

# 金山铂-钯矿和力马河镍矿 的硫同位素组成特征及地质意义

马言胜<sup>1,2</sup>, 陶 琰<sup>1</sup>, 朱飞霖<sup>1,2</sup>, 王兴阵<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;  
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001

**摘 要:**金山铂钯矿和四川力马河镍矿是峨眉山大火成岩省内两个重要的 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床,但二者矿化特征明显不同,前者贫铜、镍,富铂、钯,硫化物含量低,呈浸染状;后者贫铂族元素,富含硫化物,矿石以陨铁状或块状为主。本文以两矿床成矿元素组成的变化和矿石结构类型的显著差异为出发点,系统分析了硫化物的硫同位素,发现金山铂-钯矿的硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值(0.6‰~2.8‰)略高于地幔硫(0±2‰),显示有微弱的地壳物质混染,而力马河镍矿的硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值(2.4‰~5.4‰)显著高于金山铂-钯矿,反映受地壳混染程度较高;指出成矿岩浆演化过程中地壳混染程度上的差异,可能是造成峨眉山大火成岩省岩浆 Ni-Cu-PGE 矿床矿化类型不同的主要原因。

**关键词:**硫同位素; 岩浆 Ni-Cu-PGE 矿床; 地壳混染; 金山铂钯矿; 力马河镍矿

**中图分类号:**P618.53;P618.63 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2009)02-0123-05

## The Sulfur Isotopic Characteristics and Geological Significance of Jinbaoshan Pt-Pd Deposit and Limahe Nickel Deposit

MA Yan-sheng<sup>1,2</sup>, TAO Yan<sup>1</sup>, ZHU Fei-lin<sup>1,2</sup>, WANG Xing-zhen<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Department of Resource and Environment Engineering, Anhui Institute of Technology, Huainan City, Anhui 232001, China

**Abstract:** The Jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limahe nickel deposit are two important Ni-Cu-PGE sulfide deposits in the Emeishan Large Igneous Province (ELIP), SW China. The two deposits have very distinctive mineralization characteristics that the Jinbaoshan deposit enriched Pt and Pd but depleted Cu and Ni, and contained low content of disseminated sulfides; while the Limahe deposit depleted PGE and enriched troilite-like or massive sulfide ores. The objective of this study is to explore the large variations of ore-forming elements and texture types of ores by the means of analyzing S isotopic compositions of the sulfide ores. The sulfide ores in Jinbaoshan have a restricted range of  $\delta^{34}\text{S}$  values from +0.6‰ to +2.8‰ slightly higher than the range of 0±2‰, which is considered to be normal for sulfur of mantle derivation. These values indicate that the ore-forming magma experienced a weak contamination of crustal material. Compared with the Jinbaoshan deposit, the Limahe deposit has higher  $\delta^{34}\text{S}$  values from +2.4‰ to +5.4‰ which are significantly higher than the corresponding values of Jinbaoshan deposit. It indicates that the ore-forming magma of Limahe experienced a larger degree of contamination from the crustal material. As a result, the difference degrees of crustal material contamination during the evolution of ore-forming magma may be one important reason for the variations of mineralization types of magmatic Ni-Cu-PGE deposits in the ELIP.

**Key words:** Sulfur isotope; magma sulfide Ni-Cu-PGE deposits; crustal contamination; Jinbaoshan Pt-Pd deposit; Limahe nickel deposit

收稿日期:2008-08-04 收到,10-13 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40573020,40773033);中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-111)

第一作者简介:马言胜(1979—),男,博士研究生,矿床地球化学专业。E-mail: mayansheng0904@163.com.

