



花岗岩成矿元素迁移富集的分析方法 ——以滇西南大同山稀土矿区矿化与风化过程为例

顾光明¹, 李杭¹, 严城民², 马重辉¹, 雷星¹, 胡凯兵¹

1. 云南省核工业地质调查院, 云南昆明 650106;

2. 云南省地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队, 云南玉溪 653100

摘要: 研究区位于滇西南临沧花岗岩中南段。为查证稀土矿体中有色金属、稀有金属的共伴生情况, 在钻孔的稀土矿体中采集30件化学分析样品, 分析元素为W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs。对花岗岩成矿元素迁移富集的研究, 采用了如下方法步骤: 1) 将各元素的分析值由大到小顺序排列并划分为6个组, 每组5个数据; 进行观察后发现21件样品未发生矿化, 4件样品发生过Sn矿化, 4件样品发生过Rb矿化, 1件样品发生过Sn、Rb矿化。2) 在未发生矿化的样品中, 将风化壳与未风化岩石的元素质量分数进行对比, 定量评估岩石在风化过程中元素的迁移富集程度; 与该地区基岩相比较, 风化壳中W、Sn、Nb、Ta质量分数增高(元素富集), Rb、Cs质量分数下降(元素迁移)。3) 将Sn、Rb矿化样品的平均值与非矿化样品的平均值进行对比, 定量评估岩石的矿化程度; 发生矿化的样品平均值中, Sn矿化伴有较弱的W、Ta矿化, Rb矿化伴有明显的W、Ta、Cs矿化, Sn、Rb矿化伴有明显的W、Ta、Cs矿化。
关键词: 花岗岩; 成矿元素; 稀土矿; 迁移富集; 分析方法; 云南省

ANALYSIS MEANS FOR MIGRATION AND ENRICHMENT OF ORE-FORMING ELEMENTS IN GRANITE: Mineralization and Weathering Process of Datongshan REE Orefield in Southwestern Yunnan

GU Guang-ming¹, LI Hang¹, YAN Cheng-min², MA Chong-hui¹, LEI Xing¹, HU Kai-bing¹

1. Yunnan Provincial Institute of Nuclear Industry Geological Survey, Kunming 650106, China;

2. Regional Geological Survey Brigade, Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Yuxi 653100, Yunnan Province, China

Abstract: The study area is located in the middle-southern part of Lincang granite in southwestern Yunnan. To verify the coexistence condition of non-ferrous and rare metals in the rare earth element (REE) orebody, 30 chemical samples are collected from the drilled orebody to analyze elements including W, Sn, Nb, Ta, Rb and Cs. The following methods and steps are adopted to study the migration and enrichment of ore-forming elements in granite: First, the analysis values of each element are arranged in order from large to small and divided into 6 groups, with 5 data in each group. Observation shows that, of the samples, 21 have no mineralization, 4 have Sn mineralization, 4 have Rb mineralization, and one has Sn and Rb mineralization. Then, among the unmineralized samples, the element contents

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-07-06. 编辑: 李兰英.

基金项目: 云南省地质勘查基金项目“云南省澜沧县大同山-大黑山风化壳离子吸附型稀土矿调查评价”(D202005).

作者简介: 顾光明(1982—), 男, 高级工程师, 从事地质矿产调查工作, 通信地址 云南省昆明市五华区人民西路606号, E-mail//85136159@qq.com

通信作者: 马重辉(1982—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事地质矿产调查工作, 通信地址 云南省昆明市五华区人民西路606号, E-mail//79471532@qq.com

(in mass fraction) of weathered crust are compared with those of unweathered rocks to quantitatively evaluate the migration and enrichment degree of elements during weathering. Compared with the bedrocks in the area, the contents of W, Sn, Nb and Ta have increased (showing enrichment), while the contents of Rb and Cs have decreased (showing migration). Finally, the average values of Sn and Rb mineralized samples are compared with those of non-mineralized samples to quantitatively evaluate the mineralization degree of rocks. According to the average value of mineralized samples, Sn mineralization is accompanied by weak W and Ta mineralization, Rb mineralization by obvious W, Ta and Cs mineralization, and Sn-Rb mineralization by obvious W, Ta and Cs mineralization.

