

4 Marti K, Graf T. Cosmic-ray exposure history of ordinary chondrites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1992, 20: 221~243

5 Lin Y, Wang D, Liu J, et al. Two meteorite fall in Zhuanghe city, Liaoning province, China. In: *Antarctic Meteorites*. Tokyo: NIPR, 2000. 67~68

6 林杨挺, 王道德, 刘金远, 等. 庄河、光明山陨石的岩石矿物学研究. *空间科学学报*, 2001, 21(1): 1~6

7 Wang D, Rubin A E. Petrology of nine ordinary chondrites falls from China. *Meteoritics*, 1987, 22(1): 97~104

8 王道德, 易惟熙, Eugster O. 我国球粒陨石稀有气体的研究. *地球化学*, 1992(4): 313~332

9 Eugster O, Michel T, Niederman S. Guangnan(L6) and Ningqian(CV3): Exposure ages and radiogenic ages of two unusual chondrites. *Meteoritics*, 1988, 23(1): 25~27

10 Nishiizumi K, Regnier S, Marti K. Cosmic ray exposure ages of chondrites, pre-irradiation and constancy of cosmic ray flux in the past. *Earth Planet Sci Lett*, 1980, 50(1): 156~170

11 王道德, 王瑞田. 郾城球粒陨石的稀有气体及宇宙射线暴露年龄. *科学通报*, 1999, 44(1): 82~83

12 王道德, 陈永亨. 我国普通球粒陨石岩石学、化学组成及分类的研究. *地球化学*, 1991(1): 13~26

13 Mason B. Data of Geochemistry. In: Fleischer M, ed. *Meteorites in Geological Survey, Professional Paper 440-B-1*, 6th ed. Chapt B. Washington: United States Government Printing Office, 1979. 118

14 王道德, 陈永亨, 李肇辉, 等. *中国陨石导论*. 北京: 科学出版社, 1993. 505

(2000-10-17 收稿, 2001-01-11 收修改稿)

# 墨江镍金矿床(黄铁矿)硅质岩的成岩成矿时代

方维萱<sup>①②</sup> 胡瑞忠<sup>①</sup> 谢桂青<sup>①</sup> 苏文超<sup>①</sup> 漆亮<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>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, 贵阳 550002; <sup>②</sup>西北有色金属地质勘查局, 西安 710068. E-mail: fangwuxuan@163.net)

**摘要** 用同位素地球化学年代学, 探讨墨江镍金矿床热水喷流同生沉积成矿时代、赋矿地层金厂岩组的形成时代. 含镍金黄铁矿硅质形成时代为: Sm-Nd 等时线年龄( $t$ ) =  $(358 \pm 8.6) \text{ Ma}(2\sigma)$ , Rb-Sr 等时线年龄( $t$ ) =  $(354.7 \pm 0.72) \text{ Ma}(2\sigma)$ . 上泥盆统金厂岩组深水硅质岩的 Sm-Nd 等时线年龄( $t$ ) =  $(359 \pm 21) \text{ Ma}(2\sigma)$ , Rb-Sr 等时线年龄( $t$ ) =  $(358.02 \pm 0.3)(2\sigma) \text{ Ma}$ .

**关键词** 成矿时代 Sm-Nd 等时线年龄 Rb-Sr 等时线年龄 热水喷流同生沉积 墨江镍金矿床

哀牢山金矿带位于扬子地块西南缘(图 1), 长约 250 km, 该金矿带引起地学界的注意<sup>[1~10]</sup>. 其中墨江镍金矿床属多因复成类型的矿床, 在成矿时代、矿床成因及物质来源上有不同的认识<sup>[6~12]</sup>. 本文通过实测构造岩石地层层序及变形筛分等方法<sup>[13]</sup>, 采用 4 组样品(矿石与地层)的 Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法年代学约束, 探讨墨江镍金矿床的赋存地层及热水同生喷流沉积成矿时代.

## 1 地质特征

墨江金矿床位于云南哀牢山造山带产于主造山期形成的九甲-安定脆韧性剪切带中, 东部外围属草坝-安定逆冲推覆型脆韧性剪切带的控制, 它们之间是金厂超基性岩体(群)组成的构造岩片. 金矿体受金厂逆冲断层和古生代浅变质岩系以及超基性岩体的控制. 矿区主要出露上泥盆统金厂岩组浅变质岩系和三叠系<sup>[14]</sup>, 金厂岩组和金厂超基性岩体属异地外来构造岩片, 三叠系属原地地层系统. 从北向南, 有

四十八两山、老金牛、烂山、猫鼻梁子等金矿段. 矿石类型主要有蚀变岩型(I)和石英脉型(II), 表现为浅部以蚀变岩型矿石为主、深部则多为石英脉型矿石、浅部金品位较低、深部变富的趋势.

