

文章编号:1000-4734(2003)03-0296-07

遵义牛蹄塘组黑色岩系中多元素富集层的主要矿化特征

罗泰义¹, 张欢^{1,2}, 李晓彪^{1,2}, 朱丹^{1,2}(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在对大量数据进行系统分析的基础上,将贵州遵义下寒武牛蹄塘组黑色岩系中多元素富集层矿化元素按富集系数分为三组。超富集元素:富集系数大于1000,包括Mo、As、Se、Re等;强富集元素:富集系数介于100~1000,包括Ni、U、Au、Ag、Pt、Pd、Tl等;弱富集元素:富集系数近于5~100,包括V、Co、Cu、Pb、Zn、Y、Cd等。结合上述元素的地球化学性质和矿化岩石类型,指出贵州牛蹄塘组多元素富集层综合了岩浆作用、热水沉积和机械沉积作用的特点,是深部岩浆活动强烈喷发期的产物,提出了可能的成矿模式:早期岩浆(火山)活动伴随热水沉积,形成磷块岩(和硅质岩);中期岩浆活动减弱,表现为剥蚀沉积;晚期火山爆发,除大量射气元素的富集,还带出深部的成矿物质,然后通过水流机械富集成矿。

关键词:黑色岩系;多元素富集层;矿化特征;岩浆活动;牛蹄塘组;遵义

中图分类号:P595 **文献标识码:**A

作者简介:罗泰义,男,1968年生,成因矿物学博士,主要从事黑色岩系和暗色岩研究。

中国南方下寒武统黑色岩系素有“多元素富集层”之称,富含V、U、P、REE、Ni、Mo、PGE等元素,比较重要的矿床包括天柱—新晃重晶石矿床、湘西北Ni-Mo-PGE矿化带、遵义Ni-Mo-PGE矿化带、织金P-REE矿床等。同时,寒武系早期生物多样性的快速建立是普通生物进化理论所不能解释的,暗示了生命“寒武纪大爆发”前后,地球环境发生了重大的变化,因而下寒武统黑色岩系也是寒武纪全球变化的重要信息库。

多数研究者认为“多元素富集层”是复杂的多种机制的产物,典型的模式包括热卤水+火山喷发物+地外物质模式;地幔源、孔隙水或建造水或表生水模式;海底热水沉积模式^[1-3]。Long等^[4,5]在江西樟村—邦坊钒矿床所发现的钽冰长石岩肯定了海底喷流沉积的重要性,是非常重要的进展;龙洪波^[6]对一系列钒钛矿物(氧化物)的揭示,暗示了钒除有机质之外的其他成因。

最近我们对贵州的相关层位(主要是遵义的松林矿区)进行了大量的野外勘察和元素分析工

作,我们认为对岩石类型和矿化元素类型进行详细的划分有助于了解该地区“多元素富集层”的特征和成因。

1 地质概况及岩石类型

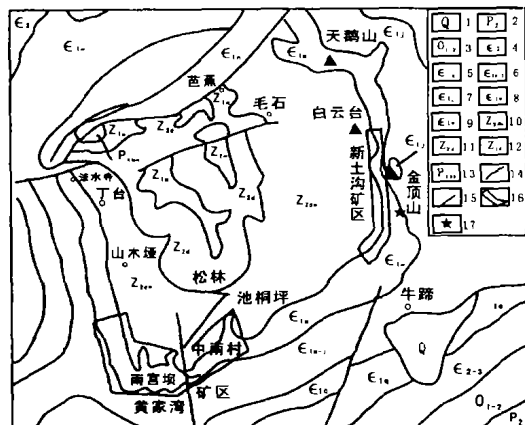
在黔北地区,震旦—寒武地层主要出露于一系列背斜的核部,主要出露地点有遵义松林、金沙岩孔、习水桑木和湄潭梅子湾,目前发现的可以民采的镍钼矿化点集中于遵义松林地区(图1),主要有小竹流水、中南、团山堡等,也是本文主要的研究点。

