

滇东南八布杨万铜矿床硫化物 Re-Os 同位素 年龄及其地质意义

向忠金^{1,2}, 闫全人³, 夏磊⁴, 夏文静⁵, 李超⁶

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037; 3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 云南大学地球科学学院, 云南昆明 650500; 5. 北京航空航天大学学生处, 北京 100191; 6. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 滇东南八布地区发育一套晚古生代超镁铁质-镁铁质杂岩, 是认识古特提斯分支洋构造演化的重要窗口, 而其中以火山岩为赋矿围岩的杨万铜矿床, 被视作区域找矿的突破点。目前, 对这套超镁铁质-镁铁质杂岩的构造属性及赋存铜矿床的成矿时代及成因联系还存在争议。通过对杨万铜矿床中黄铜矿和黄铁矿进行 Re-Os 同位素定年, 获得 Re-Os 等时线年龄为 269 ± 3 Ma, 表明该矿床形成于早中二叠世, 与火山岩 (~ 270 Ma) 大致同时; 而初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 0.31 ± 0.17 , 暗示成矿时存在热液流体与古海水的相互作用。区内玄武岩围岩和其它超镁铁质-镁铁质岩石的地球化学特征对比分析显示, 八布超镁铁质-镁铁质杂岩为一套 N-MORB 型蛇绿岩组合, 代表了古特提斯分支洋盆的洋壳残片。杨万铜矿床应划归为与古特提斯分支洋裂解有关的火山成因块状硫化物 (VMS) 矿床, 其周边地区具有较好的找矿潜力。

关键词: Re-Os 同位素定年; 金属硫化物; 蛇绿岩; 杨万铜矿床; 滇东南

中图分类号: P597; P578.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)05-0583-13

Re-Os geochronology of the Babu copper deposit in southeast Yunnan Province and its geological implications

XIANG Zhong-jin^{1,2}, YAN Quan-ren³, XIA Lei⁴, XIA Wen-jing⁵ and LI Chao⁶

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 5. Department of Student Affairs, Beihang University, Beijing 100191, China; 6. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: Babu ultramafic-mafic rocks, located in the southeastern Yunnan Province, provide researchers a good opportunity to investigate the tectonic evolution of the branch of Paleotethys Ocean. The Yangwan copper deposit, which is hosted by basalts and breccia in Babu area, is considered as a good metallogenic prospective zone. However, the petrogenesis of the Babu ultramafic-mafic rocks and the age of Yangwan copper deposit are still controversial. In order to get the age of ore deposit, the authors applied Re-Os isotope dating to sulfides from the Yangwan deposit. Chalcopyrite and pyrite were picked out for Re-Os isotope analysis. Re-Os isotope dating yielded an isoch-

收稿日期: 2020-06-01; 接受日期: 2020-08-04; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41102141); 中国地质调查局项目(DD20160122-7); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题(J1901-20-8); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费(J1515)

作者简介: 向忠金(1985-), 男, 助理研究员, 构造地质学专业, E-mail: zhxiang@cags.ac.cn.

ron age of 269 ± 3 Ma, with an initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio of 0.31 ± 0.17 . The well-defined Re-Os isochron, excluding the possible mixed isochron, represents the depositional age of sulfides, which means they were formed at the same time as ultramafic-mafic rocks (~ 270 Ma). The high initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio was interpreted as entrainment of seawater into pristine hydrothermal fluid. The characteristics of ore and the age of sulfides indicate that the Yangwan copper deposit is a VMS deposit. Though a comparative research on geochemistry between wall rock basalts and other rocks, it is held that all the data support the argument that the Babu ultramafic-mafic rocks are normal middle ocean ridge basalt (N-MORB)-type ophiolites at present. They probably represent the relics of the branch of Paleotethys Ocean.

Key words: Re-Os geochronology; sulfides; ophiolite; Yangwan copper deposit; Southeast Yunnan

Fund support: National Young Science Foundation of China (41102141); China Geological Survey Project (DD20160122-7); Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources (J1901-20-8); Basic Scientific Research Fund of Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (J1515)

铼-钼(Re-Os)同位素体系在确定成矿时代和示踪成矿物质来源方面被证明是一种十分有效的方法,尤其是对Re含量较高的辉钼矿(Stein *et al.*, 1998; 杜安道等, 2012),辉钼矿Re-Os同位素定年技术已被广泛用于铜、钼矿床(Mao *et al.*, 1999; 侯增谦等, 2003)。近年来,随着质谱技术的发展以及分析方法的革新,一些具有低放射成因Os含量的硫化物(如黄铁矿、磁黄铁矿和黄铁矿等)也能被准确测定,使得该方法的应用对象和适用矿床类型更为丰富(Stein *et al.*, 2000; 高永宝等, 2012; Nozaki *et al.*, 2010, 2014; 李超等, 2016)。同时,黄铜矿和黄铁矿等矿石硫化物含有一定量的初始Os,还可以示踪矿床的成矿物质来源,因此Re-Os同位素越来越多地被应用于矿床成因研究(Selby *et al.*, 2009; 张正伟等, 2011; 赵冰爽等, 2018)。

滇东南地区地质构造及岩浆活动强烈,成矿地质条件优越,一直是我国重要的资源勘查基地之一。区内已发现的铜矿床(点)分布广泛,其中以火山岩为赋矿围岩的铜及铜多金属矿床赋矿层位多、规模较大、品位较富(莫向云等, 2013),成为区内重要的矿床类型,已引起业界的关注。目前,区内已发现的代表性矿床有金平龙脖河铜矿、麻栗坡杨万铜矿和个旧老厂-卡房铜多金属矿床等(蒙光志, 2003; 刘明等, 2007; 崔银亮, 2008)。前人对这些矿床的矿化特征和矿床成因已开展过相关地质调查和研究工作,然而关于诸如围岩时代、成矿时代及成矿物质来源等关键问题尚未明确,对赋矿火山岩的成因和形成环境等也存在争议,限制了对区域地质演化和成矿规律的认识,进而严重制约了区域找矿勘查工作的进程。

杨万铜矿床赋存于滇东南麻栗坡八布海相火山岩中,前人研究认为其成矿时代与火山岩年龄一致,形成于中三叠世(蒙光志, 2003; 莫向云等, 2013)。然而,近年来的年代学、岩石学和地球化学研究工作表明,八布超镁铁质-镁铁质杂岩(包括赋矿火山岩)可能是一套早中二叠世蛇绿岩组合(钟大赉等, 1998; 冯庆来等, 2002; 张斌辉等, 2013; Liu *et al.*, 2018),因此,该矿床的成因和成矿时代需要重新认识。本文在区域地质调查的基础上,通过对杨万铜矿床主矿体中黄铁矿和黄铜矿等矿石矿物进行Re-Os同位素定年,结合区域火山岩同位素定年和地球化学结果,综合分析确定其成矿时代,进而探讨其成因类型和形成环境,为研究区域成矿规律和指导找矿提供依据。

1 地质背景

现今东南亚是由包括华南(扬子和华夏地块)和印支地块在内的众多陆块和一系列古特提斯缝合带拼合而成(Sone and Metcalfe, 2008)。多数学者认同华南与思茅-印支地块沿哀牢山-Song Ma缝合带碰撞拼合(Sone and Metcalfe, 2008; Faure *et al.*, 2014; Lai *et al.*, 2014),也有学者提出华南与印支地块之间沿Song Chay缝合带(Lepvrier *et al.*, 2011; Faure *et al.*, 2014)或滇琼缝合带(Cai and Zhang, 2009)拼合。八布杨万铜矿床产于滇东南麻栗坡盆地东南部,邻近中越边境一带。大地构造位置上,研究区处于滇琼缝合带内(图1a),属于华南与印支地块汇聚拼合部位。由于受古特提斯华南与印支地块汇聚碰撞和晚新生代哀牢山-红河走滑断裂的影响,

