

文章编号: 1000-4734(2016)03-0343-11

云南澜沧大黑山勘查区的流体地球化学

范云飞^{1,2}, 杨金彪³, 石增龙⁴, 甘甜^{1,2}, 罗泰义^{1*}

(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, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 怀柔 100049;
3. 云南澜沧铅矿有限公司, 云南 澜沧, 665601; 4. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖, 655011)

摘要: 浅成低温热液系统可能是深部斑岩成矿系统的表征。在澜沧裂谷, 喜山期花岗斑岩隐伏侵入裂谷中部下石炭统依柳组玄武质火山岩地层, 形成了与老厂大型钼铜银铅锌多金属矿床有关的斑岩-夕卡岩型热液蚀变体系, 在浅表的碳酸盐岩地层中则形成脉状银铅锌矿化。裂谷西部的大黑山勘查区下石炭统地层为南段组碎屑岩, 深部隐伏的花岗斑岩可能形成不同于老厂的热液蚀变体系, 对大黑山勘查区一个综合垂直剖面的初步研究表明: (1)深部热液体系在南段组中以形成具有明显 Eu 正异常 ($\delta\text{Eu}=1.58$) 的石英网脉为特征, 并且具有与老厂蚀变斑岩相似的 Pb-Bi-Ag-Zn-Cu 富集模式但 Mo 明显亏损, 暗示深部可能存在与老厂矿区相同的花岗斑岩及 Mo 的矿化。(2)深部热液体系在 $\text{C}_{1n}/\text{C}_{2+3}$ 岩性界面与低温天水系统混合, 在 C_{2+3} 白云岩中形成具有突出 Eu 正异常 (δEu 最高达 5.71) 的铁锰方解石化, 并在近 40 m 的蚀变带内显示出 Pb-Zn-Ag 矿化异常; 蚀变过程中 Mg 的带出与 Ca-Fe-Mn 的带入具有良好的相关性, 并形成继续向上运移的低温 Mg-Mn 热液。(3)低温 Mg-Mn 热液在上覆二叠系生物碎屑灰岩中形成热液角砾白云岩化蚀变, 大黑山勘查区地表以线型正地形的黑山梁子为代表; 热液角砾白云岩化表现为弱的 Eu 正异常、Sr-U 明显亏损和强烈的 Mn 富集, 是地表锰银矿化的重要物源。大黑山综合剖面的研究确证了地表灰岩中广泛存在的各种形式的热液角砾白云岩化是深部岩浆热液活动的具体体现, 是非常有利的找矿标志。

关键词: 喜山期斑岩热液体系; 石英网脉; 铁锰方解石化; 热液角砾白云岩化; 澜沧裂谷

中图分类号: P579; P599; P622

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.03.004

作者简介: 范云飞, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业。E-mail: 598739059@qq.com

Fluid Geochemistry Research on Daheishan Exploration Area in Lancang Area, Yunnan Province, China

FAN Yun-fei^{1,2}, YANG Jin-biao³, SHI Zeng-long⁴, GAN Tian^{1,2}, LUO Tai-yi¹

(1. The state Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. School of the Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yunnan Lancang Lead Mine Co. Ltd., Lancang 665601, China; 4. Yunnan Chihong Zn & Ge Co. Ltd., Qujing 655011, China)

Abstract: Himalayan granitic porphyry concealed invaded into the basaltic volcanic strata of early Carboniferous Yiliu Formation in middle of Lancang rift, which has been resulted in forming the porphyry-skarn hydrothermal alteration system relative with the large Mo-Cu-Ag-Pb-Zn polymetallic ore deposit of Laocang Area, Yunnan Province, China. A distinguishing hydrothermal alteration system has been predicted for deep concealed granitic porphyry invaded into the calstic rocks of early Carboniferous Nanduan Formation in Daheishan exploration area. Preliminary research on a comprehensive vertical section in Daheishan area indicates that: (1) the deep part of hydrothermal system in Nanduan Formation forms quartz veinlet characterized by distinct positive Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=1.58$) and Pb-Bi-Ag-Zn-Cu enrichment model similar to Laocang altered porphyry, revealing that there is Laochang-type granitic porphyry and Mo mineralization in deep of Daheishan exploration area; (2) the deep hydrothermal system mixed with the shallow low-temperature meteoric fluid system in $\text{C}_{1n}/\text{C}_{2+3}$ lithological interface, and nearly 40 meters iron-manganese calcitization alteration zone typical with prominent positive Eu abnormal (the highest $\delta\text{Eu}=5.71$) and Pb-Zn-Ag

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41072054; 41530210); 国家 973 项目 (编号: 2015CB452603)

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

mineralization has been formed. During the processes of alteration, the move out of Mg and the addition of Ca-Fe-Mn have a good relationship, and the new hydrothermal system enriched with Mg-Mn also has been produced; and (3) hydrothermal breccia dolomitization, which is represented by linear positive topography of Heishan ridge in Daheishan area, caused by the Mg-Mn enrichment hydrothermal fluid altered with the overlying bioclastic limestone of the Permian. The hydrothermal breccia dolomitization is a character with obvious Sr-U depletion and strong Mn-enrichment, and is an important resource for the surface Mn-Ag mineralization. The vary of hydrothermal breccia dolomitization in the surface limestone has been confirmed as a good indicator for deep magmatic hydrothermal activity and relative mineralization through the research of comprehensive Daheishan section.

Keywords: Himalayan porphyry hydrothermal system; quartz veinlet; iron-manganese calcitization; hydrothermal breccia dolomitization; Lancang rift

斑岩型矿床是世界上主要的铜钼(金)来源, 据统计, 斑岩型矿床主要产于显生宙, 主要就位深度范围为 1~6 km (平均 2 km)^[1, 2]; 以斑岩型铜矿(PCD)为例, 据估算, 整个显生宙形成了约 125895 个 PCD, 但 62% (78106) 的 PCD 因为地壳抬升而被剥蚀, 约 38% (47789) 的 PCD 还保留在地壳中, 其中仅仅有 574 个 PCD 被人类勘探发现^[2]。因此, 加强对深部隐伏斑岩型矿床的找矿研究具有重要意义。

根据与德兴斑岩铜矿有关的斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌矿床-远接触带低温热液型金矿的综合成矿模式^[3], 浅表的低温热液系统可能表征深部隐伏的斑岩成矿系统。以云南澜沧老厂钼铜银铅锌多金属矿床为例, 斑岩主体隐伏在矿区地表 1000 m 以下, 斑岩内外接触带形成斑岩型钼矿-夕卡岩型铜矿, 碳酸盐岩地层中主要形成脉状银铅锌矿化。通过近十年在该区的野外工作, 我们认为矿区地表大面积分布的热液角砾白云岩化可能是深部斑岩热液活动的直接表征, 具有明确的找矿意义, 但一直欠缺相关的地球化学证据。

大黑山勘探区属于昌宁-孟连裂谷西部地层分区, 位于澜沧老厂铅锌矿的东南部, 以出露南段组地层为主^[4, 5]。最近正在进行的坑道勘探, 揭示了在下部石炭系南段组碳质碎屑岩中普遍发育石英网脉; 而在上覆的中晚石炭系白云岩中, 发育近 40 m 厚的铁锰方解石化并伴随一定的铅锌矿化; 在地表二叠系生物碎屑灰岩中, 发育大规模线状热液角砾白云岩化, 其中最典型的代表是大黑山梁子, 延展近 3 km, 宽度 50~100 m 左右。通过对大黑山矿产勘查区内景鑫矿业公司下属的两条探矿平巷及其附近地表岩石的岩矿鉴定和初步的微量元素分析, 发现 C_{1n} 中石英网脉及 C_{1n}/C₂₊₃ 界面的铁锰方解石化中普遍存在非常明显的 Eu 高正异常。综合上述资料, 我们认为大黑山矿产勘查区保存了相对完整的喜山期斑岩热液体系的浅成低温热液剖面, 高 Eu 正异

常特征是深部喜山期花岗斑岩岩浆热液活动的具体表现。本文的目的, 就是对该热液剖面在垂直方向和水平方向的元素地球化学变化进行初步解剖, 为进一步完善区域上喜山期花岗斑岩岩浆热液活动规律打下基础, 也给勘查区今后的找矿工作提供一定参考。

