

## 前寒武纪大气圈、水圈和岩石圈的基本发育阶段——金属成矿的基础

### 岩石发育的基本阶段

对前寒武系地层含矿性有决定影响的长期沉积过程,与海洋和大气的演化特点密切相关。成层岩石圈在前寒武纪地质发展史中长期的增长,都是借助于来自地幔深部的火山物质,来自地盾与陆地部分的陆源物质,以及来自海洋与大气的化学成因物质。作为地圈上部的成层岩石圈、水圈和大气圈,在整个前寒武纪时期内,也正如在现代一样,构成一个复杂而又相互关联的体系。这个体系在时间上的变化决定于表层均衡的演化,个别块段之间物质交换的动力状况,生物的演化,以及地球深部的影响作用。

据放射性测定的数据,最老的沉积岩年龄可达30~35亿年。那时保存下来的不够完整的少量残留物,也都经过不同程度变质作用的触动。

地壳发育的主要趋势在于喷出岩露头面积逐步减少,沉积岩面积逐步增大(图6)。已经查明了大陆沉积堆积区岩石成分以及沉积岩与火山岩比例的演化总趋势(图7)。在前寒武纪早期(35~26亿年),碳酸盐岩很少,主要是白云岩;古生代则以有机成因的灰岩为

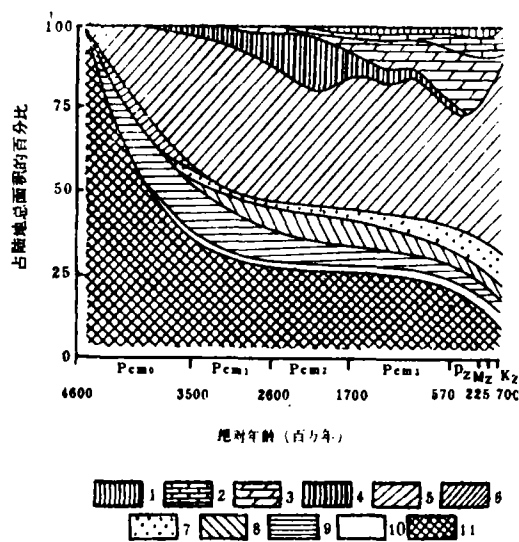


图6 大陆剥蚀区最主要岩石类别在时间上的变化示意图

1—蒸发岩类; 2—灰岩; 3—白云岩; 4—碧玉铁质岩; 5—页岩及其相当的变质产物; 6—一次生石英岩; 7—石英岩; 8—长石砂岩; 9—杂砂岩; 10—大陆喷出岩; 11—基性为主的水下熔岩

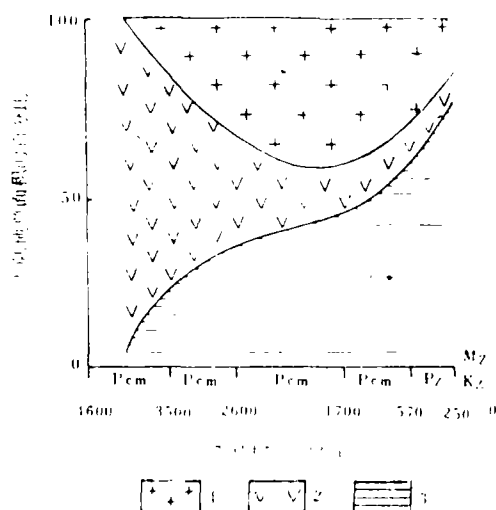


图7 大陆沉积堆积区沉积岩与火山岩的岩石成分和比例演化示意图

1—花岗岩类与正片麻岩; 2—基性为主的喷出岩; 3—沉积岩

主。据研究,在地圈外层发育史上最有影响的可能要算元古代(20~14亿年)。和这一时期有关的是:地台面积显著加大;生物沉积过程加强(藻灰结核与叠层灰岩);大气中碳酸气分压力降低,氧的分压力明显增大,以致地表的氧化过程加强;海水中硫酸盐离子浓度加大,重碳酸盐和碳酸盐离子浓度降低;从碧玉铁质岩为主的碳酸盐堆积过渡为以白云岩为主的碳酸盐堆积,出现了第一批蒸发岩类。

