文章编号：0258-7106（2018）06-1168-11 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2018. 06. 002

德兴斑岩铜矿田黄铁矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义*

李 利，倪 培**，王国光，朱安冬
（南京大学内生金属矿床机制研究国家重点实验室，地质流体研究所，地球科学与工程学院，江苏 南京 210023）

摘 要 德兴斑岩铜矿田是中国东部最大的斑岩铜矿系统，一直以来，德兴铜矿的成矿过程和成因机制都是矿床学家关注的热点问题。前人在德兴铜矿的围岩蚀变、矿化期次、流体特征、成岩年代等方面取得了较为一致的认识，但其成矿时代仍争议较大。文章首次对矿田内与黄铜矿密切共生的黄铁矿进行了 Re-Os 同位素定年，10 件样品中的 4 件 w(Re)极低，模式年龄变化范围大，且误差较大，故不对其进行讨论；其余 6 件的 w(Re)为 10.58×10^{-9}~102.59×10^{-9}，普通 w(Os)较低（0.0054×10^{-9}~0.0113×10^{-9}），$w(^{187}Os)$较高（0.019×10^{-9}~0.177×10^{-9}），Re/Os 比值较高（4406~73 422），为低含量高放射性 Os 成因硫化物。研究获得黄铁矿 Re-Os 同位素加权平均模式年龄为（165.3±2.3）Ma（MSWD=1.04）。因此，德兴铜矿的铜成矿年龄为中侏罗世，综合前人资料，德兴铜矿最可能形成于古太平洋板块俯冲的远程效应影响下的陆内伸展的地质背景，为陆内环境斑岩铜矿。

关键词 地球化学；黄铁矿；Re-Os 同位素；成矿时代；德兴斑岩铜矿田
中图分类号：P618.41 **文献标志码**：A

Re-Os isotopic dating of pyrite from Dexing porphyry copper orefield and its geological significance

LI Li, NI Pei, WANG GuoGuang and ZHU AnDong
(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Institute of Geo-Fluids, School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract

The Dexing porphyry copper orefield is the largest porphyry Cu system in eastern China. The metallogenic process and genetic mechanism of Dexing copper mine have always been a hot issue which have aroused much interest among geologists. Previous studies have reached a consensus on the alteration, minerogenetic stages, characteristic of fluids and petrogenetic age. However, its metallogenic age remains controversial. In order to further determine its metallogenic age, the authors first carried out the Re-Os isotopic dating of pyrite. Four pyrite samples were rejected for their extremely low content of Re, wide range of model ages and large errors. The remaining six pyrite samples belong to low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides, characterized by Re content between 10.58×10^{-9} and 102.59×10^{-9}, low common Os content (0.0054×10^{-9}~0.0113×10^{-9}), relatively high content of ^{187}Os (0.019×10^{-9}~0.177×10^{-9}) and Re/Os ratios (4406~73 422). The average Re-Os model age is (165.3±2.3)

* 本文得到国家重点研发计划(编号：2016YFC0600206)、国家自然科学基金(编号：41772063)和中国地质调查局项目(编号：12120114034601)联合资助

第一作者简介 李 利，女，1990 年生，博士研究生，矿床学专业。Email: lilinjuedu@163.com
** 通讯作者 倪 培，男，1963 年生，教授，从事矿床学研究。Email: peini@nju.edu.cn

收稿日期 2018-06-09；改回日期 2018-10-15。秦思婷编辑。

Ma (MSWD=1.04), indicating that the porphyry style Cu mineralization occurred during the Jurassic period. The Dexing copper mine was probably formed in the geological background of intracontinental extension.

Key words: geochemistry, pyrite, Re-Os isotope, metallogenic age, Dexing porphyry copper orefield

近几十年来，Re-Os同位素逐渐成为探究金属硫化物矿床成矿年代和成矿物质来源的直接和有效手段（蒋少涌等，2000；杜安道等，2009）。因辉钼矿具有较高的Re含量，而几乎不含普通Os，其已成为目前应用最广泛的Re-Os定年矿物（谢桂青等，2006；丰成友等，2012；范羽等，2014；李海立等，2016；Li et al., 2017；Ni et al., 2017）。相比于辉钼矿，黄铁矿在金属硫化物矿床中更为普遍，但是由于其含有较低的Re、Os含量（通常 10^{-9}~10^{-12} 级），通常不容易得到较好的等时线年龄（蒋少涌等，2000）。黄铁矿Re-Os同位素定年在中国主要成功应用于金矿（石桂勇等，2012；赵晓波等，2014；Ding et al., 2016；张朋等，2016）、铅锌矿（唐永永等，2013；Li et al., 2016）、铁矿（Huang et al., 2013；邵建波等，2014；刘明军等，2014）、铜矿及锡多金属矿等（梁婷等，2009）。对于铜矿而言，黄铁矿Re-Os同位素定年的成功案例主要包括海底热水沉积-热液叠加改造型铜矿（郭维民等，2011；陈雷等，2013）、铜镍硫化物矿床（Wang M F et al., 2015；段士刚等，2017）、矽卡岩型铜矿（陈红瑾等，2011；Ying et al., 2014）和斑岩型铜矿（Zhang et al., 2016）等。

德兴斑岩铜矿田是华南最大的斑岩铜矿系统，自1958年建矿以来就有众多地质学家对其进行研究。在德兴铜矿的成岩时代方面，近期研究者对花岗闪长斑岩开展高精度SHRIMP或LA-ICP-MS锆石U-Pb测年，得到了较为统一的年代，约171 Ma（Wang et al., 2006；Liu et al., 2012；Zhou et al., 2012a；Li et al., 2013；Wang G G et al., 2015）。此外，德兴铜矿还广泛发育石英闪长玢岩等脉岩，Li等（2013）和李利等（2018）利用锆石SHRIMP或LA-ICP-MS U-Pb法得到朱砂红、富家坞矿床闪长玢岩的年龄为168~166 Ma，略晚于花岗闪长斑岩的侵位时间。

德兴铜矿的成矿时代还存在争议。近年来，一些研究者根据德兴铜矿田的辉钼矿Re-Os年龄，认为德兴铜矿的成矿年代约为171 Ma（Guo et al., 2012；Zhou et al., 2012a；Li et al., 2017）。也有研究者根据与铜矿化密切相关的金红石和磷灰石的ID-TIMS U-Pb定年方法，获得铜矿化年代为165 Ma（Li et al., 2013）。Li等（2013）结合辉钼矿Re-Os年代学资料提出德兴铜矿存在钼矿化（171 Ma）和铜矿化（165 Ma）两期热液事件。此外，Zhou等（2012b）通过对大脉型含矿石英脉中热液锆石SHRIMP U-Pb定年（~104.3 Ma），认为德兴斑岩铜矿田还存在另一期早白垩世的成矿事件。为进一步确定德兴斑岩铜矿田的铜矿化时代，本文首次对德兴斑岩铜矿田内的与黄铜矿密切共生的黄铁矿进行Re-Os同位素定年，并探讨其地质意义。