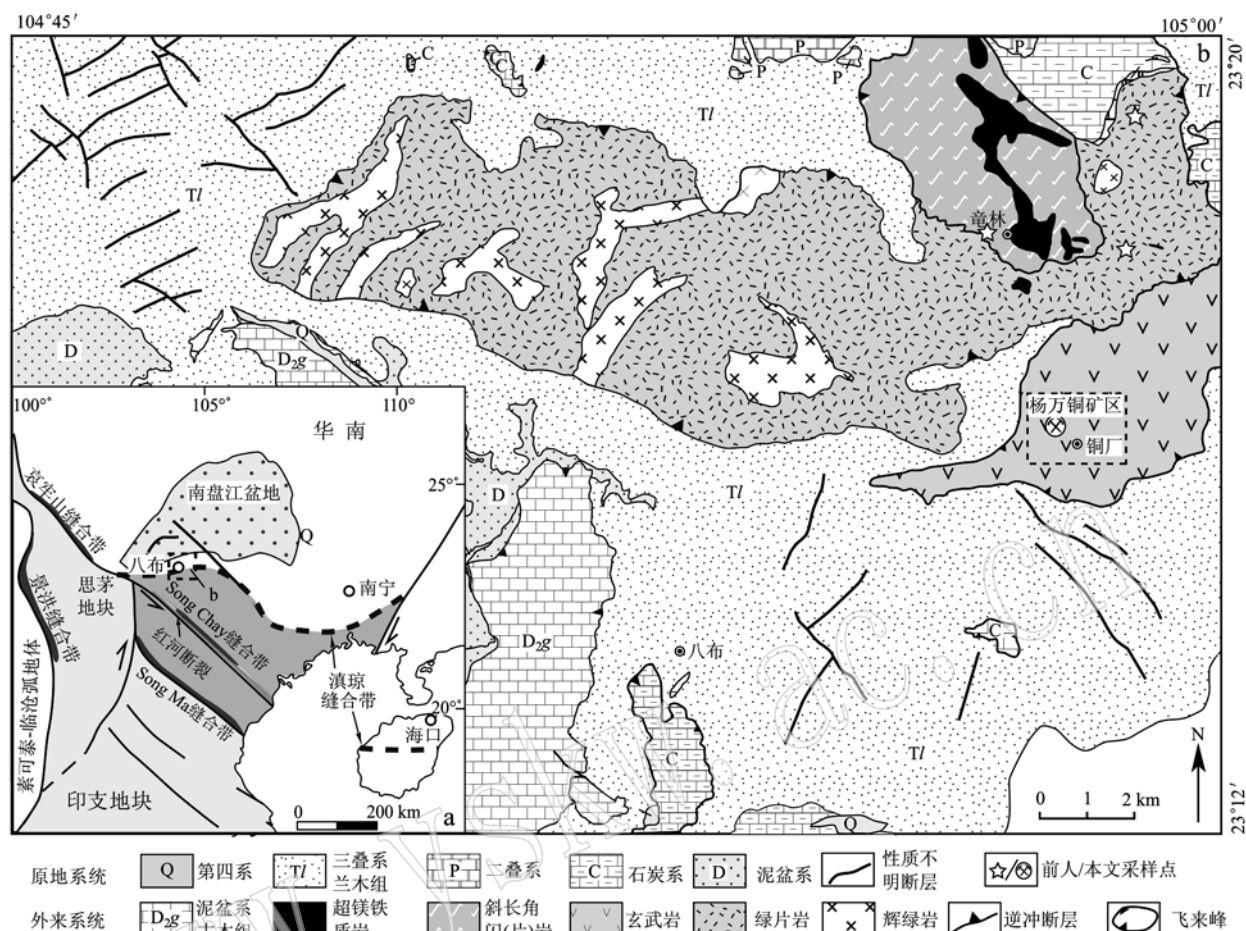


图1 滇东南八布地区地质简图(a据 Sone and Metcalfe, 2008; Cai and Zhang, 2009; Faure *et al.*, 2014; b据中国地质调查局成都地调中心, 2011^①)

Fig. 1 Simplified geological map of the Babu area in southeastern Yunnan Province (a after Sone and Metcalfe, 2008; Cai and Zhang, 2009; Faure *et al.*, 2014; b after Chengdu Geological Survey Center, CGS, 2011^①)

滇东南地区发育一系列向北西方向凸出的弧形断裂(图 1a)。八布杨万铜矿床所处的麻栗坡盆地正好位于该弧形区的核心部位,南西侧受文山-麻栗坡断裂控制,北东侧与古生界接触,东南方向延伸入越南境内与猷河(Song Hein)盆地相连。

中国地质调查局成都地调中心(2011)^①将研究区内岩石地层分为“原地系统”和“外来系统”两类(图1b)。“原地系统”包括泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系,其中石炭系和二叠系岩石组合以碳酸盐岩为主,泥盆系为一套深色硅质岩夹薄层硅质泥岩。三叠系为泥岩和粉砂岩等细碎屑岩组合,云南省地质局第二区域地质调查队(1976)^②将其划为中三叠统法郎组(T₃f),中国地质调查局成都地调中心

(2011)^①将其划分为三叠系兰木组(TI)。局部可见石炭系灰岩呈飞来峰逆冲推覆到三叠系砂岩之上。“外来系统”包括泥盆系古木组碳酸盐岩和八布竜林超镁铁质-镁铁质杂岩。古木组碳酸盐岩逆冲推覆于泥盆系硅质岩和硅质泥岩之上,与三叠系和石炭系均为断层接触。八布乡竜林村一带的超镁铁质-镁铁质杂岩岩石组合包括变橄辉岩、蛇纹岩、玄武岩、辉长岩、辉绿岩和绿片岩等,部分玄武岩和辉绿岩已变质为斜长角闪岩或角闪片岩,绿片岩原岩为凝灰岩和凝灰质粉砂岩。超镁铁质-镁铁质杂岩北侧与石炭系逆断层接触,发育断层破碎带,南侧与三叠系接触带中碎屑岩呈强片理化。早期区域地质调查工作将这套岩石视作区域伸展的产物,形成于裂

① 中国地质调查局成都地调中心, 2011. 云南省麻栗坡地区矿产远景调查报告.

② 云南省地质局第二区域地质调查队, 1976. 1:20 万马关幅地质图及调查报告.

陷槽或裂谷环境,时代为中三叠世(云南省地质局第二区域地质调查队,1976^①;云南省地质矿产局,1990^②)。上述认识仍被许多地质找矿部门用于指导区域找矿(蒙光志,2003;莫向云等,2013)。目前,多数研究者基于岩石组合、地球化学和同位素特征,普遍认同竜林超镁铁质-镁铁质杂岩为 N-MORB 型蛇绿岩,代表了古特提斯分支洋的残留,构造就位位于三叠系碎屑岩之上(马文璞,1998;钟大赉等,1998;张斌辉等,2013)。Liu 等(2018)进一步研究认为,八布地区存在 N-MORB 型和 SSZ 型两种蛇绿岩,可与金沙江-哀牢山蛇绿岩对比。

杨万铜矿床位于八布竜林东南侧老厂坡至铜厂一带,围岩为未变质玄武岩,具斑状结构,斑晶为斜长石,粒径约 1 mm,基质为微晶或隐晶结构,局部可见枕状构造。矿床地质调查表明,铜矿体主要呈层状、似层状,少量呈脉状或囊状赋矿于玄武岩、细碧岩、火山角砾岩和凝灰岩中(图 2、3a、3b)(蒙光志,2003;杨维等,2018)。目前,区内已探明 12 个矿体,