李胜荣^[1]对湘黔地区“多元素富集层”进行了剖面对比,其中遵义天鹅山矿化点缺乏与湘西可对比的硅质层,我们在小竹、中南、团山堡等地也没有发现硅质层。松林地区的岩性变化大,风化后很难对比,综合一些地表露头 and 坑道考察,松林地区详细的岩性剖面如图2。

特别的是,镍钼富集层的厚度及岩性变化非常大,经过多次坑道考察,特此描述如下:主要岩性为黑色碳质粉砂质页岩,其中产出囊状镍钼富集体和薄层镍钼层;囊状富集体的特征是顶部和石煤层水平接触,向下弯曲成囊状,向两侧厚度变

收稿日期:2003-03-27

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999043208)



1. 第四系 2. 上二叠统 3. 中下奥陶统 4. 中寒武统 5. 下寒武统清虚洞组 6. 下寒武统明心寺组与金顶山组并层 7. 金顶山组 8. 明心寺组 9. 牛蹄塘组 10. 震旦系灯影组 11. 陡山沱组 12. 南沱组 13 下元古界板溪群 14. 地层界线 15. 断层 16. 镍钼矿化带 17. 采样点

图 1 贵州遵义黑色页岩及镍钼层出露地质略图

Fig. 1. Geologic sketch map of the black shales and Ni-Mo strata exposed in Zunyi, Guizhou.

化很快,成为薄层状并逐渐尖灭;层状体厚度 0-30 cm,囊状体最大厚度在中南一般 30-50 cm,在小竹可达到200 cm左右。矿石为碎屑堆积成竹叶状结构,可分为两类,一种金属硫化物多,致密块状,富镍钼;一种松散,容易风化,风化后很轻,富钼。此外,该层位经常含有直径变化很大(一般10~30 cm,有的长轴大于50 cm)的“结核”或“球体”,有球状、脸盆状、枕头状等,成分上可分为两类,一类主要是隐晶质磷灰石组成,含斑晶状白云石和碎屑石英;另一类主要为碳酸盐组成,在团山堡似顺层分布,小竹比较少见。

2 样品处理及分析方法

根据岩矿鉴定结果,选择代表性样品进行了微量元素分析和 PGE 分析,代表性样品的详细描述列于表 1。样品分析全部在中国科学院地球化学研究所测试分析中心完成,微量元素和 PGE 分析是在 ICP-MS 上由漆亮测试。

