科学通报 2019 年 第 64 卷 第 15 期: 1545 ~ 1566
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
香山科学会议专栏 评 述
第630次香山科学会议 · 新兴关键矿产资源

中国铌钽矿成矿规律

李建康*, 李鹏, 王登红, 李兴杰

中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

* 联系人, E-mail: Li9968@126.com

2018-09-12 收稿, 2019-01-06 修回, 2019-01-08 接受, 2019-04-16 网络版发表

中央级公益性科研院所基本科研业务费(JYYWF201814)、国家自然科学基金(41872096)和中国地质调查项目(DD20160346, DD20160056, DD20160055)资助

摘要 铌、钽是世界新兴产业发展的关键性金属资源. 世界上的铌钽资源主要为内生来源, 可分为过铝质岩浆系统的花岗伟晶岩型和花岗岩型铌钽矿床、碱性岩-碳酸岩岩浆系统的碳酸岩及其风化壳型和碱性岩型铌钽资源. 我国的铌钽资源主要为花岗岩型、花岗伟晶岩型、碱性岩型和碳酸岩型, 但资源品位较低, 碳酸岩型铌钽资源较少, 尚未发现碳酸岩风化壳型资源. 我国过铝性岩浆系统的铌钽矿床主要分布在阿尔泰、松潘-甘孜、江南古陆、南岭和滇西-藏南等铌钽成矿带, 成矿作用集中在加里东期、印支期和燕山期, 并有少量发生在喜山期; 碱性系统的铌钽成矿带主要为塔里木-华北北缘、秦岭和扬子西缘成矿带, 成矿主要发生在海西-印支期, 并有元古宙的成矿作用, 两种类型成矿系统的时空分离交替成矿的特征主要归因于二者具有不同的成矿构造背景. 前者主要发生在具有巨厚复理石沉积建造的造山带, 造山过程中发生铌钽成矿作用; 后者主要发生在深大断裂带或裂谷区, 成矿物质具有深部来源特征. 在今后的找矿工作中, 我国应该在松潘-甘孜、阿尔泰、江南古陆、藏南等巨厚复理石沉积建造区, 加大寻找高品位花岗伟晶岩型铌钽资源的力度; 在塔里木-华北陆块北缘和秦岭等深大断裂发育区, 寻找碳酸岩型铌资源; 重视南岭、滇西和秦岭地区钨锡矿床中共(伴)生的铌钽资源, 加强综合利用研究.

关键词 铌、钽矿床, 成矿规律, 花岗伟晶岩, 碳酸岩, 找矿远景区

铌、钽具有耐热性好、熔点高、延展性好、耐蚀性强和热导率高等特性, 是电子、原子能、宇航、钢铁、化工等工业的重要原料, 在国防、能源、高新技术和医疗领域具有不可替代性. 因而, 铌、钽被视为新兴战略金属或新兴关键战略金属, 钽金属尤为稀少, 还被称为“贵族金属”. 我国铌钽资源量大, 但对外依赖度高, 反映了我国铌钽资源禀赋特征的缺陷. 因此, 系统分析我国铌钽资源的成矿特征和成矿规律, 对指导我国铌钽资源的找矿工作具有重要意义, 也有助于我国新兴产业的科学布局和健康发展.

铌、钽在元素周期表上是同族元素, 二者地球化学特征非常相似, 在地质过程中密切伴生, 但二者的行为又存在一定差异. 在内生矿床中, 决定二者富集的地球化学因素主要为Ti在岩浆中的原始浓度、有无吸收Nb, Ta的造岩矿物及副矿物存在、有无平衡电荷所需的离子、岩浆碱性的强弱等因素[1]. 其中, 碱性强弱对铌钽成矿作用的影响较为明显. 铌铁矿和钽铁矿的溶解度, 在过碱性熔体中随着熔体中碱质的增多而提高; 在过铝质熔体中随Al的增多而提高[2], 且钽铁矿的溶解度高于铌铁矿的溶解度, 导致过铝质熔体的结晶过程中Nb/Ta降低[3]. 在碱性岩中, Nb/Ta比变化为25~10, 在碳酸岩中介于50~100, 在花岗岩中为12~5, 晚期伟晶岩中可达到1~0.5[3]. 在热液阶段的铌钽成矿作用中, Ta和Nb的氟络合物在富Na, Cs, Rb等碱性组分的溶液中

引用格式: 李建康, 李鹏, 王登红, 等. 中国铌钽矿成矿规律. 科学通报, 2019, 64: 1545–1566
Li J K, Li P, Wang D H, et al. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1545–1566, doi: 10.1360/N972018-00933

© 2019《中国科学》杂志社

具有不同的稳定性, 也会导致铌、钽的分离富集[4]. 这些特征表明, 岩浆系统碱性程度的差异可以造成钽、铌发生一定程度的分离富集. 因此, 本文拟以岩浆的酸碱性为主线, 厘定中国的铌钽矿床类型和成矿带, 研究中国铌钽资源的成矿规律, 分析资源禀赋特征, 评价找矿远景区.

1 国内外铌、钽资源概况

世界铌资源主要分布在巴西(约95%)和加拿大(约3.5%), 其他铌资源国主要为安哥拉、澳大利亚、中国、格陵兰、马拉维、俄罗斯、南非和美国, 巴西最大的铌资源由碳酸盐矿物组成[5,6]. 钽资源主要分布在巴西, 巴西钽储量约10.6万吨, 约占全球的40%, 其余储量以递减的顺序依次为澳大利亚、中国和东南亚、俄罗斯和中东、中部非洲、非洲其他地区、北美和欧洲[5,6]. 巴西的钽资源主要与碳酸岩杂岩体和Volta-Grande伟晶岩区的大型烧绿石矿床有关, 澳大利亚的钽矿石主要由花岗伟晶岩提供[7].

中国的铌资源主要集中在内蒙古、湖北、福建、新疆等省区(图1), 白云鄂博矿床是中国最大的铌矿, 集中了全国探明铌储量的63.4%和工业储量的82.7%. 中国钽矿主要集中在江西、湖南、福建、广西、广东、四川、新疆及内蒙古等省区(图1), 钽资源高度集中于江西宜春414和福建南平等大中型矿床中. 中国钽储量和基础储量在数量上巨大, 但钽资源品位一般未超过0.02%, 铌也是品位较低[7]. 2017年发现的湖南省平江县仁里花岗伟晶岩型钽矿床有望提高我国钽资源量、改善我国钽资源的品质[8].

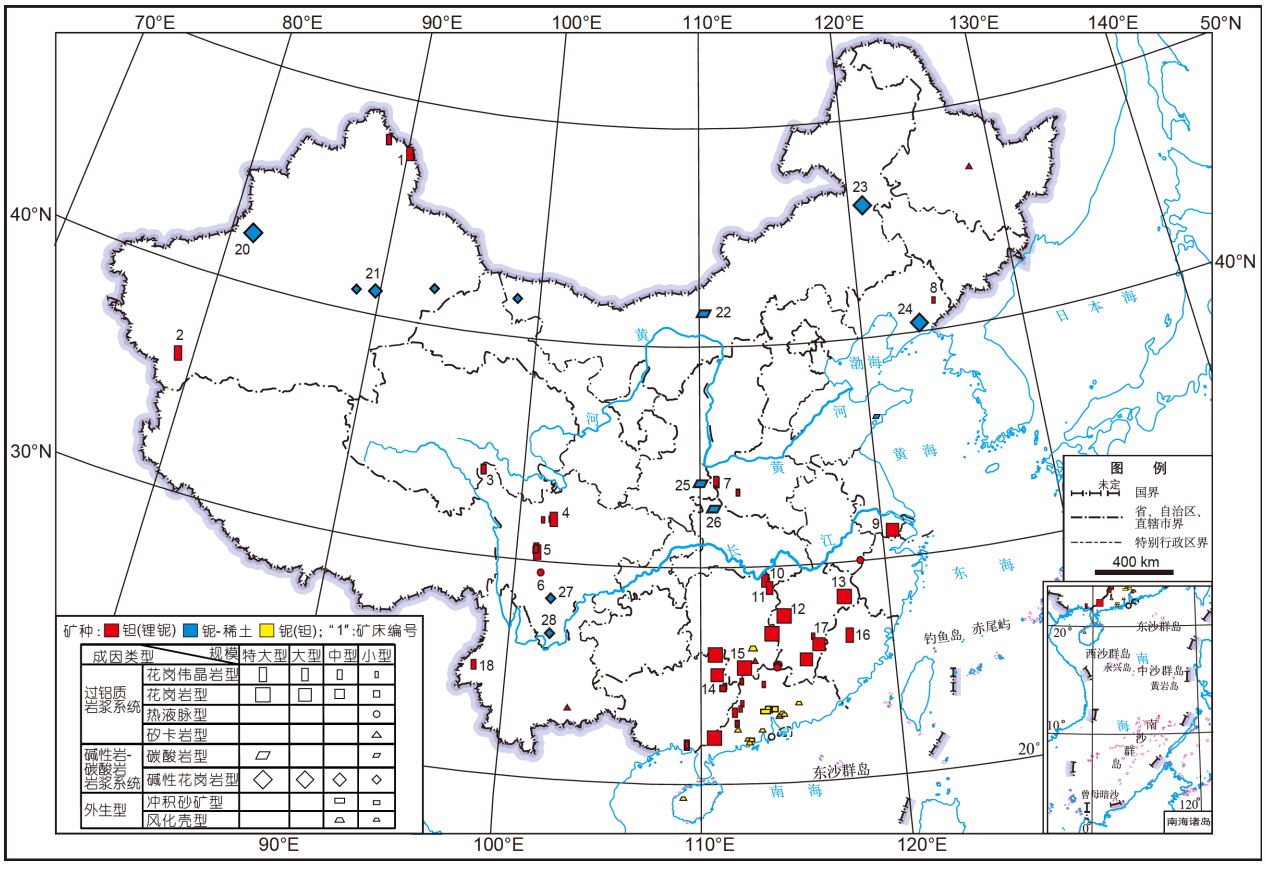


图 1 我国铌钽资源分布图. 矿床编号对应的钽(铌)矿床(田)名称: 1, 可可托海; 2, 大红柳滩; 3, 扎乌龙; 4, 可尔因; 5, 甲基卡; 6, 赫德; 7, 官坡; 8, 李家堡子; 9, 苏州; 10, 断峰山; 11, 仁里; 12, 宜春; 13, 松树岗黄山; 14, 栗木; 15, 尖峰岭; 16, 南平; 17, 姜坑里; 18, 黄连沟. 矿床编号对应的铌(钽)矿床(田)名称: 20, 波孜果尔; 21, 瓦吉里塔格; 22, 白云鄂博; 23, 巴尔哲; 24, 赛马; 25, 华阳川; 26, 庙垭; 27, 甘洛地; 28, 炉库

Figure 1 Distribution of Nb and Ta resources in China. Names of tantalum (niobium) deposits corresponding to deposit number: 1, Koktokay; 2, Dahongliutan; 3, Zhawulong; 4, Keeryin; 5, Jiajika; 6, Hede; 7, Guanpo; 8, Lijiapuzi; 9, Suzhou; 10, Duanfengshan; 11, Renli; 12, Yichun; 13, Huangshan; 14, Limu; 15, Jianfengling; 16, Nanping; 17, Jiangkengli; 18, Huangliangou. Names of Nb (Ta) deposits corresponding to deposit number: 20, Boziguoer; 21, Wagiritag; 22, Bayan Obo; 23, Baerzhe; 24, Saima; 25, Huayangchuan; 26, Miaoya; 27, Ganluodi; 28, Luku

2 铌、钽矿床类型及其主要特征

铌钽矿床可分为内生和外生两大类. 内生矿床可分为: (1) 过铝质岩浆系统的钽铌矿床, 主要包括花岗岩型和花岗伟晶岩型, 此类矿床产出世界主要的钽资源, 花岗岩型钽铌矿床常共生锡, 伟晶岩型钽矿床常共生锂或铯; (2) 碱性岩-碳酸岩岩浆系统的铌钽矿床, 主要包括: 碳酸岩型和碱性岩型矿床, 前者赋存了世界上大部分的铌资源, 并常与稀土共生; 后者主要发生REE-Y-Nb-Zr型矿化作用, 在一些情况下, 也发生钽矿化. 外生铌钽矿床多为原生矿床经过次生物理化学作用后造成铌钽资源的再次富集, 以碳酸岩风化壳型铌矿床最具代表性. 中国的铌钽矿床类型见表1, 缺失碳酸岩风化壳型铌资源.

2.1 过铝质岩浆系统的钽铌矿床

(ⅰ) 花岗岩型钽铌矿床. 过铝质花岗岩赋存大量的原生(如宜春414矿床[9])或共(伴生)钽资源(如巴西的Pitinga矿床和俄罗斯的Orlovka矿床[10,11]). 与伟晶岩型矿床相比, 含矿花岗岩中钽铌储量比较大, 但品位较低, 矿物粒度较细. 这种矿床的花岗岩, 在化学成分上富含钠、钾及二氧化硅, 长石以钾长石和钠长石为主. 矿床多产于复式或多岩相花岗岩体内相对中-晚期、面积较小、侵入体隆起部位的顶部. 矿体形态受侵入体与围岩的接触构造控制, 多为不规则透镜状, 矿体长有数百米至千余米, 宽数十米至数百米, 厚度数十米至近百米. 花岗岩体因结晶分异作用, 常在垂向上形成了似层状的岩相带, 分异愈强, 岩相带愈发育, 稀有金属矿化越强[12](图S1); 岩体上部也可能产出伟晶岩型钽矿化和石英脉型钨锡矿化[13]. 该类矿床的稀有金属矿物主要为锂云母、绿柱石、铌铁矿-钽铁矿、细晶石、褐钇铌矿、锆石, 并常伴有萤石、黄玉、独居石、褐帘石、磷钇矿、钨锰铁矿、锡石、电气石、磷灰石等副矿物[3].

