

文章编号: 1000-4734(2018) 02-0196-09

滇东南南捞铜钨矿床 S-Pb 同位素特征

陈智明^{1,2}, 王大鹏^{3,*}, 李山志^{1,2}

(1. 云南华联矿产勘探有限责任公司, 云南 曲靖 655000; 2. 云南省有色地质局 317 队, 云南 曲靖 655000;
3. 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, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 南捞是近年来滇东南老君山西北部地区新发现的矽卡岩铜钨矿床, 由田房、布忙和高井槽等矿段组成, 已探明铜钨资源储量均达到中型。为了查明其矿床成因, 开展了矿床地质和 S-Pb 同位素等研究。结果表明, 田房矿段中硫化物以似层状毒砂、脉状黄铜矿和黄铁矿等硫化物为主, 其中, 黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值在 4.05‰~11.02‰ 之间, 呈塔式分布, 暗示矿石 S 以岩浆或深部热液为主, 并可能受地壳混染。不同金属矿物 Pb 同位素差异显著, 具多来源特征。田房、布忙矿段中各矿石单矿物铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为: 白钨矿, 18.412~18.761、15.600~15.789、38.504~39.094; 黄铜矿, 18.301~18.345、15.652~15.696、38.488~38.564; 黄铁矿, 17.871~18.972、15.415~16.037、38.008~39.769; 毒砂, 17.917~18.093、15.524~15.650、38.004~38.283。对比研究表明, 矿石与寒武系片岩和大理岩具有不同的 Pb 同位素组成, 与加里东期南捞片麻岩或燕山期老君山花岗岩有相似分布范围。结合年代学研究成果, 本文认为南捞 Cu-W 矿床的矿石 Pb 及其成矿金属物质可能起源于加里东期岩浆作用, 其成矿作用与加里东期花岗岩作用更为密切, 南捞片麻岩与寒武系的内外接触带附近, 尤其是高温矿物组合部位可能是矿化的有利部位, 该类矿化在该区找矿潜力巨大。

关键词: 南捞铜钨矿床; S-Pb 同位素; 成矿物质来源; 加里东期

中图分类号: P597; P611 文献标识码: A doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2018.025

作者简介: 陈智明, 男, 1982 生, 工程师, 从事地质勘查专业。E-mail: 89431529@qq.com

Sulfur and Lead Isotopic Geochemistry of Nanlao Cu-W Deposit in Southeastern Yunnan Province, China

CHEN Zhi-ming^{1,2}, WANG Da-peng^{3*}, LI Zhi-shan^{1,2}

(1. Yunan Hualian mineral Resource Exploration Lt. Co., Qujing 655000, China; 2. 317 team, Bureau of Nonferrous Metal Geology of Yunnan Province, Qujing 655000, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Nanlao Cu-W deposit, one of newly discovered skarn deposits, is located in the north-western of Laojunshan district, and its Cu and W reserves reach the middle scale. To clarify its ore genesis, an investigation with geological feature and sulfur and lead isotope on this deposit is carried out. Sulfur isotopic compositions of sulfides have a relatively uniform $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ value ranging from 4.05‰ to 11.02‰, suggesting a mixture of magmatic and strata sulfur origin. Radioactive lead in different ore minerals is significantly different, which shows a multi-source character. The isotopic composition of lead ranges in $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ are 18.412-18.761, 15.600-15.789, and 38.504-39.094 for scheelite, 18.301-18.345, 15.652-15.696, and 38.488-38.564 for chalcopyrite, 17.871-18.972, 15.415-16.037, and 38.008-39.769 for pyrite, and 17.917-18.093, 15.524-15.650, and 38.004-38.283 for arsenopyrite, respectively. In comparison, they are obviously different from that of the Cambrian, but consistent with that of the Caledonian or Late Yanshanian magmatic rocks, combined with

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 云南华联锌铜股份有限公司委托项目(编号: KY20120910); 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(编号: SKLODGC-ZY125-06); 国家自然科学基金项目(编号: 41372105)

*通讯作者, E-mail: wangdapeng@mail.gyig.ac.cn

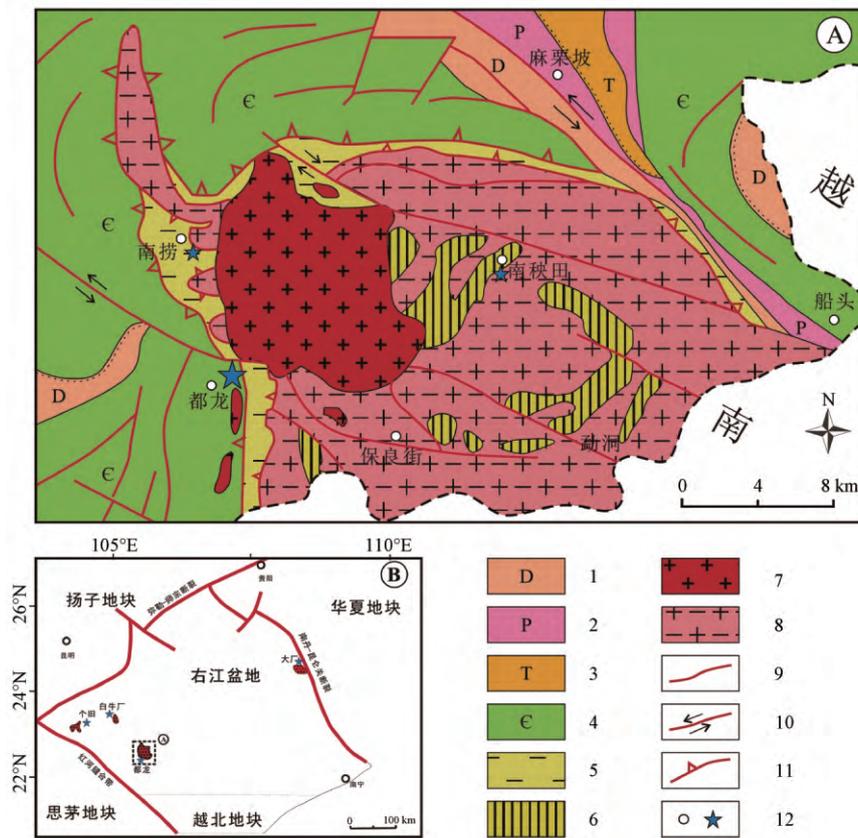
geochronology research result , hinting to the Pb and ore-forming metals are probably derived from the Caledonian magmatism. It is a mesothermal to hyperthermal deposit related to the Caledonian magmatism , contact belt between Nanlao gneiss and the Cambrian is the favourable setting for ore formation.

