

刊于“矿床学参考资料”(下册)
朱上庆主编
地质出版社, 1986.

关于成矿系列及成矿模式问题

武汉地质学院

翟裕生 秦长兴

成矿系列及成矿模式是现代矿床学的重要成就和发展方向之一, 对这方面的研究成果作一介绍及评述是十分必要的。

一、成 矿 系 列

(一) 概 述

1979年程裕淇等在“铁矿成矿系列”的基础上提出了“成矿系列”的概念。“成矿系列是由两个或更多的矿床类型所组成, 它们分别含有一定的有用组分, 产出在一定地质单元内的不同地质部位, 其具体的生成地质条件虽有所不同, 但都在一定的主要的地质作用的影响之下, 主要形成于一定的地质历史时期的同一或不同阶段, 且从区域地质的发展历史角度来考虑, 彼此之间存在着内在的联系, 并构成一个四维成矿整体, 即一个成矿系列。”^[1]成矿系列在一定程度上可与构造体系、建造及矿物共生组合等概念相类比。

成矿系列从联系的观点、总体的观点研究同一地区不同类型矿床之间的联系; 注意这些矿床总的地质构造背景及其发展历史; 在区域构造场、地化场及地球物理场等综合研究的基础上探求矿床的成因及分布规律; 此外, 从成矿系列的观点出发还可对矿床学中的一些基本问题, 如层控矿床的成因作更为合理的理解。成矿系列是在更高的层次去研究矿床, 这就加深了对矿床成因的认识, 这是矿床学研究中思想方法上的一次飞跃。在实践中, 当一个地区发现了某种类型的矿床时, 则可注意寻找属于同一系列的其它类型的矿床, 指导就矿找矿, 并对矿区远景作出较为客观的综合评价。如近年来安徽321队在狮子山矿区深部发现了五通石英岩顶部的层状铜矿体(类似铜官山式)及其它矿化类型, 因而确定了矽卡岩型、层控型等多种铜、硫矿床类型的共生关系。又如, 322队利用玢岩铁矿模式(实质是一个成矿系列模式)在宁芜火山岩系地区找到了类似白象山式铁矿化, 这都说明了成矿系列对找矿的指导意义。

(二) 主要的成矿系列

程裕淇等(1983)首先以三大岩类所反映的不同地质背景, 作为划分最高级别成矿系列的依据, 并列出了主要的成矿系列(表1至表3)。

表 1 与岩浆作用有关的矿床成矿系列简表(据程裕淇等简化, 1980)

系 列 类 别	常见的(或可能的)矿种(或元素)	矿床实例
1. 与酸性中、浅成侵入活动有关的成矿系列 ① 岩浆晚期、气成热液型亚系列 ② 锡石硫化物型亚系列 ③ 云英岩、矽卡岩复合型亚系列 ④ 接触交代、热液型亚系列 ⑤ 热液型亚系列	W, TR, Nb, Ta (Bi, Mo) Sn, Cu, Pb, Zn (W, Sb, Hg) W, Bi, Sn, Mo (Be, Pb, Zn, Hg) Fe, W, Mo, Zn (Cu, Pb, Sn, Bi) Co, Ni, Bi, Ag, U (As, Sb)	大吉山, 西华山 个旧, 大厂 柿竹园 翠宏山 捷克西富矿山
2. 与中、酸性浅成侵入活动有关的成矿系列 ① 斑岩铁矿型亚系列 ② 斑岩铜矿型亚系列	Fe, Mo (Cu, Pb, Zn) Cu, Mo, Fe, S (Pb, Zn, Ag)	河南八宝山 城门山
3. 与酸性、中(偏基或偏酸)性火山侵入活动有关的成矿系列	Fe, Sn, Mo, Zn, Pb (Cu, S)	闽南 粤东
4. 与海相酸、中性火山-侵入活动有关的成矿系列	Cu, Pb, Zn, S, 石膏	日本黑矿
5. 与海陆交替相中性火山-侵入活动有关的成矿系列	Au, Ag, Cu, Pb, Zn, S, Hg	罗马尼亚喀 尔巴阡山
6. 与中性(或偏酸)、中基性中、浅成侵入活动有关的成矿系列 ① 接触交代热液型铁(铜、钴)亚系列 ② 接触交代热液型铁、钴(砷)亚系列	Fe (Cu, Co) Fe, Co (As)	大冶 苏联达什干山
7. 与陆相富碱玄武安山质火山-侵入活动有关的成矿系列(玢岩铁矿型)	Fe (Cu, S, P, Au等)	宁芜
8. 与海相角斑质、中酸性火山-侵入活动有关的浅变质成矿系列	Fe (P)	瑞典基鲁纳
9. 与细碧角斑质火山-侵入活动有关的浅变质成矿系列 ① 第一亚系列 ② 第二亚系列 ③ 第三亚系列(含铜黄铁矿)	Fe (Cu) Fe, S (Co) Cu, S (Pb, Zn)	云南大红山 云南大勐龙 白银厂
10. 与铁质基性、超基性岩浆侵入活动有关的成矿系列	Fe, Ti, V (Co, Ni, Cu, Cr)等	大庙
11. 与镁质基性超基性岩浆侵入活动有关的成矿系列	Cr (Pt)	甘、新、藏
12. 与钙镁质基性超基性岩浆侵入活动有关的成矿系列	Cu, Ni (Pt)	金川
13. 与碱性岩浆侵入活动有关的成矿系列 ① 与正长岩有关的亚系列 ② 与富钾质岩浆活动有关的碳酸岩型亚系列 ③ 与富钠质超基性杂岩有关的碳酸岩型亚系列	U, Th, Nb, TR TR, Th Fe, P, TR	辽宁赛马 美国加州蒙 廷帕斯 苏联、科无 朵尔
14. 与酸性火山-侵入活动有关的非金属成矿系列 ① 接触酸性淋滤交代型、刚玉、红柱石亚系列 ② 火山-气液交代型沸石、膨润土、珍珠岩亚系列	红柱石、刚玉 沸石、膨润土、珍珠岩	苏联谢米兹一 布台 吉林九台

表 2 与沉积作用有关的成矿系列(据程裕淇等简化, 1980)

