科学通报 2020 年 第 65 卷 第 33 期: 3763 ~ 3777
专辑: 中国关键矿产资源研究 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

中国铌钽锆铪资源

王汝成[1*], 车旭东[1], 邬斌[2], 谢磊[1]

1. 南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023;
2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

* 联系人, E-mail: rcwang@nju.edu.cn

2020-03-15 收稿, 2020-04-14 修回, 2020-04-15 接受, 2020-05-07 网络版发表
国家自然科学基金(91855209, 41672065, 41702033)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0802)资助

摘要 铌、钽、锆、铪是重要的关键金属, 铌与钽、锆与铪具有相似的地球化学性质. 我国铌钽矿床与铝质花岗岩(过铝和准铝)、花岗伟晶岩、碱性-过碱性花岗岩和碳酸岩有关, 在空间上主要分布于环太平洋构造域、特提斯构造域、古亚洲洋构造域以及扬子板块和华北克拉通边缘, 成矿作用主要发生于5个地质时期: 中-新元古代、古生代、早中生代、晚中生代和新生代. 据对我国近50个已查明储量的铌钽矿床(点)统计, 我国铌资源储量(以Nb_2O_5计)约为267万t(不包括白云鄂博Fe-Nb-REE矿床的铌储量), 钽资源储量(以Ta_2O_5计)约为17万t, 但对外依存度均接近或超过90%. 由于锆铪与铌钽具有相似的地球化学性质, 我国主要的内生锆铪矿床在空间上常与铌钽矿床共伴生, 时间上主要成矿于晚古生代和中生代, 与碱性-过碱性花岗岩、花岗伟晶岩和铝质花岗岩有关. 但我国可供开采的锆铪资源主要来源于第四纪外生矿床, 包括滨海沉积型、河流冲积型和风化壳与残坡积型三类; 锆储量(以ZrO_2计)约50万t. 鉴于我国铌钽锆铪资源禀赋, 一方面需要加大地质勘查、提高增量, 另一方面需要用好存量, 提高现存资源的可利用性.

关键词 铌-钽, 锆-铪, 成矿类型, 矿床时空分布, 资源可利用性

铌(Nb)、钽(Ta)、锆(Zr)、铪(Hf)具有耐高温、耐摩擦、耐腐蚀等材料学特征, 在国防、航空航天、核工业和超硬材料等行业具有重要的作用, 是重要的关键金属.

1 铌钽锆铪矿床中主要矿物

铌、钽、锆、铪都属于高场强元素, 铌与钽、锆与铪分别具有相似的晶体化学性质, 处于6次配位位置的Nb^{5+}、Ta^{5+}、Zr^{4+}和Hf^{4+}的离子半径分别为0.64、0.64、0.72和0.71 Å[1], 铌与钽、锆与铪也被视为地球化学元素对, 因此在矿物中铌、钽之间和锆、铪之间总是相互替换(表1). 事实上, 铌钽矿物一般都是铌、钽系列矿物, 常见的铌钽矿物有铌铁矿族矿物及重钽铁矿系列、烧绿石-细晶石系列、锡锰钽矿系列等, 金红石、锡石也可以非常富集铌钽; 此外, 褐钇铌矿、铈铌钙钛矿等在一些特殊类型的岩石中也较常见. 锆铪矿物其实是以锆矿物为主, 但总是含有不同程度的铪, 最为人所知的当然是锆石, 铪在锆石中以类质同象形式富集, 直至铪石; 斜锆石是硅不饱和岩石中常见的锆矿物, 而在碱性岩中锆矿物非常复杂, 多为锆硅酸盐矿物, 如异性石、钾锆石等.

2 铌钽锆铪矿床类型

大陆上地壳中铌、钽、锆、铪的含量大约为12、0.9、193、5.3 ppm(1 ppm=1 μg/g)[2], 其富集成矿作用既可以发生于原生过程, 也可以与表生过程有关. 原生

引用格式: 王汝成, 车旭东, 邬斌, 等. 中国铌钽锆铪资源. 科学通报, 2020, 65: 3763–3777
Wang R C, Che X D, Wu B, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3763–3777, doi: 10.1360/TB-2020-0271

© 2020《中国科学》杂志社

表 1 主要铌钽锆铪矿物

Table 1 List of main Nb-Ta, Zr-Hf minerals

	中文名	英文名	化学式
铌钽矿物	铌铁矿族矿物(包括铌铁矿、钽铁矿、铌锰矿、钽锰矿)	Columbite group minerals	$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$
	重钽铁矿	Tapiolite	$(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$
	烧绿石-细晶石	Pyrochlore-microlite	$(Na,Ca)(Nb,Ta,Ti)_2O_6(F,OH)$
	锡锰钽矿	Wodginite	$(Ta,Nb,Sn,Mn,Fe,Ti)O_2$
	褐钇铌矿	Fergusonite	$YNbO_4$
	易解石	Aeschynite	$(Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb,Ta)_2(O,OH)_6$
	铈铌钙钛矿	Loparite	$(Ce,Na,Ca)_2(Ti,Nb,Ta)_2O_6$
	斜方钠铌矿	Lueshite	$NaNbO_3$
锆铪矿物	锆石-铪石	Zircon-hafnon	$(Zr,Hf)SiO_4$
	斜锆石	Baddeleyite	ZrO_2
	异性石	Eudialyte	$Na_{15}Ca_6Fe_3Zr_3Si_{26}O_{72}(OH)_4Cl$
	钠锆石	Catapleiite	$Na_2ZrSi_3O_9\cdot 2H_2O$
	纤维硅锆钠石	Elpidite	$Na_2ZrSi_6O_{15}\cdot 3H_2O$
	钾锆石	Wadeite	$K_2ZrSi_3O_9$
	硅钾锆石	Dalyite	$K_2ZrSi_6O_{15}$

矿床主要与岩浆岩有关, 根据具有矿床成因联系的岩石组合, 铌、钽、锆、铪原生成矿作用可以分为三类.

(1) 与碳酸岩有关的矿床以铌、锆为主, 品位富、储量大, 特别是最重要的铌资源, 巴西的碳酸岩型烧绿石矿储量约占全球铌资源的92%, 其中Araxa是全球最大的碳酸岩型铌矿床, 矿石储量超过800万t(平均2.3wt% Nb_2O_5)[3]; 相对而言, 与碳酸岩有关的大型锆矿较少, 其中俄罗斯科拉半岛的Kovdor斜锆石矿是较著名的碳酸岩型锆矿床[4].

(2) 与过碱性-碱性花岗岩有关的矿床包括钠质碱性花岗岩和正长岩, 以形成烧绿石和锆石、异性石等大量结晶的铌、锆矿床为特色. 钠闪石花岗岩可形成大型的Nb-Zr矿床(如巴西Pitinga矿床); 正长岩可以是霓石正长岩, 也可以是霞石正长岩, 或霓霞正长岩. 科拉半岛Khininy岩体(全球异性石最著名产地)、格陵兰岛Ilimaussaq、加拿大西北部Thor湖等都是典型的碱性岩Nb-Zr矿床. 碱性伟晶岩是另一类与铌成矿有关的岩石, 同时伴生重稀土成矿, 这类伟晶岩多为NYF(富集Nb-Y-F)型伟晶岩.

(3) 与过铝质花岗岩和花岗伟晶岩有关的矿床, 过铝质岩浆的高度分异作用导致钽、铪以及锂、铍、铯等稀有金属超常富集, 全球钽资源主要产自这类高分异花岗岩或伟晶岩, 其中LCT(富集Li-Cs-Ta)型伟晶岩可形成大型、超大型钽矿床, 如全球最大的钽矿为加拿大的Tanco伟晶岩.

由于铌、钽、锆、铪矿物均为耐风化、比重大(一般大于5)的矿物, 因此, 经表生过程可以形成外生矿床. 一类为风化坡积型, 烧绿石型碳酸岩风化后可进一步富集形成品位高的大型, 甚至超大型铌矿, 如巴西的Morro dos Seis Lagos矿石储量达2897.9 Mt(2.81wt% Nb_2O_5), 是全球最大的铌矿[5]; 非洲的钽矿也以花岗伟晶岩风化后次生成矿为主; 另一类是滨海砂矿, 因品位低、分离提纯复杂等原因, 全球极少内生火成岩锆矿达到经济开采级别, 但太平洋、大西洋和印度洋海岸带分布一系列重要的滨海锆砂矿, 是目前最经济的锆资源.

