

俄罗斯哈里顿诺沃岩体碱性和过碱性 正长岩-花岗岩系的成因

Ada N. Zanvilevich, Boris A. Litvinovsky 等

摘要 巨大的蒙古-外贝加尔晚古生代碱性正长岩、花岗岩岩区呈 NEE-SWW 展布,长约 200km,包括 350 多个岩体。哈里顿诺沃岩体位于岩区中段,面积约 230km²,由 A 型花岗岩类组成,包括依次生成的碱性正长岩-花岗岩系列和过碱性正长岩-花岗岩系列。其中正长岩均多于花岗岩,两个系列的岩石都以含大量中条纹长石(正长岩中约占 90vol%,花岗岩中占 60vol%以上)和几乎不含斜长石为特征。过碱性系列岩石的镁铁矿物有钠闪石-亚铁钠闪石、红闪石和霓石,并有次生的铁云母质黑云母;在碱性系列岩石中则主要是浅闪石和富铁黑云母。同期的镁铁质岩石以同深成复合岩墙形式产出,表明至少曾有两幕镁铁质岩浆注入到酸性岩浆房中。主要元素和微量元素资料被用来检验正长岩和花岗岩的成因模式。在考虑的几种模式中,最可能的一种是:两个系列都是由正长岩岩浆经结晶分异所形成。质量平衡计算说明,在早期碱性系列中,结晶分异作用很可能与长英质和镁铁质岩浆的混合作用相联系,这也得到野外证据的支持。过碱性系列的正长质母岩浆可能由早期碱性正长岩部分熔融(约 20%)所产生。就这一点而言,可以认为碱性正长岩是整个岩体的母岩。我们认为,生成碱性正长岩岩浆的两个可能成因模式为:(1)深埋的地壳岩石部分熔融;(2)亚碱性玄武岩岩浆(80%)与下地壳酸性熔体(约 20%)混合形成的混染熔体又发生结晶分异作用。按照这两种模式,为了获得与实际成分一致的岩浆还应加入部分钾及其他一些不相容元素。

引 言

A 型花岗岩的成因是当代岩石学领域争论的热点之一,目前流行的四种成因假说是:(1)富不相容元素的幔源玄武岩浆中晶体-液体之间的分离作用;(2)下地壳酸性岩石的部分熔融,该酸性岩石因早期熔体萃取事件或脱羟基事件在化学上业已亏损;(3)亏损的地壳源岩因幔源流体注入而熔融或者是交代蚀变的地壳源岩部分熔融;(4)下地壳部分熔融的酸性熔体与侵入的玄武质岩浆发生混合,形成混染熔体并随后发生结晶分异作用。

蒙古-外贝加尔碱性花岗岩-正长岩区可能是世界上规模最大、出露最好的碱性花岗岩区,本文根据一些新的化学资料论述了该岩区 A 型花岗岩类的成因。岩区位于西伯利亚南部,穿过蒙古北部和外贝加尔,延伸近 2000km,平均宽 200km(图 1),由 350 多个不同的花岗岩类岩体以及同源的火山岩所组成,单个岩体的大小从 1~2km² 直至 1600km²。如此大规模碱性花岗岩质岩浆的产生,与二叠纪一早三叠世陆内裂谷构造的发展密切相关。地球动力学的再造显示,在晚古生代时蒙古-外贝加尔带是巨型裂谷带系统的一部分,该系统叠加在中亚活动带之上,分布范围达 5000km×2000km。

蒙古-外贝加尔碱性花岗岩区可识别出三个主要的岩浆活动阶段:早二叠世、晚二叠世和

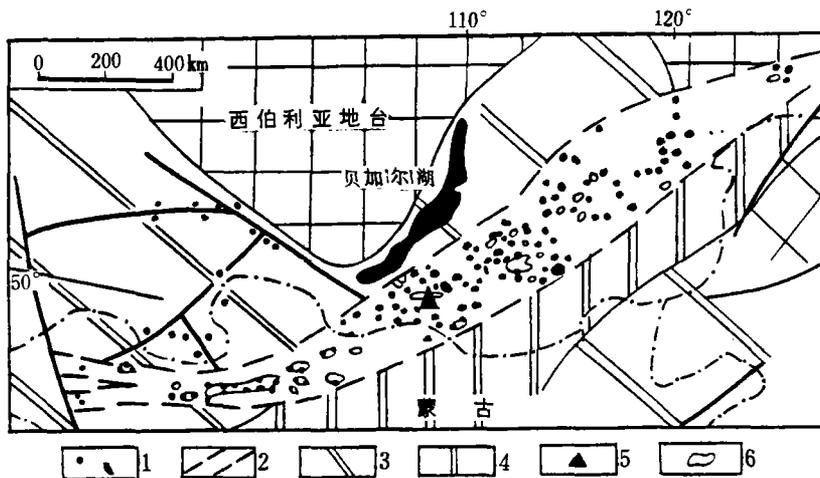


图1 中亚东部二叠—三叠纪碱性花岗岩类及相应火山岩的大地构造位置图
(黑三角为研究区)

