浙江治岭头钼铅锌金多金属矿床矿质来源的硫、铅同位素示踪及成矿时代

楚克磊[1,2]，陈小荣[3]，齐刚[3]，高翔[3]，胡博[3]，李胜进[3]

1）中国地质科学院，北京，100037；2）南京大学，内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室，南京，210093；
3）浙江省第七地质大队，浙江丽水，323000

内容提要：治岭头矿床上部（火山岩盖层）以铅锌矿床、硫矿床为主，中间（变质岩基底）以金银矿、铅锌矿为主，深部（侵入岩体）以斑岩型钼矿床为主的"三层楼"模式。本文在前人研究的基础上，通过辉钼矿 Re-Os 同位素定年技术对治岭头矿床进行了成矿时代的厘定。6件辉钼矿样品的模式年龄为113.7～114.6 Ma，加权平均年龄为114.03±1.78 Ma，表明治岭头钼多金属矿床成矿作用发生于早白垩世晚期。该矿床辉钼矿样品的 Re 含量变化于 16.05×10^{-6}～66.29×10^{-6}，表明其成矿物质具有壳幔混源的特征。矿石硫同位素组成变化范围较窄（−2.1‰～2.6‰），具有相对均一的来源，可能主要来自上地幔或下地壳的深源岩浆，但也可能受到陆壳沉积物的混染。治岭头钼铅锌金多金属矿床矿石铅同位素组成变化范围比较小，$^{208}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$、$^{206}Pb/^{204}Pb$ 的范围分别为38.765～39.137、15.523～15.751、18.450～18.667，具有明显的壳幔混合特征。治岭头钼多金属矿床成矿年龄的厘定为下一步在区内开展同时期的斑岩成矿系统找矿勘探提供了重要的线索，同时为进一步深入研究中国东南沿海大陆边缘成矿带成岩成矿作用提供了新的资料和证据。

关键词：治岭头钼铅锌金多金属矿床；辉钼矿 Re-Os 定年；成矿物质来源；东南沿海成矿带

中国东南沿海大陆边缘成矿带指浙江、福建、广东等地区，属于西太平洋成矿带的重要组成部分，区内发育大量与燕山期火山-侵入岩有关的斑岩型铜钼矿、脉状铅锌矿、浅成低温热液型金矿，如著名的紫金山铜金多金属矿以及治岭头钼铅锌金多金属矿等。其中治岭头矿床是上部（火山岩盖层）以铅锌矿床、硫矿床为主，中间（变质岩基底）以金银矿、铅锌矿为主，深部（侵入岩体）以斑岩型钼矿床为主的"三层楼"模式，是探索斑岩成矿系统的理想对象。

治岭头多金属矿位于绍兴-龙泉隆起带。绍兴-龙泉隆起带属于华南地块一部分，西以江山-绍兴断裂，东以丽水断裂为界，分别与江南古岛弧和东南沿海海西-印支褶皱带相连接。治岭头首先发现金矿，后陆续探明黄铁矿、金银矿、铅锌矿以及钼矿等矿产资源。迄今为止，众多的学者对治岭头多金属矿开展了研究，已经积累了丰富的资料（Liang Zihao et al.，1985；Zheng Minghua et al.，1986；Liu Jianming，1990；Zhang Yaxiong et al.，1995；Chen Haoshou et al.，1996；Hua Jiexiong et al.，2000；Mei Jianming，2001；Pu Weimin et al.，2008；Wang Keqiang et al.，2014；Wang Yongbin，2014）。前人对成矿年龄进行了不同方法的尝试，但矿床的成矿时代数据较多。Mei Jianming.（2001）获得该金矿床中的石英 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为139±18.6 Ma，为白垩纪早期成矿，并认为是伸展体制下火山、次火山热液叠加作用使八都群中的金矿化进一步富集而成，而早期的沉积变质作用仅使金达到矿化富集。Chen Haoshou et al.（1996）也测得治岭头金银矿床的成矿时代在135～145Ma左右；而王永彬（2014）获得铅锌矿闪锌矿 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 等时线年龄为108.3±8.3 Ma，斑岩体侵入年龄114.1±1.1 Ma（Wang Keqiang et al.，2014）。

众所周知，精确测定金属矿床的成矿时代，对于

注：本文为南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金项目（2018-LAMD-K10）和中国地质科学院基本科研业务费课题（编号 JYYWF20180601）共同资助成果。
收稿日期：2019-07-09；改回日期：2019-11-22；网络发表日期：2019-12-17；责任编委：毕献武；责任编辑：黄敏。
作者简介：楚克磊，男，1984年生。助理研究员，研究方向：矿床学与矿床地球化学。Email：chukelei@163.com。
引用本文：楚克磊，陈小荣，齐刚，高翔，胡博，李胜进．2020．浙江治岭头钼铅锌金多金属矿床矿质来源的硫、铅同位素示踪及成矿时代．地质学报，94(8)：2325～2340，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020034.
Chu Kelei，Chen Xiaorong，Qi Gang，Gao Xiang，Hu Bo，Li Shengjin. 2020. Sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material and ore-forming age of the Zhilingtou Mo-Pb-Zn-Au polymetallic deposit in the Zhejiang Province. Acta Geologica Sinica，94(8)：2325～2340.

正确认识矿床成因和控矿因素、总结成矿规律并指导找矿勘探工作都具有极为重要的意义(Zhai Yusheng et al.,1992;Chen Yuchuan et al.,1994;Mao Jingwen et al.,2000,2005)。辉钼矿 Re-Os 同位素测年技术被公认为是较为成熟的金属矿物测年手段,已广泛应用于直接厘定不同类型钼矿床和含钼多金属矿床成矿年龄的有效方法(Mao Jingwen et al.,2004,2006,2008;Xie Guiqing et al.,2007;Zheng Wei et al.,2016;Li Houmin et al.,2007;Yuan Shunda et al.,2012;Guo Chunli et al.,2014;Zheng Wei et al.,2013a,2017,2018)。本文利用辉钼矿 Re-Os 同位素定年法,对治岭头钼铅锌金多金属矿的成矿时限进行厘定,并对矿床中的斑岩体、围岩以及硫化物开展系统的 S、Pb 同位素对比分析,以期对成矿物质来源和形成机理进行初步探讨,为完善区内成矿年代学格架提供新的信息,同时为下一步在区域上开展同时期的多金属矿床找矿勘探提供重要的线索。

1 区域地质背景

中国东南沿海成矿带大地构造位置位于欧亚板块东南缘,是环太平洋巨型构造-岩浆活动带的重要组成部分。其处于政和-大浦断裂以东及邻区,自北东向南西跨过浙江、福建和广东沿海地区。历经华夏古陆的形成与裂解、扬子与华夏板块的碰撞拼合、太平洋板块与欧亚大陆板块的相互作用阶段(Shui Tao,1987;任纪舜等,1990;Zhao Fengqing et al.,1996)。东南沿海矿集区历经自太古宙古陆核形成以来的多期次岩浆活动,其中尤以中生代岩浆活动最为宏伟壮观(Wu Ganguo et al.,2004)。岩石类型齐全,从超基性-超酸性及碱性岩类均有,主要以酸性岩类为主。其中东南沿海地区三叠纪和侏罗纪岩浆作用相对于白垩纪较弱,前者主要由石英正长岩和石英二长岩组成(Mao Jingwen et al.,2013;Zhu Kongyang et al.,2013),后者主要包括混合岩、花岗质岩石和火山岩(Yui et al.,2009;Liu Qian et al.,2012;Li Zhengxiang et al.,2012;Huang Huiqing et al.,2013;Qiu Zengwang et al.,2017a)。白垩纪岩浆活动最为强烈并广泛分布,早期岩浆岩主要由火山岩和花岗岩组成(Wong et al.,2011;Jiang Yaohui et al.,2011;Guo Feng et al.,2012;Chen Jingyuan et al.,2014;Yang Shuiyuan et al.,2013;Zhou Jie et al.,2013;He Zhenyu et al.,2012;Zhu Kongyang et al.,2014),晚期岩浆岩主要由花岗岩和流纹岩组成,含少量玄武岩和辉长岩(Lan Chingying et al.,1996;Zhao Junhong et al.,2004;Guo Feng et al.,2012;Chen Jingyuan et al.,2013;Li Zhen et al.,2014;徐夕生,2008)。

东南沿海矿产丰富而富有特色(图 1),矿床的时空分布与构造应力场的转换、多期次岩浆、沉积作用等多因素密切相关,尤以中生代以来的成矿作用强度大、持续时间长,占据主导地位(Wu Ganguo et al.,2004)。在浙闽地区以形成铅、锌、金、银、铜、钼及非金属矿萤石、叶蜡石矿床为主,在粤东及粤西地区主要形成钨、锡、铅、锌、铜、金、银为主的矿床(Chen Yuchuan et al.,2014;Zheng Wei et al.,2018)。粤东和粤西地区成岩成矿受北东向与东西向深大断裂的共同控制,而在浙闽地区则以北东向走滑断裂系对成岩成矿起主导的控制作用(Xu Xiaochun et al.,1999;Zheng Wei,2018)。另外,浙闽粤沿海矿集区矿床的元素组合及空间展布还受区域火山岩基底地层含矿性的影响:如粤东地区的 Sn 矿化与金鸡组 Sn 的高含量有关,而浙闽地区 Au 矿化可能与区内出露的变质基底地层高背景值有关(Xu Xiaochun et al.,1999)。

2 矿区地质概况

治岭头矿区地层具有双层结构,基底为古元古界八都群变质岩,盖层为中生代上侏罗统大爽组火山碎屑岩和火山熔岩(图 2),两者呈角度不整合或断层接触。八都群变质岩出露于矿区南部,主要岩性包括黑云斜长片麻岩、斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、含石榴子石黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩等。矿区断裂构造、火山构造发育。尤其火山活动引起的环状断裂、放射状断裂与基底构造相叠加形成的多边环状断裂极为发育。矿区断裂构造具多期活动的特点,主要有北东向、北西向、近南北向和近东西向(Deng Xingen et al.,2010)。侵入岩主要为燕山期的花岗斑岩、闪长玢岩、辉绿岩、霏细斑岩、霏细岩等,侵位于基底八都群变质岩和大爽组火山岩中。

治岭头矿区矿产丰富,形成了贵金属金、银,有色金属铅、锌、钼及硫铁矿等矿产组合。矿区已探明的金银矿化带(图 3),位于华峰尖火山口北侧,呈“S”型展布,多为近东西走向,倾向西南或东南,走向上延伸超过 1400m,垂向上延深 200m 左右。金银矿体,呈网脉状和角砾状赋存于含石榴子石黑云斜长片麻岩等变质岩中。矿石矿物主要为金银矿、银金矿、闪锌矿、黄铁矿、方铅矿、磁黄铁矿,次为自然银、辉银矿、自然金、碲银矿、黄铜矿、硫锰矿等;脉石矿物主要为石英、蔷薇辉石,次为玉髓、绢云母、菱

