

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.321>



# 与A型花岗岩有关锡矿的云英岩化蚀变矿化地球化学： 以新疆卡姆斯特和干梁子矿床为例

陈言飞<sup>1,2,3\*</sup>, 王玉往<sup>3\*</sup>, 王京彬<sup>3</sup>, 王莉娟<sup>3</sup>, 唐萍芝<sup>3</sup>, 石煜<sup>3</sup>, 赵路通<sup>3</sup>

1.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

2.中国地质科学院地质研究所,北京 100037

3.北京矿产地质研究院,北京 100012

**摘要:**新疆准噶尔盆地东部卡拉麦里地区发育我国典型的A型花岗岩型锡矿,通过对该区卡姆斯特和干梁子两个锡矿4个矿化蚀变带的岩相学及地球化学研究,发现矿体和致矿岩体是同源岩浆演化的结果,矿体是岩浆分异演化末期向流体演化过程中形成的。矿床的蚀变分带模式可分为两种:(1)(红色)细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩→含锡石英脉;(2)细粒黑云母花岗岩→含锡云英岩→含锡石英脉。其蚀变带中岩石的地球化学组分总体迁移规律为: $\text{SiO}_2$ 迁入, $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 迁出, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 总体表现为迁入,  $\text{Th}/\text{U}$ 值不断降低,表明硅化和碱交代作用贯穿整个成矿过程,成矿环境由碱性向酸性变化,并伴随氧逸度的升高。 $\text{F}$ 、 $\text{Cl}$ 、 $\text{W}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{In}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Rb}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 等元素与成矿元素 $\text{Sn}$ 的迁移、富集和沉淀密切相关,其中 $\text{F}$ 和 $\text{Cl}$ 是迁移过程中最活跃的组分,是 $\text{Sn}$ 元素最大的“搬运工”, $\text{Sn}$ 元素的富集与 $\text{W}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{In}$ 等元素迁移呈正相关,反映流体作用与 $\text{Sn}$ 成矿密切相伴,而与 $\text{Pb}$ 、 $\text{Rb}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 等元素的迁移呈负相关,反映致矿岩体自身元素的稀释和带出, $\text{Sn}$ 的富集和成矿是在岩浆向流体演化过程中完成的。

**关键词:** 锡矿; A型花岗岩; 蚀变矿化分带; 元素迁移规律; 成矿条件; 地球化学。

中图分类号: P614

文章编号: 1000-2383(2018)09-3154-15

收稿日期: 2018-03-03

## Greisenized Alteration-Mineralization Geochemistry of the Tin Deposit Related to A-Type Granite: Case Study on the Kamusite and Ganliangzi Deposits, Xinjiang

Chen Yanfei<sup>1,2,3</sup>, Wang Yuwang<sup>3\*</sup>, Wang Jingbin<sup>3</sup>, Wang Lijuan<sup>3</sup>, Tang Pingzhi<sup>3</sup>, Shi Yu<sup>3</sup>, Zhao Lutong<sup>3</sup>

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

**Abstract:** The typical tin ores related to A-type granite have been discovered in Kalamaili region, east of the Junggar, North Xinjiang. However, little has been known about the metallogenetic mechanism of the tin ores so far. This study on petrology and geochemistry of four mineralization-alteration zones from the Kamusite and Ganliangzi tin deposits show that the ores and metallogenic rock body are the products of the fractional crystallization of homologous magma with the ores forming at the later stage, and there are two alteration zoning patterns: (1) (red) fine-grained Bt-granite→greisenized fine-grained granite→tin-bearing quartz veins; (2) fine-grained Bt-granite→tin-bearing greisen→tin-bearing silicification veins. The elements migration of the altered zone show that  $\text{SiO}_2$  was externally supplied,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  moved out in varying degrees, more  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  was supplied than lost, and  $\text{Th}/\text{U}$  ratios kept decreasing in the whole mineralized process, which suggests that the on-going silicifi-

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No.2014CB440803)。

**作者简介:**陈言飞(1985—),男,博士研究生,主要从事岩石学和矿床学方面的研究。ORCID: 0000-0002-9860-9089. E-mail: cyfeifly@163.com

\*通讯作者:王玉往, E-mail: wwy@cncem.com

**引用格式:**陈言飞,王玉往,王京彬,等,2018.与A型花岗岩有关锡矿的云英岩化蚀变矿化地球化学:以新疆卡姆斯特和干梁子矿床为例.地球科学,43(9): 3154-3168.

cation and alkali metasomatism in the whole process result in the changes of metallogenic environment from basic to acidic and the increases of oxygen fugacity. The migration of trace elements (eg. W, Cu, Bi, In) was significantly positively associated with the enrichment of tin, while that of others (eg. Pb, Rb, Nb, Ta) was negative, together with the most active component of F and Cl, and these elements played important roles in the process of migration, enrichment and precipitation of tin. This indicates that the elements from the metallogenic rock body were lost while the fluid played an important role in the process of Sn mineralization, and the enrichment and mineralization of Sn was probably caused in the transition stage from magmatic to hydrothermal system.

**Key words:** tin ore; A-type granite; alteration-mineralization zone; migration regularity; metallogenic conditions; geochemistry.

成矿过程中,矿体和周围蚀变带中元素迁移与成矿有密切关系,并对成矿环境和成矿机制有指示意义。近年来,通过元素的迁移富集过程来探讨成矿演化和限定成矿机制的报道越来越多,如对金矿和铜矿矿化蚀变分带特征及元素地球化学行为的研究(张智宇等,2012;赵睿等,2015;郑硌等,2015),对铁矿、铀矿、钨矿床的蚀变分带特征和元素迁移规律的研究(江满容等,2015;项新葵等,2015;李海东等,2016)。随着研究的深入,国内外学者相继发现了一系列与 A 型花岗岩有关的锡矿(Zhao *et al.*, 2001; 李兆丽, 2006; Li *et al.*, 2007, 2018; 毕献武等, 2008; Yuan *et al.*, 2011; Samuel *et al.*, 2015; 周云等, 2017),并对其中部分矿床的成矿时代、矿化蚀变分带特征、成矿流体来源和锡元素的赋存状态及迁移形式进行了探讨(Taylor and Wall, 1993; Zhao *et al.*, 2001; 李兆丽, 2006; Li *et al.*, 2007b, 2018; 毕献武等, 2008; Yuan *et al.*, 2011),但与 A 型花岗岩有关的锡矿矿体—蚀变带一致矿岩体之间的地球化学组分迁移规律研究则鲜有报道。我国新疆东准噶尔卡拉麦里地区发育一系列与 A 型花岗岩有关的锡矿,包括卡姆斯特、干梁子、贝勒库都克、萨惹什克 4 个中小型锡矿床及苏吉泉、红土井子等锡矿点,是我国乃至世界上少见的与 A 型花岗岩有关的锡矿化集中区(毕承思等,1992;陈言飞,2013)。前人对该区部分矿床的地质特征、成矿时代、地球化学特征、流体包裹体等进行了研究(陈富文等,1999; 杨富全等,2008; 王莉娟等,2011),但缺少对矿体与蚀变带及致矿岩体之间蚀变演化关系以及各带中化学组分迁移规律的研究,对矿床的成矿机制研究也相对薄弱。

本文选择卡拉麦里锡矿带的卡姆斯特和干梁子矿床为研究对象,通过开展典型的矿体—蚀变带一致矿岩体的地质剖面调查,以及岩/矿石的岩相学、地球化学等方面研究,总结其矿化—蚀变的演化特点,结合各蚀变带中元素组分的迁移规律,探讨锡矿的成矿环境及成矿机制,从而为该类锡矿的成矿模

式及找矿预测研究提供依据。

## 1 地质背景

卡姆斯特和干梁子锡矿位于新疆准噶尔盆地东部(东准噶尔)卡拉麦里地区(图 1a)。东准噶尔为中亚成矿域的重要组成部分,大地构造上位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块的接合部位(图 1a)(Şengör *et al.*, 1993; 舒良树等,2001; 王京彬和徐新,2006; 张克信等,2015)。区内出露的地层主要由奥陶系、志留系、泥盆系和石炭系组成,以泥盆系、石炭系为主,其他为零星出露(图 1b)(张以熔等,2006; 王富明等,2014)。泥盆系主要出露中泥盆统平顶山组凝灰质粉砂岩、玄武岩和凝灰岩,夹有少量砾岩及砂砾岩等;石炭系松喀尔苏组以凝灰质粉砂岩、火山碎屑岩为主,夹有灰岩、含炭泥灰岩等。卡拉麦里断裂是一条区域性深大断裂,呈 NWW 向展布,断裂两侧有断续的蛇绿混杂岩分布(图 1b)。该蛇绿混杂岩带由不同的岩块组成,主要包括强蛇纹石化变质橄榄岩、辉长岩、辉绿岩和基性熔岩等(刘希军等,2007; 徐新等,2007)。卡拉麦里断裂带东北侧的苏吉—清水断裂和库普—库布苏断裂,也是呈 NWW 向展布的区域性大断裂,大致平行于卡拉麦里断裂带,区域上,二者控制了碰撞造山后的富碱花岗岩体侵位(喻亨祥等,2001; 韩宝福等,2006),使该地区形成了一条与断裂带平行侵位的富碱花岗岩带。该花岗岩带出露总面积约 1 100 km<sup>2</sup>,由不同期次、大小不等的多个岩体组成,由西向东分布有:老鸦泉岩体、贝勒库都克岩体、黄羊山岩体和苏吉泉岩体(赵东林等,2000; 李月臣等,2007; 林锦富等,2007; 郭芳放等,2010)。

老鸦泉岩体位于卡拉麦里富碱花岗岩带最西侧,呈 NW 向展布,侵位于泥盆系平顶山组和石炭系卡姆斯特组中(图 1b)。岩石地球化学特征表明,该岩体为 A 型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987; Eby,

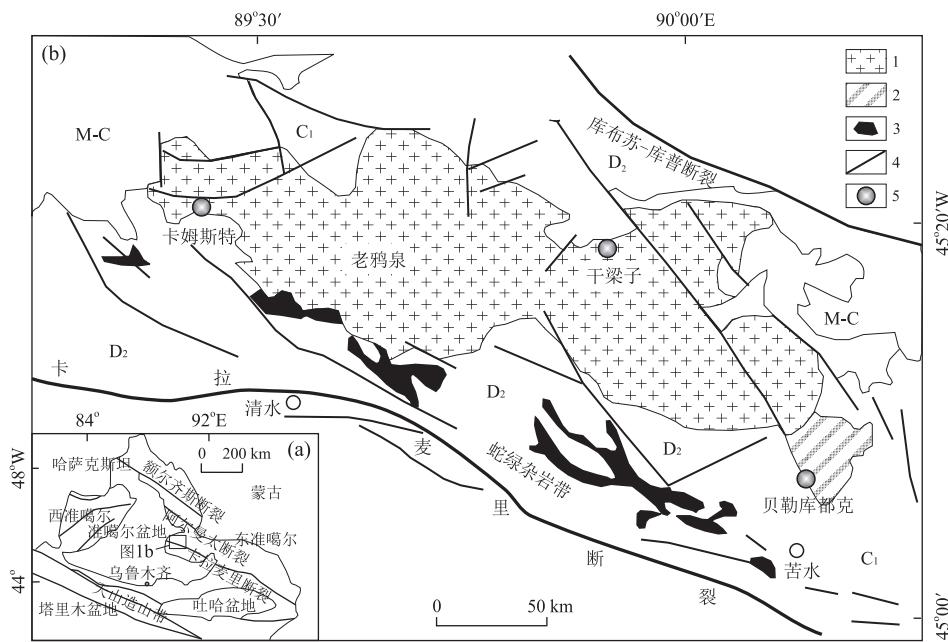


图 1 准噶尔地块构造简图(a)及卡姆斯特—干梁子矿床区域地质图(b)

Fig.1 Tectonic outline of Junggar terrane (a) and regional geological sketch of the Kamusite and Ganliangzi deposits (b)  
 图据张以熔等(2006)修改;M-C.中—新生界;C<sub>1</sub>.下石炭统;D<sub>2</sub>.中泥盆统;1.老鸦泉岩体:黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩;2.贝勒库都克岩体:黑云母正长花岗岩、黑云母二长花岗岩;3.蛇绿岩套:镁铁—超镁铁岩;4.断裂;5.锡矿床

1992; 唐红峰等, 2008), 具有高硅、富碱、低铝、贫钙镁的特征(赵东林等, 2000; 王莉娟等, 2012). 黑云母花岗岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 302.15 ± 2.80 Ma(赵东林等, 2000), 属晚石炭世末. 卡姆斯特和干梁子锡矿床就产于该岩体中(图 1b).

