

文章编号: D258-7106 (2009) 05-0707-6

大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象 及¹⁸⁷Os 迁移模式研究*

李 超, 屈文俊, 杜安道

(国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘 要 对采自西华山钨矿的大颗粒辉钼矿样品的不同部位进行了取样, 并对其年龄分别进行精确厘定, 得到了不同的 Re-Os 模式年龄值, 验证了失耦现象的存在。从原理上对失耦现象及其成因进行了解释, 并在前人成果的基础上, 探索性地提出了¹⁸⁷Os 可能的迁移模型。取样方式的不同会对辉钼矿的模式年龄产生很大影响, 因此, 在实际应用中一定要严格遵循“多取样, 细磨碎”的原则, 这对于能获得科学真实的与地质背景相符的 Re-Os 同位素地质年龄, 从而深入探讨矿床成矿作用具有重要意义。

关键词 地球化学; Re-Os 年龄; 失耦现象; 迁移模式; 辉钼矿; 钨矿床; 西华山

中图分类号: P597+.1

文献标志码: A

Decoupling of Re and Os and migration model of ¹⁸⁷Os in coarse-grained molybdenite

LI Chao, QU WenJun and DU AnDao

(National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract

Different parts of coarse-grained molybdenite from the Xihuashan tungsten deposit were sampled and dated, which yielded different Re-Os apparent ages and hence confirmed the decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite. The decoupling phenomenon and its cause were explained, and a tentative migration model of ¹⁸⁷Os within coarse-grained molybdenite was established. The results show that the difference in sampling methods might exert remarkable influence on the Re-Os apparent age. In order to reduce the influence of decoupling on Re-Os dating, more molybdenite samples should be collected, and the samples should be ground into homogeneous powder (200 meshes). Only in this way can scientific and accurate Re-Os ages be obtained.

Key words: geochemistry, Re-Os dating, decoupling, migration model, molybdenite, tungsten deposit, Xihuashan

前人对南岭地区钨矿的成因、构造等研究较多, 但并未对这些钨矿床进行精确的年代厘定。近些年来, 辉钼矿 Re-Os 同位素体系已成功应用于南岭地

区钨矿床的定年研究, 取得了厘定一批钨矿床成矿时代的成果(陈郑辉等, 2006; 丰成友等, 2007a; 付建明等, 2007, 2008; 刘国庆等, 2008)。

* 本文得到国家科技支撑计划“南岭地区有色-贵重金属综合勘查技术研究”课题(2006BAB01B03), 中国地质大调查“我国重要矿产和区域成矿规律研究”项目(1212010633903); 中国成矿体系综合研究“项目(1212010634002)以及“我国西部重要成矿区带矿产资源潜力评估”项目(编号 200420190004)的联合资助

第一作者简介: 李 超, 男, 1983 年生, 硕士研究生, 同位素年代学专业。Email: lichao533111@163.com

收稿日期: 2009-04-06; 改回日期: 2009-06-03。许德焕编辑。

钨矿床中辉钼矿的 Re、Os 含量往往较低,据笔者对中国南岭地区 16 个钨矿床中辉钼矿的 Re 含量的统计,其平均值为 $1\,173\text{ ng/g}$,绝大多数钨矿床中辉钼矿的 Re 含量为 $n \times 10^2\text{ ng/g}$,且颗粒较大。笔者在实验室内测定钨矿床中辉钼矿的 Re-Os 年龄时,经常出现单件样品的模式年龄值与该矿床的等时线年龄值相差较大的现象,如:樟斗钨矿中辉钼矿 ZD-2 号样品的模式年龄为 $(168.0 \pm 2.1)\text{ Ma}$,而该矿床的等时线年龄为 $(149.1 \pm 7.1)\text{ Ma}$ (丰成友等, 2007b);大垌钨锡矿 05DA6-3-5 号辉钼矿样品的模式年龄为 $(161.1 \pm 3.1)\text{ Ma}$,而该矿床的等时线年龄则为 $(151.3 \pm 2.4)\text{ Ma}$;石人嶂钨矿 06SX62126 号辉钼矿样品的 Re-Os 模式年龄为 $(153.81 \pm 2.2)\text{ Ma}$,而该矿床的等时线年龄为 $(159.1 \pm 2.2)\text{ Ma}$ (付建明等, 2007; 2008)。笔者认为,这可能是失耦现象在南岭地区钨矿内辉钼矿 Re-Os 定年中的具体表现。