1. 花岗岩体 2. 蒙古-外贝加尔裂谷带 3. 加里东和贝加尔褶皱区 4. 海西隆起带 5. 哈里顿诺沃岩体 6. 双峰式火山岩系

岩和花岗岩。在外贝加尔地区,上述三个岩系依序被称为 Lower Selenga 岩套、Kudun 岩套和 Kunalei 岩套。后两个岩套的花岗岩类岩石通常构成复式岩体,二者外观上非常相似,具有相近的矿物和化学组成,这表明它们有明显的成因联系。哈里顿诺沃岩体是蒙古-外贝加尔岩区最具代表性的岩体之一,本文列出了该岩体中 Kudun 岩套和 Kunalei 岩套的化学及岩石学研究结果,提出了大陆裂谷环境中碱性花岗质岩套成因的综合模式。

岩体地质

哈里顿诺沃岩体产于碱性花岗岩区的中段,沿希洛克河下游延伸(图1、2),出露面积约 230km²。岩体南界被中生代火山岩和沉积岩覆盖,在岩体露头的南半部发育大量的侏罗纪正长斑岩和粗面岩及粗玄岩成分的岩墙。岩体的围岩主要是较老的泥盆纪一早二叠世花岗岩类岩石,仅西南部侵入到显然是碱性深成岩对应物的二叠纪火山岩中。

平面上岩体为不规则状,但构成该岩体的各侵入体在排列和形状上显示清楚的线性特征,说明岩浆侵入受裂隙系统的控制。位于岩体中部和东南部的过碱性深成岩(Kunalei 岩套)呈楔状产出。

碱性系列分为先后两个阶段,即正长岩阶段和花岗岩阶段。在每一阶段中,依据切割关系确定几期岩浆侵入活动。正长岩阶段侵入期的先后顺序为:(1)粗粒正长岩;(2)中-细粒正长岩;(3)细晶岩脉。花岗岩阶段的顺序为:(1)中粒淡色花岗岩;(2)中条纹长石细晶岩脉和花岗斑岩岩墙。

以正长岩为代表的过碱性系列,从早到晚为:(1)粗粒含石英正长岩;(2)中-细粒石英正

二叠-三叠纪。在每个岩浆阶段,都有正长岩-花岗岩深成岩系侵位,并伴有稍早的火山对应物。依序侵入的深成岩系从早到晚其岩石的碱度增加,矿物组成显示出相应的规则变化:早二叠世岩系为含斜长石的碱性正长岩和花岗岩,晚二叠世岩系为碱性中条纹长石正长岩和花岗岩,二叠-三叠纪之交则出现过碱性正长岩、石英正长

长岩；(3) 细粒花岗正长岩岩墙。此外，还有过碱性细粒花岗岩呈薄脉(1.5~3.0 cm)产出，不过过碱性花岗岩在岩区的其他岩体中亦有呈较大侵入体产出的。在碱性岩套和过碱性岩套中，占优势的岩石类型是各自的第一期粗粒正长岩(分别占其总体积的 65%和 85%)。

哈里顿诺沃岩体的一个重要特点是出现复合岩墙，包括较早的正长岩-玄武岩复合岩墙和稍晚的细晶岩-玄武岩复合岩墙。它们仅分布在粗粒碱性正长岩中，在碱性淡色花岗岩和过碱性正长岩中缺失，这说明复合岩墙与碱性正长岩阶段密切相关。正长岩-基性岩墙是在正长岩浆阶段的第二期岩浆活动时侵位的，此类岩墙中的正长岩部分与中粒碱性正长岩不能区分。细晶岩-基性岩墙则与细晶岩同时形成。复合岩墙厚 1.5~5m，通常长约数十米。

复合岩墙最特征的是酸性基质环绕着枕状镁铁质包体和团块所组成的构造。包体大小从数厘米到 2~3 米，即使在同一条岩墙中，镁铁质包体与酸性基质的体积比也有相当大的变化。复合岩墙有一些明显特征可作为岩浆混杂作用、混合作用和岩浆呈乳浊体侵入的证据。这些特征包括：(1) 镁铁质包体为圆形和椭圆形，其边缘呈锯齿状、叶状和扇状；(2) 在较大包体的边缘，矿物粒度明显减小，并伴随出现斑状结构；(3) 岩墙的某些地段具有不均匀流动的结构标志，此种地段的包体常显示有塑性应变的证据。

关于哈里顿诺沃岩体的侵位年龄还没有完全确定的数据。岩体侵入早二叠世正长岩并被中侏罗纪火山岩覆盖，这种地质关系表明其侵位时代可能介于早二叠世末到早侏罗世初之间。据我们对全岩和钾长石样品 Rb-Sr 等时线的初步测定，碱性系列的年龄为 $239 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD=7.4, 6 个样品, $I_{\text{Sr}}=0.7040 \pm 7$)，过碱性系列年龄为 $220 \pm 4\text{Ma}$ (MSWD=2.7, 5 个样品, $I_{\text{Sr}}=0.7040 \pm 1$)。这些数据与岩区内其他岩体的放射性年龄(240~250Ma, K-Ar 法、Rb-Sr 法)相比稍微年轻。氧同位素数据表明，年龄的差异可能与过碱性系列侵位过程中局部出现大气降水-热液蚀变有关。最近还获得了岩体中榍石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄，碱性系列为 228Ma，过碱性系列为 192Ma。

