

安徽月山地区闪长岩类岩浆动力学及其与成矿作用的联系*

周涛发 岳书仓 兰天佑

(合肥工业大学,安徽合肥)

提 要: 基于火成岩石学、流体动力学、流变学及传热学和热力学等的研究,计算和分析了安徽月山地区闪长岩类岩浆的分凝、上升、对流、定位和结晶等岩浆过程的速度与机理,并探讨了岩浆的某些物理性质和动力学行为如熔体的含水量、水的运动特征、岩浆上升速度和对流状态等与成矿作用的联系。

主题词: 闪长岩类 岩浆物理学 岩浆动力学 成矿作用 月山地区

安徽月山地区是我国长江中下游铜、铁(硫)、金成矿带的重要组成部分。长期的地质研究工作表明,闪长质侵入体与区内铜等金属的成矿作用具密切的成因联系。本文依据热力学及流体动力学原理,研究月山地区三个代表性岩体——月山岩体、总铺岩体和五横岩体的岩浆物理学性质、结晶演化的动力学机理及其与铜等金属成矿作用的成因联系。

1 岩体地质

月山岩体、总铺岩体和五横岩体产于扬子地台北缘下扬子台拗沿江断裂带中段。区内地层系统由前寒武系董岭群、寒武系至三叠系、侏罗系和白垩系等三个构造层组成,岩体的空间分布及形态主要受NE向的庐江-杯宁隐伏断裂和近E-W向的月山-总铺-(独秀山)断裂及其二者的交汇部位控制(图1),岩体的Rb-Sr年龄在 $143 \times 10^6 \sim 147 \times 10^6$ a之间^①。

月山岩体为一中浅成、中酸性、一次性侵位的多枝状岩株,侵位中心位于岩体东枝,岩体的原生流动构造——流线、流面较清晰,且在岩体边缘发育较好,岩石类型主要为细粒、不等粒或似斑状结构的闪长岩、石英二长闪长岩、石英闪长岩等,局部为花岗闪长岩,岩体内常见围岩(三叠系)捕虏体。总铺岩体由深部相连的东、西两部分组成,岩体的侵位中心位于东部主体的菜瓜山至鹅公山一线,为一单一的、裂隙型小岩株,岩体水平相带发育,主体中心部位由似斑状闪长岩、(石英)二长闪长岩组成,主体边缘及西枝由中细粒闪长岩及少量闪长玢岩组成,岩体中暗色包体发育,常成群定向分布,也常见围岩捕虏体。五横岩体横跨庐枞盆地和怀宁隆起两

* 国家教委高等学校博士点科研基金资助

周涛发,男,1963年生,博士,讲师,从事岩石学、矿床学和地球化学方面的教学和科研工作。邮政编码:230009

1994-1 收稿,1994-10 修改回。由徐川、刘浩龙编辑

① 安徽省地矿局 326 地质队,1991(内部资料)

个亚构造单元,为一长条状一次性侵位的岩株,岩石类型为中细粒闪长岩、似斑状黑云母辉石闪长岩,岩体内暗色包体及围岩捕虏体均发育。

闪长岩类造岩矿物主要为斜长石(51%~75%)和角闪石(3%~15%),其次为钾长石、石英和黑云母,副矿物为榍石-磷灰石-磁铁矿组合,矿物成分特征显示月山岩体和五横岩体富钾富钠,总铺岩体富钠,且月山岩体结晶晚期岩浆体系富水、富挥发分和富硅富碱。组构方面,闪长岩类早期结晶矿物斜长石、角闪石等隙间被颗粒细小的较晚结晶的矿物石英、钾长石等充填,或较晚结晶的长石类矿物呈巨晶包裹早期斜长石和角闪石等晶体。

闪长岩类岩石化学成分中, SiO_2 含量变化较大,在52.12%~70.47%之间,集中于57%~66%之间;总碱量高, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 平均含量大于8.10%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值变化大。

2 闪长质熔体中水的含量及运动特征

水是天然硅酸盐熔体中最主要的挥发性组分,硅酸盐熔体在冷凝成岩过程中,其中大量的挥发性组分都已散失,所以由岩石化学成分

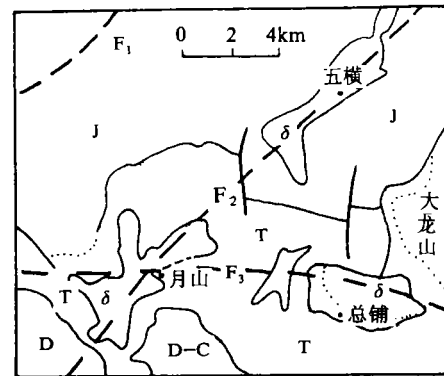


图1 安徽月山地区岩体地质略图

J—侏罗系;T—三叠系;C—石炭系;D—泥盆系; δ —闪长岩;F₁—牛集-独秀山断裂;F₂—庐江-怀宁断裂;F₃—总铺-月山(独秀山)断裂

Fig. 1. Geologic sketch map of the intrusions in Yueshan area, Anhui province, showing distribution of intrusive bodies.

J—Jurassic; T—Triassic; C—Carboniferous; D—Devonian; δ —Diorite; F—Niuji-Duxiushan fault; F₂—Lujiang-Huaining fault; F₃—Zongpu-Yueshan(Duxiushan) fault.

