

安徽沙溪含和不含铜(金)矿斑岩斜长石斑晶粒度统计及其岩浆结晶动力学和成矿意义

Size Statistics of Plagioclase Phenocrysts in Mineralized and Barren Porphyries in Shaxi Porphyry Copper-Gold Deposit, Anhui Province and Its Significance for Studying Magma-Crystallization Kinetics and Ore-Forming Process

徐文艺 傅斌 任启江 胡文暄 徐兆文

Xu Wenyi, Fu Bin, Ren Qijiang, Hu Wenxuan and Xu Zhaowen

(南京大学地球科学系 南京 210093)

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)

摘要 通过对沙溪矿区含矿与不含矿斑岩中斜长石斑晶的粒度统计,计算出平均矿物粒度(S)、矿物分布密度(D)及矿物分布均匀度(H);再根据晶体大小分布理论(CSD),计算出斜长石的晶体生长速率、成核密度及成核速率等岩浆结晶动力学参数;发现含矿斑岩较无矿斑岩有高的成核密度和成核速率,而晶体生长速率则较低;指出成分相近的斑岩在岩浆结晶动力学特征上的极细差别可能造成岩体含矿性明显不同。

Abstract Through size statistics of plagioclase phenocrysts in mineralized and barren porphyries in Shaxi porphyry copper-gold deposit, the three parameters, i. e. average grain size (S), grain density (D) and homogeneity of distribution (H), have been calculated. On the basis of the crystal size distribution (CSD) theory, the growth rates, nucleation density and nucleation rates of plagioclase have been worked out. Comparing these parameters of mineralized porphyries with those of barren ones, we find that nucleation rates and nucleation density of mineralized porphyries are higher than those of barren ones, but crystal growth rates of mineralized porphyries are slower. This study shows that a slight difference of the characteristics of magma-crystallization kinetics among the porphyries having similar petrochemical and geochemical composition, may result in obviously distinctive ore-bearing potentiality.

• 1995-07-13日收稿,1996-11-23日改回。

本文为国家自然科学基金资助项目(编号9472110)成果之一。

第一作者简介:徐文艺 男 1970年生 博士 矿床学专业

主题词 岩浆结晶动力学 平均矿物粒度 矿物分布密度 矿物分布均匀度 晶体大小分布理论

Key words: Magma-crystallization kinetics; Average grain size; Grain density; Homogeneity of distribution; Crystal size distribution theory

分类号: P588.121

Classific. code: P588.121

1 引言

Graybeal (1973) 在研究美国西部两个拉拉米期岩体时发现: 黑云母的铜含量与岩体的主要元素无关而与岩浆结晶过程有关, 在同源的粒状结构岩石中黑云母平均含铜量为 115 $\mu\text{g/g}$, 而在具斑状结构的岩石中黑云母平均含铜量为 82 $\mu\text{g/g}$, 他认为这是斑岩体之所以与铜矿化直接有关的主要原因, 未进入黑云母晶格的铜成为斑岩铜矿铜的来源。这一研究一方面支持了正岩浆模式的观点, 即铜在岩浆残留相中富集而不进入造岩矿物晶格是斑岩铜矿成矿的先决条件; 另一方面也揭示了岩浆结晶动力学环境对 Cu 的晶体/熔体分配系数的制约关系。国外其他学者也有类似看法 (Holland, 1972; Kesler et al., 1975a; Feiss, 1978; Hendry et al., 1981; Titley, 1988)。任启江和 Guilbert et al. (1984; 1988) 在研究美国西部各种类型 I 型花岗岩中钛铁氧化物的分布特征时发现, 斑岩铜矿只与高或中等分布密度的岩体有关, 而与低分布密度的岩体无关, 并且指出影响分布密度的主要因素是熔体的聚合程度和岩浆的冷却速度。这一问题的研究对斑岩铜矿成因与斑岩岩浆结晶动力学特征紧密相关这一岩石学-矿床学新的前缘研究领域有指导作用。本文采用斑晶统计的方法, 半定量地计算了沙溪矿区有关斑岩岩浆结晶动力学参数, 进一步分析了含矿与无矿斑岩的差别, 探讨了岩浆结晶动力学环境与斑岩成矿的内在联系。