系 列 类 别	常见的(或可能的)矿种(或元素)	矿床实例
1. 海相陆源碎屑岩、近岸硅质岩、碳酸盐岩组合的成矿系列 ①正常沉积的Fe、Mn亚系列 ②沉积磷块岩亚系列 ③沉积矿源层或受沉积期后作用叠加的Fe、Pb等亚系列	Fe、Mn矿 磷灰石矿或磷灰石—细晶磷灰石矿(或含P、Cl等) 镜铁矿—方铅矿、闪锌矿(或含Sb、Hg、Ag等) 菱铁矿(或含Pb、Zn、Cu、Sb、Au、U、Mn等)	云南鱼子甸 广东乐昌、四川什坊、贵州 陕西大西沟 东川Z铜矿
2. 海相黑色页岩、石煤、硅质岩组合P、V、U、Mo、Ni等元素的成矿系列	黑色页岩(或含U、V、Mo、Ni、Co、Cu)—磷结核、石煤(或含V、Mo、Ni等)、硅质岩(或含U、V)、黑页岩—黄铁矿	湖南牛蹄塘组 华南孤峰组
3. 海陆过渡相或陆相碎屑岩组合含Fe、Al、煤、石油的成矿系列 ①Fe、Al、煤亚系列 ②石油、天然气、油页岩(自然硫)亚系列	褐铁矿(或相变为黄铁矿)、铝土矿(或相变为耐火粘土矿)、煤层(常包含Ge、Ga等元素) 石油、天然气矿藏(油田水常伴生K、Na、Li、B、J元素)及(或)油页岩矿(常伴生U、V、Cu等元素)及(或)自然硫矿(伴生石膏、硬石膏等)	华北(C)褐铁矿、黔桂(C-的铝土矿、华北(CP、TJ、R)的煤田 松辽(K)油田, 茂名(E)油页岩, 山东(E)自然硫
4. 海相碳酸盐岩、蒸发岩组合的成矿系列	石膏矿(石盐)、石盐矿(钾石盐)、石盐矿(光卤石)	山西(O)石膏矿、四川(T)石盐矿、苏联(E)喀尔巴阡钾盐矿床
5. 陆相碎屑岩、蒸发岩组合的成矿系列 ①夹海相层的亚系列 ②单纯陆相亚系列	石膏矿—石盐矿, 石盐矿—杂卤石矿, 石盐矿—杂卤石矿(钾芒硝矿) 芒硝、天然碱矿—石膏、石盐矿、硼砂矿、石盐—光卤石矿 含铜砂岩、含铜砂砾岩矿(或含U、V等)	大汶口(E)石盐、杂卤石矿床、江汉(E)石盐、钾芒硝矿床 桐柏(E)天然碱矿、察尔汗光卤石矿、班戈湖硼砂矿(或K—E)含铜砂岩矿
6. 陆相表生风化残积带的成矿系列 中、酸性火成岩表生风化带亚系列	高岭土、(红土型)铝土矿、富稀土元素粘土矿	苏州高岭土矿床、海南岛红土型铝土矿、赣南含稀土的风化壳矿床

(三) 关于成矿系列的几个问题

1. 成矿系列的概念问题: 自成矿系列的概念提出以来, 许多学者从不同的角度对其进行了论述。考查这个概念就会发现: (1) 从概念本身看成矿系列是指一个地区实际存在的矿床组合(类似于构造体系), 但从前人已建立的成矿系列(表1至表3)可以看出, 指的是一个理想的矿床组合(相当于构造型式)。(2) 概念的核心是成因联系, 但其伸缩性太大, 不能确定有怎样的联系才能归于一个系列, 致使各人所建立的成矿系列^{〔1〕〔2〕〔3〕〔4〕}的实质相差很大。实际上, 在一定的层次内探讨成因联系才有确切的含义。(3) 成矿系列的研究虽然对其它地质学科的成果有所考虑, 但在概念中没有反映, 使得成矿系列的建立与划分没有一个合理而明确的标准。(4) 将成矿系列划分为与变质作用、沉积作用和岩浆作用有关的三大类, 虽有利于研讨成岩作用和成矿作用的联系, 但是限制人们跳出此范围

表 3 与变质作用有关的成矿系列(据程裕淇等简化, 1983)

系 列 类 别	常见的(或可能的)矿种(或元素)	矿 床 实 例
1. 受变质沉积矿床成矿系列 ①铁矿亚系列 ②铁、硫(黄铁矿)亚系列 ③铅、锌、铜、铁亚系列	Fe Fe, S, (Cu) Pb, Zn, Cu, Fe	鞍山、迁西 山西五合金岗库 内蒙狼山
2. 受变质火山矿床成矿系列 ①铁矿亚系列	Fe, (Ti)	晋北五台、吕梁地区
3. 受变质火山型-变质热液富集型成矿系列 ①铜铁亚系列 ②钨矿亚系列	Cu, Fe W	四川拉拉-石龙地区 奥地利费别塔尔矿床
4. 受变质沉积型-混合岩化热液富集型成矿系列 铁矿亚系列	Fe	鞍山弓长岭等
5. 混合岩化富集成矿系列 硼、铁(稀土)亚系列	B, Fe, (TR, Cu)	辽宁东南部和吉林南端

建立更高层次的成矿系列, 以及探求系列形成的机制。可见, 必须给成矿系列一个合理的定义, 并要有成矿系列层次的概念。

前人已注意到了矿床与建造的密切联系^[2]。从自然作用的实质看, 矿床是建造中的特殊岩相, 矿床的成因与建造的成因具有一致性(故在现代矿床学中矿石与岩石的界线越来越模糊了)。此外, 建造是已被广泛接受和使用的概念。因此应将成矿系列定义为: 与同一建造有成因联系的各种成因类型矿床构成的四维整体。

建造是在一定大地构造单元某一阶段形成的岩石的共生组合。这个概念有三个要点:

(1) 建造与一定的大地构造单元相联系; (2) 建造与大地构造发展的一定阶段相联系; (3) 建造是岩石的共生组合, 这些岩石之间有成因联系。与同一建造有成因联系的各种类型的矿床之间也有成因联系, 因而表现出一定的时空(四维)关系, 其整体(成矿系列)形成于一定的地质构造单元, 受一定的地质作用的控制。如发育于优地槽发展早期阶段的细碧角斑岩建造, 它主要由细碧岩、角斑岩和石英角斑岩组成, 与其有关的有黄铁矿型铜、锌、铅矿床及铁、锰的氧化物矿床, 它们可构成一个成矿系列^[1]。

这样叙述成矿系列的概念: (1) 包括了前人的含义; (2) 反映了矿床与建造的本质联系, 又利用了现已被广泛接受了的建造的概念; (3) 适合当前从建造、构造等基本成矿条件出发进行矿床预测及找矿勘探的状况; (4) 包括了难以归入成矿系列的、不与其他类型矿床共生的“独居”矿床, 如金伯利岩中的金刚石矿床; (5) 简明。