表1 月山地区闪长质无水熔体成分(mol%)及有关参数

Table 1. Composition (mol%) and related parameters of anhydrous dioritic melts in Yueshan area

组分	C ₀	C _i	月山	总铺	五横
SiO ₂	-16903.1291	306.6668	67.28	69.68	62.93
TiO ₂		1984.7178	0.5	0.40	0.60
Al ₂ O ₃		0	10.73	11.10	10.80
Fe ₂ O ₃		-47.2461	0.92	0.46	1.13
FeO		-497.7882	2.63	1.92	3.67
MnO		8382.5618	0.02	0.00	0.07
MgO		289.6371	4.34	3.79	5.87
CaO		305.9223	5.66	4.26	6.93
Na ₂ O		-587.0932	5.53	7.31	5.67
K ₂ O		-560.4951	2.04	1.06	2.33

C₀、C_i分别为 Nicholls (1980) 公式中的常数项和组分回归系数

分析的水含量不能代表其熔体状态时的溶解度。由岩浆开始结晶时的温度,压力和水逸度^[1],结合无水熔体中主要氧化物的摩尔浓度(表1),应用热力学方法^[5](Stolper, 1982),对包括月山

地区在内的长江中下游地区部分成矿和无矿岩体的岩浆熔体含水量的计算结果如表 2 所示。

表 2 长江中下游地区部分岩体岩浆熔体含水量(%)

Table 2. Water content of melts for some intrusives in middle and lower Yangtze valley

岩 体	月 山	总 铺	五 横	殷 祖	铜官山	洪 镇	武 山
含 水 量	4.05	4.10	3.64	3.88	4.42	3.45	4.18
矿化情况	强	弱	弱	无	强	无	强

熔体含水量有两方面特点:其一,与世界一般花岗质岩浆含水量 2.6%~6.0% (Burnham, 1979) 相比,包括本区在内的长江中下游地区岩体中酸性岩浆侵位时的含水量中等。岩浆的含水量与其形成和演化特点有关^[6] (Burnham, 1975),即含水量的多少主要与岩浆源的深度、来源区性质、岩浆形成的物理化学条件和过程有关,而且,根据 Gustafson^[6]对中酸性小侵入体的上侵机制的研究结果表明,不高的含水量,保证了岩浆在有利的导岩构造配合时快速上侵,导致岩浆侵位深度浅、结晶温度高,这与本区岩浆岩结晶的物理化学条件研究结果一致^[1];其二,岩浆含水量的相对高低与岩体成矿潜力具一定的对应关系:矿化发育的岩体如月山,铜官山和武山等的岩浆含水量常略高于 4.0,而无矿岩体如殷祖和洪镇等的岩浆含水量则低于 4.0,表明岩浆含水量相对较高时,熔-流分离时产生的流体相多,进入流体相(热液)中的成矿元素和 Cl、Na 等的量亦随之增加,当其它地质地球化学条件合适时,则对成矿更有利。同时,含水量中等而不过高,既确保了上升岩浆能浅成定位,又避免了岩浆在浅成定位前过早出现水过饱和而发生大规模水及其中的成矿物质的分散和流失^[6] (Burnham, 1964),故岩浆含水量的相对高低与岩体成矿潜力直接相关。

水的运动特征与成矿有一定关系。据研究,长江中下游地区许多含矿岩体如鄂城岩体、铁山岩体、铜官山岩体等的岩浆岩生长系统常具“三层结构”,即浅部的含矿小岩体、中深部的岩浆(岩)柱和深部的隐伏岩浆房(岩基),这种“三层结构”与成矿的根本联系在于岩浆中水的作用,相对较高的熔体含水量与“三层结构”岩浆生长系统联合作用时,更有利于成矿。因为深部岩浆房的熔体含水量比浅部侵位的岩浆总体上更为丰富,且结晶温度比浅部岩浆也低(Burnham, 1979),深部岩浆房一方面通过中间岩浆柱对浅部岩株的岩浆演化和结晶施加影响,而且在浅部岩株完全固结之后,深部岩浆可能仍在活动,熔-流分离作用仍在进行,深部岩浆房冷凝释放出的含矿岩浆水持续至浅部岩浆固结之后,这种作用方式有利于含矿岩浆热液的形成与演化,有利于成矿。

综上所述,浅成侵入体岩浆本身相对较高的含水量及深部岩浆房的存在是成矿的主要条件之一,也是岩体成矿潜力评价的重要标志。本区月山岩体岩浆含水量较高(表 2),地球物理资料^①解释已证实该岩体存在“三层结构”,而总铺岩体和五横岩体则不同时具备上述两方面条件,可以认为月山岩体的成矿作用比总铺岩体和五横岩体有利。

