

斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素富集贫化规律研究

马生明¹⁾, 朱立新²⁾, 刘崇民¹⁾, 陈晓锋²⁾, 梁胜跃¹⁾

1)中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;

2)中国地质科学院, 北京 100037

摘要: 依据江西城门山、内蒙古乌奴格吐山、甘肃白山堂三个斑岩型 Cu(Mo)矿床试验资料, 探讨了斑岩型 Cu-Mo 矿床中微量元素的富集贫化规律。在斑岩型 Cu(Mo)矿床中, 除存在成矿元素及其伴生元素的富集以外, 还存在着部分亲石分散元素、稀有元素等的贫化。发生贫化的微量元素因矿床而异, 既有共性又有特殊性。Sr 等微量元素在斑岩型 Cu(Mo)矿床中显著贫化并且有随 Cu 矿化增强贫化程度增强的规律, 可以作为判断与斑岩体有关的地球化学异常的成矿前景。此项研究成果为实现地球化学勘查指标的定量化提供了基础。

关键词: 斑岩型 CuMo 矿床; 微量元素; 富集贫化

中图分类号: P595; P618.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3021(2009)06-821-10

A Study of the Enrichment and Depletion Regularity of Trace Elements in Porphyry Cu (Mo) Deposits

MA Sheng-ming¹⁾, ZHU Li-xin²⁾, LIU Chong-min¹⁾, CHEN Xiao-feng²⁾, LIANG Sheng-yue¹⁾

1) *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei 065000;*

2) *Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037*

Abstract: According to the test data obtained from three porphyry Cu(Mo) deposits lying respectively in Chengmenshan of Jiangxi, Wunugetushan of Inner Mongolia and Baishantang of Gansu, the authors studied the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu(Mo) deposits. It is found that there exists not only the enrichment of some metallogenic elements but also the depletion of some lithophile-dispersed elements and rare elements in porphyry Cu(Mo) deposits, and that the characteristics of the depleted trace elements change from one deposit to another, showing their different particularities in porphyry Cu(Mo) deposits. These elements, however, also show some general characteristics. In porphyry Cu(Mo) deposits, some trace elements, such as Sr, are obviously depleted and their depletion degree gradually increases along with the intensification of Cu mineralization, which can serve as a discrimination criterion for the mineralization perspective of geochemical anomalies related to porphyries. The results of this study can provide the basis for realizing the indicator quantification in geochemical exploration.

Key words: porphyry Cu(Mo) deposit; trace elements; enrichment and depletion

成矿过程中元素的富集、贫化是成矿作用的两个方面, 没有成矿元素的高度富集不可能形成矿床, 而在成矿元素及其伴生元素发生富集的同时, 势必导致其它一些元素出现贫化, 也就是说, 元素的富

集和贫化均是成矿作用的结果, 成矿作用过程中发生贫化的元素与发生富集的元素一样, 都可以很好地指示矿床或矿化体的存在, 在地球化学勘查中具有同等重要的作用。然而, 就目前掌握的文献资料

本文由国家科技支撑计划课题(编号: 2006BAB01A10)和中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212010813057)联合资助。

收稿日期: 2009-08-03; 改回日期: 2009-11-27。

第一作者简介: 马生明, 男, 1963年生。教授级高工。现主要从事矿产勘查地球化学方法技术研究工作。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市金光道84号。电话: 0316-2267728。E-mail: MSMIGGE@163.com。

来看,有关成矿作用过程中发生贫化作用元素的研究以及它们在矿床地球化学勘查中的实际应用却比较少。针对这一问题,本文以江西城门山、内蒙古乌奴格吐山和甘肃白山堂斑岩型 Cu(Mo)矿床为研究对象,探讨了斑岩型 Cu(Mo)矿床中元素的富集贫化规律,重点归纳了斑岩型 Cu(Mo)矿床中发生贫化的微量元素及其在斑岩型 Cu(Mo)矿床勘查中的作用。此项研究成果为筛选斑岩型 Cu(Mo)矿床地球化学勘查新指标,实现地球化学勘查指标的定量化提供了基础。

1 试验研究方法

城门山、乌奴格吐山、白山堂试验区分属于不同景观区不同成矿带。采样点布置视每个试验区矿床开采及勘探现状而定。城门山试验区位于长江中下游九江-瑞昌成矿带内,成矿受长江断裂带与北西及北东向断裂带控制,矿床与中酸性浅成斑岩体有关,属深源浅成Cu-Mo矿床,该矿床已经露天开采。本试验区采样点沿矿床露天采坑边坡布设,共布置采样剖面2条,采集与矿化有关的花岗闪长斑岩、石英斑岩样品39件。

乌奴格吐山试验区位于大兴安岭西北部(强扩张区)构造-岩浆带成矿构造环境,属得尔布干Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Au成矿带(徐志刚等,2008)。矿床主要受由中心式火山机构控制的燕山晚期以花岗闪长斑岩为主的杂岩体控制。矿床尚没有开采,正在进行开采前的补充勘探。试验样品采自4个矿床勘探钻孔,采样方式参照钻孔原生晕样品采集方法,连续捡块,采样间距5-7 m。共采集钻孔岩芯样品170件。

白山堂试验区位于北山裂谷带,俞井子-丁字路口石炭纪裂陷海槽褶皱带。岩浆岩主要为华力西中-晚期火山岩和中酸-酸性侵入岩,属造山期产物,为钙碱性岩石系列,表现为高硅、高碱特性。含矿浅成侵入体的围岩是蓟县系平头山群,主要由绢云石英片岩、石墨石英片岩和钙质片岩组成。矿体受到北北东向平移断裂控制。试验样品分别采自矿床露天采坑和巷采不同中段。共采集样品54件。

样品测试由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室承担,每件样品分析测试了34项微量元素(白山堂试验区30项)。样品分析质量监控结果表明,分析测试数据质量100%合格。

出于归纳叙述方便的考虑,文中综合参照刘英俊等《元素地球化学》(刘英俊等,1984)、牟保磊《元素地球化学》(牟保磊等,1999)、陈骏等《地球化学》

(陈骏等,2004)的元素地球化学分类,将上述34个微量元素归并为亲铜成矿元素、钨钼族元素、亲铜分散元素、亲石分散元素、矿化剂卤素元素、铁族元素和稀有元素等七类。

