

文章编号: 0258-7106 (2012) 02-0293-16

铌钽矿研究进展和攀西地区铌钽矿成因初探^{*}

王汾连^{1,2}, 赵太平^{1**}, 陈伟³

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3 香港大学地球科学系, 香港)

摘要 铌钽矿主要产出类型包括伟晶岩型、富Li-F花岗岩型、碱性侵入岩型、碳酸岩型及冲积砂矿型。前2种类型以钽为主,后3种则以铌占主导。铌和钽大多以铌钽独立矿物(铌铁矿、钽铁矿、细晶石、烧绿石等)呈浸染状分布于含矿岩石中,也有部分以类质同象的形式分布于云母、榍石、霓石、钛铁矿等矿物中。关于铌钽矿的富集机制,一些学者认为可由富F-Na和稀有金属(铌、钽等)的花岗质熔体经结晶分异作用形成;另一些学者则根据铌钽矿化与岩石的钠长石化、锂云母化等紧密共生的特点,认为铌钽的富集是岩浆期后流体交代早期形成的花岗岩所致。攀西(攀枝花-西昌)地区的铌钽矿床(化)基本上都是沿着断裂带分布,矿体赋存于印支期碱性岩脉(碱性正长伟晶岩)中,有少数存在于碱性花岗岩中,与区域上邻近的正长岩体及花岗岩体关系密切。其矿石矿物主要为烧绿石、褐钇铌矿等。初步推断,攀西地区的铌钽矿与二叠纪地幔柱活动有关。碱性的正长岩体及花岗岩体与广泛分布的峨眉山玄武岩、辉长岩均是地幔柱岩浆活动的产物,长英质岩体(包括正长岩体和花岗岩体)是富铌钽岩石的母岩体。碱性伟晶岩脉(如炉库和白草地区)是碱性岩浆逐步演化的产物,含矿的碱性花岗岩是花岗质岩浆分异演化的结果。此外,在该地区的铌钽矿床中,铌钽矿物几乎都富集在钠长石化发育的地段,说明后期的热液交代对铌钽的富集也起到了一定作用。因此,攀西地区铌钽的富集是岩浆结晶分异和岩浆期后热液交代共同作用的结果。

关键词 地质学; 铌钽矿; 伟晶岩型; Li-F质花岗岩; 碱性岩; 结晶分异; 热液交代; 攀西地区

中图分类号: P618.79; P618.86

文献标志码: A

Advances in study of Nb-Ta ore deposits in Panxi area and tentative discussion on genesis of these ore deposits

WANG FenLian^{1,2}, ZHAO TaiPing¹ and CHEN Wei³

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract

Niobium and tantalum ore deposits are mainly hosted in pegmatites, Li-F-rich granites, alkali intrusive rocks, carbonatites and alluvial sandstones. The first two types of ore deposits are dominated by tantalum and the other ore deposits by niobium. Niobium and tantalum are present mainly as independent minerals (such as columbite, tantalite, microlite and pyrochlore) disseminated in the host rocks and occasionally isomorphously in other minerals (such as mica, titanite, aegirine and ilmenite). Two main enrichment mechanisms for Nb-Ta ores are suggested: ① fractional crystallization from granitic melt rich in F, Na and rare metals; ② hydrothermal metasomatism of granite after magmatism. The Nb-Ta ore deposits in Panxi area (Panzhihua-Xichang) are mostly distributed along the fracture belt, and the ore bodies are hosted in alkali pegmatite veins and alkali

* 本文得到国家基础研究发展计划(973项目)(2011CB808903)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-06-03)的资助
第一作者简介 王汾连,女,1986年生,硕士研究生,矿物学岩石学矿床学专业。Email: fenlian0523@163.com

** 通讯作者 赵太平,男,1963年生,研究员,博士生导师,矿物学岩石学矿床学专业。Email: tpzhao@gig.ac.cn

收稿日期: 2011-06-16; 改回日期: 2011-08-04。许德焕编辑。

granites, closely related to adjacent syenites and granites widely spread in this area. The main ore minerals are pyrochlore and fergusonite. Studies show that the metallogenesis might have been an event related to Permian Emeishan mantle plume. The felsic rocks (syenites and granites), probably the parent rocks of the ore deposits, were products of Permian Emeishan mantle plume similar to widespread Emeishan basalts and gabbros. The alkali pegmatite veins (e.g., Luku and Baicao) were formed by fractional crystallization from alkali magma and ore-bearing alkali granites by differentiation of granitic magma. Besides, the hydrothermal metasomatism might have contributed to the concentration of niobium and tantalum, as evidenced by the fact that ore minerals are always present where albitization occurs. It is therefore considered that the formation of Nb-Ta ore deposits in Panxi area resulted from both fractional crystallization and hydrothermal metasomatism.

Key words: geology, Nb-Ta ore deposit, pegmatite, Li-F granite, alkali rock, fractional crystallization, hydrothermal metasomatism, Panxi area

Nb 和 Ta 是重要的稀有金属元素, 由于其高熔点(Ta, 2 996 °C; Nb, 2 468 °C)、高沸点(Ta, 5 427 °C; Nb, 5 127 °C), 具有耐腐蚀性、超导性、单极导电性和在高温下强度高特性, 是现代尖端电子、宇航、医疗、机械及原子能工业中不可缺少的重要金属原料。尤其是近 20 年来, 科技和经济的快速发展, 致使铌钽需求量日增, 价格持续上扬, 成为一些国家的战略储备资源。

近些年来, 有关铌钽矿床的研究取得了不少进展, 包括赋矿岩石的岩石学、地球化学特征(Lin et al., 1995; Helba et al., 1997; Zhu et al., 2001)、成因(Beus et al., 1962; Hildreth, 1979; Pollard, 1986; 1989; Cuney et al., 1992; Raimbault et al., 1995; Kempe et al., 1999) 及铌钽矿物的矿物学等(Abdalla et al., 1998; Kempe et al., 1999; Belkasmı et al., 2000; Pal et al., 2007)。尽管如此, 迄今还不清楚为什么有些矿床以钽为主(如中国江西雅山钽铌矿, Lin et al., 1995; 法国中部 Beauvoir Ta-Sn-Li 矿, Raimbault et al., 1995), 而另一些则以铌为主(如蒙古西部 Khaldzan-Buregtey 碱性花岗岩 Nb-Zr-REE 矿床, Kovalenko et al., 1995; Dill, 2010); 不同类型铌钽矿床在成因上有何不同(Abdalla et al., 1998; Belkasmı et al., 2000; 冯守忠, 2000; Zhu et al., 2001); 铌和钽来源于哪里, 通过何种机制, 在何种条件下富集成矿。这些问题的存在在一定程度上制约了有关铌钽矿床成因模式的建立, 也影响了铌钽矿床的找矿工作。

本文总结并对比了世界上不同类型铌钽矿床的基本特征, 介绍了有关铌钽矿床成因研究的最新进展。在此基础上, 介绍了中国攀西地区铌钽矿床的

一些基本特征, 并对其成因做了初步探讨。

1 世界铌钽矿的分布

世界上的铌钽矿床主要分布在加拿大、澳大利亚、巴西、刚果及尼日利亚等地。全球钽需求量的 50% 以上是由澳大利亚提供的(Selway et al., 2005), 全球储量最大的 2 个钽矿床就是澳大利亚的 Greenbushes(Partington et al., 1995) 和 Wodgina 钽矿床(Sweetapple et al., 2002; Fetherston, 2004), 占全球钽储量的 75%(Selway et al., 2005)。此外, 加拿大的 Tanco 伟晶岩钽矿床(London et al., 1986; Lichterveled et al., 2007)、埃及东部 Nuweibi 钠长花岗岩体钽矿床(Helba, 1997; Abdalla et al., 1998)、印度的 Bastar-Malkangiri 伟晶岩钽矿床(Pal et al., 2007) 以及蒙古的 Khaldzan Buregte 铌矿床(Kempe et al., 1999) 等也是大型的铌钽矿床。

中国的铌钽矿床大部分位于华南地区, 如江西、湖南、广东等地, 在攀西地区和新疆北部以及内蒙古也有零星分布(图 1)。著名的有江西宜春钽铌矿床(Lin et al., 1995; Belkasmı et al., 2000)、江西横峰葛源钽铌钨锡矿床(钽为特大型)、广西栗木黄玉-锂云母-钠长石花岗岩钽矿床(甘晓春等, 1992; Zhu et al., 2001) 等; 福建南坪西坑伟晶岩钽铌矿床(王文瑛等, 1999; 陈宝泉, 2008)、新疆可可托海伟晶岩钽矿床(朱金初等, 2000; 冷成彪等, 2007) 及内蒙古白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床(高计元等, 1999; 刘淑春等, 1999; 刘健等, 2009) 和巴尔哲碱性花岗岩稀有(Nb) 稀土元素矿床(冯守忠, 2000) 等也是中国的大型铌钽矿床。