Key words: granite; ore-forming element; REE deposit; migration and enrichment; analysis method; Yunnan Province

0 引言

目前,众多学者^[1-9]根据花岗岩类地球化学异常及年代学特征,在花岗岩类岩石分布区找矿潜力、成矿远景预测等方面开展了一系列的研究讨论。作者在查阅前人研究成果的基础上发现,对花岗岩成矿元素迁移富集的分析方法研究不多。故此,本文利用云南省澜沧县大同山-大黑山风化壳离子吸附型稀土矿区(以下简称“大同山稀土矿区”)所获资料,对此问题进行分析研究。

在大同山稀土矿区 1:50 000 土壤地球化学调查中,圈定了有色金属、稀有金属综合异常 16 个。为查证风化壳离子吸附型稀土矿体中有色金属、稀有金属的共生情况,在稀土矿体中共采集 30 件化学分析样品,分析元素为 W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs。

本文通过花岗岩成矿元素迁移富集的研究,探索一种分析方法,以期在不同地区的类似研究提供借鉴。

1 矿区地质概况

临沧花岗岩位于滇西南部,挟持于澜沧江断裂^[10]与双江-竹塘断裂^[11]之间,呈复式岩基状产出。该花岗岩基的主体部分为结构不同的三叠纪黑云二长花岗岩($\eta\gamma T$),而二叠纪中细粒花岗闪长岩($\gamma\delta P$)和中细粒英云闪长岩($\gamma\delta oP$)出露面积较小。

大同山稀土矿区位于临沧花岗岩中南段,矿区呈南北向狭长条带状,南北向展布的各地段地质背景基本相同。三叠纪黑云二长花岗岩的出露范围占矿区面积的 95%(图 1),从早到晚依次为中细粒黑云二长花岗岩($\eta\gamma^a T$)、似斑状中细粒黑云二长花岗岩($\eta\gamma^b T$)、中粗粒黑云二长花岗岩($\eta\gamma^c T$)及似斑状中粗粒黑云二长花岗岩($\eta\gamma^d T$)。

有关学者^[12-14]研究认为,三叠纪黑云二长花岗岩属 S 型花岗岩,具同碰撞花岗岩特点,主要由上地壳经不同程度的部分熔融形成。

2 样品采集与测试方法

参照南岭地区、普雄稀土矿风化壳的划分方案^[15-17],临沧花岗岩的风化壳自上而下划分为腐殖层、黏土层、全风化层、半风化层。在矿区地质勘查中,离子相稀土含量分析样品按黏土层、全风化层、半风化层分层采样。基本样长为 1 m。经化学分析,风化壳离子吸附型稀土矿产于全风化层中部及下部,矿体一般厚 3~5 m。

进行离子相稀土含量分析后,在 W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs 土壤地球化学异常区的 30 个见低品位矿(低于工业品位)或工业矿(达到或大于最低工业品位)的钻孔中选送 W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs 分析样品,每个钻孔选送 1 件。W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs 分析样品在低品位矿或工业矿的副样中选送。同一钻孔中有多件样品的离子相稀土元素含量达到边界品位时,选送离子相稀土元素含量中等的样品。

样品分析结果如表 1。其中,1—12 号样品为三叠纪似斑状中粗粒黑云二长花岗岩,13—25 号样品为三叠纪中粗粒黑云二长花岗岩,26—27 号样品为三叠纪似斑状中细粒黑云二长花岗岩,28—29 号样品为三叠纪中细粒黑云二长花岗岩,30 号样品为二叠纪中细粒花岗闪长岩。

样品分析测试单位为云南省核工业 209 地质大队实验室。W、Nb、Ta、Rb、Cs 采用等离子体质谱仪(PE1000G)电感耦合等离子体质谱法测定,Sn 采用 2 m 光栅发射光谱仪(802W)交流电弧-发射光谱法测定。