试验中按主成矿元素Cu含量升序方式将三个试验区其它微量元素含量进行排序,然后依据Cu含量水平将各试验区Cu含量划分为依次递增的含量段,用来表示Cu矿化增强。根据每个试验区Cu含量状况,将城门山试验区划分为五个含量段,乌奴格吐山试验区划分为六个含量段,白山堂试验区划分为七个含量段。计算各含量段内Cu及其它微量元素含量平均值。用微量元素含量平均值与酸性岩丰度(酈明才等,1997)的比值(文中称为富集系数)来探讨微量元素的富集与贫化特征。通过微量元素含量平均值随Cu含量增高的变化特征总结微量元素富集贫化规律。结果如表1、表2、表3所示。

2 斑岩型Cu(Mo)矿床中微量元素含量随Cu矿化增强变化特征

2.1 城门山试验区微量元素含量随Cu矿化增强变化特征

从表1中可以看到,当Cu含量小于 100×10^{-6} 时,亲铜成矿元素中只有Zn的平均含量低于其酸性岩中的丰度,其它Pb、As、Bi、Sb、Ag、Au、Hg等的含量均高于酸性岩中相应元素的丰度,出现一致的富集规律。随着Cu矿化增强,亲铜成矿元素含量总体上呈现出增大趋势。

与酸性岩中丰度相比,钨钼族元素均表现出富集特征。当Cu含量小于 2000×10^{-6} 时,Sn、W虽然富集但总体含量变化幅度不大,随Cu矿化增强含量变化趋势也不甚明显。当Cu含量大于 2000×10^{-6} 后,Sn、W两元素富集程度明显增大,分别是酸性岩中丰度的8倍和80倍。在Cu矿化过程中,Mo含量显著高于其酸性岩丰度,但是含量波动较大,没有表现出明显的变化规律,这可能受到了Mo矿化程度的直接影响,而非单纯与Cu矿化有关。

亲铜分散元素Cd、Ga、Tl、In、Se等随Cu矿化增强富集贫化趋势不尽相同。当Cu含量小于 100×10^{-6} 时,Cd含量低于其酸性岩丰度,当Cu含量大于 100×10^{-6} 之后,Cd含量显著富集,最低为酸性岩丰度的30多倍,当Cu含量大于 2000×10^{-6} 时Cd富集幅度最大,为其酸性岩丰度的250倍。当Cu含量小于 2000×10^{-6} 时,Ga含量基本上是随着Cu矿化增强而减小,表现出贫化特点,当Cu含量大于2000

表 1 城门山试验区微量元素含量平均值随 Cu 含量增高变化特征统计表
Table 1 Statistics of the variations of average trace element contents with the increasing copper content in Chengmengshan experimental area

元素分类	元素	酸性岩丰度*	Cu 含量段									
			< 100 (n=2)		100-500 (n=15)		500-1000 (n=14)		1000-2000 (n=4)		> 2000 (n=4)	
			X	K	X	K	X	K	X	K	X	K
亲铜成矿元素	Cu	8	96	12	320	40	635	79	1558	195	6798	850
	Zn	45	11	0.2	289	6.4	200	4.4	626	14	1449	32
	Pb	24	117	4.9	95	4.0	280	12	48	2.0	174	7.3
	As	1.7	31.5	19	24.9	15	109.5	64	120.8	71	114.1	67
	Bi	0.24	3.49	15	3.14	13	5.18	22	5.89	25	16.75	70
	Sb	0.16	12.1	76	2.9	18	22.1	138	41.4	259	32.4	203
	Ag	60	1669	28	4861	81	6690	112	5354	89	14236	237
	Au	0.5	6.2	12	15.7	31	68.1	136	81.5	163	56.7	113
	Hg	7	57	8.1	72	10	181	26	383	55	112	16
钨钼族元素	Sn	2.0	5.6	2.8	4.7	2.4	5.5	2.8	6.5	3.3	17.7	8.9
	W	0.85	25.2	30	12.8	15	20.2	24	30.5	36	68.3	80
	Mo	0.70	15	21	353	504	99	141	74	106	132	189
亲铜分散元素	Cd	60	53	0.9	2507	42	1881	31	2427	40	15009	250
	Ga	18	23	1.3	13	0.7	15	0.8	7	0.4	43	2.4
	Tl	0.73	0.73	1.0	0.50	0.7	0.43	0.6	15.37	21	3.72	5.1
	In	0.05	0.11	2.2	0.12	2.4	0.15	3.0	0.51	10	8.15	163
	Se	0.03	0.81	27	4.00	133	6.33	211	7.08	236	10.53	351
亲石分散元素	Ba	700	224	0.3	253	0.4	246	0.4	208	0.3	202	0.3
	Sr	250	134	0.5	60	0.2	51	0.2	46	0.2	58	0.2
	Cs	3.5	5.6	1.6	2.1	0.6	2.2	0.6	1.4	0.4	14.3	4.1
矿化剂、卤族元素	B	6.2	11.1	1.8	5.0	0.8	4.8	0.8	3.7	0.6	4.6	0.7
	S	120	142	1.2	18473	154	5709	48	46441	387	15556	130
	F	490	685	1.4	333	0.7	522	1.1	384	0.8	606	1.2
	I	0.05	0.43	8.6	1.26	25	1.39	28	0.73	15	1.12	22
铁族元素	Ti	1770	3068	1.7	1596	0.9	1815	1.0	699	0.4	1683	1.0
	Mn	380	35	0.1	79	0.2	63	0.2	188	0.5	8848	23
	Ni	7.7	1.0	0.1	3.0	0.4	2.8	0.4	4.7	0.6	17.5	2.3
	Co	4.8	0.3	0.1	21.7	4.5	6.1	1.3	49.4	10	448.2	93
稀有元素	Zr	160	202	1.3	95	0.6	105	0.7	56	0.4	94	0.6
	Li	19	6.9	0.4	7.2	0.4	5.6	0.3	6.3	0.3	5.2	0.3
	Nb	15	10.9	0.7	5.0	0.3	6.2	0.4	2.8	0.2	6.8	0.5
	Ta	1.20	0.97	0.8	0.42	0.4	0.55	0.5	0.24	0.2	0.80	0.7
	Sc	5.3	6.7	1.3	4.3	0.8	5.5	1.0	2.9	0.5	9.8	1.8
	Hf	5.0	6.8	1.4	3.3	0.7	3.7	0.7	2.0	0.4	3.5	0.7