3 闪长质岩浆的粘度和密度

3.1 粘度

① 安徽省地矿局 326 地质队内部资料

根据熔体结构的聚合作用模式(莫宣学, 1985), 熔体中成网阳离子(Si^{4+} 和部分 Al^{3+} 、 Fe^{3+})愈多, 其聚合程度愈高, 要使键力很强的网络破裂变形而开始流动, 就必须施加较大的应力, 因而粘度愈大; 反之, 变网阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等)含量高, 熔体聚合程度降低, 粘度就小, 因此, SiO_2 含量高的酸性岩浆的粘度比基性岩浆大得多。挥发分中的水一般能破坏桥键, 使熔体解聚。温度和压力亦有重要影响: 温度升高, 分子活动性增强, 有助于解聚作用, 降低熔体粘度; 当温度一定时, 熔体粘度随压力增大而降低。根据上述分析, 可选用Shaw(1972)由阿仑尼乌斯原理改进的粘度关系式, 计算区内主要岩体闪长质岩浆在不同温度下(800~1300℃)的粘度, 如表3所示, 表4为总铺岩体不同相带岩浆的粘

表3 月山地区闪长质岩浆在不同温度下的粘度(Pa·s)

Table 3. Viscosity of dioritic magma at different temperatures in Yueshan area

岩体	$\Sigma X_i(\text{Si}^0 \cdot X_{\text{SiO}_2})$	S	ln η					
			800℃	900℃	1000℃	1100℃	1200℃	1300℃
月山	1.12	2.56	11.32	9.28	7.57	6.11	4.84	3.73
总铺	1.11	2.65	12.03	9.92	8.15	6.63	5.32	4.18
五横	1.13	2.40	10.07	8.16	6.55	5.18	3.99	2.96
平均			11.14	9.12	7.42	5.97	4.72	3.62

表4 总铺岩体不同相带岩浆在不同温度下的粘度(Pa·s)

Table 4. Viscosity of magma of two petrofacies zone at different temperatures in Zongpu intrusive

岩相	$\Sigma X_i(\text{Si}^0 \cdot X_{\text{SiO}_2})$	S	ln η					
			800℃	900℃	1000℃	1100℃	1200℃	1300℃
闪长岩	1.18	2.71	12.44	10.33	8.52	6.97	5.63	4.46
似斑状 闪长岩	1.09	2.61	11.17	9.63	7.88	6.39	5.10	3.98

度值。计算时, 运用含水量对熔体各组分加以调整。可见, 熔体在不同温度时的粘度变化很大, 随温度降低, 粘度显著增大; 同一温度下, 岩浆粘度自总铺岩体、月山岩体和五横岩体依次降低, 显示各岩体的岩浆物理性质并不相同。同一岩体(总铺)不同相带的岩浆粘度亦有一定的变化, 总铺岩体的细粒闪长岩的岩浆粘度是似斑状闪长岩岩浆粘度的1.5~2.5倍, 因此, 岩浆粘度差异是总铺岩体产生相带的重要原因之一。

3.2 密度

对任意温度下硅酸盐熔体密度的计算必须综合考虑硅酸盐的熔体结构、温压条件、化学成分、各氧化物的偏摩尔体积等复杂因素^[7](Bottinga, 1982)。当 SiO_2 的摩尔分数在0.4~0.8范围内时, 可以认为 SiO_2 等组分的偏摩尔体积与化学成分无关(标准误差一般小于2%)^[7]。根据Bottinga等(1970)提出的公式和Mo^[8]对偏摩尔体积的研究结果, 对月山地区闪长质岩浆不同温度(800~1300℃)时的熔体密度进行计算, 结果如表5所示。

将熔体密度计算结果(表5)与粘度计算结果(表3)对比可知, 对同一岩体, 粘度与密度基本上具正相关性质, 但不同岩体岩浆的物理化学性质对此二物理量的制约程度各不相同。

表 5 月山地区闪长质岩浆不同温度时的密度(g/cm³)

Table 5. Density of dioritic magma at different temperatures in Yueshan area

岩体	$\Sigma X_i M_i$	800℃		900℃		1000℃		1100℃		1200℃		1300℃	
		$\Sigma X_i V_i$	ρ	$\Sigma X_i V_i$	ρ	$\Sigma X_i V_i$	ρ	$\Sigma X_i V_i$	ρ	$\Sigma X_i V_i$	ρ	$\Sigma X_i V_i$	ρ
月山	61.992	25.634	2.418	25.788	2.404	25.943	2.387	26.096	2.373	26.250	2.359	26.043	2.345
总铺	61.243	25.839	2.370	25.980	2.357	26.122	2.344	26.262	2.332	26.403	2.320	26.544	2.307
五横	53.422	25.253	2.115	25.429	2.101	25.607	2.086	25.782	2.072	25.958	2.058	26.134	2.044
平均			2.301		2.287		2.271		2.259		2.245		2.232

X_i —氧化物摩尔分数; V_i —氧化物摩尔体积; ρ —熔体密度; M_i —氧化物摩尔质量

相同温度下,月山岩体熔体密度最高,总铺次之,五横最小;不同温度时同一岩体的熔体密度差别较大,如月山岩体 800℃ 时的熔体密度比 900℃ 时增大 0.58%,总铺岩体增大 0.55%,五横岩体增大 0.67%,五横岩体的熔体密度受温度影响最大。