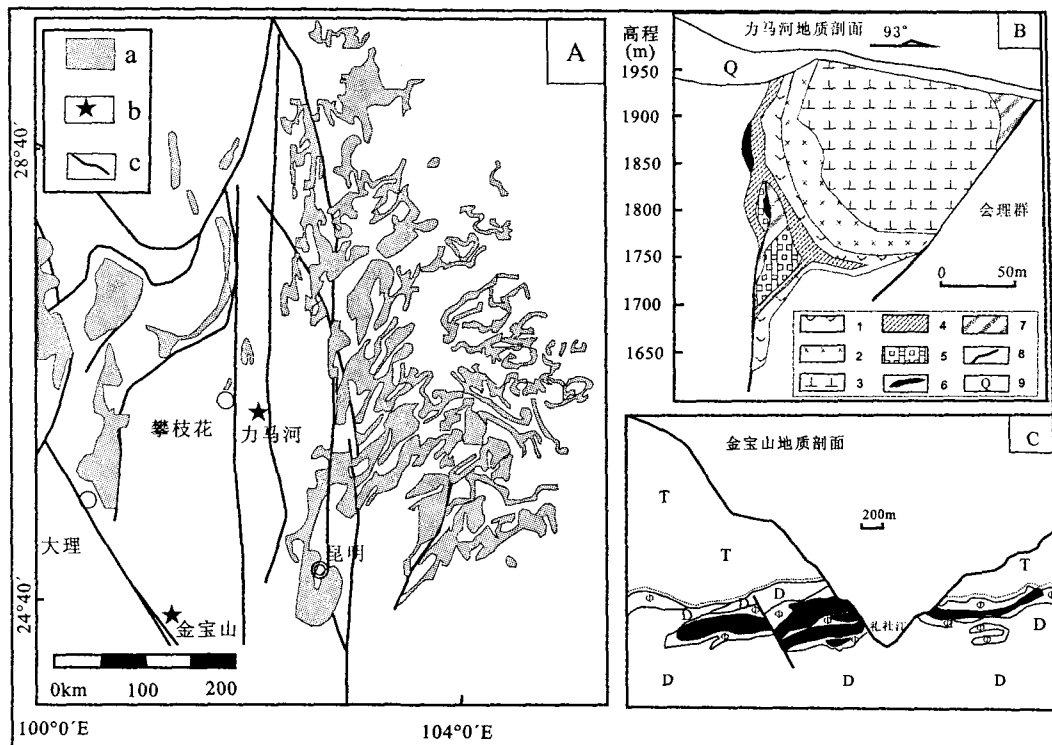
通讯作者:陶琰。E-mail: taoyan@vip.gyig.ac.cn

峨眉山大火成岩省的 Ni-Cu-PGE 矿床按成矿元素组分可分为不同的矿化类型,其中金宝山和力马河两个矿床分别代表富铂族元素和贫铂族元素的两种极端类型:前者贫铜、镍,富铂、钯,硫化物含量低,呈浸染状;力马河矿床贫铂族元素,富含硫化物,矿石以陨铁状或块状为主。研究表明,两个矿床成矿岩体的岩石地球化学特征基本相同,均为峨眉山大火成岩省玄武质岩浆分异演化的产物<sup>[1,2]</sup>。是什么原因造成矿床成矿元素组成的变化和矿石结构类型的显著差异?本文对矿石的硫化物进行了系统的硫同位素分析,探讨了跟成矿有关的硫化物熔离和地壳混染等过程,以期在研究峨眉山大火成岩省 Ni-Cu-PGE 矿床不同矿化类型成因方面有所启示。