全球确切的铌、钽、锆、铪储量很难统计. 据美国地质调查局2019年资料, 全球铌资源储量(Nb_2O_5)超过1300万t, 年产量为7.4万t[6], 主要分布在巴西、加拿大、澳大利亚、中国等. 目前正开采的最大铌矿床都集中在巴西的碳酸岩型(及其风化型)烧绿石矿, 约占全球产量的五分之四; 全球钽储量(Ta_2O_5)超过9万t, 年产量1800 t[7], 主要分布在澳大利亚、加拿大、刚果、卢旺达、尼日利亚、中国等国, 以伟晶岩型矿床为主. 全球锆储量(ZrO_2)约6200万t, 年产140万t[8], 原生锆矿床开采较少, 锆资源主要依靠滨海砂矿, 集中在澳大利亚

东海岸与西南海岸的Murray、Perth和Eucla三大盆地, 以及南非东西海岸的Kwazulu-Natal等省, 约占全球产量的三分之二; 全球铪资源的可靠资料较少, 估计约1500~2000 t(HfO_2), 目前主要是通过锆砂矿提取铪.

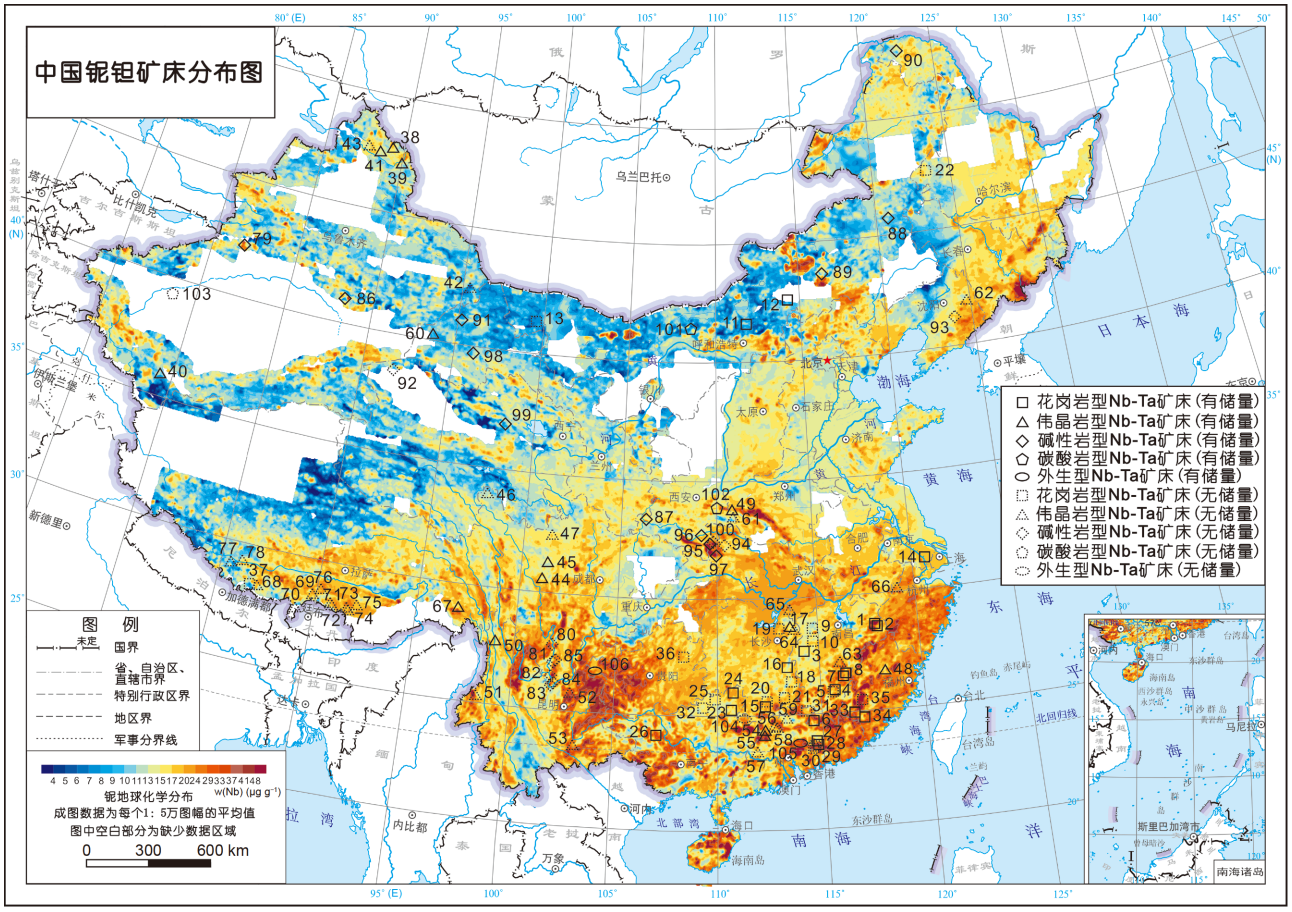
3 我国铌钽资源特征

3.1 我国铌钽成矿特征

我国主要铌钽矿床见图1. 我国花岗岩分布广泛, 与此相关的铌钽成矿作用遍及主要地质单元, 不仅类型多样, 而且成矿时代复杂.

与全球铌钽矿床类型类似, 我国铌钽矿床主要与铝质花岗岩、花岗伟晶岩、碱性-过碱性花岗岩和碳酸岩有关. 但是相对而言, 我国与花岗岩有关的铌钽矿床分布更为普遍, 伟晶岩分布较为局部, 碱性岩零星分布.

铝质花岗岩型铌钽矿床主要分布在华南, 特别是南岭地区, 根据其特征又分为过铝质和准铝质两类. 过铝质铌钽成矿花岗岩以钠长石花岗岩为特色(石英、钾长石、钠长石、富锂白云母等浅色矿物为造岩矿物, 亦称为淡色花岗岩), 具有强过铝特征(铝饱和指数ACNK大于1.1), 富挥发组分, 特别是F含量较高, 可出



1, 江西葛源松树岗; 2, 江西黄山; 3, 江西宜春414矿; 4, 江西会昌早叫山; 5, 江西会昌672矿; 6, 江西大吉山; 7, 江西石城海罗岭; 8, 江西石城姜坑里; 9, 江西大湖塘; 10, 江西宜丰; 11, 内蒙古赵井沟; 12, 内蒙古加不斯; 13, 内蒙古东七一山; 14, 江苏苏州; 15, 湖南临武尖峰岭; 16, 湖南金竹垄; 17, 湖南仁里; 18, 湖南小江; 19, 湖南湘阴县望湘; 20, 湖南临武癞子岭; 21, 湖南界牌岭; 22, 黑龙江齐齐哈尔碾子山; 23, 广西栗木; 24, 广西戈洞坪; 25, 广西高岭; 26, 广西巴马; 27, 广东博罗524矿; 28, 广东博罗525矿; 29, 广东博罗523矿; 30, 广东博罗七娘坛; 31, 广东始兴良源; 32, 广西元宝山; 33, 福建永定大坪; 34, 福建永定上下湖; 35, 福建龙岩东宫下; 36, 贵州梵净山; 37, 西藏普士拉; 38, 新疆柯鲁木特; 39, 新疆可可托海; 40, 新疆大红柳滩; 41, 新疆大喀拉苏; 42, 新疆镜儿泉; 43, 新疆蒙库喀拉苏; 44, 四川甲基卡; 45, 四川马尔康地拉秋; 46, 四川扎乌龙; 47, 四川可尔因; 48, 福建南平; 49, 河南卢氏; 50, 云南贡山丹珠; 51, 云南黄连沟; 52, 云南黑马; 53, 云南宝华山; 54, 广东横山厚溪; 55, 广东村心大尾坑; 56, 广东洞头南; 57, 广东德庆565矿; 58, 广东深坑; 59, 广东曲江一六; 60, 甘肃肃北县庙庙井南; 61, 陕西商南大河; 62, 辽宁新宾李家堡子; 63, 江西广昌西港; 64, 湖南连云山; 65, 湖北通城断峰山; 66, 浙江临安石室寺; 67, 西藏八宿县加弄; 68, 西藏珠峰; 69, 西藏康马; 70, 西藏告乌; 71, 西藏拉隆; 72, 西藏洛扎; 73, 西藏库曲; 74, 西藏错那; 75, 西藏错那洞; 76, 西藏然巴; 77, 西藏佩枯措; 78, 西藏夏如; 79, 新疆波孜果尔; 80, 四川西昌太和; 81, 四川德昌茨达; 82, 四川会理路枯; 83, 四川会理红格; 84, 四川会理草场; 85, 四川德昌黄草; 86, 新疆阔克塔格西; 87, 陕西安林沟; 88, 内蒙古巴尔哲; 89, 内蒙古石灰窑; 90, 黑龙江漠河782矿; 91, 甘肃瓜州县古堡泉; 92, 青海交通社; 93, 辽宁凤城赛马; 94, 湖北竹山杀熊洞; 95, 湖北庙垭; 96, 陕西安康; 97, 湖北竹溪天宝; 98, 甘肃阿克塞余石山; 99, 青海夏日达乌; 100, 湖北竹山土地岭; 101, 内蒙古白云鄂博; 102, 陕西华阳川; 103, 新疆瓦吉尔塔格; 104, 湖南姑婆山; 105, 广东永汉; 106, 贵州威宁