2 研究方法及其原理

安徽沙溪斑岩铜矿是一个典型的岩浆热液型铜(金)矿床, 矿区及其附近已发现有九种不同类型的斑岩体, 按侵入顺序为: 葛蒲山角闪闪长斑岩→石英闪长斑岩→黑云母石英闪长斑岩→角闪闪长斑岩→粗斑闪长斑岩→含大量角砾的闪长斑岩→闪长斑岩→黑云母闪长斑岩→花岗闪长斑岩(任启江等, 1991)。这些岩体可区分为三类: A 式无矿、B 式无矿和含矿斑岩, 三类斑岩特征列于表 1。矿物组成上(表 2), 含矿斑岩和 A 式无矿斑岩大致相同; 化学组成上, 含矿斑岩与 A 式无矿斑岩亦无明显差别(表 3)。鉴于①斜长石是含矿与 A 式无矿斑岩中最主要造岩矿物(75%以上); ②斜长石主要受到绢云母的蚀变, 晶形能较完好保存; ③角闪石和黑云母等矿物含量少且蚀变(主要为绿泥石化)后晶形受到较大破坏; 我们选用斜长石作为粒径统计对象以区别含矿的和 A 式无矿的斑岩。本文运用了晶体大小分布理论(Crystal Size Distribution, 简称为 CSD)及有关的斜长石斑晶的平均粒度、分布密度和分布均匀度(分别用 S 、 D 和 H 表示)的统计方法。

表1 沙溪矿区含矿岩体与无矿岩体(A式,B式)特征对比

Table 1 Feature comparison between mineralized and barren porphyries (including type A and type B) in Shaxi deposit

岩体类型	含矿岩体	A式无矿岩体	B式无矿岩体
侵入顺序	较早	同时或稍晚	或早,或晚
分布	矿床内部	矿床内部	矿床外围
岩石类型	石英闪长斑岩, 黑云母石英闪长斑岩	闪长斑岩,黑云母闪长斑岩, 侵入角砾岩,角闪闪长斑岩, 粗斑闪长斑岩等	葛蒲山角闪闪长斑岩, 八字口花岗闪长斑岩岩脉
岩石化学	富钠,富碱, SiO ₂ 含量约60%~63%	富钠,富碱, SiO ₂ 含量 与含矿岩体差别不大	SiO ₂ 含量与含矿岩体差别 较大(54%~70%)
矿物成分	以斜长石为主, 还含有角闪石、黑云母等矿物, 石英含量为5%~10%	以斜长石为主,角闪石、 黑云母含量较高,可达10% 以上,石英含量小于5%	葛蒲山岩体富含角闪石; 八字口岩脉富含钾长石、 石英,石英含量达25%
蚀变特征	青磐岩化,石英-绢云母化, 钾质蚀变发育,深部还 可能存在钠质蚀变	碳酸盐化,绢云母化,绿泥石化	蚀变不发育
矿化特征	矿化强烈,与矿化有成因联系	弱矿化至无矿化, 与矿化无成因联系	无矿化,与矿化无成因联系