2. 成矿系列的层次及不同层次成矿系列的关系问题: 系列内部都是有一定层次的, 成矿系列也有一定的层次。我们通常使用的成矿系列(狭义)是指在一定地质历史时期、一定地质单元这个较低层次的综合。一定的地质历史时期是指具有相同或相似的主要地质作用活动的地质发展阶段。如与一定地壳运动有关的构造岩浆期、海进、海退或海进海退交替期, 区域变质作用期等。在不同地质单元, 其延续的时间长短是不同的。

一定的地质单元是指具有一定的共同地质作用发展史, 构造、岩浆(及(或)沉积、变质)作用特征的地区或地带, 在许多情况下, 相当于三、四级大地构造单元。还可在更长

的地史时期、更大的区域对成矿作用进行更高层次的综合,依此类推。最后可在整个地史时期、全球范围内综合,得到最高层次的成矿系列。这就是成矿系列的层次。例如,地槽中形成的每一建造对应一个成矿系列,但考虑到地槽下沉→上升→褶皱的全过程,则这些建造有一定的联系及次序,构成一建造系列,对应的成矿系列可综合成高一层次的成矿系列;若再考虑地壳由地槽→地台→地洼的演化,则可综合得到更高层次的成矿系列。

成矿系列层次的概念是成矿系列概念的补充和发展,由此可更确切地理解成矿系列,并消除一些混乱。它引导人们在更高层次去研究矿床的时空分布特征,有助于全球及区域成矿规律的研究,有助于不同比例尺的成矿预测及找矿勘探。

矿床分类的一般原则是矿床之间所固有的次序及本质的联系。现在的矿床成因分类作为最低层次的分类经理论和实践证明是可行的。由于成矿系列揭示了矿床之间的联系及次序,适用于不同比例尺的成矿预测和找矿勘探,有利于在矿床学研究中采用系统论、控制论的方法,即它能方便地用于矿床学的理论与实践。因此现代矿床的分类应当依据成矿系列的层次,以反映成矿系列本身所固有的次序。

成矿作用具有阶段性、不可逆性和周期性,这是成矿系列及成矿系列层次存在的客观基础。不可逆性与周期性的辩证统一就是重演律,因此不同层次的成矿系列符合地质重演律,即不同层次的成矿系列有大致相同的演化规律。例如华南与燕山期花岗岩有关的稀有元素矿床的演化:TR相对时代较早,形成于燕山第一至第四期,主要为第三期,同位素年龄 $170\sim 136\text{Ma}$;Nb、TR与TR相似,但略迟于TR(约 $161\sim 122\text{Ma}$);Nb、Ta都属燕山第三至第四期($159\sim 107\text{Ma}$),其中Nb花岗岩主要是燕山第三期补充期或燕山第四期早阶段的,而Ta花岗岩几乎全属燕山第四期晚阶段($135\sim 100\text{Ma}$);Be与Nb、Ta相似,但略晚(平均 128Ma);W、Sn、Mo成矿时间较长,至少有两个成矿期,属燕山第三、四期。可见华南与燕山期花岗岩有关的矿床,随时间的先后,大体构成一个 $\text{TR}\rightarrow\text{Nb}$ 、 $\text{TR}(\text{W}, \text{Sn}, \text{Mo})\rightarrow\text{Nb}(\text{Be})\rightarrow\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}\rightarrow\text{W}$ 、 Sn 、 Be 、 Mo 的成矿系列。

与燕山期某一(复式)岩体有关的矿床,由早期向晚期演化往往依次产生 $\Sigma\text{Ce}\rightarrow\Sigma\text{Y}\rightarrow\text{TR}$ 、 Nb 、 $\text{Ta}\rightarrow\text{Ta}\rightarrow\text{W}$ 、 Sn 矿化。

综合上述,华南与燕山期有关的矿床的总体演化与同一岩体有关的矿床有大致相似的演化规律,即符合重演律。

又如锡矿研究表明^[5],前寒武纪至早古生代以含锡伟晶岩为主;晚古生代以电气石、绿泥石多硫化物和矽卡岩型锡石-硅酸盐建造为主;晚古生代至中生代中期以石英、云英岩和矽卡岩型锡石-石英建造为主;中生代早中期以电气石、绿泥石多硫化物为主,有少量的矽卡岩型锡石-硅酸盐建造;早古新世至晚第三纪以锡石-硫化物和流纹岩建造为主。而与某一岩体有关的锡矿床,由早到晚往往有从矽卡岩型、伟晶岩型→云英岩型、石英脉型→锡石硫化物型的演化趋势。

同样可以看出,整个地史时期锡矿类型的演化和与同一岩体有关的锡矿化有大体相似的演化规律,即符合重演律。

3. 成矿系列的划分及建立问题:既然成矿系列是与同一建造有成因联系的所有类型矿床构成的四维整体,所以建造就是成矿系列划分及建立的基本依据。

成矿系列的产生是成矿流体化学运动、机械运动的综合结果,故成矿系列的建立要充

分考虑基础学科的知识,要以成矿流体在其运动过程中的动力学状态、化学状态的演变及元素在流体运动过程中的性状变化为其重要依据。

可用矿床的成因类型进行排列组合,得出所有可能的组合型式,除去有逻辑矛盾的或与现有公认地质理论相矛盾的组合方式,剩下的就是自然界可能存在的成矿系列。这样可把现有的成矿系列归入其中,并用它进行新的成矿系列的预测。可见它在矿床学中有象化学中门捷列夫周期表那样的作用。

4. 成矿系列的复合问题:成矿系列反映了在同一地区近于同时形成的、有成因联系的矿床之间的关系。既然每一矿床都可归入一定的成矿系列,那么矿床间的另一种关系——即同一地区出现不同时期形成的没有成因联系的矿床就属于成矿系列的复合。

重新考查以前许多有争论的矿床,则可明白那些被认为是“多成因、物质多来源、多期形成的矿床”原来是一个成矿系列或成矿系列的复合或成矿系列的联合。例如白云鄂博铁-稀土元素矿床,以前对其争论很多,但近年来的研究表明它是元古代的沉积作用和海西期热液作用复合的结果,即是成矿系列的复合。对于相当数量的“层控矿床”可能作相似的理解。