1　区域地质背景

德兴斑岩铜矿田位于扬子地块东南缘，江（山）—绍（兴）断裂带北西侧，江南造山带东段（图1a）。区内地层为新元古界双桥山群（图1b），由浅海沉积的泥砂岩和火山碎屑岩夹凝灰熔岩组成，这些碎屑岩经历了低级区域绿片岩相变质作用之后形成了一套厚2678~5472 m的千枚岩（Wang et al., 2008）。上覆地层为中侏罗统鹅湖岭组（图1b），其出露在德兴地区西南部NE向的孔家-银山火山岩盆地中，LA-ICP-MS锆石U-Pb定年表明此次火山事件发生在中侏罗世（176~166 Ma）（Wang et al., 2012）。赣东北断裂为区域内的一级断裂（图1b），东北向延伸，长度超过200 km。蛇绿混杂岩（1.0 Ga）沿该断裂分布，代表了新元古代扬子板块和海洋岛弧的次级缝合带（Li et al., 1997）。另外，区内北西部为北东向展布的乐安江断裂，中部为泗洲庙向斜（图1b）。

德兴地区的岩浆侵入事件发生在晚中生代（侏罗纪—早白垩纪）（图1b）。德兴花岗闪长斑岩（锆石U-Pb年龄为170 Ma）和银山英安岩到流纹质次火山岩（锆石U-Pb年龄为170~166 Ma）均是侏罗纪岩浆事件的产物（Wang et al., 2012；2015）。区内东南部的大型A型大茅山花岗岩为白垩纪的产物（锆石U-Pb年龄为126~122 Ma；Jiang et al., 2011）。

2　矿田地质

德兴斑岩铜矿田由朱砂红、铜厂和富家坞3个矿床组成，呈北西西方向展布（图2）。矿田内出露地

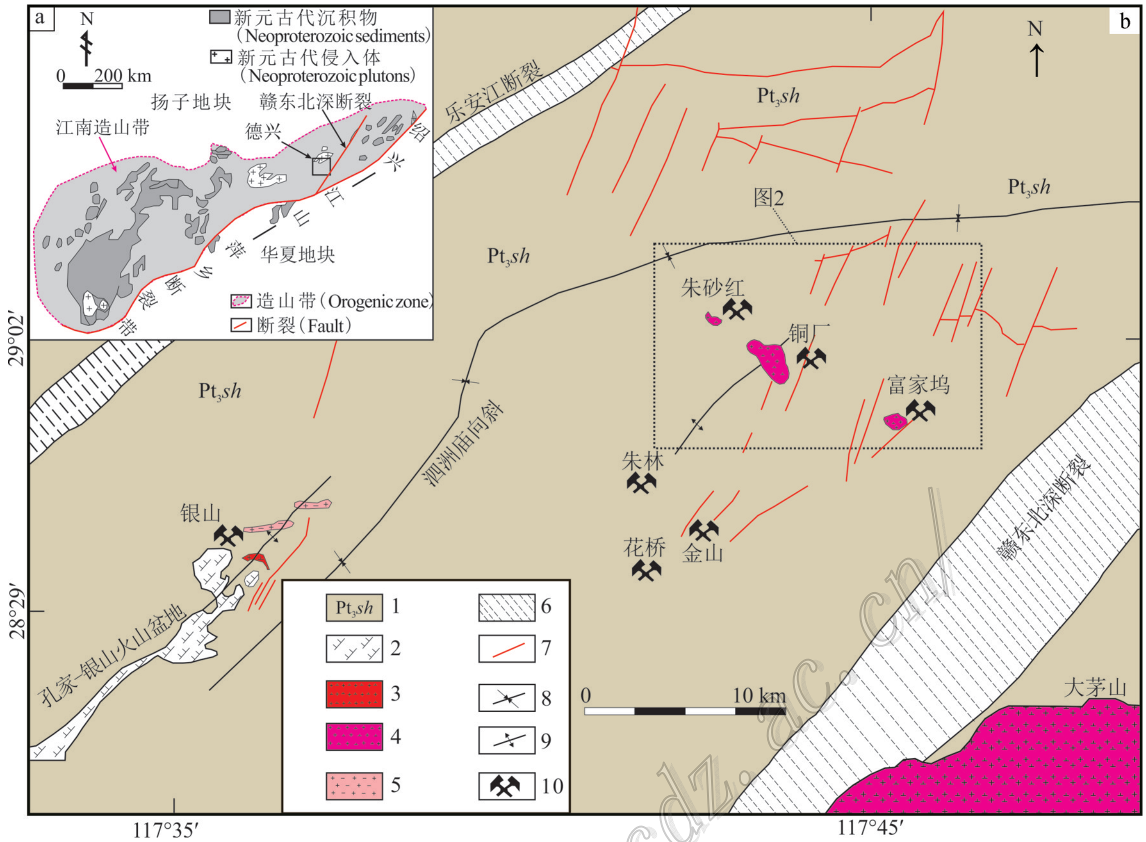

图1 华南江南造山带地质简图(a,据 Wang et al., 2008 修改)和德兴地区地质简图(b,据 Wang G G et al., 2015 修改)

1—新元古代双桥山群浅变质岩;2—中侏罗世鹅湖岭组火山岩;3—中侏罗世安山玢岩;4—中侏罗世花岗闪长斑岩;5—中侏罗世石英斑岩;6—深断裂;7—断层;8—向斜;9—背斜;10—矿床

Fig. 1 Simplified geological map of the Jiangnan orogen in South China (a, modified after Wang et al., 2008) and sketch map of the Dexing ore district (b, modified after Wang G G et al., 2015)

1—Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group epi-metamorphic phyllite; 2—Middle Jurassic Ehuling Formation volcanic rock; 3—Middle Jurassic dacitic porphyries; 4—Middle Jurassic granodiorite porphyries; 5—Middle Jurassic quartz porphyries; 6—Deep fault zone; 7—Fault; 8—Synclinorium; 9—Anticline; 10—Deposit

层为新元古界双桥山群浅变质岩。矿田北侧的泗州庙向斜是矿田内的主要褶皱构造,另外还发育北东向次级褶皱,如西源岭背斜、官帽山向斜、富家坞鼻状构造等。矿田中发育多个方向的断裂构造,矿田的内挤压断裂包括东西向、北东向和北北东向的断裂系统,这些断裂都是与同方向的褶皱构造相伴出现,另外还可见北西西向的横张断裂(图2)。

