

铜陵矿集区浅层含矿岩浆输运网络与运移机制*

邓 军 ** 王庆飞 黄定华 万 丽 杨立强 高帮飞

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074; 广州大学数学与信息科学学院, 广州 510006)

摘要 研究证实铜陵矿集区燕山期岩浆浅表侵入导致了大规模成矿作用, 成矿期区域中部-10 km 处存在一个隐伏岩浆房, 成矿岩浆由此处产生并向上运移, 然浅层成矿岩浆输运网络与运移机制这个与成矿作用密切相关问题的探索仍有待深入. 构造力学、分形统计和地质事实综合分析表明北东向高角度褶皱相关断层及棋盘格状基底断裂系是岩浆由浅层岩浆房向盖层褶皱系运输的主要通道, 褶皱核部的虚脱部位是岩浆主要就位空间. 因而, 上褶-下断的构造网络为浅层岩浆的导流-定位系统. 多层结构地质体在变形过程中, 上部地层受下部地层顶托更趋于发生褶皱, 下部地层承受上部地层的载荷易发生断裂, 当下部地层岩石力学强度高于上部时, 上褶-下断构造组合的发育概率会更为增加. 由于存在导流网络, 浅部岩浆房顶部的富含挥发份岩浆以“岩脉式”快速向表层输运, 定位于褶皱虚脱空间中, 并快速充填和改造就位空间; 岩浆顶部的挥发份物质因压力骤降而发生隐爆, 引发多相流体不混溶以及大量成矿元素富集. 脉动式岩脉活动可能是导致铜陵矿集区岩浆岩化学成分互有差异且时空上紧密伴生的主要因素.

关键词 铜陵 构造网络 岩浆侵入 分形 岩脉

铜陵矿集区是长江中下游成矿带重要的矿集区之一, 其成矿作用与燕山期中酸性岩浆侵入有密切成因联系^[1~4]. 长期以来, 研究者对该区的构造体系和侵入岩系从不同侧面做了大量工作, 取得了以下丰富成果: (1) 精确测定了岩体的成分与年龄, 并对岩体中多种类型包体进行了详细的岩石学研究^[5~10];

(2) 对于岩浆表层就位过程中某些重要的物理化学作用, 如隐爆作用、岩浆-夕卡岩浆分异作用, 进行了详细的地质学和地球化学研究^[11,12]; (3) 借助于深反射地震剖面, 探测了区域深部结构, 并通过物理实验手段重塑了盖层三维形变场^[13~18]; (4) 利用数值模拟手段, 通过对典型矿田钻孔勘探剖面的观测, 对浅表部

收稿日期: 2005-08-06; 接受日期: 2005-12-20

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40234051)、教育部科学技术研究重点项目(批准号: 03678)、教育部跨世纪人才基金项目 and 国土资源部科技专项计划(批准号: 20010103)资助

** E-mail: djun@cugb.edu.cn

分岩枝的空间形态做了初步调查^[19]。

尽管如此，与成矿作用密切相关的浅层含矿岩浆输运网络及其运移机制的探索仍相对薄弱，主要体现在：(1) 限于地质观测的局限性，对区域岩浆输运通道尚未形成完整认识；(2) 地质剖面观测和理论分析证实，地壳内的岩浆输运主要包括底辟、岩脉、中尺度渗流三种方式^[10-22]，而铜陵地区鲜有可代表岩浆输运过程的地质剖面被揭露，从而使该研究多集中于岩体就位过程，而对岩浆输运方式的探索难以入手。本文利用分形统计、构造力学和地质事实的综合分析确定了区域导流-定位构造网络模型，并对浅层含矿岩浆输运方式进行了理论判析。

1 区域地质背景

铜陵矿集区出露盖层主要由志留系至三叠系组成，其中下部泥盆系五通组石英砂岩力学强度最大，为变形过程中的能干层。矿集区于印支-燕山期经历

了先压后剪的递进变形作用，形成了盖层形变场的主体格局，其主要特征包括：(1) 三套NE向“S”型褶皱组成了区域变形场的主体，与褶皱相伴生的是两翼顺层滑脱断层；(2) 由于盖层具多层结构，背斜核部上、下层位的变形存在差异，形成了大量虚脱空间；(3) 北西向断裂切割了早期的褶皱。另外，前人根据重磁资料指出区域基底存在NS与WE向两组断裂^[23](图 1)。

区域侵入岩可以划分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列，橄榄安粗岩系列的岩石组合为辉石二长闪长岩+二长闪长岩+石英二长岩，岩石的里特曼指数大于 4，占全区侵入岩的 20%；高钾钙碱性系列侵入岩岩石组合为闪长岩+石英二长闪长岩+花岗闪长岩，岩石的里特曼指数小于 4，占全区侵入岩的 80%，为主要成矿岩体^[5,6]。从区域岩浆岩的岩相学及氧化物含量特征可以看出，成矿岩体在化学组成上整体相似、细节存在差异。稀土元素显示区域岩体具