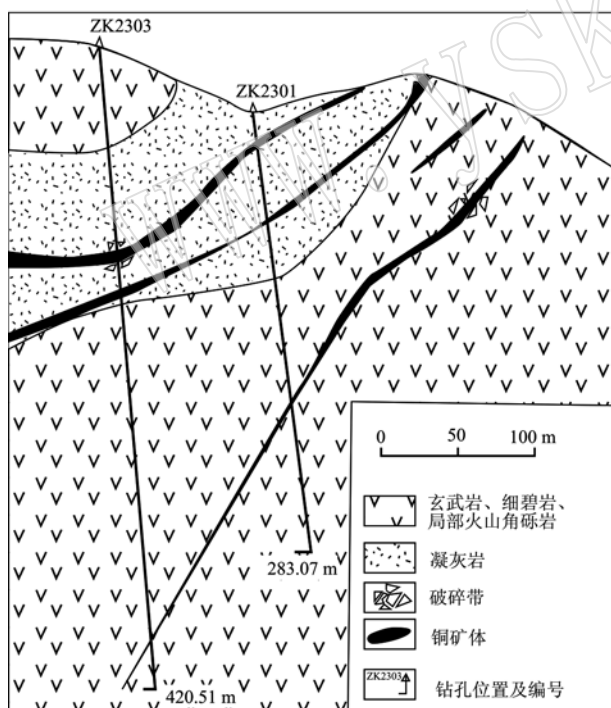


图2 八布杨万铜矿床老厂坡矿段 23 号勘探线剖面简图 (据杨维等,2018)

Fig. 2 Geological section along No. 23 exploration line of Laochangpo ore block of the Yangwan copper deposit (after Yang Wei *et al.*, 2018)

铜金属量 6.78 万吨(莫向云等,2013)。钻孔岩芯观察显示,矿脉平均厚度 3~4 m,最厚可达 16 m,矿体受断裂构造控制明显,围岩强烈破碎的部位,矿化明显增强且矿体厚大(杨维等,2018)。矿石具有块状(图 3c)、浸染状和细脉状构造,主要由胶状黄铁矿(大于 60%)(图 3d)组成,铜矿物主要包括黄铜矿和辉铜矿,次为斑铜矿、蓝铜矿和孔雀石等,脉石矿物有石英、方解石、绿泥石、绿帘石和绢云母等。与矿化有关的围岩蚀变有绿泥石化、绿帘石化、硅化、黄铁矿化和碳酸盐化等。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

矿区目前尚未进行大规模采矿作业,因而无法进入坑道内采样,本次样品采自铜厂三号矿体矿石堆。从同一块较大的矿石上采集块状和似层状矿石样品,样品先后经过重力分离、电磁分离和显微镜下挑选,获得黄铁矿和黄铜矿,相关分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。对其中 4 件黄铜矿和 3 件黄铁矿进行了 Re-Os 同位素分析。在矿体外围远离断裂的基岩露头采集了新鲜的斑状玄武岩样品(图 3e),用于全岩地球化学分析。

2.2 分析方法

硫化物 Re-Os 同位素和全岩主量、微量、稀土元素测试分析在国家地质实验测试中心实验室完成。Re、Os 化学分离和详细分析流程参见文献(杜安道等,2001;李超等,2009,2010),分析步骤简述如下:准确称取样品通过细颈漏斗加入 Carius 管底部,把准确称取的 Re、Os 混合稀释剂加入到液氮冷冻的 Carius 管底部,再依次加入 5 mL 15 mol/L 硝酸和 3 mL 30% 的双氧水,用液化石油气和氧气火焰封闭 Carius 管,在 230℃ 下加热 24 h。加热完成后,将溶好冰冻的 Carius 管在细颈处打开,向管中加入超纯水定容至 25 mL 采用直接蒸馏法,采用 5 mL 超纯水作为吸附液对 Os 进行分离富集。完成 Os 蒸馏后,将 Carius 管蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中,置于电热板上,加热近干。在 10 mol/L NaOH 碱性介质中,用丙酮对 Re 进行萃取,丙酮蒸干后,加入 5 mL

① 云南省地质局第二区域地质调查队. 1976. 1:20 万马关幅地质图及调查报告.

② 云南省地质矿产局. 1990. 云南省地质志.

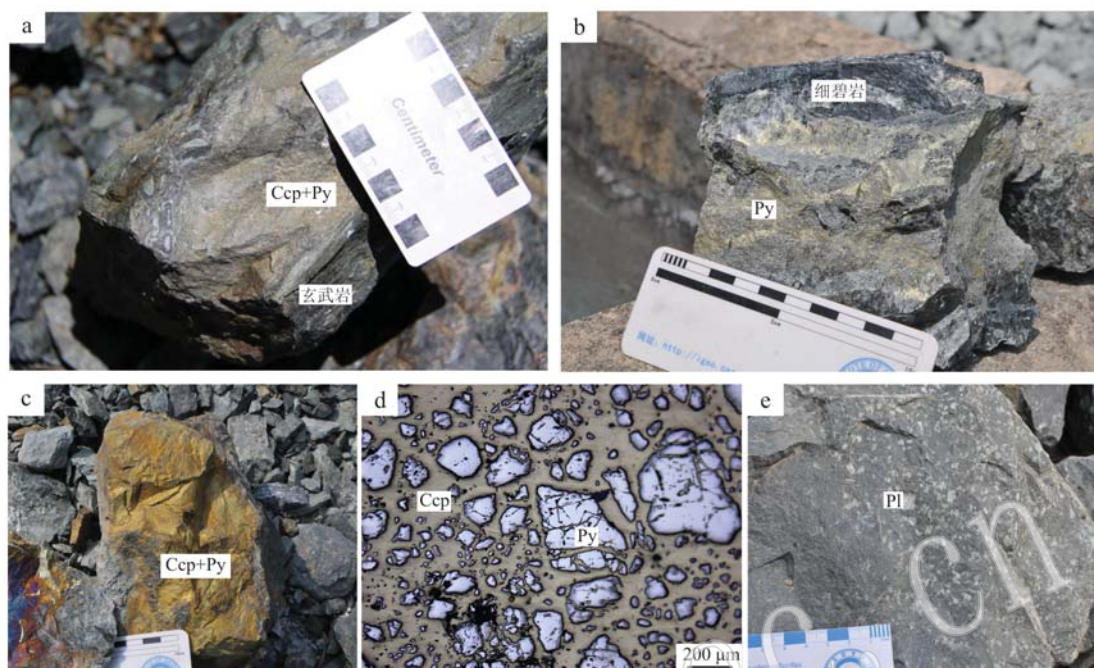


图3 八布杨万铜矿围岩和矿石特征

Fig. 3 Photographs and photomicrographs of sulfide ores and basalts from the Yangwan copper deposit

a—玄武岩中似层状矿体(Ccp + Py); b—细碧岩中脉状黄铁矿(Py); c—块状矿石, 富含黄铜矿(Ccp)和黄铁矿(Py);

d—黄铁矿(Py)和黄铜矿(Ccp)的共生关系(反射光); e—斑状玄武岩, 斑晶为斜长石(Pl)(矿物缩写符号引自沈其韩, 2009)

a—stratiform ore in basalt, coexistent with chalcopyrite (Ccp) and pyrite (Py); b—pyrite vein in spilitite; c—massive ore coexistent with chalcopyrite (Ccp) and pyrite (Py); d—pyrites scattered in chalcopyrite (reflected light); e—basalts with plagioclase (Pl) phenocryst (mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

超纯水,用于点带。

主量元素通过 XRF(X 荧光光谱仪 3080E)方法测试,分析精度为 5%。微量和稀土元素通过等离子质谱仪(ICP-MS-Excell)测试,含量大于 10×10^{-6} 的元素的测试精度为 5%,而含量小于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 10%。

3 分析结果

3.1 Re-Os 同位素组成及等时线年龄

Re 和 Os 的含量以及 Os 同位素比值经扣除空白后列于表 1,其中 ^{187}Os 为总 ^{187}Os ,计算时 $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$

