地信网论坛
BBS.3S001.COM

前　言

稀有元素，种类很多。哪些元素归属稀有，各家说法不一。有的把钨、锡、钼、铋列为稀有元素；有的则将镓、铟、锗、铊划归稀有元素。本文所讨论的稀有元素，主要为锂、铍、铌、钽、锆、铪、铷、铯及稀土等；稀土元素包括铈组稀土及钇组稀土两大类。

近十年来，随着原子能工业、电子工业、人造卫星、宇宙飞船及国防工业等的发展，对稀有金属的需要量突飞猛增，大大促进了稀有金属矿产资源的寻找和开发工作。稀有金属的普查和勘探，以空前的速度和规模进行着。加上找矿新技术的运用，以及选冶技术的日益精良，一些新的矿床类型相继发现，一些储量大、品位高的矿床陆续投入了生产。

随着我国社会主义革命和社会主义建设事业的飞速发展，国防和民用工业各方面都对稀有金属提出了更高更多的要求。稀有金属矿床地质工作发展很快，特别是无产阶级文化大革命以来，国内相继找到一批储量大、类型新的稀有金属矿床。如含钽花岗岩、含磷钇矿混合岩等都是国内第一次发现。含重稀土的离子吸附型花岗岩风化壳矿床，国外除有个别地点作为矿物产地予以报导外，作为供工业利用的矿床，至今尚无先例。这些矿床的发现，不仅为我国工业利用提供了资源，而且大大丰富了稀有金属矿床学的内容。

本文是收集我国1973年8月以前的实际资料编写而成的。主要目的在于使从事普查找矿和勘探的广大地质工作同志，对我国稀有金属矿床类型，有一大致的了解，以资工作时参考。介绍矿床类型，必先涉及矿床类型的划分，这是一个既有实际意义又有理论意义的问题，因此，本文也作了适当的探讨。

全文分两章。第一章讨论矿床类型划分的依据，第二章介绍矿床类型。每一类型都附有矿床实例。对于研究工作较细，资料

31935

较多的矿床类型，如稀有金属花岗岩型及稀有金属伟晶岩型等。除矿床实例外，并对它们共同的地质特征作了初步的综合概括。鉴于国内最近出版了一些有关稀有金属矿床地质的论文[①]，为避免重复，文中只重点列举个别重要的矿床实例。

由于本文涉及的面较广，资料又收集不全，挂一漏万，在所难免，诚恳希望读者批评指正。

目　录

前　言

第一章　稀有金属矿床类型划分的依据……1

第二章　稀有金属矿床类型……12

内生矿床

一、与花岗岩类岩石有关的矿床……12

（一）稀有金属花岗岩型矿床……12

矿床地质特征概述……12

矿床实例……28

1. 四川某地褐钇铌矿锆石碱性花岗岩……28

2. 江西某地氟碳钇钙矿白云母化花岗岩及其风化壳……32

3. 江西某地铌钽铁矿细晶石钠长石化锂云母化花岗岩……34

4. 江西某地绿柱石钠长石化云英岩化花岗岩……39

5. 广东某地绿柱石日光榴石云英岩……41

（二）稀有金属伟晶岩型矿床……46

矿床地质特征概述……46

矿床实例……64

1. 云南某地绿柱石钽铌铁矿钠长石微斜长石伟晶岩……64

2. 四川某地钽铌铁矿锂辉石钠长石伟晶岩……67

3. 河南某地绿柱石细晶石铯榴石锂云母钠长石伟晶岩……69

（三）稀有金属细晶岩型矿床……71

（四）稀有金属条纹岩型矿床……76

（五）稀有金属热液脉……81
二、与碱性岩类岩石有关的矿床……85
矿床地质特征概述……85
矿床实例……89
1．东北某地稀有金属碱性岩……89
2．山东某地氟碳铈矿热液脉……94

变质矿床

一、稀有金属混合岩型矿床……96
二、稀有金属变碳酸岩型矿床……100

外生矿床

一、稀有金属风化壳矿床……108
二、稀有金属滨海砂矿……108
三、稀有金属河流冲积砂矿……114
四、稀有金属沉积矿床……119
（一）磷块岩中的稀土元素……119
（二）铝土矿中的钪……122
（三）盐类矿床中的锂……125
主要参考文献……126

第一章　稀有金属矿床类型划分的依据

前人曾对稀有金属矿床作过许多分类尝试，其中有两个比较大的缺点。一个缺点是，划分类型时对矿床成因和矿床与周围地质体的联系注意不够。对矿床类型用了一连串稀有元素或稀有矿物来命名。如法国的G、奥伯尔特将稀有金属花岗岩型矿床，叫做含氟、锂、铍、铌、钽等稀有金属矿物的钠长石白云母花岗岩④。并解释说，"这些矿床，西欧通常叫做气成矿床，由于矿床的'气成'概念是有争论的，所以不如以其中所含大量稀有金属来命名"。另一个缺点是，过于繁琐，实际运用甚不方便。苏联一些学者常有这方面的弊病。如洛谢夫把锂、铍、铌、钽、钨、锡、钼、铋，甚至镓、铟、锗、铊都归属为稀有元素⑤。把这些地质产状迥然不同的矿床凑在一起，统归于稀有金属矿床⑦，势必内容杂乱，体系不清。而对某些稀有元素，如铍或铌钽，其矿床分类，也嫌过细。总想把所有自然界见到的，甚至只有一些稀有元素矿物产出的岩体，也作为一类矿床，并谓其为"成因类型"，致使类型繁多，使人难于掌握和记忆。

除上面两个主要缺点外，在类型划分和命名上，也还存在一些其他问题。如有的类型，以稀有元素命名，虽然这在一定程度上综合概括性较强，但不如以矿物命名，在野外易于理解，便于应用。此外，有的分类，过于抽象，常与实际情况不符；如伟晶岩的结构构造共生分类⑧即是一例。对这些稀有金属矿床类型划分上的缺点，因其不为本文重点，在此不一一例举。

本文在划分稀有金属内生矿床时，特别注意下列几点：

1．成矿与成岩作用的关系。不同的稀有金属来源于不同的岩浆岩，即岩石具有"成矿专属性"。因此，类型划分，首先指明稀

有金属矿床的母岩，分出与花岗岩类岩石有关的稀有金属矿床，与碱性岩类岩石有关的稀有金属矿床等。

2．稀有金属内生矿床，除个别形成于岩浆作用的岩浆阶段外，大部分形成于岩浆作用的岩浆晚期阶段和岩浆期后的早期阶段。成矿阶段比较集中。在进一步划分时，若以成矿阶段划分类型，不可能将多种多样的稀有金属矿床分开。因而，在进一步分类时，主要根据矿床的地质产状。如在与花岗岩类岩石有关的矿床中，分出花岗岩型矿床，伟晶岩型矿床、细晶岩型矿床、条纹岩型矿床及热液脉型矿床等。

3．花岗岩型矿床或伟晶岩型矿床的进一步分类，主要考虑各类型矿床之间的继承发展关系，一定类型矿床的出现，常是整个成岩成矿作用发展过程中一定阶段的产物。不同类型的矿床之间既相互联系又相互区别。如花岗岩型矿床中，富含铌的花岗岩，形成可能早于富含钽的花岗岩，而可能晚于富含稀土的花岗岩。所有这三类含矿花岗岩，都是富含稀有金属花岗岩浆发展演化不同阶段的产物。这种主要取决于岩浆分异作用的演化发展，是稀有金属内生矿床分类时经常考虑的主要因素。

4．稀有金属矿床的形成，交代作用的意义很大。就现在所知，内生稀有金属矿床，成矿多半与碱交代作用有关。矿床命名时常考虑这一因素。交代作用，在这里是指一个矿物被另一个矿物所代替，或一些矿物集合体被另一些矿物集合体所代替，在野外和室内显微镜下均可见到。至于交代作用是以液态进行或是以气态进行，甚至以固态交代，争论较多，问题比较复杂，本文不拟涉及这一问题。

5．所分出的矿床类型，首先目前要有工业价值，或者不久后可以利用。现在国内不能利用，而且在较长时间内还是提不到工业利用日程的，暂不分类。不把它们作为矿床看待。如含轻稀土的花岗伟晶岩就未列入。这样减少了矿床类型，使分类趋于简明。

6．容易识别和分辨，从命名上即可了解整个矿床的重要特征，也是分类应注意的问题。矿物共生，特别是标型矿物的共生，突出地反映了矿床的成因及其工业意义，在野外即易于辨认。本

文分类中主要以标型的造岩矿物，如微斜长石、钠长石、锂辉石、白云母、锂云母等参加命名。标型的稀有金属矿物，如铌铁矿、钽铁矿、绿柱石、细晶石、磷钇矿，氟碳钇钙矿等也经常用以命名。

我国稀有金属矿床类型，其类型大类见表1，各大类的进一步划分见表2、表3等。

下面主要用与花岗岩类岩石有关的矿床为例，进一步具体讨论其类型的划分。

与花岗岩类岩石有关的稀有金属矿床，分为五大类：即稀有金属花岗岩；稀有金属伟晶岩；稀有金属细晶岩；稀有金属条纹岩；稀有金属热液脉。这五类矿床的形成，也多少有先后之别。花岗岩型矿床中，有的稀有金属成矿于岩浆阶段，形成最早。伟晶岩型矿床，其中稀有金属成矿，常介于岩浆阶段与岩浆期后阶段之间，成矿较晚。条纹岩型矿床中，主要部分的矿石是岩浆期后阶段的产物。热液脉型矿床，其中稀有金属成矿纯属岩浆期后阶段。因此，这五类矿床的分出，虽然注意了矿体的地质产状及形态，但同时也注意岩浆演化发展的顺序。

表1　中国稀有金属矿床类型

内生矿床	与花岗岩类岩石有关的矿床	稀有金属花岗岩型矿床
		稀有金属伟晶岩型矿床
		稀有金属细晶岩型矿床
		稀有金属条纹岩型矿床
		稀有金属热液脉型矿床
	与碱性岩类岩石有关的矿床	稀有金属碱性岩型矿床
		稀有金属伟晶岩型矿床
		稀有金属钠长岩型矿床
		稀有金属碳酸岩型矿床
		稀有金属矽卡岩型矿床
		稀有金属热液脉型矿床

变质矿床	稀有金属混合岩型矿床	
	稀有金属变碳酸岩型矿床	
外生矿床	稀有金属风化壳矿床	
	稀有金属残坡积、冲积砂矿	
	稀有金属海滨砂矿	
	稀有金属沉积矿床	含稀有金属磷块岩
		含稀有金属铝土矿
		含稀有金属碎屑岩
		含稀有金属碳质页岩(包括煤)
		含稀有金属盐类矿床

表 2　稀有金属花岗岩矿床类型

成矿阶段	类型代号	类型名称
岩浆期矿床	I	磷钇矿独居石黑云母花岗岩型矿床
	II	褐钇铌矿铌铁矿黑云母花岗岩型矿床
岩浆晚期和岩浆期后矿床	III	褐钇铌矿锆石钠闪石化碱性花岗岩型矿床
	IV	硅铍钇矿氟碳铈钙矿钾长石化(白云母化)花岗岩型矿床
	V	铌铁矿(锆石)钠长石化黑鳞云母化(天河石化)花岗岩型矿床
	VI	黄钇钽矿钇钽铁矿钠长石化云英岩化花岗岩型矿床
	VII	铌钽铁矿细晶石锰钽矿钠长石化云英岩化(锂云母化)花岗岩型矿床
	VIII	绿柱石钠长石化云英岩化花岗岩型矿床
	IX	绿柱石日光榴石云英岩型矿床

稀有金属花岗岩指含锂、铍、铌、钽、铷、铯、锆、铪及钇组稀土的各类花岗岩而言。其中稀有元素成矿富集达到工业利用要求的，称为稀有金属花岗岩型矿床。为简便起见，除特殊说明外，下

而统将稀有金属花岗岩型矿床称为稀有金属花岗岩或含矿花岗岩。这类矿床，从表2可见，又可分出9类。

其中前两类，属岩浆期矿床。稀有金属成矿主要在岩浆阶段。岩浆期矿床的特点，是矿体中富含挥发分的矿物不多，交代现象不显著。稀有金属矿物多以一般"副矿物"形式较均匀地分布在岩体中。后七类矿床属岩浆晚期和岩浆期后矿床。岩浆晚期和岩浆期后矿床，交代作用，特别明显。类型命名常加上交代矿物，赋以"××化"的名称，如钠长石化等。

岩浆演化发展由岩浆阶段转化到岩浆期后阶段，其转化的机理，主要有两种不同的说法：一种认为，二者之间不是逐渐过渡而是突然转变的。由于岩浆与水溶液不互溶，或者说岩浆对水溶液的溶解度是有限的，在临界温度以上，只有一个相，即熔体相。而在临界温度以下，可以有两种流体相并存。自此临界点，岩浆转化为岩浆期后溶液[8]。按照这一看法，矿床就可分出岩浆期矿床与岩浆期后矿床。另一种认为，只要是结晶过程中熔体富含碱分，氧化铝含量不高，而且有大量氟、氯等挥发分存在，岩浆对水溶液的溶解度可以是很大的。此时只有一个流体相。随着温度的降低，不出现临界现象。这可以促使从岩浆连续不断地向热水溶液转变。因而，由岩浆阶段到岩浆期后阶段，采取逐渐过渡形式[10]。这样一来，分出岩浆期矿床和岩浆期后矿床，"有关矿物是由岩浆或岩浆期后热液形成的争论，就失去了任何意义"[9]。

对稀有金属花岗岩的形成，主要根据野外地质观察及室内镜下研究，我们比较倾向于前一说法。但对后一见解及某些推论，也认为有值得注意的地方。

认为自岩浆期向岩浆期后转化采取渐变形式，分不出阶段，根本分不出岩浆期矿床、岩浆晚期矿床和岩浆期后矿床，这与所见的地质事实不符。岩浆的演化发展，不断发展只是其一方面，而发展具有阶段性是另一方面。这种岩浆演化发展的阶段性，表现在稀有金属花岗岩的形成上，是近年来由地质观察逐渐弄明白的。花岗岩中钾长石化的出现，主要是微斜长石化的出现，可能意味着岩

浆演化进入岩浆晚期阶段。云英岩化作用的出现或锂云母化作用的出现，可能意味着岩浆演化已发展到岩浆期后阶段。特别是稀有金属花岗岩中常伴随有大量含钨、锡、铍的石英脉，其脉旁云英岩化广泛发育，这无疑是岩浆期后阶段的产物。

以微斜长石化和钠长石化作为岩浆晚期交代作用的特征，有以下一些证据：

1．矿石成分在较大面积内逐渐变化；

2．钾长石和钠长石以及有关稀有矿物较均匀分布在岩体中；

3．矿物以铝硅酸盐为主；

4．除铝硅酸盐外，还见有富含挥发分的矿物、矿物中常见气、液包裹体；

5．有了交代现象，交代矿物沿早期矿物边缘及解理缝等进行交代。

前三种现象说明微斜长石化和钠长石化作用进行时，介质是以熔体（岩浆）为主。后两种现象补充说明这种熔体（岩浆）是一种含挥发分较多的熔体，它与一般岩浆不同。因此，可能属于岩浆晚期发展阶段的熔体。

以云英岩化或锂云母化作用作为岩浆期后交代作用的特征，可举出以下一些事实：

1．矿石成分在小范围内变化很大；

2．云英岩或锂云母集合体多呈脉状、细脉网状直接分布在上覆沉积变质岩层之下；

3．云英岩或锂云母集合体中有遭受过淋滤作用的迹象；

4．矿石中含大量挥发分矿物；

5．交代作用非常明显，交代残余结构到处可见。

以上这些现象，不是熔体（岩浆）所具有的，而是岩浆期后溶液（包括气态溶液和液态溶液）所具有的典型特征，因此，把云英岩化和锂云母化归属于岩浆期后阶段。

由上可知，微斜长石化钠长石化作用的进行，主要与熔体相有关，而云英岩化锂云母化作用的进行，主要与溶液相有关，它们是

不同阶段的产物。

另一方面，岩浆是一个成分复杂的多组分系统。特别是稀有金属花岗岩，其中锂、钠、钾等碱金属及氟、氯、水等挥发分含量很高。因此，这些花岗岩与一般含碱及挥发分含量较少的花岗岩相比，其成矿时阶段划分就不那么明显，界线不太清楚，这也是事实。

本文对稀有金属花岗岩的分类，只是分出岩浆期矿床，而没有把岩浆晚期矿床和岩浆期后矿床分开，主要原因即在于此。一方面，指出有岩浆期矿床，岩浆晚期和岩浆期后矿床之分；对矿石进行仔细观察与研究，它们的界线是很清楚的，它们是岩浆演化发展不同阶段上的产物；但另一方面，在稀有金属花岗岩内，特别是在岩体上部，岩浆晚期作用和岩浆期后作用，在空间上重叠在一起，而且有时发育强度也很近似。如在一些稀有金属花岗岩中，微斜长石化、钠长石化和云英岩化、锂云母化等混在一起，共见于一个小岩体中。在空间上不容易，有时甚至不可能把它们分开，因此，分类中将它们统归于岩浆晚期和岩浆期后矿床，不再细分。

在岩浆晚期和岩浆期后矿床中，又包括七类（表2）。这七类矿床的进一步划分主要是根据造岩矿物及稀有金属矿物的不同。而此类矿床的先后排列，主要反映各种交代作用的先后更迭。

稀有金属花岗岩的造岩矿物中，最特征的是微斜长石、白云母、钠长石、锂云母及交代形成的石英。这些矿物多半由交代作用生成，表现为微斜长石化、白云母化、钠长石化、锂云母化及云英岩化等。正是这些矿物及交代作用的先后出现，反映了岩浆晚期和岩浆期后熔体溶液*演化发展的顺序。在稀有金属花岗岩形成过程中，即在熔体溶液演化过程中，通常微斜长石化作用较早发生，钠长石化作用次之，锂云母化或云英岩化作用最晚。若以碱金属元素表示，这种演化发展过程可简化为 K——→Na——→Li 的顺序。

至于不同稀有元素作为各种稀有矿物晶出，也是有先有后。一般稀土矿物晶出较早，铌矿物晶出较晚，而钽锂矿物晶出更晚。

---

* 熔体指岩浆，溶液指岩浆期后富含气水的热液。含矿花岗岩的成矿，既包括早期熔体的作用，也包括晚期热液的作用，可用熔体溶液的演化来说明。

同样，若以稀有元素来表示，在整个稀有金属花岗岩形成过程中，稀有金属矿物是按 Y——→Nb——→Be——→Ta——→Li 的顺序晶出的。

一定稀有金属矿物，相应于一定交代作用而出现。如微斜长石化及白云母化作用期间，常晶出磷钇矿、氟碳钇钙矿、硅铍钇矿等。钠长石化作用及黑鳞云母化作用期间常晶出铌铁矿，铌铁金红石等。锂云母化或云英岩化作用期间，常晶出细晶石、钽铁矿，钽铁金红石、锂云母等。而铌钽铁矿及钽铌铁矿的晶出多在钠长石化作用及云英岩化作用或锂云母化作用期间。对铍来说，硅铍钇矿晶出最早，相当于白云母化及钾长石化作用期间，绿柱石晶出稍晚，在钠长石化及云英岩化作用期间。日光榴石的晶出，在云英岩化作用期间或更后。

这种岩浆熔体溶液表现出来的交代作用及稀有元素的演化，结合含矿岩体面积的大小不同，碱金属含量及 Zr/Hf，K/Na，Nb/Ta 比值的变化，可综合表示稀有金属花岗岩形成过程中熔体溶液的演化及其发展（图 1）。

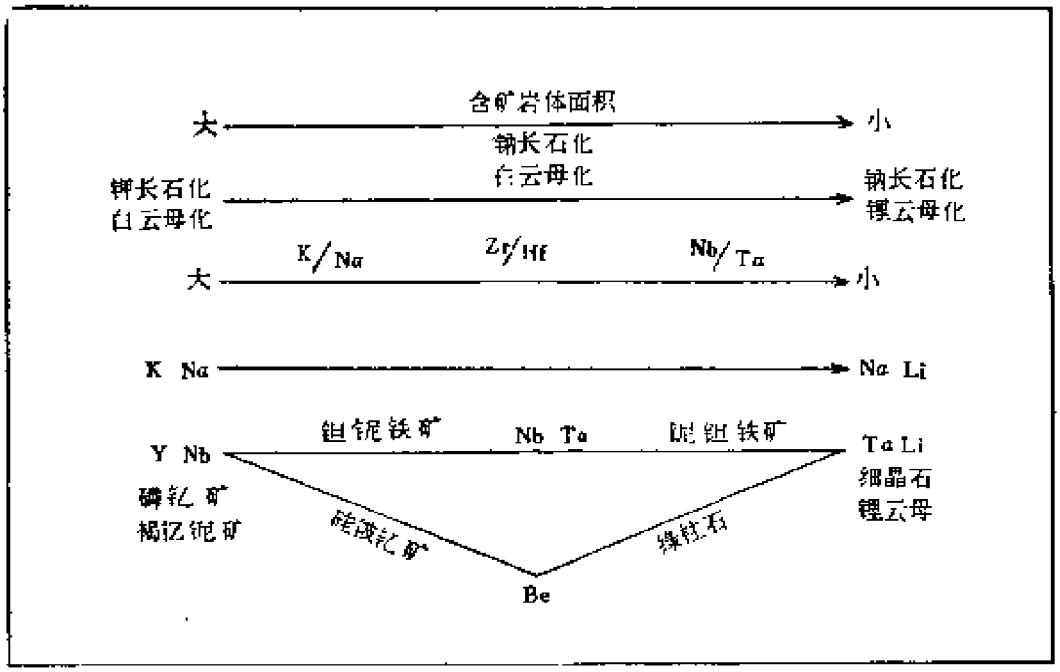


图 1　稀有金属花岗岩形成过程中熔体溶液演化发展图

铍在演化过程中的位置不太清楚，特别是铍矿物与锂、钽矿物

的关系不太清楚。含铍花岗岩与含钽锂花岗岩可能是岩浆演化发展的两个独立分支，二者先后关系不好比较。故在图1中以三角形表示，铍的位置不在铌和钽锂之间而位置稍下，意味着铍沿另一途径晶出。

稀有金属花岗岩的成矿过程，简化表示为K——→Na——→Li或Y——→Nb——→Be——→Ta——→Li的顺序，就主体而言只是概略性的。实际上，经常见到的并不是K——→Na——→Li的全过程，而只有钾交代阶段或钾钠交代阶段，没有锂交代阶段。另一方面，K——→Na——→Li的成矿过程，并不意味着到锂阶段以后，成矿作用完全终止。实际上，在含矿花岗岩内，在锂云母化或云英岩化作用之后常可见到晚期微斜长石化和晚期钠长石化。晚期微斜长石和晚期钠长石常呈脉状产出，它们明显是岩浆期后阶段的产物。这种晚期钾长石化和钠长石化作用比前一阶段的弱得多，也伴有少量稀有元素矿物形成。因此，整个成矿过程，并不是单一的K——→Na——→Li旋廻，而可能是复杂的，有多次K——→Na——→Li作用参与的反覆作用过程。

此类矿床的分出及其先后排列，主要是根据上述熔体溶液的演化发展。有关含矿花岗岩相互间的关系，以及含矿花岗岩的各种特征，在后面第二章内专门讨论。

稀有金属伟晶岩，前人分类就更多。或是主要依据伟晶岩的分异作用，或是主要依据伟晶岩的交代作用，或是主要依据矿物共生，或是主要依据结构构造。对这些分类的优缺点，不一一评述。本文伟晶岩矿床分类的依据和上述稀有金属花岗岩的分类一样。类型的分出及其先后排列主要依据伟晶岩熔体溶液的演化发展，而类型的命名，则以特征的矿物共生来命名。伟晶岩型矿床进一步分为六类(表3)。对伟晶岩型矿床来说，其物质组成和含矿花岗岩大体类似。其中不同元素和矿物的晶出顺序和含矿花岗岩也大体类似，但伟晶岩的结构构造和含矿花岗岩的迥然不同。这最可能是由伟晶岩的形成深度较大，以及形成时的地质构造条件所决定。交代作用也是伟晶岩熔体溶液物质成分演化的结果。交

代作用导致伟晶岩中交代带的出现，使伟晶岩的带状构造趋于复杂。在伟晶岩的进一步分类中也考虑到伟晶岩的交代作用、分异作用、以及结构构造等。这在后面第二章中就可看出。同样，伟晶岩各类型之间的相互关系，以及各类型伟晶岩的主要特征，也在第二章中介绍。

表 3　稀有金属伟晶岩矿床类型

交代作用发育程度	类型代号	类　型　名　称
不发育	I	铌稀土矿物黑云母奥长石微斜长石伟晶岩
	II	绿柱石铌铁矿白云母微斜长石伟晶岩
比较发育	III	绿柱石钽铌铁矿钠长石（微斜长石）伟晶岩
	IV	钽铌铁矿锂辉石钠长石伟晶岩
强烈发育	V	铌钽铁矿细晶石铪锆石白云母微斜长石钠长石伟晶岩
	VI	绿柱石锰钽矿细晶石铯榴石铪锆石锂云母钠长石伟晶岩

稀有金属热液脉型矿床，也可再细分为若干类。它们的划分，主要依据热液的物质成分和热液在成矿过程中的演化。需要指出的是，这类矿床除某些含铍、钽石英黑钨矿脉外，稀有金属的价值一般不大。其分类依据和含矿花岗岩大致类似。

与碱性岩类岩石有关的矿床，国内见到的不多，研究工作也较少。其分类依据也和上述与花岗岩类岩石有关的矿床类似。分析我国与碱性岩有关的矿床资料，可以分为六类矿床（表 1）。在稀有金属碱性岩型矿床中也可分出岩浆期的，岩浆晚期和岩浆期后的两类。属于岩浆期矿床的，如含锆石的碱性正长岩和含异性石的异性霞石正长岩。属于岩浆晚期和岩浆期后矿床的，如含绿层硅铈钛矿的霓霞正长岩等。

表 1 中的变质矿床系指混合岩型矿床和变碳酸岩型矿床。这两类矿床，从其成因看，介于内生矿床和外生矿床之间。即矿床的形成，既有内成因素，也有外成因素。混合岩型矿床，其中稀有

金属可能来源于沉积变质岩或火山沉积岩，稀有金属的富集成矿与区域的混合岩化作用有明显关系。变碳酸岩型矿床，是最近提出来的一个名词。含矿岩石为沉积变质的碳酸盐岩石(如大理岩)和铝硅酸盐岩石(如片岩)，二者均同时见到。有时大理岩也呈夹层产出。从物质成分看，这类矿床与一般的碳酸岩(Carbonatite)类似，但矿床中稀有金属极可能是由火山喷发作用带来，而且是通过地表沉积作用沉淀的。这类火山喷发沉积矿床，形成时代古老，又经受了不同程度的区域变质作用和交代作用。在个别矿床上，交代作用特别强烈，使矿床的物质成分和结构构造十分复杂。本文暂将这类矿床归入变质矿床内。

稀有金属外生矿床，包括风化壳矿床、残坡积冲积砂矿、海滨砂矿及沉积矿。国内见到的风化壳矿床多半是稀有金属花岗岩的风化壳，以其成因和稀有金属花岗岩一致，故不单独讨论，其成矿地质特征主要在有关含矿花岗岩中描述。

稀有金属外生矿床，国内外研究工作都很少，但其在工业利用上意义很大。象海滨砂矿是锆石、磷钇矿、独居石等的重要来源，采掘成本低，经济上有利。沉积矿床，其中稀有金属储量大，只要工艺流程过关，可在开采重金属时作为副产品回收，经济价值很大，值得今后注意。

第二章　稀有金属矿床类型

内　生　矿　床

一、与花岗岩类岩石有关的矿床

（一）稀有金属花岗岩型矿床

矿床地质特征概述

稀有金属花岗岩划分为九类（表 2）。从稀有金属角度，这九类矿床又可归纳为四类，即富钇花岗岩、富铌花岗岩、富钽（锂）花岗岩、富铍花岗岩。在第一章中已经指出，这几类含矿花岗岩可能是不同地质条件下富含稀有金属的花岗岩浆演化发展不同阶段的产物。随着花岗岩浆的演化发展，最早形成富钇花岗岩（相应于花岗岩中微斜长石化或白云母化的出现），其次形成富铌花岗岩（相应于钠长石化及黑鳞云母化的出现），富钽（锂）花岗岩（相应于锂云母化及云英岩化的出现）最晚形成。岩浆演化过程中这种不同含矿花岗岩的出现，若以碱金属表示，可归纳为 K——→Na——→Li 的顺序，若以稀有金属表示，可归纳为 Y——→Nb——→Be——→Ta——→Li 的顺序。下面分几方面概述稀有金属花岗岩的一般特征，从这些特征可以进一步了解这些不同类型含矿花岗岩的先后更替。

1. 稀有金属花岗岩的形成时代及构造位置

就现有资料，我国稀有金属花岗岩都形成较晚，多在中生代。尤其燕山期是含矿花岗岩成矿的集中时期。现将一些比较肯定的含矿花岗岩形成时代列于表 4。

从表 4 看出，除新疆、河北、四川等地外，其它含矿花岗岩主要

表4　稀有金属花岗岩的形成时代

类　　型	产　地	年　　代
Ⅰ.磷钇矿独居石黑云母花岗岩	广东某地	燕　　山
Ⅱ.褐钇铌矿铌铁矿黑云母花岗岩	广西某地 广东某地	160－190×10⁶ 年 132×10⁶ 年
Ⅲ.褐钇铌矿锆石钠闪石化碱性花岗岩	四川某地	印　　支
Ⅳ.硅铍钇矿氟碳钇钙矿钾长石化(白云母化)花岗岩	江西某地①	155×10⁶ 年
	江西某地②	134—136×10⁶ 年
Ⅴ.铌铁矿锆石钠长石化黑鳞云母化(天河石化)花岗岩	广东某地①	91－127×10⁶ 年
	广东某地②	136×10⁶ 年
	江西某地①	100×10⁶ 年
	江西某地②	132－136×10⁶ 年
	江苏某地	燕　　山
	河北某地	172－185×10⁶ 年
Ⅵ.黄钇钽矿钇钽铁矿钠长石化云英岩化花岗岩	江西某地	燕　　山
Ⅶ.铌钽铁矿细晶石锰钽矿钠长石化云英岩化(锂云母化)花岗岩	湖南某地①	燕　　山
	湖南某地②	132×10⁶ 年
	江西某地①	131－157×10⁶ 年
	江西某地②	158×10⁶ 年
	广西某地	燕山中晚期
Ⅷ.绿柱石钠长石化云英岩化花岗岩	新疆某地	海　　西
	云南某地	100×10⁶ 年
	江西某地	110×10⁶ 年
	广东某地	燕　　山
Ⅸ.绿柱石白光榴石云英岩	广东某地	燕　　山

见于华南，或者多见于南岭地区。南岭地区含矿花岗岩多形成于燕山期，是否与区域地球化学特点有关，有待进一步证实。南岭富稀有金属花岗岩的地区、其大地构造性质有许多争论，有的认为是准地台，有的认为是地槽区，有的认为是地台活化区。总的说来，

地壳活动非常强烈，特别是在燕山时期有广泛的断裂运动和大规模的岩浆活动，造成大面积的岩浆岩分布。按照地质力学观点，南岭地区东南部的构造方向，主要是北北东向，北东向和东西向，其次有南北向。这些构造方向控制了断裂的分布，而断裂特别是两组构造断裂的复合，常决定着花岗岩的形态及延展方向。至于含矿花岗岩的位置，常受同一构造方向上的次一级断裂所控制。江西、广东、湖南一些含矿花岗岩的情况就是如此。如著名的江西含钇花岗岩风化壳矿床，花岗岩的位置取决于东西向构造带及北北东向构造带的联合控制。广东的含铌铁矿花岗岩受北东向大断裂的控制等。在南岭地区的西北部，如广西、湖南的某些矿床，含矿岩体受南北向构造带的控制。

南岭以外地区的含矿花岗岩，其构造控制，因地而异。如四川西部及云南一些含矿花岗岩沿南北向大断裂侵入等。

除断裂构造外，含矿花岗岩也常见于背斜构造中，受背斜隆起的控制。

2. 稀有金属花岗岩体的大小及产状

含矿花岗岩的类型不同，产状及形态也各异。富钇的花岗岩及富铌的花岗岩，岩体出露面积较大，多呈大岩体或岩株形式。富钽、锂及铍的花岗岩，出露面积较小，常呈岩株、岩枝、岩脉及岩床等形式产出。不同类型含矿花岗岩的面积大小见表5。

表5　稀有金属花岗岩的大小及产状

类　型	产　　地	大　小　及　产　状
Ⅰ	广　东　某　地	大岩体，　　数千平方公里
Ⅱ	广　西　某　地 广　东　某　地	大岩体，　　500平方公里 大岩体，　　225平方公里
Ⅲ	四　川　某　地	岩株，　　2.7平方公里
Ⅳ	江　西　某　地① 江　西　某　地②	岩株，　　4平方公里 大岩体，　　数百平方公里

续表

类型	产地	大小及产状	
V	广东某地①	岩株、岩脉、岩枝	1 平方公里
	广东某地②	岩株	3—4 平方公里
	江西某地①	岩株	3—4 平方公里
	江西某地②	岩株	2.86 平方公里
	江苏某地	岩株	
	河北某地	弧状岩株	5.37 平方公里
VI	江西某地	岩墙	0.2 平方公里
VII	湖南某地①	岩株、岩床、岩枝	小于 1.15 平方公里
	湖南某地②	岩株	4.4 平方公里
	江西某地①	岩株	9.5 平方公里
	江西某地②	岩盖	0.22 平方公里
	广西某地	岩株	1.5 平方公里
VIII	新疆某地	岩株	
	云南某地	岩株、岩盖	0.7 平方公里
	江西某地	岩株	0.8 平方公里
	广东某地	岩株	1.7 平方公里
IX	广东某地	岩体边缘部分	

表中所指岩株是指出露面积较小、形态可能很复杂的岩体。

富锂及部分富铌的花岗岩岩体面积较大；富钽、锂及部分富铌、铍的花岗岩面积较小。后者常在一个地区内由若干个矿体集合，成群产出。如果含矿花岗岩受断裂控制，可见若干小的含矿岩体在一条带上断续出露，排列如串珠状(图 2)。如果含矿花岗岩沿一组平行断裂侵入，则矿体可呈一组平行排列的脉状或岩墙状(图 3)。

如果含矿岩体是其下伏大岩体的分支，则若干小岩枝或岩瘤围绕大岩体四周分布，排列如环状(图 4)。湖南某地含钽花岗岩，大小岩体约 38 个，其中最大一个出露面积约 1.45 平方公里。其余 37个岩体总面积约 0.35 平方公里。这样多的小岩体，围绕中心较大的岩体，作“卫星”式分布(图 5)。

基于岩体的大小及产状，与之有关的各类含矿花岗岩的结构

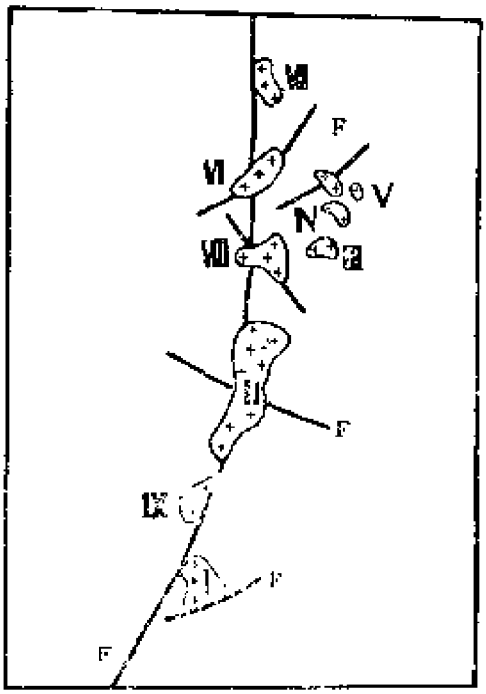


图 2　江西某地含铌钽花岗岩体分布示意图

1. 含矿花岗岩及编号；2. 断层

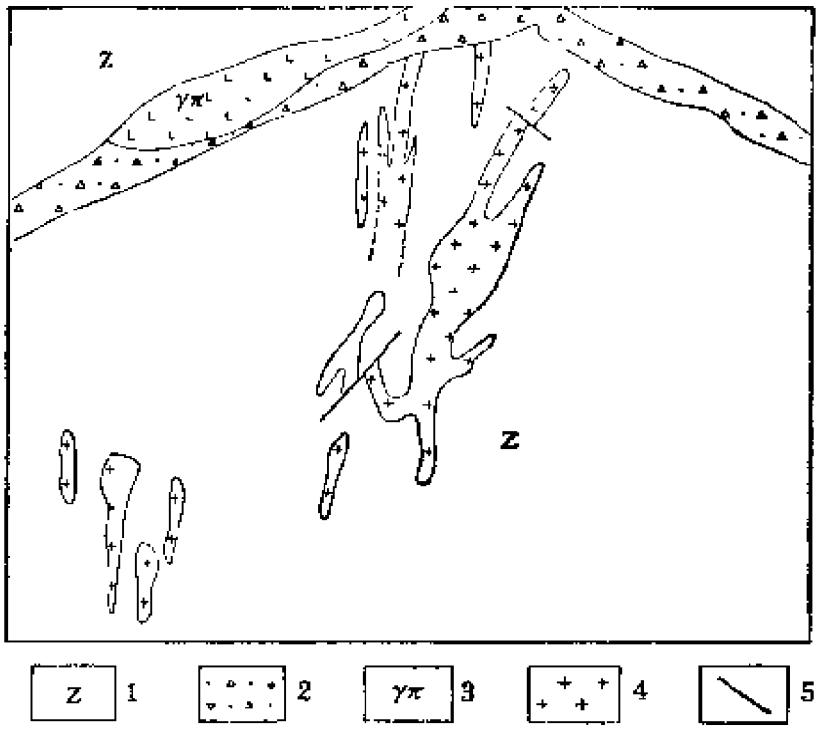


图 3　江西某地含钽花岗岩体分布示意图

1. 沉积变质岩；2. 破碎带；3. 花岗斑岩；4. 含矿花岗岩；5. 断层

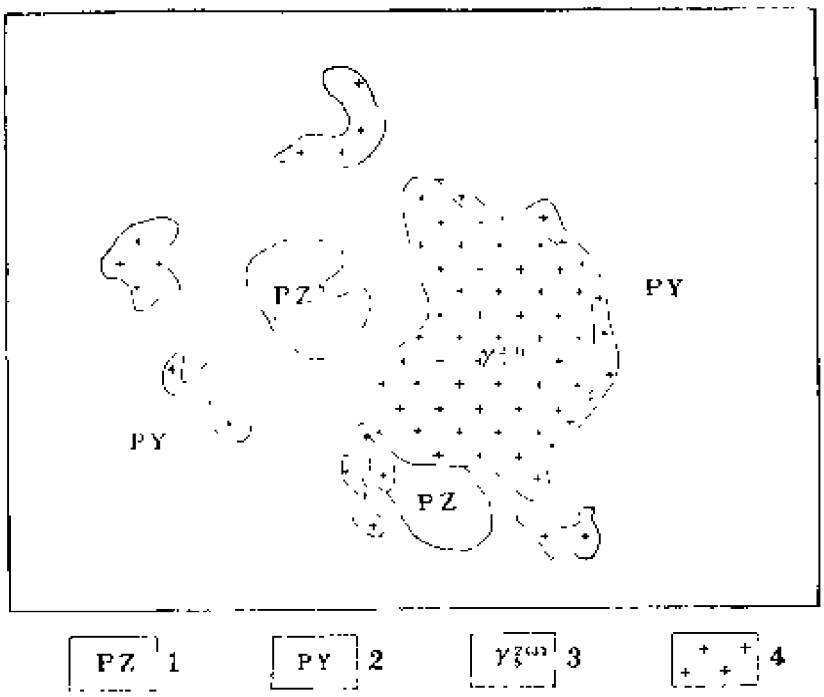


图 4　广东某地含铌花岗岩体分布示意图

1. 石英云母片岩；2. 斜长花岗片麻岩；3. 中粒花岗岩；4. 含矿花岗岩体

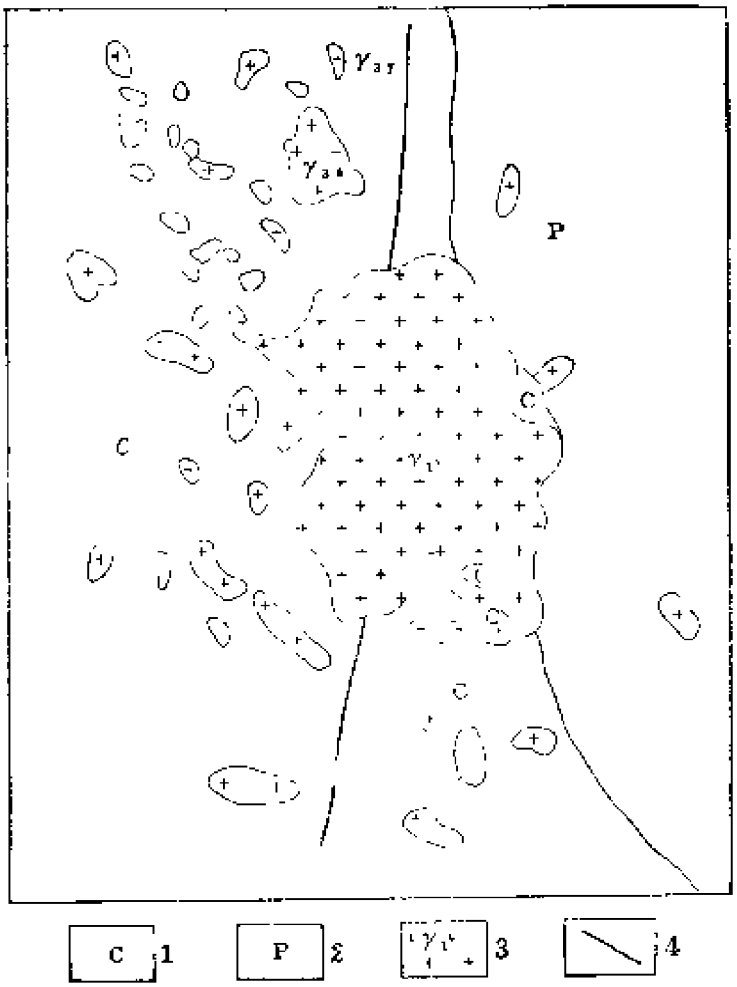


图 5　湖南某地含钽花岗岩体分布示意图

1. 石炭系地层；2. 二叠系地层；3. 含矿花岗岩；4. 断层

构造略有不同。一般富钇花岗岩岩体较大，常具中粒或中粗粒结构，间或具斑状结构。富铌、钽及铍的花岗岩岩体较小，常具细粒斑状或中细粒斑状结构。由于交代蚀变作用，常见变余花岗结构、花岗变晶结构、鳞片变晶结构等。