### 1 金宝山铂-钯矿与力马河镍矿

金宝山铂-钯矿是一大型的独立铂、钯矿床,位于扬子地台西缘南端,宁蒗-弥渡镁铁-超镁铁岩带内,该镁铁-超镁铁岩带北入四川省,南到云南南华

县<sup>[3]</sup>。金宝山铂-钯矿位于云南省弥渡县境内,成矿岩体主要为蛇纹石化辉橄岩,呈似层状侵入泥盆系金宝山组白云岩中(图 1)。岩体中锆石 SHRIMP 年龄为 260 Ma<sup>[4]</sup>,与峨眉山大火成岩省主要岩浆活动时限(256~260 Ma)相当<sup>[5,6]</sup>。岩石几乎全部变质,橄榄石强烈蛇纹石化,辉石强烈次闪石化,镜下可见明显网状结构,但晶体结构尚存。矿体赋存于辉橄岩中。矿石中硫化物主要呈浸染状,含量一般低于 3%,矿床贫铜、镍,富铂、钯,矿石 Pt+Pd 一般为 1~5 g/t,最高达 17 g/t,铜、镍含量较低,铜含量一般为 0.03%~0.24%,平均 0.14%;镍含量一般为 0.07%~0.2%,平均 0.17%。矿石硫化物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿等<sup>[1]</sup>。金宝山铂-钯矿是典型的岩浆型矿床,但岩体蚀变强烈,矿体广泛发育热液硫化物细脉,脉石有较高的铂族元素含量,但主要为就地改造,热液活动未造成矿体形态与产状的根本变化<sup>[7,8]</sup>。



a. 玄武岩; b. 金宝山铂-钯矿和力马河镍矿位置; c. 断裂; 1. 橄橄岩; 2. 辉长岩; 3. 闪长岩; 4. 浸染状矿石; 5. 网脉状矿石; 6. 块状硫化物矿石; 7. 会理群; 8. 断裂; 9. 第四纪风化层; T. 三叠纪; D. 泥盆纪; Φ. 超镁铁质岩;

图 A 底图据文献[9];图 B 底图据文献[10];图 C 底图据文献[8]

a. basalt; b. location of the Jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limahe nickel deposit; c. fault; 1. peridotite; 2. gabbro; 3. diorite; 4. disseminated sulfide ore; 5. net-texture sulfide vein ores; 6. massive sulfide ore; 7. Huili Group; 8. fault; 9. Quaternary;

T Triassic; D Devonian; Φ ultramafic rock

图 1 A. 金宝山铂钯矿和力马河镍矿的产出位置; B. 力马河镍矿代表性剖面;

C. 金宝山铂钯矿代表性剖面

Fig. 1 A. Location of the Jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limahe nickel deposit (based on [9]); B. The representative cross section of the Limahe nickel deposit (modified from [10]); C. The cross section of the Jinbaoshan Pt-Pd deposit (modified from [8])

力马河镍矿位于康滇地轴中段四川会理县小关河地区前寒武结晶基底出露区,成矿岩体为一小型的镁铁-超镁铁岩侵入体(图 1),由不对称环带状分布的超镁铁质岩(包括含长辉石橄榄岩和斜长橄榄辉石岩)和镁铁质岩(包括辉长岩和闪长岩)组成,侵位于会理群力马河组石英岩及凤营组硅质灰岩。岩体中锆石 SHRIMP 年龄为 260 Ma 左右<sup>[11]</sup>,已有研究认为,力马河岩体是峨眉山大火成岩省岩浆活动的产物<sup>[12,13]</sup>。矿体产于在超镁铁岩中,产状与超镁铁岩一致,成矿元素组合为 Ni-Cu,铂族元素(PGE)含量很低,没有铂族元素的工业富集。矿石中硫化物主要呈陨铁状(网脉状)及致密块状,部分呈浸染状。陨铁状矿石硫化物组成主要是:黄铜矿 10%左右,磁黄铁矿 60%~80%,镍黄铁矿 10%~20%;块状硫化物矿石以磁黄铁矿和镍黄铁矿为主,黄铜矿很少<sup>[2,14]</sup>。