矿田内的3个矿床均主要与燕山期花岗闪长斑岩有关,单个岩体均向北西深部倾伏,呈3个大小不同的似筒状岩株。3个主岩体与围岩均呈接触侵入,接触界线清楚,呈突变关系。3个矿床的铜钼矿体均产于含矿花岗闪长斑岩岩体顶部和上部的内外接触带,岩体的中心及深部,一般未形成工业矿体,斑岩中的铜矿体小于围岩中的铜矿体,其空间形态呈倾向北西的空心筒状体,在水平切面上呈"环形",在纵剖面上呈倾斜的"梭形"。从北西部的朱砂红矿床到南东部的富家坞矿床,矿体倾角由陡变缓,矿体形态由复杂到简单,矿石铜钼品位由贫变富,矿床剥蚀程度由浅变为中等。矿田内3个矿床具有相似的蚀变类型和分带型式,与典型斑岩铜矿的蚀变类型一致,即钾化蚀变、黄铁绢英岩化蚀变和青磐岩化蚀变(图2)。

3 样品特征及测试方法

本次用于Re-Os同位素年龄测定的10件黄铁矿

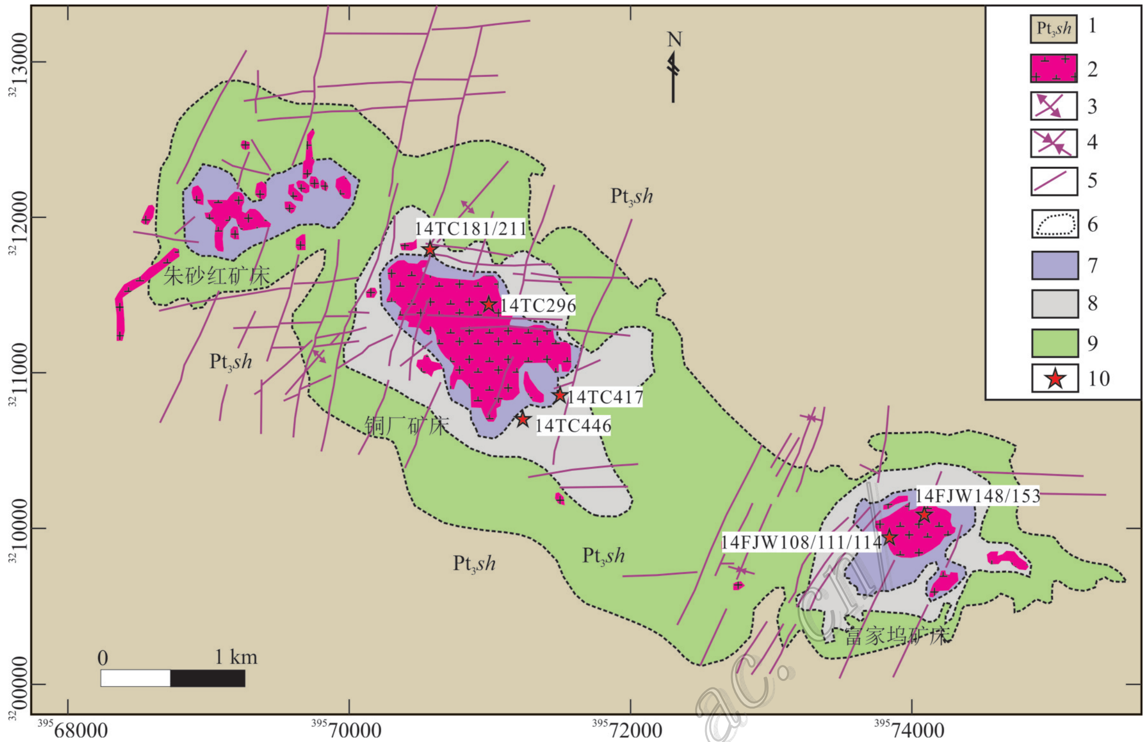

图2　德兴铜矿田地质简图和样品位置(据 Wang G G et al., 2015修改)

1—新元古代双桥山群浅变质岩;2—中侏罗世花岗闪长斑岩;3—背斜;4—向斜;5—断层;6—蚀变界线;7—钾化蚀变;8—黄铁绢英岩化蚀变;9—青磐岩化蚀变;10—采样位置

Fig. 2　Geological map of Dexing porphyry copper orefield and sample location (modified after Wang G G et al., 2015)

1—Neoproterozoic Shuangqiaoshan Group epi-metamorphic phyllite; 2—Middle Jurassic granodiorite porphyry; 3—Anticline; 4—Syncline; 5—Fault; 6—Alteration boundary; 7—Potassic alteration; 8—Phyllic alteration; 9—Propylitic alteration; 10—Sample location

样品,其中5件来自铜厂矿床,其余的来自富家坞矿床,采样位置见图2。样品均为矿石,主要呈细脉浸染状产出,发育半自形-他形粒状结构、粒间充填交代结构、裂隙充填交代结构等,矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等,黄铜矿与黄铁矿紧密共生,同时可见辉钼矿与黄铜矿、黄铁矿共生,脉石矿物主要为石英、绢云母等(图3a~d)。样品经人工粉碎后,按重力和磁选方法分选出黄铁矿,最后在双目镜下挑选(纯度>99%)。

样品分析和测试工作在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完成,实验仪器为ELAN DRC-e型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),仪器灵敏度大于4000 cps/10^{-9} ^{115}In,相对标准偏差(RSD%)小于3%。实验中所用的HCl和HNO_3通过亚沸蒸馏提纯,实验用水为Millipore 18 MΩ·cm,^{187}Re和^{190}Os同位素稀释剂分别稀释至10×10^{-9}备用,卡洛斯(Carius)管约230 mm长,内径26 mm,外径30 mm,内部容积大约120 mL,实验前用60%的王水加热煮5 h,蒸馏水清洗干净后加热至560℃约8 h退火。

实验步骤简述如下:准确称取3~5 g黄铁矿样品置于Carius管中,缓慢加入HNO_3以分解黄铁矿,吸收管将产生的气体和少量Os用2.5 mL 10 mol/L的HCl在冰水浴中吸收,反应过程中需持续通入净化的空气,以免Carius管冷却使其内压降低而吸收Os的HCl回流。反应完全后,将吸收Os的HCl转移到Carius管中,并用4 mL HCl分2次清洗Carius管,然后加入适量的Re和Os稀释剂,加入15 mL HNO_3,密封Carius管,将其置入不锈钢套中在200℃下加热15 h,然后取出Carius管并置于冰箱的冷却室中冷却2 h,打开Carius管,将进气的特氟龙(Teflon)管移至Carius管底部,在沸腾的水浴中加热蒸馏,在蒸馏过