## 2 样品和分析方法

在不同矿段的地质和矿化特征基础上, 针对矿物组合、岩石类型及同生变形特征的地质体进行采样, 样重一般 1000 g 左右. 剔除受后期蚀变的样品, 挑选岩石组构和组成矿物相同的样品在室内进行加工和分析.

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成在南京大学现代分析中心采用高压密闭熔样及阳离子交换技术分离和提纯, 然后用 VG-354 同位素质谱计测定<sup>[10]</sup>. 对美国的 La Jolla 标样测定的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  为  $0.511860 \pm 6(2\sigma)$ , Nd 的全流程本底为  $(5\sim7) \times 10^{-11} \text{ g}$ . 对美国的 Sr 同位素标样(标样推荐值为  $0.71034 \pm 26$ )测定的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  =  $0.710389 \pm 9(2\sigma)$ , Sr 的全流程本底为  $(1\sim2) \times 10^{-9} \text{ g}$ .  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素比值分别用

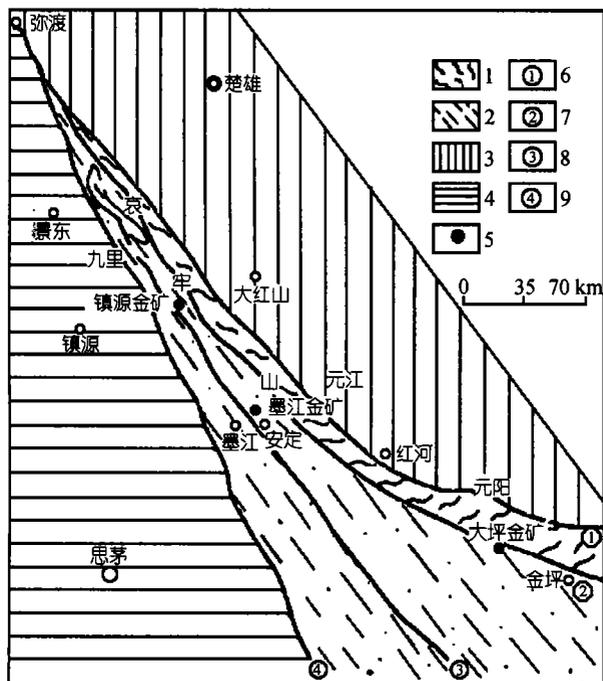


图1 哀牢山金矿带区域地质简图

据云南省地质队三队简化。1. 哀牢山深变质带；2. 哀牢山浅变质带；3. 扬子地块；4. 中甸地块；5. 金矿位置；6. 红河深大断裂；7. 哀牢山深大断裂；8. 九甲-安定脆韧性剪切带；9. 阿墨江深大断裂

$^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  和  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  进行标准化。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  的分析误差( $2\sigma$ )分别为  $\pm 1\%$  和  $\pm 0.2\%$ 。Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄采用 Ludwig 的 ISOPLOT 程序(Version 2.90)计算, 衰变常数  $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ 。

### 3 测定结果

(1) Sm-Nd 等时线年龄。云南墨江镍金矿床内上泥盆统金厂岩组中, 含镍金凝灰质硅质岩-含金黄铁矿硅质岩的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值为  $0.0556\sim 0.2408$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值变化范围为  $0.511962\sim 0.512398$ 。在 Sm-Nd 等时线图(图2)上, 7 个样品点(表1)具有良好的线性相关关系, Sm-Nd 等时线年龄( $t = (358 \pm 8.6) \text{ Ma}$ ),  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.7$ ,  $\text{MSWD} = 0.367$ , 反映了本区镍金矿床中, 含镍金黄铁矿硅质岩热水喷流同生沉积成岩成矿的年龄。上泥盆统金厂岩组层纹状绢云母硅质岩-层纹状含炭绢云母硅质岩中,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值为  $0.0905\sim 0.2358$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值变化范围为  $0.512079\sim 0.512415$ 。在 Sm-Nd 等时线图(图3)上, 8 个样品点(表1)具有很好的线性正相关关系,

