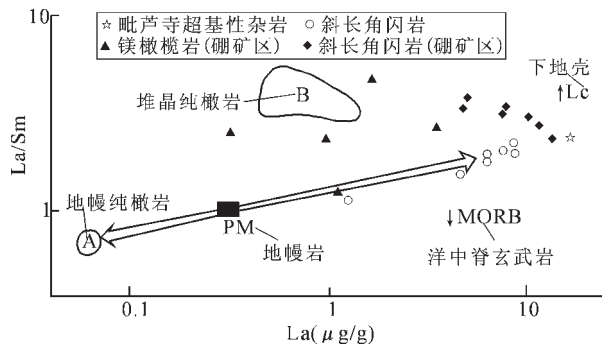


图 10 后仙峪超镁橄辉岩、斜长角闪岩与毗芦寺超基性杂岩、北秦岭松树沟两类纯橄辉岩的 La/Sm-La 变异对比图^[25]

Fig.10 Comparison diagram of (La/Sm)-La variations of super-magnesium peridotite and amphibolite in the Houxianyu area with the Pilusi ultramafic complex and Songshugou dunites in the North Qinling^[25]

① 中国地质调查局. 辽吉地区地质与成矿研讨会论文集, 2001.

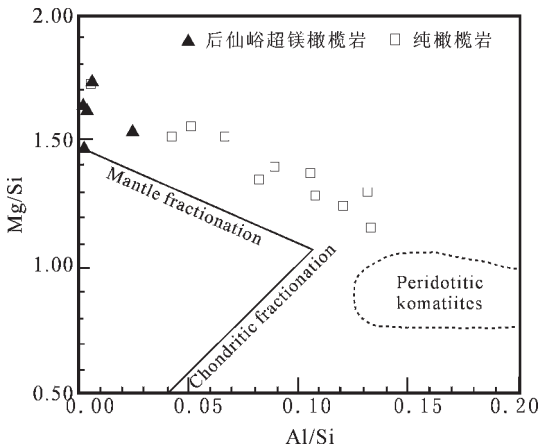


图 11 超镁橄榄岩 Mg/Si-Al/Si 协同变化图
(据 C.R.L.Friend,2002)

Fig.11 Mg/Si-Al/Si covariation diagram of super-magnesium peridotite (after Friend, 2002)

残余相富镁的地幔橄榄岩在后期又发生重熔,分离出富镁、低铝的科马提岩浆,在裂谷环境上海相喷发成岩,其在后期的区域变质作用和混合岩化过程发生变形变质作用。

5 结论

(1)岩石形成大地构造环境、岩石地质产状、岩石结构构造,说明岩石为裂谷环境下喷出的火山岩。岩石矿物组合稳定、单一,岩石化学富 MgO,贫铝、钙、碱的特点,m/f 较高,其来源可能是熔融程度较高的地幔残余物质。

(2)岩石虽然经过强烈的蚀变,岩石的抗后期地质事件的特征的情性元素仍可与典型的超基性岩相似,具有幔源特点;活动元素中既有大离子亲石元素、亲气元素,又有生热元素;Cr、Ni 较低,区内又有含硫化物相的大量存在,说明岩石形成于非原始岩浆;稀土元素总量低,负异常明显,说明岩浆经历了复杂的演化过程; ϵ_{Nd} 为-7.51961~9.0654,这些特征都体现了本区岩石的形成先后经过 3 个过程,先是经历较强程度的部分熔融,分离出拉斑玄武岩;后又经历重熔,形成富镁低铝的科马提岩质的岩浆;在区域变质、混合岩化过程又遭受多次变形、变质和富硼、氟、硅流体的改造。

(3)本区的超镁橄榄岩与斜长角闪岩以及临区的侵喷超基性-基性杂岩中的毗芦寺超基性杂岩有密切的成生联系,共同反映地幔橄榄岩的熔融过程,同属同一构造环境下的产物。本区的超镁橄榄岩与北秦岭松树沟纯橄榄岩、Southern West Greenland 的深成橄榄岩中的纯橄榄岩相似,都是地幔橄榄岩部分熔融较大时的富镁残余物质,不过本区岩石形成过程更复杂。

参考文献(References):

[1] 王秀璋.内生硼镁石及内生镁铁硼酸盐矿物形成条件的讨论[J].地

质科学,1995,2:157~171.