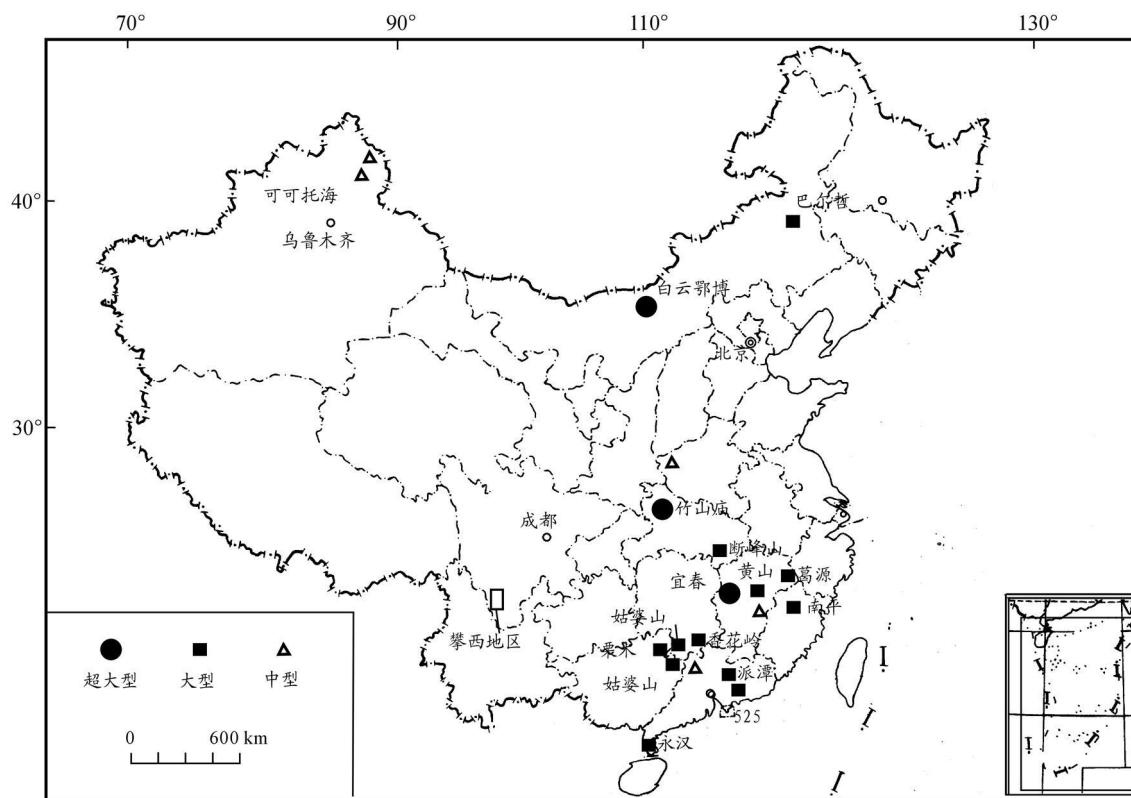


图 1 中国铌钽矿分布图

Fig. 1 Simplified map showing distribution of Nb-Ta ore deposits in China

2 铌钽矿床的分类及基本特征

2.1 铌钽矿床的分类

按铌、钽的相对量比, 可将铌钽矿床分为 3 类: 钽矿床(钽、铌氧化物比值为 3: 1~ 1: 5), 钽-铌矿床(钽、铌氧化物比值为 1: 5~ 1: 20), 铌矿床(钽、铌氧化物比值小于 1: 20)。

依据铌钽矿石所赋存的岩石类型, 可将铌钽矿床分为岩浆型和沉积型 2 种(Dill, 2010)。岩浆型又包括钙碱性和碱性的富含 Ta-Nb-Sn 的花岗岩和伟晶岩, 碱性的富铌岩体及碳酸岩 3 类。Pollard (1986) 将岩浆型分为花岗岩型、伟晶岩型、霞石正长岩型和碳酸岩型, 其中, 花岗岩型铌钽矿是重要的铌钽矿类型, 主要包括 3 类: 碱性花岗岩型、黑云母和(或)白云母花岗岩型及锂云母-钠长石花岗岩型。

本文综合前人观点, 结合铌钽赋矿岩石的结构构造特征及某些地球化学特性, 将岩浆型铌钽矿床划分为伟晶岩型、花岗岩型、碱性岩型及碳酸岩型(表 1)。沉积型铌钽矿床主要产于残余风化壳及沉

积层中, 如西非象牙海岸的 Issia 铌钽砂矿床(Allou et al., 2008)。

就产量而言, 岩浆型铌钽矿床远高于沉积型。例如, 伟晶岩型铌钽矿是国内外最重要的铌钽矿, 世界上大部分的钽产量集中在伟晶岩型铌钽矿中(Seaway et al., 2005), 而碱性岩型铌钽矿则是赋存钽的主要矿床类型(Pollard, 1989; Kovalenko et al., 1995)。在中国华南地区, 花岗岩型铌钽矿是最主要的铌钽矿类型, 而且, 钽铌等稀有金属主要富集于锂云母-钠长石花岗岩中(Zhu et al., 2001)。

2.2 各类铌钽矿床的基本特征

伟晶岩型铌钽矿床

Cerny (1991a) 把伟晶岩型铌钽矿分为 3 种: LCT (Li-Cs-Ta) 型、NYF (Nb-Y-F) 型和 LCT 与 NYF 混合型。LCT 型的主要富集元素为 Li、Cs、Nb < Ta、B、P、F; NYF 型的主要富集元素为 Nb > Ta、Y、REE、Ti、Zr、Be、Th、U、F; LCT 与 NYF 混合型伟晶岩中 Nb 和 Ta 的含量相当。NYF 型常与贫铝-准铝、贫石英的 A 型花岗岩及正长岩体有关, 而且赋矿岩石常为富碱的, 因此, 本文将将其归入碱性岩型铌钽矿类。

表 1 铌钽矿的分类
Table 1 Classification of Nb-Ta ore deposits

类型	亚类	矿床基本特征	主要矿石矿物	产出位置	矿床实例	参考文献
岩浆型铌钽矿床	伟晶岩型铌钽矿床	含矿伟晶岩常常分布在花岗岩体附近,常具有分带性,钽常常富集在钠长石和锂云母带	锰钽铁矿、锰钽铁矿、锡钽矿、细晶石等	大的铌钽矿常常倾向于发育在大区域断裂带附近	澳大利亚的 Greenbushes 和 Wodgina 钽矿床、加拿大 Tanco 伟晶岩铌钽矿床	Černý et al., 1989a; 1989b; Selway, 2005; Lichtervded et al., 2007
	花岗岩型铌钽矿	岩体成小圆锥状,常具有垂直分带特征,铌钽矿物呈浸染状分布于最上部的(锂云母)-钠长石花岗岩带中,赋矿花岗岩一般富 F 和 Li,常发育“雪球”构造	钽铁矿-钽铁矿、细晶石、金红石,富 Ta 锡石等	非造山和造山后的构造背景	埃及东部 Nuweibi 钠长石花岗岩岩体钽矿床,中国江西宜春雅山铌钽矿及广西栗木钠长石花岗岩铌钽矿	Pollard, 1989; Lin et al., 1995; Helba et al., 1997; Belkasmī et al., 2000; Zhu et al., 2001
	碳酸岩型铌钽矿床	常呈同心壳状侵入体,岩体多为碱性碳酸岩杂岩体,矿物组合有磷酸盐、蛭石、萤石、重晶石、锆石、U-Th 矿物和稀土元素矿物等	烧绿石族矿物	稳定的克拉通和板块区	刚果 Lueshe 碳酸岩-烧绿石钽矿,刚果 Bingo 碳酸岩-霓霞岩-正长岩钽矿	Dill, 2010
	碱性岩型铌钽矿床	铌钽赋存在碱性花岗岩、英碱正长岩、碱性伟晶岩等岩石内,岩石一般都强烈富碱(Na, K)含有钠闪石、霓石等碱性暗色矿物,碱性暗色矿物常发生蚀变	烧绿石族矿物	稳定的克拉通、大断裂带附近	蒙古 Khaldzan Buregte 钽矿床、中国蒙古巴尔哲碱性花岗岩稀有(钽)稀土元素矿床	Kovalenko et al., 1995; 冯守忠, 2000
沉积型铌钽矿	残积、坡积、冲积型铌钽矿及红土和铝土型矿床	多数分布在发生风化的花岗岩附近,有些就分布在原始的花岗岩或花岗伟晶岩铌钽矿附近,是岩浆侵入体经过强烈的化学风化导致含矿矿物重新积累而形成	钽铁矿、钽铁矿、锡石等		西非象牙海岸 Issia 钽钽砂矿、巴西 Tapira-Minas 铝土钽矿	Allou et al., 2008; Dill, 2010

LCT 型伟晶岩为花岗质伟晶岩,与过 Al₂O₃、富石英的 S 型花岗岩关系密切,通常,矿体与花岗岩体的距离不超过 5 km,且发育在深大断裂带附近或岩基接触带内(Cerný et al., 1989b)。

含铌钽矿的 LCT 型伟晶岩通常具有明显的空间分带特征,常表现为浅色花岗质细粒边缘带、钾长石+石英(钠长石)为主的文象伟晶岩外部带、锂辉石(或透锂长石)+石英+钠长石为主的中间带和块状石英+钾长石为主的核部带,典型例子有中国的阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉(朱金初等,2000),但不是每个伟晶岩都发育完好的带状构造。大部分伟晶岩型铌钽矿中,钽(铌)主要集中在富钠长石带,常与富锂的矿物(如锂辉石、透锂长石、锂云母、鳞锂铝石等)紧密共生(Cerný et al., 1989b; 1991b; Mulja et al., 1996; Linnen, 1998)。伟晶岩型铌钽矿床中的铌钽矿物主要是钽铁矿-钽铁矿族矿物、重钽铁矿和富钽的锡石、细晶石等,其中,钽铁矿-钽铁矿族矿物是最富铌钽的矿物。

花岗岩型铌钽矿床

依据赋矿岩石的差异,花岗岩型铌钽矿包括黑

云母和(或)白云母花岗岩型及 Li₂F 花岗岩型 2 类。其中,以 Li₂F 花岗岩型分布最为广泛,常被认为是岩浆高度演化到后期阶段的产物,在化学成分上常是过铝-准铝质(Pollard, 1989)。典型的当属黄玉-锂云母-钠长石花岗岩,见于埃及东部 Nuweibi 及中国江西雅山、广西栗木等地(Lin et al., 1995; Helba et al., 1997; Belkasmī et al., 2000; Zhu et al., 2001)。这些岩体以浅侵位的小岩株为主,出露面积很小,但通常具有明显的垂直分带(图 2),自下而上一般为: I. 二云母(黑云母)花岗岩带; II. 白云母花岗岩或浅色花岗岩带; III. 黄玉-锂云母(或铁锂云母)-钠长石花岗岩带; IV. 云英岩带; V. 钾长石伟晶岩壳和石英壳。有些矿床分带发育不全。Nb、Ta 和 Na、Al、F 等的含量也自下而上逐渐增加;其矿物含量则表现为钠长石增多,钾长石减少(钾长石伟晶岩带除外);此外,云母的成分也从黑鳞云母、白云母依次变化为锂云母。在上述分带中,黄玉-锂云母-钠长石花岗岩带是主要的含矿带,铌和钽常以单矿物(钽铁矿、钽铁矿、锡石、细晶石等)形式呈浸染状分布于其中。

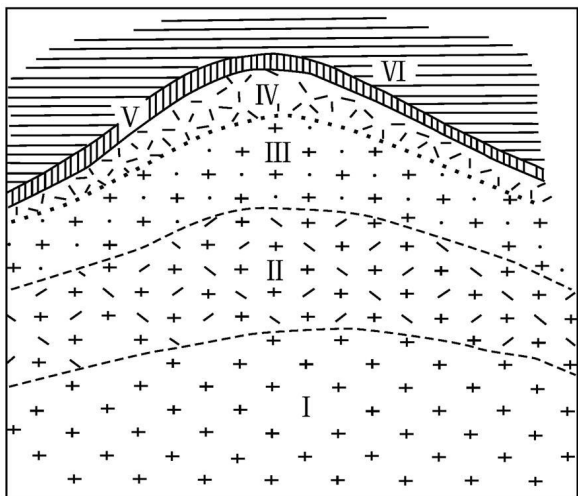


图 2 稀有金属花岗岩垂直分带图(据朱金初等, 2002)