Keywords: Caledonian; Cu-W deposit; S-Pb isotope; Nanlao

滇东南老君山地区是我国重要的钨锡锌多金属成矿区,该区地质条件复杂、成矿条件优越,围绕燕山晚期老君山花岗岩体产出了以都龙超大型锡钨多金属矿床和南秧田大型钨矿床为代表的一系列矿床(图 1)^[1-3]。近年来,老君山花岗岩体西部通过地质找矿勘探工作,在南捞一带新探获 1 个中型规模的铜钨多金属矿床。该矿床地质、成矿背景等条件可以与区域上多处矿床对比,但其成矿物质来源、成矿时代、矿床成因等地质地球化学研究较少,本文对该矿床中矿石硫化物进行系统的 S-Pb 同位素分析,以期查明成矿物质的来源,探讨该类型矿床成因及其深部找矿意义。

1 区域地质背景

滇东南老君山成矿区是滇东南锡成矿带最重要的多金属矿集区,成矿区位于滇东南拗褶断带文山—马关隆起南端的老君山花岗岩复式背斜,所在构造单元属华南褶皱系西南部(图 1)。20 世纪 80 年代,俞开基^[4]、杨世瑜等^[5-6]认为滇东南老君山地区存在 1 个由变质岩系和花岗岩体组成的变质-岩浆-构造穹窿。20 世纪 90 年代中期,根据岩石变形-变质特征、发育在核部岩系中的剥离断层系和盖层岩系中的叠瓦状正断层系等构造形迹及其组合特征,将老君山地区的“变质-岩浆-构造穹窿”体系厘定为“老君山变质核杂



A-据文献[1-3] 简化编绘的地质图; B-研究区在华南大地构造中位置(底图据文献[11])
1-泥盆系; 2-二叠系; 3-三叠系; 4-寒武系; 5-新寨岩组; 6-勐洞群; 7-老君山花岗岩; 8-南温河花岗岩;
9-断层; 10-走滑断层; 11-剥离断层; 12-地名, 矿床

图 1 滇东南老君山地区区域地质略图

Fig.1. Regional geological map of Laojunshan area in Southeastern Yunnan Province , China.

岩”^[7-11]。

老君山变质核杂岩具有重要的区域控矿意义: ①老君山变质核杂核部至少有 4 期规模较大的岩浆侵入活动, 最早 1 期为新元古代中-基性岩, 主要岩性为斜长角闪岩和斜长片麻岩, 第 2 期为加里东期壳幔混合来源的花岗岩, 以南温河花岗岩和南捞片麻岩 (Ngn) 为代表^[12-13], 第 3 期为中-晚二叠世基性岩脉, 主要岩性为斜长角闪岩, 第 4 期为燕山晚期老君山 S 型花岗岩^[14-15]。老君山地区诸多的矿床 (点) 都与不同期次的岩浆活动有着密切的时空联系; ②老君山地区的多金属矿床大多分布在老君山变质核杂岩的剥离断层附近, 富厚矿体多赋存在剥离断层或与其与 NNE 向、E-W 向脆性断层的交汇部位, 上剥离断层 (大致沿田蓬组与新寨岩组) 控制了都龙 Sn-Zn 多金属矿床, 基底剥离断层系 (沿南温河花岗岩与新寨岩组) 及相关的老寨-南捞-新马街一带构造天窗群, 控制了南捞、八梅、铜厂坡等一系列 Zn-Sn-W-Cu 多金属矿床的产出, 下剥离断层系 (南温河花岗岩与猛硐岩群之间) 及相关的南秧田-大丫口-岩龙关一带的猛硐岩群构造岩片, 控制了岩龙关及老君山东部南秧田、丫口等矿床产出。

2 南捞铜钨矿区地质特征

南捞矿区由田房、布忙、高井槽和那丕等矿段组成 (图 2), 目前, 已探明的铜、钨金属资源量分别约为 $9 \times 10^7 \text{ kg}$ 和 $1 \times 10^7 \text{ kg}$, 平均质量分数分别为 0.7% 和 0.2%^[16]。矿区内出露上元古界新寨岩组 (Pt_3x)^[17] 和南捞片麻状花岗岩 (Ngn)。新寨岩组地层产状平缓, 总体倾向北西, 倾角 $5^\circ \sim 30^\circ$, 多为 $15^\circ \sim 25^\circ$, 主要岩性为云母石英片岩、石英云母片岩、夹炭硅质千枚岩及少量大理岩透镜体, 其中云母不同程度地发生绿泥石化, 石英条带、皱纹线理等变形组构发育, 推测原岩为一套细碎屑岩夹碳酸盐岩, 并经历了绿片岩相变质作用和脆-韧性变形作用。南捞片麻岩分布于矿区大部分区域, 岩性为黑云二长片麻岩和二云二长片麻岩, 局部残留花岗岩组构, 从矿物组分、岩石化学、副矿物、微量元素和稀土元素等特征均反映与花岗岩相近似, 其原岩应为黑云二长花岗岩, 侵入时代约为 $400 \sim 440 \text{ Ma}$ ^[10, 18]。

