

东川雪岭铜多金属矿区地层及辉绿岩地球化学特征

刘文恒¹, 刘继顺¹, 马慧英², 刘卫明³, 尹利君¹, 吴自成¹, 罗梦悦⁴

- (1. 中南大学 教育部有色金属矿产预测重点实验室 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 湖南省地质调查院, 长沙 410000; 3. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 赣州 341000;
4. 东华理工大学 研究生院, 南昌 330013)

摘 要: 雪岭矿区铜多金属矿化沿灯影组和渔户村组层间断裂带产出, 部分与辉绿岩接触产出。为了探索其成矿作用和成矿物质来源, 在矿区系统取样, 研究地层及辉绿岩地球化学特征。结果表明: 矿区各地层均较上地壳富集 Ag、As、Pb、Sb, 断裂构造运动有利于成矿物质的迁移富集。矿区辉绿岩为钙碱性系列岩石, 形成于大陆板内构造环境, 为峨眉山玄武岩同期产生的同源异相岩浆活动产物。经综合分析, 矿区矿化应是深部成矿物质受构造运动活化运移至浅部构造有利位置沉淀富集所致, 围岩提供了部分成矿物质, 辉绿岩对矿化具一定积极的作用。

关键词: 雪岭; 地层; 地球化学; 辉绿岩; 矿床成因

中图分类号: P595

文献标志码: A

Geochemistry characteristics of strata and diabase in Xueling Cu-polymetallic mining area, Dongchuan

LIU Wen-heng¹, LIU Ji-shun¹, MA Hui-ying², LIU Wei-ming³, YIN Li-jun¹, WU Zi-cheng¹, LUO Meng-yue⁴

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410000, China;
3. Faculty of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
4. Graduate School, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Cu-polymetallic mineralization occurs in the interlaminar fault of Dengying Formation and Yuhucun Formation in Xueling mining area, and parts of mineralization contact with diabase. In order to explore the mineralization and ore-forming material source, the systematic sampling was carried out to research the geochemistry characteristics of the strata and the diabase. The results show that the strata contain more element contents of Ag, As, Pb and Sb comparing with the upper crust, and the tectonic movement is beneficial to the migration and enrichment of metallogenic material. The diabase which formed in the tectonic settings for continental intraplate belongs to calc-alkaline series, it is the product of polymorphism magmatic activities of the Emeishan basalt. By synthetic analysis, the mineralization is resulted from that the deep metallogenic material activated and migrated under the influence of fault, then enriched in the shallow structural favorable position. The surrounding rocks provide parts of the metallogenic material, and the diabase is favorable for mineralization.

Key words: Xueling; strata; geochemistry; diabase; genesis of deposit

雪岭铜多金属矿区位于扬子板块西侧, 处于康滇南北向地体之东川断隆南缘(见图 1)。东川断隆由南北

向的普渡河断裂、小江断裂和东西向的麻塘断裂和宝九断裂等 4 条生长大断裂所围限, 一直是我国重要的

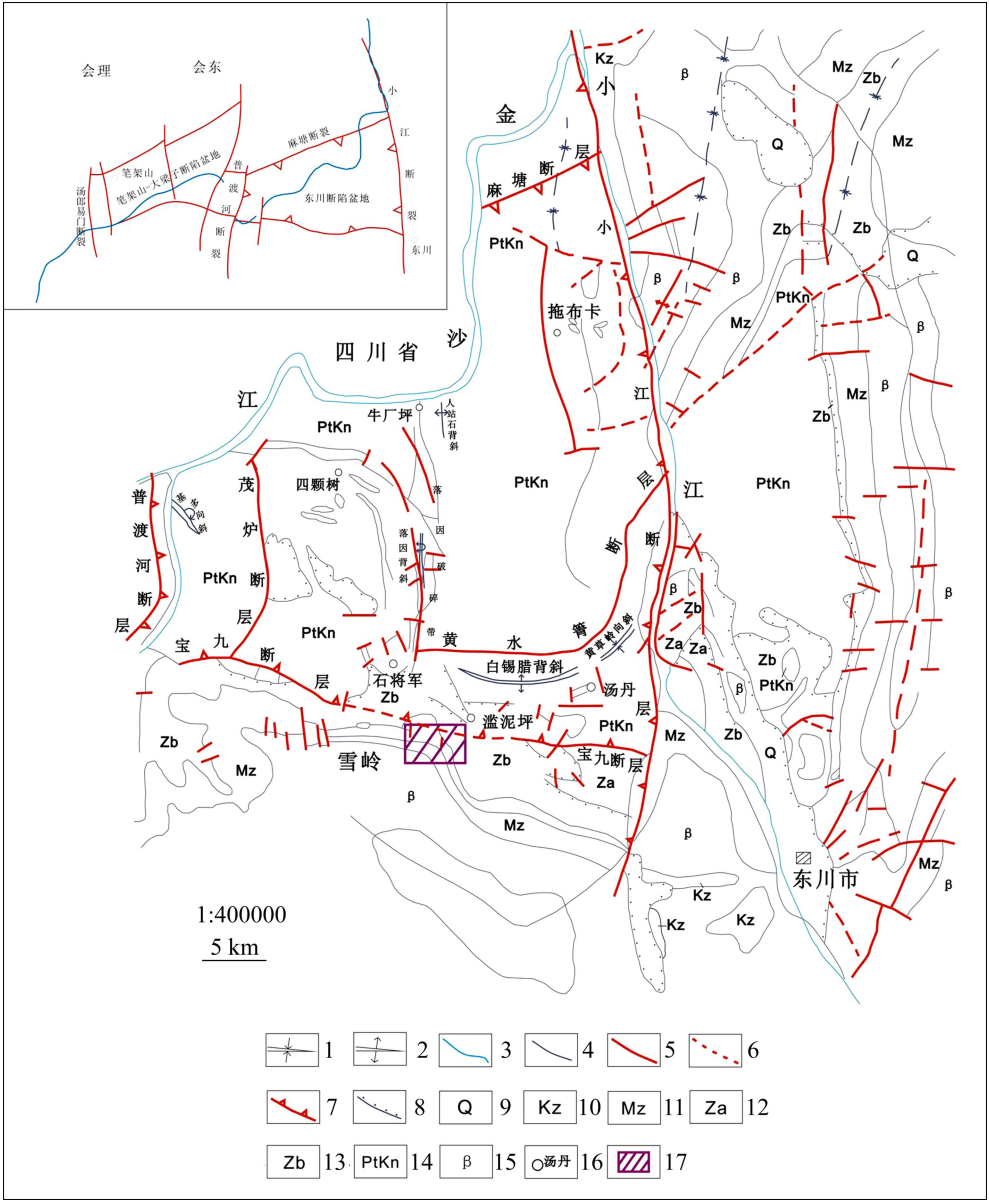


图 1 雪岭矿区地质图: 1—向斜轴; 2—背斜轴; 3—河流; 4—地层界线; 5—断层; 6—推测断层; 7—边界断裂; 8—角度不整合; 9—第四系; 10—新生界; 11—中生界; 12—下震旦统澄江组; 13—上震旦统陡山沱组-灯影组; 14—中元古界昆阳群; 15—二叠系上统峨眉山玄武岩; 16—地点; 17—研究区

Fig. 1 Geologic map of Xueling mining area: 1—Synclinal axis; 2—Anticlinal axis; 3—River; 4—Stratigraphic boundary; 5—Fault; 6—Inferring fault; 7—Boundary fault; 8—Angle unconformity; 9—Quaternary; 10—Cainozoic; 11—Mesozoic; 12—Chengjiang formation of lower Sinian; 13—Doushantuo-Dengying formation of upper Sinian; 14—Kunyang group of middle Proterozoic; 15—Emeishan basalt of upper Permian; 16—Place; 17—Researched area

铜铁多金属产区^[1-2]。前人对东川矿区进行了大量的研究^[3-7], 但对处于东川断块南缘的雪岭矿区却鲜有涉及。本文作者以在雪岭矿区多条地层剖面系统采集的样品和矿区出露辉绿岩样品为基础, 对本区地层成矿元素及辉绿岩地球化学特征进行研究探讨, 以便理清本区地球化学背景, 了解其成矿作用, 并为后期找矿勘探工作提供一定的依据。