1 地质概况及取样情况

由柯街-孟定断裂和西南澜沧江断裂挟持的昌宁-孟连晚古生代裂谷带是滇西南地区极其复杂的地质构造单元, 也是三江成矿带南段重要的成矿单元; 以柯街-孟定断裂为界, 其西部为保山-掸邦微陆块, 石炭-二叠纪以具有冈瓦纳特征的冰水沉积、冷水动物群及大陆溢流玄武岩为特征; 以西南澜沧江断裂为界, 东部为临沧-景洪微地块, 以广泛出露的变质岩和临沧花岗岩基为特征^[6-9]。昌宁-孟连裂谷带的地质大致具有三分性, 东侧出露下古生界地层(具有保山-掸邦微陆块的特征)加中生界地层为主, 中部出露石炭纪玄武质火山岩(石炭纪依柳组)为特征, 西侧主要出露分选极差的陆源碎屑岩(石炭纪南段组)。晚古生代以来, 澜沧地区区域动力学环境多次转变, 区域构造演变过程可分为裂谷期(D-P₁)→裂谷封闭-隆升期(P₂-K)→陆内碰撞造山期(新生代以来)三大构造期^[10, 11]。

从目前有限的资料来看, 约 45Ma 的岩浆活动是昌宁-孟连裂谷带的重要成矿驱动力。裂谷东部中缅毗邻的金腊银铅锌矿田(缅甸金厂到中国南腊, 缅甸境内有著名的包德温和臭水铅锌矿)内大面积出露的缅甸勐林山似斑状黑云二长花岗岩(出露面积 100 km²)和中缅交界的沧源老厂似斑状角闪二长花岗岩(出露面积 8 km²)的锆石同位素 U-Pb 年龄皆为(45±1) Ma^[12], 南腊碱长花岗斑岩(出露面积 0.8 km²)的锆石同位素 U-Pb 年龄为 42~44 Ma 左右^[12-13]。裂谷中部澜沧老厂矿区深部隐伏花岗斑岩

具有与南腊碱长花岗斑岩相似的岩石学特征, 年龄也非常接近 ($44.6 \pm 1.1 \text{ Ma}$) [11, 14]。

裂谷中部以玄武岩为主的火山岩带北起昌宁, 经澜沧、孟连、曼信延至缅甸, 国内出露长度超过 200 km, 宽 1~3 km, 呈南北向狭长条带状展布; 火山岩岩性由熔岩和火山碎屑岩组成, 火山碎屑岩由凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩和沉凝灰岩构成, 而熔岩则以玄武岩占绝大多数, 其质量分数约占火山岩的 90% 以上 [15-16]。区内目前发现与火山岩有关的矿床主要有云县铜厂街铜矿 [17] 和澜沧老厂铜铅银铅锌多金属矿床 [18-19]。

裂谷西部以大面积展布的石炭系南段组碎屑岩为特征, 局部含有石炭-二叠系的碳酸盐岩盖层, 目前还没有发现具有影响力的矿床, 但在裂谷北段的澜沧县茫登-亮山一带有少量的酸性斑岩 (年龄未知) 出露, 周边发育有铅锌矿点和钨矿点 (1:20 万上班老沧源地质矿产图资料), 暗示了可能属于喜山期的斑岩活动在裂谷西部南段组地层中也具有成矿潜力, 但相关研究非常薄弱。

大黑山勘查区 (图 1) 早石炭纪为裂谷边缘相

地区, 主要发育南段组 (C_{1n}) 碎屑岩, 是一套厚度巨大的类复理石建造, 为灰黑色中厚层含凝灰质长石英砂岩、细砂岩夹页岩、粘板岩; 上覆中上石炭统白云岩及二叠系灰岩, 岩性与老厂矿区基本相同。区内发育三组断裂构造, 分别为 NE、NW 和 EW 走向, 且自西向东以大黑山为中心形成放射状格局。根据坑道揭露和地表观察, 大黑山勘查区的热液蚀变体系从下向上依次分布为: 南段组中发育石英网脉型硅化、 C_{2+3} 白云岩中发育铁锰碳酸盐化并具有一定的银铅锌矿化、地表二叠系灰岩中发育线型热液角砾白云岩化并以黑山梁子的正地形为特征。

为揭示热液蚀变体系的垂向变化及不同岩性中的元素地球化学特征, 我们对大黑山勘查区的两个坑道及地表典型的热液蚀变角砾白云岩剖面进行了系统取样 (图 2)。2 号平巷 (D2: N $22^{\circ}37'57.0''$; E $99^{\circ}45'57.3''$, 高程 1492 m) 为目前海拔标高最低的平巷, 主要出露下石炭统南段组 (C_{1n}) 灰-黑色细粒石英砂岩, 夹有较多泥质杂基, 岩层局部强烈褶皱变形并伴随角砾化。巷道中部沿着一小型断裂可

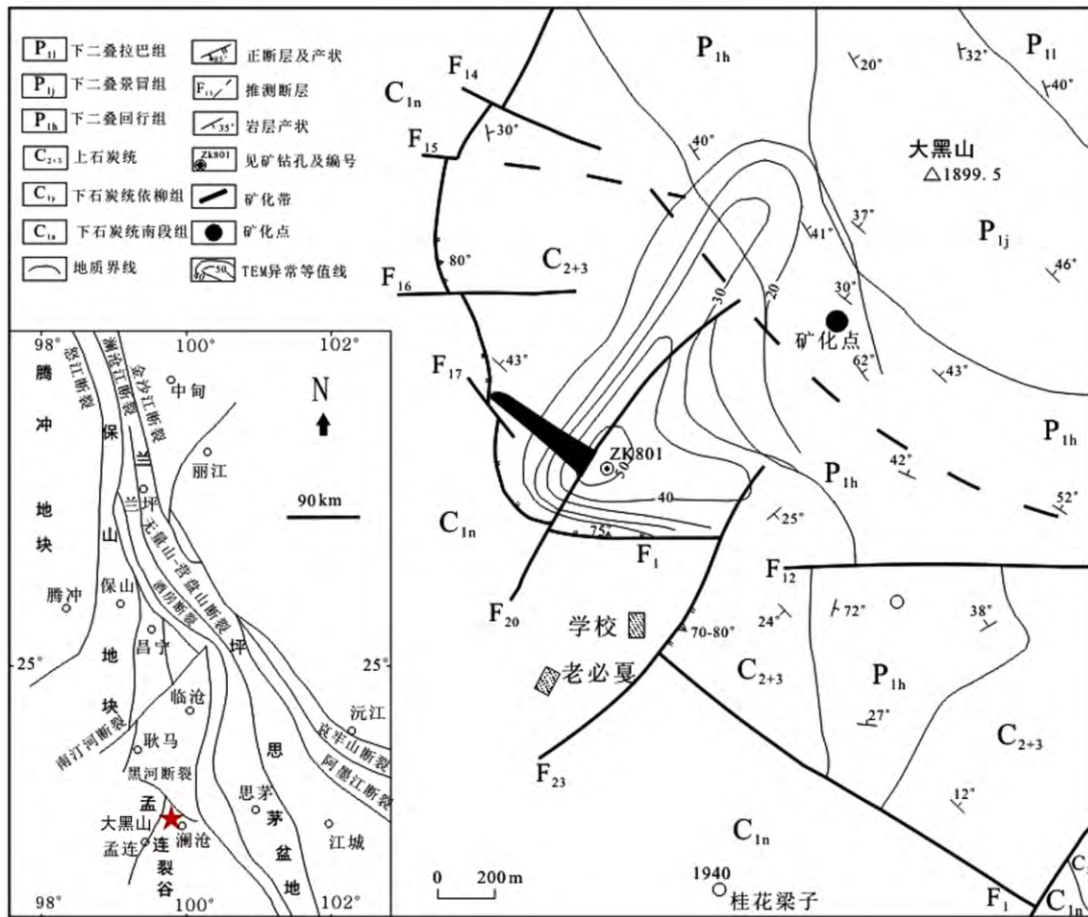


图 1 澜沧大黑山银铅锌多金属矿矿区地质图 (修改自田宗春, 2011)

Fig. 1. Geological map of Daheishan Ag-Pb-Zn multimetallic exploration area (modified after Tianzongchun, 2011).

