中 国 科 学
1984 年 1 月　　B 辑　　第 1 期

宁芜地区宁芜型铁矿的成因、分类和成矿模式

李秉伦　谢奕汉
（中国科学院地质研究所，北京）

摘　要

本文论述了成矿岩浆的发生和演化，及其与形成两个成因系列矿床的关系．提出了各种类型矿床矿石的组构和共生矿物特征的理论解释．利用流体包裹体方法获得了成矿作用的物理化学条件及其空间变化的信息．据此，提出了矿床的成因分类和成矿模式．

本区与火山-侵入岩浆活动有成因联系的铁矿床，根据它们的生成条件，已建立了玢岩铁矿模式，并就其矿化部位和成矿特点进行了分类[1,2]．随着研究工作的深入，吴利仁提出了本区火山岩铁矿包括两大成因系列的论点[3]，从而在这类矿床的成因认识上，达到了一个新的高度．而苏、皖冶金 807 和 808 队在这类矿床的地质方面做出了贡献，为深入研究矿床成因打下了基础．在成矿的物理化学条件方面，虽然已进行过一些测温工作[4],1)，但各种矿床磁铁矿的测温结果，相当接近，多在 350—450℃之间，因而与矿床成因的论点相矛盾．因此作者对矿床地质和成矿物理化学条件又进行了多方面的研究．在成矿岩浆发生和演化以及成矿过程获得了新的成果．据此，本文阐明了这类矿床的生成和演化的物理化学条件和地球化学性质，并拟定了矿床成因分类和成矿模式，以求对前人工作做某些补充和修正．

一、成矿岩浆的发生与演化

关于火山岩铁矿与那种岩浆岩有成因关系的问题，现在已有许多证据表明：火山岩铁矿与早白垩世硅酸饱和的，富碱质的中偏基性岩石有密切关系．从粗安岩 Sr^{87}/Sr^{86} 初始比值（0.7053，0.7088）得知，火山岩浆来自上地幔，对地壳物质有一定程度的同化混染[5]．大地电磁测深的研究表明：在山东南部的沂沭地区郯庐断裂的位错，进入了软流圈[6]，该深断裂南延，通过本区的西侧．而在长江中下游分布一系列继承式断陷盆地，火山-侵入杂岩均沿断陷盆地的断裂分布．因此推测：上地幔经部分融熔产生的成矿岩浆，可能以郯庐断裂及下扬子破裂带为通道而上升．因其部位深，应处于低氧逸度的封闭系统，它的分离结晶作用，导致残浆富集铁质[7,8]．当这种岩浆侵入与地表相通的断陷盆地的断裂时，因大气氧的混入，氧逸度升高，在一定的温度条件下，将发生不混溶作用，形成岩浆和矿浆．这可以菲尔波次的闪长岩-磷灰石-磁铁矿系统在 1420℃ 发生不混溶的实验结果[9] 做佐证．在这种开放系统中的岩浆，分异趋向也发生了变化，将向富集硅和碱质的方向进行[7,8]，以致形成了本区硅酸饱和的富碱

本文 1982 年 11 月 13 日收到；1983 年 2 月 11 日收到修改稿．
1）卢焕章，全国铁矿会议资料，1979．

质的中偏基性的火山-侵入杂岩．岩浆中碱质的富集，有利于残浆气液铁矿床的形成．因此产生了两个成因系列矿床：铁矿浆矿床（岩浆熔离矿床）和由岩浆分异后期的残浆、气液发展而成的铁矿床[3]．