## 2 矿床地质概况及蚀变分带特征

### 2.1 矿床地质

卡姆斯特和干梁子锡矿床主要产于老鸦泉岩体与泥盆系平顶山组接触部位的花岗岩中(图 1b), 致矿岩体(赋矿直接围岩)是老鸦泉岩体中的细粒黑云母花岗岩. 矿化类型可分为石英大脉型、云英型和云英岩化花岗岩中的细脉状、网脉状和浸染状矿体, 矿体形态以脉状、不规则状、串珠状为主. 矿石类型主要为石英脉型锡矿石、云英岩型锡矿石和云英岩化花岗岩型锡矿石. 矿物共生组合较为复杂, 矿石矿物以锡石为主, 辉钼矿、黄铁矿等硫化物次之, 还有少量铁氧化物, 偶见绿柱石; 脉石矿物以石英为主, 钾长石和斜长石次之, 还有少量白云母、绢云母、绿帘石、绿泥石、高岭石、萤石及微量锆石、磷灰石、金红石等. 锡石呈棕褐色, 在石英脉中主要以浸染状和斑杂状为主, 而在云英岩和云英岩化花岗岩中多以单晶形式出现, 偶见膝状双晶, 单晶粒径一般为

0.5~5.0 mm.

矿床围岩蚀变强烈, 蚀变类型主要是云英岩化和硅化.

### 2.2 矿体蚀变分带特征及采样

根据野外地质情况, 针对不同的矿体笔者共调查了 4 个蚀变分带剖面, 每个剖面都穿过矿体、蚀变带和致矿岩体, 并依次采样(图 2). 其中剖面 1、2、3 为卡姆斯特矿床(图 2a~2f), 剖面 4 为干梁子矿床(图 2g~2h).

矿体和致矿岩体之间的蚀变类型主要为云英岩化和硅化, 二者在形式上表现为云英岩脉和石英脉, 以石英脉矿体为中心向两侧蚀变程度由强逐渐减弱, 并形成蚀变分带. 从致矿岩体到矿体可分为 2 种蚀变分带形式:(红色)细粒黑云母花岗岩→含锡云英岩化细粒花岗岩→含锡石英脉(图 2a~2f), 以及细粒黑云母花岗岩→含锡云英岩→含锡石英脉(图 2g~2h). 云英岩化细粒花岗岩(云英岩)与含锡石英脉界线截然, 而与细粒黑云母花岗岩无明显界线, 呈现出渐变关系, 表明云英岩化细粒花岗岩(云英岩)矿体可能是由细粒黑云母花岗岩蚀变形成的, 二者具有同源关系, 而石英脉矿体则是由含矿热液自身沉淀形成. 细粒黑云母花岗岩的红色可能由后期热液蚀变导致.

#### 2.2.1 剖面 1 及其岩相学特征 蚀变分带形式为

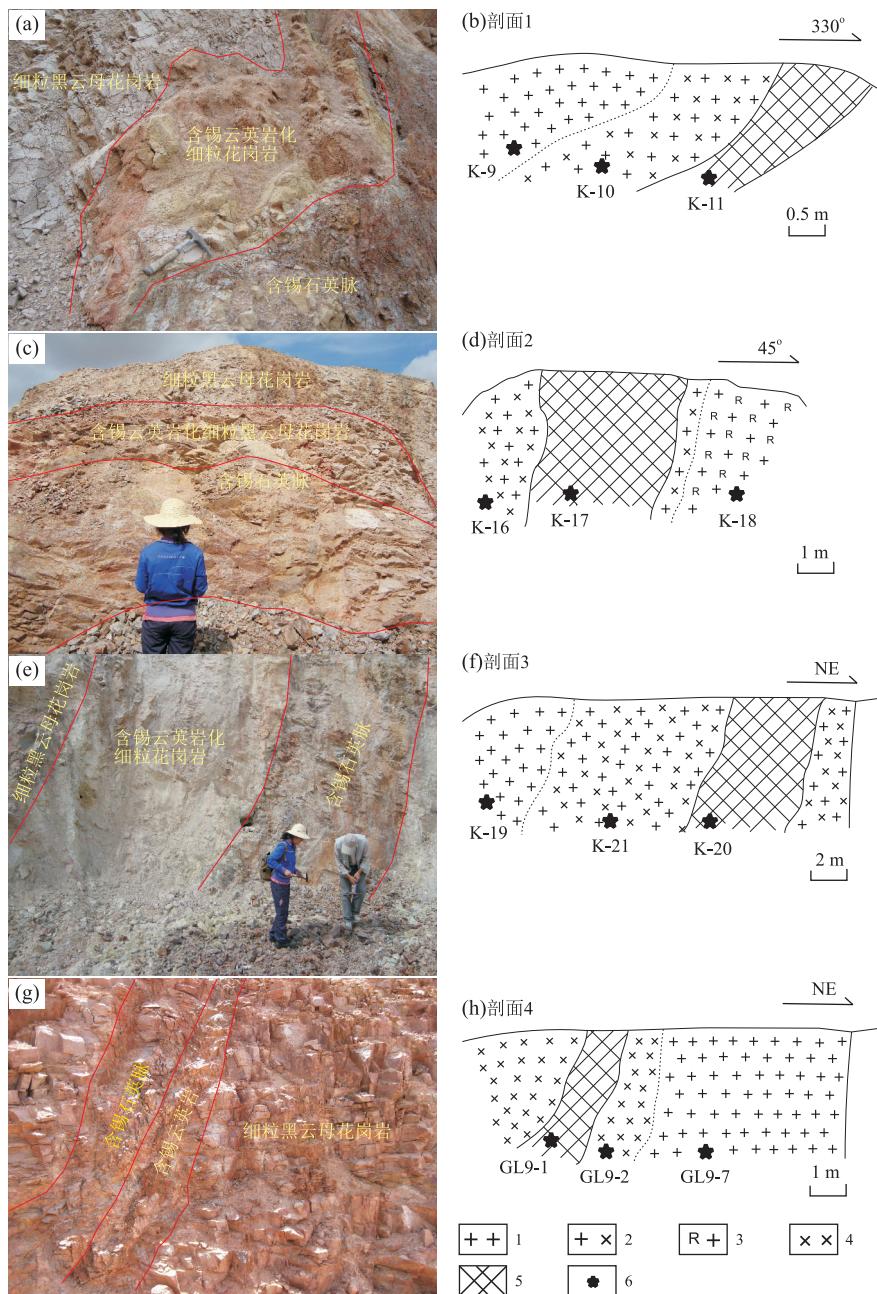


图2 新疆卡姆斯特和干梁子锡矿床蚀变分带特征照片、剖面及采样位置示意

Fig.2 The photos showing alteration zone, and sections and sample location of the Kamusite and Ganliangzi tin deposits  
a-f.卡姆斯特锡矿;g-h.干梁子锡矿;1.细粒黑云母花岗岩;2.云英岩化细粒黑云母花岗岩;3.红色细粒黑云母花岗岩;4.含锡云英岩;5.含锡石英脉;6.采样位置

细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩→含锡石英脉,云英岩化细粒花岗岩与含锡石英脉界线明显,而与细粒黑云母花岗岩无明显界线,呈现出渐变关系(图2a,2b)。

**细粒黑云母花岗岩(K-9):**岩石较新鲜,细粒状结构。矿物组成有石英、斜长石、钾长石和黑云母,石英粒度主要介于0.2~1.5 mm,含量约40%;斜长石含量约30%;钾长石粒度大小不等,最大可达

5 mm,部分有轻微粘土化,含量约15%;黑云母含量约5%(图3a)。

**云英岩化细粒花岗岩(K-10):**产于细粒黑云母花岗岩和石英脉体之间。岩石呈粒状结构,矿物组成为石英、长石、绢云母、白云母和少量锡石。石英粒度主要介于0.2~1.5 mm,具重结晶现象,含量约60%;斜长石发生了普遍的白云母和绢云母化蚀变,局部仍保留斜长石晶型;还有少量锡石分布在石英

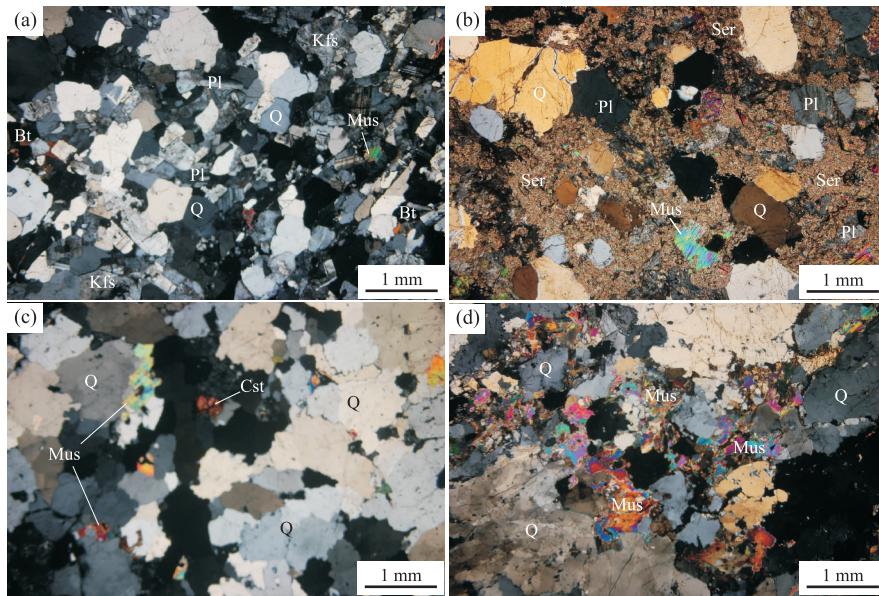


图 3 卡姆斯特—干梁子锡矿床岩石和矿石显微照片

Fig.3 Microscopic photos for rocks and ores of the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

a.细粒黑云母花岗岩;b.云英岩化细粒花岗岩;c.云英岩;d.含锡石英脉;矿物代号:Q.石英;Bt.黑云母;Pl.斜长石;Kfs.钾长石;Mus.白云母;Ser.绢云母;Cst.锡石