- I. 二云母花岗岩带; II. 白云母花岗岩或浅色花岗岩带;
- III. 黄玉-锂云母-钠长石花岗岩带; IV. 云英岩带;
- V. 钾长石伟晶岩壳和石英壳; VI. 围岩

Fig. 2 Vertical zoning of rare metal granites

(after Zhu et al., 2002)

- I. Tw ϕ -mica granite zone; II. Leucocratic granite zone; III Topaz-lepilotite-albite granite zone; IV. Greisen zone; V. K-feldspar pegmatite crust and quartz crust; VI. Country rocks

在黄玉-锂云母-钠长石花岗岩带中常见到“雪球”结构。所谓“雪球”结构就是在石英和钾长石斑晶中, 板条状钠长石晶体呈环带状占据石英或钾长石斑晶矿物的生长带间, 从核部向边部扩张(图 3)。大部分学者倾向于认为, “雪球”结构是岩浆作用所致(Pollard, 1989; 李福春等, 2000a), 即在富 F、Na、Al 的花岗质岩浆结晶初期, 由于高成核密度和低生长速率而形成了大量的钠长石晶核(也可能同时形成了少量石英晶核), 随着岩浆的演化, 体系逐渐转变为适合于钠长石、石英和钾长石同时生长, 在 H₂O 含量较高的条件下, 石英的生长速率高于钠长石, 相对快速生长的石英晶体在向外生长的过程中逐渐包容了钠长石晶体, 最终形成了按斑晶晶面排列的“雪球”结构。但 Beus 等(1962)和 Kempe 等(1999)则认为, “雪球”结构中的石英是在花岗岩发生钠长石化的过程中形成的, 并且在生长过程中捕获了钠长石。

花岗岩型铌钽矿中的铌钽矿物与伟晶岩型中的基本相似, 主要为铌铁矿-钽铁矿族矿物以及锡石、细晶石等。其颗粒一般很细小(1~2 mm), 常呈浸染状分布于成矿母岩中, 但有时也呈集合体状或充填于石英、钠长石和锂云母等裂缝中, 例如, 广西栗

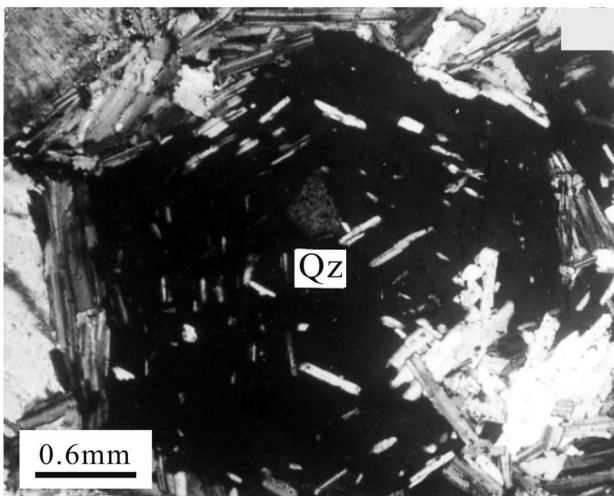


图 3 埃及 Eastern Desert 稀有金属花岗岩中的“雪球”结构(Abdalla et al., 1998)

暗色为石英斑晶, 浅色为板状钠长石; Qz—石英

Fig. 3 “Snow ball” structure in rare-metal granite, Eastern Desert, Egypt (Abdalla et al., 1998)

The dark part is phenocryst of the quartz, the light parts are lathshaped albite; Qz—Quartz

木黄玉-锂云母花岗岩中的铌钽矿物以包裹体的形式存在于石英、黄玉和云母晶体中(Zhu et al., 2001)。

碱性岩型铌钽矿床

碱性岩型铌钽矿的实例有加拿大的 Strange Lake 含 Nb 钠铁闪石花岗岩矿床、沙特阿拉伯的 Ghurayyah 含铌钠质角闪石花岗岩矿床以及蒙古的 Khaldzan Buregte 碱性花岗岩铌矿床等。碱性岩型铌钽矿床常相对富铌, 钽的含量较低(Abdalla et al., 1998)。此类矿床的成矿母岩主要为碱性花岗岩、英碱正长岩以及 NYF 型碱性伟晶岩等, 岩石为过碱质的, 包含碱性长石和碱性暗色矿物, 如碱性角闪石(钠闪石、钠铁闪石)、碱性辉石(霓石、霓辉石)、含钛黑云母及铁锂云母等。碱性岩中的碱性暗色矿物一般比长石结晶稍晚或者同时, 表现为他形、包含浅色矿物或充填于浅色矿物间隙中。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿、烧绿石、锆英石、星叶石、独居石等。矿石中主要的含铌(钽)矿物为烧绿石, 此外, 富集 Y 等 REE 的矿物如独居石、褐钇铌矿中常有较高的铌钽含量, 尤其是铌, 有的褐钇铌矿中铌氧化物含量可达 40% 左右。含矿岩石中的早期造岩矿物以及矿石矿物常被钠长石交代, 因此, 常被认为是热液交代的证据(Kempe et al., 1999)。

碳酸岩型铌矿床

碳酸岩也常富集 Nb 及 REE 等,在空间上常与基性超基性碱性岩密切共生(秦朝建等, 2001; Dill, 2010)。刚果的 Bingo 碳酸岩 霓霞岩 正长岩 铌矿岩体(Woolley et al., 1995)和 Lueshe 碱性碳酸岩杂岩体(Wall et al., 1996; Philippo et al., 1997)都是大型的铌、REE 矿床。岩体常呈同心壳状侵入体,多为碱性碳酸岩杂岩体,是一类以烧绿石为铌的主要赋存矿物的矿床,赋矿岩石主要是碳酸岩,其主要组成矿物为方解石、霓石、云母、磁铁矿等,副矿物有烧绿石、磷灰石、蛭石、萤石、重晶石、锆石、U-Th 矿物、REE 矿物。

沉积型铌钽矿床

该类矿床主要包括残积、坡积和冲积砂矿及铝土矿。巴西的 Tapira-Minas Nb(T+P) 矿床存在于残余的红土碎屑岩和铝土矿中。碱质的岩浆侵入体经过强烈的化学风化可导致许多残积矿床富集 Nb、Ta 等稀有元素。泰国和马来西亚的 Nb-Ta(Sn) 矿床就是中生代含 Sn 花岗岩经风化蚀变导致钽铁矿、铌铁矿、锡石、钛铁矿、独居石等在海岸带重新沉积成矿的(Dill, 2010)。尼日利亚和刚果也有残积及冲积砂矿,都分布在风化强烈的花岗岩附近(Sakoma et al., 2000),其矿物组合主要为钽铁矿-铌铁矿、锡石等。

2.3 铌钽铁钽族矿物的特征

由于 Nb 与 Ta 及 Fe 与 Mn 的等价替换,铌钽铁钽族矿物常显示出强烈的、局部的、复杂的化学分带

(Ercit et al., 1995; Belkasmı et al., 2000)。例如,江西宜春铌钽矿,其钽铌矿族矿物中的 $Mn/(Mn+Fe)$ 和 $Ta/(Ta+Nb)$ 比值一般从中心到边部是逐渐增加的(Belkasmı et al., 2000),因而,具有一个富 Nb、Fe 的核部及富 Ta、Mn 的不规则边部(如图 4a; Abdalla et al., 1998; Belkasmı et al., 2000);埃及东部的 Nuweibi 钽铌矿(Abdalla et al., 1998)也显示出相似特征(如图 4b)。钽铌比值的变化也表现于岩浆分带(如宜春钽铌矿),从白云母-铁锂云母花岗岩带、锂云母花岗岩带至分异最好的黄玉-锂云母花岗岩带, $Ta/(Ta+Nb)$ 比值逐渐增大(Belkasmı et al., 2000)。

3 岩浆型铌钽矿的富集机制

近几十年来,关于岩浆型铌钽矿的富集成因存在着 2 种观点,一种认为铌和钽是通过岩浆结晶分异过程逐渐富集的(Hildreth, 1979; Pollard 1989; Cuney et al., 1992; Raimbault et al., 1995; Kovalenko et al., 1995; Zhu et al., 2001),另一种则认为铌钽的富集与岩浆期后气热溶液交代早期结晶的花岗岩有关(Beus et al., 1962; Kempe et al., 1999)。

3.1 岩浆结晶分异说

富含铌钽矿的花岗质岩石、伟晶岩及碱性岩中都含有较多的黄玉等富 F 矿物。Dingwell 等(1985)

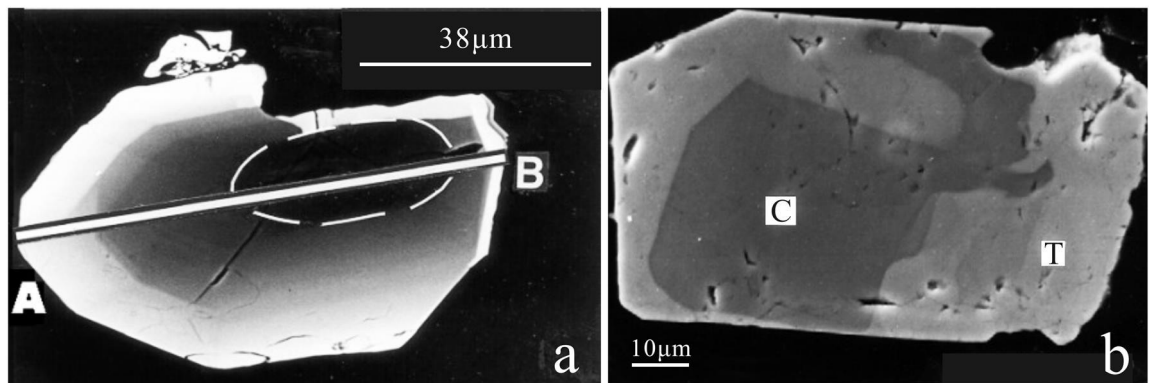


图 4 铌钽铁钽族矿物中的化学分带

- a. 江西宜春钠长石花岗岩中的钽铌矿物(Belkasmı et al., 2000),暗色为富 Nb、Fe 的核部,边部富 Ta、Mn; b. 埃及东部 Nuweibi 钠长石花岗岩中的钽铌矿物(Abdalla et al., 1998), C—铌铁矿, T—钽铁矿

Fig. 4 Chemical zoning observed in columbite-tantalite

- a. Columbite-tantalite of albite granite in Yichun, Jiangxi (Belkasmı et al., 2000). The dark core is rich in Nb and Fe, the brim is rich in Ta and Mn; b. Columbite tantalite of Nuweibi granite, Egypt (Abdalla et al., 1998); C—Columbite; T—Tantalite

