

鲁东地区主要副矿物晶体化学特征的研究

康宝田

(冶金部山东地质勘探公司第二地质勘探队)

岩石中副矿物的晶体形态主要受岩石化学及形成时的物理化学条件所控制。矿物晶体化学成分的变化反映了岩性的差异。由于不同的岩石形成时,介质的酸度和碱度有所不同,其中副矿物晶面生长速度也就不同,从而形成不同的晶体形态。因此,研究副矿物的晶体化学特征,对探讨岩石和矿床成因、成矿专属性和地层对比等都起着重要的作用。

目前对岩石中副矿物的研究,特别是对分布普遍、含量较高、化学性质稳定的锆石、榍石和磷灰石的晶体化学特征的研究,不论从深度和广度上都很不够。笔者从1978年以来,一直从事鲁东地区副矿物研究工作,据自己多年工作成果,结合分析前人资料,对本区上述副矿物的晶体化学特征和标型特征取得一点认识,在此提出,以供探讨,不当之处,敬请批评指正。

一、锆石晶体化学特征

(一) 锆、铪元素的地球化学行为及其在本区分布特点

锆(Zr)、铪(Hf)两元素是锆石晶体的基本元素。它们均为亲氧元素,两者密切共生,难以分离,这主要是因为它们的物理、化学性质相似,主要的地球化学参数近似的缘故。它们以无限类质同像形成连续系列矿物锆石——铪石。

在本区锆、铪元素多以独立矿物产出,富含于偏碱性岩石(正长岩)、石英二长岩和酸性侵入岩(花岗岩、花岗闪长岩)中。而在出露面积较大的胶东群变质岩和玲珑混合花岗岩中也有相当的数量,锆主要是产在晶质锆石中,而铪是在变生锆石中。

从岩石化学特点显示,本区锆和铪主要富集于岩浆阶段,其次是伟晶岩阶段和气成阶段。在花岗岩中一般Zr/Hf比值是由中心相→过渡相→边缘相依次降低。同时随着岩性由超基性、基性向酸、碱性岩演化,锆和铪的含量逐渐增加,Zr/Hf比值逐渐减小。

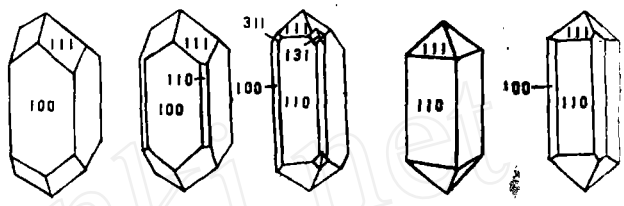
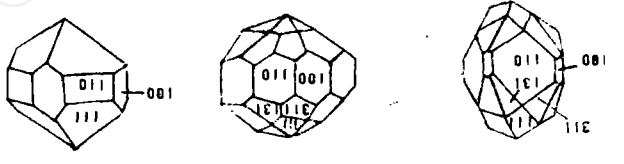
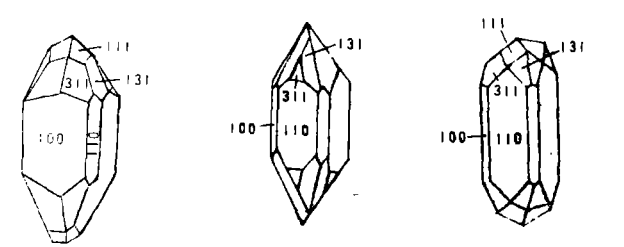
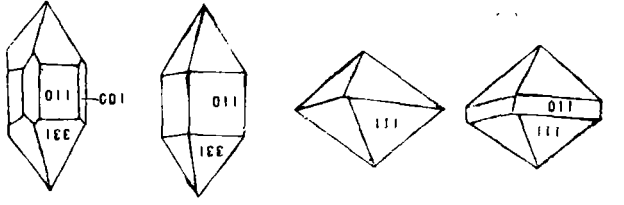
(二) 锆石晶体形态与岩石化学成分的关系

锆石晶体形态与岩石化学成分有关,这是大家一致公认的。但对于不同地区来说,由于受到某种因素干扰,矿物晶体形态随之发生变化。

本区常见锆石晶体对称要素总合为 L^44L^25PC ,系复正方双锥面体类。最主要单形有 $\{110\}$ 、 $\{100\}$ 、 $\{111\}$ 、 $\{311\}$ 和 $\{101\}$ 。常见的晶体是由这些单形以不同的发育程度组成各种聚形。这些不同的晶体形态都与其结晶时的介质环境密切相关。在不同的生成条件下,可以出现不同的单形组合。通常,在相对富含钾、钠和硅的火成岩中锆石晶体柱面

$\{110\}$ 、 $\{100\}$ 发育,锥面 $\{111\}$ 常见,晶体一般呈柱状;在富含钾、钠而相对贫硅的火成岩中,锥面 $\{111\}$ 发育,晶体呈四方双锥体;在钾、钠和硅含量低的成火岩中,锆石晶体复正方双锥 $\{311\}$ 、 $\{131\}$ 发育,而锥面 $\{111\}$ 发育较差,甚至消失,柱面 $\{110\}$ 、 $\{100\}$ 常见。根据锆石晶体形态特征与岩石化学成分的关系,本区锆石大体可分以下几种类型,(表1)。

