

变质作用矿床概述

董中保

(北京大学地质系)

1998/10

摘要: 近代矿床学的研究已初步摆脱了经典的对立的内生和外生作用矿床的研究范围,走向一个以整体地质环境为背景以各种地质作用相互联系为基础的动力学研究的方向,并从矿床的源区和源岩出发在不同的地质作用下特别是与挥发组分的参预相结合,追溯其矿床的形成过程。

变质作用矿床是一类中间型的矿床,属于近源迁移型。在原有地壳中含矿建造和矿源层的基础上经历了变质作用和它的后期混合岩作用过程,并通过变质作用传导体制的不同阶段中出现的流体的参预,形成一系列的由前变质矿床直至混合岩化期后矿床。本文对影响变质作用矿床的控制因素及其地位作了扼要的叙述,进行了变质作用分类的探讨,并从其传导体制中出现的热流及其形成环境上,与岩浆型花岗岩后期热液型进行了对比和讨论。**关键词:** 变质作用矿床的地位及其控制,含矿建造和矿源层,变质作用流体、变质作用矿床分类、变质形成矿床和混合岩化矿床。

1 引言

20 世纪 60 年代以来,大量的矿床学研究资料显示出它已开始冲出经典的受某一地质作用所限制的,相对立的假说—内生作用对外生作用、岩浆矿床对沉积矿床(Lindgren, 1933⁽¹⁾)的影响,而转向一个以整体地质环境为背景,相互地质作用的变化为主线的地球动力学方向(geodynamic prospect);亦即矿床的形成和发展虽受某些特定的地质条件所限制,但从总体上看,它们是处于一个整体地质作用进程(wholesale geological processes)的控制,在各种地质作用的相互作用和转化中(interaction and mutation)形成和发展的。70 年代中,各种边沿的矿床的总结,包括火山沉积热液矿床、远程热液矿床(tele thermal deposits)等方面的发展,促使矿床学研究出现了转向的变化。开始时见于 Stanton(1972)⁽²⁾的矿石岩石学(ore petrology)。国际方面则逐渐形成普遍接受的层控矿床理论(strate-bound ore deposits),其基本涵义见 Wolf 主编的层控和层状金属矿床学, I. 原则及一般性研究(1976⁽³⁾)。

从物质组分的共生组合,特别是从地球化学元素的分布上看,任何一个矿床都有着自己的、特定的元素共生,并以之组成为某些岩石和矿物的共生,代表其发生时的源区和源岩。它们大致与其所处的某一地质作用的源区有关,如花岗岩重熔(anatexis)时的源(source)、基性岩浆部分重熔(partial melting)时的地幔特点等。它们是矿床的源泉,并在以后的某一地质作用进程或联合作用进程中发生元素的迁移和集中,形成某些矿化系列和矿石,最后可形成若干矿床或矿床系列。形成矿床的地质作用控制虽有多种,但它们共同的本质上的控制(basic constraints)则是其中的挥发组分(主要是 H_2O 、 CO_2 以及某些碱金属和一些不相容元素(incompatible elements)所组成的流体、熔浆和溶液的影响。目前它们已在各种地质作用环境中越来越重要,并已成为一个重要方向一流体和岩石圈的相互作用。而这一研究也是近代矿床学的动力学研究的必要的和不可少的条件。这一方面的研究比较困难,至今未能形成一个全面理论体系。以 H_2O 而论,它在各种作用所处的位置,

包括其渊源、热力学体系中的地位,各种反应中,它应处的范围,是体系中的一个组分、相,是封闭的、开放的抑或是具有开放性的、未废除的组分(hydrol, Zen, 1963⁽⁴⁾)都有待于确定。

矿床学的研究虽然发展迅速,但其中的主要问题如源区和含矿岩岩的基本特性。各种地质作用的相互作用及其机理、挥发组分的迁移作用以及它们所处的大地构造环境都还未得到量化的处理和系统的阐述,至今仍以在叙述性为主,辅以某些实验数据的动态研究的初级阶段。从源区和各种地质作用的联系上看,粗略的矿床类型的划分可归纳为:1、原地型(in situ type),即矿床与含矿建造的形成大致同时,矿床基本存在于含矿建造中,二者无明显的迁移距离,相当于狭义的同生矿床(syngenetic deposits, *sensu stricto*),如超基性和某些基性岩浆矿床、同生沉积矿床等。2、异地型(allochthonous type),矿床的形成后于含矿建造,矿床可脱离原有的源区和含矿建造,通过不同的地质作用形成不同的迁移距离。由于地质作用中由热流对递而引发的物化作用特别是挥发组分行为的不同,它们之中可能进一步分出远程迁移型(long-range migration type),矿床与含矿建造有较长的迁运距离,如一般的花岗岩期后热液型矿床,它们往往代表一类迁移含矿元素的热液体系,可出现于远离源区的围岩中,和近程迁移型(short-range migration type),矿床与含矿建造距离较近,二者有时相接,但仍可见有明显的迁移距离如一些低温近程的远热液沉积矿床(telethermal deposits)。