## 2 样品分析

硫同位素测试在美国印第安纳大学地质系稳定同位素实验室完成,地质样品(矿石手标本)采自金宝山铂-钯矿和力马河镍矿的主要矿体,测试样品是从手标本上用手钻钻取的硫化物(分别为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿)粉末,重量 0.1~0.2 mg。在锡杯中放入样品粉末和 1~1.5 mg V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,并在约 1800℃ 的温度下燃烧,反应柱的温度为 1010℃。运用 Finnigan MAT 252 稳定同位素质谱仪进行 SO<sub>2</sub> 分析,分析误差小于±0.05‰,样品再现性在±0.3‰之内。硫化物标准包括 IAEA S-1(具有一个固定值 -0.3‰ V-CDT),IAEA S-2(21.7‰),IAEA S-3(-31.3‰)和印第安纳大学的几个实验室标准<sup>[1]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 分析结果

金宝山铂-钯矿和力马河镍矿中硫化物的 δ<sup>34</sup>S 值列于表 1。其中金宝山镍矿中浸染状磁黄铁矿、黄铜矿及细脉状黄铁矿和黄铜矿的 δ<sup>34</sup>S 值局限于 0.6‰~2.8‰,主要集中在 1‰~2‰,平均 1.64‰,这些值处在正常幔源硫的范围内(0±2‰)。底板白云岩中的黄铁矿和捕虏体及由火成岩碎屑组成的角砾岩基质以高度变化的 δ<sup>34</sup>S 值为特征,为 -23‰~19‰,这可能是氧化状态的变化和热液流体中硫酸盐对硫化物的比值的局部改变,导致具不同 δ<sup>34</sup>S 值的黄铁矿的结晶所致<sup>[15]</sup>。

力马河镍矿中硫化物的 δ<sup>34</sup>S 值为 2.4‰~

表 1 金宝山铂钯矿和力马河镍矿中硫化物的硫同位素  
Table 1 Sulfur isotope of sulfide mineral from the Jinbaoshan Pt-Pd deposit and the Limahe Ni deposit

样品编号	矿物	矿石类型	δ <sup>34</sup> S (‰)
JB82-2a	磁黄铁矿	浸染状	1.1
JB82-2b	磁黄铁矿	浸染状	1.6
JB2H22a	磁黄铁矿	浸染状	1.9
JB2H22b	磁黄铁矿	浸染状	2.0
JB2H22c	磁黄铁矿	浸染状	2.0
JB2H22d	磁黄铁矿	浸染状	2.0
JB145-3a	磁黄铁矿	浸染状	1.2
JB145-3b	磁黄铁矿	浸染状	1.9
JB145-4a	磁黄铁矿	浸染状	1.7
JB145-4b	磁黄铁矿	浸染状	1.5
JB82-2	黄铜矿	黄铜矿矿脉	0.6
JB145-4e	黄铜矿	黄铜矿矿脉	2.8
JB145-3c	黄铜矿	黄铜矿-黄铁矿矿脉	1.6
JB145-3d	黄铁矿	黄铜矿-黄铁矿矿脉	2.1
JB322-7	黄铁矿	浸染状	0.6
JB144a	黄铁矿	角砾岩中的硫化物矿石	6.5
JB144b	黄铁矿	角砾岩中的硫化物矿石	5.4
JB322-6a	黄铁矿	角砾岩中的硫化物矿石	-23.0
JB322-6b	黄铁矿	角砾岩中的硫化物矿石	-21.9
JB176-1	黄铁矿	白云岩中的硫化物包体	18.5
JB176-3	黄铁矿	白云岩中的硫化物包体	18.6
JB39J-2a	黄铁矿	白云质底岩中的矿脉	11.7
JB39J-2b	黄铁矿	白云质底岩中的矿脉	12.1
LMK2	磁黄铁矿	块状	3.2
LM8-2	磁黄铁矿	块状	4.0
LMK1	磁黄铁矿	块状	3.3
LMK1	磁黄铁矿	块状	3.2
LMK1	磁黄铁矿	块状	3.1
LMK4	磁黄铁矿	网格状	3.0
LMK6	磁黄铁矿	网格状	2.9
LMS1	磁黄铁矿	浸染状	2.8
LMB1	磁黄铁矿	浸染状	3.2
LMS4	磁黄铁矿	浸染状	4.6
LMK3	磁黄铁矿	浸染状	3.2
LMK3	黄铜矿	浸染状	3.2
LMK5	磁黄铁矿	浸染状	3.6
LMK5	黄铜矿	浸染状	3.8
LMS2	磁黄铁矿	浸染状	3.4
LMS5	磁黄铁矿	浸染状	2.4
LMK4	磁黄铁矿	角砾状	5.4