表2 沙溪矿区主要侵入岩矿物组成

Table 2 Mineral contents of the main intrusives in Shaxi deposit

岩体类型	岩石类型	主要斑晶矿物	主要基质矿物	矿物总体积百分含量
含矿斑岩	石英闪长斑岩	以Pl(An=20~35) 为主,少量 Qz, Amp, Bi	以Pl为主,少量Qz, Amp, Bi, Ap, Mt	Pl 75%; Qz 10%; Amp 8%; Bi 6%
	黑云母石英闪长斑岩	以Pl为主, 少量Qz, Bi	由微晶Pl, Qz, Bi组成	Pl 78%; Bi 12%; Qz 9%
A式无矿斑岩	角闪闪长斑岩	由Pl(An=20~40), Amp组成	由细粒Pl, Amp, Bi, Qz, Ap, Mt组成	Pl 80%; Amp 12%; Qz 4%; Bi 3%
	粗斑闪长斑岩	主要由And和Amp 组成,少量Bi	以Pl为主, 少量Qz和Ap	Pl 85%; Amp 8%; Bi 4%; Qz 3%
	含角砾闪长斑岩	角砾成分为志留系砂页岩	胶结物成分为闪长斑岩	
	闪长斑岩	以And为主, 少量Amp	以微晶为Pl主,少量Qz	Pl 85%; Amp 8%; Qz 3%
	黑云母闪长斑岩	由Pl, Amp和Bi组成	由微晶Pl和Qz组成	Pl 80%; Bi 10%; Amp 5%; Qz 4%
B式无矿斑岩	葛蒲山角闪闪长斑岩	And-Oli和Amp	细粒Pl, Qz, Ab和Amp	Pl 80%; Amp 15%; Qz 4%
	八字口花岗闪长斑岩	主要是Oli和Qz, 少量Kf和Bi	Pl, Qz, Kf等构成 微花岗结构	Pl 57%; Qz 22%; Kf 15%; Bi 5%

注: And 为中长石; Oli 为更长石; Pl 为斜长石; Amp 为角闪石; Qz 为石英; Kf 为钾长石; Bi 为黑云母; Mt 为磁铁矿; Ap 为磷灰石; Ab 为钠长石。

表3 沙溪矿区含矿斑岩与A式无矿斑岩主元素(%)和稀土元素(μg/g)特征对比
Table 3 Comparison of petrochemical and REE geochemical characteristics between mineralized porphyries and type A barren porphyries in Shaxi deposit

取样位置	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	σ	DI
ZK608-802.8m	闪长斑岩	62.27	0.42	15.48	2.40	1.27	0.09	2.02	3.89	5.08	1.82	0.22	2.47	68.3
ZK1404-503.3m	闪长斑岩	61.44	0.31	14.67	1.97	0.92	0.09	2.19	4.10	3.90	2.78	0.16	2.42	65.8
断龙颈*	黑云母石英闪长斑岩	63.40	0.42	14.74	2.00	2.66	0.04	1.68	1.84	3.86	2.72	0.22	2.11	72.2
铜泉山*	石英闪长斑岩	60.67	0.52	16.54	3.00	2.43	0.04	1.95	3.14	5.40	2.01	0.25	3.11	68.8

取样位置	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
ZK608-362.1m	石英闪长斑岩	19.65	37.99	4.99	17.69	3.52	1.03	3.09	0.46	2.35	0.49	1.30	0.20	1.26
ZK608-802.8m	闪长斑岩	15.47	32.48	4.99	16.62	3.43	0.83	2.58	0.37	1.88	0.39	1.04	0.16	1.04
Zk1404-503.3m	闪长斑岩	17.92	31.71	3.79	13.98	3.03	0.74	2.41	0.35	1.70	0.36	0.99	0.15	0.97

取样位置	岩石名称	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe	LR%	MR%	HR%	Sm/Nd
ZK608-362.1m	石英闪长斑岩	0.19	12.3	106.6	84.8	21.7	3.91	0.93	0.90	85.2	11.6	3.13	0.20
ZK608-802.8m	闪长斑岩	0.17	9.55	90.6	73.4	17.1	4.27	0.81	0.92	85.3	11.6	2.97	0.21
Zk1404-503.3m	闪长斑岩	0.16	8.61	86.8	71.1	15.7	4.53	0.81	0.88	86.1	10.9	2.90	0.22

注: 带* 样品由安徽省327地质队提供; 闪长斑岩为A式无矿斑岩, 其余为含矿斑岩。

Marsh (1988) 提出的CSD理论的主要思想如下:

设 $N(\rho)$ 表示单位体积岩浆系统中粒度 ρ 以下所有晶体数, $n(\rho)$ 为粒度 ρ 上晶体布居密度 (Population density), 则有:

$$N(\rho) = \int_0^\rho n(\rho)d\rho \text{ 或 } n(\rho) = dN(\rho)/d\rho \tag{1}$$