* 据鄯明才等(1997); X: 元素含量平均值; K: 富集系数; 含量单位: Au、Ag、Hg、Cd($\times 10^{-9}$), 其余元素($\times 10^{-6}$)。

$\times 10^{-6}$ 时, Ga 含量则富集到其酸性岩丰度的 2 倍以上。Tl 含量富集贫化规律与 Ga 类似, 只是最高含量出现在 Cu 为(1000-2000) $\times 10^{-6}$ 含量段, 富集幅度也较 Ga 更大, 为其酸性岩丰度的 21 倍。In、Se 两元素含量明显高于各自酸性岩丰度, 并表现出随 Cu 矿化增强而富集的趋势。Cu 含量小于 2000 $\times 10^{-6}$ 时, In

的最高含量为其酸性岩丰度的 10 倍, 当 Cu 含量大于 2000 $\times 10^{-6}$ 时, In 含量大幅度增高到其酸性岩丰度的 160 多倍。Se 含量始终表现出较高的富集趋势, 最低平均含量为其酸性岩丰度的 27 倍, 最高为 350 倍。

亲石分散元素 Ba、Sr、Cs 含量基本上不到各自

酸性岩丰度的一半,是贫化比较明显的一类元素。当 Cu 含量小于 2000×10^{-6} 时,随 Cu 矿化增强呈现出贫化趋势,但是当 Cu 含量大于 2000×10^{-6} 时, Ba、Cs 含量有一定幅度的增高,分别达到其酸性岩丰度的 1.5 倍和 4 倍。

矿化剂元素 B 随着 Cu 矿化增强基本上呈现贫化特征。当 Cu 含量小于 100×10^{-6} 时,相应的 S 含量基本处在酸性岩中 S 的背景水平,当 Cu 含量大于 100×10^{-6} 之后, S 含量显著增高,最低为 5700×10^{-6} ,最高是 46400×10^{-6} ,分别是其丰度的近 50 倍和 386 倍,但是 S 的富集没有随 Cu 矿化强度表现出明显的规律性。卤素元素 I 最低含量是其酸性岩丰度的 8 倍,最高含量是其丰度的 27 倍, F 的富集程度和变化规律均不太明显。

Ti 既出现富集,也出现贫化,其富集贫化与 Cu 矿化强度没有一致的相关性。Cu 含量小于 100×10^{-6} 时, Mn、Ni、Co 含量明显低于酸性岩中各自元素的丰度,随着 Cu 矿化逐级递增,这几个元素含量基本呈现富集趋势,当 Cu 含量大于 2000×10^{-6} 时,平均含量陡增至各自酸性岩丰度的 23 倍、2 倍和 93 倍。

稀有元素 Zr、Li、Nb、Sc、Hf、Ta 的含量基本上随 Cu 矿化增强而贫化,贫化幅度最大的是 Li,平均最低含量只有酸性岩丰度的 27%。当 Cu 含量大于 2000×10^{-6} 时, Zr、Nb、Sc、Hf、Ta 的含量均较前一 Cu 含量段平均含量略有增加。

2.2 乌奴格吐山试验区微量元素含量随 Cu 矿化增强变化特征

与酸性岩中相应元素丰度相比,无论 Cu 含量如何, Pb 都表现出贫化特征,而且随着 Cu 矿化增强,其贫化幅度有增大的趋势。当 Cu 含量小于 200×10^{-6} 时, Bi 元素的平均含量低于其酸性岩中的丰度,表现为贫化,在 Cu 含量大于 200×10^{-6} 之后表现为富集,但是总体来讲富集幅度不大。其它亲铜成矿元素 Zn、As、Sb、Ag、Au、Hg 等的含量,无论 Cu 矿化强度如何,均不同程度地高于其酸性岩丰度,而且随着 Cu 矿化增强,这些元素含量增大特征明显,表现出一致的富集特征(表 2)。

与酸性岩丰度相比,钨钼族元素均表现出富集特征。随着 Cu 矿化增强, Sn、W 平均含量呈现出逐次增高的趋势, Mo 含量显著高于酸性岩丰度,但是含量波动较大,没有表现出明显的变化规律,这可能受到了 Mo 矿化程度的直接影响,而非单纯与 Cu 矿化有关。

亲铜分散元素 Cd、Ga、Tl、In、Se 中, Cd 含量

呈现富集特征,但是富集程度不强,富集程度与 Cu 含量也没有一致的相关性。当 Cu 含量小于 2000×10^{-6} 时, Ga、Tl、In 三元素基本上与各自的酸性岩丰度处于相同的水平,当 Cu 含量大于 2000×10^{-6} 时, Tl、In 含量有所增高,达到其酸性岩丰度的 2 倍以上。Se 含量表现出明显的富集趋势,最低平均含量为其酸性岩丰度的 14 倍,最高为 49 倍。

亲石分散元素 Ba、Sr、Cs 含量基本低于各自酸性岩丰度,表现出明显的贫化特征。随 Cu 矿化增强, Ba、Sr、Cs 的贫化程度略有增强。

矿化剂元素 B 表现出富集的特征,其富集程度与 Cu 含量关系不明显。S 含量均显著高于其酸性岩丰度,最低为 1213×10^{-6} ,最高是 6414×10^{-6} ,分别是其丰度的 10 倍和 53 倍,富集程度基本上随 Cu 矿化增强而增强。卤素元素 F 表现为富集特征,但是富集程度总体不大。I 最低含量是其酸性岩丰度的 4 倍,最高含量是其丰度的 6 倍,随着 Cu 含量增高,富集程度变化不大。

Ti、Ni 两个铁族元素出现程度不同的贫化现象,其贫化与 Cu 矿化强度关系不明显。Mn 既出现富集,也出现贫化,其富集贫化与 Cu 矿化强度没有一致的相关性。Cu 含量小于 200×10^{-6} 时, Co 含量明显低于酸性岩中丰度,随着 Cu 矿化逐级递增, Co 元素含量增加,但是增加的程度与 Cu 矿化强度没有相关性。