H.M.Српачов把地球发育史中的沉积成岩作用分为四个阶段,其中前三个阶段在前寒武纪,最后一个阶段在泛生代。

**初始阶段(太古代之前)** 这个阶段在类型上近于火山沉积型,但在远离喷溢中心的地段则是温湿型。最初的大气与海洋的化学特征决定着沉积成岩作用的基本特点。大气成分主要是混有水气的 $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ 和少量惰性气体。由地幔物质的各种气体产生的原始水圈为酸性,本身可以说是 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{H}_3\text{BO}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 的溶液, pH值近于1~2。这种原生水还溶有 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CH}_4$ 以及 $\text{CO}_2$ 等气体,但不存在硫酸盐或者只有极少量,因为缺少使 $\text{H}_2\text{S}$ 氧化的游离氧。这些条件使水圈的酸性溶液中和。硅酸盐遭到破坏,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 和其它金属阳离子从中被带出并结合为氯化物、氟化物和硼酸盐。在大气中的 $\text{CO}_2$ 对第一批岛屿表面的作用下,富含K、Na、Ca、Mg和二氧化硅溶胶的火山岩发生风化。酸性大洋水中的碳酸盐与游离酸进行反应,转变为K、Na、Mg、Ca、 $\text{H}^+$ 的氯化物和水,大洋水的酸度降低。中和过程导致大洋水更多地具有氯化物型溶液的性质。这种水的特点是大量富集Al、Fe和其它重金属的氯化物,与现代火山的热热水溶液非常相似。氯化水失去了已溶的碳酸盐,因为其中只要存在少量强酸,碳酸盐很快就会破坏并向大气释出 $\text{CO}_2$ 。由于这个原因,没有碳酸盐类的沉淀。

在这第一阶段形成的沉积物可能是溶岩和各种疏松凝灰物质。此外还有一般类型的陆源沉积物。化学沉积方式产生的有二氧化硅、铁、铝、锰的氯化物和重金属硫化物。铁与锰的运移和沉积完全以低价形式进行。

对地圈发育和岩石形成这一阶段的描述,所根据的是一般的地质认识和物理-化学概念。这个阶段在前寒武纪的岩石方面没有留下痕迹。但如果上述的种种条件在地球发育的早期确曾存在,那么就会为沉积地层发生金属成矿富集提供前提。随后,当这种地层成为变质作用地带之后,就可能是硫化物型金属矿床的源生地。这个阶段延续的时间长度完全不清楚,有人大致估计为5亿年左右。

**太古代阶段** 这个阶段始于光合作用产生以前,特点是硅铝层增长显著。出现地台区与地槽区,换言之,开始产生以后地球发育史上所确认的那些构造单元。大气圈与水圈的化学成分发生重大变化,达到发育的第二期(参见表4)。游离强酸最后的痕迹在大洋中消失,出现了碳酸盐累进堆积的可能。大气圈与水圈 $\text{CO}_2$ 的充斥以及海洋pH值的降低造成碳酸盐类大量溶解。大洋水从早期的氯化性质变为氯化-碳酸盐化。在这种条件下发生 $\text{NaCO}_3$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCO}_3$ 以及 $\text{FeCO}_3$ 和 $\text{MnCO}_3$ 的堆积。主要在离岸线较远的地方,二氧化硅、铁、锰继续积聚。有人认为,在这个阶段光合作用还不存在,这意味着植物与动物的区分还没有完成,可见数量的游离氧也不存在。考虑到这个阶段最典型的化学成因岩石的物质成分,有人就把这一阶段称作白云岩-碧玉铁质岩单期沉积作用阶段,同时伴随多价元素低氧化形式的原生沉积。

**元古代-显生代** 上部地圈和沉积成岩作用的这一发育阶段遗留下来的地质资料甚多,据此可以较有把握地确定它的发展过程。在这个时期,地壳已经具备广大的硅铝层,而后者仍继续增长。受到褶皱作用的地槽已经十分明显,地台则借助于地槽而逐步加大。在广阔

的地台大陆范围内,气候分带已经确立,促进了岩石成因类型的区分。因此出现了岩石成因上的干燥型与冰川型,二者均在元古代地层和里非期地层剖面上留下了痕迹。与温湿、干燥、冰川等表生类型的岩石成因相比,火山-沉积的成岩作用就其本身造成的凝灰物质和化学成岩物质来说,日益退居次要地位。光合作用的产生导致大气圈出现游离氧,同时 $\text{CO}_2$ 含量减少。水圈的 $\text{CO}_2$ 含量同样渐减,但 $\text{O}_2$ 富集。所有这些都急剧地改变了大洋的水化学面貌。氧化-还原势 $E_h$ 累进增加, pH值的增长接近于中性。随火山喷气而进入海洋的自然硫与硫化氢,在氧的介质中转变为硫酸盐形式。