根据岩石的结构构造及岩体产状可以大致推测含矿岩体的形成深度。岩浆期矿床，其花岗岩形成深度较大；岩浆晚期和岩浆期后矿床，其花岗岩形成深度较小。江西某地见到含矿的花岗斑岩，当系近地表的浅成产物。

3. 稀有金属花岗岩的分期分相特点

含矿花岗岩多构成复式岩体。复式岩体是不同时代岩浆岩于同一地区沿着区域构造带方向分布而成。含矿花岗岩为复式岩体的晚期相。大体上华南一带的复式岩体主要由加里东期、海西期、印支期及燕山期的岩浆岩组成。正如前述，含矿岩体主要属燕山期。

有关复式岩体，包括含矿花岗岩的成因，有多种说法。有的认为它们是花岗岩化多次作用的产物；有的则相信它们的形成与基性岩浆的演化有关；还有的主张它们是硅铝层沿断裂多次重熔的结果。这一花岗岩成因的大问题，涉及面很广，我们不准备在这里论证。需着重提出的是，不论复式岩体的成因为何，作为复式岩体晚期相的含矿花岗岩体，是由岩浆冷凝而成，似无多大疑问，这从含矿花岗岩的产状、大小，特别是含矿花岗岩的分期分相特点，以及不同相的结构构造等可以看出。

燕山期花岗岩类岩石也是多期多阶段生成。燕山期花岗岩从老到新，常有如下侵入顺序：花岗闪长岩、石英正长岩、二长花岗岩——>角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩——>黑鳞云母、二云母花岗岩——>花岗斑岩——>中基性岩墙。分布最广的是中粗粒斑状黑云母花岗岩和中细粒黑云母及二云母花岗岩。前者常以大岩体形式产出，较富于稀土及铌，多形成于燕山早期，后者常呈岩株侵入前者或在前者的内外接触带，多富含铌、钽、铍，常形成于燕山晚期。南岭地区还常见一些含锂的白云母花岗岩岩墙，它们多半是上述晚期黑鳞云母、二云母花岗岩同期不同相的产物。

现举广东某含铌铁矿花岗岩矿田为例，其中岩浆岩的侵入顺序如下：

喜山期：各种酸性、中性岩脉。

燕山期
- 第四期
  - 晚期：细中粒花岗岩（91—127×10⁶年）；
  - 中期：细粒斑状黑云母花岗岩（127×10⁶年）；
  - 早期：中粗粒黑云母花岗岩（135—148×10⁶年）；
- 第三期：细粒粗斑状、细粒斑状黑云母花岗岩；
- 第二期：石英闪长斑岩和细粒石英闪长岩；

印支期：中粒、中粒斑状角闪石黑云母花岗岩（花岗闪长岩），片麻状二长花岗岩；

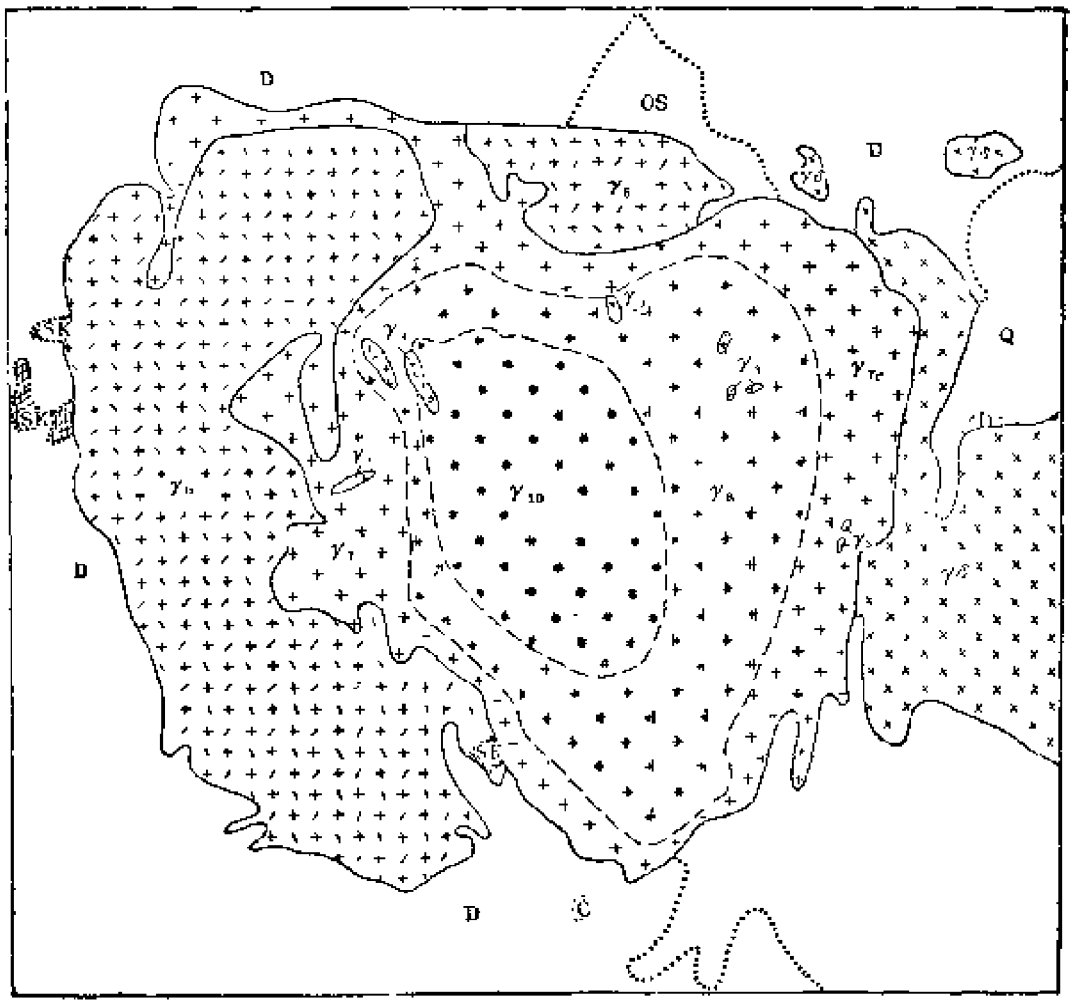
加里东期（?）：黑云斜长花岗片麻岩，黑云花岗片麻岩。

该矿田燕山第三期及其以前的侵入体都不含铌铁矿或含量甚微。燕山第四期早、中、晚三次侵入形成的花岗岩，含有程度不等的铌钽矿化。矿化最富的是第四期晚期形成的含矿花岗岩；这种花岗岩呈岩株、岩枝、岩脉等分布在第四期早期和中期花岗岩体的边缘或外围接触带中。

广西某含褐钇铌矿花岗岩分为三期，矿化富集于第二期的中粗粒黑云母花岗岩中。江西某含硅铍钇矿花岗岩分为四期，矿化以第二期中粒黑云母花岗岩最为富集，所有这些都可作为复式岩体分期的例证。

稀有金属花岗岩又常具分相特征，特别是富钇花岗岩和富铌花岗岩，这种现象尤为明显。含矿花岗岩一般都可分出边缘相、中心相及过渡相。边缘相多半具细粒及细粒斑状结构，中心相一般具中粒粗粒结构。从边缘相到中心相，在矿物成分及结构构造上是逐渐变化的，彼此间无明显界限。矿化最富集部位，一般是边缘相及过渡相。广西某地含褐钇铌矿花岗岩分期分相特点比较明显，其岩相分带如图6所示。

以江西及江苏的两个含铌铁矿角闪石黑云母花岗岩为例（表6），可以看出，同一期岩体，其中心相、过渡相、边缘相中的稀有金属矿化，有按铈→钇→铌的顺序而变化的趋势。



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

图 6　广西某地含矿花岗岩岩相分带示意图

1. 花岗闪长岩体；2. 燕山第一亚期细-中粗粒斑状黑云母花岗岩；3. 燕山第二亚期中央相中粒正斑状角闪石黑云母花岗岩；4. 燕山第二亚期过渡相中-粗粒似斑状黑云母花岗岩；5. 燕山第二亚期边缘相细-粗粒黑云母花岗岩；6. 燕山第三亚期细粒黑云母花岗岩；7. 燕山第三亚期细粒斑状黑云母花岗岩；8. 矽卡岩；9. 岩相界线；10. 地层界线；OS—奥陶系砂岩千枚岩及页岩；D—泥盆系砂岩页岩及灰岩；C—石炭系灰岩；Q—第四系

4. 稀有金属花岗岩的蚀变作用及蚀变分带

岩浆晚期及岩浆期后稀有金属花岗岩的交代蚀变作用特别明显、最主要的有：微斜长石化、天河石化、白云母化、钠长石化、黑鳞云母化、锂白云母化、锂云母化、黄玉化、萤石化、电气石化及云英岩化作用等。稀土元素，特别是钇，矿化与钾长石化、白云母化

表6　含矿花岗岩不同岩相的特征副矿物

产地	岩相	岩性	主要稀有金属矿物	主要副矿物
江苏某岩体	中心相	似斑状角闪石黑云母花岗岩	褐帘石、锆石、褐帘石	钛铁矿、磁铁矿、磷灰石
	过渡相	黑云母花岗岩	褐帘石、独居石、锆石、褐钇铌矿	磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿、磷灰石、金红石
	边缘相	钠长石化黑鳞云母化花岗岩	铌铁矿、铌钽金红石、锆石、钍石、氟碳铈矿	磁铁矿、赤铁矿、金红石、锐钛矿、黄玉、萤石
江西某岩体	中心相	角闪石黑云母花岗岩	锆石、褐帘石、锌石	磁铁矿、钛铁矿
	过渡相	黑云母花岗岩	褐帘石、独居石、锆石、钍石、褐钇铌矿	磁铁矿、钛铁矿、磷灰石
	边缘相	钠长石化黑鳞云母化花岗岩	铌铁矿、钙石氟碳铈矿、钍石	黄铁矿、黄玉、萤石

关系最为密切。铌的矿化与钠长石化、黑鳞云母化关系最为密切。钽、铍的矿化与锂云母化或含锂白云母化关系密切，同时也与叶片状钠长石化关系密切。钛的矿化与钠长石化及云英岩化关系最为密切。而锂云母化花岗岩本身就常常是锂云母、锂辉石等锂的来源。挥发分矿物的大量产出，是稀有元素成矿富集的有利标志。黄玉、萤石、电气石及云母等就常常是含稀有元素花岗岩型矿床的找矿标志。

花岗岩中的微斜长石化及大部分钠长石化和白云母化，交代作用是沿花岗岩已形成矿物的粒间进行。微斜长石、钠长石及白云母这时在花岗岩中大致作均匀浸染分布。与其有成因关系的稀有元素矿物也大致均匀浸染在蚀变花岗岩中。云英岩化、锂云母化及部分钠长石化作用，可能是矿液沿花岗岩中的原生冷凝节理或裂隙运移，并交代已形成矿物的结果。这些云英岩、锂云母及钠长石集合体，常呈细脉状、网脉状甚或脉状分布于花岗岩中；与其

有成因关系的稀有元素矿物，其富集部位也多与蚀变岩石形态一致。当锂云母化、云英岩化作用特别强烈时，整个岩体顶部悉被改造，花岗岩的面貌已不复存在，最终变成云英岩、锂云母岩、黄玉岩等蚀变岩石。与其有关的稀有元素矿物除富集于裂隙带外，在蚀变岩石内常可见到矿化富集的矿囊或矿巢。矿巢内稀有元素高度富集；矿巢外也见稀有元素矿物，但含量较低，大致作细脉浸染状分布。

含矿花岗岩内不同的交代作用，出现于岩体一定的地段与部位，有规律地呈带状分布，形成蚀变带。交代作用发育较完全的花岗岩，大体上从岩体下部到上部，从中心到边缘方向，可见到微斜长石化（或天河石化或白云母化）作用带→钠长石化（或黑鳞云母化）作用带→含锂白云母化（或锂云母化）作用带→云英岩化（包括萤石、黄玉、电气石等的形成）作用带。在蚀变岩体与围岩接触处的边缘地带，有时有似伟晶岩带或伟晶岩状结构带。这种似伟晶岩，可作为找寻这类矿床的十分良好的找矿标志。

花岗岩中的微斜长石化作用，通常由下而上逐渐减弱。钠长石化、锂云母化、云英岩化由下而上作用逐渐增强。在交代作用较发育的钽锂花岗岩上，岩体最上部发育着极强烈的钠长石化、锂云母化、云英岩化作用。

蚀变带比较完善的可以湖南某地含矿花岗岩为例。其分带如图7及图8所示。

在一些含矿花岗岩上，云英岩化作用及锂云母化作用发育很弱。这时，在岩体顶部直接分布着白云母化或钠长石化发育的地段。某些含氟碳钇钙矿白云母花岗岩即具有这种情况。

各交代蚀变带在空间上按一定地段分布，在时间上是按先后顺序逐渐形成。花岗岩中的原生矿物最先被钾长石或白云母等交代，导致钾长石化或白云母化地段的出现。稍晚，钠长石化作用使早期矿物，包括钾长石和白云母等消失，导致钠长石化地段的出现。再进一步，早期矿物，包括钠长石等又被锂云母、含锂白云母、石英、黄玉等交代，在岩体顶部形成云英岩化作用带。与此相应，

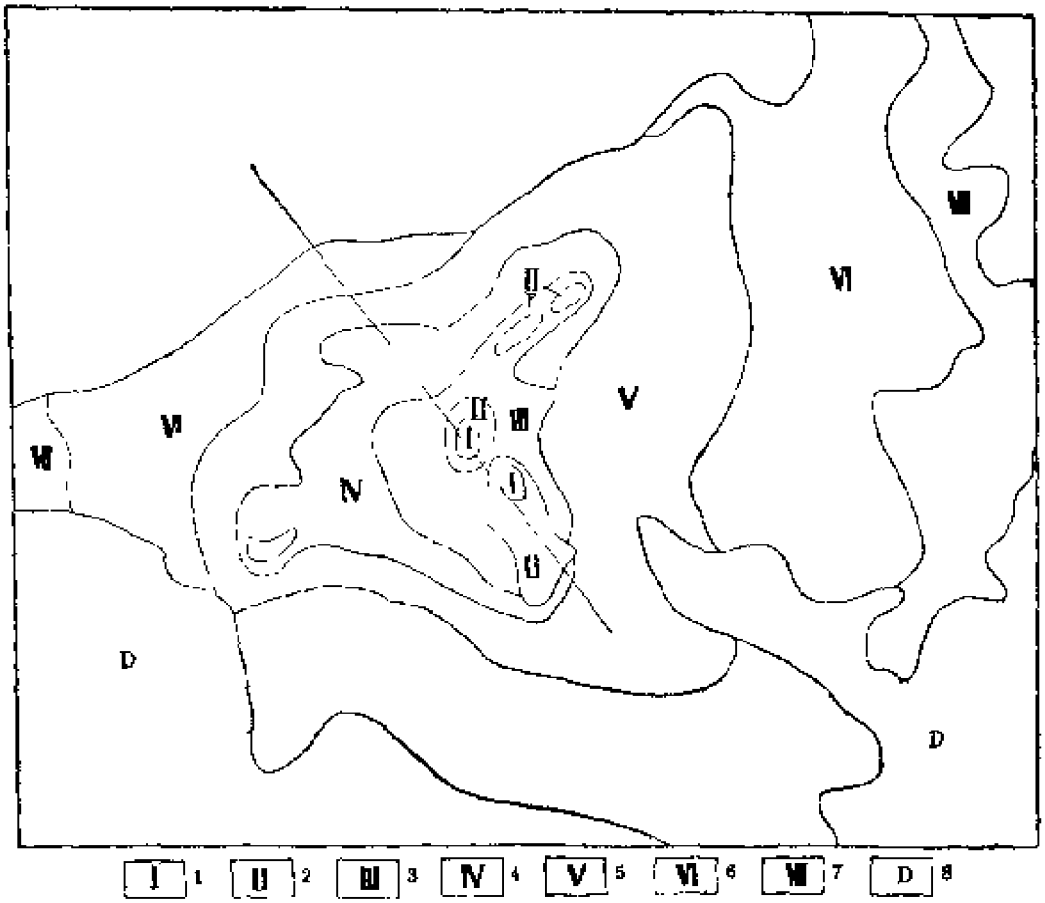


图 7　湖南某地含矿花岗岩体蚀变分带平面图

1．云英岩；2．强云英岩化钠长石化钾长石化花岗岩；3．云英岩化钠长石化钾长石化花岗岩；4．弱云英岩化强钠长石化钾长石化花岗岩；5．强钠长石化钾长石化花岗岩；6．钠长石化钾长石化花岗岩；7．钾长石化锂黑云母花岗岩；8．沉积变质岩

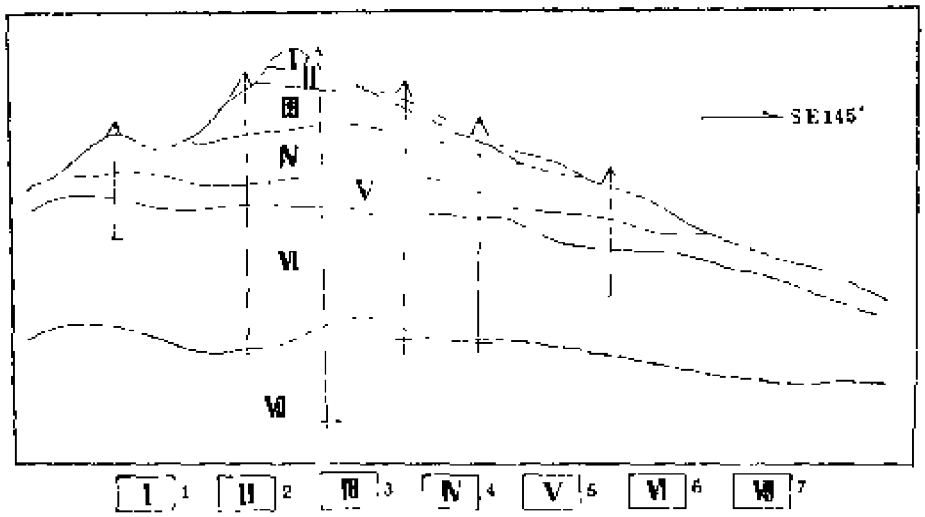


图 8　湖南某地含矿花岗岩体蚀变分带剖面图

图注与图 7 相同

稀有金属矿物也按一定顺序逐渐分出，而在含矿花岗岩内呈带状分布。

这种不同交代矿物及稀有金属矿物的先后出现，反映了含矿花岗岩熔体溶液成分的不断演变。含矿熔体溶液成分及状态的变化，与所谓岩浆的"分异作用"有密切关系。交代作用是现象，分异作用是实质。

5. 稀有金属花岗岩的化学成分

与正常钙碱系列花岗岩相比，稀有金属花岗岩中硅、碱、有时铝的含量较高，而钛、镁、铁、钙等的含量较低。富含稀有元素及挥发分，是这类花岗岩的显著特点。挥发分中最主要的是氟和水，磷和碳酸的含量一般较低。进一步看，不同的稀有金属矿化又有不同的地球化学特点。大体上，富钇组稀土的花岗岩常富含钾，其化学成分中钾含量大于钠。富铌花岗岩中钠含量常大于钾。富绿柱石的花岗岩，除以硅含量高为特征外，常含铝较高。而富含钽锂的花岗岩，除硅、碱及挥发分高外，又常富含稀碱及铯。除含褐钇铌矿钠闪石碱性花岗岩含较高量的锆外，锆和铈组稀土在稀有金属花岗岩中含量一般不高。对同一个含矿花岗岩体，从下部到上部，从中心到边缘，不同元素含量是逐渐变化的。岩体深部，钛、铁、镁、钙相对较多，岩体顶部，挥发分及稀有元素相对较富；下部钾多，上部富钠、锂。这种不同元素含量的变化，是与含矿花岗岩蚀变带的分布相适应的。

钨和锡是稀有金属花岗岩中经常伴生的有用元素。稀有金属花岗岩中钨、锡含量一般都很高，有时一个含稀有金属花岗岩型矿床，也同时是钨、锡矿床。我国所见之富钽蚀变花岗岩类型矿床，几乎无例外地皆与钨锡矿相伴生。富含重稀土元素的花岗岩也常与钨矿共同产出。含绿柱石花岗岩有时还含较高量的钽和铋。至于稀有元素，特别是该花岗岩所固有的稀有元素，其含量一般都达到工业要求；有的含量虽稍低，但岩石经风化后，开采成本降低，仍不失其矿床意义。

总体看，稀有元素一般富集于岩体顶部和边缘部分，岩体的中

心和深部含量较低。富矿体分布在花岗岩中的部位有如图 9 所示的几种情况。如果花岗岩较小，为岩瘤、岩枝、岩墙等，此时整个岩体可能全为富矿体。

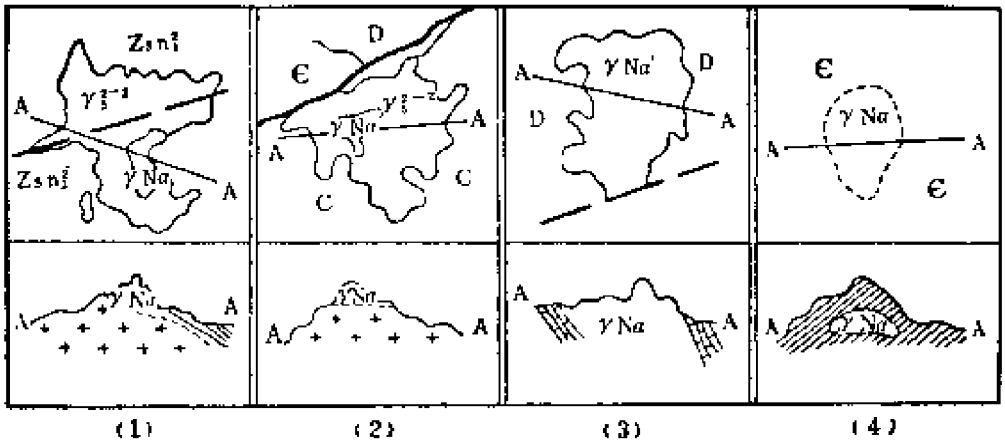


图 9　矿体产状示意图

1．矿体见于花岗岩边缘；2．矿体见于花岗岩顶部；3．矿体呈孤立岩瘤出露地表；4．矿体隐伏于地下；γNa 为矿体

分别看，铌和铷在花岗岩中含量分布比较稳定，分布面积及深度较大。其含量从岩体顶部向下逐渐降低。钽、锂、铯、铯等主要富集于岩体顶部附近，从岩体顶部向下，随着蚀变作用减弱，含量迅速降低。铍和钽、锂情况大体类似，可能分布部位稍低。如果花岗岩中除锂、钽、铌等元素外，同时还含锆、稀土等元素，前者分布部位一般较高，后者分布部位一般较低，从岩体顶部向下，前者逐渐为后者所代替。

尽管蚀变作用深度在花岗岩中向下可达数百米，甚或千米。但稀有金属富集部位深度不大。矿化富集部位一般见于离岩体顶部向下约 50—100 米间隔内，有时深度更小。大体上，锂、钽、铍的矿化深度较小，铌、钇、锆等的矿化深度较大。稀有金属富矿体与交代作用强度之间的关系及富矿体在蚀变岩石中的部位如图 10 所示。

6．稀有金属花岗岩的矿物成分

稀有金属花岗岩在矿物成分上独具特征。主要造岩矿物有钾长石、酸性斜长石、石英及云母。钾长石主要为微斜长石，其次为

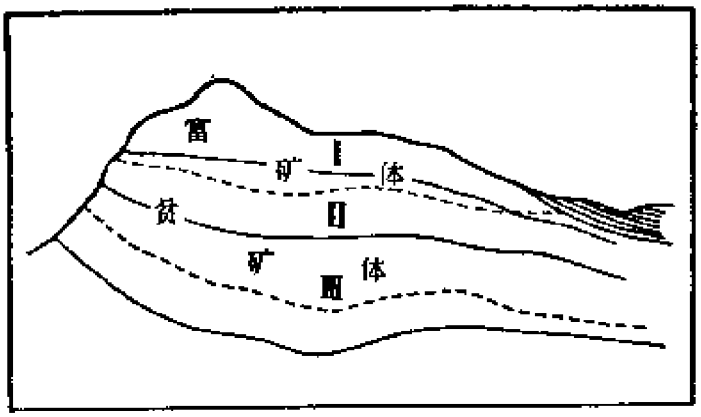


图 10　富矿体在蚀变花岗岩中的部位

I, II, III, 分别为强、中、弱蚀变带

天河石。酸性斜长石主要为钠长石，其次为钠奥长石。钠长石又可分出棋盘状、板条状、叶片状、糖粒状等不同形态。稀有金属矿化与叶片状及糖粒状钠长石关系密切。石英在这类花岗岩中有好几个世代，形成于不同的时期，而在云英岩化作用期大量晶出。云英岩化形成的石英常见明显的筛状结构。云母类矿物主要为黑云母、黑鳞云母、白云母或含锂白云母。在蚀变花岗岩中可见到黑云母-锂云母系列的各种过渡成分，即黑云母—含锂黑云母—黑鳞云母—铁锂云母—绿鳞云母—锂云母等。绢云母也是花岗岩中常见的次生矿物。含锂白云母和锂云母的产出是寻找富钽花岗岩的明显标志之一。

含挥发分矿物大量发育。除各种云母外，黄玉、萤石及电气石是最重要的含挥发分矿物，有时含挥发分矿物大量富集，以致在岩体顶部形成象黄玉岩，萤石岩等近单矿物岩石。

稀有矿物中的锂矿物见到的有锂云母、锂鳞铝石、锂辉石等。铍矿物有绿柱石、日光榴石、羟铍石、蓝柱石及硅铍钇矿等。铌矿物有铌铁矿、钽铌铁矿、烧绿石、铌铁金红石、褐钇铌矿、黑稀金矿、复稀金矿等。钽矿物有铌钽铁矿、锰钽矿、钇钽铁矿、细晶石、黄钇钽矿、钽铁金红石、含钽锡石及含钽黑钨矿等。含铷矿物有天河石及含铷云母。铯除分散于锂云母中外，还呈独立矿物——铯榴石产出。锆铪矿物主要为锆石或含铪锆石。钇组稀土矿物有磷钇矿、硅铍钇矿、氟碳钇钙矿、砷钇矿、黑稀金矿等。铈组稀土矿物不是

特征矿物，见到的有独居石，氟碳铈矿、褐帘石及榍石等。钛矿物，除含铌钽金红石外，一般不发育，如钛铁矿、锐钛矿、钙钛矿、榍石等虽有产出，但含量相对甚低。

在含铌钽的蚀变花岗岩中，一般下部铌铁矿或钽铌铁矿较多，上部铌钽铁矿和细晶石较多。富铌矿物见于剖面下部，富钽矿物见于剖面上部。在含钽钇花岗岩内，富钇的矿物大量发育，岩体顶部及深部皆能见到，富钽的矿物仅见于岩体上部。江西某地含矿花岗岩中，由岩体顶部向下，黄钇钽矿及钇钽铁矿含量迅速降低，但下部仍见到大量氟碳钇钙矿及硅铍钇矿。

各类含矿花岗岩中具有的特征脉石矿物和稀有金属矿物如表7所示。

表7　各类型稀有金属花岗岩的矿物成分

类型	主要脉石矿物	主要副矿物	
		稀有元素矿物	其他矿物
Ⅰ	钾长石（条纹长石，微斜长石），奥长石，石英，黑云母，角闪石，白云母	磷钇矿，独居石，锆石	钛铁矿，赤铁矿，磁铁矿
Ⅱ	钾长石，斜长石，石英，黑云母，角闪石	褐钇铌矿，锆石，钍石，独居石，褐帘石	钛铁矿，磁铁矿，磷灰石
Ⅲ	钠闪石，霓石，条纹长石，正长石钠长石，石英	褐钇铌矿，锆石，钇烧绿石，铌铁金红石，氟铈镧矿，独居石，硅钛铈矿，钍石	榍石，磷灰石，磁铁矿，赤铁矿，褐帘石
Ⅳ	微斜长石，钠长石，白云母，黑云母	硅铍钇矿，磷钇矿，氟碳钇钙矿，黑稀金矿，锆石，独居石	磷灰石，黄玉，萤石，（黑钨矿，锡石）
Ⅴ	钾长石，钠长石，石英，黑云母，黑鳞云母（铁锂云母）	铌铁矿，铌铁金红石，锆石氟铈镧矿，黑稀金矿，复稀金矿，褐钇铌矿（有时主要为铌钇矿）	磁铁矿，赤铁矿，锐钛矿，黄玉，萤石，黄铁矿，（锡石，黑钨矿）
Ⅵ	钾长石，钠长石钠奥长石，石英，白云母（锂云母）	黄钇钽矿，钇钽铁矿，氟碳钇钙矿，硅铍钇矿，铌钽铁矿，褐钇铌矿，磷钇矿，独居石，锆石	锡石，黑钨矿，黄铁矿等金属硫化物

续表

类型	主要脉石矿物	主要副矿物	
		稀有元素矿物	其他矿物
Ⅶ	钠长石，钾长石，石英，锂云母，含锂白云母	铌钽铁矿，锰钽矿，细晶石，钽铁金红石，含钽锡石，富铪锆石，锂云母，铯榴石	柘榴石，黄玉，萤石，电气石，黑钨矿，金红石及黄铁矿等金属硫化物
Ⅷ	钠奥长石，钠长石，微斜长石，白云母(含锂白云母)	绿柱石(羟硅铍石?)	黄玉，萤石，电气石，黑钨矿，黄铁矿
Ⅸ	白云母、(含锂白云母)、黑鳞云母，石英	绿柱石，日光榴石，羟硅铍石，蓝柱石	黄玉，黑钨矿，锡石，辉钼矿，黄铁矿

7. 稀有金属花岗岩的经济价值。

稀有金属花岗岩是锂、铍、铌、钽、锆、铪及重稀土等的主要矿床类型，也是黑钨矿、锡石及陶瓷原料的重要来源。目前世界开采的钽，除伟晶岩外，就是来自稀有金属花岗岩。与花岗伟晶岩相比，含矿花岗岩中的稀有金属储量都比较大，但其中稀有金属品位较低，稀有金属矿物粒度较细。

在我国南方，稀有金属花岗岩风化壳异常发育，经受风化后，质地疏松，利于采选，经济价值巨大。某些含矿花岗岩，稀有金属品位虽不够工业要求，但由于岩石风化，采选成本降低，而成为有价值的矿床。

稀有金属花岗岩也是冲积砂矿的成矿母岩。某些储量巨大的锆石、独居石、磷钇矿海滨砂矿，就是稀有金属花岗岩风化壳经多次搬运、沉积而重新富集的结果。

矿床实例

1. 四川某地褐钇铌矿锆石碱性花岗岩

含矿花岗岩区域内前震旦系、震旦系、寒武系及二叠系沉积岩和变质岩系零星分布，而各种岩浆岩分布广泛，占全区面积的80%左右。含褐钇铌矿锆石钠铁闪石花岗岩，呈岩株状产出，面积较小(图11)。花岗岩的围岩主要为海西期基性岩，二者呈侵入接触。在接

触带附近的辉长岩中见有5—10米，最宽达30米的混合岩带。岩体

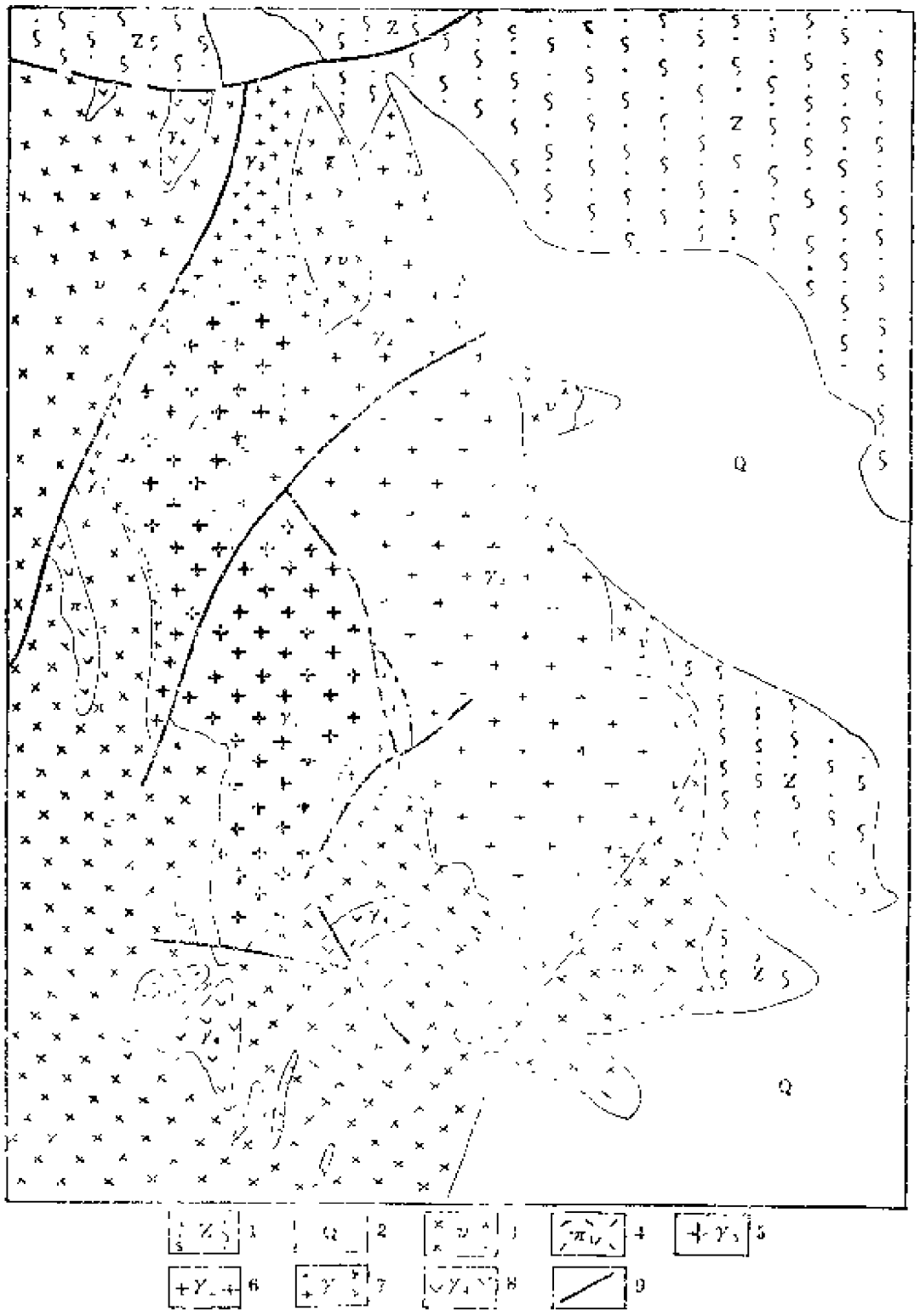


图11　四川某地褐钇铌矿钠石花岗岩地质示意图

1．前震旦系变质岩；2．第四系；3．辉长辉绿岩；4．正长岩脉；5．中心钾花岗岩；6．过渡钾花岗岩；7．边缘钠花岗岩；8．脉状花岗岩；9．断裂

也与前震旦系变质岩接触,也为侵入接触,接触带蚀变作用不强烈。

岩体明显可分出边缘相、过渡相和中心相三个岩相。边缘相断续分布在岩体边缘,宽度不大,主要由角闪石花岗岩组成,其次也见有黑云母花岗斑岩、角闪石石英正长岩、钠铁闪石石英正长岩等。过渡相岩石占岩体总面积一半以上,主要分布在岩体东部,以钠铁闪石花岗岩及黑云母化钠铁闪石花岗岩为主,为褐钇铌矿主要产出岩相。中心相岩石约占岩体面积的三分之一,岩性简单,主要由霓石钠铁闪石花岗岩组成,西与辉长岩接触,其他三面与过渡相岩石呈渐变接触或断层接触。中心相岩石分布于全区最高部位,整个岩体地形由西向东倾斜。

各岩相带岩石的结构构造和矿物组成等见表 8。

各岩相带岩石的化学成分见表 9。

岩石中的蚀变作用虽较普遍,但作用微弱,没有形成单独的蚀变带,而以不规则团块状出现。常见的蚀变作用有钠长石化、钠闪石化、钛磁铁矿化三种,较少见的有黑云母化、霓石化、绿泥石化及赤铁矿化等。钠长石化及钠闪石化作用由边缘相经过渡相到中心相,作用逐渐增强。

岩体中已查明的稀有元素有铌、钽、稀土、锆、铪、钍、铀等。铌、钽、锆、稀土及钍均以过渡相最富。中心相铀最富。

岩体中已知工业矿物为褐钇铌矿及锆石。褐钇铌矿主要富集在过渡相钠铁闪石花岗岩、黑云母钠铁闪石花岗岩和磁铁矿化黑云母化花岗岩中,大致呈均匀浸染状分布,其他岩相中比较少见。锆石在整个岩体中普遍分布,各岩相带含量变化不大,但在磁铁矿化黑云母化花岗岩和钠铁闪石霓石花岗岩中较少。锆石在岩体中也大致呈均匀浸染分布。岩体中的褐钇铌矿和锆石在含量变化上大致呈正比关系。

褐钇铌矿,颜色很杂,其中含 Nb_2O_5 40—47%, TR_2O_3 30.07—40.99%。稀土中主要是钇,其次有铒、镝、钆、铕等。锆石可分为深色及浅色两种。深色锆石含 ZrO_2 45.80%, HfO_2 1.89%, TR_2O_3 7.64%, Y_2O_3 2.60%;浅色锆石含 ZvO_2 51.11%, HfO_2 0.80%, TR_2

表 8　各岩相带岩石的结构构造和矿物成分

岩相	岩石	颜色	结构构造	主要造岩矿物及百分含量									次生矿物	稀有矿物及副矿物
				正长石条纹长石	钠长石	中长奥长石	石英	钠铁闪石	钠闪石	霓石	角闪石	钛磁铁矿	黑云母	
边缘相	角闪花岗岩	肉红间黑绿色	中细粒花岗结构，块状构造	58—72		少—4	20-26				1—5	1—4		黑云母，绿泥石，绢云母	铝石，褐钇铌矿，褐帘石，榍石，独居石
过渡相	钠铁闪石花岗岩	灰白	中粒及中细粒结构，块状构造	65	3 5		27	4.5		1±		1±		绿泥石，褐帘石，绢云母	褐钇铌矿，锆石，钍石，硅钛铈矿，褐帘石，萤石，电气石
	黑云母化钠铁闪石花岗岩	灰白 肉红	中粒、中细粒结构，块状构造	50—70	2—3		30 45					1—1 2		绿泥石 1—15%	褐钇铌矿、锆石，烧绿石，褐帘石，磷灰石，榍石，钍石
中心相	霓石钠铁闪石花岗岩	淡灰、灰白	中粒，中粗粒花岗结构、块状构造	40-70	1—7		20 45	2—6	1—3	2- 8		≤1		钠云母，绿泥石，绢云母，绿帘石	锆石，榍石，金红石，褐钇铌矿，独居石，褐帘石，烧绿石，电气石，钍石，锡石

