江西永平铜矿床成矿地球化学研究

何　江

（南京大学地球科学系）

本文运用分配系数理论并结合金属占有率方法，揭示和反演了永平铜矿床的形成机制。该矿床是成矿元素在分异地质相间3次有利分配形成的，混合岩化作用形成矿床之主体，花岗岩对矿床起叠加改造作用。

关键词　分配系数　占有率　分异地质相有利分配

金属元素在分异地质相间的有利分配是导致其富集成矿的主导因素，而成矿元素在分异相间的分配取决于自身的特性和成矿地球化学环境，成矿富集常需通过多次有利分配才能完成。

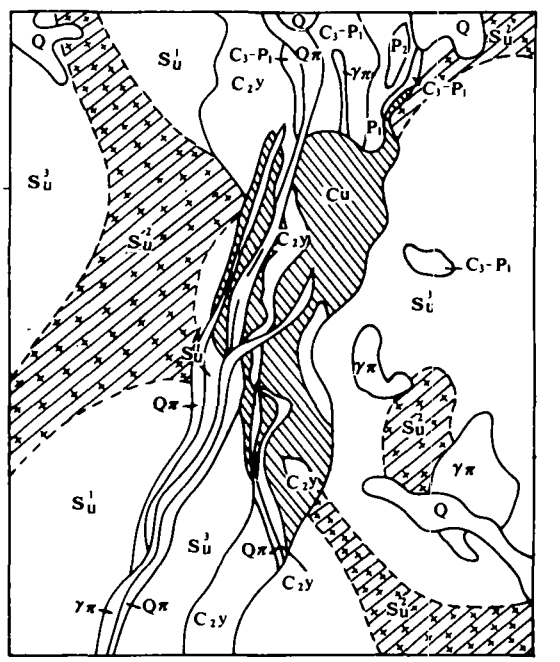
矿区地质概况

矿区位于武夷山隆起与信江坳陷带的接壤地带，属饶南多金属成矿带的主要区段。

区内地层较简单。基底为震旦—寒武系的碎屑岩—火山碎屑岩系。受加里东运动的影响，该套地层变质为绿片岩相—角闪岩相，后因受海西—印支运动的作用，发生混合岩化，形成广布矿区、面积达130km^{2}的混合岩。混合岩分为混合岩化带—混合岩带—均质混合岩、混合花岗岩带。混合岩是老地层局部熔融并经结晶分异而成的原地—半原地花岗质岩类（见图）。

盖层包括中石炭统叶家湾组、二叠纪及侏罗纪俄湖岭组。叶家湾组是一套以浅海相为主的灰岩、泥灰岩、条带状灰岩夹砂岩、页岩的碳酸盐岩建造，因其良好的岩性储盖组合关系而成为矿区的主要储矿层。受海西—印支期混合岩化作用的影响，该套地层遭受夕卡岩化和千枚岩化等蚀变。

区内火成岩以十字头似斑状黑云母花岗岩为主体，面积约0.65km^2，K-Ar法年龄161～183Ma。



矿区地质简图

Q—第四系；C_3-P_1—船山—茅口组；C_2y—叶家湾组；P_1—李家组；P_2—龙坛组；γπ—花岗（斑）岩；Qπ—石英斑岩；Su^1—混合岩化带；Su^2—混合岩带；Su^3—混合花岗岩带；Cu—矿体

本文1992年10月收到，1993年1月改回，张旭明编辑。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1. 测试方法及可靠性

成矿元素用原子吸收光谱测定，矿物含量统计用图像仪求得各种矿物的面积百分比并乘以相应矿物的比重而得，单矿物的纯度大于95%。

2. 混合岩化作用中成矿元素的分配

仿矿物—全岩法计算混合花岗岩中Cu的分配系数，结果列表1。

表1 混合花岗岩Cu分配系数及占有率

岩石名称	矿物名称	矿物含量	Cu含量(10^{-6})	Cu占有率(%)	K_D^{Cu}
混合花岗岩 I	Pl	41.47	12	13.96	0.055
	K-f	25.52	20	14.02	0.091
	Q	28.06	12	9.27	0.055
	Py	2.45	750	49.19	3.318
	Bi	2.51	200	15.07	0.909
	Am		220		$K_{TD}^{Cu}=0.17$
混合花岗岩 II	Pl	40.90	37	41.67	0.223
	K-f	30.50	18	16.67	0.108
	Q	26.10	25	19.44	0.151
	Py	0.63	270	4.72	1.623
	Bi	2.62	250	18.33	1.506
	Am				$K_{TD}^{Cu}=0.21$