岩相学与矿物学

在哈里顿诺沃岩体中，正长岩类和花岗岩类的所有主要变种都是淡色岩石，结构均一。其过碱性正长岩和碱性正长岩外观上非常相似，通常只能在薄片中识别：过碱性岩石中存在富钠闪石和辉石。由于碱性长石晶体构成岩石的主要部分，因此正长岩以柱状结构为特征，花岗岩则为半自形结构。多数岩石尤其是粗粒岩石常存在大量晶洞，晶洞中部分充填了石英和镁铁矿物集合体，有时还有萤石，表明岩体为浅成侵位。

表 1 列出了岩体中主要岩石类型的实际矿物组成。在所有主要岩石类型中碱性长石和石英的总含量占 95%~98%。正长岩中的碱性长石为中条纹长石，碱性花岗岩中的为隐纹长石。长石的 Na/K 比约为 1.2~1.5。含钙的斜长石通常缺失，只有在复合岩墙的混染正长岩中和某些中粒碱性正长岩中才会达到有意义的含量。斜长石的 An 含量为 7%~8%，偶而高达 26%。混染正长岩的镁铁矿物增多，可达 8vol%，这也有助于确认该岩石的混染特性。

碱性正长岩和细晶岩中的镁铁矿物为浅闪石和富铁黑云母，碱性花岗岩中仅有黑云母；过碱性岩石中主要为霓石和钠质闪石，并且从较早的侵入相到较晚的侵入相，其闪石的碱含量增高：粗粒正长岩中为红闪石(具红闪石-钠闪石边)，石英正长岩和花岗岩中为钠闪石-亚铁