变质作用矿床属于一类过渡型矿床,由已经形成地壳的含矿建造通过变质作用和部分转化为熔体的过渡阶段所形成的矿床,其形成的类型基本属于短程迁移型。这一类型不同于通常的岩浆型或沉积型。是由外生作用形成的源区中的含矿建造通过内生作用而转变的矿床。矿床类型具有本身独特的特征。同时,它的研究将会增加沉积和岩浆热液矿床所不及之处,从而加深和扩大矿床学动力学研究的方向。

II. 变质作用矿床的涵义

变质作用矿床可定义为:在变质地区中受区域变质作用影响而形成的矿床称为变质作用矿床。它们是区域变质作用及相继发生的混合岩化作用的影响下,原岩建造中的含矿建造、矿源层或原有矿床受变质重结晶、变质热液及混合化作用产生的混合岩浆及热液的影响,它们之中的含矿组分经过迁移、搬运而形成矿床。

变质作用矿床是一种复杂的转化作用形成的矿床,其地位介于岩浆作用沉积作用矿床之间。长期以来,它们虽被列入一级矿床,但其中的矿床类型常被认为是某沉积矿床的变质重结晶或被认为是岩浆热液矿床,如瑞典的著名的 Falun 型多金属硫化物矿床、澳大利亚的 Brokenhill 铅锌矿床、挪威的含铜黄铁矿床等。它们的地位常不固定,直至 70 年代才始被确认。其中前苏联所作的工作较为系统(Khlestov et al., 1975⁽⁵⁾, Belevtsev, 1984⁽⁶⁾)。就目前所知,主要矿产有铁、铜、铝、铅、锌、金、铀、钨、钼、铬、镍、钴、及非金属材料如白云母、硼、石墨、菱镁矿、滑石、蓝晶石、刚玉、石棉以及一些稀有元素如铋、钨等,其中铁、铜、钨等的储量据世界首位,变质作用矿床在我国是一类重要的矿床类型,诸如铁、铝、铅、锌、金、硼、菱镁矿、石墨、蓝晶石等都居于首要地位,特别是在前寒武纪克拉通和结晶基底中显得更加重要,并已形成若干工业基地。

III. 变质作用的基本控制条件

变质作用矿床的发生总体上受制于区域变质作用,它们反映出变质作用矿床形成时的大地构造环境及区域性的热流传递体制,后者的 P-T-t 轨迹可代表着变质作用类型中 P-T 体制的演化途径以及各个阶段中,变质作用矿床发生的流体的基本属性。因此,它们属于第一级的控制。每一变质作用类型的基本控制包含两个方面:1、原岩中的含矿建造和矿源层。2、矿床中媒体介质的流体效应及其形成时的物理-化学作用。

1) 含矿建造及矿源层

变质作用矿床的源区可分为两个方面：1、含矿建造(ore formation)和2、矿源层(source bed)。含矿建造是与矿源层有关的岩石组合，它们更多标志着矿源层的成岩环境。同时，它们是原岩建造组成的一个部分，代表着建造形成时的某一成矿作用阶段。

矿源层是含有含矿组分的岩石，目前可分为两种类型：1)主矿源层(major source bed)，即含有主要成矿组分，变质作用后形成矿床；2)微矿源层(micro-source bed)，含有特定超过一定丰度的微量元素所组成的矿源层，它们与邻区的微量元素矿床的联系还有待于查明，这一类又可称为潜在矿源层。

变质沉积建造中的重要含矿建造有：复理土型千枚岩、变粒岩、片岩系、镁质大理岩系和碎屑岩型的片麻岩系。含矿建造往往处于原岩建造形成时的某一特定环境。它们的矿源层是其中的含矿组分组成部分，主要有前寒武纪的含铁硅质岩(Lake superior型)含金属硫化物的碳质千枚岩(北欧)、含金属硫化物的千枚岩和片岩(澳大利亚、陕西、甘肃)、含铜碳酸盐(云南东川)、金、铀变质砾岩(加拿大)、含石墨片麻岩(山东南墅)、含蓝晶石的变粒岩(山西五台)、含白云母的矽线石、石榴石片岩(内蒙古)等，其中有些含矿建造特别是前寒武纪的，具有某些唯一性特征。