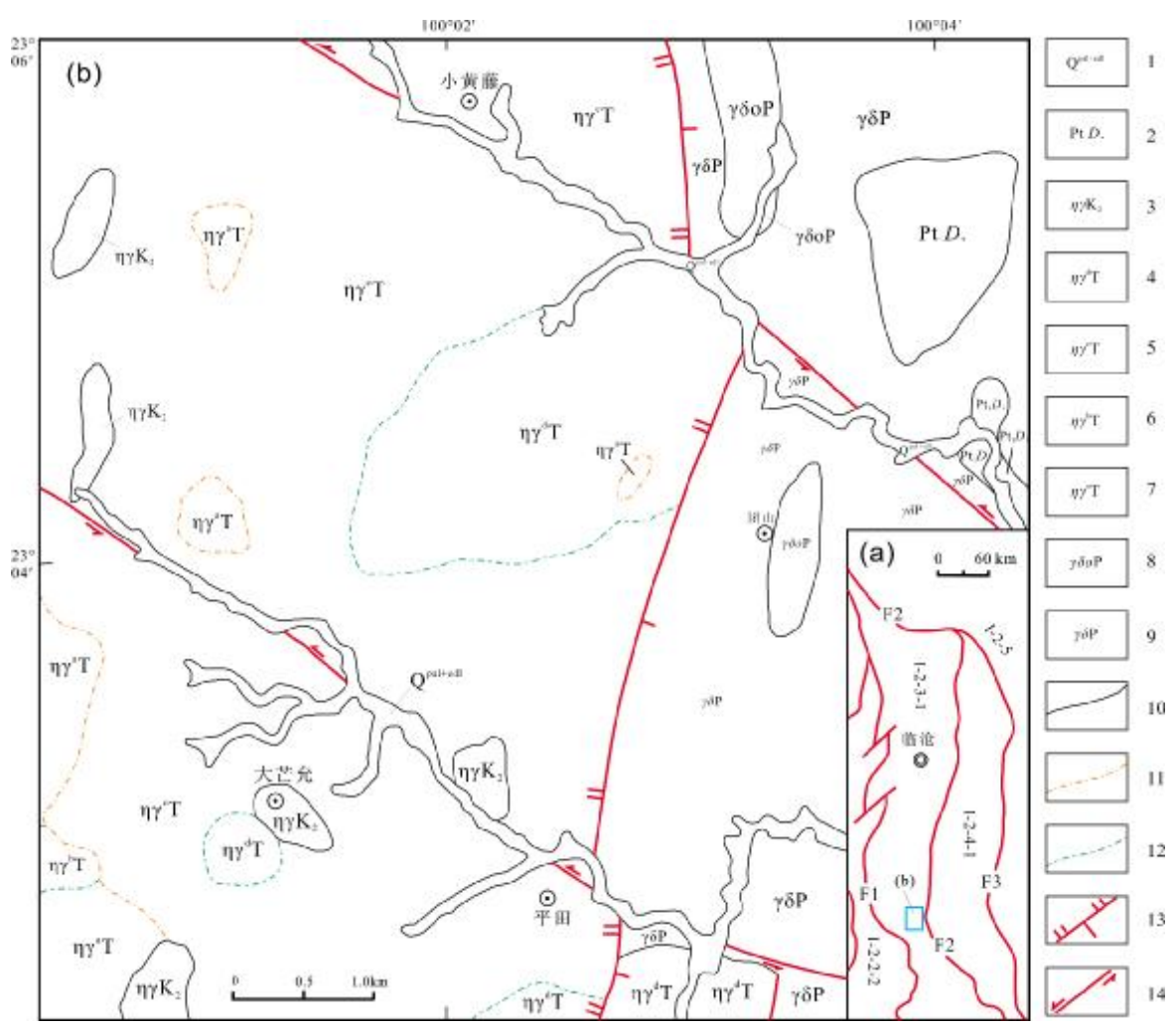


图 1 云南省澜沧县大同山-大黑山稀土矿区地质图

Fig. 1 Geological map of Datongshan-Daheishan REE orefield in Lancang County, Yunnan Province

a—区域构造图(据文献[11]修编)(regional tectonic map, modified from reference [11]); b—平田矿段地质图(geological map of Pingtian ore block); F1—双江-竹塘断裂(Shuangjiang-Zhutang fault); F2—澜沧江断裂(Lancang River fault); F3—芒怀-酒房断裂(Manhuai-Jiufang fault); I-2-2-2—昌宁-孟连结合带(P₂) (Changning-Mengliao junction zone); I-2-3-1—临沧-勐海岩浆弧(P-T)(Lincang-Menghai magmatic arc); I-2-4-1—云县-景洪火山弧(T) (Yunxian-Jinghong volcanic arc); I-2-5—兰坪-普洱陆块(S-T) (Lanping-Pu'er landmass); 1—洪冲积物+残坡积物(proluvium alluvium+ residual slope deposit); 2—大勐龙岩群(Damenglong rock group); 3—晚白垩世二长花岗岩(Late Cretaceous monzogranite); 4—三叠纪似斑状中粗粒黑云二长花岗岩 (Triassic porphyritic medium-coarse grained biotite monzogranite); 5—三叠纪中粗粒黑云二长花岗岩 (Triassic medium-coarse grained biotite monzogranite); 6—三叠纪似斑状中细粒黑云二长花岗岩 (Triassic porphyritic fine-medium grained biotite monzogranite); 7—三叠纪中细粒黑云二长花岗岩(Triassic fine-medium grained biotite monzogranite); 8—二叠纪中细粒(片麻状)英云闪长岩(Permian fine-medium grained/gneissic tonalite); 9—二叠纪中细粒花岗闪长岩 (Permian fine-medium grained granodiorite); 10—花岗岩与围岩侵入接触界线 (intrusive contact boundary of granite and surrounding rock); 11—花岗岩体内部脉动接触界线(pulsating contact boundary inside the granite); 12—花岗岩体内部涌动接触界线(surge contact boundary inside the granite); 13—逆断层(reverse fault); 14—左形平移断层(left-lateral strike-slip fault)

3 数据分组

经观察, 30 件样品的分析值中, 一部分明显受矿化影响, 另有部分受矿化影响不明显. 在 6 种元素中, Cs 一般不形成独立矿床^[18]. 是否发生矿化, 仅需在 W、Sn、Nb、Ta、Rb 中考虑.