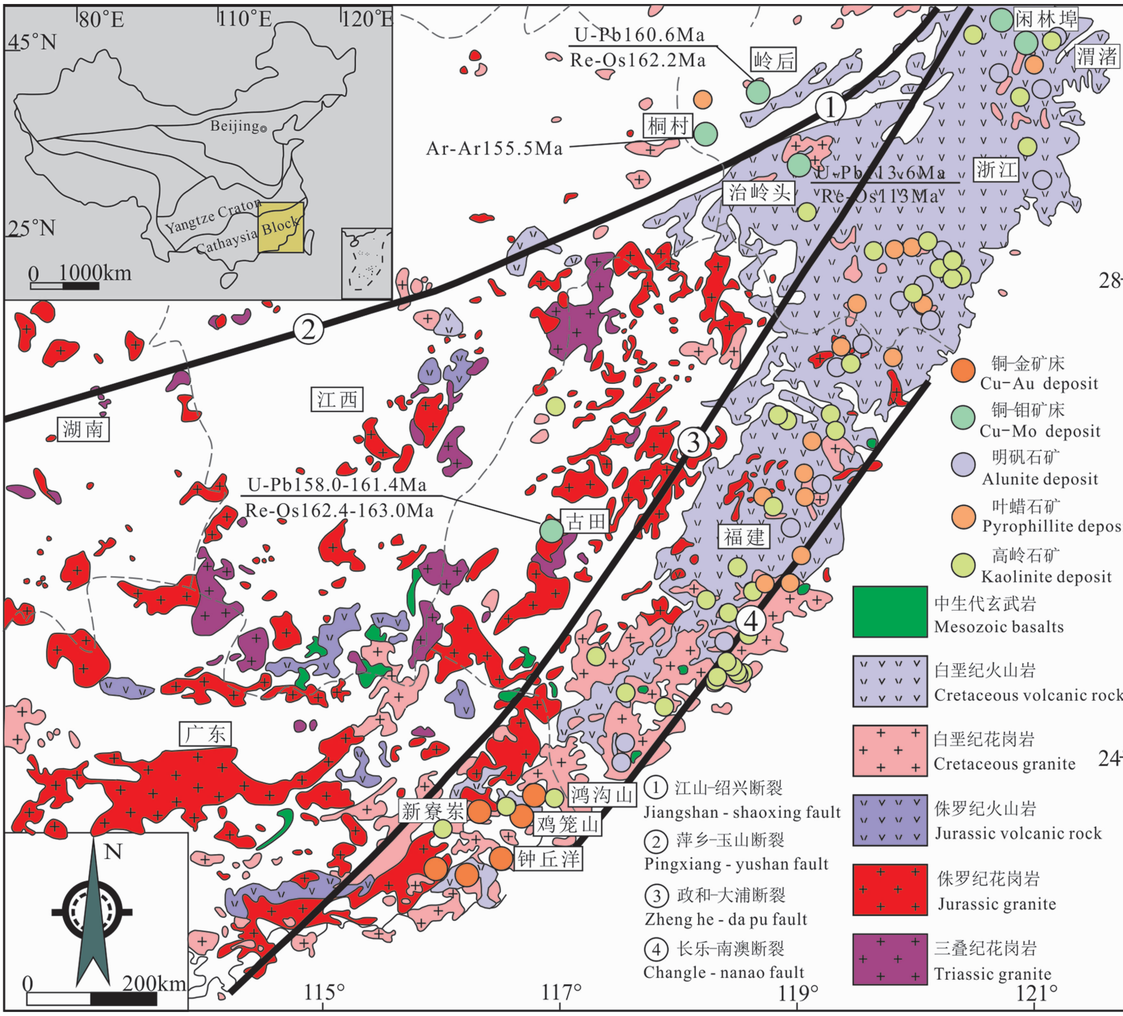

图 1　东南沿海地质简图及主要矿产分布图(据 Zhou Xinmin et al.,2006;Li Bin et al.,2016)

Fig. 1　Geological map of the southeast coast and the distribution of major minerals (after Zhou Xinmin et al.,2006;Li Bin et al.,2016)

锰矿等。围岩蚀变包括硅化、黄铁矿化、绢云母化和绿泥石化等。

铅锌矿分为隐爆角砾岩型铅锌矿和脉状铅锌矿。隐爆角砾岩型铅锌矿为中型铅锌矿床,位于华峰尖破火山口断陷边缘的西北侧,埋藏深度约 100m。铅锌矿体赋存在隐爆形成的火山岩中。脉状铅锌矿矿体呈脉状分布于距火山中心约 400～1000m 的范围,主要集中在华峰尖北部和东部的杨梅岗等地,另外在火山口西南治岭头以北也有分布。华峰尖北部矿段呈脉状、分枝复合状,走向长度约 450m,厚度为 0.25～11.20 m,平均厚 2.84m,倾向延深大于 200m,倾向 60°～70°。杨梅岗铅锌矿段为一中小型矿床,矿体呈脉状,受北北西向—近南北向的断裂构造控制,围岩为火山碎屑岩、变质岩与花岗斑岩。金属矿物以方铅矿、闪锌矿和黄铁矿等为主。脉石矿物主要包括石英、绿泥石、绿帘石、绢云母、长石、碳酸盐类矿物。矿石构造以浸染状、脉状、细脉状、斑杂状等为主,次为角砾状、团块状构造等。围岩蚀变类型主要包括绿泥石化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化和萤石化等。

钼矿呈细脉浸染状主要赋存于花岗斑岩和变质岩内。赋存标高在 100m 以下,其中 ZK1203 矿体总垂厚达 78.71m,最大单层垂厚为 40.99m,Mo 品位一般为 0.03%～0.10%,最高达 0.208%。新近完成的钻孔 ZK1204 揭示出 6 层钼矿体,累计垂直厚度超过 200m,其中 IV 号钼矿体垂直厚度 196.2m,平均含 Mo 0.06%。该孔最高品位处在斑岩体与变质岩接触带,含 Mo 达 0.63%。钼矿化主要以石英-钾长石-辉钼矿脉、石英-辉钼矿脉、辉钼矿细脉形式产出。围岩蚀变种类丰富,包括钾化、绢云母化、硅化、绿泥石化和绿帘石化等典型的斑岩型矿化蚀变类型。

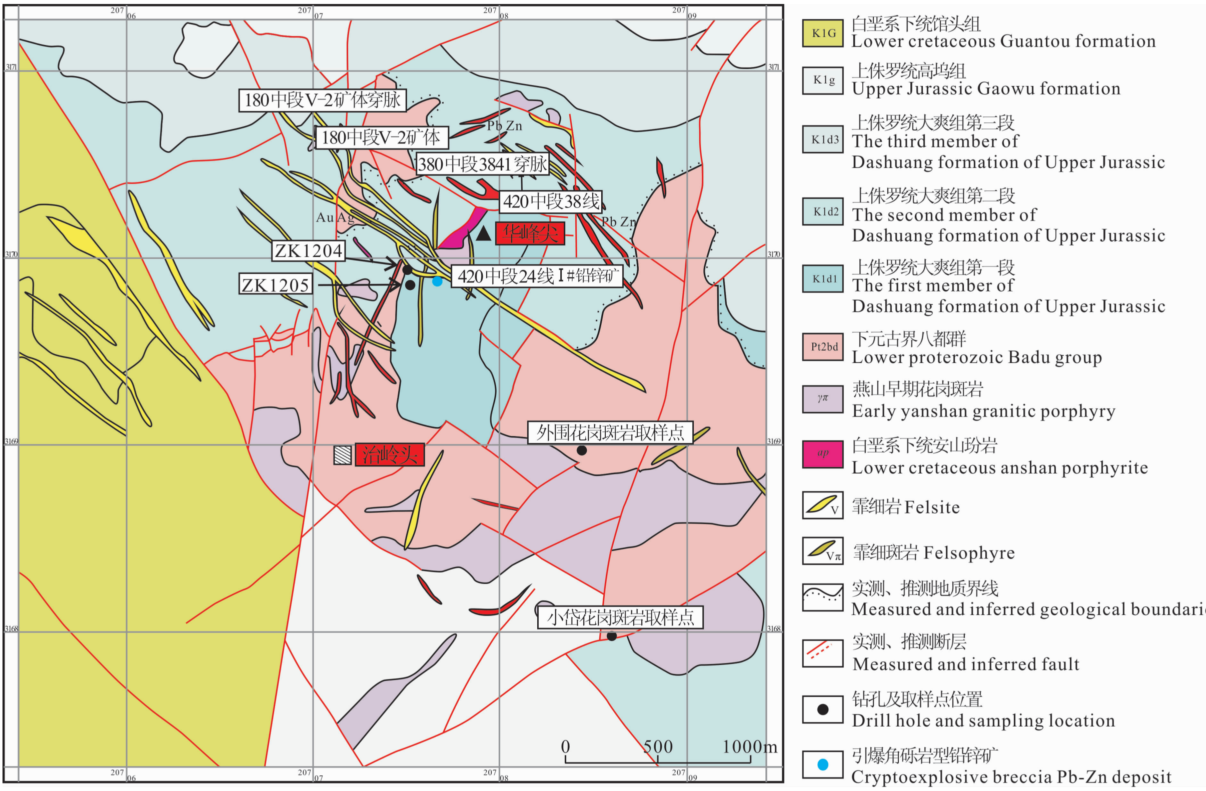

图 2 治岭头多金属矿床矿区地质图(据华杰雄等,2000)

Fig. 2 Geological map of Zhilingtou polymetallic deposit(after Hua Jiexiong et al. ,2000)

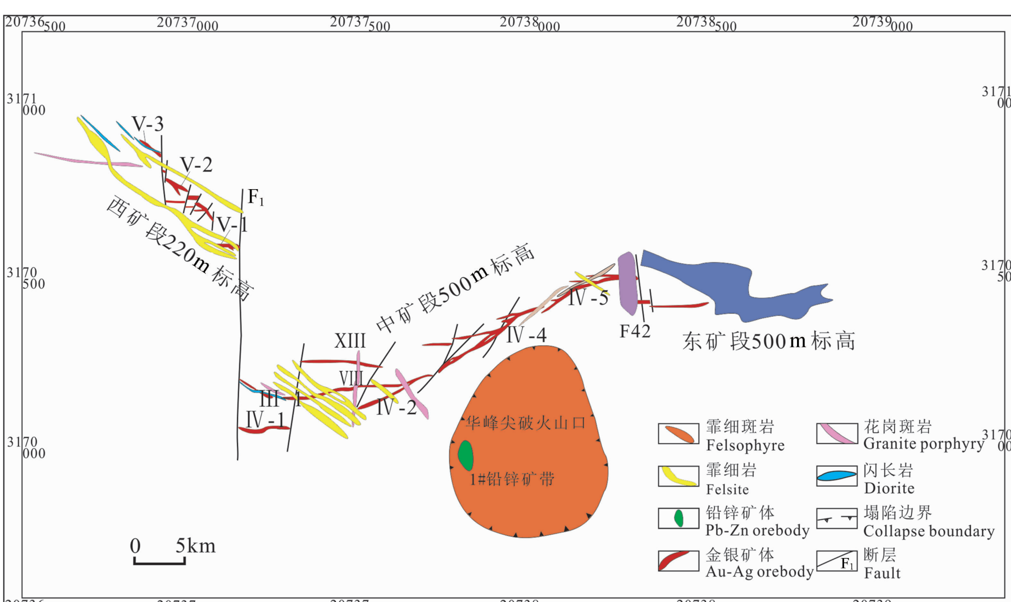

图 3 治岭头金银矿体中段展布图(据钱建民等,2007)

Fig. 3 The layout of the middle section of the gold-silver orebodies in the Zhilingtou deposit(after Qian Jianmin et al. ,2000)

3 样品采集及分析方法

3.1 Re-Os 同位素测年

为了精确厘定治岭头钼多金属矿床的成矿年龄,本文对该矿床进行了 Re-Os 同位素测年。用于 Re-Os 测年的 6 件辉钼矿样品均采自 ZK1204 钻孔,辉钼矿主要以浸染状和脉状等形式产出。Re-Os 同位素测年在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,分析方法和流程主要有样品的分解、Os 的蒸馏分离、Re 的萃取分离、质谱测定 4 个

步骤，详细流程见有关文献（Shirey et al.，1995；Du Andao et al.，2001；Du Andao et al.，2004）。Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、质谱测量的分馏校正误差、稀释剂的标定误差、待分析样品同位素比值测量误差。模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度（1.02%），置信水平 95%。辉钼矿的模式年龄计算采用公式如下：$t=1/\lambda[\ln(1+{}^{187}Os/{}^{187}Re)]$。上式中 ^{187}Re 衰变常数 $\lambda=1.666\times10^{-11}\ a^{-1}$（相对不确定度 1.02%）（Shen et al.，1996）。

