

新疆海蓝宝石中包裹体特征、形成条件和鉴别专属性*

刘斌¹ 沈昆²

1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 山东地质实验科学研究所, 济南 250013.

1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shandong Institute of Geoscience and Experiments, Jinan 250014, China.

2000-07-05 收稿, 2000-09-19 改回.

Liu Bin and Shen Kun. 2000. Characteristics, formation conditions and distinguishing specialization of inclusions in the aquamarines in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4):633~638

Abstract The samples of aquamarine were collected from the Granite-pegmatite of Keketuohai in Aletai of Xinjiang. There are many kinds of inclusions in these samples and the assemblage of melt-gas-liquid and $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ immiscible fluid inclusions is of the distinctive characteristics. The trapping temperatures of the inclusions range from over 700 to 200 °C and trapping pressures from over 300 MPa to 200~100 MPa. The special kinds of inclusions and their thermodynamic parameters are the most effective indicators by which the aquamarines in this region can be distinguished from those in the other regions and from synthetic or treated aquamarines.

Key words Aquamarines in Xinjiang, Characteristics of inclusions, Formation conditions, Distinguishing specialization

摘要 新疆海蓝宝石产于阿勒泰可可托海花岗伟晶岩脉之中, 呈海蓝宝石的绿柱石中分布多种类型的流体包裹体, 其中以熔体-气液流体和 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 不混溶流体包裹体类型为特征。流体包裹体捕获的温度从大于 700 °C 逐渐降低到 200 °C 左右, 捕获压力从大于 300 MPa 也递减到 200~100 MPa。流体包裹体形成的热力学条件为合成宝石提供了实验数值依据。流体包裹体特殊的组合类型和标志特征以及一定的热力学参数数值是区分本区和其它产地及人工合成海蓝宝石的标志。宝石人工加热后, 其中 CO_2 流体包裹体形态和热力学参数有较大的变化, 这是鉴别本地宝石进行过人为处理的最好证据。

关键词 新疆海蓝宝石; 流体包裹体特征; 形成条件; 鉴别专属性

中图法分类号 P571; P578.953

1 地质概况

新疆海蓝宝石为绿柱石矿物, 产于阿勒泰可可托海花岗伟晶岩脉之中。大地构造位置处于西伯利亚板块南缘的阿勒泰陆缘活动带, 哈龙-青河岩浆弧的中段, 富蕴复背斜带内(卢焕章, 1995)。区内发育下古生代变质岩系列, 侵入岩分布广泛, 除少量基性岩外, 主要为加里东期中-酸性岩。矿化伟晶岩的形成与阿拉尔复式花岗岩体密切相关, 该岩体出露面积百余平方公里, 由似斑状黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩组成, 其周围分布着一系列中细粒二云母花岗岩的岩枝、岩脉和小岩钟。沿着阿拉尔岩体的内外接触带, 伟晶岩脉成群断续分布, 形成一个长数十公里的伟晶岩环带。在阿勒

泰六千平方公里范围内已发现的花岗伟晶岩脉近十万条之多, 其中数千条具有不同程度的稀有金属矿化和白云母矿化, 这些矿化的脉岩, 是开采宝石的基地, 众多岩脉中以可可托海三号伟晶岩脉最为著名。岩脉分布于黑云母微斜长石花岗岩岩体顶部凹陷的辉长岩—闪长岩体之中。岩脉由岩钟状和缓倾斜脉体两部分组成。岩钟走相 NNW, 倾向 NE, 上盘倾角 40°, 下盘 80°。伟晶岩脉具有典型的同心环带构造, 根据矿物组合和结构构造从外到内, 可将伟晶岩脉分成十个带(卢焕章, 1997), 作为海蓝宝石的绿柱石矿物在各个带中赋存数量不一, 主要在第三带至第六带之中, 呈现优质海蓝宝石的亦不多见。不同结构带中矿物内广泛分布不同的包裹体, 其中呈海蓝宝石的绿柱石中分布特有的包裹体类型。