注：Pl—斜长石；K-f—钾长石；Q—石英；Py—黄铁矿；Bi—黑云母；K_D^{Cu}—分配系数；K_{TD}^{Cu}—总分配系数；Am—全岩含Cu量。

由表1看出，无论是单一造岩矿物对Cu的分配系数或造岩矿物对Cu的总分配系数均远小于1，表明混合花岗岩形成演化过程中，Cu趋于在晚期残余熔体相中聚集。分配率平衡计算表明，黄铁矿尽管其矿物含量仅占很小部分，但对Cu的占有率却很高，说明Cu的强亲硫性，并标明混合花岗岩中少量硫化物的存在，将导致成矿元素进入其矿物晶格而分散及晚期流体相中成矿元素浓度的减低。

混合花岗岩形成的全过程包括老地层的局部熔融及"重熔岩浆的结晶分异"，结晶作用的晚期将析离出以水为主的流体。当已知重熔岩浆的含金属量、分离结晶作用程度、物化条件、流体盐度及矿物—熔体总分配系数条件下，析出流体的含金属量，可参照不同流体介质实验模拟得到的流体—熔体间分配系数资料进行估算。

据公式$C_L^m = C_0 \times F^{(K_{TD}-1)}$（$C_L^m$—残浆含金属量，$C_0$—重熔原始岩浆含金属量，$F$—固结度，$K_{TD}$—矿物—熔体总分配系数），笔者计算了$F=10$时晚期残浆中的含Cu量，并据盐度及Candela(1984)实验测得的K_{Cu}^{f-m}(流体—熔体间的Cu分配系数)值计算了析离流体相中的含Cu量(表2)。

由上表可知，重熔岩浆结晶分异作用的晚期，成矿元素表现不相容性而在晚期残浆中强烈聚集。值得注意的是，条带状混合岩之基体含Cu量高达560×10^{-6}，而脉体含Cu量仅为264×10^{-6}，表明重熔过程中，老地层成矿元素强烈迁出并聚集于重熔熔体及晚期析离流体中，这与重熔岩浆结晶分异作用的讨论结果是一致的。

3. 花岗岩中成矿元素的分配

仿斑晶—基质法计算Cu的分配系数，结果列表3。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　残浆及析离流体中 Cu 含量估算结果(10^{-6})

岩石名称	原始含 Cu 量	K_{TD}^{Cu}	F	K_{Cu}^{f-m}	盐度(wt%)	残浆含 Cu 量	流体含 Cu 量
混合花岗岩 I	220	0.17	10	1.59～50	$\frac{4.9\sim7.6}{6}$	1487.38	2364.93
混合花岗岩 II	166	0.21	10	1.59～50	$\frac{8.6\sim16.4}{14}$	1023.55	1627.45

注：K_{Cu}^{f-m} 引自 Candela(1984)，系流体成分为 1～4MNaCl，750℃，1.5kbar，NiO—Ni 缓冲下的熔体—流体相中 Cu 的分配系数。

表 3　花岗岩 Cu 分配系数及占有率

岩石名称	矿物名称	矿物含量(%)	Cu 含量(10^{-6})	Cu 占有率(%)	K_D^{Cu}
早期花岗岩	Pl	20.53	24	17.73	1.26
	k-f	2.25	7	0.71	0.37
	Q	7.32	22	7.09	1.16
	Bi	5.24	170	31.92	8.95
	Bm	64.67	19	42.55	$K_{TD}^{Cu}=0.82$
晚期花岗岩	Pl	15.39	12	3.45	0.16
	k-f	8.68	9	1.38	0.12
	Q	5.98	18	1.72	0.24
	Bi	5.32	85	8.62	1.13
	Bm	64.63	75	84.48	$K_{TD}^{Cu}=0.11$

注：Bm—基质，其它代号同表 1。

需指出，花岗岩之基质与斑晶矿物成分上是相似的。早期花岗岩斑晶矿物对 Cu 的占有率总和近 60%，基质对 Cu 的占有率约 40%。斑晶中又以黑云母对 Cu 的占有率为最，计算得黑云母 Cu 的分配系数 $K_{DBi}^{Cu}=8.95$，表明 Cu 有强烈进入黑云母晶格而呈分散状态的趋势。对斑晶矿物求算总分配系数得 $K_{TD}^{Cu}=0.82$，略小于 1，表明岩浆结晶分异作用的早阶段 Cu 在熔体相中有微弱富集的趋势。