的研究表明, F 可以降低熔体的黏度, 也可以增加铌和钽的溶解度; 高 F 含量也能导致熔体结构的改变, 致使岩浆的固相线降低至 490 °C, 从而间接降低了高场强元素在熔体中的活度系数及晶体/熔体分配系数, 使它们成为强不相容元素 (London et al., 1988; Webster et al., 1989; Keppler 1993; Xiong et al., 1998)。这样, 结晶分异作用就能使 Nb、Ta 等在残余熔体中逐渐富集成矿。其演化过程大致为, 富 F 和稀有金属的花岗质熔体首先结晶分异出石英、钾长石、斜长石和云母等造岩矿物, 导致残余的熔体逐渐富集不相容元素和挥发分; 当挥发分和稀有金属富集到一定程度后, 黄玉开始结晶, 导致熔体中的 F 明显降低, 诱发 Nb、Ta 独立矿物(如钽铁矿-钼铁矿等)结晶而成矿 (Cuney et al., 1985)。铌钽矿物的最终晶出温度对成矿也有重要影响, 一般取决于花岗质岩浆的最终固结温度。低的固结温度为岩浆的彻底分异提供了充分的时间, 从而导致 Nb、Ta 充分富集。而固结温度与压力有关, 通常认为花岗伟晶岩在 200~ 400 MPa 条件下形成 (Cerny, 1991b), 在该压力条件下, 钼铁矿等的固结温度可能低于 600 °C (Linnen, 1998), 如 London (1986) 提出, Tanco 矿床的矿化温度为 420~ 470 °C。

有部分矿床, 其岩石或矿石成分的空间变化特点也显示出岩浆结晶分异成矿的特点。法国的 Beauvoir 和 Montebraz 矿床, 具有结晶分异晚期的 Li-F 花岗质小岩脉切穿早期花岗质岩体的特点 (Aubert, 1969); 江西宜春钽铌矿床中, 全岩的 Nb、Ta 和 F 含量以及钽铌矿物的 Ta/(Ta+ Nb) 比值, 从底部的黑云母花岗岩到上部的钠长石锂云母花岗岩或伟晶岩脉等, 是逐渐增加的 (Lin et al., 1995), 这符合岩浆结晶分异演化的特点。这种演化特点可能与 Ta 和 Nb 在富 F 熔体中的溶解度差异有关, 一般而言, Ta 的溶解度相对高于 Nb, 并且, Ta 的络合物在低温下更趋向于稳定 (Keppler, 1993; Xiong et al., 1998), 因而, 随着岩浆演化的进行, 残余熔体的 Ta/(Ta+ Nb) 值必然逐渐升高 (Cerny et al., 1986)。

3.2 热液交代说

在一些铌钽矿床中, 常见到矿物交代和蚀变现象, 因此, 有部分学者认为, 铌钽矿的富集与热液交代作用有关 (Beus et al., 1962; Kempe et al., 1999; Salvi et al., 2006)。这种热液一般为花岗质岩浆分异晚期的热液流体, 通常富 F、Na 等元素, 交代早期结晶的矿物, 形成了具有经济价值的铌钽矿床。

在花岗岩型和伟晶岩型铌钽矿床中, 岩石蚀变通常表现为钠长石化、锂云母化等, 而且, 交代最强烈的地方通常也是铌钽矿化最好的地方 (Wang et al., 1982)。例如江西宜春花岗岩体, 从底部往上, 钠长石化及锂云母化越来越强烈, 铌钽等的含量也越高 (黄小娥等, 2005)。钠长石化蚀变主要是 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 等离子在碱性长石与热液流体之间的交换反应 (Pollard, 1989), 受到流体 K/Na 比值、温度 (Lagache et al., 1977) 及阴离子的特性 (Pichavant, 1983) 的影响。在高温含水的流体中, NaF 的溶解度有限, 因而, 任何含 F 矿物 (黄玉、萤石、云母等) 的沉淀或者受到其他流体的影响而使 F 浓度降低, 都能导致岩石发生钠长石化 (Pollard, 1989), 由于铌钽的络合物遭受破坏, 促使铌钽矿物沉淀析出。实验表明, 如果花岗质熔体含有 0.7% 的 F 和 0.3% 的 Li, 则其固相线温度会降低到 610 °C (100 MPa), 其固相矿物是钠长石+ 石英+ 锂云母, 而钾长石只有在 $w(\text{F}) < 0.7\%$ 和 $w(\text{Li}) < 0.3\%$ 的熔体中结晶, 这也就说明了为什么花岗岩和伟晶岩中的铌钽矿总是与钠长石(化)密切相关 (Glyuk et al., 1980)。在钠长石化的同时也常伴随有锂云母化, 表现为早期岩石中的黑云母和白云母被后期的锂云母所替换, 说明 Li 在岩石-流体反应中也起到了一定作用。在碱性岩型铌矿床中, 岩石蚀变则更加普遍, 与成矿有关的多为钠长石化; 富铌矿物烧绿石常富集在钠长石化蚀变强烈的碱性岩体中。

3.3 小结

尽管现在有越来越多的证据倾向于认为铌钽的富集主要是岩浆结晶分异作用的结果, 但在空间上, 交代蚀变花岗岩中的铌钽矿化均伴随有强烈的钠长石化及锂云母化等, 对此仅根据岩浆结晶分异作用显然很难解释。综合前人研究, 笔者认为, 岩浆分异结晶作用能使不相容的铌和钽及挥发分逐渐富集在残余熔体中; 当岩浆演化到晚期的热液-流体阶段, 此时造岩矿物已全部结晶, 流体强烈富含 Na、F 及 Nb 和 Ta 等元素, 沿裂隙交代早期矿物, 发生钠长石化, 导致流体成分改变, 铌钽络合物瓦解, 铌钽矿物在钠长石化之处结晶沉淀。有些铌和钽在结晶分异过程中会以类质同象形式少量进入到云母、钽铁矿等矿物中, 钠长石化蚀变作用也可能从造岩矿物中萃取铌、钽, 促使这些元素发生再迁移和再分配。

3.4 不同矿床中铌和钽富集程度不一致的可能解释

铌和钽是化学性质极为相似的2种元素,常伴生在一起。但在世界上不同的铌钽矿床中,铌和钽的富集程度不同。例如,在大部分花岗岩型和伟晶岩型铌钽矿中,钽的含量一般多于铌,而在碱性岩型和碳酸岩型矿床中,铌又占主导地位。那么,究竟是何种机制导致了铌和钽在不同矿床中发生分异?

铌氧化物(Nb_2O_5)和钽氧化物(Ta_2O_5)的溶解度及活度在组分不同的花岗质熔体中是有差异的。熔体中对铌和钽富集程度有影响的组分主要是Li、Na、Al、F、K等(von Knorring et al., 1981; London et al., 1982; Cerny et al., 1989b; Cerny, 1991b; Mulja et al., 1996; Linnen, 1998)。钽矿化常与Li、Na、Al、F关系密切,尤其是Li,矿石矿物总是富集在锂云母较多的岩石或锂云母带中,而且,较为富集钽的花岗岩和伟晶岩多为高度分异的过铝质岩体。如江西雅山的黄玉-锂云母花岗岩(Lin et al., 1995)、广西栗木的锂云母-钠长石花岗岩(Zhu et al., 2001)。相反,富集铌的碱性侵入岩常富K和F而贫Al和Li(Cerny, 1991a)。如加拿大怪湖过碱型花岗岩体(Salvi et al., 2006)。实验表明,熔体中Li和F的含量高度影响着铌钽矿物的溶解度。例如,在水饱和的花岗质熔体中,锰铌铁矿和锰钽铁矿的溶解度随着Li的富集而增加,但在高度分异的过铝花岗质熔体中,铌氧化物比钽氧化物优先达到饱和(Linnen et al., 1997)。Linnen(1998)认为,高Li和F含量促使Ta富集在熔体中,熔体中的Li和F能阻止钽铁矿比铌铁矿晚饱和结晶,一直到Li±F矿物结晶,降低了钽铁矿的溶解度,才导致富Ta矿物形成,这样形成的矿床就具有富钽的特征。另一方面,Li和F在花岗岩体内富集的过程中也促进了Na和Al的富集(Manning, 1981; Martin, 1983)。因此,如果条件允许,可导致不同矿床中铌和钽的含量比值产生差异。

花岗质熔体的成分影响着铌和钽在不同岩石中的富集程度,源区岩石中Nb和Ta含量的差别也是导致这2种性质相似的元素在不同矿床中的比值产生差异的重要原因。例如,LCT型伟晶岩与S型花岗岩(富Al)关系密切,此类花岗岩是先存的沉积岩部分熔融的产物(Shelley, 1993),由于源岩中黑云母的存在而使熔体富集Li、Cs、Ta等元素(London, 2004)。

4 攀西地区的铌钽矿床

中国的铌钽矿类型丰富,以华南地区的花岗岩型铌钽矿分布最为广泛。目前,对赋矿花岗岩体地球化学特征的研究相对较多(甘晓春等, 1992; Lin et al., 1995; 黄定堂, 1999; 朱金初等, 2000; 2002; 李福春等, 2000b)。研究表明,铌钽等是在富Li、F和Na的岩浆结晶分异过程中逐渐富集起来的(熊小林等, 1996; 李福春等, 2003)。

近年来,在攀西地区陆续发现了一些赋存于碱性伟晶岩脉和碱性花岗岩中的铌钽矿床及矿化点(秦震, 1995; 贺金良, 2004; 张成江等, 2009)。赋矿的碱性伟晶岩脉与攀西地区广泛发育的正长岩体和花岗岩体关系密切,并在时空上与峨眉山大火成岩省的玄武岩及赋存 $Fe-Ti-V$ 的镁铁质-超镁铁质岩(如辉长岩)紧密相关(Zhong et al., 2007; Xu et al., 2008),很可能代表了一次与地幔柱活动有关的铌钽成矿事件,但迄今相关的研究较少。新近,笔者对该区的铌钽矿床(主要以炉库和白草铌钽矿为例)开展了详细的野外地质调查和室内研究(包括薄片观察及少量电子探针成分测试等)。

4.1 攀西地区铌钽矿床的基本特征

攀西地区位于扬子板块西部边缘和峨眉山大火成岩省内部带。该地区内,广泛分布着与地幔柱活动有关的二叠纪峨眉山玄武岩、基性-超基性岩及正长岩和花岗岩等,其中,基性-超基性岩体中赋存有硫化物矿床和钒钛磁铁矿矿床。区内断裂发育,几乎都呈近SN向分布,主要有安宁河断裂、小金河断裂、攀枝花断裂及牦牛山断裂等。沿着断裂带两侧分布有大小不一的铌钽矿床(矿化点)30余处(贺金良, 2004),其中的近十处铌钽矿床(矿化点)分布在安宁河断裂带的两侧,空间上与攀西地区广泛发育的长英质岩体(茨达岩体和矮郎河岩体及其附近的正长岩体)关系密切(图5),这些岩体形成于260~252 Ma,被认为是与峨眉山地幔柱活动有关的产物(Zhong et al., 2007; Xu et al., 2008; Zhou et al., 2008)。