* 国家自然科学基金(4916321)和上海市教委基金(98JG0535)项目资助。

第一作者简介: 刘斌, 男, 1941 年 8 月生, 副研究员, 流体包裹体专业。

2 流体包裹体特征

根据包裹体的成分,可以分成下列类型。

2.1 熔体-气液流体包裹体

这种包裹体主要有两种类型,一是熔体+CO₂ 流体包裹体,二是熔体+H₂O+NaCl 流体包裹体。

两种类型包裹体的熔体玻璃不少已产生去玻化作用,结晶成为硅酸盐矿物微晶,这些固体硅酸盐微晶一般沿包裹体壁分布,正交偏光镜下各个微晶的光性方位不同,它们为钠长石、石英、绿柱石、磷灰石等矿物。流体部分分成两种:一是以CO₂ 成分为主;另一种为H₂O+NaCl 成分。它们通常形成于伟晶岩浆-热液作用过渡阶段,随着以后温度的下降,熔体部分结晶出多种硅酸盐子矿物,同时由岩体分离的气液部分为CO₂ 和H₂O+NaCl 不混溶流体,组成熔体+CO₂ 和熔体+H₂O+NaCl 两类为主及相态组成比例不一的复杂组合。

2.2 气液流体包裹体

气液流体包裹体有多种,主要有五种类型:

(1) CO₂+H₂O 不混溶流体包裹体:这种不混溶流体包裹体分布广泛,一般具有CO₂ 气相、CO₂ 液相和水溶液三种相态,其中CO₂ 和H₂O 相体积比例在同一矿物之中相差较大。

(2) 纯CO₂ 包裹体:为纯CO₂ 成分的气、液两相或单相的流体包裹体。

(3) 纯液相包裹体:为纯H₂O 成分的液相流体包裹体。含盐度小于5% NaCl,气相百分比一般小于10%,它与上述纯CO₂ 包裹体常常共生在一起,为CO₂+H₂O 不混溶流体包裹体的两种极端成分类型。

(4) 高盐度水溶液包裹体:含盐度为37%~40% NaCl,室温下含石盐(NaCl)、钾盐(KCl)以及其它盐类子晶为特征。其中不同的包裹体含子晶数目不一,从含一种NaCl 子晶到含NaCl+KCl 两种子晶以及含NaCl+KCl+其它盐类多种子晶成分。

(5) 低盐度水溶液包裹体:含盐度为3%~15% NaCl,它们以含气液两相、室温下见不到盐类子晶为特征,气液比为5%~25%不等。

流体包裹体特征见表1。

3 测定和计算热力学参数

我们对于其中分布较多的CO₂+H₂O 包裹体进行了激光喇曼探针成分分析,分析结果见表1中说明。对熔体-气液流体包裹体中熔体部分,采用高温加热淬火分析,气液部分

和其它流体包裹体,利用吉林浑江光学仪器厂仿法国Chaixmeca 公司生产的电脑冷热台进行显微测温实验,然后根据显微测温结果进行热力学参数的计算。包裹体捕获时的热力学条件,不同情况采用不同的计算方法:对于熔体-气液流体包裹体,可以将测定的富熔体-气液流体包裹体的完全均一温度作为形成温度,将它代入到气液成分的状态方程中计算形成压力;对于CO₂+H₂O 不混溶流体包裹体,利用这群包裹体的两个极端成分包裹体:富CO₂ 和富H₂O 包裹体,根据“不混溶流体包裹体作为地质温度计和压力计”的方法(刘斌,1986),分别列出两种包裹体的流体状态方程(两种包裹体均采用1981年Holloway 等人修正的Redlich-Kwong 状态方程或者其它方程,只是包裹体均一方式不同,富CO₂ 包裹体均一成CO₂ 相,富H₂O 包裹体均一成H₂O 相),然后两式联立解之,可以同时获得形成温度和形成压力两个数值。