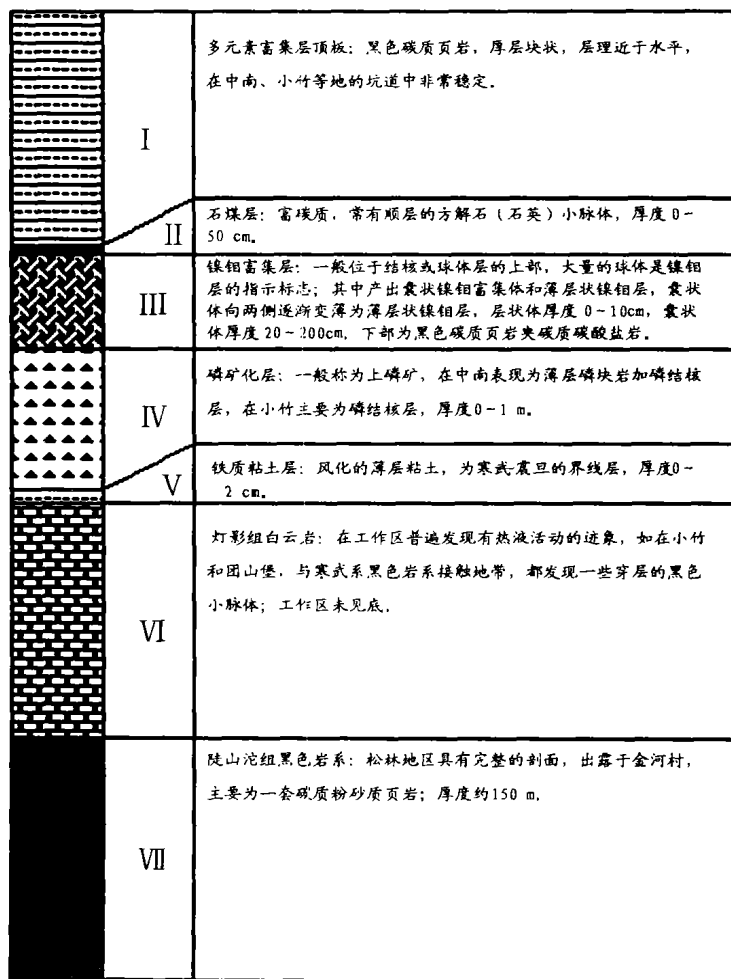


图 2 遵义早寒武世黑色页岩建造柱状图

Fig. 2. The stratigraphical column of Early Cambrian black shales in Zunyi.

表1 遵义地区黑色岩系代表性样品层位归属及性质描述

Table 1. The stratigraphic designation and characteristics of the representative samples from the Niutitang Formation black shale series in Zunyi

样品号	层位	产地	岩性	样品号	层位	产地	岩性
MT-2	I	湄潭	黑色页岩	ZT-N	IV	团山堡	磷质结核
PXZ-8	II	小竹	石煤层	ZT-P	IV	团山堡	磷块岩
ZY-1	III	中南	黑色页岩	ZZN-P	IV	中南	磷块岩
GZX-8	III	小竹	黑色页岩	ZYK-82	IV	岩孔	磷块岩
XZ3-1	III	小竹	磷质球体	ZXZ-P	IV	小竹	磷块岩
XZ3-3	III	小竹	镍钼矿石	ZYK-L1	VI	岩孔	块状白云岩
XZ-NI	III	小竹	镍钼矿石	ZYK-81	VI	岩孔	纹层状白云岩
ZN-10	III	中南	镍钼矿石	ZT8CD	VI	团山堡	白云岩
ZY-3	III	中南	镍钼矿石	ZT8BE	VI	团山堡	白云岩中的细脉
ZXZ-C	III	小竹	钼矿石	ZGY	VII	千堰	黑色页岩
XZ-C	III	小竹	碳酸盐体	JH-12	VII	金河	黑色页岩
ZT-6	III	团山堡	碳酸盐体				

3 结果

代表性样品矿化元素的测试分析结果列于表2~5,表4和5中还列出了相应的地壳丰度,

计算了相应的富集系数。为综合评价矿床,对一些未能全面分析的数据进行了评估(主要是Os、Se和Re),还列出了相关矿化元素的工业评价指标。

表2 遵义地区下寒武黑色页岩代表性围岩矿化元素数据($w_B/10^{-6}$)

Table 2. Mineralizing element data from the typical country rocks of the Lower Cambrian black shale series in Zunyi

	ZGY	ZYK-L1	ZYK-81	ZT-8cd	ZT-8be	ZY-1	GZX-8	MT-2
V	18.754	2.541	0.515	7.909	25.781	289.381	206.431	47.101
Cr	26.311	133.390	-	2.899	19.805	96.749	52.265	55.526
Co	15.468	29.462	4.312	6.870	9.220	181.362	28.684	33.011
Ni	22.832	69.181	6.761	14.337	17.650	1421.618	193.369	22.073
Cu	35.414	2.813	1.121	3.127	2.940	110.923	46.953	48.007
Zn	63.076	1.486	0.020	12.287	14.352	467.953	58.615	379.485
As	55.457	11.160	3.842	5.427	10.186	241.992	176.125	32.296
Y	38.875	0.194	0.283	4.059	11.696	40.438	16.157	36.740
Mo	15.732	9.310	1.997	1.513	3.590	331.770	108.751	6.139
Ag	0.185	-	-	-	-	3.895	1.848	0.369
Pb	74.292	0.880	0.758	2.483	9.171	74.648	35.674	6.459
Th	1.050	0.008	0.021	0.120	0.330	10.265	6.556	3.466
U	5.630	0.319	0.317	0.757	10.927	86.328	21.954	2.667
Ree	201.664	0.572	0.775	7.730	21.371	143.855	56.230	124.085
Ga	4.530	0.022	0.015	0.233	1.175	19.842	13.333	10.964
Ge	0.288	0.001	-	0.035	0.059	1.638	0.732	2.066
Cd	0.398	0.631	0.373	0.265	0.497	2.192	0.559	0.539
In	0.026	0.065	0.004	0.008	0.004	0.055	0.027	0.031
Tl	0.636	0.070	0.020	0.064	0.114	4.686	3.772	0.305

