

辽宁营口蛇纹石玉成因分析

王长秋, 叶立金

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 辽宁营口大石桥后仙峪硼矿区是蛇纹石玉的一个新产地, 产出的营口玉具色深、富镁、高铁等特征。本文通过对该玉石的岩石学、岩石化学及地球化学特征分析, 结合大地构造背景、定年数据、MgO-SiO₂-H₂O体系实验结果等, 探讨了营口玉的成矿过程。认为其原岩是镁橄榄岩和镁质碳酸岩, 并且受到混合岩化后期热液的交代, 其主成矿期在1.95~1.85 Ga之间, 成矿压力接近 $500 \times 10^5 \sim 2\,000 \times 10^5$ Pa, 成矿温度在400~250°C之间, 营口玉玉矿是中温变质热液交代矿床。

关键词: 辽宁后仙峪, 营口玉, 蛇纹石, 矿床成因

中图分类号: P619.28⁺3; P578.964

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0397-10

A genetic analysis of the Yingkou serpentine jade deposit in Liaoning Province

WANG Chang-qiu and YE Li-jin

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Houxianyu boron ore district in Yingkou of Liaoning Province is a new producing area of serpentine jades, in which Yingkou jades display the characteristics of rich Mg, high Fe and dark color. In this paper, the metallogenic process of the Yingkou jade is discussed based on an analysis of petrology, petrochemistry and geochemistry of the jades, in combination with the geotectonic background, data of dating and the experimental results of the MgO-SiO₂-H₂O system. The results show that the protolith was magnesium peridotite and carbonatite which was replaced by metamorphic hydrothermal fluid from granitization granite. It is held that the serpentine jade deposit was mainly formed during 1.95~1.85 Ga, with the pressure close to $500 \times 10^5 \sim 2\,000 \times 10^5$ Pa and temperature 400~250°C, suggesting that it is a mesothermal metamorphic hydrothermal metasomatic deposit.

Key words: Houxianyu in Liaoning; Yingkou Jade; serpentine; deposit genesis

辽宁营口大石桥是我国著名的硼矿、菱镁矿产区。近年来,在大石桥市后仙峪矿区发现了较大储量的蛇纹石玉,市场上也已见有由营口蛇纹石玉雕刻成的饰品或摆件。已有的研究提出,营口大石桥后仙峪蛇纹石玉,特称为“营口玉”,并依据颜色、透明度、质地等外观特征将其分为翠绿玉、墨绿玉、青铜玉和云翠玉4个基本类型(王长秋等,2011)。营口

玉产出的地质特征、矿物学特征、宝石学特征及其红外发射功能和负离子释放功能等也有了初步研究(郝志波等,2006;王时麒等,2007a;王长秋等,2011;周维卫等,2011a,2011b),但是正如该区硼矿的形成存在不同观点一样(刘敬党等,2007),对于该蛇纹石玉的成因,也存在不同的认识。本文通过对营口玉的岩石学、地球化学特征的研究,分析探讨营口玉

的成因。

1 矿区地质特征

营口玉产于辽宁省营口市后仙峪一个历史悠久的大型硼矿产区。大地构造上位于中朝准地台胶辽台隆营口-宽甸台拱的虎皮峪复背斜南翼(邢志波等, 2006) (图 1)。区域出露的地层主要为下元古界辽河群变质岩系, 由浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组地层组成。地层倒转, 里尔峪组上部为赋矿层位, 该组地层由下至上(由新至老) 分为:

(1) 变粒岩段: 由电气石变粒岩、黑云电气变粒岩、黑云变粒岩组成, 含少量黑云母片麻岩, 原岩是一套中酸性火山岩-沉积岩建造, 经历了铁铝榴石角

闪岩相区域变质作用(刘敬党等, 2007)。

(2) 镁橄榄岩、镁质大理岩段: 是玉矿的容矿层, 普遍蛇纹石化。镁橄榄岩和镁质大理岩呈层状产出, 二者空间上或共生相互包容, 或独立产出, 其原岩是古元古代海底喷发的由超镁质岩浆分异形成的镁橄榄岩和镁质碳酸岩(刘敬党等, 2007)。

(3) 黑云变粒岩段: 岩性为黑云变粒岩, 夹少量透闪石浅粒岩, 原岩为火山岩-沉积岩建造。

(4) 层状混合岩段: 由花岗质混合岩组成, 部分含角闪石。位于矿化层和黑云变粒岩的上部和褶皱核部, 与变粒岩呈整合接触和连续过渡(刘敬党等, 2005)。

矿区主要构造为后仙峪翻转向斜, 轴向 $130^{\circ} \sim 135^{\circ}$, 玉矿体位于转折端, 与硼矿共生。营口玉矿体赋存于镁橄榄岩和镁质大理岩中, 与后仙峪硼矿相伴共生, 位于层状混合岩之下。