和云母之间,粒度小,呈他形晶体。此外,萤石和孔雀石的微小颗粒也普遍分布。岩石后期破碎强烈,发育小的破碎带及裂隙(图 3b)。

**含锡石英脉(K-11):**矿物主要为石英,相邻颗粒间具镶嵌结构,含量为 90%~95%,还有少量白云母和粘土矿物;半自形—自形锡石粒度在 0.2~0.5 mm 之间,较云英岩化细粒花岗岩内的锡石粗大,嵌布于石英颗粒之间。萤石和孔雀石以微小颗粒状普遍分布(图 3c)。

**2.2.2 剖面 2 及其岩相学特征** 如图 2c~2d 所示,剖面 2 蚀变特征同剖面 1,蚀变分带为红色细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩→含锡石英脉,云英岩化细粒花岗岩与细粒黑云母花岗岩无明显界线,而与含锡石英脉界线截然。

**红色细粒黑云母花岗岩(K-18):**岩石较新鲜,呈暗红色,矿物主要由石英、斜长石、钾长石和黑云母组成。石英粒度从 0.2~1.5 mm 不等,含量约 40%;斜长石晶体为半自形到自形,含量约 20%;钾长石粒度大小不等,最大可达 5 mm,部分有轻微粘土化,含量约 25%;黑云母含量约 5%。云英岩化细粒花岗岩(K-16)和含锡石英脉(K-17)岩相学特征分别同剖面 1 中的样品 K-10 和 K-11。

**2.2.3 剖面 3 及其岩相学特征** 此剖面蚀变及岩相学特征与剖面 1 和剖面 2 相同,蚀变分带也为细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩→含锡石英

脉(图 2e~2f),各岩石类型的岩相学特征也与剖面 1 中的相同。

**2.2.4 剖面 4 及其岩相学特征** 该剖面与上述 3 个剖面不同,蚀变分带形式为细粒黑云母花岗岩→含锡云英岩→含锡石英脉。含锡云英岩与细粒黑云母花岗岩之间无明显界线,二者过渡呈渐变状态,而含锡云英岩与含锡石英脉间界线较明显(图 2g~2h)。

含锡石英脉(GL9-1)和细粒黑云母花岗岩(GL9-7)岩相学特征同上。含锡云英岩(GL9-2):中—细粒鳞片状变晶结构,矿物组成主要为石英和白云母。石英含量约 70%,白云母含量约 30%,几乎不见绢云母。此外,还发现少量细粒锡石,主要分布于石英和云母的颗粒之间,萤石和孔雀石的微小颗粒也普遍分布(图 3d)。

### 3 蚀变分带地球化学特征

#### 3.1 测试方法及结果

在系统采集各类岩石样品的基础上,选择代表性的样品进行粉碎,并研磨至 200 目,然后进行主量元素和微量元素成分分析。分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,主量元素分析仪器型号为飞利浦 PW2404 X-射线荧光光谱仪,测试方法为 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法,其中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$  检测限

表1 卡姆斯特和干梁子矿床岩石与矿石主量(%)及微量元素( $10^{-6}$ )表Table 1 Major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) data of the wall rocks and ores from the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

| 剖面                             | 剖面1              |                   |           | 剖面2              |                   |           | 剖面3              |                   |           | 剖面4              |           |           |
|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------|------------------|-------------------|-----------|------------------|-------------------|-----------|------------------|-----------|-----------|
|                                | 样品               | K9-9              | K9-10     | K9-11            | K9-18             | K9-16     | K9-17            | K9-19             | K9-21     | K9-20            | GL9-7     | GL9-2     |
| 岩性                             | 细粒黑<br>云母花<br>岗岩 | 云英岩<br>化细粒<br>花岗岩 | 含锡石<br>英脉 | 细粒黑<br>云母花<br>岗岩 | 云英岩<br>化细粒<br>花岗岩 | 含锡石<br>英脉 | 细粒黑<br>云母花<br>岗岩 | 云英岩<br>化细粒<br>花岗岩 | 含锡石<br>英脉 | 细粒黑<br>云母花<br>岗岩 | 含锡云<br>英岩 | 含锡石<br>英脉 |
| SiO <sub>2</sub>               | 78.44            | 75.30             | 93.99     | 77.79            | 73.79             | 97.81     | 78.26            | 79.87             | 93.60     | 78.24            | 81.76     | 91.30     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.05             | 0.05              | 0.05      | 0.05             | 0.04              | 0.03      | 0.06             | 0.05              | 0.06      | 0.07             | 0.08      | 0.07      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.94            | 14.69             | 2.57      | 11.40            | 15.57             | 0.73      | 11.04            | 12.28             | 3.28      | 11.10            | 9.14      | 3.20      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.45             | 0.41              | 0.84      | 0.86             | 0.66              | 0.16      | 0.35             | 0.59              | 0.33      | 0.38             | 0.65      | 0.56      |
| FeO                            | 0.45             | 0.10              | 0.20      | 0.10             | 0.20              | 0.10      | 0.55             | 0.10              | 0.35      | 0.30             | 0.45      | 0.10      |
| MnO                            | 0.02             | 0.02              | 0.01      | 0.02             | 0.01              | 0.01      | 0.02             | 0.02              | 0.02      | 0.01             | 0.02      | 0.01      |
| MgO                            | 0.03             | 0.15              | 0.06      | 0.04             | 0.08              | 0.01      | 0.07             | 0.05              | 0.01      | 0.04             | 0.08      | 0.01      |
| CaO                            | 0.13             | 0.14              | 0.10      | 0.13             | 0.17              | 0.26      | 0.15             | 0.63              | 0.22      | 0.34             | 0.56      | 0.50      |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.76             | 0.40              | 0.17      | 3.87             | 0.18              | 0.13      | 3.65             | 0.26              | 0.08      | 3.83             | 2.38      | 0.12      |
| K <sub>2</sub> O               | 4.84             | 6.81              | 0.50      | 4.99             | 6.54              | 0.01      | 4.93             | 3.70              | 1.17      | 4.82             | 2.42      | 3.18      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01             | 0.01              | 0.01      | 0.01             | 0.01              | 0.01      | 0.01             | 0.01              | 0.01      | 0.01             | 0.01      | 0.01      |
| F*                             | 0.09             | 0.12              | 0.11      | 0.09             | 0.26              | 0.13      | 0.12             | 0.35              | 0.28      | 0.17             | 0.38      | 0.30      |
| Cl*                            | 0.01             | 0.05              | 0.01      | 0.02             | 0.00              | 0.02      | 0.03             | 0.13              | 0.01      | 0.02             | 0.02      | 0.01      |
| LOI                            | 0.8              | 1.86              | 1.42      | 0.69             | 2.69              | 0.71      | 0.82             | 2.34              | 0.78      | 0.78             | 1.35      | 1.00      |
| 总量                             | 100.4            | 100.0             | 100.1     | 100.1            | 100.1             | 99.9      | 100.6            | 99.9              | 100.2     | 100.4            | 100.3     | 100.0     |
| La                             | 8.99             | 14.7              | 17.8      | 6.37             | 18.8              | 14.8      | 14               | 15.5              | 20.1      | 33.6             | 30.7      | 18.2      |
| Ce                             | 21.5             | 24.0              | 42.5      | 17.8             | 36.8              | 31.6      | 32.5             | 41.6              | 46.4      | 78.5             | 77.2      | 52.9      |
| Pr                             | 3.11             | 3.86              | 6.78      | 2.40             | 4.44              | 4.50      | 4.31             | 5.23              | 5.95      | 10.60            | 11.60     | 7.46      |
| Nd                             | 12.50            | 14.80             | 25.90     | 9.97             | 15.70             | 16.90     | 16.10            | 19.30             | 21.90     | 43.60            | 49.10     | 31.90     |
| Sm                             | 3.84             | 4.63              | 5.58      | 3.38             | 4.44              | 5.44      | 4.96             | 4.82              | 5.86      | 10.4             | 10.9      | 10.1      |
| Eu                             | 0.03             | 0.03              | 0.03      | 0.03             | 0.02              | 0.02      | 0.02             | 0.01              | 0.02      | 0.03             | 0.02      | 0.05      |
| Gd                             | 3.81             | 5.08              | 4.40      | 3.77             | 5.06              | 5.86      | 5.59             | 4.29              | 5.32      | 10.30            | 11.10     | 10.30     |
| Tb                             | 1.04             | 1.45              | 1.10      | 1.09             | 1.58              | 1.83      | 1.58             | 1.10              | 1.51      | 2.42             | 2.65      | 2.59      |
| Dy                             | 7.82             | 11.10             | 8.05      | 8.12             | 13.00             | 14.30     | 11.70            | 8.53              | 11.20     | 16.10            | 18.10     | 17.80     |
| Ho                             | 1.78             | 2.79              | 1.83      | 1.89             | 3.45              | 3.39      | 2.57             | 2.02              | 2.61      | 3.39             | 3.78      | 3.84      |
| Er                             | 6.44             | 9.88              | 6.98      | 6.81             | 13.60             | 12.70     | 9.13             | 8.31              | 10.00     | 11.00            | 12.60     | 11.90     |
| Tm                             | 1.46             | 2.16              | 1.55      | 1.54             | 3.17              | 2.99      | 1.83             | 1.96              | 2.20      | 1.98             | 2.21      | 2.25      |
| Yb                             | 11.1             | 16.6              | 11.8      | 11.4             | 23.7              | 21.1      | 13.2             | 15.6              | 15.9      | 13.6             | 14.4      | 14.5      |
| Lu                             | 1.86             | 2.83              | 1.97      | 1.92             | 4.15              | 3.49      | 2.10             | 2.78              | 2.59      | 2.09             | 2.32      | 2.29      |
| $\delta$ Eu                    | 0.007            | 0.007             | 0.005     | 0.007            | 0.004             | 0.003     | 0.004            | 0.002             | 0.004     | 0.003            | 0.002     | 0.005     |
| Rb                             | 448.0            | 634.0             | 109.0     | 450.0            | 621.0             | 11.9      | 500.0            | 431.0             | 176.0     | 305.0            | 211.0     | 217.0     |
| Ba                             | 19.50            | 44.00             | 6.58      | 15.20            | 37.60             | 7.44      | 20.00            | 6.04              | 10.10     | 13.50            | 15.70     | 57.10     |
| Th                             | 56.4             | 46.1              | 55.5      | 44.1             | 48.2              | 44.9      | 48.3             | 53.7              | 50.7      | 30.8             | 32.6      | 37.9      |
| U                              | 4.78             | 4.88              | 7.94      | 4.78             | 6.11              | 9.91      | 5.19             | 5.95              | 6.81      | 3.87             | 9.33      | 4.75      |
| Ta                             | 3.62             | 3.48              | 2.14      | 6.52             | 5.41              | 1.64      | 4.18             | 3.23              | 2.51      | 2.37             | 1.52      | 1.86      |
| Nb                             | 16.40            | 15.40             | 10.40     | 19.40            | 20.60             | 5.97      | 16.30            | 13.40             | 9.83      | 13.40            | 11.20     | 6.20      |
| Sr                             | 9.87             | 8.66              | 11.80     | 9.83             | 77.40             | 23.40     | 9.22             | 10.40             | 5.99      | 76.30            | 155.00    | 9.01      |
| Zr                             | 206              | 178               | 214       | 186              | 197               | 190       | 164              | 204               | 184       | 174              | 179       | 226       |
| Hf                             | 12.90            | 10.60             | 12.70     | 13.00            | 13.70             | 12.40     | 9.83             | 12.50             | 11.00     | 8.97             | 10.20     | 10.60     |
| Y                              | 60.1             | 95.1              | 52.1      | 65.1             | 135.0             | 117.0     | 75.8             | 86.4              | 97.1      | 103.0            | 111.0     | 113.0     |
| Li*                            | 184.0            | 53.0              | 294.0     | 147.0            | 71.7              | 14.4      | 250.0            | 120.0             | 148.0     | 60.9             | 148.0     | 20.4      |
| Be*                            | 2.56             | 3.98              | 2.89      | 4.25             | 6.52              | 0.03      | 4.54             | 1.39              | 1.13      | 4.69             | 3.13      | 0.43      |
| Sc*                            | 2.90             | 2.52              | 2.69      | 3.20             | 4.11              | 0.29      | 2.77             | 2.95              | 2.13      | 2.01             | 2.97      | 0.66      |
| V*                             | 13.10            | 10.60             | 20.50     | 15.30            | 7.00              | 2.93      | 8.48             | 6.91              | 9.04      | 6.99             | 6.63      | 17.40     |
| Cr*                            | 9.00             | 7.79              | 8.65      | 11.10            | 10.30             | 9.08      | 4.21             | 1.66              | 8.29      | 2.71             | 11.00     | 9.10      |
| Co*                            | 0.23             | 0.15              | 0.22      | 0.17             | 0.14              | 0.09      | 0.26             | 0.18              | 0.19      | 0.25             | 0.24      | 0.20      |
| Cu*                            | 90.8             | 38.8              | 294.0     | 115.0            | 211.0             | 109.0     | 105.0            | 211.0             | 68.3      | 127.0            | 468.0     | 114.0     |
| Zn*                            | 39.6             | 9.5               | 56.8      | 75.6             | 45.0              | 15.0      | 132.0            | 13.7              | 25.6      | 48.7             | 81.3      | 17.2      |
| Ga*                            | 26.10            | 32.00             | 8.86      | 28.40            | 28.00             | 1.45      | 23.40            | 26.00             | 10.90     | 23.10            | 16.70     | 5.73      |
| Mo*                            | 0.92             | 0.90              | 0.26      | 0.24             | 0.31              | 0.32      | 0.15             | 0.11              | 0.27      | 1.12             | 0.96      | 1.34      |
| Cd*                            | 0.10             | 0.08              | 0.81      | 0.12             | 0.23              | 0.05      | 0.07             | 0.23              | 0.16      | 0.15             | 2.65      | 1.69      |
| In*                            | 0.16             | 0.21              | 1.34      | 0.13             | 0.32              | 0.02      | 0.16             | 0.28              | 0.27      | 0.21             | 3.26      | 3.10      |
| Sb*                            | 0.75             | 1.35              | 4.05      | 2.12             | 5.16              | 0.43      | 0.25             | 6.20              | 0.88      | 0.21             | 2.35      | 0.69      |
| Cs*                            | 26.70            | 9.48              | 6.98      | 20.20            | 14.00             | 1.39      | 81.70            | 13.30             | 7.63      | 17.70            | 18.80     | 6.48      |
| W*                             | 2.35             | 8.77              | 8.03      | 5.60             | 10.70             | 3.15      | 2.73             | 3.28              | 5.91      | 1.11             | 22.40     | 5.09      |
| Tl*                            | 2.45             | 3.09              | 0.41      | 2.64             | 3.31              | 0.05      | 2.69             | 1.97              | 0.95      | 1.55             | 1.06      | 1.06      |
| Pb*                            | 20.60            | 4.70              | 9.72      | 21.40            | 36.00             | 9.04      | 22.20            | 10.50             | 4.17      | 31.20            | 13.00     | 5.60      |
| Bi*                            | 2.95             | 2.58              | 7.39      | 0.80             | 5.20              | 2.30      | 1.12             | 1.79              | 0.38      | 0.82             | 39.50     | 67.30     |