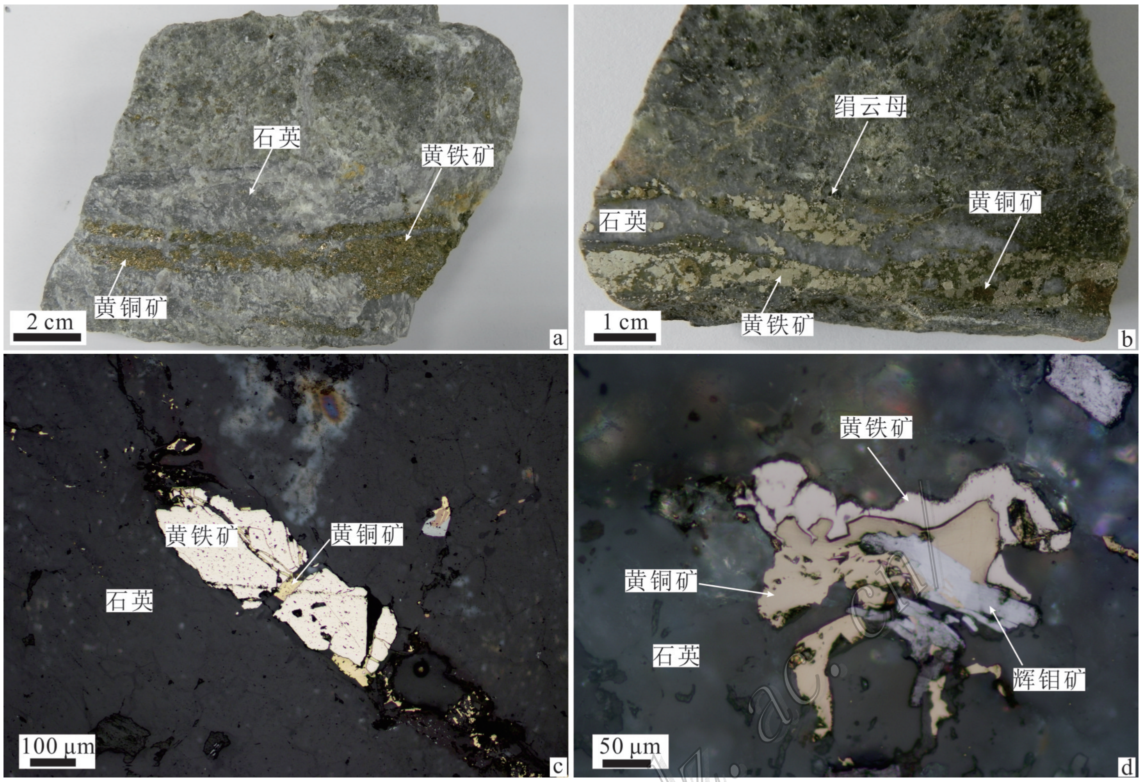

图3 德兴斑岩铜矿田黄铁矿Re-Os同位素样品典型手标本照片(a、b)和显微照片(c、d)

Fig. 3 Representative specimen photos (a, b) and reflected light microphotographs (c, d) for pyrite Re-Os isotope sample in the Dexing porphyry copper orefield

程中缓慢加入约5 mL H_2O_2使Os蒸馏完全，Os用净化的空气带出，并用1.5 mL H_2O在冰水浴中吸收，将吸收液保存在冰箱冷冻室，备测。将蒸馏Os剩下的溶液转移至125 mL Teflon烧杯中蒸干，加入3 mL HCl再蒸干，用25 mL 2mol/L的HCl溶解残渣，用阴离子交换树脂（AG1-X8 200~400目）分离Re。实验原理及详细步骤参阅杜安道等（2009）、漆亮等（2009）和Qi等（2010）。

4 测试结果

10件黄铁矿样品的Re-Os同位素分析结果见表1。其中铜厂矿床有4件样品的Re含量极低（$<3\times10^{-9}$），从而导致其模式年龄变化范围大（2192.6~240.0 Ma），且误差较大（>10 Ma），无法形成等时线谐和图，因而不对其进行讨论。其余6件测试样品的w(Re)为10.58×10^{-9}~102.59×10^{-9}，普通w(Os)较低（0.0054×10^{-9}~0.0113×10^{-9}），w(^{187}Os)较高（0.019×10^{-9}~0.177×10^{-9}），Re/Os比值较高（4406~73 422），模式年龄集中在173.5~162.3 Ma，普通Os相对于放射性Os可忽略不计，与Stein等（2000）提出的低含量高放射成因Os（LLHR）的硫化物类似。由于此类样品中的Os主要以放射性^{187}Os为主，普通Os含量很低，导致普通Os很难准确测定，造成^{187}Re/^{188}Os与^{187}Os/^{188}Os之间的相关误差较大，因此，选用以^{187}Re为横坐标，以^{187}Os为纵坐标的等时线投图，利用ISOPLOT程序得到^{187}Re-^{187}Os等时线年龄为（162.7±6.9）Ma（MSWD=0.48）（图4a），加权平均模式年龄为（165.3±2.3）Ma（MSWD=1.04）（图4b）。

5 讨 论

5.1 德兴铜矿黄铁矿Re-Os同位素年龄

Re、Os元素具有亲铁、亲硫及耐熔的特性，在自然界它们主要富集于金属和硫化物相中，是直接约束金属矿床成矿时代的有力工具。本次选取的黄铁矿与黄铜矿密切共生，因此，其Re-Os同位素约束的成矿时代可以代表铜矿化时代。

表 1　德兴斑岩铜矿田黄铁矿 Re-Os 同位素结果

Table 1　Re−Os isotopic data of pyrite from the Dexing porphyry copper orefield

样品号	w(Re)/10^{-9}		w(普 Os)/10^{-9}		w(^{187}Re)/10^{-9}		w(^{187}Os)/10^{-9}		模式年龄/Ma		Re/Os
	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	测定值	1σ	比值
等时线谐和样品											
14TC181	10.58	0.34	0.0113	0.0017	6.62	0.21	0.019	0.001	173.5	8.0	4406
14FJW153	30.92	0.42	0.0059	0.0021	19.35	0.27	0.056	0.001	172.2	4.4	24543
14FJW148	24.55	1.87	0.0054	0.0006	15.37	1.17	0.042	0.001	165.0	3.0	21439
14FJW111	83.75	2.66	0.0058	0.0010	52.43	1.67	0.145	0.002	165.7	1.8	68070
14FJW114	57.55	0.92	0.0058	0.0009	36.02	0.57	0.098	0.001	162.3	2.4	46850
14FJW108	102.59	2.84	0.0066	0.0014	64.22	1.78	0.177	0.004	164.9	3.6	73422
w(Re)低样品											
14TC211	0.92	0.09	0.0117	0.0056	0.58	0.06	0.004	0.000	380.9	26.7	370
14TC296	1.05	0.02	0.0051	0.0008	0.66	0.02	0.003	0.000	240.0	12.3	971
14TC417	2.08	0.06	1.0769	0.0018	1.30	0.04	0.007	0.001	300.4	20.7	1288
14TC446	0.05	0.03	0.5007	0.0071	0.03	0.21	0.001	0.000	2192.6	278.8	32