将表 1 中各元素的分析值由大到小顺序排列并进行观察后发现: Sn、Rb 的分析值变化较大, 且明显分为 2 个部分, 含量较高的部分有可能是矿化作用的结果; W、Nb、Ta、Cs 分析值变化较小, 且连续变化, 矿化现象不明显.

表 1 矿区 W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs 分析结果

Table 1 Analysis result of W, Sn, Nb, Ta, Rb and Cs contents in the orefield

序号	W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs	序号	W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs
1	12.30	92.2	15.7	2.60	164	7.76	17	9.89	14.2	21.7	2.14	176	11.70
2	9.38	51.0	12.8	2.21	195	6.42	18	4.91	16.2	23.5	2.49	163	7.27
3	3.83	16.4	13.0	1.93	198	9.06	19	8.45	17.2	23.3	2.13	163	11.10
4	7.41	12.5	14.3	1.76	198	8.37	20	11.00	65.0	13.7	3.67	248	15.80
5	4.61	10.8	13.0	1.65	188	6.51	21	5.44	10.8	13.2	2.76	259	16.10
6	6.94	15.0	12.4	1.51	108	3.03	22	33.60	10.8	11.6	2.38	246	6.04
7	2.55	10.1	16.1	1.85	192	6.20	23	2.11	11.1	12.3	2.90	281	6.94
8	8.59	10.9	14.5	1.84	162	5.49	24	9.77	4.6	11.4	1.23	124	3.28
9	7.28	8.6	12.9	1.89	217	10.80	25	10.20	7.1	10.7	1.08	121	2.48
10	4.05	8.3	13.3	1.93	210	7.30	平均值	10.38	15.8	16.5	2.27	195	8.77
11	8.44	47.0	14.5	2.37	226	8.74	26	5.58	12.9	19.4	2.62	42	1.39
12	4.30	9.2	11.7	1.73	166	6.49	27	5.11	44.0	19.2	2.35	42	1.36
平均值	6.64	24.3	13.7	1.94	185	7.18	平均值	5.35	28.5	19.3	2.48	42	1.38
13	11.20	14.3	16.6	1.90	185	5.08	28	11.70	14.1	12.1	3.60	322	12.90
14	11.20	10.9	13.7	1.63	206	8.35	29	10.00	10.0	15.2	1.80	192	9.36
15	3.76	7.5	17.3	2.28	218	11.30	平均值	10.85	12.1	13.7	2.70	257	11.13
16	13.40	15.0	25.8	2.46	142	8.52	30	2.64	9.2	17.0	1.74	113	10.80

含量单位:10⁻⁶.

矿化与非矿化的划分,可用分析值分组的方法进行^[19].将每种元素的 30 个分析数据,5 个分为 1 组,共 6 组.

数据分组后,各组的特征数值有如下意义:

(1)相邻两组平均值之差称组差.组差不大,说明相邻两组分析值连续变化;反之,组差较大,说明相邻两组分析值在分组处及其附近存在分析值连续变化的间断点.

(2)组距为该组分析值的最大值与最小值之差.组距较大说明组内分析值变化相对不连续,组距较小说明组内分析值相对连续分布.

(3)中位数与平均值之差称位差.位差为正数,说明组内分析值的分布偏向组内最大值;位差为负数,说明组内分析值的分布偏向组内最小值.因此,位差也是衡量分析值分布均匀程度的特征参数.位差越小,

说明组内分析值分布越均匀.

Sn 元素的特征数值(表 2)显示:第一组与第二组的组差较大(43.8×10⁻⁶),其余 5 组的组差较小(≤2.7×10⁻⁶);第一组的组距较大(48.2×10⁻⁶),其余 5 组的组距较小(≤4.0×10⁻⁶);第一组位差较大(5.2×10⁻⁶),其余 5 组位差较小(≤0.5×10⁻⁶).结合第一组分析值较高(92.2×10⁻⁶~44.0×10⁻⁶)的情况分析,该组分析值有可能由矿化引起,与其他 5 组有明显差异.该组 5 个矿化元素的样品序号为 1、20、2、11、27(表 1).