当建立了一定数量的成矿系列之后,可对其进行排列组合,剔除其中有逻辑矛盾的及与公认地质理论不符合的组合形式,可得出成矿复列复合、联合的可能方式,把已有的成矿系列复合、联合方式归入其中,并用它进行成矿系列复合、联合新方式的预测。

二、成 矿 模 式

(一) 概 述

成矿模式是用简明的图表等形式对矿床的地质特征、成因和分布规律等的高度综合和概括。如斑岩铜矿模式、黑矿成矿模式、钨矿的“五层楼”模式等。

模式一般包括矿体的形态产状、矿石成分、围岩性质、蚀变特征以及矿床之间的关系和总的地质背景。一些模式中还反映了矿床的时空分布、物质来源、成矿条件、成矿方式等内容。模式一般有三种表达方式:即图解式;流程图式及概念化表格式,有的还用简炼的文字或公式表示。模式有定性的,也有定量的,现在多为定性的。

成矿模式的研究一般是选择研究程度较高的典型矿床,利用地质观察、地球化学、地球物理等方法取得各种信息,并对其进行反复的对比、综合分析,不仅依据地质理论推断、重视矿山地质的调查和验证,而且要用基础学科的知识佐证推断的科学性,力求在矿床成因产状或勘查方面取得比较深入的认识,概括出一些本质性的规律而建立矿床成因模式或矿床勘探模式。

模式的萌芽早就有了,葛朗特(Grout)的金属成矿树、艾孟斯的围绕岩基的金属成矿分带(16个带)就是理想的成矿模式。成矿模式实质是对某种成矿观点或认识的概括,它的主要特点是高度的综合性和概括性,它象物理模型和数学模型一样,反映了矿床最本质的东西,因而可作为进一步研究或对比的基础。模式化尤其有利于定量研究,如美国据几个典型成矿模式,建立了找矿的计算机咨询系统。成矿模式在找矿中也显示了巨大的威力,如六十年代Lowell和Guilbert、Sillitoe、Sawkins等人建立了斑岩铜矿成矿模式后,据此

不仅在南、北美洲滨太平洋矿带发现了多处斑岩铜矿，还在菲律宾、巴布亚新几内亚等地相继找到了大型矿床。又如华南钨矿床“五层楼”模式建立后，据此并结合控矿构造分析找到了新的隐伏钨矿床。

成矿模式的研究推动了矿床学的发展，有人甚至认为近二十年来成矿理论的研究成果主要表现在提出了四个成矿模式：（1）斑岩铜矿的热液蚀变模式；（2）密西西比型矿床古含水层模式；（3）沉积型铜矿的萨布哈模式；（4）块状硫化物矿床的火山成因模式。

（二）锡矿的多旋迴成矿模式及由此看国内外成矿模式方面研究的主要差别

C. K., Burton(1977) 认为马来西亚的锡矿是由多旋迴成矿作用形成的：（1）深成岩浆作用将锡由深部带到浅部；（2）深成岩浆作用使锡初步富集；（3）岩浆活动晚期部分岩浆上升到浅部，锡富集在岩体的边缘及顶部；（4）侵蚀作用使原生锡矿搬运形成砂矿；（5）砂矿下沉，并被深成岩浆作用迁移形成更大的锡矿。这种作用多次反复，形成越来越大的锡矿。

为了叙述方便，我们将与酸性岩浆作用有关的成矿作用分为三个阶段：（1）前岩浆阶段（简称Ⅰ阶段）：包括生成岩浆的原始物质的形成及这个过程中成矿物质的初步富集、岩浆的形成等；（2）岩浆阶段（简称Ⅱ阶段）包括岩浆的侵入、演化、成矿物质的进一步富集及含矿流体的分离；（3）岩浆后期及岩浆期后阶段（简称Ⅲ阶段）就是狭义的成矿阶段，包括花岗岩的蚀变、伟晶岩的形成及以后的气成-热液作用。

根据成矿模反映的多旋迴成矿作用的完善程度，将其分为：

1. 完全的成矿模式：它反映了前岩浆阶段（Ⅰ）、岩浆阶段（Ⅱ）、岩浆后期和岩浆期后阶段（Ⅲ）这个成矿作用的整个过程，这里称为Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ型。

2. 不完全的成矿模式：它只反映整个成矿作用过程中的某一阶段或两个阶段，它又可再分为：第一类：从反映Ⅰ或（和）Ⅱ阶段为主的成矿模式，称为Ⅰ+Ⅱ型。如A. H. G., Mitchell (1972) 的含锡斑岩的全球模式，上述锡矿的多旋迴模式等；第二类，以反映Ⅲ阶段为主的成矿模式，简称Ⅲ型，如内蒙黄岗梁内生金属成矿模式，斑岩铜矿蚀变分带模式等。

依据以上的划分，我们将现已有的主要的锡矿成矿模式加以考查、统计（如表4）。

表 4 现已提出的锡矿成矿模式的类型及分布

（据[12]—[20]等统计）

模 式 数 目	类 型	完全成矿模式	不完全成矿模式		Σ
		Ⅰ+Ⅱ+Ⅲ型	Ⅰ+Ⅱ型	Ⅲ型	
国 外		0	9	1(?)	10
国 内		0	0	8	8
Σ		0	9	9	18

可见，国外锡矿模式以反映Ⅰ—Ⅱ阶段为主，而国内则以反映Ⅲ阶段的为主。

我们认为：Ⅰ、Ⅱ阶段主要决定矿床的总体特征（矿床产出的大地构造背景、矿化强

度等),因此,反映这个阶段的成矿模式有利于大区域的成矿预测,其适用性也广,但不能用来具体地指导大比例尺的找矿勘探及成矿预测。国外以这类成矿模式为主,反映了他们重视矿床产出总的背景、总的分布及对大地构造环境的重视。而Ⅲ阶段决定于含矿区内矿床的特征(各类型的发育程度、时空关系等),反映此阶段的成矿模式有利于大比例的找矿勘探和成矿预测,有利于就矿找矿,但对大区域的预测就不全适用。国内以这类成矿模式为主,反映了国内对狭义成矿作用及矿床本身特征的重视,这也与对深部构造、大区域构造与成矿的关系研究不足有关。

(三) 成矿模式研究的动向

1. 由上述分析可以看出,不完全成矿模式都有缺陷,而比较完美的是完全成矿模式。它反映了矿床形成的整个过程,利于各种比例尺的找矿勘探及成矿规律的研究。因此,Ⅰ+Ⅱ型与Ⅲ型成矿模式的结合,建立完全的成矿模式是模式研究的重要发展方向,现已有一些可贵的尝试。如云南云龙锡矿模式^[14]。