当岩浆系统结晶达到平衡时有:

$$d(G \cdot n)/d\rho = -n/t \tag{2}$$

式中 G 为晶体的平均线形生长速率, t 为晶体在系统中的平均滞留时间。若 G 与 ρ 无关 (即McCabe定律), 则方程(2)积分得:

$$n = n^0 \exp(-\rho/Gt) \tag{3}$$

式中 n^0 为积分常数, 表示 $\rho \rightarrow 0$ 时的布居密度, 即成核密度, 成核速率 J 表示为:

$$J = dN(\rho)/dt|_{\rho \rightarrow 0} = n^0 G \tag{4}$$

将(3)式两边取对数得:

$$\ln n = \ln n^0 - (1/Gt) \cdot \rho \quad (5)$$

将 $\ln n$ 对 ρ 作图, 求出 $\ln n^0$ 和斜率 $(-1/Gt)$, 并根据实际情况取适当的晶体滞留时间, 即可得晶体的成核密度和生长速率, 从而亦可求出成核速率 J 。

任启江等(1984; 1988; 1991)的 S 、 D 、 H 统计方法中, S 代表矿物平均粒度, D 代表矿物分布密度, H 代表矿物分布均匀度, 即:

S = 视域中所有斜长石粒径累加总和/斜长石颗粒累加总数 (cm)

D = 视域中斜长石颗粒数累加总和/视域总面积 (颗/cm²)

H = (视域中出现斜长石的微区总数/被测试微区总数) × 100%

我们对沙溪矿区含矿斑岩(石英闪长斑岩)和无矿斑岩(闪长斑岩)薄片中共13119颗斜长石斑晶(取大于0.061mm)在显微镜下逐个测量, 然后进行统计。具体统计步骤如下:

- (1) 先对斜长石粒度进行分级, 统计各粒度级晶体数 N_i ;
- (2) 求出相应单位面积晶体数 N_{Ai} ($N_{Ai} = N_i/A$) 和单位体积晶体数 N_{Vi} ($N_{Vi} = N_{Ai} \cdot V$);
- (3) 作直方图和累积曲线图(如图1);
- (4) 用差商法求出累积曲线在各粒度级上的斜率, 即 $n(\rho)$ 。将 $\ln n(\rho)$ 对 ρ 作图, 用最小二乘法算出回归直线的截距 $\ln n^0$ 和斜率 $(-1/Gt)$;
- (5) 计算 t , 通过岩体中捕虏体的大小和组成以及岩体的全岩成分, 由 Stokes 定律估算岩浆上侵速度(马昌前, 1986), 再根据矿区地质背景估算晶体的平均滞留时间, 本文取 $t = 6.3072 \times 10^7$ s。
- (6) 计算 G 、 J 、 S 、 D (本文已转换为单位体积颗粒数) 和 H 。

3 统计结果

由于沙溪矿区含矿和 A 式无矿斑岩的矿物组成中斜长石占绝大部分(75%以上), 因此斜长石的结晶动力学特征可代表两类斑岩的结晶动力学特征。统计结果(表4)显示沙溪矿区含矿和 A 式无矿斑岩的岩浆结晶动力学特征存在显著差别。

(1) 由表3和图2可看出含矿斑岩的斜长石斑晶小而多, 其 S 值范围为 0.0300~0.0536 cm, D 值范围为 1991~4729 颗/cm²; 无矿斑岩斜长石斑晶则大而少, S 值范围为 0.0527~0.0656 cm, D 值范围为 322~1463 颗/cm²。

(2) 含矿斑岩晶体成核密度(n^0 为 10509~46166 颗/cm⁴)^①远高于无矿斑岩的成核密度(n^0 为 1212~4866 颗/cm⁴); 含矿斑岩的晶体生长速率(G 为 2.32×10^{-10} ~ 5.83×10^{-10} cm/s, 均值为 4.07×10^{-10} cm/s) 低于无矿斑岩晶体生长速率(G 为 5.25×10^{-10} ~ 9.27×10^{-10} cm/s, 均值为 6.78×10^{-10} cm/s)。如图3所示, 根据晶体生长速率和成核密度能很好的将含矿与无矿斑岩区别开。