1 矿区地质背景

雪岭矿区位于昆明市东川区 280° 方向, 水平距离约 20 km。矿区范围内主要出露有震旦系灯影组地层和寒武系渔户村组及筇竹寺组地层, 其次是下二叠统地层, 第四系在本区有零星分布(见表 1)。基底岩

表 1 雪岭地区出露地层

Table 1 Exposed strata of Xueling mining area

地层组	地层段	岩性描述
第四系	Q	矿区零星分布，主要有冰川沉积、湖相沉积、洪积沉积、冲积沉积、钙华沉积及风化壳等。
上二叠统峨眉山玄武岩组	P ₂ β	为峨眉山玄武岩组玄武岩，顶部有陆相碎屑岩含煤建造。
下二叠统	P ₁	以浅海相碳酸盐岩为主，底部出现海陆交互相的含煤地层，与下伏中寒武统地层不整合接触。
中寒武统西王庙组	C ₂ x	灰黄色、灰绿色细粒长石砂岩夹紫红色、褐红色粉砂岩，局部夹石膏层，与下统(C ₁)地层整合接触。
下寒武统筇竹寺组	C ₁ q	黄绿、灰绿色、黑色泥质页岩与细砂岩、粉砂岩互层，厚 308~368 m，与下伏渔户村组地层整合接触。
下寒武统渔户村组	第二段 C ₁ y ²	白云岩段。深灰、灰白色中-厚层状白云岩夹硅质岩，局部白云岩发生结晶，且可见黄铁矿星点，厚 27.3~46.7 m。
	第一段 C ₁ y ¹	磷块岩段。胶磷矿磷块岩和含磷白云岩、含磷泥质粉砂岩、含磷粉砂质泥岩及含磷白云质灰岩，厚 28.3~95.4 m。 该岩性段为矿区主要的含磷矿段。与下伏上震旦统灯影组整合接触。
	第三段 Z ₂ dn ³	硅质白云岩段。灰白色薄-中层硅质白云岩，偶见小型波状藻，顶部破碎带中常见铅锌铜矿化，厚 60~260 m。
上震旦统灯影组	第二段 Z ₂ dn ²	结晶白云岩段。上部为白色、浅灰色细晶夹粗晶白云岩；中部为灰白色粗晶夹细晶白云岩，粗晶白云岩普遍具鲕状、同心圆状、皮壳状构造；下部为白、灰白色致密白云岩；底部有 1~2 层黄白色薄层泥质白云岩，向上具密细线状弯曲纹理，厚 120~280 m。
	第一段 Z ₂ dn ¹	条带状白云岩段。顶部为鲕状白云岩；上部为灰、深灰色花纹状白云岩；中部为灰、灰白色致密状白云岩。局部有弱黄铁矿、黄铜矿化；下部为灰、青灰色条带状白云岩，厚 100~210 m。

系为强烈褶皱成一系列紧密背斜和相对开阔向斜且厚度近万米的昆阳群浅变质岩，与其上的震旦系地层呈强烈的不整合接触关系。本区断裂主要为近东西的宝九断裂和落因断裂系南沿至本区形成的南北西的断裂带(滥泥坪断裂、吊水井断裂)，其中宝九断裂从本区北部隐伏通过，其上覆盖灯影组白云岩地层。区内岩浆岩主要为分布于矿区西南部的晚二叠世峨眉山玄武岩以及矿区北部的辉绿岩。

2 矿区地层地球化学特征

2.1 矿区研究剖面及采样

雪岭矿区铜多金属矿化带沿落因断裂系南沿断裂

近于南北向产出，原生矿物以黝铜矿、辉铜矿、黄铁矿为主，黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等少见，氧化矿物主要为褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿等。在矿区按照方位角 242°布置勘探线，间距 200 m，在其上选取 3 条勘探线系统取样，做矿区地层地球化学研究分析。勘探线剖面如图 2 所示。本次地层地球化学分析共系统采样 180 件，样品平均质量约 500 g，多数为新鲜基岩。样品由国土资源部昆明矿产资源监督检测中心进行破碎处理和测试，分析元素为 Ag、As、Ba、Co、Cu、Ni、Pb、Sb、Sr、Zn。其中 Ag 的检测仪器为 WSP-1 型 2 米光栅摄谱仪，As 的检测仪器为 AFS-3100 原子荧光光度计，其余元素采用 ICP-AES(IRIS Intrepid II) 进行检测，检验温度均为 24 ℃，湿度为 55%。

2.2 矿区沉积地层单元地球化学元素含量及分布特征

通过对矿区各沉积地层样品检测值进行系统分析(见表 2), 其相关元素的基本特征表现如下:

1) 灯影组为矿区出露面积最大的地层, 为滞留泄湖相碳酸盐沉积。铜铁多金属矿化多产自灯影组白云岩中, 故研究灯影组地层白云岩中成矿元素及其相关元素的地球化学特征, 对于探讨矿区铜铁多金属矿化产出规律和控矿因素具有重要的指示意义。灯影组白云岩中, Ag、As、Pb、Sb 含量相对于上地壳的富集, 元素含量分别为上地壳的 4 倍、7 倍、5 倍和 62 倍; Cu、Zn 含量与上地壳的相对持平; Ba、Co、Ni、Sr 含量相对于上地壳的亏损, 元素含量分别为上地壳的 1/6、1/3、1/6 和 1/8。

对灯影组白云岩中相关元素进行聚类分析研究, 结果如表 3 和图 3 所示。由表 3 和图 3 可以看出:

- ① 在相关系数 0.8 水平下, 元素组合为 Pb-Zn;
- ② 在相关系数 0.7 水平下, 元素组合为 Pb-Zn-Ba-Ni-Ag;
- ③ 在相关系数 0.6 水平下, 元素组合为 Pb-Zn-Ba-Ni-Ag-As-Cu。

灯影组作为矿区铜多金属产出的主要地层, 除 Pb 和 Ag 以外, 其主要成矿元素如 Cu、Zn 的含量并未较上地壳有明显的富集, 可以认为灯影组白云岩可能为矿区成矿提供了部分 Pb、Ag 等成矿物质。

2) 渔户村组白云岩中, Ag、As、Pb、Sb 含量相对于上地壳的富集, 元素含量分别为上地壳的 13 倍、20 倍、3 倍和 170 倍; Cu、Ba、Sr、Zn、Co 含量与

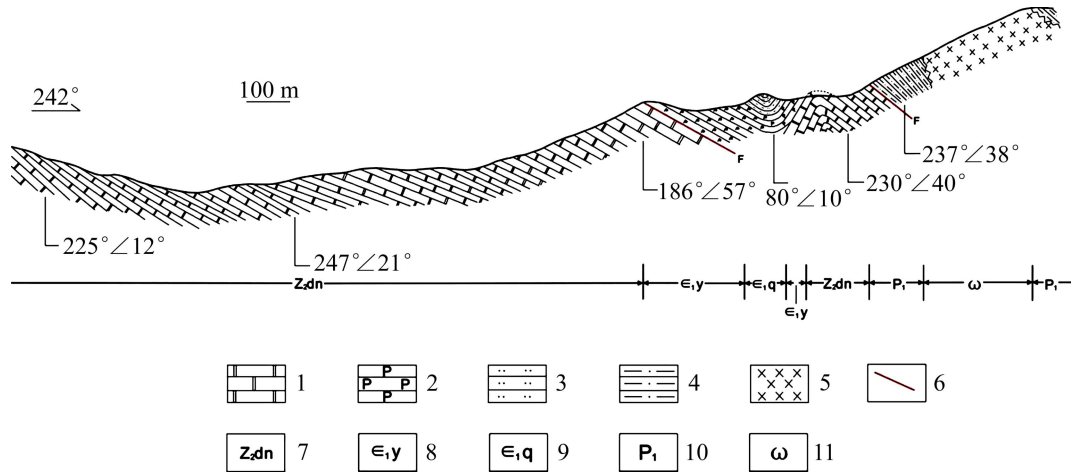


图 2 雪岭矿区剖面图: 1—白云岩; 2—磷块岩; 3—砂岩; 4—砂页岩; 5—辉绿岩; 6—断裂; 7—灯影组; 8—渔户村组; 9—筇竹寺组; 10—二叠系下统; 11—华力西期辉绿岩