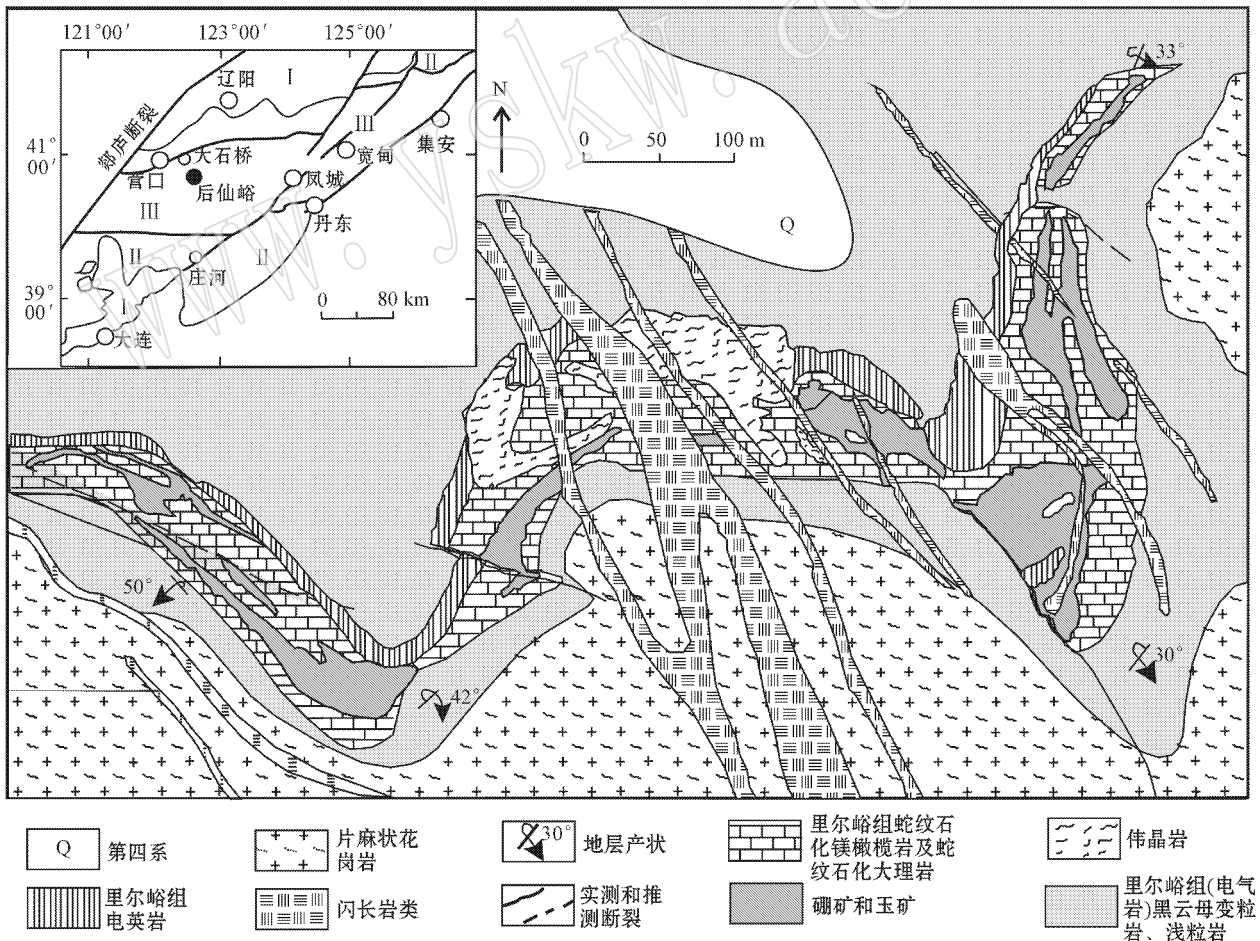


图 1 辽宁后仙峪蛇纹石玉矿区地质简图 [据邹日等(1995) 修编]

Fig. 1 Geological sketch map of serpentine jade deposits in Houxianyu, Liaoning (modified after Zou Ri et al. , 1995)

2 营口玉的岩石学、地球化学特征

2.1 岩石学特征

镜下观察表明,从岩相学角度看,4种营口玉分别属于蛇纹岩(翠绿玉、墨绿玉)、蛇纹石化大理岩(云翠玉)、碳酸盐-蛇纹石化镁橄榄岩(青铜玉、云翠玉)。

属于蛇纹岩的翠绿玉和墨绿玉,呈绿-黄绿-暗绿色,显微片状、纤维状交织结构,致密块状构造。蛇纹石含量超过95%,呈片状、纤维状交织在一起。次要矿物白云石、菱镁矿呈孤岛状分布,并可见交代残余港湾状结构(图2a)。副矿物主要是磷灰石、钛铁矿、黄铁矿、闪锌矿等。当其结构均匀、质地细腻时即形成品质优良的蛇纹石玉。

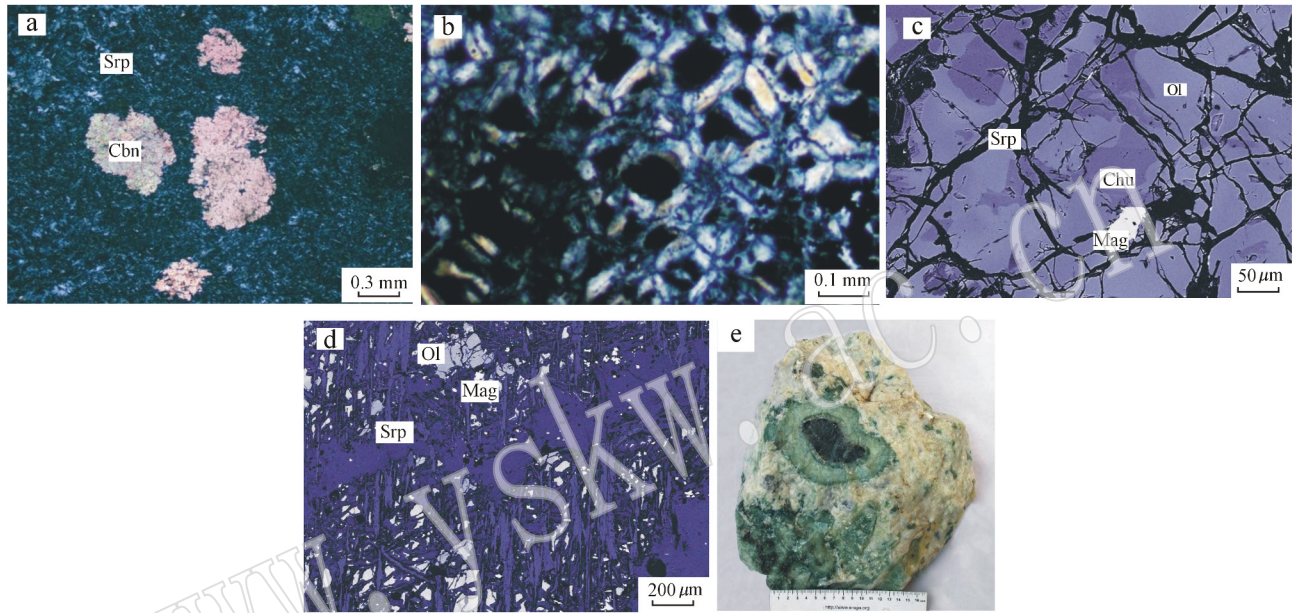


图2 营口玉的手标本、显微照片和背散射电子像

Fig. 2 Hand specimens, polarizing microphotographs and back scatter electron images of Yingkou jades