① 成核密度为一种特殊布居密度, 可沿用布居密度单位(颗/cm⁴) (Cashman and Marsh, 1988), 但它表示 ρ (粒度) $\rightarrow 0$ 时的布居密度, 其实际单位为颗/cm³。

(3) 含矿斑岩的晶体成核速率(J)较高, 变化范围为 $3.08 \times 10^{-6} \sim 1.44 \times 10^{-5}$ 颗 $\cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值为 7.87×10^{-6} 颗 $\cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; 而无矿斑岩成核速率为 $9.10 \times 10^{-7} \sim 3.19 \times 10^{-6}$

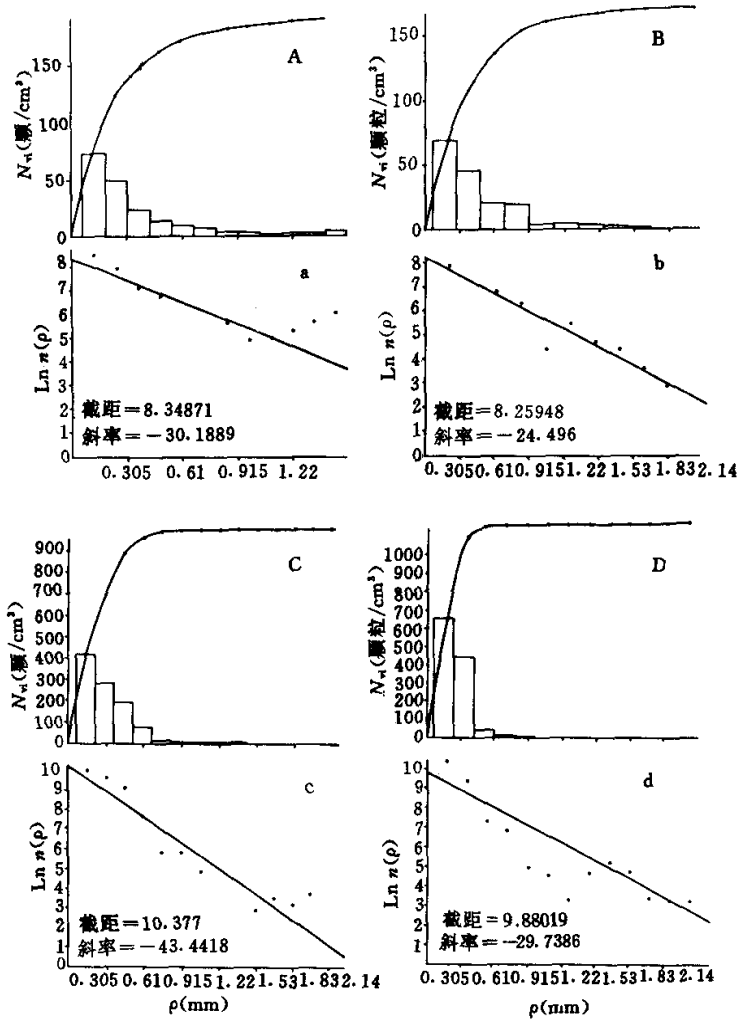


图1 斜长石斑晶粒度统计图

A, B, C 和 D 为频率直方图和累积曲线图; a, b, c, 和 d 为 $\ln n(\rho)$ 对 ρ 回归直线图; A(a), B(b), C(c), D(d) 样号分别为 S4-60, S4-180, S4-195, S4-182; A, B 为无矿斑岩; C, D 为含矿斑岩

Fig. 1 Cartogram of plagioclase phenocryst size; A, B, C and D are distribution frequency histograms; a, b, c and d are $\ln n(\rho)$ vs. ρ regression curves; A(S4-60) and B(S4-180) are barren porphyries, C(S4-195) and D(S4-182) are mineralized porphyries