随着水圈发生的化学变化,许多金属在沉积成岩作用中的迁移也发生变化。例如铁、锰、铝、铜、镍、钴和其它一些金属,开始较少以已溶物的形式而是更多地以悬浮物的形式移动。铁、锰、铜和其它多价元素从溶液中沉出的方式也有了改变。在氧的介质中,它们开始以高级氧化阶段的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 等形式沉淀下来,沉积作用的低氧化方式为过氧化方式所取代。但这些元素的沉出方式本身还是多种多样的。在近岸的浅水区,铁、锰和其它金属的氧化物、氢氧化物在底部堆积。在更深层,由于有机物分解的影响,沉积开始具有还原性,氢氧化物形式转变为低氧化形式并构成进一步很少变化的碳酸盐、硅酸盐和硫化物。少量的有机物进入沉积岩,成为其中一种固定的组分。从主要特征来看,有人把这一阶段称作白云岩-碧玉铁质岩两期过氧化-低氧化阶段。

**泛生代阶段** 沉积作用的这个阶段与前寒武纪无直接关系,其特点是岩石成因的所有类型发育。生物对海洋与大气圈的全部地球化学作用极大地加强。海水的 $E_h$ 与pH值急剧增加,并开始呈碱性。大洋水由氯化-碳酸盐化-硫酸盐化变为氯化-硫酸盐化。多价元素只以氧化程度更高的化合物的形式在这种水中存在。根据上述的主要特征,有人把这个阶段称作炭质-碳酸盐-卤素的低氧化-过氧化两期阶段,不仅间接地(象以前那样)、而且直接地受到生物的强烈影响。

以上划分的几个阶段之中,实际上只有最后两个阶段才在地壳的岩石发育史上保持有本身的记载。对南非斯瓦齐兰岩系剖面(这是在岩石学方面最古老的、保存得最完好的剖面)的详细研究表明,它相当于以上划分的沉积第二阶段。例如,斯瓦齐兰岩系最古老的昂维尔瓦赫特群是由强蚀变的基性熔岩与酸性熔岩(石英斑岩)互层组成,其中各自还有从属的粘土片岩和条带状含铁石英岩夹层。该岩系中较年青的是无果树岩群,其组成则是条带状石英岩与见有石墨物质和古生命迹象的片岩的互层。上部的莫吉斯岩群则包括若干灰岩层。这几个岩群的年龄都超过31亿年,说明前寒武纪的最早期已经发生了光合作用和碳酸盐岩的沉积。南非的布拉瓦扬岩系可能在地层划分上与无果树岩群相当。在这个岩系中发现了含石墨的灰岩和石层构造。由此可以推论,前寒武纪的成矿沉积作用是在低氧化-过氧化白云岩-碧玉铁质岩沉积形成的条件下,在很长的时期内发生的。

在经过不同演化过程的许多前寒武纪铁矿建造的剖面上,已经查明了所有已知的各种程度的氧化相,即:含石墨物质和黄铁矿的硫化相,含绿泥石的硅酸盐相,含菱铁矿的碳酸盐相,以及含赤铁矿和磁铁矿的过氧化相。在多数情况下,所有各氧化相都反映了原生的沉积条件,只有个别情况才反映次生的成岩改造作用或变质作用。因此可以说,在年代久远的前寒武纪,铁(锰及其它元素)的化合物是在海洋有机物新陈代谢所决定的不同氧化-还原条件下沉出的,也就是说,在前寒武纪一个持续时间极长的时期内,曾经存在过沉积蓄水盆地,其中还有 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的富集区。这些富集区的分布,特别是在封闭的蓄水盆地之中,带有分层的性质,同时在海的光亮部分为含氧带,靠近底层则是硫化氢带。

目前暂时还不能确切地构拟出前寒武纪海的古化学状况。但从总的物理-化学和生物学的

认识出发,只能设想前寒武纪早期含氧带、碳酸带与硫化氢带之间的比例是以后两者为主,而含氧带是随着地质年代的推移才逐步夺得更大的空间,直到现代实际上占据了整个大洋。在这个时期内,大洋中始终进行着具有光合作用能力的有机体和微生物之间复杂的生物与化学斗争,光合作用有机物可以制造游离氧,微生物可以引起硫化氢与碳酸的发酵。这种发酵现象决定了除硫作用并产生一部分与其它非有机成因的来源相比(火山作用、变质作用,等等)更多的 $\text{CO}_2$ 。

前寒武纪海存在不同的氧化带,对于化学元素在更大范围内的运移和多种形式的沉出起了促进作用。比如说,硫化氢带有利于多价金属的强烈移动,而且是许多亲铜元素沉出的良好地球化学屏障,例如:含铜砂岩中的铜,层状矿床中的银、锌、铅,沥青岩中的铀。碳酸质的水同样有助于元素强烈运移并以碳酸盐的形式固定下来。含氧带发生的运移与沉积则与现代海洋的条件相同。