2. 野外地质特征与成岩成矿实验结合,使模式建立在可靠的基础之上。如亲花岗岩矿床模式^[8]和内生矿床的岩石学模式^[9]。

3. 矿床地质特征、地球物理特征及地球化学特征结合,有利于找矿勘探。如叶绪孙的大厂锡矿模式^[10]。

4. 体现联系的观点、总体的观点(即反映成矿系列),这在国内最为特征。如玢岩铁矿模式、长江中下游安山岩-闪长岩质火山-深成岩铁矿系列(见后)^[11]。

5. 大区域的对比及综合:业已发现,许多矿床都有某些共同特征及系统演化(如花岗岩的特征、矿床特征、矿物的标型特征等),还发现一些巨大的区域分带(如南岭地区东钨西锡的分带,马来西亚锡矿化东弱西强^[12]等)。要搞清楚这些问题非进行区域对比不可,可见在更大范围内综合并建立更高层次的成矿模式具有重要的意义。

6. 多旋迴模式引起了广泛的重视,在美国、苏联、玻利维亚^[13]、马来西亚和中国都有人提出这种模式,这表明了这种成矿作用的普遍性,因此应加强研究,尤其是实验研究,使其更加完善。

7. 定量化的趋势:模式定量地表示矿床特征(地质、地球物理、地球化学)、定量地解释矿床成因(与相图结合),十分有利于矿床研究中应用电算技术,有利于应用数学推理的方法。如叶绪孙大厂锡矿模式、亲花岗岩矿床模式。

总的看来,模式的研究是向着多样性、综合性、严密性和科学性的方向发展。

三、成矿系列和成矿模式研究举例

长江中下游地区是我国重要的铁矿基地。这里的矽卡岩型和玢岩型铁矿揭露较好,研究程度较高。作者之一^[3](1979)在学习前人成果和近年来研究的基础上,对上述两类矿床进行了综合对比,认为矽卡岩型铁矿和玢岩铁矿在成因上相似,都包含有接触交代成矿作用、碱质交代成矿作用、矿浆贯入作用和沉积-接触变质成矿作用以及相应的矿床类型,并在此基础上分析了区域构造和岩浆活动背景,初步提出了安山岩-闪长质火山-深成岩成矿系列的概念,探讨了其可能的成矿模式。

1. 成矿的区域地质背景：长江中下游位于华北华南两个地块之间，为一向南突出的弧形断陷带，震旦系到第三系的总厚度超过一万余米，其中分别含有煤、石煤、磷结核层、菱铁矿、赤铁矿、黄铁矿及膏盐等沉积矿产。内生铁矿主要赋存在上古生代和三叠纪的碳酸盐建造和中生代火山-沉积建造中。

区内断裂褶皱构造发育。近EW向、NE向和NW向三组深断裂为主干断裂。褶皱构造主要完成于印支-燕山期，由震旦系到三叠系的地层组成，轴向多为NE和NNW向。燕山运动尤其是中晚期、新华夏系构造广泛发育，其中NNE向断裂（由大量地质、物探及同位素资料证明）切割到达上地幔，是控制燕山中-晚期构造岩浆成矿带的主干构造，它们与近EW向、NW向构造的交接复合部位，多是岩浆作用、热液活动的频繁地带，在其它有利因素的配合下常形成矽卡岩型矿床和玢岩铁矿。

2. 含矿岩浆岩的特点：与铁矿有关的主要是燕山期的闪长岩和安山岩类，出露面积甚广，成岩时间集中在 $1.70 \sim 0.9 \times 10^8$ a间，并由中偏基性、经中性向酸性或偏碱性演化，既形成各种深度的侵入岩，又发生陆相断陷盆地中的火山活动，构成复杂的火山-深成岩组合。

与矽卡岩型铁矿有关的岩浆岩主要是闪长岩、辉石闪长岩、石英闪长岩、还有石英二长岩、花岗闪长岩、花岗岩等，多构成岩株状复式杂岩。成岩时期据同位素年龄为 $1.65 \sim 0.95 \times 10^8$ a，伴生铁矿化时间为 $1.40 \sim 0.9 \times 10^8$ a，岩体顶板侵入深度 ≥ 2 km。岩石富碱、更富钠， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.21 \sim 8.97\%$ ， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.29 \sim 2.35$ ， $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 5.08\%$ ，钙碱指数58，属钙碱系列。

与玢岩铁矿有关的是辉长闪长玢岩等，形成于玄武安山岩喷发旋回的晚期是一种来源较深、体积较大、侵位较浅、常出现角砾状构造的次火山岩。成岩时间 $1.31 \sim 0.90 \times 10^8$ a，伴生的铁矿化的时间为 $1.18 \sim 0.93 \times 10^8$ a。岩体顶板侵入深度 < 1.5 km，其局部突出的岩钟、岩瘤、岩枝等小侵入体是铁矿形成的有利部位。岩石富钠、偏基性， $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.90 \sim 8.09\%$ （平均6.79%）、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.24 \sim 5.83$ （平均2.00）、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} = 7.99\%$ ，钙碱指数52，属钙碱性的中基性岩。

总体来看，上述两类含矿岩石主要是富钠、偏基或偏碱的中基性岩，含挥发分较多，付矿物属磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石组合。其原始成分相当于上地幔或下地壳安山质（玄武安山质）岩浆，沿断裂向上运移过程中同化围岩，汲取其中的Fe、Ca、Na、K以及Cl、F、P、S、 CO_2 和 H_2O 等挥发份从而增加了岩浆中的铁质和矿化剂，促进铁质运移和在一定条件下聚集，在不同的环境下形成了不同岩石组合及有关的矿床类型。

3. 矽卡岩型矿床的成因分类：矽卡岩矿床是指一组与中性-中酸性侵入岩和碳酸盐岩有关的接触交代到热液型铁矿床，通称大冶式，以鄂东地区最为著名。它的构造背景是位于隆起区和拗陷区的过渡部位，有比较发育的碳酸盐相和碎屑岩相；在构造上处于几组断裂的交汇部位，它们是岩浆作用及矿化活动的中心。中-酸性岩浆侵入到古生界—三叠系地层中，碳酸盐是铁矿物的良好沉淀剂，上三叠统砂页岩常对矿液起到遮挡层的作用，使矿石堆积在下伏的中-下三叠统碳酸盐岩中。