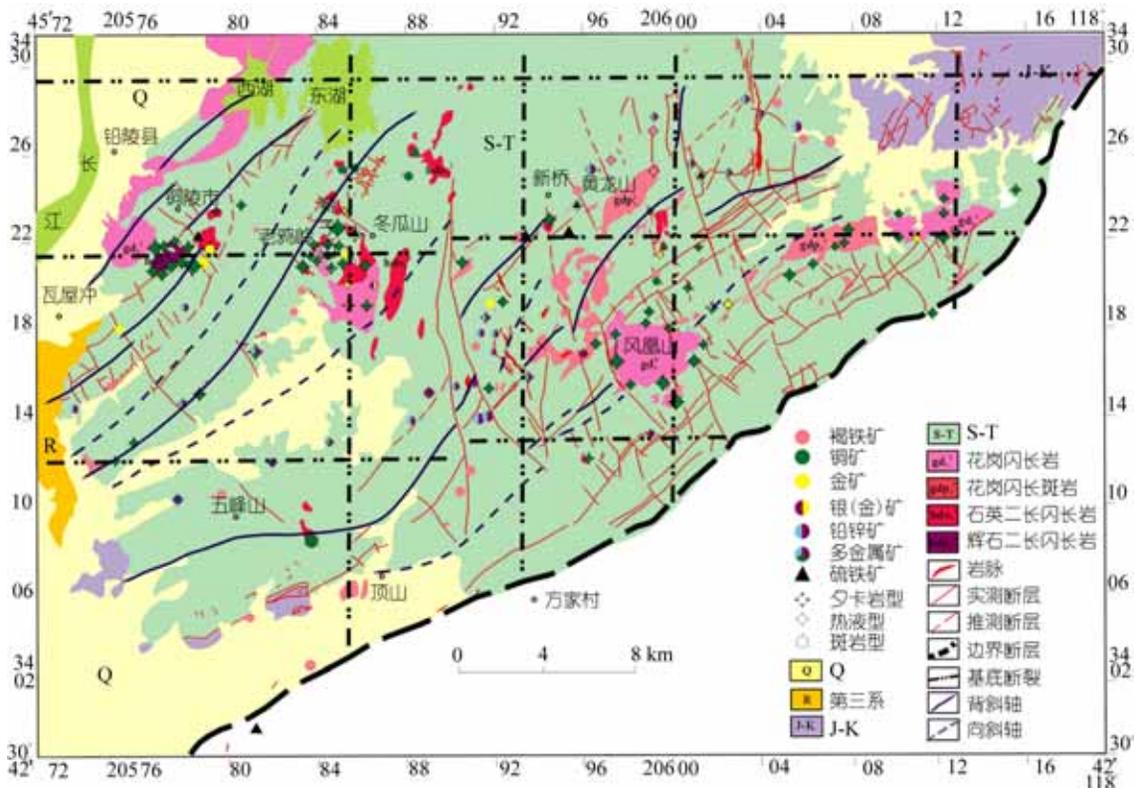


图 1 铜陵矿集区区域地质图

据《安徽省铜陵地区地质图(1 : 50000)》(安徽省地矿局三二一地质队, 1989)及野外观测编制

有同源演化的特点(图 2)。成矿岩浆富含挥发份,具有低密度、低黏度的特点。通过对重要成矿岩体测年结果的统计发现岩浆侵入时间比较集中,主要分布在 145~136 Ma 之间。多个不同成分、不同侵入时间的岩体呈侵入接触关系。

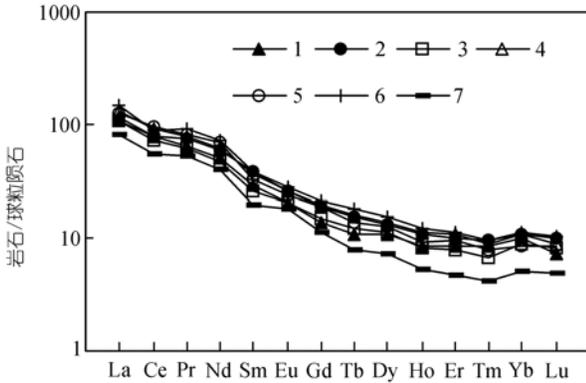


图 2 铜陵侵入岩稀土元素配分曲线

1. 凤凰山花岗闪长岩; 2. 曹山辉石闪长岩; 3. 冬瓜山花岗闪长岩; 4. 狮子山石英闪长岩; 5. 小铜官山石英闪长岩; 6. 朝山辉石闪长岩; 7. 新桥头花岗闪长斑岩(数据引自王强^[2]和常印佛等¹⁾)

多方证据证实铜陵矿集区中部存在一隐伏岩株,一般认为该隐伏岩株于燕山期成矿岩浆活动时为一浅层岩浆房,主要证据包括:(1)遥感图像线性解译显示区域中部存在一大型放射状构造,隐示了深部隐伏岩株的存在;(2)岩石包体资料显示在深度约为 8~12 km 处存在一浅层隐伏岩浆房^[8];(3)重磁异常辅证了深部存在一隐伏岩株;(4)深反射与高分辨率地球物理探测剖面解释也显示了与上述证据相一致的结果^[16,17],图 3 为狮子山矿田内的深反射地震剖面和浅层高精度地震反射剖面的合成图,图中可以看出在基底内部 10 km 左右存在一岩株,而上部盖层发育一些小型岩体。

矿集区包括新桥、狮子山、铜官山、凤凰山等四个矿田,矿田具有三个共性:一是矿田内矿床与燕山期岩浆及热液活动有密切成因联系,岩浆是成矿元素主要的供给者;二是矿田大都分布于背斜或复合背斜核部;三是它们具有相似的成矿类型,包括隐爆角砾岩型、夕卡岩型、热液型等^[24-26]。