注:剖面1~3数据引自王莉娟等(2012);剖面4数据及\*元素为本文分析。

表 2 卡姆斯特—干梁子锡矿蚀变带成分(%)迁移数据

Table 2 Component (%) migration of altered zone from the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

| 剖面      | 蚀变分带                           | 细粒黑云母花岗岩  | A 阶段: 细粒黑云母花岗岩 → 云英岩化 |                  |           | B 阶段: 云英岩化细粒花岗岩 / 云英岩 → 含锡石英脉 |                  |           |
|---------|--------------------------------|-----------|-----------------------|------------------|-----------|-------------------------------|------------------|-----------|
|         |                                |           | 细粒花岗岩 / 云英岩           |                  | $T_i$ (%) | $T_i/M_{ip}$ (%)              | $w_B$ (%)        | $T_i$ (%) |
| 元素 / 参数 | $w_B$ (%)                      | $w_B$ (%) | $T_i$ (%)             | $T_i/M_{ip}$ (%) | $w_B$ (%) | $T_i$ (%)                     | $T_i/M_{ip}$ (%) |           |
| 剖面 1    |                                | K-9       | K-10                  | K-9 → K-10       |           | K-11                          | K-10 → K-11      |           |
|         | SiO <sub>2</sub>               | 78.44     | 75.3                  | +1.57            | +2.00     | 93.99                         | +14.93           | +19.83    |
|         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.94     | 14.69                 | +4.67            | +42.67    | 2.57                          | -12.22           | -83.20    |
|         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.45      | 0.41                  | -0.01            | -3.19     | 0.84                          | +0.40            | +96.68    |
|         | FeO                            | 0.45      | 0.10                  | -0.34            | -76.39    | 0.20                          | +0.09            | +92.00    |
|         | MnO                            | 0.02      | 0.02                  | 0.00             | -4.93     | 0.01                          | 0.00             | -20.94    |
|         | MgO                            | 0.03      | 0.15                  | +0.13            | +449.57   | 0.06                          | -0.09            | -60.32    |
|         | CaO                            | 0.13      | 0.14                  | +0.02            | +14.42    | 0.10                          | -0.04            | -31.43    |
|         | Na <sub>2</sub> O              | 3.76      | 0.40                  | -3.34            | -88.70    | 0.17                          | -0.24            | -59.20    |
|         | K <sub>2</sub> O               | 4.84      | 6.81                  | +2.40            | +49.50    | 0.50                          | -6.33            | -92.95    |
|         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01      | 0.01                  | 0.00             | -2.60     | 0.011                         | 0.00             | -4.00     |
|         | F                              | 0.09      | 0.12                  | +0.04            | +40.11    | 0.11                          | -0.01            | -12.00    |
|         | Cl                             | 0.01      | 0.05                  | +0.05            | +1 005.00 | 0.01                          | -0.04            | -76.00    |
| 剖面 2    |                                | K-18      | K-16                  | K-18→K-16        |           | K-17                          | K-16→K-17        |           |
|         | SiO <sub>2</sub>               | 77.79     | 73.79                 | +6.06            | +7.79     | 97.81                         | +74.61           | +101.11   |
|         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.40     | 15.57                 | +6.29            | +55.20    | 0.73                          | -14.46           | -92.89    |
|         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.86      | 0.66                  | -0.11            | -12.79    | 0.16                          | -0.42            | -63.22    |
|         | FeO                            | 0.10      | 0.20                  | +0.13            | +127.27   | 0.10                          | -0.05            | -24.14    |
|         | MnO                            | 0.02      | 0.01                  | 0.00             | -21.88    | 0.01                          | 0.00             | -44.83    |
|         | MgO                            | 0.04      | 0.08                  | +0.04            | +98.86    | 0.01                          | -0.06            | -72.41    |
|         | CaO                            | 0.13      | 0.17                  | +0.06            | +48.60    | 0.26                          | +0.22            | +132.05   |
|         | Na <sub>2</sub> O              | 3.87      | 0.18                  | -3.67            | -94.71    | 0.13                          | +0.02            | +9.58     |
|         | K <sub>2</sub> O               | 4.99      | 6.54                  | +2.44            | +48.93    | 0.10                          | -6.39            | -97.77    |
|         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01      | 0.01                  | 0.00             | +26.26    | 0.01                          | 0.00             | +36.55    |
|         | F                              | 0.09      | 0.26                  | +0.20            | +224.68   | 0.13                          | -0.06            | -24.14    |
|         | Cl                             | 0.02      | 0.01                  | -0.02            | -82.06    | 0.02                          | +0.03            | +962.07   |
| 剖面 3    |                                | K-19      | K-21                  | K-19→K-21        |           | K-20                          | K-21→K-20        |           |
|         | SiO <sub>2</sub>               | 78.26     | 79.87                 | +28.80           | +36.80    | 93.6                          | -7.75            | -9.71     |
|         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.04     | 12.28                 | +5.42            | +49.10    | 3.28                          | -9.75            | -79.42    |
|         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.35      | 0.59                  | +0.44            | +125.96   | 0.33                          | -0.34            | -56.90    |
|         | FeO                            | 0.55      | 0.10                  | -0.42            | -75.63    | 0.35                          | +0.17            | +169.67   |
|         | MnO                            | 0.02      | 0.02                  | +0.01            | +49.81    | 0.02                          | 0.00             | -10.79    |
|         | MgO                            | 0.07      | 0.05                  | 0.00             | -3.19     | 0.01                          | -0.04            | -80.74    |
|         | CaO                            | 0.15      | 0.63                  | +0.69            | +462.98   | 0.22                          | -0.46            | -73.09    |
|         | Na <sub>2</sub> O              | 3.65      | 0.26                  | -3.30            | -90.45    | 0.08                          | -0.20            | -76.29    |
|         | K <sub>2</sub> O               | 4.93      | 3.70                  | +0.03            | +0.60     | 1.17                          | -2.80            | -75.64    |
|         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01      | 0.01                  | 0.00             | +0.53     | 0.01                          | 0.00             | +11.29    |
|         | F                              | 0.12      | 0.35                  | +0.35            | +290.96   | 0.28                          | -0.13            | -38.36    |
|         | Cl                             | 0.03      | 0.13                  | +0.14            | +462.11   | 0.01                          | -0.12            | -94.07    |
| 剖面 4    |                                | GL9-7     | GL9-2                 | GL9-7→GL9-2      |           | GL9-1                         | GL9-2→GL9-1      |           |
|         | SiO <sub>2</sub>               | 78.24     | 81.76                 | -33.79           | -43.87    | 91.30                         | +96.02           | +122.93   |
|         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.10     | 9.14                  | -5.83            | -47.29    | 3.20                          | +16.35           | +139.41   |
|         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.38      | 0.65                  | +0.20            | +76.11    | 0.56                          | +1.31            | +154.10   |
|         | FeO                            | 0.30      | 0.45                  | -0.15            | -26.53    | 0.10                          | -0.32            | -44.02    |
|         | MnO                            | 0.01      | 0.02                  | -0.00            | -23.35    | 0.01                          | +0.00            | +0.90     |
|         | MgO                            | 0.04      | 0.08                  | +0.10            | +120.11   | 0.01                          | -0.05            | -13.68    |
|         | CaO                            | 0.34      | 0.56                  | -0.31            | -66.67    | 0.50                          | +0.95            | +338.65   |
|         | Na <sub>2</sub> O              | 3.83      | 2.38                  | -2.76            | -75.73    | 0.12                          | +6.87            | +429.26   |
|         | K <sub>2</sub> O               | 4.82      | 2.42                  | -3.26            | -65.93    | 3.18                          | +8.04            | +264.44   |
|         | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.01      | 0.01                  | +0.00            | +18.62    | 0.01                          | +0.01            | +81.62    |
|         | F                              | 0.17      | 0.38                  | +0.20            | +117.65   | 0.30                          | -0.07            | -17.81    |
|         | Cl                             | 0.02      | 0.02                  | 0.00             | +26.01    | 0.01                          | -0.01            | -52.68    |