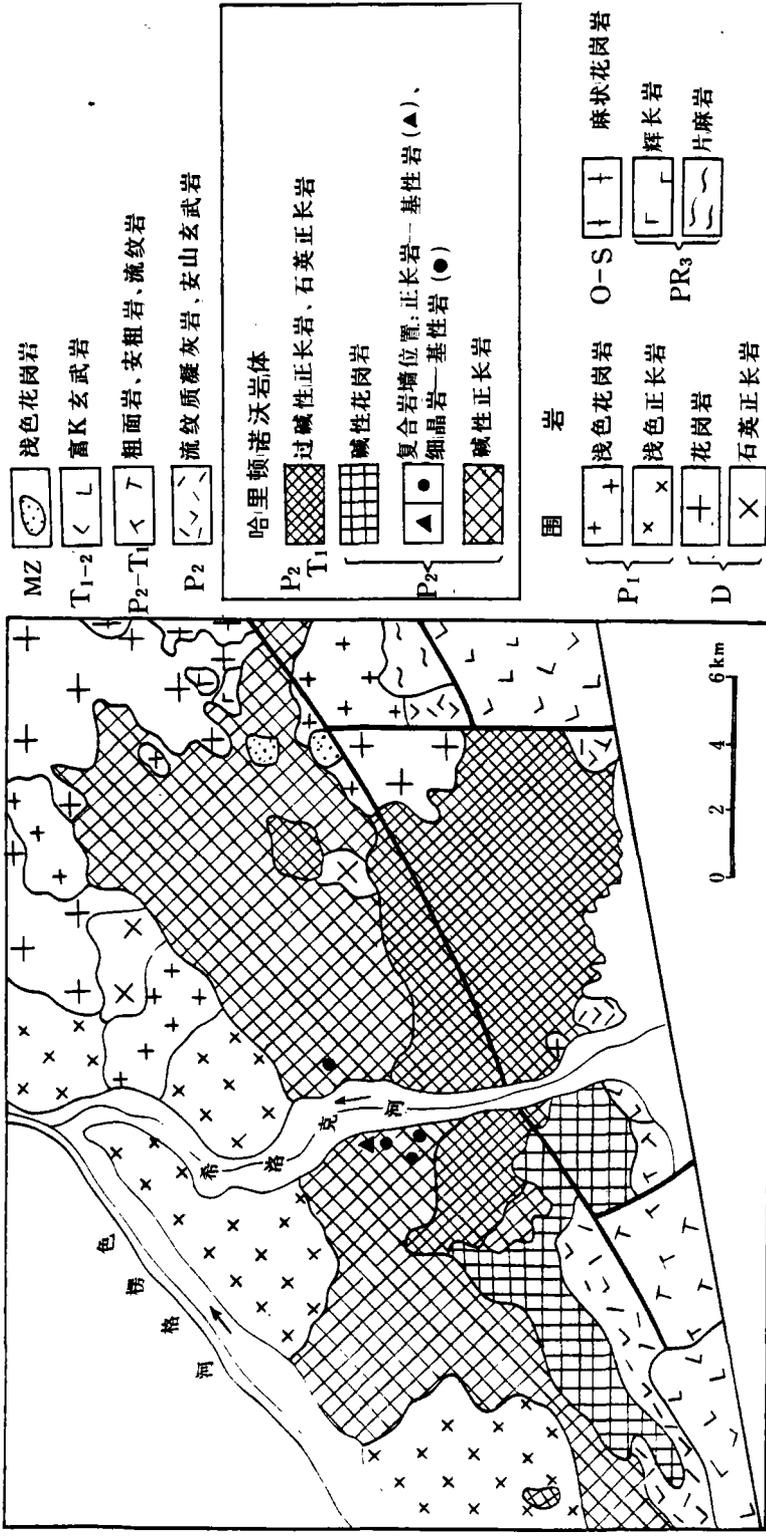


图2 哈里顿诺沃岩体及其与其他深成岩关系地质略图(注意复合岩墙分布)

钠闪石和钠透闪石。粗粒正长岩的黑云母仅呈包裹体产于长石晶体中,并富含 Ti,这正是高碱岩石的一个特征。

表 1 哈里顿诺沃岩体主要岩石的实际矿物组成(体积%)

	钾长石	斜长石	石英	闪石	黑云母	辉石	不透明矿物	副矿物
碱 性 系 列								
一期正长岩	85.3~97.2	0~2.8	0.4~7.6	0.9~3.6	微量~1.5	微量	0.5~1.2	0.2~1(Sph, AP, Zir)
二期正长岩	91.4~96.1	0~2.5	0.8~2.5	1.1~2.1	1.1~2.3	—	0.5~1.5	微量~0.8(Sph, Ap, Zir)
细晶岩	35~38	23~32.5	30~37	0~1.7	1.3~2.1	—	>0.5	微量(Sph, Ap, Zir)
花岗岩	62~75	0~2	20~35	—	0.5~1	—	0.4~1.5	微量~0.5(Zir, Ap, All, Fl)
过 碱 性 系 列								
一期正长岩	84~92	—	1.6~9.5	0.8~4	微量~2	0.8~4.5	微量~1.5	微量~0.6
二期石英正长岩	82~85.5	—	6.5~11	2.5~3.5	0~1	3~3.5	0.8~1.5	<0.5(Zir, All, Ap, Sph)
花岗正长岩	82	—	13	2	—	2.5	0.5	微量(Zir, Ap, Sph)
花岗岩	65~75	—	19~27	2~3	微量	2.5~4	0.5~0.8	<0.5(Zir, All, Sph)

注, Sph-榍石 Ap-磷灰石 Zir-锆石 All-褐帘石 Fl-萤石

由于镁铁质岩浆与长英质岩浆之间相互作用程度的差异,复合岩墙中基性岩的成分是变化的。大的镁铁质团块由斜长石、闪石、黑云母和少量磁铁矿组成,其中心部分仍保留有岩浆结构,在有些地方,闪石中包裹有熔蚀的单斜辉石颗粒。即使在同一块薄片矿物成分也有变化。与角闪石一起出现的富钙斜长石(斑晶核部 An_{62} , 边缘为中长石)可与较晚的较钠质斜长石(An_{15})及无疑是次生的阳起石质角闪石并存。钙质斜长石和角闪石是镁铁质岩石的原生矿物,较钠质斜长石可能是在镁铁质岩石已大体结晶时由渗入其中的受混染酸性液体所形成或是由受混染的镁铁质液体结晶形成。富 Ti 贫 Mn 的黑云母显然也属于初始矿物组合,这样的黑云母在大型镁铁质包体中部经常见到,它们与包体边缘的黑云母及包体周围正长岩内的黑云母有明显差异。因而可以设想,同期的镁铁质岩石的初始矿物有斜长石(斑晶 An_{60-65} , 基质 An_{40})、角闪石、次透辉石、黑云母和磁铁矿。

岩石化学与岩石成因

哈里顿诺沃岩体碱性和过碱性系列岩石的化学特征是碱含量很高(正长岩为 11~13wt%,花岗岩为 9~11wt%)。碱性系列中 K 稍高于 Na,过碱性系列则相反。所有岩石的碱性指数均接近于 1;碱性岩石为 0.84~0.98,过碱性岩石为 1.01~1.09。其他化学特征为贫 CaO、Sr 和富集 Nb、Ga、K/Rb,说明该岩体与 A 型花岗岩类具明显的亲缘性。根据 Eby(1990)对 A 型花岗岩的构造环境分类,这些岩石相当于大陆裂谷带中的花岗岩类,在岩石化学、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值和侵位年龄上它们与奥斯陆地堑中的正长岩类相似,也与苏丹的 Ras ed Dom 和 Sultaniat 杂岩相似。