这就是说,在漫长的前寒武纪时期内,沉积作用过程在不同程度上为许多金属在沉积岩层的富集提供了现实的前提。有的地方即由这种富集产生沉积矿床( $\text{Fe}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Cu}$ 等),有时只是使岩石富含某些金属,生成产矿岩层,之后在变质作用和再生作用等次生叠加过程中成为造矿元素的来源。

从上述情况应当引出一个公认的结论,即生命活动对前寒武纪化学元素运移的影响是逐步加大的。按现有的资料判断,前寒武纪早期就已经发生了生物成因有机物的石化作用,并以强变质岩中石墨夹层的形式和石板片岩中含炭物质的形式保留下来。据美国地质学家的计算,仅仅北美前寒武纪的一个格伦维耳建造的有机炭含量,就要大于世界全部煤矿的含量。

有机物在前寒武纪的埋藏条件往往是很有利的,因为缺乏或完全没有微生物的消蚀破坏作用。目前已知的无数事实证明单细胞自养生物和真正的海藻在前寒武纪海中的作用巨大。在前寒武纪晚期,海中发生相当有力的生命活动不仅来自浮游生物,而且也来自底栖生物,由它们产生大量的有机物。

在前寒武纪中、晚期的所有剖面上,都见有炭质岩和沥青岩。它们在早前寒武纪的岩石中也有发现(北美的索乌坚建造,南非的斯瓦齐兰岩群)。在加拿大地盾前寒武纪地层的休伦系岩群见有许多炭质沉积层,其中甚至还有厚达2米的无烟煤状的岩石。昂加伐的铁白云岩(年龄大于20亿年)中存在如此大量的有机物,以至富含炭质的岩石可作为取暖的燃料。经过研究证明,这种燃料燃烧释放的热量与褐煤相等。

波罗的地盾范围内的卡累利阿建造,广泛分布有含炭的沥青粘土页岩(伊曼德腊-瓦尔祖格岩系,贝辰加-库钦岩系)。在卡累利阿,发育有一种由石墨构成的无烟煤状的岩石,即半石墨。半石墨共分两种:一种含炭90~94%,以薄夹层状产出;另一种叫作半石墨无烟煤,本身是暗灰色的岩石,有明显的分带性,含炭60~63%,以厚达2米的水平层状产出。

含炭岩石广泛分布于乌克兰晶质地盾的前寒武纪地层,所见的层状石墨矿床均赋存于强变质岩。在克里沃罗格岩系的上部有相当厚的一层(200~400米)含炭的绢云石墨片岩。乌拉尔南部,哈萨克斯坦,戈尔内-朔里亚,萨扬东部以及萨扬阿尔泰等地的前寒武纪地层都见有炭质层和石墨层。

在炭质层中有一段包括寒武纪、奥陶纪和志留纪的很长的地层缺失。只是到泥盆纪才出现借助于裸蕨类植物群产生的湖成煤矿床,不过为数很少。有人认为,在远古的某个时期,生源条件十分有利于有机物的堆积而且几乎普遍存在于浅海区。这个意见是与下述情况相一致的,即前寒武纪各种各样岩石成分的沉积层中均见有以分散的或积聚的有机物形式所含的沥青质。因此,前寒武纪促成可燃矿产堆积的相的条件,在以后的地质时代没有重复出现。

前寒武纪有机物积聚的最典型代表物就是半石墨。认为半石墨是湖成的论点恐怕并不正确。从整体来看,前寒武纪海藻煤的成因应该与更年青的腐泥煤的成因有很大区别。半石墨及其相同的类煤岩的发育,显然主要借助于前寒武纪海大量的浮游生物。如果考虑到石墨-含炭物质是与黄铁矿密切共生,就可以设想有机物的沉积大多发生在硫化氢的环境下。这种环境在前寒武纪海的不同深度常常出现,而其本身又是硫化氢发酵作用的产物。有利于有机物堆积的一个因素就是消蚀物和破坏物的数量很少,它们由低级形式开始的演化发育是很晚以后的事,大概是古生代的前半期。在古生代初期,海藻类浮游植物群看来已不可能为大量的炭质堆积提供足够的材料。

虽然在前寒武纪的不同时期发生了有机物的大量堆积,构成了厚层和薄层,但更大量的已经死亡的浮游植物机体以分散状态进入沉积岩。从前寒武纪海水中发生了金属的积聚,出现了古老的产矿岩层。