注: 表中原岩总质量假设为 1,+ 为带入,- 为带出。

为0.1%, MnO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 检测限为0.01%; CO<sub>2</sub> 含量用电位法完成, 检测限为0.1%; H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> 含量用重量法完成, 检测限为0.1%. FeO用容量法测定, 检测限为0.1%. 微量元素分析由ICP-MS实验室在“ELEMENT”分析仪上采用In内标溶液、ICP-MS法完成, 分析精度为3%, 检测限为0.002×10<sup>-6</sup>(La)~0.020×10<sup>-6</sup>(Ce). 在整个测量过程中, 以标样和平行样对测量进行严格的质量监控、检验及校正, 以保证数据的准确性. 分析结果见表1.

### 3.2 主量元素迁移特征

研究蚀变矿化过程中组分的得失, 有助于认识元素的地球化学性状、热液作用的性质及成矿环境(魏俊浩等, 2000; 张可清和杨勇, 2002). 本文应用张可清和杨勇(2002)的质量平衡公式, 计算获得了4个蚀变岩带剖面化学元素的变化情况(表2, 图4).

$$T_i = M_{id} - M_{ip} = w_{id} M_d - w_{ip} = \\ w_{id} w_{jp}/w_{jd} - w_{ip}, \quad (1)$$

式(1)中:  $T_i$  为元素  $i$  在岩石发生物质变化中迁入或迁出原岩的总质量或总量(g或mol);  $M_{ip}$  为元素  $i$  在原岩(改变前的岩石)中的总质量或总量(g或mol);  $M_{id}$  为元素  $i$  在子岩(改变后的岩石)中的总质量或总量(g或mol);  $w_{ip}$ ,  $w_{id}$  分别为原岩和子岩中元素  $i$  的质量分数;  $M_p$ ,  $M_d$  分别为原岩和子岩的总质量, (指定  $M_p=1$ );  $w_{jp}$ ,  $w_{jd}$  分别为原岩和子岩中不活动元素  $j$  (即  $T_j=0$ )的质量分数.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 在很多热液矿床的蚀变中均可作为惰性组分(魏俊浩等, 2000), 本文对所得的数据进行综合分析和逐个对比, 采用 TiO<sub>2</sub> 作为本次计算的不活动元素组分.

为方便后文讨论各元素组分在不同蚀变带之间的迁移规律, 本文将从细粒黑云母花岗岩到云英岩

化细粒花岗岩(含锡云英岩)定为A过程, 将从云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)到含锡石英脉定为B过程.

A过程: 主要迁入组分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、F、Cl, 其中迁入量较大的为F、Cl、MgO; 主要迁出组分为Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O, 其中迁出量较大的为Na<sub>2</sub>O; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在剖面1、2中迁出, 在剖面3、4中迁入, 且相对迁移量均较小; FeO在剖面1、3中迁出, 在剖面2、4中迁入(图4).

B过程: 主要迁入组分为SiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 主要迁出组分为Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、F、Cl, 其中迁出量较大的为Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cl; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在剖面2、3中迁出, 在剖面1、4中迁入, 且相对迁入量大于迁出量; FeO在剖面2、4中迁出, 在剖面1、3中迁入(图4).

总体来看, 在整个矿化蚀变过程中, SiO<sub>2</sub> 一直处于迁入状态, Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 一直处于迁出状态, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在不同剖面的不同过程迁移状态不同, 整体总迁入量大于迁出量; F 和 Cl 在 A 过程整体处于迁入状态, 而在 B 过程处于迁出状态, 迁入量远远大于迁出量, 是所有迁移组分中最活跃的组分, 其迁移百分比总量最高可达1081%(图4).

此外, 从表1也可以看出(红色)细粒黑云母花岗岩SiO<sub>2</sub>含量为77.79%~78.44%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O含量为8.58%~8.86%. 云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)SiO<sub>2</sub>含量为73.79%~81.76%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O含量为3.96%~7.21%. 含锡石英脉SiO<sub>2</sub>含量为91.3%~97.81%, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O含量为0.23%~3.25%. 也表现出从致矿岩体到矿体SiO<sub>2</sub>含量逐渐升高而K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O含量逐渐降低的趋势.

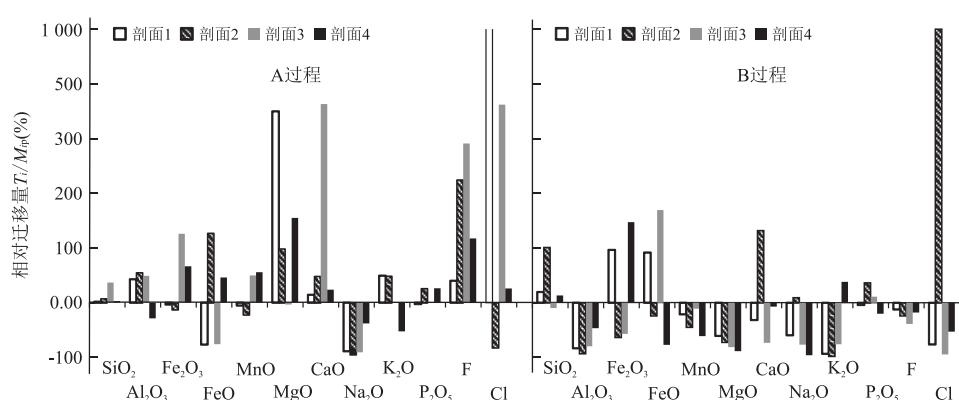


图4 卡姆斯泰—干梁子锡矿蚀变带化学组分迁移图

Fig.4 Diagram showing the mass balance for the altered zone of the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

表 3 卡姆斯特和干梁子锡矿蚀变带微量元素含量平均值( $10^{-6}$ ,  $n=4$ )

| 蚀变带            | La    | Ce    | Pr    | Nd    | Sm    | Eu   | Gd    | Tb    | Dy     | Ho     | Er     | Tm     | Yb     | Lu    | Co   |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|
| 细粒黑云母花岗岩       | 15.72 | 37.55 | 5.13  | 20.52 | 5.65  | 0.03 | 5.87  | 1.53  | 10.94  | 2.41   | 8.35   | 1.70   | 12.35  | 1.99  | 0.23 |
| 云英岩化细粒花岗岩(云英岩) | 16.53 | 33.73 | 4.90  | 18.33 | 5.02  | 0.02 | 5.10  | 1.49  | 11.61  | 2.87   | 10.79  | 2.47   | 18.30  | 3.11  | 0.15 |
| 含锡石英脉          | 21.13 | 54.68 | 7.53  | 30.58 | 7.90  | 0.03 | 7.75  | 1.96  | 13.96  | 3.07   | 10.83  | 2.16   | 15.13  | 2.50  | 0.20 |
|                | Mo    | Cd    | In    | Tl    | Sb    | Be   | Sc    | Zn    | Y      | Li     | Rb     | Cu     | Zr     | Cr    | W    |
| 细粒黑云母花岗岩       | 0.61  | 0.11  | 0.16  | 2.33  | 0.83  | 4.01 | 2.72  | 73.98 | 75.50  | 160.48 | 424.75 | 109.45 | 182.25 | 6.76  | 2.95 |
| 云英岩化细粒花岗岩(云英岩) | 0.45  | 0.29  | 0.47  | 1.72  | 2.75  | 3.35 | 2.40  | 31.58 | 99.80  | 108.28 | 343.98 | 163.20 | 194.75 | 8.96  | 7.66 |
| 含锡石英脉          | 0.67  | 1.18  | 1.73  | 1.26  | 2.53  | 1.52 | 2.18  | 34.45 | 102.38 | 109.10 | 258.75 | 215.33 | 198.50 | 7.51  | 9.17 |
|                | Ga    | Sr    | Nb    | Cs    | Ba    | Ta   | Pb    | Bi    | Th     | V      | Hf     | Rb/Sr  | Ba/Rb  | Nb/Ta |      |
| 细粒黑云母花岗岩       | 25.25 | 26.33 | 16.38 | 36.58 | 17.05 | 4.18 | 23.85 | 1.42  | 44.90  | 10.97  | 11.18  | 16.13  | 0.04   | 3.92  |      |
| 云英岩化细粒花岗岩(云英岩) | 17.58 | 30.32 | 13.09 | 7.96  | 23.91 | 3.17 | 14.87 | 4.37  | 48.68  | 10.26  | 12.35  | 11.35  | 0.07   | 4.13  |      |
| 含锡石英脉          | 14.83 | 45.85 | 10.16 | 11.55 | 22.14 | 2.28 | 8.32  | 27.24 | 43.68  | 10.00  | 11.08  | 5.64   | 0.09   | 4.46  |      |