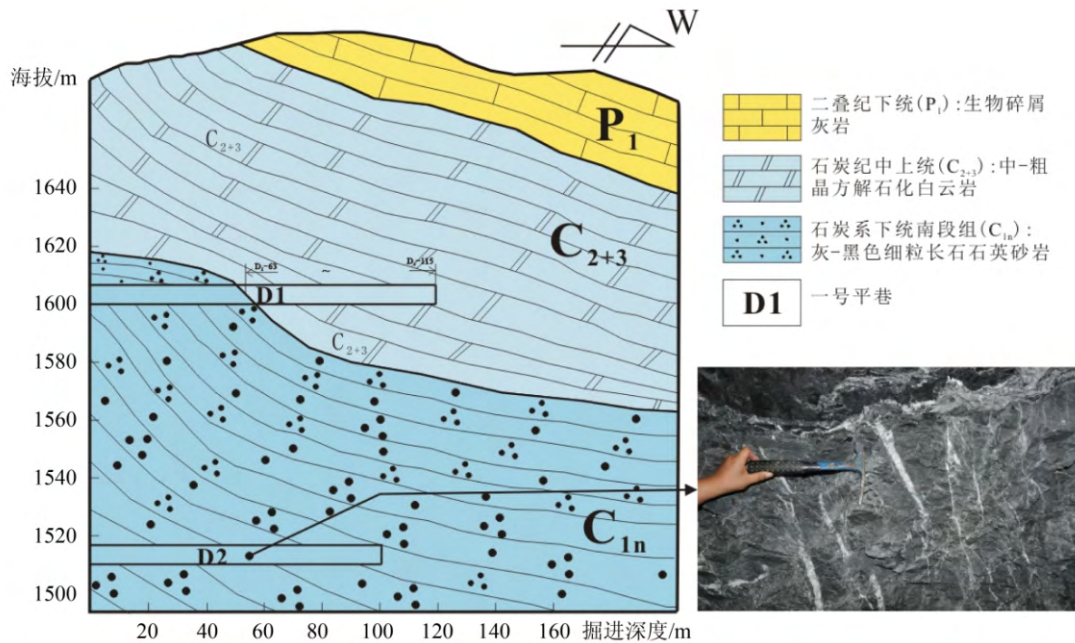


图2 澜沧大黑山取样位置剖面示意图

Fig. 2. Cross-section map of sampling location in Daheishan exploration area, Lancang Area.

见后期硅化形成的大量石英网脉，整体宽度 2 ~ 3 m，单条石英脉的厚度一般为 1 ~ 2 cm；采集了数条石英网脉，手工挑选石英脉并组合为一个分析样品。光学显微镜下，石英脉主要由大量他形石英和少量方解石构成。

1号平巷 (D1: N 22°37'54.5"; E 99°46'04.5", 高程 1619 m) 巷口出露 C_{1n} 灰黑色细粒长石石英砂岩，平巷 63 m 处为 C_{1n}/C₂₊₃ 岩性界面，自此往迎头方向均出露 C₂₊₃ 白云岩，岩性由黑褐色粗晶-伟晶状铁锰方解石化白云岩逐渐过渡为浅棕-棕褐色细-中粗晶白云岩。铁锰方解石化不均一，细脉状、网脉状到团斑状，局部见角砾岩化。矿化较弱，少见黄铁矿等硫化物，普遍氧化为褐铁矿，黑褐色铁锰方解石化局部强烈氧化形成锰土。从界面处到迎头，共采集样品 12 块，样品后的编号代表了在平巷中的空间距离。

大黑山勘查区地表的热液白云岩化主要表现为线型正地形，以黑山梁子为代表（延伸约 3 km）（照片 1），在省道 S230 沿线可以观察到小规模的不规则状热液白云岩化露头，地表样品主要采自 S230 沿线热液白云岩化的露头（样品的点号代表了不同 GPS 位置，每个露头至少采集灰岩原岩一块，热液白云岩数块）。通过省道 S230 沿线的观察，地表露头的原岩主要是下二叠统青灰色生物碎屑灰岩，经常发育不均一的肉红色角砾状热液白云岩化，接触界线非常不规则（照片 2），但没有突兀的线状接触，体现了类似岩浆侵入的特点；其中角砾的原岩为灰

岩，粒径变化大，棱角-次棱角状，基本无分选和磨圆，大多表现为原位角砾化，然后白云岩化，显示出热液沿着构造断裂和节理裂隙侵位形成热液白云岩化的特征。



照片 1 澜沧—孟连公路远眺黑山梁子正地形地貌



照片 2 澜沧—孟连公路边热液白云岩化露头

2 测试方法与结果

2.1 测试方法

我们对典型岩石样品都进行了微量元素分析，

测试采用四级杆型电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS), 在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 该仪器对绝大多数微量元素的重复性测试相对标准偏差(RSD)优于10%。对1号平巷的连续剖面样品进行了主量元素的分析, 该工作由澳实分析检测公司完成, 采用X

射线荧光光谱熔融法(ME-XRF26d)进行测试, 测试精度为0.01%。

2.2 数据分析

勘查区各类岩石样品的主量元素及微量元素检测数据示于表1和表2中。

表1 大黑山勘查区二号平巷石英脉、一号平巷铁锰方解石化蚀变样品的主量元素和微量元素
Table 1. Major element and trace element data for sample of No.2 drift quartz veinlet and No.1 drift iron-manganese calcitization from Daheishan area

样号	岩性	w _B /%												
		Al ₂ O ₃	CaO	TFeO	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	LOI	
D2-3	石英网脉综合样													
D1-63m	强烈方解石化	0.13	53.0	0.58	0.02	0.18	2.85	0.03	0.01	0.24	-	0.02	42.05	
D1-69m	强烈方解石化	0.06	53.2	0.29	0.02	0.20	3.83	0.05	0.01	0.13	0.02	0.01	41.50	
D1-79m	强烈方解石化	0.09	53.5	0.32	0.03	0.16	3.42	0.06	0.01	0.18	0.01	0.02	41.59	
D1-81m	强烈方解石化	0.08	53.5	0.24	0.02	0.09	3.35	0.07	0.01	0.18	0.01	0.01	41.70	
D1-87m	强烈方解石化	0.13	45.1	1.13	0.02	7.99	0.65	0.07	0.02	0.28	0.01	0.01	44.31	
D1-88m	强烈方解石化	0.07	55.7	0.80	-	0.24	0.34	0.09	0.01	0.21	0.05	0.02	43.28	
D1-92m	方解石化白云岩	0.06	40.4	0.43	0.01	11.55	1.79	0.07	0.01	0.15	0.01	0.01	44.64	
D1-94m	方解石化白云岩	0.10	42.0	0.34	0.02	10.15	1.89	0.06	0.01	0.20	0.02	0.01	44.40	
D1-97m	方解石化白云岩	0.07	44.1	0.33	0.01	9.56	0.42	0.07	0.02	0.17	-	0.01	44.88	
D1-102m	方解石化白云岩	0.06	45.3	0.35	0.01	8.42	0.43	0.06	0.05	0.16	-	0.01	44.66	
D1-108m	白云岩	0.04	31.3	0.19	0.02	20.70	0.09	0.08	0.01	0.12	0.01	-	47.11	
D1-115m	白云岩	0.05	32.7	0.16	0.02	19.75	0.07	0.09	0.02	0.13	0.01	0.01	46.49	
样号	w _B /10 ⁻⁶													
	Sc	V	Cr	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Sn
D2-3	0.46	1.29	0.97	4.56	10.56	0.38	2.73	1.82	5.20	9.13	0.16	0.59	0.18	0.18
D1-63m	2.38	10.40	7.30	27.03	27.54	2.25	0.15	189	13.30	4.39	0.18	-	0.99	21.92
D1-69m	1.74	2.66	2.72	24.31	4.64	2.70	0.15	96.7	12.00	1.55	0.11	0.23	4.57	0.78
D1-79m	1.41	4.13	12.30	24.22	5.57	2.55	0.16	79.7	8.89	2.32	0.16	0.15	88.10	5.83
D1-81m	1.44	6.27	5.93	25.41	8.90	2.30	0.18	51.2	9.24	2.37	0.18	0.05	57.40	6.34
D1-87m	1.37	12.00	16.70	23.20	8.90	0.57	0.19	109	6.34	1.66	0.17	0.04	5.73	1.33
D1-88m	1.36	9.11	14.40	27.71	5.82	0.33	0.19	108	5.26	1.02	0.11	0.01	4.79	1.16
D1-92m	1.35	9.90	5.64	19.21	17.14	1.33	0.12	53.7	8.97	1.63	0.12	0.05	14.80	26.92
D1-94m	1.32	6.67	5.06	18.95	19.88	1.38	0.12	33.4	7.17	1.21	0.10	0.07	13.80	16.84
D1-97m	1.18	2.90	2.55	20.91	4.79	0.38	0.06	14.8	6.24	0.83	0.13	0.01	3.54	0.48
D1-102m	1.07	5.19	2.73	22.69	13.73	0.40	0.05	24.8	1.17	0.60	0.13	-	4.55	9.89
D1-108m	1.09	1.67	3.72	15.21	2.04	0.10	0.04	2.91	0.25	0.31	0.09	-	0.73	0.34
D1-115m	0.86	3.04	5.50	15.64	2.87	0.10	0.03	2.48	0.63	0.69	0.20	0.08	0.17	0.75
样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
D2-3	1.55	3.69	0.51	2.32	0.63	0.38	0.84	0.16	0.93	0.20	0.48	0.07	0.43	0.05
D1-63m	6.69	7.45	1.02	4.28	0.86	0.72	1.20	0.22	1.30	0.31	0.75	0.11	0.64	0.08
D1-69m	7.52	5.83	0.98	3.89	0.69	1.04	1.09	0.18	1.03	0.25	0.64	0.10	0.46	0.07
D1-79m	4.78	4.34	0.67	2.46	0.49	0.71	0.77	0.12	0.71	0.17	0.42	0.06	0.33	0.04
D1-81m	5.54	3.88	0.70	2.84	0.51	1.28	0.91	0.12	0.77	0.18	0.50	0.06	0.37	0.05
D1-87m	2.83	1.62	0.39	1.70	0.36	0.19	0.56	0.08	0.54	0.10	0.31	0.04	0.25	0.04
D1-88m	4.70	2.10	0.47	1.96	0.42	0.14	0.53	0.08	0.42	0.10	0.24	0.03	0.18	0.03
D1-92m	4.06	2.26	0.60	2.39	0.50	0.82	0.76	0.11	0.72	0.17	0.43	0.06	0.31	0.06
D1-94m	2.18	1.38	0.38	1.57	0.35	0.35	0.60	0.09	0.55	0.13	0.37	0.05	0.27	0.05
D1-97m	1.68	0.85	0.31	1.43	0.30	0.11	0.49	0.07	0.43	0.10	0.29	0.04	0.24	0.03
D1-102m	0.25	0.19	0.04	0.19	0.05	0.03	0.08	0.01	0.08	0.01	0.05	0.01	0.04	-
D1-108m	0.12	0.12	0.02	0.05	0.03	0.01	0.05	-	0.02	-	0.01	-	0.01	-
D1-115m	0.31	0.41	0.05	0.24	0.05	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01	0.02	0.01	0.03	-