4 岩浆上升通道及上升速度

4.1 岩浆上升通道

月山、总铺、五横三个岩体的产出均受基底断裂控制,根据构造研究并结合卫片遥感解译结果,月山岩体受 NE 及近 E-W 向基底断裂的交叉控制,总铺岩体主要受近 E-W 向基底断裂的控制,五横岩体则主要受 NE 向基底断裂构造控制(图 1),岩体的长轴方向常指示基底断裂的走向,故 NE 向的庐江-怀宁断裂和近 E-W 向的月山-总铺(-独秀山)隐伏断层尤其是二者的交汇部位是本区闪长质岩浆上升的通道。

4.2 岩浆上升速度

月山地区闪长质岩体的中深部产出特点是沿断裂呈长条状分布,因此,各岩体岩浆的上侵状况可近似用一维槽状流体行为进行模拟。根据流体上升速度与流体与介质间的密度差($\Delta\rho$)、裂隙宽度(Δx)及粘度等参量间的函数关系^[9],可对闪长质岩浆的上升速度进行计算。

月山、总铺、五横三个岩体的围岩皆为侏罗系或前侏罗系的砂页岩、灰岩或大理岩,其密度值在 2.61~2.83 之间,取其端员 2.61、2.83 分别进行计算。岩体出露宽度皆在 0.5~2.5 km 之间,估计岩浆上侵时裂隙宽(Δx)不会小于 3 m,故取 3 m、5 m、10 m 分别计算。计算时,岩浆上侵温度分别取 1000℃、900℃ 和 800℃。计算结果(表 6)表明,当裂隙宽度一定时,温度越高,流速越快;当温度一定时,裂隙越宽,流速越快。对不同岩体,当温度、裂隙宽相同时,五横岩体岩浆上侵速度最快,月山岩体次之,总铺岩体最小,例如,当 $t=800^\circ\text{C}$,裂隙宽取 3m 时,各岩体岩浆流速分别为:月山 $1.71 \times 10^{-2} \sim 3.67 \times 10^{-2} \text{m/s}$;总铺 $1.05 \times 10^{-2} \sim 2.02 \times 10^{-2} \text{m/s}$;五横 $15.40 \times 10^{-2} \sim 22.24 \times 10^{-2} \text{m/s}$,五横岩体的岩浆上侵速度分别约为月山岩体和总铺岩体的 9 倍和 14 倍。岩浆上侵速度快,动能大,定位则浅,月山岩体、总铺岩体和五横岩体之岩浆上侵速度的关系与各自的侵位深度是相吻合的。

为了对比,表 6 还计算了区域西南部具底辟式侵位特点的洪镇岩体^[2]主体二长花岗岩的岩浆在不同温度和裂隙宽度情况下的上升速度,分析可见,在对应的 t 、 Δx 情况下,洪镇岩

表6 月山地区闪长质岩浆上侵速度

Table 6. Velocity of upward intrusion of diorite magma in Yueshan area

岩体	t (°C)	$\eta \cdot 10^{-4}$ (Pa·s)	ρ (kg/m ³)	$\Delta\rho$ (kg/m ³)		V (m/s)		
				$\rho' = 261$	$\rho' = 283$	$\Delta x = 3m$	$\Delta x = 5m$	$\Delta x = 10m$
月山	1000	0.194	2387	223	443	0.8449~1.6783	2.3468~4.6600	9.3875~18.6486
	900	1.072	2404	206	426	0.1412~0.2921	0.3923~0.8113	1.5613~3.2453
	800	8.245	2418	192	412	0.0171~0.0367	0.0475~0.1020	0.1902~0.4081
总铺	1000	0.346	2344	266	486	0.5651~1.0323	1.5696~2.8678	6.2784~11.4711
	900	2.033	2357	253	473	0.0915~0.0171	0.2541~0.4750	0.0163~1.9001
	800	16.771	2370	240	460	0.0105~0.0202	0.0292~0.0560	0.1169~0.2240
五横	1000	0.070	2086	524	744	5.5020~7.8120	15.2833~21.7000	61.1333~86.8000
	900	0.350	2120	509	729	1.0689~1.5309	2.9692~4.2525	11.8767~17.0100
	800	2.362	2112	495	715	0.1540~0.2224	0.4279~0.6180	1.7114~2.4721
洪镇	1000	5.5826	2417	343	413	$4.516 \times 10^{-2} \sim$ 5.438×10^{-2}	0.1254~0.1510	0.5018~0.6042
	900	44.2413	2420	340	410	$5.649 \times 10^{-3} \sim$ 6.812×10^{-3}	$1.569 \times 10^{-2} \sim$ 1.892×10^{-2}	0.0628~0.0757
	800	517.8365	2433	327	347	$4.641 \times 10^{-4} \sim$ 5.6×10^{-4}	$1.289 \times 10^{-3} \sim$ 1.565×10^{-3}	$5.157 \times 10^{-3} \sim$ 6.26×10^{-3}

体的岩浆上侵速度远低于月山、总铺、五横等岩体的闪长质岩浆的上侵速度；与底辟式侵位特点的北京周口店岩株^[3]比较，月山地区闪长质岩浆的上侵速度明显高于周口店花岗闪长岩的岩浆上侵速度（过渡相 $2.53 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ，边缘相 $4.53 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ）^[3]。传统认为，具底辟式侵位特点的岩浆上侵速度快，具被动式侵位特点的岩浆上侵速度慢。本文结论是，虽然岩浆的上侵速度与其侵位机制有关，但上侵速度主要受岩浆自身性质（熔体化学成分、含水量、粘度和密度等）、岩浆的导通构造和围岩的物理性质及区域构造应力场特点等因素综合制约，因此，不能简单根据岩浆的侵位机制来确定其上侵速度。