Rb 元素中,第六组有 2 个明显偏小的分析值(42×10⁻⁶),使该组失去了统计分析意义.剩余 5 个组的特征数值(表 3)显示:第一组与第二组的组差较大(56×10⁻⁶),其余 4 组的组差较小(≤22×10⁻⁶);第一组的组距较大(76×10⁻⁶),其余 4 组的组距较小(≤52×10⁻⁶);第一组位差较大(-12×10⁻⁶),其余 4 组位差较小(-7×

表 2 Sn 元素的分析值与特征数值
Table 2 Analytical values and eigenvalues of Sn

组号	分析值					平均值	组差	两极值	组距	中位数	位差
1	92.2	65.0	51.0	47.0	44.0	59.8		92.2~44.0	48.2	65.0	5.2
2	17.2	16.4	16.2	15.0	15.0	16.0	43.8	17.2~15.0	2.2	16.2	0.2
3	14.3	14.2	14.1	12.9	12.5	13.6	2.4	14.3~12.5	1.8	14.1	0.5
4	11.1	10.9	10.9	10.8	10.8	10.9	2.7	11.1~10.8	0.3	10.9	0
5	10.8	10.1	10.0	9.2	9.2	9.9	1.0	10.8~9.2	1.6	10.0	0.1
6	8.6	8.3	7.5	7.1	4.6	7.2	2.7	8.6~4.6	4.0	7.5	0.3

含量单位:10⁻⁶. 组差为本组与上一组数据之差.

表 3 Rb元素的分析值与特征数值
Table 3 Analytical values and eigenvalues of Rb

组号	分析值					平均值	组差	两极值	组距	中位数	位差
1	322	281	259	248	246	271		322~246	76	259	-12
2	226	218	217	210	206	215	56	226~206	20	217	2
3	198	198	195	192	192	195	20	198~192	6	195	0
4	188	185	166	164	163	173	22	188~163	25	166	-7
5	176	163	162	142	124	153	20	176~124	52	162	9
6	121	113	108	42	42	85	68	121~42	79	108	23

含量单位:10⁻⁶. 组差为本组与上一组数据之差.

10⁻⁶~ +9×10⁻⁶). 结合第一组分析值较高 (322×10⁻⁶~ 246×10⁻⁶) 的情况分析, 该组分析值有可能由矿化引起, 与其他 4 组有明显差异. 该组 5 个矿化元素的样品序号为 28、23、21、20、22 (表 1). 20 号样品同时发生 Sn、Rb 矿化.

数据分组是为了更好地揭示数据之间的地质内涵. 采用上述方法对 Sn、Rb 元素分组后, 矿化样品与非矿化样品的特征数值有明显差异, 说明分组方法基本合理. 如分组后达不到相应的地质目的, 需用其他方法进行分组, 并通过比较后选定较为合理的分组方法.

4 风化过程

前已述及, 在 30 件样品中, 有 9 件样品发生矿化. 剔除受矿化影响的 9 个样品后, 剩余的 21 件非矿化样品的母岩有 5 种类型. 不同母岩的样品中各元素的平均值基本相近 (表 4), 反映了母岩对研究的 6 种

元素影响不大. 样品平均值变化较大的母岩为: 似斑状中细粒黑云二长花岗岩贫 Rb (42×10⁻⁶)、Cs (1.39×10⁻⁶), 中细粒黑云二长花岗岩贫 W (2.64×10⁻⁶), 其原因暂无法查证.

表 4 不同母岩的非矿化样品的 W、Sn、Nb、Ta、Rb、Cs 平均值
Table 4 Average values of W, Sn, Nb, Ta, Rb and Cs of non-mineralized samples from different parent rocks

岩石名称	样品数	W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs
似斑状中粗粒黑云二长花岗岩	9	5.51	11.3	13.5	1.79	182	7.03
中粗粒黑云二长花岗岩	9	9.20	11.9	18.2	1.85	166	7.68
似斑状中细粒黑云二长花岗岩	1	5.58	12.9	19.4	2.62	42*	1.39*
中细粒黑云二长花岗岩	1	10.00	10.0	15.2	1.80	192	9.36
中细粒花岗闪长岩	1	2.64*	9.2	17.0	1.74	113	10.80
平均值	21	7.17	11.5	16.0	1.89	166	7.77

含量单位:10⁻⁶. * 为质量分数明显偏小的平均值.

为研究成矿元素在风化过程中的迁移富集特征, 对风化壳与未风化岩石的元素质量分数进行对比 (表 5). 风化壳采用 2 种数据进行算术平均: 1) 本次研究中采集的 1 080 件土壤地球化学调查样品的算术平均值; 2) 表 3 中稀土矿体的 21 件非矿化样品平均值. 未风化基岩中, W、Sn、Nb、Rb、Cs 采用“滇西地区铜矿找矿立项物化探资料研究报告”(云南省地质调查院, 1993) 数据, Ta 采用临沧花岗岩中“1:250 000 临沧县幅、滚龙幅区域地质调查报告”(云南省地质调查院, 2003) 的 16 件样品平均值.