颗·cm⁻³·s⁻¹, 均值为 1.94×10^{-6} 颗·cm⁻³·s⁻¹。

总之, 含矿斑岩和 A 式无矿斑岩尽管岩石化学和地球化学特征大致相同(表 2), 但二者有不同的结晶动力学特征, 含矿斑岩结晶成核速率(J)和成核密度(n^0)高于 A 式无矿斑岩, 而晶体生长速率则低于 A 式无矿斑岩。

表 4 沙溪矿区斑岩岩浆结晶动力学参数计算结果

Table 4 Calculating results of magma-crystallization kinetics parameters of porphyries in Shaxi deposit

样号	岩石类型	测量面积 (cm ²)	测量颗数 (颗)	$S \times 10^{-2}$ (cm)	D (颗/cm ³)	H (%)	$\ln n^0$	$-1/Gt$ (cm ⁻¹)	n_0 (颗/cm ⁴)	$G \times 10^{-10}$ (cm/s)	$J \times 10^{-6}$ (颗·cm ⁻³ ·s ⁻¹)
S2-130	M	4.00	676	3.32	2197	32	8.69	-31.4	5943	5.05	3.08
S2-146	M	4.00	884	4.58	3285	38	10.7	-50.8	46166	3.12	14.4
S2-159	M	4.00	633	3.00	1991	33	10.6	-68.3	41357	2.32	9.59
S2-169	M	4.03	964	4.10	3700	33	10.2	-41.0	28282	3.87	10.9
S2-180	M	4.00	839	4.66	3038	38	9.14	-27.9	9321	5.68	5.29
S2-190	M	4.00	709	5.36	2360	46	9.26	-27.2	10509	5.83	6.13
S4-182	M	4.00	1127	3.05	4729	41	9.88	-29.7	19536	5.34	10.4
S4-183	M	4.00	1003	3.97	3971	43	10.4	-36.4	32860	4.26	14.3
S4-195	M	2.25	627	3.56	4562	54	10.4	-43.4	32209	3.65	11.8
S4-190	M	4.00	649	5.12	2067	39	10.2	-42.0	26903	3.77	10.1
S4-191	M	4.00	851	3.12	3103	25	9.30	-31.2	10938	5.08	5.56
S4-192	M	4.00	786	3.53	2755	30	9.57	-38.2	14382	4.15	5.59
均值	M	-	-	-	-	-	9.87	-39.0	19341	4.07	7.87
S4-54	B	2.25	290	5.38	1463	44	7.91	-19.1	2724	8.30	2.26
S4-56	B	4.00	391	5.58	966	48	7.69	-19.8	2186	8.01	1.75
S4-60	B	4.00	448	5.91	1185	35	8.35	-30.2	4230	5.25	2.22
S6-102	B	4.00	188	6.56	322	34	7.10	-21.1	1212	7.51	0.91
S4-64	B	4.00	328	6.56	743	38	7.62	-17.1	2039	9.27	1.89
S4-65	B	4.00	258	5.56	518	38	7.75	-27.7	2322	5.72	1.33
S4-180	B	4.08	398	5.70	963	32	8.26	-24.5	3866	6.47	2.50
S5-25	B	3.32	355	6.15	1106	22	8.49	-24.2	4866	6.55	3.19
S5-33	B	3.44	337	6.25	970	31	8.14	-22.7	3429	6.98	2.39
S4-194	B	4.00	372	5.27	897	25	8.30	-27.7	4024	5.72	2.30
均值	B	-	-	-	-	-	7.96	-23.4	2864	6.78	1.94

注: M 代表含矿石英闪长斑岩, B 代表无矿闪长斑岩。

4 斑岩岩浆结晶动力学特征与斑岩铜矿的成因关系

前文已指出, 含矿斑岩结晶过程中具有高的成核密度和成核速率以及低的晶体生长速率(导致高的分布密度), 这些特征主要与岩浆快速冷却有关 (Swanson, 1977), 因此斑岩铜矿的形成与岩浆快速冷却有一定的成因联系, 这是为什么只有斑岩才形成细脉浸染型铜矿的原因之一。