注:“-”表示低于检出限。

表 3 遵义地区牛蹄塘组中代表性磷矿化岩石的矿化元素数据 ($w_B/10^{-6}$)

Table 3. Mineralizing elements data from the representative phosphorus mineralization rocks at Niutitang, Zunyi

	ZXZ-P	ZT-P	ZZN-P	ZYK-32	ZT-N	XZ3-1	平均	地壳丰度	富集系数
V	1687.384	869.377	551.592	564.326	594.064	494.113	793.476	143.0	5.5
Cr	676.354	19.935	155.470	272.278	119.607	12.536	209.363	127.0	1.6
Co	26.644	36.281	64.253	55.894	7.126	12.633	33.805	24.7	1.4
Ni	116.398	358.739	29.084	19.654	104.132	137.867	127.646	81.3	1.6
Cu	63.157	54.022	24.915	11.582	76.301	13.188	40.527	75.0	0.5
Zn	241.597	137.391	48.829	17.422	1083.213	118.770	274.537	76.3	3.6
As	154.800	547.717	55.123	21.341	28.582	68.461	146.004	2.0	71.9
Y	523.691	78.301	254.030	376.633	277.968	128.848	273.245	27.7	9.9
Mo	331.671	259.771	33.598	8.753	8.134	96.622	123.092	1.4	86.1
Ag	4.719	0.803	0.203	0.140	5.410	0.981	2.043	0.1	27.2
Pb	400.918	208.058	34.257	58.678	62.528	261.318	170.959	8.0	21.4
Th	2.186	0.868	1.649	1.363	1.046	0.896	1.335	7.6	0.2
U	1092.320	688.825	75.052	141.825	239.273	1068.742	551.006	2.1	262.4
REE	759.051	125.121	428.591	730.150	355.662	196.202	432.463		
Ga	11.815	6.521	4.843	7.363	3.273	7.139	6.826	16.7	0.4
Ge	1.408	0.431	1.115	0.915	0.447	0.839	0.859	1.6	0.5
Cd	1.991	1.638	1.723	0.839	11.763	0.888	3.140	17.7	0.2
In	0.056	0.038	0.029	0.084	0.018	0.005	0.038	0.1	0.4
Tl	1.973	5.828	0.546	0.500	0.210	0.830	1.648	0.7	2.3

表 4 遵义地区牛蹄塘组中典型镍钼矿石的矿化元素数据 ($w_B/10^{-6}$)

Table 4. Mineralizing elements in the typical Ni-Mo ores from the Niutitang Formation, Zunyi

	ZN-10	ZXZ-NI	ZY-3	XZ3-3	镍钼矿 石平均	钼矿石 ZXZ-C	地壳 丰度	镍钼矿石 富集系数	最低工 业要求
V	303.4	1681.9	362.8	270.4	654.6	538.3	143.0	4.6	280
Co	304.9	348.1	307.4	234.3	298.7	545.2	24.7	12.1	200
Ni	47627.0	26450.6	53776.9	30471.4	39581.5	2312.3	81.3	486.9	2000
Cu	2701.3	1639.7	3307.4	2362.0	2502.6	615.7	75.0	33.4	2000
Zn	4217.2	3922.3	4097.7	1633.1	3467.6	110.1	76.3	45.4	5000
As	9762.4	10188.7	9806.1	15393.6	11287.7	26915.6	2.0	5560.5	30000
Y	283.5	200.4	89.7	60.8	158.6	11.3	27.7	5.7	197
Mo	38161.1	48174.6	41312.0	55934.6	45895.6	31902.4	1.4	32094.8	200
Ag	67.4	53.6	62.6	39.3	55.7	76.7	0.1	743.3	5
REE	736.9	468.9	318.5	172.4	424.2	85.6			
Pb	531.9	720.0	600.2	498.6	587.7	703.9	8.0	73.5	3000
Th	4.3	4.6	4.2	4.7	4.4	12.6	7.6	0.6	
U	253.7	388.7	124.8	155.0	230.5	167.7	2.1	111.4	200
Ga	16.1	16.4	19.8	17.4	17.4	25.0	16.7	1.0	20
Ge	7.5	4.2	6.5	2.6	5.2	9.9	1.6	3.3	5
Cd	136.8	77.8	91.7	77.1	95.9	19.2	17.7	5.4	20
In	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.1	2.6	5
Tl	259.7	245.9	274.9	293.8	268.6	222.7	0.7	369.4	20
Se	1171.5	559.7			2570 ^[7]	2016 ^[7]	0.1	25700.0	20
Re	7.835 ^[1]				17 ^[7]	28 ^[7]	0.0002	85000.0	2