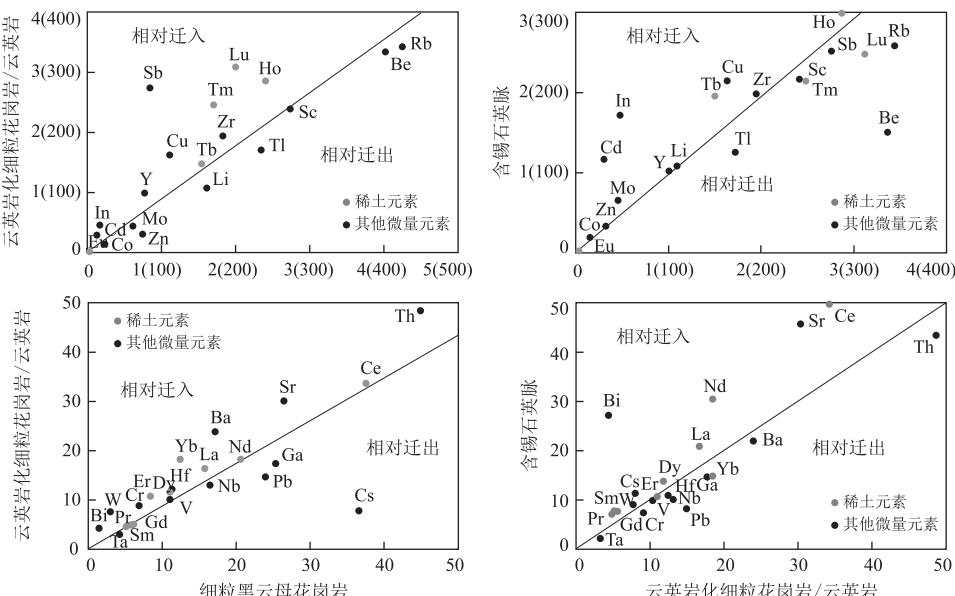
图 5 卡姆斯特—干梁子锡矿蚀变带根据  $\text{TiO}_2$  质量分数确定的微量元素等比线

Fig.5 Grant's isocon diagram of trace elements based on the mass fraction of  $\text{TiO}_2$  of the altered zone from the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

横纵坐标表示图中各元素在对应岩石中的质量分数( $10^{-6}$ ),上两图中坐标轴上括号内数值是专为表示元素 Zn、Y、Li、Rb、Cu 和 Zr 的质量分数而设,图中其他元素质量分数用括号外数值表示

### 3.3 微量元素迁移特征

为方便讨论不同蚀变带之间微量元素迁移规律,现将同一蚀变带中 4 个样品的微量元素含量平均,结果见表 3,并根据  $\text{TiO}_2$  质量分数做微量元素等比线(图 5)。

**3.3.1 稀土元素** La、Ce、Pr、Nd、Tb、Dy、Ho 在 A 和 B 过程中均迁入;Sm、Eu、Gd 在 A 过程中无明显迁移现象,而在 B 过程迁入;Er、Tm、Yb、Lu 在 A 过程中迁入,B 过程迁出。

**3.3.2 其他微量元素** 由图 5 可看出,元素 W、Cu、Bi、Sr、In、Cd、Zr、Y 在蚀变过程中从致矿岩体到矿体一直处于迁入状态;Pb、Rb、Be、Tl、Nb、Ta、Ga 一直处于迁出状态;Hf、Sb、Ba、Th、Cr 在 A 过程中迁入,B 过程迁出;Co、Mo、Cs 在 A 过程中迁出,B 过程迁入;Zn、Li 在 A 过程中迁出,B 过程无明显迁移;Sc 在 A 过程中无明显迁移,在 B 过程相对少量迁出;V 在整个蚀交代中迁移现象都不明显,相对较稳定。

## 4 讨论

### 4.1 成矿热液来源

卡姆斯特和干梁子锡矿赋矿岩石和矿石稀土配分曲线图显示,致矿岩体、蚀变带和矿体 REE 含量整体偏低,轻、重稀土分馏不明显,具有强烈的负“Eu”异常,配分曲线呈典型的“V”字型(图 6a).微量元素蛛网图显示,Rb、Th、U 等元素相对富集,Ba、Sr、Ti 相对亏损(图 6b).致矿岩体、蚀变带和矿体稀土配分曲线图和微量元素蛛网图类似的形态,表明它们的来源是相同的.王莉娟等(2012)也指出老鸦泉花岗岩体与侵入其中的小花岗岩体(赋矿的直接围岩)及云英岩型锡矿体、石英脉型锡矿体是同源岩浆结晶分异演化的结果,锡矿体是老鸦泉富碱岩浆分异演化及以钠质为主的强烈碱交代自变质作用的最终产物.因此,笔者认为卡姆斯特和干梁子锡矿的致矿岩体和矿体均为同源岩浆演化的结果,成矿热液为岩浆分异演化晚期花岗岩蚀变而析出的产物,矿体是岩浆分异演化末期形成的.

### 4.2 元素迁移及成矿条件分析

在热液矿床的成矿过程中,围岩蚀变是成矿元素沉淀和矿体形成的重要步骤.前人研究表明,在不同的温压条件下均可产生蚀变交代作用,从而引起元素的迁移(Alderton *et al.*, 1980; Fulignati *et al.*, 1999; Parsapoor *et al.*, 2009).

在卡姆斯特和干梁子锡矿的矿化蚀变过程中,从致矿岩体到矿体,即从(红色)细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)→含锡石英脉, $\text{SiO}_2$ 一直处于迁入状态,说明硅化作用贯穿于整个热液蚀变过程,且越靠近矿体其相对迁入量越

大,并最终沉淀形成了石英脉矿体. $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 一直处于迁出状态,说明碱交代自始至终一直在进行,在高温高压条件下  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  可与  $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  形成稳定的盐(如,  $\text{NaSnCl}_3$ 、 $\text{KSnCl}_3$ )(胡晓燕等, 2007), 在温压条件发生改变时,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  与  $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$  形成的盐分解,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  向外迁移, 环境由碱性向酸性变化, 导致 Sn 元素析出并沉淀成矿.Sn 元素在岩浆中主要以  $\text{Sn}^{2+}$ (II) 离子存在, 而随着水岩反应及  $\text{H}^+$  离子的消耗, 在相对较高的氧逸度环境下, 锡才以  $\text{SnO}_2$ (IV) 的形式沉淀析出(Lehmann, 1987; 陈骏等, 2000; Schmidt, 2018).  $\text{Fe}^{3+}$  的存在可以指示氧化还原环境,  $\text{Fe}^{3+}$  迁入说明氧逸度增高, 反之则降低(Brsukove *et al.*, 1987),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  在不同剖面的不同过程迁移状态不同, 整体总迁入量大于迁出量, 说明从致矿岩体到矿体氧逸度逐渐升高.Th/U 值的变化也可反映环境的氧化还原特征, 在还原条件下 Th/U 值增加而在氧化条件下 Th/U 值降低(韩吟文等, 2003), 从致矿岩体到蚀变带再到矿体其 Th/U 平均值分别为 9.57、7.46 和 6.74, 也说明其氧逸度逐渐升高.F 和 Cl 在 A 过程大量迁入而在 B 过程大量迁出, 且迁入量远远大于迁出量, 是相对迁移量最大的元素, 由于 F、Cl 离子是最易与 Sn 形成络合物的离子(Müller and Seward, 2001; 胡晓燕等, 2007; Schmidt, 2018), 巨大的迁入量使它们携带大量的 Sn 由致矿岩体向矿体迁移并富集, 成为了 Sn 最大的“搬运工”, 它们的大量迁移在 Sn 的迁移、富集和沉淀过程中起着不可替代的作用.

稀土元素迁移特征为:轻稀土元素(La、Ce、Pr、Nd)在 A 和 B 两个过程中均富集,中稀土元素除 Sm、Eu 和 Gd 在 A 过程中无明显迁移现象,其他

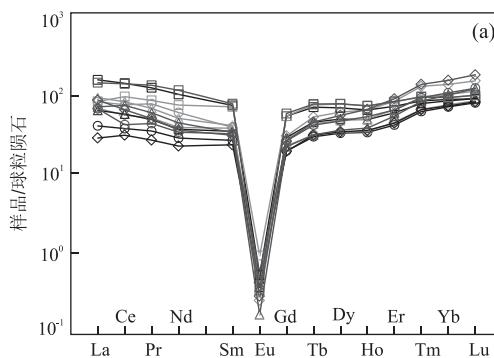
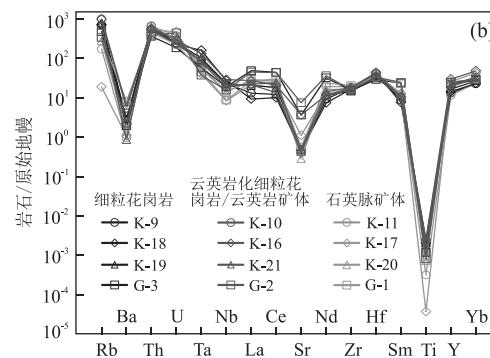


图 6 卡姆斯特和干梁子锡矿蚀变带稀土配分曲线模式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of the altered zone from Kamusite and Ganliangzi tin deposits

球粒陨石及原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough(1989)



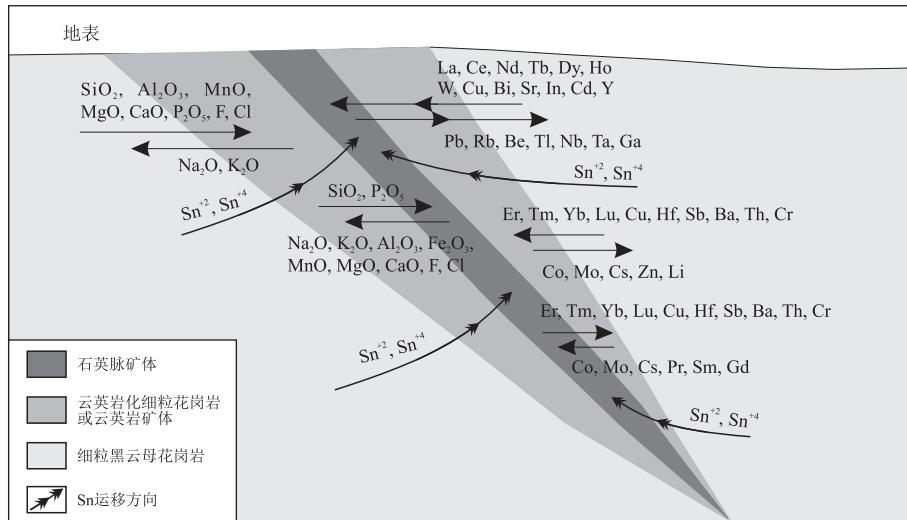


图 7 卡姆斯特—干梁子锡矿矿化蚀变分带特征、元素迁移规律及成矿机制示意

Fig.7 Schematic diagram of mineralized-altered zonation, element migration and formation mechanism of the Kamusite and Ganliangzi tin deposits

(Tb、Dy、Ho)在 A 和 B 两个过程中也均富集,而重稀土元素(Er、Tm、Yb、Lu)在 A 过程中富集,B 过程亏损(图 7)。在整个矿化蚀变过程中表现出轻稀土逐渐富集而重稀土逐渐亏损的趋势,表明从致矿岩体到蚀变带再到矿体演化分异的程度越来越高(韩吟文等,2003),矿体是岩浆分异演化到更晚期而形成的。