Fig. 2 Profile map of Xueling mining area: 1—Dolomite; 2—Phosphorite; 3—Sandstone; 4—Sand-shale; 5—Diabase; 6—Fault; 7—Dengying formation; 8—Yuhucun formation; 9—Qiongzhusi formation; 10—Lower Permian; 11—diabase of Varisian

表 2 雪岭矿区各地层相关元素含量统计表

Table 2 Statistical table of element contents in strata of Xueling mining area

样品	样品数	w/10 ⁻⁶									
		Ag	As	Ba	Co	Cu	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
灯影组白云岩	121	0.19	10.71	88.44	3.18	23.65	3.74	94.33	12.55	43.97	71.75
渔户村组白云岩	3	0.69	32.19	367.37	6.00	21.25	1.76	68.43	35.00	349.07	62.00
渔户村组磷块岩	10	0.34	12.94	418.67	2.79	18.07	10.18	74.27	2.65	421.83	137.40
筇竹寺组砂岩	4	0.12	12.71	745.50	11.38	15.80	24.48	62.46	1.76	66.43	75.33
筇竹寺组白云岩	2	0.20	20.34	595.50	15.60	23.80	41.45	71.45	1.07	48.20	91.40
二叠纪下统砂岩	10	0.15	14.05	497.63	12.97	25.71	20.07	39.06	1.78	132.94	55.98
铜多金属矿石	30	0.72	145.78	243.75	17.56	257.56	21.71	227.99	60.60	58.80	363.30
上地壳 ^[8]		0.05	1.50	550.00	10.00	25.00	20.00	20.00	0.20	350.00	71.00

注: 由国土资源部昆明矿产资源监督检测中心测试。

表 3 灯影组白云岩样品元素聚类分析表(样品数: 121)

Table 3 Table of cluster analysis of element content in dolomite of Dengying formation (Sample number: 121)

Element	Ag	As	Ba	Co	Cu	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
Ag	1	0.567	0.289	0.503	0.308	0.245	0.731	0.518	0.039	0.703
As		1	0.375	0.301	0.511	0.538	0.562	0.191	0.151	0.713
Ba			1	0.531	0.669	0.72	0.154	0.179	0.529	0.395
Co				1	0.463	0.686	0.218	0.36	0.112	0.372
Cu					1	0.666	0.267	0.267	0.378	0.66
Ni						1	0.097	0.15	0.36	0.402
Pb							1	0.319	-0.003	0.815
Sb								1	-0.048	0.377
Sr									1	0.193
Zn										1

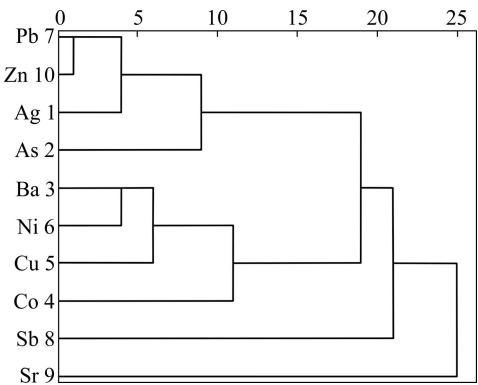


图 3 灯影组白云岩样品元素聚类分析图

Fig. 3 Figure of cluster analysis of element content in dolomite of Dengying formation

上地壳的相对持平; Ni 含量相对于上地壳的亏损,为上地壳 Ni 含量的 1/10。

渔户村组磷块岩中, Ag、As、Pb、Sb、Zn 含量相对于上地壳的富集,元素含量为上地壳的 73 倍、8 倍、4 倍、13 倍和 2 倍; Cu、Ba、Sr 含量与上地壳的相对持平; Co、Ni 含量相对于上地壳的亏损,元素含量分别为上地壳的 1/5 和 1/2。

渔户村组以磷块岩产出为主,其 Ag、As、Sb、Pb、Zn 均较上地壳有明显富集。结合矿区部分铜多金属矿呈透镜状、脉状、浸染状沿灯影组白云岩和渔户村组含磷岩系之间的层间破碎带分布,可以认为渔户村组地层为成矿提供了部分物质来源。

3) 筇竹寺组砂岩中, Ag、As、Pb、Sb 含量相对于上地壳的富集,元素含量分别为上地壳的 2 倍、8 倍、3 倍和 9 倍; Ba、Co、Ni、Zn 含量与上地壳的相对持平; Cu、Sr 含量相对于上地壳的亏损,元素含量分别为上地壳的 1/2 和 1/5。

筇竹寺组白云岩中, Ag、As、Ni、Pb、Sb 含量

相对于上地壳的富集,元素含量分别为上地壳的 4 倍、7 倍、2 倍、3 倍和 5 倍; Ba、Co、Cu、Zn 含量与上地壳的相对持平; Sr 含量相对于上地壳的亏损,为上地壳 Sr 含量的 1/7。

筇竹寺组主要分布在矿区的中北部,样品分析显示其 Ag、Ni、Pb 等成矿元素含量相对上地壳的有不同程度的富集,虽然在该组地层浅表未见有明显矿化,但与同属下寒武统的渔户村组地层均具有较高的成矿元素地球化学背景值,可以推断筇竹寺组对矿区成矿可能提供了部分成矿物质来源。

4) 二叠下统砂岩中, Ag、As、Pb、Sb 含量相对于上地壳的富集,元素含量分别为上地壳的 3 倍、10 倍、2 倍和 9 倍; Ba、Co、Cu、Ni、Zn 含量与上地壳的相对持平; Sr 含量相对于上地壳的亏损,为上地壳 Sr 含量的 1/3。

同样在矿区二叠纪砂岩中未见明显矿化,由于其主要成矿元素并未较上地壳的有明显富集,故该组地层对矿区成矿未有较大影响。

由此可见,矿区沉积地层与上地壳相比, Ag、As、Pb 和 Sb 部分富集,其余分析元素则与之持平或明显亏损。此外需要指出的是,矿区各类岩性中, Pb、Zn、Ag、Cu 等成矿元素含量,以灰白色白云岩的最低,硅质白云岩的次之,而黑色含炭质泥晶白云岩、泥砂质白云岩及含磷岩系的成矿元素含量高,且高于上地壳丰度值的数倍至十余倍。这说明沉积过程中有机质和泥质对成矿元素的吸附作用较强。

2.3 矿区成矿及相关元素分布规律

将矿区成矿及相关元素在地层不同岩性中的含量依次进行对比作图(见图 4),可以看出:

1) Ag、As、Sb 在渔户村组白云岩中含量最高,

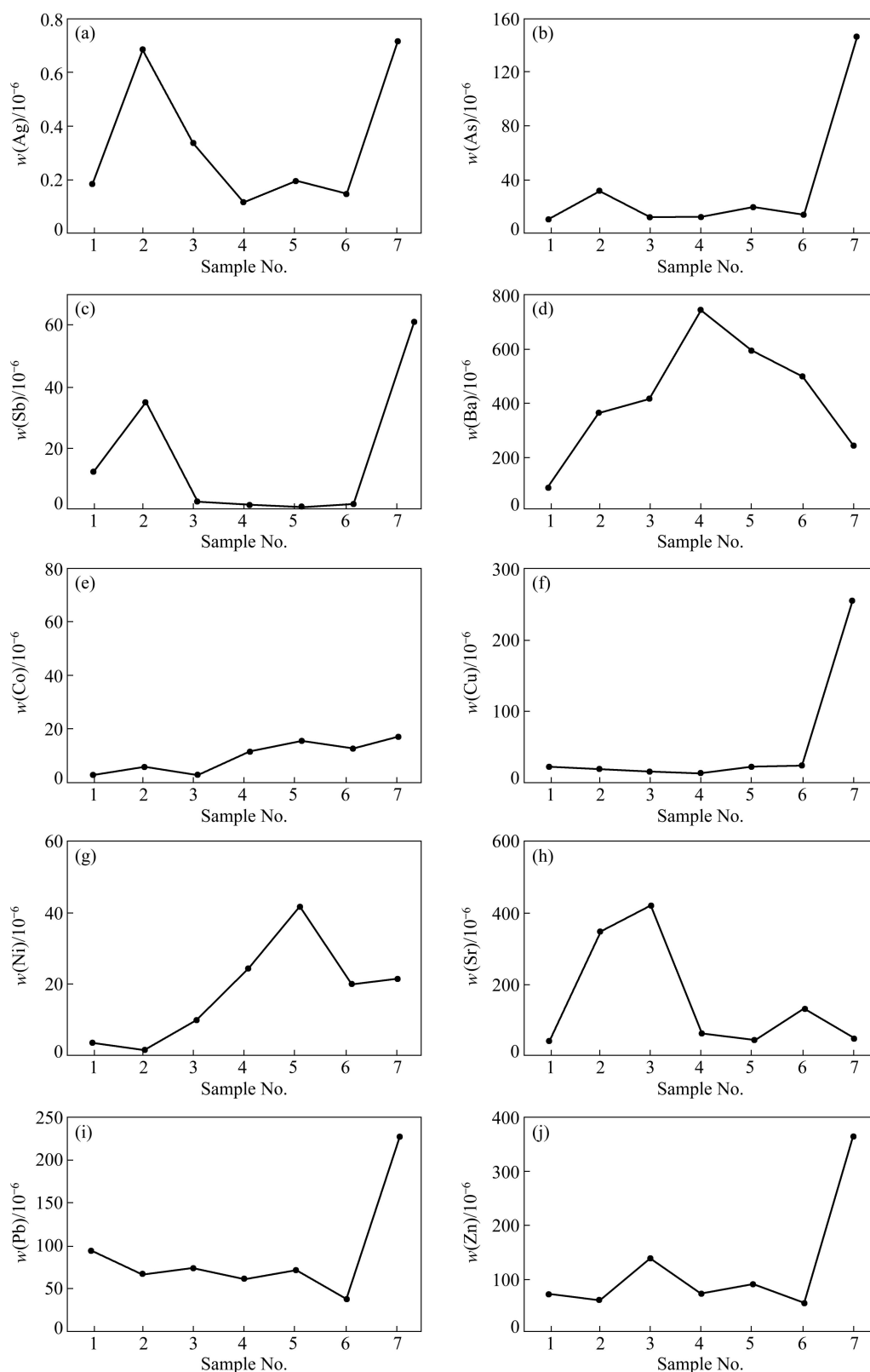


图4 雪岭矿区元素在各层位各岩性中含量变化图: 1—灯影组白云岩; 2—渔户村组白云岩; 3—渔户村组磷块岩; 4—筇竹寺组砂岩; 5—筇竹寺组白云岩; 6—二叠下统砂岩; 7—矿石样

Fig. 4 Figure of element content change in different strata and different lithology of Xueling mining area: 1—Dolomite of Dengying formation; 2—Dolomite of Yuhucun formation; 3—Phosphorite of Yuhucun formation; 4—Sandstone of Qiongzhusi formation; 5—Dolomite of Qiongzhusi formation; 6—Sandstone of Lower Permian; 7—Ore samples

在其他地层岩石中含量较平均，均高于上地壳相应元素丰度值，在矿石样中明显富集；

2) Co、Cu、Ni 在灯影组、渔户村组、筇竹寺组中含量较平均，基本与上地壳丰度值相似，在矿石样中明显富集。

3) Ba 在筇竹寺组砂岩中最富集，在矿区其他地层岩性中含量较平均，与上地壳丰度值基本持平，但在灯影组中含量最低，相比上地壳有明显亏损；

4) Sr 在渔户村组中含量与上地壳基本持平，但在灯影组、筇竹寺组、二叠纪及矿石样中均有明显亏损。Sr 在沉积岩中，物源、沉积环境和古地理条件的差异导致了 Sr 的分布具有明显的不同^[9]；

5) Pb 在矿区各地层中含量较上地壳丰度值均有不同程度的富集，Zn 在矿区各地层中含量则基本与之持平，但在矿石样中 Pb、Zn 含量明显富集。说明矿石中 Pb 除来源于深部以外，高背景值的围岩也可能是 Pb 富集的原因之一，Zn 则基本来源于深部。

2.4 构造作用对矿化的影响

雪岭地区铜多金属矿石主要沿灯影组白云岩和渔户村组含磷岩系层间破碎带或灯影组白云岩中断裂带分布，为了研究断裂构造对成矿元素富集的影响，对矿区断裂带通过处与断裂带未通过处的白云岩样品所含元素含量进行统计对比分析(见表 4 和图 5)。

由图 5 可见，灯影组中断裂带通过处的白云岩所含元素含量均高于断裂带未通过处的白云岩所含元素含量，其中 Ba、Ag、Cu、Sb、Pb 和 Zn 含量分别为断裂带未通过的白云岩的 3 倍、2 倍、2 倍、11 倍、2 倍和 2 倍。这与断裂带内重晶石化、黄铁矿化、黝铜矿化等蚀变特征相符。Co、Ni 作为深部来源元素，断裂构造使其在受断裂作用的白云岩中得到富集，Co、Ni 含量分别比未受断裂作用的白云岩的富集了 4 倍和 2 倍，虽仍低于上地壳 Co、Ni 含量平均值($w(\text{Co})=10\times 10^{-6}$ ， $w(\text{Ni})=20\times 10^{-6}$)，但可以说明矿区断裂构造有利于成矿及相关元素的活化富集，对铜多金属矿

化有积极影响。

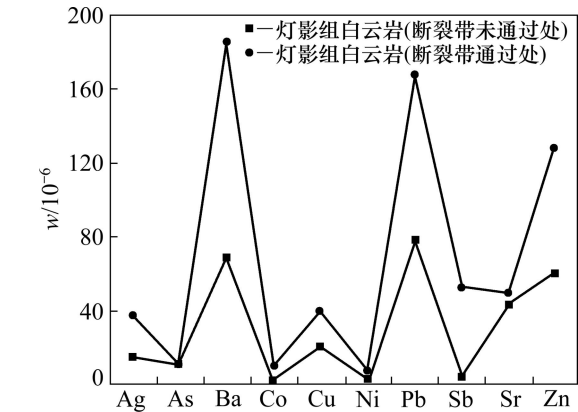


图 5 灯影组中断裂带通过处白云岩与断裂带未通过白云岩元素含量对比

Fig. 5 Element content comparison of dolomite affected by fault and dolomite unaffected by fault in Dengying formation

3 辉绿岩地球化学特征

在矿区野外地质调查工作中，除见铜多金属矿化沿震旦系灯影组白云岩和寒武系渔户村组磷块岩层间断裂带产出以外，还在矿区北部西碑垭口处发现大量辉绿岩产出，西侧与灯影组白云岩呈断裂接触，东侧与筇竹寺组-渔户村组砂页岩接触，接触部位见明显的铜多金属矿化，矿物以孔雀石为主，并见氧化残余的黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等。这些都说明雪岭矿区内的铜多金属矿化可能与辉绿岩侵入有一定关系。

样品均为雪岭矿区西碑垭口辉绿岩出露处所采新鲜岩体，单个样品质量为 1 500 g 左右。主量元素、微量元素和稀土元素测试均在长沙核工业二三〇研究所分析测试中心完成。主量元素测试采用 XRF 方法，测试仪器为荷兰 PANalytical B.V.公司 AxiosMAX 型 X 射线荧光光谱仪，分析精度高于 1%；微量元素和稀土元素测试采用 ICP-MS 方法，测试仪器为美国 PE

表 4 灯影组白云岩中断裂带通过处与断裂带未通过处元素含量对比表

Table 4 Table of element content comparison of dolomite affected by fault and dolomite unaffected by fault in Dengying formation

样品	样品数	w/10 ⁻⁶									
		Ag	As	Ba	Co	Cu	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
灯影组白云岩(断裂带未通过处)	101	15.20	10.64	69.18	2.09	20.57	3.16	79.62	4.68	42.93	60.56
灯影组白云岩(断裂带通过处)	20	37.50	11.05	185.68	8.66	39.21	6.68	168.61	52.29	49.20	128.27