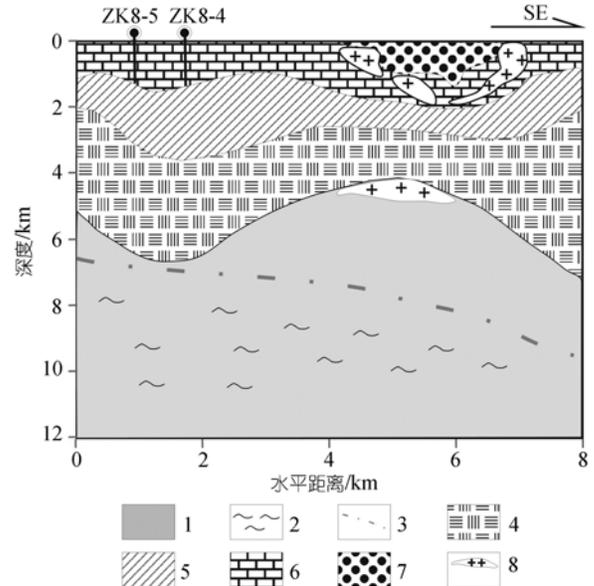


图 3 狮子山矿田下部隐伏岩株剖面图

1. 基底; 2. 隐伏岩株; 3. 岩株界线; 4. 寒武系和奥陶系; 5. 志留系和泥盆系; 6. 石炭系、二叠系与三叠系; 7. 第三系与第四系; 8. 浅层小岩体(据吕庆田等^[16,17]改编)

2 岩浆表层输运网络

2.1 岩浆输运通道与定位空间

由于分维值可以作为统计对象空间发育程度的一种表征量^[27],而多种对象空间发育程度的依存关系可以进一步反映它们之间的成因联系,所以为了解区域岩浆在盖层的分布状态及其受控机制,本文开展了分形统计研究。作者把矿集区划分为 35 个正方形单元(图 4),每个单元左上、右下两边呈北东向,与地层走向平行,同时把单元面积定为 25 km²,以便使一个或两单元的都能够基本覆盖一个矿田,如狮子山矿田在单元 30 中,铜官山矿田在单元 34 中,新桥矿田在单元 21, 22 中,凤凰山矿田在单元 11, 12 中(图 4)。利用盒子维的计算方法^[27,28],计算单元内部的岩体(图 4(a))、矿点(图 4(c))、断裂、北东向顺层滑脱断裂和北西向断裂(图 4(b))的分维值(表 1)。单元(图 4(d))的五个对象的分维值计算表明它们普遍具有简单分形的特点。将计算所得的分维值,通过 SPSS

