

滇西北中甸地区休瓦促岩浆热液型 Mo-W 矿床 S、Pb 同位素对成矿物质来源的约束*

王新松¹ 毕献武^{1**} 胡瑞忠¹ 冷成彪¹ 余海军² 尹光侯²

WANG XinSong¹, BI XianWu^{1**}, HU RuiZhong¹, LENG ChengBiao¹, YU HaiJun² and YIN GuangHou²

1. 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 贵阳 550002

2. 云南省地质调查局 昆明 650051

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Yunnan Bureau of Geological Survey, Kunming 650051, China

2015-04-01 收稿, 2015-06-17 改回.

Wang XS, Bi XW, Hu RZ, Leng CB, Yu HJ and Yin GH. 2015. S-Pb isotopic geochemistry of Xiuwacu magmatic hydrothermal Mo-W deposit in Zhongdian area, NW Yunnan: Constrains on the sources of metal. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3171-3188

Abstract A Late Cretaceous Mo-Cu-(W) metallogenic belt was found in the Zhongdian area, southern portion of the Yidun Arc, which is not only distinguished from contemporary Sn-Ag-Pb-Zn mineralization in the northern Yidun Arc, but also different from the Late Triassic porphyry Cu mineralization in the same area. The reason why the metals of that above mineralization in the Yidun Arc are different remains unclear, as a lacking of researches on the sources of ore-forming materials of those Late Cretaceous deposits in the Zhongdian area. The Xiuwacu deposit is a large-scale Late Cretaceous Mo-W deposit in the Zhongdian area, with ages ranging from 85Ma to 83Ma. Three stages of the Late Cretaceous granites developed in the area consist of biotite granitic porphyry, monzogranite, and alkali-feldspar leucogranite. In addition, fluorite-feldspar pegmatite vein occurred under the alkali-feldspar leucogranite. The ore bodies are mainly of the quartz-vein-type, greisen-type and porphyry type. They are hosted in hornblende biotite monzogranite and biotite monzogranite, and distributed extending NNW along regional faults. Hydrothermal alteration consists mainly of K-feldspathization, greisenization, argillization, and silicification. Microthermometric data indicate a moderate-to-high temperature (146.6 ~ 550.0°C), low-to-moderate salinity (3.15% ~ 12.51% NaCl_{eqv}), CO₂-rich, aqueous ore-forming fluid, which were probably derived from postmagmatic hydrothermal solution. Both of the sulfide minerals and granites have similar Pb isotopic compositions (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.610 ~ 19.460, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.606 ~ 15.747, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.815 ~ 39.410) suggest that the metallogenic elements were probably derived from magmas. The S isotope of sulfide minerals ($\delta^{34}S_{VCDT}$: 2.07‰ ~ 4.33‰) also indicate a magma sources. Comparing the S-Pb isotopes and petrogeochemistry of Xiuwacu Mo-W mineralization with contemporary Sn-Ag-Pb-Zn mineralization in the northern Yidun Arc and Late Triassic porphyry Cu mineralization in the Zhongdian area, it shows that each of those magma events has different characteristics and metallogenic specialization. In other words, partial melting of thickened moderate to mafic lower continental crust would generate fertile magmas for Mo-Cu-(W) mineralization in the southern Yidun Arc; mixing of the mantle- and sediment-derived melts probably product favorable magmas for Sn-polymetallic mineralization in the northern Yidun Arc; and the Late Triassic porphyry Cu mineralization are genetically related to the mantle-derived magmas.

Key words Granites; Mo-W mineralization; Sources of metal; Xiuwacu; Yidun

摘要 滇西北中甸地区位于义敦岛弧南段,近年来勘探及研究工作发现区内燕山晚期发育有一期重要的 Mo-Cu-(W) 矿化,明显区别于义敦岛弧北段同期的 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化,也不同于同地区印支期大量发育的斑岩型 Cu 矿化。目前,中甸地区燕山晚期 Mo-Cu-(W) 矿化成矿物质来源研究相对较弱,尚不能很好地解释这些成矿作用主要成矿元素存在差别的原因。

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2015CB452603)、矿床地球化学国家重点实验室项目群资助项目(SKLOGD-ZY125-03)和国家自然科学基金重点项目(41130423)联合资助。

第一作者简介:王新松,男,1986年生,博士,助理研究员,矿床学、岩石学、矿床学专业, E-mail: wangxinsong@mail.gyig.ac.cn

** 通讯作者:毕献武,女,1967年生,研究员,博士生导师,矿床地球化学专业, E-mail: bixianwu@vip.gyig.ac.cn

因。休瓦促矿床是中甸地区代表性的燕山晚期大型岩浆热液型 Mo-W 矿床,前人定年结果显示成矿年龄为 ~83Ma。矿区内发育有三阶段的晚白垩世花岗岩,岩性主要有黑云母花岗斑岩、二长花岗岩和碱长花岗岩;且碱长花岗岩体下方还发育有萤石-长石似伟晶岩脉。矿化类型主要为石英脉型、近石英脉蚀变花岗岩型和斑岩型 Mo-W 矿化;矿体主要产在岩体内部,受控于北北西向断裂构造。蚀变类型有钾化、云英岩化、绢云母化及硅化等。流体包裹体测温显示成矿流体为含 CO₂ 的中高温(146.6~550.0℃),中低盐度(3.15%~12.51% NaCleqv)的 H₂O-NaCl 热液,可能主要来自于岩浆期后热液。多种金属硫化物与燕山晚期花岗岩具有一致的初始 Pb 同位素组成(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.610~19.460, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.606~15.747, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 38.815~39.410),显示其成矿物质可能主要源于壳源岩浆作用, S 同位素特征(δ³⁴S_{VCDT}: 2.07‰~4.33‰)也显示其来自于岩浆作用。通过对比休瓦促 Mo-W 矿化、义敦岛弧北段同期的 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化及中甸地区印支期斑岩型 Cu 矿化,这三种与岩浆有关的热液矿化的 S、Pb 同位素及岩石地球化学性质,发现这三种矿化的成矿岩浆与相应的成矿元素均具有较好的成矿专属性;并指示着在燕山晚期陆内环境下,中甸地区的 Mo-Cu-(W) 矿化成矿物质来源于加厚的中基性下地壳部分熔融而形成的 I 型花岗岩,义敦岛弧北段的 Sn-Ag-Pb-Zn 矿化则主要来源于中酸性变沉积岩地壳的部分熔融而形成的 A 型花岗岩;而中甸印支期斑岩型的 Cu 矿化则与幔源岩浆作用有着密切的关系。

关键词 花岗岩; Mo-W 矿化; 成矿物质来源; 休瓦促; 义敦
中图法分类号 P618.65; P618.67

1 引言

中甸地区位于义敦岛弧的南段,三江特提斯成矿域的中部(图1;侯增谦等,2001,2003)。近年来,大量年代学研究显示中甸地区发育有多个燕山晚期斑岩型-矽卡岩型、岩浆热液型 Mo 多金属矿床(杨岳清等,2002;曾普胜等,2004;徐兴旺等,2006;李建康等,2007;尹光候等,2009;王新松等,2011;李文昌等,2012;Deng *et al.*, 2014a, b; Yu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014a; Deng and Wang, 2015; Zu *et al.*, 2015)。该期 Mo-Cu-(W) 成矿作用,不同于中甸岛弧印支期的斑岩型 Cu 矿化,也明显区别于义敦岛弧北部燕山晚期的 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化。目前,中甸岛弧燕山晚期 Mo-Cu-(W) 矿化的成矿特征及物质来源研究仍相对薄弱,这限制了对义敦岛弧不同期次及地区花岗岩浆作用的成矿元素专属性的理解。休瓦促矿床是中甸地区燕山晚期的一个大型岩浆热液型 Mo-W 矿床,前人研究主要集中在成岩成矿年代学、成矿岩浆成因及动力学背景方面(侯增谦等,2003;李建康等,2007;Wang *et al.*, 2014a, b),对该矿床的成矿流体特征及成矿物质来源研究较少,这制约了对休瓦促矿床及中甸地区燕山晚期成矿作用成矿物质来源的探讨。本文以休瓦促 Mo-W 矿床为例,详细介绍该矿床的矿床地质特征,对早期的萤石-长石似伟晶岩脉中的萤石及矿化石英脉中的石英进行流体包裹体显微测温分析,初步了解成矿流体特征;对休瓦促矿床多种金属硫化物及花岗岩进行 S、Pb 同位素分析,并通过对比休瓦促 Mo-W 矿化与义敦岛弧北段同期的 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化及中甸地区印支期斑岩型 Cu 矿化这三种与岩浆有关的热液矿化的 S、Pb 及岩石地球化学性质,综合探讨休瓦促矿床的成矿物质来源,进而对义敦岛弧不同期次及不同区域与岩浆有关的成矿作用成矿元素专属性进行初步解释。

2 区域地质背景

义敦岛弧位于三江特提斯成矿域的北中段,青藏高原的东侧,是由甘孜理塘洋壳在晚三叠纪向西俯冲于中咱微陆块之下而形成的陆缘弧(图1;侯增谦等,2001,2003,2004)。义敦岛弧可划分为两个主要地质构造单元,分别为中咱微陆块和火山弧带(Reid *et al.*, 2005)。中咱微陆块出露有与扬子陆块相似的古元古代地层,通常认为其在二叠纪时期从扬子地块分离出来,两者具有相似的结晶基底(Chang, 1997)。义敦岛弧火山弧带内地层主要为中晚三叠系火山岩及火山碎屑沉积岩建造,岩性主要为弧火山岩、砂岩、灰岩及火山碎屑岩(Wang *et al.*, 2013a)。构造主要发育有 NW 及 NNW 向高角度断层。义敦岛弧由于南北段印支期构造样式及成岩成矿作用特征迥异,而被划分为昌台弧(北段)和中甸弧(南段)(侯增谦等,2001,2003,2004)。昌台弧主要发育有印支期弧后盆地、弧间裂谷双峰式火山岩及相伴生的 VMS 型 Cu-Ag-Pb-Zn 多金属成矿作用(Wang *et al.*, 2013b),多个矿床达到大型规模,如:呷村、嘎依穷等 VMS 型矿床(Hou, 1993; Hou *et al.*, 2001, 2007)。中甸弧主要发育有印支期俯冲作用相关的玄武-安山岩系列、斑岩及相伴生的斑岩型及矽卡岩型 Cu 多金属矿化作用(Wang *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2014),如普朗、雪鸡坪等斑岩型 Cu 矿床及浪都矽卡岩型 Cu 矿床(李文昌等,2011; Leng *et al.*, 2012)。在晚三叠世甘孜-理塘洋闭合后,义敦岛弧和松潘-甘孜地块发生碰撞,在侏罗纪义敦岛弧和松潘-甘孜地块出现的板内岩浆(张能德和张怀举,1993;曲晓明等,2003;胡健民等,2005;赵永久等,2007;王全伟等,2008;Wu *et al.*, 2014)及 W-Sn 成矿作用(Liu *et al.*, 2007)指示着义敦岛弧及松潘-甘孜地块在侏罗纪已进入陆内造山阶段并发生了造山后伸展作用(Wang *et al.*, 2014a, b)。