注：由国土资源部昆明矿产资源监督检测中心测试。

公司 NexION 300X 型等离子质谱仪,分析精度高于3%。检测温度均为 25℃,湿度为 65%左右。

3.1 主量元素特征

对雪岭辉绿岩样品进行化学成分分析(见表5),数据表明雪岭辉绿岩 SiO_2 平均含量为 48.45%,均小于中国辉绿岩^[10]和世界辉绿岩^[11]平均值;铝饱和指数小于 1(A/CNK 为 0.687~0.821), Al_2O_3 含量为 13.99%~16.54%,平均为 15.27%; Na_2O 含量为 2.53%~2.7%,平均为 2.62%; K_2O 含量为 1.13%~1.27%,平均为 1.2%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 1.99~2.39, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$; 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量为 3.8%~3.83%, TFe 含量为 8.4%~10.98%,平均为 9.69%; MgO 含量为 5.2%~6.01%,平均为 5.61%。 TiO_2 含量为 2.85%~3.28% ($> 2.8\%$),为高钛玄武岩类,其母岩浆的形成主要源于石榴子石稳定区的部分熔融($> 70 \text{ km}$),代表地幔柱边部或消亡期地幔部分熔融的产物^[12]。雪岭辉绿岩应为碱性铁质富钛基性岩。与世界辉绿岩相比, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 MnO 含量明显偏低, Fe_2O_3 、 FeO 、 K_2O 和 TiO_2 含量则明显偏高。在 SiO_2 — $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (TAS)图解(见图6)中,雪岭基性岩落入玄武岩和

玄武安山岩区域,与中国辉绿岩和世界辉绿岩落入区域基本相似,且均集中在亚碱性区域。在 SiO_2 — K_2O 图解(见图7)上,雪岭矿区2个辉绿岩样品投到高钾钙碱性系列和钙碱性系列分界线附近,与计算得出的里特曼指数(δ)1.99~2.7 指示结果相符,属于钙碱性岩。

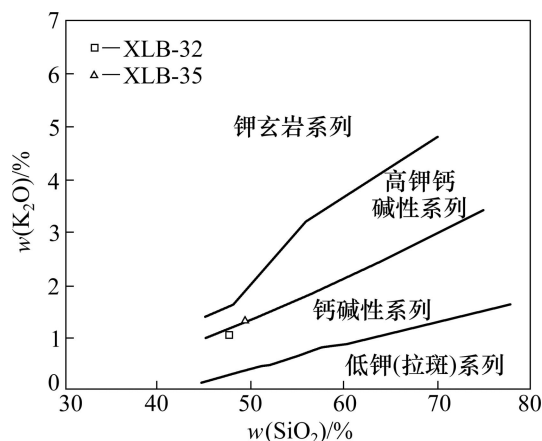


图7 雪岭辉绿岩的 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(据 Peccerillo and Taylor^[14])

Fig. 7 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ diagram of diabase in Xueling (after Peccerillo and Taylor^[14])

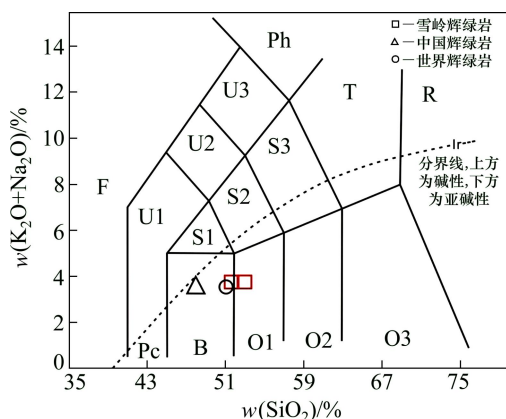


图6 雪岭基性岩 TAS 分类图(据 LeBas^[13]): Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U1—碱玄岩、碧玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄质响岩; Ph—响岩

Fig. 6 TAS nomination diagram for basic rock classification in Xueling (after LeBas^[13]): Pc—Picrite-basalt; B—Basalt; O1 — Basaltic-andesite; O2 — Andesite; 3 — Dacite; R—Rhyolite; S1—Trachybasalt; S2—Basaltic Trachyandesite; S3 — Trachyandesite; T — Trachyte, Trachytic dacite; F—Foidite; U1 — Tephrite, Basanite; U2 — Phonotephrite; U3—Tephriphonolite; Ph—Phonolite

分异指数(DI)是岩浆分离结晶程度和岩浆基性程度的标志,分异指数越大,说明岩浆分离结晶作用越强烈,酸性程度越高。该区辉绿岩分异指数偏低(31.05~33.82),反映岩浆结晶分离作用不强烈,岩体基性程度较高,与样品 SiO_2 含量偏低相符。固结指数(SI)较低(24.65~25.82), Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 和 MgO 含量较高,显示该单元为幔源岩浆分异产物。样品分析数据通过 CIPW 标准矿物计算有石英析出,表明雪岭辉绿岩为 SiO_2 过饱和型。

3.2 微量元素特征

微量元素分析结果(见表6)显示,雪岭辉绿岩所含 Cu、Pb、Zn 元素平均含量($w(\text{Cu})=465.12 \times 10^{-6}$, $w(\text{Pb})=34.74 \times 10^{-6}$, $w(\text{Zn})=1086.9 \times 10^{-6}$)均高于中国辉绿岩和世界辉绿岩,说明雪岭辉绿岩具有成矿元素高背景值,可能对矿区矿化提供了部分成矿物质来源。

高场强元素(HFSE)Nb、Zr 和 Hf 在变质和蚀变过程中能保持良好的稳定性,是指示岩石成因及反映源区性质的较好的示踪剂^[15]。雪岭辉绿岩微量元素 Zr 含量为 297.03×10^{-6} ~ 321.48×10^{-6} ,远高于 MORB 的 Zr 含量(90×10^{-6})^[16],略高于 OIB 的 Zr 含量(280×10^{-6})^[17]; Hf 含量为 5.92 ~ 6.47×10^{-6} ,介于 MORB 和 OIB 的含量之间(分别为 2.4×10^{-6} 和 7.8×10^{-6})^[16-17];

表 5 雪岭辉绿岩化学成分分析结果

Table 5 Chemical composition analyses of diabase in Xueling

编号	岩性	w/%														烧失量	总量
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	CO ₂		
XLB-32	辉绿岩	47.64	5.49	9.18	13.99	8.09	6.01	1.13	2.70	0.30	3.28	0.21	1.20	0.22		1.16	100.60
XLB-35	辉绿岩	49.27	5.12	6.19	16.54	8.03	5.20	1.27	2.53	0.26	2.85	0.16	1.83	0.65		1.71	101.61
1	中国辉绿岩 ^[10]	48.89	3.35	7.10	16.25	9.30	7.14	0.84	2.76	0.20	1.28	0.16	1.82		0.35		
2	世界辉绿岩 ^[11]	51.36	12.24 (TFE)		16.56	9.41	7.46	1.00	2.62	0.32	1.50	0.26					

样品由长沙核工业二三〇研究所分析测试中心分析测试。

表 6 雪岭辉绿岩微量元素含量

Table 6 Trace element compositions of diabase in Xueling

编号	岩性	w/10 ⁻⁶												
		Cu	Pb	Zn	Sr	Ba	Ag	V	Cr	Ni	Co	Ge	Be	Cs
XLB-32	辉绿岩	677.38	65.97	2084.25	407.04	370.56	3.80	486.45	92.04	112.40	63.36	1.28	2.01	0.31
XLB-35	辉绿岩	252.86	3.51	89.55	538.84	337.17	0.96	310.38	100.82	86.52	38.58	1.18	1.76	0.47
1	中国辉绿岩 ^[10]	57.00	13.00	100.00	330.00	320.00	0.08	230.00	115.00	71.00	41.00	1.20	0.40	2.10
2	世界辉绿岩 ^[11]	100.00	8.00	130.00	440.00	300.00	0.10	200.00	200.00	160.00	45.00	1.50	0.40	1.00

编号	岩性	w/10 ⁻⁶									Zr/Nb	La/Nb	Th/Ta	Ta/Hf
		Li	Rb	Nb	Ta	U	Th	Hf	Zr	Ga				
XLB-32	辉绿岩	7.86	15.40	25.57	1.52	1.15	7.01	6.47	297.03	24.16	11.62	1.63	4.61	0.23
XLB-35	辉绿岩	5.20	17.45	25.94	1.42	1.10	6.51	5.92	321.48	22.63	12.39	1.45	4.58	0.24
1	中国辉绿岩 ^[10]	11.00	30.00	10.00	0.50	0.60	2.40	3.20	135.00	20.30	13.50	1.65	4.80	0.16
2	世界辉绿岩 ^[11]	15.00	45.00	20.00	0.48	0.50	3.00	1.00	100.00	18.00	5.00	1.35	6.25	0.48