从对氧同位素特征及稀土元素含量和配分的研究中，可知：姑山铁矿具流纹气孔结构的矿石，其赤铁矿的 δO^{18} 为 $+0.44‰$，具雪花结构的矿石，其赤铁矿的 δO^{18} 为 $+3.46‰$；梅山铁矿中的磁铁矿，δO^{18} 为 $+1\sim+4‰$ 之间，接近岩浆岩中赤铁矿和磁铁矿 δO^{18} 的数值。因此姑山和梅山铁矿不仅矿石结构具有矿浆成因特点，就其氧同位素而言，也与火山岩的相似．在姑山铁矿的岩体与矿体中的磷灰石，其 Y、Ce 和 La 的含量和配分值十分接近[1]，进而说明两者为同源岩浆经不混溶作用形成的两种产物——岩体和矿体．向阳铁矿在成因上属于接触交代作用形成的白象山式铁矿，其磁铁矿 δO^{18} 为 $+3.73—+5.94‰$，与罗河铁矿者相近，比矿浆型铁矿的要高．铁矿体上覆黄马青组页岩所含的铁质结核，受热液影响的 δO^{18} 为 $+13.1‰$，未受热液影响的 δO^{18} 为 $+17.6‰$，因此推测形成向阳铁矿的岩浆及其热液，在成岩成矿过程中与沉积岩发生过同化和交代作用，混入了沉积成因的岩矿物质．白象山铁矿的火成岩与矿石中磷灰石的稀土元素，与姑山铁矿不同，在含量及配分值上都有明显的差异[1]．这反映出成矿性质的变化．白象山铁矿为接触交代型矿床，其成矿热液是从成矿岩浆演化而来的，并交代混染了沉积岩物质，在成分和物理化学性质上都发生了很大的改变，因而造成岩石和矿石中磷灰石的稀土元素含量的不同和重氧同位素的富集．这些研究结果既充分说明了岩浆和矿浆的亲缘关系，也表明了矿浆矿床和残浆气液交代矿床成矿作用的差异．

二、矿床特征

铁矿浆矿床有火山碎屑沉积、表成溢流和浅成贯入等不同产状；残浆气液矿床可分为岩浆后期的自变质型铁矿、伟晶型铁矿、接触交代型铁矿和热液型铁矿．它们各具特点，但又互相重迭，表现出成矿作用的多成因多阶段性质．

矿浆矿床的矿石结构和共生矿物与矿床产状有密切关系．与火山碎屑沉积、溢流和贯入等不同产状相对应的矿石结构为：火山碎屑结构（龙旗山）、气孔和炉渣结构（姑山顶部）以及晶洞和致密块状结构（梅山及姑山下部）．与之对应的矿物共生组合为：赤铁矿、石英和重晶石，赤铁矿和石英（有时有磷灰石），磁铁矿和石英（有时有磷灰石），磁铁矿、普通辉石和磷灰石（有时有钙铁榴石和石英）．这种共生矿物的变化与成矿时氧的分压有密切关系．浅成贯入矿床的成矿作用经历了矿浆阶段、伟晶阶段和热液阶段，在矿体下部的伟晶矿脉切割主矿体，在矿物共生组合上二者相同，表明形成伟晶矿脉的流体是从铁矿浆演化来的，而在矿区内广泛发育的碳酸盐化作用，结束了矿浆矿床的成矿作用．

残浆-气液交代充填矿床的共同特点是以闪长（玢）岩小岩体为中心，广泛发育矿化蚀变岩．早期矿化蚀变是从岩浆后期的碱质交代开始的，在浅成超浅成中性岩体上部构成巨厚的钾钠长石岩和钠柱石岩．铁质以磁铁矿的形式析出是从钠长石化开始的，至钠柱石化逐渐加强，在岩体上部构成浸染状的陶村式铁矿．当围岩封闭性质良好时，析出的矿物呈伟晶状，构成凹山式铁矿．中期矿化蚀变是早期矿化蚀变的继续，在各个矿区均有强烈表现，既可迭加在