有关显微测温结果和计算的热力学参数,列在表2之中。

4 鉴别专属性

4.1 为人工合成宝石提供了实验数值依据

根据计算所得到的包裹体形成时的热力学参数,可以更有效更有目的地在这种实验条件下人工合成海蓝宝石。

4.2 与其它地区及人工合成海蓝宝石的鉴别

(1) 利用包裹体特征鉴别:

a. 特殊的组合类型鉴别:本区海蓝宝石经历伟晶岩浆-热液作用多个阶段,主要有三个演化阶段,伴随K-Na-Li 的交替作用,其中捕获的包裹体也产生变化:早期K-Na 阶段以岩浆熔体加上气液流体成分为主的包裹体比较发育;中期Na-Li 阶段以不混溶流体包裹体为主要成分;晚期Na 阶段以盐水溶液包裹体为特征。虽然其它地区形成的海蓝宝石也可能经历过这些阶段,由于不同地区地质环境的复杂性和差异性,不同阶段演化的强度和次序有所不同,因此捕获的包裹体也不尽相同,从而包裹体的组合类型也不尽相同,每一个地区均有特殊的包裹体组合类型;反之,利用宝石中赋存的特殊包裹体组合类型,可以确定这种宝石是什么地区的产物。本区海蓝宝石中具有两种特殊的包裹体组合类型。一是熔体-气液流体包裹体,又分成两种类型:熔体+CO₂ 流体包裹体和熔体+H₂O+NaCl 流体包裹体。二是气液流体包裹体,又有五种主要类型:CO₂+H₂O 不混溶流体包裹体;纯CO₂ 包裹体;纯液相包裹体;高盐度水溶液包裹体和低盐度水溶液包裹体。其它矿区和人工合成海蓝宝石中,难以有这种同样的包裹体组合类型。

b. 特殊的标志特征鉴别:本区海蓝宝石以熔体-气液流体包裹体和CO₂+H₂O 不混溶流体包裹体为特征,它们个体大、形态特殊、分布广泛而且丰度较高。它们可以作为本区海

表 1 流体包裹体特征

Table 1 Characteristics of fluid inclusions

样品 编号	矿物 名称	包 裹 体 特 征										
		成分类型	成因类型	形态	颜色	透明度	大小 (μm)	气相 充填度	CO ₂ 充填度	分布 丰度	产状特征	生成 时期
k1	黄色 绿柱石	熔体+CO ₂ +H ₂ O	原生	粒状边缘呈棱角状	无色	透明—半透明	5~8		20~80	中等	小群孤立分布	早期
		纯 CO ₂	原生	浑圆状	无色稍带棕色	透明—半透明	3~6	100		少量	孤立分布	早期
		低盐度水溶液	原生	浑圆状	无色	透明—半透明	4~8	5~15		少量	孤立分布	早期
		CO ₂ +水溶液*	原生	浑圆状	无色稍带棕色	透明	6~15			丰富	群体分布	中期
		石盐子晶盐水溶液	原生	不规则状边缘浑圆	无色	透明—半透明	3~10	5~20		少量	小群孤立分布	中期
		低盐度水溶液	次生	浑圆状	无色	透明—半透明	4~10	5~15		中等	沿裂隙面分布	晚期
k2	海蓝色 绿柱石	熔体+CO ₂	原生	浑圆边缘不规则状	无色	透明—半透明	5~8		20~80	中等	小群孤立分布	早期
		纯 CO ₂	原生	浑圆状	无色稍带棕色	透明—半透明	3~6		100	少量	孤立分布	早期
		低盐度水溶液	原生	浑圆状	无色	透明—半透明	4~8	5~15		少量	孤立分布	晚期
		CO ₂ +水溶液**	原生	浑圆状	无色稍带棕色	透明	6~20			丰富	群体分布	中期
		石盐子晶盐水溶液	原生—次生	不规则状边缘浑圆	无色	透明—半透明	3~8	5~20		少量	小群孤立分布	中期
		低盐度水溶液	次生	浑圆状	无色	透明—半透明	4~10	5~15		中等	沿裂隙面分布	晚期
E-10	绿柱石	熔体+CO ₂ +H ₂ O	原生	浑圆状	无色	透明—半透明	5~8		5~20	较少	小群孤立分布	早期
		CO ₂ +水溶液	原生	不规则状边缘浑圆状	无色稍带棕色	透明—半透明	6~15		10~25	丰富	群体分布	中期
		石盐钾盐子晶盐水溶液	原生—次生	粒状边缘不规则状	无色	透明—半透明	3~6	5~20		中等	群体分布	中期
		低盐度水溶液	次生	粒状边缘	无色稍带棕色	透明—半透明	2~5	5~15		中等	沿裂隙面分布	晚期
6~7	绿柱石	纯 CO ₂	原生	浑圆状	无色稍带棕色	透明—半透明	3~6		100	少量	孤立分布	早期
		低盐度水溶液	原生	浑圆状	无色	透明—半透明	4~8	5~15		少量	孤立分布	早期
		CO ₂ +水溶液	原生	浑圆状	无色	透明—半透明	6~20	10~25		丰富	群体分布	中期
		石盐子晶盐水溶液	原生—次生	不规则状边缘浑圆状	无色	透明—半透明	3~8	5~20		少量	群体分布	中期
		低盐度水溶液	次生	不规则状边缘浑圆状	无色	透明—半透明	2~6	5~15		中等	沿裂隙面分布	晚期