表 1 中国主要钽铌矿床类型分布表

Table 1 Main types of Ta-Nb deposits in China

矿床类型			赋矿地质体	主要矿种	实例
过铝质岩浆系统的铌钽类矿床	花岗岩型		细晶石铌钽铁矿锂云母钠长石花岗岩	Ta, Nb, Li, Be, Hf	江西宜春
			褐钇铌矿黑云母花岗岩	TR, Nb	湖南姑婆山
			细晶石铌钽铁矿白云母钠长石花岗岩	Ta, Nb, Be	江西大吉山
			铌钽铁矿细晶石铁锂云母钠长石花岗岩	Ta, Nb, Be	江西海罗岭江西姜坑里
			黄钇钽矿氟碳钙钇矿锂白云母钠长长石花岗岩	Ta, ΣY	江西牛岭坪
			铌铁矿黑鳞云母钠长石花岗岩	Nb	广东博罗
			铌钽铁矿细晶石钠长石细晶岩	Ta, Nb	湖南431
	花岗伟晶岩型	二云母类	二云母微斜长石钠长石伟晶岩	TR, Nb, Be	云南卡场
		白云母类	白云母微斜长石钠长石伟晶岩	Nb, Be	江西葛源
			白云母微斜长石钠长石锂辉石伟晶岩	Be, Li, Nb, Ta, Cs, Hf	新疆可可托海
			白云母钠长石锂辉石伟晶岩	Li, Nb, Ta, Be	四川甲基卡
			白云母钠长石伟晶岩	Ta, Nb, Be	湖南仁里
		锂云母类	锂云母钠长石伟晶岩	Ta, Li, Nb, Rb, Cs, Hf	河南官坡
碱性岩-碳酸岩岩浆系统的铌钽矿床	岩浆型		绿层硅铈钛矿霓霞正长岩	Nb, Ce	辽宁赛马
			硅铍钇矿铌铁矿钠长石碱性花岗岩	Be, Nb, TR	内蒙古巴尔哲
			褐钇铌矿钠闪石花岗岩	Nb, Y	四川茨达
			烧绿石锆石钠长岩脉	Nb, Y	四川路枯
	碳酸岩型		烧绿石锆石浅成侵入碳酸岩	TR, Nb	新疆拜城
			氟碳铈矿独居石烧绿石铌铁矿火山沉积碳酸岩	ΣCe, Nb	内蒙白云鄂博
			正长岩-碳酸岩杂岩体	REE, Nb	湖北庙垭
风化壳型			钽铌铁矿(褐钇铌矿)花岗岩风化壳	Nb, Ta	广东524
残坡积冲积砂矿型			褐钇铌矿冲积砂矿	Nb, Y	湖南姑婆山
			钽铌铁矿冲积砂矿	Nb, Ta	广东博罗

花岗岩型钽铌矿床是我国主要的钽铌资源来源地, 典型矿床包括江西宜春414矿床、湖南尖峰岭和香花岭矿床、广西栗木矿床、江西大吉山矿床. 长期以来, 关于该类矿床争论的焦点是成矿作用发生在岩浆阶段还是岩浆晚期的热液自交代阶段[12,14]. 近年来, 岩石矿物学和熔体包裹体研究表明国内该类型矿床多为岩浆结晶分异成因[9,15]. 矿物学研究表明, 该类矿床除了岩浆结晶作用外, 还存在热液阶段铌钽成矿的现象[16~23]. 在该类型矿床中, 成矿花岗岩富集Ta, Li, Nb和Rb, Cs, Sn, 以及不同含量的P, B等组分, 矿石矿物主要为浸染状Ta-Nb-Sn氧化物, 常与黑钨矿、锡石等钨锡矿化共生. 如, 宜春414矿床旁边产出新坊钨矿[24], 湖南尖峰岭、香花岭矿床位于湘南骑田岭钨锡多金属矿田[25], 广西栗木和江西大吉山矿床存在上钨锡下钽铌的矿化特征[26,27].

(ⅱ) 花岗伟晶岩型钽铌矿床. 花岗伟晶岩型钽矿床是重要的钽资源类型, 主要分布在加拿大、俄罗斯、巴西、澳大利亚、中非和南非, 世界钽资源主要开采于加拿大Tanco和澳大利亚Greenbush, Wodgina等花岗伟晶岩中[28]. 富钽伟晶岩主要产自于LCT型花岗伟晶岩, 成矿母岩体主要为黑云母花岗岩及二云母花岗岩, 偶尔见有花岗闪长岩. 富钽伟晶岩可分为: (I) 绿柱石型; (II) 复合型(锂辉石、透锂长石或磷铝锂石型); (III) 复合型(锂云母型); (IV) 钠长石锂辉石型; (V) 钠长石型[29]. 从I到II型, 铌钽矿化主要发生在伟晶岩内部的钠长石单元、云英岩状云母团块和锂云母单元中. 在锂云母型伟晶岩或伟晶岩中的锂云母单元中, 钽矿物主要为细晶石族矿物, 其他单元或类型伟晶岩中, 钽矿物主要为铁锰氧化物[29]. 高品位钽主要产出在(II)型伟晶岩矿床中, 特别是含锂云母和铯榴石的伟晶岩中.

在新疆可可托海3号伟晶岩脉, 矿物结构带比较充分地反映了不同矿物结构带的稀有金属矿化组合: (1) 文象-变文象石英微斜长石带; (2) 糖晶状钠长石巢体带(主要含铍矿带); (3) 块体微斜长石带; (4) 白云母-石英集合体带; (5) 叶钠长石-锂辉石带(含铍铌的锂矿带); (6) 石英-锂辉石带; (7) 白云母薄片状钠长石带(含锂、铍的铌钽矿带); (8) 薄片状钠长石-锂云母带(含铌钽的锂矿带); (9) 块体石英带, 不同结构带的铌钽矿物种类和稀有金属矿物组合存在差异. (5)~(9)带是主要的钽铌矿化带(表2), 钽铌矿化与钠长石的发育程度密切相关[31,32], 该规律同样适用于其他矿床, 如湖南平江仁里花岗伟晶岩型钽铌矿床[8,33]. 这主要因为在富钠熔体或流体中, 铌钽和钠往往形成络合物($Na(Nb,Ta)O_3$)), 使铌钽稳定并一起运移存在[34].

2.2 碱性岩-碳酸岩岩浆系统的铌钽矿床

(ⅰ) 碳酸岩型铌矿床. 碳酸岩型矿床是世界上大部分铌资源来源, 但并非所有碳酸岩都显示出类似的富集, 碳酸岩热液(富CO_2和F)形成的碳酸岩通常富含稀土元素和锶, 但不含铌(如四川牦牛坪和山东微山稀土矿床[35]), 而碳酸岩岩浆通常发生富含铌, 磷和钛的成矿作用[36]. 大部分碳酸岩侵入体主要产生于大陆裂谷环境, 一般位于多期硅不饱和、超基性碱性杂岩体的内部和边部, 如东非大裂谷产出的碳酸岩杂岩体. 杂岩体常见的岩石类型为单斜辉石岩、钠辉霞霓岩-磷霞岩组合、霞石正长岩, 如Beloziminskiy和Tomtor杂岩体. 这些碱性岩-碳酸岩杂岩体中的碳酸岩相往往富集铌、相对贫钽, 但达到铌矿化程度的碳酸岩相对较少, 矿化碳酸岩中的Nb_2O_5含量一般为0.5%~0.7%, 最高可达1.6%[37]. 在碳酸岩型铌矿床中, 铌的矿石矿物一般为烧绿石、铌铁矿. 虽然一些碳酸岩含有富钽的铌矿物, 如含有14%Ta_2O_5的铌铁矿, 34 wt%(质量百分比)Ta_2O_5的烧绿石, 但碳酸岩的钽一般含量较低, 富钽碳酸岩局限于早期碳酸岩相中, 如在BlueRiver地区, 钽的平均品位为~200 ppm, Nb/Ta为1~11[38,39], 这些富钽的早期烧绿石常伴有较多的铀(可达到29 wt%[3]), 在工业开采过程中易于产生环境问题.

湖北庙垭矿床是我国最具代表性碳酸岩型铌钽矿床. 该矿床产于含铌、稀土正长岩-碳酸岩杂岩中[40,41](图S2): (1) 正长岩类杂岩体: 可分为中心相正长岩、边缘相正长斑岩和与围岩混染相混染钠质正长岩, 稀有金属矿物为铌金红石、铌铁矿, 矿石Nb_2O_5品位0.068%~0.152%; (2) 碳酸岩类杂岩体: 分为黑云母碳酸岩、方解石碳酸岩、含碳质方解石碳酸岩、铁白云石碳酸岩4种, 稀有金属矿物为铌金红石、锆石、烧绿石、铌铁矿. 以上含矿杂岩体, 以富含铌和轻稀土元素为特征, 且贫钽和重稀土. 铌含量最高的是黑云母碳酸岩; 轻稀土含量最高的是铁白云石碳酸岩. 但该矿床的矿石矿物颗粒细, 相互镶嵌复杂, 难以开发利用.

(ⅱ) 碳酸岩风化壳型铌矿床. 碳酸岩风化壳是一种高品位的铌矿床类型, Nb, La, Y, Sc, Zr等组分高度富集, 在世界铌资源中占有重要地位. 在该类矿床中, 铌品位较原生矿石高出1个数量级, 一般为百分之几. 其主要聚矿机理是: 在氧化条件下, 惰性稀有元素(Nb,

表 2　不同伟晶岩结构带中铌钽矿物的产出特征[30]

Table 2　Occurrence characteristics of columbite group minerals in different pegmatite zones[30]

结构带	碱的作用	主要铌钽矿物	铌铁矿族矿物 Nb_2O_5/Ta_2O_5	共生矿物	稀有金属矿化典型矿物	指示矿物				
						绿柱石	电气石	云母	锆石	微斜长石
(1) 文象-变文象石英微斜长石带; (2) 糖晶状钠长石巢体带; (3) 块体微斜长石带; (4) 白云母-石英集合体带	K(Na)	铌锰矿、钽铌锰矿、铌铁矿、铀细晶岩	4~0.5	微斜长石、白云母、钠长石、绿色绿柱石、黑色电气石	绿柱石	含量减少, 含碱(Na、K、Rb、Cs、Li)量增加, 颜色从绿色至白, 折光率增加	颜色变浅, (黑-蓝-绿-淡绿-玫瑰), 铁减少, 比重减小, 折光率减小	由白云母到锂云母, 白云母中铁减少, 铝增加, 片径变细	铪含量增加, 矿物总量也增加	其中Rb、Cs含量增加
(5) 叶钠长石-锂辉石带; (6) 石英-锂辉石带	Na,Li	钽铌锰矿、铌钽锰矿、铀细晶石、钽铋矿	1.5~0.5	锂辉石、钠长石、石英、磷铁锂矿、磷锰锂矿、锆石、白色绿柱石、磷钙钍石、蓝电气石	锂辉石					
(7) 白云母薄片状钠长石带	Na(K)	铌钽锰矿、钽锰矿、铀细晶石、铋细晶石、铋钽钛铀矿、钽铋矿	0.3±	薄片状钠长石、鳞片状白云母、铯榴石、晚期石英、锂辉石、锂云母、白色绿柱石、富铪锆石、磷钙钍矿、彩色电气石	铌钽锰矿、铀细晶石、富铪锆石、铯榴石					
(8) 薄片状钠长石-锂云母带	Li(Na)	铌钽锰矿、钽铌锰矿、铀细晶石、铋细晶石	1.0±	锂云母、钠长石、石英、磷锂锰矿、富铪锆石、磷钙钍石、锂辉石	锂云母					
(9) 块体石英带	Si(K)	铌钽锰矿、铀细晶石、钽铌锰矿	1.0±	微斜长石、石英、色榴石、白色绿柱石、锂辉石	色榴石、微斜长石					

La, Ce, Y等)堆积在淋滤带内的残余产物中, 而大部分碳酸岩造岩组分(CO_2, Ca, Mg和部分P, Si, Al)从这个带中淋出, 并在风化壳被埋藏的还原环境下, 铁和锰转化为二价阳离子被淋出, 而惰性的和活动性弱的稀有金属(Nb, La, Ce, Y, Sc, V等)在后生蚀变风化壳中再次聚集[1,7].

根据风化壳的发育程度和阶段可将碳酸岩风化壳型铌矿床分为三类: 水云母风化壳型铌矿床, 如巴西的Catalao I矿床; 红土风化壳型铌矿床, 代表矿床有巴西的Araxa矿床; 后生蚀变、部分再沉积的红土风化壳型矿床, 代表矿床有俄罗斯的Tomtor矿床. 前两类类矿床形成于表生作用的氧化环境中, 第三类矿床成矿过程较为复杂, 既经历了成壳阶段的氧化环境, 又经历了后生作用阶段的还原环境, 成矿物质经历了多次再生富集, 因此易于形成高品位的大型稀有金属矿床[42].

(ⅲ) 碱性岩型铌钽矿床. 碱性岩石的范围可以从超镁铁质到长英质岩石, 从硅不饱和到硅过饱和. 碱性岩石的一个重要特征是富集高场强元素, 包括锆、铌、钛、铀、钇和稀土元素[43], 少有高含量的钽, 这使碱性到过碱性花岗岩易于成为重要的铌资源来源. 碱性花岗岩型矿床与钙碱性花岗岩型矿床的主要区别在于其富含钠的深色矿物(钠闪石霓辉石、霓石等), 相对富含铁和硅, 而贫铝和磷, 富含铌稀土矿物等. 碱性花岗岩矿床一般规模大, 部分铌和稀土元素形成了独立工业矿物, 部分呈类质同象存在, 但矿床一般品位低, 矿物粒度细, 难以成为铌和钽资源的工业来源[6]. 碱性岩型铌钽矿床实例包括巴西的Pitinga杂岩体、加拿大的StrangeLake和ThorLake杂岩体、格陵兰南部的Ilímaussaq和Motzfeldt杂岩体、俄罗斯Lovozero和南非的Pilanesberg杂岩体、美国阿拉斯加州的BokanMountain和阿肯色州的MagnetCove杂岩体.

我国的碱性岩型铌钽矿床主要产在碱性花岗岩(如内蒙古巴尔哲、新疆波孜果尔矿床)、正长岩(如辽宁赛马矿床)、钠闪石花岗岩(如四川茨达矿床), 常与稀土矿化共生. 其中, 碱性花岗岩型铌钽矿床是我国最主要的碱性岩型铌钽矿床, 典型矿床为内蒙扎鲁特旗巴尔哲“801”REE-Zr-Be-Nb-Ta多金属矿床. 岩体自上而下可分出如下5个带(图S3): 伟晶状花岗岩带、钠长石化硅化碱性花岗岩、弱钠长石化硅化碱性花岗岩、微钠长石化硅化碱性花岗岩、钠闪石碱性花岗岩[40,44].

(ⅳ) 白云鄂博式铌-稀土矿床. 除了以上类型外, 尚有成因存在较大争议的赋存于白云岩、大理岩等中的铌稀土矿床, 如白云鄂博矿床, 此类矿床主要赋存在类复理石建造内, 呈层状或透镜状展布, 产状与岩层一致[42,45,46]. 但矿化元素组合与碳酸岩型铌矿床一致, 主要有铌、铈组稀土、磷和铁, 以及少量的钍, 特征元素还有锶、钡、钾、钠、氟和硫等, 稳定同位素也显示了内生特征, 因此更可能是火成成因[46].