a—翠绿玉中的碳酸盐矿物残余,正交偏光; b—青铜玉中网边黑心结构,正交偏光; c—青铜玉中橄榄石与斜硅镁石共存,橄榄石边缘和裂隙蛇纹石化, BSE; d—青铜玉中橄榄石呈蛇纹石化交代残余, BSE; e—云翠玉中呈眼球状蚀变残余的橄榄岩; 矿物缩写代号据 Whitney & Evans (2010)

a—residual carbonate minerals in green jades, crossed nicols; b—structure with dark center and mesh side in bronze jades, crossed nicols; c—BSE image of olivines coexistent with clinohumite in bronze jades, whose margin and cracks are serpentinized; d—olivine as metasomatic relicts after serpentinization; e—peridotite as an augen relict after alteration in cloud jades; mineral abbreviation in the figures after Whitney & Evans (2010)

属于蛇纹石化大理岩或碳酸盐-蛇纹石化镁橄榄岩的云翠玉,绿白色,有时间杂黑色团块,不规则、花斑状分布,质地较细腻,显微片状-纤维状-粒状变晶结构,致密块状构造。主要组成矿物蛇纹石占65%~95%,白云石和菱镁矿占5%~25%;次要矿物有硼镁石、橄榄石、绿泥石、金云母、硼镁铁矿、滑石等,白云石、菱镁矿多呈孤岛状分布,多数菱镁矿位于白云石中。橄榄石集合体可见被蛇纹石交代包裹呈眼球状残余(图2e)。副矿物有磁铁矿、磷灰石等。

属于碳酸盐-蛇纹石化镁橄榄岩的青铜玉,青

灰、黑绿等色,整体较均匀,质地不如前3类细腻,略显粗糙,显微粒状鳞片变晶结构,致密块状构造,也见花纹状、浸染状和“毛毡”状构造。主要组成矿物为蛇纹石、橄榄石、斜硅镁石。橄榄石与斜硅镁石紧密共存,橄榄石颗粒局部被斜硅镁石交代,两者共存于一个颗粒上,偏光显微镜下难以分辨,但由于斜硅镁石成分中镁含量更高且含水,在电子探针的BSE图像上有明显的灰度差别(图2c)。橄榄石具不同程度蛇纹石化、碳酸盐化,轻微者颗粒沿边缘蚀变(图2c),严重者仅剩零星分散的残余颗粒(图2d)。次要矿物为白云石、菱镁矿、滑石、硼镁铁矿、水镁石、金

云母等, 偶见少量方解石、透辉石, 并含微量金属矿物, 包括磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等, 其他副矿物有磷灰石、钛铁矿等。

若将蛇纹石化视为玉石的主成矿期, 之前的岩石则为原岩。翠绿玉和墨绿玉蛇纹石含量高于 90%, 交代反应进行得很完全, 原岩成分仅呈残余状, 云翠玉中残余的菱镁矿等碳酸盐矿物较多, 交代反应不甚完全, 且含一定量硼镁石, 整体显得绿白相间, 青铜玉中常见包体及斑块, 蛇纹石含量可低至 45%, 斑块中含杂质矿物橄榄石、硅镁石、暗色矿物等较多, 交代反应不彻底, 质地显得较粗糙。

从交代关系看, 交代残余矿物主要有碳酸盐矿物和镁橄榄石两类。翠绿玉、墨绿玉和一部分云翠玉中或多或少残余了大理岩的成分, 这三类玉石原岩应为碳酸岩或碳酸盐岩变质形成的大理岩; 青铜玉和一部分云翠玉中多见明显蛇纹石化的橄榄石, 其原岩应为橄榄岩。XRD 分析显示(王长秋等,

2011), 翠绿玉、墨绿玉和云翠玉中蛇纹石为叶蛇纹石或叶蛇纹石 + 利蛇纹石, 而青铜玉中有两种组合: 叶蛇纹石 + 利蛇纹石和利蛇纹石 + 纤蛇纹石, 并且后者形成利蛇纹石 + 水镁石羽毛状网边和细粒利蛇纹石 ± 纤蛇纹石隐晶质网心的结构(图 2b)。这种结构是超基性火成岩发生水化作用蛇纹石化的常见结构(Wicks *et al.*, 1985)。

2.2 岩石化学、地球化学特征

2.2.1 常量元素

相对于我国著名的蛇纹石玉——岫岩玉, 营口玉富铁, 绝大部分全 FeO 含量大于 2%, 而岫玉的全 Fe₂O₃ 平均值只有 0.82%(李庆森等, 1984)。将 4 类玉石与区内镁橄榄岩、镁质大理岩的全岩成分进行比较, 显示翠绿玉、墨绿玉和大部分云翠玉的 MgO、TFeO 含量接近大理岩, 而青铜玉和部分云翠玉接近镁橄榄岩(表 1)。

2.2.2 稀土和微量元素

表 1 各类营口玉与区内镁橄榄岩、镁质大理岩的全岩成分比较

$w_B/\%$

Table 1 Comparison of the whole-rock composition between jades, peridotite and magnesian marble

类别	SiO ₂	MgO	TFeO
翠绿玉	41.40~42.58/41.93	41.22~42.11/41.75	2.64~4.02/3.15
墨绿玉	39.63~41.84/40.67	39.63~41.84/41.15	2.08~5.38/3.21
青铜玉	33.41~36.05/34.80	39.72~49.73/47.06	3.24~6.28/4.76
云翠玉	34.12~41.63/38.65	38.97~43.04/41.44	1.77~2.82/2.06
镁橄榄岩*	35.90~41.43/38.53	44.42~48.87/46.95	6.43~7.60/7.24
大理岩*	/13.94	/40.33	/3.04