图 1 我国铌钽矿床(点)分布图. 底图为铌地球化学分布图, 源自文献[9]

Figure 1 Map showing spatial distribution of Nb-Ta deposits in China. The base map of Geochemical distribution of niobium is taken from Ref. [9]

现黄玉和/或氟磷灰石，云母以铁锂云母-锂云母为主，锆石高度富铪(HfO_2常高于10wt%)，这些矿物构成了花岗岩铌钽成矿能力的显著标志. 铌钽成矿花岗岩是高分异结晶作用的产物，呈现为多期岩浆活动的最晚期花岗岩，如华南地区多个铌钽成矿区存在黑鳞云母花岗岩、白云母花岗岩、铁锂云母-白云母花岗岩的组合，仅后者与铌钽成矿有直接关系. 此外，还需要指出的是，铌钽成矿花岗岩本身也具有明显的分带特征，特别是岩体的顶部相钽成矿作用更为强烈. 全岩铌钽含量高，对华南铌钽成矿钠长石花岗岩的统计结果显示，平均Nb、Ta含量分别为93、58 ppm, Nb/Ta比值大部分低于5(图2)；大部分铌钽花岗岩中Li、Be、Cs也会富集成矿. 铌铁矿-钽铁矿、烧绿石-细晶石、富铌钽金红石和锡石等为主要矿石矿物，它们常见的岩相学特征呈浸染状分布在造岩矿物内部或晶间，显示铌钽成矿作用多发生在钠长石花岗岩岩浆结晶阶段，岩体就是矿体；但越来越多的研究发现铌钽具有较强的热液活动性，细脉状钽铁(锰)矿在南平、宜春等铌钽矿床中都存在，这些特殊现象说明，花岗岩演化晚期富集流体环境有利于钽富集成矿，并构成岩浆-热液两阶段成矿过程.

江西宜春铌钽矿(早期文献中称为“414矿床”)是我国也是全球最为典型的钠长石花岗岩型成矿实例，地处武功山混合岩-花岗岩穹窿区，出露面积约9.5 km^2，为燕山期多阶段侵入的复式岩体，根据云母特征从早到晚可分为五期花岗岩：(1) 中粗粒黑鳞云母-白云母花岗岩；(2) 细粒斑状白云母花岗岩；(3) 中粒白云母花岗岩；(4) 含锂白云母花岗岩；(5) 黄玉-锂云母花岗岩. 铌钽成矿作用主要发生于最晚期的黄玉-锂云母花岗岩中, Nb、Ta含量最高分别可达170、163 ppm, 主要铌钽矿物为铌锰矿-钽锰矿、细晶石、锡锰钽矿、富钽锡石等，探明的矿床储量约为Nb_2O_5 1.5万t、Ta_2O_5 1.8万t(Nb_2O_5 + Ta_2O_5~0.018wt%)[10,11]. 江西上饶横峰县葛源铌钽矿床是华南另一个勘查确定的花岗岩型特大型矿床，最近经详查探明储量约为Nb_2O_5 6.3 万t、Ta_2O_5 4.2万t. 内蒙古武川县赵井沟也发现了一处大型花岗岩铌钽矿床，铌钽氧化物储量为8000余吨(Nb_2O_5为0.011wt%, Ta_2O_5为0.012wt%)[12].

准铝质铌钽花岗岩主要为(含角闪石)黑云母花岗岩，它们的铝饱和指数1.0左右(图2)，全岩铌含量显著高于钽(大部分Nb/Ta>5)，同时以锆明显富集(大部分

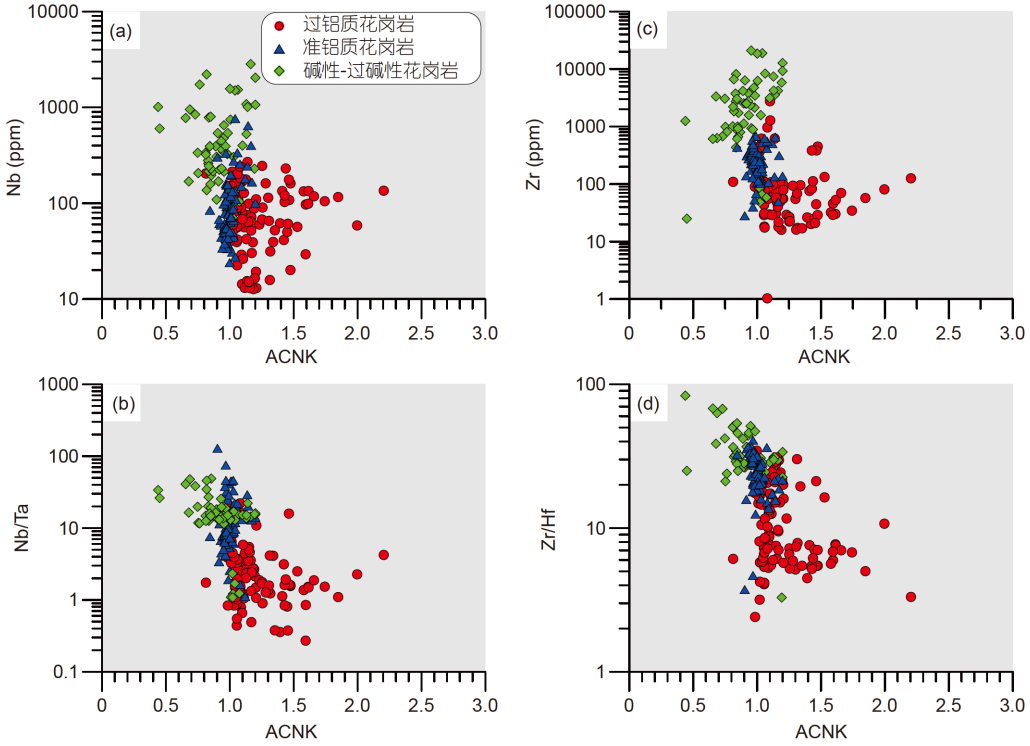


图 2 (网络版彩色)我国铌钽成矿花岗岩的铝饱和指数(ACNK)与Nb含量、Nb/Ta比值、Zr含量和Zr/Hf比值之间的关系. 数据来源见补充材料

Figure 2 (Color online) Diagrams for aluminum saturation index (ACNK) vs. Nb, Nb/Ta, Zr and Zr/Hf of Nb-Ta granites in China. Data are from Supplementary materials

Zr/Hf>10), 并以褐钇铌矿、铌铁矿和烧绿石等铌端元矿物为特征. 湘桂交界的姑婆山花岗岩是我国最早勘探的铌矿床, 富含褐钇铌矿. 我国东南沿海地区存在一些早白垩世富铌花岗岩(结晶年龄约130 Ma), 以江西灵山-黄山、江苏苏州岩体为代表(李建康等称之为江南铌钽成矿带[13]). 它们具有以下特征: 全岩铌含量高(平均~120 ppm, Zr/Hf ~17), 黑云母为典型的黑鳞云母(含锂、氟的黑云母), 且显著富铌(可近2000 ppm), 是铌的主要赋存矿物[14,15], 它经受热液蚀变淋滤出的铌对于后期铌成矿具有重要的意义, 是需高度重视的铌成矿带.

我国花岗伟晶岩型铌钽矿床以新疆可可托海、福建南平为代表, 但它们均处于闭坑状态, 近几年陆续发现的湖南仁里、四川甲基卡、新疆大红柳滩等LCT型伟晶岩提供了新的重要铌钽(特别是Ta)资源, 在喜马拉雅淡色花岗岩带也有大量铌钽成矿的伟晶岩. 花岗伟晶岩以脉状产出为主, 大部分具有较好的分带性, 由外向内至少可以分为边缘带、外侧带、中间带和核部带. 花岗伟晶岩主要有两种成因. 普遍认为伟晶岩源于母体花岗岩分异出的富流体熔体的结晶作用, 在花岗岩的上部区域分散分布年龄相同、成分规律性变化的伟晶岩脉, 从富Be(绿柱石)伟晶岩到Nb-Ta伟晶岩, 最后为Li-Be-Nb-Ta伟晶岩; 但由于在不少伟晶岩地区未见明显成因联系的花岗岩出露, 也有学者提出伟晶岩为深熔成因, 但仅通过这种作用形成的岩浆较难发生稀有金属的超常富集. 伟晶岩型铌钽矿床中, 钽矿物明显占优, 以钽锰矿、锡锰钽矿、重钽铁矿等为特色, 富流体环境有利于钽的富集作用, 并经常见到铌钽矿物边部出现大量的富钽矿物叠加[16]. 湖南平江县仁里伟晶岩型钽铌矿床共查明伟晶岩脉140条, 已探明的14条伟晶岩脉平均品位为0.036%Ta_2O_5、0.047%Nb_2O_5, Ta_2O_5 和 Nb_2O_5资源量分别为10791和14057 t[17,18], 其中5号矿脉为最重要的伟晶岩脉, 平均厚度近3 m, 长近2 km, 其钽铌资源量占仁里矿段总资源量的62.7%.