在晚白垩世即燕山晚期,沿义敦岛弧近南北向近 500km

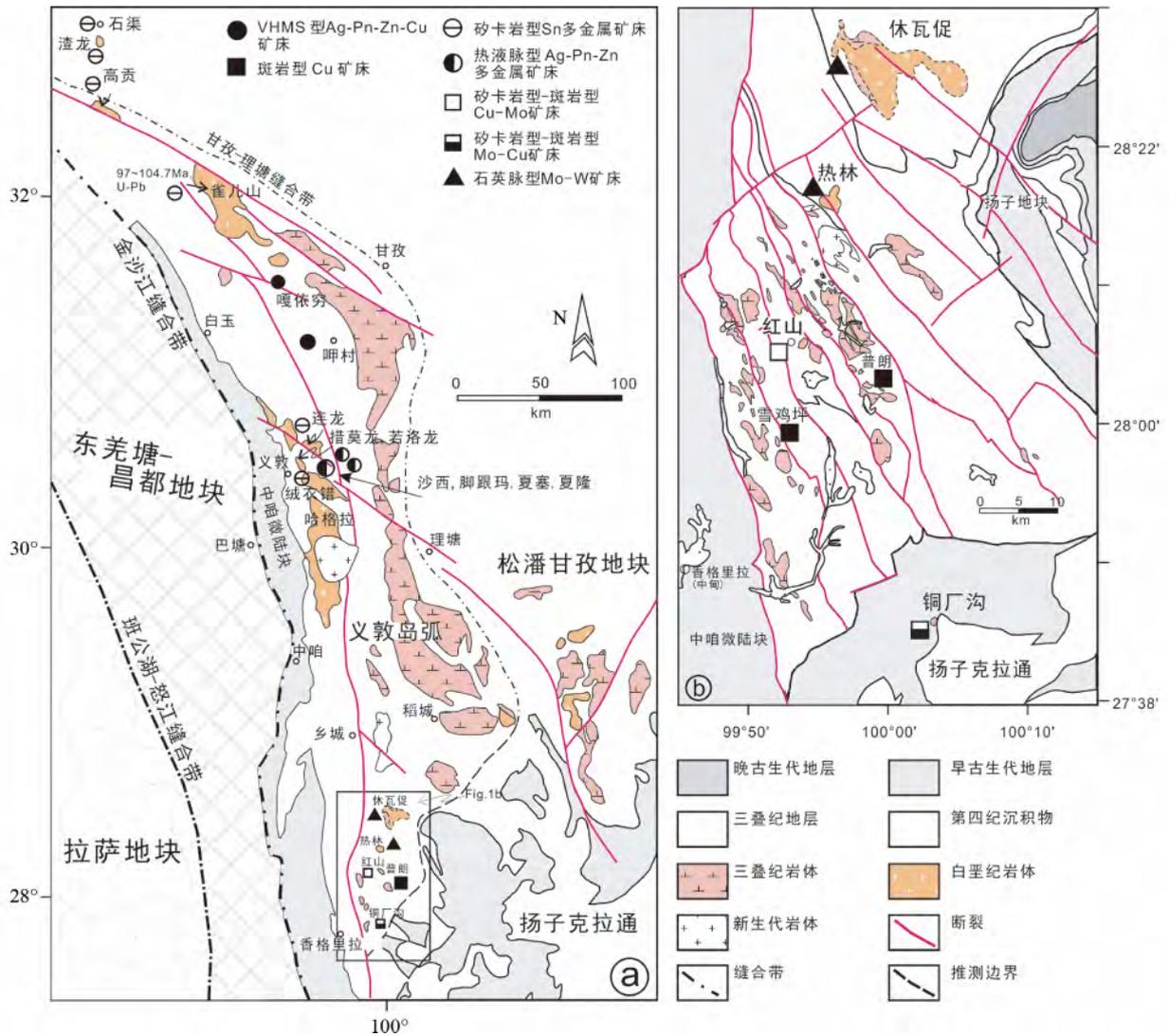


图1 义敦岛弧 (a) 和中甸地区 (b) 地质矿产简图(据 Wang *et al.* , 2014a 修改)
 Fig.1 Simplified geological maps of the Yidun Arc (a) and the Shangri-La region (b) (modified after Wang *et al.* , 2014a)

发育大量花岗岩及相关的多金属成矿作用(图1、表1) (侯增谦等, 2003)。在义敦岛弧北段主要发育有 A-型花岗岩及其相关的矽卡岩型及热液脉型 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化, 典型矿床有夏塞热液脉型 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿床、连龙 Sn 多金属矿床等(侯增谦等, 2001, 2004; 曲晓明等, 2001, 2002; Qu *et al.* , 2002; 刘权, 2003; Hou *et al.* , 2007; 邹光富等, 2008; 林青, 2010); 而在义敦岛弧的南段中甸弧主要发育 I 型花岗岩(Wang *et al.* , 2014b) 及斑岩型、矽卡岩型和岩浆热液型 Mo-Cu-(W) 多金属矿化, 典型矿床有休瓦促和热林岩浆热液型 Mo-W 矿床、红山斑岩型-矽卡岩型 Cu-Mo 多金属矿床及铜厂沟斑岩型-矽卡岩型 Mo-Cu 矿床(杨岳清等, 2002; 曾普胜等, 2004; 徐兴旺等, 2006; 李建康等, 2007; 尹光候等, 2009; 王新松等, 2011; 李文昌等, 2012; Yu *et al.* , 2014; Wang *et al.* , 2014a; Zu *et al.* , 2015)。Wang *et al.* (2014b) 通过梳理拉萨地块和羌塘地块的碰撞历史及藏

东地区磷灰石裂变径迹年龄数据, 提出义敦岛弧燕山晚期的这期成岩成矿作用可能形成于拉萨-羌塘地块碰撞相关的碰撞后的伸展环境。

前人已对上述义敦岛弧两期重要的与成矿相关的岩浆作用开展了大量的岩石地球化学工作。中甸地区印支期斑岩型 Cu 矿相关斑岩及玄武-安山岩岩石学研究显示, 其主要来自于地幔楔的部分熔融, 受到少量下地壳物质的混染(Leng *et al.* , 2012, 2014)。休瓦促岩体及中甸地区同期的热林、红山及铜厂沟岩体均呈现出了 I 型花岗岩的特征, 矿物学及多种同位素地球化学均证实其主要来自于加厚的中基性下地壳的部分熔融(Wang *et al.* , 2014a, b)。义敦岛弧北段的 Sn-Ag-Pb-Zn 矿化相关的 A 型花岗岩, 则主要来自于中酸性变沉积岩地壳物质的部分熔融(Qu *et al.* , 2002; 侯增谦等, 2003)。综合前人研究中这三种矿化所用相关岩体的 Sr-Nd 同位素数据进行投图(图 2), 这三种岩浆活动呈现出

表 1 义敦岛弧燕山晚期主要矿床及矿床地质特征表

Table 1 Geological features of major Late Yanshanian ore deposits in the Yidun Arc

矿床名称 (经纬度)	地理位置	成因类型	成矿元素	储量/品位	地层及围岩	蚀变类型	矿石矿物	相关岩体	成岩成矿年代	数据来源
休瓦促 (99°57', 28°30')	香格里拉 拉县	岩浆热 液型	Mo-W	Mo:13.627/ 0.38%,WO ₃ : 8431t/0.28%	上三叠统砂岩 及板岩	钾长石化、云英 岩化、硅化、泥 化、黄铁矿化	辉钼矿、白钨 矿、辉钨矿、毒 砂、黄铜矿、黄 铁矿、磁黄铁矿	休瓦促二长花 岗岩、碱长花岗 岩	锆石 U-Pb LA-ICPMS 定年: 84.4 ± 1.4Ma ~ 85.6 ± 0.5Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时 线年龄: 83 ± 1Ma	李建康等, 2007; Wang et al., 2014a
热林 (99°56', 28°17')	香格里拉 拉县	岩浆热 液型	Cu-Mo- W	Mo:0.049%	上三叠统砂岩 及板岩	角岩化、硅化, 黄铁矿化及弱 砂卡岩化	辉钼矿、白钨 矿、黄铜矿、黄 铁矿、磁黄铁矿	热林黑云母二 长花岗岩	锆石 U-Pb LA-ICPMS 定年: 82.7 ± 0.5Ma, 黑云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar: 81.7 ± 0.9Ma, 82.0 ± 0.9Ma, 辉钼矿 Re- Os 等时线年龄: 81.2 ± 2.3Ma	尹光候等, 2009; Wang et al., 2014a
红山 (99°53', 28°07')	香格里拉 拉县	斑岩型- 砂卡 岩型	Cu 多 金属	Cu:0.65Mt/1.23%, S:4.95Mt/3.77%, Ag:323t/15.4g/t, Mo:5.769t, In-Co- Bi:8.733t, WO ₃ : 7.532t, Pb-Zn: 25.262t	上三叠统砂岩、 板岩、灰岩、大 理岩	砂卡岩化及大 理岩化	磁黄铁矿、黄铜 矿、黄铁矿、辉 钼矿、闪锌矿	红山花岗斑岩	锆石 SIMS U-Pb 定年, 隐伏 斑岩: 79.8 ± 1.3Ma, 锆石 U-Pb LA-ICPMS 定年, 地表 出露花岗斑岩: 81.1 ± 0.5Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时 线年龄: 81.2 ± 2.6Ma	Wang et al., 2014a
铜厂沟 (100°42', 28°44')	香格里拉 拉县	斑岩- 砂卡 岩型	Mo-Cu	Mo:50000t/0.3%, Cu:340000t/0.8%, Ag:35t/8.05g/t	三叠系灰岩、大 理岩、二叠纪玄 武岩	砂卡岩化及大 理岩化	辉钼矿、黄 铜矿、黄铁矿、磁 铁矿	黑云母花岗斑 岩	锆石 U-Pb LA-ICPMS 定年: 86.3 ± 0.6Ma, 87.4 ± 0.6Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时 线年龄: 85 ± 2Ma	李文昌等, 2012; Wang et al., 2014a
夏塞 (99°36', 30°27')	巴塘县	热液 脉型	Ag-Pb- Zn-(Sn- Cu-Au)	Ag:5600t/300g/t, Pb:0.73Mt/8%, Zn:0.44Mt/2%, Sn:20000t/0.19%	上三叠统砂岩、 板岩及少量碳 酸盐岩	黄铁矿化、硅 化、铅云母化、 绿泥石化、磷酸 盐岩化	方铅矿、闪锌 矿、黄铁矿、黄 铜矿、自然银	若洛隆及绒衣 错黑云母二长 花岗岩	夏塞主要矿化脉中石英 的 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar: 73.2 ± 0.3Ma, 76.9 ± 0.6Ma, 绒衣错二长 花岗岩中钾长石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar: 75.2 ± 0.3Ma, 绒衣错二长 花岗岩全岩 Rb-Sr: 93 ± 5Ma, 若洛隆二长花岗岩全 岩 Rb-Sr: 93 ± 7Ma	张能德和张怀举, 1993; Qu et al., 2002; 林方成等, 2003; 应汉龙等, 2006; 林青, 2010
沙西 (99°34', 30°26')	巴塘县	热液 脉型	Ag-Pb- Zn-Sn- (Cu-Au -W)	Ag: > 10000t, Pb 和 Zn: 3Mt, Sn: 0.10Mt	同上	同上	同上	同上	绒衣错二长花岗岩中钾长 石 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar: 75.2 ± 0.3Ma, 绒衣错二长花岗岩全岩 Rb- Sr: 93 ± 5Ma, 若洛隆二长花 岗岩全岩 Rb-Sr: 93 ± 7Ma	同上

续表 1

Continued Table 1

矿床名称 (经纬度)	地理位置	成因类型	成矿元素	储量/品位	地层及围岩	蚀变类型	矿石矿物	相关岩体	成岩成矿年代	数据来源
夏隆 (99°34', 30°24')	巴塘县	热液脉型	Ag-Pb-Zn-(Sn)	Ag: > 20000t/91 ~ 583g/t, Pb: 0.18Mt/ 1.56% ~ 11.37%, Zn: 0.24Mt, /0.85% ~ 6.96%	同上	同上	同上	同上	同上	同上
脚腿玛 (99°34', 30°24')	巴塘县	热液脉型	Sn	Sn: > 90000t/0.6%	上三叠统砂岩、 板岩及碳酸盐岩	钾长石化、云英 岩化、碳酸盐化	锡石、方铅矿、 闪锌矿、毒砂、 黄铁矿、黄铜 矿、辉银矿	若洛隆及措莫 隆黑云母二长 花岗岩	同上	同上
措莫隆- 亥隆 (99°22', 30°30')	巴塘县	矽卡 岩型	Sn-Cu- Ag-Pb- Zn	Sn: 36011t/0.1% ~ 18.25%, Cu: 0.2% ~ 3.26%, Pb: 0.12% ~ 7.95%, Zn: 0.12% ~ 9.19%, Ag: 38.6 ~ 154g/t	上三叠统砂岩、 板岩及碳酸盐 岩	钾长石化、云英 岩化、矽卡 化、硅化	锡石、方铅矿、 闪锌矿、毒砂、 黄铁矿、黄铜 矿、斑铜矿、辉 铜矿	若洛隆及措莫 隆黑云母二长 花岗岩	若洛隆二长花岗岩全岩 Rb- Sr: 93 ± 7Ma	Qu et al., 2002; 范 晓, 2009
连龙 (99°20', 30°32')	白玉县	矽卡 岩型	Sn-Ag	Sn: 27000t/0.45% ~ 1.62%, Ag: 124t/ 57.6g/t	上三叠统砂岩、 板岩、碎屑岩及 碳酸盐岩	钾长石化、云英 岩化、矽卡 化、大理岩化	锡石、方铅矿、 闪锌矿、黄铜 矿、黄铁矿、黝 铜矿、共硫铋银 矿	连龙黑云母二 长花岗岩	连龙二长花岗岩全岩 Rb- Sr: 89.1 ± 5.2Ma	同上
渣龙	石渠县	热液脉型	Sn	—	上三叠统砂岩、 板岩	云英岩化、硅 化、绿泥石化	锡石、方铅矿、 闪锌矿、黄铜 矿、黄铁矿、毒 砂	渣龙花岗岩斑岩	二长花岗岩全岩 Rb-Sr: 103.7 ± 6.4Ma	同上