白云鄂博矿床的矿石类型主要有白云岩型和硅酸盐岩型. 白云岩因含磁铁矿、黄铁矿及菱铁矿等, 风化后常呈褐色或黄褐色, 并有较强放射性. 矿床的有用矿物主要为铌铁矿、烧绿石、易解石、褐铈铌矿、铌铁金红石、独居石、氟碳铈矿、磷灰石、磁铁矿及赤铁矿等[40].

2.3 砂矿

含铌砂矿一般规模小, 但砂矿易采易选, 并常与钽铁矿、锡石等一起产出, 其中, 尼日利亚宾盖大型铌钽砂矿探明铌钽金属资源量逾4万吨, 锡金属资源量2万吨[47,48]. 扎伊尔、泰国、马来西亚、澳大利亚等国开采砂矿时获得的含铌铁矿-钽铁矿的锡石精矿, 冶炼粗锡剩下的炉渣中含10%~20%的Nb_2O_5, 被作为重要的副产品回收[49].

在我国, 外生型铌钽矿床主要为残坡积砂矿和河流砂矿. 多分布在广东、广西和湖南, 如广东增城派潭铌铁矿砂矿床, 以及广东龙门县永汉铌铁矿砂矿$Nb_2O_5$4852t, 广东台山县坂潭锡矿[50].

3 中国主要铌钽成矿带

与过铝质和碱性岩浆系统的铌钽矿床对应, 中国铌钽成矿带也可以分为以过铝质岩浆系统铌钽成矿为主和以碱性岩浆系统铌钽成矿为主的两类铌钽成矿带, 其空间分布见图2.

3.1 以过铝质岩浆系统成矿为主的钽铌成矿带

(ⅰ) 新疆阿尔泰花岗伟晶岩成矿带. 新疆阿尔泰造山带位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块之间, 呈北西-南东方向展布, 面积约23000 km^2, 发育十万余条伟晶岩脉, 包括38个伟晶岩矿田, 分布9个伟晶岩矿集区(图S4)[30,52,53]. 阿尔泰伟晶岩成矿带的稀有金属成矿作用发生在元古宙沉积基底中, 元古宙为一套含长英质的变质火山、沉积碎屑岩, 且富含稀有金属元素[30,52,54]. 区域在中、新元古代造山运动后的加里东期、海西期、印支期至燕山期中, 均有伟晶岩及伟晶

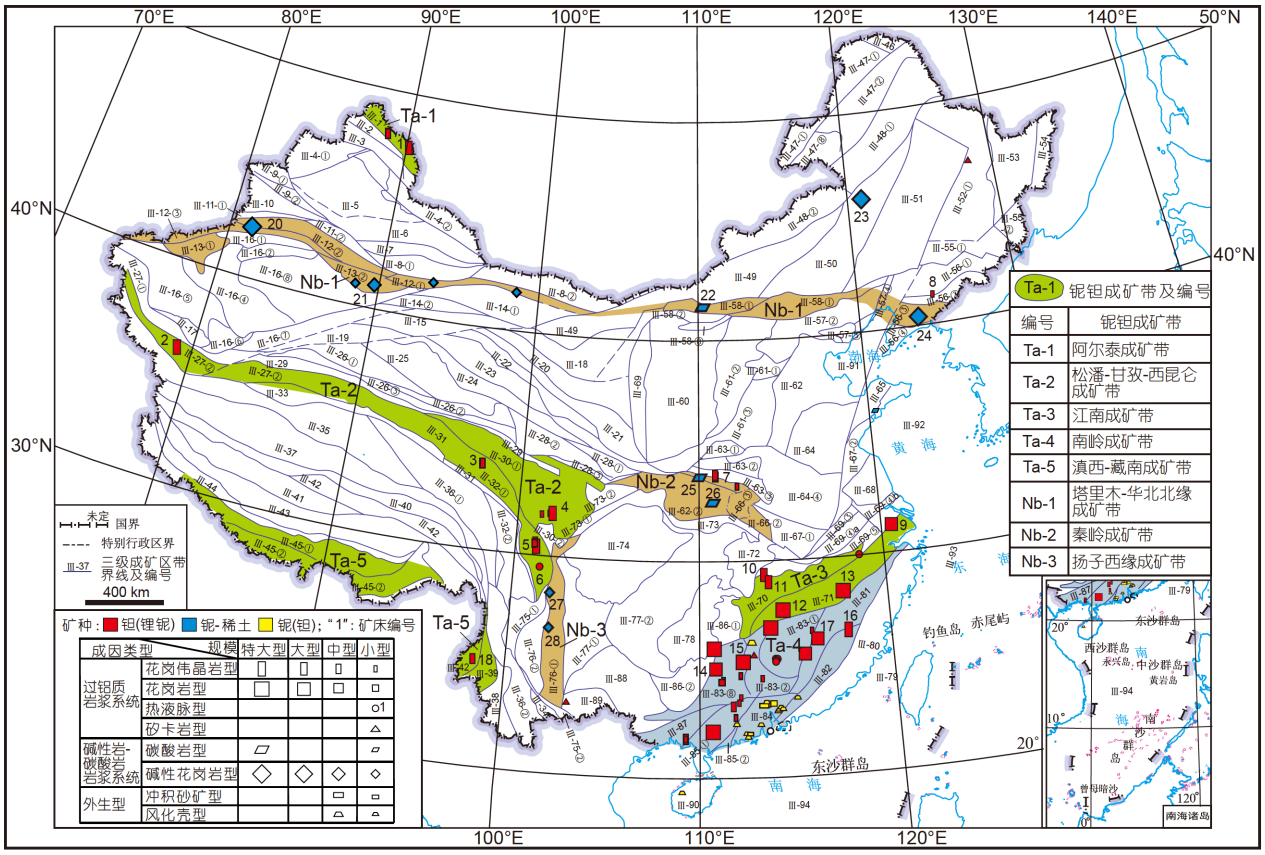


图 2 中国铌钽成矿区带划分图. 底图为中国成矿区带划分图[51], 图中矿床编号对应的矿床名称同图1

Figure 2 Nb-Ta metallogenic belts in China. The China metallogenic belt division map is quoted from Ref. [51]. The ore deposit names corresponding to the ore deposit numbers in the map are as the same as those in Figure 1

岩矿床的形成, 由早至晚元素和矿物组合越来越多, 伟晶岩分带越来越完善, 矿床规模越来越大, 矿种从加里东期比较单纯的白云母矿床向印支期-燕山期超大型综合性矿床演化的规律[55].

阿尔泰成矿带的稀有金属成矿作用存在一定的分带性(图S4): (1) 南阿尔泰地体主要产出铍铌钽矿床(点), 主要包括大喀拉苏-可可西尔矿集区、小喀拉苏-切别林矿集区、海流滩-也留曼矿集区和加曼哈巴矿集区; (2) 中阿尔泰地体中部成矿作用以锂为主, 铍铌钽矿化规模较小, 包括柯鲁木特-吉得克矿集区和卡拉额尔齐斯矿集区, 产出柯鲁木特、库克拉盖等大中型锂矿床; (3) 中阿尔泰东部成矿作用以铍为主, 锂铌钽矿化规模相对较小, 产出青河矿集区、可可托海矿集区和库威-结别特矿集区.

(ⅱ) 松潘-甘孜花岗伟晶岩成矿带. 松潘-甘孜花岗伟晶岩成矿带是我国最重要的稀有金属成矿带, 从四川西部一直延伸到新疆的喀喇昆仑地区[56](图S5). 在大地构造上, 位于扬子陆块、羌塘-昌都陆块和华北-塔里木陆块之间的"倒三角式"造山带, 造山带沉积超过7000 m的三叠系西康群-巴颜喀拉群复理石沉积建造[57]. 在晚三叠世古特提斯洋闭合后的陆-陆碰撞挤压作用过程中[58], 发生稀有金属成矿作用, 形成甲基卡、可尔因、扎乌龙、大红柳滩等特大和大型锂铍铌钽矿床, 成矿时代集中在~210 Ma[56,59~61]区域, 其中甲基卡矿床最具代表性. 在甲基卡矿床, 铌钽矿物主要呈铌钽铁矿出现, 部分以类质同象的形式分散在其他矿物中. 铌钽铁矿存在于二云母二长花岗岩和各类型伟晶岩脉中. 在伟晶岩中, 铌-钽铁矿主要赋存在各种伟晶岩的粗粒结构带和微斜长石、石英块体结构带中, 与钠长石有密切关系.

(ⅲ) 江南钽铌成矿带. 江南造山带位于扬子地块与华夏地块之间[62], 造山带内产出众多大型钽锂为主的稀有金属矿床, 主要包括苏州、江西葛源黄山、松树岗、枭木山等花岗岩型钽锂铌矿床, 以及江西九岭

复式岩体内的花岗岩型稀有金属矿床(点)(图3). 在江西造山带的中段, 还产出幕阜山-连云山伟晶岩型稀有金属成矿带, 包括湖北断峰山和湖南仁里钽铌矿床[63]. 虽然这些钽铌锂矿床的空间分布与江南造山带一致, 且主要产出在江南造山带的主体——新元古代冷家溪群和板溪群中, 但成矿时代集中在~130 Ma, 显示了新元古代复理石沉积在燕山期发生重熔成矿的特征, 其形成过程可能与古太平洋板块向扬子板块的俯冲过程有关[64], 成矿背景与南岭地区的钨锡铌钽成矿作用相近, 但成矿物质与扬子板块和华夏板块间的海槽沉积密切相关, 且时代明显晚于南岭地区的钨锡铌钽成矿作用. 因而, 本文把该成矿带独立于华南成矿带, 称为江南钽铌成矿带.

幕阜山矿集区是江南铌钽成矿带成矿强度最大的地区, 地处湘鄂赣三省交界处. 幕阜山复式花岗岩基是典型的由同源联系的多个单一侵入体先后相继侵位构成的"体中体"模式复式岩体[33], 在该岩体内部和周边地区, 产出断峰山、仁里-传梓源等大型-超大型矿床在内的超过70处稀有金属矿床/矿点, 稀有金属矿化类型主要包括花岗伟晶岩型、云英岩型等多种类型稀有金属矿床, 并显示出由东北向西南岩浆岩年龄由老至新, 岩浆分异演化程度逐渐增高, 稀有金属矿化种类由单一的铍矿化向铍铌钽锂铯综合演化的变化趋势.

(ⅳ) 南岭钽铌成矿带. 南岭地区经历了多次的造山运动, 岩浆活动频繁, 产出众多花岗岩类矿床, 使之成为我国重要的稀有金属、钨、锡多金属成矿带(图S6). 在加里东运动之前, 该地区位于扬子准陆块南部, 为滨海-浅海-斜坡沉积环境, 沉积了巨厚的泥砂质碎屑岩、韵律状泥砂质岩系夹炭质岩. 加里东期运动, 区域抬升成陆, 发生陆内造山运动, 其后的印支期和燕山期, 也发生了陆内褶皱和过铝花岗质岩浆活动[65]. 加里东期、印支期和燕山期钽成矿作用分别以福建南平伟晶岩型钽矿床、广西栗木花岗岩型锡钽多金属矿床、江西大吉山钨钽矿床为代表[66]. 此外, 许多铌钽多还共(伴)生产出在W-Sn矿床中, 特别是石英脉型和交代型钨锡矿床中. 如柿竹园、香花岭、画眉坳等W-Sn矿床.

(ⅴ) 滇西-藏南成矿带. 滇西是我国重要的伟晶岩成矿带, 产出高黎贡山伟晶岩带、西盟伟晶岩带、凤庆-临沧伟晶岩带、石鼓伟晶岩带、哀牢山伟晶岩带[67]. 传统上认为, 该地区的伟晶岩多以富锡伟晶岩为主, 如宝华山锡矿出露伟晶岩脉百余条, 长10~180 m, 厚0.3~5 m. 但近年来, 在该地区南段的黄连沟地区发

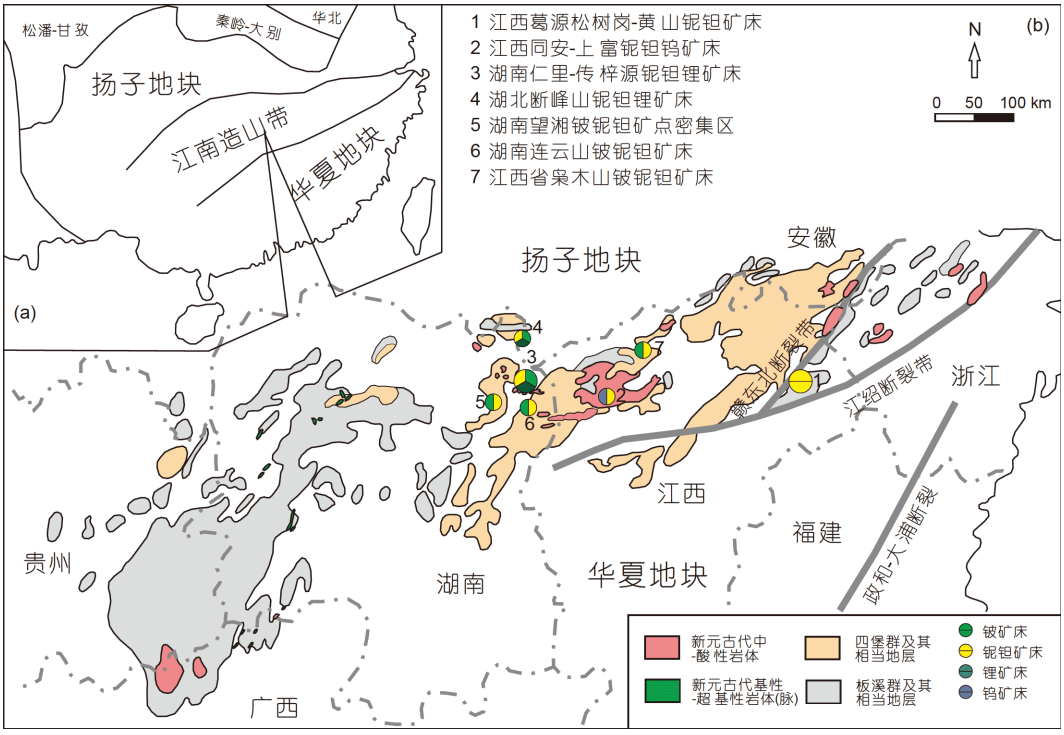


图 3 江南铌钽成矿带的稀有金属矿床分布图. 地质底图见王孝磊等人[62]

Figure 3 Distribution of rare-metal deposits in the Jiangnan Nb-Ta metallogenic belt. Geology map is modied from Wang et al.[62]

现高钽品位的伟晶岩脉(Ta_2O_5含量超过1%)[7]，在北段的贡山县发现黑马铁锂云母型花岗伟晶岩脉[68]. 而且，近年来，我国还在藏南地区发现了具有良好铌钽矿化前景的淡色花岗岩和伟晶岩[69,70]，铍地球化学异常也显示该地区优良的稀有金属找矿前景. 这些地区的稀有金属成矿作用均形成于喜山期，是印度板块与欧亚板块碰撞的结果, 本文称之为滇西-藏南成矿带.