除个别情况以外,稀有元素 Zr、Li、Nb、Sc、Hf、Ta 的含量基本上均低于各自的酸性岩丰度,表现出普遍贫化的特性。贫化程度因元素而异,与 Cu 矿化强度没有明显的相关性。

2.3 白山堂试验区微量元素含量随 Cu 矿化增强变化特征

与酸性岩中元素丰度相比,亲铜成矿元素 Zn、Pb、As、Bi、Sb、Ag、Au 等表现出富集特征。从总体上看,这些元素的富集程度与 Cu 含量呈正相关关系,但是不排除个别含量段上出现例外的情况。白山堂试验区 Hg 的含量普遍比较低,其平均含量大体与其酸性岩丰度相当(表 3)。

W、Sn 含量均高于各自的酸性岩丰度,表现出富集特征,随着 Cu 含量增高,富集趋势略有增强。Mo 也表现出富集特征,其富集趋势与 Cu 含量变化没有明显关系。

亲铜分散元素 Cd、In 基本上随着 Cu 含量增高而增高,而且与各自酸性岩丰度相比表现出富集特征。Ga、Tl 总体表现出贫化特征,其贫化与 Cu 含量变化没有明显关系。

表 2 乌奴格吐山试验区微量元素含量平均值随 Cu 含量增高变化特征统计表
Table 2 Statistics of the variations of average trace element contents with the increasing copper content in Wunugetushan experimental area

元素分类	元素	酸性岩丰度*	Cu 含量段											
			< 100 (n=11)		100-200 (n=21)		200-500 (n=30)		500-1000 (n=31)		1000-2000 (n=33)		> 2000 (n=44)	
			X	K	X	K	X	K	X	K	X	K	X	K
亲铜成矿元素	Cu	8	57	7.1	145	18	338	42	724	91	1433	179	4458	557
	Zn	45	72	1.6	69	1.5	111	2.5	68	1.5	77	1.7	150	3.3
	Pb	24	13	0.5	14	0.6	15	0.6	17	0.7	8	0.3	12	0.5
	As	1.7	20	12	23	14	83	49	89	52	115	68	350	206
	Bi	0.24	0.11	0.5	0.10	0.4	0.38	1.6	0.43	1.8	0.32	1.3	0.38	1.6
	Sb	0.16	0.48	3.0	0.58	3.6	1.30	8.1	1.31	8.2	2.50	16	5.68	36
	Ag	60	118	2.0	282	4.7	273	4.6	432	7.2	442	7.4	1334	22
	Au	0.5	1.0	2.0	3.7	7.4	2.8	5.6	2.5	5.0	2.5	5.0	3.5	7.0
	Hg	7	14	2.0	67	9.6	67	9.6	67	9.6	152	22	278	40
钨钼族元素	Sn	2.0	3.1	1.6	3.8	1.9	4.8	2.4	5.4	2.7	7.1	3.6	8.1	4.1
	W	0.85	2.4	2.8	4.7	5.5	7.9	9.3	8.5	10	9.5	11	10.7	13
	Mo	0.70	33	47	96	137	82	117	72	103	46	66	83	119
亲铜分散元素	Cd	60	139	2.3	301	5.0	251	4.2	204	3.4	139	2.3	196	3.3
	Ga	18	14	0.8	13	0.7	15	0.8	16	0.9	17	0.9	16	0.9
	Tl	0.73	0.89	1.2	0.68	0.9	0.98	1.3	0.85	1.2	0.91	1.2	1.43	2.0
	In	0.05	0.05	1.0	0.05	1.0	0.06	1.2	0.08	1.6	0.08	1.6	0.14	2.8
	Se	0.03	0.42	14	0.81	27	0.83	28	1.10	37	1.48	49	1.04	35
亲石分散元素	Ba	700	622	0.9	624	0.9	562	0.8	606	0.9	508	0.7	494	0.7
	Sr	250	76	0.3	93	0.4	91	0.4	72	0.3	45	0.2	56	0.2
	Cs	3.5	4.3	1.2	1.9	0.5	2.8	0.8	2.7	0.8	1.4	0.4	2.0	0.6
矿化剂、卤族元素	B	6.2	18.3	3.0	13.1	2.1	19.6	3.2	19.4	3.1	14.7	2.4	20.9	3.4
	S	120	1213	10	1078	9.0	5491	46	4285	36	6414	53	6170	51
	F	490	600	1.2	668	1.4	1080	2.2	1192	2.4	1493	3.0	1590	3.2
	I	0.05	0.20	4.0	0.32	6.4	0.24	4.8	0.24	4.8	0.26	5.2	0.28	5.6
铁族元素	Ti	1770	534	0.3	596	0.3	752	0.4	937	0.5	756	0.4	973	0.5
	Mn	380	482	1.3	310	0.8	600	1.6	500	1.3	317	0.8	306	0.8
	Ni	7.7	2.9	0.4	3.6	0.5	6.6	0.9	6.1	0.8	4.4	0.6	5.0	0.6
	Co	4.8	1.4	0.3	1.5	0.3	11.5	2.4	7.9	1.6	14.9	3.1	11.9	2.5
稀有元素	Zr	160	82	0.5	90	0.6	92	0.6	96	0.6	99	0.6	106	0.7
	Li	19	11	0.6	10	0.5	29	1.5	14	0.7	9	0.5	14	0.7
	Nb	15	5	0.3	5	0.3	6	0.4	7	0.5	7	0.5	6	0.4
	Ta	1.20	0.60	0.5	0.61	0.5	0.64	0.5	0.70	0.6	0.81	0.7	0.62	0.5
	Sc	5.3	2.1	0.4	2.5	0.5	2.9	0.5	3.3	0.6	3.0	0.6	3.5	0.7
	Hf	5.0	5.0	1.0	3.5	0.7	3.5	0.7	3.6	0.7	3.8	0.8	4.0	0.8

* 据郑明才等(1997); X: 元素含量平均值; K: 富集系数; 含量单位: Au、Ag、Hg、Cd($\times 10^{-9}$), 其余元素($\times 10^{-6}$)。

亲石分散元素 Ba、Sr 含量明显低于各自酸性岩丰度, 随着 Cu 含量增高, Ba、Sr 贫化幅度增强。当 Cu 含量小于 2000×10^{-6} 时, 与酸性岩丰度相比, Cs 表现为轻微富集, 当 Cu 含量大于 2000×10^{-6} 时, Cs 表现为贫化。