表 9　各岩相带岩石的化学成分

岩相	岩石	化学成分 (%)									
		SiO_2	TiO_2	N_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
边缘相	黑云母化角闪花岗岩	75.92	0.13	11.22	0.91	3.37	0.03	0.23	0.12	3.23	4.14
过渡相	中粒钠铁闪石化岗岩	74.58	0.19	12.20	1.01	1.74	0.05	0.14	0.34	3.32	4.84
	黑云母化钠铁闪石化岗岩	75.30	0.15	12.19	0.79	1.89	0.03	0.14	0.07	3.34	4.82
中心相	钠铁闪石霓石花岗岩	74.54	0.26	10.99	2.01	1.96	0.10	0.10	0.33	4.64	4.90

$O_3$6.94%，$Y_2O_3$2.60%。本区锆石为一种含钇组稀土较高并含微量钍、铀、铌的锆石。

元素在钠铁闪石花岗岩中的分配情况研究说明，其中的铌约一半左右赋存在褐钇铌矿中，其次占有铌的矿物为钠铁闪石(17.9%)，再次为长英矿物（12.1%）。稀土主要分布在褐钇铌矿(22.6%)、锆石(26.6%)及钠铁闪石（24.7%)中，三者占稀土总量的73.9%。锆绝大部分赋存在锆石中(96.2%)。

矿区地形西高东低，西部为南北延长的山脊，东部为箕状河谷。在东部谷地和高山间广泛发育有坡洪积扇群，其余多为陡坡连接，大小冲沟广泛发育，形成剥蚀地貌和锥、扇形、裙形堆积地貌。在山麓堆积的坡洪积扇群中赋存有质量良好的褐钇铌矿锆石砂矿。本区风化壳及残坡积砂矿虽也发育，但矿化远不如坡洪积砂矿的好。

2. 江西某地氟碳钇钙矿白云母化花岗岩及其风化壳

矿区一带燕山期花岗岩呈东西向展布，与早侏罗世余田群基性-中酸性火山岩系作侵入接触，局部与二叠纪和三叠纪地层接触。北北东向和东西向构造体系决定了含矿花岗岩的位置，而岩体内这两个方向的两组断裂的发育，对含矿风化壳的形成起重要作用(图12)。

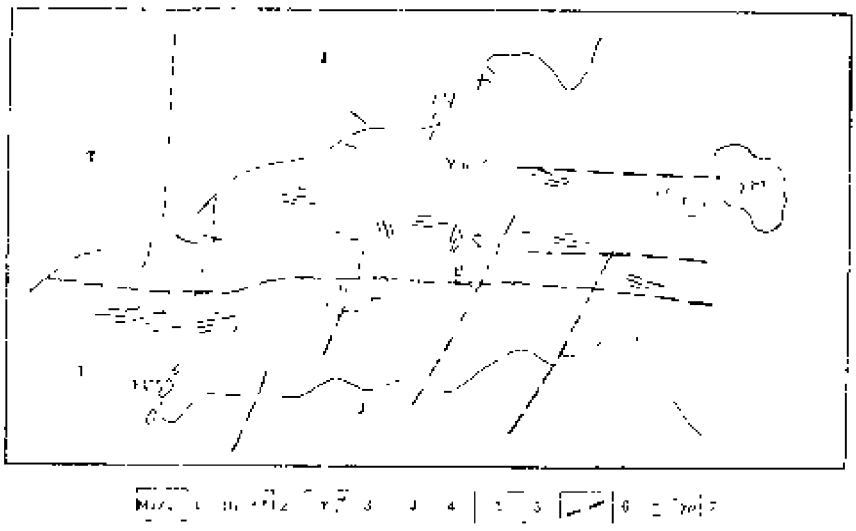


图12　江西某地稀土矿床地质构造略图

1. 燕山早期第二阶段白云母花岗岩；2. 燕山早期第二阶段黑云母花岗岩；3. 燕山早期第三阶段花岗岩；4. 侏罗系；5. 三叠系；6. 断层；7. 花岗伟晶岩

矿区范围内花岗岩有两类。一类为中粒白云母花岗岩，分布广泛；另一类是中粒黑云母花岗岩，零星分布于白云母花岗岩中。两类花岗岩无明显接触界线，为渐变过渡。白云母花岗岩是风化壳稀土矿床的原岩，多呈浅红色，少数白色，中粒花岗结构，块状构造，主要组成矿物有石英 35—40%，斜长石 25—30%，钾长石 25—30%，白云母 3—7%，黑云母 0—1%。斜长石中以钠长石(<№5)为主，有少量奥钠长石；钾长石以微斜长石为主，少量微斜条纹长石。白云母花岗岩普遍发育白云母化，白云母明显交代黑云母，并常与工业矿物——氟碳铈钙矿共生。黑云母花岗岩的矿物组成与白云母花岗岩不同，其中钾长石含量可达 35%，微斜长石与微斜条纹长石同等发育，后者常呈斑晶产出，斜长石以奥钠长石为主。

两类花岗岩的岩石化学成分如表 10 所示。

表 10　两类花岗岩的岩石化学成分

类　型	化学成分百分含量						
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO
白云母花岗岩	74.88	0.05	13.44	0.21	1.42	0.08	0.19
黑云母花岗岩	74.58	0.15	13.34	0.56	1.25	0.05	0.18

类　型	化学成分百分含量						
	CaO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	F	CO_2	
白云母花岗岩	0.58	4.61	3.97	0.06	0.172	0.11	
黑云母花岗岩	0.73	4.80	3.65	0.05	0.082	—	

白云母花岗岩的副矿物，以氟碳铈钙矿、萤石、锆石为主，并出现砷钇矿、钛钇矿、铌钽铅矿(?)等自然界罕见的铌和稀土矿物。磷钇矿、独居石数量不多；磷灰石、钛铁矿、金红石、榍石等极少见。黑云母花岗岩副矿物组合较简单，以磷钇矿、独居石、锆石为主。花岗岩的围岩——流纹斑岩见有大量磁铁矿和赤铁矿，钛铁矿和金红石较多，稀土矿物含量低。

花岗岩中的交代蚀变作用主要属岩浆晚期的钠长石化、白云母化和萤石化。黑云母化、碳酸盐化及硅化等也常见到。重稀土矿物的矿化主要与白云母化及萤石化关系密切。

稀土矿物主要是氟碳钇钙矿，经常与白云母及萤石共生或包裹其中。这种萤石和白云母多半见于残留的黑云母附近，或就是黑云母被交代的产物。交代微斜长石形成的白云母及与之伴生的萤石，其中氟碳钇钙矿较少见。

白云母化花岗岩的风化壳是目前工业利用的主要对象。风化壳十分发育，最厚可达40多米。组成风化壳的主要矿物有石英40%、长石20%、云母5%及粘土矿物35%。粘土矿物中又包括高岭石、多水高岭石及水云母等。风化壳中的稀土矿物有磷钇矿、独居石、钛钇矿、砷钇矿、硅铍钇矿及褐钇铌矿等。铌钽矿物有铌铁矿、铌铁金红石及铌钽铅矿(?)等。其他副矿物还有锆石、锡石及钍石。

风化壳中的稀土，一部分呈独立矿物产出，绝大部分稀土呈离子状态被吸附在粘土矿物表面上。最重要的风化壳型重稀土矿床即由这部分稀土构成。重稀土中主要是钇，其次有钆、镝及镱，轻稀土中有钕及镧等。

稀土金属最富集部位见于风化壳充分发育的上部。向下，随着风化程度的减弱，稀土品位逐渐降低。花岗岩风化作用的初期阶段，长石被水云母交代，粘土矿物尚未大量形成，稀土矿物的分解也还不充分，因此其中稀土品位无显著增加。只有当花岗岩风化作用发育到高岭石和多水高岭石形成的阶段，稀土矿物充分分解，游离出来的稀土离子正好被粘土矿物所吸附，从而稀土品位显著增高。风化壳中多水高岭土分布的地段正好是重稀土富集的地段。

黑云母花岗岩中，易风化的氟碳钇钙矿等含量较低，黑云母花岗岩风化壳虽然也较发育，但其中呈离子状态被吸附的稀土含量较低，比较多的稀土以单矿物形式存在。由于矿物粒度较细，目前选矿还有一定困难，利用上仍存在一些问题。

3. 江西某地铌钽铁矿细晶石钠长石化锂云母化花岗岩

矿床位于某复背斜的东北部。区内主要地层由前震旦系浅变

质砂页岩组成。从加里东至燕山晚期本区均有岩浆活动。铌钽矿床主要与燕山期花岗岩株及岩脉有关。

含矿岩体出露面积不大，见于燕山期花岗岩株东南缘的顶部。岩体沿北东向断裂带侵入变质岩中。含矿岩体自上而下可分出三个岩相：细粒白云母花岗岩、中粒二云母花岗岩和中粗粒黑云母花岗岩。细粒白云母花岗岩中，钠长石化锂云母化发育地段即为铌钽矿体。岩体内外接触带有含钨、锡的石英脉产出(图 13)。

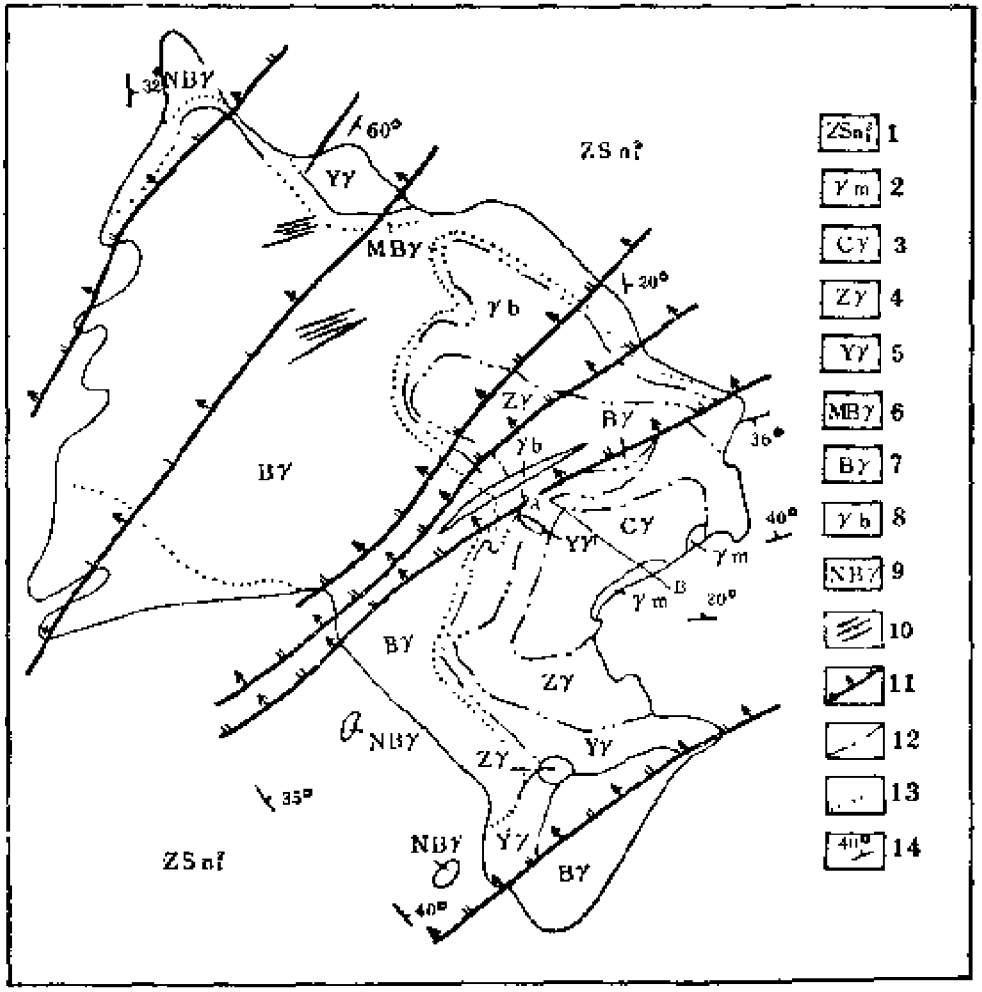


图 13　矿区地质平面示意图

1. 变质岩；2. 似伟晶岩；3. 强钠长石化花岗岩；4. 中钠长石化花岗岩；5. 弱钠长石化花岗岩；6. 中粒二云母花岗岩；7. 粗粒黑云母花岗岩；8. 钠长石化花岗岩脉；9. 细粒白云母花岗岩；10. 钨锡石英脉；11. 张扭性断层；12. 蚀变花岗岩界线；13. 推断地质界线；14. 变质岩产状

铌钽矿化主要与岩浆晚期及岩浆期后的交代蚀变作用有关。与矿化有关的交代蚀变作用主要为钠长石化和锂云母化。岩体中

的蚀变作用按形成顺序可以分为三期。第一期为叶钠长石化及锂云母化，第二期为钠长石化及锂云母化，第三期为伊利石化。按钠长石化作用强度又可分出强钠长石化（钠长石含量40—60%）、中钠长石化（钠长石含量20—40%）及弱钠长石化（钠长石含量小于20%）三类。矿化岩石主要是强钠长石化锂云母化花岗岩、中钠长石化锂云母化花岗岩和弱钠长石化花岗岩。在强钠长石化锂云母化花岗岩中有明显的黄玉化。钽铌等稀有元素主要在上述第一期交代作用阶段析出，而第一期蚀变作用又主要在强钠长石化锂云母化花岗岩中。

组成矿体的花岗岩及其原岩，都为铝过饱和岩石。其中钛、铁含量很低，氟含量很高。花岗岩的化学成分列于下表（表11）。

表11　各类花岗岩的岩石化学成分

岩石类型		强钠长石化锂云母化花岗岩	中钠长石化锂云母化花岗岩	弱钠长石化花岗岩	中粒二云母花岗岩	细粒黑云母花岗岩
化学成分%	SiO_2	67.94	73.24	74.36	73.6	73.84
	TiO_2	0.008	0.015	0.018		0.14
	Al_2O_3	16.85	13.26	14.29	12.32	13.35
	Fe_2O_3	0.07	0.08	0.21	0.04	0.5
	FeO	0.22	0.34	0.4	1.07	0.56
	MnO	0.14	0.26	0.49	0.23	0.1
	MgO	0.004	0.005	0.008	0.01	0.27
	CaO	0.14	0.49	0.19	0.51	0.21
	K_2O	2.51	3.49	3.25	3.94	4.88
	Na_2O	6.15	4.75	4.91	4.17	2.97
	F	1.4	0.08	0.06	0.22	0.07
	S	0.022	0.028	0.027		0.022
	P	0.185	0.17	0.008		
	H_2O	0.32	0.12	0.15	0.08	0.58

花岗岩中的蚀变作用，自下而上逐渐加强，使矿床具有明显的垂直分带现象。蚀变花岗岩体的顶部覆盖着前震旦系浅变质砂质岩，自此往下分出六个带，即 1. 似伟晶岩带；2. 强钠长石化锂云母化花岗岩带；3. 中钠长石化锂云母化花岗岩带；4. 弱钠长石化花岗岩带；5. 中粒二云母花岗岩带；6. 中粗粒黑云母花岗岩带（图 14）。各带均呈似层状产出，产状平缓。各带之间以渐变形式过渡。现分述各带特征如下：

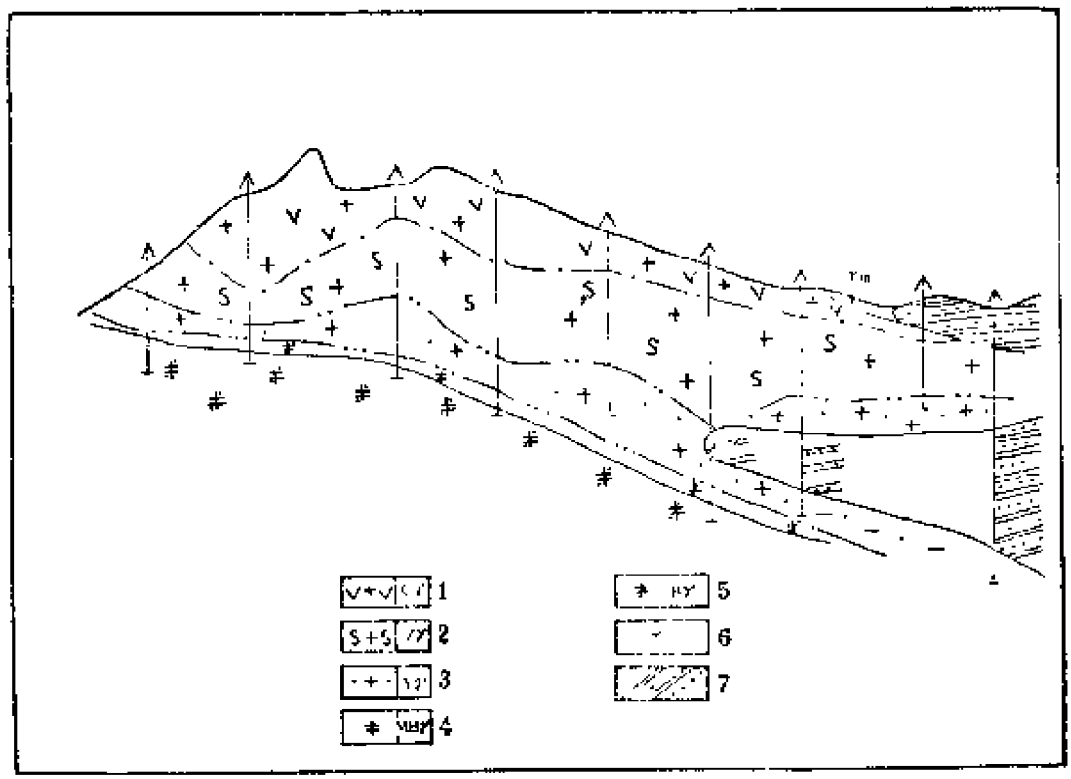


图 14　花岗岩垂直分带示意图

1. 强钠长石化花岗岩；2. 中钠长石化花岗岩；3. 弱钠长石化花岗岩；4. 中粒二云母花岗岩；5. 粗粒黑云母花岗岩；6. 似伟晶岩；7. 变质岩

1. 似伟晶岩带：见于岩体顶部，直接与其上变质岩接触。一般厚度 0.5—0.7 米，最大厚度 7 米。主要由伟晶状石英和斜长石组成。稀有矿物见有富锰铌钽铁矿、细晶石和含钽锡石。矿石中的 $Ta_2O_5:Nb_2O_5$ 0.6。此带矿物组分简单，矿石品位低。

2. 强钠长石化锂云母化花岗岩带：呈灰白色带浅紫色。细粒结构。可见交代环带状构造。主要由钠长石（其中叶钠长石含量

大于30%、条柱状钠长石小于20%)、锂云母、石英和黄玉组成。钾长石含量约0.5%。锂云母、黄玉、变种锆石为本带特征矿物。钽、铌、锂、铷、铯含量较高。铯榴石仅见于此带。该带为富钽、富锂、铷和铯的矿体。工业矿物有细晶石、富锰铌钽铁矿、锂云母及含钽锡石等。矿物组分简单。钽铌矿物粒度较大，多嵌生于叶钠长石中，有利于选矿回收。矿石中 $Ta_2O_5:Nb_2O_5=1.7-2$。

3. 中钠长石化、锂云母化花岗岩带：呈浅灰色，细粒结构，局部有交代环带构造。主要由钠长石（其中叶钠长石约12%、条柱状钠长石约18%）、石英、钾长石和锂云母组成，钽、铌、锂、铷、铯含量较低，工业矿物有富锰铌钽铁矿、含钽锡石、锂云母和少量细晶石，锂云母含量约8%。锂云母、变种锆石及黄玉的量比上一带显著减少。该带矿物组分复杂，有含锡钽铁金红石、钛铁矿、磷铁锰矿、锆石、黝锡矿及闪锌矿等。矿石中 $Ta_2O_5:Nb_2O_5=0.9-1.3$。

4. 弱钠长石化花岗岩带：呈灰色，变余花岗结构，主要由钾长石、斜长石、石英(含锂)、白云母和钠长石组成，稀有元素含量低。工业矿物主要有富锰铌钽铁矿和少量含钽锡石，细晶石微量。本带锂云母消失，出现白云母或含锂白云母。矿物组分复杂，出现较多的钛铁矿、黑钨矿、金红石、锆石、独居石和金属硫化物。矿石中 $Ta_2O_5:Nb_2O_5=0.6-0.8$。

5. 中粒二云母花岗岩带：具中粒花岗结构。主要矿物有钾长石、斜长石、白云母、石英、黑云母。稀有元素含量很低。有铌钽铁矿，但不具工业价值。钛铁矿、独居石、磷钇矿、榍石、石榴石、锆石的含量比上带增多。此带岩石中 $Ta_2O_5:Nb_2O_5=0.3-0.6$。

6. 中粗粒黑云母花岗岩带：具中粗粒花岗结构。主要由斜长石、钾长石、石英及黑云母组成。见有少量白云母。有极少量铌钽铁矿，呈黑色、细小粒状产出。副矿物与上带大致相同。

本区黑云母花岗岩中稀有元素含量较高，这是该矿床成矿的物质基础。由分析得知，矿石中的钽铌比值与岩石蚀变强度成正比。钽、锂及铯的出现与钠长石化锂云母化作用关系密切，而铌和铷则与这些作用的关系较小。此外，矿石中 Cs_2O 品位较高，矿石

中有铯榴石存在。

由稀有元素的赋存状态研究得知。在强和中钠长石化锂云母化花岗岩带内，钽的68%形成工业矿物，其余的钽主要分散在长石及锂云母中。铌约有一半组成工业矿物，另一半主要分布在锂云母及长石中。至于锂、铷、铯，主要分布在锂云母中。

目前已查明的稀有元素矿物主要有富锰铌钽铁矿、细晶石、含钽锡石及锂云母。这些矿物大都富集在上述强和中钠长石化锂云母化花岗岩带内，向下含量迅速降低。钠长石与这些矿物间具正消长关系。进一步看，上部强钠长石化锂云母化花岗岩中，以富钽矿物、黑色锡石、变种锆石为主。下部中钠长石化锂云母化和弱钠长石花岗岩中除仍以富钽矿物为主外，锆石多为普通锆石、锡石多为色浅的锡石。

从岩体上部向下，伴随着钠长石化锂云母作用的减弱，云母类矿物由锂云母→锂白云母→白云母→黑云母的顺序而变化。

4. 江西某地绿柱石钠长石化云英岩化花岗岩

矿床位于某一大花岗岩基的边缘。北东和北西两组构造线方向控制着区域岩浆活动及矿产分布。区域花岗岩为一复式侵入体，形成于燕山期，主要可分出两期。第一期为斑状黑云母花岗岩，构成岩基主体。第二期为中细粒二云母花岗岩或中细粒黑云母花岗岩，呈岩株、岩枝及岩瘤等形式侵入第一期斑状黑云母花岗岩中。二者接触界线明显。在第二期花岗岩的突出部位或岩枝前缘常有强烈的云英岩化及钠长石化，是铍、铌钽等稀有金属矿化的有利部位。

在矿区内，第一期黑云母花岗岩见于矿区边部或呈包体及残留体赋存于第二期中细粒二云母花岗岩中。第二期二云母花岗岩是含矿母岩，出露面积不大，呈小穹窿体产出，贯入第一期花岗岩中(图15)；二者接触面，北、东、南三面较缓，西面较陡。由于岩体内常见黑云母花岗岩的残留顶盖，证明岩体剥蚀深度不大。

含矿花岗岩颜色很浅，具变余花岗结构，片麻状构造明显。岩石的主要造岩矿物有钾长石、钠奥长石、钠长石、石英、白云母及黑

云母。钠奥长石牌号 10—13，钠长石牌号 5—8。副矿物有独居石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、锆石、石榴石、电气石、黄玉及萤石等。

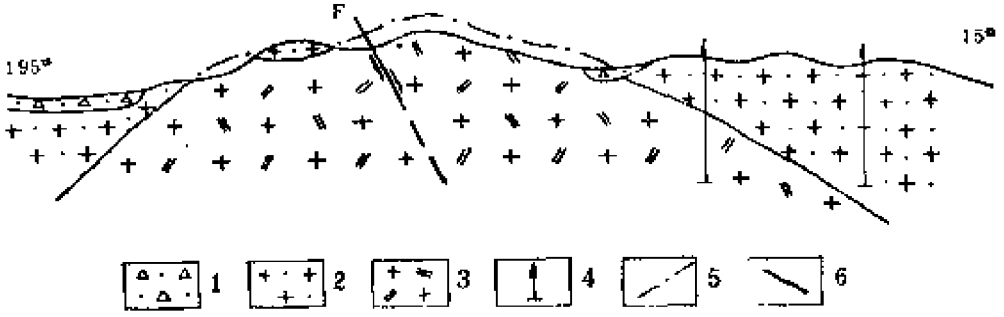


图 15　江西某地含矿花岗岩产状示意图

1. 第四系；2. 第一期斑状黑云母花岗岩；3. 第二期中细粒二云母花岗岩；4. 钻孔；5. 第二期花岗岩被侵蚀部分；6. 断层

矿区范围内见到的脉岩有细晶岩、伟晶岩，以及二者相互呈互层产出的细晶-伟晶岩脉。细晶岩脉分布于含矿岩体内外接触带，明显切穿伟晶岩，形成最晚。伟晶岩脉和细晶伟晶岩脉主要见于外接触带黑云母花岗岩中。三类岩脉都有微弱的绿柱石矿化。

含矿花岗岩流线构造不明显，流面构造随处可见。长石、石英，特别是云母类矿物大致平行岩体接触面呈定向排列，随接触面产状变化而变化。岩石中的三组原生节理，即层节理、纵节理及横节理，常可根据此种流面构造来判断。控制成矿的构造，主要是岩体冷凝时期形成的细微节理或裂隙，它们常与三组原生冷凝节理方向一致。岩体内的含绿柱石矿体，产状或与一个方向节理或裂隙有关，或与两组方向节理或裂隙有关，或者与它们的交切有关。

花岗岩体遭到不同程度的岩浆晚期和岩浆期后蚀变作用。岩浆晚期作用为微斜长石化和钠长石化。岩浆期后作用主要为云英岩化。微斜长石化在岩体中普遍见到，但不强烈，钠长石化作用出现较弱，云英岩化作用最强。

云英岩化按其分布和强度，又大致可分为一般云英岩化和强烈云英岩化两类。前者遍于整个岩体，蚀变深达 200 米，从上至下，可分出如下的垂直蚀变带：

1. 云英岩化细粒花岗岩带　　厚度 0— 5 米
2. 云英岩化中细粒花岗岩带　　厚度 5— 20 米
3. 云英岩化中粒花岗岩带　　厚度 20— 50 米
4. 弱云英岩化中粒花岗岩　　厚度 50—200 米

强烈云英岩化形成的岩石多见于一般云英岩化岩石的顶部，即上述一、二带中，其分布与岩体顶部裂隙带有关。强烈云英岩化岩石又可分为强云英岩化中粗粒花岗岩及白云母碱性长石云英岩化花岗岩两类。这两类交代岩体，云英岩化作用较上述一般云英岩化岩石强烈得多，而且可能伴随有碱性长石化作用。这两类岩体与绿柱石矿化关系最为密切。

几类蚀变岩体的矿物成分及化学成分列于表 12。

含绿柱石矿体主要见于强烈云英岩化花岗岩中。在其中以不规则细脉状、囊状、透镜状、鸡窝状及各种不规则形状产出。矿体与周围蚀变花岗岩之间以渐变形式过渡。在矿体内，绿柱石的分布，形式极其多样而复杂，有的绿柱石呈浸染状均匀分散在云英岩化花岗岩中，有的绿柱石集合体以囊状或脉状形式赋存在云英岩化花岗岩中，有的一条细脉或囊体几乎全由绿柱石组成，而有的则由绿柱石石英或绿柱石石英长石云母等组成。

矿体的矿物成分比较简单，主要脉石矿物有微斜长石、钠奥长石、石英及白云母，次要的脉石矿物有黑云母、电气石、黄玉、石榴石和萤石；工业矿物仅有绿柱石；其他稀有和金属矿物见有钽铌铁矿、褐钇铌矿、黄铜矿、辉钼矿、磁铁矿及黄铁矿等。

矿化富集地段，只见于中细粒二云母花岗岩的顶部，一般从岩体顶部向下深度约 20 米的间隔内为矿化富集地段，自此以下矿化迅速减弱。在岩体顶部，富矿地段又常见于岩体顶部的局部突出部位、岩体接触面比较平缓的内接触带中，以及岩体边缘拐弯处等。

5. 广东某地绿柱石日光榴石云英岩

矿床分布地区内见到的最老岩层为侏罗纪小坪煤系。煤系主要由砾岩、砂岩及页岩组成，并夹有劣质煤层。此外即为第四系

表 12　各类岩体的矿物成分和化学成分

岩石类型		二云母花岗岩（蚀变）	一般云英岩化花岗岩	强烈云英岩化花岗岩	
				强云英岩化中粗粒花岗岩	白云母碱性长石云英岩化花岗岩
主要造岩矿物含量(%)	钾长石	23.3	22.88	14.60	36.50
	钠奥长石	27.3	24.09	13.68	28.02
	石英	34.7	37.57	59.60	14.60
	白云母	8	11.77	8.58	16.86
	黑云母	5	3.22	3.20	2.24
岩石化学成分(%)	SiO_2	73.24	73.51	76.70	55.92
	TiO_2	0.10	0.06	0.06	0.10
	Al_2O_3	14.16	14.61	13.28	26.34
	Fe_2O_3	0.33	0.74	0.49	0.53
	FeO	1.21	0.84	1.06	0.37
	MnO	0.045	0.08	0.12	0.03
	MgO	0.22	0.12	0.33	0
	CaO	0.81	0.13	0.34	0.07
	Na_2O	3.52	3.08	2.80	3.38
	K_2O	4.52	4.71	3.02	6.36
	P_2O_5	0.10	0.10	0.13	0.04
	H_2O	1.02	0.48		1.16
	烧失		1.37	0.96	11.67
	总计	99.42	99.83	99.29	98.97

的残坡积层及冲积层。区域内的岩浆活动以及矿床的形成受北东——南西及北北西——南南东向的区域构造线控制。岩浆活动频繁而剧烈，主要表现为石英斑岩-流纹岩及大面积花岗岩的形成。石英斑岩-流纹岩形成在先，花岗岩形成在后，二者呈侵入

接触。

矿区内的岩石主要为石英斑岩及黑云母花岗岩。花岗岩呈舌状伸入石英斑岩中，二者接触带走向分别为北东及北西。花岗岩在此处呈一南端闭合，北端张开的舌状体。矿区已揭露的矿化大多限制在舌状体东南部分花岗岩与石英斑岩接触的内接触带中，矿带大约呈北东向，然后转东西向(图 16)。

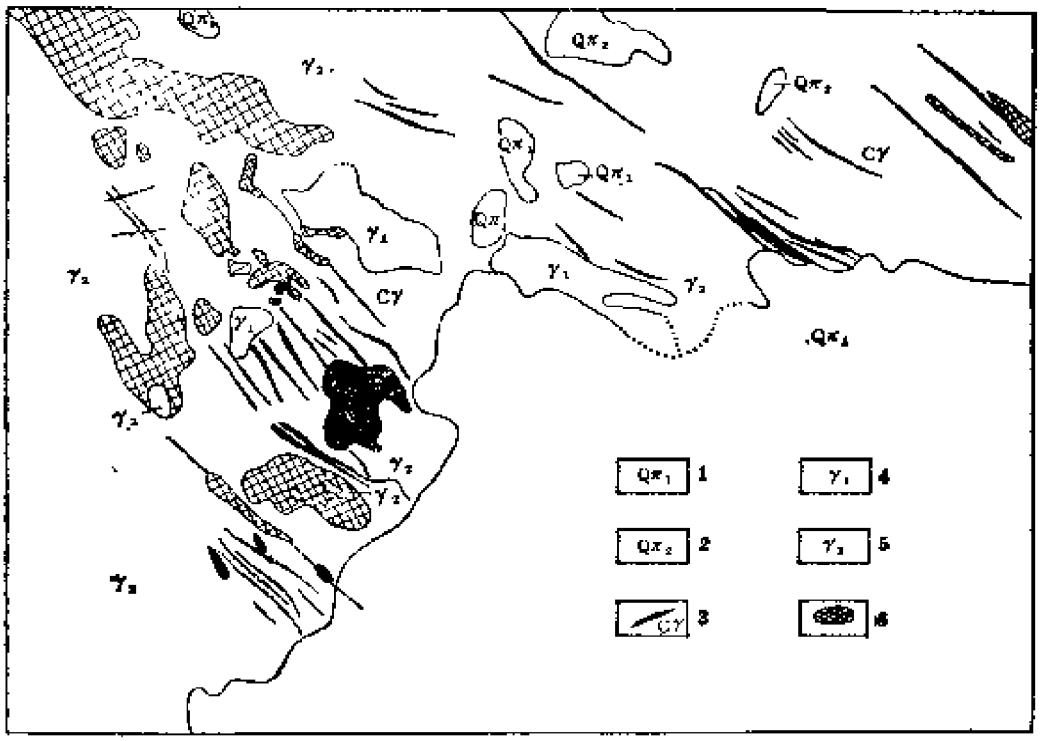


图 16　广东某地含铍云英岩矿床地质示意图

1. 石英斑岩；2. 斑晶以长石为主的石英斑岩；3. 脉状云英岩体；4. 细粒钠长石化花岗岩；5. 中粒钠长石化花岗岩；6. 云英岩

花岗岩与石英斑岩为侵入接触，接触面倾角陡缓不一。从花岗岩顶部石英斑岩呈残留顶盖形式存在，推测矿区一带的花岗岩刚被侵蚀揭露不久。石英斑岩在成矿上起阻止矿液流失的"遮挡层"作用。

矿区花岗岩受到钠长石化作用及云英岩化作用，分别形成钠长石化花岗岩、云英岩化花岗岩及含矿云英岩。愈近矿体，交代作用愈强烈；远离矿体交代作用逐渐减弱。未受到蚀变作用的原生岩石为黑云母花岗岩，具中粒等粒结构。

花岗岩中的原生冷凝节理十分发育，含矿云英岩即沿节理分布。云英岩呈囊状及脉状产出，大小不等。囊状含矿云英岩从平面上看小的仅数平方米，大的面积可达一百多平方米；深度不详。

组成含矿云英岩的矿物成分极其复杂，主要矿物有石英、黄玉、黑鳞云母及白云母；较次要的矿物有绿泥石、叶蜡石、萤石、长石及菱铁矿等。含铍矿物为绿柱石、日光榴石、羟硅铍石及蓝柱石。金属矿物有黑钨矿、锡石、辉钼矿、辉铋矿及黄铁矿等金属硫化物。目前矿山开采的对象为日光榴石及绿柱石。

日光榴石在云英岩中常呈致密团块状产出，块体大者直径可达1米以上；有的日光榴石呈散点状或似脉状分散在云英岩内。根据化学分析，日光榴石中日光榴石分子占52%，铍榴石分子占41%，锌日光榴石分子占7%。与日光榴石共生的矿物主要有石英、黄玉、黑鳞云母、绿柱石及黄铁矿。日光榴石及黄铁矿在地表氧化，铁相对富集，形成"铁帽"。绿柱石在云英岩中也多呈不规则短柱状的聚晶集合体，间或也呈散点状、似脉状分散于云英岩中；绿柱石为天蓝色及白色，云英岩中石英块体及云母片增大的地方绿柱石晶体也较大，最大的绿柱石晶体，柱长达40厘米。与绿柱石共生的矿物最常见的是黑鳞云母、黄玉、石英及日光榴石。羟硅铍石呈白色、片状，交代绿柱石及日光榴石而发育；与之共生的矿物有白云母、绿泥石、萤石及菱铁矿等。蓝柱石无色透明，为柱状或细小针状。羟硅铍石及蓝柱石都是绿柱石及日光榴石经晚期热液作用交代而形成的两种次生铍矿物。

含绿柱石日光榴石的云英岩，其中不同矿物组合的分布具有清楚的呈带性，形成不同的云英岩带。从云英岩体中心向外可分出如下各带(图17)：

1. 绿柱石日光榴石中心铍矿物带；
2. 黄玉石英云英岩带；
3. 黄玉黑鳞云母石英云英岩带；
4. 黑鳞云母石英云英岩带。

以上四带构成含铍云英岩矿体。在黑鳞云母石英云英岩带之

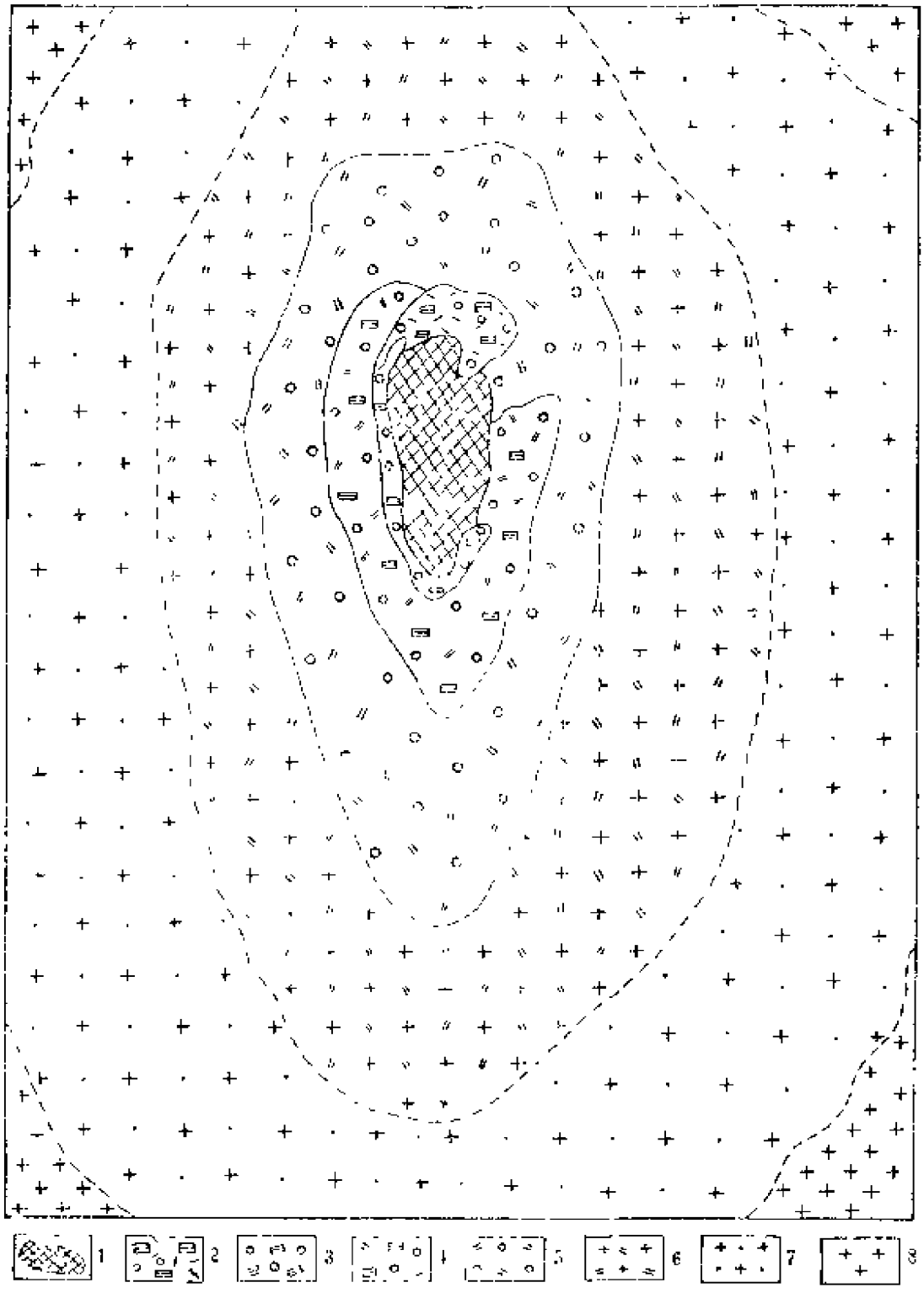


图 17　含铍云英岩体综合分带示意图

1. 铍矿物带；2. 黄玉白云母石英云英岩；3. 黄玉石英云英岩；4. 黄玉黑鳞云母石英云英岩；5. 黑鳞云母石英云英岩；6. 云英岩化花岗岩；7. 钠长石化花岗岩；8. 黑云母花岗岩