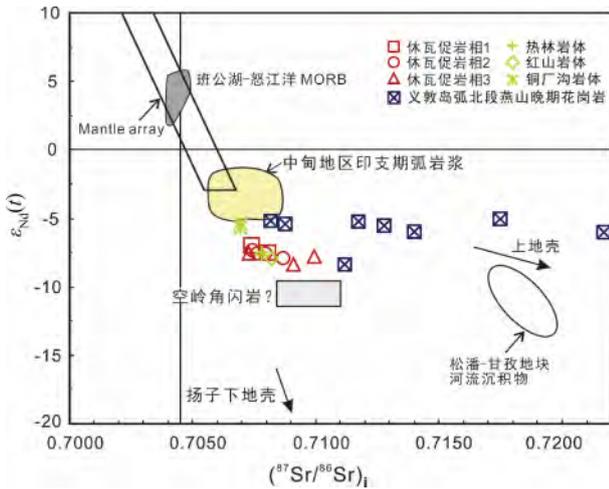


图2 义敦岛弧主要矿床岩体的 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值相关关系图

图中各地质体的 Sr、Nd 同位素值的应用来源分别为: 班公湖-怒江洋 MORB 引自 Wang *et al.*, 2010; 地幔、下地壳和上地壳可能分布趋势引自 Jahn *et al.*, 1999; 空岭角闪岩引自 Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000; 中甸地区晚三叠世的弧火成岩引自 Wang *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2012, 2014; 松潘-甘孜地块沉积岩引自 Wu *et al.*, 2010

Fig. 2 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of the intrusions in the Yidun Arc

Bangong MORB from Wang *et al.*, 2010; The trends of mantle array, lower continental crust (LCC) and upper continental crust (UCC) are from Jahn *et al.*, 1999; Kongling amphibolite are from Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000; Late Triassic arc magmas in the southern Yidun Terrane from Wang *et al.*, 2011; Leng *et al.*, 2012, 2014; Songpan-Ganzi sedimentary rocks from Wu *et al.*, 2010

明显不同的 Sr、Nd 同位素特征, 指示着它们不同的来源。

3 矿区及矿床地质

休瓦促岩浆热液型 Mo-W 矿床位于香格里拉(中甸)县城北东 20° 方向约 80km 处(图 1), 矿床储量 WO_3 : 8431 吨(品位 0.28%), Mo: 13627 吨(品位 0.38%)。该矿床于 1991 年由云南省地矿局第三地质大队完成普查工作, 之后于 2010 年 8 月由香格里拉雪域开发有限责任公司委托云南黄金股份有限公司完成了矿区的详查工作。矿床分为四个矿区: 北矿区、东矿区、西矿区和桑都格勒矿区。目前, 北矿区、东矿区和西矿区由雪域公司进行开采, 桑都格勒矿区由香格里拉康特钼矿业有限责任公司进行开采。

区内出露地层主要为上三叠统喇嘛垭组的砂岩及砂质板岩。主要赋矿围岩为休瓦促岩体, 矿体呈石英脉或脉状分布在岩体内部(图 3)。休瓦促岩体为一个多期多阶段的复式岩体, 岩体总体可分为两期岩体, 早期岩体为印支期的角闪黑云钾长花岗岩和黑云母花岗岩斑岩; 晚期岩体则为燕山晚期的花岗岩, 可分为三个岩相, 分别为岩相 1 黑云母花岗岩(图 4a、图 5a)、岩相 2 黑云母二长花岗岩(图 4b、图 5b)和岩相 3 浅色碱长花岗岩(图 4c、图 5c)。空间上印支期岩体分布在周边而燕山晚期岩体侵入在内部。整个休瓦促岩体出露面积达 100km², 侵位于上三叠统图姆沟组和喇嘛垭组的地层中。休瓦促燕山晚期三个岩相具有较高的 SiO_2 (70% ~ 76%) 及全碱含量($Na_2O + K_2O$: 7.5% ~ 10.7%) 为准铝质到弱过铝质 (A/CNK : 0.96 ~ 1.07), 具有较低的 Mg、Ca、P 含量, 相对富集轻稀土元素、Rb、U、Th 和 Ta, 而相对亏损重稀土元素、Ba、Sr 和 Eu; 总体呈现出高分异 I 型花岗岩特征(Wang *et al.*, 2014b)。休瓦促岩体具有相对较高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.7075 ~ 0.7098) 和 $\delta^{18}O$ (5.9‰ ~ 8.4‰) 值, 负

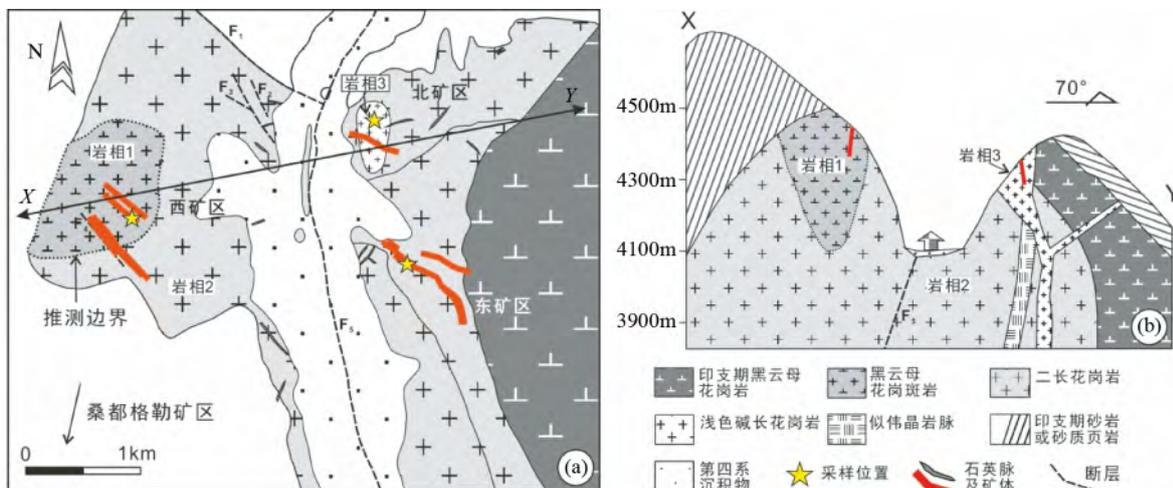


图3 休瓦促 Mo-W 矿床地质图 (a) 和地质剖面简图 (b) (据 Wang *et al.*, 2014b 修改)

Fig. 3 Simplified geological map (a) and cross-section map (b) of the Xiuwacu Mo-W deposit (modified after Wang *et al.*, 2014b)

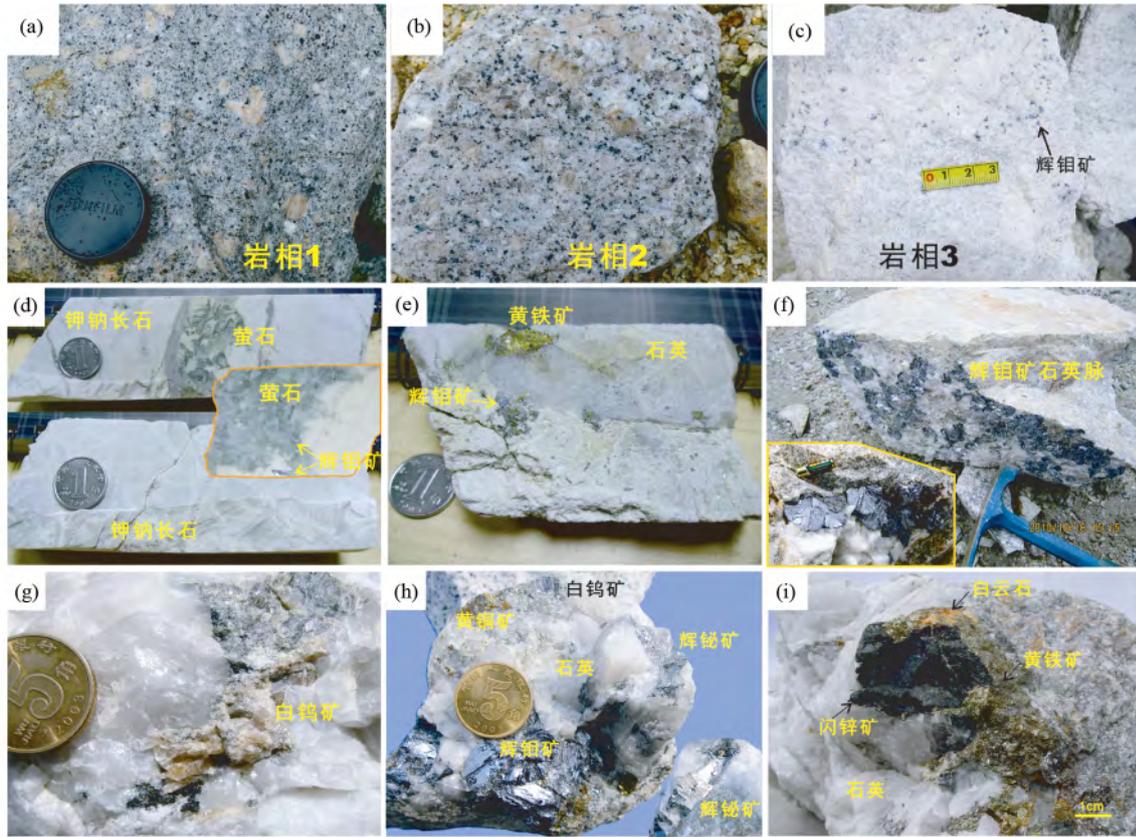


图4 休瓦促 Mo-W 矿床岩体及矿石野外照片

(a) 岩相1 黑云母花岗岩斑岩; (b) 岩相2 二长花岗岩; (c) 岩相3 浅色碱性长石花岗岩, 其中发育有浸染状辉钼矿矿化; (d) 萤石-长石似伟晶岩脉, 其中长石为钾钠长石巨晶, 萤石为矿物集合体; (e) 岩相3 中的含辉钼矿、黄铁矿的矿化石英脉; (f) 沿岩体中断裂面分布的辉钼矿扇形集合体; (g) 石英脉中的白钨矿; (h) 白钨矿、辉钼矿、辉铋矿、黄铜矿矿化石英脉; (i) 含白云石的黄铁矿、闪锌矿矿化石英脉

Fig. 4 Field photographs of the intrusions and ores from the Xiuwacu Mo-W deposit

(a) phase 1 biotite granitic porphyry; (b) phase 2 monzogranite; (c) phase 3 alkali-feldspar leucogranite with disseminated molybdenite mineralization; (d) fluorite-feldspar pegmatite vein, with K-Na feldspar, and fluorite megacrysts (3 ~ 20cm); (e) alkali-feldspar leucogranite associated with molybdenite-pyrite-quartz veinlets; (f) molybdenite occurs as fan-shaped sheets or stellate aggregates along the fracture surface of the intrusions; (g) scheelite occurs as allotriomorphic grains in quartz vein; (h) scheelite-molybdenite-bismuthinite-chalcopyrite quartz vein; (i) pyrite-sphalerite-dolomite quartz vein

的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ (-8.0 ~ -6.9) 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ (-7.6 ~ -3.2) 值, 以及古老的 Nd 及 Hf 同位素的模式年龄 1.3 ~ 1.7Ga, 指示着其主要源于加厚的中基性下地壳部分熔融 (Wang *et al.*, 2014b)。矿区主要矿化类型有岩浆热液型、近石英脉蚀变花岗岩型及少量斑岩型矿化。斑岩型矿化主要产在北矿区的浅色细粒碱长花岗岩体内部 (图 2), 而且北矿区深部发育有宽大的石英脉和巨晶 (3 ~ 20cm) 的钾钠长石及萤石, 呈现出似伟晶岩特征 (图 4d); 岩浆热液型及蚀变花岗岩型矿体主要产在东矿区和西矿区的两期岩体内部。蚀变类型有钾长石化、云英岩化、绢云母化和硅化, 且往往呈现出多种蚀变叠加的特征 (图 2)。

矿体主要受到近南北向、北西向断裂控制。矿石结构主要有交代结构、包含结构。通过休瓦促矿床矿物组合及矿石结构成矿过程可以划分为三个成矿阶段: (1) 硅酸盐-氧化物阶段, 以北矿区发育的萤石-长石似伟晶岩脉、钾化、云英岩

化及斑岩型矿化为代表。萤石-长石似伟晶岩脉中萤石和钾钠长石均呈巨晶状 (图 4d); 钾化及云英岩化蚀变岩中普遍发育有钾长石、黑云母、锆石、金红石、钽石、氟碳铈镧矿、磁铁矿、白钨矿等氧化物及硅酸盐矿物 (图 4d); 斑岩型矿化发育在似伟晶岩脉上部的浅色细粒碱长花岗岩体内部 (图 3), 辉钼矿及白钨矿呈浸染状分布 (图 4c); (2) 硫化物阶段, 该阶段以石英脉及金属硫化物矿化为代表 (图 4e)。生成矿物主要有辉钼矿、辉铋矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂、砷黝铜矿、闪锌矿等 (图 4e-i、图 5f)。辉钼矿往往呈自形 1 ~ 8cm 扇形片状集合体或者菊花状集合体沿断裂附着在岩体裂隙表面 (图 4f) 或者形成于蚀变花岗岩和石英脉之间。晚期的金属硫化物往往交代早期的硅酸盐、磁铁矿及白钨矿, 如图 5e 反映出首先黄铜矿沿裂隙交代了磁铁矿, 紧接着砷黝铜矿交代了黄铜矿, 并可见有磁铁矿碎屑被包裹在黄铜矿及砷黝铜矿中, 最后辉钼矿交代了砷黝铜矿; 该过程中也反映出在成矿过程