3.2　S、Pb 同位素分析

本次工作主要分析了石英硫化物阶段的矿石矿物黄铁矿、闪锌矿和方铅矿以及花岗斑岩和赋矿围岩片麻岩样品的 S、Pb 同位素。从中选取具有代表性的样品，经手工进行逐级破碎、过筛在双目镜下挑选 40～60 目，纯度＞99%的单矿物样品 0.5g 以上。将挑纯后的单矿物样品在玛瑙钵里研磨至 200 目以下，送实验室进行分析。S、Pb 同位素在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。硫同位素由 MAT-251 同位素质谱仪进行测定，采用 VCDT 国际标准，分析精度为±0.2‰；铅同位素比值利用 ISOPROBE-T 热电离质谱仪测定，$^{208}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$、$^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值误差小于 0.05%。

4　分析结果

4.1　辉钼矿 Re-Os 年龄

选自治岭头多金属矿床的 6 个辉钼矿样品的 Re-Os 同位素测试结果如表 1 所示。由表 1 可见，辉钼矿中 ^{187}Re 和 ^{187}Os 含量变化非常小，^{187}Re 为 $10087\times10^{-9}\sim41662\times10^{-9}$，$^{187}Os$ 为 $19.14\times10^{-9}\sim79.29\times10^{-9}$。6 个辉钼矿样品的 Re-Os 模式年龄介于 113.7～114.6 Ma 之间，利用 Isoplot 软件（Ludwig，2003）得到其等时线年龄为 114.3±1.1 Ma（图 4）。

表 1　浙江治岭头多金属矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素测年结果

Table 1　Re-Os isotopic analyses of molybdenites from the Zhilingtou polymetallic deposit in Zhejiang Province

样号	样重(g)	Re ($\times10^{-9}$)		普 Os ($\times10^{-9}$)		^{187}Re ($\times10^{-9}$)		^{187}Os ($\times10^{-9}$)		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
ZLT-1	0.01655	59708	787	0.0114	0.0009	37528	495	71.72	0.43	114.6	2
ZLT-2	0.01507	66286	852	0.0219	0.001	41662	536	79.29	0.47	114.1	2
ZLT-3	0.0151	31831	316	0.0327	0.001	20006	199	37.98	0.23	113.8	1.7
ZLT-4	0.01517	45051	367	0.0318	0.001	28316	231	53.93	0.33	114.2	1.6
ZLT-5	0.01522	16049	115	0.0215	0.0009	10087	72	19.14	0.12	113.8	1.6
ZLT-6	0.0152	49529	472	0.0518	0.0009	31130	297	59.03	0.42	113.7	1.8

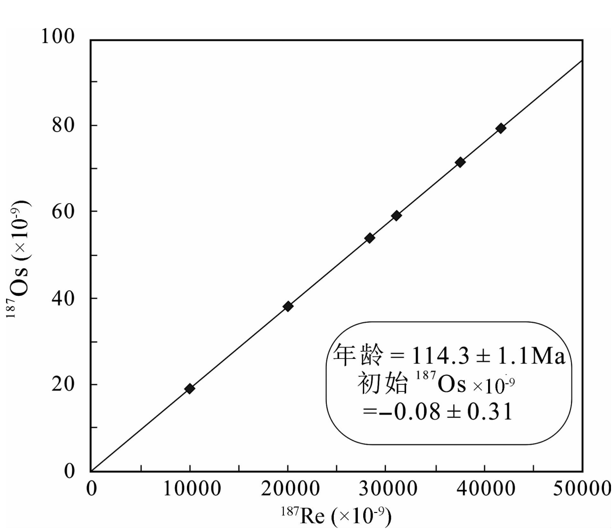

图 4　浙江治岭头多金属矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 4　Re-Os isochron age diagram for molybdenite samples from the Zhilingtou polymetallic deposit in Zhejiang Province

4.2　硫同位素组成

治岭头矿床矿石硫化物的 S 同位素组成见表 2。32 件样品 $\delta^{34}S$ 值变化于 2.3‰～7.6‰之间，极差为 5.3‰，平均值为 5.2‰。其中，6 件西矿段含金石英脉中的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 3.3‰～4.8‰，极差为 1.5‰，平均值为 3.95‰；7 件片麻岩中的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 6.3‰～7.6‰，极差为 1.3‰，平均值为 7‰；8 件方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为 2.3‰～4.8‰，极差为 2.5‰，平均值为 3.8‰；8 件闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值为 5.8‰～6.8‰，极差为 1‰，平均值为 6.2‰；5 件花岗斑岩 $\delta^{34}S$ 值为 5.8‰～6.2‰，极差为 0.4‰，平均值为 5.9‰；3 件片麻岩 $\delta^{34}S$ 值为 5.1‰～6.2‰，极差为 1.1‰，平均值为 5.63‰。王永彬（2014）曾测得 8 件辉钼矿 $\delta^{34}S$ 值为 6.9‰～7.6‰，极差为 0.7‰，平均值为 7.2‰。

4.3　铅同位素组成

本次研究对治岭头矿床中的 24 个金属硫化物（6 个含金矿石英脉中的黄铁矿，6 个斑岩体及赋矿围岩中的黄铁矿，7 个闪锌矿以及 5 个方铅矿）进行了普通铅同位素分析，并对比了 3 个赋矿围岩和 5 个

表 2 浙江治岭头多金属矿床硫同位素测试结果

Table 2 Sulfur isotopic analytical results from the Zhilingtou polymetallic deposit in Zhejiang Province

序号	样号	测定矿物	岩性	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$(‰)				平均值
				数值	变化范围	极差	平均	
1	V-1	黄铁矿	含金石英脉	4.2				
2	V-2-1	黄铁矿	含金石英脉	3.5				
3	V-2-2	黄铁矿	含金石英脉	4.8				
4	V-3-2	黄铁矿	含金石英脉	3.3				
5	V-3-3	黄铁矿	含金石英脉	4.2				
6	F1-(1-4)	黄铁矿	断层中的含金石英脉	3.7				
7	D07-1	黄铁矿	含铅锌矿片麻岩	6.7	3.3～7.6	4.3	5.6	
8	D08	黄铁矿	含铅锌矿片麻岩	7.6				
9	540-1-2	黄铁矿	含铅锌矿片麻岩	6.7				
10	540-3-1	黄铁矿	含铅锌矿、黄铁矿钾化片麻岩	7.1				
11	2007-23	黄铁矿	片麻岩	7.1				
12	2007-24	黄铁矿	片麻岩	6.3				
13	2007-15	黄铁矿	片麻岩	7.2				
14	D08	方铅矿	片麻岩	4.5				
15	D09-1	方铅矿	片麻岩	4.3				
16	D09-2	方铅矿	片麻岩	2.3	2.3～4.8	2.5	3.8	
17	540-1-1	方铅矿	片麻岩	4.8				
18	540-3-1	方铅矿	片麻岩	4.3				5.43
19	2007-7	方铅矿	片麻岩	2.4				
20	D06-1	闪锌矿	片麻岩	6.1				
21	D07-1	闪锌矿	片麻岩	5.8				
22	D07-2	闪锌矿	片麻岩	6.4				
23	D08	闪锌矿	片麻岩	5.8	5.8～6.8	1	6.2	
24	540-1-2	闪锌矿	片麻岩	6.2				
25	540-3-1	闪锌矿	片麻岩	6				
26	2007-2	闪锌矿	片麻岩	6.3				
27	2007-15	闪锌矿	片麻岩	6.8				
28	zk12-01	花岗斑岩	花岗斑岩	6.2				
29	zk12-06	花岗斑岩	花岗斑岩	5.7				
30	zk12-09	花岗斑岩	花岗斑岩	5.8	5.8～6.2	0.4	5.9	
31	zk12-11	花岗斑岩	花岗斑岩	6				
32	zk12-14	花岗斑岩	花岗斑岩	5.8				
33	zk12-35	片麻岩	片麻岩	5.6				
34	zk12-37	片麻岩	片麻岩	6.2	5.1～6.2	1.1	5.63	
35	zk12-41	片麻岩	片麻岩	5.1				

花岗斑岩样品的 Pb 同位素数据，测试结果如表 3 所示。

含金石英脉中的 6 个黄铁矿样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.015～18.354，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.638～15.783，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 38.477～39.469；斑岩体及赋矿围岩中的黄铁矿样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 17.999～18.177，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.412～15.716，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 38.841～39.12；7 个闪锌矿样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 17.985～18.073，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.658～15.761，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 38.914～39.219；5 个方铅矿样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.012～18.095，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.643～15.732，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 38.875～39.17；5 个花岗斑岩样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.109～18.335，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.636～15.657，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 39.092～39.544；3 个片麻岩样品 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.249～18.457，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为 15.639～15.662，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值为 39.259～39.705。

5 讨论

5.1 成矿时代和成矿期次

利用金属矿物进行同位素测年可以直接获取成矿年龄，并随着分析测试技术的快速发展正逐渐成为成矿年代学研究的趋势（Yuan Shunda et al.，2008，2012；Zheng Wei et al.，2013b，2017）。本次测试的 6 件辉钼矿样品等时线年龄为 114.3±1.1 Ma，为治岭

表 3　浙江治岭头多金属矿床铅同位素测试结果

Fig. 3　Pb isotope data in ore mineral from the Zhilingtou polymetallic deposit in Zhejiang Province

序号	样号	样品描述	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	T/Ma	μ	ω	Th/U
1	V-1	含金石英脉中的黄铁矿	18.354	15.638	38.477	255	9.54	41.1	4.17
2	V-2-1	含金石英脉中的黄铁矿	18.068	15.783	39.469	620	9.87	44.9	4.4
3	V-2-2	含金石英脉中的黄铁矿	18.028	15.738	39.382	598	9.79	44.29	4.38
4	V-3-2	含金石英脉中的黄铁矿	18.015	15.698	39.195	563	9.71	43.11	4.3
5	V-3-3	含金石英脉中的黄铁矿	18.037	15.748	39.297	603	9.81	43.96	4.34
6	F1-(1-4)	含金石英脉中的黄铁矿	18.073	15.735	39.233	564	9.78	43.29	4.28
7	D07-1	片麻岩中的黄铁矿	18.078	15.412	39.096	174	9.13	39.26	4.16
8	D08	片麻岩中的黄铁矿	18.084	15.716	39.12	536	9.74	42.51	4.22
9	540-1-2	片麻岩中的黄铁矿	18.177	15.711	39.105	466	9.71	41.79	4.17
10	540-3-1	片麻岩中的黄铁矿	18.052	15.678	38.993	515	9.66	41.76	4.18
11	2007-23	片麻岩中的黄铁矿	17.999	15.651	38.841	521	9.62	41.15	4.14
12	2007-15	片麻岩中的黄铁矿	18.014	15.663	38.88	524	9.64	41.35	4.15
13	D06-1	闪锌矿	18.057	15.687	39.005	522	9.68	41.87	4.19
14	D07-1	闪锌矿	18.073	15.708	39.074	534	9.72	42.3	4.21
15	D07-2	闪锌矿	18.064	15.694	39.03	525	9.69	42.01	4.2
16	D08	闪锌矿	17.985	15.761	39.219	652	9.84	44.11	4.34
17	540-1-2	闪锌矿	18.029	15.677	38.974	530	9.66	41.81	4.19
18	540-3-1	闪锌矿	18.017	15.658	38.914	517	9.63	41.43	4.16
19	2007-15	闪锌矿	18.05	15.717	39.063	560	9.74	42.49	4.22
20	D08	方铅矿	18.012	15.662	38.936	525	9.64	41.6	4.18
21	D09-1	方铅矿	18.044	15.675	38.953	517	9.66	41.6	4.17
22	D09-2	方铅矿	18.047	15.68	38.958	521	9.67	41.66	4.17
23	540-1-1	方铅矿	18.095	15.732	39.17	546	9.77	42.83	4.24
24	540-3-1	方铅矿	18.024	15.643	38.875	495	9.6	41.06	4.14
25	ZK12-01	花岗斑岩	18.291	15.644	39.423	307	9.56	41.72	4.22
26	ZK12-06	花岗斑岩	18.109	15.649	39.092	442	9.6	41.52	4.19
27	ZK12-09	花岗斑岩	18.335	15.643	39.544	274	9.56	41.94	4.25
28	ZK12-11	花岗斑岩	18.248	15.657	39.348	353	9.59	41.82	4.22
29	ZK12-14	花岗斑岩	18.23	15.636	39.115	341	9.56	40.72	4.12
30	ZK12-35	片麻岩	18.457	15.659	39.705	206	9.57	42.02	4.25
31	ZK12-37	片麻岩	18.426	15.639	39.564	204	9.54	41.42	4.2
32	ZK12-41	片麻岩	18.249	15.662	39.259	358	9.6	41.48	4.18