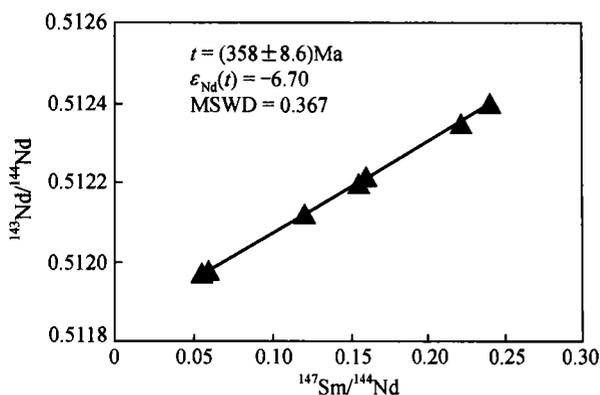


图2 墨江镍金矿床热水盆喷流沉积型镍金矿石 Sm-Nd 等时线

表1 云南墨江-元江镍金矿床岩(矿)石全岩 Sm-Nd 同位素分析结果<sup>a)</sup>

样品	样品名称	Sm/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Nd/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2\sigma)$
G18	含硅质角砾硫化物岩	0.1742	0.4623	0.2221	0.512349( $\pm 9$ )
G29	浸染状黄铁矿硅质岩	0.1996	0.7819	0.1557	0.512195( $\pm 10$ )
G30	黄铁矿硅化岩(蚀变基性火山角砾熔岩)	0.0259	0.4961	0.0556	0.511962( $\pm 11$ )
G19	黄铁矿硅质角砾岩	0.4108	2.016	0.1205	0.512116( $\pm 7$ )
G20	块状黄铁矿硫化物岩	0.2275	0.6004	0.2408	0.512398( $\pm 8$ )
G21	镭水云母黄铁矿岩	0.6589	6.502	0.0594	0.511969( $\pm 9$ )
G28	强蚀变基性火山角砾熔岩	0.3258	1.305	0.1597	0.512212( $\pm 12$ )
G34	含火山角砾炭硅质岩	4.3090	20.98	0.1253	0.512161( $\pm 9$ )
G46	角砾状含炭硅质岩	0.1007	0.4015	0.1514	0.512217( $\pm 8$ )
G35	镭水云母黄铁矿硅质岩	0.1103	0.2830	0.2358	0.512415( $\pm 7$ )
G49	镭水云母黄铁矿硅质岩	0.1205	0.8055	0.0905	0.512079( $\pm 10$ )
G74	层纹状硅质岩	1.910	6.562	0.1634	0.512256( $\pm 7$ )
G76	层纹状绢云母硅质岩	6.514	32.79	0.1180	0.512137( $\pm 10$ )
G77	层纹状含炭硅质岩	4.356	23.07	0.1167	0.512128( $\pm 9$ )
G48	浅绿色块状碧玉岩	5.641	28.45	0.1198	0.512151( $\pm 8$ )

a) 分析者: 南京大学现代分析测试中心王银喜

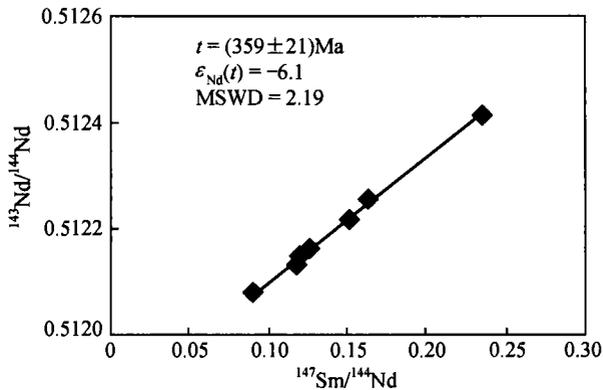


图3 墨江镍金矿床硅质岩 Sm-Nd 等时线

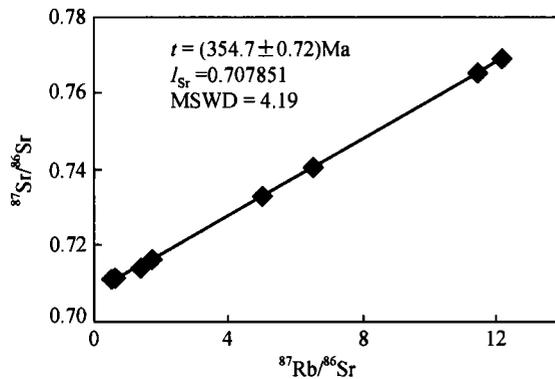


图4 墨江镍金矿床热水盆喷流沉积型镍金矿石 Rb-Sr 等时线

Sm-Nd 等时线年龄( $t$ ) =  $(359 \pm 21) \text{ Ma}(2\sigma)$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.1$ ,  $\text{MSWD} = 2.19$ , 代表了本区深水硅质岩的形成年龄。