表 5 不同层位成矿元素质量分数对比
Table 5 Comparison of ore-forming element contents in different strata

元素	W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs
风化壳/10 ⁻⁶	5.8	10.3	17.2	2.10	142	8.5
基岩/10 ⁻⁶	2.9	5.1	14.5	1.09	165	10.8
富集系数/%	2.00	2.02	1.19	1.93	0.86	0.79

本文引用富集系数来定量评估岩石在风化过程中元素的迁移富集程度. 富集系数(K)=风化壳数据/基岩数据. 在风化过程中: K>1, 元素发生富集; K=1, 元素未发生富集或迁移; K<1, 元素发生迁移.

由表 5 可知,岩石风化后,W、Sn、Ta、Nb 质量分数明显增高(指标元素富集),Rb、Cs 质量分数明显降低(指示元素迁移)。

风化过程中元素的迁移富集规律,要能够从相关地质理论中得到合理的解释。据文献[18]资料:钨矿的主要矿物为黑钨矿、白钨矿,锡矿的主要矿物为锡石,铌钽矿的主要矿物为铌铁矿、钽铁矿、褐钇铌矿、(铌)易解石、烧绿石等。这些矿物均属氧化物大类,在表生作用下较为稳定,易于形成重砂矿物^[20]。在风化过程中,含有 W、Sn、Ta、Nb 的矿物大多残留原地,赋存于风化壳中,致使风化壳的元素发生明显富集。Rb、Cs 在风化壳中发生迁移的原因,还需进一步研究。

限于研究程度,本文的样品均采自全风化层,如能在黏土层、全风化层、半风化层中系统采集样品,岩石在风化过程中元素迁移富集的结论则更加可靠。

5 矿化作用

在研究样品矿化过程中,也可以引用富集系数来

定量评估样品的矿化程度。富集系数=矿化样品平均分析值÷非矿化样品平均分析值。

研究样品中见 3 类矿化: Sn 矿化样品, Rb 矿化样品, Sn、Rb 矿化样品(表 6)。

矿化主元素的命名方法为: 在富集系数较高的元素中, 将元素平均质量分数除以边界品位下限值后进行比较,数值较大者为主矿化元素,即:元素平均质量分数÷边界品位下限值×100%。在有色金属、稀有金属中, 仅取数值最大的元素参加命名。元素的工业指标据相关规范^[21-22],将单质或氧化物计量单位由百分数(%)换算为元素百万分之一(10⁻⁶)进行表示(表 7)。表 7 中, Nb₂O₅、Ta₂O₅ 的工业指标为矿床实例; Rb、Cs 为综合回收工业指标; Cs 无边界品位,据多数矿种边界品位与工业品位的比值,Cs 的边界品位取工业品位的 2/3。

Sn 矿化样品: Sn 的平均质量分数(58.6×10⁻⁶)已达边界品位下限值(1 000×10⁻⁶)的 5.86%; W、Ta 的平均质量分数(8.81×10⁻⁶、2.33×10⁻⁶)仅为边界品位下限

表 6 矿化样品的平均值与富集系数
Table 6 Average values and enrichment coefficients of mineralized samples

样品类型	样品数	平均值/10 ⁻⁶						富集系数/%					
		W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs	W	Sn	Nb	Ta	Rb	Cs
非矿化	21	7.17	11.5	16.0	1.89	166	7.77						
Sn 矿化	4	8.81	58.6	15.6	2.33	157	6.07	1.23	5.10	0.98	1.23	0.95	0.78
Rb 矿化	4	13.21	11.7	12.3	2.91	277	10.50	1.84	1.02	0.77	1.54	1.67	1.35
Sn、Rb 矿化	1	11.00	65.0	13.7	3.67	248	15.80	1.53	5.65	0.86	1.94	1.49	2.03

表 7 花岗岩中 Sn-W-Nb-Ta-Rb-Cs 的工业指标
Table 7 Industrial indexes of Sn, W, Nb, Ta, Rb and Cs in granite

矿种	氧化物(单质)/%			元素/10 ⁻⁶		
	符号	边界品位	最低工业品位	符号	边界品位	最低工业品位
钨	WO ₃	0.064~0.10	0.12~0.20	W	507~793	951~1586
锡	Sn	0.1~0.2	0.2~0.4	Sn	1 000~2 000	2 000~4 000
铌	Nb ₂ O ₅	0.05	0.1	Nb	350	699
钽	Ta ₂ O ₅	0.006	0.01	Ta	49	82
铷	Rb ₂ O	0.04~0.06	0.1~0.2	Rb	366~549	914~1 829
铯	Cs ₂ O		0.05~0.06	Cs	315~377	472~566