注: /后面为平均值; * 据刘敬党等(2007)。

代表性营口玉样品的稀土元素和 Cr、Co、Ni 微量元素含量见表 2。稀土元素球粒陨石标准化后配分曲线见图 3。稀土元素配分型式可分为两种: 其一为轻稀土元素微富集的左高右低型, 其(La/Yb)_N > 1(图 3a); 其二为轻稀土元素亏损的略具左低右高的近平坦型, 其(La/Yb)_N < 1(图 3b)。两者的(La/Yb)_N、(La/Sm)_N、LREE/HREE 和 δEu 值分别与矿区周围的大理岩和橄榄岩(刘敬党等, 2007)相似。营口玉均具有较强烈的负 Eu 异常, 与岫岩蛇纹石玉及其原岩(大石桥组海相沉积碳酸盐岩)明显不同, 岫玉及其原岩基本不显 Eu 负异常(王时麒等, 2007b)。

营口玉的微量元素 Cr、Co、Ni 的含量均较低(表 2), 20 件样品的平均值分别 3.74×10^{-6} 、 9.75×10^{-6} 、 21.53×10^{-6} , 与后仙峪矿区的橄榄岩和富镁大理岩的特征一致(刘敬党等, 2007), 但与通常的超

基性岩相比明显亏损。

3 营口玉的成因分析

3.1 成矿时间

由于营口玉与区域的硼矿相伴产出, 空间上共存, 玉矿与硼矿为姊妹矿床, 因此, 有关硼矿及区域的相关研究资料可用来讨论营口玉的形成时间。

矿区层状混合岩的形成年龄, 张秋生(1984)给出了 1 955 Ma 的 U-Pb 法定年结果。Lu 等(2005)对辽吉硼矿带进行了 Ar-Ar 定年, 显示砖庙矿床金云母坪年龄为 $1 918 \pm 113$ Ma, 微斜长石有两个坪年龄, 分别为 $1 425 \pm 19$ 和 250 ± 8 Ma。汤好书等(2009)对砖庙、翁泉沟硼矿等矿段的 30 件矿石进行了铅同位素测年, 给出的等时线年龄为 $1 902 \pm 12$ 、 $1 852$

表 2 代表性营口玉样品稀土元素和微量元素含量

$w_B/10^{-6}$

Table 2 REE and trace element content of representative Yingkou jade samples

玉石类型 样号	云翠玉			墨绿玉			青铜玉			云翠玉			
	A-1	A-3	A-4	B-1	B-2	B-4	C-7	C-8	C-14	D-3	D-4	D-5	D-6
La	1.868	0.999	3.835	1.962	1.737	6.182	4.196	2.293	14.90	5.290	2.271	0.378	1.610
Ce	3.757	2.200	7.961	4.380	3.917	12.06	13.72	7.808	45.71	17.63	6.538	0.865	3.547
Pr	0.416	0.344	0.998	0.555	0.503	1.648	2.190	1.286	7.407	3.057	0.890	0.140	0.432
Nd	1.755	1.648	4.436	2.341	2.259	7.659	10.84	7.055	41.87	15.92	4.775	0.695	1.861
Sm	0.450	0.447	1.399	0.549	0.565	2.301	3.336	1.984	13.77	5.895	1.488	0.217	0.526
Eu	0.022	0.029	0.076	0.028	0.029	0.137	0.119	0.073	0.688	0.403	0.066	0.011	0.020
Gd	0.519	0.561	1.591	0.646	0.671	2.941	4.013	3.333	23.90	7.774	2.809	0.322	0.641
Tb	0.097	0.106	0.261	0.125	0.130	0.508	0.742	0.796	5.495	1.525	0.664	0.064	0.114
Dy	0.649	0.723	1.605	0.861	0.880	3.141	4.657	6.367	41.760	9.659	5.270	0.475	0.721
Ho	0.150	0.175	0.341	0.200	0.201	0.674	0.976	1.608	10.31	1.974	1.314	0.112	0.163
Er	0.486	0.603	1.045	0.679	0.653	2.007	2.853	5.371	32.62	5.677	4.191	0.390	0.553
Tm	0.091	0.103	0.189	0.110	0.113	0.342	0.502	1.034	5.545	0.940	0.730	0.084	0.102
Yb	0.666	0.694	1.364	0.724	0.833	2.391	3.615	6.948	32.01	6.014	4.613	0.673	0.713
Lu	0.097	0.107	0.211	0.113	0.117	0.406	0.620	1.063	5.012	0.833	0.717	0.106	0.117
Cr	0.655	3.278	5.055	7.784	4.372	0.545	4.222	4.542	5.555	3.315	1.779	1.807	4.243
Co	7.372	8.148	9.844	7.689	5.612	8.089	15.00	8.590	7.870	6.669	5.706	6.440	5.577
Ni	25.32	12.29	26.54	11.20	14.88	14.97	36.65	23.68	13.31	12.30	8.875	11.25	12.86