1）安徽省冶金地质 808 队，全国铁矿会议上的报告，1979．

早期矿化蚀变岩之上，又可形成独立的蚀变岩，构成巨大的矿体．这期蚀变以发育一套硅酸盐矿物，硷性长石和碳酸盐矿物为特征．磁铁矿在阳起石钠长石岩、绿帘石钠长石岩、金云母钾长石岩和金云母阳起石岩中形成工业矿体，如白象山铁矿．早、中期蚀变岩和原来围岩中的硅酸盐矿物，经晚期蚀变作用都可以改造成石英、高岭石、水云母及碳酸盐矿物．含铁矿物和磁铁矿当遭受晚期蚀变时就变成黄铁矿、赤铁矿和菱铁矿，在有利的地质条件下，可以形成黄铁矿或菱铁矿的工业矿体．

三、成矿的地球化学

1. 两个成因系列矿床的成矿介质都是从熔体开始，并发展成热液的

浅成矿浆型矿床主要矿物的生成顺序为辉石、石榴石、磷型灰石、磁铁矿、石英和方解石(后两种矿物常在晶洞中产生)．各种包裹体在上述矿物中的分布情况是：在辉石中为融熔包裹体，在石榴石、磷灰石和磁铁矿中，除融熔包裹体外，还有气液固多相、气相和气液两相包裹体，而晶洞中先结晶的石英内，主要为气相包裹体，在后结晶的方解石中主要为液相包裹体．在热液阶段形成的菱铁矿中为液相包裹体．表明矿浆矿床的成矿作用是从“干”矿浆开始的，经气相逐渐转变为热液的．

在以闪长(玢)岩侵入体为中心而分布的一系列成因不同的矿床中，岩体上部的残浆气液交代矿床，早期形成的辉石和磷灰石中有融熔包裹体及气相和气液两相包裹体；在接触交代矿床和热液矿床的矿物中，均为气液包裹体．这种分布情况表明：这组矿床的成矿作用，是由岩浆分异后期的残浆开始成矿并演化到热液成矿的．

由此进一步证明了宁芜地区与火山-侵入杂岩有关的两个成因系列矿床的存在．虽然它们各具特点，但都是从熔浆开始并逐渐转变为气液成矿的．

2. 火山岩铁矿均属多成因和多阶段成矿的

各种类型矿床的野外观察和对其中赤铁矿磁铁矿等矿物热爆法测温表明：本区铁矿均属多成因和多阶段成矿．例如，梅山铁矿是经过矿浆阶段、伟晶阶段和热液阶段等成矿作用形成的．其中磁铁矿封存了成矿流体和成矿后的各期流体，在热爆温度曲线上，表现出矿浆温度(760℃)，伟晶-气液温度(480℃)和热液温度(290℃)(图 1)．陶村铁矿是经过两次主要的矿化蚀变形成的，在热爆曲线上表现出残浆-气液交代作用温度(805℃)和热液作用温度(410℃)(图 2)．热爆曲线上表现的多成因多阶段成矿与地质观察的结果是完全一致的．

3. 铁矿浆矿床系列的成矿温度范围宽泛，且表成矿床比浅成矿床形成温度高

浅成矿浆型铁矿(梅山)的形成温度为 1,075℃ 到 120℃，其中磁铁矿的形成温度，矿浆阶段的为 840—640℃，伟晶-气液阶段的为 560—400℃，赤铁矿化发生在 400—350℃，形成黄铁矿和菱铁矿的热液温度为 360—120℃．表成矿浆型铁矿(姑山)赤铁矿的形成温度为 1,040—350℃，其中矿浆阶段的赤铁矿形成温度为 1,040—720℃，伟晶-气液温度为 520—350℃，铁碧玉形成温度为 170—120℃．值得提起的是，矿浆阶段形成的铁矿物，表成矿床比浅成矿床的形成温度高，这与喷出岩形成温度高于侵入岩类似．

4. 残浆气液矿床系列的成矿温度具有清楚的分带性

从岩体向外依次分布的各矿床的形成温度情况如下：产在侵入体上部的残浆气液矿床(陶村铁矿)的磷灰石和透辉石中，有融熔包裹体，浸染状磁铁矿的热爆温度为 800℃ 左右，是