值(507×10^{-6} 、 49×10^{-6})的 1.73%、4.76%。因此将主矿化元素确定为 Sn,伴有较弱的 W、Ta 矿化。

Rb 矿化样品: Rb 的平均质量分数(277×10^{-6})已达边界品位下限值(366×10^{-6})的 75.68%; W、Sn、Ta、Cs 的平均质量分数(13.21×10^{-6} 、 11.7×10^{-6} 、 2.91×10^{-6} 、 10.50×10^{-6})仅为边界品位下限值(507×10^{-6} 、 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 、 49×10^{-6} 、 315×10^{-6})的 2.61%、1.17%、5.94%、3.33%。因此,将主矿化元素确定为 Rb,伴有明显的 W、Ta、Cs 矿化。

Sn、Rb 矿化样品: Sn、Rb 的平均质量分数(65.0×10^{-6} 、 248×10^{-6})已达边界品位下限值($1\ 000 \times 10^{-6}$ 、 366×10^{-6})的 6.50%、67.76%; W、Ta、Cs 的平均质量分数(11.00×10^{-6} 、 3.67×10^{-6} 、 15.80×10^{-6})仅为边界品位下限值(507×10^{-6} 、 49×10^{-6} 、 315×10^{-6})的 2.17%、7.49%、5.02%。因此,将主矿化元素确定为 Sn,伴有明显的 W、Ta、Cs 矿化。

矿区 1:50 000 土壤地球化学调查中,圈定了 8 个 Sn-W 综合异常和 8 个 Nb-Ta-Rb-Cs 综合异常。部分 Sn-W 综合异常与 Nb-Ta-Rb-Cs 综合异常重叠,形成 Sn-W-Nb-Ta-Rb-Cs 综合异常。综合异常的类型和异常元素组合,与本文分析的矿化类型和矿化元素组合大致相同,说明矿区很可能存在 Sn-W-Ta 矿化、Rb-W-Ta-Cs 矿化、Rb-Sn-W-Ta-Cs 矿化。

从矿化元素看, Sn、Rb 矿化为 Sn 矿化和 Rb 矿化的交集,可能为 Sn 矿化与 Rb 矿化的重叠所致,但需进一步查证。

6 结论

(1)花岗岩成矿元素迁移富集的研究方法可采用如下步骤:①将样品的各元素分析值由大到小顺序排列并进行分组,进行观察后即可发现矿化样品的矿化元素;②进行风化壳与未风化岩石的元素质量分数对比,可定量评估岩石在风化过程中元素的迁移富集程度;③进行 Sn、Rb 矿化样品的平均值与非矿化样品平均值的对比,可定量评估岩石的矿化程度。

(2)经统计分析表明:21 件样品未发生矿化,4 件样品发生过 Sn 矿化,4 件样品发生过 Rb 矿化,1 件样品发生过 Sn、Rb 矿化。

(3)与该地区基岩相比较,未发生矿化的样品中, W、Sn、Nb、Ta 质量分数增高(元素富集), Rb、Cs 质量

分数下降(元素迁移)。

(4)发生矿化的样品平均值中, Sn 矿化伴有较弱的 W、Ta 矿化, Rb 矿化伴有明显的 W、Ta、Cs 矿化, Sn、Rb 矿化伴生明显的 W、Ta、Cs 矿化。

参考文献(References):

- [1]张民,何显川,谭伟,等.云南临沧花岗岩离子吸附型稀土矿床地球化学特征及其成因讨论[J].中国地质,2022,49(1):201-214.
Zhang M, He X C, Tan W, et al. Geochemical characteristics and genesis of ion-adsorption type REE deposit in the Lincang granite, Yunnan Province[J]. Geology in China, 2022, 49(1): 201-214.
- [2]郝士龙,李成禄,胡忠贤.黑龙江省嫩江市播根里地区地球化学异常特征及找矿潜力[J].地质与资源,2020,29(5):419-428,410.
Hao S L, Li C L, Hu Z X. Geochemical anomaly and prospecting potential in Bogenli area, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2020, 29(5): 419-428, 410.
- [3]齐文博,师兵,王嘉炜,等.青海省都兰县查哈西里地区地球化学异常特征及成矿远景评述[J].地质与资源,2021,30(4):431-442.
Qi W B, Shi B, Wang J W, et al. Geochemical anomalies and metallogenic prospect in Chahaxili area of Dulan County, Qinghai Province[J]. Geology and Resources, 2021, 30(4): 431-442.
- [4]刘希瑶,王德力,刘驰.大兴安岭北部中生代花岗岩类地球化学特征及地质意义[J].地质与资源,2020,29(3):207-211,281.
Liu X Y, Wang D L, Liu C. Geochemistry of Mesozoic granitoids in northern Daxinganling Mountains: Geological implication[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 207-211, 281.
- [5]李巍巍,陈井胜,高忠晖,等.赤峰哈拉道口早石炭世花岗岩闪长岩年代学、地球化学及其地质意义[J].地质与资源,2020,29(3):212-223.
Li W W, Chen J S, Gao Z H, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Carboniferous granodiorites in Haladaokou area of Chifeng City: Geological implication[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 212-223.
- [6]潘志龙,李强,程学芹,等.内蒙古北山地区小红山钒钛磁铁矿双峰式侵入岩——岩石学、年代学、地球化学特征及其地质意义[J].地质与资源,2022,31(5):614-624.
Pan Z L, Li Q, Cheng X Q, et al. Bimodal intrusive rocks in Xiaohongshan vanadium-titanium magnetite orefield in Beishan area of Inner Mongolia: Petrology, geochronology, geochemistry and geological implication[J]. Geology and Resources, 2022, 31(5): 614-624.
- [7]刘欣,伍月,金珊合.皖浙赣交界莲花山岩体 U-Pb 锆石年龄及其地质意义[J].地质与资源,2021,30(6):666-674,682.
Liu X, Wu Y, Jin S H. U-Pb zircon age of Lianhuashan pluton in the junction of Anhui-Zhejiang-Jiangxi provinces: Geological implication [J]. Geology and Resources, 2021, 30(6): 666-674, 682.