注:地壳丰度据黎彤(1992);最低工业要求引自《矿产工业要求参考手册》的数据。

表5 遵义地区代表性岩石的贵金属元素分析数据 ($w_B/10^{-9}$)

Table 5. Analytical PGE data from the representative rocks in Zunyi

样品	Os	Ru	Pd	Ir	Pt	Rh	PGE	Au
JH-12		1.8	5.3	0.5	17.0	0.2	24.8	5.0
ZZN-P		2.4	4.1	0.6	3.1	0.3	10.5	20.6
ZY-1		1.9	20.0	0.6	18.0	0.3	40.8	17.8
XZ3-1		1.9	2.7	0.5	5.1	0.2	10.5	25.9
ZXZ-C	213.9	14.7	678.6	3.3	618.7	17.0	1546.2	552.8
XZ3-3	143.6	36.3	321.7	4.4	360.0	9.7	875.6	157.8
ZN-10	135.1	13.7	504.2	4.0	328.8	8.9	994.6	265.3
矿石平均	164.2	21.5	501.5	3.9	435.8	11.8	1138.8	325.3
富集系数	821.0	215.4	45.6	3.9	66.7	2.4		148.5

从表2可见:

(1) 陡山沱组黑色页岩具有较高的背景值,但目前还没有发现矿化元素被直接的被活化的证据。

(2) 在灯影组白云岩中,元素的变化较大,总的来说,大部分元素的背景值都很低,其中Cr、Co、Ni具有较高的值,李胜荣^[1]的分析也给出较高的Ni和Zn值,系统评价灯影组白云岩还需要大量的数据。

(3) 纹层状白云岩中各种元素都比较亏损,而靠近顶部的白云岩略有富集,其中的(黑色)脉体富集强度更大一些,对这些脉体的成因还有待深入探讨。但总的来说,这些热液活动可能是发生在本地区牛蹄塘组沉积之前,而且大部分可能已经被剥蚀。

(4) 镍钼富集层中的黑色页岩,具有较高的镍钼值,虽然发现有一些成岩期或构造成因的石英脉体和方解石脉体,但这些脉体中目前还没有发现镍钼矿化,也就是说,这一层位的黑色页岩没有被高强度的活动所改造,较高的镍钼含量应来自当时的沉积物源。

(5) 镍钼层之上的黑色页岩,镍钼含量和陡山沱组相近,但具有较高的锌含量,表明沉积物源已经接近正常。

表3列出的磷质球体(XZ3-1)的数据表明,磷矿化和U、Y、Mo、As、V等的富集密切相关,结合工业综合利用的要求(表4),该地区的磷矿石可综合利用其中的U、V和Y。

表4中Se和Re没有专门测试,列出的两个Se数据具有半定量性质,但根据朱建明进行大量硒测试的经验,这一结果可能偏低(朱建明,私人交流,2001),李胜荣^[1]的结果也表明镍钼矿石含有丰富的Se;此外,张爱云等^[7]、李有禹^[8]对湘西