我国与铌成矿有关的碱性-过碱性花岗岩包括碱性花岗岩和正长岩, 常含有霓(辉)石、钠(铁)闪石等钠质镁铁矿物, 碱性长石呈条纹结构, 晶洞构造发育, 全岩ASI<1, 全岩铌含量一般大于200 ppm, 可达3000 ppm, Nb/Ta比值超过15(图2), 显示强烈的铌成矿特征, 铌铁矿、烧绿石、褐钇铌矿等铌矿物自形, 浸染状分布, 呈现明显的岩浆结晶特征. 内蒙古巴尔哲碱性花岗岩是我国最典型的铌-锆-稀土成矿花岗岩, 由钠闪石花岗岩和碱长花岗岩为主, 矿床(文献中也称为“801矿床”)铌探明储量30万t(以Nb_2O_5计, 品位约0.24wt%)[19], 铌铁矿、烧绿石为主要铌矿物, 在矿体中上部钽资源增加, 可达1.1万t(以Ta_2O_5计, 品位约0.02wt%). 四川攀西地区出露一系列碱性岩, 以含霓石和钠闪石正长岩为主, 近期也发现了碱性伟晶岩, 炉库(又名“路枯”, 下同)和白草两地的正长岩发生铌成矿作用, 形成了烧绿石等铌矿物[20]. 陕西汉中地区分布大量古生代碱性正长岩, 东西长约160 km, 南北宽20~40 km, 是我国规模最大的一条碱性铌成矿带[21]; 在该区域同时发育一套碱性火山岩, 粗面质为主, 全岩铌含量最高达4800 ppm, 锆含量亦近10000 ppm[22], 与正长岩一起构成一条潜力巨大的碱性铌(锆)成矿带.

碳酸岩是全球绝大部分铌资源的贡献者, 遗憾的是虽然我国川西有大规模稀土元素成矿的碳酸岩, 但并未发现共生的铌成矿现象. 白云鄂博Fe-Nb-REE矿床作为全球最大的稀土矿床, 伴生的铌资源量预计可达660万t, 是我国最应该重视的铌资源. 铌主要富集在烧绿石、易解石、铌铁矿和富铌金红石中.

我国外生铌钽资源勘探程度不高, 西南地区玄武岩风化剖面显示次生铌富集现象[23], 值得关注.

3.2 我国铌钽资源现状

根据以上所述, 据对我国近50个已查明储量的铌钽矿床(点)统计, 我国铌资源储量(以Nb_2O_5计)约为267万t(不包括白云鄂博Fe-REE-Nb矿床的铌储量), 钽资源量(以Ta_2O_5计)约为17万t. 这些资源分布在江西、广东、新疆、内蒙古等19个省(自治区), 但分布极不均匀, 白云鄂博Fe-REE-Nb矿床的铌储量(以Nb_2O_5计)约为660万t[24], 占全国铌储量近70%; 钽资源主要集中在南方, 其中江西钽资源占全国近1/3. 与全球相比, 我国铌钽资源呈现的特点是品位低, 且隐伏矿床居多, 开采成本高, 位于东部地区多, 环境压力大. 目前每年的铌、钽精矿产量分别仅为50~60 t[25]、90~100 t[7], 远远达不到我国需求, 对外依存度极高, 均接近或超过90%[26], 铌矿产品从巴西、加拿大等国进口, 钽主要从非洲国家进口.

3.3 我国铌钽成矿时空特征

我国铌钽成矿作用主要发生于环太平洋构造域、古亚洲洋构造域和特提斯构造域等主要构造单元中, 亦与华南板块、华北克拉通存在空间联系(图3). 华南

大部分铌钽矿床位于环太平洋构造域，南岭地区的铌钽矿床与燕山期高分异花岗岩有关，是我国重要的铌钽成矿区之一. 现在也越来越多地发现江南造山带有重要的铌钽成矿潜力，除了传统的武功山地区(宜春雅山)，高度分异的铌钽花岗岩也分布在江西上饶灵山地区(横峰县松树岗[28])和九江九岭地区(宜丰县狮子岭[29]). 古亚洲洋构造域中的阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分，分布以可可托海为标志的稀有金属花岗伟晶岩，是我国最重要的锂铍铌钽成矿带之一[30]. 有意义的是川西松潘-甘孜到西昆仑甜水海所形成的三叠纪伟晶岩型锂铍铌钽成矿带，位于古特提斯构造域内，是古特提斯大洋闭合、地体汇聚碰撞形成的巨型印支碰撞造山带[31]. 同样巨大的是喜马拉雅铍铌钽成矿带，与淡色花岗岩高分异结晶作用直接相关，它是新特提斯构造运动的直接产物[32]. 我国境内的碱性岩和碳酸岩主要分布在板块边缘，与拉张或裂谷背景有关，特别是华南板块西缘和北缘分布一系列碱性岩型铌矿床(点)，构成了独特的华南板块边缘铌钽成矿带.

全球稀有金属花岗伟晶岩主要集中于大陆拼合和裂解的重大历史时期[33,34]. 利用铌铁矿或相关的锡石、独居石取代锆石作为U-Pb定年矿物获得的45个成

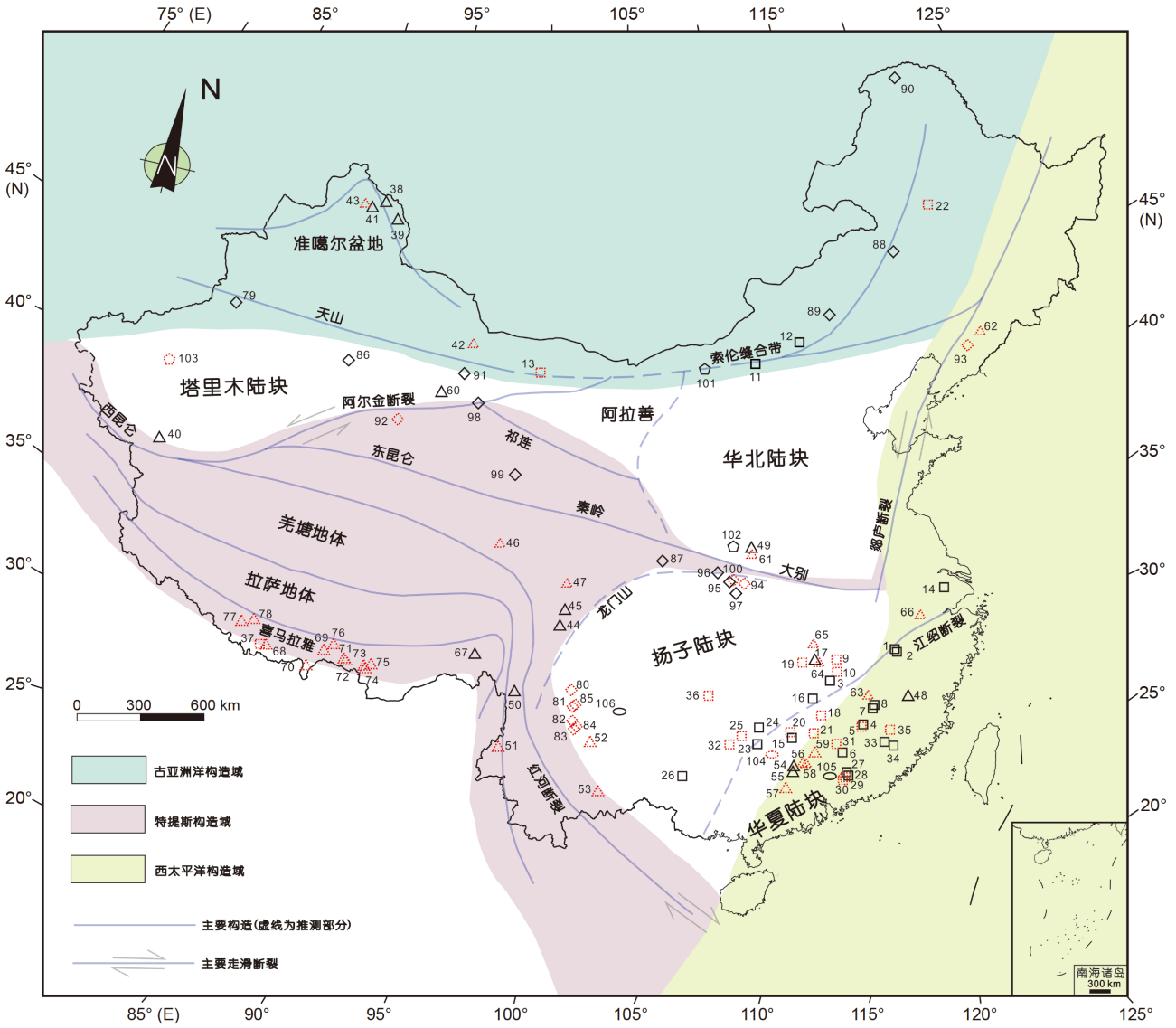


图 3 (网络版彩色)我国铌钽矿床分布与大地构造关系. 底图据文献[27]; 矿床类型及序号同图1

Figure 3 (Color online) Map showing the distribution of Nb-Ta deposits in the tectonic framework of China. Simplified tectonic map of China modified after Ref. [27]; both deposit types and deposit numbers are the same as in Figure 1