1) 常印佛, 裴荣富, 侯增谦, 等. 国土资源部“十五”专项研究《大型矿集区地壳深部结构与成矿信息》报告, 2003

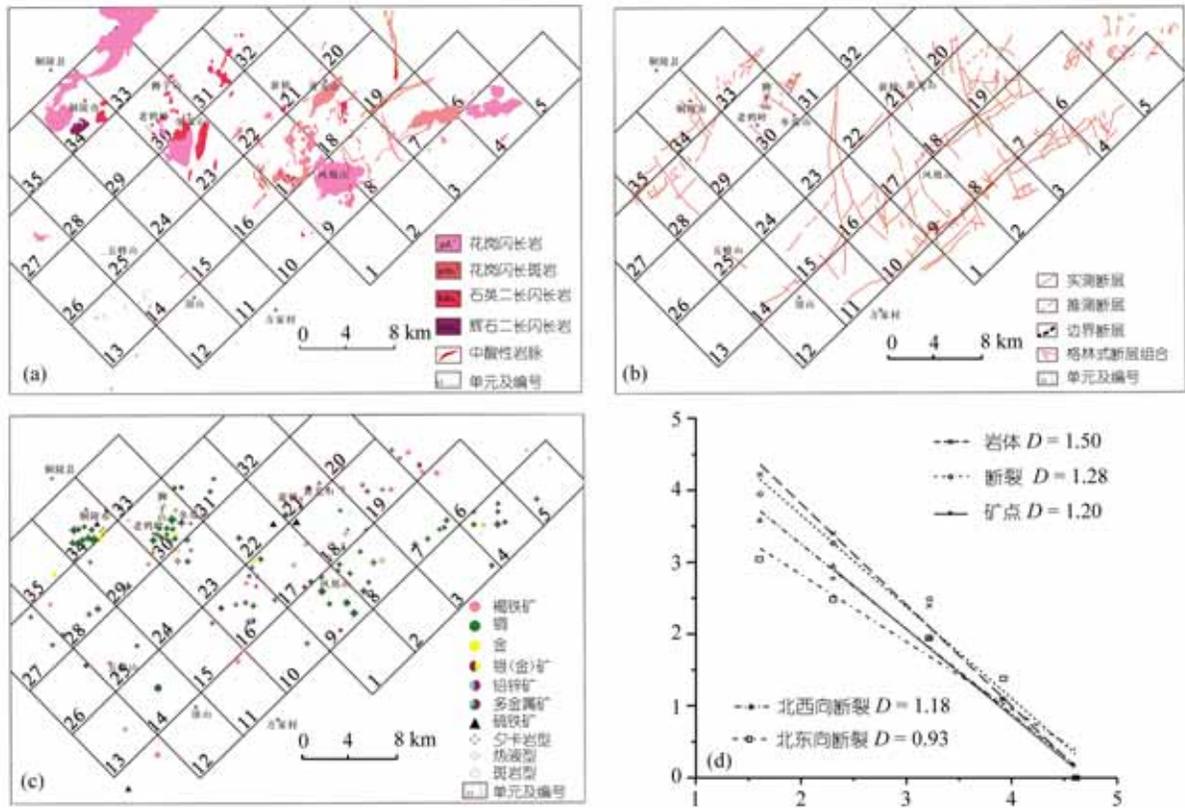


图 4 铜陵矿集区单元分维计算

(a) 岩体; (b) 断裂; (c) 矿点; (d) 狮子山矿田单元中的断裂、岩体、矿点分维值计算(地质事实证实本区的硫铁矿、金矿、铅锌矿等为岩浆热液成因, 地表出露的褐铁矿是由硫铁矿风化而成, 底部即为原生的硫铁矿, 因此, 这些矿点均被列入统计范围之内)

软件, 进行了R型聚类分析(图 5)。分析结果发现, 矿点分布与岩体分布密切相关; 而岩浆分布与北西向走滑断层和北东向顺层滑脱断层间没有明显相关关系。北东向顺层滑脱断层倾角较缓, 不具有沟通深浅流体的能力; 而北西向走滑断层倾角虽陡, 具备输运流体的空间条件, 但其为岩浆侵入后期发育的构造, 局部地质观测也证实了该观点。三维构造模拟实验发现在地层褶皱的同时, 褶皱核部发育一组北东向展布的高角度逆冲断层, 该组断层具备输运流体的时空条件。如前所述, 含矿岩浆主要分布于褶皱的核部, 暗示褶皱核部高角度逆冲断层为岩浆浅层运输的主要通道; 作者在狮子山矿田和新桥矿田等典型矿田钻孔剖面中, 发现岩浆多沿褶皱核部北东向逆断层向下延伸(图 6), 进一步验证了上述推断。其它区域研究也证实逆断层具有导流的功能^[29,30]。相对于北东向顺层滑脱, 该组断裂发育较少, 且多于盖层

下部发育, 同时又受岩浆改造, 因而在地表难以识别, 只在矿区钻孔剖面图上有不同程度的显示。

在先压后剪的早期阶段, 北西向挤压作用也易使早期形成的基底断裂再次活动而成为成矿岩浆由基底向盖层运输的通道。因此在基底上部和盖层下部, 由深部东西与南北向断裂和与褶皱相关的逆冲断裂组成了一个导流网络, 控制了岩浆的输运。岩体发育于基底断裂与背斜枢纽的相交部位, 且浅层岩体多呈北东向展布证实了该结论。

导流的北东向逆冲断裂多刺穿褶皱核部的虚脱空间, 后者成为岩体就位的主要场所。当岩浆侵入到盖层后, 沿褶皱核部的逆冲断裂向上输运, 虚脱空间为断裂上的压力最低处, 成为岩浆就位的理想场所, 分形统计结果表明岩浆分布与北东向顺层滑脱断裂空间联系不甚密切, 说明多数岩浆就位于褶皱核部后, 释放热液, 并较快冷却, 导致岩浆粘度增大, 没

表 1 铜陵矿集区单元盒子维数列表

单元编号	北东向断裂	北西向断裂	断裂	矿点	岩体
1	1.20	0.80	1.29	0.00	0.00
2	1.36	1.25	1.47	0.00	0.00
3	1.24	1.28	1.44	0.00	0.45
4	1.35	1.37	1.53	0.00	1.21
5	1.15	1.09	1.20	0.82	1.68
6	1.30	1.34	1.51	0.62	1.64
7	1.26	1.34	1.50	0.81	1.39
8	1.29	1.25	1.47	0.88	1.75
9	1.10	1.35	1.50	0.00	0.79
10	1.25	1.05	1.39	0.00	0.56
11	0.91	0.38	0.95	0.00	0.88
12	1.11	0.38	1.25	0.00	0.00
13	1.23	0.18	1.26	0.00	0.00
14	1.12	0.85	1.18	0.00	1.05
15	1.12	0.93	1.15	0.26	0.00
16	0.79	1.43	1.47	1.05	1.06
17	0.63	1.22	1.25	0.92	1.71
18	0.46	1.00	1.05	0.78	1.85
19	1.16	1.56	1.60	0.71	1.26
20	0.47	0.83	1.00	0.26	0.91
21	0.71	1.00	1.06	0.43	1.11
22	0.96	0.94	1.26	0.47	1.19
23	0.52	0.93	0.94	0.53	1.79
24	0.00	0.87	0.87	0.00	0.00
25	0.00	0.76	0.76	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.83	0.83	0.47	0.77
28	1.10	1.43	1.45	0.43	0.61
29	0.38	1.14	1.13	0.41	0.91
30	0.94	1.18	1.28	1.20	1.50
31	0.89	1.10	1.14	0.64	1.44
32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33	1.20	1.21	1.39	0.00	1.57
34	1.17	1.36	1.46	1.17	1.76
35	1.05	1.08	1.27	0.00	0.00
区域	1.10	1.16	1.39	0.61	1.38