表 1 八布杨万铜矿床金属硫化物 Re-Os 同位素分析数据

Table 1 Re-Os isotopic data for sulfides in the Yangwan copper deposit

样品编号	$w(\text{Re})/10^{-9}$		$w(\text{普 Os})/10^{-12}$		$w(^{187}\text{Os})/10^{-12}$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$		$1/^{192}\text{Os}$	模式年龄/Ma		
	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ		测定值	2σ	
黄铜矿	13TC-16	49.10	0.14	53.83	0.17	140.96	0.44	4 406	45	20.1	0.03	46.3	273.5	1.2
	13TC-19	58.51	0.17	29.90	0.10	173.51	0.54	9 395	95	44.1	0.08	82.5	282.6	1.3
	13TC-21	46.66	0.14	27.35	0.10	132.92	0.45	8 222	83	37.1	0.08	90.6	271.4	1.3
黄铁矿	13TC-17	7.50	0.06	12.13	0.09	21.62	0.16	2 982	30	13.7	0.02	205.0	274.7	2.8
	13TC-18	8.03	0.02	18.29	0.06	23.49	0.07	2 108	21	9.8	0.02	134.9	278.9	1.2
	13TC-20	41.95	0.12	17.03	0.07	132.28	0.48	11 584	120	56.6	0.21	138.8	300.4	1.5
	13TC-22	49.72	0.15	10.58	0.04	151.99	0.49	22 586	229	109.0	0.30	232.7	291.2	1.3

注: 普 Os 代表非放射成因的 Os。

和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的误差指其总误差,置信度为 95%。从分析结果(表 1)可见,黄铜矿 Re 含量为 $46.66 \times 10^{-9} \sim 58.51 \times 10^{-9}$,普通 Os 含量为 $27.35 \times 10^{-12} \sim 53.83 \times 10^{-12}$, ^{187}Os 含量为 $132.92 \times 10^{-12} \sim 173.51 \times 10^{-12}$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值为 $4\,406 \sim 9\,395$;黄铁矿 Re 含量变化较大,为 $7.50 \times 10^{-9} \sim 49.72 \times 10^{-9}$,普通 Os 含量为 $10.58 \times 10^{-12} \sim 18.29 \times 10^{-12}$, ^{187}Os 含量为 $21.62 \times 10^{-12} \sim 151.99 \times 10^{-12}$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值为 $2\,108 \sim 22\,586$ 。采用 Isoplot 软件(Ludwig, 2003)进行等时线投图,7 件样品拟合得到的等时线年龄为 $292 \pm 10\text{ Ma}$ (图未列出),但平均权重方差较大($\text{MSWD} = 28$),数据点线性关系不是很好,没有实际的地质意义。其中,TC-20 和 TC-22 两件黄铁矿样品的 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值($>11\,000$)和模式年龄($300 \sim 290\text{ Ma}$)明显大于其它样品(表 1),暗示它们可能不是同一成因。剔除这两件样品后,其余 5 件硫化物的 Re-Os 等时线年龄为 $278 \pm 18\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 11$)(图 4)。该等时线年龄误差和平均权重方差仍然偏大,主要受 TC-19(黄铜矿)的影响,其 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值(9 395)相较于其余 4 件样品较大。剔除 TC-19 后,剩下 4 件硫化物的 Re-Os 等时线年龄为 $269 \pm 3\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.19$),初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 0.31 ± 0.17 (图 4)。这 4 件单矿物的模式年龄约为 $279 \sim 271\text{ Ma}$,与等时线年龄也非常接近。

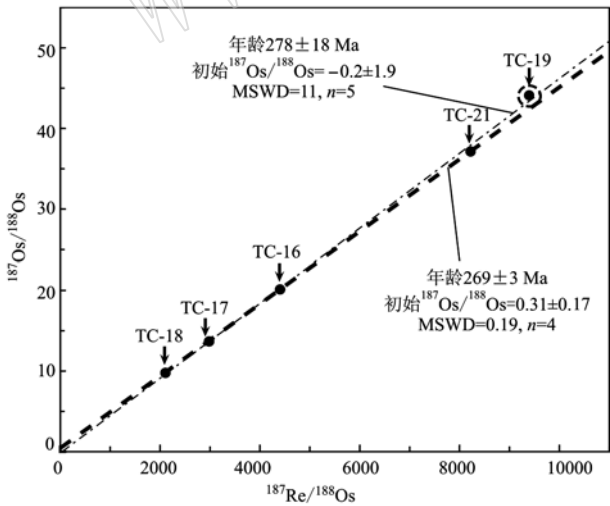


图 4 八布杨万铜矿硫化物 Re-Os 等时线图
Fig. 4 Re-Os isochron diagram of sulfides for the Yangwan copper deposit

3.2 岩石地球化学

全岩地球化学分析结果见表 2。分析结果显示,八布杨万铜矿围岩的玄武岩 SiO_2 含量为 $49.76\% \sim$

表 2 杨万铜矿床容矿围岩玄武岩的主量($w_B/\%$)、微量和稀土元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 2 Major elements ($w_B/\%$), trace elements and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) values for basalts in the Yangwan copper deposit

样品编号	D040-4	D045-1	D045-4
SiO ₂	51.14	49.76	49.83
TiO ₂	1.48	1.06	1.29
Al ₂ O ₃	19.18	19.50	17.52
TF ₂ O ₃	7.90	8.20	9.21
MnO	0.12	0.15	0.15
MgO	6.08	7.34	8.30
CaO	8.94	9.54	9.60
Na ₂ O	4.69	4.07	3.82
K ₂ O	0.32	0.29	0.15
P ₂ O ₅	0.16	0.10	0.13
LOI	2.69	3.11	2.71
Mg [#]	61	64	64
Sc	21.60	22.00	23.3
V	208	156	188
Cr	170	234	257
Ni	75	90	123
Rb	2.11	2.89	1.75
Sr	302	223	176
Zr	108	66	91
Nb	0.88	0.55	0.74
Ba	21.60	14.70	20.30
Hf	2.91	2.04	2.61
Ta	0.08	0.06	0.07
Pb	2.09	0.92	1.21
Th	0.07	0.06	0.06
U	0.05	0.12	0.10
La	3.35	2.38	3.26
Ce	12.80	8.58	11.20
Pr	2.33	1.60	2.16
Nd	13.20	9.24	12.10
Sm	3.55	2.54	3.28
Eu	1.30	1.07	1.18
Gd	4.47	3.29	4.20
Tb	0.76	0.57	0.73
Dy	5.09	3.97	4.94
Ho	1.13	0.81	0.98
Er	3.13	2.20	2.73
Tm	0.49	0.33	0.43
Yb	2.92	2.02	2.55
Lu	0.43	0.31	0.39
Y	27.20	18.50	21.70
ΣREE	54.95	38.91	50.13
(La/Yb) _N	0.70	0.71	0.77
δEu	1.00	1.10	0.97

51.14% , TiO_2 含量 $1.06\% \sim 1.48\%$, Al_2O_3 含量为 $17.52\% \sim 19.50\%$, MgO 含量 $6.08\% \sim 8.30\%$, Na_2O 含量为 $3.82\% \sim 4.69\%$, Na/K 值为 $14 \sim 25$,属于低钾拉斑系列玄武岩(图 5)。

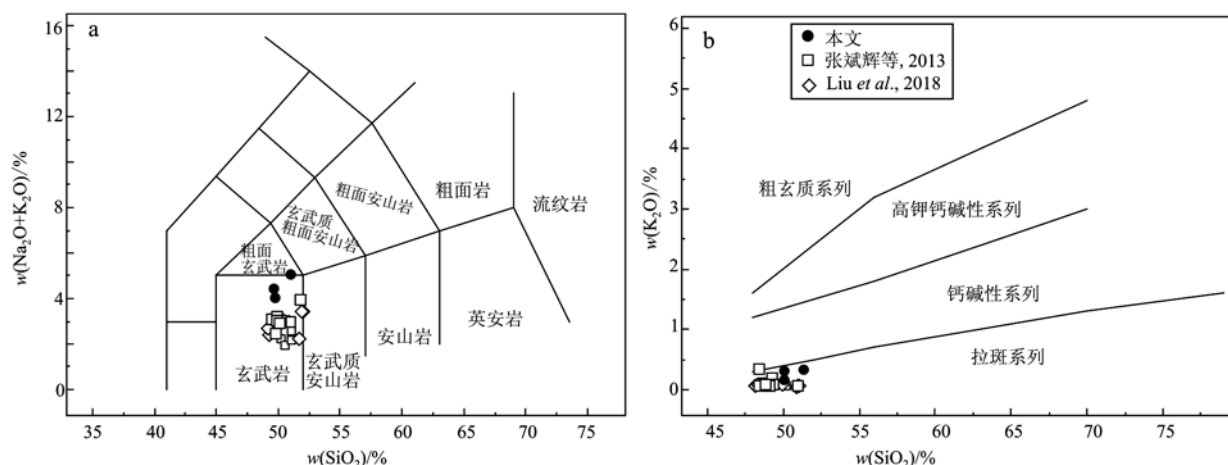


图5 八布杨万铜矿围岩玄武岩全碱(a)和 K_2O (b)与 SiO_2 比值图解(a 据 Le Maitre, 2002; b 据 Ringwood, 1989)
Fig. 5 TAS (a, after Le Maitre, 2002) and K_2O versus SiO_2 (b, after Ringwood, 1989) ratios diagram for basalts in the Yangwan copper deposit