矿区内新寨岩组与南捞片麻岩的接触界线是 1 条大规模的剥离断层 (F_0), 该断层属南温河变质核杂岩构造下拆离滑脱带剥离断层, 主断面上

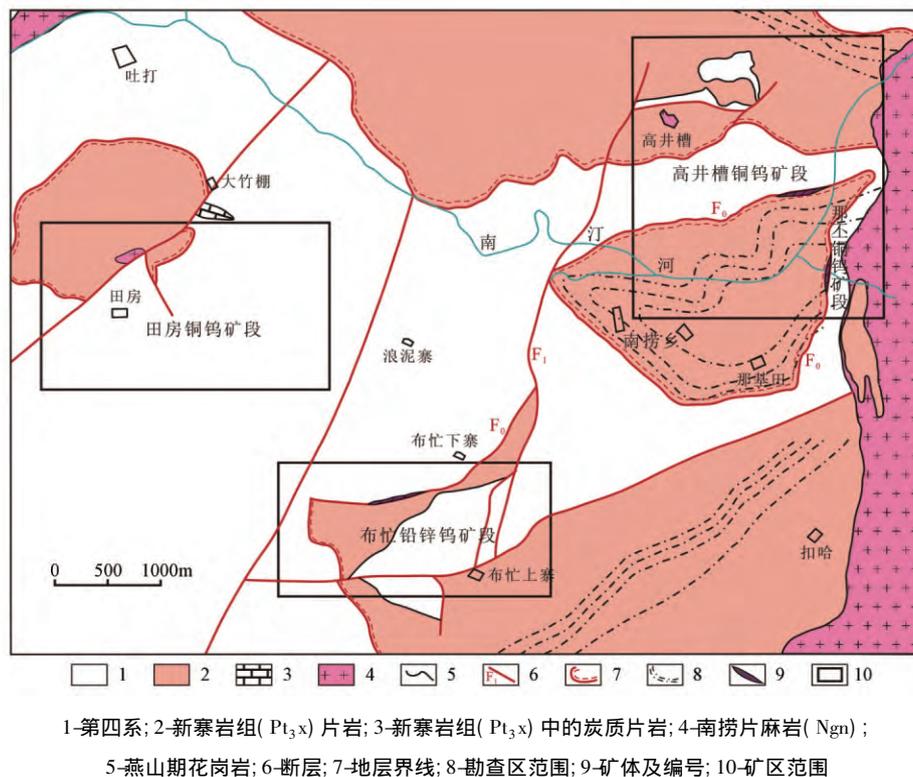


图 2 南捞铜钨矿床地质略图 (据文献 [16])

Fig.2. Geological characteristics of Nanlao Cu-W deposit (after Miao et al., 2013).

盘为新寨岩组石英二云片岩,下盘为南捞片麻岩。剥离断层附近上、下盘矿化蚀变都十分发育,目前钻孔及地表工程所控制的 Cu-W 矿体主要赋存在剥离断层附近(图 2、3),并具以下特征:①上盘新寨岩组下部的矽卡岩化或绿泥石化的云母石英片岩、石英云母片岩,常发育弥散状、网脉状石英脉型矿化,为本区主要含矿层位;②新寨岩组下部所夹的含炭质千枚岩,含矿岩石常具硅化、绿泥石化及矽卡岩化等,为本区次要含矿层位;③剥离断层之下的南捞片麻岩顶部,硅化、矽卡岩化蚀变强烈的片麻岩,为次要含矿层。矿床中矿石矿物主要为黄铜矿、白钨矿、黄铁矿,次为毒砂、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、辉铜矿及少量辉钼矿和锡石等。脉石矿物为石英、长石、白云母、黑云母、绢云母、透辉石、透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石、角闪石和电气石等。常见的矿化构造有星点状、斑点状、斑杂状、细脉浸染状和网脉状等。

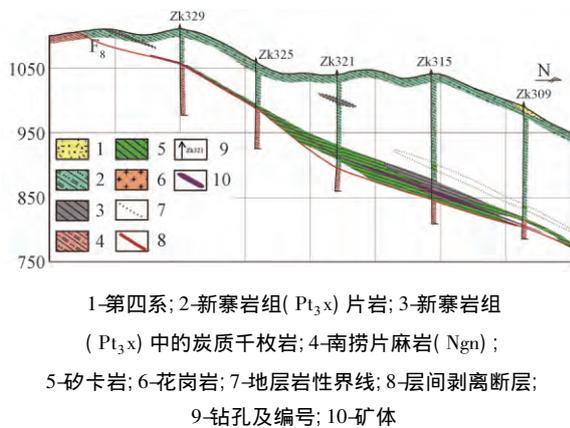


图 3 南捞钨铜矿床 3 号勘探线剖面图

Fig.3. Cross-cutting of Line 3 of Nanlao Cu-W deposit.

3 样品采集与分析方法

样品分别采集自田房和布忙矿段,田房矿段样品为硅化的片麻状花岗岩矿石,布忙矿段样品为矽卡岩化矿石、硅化矿石或者含石英英脉。样品单矿物分选均在双目镜下挑纯至纯度 95% 以上,白钨矿挑选时双目镜用荧光灯做光源。单矿物用玛瑙研钵手工粉碎至 200 目以下备用。S 同位素的分析测试在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为连续流同位素质谱仪 CF-IRMS(EA-IsoPrime, 型号为 Euro3000, GV instruments)。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(Ag₂S) GBW-4414(δ³⁴S = -0.07‰) 和 GBW-

4415(δ³⁴S = 22.15‰) 校正,测量误差 ±0.2‰。本次工作共 23 件硫化物做 S 同位素分析,其中选田房矿段 16 件(黄铁矿 4 件、毒砂 9 件、黄铜矿 3 件),布忙矿段 7 件黄铁矿,所分析的样品包含了 2 个矿区主要硫化物类型,具有代表性,分析结果见表 1。田房矿段硫化物包括似层状毒砂、脉状

表 1 南捞 Cu-W 矿床硫同位素组成

Table 1. Sulfur Composition of Nanlao Cu-W Deposit.