矿年龄数据统计，我国铌钽矿床主要形成于5个地质时期(图4). 第一个成矿期为元古代, 白云鄂博与稀土共生的铌成矿作用发生于中元古代(1.4~1.3 Ga), 在桂北元宝山、黔东梵净山等地发现的铌钽成矿作用形成于新元古代晚期(约820 Ma), 是华南最早发生的铌钽成矿作用[35]; 古生代铌钽矿床较少, 但其规模较大, 福建南平为代表的华南古生代稀有金属伟晶岩(约400~380 Ma)代表了加里东期陆内构造运动的产物; 与古特提斯构造运动及中亚造山带后碰撞有关的早中生代三叠纪成矿分布面广(约250~200 Ma), 而且直接反映了我国数量众多的花岗伟晶岩的成岩成矿作用; 晚中生代铌钽成矿作用代表了我国最重要的大规模铌钽成矿期, 集中在晚侏罗世到早白垩世(约160~120 Ma, 最晚到90 Ma), 是华南"燕山期成矿大爆发"中的主要组成部分[36]; 新生代(主要为渐新世到中新世)大规模淡色花岗岩岩浆作用发生高分异结晶作用, 导致铌钽等稀有金属成矿发生, 随着研究程度的加深, 我国这一时期的铌钽资源会有越来越多的发现. 非常有意义的是, 我国近一半的钽资源形成于三叠纪(花岗伟晶岩为主), 而铌资源除了白云鄂博之外, 近60%是晚中生代(侏罗纪-白垩纪)花岗岩结晶分异的产物.

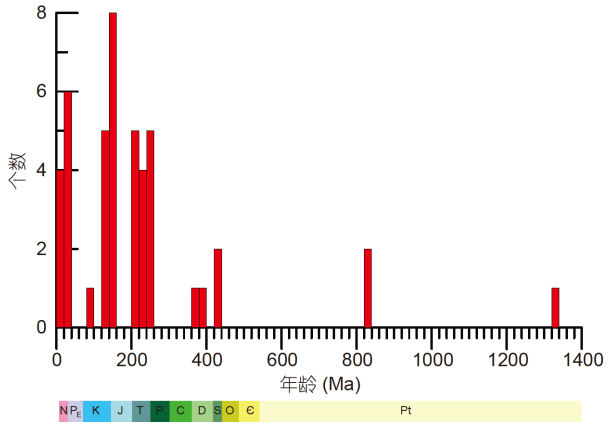


图 4 (网络版彩色)我国铌钽矿床成矿时代. 根据铌铁矿、锡石或独居石LA-ICP-MS U-Pb定年结果, 数据详见表S1

Figure 4 (Color online) Histogram of ages of Nb-Ta deposits in China. Based on LA-ICP-MS U-Pb dating data of columbite, cassiterite and monazite in Table S1

4 我国锆铪资源特征

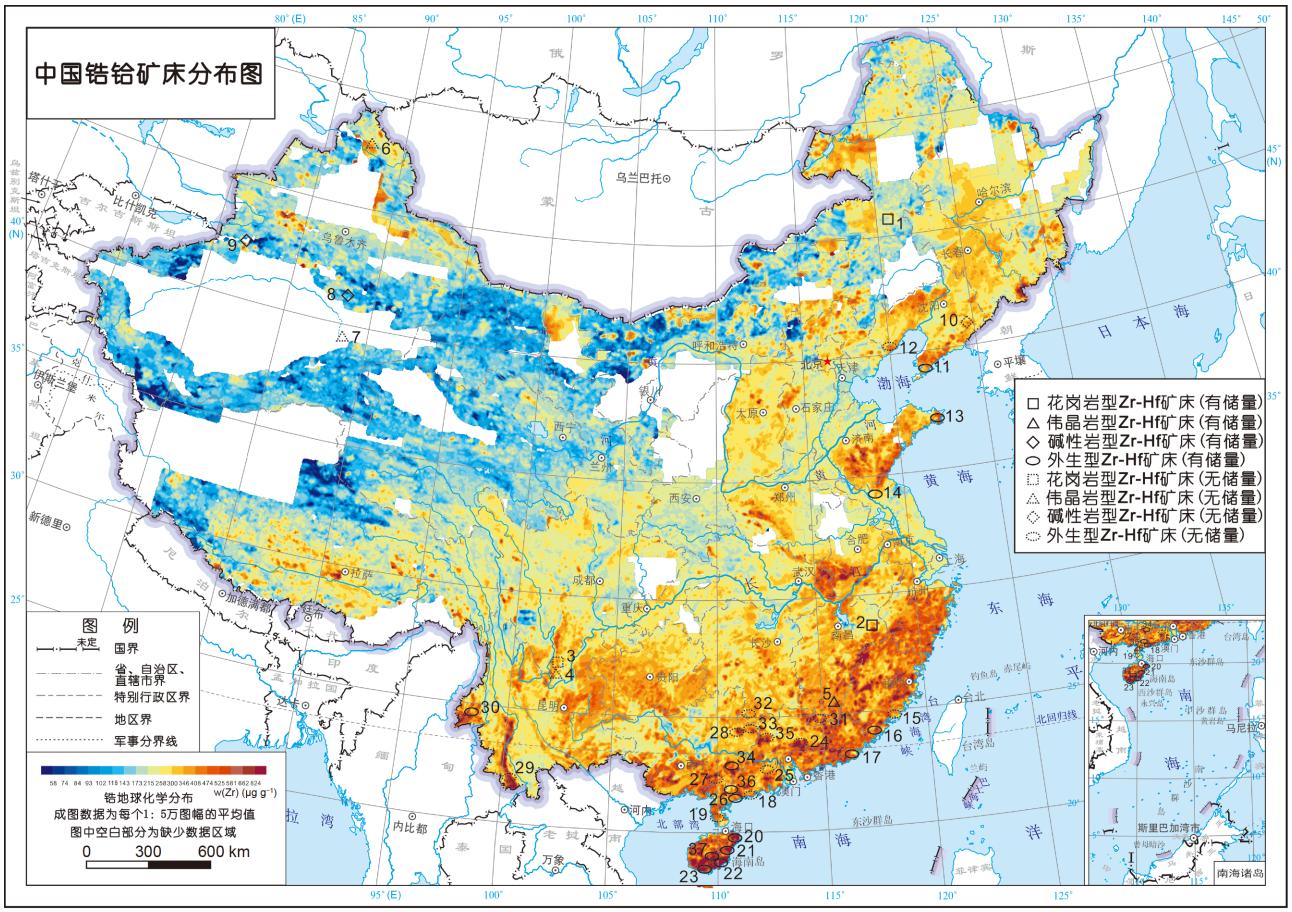
4.1 我国锆铪成矿特征

我国锆铪资源较少，无论是内生矿床还是外生矿床，主要集中在东部地区(图5, 表2). 由于锆铪与铌钽相似的地球化学性质，我国主要的内生锆铪矿床在空间上常与铌钽矿床共伴生，与碱性-过碱性花岗岩、花岗伟晶岩和铝质花岗岩有关，以碱性花岗岩和碱性岩为主，花岗伟晶岩分布较为局部，铝质花岗岩零星分布. 然而由于内生锆铪矿床品位低、开采提纯难度大等原因, 目前尚无大规模开采. 我国可供开采的锆铪资源主要来源于外生矿床，分为滨海沉积型、河流冲积型和风化壳与残坡积型三类，其中滨海沉积型锆铪资源占绝对优势.

碱性花岗岩型锆铪矿床是重要的锆铪资源类型, 除锆石外，锆铪还大量富集于硅锆钙石($CaZrSi_2O_7$)、纤维硅锆钠石($Na_2ZrSi_6O_{15}\cdot 3H_2O$)等复杂锆矿物中，并与烧绿石、铌铁矿、氟碳铈矿等铌钽矿物和稀土矿物共生，形成于碱性花岗岩岩浆演化晚期或岩浆-热液过渡阶段. 内蒙古巴尔哲碱性花岗岩是我国最典型的铌-锆-稀土成矿花岗岩，矿床探明储量锆矿石280万t(ZrO_2平均品位2.73 wt%)，锆石是主要的锆铪赋存矿物[19,37,38]. 巴尔哲岩体分带明显，自下而上依次分为钠闪石花岗岩带、钠长石花岗岩带和伟晶状花岗岩带, 成矿集中于钠长石花岗岩带. 此外, 扬子陆块西缘攀西裂谷一带分布着明显锆矿化的茨达碱性花岗岩体和炉库-白草正长岩-碱性伟晶岩矿区. 茨达岩体锆矿化集中于钠铁闪石霓石花岗岩, ZrO_2平均品位0.11 wt%[39].