Stein 等(1998; 2003)首先提出了失耦现象,并发现一些粗颗粒辉钼矿样品由于失耦现象的存在而不适合用于 Re-Os 地质定年。Selby 等(2004)估算出了辉钼矿中 ^{187}Os 的扩散速率。杜安道等(2007)对 Re-Os 年龄范围为 $14 \sim 1\,800\text{ Ma}$ 的辉钼矿样品和定年标准物质的年龄测定精度与颗粒大小及取样量的关系进行了探讨,提出了克服失耦现象对 Re-Os

同位素年龄影响的措施。本文对钨矿石中粒径为 1 cm 的单个辉钼矿颗粒的不同部位进行了取样和年龄测定,对失耦现象进行了进一步的分析和研究,在前人研究成果的基础上,提出了 ^{187}Os 可能的迁移模型,意欲研究出一种更为合理的选取被测样品的方法,以获得可信度更高的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄。

1 样品简述

本实验的研究样品是采自西华山钨矿床的矿化花岗岩中的辉钼矿。在该样品手标本(图 1)的石英脉中,含有浸染状的细小辉钼矿颗粒(直径 1 mm),也含有鳞片状的粗大辉钼矿晶体(直径 10 mm),辉钼矿与少量黄铁矿伴生,脉石矿物为石英、长石、绢云母。

2 选样及分析方法

由于该辉钼矿样品的 Re、Os 含量低,而且年龄短,不适宜运用激光探针对其进行原位研究,因此,本实验采用微型电钻对其不同部位进行钻取,并且以相同的方法对其进行化学预处理、仪器测量和数据处理。样品的选取位置和选取方式如图 1 及表 1 所示。



图 1 西华山辉钼矿样品手标本及其取样位置

Fig. 1 Molybdenite ore specimen from Xihuashan and sampling position

表 1 西华山辉钼矿样品的选取位置和选取方式

Table 1 Sampling position and sampling methods of molybdenite ore from Xihuashan

样品编号	选样位置	选样方式	备注
081125-2	直径 1 cm 粗大辉钼矿晶体的中心部分	微型电钻钻取	
081125-3	直径 1 cm 粗大辉钼矿晶体的中间部分	微型电钻钻取	容易钻取的辉钼矿全部钻下
081127-1	直径 1 cm 粗大辉钼矿晶体的边缘部分	砸碎后手工挑取	与硅酸岩相相邻部分的辉钼矿和深入硅酸岩相内部的辉钼矿晶体一定不能遗漏
081125-4	浸染状细小辉钼矿颗粒	微型电钻钻取	即使混入一些围岩亦无关系,因为硅酸岩中几乎不含 Re、Os
081125-1	直径 0.5 cm 的完整辉钼矿颗粒	砸碎后手工挑取	全部收集

将选取的辉钼矿单矿物在双目镜下进行检查，挑选出晶体新鲜、无氧化、无污染、纯度大于 95 % 的颗粒，研磨至 200 目，用于 Re-Os 同位素分析。

Re、Os 的化学分离步骤和质谱测定，则参照有关文献（杜安道等，1994，2001；屈文俊等，2003）。

3 结果与讨论

3.1 实验结果

以不同选样方式选取的辉钼矿样品的 Re-Os 同位素数据测试结果列于表 2。由表 2 可以看出，从同一块辉钼矿手标本所选取的辉钼矿样品，所得到的 Re-Os 同位素地质模式年龄差异很大，尤其是在直径 1 cm 粗大辉钼矿聚晶颗粒内部和边缘所选取的样品的模式年龄相差 73.6 Ma，出现这一现象，很可能是由于辉钼矿中 Re-Os 同位素发生失耦现象造成的。通过计算从粗大颗粒辉钼矿聚晶颗粒内部、中间和边缘所选取样品的 Re、Os 平均含量，得出该大颗粒

辉钼矿的模式年龄为(154.3 ± 2.2) Ma，与小颗粒完整取样和浸染状样品在误差范围内一致，并且与西华山花岗岩岩体的 Rb-Sr 等时线年龄(161.03 ± 2.6) Ma 相互印证（叶瑛，1989），显然这是较为合理的模式年龄数据。