矿床产于接触带构造中，矿体形态复杂，矿石构造变化大，过去都认为是接触交代成因的。近来鄂东南区铁及铁铜矿山揭露出的深部矿化现象说明其成因比较复杂，初步划分三类：

(1) 接触交代型: 有明显的交代作用, 矿体中常保留有原岩的残余, 原岩的层理揉皱以及选择交代现象, 是含铁热液在接触带附近交代有利岩层成矿的, 属狭义的接触交代矿床。矿体为似层状和不规则状, 常紧靠接触带产出, 产状受接触带产状制约。矿石以交代型条纹状、稠密浸染状和块状为主。矿石矿物有磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿、菱铁矿、黄铜矿、黄铁矿等; 脉石矿物有透辉石、石榴石、金云母、绿帘石、方解石、硬石膏、石膏等。有用元素组合为Fe-Co, Fe-Cu-Co, Fe-Cu-S, Fe-Cu-Au等, 组成铁矿床或铁铜矿床。一般矽卡岩化较强, 矿体(脉)旁含水硅酸盐矿物如金云母、阳起石、绿泥石等比较发育。

矿旁岩浆岩中碱质交代作用(主要是钠长石化、钠柱石化)比较发育, 且靠近矿体有强度变大的趋势。在一些揭露较深的矿山中, 显示出铁矿化强度与蚀变强度呈正相关。岩石分析资料表明, 闪长岩钠化后析出铁达岩石重量的3~5%。当岩体较大、蚀变较强时, 能析出相当数量的铁, 成为矿床中铁的重要来源。如灵乡的脑窖和广山两铁矿中, 矿体产在钠化闪长岩顶部的大理岩和矽卡岩化大理岩中。矿体中残余层理明显, 甚至有残留大理岩包体, 有大量条纹状矿石。这种条纹状矿石可与美国犹他州铁泉矿床的矿化蚀变比较。其成矿机制可能是: 该区原来存在由大冶灰岩组成的背斜构造, 当闪长岩向上侵位时, 岩体自变质即钠化过程中形成的富铁气液沿边缘相带的陡立原生, 次生裂隙上升, 遇到大理岩、白云质大理岩时, 顺层交代而形成铁矿体。形成的矿体多位于岩体顶缘或侧旁局部拱起处, 侧向较长, 垂向较短, 多呈覆瓦状或斗蓬状。

(2) 矿浆贯入型: 近年来^[11]在鄂东南矽卡岩型矿床中多次发现有矿浆成矿的迹象。在铁山的铁门坎和狮子山矿段, 在大冶的黄牛山和大广山、灵乡的脑窖和小包山等处, 除了上述的接触交代矿体之外, 还有一种富矿脉, 它们与大理岩、闪长岩等围岩有清楚的穿插关系, 矿体边缘常具弧形焊接边和薄层片理化带, 表示曾发生过高温度流体对围岩的挤压、贯入作用。围岩蚀变很弱或没有, 为充填成因的。矿体由致密块状磁铁矿或含铜磁铁矿组成, 伴生矿物很少, 多为富矿石, V、Ti含量高。矿体中常见因冷缩而形成的横节理以及一些空洞, 有的被后期热液矿物充填。产于闪长岩中的这种矿体边部常见沿原生S、Q、L节理破裂的闪长岩板条被矿石胶结, 板条定向排列, 具有可拼性, 显示出富铁流体对脆性围岩的肢解贯入和胶结作用。

矿体多呈脉状或透镜状产在断裂接触带构造中, 围岩为大理岩或闪长岩。它们产在矽卡岩带中并与早期的接触交代矿床重叠, 形成复合型矿床。

上述矿床的特点很难用接触交代或热液充填作用来解释, 可能是一定深度的岩浆熔离作用析出的富铁粘稠流体或矿浆, 在压应力作用下沿断裂上升, 贯入到接触带或侧旁的裂隙中成矿的。对这类矿床, 围岩并不提供铁质。矿体不象接触交代矿床那样直受接触带控制, 而主要受断裂、裂隙的控制, 可与接触带重叠, 也可有一段距离。

值得注意的是这种贯入式矿体附近陆续发现了一些钠长斑岩或石英闪长斑岩墙(如大洪山、小洪山、脑窖、小包山等), 它们形成于主岩体之后, 略早于富矿体, 这一情况与宁芜地区有些类似。在宁芜地区, 贯入式富矿体经常与原生钠长岩体相伴出现。因此, 我们推测, 造成贯入式矿体的富铁矿浆和钠长岩(斑岩)很可能是玄武安山质岩浆发生熔离作用形成的两个端员产物。三叠系中广泛存在的膏盐层和下构造层中的含磷层可能被上升岩浆同化, 并促进岩浆的熔离作用。费尔波茨(1976)提出的磷灰石-磁铁矿-闪长岩三元

系相图，说明磷酸盐对磁铁矿浆与闪长质岩浆熔离起了作用。这种熔离作用的机制及形成的深度还需进一步研究。

(3) 沉积-接触变质型：即D₃、C₁₋₂，T₁及J₃-K₁等地层中的沉积赤铁矿或菱铁矿层（或矿源层）受中-中酸性侵入体接触变质以及热液叠加改造所形成的矿床。矿石中铁质加富，铁矿物相变为磁铁矿（据鄂东南地质队同志介绍，在鄂东抱桐山一带铁矿体中曾发现赤铁矿变为磁铁矿）。矿体为似层状、揉皱状，仍保留有沉积矿层的特征。鄂东南蒲圻群中的薄层磁铁矿体以及江苏的漂水、漂阳盆地的一些矿点属此类型。王永基也指示，我国南方（包括长江中下游）某些有一定层位的层状砂卡岩型铁矿床可能是由菱铁矿床经岩浆热液改造形成的。

由上述可知，长江中下游的砂卡岩型矿床成因较为复杂，可初步分出接触交代、矿浆贯入和沉积-接触变质三种成矿机制，它们既可独立存在，也可两种或三种共存在一个矿床中。

4. 玢岩铁矿的成因分类：以宁芜铁矿为代表的玢岩铁矿广泛分布在宁芜、庐枞等地区。矿床产在中生代陆相火山岩断陷盆地中，铁矿与主旋迴喷发晚期的辉长闪长玢岩等次火山岩有密切的空间和成因联系，故称为玢岩铁矿^{〔12〕}。其中又可划分出若干亚类。我们据成矿作用的方式并考虑成矿物质来源，将陆相火山岩矿床划分为以下三类：