变质火山沉积建造中的含矿建造是变质作用矿床中最重要的类型，源区来自于火山作用并常经过沉积作用的分选。重要类型有：基性火山沉积型的麻粒岩系和斜长角闪岩系、中酸性火山沉积岩型的变粒岩和浅粒岩系、火山沉积射气型的硼、钠(钾)变粒岩系、火山作用同生的沉积型的镁质白云岩系、片岩系及变粒岩系、钠质火山沉积岩系中的变粒岩和浅粒岩系。它们往往出现某些与含矿组分的火山作用与沉积作用交替的旋回中，重要的矿源层有：与斜长角闪岩或基性麻粒岩系有关的硅铁建造(algoma型)、铁、铜型含钠硅铁质建造(云南大红山型)、含金硅铁质建造(Homstack型)含多属硫化物的变粒岩和浅粒岩(Boliden型)、含铜、铅、锌硫化物的变粒岩和浅粒岩(Falun型)、块状多金属硫化物的浅粒岩-斜长角闪岩(红透山型)、含金斜长角闪岩(太华型)、含菱铁矿的白云石大理岩、碧玉岩组合(大石桥型)、含硼镁铁矿的电气石变粒岩等。

火山建造中的含矿建造存在于变质火山岩系中，诸如云南惠民的与基性火山射气作用有关的菱铁矿床、甘肃白银厂的浸染型黄铁矿型铜(铅、锌)矿床、四川稻城的与变质流纹岩有关的多金属硫化物矿床等。但这一矿床大部被认为是原有火山作用矿床，变质作用对于它们的影响并未经过详细研究。它们的地位仍有待于明确。

2. 流体效应(Fluid effects)

变质作用矿床的形成一般可认为是矿源层的物质组分经过变质作用产生的流体与其反应经过迁移、富集而形成。它是变质作用矿床中的主要控制(constraint)。流体可发生于原岩建造的孔隙中，并在变质作用P-T-t演化的途径中产生不同效应的流体，可从粒间溶液(pore solution)、地幔流体、脱水反应(dehydration)、直至变质分选(segregation)热液。混合岩化热液(migmatized solution)、混合岩浆(migma)直至后期热液最后可出现为退化变质热液。与一般的岩浆热液不同，其生成的阶段不同，效应亦各异。

变质作用埋深阶段中，原岩建造的间隙液体(interstitial liquid)开始活动。主要起着触媒作用和部分的溶解作用，所引起的效应与温度成线形增长。在等压增温(isobaric heating)阶段，脱水反应(dehydration reaction)呈现的挥发组分以及部分幔源流体居于首位，但在各种变质作用类型中表现不完全相同，视其反应性质而定。在有些变质作用达到重熔(anatexis)曲线附近峰期变质(peak metamorphism)时，它们是形成混合岩化作用和混合花岗岩的必要条件。此外，重熔岩浆出现后的去水熔融反应(dehydration melting reaction)亦占重要位置。

混合岩化作用代表变质作用中固态重结晶作用转向深熔作用的中间过程。由此形成的混合花岗岩虽可认为一种‘熔浆型’的花岗岩(anatectic granite)，并可转变为‘岩浆

型'花岗岩 (magmatic granite), 但它基本是借助于流体作用于变质岩, 并在热流体制 (heat conductive regime) 下发生的, 与一般由对流体制 (heat convection regime) 发生的岩漿型花岗岩有所不同, 变质流体包括地幔流体在形成时起着重要作用, 而源区组分的搬运距离亦较短。它们常发生于含矿建造中, 并成线形分布。

在变质作用后期的抬升深蚀阶段 (exhumation stage), 由对流 (advection) 而引发的液体渗透 (liquid infiltration), 在变质成矿作用亦居有一定地位, 特别是那些压力释放的退化变质反应 (pressure-released retrogressive reaction) 的流体对成矿起着重要作用。如变质地区中韧性剪切带中出现的金矿床或金属硫化物矿床, 可作为其中的一个例证。

变质作用矿床中, 流体对于源岩的作用是多方面的, 既可以在转变过程中形成变质热液矿脉、变质分泌的伟晶岩脉, 也可有混合岩和混合花岗岩的各种交生矿体 (symplectites) 和混合花岗闪后的伟晶岩及热液脉。同时, 受原岩建造的影响, 流体介质的氧化-还原电位也在某些变质矿床中起着重要作用。流体反应于变质岩中, 交代作用 (广义的) 普遍存在。

3. 含矿组分的迁移

矿源层中组分的迁移是变质矿床中的一个根本问题。它们的迁移既受组分本身化学性质的制约, 同时又受变质作用的影响, 特别是在变质作用的 P-T-t 轨迹变化中, 引发的流体的影响。

目前一般认为, 在变质作用阶段中, 常量元素-其电子壳外层为 8 者—属于等化学变质 (isoechemical metamorphism), 局部可出现 Alps 型热液脉, 但一些微量元素, 包括电子壳外层为 18 以及部分过渡族元素则可在不同的变质阶段直至后期退化变质阶段出现迁移变化和集中。在不同的原岩建造中, 其丰度可达原有克拉克值好几倍, 直至形成矿床 (Belevtsev, 1984⁽⁶⁾)。在混合化作用阶段, 当重熔融浆 (anatexitic melt) 处于开始和形成时, 常量元素即出现搬运和迁移, 分成以 K, Na, Si 为主的活动组分 (mobile components) 和 Fe, Mg, Ca 为主的惰性组分 (inert components)。硅酸盐向含 (OH) 多的层状矿物发展, 最后可形成各种络阴离子化合物和氧化物或氢氧化合物。硫化物在变质作用的基础上, 受着流体的影响, 可在不同温度和压力条件下, 出现了硫的遗失, 并形成复杂的硫盐矿物。