1. 碱性系列(Kudan 岩套):碱性系列以三种岩石类型为代表。(1) 早期粗粒正长岩(一期正长岩);(2) 中粒正长岩(二期正长岩);(3) 黑云母淡色花岗岩。粗粒正长岩有两个样品具弱正铕异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.08 \sim 1.19$),暗示存在着堆晶长石,但这两个样品与粗粒正长岩其他样

品相比,主要元素和其他微量元素都没有明显差异。

尽管一期正长岩和二期正长岩的 SiO_2 含量相近,但后者一般含有稍多的 TiO_2 、 FeO 、 MgO 和 CaO ,并且较富含 Rb 、 Li 和稀土元素(二期正长岩 $\Sigma\text{REE}=208\times 10^{-6}$,一期正长岩为 $125\sim 185\times 10^{-6}$),此外,二期中粒正长岩的稀土丰度型式显示小而引人注目的负铈异常。所有这些特征表明,二期正长岩浆可能有由几种机制产生:一期正长岩熔体的晶体-液体分离作用(或一期正长岩的部分熔融作用),或一期正长岩浆中加入一些镁铁物质(混染岩浆随后可能发生分离作用)。前已述及,二期碱性正长岩形成时伴随有复合岩墙侵入,这意味着镁铁质岩浆与正长岩浆之间的相互作用可能确实出现过。

为检验这些假说,进行了地球化学模拟。为此,必须确定任何混合过程中镁铁质端元最可能的成分。显然,正长岩-镁铁质复合岩墙中同期的镁铁质岩石提供了初步的近似值。不过,即使最轻微混染的同深成微辉长岩,其矿物组成也曾受到复合岩墙中长英质部分某种程度的影响,为了估计镁铁质岩浆在贯入时的原始成分,有必要作一些解释。众所周知,在岩浆混合过程中镁铁质岩石的某些元素较其他一些元素更易迁移,它们在混染岩石中不同的浓集趋势就反映了这种差异活动性。不过,那些混染最弱的微辉长岩包体的中心部分,其化学成分与原始镁铁质岩浆很可能没有多大差别。例如产在正长岩-玄武岩和细晶岩-玄武岩两种复合岩墙中的此类大包体,它们中心部分的稀土元素丰度是相似的,而与周围的正长岩、细晶岩则有明显差异。大多数其他微量元素也是如此。据上述可知,复合岩墙中两种不同性质岩浆之间的化学反应并没有使微辉长岩包体混染最弱部分的组分浓度发生大的改变,理所当然,这类样品的成分与初始基性岩浆非常接近。

在我们的模拟计算中,用同深成辉长岩一件样品的成分代表基性岩浆,用早期粗粒正长岩一件样品的成分代表原始正长岩浆。模拟计算是用最小二乘法拟合 10 种主要氧化物的数据,接着用某些微量元素和稀土元素进行检验。计算结果显示,由 $\sim 90\%$ 粗粒正长岩与 $\sim 10\%$ 镁铁质岩浆简单混合就能得到与中粒正长岩实际成分匹配良好的结果,这一结果并不是独一无二的。二期正长岩也可能由一期正长岩经结晶分异作用移出约 $15\text{wt}\%$ 的钾长石所生成。但很难设想仅有钾长石分离而没有伴随任何致密镁铁相的分离,因而第二种方案不太可能。

中条纹长石花岗岩的化学成分在哈克图解上显示特有的趋势,即 SiO_2 与所有主元素均呈负相关,这主要是由石英含量增加和镁铁矿物含量稍许减少所引起。与正长岩相比,这些花岗岩明显富集 Rb 、 Zr 、 Nb 、 Y 和轻稀土,而镁铁组合、 Sr 、 Ba 、 Li 、 Ti 和 P 的含量偏低,并以明显的负铈异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.22\sim 0.32$)为特征。花岗岩是碱性侵入系列的晚期产物,加之所有上述化学特征,证明这些花岗岩代表富集高场强元素、稀土、碱质和 SiO_2 的残余熔体。花岗岩构成较大的侵入体,显示淡色白岗岩的特征,不含钙质斜长石,这些都表明该残余熔体的母岩浆是演化的正长岩浆,而不是存在于复合岩墙中的小规模混染正长岩。淡色花岗岩岩浆既可能由碱性正长岩浆通过晶体-液体之间的分离作用形成。也可能由粗粒碱性正长岩部分熔融所形成。用地球化学模拟对这两种可能性进行检验,二者的计算结果非常相似。

2. 过碱性系列(Kunalei 岩套):哈里顿诺沃岩体中的过碱性系列主要以第一期侵入的粗粒含石英正长岩和第二期侵入的中-细粒石英正长岩为代表,而更晚的花岗正长岩和过碱性花岗岩仅呈细脉产出。这些岩石在哈克图解上的分布趋势与结晶分异作用相符。若此三期侵入产物的体积比为 $85:14:1$,那么结晶分异过程看来是合理的。在过碱性系列的岩石中,