采样点	编号	样品	δ ³⁴ S _{CDT} /‰	均值/‰	标准差
布忙矿段	09h1b-1	黄铁矿	11.03	10.95	0.11
			10.88		
	09h1b-10	黄铁矿	11.02	11.02	0.00
			11.02		
	09h1b-14	黄铁矿	10.44	10.39	0.06
			10.35		
	09h1b-5	黄铁矿	10.17	10.15	0.03
			10.13		
			10.70		
	09h1b-7	黄铁矿	10.97	10.84	0.19
10.59					
09h1b-9	黄铁矿	10.66	10.63	0.05	
		10.39			
10bm-4		黄铁矿	10.40	10.40	0.01
田房矿段	09h1t-12	黄铁矿	4.57	4.43	0.20
			4.29		
	09h1t-16	黄铁矿	4.26	4.37	0.17
			5.72		
	09h1t-17	黄铁矿	5.71	5.71	0.00
			4.49		
	09h1t-2	黄铁矿	4.46	4.47	0.02
			7.86		
	09h1t-18	毒砂	8.01	7.93	0.11
			7.50		
	09h1t-19	毒砂	7.50	7.50	0.00
			7.83		
	10h1t-37	毒砂	7.83	7.83	0.00
			8.29		
10h1t-39	毒砂	8.14	8.21	0.11	
		7.76			
10h1t-40	毒砂	7.70	7.73	0.04	
		7.64			
10h1t-41	毒砂	7.74	7.69	0.07	
		7.34			
10h1t-42	毒砂	7.35	7.34	0.01	
		9.02			
10h1t-43	毒砂	8.99	9.00	0.02	
		7.38			
10h1t-44	毒砂	7.32	7.35	0.04	
		4.10			
09h1t-7	黄铜矿	4.01	4.05	0.06	
		4.01			
09h1t-13	黄铜矿	4.37	4.28	0.13	
		4.19			
09h1t-35	黄铜矿	4.07	4.07	0.00	
		4.07			

注: 平行样 10h1t-44.

黄铜矿、黄铁矿等硫化物。黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.05‰~4.28‰, 平均值 4.13‰, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.37‰~5.71‰, 平均值 4.75‰, 毒砂 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.34‰~9.00‰, 平均值 7.84‰。布忙矿段原生硫化物主要为黄铁矿, $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较小, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 10.15‰~11.02‰, 平均值 10.62‰。

Pb 同位素组成分析在天津矿产地质研究所完成。铅同位素比值用多接收器等离子体质谱法 (MC-ICP-MS) 测定, 所用仪器为美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE 多接收等离子质谱。此次研究分析了田房、布忙中的白钨矿 (9 件)、黄铜矿 (2 件)、毒砂 (11 件)、黄铁矿 (10 件) 等矿石矿物共计 32 件样品, 分析结果见表 2。加上近几年获得的都龙矿床、寒武系地层、南温河花岗岩及老君山花岗岩的长石样品的 Pb 同位素数据, 代表本地区矿床

及可能的成矿物质来源区的铅同位素组成。

分析结果表明, 田房、布忙 2 个矿段单矿物铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为: 白钨矿, 18.412~18.761、15.600~15.789、38.504~39.094; 黄铁矿, 17.871~18.972、15.415~16.037、38.008~39.769; 毒砂, 17.917~18.093、15.524~15.650、38.004~38.283; 黄铜矿, 18.301~18.345、15.652~15.696、38.488~38.564。南温河花岗岩 (南捞片麻岩) 长石、老君山花岗岩长石、寒武系片岩、寒武系大理岩铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为: 南温河花岗岩 (南捞片麻岩) 长石, 18.434~19.119、15.644~15.701、38.514~38.921; 老君山花岗岩长石, 18.404~18.746、15.637~15.760、38.749~39.187; 寒武系