有机体在生物圈演化过程中最重要的地球化学功能,在于可以把分散在海水中的许多化学元素积聚起来。有人就把它称为积聚功能,并且指出,植物死亡以后,大部分被积聚的元素埋藏在沉积层,形成数量可观的堆积。由菌类和藻类积聚起来的大量金属,可能成为沉积成因的许多矿石和矿化点的物质来源。许多金属在活细胞中构成带有不同阴离子群的络合物。细胞所含这种元素的数量往往要比它们在原有环境下多千百倍。门捷列夫周期表里的一系列过渡金属,诸如Ti、Cr、Mn、Fe、Co、Ni,以及某些负电性金属,如Al、Cu、Zn等,都是很好的络合剂。

在地质时代的推移过程中,具有不同积聚功能的各种有机体是更迭变换的。有人发现,这种变化是从原始有机体对各种元素一般的吸收进而在细胞中制造复杂的络合物,致使某种元素积聚达到它在通常环境含量的几千倍以上。例如,前寒武纪早期的古老有机体由营养生存方式向光合作用的过渡,意味着Al、Si、Ca、Mn、Ti、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Mo及一系列其它元素积聚的加强。蓝绿藻具有含铁量高的特点,从而可以说明为什么在前寒武纪出现铁的成矿富集。含铜量最高的是绿藻,它的出现是在元古代末、古生代初。

植物的积聚功能随着地球植被总量的增加和种属的多样化而不断加强。参与积聚功能演化的是各种类型的光合作用植物,而在前寒武纪时期具备这种功能的主要是浮游植物。

目前还难于断定远古植物的积聚功能与前寒武纪剖面已知层状沉积矿床之间的直接关系。微生物进化所引起的积聚功能的演化可与已知的前寒武纪和古生代沉积矿床对比的意见,是过于概括和抽象。我们可以说,有机界在前寒武纪的长期发育,无论是需氧型的或是嫌氧型的都包括在内,对于地球沉积层中一系列金属的富集和提供外部环境,(如:含有 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2S$ 并具有一定的pH、Eh值)都起了极大的作用。这时已经产生了前寒武纪不同时期形成层状矿体所需的基础,有时甚至是直接的前提条件。

大量的沉积岩在这个时期内都受到了变质作用,又开始了化学元素的运移,伴随产生含矿溶液并继而形成热液型金属矿床。被改造为前寒武纪变质岩的沉积物的数量,不同人有不同的看法。据Rancama的计算,35亿年间形成的风化物总量,相当于整个硅铝层。有人根据阳离子地球化学平衡得出的计算结果与上述的估计近似。也有人认为地壳组成中的沉积物质总量可达30%。

在整个地质发育史上,地壳沉积圈层的界限是不断改变的。发生在活动带深部的沉积岩层的区域变质作用和花岗岩化作用,使陆地花岗岩层增厚,使沉积圈层的底部界线升高。因此,可心把地球现代的成层岩石圈看作是“淹没”在广大变质作用和花岗岩化用区域的大量沉积岩的少许残余。

地壳物质经过风化、磨蚀、搬运和沉积等所有过程的综合作用，使地球生物圈的物质处于一种特殊的状态，其物理特征如下：

1. 物质的崩解和分散程度高，增加了它们在地质、地球化学过程中的活动性；
2. 大气富含 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 等石化气体；
3. 大量的水分，既有游离水（水蒸气），也有化合水（结构水、结晶水）；
4. 矿物质的化学分解程度高并产生沉积分异，而在硅铝层的沉积层内存在大量简单化合物，经常是游离氧的化合物，构成厚薄不同的层面；
5. 物质的活动性和反应性相当强，运移的形式多种多样；
6. 物质的疏散性强；
7. 游离能量相当高度集中，物质在地面的各种反应过程中获得这种能量。这方面最有意义的就是光合反应，即通过吸收太阳能而形成生物圈的游离氧，后者的积聚又造成高能势。游离氧在地壳的景观区可以引起大量的氧化与燃烧反应。

当沉积层向地槽凹陷下降时，它们长期所处位置低于海平面，而且是“湿润”的，因为含有大量的海水。这时，细粒分散的沉积物中发生溶于海水的许多金属的离子吸收作用，产矿地层的潜在含矿性加大。

以上说明，前寒武纪的整个沉积作用过程，特别是在地槽带，为随后在变质作用和超变质作用过程中的潜在金属成矿，提供了最重要的前提条件。

### 变质作用与岩浆作用的发育

变质作用可以使熔点较低、密度小而活动力强的物质发生运动并被运移带出。这时， $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 和碱金属都转入活动状态。在变质作用中，物质的搬运有多种方式，而原子（离子）通过晶体结构残缺物质的渗滤，总的来说并不起很大作用。通过结晶格架的渗滤，甚至在有晶疵的情况下，也是十分缓慢的。所以变质产物主要决定于母岩的原始化学成分。地壳花岗变质层的特点是成分多样化，它反映了岩石的原生岩石化学多样化。在变质作用下，物质的运移主要有两个途径：①渗透交代；②最易熔物质在选择熔化时的深熔活动。