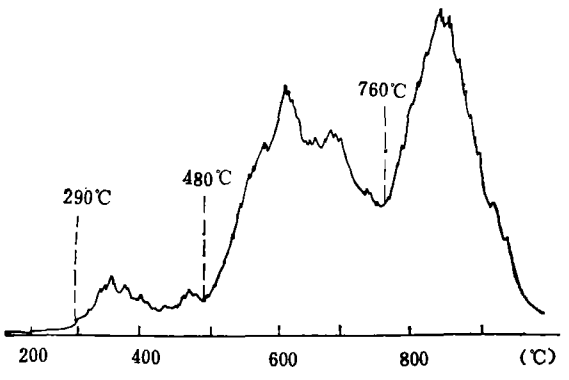

图 1　梅山铁矿磁铁矿热爆温度曲线

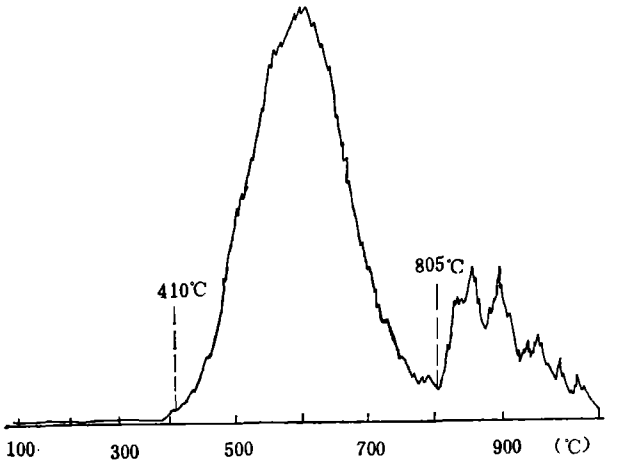

图 2　陶村铁矿磁铁矿热爆温度曲线

在这个系列中形成温度最高的矿床．伟晶脉状铁（磷）矿床（太山铁矿）的磁铁矿形成温度为670—355℃．接触交代矿床，例如白象山铁矿和向阳铁矿，矿体分布在内接触带或侵入岩体内，其中夕卡岩阶段的磁铁矿形成温度为 630—500℃，热液阶段的磁铁矿形成温度为 450—320℃．根据前人资料[4]，和睦山和钟九铁矿磁铁矿的形成温度（380—320℃），应属于热液矿床．值得注意的是它们大都赋存在外接触带前火山岩系的岩层中．

总之，从闪长（玢）岩体向外分布的各种成因类型矿床，形成温度逐步降低，显示出明显的温度分带特征．

5. 成矿介质中的气体还原参数与矿物共生性质有密切关系

由文献[10]可知，姑山、梅山、向阳和太山等火山岩铁矿矿物包裹体气体分析结果，其中主要成分为 H_2O，CO_2，CO，CH_4 和 H_2．此外在低温爆裂的包裹体中，未发现 N_2 和 O_2，而在高温爆裂的包裹体中有 N_2 的显示．其它气体成分未分析．对比各种成因类型矿床及其主要共生矿物和还原参数（包裹体气体成分中的还原性气体克分子总和对 CO_2 克分子数之比）可知：还原参数越大，环境的还原性越强，反之，越弱．还原参数的变化与成矿深度和共生矿物性质有密切关系．例如，姑山铁矿为表成矿床，铁矿物为三价铁组成的赤铁矿，它与石英（有时有磷灰石）共生，赤铁矿中包裹体的气体成分为 H_2O 及 CO_2，还原参数为零，属氧化环境形成的．梅山铁矿为浅成矿床，铁矿物为磁铁矿，它与含 Fe^{3+} 的钙铁榴石及含 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的普通辉石共生，包裹体的气体成分除 H_2O 和 CO_2 外，还有少量的 H_2，CO 和 CH_4，还原参数为 0.028，属于弱还原环境成矿．太山伟晶脉状磷铁矿床，共生矿物与梅山铁矿相似，因磁铁矿受后期氧化很强烈，故用与磁铁矿密切共生的磷灰石的还原参数代替．它的还原参数为 0.045，也属弱还原环境成矿．向阳铁矿属接触交代矿床，铁矿物为磁铁矿，它与金云母，阳起石、绿帘石、钠长石和硬石膏等矿物共生，含有还原态 Fe^{2+} 成分和氧化态（Fe^{3+}，$SO_4^{=}$）成分，磁铁矿包裹体气体成分除 H_2O 和 CO_2 外，含有较多的 H_2，CO 和 CH_4，还原参数为 0.117，比前者还原性为强．弓长岭铁矿属于沉积变质热液再造矿床，形成深度估计为 8 公里，磁铁矿与石墨、含 Fe^{2+} 的铁铝榴石和低铁绿钠闪石等强还原性矿物共生，包裹体气体成分有更多的还原性气体，还原参数为 2.410．通过上述实例可以看出，根据还原参数的大小，可以估计成矿