岩浆上侵速度与成矿作用有着一定关系。上侵速度慢，岩浆熔-流分离作用相对较彻底，矿质较易集中，有利于含矿岩浆热液的形成；岩浆上侵速度快，除与岩浆粘度小、自身压力大等因素有关外，同时也表明岩浆具良好而通畅的入侵上升构造通道，因而有可能有利于深部岩浆房与浅部结晶岩株的持续联系；另一方面，岩浆上升速度快，则定位浅，冷却速度较快，岩浆上侵过程中的熔-流分离作用较差，矿质则分散于浅部岩体中（如五横岩体），形成含矿岩体，也可为成岩后的水-岩作用、成矿物质的活化转移提供有利条件。

5 岩浆侵位机制、定位深度及侵位时的温度

5.1 侵位机制

根据区域构造运动—变质作用—岩浆活动的部分研究成果（杨巍然等，1987；黄萱等，1990；李曙光等，1989）和月山地区构造-岩浆系特征分析认为，华北地块和扬子地块在三叠纪初发生对接碰撞，在 $(240 \pm 50) \times 10^6 \text{a}$ 前后达到顶峰，自 $214.8 \times 10^6 \sim 134.4 \times 10^6 \text{a}$ 进入碰

撞造山后的拉张期。区域地幔隆起、长江深断裂带的形成、一系列张性断裂和断陷盆地的形成、碱性超基性岩、基性岩及碱性花岗岩（“A”型花岗岩）的形成等皆指示进入燕山期后，南、北两陆块碰撞减弱，同时受太平洋板块向欧亚板块的NW向俯冲作用影响，区域由大陆边缘的挤压剪切构造环境向近大陆边缘的陆内断块的拉张剪切环境过渡。构造应力场特征导致月山地区NE向和近E-W向基底断裂向张剪性发展，根据格里菲斯破碎理论及有效应力定律可知，张性断裂的发展可深切岩石圈，导通深部岩浆源，本区的闪长质岩浆就是在这种构造背景下沿基底断裂上升的，其岩浆的侵位机制可用shaw（1980）和Castro（1987）的“岩墙扩展作用”描述。

本区闪长质岩浆的浅部就位是沿上部地壳的虚弱部位进行的。由于岩浆自身压力高，粘度小，上升速度快，岩浆便可以上侵并嵌入到围岩中去。

5.2 定位深度

根据闪长岩类岩浆结晶物理化学条件（图2）研究结果，区内各岩体的岩浆定位深度分别

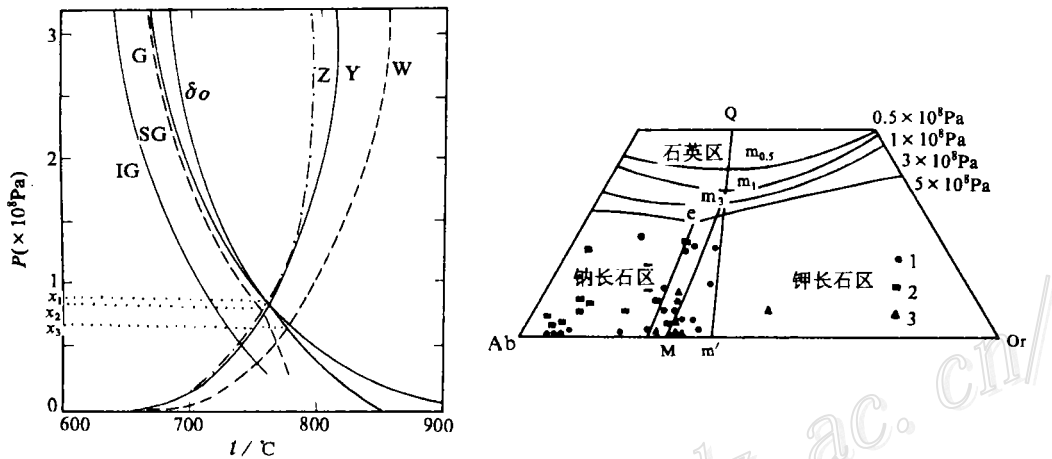


图 2 月山地区闪长岩类岩浆体系结晶的温度-水逸度及岩石熔融曲线（左图）

G—花岗岩（Tuttle and Bowen, 1958）； δo —石英闪长岩（贵阳地化所，1979）；IG—黑云母花岗岩（贵阳地化所，1977）；SG—堇青石黑云母花岗岩（贵阳地化所，1977）；Y—月山岩体黑云母平均 $p-t$ 曲线；Z—总铺岩体黑云母平均 $p-t$ 曲线；W—五横岩体黑云母 $p-t$ 曲线； x_1 、 x_2 、 x_3 分别为月山、总铺、五横岩体黑云母形成时的水压（ p_{H_2O} ）

Fig. 2 $t-f_{H_2O}$ curves of the dioritic magma cryatallization system and rock melting curves for Yueshan area(left).