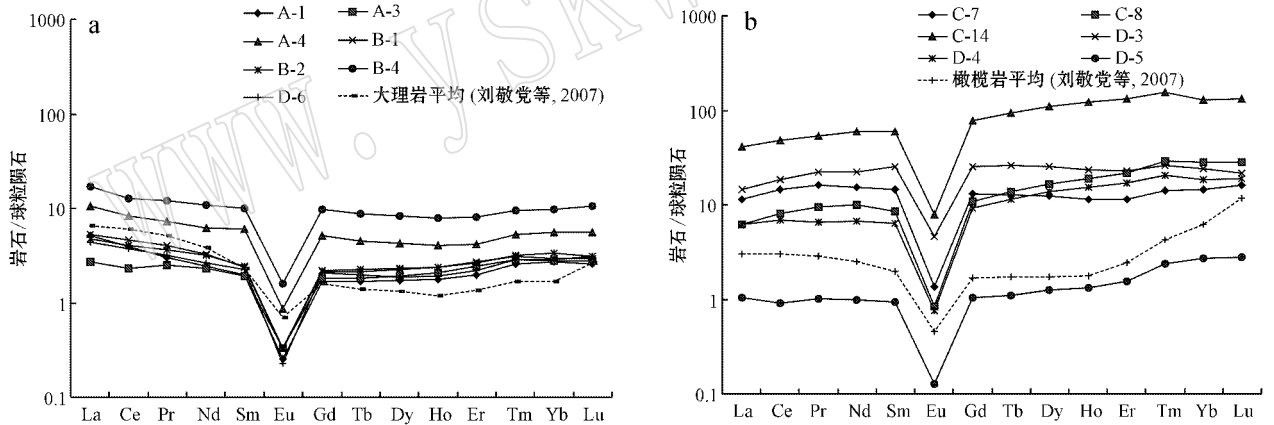


图 3 营口玉与后仙峪碳酸岩、镁橄榄岩稀土元素配分曲线比较

Fig. 3 Comparison of REE patterns between Yingkou jade, peridotite and magnesian marble

± 9 和 $1\ 917 \pm 48$ Ma; 后仙峪矿区中心与橄榄石、硼镁石呈平衡共生关系的金云母的 Ar-Ar 坪年龄 884.4 ± 8.9 Ma。

以上定年数据显示辽东地区硼矿化作用在时间上具有一致性,主矿化时间约在 $1\ 950 \sim 1\ 850$ Ma 之间, $1\ 400 \pm$ 、 $880 \pm$ 和 $250 \pm$ Ma 为发生改造时间。

结合华北克拉通的大地构造研究,认为玉矿和硼矿的矿化过程应与吕梁运动有重要联系。多数学者认为吕梁运动是从拉伸到挤压的完整构造旋回,分为早期伸展阶段 ($2\ 200 \sim 2\ 000$ Ma) 和晚期挤压阶

段 ($2\ 000 \sim 1\ 800$ Ma) 两阶段(赵宗溥, 1993), 在 $1.88 \sim 1.85$ Ga (或 1.87 Ga) 华北克拉通开始转入伸展机制(董春艳等, 2011)。营口玉及硼矿的矿化事件发生于古元古代中晚期吕梁运动挤压阶段。

由以上分析,营口玉玉矿应形成于 $1\ 950 \sim 1\ 850$ Ma, 之后经历了 $1\ 400 \pm$ Ma、 $880 \pm$ Ma 和 $250 \pm$ Ma 时间段内的构造及热扰动事件,蛇纹石发生重结晶并进一步玉化。

3.2 营口玉的原岩

产于后仙峪的营口玉的岩石学和地球化学特征

表明,其原岩有两类,即镁橄榄岩和富镁大理岩,但是关于镁橄榄岩和富镁大理岩的来源仍存在争议。分歧主要表现为,一种观点认为富镁大理岩为海相沉积的碳酸盐岩经区域变质形成,而镁橄榄岩则是大理岩经富硼和硅的热液交代而成(王秀璋,1965;中国科学院贵阳地球化学研究所等,1974);另一种观点认为,镁橄榄岩是超基性火山岩经变质作用形成,而富镁大理岩则是与超基性火山岩同源分异的碳酸岩经变质作用的产物(王翠芝等,2006;刘敬党等,2007)。

对于后仙峪及其邻区硼矿的新近研究显示,镁橄榄岩与围岩整合接触,岩层厚达百米,岩石组成单一,镁橄榄石呈粒状镶嵌接触,颗粒之间界线清楚,无交代其他矿物而形成的变斑晶的特征,对青铜玉的薄片观察亦见其火成结构特征(图2b),并且在一些变质程度较弱的地段,发现具明显变余结构的火山矿物和火山岩组构(刘敬党等,2007)。然而,镁橄榄岩以及营口玉的微量元素Cr、Co、Ni含量明显偏低,似乎与超基性火成岩的特征有较大差异。对此,王翠芝等(2006)研究认为,区内镁橄榄岩是地幔岩经较大幅度的部分熔融,分离出拉斑玄武岩浆,残余相富镁的地幔橄榄岩后期又发生重熔,分离出富镁、低铝的超基性岩浆,在裂谷环境下海相喷发成岩,后经区域变质作用和混合岩化过程形成蛇纹石玉化前的橄榄岩。经与格陵兰西南3800 Ma前的深成橄榄岩中的地幔岩残余相——纯橄榄岩对比,后仙峪矿区的橄榄岩与其在矿物成分、常量元素含量及其比值分布趋势、微量元素特征、稀土元素配分型式、明显的负Eu异常等方面都很相似。Cr、Co、Ni等含量之所以偏低,是由于原始岩浆分异过程中,这些亲硫元素进入与硅酸盐熔体相分离的硫化物熔体相。在后仙峪矿区确实发现有许多黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物聚集体分布。本区的镁质大理岩及其交代蚀变形成的蛇纹石玉与正常沉积的碳酸盐岩及其交代蚀变的蛇纹石玉(如岫岩玉)的稀土元素地球化学特征明显不同,其碳氧同位素组成变化与白云鄂博碳酸岩的特征类似,显示其具岩浆成因特征。镁橄榄岩与富镁大理岩在矿区互相包容、共生产出,其原岩属于同源岩浆熔离分异的产物。

据王时麒等(2013),营口玉的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值在 $-0.1\text{‰} \sim +0.6\text{‰}$ 之间,与海相沉积的白云岩中 $\delta^{30}\text{Si}$ 值明显不同($>1\text{‰}$),与花岗岩类的范围($-0.4\text{‰} \sim +0.4\text{‰}$)有很大的重合。由于从镁铁质岩到酸性岩 $\delta^{30}\text{Si}$ 值逐渐升高,矿区地层中的中酸性

火山岩应有较高的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值,在变粒岩部分熔融过程中形成的热液富硅,也会再次富集 ^{30}Si ,所以营口玉的 $\delta^{30}\text{Si}$ 与部分熔融形成的混合岩具有很好的继承关系。经营口玉的氢氧同位素测试分析并将 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值投图,结果表明玉石成矿溶液中的水都位于靠近原生岩浆水的区域。总的来说,同位素显示成矿过程中Si和 H_2O 大部分来源于本区的层状花岗岩质混合岩。