碱性岩岩体分布于陆内裂谷、板块边缘以及造山后等伸展构造环境, 空间上可以与碳酸岩共生, 具有贫硅、富碱质和Zr、Hf、Nb、Ta、REE等不相容元素的特征. 除锆石和斜锆石外, 碱性岩型矿床的锆矿物还包括异性石、钾锆石、钠锆石等复杂硅酸盐矿物，常与烧绿石、晶质铀矿、独居石、磷钇矿等铌-铀矿物、稀土矿物共生. 我国辽宁赛马出露的与U-Nb-Zr-REE成矿有关的碱性岩，主要由响岩、霞石正长岩和异霞正长岩组成, 锆矿化集中于晚期异霞正长岩阶段, Zr含量约7000~8000 ppm, Hf含量约200 ppm, Zr、Hf元素主要赋存于异性石中[40].

伟晶岩型锆铪矿床多产于由准铝质或过碱性质的A型花岗岩分异演化形成NYF型花岗伟晶岩, 而富铪锆石大多与LCT型花岗伟晶岩有关. 伟晶岩岩体分带性明显, 常呈层状或脉状产出, 锆石常与铌铁矿族矿物、电气石等矿物共生. 受岩浆分异过程和富挥发分流体影响，花岗伟晶岩显现明显的Zr/Hf分馏，成为最富铪的岩石，锆石成分向铪质锆石，甚至锆质铪石转变，如



1, 内蒙古巴尔哲; 2, 江西葛源黄山; 3, 四川德昌茨达; 4, 四川会理路枯白草; 5, 江西石城海罗岭; 6, 新疆可可托海; 7, 新疆依兰里克; 8,新疆阔克塔格; 9, 新疆波孜果尔; 10, 辽宁赛马; 11, 辽宁登沙河; 12, 河北秦皇岛-北戴河沿线; 13, 山东荣成; 14, 江苏邳州花山子; 15, 福建黄厝; 16, 福建诏安宫口; 17, 广东陆丰潭西-甲子; 18, 广东阳江; 19, 广东徐闻; 20, 海南文昌; 21, 海南琼海; 22, 海南万宁; 23, 海南陵水; 24, 广东龙门; 25, 广东新兴; 26, 广东电白马店河; 27, 广西陆川白马; 28, 广西贺州725矿; 29, 云南勐海; 30, 云南保山板桥; 31, 江西龙南塔背; 32, 湖南江华姑婆山; 33, 广西钟山花山; 34, 广西北流520矿; 35, 广东广宁512, 513矿; 36, 广东化州平定; 37,海南万隆长安11-23, 为滨海沉积型; 24-30, 为河流冲积型; 31-37, 为风化壳和残坡积型

图 5 我国锆铪矿床分布图. 底图为锆地球化学分布图, 源自文献[9]

Figure 5 Map showing spatial distribution of Zr-Hf deposits in China. The base map of Geochemical distribution of niobium is taken from Ref. [9]

新疆阿尔泰可可托海1号伟晶岩脉(LCT型)从条带状细晶岩带(I带)到叶钠长石-石英-锂辉石带(III带), 锆石中HfO_2含量逐渐升高, 最高达58.88wt%(属于锆质铪石)[41]. 我国伟晶岩型锆铪矿床储量最小, 较大规模的锆铪矿床主要分布于江西和新疆, 如江西海罗岭、新疆可可托海. 除了花岗伟晶岩外, 碱性伟晶岩中锆资源值得重视, 四川炉库-白草碱性伟晶岩全岩ZrO_2含量1.24wt%, 新疆依兰里克碱性伟晶岩型Nb-Ta-Zr矿床中ZrO_2含量亦可达1.20wt%[39].

滨海沉积型砂锆矿占我国锆矿产量的90%以上, 大、中型砂矿床主要分布在辽宁、山东、福建、广东、广西、海南和台湾省区, 而河北、江苏、浙江三省仅有少量矿点和异常区. 矿石矿物主要有锆石、斜锆石、独居石、磷钇矿、铌钽铁矿等. 海南是我国最大的可利用锆砂矿资源产地, 约占国内锆资源总储量的19%(仅次于内蒙古的70%[42]). 砂锆矿主要分布于文昌、琼海、万宁和陵水四县, 砂锆矿品位全国最高, ZrO_2品位805~7096 g/m^3, 平均2144 g/m^3[43]. 矿体主要分布于砂质、砂砾质海湾海岸和砂质平原海岸, 淤泥质海岸与基岩海岸较少. 含矿层及矿体一般平行海岸呈带状分布, 规模较大且形态规则, 分布连续性好, 矿床开发程度最高, 以中大型为主. 成矿母岩较复杂, 以燕山期花岗岩为主, 部分产自寒武系变质岩[44].

河流冲积型砂锆矿为内陆河流冲积矿床, 多产于中小型河流, 大型河流因冲积搬运能力强而难以成矿. 沿海地带矿体富集于中小型河流入海口, 伴随残坡积和海相沉积; 陆上中小型河流汇入大型河流处, 成矿作用较单一, 偶见残坡积, 矿床呈层状或似层状, 矿层厚

表 2　中国主要锆铪矿床类型

Table 2　Major types of Zr-Hf deposits in China

	矿床类型	赋矿地质体	主要矿种	实例
内生矿床	碱性花岗岩型	钠长石化花岗岩	REE-Zr-Nb-Be	内蒙古巴尔哲801矿
		碱性花岗岩	Y-Nb-Zr	四川茨达
		钠长石化花岗岩	Nb-Ta-Zr-Hf	江西横峰葛源黄山
	伟晶岩型	蚀变花岗伟晶岩	Nb-Ta-Zr-W-Sn-Li-Rb	江西石城海罗岭
		钠长石化花岗岩-伟晶岩	Nb-Ta-Zr-Hf	江西横峰葛源黄山
		碱性伟晶岩	REE-Nb-Ta-Zr	四川会理路枯-白草
		碱性伟晶岩	Nb-Ta-Zr	新疆依兰里克
		花岗伟晶岩	Li-Be-Nb-Ta-Zr-Hf	新疆可可托海
	碱性岩型	异霞正长岩	REE-Zr-U	辽宁赛马
		碱性正长岩	REE-Nb-Ta-Zr	新疆阔克塔格
		碱性正长岩	REE-Nb-Ta-Zr	新疆拜城波孜果尔
外生矿床	滨海沉积型	砂矿	Zr-Hf	山东荣成
		砂矿	Au-Zr-Hf	辽宁登沙河
		砂矿	REE-Ti-Fe-Zr-Hf	广东陆丰、阳江、徐闻
		砂矿	Ti-Fe-Zr-Hf	海南文昌、琼海、万宁、陵水
	河流冲积型	砂矿	Nb-Fe-REE-Zr-Hf	广东龙门永汉、新兴、电白马店河
		砂矿	REE-Y-Nb-Zr-Hf	广西贺州725矿、陆川白马
		砂矿	Ti-Fe-REE-Zr-Hf	云南保山板桥、勐海勐阿
	风化壳和残坡积型	变质花岗岩风化壳	REE-Zr-Hf	广西北流520矿、钟山花山
		黑云母花岗岩风化壳	Nb-Y-Zr-Hf	湖南江华姑婆山(729矿)
		黑云母花岗岩风化壳	REE-Y-Zr-Hf	广东广宁512、513矿
		花岗岩风化壳	Ti-Fe-Zr-Hf	广东化州平定

度变化大(0.5~95 m)，但矿体埋藏浅(0~85 m)，易开发[44,45]．此类矿床一般产自于富含锆石的花岗岩、碱性岩以及混合岩地区，矿石矿物为锆石、锡石、钛铁矿、独居石、铌铁矿、褐钇铌矿、磷钇矿等，如泰国拉廊-普吉砂锆矿，主要产自风化花岗伟晶岩和石英脉形成的河流冲积层．我国此类砂锆矿主要产于广东、广西、海南、云南等地，重要矿床有海南陵水的万洲坡、广东电白的马店河、云南勐海勐阿和保山板桥等，其中云南保山板桥中型锆石-钛铁矿砂矿产于第四系盆地沉积层内，锆石品位349 g/m^3，矿石总储量约14万t[39,46]．