其他微量元素中,W、Cu、Bi、Sr、In、Cd、Zr、Y 在蚀变过程中从致矿岩体到矿体一直处于迁入状态,与 Sn 元素的富集呈正相关,Pb、Rb、Be、Tl、Nb、Ta、Ga 一直处于迁出状态,与 Sn 元素的富集呈负相关,表明以上元素与 Sn 元素的富集沉淀有密切关系(图 7)。前人研究也表明,Sn 和 W、In、Nb、Ta 在迁移富集中相互都起着重要的作用(朱笑青等,2006; Murakami and Ishihara, 2013; Moura *et al.*, 2014; Melcher *et al.*, 2015; Yuan *et al.*, 2015, 2018; Zhang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018),且 Nb<sup>5+</sup> 和 Ta<sup>5+</sup> 与 Sn<sup>6+</sup> 离子半径相似,它们之间还可以类质同像替代(Linnen *et al.*, 1995; 陈骏等,2000)。Hf、Sb、Ba、Th、Cr、Er 在细粒黑云母花岗岩到云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)带过程中迁入,从云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)带到石英脉带过程中迁出,Co、Mo、Cs 在细粒黑云母花岗岩到云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)带过程中迁出,而在云英岩化细粒花岗岩(含锡云英岩)带到石英脉带过程迁入,而 Zn、Li 在 A 过程中迁出,B 过程无明显迁移,笔者推测这些元素在矿化蚀变过程

中的某一阶段可能与 Sn 元素迁移、富集、沉淀有一定的相关性.V、Sc 在蚀变交代中无明显迁移现象,相对较稳定,在成矿过程中可能与 Sn 元素的蚀变矿化无关(图 7)。

前人研究表明,Sn 成矿与致矿岩体的侵位有着密切的关系,岩浆作用和流体成矿作用甚至可以是同时的(Yuan *et al.*, 2011, 2015; Zhang *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018)。Sn 元素的富集伴随着 W、Cu、Bi、In 等成矿元素的迁入,反映出流体作用与 Sn 成矿密切相伴;同时又伴随着 Na、K、Pb、Rb、Nb、Ta 等元素的迁出,反映出致矿岩体自身元素的稀释和带出,说明了 Sn 的富集和成矿是在岩浆向流体演化过程中完成的。

综上所述,卡姆斯特和干梁子锡矿矿化蚀变分带、蚀变过程中的元素地球化学行为特征及成矿机制总结于图 7。

## 5 结论

(1) 卡姆斯特—干梁子锡矿蚀变分带有两种模式:①卡姆斯特锡矿为:(红色)细粒黑云母花岗岩→云英岩化细粒花岗岩→含锡石英脉;②干梁子锡矿为:细粒黑云母花岗岩→含锡云英岩→含锡石英脉。

(2) 在 Sn 成矿过程中,成矿环境由碱性向酸性转换,并伴随着氧逸度的升高.W、Cu、Bi、In 等元素迁移特征与 Sn 元素的富集趋势呈正相关性,Pb、Rb、Nb、Ta 等元素与 Sn 元素的富集趋势呈负相关

性, F、Cl 在迁移过程中表现最为活跃, 是 Sn 最大的“搬运工”, 以上元素与 Sn 的迁移、富集和沉淀密切相关。而 V、Sc 则相对较稳定, 可能与 Sn 元素的成矿关系不大。

(3) 卡姆斯特—干梁子锡矿矿体和致矿岩体是同源岩浆演化的结果, 矿体是岩浆分异演化到末期向流体演化过程中形成的。

致谢: 文章在写作过程中得到了姜福之老师、邹涛博士、袁月蕾博士的悉心指导和帮助, 编辑部以及匿名审稿老师也对本文提出了宝贵意见, 在此一并致谢!

## References

- Alderton, D.H.M., Pearce, J.A., Potts, P.J., 1980. Rare Earth Element Mobility during Granite Alteration: Evidence from Southwest England. *Earth and Planetary Science Letters*, 49 (1): 149—165. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(80\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821x(80)90157-0)
- Bi, C.S., Shen, X.Y., Xu, Q.S., 1992. The First Discovery of a Tin Deposit Related to Hercynian A-Type Granites in China. *Science in China (Series B)*, 22 (6): 632—638 (in Chinese with English abstract).
- Bi, X.W., Li, H.L., Shuang, Y., et al., 2008. Geochemical Characteristics of Fluid Inclusions from Qitianling A-Type Granite, Hunan Province, China—Tracing the Source of Ore Forming Fluid of the Furong Superlarge Tin Deposit. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 539—548 (in Chinese with English abstract).
- Brsukove, V.L., Durasova, N.A., Kovalenko, N.I., 1987. Oxygen Fugacity and Tin Behavior in Metals and Fluids. *Geology*, 38(6): 723—733.
- Chen, F.W., Li, H.Q., Cai, H., et al., 1999. Chronology and Origin of the Ganliangzi Tin Orefield, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 18(1): 91—97 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Wang, R.C., Zhou, J.P., et al., 2000. The Geochemistry of Tin. Nanjing University Press, Nanjing (in Chinese).
- Chen, Y.F., 2013. The Geological Features and Wall-Rock Alteration of the Tin Deposit Related to A-Type Granite from Kalamaili, North Xinjiang (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Eby, G.N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20 (7): 641—644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<641:csotat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<641:csotat>2.3.co;2)
- Fulignati, P., Gioncada, A., Sbrana, A., 1999. Rare-Earth Element (REE) Behaviour in the Alteration Facies of the Active Magmatic-Hydrothermal System of Vulcano (Aeolian Islands, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88 (4): 325—342. [https://doi.org/10.1016/s0377-0273\(98\)00117-6](https://doi.org/10.1016/s0377-0273(98)00117-6)
- Guo, F.F., Jiang, C.Y., Lu, R.H., et al., 2010. Petrogenesis of the Huangyangshan Alkali Granites in Kalamaili Area, Northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (8): 2357—2373 (in Chinese with English abstract).
- Han, B.F., Ji, J.Q., Song, B., et al., 2006. Late Paleozoic Vertical Growth of Continental Crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of Post-Collisional Plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (5): 1077—1086 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y.W., Ma, Z.D., Zhang, H.F., et al., 2013. *Geochemistry*. Geological Publishing House, Beijing 71—80 (in Chinese).
- Hu, X.Y., Bi, X.W., Hu, R.Z., et al., 2007. Advances in Tin Distribution between Granitic Melts and Coexisting Aqueous Fluids and a Review of Tin in Fluids and Melts. *Advances in Earth Science*, 22(3): 281—289 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, M.R., Zhang, J., Liu, W.H., et al., 2015. Alteration-Mineralization and Element Migration Features of Nihe Iron Deposit in Lujiang, Anhui Province. *Earth Science*, 40 (6): 1034—1051 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.086>
- Lehmann, B., 1987. Tin Granites, Geochemical Heritage, Magmatic Differentiation. *Geologische Rundschau*, 76 (1): 177—185. <https://doi.org/10.1007/bf01820581>
- Li, H., Myint, A.Z., Yonezu, K., et al., 2018. Geochemistry and U-Pb Geochronology of the Wagone and Hermyingyi A-Type Granites, Southern Myanmar: Implications for Tectonic Setting, Magma Evolution and Sn-W Mineralization. *Ore Geology Reviews*, 95: 575—592. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.015>
- Li, H.D., Pan, J.Y., Xia, F., et al., 2016. Hydrothermal Alteration and Its Geochemical Characteristics of Lijialing Deposit in Xiangshan Uranium Ore Deposit. *Geoscience*, 30(3): 555—566 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.C., Yang, F.Q., Zhao, C.S., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Beilekuduk Pluton in Xinjiang and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2483—2492 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Hu, R., Yang, J., et al., 2007. He, Pb and S Isotopic Constraints on the Relationship between the A-Type Qitianling Granite and the Furong Tin Deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97 (1—2): 161—173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.009>
- Li, Z.L., 2006. Geochemical Relationship between Tin Miner-

- alization and A-Type Granite; A Case of the Furong Tin Orefield, Hunan Province, South China (Dissertation). Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Lin, J.F., Yu, H.X., Yu, X.Q., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geological Implication of the Sabei Alkali-Rich Granite from Eastern Junggar of Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):1876—1884 (in Chinese with English abstract).
- Linnen, R.L., Pichavant, M., Holtz, F., et al., 1995. The Effect of  $f_{O_2}$  on the Solubility, Diffusion, and Speciation of Tin in Haplogranitic Melt at 850 °C and 2 kbar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(8):1579—1588. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00064-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00064-7)
- Liu, X.J., Xu, J.F., Hou, Q.Y., et al., 2007. Geochemical Characteristics of Karamaili Ophiolite in East Junggar, Xinjiang: Products of Ridge Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7):1591—1602 (in Chinese with English abstract).
- Melcher, F., Graupner, T., Gäßler, H. E., et al., 2015. Tantalum- (Niobium-Tin) Mineralisation in African Pegmatites and Rare Metal Granites: Constraints from Ta-Nb Oxide Mineralogy, Geochemistry and U-Pb Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 64: 667 — 719. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.09.003>
- Moura, M.A., Botelho, N.F., Olivo, G.R., et al., 2014. Genesis of the Proterozoic Mangabeira Tin-Indium Mineralization, Central Brazil: Evidence from Geology, Petrology, Fluid Inclusion and Stable Isotope Data. *Ore Geology Reviews*, 60(3): 36 — 49. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.010>
- Murakami, H., Ishihara, S., 2013. Trace Elements of Indium-Bearing Sphalerite from Tin-Polymetallic Deposits in Bolivia, China and Japan: A Femto-Second LA-ICPMS Study. *Ore Geology Reviews*, 53:223—243. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.010>
- Müller, B., Seward, T.M., 2001. Spectrophotometric Determination of the Stability of Tin (II) Chloride Complexes in Aqueous Solution up to 300 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(22):4187—4199. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00690-1](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00690-1)
- Parsapoor, A., Khalili, M., Mackizadeh, M. A., 2009. The Behaviour of Trace and Rare Earth Elements (REE) during Hydrothermal Alteration in the Rangan Area (Central Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (2): 123—134. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.04.005>
- Samuel, N.W.P., Chung, S.L., Robb, L.J., et al., 2015. Petrogenesis of Malaysian Granitoids in the Southeast Asian Tin Belt: Part 1. Geochemical and Sr-Nd Isotopic Characteristics. *Geological Society of America Bulletin*, 127(9—10): 1209—1237. <https://doi.org/10.1130/b31213.1>
- Schmidt, C., 2018. Formation of Hydrothermal Tin Deposits: Raman Spectroscopic Evidence for an Important Role of Aqueous Sn (IV) Species. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 499—511. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.10.011>
- Sengör, A.M.C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364 (6435): 299 — 307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shu, L.S., Lu, H.F., Yin, D.H., et al., 2001. Late Paleozoic Continental Accretionary Tectonics in Northern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 19(1):59—63 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313 — 345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, H.F., Zhao, Z.Q., Huang, R.S., et al., 2008. Primary Hf Isotopic Study on Zircons from the A-Type Granites in Eastern Junggar of Xinjiang, Northeast China. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4):335—342 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, J.R., Wall, V.J., 1993. Cassiterite Solubility, Tin Speciation, and Transport in a Magmatic Aqueous Phase. *Economic Geology*, 88 (2): 437 — 460. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.2.437>
- Wang, F. M., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Geological Implications of Unconformity between Upper and Middle Devonian, and 346.8 Ma Post-Collision Volcanic Rocks in Karamaili, Xinjiang. *Earth Science*, 39 (9): 1243 — 1257 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.107>
- Wang, J.B., Xu, X., 2006. Post-Collisional Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1):23—31 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.J., Wang, J.B., Wang, Y. W., et al., 2011. Study on the Geology and Ore-Fluids of the Tin Deposits in Laoyaquan Alkaline Granites in Eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (5): 1483 — 1492 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.J., Wang, J. B., Wang, Y. W., et al., 2012. Rock Geochemistry of Laoyaquan Alkaline Granites and Related Tin Deposits in Eastern Junggar, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 31 (3):438—448 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J.H., Liu, C.Q., Ding, Z.J., 2000. Active Laws of Element Migration in Wall-Rock Alteration Processes for Hydrothermal Gold Deposits: As Evidenced by Dongping, Hougou and Shuijingtun Gold Deposits. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(2):