该地区的铌钽矿床(矿化点)几乎都赋存在碱性正长伟晶岩脉-碱性花岗岩中。这些岩石的形成时代集中于印支期(表2),其矿物组合主要为微斜长

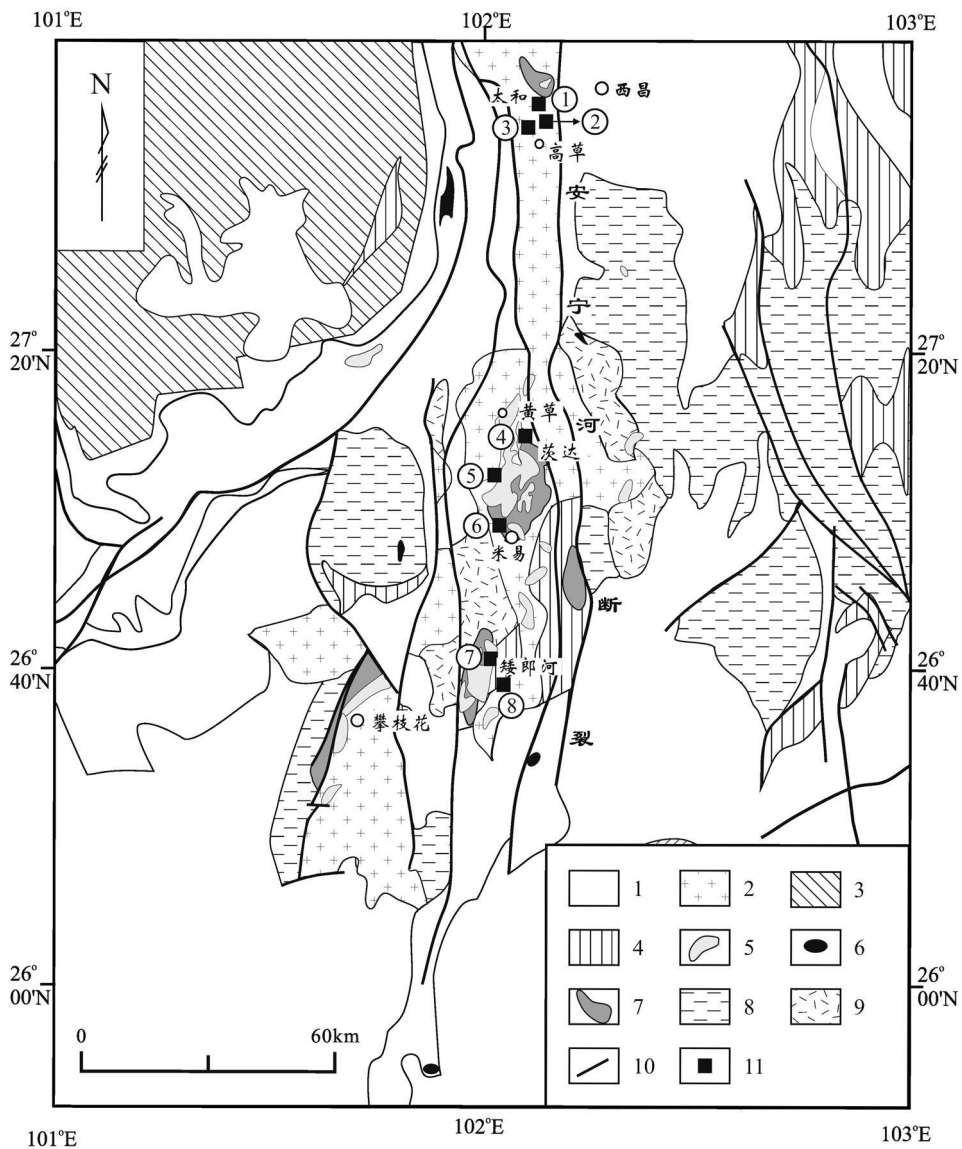


图 5 攀西地区安宁河断裂带附近碱性岩(钽)矿分布示意图(据贺金良, 2004; Pang et al., 2009)

1—第四系—侏罗系; 2—中生代花岗岩; 3—三叠系; 4—峨眉山溢流玄武岩; 5—层状氧化物矿床; 6—镁铁质-超镁铁质层状硫化物矿床; 7—正长岩; 8—古生界; 9—前寒武纪变质火成岩体; 10—断层; 11—铌钽矿床及矿化点: ①—乱石滩, ②—长村, ③—莲花山, ④—黄草, ⑤—黄土坡, ⑥—草场, ⑦—白草, ⑧—炉库

Fig. 5 Sketch map showing distribution of Nb-Ta ore deposits in alkaline rocks along Anninghe fault in Panxi area (after He, 2004; Pang et al., 2009)

1—Quaternary-Jurassic; 2—Mesozoic granite; 3—Triassic; 4—Emeishan flood basalt; 5—Layered oxide mineralized intrusion; 6—Sulfide mineralized mafie-ultramafic sill; 7—Syenite; 8—Paleozoic; 9—Precambrian igneous metamorphic complex; 10—Fault; 11—Nb-Ta ore deposits: ①—Luanshitan, ②—Changcun, ③—Lianhuashan, ④—Huangcao, ⑤—Huangtupo, ⑥—Caochang, ⑦—Baicao, ⑧—Luku

石、斜长石、钾长石(条纹长石、正长石等)、霓石及钠闪石等, 花岗岩脉含有较多的石英; 其化学成分显示出富碱的特点: $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.51% ~ 9.44%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 3.46% ~ 6.20%, $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 为 7% ~ 13%。这些赋矿岩石的另一特点是稀土元素

含量高, 其总量为 $(200 \times 10^{-6}) \sim (2457 \times 10^{-6})$ (李立主, 2001)。

4.2 炉库铌钽矿床

该矿床位于攀西地区安宁河断裂的西侧(图 5), 盐边县境内。其西侧为碱性正长岩体, 东侧为矮郎

表2 攀西地区部分铌钽矿区、矿床及矿点
Table 2 Na-Ta ore deposits and ore spots in Panxi area

矿床及矿点	含矿地层、岩性	规模	成矿时代	矿石自然类型	矿石品位 $w(B)/\%$		资料来源
					Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	
盐边县白草	碱性伟晶岩脉; 碱性正长岩外接触带及辉长岩中	小型矿床	印支期	烧绿石、砂钛铈矿、星叶石、锆石	平均 0.19	平均 0.013	①
盐边县炉库	碱性伟晶岩脉; 碱性正长岩与基性超基性岩接触带上	中型矿床	印支期	烧绿石、锆英石	0.116~0.17	0.009~0.17	②
米易黄草	碱性伟晶岩与正长岩及辉长岩接触带上	矿点	印支期		0.05~0.22	0.01~0.02	③
西昌莲花山	英碱正长岩内、外接触带上, 有4个含矿脉体	矿点	印支期		平均 0.106	平均 0.1005	④
米易草场	花岗岩脉、正长岩脉侵入辉长岩中	矿点	印支期		0.0005~0.2		③
西昌乱石滩	碱性伟晶正长岩脉	矿点	印支期		0.082~0.264	0.002~0.005	杨铸生等, 2007
西昌长村	碱性伟晶正长岩脉	矿点	印支期		0.121~0.411		杨铸生等, 2007
米易黄土坡	碱性伟晶岩	矿点	印支期	烧绿石、褐帘石	0.066~0.52	0.0025~0.1024	③

注: ① 四川省地质局西昌地质队, 1962. 会理白草铌钽矿区详细普查报告. 内部资料; ② 四川省地质局 403 地质队, 1965. 会理路枯烧绿石伟晶岩矿区详细普查报告. 内部资料; ③ 四川省地质局第一区域地质测量队, 1966. 1: 20 万米易幅调查报告. 内部资料; ④ 四川省地质局攀西地质队, 2007. 西昌市莲花山铌钽矿点地质报告. 内部资料。

河花岗岩体的一部分。碱性岩脉产于碱性正长岩体外接触带的基性超基性岩中, 距离碱性正长岩体 0.5~1 km。碱性岩脉主要有 4 类, 分别为碱性正长伟晶岩脉、碱性正长岩脉、碱性花岗伟晶岩脉和钠长岩脉。各类岩脉在水平方向上具有高度的同向性, 在垂直方向上则呈平行排列或窄束的放射状排列, 产出严格受裂隙的控制。据统计, 80% 的岩脉向西倾, 倾角较陡。在数量上, 碱性正长伟晶岩脉最多, 其次为碱性正长岩脉, 再次为钠长岩脉, 而碱性花岗伟晶岩脉最少, 仅发现 2 条。碱性正长岩脉离正长岩体最近, 其次是碱性正长伟晶岩脉, 最远的是钠长岩脉。在规模上, 碱性正长岩脉厚而长(长 50~400 m, 厚 1~20 m); 钠长岩脉细而长(长 50~500 m, 厚 0.5~3 m); 碱性正长伟晶岩脉较厚但延伸不远(长 50~300 m, 厚 0.5~32 m), 碱性花岗伟晶岩脉规模最小(长仅 $n \times 10$ m, 厚 1~3 m)。就含矿性而言, 钠长岩脉最好, 碱性花岗伟晶岩脉和碱性正长伟晶岩脉次之, 碱性正长岩脉则无工业矿体。鉴于碱性正长伟晶岩脉数量众多, 应该是炉库矿床最重要的含矿岩脉。

各类岩(矿)脉的主要矿物大体相同, 主要造岩矿物为钾长石(条纹长石和微斜长石)、钠长石, 暗色

矿物主要为霓石和钠铁闪石, 碱性花岗伟晶岩含有较多的石英。但是, 各种矿物在不同类型岩(矿)脉中的含量却有很大差异, 从碱性正长岩到碱性正长伟晶岩至钠长岩, 钾长石的含量减少, 钠长石含量增多, 霓石和钠铁闪石等暗色矿物的含量不稳定。副矿物主要为磁铁矿、榍石、锆石、星叶石等, 偶见电气石、磷灰石等。含矿的霓石碱性正长伟晶岩常富钠 [$w(Na_2O)$ 为 7%~10%, $w(K_2O)$ 为 1%~4%]^①。