续表 1

样号	岩性	$w_B/10^{-6}$												
		Hf	Ta	Tl	Th	U	Rb	Cs	Sr	Ba	Pb	Zn	Bi	Mn
D2-3	石英网脉综合样	0.19	0.09	0.02	0.81	0.18	1.74	0.10	57.6	33	19	17	0.06	524
D1-63m	强烈方解石化	0.08	0.04	1.36	0.18	0.93	0.62	0.06	50.6	127	25	1606	0.01	22077
D1-69m	强烈方解石化	0.02	0.05	1.68	0.12	0.28	0.76	0.09	73.4	124	67	1909	0.01	30831
D1-79m	强烈方解石化	0.03	0.06	0.42	0.13	0.47	1.38	0.68	128	400	1250	1017	0.02	26725
D1-81m	强烈方解石化	0.04	0.06	1.15	0.21	0.72	0.75	0.40	103	305	1530	658	0.02	25563
D1-87m	强烈方解石化	0.04	0.04	1.61	0.12	0.45	0.69	0.18	55.1	77.6	1490	655	0.06	4942
D1-88m	强烈方解石化	0.01	0.05	0.51	0.04	0.54	0.13	0.07	64.5	34.8	162	225	0.02	2680
D1-92m	方解石化白云岩	0.03	0.06	0.90	0.06	0.39	0.33	0.17	43.8	129	2130	670	0.03	14563
D1-94m	方解石化白云岩	0.03	0.06	0.44	0.04	0.36	0.64	0.21	27.4	175	683	925	0.01	15261
D1-97m	方解石化白云岩	0.04	0.07	0.08	0.06	0.29	0.18	0.04	29.7	122	64	578	0.02	3494
D1-102m	方解石化白云岩	0.01	0.07	0.54	0.03	0.15	0.20	0.03	28.7	44.6	1660	597	0.03	3447
D1-108m	白云岩	-	0.09	0.03	0.03	0.15	0.15	0.01	69.5	12.4	36	94	0.02	729
D1-115m	白云岩	0.01	0.13	0.04	0.09	0.23	0.34	0.03	16.6	4.07	161	109	0.04	411

注：“-”代表数据低于检测限，下同。

表 2 大黑山勘查区地表弱蚀变碳酸盐岩及热液角砾白云岩化碳酸盐岩样品的微量元素 ($w_B/10^{-6}$)

Table 2. Trace element data for weakly altered and hydrothermal breccia dolomitization carbonates in Daheishan exploration area

样号	岩性	Sc	V	Cr	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Sn
442-1	生物碎屑灰岩	1.17	5.68	12.9	24.99	1.52	0.03	0.09	0.60	0.67	0.47	0.04	0.07	0.02	0.02
446-1	生物碎屑灰岩	0.52	1.92	9.45	25.41	1.68	0.04	0.05	0.41	0.34	0.50	0.04	-	0.03	-
二叠系生物碎屑灰岩平均		0.85	3.80	11.2	25.20	1.60	0.03	0.07	0.50	0.51	0.49	0.04	0.07	0.03	0.02
439-1	中晶白云岩	1.06	1.28	17.0	15.38	3.70	0.09	0.06	0.95	0.50	0.53	0.08	0.01	0.09	0.25
440-1	细晶白云岩	1.47	4.63	4.20	15.64	3.84	0.08	0.10	2.27	0.73	0.95	0.09	0.05	0.3	0.12
448-1	中粗晶白云岩	1.12	2.11	8.14	21.99	5.93	0.20	0.02	1.94	2.21	0.73	0.17	0.13	0.03	0.14
中上石炭统白云岩平均		1.22	2.67	9.78	17.67	4.49	0.12	0.06	1.72	1.15	0.74	0.12	0.06	0.14	0.17
441-1	细晶白云岩	1.5	4.17	3.63	14.11	3.04	0.10	0.08	1.69	7.50	1.59	0.15	-	0.09	0.10
442-2	细晶白云岩	1.24	7.85	10.9	16.66	3.49	0.13	0.08	0.64	1.88	0.44	0.07	0.03	-	0.04
442-3	粗晶白云岩	1.28	3.02	9.13	17.34	3.92	0.11	0.02	0.40	2.58	0.56	0.05	-	-	-
442-4	细晶白云岩	1.46	10.2	14.0	18.27	4.92	0.07	0.06	0.88	0.71	0.38	0.07	0.15	-	0.08
443-1	细晶白云岩	1.22	5.29	12.1	18.53	5.27	0.07	0.06	1.07	0.82	0.41	0.06	0.01	-	0.07
443-2	细中晶白云岩	1.34	8.38	10.5	16.40	3.66	0.06	0.10	0.71	1.49	0.39	0.04	-	-	-
444-1	粗晶白云岩	1.17	10.4	17.2	16.83	3.28	0.12	0.10	0.70	1.55	0.31	0.04	0.04	0.01	-
444-2	粗晶方解石脉	1.86	5.52	7.19	18.87	3.60	0.12	0.09	1.43	1.05	0.38	0.04	0.01	-	0.09
445-1	粗晶角砾白云岩	1.43	2.66	4.87	19.72	3.88	0.10	0.03	0.98	1.51	0.21	0.03	0.05	-	0.26
446-2	细晶白云岩	1.23	2.40	8.88	15.64	3.29	0.04	0.09	0.67	0.18	0.33	0.04	-	-	0.02