外为受蚀变的花岗岩，由矿体向外，大致可分出三带：

5. 云英岩化花岗岩带；

6. 钠长石化花岗岩带；

7. 未蚀变的黑云母花岗岩。

根据含铍云英岩矿体中各种矿物的形成顺序，以及花岗岩中钠长石化作用在先，云英岩化作用在后，可以确定上述各蚀变花岗岩及云英岩各带的形成顺序(含矿云英岩体的形成顺序或发育过程如图 18 所示)。可以推想，图 17 上的各个带是按先外后内的顺

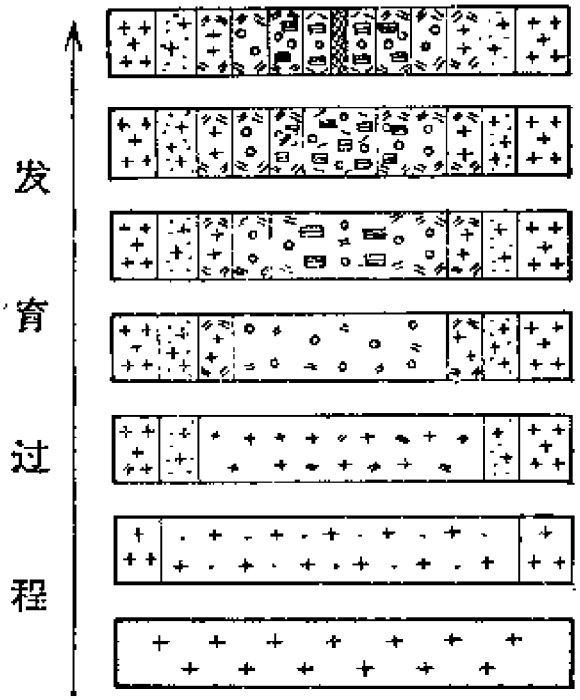


图 18　含铍云英岩体发育过程示意图

图例与图 17 的相同

序逐渐形成的。考虑到矿体直接位于石英斑岩之下并常沿节理分布，含矿云英岩形成时，矿液是由下部及四周向节理处汇聚，储积在上覆石英斑岩"遮挡层"之下，逐步交代花岗岩而形成。

（二）稀有金属伟晶岩型矿床

矿床地质特征概述

稀有金属伟晶岩，在我国广泛分布，研究工作最多最细，是我国目前锂、铍、钽、铯等稀有金属的重要来源。

稀有金属伟晶岩进一步可分为六类（见表3）。这六类伟晶岩的分出，和九类含矿花岗岩的分出一样，主要根据是形成伟晶岩的熔体溶液的演化发展。含矿伟晶岩不是由什么独特的伟晶岩浆形成的，而是由含矿花岗岩浆在不同深度不同地质条件下形成的。这种含矿花岗岩浆。在一种深度，一种地质条件下，可以形成含矿花岗岩，而在另外一种深度（多半深度较大），另外一种地质条件下（如大的裂隙空洞发育），可以形成含矿伟晶岩（有关含矿花岗岩和含矿伟晶岩是由同一种含矿花岗岩浆形成的讨论见后第10节）。因此，含矿花岗岩浆物质成分的演化发展，既决定了不同类型稀有金属花岗岩的形成，也决定了不同类型稀有金属伟晶岩的形成。不同类型伟晶岩的先后出现，和含矿花岗岩一样，若以碱金属表示，可以归纳为K——→Na——Li的顺序，若以稀有金属表示可以归纳为Y——→Nb——→Be——→Ta——→Li的顺序。这种先后顺序在不同类型伟晶岩彼此之间的空间排列及各种矿物共生的先后形成上，都有明显反映。

1．稀有金属伟晶岩的空间分布

我国稀有金属伟晶岩分布广泛，构成许多大的稀有金属伟晶岩区。

在一个大的伟晶岩区内，常常聚集着成千上万条伟晶岩脉。我国西北某伟晶岩区，伟晶岩脉已知达数万条。这样数目众多的伟晶岩脉在一个伟晶岩区内，又常分别富集在若干个伟晶岩矿田内。一个伟晶岩矿田有的又叫做伟晶岩密集区，里边聚集着成百成千的伟晶岩脉。同样，在一个伟晶岩矿田内又可分出若干伟晶岩带。一个伟晶岩带，伟晶岩多达数十或数百条不等，大致沿同一方向延展，受同一地质构造控制。一条伟晶岩带长数公里到数十公里，宽可达数公里。一个伟晶岩矿田内的不同伟晶岩带，其延展方向可能不同，彼此间伟晶岩脉的产状形态也可能不同。

一个大伟晶岩区内，与成矿有关的花岗岩，多见于背斜的轴部，也有的见于背斜的翼部或倾没部分，而与其有关的伟晶岩多见于花岗岩体的外接触带附近，多偏离背斜轴部中心，而聚集在背

斜的翼部或倾没部分。一个伟晶岩区内，不同伟晶岩矿田的伟晶岩与不同的花岗岩体有成因关系，而一个矿田内的各个伟晶岩带则常围绕着同一个花岗岩体四周，分布在不同的部位，其中一些方向上的伟晶岩特别发育，另一些方向上的伟晶岩不太发育。

各区伟晶岩矿田延展方向常与区域构造方向一致。产于沉积变质岩中的伟晶岩，有时其走向也与围岩的走向一致（倾向不尽相同）。如内蒙南部伟晶岩，伟晶岩矿田多呈东西向延展，与区域构造线方向一致，单一伟晶岩脉也常呈东西走向。四川、云南一些伟晶岩区，区域构造线为南北向、沉积变质岩的走向常作南北向，其中伟晶岩矿田也常作南北向。

在花岗岩体四周的伟晶岩，最常见于花岗岩向围岩突出的一方及岩体缓倾斜一方的外接触带中（见图 19、21 等）；岩体边缘平直较钝的一方，或岩体陡倾斜接触的一方，一般少见富含稀有金属的花岗伟晶岩。

2. 稀有金属伟晶岩的形成时代

我国稀有金属伟晶岩可以分为前寒武纪及寒武纪以后的两大成矿时代。大型稀有金属伟晶岩主要见于寒武纪以后，这与国外的大型稀有金属伟晶岩多形成于前寒武纪的不同。何以如此？确需研究。就现有资料，前寒武纪的伟晶岩主要是一些含铌稀土矿物及白云母的伟晶岩；含大量铍、钽、铯矿物的伟晶岩，主要见于寒武纪以后。寒武纪以后各大造山旋回都有伟晶岩产出，其中又以海西及燕山期的伟晶岩含稀有金属最富。现将各种类型伟晶岩的主要成矿时代列于表 13。需要指出，在同一地区，同一成矿期，几乎各种类型伟晶岩都能见到，交代作用发育的、不发育的都有，因此表中所列一般是指该区最发育最有代表性的伟晶岩而言。

3. 稀有金属伟晶岩的成矿母岩

与稀有金属伟晶岩有成因关系的母岩，主要为黑云母花岗岩及二云母花岗岩，偶尔见有花岗闪长岩。黑云母花岗岩多呈“岩基”形式出露，面积可达数百平方公里甚或更大。大体上，伟晶岩区愈大，其中伟晶岩脉数量愈多，与之有关的花岗岩母岩出露面积也愈

表 13　稀有金属伟晶岩的形成时代

类　　型	产　　地	成　矿　期	同位素地质年龄
I. 铌稀土矿物黑云母奥长石微斜长石伟晶岩	黑龙江某地	前寒武纪	1900×10⁶ 年
	内蒙某地	〃	1843　1938×10⁶ 年
	河北某地	〃	1827×10⁶ 年
	山西某地	〃	1674×10⁶ 年
	辽宁某地	〃	1400×10⁶ 年
II. 绿柱石铌铁矿白云母微斜长石伟晶岩	内蒙某地	前寒武纪	1881×10⁶ 年
	辽宁某地	〃	1400×10⁶ 年
	四川某地①	印　支	198　×10⁶ 年
	四川某地②	印　支	183　×10⁶ 年
	云南某地	〃　〃	
III. 绿柱石铌铁矿-钽铁矿钠长石(微斜长石)伟晶岩	湖南某地	燕　山	136×10⁶ 年
	云南〃〃	燕　山	90×10⁶ 年
	江西〃〃	燕　山	95—136×10⁶ 年
	新疆〃〃	海　西	
IV. 铌钽铁矿锂辉石钠长石伟晶岩	四川某地①	印　支	192×10⁶ 年
	四川某地②	印　支	
	陕西某地		
V. 铌钽铁矿细晶石铯锂石白云母微斜长石、钠长石伟晶岩	福建某地	海西早期	352　361×10⁶ 年
	内蒙某地	海西早期	320×10⁶ 年
	新疆某地	海　西	
	江西某地	燕山早期	
	湖南某地	燕　山	131×10⁶ 年
	湖南某地	燕　山	110—147×10⁶ 年
	广西某地	燕　山	103×10⁶ 年
VI. 绿柱石锰钽矿细晶石铯锂石锂云母钠长石伟晶岩	河南某地	加里东期	391—410×10⁶ 年
	陕西〃〃	加里东期	372×10⁶ 年
	新疆〃〃①	海西晚期	203—261×10⁶ 年
	新疆〃〃②	〃	211×10⁶ 年

大。这类岩石常具中粒或中粒斑状结构，有时具粗粒结构。岩石的主要组成矿物有黑云母，钾微斜长石，奥长石及石英，间或见到普通角闪石及钠长石。副矿物主要是磷灰石，榍石，褐帘石，锆石，

磁铁矿、其次是独居石及钛铁矿。二云母花岗岩，岩体出露面积较小，岩体形态较复杂。四川某地与伟晶岩有成因关系的二云母花岗岩呈岩镰状产出，伟晶岩多分布在岩镰向北突出一方的外接触带中(图19)。这类岩石，常具中粒结构及细粒结构。岩石的主要组成矿物有钾长石，奥钠长石，石英。白云母多于黑云母。特征副矿物有石榴石，磷灰石，电气石，萤石及锆石。榍石，褐帘石、钛铁矿，磁铁矿等远较黑云母花岗岩为少。二云母花岗岩常含有稀有元素矿物，如锂辉石，绿柱石，钽铌铁矿，铌钇矿，黑稀金矿等。

与伟晶岩有成因关系的黑云母花岗岩，其化学成分与一般钙碱系列的正常黑云母花岗岩一致，这在矿物成分上即可看出。与伟晶岩有成因关系的二云母花岗岩，和一般黑云母花岗岩相比，其中硅的含量显著较高，碱元素与挥发分含量也高，而钙、钛、镁、铁等元素含量相对较低。若以二云母花岗岩与稀有金属花岗岩相比，则情况相反，其中硅，碱元素及挥发分的含量又略低。特别是二云母花岗岩中虽含有稀有元素，但其含量大大低于含矿花岗岩。

4. 稀有金属伟晶岩的分异作用及交代作用

伟晶岩的分异作用由形成伟晶岩熔体溶液的演化所引起，表现为伟晶岩内部自外向内的原生结构分带。实际上，伟晶岩中的交代作用也是分异作用的一种特殊表现形式，是分异作用的必然结果和继续。引起交代作用的溶液，大部来自该伟晶岩本身，是伟晶岩熔体溶液分异演化残留下来的一部分。设想引起交代作用的大部分溶液来自伟晶岩体下部的深处，难于令人相信。交代作用表现为早期矿物被晚期矿物交代，交代生成的矿物或矿物集合体，尽管其空间排列的秩序性较差，但其形成时间，确有先后之别。据此可以恢复伟晶岩的全部历史，帮助了解伟晶岩熔体溶液的演化发展过程。

伟晶岩的分异作用，伟晶岩内的带状构造，对稀有金属成矿的控制，表现得不十分明显。分异好的呈带性完善的，稀有元素可以富集。分异差的呈带性不明显的，也常见到显著的稀有金属矿化。呈带性完善的伟晶岩，矿化富集部位多见于石英核与块体微斜长

石带的四周。

伟晶岩分异作用比较明显，内部结构带比较发育的，可以四川某地区含锂辉石伟晶岩为例(表14)。表14中的13个结构带，是若干伟晶岩脉的综合分带，其中既包括原生结构带，又包括交代结构带。带的顺序大致由脉壁向中心排列。各带的形成顺序是，边缘带在先，内部核心带在后；原生结构带在先，交代结构带在后。由表14可见，若以碱金属表示，伟晶岩结构带从外到内，有K——→Na——→Li的变化顺序，各结构带的形成时间也是按K——→Na——→Li的先后顺序。若以稀有元素表示，从外到内，从早到晚，可见到Be——→Nb——→Ta——→Li的演化顺序。

伟晶岩中交代作用与稀有金属成矿关系最为密切。一般交代作用不发育的伟晶岩，仅见部分锂、铍及铌的矿化，稀土矿物虽多见，但一般工业价值不大。伟晶岩脉内交代作用愈发育，稀有金属矿化的可能性愈大。交代作用常见的为白云母化、钠长石化及锂云母化，而且从早到晚、从伟晶岩的边缘到内部表现为白云母化、钠长石化和锂云母化的顺序。大体上白云母化与铍、铌的成矿关系密切，钠长石化与铍、铌及部分钽的成矿关系密切，而锂云母化和钠长石化同时大量发育的伟晶岩，常伴随产生锂、铍、铌、钽、铷、铯的综合型稀有金属矿化。伴随锂云母和钠长石化作用的常有富铯锂石及富钽锡石的形成。富铯锂石是目前开采铯的唯一来源。

在一条伟晶岩脉中，无论白云母化、钠长石化，锂云母化都可能出现于好几个阶段，形成不同产状和不同形态的矿物。如钠长石化作用，即先后可能有糖晶状的钠长石、叶片状钠长石和薄板状钠长石的形成。锂云母化也有大片锂云母及鳞片状锂云母之分。象钽、铯等矿化主要与叶片状及糖粒状钠长石、鳞片状锂云母的形成有关。

5. 稀有金属伟晶岩的带状分布

在一个伟晶岩矿田内，可见到不同类型伟晶岩分布上的带状性。即围绕着大的花岗岩体，从花岗岩到围岩方向，有规律地分布着不同类型伟晶岩。最理想情况下，一般铌稀土奥长石微斜长石伟

表 14　四川某地稀有金属伟晶岩结构带

结构带名称及代号	主要矿物及其百分含量	次　要　矿　物	有价值的矿石矿物
细粒边缘带 (1)	石英　30—40 微斜长石　30—50	白云母，钠长石奥长石，电气石，石榴石	
文　象　带 (2)	石英　20—35 微斜长石　50—70	白云母，钠长石黑电气石	
粒状微斜长石带 (3)	石英　20--35 微斜长石　40--60	白云母，钠长石黑电气石	
块体微斜长石带 (4)	石英　<20 微斜长石　70　90	钠长石，白云母绿柱石(锂辉石)	近(5)带处有绿柱石，铌铁矿
块体石英带 (5)	石英　>90	白云母、钠长石微斜长石	
白云母带 (6)	石英　20—50 白云母　30 -60	钠长石，微斜长石	白云母，绿柱石钽铌铁矿
微斜长石钠长石带 (7)	石英　20--35 微斜长石　20--40 钠长石　20—40	白云母	绿柱石，钽铌铁矿
锂辉石带 (8)	石英　20--50 锂辉石　10—40 微斜长石　10—40	钠长石，白云母	锂辉石
钠长石带 (9)	石英　30—40 钠长石　10--60	白云母，微斜长石，锂辉石	
钠长石锂辉石带 (10)	石英　25—40 钠长石　25—45 锂辉石　10--30	微斜长石，白云母	绿柱石、锂辉石，钽铌铁矿
钠长石锂云母带 (11)	石英　30—40 钠长石　30--50 锂云母　5--25	微斜长石，白云母，多色电气石(锂辉石)	
钠长石白云母带 (12)	石英　30—40 钠长石　30—50 白云母　10—20	微斜长石(锂辉石)	钽铁矿，锡石，绿柱石
云英岩带 (13)	石英　50　70 白云母　20　40	钠长石等	锡石铌，钽铁矿，绿柱石等

晶岩或绿柱石铌铁矿白云母微斜长石伟晶岩离花岗岩体最近，并且常常见于花岗岩内接触带。向外接触带方向追索，可以见到绿柱石铌铁矿-钽铁矿钠长石伟晶岩或绿柱石钽铌铁矿锂辉石钠长石伟晶岩。铌钽铁矿细晶石铯锆石白云母微斜长石钠长石伟晶岩或绿柱石锰钽矿细晶石铯榴石锂云母钠长石伟晶岩分布在离岩体最远的地段。大体上从内接触带到外接触带方向，表现出以下几方面的规律性变化：

（1）伟晶岩脉的规模愈来愈大；

（2）交代作用愈来愈强烈。交代作用的顺序是白云母化——→钠长石化——→锂云母化；

（3）稀有金属愈来愈富集。其排列顺序大致为稀土——→铌(钽)——→铍——→钽(铌)——→钽、锂、铷、铯、铪。钽、锂、铷、铯通常都富集在最远离母岩的外接触带围岩中。铍在各种类型伟晶岩中都能见到，呈不同颜色和晶形的绿柱石产出，因此在不同距离内都多少能见到铍。

我国四川、江西、陕西、新疆、湖南、湖北、广西等地区的伟晶岩矿田内都见到这种伟晶岩脉的带状分布现象。现举陕西、四川等地的伟晶岩矿田为例，其中不同类型伟晶岩围绕花岗岩呈带状分布的现象见图 19，图 20 及图 21。

由上述可以看出，不同类型伟晶岩沿花岗岩体的带状分布，反映出K——→Na——→Li和TR——→Nb——→Be——→Ta——→Li的顺序。

6. 稀有金属伟晶岩的化学成分和矿物成分

稀有金属伟晶岩化学成分上的特点是富硅、富碱、富铝。钙、钛、铁、镁等含量普遍较低，挥发分及稀有元素高度富集。和稀有元素花岗岩相比，其中硅及碱的含量可能大致相等或稍低，而铝的含量或相等或稍高。特别是稀有元素含量常较含矿花岗岩中的高。现有资料说明，含矿花岗岩中的所有稀有元素，包括Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Zr、Hf等，伟晶岩中皆有。由于伟晶岩的特殊条件，这些稀有元素形成的矿物，粒度大，更富集，更利于工业利用。



图 19　四川某地①不同类型伟晶岩空间分布示意图

1. 二云母花岗岩；2. 微斜长石型伟晶岩；3. 微斜长石钠长石型伟晶岩；4. 钠长石型伟晶岩；5. 钠长石锂辉石型伟晶岩；6. 钠长石锂云母型伟晶岩；7. 类型分带线；8. 类型分带编号

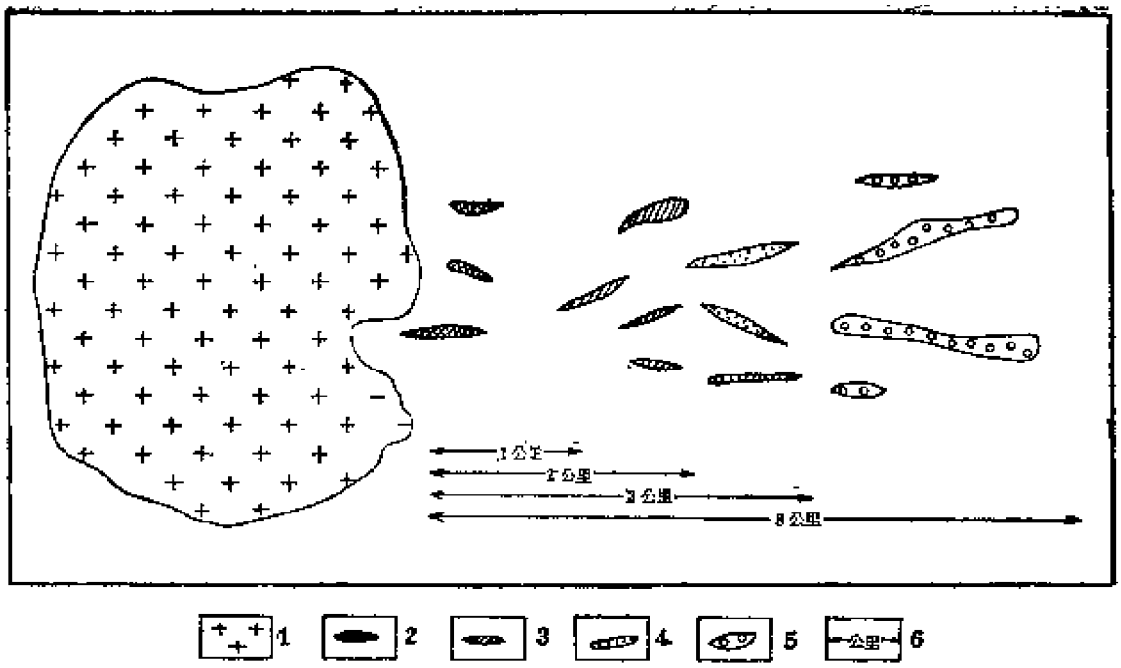


图 20　四川某地②不同类型伟晶岩空间分布示意图

1. 二云母花岗岩；2. 微斜长石型伟晶岩；3. 微斜长石钠长石型伟晶岩；
4. 钠长石型伟晶岩；5. 钠长石锂辉石型伟晶岩；6. 离花岗岩距离

伟晶岩中的矿物极其丰富而复杂。组成伟晶岩的矿物主要是硅酸盐和氧化物，硫化物和碳酸盐很少。伟晶岩形成的原生结晶作用阶段，矿物种类较少，晶出大部硅酸盐和少量稀土钛铌酸盐。在伟晶岩形成的交代作用阶段，矿物种类最多。除少量铌及铍在早期阶段以绿柱石，铌铁矿晶出外，大多数稀有元素矿物都形成于交代作用阶段。

不同类型伟晶岩中的矿物成分是不同的，现将其列于表 15。

表 15 中所列矿物实际仅是最常见的部分，而且是与成矿关系最密切的一部分。伟晶岩中的矿物远不止此。某些矿物（如钠长石）虽然在各种类型中都见到，但它们形成于不同的世代。不同类型中的同一矿物，其成分、形态、颜色等都不同。以斜长石为例，从 I 类到 VI 类，有由奥长石、奥钠长石、钠奥长石到钠长石的变化。钠长石又有糖粒状、叶片状、薄板状等。从白云母来看，I、II 类的主要是大片白云母，III、IV、V 类的主要是小片或鳞片白云母，有的为含锂白云母。VI 类中除含锂白云母外，又有绿鳞云母、锂云母等。

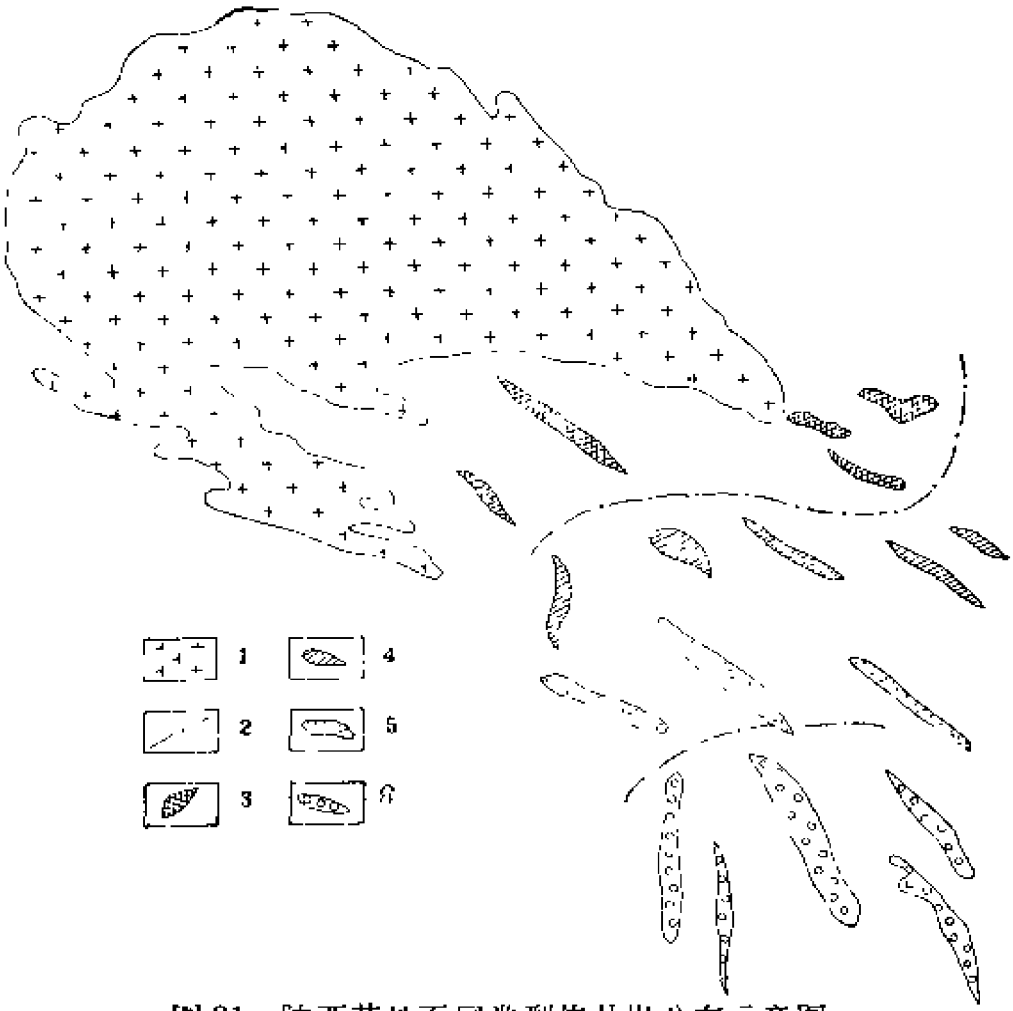


图 21　陕西某地不同类型伟晶岩分布示意图

1. 黑云母花岗岩；2. 类型分带线；3. 锂、钽、稀土斜长石伟晶岩；4. 铍斜长石微斜长石伟晶岩；5. 铍铌钽微斜长石斜长石伟晶岩；6. 锂、铍、铌、钽、铯、锂云母锂辉石钠长石伟晶岩

其他像绿柱石，电气石，锂辉石及石榴石等都有好几个世代，这在一般伟晶岩矿物描述中常加讨论。值得指出的是不同世代的矿物可以指示不同的稀有金属矿化，这在找矿和矿床研究时应予以注意。

伟晶岩中的矿物，总是以一定的矿物共生组合出现在一定类型的伟晶岩中，分布在伟晶岩一定的部位。一个矿物共生组合代表一组矿物，既包括造岩脉石矿物，又包括稀有元素矿物，而一定的矿物共生组合在一定的地质条件下表现为一定的结构带。这种矿物共生组合及结构带的研究，对了解稀有元素矿物赋存情况、矿化规模及强度，非常重要。

表 15　不同类型伟晶岩的矿物成分

类型	主要脉石矿物	主要副矿物	
		稀有元素矿物	其他矿物
Ⅰ	奥长石、微斜长石、石英、黑云母、白云母	褐帘石、黑稀金矿，褐钇铌矿、铌钇矿、独居石、钍石、铌铁矿、绿柱石、硅铍钇矿	黑电气石、石榴石、磁铁矿、钛铁矿、榍石
Ⅱ	微斜长石、奥钠长石、石英、白云母(黑云母)	金绿宝石、绿柱石、硅铍钇矿、铌铁矿、独居石	黑电气石、石榴子石、磷灰石、萤石、金属硫化物
Ⅲ	钠长石、钠奥长石、微斜长石、石英、鳞片白云母	金绿宝石、绿柱石、铌铁矿—钽铁矿、钽黑稀金矿，黑稀金矿、独居石、锆石、天河石	黑电气石、锰铝石榴石、绿帘石、尖晶石、磁铁矿、白钛石、金属硫化物
Ⅳ	钠长石、石英、锂辉石、锂白云母	锂辉石、锂磷铝石、透锂长石、绿柱石、钽铌铁矿、锰铌矿、锆石	黑电气石、磷灰石、锰铝榴石、多色电气石、黄玉、萤石、磁铁矿、白钛石、金属硫化物
Ⅴ	钠长石、钠奥长石、石英、白云母、微斜长石	绿柱石、天河石、铌钽铁矿、钽铌铁矿、钽铁矿、锰钽矿、细晶石、铪锆石、(褐钇铌矿、独居石)、锂云母	黑电气石、多色电气石、锰铝石榴石、锡石、白钨矿、晶质铀矿、金红石、磷灰石，金属硫化物
Ⅵ	钠长石、石英、锂云母、含锂白云母、绿磷云母	多色绿柱石、铌钽铁矿、锰钽矿、铋钽矿、锡钽矿、细晶石、钽铁金红石、富铪锆石、锂云母、锂辉石、透锂长石、锂磷铝石、铯榴石、磷钙铈矿、锂蓝铁矿	多色电气石、玫瑰色石英、黄玉、锡石、晶质铀矿、磷灰石、铁锰磷酸盐，刚玉、金属硫化物

7．稀有金属伟晶岩的围岩

稀有元素矿化较富的伟晶岩，主要见于花岗岩体外接触带围岩中，从这些围岩的岩性看，多为各种沉积变质岩及基性超基性岩，前者如斜长角闪片岩、黑云石英片岩及片麻岩等，后者如纯橄榄岩、辉石岩及辉长岩等。花岗岩类岩石中的伟晶岩，岩脉规模不太大，矿化强烈的不多。据现有资料，基性岩类岩石中常赋存有稀

有金属伟晶岩富矿。世界上几个稀有金属伟晶岩富矿，围岩都是基性岩类岩石。就同一矿区看，基性岩中的伟晶岩，矿化也常比其他岩石中的强。

无论围岩为何，实际资料证明，伟晶岩的某些物质，如易活动组分可能带至围岩中。相反，伟晶岩的物质，特别是成矿元素是否由围岩带来，还需进一步探索。

伟晶岩的硅铝质围岩，如各种片岩、片麻岩或砂页岩，围岩蚀变多不显著，围岩对伟晶岩物质成分的影响也不明显。伟晶岩熔体溶液对围岩的影响一般表现为脉旁形成不宽且不连续的围岩蚀变带，形成电气石、黑云母、白云母、石榴石、石英、绢云母、绿泥石、红柱石、硅线石等。个别情况下，能见到锂角闪石，含锂白云母等。

伟晶岩的铁镁质围岩，如各种橄榄岩、辉岩、辉长岩及透辉闪长岩等，围岩蚀变现象也不显著，仅见到少量黑云母、滑石、蛇纹石及绿泥石等。围岩对伟晶岩的影响有时表现为脉体边缘形成不宽的斜长石带，有时也有锂角闪石和黑云母的形成。

对于钙镁质围岩，如各种大理岩，伟晶岩与围岩的相互影响，比较显著，主要表现为脉壁附近有时有各种接触交代矿物的形成，如符山石，石榴石，硅灰石，透辉石及透闪石等，但宽度一般也不大。此外，个别地方还见到围岩再结晶及硅化现象。

由于伟晶岩的易活动组分带入围岩中，在围岩中常形成各种分散晕。这些分散晕的面积较伟晶岩体大得多，可作为找寻稀有金属伟晶岩的找矿标志。易活动组分，首先是氟，其次是稀碱金属，如锂、铷、铯等，以及还有铍、锡等都常进入围岩中。有关锂、铷进入云母、角闪石及电气石等矿物中，并在围岩中形成矿物分散晕的事实早有许多报导。近年来，国外报导铯进入云母中，在伟晶岩脉旁形成厚大的铯云母岩，可考虑在工业上利用。星散的含铯云母可分布在离伟晶岩较远的地段，是找寻含铯伟晶岩的标志。此外，对稀有金属花岗岩，有人确定，氟的分散晕可扩展到离花岗岩好几公里的地段。是否伟晶岩也有类似现象，值得今后注意。

8. 稀有金属伟晶岩的形态

伟晶岩脉的形态，多种多样。最常见的为脉状、囊状及透镜状。此外，还见到串珠状、草帽状、树根状及马蹄状等极为奇特的形态。国内见到的后几种奇特形态的伟晶岩，其中常发育锂、铯及钽的矿化，稀有矿物极为丰富。

脉状，透镜状的伟晶岩，常呈若干脉体集合成组排列，大致平行延伸。形态奇特的伟晶岩，多单独产出。一个矿区主要就是几条，甚至就是一二条这样的岩脉集中了大部分的稀有金属。

伟晶岩脉与热液脉的形成情况不大一样。伟晶岩脉的形态除主要决定于构造及围岩性质外，伟晶岩熔体溶液本身的贯入作用对伟晶岩脉呈何种形态有一定影响。因此伟晶岩脉的形态受制约的因素较多。下面主要根据伟晶岩脉的形态及岩脉赋存的构造性质等，将所见到的伟晶岩脉分出 6 种类型（或伟晶岩脉的构造形态类型）：

1. 分布在母岩花岗岩体内的伟晶岩。这类伟晶岩可能是当花岗岩浆冷凝过程中或冷凝固化不久形成的。伟晶岩与四周花岗岩之间界线不清，细晶岩边缘常不显著。脉体多呈囊状，各向长度相差不大。这类伟晶岩，因其矿物粒度较粗大，仅从形态上看可暂归于伟晶岩一类。实际上，就矿化规模和成因看，它更接近于稀有金属花岗岩。

2. 伟晶岩熔体溶液沿围岩层理或片理贯入的伟晶岩脉。其走向与倾斜均与围岩层理或片理一致。脉体多为脉状，延伸较大。

3. 分布在花岗岩及四周围岩张力裂隙中的伟晶岩脉。这类岩脉可作平行的一组延伸，有时也作放射状分布。后者与不同方向的放射状张力裂隙有关。岩脉脉幅不大，多作透镜状。

4. 分布在花岗岩及沉积变质岩中剪力与张力共轭裂隙中的伟晶岩脉。其中产在沉积变质岩中者，伟晶岩多与围岩片理斜交，这类岩脉，形态较规则，延伸远，深度大、脉幅宽，或作雁行状排列，或作两组方向脉汇合。

5. 分布在基性、超基性岩中，间或也分布在花岗岩中，因岩块错动，或受到伟晶岩熔体溶液贯入的影响而形成的伟晶岩脉。这

类伟晶岩脉形态通常都不规则，呈串珠状、草帽状、阶梯状、筒状、马蹄状等各种形态。

6. 分布在两类性质不同的岩石交界处脆弱带上的伟晶岩脉。这类岩脉沿不同岩石接触面分布，延伸颇大，厚度也较大。有时能见到主脉分出支脉，呈须根状。

一般在稀有金属花岗岩体顶部，与围岩交界处见到的似伟晶岩体，不属此类。该似伟晶岩主要属交代的成因可能与含矿花岗岩的形成作用有关。

伟晶岩脉形成时，构造环境稳定与否对伟晶岩体的内部构造及形态影响很大。通常在构造稳定条件下形成的岩脉，呈带性好，稀有元素比较集中，脉体中矿物个体较大。在构造不稳定状况下形成的伟晶岩，情况与此完全不同。

9. 稀有金属伟晶岩内稀有元素的分布与富集。

在一条含矿伟晶岩脉内稀有元素往往在一定的部位趋于富集。综合已有资料可知，伟晶岩的产状对其中稀有元素富集有一定影响。直立产出的伟晶岩脉，稀有元素常在脉的上部或顶部富集，特别在上部脉的膨大部分。缓倾斜脉体中，稀有金属矿物多富集于脉体上盘一边，如上下盘皆见稀有元素富集，则上盘一边较下盘一边更富。如矿脉厚度不大，交代作用又特别发育，可能整条矿脉稀有金属都很富。如脉体较大，分带又十分明显，常在石英长石核体带四周见到富矿地段。此外，在脉体转弯处，两脉交叉处或脉中有围岩夹行处，也常见到富矿地段。

总的来看，从脉的边缘到中心，从脉的下部到上部，稀有金属含量逐渐增高。对铌、钽、铷、铯，这种情况比较明显。对锂和铍，有时脉的边部含量也较高。由于稀有元素矿化与交代作用关系密切，交代作用发育部位总是稀有金属富集部位。一条伟晶岩脉内矿化向下延展的深度难于肯定。有的伟晶岩脉内矿化富集块段向下突然不见，而更向下又再出现。矿化向下延展深度随裂隙性质、脉的产状及结构带等变化，随地而异。

伟晶岩中不同稀有元素的分散情况也显著不同。大体上，在

有锂、铍、铌、钽、铷、铯等矿化富集的伟晶岩中，铷、铯的分散率较高，铌、钽分散率较小，锂、铍分散率更小。铷全部分散在微斜长石、云母和绿柱石中。铯的独立矿物是铯榴石，其余分散的铯多见于云母、微斜长石和绿柱石中。铌钽主要分散在白云母内。铌的分散率又常大于钽的分散率。在含铌钽富矿的伟晶岩内，70—80%的铌钽都呈独立矿物存在。锂在矿化伟晶岩内，大部分呈独立矿物——锂辉石和锂云母产出，少部分分散在白云母及绿柱石等矿物中。在不含锂辉石和锂云母等的伟晶岩中，锂则多半完全分散。这类伟晶岩内，锂的含量一般都非常低。铍在含矿伟晶岩中，绝大部分以绿柱石等独立矿物产出。分散的铍主要赋存在白云母内。锆和铪在交代作用发育的伟晶岩内主要形成富铪锆石，锆石及富铪锆石常同时见于一条伟晶岩脉内。

交代作用不发育的伟晶岩，稀有金属矿物粒度较大，绿柱石，铌铁矿-钽铁矿，锂辉石、铯榴石等用手即可选出。交代作用发育的伟晶岩，稀有金属矿物多细小，有时肉眼不易辨认。这类伟晶岩需用机械选矿。

10. 稀有金属伟晶岩和稀有金属花岗岩的关系讨论

综合上述含矿花岗岩和含矿伟晶岩的地质特征，可以看出二者有许多共同的地方。

（1）二者在物质组成上十分近似。首先，它们的碱金属、硅、及挥发分含量高，铁、镁、钛等二价阳离子元素含量低。碱金属中的钾、钠、锂，以及稀碱金属铷和铯，含量都很高。其次，稀有元素大量富集是它们的共同特点。稀土、铌钽、锆铪、锂铍等含量高，常达工业要求。铪这样的元素，象含矿花岗岩和伟晶岩中这样高度富集者，其他地质体中实不多见。

与化学元素相对应，二者的矿物也近似。钾长石、钠长石、各种云母，不但矿物成分相同，而且不同世代及其特征也相似。稀有元素矿物的种类和性质也极相似。伟晶岩中见到的稀有元素矿物，极其丰富，这些矿物近年来在含矿花岗岩中都陆续找到，以前认为仅属于伟晶岩的特有矿物——铯榴石，据初步报道，在江西某

含矿花岗岩内也见到。

(2) 二者的形成途径和地球化学演化十分近似。正如前述，无论含矿花岗岩或伟晶岩，形成时岩浆的演化都循一定的途径，都沿一定的方向。如以碱金属元素表示，可以简化为 K——>Na——>Li 的顺序。如以稀有金属元素表示，可以简化为 Y——>Nb——>Be——>Ta——>Li的顺序。一定的造岩矿物——微斜长石、钠长石或锂云母，都出现于演化作用的一定阶段，而与其相应的，有一定的稀有元素矿化，它们是密切相关的。这种演化顺序的共同性说明二者形成的方式大致相同。

进一步，云母、长石及稀有元素矿物等的演化，也极其相似。云母类矿物，总是先出现黑云母，最后见到锂云母。钠长石总是先见到棋盘状、板条状钠长石，后见到叶片状、糖粒状钠长石。稀有元素矿物中的铌矿物和钽矿物、铈组稀土矿物和钇组稀土矿物，以及锆铪、铍锂等矿物，从作用早期到晚期，都作有规律的发展，二者见到的极其相似。

(3) 二者具有近似的垂直呈带性。在含矿花岗岩中，挥发份和稀有元素矿物都集中于岩体顶部，直接赋存在顶板沉积岩盖层之下。由岩体顶部向下，挥发分及稀有元素矿物逐渐减少。在伟晶岩中，挥发分和稀有元素矿物也以脉体顶部最富集。在陡倾斜脉体中，这些矿物富集在脉体顶部膨大部位，在缓倾斜脉体中，这些矿物多富集在脉体上部偏上盘一侧。向深部追索，这些矿物也逐渐减少。

进一步，各种造岩矿物的分布也呈现相同的垂直呈带性。奥钠长石或微斜长石，无论在含矿花岗岩或伟晶岩中，总多见于下部，钠长石多见于中上部，含锂白云母或锂云母等总是多见于最上部。

(4) 二者的交代蚀变作用，主要是钠长石化、云英岩化及锂云母化都很发育。穿插、溶蚀、交代结构随处可见。

(5) 二者都与花岗岩类岩石有空间上或成因上的联系。

另一方面，含矿花岗岩和含矿伟晶岩之间也有不同的地方。

（1）二者见于不同地区。新疆、四川、陕西等地伟晶岩发育地区，含矿花岗岩不发育。南岭一带含矿花岗岩发育的地方，含矿伟晶岩不发育或发育较差。需说明，含矿花岗岩体顶部见到的似伟晶岩或小囊包状伟晶岩不属此列，后者无论就成因或规模看都不能和一般含矿伟晶岩相比。