从热力学观点看, 化合物的生成自由能 ($-\Delta F$) 的绝对值越高, 则越稳定。根据标准状态下所测得的数据, 硫化物一般为 $(8-40) \times 4.18 \text{ k/mol S}$, 氧化物为 $(60-144) \times 4.18 \text{ k/mol O}_2$, 硅酸盐 (SiO_2 , 或 SiO_4) 为 $(101-171) \times 4.18 \text{ k/mol O}_2$ 。P-T-t 轨迹的等压升温过程中, 硫化物趋于不稳定, 易进入溶液。

一些元素的迁移可如下述:

a. 亲石元素 (lithophils) 它们在变质作用过程中大多形成硅酸盐, 较稳定, 但碳酸盐受热液影响, 易集中成矿床。铀、钍易被带出, 铁表现不同, 硫化物和菱铁矿易搬运或形成矿床。混合岩化作用阶段, 它们开始分解和迁移, 视其元素的化学性质而定, 碱性元素如 Al 可形成某些非金属矿床和蚀变矿物。Fe, Mg, (Ca) 被带出进入后期热液蚀变阶段。) 铀、钍、铈、钽、钨、钼、铍等微量元素集中成矿化脉。

b. 亲铜元素 (chalcophils) 在变质作用及混合岩化过程中, 都可迁移和集中, 变为各种与热液有关的矿床, 其中如砷、硒、碲、锑、汞和部分的金和银在低级变质时即能转变为变质热液矿床。混合岩化作用以及晚期退化变质作用过程都可存在。各种不同的亲铜元素组合视其变质作用条件而定。

c. 亲铁元素 (siderophils) 大都表现稳定, 似乎不易形成与变质作用直接有关的矿床。

III. 变质作用矿床分类

20 世纪 50 年代以前,受岩浆矿床及沉积矿床分类的影响,把一部分与变质作用有关的矿床归为岩浆矿床,而把变质矿床看成主要是沉积矿床的重结晶。70 年代开始,变质作用矿床分类开始强调了变质作用本身的特征,包括变质热液和混合岩化作用。我国有谢家荣(1963)^[7]程裕淇(1957)^[8]罗耀星^[9]等的论文和前苏联的 Belevtsev^[6]的分类。Mookherjee 还对矿床形成作了全面的叙述(1976)^[4]。董中保(1990)^[10]结合中国实际全面进行了探讨。

变质作用矿床的分类主要是以变质作用整个过程中,含矿建造的含矿组分受不同的流体影响而聚集形成。它的第一位控制是变质作用演化过程以及不同阶段的流体作用于原岩。原岩组分是基础、变质作用的物理化学控制受变质作用中的 P-T-t 的控制。为此,变质作用分类的控制首先是变质作用阶段的划分,其次是各阶段中流体所表现的行为。矿源岩是物质组分的迁移的基础。P-T 条件是影响流体行为的重要因素,但它们应与 P-T-t 轨迹结合,来判断每一变质作用进程中一些作用进程的特点,以便于更好地与地质作用相结合。

初步分类的设想如下(董中保,1990)。

I. 前变质矿床(Pre-metamorphic deposit)

II. 变质形成矿床(Metamorphogenic deposit)

a. 变质重结晶型(Metamorphic recrystallization type)

b. 变质热液型(Metamorphic hydrothermal type)

III. 混合岩化矿床(Migmatic deposit)

a. 原地交代型(Autochthonous metasomatic type)

b. 后期热液交代型(Post-hydrothermal type)

兹简述如下:

1. 前变质矿床

属于受变质作用影响的,前已成为矿床的类型。主要是与火山作用有关的硫化物矿床或基性岩浆有关的矿床,具矿源层性质如硅铁建造者不在这一范围。由于含矿组分已相当集中,表面能较分散颗粒为少,变质反应差别不大,很少有迁移和解集中现象。因此,它们大部以变形为主,金、银、砷、锑等不稳定的硫化物,可重新分配,形成硫盐,或再集中。这一类型对已形成的矿床影响似不大。属于变质作用矿床中的次要类型。