样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
442-1	生物碎屑灰岩	0.30	0.21	0.05	0.18	0.04	0.02	0.07	0.009	0.056	0.014	0.033	0.006	0.025	0.003
446-1	生物碎屑灰岩	0.19	0.29	0.03	0.14	0.03	0.01	0.04	0.006	0.037	0.006	0.014	0.003	0.013	0.004
二叠系生物碎屑灰岩平均		0.24	0.25	0.04	0.16	0.03	0.01	0.06	0.007	0.046	0.010	0.024	0.005	0.019	0.003
439-1	中晶白云岩	0.25	0.34	0.05	0.19	0.04	0.01	0.04	0.009	0.033	0.005	0.033	0.004	0.023	0.005
440-1	细晶白云岩	0.81	0.81	0.11	0.39	0.08	0.03	0.10	0.015	0.073	0.011	0.042	0.006	0.017	0.005
448-1	中粗晶白云岩	0.86	0.72	0.15	0.59	0.15	0.04	0.16	0.027	0.177	0.038	0.099	0.012	0.080	0.013
中上石炭统白云岩平均		0.64	0.63	0.10	0.39	0.09	0.03	0.10	0.017	0.094	0.018	0.058	0.007	0.040	0.008
441-1	细晶白云岩	1.92	1.67	0.43	1.73	0.32	0.13	0.58	0.098	0.617	0.142	0.378	0.049	0.308	0.048
442-2	细晶白云岩	2.94	2.91	0.45	1.76	0.29	0.11	0.30	0.028	0.176	0.026	0.052	0.008	0.049	0.006
442-3	粗晶白云岩	2.65	3.08	0.51	2.04	0.36	0.13	0.44	0.048	0.180	0.038	0.106	0.011	0.040	0.005
442-4	细晶白云岩	0.72	0.57	0.08	0.34	0.04	0.03	0.06	0.009	0.068	0.010	0.024	0.007	0.023	0.003
443-1	细晶白云岩	0.79	0.99	0.15	0.61	0.16	0.04	0.15	0.017	0.084	0.018	0.040	0.005	0.018	0.003
443-2	细中晶白云岩	0.74	0.61	0.08	0.37	0.07	0.02	0.14	0.019	0.111	0.031	0.071	0.013	0.054	0.007
444-1	粗晶白云岩	1.45	0.97	0.14	0.62	0.08	0.02	0.16	0.020	0.136	0.027	0.061	0.01	0.046	0.009
444-2	粗晶方解石脉	1.00	0.67	0.09	0.38	0.06	0.02	0.09	0.014	0.077	0.022	0.054	0.003	0.031	0.003
445-1	粗晶角砾白云岩	0.94	0.57	0.08	0.31	0.07	0.02	0.11	0.019	0.109	0.024	0.050	0.006	0.049	0.009
446-2	细晶白云岩	0.76	0.62	0.07	0.21	0.05	0.02	0.06	0.005	0.030	0.002	0.018	-	0.014	0.002

续表 2

样号	岩性	Hf	Ta	Tl	Th	U	Rb	Cs	Sr	Ba	Pb	Zn	Bi	Mn
442-1	生物碎屑灰岩	0.02	0.03	-	0.02	1.05	0.02	0.01	174	2.38	0.65	4.36	0.04	11
446-1	生物碎屑灰岩	0.01	-	-	0.03	0.66	0.10	0.01	155	2.70	1.79	3.99	0.01	14
二叠系生物碎屑灰岩平均		0.01	0.02	-	0.02	0.85	0.06	0.01	165	2.54	1.22	4.18	0.02	12
439-1	中晶白云岩	0.01	0.03	0.02	0.04	0.18	0.27	0.03	98	9.81	4.11	17.32	0.04	152
440-1	细晶白云岩	0.01	0.04	0.19	0.04	0.56	0.26	0.02	32	27.30	1.40	28.34	0.03	265
448-1	中粗晶白云岩	0.03	0.11	0.96	0.07	0.33	0.32	0.06	20	31.70	0.44	20.50	0.02	1208
中上石炭统白云岩平均		0.02	0.06	0.39	0.05	0.36	0.28	0.04	50	22.94	1.98	22.05	0.03	542
441-1	细晶白云岩	0.03	0.04	0.05	0.12	0.34	0.26	0.01	22	16.30	0.89	7.47	0.04	250
442-2	细晶白云岩	-	0.03	0.01	0.02	0.34	0.13	0.01	31	2.05	0.97	14.04	0.02	497
442-3	粗晶白云岩	-	0.03	0.01	0.01	0.14	0.07	0.01	31	1.39	0.84	10.34	0.02	459
442-4	细晶白云岩	0.01	0.03	0.01	0.04	1.01	0.12	0.01	31	2.57	0.90	18.92	0.02	168
443-1	细晶白云岩	0.02	0.03	0.01	0.03	0.20	0.06	0.01	39	4.14	1.48	56.0	0.04	180
443-2	细中晶白云岩	0.02	0.02	0.01	0.03	0.50	0.08	0.01	29	2.09	0.62	21.44	0.02	156
444-1	粗晶白云岩	0.03	0.03	-	0.03	0.25	0.08	0.01	38	1.12	0.58	7.78	0.02	968
444-2	粗晶方解石脉	0.02	0.03	0.15	0.02	0.09	0.04	0.01	62	1.26	1.83	6.63	0.02	550
445-1	粗晶角砾白云岩	0.02	0.03	0.12	0.01	0.18	0.03	0.01	45	1.78	1.96	19.17	0.02	621
446-2	细晶白云岩	0.02	0.02	0.01	0.03	0.17	0.13	0.01	26	3.83	0.69	17.83	0.01	258

3 讨论

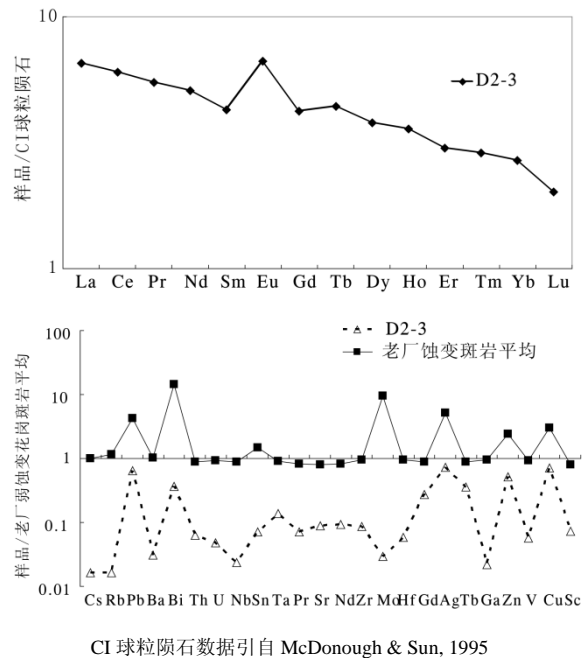
3.1 2号平巷石英脉

2号平巷(D2)石英脉的稀土总量为 12.24×10^{-6} , 球粒陨石均一化配分图中表现为轻稀土元素轻微富集并具有明显 δEu 正异常的右倾模式(图 3a), $(La/Yb)_N$ 为 2.57, δCe 为 1.01, δEu 为 1.57.

以澜沧老厂矿区 Na_2O 含量高于 2.3% 且无明显成矿元素 Mo-Cu-Pb-Zn-Ag 异常的样品的平均值(老厂弱蚀变花岗斑岩平均)作为相对新鲜的花岗斑岩的标准值^[17], D2 石英脉微量元素蛛网图(图 3b)表明, 石英脉中矿化特征元素含量都比较低, 但具有明显的 Pb-Bi-Ag-Zn-Cu 正异常; 该富集模式和老厂矿区深部蚀变花岗斑岩的模式基本相似, 但具有明显的 Mo 亏损。上述特征表明大黑山勘查区深部可能存在与老厂矿区相同的花岗斑岩, Mo 是老厂喜山期花岗斑岩的特征成矿元素, 但在大黑山浅部的石英脉中 Mo 明显亏损, 进一步暗示了深部可能存在 Mo 矿化。

澜沧老厂矿区深部花岗斑岩的顶盖围岩是厚大的玄武质火山岩(裂谷带内最厚可达 1500 m^[9]), 玄武岩本质上具有硅不饱和的地球化学特征; 花岗斑岩形成的富硅热液体系在玄武岩中主要形成夕卡岩化蚀变, 很难形成石英脉。大黑山勘查区下石炭统南段组属于澜沧裂谷的边缘相, 主要岩性为碎屑岩(长石石英砂岩), 整体“酸性”程度较高, 有利于花岗斑岩热液体系形成石英脉。

老厂花岗斑岩蚀变过程中, 矿物学上主要体现为斜长石的分解蚀变, 参照大洋中脊玄武岩热液体



CI 球粒陨石数据引自 McDonough & Sun, 1995
 图 3 a. 大黑山勘查区 2 号平巷石英脉的稀土配分图;
 b. 大黑山勘查区 2 号平巷石英脉的多元素配分图
 Fig.3. (a) CI-chondrite-normalized REE patterns for No.2 drift quartz veinlet in Daheishan. (b) Multi-element distribution patterns for No.2 drift quartz veinlet in Daheishan.