样品由长沙核工业二三〇研究所分析测试中心分析测试。

Nb 含量为 $25.57\times10^{-6}\sim25.94\times10^{-6}$, 与 MORB 和 OIB 的含量(分别为 3.5×10^{-6} 和 48×10^{-6})^[16-17] 差别较大。

高场强元素比值 Zr/Nb 为有效的环境判别指标^[15], 雪岭辉绿岩 Zr/Nb 为 11.62~12.39, 低于原始地幔平均值(14.8), 接近洋岛拉斑玄武岩平均值(10)^[18], 表明原始岩浆来源于某种过渡型或富集型的地幔源区。La/Nb 为 1.45~1.63>1, 表明岩浆在运移过程中有地壳物质的混入。张招崇(2002)指出, La/Nb>1 的基性岩浆在高位岩浆房和上升过程中均经历了一定程度的分离结晶作用, 而且上升过程中受到了地壳不同程度的混染。Cr 含量为 $92.04\times10^{-6}\sim100.82\times10^{-6}$ ($<200\times10^{-6}$), 表明岩浆在活动早期也有一定程度的分异作用^[19]。

雪岭辉绿岩中 Th 的含量较高($6.51\times10^{-6}\sim7.01\times10^{-6}$), 且 Th/Ta 为 4.58~4.61, 高于原始地幔(2.3)。较高的 Th 和 Th/Ta 被认为是典型的大陆板内环境的标志^[20]。Ta/Hf 为 0.23~0.24>0.1, 属于大陆板内玄武岩类, 与峨眉山玄武岩特征类似^[21]。在 Ti/100-Zr-3Y 判别图解(见图 8)上, 雪岭辉绿岩样品落在板内玄武岩

类区。这些都说明雪岭辉绿岩形成于大陆板内构造环境, 应与岩浆沿大陆裂谷上涌侵位有关, 且混染了部

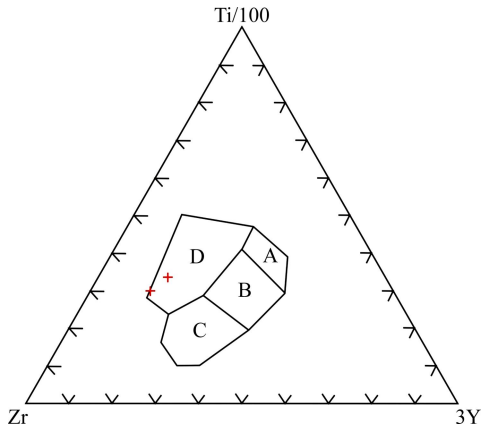


图 8 雪岭辉绿岩 Ti/100-Zr-3Y 图解(据 Pearce and Cann^[22]): A 和 B—岛弧拉斑玄武岩; B 和 C—岛弧钙碱性玄武岩; D—板内玄武岩

Fig. 8 Ti/100-Zr-3Y diagram of diabase in Xueling (after Pearce and Cann^[22]): A and B—Island-arc tholeiite; B and C—Island-arc calc-alkaline basalt; D—Intiplate basalt

分地壳组分。

微量元素蛛网图可以较好地反映岩浆的成因、演化过程以及构造背景。从图 9 可以看出, 雪岭辉绿岩微量元素蛛网图与中国辉绿岩和世界辉绿岩显著不同。雪岭辉绿岩明显富集 Th、La、Zr、Sm、Nd 元素, 相对亏损 Rb、K、Sr、P、Yb 元素, 基本上高场强元素(HFSE)有一定程度的富集, 而大离子亲石元素(LILE)则有亏损。矿区辉绿岩微量元素含量基本较普通标准辉绿岩含量高, 表明辉绿岩的形成经历了原始岩浆的熔融分离结晶和地壳混染作用^[24]。

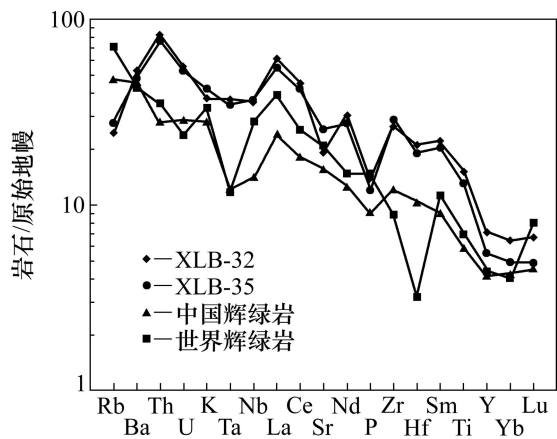


图 9 雪岭辉绿岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔数据引自文献[23])

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spider-web diagram of diabase in Xueling(Primitive mantle data from Ref.[23])

表 7 雪岭辉绿岩稀土元素成分

Table 7 Rare earth element contents of diabase in Xueling

编号	岩性	w/10 ⁻⁶											
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
XLB-32	雪岭辉绿岩	41.59	80.19	11.27	41.03	9.96	3.01	8.94	1.46	7.35	1.35	3.55	0.48
XLB-35	雪岭辉绿岩	37.65	74.63	10.45	37.39	9.05	2.66	7.51	1.17	5.60	1.09	2.82	0.39
1	中国辉绿岩 ^[10]	16.50	32.00	3.70	17.00	4.00	1.40	4.00	0.66	4.00	0.80	2.20	0.35
2	世界辉绿岩 ^[11]	27.00	45.00	4.00	20.00	5.00	1.00	5.00	0.80	2.00	1.00	2.00	0.20
3	东川汤丹辉绿岩 ^[1]	13.91	31.97	4.47	19.36	4.72	1.74	5.00	0.88	5.57	1.07	3.11	0.47

编号	岩性	w/10 ⁻⁶						LREE/HREE	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe
		Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE						
XLB-32	雪岭辉绿岩	3.17	0.50	32.48	213.85	187.06	26.79	6.98	8.87	2.63	2.29	0.96	0.86
XLB-35	雪岭辉绿岩	2.43	0.36	25.20	193.21	171.84	21.38	8.04	10.48	2.62	2.50	0.96	0.87
1	中国辉绿岩 ^[10]	2.10	0.34	19.00	89.05	74.60	14.45	5.16	5.31	2.60	1.54	1.06	0.93
2	世界辉绿岩 ^[11]	2.00	0.60	20.00	115.60	102.00	13.60	7.50	9.12	3.40	2.03	0.61	0.92
3	东川汤丹辉绿岩 ^[1]	2.89	0.42	27.84	95.58	76.17	19.41	3.92	3.25	1.85	1.40	1.09	0.95

样品由长沙核工业二三〇研究所分析测试中心分析测试。

3.3 稀土元素特征

从稀土元素分析结果(见表 7)和配分模式图(见图 10)可以看出, 雪岭辉绿岩稀土元素总量为 $193.21 \times 10^{-6} \sim 213.85 \times 10^{-6}$, 相差较小, 均高于中国辉绿岩和世界辉绿岩。较高的稀土元素总量应是岩体在上侵过程中受到了壳源物质的混染。岩体富轻稀土元素, 重稀土元素相对亏损, LREE/HREE 为 6.98~8.04, $(La/Yb)_N$ 为 8.87~10.48, $(La/Sm)_N$ 为 2.62~2.63, $(Gd/Yb)_N$ 为 2.29~2.5, 轻稀土的分馏程度较重稀土为高, 可能是部分溶化程度不同或岩浆源区的不均一性所致。显示弱的 Ce 负异常(δCe 为 0.86~0.87), 具轻微的 Eu 负异常(δEu 为 0.96), 表明岩浆结晶分离过程中斜长石晶出较少。稀土配分型式与世界辉绿岩差异较大, 但与中国辉绿岩相似, 均为右倾斜型(见图 10), 只是中国辉绿岩的 Eu 具轻微的正异常(1.06)。