3.2 失耦现象及其原因

由于放射性成因¹⁸⁷Os 的迁移致使 Re 与¹⁸⁷Os 在空间上不再保持连接，称之为失耦现象。如果在选取大颗粒辉钼矿样品时忽略了这种现象，那么，将得到错误的 Re-Os 模式年龄。钨矿床中的辉钼矿，往往存在比较大的颗粒，本实验所选取的直径为 1 cm 的辉钼矿大颗粒样品，就是其中的典型。辉钼矿中的 Re-Os 同位素体系为何会出现失耦现象？一方面，+ 4 价¹⁸⁷Re 经 β 衰变产生了 + 5 价¹⁸⁷Os，其离子半径要小于 + 4 价¹⁸⁷Re，而且造成了体系的电荷失衡；另一方面，从原子核内发出的电子(β⁻)有可能被发射到¹⁸⁷Os 的外围电子层，从而把 + 5 价¹⁸⁷Os 还原为结构上有些与辉钼矿相容的 + 4 价¹⁸⁷Os，但 OsS₂

表 2 从不同部位选取的辉钼矿的 Re-Os 同位素数据

Table 2 Re-Os data from different parts in molybdenite ore sample

样品号	取样位置	取样方式	样重/g	Re/ng/g		普 Os/ng/g		¹⁸⁷ Re/ng/g		¹⁸⁷ Os/ng/g		模式年龄/Ma	
				测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
081125-4	浸染状细小颗粒	钻取	0.30426	43.44	0.34	0.0077	0.0007	27.30	0.21	0.0713	0.0006	156.5	2.2
081125-1	0.5 cm 完整颗粒	砸碎挑选	0.43503	30.24	0.27	0.0055	0.0003	19.01	0.17	0.0487	0.0005	153.7	2.5
081125-2	1 cm 大颗粒中心	钻取	0.46288	59.94	0.44	0.0047	0.0000	37.67	0.27	0.0829	0.0006	132.0	1.8
081125-3	1 cm 大颗粒中间	钻取	0.24938	42.92	0.44	0.0042	0.0003	26.98	0.28	0.0686	0.0007	152.4	2.6
081127-1	1 cm 大颗粒边缘	砸碎挑选	0.53791	27.70	0.25	0.0046	0.0000	17.41	0.16	0.0597	0.0005	205.6	3.1
平均值*	1 cm 完整大颗粒		0.416723	43.52	0.38	0.0045	0.0001	27.35	0.24	0.0704	0.0006	154.3	2.2

* 为 081125-2、081125-3 和 081127-1 号辉钼矿样品（分别从直径为 1 cm 粗大辉钼矿颗粒的中心、中间和边缘选取）所测结果的平均。

在结构上是立方晶系,不像 MoS_2 和 ReS_2 属六方晶系。因此, +4 价 ^{187}Os 在辉钼矿中的稳定性不如 +4 价 ^{187}Re 要完全取代衰变母体 ^{187}Re 的位置并不容易。总体来讲, Os 与整个辉钼矿体系是不相容的,这一点从辉钼矿中几乎不含普通 Os 也能说明。

3.3 ^{187}Os 迁移模型

3.3.1 ^{187}Os 迁移去向

^{187}Os 的迁移去向对于影响辉钼矿及其周围矿物的 $^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}$ 是十分重要的,尤其是对于 Re 、 Os 含量较低的辉钼矿,如钨矿床中的辉钼矿,即使 ^{187}Os 的迁移量很少,也会对 $^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re}$ 产生十分重要的影响。如果与辉钼矿相邻的是黄铜矿,那么,辉钼矿中的 ^{187}Os 很有可能从辉钼矿中迁移出来而进入黄铜矿,这会使辉钼矿的 Re-Os 同位素地质年龄偏低,同时,由于黄铜矿等硫化物的 Re 和放射性成因 ^{187}Os 含量很低,迁移进来的 ^{187}Os 会使黄铜矿的 Re-Os 地质年龄变老很多 (Stein et al., 2003)。如果与辉钼矿相邻的是硅酸岩相,那么,由于 Re 、 Os 同属亲硫性元素,硫化物中的 ^{187}Os 不可能迁移进入硅酸岩相。

从本实验所得到的辉钼矿大颗粒不同部位的 Re-Os 同位素地质模式年龄来看,中心位置偏年轻,边缘部分偏老。 ^{187}Os 在辉钼矿大颗粒中的迁移趋势是从中心迁移到边缘,如果在选取样品时,能将一个辉钼矿大颗粒中的衰变成因 ^{187}Os 与 Re 全部收集起来,那么,就能得到一个合理的 Re-Os 地质年龄值(如表 2 中平均值数据所示)。然而,由于这种辉钼矿颗粒较大,而且其中心相对于边缘来讲较易选取,如果只选取了中心部分,那么,就会得到一个比实际地质背景年龄偏低的模式年龄值。