岩石稀土元素总量较低, 介于 $38.91 \times 10^{-6} \sim 54.95 \times 10^{-6}$ 之间, 在球粒陨石标准化配分图(图6a)上, 轻稀土元素呈现轻微左倾趋势, 重稀土元素平坦, 轻重稀土元素分异不明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.70 \sim 0.77$, 无 Eu 异常, 表明斜长石结晶分异程度较低。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图6b)上, Th、

Nb 和 Ta 相对亏损, 活动元素 Rb、Ba、U 和 K 相对富集。Sr 具弱的正异常, 可能与岩石具轻度蚀变有关。总体上, 杨万铜矿围岩玄武岩的稀土和微量元素特征呈现出与 N-MORB 相似的配分曲线(Sun and McDonough, 1989)。

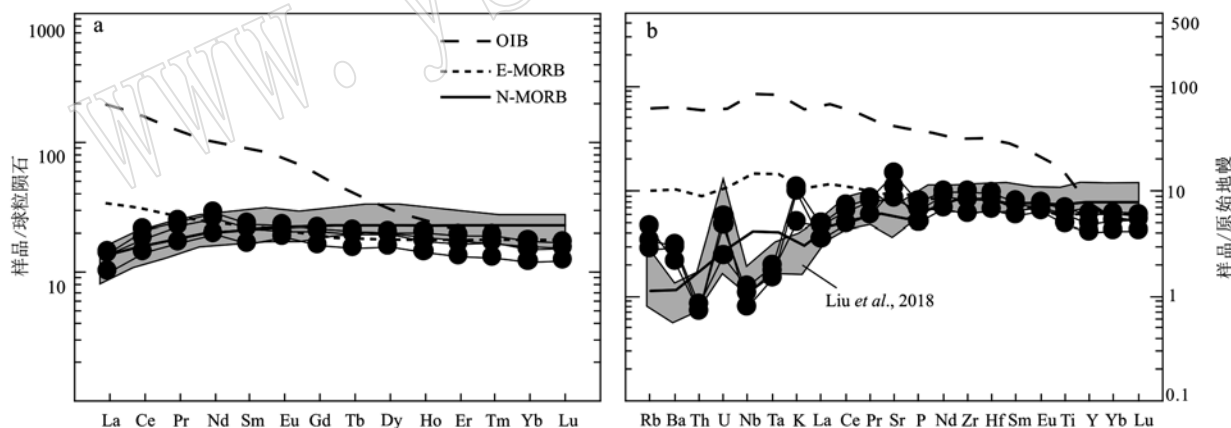


图6 八布杨万铜矿围岩玄武岩球粒陨石标准化(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔值据 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) for basalts in the Yangwan copper deposit (chondrite and primitive mantle data after Sun & McDonough, 1989)
N-MORB—正常型大洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型大洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩
N-MORB—normal mid-ocean ridge basalts; E-MORB—enriched mid-ocean ridge basalts; OIB—ocean island basalts

4 讨论

4.1 成矿年龄

八布杨万铜矿床属于火山喷流沉积-热液改造

成因, 已被普遍认同(蒙光志, 2003; 莫向云等, 2013; 杨维等, 2018), 因而其成矿时代与围岩地层时代一致。云南省地质局第二区域地质调查队(1976)^①将八布地区发育的这套火山岩与碎屑岩都划为中三叠统, 故其成矿时代被认定为中三叠世(蒙

① 云南省地质局第二区域地质调查队. 1976. 1:20 万马关幅地质图及调查报告.

光志, 2003; 莫向云等, 2013), 并以此指导区域找矿工作。

从20世纪末开始至今, 众多学者先后对八布超镁铁质-镁铁质杂岩和围岩碎屑岩地层的时代开展了大量研究工作, 取得了一系列成果。根据岩石组合、结构及地球化学证据, 钟大赉等(1998)提出八布超镁铁质-镁铁质杂岩为一套蛇绿岩组合, 异地推覆就位位于中三叠统细碎屑岩中。吴根耀等(2001)获得镁铁质岩 Sm-Nd 等时线年龄 328 Ma, 认为这套超镁铁质-镁铁质杂岩形成于早石炭世末。冯庆来等(2002)在采自竜林附近硅质岩中鉴定出放射虫化石时代为早二叠世, 提出八布蛇绿岩形成于早二叠世。近年来, 研究者先后对其中变玄武岩和斜长角闪岩进行了锆石 U-Pb 定年, 获得同位素年龄为 272 ~ 265 Ma, 进而认为八布蛇绿岩形成于早中二叠世(张斌辉等, 2013; Liu *et al.*, 2018)。此外, 杨江海等(2017)对竜林一带原中三叠统砂岩开展碎屑锆石 U-Pb 定年分析, 获得最年轻一组锆石年龄峰值为 285 Ma, 提出该套碎屑岩沉积时代应为早二叠世, 而非中三叠世。张斌辉等(2019)在这套碎屑岩中新发现一套凝灰岩夹层, 对其开展锆石 U-Pb 定年, 获得了 226 ± 1 Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 认为该套碎屑岩沉积时代可能为晚三叠世。综上所述, 目前对八布地

区碎屑岩地层沉积时代和超镁铁质-镁铁质杂岩年龄仍存在争议, 而依据围岩地层时代限定的成矿年龄为中三叠世, 值得商榷。

本次从杨万铜矿床矿石中分选出黄铁矿和黄铜矿, 对其开展 Re-Os 同位素定年, 直接限定了其成矿时代。尽管金属硫化物 Re-Os 等时线年龄有时可能是混合等时线而不具地质意义, 但根据 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $1/^{192}\text{Os}$ 是否存在相关性, 可排除这类干扰(Li *et al.*, 2015; 赵冰爽等, 2018), 从而获取正确的年龄信息。4件硫化物 Re-Os 等时线年龄为 269 ± 3 Ma, 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $1/^{192}\text{Os}$ 不存在相关性(图 7a), 表明其不是混合等时线, 应代表了成矿时代。此外, Stein 等(2000)提出, 对于低普通 ^{187}Os 、高放射性成因 ^{187}Os 的硫化物(LLHR), 可以采用 ^{187}Re 与 ^{187}Os 含量进行投图获得更为准确的等时线年龄。从表 1 可见, 上述 4 件硫化物也具有类似 LLHR 的 Re-Os 同位素组成, 采用 ^{187}Re 与 ^{187}Os 含量投图获得等时线年龄为 272 ± 5 Ma (MSWD = 2.0)(图 7b), 与 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 等时线年龄在误差范围内是一致的。因而, 本文获得的金属硫化物 Re-Os 等时线年龄(269 ± 3 Ma)代表了真正的成矿时代, 表明杨万铜矿床形成于早中二叠世(~ 270 Ma), 而非中三叠世。