有再沿滑脱断裂继续运输, 分异出的岩浆热液继续沿滑脱断裂运输, 形成矿体。

综上, 在铜陵矿集区的基底上和盖层下部, 由东西向、南北向的棋盘格状基底断裂系和北东向逆冲断裂组成一个岩浆导流系统; 在盖层上部, 由于地层变形的差异, 而在褶皱核部形成大量虚脱空间, 成为岩浆就位的主要场所。上褶下断的构造组合构成了

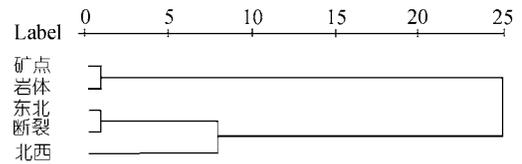


图 5 单元分形维数 R 型聚类分析

矿集区浅层岩浆运输 - 就位网络(图 7)。

2.2 多层结构地质体中输运-定位构造网络

多层结构地质体在纵弯变形过程中很有可能发育“上褶下断”的构造组合。由于多层结构模型的变形机制在一定程度上相似于双层模型, 所以可以先从分析双层模型的变形特征入手。如图 8 所示, 双层模型受到水平挤压作用(图 8(a)). 由于下部层位的顶托, 上部层位易发生褶皱(图 8(b), (d)); 与上部层位相反, 下部层位受到上部的负载, 更易发生断裂(图 8(c), (e)). 因而, 由于所处层位的不同, 上下部分会产生不同的变形行为。由于上下层位的运动有所差异, 导致虚脱空间与层间滑脱断层发育; 而当上下层位的力学性质差异较大, 或者两者之间存在薄弱层时, 虚脱空间发育的几率增加。与双层结构模型类似, 在多层结构模型中, 由于下部层位所受的负荷远比上部地层大, 所以其亦比上部地层更易发生断裂, 同时上部地层比下部层位更易发育褶皱, 在层间滑移面存在的情况下, 褶皱发育的可能性增加。由于上部地层褶皱规模比下部地层的大, 核部虚脱空间发育的几率及程度随之增加。在多层结构地质体的变形场中, 褶皱幅度向深部逐步降低。在褶皱系的下部, 岩石变形一般以垂向加厚和断裂为主, 该组断裂对应于铜陵地区的基底断裂。另外, 随着纵弯作用不断加剧, 在褶皱系底部靠近枢纽的局部位置, 由于应力值超出岩石的屈服应力, 而发生破裂, 该破裂自下向上逐步扩展, 成为褶皱相关断裂, 其对应于矿集区中的北东向高角度逆冲断层。当上部地层的强度弱于下部地层时, “上褶下断”构造系发育的几率进一步提高。多层模型变形的物理实验证实了该理论分析的结论^[14,30]。