3.2 碱性岩-碳酸岩岩浆系统成矿作用为主的铌钽成矿带

(ⅰ) 塔里木-华北地块北缘铌成矿带. 横贯中国东西部的塔里木-华北陆块构成了中国大陆的主体，沿塔里木-华北地块北缘深断裂带及其两侧已发现各种类型碱性岩体117个和碱性伟晶岩脉集中区31个，构成了长达5146 km近东西向巨型碱性岩带[71](图2), 在地质历史上, 塔里木-华北地块北缘深断裂多次拉张活动, 导致深源岩浆的多次侵入或喷发，致使该碱性岩带中的碱性岩形成时期主要为元古代、加里东期、海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期. 但主要在海西期发生了与碱性岩有关的稀土、铌、钽成矿作用, 主要包括: 与碱性岩正长岩有关的铌钽锆矿床, 如, 塔里木北缘的波孜果尔稀土-铌-钽-锆矿床、阔克塔格稀土-铌-钽-锆矿床; 碳酸岩型铌-稀土矿床, 如新疆瓦吉尔塔格铌-稀土矿床; 碱性伟晶岩型稀土-铌-钽-锆矿床, 如塔里木北缘的依兰里克矿床; 与霓霞正长岩有关的铀-铌-稀土矿床，如辽宁赛马矿床. 内蒙古白云鄂博稀土-铁-铌矿床也位于该碱性岩带，其成矿作用发生在元古代、加里东期和海西期. 近年来，甘肃北山-内蒙古阿拉善地区也发现多个碱性岩型铌-稀土矿点，其中规模较大的为内蒙古额齐纳旗的石灰山矿床.

(ⅱ) 秦岭成矿带. 秦岭造山带是华北陆块与扬子陆块的汇聚部位[72,73]. 区域除了在陕西和河南交界的灰池子岩体周边产出大量加里东期花岗伟晶岩型锂铍铌钽矿外[74], 还存在较多的碱性岩体(图4). 碱性岩主要为中深成侵入相和浅成相的正长岩类与霞石正长岩类, 部分为碱性-超基性杂岩、偏碱性的镁铁-超镁铁质岩和碳酸岩.

在三叠纪, 扬子陆块与扬子陆块汇聚, 区域发生碰

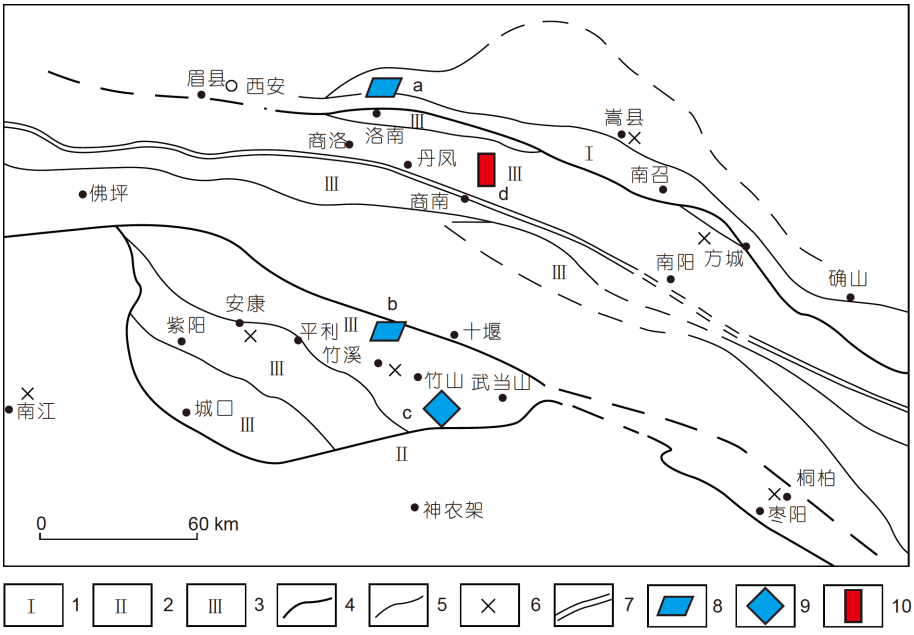


图 4 秦岭地区铌钽成矿带地质简图[72~74]. 1, 华北陆块南缘; 2, 扬子陆块北缘; 3, 秦岭造山带; 4, 秦岭造山带南、北断裂带; 5, 一级区域性断裂; 6, 碱性岩分布区; 7, 对接带; 8, 碳酸岩型稀土-铌矿床: a, 陕西华阳川铀-铌-铅-稀土矿床; b, 湖北庙垭稀土-铌矿床; 9, 碱性岩型稀土-铌矿床: c, 湖北杀熊洞稀土-铌矿床; 10, 花岗伟晶岩型锂铍铌钽矿床: d, 河南官坡锂铍铌钽矿床

Figure 4 Geological sketch of Nb-Ta metallogenic belt in Qinling area[72~74]. 1, Southern margin of North China Block; 2, north margin of Yangtze block; 3, Qinling orogenic belt; 4, south and north fault zone of the Qinling orogenic belt; 5, first-order regional fracture; 6, distribution area of alkaline rocks; 7, jointing strip; 8, carbonate type rare earth-niobium deposits: a, Uranium-niobium-lead-rare earth deposit in Huayangchuan, Shaanxi Province; b, Miaoya rare earth-niobium deposit, Hubei Province; 9, alkaline rock type rare earth-niobium deposits: c, rare earth-niobium deposit in Shaxiongdong, Hubei Province; 10, granite pegmatite lithium-beryllium-niobium-tantalum deposits: d, Guanpo Li-Be-Nb-Ta deposit, Henan Province

撞造山运动[57]. 在秦岭造山带与华北陆块的汇聚断裂带附近的太古界或元古界深变质岩或变质火山岩中, 产出多个碱性岩岩株或岩脉及碳酸岩, 岩石类型以碱性正长岩、霓辉正长岩和霞石正长岩为主, 以及大量脉状和网脉状碳酸岩, 形成华阳川铀-稀土-铌矿床和黄龙铺钼矿床, 成矿时代集中在207~229 Ma[75]. 在秦岭造山带与扬子陆块的汇聚断裂带中, 产出湖北枣阳-随县地区和河南桐柏地区的碱性正长岩类岩石, 鄂西地区的庙垭、杀熊洞碱性正长岩-碳酸岩, 关娅子的碱性杂岩, 陕南紫阳-平利-岚皋一带的碱性正长岩、碱性粗面岩和偏碱性的镁铁-超镁铁质岩石, 以及北大巴山区四川南江坪河一带的碱性-超基性杂岩(图4). 其中, 庙垭碱性岩-碳酸岩杂岩体和杀熊洞正长岩体发生明显的稀土-铌成矿, 随州的大洪山地区的花山寨和观子山等正长杂岩中也有铌钽矿化迹象. 在北大巴山-大洪山地区还分布有沉积变质型稀土-铌矿床, 如广水稀土-铌矿床.

(ⅲ) 扬子陆块西缘成矿带. 扬子地台西缘产出一系列与碱性岩有关的铌-稀土矿床, 在构造位置上属于攀西裂谷. 该裂谷是在早古生代地台盖层及其基底基础上发展起来的陆缘裂谷. 裂谷作用孕育于早古生代末, 发育于晚古生代及中生代, 到印支晚期封闭, 进入裂谷后时期[76,77]. 区域断裂发育, 呈近SN向分布, 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[78], 其中的近10处铌钽矿床(矿化点)分布在安宁河断裂带的两侧, 主要赋存在碱性正长伟晶岩脉、碱性花岗岩中, 如茨达岩体和矮郎河岩体, 形成时代集中于印支期(图S7), 赋矿岩石同时具有较高的稀土元素含量高, 其总量为200×10^{-6}~2457×10^{-6}[79]. 区域的重要铌钽矿床为茨达、太和等碱性花岗岩型稀土-铌钽矿床, 黄草、路枯、黄土坡等碱性伟晶岩脉型稀土-铌钽矿床.

4 中国铌钽矿床的时空分布规律

为了厘定中国铌钽矿床的时空分布规律, 本文搜集了近年来采用锆石、铌钽铁矿U-Pb和云母Ar-Ar等高精度同位素定年技术得到的测年结果(表3), 并绘制了中国铌钽矿床的时空分布图(图5).

4.1 中国铌钽矿床的时空分布特征

由图5可知, 过铝性岩浆系统的花岗岩型和花岗伟晶岩型钽铌矿床主要产出在阿尔泰、松潘-甘孜、江南、南岭和滇西-藏南地区等稀有金属成矿带, 对应的成矿作用主要发生在加里东末期、印支-燕山期、喜马拉雅期等. 其中, 阿尔泰、松潘-甘孜和江南地区的成矿作用发生在印支-燕山期, 是花岗岩型和花岗伟晶岩型铌钽矿床的主成矿期. 南岭成矿带存在加里东期和印支-燕山期两期成矿作用, 秦岭铌钽成矿带的花岗伟晶岩型成矿作用发生在加里东期, 滇西-藏南成矿带的成矿作用发生在喜马拉雅期.

与过铝性花岗岩类铌钽矿床成矿特点不同, 碱性岩浆系统有关的铌钽矿床主要形成于海西期和印支期(图5). 塔里木-华北地块北缘成矿带中, 塔里木北缘的碳酸岩-碱性成矿岩体主要形成于海西期, 冀北和辽东断裂带的碱性岩主要形成于印支期; 秦岭铌钽成矿带中, 庙垭、华阳川等碳酸岩型矿床也形成于海西期. 但其中的内蒙古白云鄂博Nb-REE矿床有多组同位素年龄, 存在中元古代、加里东期和海西期多期成矿, 但中元古代为主成矿期[99].

4.2 过铝性岩浆系统铌钽矿床的成矿背景

过铝性岩浆系统的铌钽矿床主要形成于褶皱造山带, 板块边缘或板块之间的海槽环境对成矿作用的发生起着重要作用. 其成矿环境特点为: (1) 赋矿地层的沉积环境: 一般分布于大陆之间海槽环境, 但范围大小不等, 具有特征性的(类)复理石沉积建造, 还包括硬砂岩建造、硅质-火山岩建造等, 沉积厚度巨大, 从数千米到上万米. (2) 造山过程: 在板块汇聚的造山过程中, 广泛发育强烈的中酸性岩浆活动, 构造变形强烈, 普遍发育褶皱和逆冲断层推覆构造等. (3) 变质作用: 区域变质作用发育, 板岩、片岩发育. 例如, 松潘-甘孜伟晶岩成矿带赋存的巴颜喀拉海中沉积了巨厚三叠系西康群和巴颜喀拉群泥质片、板岩, 厚度超过10000 m[57]); 幕阜山-连云山伟晶岩产出于新元古代冷家溪群, 冷家溪群沉积于华夏地块与扬子地块间的海洋, 沉积厚度大于8664 m[100]; 武夷地区的南平伟晶岩田位于华南褶皱造山带, 前泥盆纪复理石沉积厚度近20000 m[101]; 阿尔泰伟晶岩带虽然经受了多期造山作用, 但新元古代基地为沉积碎屑岩[54], 奥陶纪复理石沉积厚度超过6000 m[57]. 这些沉积建造一般吸附了较多的稀有金属元素, 可能是成矿物质的来源[56,59,102,103], 但有待进一步研究.

在造山带中, 如果(类)复理石沉积建造提供了稀有金属成矿的物质基础[104,105], 造山过程则为成矿作用的

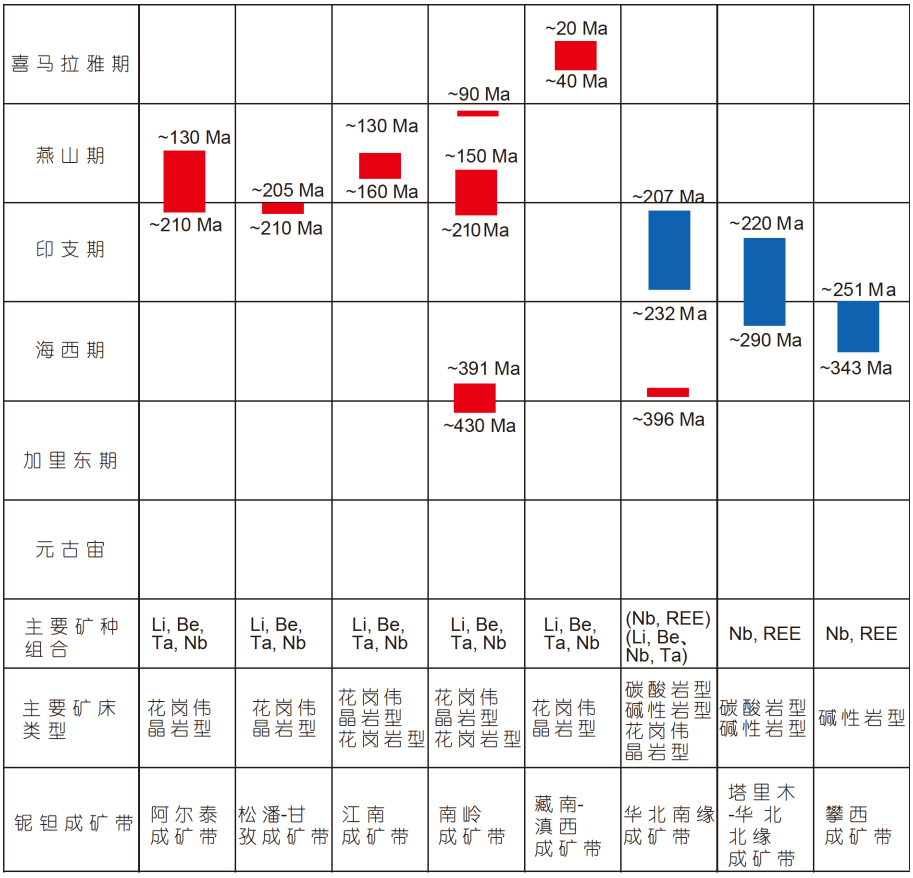


图 5 中国主要铌钽成矿带铌钽成矿时代分布. 红色条块代表造山带内花岗岩类锂铍铌钽矿床形成的时限; 蓝色条块代表陆缘断裂带或裂谷中碱性岩和碳酸岩型稀土-铌矿床的形成时限. 造山旋回时限参考全国地层委员会(2002)

Figure 5 Distribution of niobium-tantalum metallogenic ages in major Nb-Ta metallogenic belts of China. Red strips represent the time limit for the formation of granitoid deposits in folded orogenic belts; blue strips represent the time limit for the formation of rare earth-niobium deposits of alkaline rocks and carbonate rocks in continental margin faults or rifts. The time limit for the orogenic cycle refers to the National Stratigraphic Commission (2002)

发生提供了能量. 在世界范围内, 过铝性花岗岩类铌钽矿床的成矿作用形成于某个造山过程的一定阶段, 但往往经历了多期次造山活动[106]. 这主要因为多期次造山过程能够促进岩浆多次分异, 导致稀有金属逐渐富集乃至成矿. 这一现象不但存在于北美苏必利尔、巴西东部伟晶岩、以及澳大利亚Greenbushes矿床等世界多地的伟晶岩(带)省, 在新疆阿尔泰、江南、南岭等铌钽成矿带也尤为明显. 其中, 阿尔泰经历了加里东、海西和印支-燕山期的造山活动, 但稀有金属主要成矿发生于印支-燕山期; 江南地区经历了新元古代和燕山期的造山活动, 但成矿于燕山期; 南岭地区, 从加里东期便开始发生稀有金属成矿作用, 但在燕山期达到成矿高峰; 松潘-甘孜地区是世界上少有的主要经历一次造山活动便发生大规模成矿的地区, 且未明显遭受后期造山活动影响的成矿带.