* 喇曼探针成分分析:气相(mole%):CO₂-88.2; N₂-6.4; CH₄-5.4; 液相(mole%):CO₂-54; H₂S-6; H₂O-40

** 喇曼探针成分分析:气相(mole%):CO₂-96; N₂-0.9; CH₄-0.4; H₂O-2; 液相(mole%):H₂O-98

与绿柱石共生的石英内含 CO₂ 包裹体喇曼探针成分分析:

气相(mole%):CO₂-99.4; H₂S-0.1; CH₄-0.2; H₂O-0.3; 液相(mole%):CO₂-71; H₂S-7; H₂O-22

表 2 显微测温及有关热力学参数计算结果

Table 2 Microthermometric measurements and calculated values of thermodynamic parameters

样品 编号	矿物 名称	包裹体 成分类型	显 微 测 温					包 裹 体 热 力 学 参 数					
			T _m (CO ₂) (C)	T _m (cl) (C)	T _m (mi) (C)	Th(CO ₂) (C)	Th(all) (C)	含盐度 (NaCl,wt%)	CO ₂ 密度 (g/cm ³)	流体密度 (g/cm ³)	均一压力 (MPa)	形成温度 (C)	形成压力 (MPa)
k1	黄色 绿柱石	熔体+ CO ₂ +H ₂ O				29.1(L)	水溶液: 330[>400] 熔体: >700[>800]		0.629 [<0.6]	0.782	>300	>700 [>800]	>300
		纯 CO ₂ * 低盐度水溶液	-56.6		-3.1	~-4.6 (L)	220(L)	5.11	0.953	0.883		450	317
		CO ₂ + 盐水溶液	-57.1	8.5		23.4(L) [30,G]	330(L) [350,L]	3.01 [3.38]	0.733 [0.346]	0.838 [0.4696]	174 [591]	330 [350]	174 [591]
		石盐子晶 盐水溶液				NaCl: 10 2KCl: 20	265(L) ~295(L)	NaCl: 23.7 KCl: 15.4		1.05[0.74] ~1.06[0.82]		[>270]	[<150]
		低盐度 水溶液				-4.7~ -5.2	220(L)[270] ~310(L)[360]	7.45[6.9] ~8.14[8.9]	0.78~ 0.910			>220	
k2	海蓝色 绿柱石	熔体+CO ₂	-56.6			21.0(L)	>700		0.775			>700	>280
		纯 CO ₂	-56.6			1.3(L)			0.919			425	272
		低盐度水溶液				-2.9	215(L)	4.8		0.888			
		CO ₂ + 盐水溶液	-56.9	8		25.0(L)	315(L)	3.95	0.711	0.902	315	198	
		石盐子晶 盐水溶液				NaCl: 85 KCl: 18	270(L) ~303(L)	NaCl: 23.5 KCl: 14.5		1.06 ~1.08		>260	
低盐度 水溶液				-4.3~ -4.9	210(L) ~305(L)	6.88~7.73		0.786 ~0.910		>210			

注: T_m(CO₂)-固体 CO₂ 熔化温度; T_m(cl)-CO₂ 水合物熔点温度; T_m(mi)-水溶液冰点温度或盐子晶熔化温度; Th(CO₂)-CO₂ 相均一温度; Th(all)-包裹体完全均一温度; (L,V)均一呈液相(L)或气相(V)。