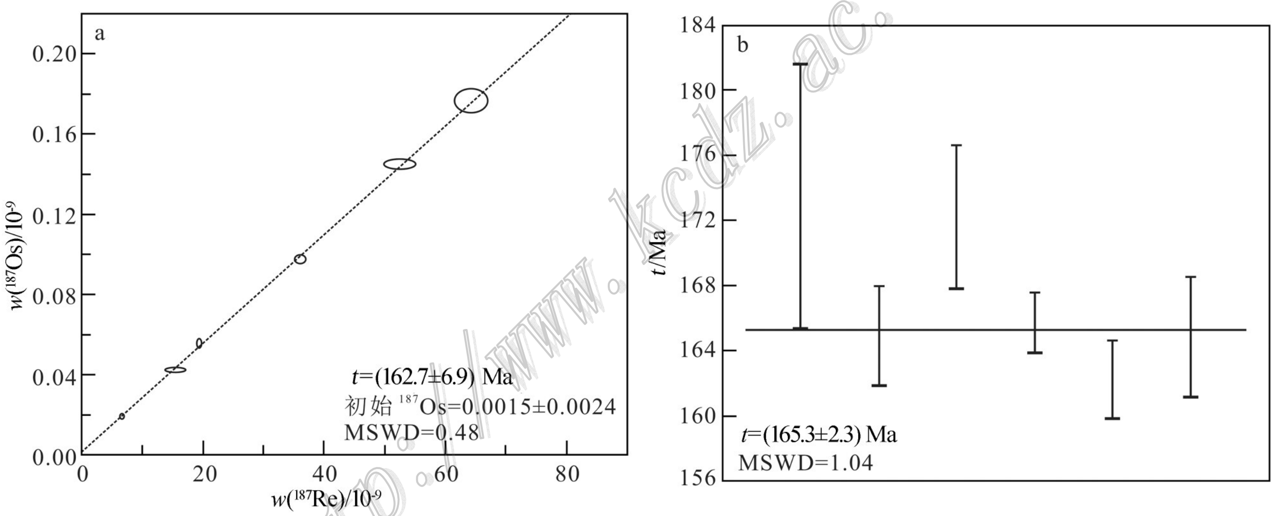

图 4　德兴斑岩铜矿田黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄(a)和加权平均模式年龄(b)

Fig. 4　Re-Os isochron age (a) and Re-Os weighted average model ages (b) of pyrite from the Dexing porphyry copper orefield

德兴斑岩铜矿田成矿年代学研究始终是中国地质学者的研究热点,长期以来,在该区获得了大量的成岩成矿年龄数据。朱训等(1983)通过全岩和矿物的 K-Ar、Rb-Sr 同位素得到花岗闪长斑岩的等时线年龄为 172~112 Ma,石英闪长玢岩的等时线年龄为 193~96 Ma。由于全岩或矿物的 K-Ar 和 Rb-Sr 封闭温度较低,后期低温的热液蚀变会导致岩体的 Rb-Sr 和 K-Ar 同位素不封闭而导致 Rb-Sr 和 K-Ar 同位素年龄不能准确代表岩浆结晶年龄。而锆石性质稳定,不易受到蚀变的影响,而且其 U-Pb 体系封闭温度很高(900~1100℃),因此,锆石 U-Pb 同位素方法可以获得准确的岩体侵位年龄(Cliff, 1985; Lee et al., 1997)。Wang 等(2006)、Liu 等(2012)、Zhou 等(2012a)和 Wang G G 等(2015)通过锆石 SHRIMP 或 LA-ICP-MS U-Pb 定年得到花岗闪长斑岩的年代为 172~170 Ma。Li 等(2013)和李利等(2018)通过锆石 SHRIMP 或 LA-ICP-MS U-Pb 定年得到闪长玢岩的年代为 168~166 Ma。故德兴斑岩铜矿田内的岩浆活动发生在侏罗纪(172~166 Ma)。

Guo 等(2012)、Zhou 等(2012a)、曲焕春等

(2015)和Li等(2017)通过辉钼矿Re-Os同位素开展成矿年代研究,推断斑岩铜矿成矿时代为中侏罗世,约171 Ma。尽管辉钼矿Re-Os年代学定年准确性高,可信度高,但是部分学者提出德兴铜矿的钼、铜可能不是同期形成的产物(Li et al., 2013)。Li等(2013)通过铜矿化相关的磷灰石和金红石ID-TIMS U-Pb定年,推断铜矿化略晚于钼矿化,斑岩铜矿化时代为165 Ma。此外,Zhou等(2012b)通过热液锆石U-Pb定年得到德兴斑岩铜矿田内可能存在白垩纪的铜成矿事件(106~100 Ma)。

铜厂和富家坞矿床6个较高Re含量的黄铁矿样品中有2个样品的模式年龄为172.2 Ma和173.5 Ma,其余4个样品模式年龄比较年轻,为165.7~162.3 Ma。前人报道的德兴地区花岗闪长斑岩和辉钼矿Re-Os年龄均约为171 Ma,与本次2件黄铁矿样品的模式年龄一致。国际上也有报道指出,斑岩型矿床的成岩成矿时差常很小,通常小于1~2 My(Von Quadt et al., 2011)。本次研究的结果也暗示了德兴铜矿铜、钼矿化为同期产物。

对于模式年龄年轻的黄铁矿样品,存在2种可能性:第一种为分析测试导致的误差,这主要是由于黄铁矿样品中Re含量远低于辉钼矿中Re含量,因此,黄铁矿样品中Re-Os体系微小的同位素组成测定误差可能会产生较大的模式年龄误差;第二种可能性为分析对象为黄铁矿可能经历了后期热液蚀变的影响,即早期黄铁矿(~171 Ma)受到后期热液蚀变的改造导致,后期的热液事件年代时间尚不能确定,可能为~165 Ma闪长玢岩对应的热液蚀变(金红石和磷灰石TIMS U-Pb年龄为~165 Ma)或者为104.3 Ma热液蚀变造成。综上所述,本文倾向于解释黄铁矿Re-Os定年的数据为德兴铜矿主体铜成矿时间为171 Ma,后期热液蚀变对成矿贡献大小需要进一步研究。

5.2 成矿地质背景

华南中生代构造动力学演化模型存在的观点主要可分为3类:① 碰撞模型(Hsü et al., 1988);② 地幔柱模型(谢窦克等,1996;谢桂青等,2001);③ 古太平洋或Izanagi板块俯冲模型(Zhou et al., 2006; Li et al., 2007; Sun et al., 2007)。目前被相关学者普遍接受的为古太平洋板块俯冲模型(毛景文等,2011; Jiang et al., 2015; Wang G G et al., 2015)。Wang等(2016)认为中侏罗世—早白垩世俯冲于华南陆块之下的更可能为伊泽纳崎板块(或古太平洋板块)(Engebretson, 1985),并且俯冲板块漂移方向为NW向或NNW向(Goldfarb et al., 2007; Seton et al., 2012)。