4.3 碱性岩浆系统铌钽矿床的成矿环境

与碳酸岩和碱性岩相关的铌-稀土-(钽)矿床多形成于板块边缘或陆内的深大断裂带(图2), 显示了拉张的构造环境和成矿物质的深部来源[107], 我国的此类矿床主要产于陆缘断裂带或裂谷[40]. 其中, 白云鄂博Nb, REE, Fe矿床位于华北陆块北缘的断裂带内, 新疆拜城碱性伟晶岩锆石矿化及瓦吉尔塔格碳酸岩稀土-铌矿化则沿塔里木陆块北缘的深断裂分布, 三者均位于塔里木-华北陆块北缘深大断裂带内, 受控于塔里木-华北板块与西伯利亚板块拼接后的多次伸展拉张环境[30,71]. 四川茨达、太和、路枯等铌矿床沿扬子陆块西缘的安宁河深断裂分布, 受到攀西裂谷的控制[78]; 湖北庙垭Nb和REE矿床沿扬子陆块北缘的安康-房县深断裂分布, 受控于扬子陆块与秦岭造山带的汇聚过程中的拉张环

表 3 我国主要铌钽矿床的成矿年龄

Table 3 Metallogenic ages of main Nb-Ta deposits in China

成矿带	矿产地	矿种组合	采样地质体	成矿年龄(Ma)	测试方法	文献
塔里木-华北陆块北缘成矿带	内蒙古白云鄂博	REE, Nb	碱性岩-碳酸岩	1305 485~386 277~255	Sm-Nd	[40]
	新疆瓦吉尔塔格	REE, Nb	碳酸岩	252	Ar-Ar	[30]
	辽宁赛马	REE, Nb	碱性岩	222	黑云母Ar-Ar	[80]
	新疆波孜果尔	REE, Nb	碱性岩	290	锆石U-Pb法	[81]
秦岭成矿带	湖北竹山庙垭	Nb, REE	碱性岩-碳酸岩	232	铌钽铁矿U-Pb	[82]
	陕西华阳川	Nb, REE	碱性岩-碳酸岩	207 225~229	锆石U-Pb	[75]
	陕西商南县大河	Ta-Nb-Li	花岗伟晶岩	~360	铌钽铁矿U-Pb	[83]
扬子西缘成矿带	四川德昌黄草	Nb, REE	碱性岩	259	锆石U-Pb	[84]
	四川会理红格	Nb, REE	碱性岩	259	锆石U-Pb	[85]
	四川会理草场	Nb, REE	碱性岩	260	锆石U-Pb	[86]
	四川德昌茨达	REE, Nb	碱性花岗岩	258	锆石U-Pb	[84]
	四川西昌太和	Nb, REE	碱性花岗岩	259~256	锆石	[87]
阿尔泰成矿带	新疆可可托海	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	218	铌钽铁矿U-Pb	[83]
	新疆可可托海	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	208	辉钼矿Re-Os	[88]
	新疆可可托海	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	182~179	白云母Ar-Ar	[89]
	新疆柯鲁木特	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	140	白云母Ar-Ar	待发表
	新疆蒙库喀拉苏	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	268~252	白云母Ar-Ar	[30]
	新疆蒙库喀拉苏	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	240	铌铁矿U-Pb	[90]
松潘-甘孜成矿带	新疆大红柳滩	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	212	白云母Ar-Ar	[61]
	四川甲基卡	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	208	花岗岩锆石U-Pb	[59]
	四川可尔因	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	205	花岗岩锆石U-Pb	[56]
	四川扎乌龙	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	210	花岗岩锆石U-Pb	待发表
南岭成矿带	江西广昌西港	Li-Ta	花岗伟晶岩	420~430	铌铁矿U-Pb	[66]
	福建南平	Ta-Nb-Li	花岗伟晶岩	391	铌钽铁矿U-Pb	[83]
	广西恭县栗木	Ta, Nb	花岗岩	211~214	白云母Ar-Ar	[24]
	广西恭县栗木	Ta, Nb	花岗岩	~218	铌铁矿U-Pb	[66]
	湖南临武尖峰岭	Li, Be, Nb, Ta	花岗岩	160	锆石U-Pb	[91]
	湖南临武尖峰岭	Li, Be, Nb, Ta	花岗岩	160	铌铁矿U-Pb	[66]
	湖南临武癞子岭	Be, Nb, Ta, Sn	花岗岩	155	锆石U-Pb	[92]
	江西全南大吉山	Ta, Nb, W	花岗岩	161	Rb-Sr	[93]
	界牌岭	Ta, Nb	花岗岩	~90	铌钽铁矿U-Pb	[66]
江南成矿带	江西横峰黄山	Nb, Ta, W	花岗岩	130	铌钽铁矿U-Pb	[66]
	江西宜春414	Ta, Nb	花岗岩	160	铌钽铁矿U-Pb	[83]
	湖北断峰山	Ta-Nb-Be-Li	花岗伟晶岩	128	白云母Ar-Ar	待发表
	湖南湘阴望湘	Nb, Ta	花岗岩	137	Rb-Sr	[94]
	湖南平江仁里	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	130	铌钽铁矿U-Pb	待发表
	湖南连云山	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	130	辉钼矿Re-Os	待发表
滇西-藏南成矿带	云南黄连沟	Be, Ta	花岗伟晶岩	28	白云母Ar-Ar	待发表
	云南宝华山	Sn, Ta, Li	花岗伟晶岩	15	白云母Ar-Ar	待发表
	云南黑马	Sn, Ta, Li	花岗伟晶岩	40	铁锂云母Ar-Ar	待发表
	云南梁河	Be	花岗伟晶岩	48	锆石U-Pb	[95]
	藏南地区	Be, Ta	花岗岩	16~19	锆石	[96]
其他地区	新疆镜儿泉	Li-Be-Nb-Ta	花岗伟晶岩	243	白云母Ar-Ar	[97]
	内蒙古巴尔哲	REE-Nb-Be	碱性花岗岩	121	锆石U-Pb	[98]

境[40].

各个断裂带在地质历史中，发生过多次“开合”运动，导致多期碱性岩浆侵位，但铌钽成矿作用往往集中在较晚期次侵位的碱性岩浆中，达到成矿的高峰期，其机制有待进一步研究. 例如，在新疆的塔里木北缘断裂带，碱性岩浆主要活动于新元古代(931~900~683 Ma)、早-中石炭世(360~310 Ma)、早二叠世(279~273 Ma)和晚二叠世(249 Ma)，但铌钽-稀土成矿作用主要发生在二叠纪的岩浆活动期[30]. 在整个塔里木-华北陆块北缘断裂带中，碱性岩浆活动经历了元古宙、加里东期、海西期、印支期、燕山期，但主要在海西期和印支期发生了与碱性岩有关的稀土、铌、钽成矿作用，燕山期发生碱性岩型金成矿作用. 在秦岭地区，碱性岩的形成时代跨越了较长的时间范围: 即从元古代末期的晋宁运动开始，一直延续到中生代的印支期，均有碱性岩的形成[72]，但庙垭和华阳川的成矿作用直至印支期才发生.

综上所述，碱性岩浆系统的铌-稀土矿床的成矿时代主要在海西期-印支期，过铝性岩浆系统的花岗岩型和花岗伟晶岩型钽铌矿床主要形成于加里东晚期和印支晚期-燕山期，二者具有一定交替成矿的特点，这种铌钽成矿作用的时空差异主要制约于成矿构造环境的不同，是中国大陆多块体拼合造山过程与深大断裂带活动期不同时空发生的体现，也反映了中国大陆的挤压和拉张构造环境的交替. 以松潘-甘孜花岗伟晶岩型钽锂成矿带和攀西碱性岩型稀土-铌成矿带为例，二者均处于扬子板块西缘，攀西稀土-铌成矿作用主要发生于攀西裂谷发育期的早印支期拉张环境中[77]，在印支晚期，随着古特提斯洋的闭合，扬子板块与羌塘-昌都、华北陆块汇聚，区内进入褶皱造山阶段[108]，成矿作用转变为以花岗伟晶岩型锂钽为主，局限于松潘-甘孜造山带的三叠系西康群中.

5 中国铌钽资源的前景分析

5.1 中国铌钽资源的品质

世界上的钽资源主要来源于花岗伟晶岩型矿床中，铌资源主要来源于碳酸岩风化壳型铌矿床. 但我国缺乏高品位的花岗伟晶岩型钽资源，尚未发现碳酸岩风化壳型铌资源，只能以低品位的花岗岩型钽铌作为主要钽铌资源来源. 而且，我国碳酸岩型铌矿床的数量很少，除湖北庙垭和新疆瓦吉尔塔格等少数几个矿床外，在其他地区找矿突破有限，尚未发现巴西Araxá式的碳酸岩型烧绿石矿床.

与世界上的同类型铌钽资源相比，中国的铌钽资源品位低、开发利用难度高. 中国已利用铌矿的Nb_2O_5品位为0.0083%~0.0437%，钽的品位很少超过0.02%(图6). 而且，中国的铌钽矿床中共生矿物复杂，选冶困难. 巴尔哲、庙垭等大型铌矿床均为多组分稀有稀土共伴生矿，矿物粒度细、选冶难、回收率低，一般为23.61%~47.64%. 精矿品位也低(2.80%~34.62%). 在白云鄂博铁-稀土-铌矿床中，铌矿物晶粒很细，部分(约占15%)呈类质同象或呈细微矿物(<0.003 mm)包裹在矿石矿物和脉石中，选矿困难，直至目前还未选出品位较高的铌精矿. 华南地区风化壳和砂矿型铌钽矿床品位

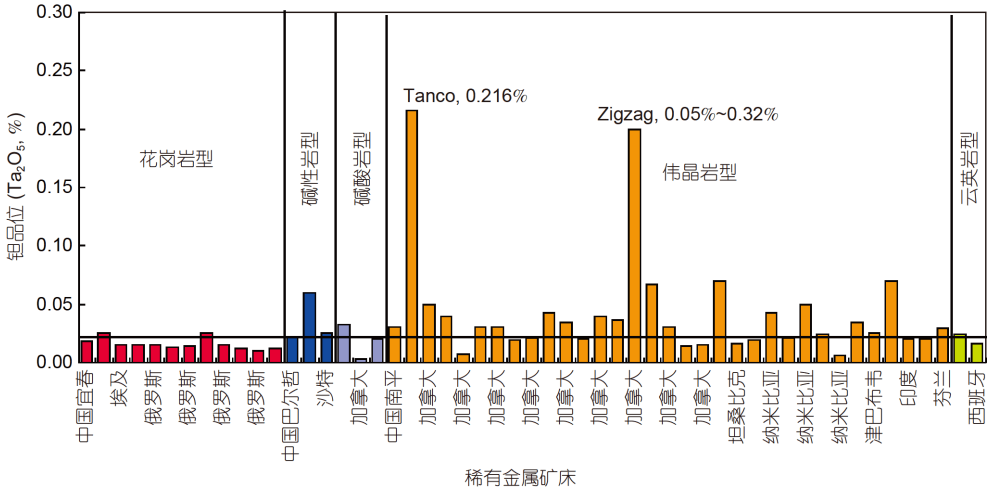


图 6 世界钽矿床的品位信息[109]
Figure 6 Grade information of world tantalum deposits[109]

低, 经济效益有限, 派潭、永汉等铌钽矿山已停采多年. 目前, 中国的铌钽资源主要来源于宜春414矿床, 广西栗木矿床从锡石中提取钽, 造成我国铌钽资源对外依存度较高.

我国的钨锡矿床众多, 钽在锡石中既可能以类质同象存在, 也可能以矿物包裹体存在[110,111]. 通常与热液矿床中的锡石钽含量较低, 稀有金属花岗岩和伟晶岩的锡石含有较高的钽铌含量. 如, 法国Chedeville花岗伟晶岩中的锡石Ta_2O_5含量12.61%[112]. 近年来, 世界消耗的钽大约一半来自富钽的锡渣, 钽原料年总产能(Ta_2O_5)约1600 t, 其中钽精矿生产能力为500 t, 锡渣生产能力为1000 t[7]. 东南亚国家主要从采锡石矿并从锡渣中提取钽. 如表4所示, 中国许多锡矿床的锡石中Ta_2O_5含量均远超过国内钽矿床的最低工业品位要求. 这些高Ta_2O_5含量的锡石熔炼后的锡矿渣保持Ta_2O_5含量不变, 具有较高的经济价值. 因此, 我国在今后研究应重视原生锡矿中钽的含量及其赋存状态, 注意锡渣中钽的经济可选性, 并开展部分黑钨矿的铌钽综合利用研究. 此外, 黑钨矿中也存在较高的铌钽含量, 甚至形成钨铁铌矿或铌黑钨矿((Fe, Mn)(Nb, Ta, W)O_4). 因此, 与花岗型铌钽矿床共生的黑钨矿矿体的铌钽含量值得重视[110], 如江西大吉山矿床岩体上部的石英脉型矿体的黑钨矿平均含有约0.1% Ta_2O_5, 0.3% Nb_2O_5[117], 但尚未在黑钨矿选冶中引起重视.