矿化剂元素 S 含量显著高于其酸性岩丰度, 最

低含量是其丰度的 24 倍, 最高是其丰度的 515 倍, 而且富集程度随 Cu 矿化增强而增强。

当 Cu 含量小于 1000×10^{-6} 时, 铁族元素 Ti 含量略高于其酸性岩丰度, 当 Cu 含量大于 1000×10^{-6} 时, Ti 含量小于其酸性岩丰度, 而且 Cu 含量越高, Ti 含量越低。与酸性岩丰度相比, Mn 含量总体略有增

表3 白山堂试验区微量元素含量平均值随Cu含量增高变化特征统计表
Table 3 Statistic of the characteristics of trace element content varying with copper content increasing in Baishantang experimental area

元素分类	元素	酸性岩丰度*	Cu含量段													
			<100 (n=9)		100-200 (n=4)		2000-500 (n=6)		500-1000 (n=6)		1000-2000 (n=5)		2000-5000 (n=8)		>5000 (n=16)	
			X	K	X	K	X	K	X	K	X	K	X	K	X	K
亲铜成矿元素	Cu	8	52	6.5	118	15	297	37	787	98	1437	180	3181	398	46565	5821
	Zn	45	59	1.3	235	5.2	104	2.3	134	3.0	107	2.4	107	2.4	2789	62
	Pb	24	312	13	43	1.8	288	12	1609	67	246	10	661	28	7002	292
	As	1.7	46	27	73	43	64	38	306	180	132	78	532	313	395	232
	Bi	0.24	1.2	5.0	2.5	10	6.5	27	63.6	265	32.7	136	72.1	300	397.5	1656
	Sb	0.16	1.35	8.4	1.00	6.3	2.18	14	5.79	36	2.06	13	5.31	33	11.37	71
	Ag	60	373	6.2	229	3.8	1378	23	2956	49	1677	28	6340	106	43471	725
	Au	0.5	5.4	11	1.7	3.4	5.8	12	5.6	11	41.3	83	31.4	63	134.6	269
	Hg	7	7.5	1.1	6.6	0.9	26.9	3.8	10.7	1.5	7.0	1.0	6.8	1.0	12.2	1.7
钨钼族元素	W	0.85	2.55	3.0	4.96	5.8	5.88	6.9	4.99	5.9	6.33	7.4	6.86	8.1	322	379
	Sn	2.0	5.7	2.9	9.8	4.9	11.9	6.0	17.7	8.9	16.6	8.3	42.7	21	67.1	34
	Mo	0.70	1.15	1.6	1.84	2.6	1.71	2.4	3.01	4.3	7.84	11	2.33	3.3	3.16	4.5
亲铜分散元素	Cd	60	142	2.4	235	3.9	774	13	358	6.0	198	3.3	643	11	14150	236
	In	0.05	0.05	1.0	0.14	2.8	0.12	2.4	0.52	10	0.33	6.6	0.50	10	5.56	111
	Ga	18	13	0.7	13	0.7	13	0.7	17	0.9	11	0.6	13	0.7	11	0.6
	Tl	0.73	0.80	1.1	0.93	1.3	0.49	0.7	0.67	0.9	0.45	0.6	0.24	0.3	0.27	0.4
亲石分散元素	Ba	700	741	1.1	553	0.8	354	0.5	540	0.8	369	0.5	111	0.2	106	0.2
	Sr	250	103	0.4	55	0.2	49	0.2	106	0.4	53	0.2	53	0.2	16	0.1
	Cs	3.5	4.7	1.3	5.2	1.5	5.6	1.6	5.4	1.5	5.4	1.5	2.6	0.7	2.1	0.6
矿化剂	S	120	2925	24	5957	50	5823	49	6950	58	12393	103	25987	217	61851	515
	Ti	1770	2029	1.1	2141	1.2	2266	1.3	2071	1.2	1502	0.8	1431	0.8	626	0.4
	Mn	380	418	1.1	394	1.0	502	1.3	461	1.2	372	1.0	603	1.6	394	1.0
	Ni	7.7	20	2.6	78	10	33	4.3	61	7.9	82	11	83	11	93	12.1
	Co	4.8	17	3.5	95	20	41	8.5	44	9.2	70	15	262	55	391	81
稀有元素	Zr	160	116	0.7	125	0.8	155	1.0	135	0.8	116	0.7	85	0.5	57	0.4
	Li	19	15	0.8	27	1.4	32	1.7	30	1.6	30	1.6	33	1.7	24	1.3
	Nb	15	7	0.5	9	0.6	9	0.6	7	0.5	5	0.3	5	0.3	3	0.2
	Ta	1.20	0.76	0.6	1.03	0.9	0.98	0.8	0.63	0.5	0.38	0.3	0.24	0.2	0.13	0.1
	Sc	5.3	8.0	1.5	7.3	1.4	7.0	1.3	6.9	1.3	4.2	0.8	5.7	1.1	3.4	0.6
	Hf	5.0	3.5	0.7	3.6	0.7	4.3	0.9	3.6	0.7	3.0	0.6	2.1	0.4	1.5	0.3

* 据鄂明才等(1997); X: 元素含量平均值; K: 富集系数; 含量单位: Au、Ag、Hg、Cd($\times 10^{-9}$), 其余元素($\times 10^{-6}$)。

高,基本表现为富集,但是富集程度不高,与Cu含量增高也没有明显的相关性。Ni、Co的情况基本一致,与酸性岩丰度相比表现出明显的富集特征,而且随着Cu含量增高,富集程度总体增强。

稀有元素中,Zr、Nb、Ta、Hf的含量基本上低于各自的酸性岩丰度,而且随着Cu含量增加,这些元素的含量总体上呈现降低趋势。Li含量基本上大于其酸性岩丰度,其含量变化与Cu含量增高没有明显的关系。随着Cu含量增高,Sc含量基本表现为降低的趋势,与酸性岩中Sc的丰度相比,当Cu含量