3.3.2 ^{187}Os 迁移参数

失耦现象主要是由 ^{187}Os 在辉钼矿中的迁移引起的 (Selby et al., 2004)。定义 ^{187}Os 的扩散系数 D 为下式

$$D = X^2/t \tag{1}$$

式中, X 是扩散距离,单位是 m ; t 是扩散所经过的时间,单位是 s 。

在本实验中,欲计算迁移速率必须有以下几点假设:① 辉钼矿大颗粒为一个直径 10 mm 的球体;② ^{187}Os 以相同的速率从中心向边缘迁移,受外界干扰影响很小;③ 所取样品为纯辉钼矿,其密度为 4.8 g/cm^3 ;④ 所取样品的中心、中间和边缘 3 部分为球形和环球形,这 3 个球形的半径如图 2 及表 3 所示;⑤ ^{187}Os 含量在辉钼矿大颗粒中心、中间和边缘诸部

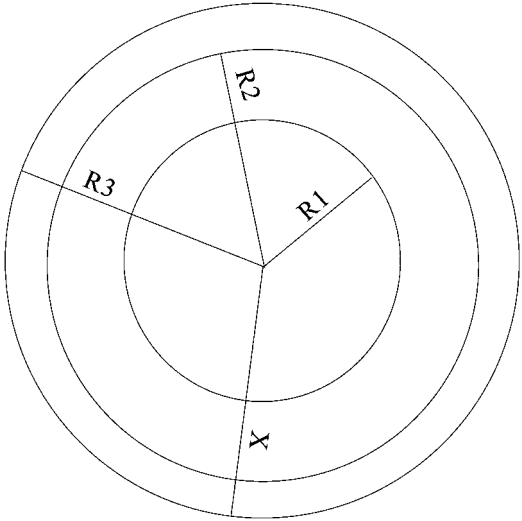


图 2 辉钼矿大颗粒剖面模型示意图

R1—辉钼矿大颗粒中心部分的半径;R2—辉钼矿大颗粒中心部分和中间部分之和的几何半径;R3—整个辉钼矿大颗粒的半径;
X—辉钼矿大颗粒中心到边缘的距离

Fig. 2 Sketch diagram of coarse-grained molybdenite
R1—Radius of the central part of coarse-grained molybdenite; R2—Geometric radius of the sum of the central part and the middle part of coarse-grained molybdenite; R3—Radius of the whole coarse-grained molybdenite; X—Distance from the center to the edge of coarse-grained molybdenite

表 3 选取辉钼矿大颗粒各部分半径计算数据

Table 3 Radii data of different parts in coarse-grained molybdenite

样品部位	质量/g	体积/ cm^3	半径/cm
中心	0.463	0.096	0.285
中心+中间	0.962	0.200	0.363
中心+中间+边缘	1.600	0.333	0.430

分呈均匀分布。

$X = R3 - (R3 - R2)/2$, 由此可以算得 $X = 0.3966 \text{ cm}$, 由表 2 可知, $t = 154.3 \text{ Ma}$, 故由 (1) 式可求得 $D = 3.23 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$ 。该结果与 Selby 等 (2004) 所估计的值基本一致。由此可知, ^{187}Os 在辉钼矿大颗粒晶体内部以 $3.23 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$ 的扩散趋势由中心向边缘迁移。

考虑到 ^{187}Os 在辉钼矿中的含量也是由辉钼矿刚形成后不断积累增加的,在一定范围内, ^{187}Os 的迁移速率可能与 ^{187}Os 的总量有关。如果辉钼矿颗粒中心的模式年龄为 154.3 Ma, 那么,由中心部分的 Re 含量可得其中心部分的理论 ^{187}Os 含量为 0.0971 ng/g , 由表 2 可知,其中心部分的实际 ^{187}Os 含量为 0.0829 ng/g , 故而,从该辉钼矿大颗粒形成