系中斜长石分解蚀变普遍形成 δEu 正异常的热液体系^[18, 19], 我们倾向于老厂花岗斑岩热液体系也具有明显的 δEu 正异常。当这种热液进入围岩, 依据围岩的性质而发生不同蚀变; 在老厂矿区的玄武质火山岩中形成面型夕卡岩化, 厚大的玄武质火山岩就像缓冲剂, 夕卡岩化过程中 δEu 表现出微弱的波动^[17]; 在大黑山勘查区以线性蚀变为主,

即沿着一定构造发育，并形成脉状热液体系，石英脉中基本保留了原始热液 δEu 正异常的特性。

3.2 1 号平巷的铁锰方解石化

1 号平巷(D1)63 m 处为石炭系地层(C_{1n}/C₂₊₃)的岩性界面，C_{1n} 为南段组碳质凝灰质长石石英砂岩，未见明显蚀变和矿化；C₂₊₃ 白云岩则是重要的矿化层位，D1 平巷中以广泛发育粗晶黑褐色铁锰方解石化为特征。样品主量元素变化见图 4a，从迎头方向向 C₁/C₂₊₃ 界面处，在深部热液的改造下，C₂₊₃ 白云岩逐渐大规模方解石化，w(MgO)从 20% 快速递减到 10% 左右并逐渐趋近于 0%，w(CaO)从 30% 左右递增到 40% 左右并最终稳定在 50% 左右；表现出热液交代过程中获得大量的钙，这与 D2 石英脉中存在一定的方解石吻合。Mn(Fe)是方解石化的特征元素，迎头附近弱交代的白云岩 w(Mn)接近 0，向界面方向，中等方解石化样品 w(Mn)可达 1%，强烈方解石化样品则多在 3.0%~3.5% 左右；从图 4b 可以看出，w(CaO+TFeO+MnO)与 w(MgO)具有极好的负相关性，说明深部热液带来的钙铁锰联合置换 C₂₊₃ 白云岩中的镁，形成广泛的方解石化。交代过程带出的镁在白云岩中没有适宜的沉淀条件，推测交代过程产生的 MgO 将继续向上运移，是上覆二叠系灰岩地层热液白云岩化的主要触发因素。

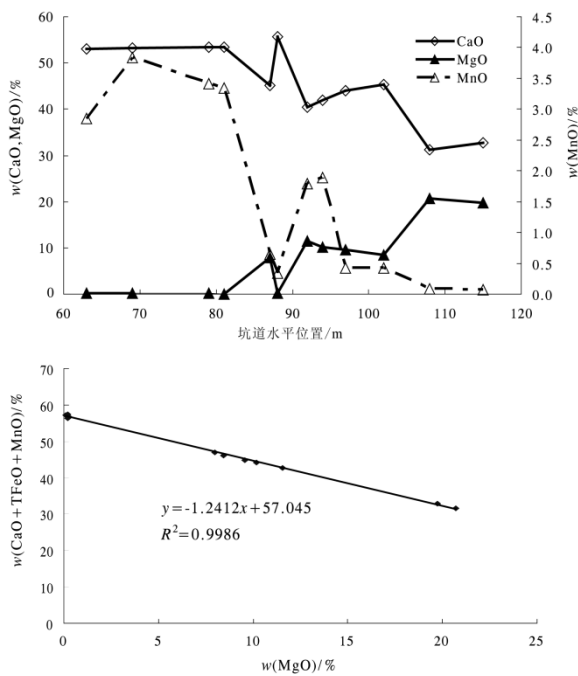


图 4 a. 1 号平巷 CaO、MgO、MnO 水平分布图；b. 1 号平巷白云岩方解石化过程中主量元素相关性
Fig. 4. (a) CaO, MgO, and MnO distribution diagram for No.1 drift. (b) Major element relation diagram for No.1 drift samples during the process of Fe-Mn calcitization.

D1 样品的特征成矿元素 Pb-Zn-Ag 的水平分布特征比较复杂(图 5a)，但总体显示了伴随铁锰方解石化的增强，近 40 m 的蚀变带内 Pb-Zn-Ag 明显形成矿化异常。D1 样品的 ΣREE 含量为 0.45×10⁻⁶~25.63×10⁻⁶，变化较大；δEu 为 0.35~5.71，平均 2.23，大部分样品特别是铁锰方解石化强烈的样品表现出明显的 Eu 正异常；水平方向上从 115 m 到 63 m，相当于从白云岩围岩向反应中心，ΣREE 和 δEu 均呈明显的上升趋势(图 5b)，表明铁锰方解石化过程中，稀土元素特别是 Eu 得到明显富集。

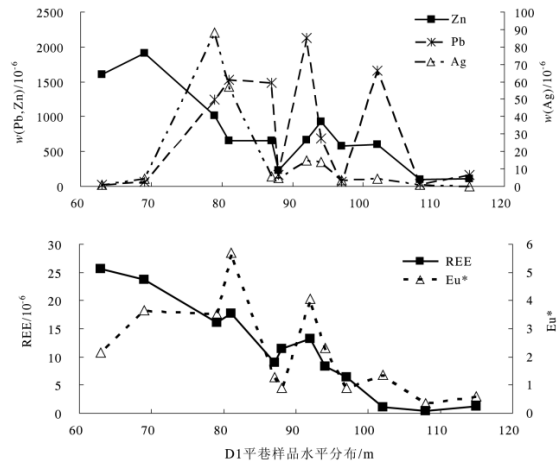


图 5 a. 1 号平巷矿化元素铅锌银水平分布图；b. 1 号平巷稀土总量与 Eu* 异常的水平分布图

Fig. 5. (a) Pb-Zn-Ag distribution diagram for No.1 drift. (b) REE and Eu* anomaly distribution diagram for No.1 drift.

为进一步判别铁锰方解石化过程中微量元素的变化特征，我们在中上石炭统白云岩地层的地表露头中选取了 3 个蚀变微弱的样品，这 3 个样品具有基本一致的微量元素配分模式(图略)，其平均值可以近似作为大黑山勘查区未蚀变中上石炭统白云岩的标准。以该标准均一化的 D1 平巷样品的稀土元素配分图(图 6a)表明，铁锰方解石化强烈的样品(D1-63 到 D1-97)，稀土明显富集(平均富集 14.61 倍)，并且表现出明显的 Eu 正异常(δEu 平均 3.08)；靠近迎头(围岩)的 3 个样品，铁锰方解石化很微弱，稀土元素表现为亏损，Eu 以负异常为主，表明在铁锰方解石化过程中，浅部地表水循环已经建立，并且将围岩地层中的稀土元素向反应中心输送。矿化元素的配分图(图 6b)表明，在铁锰方解石化过程中 Pb-Sn-Ag-Zn 形成明显富集，与 D2 石英脉的配分图(图 3b)比较，Cu-Bi 的正异常消失，新增加了 Sn 的富集异常(Sn 的富集也验证了热液与深部花岗岩有关)，暗示了在 C_{1n}/C₂₊₃ 岩性界面，铁锰方解石化过程中伴随了 Pb-Zn-Ag 硫化物的沉淀，还可能形成锡石沉淀。