5.2 中国铌钽找矿方向

综合前文所述, 我国缺乏高品位的碳酸岩型烧绿石铌钽资源, 与世界上同类型铌钽矿床相比, 我国的铌钽资源品位较低, 选冶困难, 但我国的锡矿中的钽资源有一定的综合利用潜力. 这些特点决定我国今后的铌钽找矿方向应该重点寻找高品质资源的花岗伟晶岩型和碳酸岩型铌钽资源, 同时重视共(伴)生铌钽资源的综合利用.

(ⅰ) 花岗伟晶岩型铌钽资源的找矿方向. 在西部, 除了阿尔泰地区外, 松潘-甘孜成矿带的伟晶岩型铌钽资源找矿前景可观. 近年来, 川西地区的花岗伟晶岩型矿床的找矿工作取得较大突破, 在可尔因地区发现李家沟特大型稀有金属矿床, 在甲基卡矿区的外围, 取得X03号脉的找矿突破[118]. 另外, 石渠县扎乌龙地区的工作程度很低, 20世纪80年代的勘查工作仅确定为中型规模, 预计深部和外围找矿前景巨大, 规模可能扩大为大型, 甚至超大型. 在西昆仑大红柳滩一带的稀有金属矿集区具有极好的成矿条件, 发现了白龙山锂铍铌钽矿床[119], 西昆仑毗邻的阿尔金山地区也有较好的稀有金属资源找矿潜力[120]. 但是这些地区侧重于寻找锂资源, 应重视成矿岩体和靠近岩体的钠长石微斜长石的铌钽资源, 如甲基卡二云母花岗岩中存在一定的铌钽铁矿.

在我国东部, 随着湖南省平江县仁里钽铌矿床的发现, 江南造山带的稀有资源找矿工作逐渐引起湖南省、江西省和湖北省的重视. 区域的找矿工作应注意幕阜山岩体周边的找矿工作, 包括幕阜山南缘仁里矿区周边, 幕阜山北缘断峰山矿区周边, 以及岩体内部晚期岩体的含矿性评价. 此外, 应注意九岭复式岩体中, 晚期岩体, 即燕山期岩体的找矿评价, 以花岗岩型矿床为主要找矿目标. 在南岭地区, 应注意南平铌钽矿床所

表 4 中国部分锡矿床中锡石的Ta_2O_5含量

Table 4 Ta_2O_5 content in cassiterite in some tin deposits in China

矿产地	矿床类型	锡石中Ta_2O_5含量(%)	资料来源
广东信宜锡坪锡矿床	云英岩型	0.681	[113]
广东信宜银岩锡矿床	斑岩型	0.341	[113]
云南宝华山锡矿床	花岗伟晶岩	0.2	[114]
云南新岔变锡矿床	花岗岩型	0.11	[114]
云南某锡矿床	花岗伟晶岩型	1.15	[114]
云南某锡矿床	花岗伟晶岩型	1.22	[114]
广东郁南-广宁锡铌钽矿床	花岗伟晶岩型	1.925	[115]
云南腾冲锡矿带	花岗伟晶岩型	0.439	[116]
福建南平铌钽矿床	花岗伟晶岩型	0.44~5.86	[101]
河南官坡镇七里沟锡矿	花岗伟晶岩型	~2.0	王汝成教授提供

处的武夷地区的花岗伟晶岩型矿床的找矿工作.

在藏南地区, 喜马拉雅淡色花岗岩带呈东西向分布, 延绵超过1000 km, 产出大量钠长石花岗岩和花岗伟晶岩, 发现代表铌钽成矿的铌铁矿族矿物、烧绿石-细晶石、褐钇铌矿、铌铁金红石等[69,111]. 该地区与滇西地区钽成矿作用均形成于喜马拉雅期, 说明我国西南地区和西藏地区存在较大的铌钽资源找矿潜力, 有望成为我国又一个铌钽等稀有金属资源基地[111].

其他地区, 东天山的镜儿泉和与西昆仑毗邻的阿尔金地区的伟晶岩找矿工作前景也很大, 这些地区均值得进一步勘查和研究.

(ⅱ) 碳酸岩型铌钽资源的找矿方向. 碳酸岩型铌钽资源的找矿应重点放在我国的几大断裂带. 目前, 在塔里木-华北陆块北缘断裂带中, 产出众多的碱性岩型稀土-铌矿床, 碳酸岩型矿床仅发现新疆瓦吉尔塔格等少数几个, 该地区的找矿工作可在20世纪80年代工作的基础上, 加大找矿勘查工作. 南秦岭碱性岩-碳酸岩型稀土-铌成矿带, 以庙垭和杀熊洞为代表性矿床, 该成矿带东部的观子山和花家寨碱性岩体也可能具有一定的成矿潜力, 可作为今后的找矿方向. 此外, 我国郯庐断裂带北段, 除了产出微山碳酸岩型稀土矿床外, 在莱芜地区产出众多碳酸岩, 而且发现了高铌-稀土品位的塔埠头碳酸盐伟晶岩型矿床, 说明该地区也有较大的找矿潜力.

(ⅲ) 共(伴)生铌钽资源. 近年来, 我国由于锡资源紧缺, 逐渐加大锡的找矿力度. 鉴于锡与钽的共生性, 二者的找矿突破可以一起开展. 在滇西地区, 除了花岗伟晶岩型黄连沟式钽矿床的找矿工作, 更应该重视该地区的伟晶岩锡矿床, 注意评价锡石中的钽含量, 开展综合利用研究. 在秦岭地区, 河南和陕西交界的灰池子岩体周边产出了具有较高锡品位的花岗伟晶岩脉(未公布资料), 与锡共(伴)生的钽资源有待进一步评价. 此外, 如表4所示, 我国南岭地区也应该加强评价钨锡矿中共(伴)的钽资源, 特别是武夷地区的花岗伟晶岩型矿床和与花岗岩型铌钽矿体共生的钨锡矿体, 宜春414矿床旁边的新坊黑钨矿矿体.

相对于其他成矿带, 大兴安岭成矿带的稀有金属矿床研究尤为薄弱. 该地区的典型矿床为巴尔哲稀土-铌钽矿床. 近年来又在锡林浩特附近发现石灰窑云英岩型铌钽铷矿床和维拉斯托大型锡矿床, 而且, 大兴安岭地区出露较大面积的火山岩, 某些地段有Nb和Ta异常. 这些特征说明, 我国东北地区不但具有寻找钨锡矿床, 还具有发现与钨锡共(伴)生铌钽矿床的潜力.

6 总结

(1) 世界上的铌钽矿床主要类型为过铝质岩浆系统的花岗岩型、花岗伟晶岩型和碱性岩-碳酸岩岩浆系统的碳酸岩型、碳酸岩风化壳型和碱性岩型, 以及砂矿型. 我国的铌钽矿床主要为花岗伟晶岩型、花岗岩型、碱性岩型和碳酸岩型, 缺乏碳酸岩风化壳型铌钽资源.

(2) 在我国, 过铝质岩浆系统的铌钽成矿带主要为阿尔泰、松潘-甘孜、江南和南岭成矿带; 碱性岩-碳酸岩岩浆系统的铌钽成矿带主要为塔里木-华北陆块北缘、秦岭和扬子陆块西缘成矿带. 在成矿时间方面, 过铝性岩浆系统的铌钽成矿带成矿作用主要发生在印支晚期-燕山期, 并存在少量加里东和喜马拉雅期成矿作用; 碱性岩-碳酸岩岩浆系统的铌钽成矿带主要在海西期-印支期发生成矿, 并存在元古宙成矿期. 两个类型的成矿带具有时空分离、交替成矿的特点.

(3) 在成矿背景方面, 过铝质岩浆系统的铌钽矿床主要发生在巨厚(类)复理石沉积建造区的褶皱造山过程中, 多期造山运动有利于稀有金属元素的富集; 而碱性岩浆系统的铌钽矿床主要产在板块边缘或陆内的深大断裂带或裂谷区, 显示了成矿物质的深部来源, 断裂带的多次开合运动中, 较晚时期的拉张环境有利于铌钽成矿. 二者成矿背景的不同是二者时空分离、交替成矿的主要原因.

(4) 在资源禀赋方面, 我国的铌钽资源开发利用难度高, 可供利用的矿产地和储量却很少, 我国的锡石和黑钨矿中的钽资源开发利用值得重视. 今后, 我国应该重视高品位花岗伟晶岩型和碳酸岩型铌钽资源的找矿工作. 重点在松潘-甘孜、阿尔泰、江南、藏南等铌钽成矿带实现花岗伟晶岩型资源的找矿突破, 在塔里木-华北陆块北缘、秦岭等成矿带, 以及郯庐断裂带寻找碳酸岩型铌钽资源, 并重视在钨锡成矿区寻找共(伴)生型钽资源.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所秦克章研究员和南京大学车旭东博士对本文的评审及提出的修改意见. 图1, 2涉及的中国地图已由自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2019)606号.

参考文献

1 Liu Y J, Cao L M, Li Z L. Elemental Geochemistry (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987. 1–548 [刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1987. 1–548]

2 Linnen R L, Keppler H. Columbite solubility in granitic melts: Consequences for the enrichment and fractionation of Nb and Ta in the Earth's crust. Contrib Mineral Petrol, 1997, 128: 213–227

3 Linnen R L. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2nd ed. 2014, 13: 543–568

4 Kaeter D, Barros R, Menuge J F, et al. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite. Geochim Cosmochim Acta, 2018, 240: 98–130

5 Gunn G. Critical Metals Handbook. Nottingham: British Geological Survey, 2014. 1–439

6 Schulz K J, DeYoung, Jr J H, et al. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. USGS, Professional Paper, 2017, 1802. 1–862

7 Wang R J, Wang D H, Li J K, et al. Rare rare earth rare mineral resources and their development and utilization (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2015. 1–429 [王瑞江, 王登红, 李建康, 等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用. 北京: 地质出版社, 2015. 1–429]

8 Liu X, Zhou F C, Huang Z B, et al. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its significances (in Chinese). Geotect Metal, 2018, 42: 235–243 [刘翔, 周芳春, 黄志飚, 等. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义. 大地构造与成矿学, 2018, 42: 235–243]

9 Li S, Li J, Chou I M, et al. The formation of the Yichun Ta-Nb deposit, South China, through fractional crystallization of magma indicated by fluid and silicate melt inclusions. J Asian Earth Sci, 2017, 137: 180–193

10 Reyf F G, Seltmann R, Zaraisky G P. The role of magmatic processes in the formation of banded Li, F-enriched granites from the Orlovka tantalum deposit, Transbaikalia, Russia: Microthermometric evidence. Canad Miner, 2000, 38: 915–936

11 Bastos Neto A C, Pereira V P, Ronchi L H, et al. The world-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas State, Brazil. Canad Miner, 2009, 47: 1329–1357

12 Zhu J C, Rao B, Xiong X L, et al. comparison and genetic interpretation of Li-F rich, rare-metal bearing granitic rocks (in Chinese). Geochimica, 2002, 31: 141–152 [朱金初, 饶冰, 熊小林, 等. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考. 地球化学, 2002, 31: 141–152]

13 Černý P, Blevin P L. Granite-related ore deposits. Soc Econ Geol, 2005, 100th Anniversary Volume: 337–370

14 Yuan Z X, Bai G, Yang Y Q. A discussion on petrogenesis of rare metal granites (in Chinese). Mineral Deposits, 1987, 6: 90–98 [袁忠信, 白鸽, 杨岳清. 稀有金属花岗岩型矿床成因讨论. 矿床地质, 1987, 6: 90–98]

15 Li S H, Li J K, Zhang D H, et al. The evolution of ore-forming fluid and its constrain to the ore-forming process in Limu Ta-Nb-Sn polymetallic ore deposit, Guangxi, China (in Chinese). Acta Geol Sin, 2015, 31: 954–966 [李胜虎, 李建康, 张德会, 等. 广西栗木钽铌锡多金属矿床的成矿流体演化及其对成矿过程的制约. 岩石学报, 2015, 31: 954–966]

16 Huang X L, Wang R C, Chen X M, et al. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China. Canad Miner, 2002, 40: 1047–1068

17 Xie L, Wang R C, Che X D, et al. Tracking magmatic and hydrothermal Nb-Ta-W-Sn fractionation using mineral textures and composition: A case study from the late Cretaceous Jiepailing ore district in the Nanling Range in South China. Ore Geol Rev, 2016, 78: 300–321

18 Xie L, Wang R C, Groat L A, et al. A combined EMPA and LA-ICP-MS study of Li-bearing mica and Sn-Ti oxide minerals from the Qiguling topaz rhyolite (Qitianling District, China): The role of fluorine in origin of tin mineralization. Ore Geol Rev, 2015, 65: 779–792

19 Xie L, Wang Z, Wang R, et al. Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing district, south China). Ore Geol Rev, 2018, 95: 695–712

20 Zhu J C, Wang R C, Liu J J, et al. Fractionation, evolution, petrogenesis and mineralization of Laiziling Granite Pluton, Southern Hunan Province. Geol J China Univ, 2011, 17: 381–392

21 Zhu Z Y, Wang R C, Che X D, et al. Magmatic-hydrothermal rare-element mineralization in the Songshugang granite (northeastern Jiangxi, China): Insights from an electron-microprobe study of Nb-Ta-Zr minerals. Ore Geol Rev, 2015, 65: 749–760

22 Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, et al. The Early Cretaceous Huangshan rare metal granite complex, northeast Jiangxi Province, southeast China: A new style of Nb-rich rare metal granite. Am Mineral, 2018, 65: 1–11

23 Wang R C, Hu H, Zhang A C, et al. Pollucite and the cesiumdominant analogue of polylithionite as expressions of extreme Cs enrichment in the Yichun topaz-lepidolite granite, southern China. Can Mineral, 2004, 42: 883–896

24 Li S H. Metallogenic mechanism and prospecting model of typical granite-type rare metal deposits in South China (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 2015 [李胜虎. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究. 博士学