渗透交代是物质搬运非常有效的过程。破碎带中活泼的热水溶液，在变质作用下积极作用于岩石，引起溶解和化学置换。渗透交代伴随携出钙、镁、铁，同时携入碱金属与二氧化硅。经过渗透交代，岩石化学成分彻底改变。

选择熔化发生于超变质作用，首先涉及的是最易熔的组分。母岩熔化的规模随着温度增高而加大。岩石中接近花岗共熔点的易熔组分转入熔融状态。

选择溶化过程在前寒武纪早、中期起主要作用。沉积物或变质层向压力约为4~6千巴（4~6千巴的压力相当于深度12~20公里）、温度为650℃的深部下降时，这个深度有足够的水的分压力，应该产生岩浆。有人已对高压水蒸气下（2千巴）从变泥岩（片麻岩）中熔出花岗熔融物的过程进行过实验模拟。

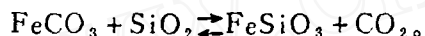
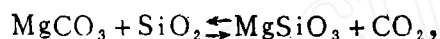
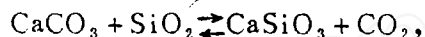
这个过程的热动力条件，也经过了一系列的实验研究。取得的资料说明：在地壳的温度和压力条件下，变泥质沉积物的深熔花岗岩化与再生作用只能发生在水的分压力相对较高的情况（0.5千巴或更高），温度要求为640~650℃。深熔岩浆的数量取决于母岩的原有成分。目前所有的物理-化学实验和地质观测资料都说明，在温度650~700℃、压力6~8千巴的相对来说不太大的深度，有可能形成再生岩浆。这个深度以现代平均地热梯度计算则是18~30公里。

在一般属于太古代的前寒武纪岩石分布的许多地段，见有花岗片麻岩与混合岩，足以证

明岩浆是在现代可见露头范围内就地形成的。混合岩多数是不含矿的,原因可能是在形成过程中成矿元素与挥发物一起丢失掉。混合岩层中的花岗岩体与其共生的片麻岩带区别不大,但在更晚一些的里非期和古生代的建造中,花岗岩类岩石逐渐具有更多的侵入性。在这类情况下,岩浆体开始与围岩不相容,从而促进了不是在前寒武纪、而是在泛生代常见的接触变质矿床的形成。

变质过程中水的作用很大,它可以使物质溶解并被搬运,可以降低反应的温度,参与矿物的形成。在长期沉降区,来自海洋的沉积水的深度可以达到10~12公里。地壳等温+400℃可能就是液态水的底层分布界线。这就是说,以循环水为主的地下水,有相当大的数量赋存于未变质的沉积物中。但在极深部,由于温度和压力的影响,它们与沉积物分离而形成热液水,富含多种气体(液体)并沿裂隙与孔隙升向地表。换言之,变质程度的加强导致原岩脱水。例如,沉积区的沉积物含水60%,而在沉积变质和化学变质阶段含水30~20%,进一步到变质的绿色片岩相的岩石只含水4%,角闪岩相岩石的含水量降至2~1%,变粒岩相岩石含水只有0.5%。显然,累进式的变质作用促使原岩发生重要的脱水现象。所以说,再生水正象热液水一样积极参与变质过程,起着助溶剂、催化剂和强溶剂的作用,使最初的沉积层的含矿元素活跃起来。

与变质过程中的脱水作用同时发生去气作用。这时主要释出的CO<sub>2</sub>大部分来自碳酸盐的分解。在变质作用加强的条件下,平衡反应按下式由左向右进行:



热液水形成于不断加强的变质过程,饱含碳酸,具有高度的反应性。这些再生的热液水由底层进入上部,成为前寒武纪不同时期热液成矿最重要的因素。有的资料提出,这种途径产生的溶液尽管其中已溶金属的浓度相对较低,但可能具有成矿作用。在这种情况下,对成矿起决定作用的是地球化学地障,后者能够促使矿石从已溶金属浓度低的溶液中沉出。虽然变质作用的某些方面还需进一步深入研究,但在任何情况下,前寒武纪各种沉积层的变质过程无疑是形成热液型矿床的决定因素。