至今,其中心部位所丢失的¹⁸⁷Os 的量($\Delta^{187}\text{Os}$)为 0.0142 ng/g。由于衰变失去的 Re 相对于原有 Re 的含量可忽略不计,由表 2 可知其中心部分的¹⁸⁷Re 含量为 37.67 ng/g,因此可得下式:

$$\int_0^{154} Q^* K t dt = \Delta^{187}\text{Os} \quad (2)$$

式中 Q 是单位时间内由衰变所产生的¹⁸⁷Os 的量, $Q = 0.0971 \text{ ng/g} / 154.3 \text{ Ma} = 0.0063 \text{ ng/g/Ma}$;

K 是单位时间内¹⁸⁷Os 迁移量所占¹⁸⁷Os 总量的比例,单位是 Ma^{-1} ; $\Delta^{187}\text{Os}$ 为中心部分丢失的¹⁸⁷Os 的量,单位是 ng/g; t 是衰变时间,单位是 Ma。

由(2)式可求得 $K = 0.19 \% \text{ Ma}^{-1}$ 。由此结果可知,在单位 Ma 时间内,在辉钼矿大颗粒晶体内部存在着约占总量 0.19 % 的¹⁸⁷Os 由中心向边缘迁移。

3.4 如何克服失耦现象对 Re-Os 定年的影响

对于钨矿床中的辉钼矿而言,完全可以通过改进取样方式来克服失耦现象对 Re-Os 定年的影响,以得到一个与实际地质背景相符合的 Re-Os 同位素年龄。在取样过程中,一定不要从一个辉钼矿大颗粒中选取一部分,而是要严格遵循“多采样,细磨碎”的原则,尽可能地在整个矿区采样,这样所测得的 Re-Os 同位素地质年龄值才更具代表性,而且能在一定程度上克服 Re-Os 等时线年龄图上 Re、Os 含量相近而拉不开的现象,同时,还能发现一些异常年龄值,更易于有所新的发现。在一块手标本上,尽可能大范围地选取浸染状的辉钼矿,因为浸染状辉钼矿的颗粒细小,失耦现象不十分明显,这从表 2 内 081125-4 号样品所测得的年龄值可以看出。钨矿中辉钼矿的 Re、Os 含量较低,因此,要尽可能多地选取一些样品,至少要 1 g,才能满足分析测试的要求。当浸染状辉钼矿的含量有限而不能满足测试分析要求时,再考虑选取辉钼矿大颗粒,这时,一定要将大颗粒完整取下,即使混入少量硅酸岩也没关系,因为硅酸岩中几乎不含有 Re、Os。对于钨矿中的辉钼矿和年龄长的大颗粒辉钼矿,样品数目要多一些,比如 10 个左右,对每个样品的结晶状态作详细记录,最后,对所获年龄数据是否存在 Re-Os 失耦现象进行判断,并对数据进行取舍。

由表 2 数据可知,在辉钼矿的各个部位,Re、Os 含量是不相同的,尤其是大颗粒辉钼矿晶体,单位体积辉钼矿的¹⁸⁷Os/¹⁸⁷Re 也存在不小的差异。因此,一定要将所选取的辉钼矿破碎至 200 目,以减少失耦现象对 Re-Os 同位素地质年龄的影响。

4 结 论

本文对西华山钨矿床中不同辉钼矿样品的定年对比研究表明,大颗粒辉钼矿样品存在比较严重的失耦现象,在其不同部位选取的样品,会得到不同的模式年龄值,而浸染状矿石和整个辉钼矿颗粒的定年则可得到真实的成矿年龄,表明其失耦现象是由¹⁸⁷Os 在硫化物中迁移所造成,并且理论计算了¹⁸⁷Os 在辉钼矿中的扩散速率。由此可见,选取样品方式的不同会对辉钼矿的模式年龄产生很大影响,在实际应用中,一定要严格遵循“多采样,细磨碎”的原则,尽量采集浸染状细颗粒辉钼矿,这样才能有效地减少失耦现象,从而得到真实合理的与地质背景相符的 Re-Os 同位素地质年龄。