(2) Rb-Sr 等时线年龄。云南墨江镍金矿床上内泥盆统金厂岩组中, 含镍金凝灰质硅质岩-含镍金黄铁矿硅质岩的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  值变化范围为 0.4496~12.09,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化于 0.710254~0.768905。在 Rb-Sr 等时线图解(图 4)上, 10 个样品点(表 2)具有良好的线性正相关关系, 由此求得, Rb-Sr 等时线年龄( $t$ ) =  $(354.7 \pm 0.72) \text{ Ma}(2\sigma)$ ,  $\text{MSWD} = 4.91$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.707851$ , 与采用 Sm-Nd 等时线年龄法所获得的数据基本相近。本区上泥盆统金厂岩组中层纹状绢云母硅质岩-层纹

状含炭绢云母硅质岩的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  值变化范围为 0.3304~14.06,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化于 0.709425~0.779391。在 Rb-Sr 等时线图解(图 5)上, 8 个样品点(表 2)具有良好的线性正相关关系, 由此求得, Rb-Sr 等时线年龄( $t$ ) =  $(358.02 \pm 0.3) \text{ Ma}(2\sigma)$ ,  $\text{MSWD} = 0.412$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.707745$ , 与采用 Sm-Nd 等时线年龄法所获得的数据基本接近。

从以上讨论可知, 全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 法体系的封闭温度可高达  $650^\circ\text{C}$  或更高<sup>[13,14]</sup>, 在这两种同位素体系封闭后, 浅变质过程中不会造成同位素计时体系的过大扰动, 它们具有较强的抗扰动能力<sup>[15]</sup>。因

表2 云南墨江镍金矿床岩(矿)石全岩 Rb-Sr 同位素分析结果<sup>a)</sup>

样品	样品性质	Rb/mg · g <sup>-1</sup>	Sr/mg · g <sup>-1</sup>	Rb <sup>87</sup> /Sr <sup>86</sup>	Sr <sup>87</sup> /Sr <sup>86</sup> (2σ)
G15	清灰色黄铁矿燧石岩	15.89	7.253	6.465	0.740481(±18)
G18	含硅质角砾硫化物岩	19.54	4.997	12.09	0.768905(±20)
G29	浸染状黄铁矿硅质岩	7.851	4.438	4.982	0.732978(±17)
G30	黄铁矿硅化岩(蚀变基性火山角砾熔岩)	3.863	6.512	1.685	0.716324(±14)
G38	铬水云母炭硅质岩	30.22	8.156	11.430	0.765568(±12)
G531	黄铁矿硫化物岩	0.9971	5.428	0.5364	0.710513(±24)
G19	黄铁矿硅质角砾岩	7.395	18.04	1.2660	0.714207(±19)
G20	块状黄铁矿硫化物岩	0.7047	4.263	0.4496	0.710254(±21)
G21	铬水云母黄铁矿岩	285.3	54.67	1.7620	0.716802(±10)
G28	强蚀变基性火山角砾熔岩	2.61	11.04	0.6579	0.711125(±13)
G34	含火山角砾炭硅质岩	115.2	45.36	7.6430	0.746731(±16)
G46	角砾状含炭硅质岩	4.109	36.05	0.3304	0.709425(±19)
G35	铬水云母黄铁矿硅质岩	7.541	27.49	0.8092	0.711860(±14)
G49	铬水云母黄铁矿硅质岩	2.435	5.473	1.6080	0.715934(±12)
G74	层纹状硅质岩	13.27	11.05	3.382	0.724973(±18)
G76	层纹状绢云母硅质岩	270.3	52.90	14.060	0.779391(±22)
G77	层纹状含炭硅质岩	95.30	34.92	8.045	0.748742(±20)
G48	浅绿色块状碧玉岩	44.61	38.28	3.403	0.725107(±17)

a) 分析者: 南京大学现代分析测试中心王银喜

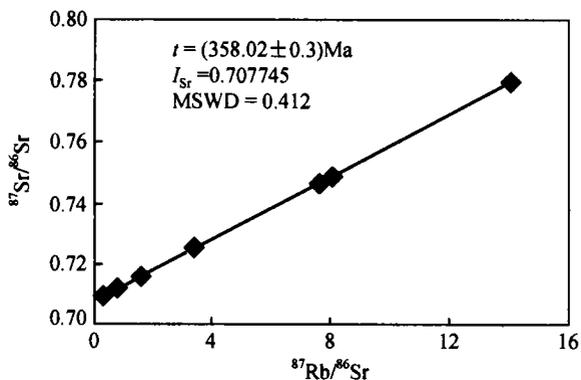


图5 墨江镍金矿床硅质岩 Rb-Sr 等时线

此本文所获全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线法年龄, 代表了本区热水喷流同生沉积成岩成矿作用事件的发生时间, 即晚泥盆世末(按 355 Ma 为泥盆-石炭纪界线<sup>[16]</sup>).