3.3 营口玉的成矿温压条件

辽东地区变质岩系普遍经历了中低压角闪岩相区域变质作用和混合岩化作用,营口玉成矿温压条件可以从区域变质条件、混合岩化条件和硼矿成矿条件及玉石矿物组合等角度综合考虑。

据刘敬党等(2007),区域变质温度约 $600 \sim 700^\circ\text{C}$,压力为 $5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 左右。关会梅等(2008)通过地质温压计得到辽东海城地区辽河群的3种角闪岩形成和变形温压条件,显示辽河群经历了升温升压→降温升压→降温降压的过程,温压范围为 $550 \sim 620^\circ\text{C}$ 和 $4\,000 \times 10^5 \sim 5\,000 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。对于镁铁硼酸盐矿物生成的地质条件,王秀璋进行了大量的实验分析,显示硼矿的主成矿温度应在 350°C 以上,压力约 $500 \sim 1\,500 \times 10^5 \text{ Pa}$,属于中高温变质热液矿床(中国科学院贵阳地球化学研究所等,1974)。王时麒等(2013)对玉矿中与蛇纹石共生的黄铁矿和后期方解石脉采用爆裂法和均一法得出的温度为 $387 \sim 269^\circ\text{C}$ 。此外,对于青铜玉中的利蛇纹石+纤蛇纹石组合,据Wicks等(1985),当水分压约为 $2\,000 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度约低于 375°C 时,在退变质环境中镁橄榄石被利蛇纹石+纤蛇纹石交代为网状结构(图2d);当压力约 $2\,000 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度低于 340°C 时,矿物组合变为利蛇纹石+纤蛇纹石+水镁石。

以上温度范围显示营口玉形成温度为 $400 \sim 250^\circ\text{C}$ 。基于 $\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 实验体系研究,叶蛇纹石的稳定温度范围是 $250 \sim 550^\circ\text{C}$ (Mellini *et al.*, 1987)利蛇纹石和纤蛇纹石的形成温度有很大程度的重叠,可以从地表或近地表一直到高达 400°C 温度范围内出现,但是低温下($<300^\circ\text{C}$)利蛇纹石更稳定, 300°C 以上,叶蛇纹石比两者都稳定(Evans, 2004),即在 $250 \sim 400^\circ\text{C}$ 温度范围内,蛇纹石的稳定性顺序大致为叶蛇纹石>利蛇纹石>纤蛇纹石,因此营口玉中蛇纹石主要为叶蛇纹石,其次为利蛇纹石,只在部分青铜玉中出现利蛇纹石+纤蛇纹石的组合。通常纤蛇纹石稳定于 250°C 以下的低温条件,

但万朴等(1986)认为纤蛇纹石的形成需要活动裂隙应力场来不断地供给组分,特别是在压性裂隙造成升温升压的局部环境容易形成。

综合以上分析,该区蛇纹石玉的形成经历了区域变质→混合岩化→热液交代→硼矿→玉矿这样一个增温再降温的连续过程,形成温度在 400~250℃ 之间,成矿压力受构造环境控制,接近 $500 \times 10^5 \sim$

2000×10^5 Pa 的范围,玉矿属于中温热液矿床。

3.4 营口玉的成矿过程

基于以上岩石学、岩石化学、地球化学特征及成矿时间、成矿温压条件的分析,将营口玉的矿化过程分为镁质原岩形成阶段、区域变质-混合岩化-变质热液交代成矿阶段和后期改造阶段。营口玉的成矿过程及模式如图 4 所示。