在整个前寒武纪,由于热动力条件的支配,变质过程的强度是有变化的。从各方面的资料来看,变质作用随时间之推移而减弱,上部变质带逐渐下降。在前寒武纪早期,地热梯度远较现代的为大,其原因可能与U<sup>238</sup>、U<sup>235</sup>、Th<sup>232</sup>、K<sup>40</sup>及其它某些存在时间不长的放射性同位素衰变发出较高的放射性热量有关。前寒武纪的一个时期内(35~20亿年前),变质作用距地表的深度不大,发生的区域范围很广。这一时期的岩石更多的是花岗岩、花岗片麻岩和混合岩,经过弱变质和热液作用的碎屑岩极少见。变质分异达到很大的规模,致使原始的壳层消失。

据某些人的意见,在陆地的分段区,玄武岩类壳层已全部经过改造并分为两个变质层,即:变粒基性岩层与花岗片麻岩层。只在目前地盾的少数地区以所谓“绿岩陆核”的形式保存有少量火山建造的残余。有人认为,脱花岗岩化带的位置很可能只距地表5~10公里。进入这个带的最老的火山物质和沉积物质改造成为变粒岩和少量的榴辉岩,同时向上部释出大量的酸性组分。

在随后的一个时期(20~14亿年前),即里非期之前,变质的规模和强度减小,超变质带和花岗岩化带的界线下降。

再进一步(14亿~5亿7千万年前),区域变质的面积更加缩小。这个过程看来在不同

的陆地范围内是不平衡的,因为典型的具有“太古代”外貌的花岗片麻杂岩体广泛发育在加拿大的格林维耳带(11~9亿年)、南极洲(6~4亿年)和巴西的曼吉凯尔带(6亿~4亿7千万年)。变质带的深度增加,新生代-中生代凹陷区的化学变质带深达8~10公里。

前寒武纪不同时期花岗岩的形成与变质过程是相互关联的。正如变质作用下的情况一样,由于地球外层温度降低,前寒武纪花岗岩形成的规模逐渐缩小,形成的途径有着变化。按照现代的认识,花岗岩浆可以在硅铝层产生,并在许多方面有别于来自地幔的玄武岩浆(辉长岩浆)。花岗岩浆源的产生位置不深于变质作用角闪岩相的分布水平,后者在前寒武纪的深度为几百米到3公里(目前的深度大概是15~20公里)。玄武岩浆形成于地幔范围内的100~200公里深部。花岗岩浆的温度不超过800℃,玄武岩浆的温度接近1300℃。例如,对液态玄武岩测定的温度范围是1000~1100℃。

在硅铝层发育的初始阶段,与混合岩和深熔岩密切共生的有许多平面形和不规律形的花岗岩体。稍后则出现较大的花岗岩体。到20~18亿年前的时期,花岗岩化的规模在各大陆上急剧加大。进一步则出现明显的分异:花岗岩分为原始地槽型和原始地台型两类。前者以火成为主,但还保持着与区域变质带的关系,尽管变质的程度和强度已经减小。多数花岗岩深成岩体没有很深的岩根,也没有大距离的移位标志。

地台花岗岩表现为相当巨大的深成岩体,边缘部分明显,主要赋存在前寒武纪晚期轻度破坏地层。只是在20~18亿年前这个时代之后,才第一次出现轮廓鲜明的地台型深成岩体,有时与酸性岩和基性岩成为共生集合体。乌克兰的奥长环斑岩和花斑花岗岩(18亿年),波罗的地盾的奥长环斑岩体,南非和加拿大地盾分异侵入的花斑花岗岩等,都属于这一类型。

到前寒武纪晚期,花岗岩浆的出现更多地移向地槽区,并具有典型的岩浆外貌,表现为大型的侵入体(岩基),一般位于复背斜核心。花岗岩岩基在其本身产出部位的形成是借助于沉积岩、火山岩和变质岩在造山期的熔化,而当时的热动力条件十分有利。岩基顶部发生岩浆喷气、接触变质和交代作用,结果形成各种岩浆成因矿床。这种矿床主要是泛生代造山带的特征产物,少部分属于前寒武纪晚期。

侵入花岗岩的含金属程度多种多样,而花岗岩体也并非每个都潜在含矿。与花岗岩浆有关的Sn、W、Mo、Pb、Zn、Cu、Co、Ta、Nb、TR等金属矿床的出现,决定的因素可能很多,但其中起主要作用的显然有两个:①事先已经积聚有某些金属的沉积-火山岩层原来的化学成分;②存在的相当大量的挥发性物质(H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>及其它等),它们同样可以借助于经过变质作用和花岗岩化的沉积层的成分而再生。