G—Granite; δ —Quartz diorite; IG—Biotite granite; SG—Cordierite biotite granite; Y—Average $p-t$ curve of biotite from Yueshan rock body; Z—Average $p-t$ curve of biotite from Zongpu rock body; W— $p-t$ curve of biotite from Wuheng rock body; x_1 , x_2 and x_3 stand respectively for p_{H_2O} values of Yueshan, Zongpu and Wuheng rock body.

图 3 月山地区闪长岩类 Q-Ab-Or 三元系相图（右图）

1—月山岩体；2—总铺岩体；3—五横岩体

Fig 3. Q-Ab-Or ternary phase diagram of diorites in Yueshan area(right).

1—Yueshan rock body; 2—Zongpu rock body; 3—Wuheng rock body.

为^[1]：总铺岩体 2.05~3.80 km(平均 2.87 km)；五横岩体 2.05~2.38 km(平均 2.15 km)；月

山岩体 2.05~3.27 km(平均 2.64 km)。基本处于岩浆浅成相深度拟定值范围(黄茂新等, 1980)内,本区岩浆定位深度主要为浅成相。

5.3 侵位温度

显微岩相学研究表明,构成本区闪长岩类的主要矿物相斜长石有早、晚两个世代,早世代斜长石常以斑晶或似斑晶出现,呈次棱状、长条状或不规则状等,具熔蚀现象,见净边结构和似斑状结构;晚世代斜长石常呈他形包裹早世代斜长石、角闪石等,表明早世代斜长石(似斑晶)在岩浆定位之前便已开始结晶,侵位后由于物化条件变化而发生熔化、变形、加大,甚至被包裹。各岩体岩石化学成分在 Q-Ab-Or 三元相图(图 3)上的投点绝大部分落入钠长石首晶区,进一步证明了上述认识。黑云母结晶的 f_{O_2} - T 关系研究及矿物温度计和热力学计算结果^[1]表明,本区闪长质岩浆上侵时的温度应高于 800℃。

6 闪长质岩浆对流分析

月山岩体垂深 700 m 以上流线、流面构造发育,总铺、五横等岩体多处见闪长质暗色包体成群定向分布及暗色片柱状矿物构成的流线构造,这些都是岩浆对流的证据,岩体中斜长石具环带结构,一定程度上可能也与岩浆对流作用有关(马昌前,1983),被岩浆挟带的晶体,在对流过程中受系统波动着的温度、成分及水压等的影响产生环带,在冷凝过程中,矿物中组分扩散缓慢,矿物环带得以保存。另外,月山岩体的近似垂直分带、总铺岩体的水平分带及五横岩体的局部近似水平分带现象表明,岩浆定位后不同部位存在温度差。据前人研究,只要有温度梯度的存在,岩浆即会产生对流。

由无量纲瑞利系数 Ra 的计算结果(表 7)可知,在 1100~800℃之间,若岩浆没有冷凝到固相线温度以下,各岩体在温差 ΔT 取很小值均可满足 $Ra > 10000$,即是说,只要存在一很小的温度梯度,岩浆便可产生对流,例如,当 $\Delta T = 1K$ 时,800℃时各岩体岩浆的 Ra 分别为:月山岩体 2.299×10^8 ,总铺岩体 1.108×10^7 ,五横岩体 1.516×10^8 ,均远远大于 10^4 ,根据 Hill (1984)的理论,显然,本区闪长质岩浆体完全会发生对流。

表 7 月山地区闪长质岩浆瑞利系数(Ra)计算结果

Table 7. Calculated Reynolds number (Ra) of dioritic magma in Yueshan area

岩体	L (km)	Ra			
		1100℃	1000℃	900℃	800℃
月山(东枝)	2	$4.131 \times 10^{10} \cdot \Delta T$	$6.599 \times 10^9 \cdot \Delta T$	$1.758 \times 10^9 \cdot \Delta T$	$2.299 \times 10^8 \cdot \Delta T$
总铺	2	$2.414 \times 10^{10} \cdot \Delta T$	$5.307 \times 10^9 \cdot \Delta T$	$9.089 \times 10^8 \cdot \Delta T$	$1.108 \times 10^7 \cdot \Delta T$
五横	1.2	$9.142 \times 10^{10} \cdot \Delta T$	$5.052 \times 10^9 \cdot \Delta T$	$1.017 \times 10^9 \cdot \Delta T$	$1.516 \times 10^8 \cdot \Delta T$

根据 Marsh (1985) 的理论,对本区各岩体的岩浆在不同温度下对流速度的计算结果如表 8 所示。结果表明,各岩体的岩浆在高于固相线温度时皆具有较高的对流速度,必然导致岩体冷却速度加快,因为岩浆对流与否,对岩浆的冷却速度影响较大,对流岩浆的冷却速度比不对

表 8 月山地区闪长质岩浆的对流速度

Table 8. Convection velocity of dioritic magma in Yueshan area

岩体	L (km)	V ₀ (cm/s)			
		1100 °C	1000 °C	900 °C	800 °C
月山	2	1.854×10^{-2}	7.467×10^{-3}	3.854×10^{-3}	1.393×10^{-3}
总铺	2	1.417×10^{-2}	6.697×10^{-3}	2.771×10^{-3}	3.060×10^{-4}
五横	1.2	4.597×10^{-2}	1.106×10^{-3}	4.961×10^{-3}	1.944×10^{-3}