主要的含铌工业矿物为烧绿石、褐钨铌矿等, 呈浸染状分布于含矿岩石中。烧绿石晶形较为规则, 多为八面体, 少数呈半自形粒状, 粒径一般为 0.05~0.3 mm, 最大可达 3 mm。烧绿石常与暗色矿物霓石密切共生, 常产于霓石、钠长石化微斜长石与钠铁闪石粒间, 有时包裹于闪石化的霓石中。此外, 电子探针成分测试结果(未刊资料)表明, 榍石、钛铁矿等副矿物以及造岩矿物钠铁闪石、钠长石、条纹长石、霓石中也含有大量的铌。

各类岩(矿)脉中广泛发育交代作用, 与成矿关系密切的主要是钠长石化和霓石化, 主要表现为烧绿石总是产出于强烈钠长石化或霓石等暗色矿物富集的部位(图 6A、B、C), 并且, 烧绿石常呈线状排列。钠长石化表现为微斜长石、条纹长石被钠长石选择

① 四川省地质局 403 地质队, 1965. 会理路枯烧绿石伟晶岩矿区详细普查报告. 内部资料。

注: 原地名为路枯, 归属四川省会理县, 现改名为炉库, 归属四川省盐边县。

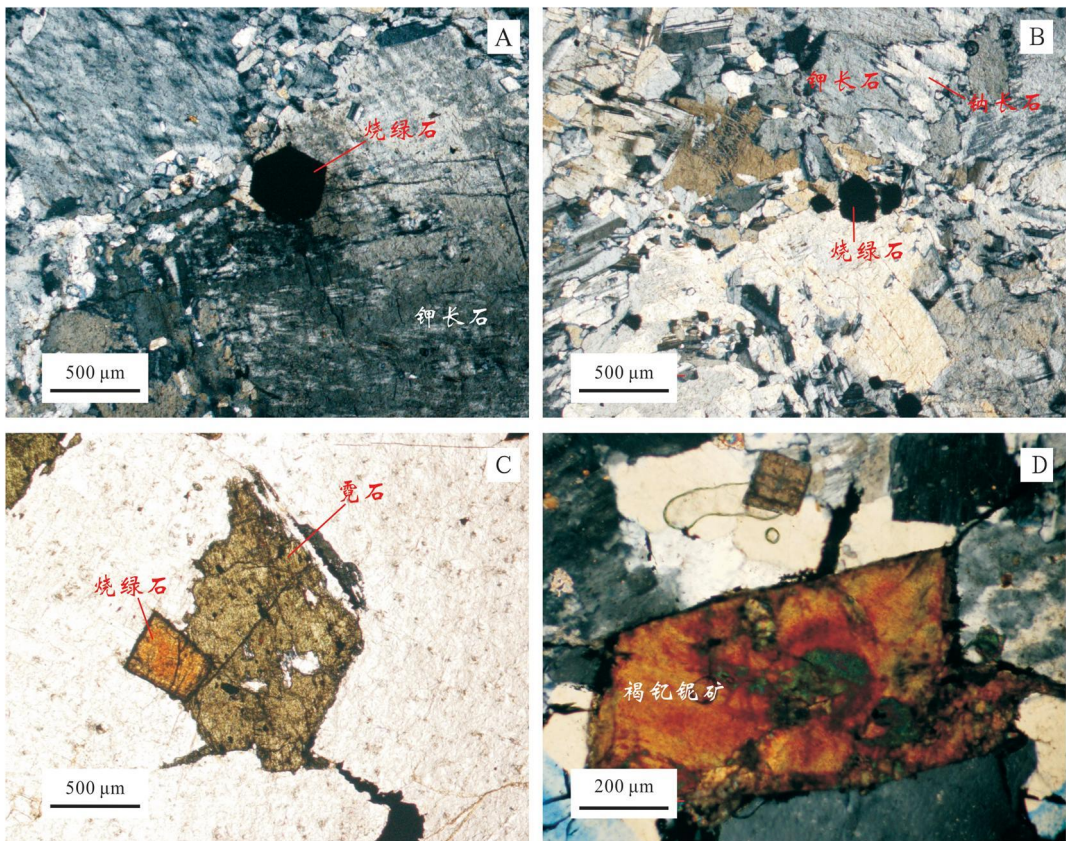


图 6 攀西地区钨钽矿内的含钨钽矿物

A、B. 自形的烧绿石分布于钾长石颗粒之间和钠长石化部位(炉库碱性伟晶正长岩脉); C. 自形烧绿石与霓石共生(炉库碱性伟晶正长岩脉); D. 自形的褐钨钽矿(白草碱性伟晶正长岩脉)

Fig. 6 Nb-Ta-bearing minerals from Nb-Ta ore deposits in Panxi area

A, B. Euhedral pyrochlores distributed in the gap of K-feldspars and localization of albitization (alkalic pegmatitic syenite veins in Luku); C. Euhedral pyrochlore associated with aegirine (alkalic pegmatitic syenite veins in Luku); D. Euhedral fergusonite (alkalic pegmatitic syenite veins in Baicao)

性交代,多沿长石四周进行,钠长石呈他形粒状。较为强烈的钠长石化表现为钠长石较大范围交代早期矿物,不只是钾长石。从碱性正长伟晶岩—碱性花岗伟晶岩—钠长岩脉,蚀变越来越强烈,含矿性也越来越好,实际上,含矿最高的钠长岩是碱性正长伟晶岩强烈钠长石化的结果。

4.3 白草钨钽矿床

该矿床位于安宁河断裂带的西侧(图 5)。含矿脉体主要产在碱性正长岩墙外接触带的基性—超基性岩体中,一般长($n \times 10$)~300 m,最长达 775 m,厚 1~5 m,倾角一般很陡(一般为 60~70°)。脉体形态变化较大,有透镜状、树枝状等;主要为碱性岩脉,包括角闪正长岩脉、霓石细晶正长岩脉、霓石伟晶正长岩脉和花岗伟晶岩脉,从细晶正长岩到伟晶正长岩再到花岗岩,钨钽矿物逐渐增加。

细晶正长岩脉数量最多,占脉体总数的一半以上,分布于碱性正长岩墙的内、外接触带,特别是在外接触带 1~1.5 km 外仍有出露,分布广泛,有时被后期花岗伟晶岩脉所穿插。主要造岩矿物为微斜长石、霓石及钠闪石;副矿物有楣石、磷灰石、钛铁矿、锆石等;主要的稀有金属矿物为烧绿石、星叶石、褐钨钽矿(图 6D)等,而且,烧绿石常与霓石共生、富集。岩石的钠长石化交代作用普遍存在。

伟晶正长岩脉的主要造岩矿物与细晶岩脉的相同,只是石英含量稍有增加,矿物粒度变大,其主要的含钨矿物同样为烧绿石和星叶石等。

花岗伟晶岩脉在该矿区出露不多,厚度多为 1~2 m,延伸也不远,一般小于 200 m,石英含量比正长岩脉的多,占 20%~30% 或更多,具花岗结构、花岗伟晶结构,矿物成分较为复杂,稀有元素含量也高。

在化学成分上,含矿的正长岩和花岗岩都强烈富钠,其含量远高于钾:细晶正长岩 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均为7.7%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为3.6%;钠长石化强烈的伟晶正长岩 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为8.57%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为0.2%;花岗伟晶岩 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为4.3%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为2.5%^①。

岩脉常发生钠长石化、绿帘石化、铁锰质浸染、棕云母化等蚀变,其中,钠长石化与铌钽矿的形成有密切关系。钠长石化在各类岩脉中普遍发育。钠长石常呈白色、淡黄白色,不规则半自形、他形糖粒状,少数呈叶片状集合体,交代早期结晶的矿物,如钾长石、霓石、钠闪石等,其中,钠长石对钾长石的交代最为明显,表现为钾长石的边部及部分中间部位有糖粒状钠长石分布,使钾长石表现为交代残余结构。钠长石化的程度不一样,从轻微的到较强烈的,钠长石越来越多,在其富集部位烧绿石含量增多,说明钠长石化对稀有元素的富集起了很大的作用。

5 攀西地区铌钽矿床成因初探

5.1 成矿时代和成矿物质来源

攀西地区富含铌钽的碱性岩脉侵入于二叠纪辉长岩体,在时间上应晚于后者,但是,目前还没有确切的成矿时代资料。区域调查资料表明,含矿的脉体(花岗岩)几乎都形成于印支期(贺金良,2004),稍晚于峨眉山玄武岩、辉长岩及长英质岩体(长英质岩体中茨达岩体为261 Ma, Zhong et al., 2007; Xu et al., 2008; 矮郎河岩体为251 Ma, Zhong et al., 2007),同属地幔柱活动的产物(Shellnutt et al., 2007; Zhong et al., 2007)。

碱性岩(矿)脉在空间上与该区广泛发育的正长岩体及花岗岩类关系密切,主要分布在正长岩体的外围(上盘方向)1~1.5 km范围内。含矿碱性正长岩脉的矿物组合特征与该地区的正长岩体类似,其主要矿物组合为钾长石、钠长石、霓石、钠闪石及少量斜长石、石英等。从正长岩体到碱性岩脉再到含矿的霓石伟晶正长岩脉,钠长石含量逐渐增加,烧绿石等矿石矿物也逐渐富集,表明岩体与岩脉之间有一定的演化关系,而正长岩体及碱性岩脉中楣石、钛铁矿等副矿物含有较高量的 Nb_2O_5 (最高近5%),说明原始岩浆富铌等成矿元素。含矿花岗岩脉与花岗

岩体也有密切联系。因此初步认为,该地区铌钽矿脉的成矿母岩是该地区内的长英质岩体,尤其是正长岩体,而为数很少的花岗岩脉可能是由花岗岩体演化而来。

5.2 成矿机制

碱性伟晶岩脉是碱性岩浆逐步演化的产物。碱性岩浆侵入形成岩墙后,残余岩浆沿岩墙上升,在上盘围岩(辉长岩体)及岩墙上部裂隙中形成了规模较大且数量较多的正长岩脉。由于生成时间较早,温度较高,遇围岩冷却迅速,挥发分也有限,矿物没有充分时间结晶,以细晶结构产出。随后,残余岩浆中挥发分和稀有金属的含量增多,温度和冷却速度都降低,在封闭较好的围岩(如辉绿辉长岩)中,矿物充分结晶形成了颗粒粗大的正长岩脉。

钠长石化可能对铌钽的富集起到重要作用。这主要表现为烧绿石等稀有金属矿物总是富集在脉体的钠长石化带部位。碱性岩浆演化到晚期的岩浆热液阶段,稀有金属得到最大程度的富集,碱元素(主要是Na)和挥发分的含量也很高,这时,铌钽等主要与Na、F等元素组成络合物,流体沿着裂隙及早期造岩矿物的间隙进行钠质交代,络合物结构遭到破坏,铌钽等元素在钠长石化部位结晶成晶形完好的铌钽矿物。那么,烧绿石为何又总是与霓石共生?根据炉库碱性正长伟晶岩中霓石呈线状定向排列的现象可以推测,霓石应该结晶较早,后来被含矿热液带到围岩裂隙中,随着伟晶岩钠长石化及铌钽矿物的结晶沉淀,霓石最终停留在钠长石化部位,流体的流动作用使其排布具有一定的方向性。攀西地区的碱性岩脉型铌钽矿应为与碱性正长岩有关的局部钠长石化的气成-热液碱性岩脉矿床。

6 存在问题及研究展望

经过几十年的研究,人们对铌钽矿床的分类、赋存的岩石类型及地球化学特征有了较为一致的认识。但是,目前对铌钽矿的赋存状态还不清楚,对铌钽为何分异和铌钽的来源与成矿条件等问题还研究甚少。因此,关于铌钽矿的成因,还有许多问题有待深入探讨和解决。

(1) 在绝大多数铌钽矿床中,铌和钽以独立的铌

① 四川省地质局西昌地质队,1962. 会理白草铌钽矿区详细普查报告. 内部资料.