2. 变质形成矿床

属于变质作用时期的固态重结晶阶段,包括晚期抬升而受深蚀(exhumation)的退化变质阶段。矿床的形成由变质重结晶作用和流体效应联合影响于含矿建造中所致。由于二者影响的程度不同,又可分为:

a. 变质重结晶型 含矿组分的迁移、反应和集中主要由变质反应时的重结晶为主,流体占次要地位,触媒为主。它们迁移的距离不明显,集中于矿源层内。温度升高的重结晶作用在工业矿床中占有优势。例如大部分的条带磁铁矿英岩、石墨片麻岩、蓝晶石或刚玉片岩等。

b. 变质热液型 它们主要由变质作用发生时期中的流体参与而形成。流体来源有多种,包括粒间溶液、地幔上升含挥发组分(硼、氟、……)的流体、不同变质作用演化阶段,包括抬升时的退化变质的流体渗透等,其中以去水反应中出现的挥发组分,特别是 H₂O 的热力学体系中的地位、它的化学位的计算和它对碱金属的活化以及退化变质阶段的流体渗透都应进一步探讨。含矿组分的迁移主要是亲铜元素和部分过渡族元素。受流体影响的迁移反应较明显,主要表现为热液蚀变所呈现的交代作用,蚀变矿物的组分来自于原岩建造,如硅化(白硅化)、绿泥石化、云母化、碳酸盐化、方柱石化、钠长石化等。含矿组分有明显的迁移,但大都限于含矿建造中,退化变质阶段中某些矿床迁移可较远、矿体或矿

¹ 罗耀星, (1981)。变质作用及变质矿床。冶金部地质技术干部进修学校。

脉常成顺层状，后期除外。矿体结构常与变质结构有继承关系或包含关系，例如铁矿的海绵结构。

2、混合岩化矿床

属于变质作用后期由固态重结晶转向重熔过程的转化阶段。总体上看，这是在产生变质作用热流传导体制（conductive regime）下，达到重熔曲线后发生的花岗质重熔作用。在温度继续升高下，借助于流体包括幔源流体的参与，原有变质建造的组分进行全面调整和选择性的迁移和集中，出现了混合岩作用的中间阶段，形成由淡色体（leucosome）、暗色体（melanosome）和中色体（mesosome）所组成的各种混合岩化构造和混合岩，通过分泌体（segregated body），伟晶岩和长英岩脉发展成为初始熔浆（initiated melt），并可借助于去水熔融反应（dehydration melting reaction）扩展其容量，上升成为混合岩浆（magma），发展成为一系的花岗质重熔作用，其中原岩的惰性组分如 Fe、Mg、Ca 及某些含矿组分等与这一体系中形成融浆以后被摒除的液体可组成混合岩浆后期热液和相应矿床。

根据其发生的阶段不同，这一类型又可分为：

a. 原地交代型 属于混合岩化早期，表现为重熔的开始，贯通流体的发生和原岩组分的活化。原岩组分开始时常聚集成为伟晶或粗晶集合体，相当于聚晶作用（adcumulation），随后分解成为含水化合物、络阴离子化合物、氧化物等并逐渐析出。惰性组分和亲铜元素及微量元素都可形成矿床，主要矿床有伟晶岩型如白云母型、锂、铍、铌、钽型、磷灰石型等（内蒙丰镇），混合花岗岩如铀、钍型（辽宁连山关）、刚玉型（河北阜平），它们主要特征是：1、交代作用明显；2、伴生的热液蚀变矿物与原岩矿物成世代关系，并密切相关；3、矿体常成顺层状、浸染状或伟晶状和含矿建造相一致；4、成矿期与混合岩期相一致。这一类型不居有重要地位。

2、混合岩化后期热液型

属于混合花岗岩形成后的热液型。它们往往处于后期的近于绝热降压阶段（adiabatic decompression），流体贯通明显，形成的矿床的组分基本来自含矿建造内，与含矿建造成线形排列。热液交代现象普遍，主要是铁、镁交代作用和碱性交代作用。取材大都来自于含矿建造中，其中铁、镁交代作用如透辉石化、铁镁闪石化、直闪石化、堇青石化、铁铝石榴石化、绿泥石化明显，它们大都与原岩有世代联系，反映其源（image their sources），相当于原岩组分如铁、镁等经流体带出后，又在熔浆后期绝热降压阶段析出。这一类型矿床是混合岩化矿床中的重要类型，在我国著名类型有：受电气石变粒岩所控制的金云母、透辉石化硼镁铁矿及硼镁矿床（辽宁营口—辑安）、受硅铁建造控制的铁镁闪石、铁铝石榴石富铁矿床（辽宁鞍山）、受铁、铜建造控制的似 Falun 型的堇青石、直闪石型铜矿床（甘肃陈家庙）等。它们的矿床的演化大致见表 1、2 和 3。

表 1 辽宁太古期的鞍山式富铁矿的演化

表 2 辽宁营口早元古期混合岩化硼矿型的演化

（摘自董中保、张秋生、李树勋，1972。辽东半岛前震旦纪混合岩化作用本利稿）

表3 甘肃陈家庙混合岩化铜矿床型的演化(董中保, 1990)