(1) 气成热液交代-充填型：以陶村、凹山、吉山和梅子山等矿床为代表，是玢岩铁矿的基本类型（狭义的玢岩铁矿）。矿床主要产在含矿岩体顶缘，少量在附近围岩中。矿化受岩体内外裂隙带和角砾岩体控制，多成浸染状、网脉状和角砾状矿石带。矿石品位中等到贫。矿体规模大。矿石由磁铁矿、阳起石（透辉石）、磷灰石、钠长石等组成，有时含赤铁矿和方柱石。矿石中V、P、Ga高，Ti稍高，成矿温度550~380℃。围岩蚀变普遍而强烈，与矿关系最为密切的是钠长石化和钠柱石化。

地质观察和实验资料表明：钠长石化与矿体在空间上密切伴随，钠长石化强度与铁矿规模呈正相关；在采场可见到由未蚀变辉石闪长玢岩—钠长石—绿帘石—阳起石—磁铁矿的清楚分带；辉长闪长岩经钠化后能析出5%±的铁；这些以及其它的事实说明钠化对铁的活化转移起了重要作用。

矿床形成的可能机制是：辉长闪长岩基本固结后，又受到富钠流体的裂隙渗滤交代作用（钠化为主），使辉石、角闪石等暗色矿物中的铁与其硅酸盐载体脱离，而以络合物的形式加入到热液中去，并沿岩石的孔隙和裂隙上升到岩体顶部的裂隙——角砾岩化带中充填交代形成铁矿石，也可渗滤到外接触带围岩中交代成矿。这与上述砂卡岩型的接触交代成因铁矿相似。

(2) 矿浆贯入型：根据我们对凹山、大东山的研究，以及地科院矿床所、南京地矿所、冶金807队、808队对梅山、姑山等矿床的研究，认为其中的富铁矿是矿浆成因的。这些矿体呈透镜状、钟状和饼状，产于岩体边缘裂隙和角砾岩带中，与围岩界限清楚。矿石为致密块状磁铁矿或假象赤铁矿，含V、Ti较多，蚀变发生在成矿晚期和成矿以后。矿石中可见拉长气孔和致密球粒状“杏仁”说明成矿流体粘稠。成矿温度>450℃，较一般热液矿床为高。矿体中还有张性冷缩裂隙。

基于以上事实，认为成矿流体是高温、粘稠的富铁流体或矿浆，它可能是岩浆同化围岩（包括膏盐层）发生熔离作用形成，又沿断裂贯入到上部裂隙中成矿，甚至喷溢到地表

形成矿浆喷溢型矿体（如姑山上部矿体，有一些迹象需进一步查证）。又据钟九和大东山等地原生钠长（斑）岩与这种矿体密切相伴，我们认为：这两种产物可能是玄武安山岩浆分异作用的结果。

（3）火山沉积-接触变质型：当火山岩系中的火山-沉积型硅质赤铁矿石或含铁碧玉岩受次火山岩侵入接触时，受热力变质及热液改造而成为石英磁铁矿矿石，并伴有石榴石、绿帘石、阳起石等。矿石中V、Ti、P、Ga均很低，显示出原生沉积的特点。如宁芜的竹园山、老母峴等矿床。

上述三种主要成矿方式及相应的铁质来源，可以大体与矽卡岩型铁矿对比，这种现象有深刻的地质构造背景。

5. 长江中下游安山岩-闪长质火山-深成岩铁矿系列及成矿模式：综上所述，本区矽卡岩型铁矿和玢岩铁矿既有联系又有区别。它们产出的地质构造背景不同，因而具有上述种种差异，但它们之间又有一些基本相同点：

（1）含矿母岩基本上都属于富钠、偏基或偏酸的中性岩（闪长岩、辉石闪长岩、石英闪长岩等）；（2）铁质来源：初步研究认为：铁质主要来自就近的含矿母岩，部分来自深部岩浆分熔出来的矿浆及被改造的沉积或火山-沉积铁矿（源）层。（3）成矿方式有三种：气成高温热液交代充填为主（钠化占一定位置），其次是矿浆贯入（及喷溢（？））作用，以及原生沉积矿层的接触变质和热液改造。（4）火山岩下基底层中的膏盐层和含磷层等不仅为内生铁矿床提供了一定的物质来源，也是促使岩浆分异和铁质运移富集的重要因素。（5）成矿时代基本都属燕山晚期，由 $1.40 \sim 0.90 \times 10^8$ a，其中矽卡岩型铁矿成矿开始较早，而玢岩铁矿则稍迟。

两类铁矿床的主要区别在于：（1）产出的地质构造环境不同；矽卡岩型铁矿产在断拗带中巨厚碳酸盐岩层中的岩浆侵入地段，成矿深度 ≥ 2 km；玢岩铁矿产在陆相火山岩盆地的次火山岩体顶缘（及火山管道附近）；成矿深度 ≤ 1.5 km。（2）控矿构造不同，矽卡岩型矿床受接触带及断裂破碎带、层间裂隙的控制；玢岩铁矿以具钟状构造、厚生裂隙构造和各种角砾岩体为特征，显示超浅成矿床的特点。

应特别指出：在上述两种成矿地质环境的过渡地区，即隆起区与火山盆地的过渡地带，经常有特点介于矽卡岩型铁矿和玢岩铁矿之间的过渡类型的矿床，如南京附近的凤凰山铁矿、铁山岩体西部和金山店岩体西部的破头山、广孔山、五豹山、新屋下等矿床（点）。它们位于闪长岩类小岩体的接触带及附近的围岩中（三叠系到侏罗一下白垩统），矽卡岩不发育，属于充填-交代型矿床。详细研究这种过渡类型的矿床，发现其中也有接触交代型（如灵乡狮子山）、矿浆贯入型（灵乡脑脊）和沉积-接触变质改造型（如当涂白象山的一部分）等几个亚类，其成矿机理可与矽卡岩型及玢岩铁矿的有关类型相类比。

由以上分析可知，矽卡岩型铁矿，玢岩铁矿以及介于其间的热液交代-充填型铁矿，它们既有区别，又有联系。从区域构造全局来看，它们都是长江中下游断裂拗陷带内燕山期安山岩-闪长质火山-深成岩浆活动发展过程中的孪生产物。据郭文魁教授对长江中下游构造岩浆发展的时空分布特征的研究，并联系到铁矿成矿作用的演化，可以认为：矽卡岩型矿床形成较早（ J_3-K_1 ），位于拗陷带中隆起区的边缘。当时断裂切割尚不太深，导致花岗闪长岩-石英闪长岩-闪长岩系列的侵入，矿化以铁及铁铜为主，属早期成矿旋迴。玢岩铁矿成矿时代较晚（ K_1-K_2 ），位于继承式断陷盆地中，深断裂已切割到下地壳至上地幔，