钽矿物(如铌铁矿-钽铁矿、细晶石、烧绿石等)存在,也较多存在于金红石、锡石等矿物中,有少量呈类质同象分散于造岩矿物中(此部分无工业价值)。如攀西地区莲花山铌钽矿中,铌不以独立矿物存在,主要赋存于钛铁矿中,与钛呈类质同象(笔者未刊资料)。为什么在不同矿床中铌钽的赋存方式不同,依然是值得深入研究的问题。弄清铌钽的赋存状态对探讨铌钽在岩浆和(或)流体中的地球化学行为以及最后如何富集成矿有着重要意义。

(2) 铌和钽的地球化学性质相似,但一般不会同时形成大型的铌矿和钽矿,对铌和钽分异的原因、机理还不甚清楚。虽然一些实验岩石学给出了一些证据,如熔体中 Li、F、Na、K 等元素含量的制约,但有关钽和铌的分异是否还与其他岩浆条件有关,是否在岩浆演化过程中已经发生过富钽或富铌矿物的早期分异(岩浆演化越彻底,钽越富集)、在岩浆分异过程中钽铌的含量比值是否直接反映了源区的特点等问题,仍需进行深入研究。

(3) 单独的岩浆结晶分异作用和热液交代作用的观点都不能全面地解释铌钽的富集成矿。关键问题在于,在铌钽矿物的最终形成过程中,交代作用(尤其是钠长石化)究竟有无贡献。或许,对于富铌和富钽的不同类型矿床,其成矿的机制并不一样。钽的矿化可能更多地是岩浆作用的结果,流体交代的作用似乎不大(Linnen et al., 2005),这是由铌钽的化学性质决定的。铌在熔体中的不相容性弱于钽,在岩浆演化成岩过程中,铌比钽更容易以类质同象进入早期脉石矿物(尤其是富钛的矿物)中。至于花岗岩体顶部富含钽,钠长石化广泛发育,可能是由于岩浆演化后期,流体由于构造地质条件的限制而交代先形成的围岩所致。热液作用在 Nb、Zr 和 REE 矿床的形成过程中起着很重要的作用(Salvi et al., 2005)。但是,关于热液的组分、来源、性质以及在交代过程中铌钽的行为特征等问题,尚需进行更多的研究。

一个值得注意的现象是,富铌的碱性岩型矿床一般也富稀土元素,岩石常富集萤石等含 F 矿物,并且,铌通常存在于稀土元素矿物(如铌钽矿、褐钨铌矿等)中。Gagnon 等(2004)通过研究美国科罗拉多州的 NYF 型伟晶岩 Nb-Y-REE 矿中萤石的流体包裹体表明,萤石是从含 Ca 与富 F 的混合流体中沉淀出来的,含 Ca 的流体是由伟晶岩的钠长石化形成的,富 F 的流体则来源于伟晶岩的岩浆演化,萤石形

成以后,流体中 F 含量降低,铌钽和稀土元素的络合物遭到破坏,从而沉淀形成了 REE 矿物。这或许说明钠长石化在铌钽富集过程中所起的作用不仅仅在于从早期的造岩矿物中萃取分散状的铌钽,还在于通过钠长石化交代作用,使承载铌钽的络合物溶解,从而促使铌钽矿物结晶析出。

(4) 目前对铌钽矿的研究大多侧重于成矿母岩的岩石地球化学和铌钽矿物学,而关于富含铌钽矿的岩石的母岩浆成分及源区等问题,依然是研究的薄弱环节(Kovalenko et al., 2007)。铌和钽倾向于富集在岩石圈,特别是地壳中,赋存铌钽的高演化花岗岩及碱性岩是否是地壳熔融的产物?不同类型的铌钽矿的源区有何不同?什么样的条件下岩石部分熔融然后经过结晶分异才能形成富含铌钽的矿石?这些问题需要深入研究。攀西地区的碱性正长岩体是否是铌钽矿脉的母岩?与花岗岩体的关系又如何?这些问题的解决,有待于对攀西地区铌钽矿的年代学、岩相学、同位素学及地球化学特征等进行详细的研究。

参考文献/References

- 陈宝泉. 2008. 福建南平西坑铌钽矿区玉帝庵矿段含矿伟晶岩特征[J]. 福建地质, 27(3): 281-288.
- 冯守忠. 2000. 内蒙古巴儿哲碱性花岗岩稀有稀土矿床地质特征及成因探讨[J]. 火山地质与矿产, 21(2): 137-142.
- 高计元, 王一先, 袁愉卓, 张乾. 1999. 白云鄂博矿床含矿白云岩的成因探讨[J]. 沉积学报, 17: 576-680.
- 甘晓春, 朱金初, 沈渭洲. 1992. 广西栗木水溪庙稀有金属花岗岩成因[J]. 地质找矿论丛, 7(2): 35-45.
- 贺金良. 2004. 四川攀西地区铌钽矿床成矿地质条件及找矿前景[J]. 四川地质学报, 24(4): 206-211.
- 黄定堂. 1999. 江西横峰松树岗钨锡铌钽多金属矿床成因探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, 8(4): 131-136.
- 黄小娥, 徐志华. 2005. 江西雅山花岗岩体交代作用及其与稀有金属的成矿关系[J]. 江西有色金属, 19(4): 1-4.
- 冷成彪, 王守旭, 苟体忠, 陆丽娜, 刘红杰. 2007. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉研究[J]. 华南地质与矿产, 14-20.
- 李福春, 朱金初, 金章东, 李晓峰. 2000a. 钠长石花岗岩中雪球结构形成机理的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 19(1): 27-36.
- 李福春, 朱金初, 金章东. 2000b. 华南富铌钽含稀有金属花岗岩的成因分析[J]. 矿床地质, 19(4): 376-385.
- 李福春, 朱金初, 张松林, 饶冰, 张佩华. 2003. 富氟花岗岩熔体形成和演化的实验研究[J]. 岩石学报, 19: 125-130.
- 李立主. 2001. 论攀西地区稀有稀土矿的基本特征及开发前景[J]. 四川地质学报, 21(3): 150-152.
- 刘健, 凌明星, 李印, 孙卫东. 2009. 白云鄂博超大型 REE-Nb-

- Fe矿床的稀土成矿模式综述[J]. 大地构造与成矿学, 33(2): 270-282.
- 刘淑春, 章雨旭, 郝梓国, 彭阳. 1999. 白云鄂博赋矿白云岩成因研究历史、问题及新进展[J]. 地质评论, 45(5): 477-486.
- 秦朝建, 裘愉卓. 2001. 岩浆(型)碳酸岩研究进展[J]. 地球科学进展, 16(4): 501-507.
- 秦震. 1995. 攀西地区碱性岩类稀有、稀土矿成矿条件及找矿前景[J]. 四川地质学报, 15(2): 102-112.
- 王文瑛, 杨岳清, 陈成湖, 朱锦煌. 1999. 福建南平花岗伟晶岩中的铌钽矿物学研究[J]. 福建地质, (3): 113-134.
- 熊小林, 朱金初, 饶冰. 1996. Ta、Nb花岗岩的矿物平衡及岩石成因[J]. 南京大学学报, 32: 100-105.
- 杨铸生, 段惠敏, 王秀京. 2007. 四川攀西地区铌钽矿床的地质特征及找矿方向[J]. 四川地质学报, 27(4): 248-254.
- 张成江, 刘家铎, 刘显凡, 李佑国, 阳正熙. 2009. 攀西地区金属成矿系统[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(4): 387-394.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 李福春, 黄小龙, 周东山. 2000. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液演化和成因[J]. 高校地质学报, 6(1): 40-52.
- 朱金初, 饶冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考[J]. 地球化学, 31(2): 141-152.
- Abdalla H M, Helba H A and Mohamed F M. 1998. Chemistry of columbite-tantalite minerals in rare metal granitoids, Eastern Desert, Egypt[J]. Mineralogical Magazine, 62(6): 821-836.
- Allou B A, Lu H Z, Guha J and Carignan J. 2008. Columbite-Tantalite distribution and placer in Humid tropical areas: An example from the Issia columbite-tantalite district, central western Ivory coast[J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(2): 195-211.
- Aubert G. 1969. Les coupoles granitiques de Montebraz et d'Echassieres (Massif Central, Francais) et la genese de leur mineralization en etain, tungstene, lithium et beryllium[J]. Bur. Rech. Geol. Minier. Mem., 46: 1-234.
- Belkamsi M, Cuney M, Pollard P J and Bastoul A. 2000. Chemistry of the Ta-Nb-Sn-W oxide minerals from the Yichun rare metal granite (SE China): Genetic implications and comparison with Moroccan and French Hercynian examples[J]. Mineralogical Magazine, 64(3): 507-523.
- Beus A A, Severon V A, Sitin A A and Subbotin R D. 1962. Albitized and greisenized granites (apogranites) [D]. Moscow: Acad. Sci. Press. 196p (in Russian).
- Cerny P, Goad B E, Hawthorne F C and Chapman R. 1986. Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, Southern Manitoba[J]. American Mineralogist, 71: 501-517.
- Cerny P, Moller P and Saupe F. 1989a. Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum[A]. In: Moller P, Cerny P and Saupe F. eds. Lanthanides, tantalum and niobium[M]. New York: Springer Verlag. 274-302.
- Cerny P, Moller P, Saupe F. 1989b. Characteristics of pegmatite deposits of tantalum[A]. In: Moller P, Cerny P and Saupe F. eds. Lanthanides, tantalum and niobium[M]. New York: Springer Verlag. 195-239.
- Cerny P. 1991a. Fertile granites of Precambrian rare element pegmatite fields: Is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies[J]? Precambrian Research, 51: 429-468.
- Cerny P. 1991b. Rare element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits[J]. Geoscience Canada, 18: 49-67.
- Cuney M, Autran A and Burnol L. 1985. Premiers resultats par le sondage GPF de 900 m realise sur le granite sodé-lithique et fluore a mineralization disseminee de Beauvoir[J]. Chron. Rech. Mineral., 481: 59-63.
- Cuney M, Marignac C and Weisbrod A. 1992. The Beauvoir topaz-lepidolite albite granite (Massif Central, France): The disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization[J]. Econ. Geol., 87: 1766-1794.
- Dill H G. 2010. The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. Earth Science Reviews, 100: 1-420.
- Dingwell D B and Mysen B O. 1985. Effects of water and fluorine on the viscosity of albite melt at high pressure: A preliminary investigation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 74: 266-274.
- Ercit T S, Wise M A and Cerny P. 1995. Compositional and structural systematics of the columbite group[J]. American Mineralogist, 80: 613-619.
- Fetherston J M. 2004. Tantalum in Western Australia. Western Australia Geological Survey[J]. Mineral Resources Bulletin, 22: 162.
- Gagnon J E, Samson A M, Fryer B J and Williams-Jones A E. 2004. The composition and origin of hydrothermal fluids in a NYF-type granitic pegmatite, South Platte District, Colorado: Evidence from LA-ICP-MS analysis of fluorite and quartz-hosted fluid inclusions[J]. Canadian Mineralogist, 42: 1331-1355.
- Glyuk D S, Trufanova L G and Bazarova S B. 1980. Phase relation in the granite-H₂O-LiF system at 1 000 kg/cm²[J]. Geochemistry International. 17(5): 35-48.
- Helba H, Turbull R B, Moroteani G, Khalil S O and Arslan A. 1997. Geochemical and petrographic studies of Ta mineralization in the Nuwebi albite granite complex, Eastern Desert, Egypt[J]. Mineralium Deposita. 32: 164-179.
- Hildreth W. 1979. The Bishop tuff: Evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chambers[J]. Geol. Soc. America Spec., 43-75.
- Kempe U, Gotze J, Dandar S and Habermann D. 1999. Magmatic and metasomatic processes during formation of the Nb-Zr-REE deposits Khaldzan Buregte and T sakhir (Mongolian Altai): Indications from a combined CL-SEM study[J]. Mineralogical Magazine, 63: 165-177.
- Kepler H. 1993. Influence of fluorine on the origin, ore bearing and evolution of rare metal granitic rocks[J]. Contribution to Mineralogy Petrology, 114: 479-488.
- Kovalenko V I, Tasyryeva G M, Goreglyad A V, Yarmolyuk V V and