它们主要特征为: 1、矿床产于混合岩区内的含矿建造中, 其总体分布的趋向与矿源层走向一致; 2、含矿组分基本来于矿源层; 3、热液现象显著, 主要是铁、镁交代作用及碱交代作用, 铁、镁组分由源岩在混合岩化作用时带出、热液形成的蚀变矿物与原有含矿建造变质物成世代关系; 3、矿体受层状控制较明显, 成层状、透镜状及分支脉状, 矿石结构仍与混合岩化构造有相似处。

混合岩化矿床被认为是与花岗岩有关的岩浆期后热液矿床。从动力学角度看, 它和后者不能看成是同一类型。主要的区别有:

1、混合岩化矿床与区域变质作用有关, 所形成的花岗岩基本上是由变质体制中热流传导机制在流体参与下形成。岩浆型花岗岩基本来自于地壳深部, 重熔时发生的源区, 是在热流对流体制下形成。

2、混合岩化作用矿床的源区来自于变质建造, 与幔源岩浆无直接联系, 它们属于近源迁移型(short-range migration type)矿床。岩浆型热液矿床的源岩处于深部地壳, 其确切的源岩组分仍有待于进一步的确定。幔源岩浆可发生直接联系, 能通过与地壳岩浆发生混熔(mixing)而改变其源岩组分。它们属于远源型(long-range migration type)。

3、混合岩化作用矿床(包括混合花岗岩在内)的形成基本依赖于变质作用晚期的流体的参预, 形成过程以交代作用(广义的)为主, 在转化成熔浆时, 部分结晶作用(fractional crystallization)一般在晚期出现。岩浆型热液矿床的花岗岩代表着一个在深部地壳中即已形成熔浆的花岗岩在冷凝阶段中以部分结晶作用为主, 流体仅占次要地位, 仅在晚期显得重要。其大部矿床为期后热液蚀变矿床, 属于整体岩石组分(bulk composition)的交代作用(狭义的交代作用)。

从地球动力学看, 此二种与矿床有关的花岗岩从热流传递体制上, 从发生源区上以及作用过程上, 包括流体的参预都有所不同。它们代表花岗岩成因上至今所能见到的两个端元过程(end members)。研究它们的相互联系和转化是今后与花岗岩成因的矿床研究的一个重要任务。

IV. 一些建议

变质作用矿床是原地型矿床(沉积矿床)和异地型矿床(岩浆期后热液矿床)之间的一种过渡类型, 并属于近源迁移型。研究它们对于整个开展近代矿床学, 特别是源区和成矿作用的演化过程的系统研究将会提供新的信息, 突破某些方面的传统约束。

变质作用矿床的研究至今仍处于起步阶段, 还未引起重视。为完善这一方面的研究, 今后的一个相当长阶段中应加强:

1、变质演化过程(P-T-t 途径)中, 每个过程中, 物理-化学条件, 特别是流体所处的地位及热力学行为对于变质作用矿床的控制。

2、含矿建造中各类元素的迁移规律。

3、混合岩化作用和过程中, 混合花岗岩的形成及后期转化的定量模式及其运矿的规律。

附录 I

中国变质作用矿床各时期的大致分布 (董申保, 1990)

矿 产	太古代			元 古 代			古 生 代			中(新)生代			备 注
	Ⅳ型	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅰ型	Ⅱ型	Ⅲ型	
1. 铁矿	—	—	—										磁铁矿或赤铁矿的各种类型矿床
a. 条带状铁矿	—	—	—										
b. 含稀土/硼镁铁矿		—	—	—	—								
c. 菱铁矿		—	—										
d. 其它铁矿	—	—	—	—	—								
2. 铜矿													常与条带状铁矿共生
a. 铜-铁矿型				—	—								
b. 火山-沉积型				—	—		—	—					
c. 沉积型		—											
d. 块状硫化物型	—												
e. 铜-镍型 ^①	—												
3. 铅-锌矿			—			—							常含金
4. 多金属硫化物型	—		—							—			
5. 金矿	—	—	—	—	—	—	—	—	—				矿源层较多
6. 铀矿			—										
7. 铌-钽矿			—										
8. 钨-锡矿 ^②			—										
9. 钒-铝-铜-铀(金)矿							—	—	—				碱硅质板岩中
10. 锆(铪)型 ^②													
11. 铬矿 ^②							—	—	—	—			
12. 白云母	—								—	—			
13. 磷矿	—	—	—										
14. 锰矿		—	—										
15. 硼矿				—	—	—							
16. 菱镁-滑石矿				—	—	—							
17. 黄铁矿				—	—	—							
18. 蓝晶石等矿				—	—	—							
19. 刚玉矿	—												
20. 石墨矿				—	—	—							
21. 石棉矿 ^②							—	—	—				
22. 金红石矿				—	—	—							

Ⅰ型——埋深变质作用；Ⅱ型——区域低温动力变质作用；Ⅲ型——区域动力热流变质作用；Ⅳ型——区域中高温变质作用，线段宽窄表示规模大小或矿床多少；虚线表示矿化。①为前变质；②用矿床；③多微矿源层(micro-source bed)