流岩浆的约快 24 倍 (袁万明, 1992); 高温时 ($\geq 1000^\circ\text{C}$), 五横岩体的岩浆对流速度最快, 这不利于熔体中流体相的分离和聚集, 加之该岩体结晶温度高 (840°C), 结晶速度快, 不利于含矿岩浆热液系统的形成; 月山岩体和总铺岩体的岩浆在高温时对流速度相对较慢, 显然有利于成矿, 但在接近结晶温度 ($800^\circ\text{C} \pm$) 时, 岩浆对流速度较快将有利于岩浆中流体相的稳定和彻底分离, 并在结晶晚期进一步聚集后, 向有利的构造部位集中释放, 因而有利于成矿, 若岩浆对流速度缓慢, 早先形成的气-液相则多局限分布于岩(浆)体内部或相对有些集中于岩(浆)体的上部或顶部, 这些部位不利于具一定规模矿体的形成, 因而对成矿不利, 800°C 时, 月山岩体的岩浆对流速度远高于总铺岩体的岩浆对流速度。从对流速度因素来探讨岩体与成矿的关系, 显然月山岩体是有利于成矿的, 而总铺岩体和五横岩体条件较差。

7 闪长质岩浆的冷却速度

当岩浆冷凝到固相线温度以下, 便停止对流。根据近地表的岩浆体在对流条件下冷凝到固相线温度所需时间的计算公式 (Marsh 等, 1985), 对月山地区闪长质岩浆的冷却速度的计算结果显示, 各岩体的冷却时间分别为: 月山岩体 1.787×10^{11} 秒 (5651 年), 总铺岩体 3.52×10^{10} 秒 (1116 年), 五横岩体 1.98×10^{10} 秒 (628 年), 各岩体的冷却速度都较快, 这与由岩浆对流作用研究得出的结论相吻合, 月山岩体冷却时间最长, 其冷却时间是总铺岩体的 5 倍、五横岩体的 9 倍。由于月山、总铺、五横三个岩体皆属浅成侵入体, 其岩浆冷却速度比近地表岩体稍慢; 岩浆结晶时释放的结晶潜热也会使冷凝时间延长, 故可认为各岩体的实际冷凝时间比上述估算值略大一些。但月山岩体之下相连的“深部岩浆房”的存在, 必将大大延缓该岩体的冷却速度, 使其冷却时间远远长于总铺岩体和五横岩体。月山岩体缓慢的岩浆冷却速度将十分有利于含矿岩浆热液系统的形成及其在特定构造条件下与围岩发生作用, 形成有一定规模的矽卡岩化和矿化。

8 晶体的沉浮行为及分布机理

根据月山地区岩浆熔体的性质、含水量及 Huppert (1985) 的关系式计算, 本区闪长质岩浆上侵时其中晶体的含量约为 $5\% \sim 10\%$, 岩浆具一定的屈服强度 (Mcbirney 等, 1979) 和宾汉塑性体 (Maalfe, 1985) 流变学行为。本区岩石常具似斑状结构, 斜长石似斑晶粒度一般为 $0.5 \sim 2\text{mm}$, 最大达 $10 \sim 15\text{mm}$ (如总铺), 斜长石比重 ($2.63\text{g/cm}^3 \pm$) 大于闪长质岩浆的密度

(表5),晶体没有下沉,是岩浆动力学条件控制的结果。计算表明,当温度分别取1000℃、900℃和800℃,早结晶的矿物晶体克服岩浆屈服强度开始下沉的最小半径分别为13.32 mm, 13.95 mm和14.54 mm,故斜长石晶体不会下沉,而具上浮行为。

据粘性流体力学槽状流机制^[4]对总铺岩体不同部位斜长石斑晶速度分布计算结果显示,线状断裂中心部位岩浆流速最大,上升的斜长石斑晶主要分布在该中心部位,含晶体较少或不含晶体的岩浆便定位于岩浆体的边缘部位。所以,岩浆动力学行为特点是岩体相带形成的内在原因。

9 结 论

(1) 从闪长质岩浆的含水量与成矿的关系上看,显然成矿的月山岩体的熔体含水量较高,而矿化弱的五横岩体的熔体含水量低,总铺岩体的熔体含水量虽然也较高,但由于其他与成矿有关的地质地球化学因素的影响,该岩体目前未发现有一定规模的矿床。

(2) 水的运动特征与成矿有一定关系,当浅部岩株(浆)和深部岩浆房联合作用时,更有利于岩浆热液的活动与矿化,具“三层结构”特征的月山岩体的成矿作用优于总铺岩体和五横岩体。

(3) 闪长质岩浆具宾汉体特性,早晶出的斜长石晶体不会下沉;岩体的岩相学特点是上侵岩浆的速度分布及冷却特点造成的,岩浆物理性质直接影响岩浆上升和定位的动力学行为,与成矿亦具间接联系。

(4) 岩浆上升速度不但与侵位机制有关,而且还主要受岩浆自身性质,以及导岩构造和围岩的物理性质、区域构造应力场等的制约。

(5) 岩浆上升速度在一定程度上影响熔-流分离作用程度,因而与成矿具直接成因联系。

(6) 高温时($\geq 1000^\circ\text{C}$),岩浆对流速度较慢对成矿有利,接近固-液相温度(800°C)时,对流速度相对较快对成矿有利,反之则不利于成矿。