表 2 南捞 Cu-W 矿床铅同位素组成

Table 2. Lead Composition of Nanlao Cu-W Deposit

样品号	采样点或岩性	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2δ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2δ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2δ
09hlt-11		白钨矿	18.583	0.001	15.789	0.001	39.094	0.001
09hlt-13		白钨矿	18.522	0.001	15.621	0.001	38.501	0.001
10hlt-34	田房片麻岩	白钨矿	18.761	0.001	15.662	0.001	38.664	0.001
10hlt-35	矿石	白钨矿	18.412	0.001	15.600	0.001	38.504	0.001
917		白钨矿	18.508	0.001	15.657	0.001	38.554	0.001
0733		白钨矿	18.673	0.001	15.783	0.001	38.864	0.001
10bm-x	布忙石英-砂卡岩	白钨矿	18.579	0.001	15.670	0.001	38.805	0.001
10bm-5	矿石	白钨矿	18.573	0.001	15.662	0.001	38.780	0.001
10bm-98		白钨矿	18.574	0.001	15.657	0.001	38.760	0.001
09hlt-13	田房片麻岩	黄铜矿	18.301	0.001	15.696	0.001	38.564	0.001
09hlt-35	矿石	黄铜矿	18.345	0.001	15.652	0.001	38.488	0.001
09hlt-2		黄铁矿	18.076	0.001	15.609	0.001	38.241	0.001
09hlt-12	田房片麻岩	黄铁矿	18.196	0.001	15.643	0.001	38.448	0.001
09hlt-16	矿石	黄铁矿	17.969	0.001	15.598	0.001	38.200	0.001
09hlt-17		黄铁矿	17.969	0.001	15.575	0.001	38.133	0.001
09hlt-17		黄铁矿	17.990	0.001	15.608	0.001	38.194	0.001
09hlt-1		黄铁矿	18.437	0.001	15.859	0.001	39.102	0.001
09hlt-10		黄铁矿	18.972	0.001	16.037	0.001	39.769	0.001
09hlt-5	布忙石英-砂卡岩	黄铁矿	18.795	0.001	15.998	0.001	39.500	0.001
09hlt-14	矿石	黄铁矿	17.871	0.001	15.415	0.001	37.788	0.001
09hlt-7		黄铁矿	17.951	0.001	15.562	0.001	38.081	0.001
09hlt-9		黄铁矿	18.640	0.001	15.809	0.001	39.174	0.001
09hlt-18		毒砂	18.093	0.001	15.650	0.001	38.283	0.001
09hlt-19		毒砂	17.952	0.001	15.576	0.001	38.108	0.001
10hlt-37		毒砂	17.964	0.001	15.586	0.001	38.150	0.001
10hlt-45		毒砂	17.955	0.001	15.584	0.001	38.120	0.001
10hlt-38		毒砂	17.932	0.001	15.561	0.001	38.072	0.001
10hlt-39	田房毒砂层	毒砂	17.927	0.001	15.553	0.001	38.043	0.001
10hlt-40	矿石	毒砂	17.931	0.001	15.558	0.001	38.049	0.001
10hlt-41		毒砂	17.928	0.001	15.553	0.001	38.036	0.001
10hlt-42		毒砂	17.917	0.001	15.540	0.001	38.004	0.001
10hlt-43		毒砂	17.924	0.001	15.554	0.001	38.043	0.001
10hlt-44		毒砂	17.976	0.001	15.524	0.001	38.162	0.001

注: 10hlt-37 与 10hlt-45 为同一样品的平行样。

片岩,18.918~20.665、15.670~15.782、39.667~42.688;寒武系大理岩,17.314~18.658、15.449~15.681、37.808~39.219(课题组数据,未发表)。

4 讨论

4.1 硫源

已有的研究表明,一般矿床中的硫主要有 3 个来源,即深部硫或岩浆硫($\delta^{34}\text{S}$ 值在 0 左右)、地壳硫及混合硫。成矿流体中的总硫同位素组成可以代表源区的同位素组成,而成矿作用过程中存在固-液相之间的同位素分馏作用。热液形成的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般并不等于热液总的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$),而是 $f(\text{O}_2)$ 、 $f(\text{S}_2)$ 、pH、离子强度和温度的函数,即 $\delta^{34}\text{S} = f(\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}, f(\text{O}_2), f(\text{S}_2), \text{pH}, I, T)$ 。热液体系中总硫的同位素组成 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}x(\text{H}_2\text{S}) + \delta^{34}\text{S}_{\text{HS}^-}x(\text{HS}^-) + \delta^{34}\text{S}_{\text{S}_2-x\text{S}_2^-} + \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}}x(\text{SO}_4^{2-}) + \delta^{34}\text{S}_{\text{HSO}_4^-}x(\text{HSO}_4^-) + \delta^{34}\text{S}_{\text{KSO}_4}x(\text{KSO}_4) + \delta^{34}\text{S}_{\text{NaSO}_4}x(\text{NaSO}_4)$,其中 x_i 为硫化物或硫酸盐相对于总硫的摩尔分数、成矿物理化学条件和水-岩相互作用程度等因素^[19-21]。田房矿段未发现硫酸盐类矿物,其硫化物包括似层状毒砂、脉状黄铜矿和黄铁矿等, $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 4.05‰~9.00‰之间,不同硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围比较窄,且不同矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布也不连续(表 1、图 4),无法判断各种硫化物的硫的来源是否是同源的,即使是同源的也无法准确估计各种硫化物的相对含量,但是可以推断 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 介于 4.05‰~9.00‰之间,可代表其源区的硫同位素组成。布忙矿段只有黄铁矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 10.15‰~11.02‰之间(平均值 10.62‰)可代表成矿流体或其源区的硫同位素组成。

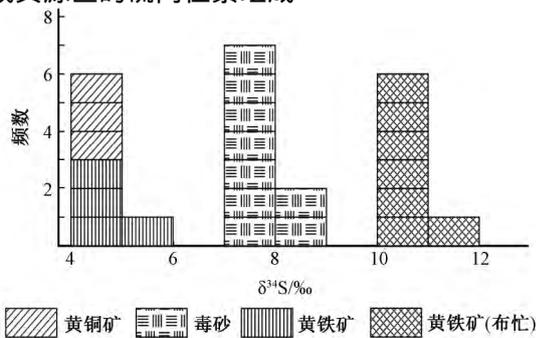


图 4 南捞地田房、布忙硫同位素组成频数直方图

Fig.4. Histogram of Sulfur isotope for ore sulfides in Nanlao Cu-W deposit.