本文从成矿年代方面,进一步确定了德兴铜矿的成矿时代为中侏罗世。中侏罗世伊泽纳崎板块北西向俯冲到华南板块之下,而此时华南活动大陆边缘弧岩浆作用微弱,可能是由于伊泽纳崎板块未俯冲至~110 km的深度(Tatsum et al., 1995)。但是,压力可能已经传到了华南内陆,活化了早先存在的深断裂(如赣东北深断裂)(Zhou et al., 2006; He et al., 2010; Wang et al., 2012)。深断裂的活化导致了陆内拉伸,这可能使得华南内陆的南岭地区形成A型花岗岩、双峰式火山岩和碱性玄武岩(Chen et al., 2005; 朱金初等,2008; He et al., 2010)。靠近赣东北断裂,德兴斑岩铜矿田内的花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩脉岩,形成于陆内拉伸的构造背景。在此背景下,新元古代江南造山运动形成的富铜初始岩石圈(Wang G G et al., 2015)拆沉或直接部分熔融形成了德兴斑岩铜矿的高镁埃达克岩浆(即花岗闪长斑岩岩浆),岩浆上涌,形成德兴斑岩铜矿。

6 结 论

(1) 德兴斑岩铜矿田内黄铁矿为低含量高放射性成因Os硫化物,黄铁矿Re-Os加权平均模式年龄为(165.3±2.3)Ma,说明其成矿作用发生在中侏罗世。

(2) 德兴铜矿最可能形成于古太平洋板块俯冲的远程效应影响下的陆内伸展地质背景,为陆内环境的斑岩型铜矿。

志 谢 野外工作期间得到江西铜业股份有限公司张映红主任、徐积辉高级工程师、李兵工程师、梁耀灵工程师、朱小云工程师等的热情帮助。实验过程中得到了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漆亮老师、黄小文老师的指导,在此一并表示感谢。

References

Chen H J, Zhang J, Jia P F, Li D P, Zhang Z Y and Wang Y Q. 2011. Re-Os isotopic dating of sulfides from the Tongshan copper deposit, Anhui Province and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1779-1784 (in Chinese with English abstract).

Chen L, Wang Z Q, Zhao Y Y, Liu Y, Cao J, Ding L and Qu W J. 2013. Re-Os dating of pyrrhotite in the Linghou Cu deposit, Jiande, Zhejiang Province and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 87(12): 1864-1873 (in Chinese with English abstract).

Chen P R, Zhou X M, Zhang W L, Li H M, Fan C F, Sun T, Chen W F and Zhang M. 2005. Petrogenesis and significance of Early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range[J]. Science China-Earth Sciences, 48(7): 912-924.

Cliff R A. 1985. Isotopic dating in metamorphic belts[J]. Journal of the Geological Society, 142(1): 97-110.

Ding C W, Nie F J, Bagas L, Dai P, Jiang S H, Ding C Z, Liu C H, Peng Y B, Zhang G X and Shao G Y. 2016. Pyrite Re-Os and zircon U-Pb dating of the Tugurige gold deposit in the western part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, China and its geological significance[J]. Ore Geology Reviews, 72(1): 669-681.

Du A D, Qu W J, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).

Duan S G, Jiang Z S, Zhang Z H, Li F M and Ren Y Q. 2017. Re-Os isotopic analysis of pyrrhotite from Tianyu Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang: Constraints on sources of ore-forming materials[J]. Mineral Deposits, 36(1): 25-37(in Chinese with English abstract).

Engebretson D C. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 206(9): 1-60.

Fan Y, Zhou T F, Zhang D Y, Yuan F, Fan Y and Ren Z. 2014. Spatial and temporal distribution and metallogical background of the Chinese molybdenum deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 88(4): 784-804 (in Chinese with English abstract).

Feng C Y, Zhang D Q, Xiang X K, Li D X, Qu H Y, Liu J N and Xiao Y. 2012. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Dahutang tungsten deposit in northwestern Jiangxi Province and its implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 3858-3868(in Chinese with English abstract).

Goldfarb R J, Hart C, Davis G and Groves D. 2007. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian Cratons[J]. Econ. Geol., 102(3): 341-345.

Guo S, Zhao Y Y, Qu H C, Wu D X, Xu H, Li C, Liu Y, Zhu X Y and Wang Z K. 2012. Geological characteristics and ore-forming time of the Dexing porphyry copper ore mine in Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 86(3): 691-699.

Guo W M, Lu J J, Jiang S Y, Zhang R Q and Qi L. 2011. Re-Os isotope dating of pyrite from the footwall mineralization zone of the Xinqiao deposit, Tongling, Anhui Province: Geochronology evidence for submarine exhalative sedimentation[J]. Chinese Science Bulletin, 56(36): 3023-3028 (in Chinese with English abstract).

He Z Y, Xu X S and Niu Y L. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China[J]. Lithos, 119(3): 621-641.

Hsü K J, Sun S, Li J L, Chen H H, Pen H P and Sengor A M C. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in south China[J]. Geology, 16(5): 418-421.

Huang X W, Zhou M F, Qi L, Gao J F and Wang Y W. 2013. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic–hydrothermal Fe deposit, NW China[J]. Mineralium Deposita, 48(8): 925-946.

Jiang S Y, Yang J H, Zhao K D and Yu J M. 2000. Re-Os isotope trace and dating methods in ore deposits research[J]. Journal of Nanjing University (Nature Sciences), 36(6): 669-677(in Chinese with English abstract).

Jiang Y H, Wang G C, Liu Z, Ni C Y, Qing L and Zhang Q. 2015. Repeated slab advance-retreat of the Palaeo-Pacific plate underneath SE China[J]. International Geology Review, 57(4), 472-491.

Jiang Y H, Zhao P, Zhou Q, Liao S Y and Jin G D. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China[J]. Lithos, 121 (1-4): 55-73.

Lee J K W, Williams I S and Ellis D J. 1997. Pb, U and Th diffusion in natural zircon[J]. Nature, 390(6656): 159-162.

Li D F, Chen H Y, Hollings P, Zhang L, Mi M, Li J, Fang J, Wang C M and Lu W J. 2016. Re-Os pyrite geochronology of Zn-Pb mineralization in the giant Caixiashan deposit, NW China[J]. Mineralium Deposita, 51(3): 309-317.

Li H L, Xiao H L, Fan F P, Chen L Z, Liu J X and Chen X T. 2016. Molybdenite Re-Os isotopic age of Fei'eshan tungsten and molybdenum polymetallic deposit in Chao'an, Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 90(2): 231-239(in Chinese with English abstract).