岩浆快速冷却, 成核速率快, 成核密度大, 晶体数量多, 致使岩浆有高的粘度 (Marsh, 1989)。由 Stokes-Einstein 扩散系数公式 $D = K_B T / 6\pi\eta r$ (K_B 为玻兹曼常数, T 为热力学温度,

η 为粘度, r 为扩散粒子半径) 可知, 相同组分粒子在快速冷却的高粘度含矿斑岩中具有较小的扩散系数, 因此有用组分在岩浆结晶过程中难以通过扩散进入造岩矿物晶格而被分散。这样, Cu 聚集于残留熔体相中而得到初步富集, 为含 Cu 岩浆热液体系的形成奠定基础。同样因为 Cu 的扩散系数低, 所以在含矿斑岩中亦不能形成 Cu 的岩浆矿床。结晶组分较低的扩散系数反过来更加阻碍了晶体的生长, 增大了成核速率和成核密度 (Ghiorso, 1987), 这种正反机制对 Cu 在残留岩浆中的富集起了极其重要的作用。

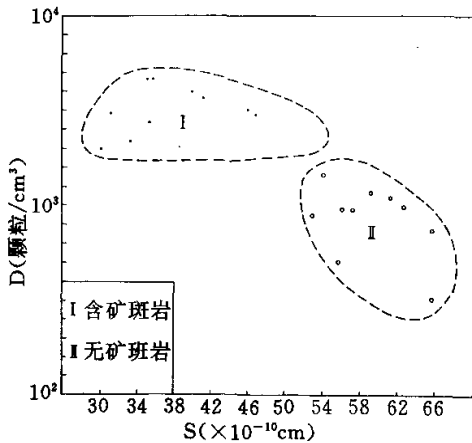


图 2 沙溪矿区两类斑岩 S - D 值分布图
I 为含矿斑岩; II 为不含矿斑岩
Fig. 2 Distribution map of S vs. D values for two types of porphyries in Shaxi deposit

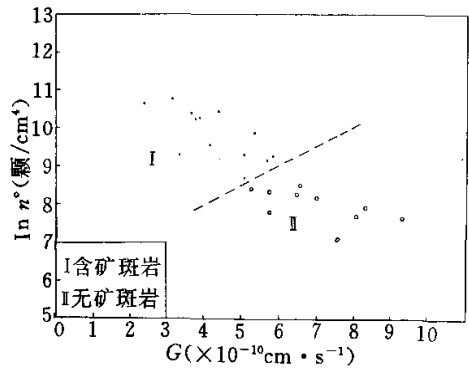


图 3 沙溪矿区两类斑岩 $\ln n^0$ - G 分布图
Fig. 3 Distribution map of $\ln n^0$ vs. G values for two types of porphyries in Shaxi deposit (the keys as the same as Fig. 2)

绝非冷却结晶越快则斑岩含矿性越好, 过速结晶 (如火山岩和脉岩) 不能形成富铜的残留岩浆熔体相, 而导致 Cu 全面分散, 使 Cu 按分配系数“均衡”地分布于造岩矿物 (包括斑晶和基质) 中。因此, 岩浆结晶动力学特征的微小差别将对斑岩含矿与否产生直接影响, 适度快的冷却速率对含矿斑岩的形成至关重要。

根据高分辨率透射电镜和 X 射线分析对环太平洋地区大量斑岩铜矿中黑云母的研究 (Ilton et al., 1988; 1993), 黑云母中 Cu 均以自然铜或 CuO 的包裹体形式赋存于黑云母结构层间, 而未进入结构层中的八面体位置, 这些含铜异常高的黑云母多分布于浅部甚至地表附近, 深部原生黑云母仅有微弱或几乎没有 Cu 的异常。大多数含矿斑岩的原生黑云母和角闪石含铜很低 (Kesler, 1975a; Hendry et al., 1981) 表明正岩浆模式斑岩铜矿成矿过程中的铜只能来源于岩浆演化过程中的残留熔体相, 而非源于岩浆期后热液对岩体中 Cu 的载体矿物的淋滤 (Titley, 1988)。岩浆适度快速冷却有利于这类残留熔体相的形成。