表1 鲁东地区不同岩性锆石形态特征

类型	结晶习性	产状	晶体形态
柱状锆石	以柱面 $\{100\}$ 和锥面 $\{111\}$ 为主; 有时柱面 $\{110\}$ 和正方双锥 $\{311\}$ 发育	产于基性岩、中性岩、酸性岩中	
短柱状锆石	柱面 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 和锥面 $\{111\}$ 、 $\{311\}$ 、 $\{131\}$ 发育程度大致相等	酸性花岗岩或花岗闪长岩中	
长柱状锆石	锥面 $\{311\}$ 或 $\{131\}$ 发育,柱面 $\{110\}$ 通常发育,有时 $\{100\}$ 发育	花岗闪长岩、斜长花岗岩、花岗斑岩、混合花岗岩	
双锥状锆石	锥面 $\{111\}$ 最发育,柱面 $\{100\}$ 为主,有时是双锥状;另一种锥面 $\{331\}$ 、柱面 $\{110\}$ 发育	产于偏碱性石英二长岩、正长岩中	

(三) 变生锆石和再生锆石的晶体形态特征

1. 变生锆石晶体特征

变生锆石在鲁东地区的胶东群变质岩、玲珑混合花岗岩等岩石中有着广泛的分布。根据其化学特点主要分为二种:¹⁾

(1) 含水变生锆石: 显示水在锆石变生作用中的存在。我区在灵山沟B₁-L (中粒花岗岩)、蒋家B₃-L₁ (中粒花岗岩)、曲城M₄-1 (中粒黑云母花岗岩) 人工重砂样品中均可见到。锆石呈乳白色、乳黄色和乳红色三种, 半透明, 强油脂光泽。晶面具裂纹, 呈次浑园状产出。

目前对这种锆石水的赋存状态认识不一, 一般有两种观点。其一是认为, 变生锆石中水的含量比晶质锆石 (正常晶体锆石) 中的高, 是因为在变生作用中锆石吸附了水, 水呈分子状态存在于锆石中。另一种观点认为, 水在变生锆石中主要呈四面体 $[(OH)_4]^{-}$ 形式置换硅氧四面体 $(SiO_4)^{4-}$, $[(OH)_4]^{-}$ 四面体降低了晶体结构的牢固性, 从而成为锆石转变为变生状态的先决条件。

И. М. 毕莫娃, E. C. 鲁基斯娜 (1972) 通过红外光谱、核磁共振、热分析等测试手段研究锆石表明, 随着锆石变生作用由强而弱, 水的总含量趋于增加。并且观察到在加热至300°C时, 变生锆石和半变生锆石的德拜图谱和红外光谱没有什么差异, 证明在这个温度时样品逸出的水不是结构水, 而是被矿物吸附的分子水。

(2) 含放射性元素(U, Th)变生锆石: 此种锆石是由锆石自身的辐射作用引起构造破坏, 使光性和比重发生变化, 即产生变生作用。在变生作用过程中, 可出现 $(OH)_4 \rightleftharpoons SiO_4$ 置换, 随着变生程度加强, 锆石的光性 (折光率) 和放射性强度也有所改变。具有这些特点的变生锆石, 在本区酸性岩、偏碱性岩和中性岩的人工重砂样品中均可见到。笔者曾对本区招远—掖县一带26个人工重砂中的锆石进行过光性 (折光率) 测试, 统计结果表明, 锆石变生作用强度与折光率成反比关系, 变生作用愈强, 折光率降低愈明显。例如, 随变生作用由弱到强, Ne (平均值)²⁾ 由1.975→1.834; No (平均值) 由1.927→1.793。而另一方面, 我们曾测定过变生锆石的放射性强度, 用铂金丝环将锆石粉末或单晶颗粒与氟化钠 (NaF) 烧成熔球, 以荧光灯照射时则熔球产生鲜艳绿色萤光, 可以根据萤光强弱来判别放射性强度的高低。测试结果表明, 变生作用愈强的锆石, 放射性强度愈高, 颜色愈鲜艳。

这类锆石多为玫瑰红色、紫红色、红褐色, 半透明, 强油脂光泽和腊状光泽。多呈浑园状—次浑园状产出, 伸长系数较小, 一般为2±。晶面裂纹发育, 紫外线照射下不发光, 少量具环带结构。

2. 再生锆石晶体形态特征

这种锆石在本区产于胶东群变质岩和混合花岗岩中, 含量高, 种类多。它主要是经强烈区域变质作用, 继承保存下来的锆石。此种锆石在超变质作用过程中发生重结晶作用, 具有“二次生长” (或称再生) 现象, 可提供岩石成因 (沉积变质、混合岩化) 的证据。本区再生锆石主要有以下几种:

(1) 捕虏晶锆石: 它是原生结石再次生长的结果。通常中心为一种锆石 (浅红色),

1) 长春地质学院, 1975, 重砂工作参考手册。

2) 为26个人工重砂样品中锆石测定的平均值。

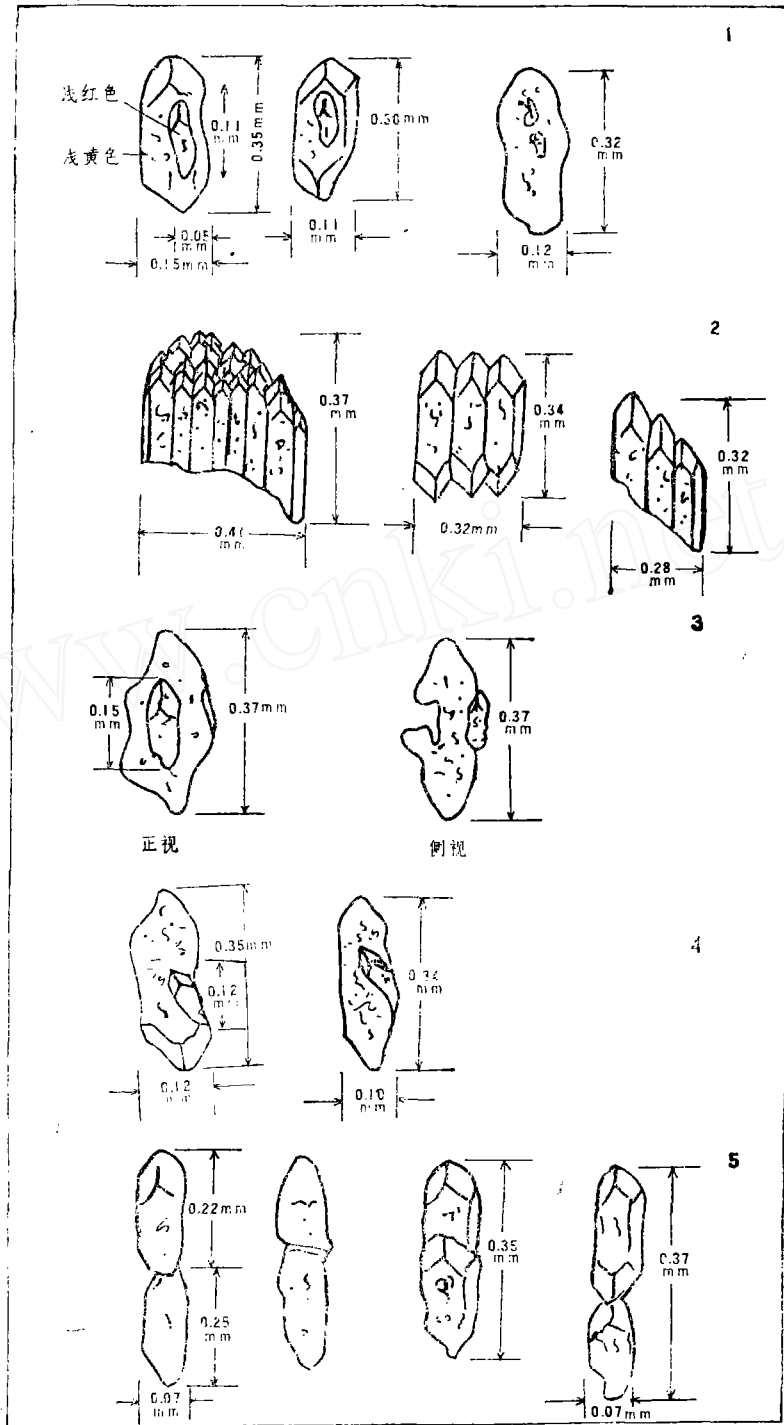


图1 再生锆石晶体形态特征

- 1.捕虏晶锆石（鲁东招远蒋家村）；
- 2.晶簇状平行连晶集合体锆石（玲珑金矿，蒋家村北）；
- 3.母子晶（子晶、晶瘤）锆石（灵山、磨山采石场）；
- 4.镶嵌状锆石（郭家岭）；
- 5.脖子状（藕节、竹节）锆石（灵山至北截）

它被另一种微透明浅黄色锆石外壳所复盖。产于招远蒋家胶东群粘土质页岩和斜长角闪岩中(图1)。

(2) 晶簇状(集合体连晶)锆石：这种锆石见于本区玲珑混合花岗岩中。它是在强烈混合岩化作用阶段形成的。这种锆石反映了其生成过程具有多阶段性。在成岩过程中，受混合岩化、花岗岩化作用，锆石生长为自生和次生锯齿状，并以集合体形态、晶簇状、平行连生状晶出，在个别大晶体中，尚残留数个小晶体平行生长痕迹。F.C.裴蒂压认为，这种在柱面上带锯齿状的自生锆石，其锯齿实际上是次生加大作用产生的一些细小锥面，这些锥面和锆石的主轴有着一定交角(图1之2)。

(3) 母子晶(晶瘤或凸起)锆石：这种锆石产于招远、灵山沟、磨山一带花岗岩化岩石中。通常在一母晶的外表，再生长出一个小晶体(子晶或晶瘤)，也叫凸起。这种凸起有的贴附在主晶(母晶)晶面上，有的依附在晶体顶端或尾部。据B.B.梁霍维奇(1960)研究，这种特殊的锆石形态，乃是晶体生长痕迹，可作为花岗岩化的标志(图1之3)。

(4) 镶嵌状锆石：产于郭家岭岩体中。镶嵌状锆石的生成过程是，原生锆石破碎成数个碎屑，各碎屑的位置稍有错动，后经再次生长，形成大晶体。这种锆石的晶面不是一个完整平面，而是由数个锆石平整晶面镶嵌而成(图1之4)。

(5) 脖子状(藕节状或竹节状)锆石：产于招远灵山、北截岩体中。这种锆石的腰部有部分溶解，而在两端出现生长现象，因此锆石具有腰部狭小而两端粗大的形态(图1之5)。

二 榧石晶体化学特征

(一) 概述

榧石是化学性质比较稳定的矿物，但在水热作用影响下会分解为方解石、石英、金红石和锐钛矿。有时在其表面覆盖一层氧化薄膜(白钛石)。从结晶分异作用观点来看，榧石中的类质同像置换只与钙和钛有关，而与硅、氟、氢氧根关系较少，有时钙可被钠、稀土、锰、锶或钡代换。磷和钛的化学性质虽有很大不同，但两者经常伴生，因此榧石、磷灰石能在同一环境下从岩浆中分离出来，本区不少岩体都具有榧石—磷灰石型副矿物组合(表2)。

榧石的主要组分钛，通常不能形成简单的硅酸盐($TiSiO_4$)，而往往与其它一些阳离子(Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等)一起形成复硅酸盐。当岩浆结晶时，钛便首先与钙结合成榧石。据B.B.梁霍维奇(1963)，岩浆中的副成分元素，可形成各种不同的副矿物，也可以类质同像方式分散在主要造岩矿物中，它的行为取决于元素本身的晶体化学性质，同时也取决于各种