镍钼矿石的测试也表明含有高含量的Se。李胜荣等^[9]进行Re测定的矿石(ZN-10)由我们提供,此外,湘西张家界一带的镍钼层也比较富集Re,最高可达 $28.0 \text{ g/t}^{[7,10]}$ 。Se、Re富集系数计算的数据是引用张爱云等^[7]的工作。

从表4中可以看出,镍钼矿石高度富集Ni、Mo、As、Ag、U、Tl、Se、Re,矿石可以综合利用的元素有Ni、Mo、U、Ag、Tl、Se、Re,此外,Ga、Ge、Cd和重稀土也接近综合利用的边界品位。

对于钼矿石,由于缺少镍的矿化,以前的分析比较少,也未被重视,但具有较高的贵金属含量(表5),其特征是高度富集Mo、As、Ag、U、Tl,相对贫Ni、Y、Cu和Zn。

表5中列出了典型岩石和矿石的贵金属元素分析数据,由于分析技术的原因,不能测试PGE中的Os,表中三个矿石的Os含量是根据该类型矿化中Os与Pt的相关性进行计算得到的。我们总结了李胜荣^[1]的测试数据,发现在镍钼金属矿石中Os与Pt具有良好的相关性(图3),而且他所

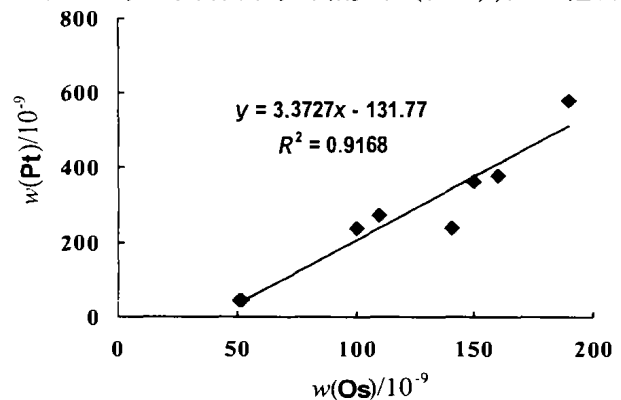


图3 湘黔镍钼矿石中Pt和Os的相关性
(数据引自李胜荣^[1])

Fig. 3. Correlation between Pt and Os in Ni-Mo ores from Guizhou and Hunan.

测定的铂钯含量与我们的分析结果很接近,此外,李胜荣等^[9]对湘黔镍钼矿石的 Os 的测定,含量为 $77.8 \times 10^{-9} \sim 233.0 \times 10^{-9}$,表明我们拟合的 Os 数据基本可信。

从表 5 可见,典型的围岩基本不富集 PGE,矿石高度富集 Os,比较富集 Pt、Pd、Au;李胜荣^[1]的结果和我们的分析都表明 Ir 在金属层中并没有大量富集。两类矿石比较而言,钼矿石比镍钼矿石更富集贵金属,相应其中 As 的含量最高(表 4),镍并不高,可能暗示了该类型矿化中贵金属与 As 具有更密切的关系。

4 矿化元素分类和讨论

综合上述矿化元素的分布特征,贵州遵义下寒武牛蹄塘组黑色岩系中多元素富集层的矿化元素可按富集系数分为三组。超富集元素:富集系数大于 1000,包括 Mo-As-Se-Re 等,这一组合仅出现在镍钼金属层中;强富集元素:富集系数介于 100~1000,其中磷矿石中仅富集 U,在镍钼层中为 Ni-U-Au-Ag-PGE-Tl 组合;弱富集元素:富集系数近于 5~100,在镍钼层中为 V-Co-Cu-Pb-Zn-Y-Cd 组合,在磷矿石中为 V-As-Y-Mo-Ag-Pb。

从矿石类型及综合利用的角度出发,可将上述矿化元素分为三个组合。磷矿石组合:P-U-Y-V;镍钼矿石组合:Ni-Mo-U-PGE-Tl-Se-Re-Y-V-Co;钼矿石组合:Mo-PGE-Tl-V-Co。