着 SiO_2 的增加, MgO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Ba 相应减少, TiO_2 、 Sr 也稍有降低。 SiO_2 还与 Rb 、 Li 、 Zr 、 Nb 、 Y 、 FeO^*/MgO 具相关性, 与 K/Rb 为负相关。从较早的正长岩到较晚的石英正长岩, 稀土元素总量增高, 且负 Eu 异常更为明显, 也意味着分异机制。 Eu/Eu^* 与 Ba 、 Sr 、 Rb 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 的有关图解大体上也支持这一推论。这些特征表明碱性长石的分离是重要的, 与此同时, SiO_2 与 MgO 、 CaO 、 FeO^*/MgO 呈负相关, 表明还有镁铁矿物的分离。对这种结晶分异假说进行地球化学模拟计算显示, 看来合理的分离组合以钾长石为主, 还包括少量闪石、黑云母及 Fe-Ti 氧化物, 可以形成较晚的石英正长岩, 尽管 Sr 、 Ba 研究结果与此不完全一致。

在哈克图解上, 呈岩墙产出的过碱性花岗岩与花岗正长岩的成分点延续了上述分异趋势。它们与第二期石英正长岩相比, 稀土总量降低, 负 Eu 异常明显, 说明在残余熔体形成过程中, 与镁铁矿物及长石的分离一道, 还发生了副矿物分离, 而主元素及微量元素的质量平衡计算结果与上述假定颇为一致。通过移出钾长石及少量其他矿物相, 可以获得过碱性花岗岩熔体的模拟成分。

综上所述, 哈里顿诺沃岩体的岩石化学特征表明, 碱性和过碱性两个系列的岩浆都具有正长岩的成分, 分别相当于碱性和过碱性粗粒正长岩, 限定各岩系演化的主要机制很可能是晶体与液体间的分离作用。液相线矿物主要有碱性长石、闪石和 Fe-Ti 氧化物, 而辉石、黑云母、榍石、磷灰石、褐帘石及锆石的分离则不太重要。在碱性系列形成的早期, 镁铁质熔体贯入到正长岩浆房中, 形成了有限混染的岩浆。

碱性与过碱性系列间可能的成因联系

在蒙古-外贝加尔岩区, 碱性和过碱性系列的正长岩和花岗岩不仅一起构成了哈里顿诺沃岩体, 还一起构成了其他许多岩体。这种空间上的密切联系决非偶然。此外, 二者在外貌、岩石学、矿物学及岩石化学上都具有相似性, 看来二者无疑存在成因联系。

为了考察这种成因联系, 对前述定义为此两系列母岩浆的碱性正长岩和过碱性正长岩进行了化学对比。当 SiO_2 含量相近时, 与碱性正长岩相比, 过碱性正长岩含较高的 Rb 、 Li 、 Zr 、 Ga 和较低的 MgO 、 CaO 、 Sr 以及较低的 K/Rb 、 Eu/Eu^* 比值, 但 Ga/Al 比值较高。过碱性正长岩的稀土总量较高, 负 Eu 异常明显 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.47 \sim 0.59$), 而碱性正长岩却几乎不显示负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.88$)。

模拟计算结果表明, 约 50wt% 的钾长石、闪石及某些副矿物从碱性正长岩浆中分离, 可产生相当于过碱性正长岩成分的残余熔体。不过, 碱性和过碱性系列两者的深成阶段在时间上被大规模双峰式火山活动所分隔, 因而过碱性正长岩熔体更可能是由构成碱性系列主体的已固结正长岩经部分熔融所形成。对这一假设用 Rb 、 Ba 、 Sr 进行了模拟检验, 这些元素在部分熔融过程中的习性是优先富集于花岗岩类的某些主要矿物中。计算表明, 当碱性正长岩熔融约达 20~30wt% 时, 可以产生过碱性正长岩成分的部分熔体。

碱性正长岩浆的可能来源

对哈里顿诺沃岩体的研究确定, 至少曾有两期镁铁质熔体贯入碱性正长岩浆中, 表明正

长岩浆房与玄武岩岩浆房曾长时间共存。野外资料以及正长岩低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.7040±7)使得有必要首先讨论正长岩是否可能直接由玄武岩岩浆派生。

碱性正长岩与同期基性岩的稀土丰度对比表明,前者单纯由后者结晶分异形成的假说是大不可能的。正长岩具微弱的负Eu异常,这就排除了玄武岩浆中曾发生广泛的斜长石分离作用(假定氧逸度不是极高)。然而,没有斜长石和镁铁矿物的大量分离,也就不可能从玄武质母岩浆中派生出其长石几乎全是碱性长石的熔体。假如玄武质岩浆分异作用发生在深部位(8~10 kbar 或更大),应该主要分离出橄榄石、铝质斜方辉石、尖晶石、单斜辉石和石榴石,那么正长岩熔体不显负Eu异常就得到了解释。但在这种情况下,残余熔浆中就应该富集稀土元素,尤其是轻稀土元素。而哈里顿诺沃岩体中的正长岩和镁铁质岩石两者的轻稀土和重稀土都没有明显差异,并且两者其他痕量元素的对应关系也与分离作用模式不符。例如,Ba元素应聚集在残余熔体中,但与此相反,镁铁质岩石要比正长岩更强烈富含Ba。