- [8] 李利阳, 韩瑶, 伍光英, 等. 大兴安岭乌奴耳地区石炭纪花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄及形成地质背景[J]. 地质与资源, 2022, 31(6): 707-715, 728.
- Li L Y, Han Y, Wu G Y, et al. Zircon U-Pb age and geological background of Carboniferous granodiorites in Wunuer area, Daxinganling Mountains[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(6): 707-715, 728.
- [9] 陈聪, 吴涛涛, 周永恒, 等. 蒙古国查夫银多金属矿床含矿花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地质与资源, 2023, 32(2): 127-139.
- Chen C, Wu T T, Zhou Y H, et al. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and petrogenesis of ore-bearing granodiorite in Tsav silver polymetallic deposit, Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 2023, 32(2): 127-139.
- [10] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 444-446.
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 444-446. (in Chinese)
- [11] 王泽传, 朱延浙, 严城民, 等. 云南地史与特提斯构造演化[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2017: 18.
- Wang Z C, Zhu Y Z, Yan C M, et al. Geological history and Tethian tectonic evolution of Yunnan Province [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2017: 18. (in Chinese)
- [12] 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 等. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1438-1452.
- Kong H L, Dong G C, Mo X X, et al. Petrogenesis of Lincang granites in Sanjiang area of western Yunnan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(5): 1438-1452.
- [13] 刘振声, 王洁民. 青藏高原南部花岗岩地质地球化学[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 58.
- Liu Z S, Wang J M. Geological and geochemical characteristics of granite in southern Tibetan Plateau [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994: 58. (in Chinese)
- [14] 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(2): 123-132.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1032-1042.
- [15] 陈炳辉, 俞受望. 广东平远花岗岩风化壳及其稀土成矿特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1995, 34(1): 96-101.
- Chen B H, Yu S J. The weathering crust and REE metallogenic characteristics of granite in Pingyuan, Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1995, 34(1): 96-101.
- [16] 张恋, 吴开兴, 陈陵康, 等. 赣南离子吸附型稀土矿床成矿特征概述[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(1): 10-17.
- Zhang L, Wu K X, Chen L K, et al. Overview of metallogenic features of ion-adsorption type REE deposits in southern Jiangxi Province [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2015, 33(1): 10-17.
- [17] 李余华, 段文婷, 张子军, 等. 滇东南建水稀土矿稀土数值特征及研究意义[J]. 稀土, 2020, 41(2): 95-104.
- Li Y H, Duan W T, Zhang Z J, et al. REE characteristics and research significance of Jianshui rare earth deposits in southeastern Yunnan [J]. *Chinese Rare Earths*, 2020, 41(2): 95-104.
- [18] 《矿产资源工业要求参考手册》编委会. 矿产资源工业要求参考手册[M]. 北京: 地质出版社, 2021: 160, 165, 208.
- Editorial Board. Reference manual for the mineral resources industry requirements [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 160, 165, 208. (in Chinese)
- [19] 刘凤祥, 王学武, 李新仁, 等. 固体矿产地质勘查基本方法[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2013.
- Liu F X, Wang X W, Li X R, et al. Basic methods of solid mineral geological exploration [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [20] 侯德义. 找矿勘探地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 75-80.
- Hou D Y. Geology of mineral prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 75-80. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0201—2020 矿产地质勘查规范: 钨、锡、汞、锑[S]. 北京: 地质出版社, 2020: 55.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0201—2020 Specifications for tungsten, tin, mercury and antimony mineral exploration [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 55.
- [22] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0203—2020 矿产地质勘查规范: 稀有金属类[S]. 北京: 地质出版社, 2020: 35-36.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0203—2020 Specifications for rare metal mineral exploration [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020: 35-36.