环境的氧化性质和成矿深度.

6. 氧逸度对成矿熔体-溶液的反应方向起很大作用

假设反应式 $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ (式 1) 和 $4H_2 + CO_2 = CH_4 + 2H_2O$ (式 2) 在成矿时成立，且达到化学平衡，根据各矿床的形成温度和包裹体中的气体成分[10]，并根据地质情况估计的成矿压力，利用文献[11—13]的数据，估算的氧逸度列入表 1

表 1 各矿床的氧逸度

矿床名称	计算时采用的温度(℃)	计算时采用的压力(巴)	式 (1) 的 $\log K$	式 (2) 的 $\log K$	X_{H_2O}/X_{H_2}	X_{CO_2}/X_{CH_4}	平均 f_{O_2}
姑 山	900	1,00	−8.196	35.608	877.5	1.4×10^9	$10^{-10.86}$
梅 山	700	1,000	−10.431	42.932	61.343	475.75	$10^{-17.52}$
太 山	700	1,000	−10.431	42.932	72.053	305.5	$10^{-17.495}$
向 阳	600	1,000	−11.942	47.852	114.852	27.063	$10^{-20.398}$
弓长岭	600	2,000	−11.942	47.852	6.49	8.74	$10^{-21.626}$

在上述实例中，氧逸度的降低恰与还原参数的升高相一致.

氧逸度对火山岩铁矿矿物共生组合的影响，可通过热力学反应来定性说明:

$$3(Fe, Mg)SiO_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons (Fe, Mg)Fe_2O_4 + 3SiO_2,$$

即当含镁的铁硅酸盐矿浆在地壳较深部位结晶时，氧逸度较低，辉石为较稳定的矿物，形成含石英较少的，以富镁的磁铁矿为主的、含有辉石的矿石(梅山铁矿). 当这种矿浆在地壳较浅部位结晶时，氧逸度增高，上述反应向右移动，辉石分解，形成磁铁矿和石英 (姑山铁矿下部)，姑山铁矿矿石中辉石完全被石英交代[1]，即为典型例证. 如果矿浆喷溢地表，氧逸度进一步增加，则反应式

$$2FeSiO_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons Fe_2O_3 + 2SiO_2$$

将向右移动. 即形成由赤铁矿和石英组成的矿石(姑山铁矿上部). 由于氧逸度增加，即使磁铁矿已经形成，也将发生假象赤铁矿化，此种现象，在宁芜地区屡见不鲜.

在本区没有发现氧逸度更低的环境中形成的岩石或矿石，例如东格陵兰 Skaergaard 层状侵入体的铁橄榄石铁辉长岩那样的岩石. 这是因为富铁岩浆侵入与地表相通的断陷盆地的断裂带，不存在低氧逸度的条件.