志 谢 感谢中国科学院贵阳地球化学研究所胡瑞忠研究员和魏文凤博士提供宝贵样品。

References

- Chen Z H, Wang D H, Qu W J, Chen Y C, Wang P A, Xu J X, Zhang J J and Xu M L. 2006. Geological characteristics and mineralization age of the Taoxikeng tungsten deposit in chongyi county, southern Jiangxi Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(4): 496-501(in Chinese with English abstract).
- Du A D, He H L, Yin N W, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenite[J]. Acta Geologica Sinica, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Du A D, Zhao D M, Wang S X, Sun D Z and Liu D Y. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with tube sample preparation[J]. Rock & Mineral Analysis, 20(4): 247-252(in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Wang D H, Li H M, Feng C Y, Liu H, Ren J and Zeng F G. 2007. Subgrain-scale decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. Mineral Deposits, 26(5): 572-580(in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[J]. Rock & Mineral Analysis, 22(4): 254-262(in Chinese with English abstract).
- Feng C Y, Xu J X, Zeng Z L, Zhang D Q, Qu W J, She H Q, Li J W, Li D X, Du A D and Dong Y J. 2007a. Zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os dating in Tianmenshan-Hongtaoling tungsten-orefield, Southern Jiangxi Province, China, and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 81(7): 951-963(in Chinese with English abstract).

- Feng C Y, Feng Y D, Xu J X, Zeng Z L, She H Q, Zhang D Q, Qu W J and Du A D. 2007b. Isotope chronological evidence for Upper Jurassic petrogenesis and mineralization of altered granite-type tungsten deposits in the Zhangtiantang area, southern Jiangxi [J]. *Geology in China*, 34(4): 642-650 (in Chinese with English abstract).
- Fu J F, Li H Q, Qu W J, Yang X J, Wei J Q, Liu G Q and Ma L Y. 2007. Re-Os isotope dating of the Da'ao tungsten-tin deposit in the Jiuyi Mountains, southern Hunan Province [J]. *Geology in China*, 34(4): 651-656 (in Chinese with English abstract).
- Fu J F, Li H Q, Qu W J, Ma L Y, Yang X J, Wei J Q and Liu G Q. 2008. Determination of mineralization epoch of quartz-vein type tungsten deposits in Shixing region, northern Guangdong and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 57-62 (in Chinese with English abstract).
- Liu G Q, Wu S C, Du A D, Fu J M, Yang X J, Tang Z H and Wei J Q. 2008. Metallogenic ages of the Xitian tungsten-tin deposit, eastern Hunan Province [J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 32(1): 63-71 (in Chinese with English abstract).
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(19): 3897-3908.
- Stein H J, Morgan J W, Markey R J and Hannah J L. 1998. An introduction to Re-Os: What's in it for the mineral industry [J]. *SEG Newsletter*, 32(1): 8-15.
- Stein H J, Scherst' en A, Hannah J L and Markey R J. 2003. Subgrain-scale decoupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19): 3673-3686.
- Ye Y. 1989. Rb and Sr isotopic composition of Xihuashan Granite and its petrogenetic significance [J]. *Journal of Zhejiang University (science)*, 23(3): 460-466 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈郑辉, 王登红, 屈文俊, 陈毓川, 王平安, 许建祥, 张家菁, 许敏林. 2006. 赣南崇义地区淘锡坑钨矿的地质特征与成矿时代 [J]. *地质通报*, 25(4): 496-501.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究 [J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carisus 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄 [J]. *岩矿测试*, 20(4): 247-252.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 2007. 辉钼矿晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的失耦现象 [J]. *矿床地质*, 26(5): 572-580.
- 丰成友, 许建祥, 曾载淋, 张德全, 屈文俊, 余宏全, 李进文, 李大新, 杜安道, 董英君. 2007a. 赣南天门山-红桃岭钨锡矿田成岩成矿时代精细测定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 81(7): 952-963.
- 丰成友, 丰耀东, 许建祥, 曾载淋, 余宏全, 张德全, 屈文俊, 杜安道. 2007b. 赣南张天堂地区岩体型钨矿晚侏罗世成岩成矿的同位素年代学证据 [J]. *中国地质*, 34(4): 642-650.
- 付建明, 李华芹, 屈文俊, 杨晓君, 魏君奇, 刘国庆, 马丽艳. 2007. 湘南九嶷山大坳钨锡矿的 Re-Os 同位素定年研究 [J]. *中国地质*, 34(4): 651-656.
- 付建明, 李华芹, 屈文俊, 马丽艳, 杨晓君, 魏君奇, 刘国庆. 2008. 粤北始兴地区石英脉型钨矿成矿时代的确定及其地质意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 32(1): 57-62.
- 刘国庆, 伍式崇, 杜安道, 付建明, 杨晓君, 汤质华, 魏君奇. 2008. 湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 32(1): 63-71.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄 [J]. *岩矿测试*, 22(4): 254-257.
- 叶瑛. 1989. 西华山花岗岩铷钨同位素组成及岩石成因的意义 [J]. *浙江大学学报*, 23(3): 460-466.