附录2 中国主要变质作用矿床实例 (缩自董中保 1990)

变质沉积建造

含矿建造类型	变质建造类型	矿床或矿化实例	矿床或矿化实例	备 注
1、铁矿 a. 硅铁条带型	凝灰质类复理石片岩系	条带状磁铁矿石层于绿片岩相中	山西岚县 (早元古期)、山西五台 (早元古期)	变质重结晶为主
b. 菱铁矿型	类复理石型碳酸盐-千枚岩系	浅海相菱铁矿层夹有铅锌矿于绿片岩相中	陕西桦水 (海西期)	变质热液明显
2、铜矿	复理石型碳酸盐-千枚岩系	马尾丝状、竹叶状、条带状、同心圆状及浸染状于白云岩中	云南东川 (晚元古期)	有变质热液参与
3、铅-锌矿	复理石型碳酸盐-千枚岩系	脉或层状, 位于构造轴部, 有时与菱铁矿共生	甘肃西秦岭 (海西期)	变质热液明显
4、铀-钍型	复理石型碳酸盐-千枚岩系	产于混合花岗岩中, 与石英岩的接触带附近	辽宁本溪 (太古代)	混合岩化作用
5、金型	复理石型片岩系	石英脉状产于千枚岩或片岩中, 属绿片岩相	新疆阿尔泰 (海西期)	有变质热液参与
6、磷矿 盐型	复理石型白云质碳酸盐-片岩系	磷矿属于磷灰石白云盐类 (包括白云岩、菱锰矿、石英岩及磷矿层)	江苏海州 (晚元古期)	可能有变质热液
b. 辉石岩型	含碳酸盐透镜体的石榴石砂线石片岩系	磷灰石伟晶岩脉产于辉石岩中, 麻粒岩相	内蒙丰镇 (太古代)	混合岩化作用
7、白云母	石榴石砂线石片岩系	白云母伟晶岩脉产于白云母石榴石片岩中, 麻粒岩相	内蒙 (太古代)	混合岩化作用
8、蓝晶石	凝灰质片岩-变粒岩系	蓝晶石透镜状产于变粒岩及片岩中	山西五台 (早前寒武纪)	有变质热液
9、石墨	黑云母片麻岩-变粒岩系	石墨层产于含石墨片麻岩中, 角闪岩相	山东南墅 (太古代)	有混合岩化现象
B. 变质火山沉积建造				
1、铁矿 a. 硅铁条带型	二辉石黑云母变粒岩系及基性麻粒岩	磁铁矿石英岩层位于二辉石黑云母变粒岩及麻粒岩中	冀东迁安 (太古代)	变质结晶为主
b. 菱铁矿型	黑云母变粒岩-斜长角闪岩系	磁铁矿石英岩层位于变粒岩及斜长角闪岩中, 属角闪岩相	辽宁弓长岭 (太古代)	混合岩化热液形成富矿
c. 硼铁型	复理石型片岩系夹钠质变基性岩	菱铁矿层位于钠质火山岩中, 射气沉积产物, 属绿片岩相	云南惠民 (晚元古期)	变质重结晶及部分变质热液
2、铜-铁型	白云大理岩-电气石钠长石变粒岩系 (硼钠火山沉积型)	呈层状产于白云大理岩中, 属角闪岩相	辽宁翁泉沟 (早元古期)	混合岩化热液
	斜长角闪岩-蓝青石黑云母片岩系, 上部有硅铁石英岩	浸染及细脉状产于一定层位中, 有蓝青石、直闪石蚀变	甘肃陈家庙 (前寒武期)	混合岩化热液