- 200—206 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Xiang, X.K., Yin, Q.Q., Feng, C.Y., et al., 2015. Elements and Fluids Migration Regularity of Granodiorite Alteration Zones in the Shimensi Tungsten Polymetallic Deposit in Northern Jiangxi and Their Constraint on Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 89(7): 1273—1287 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Zhu, Y.F., Chen, B., 2007. Petrology of the Kamste Ophiolite Mélange from East Junggar, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1603—1610 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F.Q., Mao, J.W., Yan, S.H., et al., 2008. Ore-Forming Age and Ore-Formation of the Beilekuduke Tin Deposit in East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 54(5): 626—640 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H.X., Xia, B., Liu, J.Y., et al., 2001. Crustobody Tectonic Evolution Andtectonic-Genetic Types of Granitoids in Eastern Junggar, Xinjiang, China. *Geotectonica et Metallogenesis*, 25(1): 64—73 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, S.D., Mao, J.W., Cook, N.J., et al., 2015. A Late Cretaceous Tin Metallogenic Event in Nanling W-Sn Metallogenic Province: Constraints from U-Pb, Ar-Ar Geochronology at the Jiepailing Sn-Be-F Deposit, Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 65: 283—293. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.006>
- Yuan, S.D., Peng, J.T., Hao, S., et al., 2011. In Situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb Geochronology of Cassiterite in the Giant Furong Tin Deposit, Hunan Province, South China: New Constraints on the Timing of Tin-Polymetallic Mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235—242. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.08.002>
- Yuan, Y.B., Yuan, S.D., Mao, J.W., et al., 2018. Recognition of Late Jurassic W-Sn Mineralization and Its Exploration Potential on the Western Margin of the Caledonian Guidong Granite Batholith, Nanling Range, South China: Geochronological Evidence from the Liuyuan Sn and Zhuyuanli W Deposits. *Ore Geology Reviews*, 93: 200—210. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.025>
- Zhang, K.Q., Yang, Y., 2002. Introduction of the Method for Mass Balance Calculation in Altered Rocks. *Geological Science and Technology Information*, 21(3): 104—107 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K.X., Pan, G.T., He, W.H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2): 206—233 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.016>
- Zhang, R.Q., Lu, J.J., Lehmann, B., et al., 2017. Combined Zircon and Cassiterite U-Pb Dating of the Piaotang Granite-Related Tungsten-Tin Deposit, Southern Jiangxi Tungsten District, China. *Ore Geology Reviews*, 82: 268—284. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.039>
- Zhang, Y.R., Zhu, M.Y., Tian, H.X., et al., 2006. Introduction of the Geology and Au-Sn Mineral of Eastern Junggar. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Z.Y., Du, Y.S., Pang, Z.S., et al., 2012. Element Geochemistry Zoning of Tongshan Copper Deposit in Chizhou, Anhui Province, and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3255—3270 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D.L., Yang, J.X., Hu, N.G., et al., 2000. Isotopic Geochronological Characteristics of the Laoyaquan Stanniferous Granite in Eastern Junggar Basin in Xinjiang. *Journal of Xi'an Engineering University*, 22(2): 15—17 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, R., Liu, X.F., Pan, R.G., et al., 2015. Element Behaviors during Alteration and Mineralization: A Case Study of the Xinli (Altered Rock Type) Gold Deposit, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3420—3440 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.H., Bao, Z.W., Zhang, B.Y., et al., 2001. Crust-Mantle Interaction and Its Contribution to the Shizhuyuan Superlarge Tungsten Polymetallic Mineralization. *Science China Earth Sciences*, 44(3): 266—276. <https://doi.org/10.1007/bf02882261>
- Zhao, Z.Y., Hou, L., Ding, J., et al., 2017. A Genetic Link between Late Cretaceous Granitic Magmatism and Sn Mineralization in the Southwestern South China Block: A Case Study of the Dulong Sn-Dominant Polymetallic Deposit. *Ore Geology Reviews*, 93: 268—289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.020>
- Zheng, L., Gu, X.X., Zhang, Y.M., et al., 2015. Element Mobilization, Mass-Change Quantification and Formation Mechanism of Wall Rock Alteration in the Gaosongshan Epithermal Gold Deposit, Heilongjiang Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 44(1): 87—101 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Liang, X.Q., Cai, Y.F., et al., 2017. Petrogenesis and Mineralization of Xitian Tin-Tungsten Polymetallic Deposit: Constraints from Mineral Chemistry of Biotite from Xitian A-Type Granite, Eastern Hunan Province. *Earth Science*, 42(10): 1647—1657 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.557>
- Zhu, X.Q., Zhang, Q., He, Y.L., et al., 2006. Relationships between Indium and Tin, Zinc and Lead in Ore-Forming Fluid

from the Indium-Rich and-Poor Deposits in China. *Geochimica*, 35(1): 6—12 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 毕承恩,沈湘元,徐庆生,1992.我国与海西期 A 型花岗岩有关锡矿床的新发现.中国科学(B辑),22(6): 632—638.
- 毕献武,李鸿莉,双燕,等,2008.骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征——对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示.高校地质学报,14(4): 539—548.
- 陈富文,李华芹,蔡红,等,1999.新疆干梁子锡矿田成岩成矿作用同位素年代学研究及矿床成因探讨.矿床地质,18(1): 91—97.
- 陈骏,王汝成,周建平,等,2000.锡的地球化学.南京:南京大学出版社.
- 陈言飞,2013.新疆卡拉麦里与 A 型花岗岩有关锡矿的地质特征和围岩蚀变(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 郭芳放,姜常义,卢荣辉,等,2010.新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因.岩石学报,26(8): 2357—2373.
- 韩宝福,季建清,宋彪,等,2006.新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限.岩石学报,22(5): 1077—1086.
- 韩吟文,马振东,张宏飞,等,2003.地球化学.北京:地质出版社,71—80.
- 胡晓燕,毕献武,胡瑞忠,等,2007.锡在花岗质熔体和流体中的性质及分配行为研究进展.地球科学进展,22(3): 281—289.
- 江满容,张均,刘文浩,等,2015.安徽庐江泥河铁矿床蚀变—矿化作用及元素迁移规律.地球科学,40(6): 1034—1051.
- 李海东,潘家永,夏菲,等,2016.相山李家岭轴矿床热液蚀变作用地球化学特征.现代地质,30(3): 555—566.
- 李月臣,杨富全,赵财胜,等,2007.新疆贝勒库都克岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.岩石学报,23(10): 2483—2492.
- 李兆丽,2006.锡成矿与 A 型花岗岩关系的地球化学研究——以湖南芙蓉锡矿田为例(博士学位论文).贵阳:中国科学院地球化学研究所.
- 林锦富,喻亨祥,余心起,等,2007.新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义.岩石学报,23(8): 1876—1884.
- 刘希军,许继峰,侯青叶,等,2007.新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学:洋脊俯冲的产物.岩石学报,23(7): 1591—1602.
- 舒良树,卢华夏,印栋浩,等,2001.新疆北部古生代大陆增生构造.新疆地质,19(1): 59—63.
- 唐红峰,赵志琦,黄荣生,等,2008.新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究.矿物学报,28(4):

335—342.

王富明,廖群安,樊光明,等,2014.新疆卡拉麦里上一中泥盆统间角度不整合和 346.8 Ma 后碰撞火山岩的意义.地球科学,39(9): 1243—1257.

王京彬,徐新,2006.新疆北部后碰撞构造演化与成矿.地质学报,80(1): 23—31.

王莉娟,王京彬,王玉往,等,2011.新疆东准噶尔老鸦泉富碱花岗岩型锡矿床地质及成矿流体.岩石学报,27(5): 1483—1492.

王莉娟,王京彬,王玉往,等,2012.新疆东准噶尔老鸦泉碱性岩及相关锡矿的岩石地球化学特征.矿床地质,31(3): 438—448.

魏俊浩,刘丛强,丁振举,等,2000.热液型金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪、后沟、水晶屯金矿为例.矿物学报,20(2): 200—206.

项新葵,尹青青,丰成友,等,2015.赣北石门寺钨多金属矿床花岗闪长岩蚀变带元素、流体迁移规律及其对成矿作用的制约.地质学报,89(7): 1273—1287.

徐新,朱永峰,陈博,等,2007.卡姆斯特蛇绿混杂岩的岩石学研究及其地质意义.岩石学报,23(7): 1603—1610.

杨富全,毛景文,闫升好,等,2008.新疆东准噶尔贝勒库都克锡矿床成矿时代及成矿作用.地质论评,54(5): 626—640.

喻亨祥,夏斌,刘家远,等,2001.东准噶尔壳体构造演化与花岗岩构造成因类型.大地构造与成矿学,25(1): 64—73.

张可清,杨勇,2002.蚀变岩质量平衡计算方法介绍.地质科技情报,21(3): 104—107.

张克信,潘桂棠,何卫红,等,2015.中国构造—地层大区划分新方案.地球科学,40(2): 206—233.

张以熔,朱明玉,田慧新,等,2006.东准噶尔地质及金锡矿产研究.北京:地震出版社.

张智宇,杜杨松,庞振山,等,2012.安徽池州铜山铜矿床元素地球化学分带特征及意义.岩石学报,28(10): 3255—3270.

赵东林,杨家喜,胡能高,等,2000.新疆东准噶尔老鸦泉含锡花岗岩体同位素年代学特征.西安工程学院学报,22(2): 15—17.

赵睿,刘学飞,潘瑞广,等,2015.胶东新立构造蚀变岩型金矿床元素地球化学行为.岩石学报,31(11): 3420—3440.

郑硌,顾雪祥,章永梅,等,2015.黑龙江省高松山浅成低温热液金矿床围岩蚀变元素迁移特征、定量计算与形成机制.地球化学,44(1): 87—101.

周云,梁新权,蔡永丰,等,2017.湘东锡田燕山期 A 型花岗岩黑云母矿物化学特征及其成岩成矿意义.地球科学,42(10): 1647—1657.

朱笑青,张乾,何玉良,等,2006.富铜及贫铜矿床成矿流体中铜与锡铅锌的关系研究.地球化学,35(1): 6—12.