导致安山质-玄武安山质岩浆的大量喷发和侵入,形成富碱的中-中基性岩(后期向碱性岩演化)及相应的铁磷矿床,属晚期成矿旋迴。这些矿床总的地质背景、矿质来源和成矿作用(构造-岩浆-热液-围岩的综合作用)都具有一致性。由于矽卡岩型铁矿床、玢岩铁矿以及过渡类型铁矿在时间上是逐步演化,在空间上由隆起区向拗陷盆地迁移,由岩浆侵入向火山-次火山活动转化,在区域成矿发展史上有内在的联系。因此我们认为,可将本区燕山期矽卡岩型铁矿和玢岩铁矿以及介于其间的热液型铁矿当作一个成矿系列看待,称为安山岩-闪长岩质火山-深成岩铁矿系列,以矽卡岩型铁矿和玢岩型铁矿为主要类型,另有一些过渡类型的矿床,并拟出该系列的理想模式图(图1)。模式依据现有的资料,概略地反映了本区主要内生铁矿床的时间演化、空间分布及某些成因联系,以作为进一步研究的基础。

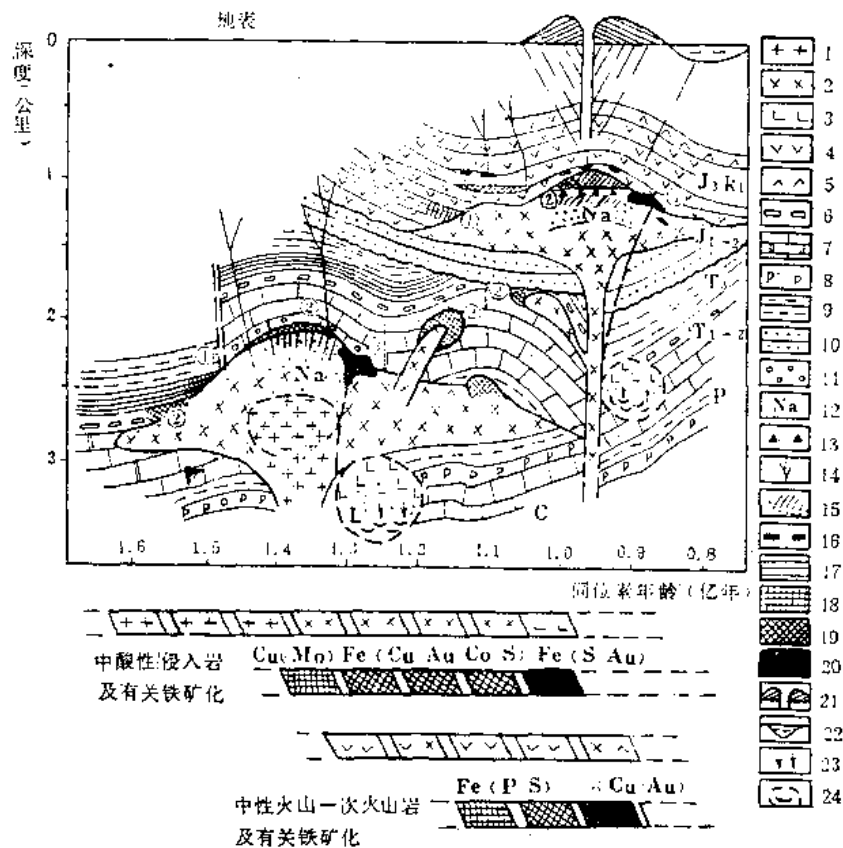


图 1 长江中下游安山-闪长岩质火山-深成岩铁矿系列理想模式图

(左—矽卡岩型铁矿成矿模式; 右—玢岩铁矿成矿模式)

- 1—酸性侵入岩; 2—中性侵入岩; 3—钠长岩; 4—中性火山岩; 5—碱性火山岩; 6—膏盐层; 7—碳酸盐岩; 8—磷块岩; 9—页岩; 10—砂岩; 11—矽卡岩化; 12—钠长石化; 13—角砾状矿石; 14—细脉及网脉; 15—蚀变矿化带; 16—黄铁矿体; 17—沉积型铁矿体; 18—沉积—接触变质型铁矿体; 19—交代型矿体; 20—岩浆贯入型矿体; 21—火山及其通道; 22—沉积盆地; 23—重力分异作用; 24—富铁熔体

主要参考文献

- 〔1〕 程裕淇等：1979，初论矿床的成矿系列问题，中国地质科学院院报 1卷 1号。
- 〔2〕 程裕淇等：1983，再论矿床的成矿系列问题——兼论中生代某些矿床的成矿系列，中国地质科学院院报 第6号。
- 〔3〕 翟裕生等：1980，长江中下游内生铁矿床成因类型及成矿系列探讨，地质与勘探 第3期。
- 〔4〕 章崇真：1980，试论华南中生代花岗岩演化规律及成矿系列，华东冶金地质 第1期。
- 〔5〕 C. Ф. 卢戈夫：1977，地壳发展历史中的锡矿化，矿床地质译文集（五），桂林冶金地质学院 1981。
- 〔6〕 张峰慧：1983，锡矿成矿模式简介，地质与勘探 第1期。
- 〔7〕 K. F. G. Hosking：马来西亚西部原生锡矿化模式，地质地球化学 1983年 第6期。
- 〔8〕 D. F. 斯特朗：亲花岗岩矿床模式，国外地质科技1981年第1期。
- 〔9〕 A. A. 马拉库舍夫：内生成矿作用的岩石学模式，国外地质科技 1983年 第7期。
- 〔10〕 H. J. Schneider等：玻利维亚锡矿省成因概念新论，D. 克莱姆编 时控与层控矿床（中译本）。
- 〔11〕 石淮立等：1981，湖北铁山“大冶式”铁矿床矿浆成矿问题的初探，地球科学第2期。
- 〔12〕 宁芜研究项目编写小组：1978年，宁芜玢岩铁矿，地质出版社。
- 〔13〕 程裕淇等：1983年，再论矿床的成矿系列问题，地质评论 第2期。
- 〔14〕 西南冶金地质勘探公司地质研究所锡矿专题组：1981，云南锡矿地质特征与成矿规律，地质与勘探，第11期。
- 〔15〕 叶绪孙：1983，大厂锡多金属矿田成矿规律及成矿预测，地质与勘探 第5期。