已有研究表明,老君山地区产出在下剥离断层附近的南秧田矿床 S 同位素组成为 -1.50‰~8.61‰^[22-23],产于上剥离断层附近的都龙矿床硫化物 S 同位素组成为 -1.3‰~4.8‰^[24],而产在基底剥离断层附近的南捞矿床 S 同位素组成为 4.05‰~11.02‰,暗示了老君山地区矿床硫化物硫主要来源以深部或岩浆硫为主,并有部分地层硫的混染。如前所述,田房和布忙矿体均赋存于新寨岩组下部至南捞片麻岩顶部之间,其 S 同位素组成略高于岩浆硫或深部硫,远低于寒武系古海水 S 同位素组成(15‰~35‰^[25]),推测南捞矿床硫的来源可能为深部硫或岩浆硫与地层硫的混合。其中,赋矿层位相对靠近南捞片麻岩的田房矿段 $\delta^{34}\text{S}$ 值略低于远离南捞片麻岩的不忙矿段,暗示田房矿段硫受地层混染成度低于布忙矿段。

4.2 铅同位素对成矿物质来源的指示

铅同位素在除放射性衰变以外的物理、化学及生物过程中均不会发生较大的分馏,在成矿物质运移和沉淀过程中也能保持相对稳定,是示踪成矿物质来源最直接最有效的方法之一^[26-28]。成矿物质来源研究中,对比矿石、岩浆岩、地层和基底 Pb 同位素组成可以把矿床的成矿物质来源精确的定位于某个地质系统或者地质体。多数金属矿物 U、Th 含量低,形成后放射成因铅几乎可以忽略不计,其 Pb 同位素组成与其物质来源区的 Pb 同位素组成接近,在 Zartman and Doe^[29]铅构造模式图解中数据投影区域重叠,并且数据投影点分散程度或展布方向一致^[30-31]。将田房、布忙 2 个矿段硫化物及白钨矿铅同位素分别投影在 Zartman and Doe^[29]铅构造模式图解中(图 5),仅黄铁矿铅投影比较分散,而白钨矿、黄铜矿和毒砂又分别集中分布于相同区域。但整体看,白钨矿、黄铜矿、毒砂以及黄铁矿铅同位素组成分布于大陆上地壳演化曲线之上或附近,表明其成矿物质以壳源为主。

为了把矿床成矿物质来源精确定位到某个地质系统,对比南捞矿床的硫化物及白钨矿、区域内老君山花岗岩、南捞片麻状花岗岩岩(南温河花岗岩)、寒武系大理岩和寒武系片岩铅同位素组成,可以看出,寒武系片岩具有较高的 U 放射成因 Pb,与本矿床矿石矿物差异明显,可以排除其为矿床成矿提供成矿物质的可能。虽然矿石矿物

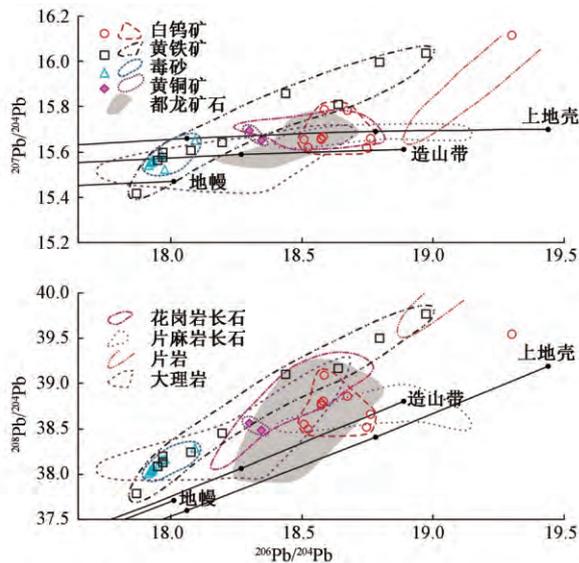


图5 南捞矿床铅构造模式图(底图据和都龙矿石据和燕山期花岗岩、加里东期南捞片麻岩、新寨岩组片岩、大理岩均为课题组数据)

Fig.5. Plumbotectonics model of lead isotope for ore sulfides in Nanlao Cu-W deposit.

Pb 同位素分布范围与寒武系大理岩有部分重叠,但白钨矿、黄铜矿和毒砂的 Pb 同位素组成却相对集中分布,这与大理岩具有较大变化范围的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分布范围是不同的。此外,区域上,大理岩中 Cu 和 W 背景值非常低,不足以提供成矿所需金属量,因此也可以排除大理岩作为矿源层的可能性。

初步分析表明,研究区寒武系地层提供成矿物质的可能性很低,事实上,南捞矿床的 Pb 同位素组成对成矿物质来源的指示依然很复杂。白钨矿、黄铜矿、毒砂 Pb 铅同位素在铅构造模式图中分别集中于不同的区域,U 放射成因 Pb 有显著降低的趋势,实测白钨矿与毒砂 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的最大分馏系数高达 45‰,成矿过程中不同矿物间 Pb 的分馏不可能这么高,暗示着它们可能有不同的 Pb 来源。黄铁矿 Pb 同位素在铅构造模式图中也较分散, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的最大分馏系数高达 58‰,说明黄铁矿中 Pb 的来源也是多来源的。毒砂与黄铁矿在铅构造模式图中投影区域部分重叠,并且毒砂与部分黄铁矿样品几乎完全重合,表明可能有部分黄铁矿样品与毒砂是同源的。此外,毒砂 Pb 同位素组成与大理岩重叠,不排除大理岩为毒砂提供成矿物质的可能性。黄铜矿在铅构造模式图中分布图中与老君山花岗岩、寒武系大理岩部分重叠,同时落在都龙矿石铅同位素分

布区域内(图5),但只有 2 个数据点,其代表性不充分,尚无法确定其源区特征。白钨矿与老君山花岗岩、南捞片麻岩、都龙矿石的 Pb 同位素分布范围重叠部分,仅靠 Pb 同位素数据无法确定白钨矿中 Pb 的来源,成矿物质可能来自南捞片麻岩或者与都龙矿床一样来源于老君山花岗岩或者二者混合来源。白钨矿 Sm-Nd 年代学研究表明,田房片麻岩中星点状白钨矿和布忙石英脉型白钨矿的 Sm-Nd 等时线年龄分别为 $(411.0 \pm 4.1) \text{ Ma}$ ($N = 8, 2\sigma, \text{MSWD} = 0.27, (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.5117192 \pm 0.0000075$) 和 $445 \pm 39 \text{ Ma}$ ($N = 4, 2\sigma, \text{MSWD} = 0.116, (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511437 \pm 0.000040$),成矿时代均为加里东期^[18],与南捞片麻岩形成时代一致。因此,推测白钨矿成矿物质来源可能与南捞片麻岩关系更为密切。