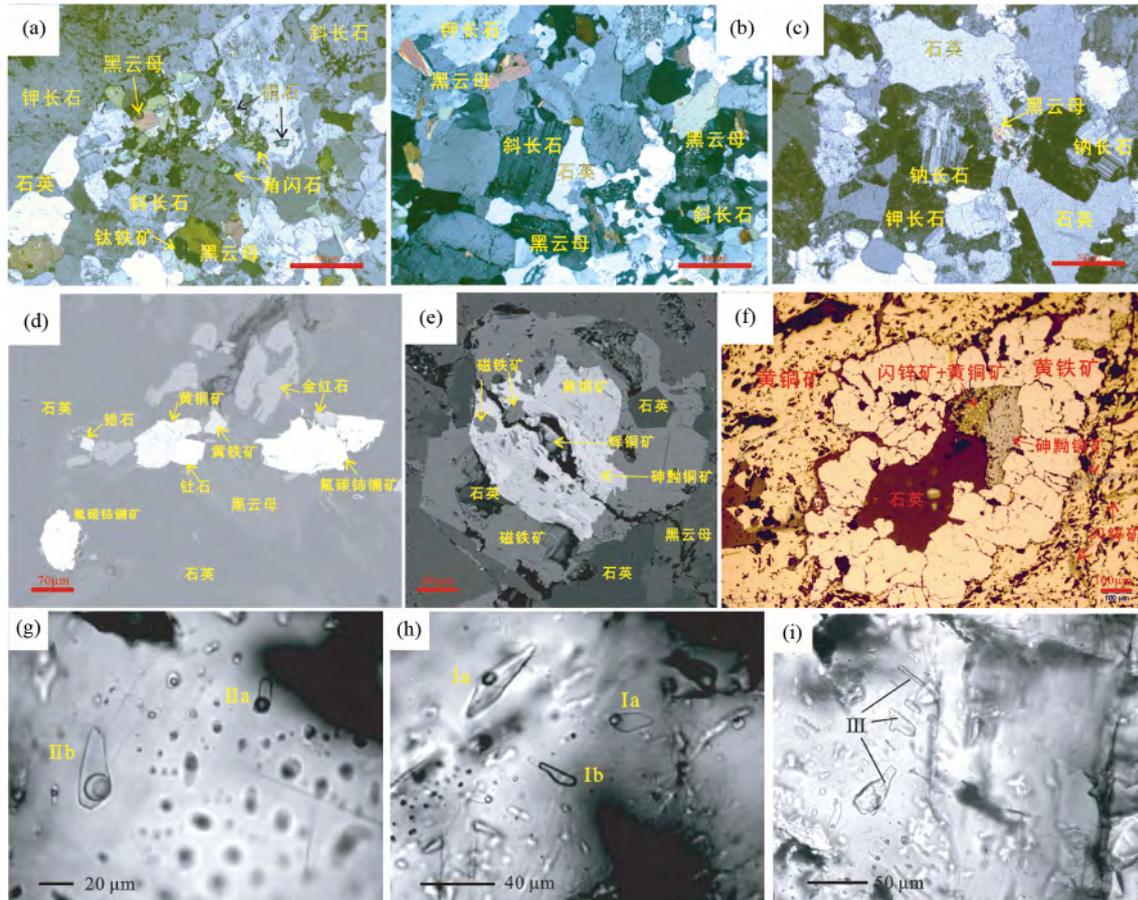


图5 休瓦促 Mo-W 矿床岩体、矿石及流体包裹体光学及电子显微镜下照片

(a、b、c) 分别为岩相 1 黑云母花岗岩斑岩、岩相 2 二长花岗岩和岩相 3 浅色碱性长石花岗岩光薄片的正交偏光镜下照片; (d) 云英岩化蚀变岩中主要矿物组合的电子探针背散射照片; (e) 石英脉中磁铁矿被晚期硫化物交代的电子探针背散射照片, 照片反映出磁铁矿先被黄铜矿交代, 然后黄铜矿被砷黝铜矿交代, 最后砷黝铜矿被辉铜矿交代, 反映出成矿流体的氧逸度和温度在不断的降低; (f) 黄铜矿中包裹的黄铁矿被晚期的闪锌矿、砷黝铜矿交代充填的反光镜下照片; (g) 萤石-长石脉中萤石的流体包裹体偏光镜下照片, 萤石中发育大量含 CO_2 包裹体, II a 型常温下 CO_2 呈一相, II b 型常温下 CO_2 呈两相; (h) 石英硫化物脉中石英中发育的气液两相流体包裹体, I a 型气液比较小, 升温均一至液相, I b 型气液比较大, 升温均一至气相; (i) 石英硫化物脉中石英中发育的纯液相包裹体

Fig. 5 Photomicrographs of intrusions, ores and fluid inclusions from Xiuwacu Mo-W deposit

(a, b, c) are photomicrographs of phase 1 biotite granitic porphyry, phase 2 monzogranite, phase 3 alkali-feldspar leucogranite under perpendicular polarized light, respectively; (d) BSE photomicrograph of major minerals in greisenized granite; (e) BSE photomicrograph of magnetite in quartz vein, magnetite was firstly metasomatic altered by chalcopyrite, then chalcopyrite was metasomatic altered by tennantite, finally tennantite was metasomatic altered by chalcocite, it reflects that the f_{O_2} and temperature of the ore forming fluids were gradually decreased; (f) both chalcopyrite and included pyrite were metasomatic altered and filled by tennantite and sphalerite; (g) CO_2 -rich fluid inclusions in the fluorite from the fluorite-feldspar pegmatite vein, type II a two-phase and type II b three-phase CO_2 -rich inclusions; (h) fluid inclusions in the quartz from quartz-sulfide vein, type I a liquid-rich aqueous inclusion and type I b vapour-rich aqueous inclusion; (i) single-phase aqueous inclusions in the quartz from quartz-sulfide vein

中成矿流体的氧逸度和温度在不断地降低; (3) 碳酸盐岩阶段, 该阶段以少量的白云石和方解石为代表。具体的成矿阶段及矿物生成顺序见图 6。

4 样品采集及分析方法

用于流体包裹体分析的萤石采于北矿区萤石-长石似伟晶岩脉, 萤石为浅绿色巨晶集合体; 石英采于东矿区一中段及二中段的石英硫化物脉中。用于硫、铅同位素分析的金属

硫化物主要采于东矿区一中段及二中段含辉钼矿的具有不同金属硫化物组合的矿化石英脉中, 其中用于硫同位素分析的辉钼矿 9 件、辉铋矿 2 件、黄铜矿 2 件、黄铁矿 7 件、闪锌矿 2 件, 用于铅同位素分析的辉钼矿 2 件、辉铋矿 1 件、磁黄铁矿 1 件、黄铁矿 2 件、闪锌矿 1 件。用于铅同位素分析的花岗岩采于矿区内燕山晚期的三个不同岩相, 分别为岩相 1 黑云母花岗岩斑岩、岩相 2 二长花岗岩和岩相 3 浅色碱性长石花岗岩。

流体包裹体测温工作及金属硫化物的硫、铅同位素分析

表 2 休瓦促 Mo-W 矿床流体包裹体显微测温数据表

Table 2 Microthermometric data in the Xiuwacu Mo-W deposit

矿物	类型	T_{m,CO_2} (°C)	T_{h,CO_2} (°C)	$T_{m,ice}$ (°C)	$T_{m,cla}$ (°C)	盐度 (% NaCleqv)	Phase (tot)	$T_{h,tot}$ (°C)
硅酸盐-氧化物阶段								
	I a			-6.5 (n=1)		9.89 (n=1)	L	238~340 (n=10)
	I b						V	403 (n=1)
萤石	II a	-58.9 ~ -57.6 (n=2)			6.8 (n=1)	6.03 (n=1)	L	282 (n=1)
	II b	-58.5 ~ -57.5 (n=9)	28.5 ~ 32.2 (n=9)		6.8 ~ 8.4 (n=9)	3.15 ~ 6.03 (n=9)	L	276 ~ 365 (n=10)
石英-硫化物阶段								
	I a			-7.2 ~ -2.5 (n=60)		4.18 ~ 10.73 (n=60)	L	152 ~ 409 (n=82)
石英	I b			-8.7 ~ -3.4 (n=4)		5.56 ~ 12.51 (n=4)	V	256 ~ 550 (n=7)
	II b	-55.8 (n=1)	26 (n=1)		5.4 (n=1)	8.35 (n=1)	L	

注: T_{m,CO_2} 和 T_{h,CO_2} 分别指固相 CO_2 的熔融温度和 CO_2 的部分均一温度; $T_{m,ice}$ 指冰熔化温度; $T_{m,cla}$ 指笼合物熔化温度; Phase (tot) 指完全均一后的相态, L 为液相, V 为气相; $T_{h,tot}$ 指完全均一温度

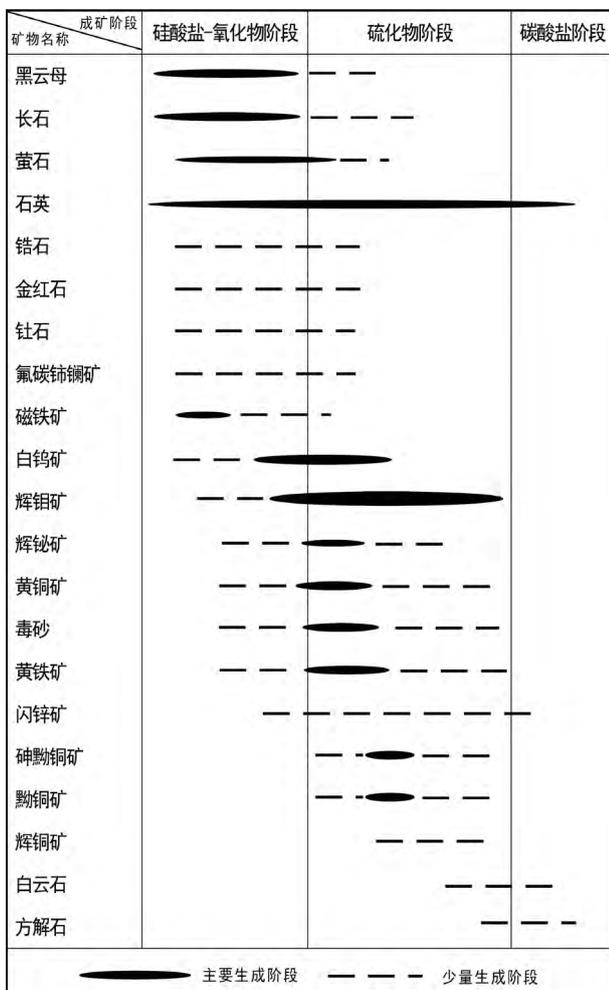


图 6 休瓦促 Mo-W 矿床的矿物生成顺序图

Fig. 6 Paragenetic sequence of minerals from Xiuwacu Mo-W deposit

均在中国科学院地球化学研究所进行。流体包裹体测温工作在矿床地球化学国家重点实验室流体包裹体实验室完成, 测试仪器为 Linkam THMSG 600 型冷热台, 测温范围为 -196°C 到 600°C, 冷冻数据和加热数据精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。金属硫化物硫同位素在环境地球化学国家重点实验室完成的, 采用连续流同位素质谱仪 CF-IRMS (EA-Iso Prime, 型号为 Euro 3000, GV instruments) 测试, 测定数据采用以国际硫同位素 CDT 标准标定的国家硫同位素标准 (硫化银) GBW-4414 ($\delta^{34}\text{S} = -0.07\text{‰}$) 和 GBW-4414 ($\delta^{34}\text{S} = 22.15\text{‰}$) 校正, 测试误差小于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。花岗岩样品铅同位素在澳室分析测试检测 (广州) 矿物实验室完成, 在称取 0.5g 样品后, 用 HNO_3 、 HCl 、 HF 和 HClO_4 溶解, 样品分解后蒸干, 之后加入盐酸溶解蒸干, 然后使用强碱性阴离子交换树脂依次加入纯化的 HBr 和 HCl 对 Pb 进行分离, 测试采用高精度扇形磁场电感耦合等离子质谱仪。金属硫化物样品铅同位素在环境地球化学国家重点实验室完成的, 在称取适量样品后, 用 HF 和 HClO_4 溶解, 然后使用强碱性阴离子交换树脂依次加入纯化的 HBr 和 HCl 对 Pb 进行分离。测试采用 Nu Instruments 公司的 Nu plasma 型多接受电感耦合等离子质谱仪, 实验采用国际标样 NBS 981 进行监控, 标样 ($n=10$) 测试结果平均值为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.93671 \pm 0.00053$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.48896 \pm 0.00053$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.6885 \pm 0.0014$ 。

5 结果

5.1 流体包裹体岩相学特征及测温结果

休瓦促矿床流体包裹体样品主要来自于北矿区似伟晶岩脉中的萤石, 以及东矿区的硫化物石英脉中的石英。根据

表3 义敦岛弧燕山晚期主要矿床金属硫化物硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotopic compositions of sulfide from major Late Yanshanian deposits in the Yidun Arc