从元素的地球化学特征来看,超富集的四元素都是典型的气相迁移元素(还包括强富集的 Tl),而且钼是典型的高温气相迁移元素,暗示了可能存在火山射气作用;强富集元素中,特征的 Ni-PGE 组合是超基性岩浆活动的产物,当然也代表了高温活动的特征,但该元素组合更代表一种深成环境;从镍钼最富集的囊状矿石的产出特征,我们认为将这些元素聚集在一起的最后作用是机械的沉积作用。一种可能的机制是相关的火山作用携带出深部的成矿物质,在海底的水流作用下分选富集,才能解释上述的元素富集模式。

目前基本肯定了磷块岩的热水沉积模式,其中强富集元素只有 U,表明 U 在当时水体环境中具有较强的迁移能力。高的 U/Th 比值一般被认为是热水沉积的典型特征,尽管有机质强烈富集铀,但黑色岩系中对应的硫化物相和残渣相也具有高的 U/Th 比值^[11]。此外,在磷块岩中发现有较大的火成岩碎屑,表明当时存在岩浆(火山)活

动,这一岩浆活动可能是相应热水活动的动力。

将一些特征元素的富集系数在镍钼层上下层位的分布进行投图(图 4)(PGE 以铂作代表,顶板岩石以 MT-2 代表,铂的数据采用 JH-12 的数据,第三层位黑色页岩以 ZY-1 代表),可见在第三层位的黑色页岩中,这些特征元素都有一定的富集;而在磷块岩中,在热水沉积作用比较惰性的 Co-Ni-Cu-PGE 等相对亏损,表明它们在当时水体环境中不具备强的迁移能力,比较稳定;但是最特征的 U-Mo-As-Ag-V 等还是得到了富集,表明热水沉积作用是对早期岩浆作用的延续和继承。

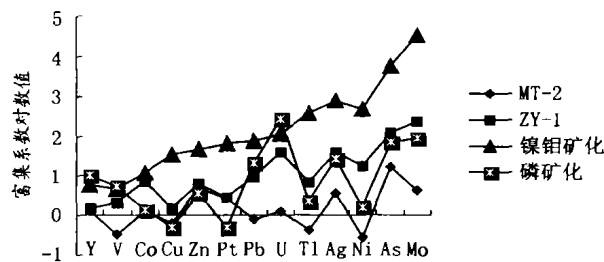


图 4 特征元素在镍钼层上下层位的富集状况
Fig. 4. Concentration diagram of the typical elements in the upper and lower Ni-Mo layers.

上述分布模式表明,在镍钼层上下层位沉积时,深部可能存在一个连续的岩浆活动体系,相关的岩浆射气作用延续了较长时间。最早期的岩浆作用(可能有弱的火山作用)伴随了较强的热水活动,形成了磷块岩;随着岩浆作用的减弱,热水活动也相应减弱,对岩浆源区的剥蚀沉积了第三层位的黑色页岩;在该黑色页岩还未固结时,最晚期的火山爆发了,除强烈的射气作用外,还带出了深部的镍钼铂族矿化岩石;火山后期的水流冲刷第三层位的黑色页岩,并对镍钼矿物进行机械富集,形成相关的矿化;最后沉积了石煤层和顶板的黑色页岩。

5 结 论

通过对遵义松林矿区镍钼层主要富集元素的分析 and 讨论,可以得到如下结论:

(1) 镍钼富集层强烈富集了一套气相迁移元素 [Mo-As-Se-Re-(Tl)], 其次主要富集了一套深源金属元素 [Ni-Au-Ag-PGE-(U)], 表明其最终的物质来源是深部的岩浆岩;镍钼矿石可综合利用的元素组合为 Ni-Mo-U-PGE-Tl-Se-Re-Y-V-Co。

(2) 磷块岩中主要富集 U, 表明 U 在热水沉积

作用中很活泼;磷矿石可综合利用的元素组合为P-U-Y-V。

(3)上述特征元素在镍钼层上下层位的富集程度的规律变化,表明这一系列的元素活化从早寒武世的磷块岩沉积已经开始,到镍钼层的爆发富集,持续到石煤层的沉积为止。结合元素的地球化学性质,我们认为这一韵律性的变化是当时