注:JM 为金宝山样品,LM 为力马河样品

5.4‰,在不同的矿石类型和不同的硫化物中没有观察到系统的变化。之前,姚家栋等<sup>[14]</sup>报道了力马河镍矿中硫化物的 δ<sup>34</sup>S 值为 3.6‰~5.4‰。所有这些数值都明显地高于典型的地幔值(0±2‰)。另外,由石英岩和石灰岩组成的接触角岩中磁黄铁矿的 δ<sup>34</sup>S 值为 5.6‰~14.8‰<sup>[14]</sup>。

### 3.2 关于硫化物饱和与地壳混染的讨论

镁铁质岩浆中硫化物的饱和和可由分离结晶、岩浆混合和地壳混染引起<sup>[16]</sup>。金宝山侵入体中没有发现岩浆混合或地壳混染的明显证据;分离结晶最可能是金宝山硫化物饱和的原因。构造关系表明铬铁矿和橄榄石是金宝山侵入体中结晶的早期相。铬铁矿和橄榄石的结晶不但增加了 S 的含量,而且减

小了残留熔体中 S 的溶解度,因此引发了硫化物的饱和<sup>[16]</sup>。

在镁铁质岩浆中,由于总压对硫溶解度的负效应,幔源岩浆到达地壳中时硫化物往往是不饱和的<sup>[16]</sup>,这就需要分离结晶或地壳混染作用来促使岩浆中的硫化物达到饱和。数值计算的结果表明,苦橄玄武质岩浆中的橄榄石在分离结晶过程中,共结硅酸盐/硫化物比值为 50 左右<sup>[17]</sup>,较力马河侵入体矿化超镁铁岩的值高一个数量级,这说明矿化过程中还需要达到硫化物饱和的其他机制。就地壳 S 的加入导致硫化物饱和而言,依靠外部 S 的数量,硅酸盐/硫化物的比值会很低。在力马河侵入体中尽管不能完全排除硅质混染的可能性,但其较高的  $\delta^{34}\text{S}$  值与硫的同化混染导致的硫化物饱和是一致的。

力马河镍矿中硫化物矿物的较高  $\delta^{34}\text{S}$  值与高  $\delta^{34}\text{S}$  值的地壳物质的混染是一致的。中性围岩如石英岩和板岩中含有少量的黄铁矿。我们没有这些围岩中黄铁矿的硫同位素分析数据,但力马河侵入体接触晕中的磁黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 10‰~15‰<sup>[14]</sup>。这些磁黄铁矿可能是在接触变质作用过程中通过下列反应由围岩中的黄铁矿转变而来<sup>[18]</sup>:  $\text{FeS}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 5/2\text{C} = \text{FeS} + \text{CH}_4 + 3/2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ 。该反应的温度小于 400℃<sup>[19]</sup>。残余磁黄铁矿中高的  $\delta^{34}\text{S}$  值表明被释放出的  $\text{H}_2\text{S}$  和原生黄铁矿也具有相似的高  $\delta^{34}\text{S}$  值。在接触变质作用中,底板中释放出的  $\text{H}_2\text{S}$  被流体或气体带走,并被合并到上覆岩浆中。涉及黄铁矿的其他反应都发生于 600℃ 以下<sup>[19]</sup>。