总之，根据上述研究，已经证明: 本区火山岩铁矿确实包括两个成因系列矿床，而且它们都是从熔浆开始成矿，并逐渐转变为热液成矿的; 每一成因类型矿床都是多成因多阶段形成的，但都保持着各该成因类型矿床的特点; 以闪长(玢)岩岩体为中心而分布的各成因类型矿床，具有明显的温度分带性质; 成矿介质中的气体还原参数和氧逸度影响着矿物共生组合和成矿流体的反应方向.

四、本区火山岩铁矿的成因分类和对玢岩铁矿模式的修正

根据成矿岩浆发生与演化的研究，根据对各矿床的形成条件与成矿性质的了解，拟定了下

列成因分类[1]：

1. 铁矿浆矿床(岩浆熔离矿床系列)

1) 喷发矿屑矿床

(1) 火山沉积层状矿床(龙旗山铁矿，I-1a).

(2) 火山沉积热液再改造矿床(竹园山铁矿 I-1b).

2) 溢流贯入矿床

(1) 表成喷溢贯入矿床(姑山铁矿，I-2a).

(2) 浅成贯入矿床(梅山铁矿 I-2b).

2. 残浆-气液交代充填矿床(残浆气液矿床系列)

1) 次火山岩体中细脉浸染状矿床(陶村铁矿，II-1).

2) 次火山岩体内外接触带的气液交代充填矿床

(1) 次火山岩体与熔岩及火山碎屑岩接触带附近的伟晶-高温气液交代矿床(凹山铁矿，II-2a)