- Wang Xiuzhang. The discussion of forming condition of endogenous saibelyite and femic borate minerals [J]. Scientia Geologica Sinica,1995,2:157~171(in Chinese with English abstract).
- [2] 中国科学院贵阳地球化学研究所,地质研究所.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,1974. Guiyang Geochemical Research Institute and Geological Institute. The Mineral Composition and Deposit Genesis of North-east Inner Boron Deposits[M]. Beijing: Science Press,1974(in Chinese).
- [3] 张秋生.辽东半岛早期地壳与矿床[M].北京:地质出版社,1988. Zhang Qiusheng. The Early Crust and Deposits of Eastern Liaoning Peninsula[M]. Beijing: Geological Publishing House,1988 (in Chinese).
- [4] 姜春潮.辽吉东部前寒武纪地质[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1987. Jiang Chunchao. Precambrian Geology of Eastern Liaoning-Jilin[M]. Shenyang: Liaoning Technological Press,1987(in Chinese).
- [5] 冯本智,邹日.辽宁营口后仙峪硼矿床特征及成因[J].地学前缘,1994,1(3-4):234~237. Feng Benzhi, Zou Ri. The features and genesis of Houxianyu boron deposits,Yingkou, Liaoning[J]. Earth Science Frontiers,1994,1(3-4): 234~237(in Chinese with English abstract).
- [6] 邹日,冯本智.营口后仙峪硼矿容矿火山-热水沉积岩系特征[J].地球化学,1995,24(增刊):46~54. Zou Ri, Feng Benzhi. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits. Yingkou, Liaoning[J]. Geochimica,1995,24(supp.):46~54(in Chinese with English abstract).
- [7] 冯本智,卢静文,邹日,等.中国辽吉地区早元古代大型-超大型硼矿床的形成条件[J].长春科技大学学报,1998,28(1):1~15. Feng Benzhi, Lu Jingwen, Zou Ri, et al. Ore-forming conditions for the early proterozoic large-superlarge boron deposits in liaoning and Jilin Provinces, China [J]. Journal of Changchun University of Science and Technoly, 1998,28 (1):1~15 (in Chinese with English abstract).
- [8] 彭齐鸣,许虹.辽东-吉南地区早元古宙变质蒸发岩及硼矿床[M].长春:东北师范大学出版社,1994. Peng Qiming, Xu Hong. The Paleoproterozoic Metaevaporitic and Boron Deposits in Eastern Liaoning and Southern Jinan [M]. Changchun: Northeast Normal University Press,1994(in Chinese).
- [9] Peng Qiming. The Paleoterozoic Mg-Fe borate deposits of Liaoning and Jilin Provinces,Northeast China[J]. Economic Geology,2002,97: 93~108.
- [10] Peng Q M, Palmer M R. The Paleoproterozoic boron deposits in eastern Liaoning,China;a metamorphosed evaporite[J].Precambrian Research,1995,72:185~197.
- [11] 许虹,彭齐鸣, Martin R. Palmer. 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)[J].中国地质,2004,31(3): 240~253. Xu Hong, Peng Qiming, Martin R. Palmer. Origin of tourmaline-rich rocks in a paleoproterozoic terrene (N. E. China)