晚期花岗岩中，斑晶矿物对 Cu 的占有率总和不足 15%，基质对 Cu 的占有率达 85%。斑晶矿物 Cu 的总分配系数 $K_{TD}^{Cu}=0.11$，远小于 1，各类斑晶矿物 Cu 的分配系数与早期相比均明显减小。表明岩浆结晶分异的晚阶段，Cu 强烈趋于在熔体相中聚集。

按与混合花岗岩同样的方法计算花岗岩残浆及晚期析离流体的含 Cu 量，结果于表 4。

表 4　花岗岩残浆及析离流体含 Cu 量估算结果 (10^{-6})

岩石名称	原始含 Cu 量(%)	K_{TD}^{Cu}	F	K_{Cu}^{f-m}	盐度(wt%)	残浆含 Cu 量	流体含 Cu 量
早期花岗岩	19	0.82	10	1.59～50	$\frac{8\sim9}{8.5}$	28.76	45.73
晚期花岗岩	75	0.11	10	1.59～50	$\frac{8\sim11}{9.5}$	582	925.38

注：各种代号同表 2。

由表 4 同样看出，花岗岩浆结晶分异过程中 Cu 强烈趋于在残浆中并最终导致在晚期析离流体中聚集而表现不相容性。

Cu 是第一过渡系元素，Cu^{2+}离子的八

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面体配位晶体场稳定化能远大于四面体配位的晶体场稳定化能，故岩浆结晶过程中 Cu 优先进入八面体配位位置。岩浆熔体中八面体与四面体配位位置的比例数又严格受控于岩浆熔体的化学组成。一般认为，岩浆中碱质总量和 SiO_2 含量的增高及 Al_2O_3 的降低均能使熔体中四面体位置的比例数增大。故熔体组分的变化直接导致岩浆熔体中 Cu 的性状及地球化学行为的变化。

据花岗岩岩石化学分析资料，求算熔体中八面体配位位置比例数的判别指标（表5），结果表明，岩浆结晶分异演化从早到晚，熔体中的 $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$ 值逐渐增大，即随岩浆结晶分异的进展，熔体中八面体配位位置的比例数渐增。从而有利于 Cu 在晚期残浆中滞留而趋于在熔体相中富集。

表5 花岗岩熔体结构判别指标

岩石名称	样品号	$Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$
晚期花岗岩	2	2.40
	11	1.75
	12	1.55
早期花岗岩	3	1.45
	13	1.56

另一方面，岩浆结晶分异的过程中，温度降低，挥发组分的含量逐渐增高（表6），挥发组分与成矿元素结合成易溶络合物，加之后期残浆对先期结晶矿物的交代，使早期矿物部分或全部分解而释放出晶格中的 Cu。各种因素的综合导致 Cu 在残浆乃至晚期析离流体中聚集。

表6 花岗岩 F、Cl 含量 (10^{-6})

岩石名称	F 含量	Cl 含量
晚期花岗岩	3400	150
早期花岗岩	910	37

4. 夕卡岩中 Cu 的分配

夕卡岩化过程虽为开放和不平衡体系，但从补偿效应和总体而言则接近平衡体系[①]。尽管有关夕卡岩中成矿元素分配的研究尚存在许多有待解决的理论问题，但因各种夕卡岩矿物有选择性的富集（或分散）不同成矿金属的特点，可将夕卡岩看作成矿金属的“中间聚集站”。故半定量的研究夕卡岩中成矿元素的分配仍是可能并十分具有意义的。

夕卡岩中成矿元素的分配系数及占有率计算结果列表7。

表7 夕卡岩 Cu 分配系数及占有率计算结果

岩石名称	矿物名称	矿物含量(%)	Cu 含量(10^{-6})	Cu 占有率(%)	K_D^{Cu}
含矿夕卡岩	Q	4.00	11	0.05	0.01
	Py	0.47	1600	0.93	2.05
	Cp	0.25	30.15×10^4	93.20	386.54
	And	95.28	49	5.81	0.06
	Am		780		
不含矿夕卡岩	Q	1.74	90	1.36	0.47
	Py	6.19	560	23.81	2.95
	Cc	1.66	40	0.48	0.21
	And	90.41	120	74.15	0.63
	Am		190		