表 1 表明,金宝山铂-钯矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值略高于地幔硫,而力马河镍矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值显著高于金宝山铂-钯矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$ (图 2)。造成硫化物 S 同位素明显升高原因有两种情况:一是如果地层中有海相硫酸盐类蒸发岩,少量硫酸盐的加入会导致 S 同位素明显升高;二是有明显的地壳物质混染。造成力马河镍矿硫化物中  $\delta^{34}\text{S}$  值显著增高的原因何在? 从围岩看,硫酸盐加入的可能性不大或加入的量很少。陶琰等<sup>[10]</sup>发现力马河镍矿硫化物的初始放射成因<sup>187</sup>Os 丰度较高, $\gamma\text{Os}(t=260\text{ Ma})=100\sim 120$ ,由于任何类型的地幔储集库含放射成因<sup>187</sup>Os 丰度都很低,高放射成因<sup>187</sup>Os 丰度的初始 Os 同位素组成反映了地壳混染的结果。如果不考虑硫化物熔离过程中硫同位素的分馏,并对金宝山成矿岩浆的混染源以围岩地层硫化物的硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}=12\%$ )进行分析,混染模式计算得到金宝山铂-钯矿硫化物中混染的地壳硫占 10% 左右。如果

以同样的参数进行模式计算,力马河镍矿硫化物中混染的地壳硫需要占 25% 左右。考虑到硫化物熔离过程中硫同位素的分馏,则地壳硫的混染比例要比单纯混合模式计算的值略低一些。

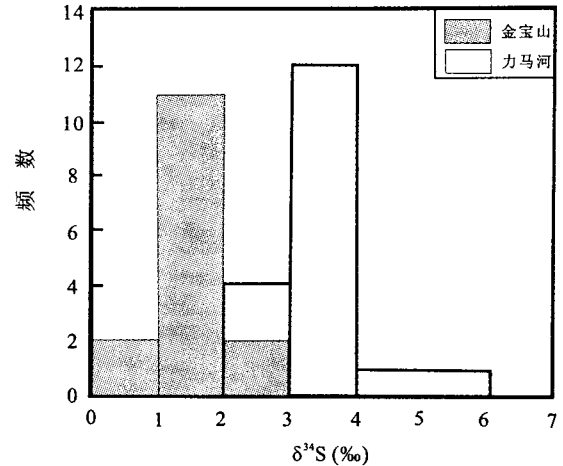


图 2 金宝山铂钯矿和力马河镍矿中硫化物矿物  $\delta^{34}\text{S}$  值的直方图

Fig. 2 Histogram of  $\delta^{34}\text{S}$  value for sulfide minerals from the Jinbaoshan Pt-Pd deposit and Limahe nickel deposit

### 3.3 地质意义

金宝山铂-钯矿和力马河镍矿在硫同位素组成上的不同,反映了成矿岩浆演化过程中地壳混染作用的差异。研究表明,这种差异可能是造成峨眉山大火成岩省岩浆 Ni-Cu-PGE 矿床矿化类型上变化的重要原因。金宝山成矿岩浆演化过程中受混染的程度相对较弱,硫化物饱和程度也低一些,因此,岩浆中熔离出来的硫化物少,表现在熔离模式参数上为很高的平衡硅酸盐熔体比例,造成硫化物中铂族元素含量很高,并因为熔离出来的硫化物少,硫化物不能得到充分积聚而形成硫化物含量较低的浸染状矿石。力马河镍矿成矿岩浆演化过程中受地壳混染作用较强,有利于硫化物熔离作用,因早期熔离硫化物的丢失造成了铂族元素的亏损,二次熔离<sup>[2]</sup>产生的大量硫化物有利于硫化物的有效积聚,因而形成富含硫化物的陨铁状和块状矿石。

## 4 结 论

金宝山铂-钯矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值略高于地幔硫,而力马河镍矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值显著高于金宝山铂-钯矿硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值,这种不同反映了成矿岩浆演化过程中地壳混染作用上的差异,可能是造成峨眉山大火成岩省岩浆 Ni-Cu-PGE 矿床在矿化类型上发生变化的重要原因。