雪岭辉绿岩与东川汤丹辉绿岩对比可以看出, 雪岭辉绿岩稀土元素总量明显高于东川汤丹辉绿岩($\Sigma REE=95.58 \times 10^{-6}$)。东川汤丹辉绿岩同样富轻稀土元素, 相对亏损重稀土元素, 但轻稀土元素与重稀土元素分异程度较低(LREE/HREE=3.92)。其 $(La/Yb)_N=3.25$, $(La/Sm)_N=1.85$, $(Gd/Yb)_N=1.4$, 均低于雪岭辉绿岩, 且具轻微的 Eu 正异常(1.09)。东川汤丹稀土元素配分型式为右倾斜型, 但与雪岭辉绿岩相比配分曲线更为平坦(见图 10)。这些都说明雪岭辉绿岩与东川汤丹辉绿岩物质来源不一样, 岩浆起熔区域性质可能存在较大差异。

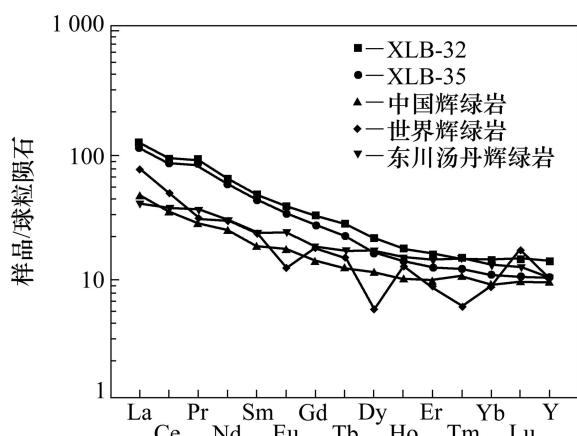


图10 雪岭辉绿岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(球粒陨石数据据文献[8])

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns of diabase in Xueling (Chondrite data from Ref.[8])

3.4 矿区辉绿岩与峨眉山玄武岩亲缘性

峨眉山玄武岩原指攀西裂谷地带晚二叠世的基性喷出岩,后指峨眉山地区出露的基性岩^[25],现在指广泛分布在整个西南三省云、贵、川大面积出露的玄武岩。目前学者们对峨眉山玄武岩进行了大量的研究,绝大部分学者认为峨眉山玄武岩与地幔柱作用密切相关^[12, 24, 26-29],少部分学者认为峨眉山玄武岩是扬子地块西缘被动大陆边缘地壳扩张所致^[30]。

本区峨眉山玄武岩主要分布在雪岭矿区西南部,与下伏地层呈假整合接触。峨眉山玄武岩普遍具有高碱, Sr、K、U、Th 含量高, 贫 Cr 和 Ni 的特点^[15], 且富集不相容元素和挥发组分, 具不同程度的 LREE 富集, 一般无明显 Eu 异常^[31]。TiO₂ 一般含量高, 但含量变化较显著(1%~5%)^[27], MgO 含量变化范围也较大(4%~25%), 普遍富铁(TFe>10%)^[24], 具有其幔源及深源的特点。雪岭矿区辉绿岩化学分析数据均符合以上峨眉山玄武岩化学成分特点。微量元素比值能较好的指示岩石的成因和构造环境, 峨眉山玄武岩一般具有 Ta/Hf>0.1, Th/Ta 为 1.6~4^[21], 以及 Zr/Nb 为 9.3~10.2, Nb/La 为 0.6~0.9^[32]的特征, 雪岭矿区辉绿岩 Ta/Hf 为 0.23~0.24, Th/Ta 为 4.58~4.61, Zr/Nb 为 11.62~12.39, Nb/La 为 0.61~0.69, 除 Th/Ta 和 Zr/Nb 比值可能受地壳混染及结晶分异等原因有极少偏差外, 其余比值参数均与峨眉山玄武岩的相符。

综合来看, 雪岭辉绿岩应是与晚二叠世-早三叠纪时峨眉山玄武岩喷发同时期的同源异相岩浆活动的产物。晚二叠世-早三叠纪时期, 由于地幔柱的剧烈异常运动以及大陆裂谷活动, 巨量的基性岩浆喷溢而

出在滇黔川大部分地区形成峨眉山玄武岩, 而雪岭矿区由于地表覆盖有较厚的以震旦纪和寒武纪碳酸盐岩为主的沉积地层, 以及雪岭矿区已经处于基性岩浆喷溢的边缘地带, 岩浆活动减弱, 最终未能冲破沉积盖层而形成辉绿岩脉。富含 Cu、Pb、Zn 等成矿元素的辉绿岩脉沿断裂带上升侵位过程中, 对矿化进行叠加改造, 促进了铜多金属矿化的再次富集。

4 讨论

通过对雪岭矿区各地层相关元素含量及辉绿岩地球化学对比分析可以看出, 包括做为矿化围岩的灯影组白云岩和渔户村组白云岩、磷块岩在内的矿区各沉积地层均较上地壳富集 Ag、Pb、As、Sb, 且构造作用有利于成矿元素的富集。矿区辉绿岩为与峨眉山玄武岩同期产生的同源异相岩浆活动产物, 具有较高的 Cu、Pb、Zn 元素含量, 对矿化应该有积极的影响。

区域上, 雪岭矿区位于铜多金属矿集区-东川矿区南缘, 具有铜多金属成矿背景条件。矿区北部紧邻的滥泥坪-白锡腊矿区在灯影组之下的陡山沱组中发现有滥泥坪式铜矿, 而且在陡山沱组下伏穿过不整合面找到了昆阳群地层中的铜(铁)矿床^[33]。雪岭矿区地球物理探测结果也显示矿区灯影组地层以下存在着多条低阻带, 暗示深部可能存在层状铜铁矿床。综合分析来看, 矿区浅表脉状矿体应是深部成矿物质受构造运动作用影响活化运移至浅部的灯影组和渔户村组地层时, 受物理、化学条件的变化在灯影组和渔户村组层间破碎带、断裂带等构造有利位置沉淀, 并萃取围岩中 Ag、Pb 等部分成矿物质富集成矿。辉绿岩则对矿化进行叠加改造, 使之更加富集。故该区除可寻找浅部脉状裂隙矿体以外, 应兼顾探索灯影组下伏陡山沱组中滥泥坪式层状铜矿和震旦系底部不整合面以下昆阳群中铜(铁)矿床。

5 结论

- 1) 雪岭矿区各沉积地层均较上地壳富集 Ag、Pb、As、Sb, 且构造运动有利于成矿物质的迁移富集。
- 2) 雪岭矿区辉绿岩为钙碱性系列岩石, 属于大陆板内构造环境。主量元素以高 SiO₂(2.85%~3.28%), 低 MgO(5.2%~6.01%), 低碱且 Na₂O>K₂O 为特点; 微量元素显示其具有较高的 Cu、Pb、Zn 元素含量; 稀土元素总量($193.21 \times 10^{-6} \sim 213.85 \times 10^{-6}$)高, 轻稀土富

集,重稀土亏损,具弱的Ce负异常(δCe 为0.86~0.87)和轻微的Eu负异常(δEu =0.96),配分型式为右倾斜型。

3) 雪岭辉绿岩具有和峨眉山玄武岩相似的地球化学特征,与东川汤丹辉绿岩相比有较大差异,综合分析可以认为雪岭辉绿岩应是峨眉山玄武岩同期产生的同源异相岩浆活动产物。

4) 结合区域地质背景和矿区地球物理探测结果,区内产于浅表断裂带中的铜多金属矿化应是深部成矿物质受构造运动影响活化迁移至浅部灯影组和渔户村组地层中构造有利位置沉淀,并萃取围岩中Ag、Pb等部分成矿物质富集成矿,辉绿岩则对矿化进行叠加改造使之更加富集。除继续研究雪岭矿区浅部脉状裂隙矿体以外,应兼顾探索深部陡山沱组和不整合面以下昆阳群中的铜多金属矿床。