元素的浓度、含量比例、介质的温度和压力等因素。岩石中主要元素比值 $\frac{Na+K+2Ca}{2Al} > 1$

(原子比)时，出现榧石—磁铁矿—磷灰石—褐帘石副矿物组合，反之则出现独居石—钛铁矿—金红石组合。前一种情况表明斜长石析出后钠、钾和钙尚有剩余，部分钙进入角闪石晶格，部分与 PO_4^{3-} 结合生成磷灰石，若钙还有剩余，则钙与钛结合形成榧石。

榍石主要赋存于正常系列岩石中，在铝过饱和系列岩石中则含量很低。如平顶山、人和集、艾山—雨山等岩体（中细粒花岗岩和花岗闪长岩）中副矿物达19种之多，而榍石含量明显增高，可达 Kg/T 以上。又如郭家岭岩体据主要元素含量为正常系列岩石，榍石含量较高，可达 3010g/T ；相反，骠山岩体（中细粒黑云二长花岗岩）的 SiO_2 含量很高（平均 73.69% ），铁镁含量均低（ MgO 平均 0.18% ， FeO 平均 1.26% ），属铝过饱和系列岩石，榍石含量甚微（表2）。

此外笔者还对本区榍石进行了电子探针和红外光谱分析。其结果见表3和图2。

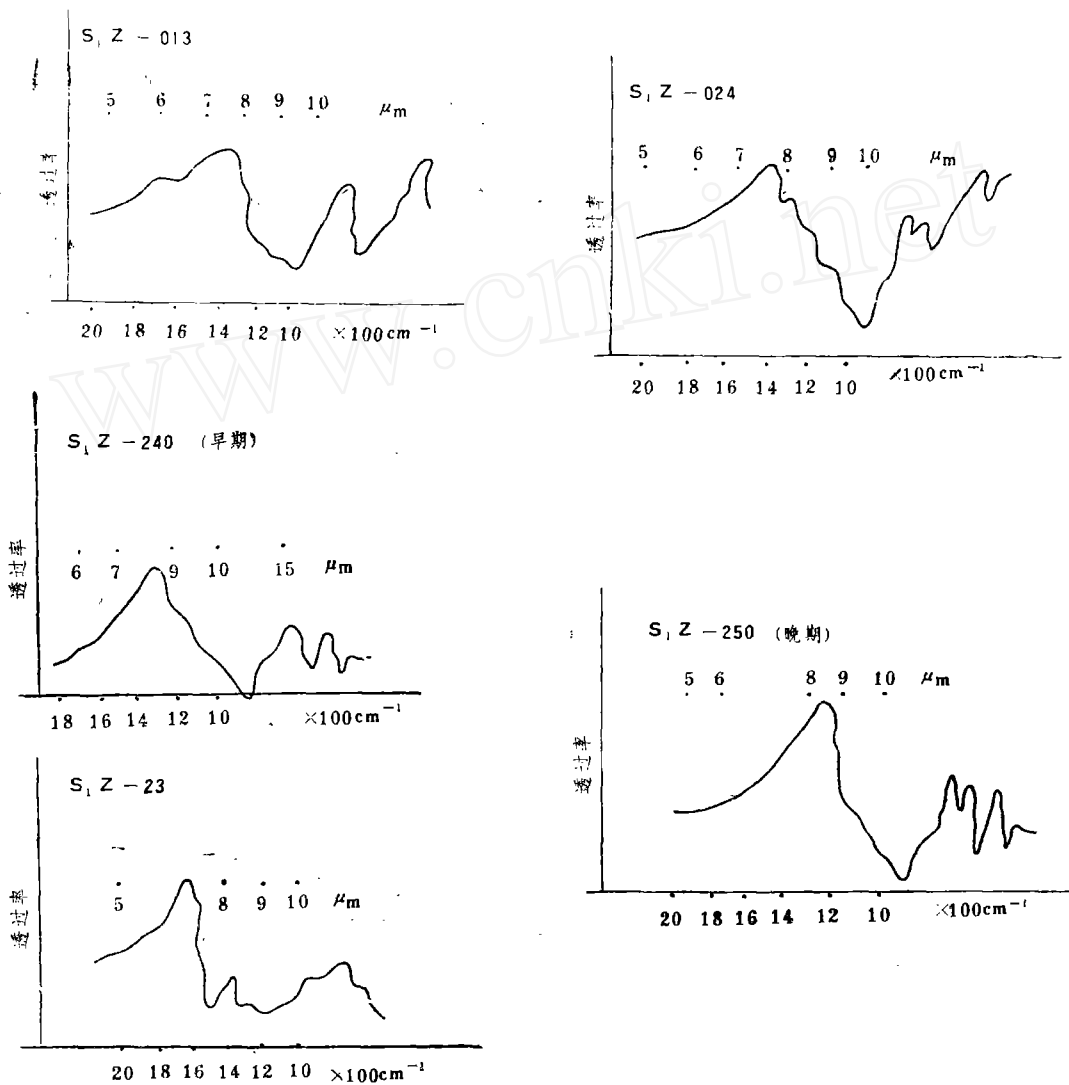


图2 锆石 ($\text{S}_1\text{Z}-013$, $\text{S}_1\text{Z}-024$)、榍石 ($\text{S}_1\text{Z}240$, $\text{S}_1\text{Z}250$) 和磷灰石 ($\text{S}_1\text{Z}-23$) 的红外光谱曲线

表3 锆石、榍石和磷灰石化学成分及微量元素含量表 (电子探针分析)