注：Cp—黄铜矿，And—钙铁榴石，Cc—方解石，其它同表1。

①李志鹄等，1990，成岩成矿作用中金属分配规律性研究报告，中色科 86-329 号。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由表7看出，含矿夕卡岩 $K^{Cu}_{Dcp} \gg 1 > K^{Cu}_{DAnd} > K^{Cu}_{DQ}$，不含矿夕卡岩 $K^{Cu}_{DPy} > 1 > K^{Cu}_{DAnd} > K^{Cu}_{DQ} > K^{Cu}_{DCc}$，含矿夕卡岩中，黄铜矿对 Cu 的占有率高达 93%，不含矿夕卡岩中黄铁矿和钙铁榴石对 Cu 的占有率分别为 24%和 74%，二者在 Cu 的分配上存在极大差异。含矿夕卡岩中尽管黄铜矿含量不足 1%，但 Cu 占有率甚高，而不含矿夕卡岩 Cu 主要分散到造岩矿物及副矿物晶格中，导致成矿元素的极大损耗。

对比两种夕卡岩中黄铁矿对 Cu 的占有率可以发现：黄铁矿对 Cu 的占有率明显受控于黄铜矿及全岩含 Cu 量。随黄铜矿的消失及全岩含 Cu 量的降低，黄铁矿对 Cu 的占有率相继增大，表明黄铜矿的沉淀受控于成矿溶液中 Cu 的浓度并 Cu 表现强亲硫性。

元素分配与成矿作用关系的讨论

成矿元素大量分散到造岩矿物和副矿物的晶格中，将会导致地质作用晚期析离流体相中成矿元素浓度的大量耗损和贫化而不利成矿，而析离流体相中成矿元素的有利分配则有利成矿。成矿元素的耗损与有利分配可用分配系数及金属占有率定量标示。

分配规律研究表明，本区混合岩化作用过程中，基底地层成矿元素强烈迁出，并在重熔岩浆结晶分异晚期乃至晚期析离流体相中聚集。这不仅为成矿准备了物质基础，也为元素的迁移、富集提供了热动力。混合岩化期后富含 SiO_2 及矿质的高温水流体，在与中石炭统叶家湾组地层进行广泛的渗滤、扩散交代作用，而使地层发生夕卡岩化同时，从相邻地层中进一步浸滤出部分成矿物质，并随交代作用的进行、成矿溶液的演进及物理化学条件的变化，成矿溶液在"中间站"卸载而富集成矿，形成矿床之主体。

花岗岩对成矿作用的贡献问题，一直存在争议。有人认为该矿床系典型的斑岩型铜矿床（章崇根，1985），另有人认为花岗岩与成矿无关（林毅高，1978，沈水生，1984）。

花岗岩成矿元素分配规律的研究清楚表明，岩浆结晶分异过程中 Cu 表现不相容性趋于在晚期残浆乃至晚期析离流体相中聚集。据此，笔者认为，花岗岩浆的侵入对矿床起叠加改造作用，作用的结果是使夕卡岩矿物成分复杂，并叠加部分成矿物质而使矿石品位增高。这种结论与矿区地质事实相一致。

几点结论

通过以上阐述，可得以下几点结论：

1.成矿元素在分异地质相间的多次有利分配是成矿的必要条件。永平铜矿床是通过三次有利分配而成矿的。

2.混合岩化作用对成矿作用的贡献最大。它不仅提供成矿物源，也为矿质的迁移、活化、富集及夕卡岩的形成提供热动力。花岗岩对矿床起叠加改造作用，并使矿石品位增富。

3.用分配系数理论，结合金属占有率方法，定量表述元素地球化学行为，进而阐述金属成矿作用机制，是成矿富集作用研究的拓展。该方法的探索将为分配系数理论在成矿作用研究中的广泛应用开辟新的途径。

本文是在昆明工学院地质系李志鹄教授的直接指导下完成的。测试工作由昆明冶金研究所协助完成，在此深表谢意。

参考文献

[1] 李志鹄，《金属矿床地球化学》，中南工业大学出版社，1987年。

[2] 刘英俊等，《元素地球化学》，科学出版社，1980。

[3] Irving. A. J.,Geochim. Cosmochim. Acta,1978, Vol.42,No.6.

[4] Feiss.P.G., Economic Geology, 1978, Vol.73, No. 3, P.379～404.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net