头钼多金属矿床提供了一个准确的形成时限。王科强等(2014)获得治岭头花岗斑岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年龄为 114.1±1.1 Ma，其与治岭头矿床成矿年龄在误差范围内基本一致，反映出该矿区成岩成矿作用主要发生于早白垩世晚期。

大量高精度成岩成矿年龄数据的积累，对认识重大成岩成矿事件非常重要。本文在梳理前人工作成果的基础上，认为东南沿海成矿带燕山晚期矿床可归纳为四个成矿系列：

(1)浙闽粤与侏罗纪斑岩-次火山岩有关的 Cu、Mo、Au、Sn 矿床成矿系列，矿床类型主要以斑岩-矽卡岩型为主。例如，粤东地区新识别出 161 Ma 的新寮岽斑岩 Cu-Mo 矿(Wang Xiaoyu et al.，2016)，157 Ma 的钟丘洋斑岩型 Cu 矿、156 Ma 年的鸿沟山和鸡笼山斑岩型 Cu-Au 矿(Mao Jingwen et al.，2017)以及鹅地铜多金属矿、玉水铜矿等；粤西新识别出的旗鼓岭斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo 矿形成于 165 Ma(Zheng Wei et al.，2018)以及茶地、芒饿岭、文光岭、地豆岗和陂头面等铜多金属矿(Zheng Wei et al.，2015a、b)；闽西古田斑岩 Cu-Mo 矿形成于 158～161 Ma 之间(Li Bin et al.，2016)，峰岩和丁家山等钼铅锌多金属矿斑岩成矿系统(与金东公司内部交流，156～160 Ma 之间)等；浙江地区的岭后矽卡岩型 Cu-Mo 矿的辉钼矿 Re-Os 年龄为 162.2±1.4 Ma(Tang Yanwen et al.，2017a)，桐村斑岩 Mo-Cu 矿绢云母 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄为 155.5±0.9 Ma(Tang Yanwen et al.，2017b)；在江西地区产出有 170 Ma 左右的德兴斑岩 Cu-Au-Mo 矿床(Guo Shuo et al.，2012)、156 Ma 的永平矽卡岩型 Cu-Mo-W 矿(Li Xiaofeng et al.，2012)和 154 Ma 的龙头岗矽卡岩型 Cu-Mo-W 矿(Wu Shenghua et al.，2015)，表明越来越多的侏罗纪斑岩铜多金属矿床正逐渐被识别和

发现。斑岩型矿床是一种极为重要的指示俯冲作用的矿床类型。越来越多的侏罗纪斑岩铜多金属矿床逐渐被发现，表明沿着中国东部东南沿海可能存在一个中晚侏罗世的大陆岩浆弧和相关的斑岩铜矿带。不过这个斑岩铜矿带的大部分被白垩纪的安山质岩石所覆盖，使得对东部陆缘不同区段的岩浆与成矿特征、时空变化、成因以及相互间对比还缺乏很好的限定，因此在白垩纪火山岩覆盖区的深部存在侏罗纪斑岩铜矿。这也与180 Ma左右Izanagi板块或古太平洋板块开始向欧亚大陆发生斜向俯冲，中国东部大陆边缘成为活动大陆边缘的认识相吻合(Maruyama et al.,1997;Mao Jingwen et al.,2014,2017;Zheng Wei et al.,2018)。

(2)浙闽粤早白垩纪与侵入岩有关的Cu、Mo、Au、W、Sn、Nb、Ta矿床成矿系列，主要分布在福建南部和广东东部，矿床类型比较复杂，其中，与中酸性次火山岩浅成斑岩侵入体有关的斑岩-浅成低温热液铜金矿床称为紫金山式，与斑岩-次火山岩有关的钨矿称为莲花山式、锡铅锌银矿床称为厚婆坳式(Wang Denghong et al.,2005)，与花岗岩有关的锡铜铅锌多金属矿床成为金坑式。福建紫金山矿田内的岩浆活动分为晚侏罗世花岗岩和白垩纪火山侵入杂岩两个体系，矿化围绕着中酸性次火山岩分布，与英安玢岩以及隐爆角砾岩关系密切。其中火山-次火山活动发生于110～100 Ma，也是紫金山-二庙沟铜、金主要成矿期(Li Bin et al.,2017)，与本文研究的治岭头多金属矿床形成时代相近。罗卜岭Cu-Mo矿形成于105 Ma(Zhong Jun et al.,2014)，其与福安赤路斑岩钼矿床(105～106 Ma, Zhang Keyao et al.,2009)、石菉和天堂斑岩-矽卡岩型铜钼多金属矿(102～104 Ma, Zheng Wei et al.,2013a;Zheng Wei,2016)形成时代相一致。粤东莲花山斑岩钨矿矿化赋存在石英斑岩的内外接触带，具有斑岩型矿床的蚀变分带(钾化、云英岩化、绿泥石化、绢云母化和青磐岩化)，形成于133 Ma(Liu Peng et al.,2018)。粤东主要形成与斑岩-次火山岩有关的锡矿称为长埔式。长埔锡多金属矿床是一中型热液脉型锡多金属矿床，与石英斑岩(145 Ma)密切相关，蚀变类型主要包括电气石化、硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化(Qiu Zengwang et al.,2016)。同类型的与高分异I型花岗岩有关的金坑Sn-Cu-Pb-Zn矿形成于139～145Ma之间(Qiu Zengwang et al.,2017b)，以及塌山Sn-Pb-Zn矿形成于138 Ma(Shen Weizhou et al.,1994)。东南沿海的白垩纪火山岩很发育，强烈喷发的陆相火山岩一般伴随有次火山岩，并且保存有发育良好的火山机构，有利于斑岩型铜、金多金属矿床和浅成低温热液型金矿床的形成与保存，但目前已知的矿床很少，是已经被剥蚀？还是由于勘查力度不够、自然条件等外部原因导致？

(3)浙闽粤晚白垩纪与火山岩有关的Pb、Zn、Ag以及非金属矿床成矿系列。包括浙江后岸银矿床、千官岭金银矿床、大岭口银铅锌矿床、五部式铅锌银矿、青田式叶蜡石矿床、矾山式明矾石矿床、老虎头式沸石矿床和武义式萤石矿床等。浙江后岸银矿床形成于75～85 Ma之间，大岭口银铅锌矿床形成于100 Ma(Yin Jiaheng et al.,1989)。浙江东部与火山岩有关的非金属超大型矿床，如武义盆地内的萤石矿矿化年龄为80～95 Ma(Zhang Yongjia,1995)。

(4)浙闽粤与晚白垩纪侵入岩有关的W、Sn、Mo、Bi多金属矿床成矿系列。包括广东鹦鹉岭锡钨多金属矿的形成时代为83.0±1.7 Ma(Zheng Wei et al.,2013a)，阳春脉状锡矿为76 Ma(Yu Jinsheng et al.,1988)，银岩斑岩型锡矿的矿化年龄为78.65±0.98 Ma(Zheng Wei et al.,2016)，大金山钨锡矿辉钼矿的Re-Os年龄为82.5±3.1 Ma(Yu Changfa et al.,2012)，锡坪钼多金属矿床的辉钼矿Re-Os年龄为89.9±3.4 Ma(Zheng Wei et al.,2017)，小南山以及锡山钨锡矿的形成时代分别为78.3±2.7 Ma和79.41±1.11 Ma(Zheng Wei et al.,2015;Zheng Wei et al.,2017)。综上所述，白垩纪晚期粤西地区发生了大规模的钨锡矿化。

5.2 成矿物质来源

成矿物质来源是矿床地球化学研究中的一项重要内容，也同时制约着成矿地质体的确定。硫是矿床中成矿金属元素迁移、富集、沉淀的重要矿化剂，通过硫同位素组成的研究，可以帮助了解和判断成矿物质的来源(Ohmoto,1986)，进而探讨矿床成因(Zhang Ligang et al.,1985;Zheng Wei et al.,2012)。目前硫同位素组成特征已经成为判断硫源及成矿物质来源的主要工具，然而对于矿床中硫的来源讨论必须根据硫化物沉淀期间热液的总硫同位素组成加以探讨分析(Zheng Yongfei et al.,2000)。由于热液成矿作用过程中的硫同位素分馏效应取决于体系总硫同位素组成、离子强度、氢离子浓度、氧逸度及温度等多方面因素，因此由热液成矿作用形成的硫化物和硫酸盐的$\delta^{34}S$值一般不等于热液总

的 $\delta^{34}S$ 值(Ohmoto,1972)。但是在一定条件下可以根据矿床的矿物组合关系估计成矿流体的硫同位素组成。Ohmoto(1972)提出如果热液体系中不存在硫酸盐类矿物，同时矿物组合比较简单时，硫化物的 $\delta^{34}S$ 值可以大致代表热液的总硫同位素组成。Zhang Ligang et al.,(1985)和 Zheng Yongfei et al.,(2000)认为在硫同位素分馏达到平衡的条件下，共生硫化物的 $\delta^{34}S$ 值按辉钼矿→黄铁矿→磁黄铁矿→闪锌矿→黄铜矿→方铅矿的顺序递减。治岭头钼多金属矿床发育的硫化物主要为黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿和斑铜矿，矿物组合比较简单，反映出成矿热液中不同价态的硫之间以及不同成矿阶段的硫同位素分馏较弱。同时，治岭头矿床矿石矿物硫同位素值 $\delta^{34}S$ 显示辉钼矿 > 黄铁矿(片麻岩中) > 闪锌矿 > 方铅矿的富集规律，表明含矿流体在成矿过程中达到硫同位素分馏平衡(图 5)，硫化物的硫同位素基本能代表成矿流体的硫同位素组成。硫化物的硫同位素组成变化范围较窄(−2.1‰～2.6‰)，表明治岭头钼多金属矿床硫同位素可能主要来自上地幔或下地壳的深源岩浆，具有相对均一的硫源，但也可能受到陆壳沉积物源硫的混染。

金属硫化物中通常含有一定量的 Pb，且 U、Th 含量很低，所以金属硫化物结晶以后通过衰变作用

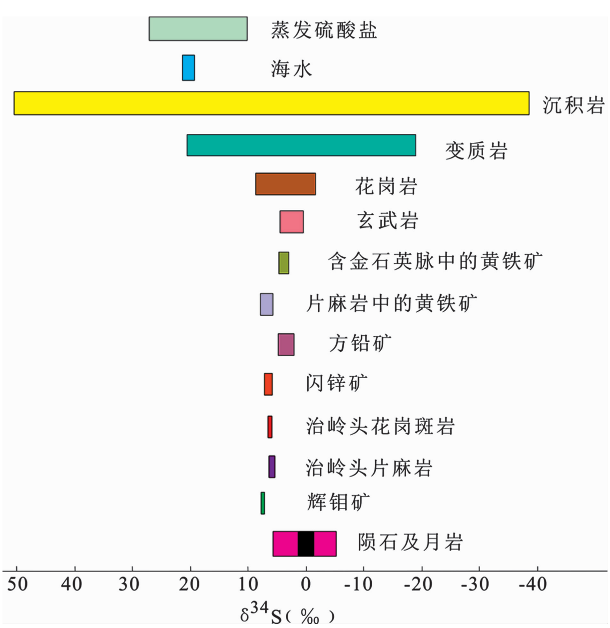

图 5　浙江治岭头钼多金属矿床的 S 同位素组成分布图(底图据 Li Shengrong et al.,2014)