4.3 区域成矿认识及其意义

老君山地区分布着都龙超大型锡锌多金属矿床、南秧田钨矿床、大丫口钨锡矿床、新寨钨锡矿床、八梅铜锌矿床和铜厂坡铜矿床等几十个多金属矿床,这些矿床大多分布在老君山变质核杂岩周围,矿体产出受老君山变质核杂岩的剥离断层以及次级断裂控制。近年来,综合矿物组合、成矿流体、成矿时代、元素及同位素地球化学等多方面的研究发现老君山地区存在多期成矿作用,其成矿物质来源比较复杂。都龙矿床中存在高温到低温典型的热液矿物组合,成矿流体、硫、金属来源多与老君山岩体有关,矿床形成时代与老君山岩体形成时代一致,认为都龙是一个与燕山期老君山花岗岩作用有关的岩浆热液矿床^[14, 34-37],锌锡矿化形成于晚白垩世。老君山东南部南秧田和丫口等钨矿床,矿石矿物以白钨矿为主,矿化与矽卡岩化关系密切^[38-41],但成矿流体性质与成矿年龄争议较大。冯佳睿等^[42]认为成矿流体主要是岩浆水,硫来源于深部岩浆。石洪召等^[43]则认为成矿流体源于地层水(变质水),硫同位素落入沉积岩、变质岩及蒸发硫酸盐的硫同位素组成范围内。不同方法的定年工作往往得出不同的成矿年龄,如冯佳睿等^[44]报道的南秧田矿田中矽卡岩型矿体的辉钨矿 Re-Os 模式年龄约为 210 Ma,谭洪旗等^[45]报道的南秧田矿田矽卡岩中金云母的 Ar-Ar 坪年龄为 114~129 Ma。李建康等^[46]得到南秧田钨矿田白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄为 $(159 \pm 14) \text{ Ma}$ 。老君山北部的南捞^[16, 47-48]、八梅^[49]、铜厂

坡^[50-51]和新寨^[42,52]等矿床赋存在南温河花岗岩与新寨岩组之间的剥离断层附近的,砂卡岩化、绿泥石化与矿化关系密切,其中南捞、新寨锡矿床成矿时代为加里东期,与南捞片麻岩的侵入时代一致^[18,52]。上述研究表明,老君山地区的成矿作用都与不同程度的砂卡岩化有关,但其成矿时代、矿物质来源和成矿流体性质等都存在差异,暗示本区成矿可能是多期的,成矿物质来源可能是多来源的。

就南捞铜钨矿床而言,S的来源可能为深部硫或岩浆硫与地层硫的混合,2个矿段白钨矿Pb同位素组成类似、成矿时代与南捞片麻岩侵入时代一致,说明钨矿化可能仅发生在加里东期岩浆-热液作用的某个或者少数几个高温阶段,因此,南捞周边地区找矿工作应该靠近南捞片麻岩与寒武系的内外接触带附近,高温矿物组合可能是矿化的有利指示。靠近岩体的部位矿化顺片麻理发育,远离岩体部位,由于片岩的“地球化学障”作用,在片岩附近形成石英脉、砂卡岩型白钨矿矿化,矿体往往小而富。

5 结 论

(1) 南捞铜钨矿床中硫主要来源以深部S为主,并有部分地层S的混染。不同矿物Pb同位素组成显示出多来源特征,但白钨矿的Pb同位素组成与加里东期岩浆岩较为相似,结合成矿年代学推测该矿床有可能为加里东期成矿作用的产物,与其有成因联系的岩浆岩很有可能为南捞片麻岩。

(2) 砂卡岩化是老君山地区成矿作用的共同特征,南捞Cu-W矿床成矿作用可能与加里东期花岗岩作用密切。靠近南捞片麻岩与寒武系的内外接触带附近、尤其是高温矿物组合部位可能是矿化的有利部位,具有较大的找矿潜力。

致 谢: 笔者感谢中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验和天津矿产地质研究所实验分析上给予大量的帮助。此外,感谢几位审稿人给予建设性的意见。

参 考 文 献:

[1] 云南省地质局第二区域地质测量大队. 1:20万地质图说明书(马关幅)[M]. 1976.
[2] 云南地矿局区调队. 1:5万地质图说明书(都龙幅)[M]. 1999.