（2）二者具有不同的结构构造。含矿花岗岩常具花岗结构、变余花岗结构、细粒斑状结构。含矿伟晶岩常具伟晶结构、文象结构、变文象结构。伟晶岩内部的带状构造比较明显，含矿花岗岩则表现为界限不明显的蚀变分带。

稀有元素矿物在含矿花岗岩中大多较均匀浸染分布在造岩矿物间，粒度多细小。含矿伟晶岩中的分布多极不均匀，粒度较大。

（3）含矿花岗岩常与钨锡矿共生。含矿伟晶岩除有的含大量锡石外，与钨锡矿共生的例子较少。

（4）含矿花岗岩具"岩钟"状形态。伟晶岩具脉状形态。伟晶岩脉穿切围岩，脉壁界线清楚，显然是裂隙充填产物。

（5）含矿花岗岩常与中细粒花岗岩或斑状花岗岩相连，有时与近地表的浅成岩石，如花岗斑岩相连。前者多呈岩株、岩枝等小岩体出现。含矿伟晶岩多与粗粒花岗岩相连。后者常形成面积较大的岩体，与近地表浅成岩石从无联系。据此可以推测，含矿花岗岩形成深度较小，含矿伟晶岩形成深度较大。

从上述含矿花岗岩和伟晶岩的共同点可以设想，形成它们的岩浆，其性质相同，它们最可能都是花岗岩浆演化后期，由富含挥发分及稀有元素的残余岩浆形成的。二者的不同点说明它们形成的深度不同和所在的地质构造条件不同。在深度较大，构造有利，有大的裂隙空洞存在的情况下，这种由花岗岩浆演化出来的稀有元素残余岩浆可能形成含矿伟晶岩。在深度较小，上覆有致密沉积盖层的情况下，这种由花岗岩浆演化而来的稀有元素残余岩浆可能形成含矿花岗岩。一个地区，在同一深度上或见到含矿花岗岩，或见到含矿伟晶岩，二者同时见到的可能性较小。

正是由于深度不同及构造裂隙的产生，使含矿伟晶岩的形态、

结构构造及矿物粒度等与含矿花岗岩的显著不同。

也可能正是由于形成深度及地质条件不同，多少影响花岗岩浆的分异作用，致使二者在某些方面稍有差异。比如含矿花岗岩中的微斜长石常以交代方式产出，伟晶岩中的微斜长石多以原始结晶方式产出。又如含矿花岗岩常与钨锡矿共生，含矿伟晶岩与钨矿共生的例子较少等。

对于含矿花岗岩和含矿伟晶岩的关系还需作进一步的研究，应从花岗岩和伟晶岩所在的大地构造性质，大地构造发展的不同阶段来探讨其相互关系。特别是伟晶岩围岩的性质及其地球化学特征在伟晶岩形成上起什么作用，是值得研究的。

矿床实例

1. 云南某地绿柱石钽铌铁矿钠长石微斜长石伟晶岩

矿田位于某大复背斜构造轴部的中段，某一花岗杂岩体东北侧的内外接触带附近。矿区一带见到中寒武统中浅变质岩系，主要由石英黑云母片岩、石英绢云母片岩及板岩等组成，其间并夹有大理岩透镜体，这一套中浅变质岩石在和花岗岩接触处，形成各种角岩和矽卡岩。而在花岗岩体内接触带，这些岩石成群地呈大小不等的长条状残留顶盖和俘虏体存在，证明矿田花岗岩刚被侵蚀剥露不久。

矿田一带，花岗岩分布最广，按其侵入顺序可分四期，即第一期斑状花岗岩，第二期中细粒角闪石黑云母花岗岩，第三期中粒斑状二云母花岗岩，第四期中细粒白岗岩。白岗岩呈岩脉产出。矿田内还见到各种晚期酸性和中基性岩脉。

含矿伟晶岩主要见于第一期斑状花岗岩的内接触带，少部分见于外接触带片岩的层间裂隙中。可见到外接触带伟晶岩直接贯入花岗岩内。

在矿田内，花岗岩呈微波状起伏，与其上覆沉积变质岩接触。接触面比较平缓，约 10—20°。在花岗岩呈"波峰"突起地段，其下伟晶岩最为发育。当岩体顶部"波峰"地段被侵蚀剥露时，伟晶岩脉即成群分布于变质岩残留顶盖的两侧或分布于两个残留顶盖之

间的地段(图 22)。

矿田内大小伟晶岩,按其产出部位主要可分为三组,三组伟晶岩的形态特征各不相同。

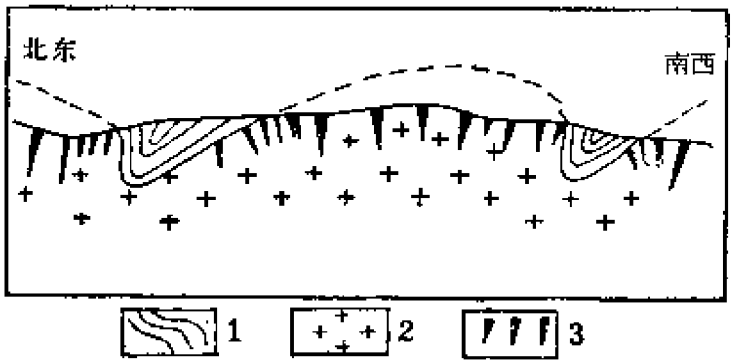


图 22　伟晶岩聚集于花岗岩"波峰"顶部及两侧的示意剖面

1. 变质岩; 2. 花岗岩; 3. 伟晶岩脉

1. 变质岩中的伟晶岩:伟晶岩多充填于沿片理发育的层间裂隙中。产状与围岩片理一致,多数呈北西—南东走向,倾向北东,倾角 30—40°,并随围岩片理的挠曲而弯曲,形态趋于复杂。此组伟晶岩呈不规则脉状及透镜状,脉体厚度变化较大,厚约 10—30 米,薄的不到 1 米。长度大的可达 600 米,短的仅只十余米。

2. 花岗岩与变质岩接触带附近的伟晶岩:伟晶岩受花岗岩顶部的张力裂隙及接触面形态的联合控制。脉体产状复杂而大小不一,常呈瘤状、囊状及盆状。有的瘤状体,由于其下与花岗岩相通,受花岗岩中张力裂隙的影响,在瘤状体下部常有数十支"须根"状伟晶岩支脉。这组岩脉长度不大,约十到百余米,厚度较大,约十余米到数十米。

3. 花岗岩中的伟晶岩脉:这组伟晶岩矿化最富,脉数最多、规模最大、多位于内接触带花岗岩的向上突起部位。由于赋存裂隙性质不同,主要又可分为二类:

(1) 横向张力裂隙中的伟晶岩脉:岩脉的分布和产状完全与花岗岩中的横向张力裂隙一致。岩脉多呈近于互相平行的脉状,脉壁粗糙不平,具分支膨缩现象。多数岩脉呈北东—南西或北东东—南西西走向,倾向南东,倾角多在 50—80° 左右。岩脉大小不

等，一般长数十到数百米，最长者达600米，厚度最大者达30余米。沿倾向延深一般约数十到百余米。大多数岩脉向深处逐渐变薄。伟晶岩与花岗岩间接触界线明显。

(2) 剪切裂隙组中的伟晶岩脉：岩脉的分布和产状与花岗岩中的剪切裂隙一致。伟晶岩成组分布、雁行状排列。最发育的一组岩脉走向北西西—南东东，倾向南西，倾角35—45°。脉体形态产状比较简单，呈薄板状，厚度变化不大，脉壁平整。有的脉也见到平行的分支复合现象。此组岩脉的长度及深度都较大，最长达1000余米，延深达200—300米。

矿田内的伟晶岩，分异作用不强，带状构造多不明显。一条伟晶岩常仅由一二结构带组成。相反，伟晶岩的交代作用比较发育，交代作用主要表现为钠长石化作用，其次有白云母化和云英岩化作用。钠长石化结果形成早期板状钠长石和晚期糖粒状钠长石；后者特别发育，与绿柱石矿化关系密切。白云母化作用虽较普遍，但不强烈，所形成的白云母，一般含量不过百分之几。白云母化也可分为早期聚片状云母化和晚期鳞片状云母化两类。前种白云母，片径较大，与石英呈集合体，呈条带状网脉状分布。后种白云母呈细小鳞片状，与晚期糖粒状钠长石和细粒石英共生。此种钠长石白云母石英集合体分布最广，尤以薄板状伟晶岩中最为发育，其中矿化最富。

组成矿田伟晶岩的矿物主要有微斜长石、微斜条纹长石、奥长石、钠长石、石英及白云母，其次有黑云母、石榴石、电气石、磷灰石及黄玉等。稀有矿物主要是绿柱石，其次是钽铌铁矿，此外尚有金绿宝石、锆石、独居石、铌钇矿、磷钇矿、锡石及钍石等。

矿田内最发育的绿柱石钽铌铁矿钠长石(微斜长石)伟晶岩最具工业价值。多属上述第三类，即赋存于花岗岩剪切裂隙中的伟晶岩。这组伟晶岩带状构造不明显，常由中细粒或中粗粒伟晶岩结构带组成。组成矿物为钾长石23%、钠长石38%、石英29%、白云母7%。

供工业利用的矿物主要是绿柱石，以富集在糖粒状钠长石化

带中的最富。这种绿柱石，粒度细小、均匀浸染分布，适于机选。而在此以前形成的绿柱石，晶体较大，常呈集合体产出，适于手选。钽铌铁矿可作为开采绿柱石时综合回收对象，其中 Nb:Ta 从 6.5:1 到 1.9:1。

伟晶岩中的铍和铌钽，大部分呈矿物形式产出，分散的不多。拿铍来看，分散状态的铍仅占脉体氧化铍总量的 7%。

铍一般富集于伟晶岩的上部。脉的陡缓不同，富集情况也不同。陡倾斜的脉，交代作用和铍的矿化都局限于上部，向下迅速减弱。缓倾斜的脉，交代作用和铍的矿化深度较大，比较均匀，矿化范围也较大。

本区伟晶岩脉的厚度与铍的矿化呈反比关系。矿化最富的主要是厚度在 1 米以内的岩脉。同一条岩脉，在其膨大变厚部分，矿化较弱，而在厚度变小的支脉部位，铍的品位常显著增高。

2. 四川某地钽铌铁矿锂辉石钠长石伟晶岩

矿区主要出露三叠系地层。原岩为一套泥岩、粉砂质泥岩及硅质岩。这些岩石经受程度不同的区域变质作用，形成一套浅变质岩系，主要包括炭质千枚岩、红柱云母石英片岩、红柱十字云母石英片岩、十字云母石英片岩及少量变粒岩、混合岩等。在与花岗岩接触处发育少量由接触变质作用形成的角岩。

矿区一带褶皱构造较为发育，形成大致平行的同斜倒转褶曲。与伟晶岩有关的二云母花岗岩，沿背斜轴部侵入，导致矿区不对称穹窿构造的形成。

伟晶岩的母岩为二云母花岗岩，出露面积约 4.8 平方公里。主体近东西向延伸，岩体东端向北突出一分支，平面上岩体呈镰刀状（图 19）。岩体同位素地质年龄为 192×10^6 年—212×10^6 年，形成于印支期。岩体主要组成矿物有钠奥长石 31.0%，微斜长石 14.8%，石英 44.5%，黑云母 1.3%，白云母 7.4%。岩石中含锂辉石等副矿物。

矿区内伟晶岩约有数百条，其中微斜长石伟晶岩（Ⅰ）、微斜长石钠长石伟晶岩（Ⅱ）、钠长石伟晶岩（Ⅲ）、钠长石锂辉石伟晶岩

(IV)、钠长石锂(白)云母伟晶岩(V)在空间上围绕二云母花岗岩体内外接触带呈有规律的带状分布。从岩体向外，I类伟晶岩逐渐相继为Ⅱ类、Ⅲ类、IV类、V类等伟晶岩所代替(图19)。

五类伟晶岩的主要特征见表16。

表16　五类伟晶岩的主要特征

特征 \ 类型		微斜长石伟晶岩(I)	微斜长石钠长石伟晶岩(Ⅱ)	钠长石伟晶岩(Ⅲ)	钠长石锂辉石伟晶岩(IV)	钠长石锂(白)云母伟晶岩(V)
主要矿物及百分含量	微斜长石	40—60	20—40	<10	10±	5—15
	钠长石	<20	20—40	30—60	25—45	30—50
	锂辉石	0	<10	<10	15—25	<15
	石　英	20—35	25—35	30—40	25—40	30—40
	白云母	3—7	3—7	2—5	2—10	10±
标型矿物		微斜长石粗晶黑电气石	板状钠长石、大片白云母(粗晶柱状锂辉石及绿柱石、板状铌铁矿)	板状及叶片状钠长石	叶钠长石、细中粒板状锂辉石(绿色含锂白云母、它形粒状绿柱石、叶片状钽铌铁矿)	细片状白云母、锂云母、(磷锂辉石、钽铁矿、锡石、多色电气石)
标型结构带		微斜长石带	微斜长石钠长石带	钠长石带	钠长石锂辉石带	钠长石锂(白)云母带
交代作用		微　弱	中等(白云母化、板状钠长石化)	强　烈(钠长石化)	强　烈(叶钠长石化、糖粒状钠长石化)	强　烈(钠长石化、锂云母化、白云母化、云英岩化)
特征碱性元素		K	K、Na	Na	Na、Li	K、Na、Li
主要矿化		(Be)	Be(Nb、Ta)	(Be、Li、Nb、Ta)	Li(Be、Nb、Ta)	Ta(Be、Nb、Li、Rb、Cs、Sn)

五类伟晶岩中以上述 IV 类——钠长石锂辉石伟晶岩，在本区工业意义最大。矿区内 104 号脉兼有上述 IV 类伟晶岩及 II 类伟晶岩的特征，特别可作为上述 IV 类伟晶岩的代表，现以其为例简述如下。

104 号伟晶岩脉，呈脉状，脉长 800—1000 米，厚约 12—18 米，产于十字云母石英片岩中。矿脉走向北东—南西，与围岩走向大致吻合。脉的上盘倾角较陡，下盘倾角较缓。

104 号脉主要由两类矿物共生组合组成。脉的南北两端由含绿柱石的微斜长石钠长石矿物组合组成，约占整个脉体三分之一强。脉的中部为锂辉石钠长石矿物组合，占脉体三分之二稍弱。微斜长石钠长石矿物组合，主要由微斜长石、钠长石，其次由白云母及石英组成。粗晶结构，其次为块体结构。稀有矿物中主要的是绿柱石及钽铌铁矿。

锂辉石钠长石矿物组合分布的地段，结构及矿物成分都较简单。主要由中细粒结构带或中粗粒结构带组成，粗粒结构偶尔见到。主要组成矿物为钠长石、锂辉石和石英，分别组成石英钠长石带和石英钠长石锂辉石带。钠长石主要是原生板状钠长石。稀有矿物主要见到锂辉石及钽铌铁矿。锂辉石以中粗粒结构带及粗粒结构带最为富集，主要与钠长石共生。个别部位见到石英和锂辉石的矿物组合。锂辉石晶体大小不一，一般长 5—10 厘米，截面直径 1—1.5 厘米，浅黄绿色，以其长轴大致垂直于脉壁作定向排列，尤以脉壁附近这种现象最明显。在 104 脉的中心部位可见到晚期属交代成因的锂辉石，白色，晶体细小，与晚期交代成因的钠长石共生。这类锂辉石量不大，锂辉石中 Li_2O 含量介于 7.12—7.32% 间。

铌和钽主要呈钽铌铁矿产出，其中 Nb_2O_5 含量约 50—60%，Ta_2O_5 含量一般在 20—30% 左右。钽铌铁矿粒径较小，多呈黑色板状、片状及板柱状。除石英锂辉石组合分布地带外，其他各结构带或各矿物组合中钽铌铁矿含量变化不大。

3. 河南某地绿柱石细晶石铯榴石锂云母钠长石伟晶岩

矿区位于某背斜的倾没部分。矿区构造简单，为一向北东东倾斜的单斜构造。矿区内断层比较发育，但一般规模不大。成矿前的断层多作北东及北西走向，伟晶岩脉常借以赋存。成矿后的断裂多作南北向，明显切断伟晶岩脉。

矿区内前震旦系地层异常发育，主要岩石是白云岩、透辉石岩、透辉大理岩及斜长角闪片岩；后者呈夹层见于碳酸盐质岩石中。矿区附近岩浆岩不发育。在矿区南部五公里以上的地方见有可能与伟晶岩有成因关系的黑云母花岗岩，呈岩株(？)产出，同位素地质年龄 417×10^6 年，属加里东早期。

矿区内大小伟晶岩有数十条，集中在一近东西向的带内。伟晶岩脉呈脉状及不规则脉状，产状稳定，形态简单，脉壁平直光滑，主要赋存在白云岩、透辉石岩及斜长角闪片岩中，以北东东及北西西走向的两组最为发育。按照主要脉石矿物的不同，伟晶岩脉可分出三种矿石类型：1. 白云母微斜长石型；2. 锂辉石微斜长石钠长石型；3. 锂云母钠长石型。第三种矿石类型的矿脉，交代作用最强，矿化最富。

第三类矿石组成的矿脉，规模较小，长约 20—75 米，厚约1—5米，长度大于深度或小于深度的两种情况都有。脉中的主要矿物有石英(15.8%)、钠长石(61.9%)、锂云母(7%)、锂辉石(5.4%)、微斜长石(5%)，次要的矿物有红电气石(2.6%)、绿电气石及磷灰石等。彩色电气石是重要的找矿标志矿物。稀有金属矿物有细晶石、黑钽铀矿、锰钽矿、锰铌矿、锑钽矿、锂辉石、锂磷铝石、绿柱石、铯榴石、锆石及锡石等。

伟晶岩交代作用特别强烈，常常几乎整条矿脉全被改造，其中尤以钠长石化及锂云母化最发育，二者常多期交替，形成不同世代的锂云母和钠长石。按形成的先后顺序，可见到片状球状锂云母——>大小叶片状钠长石——>小片及鳞片状锂云母——>小叶片状钠长石——>细微鳞片状锂云母等。锂云母化以早世代的最发育，而钠长石化以晚世代的发育。综合矿脉的原生分异结构带和交代集合体可对矿脉分出如下十个结构带：

Ⅰ. 石英微斜长石锂辉石带；

Ⅱ. 微斜长石带；

Ⅲ. 石英锂辉石带；

Ⅳ. 石英电气石锂云母交代体；

Ⅴ. 巨、中叶片状钠长石交代体；

Ⅵ. 骨针状钠长石白色锂云母交代体；

Ⅶ. 小片叶钠长石交代体；

Ⅷ. 石英锂云母交代体；

Ⅸ. 细叶钠长石针状锂辉石铯榴石交代体；

Ⅹ. 高岭石交代体。

各结构带的特征如表 17 所示。

稀有元素矿化以钽为主，兼有铌、锂、铷、铯及铍的矿化。其中铌钽矿化空间上产于各种交代体中，成因上与交代作用有关。铌钽主要以各种铌钽矿物形式出现，分别占全脉铌钽总量的 77.39％及 77.24％。其余分散的铌和钽见于锂云母、长石和石英中。锰铌矿、锰钽矿和细晶石与钠长石化关系密切，常包裹或嵌生于钠长石颗粒间，黑钽铀矿、锑钽矿与锂云母化关系密切，常包裹于锂云母片间。锂主要呈锂云母，其次呈锂辉石及锂磷铝石产出，三者占全脉氧化锂总量的 85.92％，其余的锂分散在电气石、长石和石英中。铍主要呈绿柱石产出，占全脉氧化铍总量的 71.92％，其余部分的铍分散在长石、石英和锂云母中。绿柱石含铯、锂，为铯锂绿柱石。铷主要赋存在锂云母中，其中 Rb_2O 含量 2.06—2.30％。锂云母中的铷占全脉氧化铷总量的 64.88％。铯呈铯榴石产出，也常赋存在锂云母中。铯榴石中的铯占全脉氧化铯含量的 41.73％，锂云母中的铯占 28.6％。铯榴石赋存在分异较好的石英锂辉石带和石英微斜长石锂辉石带内，呈团块状产出，常与针状锂辉石和鳞片锂云母共生。铯榴石易于与块状石英混淆，在有类似矿化标志的地方，特别是在彩色电气石、锂云母发育的脉中需仔细寻找。

（三）稀有金属细晶岩型矿床

表 17　各结构带的特征

结构带	结构构造	主要共生矿物	次要矿物	工业矿物	发育特点
Ⅰ	中、粗粒结构	石英(20—32%) 微斜长石(13—37%) 锂辉石(10—34%) 钠长石	锂云母、绿电气石、红电气石、磷灰石	锰铌矿、锰钽矿、钽铁金红石、绿柱石	分布于脉壁，略偏下盘，厚度小，延深不大，局部无锂辉石，构成石英微斜长石带
Ⅱ	块状结构	以微斜长石为主，有钠长石，石英、磷灰石	锂云母、绿电气石、红电气石	细晶石、锰钽矿、锰钽矿	多呈交代残余形式分布于脉的上盘一侧
Ⅲ	块状结构	石英(20—30%) 锂辉石(40—63%) 锂磷铝石(10—30%) 微斜长石、红电气石	钠长石、锂云母，高岭石	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锑钽矿、绿柱石	见于脉体上盘一侧，有时无锂辉石，形成石英锂磷铝石带
Ⅳ	粒状结构、球状结构	石英(22—33%) 红绿电气石(31—35%) 片状球状锂云母(10—20%)	钠长石、锂辉石	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锰铌矿、锑钽矿、绿柱石	呈透镜状及不规则形状，分布于由钠长石组成的交代体中
Ⅴ	叶片状结构	以叶钠长石为主叶钠长石№2—5	红色电气石白色锂云母高岭石、锂辉石	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锑钽矿	局部发育，多位于上盘一侧或中部
Ⅵ	骨针状结构	骨针状钠长石(40—60%) 白色锂云母(20—30%) 粒状石英(10%)		细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锑钽矿	零星分布
Ⅶ	细粒结构	以小叶片状钠长石为主，有红绿电气石、石英	萤石、方解石、重晶石	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、绿柱石	广泛发育，在脉体下盘一侧尚较稳定
Ⅷ	细粒结构，条带状构造	石英(40—60%) 锂云母(20—30%) 红绿电气石	叶钠长石	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锑钽矿、绿柱石	呈小透镜体状，见于脉体下盘及中部，延深方向渐减
Ⅸ	块状构造	石英(40%) 锂辉石(10—15%) 微斜长石(30%) 艳榴石(15—20%)	细叶钠长石、针状锂辉石、磷片状锂云母	细晶石、黑钽铌矿、锰钽矿、锑钽矿、钽铁金红石	脉体膨大部分的中心部位
Ⅹ	块状构造	高岭石(40—90%) 石英(5—30%)	叶钠长石、电气石		脉体边缘或钠长石发育处，交代上述各带

稀有金属细晶岩型矿床，研究工作尚不够，仅介绍湖南某地铌钽矿化细晶岩地质特征于下。

湖南某地含铌钽细晶岩位于某穹窿构造北部外缘。由于穹窿受南北挤压带的挤压，在挤压应力不平衡作用于穹窿四周固结程度不一致的围岩上时，促使穹窿顺时针方向发生旋扭运动，伴随产生几条旋转状排列的平推断层，并由此派生出一系列次一级近东西向的断裂构造。含矿细晶岩脉及其邻近的花岗岩，即受此种断裂系统所控制。

含矿细晶岩脉位于泥盆系灰岩和白云岩中，大致近东西走向。在细晶岩西段，沿走向向西 70 米有黑云母花岗岩体。在地表未见两者相连，经钻探得知，黑云母花岗岩以 40° 角向东侧伏于细晶岩之下。

西端的黑云母花岗岩，属燕山期，呈岩株形式产出。岩体内发育有钠长石化云英岩化作用。未经蚀变的岩体，铌钽含量较高。

含矿细晶岩呈大脉产出（图 23）。脉长 1700 米，宽 1.8—18.4 米。自西向东逐渐变窄，有膨缩和分支复合现象。全脉向南倾，倾角 40°到 80°，地表缓，深部陡。岩脉与围岩接触界线清楚。有的地方脉中见到围岩俘虏体。

细晶岩脉蚀变作用十分强烈。铌钽矿床中常见的钠长石化作用不发育，而石英黄玉化、伊利石蒙脱石化却十分强烈。蚀变作用结果形成了不同的矿石类型。其主要特征如下：

1．中强石英黄玉化细粒变晶结构矿石：呈灰白色。细柱粒变晶结构及交代残余结构。致密块状构造。蚀变作用主要为中等到中强的石英化和黄玉化作用。主要组成矿物有正长石、奥长石、石英、黄玉及白云母。矿石中 $Nb_2O_5:Ta_2O_5=0.84$。

2．强石英黄玉化微细粒变晶结构矿石：呈灰白色。微细柱粒变晶结构。致密块状构造。石英黄玉化作用很强烈，黄玉量很大，主要组成矿物为石英及黄玉，含少量白云母。实际上已成石英黄玉岩。矿石中 $Nb_2O_5:Ta_2O_5=0.71$。

3．伊利石蒙脱石粘土岩矿石：呈灰绿色及淡紫色。显微鳞片

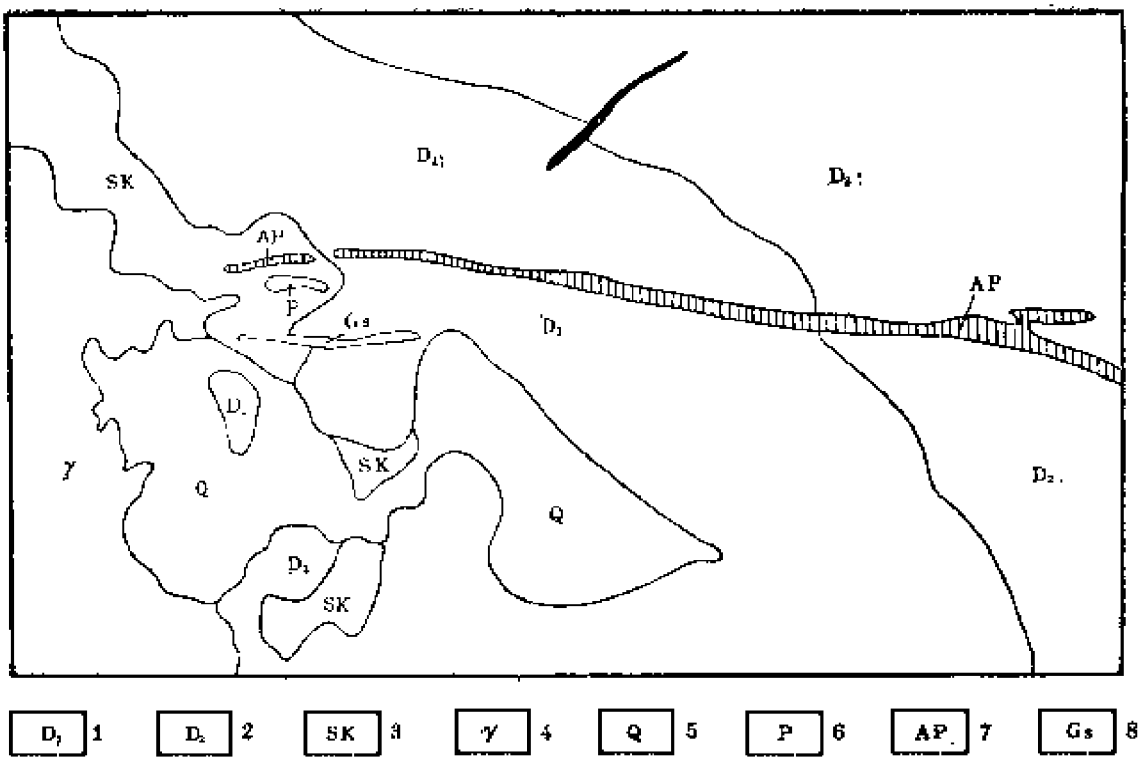


图 23　含矿细晶岩脉矿床地质示意图

1. 泥盆系东岗岭组灰岩；2. 泥盆系天子岭组灰岩；3. 矽卡岩；4. 花岗岩；5. 第四系；6. 伟晶岩；7. 含矿细晶岩脉；8. 云英岩

变晶结构。致密块状构造。主要矿物有伊利石、蒙脱石及萤石等。矿石中 $Nb_2O_5:Ta_2O_5=1.07$。

三种矿石类型的化学成分列于表 18。

强烈的蚀变作用改变了原岩的结构和矿物组成。根据岩体中残留体的观察及薄片研究，原岩以含石英、奥长石较多，其次含有少量白云母，因此暂定原岩为酸性石英斜长细晶岩。

细晶岩中的蚀变作用，从早到晚表现为：1. 石英黄玉化；2. 云英岩化；3. 萤石化；4. 伊利石蒙脱石化。

这几种时间上先后出现的蚀变作用在空间上形成了清楚的蚀变分带。脉体核心部分为中强石英黄玉化带，由中心向边缘依次为强石英黄玉化带及伊利石蒙脱石化带。由于脉体西段剥蚀深度大，主要出露为前两个蚀变带，东段剥蚀较浅，有较多的伊利石蒙脱石化带出露。

表 18　三种类型矿石的化学成分及含量

矿石类型		中强石英黄玉化岩石	强石英黄玉化岩石	含萤石伊利石粘土岩	含萤石蒙脱石粘土岩	伊利石类粘土岩
化学成分(%)	SiO_2	61.69	58.35	38.86	49.30	39.30
	TiO_2	0.0367	0.042	0.05	未定	未定
	Al_2O_3	21.98	23.25	29.28	38.05	16.41
	Fe_2O_3	0.42	0.11	未定	0.29	0.62
	FeO	0.63	0.80	未定	0.09	0.11
	MgO	0.09	0.06	未定	2.14	2.95
	MnO	0.19	0.13	未定	未定	未定
	CaO	0.466	0.36	12.27	3.31	0.58
	K_2O	4.09	3.56	7.72	7.10	8.25
	Na_2O	0.60	0.12	0.08	0.25	0.22
	F	4.26	4.58	4.35	未定	未定
	H_2O^+	3.15	4.82	3.69	未定	未定

云英岩化主要发育在脉体两段，呈团块状和脉状发育在蚀变细晶岩中。蚀变岩石由白云母及石英组成。石英多呈拉长状，云母呈薄板状。云英岩中见有粗粒铌钽铁矿、锡石及变种锆石。

萤石化作用主要发育在脉体东段，有早晚两期。早期萤石多呈不规则细到微细粒状。萤石常包裹针状黄玉，并交代石英。晚期萤石呈脉状穿插在脉体及围岩中。

伊利石蒙脱石化是本区最后一期中低温热液蚀变。大量粘土矿物——伊利石蒙脱石交代石英、萤石及透辉石、黄玉等，把原岩改造成主要由粘土矿物组成具有鳞片变晶结构的粘土岩。这种粘土岩外表为浅紫色、灰绿色，致密块状，摸之有滑感的岩石。

蚀变作用与铌钽矿化的关系，表现为石英黄玉化作用与铌钽的富集关系密切，矿石中一般钽大于铌。伊利石和蒙脱石化地段铌钽晶位也高，但矿石中一般铌大于钽。在镜下可见伊利石和蒙

脱石与铌钽矿物紧密连生。细晶岩中见到的云英岩化作用，作用不强，主要与锡矿化关系密切。

系统采样化验表明，全脉均含铌钽，脉体就是铌钽矿体。除铌钽外，脉中还伴生有铍、锂、铷、锡、钨等元素。

矿脉中的铌钽主要以独立矿物富锰铌铁矿及富锰铌钽铁矿形式存在。人工重砂中其他有用矿物尚有富铪锆石、锡石、黑钨矿、白钨矿、钨锰矿等。粒度不同的铌钽铁矿，其中铌钽含量差别较大。大于 200 目以上的都是富锰铌铁矿，而小于 200 目的主要是含钽高的富锰铌钽铁矿。钽主要赋存在细粒级铌钽铁矿中。锆石为富铪锆石，其中 $HfO_2=6.3\%$。

锡石是容易分散铌钽的矿物，矿脉中锡石含量也较高。经计算得知，锡石最大分散量对于 Ta_2O_5 为 13.36%，对于 Nb_2O_5 为 9.02%，一般不超过 5%。

本区细晶岩，其中铌钽品位高，铌钽矿物颗粒细，蚀变作用独特、类型新，值得今后找矿和研究工作注意。

（四）稀有金属条纹岩型矿床

与花岗岩有成因关系的岩浆期后稀有金属矿床，如矿体形成于花岗岩与碳酸盐岩石的接触带上，且矿液对围岩的交代蚀变作用在成矿上占重要地位，形成稀有金属接触交代型矿床，其中包括稀有金属条纹岩型矿床。矿床以其条纹构造特别发育而得名。这类矿床赋存的稀有元素，主要是铍，其次是锂，硼也常见。矿床所在地区，还有大量钨、锡、铅、锌等矿产。含铍条纹岩型矿床，铍的品位高，储量大，很有远景。

1. 这类矿床主要见于南岭地区。与成矿有关的花岗岩，属燕山期，呈岩株或岩瘤等小侵入体产出。矿化常见于向斜构造中或背斜倾没部分，主要见于外接触带镁质碳酸盐岩石中。

2. 这类矿床通常可分出三个成矿阶段，即早期花岗岩浆与碳酸盐岩石接触时形成的，以石榴石和符山石等为主的矽卡岩阶段；中期以萤石和稀有矿物大量发育的矿石形成阶段；晚期以碳酸盐、绿泥石、金属硫化物等为主的热液阶段。早期阶段矿物很不发育，

仅少量见于接触带附近；晚期阶段矿物虽较发育，但工业意义不大；中期阶段矿物大量发育，构成矿石主体，无论在矿物种类上和数量上都远大于早期和晚期阶段的矿物。

3. 矿石具十分特殊的"条纹"构造或条带构造。条纹或条带宽度不大，一般一毫米以下到数毫米。条纹常由深色矿物组成的条带和浅色矿物组成的条带相间排列而成。条纹排列如弯曲带状，有时如同心圆状。条纹集合体的宽度从几厘米到数米。总的说来，条纹愈发育，铍的品位愈富。就一个条纹岩体来看，铍的品位常有上富下贫，碳酸盐岩方向富，花岗岩方向贫的趋势。

4. 矿体内含氟矿物特别发育。其中最主要的是萤石和各种含氟云母。硼矿物也较发育，如电气石，氟硼镁石，硅硼钙石等。条纹岩中的暗色条纹主要由磁铁矿，铁镁尖晶石等组成，浅色条纹主要由萤石，氟硼镁石等组成。条纹岩中见到的锂矿物有锂云母、铁锂云母或绿鳞云母、黑鳞云母、α锂霞石、锂铍石。铍矿物有金绿宝石、铍镁晶石、香花石、羟硅铍石、双晶石、日光榴石及铍榴石等。

这类矿床以湖南某地含金绿宝石条纹岩最著名。现述其地质特征如下。

该含铍条纹岩位于湖南某穹窿构造的东翼。矿区主要分布古生界地层。穹窿构造的核心由寒武系石英砂岩、板岩和千枚岩组成。穹窿构造的两翼分布着上古生代海相钙质沉积，特别是中泥盆统东岗岭灰岩和上泥盆统天子岭灰岩与矿床关系最密切。

矿区内岩浆活动频繁，形成大小不等的花岗岩株或岩瘤。主要由中粒黑云母花岗岩及中细粒蚀变花岗岩组成。前者见于岩体深部及深切山沟中；后者见于前者顶部，为前者的蚀变岩石。蚀变作用主要有钾长石化、钠长石化及云英岩化。随花岗岩蚀变作用的进行伴随产生铌、钽及稀土的矿化。

在花岗岩与钙质岩石接触处，特别在外接触带，出现各种接触交代岩石，如白云岩化、矽卡岩化及萤石化、硅化、绿泥石化等蚀变岩石。含铍条纹岩即为花岗岩外接触带白云岩含铍最富的一种交代蚀变岩石。

含铍条纹岩就是矿体，从产状看，可分两类。一类是花岗岩残留顶盖中的条纹岩，另一类是花岗岩接触带上的条纹岩。前者呈孤岛状分布于花岗岩顶部（图 24），后者顺着接触带断续延伸（图 25）。

残留顶盖白云岩中的条纹岩，大小一、二十块，面积不等，厚度各异，其中主要的残留体厚度约 15—30 米，走向北西，倾向北东，倾角 40°。其中条纹沿残留体的节理发育。

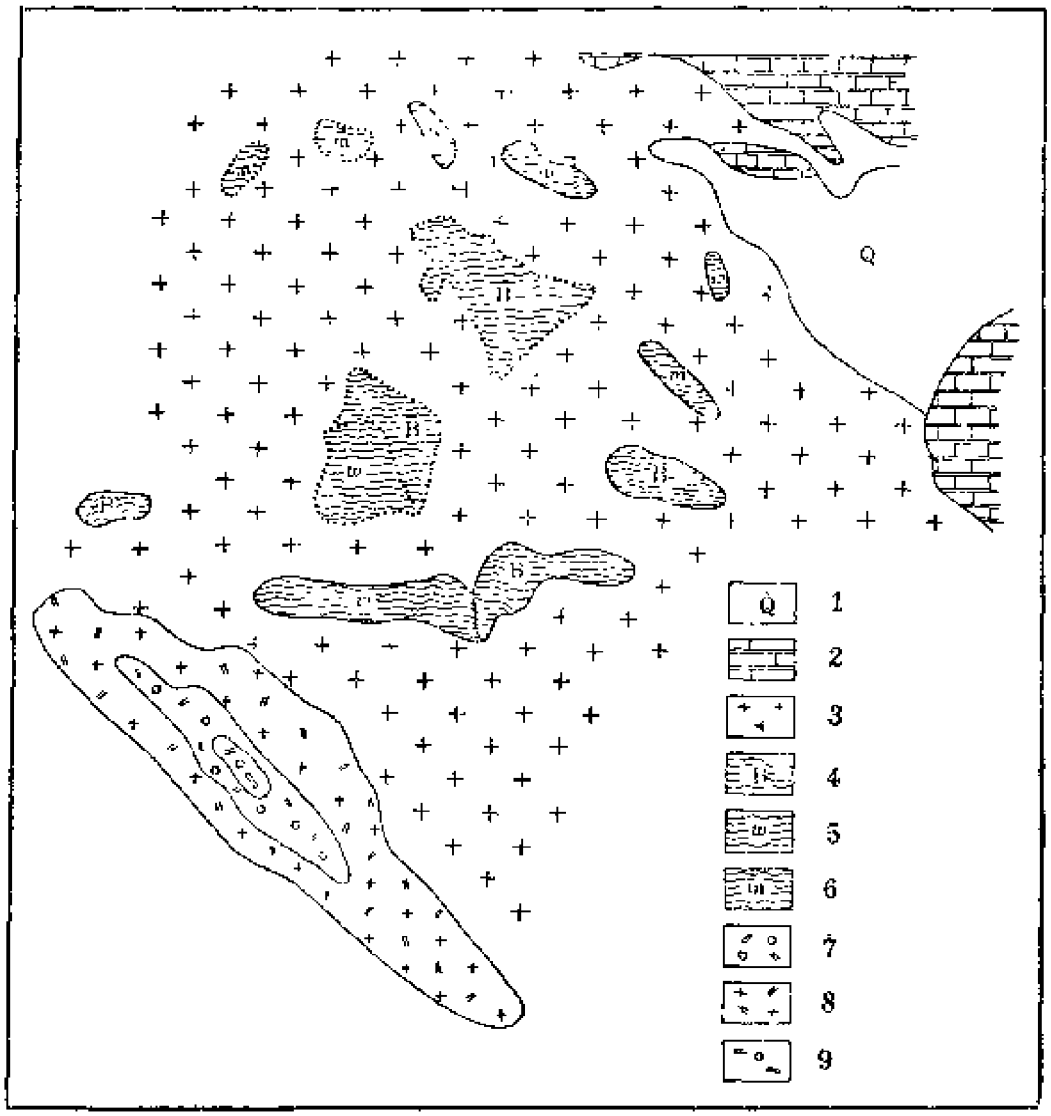


图 24　花岗岩残留顶盖白云岩中的含铍条纹岩产状示意图

1. 第四系冲积层；2. 白云质灰岩；3. 花岗岩；4. 绿色含铍条纹岩；5. 白色含铍条纹岩；6. 磁铁矿条纹岩；7. 云英岩；8. 云英岩化花岗岩；9. 黄玉云英岩