**致谢** 工作过程中得到了云南省元江镍金厂、墨江金矿领导及地质测量科的大力支持帮助, 特此致谢。本工作受国家杰出青年科学基金(批准号: 49925309)、国家重点基础研究规划(G1999043200)及云南省院校科技合作项目(批准号: YK98008-3)资助。

参 考 文 献

1 黄智龙, 王联魁. 云南镇元金矿煌斑岩矿化过程中元素活动规律. 矿物学报, 1998, 18(3): 337~343  
 2 沈上越, 魏启荣, 程惠兰, 等. 云南哀牢山带蛇绿岩中的变质橄榄岩及岩石系列. 科学通报, 1998, 43(4): 438~442

3 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 云南新平双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究. 岩石学报, 1998, 14(2): 207~211  
 4 凌其聪, 程惠兰, 沈上越, 等. 云南哀牢山蛇绿岩的矿物学研究. 矿物学报, 1999, 19(1): 56~62  
 5 沈上越, 魏启荣, 程惠兰, 等. 云南哀牢山带两类硅质岩特征. 科学通报, 2000, 45(9): 988~992  
 6 蔡新平, 徐兴旺, 张宝林, 等. 滇西墨江金厂金矿床时空四维结构模型. 矿床地质, 1999, 18(1): 55~61  
 7 李元. 云南金厂金矿床蚀变超基性岩体与金的成矿作用. 地质与勘探, 1998, 24(5): 28~32  
 8 应汉龙, 蔡新平, 刘秉光. 云南墨江金矿床含金硅质岩的地球化学特征和成因. 地球化学, 1999, 28(4): 307~316  
 9 张湘炳, 陈广浩, 吴玺虹, 等. 云南省金矿区域成矿特征及构造成矿区划. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 97~102  
 10 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 等. 云南墨江-元江镍金矿床主要控矿因素分析与研究. 矿物学报, 2001, 21(1): 70~78  
 11 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学, D 辑, 1999, 29(4): 321~330  
 12 毕献武, 胡瑞忠, 何明友. 哀牢山金矿带 ESR 年龄测定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41(14): 1301~1303  
 13 王银喜, 杨杰东, 陶仙聪, 等. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法研究及其应用. 南京大学学报(自然科学), 1988, 21(2): 297~308  
 14 Hollister L S. Metamorphic evidence for rapid (2mm/yr) uplift of a portion of the Central Gneiss Complex, Coast Mountains. B C Can Mineralogist, 1982, 20: 319~332  
 15 江博明. 太古代岩石的定年——方法学和局限性讨论. 地球化学, 1989, (2): 103~120  
 16 International Union of Geological Sciences. International stratigraphic chart. Remane J, Cita M B, Dercourt J, et al, eds. The Commission for the Geological Map of the World and UNESCO, Courtesy of the division of Earth Sciences UNESCO, 2000

(2000-10-27 收稿, 2001-02-01 收修稿)

# 阴离子表面活性剂与重金属离子在高岭矿物表面协同吸附效应

吴大清 刁桂仪 彭金莲

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640. E-mail: daqingwu@gig.ac.cn)

**摘要** 十二烷基苯磺酸离子与铜离子在高岭石表面协同吸附实验表明, 前者可提高后者在高岭石表面键合常数, 后者则降低前者在高岭石表面键合常数, 同时它们相互抑制高岭石表面吸附过程的质子吸收或释放。

**关键词** 高岭石 铜离子 阴离子表面活性剂 协同吸附

高岭石是最重要的黏土矿物, 广泛分布于各类土壤及沉积物中。高岭石矿物-水界面地球化学过程对地表土壤的发生与发展、微量元素的地球化学循

环、以及世界淡水质量的控制都起着关键的作用<sup>[1]</sup>。因此, 近年来人们对有关水体中重金属离子与高岭石矿物表面吸附作用进行了大量的研究<sup>[2~6]</sup>。然而,