位论文. 北京: 中国地质大学, 2015]
25 Wang D H, Li J K, Li J G, et al. Theory and practice of deep detection in Nanling metallogenic belt (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2018. 1−471 [王登红, 李建康, 李建国, 等. 南岭成矿带深部探测的理论与实践. 北京: 地质出版社, 2018. 1−471]
26 Zhu J C, Li R K, Zhou F Y, et al. Genesis of asymmetrically layered pegmatite-aplite dykes of Shuiximiao mine, Limu district, Guangxi (in Chinese). Geochimica, 1996, (1): 1−9 [朱金初, 李人科, 周凤英, 等. 广西栗木水溪庙不对称层状伟晶岩——细晶岩岩脉的成因讨论. 地球化学, 1996, (1): 1−9]
27 Liu X, Xing H, Zhang D. Influences of fluid properties on the hydrothermal fluid flow and alteration halos at the Dajishan tungsten deposit, China. J Geochem Explor, 2016, 163: 53–69
28 Schulz K J, Jr. J H D, Seal II R R, et al. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. US Geological Survey, Professional Paper 1802. http://doi.org/10.3133/pp1802
29 Černý P. Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: Möller P, Černý P, Saupe F, eds. Lanthanides, Tantalun1 and Niobiun Mineralogy, Geochemistry, Characteristics of Primary Ore Deposits, Prospecting, Processing and Applications. Special Publication No. 7 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989. 195–239
30 Zou T R, Li Q C. Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006. 1−284 [邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京: 地质出版社, 2006. 1−284]
31 Wang R C, Che X D, Zhang W L, et al. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China). Eur J Mineral, 2009, 21: 795–809
32 Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, et al. Mineralogy and significance of micas and feldspars from the Koktokay No. 3 pegmatitic rare-element deposit, Altai (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2013, 29: 3004−3022 [周起凤, 秦克章, 唐冬梅, 等. 阿尔泰可可托海 3 号脉伟晶岩型稀有金属矿床云母和长石的矿物学研究及意义. 岩石学报, 2013, 29: 3004−3022]
33 Li P, Li J K, Pei R F, et al. Multistage magmatic evolution and Cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: Constrains from geochronological evidence (in Chinese). Earth Sci, 2017, 42: 1684−1696 [李鹏, 李建康, 裴荣富, 等. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰: 年代学依据. 地球科学, 2017, 42: 1684−1696]
34 Liu Y J, Li J X, Hu R. Nb-Ta Geology and Survey and Exploration (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1979. 1−183 [刘源骏, 黎家祥, 胡蓉. 铌钽地质及普查勘探. 北京: 地质出版社, 1979. 1−183]
35 Li J K, Yuan Z X, Bai G, et al. Ore-forming fluid evolvement and its controlling to REE (AG) mineralizing in the Weishan deposit, Shandong (in Chinese). J Mineral Petrol, 2009, 29: 60−68 [李建康, 袁忠信, 白鸽, 等. 山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约. 矿物岩石, 2009, 29: 60−68]
36 Mitchell R H. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites. In: Linnen R L, Samson I M, Martin R F, eds. Rare-element geochemistry and mineral deposits Geol Assoc. Canad Short Course Notes, 2015, 17: 201–216
37 Biondi J C. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. In: Comin-Chiaramonti P, Gomes C B, eds. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform. São Paulo: Edusp/FAPESP, 2005. 707–750
38 Chakhmouradian A R, Williams C T. Mineralogy of high-field-strength elements (Ti, Nb, Zr, Ta, Hf) in phoscoritic and carbonatitic rocks of the Kola Peninsula, Russia. In: Wall, Zaitsev A N, eds. Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province. London: Mineralogical Society, 2004. 293–340
39 McCrea J. Summary Report on the Blue River Carbonatite Property, East-Central British Columbia. Prepared for Commerce Resources Corp., 2001
40 Yuan Z X, Li J K, Wang D H, et al. Metallogenic regularity of rare earth deposits in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2012. 1−116 [袁忠信, 李建康, 王登红, 等. 中国稀土矿床成矿规律. 北京: 地质出版社, 2012. 1−116]
41 Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, et al. A case example of the importance of multi-analytical approach in deciphering carbonatite petrogenesis in South Qinling orogen: Miaoya rare-metal deposit, central China. Lithos, 2015, 227: 107–121
42 Bai G, Yuan Z X. Carbonate geology and mineral resources (in Chinese). J Inst Mineral Geol, 1985, (1): 175−183 [白鸽, 袁忠信. 碳酸岩地质及其矿产. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1985, (1): 175−183]
43 Salvi S, Williams-Jones A E. The role of hydrothermal processes in the granite-hosted Zr, Y, REE deposit at Strange Lake, Quebec/Labrador: Evidence from fluid inclusions. Geochim Cosmochim Acta, 1990, 54: 2403–2418
44 Wang Y X, Zhao Z H. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE Nb-Be-Zr superlarge deposit (in Chinese). Geochimica, 1997, 26: 24−35 [王一先, 赵振华. 巴尔哲超大型稀土铌铍锆矿床地球化学和成因. 地球化学, 1997, 26: 24−35]
45 Yang X Y, Lai X D, Ren Y S, et al. Geological characteristics and their scientific problems of the Baiyan Obo Fe-REE-Nb deposit: Discussion on the origin of Baiyan Obo super-large deposit (in Chinese). Acta Geol Sin, 2015, 89: 2323−2350 [杨晓勇, 赖小东, 任伊苏, 等. 白云鄂博铁-稀土-铌矿床地质特征及其研究中存在的科学问题——兼论白云鄂博超大型矿床的成因. 地质学报, 2015, 89: 2323−2350]
46 Zhu X, Sun J, Pan C. Sm-Nd isotopic constraints on rare-earth mineralization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China. Ore Geol

Rev, 2015, 64: 543–553
47 Benjamin A A, Lu H Z, Jayanta G, et al. Columbite-Tantalite distribution and placer formation in humid tropical areas: An example from the Issia columbite-tantalite district, central western Ivory coast. Geotect Metal, 2008, 32: 195–211
48 Zhou Q. Large-scale Nb-Ta placer discovered by Henan Geological and Mineral Bureau in Nigeria (in Chinese). Resour Guide, 2011, (9): 36 [周强. 河南省地矿局在尼日利亚发现大型铌钽砂矿. 资源导刊, 2011, (9): 36]
49 Zhang L, Lin D S. Current situation of rare metal resources in China (in Chinese). Geol Explor, 2004, 40: 26–30 [张玲, 林德松. 我国稀有金属资源现状分析. 地质与勘探, 2004, 40: 26–30]
50 Zhang P S, Yang Z M, Tao K J, et al. Niobian-tantalian and rare earth mineralogy in china and their industrial utilization (in Chinese). Chin J Rare Metal, 2005, 29: 206–210 [张培善, 杨主明, 陶克捷, 等. 我国铌钽稀土矿物学及工业利用. 稀有金属, 2005, 29: 206–210]
51 Xu Z G, Chen Y C, Wang D H, et al. China's metallogenic belt division scheme (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2008. 1–138 [徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 中国成矿区带划分方案. 北京: 地质出版社, 2008. 1–138]
52 Qin K Z, Shen M D, Tang D M. Mineralization type and diagenetic metallogenic age of pegmatite rare metal deposits in the Alpine orogenic belt (in Chinese). Xinjiang Geol, 2013, 31(Suppl): 1–7 [秦克章, 申茂德, 唐冬梅. 阿尔套造山带伟晶岩型稀有金属矿床矿化类型与成岩成矿时代. 新疆地质, 2013, 31(增刊): 1–7]
53 Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 1993, 364: 299–307
54 Luan S W. Metallogenic geological conditions and prospecting of rare metal deposits in the Altai metallogenic belt (in Chinese). In: Chen Y C, ed. Geological, metallogenic Regularity and Technical and Economic Evaluation of Seposits in the Altai Metallogenic Belt, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 2003. 217–255 [栾世伟. 阿尔泰成矿带稀有金属矿床成矿地质条件与找矿. 见: 陈毓川, 主编. 中国新疆阿尔泰成矿带矿床地质、成矿规律与技术经济评价. 北京: 地质出版社, 2003. 217–255]
55 Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, et al. Metallogenic Series and Metallogenic Regularity in the Altai Metallogenic Province (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2002 [王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰成矿省的成矿系列与成矿规律. 北京: 原子能出版社, 2002]
56 Li J K, Wang D H, Zhang D H, et al. Mineralization Mechanism and Continental Geodynamics of Pegmatite Type Deposits in Western Sichuan, China (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2007. 1–182 [李建康, 王登红, 张德会, 等. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景. 北京: 原子能出版社, 2007. 1–182]
57 Ren J S, Jiang C F, Zhang Z K, et al. China's geotectonic structure and its evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1–124 [任纪舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社, 1980. 1–124]
58 Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B, et al. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" Lithium ore belts in China (in Chinese). Acta Geol Sin, 2018, 92: 1091–1106 [许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等. 试论中国大陆硬岩型大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 2018, 92: 1091–1106]
59 Jiankang L, Denghong W, Yuchuan C. The ore-forming mechanism of the Jiajika Pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan Province: Evidence from isotope dating. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2013, 87: 91–101
60 Hao X F, Fu X F, Liang B, et al. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance (in Chinese). Mineral Deposits, 2015, 34: 1199–1208 [郝雪峰, 付小方, 梁斌, 等. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义. 矿床地质, 2015, 34: 1199–1208]
61 Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, et al. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, west Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. Ore Geol Rev, 2018, 100: 561–573
62 Wang X L, Zhou J C, Chen X, et al. Formation and evolution of the Jiangnan Orogen (in Chinese). Bull Mineral Petrol Geochem, 2017, 36: 714–735 [王孝磊, 周金城, 陈昕, 等. 江南造山带的形成与演化. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36: 714–735]
63 Li P. Magmatic activity and metallogenic regularity of rare metals in Mufushan area (in Chinese). Postdoctoral Report of Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 2017 [李鹏. 幕阜山地区岩浆活动及稀有金属成矿规律. 中国地质科学院矿产资源研究所博士后报告, 2017]
64 Wang J Q, Shu L S, Santosh M. Petrogenesis and tectonic evolution of Lianyunshan complex, South China: Insights on Neoproterozoic and late Mesozoic tectonic evolution of the central Jiangnan Orogen. Gondwana Res, 2016, 39: 114–130
65 Shu L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block (in Chinese). Geol Bull China, 2012, 31: 1035–1053 [舒良树. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 2012, 31: 1035–1053]
66 Che X D, Wang R C, Wu F Y, et al. Episodic Nb-Ta mineralisation in South China: Constraints from in situ LA-ICP-MS columbite-tantalite U-Pb dating. Ore Geol Rev, 2019, 105: 71–85
67 Gao Z Y, Lü B X, Duan J Z, et al. Granite pegmatite in Western Yunnan (in Chinese). Yunnan Geol, 1993, 12: 367–372 [高子英, 吕伯西, 段建中, 等. 滇西花岗伟晶岩. 云南地质, 1993, 12: 367–372]
68 Li J K, Wang C H, Feng W J, et al. Discovery of granite pegmatite-type Fe-Li Mica deposit in Northwest Yunnan (in Chinese). Mineral Deposits,

2017, 36: 1453−1455 [李建康, 王成辉, 冯文杰, 等. 滇西北发现花岗伟晶岩型铁锂云母矿床. 矿床地质, 2017, 36: 1453−1455]
69 Wu F Y, Liu Z C, Liu X C, et al. Hghly fractionated ganites: Rcognition and research (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2015, 31: 1−36 [吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等. 喜马拉雅淡色花岗岩. 岩石学报, 2015, 31: 1−36]
70 Wang R C, Wu F Y, Xie L, et al. A preliminary study on mineralization of rare metals in Himalayan Pale granite in South Tibet (in Chinese). Sci Sin Terrae, 2017, 47: 871−880 [王汝成, 吴福元, 谢磊, 等. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究. 中国科学: 地球科学, 2017, 47: 871−880]
71 Zou T R, Xu J, Xia F R. Alkaline rock belt and its mineralization in the northern margin of the Tarim-Zhongchao block (in Chinese). In: Proceedings of the 2nd World Chinese Geological Science Conference (Overseas Chinese Science and Technology Association), Stanford, 2000. A141–A145 [邹天人, 徐珏, 夏凤荣. 塔里木-中朝地块北缘碱性岩带及其成矿作用研究. 见: 第二届世界华人地质科学会议论文集(海外华人科学技术协会), 斯坦福, 2000. A141–A145
72 Yu X H. The relation of alkaline rocks in the Qinlin-Daba mountains region and the tectonic evolution of the orogeny and the features (in Chinese). Geol Bull China, 1992, (3): 233−240 [喻学惠. 秦巴地区碱性岩与造山带构造演化关系及其特征. 中国区域地质, 1992, (3): 233−240]
73 Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001 [张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001]
74 Lu X X, Zhu C H, Gu D M, et al. The main geological and metallogenic characteristics of granitic pegmatite in Eastern Qinling Belt (in Chinese). Geol Rev, 2010, 56: 21−30 [卢欣祥, 祝朝辉, 谷德敏, 等. 东秦岭花岗伟晶岩的基本地质矿化特征. 地质论评, 2010, 56: 21−30]
75 Hui X C. Geochemical study on uranium polymetallic mineralization in Huayangchuan, Shaanxi Province (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 2014 [惠小朝. 陕西省华阳川铀多金属成矿作用地球化学研究. 博士学位论文. 北京: 核工业北京地质研究院, 2014]
76 Luo Y N. Understanding and progress in the study of Panxi Ancient Rift Valley (in Chinese). Geol China, 1985, (1): 29−35 [骆耀南. 攀西古裂谷研究中的认识和进展. 中国地质, 1985, (1): 29−35]
77 Munteanu M, Yao Y, Wilson A H, et al. Panxi region (South-West China): Tectonics, magmatism and metallogenesis. A review. Tectonophysics, 2013, 608: 51–71
78 Liu H Y. Geochronology of alkaline rocks in Panxi area and its geological significance (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005 [刘红英. 攀西地区碱性岩的年代学研究及其地质意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005]
79 Li L Z. Geologic features and exploitation perspective of REE ore deposits in Panzhihua-Xichang region (in Chinese). Acta Geol Sichuan, 2001, 21: 150−152 [李立主. 论攀列地K稀有稀土矿的基本特征及开发前景. 四川地质学报, 2001, 21: 150−152]
80 Zhong J, Fan H H, Chen J Y, et al. Geochemical characteristics, ^{40}Ar-^{39}Ar age and geological significance of the biotite of Nile syenite in Liaoning (in Chinese). Earth Sci, 2019, doi: 10.3799/dqkx.2018.298 [钟军, 范洪海, 陈金勇, 等. 辽宁赛马霓霞正长岩黑云母地球化学特征、^{40}Ar-^{39}Ar年龄及其地质意义. 地球科学, 2019, doi: 10.3799/dqkx.2018.298]
81 Liu C H, Wu C L, Hao Y H, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2014, 30: 1595−1614 [刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔A型花岗岩类锆石U-Pb定年及其Lu-Hf同位素组成. 岩石学报, 2014, 30: 1595−1614]
82 Ying Y C, Chen W, Lu J, et al. *In situ* U-Th-Pb ages of the Miaoya carbonatite complex in the South Qinling orogenic belt, central China. Lithos, 2017, 290-291: 159−171
83 Che X D, Wu F Y, Wang R C, et al. *In situ* U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS. Ore Geol Rev, 2015, 65: 979–989
84 Shellnutt J G, Pang K N. Petrogenetic implications of mineral chemical data for the Permian Baima igneous complex, SW China. Miner Petrol, 2012, 106: 75–88
85 Zhong H, Zhu W G, Qi L, et al. Platinum-group element (PGE) geochemistry of the Emeishan basalts in the Pan-Xi area, SW China. Chin Sci Bull, 2006, 51: 845–854
86 Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. Geochim Cosmochim Acta, 2008, 72: 3084–3104
87 Zhong H, Campbell I H, Zhu W G, et al. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. Geochim Cosmochim Acta, 2011, 75: 1374–1395
88 Liu F, Zhang Z X, Li Q, et al. New age constraints on Koktokay pegmatite No. 3 Vein, Altay Mountains, Xinjiang: Evidence from molybdenite Re-Os dating (in Chinese). Mineral Deposits, 2012, 31: 1111−1118 [刘锋, 张志欣, 李强, 等. 新疆可可托海3号伟晶岩脉成岩时代的限定: 来自辉钼矿Re-Os定年的证据. 矿床地质, 2012, 31: 1111−1118]
89 Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, et al. Formation age and evolution time span of the Koktokay No. 3 Pegmatite, Altai, NW China: Evidence from U-Pb zircon and ^{40}Ar-^{39}Ar Muscovite Ages. Resour Geol, 2015, 65: 210–231