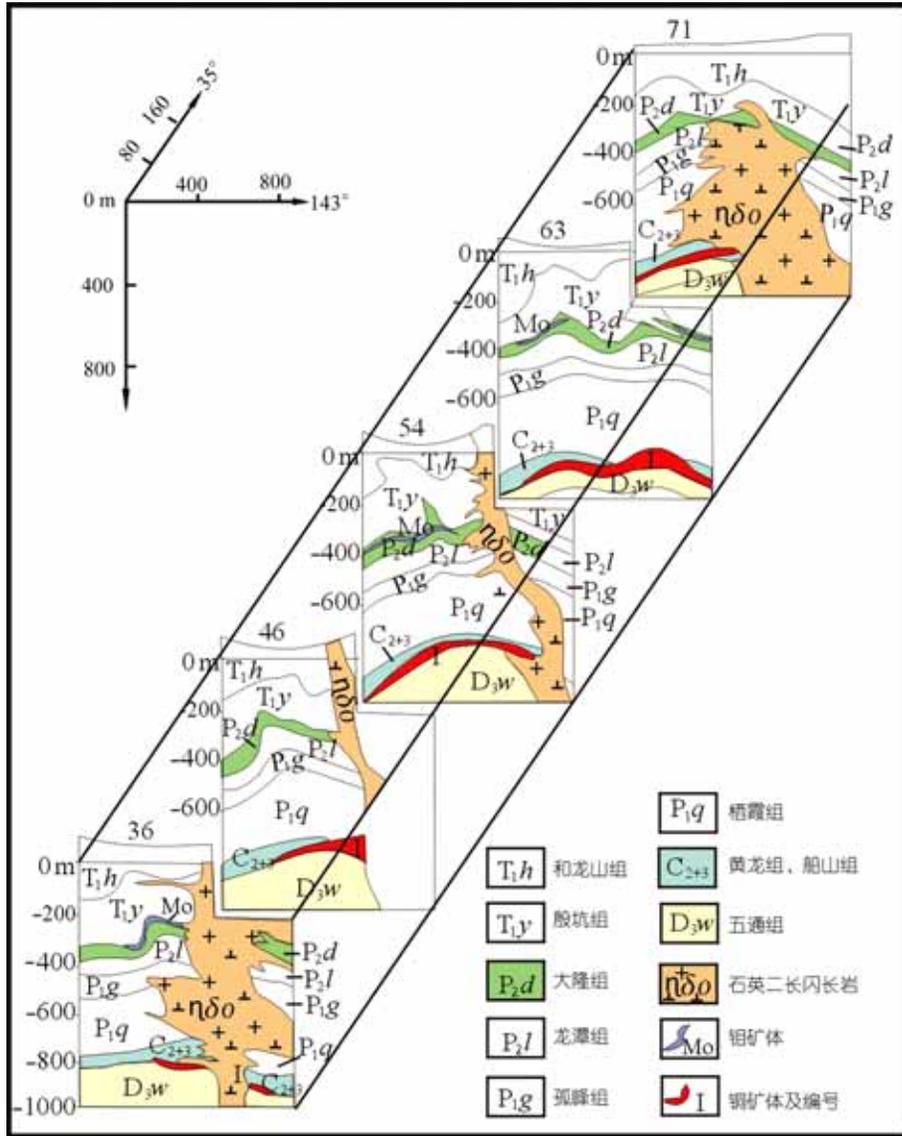


图 6 铜陵矿集区狮子山矿田联合剖面图

据安徽省地矿局 321 队, 1990

3 岩浆运输模式

岩浆的三种主要运输方式特征各异,“底辟”模式长期存在,指岩浆房在地壳中整体向上运输。而近期研究表明,“岩脉式”和“中尺度渗流式”则是更为合理的岩浆运输方式。“岩脉式”是指岩浆及其顶部挥发份物质在弹性介质中以一种类似于“水压致裂”的方式沿预先存在的构造薄弱面向上快速运动。

构造研究证实浅部岩浆房和地表岩体之间存在

一个导流网络,那么岩浆是通过何种方式从浅部岩浆房经预先存在的断裂系最后运输到盖层呢?以下几个基本地质事实证实浅部岩浆运输方式为“岩脉式”: (1) 隐爆角砾岩筒(胶结物为长英质岩浆)在岩体上部的普遍发育说明在侵入过程中岩浆顶部存在挥发份物质; (2) 岩浆热液矿床的广泛分布进一步显示岩浆内部挥发份含量高,粘度较低; (3) 盖层岩系的温度和压力较低,因而在短时间的应力作用下会表现出较强的弹性; (4) 现存的隐伏岩株说明岩浆房中

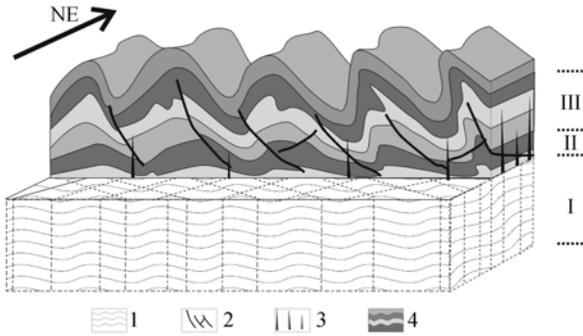


图 7 铜陵矿集区岩浆运输-定位网络

1. 韧性变形区域; 2. 褶皱相关断裂; 3. 南北向与东西向深断裂; 4. 褶皱系。地壳下部韧性变形区, 在基底上部和盖层下部, 由深部东西与南北向基底断裂和盖层褶皱相关断裂组成一导流系统; 在盖层褶皱的中上部, 岩体沿褶皱相关断裂及核部虚脱空间组成的导流-定位系统活动

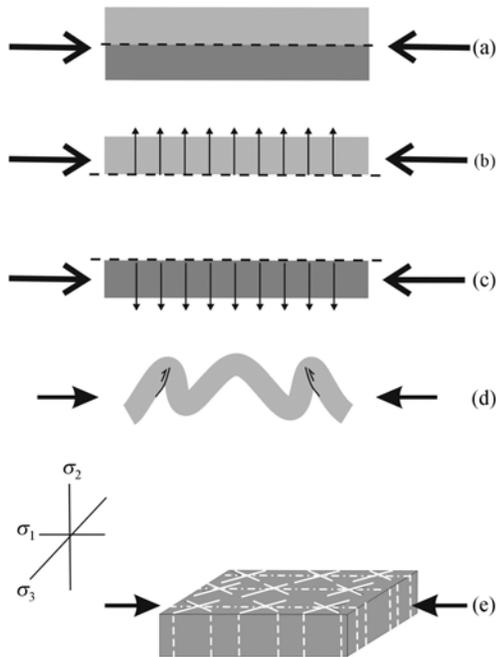


图 8 双层结构地质体变形示意图

(a) 双层结构模型受力分析图; (b) 上部层位受力分析图; (c) 下部层位受力分析图; (d) 上部层位变形图示, 上部层位以褶皱变形为主, 当褶皱程度较大时, 会在褶皱核部产生逆冲断层为褶皱相关断裂; (e) 下部层位变形图示, 除有垂直增厚外, 还发育断层(于脆性变形区)或者形成构造薄弱带(于韧性变形区)

仍残存部分岩浆, 没有全部被运输到浅表, 岩浆房比部分熔融的介质更易产生岩脉^[31], 预先存在的构造

网络也极大提高了岩脉产生的概率; (5) 岩体附近大范围热变质岩的发育及岩体内部存在的大量围岩包体等多种现象表明岩浆是被快速运输到浅表, 此过程中高温和高能的岩浆对围岩进行了改造; (6) 岩浆侵位时间比较集中, 多数矿田(如狮子山、新桥矿田等)中的岩体距隐伏岩浆房的水平距离较小(一般小于 5 km), 符合岩脉活动的特征; (7) 地表存在大量岩脉, 虽然多数岩脉被认为是岩体浅层就位后从其中分异而出的, 但这从侧面说明了本区岩浆存在以“岩脉式”运输的可能性; (8) 地球物理资料只在浅部地壳的几个特定深度解译出了隐伏岩体, 没有发现浅层隐伏岩体整体连续向上运输(“底辟式”)的迹象, 亦从反面印证了岩浆的“岩脉式”运输机制; (9) 矿集区勘探剖面中的岩体形态部分呈现岩脉状, 以狮子山矿田为例, 联合剖面图显示岩体就位于复背斜的核部, 46 线和 54 线的勘探剖面图可以看出岩体细长, 呈现出岩脉的形态(图 6)。