样品号码	矿物名称	采样地点	分 析 项 目 和 结 果 (%)													
			MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	HfO ₂	Ce	V	Co	Ni
S ₁ Z-240	榍石	灵山沟		2.45	28.96	26.97	37.24	0.51	1.50							
S ₁ Z-250	榍石	北 截		3.05	29.28	28.11	36.57	0.16	1.46							
S ₁ Z-25	锆石	招远大刘家			33.28						65.42	1.30				
S ₁ Z-24	锆石	磨 山			33.40						65.34	1.26				
S ₁ Z-250	磷灰石	招远大刘家				55.34					41.29					0.03

样品号码	矿物名称	采样地点	化 学 式
S ₁ Z-240	榍石	灵山沟	[Ca _{0.9707} Fe _{0.0422} Mn _{0.0145}] 1.0274 [Ti _{0.9409} Al _{0.0969}] 1.0378 [Si _{0.9727} O ₄] O
S ₁ Z-250	榍石	北 截	[Ca _{1.0010} Fe _{0.0405} Mn _{0.0046}] 1.0456 [Ti _{0.9181} Al _{0.1185}] 1.0366 [Si _{0.9732} O ₄] O
S ₁ Z-25	锆石	招远大刘家	[Zr _{0.9732} Hf _{0.0114}] 0.9846 Si _{1.0152} O ₄
S ₁ Z-24	锆石	磨 山	[Zr _{0.9711} Hf _{0.0110}] 0.9821 Si _{1.0178} O ₄
S ₁ Z-250	磷灰石	招远大刘家	因不能测F, 未能计算

测试单位：冶金部地质研究所

本区榭石可分早期和晚期两种。电子探针分析结果表明，早期榭石的SiO₂和CaO含量较晚期的高，而早期榭石的TiO₂则较晚期的低。其它化学成分也有所差异。矿物化学式见表3。

红外光谱分析显示，早期榭石具有峰值为1310Cm⁻¹的吸收带。另外尚出现二个弱峰值680Cm⁻¹吸收带和535Cm⁻¹吸收带。晚期榭石具有峰值为1325Cm⁻¹的吸收带和三个弱峰值640Cm⁻¹，615Cm⁻¹和530Cm⁻¹吸收带。

(二) 榭石晶体形态与岩石化学关系

榭石晶体形态主要依赖于析出时间、温度、及碱和挥发分含量的改变。本区榭石多以单晶体出现，常呈横切面为菱形的扁平信封状、柱状聚形。最常见的单形为{110}、{100}和{111}等，依{100}而成的简单接触双晶最常见。本区某些岩石中榭石晶体形态见表4和图3。

岩石酸碱性程度不同，其中的榭石晶体形态特征也不同。酸性岩(如滦家河岩体)中的榭石多呈不规则板柱状出现，{001}面特别发育时往往成板状，依{100}成双晶。偏碱性

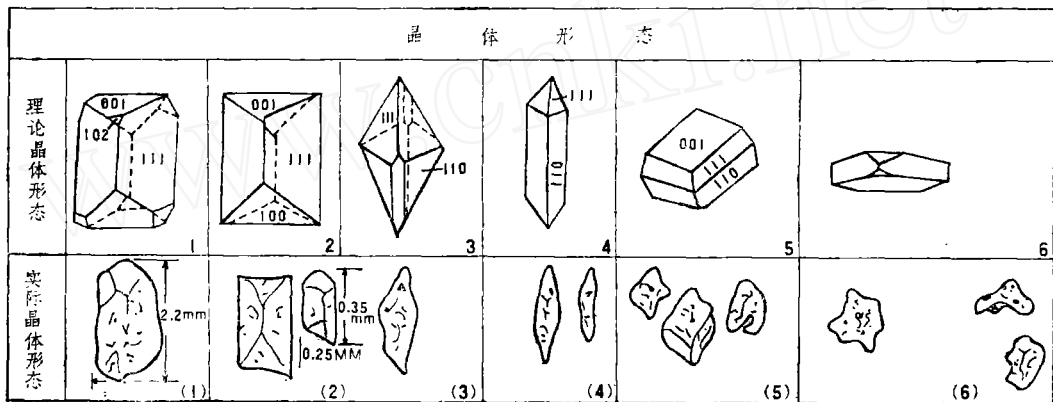


图3 鲁东地区榭石晶形形态

表4 鲁东地区某些岩石中榭石晶体形态特征

岩石性质	岩体名称	岩石名称	榭石结晶形态
岩石类别	酸性岩	滦家河岩体	花岗岩
	偏碱性岩	甲子山岩体	正长岩
	变质岩及混合花岗岩	玲珑、郭家岭岩体	黑云变粒岩 斜长角闪岩
			以扁平信封状晶出，{001}面特别发育，依{100}成双晶。见图3之2
			不规则板柱状，粒状晶出，{110}柱面发育。见图3之4和5
			不规则粒状，晶体棱角、顶角平滑，晶面、柱面多孔和麻点，可见网状，壳状晶体。见图3之5和6

岩(如甲子山岩体)中的榍石晶体一般都呈扁平信封状出现。 $\{110\}$ 柱面发育,有时可见良好的晶体,但不普遍。胶东群变质岩中的榍石呈网状、壳状及少量环状晶体产出。晶体顶端和棱角平滑,晶面(柱面)多孔。这种晶体形态数量的多寡,可反映变质作用强度,另外,在玲珑混合花岗岩岩体中,也可见到上述榍石的晶体特征。