- Troitsky V A. 1995. The peralkaline granite-related Khaldzan-Buregtey rare metal (Zr, Nb, REE) deposit, Western Mongolia[J]. *Econ. Geol.*, 90: 530-547.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kozlovsky A M, Kovach V P, Sal'nikova E B, Kotov A B and Vladykin N V. 2007. Two types of magma sources of rare metal alkali granites[J]. *Geology of Ore Deposits*, 49: 442-466.
- Lagache M and Weisbord A. 1977. The system: Two alkali feldspars-KCl-NaCl-H₂O at moderate to high temperatures and low pressures [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62: 77-101.
- Lichterveled M V, Salvi S and Beziat D. 2007. Textural features and chemical evolution in tantalum oxides: Magmatic versus hydrothermal origins for Ta mineralization in the Tanco lower pegmatite, Manitoba, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 102: 257-276.
- Lin Y, Pollard P J, Hu S Y and Taylor R G. 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China[J]. *Econ. Geol.*, 90: 577-585.
- Linnen R L and Keppler H. 1997. Columbite solubility in granitic melts: Consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 128: 213-227.
- Linnen R L. 1998. The solubility of Nb-Ta-Zr-Hf-W in granitic melts with Li and Li+ F: Constraints for mineralization in rare metal granites and pegmatites[J]. *Econ. Geol.*, 93: 1013-1025.
- Linnen R L and Cuney M. 2005. Granite-related rare element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sr-Zr-Hf mineralization [J]. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, 17: 45-68.
- London D and Burt D M. 1982. Chemical models for lithium aluminosilicate stabilities in pegmatites and granites[J]. *American Mineralogist*, 67: 494-509.
- London D. 1986. Magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare element pegmatite: Evidence from fluid inclusions and phase-equilibrium experiments[J]. *American Mineralogist*, 71: 376-395.
- London D, Hervig R L and Morgan V I G B. 1988. Melt-vapor solubilities and elemental partitioning in peraluminous granite pegmatite system: Experimental results with Macusani glass at 200 MPa[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 360-373.
- London D. 2004. Geochemistry of alkali and alkaline earth elements in ore-forming granites, pegmatites and rhyolites[A]. In: Linnen R L and Samson I M, ed. *Rare element geochemistry and ore deposits* [M]. Geological Association of Canada, Short Course Notes. 17.
- Manning D A C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Al₂O₃-Or with excess water at 1 kb[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76: 206-215.
- Martin J S. 1983. An experimental study of the effects of lithium on the granite system[J]. *Ussher Society Proceeding*, 5: 417-420.
- Mulja T, Williams-Jones A E, Martin R F and Wood S A. 1996. Compositional variation and structural state of columbite tantalite in rare element granitic pegmatites of the Preissae-Lacorne batholith, Quebec, Canada[J]. *American Mineralogist*, 81: 146-157.
- Pal D C, Mishra B and Bernhardt H J. 2007. Mineralogy and geochemistry of pegmatite-hosted Sr-Ta-Nb and Zr-Hf-bearing minerals from the southeastern part of the Bastar-Malkangiri pegmatite belt, Central India[J]. *Ore Geology Reviews*, 30: 30-55.
- Pang K N, Li C, Zhou M and Ripley E M. 2009. Mineral compositional constraints on petrogenesis and oxide ore genesis of the late Permian Panzhuo layered gabbroic intrusion, SW China [J]. *Lithos*, 110: 199-214.
- Partington G A, Menaughton N J and Williams I S. 1995. A review of the geology, mineralization and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia[J]. *Econ. Geol.*, 90: 616-635.
- Philippo S, Naud J and Verkaeren J. 1997. Geochemical evaluation of the Lueshe niobium deposit (Zaire) by Rietveld quantitative X-ray diffraction[J]. *Applied Geochemistry*, 12: 175-180.
- Pichavant M. 1983. (Na, K) exchange between alkali feldspars and aqueous solutions containing borate and fluoride anions, experimental results at P= 1kar[J]. *Proc. 3rd NATO Adv. Stud. Inst. Feldspars and Feldspathoids*, Rennes. 102.
- Pollard P J. 1986. Geologic characteristics and genetic problems associated with the development of granite hosted deposits of tantalum and niobium[J]. *Springer*, 240-256.
- Pollard P J. 1989. Geochemistry of granite associated with tantalum and niobium mineralization[A]. In: Moller P, Cerny P and Saupe F. eds. *Lanthanides, tantalum and niobium*[M]. Berlin: Springer. 145-168.
- Raimbault L, Cuney M, Azencott C, Duthou J L and Joron J L. 1995. Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sr-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central[J]. *Econ. Geol.*, 90: 548-576.
- Sakoma E M, Martin R F and Williams-Jones A E. 2000. The late stages of evolution of the Kwadonkaya A-type granite complex, Nigeria, as deduced from the mafic minerals[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 30: 329-350.
- Salvi S and Williams-Jones A E. 2005. Alkaline granite-syenite hosted deposits[A]. In: Linnen R L, Samson I M. eds. *Rare-element geochemistry and mineral deposits*[M]. Short Course Notes-Geological Association of Canada, 17: 315-341.
- Salvi S and Williams-Jones A E. 2006. Alteration, HFSE mineralisation and hydrocarbon formation in peralkaline igneous systems: Insights from the Strange Lake Pluton, Canada[J]. *Lithos*, 91: 19-34.
- Selway J B, Cerny P and Hawthorne F C. 2000. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XIV: Internal tourmaline[J]. *Canadian Mineralogist*, 38: 877-891.
- Selway J B, Breaks F W and Tindle A G. 2005. A review of rare element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits[J]. *Exploration and Mining Geology*, 14: 1-30.
- Shelley D. 1993. Igneous and metamorphic rocks under the microscope: Classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations[M]. New York: Chapman & Hall. 445p.
- Shellnutt J G and Zhou M F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China:

- Their relationship to the Emeishan mantle plume[J]. *Chemical Geology*, 243: 286-316.
- Sweetapple M T and Collins P L M. 2002. Genetic framework for the classification and distribution of Archean rare metal pegmatites in the North Pilbara Craton, Western Australia[J]. *Econ. Geol.*, 97: 873-895.
- von Knorring O and Fadipe A. 1981. On the mineralogy and geochemistry of niobium and tantalum in some granite pegmatites and alkali granites of Africa[J]. *Bulletin Mineralogie*, 104: 496-507.
- Wall F, Williams C T and Woolley A R. 1996. Pyrochlore from weathered carbonatite at Lueshe, Zaire[J]. *Mineralogical Magazine*, 60: 731-750.
- Wang Y R, Li J T, Lu J L and Fan W L. 1982. Geochemical mechanism of Nb-Ta mineralization during the late stage of granite crystallization[J]. *Geochemistry*, 1: 175-185.
- Webster J D, Holloway J R and Hervic R L. 1989. Partitioning of lithophile trace elements between H₂O and H₂O-CO₂ fluids and topaz rhyolite melt[J]. *Econ. Geol.*, 84: 116-134.
- Woolley A R, Williams C T, Wall F, Garcia D and Moute J. 1995. The Bingo carbonatite-jolite-nepheline-syenite complex, Zaire: Geology, petrography, mineralogy and petrochemistry[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 21: 329-348.
- Xiong X, Zhao Z, Zhu J, Rao B and Lai M. 1998. Partitioning of F between aqueous fluids and albite granite melt and its protogenetic and metallogenetic significance[J]. *Chin. J. Geochem.*, 17(4): 303-310.
- Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, He B, Long X, Xie L W and Shi Y R. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 3084-3104.
- Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, He D F and Song X Y. 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 236: 112-133.
- Zhou M F, Amdt N T, Malpas J, Wang C Y and Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 103: 352-368.
- Zhu J C, Li R K, Li F C, Xiong X L, Zhou F Y and Huang X L. 2001. Topaz albite granites and rare-metal mineralization in the Limu district, Guangxi Province, southeast China[J]. *Mineralium Deposita*, 36: 393-405.