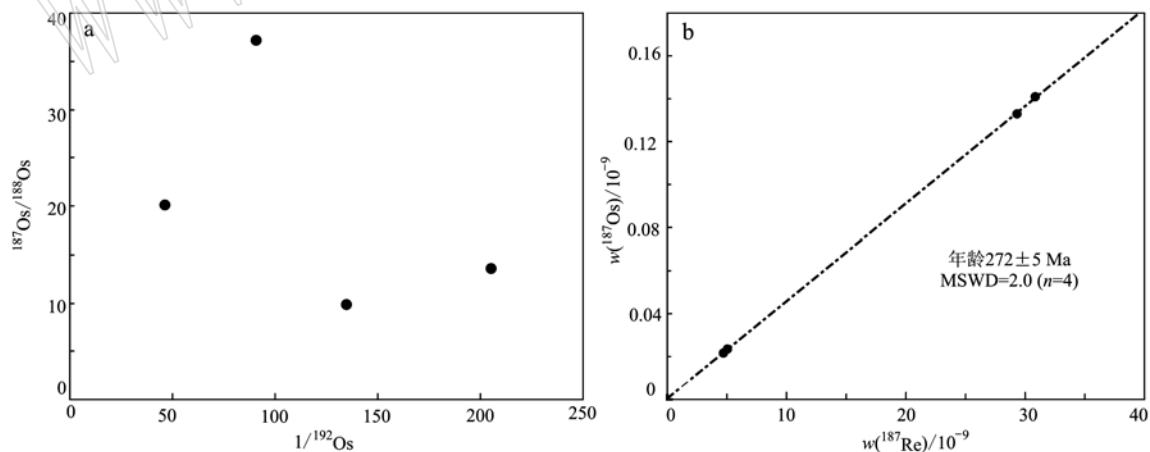


图 7 八布杨万铜矿硫化物 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $1/^{192}\text{Os}$ (a) 和 ^{187}Re - ^{187}Os (b) 图解

Fig. 7 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ versus $1/^{192}\text{Os}$ (a) and ^{187}Re versus ^{187}Os plot (b) for sulfides of the Yangwan copper deposit

4.2 成矿物质来源

矿床地质调查工作表明, 杨万铜矿矿体主要呈层状、似层状产于玄武岩、细碧岩和火山角砾岩中(图 2)(杨维等, 2018), 因受同期构造的控制, 也多见脉状、网脉状矿体产出, 因而具有火山块状硫化物

(VMS)矿床的基本特征(Mosier *et al.*, 2009)。本文获得的杨万铜矿床金属硫化物 Re-Os 等时线年龄(269 ± 3 Ma)早于八布蛇绿岩的构造就位时限(~ 230 Ma; Wu *et al.*, 1999), 也早于邻区越北一系列褶皱和北向逆冲推覆构造发育的时代($237 \sim 230$

Ma; Lepvrier *et al.*, 2011; 陈泽超等, 2013), 因此其硫化物保留了初始形成时的地球化学信息。金属硫化物初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 0.31 ± 0.17 , 与日本 Bessitype 硫化物矿床的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值($0.35 \pm 0.20 \sim 0.38 \pm 0.33$; Nozaki *et al.*, 2010, 2014)相近。本次获得的硫化物 Re-Os 等时线年龄(269 ± 3 Ma), 也与前人获得的八布蛇绿岩中变辉长岩和变玄武岩年龄($272 \sim 265$ Ma)在误差范围内一致, 表明杨万铜矿床的成矿时代与岩浆活动大致同期, 暗示岩浆热液是主要的成矿物质来源。金属硫化物初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值高于八布蛇绿岩初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值($0.125 \sim 0.134$; Liu *et al.*, 2018), 也高于地幔组成(~ 0.125 ; Shirey and Walker, 1998)和原始高温热液流体的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(~ 0.15 ; Sharma *et al.*, 2000), 表明单纯的岩浆和热液流体不能提供如此高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值。Ravizza 等(1996)将 TAG 热液地区硫化物 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值($0.16 \sim 1.05$)具有的较大变化区间解释为原始热液流体与海水相互作用的结果。八布杨万铜矿床初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值具有相似的特征, 可能也代表了热液流体与海水相互作用的结果。因此, 杨万铜矿床成矿物质可能主要来源于海底火山热液与海水的相互作用, 属于 VMS 矿床。而区内赋矿围岩强烈破碎部位的矿化明显增强且矿体变厚大的特征表明, 火山活动多期次发育的构造对

成矿有重要的控制作用, 从而表现出一些构造改造成矿的特点。

4.3 地质意义

八布竜林地区超镁铁质-镁铁质杂岩除赋矿围岩玄武岩外, 还包括变橄辉岩、蛇纹岩、斜长角闪岩和变玄武岩。钟大赉等(1998)和 Wu 等(1999)基于岩石组合、地球化学和同位素特征, 认为其属于一套 N-MORB 型蛇绿岩, 代表了古特提斯分支洋盆的洋壳残片。然而, Lepvrier 等(2011)和 Faure 等(2014)基于 Tran 等(2008)对邻区越北高平(Cao Bang)超镁铁质-镁铁质杂岩研究成果, 认为八布超镁铁质-镁铁质岩石并不是蛇绿岩, 但并未给出相应的野外和室内观察证据, 因此其质疑缺乏证据。近年来系统的岩石学、地球化学和同位素研究进一步证实, 八布超镁铁质-镁铁质杂岩是一套 N-MORB 型蛇绿岩(Cai and Zhang, 2009; 张斌辉等, 2013; Liu *et al.*, 2018)。此外, Liu 等(2018)提出, 除 N-MORB 型蛇绿岩外, 八布地区还存在 SSZ 型蛇绿岩。

本文对 Liu 等(2018)中的数据进行了对比分析, 在稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6)上, 其变玄武岩和变辉长岩配分曲线与本文玄武岩相似, 均呈现类似 N-MORB 的特征。在 Hf-Th-Ta 图(图 8a)和 Th/Yb-Ta/Yb 图(图 8b)上, 所有样品无一例外地全部落入

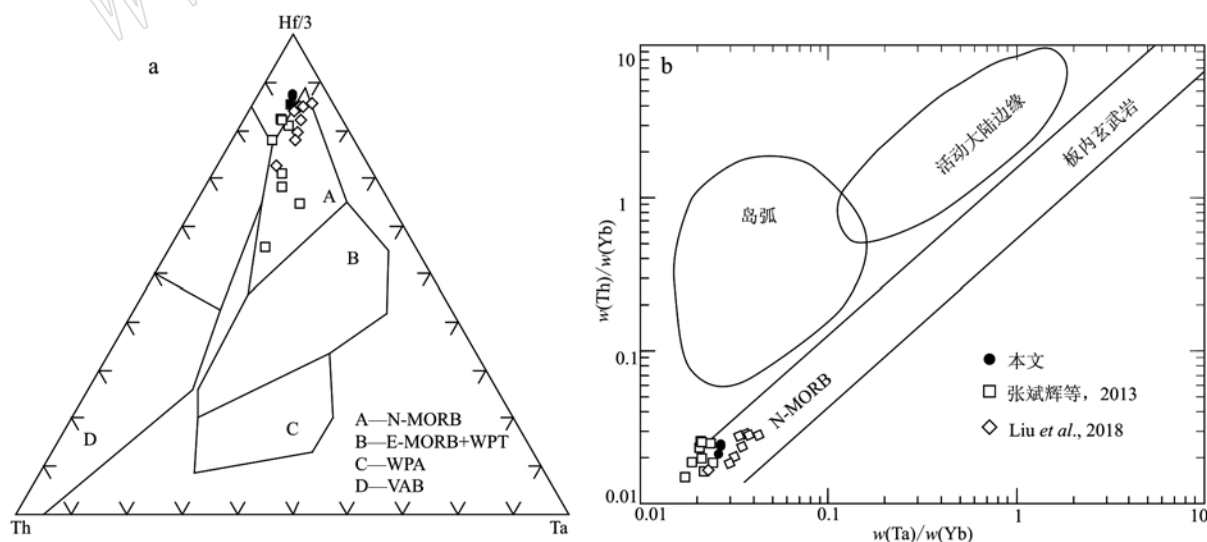


图 8 八布地区玄武岩 Hf-Th-Ta(a, 据 Wood, 1980)和 Th/Yb-Ta/Yb(b, 据 Pearce and Peate, 1995)图解
Fig. 8 Hf-Th-Ta (a, after Wood, 1980) and Th/Yb versus Ta/Yb (b, after Pearce and Peate, 1995) diagram

for basalts in the Yangwan copper deposit

N-MORB—正常型大洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型大洋中脊玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩;
VAB—火山弧玄武岩