本区榍石普遍可见裂开面,这些裂开面平行 $\{221\}$,其方向与晶体外形是平行的。依 $\{100\}$ 成双晶, $\{110\}$ 解理清晰。

(三) 榍石的元素地球化学特征

榍石是侵入岩中微量元素的主要携带者之一。就目前所知榍石中伴生元素达20多种,在岩石中有65—80%的钛富集于黑云母中,其余赋存在榍石等含钛的副矿物中。

从单矿物光谱分析(人工重砂的重矿部分)看出,本区榍石含22种微量元素(表5)。榍石多与阳离子如 Ca^{2+} 、 Na^{+} ……等一起形成复硅酸盐,有时一部分钙被稀土元素置换,所以个别样品中稀土元素含量较高。如Rz—19样品中,可见到钽榍石,晶体为黄褐色,粒状。当 Ca^{2+} 被三价稀土元素置换时,为保持电价平衡,一部分 Ti^{4+} 离子由 Al^{3+} 代替。另外在学福岩体中,曾发现富 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 的榍石(化学成分 Fe_2O_3 为2.67%; Al_2O_3 为17.4%),称为铁榍石。

就榍石中微量元素分布而言,在酸性岩及伟晶岩中,榍石的特征是含稀土元素(Y、Nb、Yb)和铝、铁、钛,在偏碱性岩中榍石主要是含铌、钽和碱金属,其次是稀土元素,在中—基性岩中榍石主要是含铝、铁、氟和氯等。

在变质和交代岩石中的榍石,由于钙、钛和铁含量增高,有利于容纳晶体化学性质相似的稀有元素。如稀土元素主要呈类质同像进入榍石中,从而导致了岩石中稀土磷酸盐含量大大减少或消失。铌、钽也往往不呈独立矿物析出,而以类质同像进入榍石中。

三、磷灰石的晶体化学特征

(一) 概述

磷灰石的分子式为 $\text{A}_5[\text{XO}_4]_3\text{Z}$,式中A主要是 Ca^{2+} 离子,但它可以被 Mn^{2+} 、 Sr^{2+} 、稀土(主要是Ce和 Y^{3+})等离子作类质同象置换; XO_4 主要代表 PO_4^{3-} ,它也可以被 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 、 $[\text{SiO}_4]^{2-}$ 、 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 、 $[\text{AsO}_4]^{3-}$ 和 $[\text{VO}_4]^{3-}$ 等所代替;Z主要代表 F^- 、 Cl^- 和 $[\text{OH}]^-$ 。最常见的磷灰石亚类有氟磷灰石、氯磷灰石、氢氧磷灰石和碳磷灰石。

磷灰石是一种富含挥发分的副矿物,它是当岩浆分异作用进行到一定阶段,随富含挥发性组分(CO_2 、 Cl 、 F 和 H_2O)的矿物一道晶出的。磷灰石与角闪石、黑云母密切共生,常常被包裹在这两种矿物中。

虽然磷和钛的化学性质有很大差异,但这两种元素经常以磷灰石和榍石的形式,在大致相同的环境下从岩浆中分离出来,相伴产出。前已提到,当岩石中主要元素的比值($\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / 2\text{Al} > 1$ (原子比)时,便出现榍石—磷灰石—磁铁矿—褐帘石副矿物组合。在本区很多岩体(如郭家岭、人和集、巴德山、甲子山和文登岩体等)都具有榍石—磷灰石型

副矿物组合(表2)。另外,在本区胶东群变质角闪石岩中,均有磷和钛富集,形成磷钛矿床。这种矿床形成于岩浆分异作用晚期,当岩浆逐渐富集了卤素、磷酸及水蒸汽等挥发组分时,便在适当介质条件下形成了磷灰石。

磷虽为亲石元素,但在硅酸盐-金属系统中则明显地表现出亲铁性。所以磷与铁的关系常常也很密切。如本区牟平县祥山磷灰石-磁铁矿,是在大理岩受火成岩影响下形成的。磷灰石和磁铁矿各自构成单独可采的矿体,而两者空间关系甚为密切(铁矿为磷矿的直接顶底板)。

(二)磷灰石晶体特征

1.晶体形态特征:本区不同岩石中磷灰石的晶体形态有所不同,分述如下。

(1)酸性岩中的磷灰石:磷灰石主要有两种形态。一种是长六方柱状晶体,自形程度完好,柱面{1010}发育。一种是短六方柱状晶体。

通常认为前者形成较早,从原生岩浆中析出,多以矿物包体(固相包体)出现。如本区郭家岭岩体中的磷灰石往往被独居石、锆石和造岩矿物所包裹。短六方柱状磷灰石形成较晚,是在富含挥发分的熔融体中析出。其特点是粒度大、颜色深。

(2)混合花岗岩中的磷灰石:招一掖一带的玲珑花岗岩是本区分布面积最广的岩石之一。其中的磷灰石按成因可分为两大类:

一类是继承磷灰石 呈浑圆的六方柱状,灰白色,半透明;随混合岩化作用加强,浑圆度改变。

另一类是新生磷灰石 呈次棱角状,无色-浅黄色。透明至半透明。晶体沿柱面{1010}发育,锥面{1011}不明显,甚至消失。晶体普遍熔融,晶面粗糙,具麻点和熔蚀孔。个别晶体次生加大现象明显,具明显凸起,呈藕节状、蘑菇状和竹节状(图4)。晶体粒度细小 长轴0.15-0.3mm,短轴0.1-0.15mm,伸长系数1.5-2。这种磷灰石是经受