Fig. 5　The $\delta^{34}S$ values from the Zhilingtou polymetallic deposit in Zhejiang Province (References for the ranges of major sulphur reservoirs are from Li Shengrong et al., 2014)

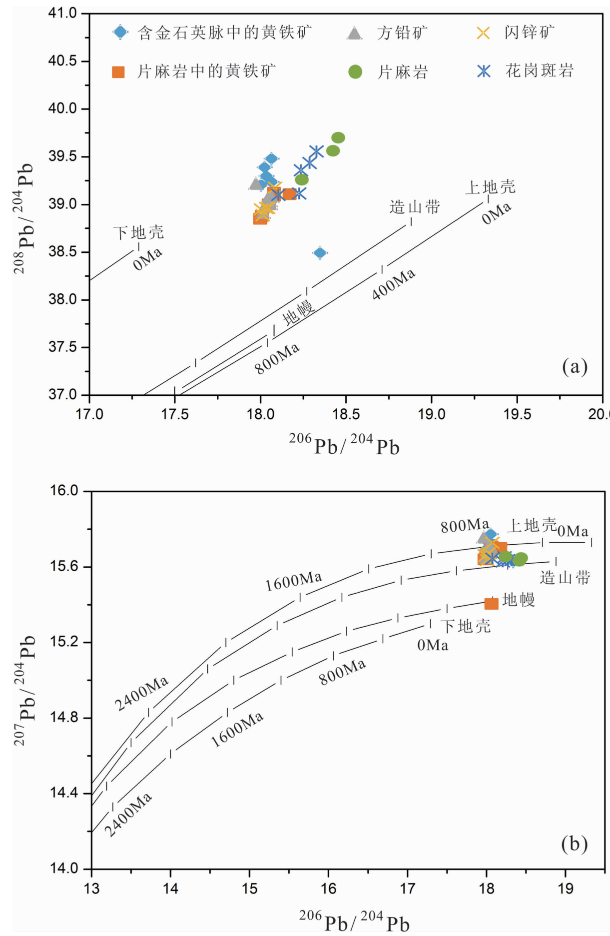

图 6　治岭头钼多金属矿床的赋矿岩石和矿石 $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ (a) 和 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ (b) 构造模式图解(Zartman et al.,1981)

Fig. 6　$^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ (a) 和 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ (b) tectonic pattern illustration of ore-forming rocks and ore in the Zhilingtou molybdenum polymetallic deposit (after Zartman et al.,1981)

所产生的放射性成因铅的含量非常低，对硫化物铅同位素组成的影响可以忽略不计(Wei Juying et al.,1988)。同时利用岩浆岩、矿石、地层和基底铅同位素综合对比的方法来研究矿石铅来源，能够更精确地探析矿床成矿流体的来源，因此 Pb 同位素也被广泛应用于成矿物质来源的示踪研究。$^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$铅同位素构造模式图解(图 6a)显示该矿床的矿石铅比较集中，落在造山带和下地壳之间。同样在 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 铅同位素构造模式图解(图 6b)中，矿石铅也比较集中，落在地幔和上地壳之间。

同时，特征值中 μ 值等的变化也可以提供地质体经历的某些地质作用的信息，反映铅的来源。从表 3 中由两阶段铅演化模式计算的参数(μ、w、Th/

U)看，不同样品的 μ、w、Th/U 模式值均有一定的变化，说明其来源并不单一，无论是黄铁矿、辉钼矿，还是方铅矿、闪锌矿，它们的铅同位素均具有非单一阶段的演化，表明可能是有不同的源区或在演化过程中有不同源区物质的混入(Meng Xiangjin et al.，2006)。一般认为来自下部地壳或者上地幔的铅 μ 值比较低(Zhu Shangqing et al.，1988)。据 Doe et al.(1979)资料显示，地幔环境的 μ 值为 8.92，造山带 μ 值为 10.87。由表 3 可知，治岭头钼多金属矿床的矿石矿物铅同位素 μ 值变化较小，比较集中，μ 值从 9.13～9.87，明显高于地幔 μ 值(8.92)而低于造山带 μ 值(10.87)，同样显示铅的来源可能为壳幔混源。其他特征值如 μ、w、Th/U、U/Pb 和 Th/Pb 比值均基本相同，反应来源的相似性(Fei Guangchun et al.，2011)。

Re-Os 同位素体系不仅可以精确确定矿床形成的时间，还可以示踪成矿物质来源以及指示成矿过程中不同来源的物质混入的程度。Mao Jingwen et al.(1999)和 Stein et al.(2001)的研究认为，从壳源、壳幔混源到幔源，辉钼矿的 Re 含量各递升一个数量级，从 $n\times10^{-6}\rightarrow n\times10^{-5}\rightarrow n\times10^{-4}$(Mao Jingwen et al.，2003)。由表 1 可以看出，治岭头钼多金属矿床 6 个辉钼矿的 Re 含量基本都在 16.05×10^{-6} 与 66.29×10^{-6} 之间，同样显示该矿床的成矿物质可能来自于壳幔混合来源。

5.3 成矿机制

矿区内与多金属矿化紧密共生的围岩主要为八都群变质岩、白垩纪火山岩、花岗斑岩及各种脉岩。Zheng Minghua et al.(1986)研究发现代表八都群原始含金背景的矿区外围大面积变质岩，以含金平均值低和数据集中为特征，但当夹有相当数量的火山物质时，其含量则可能升高。能够代表矿区变质岩含金原始丰度的远矿无蚀变变质岩，含金量普遍较高，其平均值为 11.9×10^{-9}，是区域背景值的六倍，是地壳克拉克值的三倍，而此地段变质岩的含银量更为突出(平均达 600×10^{-9})。可见，原岩以火山物质为主的治岭头矿区变质岩，是八都群地层大面积贫金的背景上，金银等成矿元素初步聚集的原始异常地段，表明金银矿床在该区产出绝非偶然。曾受矿液活动影响的矿带两侧的变质岩，含金量则显著降低，平均仅 4.77×10^{-9}。据此可以推断，此地段变质岩中的金曾发生过大规模的迁移。Hua Jiexiong et al.(2000)对矿区内不同地质体开展成矿元素分析，结果显示流纹岩、花岗斑岩、霏细斑岩的 Pb、Zn 平均含量高于其他地质体，比维氏地壳酸性岩 Pb、Zn 丰度值高几倍-几十倍。显然这些岩浆分异形成的热液具备提供成矿元素的条件。结合本次 S、Pb 同位素测试结果，可以推测铅锌矿化、钼矿化与该地区早白垩世晚期(110 Ma)的火山-岩浆活动有关。Zhao Chao et al.(2014)对治岭头斑岩钼矿体流体包裹体研究表明，成矿期发生了强烈的流体沸腾作用，导致钼矿化富集沉淀，同时发育大量的钾化和黄铁绢英岩化，为典型的斑岩型矿化。氢氧同位素研究表明该成矿流体由成矿前、成矿期的岩浆热液演化为成矿后的大气降水为主。Pu Weimin et al.(2008)和 Mao Weixiong et al.(2001)针对隐爆角砾岩型铅锌矿和脉状铅锌矿的流体包裹体研究表明，成矿热液为中低温中低盐度，流体混合可能是铅锌矿化沉淀的主要原因。

135 Ma 之后，由于太平洋板块沿 NNE 向走滑断裂带向北大规模走滑，使得中国大陆处于持续伸展阶段(Mao et al.，2008a，2008b)。在早白垩世晚期，治岭头矿区同样处于拉张伸展环境，软流圈上涌引发上地幔部分熔融，所产生的玄武质岩浆侵位于下地壳底部，诱发中下地壳的广泛熔融而形成含成矿物质的酸性岩浆房，早期受到酸性岩浆屏蔽作用的阻碍而难以继续上升，主要是酸性岩浆沿断裂上升并喷发到地表，形成隐爆角砾岩筒和断裂组成的火山机构，成为良好的导矿-容矿空间(Wang Yongbin et al.，2014)；后期，玄武质岩浆和酸性岩浆混合形成的花岗质岩浆，其演化分异出携带大量金属元素的高温、高盐度的 H_2O-NaCl 流体发生沸腾作用，形成斑岩钼矿化(Zhao Chao et al.，2014)。同时，一部分流体沿隐爆角砾岩筒向上迁移，形成角砾岩型铅锌矿；一部分流体沿火山机构伴生断裂向上迁移，与加热循环的大气水混合，形成脉状铅锌矿(Wang Yongbin，2014)。治岭头矿区斑岩钼矿、浅成低温热液型铅锌矿和远程热液型金银矿共存，在垂向上和平面上均具有从斑岩体向外出现斑岩钼矿、浅成低温热液型铅锌矿和远程热液型金银矿的分布规律。在岩浆活动中心的外围断裂系统，尤其是古韧性剪切带中的引张部位，是寻找远程热液型金矿的重要部位。

6 结论

(1)治岭头钼铅锌金多金属矿床的 6 件辉钼矿样品模式年龄的变化范围为 113.7～114.6 Ma，等时线年龄为 114.3±1.1 Ma，表明成矿作用发生于

早白垩世晚期。

(2)治岭头矿床辉钼矿的^{187}Re 含量为 16.05×10^{-6}～66.29×10^{-6}，显示成矿物质可能主要来自于壳幔混源。矿石硫同位素组成变化范围较窄(−2.1‰～2.6‰)，达到同位素分馏平衡，可能主要来自上地幔或下地壳的深源岩浆，具有相对均一的硫源，但也受到陆壳沉积物源硫的混染。治岭头钼铅锌金多金属矿床矿石铅同位素组成变化范围比较小，^{208}Pb/^{204}Pb、^{207}Pb/^{204}Pb、^{206}Pb/^{204}Pb 的范围分别为 38.765～39.137、15.523～15.751、18.450～18.667，具有明显的壳幔混合特征。

(3)治岭头矿区斑岩钼矿、浅成低温热液型铅锌矿和远程热液型金矿共存是同一构造-岩浆-热事件的产物，成矿时间具有一致性，成矿空间具有明显的分带性：即从岩体内外接触带向外或向上依次为斑岩钼矿、浅成低温热液型铅锌矿和远程热液型金矿，构成一个矿床组合模型。在这个模型中，不同类型矿床互为找矿标志。在岩浆活动中心的外围断裂系统，是寻找远程热液金矿的重要部位。

致谢：审稿专家给论文提出了许多建设性的意见，在此一并致谢！

References

Chen Haoshou, Xu Butai. 1996. Minerallization chronology for gold-silver deposits in Zhejiang. Chinese Science Bulletin. 41(12): 1107～1110. (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the mesozoic magmatism in South China. Geotectonica et Metallogenia, 38(2): 219～229. (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Pingan, Qin Keling, Zhao Donghong, Mao Jingwen. 1994. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in the Qingling area. Mineral Deposits, 13(4): 289～298(in Chinese with English abstract).

Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng, Sun Jinfeng. 2014, Geochemical transition shown by Cretaceous granitoids in southeastern China: Implications for continental crustal reworking and growth. Lithos, 196, 115～130.

Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng, Sun Jinfeng, Simon A Wilde. 2013, Petrogenesis of the Cretaceous Zhangzhou batholith in southeastern China: Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf-O isotopic evidence. Lithos, 162, 140～156.

Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming, Song Tianrui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits. Bulletin Chinese Acad. Geol. Sci. (6): 1～64. (in Chinese with English abstract).

Chu Kelei. 2013. The diagenesis and metallogeneses studies on Yuanzhuding porphyry Cu-Mo deposit in Guangdong. Beijing: A dissertation submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Doctoral Degree, 1～112(in Chinese with English abstract).

Cong Bailin. 1979. Mggmatic Activity and Igneous Combination. Beijing: Geological Publishing House, 355(in Chinese with English abstract).

Deng Xingen, Hua Jiexiong. 2010. Research on the characters and the genesis of the Pb-Zn orebody I in Zhilingtou mining zone, Zhejiang. Mineral Exploration. 5(1): 458～461. (in Chinese with English abstract).

Doe B R, Zartman R E. 1979. Plumbotectonics the Phanerozoic, In: Barnes H L. (ed), Geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley & Sons, New York, 1979, 509～567.

Du Andao, Wu Shuqi, Sun Dezhong, Wang Shuxian, Qu Wenjun, Markey R, Stein H, Morgan J, Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybenite HLP and JDC. Geostandard and Geoanalytical Research, 28(1): 41～52.

Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, Sun Dezhong, Liu Dunyi. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with carius tube sample preparation. Rock and Mineral Analysis. 20(4): 247～252. (in Chinese with English abstract).

Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, et al. 2011. S, Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming matericals in Dongzhongla lead～zinc deposit in Tibet, 31(4): 52～57(in Chinese with English abstract).

Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, Yang Zhengxi, Long Xunrong, Zhou Xiong. 2011, S, Pd and Sr ssotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet. J Mineral Petrol, 31(4): 52～57. (in Chinese with English abstract).

Guo Chunli, Li Chao, Wu Shichong, Xu Yiming. 2014, Molybdenite Re-Os isotopic dating of Xitian deposit in Hunan Province and its geological significance. Rock and Mineral Analysis. 1: 142～152. (in Chinese with English abstract).

Guo Shuo, Zhao Yuanyi, Qu Huanchun, Wu Dexin, Xu Hong, Li Chao, Liu Yan, Zhu Xiaoyun, Wang Zengke. 2012. Geological characteristics and ore-forming time of the Dexing porphyry copper ore mine in Jiangxi Province. Acta Geologica Sinica, 86(3): 691～699

Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, Zhao Liang, Li Hongxia, Yang Jinhui. 2012, Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian Provinces. Lithos 150, 62～84.

Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei. Geochemical. Beijing: Geological Publishing House, 2003, 254～255(in Chinese with English abstract).

He Zhenyu, Xu Xisheng. 2012, Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. Chemical Geology 328, 208～221.

Hua Jiexiong, Cheng Shaohua, Mao Weixiong, Den Xinggen. 2000, Structural controls of mineral localization and mineral deposit model of Zhilingtou gold-silver deposit. Gold Science and Technology. 8(4): 27～35. (in Chinese with English abstract).

Huang Huiqing, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian. 2013, Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China. Journal of Asian Earth Sciences 74, 280～302.

Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, Liao Shiyong, Zhao Kuidong, Ling Hongfei. 2009. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting. Lithos, 107(3～4): 185～204.

Jiang Yaohui, Zhao Peng, Zhou Qing, Liao Shiyong, Jin Guodong. 2011, Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. Lithos 121, 55～73.

Lan Chingying, Jahn Borming, Mertzman Stanley A, Wu Tsaiway. 1996, Subduction-related granitic rocks of Taiwan. Journal of Southeast Asian Earth Sciences 14, 11～28.

Li Bin, Jiang Shaoyong, Lu Anhui, Zhao Haixiang, Yang Litang, Hou Minglan. 2016. Zircon U-Pb dating, geochemical and Sr-

Nd-Hf isotopic characteristics of the Jintonghu monzonitic rocks in western Fujian Province, South China: Implication for Cretaceous crust-mantle interactions and lithospheric extension. Lithos, 260: 413～428.

Li Houmin, Ye Huishou, Mao Jinwen, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Qu Wenjun, Du Andao. 2007, Re-Os dating of molybdenites from Au(-Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance. Mineral Deposits. 26 (4): 417～424. (in Chinese with English abstract).

Li Shengrong, Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China craton. Ore Geology Reviews, 56: 376～414.

Li Xiaofeng, Watanabe Yasushi, Yi Xiankui. 2012. Ages and sources of ore-related porphyries at Yongping Cu-Mo deposit in Jiangxi Province, Southeast China. Resource Geology, 63: 288～312.

Li Bin, Jiang Shaoyong. 2017, Genesis of the giant Zijinshan epithermal Cu-Au and Luoboling porphyry Cu-Mo deposits in the Zijinshan ore district, Fujian Province, SE China: A multi-isotope and trace element investigation. Ore Geology Reviews 88, 753～767.

Li Bin, Jiang Shaoyong, Lu Anhuai, Lai Jianqing, Zhao Kuidong, Yang Tao. 2016, Petrogenesis of Late Jurassic granodiorites from Gutian, Fujian Province, South China: Implications for multiple magma sources and origin of porphyry Cu-Mo mineralization: Lithos, 264: 540～554.

Li Zhen, Qiu Jiansheng, Yang Xuemei. 2014, A review of the geochronology and geochemistry of Late Yanshanian (Cretaceous) plutons along the Fujian coastal area of southeastern China: Implications for magma evolution related to slab break-off and rollback in the Cretaceous. Earth-Science Reviews 128, 232～248.

Li Zhengxiang, Li Xianhua, Chung Sunlin, Lo Chinghua, Xu Xisheng, Li Wuxian. 2012, Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. Tectonophysics 532, 271～290.

Liang Zihao, Zhu Qingtao, Han Menghe, Xia Anning, Wang Yanbin, Yu Wenjuan, Zhang Yinzhen. 1985. Metallogenic conditions of the Zhilingtou gold-silver deposit in Zhejiang Province. Journal of Georeview. 31(4): 330～338. (in Chinese with English abstract).

Liu Jianming. 1990. Discussion on the genesis of the Zhilingtou Au-Ag deposit. Journal of Chengdu College of Geology. 17(2): 1～8. (in Chinese with English abstract).

Liu Peng, Mao Jingwen, Pirajno Franco, Jia Lihui, Zhang Feng, Li Yang. 2018. Ore genesis and geodynamic setting of the Lianhuashan porphyry tungsten deposit, eastern Guangdong Province, SE China: Constraints from muscovite ^{40}Ar-^{39}Ar and zircon U-Pb dating and Hf isotopes. Mineralium Deposita, 53(6): 797～814.

Liu Qian, Yu Jinhai, Wang Qin, Su Bin, Zhou Meifu, Xu Hai, Cui Xiang. 2012, Ages and geochemistry of granites in the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on Late Mesozoic magmatic evolution. Lithos 150, 268～286.

Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 1～70.

Mao Jingwen, Xie Gguiqing, Bierlein Frank P, Ye Huishou, Qu Wenjun, Du Andao, Pirajno Franco, Li Houming, Guo Baojian, Li Yongfeng and Yang Z Q. 2008a. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling～Dabie orogenic belt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 4607～4626.

Mao Jingwen, Wang Yitian, Li Houming, Pirajno Franco, Zhang Changqing and Wang Ruiting. 2008b. The relationship of mantle～derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematic. Ore Geology Reviews, 33: 361～381.

Mao Jingwen, Du Andao, Seltmann R, et al. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. Mineralium Deposita, 38: 251～257.

Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, Guo Chunli. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in south China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. Acta Geologica Sinica, 85(5): 636～658(in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Pirajno F, Lehmann B, Luo Maocheng, Berzina A. 2014. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings. Journal of Asian Earth Science, 79: 576～584.

Mao Jingwen, Stein H J, Du Andao, Zhou Taofa, Mei Yanxiong, Li Yongfeng, Zang Wenshuan, Li Jinwen. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle-lower reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization. Acta Geologica Sinica, 78(1): 121～131(in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann B, Yu Jinjie, Du Andao, Mei Yanxiong, Li Yongfeng, Zang Wenshuan, Stein H J, Zhou Taofa. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and Metallogenic implications. Ore Geology Reviews, 29: 307～324.

Mao Jingwen, Wang Zhiliang. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in east China. Mineral Deposits, 19(4): 289～296(in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, Ye Huishou, Qu Wenjun, Du Andao, Pirajno F, Li Houmin, Guo Baojian, Li Yongfeng, Yang Fuquan. 2008. Tectonic implications from Re～Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 4607～4626.

Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, Li Xiaofeng, Wang Yitian, Zhang Changqing, Li Yongfeng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169～188. (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Xiong Bikang, Liu Jun, Pirajno F, Cheng Yanbo, Ye Huishou, Song Shiwei, Dai Pan. 2017. Molybdenite Re/Os dating, zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit (Jiangnan tungsten ore belt), China: Implications for petrogenesis, mineralization and geodynamic setting. Lithos, (286～287): 35～52.

Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, Du Andao. 1999. Rhenium-osmium isotopic dating of molybdenite in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in North Qilian Mountains and its geological significance. Geochemica et Cosmochemica Acta, 63: 1815～1818.

Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, Guo Chunli. 2011. South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. Acta Geologica Sinica, 85(5): 636～658 (in Chinese with English abstract)

Mao Weixiong, Hua Jiexiong. 2001. On the geochemistry and genesis of gold-silver deposit of Zhilingtou field, Zhejiang. Journal of Southern Institute of Metallurgy. 22(4): 253～258. (in Chinese with English abstract).

Mao Zhihao, Liu Jiajun, Mao Jingwen, Deng Jun, Zhang Feng, Meng Xuyang, Xiong Bikang, Xiang Xinkui, Luo Xiaohong. 2015. Geochronology and geochemistry of granitoids related to the giant Dahutang tungsten deposit, middle Yangtze River region, China: Implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization. Gondwana Research, 28: 816～836.

Mao Jianren, Ye Haimin Liu Kai, Li Zilong, Takahashi Yutaka, Zhao Xilin, Kee Weon-Seo. 2013, The Indosinian collisionextension event between the South China Block and the Palaeo-Pacific plate: Evidence from Indosinian alkaline granitic rocks in Dashuang, eastern Zhejiang, South China: Lithos, 172: 81～97.

Mao Jingwen, Xiong Bikang, Liu Jun, Pirajno Franco, Cheng Yanbo, Ye Huishou, Song Shiwei, Dai Pan. 2017, Molybdenite Re/Os dating, zircon U-Pb age and geochemistry of granitoids in the Yangchuling porphyry W-Mo deposit (Jiangnan tungsten ore belt), China: Implications for petrogenesis, mineralization and geodynamic setting: Lithos, 286～287: 35～52.

Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese Isalnds: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. Island Arc, 6: 121～142.

Mei Jianming. 2001. Typomorphic of quartz from Zhilingtou gold deposit, Suichang, Zhejiang province. Geoscience. 15(2): 222～225 (in Chinese with English abstract).

Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Li Zhenqing. 2006. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong porphyry copper deposit, Tibet: implications for the sources of plutons and metals in the deposit. Acta Geologica Sinica, 80(4): 554～560(in Chinese with English abstract).

Ohmoto H, Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, New York: John Wiley & Sons, 509～567.

Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfurand carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67(5): 551～578

Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits. Reviews in Mimeralogy and Geochemistry, 16(1): 491～559.

Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon istopes in hydrothermal ore deposits. Econ. Geol, 1972, 67: 551～579.

Qiu Zengwang, Wang He, Yan Qinghe, et al. 2016. Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of quartz porphyry in the Changpu Sn polymetallic deposit, Guangdong Province, SE China and their geological significance. Geochimica, 45(4): 374～386. (in Chinese with English abstract).