90 Zhou Q, Qin K, Tang D, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and ^{40}Ar-^{39}Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China. Geol Mag, 2018, 155: 707–728

91 Xuan Y Z, Yuan S D, Yuan Y B, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and petrogenesis of Jianfengling pluton in southern Hunan Province (in Chinese). Mineral Deposits, 2014, 33: 1379–1390 [轩一撒, 袁顺达, 原垭斌, 等. 湘南尖峰岭岩体锆石U-Pb年龄、地球化学特征及成因. 矿床地质, 2014, 33: 1379–1390]

92 Zhu J C, Wang R C, Lu J J, et al. Fractionation, evolution, petrogenesis and mineralization of Laiziling Granite Pluton, southern Hunan Province (in Chinese). Geol J China Univ, 2011, 17: 381–392 [朱金初, 王汝成, 陆建军, 等. 湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿. 高校地质学报, 2011, 17: 381–392]

93 Zhang S M, Chen Z H, Shi G H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite from Dajishan tungsten deposit in Jiangxi Province (in Chinese). Mineral Deposits, 2011, 30: 1113–1121 [张思明, 陈郑辉, 施光海, 等. 江西省大吉山钨矿床辉钼矿铼-锇同位素定年. 矿床地质, 2011, 30: 1113–1121]

94 Granite Group of the Nanling Project of the Ministry of Geology and Minerals. Nanling Granite Geology and its Genesis and Mineralization (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1–471 [地矿部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1989. 1–471]

95 Li Z H, Tang F W, Lin S L, et al. Zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of the beryl-bearing pegmatite and its geological significance, Western Yunnan, Southwest China (in Chinese). J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 2014, 44: 554–565 [李再会, 唐发伟, 林仕良, 等. 滇西含绿柱石伟晶岩锆石U-Pb年代学及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44: 554–565]

96 Wang X X, Zhang J J, Yan S Y, et al. Age and geochemistry of the Cuona leucogranite in southern Tibet and its geological implications (in Chinese). Geol Bull China, 2016, 35: 91–103 [王晓先, 张进江, 闫淑玉, 等. 藏南错那淡色花岗岩 LA-MC-ICP-MS锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及其地质意义. 地质通报, 2016, 35: 91–103]

97 Chen Z H, Wang D H, Gong Y F, et al. ^{40}Ar-^{39}Ar isotope dating of muscovite from Jingerquan pegmatite rare metal deposit in Hami, Xinjiang, and its geological significance (in Chinese). Mineral Deposit, 2006, 25: 470–476 [陈郑辉, 王登红, 龚羽飞, 等. 新疆哈密镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床^{40}Ar-^{39}Ar年龄及其地质意义. 矿床地质, 2006, 25: 470–476]

98 Qiu Z L, Liang D Y, Wang Y F, et al. Zircon REE, trace element characteristics and U-Pb chronology in the Baerzhe alkaline granite: Implications to the petrological genesis and mineralization. Acta Petrol Sin, 2014, 30: 1757–1768 [丘志力, 梁冬云, 王艳芬, 等. 巴尔哲碱性花岗岩锆石稀土微量元素、U-Pb年龄及其成岩成矿指示. 岩石学报, 2014, 30: 1757–1768]

99 Yuan Z X, Ge B, Wu C Y, et al. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. Appl Geochem, 1992, 7: 429–442

100 Tang X S. Lithostratigraphic study of lengjiaxi group in Hunan (in Chinese). Hunan Geol, 1989, 8: 1–9 [唐晓珊. 湖南冷家溪群岩石地层的研究. 湖南地质, 1989, 8: 1–9]

101 Qiu N M, Yang Y Q. Research Report on Diagenesis and Mineralization Law and Prospecting Direction of Nanping Pegmatite Field, Fujian Province (in Chinese). Fuzhou: Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province, 1985 [仇年铭, 杨岳清. 福建省南平伟晶岩田成岩成矿规律及找矿方向研究报告. 福州: 福建省地质矿产局, 1985]

102 Li X J, Li J K, Liu Y C, et al. Geochemistry of muscovite granite from Zhawulong granitic pegmatite type rare metal deposit in western Sichuan (in Chinese). Geol Rev, 2018, 64: 1005–1016 [李兴杰, 李建康, 刘永超, 等. 川西扎乌龙花岗伟晶岩型稀有金属矿床白云母花岗岩岩石地球化学特征. 地质论评, 2018, 64: 1005–1016]

103 Tang Y, Zhao J Y, Zhang H, et al. Precise columbite-(Fe) and zircon U-Pb dating of the Nanping No. 31 pegmatite vein in northeastern Cathaysia Block, SE China. Ore Geol Rev, 2017, 83: 300–311

104 Černý P. Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regionalto global environments and petrogenesis. Geosci Can, 1991, 18: 68–80

105 Shaw R A, Goodenough K M, Roberts N M W, et al. Petrogenesis of rare-metal pegmatites in high-grade metamorphic terranes: A case study from the Lewisian Gneiss Complex of north-west Scotland. Precambrian Res, 2016, 281: 338–362

106 Thompson A B. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths. In: Castro A, Fernandez C, Vigneresse J L, eds. Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques. London: Geological Society, Special Publications, 1999, 168. 7–25

107 Woolley A R, Kjarsgaard B A. Carbonatite occurrences of the world—Map and database. Geological Survey of Canada Open File, 2008. 579–628

108 Xu Z Q, Hou L W, Wang Z X. The Orogenic Process of the Songpan Ganzi Orogenic Belt in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1–190 [许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1992. 1–190]

109 Fetherston J M. Tantalum in western Australia. Mineral Resour Bull, 2004, 22: 63–89

110 Wang R C, Zhu J C, Zhang W L, et al. Ore-forming mineralogy of W-Sn granites in the Nanling range: Concept and case study (in Chinese). Geol J China Univ, 2008, 14: 485–495 [王汝成, 朱金初, 张文兰, 等. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例. 高校地质学报, 2008, 14: 485–495]

111 Wang R C, Xie L, Lu J J, et al. Diversity of Mesozoic tin-bearing granites in the Nanling andadjacent regions, South China: Distinctive

mineralogical patterns (in Chinese). Sci Sin Terrae, 2017, 47: 1257–1268 [王汝成, 谢磊, 陆建军, 等. 南岭及邻区中生代含锡花岗岩的多样性: 显著的矿物特征差异. 中国科学: 地球科学, 2017, 47: 1257–1268]
112 Raimbault L. Composition of complex lepidolite-type granitic pegmatites and of constituent columbite-tantalite, Chedeville, Massif Central, France. Can Mineral, 1998, 36: 563–583
113 Yu S Y, Chen Z Z. Metallogenic regularity of tin deposits in southwestern Guangdong (in Chinese). Guangzhou: Zhongshan University Press, 1990. 1–108 [俞受鋆, 陈志中. 粤西南锡矿床成矿规律. 广州: 中山大学出版社, 1990. 1–108]
114 Shi L, Chen J C, Wu S L, et al. Metallogenic regularity of tin ore belt in Western Yunnan (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1–273 [施琳, 陈吉琛, 吴上龙, 等. 滇西锡矿带成矿规律. 北京: 地质出版社, 1989. 1–273]
115 Bi C S, Mao J W, Liao Y. Criteria for Prospecting and Evaluating China's Tin Deposits (in Chinese). Geol Explor, 1993, 2: 7–14 [毕成思, 毛景文, 廖英. 中国锡矿普查找矿评价标志. 地质与勘探, 1993, 2: 7–14]
116 Mao J W, Song S H, Chen Y C. Igneous Rock Series and Tin Polymetallic Deposit Metallogenic Series in Northern Guangxi (in Chinese). Beijing: Science and Technology Press, 1988. 1–196 [毛景文, 宋叔和, 陈毓川. 桂北地区火成岩系列和锡多金属矿床成矿系列. 北京: 科学技术出版社, 1988. 1–196]
117 Lin D S. Tantalum-rich Granite Deposit in South China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1–147 [林德松. 华南富钽花岗岩矿床. 北京: 地质出版社, 1996. 1–147]
118 Wang D H, Fu X F. A breakthrough in the prospecting of lithium deposits in the peripheral areas of methyl carbon, Sichuan Province (in Chinese). Rock Mineral Anal, 2013, 32: 987 [王登红, 付小方. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破. 岩矿测试, 2013, 32: 987]
119 Wang H, Li P, Ma H D, et al. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication (in Chinese). Geotect Metal, 2017, 41: 1053–1062 [王核, 李沛, 马华东, 等. 高昊新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义. 大地构造与成矿学, 2017, 41: 1053–1062]
120 Wang Y, Xing S W, Xiao K Y. Metallgoenic features and resource potential of the west Kunlun to Altun Fe-Pb-Zn-Au-rare metals metallogenic belt (in Chinese). Acta Geol Sin, 2016, 90: 1353–1363 [王岩, 邢树文, 肖克炎. 西昆仑－阿尔金Fe-Pb-Zn-Au-稀有金属成矿带成矿特征及资源潜力. 地质学报, 2016, 90: 1353–1363]

补充材料

图S1 花岗岩型钽铌矿床的垂直分带示意图
图S2 湖北庙垭矿床碱性岩-碳酸岩杂岩体地质示意图
图S3 巴尔哲矿床东矿体矿化分带示意图
图S4 阿尔泰造山带地质简图与稀有金属矿集区分布图
图S5 松潘-甘孜花岗伟晶岩成矿带矿产分布图
图S6 南岭铌钽成矿带铌钽矿床分布图
图S7 攀西地区安宁河断裂带附近碱性岩铌(钽)矿分布示意图

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “中国铌钽矿成矿规律”

A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China

Jiankang Li*, Peng Li, Denghong Wang & Xingjie Li

Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources of China, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
*Corresponding author, E-mail: Li9968@126.com

Niobium and tantalum are critical mineral resources in the world. Although they have coherent geochemical behavior, they can be separated to some degree during ore-forming processes. The alkaline property of the host rock is one main factor to control the separation of Nb-Ta. As a result, niobium and tantalum resources can be divided into tantalum-dominated deposits in a peraluminous granitic magma system, including granite-type and granitic pegmatite-type deposits, and into niobium-dominated deposits in alkaline and carbonate magmatic systems, including carbonate-type, carbonate-weathering crust-type and alkaline rock-type deposits. In China, tantalum and niobium resources are mainly present in granite (e.g., the Yichun deposit in Jiangxi), granitic pegmatite (e.g., the Renli deposit in Hunan), alkaline rock (e.g., the Ba’erzhe deposit in Inner Mongolia), and carbonate (e.g., Miaoya in Hubei); however, currently, there are no occurrences of carbonate-weathering crust niobium resources.

In China, tantalum deposits of the peraluminous granitic magma system are primarily located in the tantalum-metallogenic belts of Altay, Songpan-Ganze, Jiangnan paleocontinent, Nanling, southern Tibet-western Yunnan with mineralizations in the Caledonian, Indosinian and Yanshanian, and few cases in the Himalayas. The niobium deposits of alkaline and carbonate magma systems are primarily located in the niobium-metalogenic belts of Talimu-Northern China, Qinling, and western Yangtze block with mineralizations from Hercynian to Indianian with a few cases from the Proterozoic. Deposits of the peraluminous granitic magma system are primarily located in flysch sedimentary formations with a huge thickness that can be melted into rare metal-rich granitic magma during the orogenic process in a compressional tectonic environment. However, deposits of the alkaline and carbonate magma systems are primarily distributed along deep fractures or rift regions, bearing features of ore-forming material sourced from the mantle. These features show niobium and tantalum mineralization separation and alternation with spatial and temporal distributions, which can be controlled via compression-extension histories of different blocks in China.

Although the reserves of niobium and tantalum in China are huge, most niobium and tantalum deposits in China usually bear low grades of Ta_5O_2 and Nb_2O_5 and are difficult to utilize. Therefore, in the exploration of niobium and tantalum resources in China, we should pay attention to high-grade granitic pegmatite-type tantalum deposits in the Songpan-Ganze, Jiangnan, Qinling, southern Tibet, and western Yunnan regions. Additionally, we can explore carbonate-type niobium deposits in Talimu-Northern China. The associated niobium and tantalum resources in tungsten and tin deposits may have great potential for exploration in the Nanling, western Yunnan, and Qinling regions.

Nb and Ta deposits, metallogenic regularity, granite pegmatite, carbonatite, prospecting area

doi: 10.1360/N972018-00933