由于岩浆房中产生岩脉后, 内部挥发份含量减少导致压力降低, 这一方面阻止了岩脉继续活动, 另一方面会激励岩浆房中岩浆不断分异而生成新的挥发份物质, 随着挥发份的增多, 岩浆房中的压力不断加大, 最终导致了新一轮“岩脉”的产生, 所以岩脉活动可能具有脉动式或者间隙式的特点; 由于岩浆房处于不断分异过程中, 所以每轮向上运输的岩浆的成分都会稍有区别; 另外, 后期岩脉很可能会继续沿前一次岩脉的活动通道向上运输, 因而“脉动”式的岩脉活动可能是导致铜陵矿集区多种岩性相近的岩体空间上和时间上均紧密伴生的重要原因(图 9)。

由于运移速度较快, 岩浆就位后不但会很快地填满褶皱核部虚脱空间, 并在很大程度上对就位空间进行改造。在此过程中, 岩浆顶部的挥发份物质会由于压力骤降而发生隐爆, 形成隐爆角砾岩; 随后岩浆进一步分异出夕卡岩、岩浆硫化物、岩浆热液等多相流体^[32], 后者沿褶皱核部虚脱空间附近的顺层滑脱断层活动, 形成多金属硫化物矿床。现代矿床学研究也证实多相流体不混溶会导致成矿元素大量聚集^[33]。

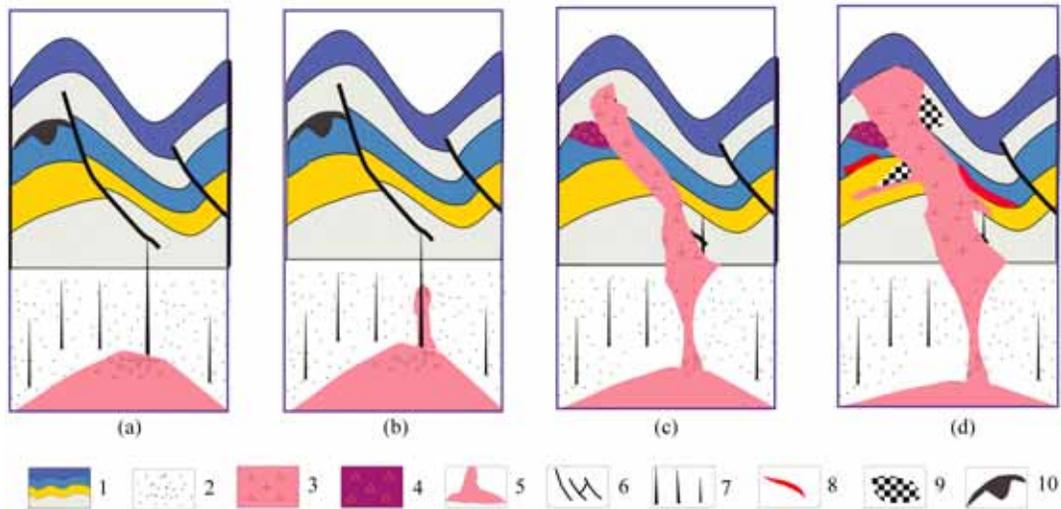


图9 铜陵矿集区浅层岩浆就位过程

(a) 上褶-下断导流-定位构造网络形成; (b) 富含挥发份岩浆沿基底断裂以“岩脉”式(dyking)向上运输; (c) 岩浆顶部的高压气液使逆冲断层张开, 岩浆在压力梯度场的作用下, 就位于褶皱核部虚脱空间, 并于顶部形成隐爆角砾岩; (d) 高温岩浆使围岩变质, 形成矽卡岩、大理岩和角岩; 后期岩浆热液沿褶皱核部虚脱空间附近的顺层滑脱断层活动, 形成多金属硫化物矿床; 1. 地层; 2. 基底浅变质岩; 3. 浅层岩体; 4. 隐爆角砾岩; 5. 岩浆房及岩脉; 6. 浅层断裂; 7. 基底断裂; 8. 热液矿体; 9. 矽卡岩矿体; 10. 虚脱空间

4 结论

(1) 铜陵矿集区浅层岩浆的导流-定位系统为“上褶下断”的构造网络。由于多层结构地质体在变形过程中, 上部地层受下部地层顶托趋于发生褶皱, 下部地层承受上部地层的载荷更易发生断裂, 当下部岩石强度高于上部时(如铜陵矿集区浅部地壳), 网络发育的概率会有很大程度的提高。

(2) 由于导流网络的存在及岩浆房中较高的挥发份含量, 浅层岩浆最有可能以“岩脉式”向上运输, 即岩浆及其顶部的挥发份物质以一种类似于“水压致裂”的方式沿预先存在的断裂向上快速运动, 最终就位于褶皱核部虚脱空间, 岩浆定位后导致了多相流体不混溶及大量成矿元素聚集。而“脉动式”的岩脉活动可能是导致铜陵矿集区岩浆岩化学成分互有差异且时空上紧密伴生的主要原因。