第二种模式认为,A型花岗岩岩浆由熔体亏损的下地壳物质部分熔融所产生。关于这一点,应该考虑到巨大的蒙古-外贝加尔岩区的许多岩体中都有大量碱性正长岩,且整个岩区此种岩石显示出稳定的矿物学和化学特征,这就有力地暗示,决定正长岩浆产生的关键是岩浆生成时特定的物理条件,而不是特定的源岩。

实验表明,当压力大于10 kbar时,花岗岩部分熔融能够产生 SiO_2 较低的初始熔体,若是在干的和水不饱和的体系中,熔体中标准矿物长石的含量将增高。在压力为15 kbar和 H_2O 为5wt%的条件下, SiO_2 为74wt%的白云母花岗岩部分熔融,可以产生正长质的初始熔体。这就说明某些正长质岩浆可能是由增厚地壳的底部经部分熔融而产生。然而,这一模式有很大的局限性,即它是以不含镁铁组分的人造花岗质体系的实验资料为基础的。在高压条件下,富含Ca、Mg、Fe的深部地壳源岩如中性片麻岩的熔融作用,产生的残晶将是单斜辉石和石榴石,结果使 SiO_2 富集在部分熔体中,成分为花岗质而不是正长质。另外,哈里顿诺沃岩体中的正长岩初始Sr同位素比值低,要求其任何地壳源区都具有低的Rb/Sr比值,且很可能亏损Rb(相应地亏损K)。这些不相容元素的富集大概恰在熔融作用之前,或与岩浆同时产生。

基于上述讨论,应当考虑另一个可能的模式,即地壳酸性熔体与地幔玄武质熔体的混合作用以及随后混染岩浆的分离作用。

由于酸性端员的成分是未知的,对基性端员也只推断出颇为近似的成分,因此,质量平衡计算仅仅是探索在理论上能否通过岩浆混合机制生成哈里顿诺沃岩体的碱性正长岩浆,而不能对混合过程进行定量估算。假定这两种大不相同的熔体成分是:酸性熔体具有A型花岗岩的平均成分,镁铁质熔体具有外贝加尔西南部早二叠世亚碱性玄武岩的平均成分,该玄武岩与哈里顿诺沃岩体中最轻微混染的同深成镁铁质岩石在化学成分上相当接近。获得最佳拟合的计算方案:80wt%玄武岩与20wt%花岗岩混合并随后发生分离作用,析出单斜辉石(12%)、橄榄石(3%)、拉长石(22%)和Fe-Ti氧化物(6%);残余正长岩熔体的比率为57%,其成分为: SiO_2 64.35%、 TiO_2 0.61%、 Al_2O_3 17.53%、 FeO^* 2.82%、MnO 0.16%、CaO 0.72%、 Na_2O 5.54%、 K_2O 4.71%,这与哈里顿诺沃岩体中碱性正长岩的成分十分接近。计算结果显示,此类岩浆混合及分异机制是碱性正长岩浆生成的另一种可能性。与此同时,在模式所取两种母岩浆钾含量可以接受的范围内,计算的残余岩浆成分总是贫K(约低1.7wt%),暗示按照该模式还需要补充额外的K组分。

这样,碱性正长岩浆生成的下述两种模式看来是可取的:(1)非放射成因 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 较低的深埋地壳物质的部分熔融;(2)亚碱性玄武岩浆与少量下地壳酸性熔体混合以及随后混染岩浆发生分离作用。按照这两种模式,在岩浆形成时或形成之前,还必要有来自地幔的钾质及其他不相容元素(尤其是 Rb) 的加入。

哈里顿诺沃岩体的构造环境资料也支持幔源物质参与了正长岩浆生成的想法。前文曾强调指出,该岩体位于由数百个碱性花岗岩及正长岩-花岗岩岩体构成的大型碱性岩区之内,并且是若干裂谷花岗岩带构成的巨型系统的一部分。在整个岩区中,花岗岩与正长岩的矿物成分和化学成分相当一致,而与局部的特定围岩之间没有显示任何相关趋势。这些特征表明,区域性酸性岩浆的生成乃是一些强有力的大规模作用过程所引起,而这些作用过程又最终起源于地幔。花岗岩类与亚碱性玄武岩在时间和空间上的联系表明,地幔不仅是形成岩浆的热源,而且也是规定花岗岩类某些化学特征的物质来源区。

结 论

根据哈里顿诺沃岩体的构造环境、矿物学和化学特征推断出岩体的复杂形成过程,该过程的主要阶段见图 3。

随着碱性正长岩浆的侵入岩体开始形成。在该岩浆结晶作用的不同阶段,少量玄武质熔体贯入到岩浆房中,形成含有约 10wt% 原始镁铁质组分的混杂岩浆。而碱性花岗岩浆显然产生在较深处,或是由初始正长岩浆经晶体-液体分离作用形成,或是由已固结碱性正长岩经部分熔融形成。