## 参考文献 (References):

- [1] Tao Y, Li C S, Hu R Z, Ripley E M, Du A D, Zhong H. Petrogenesis of the Pt-Pd mineralized Jinbaoshan ultramafic intrusion in the Permian Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 2007, 153: 321-337.
- [2] 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2785-2800.  
Tao Yan, Hu Ruizhong, Qi Liang, Luo Taiyi. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion, Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2785-2800. (in Chinese with English abstract)
- [3] 邓家藩. 云南硫化物型铜镍和铂族矿床[J]. *云南地质*, 1999, 18(1): 22-35.  
Deng Jiafan. The sulphide Cu-Ni and Platinum-group elements deposits in Yunnan Province [J]. *Geology of Yunnan Province*, 1999, 18(1): 22-35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陶琰, 马言胜, 苗来成, 朱飞霖. 云南金宝山超镁铁质侵入体的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄[J]. *科学通报*, 2008, 53(22): 2828-2832.  
Tao Yan, Ma Yansheng, Miao Laicheng, Zhu Feilin. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan Province, SW China [J]. *Chinese Bulletin of Science*, 2008, 53(22): 2828-2832.
- [5] Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan Large igneous province, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41: 599-606.
- [6] Zhou M F, Zhao J H, Qi L, Su W C, Hu R Z. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China [J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 2006, 151: 1-19.
- [7] 陶琰, 朱丹, 高振敏, 罗泰义. 金宝山铂族元素矿床铂族元素的热液活动研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(1): 32-37.  
Tao Yan, Zhu Dan, Gao Zhenmin, Luo Taiyi. Study on platinum-group elements remobilization in Jinbaoshan deposit [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(1): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)地球化学的差异及其成因意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(1): 1-16.  
Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, Xiong Dexin, Zhai Wei. Distinction of platinum group elements (PGE) geochemistry between the Jinbaoshan and Baimazhai magmatic sulfide deposits in Yunnan Province, China, and its implication for ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(1): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [9] Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A, Frey F A. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood basalt province [J]. *Geology*, 2004, 32: 917-920.
- [10] 陶琰, 胡瑞忠, 屈文俊, 杜安道. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(9): 1292-1304.  
Tao Yan, Hu Ruizhong, Qu Wenjun, Du Andao. Re-Os isotope study on the Limahe nickel deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(9): 1292-1304. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J, Malpas J. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposit, Sichuan Province, SW China [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 2253-2280.
- [12] 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 张正伟. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. *地学前缘*, 2005, 12(1): 42-54.  
Hu Ruizhong, Tao Yan, Zhong Hong, Huang Zhilong, Zhang Zhengwei. Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province, southwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 42-54. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A K. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103(34): 352-368.
- [14] 姚家栋. 西昌地区硫化铜(铂)镍矿床成因[M]. 重庆: 重庆出版社, 1986, 62-73.  
Yao Jiadong. On the genesis of Cu-(Pt)-Ni sulfide deposits in Xichang region [M]. Chongqing Publishing House, 1986. 62-73. (in Chinese with English abstract).
- [15] Ripley E M, Sarkar A, Li C. Mineralogic and stable isotopic studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit [J]. *Econ. Geol.*, 2005, 100: 1349-1361.
- [16] Li C, Ripley E M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magma at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits [J]. *Miner. Depos.*, 2005, 40: 218-230.
- [17] Li C, Ripley E M. Sulfur concentration at sulfide or sulfate saturation in silicate melts; Empirical models and selected applications [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, 71: 1783-1799.
- [18] Ripley E M. Sulfur isotopic studies of the Dunka Road Cu-Ni deposit, Duluth intrusion, Minnesota [J]. *Econ. Geol.*, 1981, 76: 610-620.
- [19] Andrews M S, Ripley E M. Mass transfer and sulfur fixation in the contact aureole of the Duluth Complex, Dunka-Road Cu-Ni deposit, Minnesota [J]. *Can. Mineral.*, 1989, 27: 293-310.