矿床	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ (‰)	$\pm 2\sigma$	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ (‰)	$\pm 2\sigma$	数据来源
休瓦促	SXWC10-47	黄铜矿	2.70	0.03	XWC11-423	辉钼矿	2.22	0.00	本文
	XWC11-82		2.44	0.03	XWC11-440		2.98	0.04	
			平均	2.57			平均	2.60	
	SXWC10-47		3.62	0.09	SXWC10-47		4.33	0.04	
	XWC11-121		3.33	0.15	XWC11-406		4.09	0.11	
	XWC11-160		2.75	0.02	XWC11-408		4.23	0.01	
	XWC11-160-1		2.77	0.02	XWC11-421	黄铁矿	3.76	0.01	
	XWC11-160-2	辉钼矿	2.07	0.02	XWC11-428		4.23	0.05	
	XWC11-160-3		2.67	0.06	XWC11-63		4.22	0.01	
	XWC11-169		2.08	0.03	XWC11-81		4.27	0.05	
	XWC11-63		3.04	0.08		平均	4.16		
	XWC11-82		2.07	0.02	XWC11-400	闪锌矿	4.23	0.01	
		平均	2.71		XWC11-64		4.09	0.07	
					平均	4.16			
红山	HS04-12	黄铜矿	5.09		HS04-13	黄铁矿	5.22		王守旭等, 2008
	HS04-16	黄铜矿	5.02		HS04-21	黄铁矿	5.29		
	HS04-17	黄铜矿	5.7		HS04-30	黄铁矿	5.44		
	HS04-18	黄铜矿	4.93		HS04-27	黄铁矿	5.34		
	HS04-23	黄铜矿	5.02		HS04-28	黄铁矿	5.89		
	HS04-8	方铅矿	4.45		HS04-36	黄铁矿	6.2		
	HS04-8	闪锌矿	6.17		HS04-10	磁黄铁矿	5.6		
	HS04-36	磁黄铁矿	5.36		HS04-20	磁黄铁矿	5.56		
夏塞	X08-1		-7.22	0.04	X09-1	闪锌矿	-5.94	0.08	应汉龙等, 2006
	X13-1	方铅矿	-7.8	0.04	X19-1	闪锌矿	-6.12	0.12	
	X16		-7.39	0.04	X10	磁黄铁矿	-7.1	0.14	
	X19		-7.6	0.16	X15-1	磁黄铁矿	-6.88	0.12	
	TC-42		-6.5		801-1	方铅矿	-4.9		侯增谦等, 2003
	YM4b5	-9.7		638-2	毒砂	-7.8			
	YM4b6	-10.5		YM1	闪锌矿	-7.2			
	YM1	方铅矿	-9.1		YM80b5-1	闪锌矿	-9.7		
	CM3b3	-9.9		H31b7	闪锌矿	-9			
	YM80b5-2	-10.5		III3	磁黄铁矿	-6.5			
	H32b10	-9.7		III4	磁黄铁矿	-6.6			
连龙	LX-08	黄铜矿	-10.4		LX-09	方铅矿	-9.8		曲晓明等, 2001
	LX-08	闪锌矿	-9.5		LX-34	毒砂	-10.5		

室温(25℃)下流体包裹体的相态特征及冷冻过程中相的变化,可将原生包裹体划分为气液两相水溶液包裹体(L+V)、富CO₂包裹体(L+V_{CO₂}或L+L_{CO₂}+V_{CO₂})以及纯液相包裹体(L)。三类包裹体岩相学特征及测温结果(表2)如下:

I型 气液两相水溶液包裹体(图5h),在各中段广泛发育,是最主要的包裹体类型。其中又以富液相包裹体(Ia)为主,少数为富气相包裹体(Ib)。I型包裹体个体大小变化较大(5~100μm),主要呈长条状、柱状、椭圆形、负晶形及不规则状,通常呈群状分布,且鲜有与CO₂包裹体共生者。其绝大部分包裹体升温之后均一至液相,仅有Ib型的少数包裹体均一至气相。测温结果显示:I型包裹体绝大部分均一到液相,其均一温度范围为146.6~409.0℃;冰点变化范围为-15~-2.5℃,对应的盐度范围为4.18%~

8.63% NaCleqv。Ib型的少数包裹体均一至气相,其均一温度范围为256.0~550.0℃,冰点变化范围为-8.7~-3.4℃,对应盐度变化范围为5.56%~12.51% NaCleqv。

II型 富CO₂包裹体(图5g),该类包裹体主要出现在北矿区似伟晶岩脉的石英及萤石中。室温下可见两相结构(IIa:L+V_{CO₂})和典型的三相结构(IIb:L+L_{CO₂}+V_{CO₂}),并以后者为主。II型包裹体大小一般在10~40μm,部分可达100μm,CO₂的体积约占总体积的5%~85%,多呈长柱状、椭圆形、负晶形、三角形或不规则状。主要成群分布,极少数与III型包裹体共生。此类包裹体在部分均一化过程中,全部均一至气态CO₂,整体均一化过程中,绝大部分均一至液相,仅个别均一至气相。富CO₂包裹体三相点温度为-58.9~-55.8℃,表明其气相成分主要为CO₂,这与拉曼测试结果

表 4 义敦岛弧燕山晚期主要矿床金属硫化物及花岗岩铅同位素组成

Table 4 Lead isotopic compositions of sulfide and granites from major Late Yanshanian deposits in the Yidun Arc

矿床	样品号	测试对象	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\pm 2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\pm 2\sigma$	μ	Th/U	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	数据来源
休瓦促	SDGL12-09	磁黄铁矿	18.646	0.002	38.857	0.003	15.650	0.001	9.54	3.79	20.94	40.67	本文
	SXWC10-42	黄铁矿	18.911	0.005	39.349	0.001	15.700	0.005	9.61	3.87	24.23	53.85	
	XWC11-94	黄铁矿	18.884	0.005	39.297	0.001	15.697	0.005	9.61	3.86	24.01	52.48	
	XWC10-31	闪锌矿	18.878	0.002	39.296	0.005	15.690	0.004	9.60	3.86	23.59	52.44	
	XWC11-123	辉铋矿	18.936	0.004	39.404	0.009	15.710	0.004	9.63	3.87	24.87	55.34	
	XWC11-161-3	辉钼矿	18.909	0.005	39.350	0.002	15.700	0.005	9.61	3.87	24.24	53.88	
	XWC11-82	辉钼矿	18.905	0.005	39.334	0.001	15.697	0.004	9.61	3.86	24.03	53.46	
	XWC12-06	黑云母花岗斑岩	19.280		39.850		15.770		9.72	3.88	28.79	67.28	
	XWC12-03	二长花岗岩	19.530		39.420		16.650		9.48	3.58	20.96	55.76	
	XWC12-48	二长花岗岩	19.730		39.810		15.760		9.67	3.65	28.13	66.21	
	XWC11-02	碱长花岗岩	19.080		39.370		15.680		9.56	3.78	22.92	54.43	
	XWC11-05	碱长花岗岩	19.410		39.498		15.758		9.69	3.69	28.00	57.85	
	夏塞	X01	变质砂岩	18.803	0.014	39.390	0.024	15.806	0.009	9.83	3.95	31.11	
X03		碳质板岩	18.751	0.021	39.135	0.033	15.695	0.033	9.62	3.86	23.87	47.91	
Y01		花岗岩	19.200	0.014	39.449	0.016	15.718	0.015	9.62	3.76	25.37	56.32	
Y03a		花岗岩	19.284	0.010	39.492	0.010	15.714	0.011	9.61	3.74	25.11	57.47	
Y04		花岗岩	19.080	0.009	39.358	0.010	15.669	0.009	9.54	3.78	22.18	53.88	
Y08		花岗岩	18.969	0.011	39.212	0.012	15.702	0.011	9.61	3.78	24.33	49.97	
连龙	LX-4	花岗岩	19.206	0.012	39.172	0.028	15.684	0.010	9.56	3.65	23.16	48.9	曲晓明等, 2001
	LX-15	花岗岩	18.959	0.015	39.211	0.055	15.707	0.017	9.62	3.79	24.66	49.95	
	LX-16	花岗岩	18.961	0.011	39.120	0.039	15.670	0.013	9.55	3.74	22.24	47.51	
夏塞	X08	方铅矿	18.692	0.015	39.003	0.017	15.691	0.026	9.61	3.84	23.61	44.38	应汉龙等, 2006
	X09	闪锌矿	18.818	0.019	39.479	0.027	15.835	0.024	9.88	3.99	33.01	57.12	
	X13	方铅矿	18.739	0.023	39.108	0.027	15.730	0.026	9.69	3.86	26.16	47.19	
	X14	碳质板岩	18.793	0.024	39.062	0.027	15.670	0.026	9.56	3.81	22.24	45.96	
	X15-1	磁黄铁矿	18.722	0.020	39.071	0.021	15.710	0.021	9.65	3.85	24.85	46.2	
	X16	方铅矿	18.813	0.042	39.407	0.058	15.814	0.050	9.84	3.96	31.64	55.2	
	X19	方铅矿	18.726	0.017	39.075	0.020	15.716	0.019	9.66	3.85	25.24	46.31	
	CM3b1	方铅矿	18.715	0.008	39.023	0.008	15.694	0.018	9.62	3.83	23.81	44.91	
	CM3b3	方铅矿	18.691	0.013	38.979	0.032	15.676	0.010	9.58	3.83	22.63	43.74	
	CM4b5	方铅矿	18.773	0.008	39.270	0.024	15.765	0.052	9.75	3.92	28.44	51.53	
	CM4b6	方铅矿	18.690	0.012	38.962	0.038	15.673	0.010	9.58	3.82	22.44	43.28	
	YMI-2	方铅矿	18.705	0.010	39.018	0.027	15.689	0.010	9.61	3.84	23.48	44.78	
	H32b10	方铅矿	18.716	0.010	39.053	0.024	15.699	0.009	9.63	3.85	24.13	45.72	
YMI-1	闪锌矿	18.724	0.014	39.093	0.049	15.711	0.013	9.65	3.86	24.92	46.79		
H1b7	闪锌矿	18.763	0.055	39.297	0.022	15.777	0.064	9.77	3.94	29.22	52.25		
638-2	毒砂	18.696	0.021	39.008	0.048	15.685	0.015	9.6	3.84	23.22	44.51		
连龙	LX-08	黄铜矿	18.618	0.020	38.812	0.043	15.630	0.017	9.5	3.79	19.63	39.26	曲晓明等, 2001
	LX-19	方铅矿	18.710	0.063	39.176	0.025	15.738	0.007	9.7	3.91	26.68	49.01	
	LX-34	毒砂	18.641	0.010	38.859	0.049	15.643	0.018	9.52	3.80	20.48	40.52	

相符。其 T_{h,CO_2} 为 26 ~ 32.2°C, 全部均一至气相 CO_2 ; $T_{m,ela}$ 为 5.4 ~ 8.4°C, 对应的盐度为 3.15% ~ 8.35% NaCleqv 之间, 表明富 CO_2 包裹体的盐度较低。这类包裹体在升温均一化过程中, 全部均一至液相, 温度为 275.7 ~ 365.3°C。

III 型 纯液相水溶液包裹体(图 5i), 该类包裹体数量较少, 呈长条状及不规则状, 可与 I 型或 II 型包裹体共生。

5.2 金属硫化物 S、Pb 同位素特征

金属硫化物的 S、Pb 同位素及花岗岩的 Pb 同位素测试

结果分别见表 3、表 4。具体各种金属硫化物的 $\delta^{34}S_{VCDT}$ 值及排序如下: 黄铁矿 (3.76‰ ~ 4.33‰, 平均 4.16‰) > 闪锌矿 (4.09‰ ~ 4.23‰, 平均 4.16‰) > 辉钼矿 (2.07‰ ~ 3.62‰, 平均 2.71‰) > 辉铋矿 (2.22‰ ~ 2.98‰, 平均 2.60‰) > 黄铜矿 (2.44‰ ~ 2.70‰, 平均 2.57‰); 而且对于同一石英硫化物矿石手标本, 也呈现出了相似的 $\delta^{34}S_{VCDT}$ 值大小排序, 如样品 SXWC10-47、XWC11-63、XWC11-82、XWC11-121 这些表明成矿热液体系中, 硫同位素分馏在各种硫化物及 H_2S 之间并未达到完全平衡。但各种硫化物之间的 $\delta^{34}S_{VCDT}$ 值相差并

表5 休瓦促矿床花岗岩铅同位素组成

Table 5 Lead isotopic compositions of granites from the Xiuwacu deposit

样品号	样品名称	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	Pb ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	t (Ma)	$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$	$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$	$\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$
XWC12-06	黑云母花岗斑岩	19.280	15.770	39.850	25.0	41.4	15.9		18.644	15.740	39.321
XWC12-03	二长花岗岩	19.530	15.650	39.420	24.6	46.7	22.7		18.610	15.606	38.815
XWC12-18	二长花岗岩	19.730	15.760	39.810	28.6	37.5	7.7	85	19.460	15.747	39.388
XWC11-02	碱长花岗岩	19.080	15.680	39.370	73.7	23.2	22.1		18.784	15.666	39.270
XWC11-05	碱长花岗岩	19.410	15.758	39.498	50.2	13.9	23.2		18.950	15.736	39.410