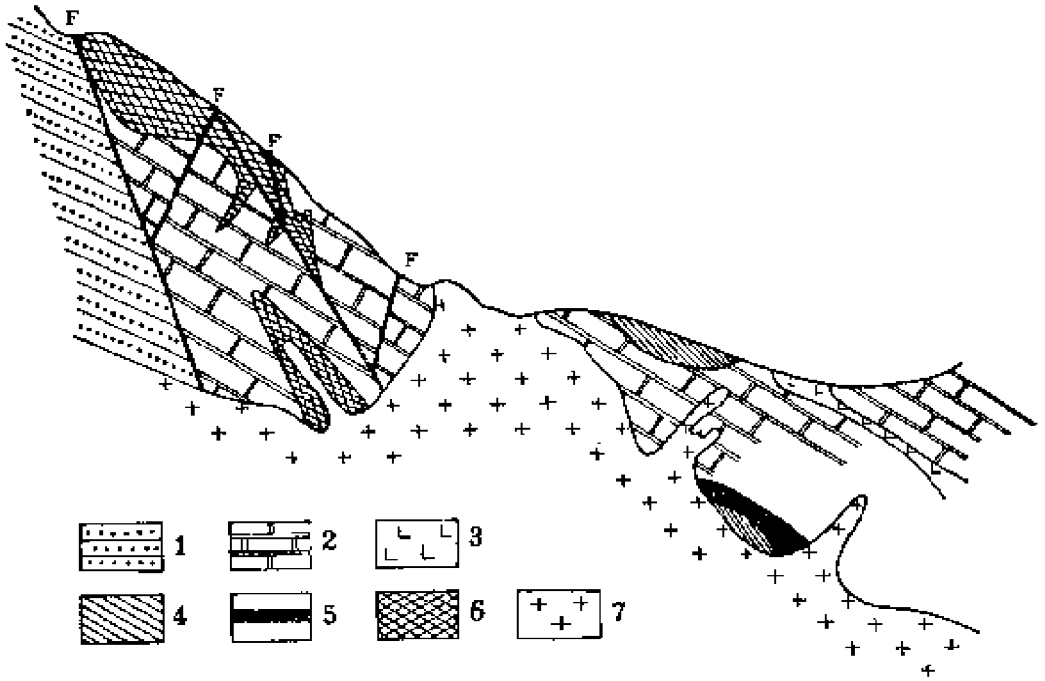


图 25　接触带上受断裂控制的含铍条纹岩产状示意图

1．砂岩；2．白云岩；3．砂卡岩；4．白钨矿矿石；5．磁铁矿条纹岩；6．白色和绿色含铍条纹岩；7．花岗岩

接触带上的条纹岩受构造控制明显，又可分出断裂带上的含铍条纹岩、层间裂隙中的含铍条纹岩及节理裂隙中的含铍条纹岩三类，而以第一类最发育。此类条纹岩的产状与断层产状一致，常呈似层状或透镜状，有的呈脉状。其中最大的一个条纹岩矿体，走向北东，倾向南东，倾角 60°—75°。

由于颜色不同，含铍条纹岩可分为白色、绿色及黑色三类。三者在野外清楚可辨。

1．白色含铍条纹岩，淡黄白到灰白色，致密块状，由淡色尖晶石、金绿宝石组成的条纹与萤石、氟硼镁石、金云母、白云石等组成的条纹相间排列。条纹细而密。常具玛瑙状及同心圆状构造。条纹集合体宽度一般 1—3 厘米，最宽可达 15 厘米。条纹集合体在每平方米内达 30 条以上。如果条纹稀疏，每平方米在 30 条以下，可称为条纹岩化大理岩。

主要根据铍硼矿物的不同，白色条纹岩又可分为①金绿宝石条纹岩、②氟硼镁石金绿宝石条纹岩、③电气石金绿宝石条纹岩、

④电气石氟硼镁石金绿宝石条纹岩四类。以前两类最发育，后两类系前两类中加入电气石而成。

（1）金绿宝石条纹岩：铍矿物为金绿宝石，主要共生矿物有萤石、金云母、尖晶石及方解石等。条纹构造非常发育，由金绿宝石、尖晶石组成的洁白色条纹与萤石、金云母等组成的微透明灰色条纹相间排列。条纹中有蓝灰色电气石细脉纵横穿插，金绿宝石粒度0.01—0.03毫米，常呈棱形粒状晶体。

（2）氟硼镁石金绿宝石条纹岩：铍矿物为金绿宝石，主要共生矿物有萤石、金云母、氟硼镁石、方解石、尖晶石、绿泥石等。这种条纹岩中洁白色氟硼镁石条带极为明显。条纹集合体中间为金云母、绿泥石细脉，其两侧对称发育氟硼镁石条带。在中间金云母绿泥石细脉中常充填有电气石细脉。

在镜下观察可见更细微的矿物组合分带现象。在条纹集合体中间为金云母绿泥石，呈鳞片状集合体，其两侧依次为萤石金云母带；氟硼镁石萤石带；氟硼镁石方解石带；白云岩带。在氟硼镁石萤石带的外侧有时可见到金绿宝石尖晶石金云母带，与前者重复出现，一般见到三、五层。

2. 绿色含铍条纹岩，绿色到浅绿色，由绿色铁镁尖晶石、铍镁晶石、金云母、铁锂云母等绿色矿物组成的条纹与由氟硼镁石、萤石、方解石等浅色矿物组成的条纹相间排列。条纹细而密集。在绿色条纹之间常夹有蚀变白云岩地段。蚀变白云岩中也有较稀疏的绿色含铍条纹。条纹集合体一般宽3—5厘米，少数可达20厘米。绿色条纹岩在矿区不多见。

3. 黑色含铍条纹岩或磁铁矿条纹岩，黑褐色，由黑色磁铁矿组成的黑色条纹与由粒硅镁石等浅色矿物组成的条纹相间排列。浅色矿物颗粒较细，含量不大。在条纹中有许多深色矿物，如石榴石、铁锂云母、符山石、普通角闪石、绿泥石等。黑色含铍条纹岩，一般矽卡岩矿物较多，含铍量很低。此种条纹岩一般厚约0.5—3米，宽20—30米。

与黑色磁铁矿条纹岩经常共同产出的还有以金属硫化物为主

的硫化物含铍条纹岩。有时磁铁矿条纹岩中有许多金属硫化物，有时硫化物条纹岩中又有许多磁铁矿，二者不易分开。硫化物条纹岩中见有大量磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿及黄铜矿等金属硫化物。与硫化物共生的最常见矿物是萤石和绿色锂云母。硫化物条纹岩分布面积较磁铁矿条纹岩大，其中铍的品位有时也较高。

上述几类条纹岩，围绕花岗岩体作规律带状分布。大体上，自花岗岩向碳酸盐岩石方向前进，先后分别见到矽卡岩——黑色磁铁矿条纹岩——硫化物条纹岩——绿色含铍条纹岩——白色含铍条纹岩。再远即为含少量条纹的白云岩。白色条纹岩和绿色条纹岩常交替出现。一般镁质较高的白云岩，蚀变后多形成绿色条纹岩，钙质较高的大理岩，蚀变后多形成白色条纹岩。白色条纹岩铍含量最富，黑色磁铁矿条纹岩铍含量最贫。总的看，条纹愈发育，铍含量愈富。

含铍条纹岩中矿物种类极为复杂，铍矿物有金绿宝石、铍镁晶石、日光榴石、香花石、锂铍石、似晶石、羟硅铍石及双晶石等，是我国已知铍矿物最丰富的一个矿床。供工业利用的稀有金属主要是铍，可供综合利用的组分有锂、硼、锡、钨及萤石等。此外，区域一带，铌、钽、铍、钨、锡、铅、锌、铋、钼等都较富。矿区一带确是一个极有远景的稀有金属成矿区。

（五）稀有金属热液脉

热液脉是整个含稀有元素花岗岩浆演化发展到岩浆期后阶段的产物。到热液脉的成矿阶段，钾及钠的活动显著减弱。硅、二氧化碳及硫等的作用加强。大多数稀有金属热液脉，主要的脉石矿物就是石英、方解石及金属硫化物。与花岗岩类岩石有关的稀有金属热液脉，见到的有如下一些：

1. 绿柱石微斜长石石英脉；
2. 绿柱石黑钨矿石英脉；
3. 绿柱石黑钨矿硫化物石英脉；
4. 日光榴石铅锌矿脉；

5. 香花石锂云母脉；

6. 含钽锡石电气石石英脉；

7. 钙铌水石霓辉石石英脉；

8. 独居石黑云母石英脉。

热液脉中的稀有金属，目前供工业利用的，主要是铍。下面主要介绍含铍热液脉的一些地质特征。

1. 矿脉的形成主要与黑云母花岗岩及二云母花岗岩有关。与伟晶岩有成因关系的花岗岩，其酸度一般不如与含铍热液脉有成因关系的花岗岩。与热液脉有成因关系的花岗岩，岩体出露面积较小，多呈岩株形式。有些矿区，地表未见花岗岩，花岗岩在深部为坑道及钻孔所揭露。有个别地区，矿脉发育地段，目前未见到花岗岩。

2. 热液脉一般由裂隙充填形式形成。控制热液脉的构造，为不同类型的裂隙。裂隙的性质不同决定了矿脉的形状、产状及延伸。控制热液脉的构造裂隙可分如下四类：

(1) 花岗岩中的冷凝裂隙：由这类裂隙控制的矿脉，沿走向及倾向延伸都不大，脉幅很小，有时形成密集的细网脉带。

(2) 花岗岩及其附近围岩中的张裂隙：由这类裂隙控制的矿脉，脉幅较大，比较稳定，沿走向及倾向延伸较大。矿脉常为细长透镜状，彼此作雁行状排列。产于花岗岩中的矿脉，有的遇围岩(沉积变质岩等)即尖灭，有的可以直接延伸进入围岩，但脉幅突然变小，延伸不远也尖灭。

(3) 花岗岩、沉积岩或变质岩中的剪切裂隙或剪力与张力共轭裂隙：这类裂隙控制的矿脉，延伸很大，沿走向有时达 1 公里以上，沿倾向一般在百米或数百米以上。脉较稳定，脉的数目不多，脉幅宽大，脉壁常见擦痕。

(4) 各类岩石中的破碎带。

上述(1)、(2)、(3)类构造裂隙，常分别赋存着上述 1、2、3 类含铍热液脉。绿柱石微斜长石石英脉多赋存于上述(1)类构造裂隙中；绿柱石黑钨矿石英脉多在(2)类构造裂隙中；绿柱石黑钨矿黄

铁矿石英脉多赋存于(3)类构造裂隙中。这种不同构造裂隙中赋存着不同矿物成分的矿脉，现象比较普遍，值得进一步研究。

3. 含铍热液脉的矿物成分十分复杂，常见的有石英、白云母、铁锂云母、钾长石、黄玉、萤石等；其次见到电气石、方解石、菱铁矿、菱锰矿、绿泥石、黑云母、绢云母等。铍矿物主要为绿柱石，间或见到羟硅铍石、日光榴石。金属矿物最有价值的是黑钨矿及白钨矿，其次有锡石、辉钼矿等。其它稀有矿物有独居石，褐钇铌矿、沥青铀矿等。金属硫化物多种多样，最常见的为黄铁矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿也见到。此外，还见到钛铁矿、白铅矿及锐钛矿等。

含铍热液脉内的不同矿物和矿物共生也常呈带状分布。和伟晶岩相比，分带性表现弱得多。有的矿脉或矿脉的某一地段，近乎由单矿物组成，最常见的是由石英或长石组成的单矿物脉，也见到由绿柱石组成的单矿物脉。

4. 赋存铍矿脉的围岩有花岗岩、砂岩、千枚岩、片岩、片麻岩、石英斑岩及碳酸盐岩等。矿脉与围岩的相互作用表现为各种围岩蚀变。围岩蚀变作用以云英岩化最普遍，硅化、黄铁矿化，绢云母化、绿泥石化、电气石化、碳酸盐化等作用也见到。花岗岩中的矿脉，脉旁围岩蚀变主要为云英岩化。江西某地蚀变花岗岩中的绿柱石黑钨矿石英脉，由矿脉向外围岩蚀变带为：

(1) 云母云英岩带(云母占90%以上)；

(2) 云母石英云英岩带(云母量大于石英)；

(3) 石英云母云英岩带(石英量大于云母)；

(4) 白云母化花岗岩带；

(5) 花岗岩。

由各蚀变带赋存的元素及其迁入带出的分析得知，蚀变带形成的顺序是先外后内，白云母化花岗岩带最先形成，而云母云英岩带最后形成。矿脉形成时，矿液是由花岗岩向裂隙方向流动。这与矿液是由裂隙向外运移并引起围岩蚀变的认识截然不同。

稀有金属热液脉可以江西某地绿柱石黑钨矿硫化物石英脉为

例。

江西某石英脉型矿床是一个以产黑钨矿和绿柱石为主，并可回收铋、钼、锌及硫等的热液脉型矿床。矿脉的同位素地质年龄为 160×10^6 年，成矿于燕山期。矿区一带出露地层主要为前震旦纪变质岩系及第四系现代堆积层。前者主要有云母石英片岩、绢云母片岩，板岩及变质砂岩等。后者又分残坡积层及冲积层。

矿区内地表未有火成岩出露。在地下坑道中见到宽 0.1—2 米的花岗岩脉。这种脉状花岗岩是细晶花岗岩或弱云英岩化花岗岩，主要由正长石、斜长石、石英及白云母组成。此外有少量黑钨矿、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿及辉钼矿浸染其中。

矿区内还见到不含黑钨矿及绿柱石的石英脉及石英长石脉。它们大多沿岩石层面或片理面分布。在空间位置上，一般花岗岩脉居于下部，石英长石脉居中，石英脉部位最高。三者均为含黑钨矿及绿柱石的矿脉所穿切。

含黑钨矿及绿柱石的矿脉，具成群分布特点，彼此之间呈雁行状排列。矿化最富的矿脉群呈 N60°—70°E 走向，倾向 NW，倾角近于直立。矿脉呈透镜状及脉状。分支复合，膨大缩小等现象十分普遍。矿脉规模一般较大，走向延长一般 100—700 米，倾斜延伸一般达 200—400 米，脉宽平均约 0.6 米，最宽的达 2 米。在大脉两侧的脉壁常见擦痕和粘土线，个别脉内见到角砾。由矿脉形态及产状推断，赋存矿脉的裂隙，可能是以张力为主并有剪力参与的张力剪力复合裂隙。

矿脉内见到的矿物约 30 余种，主要的脉石矿物为石英、钾长石、白云母、铁锂云母及萤石，主要的工业矿物是绿柱石及黑钨矿，可附带回收的有黄铁矿、辉钼矿、白钨矿、辉铋矿、闪锌矿、黄铜矿。特别是黄铁矿，量较大，作为回收硫之用。

在矿脉内，一般下部长石较多，上部石英较多，绿柱石向下有增长的趋势，黑钨矿以矿脉上部较富。矿脉上部的绿柱石晶体较粗大，呈清楚的六方柱状，近脉壁分布。矿脉深部的绿柱石多呈致密块状产出，特别在脉的尖灭处及分支复合处，一条矿脉几全为浅

绿色致密块状绿柱石集合体所占据。此外，脉中有夹石的地方，铁锂云母及萤石等富集的地方，绿柱石也比较富。

在大的矿脉内，矿物组合呈带状分布，自脉壁向中心，可见到如下几带：

（1）铁锂云母或白云母带：云母呈聚片花束状紧接脉壁生长，在云母片间常包有绿柱石晶体；

（2）萤石-绿柱石带：萤石集合体呈团块状，与绿柱石紧密共生；

（3）绿柱石-黑钨矿-硫化物带：此带矿物成分最复杂。有绿柱石、黑钨矿、白钨矿、石英、萤石、钾长石、碳酸盐、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、以及其他金属硫化物；

（4）黑钨矿硫化物石英带：此带绝大部分为致密块状石英。石英中有大的黑钨矿板状晶体。黄铁矿、黄铜矿等硫化物常呈细脉形式穿插在块体石英中。

由各种矿物的空间位置及相互溶蚀穿插现象，推测该石英脉各种矿物的形成先后大致为：铝硅酸盐（云母、绿柱石等）——氧化物（石英、黑钨矿等）——硫化物（黄铁矿、黄铜矿等）。

这一顺序大致代表了与花岗岩类岩石有关的各种热液脉矿床的矿物形成顺序。

成矿大致分为三个阶段，即1.石英长石绿柱石黑钨矿形成阶段；2.石英黑钨矿硫化物形成阶段；3.石英黄铁矿碳酸盐形成阶段。

矿脉的脉旁围岩蚀变不太强烈，但种类很多。主要的有硅化、电气石化、绢云母化及绿泥石化等。围岩的黄铁矿化也比较普遍。脉旁围岩的局部地段有钨、铍含量增高地段，局部地方有黑钨矿渗染。

二、与碱性岩类岩石有关的矿床

矿床地质特征概述

与碱性岩类岩石有关的矿床，是开采锆、稀土、铌、铀及钍的对象。以其稀有元素含量高，曾引起国内外普遍注意。十多年来，国

内虽然找到一些碱性岩，但象样的真正与碱性岩类岩石有关的稀有金属矿床却寥寥无几。本文所分出的六类矿床(碱性岩型矿床、伟晶岩型矿床、钠长岩型矿床、碳酸岩型矿床、矽卡岩及热液脉型矿床)，其中除第一类外，其他各类规模都不大，有的只能在开采其他类型矿床时，顺便回收稀有金属。因此，对这类矿床，今后更应加强研究。

所分出的六类矿床，分类的依据和与花岗岩类岩石有关的矿床大体类似。在稀有金属碱性岩型矿床(以下简称稀有金属碱性岩)中，又可分出岩浆期矿床，岩浆晚期和岩浆期后矿床。前者如含锆石的碱性正长岩，含异性石的霞石正长岩等，后者如含绿层硅铈钛矿的霓霞正长岩等。至于其它五类与碱性岩类岩石有关的矿床，除热液脉型矿床外，成矿大多在岩浆晚期和岩浆期后阶段。稀有金属矿化规模大的，主要属于岩浆晚期和岩浆期后矿床。这类矿床交代蚀变作用特别发育。交代蚀变作用不强的，矿化多半不强。以前，有一些不太清楚的认识，认为碱性岩都有矿，好象只要找到了碱性岩似乎就找到了矿。这种认识是不完全的。

分类中的稀有金属碳酸岩型矿床，国外讨论颇多，由于一些问题还未搞清楚，不拟详细介绍。

对国内见到的碱性岩，以及与其有关的稀有金属矿床，可以提出下面几点一般性特征。

1. 我国碱性岩主要分布在东北起自辽宁，经河北、河南、山西、湖北，西南到四川，云南的一条北东--南西向的狭长地带内。福建、新疆、山东等几个碱性岩体是分布于此带以外的个别例外，岩体都较小。

我国碱性岩多形成于海西期及燕山期。四川某地虽有前寒武纪的碱性岩，唯规模小，且不具工业意义。无论海西期或燕山期，碱性岩都为一个岩浆旋回岩浆演化最晚阶段的产物，其生成或与基性岩浆有关，或与酸性岩浆有关。另外，如四川某地同位于康滇地轴中段，同受一区域大断裂控制的两个碱性岩体，其中一个形成于海西岩浆旋回，另一个形成于燕山岩浆旋回。前者可能与基性

岩浆有关，后者可能与酸性岩浆有关。

2. 国内见到的碱性岩，面积一般不大。最大的不过数十平方公里，小的不到一平方公里。就形态看，有的呈环状，有的呈岩墙状，有的呈岩株状，有的呈岩床及岩盘状。从岩性看，一般霞石正长岩及超基性碱性岩多呈环状，岩盘状及岩株状。碱性正长岩及偏碱性的淡色岩类常呈岩墙状，分布面积较大。就产状看，各种碱性岩有贯入相，伟晶相及喷出相之分。三种岩相可于同一地区见到。与矿化关系最密切的是贯入相或伟晶相。喷出相碱性岩矿化较弱或没有矿化。

3. 国内见到的碱性岩类岩石，大致有四种成因类型。第一类是独立的钠质火成岩类的碱性岩体。第二类是与基性岩类有关的碱性岩体。第三类是与花岗岩类有关的碱性岩体。第四类是与基性超基性岩类有关的碱性岩体。从岩性看，国内见到的碱性岩主要为碱性花岗岩、碱性正长岩、霞石正长岩、及碱性辉长岩。四类岩体中与稀有金属矿化最密切的岩石是碱性正长岩和霞石正长岩。碱性正长岩或者是长霓岩化产物，即变质而成，或者是岩浆结晶分异的产物。变质而成的碱性正长岩，规模一般不大，如与霞石正长岩共同产出，二者间具渐变关系。由霞石正长岩经碱性正长岩而至围岩（多为钙质岩石）均以逐渐过渡形式相接。岩浆分异结晶作用形成的碱性正长岩，在与霞石正长岩共同产出时，多半碱性正长岩形成较早，霞石正长岩形成较晚，二者接触界线明显。霞石正长岩常呈岩枝、岩脉、岩柱等形状穿插在碱性正长岩中。大体上，碱性岩浆分异作用愈明显的，矿化作用一般较强。

4. 稀有金属碱性岩所含的稀有金属矿物主要为铈铌钙钛矿，锆石、绿层硅铈钛矿等。伟晶岩型矿床所含的稀有金属矿物主要是烧绿石及褐钇铌矿。钠长岩型矿床——锆石及烧绿石。碳酸岩型矿床——铌铁矿、烧绿石、独居石。矽卡岩型矿床——烧绿石。热液脉型矿床见到的稀有金属矿物种类较多，随脉的类型不同而异。国内大致见到如下几类热液脉：

（1）含烧绿石的方解石石英脉；

（2）含烧绿石的霓辉石石英脉；

（3）含烧绿石的方解石钠闪石脉；

（4）含易解石的方解石脉；

（5）含磷钇矿的重晶石脉；

（6）含氟碳铈矿的萤石方解石脉；

（7）含氟碳铈矿的石英重晶石碳酸盐脉。

稀有金属碱性岩，伟晶岩或热液脉的矿化作用，与岩浆的结晶分异作用特别是与晚期交代作用关系密切。结晶分异作用表现为岩体具分带特征，矿物分离成带，矿化局限于一定的岩相带中，稀有金属矿物在岩体中均匀浸染分布。交代作用表现为岩体受到岩浆晚期交代作用和岩浆期后热液蚀变作用，矿化与之同时出现。交代作用中，主要是钠长石化，霓石化和钠闪石化，其次有碳酸盐化和萤石化。钠交代作用与铌、锆的矿化关系密切；碳酸盐化常与铌、稀土的矿化关系密切。稀土主要是铈组稀土。我国许多碱性岩体上霓石和钠闪石的大量出现可以作为寻找烧绿石的有利标志；钠长石的大量出现，可以作为找锆石及铌铁矿的有利标志；碳酸盐及重晶石的大量出现，可以作为找寻氟碳铈矿等铈组稀土矿物的有利标志。

此外，钠质火成岩系数与矿化关系也很密切。碱性岩钠质火成岩系数大的，而且钠又大于钾时，稀有元素矿化的可能性增大。

5. 在一个地区内，能够见到稀有金属碱性岩、碱性伟晶岩、钠长岩及热液脉，只是矿化程度不等，其中以某一类型矿化最强。东北某地碱性岩体上同时见到了上述五种类型的矿化。在四川某地碱性岩体上，也同时见到含矿的碱性伟晶岩和钠长岩。与花岗伟晶岩大体相似，该地与碱性岩有关的碱性伟晶岩和钠长岩，在从碱性岩到围岩的方向上不同的岩脉在空间上作有规律的带状分布。该地碱性伟晶岩和钠长岩分布于正长岩外接触带的辉长岩中。从碱性正长岩到辉长岩方向，最先见到碱性正长岩脉，其次是碱性正长伟晶岩脉，最远是钠长岩脉。而矿化程度恰好相反，钠长岩脉矿

化最强，碱性正长伟晶岩次之，碱性正长岩脉矿化最弱。各种岩脉的平面分布如图 26、27。

该地上述三类岩脉分别见于不同的密集区内，即岩脉的数量以密集区中心最高，向外逐渐减少。岩脉密度分布的等值线见图 27。

矿床实例：

1. 东北某地稀有金属碱性岩

矿区位于新华夏构造体系第二隆起带与阴山纬向构造带东延部分的交接地带。区域内出露元古界粒变岩、大理岩和千枚岩，震旦系石英岩、页岩和泥灰岩，寒武奥陶系灰岩和板岩，侏罗系火山

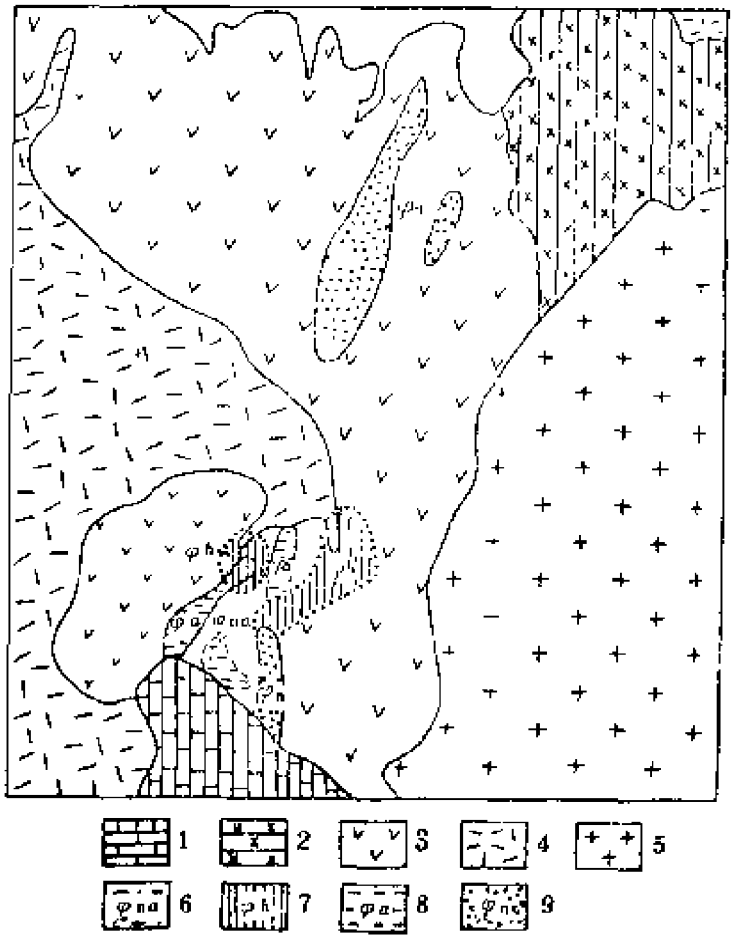


图 26　各种岩脉及矿脉的带状分布平面示意图

1. 前震旦系；2. 玄武岩；3. 基性超基性岩；4. 正长岩；5. 花岗岩；6. 钠长石化正长伟晶岩区；7. 碱性正长岩；8. 正长伟晶岩；9. 钠长岩

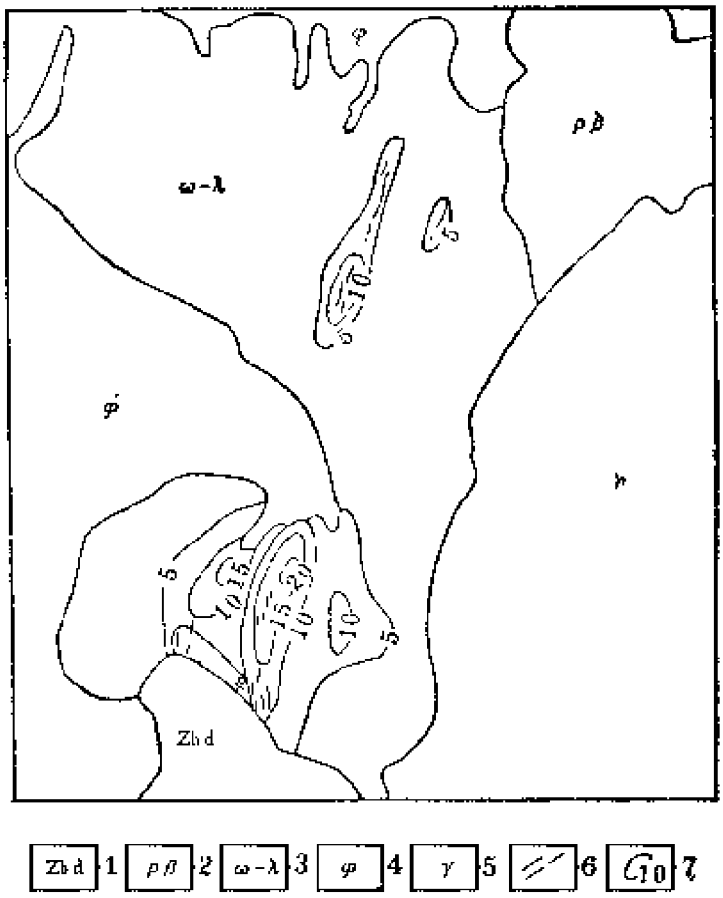


图 27　各种岩脉和矿脉分布密度等值线图

1. 前震旦系；2. 玄武岩；3. 基性超基性岩；4. 碱性正长岩；5. 碱性花岗岩；6. 矿脉；7. 岩脉或矿脉密度等值线(每平方公里的条数)

碎屑岩、砂砾岩及含煤岩系。区域南部和北部有大量燕山期花岗岩类。碱性岩见于矿区中部，形成一个近东西向展布的碱性岩群。岩体同位素地质年龄 217—258 百万年，为海西—印支期产物。矿床见于岩群最西部的一个碱性岩体中。

碱性岩体北部和西部为白云质大理岩，南部为千枚岩，东北部为石英岩和灰岩。碱性岩与上述围岩均呈侵入接触。岩体东部出露侏罗系地层，与碱性岩呈沉积接触和断层接触(图 28)。

碱性岩体呈岩株状产出，出露面积 12 平方公里。岩体与围岩的接触面一般都很陡，有时近于直立。岩体内部结构十分复杂，各期碱性岩之间有明显侵入界线。有时可见晚期岩石横切早期岩石的流线。碱性岩按其产状、成分及形成顺序，可分三类，即 1. 喷出

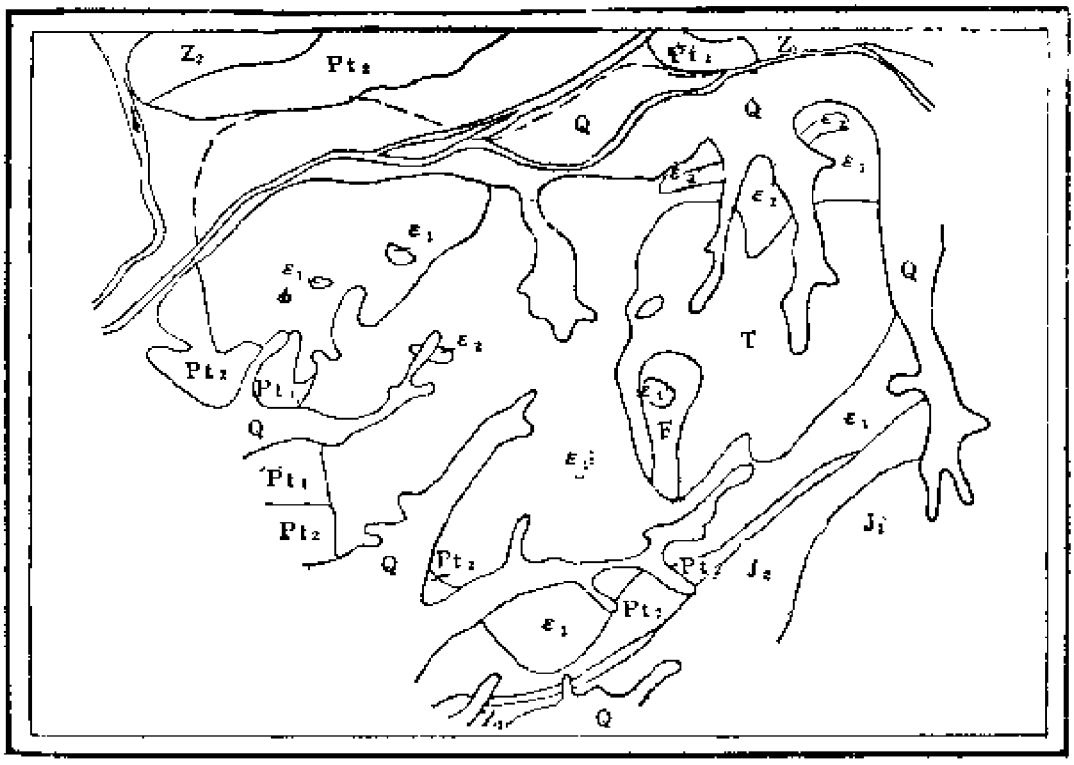


图 28　东北某地碱性岩体地质示意图

1. 第四系；2. 侏罗系砂岩页岩夹煤系；3. 侏罗系火山质凝灰岩；4. 岩体隐伏界线；5. 草绿色霓石霓霞正长岩；6. 黑色霓石霓霞正长岩、黑云母霞石正长岩、云霓霞正长岩；7. 震旦系石英岩；8. 震旦系石英岩夹页岩泥灰岩；9. 元古界千枚岩；10. 元古界大理岩；11. 粗面岩；12. 响岩

岩类；2. 侵入岩类；3. 脉岩类。其中以侵入岩与矿化关系最密切。

侵入岩分两期。第一期是岩体的主要侵入期，由一套云霞正长岩、黑榴云霞正长岩、云霓霞正长岩和黑色霓石霓霞正长岩组成，构成岩体的主体。而本期各岩相之间具相变过渡。岩石具中粒到中粗粒全晶质半自形或全他形结构，块状构造，局部见流线构造。主要组成矿物有钾钠长石 50—70%，霞石 20—30%、及暗色矿物 10—30%。暗色矿物主要包括黑云母、黑榴石及霓石。本期岩石的霓石均为黑色柱状晶体，这是区分第一期和第二期侵入岩的重要标志。

第二期侵入岩是一套草绿色霓石霓霞正长岩。主要分布于岩体西部和北部，与第一期各种岩石呈明显侵入接触。第二期侵入岩内含有第一期岩石的捕虏体。此种岩石常呈似层状，有时呈小岩株状。主要由钾钠长石40—60%、霞石10—20%、霓石10—40%组成，并含有绿层硅铈钛矿(最多达30%)、异性石(可达20%)、闪叶石(达3%)、针钠钙石(可达10%)、铈铌钙钛矿、钠锆石、硅铀钙镁矿，以及钙霞石、钠沸石、钠长石及金属硫化物等。岩石结构变化很大，从中细粒至伟晶状，从均粒变为似斑状，但以粗粒及伟晶状结构为主。块状构造。岩石内矿物分布极不均匀，局部地段，异性石能富集达90%。本期岩石中的霓石呈草绿色，单体呈细小针状，集合体组成云朵状、放射状及毡状块体，与第一期的迥然不同。

矿区一带碱性岩受到一系列岩浆晚期和岩浆期后交代蚀变作用，形成一套蚀变岩石。主要的蚀变作用有长霓岩化、矽卡岩化、霞石化、微斜长石化和钠长石化，以及沸石化、钙霞石化、碳酸盐化、萤石化、硅化、红化、水云母化、高岭土化等。

矿床主要可分出三种类型矿化：1.草绿色霓石霓霞正长岩内的绿层硅铈钛矿型矿化；2.钠铁闪石岩中的富铀烧绿石型矿化；3.晚期热液蚀变岩石中的脉状沥青铀矿型矿化。其中以第一种最重要。

1. 绿层硅铈钛矿型矿化：矿化见于岩体西北隅，矿区北部主要发育第一期侵入的岩石，南部主要发育第二期侵入的岩石。矿化西侧为一套复杂的矽卡岩(钠铁闪石岩、透闪石岩及云母岩)，并由此与白云质大理岩隔开。碱性岩与大理岩的接触带走向近南北，倾向西，倾角70—80°。矿化赋存于内接触带的草绿色霓石霓霞正长岩中。矿化富集处在距接触带20—200米范围内，构成一个北宽南窄，近南北走向的矿化带。单个矿体的产状一般较缓，走向北东，倾向南东，倾角10—20°。这些相互平行的矿体成鱼群状排列(图29)。地表以下700米仍见矿化，但主要矿化富集地段在250米深度以上。

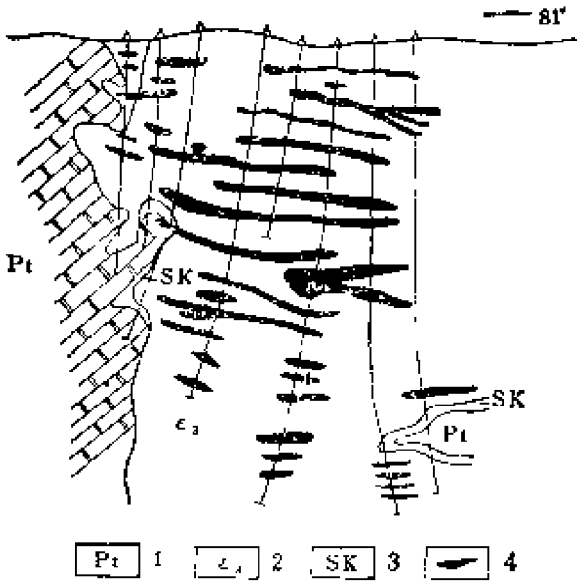


图 29　矿床剖面示意图

1. 大理岩；2. 草绿色霓石霓霞正长岩；3. 钠铁闪长岩；4. 矿体

矿石的结构构造和草绿色霓石霓霞正长岩的基本一致，主要具似伟晶岩状和中粗粒结构，块状构造，其次也见有放射状和穿插交代结构及似脉状、条带状构造等。

矿石的矿物组成也与草绿色霓石霓霞正长岩的基本一致。主要由钾钠长石、霞石、霓石、绿层硅铈钛矿及其变种胶绿层硅铈钛矿组成。矿体与围岩不同的只是其中绿层硅铈钛矿含量高。因此，矿体与围岩间无明晰界线，矿体只能根据绿层硅铈钛矿的含量来圈定。绿层硅铈钛矿中含 TR_2O_3 14.87—18.04%，U0.27—0.31%，ThO_2 1.18—2.39%。稀土中又以镧、铈、镨、钕为主。

根据矿化主要赋存在草绿色霓石霓霞正长岩中，与后者矿石矿物成分及结构构造基本一致，矿体不受明显裂隙系统控制，以及绿层硅铈钛矿强烈交代早期造岩矿物等，可以推测矿石的形成，多在碱性岩浆活动的岩浆晚期及岩浆期后的早期阶段。

2. 富铀烧绿石型矿化：矿化见于岩体西部接触带的矽卡岩中。矽卡岩带由钠铁闪石岩、云母岩、透闪石岩及三者之间过渡类型岩石构成。矿体大部赋存于钠铁闪石岩中，呈透镜状，走向南北，产状较陡。钠铁闪石岩的主要组成矿物是镁钠铁闪石或铁钠镁闪石，含量达 80%以上，其次见有微斜长石、霞石、云母、透闪石、

钠长石、异性石、闪叶石等二十多种矿物。主要工业矿物是富铀烧绿石，常呈八面体细小晶体产出，黑色到褐色，常具环带结构。

2. 山东某地氟碳铈矿热液脉

矿区出露岩石主要为片麻岩及碱性岩。碱性岩，出露面积仅0.5平方公里，大致呈椭圆形，北东走向延伸，侵入黑云斜长片麻岩中，与片麻岩呈枝叉状接触，界线清楚(图30)。碱性岩，细粒到中



Q 1　At 2　π 3　ε 4　α 5　i 6　h 7　8

图30　山东某地氟碳铈矿热液脉型矿床地质示意图

1. 第四系；2. 黑云母斜长片麻岩；3. 碱性石英正长岩；4. 霓石正长斑岩；5. 钠长斑岩及煌斑岩；6. 未定名的岩脉；7. 含氟碳铈矿重晶石碳酸盐脉；8. 构造破碎带

粒斑状结构，其中长石具环带状构造，在岩体上部保存有许多变质岩残留体，矿区碱性岩为刚被侵蚀揭露不久的浅色侵入体。

矿区碱性岩主要为石英正长岩及少量碱性花岗岩。碱性花岗岩呈不规则状及透镜状，赋存在碱性岩内，与石英正长岩等碱性岩为渐变接触关系。石英正长岩的组成矿物为条纹长石及钠长石，二者含量达85%左右。其中条纹长石约65—85%，构成斑晶及基质，并常被钠长石沿边缘进行交代。石英含量变化不定，从少量到10%。岩石中的暗色矿物有霓辉石、霓石及钠镁闪石。一般含量在5%左右。副矿物见有榍石、锆石、金红石、磷灰石、磁铁矿和独居石等。