小于 1000×10^{-6} 时为富集,Cu含量大于 1000×10^{-6} 时为贫化。

3 斑岩型Cu(Mo)矿床中微量元素富集贫化规律

综合以上试验结果可以发现,在斑岩型Cu(Mo)矿化过程中,随着矿化强度增强(即文中Cu含量增高),微量元素的地球化学行为大体可以表现出以下四种情况:1、富集;2、贫化;3、贫化-富集或富集-贫化(Cu含量低时贫化或富集,Cu含量高时富集或

贫化); 4、惰性(基本没有发生富集, 也没有发生贫化)。对比三个试验区的试验结果可以看到, 不同试验区之间微量元素的富集贫化特征不尽相同, 既有共性, 即在三个试验区内均发生富集或贫化, 也有个性, 即在一个或两个试验区内发生富集或贫化, 在另外两个或一个试验区内发生贫化或富集。为了发现斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素的富集贫化规律, 为实现地球化学勘查指标的定量化提供基础, 文中对在三个试验区内均发生富集的元素和均发生贫化的元素进行了归纳总结, 并对这些元素的富集、贫化程度进行了探讨。

3.1 斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素富集规律

从表 1 至表 3 中可以看到, 在 3 个试验区内总体发生富集的微量元素除 Cu、Mo 以外, 还有 Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S 等。这些元素基本是以往矿床勘查中广泛使用的地球化学指标, 利用 Cu 与这些元素的异常组合、组分分带、浓度分带等特征, 为判断异常成矿前景及矿床产出位置等提供地球化学信息。通过对比分析不难发现, 在同一个试验区内, 这些元素的富集基本上与 Cu 含量增高呈现出“水涨船高”式的正相关关系, 即 Cu 含量增高, 这些元素含量增大, 富集程度增强(图 1, 图 3, 图 5), 这正是利用这些元素异常指导找矿的基础。但是, 在不同试验区之间, 上述元素的富集程度却与 Cu 含量没有一致的相关性, 在 Cu 含量相当时, 这些元素在不同试验区的富集程度各不相同。例如, 当 Cu 平均含量均处在 1000×10^{-6} - 2000×10^{-6} 含量段时, 城门山、乌奴格吐山和白山堂试验区 Au 的富集系数分别是 163、5 和 78, Ag 分别是 89、7 和 28, 试

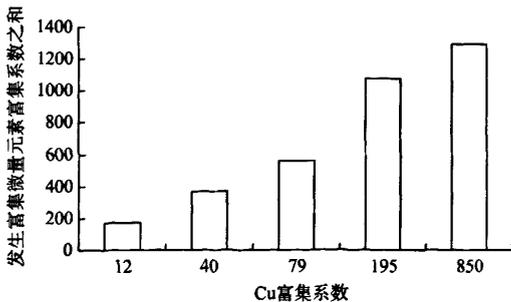


图 1 城门山试验区发生富集微量元素与 Cu 含量增高关系示意图

Fig. 1 Diagram of the relational between trace element being enriched and the increasing content of Cu in Chenmengshan experimental area

发生富集元素: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being enriched: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite.

验区之间 Au、Ag 的富集系数差异很大。正是因为不同地区 Cu 矿化指示元素富集程度存在巨大差异, 导致无法利用这些元素的含量来定量评价地球化学异常的成矿前景, 因为我们不知道这些指示元素的含量高到什么程度(或异常是多强时)才预示着可以成矿。这一问题是制约地球化学勘查指标定量化的最大障碍。

3.2 斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素贫化规律

在三个试验区内总体发生贫化的微量元素有 Ba、Sr、Zr、Nb、Ta 等, 如果用富集系数表示的话, 五个元素富集系数之和多数小于 3(五个发生贫化元

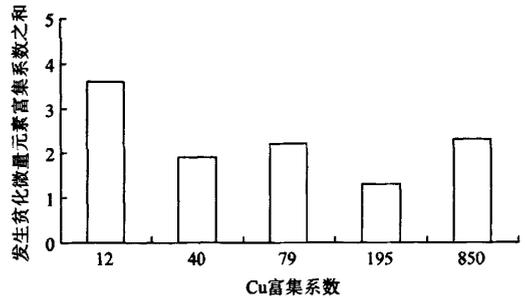


图 2 城门山试验区发生贫化微量元素与 Cu 含量增高关系示意图

Fig. 2 Diagram of the relational between trace element being depleted and the increasing content of Cu in Chenmengshan experimental area

发生贫化元素: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being depleted: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite.

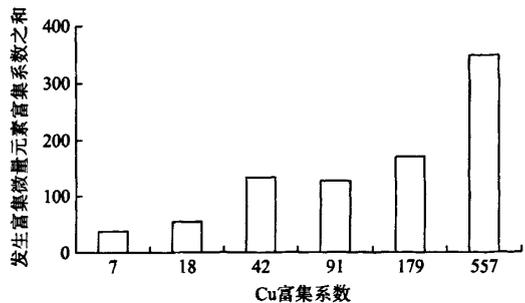


图 3 乌奴格吐山试验区发生富集微量元素与 Cu 含量增高关系示意图

Fig. 3 Diagram of the relational between trace element being enriched and the increasing content of Cu in Wunugutushan experimental area

发生富集元素: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being enriched: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite

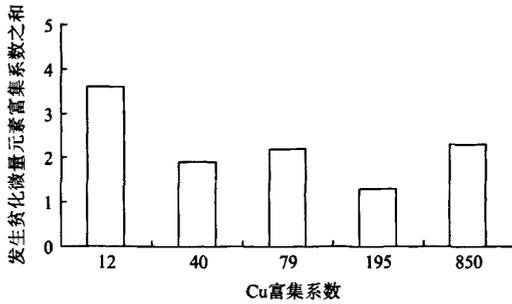


图4 乌奴格吐山试验区发生贫化微量元素与Cu含量增高关系示意图

Fig. 4 Diagram of the relational between trace element being depleted and the increasing content of Cu in Wunugetushan experimental area

发生贫化元素: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being depleted: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite

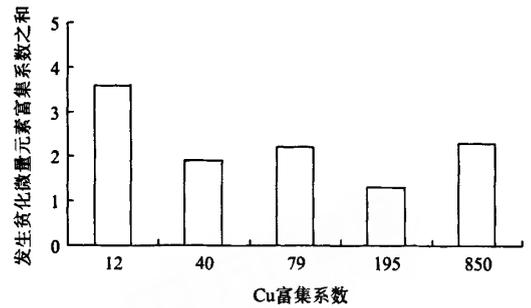


图6 白山堂试验区发生贫化微量元素与Cu含量增高关系示意图

Fig. 6 Diagram of the relational between trace element being depleted and the increasing content of Cu in Baishantang experimental area