注:表中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 代表实测值(同表4), $\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$ 、 $\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$ 、 $\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i$ 代表矫正后的初始值; t (Ma)代表岩石的成岩年龄,样品的Pb、Th、U由ICP-MS测试,误差小于5%,引自Wang *et al.*, 2014b

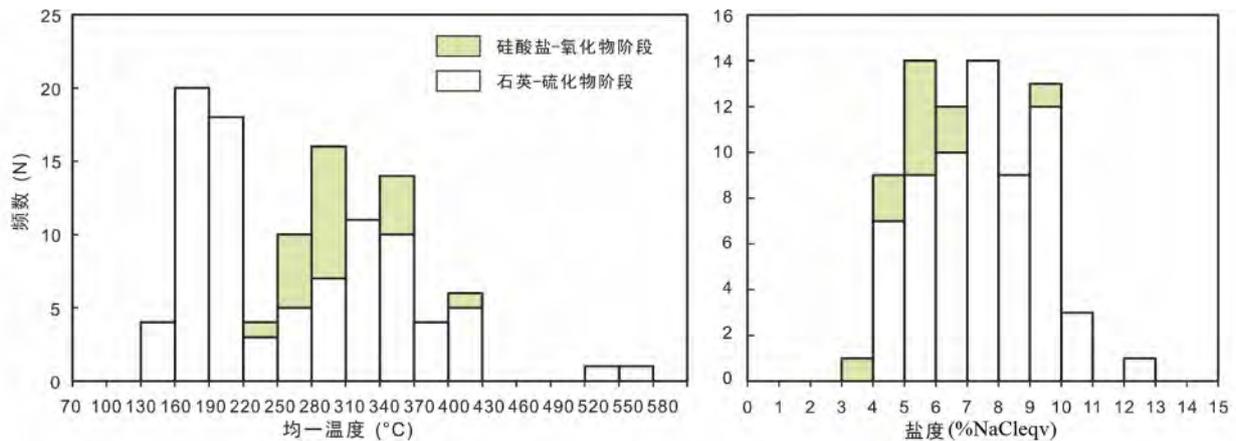


图7 休瓦促 Mo-W 矿床流体包裹体的均一温度及盐度直方图

Fig. 7 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from Xiuwacu Mo-W deposit

不大,说明在金属硫化物沉淀的过程中,并不存在较大的动力学分馏。如前所述在金属硫化物的沉淀析出过程中,热液体系的温度和氧逸度在不断降低,这可能是导致这种不完全平衡分馏的原因之一(郑永飞和陈江峰,2000)。总体而言,休瓦促矿区的金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值较为集中,在2.07‰~4.33‰之间。

Pb同位素测试结果显示,各种金属硫化物均具有较为相似的Pb同位素组成, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.646 \sim 18.936$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.857 \sim 39.404$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.650 \sim 15.710$;通过地球化学软件Geokit(路远发,2004)计算得出Pb同位素组成相关参数 μ 、Th/U、 $\Delta\beta$ 及 $\Delta\gamma$ 值见表4,它们的各自范围分别为: $\mu = 9.54 \sim 9.63$,Th/U = 3.79 ~ 3.87、 $\Delta\beta = 20.94 \sim 24.87$ 及 $\Delta\gamma = 40.67 \sim 55.34$ 。花岗岩的铅同位素组成测试结果为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 19.080 \sim 19.730$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39.370 \sim 39.850$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.680 \sim 16.650$;通过地球化学软件Geokit(路远发,2004)计算得出初始铅同位素组成(表5),分别为 $\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i = 18.610 \sim 19.460$, $\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i = 38.815 \sim 39.410$, $\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_i = 15.606 \sim 15.747$,Pb同位素组成相关参数 μ 、Th/U、 $\Delta\beta$ 及 $\Delta\gamma$ 值见表4,它们的各自范围分别为: $\mu = 9.48 \sim 9.72$,Th/U = 3.58 ~ 3.88、 $\Delta\beta = 20.96 \sim 28.79$ 及 $\Delta\gamma = 54.43 \sim 67.28$ 。

6 讨论

6.1 成矿流体特征及其性质

长石-萤石似伟晶岩脉中流体包裹体测温结果(表2)显示,早阶段硅酸盐-氧化物阶段流体富 CO_2 ,均一温度范围主要集中在275.7~365.3℃,盐度范围在3.15%~8.35% NaCleqv之间(图7),呈现出中高温、中-低盐度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 热液特征,均一温度和盐度范围均较小,说明早阶段流体来源较为单一且主要来自于原始岩浆流体。硫化物石英脉中石英的流体包裹体测温结果显示,均一温度范围较宽为146.6~550.0℃,盐度范围在4.18%~12.51% NaCleqv,反映出石英-硫化物阶段流体呈现出中高温、中-低盐度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 热液特征。但该阶段成矿流体温度范围可分为两个区间,一个区间是250~550℃,另一个区间是146.6~220℃;盐度范围却没有较明显的分区(图7)。其中高温流体温度范围和早阶段硅酸盐-氧化物阶段流体范围较为一致,说明其主要来自于原始岩浆流体,同时也继承了中-低盐度的特征,而较低温区间则说明在石英硫化物阶段有低温流体的加入。

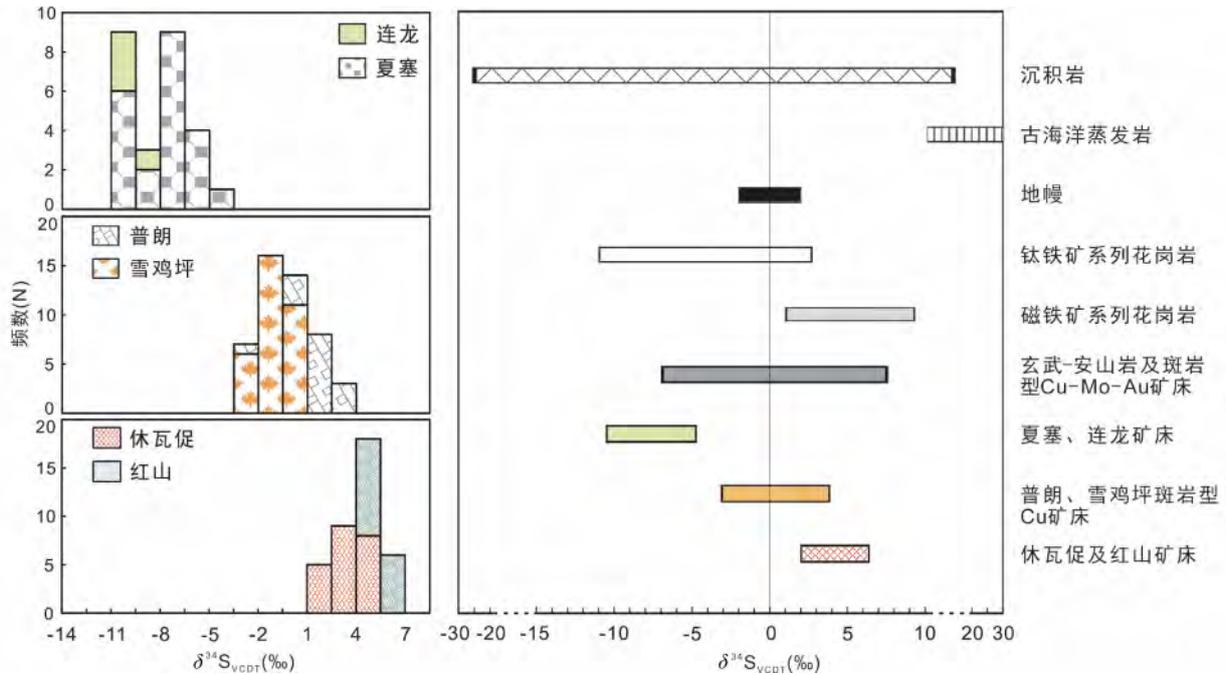


图 8 义敦岛弧主要矿床的金属硫化物的 S 同位素直方图及分布图

中甸地区燕山晚期的休瓦促 Mo-W 矿床和红山 Cu-Mo 矿床 (王守旭等, 2008; 姐波等, 2013) 以及义敦岛弧北段的连龙 Sn-Ag 矿床 (曲晓明等, 2001) 和夏塞 Ag-Sn-Pb-Zn 矿床 (侯增谦等, 2003; 应汉龙等, 2006) 的 S 同位素数据列于表 3。中甸地区印支期普朗和雪鸡坪矿床的硫同位素值引自王守旭等, 2007; 冷成彪等, 2008。沉积岩、古海洋蒸发岩、地幔、钛铁矿系列花岗岩及磁铁矿系列花岗岩的硫同位素组成范围引自 Thode *et al.*, 1961; Seal, 2006

Fig. 8 Histogram and range of $\delta^{34}\text{S}$ values for sulfide minerals from major ore deposits in the Yidun Arc

The S isotope data of Late Cretaceous Mo-W, Hongshan Cu-Mo (Wang *et al.*, 2008; Zu *et al.*, 2013), Lianlong Sn-Ag (Qu *et al.*, 2001), and Xiasai Ag-Sn-Pb-Zn deposits (Hou *et al.*, 2003; Ying *et al.*, 2006) are listed in Table 3. The S isotope compositions of Late Triassic Pulang and Xuejiping porphyry Cu deposits are from Wang *et al.*, 2007; Leng *et al.*, 2008. The S isotope compositions of ancient marine evaporites, sedimentary pyrite, ilmenite-series granites, magnetite-series granites, and basalt-andesite and porphyry Cu-Mo-Au deposit are from Thode *et al.*, 1961; Seal, 2006

6.2 休瓦促矿床成矿流体及物质来源

如前所述, 休瓦促矿区的金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值分布较为集中, 在 2.07‰ ~ 4.33‰ 之间, 说明其 S 具有较为一致的来源。由于矿物组合中少有见到硫酸盐的存在, 表明成矿热液体系中的硫以 H_2S 为主, 故而金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值可近似地反映了成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值范围, 进而指示其来源 (郑永飞和陈江峰, 2000)。由于该值范围分布非常集中, 不同于沉积岩通常具有负的或者较宽的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值域范围 (图 8; Seal, 2006), 而且其略高于地幔硫的范围 $0 \pm 2\%$ (Thode *et al.*, 1961), 说明成矿流体主要来自于岩浆作用。此外, 流体包裹体的显微测温结果显示成矿流体为含 CO_2 的中高温、中低盐度的 $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 热液, 也表明成矿流体主要来自原始岩浆。

金属硫化物铅同位素结果表明, 各种金属硫化物也具有较为相似的 Pb 同位素组成, 表明具有相同的来源, 其分布范围为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.646 \sim 18.936$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.857 \sim 39.404$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.650 \sim 15.710$ 。由于这些金属硫化

物基本不含 U、Th, 在矿物形成后基本没有放射成因的 Pb 生成, 故这些金属硫化物的铅同位素组成可反映成矿热液的初始铅同位素组成, 从而对其来源进行示踪。这些金属硫化物的初始铅同位素组成与矿区内与成矿相关的花岗岩的 Pb 同位素初始值 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 18.610 ~ 19.460 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 38.815 ~ 39.410 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 15.606 ~ 15.747, 具有一致的分布范围; 并且, 两者还具有一致的 μ 值 (9.48 ~ 9.72) 和 Th/U 比值 (3.58 ~ 3.88), 均说明他们可能有着相同的来源。

在铅同位素体系中, 由于 U、Th 及 Pb 在上地壳、下地壳及地幔三端元间的分配系数的差异, 使得样品的 μ 值即 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比值及 Th/U 比值对于三个端元具有一定的区分能力。休瓦促金属硫化物及花岗岩的 μ 值 (9.48 ~ 9.72) 及 Th/U 比值 (3.58 ~ 3.88) 的分布范围均较小, 分别介于上地壳 (μ 值 = ~14.98) 和地幔 (μ 值 = ~8.44) 及下地壳 (Th/U = 5.48) 和上地壳 (Th/U = 3.47) 之间的范围 (李龙等, 2001), Pb 的来源呈现出了壳幔混合的来源特征。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的投图中 (图 9), 休瓦促的金属硫化物及花岗岩铅同位素值主要落在造山带和上地壳的演化