矿区内有许多晚期脉岩，包括黑云母钠长斑岩、云斜煌斑岩、霓石正长斑岩及正长斑岩岩脉等。

碱性岩中稀土元素的含量普遍较高。稀土矿物也经常见到。稀土矿物最常见于暗色矿物，如霓辉石等附近。霓辉石中含 TR_2O_3 达2.78%。

矿区内见到的热液脉，主要是含氟碳铈矿的重晶石碳酸盐脉，分布很广。矿脉多作北西走向，倾向南西，少数也作北东走向。赋存矿脉的裂隙属剪力性质裂隙。按脉幅大小，矿脉可分为脉状及细脉状两种。脉状矿脉，脉幅宽约数十厘米到1米多，长可达数百米，延深比较稳定。经钻探证实，深的已达500米以上。细脉状矿脉工业意义较小，脉幅数厘米到十余厘米，常若干细脉集合构成细脉带。细脉带宽度可达4—10米。主要的脉状矿脉多赋存在内外接触带附近。矿区内已发现的矿脉，主要赋存在离接触带平面间距100米的范围内。渐远矿脉的频率及矿化程度均显著减弱。

组成矿脉的主要矿物是方解石、白云石、重晶石及石英，其次有少量萤石。稀土矿物主要是氟碳铈矿，其次有氟菱钙铈矿。

除脉状矿石外，矿区内还见有含稀土矿物的霓辉石花斑岩。其中含氟碳铈矿外，尚有少量褐帘石、烧绿石及铌铁矿等。

矿石中的稀土主要是轻稀土。在稀土总量中，Ce_2O_3 占49.11%；La_2O_3 占30.76%；Pr_2O_3 占4.74%；Nd_2O_3 占11.60%。四

种合计占稀土总量的95%以上。

变 质 矿 床

一、稀有金属混合岩型矿床

混合岩型矿床，以其分布面积广，稀有金属储量大，而具重要意义。这类矿床富集的稀有元素，主要为稀土及锆、铪。有用矿物是磷钇矿、含铪锆石、锆石及独居石等。这类矿床目前主要勘探其风化壳。由于风化，岩石疏松，探矿采矿成本降低，相对提高了矿床的利用价值。东北某地含稀土混合岩，含有大量铈硼硅石，其工业意义，尚待研究。

混合岩型矿床的成矿既有内成因素，也有外成因素。成矿过程可分两段，一是沉积岩或变质岩形成时稀有元素的积聚，二是这种含有稀有元素的沉积岩或变质岩，在混合岩化作用下，稀有元素重新富集。混合岩化作用主要是一种复杂的混合交代变质作用。有岩浆（多为区域变质作用中的再生岩浆）的注入，也有岩浆及其热液引起的原岩的交代和重结晶。因此，混合岩中稀有元素的富集，既与原沉积岩或变质岩的成分，结构构造有关，也与再生岩浆的活动及其强度有关。

混合岩化作用，最早表现为岩浆物质的带入，主要是钾、钠和氧化硅的带入，形成注入混合岩。进一步，随着作用强度增大，交代作用和重结晶作用反复进行，原岩中的稀有元素或稀有矿物也受到影响。稀有矿物，在这时或以重结晶形式，或以从溶液中沉淀形式大量形成。一般说来，混合岩中的稀有元素矿物比其中造岩矿物形成晚。而混合岩化作用强度的进一步增大，常常导致稀有矿物的溶解及稀有元素的分散。

一个混合岩带内，可分出含矿和不含矿的两种混合岩。二者之间无明晰界线，呈逐渐过渡。含矿混合岩分布的地段内又可见到矿石品位高的矿体和品位低的非矿体。矿体与非矿体之间也无明晰界线，只能用元素或矿物的品位来圈定。混合岩带的延展方

向取决于区域地层走向。含矿混合岩分布的地段，常和一定的岩石层位一致。而含矿混合岩中的矿体，其走向常与混合岩带的延展方向一致，有时甚至与原沉积岩或变质岩的片理、片麻理方向一致。当原岩发生褶曲时，矿体也随之褶曲，严格受原岩的构造控制。与稀有金属矿化有关的混合岩带及含矿混合岩多作带状延伸，其中各个矿体常作透镜状、纺锤状，个别的为不规则形状。

与稀有金属矿化有关的混合岩，按混合岩化作用强度，从弱到强，可分为三类。即注入混合岩或条带状混合岩，条痕-阴影混合岩和混合花岗岩。三类混合岩之间，无明晰界线。混合岩化作用强烈的混合花岗岩，稀有金属矿化不强。矿化强者常是混合岩化作用中等强度的条痕-阴影混合岩。在混合花岗岩中如有原沉积变质岩残余的地段，稀有元素或稀有矿物的品位常较高。

含矿混合岩的原岩，多为硅铝质岩石，局部见有碳酸盐岩石。主要为黑云母片岩、云母石英片岩、石英云母片岩及变质粉砂岩，变粒岩等。这些岩石，分布在华南的，时代属寒武奥陶纪。含矿混合岩的矿物成分与花岗岩的矿物成分类似。主要有石英、微斜长石、微斜条纹长石、奥长石、钠长石及黑云母(少量白云母)。混合岩中的稀有金属矿物以副矿物形式存在，较均匀地分布在造岩矿物颗粒间。

含矿混合岩中交代作用十分发育，交代结构及交代残余随处可见。交代作用主要为碱交代，表现为钾钠长石的形成。交代结构最常见的有溶蚀结构、云翳结构、净边结构、蠕虫状结构、缝合结构等。由于应力作用，还见到矿物拉长及压碎等现象。含矿混合岩的构造，和一般混合岩一样，能见到条带状、肠状、角砾状构造等。此外，在含矿混合岩内常见有大量原岩残留体，可借以推测和了解原岩性质和原岩的含矿性。

总的说来，国内混合岩型矿床，资料不多，研究不够。近来在国外广泛报道一些含稀有金属碱交代岩，有的富含钽铌。从报道的不完全的资料来看，其中也有的可能属混合岩化成因。因此，对混合岩型矿床进行研究，是具有现实的意义。

混合岩型矿床以广东某地磷钇矿锆石混合岩及其风化壳为例加以说明。

矿区的混合岩带西侧，分布着寒武系八村群的细粒石英砂岩、粉砂岩及板状页岩、黑色页岩。混合岩带的东侧分布着奥陶系的云母石英片岩、石英云母片岩及变质粉砂岩。矿区附近的第四纪现代冲积层中见有磷钇矿砂矿。区内地层走向及混合岩的延展均呈北东向。区内出露的燕山期花岗岩，明显侵入含矿混合岩中。花岗岩中钇组稀土元素等的含量较混合岩的低，与成矿关系不大（图31）。

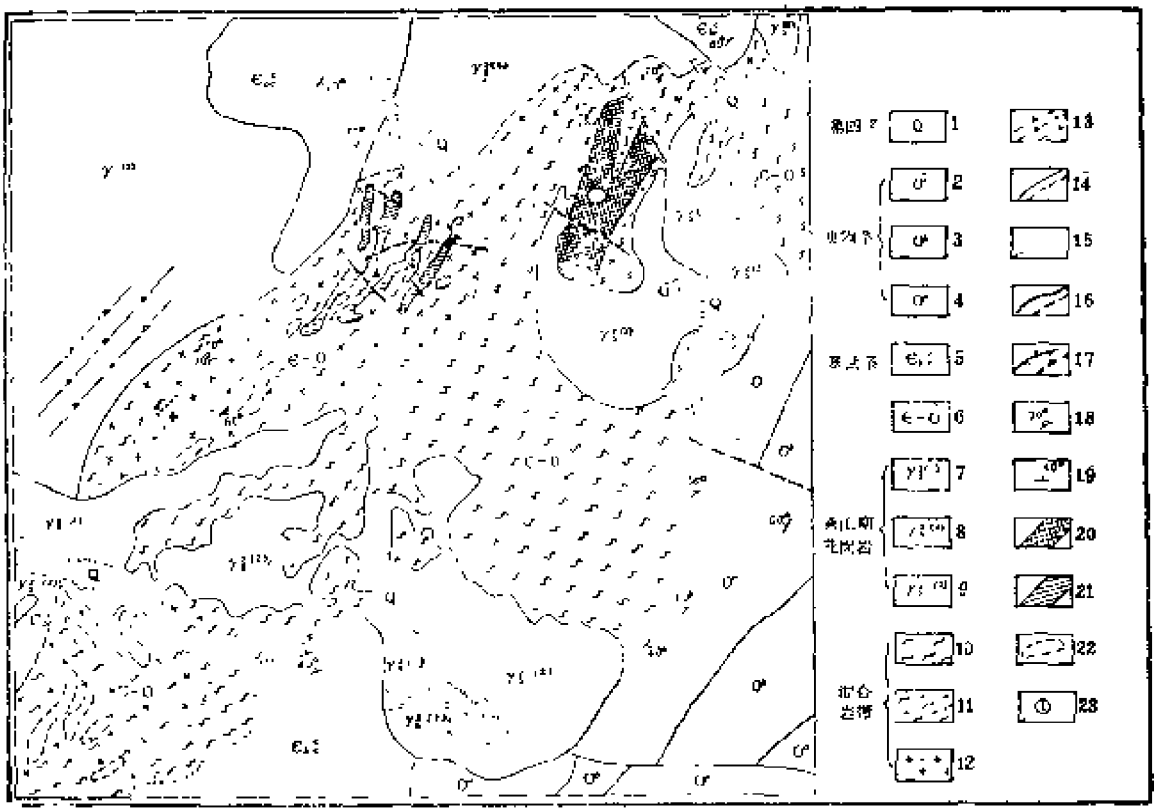


图31　含矿混合岩及其外围地质示意图

1. 现代冲积层；2. 云母石英片岩与石英云母片岩；3. 变质石英砂岩与石英粉砂岩互层；4. 变质石英砂岩与石英粉砂岩、页岩互层；5. 细粒石英砂岩页岩与黑色页岩互层；6. 已变为混合岩的寒武系奥陶系不能划分的地区；7. 第四期中细粒二云母花岗岩；8. 第三期中粗粒黑云母花岗岩；9. 第二期中粒斑状二长花岗岩；10. 条带状混合岩及混合岩化岩石；11. 条痕-阴影混合岩；12. 均质混合岩和阴影混合岩；13. 碎裂及糜棱岩化带；14. 实测及推测地质界线；15. 混合岩分带界线；16. 实测及推测性质不明的断层；17. 实测及推测的逆断层；18. 片理与片麻理；19. 正常岩层产状；20. 已勘探的磷钇矿风化壳矿床；21. 正在勘探的磷钇矿风化壳矿床；22. 普查圈定的磷钇矿风化壳矿床；23. 矿区代号

区内出露的混合岩，呈北东向延展，可分为三类：1. 条带混合岩；2. 条痕-阴影混合岩；3. 均质混合岩。三类混合岩间具渐变接触关系，三者与东西两侧寒武奥陶系地层之间也没有明晰界线。

1. 条带混合岩：主要分布于混合岩带的东侧。混合岩中的基体物质与脉体物质大致相等，二者相间排列，具条带构造。基体一般为黑云母片岩或黑云母斜长石片岩。脉体的矿物组成有石英25—30%，微斜微纹长石30—40%，斜长石10—30%。

2. 条痕-阴影混合岩：主要分布于混合岩带的西北侧和南部。混合岩中脉体物质量大于基体物质。岩石具条痕-阴影构造，花岗变晶及鳞片花岗变晶结构。主要组成矿物为石英。25—35%，微斜微纹长石20—30%，斜长石25—35%.黑云母10—20%。黑云母常聚集成宽数毫米长数厘米的平行条带。条痕-阴影混合岩中磷钇矿富集部位构成含矿混合岩或矿体。含矿混合岩中的副矿物主要有磷灰石、独居石、磷钇矿、锆石、钛铁矿、褐铁矿、磁黄铁矿及磁铁矿等。磷钇矿、锆石及独居石为矿石矿物。

3. 均质混合岩：仅在矿区西部局部见到，赋存在条痕-阴影混合岩中。均质混合岩中基体物质与脉体物质无法区分，岩石具块状构造。

含矿混合岩(矿体)呈北北东向延展，与区域地层走向、混合岩带的方向、以及混合岩中的片麻理方向完全一致。含矿混合岩在平面上呈带状，在剖面上呈大约100米厚的层状，层位比较稳定。上覆岩层为条带混合岩，其中磷钇矿含量显著较低，二者界线较明显。下伏岩层为条痕-阴影混合岩，二者无明晰界线，矿体只能根据矿石品位来圈定。含矿混合岩具褶皱形态，其产状与寒武-奥陶系变质岩的基本相同。

由于混合岩化作用不均匀，含矿混合岩中还有一些变质岩残留体。残留体一般长0.5—1米，个别延长1米以上，宽5—10厘米，延长方向与含矿混合岩的延展方向一致。残留体由各种片岩及变质砂岩组成。残留体中的锆石、磷灰石有少数呈滚圆状或半滚圆状。残留体中的磷钇矿、独居石与附近寒武系八村群中的磷

钇矿、独居石特征相同。可以推测，含矿混合岩是寒武-奥陶系含稀土元素较高的含磷黑云母片岩、石英云母片岩及云母石英片岩，经过区域变质及混合岩化作用形成的。

区内各种混合岩中普遍含有稀土元素。铈组稀土在各种混合岩中含量变化不大，钇组稀土仅在含矿混合岩中含量较高。各种混合岩中稀土矿物与稀土元素含量保持正消长关系。各种混合岩皆有磷钇矿，但以条痕-阴影混合岩中较富。条痕-阴影混合岩中，磷钇矿的含量又因原岩岩性不同而有差异。磷钇矿的富集与原沉积变质岩中富钇的一定层位有关。

矿区含矿混合岩经风化后形成含磷钇矿风化壳。后者呈似层状覆盖于含矿混合岩上，一般山顶、山脊较厚，山坡较薄。风化壳最厚 51.27 米，最薄 2.90 米、平均 16 米。风化壳产状及形态随地形而异。岩石风化后，矿石结构松散，利于矿石采选，是目前勘探的主要对象。

二、稀有金属变碳酸岩型矿床

变碳酸岩型矿床一名，是为与一般碳酸岩(Carbonatite)相区别而提出来的。碳酸岩，为 W·C·布劳格尔于 1921 年首先提出，是指与碱性超基性杂岩体有关，富含稀有金属，而且是直接由碳酸岩岩浆冷凝结晶形成的岩体。本文所指的变碳酸岩矿床，从物质成分，特别是富含铌、铈组稀土及锆等稀有金属看，与一般碳酸岩十分类似。因其缺乏碱性超基性岩体，受到不同程度的交代作用和变质作用，以及矿体从属于一定的沉积建造，矿体与围岩整合产出等，又和一般碳酸岩矿床显著不同。这类矿床的成因，是国内认识最不同，争论最多的，确需深入研究。

这类矿床有下列几个主要特点。

1. 矿体赋存在一条长而窄的带内，延续可达数公里到十余公里。矿体一般为透镜状及层状，沿走向及倾向延展都比较稳定。矿体产状与围岩产状一致。

2. 矿体的围岩为碳酸盐岩石，其次也为与碳酸盐岩相邻的片岩、板岩等。矿体的围岩层理清楚，无疑属沉积成因。

3. 断裂构造十分发育，矿体常沿断裂分布。矿体的延展方向与地层走向一致，也与断裂走向一致。

4. 矿石主要为条带状构造，其次也见到细脉浸染状构造、斑杂状构造、块状构造等。条带状构造矿石，其中暗色矿物与浅色矿物相间排列成带。带的宽度不大，一般约一、二毫米。条带有时呈现小褶曲，条带的延展方向与围岩层理或片理一致，亦即与地层走向一致。

5. 交代作用广泛发育。碳酸盐岩石中见到的交代作用主要有金云母化、黑云母化、碱性角闪石化、磷灰石化、碳酸盐化及铁矿化等，个别矿区萤石化作用较发育。铝硅酸盐岩石中见到的主要有钠辉石化、微斜长石化、钠长石化、黑云母化、白云母化、以及碳酸盐化等。

6. 特征元素为碱、磷及铁。特别是磷及铁，有的矿床含量很大，可作为工业利用对象。稀有元素主要是铌，其次有锆及钍等。稀土元素主要是铈组稀土。铌及稀土以铌铁矿、铌铁金红石、烧绿石、易解石、独居石、氟碳铈矿等产出。锆及钍的独立矿物主要为锆石及钍石。

7. 矿体与围岩间没有明晰界线。矿体是由稀有金属品位来圈定（或由稀有元素矿物品位圈定）。

8. 矿床稀有金属品位高，储量巨大。矿床中的稀有金属大部分呈独立矿物产出，分散的份额不大。稀有矿物粒度一般细小。

变碳酸岩型矿床分布地区，常有大片花岗岩类岩石产出。使人容易发生错觉，认为矿床的形成与花岗岩浆分出的热液活动有关。主要如内蒙某矿的成矿作用，有两种观点。一种认为矿液直接来自花岗岩浆，另一种认为矿质主要来自沉积岩，由于后来的花岗岩浆分出热液，一方面带入部分稀有元素，一方面使原沉积岩中的稀有元素重新富集。这是国内最近才提出的一种新看法。矿床就叫做“沉积变质、热液交代矿床”[2]。对前一种观点，不能表示赞成。对后一种观点，也需作某些补充。

不赞成内蒙某矿矿质来自花岗岩浆的理由有：

1．花岗岩中的元素及矿物与变碳酸岩中的完全不同。花岗岩中富钾，变碳酸岩中除钾外还特别富含钠，花岗岩富硅，变碳酸岩硅低而钙镁高。花岗岩一般都含钽，钇及铪，而变碳酸岩中几乎不含这些元素，相对富铌，铈及锆。与此相应，二者的矿物组成也显著不同。可以认为，花岗岩和变碳酸岩是形成于两个完全不同的地球化学环境。

2．在空间位置上，矿体一般离花岗岩有一段距离。变碳酸岩带的西端，周围数公里内未见有花岗岩露头，而稀有矿化仍强。如果二者直接接触，接触处矿化程度较弱，而且由变碳酸岩到花岗岩方向，明显见到铌及铈组稀土等稀有元素含量逐渐降低，钇组稀土含量升高的趋势。此外，变碳酸岩，长度较大，平面上具线状形态，花岗岩，虽大致呈东西向展布，但形态迥异。

3．矿区地层分布面积很广，普遍含有铁、磷、钍及稀有元素，其他地层中稀有元素含量很低，铁、磷、钍的含量也不高。这样广泛范围的稀有元素分布是这个矿区地层的特点[2]。设想稀有元素由花岗岩浆带来，从量上难于解释。另外，花岗岩形成于海西期，如果稀有元素由花岗岩浆带来，其他老地层，如志留系及石炭系地层为何不受影响。

4．在形成时代上，变碳酸岩矿床中的独居石，同位素地质年龄约为 1500×10^6 年，花岗岩的侵入时代为海西期，约在 250×10^6 年左右。

上述第二种观点，认为矿质来源于沉积岩，只有一部分来自花岗岩浆，而且成矿富集是由花岗岩浆的热液交代作用叠加而引起的。这种观点认为矿质来源于沉积岩，比较令人信服，但把稀有金属的成矿主要归因于花岗岩浆带来的热液，又不能完全同意。根据这种观点也有几个问题难以解释：

1．为什么该地沉积物中稀有金属特别富，而其他同时代地层稀有元素含量很低。

2．设想成矿富集是由花岗岩浆的热液叠加所引起，变碳酸岩矿床出露的面积相当大，要想分出热液，足以使那样大面积的碳

酸盐岩、铝硅酸盐岩、甚至含矿地层受到作用，作用又那样强烈，要多少热液？花岗岩浆能否派生出那样多的热液？带来那样多的稀有元素？

3．设想成矿作用与花岗岩浆分出的热液有关，为什么紧邻花岗岩四周的内外接触带交代蚀变作用不强烈，矿化也弱。相反，交代蚀变作用强烈的地段，总离花岗岩有一定距离，中间隔着交代弱或无交代作用的地段。此外，为什么交代蚀变作用的范围及规模与花岗岩体的形态及产状之间缺乏内在联系。变碳酸岩体呈东西向细长带状分布，其形态与花岗岩体的形态完全不同。

4．花岗岩体的形成时代约为 250×10^6 年。变碳酸岩矿体中由交代变质作用生成的黑云母，其年龄为 475×10^6 年和 452×10^6 年。显然，黑云母交代岩石的形成与花岗岩浆的热液作用毫无关系。

内蒙某矿变碳酸岩矿床的形成，花岗岩浆热液在成矿上可能起一定作用。当海西期花岗岩形成时，其分出的热液可能会对成矿作用有所影响。矿区东部接触带的一些含矿矽卡岩等的形成即可能与花岗岩浆分出的热液作用有关。但若将这种花岗岩浆热液的作用过于夸大，甚至认为它们是矿床形成的主导因素，正如上述，证据还嫌不足。

对内蒙某地碳酸岩型矿床，初步设想其成矿过程如下：

该地在前寒武纪（或下古生代）地层沉积时，伴有强烈的火山活动。火山喷出大量与一般碳酸岩物质成分类似的物质，包括稀有金属、钙、镁、磷、铁及碳酸等挥发分。这些喷出物，与当地沉积的钙质泥质物一起，构成一套沉积建造。就是说，当这一套沉积物沉积成岩作用进行时，其中就已包含有现在所见到的各种挥发分及稀有稀土元素。由于沉积物内含有大量碱质及挥发分，在沉积物成岩过程中，出现强烈的交代变质作用。一些矿物被另一些矿物交代，一些矿物可能进一步生长和富集。这时进行的交代作用，其性质有点与一般花岗岩型矿床形成过程中的交代作用相似。成矿物质沉淀固结后，整个地区又经受了区域变质作用，含矿碳酸

盐岩石变成含矿大理岩，含矿泥质岩石变成含矿片岩，某些稀有元素矿物也进一步生长，并作定向排列。此种区域变质作用可能出现于加里东时期。此后，在海西运动时期，海西花岗岩的定位，又多少导致该地段稀有元素及挥发分物质的活动及富集。成矿作用可能就是这样多次反覆进行，而且形式多样，才最终具有今天的面貌，但矿床的雏型是在沉积物沉积成岩作用时期就已确定了的。

由于成矿作用和交代变质作用的多次进行，成矿的时代就不止一个。这可能也是变碳酸岩矿床中同位素地质年龄数值不止一个的原因。初步推测前寒武纪的年龄为 1500×10^6 年可能是矿床奠定雏型时期；加里东的年龄为 452×10^6 年，可能是矿床经受区域变质作用的时期；海西的年龄为 250×10^6 年，可能是矿体东部某些接触交代矿化和矿体中某些含易解石细脉形成的时期。

内蒙某矿的成矿作用是极其复杂的。与国内其他地方同类型矿床相比，它的规模大，物质成分复杂，交代作用强，成矿作用是多次进行的。对那些成矿作用较简单的同类型矿床进行研究，内蒙矿床的成因可能更为清楚。

内蒙某地铌、稀土变碳酸岩矿床实例如下：

矿区出露的主要地层时代尚有争论，有谓形成于元古代，有谓形成于下古生代。地层由一套浅变质岩石组成，岩性包括石英岩、片岩(板岩)、砾岩、石灰岩及白云岩等。区内出露的火成岩、有辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗岩、火山岩及各种脉岩。其中黑云母花岗岩在矿区南部大面积产出，同位素地质年龄250×10^6年，形成时代属海西期。矿区的基本构造为东西向的背斜及断裂构造。变碳酸岩矿床呈东西向带状延伸(图 32)。

矿体主要赋存于白云岩中，其次也赋存于板岩及石英岩中。白云岩普遍有铌、稀土及铁的矿化，而在矿化特别强烈地段形成富矿体。矿体呈透镜状及似层状，与围岩整合产出，二者之间没有明晰界线。矿石最常具条带状、斑杂状及块状构造。条带较细，宽不过几毫米到几厘米，并显小褶曲。

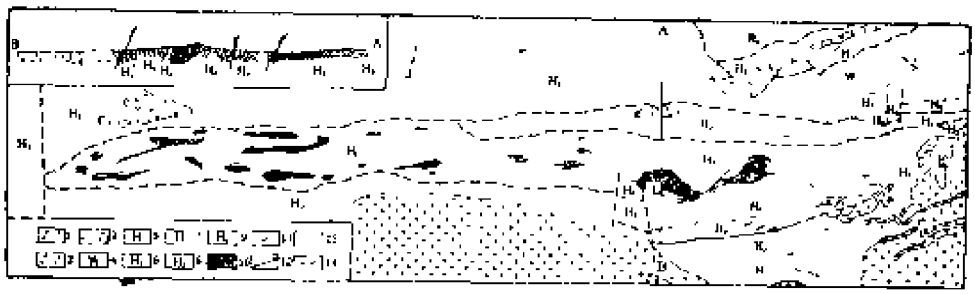


图 32　矿区地质示意图

1. 黑云母花岗岩；2. 黑云母花岗正长岩；3. 闪长岩和辉长-闪长岩；4. 石英岩和绿色片岩；5. 混合岩化岩石；6. 石英岩、砾岩；7. 石英岩、板岩；8. 主要为矿化白云岩夹石英岩、板岩、角闪岩等；9. 板岩夹石英岩；10. 富矿体；11. 岩层产状；12. 断层；13. 地质界线；14. 侵入体界线

矿石中交代作用异常发育，白云岩、板岩、石英岩普遍受其影响。其中主要的有碱性角闪石化、碱性长石化、霓石化、金云母化、萤石化、磷灰石化、黑云母化、重晶石化等，其次有碳酸盐化、黄铁矿化、辉钼矿化、绿泥石化、硅化等。在矿区东部花岗岩与白云岩接触带上见有透辉石化、硅镁石化、方柱石化及褐帘石化等矽卡岩化。不同的交代作用常伴随不同的稀有金属矿化。铌、稀土及铁等矿石矿物的形成也是交代作用的结果。

根据稀有金属的种类及主要脉石矿物的不同，矿床可分出三个主要矿石类型，在每一类型中又可分出若干亚类，即：

1. 铌、稀土、铁矿石
   （1）块状铌、稀土、铁矿石(Fe)；
   （2）萤石型铌、稀土、铁矿石(F)；
   （3）霓石型铌、稀土、铁矿石(AeFe)；
   （4）碱性角闪石型铌、稀土、铁矿石(RiFe)；
   （5）白云石型铌、稀土、铁矿石(DoFe)；
   （6）黑云母型铌、稀土、铁矿石(BiFe)；
2. 铌、稀土矿石
   （7）白云岩型铌、稀土矿石(Do)；
   （8）碱性长石型铌、稀土矿石(Fel)；
   （9）霓石型铌、稀土矿石(Ae)；

(10) 云母型铌、稀土矿石(Bi);

3. 铌矿石

(11) 含云母透辉石型铌矿石(PhI)。

不同类型矿石分别形成不同的矿体，而大的矿体又常包括几种类型矿石。不同类型矿石，其矿物组成，结构构造及稀有元素含量等皆不同。各类型矿石的空间分布如图 33 所示。

矿石的物质成分极复杂，可综合利用的元素有九种。稀有元素中，铌、稀土的含量很高，而且 Nb≫Ta, ΣCe≫ΣY、Th≫U。铈组稀土中除 La、Ce 外，Nd、Eu 稍高。组成矿石的矿物也极复杂，有原岩白云岩、板岩及石英岩的组成矿物，也有由交代作用形成的矿物。矿石矿物主要是铌、稀土及铁矿物。其中铌矿物有铌铁矿、铌铁金红石，易解石(普通易解石、铌易解石、钛易解石)、烧绿石、铌钙矿、锰铌矿、褐铈铌矿等。稀土矿物有独居石、氟碳铈矿、氟菱钙铈矿、氟碳钡铈矿、氟碳铈钡矿、铈磷灰石、铈石、褐帘石等。铁矿物主要为磁铁矿及赤铁矿。

由于矿石物质成分复杂，矿物粒度，特别是铌矿物粒度细小，矿床的评价及采冶等均需采用特别的技术方法。

外 生 矿 床

稀有元素外生矿床包括 1. 稀有元素风化壳矿床；2. 稀有元素滨海砂矿；3. 稀有元素残坡积砂矿；4. 稀有元素冲积砂矿；5. 稀有元素沉积矿床，而此类矿床中又可分出含稀有元素磷块岩、含稀有元素铝土矿、含稀有元素碳质页岩、含稀有元素碎屑岩、含稀有元素盐类矿等。

稀有元素残坡积矿在我国南方常见，其性质和特征与稀有元素风化壳近似。在我国北方许多含稀有金属伟晶岩区内，曾见到残坡积型的绿柱石、铌钽铁矿等砂矿。矿床常是伟晶岩经机械破坏并经少许搬运形成的，开采颇感方便。

沉积矿床中的含稀有元素碎屑岩和稀有元素碳质页岩等，国

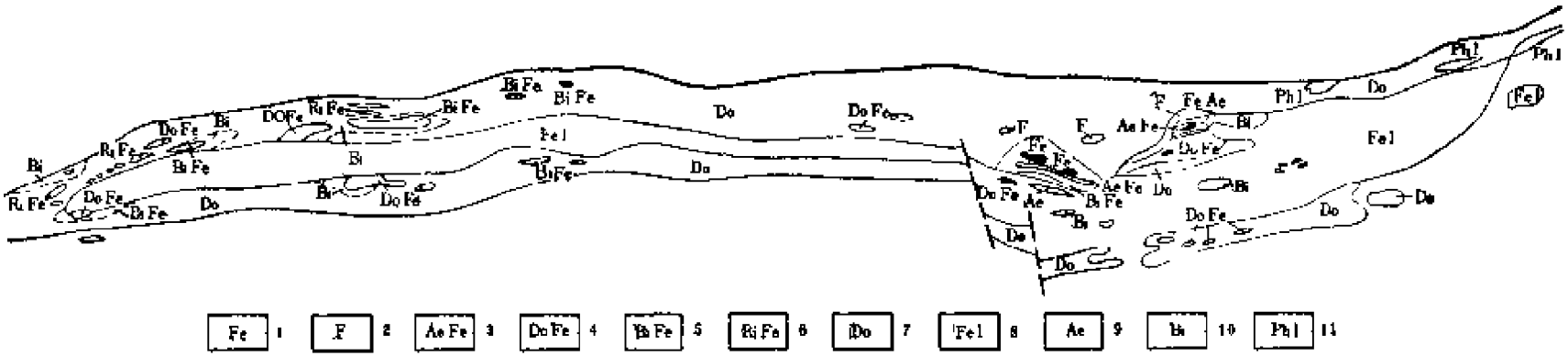


图 33　各种类型矿石分布平面示意图

1. 块状铌、稀土、铁矿石；2. 萤石型铌、稀土、铁矿石；3. 霓石型铌、稀土、铁矿石；4. 白云石型铌、稀土、铁矿石；5. 黑云母型铌、稀土、铁矿石；6. 碱性角闪石型铌、稀土、铁矿石；7. 白云岩型铌、稀土矿石；8. 碱性长石型铌、稀土矿石；9. 霓石型铌、稀土矿石；10. 云母型铌、稀土矿石；11. 金云母透辉石型铌矿石

内见到的有锆石砂岩、含独居石和锆石的砂砾岩、含稀土粘土岩、含稀土和钒的碳质页岩(板岩)、含钇组稀土的煤和褐煤等。

对这些矿床或矿化不一一描述。下面仅对风化壳型矿床、滨海砂矿、冲积砂矿及某些沉积矿作简要介绍。

一　稀有金属风化壳矿床

稀有元素风化壳主要是稀有元素花岗岩或混合岩经风化而成。湿热的气候条件，有利的地貌是决定风化壳的形成及其形态的主要条件。稀有金属花岗岩或混合岩风化后，土质松散，易于选矿分离，为矿石开采利用创造了有利条件。我国南方广泛分布的各类稀有金属花岗岩，或因稀有矿物品位较低，或因开采成本过高，目前多只利用其风化壳。风化壳的物质，来源于其下花岗岩或混合岩，风化壳的地质位置也取决于稀有金属花岗岩或混合岩。风化壳的很多特征可参考相应的含稀有金属花岗岩及混合岩。

值得一提的是，无产阶级文化大革命以来在我国发现的新类型——含稀土风化壳。一种是与含氟碳钇钙矿白云母化花岗岩有关的含重稀土风化壳矿床，另一种是含轻稀土，特别是含钕的混合岩风化壳。花岗岩或混合岩风化后，其中稀土矿物遭到分解，钇和钕等稀土元素呈离子状态被风化壳粘土矿物吸附。这种类型矿床又称为离子吸附型风化壳矿床，它是一类极重要的稀有金属风化壳矿床。经过风化淋滤，稀土进一步富集，矿石品位进一步增高，加之易回收利用，经济价值极大。

二　稀有金属滨海砂矿

滨海砂矿是目前工业利用最经济的矿床类型之一。广泛分布于我国东南沿海及山东半岛、辽东半岛之东南部，尤以海南岛、广东沿海一带最著，是我国锆石、钛铁矿、独居石等资源的主要产地。我国的台湾省，锆石及独居石砂矿早已闻名，由于蒋介石集团的反动统治，工业废弃，开矿事业近于停顿状态。广东的独居石滨海砂矿中，随着找矿勘探工作的开展，最近又发现磷钇矿砂矿，是一工业价值颇高的砂矿矿床。

滨海砂矿按成因可分为海成砂矿及海陆混合成因砂矿两类。

后者又可分出海河混合成因及海湖混合成因等。海河混合成因砂矿，一般见于河口三角洲地区；海湖混合成因砂矿常见于海滨泻湖地带。海陆混合成因砂矿意义较小，下面主要介绍海成砂矿。

海成砂矿矿体呈长条状环海岸线分布，矿带可断续延长数百公里。砂矿赋存于第四系不含土或含土很少的中-细粒石英砂或粘土质石英砂中。砂矿部位严格受地貌控制。矿体多呈层状，矿层产状一般均微向海倾斜，底板平坦，矿层与下伏岩层为渐变关系。海成砂矿通常为一层矿，矿体规模一般较大，矿石品位较富。按从海到大陆的方向，海成砂矿大致又可分为：

1. 现代海潮影响区砂矿；
2. 沙堤砂矿；
3. 沙地砂矿；
4. 堆积阶地砂矿。

现代海潮影响区砂矿，直接分布于潮汐带，为国外较重要的砂矿类型。这类砂矿矿体多呈细长条带状，平行海岸分布。矿体一般较小，矿层较薄。有用矿物较富集，但品位不稳定。这类砂矿富集于河口三角洲者称为河口海潮影响区砂矿；富集于港湾者称港口海潮影响区砂矿；富集于孤山麓、山咀处者称海蚀孤山麓、山咀处海潮影响区砂矿；富集于连岛和大弧度海湾处者，称为连岛沙堤下和大弧度海岸湾曲处海潮影响区砂矿。后者由于规模大、品位富，是最主要的海潮影响区砂矿。

沙堤砂矿，呈狭窄长条状平行海岸线分布于现代海潮影响区砂矿的内侧，具储量大、矿层厚、品位高、有用矿物种类多的特点。按其距海岸的远近，又可分为距海岸较远的古沙堤砂矿和近海岸的近代沙堤砂矿。前者位于海滨地区的丘陵残山附近，由第四纪粘土质中、细粒砂组成，沉积物分选好，稍经胶结。有用矿物多富集于古沙堤的中部和后鞍，构成规模不大的矿床。近海岸的近代沙堤砂矿，由于其规模大、品位高、有用矿物种类多，矿层直接出露地表，因而具有较大的工业意义。矿体呈条带状沿海岸分布，产状微向海倾斜。有用矿物富集于沙堤的前鞍或后鞍，而与两山相连

的近海沙堤砂矿几乎全为矿层。

沙地砂矿呈条带状沿海岸广泛分布，产状水平或微向海倾斜，有用矿物富集于全新世松散的细、中粒石英沙层中，含泥很少。含矿特点是矿石类型单一，或钛铁矿，或锆石，或独居石磷钇矿，矿体规模及品位均属中等，矿体平行排列，矿层为似层状、厚度稳定，下界平缓，垂直方向表现上富下贫。

堆积阶地砂矿是海成砂矿的重要类型之一，有用矿物富集于棕红色厚层堆积沙相阶地及白色薄层堆积沙相阶地中、细粒粘土质沙或亚沙土中。矿体呈长条状大致平行海岸线分布，富矿常见于阶地前缘中央以及后缘，品位在垂直方向上贫富交替出现，总的趋势是中上部最富，向下变贫。

影响滨海砂矿分布富集的因素很多，主要有：

1. 沿海地带基岩地质特征是形成滨海砂矿床的重要因素，它决定有用矿物的来源问题。不同岩石决定着砂矿床的不同物质组分。如海南岛滨海砂矿床主要是钛铁矿和锆石，分别来源于岛上广泛分布的中生代石英闪长岩、闪长岩、辉绿角闪岩、花岗闪长岩和正长岩、石英正长岩。山东半岛某锆石砂矿床、锆石来源于正长岩。广东西部沿海诸砂矿，其中独居石和磷钇矿来源于沿海大面积分布的混合岩。

2. 滨海地貌(图 34)对滨海砂矿的富集和分布起决定性作用。滨海地带的海滩区、浅滩区和堆积阶地的发育，是砂矿床形成

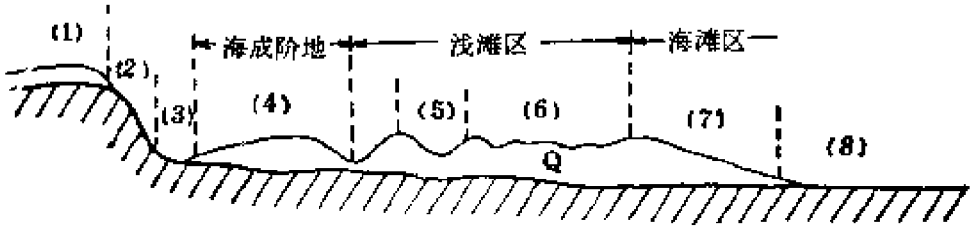


图 34　滨海地貌剖面示意图

1. 堆积平台；2. 海蚀阶地；3. 干涸泻湖；4. 古沙洲；5. 堤间泻湖；6. 沙堤群；7. 海潮影响区；8. 浅滩；Q. 第四系，第四系下为基岩

的有利场所。上述海潮影响区砂矿多见于海滩区，沙堤砂矿主要富集于浅滩区，沙地砂矿多富集于海成阶地区，而堆积阶地砂矿主

要见于堆积平台及海蚀阶地。在这些地貌单元中，有用矿物的富集又受次一级地貌单元的制约。大体上，滨海砂矿多分布于两地貌单元交界处(如一级平台与沙地、干涸泻湖与沙堤等)、河流出口处、孤山向海伸出拐角的内湾。而靠内陆的砂矿主要分布于近山的海成地貌单元，如近海沙堤前鞍、远海沙堤后鞍等。

3. 第四系地层特征对滨海砂矿富集的影响，表现为一般砂矿均富集于海相中、细粒石英砂、粘土质中、细粒砂和中、细粒亚粘土中，其次为含砾石的砂层，而砾石层以至粘土层则很少或根本不含矿。

4. 新构造运动和海流的方向等也影响滨海砂矿的分布和富集。

广东某地锆石独居石钛铁矿滨海砂矿实例如下。

矿区呈带状，紧靠海岸线分布，北东—南西方向延伸。矿区东面濒临大海，西北面是一平原(由干涸泻湖而成)。平原与大海间有高达一、二十米的沙堤或沙堤群，将平原和大海隔开。矿区内除几条孤山残余外，仓为第四系覆盖，这些孤山呈岛屿状近东西向及北东向延伸，标高均在200米以下，一般在100米左右。

矿区内火成岩出露不多，仅见于孤山地区。主要为斑状黑云母花岗岩，其次见到角闪石黑云母花岗岩，为中生代燕山期产物，其中含不等量的锆石、独居石及钛铁矿，是矿区砂矿的来源地。

矿区内海相地貌最为发育，由东至西，由北至南，大致可分出如下几个单元(图35)。

1. 浅滩：位于低潮线与波浪带之间，宽50米左右；

2. 海潮区：为高潮与低潮间的潮汐地带，呈狭长条带状，形态随海岸线变化而变化，走向大致北东。由于中部被孤山截断，此带又分成三带。每一带形似镰刀。此单元是砂矿富集的有利场所。特别是海岸宽敞弯曲处，常有砂矿赋存；

3. 沙堤：直接和海潮区接触，长度断续长达十余公里，与海潮区界线明晰，走向一致。矿区北部主要一条沙堤，矿区南部有二、三道平行沙堤构成的沙堤群。沙堤群之间为堤间凹地，由南向北