风化壳和残坡积型砂锆矿分布不广泛，一般产于风化剥蚀强烈的海蚀阶地、河流剥蚀阶地、海岸地带丘陵、河流两岸的低缓丘陵和陡峡谷切割的多山高原地区，母岩一般为碱性岩(如霞石正长岩)、花岗岩、花岗斑岩和混合岩等富含锆石等锆矿物的岩石，适合露采．我国此类砂锆矿主要分布于广西(北流520矿)、广东(化州平定)、湖南(江华姑婆山)、江西(龙南塔背)和海南(万宁长安、兴隆)等地．其中广西北流520矿含铪锆石主要分布在矿区东部的混合质浅变粒岩中，风化壳厚度为18~40 m，个别达60 m，锆石含量一般300~500 g/m^3，最高达703 g/m^3，锆石中铪含量平均2.12%，已有探明储量达到大型富铪锆石矿床规模[45]．

4.2　我国锆铪资源现状

全球各大洲均发现有锆-铪资源，主要分布在大洋洲和非洲，美洲、亚洲和欧洲也均有发现．大洋洲主要分布于澳大利亚(约占世界总储量60%)，非洲主要分布在南非(约占世界总储量20%)，其他主要锆-铪资源国为肯尼亚、莫桑比克、印度、巴西和乌克兰等国[47]．近年来全球每年的锆-铪总产量基本保持在120~180万t，而中国是全球最大的锆资源消耗国，国内锆矿年产量约

15万t, 年需求量约60万t, 而进口量达到100万t(部分经加工再出口), 主要来源于澳大利亚和南非, 对外依存度高达90%[48,49].

我国锆-铪资源相对缺乏, 储量约50万t(以ZrO_2计), 仅占全球0.68%[47]. 目前已查明锆矿产地85个, 其中大中型矿产地17个, 主要分布于内蒙古(约占70%)、海南(约占19%)、辽宁、山东和江西等14个省区. 探明储量在10万t以上的省区有5个, 依次为内蒙古、海南、广东、云南和广西[45]. 内蒙古自治区以内生锆矿(多产于碱性花岗岩)为主, 储量大, 但由于选矿困难和开采成本高等原因至今尚未大规模开采利用; 目前海南是我国最重要的锆矿产地, 截至2015年, 已探明锆矿产区共计70 处, 累计探明矿石储量370.8万t, 以开采外生滨海沉积型砂锆矿为主, 年产量约5万t, 随着产业结构调整和环境问题, 年产量呈逐年下降的趋势[44].

4.3 我国锆铪成矿时空特征

我国主要的内生锆-铪成矿带与铌-钽成矿带在空间上具有一定的重叠性, 主要分布于: (1) 塔里木-华北地块北缘成矿带; (2) 扬子西缘成矿带(如四川会理、茨达); (3) 大兴安岭成矿带南段(如内蒙古巴尔哲)也有零星出露. 我国外生锆-铪矿床以滨海沉积型砂矿为主, 集中西太平洋构造域华北和华夏版块沿海区域, 大致分为: (1) 华北环渤海-黄海成矿带; (2) 华南东海-南海沿线成矿带. 此外在南岭成矿带等地零星分布中小型河流冲积和风化壳型砂矿, 如广西贺州725河流冲积砂锆矿和赣南塔背风化壳锆铪矿.

塔里木-华北地块北缘断裂带及其两侧是我国主要的碱性岩型成矿带, 据统计该长达5146 km横贯中国东西部的巨型伟晶岩带分布着约117个碱性岩体和31个碱性伟晶岩集中区[50]. 碱性岩型锆铪矿床主要形成于海西期和印支期, 包括塔里木北缘的波孜果尔碱性正长岩型REE-Nb-Ta-Zr矿床(~290 Ma)、阔克塔格碱性正长岩型REE-Nb-Ta-Zr矿床(224±2 Ma)、依兰里克碱性伟晶岩型REE-Nb-Ta-Zr矿床(~273 Ma)[51~53]和辽宁赛马霞石正长岩型有关的U-REE-Zr矿床(224~230 Ma)[54,55]. 辽宁赛马碱性岩体位于华北克拉通东北缘宽甸地区, 岩体出露面积约20 km^2, 主要由响岩、霞石正长岩和异霞正长岩组成, 锆矿化主要集中于异霞正长岩, 全岩Zr含量约7000~8000 ppm, 代表性锆矿物为钾锆石和异性石(图6)[55~57].

扬子地台西缘攀西裂谷带是我国另一处与碱性花岗岩、碱性伟晶岩有关的REE-Nb-Ta-Zr矿床集中区域, 该裂谷作用始于早古生代末, 发育于晚古生代及中生代, 到印支晚期封闭, 形成了一系列印支期锆铪矿床, 如德昌茨达碱性花岗岩体(~260 Ma)[58]和会理炉库-白草碱性伟晶岩体(255.6±2 Ma)[20].

大兴安岭南段位于古亚洲洋成矿域和环太平洋成矿域的交汇处, 属于兴蒙造山带的一部分. 该区域的岩浆活动以海西期和燕山期为主, 其中与晚燕山期碱性花岗岩浆活动有关的巴尔哲REE-Zr-Nb-Be矿床是我国锆资源储量最大的矿床, 锆矿石储量约280万t, ZrO_2平均品位2.73wt%(121~127 Ma)[19], 岩体出露面积约0.4 km^2, 垂向分带明显, 由下向上依次分为: (1) 钠闪石花岗岩; (2) 弱钠长石化花岗岩; (3) 中钠长石化花岗岩; (4) 强钠长石化花岗岩; (5) 伟晶状花岗岩. 矿化集中于强钠长石化花岗岩, 锆石是主要的锆矿物, 并与铌铁矿、烧绿石、褐钇铌矿、复稀金矿等铌矿物共生. 此外在黑龙江漠河782矿花岗岩-花岗斑岩型Nb-REE-Zr矿床中ZrO_2品位也达到1.0wt%[59].

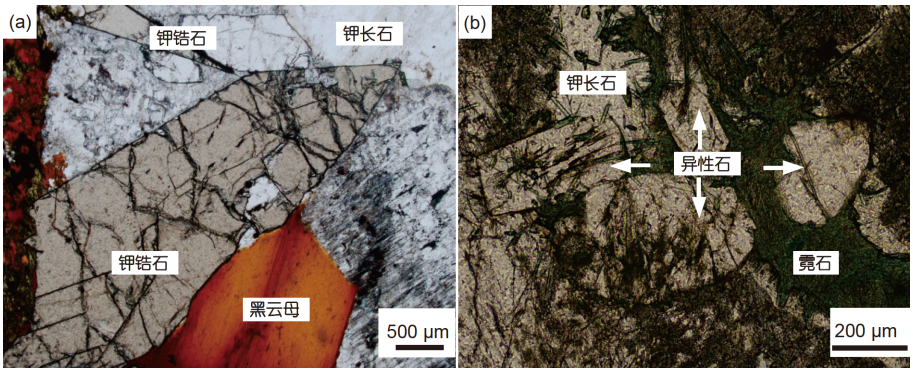


图 6 赛马碱性岩体钾锆石(a)和异性石(b)光学照片. 选自文献[56,57]
Figure 6 Microphotographs of wadeite (a) and eudialyte (b) from the Saima alkaline complex. Quoted from Refs. [56,57]

渤海-黄海滨海砂矿资源丰富, 分布不均匀, 现已探明锆石矿点百余处, 其中大、中型砂矿床主要分布在辽宁与山东两省. 辽东半岛发现10余处较大的锆砂矿点, 锆石与金刚石、砂金、独居石等共生, 主要集中于新金县登沙河, 矿石储量约1万t[39]. 山东半岛共发现锆砂矿(点)47个, 锆石异常区6个, 其中大中型锆砂矿床7个, 锆砂矿主要分布在荣成至日照东南沿海的滨海地带, 成矿物质主要来源于中生代燕山期的二长花岗岩[60].

东海-南海沿线滨海砂矿是我国最主要的锆铪矿产地, 广泛分布于海南、福建、台湾、广东和广西, 浙江省仅舟山桃花岛和巨山岛冷峙两处锆砂矿点[42]. 海南是我国最大的锆砂矿资源产地, 主要分布于东海岸, 集中在文昌、琼海、万宁和陵水四县, 成矿时期主要为晚更新世早中期至全新世中晚期, 成矿母岩主要有燕山期花岗岩、绢云母石英片岩和石英砂岩组成的寒武系变质岩[44]. 福建锆砂矿主要分布于厦门-诏安一线, 其中厦门黄厝砂矿以独居石、钛铁矿和锆石为主, 诏安官口以钛铁矿、锆石、独居石和金红石砂矿为主, 成矿母岩为更新统地层和燕山早期花岗岩. 台湾省锆砂矿多分布于西北部和西部海岸. 广东东部海丰-陆丰一带以锆石、石英砂为主, 成矿物质主要来源于燕山晚期花岗岩, 而西部锆石矿等主要分布于电白-徐闻海岸的第四纪北海组、湛江组松散堆积层中[61].