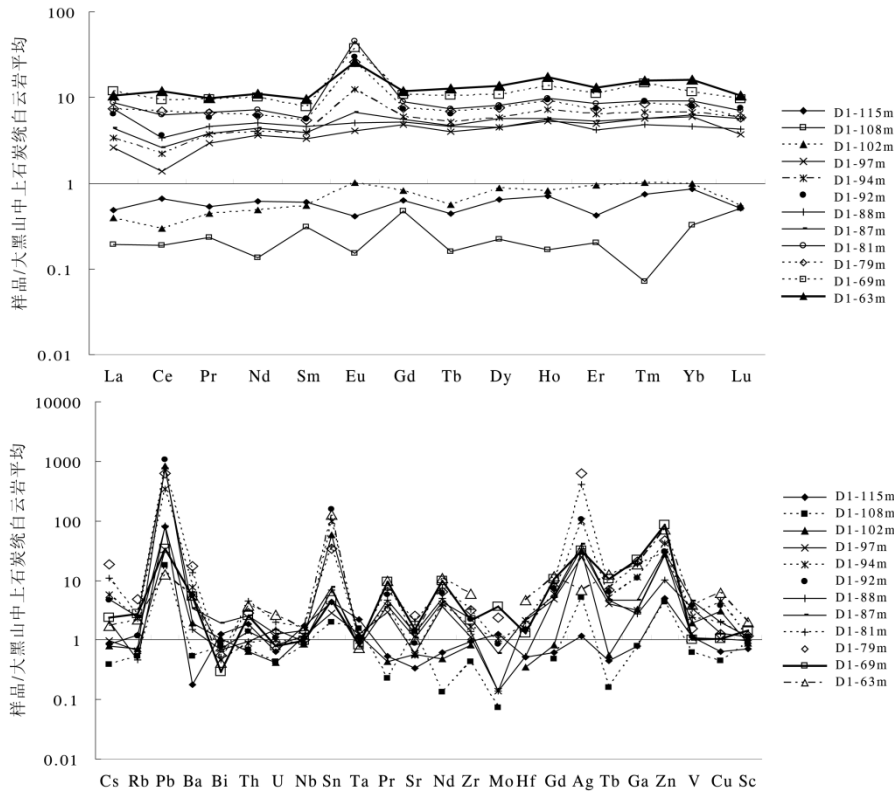


图 6 a. 1 号平巷样品稀土元素配分图; b. 1 号平巷样品矿化元素配分图

Fig. 6. (a) REE distribution patterns for No.1 drift samples. (b) Mineralization elements distribution patterns for No.1 drift samples.

63 m 处的岩性界面是最有利的成矿界面, 浅部的地表水循环以该界面为隔挡层, 深部热液通过断裂体系到达该界面后, 与浅部地表水汇合建立新的流体循环体系。在中上石炭统碳酸盐岩地层中目前没有发现夕卡岩化, 也很少发现富含硅的热液矿物, 少数粘土可能来自原始白云岩中的杂质; 因此, 我们倾向于深部富硅和碳酸盐的热液在该界面底部的碎屑岩中形成石英网脉, 可能伴随 Cu-Bi 的硫化物沉淀; 而富钙-铁-锰的碳酸盐则交代界面顶部的白云岩, 形成铁锰方解石化, 并伴随 Pb-Sn-Ag-Zn 富集 (白云岩中的硫酸盐含量可能是重要的影响因素)。由于地球化学性质差异, 相对于石英, 热液体系中的稀土元素更容易进入碳酸盐矿物, 因此, 热液中携带的 δEu 正异常信息在铁锰方解石化中得到进一步的富集保存, 在大黑山热液剖面的中部形成广泛的高 δEu 正异常为特点。

3.3 地表热液角砾白云岩化

大黑山勘查区的地表热液角砾白云岩化主要表现为线性展布, 以地表具有明显正地形地貌的黑山梁子为代表, 往南延展至省道 S230 交汇处形成了多处囊状、脉状的热液白云岩化地质体, 其原岩主要为下二叠统青灰色生物碎屑灰岩。

地表热液角砾化白云岩 ΣREE 为 $1.86 \times 10^{-6} \sim 9.64 \times 10^{-6}$, 平均 4.73×10^{-6} ; $(La/Yb)_N$ 为 $0.48 \sim 5.08$, 平均 2.69, 轻稀土元素较富集。 δEu 为 $0.58 \sim 1.66$, 平均 0.96, 基本表现为负异常; δCe 为 $0.45 \sim 0.71$, 平均 0.58, 全部表现为负异常。

2 个下二叠统生物碎屑灰岩围岩的微量元素蛛网图模式都比较相近 (图略), 其平均值可以近似作为未蚀变灰岩围岩的标准值, 以此平均值为标准的热液白云岩化样品的稀土元素配分图和微量元素蛛网图分别示于图 7a 和图 7b 中。从图 7a 中可见, 除一个样品重稀土有一定亏损外, 整体上热液白云岩化过程中稀土基本表现为富集, 同时继承了深部热液的 δEu 正异常特征, δEu 为 $0.79 \sim 2.25$, 平均 1.30, 大部分样品表现为正异常。从图 7b 中可见, 热液白云岩化过程中 Sr-U 表现为明显亏损, 这和这两个元素在碳酸盐热液中具有较强的迁移性相吻合; 由于低含量的 Ag 测不准, 这里我们用 Mn 代替 Ag, 图 7b 中可见, 矿化元素在二叠系灰岩热液白云岩化过程中体现出强烈的 Mn(Ag) 富集, 并伴随弱的 Cu-Zn 富集, 而 Pb-Bi 组合基本没有富集显示, Mn(Ag) 富集的特征和区域上地表风化常形成 Mn-Ag 矿化 (锰结核矿化) [20] 的特征吻合。

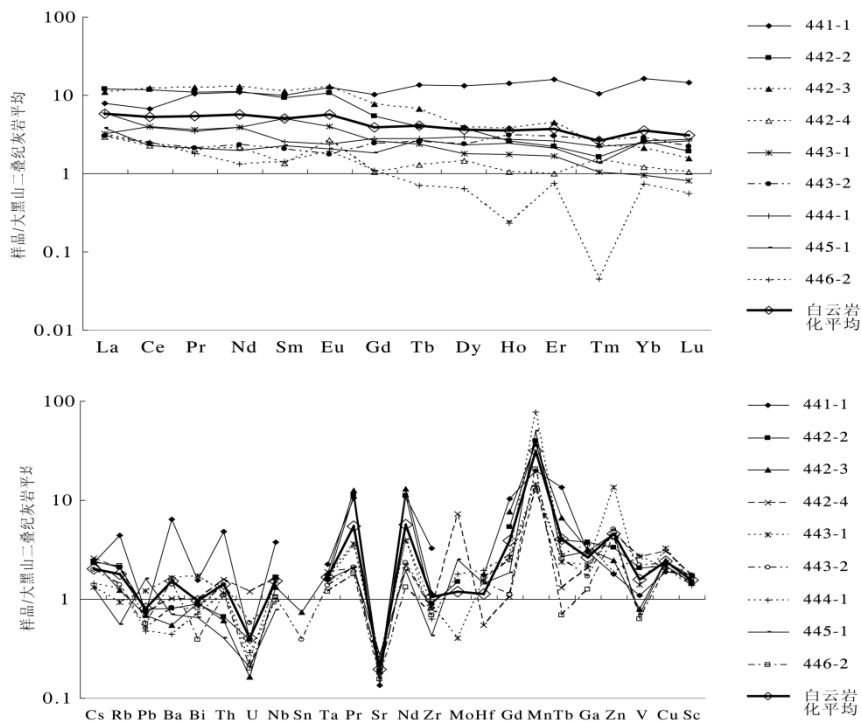


图 7 a.大黑山热液白云岩化样品稀土元素配分图; b. 大黑山热液白云岩化样品矿化元素配分图

Fig. 7. (a) REE distribution patterns for hydrothermal dolomitization samples in Daheishan. (b) Trace elements distribution patterns for hydrothermal dolomitization samples in Daheishan.