Qiu Zengwang, Li Shasha, Yan Qinghe, Wang He, Wei Xiaopeng, Li Pei, Wang Liming, Bu An. 2017a. Late Jurassic Sn metallogeny in eastern Guangdong, SE China coast: Evidence from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-S isotopes of the Dadaoshan Sn deposit. Ore Geology Reviews 83, 63～83.

Qiu Zengwang, Yan Qinghe, Li Shasha, Wang He, Tong Laixi, Zhang Rongqing, Wei Xiaopeng, Li Pei, Wang Liming, Bu An, Yan Lunming. 2017b. Highly fractionated Early Cretaceous I-type granites and related Sn polymetallic mineralization in the Jinkeng deposit, eastern Guangdong, SE China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotopes. Ore Geology Reviews 88, 718～738.

Shen J J, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. 1996. Precise Re-Os determinations and systematics of iron meteorites. Geochemica et Cosmochemica Acta, 60: 2887～2900.

Shen Weizhou, Ling Hongfei. 1994. Isotopic geochemical characteristics and material sources of tin-baring granite porphyry in Yanbei and Tashan. Acta Geoscientica Sinica. 15 (1): 117～123. (in Chinese with English abstract).

Shirey S B, Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. Analytical Chemistry, 67: 2136～2141.

Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works. Terra Nova, 13: 479～486.

Tang Yanwen, Xie Yuling, Liu Liang, Lan Tingguan, Yang Jianling, Sebastien Meffre, Yin Rongchao, Liang Songsong, Zhou Limin. 2017a. U-Pb, Re-Os and Ar-Ar dating of the Linghou polymetallic deposit, Southeastern China: implications for metallogenesis of the Qingzhou～Hangzhou metallogenic belt. Journal of Asian Earth Sciences, 137: 163～179.

Tang Yanwen, Li Xiaofeng, Xie Yuling, Liu Liang, Lan Tingguang, Meffre Sebastien, Huang Cheng. 2017b. Geochronology and geochemistry of late Jurassic adakitic intrusions and associated porphyry Mo-Cu deposit in the Tongcun area, east China: Implications for metallogenesis and tectonic setting. Ore Geology Reviews 80: 289～308.

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang. 2005. Preliminary study on Cretaceous mineralization systems in China: Implications for future prospecting. Earth Science Frontiers, 12(2): 231～239. (in Chinese with English abstract).

Wang Liqiang, Tang Juxing, Chen Wei, et al. 2014. Sulfur and Lead Isotopic Geochemistry of the Nuri and Chengba Cu-Mo-W Deposits in Tibet. Acta Geoscientica Sinica. 35(1): 39～48. (in Chinese with English abstract).

Wang Xiaoyu, Mao Jingwen, Cheng Yanbo, et al. 2016. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotopic compositions of quartz-diorite from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit in eastern Guangdong Province. Geological Bulletin of China, 35(8): 1357-1375. (in Chinese with English abstract).

Wei Juying. 1988. 1988. Isotope Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 104～134 (in Chinese with English abstract).

Wong J, Sun M, Xing G, Li X H, Zhao G C, Wong K, Wu F Y. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: Geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks. Gondwana Research 19, 244～259.

Wu Ganguo, Zhang Da, Peng Ruimin, et al. 2004. Study on the evolution regularity of mineralization ages in Southeastern China. Earth Science Frontiers. 11(1): 237～247. (in Chinese with English abstract).

Wu Shenghua, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Geng Jianzhen, Xiong Bikang. 2015. Geology, geochronology, and Hf isotope geochemistry of the Longtougang skarn and hydrothermal vein Cu-Zn deposit, North Wuyi area, southeastern China. Ore Geology Reviews, 70: 136～150.

Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruiling, Qu Wenjun, Pirajno F, Du Andao. 2007. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo(W) deposits in southeastern Hubei, China. Mineralogy and Petrology, 90: 249～270.

Xu Xiaochun, Yue Shucang, Pan Chengrong. 1999. Controlling factors of the metallogenetic time-space distribution of the ore deposits in Southeastern China coast. Geology of Anhui. 9(1): 42～44. (in Chinese with English abstract).

Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Yaohu. 2013, Petrogenesis and tectonic significance of Early Cretaceous high-Zr rhyolite in the Dazhou uranium district, Gan-Hang Belt, Southeast China. Journal of Asian Earth Sciences 74, 303～315.

Yin Jiaheng, Huang Guangzhao, Xu Minghua. 1989, Divission and correlation of Mesozoic volcanic cycles in East Guangdong. Bull. nanjing inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci. 10 (4): 16～28. (in Chinese with English abstract).

Yu Changfa, Mao Jingwen, Zhao Haijie, Chen Maohong, Luo Dalue, Guo Min. 2012. Geological characteristics and ages of granites and related mineralization in the Dajinshan tungsten-tin pplumetallic deposit, western Guangdong Province. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 3967～3979.

Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Li Peizhong, Yuan Chao. 1988. Isotope and trace element geochemistry of granitoid plutons in Yangchun basin, Guangdong. Guangdong Geology, 13(3): 1～10 (in Chinese with English abstract).

Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Li Peizhong, et al. Isotope and trace elements of granite in Yangchun basin, Guangdong Province. Guangdong Geology, 1998, 13(3): 1～9(in Chinese with English abstract).

Yuan Shunda, Peng Jiantang, Hao Shuang, Li Huimin, Geng Jianzhen, Zhang Dongliang. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and

ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit,Hunan Province,South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore Geology Reviews,43:235～242.

Yuan Shunda, Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Li Houmin, Shen Nengping, Zhang Dongliang. 2008. Aprecise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan,South China). Mineralium Deposita,43:375～382.

Yuan Shunda, Zhang Dongliang, Shuang Yan, et al. 2012. Re-Os dating of molybdenite from the Xintianling giant tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province,China and its geological implications. Acta Petrologica Sinica,28(1): 27～38. (in Chinese with English abstract).

Yui T, Okamoto K, Usuki T, Lan C Y, Chu H T, Liou J G. 2009. Late Triassic-Late Cretaceous accretion/subduction in the Taiwan region along the eastern margin of South China-evidence from zircon SHRIMP dating. International Geology Review 51, 304～328.

Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonic-the model. Tectonophysics, 75: 135～162.

Zhai yusheng, Wang Jianping, Deng Jun. 2008. Temporal spatial evolution of metallogenic system and its significance to mineral exploration. Geoscience. 22(2): 143～150. (in Chinese with English abstract).

Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, Jin Fuquan. 1992. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the Middle and Lower Valley of the Yangtze River. Mineral Deposits,11(1):1～12(in Chinese with English abstract).

Zhang Keyao, Wang Jianping, Du Andao, et al. 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Chilu molybdenum deposit in Fuan,Fujian Province. Geology in China. 36(1):147～155. (in Chinese with English abstract).

Zhang Ligang. 1985. The application of the stable isotope to geology～the hydrothermal mineralization of metal activation and its prospecting. Xi'an: Shanxi Scientific and Technological Publishing House, 51～53(in Chinese with English abstract).

Zhang Qian, Pan Jiayong. 1994. Sources of ore-forming materials of the contact metasomatic skarn-type Cu-Pb-Zn deposits in special reference to their lead isotopic compositon. Acta Mineralogic Sinica, 14(4): 369～372(in Chinese with English abstract).

Zhang Yongjia. 1995. An analysis for the genesis of the fluorite deposits in Wuyi basin,Zhenjiang. Journal of Chengdu institute of technology. 22(3): 86～90. (in Chinese with English abstract).

Zhao Chao, Ni Pei, Wang Guoguang,et al. 2014. The fluid inclusions study on Zhilingtou molybdenum deposit in Southwest Zhejiang Province. Geological Journal of China Universities. 20(1):28～49. (in Chinese with English abstract).

Zhao Junhong, Hu Ruizhong, Liu Shen. 2004, Geochemistry, Petrogenesis, and Tectonic Significance of Mesozoic Mafic Dikes, Fujian Province, Southeastern China. International Geology Review 46, 542～557.

Zheng Minghua, Liu Jianming. 1986. Material sources of the Zhilingtou gold-silver ore deposit in Zhejiang Province. Mineral Deposits. 5(1): 39～51. (in Chinese with English abstract).

Zheng Wei, Chen Maohong, Xu Lingang, Zhao Haijie, Ling Shibing, Wu Yue, Hu Yaoguo, Tian Yun, Wu Xiaodong. 2013b. Rb-Sr isochron age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance. Mineral Deposits, 32(2):259～272(in Chinese with English abstract).

Zheng Wei, Chen Maohong, Zhao Haijie, Hao Hongda, Luo Dalue, Hu Yaoguo, Zhao Xinmin. 2012. Characteristics of sulfides and S-Pb isotope composition in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit of Guangdong Province and their geological implications. Geology in China, 39(6):1838～1854(in Chinese with English abstract).

Zheng Wei, Mao Jingwen, Pirajno F, Zhao Haijie, Zhao Caisheng, Mao Zhihao, Wang Yongjian. 2015b. Geochronology and geochemistry of the Shilu Cu-Mo deposit in the Yunkai area, Guangdong Province, South China and its implication. Ore Geology Reviews, 67:382～398.

Zheng Wei, Mao Jingwen, Zhao Caisheng, Ouyang Hegen, Wang Xiaoyu. 2016. Re-Os geochronology of molybdenite from Yinyan Porphyry Sn deposit in South China. Resource geology, 66, 63～70.

Zheng Wei, Mao Jingwen, Zhao Haijie, Zhao Caisheng, Lin Weipeng, Ouyang Zhixia, Wu Xiaodong, Tian Yun. 2015a. A preliminary study of minerogenetic series and geodynamic background of polymetallic deposit in Yangchun basin of Western Guangdong Province. Mineral Deposits, 34(3):465～487 (in Chinese with English abstract).

Zheng Wei, Mao Jingwen, Zhao Haijie, Zhao Caisheng, Yu Xiaofei, Liu Donghong, Ouyang Zhixia, Wu Xiaodong. 2018. Geochronology of Potoumian Cu polymetallic deposit in Yangchun basin, zircon trace element and geological implications. Acta Petrologica Sinica, 34(9):2671～2686.

Zheng Wei, Zhao Haijie, Chen Maohong, Xu Lingang, Liu Jianxing, Luo Dalue, Hu Yaoguo. 2013a. Re～Os isotopic dating of molybdenites from the Yingwuling polymetallic deposit in Guangdong province and its geological significance. J Mineral Petrol, 33(3): 38～46(in Chinese with English abstract).

Zheng Wei, Zhao Haijie, Ouyang Hegen, Zhao Caisheng, Yu Xiaofei, Luo Dalue, Huang Huagu, Ouyang Zhixia. 2017. Re-Os dating for the molybdenite from the Xiping Mo-Cu polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 33(3): 843～858(in Chinese with English abstract).

Zheng Wei. 2016. The Yanshanian minerogenetic series and mineralization of polymetallic deposit in the Yangchun Basin of Yunkai area,South China. Ph. D. Dissertation. Beijing:China University of Geosciences, 1～298(in Chinese with English summary).

Zheng Yongfei. Stable Isotope Geochemistry. Beijing: Science Press, 2000, 218～247(in Chinese with English abstract).

Zheng Minghua, Liu Jianming. 1986. Material sources of the Zhilingtou gold-silver ore deposit in Zhejiang Province. Mineral deposits, 5(1):39～52(in Chinese with English abstract).

Zhong Jun, Chen Yanjing, Pirajno Franco, Chen Jing, Li Jing, Qi JinPing, and Li Nuo. 2014, Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling Porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province, China. Ore Geology Reviews 57, 61～77.

Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshui, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China:a response to tectonic evolution. Episodes, 29:26～33.