N-MORB—normal mid-ocean ridge basalts; E-MORB—enriched mid-ocean ridge basalts; WPT—within-plate tholeiitic basalts;
WPA—within-plate alkaline basalts; VAB—volcanic arc basalts

N-MORB 区。而 Liu 等(2018)所提具 SSZ 型蛇绿岩特征的数据,皆是引自前人的数据再次投图而来,相对缺少可信度。综上所述,岩石组合、岩石学、地球化学和同位素特征都表明,八布超镁铁质-镁铁质杂岩是一套 N-MORB 型蛇绿岩,代表了古特提斯分支洋盆消亡的洋壳残片。该区是否存在 SSZ 型或其它类型蛇绿岩,仍需要寻找更多的证据支撑。

如前述,中国地质调查局成都地调中心(2011)^①研究表明,八布蛇绿岩由南向北逆冲推覆就位于三叠系碎屑岩中。该套三叠系向东南延伸入越南境内,并与 Song Hein 盆地相连,也发育大量晚古生代-早中生代岩浆岩(Tran *et al.*, 2008, 2016)。Halpin 等(2016)在 Cao Bang 超镁铁质-镁铁质岩中识别出 N-MORB 型和 E-MORB 型两类蛇绿岩,并获得 E-MORB 型蛇绿岩的锆石 U-Pb 年龄为 274 ~ 262 Ma。该年龄与八布蛇绿岩形成时代大致相当。从野外产出特征看,两套蛇绿岩与围岩都呈现出类似的构造混杂岩(mélange)特征,而构成蛇绿混杂岩带(Isozaki *et al.*, 1990; Wakabayashi, 2011)。目前,关于八布-Cao Bang 蛇绿混杂岩带的成因和构造属性还存在争议(Cai and Zhang, 2009; Faure *et al.*, 2014; Thanh *et al.*, 2014; Halpin *et al.*, 2016),是否代表古特提斯分支洋盆消亡闭合的位置,还有待进一步研究去揭示。

5 结论

(1) 八布杨万铜矿床金属硫化物 Re-Os 等时线年龄为 269 ± 3 Ma, 其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 与 $1/^{192}\text{Os}$ 不存在相关性,该年龄可代表其成矿时代,即该铜矿床形成于早中二叠世。

(2) 杨万铜矿床的金属硫化物初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 0.31 ± 0.17 , 可能是岩浆热液流体与古海水相互作用的结果,应属于 VMS 型矿床。

(3) 八布超镁铁质-镁铁质杂岩为一套 N-MORB 型蛇绿岩组合,金属硫化物 Re-Os 等时线年龄进一步限定其形成于早中二叠世,代表了古特提斯分支洋的洋壳残片。

致谢 野外工作得到了时上钧的帮助,薛传东教授和陈雷副研究员对本文提出了宝贵意见,编辑

部老师在文章出版过程中协助修改了插图,在此一并感谢。

References

- Cai Jianxin and Zhang Kaijun. 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic [J]. *Tectonophysics*, 467: 35 ~ 43.
- Chen Zechao, Lin Wei, Faure M, *et al.* 2013. Geochronological constraint of Early Mesozoic tectonic event at Northeast Vietnam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1 825 ~ 1 840 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yinliang. 2008. The study of Mineralization Regularity and Integration Information of Longbohe Copper Ore in Jinping, Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1 ~ 233 (in Chinese).
- Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, *et al.* 2012. Re-Os Method and Its Application in the Science of Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, *et al.* 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-TIMS with Carius tube sample preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247 ~ 252 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Lypvier C, Nguyen V V, *et al.* 2014. The South China block-Indochina collision, where, when and how? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 260 ~ 274.
- Feng Qinglai and Liu Benpei. 2002. Early Permian radiolarians from Babu ophiolitic mélange in Southern Yunnan[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 27(1): 1 ~ 3 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, *et al.* 2012. Re-Os isotopic analysis of Yulonggou Cu-Ni sulfide deposit in the South Qilian Mountain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 899 ~ 906 (in Chinese with English abstract).
- Halpin J A, Tran H T, Lai C K, *et al.* 2016. U-Pb zircon geochronology and geochemistry from NE Vietnam, A “tectonically disputed” territory between the Indochina and South China Blocks[J]. *Gondwana Research*, 34: 254 ~ 273.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, *et al.* 2003. The molybdenite Re-Os isotopic dating of the Tibetan plateau Gangdise porphyry copper belt: Mineralization time limit and application of dynamic background[J].

① 中国地质调查局成都地调中心. 2011. 云南省麻栗坡地区矿产远景调查报告.

- Science in China (Series D), 33(7): 609 ~ 618 (in Chinese with English abstract).
- Isozaki Y, Maruyama S and Furuoka F. 1990. Accreted oceanic materials in Japan[J]. Tectonophysics, 181: 179 ~ 205.
- Lai C K, Meffre S, Crawford A, *et al.* 2014. The central Ailaoshan ophiolite and modern analogs[J]. Gondwana Research, 26(1): 75 ~ 88.
- Le Maitre R W. 2002. Igneous Rocks—A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (2nd eds)[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lepvrier C, Faure M, Van V N, *et al.* 2011. North-directed Triassic nappes in Northeastern Vietnam (East Bac Bo)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(1): 56 ~ 68.
- Li Chao, Pei Haoxiang, Wang Denghong, *et al.* 2016. Age and source constraints for Kongxintou copper-molybdenum deposit Shandong from Re-Os isotope in molybdenite and chalcopyrite[J]. Acta Geologica Sinica, 90(2): 240 ~ 249 (in Chinese with English abstract).
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, *et al.* 2009. Comprehensive study of extraction of Rehenium with acetone in Re-Os isotopic dating[J]. Rock and Mineral Analysis, 28(3): 233 ~ 238 (in Chinese with English abstract).
- Li Chao, Qu Wenjun, Zhou Limin, *et al.* 2010. Rapid separation of osmium by direct distillation with Carius tube[J]. Rock and Mineral Analysis, 29(1): 14 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Wang Xuance, Xu Jifeng, *et al.* 2015. Disequilibrium-induced initial Os isotopic heterogeneity in gram aliquots of single basaltic rock powders: Implications for dating and source tracing[J]. Chemical Geology, 406: 10 ~ 17.
- Liu Huichuan, Peng Touping and Guo Xiaofei. 2018. Geochronological and geochemical constraints on the coexistent N-MORB- and SSZ-type ophiolites in Babu area (SW China) and tectonic implications[J]. Journal of the Geological Society, 175: 667 ~ 678.
- Liu Ming, Peng Shenglin and Wang Li. 2007. Geological characteristics of Sn-Cu polymetallic deposit in the contact-depression zone of the Laochang-Kafang rockbody in Gejiu[J]. Mineral Resource and Geology, 21(4): 395 ~ 403 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/ex, Version 3. 00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication.
- Ma Wenpu. 1998. Babu ophiolite Turkic-type orogen[J]. Chinese Science Bulletin, 43(13): 1 363 ~ 1 364 (in Chinese).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, *et al.* 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63: 11 ~ 12.
- Meng Guangzhi. 2003. Volcanic effusive deposit-hydrothermal reformation Cu deposit in Yangwan, Malipo, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 22(1): 89 ~ 96 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xiangyun, Cui Yinliang, Jiang Yongguo, *et al.* 2013. A tentative discussion on the genesis and the prospecting direction for marine volcanic type copper deposits in Southeast Yunnan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(S1): 49 ~ 55 (in Chinese with English abstract).
- Moiser D L, Berger V I and Singer D A. 2009. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits of the World-Database and Grade and Tonnage Models [M]. U. S. Geological Survey, 1 ~ 46.
- Nozaki T, Kato Y and Suzuki K. 2010. Re-Os geochronology of the Iimori Besshi-type massive sulfide deposit in the Sanbagawa metamorphic belt, Japan[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74: 4 322 ~ 4 331.
- Nozaki T, Kato Y and Suzuki K. 2014. Re-Os geochronology of the Hitachi volcanogenic massive sulfide deposit: The oldest ore deposit in Japan[J]. Economic Geology, 109: 2 023 ~ 2 034.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annual Review Earth Planet Science, 23: 1 073 ~ 1 109.
- Ravizza G, Martin C E, German C R, *et al.* 1996. Os isotopes as tracers in seafloor hydrothermal system: Metalliferous deposits from the TAG hydrothermal area, 26° N Mid-Atlantic Ridge[J]. Earth and Planet Science Letters, 138: 105 ~ 119.
- Ringwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 22: 247 ~ 263.
- Selby D, Kelley K D, Hiymann M W, *et al.* 2009. Re-Os sulfide (bornite, chalcopyrite, and pyrite) systematic of the carbonate-hosted copper deposits at Ruby Creek, southern Brooks Ranges, Alaska[J]. Economic Geology, 104: 437 ~ 444.
- Sharma M, Wasserburg G J, Hofmann A W, *et al.* 2000. Osmium isotopes in hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge[J]. Earth and Planet Science Letters, 179: 139 ~ 152.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495 ~ 500 (in Chinese with English abstract).
- Shirey S and Walker R. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry[J]. Annual Review of Earth and Planet Science, 26: 423 ~ 500.
- Sone M and Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia, new insights for Palaeo-Tethys closure and implications for