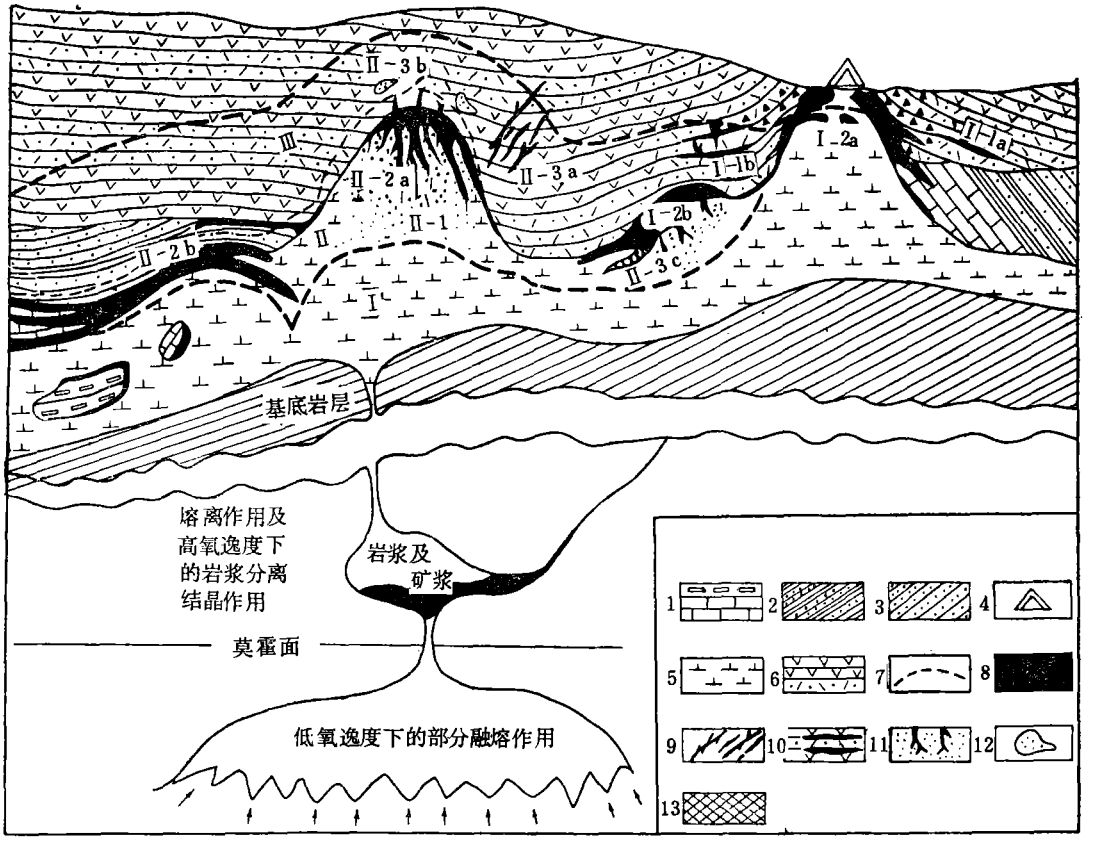

图 3　宁芜型铁矿成矿模式图

1.青龙组灰岩；2.黄马青组砂页岩；3.象山群砂岩；4.火山机构；5.辉长闪长(玢)岩；6.火山岩；7.蚀变带界线；8.块状铁矿体；9.铁矿脉；10.层状铁矿体；11.细脉浸染状铁矿；12.黄铁矿体；13.菱铁矿体.

1) 每种成因类型矿床的代号如 I-1a，与图 3 上的代号是同义的.

(2) 次火山岩体与前火山岩系的沉积岩层接触带的交代矿床(凤凰山铁矿、白象山铁矿、向阳铁矿、钟九铁矿, II-2b).

3) 火山岩或次火山岩中的中低温热液交代充填矿床

(1) 镜铁矿石英脉状矿床(龙虎山铁矿, II-3a).

(2) 黄铁矿矿床(向山黄铁矿矿床, II-3b).

(3) 菱铁矿矿床 (II-3c).

根据对火山岩铁矿中两个成因系列矿床的研究,在对他们形成条件(地质条件和物理化学条件)和空间分布的认识基础上, 对玢岩铁矿理想模式进行了补充和修正, 并表示在图 3 上. 因为矿浆矿床的成因已经离开了玢岩范畴, 故改名为宁芜地区宁芜型铁矿成矿模式图. 它既体现了以闪长(玢)岩侵入体为中心按温度分带的各种产状铁矿的空间位置; 也表示出以火山机构为中心的喷发、溢流和贯入等方式形成的矿浆矿床;还体现出两个成因系列矿床的成矿作用的迭加,这在找矿工作上或有所帮助. 在火山岩地区找矿,不仅像以往那样,注意次火岩体, 按"三层楼"的思路去找, 也应注意火山机构及其附近火山碎屑沉积物中的铁质浆屑和受火山喷发层位控制的层状铁矿,因为这些都是铁矿浆存在的标志.

作者在野外工作中曾得到江苏冶金地质勘探公司及所属 807 队和安徽冶金地质勘探公司 808 队的帮助,在此谨致谢意.

参 考 文 献

[1] 宁芜研究项目编写小组,宁芜玢岩铁矿,地质出版社, 1977.
[2] 长江中下游火山岩区铁矿研究组,地质学报, **51**(1977), 1: 1—18.
[3] 吴利仁,地质与勘探, 1978, 6: 1—8.
[4] 李荫清等,地质学报, **53**(1979), 1: 50—59.
[5] 吴利仁等,同上, **56**(1982), 3: 223—234.
[6] 顾群等,地震地质, **2**(1980), 2: 21—29.
[7] Osborn, E. F.. *Am. J. Sci.*, **259**(1959), 609—647.
[8] ————, *Am. Tineralogist*, **47** (1962), 211—226.
[9] Philpotts, A. R., *Econ. Geol.*, **62**(1967), 303—315.
[10] 李秉伦等,地质科学, 1982, 2: 220—225.
[11] Robie, R. A., et al., *U. S. Geol. Survey Bull.*, 1979, 1452, 456.
[12] Burnham, C. W., et al., *Geol. Soc. Am.*, 1969. Spec. Paper 132, 96.
[13] Рыженко, Б. Н. и Волков, В. П., *Геохимия*, 1971, 7: 760—773.