REFERENCES

- [1] 龚琳,何毅特,陈天佑,赵玉山. 云南东川元古宙裂谷型铜矿[M]. 北京:冶金工业出版社,1996:1-252.
GONG Lin, HE Yi-te, CHEN Tian-you, ZHAO Yu-shan. Dongchuan Proterozoic rift type copper deposits in Yunnan[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 1-252.
- [2] 段嘉瑞,刘继顺,胡祥昭. 云南东川铜矿区1:5万地质图修编及成矿预测研究[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1994:1-242.
DUAN Jia-rui, LIU Ji-shun, HU Xiang-zhao. 1:50000 revision description and research of the metallogenic prediction of Dongchuan copper mining area, Yunnan Province[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994: 1-242.
- [3] 何毅特. 东川铜矿成矿系列、矿床类型及成矿模式[J]. 云南地质, 1996, 15(4): 319-329.
HE Yi-te. Metallogenic series, deposit type and metallogenetic model of Dongchuan Cu Deposit[J]. Yunnan Geology, 1996, 15(4): 319-329.
- [4] 张新兵,朱自强. 东川矿区1:5万重力资料地改及地质效果[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(5): 413-415.
ZHANG Xin-bing, ZHU Zi-qiang. High precise gravity terrain correction and the geology effects in Dongchuan ore of Yunnan[J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(5): 413-415.
- [5] 刘继顺,吴延之,段嘉瑞. 东川铜矿田喷流沉积成矿机制[J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(1): 8-12.
LIU Ji-shun, WU Yan-zhi, DUAN Jia-rui. The mechanism of exhalative sedimentary metallization in Dongchuan copper field[J]. Journal of Central South University of Technology, 1996, 27(1): 8-12.
- [6] 王国泰,包昌良. 云南东川昆阳古裂谷型铜矿的成矿模式与找矿方向[J]. 矿产与地质, 2003, 97(17): 342-344.
WANG Guo-tai, BAO Chang-liang. Metallogenic model and Exploring direction of Kunyang ancient rift type copper deposit, Dongchuan, Yunnan[J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 97(17): 342-344.
- [7] 高辉,裴荣富,王安建,曹殿华,范世家,梅燕雄. 海相砂页岩型铜矿成矿模式与地质对比—以中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿为例[J]. 地质通报, 2012, 31(8): 1332-1351.
GAO Hui, PEI Rong-fu, WANG An-jian, CAO Dian-hua, FAN Shi-jia, MEI Yan-xiong. Marine sand shale-hosted copper mineralization model and geological correlation: A case study of the Dongchuan copper mine in Yunnan and the Aynak copper mine in Afghanistan[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(8): 1332-1351.
- [8] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-312.
- [9] 倪善芹,侯泉林,王安建,据宜文. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义—以北京下古生界碳酸盐岩为例[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1510-1516.
NI Shan-qin, HOU Quan-lin, WANG An-jian, JU Yi-wen. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications-taking the lower palaeozoic carbonate rock of Beijing area as an example[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(10): 1510-1516.
- [10] 迟清华,鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京:地质出版社, 2007: 26-27.
CHI Qing-hua, YAN Ming-cai. The book of elemental abundance data for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 26-27.
- [11] VINOGRADOV A P. Average content of chemical elements in the major types of igneous rocks of the earth's crust[J]. Geochemistry, 1962(7): 641-664.
- [12] 徐义刚,钟孙霖. 峨眉山大火成岩省:地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
XU Yi-gang, ZHONG Sun-lin. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
- [13] LEBAS M J. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745-750.
- [14] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [15] 覃小峰,夏斌,李江,陆济璞,许华,周府生,胡贵昂,李乾. 阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群的地球化学特征及构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(1): 14-22.
QIN Xiao-feng, XIA Bin, LI Jiang, LU Ji-pu, XU Hua, ZHOU Fu-sheng, HU Gui-ang, LI Qian. Geochemical characteristics and tectonic settings of the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt[J]. Acta Petrologica

- et Mineralogica, 2008, 27(1): 14–22.
- [16] PEARCE J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Andesite: Orogenic Andesites and Related Rocks[J]. Chichester: Wiley, 1982: 525–548.
- [17] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. London: Geological Society Special Publication, 1989: 313–345.
- [18] WILSON M. Igneous petrogenesis: A globe tectonic approach[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [19] 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 曹远志, 张静艺. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 795–803.
- HAN Wei, LUO Jin-hai, FAN Jun-lei, CAO Yuan-zhi, ZHANG Jing-yi. Late Permian diabase in Luodian, Southeastern Guizhou, and its tectonic significances[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 795–803.
- [20] DAVIS J, HAWKESWORTH C. The petrogenesis of 30–20 Ma basic and intermediate volcanics from the Mogollon-Datil Volcanic Field, New Mexico, USA[J]. Contrib Miner Petrol, 1993, 115: 165–183.
- [21] 汪云亮, 张成江, 修淑艺. 玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf-Ta/Hf图解判别[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 413–421.
- WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-yi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 413–421.
- [22] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth Planet Sci Lett, 1973, 19: 290–300.
- [23] ANDERSON P L. Chemical composition of the mantle[J]. Geophys Res, 1983, 88: 41–52.
- [24] 张招崇, 王福生, 郝艳丽, MAHONEY J J. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 171–180.
- ZHANG Zhao-chong, WANG Fu-sheng, HAO Yan-li, MAHONEY J J. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan Large Igneous Basalt Province and constraints on their source region[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 171–180.
- [25] 熊舜华, 李建林. 峨眉山地区晚二叠世大陆裂谷边缘玄武岩系的特征[J]. 成都地质学院学报, 1984(1): 43–57.
- XIONG Shun-hua, LI Jian-lin. The characteristics of the late Permian basalts in the margin of continental rift in Emeishan area[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1984(1): 43–57.
- [26] 卢记仁. 峨眉地幔柱的动力学特征[J]. 地球学报, 1996, 17(4): 777–792.
- LU Ji-ren. Dynamical characteristics of the Emei mantle plume[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, 17(4): 777–792.
- [27] 张招崇, 王福生, 范蔚茗, 邓海琳, 徐义刚, 许继峰, 王岳军. 峨眉山玄武岩研究中的一些问题的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 239–246.
- ZHANG Zhao-chong, WANG Fu-sheng, FAN Wei-ming, DENG Hai-lin, XU Yi-gang, XU Ji-feng, WANG Yue-jun. A discussion on some problems concerning the study of the emeishan basalts[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 239–246.
- [28] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰, 唐冬梅, 张蓬勃, 朱士飞. 云南宾川-永胜-丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 777–792.
- JIANG Chang-yi, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Han-bing, TANG Dong-mei, ZHANG Peng-bo, ZHU Shi-fei. Petrogenesis and Source Characteristics of low-Ti basalts and picrites at Binchuan–Yongsheng–Lijiang region, Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(4): 777–792.
- [29] 朱士飞, 秦勇, 钱壮志, 高艳青. 云南省丽江-宾川地区二叠纪玄武岩地球化学特征及其构造背景研究[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 64–71.
- ZHU Shi-fei, QIN Yong, QIAN Zhuang-zhi, GAO Yan-qing. The geochemical characteristics and tectonic setting of the Permian Basalts in the Binchuan–Lijiang area in Yunnan Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 64–71.
- [30] DMITRIEV Y I, BOGATIKOV O A. Emeishan flood basalts, Yangtze platform: Indications of an aborted oceanic environment[J]. Petrology, 1996, 4: 407–418.
- [31] 焦骞骞. 云南武定晚二叠世高钛辉绿岩特征及形成环境[J]. 云南地质, 2012, 31(3): 395–399.
- JIAO Qian-qian. The characteristics and formation environment of late Permian Ti-high diabase in Wuding, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2012, 31(3): 395–399.
- [32] 宋谢炎, 戚华文. 云南东川峨眉山玄武岩的特征及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(z1): 49–50.
- SONG Xie-yan, QI Hua-wen. The characteristics and signification of emeishan basalts in Dongchuan, Yunnan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(z1): 49–50.
- [33] 柳玉龙, 郑厚义. 东川滥泥坪矿区辉长岩-闪长岩地质特征及找矿意义[J]. 中国矿业, 2011, 20(6): 77–79.
- LIU Yu-long, ZHENG Hou-yi. Geologic characteristics of gabbro-diorite rock mass of the Lanniping district of the Dongchuan copper deposits and their ore-prospecting significance[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(6): 77–79.

(编辑 何学锋)