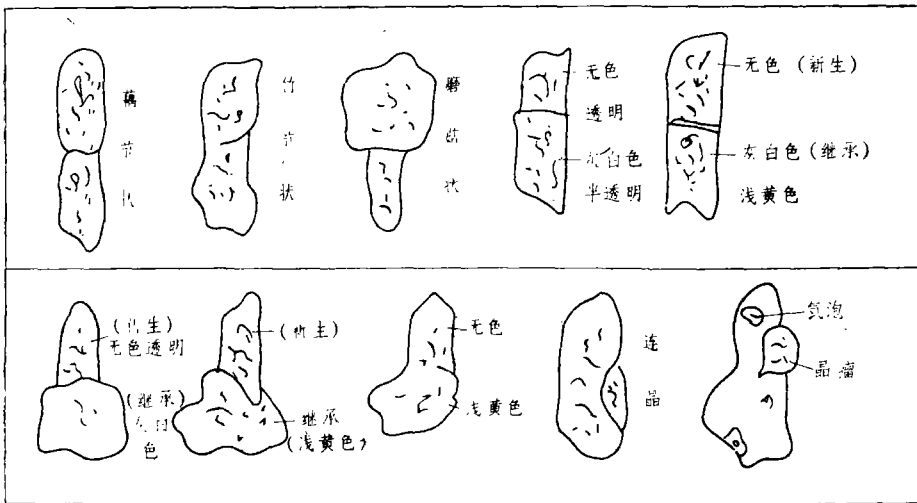


图4 混合花岗岩中磷灰石晶形特征

1) 山东省地质局综合研究队, 1976, 怎样找磷矿。

多期地质作用，迭加改造的产物。

在混合花岗岩中，磷灰石多赋存于基体和脉体黑云母中，有时呈锆石的包体。

(3) 蚀变花岗岩中的磷灰石：在本区招远县台上金矿区偶尔可见磷灰石的次棱角状粗大六方晶体，产于含金黄铁绢英岩中。磷灰石粒度可达0.34—0.5mm。这可能意味着介质的挥发分（首先是水）浓度增高，因为挥发分浓度增高，降低了流体（岩浆？）的粘度，这就有助于晶体生长。

2. 其它物理特征

(1) 颜色：在不同的岩石中，磷灰石的颜色随所含的杂质元素种类、含量多寡及价态不同而改变。本区酸性岩浆岩中的磷灰石通常为无色—白色柱状或粒状晶体；在中性—偏碱性侵入岩中磷灰石为浅灰白色，透明；在变质岩和混合岩中磷灰石为黄色、黄褐色，半透明；在蚀变交代岩中磷灰石为乳白色，半透明的不规则粒状晶体。因此说明磷灰石的颜色可以反映岩浆的地球化学特点和磷灰石的成因特点。

(2) 折射率：本区磷灰石折射率变化的规律性不明显。总的趋势是由岩体的内部相至外部相磷灰石的折射率有所降低，由酸性岩经中性岩到碱性岩，磷灰石折射率略有增高；在混合花岗岩和变质岩中磷灰石折射率有所突变（增加）。这可能是由于磷灰石中微量元素含量变化引起的。

根据磷灰石单矿物光谱分析和电子探针分析结果，说明在伟晶岩中的磷灰石含稀土元素和锰较高；由交代作用形成的磷灰石特点是含氯和 SO_3 ；晚期钾质花岗岩中磷灰石含铯较高。这些可能导致折射率的变化。经分析测定，本区以氟磷灰石为主，含量较高，分布面积较广，其折射率值变化范围为： $n_e = 1.624 - 1.629$ ， $n_o = 1.630 - 1.634$ 。

(三) 磷灰石的富集规律

磷灰石是火成岩中磷的主要浓集矿物，但作为副矿物，磷灰石含量仅占火成岩矿物含量的2.5%，在花岗岩中磷灰石含量甚低，只有0.1—0.3%。在各种火成岩中，碱性岩类、超基性—碱性岩类和基性岩类含磷灰石较高，因此，基性岩中的磷灰石矿床较多，而中酸性岩石中磷灰石含量较低。

本区各类酸性岩的磷灰石平均含量为224.32g/T，在偏碱性岩石（甲子山岩体）中，磷灰石含量为1983.4g/T，在中性岩（学福岩体）中为2455.37g/T（如图5所示）。

就各岩体中磷灰石的空间分布而言，一般是岩体上部的磷灰岩含量较岩体下部的高，岩体中心相的磷灰石含量较边缘相的为富。如郭家岭岩体边缘相磷灰石含量为18.8g/T，而中心相（岩体顶部）含量可达144g/T。另外，在岩体接触带附近，如遭受岩浆挥发分作用（气成—热液作用）显著或强烈时，磷灰石也有所富集。