- the Indosinian orogeny[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2): 166 ~ 179.
- Stein H J, Morgan J W and Schersten A. 2000. Re-Os dating of low-level highly radiogenic (LLHR) sulfides: The Harnas gold deposit, south-west Sweden, records continental tectonic events[J]. *Economic Geology*, 95: 1 657 ~ 1 671.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, *et al.* 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland, and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineralium Deposite*, 33: 329 ~ 345.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmaism in the Ocean Basins* [C]. The Geological Society of Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Thanh N X, Hai T T, Hoang N, *et al.* 2014. Backarc mafic-ultramafic magmatism in Northeastern Vietnam and its regional tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 45 ~ 60.
- Tran T H, Izokh A E, Polyakov G V, *et al.* 2008. Permo-Triassic magmatism and metallogeny of Northern Vietnam in relation to the Emeishan plume[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 49: 480 ~ 491.
- Tran T H, Polyakov G V, Tran T A, *et al.* 2016. Intraplate Magmatism and Metallogeny of North Vietnam[M]. Springer, 106 ~ 149.
- Wakabayashi J. 2011. Mélanges of the Franciscan Complex, California, Diverse structural settings, evidence for sedimentary mixing, and their connection to subduction processes[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 480: 117 ~ 141.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 50: 11 ~ 30.
- Wu Genyao, Ma Li, Zhong Dalai, *et al.* 2001. Indosinian Turkic-type orogen bordering Yunnan and Guangxi: With reference to coupled basin evolution[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(1): 8 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Wu Genyao, Zhong Dalai, Zhang Qi, *et al.* 1999. Babu-Phu Ngu ophiolites, a geological record of Paleotethyan ocean bordering China and Vietnam[J]. *Gondwana Research*, 2(4): 554 ~ 557.
- Yang Jianghai, Du Yuansheng, Yu Xin, *et al.* 2017. Early Permian volcanic fragment-bearing sandstones in Babu of Southeast Yunnan: Indicative of Paleo-Tethyan ocean subduction[J]. *Earth Science*, 42(1): 24 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Shi Yinmao and Zhou Xun. 2018. The geological feature and genesis of Laochangpo ore block of Yangwan Cu deposit in Malipo[J]. *Yunnan Geology*, 37(4): 435 ~ 441 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Binhui, Ding Jun, Zhang Linkui, *et al.* 2013. SHRIMP zircon U-Pb chronology of the Babu ophiolite in Southeastern Yunnan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1 498 ~ 1 509 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Binhui, Niu Haobin, Zhou Jiewen, *et al.* 2019. Determination of forming age of clastic rocks in the Malipo Babu area of southwestern Nanpanjiang Basin and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2 187 ~ 2 196 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhengwei, Qi Liang, Shen Nengping, *et al.* 2011. Re-Os isotopic dating of chalcopyrite from the Abalieke copper-lead deposits in West Kunlun, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3 123 ~ 3 128 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Bingshuang, Li Jie, Long Xiaoping, *et al.* 2018. Re-Os isochron age of pyrites from Meiling Cu Deposit in the Eastern Tianshan: A case study for the Os isotopic heterogeneity[J]. *Earth Science*, 43(9): 2 966 ~ 2 979 (in Chinese with English abstract).
- Zhong DaLai, Wu Genyao, Ji Jianqing, *et al.* 1998. Discovery of ophiolite in Southeastern Yunnan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(13): 1 365 ~ 1 369.

附中文参考文献

- 陈泽超, 林 伟, Faure M, 等. 2013. 越南东北部早古生代构造事件的年代学约束[J]. *岩石学报*, 29(5): 1 825 ~ 1 840.
- 崔银亮. 2008. 云南金平龙脖河铜矿成矿规律及综合信息研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1 ~ 233.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 2012. 铼-钨法及其在矿床学中的应用 [M]. 北京: 地质出版社.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. 2001. Carius 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.
- 冯庆来, 刘本培. 2002. 滇东南八步蛇绿混杂岩中的早二叠世放射虫化石[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 27(1): 1 ~ 3.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟, 等. 2012. 南祁连山龙沟铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素物质来源示踪研究[J]. *地球学报*, 33(6): 899 ~ 906.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. *中国科学(D 辑)*, 33(7): 609 ~ 618.

- 李超, 裴浩翔, 王登红, 等. 2016. 山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. 地质学报, 90(2): 240~249.
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 等. 2009. 铼-锇同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. 岩矿测试, 28(3): 233~238.
- 李超, 屈文俊, 周利敏, 等. 2010. Carius 管直接蒸馏快速分离锇方法研究[J]. 岩矿测试, 29(1): 14~16.
- 刘明, 鹏省临, 王力. 2007. 个旧老-卡岩体接触-凹陷带锡-铜多金属矿地质特征及成因分析[J]. 矿床与地质, 21(4): 395~403.
- 马文璞. 1998. 八布蛇绿岩突厥型造山带[J]. 科学通报, 43(13): 1363~1364.
- 蒙光志. 2003. 麻栗坡杨万火山喷流沉积-热液改造型铜矿[J]. 云南地质, 22(1): 89~96.
- 莫向云, 崔银亮, 姜永果, 等. 2013. 滇东南海相火山岩型铜矿成因及找矿方向探讨[J]. 地球学报, 34(S1): 49~55.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 吴根耀, 马力, 钟大赉, 等. 2001. 滇桂交界区印支期增生弧型造山带, 兼论与造山作用耦合的盆地演化[J]. 石油实验地质, 23(1): 8~18.
- 杨江海, 杜远生, 于鑫, 等. 2017. 滇东南八布早二叠世含火山岩屑砂岩指示古特提斯洋俯冲[J]. 地球科学, 42(1): 24~34.
- 杨维, 施银茂, 周迅. 2018. 麻栗坡县杨万铜矿老厂坡矿段地质特征及成因[J]. 云南地质, 37(4): 435~441.
- 张斌辉, 丁俊, 张林奎, 等. 2013. 滇东南八步蛇绿岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 地质学报, 87(10): 1498~1509.
- 张斌辉, 牛浩斌, 卓皆文, 等. 2019. 南盘江盆地西南缘麻栗坡八布地区碎屑岩时代的厘定及其构造意义[J]. 地质学报, 93(9): 2187~2196.
- 张正伟, 漆亮, 沈能平, 等. 2011. 西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿 Re-Os 定年及地质意义[J]. 岩石学报, 27(10): 3123~3128.
- 赵冰爽, 李杰, 龙晓平, 等. 2018. 东天山梅岭铜矿床黄铁矿 Re-Os 等时线年龄: Os 同位素不均一的结果[J]. 地球科学, 43(9): 2966~2979.
- 钟大赉, 吴根耀, 季建清, 等. 1998. 滇东南发现蛇绿岩[J]. 科学通报, 43(13): 1365~1370.