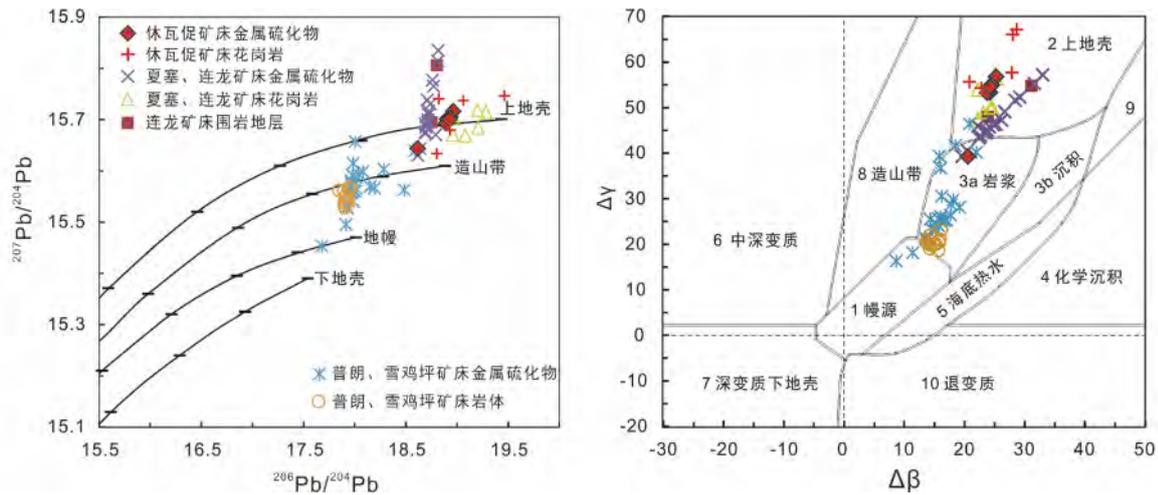


图9 义敦岛弧主要矿床的金属硫化物的Pb同位素的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a, 据 Zartman and Doe, 1981) 及 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 值的相关关系图 (b, 据 Zartman and Doe, 1981)

中甸地区燕山晚期的休瓦促 Mo-W 矿床和紅山 Cu-Mo 矿床 (王守旭等, 2008) 以及义敦岛弧北段的连龙 Sn-Ag 矿床 (曲晓明等, 2001) 和夏塞 Ag-Sn-Pb-Zn 矿床 (侯增谦等, 2003; 应汉龙等, 2006) 的 Pb 同位素数据列于表 4。中甸地区印支期普朗和雪鸡坪矿床的 Pb 同位素值引自冷成彪等, 2008; 刘学龙等, 2012

Fig. 9 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram (a, after Zartman and Doe, 1981) and $\Delta\gamma$ vs. $\Delta\beta$ diagram (b, after Zhu, 1998) of Pb isotope compositions of sulfide from major ore deposits in the Yidun Arc

The Pb isotope data of Late Cretaceous Mo-W, Hongshan Cu-Mo (Wang *et al.*, 2008), Lianlong Sn-Ag (Qu *et al.*, 2001), and Xiasai Ag-Sn-Pb-Zn deposits (Hou *et al.*, 2003; Ying *et al.*, 2006) are listed in Table 4. The Pb isotope compositions of Late Triassic Pulang and Xuejiping porphyry Cu deposits are from Leng *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012

线之间, 表明其铅可能主要来自于上地壳。在 $\Delta\gamma$ 和 $\Delta\beta$ 的投图中 (图 9; 朱炳泉, 1998), 它们主要落在上地壳和岩浆作用区域。从这两个国内学者常用的 Pb 同位素投图来看, 休瓦促的金属硫化物铅可能主要来自于上地壳, 但是也如国内很多学者所发现的这两张投图中的造山带、上地壳的演化线及岩浆作用区域具有多解性。在国内大量的 Pb 同位素研究显示, 很少有样品的 Pb 同位素落入下地壳的范围内, 反而很多麻粒岩样品及源于下地壳部分熔融而形成的花岗岩的 Pb 同位素均落在了造山带和上地壳的范围内 (朱炳泉, 1998; 李龙等, 2001; 吴开兴等, 2002)。故而, 通过金属硫化物及花岗岩的 Pb 同位素组成对比, 推测休瓦促的成矿物质主要来自于矿区内燕山晚期花岗岩, 且可能主要来自于壳源物质的部分熔融。

Wang *et al.* (2014b) 通过对休瓦促岩体的不同岩相开展了详细的矿物化学、岩石地球化学及 Sr-Nd-Hf-O 同位素分析显示休瓦促岩体为高分异的 I 型花岗岩, 主要来源于加厚的中基性下地壳的部分熔融, 且经历了较强的结晶分异作用。萤石-长石似伟晶岩脉即可能是岩浆演化到最晚期的产物, 故而其中的萤石含有富 CO_2 的流体包裹体。休瓦促矿床的金属硫化物硫同位素也与磁铁矿系列花岗岩或 I 型花岗岩具有相似的硫同位素范围 (Seal, 2006)。故综合休瓦促矿床的地质、成矿流体及金属硫化物的 S、Pb 同位素特征, 表明休瓦促矿床的成矿流体及物质来源主要来自于源于加厚下地壳部分熔融而形成的高分异 I 型花岗岩浆所分异出的岩浆

期后热液。

6.3 对义敦岛弧与岩浆有关的成矿作用成矿元素专属性的初步解释

为了更好的解释休瓦促矿床的成矿物质来源, 本文收集了中甸地区印支期的斑岩型 Cu 矿化及义敦岛弧北段燕山晚期的 Sn-Ag-Pb-Zn 多金属矿化作用金属硫化物的 S-Pb 同位素, 通过综合对比来探讨这些成矿作用的成矿物质来源及相关岩浆作用的成矿专属性。

如前所述, 休瓦促岩体及中甸地区同期的热林、紅山及铜厂沟岩体均呈现出了 I 型花岗岩的特征, 矿物学及多种同位素地球化学均证实其主要来自于加厚的中基性下地壳的部分熔融 (Wang *et al.*, 2014a, b)。中甸地区印支期斑岩型 Cu 矿相关斑岩及玄武-安山岩, 主要来自于地幔楔的部分熔融, 受到少量下地壳物质的混染 (Leng *et al.*, 2012, 2014)。义敦岛弧北段的 Sn-Ag-Pb-Zn 矿化相关的 A 型花岗岩, 则主要来自于中酸性变沉积岩地壳物质的部分熔融 (Qu *et al.*, 2002; 侯增谦等, 2003)。

通过收集整理三种成矿作用的金属硫化物及相关岩体的 Pb 同位素, 发现中甸地区印支期岩体及金属硫化物的 Pb 同位素主要呈现出幔源物质与地壳混染的特征 (图 9), 而燕山晚期的 Mo 多金属矿化及 Sn-Ag 多金属矿化则主要呈现出了壳源特征 (图 9)。同时, 三种成矿作用的金属硫化物的 S 同位素则呈现出了更加明显的区别, 中甸地区印支期斑岩型

Cu 矿化的 S 同位素在 $-3.1‰ \sim 3.8‰$ 之间,与岛弧玄武安山岩及地幔 S 同位素范围较为一致,具有较为明显的幔源硫特征(图 7);中甸地区休瓦促矿床金属硫化物的 $\delta^{34}S_{VCDT}$ 值范围在 $2.07‰ \sim 4.33‰$ 之间,与磁铁矿系列花岗岩范围一致,指示可能来自于火成岩原岩重熔而形成的岩浆;义敦岛弧北段的 Sn-Ag-Pb-Zn 矿化则为负值,在 $-10.5‰ \sim -4.9‰$ 之间,略低于幔源硫的范围,与钼铁矿系列花岗岩范围一致,指示可能来自于沉积岩原岩重熔而形成的岩浆(Seal, 2006)。这三种矿化作用的金属硫化物的 S、Pb 同位素特征所指示的成矿物质源区,分别与成矿相关岩体的岩石地球化学性质所指示的来源具有很好的对应关系,不仅指示着这些成矿物质主要来源于相关岩浆作用,而且说明这些岩浆作用与相关成矿元素的矿化之间具有很好的成矿专属性。

换言之,通过义敦岛弧这三种与岩浆有关的热液矿化的 S、Pb 及岩石地球化学性质对比,指示着印支期斑岩型的 Cu 矿化与幔源岩浆作用有着密切的关系;燕山晚期陆内环境下,中甸地区与花岗岩有关的 Mo-Cu-(W) 矿化成矿物质来源于加厚的中基性下地壳部分熔融而形成的 I 型花岗岩,而义敦岛弧北段 Sn-Ag-Pb-Sn 矿化成矿物质则主要来源于中酸性变沉积岩地壳的部分熔融而形成的 A 型花岗岩。

7 结论

(1) 流体包裹体测温显示休瓦促 Mo-W 矿床成矿流体为含 CO_2 的中高温、中低盐度的 $H_2O-NaCl$ 热液,可能主要来自于岩浆期后热液。

(2) 多种金属硫化物的 S 和 Pb 同位素及成矿相关花岗岩的 Pb 同位素显示休瓦促 Mo-W 矿床的成矿物质主要源于壳源物质部分熔融的花岗岩浆作用。

(3) 通过岩石地球化学性质及与岩浆有关的热液矿化的 S 和 Pb 同位素对比,发现燕山晚期中甸地区的 Mo-Cu-(W) 矿化成矿物质来源于加厚的中基性下地壳部分熔融而形成的 I 型花岗岩,义敦岛弧北段 Sn-Ag-Pb-Sn 矿化则主要来源于中酸性变沉积岩地壳的部分熔融而形成的 A 型花岗岩;而中甸印支期斑岩型的 Cu 矿化则与幔源岩浆作用有着密切的关系。

致谢 野外工作得到了中国科学院地球化学研究所陈佑纬副研究员、唐永永博士及许岳博士的大力帮助; S、Pb 同位素的测试过程中得到了中国科学院地球化学研究所安宁副研究员、刘河清博士的帮助; 流体包裹体测试过程中得到了蔡佳丽工程师的帮助; 两位匿名审稿专家对本文提出了很多的宝贵意见; 在此一并表示衷心的感谢!

References

Chang CF. 1997. *Geology and Tectonics of Qinghai-Xizang Plateau.*

- Beijing: Science Press, 1-153
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014a. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268-299
- Deng J, Wang QF, Li GJ, Li CS and Wang CM. 2014b. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. *Gondwana Research*, 26(2): 419-437
- Deng J and Wang QF. 2015. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, doi: 10.1016/j.gr.2015.10.003
- Fan X. 2009. Geological features, ore-formation and mineralization zonation of the Hailong-Cuomolong skarn type Sn-polymetallic deposit in Batang, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 29(S2): 112-123 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Ling WL, Qiu YM, Lian Z, Hartmann G and Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13-14): 2071-2088
- Hou ZQ. 1993. Tectono-magmatic evolution of the Yidun island-arc and geodynamic setting of Kuroko-type sulfid deposits in Sanjiang region, SW China. *Resource Geology*, 17: 336-350
- Hou ZQ, Zaw K, Qu XM, Ye QT, Yu JJ, Xu MJ, Fu DM and Yin XK. 2001. Origin of the Gacun volcanic-hosted massive sulfide deposit in Sichuan, China: Fluid inclusion and oxygen isotope evidence. *Economic Geology*, 96(7): 1491-1512
- Hou ZQ, Qu XM, Zhou JR, Yang YQ, Huang DH, Lü QT, Tang SH, Yu JJ, Wang HP and Zhao JH. 2001. Collision-Orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: Record of granites. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 484-497 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Yang YQ, Wang HP *et al.* 2003. Collision-Orogenic Progress and Mineralization System of Yidun Arc. Beijing: Geological Publishing House, 1-345 (in Chinese)
- Hou ZQ, Yang YQ, Qu XM, Huang DH, Lu QT, Wang HP, Yu JJ and Tang SH. 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sanjiang region, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 109-120 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Zaw K, Pan GT, Mo XX, Xu Q, Hu YZ and Li XZ. 2007. Sanjiang tethyan metallogenesis in S. W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 48-87
- Hu JM, Meng QR, Shi YR and Qu HJ. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867-880 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1-2): 119-146
- Leng CB, Zhang XC, Wang SX, Wang WQ, Qin CJ, Wu KW and Ren T. 2008. Sulfur and lead isotope compositions of the Xuejiping porphyry copper deposit in Northwest Yunnan, China: Tracing for the source of metals. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4): 80-88 (in Chinese with English abstract)
- Leng CB, Zhang XC, Hu RZ, Wang SX, Zhong H, Wang WQ and Bi XW. 2012. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the genesis of the Xuejiping porphyry copper deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 31-48
- Leng CB, Huang QY, Zhang XC, Wang SX, Zhong H, Hu RZ, Bi XW,