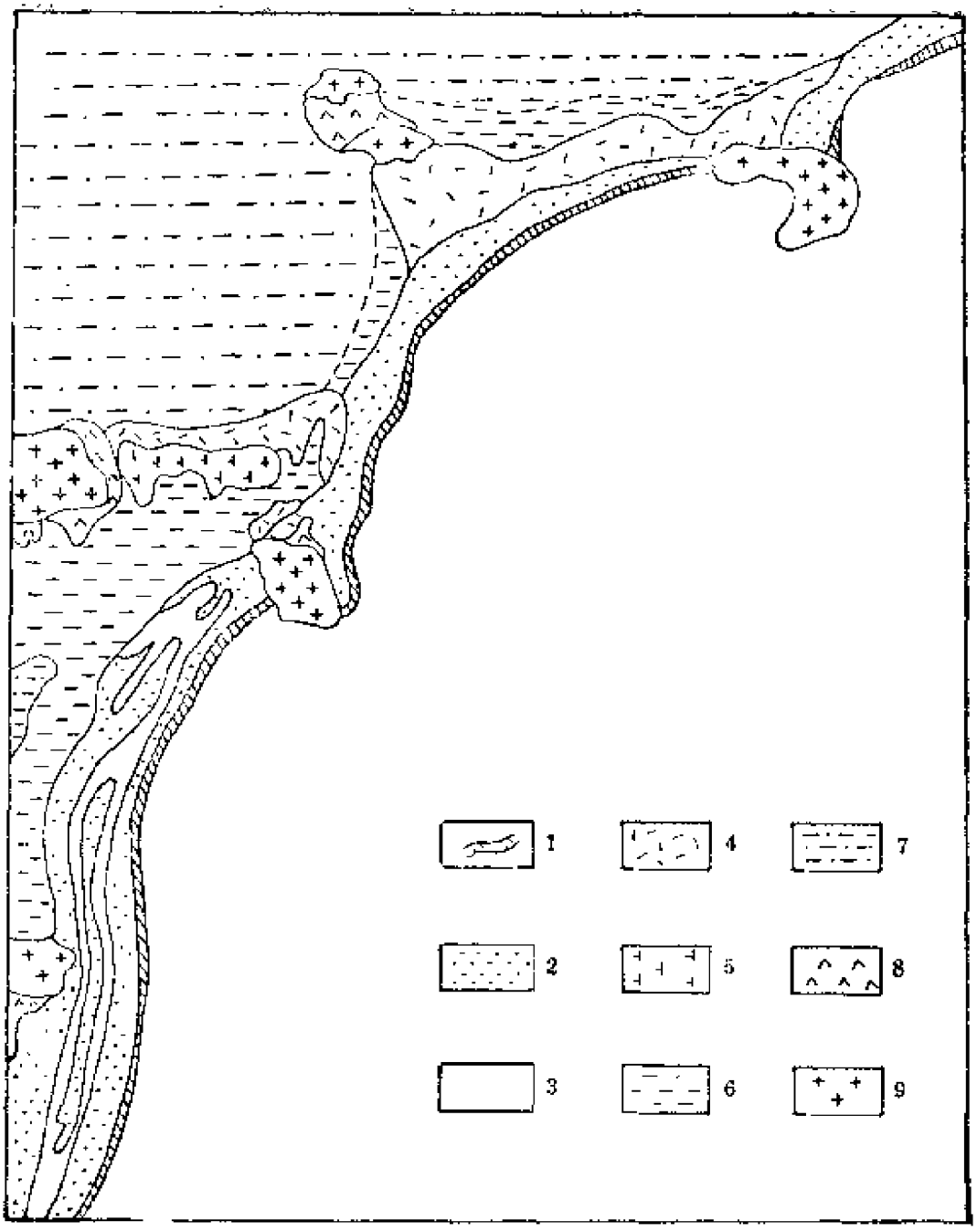


图 35　广东某滨海砂矿地貌示意图

1. 海潮区；2. 沙堤；3. 堤间凹地；4. 沙地；5. 连岛古沙堤；6. 干涸泻湖；7. 干涸泻湖(海河混成)；8. 坡积裙；9. 花岗岩

逐渐汇合。沙堤或沙堤群是矿区最主要的含矿单元，富矿体多见于这一地貌单元中；

4. 沙地：主要呈裙状位沙堤内侧边缘。总长 5500 米，与其西北面的干涸泻湖相连，并较之略高，高差不到二米。沙地表面平

坦，微向干涸泻湖方向倾斜；

5. 干涸泻湖：位于沙地与沙堤群西部，高出海面不过 1 米，表面平坦。在其向海岸一边的泻湖属海成成因，西北靠内地一边，泻湖的形成属海陆混合成因。二者无明显界线，在西部构成一广阔平原；

6. 泻湖沙洲：局部分布，与干涸泻湖相对高差 1—2 米；

7. 连岛古沙堤：位于矿区中部，大致作东西向条带状延伸，长千余米，宽数百米，与干涸泻湖相对高差 5 米，向南北两面的干涸泻湖方向倾斜，坡度约 2 度。此单元含矿性较好，为矿区最早成矿地貌单元。

矿区陆相地貌，主要指孤山及坡积裙。孤山不同程度的高出周围地面，形成山坡，而坡积裙常沿其边缘分布。

矿区第四系海相沉积极为发育，沉积厚度最大达 45 米，按岩性及时代可分为五期：

第一期为古老海相沉积地层，以棕红色含土细沙及灰色细沙为主，间夹薄层含砾细沙。沉积厚度 17 米。近基岩处有 1—2 米含碎石沙层；

第二期为海湖混合沉积地层，以白色、灰白色、桔黄色细沙为主。沉积厚度 4—15 米；

第三期为湖海混合沉积，多分布于干涸泻湖区。矿区北部沉积物复杂，以灰色细沙、灰黄色沙砾及黑色淤泥等为主。沉积厚度在 15 米以上。南部沉积物简单，主要为灰色、黄色含贝壳细沙，沉积厚度 4—10 米。

第四期为海相沉积，主要分布于沙堤及沙堤群上。从北到南，不同地段的沉积物略有不同，主要由黄色、灰色、灰白色等细沙组成，中夹灰黑色淤泥、黄色含土沙砾层及粘土等。

第五期为最新海相沉积，分布于海潮区，主要由细沙组成，表部有少量贝壳及小砾石。

矿区第四纪陆相沉积分布零星，主要分布在孤山四周及泻湖中。

含锆石、独居石、钛铁矿的砂矿矿体，主要平行海岸线呈条带状延伸。按其所赋存的地貌单元不同可分出 1. 海湖区砂矿；2. 沙堤砂矿；3. 干涸泻湖砂矿；4. 古沙堤砂矿四类。其中矿化最富的为后三类。此外，三类砂矿在不同地段矿化程度也不同。矿区南部的沙堤群砂矿及干涸泻湖砂矿是矿区最主要的富矿段。

沙堤群砂矿，矿体形态较规则，矿体厚度及品位较稳定，矿体多直接出露地表。干涸泻湖砂矿，矿体形态不甚规则，但厚度较稳定，品位有时变化大，矿层多埋藏于地下水面以下。无论何种矿体，矿体均多呈长透镜状，矿体与非矿体之间无明晰界线，只能根据取样和重砂分析才能确定。大体上，沿矿体走向，矿石品位变化不大，而沿矿体倾向，品位变化较大。在沙堤内的矿体，一般地表含矿富，向下逐渐变贫，而于涸泻湖内的矿体，矿化是中间富，上下贫。

砂矿中可为工业利用的矿物主要是锆石、独居石及钛铁矿，并有磷钇矿及金红石。其他重矿物有磁铁矿、铬尖晶石、榍石、黄铁矿、锐钛矿、赤铁矿及刚玉等约 20 种。

矿体中的锆石与钛铁矿含量具共同消长关系。两种富矿体的分布基本一致，但锆石富矿体的分布范围略大于钛铁矿富矿体的分布范围。另外，独居石和金红石的富矿部位，与锆石的富矿部位也大体一致，但关系远不如锆石与钛铁矿的那样清楚。

三　稀有金属河流冲积砂矿

已知具工业意义的河流冲积砂矿，有钽铌铁矿砂矿、褐钇铌矿砂矿、锆石砂矿、独居石磷钇矿砂矿等。其中独居石、磷钇矿砂矿分布最广泛，普遍见于我国南北各省，而钽铌铁矿、褐钇铌矿砂矿则分布局限，仅见于南方燕山期花岗岩分布的个别地区。形成河流冲积砂矿的条件，主要有：砂矿床的物质来源；新构造运动影响；湿热的气候条件；地表径流的冲刷搬运等。

钽铌铁矿砂矿，其中钽铌铁矿来源于燕山期花岗岩及含钽铌铁矿伟晶岩。褐钇铌矿砂矿，其中褐钇铌矿主要来源于燕山期黑云母花岗岩及钠铁闪石碱性花岗岩。独居石磷钇矿砂矿，稀土矿

物来源于混合岩、花岗片麻岩及花岗岩。锆石则主要来源于正长岩、花岗岩及混合岩。大体上，钽铌铁矿、褐钇铌矿搬运的距离较短，独居石、磷钇矿、锆石等可搬运到较远处富集成矿。我国已知钽铌铁矿有搬运达十多公里富集成矿的，这在国外也较罕见。

新构造运动使区内持续缓慢上升，有利于剥蚀丘陵、侵蚀堆积地形、以及岩石风化壳的形成。上升间歇利于河谷堆积物的形成。

各类冲积砂矿主要赋存在河流第四系冲积层中。第四系冲积层剖面自上而下大致为：

现代河床堆积层：砂砾层，松散

河漫滩堆积层：含土砂层，松散，含沙粘土

阶地堆积层：每级阶地上部为含土沙、含沙粘土、下部为砂砾层，砾石愈新磨圆度愈好

早期洪坡积层：含沙及碎石的粘土层

富矿部位见于晚期形成的阶地堆积层，以及河漫滩堆积层和现代河床堆积层中，即主要见于矿物磨圆度较大、粒度较粗、多未胶结的松散沙和砂砾层中。

河流地貌对砂矿富集关系极大。一般河谷的横剖面大致如图36所示。砂矿最易赋存于Ⅰ、Ⅱ级阶地及现代河床和河漫滩中。大体上，地貌单元时代愈新，含矿愈富。

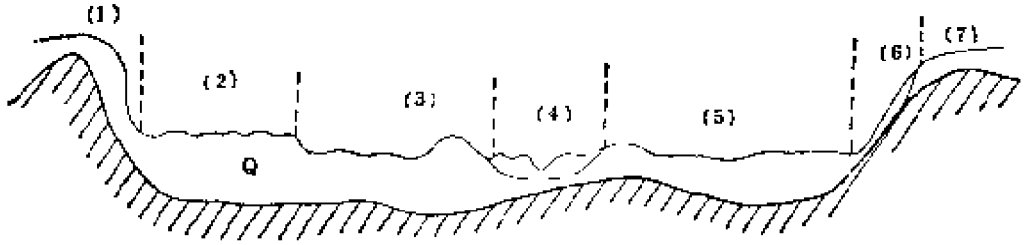


图36　河谷横剖面示意图

1. 残坡积层；2. 河流冲积Ⅱ级阶地；3. 5. 河流冲积Ⅰ级阶地；4. 现代河床堆积层；6. 坡积层；7. 河流冲积Ⅲ级阶地。Q为第四系，其下为基岩

在现代河床及河漫滩中的矿体，多直接出露地表。它们直接受河水冲刷及外力的破坏，可进一步富集，矿体形态仍变动不定。赋存在Ⅰ级阶地，特别是Ⅱ级阶地的矿体，矿层较稳定，矿体厚度

较大，埋藏较深。采矿时需进行剥离工作。有时剥离深度可达数米。

冲积砂矿矿体沿河床分布，平面上呈树枝状，叶脉状（图38）。矿体一般呈层状、板状及透镜状。河流上游，由于河床坡度大，河床摆动小，形成的矿体窄而薄。下游河谷宽，下切深，河床摆动大，形成的矿体宽度及厚度都较大。一般水系最上游，矿体小而分散；中游至中下游，以及几条水系汇合处，矿体多且规模大；河流最下游一般不利于砂矿的形成。此外，河流中下游砂矿，矿体底板较平坦，微向河流下游倾斜。如河谷基底为碳酸盐岩石，由于岩溶作用发育，可形成岩溶凹地砂矿。这类砂矿，矿体形态很不规则。

赋存于冲积层中的矿体，其上下盘与围岩的界线，有的清楚。这时，矿体赋存于某一层位中，如砂砾层。含矿层以上或以下的层位，矿石品位显著降低，物质成分也与含矿层显著不同。另外，大多数的情况是矿体与围岩界线模糊不清。在同一层位中矿石品位从高到低逐渐变化。这时只有根据重砂分析品位，按工业指标圈定出矿体界线。

广西某地褐钇铌矿冲积砂矿地质特征如下。

矿床位于一狭长形半封闭盆地中。盆地呈椭圆形，东西宽约12公里，南北长约20公里。其边缘为中高山区，一般比高50—100米，外围属高山区，比高800—1200米。四周高山的水流沿无数放射状冲沟向盆地汇聚，集成河流，向南流出盆地。在河流中游盆地开阔处，地势转平，形成大的冲积砂矿矿体。

整个盆地全位于花岗岩上。花岗岩为黑云母花岗岩，分出三期，以第二期规模最大。第二期花岗岩又分出三种岩相，即中央相、过渡相及边缘相（图6）。含褐钇铌矿较富的花岗岩属过渡相。冲积砂矿中的褐钇铌矿主要来源于过渡相的粗粒似斑状黑云母花岗岩。

矿区地貌主要属侵蚀构造和侵蚀堆积类型。侵蚀构造类型见于盆地周围海拔400—1000米高度范围内。由高到低存在三级剥蚀面（图37）。第一个剥蚀面（1）在海拔1000米左右，构成环状分

水岭，第二个剥蚀面(2)在海拔 800 米左右，第三个剥蚀面(3)在海拔 400—500 米左右。侵蚀堆积地形主要见于海拔高度 210—250 米内，也可分出三级侵蚀堆积阶地。第三级阶地(Ⅲ)高出现代河床约 40 米，海拔高度 210 米。第二级阶地(Ⅱ)高出现代河床 2—3 米，分布在现代河流两侧，面积最广。第一级阶地(Ⅰ)为近代河床，一般宽 40 米。河的外侧，有比河床宽 1—5 倍的河漫滩，坡度平缓。盆地内的河流，上游及下游的河谷呈“V”字形，刻切较深，中游，特别在中游东西两支流汇合处，为开阔盆地，河谷宽敞，河谷呈“U”字形，宽约 1000—1200 米，是砂矿赋存地。在这一地段，河流侧蚀作用强烈，形成不对称阶地，河流的一岸较陡，另一岸较缓，具典型河漫滩地貌。

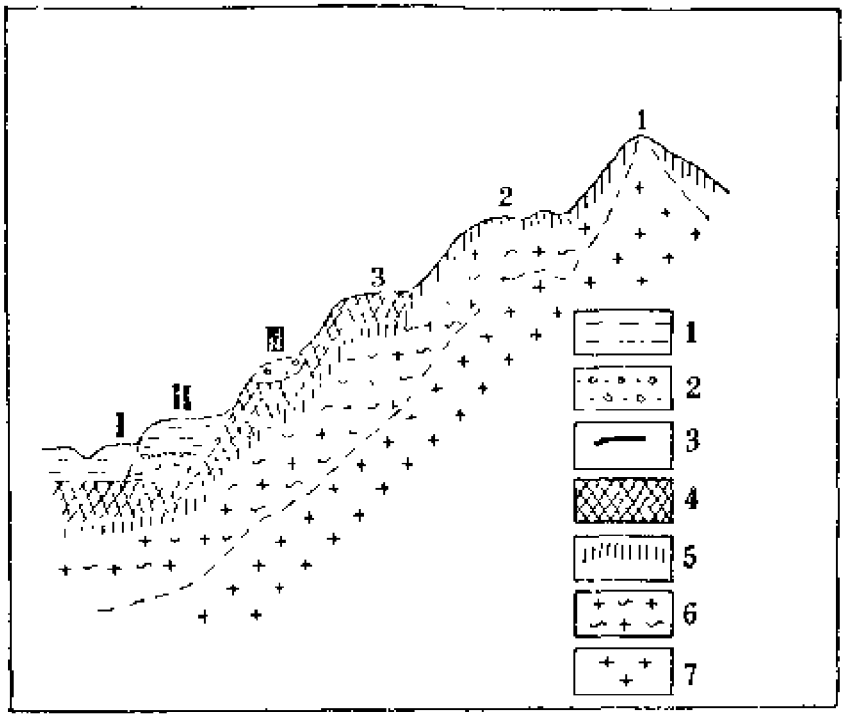


图 37　冲积砂矿地质地貌剖面示意图

1. 沙土层；2. 夹砾石沙层；3. 沼泽层；4. 全风化带；5. 半风化带；6. 微风化带；7. 花岗岩。1,2,3—三级剥蚀面；Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ—三级阶地

盆地内主要覆盖着第四系冲积层，自下而上分为：

1. 下更新统白沙组坡积冲积层和残积层：构成第三级阶地，上部为砾石层，下部为花岗岩风化壳；

2. 中上更新统望高组冲积层：又分四层，自上而下为沙土层、砂质粘土层、沼泽层及夹卵石含土沙层。其中夹卵石含土沙层，厚 2—4 米，沙、卵石和砾石的总量约占 75—95%，粘结性差，土质松散，除含钛铁矿及锆石外尚有褐钇铌矿、独居石，为本区砂矿的最主要含矿层：

3. 全新统近代冲积层：厚 6—7 米，含沙量很高，含有少量卵石，沙量一般约 75—95%。常常在表面上有一沙粒层，几乎全由沙组成。此层含矿也好，普遍含褐钇铌矿、独居石、钛铁矿及锆石。

含褐钇铌矿冲积砂矿，沿河床分布。平面上矿带的分布呈树枝状、叶脉状(图 38)。在矿带内矿体呈层状，矿层厚度较稳定。

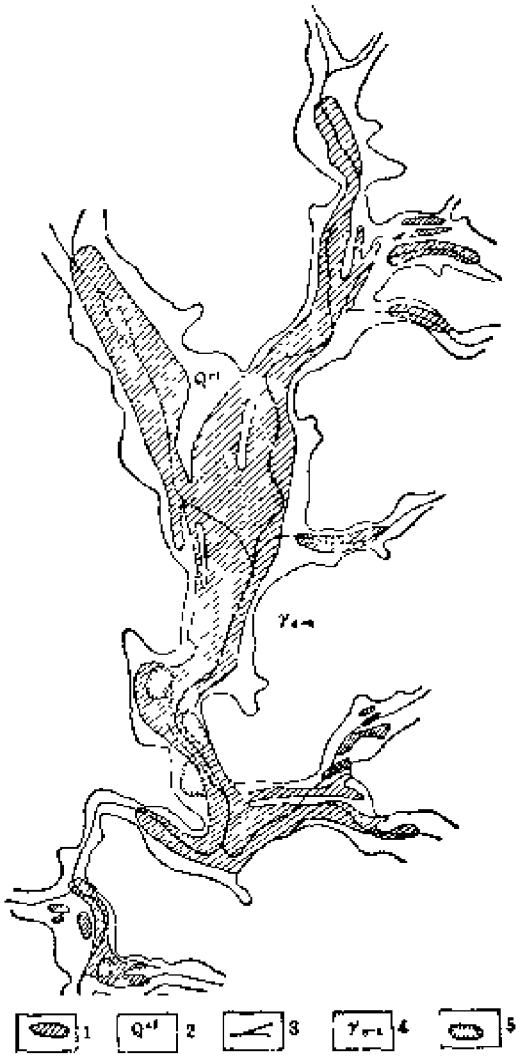


图 38　冲积砂矿矿带分布平面示意图

1. 矿带；2. 第四系；3. 河流；4. 角闪石黑云母花岗岩；5. 采场

一般为一层矿。表土较薄，平均厚 1.53 米。矿层底板平坦，底板为中粒正斑状角闪石黑云母花岗岩风化壳，其次为白沙组冲积层。

组成矿体的矿物成分较复杂，有用矿物为褐钇铌矿、独居石、锆石及钛铁矿。褐钇铌矿呈单体状态赋存在望高组冲积层及全新统近代冲积层中，尤以前者的下部夹卵石含土沙层中最富。一到下更新统白沙组冲积层中，褐钇铌矿含量显著降低。

四　稀有金属沉积矿床

沉积地层及其矿产中的稀有元素，随着地质研究工作的开展，特别是无产阶级文化大革命以来认真贯彻关于"综合评价综合利用"的方针，对它们的认识逐步加深，新的矿床类型开始被发现。这里仅就磷块岩中的稀土元素，铝土矿中的铌，盐湖矿床中的锂等作一简要描述。

（一）磷块岩中的稀土元素

云南、贵州、四川等省稀土矿化的磷矿层，位于震旦系顶部之沉积间断面上，时代除四川某矿床为上泥盆世外，其余均为下寒武世。矿床规模巨大，品位较富。同一层位矿床规模大小与沉积间断时间的长短有直接的关系。稀土元素的富集距古海岸线有一定的距离，限于滨海到浅海，以古海岸线坡度小于 35 度为最有利。矿石类型可分为含稀土元素硅质磷矿层及含稀土元素碳酸盐质磷矿层。前者主要由胶磷矿（包括少量细晶磷灰石）、石英、玉髓、黄铁矿、褐铁矿、蛇纹石等组成。后者主要由白云石、胶磷矿（包括细晶磷灰石）、方解石、黄铁矿、水云母等组成。矿石以鲕状结构，条带状、块状构造为主。矿石中除磷外，可利用的元素主要是重稀土（钇），其次尚有铀、钼、镍、碘等。稀土元素的含量变化一般与 P_2O_5 含量的变化呈正消长关系。现举云南某地含重稀土的磷块岩为例，介绍其特征如下。

矿区出露地层有上震旦统、下寒武统及其上假整合覆盖的上泥盆统，缺失中寒武统到中泥盆统间的所有地层。含钇组稀土磷块岩主要赋存在下寒武统筇竹寺组中。矿区西部为一轴向近南北的开阔向斜，东部为一走向 30°，倾向 300°，倾角 10°的单斜构造。

两者间被一高角度逆断层分开(图 39)。区内断层一般较小，东部较西部发育，断层走向有北北东—南南西和北北西—南南东两组，多为高角度逆断层，正断层较少。总的说来，区内构造简单，开采技术条件良好。

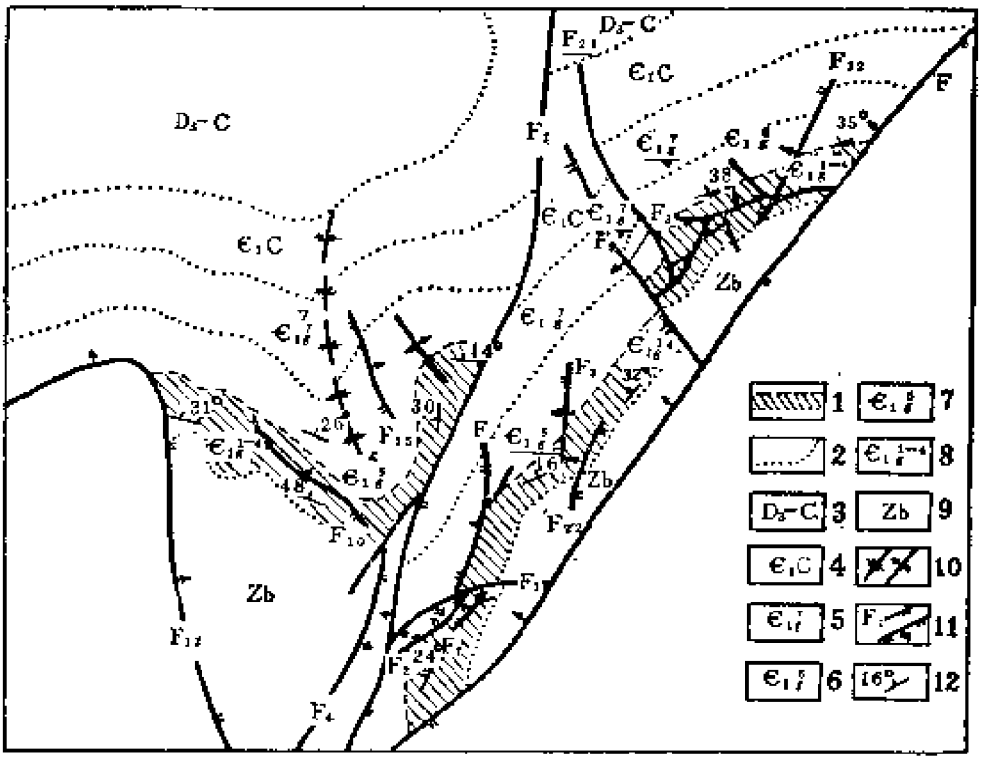


图 39　含重稀土磷块岩矿区地质示意图

1. 含重稀土磷块岩层；2. 地层界线；3. 上泥盆至石炭系灰岩；4. 下寒武统沧浪铺组砂页岩；5. 下寒武统筇竹寺组黄绿色页岩；6. 下寒武统筇竹寺组黑色页岩；7. 下寒武统筇竹寺组灰色粉砂岩；8. 下寒武统筇竹寺组磷块岩层；9. 上震旦统灯影灰岩；10. 向斜轴及背斜轴；11. 逆断层及正断层；12. 岩层产状

下寒武统筇竹寺组有七个比较稳定的矿层。磷矿层属筇竹寺组下部。各矿层特征见表 19。

含磷矿层总厚数十米，为一套生物化学沉积岩，下部为硅质岩夹含磷硅质粉砂岩，中部为硅质磷块岩夹含磷硅质岩，上部为含磷结核白云质粉砂岩。整个含磷层P_2O_5含量从 2%—30%。共圈出五个矿体(表中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ及Ⅴ)。各矿体的厚度及P_2O_5品位沿走向的变化都不大，沿倾向从氧化带到原生带，P_2O_5和酸不溶物含量有一定程度降低，一般P_2O_5降低约 2%，酸不溶物降低 8%。

表19 矿区下寒武统筇竹寺组中含矿层特征

矿层名称		产出层位	主要矿石类型	矿体形态	矿体规模		有用元素	
					走向长度	平均厚度(米)	主要的	可综合利用的
镍钼矿层		ϵ_1^6 底部	1. 含 Ni,Mo 黑色板状页岩 2. 含 Ni,Mo 鳞片状粘土页岩 3. 含 Ni、Mo 炭质结晶灰岩	层状	数千米	1 米以下	Ni Mo U	Pt、Pa、Ga Pb、Zn、Cu V、稀土、P、Se
钒矿层		ϵ_1^5 底部	含钒炭质粉砂岩	层状	数千米	2 米以上	V	Ag、Ga、U
磷块岩层	I	ϵ_1^{6-1}—ϵ_1^{3-2}	1. 角砾状结核状硅质磷块岩 2. 条带状硅质磷块岩 3. 含磷硅质岩	层状	数千米	10 余米	P	
	II	$\epsilon_1^{3\ 1}$	1. 鲕状条带状硅质磷块岩 2. 炭质磷块岩(少) 3. 白云质磷块岩(少)	层状	数千米	30 余米	P	TR I、Ga Pb
	III	ϵ_1^2 中上部	含磷硅质粉砂岩	透镜状	数百米	3 米余	P	
	IV	ϵ_1^2 中下部	含磷硅质粉砂岩	透镜状	数百米	4 米余	P	
	V	ϵ_1^2 底部	1. 结核状硅质磷块岩 2. 结核状含磷白云质粉砂岩	透镜状	数百米	1 米以下	P	V、U 稀土

矿石的组成矿物主要有玉髓、炭质及泥质物，其次有石英、白云石、方解石、绿泥石、绢云母、白云母等，微量的有电气石、绿帘石、钛铁矿、锆石、金红石、重晶石、天蓝石及金属硫化物等。未发现任何稀土独立矿物。矿石中的含磷矿物，绝大部分为胶磷矿(95%以上)，其次为细晶(氟)磷灰石和磷铝石。含微量磷的有磷锶矿、磷铁矿、磷铝钙石及银星石等。

矿区五个磷矿体中，以Ⅱ号矿体规模最大，磷的储量占全矿区总储量的四分之三。在Ⅱ号矿体中稀土元素(主要是钇组稀土)的分布有如下一些特征：

1．沿矿体走向和倾向，TR_2O_3和P_2O_5含量的变化极相似。沿矿体走向，含量分布稳定，变化不大。沿矿体倾斜，含量逐渐降低，但P_2O_5降低的幅度较大，TR_2O_3降低的幅度较小；

2．在垂直方向上，稀土和磷的富集层位相同。Ⅱ号矿体从上到下分出三个富集层位，上、中、下各层相隔3—4米。其TR_2O_3和P_2O_5的富集情况相似；

3．矿石中TR_2O_3含量和P_2O_5含量成正比，而与酸不溶物含量呈反比。对矿石进行酸溶情况表明，稀土元素的浸取率与磷的浸取率成正比，证明稀土元素主要赋存在磷矿物中；

4．矿石中TR_2O_3含量与有机炭的关系，有两种情况。当有机炭含量>1.0%时，TR_2O_3与有机炭含量呈正消长关系。有机炭含量<0.5%时，两者关系不明显；

5．矿石中TR_2O_3；Y和酸不溶物；P_2O_5两个比值呈正比关系变化。据此推测，钇与磷的含量关系更为密切，除钇外的其他稀土元素可能一部分与酸不溶物有关。

根据上述几点推测，此类矿床的稀土元素主要是钇，可能是以类质同像形式存在于胶磷矿中，最可能置换钙而存在。

（二）铝土矿中的铌

矿化见于贵州、山西、辽宁等省。贵州某地铝土矿中所含稀有元素曾作较多工作，现将其地质特征简介如下。

贵州铝土矿位于黔桂地台北部黔北古陆南缘与黔南凹陷的过

渡带。区域出露地层有震旦系、寒武系、石炭系到三叠系。奥陶志留泥盆缺失。铝土矿含矿系沉积于寒武系白云岩凹凸不平的侵蚀面上，厚度一般5—20米，上部与石炭系黄龙灰岩接触，为渐变过渡。

区域构造常见平缓单斜构造或开阔平缓的背斜和向斜构造。褶曲走向一般为南北或北北东向，其次为北东向。断裂较发育，以正断层为主，常将铝土矿切成若干断块。

组成含矿系的各种矿石及岩石，在含矿系中作规律分布。赤铁矿、铁质页岩等位于含矿系的底部。铝土矿、铝土岩或铝土质页岩等位于含矿系的上部，组成所谓"铝矿系"。铝土矿位于"铝矿系"中间，铝土岩或铝土质页岩分布于上下。局部地区有煤及炭质页岩位于顶部（图40）。

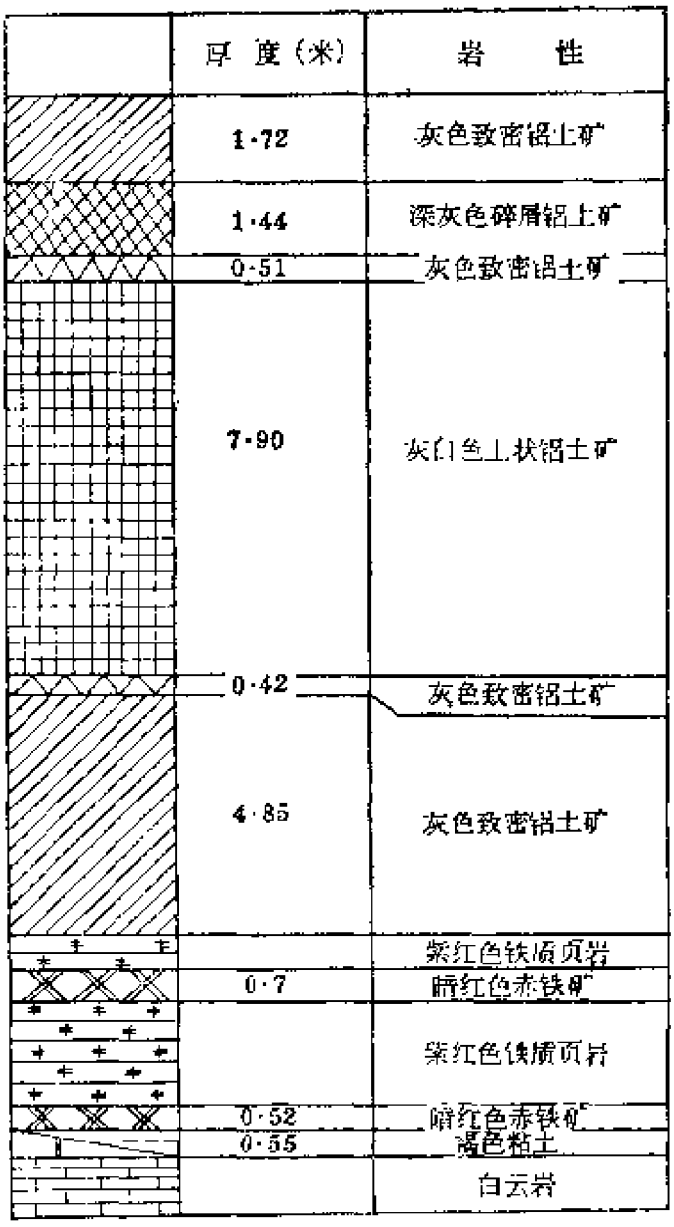


图40　含矿系柱状剖面图

铝土矿分布在隆起区与凹陷区的过渡带。最富集部位是在古陆边缘海湾的中部地带（图41）。

矿层底板为一起伏不平的岩溶侵蚀面。底板的起伏常决定了矿体的厚度。低凹处沉积的铝土矿厚度大，质量好，

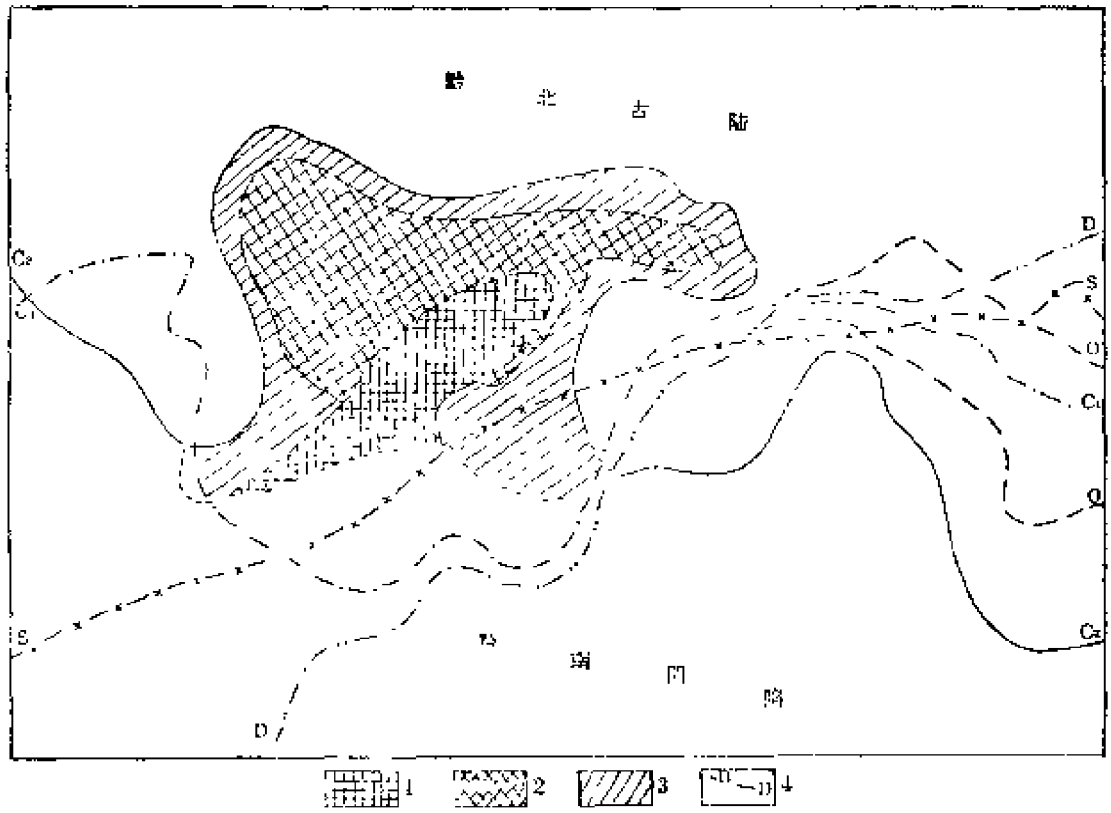


图 11　铝土矿分布地区中石炭系古地理图

1. 土状铝土矿分布区；　2. 致密铝土矿分布区；　3. 铝土岩分布区；
4. 泥盆纪古海岸线

凸起处沉积的铝土矿厚度小，质量差。

铝土矿分为土状铝土矿、致密铝土矿及碎屑铝土矿三类。铝土矿中 Al_2O_3 含量一般 55—75%。其中土状铝土矿质量最佳，Al_2O_3 含量达 70—80%，多分布在矿体中心部位。致密铝土矿质量较差，常呈环状围绕土状铝土矿分布。碎屑铝土矿多见于顶部。

铝土矿矿体呈层状或透镜状，为单一矿层。偶尔在主矿层上下见有小透镜状矿体。矿体走向不定，多为北北西向。矿体长度一般 1000—1500 米。矿体边界极不规则，弯弯曲曲，并有分支现象。矿体厚度一般 1—6 米，最大 16.91 米。一般中间厚，向边缘呈波浪式变小。通常含矿系（或铝矿系）厚度大，矿体厚度也大。如果含矿系厚度小于 4 米，就不可能期望见到矿体。

组成铝土矿的矿物很复杂。计有硬铝石、薄水铝石、金红石、

锐钛矿、板钛矿、白钛石、钛铁矿、榍石及锆石等35种矿物。

铝土矿中的稀有元素主要为铌、钽及锆。锆以锆石形式产出。铌钽的赋存状态还不完全清楚，一部分可能存在于钛矿物中，与钛呈类质同像置换关系。

铝土矿中的铌钽和铝含量之间具共同消长关系。

贵州铝土矿，大小矿区有数十个，铝的储量巨大，如能综合回收稀有元素，意义极大。

（三）盐类矿床中的锂

盐类矿床包括固体石盐矿和盐湖卤水矿。目前可提取利用的稀有金属主要是锂。固体石盐矿主要又分为第三纪石盐矿及第四纪石盐矿两类。前者见于四川、江西等地，后者见于青海、西藏、新疆等盐湖沉积物中，与盐湖卤水矿共同产出。

含锂的盐湖卤水是重要的稀有金属盐类矿床，主要分布在青海现代盐湖中。盐湖卤水矿又可分为地表卤水和地下卤水。地表卤水即现代盐湖水，其中锂的浓度随季节的变化，外水补给等的变化而不同。主要由于干季及湿季的更递，湖水的面积、深度及湖水中稀有元素的含量皆有变化。地下卤水主要指盐湖下部第四系更新统及全新统盐类沉积及碎屑沉积中的卤水。卤水赋存在石盐等盐类沉积物中的叫晶间卤水，赋存在细沙等碎屑物中的叫孔隙卤水。无论晶间卤水或孔隙卤水，受外来补给水的影响较小，其中稀有元素含量较稳定。但另一方面，如果进行提取，部分卤水采空，外来水随之补给，能否引起卤水中稀有元素含量降低，值得注意。

地下卤水矿的底板多为不透水的粘土层或沙质粘土层。自底板向上，分别赋存着不同的盐类沉积物或碎屑沉积物。这些沉积物由于性质不同具有分层特点，稀有元素含量最高的卤水常见于这些沉积物的中部。

盐湖卤水，包括地表卤水及地下卤水，其中稀有元素主要是锂。硼、钾、镁，以及铷、铯也是盐湖卤水中经常见到的有用元素。锂主要呈氯化锂形式存在，提取方便。

主 要 参 考 文 献

1. 《全国稀有元素地质工作会议论文集》 第二集 地质出版社 1974
2. 王中刚、李绍炳、苏泽贤：沉积变质-热液交代型稀土、铁矿床的成因特征 《地球化学》 1973. №1
3. 洛谢夫著，南京大学地质系译：《稀有元素地球化学》 科学出版社 1960
4. G. 奥伯尔特著，矿冀泰编译：含氟、铍、锡、铌、钽、钍等稀有元素矿物的钠长石-云母花岗岩 《稀有元素矿床地质译文集》 地质出版社 1974
5. C. W. Burnham and R. H. Jahns: A Method for determining the Solubility of water in Silicate Melts
   Am. Jour. Sci. Vol.260. p. p 721—715. 1962
6. O. F. Tuttle and N. L. Bowen: Origin of granite in the light of experimental Studies in the System $NaAlSi_3O_8$—$KAlSi_3O_8$—SiO_2—H_2O.
   Geol. Soc. America Memoir 71. p. p. 84—89. 1958
7. К. А. Власов; Генетические Типы Месторождений Редких Элементов Том Ⅲ.
   Издательство «НАУКА» 1966
8. К. А. Власов; Текстурно - Парагенетическая Классификация Гранитных Пегматитов
   ИЗВ. АН СССР. Сер-Геол №2 1952.
9. А. И. Гинзбург; Редкометальные Граниты и Проблемы Магматической Дефференциации
   Издательство «НЕДРАН» 1972