- evidence for evaporite-derived boron [J]. *Geology in China*, 2004,31(3):240~253(in English).
- [12] 黄作良, 王濮, 冯本智. 辽吉硼矿床矿物学[M]. 北京:地质出版社,1999.
Huang Zuoliang, Wang Pu, Feng Beizhi. Mineralogy of Liaoning-Jilin Boron Deposits [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [13] 王成文, 刘永江, 李东涛. 辽河岩群南北区域对比的新证据[J]. 长春地质学院学报, 1997,27(1):17~24.
Wang Chengwen, Liu Yongjiang, Li Dongtao. New evidences on the correlation of Liaohelitho Group between the southern and the northern regions in eastern Liaoning Province [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1997,27 (1):17~24 (in Chinese with English abstract).
- [14] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社,1983.
Qiu Jiarang. Igneous petrology[M]. Beijing:Geological Publishing House,1993(in Chinese).
- [15] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989.
Wang zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, et al. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing:Science Press,1989(in Chinese).
- [16] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992.
Li Changnian. Petrology of Igneous Trace Elements[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press,1992(in Chinese).
- [17] 张招崇, 毛景文, 杨建民, 等. 北祁连熬油沟蛇绿岩岩石成因的地球化学证据[J]. 地质学报, 1998,72(1):42~51.
Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Yang Jianmin, et al. Geochemical evidence on the petrogenesis of the Aoyougou ophiolite in north Qilian mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998,72(1):42~51(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈树良, 郇彦清, 郇志波. 辽东地区古元古代侵入岩特征及构造岩浆大陆动力学演化[J]. 辽宁地质, 2001,18(1):43~51.
Chen Shuliang, Huan Yanqing, Bing Zhibo.Characteristics of Paleoproterozoic intrusive rocks and continental dynamic evolution pattern of tectonomagma in east Liaoning [J]. *Liaoning Geology*, 2001,18(1):43~51(in Chinese with English abstract).
- [19] Amdt N T, Nisbet E G. 颜秉纲, 王炳熙, 白文吉,等译.Komatiites [M]. 北京:地质出版社,1985.
Arndt N T, Nisbet E G. Komatiites (Chinese translation by Yan Binggang, Wang Bingxi, Bai Wenji, et al).[M]. Beijing:Geological Publishing House,1985(in Chinese).
- [20] 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 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, 1996,11(增刊):24~41.
Wang Xibin, Bao Peisheng, Rong He. Rare earth elements geochemistry of the mantle peridotite in the ophiolite suites of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996,11(supp.):24~41(in Chinese with English abstract).
- [21] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 青藏高原西部蛇绿岩类型:岩石学与地球化学证据[J]. 地学前缘, 2005,12(5):277~291.
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou Su, et al. Ophiolite types in western Qinghai-Tibetan plateau:Evidences from petrology and geochemistry [J]. *Earth Science Frontiers*. 2005,12 (2):277~291(in Chinese with English abstract).
- [22] 董显扬, 李行, 叶良和, 等. 中国超镁铁质岩[M]. 北京:地质出版社,1995.
Dong Xianyang, Li Xing, Ye Lianghe, et al. China Ultramafic Rocks[M]. Beijing:Geological Publishing House,1995(in Chinese).
- [23] Hugh Rollinson. Petrology and geochemistry of metamorphosed komatiites and basalts from the Sula Mountains greenstone belt, Sierra Leone[J]. *Contrib Mineral Petrol*,1999,134:86~101.
- [24] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 地质出版社,1988.
Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House,1988(in Chinese).
- [25] 张泽军. 北秦岭松树沟超镁铁质岩中两类不同成因的纯橄榄岩[J]. 岩石学报, 1995,11(增刊):178~189.
Zhang Zejun. The genesis of dunite in the Songsugou ultramafic rock body, North Qinling [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995,11(supp): 178~189.
- [26] Friend C R, Bennett V C, Numan A P. Abyssal peridotites>3800 Ma from southern west Greenland;field relationships,petrography, geochronology,whole-rock and mineral chemistry of dunite and harzburgite inclusions in the ltsaq gneiss complex [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002,143:71~92.

Geochemistry of super-magnesium peridotite in the Houxianyu boron deposit, Yingkou, Liaoning, and its constraints on the source region

WANG Cui-zhi¹, XIAO Rong-ge¹, LIU Jing-dang^{1,2}, ZOU Hong-chun¹, LIU Jing-qing¹

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

2. Liaoning Geological Survey for Chemical Industry, Jingzhou 121000, Liaoning, China)

Abstract: Super-magnesium peridotite is the main host rock of boromagnesite ore in the Houxianyu boron deposit, Yingkou, Liaoning Province. The geological and geochemical characteristics of the rock are as follows: ① The rock occurs as concordant belts and lenses in magnesium-rich borate rocks of a boron-bearing rock sequence of the Paleoproterozoic volcano-sedimentary rock series, and is almost all made up of forsterite and has a blastic exhalative-sedimentary fabric. ② The major elements indicate that the rock is rich in magnesium and iron. ③ Inactive trace elements such as Zr, Hf and Ta are rich, which is similar to the case of typical ultramafic rocks; the lower contents of Cr and Ni suggest a non-primitive magma, and $Nb^* > 1$ and the (La/Yb)_N-(Yb)_N diagram both indicate a mantle origin for the rock. ④ The total REE content ranges from 7.41×10^{-6} to 46.82×10^{-6} , being similar to that of the upper mantle; the fractionation of LREE and HREE is not pronounced, with a pronounced negative Eu anomaly; and the chondrite-normalized REE patterns of the rock are “v”-shaped, being similar to those of dunite. ⑤ The values of ϵ_{Nd} range from -7.51961 to 9.0654, which indicates the feature of mixing of the mantle and crust. From the above-mentioned geological and geochemical characteristics, it may be inferred that the rock is magnesium-rich rock left after relatively high degrees of partial melting of mantle peridotite contaminated by the crust.

Key words: super-magnesium peridotite; boron deposit; geochemical characteristics; Liaoning

About the first author: WANG Cui-zhi, female, born in 1965, Ph.D candidate and senior engineer, specializes in mineral deposits; E-mail: wcuizhi@163.com.