发生贫化元素: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being depleted: Ba、Sr、Zr、Nb、Ta; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite

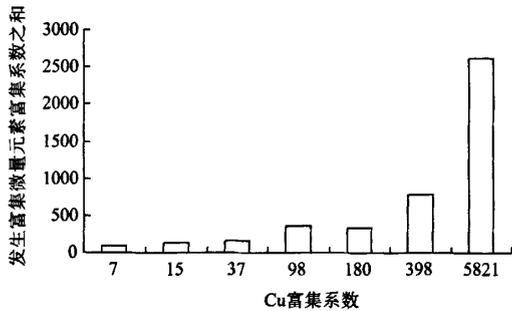


图5 白山堂试验区发生富集微量元素与Cu含量增高关系示意图

Fig. 5 Diagram of the relational between trace element being enriched and the increasing content of Cu in Baishantang experimental area

发生富集元素: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; 富集系数: 元素含量平均值与元素酸性岩丰度之比

Element being enriched: Zn、As、Sb、Ag、Au、W、Sn、Cd、In、S; Enrichment coefficient: the ratio of average content of element to abundance of the element in acidite

素的富集系数为5(图2, 图4, 图6)。在三个试验区之间, Ba、Zr、Nb、Ta等元素的贫化程度及贫化规律存在差异。在城门山试验区, 当Cu含量小于 2000×10^{-6} 时, Ba的富集系数介于0.4-0.3之间, 当Cu含量大于 2000×10^{-6} 时, Ba出现了富集, 富集系数为1.4。乌奴格吐山试验区Ba的富集系数在0.9-0.7之间, 随Cu含量增高Ba的富集系数略有减小, 表明贫化程度增强。白山堂试验区Ba的富集系数在1.1-0.2, 随Cu含量增高Ba的贫化程度总体增强, 当Cu含量大于 2000×10^{-6} 时, Ba的富集系数仅有0.2, 表明此时Ba的贫化程度很强。从总体上比较而言, Ba在城门山试验区的贫化程度更大些。

在城门山、乌奴格吐山试验区内, 除个别情况以外Zr的贫化程度大体相当, 富集系数基本介于0.4-0.7之间, 多数为0.5-0.6, 而且贫化程度基本不受Cu含量的影响。与这两个试验区相比, 白山堂试验区内Zr的贫化程度弱一些, 其贫化程度与Cu含量存在一定的相关性, 总体看Cu含量越高, 贫化越强。

Nb、Ta在三个试验区内的贫化规律与Zr相似。在城门山试验区内, Nb的富集系数为0.7-0.2, Ta的富集系数为0.8-0.2; 乌奴格吐山试验区内, Nb的富集系数为0.5-0.3, Ta的富集系数为0.7-0.5, 这两个试验区内Nb、Ta的贫化基本上与Cu含量没有明确的相关性。白山堂试验区内Nb的富集系数为0.6-0.2, Ta的富集系数为0.9-0.1, 贫化程度与Cu含量存在一定的相关性, 基本上是随着Cu含量增高, Nb、Ta的富集系数减小, 贫化增强。

Sr在三个试验区内的贫化程度大体相同, 富集系数均在0.4以下, 而且当Cu含量相当时, 不同试验区间Sr的贫化程度也基本相同, 例如Cu含量处在 $(1000-2000) \times 10^{-6}$ 含量段时, 城门山、乌奴格吐山和白山堂试验区Sr的富集系数分别是0.2、0.2和0.2。城门山、乌奴格吐山和白山堂矿床的成因虽然同属于斑岩型, 但是它们却位于不同的成矿带、处于不同的景观条件, 成矿环境以及遭受的表生风化作用等存在本质差异, 而且三个试验区总体矿化强度及矿床规模等也不相同, 同一试验区矿床范围内矿化强度也不均匀, 然而在这三个试验区内, Sr的

含量特征及其贫化程度却如此相似, 这些现象均表明, Sr 的含量水平及其贫化程度是斑岩型 Cu(Mo)矿床特有的标志之一。

4 结论

在斑岩型 Cu(Mo)矿床中, 部分微量元素发生富集, 部分微量元素发生贫化, 综合利用发生富集和贫化的微量元素, 可以为矿床勘查提供更准确的地球化学信息。根据本文试验研究结果, 利用微量元素的贫化规律能够有效指示斑岩型 Cu(Mo)矿床的产出位置, 图 7 展示的是乌奴格吐山试验区贫化指标与矿化蚀变带的空间关系, 从中可见, 贫化指标富集系数之和很好地指示出矿化蚀变带的产出位置及其分布范围。结合已有斑岩型 Cu(Mo)矿床中常量化学组分贫化特征研究结果预测(弓秋丽等, 2009), 斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素(以及部分常量化学组分)的贫化及其贫化规律在斑岩型矿床地球化学勘查中将发挥极其重要的作用, 以此为基础, 甚至可以提出一系列寻找斑岩型矿床的定量地球化学指标。

现有文献资料表明, 化学元素的贫化及其对矿产勘查的指导作用早在 1979 年就有研究者进行了探讨, 此后间或见有此类研究文献报道。研究文献

涉及到不同地区、不同矿床成因类型和矿种类型, 研究者根据各自的试验结果, 注意到了由元素贫化而形成的负异常, 认为负异常是某些矿化的特征标志, 并阐明了负异常在矿产勘查中的实际意义, 将由元素贫化形成的负异常和由元素富集形成的正异常的指示作用等同起来综合利用(Dunlop et al., 1979; Chaffee et al., 1981; Robertson et al., 1987; 季克俭等, 1990; 马东升等, 1991; 孙承轅等, 1993; 史长义等, 1995; Shi et al., 1995; Goldberg et al., 2003), 这无疑对提高地球化学勘查效果而言是有益的。然而笔者认为, 元素贫化及由此形成的负异常在地球化学勘查中的作用并非仅此而已。根据本文试验结果, 某些微量元素(例如 Sr)的含量及其贫化程度本身就是判断与斑岩体有关的地球化学异常是否是矿致异常的直接标志, 而且微量元素的贫化通常与主成矿元素(Cu)的富集呈反消长关系, 综合利用发生贫化和发生富集的化学元素, 针对不同规模、不同埋藏深度的斑岩型 Cu(Mo)矿床, 可以研制出定量的地球化学评判指标, 以此指导找矿将极大地提高地球化学勘查方法的找矿效果。矿床中化学元素的富集贫化规律, 是实现地球化学勘查指标定量化的前提和基础, 这正是探讨斑岩型 Cu(Mo)矿床中微量元素富集贫化规律的意义所在。