由于沙溪斑岩铜(金)矿的矿化过程是一个“协和反馈”的非平衡过程(任启江等, 1991), 其制约因素极为复杂, 本文只是从岩浆结晶动力学的角度讨论了斑岩铜矿成矿控制因素的一个侧面, 而不是沙溪斑岩铜矿成矿机制的全面阐述。

5 结论

在沙溪斑岩铜矿区, 岩石化学和地球化学特征相近的含矿斑岩和A式无矿斑岩在岩浆结晶动力学特征方面有明显的差别, 含矿斑岩具有较高的 D 值、成核速率和成核密度以及较低的晶体生长速率和 S 值。这些岩体在岩浆结晶动力学特征上的极小差别显示出含矿性的明显不同, 岩浆适度快速冷却结晶对斑岩岩体的成矿起着重要作用。

参 考 文 献

- 任启江, Guilbert J M. 1984. 北美西南部斑岩铜矿有关岩体岩浆结晶的物理化学条件. 南京大学学报(地质增刊): 109~126
- 任启江, 徐兆文, Guilbert J M, 雷秉舜. 1988. 钛铁氧化物的 D 、 S 、 H 值在中-酸性火成岩研究中的意义. 岩石学报, (1): 70~83
- 任启江, 邱检生, 徐兆文, 张重泽, 方长泉, 杨荣勇. 1991. 安徽沙溪斑岩铜(金)矿床矿化小岩体的形成条件. 矿床地质, (3): 232~242
- 任启江著. 1991. 火成岩及其有关矿床中的钛铁氧化物研究. 北京: 科学出版社. 154~234
- 马昌前. 1986. 岩浆活动中某些动力学参数的估量方法. 地质科技情报, 5(3): 47~54
- Cashman K V and Marsh B D. 1988. Crystal size distribution in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization (II). Contrib. Mineral. Petrol., 99: 292~305
- Feiss P G. 1978. Magmatic sources of copper in porphyry copper deposits. Econ. Geol., 73: 397~494
- Ghiofso M S. 1987. Chemical mass transfer in magmatic process (III). Contrib. Mineral. Petrol., 96: 292~305
- Graybeal F T. 1973. Copper, manganese, and zinc in coexisting mafic minerals from Laramide intrusive rock in Arizona. Econ. Geol., 66: 785~792
- Hendry D A F, Chivas A R, Reed S B T and Long J V P. 1981. Geochemical evidence for magmatic fluids in porphyry copper mineralization, Part II, Ion-probe analysis of Cu contents of mafic minerals, Koloula Igneous Complex. Contrib. Mineral. Petrol., 78: 404~412
- Holland H D. 1972. Granites, Solutions and base metals deposits. Econ. Geol., 67: 281~301
- Ilton E S and Veblen D R. 1988. Copper inclusions in sheet silicates from porphyry copper deposits. Nature, 334: 516~518
- Ilton E S and Veblen D R. 1993. Origin and model of copper enrichment in biotite from rocks associated with porphyry copper deposits: A transmission electronic microscopy investigation. Econ. Geol., 88: 885~900
- Kesler S E, Issigonis M J, Brownlow A H, Damon P E, Moore W J, Northcote K E and Preto VA. 1975a. Geochemistry of biotites from mineralized and barren intrusive systems. Econ. Geol., 70: 559~567
- Marsh B D. 1988. Crystal size distribution in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization (I). Contrib. Mineral. Petrol., 99: 277~291
- Marsh B D. 1989. On convective style and vigor in sheet-like magma chambers. Journal of Petrology, 30: 479~530
- Swanson S E. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granitic texture. American Mineralogist, 62: 966~978
- Tittle S E. 1988. Silicates flushed with copper. Nature, 334: 472~473