Zhou Jie, Jiang Yaohui, Xing Guangfu, Zeng Yong, Ge Weiya. 2013, Geochronology and petrogenesis of Cretaceous A-type granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China. International Geology Review, 1～25.

Zhu Bingquan. 1998. Isotopes in the Earth Science System Theory and Application—On the evolution of the continental crust and mantle. Beijing: Science Press, 216～235(in Chinese with English abstract).

Zhu Shangqin, Huang Huasheng. 1988. Strata～bound deposit geochemistry. Beijing: Metallurgical Industry Press, 177～205 (in Chinese with English abstract).

Zhu Kongyang, Li Zhengxiang, Xu Xisheng, Simon A. Wilde. 2013, Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: Evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate. Journal of Asian Earth Sciences 74, 265～279.

Zhu Kongyang, Li Zhengxiang, Xu Xisheng, Simon A. Wilde. 2014, A Mesozoic Andean-type orogenic cycle in southeastern China as recorded by granitoid evolution. American Journal of

Science 314，187～234.

参 考 文 献

陈好寿，徐步台．1996．浙江主要金银矿床的成矿时代．科学通报，41(12)：1107～1110.
陈毓川，王登红，徐志刚，黄凡．2014．华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要．大地构造与成矿学，38(2)：219～229.
陈毓川，王平安，秦克令，赵东宏，毛景文．1994．秦岭地区主要金属矿床成矿系列划分及区域成矿规律探讨．矿床地质，13(4)：289～298.
程裕淇，陈毓川，赵一鸣，宋天锐．1983．再论矿床的成矿系列问题．中国地质科学院院报，(6)：1～64.
丛柏林．1979．岩浆活动与火成岩组合．北京：地质出版社，355.
邓新根，华杰雄．2010．浙江治岭头矿区Ⅰ号铅锌矿体地质特征及成因初探．矿产勘查，5(1)：458～461.
杜安道，赵敦敏，王淑贤，孙德忠，刘敦一．2001．Carius 管溶样-负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-锇同位素地质年龄．岩矿测试，20(4)：247～252
费光春，多吉，温春齐，阳正熙，龙训荣，周雄．2011．西藏洞中拉铅锌矿床 S、Pb、Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪．矿物岩石，31(4)：52～57.
郭春丽，李超，伍式崇，许以明．2014．湘东南锡田辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义．岩矿测试，1：142～152.
韩吟文，马振东，张宏飞．2003．地球化学．北京：地质出版社，254～255.
华杰雄，陈少华，毛伟雄，邓新根．2000．治岭头金银矿床控矿构造因素及成矿模式．黄金科学技术，8(4)：27～35.
李厚民，叶会寿，毛景文，王登红，陈毓川，屈文俊，杜安道．2007．小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-锇定年及其地质意义．矿床地质，26(4)：417～424.
梁子豪，朱清涛，韩梦合，夏安宁，王雁宾，俞文娟，张银珍．1985．浙江治岭头金-银矿床成矿条件的研究．地质论评，31(4)：330～338.
刘建明．1990．治岭头金银矿床成因讨论．成都地质学院院报，17(2)：1～8.
毛景文，王志良．2000．中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨．矿床地质，19(4)：289～296.
毛景文，谢桂青，张作衡，李晓峰，王义天，张长青，李永峰．2005．中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景．岩石学报，21(1)：169～188.
毛伟雄，华杰雄．2001．治岭头金银矿床成矿地球化学特征及矿床成因分析．南方冶金学院学报，22(4)：253～258.
梅建明．2001．浙江遂昌治岭头金矿床的石英标型．现代地质，15(2)：222～225.
孟祥金，侯增谦，李振清．2006．西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成：对含矿斑岩与成矿物质来源的指示．地质学报，80(4)：554～560.
濮为民，雷英华，曾亮，杨裕凡．2008．治岭头地区隐爆型铅锌矿床地质特征．有色金属，60(6)：20～24.
钱建民．2007．浙江省遂昌金矿大比例尺成矿预测报告.
丘增旺，王核，闫庆贺，李莎莎，汪礼明，卜安，慕生禄，李沛，魏小鹏．2016．广东长埔锡多金属矿床石英斑岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义．地球化学，45(4)：374～386.
任纪舜，陈廷愚，牛宝贵，等．1990．中国东部及邻区大陆岩石圈构造演化与成矿．北京：科学出版社.
沈渭洲，凌洪飞．1994．岩背和塌山含锡花岗斑岩的同位素地球化学特征和物质来源．地球学报，15(1)：117～123.
水涛．1987．中国东南大陆基底构造格局．中国科学(B 辑)，(4)：414～422.
王登红，陈毓川，徐志刚．2005．中国白垩纪大陆成矿体系的初步研究及找矿前景浅析．地学前缘，12(2)：231～239.
王科强，张德会，付芬，朱玉娣．2014．浙江遂昌治岭头金矿床花岗斑岩单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义．矿床地质，S1，753～754.
王立强，唐菊兴，陈伟，罗茂澄，江化寨，张凯．2014．西藏努日、程巴铜-钼-钨矿床硫铅同位素地球化学．地球学报，35(1)：39～48.
王小雨，毛景文，程彦博，刘鹏，张兴康．2016．粤东新寮岽铜多金属矿区石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Hf 同位素组成．地质通报，35(8)：1357～1375.
王永彬．2014．浙江省治岭头岩浆热液-浅成热液多金属成矿系统研究［博士学位论文］．中国科学院大学，1～142.
魏菊英．1988．同位素地球化学．北京：地质出版社，104～134.
吴淦国，张达，彭润民，吴建设，高天钧，陈柏林，汪群峰，狄永军，张祥信．2004．东南沿海成矿带矿床形成的时间演化规律研究．地学前缘，11(1)：237～247.
徐晓春，岳书仓，潘成荣．1999．中国东南沿海金属矿床时空分布的控制因素．安徽地质，9(1)：42～44.
尹家衡，黄光昭，徐明华．1989．粤东中生代火山旋回划分及对比．南京地质矿产研究所所刊，10(4)：16～28.
余长发，毛景文，赵海杰，陈懋弘，罗大略，郭敏．2012．粤西大金山钨锡多金属矿床地质特征及成岩成矿年代学研究．岩石学报，28(12)：3967～3979.
于津生，桂训唐，李培忠，袁超．1998．广东阳春盆地花岗岩类同位素、微量元素地球化学研究．广东地质，13(3)：1～9.
袁顺达，张东亮，双燕，杜安道，屈文俊．2012．湘南新田岭大型钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义．岩石学报，28(1)：27～38.
翟裕生，王建平，邓军，彭润民，刘家军．2008．成矿系统时空演化及其找矿意义．现代地质，22(2)：143～150.
翟裕生，姚书振，林新多，金福全．1992．长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究．矿床地质，11(1)：1～12.
张克尧，王建平，杜安道，林仟同，黄金明，胡荣华，黄庆敏．2009．福建福安赤路钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义．中国地质，36(1)：147～155.
张理刚．1985．稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿．西安：陕西科学技术出版社，51～53.
张乾，潘家永．1994．论接触交代矽卡岩型多金属矿床的矿质来源——以铅同位素组成为依据．矿物学报，14(4)：369～372.
张亚雄．1995．浙江遂昌地区金矿床矿物包裹体研究．大地构造与成矿学，19(3)：274～280.
章永加．1995．浙江武义盆地萤石矿成因分析．成都理工学院学报，22(3)：86～90.
赵超，倪培，王国光，陈辉，蔡逸涛．2014．浙西南治岭头斑岩钼矿体流体包裹体研究．高校地质学报，20(1)：28～49.
赵风清，孙大中，张惠民．1996．华夏地块前加里东期变质基底形成的构造环境及地壳演化．中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊，29：101～109
郑明华，刘建明．1986．论浙江治岭头金银矿床的成矿物质来源．矿床地质，5(1)：39～51.
郑伟，陈懋弘，徐林刚，赵海杰，凌世彬，吴越，胡耀国，田云，吴晓东．2013b．广东天堂铜铅锌多金属矿床 Rb-Sr 等时线年龄及其地质意义．矿床地质，32(2)：259～272.
郑伟，陈懋弘，赵海杰，郝宏达，罗大略，胡耀国，赵辛敏．2012．广东天堂铜铅锌多金属矿床矿物学、硫化物 S-Pb 同位素特征．中国地质，39(6)：1838～1854.
郑伟，毛景文，欧阳志侠，赵财胜，于晓飞，赵海杰，刘东宏，吴晓东．2018．阳春盆地陂头面铜多金属矿床成岩成矿年代学、锆石微量元素及地质意义．岩石学报，34(9)：2671～2686.
郑伟，毛景文，赵海杰，赵财胜，林玮鹏，欧阳志侠，吴晓东，田云．2015a．粤西阳春盆地多金属矿床成矿系列及动力学背景．矿床地质，34(3)：465～487.
郑伟，欧阳荷根，赵海杰，赵财胜，于晓飞，罗大略，黄华谷，欧阳志侠．2017．广东锡坪钼铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义．岩石学报，33(3)：843～858.
郑伟，赵海杰，陈懋弘，徐林刚，刘建新，罗大略，胡耀国．2013a．广东鹦鹉岭多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义．矿物岩石，33(3)：38～46.
郑伟．2016．云开地区阳春盆地燕山期多金属矿床成矿系列：［博士学位论文］．北京：中国地质大学，1～298.

郑永飞. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京:科学出版社, 218～247.
朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化. 北京:科学出版社, 216～235.
朱上庆, 黄华盛. 1988. 层控矿床地球化学. 北京:冶金工业出版社, 177～205.

Sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material and ore-forming age of the Zhilingtou Mo-Pb-Zn-Au polymetallic deposit in the Zhejiang Province

CHU Kelei*[1,2], CHEN Xiaorong[3], QI Gang[3], GAO Xiang[3], HU Bo[3], LI Shengjin[3]

1) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing*, 210093;

3) *No. 7 Geological Party of Zhejiang Province, Lishui, Zhejiang*, 323000

* *Corresponding author: chukelei@163.com*

Abstract

The Zhilingtou deposit has a "three-story" mode: the upper part (volcanic rock caprock) is dominated by lead-zinc deposits and sulfur deposits, the middle section (metamorphic rock basement) by gold-silver and lead-zinc deposits, and the deep part (intrusive rock) by porphyry molybdenum deposits. Based on the previous studies, this paper determined the ore-forming age of the Zhilingtou deposit by molybdenite Re-Os isotope dating. The model age of the six molybdenite samples was 113.7～114.6 Ma, with a weighted average age of 114.03 ± 1.78 Ma, indicating that the mineralization of the Zhilingtou Mo polymetallic deposit occurred in the late stages of the Early Cretaceous. The Re content of the molybdenum sample in this deposit changed from 16.05×10^{-6} to 66.29×10^{-6}, indicating that its ore-forming material has the characteristics of crust-mantle mixed source. The sulfur composition of sulphide has a narrow range of changes (−2.1‰～2.6‰), which reaches the equilibrium of isotope fractionation and may be derived mainly from the deep magma of the upper mantle or the lower crust. It has a relatively uniform source of sulfur, but may also be affected by the continental crust. The range of lead isotope composition of the ore minerals from the Zhilingtou Mo-Pb-Zn-Au polymetallic deposit is relatively small. The values of $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, and $^{206}Pb/^{204}Pb$ are 38.765～39.137, 15.523～15.751, 18.450～18.667, respectively, indicate crust-mantle mixing characteristics. The determination of the ore-forming age of the Zhilingtou Mo polymetallic deposit provides an important clue for the prospecting of contemporary porphyry ore-forming systems in the region, and provides new information for further studying the petrogensis and metallogeny of the southeast coastal metallogenic belt.

Key words: Zhilingtou Mo-Pb-Zn-Au polymetallic deposit; molybdenite Re-Os dating; sources of ore-forming materials; southeast coastal metallogenic belt