(7) 岩浆冷却速度慢,冷却时间长,熔-流分离较彻底,有利于成矿;反之不利于成矿。

(8) 在一系列岩浆物理性质及动力学行为方面,月山岩体比总铺岩体和五横岩体对成矿作用更有利。

衷心感谢李文达教授、刘宝班教授、陶奎元研究员和王文斌研究员对论文的审阅。

参 考 文 献

- 1 周涛发等. 安徽月山地区闪长岩类岩浆结晶的物理化学条件研究. 合肥工业大学学报, 1994, 17(3)
- 2 董树文等. 安徽董岭花岗岩类的构造特征及侵位机制. 地质科学, 1993, 28(1)
- 3 马昌前. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理. 地质学报, 1988, 62(4): 329~341
- 4 Torcotte D L 和 Schubert G, 地球动力学. 韩贝传等译. 北京: 地质出版社, 1986
- 5 Niclols I. A simple thermodynamic model for estimating the solubility of H_2O in magma. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1980, 74: 211~220.
- 6 Gustafson. Porphyry copper deposits and calc-alkaline volcanic. In: Moelhinny M W, ed. *The earth, its origin structure and evolution.* 1984. 427~463
- 7 Sparks R. S. J et al. The fluid dynamic of evolving magma chambers. *Royal Society of London Philosophical Transaction*, 1984, A310: 511~534
- 8 Mo X et al. The partial molar volume of Fe_2O_3 in multicomponent silicate liquids and the pressure dependence of oxygen fugacity in magma. *Mineral Mag.*, 1982, 45: 237~245
- 9 Kushiro I. Viscosity, density and structure of silicate at high pressure, and their petrological applications. In: Hargraves R B, ed. *Physics of magmatic process.* Princeton Univ. Press, 1980. 83~120

MAGMATIC DYNAMICS AND ITS RELATIONS TO METALLIZATION OF DIORITES IN YUESHAN, ANHUI PROVINCE

Zhou Taofa, Yue Shucang and Lan Tianyou

(*Department of Resources and Environmental Science, Hefei University of Technology, Hefei 230009*)

Key words: diorites, magmatic physics, metallization, Yueshan area

Abstract

Yueshan area of Anhui Province is one of the most important parts of the copper, iron (sulfur) and gold metallogenic belt of the Middle and Lower Yangtze Valley. On the basis of studies on petrology, fluid dynamics, rheology, thermal conductivity and thermodynamics, the authors have calculated and analysed the physical properties of magma and the dynamic mechanism of magmatic ascending, emplacement and crystallization for the formation of Yueshan, Zongpu and Wuhen diorite intrusives in Yueshan area and also investigated the relationships between physics and dynamics of magma (such as H₂O content of melt, migration character of magmatic water, and ascending velocity and convection state of magma) and metallization. The main results obtained are as follows:

The dioritic magma of Yueshan, Zongpu and Wuhen intrusives has moderate H₂O content (3.64%~4.10%) and comparatively low viscosity as compared with ordinary granitic magma in the world. The ascending magma contains some 5%~10% suspended phenocrysts and displays behaviors of Bingham body. The magma ascends rapidly in the form of dike extension along the NE- and nearly EW-trending faults and at their intersects, and is then emplaced hypabyssally at a high temperature (>800°C). The convection resulting from emplacement of magma leads to relatively rapid cooling. Compared with other intrusives, the metallogenic Yueshan dioritic body has a relatively high H₂O content and a magmatic growth system, consisting of a shallow ore-bearing stock, a medium-depth magmatic (or rock) pillar and a deep batholith (i. e. a "three-layer-structure"), which is favorable for the accumulation of magmatic water, ore-forming elements and carrier elements in the fluid phases during the melt-fluid partitioning processes and the continuous activity and mineralization of the ore-bearing hydrothermal system. The magma ascends more rapidly than magma of the diapiric Hongzheng granite, suggesting that besides being related to the emplacement mechanism, the ascending velocity of magma is mainly restricted by multiple factors such as properties (composition, water content, viscosity and density) of magma itself, ascending pathway of magma, physical behaviors of wall rocks and tectonic stress field. This also implies that there might exist a good channelway connecting the shallow stock with the deep magmatic chamber, which is favorable for the upward migration and mineralization of magmatic hydrothermal solution. At high temperature (≥ 1000 °C) the convection velocity of the Yueshan magma is relatively low, and at the temperature approaching solid-liquid phase (800 °C \pm), the velocity is relatively high, which is even more favorable for the steady and thorough partitioning of melts as well as their further accumulation at the late stage of crystallization. The cooling of Yueshan rock body lasts much longer than that of Zongpu rock body and Wuhen rock body, and the slow cooling of magma is very favorable for the formation of ore-bearing hydrothermal system in magma of Yueshan rock body and certain degrees of skarnization and mineralization through water-rock interaction under specific structural conditions. It is thus concluded that Yueshan intrusive body has more favorable ore potentiality than Zongpu and Wuhen in a series of physical and dynamic behaviors of magma.