3.4 勘查区岩浆热液剖面

D2 石英网脉与澜沧老厂矿区深部斑岩具有基本一致的矿化元素配分图, D1 平巷铁锰方解石化白云岩中出现明显的 Sn 富集异常, D2 和 D1 系统中普遍存在明显的 Eu 正异常, 都说明了在大黑山勘查区的深部存在老厂式花岗斑岩, 而且 Mo 的亏损暗示了深部可能存在 Mo 的矿化。D1 平巷 63m 处的 C_{1n}/C_{2+3} 岩性界面, 是深部岩浆热液系统与地表天水循环体系的交汇处, 是最有利的成矿部位; 随着大量地表水的加入, 热液温度降低, 伴随 Ca-Mn-Fe 热液对白云岩的交代形成广泛的铁锰白云岩化, 白云岩中硫酸盐的热化学还原过程提供的硫是铅锌矿化的重要控制因素。 C_{1n}/C_{2+3} 岩性界面中最主要的元素活化迁移是 Mg-Mn 组合, 由于含 Ca-Mn-Fe 热液对白云岩的交代, 在低温体系中多余的 Mg 在白云岩围岩中没有适宜的交代对象, 只有继续进入热液向上迁移 (伴随少量 Mn), 并在进入二叠系灰岩地层时交代灰岩形成不同形式的热液白云岩化。

将大黑山矿产勘查区内两条探矿平巷和地表热液白云岩化在空间上进行组合, 便构成一个较为完整的喜山期岩浆-热液剖面, 据此建立了如下的岩浆-热液演化模式: 喜山期中酸性岩浆在大黑山矿产勘

查区侵位后分异演化出的高温热液向上运移, 在 C_{1n} 中伴随温度变化形成含方解石的石英网脉; 热液进入 C_{1n}/C_{2+3} 界面时, 与天水循环体系混合, 温度、压力降低, 主要的矿化物质基本沿着这一岩性界面沉淀, 主要蚀变特征为白云岩的铁锰方解石化; 铁锰方解石化过程中交代产生的富 Mg (Mn) 的低温热液体系继续向上迁移, 在二叠系生物碎屑灰岩地层中形成不同形式的热液白云岩化 (可能伴随有隐爆角砾岩化) (图 8)。

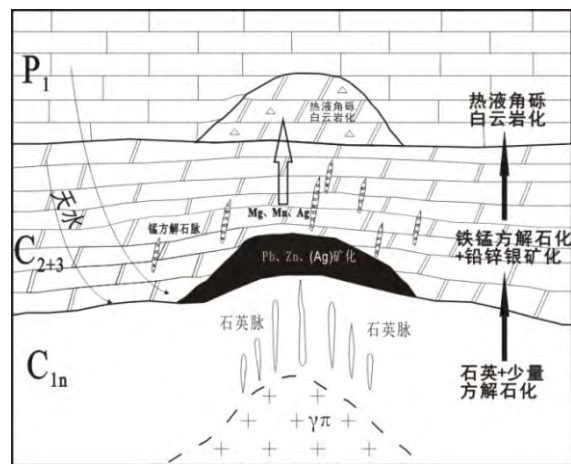


图 8 大黑山矿产勘查区岩浆-热液演化模式
Fig. 8. Magma- hydrotherm evolution model for Daheishan exploration region.

4 结论

通过对大黑山矿产勘查区不同地层中热液活动现象的初步解剖及综合, 建立了一个典型的岩浆-热液活动的垂直剖面, 为进一步厘清澜沧裂谷北段喜山期岩浆-热液的成矿模式奠定了基础。垂直剖面包括如下3个层次:

(1) 热液体系在 C_{1n} 南段组碳质碎屑岩中表现为具有明显正 Eu 异常的石英网脉, 整体具有与老厂深部蚀变斑岩相似的微量元素配分模式, 但具有明显的 Mo 亏损, 综合 C_{1n}/C_{2+3} 界面铁锰方解石化中的 Sn 富集异常, 推测大黑山勘查区深部存在老厂型喜山期花岗岩斑岩并可能具有 Mo 矿化。

(2) C_{1n}/C_{2+3} 岩性界面是深部高温岩浆流体与地表低温天水体系的混合反应区域, 也是重要的成

矿界面, 在界面顶板 C_{2+3} 白云岩中发育广泛的粗晶铁锰方解石化, 以普遍具有突出的正 Eu 异常为特征; 由 C_{1n}/C_{2+3} 岩性界面逐渐到围岩, 白云岩的铁锰方解石化程度、稀土含量、正 Eu 异常、 $Pb-Zn-Ag$ 异常都逐渐降低。

(3) 热液体系在地表二叠系生物碎屑灰岩中表现为热液角砾白云岩化, 在 C_{1n}/C_{2+3} 岩性界面的铁锰方解石化过程中置换出大量的镁进入热液并沿构造向上迁移, 交代生物碎屑灰岩形成热液白云岩化, 局部伴随隐爆角砾岩化; 以富 $Mn (Ag)$ 为特征, 是地表锰银矿化的物源。综合剖面的研究确证了地表灰岩中广泛存在的各种形式的热液白云岩化是深部岩浆热液活动的具体体现, 在澜沧裂谷地区具有明确的找矿意义。

参考文献:

- [1] Sillitoe R H. Porphyry Copper Systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105 (1): 3-41.
- [2] Kesler S E, WILKINSON B H. Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits [J]. *Geology*, 2008, 36 (3): 255-258.
- [3] 毛景文, 张建东, 郭春丽. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例 [J]. *地球科学与环境学报*, 2010, (1): 1-14.
- [4] 李波, 张准, 刘建龙, 包广萍, 杨玉琼. 滇西澜沧大黑山富铀蚀变岩脉的发现及其地质意义 [J]. *矿物学报*, 2013, 33 (4): 705-708.
- [5] 田宗春. 澜沧大黑山铅锌多金属矿火山地质作用与成矿 [J]. *云南地质*, 2011, 30 (3): 299-304.
- [6] 李兴林. 昌宁-孟连地区火山岩系基本特征及构造环境的认识 [J]. *云南地质*, 1997, (02): 165-183.
- [7] 李学军. 昌宁-孟连缝合带火山岩地球化学及岩石成因 [D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [8] 赖绍聪, 秦江锋, 李学军, 臧文娟. 昌宁-孟连缝合带乌木龙-铜厂街洋岛型火山岩地球化学特征及其大地构造意义 [J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 44-52.
- [9] 李兴振, 刘朝基, 丁俊. 大湄公河次地区主要结合带的对比与连接 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, (4): 1-12.
- [10] 李峰, 陈琿, 鲁文举, 罗思亮. 云南澜沧老厂花岗岩斑岩形成年龄及地质意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2010, (1): 84-91.
- [11] 李峰, 鲁文举, 杨映忠, 陈琿, 罗思亮, 石增龙. 云南澜沧老厂斑岩钼矿成矿时代研究 [J]. *现代地质*, 2009, (6): 1049-1055.
- [12] 陈永清, 黄静宇, 卢映祥, 程志中, 李建荣. 中缅毗邻区金铅 $Pb-Zn-Ag$ 多金属矿田花岗岩锆石 $U-Pb$ 定年与地球化学特征 [J]. *地学前缘*, 2009, 16 (1): 344-362.
- [13] 邓贤泽, 陶琰, 李娟, 熊凤. 云南沧源南腊铅锌多金属矿母岩成岩年龄及动力学分析 [J]. *矿物学报*, 2015, 35 (S1): 385-386.
- [14] 陈琿, 李峰, 坚润堂, 罗思亮, 姚巍. 云南澜沧老厂花岗岩斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2010, (4): 485-491.
- [15] 陈惜华, 胡洋昭. 滇西澜沧-孟连火山岩带火山岩特征与成因 [J]. *中南矿冶学院学报*, 1992, (1): 1-7.
- [16] 胡祥昭, 陈惜华, 匡立新. 昌宁-孟连火山岩带玄武岩的岩石学及地球化学 [J]. *中南矿冶学院学报*, 1994, (5): 560-564.
- [17] 陈莉, 王立全, 王保弟, 刘函. 滇西昌宁-孟连缝合带铜厂街矿床成因探讨 [J]. *矿床地质*, 2015, 34 (3): 617-631.
- [18] 李宏坤, 蒙光志, 肖述刚. 云南省澜沧老厂钼矿特征及资源前景 [J]. *矿物学报*, 2014, (2): 217-222.
- [19] 代清华, 钟桂芬. 云南澜沧老厂矿区钼矿地质特征及找矿远景 [J]. *云南地质*, 2012, (1): 58-62.
- [20] 王静, 甘甜, 杨金彪, 石增龙, 范云飞, 罗泰义. 花岗岩-玄武岩热液蚀变体系研究: 以澜沧老厂钼银铅锌铜钼矿床为例 [J]. *矿物学报*, 2016, 36 (3): 329-342.
- [21] Douville E, Charlou J L, Oelkers E H, Bienvenu P, Colon C F J, Donval J P, Fouquet Y, Prieur D, Appriou P. The rainbow vent fluids (36°14' N, MAR): the influence of ultramafic rocks and phase separation on trace metal content in Mid-Atlantic Ridge hydrothermal fluids [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184 (1/2): 37-48.
- [22] Bau M, Dulski P. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 155 (1/2): 77-90.
- [23] 陈百友, 王增润, 彭省临, 张映旭, 陈伟. 云南澜沧老厂红土型钼矿床地质特征及成因探讨 [J]. *大地构造与成矿学*, 2002, (1): 86-91.