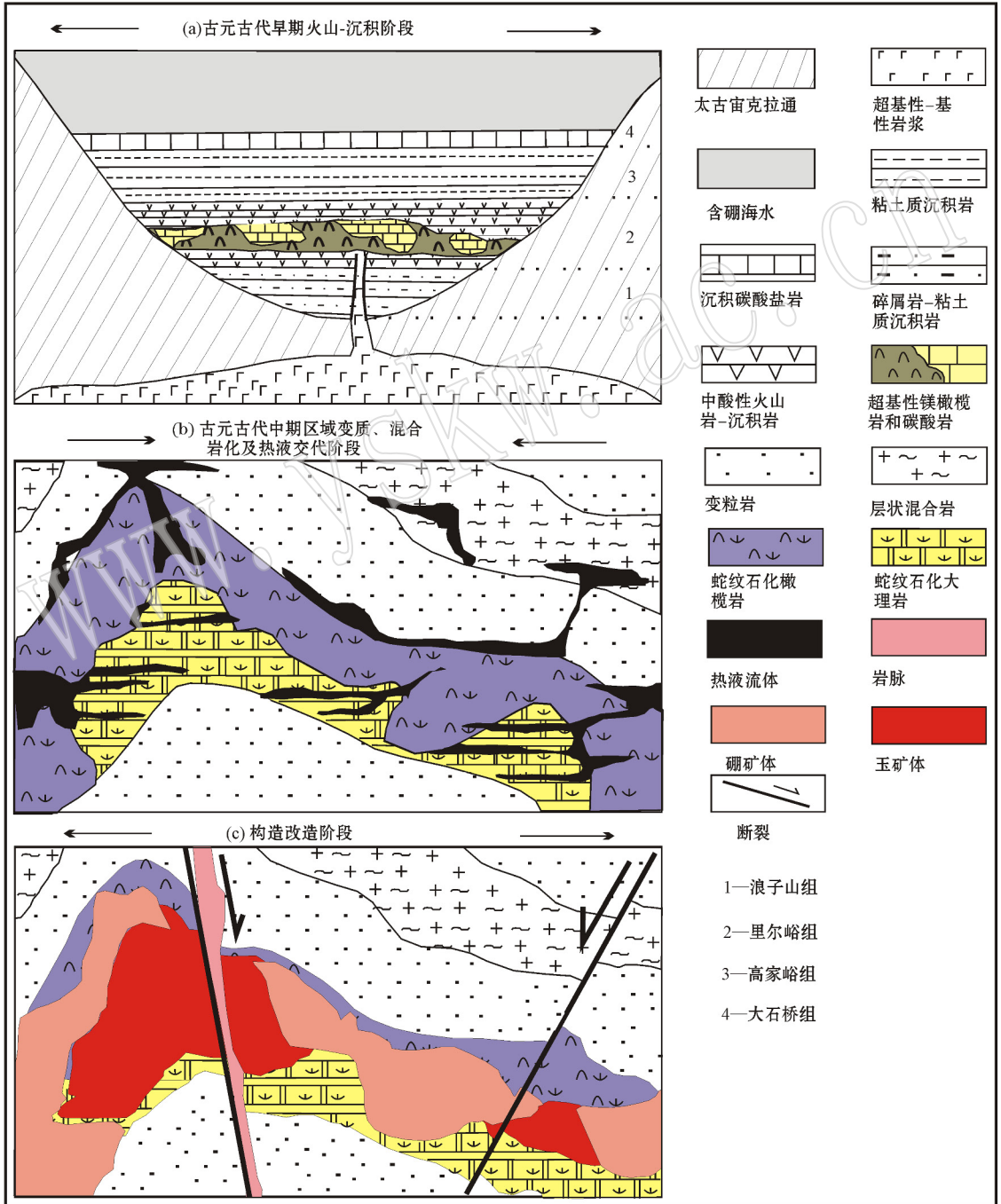


图 4 营口玉成矿过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the metallogenic process of Yingkou jade

3.4.1 镁质原岩形成阶段

辽东地区南北两陆块在古元古代早期(2.3~2.2 Ga)由于全球性的板块裂解而产生近 EW 向的辽吉古裂谷,形成海盆环境。距今 2.2~2.173 Ga 之间裂谷中部地壳减薄、地幔物质上涌,使得这一时期海底频繁发生中酸性火山活动,并伴随喷发间期的泥质岩、泥质粉砂岩沉积,形成一套中酸性火山岩—深海沉积岩建造,期间部分超基性岩浆上涌,在海底喷发并分异为镁橄榄岩和碳酸岩,二者相互包含,在局部也单独产出。这套镁质岩化学成分富 MgO、贫碱低铝,是后仙峪硼矿和蛇纹石玉矿的镁源和成矿基岩。

3.4.2 区域变质—混合岩化—变质热液交代成矿阶段

距今约 2.0~1.85(或 1.87)Ga 间,华北克拉通进入吕梁运动挤压阶段,这一过程中,古元古代含硼岩系原岩建造发生一系列褶皱和大范围的中低角闪岩相区域变质,岩层开始升温、脱水并发生混合岩化(镁质岩层上下温度能超过 700℃)(刘敬党等, 2007)。在混合岩化过程中产生温度较高的气水溶液,沿地层流动过程中萃取其中的硅、硼、铁等矿质,并溶解一定的 CO₂(大理岩中菱镁矿部分分解活化,菱镁矿分解点约 700℃)。

在退变质阶段温度降低至 550℃ 后,镁橄榄岩发生水化、碳酸化作用,即蛇纹石、碳酸盐蚀变,开始形成镁橄榄岩成因型营口玉。

当温度降至 400℃ 以下时,富硅热液沿裂隙及褶皱虚脱空间流动,交代蛇纹石化镁橄榄岩和大理岩,形成蛇纹石化程度较高、结构均匀、质地细腻的大理岩成因型营口玉以及橄榄岩成因型营口玉,剩余的少量硼生成硼镁石和硼镁铁矿。成矿作用结束后主要发生晚期热液充填、后期热液改造,形成一些蛇纹石、方解石脉体。

3.4.3 后期改造阶段

1 400±、880± 和 250± Ma 时间段内的构造及热扰动事件,使蛇纹石发生重结晶。古生代末—三叠纪期间,华北克拉通北缘的古亚洲洋和南缘的古特提斯洋北支相继闭合,华北克拉通先后与西伯利亚板块、扬子板块碰撞,引发了印支期及其后续的构造—岩浆事件(汤好书等, 2009),形成一系列断层构造及充填其中的酸性岩脉。但对玉矿体只起到机械切割作用,对玉质无大的影响(王时麒等, 2013)。

4 结论

营口玉有两种矿化原岩,分别是镁橄榄岩和镁质大理岩(原岩为碳酸岩)。营口玉由两种镁质原岩受混合岩化后期热液的交代而形成,其主成矿期在 1.95~1.85 Ga 之间,成矿压力约 $500 \times 10^5 \sim 2\,000 \times 10^5$ Pa,温度在 400~250℃ 之间。营口玉玉矿属于中温变质热液交代矿床。

References

- Bing Zhibo, Shi Jianmin and Li Shibo. 2006. Geological characteristics and developing prospects of the serpentine jade in Houxianyu, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 15(4): 286~289 (in Chinese with English abstract).
- Dong Chunyan, Wang Shijin, Liu Dunyi, et al. 2011. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate-basic intrusive rocks in eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1699~1706 (in Chinese with English abstract).
- Evans B W. 2004. The serpentinite multisystem revisited: Chrysotile is metastable[J]. *International Geology Review*, 46(6): 479~506.
- Guan Huimei, Liu Junlai and Zhao Shengjin. 2008. Flow and deformation mechanisms of hornblende rocks—Example of deformed amphibolites from the Paleoproterozoic fold belt in Liaodong Peninsula[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 38(5): 778~783 (in Chinese with English abstract).
- Guiyang Geochemical Research Institute and Geological Institute. 1974. The Mineral Composition and Deposit Genesis of North-east Inner Boron Deposits[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Li Qingsen, Nie Qiyang and Sun Jixi. 1984. The Geological features of minerogenesis and genesis on serpentine jade deposits in Xiuyar[J]. *Liaoning Geology*, (4): 322~340 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang, Xiao Rongge, Wang Cuizhi, et al. 2005. Genesis of the Dashiqiao granite and its significance in borate mineral exploration[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 35(6): 714~719 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang, Xiao Rongge, Wang Wenwu, et al. 2007. Regional Met-allogensis of Borate Deposit in Eastern Liaoning, China[M]. Bei-