Li L, Ni P, Wang G G, Zhu A D, Pan J Y, Chen H, Huang B, Yuan H X, Wang Z K and Fang M H. 2017. Multi-stage fluid boiling and formation of the giant Fujiawu porphyry Cu-Mo deposit in South

China[J]. Ore Geology Reviews, 81: 898-911.

Li L, Ni P, Wang G G, Zhu A D, Zhang Y H and Liang Y L. 2018. Geochronology and geochemistry of quartz diorite porphyries of the Zhushahong porphyry copper deposit in Dexing and their geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.74 (in Chinese with English abstract).

Li X F, Hu R Z, Rusk B, Xiao R, Wang C Y and Yang F. 2013. U-Pb and Ar-Ar geochronology of the Fujiawu porphyry Cu-Mo deposit, Dexing district, southeast China: Implications for magmatism, hydrothermal alteration, and mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 74: 330-342.

Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, Zhou G Q and Xing F M. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Precambrian Research, 81(1-2): 129-144.

Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. Geology, 35(2): 179-182.

Liang T, Wang D H, Qu W J, Cai M H and Wei K L. 2009. Re-Os isotope composition and source of ore-forming material of pyrite in Tongkeng tin-polymetallic deposit, Guangxi[J]. Journal of Earth Science and Environment, 31(3): 230-235(in Chinese with English abstract).

Liu M J, Li H M, Yu S X, Xu Z X, Yao L D, Wen Y and Zhao H Z. 2014. Re-Os isotopic dating of pyrite and molybdenite from the iron deposits in Anshan-Benxi area of Liaoning Province and its geological significances[J]. Geology in China, 41(6): 1821-1832 (in Chinese with English abstract).

Liu X, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Li Q L, Yang Y H and Liu Y. 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, southeastern China[J]. Lithos, 150(10): 85-100.

Mao J W, Chen M H, Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological characteristics of the Qinhang(or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 85(5): 636-658(in Chinese with English abstract).

Ni P, Wang G G, Cai Y T, Zhu X T, Yuan X H, Huang, B, Ding J Y and Chen H. 2017. Genesis of the Late Jurassic Shizitou Mo deposit, South China: Evidences from fluid inclusion, H-O isotope and Re-Os geochronology[J]. Ore Geology Reviews, 81:871-883.

Qi L, Zhao Z, Hu J and Huang Y. 2009. Study on the dating method for low concentrations Re-Os isotopes in common hydrothermal sulphides[J]. Acta Mineralogica Sinica, 29(Supp.): 611-622(in Chinese).

Qi L, Zhou M F, Gao J F and Zhao Z. 2010. An improved Carius tube technique for determination of low concentrations of Re and Os in pyrites[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 25(4): 585-589.

Qu H C, Zhou L M and Yang Z M. 2015. Dating of molybdenite-bearing rock in the Zhushahong deposit of Dexing and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(3): 517-525 (in Chinese with English abstract).

Seton M, Müller R D, Zahirovic S, Gaina C, Torsvik T, Shephard G, Talsma A, Gurnis M, Turner M, Maus S and Chandler M. 2012. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma[J]. Earth Science Reviews, 113(3-4): 212-270.

Shao J B, Zhang X Y, Wang H T, Chen D Y and Ren Q. 2014. Geochemistry and pyrite Re-Os dating of the Tadong iron deposit in Jilin Province[J]. Acta Geologica Sinica, 88(1): 83-98(in Chinese with English abstract).

Shi G Y, Sun X M, Pan W J, Hu B M, Qu W J, Du A D and Li C. 2012. Re-Os dating of auriferous pyrite from the Zhenyuan super-large gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, southwestern China[J]. Chinese Science Bulletin, 57(26): 2492-2500 (in Chinese with English abstract).

Stein H J, Morgan J W and Scherstén A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, southwest Sweden, records continental-scale tectonic events[J]. Econ. Geol., 95(8):1657-1671.

Sun W D, Ding X, Hu Y H and Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific[J]. Earth and Planetary Science Letters, 262(3-4): 533-542.

Tang Y Y, Bi X W, Wu L Y, Wang L, Zou Z C and He L P. 2013. Re-Os isotopic dating of pyrite from Jinding Zn-Pb ore deposit and its geological significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 3(30): 287-294 (in Chinese with English abstract).

Tatsumi Y and Eggins S. 1995. Subduction zone magmatism[M]. Blackwell Science.

Von Quadt A, Erni M, Martinek K, Moll M, Peytcheva I and Heinrich C A. 2011. Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatic-hydrothermal systems[J]. Geology, 39(8): 731-734.

Wang G G, Ni P, Zhao K D, Wang X L, Liu J Q, Jiang S Y and Chen H. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization[J]. Lithos, 150(10): 135-154.

Wang G G, Ni P, Yao J, Wang X L, Zhao K D, Zhu R Z, Xu Y F, Pan J Y, Li L and Zhang Y H. 2015. The link between subduction-modified lithosphere and the giant Dexing porphyry copper deposit, South China: Constraints from high-Mg adakitic rocks[J]. Ore Geology Reviews, 67: 109-126.

Wang G G, Ni P, Zhao C, Wang X L, Li P F, Chen H, Zhu A D and Li L. 2016. Spatiotemporal reconstruction of Late Mesozoic sillicic large igneous province and related epithermal mineralization in South China: Insights from the Zhilingtou volcanic-intrusive complex[J]. Journal of Geophical Research: Solid Earth, 121(11), 7903-7928.

Wang M F, Wang W, Gutzmer J, Liu K, Li C, Michalak P P, Xia Q L and Guo X N. 2015. Re-Os geochronology on sulfides from the Tudun Cu-Ni sulfide deposit, eastern Tianshan, and its geological significance[J]. International Journal of Earth Sciences, 104(8): 2241-2252.

Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L and Ma J L. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 47(1): 119-144.

Wang X L, Zhao G C, Zhou J C, Liu Y S and Hu J. 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogeny[J]. Gondwana Research, 14(3): 355-367.

Xie D K, Ma R S, Zhang Y S, Zhao X X and Coe R S. 1996. The crust growth and mantle plume tectonics of South China continent[M]. Beijing: Geological Publisging House. 1-257(in Chinese).

Xie G Q, Hu R Z, Zhao J H and Jiang G H. 2001. Mantle plume and the relationship between it and Mesozoic large-scale metallogenesis in southeastern China: A preliminary discussion[J]. Geotectonica et Metallogenia, 25(2): 179-186(in Chinese with English abstract).

Xie G Q, Mao J W, Li R L, Zhang Z S, Zhao W C, Qu W J, Zhao C S and Wei S K. 2006. Metallegenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo-(W) deposits in southeastern Hubei Province: Constraints from Re-Os molybdenite ages[J]. Mineral Deposits, 25 (1): 43-52 (in Chinese with English abstract).