- Zhu JJ and Wang XS. 2014. Petrogenesis of the Late Triassic volcanic rocks in the southern Yidun arc, SW China: Constraints from the geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. *Lithos*, 190–191: 363–382
- Li JK, Li WC, Wang DH, Lu YX, Yin GH and Xue SR. 2007. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan epoch and research of ore-forming regularity in Zhongdian arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2415–2422 (in Chinese with English abstract)
- Li L, Zheng YF and Zhou JB. 2001. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 61–68 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Liu XL, Zeng PS and Yin GH. 2011. The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province. *Geology in China*, 38(2): 403–414 (in Chinese with English abstract)
- Li WC, Yu HJ, Yin GH, Cao XM, Huang DZ and Dong T. 2012. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in Northwest Yunnan and its metallogenic environment. *Mineral Deposits*, 31(2): 282–292 (in Chinese with English abstract)
- Lin FC, Yang JR, Chen CD, He XG, Lin Q, Lu YX, Liu YC and Xie ES. 2003. Potentiality and assessment of Cu-Ag-Pb-Zn-Sn mineral resources in the Yidun metallogenic belt. *Acta Geologica Sichuan*, 23(3): 141–145 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q. 2010. Geological features and prospecting potential for the Xialong Ag-Pb-Zn deposit in Batang, Sichuan. *Acta Geologica Sichuan*, 30(4): 447–449, 461 (in Chinese with English abstract)
- Liu Q. 2003. Geological characteristics and genesis of Xiasai silver-polymetallic deposit in western Sichuan Province. *Mineral Deposits*, 22(2): 121–128 (in Chinese with English abstract)
- Liu XL, Li WC and Yin GH. 2012. Lead isotope characteristics and tracing significance of ore metallogenic material in Geza arc metallogenic belt, Yunnan. *Geoscience*, 26(3): 445–452 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Deng J, Li CF, Shi GH and Zheng AL. 2007. REE composition in scheelite and scheelite Sm-Nd dating for the Xuebaoding W-Sn-Be deposit in Sichuan. *Chinese Science Bulletin*, 52(18): 2543–2550
- Lu YF. 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft excel. *Geochimica*, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract)
- Ma CQ, Ehlers C, Xu CH, Li ZC and Yang KG. 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precambrian Research*, 102(3–4): 279–301
- Qu XM, Hou ZQ and Zhou SG. 2001. Metallogenic geological characteristics of the Lianlong skarn type Sn-Ag polymetallic deposit in western Sichuan. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 29–34 (in Chinese with English abstract)
- Qu XM, Hou ZQ and Zhou SG. 2002. Geochemical and Nd, Sr isotopic study of the post-orogenic granites in the Yidun arc belt of northern Sanjiang region, southwestern China. *Resource Geology*, 52(2): 163–172
- Qu XM, Hou ZQ, Zhou SG and Tang SH. 2002. The age and tectonic setting of Lianlong Sn-bearing granite in western Sichuan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 223–228 (in Chinese with English abstract)
- Qu XM, Hou ZQ and Tang SH. 2003. Age of intraplate volcanism in the back-arc area of Yidun island arc and its significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(2): 131–137 (in Chinese with English abstract)
- Reid AJ, Wilson CJL and Liu S. 2005. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun arc, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Structural Geology*, 27(1): 119–137
- Seal II RR. 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 633–677
- Thode HG, Monster J and Dunford HB. 1961. Sulphur isotope geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 25(3): 159–174
- Wang BD, Chen JL, Xu JF, Wang LQ, Zeng QG and Dong YH. 2010. Chronology and geochemistry of the Nadingcuo volcanic rocks in the southern Qiangtang region of the Tibetan Plateau: Partial melting of remnant ocean crust along the Bangong-Nujiang suture. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1461–1473
- Wang BQ, Zhou MF, Li JW and Yan DP. 2011. Late triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: Adakitic magmatism and porphyry copper mineralization. *Lithos*, 127(1–2): 24–38
- Wang BQ, Wang W, Chen WT, Gao JF, Zhao XF, Yan DP and Zhou MF. 2013a. Constraints of detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes on the provenance of the Triassic Yidun Group and tectonic evolution of the Yidun Terrane, Eastern Tibet. *Sedimentary Geology*, 289: 74–98
- Wang BQ, Zhou MF, Chen WT, Gao JF and Yan DP. 2013b. Petrogenesis and tectonic implications of the Triassic volcanic rocks in the northern Yidun Terrane, Eastern Tibet. *Lithos*, 175–176: 285–301
- Wang QW, Wang KM, Han ZZ *et al.* 2008. The Granite in West Sichuan and Its Metallogenic Series. Beijing: Geological Publishing House, 1–305 (in Chinese)
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB and Qin CJ. 2007. A tentative study of ore geochemistry and ore-forming mechanism of Pulang porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan. *Mineral Deposits*, 26(3): 277–288 (in Chinese with English abstract)
- Wang SX, Zhang XC, Leng CB, Qin CJ, Wang WQ and Zhao MC. 2008. Stable isotopic compositions of the Hongshan skarn copper deposit in the Zhongdian area and its implication for the copper mineralization process. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 480–488 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Bi XW, Leng CB, Tang YY, Lan JB, Qi YQ and Shen NP. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granite porphyry in the Hongshan Cu-polymetallic deposit, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 315–321 (in Chinese with English abstract)
- Wang XS, Bi XW, Leng CB, Zhong H, Tang HF, Chen YW, Yin GH, Huang DZ and Zhou MF. 2014a. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo-Cu-(W) mineralization in the southern Yidun arc, SW China: Implications for metallogenesis and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 61: 73–95
- Wang XS, Hu RZ, Bi XW, Leng CB, Pan LC, Zhu JJ and Chen YW. 2014b. Petrogenesis of Late Cretaceous I-type granites in the southern Yidun Terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan Plateau. *Lithos*, 208–209: 202–219
- Wu KX, Hu RZ, Bi XW, Peng JT and Tang QL. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review. *Geology-Geochemistry*, 30(3): 73–81 (in Chinese with English abstract)
- Wu T, Xiao L, Ma CQ, Pirajno F, Sun Y and Zhan QY. 2014. A mafic intrusion of ‘arc affinity’ in a post-orogenic extensional setting: A case study from Ganluogou gabbro in the northern Yidun Arc Belt, eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 139–156
- Wu WH, Xu SJ, Yang JD, Yin HW, Lu HY and Zhang KJ. 2010. Isotopic characteristics of river sediments on the Tibetan Plateau. *Chemical Geology*, 269(3–4): 406–413
- Xu XW, Cai XP, Qu WJ, Song BC, Qin KZ and Zhang BL. 2006. Later cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in the Hongshan area, northwestern Yunnan and its significances for tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1422–1433 (in Chinese)

- with English abstract)
- Yang YQ, Hou ZQ, Huang DH and Qu XM. 2002. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian Arc. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 17-24 (in Chinese with English abstract)
- Yin GH, Li WC, Jiang CX, Xu D, Li JK and Yang SR. 2009. The evolution of relict complex rock masses in Yanshan phase and Ar-Ar dating age and copper-molybdenum mineralization characteristics of Zhongdian volcanic-magma arc. *Geology and Exploration*, 45(4): 385-394 (in Chinese with English abstract)
- Ying HL, Wang DH and Fu XF. 2006. Timing and lead and sulfur isotope composition of Xiasai granite and silver polymetallic deposit in Batang, Sichuan Province. *Mineral Deposits*, 25(2): 136-146 (in Chinese with English abstract)
- Yu HJ, Li WC, Yin GH, Lu YX, Cao XM, Huang DZ, Dong T and Zhang YM. 2014. Zircon U-Pb ages of the granodioritic porphyry in the Laba molybdenum deposit, Yunnan, SW China and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 1183-1194
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 75(1-2): 135-162
- Zeng PS, Wang HP, Mo XX, Yu XH, Li WC, Li TG, Li H and Yang CZ. 2004. Tectonic setting and prospects of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 535-540 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ND and Zhang HJ. 1993. Ages of several granite plutons in northwestern Sichuan. *Geochimica*, (3): 303-312 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YJ, Yuan C, Zhou MF, Yan DP, Long XP and Cai KD. 2007. Post-orogenic extension of Songpan-Garzê orogen in Early Jurassic: Constraints from Niuxingou monzodiorite and Siguniangshan A-type granite of western Sichuan, China. *Geochimica*, 36(2): 139-152 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF and Chen JF. 2000. *Stable Isotope Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1-336 (in Chinese)
- Zhu BQ. 1998. *The Theory and Practice of Isotope System in Geoscience: Concurrent Discussion of the Continental Crust and Mantle Evolutions in China*. Beijing: Science press, 1-333 (in Chinese)
- Zou GF, Zheng RC, Hu SH, Chen CJ, Jiang HC and Wu HB. 2008. Geological features of the Xiasai silver-polymetallic deposit in West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(1): 93-102 (in Chinese with English abstract)
- Zu B, Xue CJ, Ya XE, Wang QF, Liang HY, Zhao Y and Liu MT. 2013. Sulfide zonal texture and its geological significance of ores from the Hongshan copper deposit in Shangri-la, Yunnan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1203-1213 (in Chinese with English abstract)
- Zu B, Xue CJ, Zhao Y, Qu WJ, Li C, Symons DTA and Du AD. 2015. Late cretaceous metallogeny in the Zhongdian area: Constraints from Re-Os dating of molybdenite and pyrrhotite from the Hongshan Cu deposit, Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 64: 1-12
- 附中文参考文献**
- 范晓. 2009. 四川巴塘县亥隆-措莫隆砂卡岩型锡多金属矿的矿床特征、成矿作用与矿化分带. *四川地质学报*, 29(S2): 112-123
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 杨岳清, 黄典豪, 吕庆田, 唐绍华, 余今杰, 王海平, 赵金花. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录. *地质学报*, 75(4): 484-497
- 侯增谦, 杨岳清, 王海平等. 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统. 北京: 地质出版社, 1-345
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 黄典豪, 吕庆田, 王海平, 余金杰, 唐绍华. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. *地质学报*, 78(1): 109-120
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 渠洪杰. 2005. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 867-880
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 王外全, 秦朝建, 吴孔文, 任涛. 2008. 滇西北雪鸡坪斑岩铜矿 S, Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪. *矿物岩石*, 28(4): 80-88
- 李建康, 李文昌, 王登红, 卢映祥, 尹光侯, 薛顺荣. 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究. *岩石学报*, 23(10): 2415-2422
- 李龙, 郑永飞, 周建波. 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型. *岩石学报*, 17(1): 61-68
- 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 尹光侯. 2011. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征. *中国地质*, 38(2): 403-414
- 李文昌, 余海军, 尹光侯, 曹晓民, 黄定柱, 董涛. 2012. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境. *矿床地质*, 31(2): 282-292
- 林方成, 杨家瑞, 陈慈德, 何显刚, 林青, 卢映祥, 刘宇淳, 谢恩顺. 2003. 义敦成矿带铜银铅锌锡矿产资源调查评价进展与潜力. *四川地质学报*, 23(3): 141-145
- 林青. 2010. 四川巴塘县夏隆银铅锌矿床特征与找矿前景. *四川地质学报*, 30(4): 447-449, 461
- 刘权. 2003. 四川夏塞银多金属矿床地质特征及成因. *矿床地质*, 22(2): 121-128
- 刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 2012. 云南格咱岛弧岩浆成矿带铅同位素特征及成矿物质来源示踪. *现代地质*, 26(3): 445-452
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459-464
- 曲晓明, 侯增谦, 周书贵. 2001. 川西连龙夕卡岩型锡、银多金属矿床成矿地质特征. *地球学报*, 22(1): 29-34
- 曲晓明, 侯增谦, 周书贵, 唐绍华. 2002. 川西连龙含锡花岗岩的时代与形成构造环境. *地球学报*, 23(3): 223-228
- 曲晓明, 侯增谦, 唐绍华. 2003. 义敦岛弧带弧后区板内岩浆作用的时代及意义. *岩石矿物学杂志*, 22(2): 131-137
- 王全伟, 王康明, 阚泽忠等. 2008. 川西地区花岗岩及其成矿系列. 北京: 地质出版社, 1-305
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 秦朝建. 2007. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探. *矿床地质*, 26(3): 277-288
- 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 秦朝建, 王外全, 赵茂春. 2008. 中甸红山砂卡岩铜矿稳定同位素特征及其对成矿过程的指示. *岩石学报*, 24(3): 480-488
- 王新松, 毕献武, 冷成彪, 唐永永, 兰江波, 齐有强, 沈能平. 2011. 滇西北中甸红山 Cu 多金属矿床花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *矿物学报*, 31(3): 315-321
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述. *地质地球化学*, 30(3): 73-81
- 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 宋保昌, 秦克章, 张宝林. 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗岩斑岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义. *地质学报*, 80(9): 1422-1433

- 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. 地球学报, 23(1): 17-24
- 尹光候, 李文昌, 蒋成兴, 许东, 李建康, 杨舒然. 2009. 中甸火山-岩浆弧燕山期热液复式岩体演化与 Ar-Ar 定年及铜钼矿化. 地质与勘探, 45(4): 385-394
- 应汉龙, 王登红, 付小方. 2006. 四川巴塘夏塞花岗岩和银多金属矿床年龄及硫、铅同位素组成. 矿床地质, 25(2): 135-146
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 喻学惠, 李文昌, 李体刚, 李红, 杨朝志. 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景. 地球学报, 25(5): 535-540
- 张能德, 张怀举. 1993. 四川西北部几个花岗岩体的时代. 地球化学, (3): 303-312
- 赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙晓平, 蔡克大. 2007. 松潘甘孜造山带早侏罗世的后造山伸展: 来自川西牛心沟和四姑娘山岩体的地球化学制约. 地球化学, 36(2): 139-152
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 1-336
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 1-333
- 邹光富, 郑荣才, 胡世华, 陈才金, 蒋洪昌, 伍洪邦. 2008. 四川巴塘县夏塞银多金属矿床特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(1): 93-102
- 俎波, 薛春纪, 亚夏尔, 王庆飞, 梁华英, 赵毅, 刘铭涛. 2013. 云南香格里拉红山铜矿石硫化物环带及地质意义. 岩石学报, 29(4): 1203-1213