- jing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa, Chen Yuchuan, Li Huaqin, *et al.* 2005. Metallogenic chronology of boron deposits in the eastern Liaoning Paleoproterozoic rift zone [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 79(3): 412~425.
- Mellini M, Trommsdorff V and Compagnoni R. 1987. Antigorite polysomatism: behaviour during progressive metamorphism [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 97(2): 147~155.
- Tang Haoshu, Chen Yanjing and Wu Guang. 2009. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and its geological implication of the Houxianyu boron deposit, Liaoning province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2758~2759 (in Chinese with English abstract).
- Wan Pu, Li Heyu and Shi Ding. 1986. Serpentinization and geochemistry of mineralization of Sichuan asbestos deposit [J]. *Journal of Sichuan Institute of Building Materials*, (1): 47~58 (in Chinese with English abstract).
- Wang Changqiu, Wang Shiqi, Zhou Weiwei, *et al.* 2011. The types and characteristics of Yingkou serpentine jades, Liaoning Province [A]. Editorial Board of Proceedings of International Symposium on Jade. *Proceedings of International Symposium on Jade* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 185~194 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cuihui, Xiao Rongge, Liu Jingdang, *et al.* 2006. Geochemistry of super-magnesium peridotite in the Houxianyu boron deposit, Yingkou, Liaoning, and its constraints on the source region [J]. *Geology in China*, 33(6): 1246~1255 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Yu Guang, Wang Changqiu, *et al.* 2013. Yingkou Jades in China [M]. Shenyang: Liaoning Nationalities Publishing House, (in Chinese).
- Wang Shiqi, Yun Xuemei and Li Shibo. 2007a. Gemmological characteristics and developing prospect of Fe-rich serpentine jade from Liaoning Province [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 9(4): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Zhao Chaohong, Yu Guang, *et al.* 2007b. Xiuyan Jades in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Xiuzhang. 1965. The discussion of forming condition of endogenous saibelyite and mafic borate minerals [J]. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 157~171 (in Chinese).
- Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals [J]. *American Mineralogist*, 95: 185~187.
- Wicks F J and Wan Pu. 1985. Advance research on mineralogy and deposits of chrysotile asbestos [J]. *Non-Metallic Geology*, (1): 1~22 (in Chinese).
- Zhang Qiusheng. 1984. *Geology and Metallogeny of the Early Precambrian in China* [M]. Changchun: Jilin People's Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongfu. 1993. *Precambrian Crustal Evolution of Sino-Korean Platform* [M]. Beijing: Science Press, 389~390 (in Chinese).
- Zhou Weiwei, Chuan Xiuyun and Wang Shiqi. 2011a. Infrared emission function and its influencing factors of Yingkou serpentine jade [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(4): 750~756 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Weiwei, Chuan Xiuyun, Wang Shiqi, *et al.* 2011b. A discussion on the negative ion emission function and mechanism of Yingkou serpentine jade [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(Suppl.): 144~150 (in Chinese with English abstract).
- Zou Ri and Feng Benzhi. 1995. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning [J]. *Geochemistry*, 24(Suppl.): 46~55 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邢志波, 时建民, 李世波. 2006. 辽宁后仙峪蛇纹岩玉石地质特征及开发前景初探 [J]. *地质与资源*, 15(4): 286~289.
- 董春艳, 王世进, 刘敦一, 等. 2011. 华北克拉通元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. *岩石学报*, 27(6): 1699~1706.
- 关会梅, 刘俊来, 赵胜金. 2008. 变形角闪质岩石流动变形及意义——以辽东古元古宙褶皱带变形斜长角闪岩为例 [J]. *吉林大学学报*, 38(5): 778~783.
- 李庆森, 聂奇英, 孙积玺. 1984. 岫玉成矿地质特征及矿产成因 [J]. *辽宁地质*, (4): 322~340.
- 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探中的意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 35(6): 714~719.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 等. 2007. *辽东硼矿区域成矿模型* [M]. 北京: 地质出版社.
- 汤好书, 陈衍景, 武广. 2009. 辽宁后仙峪硼矿床氩-氦定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 25(11): 2758~2759.
- 万朴, 李和玉, 史定. 1986. 四川石棉县水镁石-纤蛇纹石石棉矿床成矿作用地球化学特征 [J]. *四川建材学院学报*, (1): 47~58.
- 王长秋, 王时麒, 周维卫, 等. 2011. 营口蛇纹石玉类型及其特征 [A]. 玉石学国际学术研讨会论文集编委会. 玉石学国际学术研

- 讨会论文集[C]. 北京:地质出版社,185~194.
- 王翠芝,肖荣阁,刘敬党,等. 2006. 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[J]. 中国地质,33(6): 1246~1255.
- 王时麒,于 洸,王长秋,等. 2013. 中国营口玉[M]. 沈阳:辽宁民族出版社.
- 王时麒,员雪梅,李世波. 2007a. 辽宁富铁蛇纹石玉的宝石学特征及开发利用[J]. 宝石和宝石学杂志,9(4):1~6.
- 王时麒,赵朝洪,于 洸,等. 2007b. 中国岫岩玉[M]. 北京:科学出版社.
- 王秀璋. 1965. 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,(2):157~171.
- Wicks F J, 万 朴. 1985. 纤蛇纹石石棉矿物和矿床的研究现状[J]. 建材地质,(1):1~22.
- 张秋生. 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用[M]. 长春:吉林人民出版社.
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京:科学出版社,389~390.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所,地质研究所. 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.
- 周维卫,传秀云,王时麒. 2011a. 营口蛇纹石玉红外发射功能及其影响因素[J]. 矿物学报,31(4):750~756.
- 周维卫,传秀云,王时麒,等. 2011b. 营口蛇纹石玉负离子释放功能及机理探讨[J]. 岩石矿物学杂志,30(增刊):144~150.
- 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(增刊):46~55.

www.yskw.ac.cn