四、副矿物组合与岩体含矿性的关系

前已述及副矿物特征和副矿物组合与岩体的岩石化学特性密切相关，本区具有不同副矿物组合的花岗岩，矿化特点也有所差异。例如：

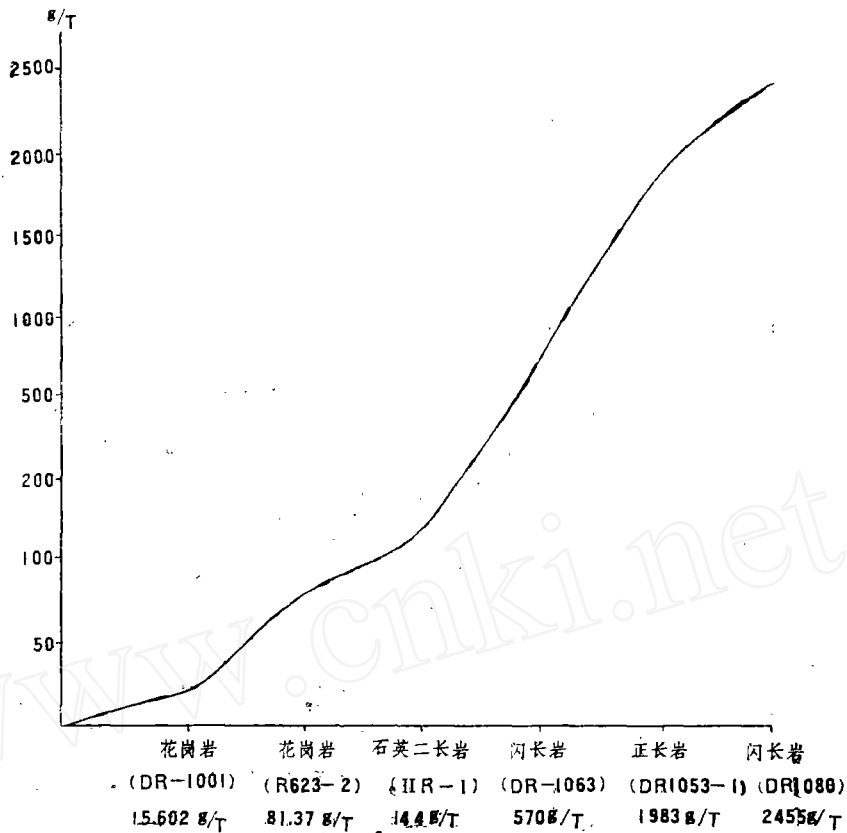


图5 某些岩石中的磷灰石含量变化曲线

榍石型花岗岩：可能有钨、铀、铅和锌矿化；

榍石—锆石型花岗岩：具有稀土、铀、钍、铪、铌和钽矿化；

榍石—磁铁矿型花岗岩：有钼、铜、铁矿化；

榍石—磷灰石型花岗岩：可能有磷、钛和钒矿化。

本文中，有关锆石部分工作是在长春黄金研究所朱奉三高级工程师直接指导下完成的，榍石部分由中南工业大学张振儒教授进行了审阅，磷灰石部分由北京大学曹正民教授进行了审阅。本文综合写成后，又得到山东地质矿产局实验室李福堂、张起诚工程师的帮助，他们提出修改意见。笔者在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] V. M. 戈尔德施密特, 1959, 地球化学(沈永直等译)。科学出版社。

[2] B. B. 兹纳明斯基, 1963, Ti, Nb, Ta在含榍石花岗岩类中的分布(陈德潜摘译)。地质快报, 1963, 第1期。

[3] H. H. 阿姆申斯基, 1964, 花岗岩中副成分元素分布的某些规律(周玲棣摘译)。地质

快报, 1964, 第19期。

- [4]Ф.П.西米里诺夫等, 1976, 金和磷的地球化学联系及其在评价阿尔丹地盾含金性远景上的意义(郑秀中译)。地质地球化学, 1976, 第2期。
- [5]B.B.梁霍维奇, 1964, 副矿物—各种地质作用指示剂(向晓荣摘译)。地质快报, 1964, 第9期。
- [6]И.Г.谢尔巴科夫, Г.А.佩列若金, 1965, 论金的地球化学(黄金公司研究室译)。东北黄金公司金矿资料参考汇编, 第1集。
- [7]何铸等文, 1978, 鞍本地区锆石的二次生长。全国矿物岩石地球化学论文摘要汇编(矿物学部分)。
- [8]李应运, 1978, 火成岩中副矿物—榍石。全国矿物岩石地球化学论文摘要汇编(矿物学部分)。
- [9]康宝田, 1983, 胶东地区副矿物榍石的研究及其地质意义。全国第一届重砂矿物学术会议论文。
- [10]康宝田, 1983, 从山东招远金矿围岩的岩石化学特征探讨胶东群的含金性。中国区域地质, 第4期。

www.cnki.net

STUDY ON THE CRYSTALLOGRAPHIC AND CHEMICAL PROPERTIES OF THE
MAIN ACCESSORY MINERALS IN THE EASTERN SHANDONG REGION

Kang Baotian

*(The Second Exploration Party, the Geological
Exploration Corporation of Shandong Provincial
Department of Metallurgical Industry)*

Abstract

The three main accessory minerals, zircon, sphene and apatite which have stable chemical properties are widely distributed in the rocks in the Eastern Shandong Region. The accessory minerals can be used as an indicator of various kinds of geologic processes.

Zircon occurred in this region was mainly concentrated during the magmatic stage, and then the pegmatitic stage and pneumatogenic stage. The Zr/Hf ratios are reduced, in turn, from the central facies through the transitional facies and then to the border facies in the granites. The abundance of zirconium and hafnium increases gradually from the ultrabasic and basic rocks to the acidic and alkaline rocks. Two kinds of zircon with different typomorphic characteristics have been recognized: the crystalline zircon which occurs mainly in the intrusive rocks and dykes, and the metagenic and regenerated zircons which have various complex forms and occur mainly in the migmatized metamorphic rocks, migmatites and metasomatic granites.

Sphene, one of widespread stable accessory minerals in this region occurs mainly in the subalkaline and normal-series granitoids, but has a low-abundance in the Al-oversaturated series of rocks. In view of the crystallization differentiation, the isomorphous substitution in sphene is only related to calcium and titanium which was often accompanied with phosphorus when separated from the magma. As a result, the accessory mineral assemblage of sphene-apatite is characteristic of many rock masses in the region. In addition, sphene is one of the main carriers of trace elements in the intrusive rocks and 22 elements, so far, have been found in the sphene, including keilhauite and grothite with a relatively high Al and Fe³⁺ content. The cry-

stal forms and colours of sphene which vary with the rock types are discussed in this paper.

Apatite is an accessory mineral rich in volatile components. Apatite was separated from the magma in association with hornblende and biotite when they crystallized from the magma as the first group of volatile-bearing minerals. The close association of phosphorus and titanium in the geologic processes has led to the concentration of phosphorus-titanium (deposits) in the metamorphosed hornblendite in this region. The migmatization and granitization of the old metamorphosed intermediate-basic volcanic rocks has resulted in the remobilization and reconcentration of phosphorus and gold in the Eastern Shandong region which have a spatial and geochemical relationship, too.

www.cnki.net