* 经加热处理包裹体已经爆裂,流体泄出,不能测定;其它成分包裹体,均一温度改变,造成形成温度改变,表中方括弧内的数值为加热后包裹体测定和计算数值。

续表 2

Continued table 2

样品 编号	矿物 名称	包裹体 成分类型	显 微 测 温					包 裹 体 热 力 学 参 数					
			T _m (CO ₂) (°C)	T _m (cl) (°C)	T _m (mi) (°C)	Th(CO ₂) (°C)	Th(all) (°C)	含盐度 (NaCl, wt%)	CO ₂ 密度 (g/cm ³)	流体密度 (g/cm ³)	均一压力 (MPa)	形成温度 (°C)	形成压力 (MPa)
E~10	绿柱石	熔体+ CO ₂ +H ₂ O				19.5(L)	水溶液: 280 熔体: >700	0.771	0.82		>700	>300	
		CO ₂ + 盐水溶液		8.3 [7.2]		23.5(L) [28,G]	315(L) [310,L]	3.38 [5.4]	0.732 [0.287]	0.899 [0.813]	202 [642]	315 [308]	202 [642]
		石盐钾盐 盐水溶液				NaCl: 92 KCl: 45	250(L) ~290(L)	NaCl: 23.2 KCl: 16.2		1.07 ~1.09		>250	
		低盐度 水溶液			-3.1 ~3.7	215(L) ~305(L)	5.1 ~6.0		0.757 ~0.888		>215		
		纯 CO ₂ *				~-3.1 (L)		0.898		273	460	273	
		低盐度 水溶液			-1.8 [-4.9]	215(L) [350,L]	3.06 [7.76]		0.871 [0.9]		[>220]	[<125]	
6~7	绿柱石	CO ₂ + 盐水溶液 *	-56.9	8.25		27.5(L)	327(L)	3.48	0.667	0.823		327	162
		石盐子晶 盐水溶液				NaCl: 8 8KCl: 20	280(L) ~308(L)	NaCl: 23.6 KCl: 14.8		1.06 ~1.08		>280	
		低盐度 水溶液				-3.7 ~-4.2	217(L) ~308(L)	5.71 ~6.74				>217	

注: T_m(CO₂)-固体 CO₂ 熔化温度; T_m(cl)-CO₂ 水合物熔点温度; T_m(mi)-水溶液冰点温度或盐子晶熔化温度; Th(CO₂)-CO₂ 相均一温度; Th(all)-包裹体完全均一温度; (L, V)均一呈液相(L)或气相(V)。

* 经加热处理包裹体已经爆裂, 流体泄出, 不能测定; 其它成分包裹体, 均一温度改变, 造成形成温度改变, 表中方括弧内的数值为加热后包裹体测定和计算数值。

蓝宝石鉴别的特殊标志,其它矿区产出的海蓝宝石中,难以有相似于这两种类型的特殊包裹体。另外,现有人工条件下合成的海蓝宝石,即使几个阶段形成的热力学参数控制得完全相同于天然宝石,由于时间长短难以确定,一般地讲人工宝石不如天然宝石生长时间长,因而人工宝石中流体包裹体也不如天然宝石发育,现有人工条件下合成的海蓝宝石中,更难以捕获与天然宝石相同形态、相同特征的特殊包裹体。

(2) 利用包裹体热力学参数鉴别:

a. 利用均一温度、含盐度进行鉴别:本区海蓝宝石中不同的流体包裹体具有不同的均一温度和含盐度,其它矿区产出和人工条件下合成的海蓝宝石,即使其中流体包裹体相同,它们相应的均一温度、含盐度也不可能完全相同。

b. 利用形成时的热力学参数进行鉴别:本区海蓝宝石经历伟晶岩浆—热液作用三个演化阶段,三个演化阶段包裹体的形成条件有所不同,利用捕获的包裹体求得的形成温度、形成压力均有特定数值。其它矿区产出的海蓝宝石由于演化阶段不同,同样阶段的形成条件也有所差异,利用相应包裹体所求得的形成温度、形成压力也难以有相同的数值。

(3) 人工处理过海蓝宝石的鉴别

宝石人工处理的方法目前有染色法、漂白法、加热法、涂层法和辐射法等。对于海蓝宝石常常使用 γ 射线照射,使无色和浅色绿柱石色彩变蓝;利用短波紫外线照射,使粉色绿柱石的色彩变成深蓝色;另外常常使用加热法,排除原石中的黄色,使宝石色彩变成纯蓝绿色。无论是辐射法还是加热法,对于其中的包裹体,特别是含有 CO_2 的包裹体均有不同程度的破坏作用。