Ying L J, Wang C H, Tang J X, Wang D H, Qu W J and Li C. 2014. Re-Os systematics of sulfides (chalcopyrite, bornite, pyrite and pyrrhotite) from the Jiama Cu-Mo deposit of Tibet, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79(A): 497-506.

Zhang P, Huang X W, Cui B, Wang B C, Yin Y F and Wang J R. 2016. Re-Os isotopic and trace element compositions of pyrite and origin of the Cretaceous Jinchang porphyry Cu-Au deposit, Heilongjiang Province, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 129: 67-80.

Zhang P, Li B, Li J, Chai P, Wang X J, Sha D M and Shi J. 2016. Re-Os isotopic dating and its geological implication of gold bearing pyrite from the Baiyun gold deposit in Liaodong rift[J]. Geotectonic et Metallogenia, 40(4): 731-738 (in Chinese with English abstract).

Zhao X B, Xue C J, Men Q H, Yan Y H, Wang H G, Zu B, Mi D J and Li X Z. 2014. Origin and metellogenesis of the Tawuerbieke gold deposit, western Tianshan: Insight from Re-Os isotopic compositions[J]. Earth Science Frontiers, 21(5): 176-186 (in Chinese with English abstract).

Zhou Q, Jiang Y H, Zhao P, Liao S Y and Jin G D. 2012a. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. International Geology Review, 54 (5): 572-592.

Zhou Q, Jiang Y H, Zhao P, Liao S Y, Jin G D, Liu Z and Jia R Y. 2012b. SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircons: Evidence for an Early Cretaceous epithermal event in the Middle Jurassic Dexing porphyry copper deposit, southeast China[J]. Econ. Geol., 107: 1507-1514.

Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 29(1): 26-33.

Zhu J C, Chen J, Wang R C, Lu J J and Xie L.2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4):474-484 (in Chinese with English abstract).

Zhu X, Huang C K, Rui Z Y, Zhou Y H, Zhu X J, Hu C S and Mei Z K. 1983. Dexing porphyry copper deposit[M]. Beijing: Geological Publisging House. 1-336 (in Chinese).

附中文参考文献

陈红瑾,张静,贾鹏飞,李大鹏,张智宇,王通其. 2011. 安徽铜山铜矿床硫化物Re-Os定年及其地质意义[J]. 岩石学报,27(6):1779-1784.

陈雷,王宗起,赵元艺,刘妍,曹洁,定立,屈文俊. 2013. 浙江建德岭后铜矿雌黄铁矿Re-Os年代学特征及成矿意义[J]. 地质学报,87(12):1864-1873

杜安道,屈文俊,李超,杨刚. 2009. 铼-锇同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试,28(3):288-304.

段士刚,蒋宗胜,张作衡,李凤鸣,任雅琼. 2017. 东天山天宇铜镍硫化物矿床雌黄铁矿Re-Os同位素物质来源示踪[J]. 矿床地质,36(1):25-37.

范羽,周涛发,张达玉,袁峰,范裕,任志,Noel W. 2014. 中国钼矿床的时空分布及成矿背景分析[J]. 地质学报,88(4):784-804.

丰成友,张德全,项新葵,李大新,瞿泓滢,刘建楠,肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿Re-Os同位素定年及其意义[J]. 岩石学报,28(12):3858-3868.

郭维民,陆建军,蒋少涌,章荣清,漆亮. 2011. 安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿Re-Os同位素定年:海底喷流沉积成矿的年代学证据[J]. 科学通报,56(36):3023-3028.

蒋少涌,杨竞红,赵葵东,于际民. 2000. 金属矿床Re-Os同位素示踪与定年研究[J]. 南京大学学报(自然科学),36(6):669-677.

李海立,肖惠良,范飞鹏,陈乐柱,刘建雄,陈叙涛. 2016. 广东潮安飞鹅山钨钼多金属矿床辉钼矿Re-Os同位素定年[J]. 地质学报,90(2):231-239.

李利,倪培,王国光,朱安冬,张映红,梁耀灵. 2018. 德兴朱砂红斑岩铜矿石英闪长玢岩的年代学和地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.74.

梁婷,王登红,屈文俊,蔡明海,韦可利. 2009. 广西铜坑锡多金属矿黄提款的Re-Os同位素组成及成矿物质来源示踪[J]. 地球科学与环境学报,31(3):230-235.

刘明军,李厚民,于仕祥,许宗宪,姚良德,文屹,赵洪振. 2014. 辽宁鞍本地区铁矿床黄铁矿和辉钼矿Re-Os同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质,41(6):1821-1832.

毛景文,陈懋弘,袁顺达,郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报,85(5):636-658.

漆亮,赵正,胡静,黄艳. 2009. 普通热液硫化物中低含量Re-Os同位素定年方法研究[J]. 矿物学报,29(增刊):611-622.

曲焕春,周利敏,杨志明. 2015. 德兴朱砂红矿床含辉钼矿岩石样品Re-Os定年及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,34(3):517-525.

邵建波,张希友,王洪涛,陈殿义,任强. 2014. 吉林省塔东大型铁矿地球化学特征及黄铁矿Re-Os同位素定年[J]. 地质学报,88(1):83-98.

石桂勇,孙晓明,潘伟坚,胡北铭,屈文俊,杜安道,李超. 2012. 云南哀牢山金矿带镇沅超大型金矿载金黄铁矿Re-Os定年及其地质意义[J]. 科学通报,57(26):2492-2500.

唐永永,毕献武,武丽艳,王雷,邹志超,和利平. 2013. 金顶铅锌矿黄铁矿Re-Os定年及其地质意义[J]. 矿物学报,3(30):287-294.

谢窦克,马荣生,张禹慎,赵西西,Coe R S. 1996. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造[M]. 北京:地质出版社. 1-257.

谢桂青,胡瑞忠,赵军红,蒋国豪. 2001. 中国东南部地幔柱及其与中生代大规模成矿关系初探[J]. 大地构造与成矿学,25(2):179-186.

谢桂青,毛景文,李瑞玲,张祖送,赵维超,屈文俊,赵财胜,魏世昆. 2006. 鄂东南地区Cu-Au-Mo-(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨:辉钼矿Re-Os同位素年龄[J]. 矿床地质,25(1):43-52.

张朋,李斌,李杰,柴鹏,王希金,沙德铭,时建民. 2016. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿Re-Os定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学,40(4):731-738.

赵晓波,薛春纪,门启浩,闫永红,王洪刚,俎波,米登江,李晓忠. 2014. 西天山塔乌尔别克金矿成矿作用:Re-Os年龄和S-Pb同位素示踪[J]. 地学前缘,21(5):176-186.

朱金初,陈骏,王汝成,陆建军,谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨A型花岗岩带[J]. 高校地质学报,14(4): 474-484.

朱训,黄崇轲,芮宗瑶,周耀华,朱贤甲,胡淙声,梅占魁. 1983. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京:地质出版社. 1-336.