(3) 本文使用了分形统计的方法对岩浆运输通道进行了推断。该方法可以定义为, 计算诸研究对象时空分布的分维值, 再将分维值视为变量进行统计学分析, 继而可以推断研究对象间的某些内在联系。本文中分形统计所得结论与其他各项分析结果相吻合, 证实该新方法的尝试是成功的。

参 考 文 献

- Zhao Y M, Zhang Y N. BICS. Geology of gold bearing skarn deposits in the middle and lower Yangtze River Valley and adjacent regions. *Ore Geology Reviews*, 1999, 14(3-4): 227~249[DOI]
- Pan Y M, Dong P. The lower Changjiang(Yangzi/YangtzeRiver) metallogenic belt, east central China: Intrusion and wallrock hosted Cu, Fe Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. *Ore Geology Reviews*, 1999, 15(4): 177~242[DOI]
- 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 等. 长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 122~128
- 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 1999, 18(4): 300~307
- Wu C L, Wang Z H, Qiao D W, et al. Types of enclaves and their features and origins in intermediate-acid intrusive rocks from the Tongling district, Anhui Province. *China Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(1): 56~67
- Wu C L, Wang F S, Hao M Y, et al. Geochronology of intermediate-acid intrusive rocks from Tongling, Anhui. *Continental Dynamics*, 2000, 5(1): 15~23
- 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的约束. *中国科学, D 辑*, 2003, 33(4): 323~334
- Du Y S. Petrological and mineralogical study of enclaves inclusions in the typical mining districts of Tongling, Anhui and its bearing on the process of magmatism and metallogeny. *Chinese*

- Journal of Geochemistry, 1999, 18(3): 208~218
- 9 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. 中国科学, D 辑, 2003, 33(4): 289~300
 - 10 毛景文, Holly Stein, 杜安道, 等. 长江中下游地区铜金(铂)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 2004, 78(1): 121~131
 - 11 肖建新, 顾连兴, 倪培, 等. 安徽铜陵狮子山铜金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系. 中国科学, D 辑, 2002, 32(3): 199~206
 - 12 吴言昌, 邵桂清, 吴炼. 岩浆矽卡岩及其矿床. 安徽地质, 1996, (2): 30~39
 - 13 Deng J, Huang D H, Wang Q F, et al. The Formation Mechanism of the "Drag Depressions" and the Irregular Boundaries in Intra-plate Deformation. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 267~272
 - 14 邓军, 黄定华, 王庆飞, 等. 铜陵矿集区印支-燕山期盖层形变三维结构的实验重塑. 中国科学, D 辑, 2004, 34(3): 993~1001
 - 15 吴淦国, 张达, 臧文拴. 铜陵矿集区构造滑脱与分层成矿特征研究. 中国科学, D 辑, 2003, 33(4): 300~308
 - 16 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 等. 深地震反射剖面揭示铜陵矿集区复杂地壳结构形态. 中国科学, D 辑, 2003, 33(5): 442~449
 - 17 吕庆田, 侯增谦, 杨竹森, 等. 长江中下游地区的底侵作用及动力学演化模式: 来自地球物理资料的约束. 中国科学, D 辑, 2004, 34(9): 783~794.
 - 18 吴言昌, 曹奋扬, 常印佛. 初论安徽沿江地区成矿系统的深部构造-岩浆控制. 地学前缘, 1999, 6(2): 285~296
 - 19 Deng J, Huang D H, Wang Q F, et al. Surplus space method: A new numerical model for prediction of shallow concealed magmatic bodies. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 358~367
 - 20 Agust G, Laura B M, Joan M. Injection and arrest of dykes: implications for volcanic hazards. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 88: 1~13[DOI]
 - 21 Roberto F W. Mesoscale pervasive felsic magma migration: alternatives to dyking. Lithos, 1999, 46: 393~410[DOI]
 - 22 Sibson R H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. Journal of Structural Geology, 1996, 18(8): 1031~1042[DOI]
 - 23 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社. 1992. 1~235
 - 24 Zhai Y S, Xiong Y Y, Yao S Z, et al. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Craton, east-central China. Ore Geology Review, 1996, 11: 229~248[DOI]
 - 25 王庆飞, 邓军, 侯增谦, 等. 铜陵矿集区成矿作用研究进展. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 480~483
 - 26 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 1~379
 - 27 Deng J, Fang Y, Yang L Q, et al. Numerical modelling of ore-forming dynamics of fractal dispersive fluid systems. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 220~232
 - 28 Paul M. Fractal, Scaling and Growth Far from Equilibrium, London: Cambridge University Press, 2000. 1~674
 - 29 万天丰, Teyssier C, 曾庆霖, 等. 山东玲珑花岗岩体侵位机制. 中国科学, D 辑, 2000, 30(4): 337~344
 - 30 黄定华, 张国胜. 鄂东南地区印支-燕山期区域构造变形的实验研究与动力学分析. 矿床地质, 1994, 13(4): 299~306
 - 31 Paul M, Stephen T. The growth of dykes from magma chambers, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 92: 231~245[DOI]
 - 32 孟良义. 长江中、下游铜矿床的成矿模式. 中国科学, D 辑, 1996, 26(1): 21~25
 - 33 邓军, 王庆飞, 黄定华. 成矿流体运输物理机制研究的关键难题与方法体系. 地球科学进展, 2004, 19(3): 393~398