深部岩浆活动的具体体现,可能的成矿演化模式为:早期岩浆活动伴随热水沉积,形成磷块岩(和硅质岩);中期岩浆活动减弱,表现为剥蚀沉积;晚期火山爆发,除大量射气元素的富集,还带出深部的成矿物质,然后水流机械富集成矿。具体的原始岩浆性质和成矿元素演化成矿机制,还有待于更深入的研究。

参 考 文 献:

- [1] 李胜荣. 湘黔地区下寒武统黑色岩系金银铂族元素地球化学研究[R]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所(博士后科研论文),1994.
- [2] Lott D A, et al. Sedimentary exhalative nickel-molybdenum ores in south China [J]. *Economic Geology*, 1999, 94(7): 1051 ~ 1067.
- [3] Steiner M, et al. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from south China and associated fossils-insights into a lower Cambrian facies and bio-evolution [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169: 165-191.
- [4] Long H B, et al. Existence of hyalophanite in the Zhangcun-Zhengfang black shales vanadium deposit: Evidence for a hydrothermal genesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(21): 1824 ~ 1827.
- [5] Long H B, Cao Z M. Geochemistry of Zhangcun-Zhengfang black shale-type vanadium deposit and its significance, eastern Jiangxi Province of China [J]. *Abstract of 30th International Geological Congress*, 1996, 2: 708.
- [6] 龙洪波. 江西樟村-郑坊黑色岩系钒矿床地球化学研究 [D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所硕士论文,1999.
- [7] 张爱云,等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义 [M]. 北京:科学出版社,1984.
- [8] 李有禹. 湘西北镍钼多金属喷气沉积矿床的地球化学特征 [J]. *地球化学*, 1997, 26(3): 89 ~ 95.
- [9] 李胜荣,肖启云. 湘黔下寒武统多元素富集层铂族元素来源与矿化年龄的铼钨同位素制约 [J]. *中国科学(D)*, 2002, (7): 568 ~ 576.
- [10] Horan R J, et al. Rhenium and osmium isotope in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada and Hunan and Guizhou provinces, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 257 ~ 265.
- [11] 吴朝东,储著银. 黑色页岩微量元素形态分析及地质意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(1): 14-19.

MINERALIZATION CHARACTERISTICS OF THE MULTI-ELEMENT-RICH STRATA IN THE NIUTITANG FORMATION BLACK SHALE SERIES, ZUNYI, GUIZHOU, CHINA

LUO Tai-yi¹, ZHANG Huan^{1,2}, LI Xiao-biao^{1,2}, ZHU Dan^{1,2}

(1. Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on a large wealth of systematical analysis data and according to the enrichment coefficients, the mineralizing elements in the multi-element-rich strata of the Niutitang Formation black shale series can be classified as three categories: (1) super-enriched elements with enrichment coefficients > 1000, including Mo, As, Se, Re, etc.; (2) strongly enriched elements with enrichment coefficients ranging from 100 to 1000, including Ni, U, Au, Ag, Pt, Pd, Tl, etc.; and (3) weakly enriched elements with enrichment coefficients from 5 to 100, including V, Co, Cu, Pb, Zn, Y, Cd, etc. Furthermore, considering the geochemical characteristics and types of the mineralized rocks of the above elements, the authors think the multi-element-rich strata possess synthetic characteristics of magmatism, hydrothermal sedimentation and mechanical sedimentation, which are the product of deep-seated magmatic activities. The general metallogenic model can be described as follows: the early magmatic activities are accompanied with hydrothermal sedimentation and the formation phosphorite (and siliceous rocks), in the middle period, the magmatic activities became weak, as reflected by denudation sedimentation; and in the late period, volcanic explosion led to not only the accumulation of emanation, but also brought about deep-seated metallogenic materials, followed by ore deposition under the action of flowing water through their mechanical enrichment.

Key words: black shale series; multi-element-rich strata; mineralization characteristics; magmatic activity; Niutitang Formation; Zunyi, Guizhou