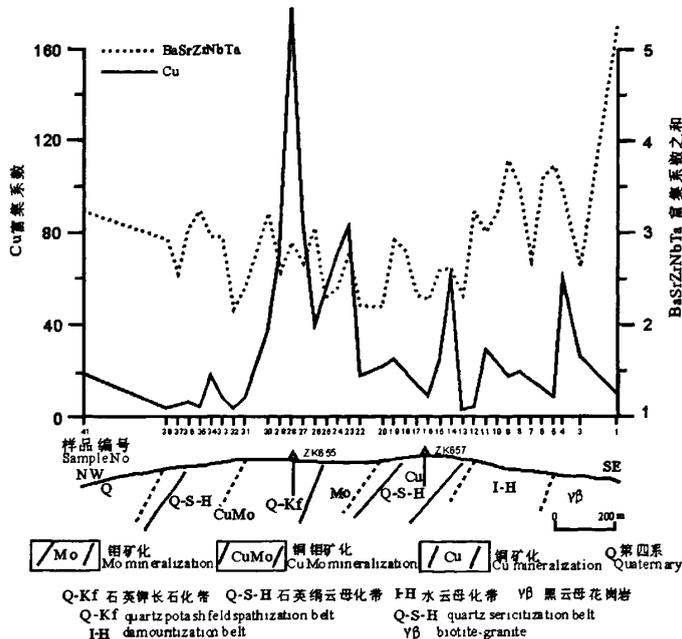


图 7 乌奴格吐山试验区贫化指标与矿化蚀变带关系示意图
Fig. 7 The schematic diagram of relationship between depletion indicators and mineralization alteration belts in Wunugetushan experimental area

参考文献:

- 陈骏, 王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 70-72.
- 弓秋丽, 朱立新, 马生明, 席明杰. 2009. 斑岩型铜矿床地球化学勘查中岩石化学指标研究[J]. 物探与化探, (33) 1: 31-34.
- 季克俭, 王立本, 吕凤翔, 王五一, 张建华. 1992. 热液矿床的负晕和地球化学场系[J]. 地质学报, 66(4): 350-361.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 马东升, 刘英俊. 1991. 江南成矿带层控金矿的地球化学特征和成因研究[J]. 中国科学(B辑), 10: 424-433.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 史长义, 汪彩芳. 1995. 区域次生地球化学异常模型及其意义[J]. 物探与化探, 19(2): 104-113.
- 孙承轅, 张干. 1993. 漠滨金矿区外围地层及矿区围岩中金的负异常及其地球化学意义[J]. 地质与勘探, 29(3): 47-52.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 59-71.
- 鄯明才, 迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社, 73.
- type deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 33 (1): 31-34 (in Chinese with English abstract).
- JI Ke-jian, WANG Li-ben, LV Feng-xiang, WANG Wu-yi, ZHANG Jian-hua. 1990. The negative haloes and geochemical field system of hydrothermal deposits [J]. Acta Geoscientica Sinica, 66(4): 350-361 (in Chinese with English abstract).
- LIU Ying-jun, CAO Li-ming, LI Zhao-lin, WANG He-nian, CHU Tong-qing, ZHANG Jing-rong. 1984. Element geochemistry [M]. Beijing: Science Publishing House (in Chinese).
- MA Dong-sheng, LIU Ying-jun. 1991. A study on geochemical characteristics and metallogenesis of stratabound gold deposit in Jiangnan metallogenic belt [J]. Science in China(series B), 10: 424-433 (in Chinese with English abstract).
- MU Bao-lei. 1999. Element geochemistry [M]. Beijing: Publishing House of Peking University (in Chinese).
- ROBERTSON I D M, TAYLOR G F. 1987. Depletion haloes in fresh rocks surrounding the Cober orebodies, N. S. W., Australia: implications for exploration and ore genesis[J]. Journal of Geochemical Exploration, 27: 77-101.
- SHI Chang-yi, WANG Cai-fang. 1995. The regional secondary geochemical negative anomaly model and its significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 19(2): 104-113 (in Chinese with English abstract).
- SHI Chang-yi, WANG Cai-fang. 1995. Regional geochemical secondary negative anomalies and their significance [J]. Journal of Geochemical Exploration, 55: 11-23.
- SUN Cheng-yuan, ZHENG Gan. 1993. Negative geochemical anomaly over Mobin Au mining area and their significance to ore exploration[J]. Geology and Prospecting, 29(3): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LI Hou-min. 2008. The scheme of the classification of the minerogenetic units in China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- YAN Ming-cai, CHI Qing-hua. 1997. The chemical compositions of crust and rocks in the eastern part of China [M]. Beijing: Science Publishing House: 73 (in Chinese).

References:

- CHAFFEE M A, HILL R H, SUTLEY S J. 1981. Regional geochemical studies in the Patagonia Mountains, Santa Cruz County, Arizona[J]. Journal of Geochemical Exploration, 14: 135-153.
- CHEN Jun, WANG He-nian. 2004. Geochemistry [M]. Beijing: Science Publishing House, 70-72 (in Chinese).
- DUNLOP A C, AMBLER E P, AVILA, E T. 1979. Surface litho-geochemical studies about a distal volcanogenic massive sulphide occurrence at Limerick, New South Wales[J]. Journal of Geochemical Exploration, 11: 285-297.
- GOLDBERG I S, ABRAMSON G Y, LOS V L. 2003. Depletion and enrichment of Primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 3: 281-293.
- GONG Qiu-li, ZHU Li-xin, MA Sheng-ming, XI Ming-jie. 2009. Petrochemical indices in geochemical exploration of porphyry