	含碳酸盐的片岩系夹有变粒岩及钠质细碧-角斑岩, 伴有磁铁矿石英岩	浸染及层状矿体, 产于钠质火山沉积岩及碳酸盐岩中, 属绿片岩相	川镇拉拉厂及大红山(早元古期)	变质热液明显
3、铜矿	浅粒岩-斜长角闪岩系	浸染状、块状不规则矿体, 属角闪岩相	山西中条山(早元古期)	有热液参与
a. 火山沉积型	浅粒岩-斜长角闪岩系(互层状)	块状铜辉矿床成似层状, 属角闪岩相	辽宁红透山(太古期)	有混合岩化作用
b. 块状硫化物型	浅粒岩、变粒岩-硅质岩系	金呈似层状, 产于硅铁建造中, 属麻粒岩相	黑龙江东风山(太古期)	有热液参与
4、金矿	黑云母变粒岩-斜长角闪岩系	含金石英脉型, 属角闪岩相	陕西太华(太古期)	有热液参与可能为混合岩化热液
5、硼矿	含电气石钠长石变粒岩-铁质碳酸盐系	硼铁矿石、透安石矿层产于铁质大理岩中, 属角闪岩相	辽宁营口(古生代)	混合岩化热液
6、黄铁矿	复理石型碳酸盐-片岩系夹有钠长石浅粒岩	含铜黄铁矿产于钠质浅粒岩中, 属角闪岩相	辽宁本溪草河口(早元古期)	
7、菱镁-滑石矿	菱镁大理岩-碧玉岩系	菱铁矿呈星状、少数呈脉状, 部分含滑石, 属角闪岩相	辽宁大石桥(早元古期)	有变质热液
8、刚玉	黑云母片麻岩-变粒岩系, 有斜长角闪岩夹层	含白云母的刚玉透视镜产于斜长角闪岩中, 属角闪岩相	河北阜平、灵寿(太古期)	混合交代产物
C、变质火山建造				
1、基性火岩岩型	斜长角闪岩变粒岩系	磁铁矿体产于辉绿结构的斜长角闪岩中, 属角闪岩相	云南大勐龙(中元古期)	变质热液
2、铜矿	变细碧-角斑岩系	浸染状黄铁矿型铜矿(铅、锌)位于石英角斑岩的古火山机构中, 属绿片岩相	甘肃白银厂(加里东期)	有变质热液, 但与火山岩蚀为不好分
3、金红石	钠质白云母片岩-斜长角闪岩系	粒状集合体及网脉状出现于榴辉岩-榴闪岩中, 属绿片岩相	湖北北部(太古期)	变质热液交代

参 考 文 献

1. Lindgren, W., Mineral Deposits. McGraw-Hill, New York, N.Y. 1933, 1-929.
2. Stanton, R. L., Ore Petrology. Mc-Graw Hill, New York, N. Y., 1972, 1-713.
3. Wolf, K. H., (ed.), Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits, I. Principles and General Studies. Elsevier, Amsterdam, 1976, 1-338.
4. Zen E-An. Components, phases, and criteria of chemical equilibrium in rocks. Am. Jour. Sci., 1963, 261: 929-942.
5. Khlestov, "Ya. V. et al, The facies of regional metamorphism at high pressure (translated by D. A. Brown). Australian Univ. Geol. Pub., 1975, 265:258-277.
6. Belevtsev, Ya. N. et al., Fundamental of the theory of metamorphogenic ore formation. Geological Journal, 1974, 44:42-80.
7. 谢家荣, 让花岗岩及花岗岩化的研究为区测与找矿工作服务. 地质快报, (1963), 12: 1-13.

8. 程裕祺, 中国东北部辽宁、山东等省前震旦纪鞍山式条带状磁铁矿中富矿的成因问题. 地质学报, (1947) 37, 2;
9. Mookherjee, A., Ore and metamorphism: temporal and genetic relationships. In: Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits, I. Principles and General Studies, (Ed.) K. H. Hof. Elsevier, Amsterdam. 1976, 4: 203-251.
10. 董申保, 中国变质作用矿床概述. 冯景兰教授诞辰 90 周年论文集, 地质出版社, 北京, 1990, 100-112.

A general account on the metamorphic mineral deposits

Dong Shenbao

Geological Department of Geology Peking University

Abstract: Recent researches of mineral deposit have been divorced from the classical studies within a narrow scope of rival hypotheses such as magmatic and sedimentary deposits, and turned into a dynamic perspect, that the ore deposits have been formed within a geodynamic framework from which the source rocks or ore formations of any geological environment are susceptible to be activated, migrated and concentrated as lodes through the interconnection and interaction of geological processes. Among them, the fluids originating either as magmatic, juvenile and meteorological or both play a key role in the ore genesis.

Metamorphic mineral deposits have been originated from regional metamorphism mainly caused by conduction regime within earth's crust. It indicates a kind of transformation ore deposits belonged to 'short-range migration type'. The ore constituents of source beds or pre-existing ore deposits are activated, migrated and concentrated to form this transformation ore type mainly through the fluid actions evolved at various stages of its P-T-t path which embodies the anatexis when the peak metamorphism reaches beyond the melting curve. The ore formations, being represented as the rock association of source beds and micro-source beds, can be classified as sedimentogenic, volcano-sedimentogenic and volcanic, among which the volcano-sedimentogenic ore-formations appear as most important one.

Metamorphic reactions notably the dehydration reactions from which the fluids evolved in the various stages of regional metamorphism since the interstitial solution to the initiation of migmatization and exhumation stage presented as pressure-released retrogressive reactions predominate in constraining the migration behavior of geochemical elements such as lithophil, chalcophil and siderophil.

A tentative classification of metamorphic mineral deposits may be categorized according to the evolutionary stages of metamorphism and the fluid effects including the migmatization and its post hydrothermal solution stage as: 1) Pre-metamorphic deposits, 2) Metamorphogenic deposits, and 3) Migmatitic deposits.

Key words: Status of metamorphic deposits, constraints of metamorphic mineral deposits, ore formations and fluid effects, classification of metamorphic mineral deposits.