我们对本区海蓝宝石进行了加热试验,将原石样品在高温加热炉中恒温于 $400\text{ }^\circ\text{C}$,时间为36小时,然后淬火分析,结果是其中纯 CO_2 包裹体和 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 包裹体变化比较明显,许多大的包裹体发生破裂,不少包裹体爆裂成不规则状,它们连接相通而形成不规则裂纹,包裹体成分发生泄漏,原来一些有机质成分由于加热后产生氧化作用,变成黑色碳质成分残留在包裹体壁上,致使新生成的不规则微裂隙变成半—不透明,造成整个原石中的色调变深。其中包裹体均一温度与原来未变化包裹体的均一温度也有所差异,其变化情况可见表2中括弧内的数值和说明。这种只是在较低的温度加热时($400\text{ }^\circ\text{C}$),就发生如此大的变化,因此,用辐射法或其它人工方法处理本区宝石时,由于 CO_2 流体辐射后内能的增大,包裹体也会发生上述变化。 CO_2 包裹体破裂、爆裂,造成新生不规则微裂隙; CO_2 包裹体形态、成分和热力学参数的变化,是判定本区海蓝宝石进行过人工处理的最好证据。

5 结论

(1) 新疆阿勒泰可可托海花岗伟晶岩脉之中的海蓝宝石存在特殊的流体包裹体组合,包括:(a) 熔体-气液流体包

裹体,它分为两种类型:熔体+ CO_2 流体包裹体;熔体+ $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}$ 流体包裹体。(b) 气液流体包裹体,主要有五种类型: $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 不混溶流体包裹体;纯 CO_2 包裹体;纯液相包裹体;高盐度水溶液包裹体;低盐度水溶液包裹体。其中以熔体-气液流体和 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 不混溶流体包裹体类型分布最广。

(2) 对于海蓝宝石中流体包裹体成分、形成热力学条件进行了测定和计算,得出不同期次形成温度、压力变化范围较大为特征,捕获温度从大于 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐降低到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,捕获压力从大于 300 MPa 也递减到 $200\sim 100\text{ MPa}$ 。

(3) 流体包裹体形成的热力学条件为合成宝石提供了实验数值依据。

(4) 流体包裹体特殊的组合类型和标志特征以及一定的热力学参数数值是区分本区和其它产地及人工合成海蓝宝石的标志。人为加热使其中的 CO_2 流体包裹体形态和热力学参数有较大的变化,这是鉴别本地宝石进行过人工处理的最好证据。

References

- Duan Z *et al.*, 1992a. An equation of state for the $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system: I. Pure system from 0 to $1000\text{ }^\circ\text{C}$ and 0 to 8000 bar . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56:2605~2617
- Flowers GC. 1979. Correction of Holloway's (1977) adaptation of the modified Redlich-Kwong equation of state for calculation of the fugacities of molecular species in supercritical fluids of geologic interest; *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69:315~318
- Holloway JR. 1981. Compositions and volumes of supercritical fluids in the Earth's crust. In: Hollister LS and Crawford ML (eds.), *Fluid inclusions: applications to petrology*; Short Course Handbook. Min. Assoc. Canada, 6:13~38
- Liu Bin. 1987. Immiscible fluid inclusions as geothermometer and geobarometer, *Chinese Science Bulletin*, 32(14):978~982 (in Chinese)
- Liu Bin and Shen Kun. 1999. *Thermodynamics of fluid inclusions*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Lu HZ. 1997. *Mineralizing fluid*. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House (in Chinese)
- Lu HZ, Chi GX and Wang Z. 1995. *Model and tectonical environments of typical mineral deposits in the world*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

附中文参考文献

- 刘斌. 1987. 利用不混溶流体包裹体作为地质温度计和压力计. *科学通报*, 32(14):978~982
- 刘斌,沈昆. 1999. *流体包裹体热力学*. 北京:地质出版社
- 卢焕章. 1997. *成矿流体*. 北京:北京科学技术出版社
- 卢焕章,池国祥,王中刚. 1995. *典型金属矿床的成因及其构造环境*. 北京:地质出版社