[3] 云南地矿局区调队. 1:5万地质图说明书(麻栗坡幅)[M]. 1999.
[4] 俞开基. 老君山锡多金属矿区地质概论[J]. 地质与勘探, 1984(11): 2-7.
[5] 杨世瑜. 试论云南锡矿床控矿构造类型[J]. 云南地质, 1987, 6(3): 227-240.
[6] 杨世瑜. 滇东南环块构造、隆起构造与锡矿构造[J]. 地质与勘探, 1988(2): 5-12.
[7] Li D X, Deng J. Metamorphic core complex and vortex structure in Laojunshan, southeastern Yunnan province [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1996, 5(1): 1-9.
[8] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, et al. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology [J]. *Tectonophysics*, 2000, 321(4): 449-466.
[9] Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, et al. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2001, 19(1-2): 233-248.
[10] Liu Y P, Ye L, Li C Y, et al. Laojunshan - Song Chay metamorphic core complex and its tectonic significance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 2003, 67(18): 259.
[11] 颜丹平, 周美夫, 王焰, 等. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代-南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(4): 402-412.
[12] 王丹丹, 李宝龙, 朱德全, 等. 滇东南老君山地区变质岩锆石U-Pb年代学及其构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(10): 1718-1734.
[13] Xu B, Jiang S Y, Hofmann A W, et al. Geochronology and geochemical constraints on petrogenesis of Early Paleozoic granites from the Laojunshan district in Yunnan Province of South China [J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 248-263.
[14] Xu B, Jiang S Y, Wang R, et al. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province, South China: geochronology, geochemistry, mineral chemistry and Nd-Hf isotopic compositions [J]. *Lithos*, 2015, 218-219: 54-72.
[15] 蓝江波, 刘玉平, 叶霖, 等. 滇东南燕山晚期老君山花岗岩的地球化学特征与年龄谱系[J]. 矿物学报, 2016, 36(4): 441-454.
[16] 缪应理, 陈智明, 涂长寿, 等. 滇东南老君山南捞铜钨矿床地质特征及成因探讨[A]. 云南省有色地质局建局60周年学术论文集[C]. 北京: 中国地质科学院地球学报编辑部, 2013.
[17] 李东旭, 许顺山. 变质核杂岩的旋扭成因—滇东南老君山变质核杂岩的构造解析[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 113-119.
[18] 王大鹏, 张乾, 刘玉平, 等. 滇东南马关县南捞地区成岩、成矿时代约束[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 720.

- [19] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- [20] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 491-559.
- [21] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [22] 冯佳睿. 云南麻栗坡南秧田钨矿床成矿流体特征与成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院(博士论文), 2011.
- [23] 贾福聚, 秦德先, 张文源, 等. 云南都龙锡锌多金属矿床矿化趋势分析及成矿规律[J]. *有色金属*, 2010, 62(1): 84-87.
- [24] 何芳, 张乾, 王大鹏, 等. 云南都龙 Sn-Zn 多金属矿床成矿物质来源——硫、碳、氧稳定同位素证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(6): 900-907.
- [25] Claypool G E, William T H, Kaplan I R, et al. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation [J]. *Chemical Geology*, 1980, 28: 199-260.
- [26] Zhu B Q. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 55(1-3): 171-181.
- [27] Canals A, Cardellach E. Ore lead and sulphur isotope pattern from the low-temperature veins of the Catalonian Coastal Ranges (NE Spain) [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32(3): 243-249.
- [28] Mirnejad H, Simonetti A, Molasalehi F. Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj - Sirjan zones in Iran [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39(4): 181-187.
- [29] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics - the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1-2): 135-162.
- [30] 张乾, 潘家永, 邵树勋. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 231-238.
- [31] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(3): 73-81.
- [32] 刘玉平, 李朝阳, 谷团, 等. 都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源的同位素示踪[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(4): 75-82.
- [33] 何芳, 张乾, 刘玉平, 等. 云南都龙锡锌多金属矿床铅同位素组成: 成矿金属来源制约[J]. *矿物学报*, 2015, 35(3): 309-317.
- [34] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 967-976.
- [35] 李进文, 裴荣富, 王永磊, 等. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. *矿床地质*, 2013, 32(4): 767-782.
- [36] 鲍谈. 云南都龙砂卡岩型锡锌多金属矿床成矿流体及成矿机制研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所(硕士论文), 2014.
- [37] 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 等. 都龙锡锌多金属矿床 LA-MC-ICPMS 锡石 U-Pb 测年及其意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 867-876.
- [38] 许翠芳, 舒培华, 王建萍. 云南麻栗坡西丫口白钨矿成矿规律[J]. *云南地质*, 2010, 29(3): 318-322.
- [39] 石洪召, 张林奎, 任光明, 等. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床层控似砂卡岩成因探讨[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 673-680.
- [40] 石洪召, 张林奎, 范文玉, 等. 滇东南老君山地区南秧田白钨矿床成矿模式[J]. *中国钨业*, 2015, 30(2): 1-6.
- [41] 税青松. 浅析云南麻栗坡西丫口白钨矿的成矿规律[J]. *中国科技期刊数据库*, 2015(24): 265.
- [42] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例[J]. *矿床地质*, 2011, 30(1): 57-73.
- [43] 石洪召, 张林奎, 林方成, 等. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床流体包裹体、稳定同位素特征及其成矿意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2013, 33(2): 95-102.
- [44] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 滇东南老君山南秧田钨矿床的成矿流体和成矿作用[J]. *矿床地质*, 2011, 30(3): 403-419.
- [45] 谭洪旗, 刘玉平, 叶霖, 等. 滇东南南秧田钨锡矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年及意义[J]. *矿物学报*, 2011, 31(S1): 639-640.
- [46] 李建康, 王登红, 李华芹, 等. 云南老君山矿集区的晚侏罗世—早白垩世成矿事件[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 1023-1036.
- [47] 陶志华. 云南省马关县布忙铅锌多金属矿区成矿规律浅析[J]. *广东科技*, 2012(11): 150-151.
- [48] 陈敏华, 张林奎, 张彬, 等. 云南省麻栗坡地区高槽槽白钨矿床地质特征及矿床勘查类型的确定[J]. *矿产与地质*, 2012, 26(1): 19-23.
- [49] 杨翰魁. 马关八梅喷流沉积铅锌锡铜金多金属矿床[J]. *云南地质*, 2008, 27(2): 175-180.
- [50] 樊灏, 陈国荣, 马杰. 马关县铜厂坡铜多金属矿床成因[J]. *云南地质*, 2014, 33(4): 532-537.
- [51] 陈波. 云南马关县铜厂坡铜多金属矿地质特征以及找矿标志探讨[J]. *东华科技*, 2015(4): 487-488.
- [52] 杜胜江. 滇东南老君山钨锡多金属矿集区成矿规律及动力学背景[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所(博士论文), 2015.