先存的碱性正长岩发生约 25% 的部分熔融,生成过碱性正长岩浆,并沿碱性正长岩浆早先上升的通道侵入,标志着岩浆作用过碱性阶段的开始。过碱性正长岩浆经结晶分异,依次产生石英正长质和花岗质残余熔体。

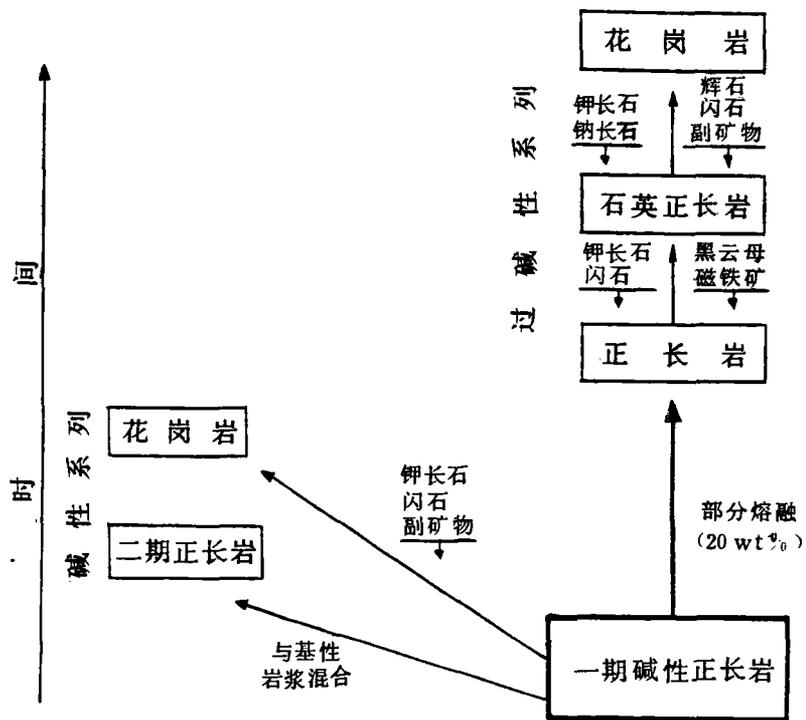


图 3 哈里顿诺沃岩体形成的岩浆演化序列。熔体份数根据地球化学模拟估算。

碱性正长岩浆可视为哈里顿诺沃岩体所有岩石的母岩浆,这种母岩浆的真实成因并没有完全解决,但很可能是由深埋的酸性物质经部分熔融生成,或是由混染熔体经晶体-液体分离作用生成,而混染熔体又是由约 80wt%亚碱性玄武岩浆与 20wt%下地壳酸性(花岗质)岩浆混合形成。按照这两种模式,正长岩浆的形成显然伴随有来自幔源的不相容元素加入,主要是钾的加入。

译自《The Journal of Geology》,1995, vol. 103, No. 2, p. 127—145

陈瑞保 译 马大铨 刘先智 校

世界级贵金属和贱金属矿床 的定量研究

D. A. Singer

摘要 迄今全世界已发现金 19.3 万吨,其中 62%产于四个主要产金国,68%产于四种主要金矿床类型。银已发现 174 万吨,55%产于四个主要产银国,45%产于四种主要银矿床类型。铜已发现 15.2 亿吨,56%产于四个主要产铜国,88%产于四种主要铜矿床类型。锌已发现 7.13 亿吨,铅已发现 3.49 亿吨,50%产于四个主要产铅-锌国,70%产于四种主要铅-锌矿床类型。

至少 74%的金、银、锌、铅和 44%的铜是产在平均品位高于其各自中值品位的矿床中。低品位矿床所含总金属量少于高品位矿床。矿石总吨数是矿床中所含金属量的最好预测值,每种金属总量的 96%以上存在于中型以上规模的矿床中,而在 10%(矿床数)的最大矿床中金属量占每种金属总量的 47%~79%。

本文依据矿床所含金属量将世界级矿床定义为 10%(矿床数)的最大矿床,这类矿床中金占全部金的 86%,银占全部银的 79%,铜占全部铜的 84%,锌占全部锌的 71%,铅占全部铅的 73%。这些巨型矿床至少含有 100t 金、2400t 银、2Mt 铜、1.7Mt 锌、1Mt 铅。

产在地壳中的矿床十分稀少,大的矿床特别稀少。本文阐明,只有非常大的矿床才会对供给有显著影响。

绪 言

当有人宣布又发现一世界级矿床时,人们都迫切想知道这样的矿床可能有多少,称其为“世界级”的根据何在,它们主要产在哪些国家,对某一金属而言主要是哪些矿床类型,其品位及所含金属量是多少等等。本文试图利用统计资料就贵金属和贱金属 Au、Ag、Cu、Zn、Pb 回答这些问题。