与钛、铬、镍、铂和其它金属矿床有关的基性岩浆的出现,对前寒武纪金属成矿作用有决定意义。这些矿床是在地球发育史整个过程中发生的地幔分异的产物。总的来看,这也就是最早期的成矿过程,它的独特表现可以见于月球海的某些区域。月球斜长石富含钛、铬及其它过渡金属,特点是年龄值大(35~40亿年),可以作为地球早前寒武纪金属成矿作用的标本。

在成因上与地幔分异有关的矿床当中,有人划分出以下几个基本的建造群:

- 1.含铬的橄榄岩建造;
- 2.含钛磁铁矿、少量含铂族的辉长岩建造;
- 3.产有硫化铜-镍矿床的暗色岩建造;
- 4.含金刚石的金伯利岩建造;
- 5.碳酸岩中赋存有色金属、稀有金属矿床的碱性-超基性岩建造;
- 6.伴随有黄铁矿型矿床的细碧辉绿岩和细碧角斑岩地槽建造;



橄榄岩、辉长岩和暗色岩等前三个建造群与侵入岩浆作用有关,主要赋存于古老台向斜,形成于20亿年前(布什维尔德岩盆的年龄),而后在前寒武纪晚期和泛生代发育。金伯利岩和碱性-超基性岩建造与古地台发育的深断裂有关。

细碧辉绿岩和细碧角斑岩建造产生于水下火山作用的条件,黄铁矿型矿床与其有关。水下火山作用的结果产生分层的铜、铅、锌矿体。加拿大的最近研究提供了一些有力的依据,可以使人推测层状矿床属于前寒武纪的很早期(35~26亿年前)。在这以后的前寒武纪的地质时代中,正象典型的沉积成因矿床一样,层状矿床中的许多矿床也受到变质作用,失去了原来的形貌。

在前寒武纪中期的许多剖面上,片麻岩体中见有板状硫化矿体。与硅酸盐类的围岩相比,这些金属硫化物已轻度变质,因此前寒武纪早期、中期的沉积矿床、沉积-火山矿床和火山矿床已不同程度变质,并失去了原生的沉积特点。变质作用通常伴随着成矿物质的活动和再沉积,或在原生地、或经过搬运而产生次生成矿富集。硫化矿床的再生过程有时达到如此强的程度,以致原生沉积矿床具备了典型的内生面貌。以前是把这种矿床作为岩浆成因描述的。但现在根据铅同位素成分的资料来看,许多过去认为是热液的铅-锌矿床和铜矿床;实际上是已再生的原生沉积矿床。

这就是说,大气圈、水圈、生物和岩石圈在前寒武纪总的演化,为许多金属的堆积和成矿省的形成提供了广泛的可能。含矿积聚的堆积过程是缓慢的,而且是不可逆地和环境的变化共同演化着,并主要反映在沉积矿床的外貌和形态上,与花岗岩化和变质作用有关的矿床反映程度次之。地幔分异成矿过程演化最为缓慢,彼此在构造特点和规模上的区别大于矿石和围岩的成分。

(全文完)

薛意译自:《Полезные ископаемые и  
металлогения докембрия》

作者: Г.В.Войткевич, Г.И.Лебелко

(上接第92页)

的。根据参数值  $\eta = \frac{Z_a - Z_b}{Z} \cdot 100\%$  来估计异常。式中的  $Z_a$  是与断裂岩层处对应的测点上的场值。 $Z$  为无断裂时,在该点上的旁侧负异常值。

当测线到岩层的距离不变并等于它的厚度时,即便断裂宽度很小 ( $L = 0.3h$ ),在  $Z$  曲线上表征异常形式的负磁场 ( $\eta = 55\%$ ) 明显地减小。当  $L = 0.5h$  时,出现  $Z$  的负值。当断裂的宽度不变,在  $L = h$  时,随着观测线离岩层愈远,则异常也愈减少。例如,当  $R = 1.5h$  时,  $Z$  的正值就消失;而当  $R = 3h$  时,曲线上断裂的异常变模糊,实际上已不可察觉。在这种条件下当岩层的厚度为20米时,

60米的距离对于推断岩层的间断来说,应认为是最大的了。异常的宽度(根据  $Z$  的最大梯度确定)超过岩层断裂的宽度数倍。只有在  $R \leq 0.5h$  时,异常的宽度才接近于岩层断裂的宽度。

野外工作经验和模型实验证明,在钻孔以小角度穿过磁铁矿石岩层时,根据井中磁测资料,可以弄清钻孔附近空间内岩层的间断情况,查明深达300~400米孔段岩层有无断裂,以及断裂的位置和它的宽度。

金益译自:《Геофизический  
сборник》, 63, стр.64~67

作者: Я.П.吉特林