5 几点认识

(1) 我国铌钽锆铪矿床类型多样, 从与花岗岩、伟晶岩、碱性岩和碳酸岩等岩浆-热液过程密切相关的内生矿床, 到滨海沉积、河流冲积和风化壳及残坡积成因的外生矿床, 特别是外生作用为我国锆铪资源提供了基本供给. 环太平洋构造域是我国传统的稀有金属成矿区, 燕山期成矿大爆发不仅形成了经典的南岭铌钽成矿区, 也在南岭周边形成了强烈的成矿作用; 古亚洲洋构造域阿尔泰造山带是我国最重要的稀有金属成矿带, 在三叠纪发生了大规模的锂铍铌钽等稀有金属成矿作用; 特提斯构造域发生两次大规模成矿作用, 一次是横跨潘松-甘孜到西昆仑的三叠纪花岗伟晶岩锂铍铌钽成矿作用, 另一次是喜马拉雅新生代淡色花岗岩铍铌钽成矿作用; 华北克拉通边缘和扬子板块周边亦有碱性岩(碳酸岩)型铌锆矿床分布(包括我国最大的资源地白云鄂博), 我国应该加大此类资源的勘查.

(2) 我国近年来在铌钽锆铪资源勘探方面投入不断加大, 新发现了一批矿床、新增了可观的资源量. 据初步和不完全统计, 我国铌钽资源量(以Nb_2O_5计)近270万t(还不包括白云鄂博Fe-REE-Nb矿床的铌储量), 钽资源量(以Ta_2O_5计)超过15万t, 总量喜人. 但我国铌钽资源劣势也很明显, 一是矿床规模不大, 单个铌矿床储量一般在2~3万t, 而大部分钽矿床储量不足万吨; 二是品位偏低, 绝大部分氧化物含量低于0.02wt%; 三是伴生资源明显, 特别是碱性岩或碳酸岩型矿床中, 铌作为次要可用资源.

(3) 鉴于我国铌钽锆铪资源禀赋, 一方面需要加大地质勘查、提高增量, 另一方面需要用好存量, 提高现存资源的可利用性. 通过研究不同类型矿床中铌钽锆铪的赋存状态, 提高成矿元素的高效利用. 初步估算白云鄂博Fe-REE-Nb矿床有660万t伴生铌资源(以Nb_2O_5计), 但铌矿物颗粒细小且嵌布复杂多样, 通过矿物学研究, 揭示铌赋存状态研究, 可有助于完善白云鄂博矿床中铌的选冶工艺, 提高我国铌资源保障能力.

致谢 感谢中国科学院广州地球化学研究所赵振华研究员和中国科学院地球化学研究所张辉研究员的评阅及宝贵的修改意见. 图1,3,5涉及的中国地图经自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2020)1767号.

参考文献

1 Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. Acta Cryst A, 1976, 32: 751–767
2 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. In: Rucnick R L, ed. Treatise on Geochemistry: The Crust. Amsterdam: Elsevier, 2003, 3. 1–64
3 Linnen R L, Trueman D L, Burt R. Tantalum and niobium. In: Gunn G, ed. Critical Metals Handbook. 1st ed. Oxford: John Wiley & Sons Ltd., 2014. 361–384
4 Jones J V III, Piatak N, Bedinger G. Zirconium and hafnium. In: Schulz K J, Bradley D C, DeYoung J H Jr, et al., eds. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1802. 2017

5 Giovannini A L, Bastos Neto A C, Porto C G, et al. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil). Ore Geol Rev, 2017, 88: 461–480
6 U.S. Geological Survey (USGS). Niobium. USGS Mineral Commodity Summaries, 2020. 117–118
7 U.S. Geological Survey (USGS). Tantalum. USGS Mineral Commodity Summaries, 2020. 164–165
8 U.S. Geological Survey (USGS). Zirconium and hafnium. USGS Mineral Commodity Summaries, 2020. 192–193
9 Xiang Y C, Mou X Z, Ren T X, et al. Research on the Application of Geochemical Data for National Potential Assessment of Ore Resources (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2018. 155 [向运川, 牟绪赞, 任天祥, 等. 全国矿产资源潜力评价化探资料应用研究. 北京: 地质出版社, 2018. 155]
10 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. Can Miner, 2002, 40: 1047–1068
11 Wang H J. Characteristics and prospecting study of rare-metals such as Nb and Ta in China (in Chinese). Sci Technol Innov Her, 2017, 17: 74–75 [王红军. 我国铌钽等稀有金属矿特征及找矿研究. 科技创新导报, 2017, 17: 74–75]
12 Nie F J, Wang F X, Zhao Y A, et al. Geological features and origin of Zhaojinggou Nb-Ta deposit in Wuchuan County, Inner Mongonia (in Chinese). Miner Depos, 2013, 32: 730–743 [聂凤军, 王丰翔, 赵宇安, 等. 内蒙古赵井沟大型铌钽矿床地质特征及成因. 矿床地质, 2013, 32: 730–743]
13 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 [李建康, 李鹏, 王登红, 等. 中国铌钽成矿规律. 科学通报, 2019, 64: 1545–1566]
14 Zhu Z, Wang R, Marignac C, et al. A new style of rare metal granite with Nb-rich mica: The Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China. Am Miner, 2018, 103: 1530–1544
15 Wang R C, Xie L, Zhu Z Y, et al. Micas: Important indicators of granite-pegmatite-related rare-metal mineralization (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2019, 35: 69–75 [王汝成, 谢磊, 诸泽颖, 等. 云母: 花岗岩伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物. 岩石学报, 2019, 35: 69–75]
16 Rao C, Wang R C, Hu H, et al. Complex internal texture in oxide minerals from the Nanping No. 31 dyke of granitic pegmatite, Fujian Province, southeastern China. Can Miner, 47: 1195–1212
17 Zhou F C, Liu X, Li J K, et al. Metallogenic characteristics and prospecting direction of Renli super-large rare metal deposit in Hunan Province, China (in Chinese). Geotect Metal, 2019, 43: 77–91 [周芳春, 刘翔, 李建康, 等. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征和成矿模型. 大地构造与成矿学, 2019, 43: 77–91]
18 Li P, Li J, Liu X, et al. Geochronology and source of the rare-metal pegmatite in the Mufushan area of the Jiangnan orogenic belt: A case study of the giant Renli Nb-Ta deposit in Hunan, China. Ore Geol Rev, 2020, 116: 103237
19 Qiu K, Yu H, Wu M, et al. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China. Am Miner, 2019, 104: 1487–1502
20 Wang F L, Zhao T P, Wang Y. Petrogenesis of permian Nb-Ta mineralized syenitic dikesin the Panxi district, SW China (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2015, 31: 1797–1805 [王汾连, 赵太平, 王焰. 攀西地区二叠纪赋存铌钽矿的正长岩脉的成因探讨. 岩石学报, 2015, 31: 1797–1805]
21 Deng S B, Wang W H, Wang X J. The geological characteristics of the alkali-intermediate rocks and their ore-bearing (columbotantalite) features in the Ziyang-Langao areas (in Chinese). Geol Shanxi, 2003, 21: 19–26 [邓盛波, 王炜红, 汪显均. 紫阳-岚皋地区碱中性岩地质特征及其含矿(铌钽)性研究. 陕西地质, 2003, 21: 19–26]
22 Lu X S, Huang J M, Xiong Y L, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the volcanic rocks in the Tudiling Nb-Ta deposit, South Qinling orogenic belt, and its geological implications (in Chinese). Geol Sci Technol Inform, 2019, 38: 40–51 [鲁显松, 黄景孟, 熊意林, 等. 南秦岭土地岭铌钽矿床火山岩地球化学、锆石U-Pb年代学特征及地质意义. 地质科技情报, 2019, 38: 40–51]
23 Li Z M. Discovery and significance of Huangnipo niobium deposit in Weining of Guizhou (in Chinese). Nonfer Metal Design, 2018, 45: 72–74 [李政明. 贵州威宁黄泥坡铌矿的发现及意义. 有色金属设计, 2018, 45: 72–74]
24 Gao H Z. General comments on rare earth and scarce resources in Baiyunebo (I) (in Chinese). Sci Technol Baotou Steel (Group) Corp, 2009, 35: 1–6 [高海洲. 白云鄂博矿区稀土稀有矿产资源综合评价(一). 宝钢科技, 2009, 35: 1–6]
25 He H Y, He M, Li J W. Analysis of the niobium resources supply and demand pattern in China (in Chinese). China Min Mag, 2018, 27: 1–5 [何海洋, 何敏, 李建武. 我国铌矿资源供需形势分析. 中国矿业, 2018, 27: 1–5]
26 Deng P, Chen Y M, Ye J H, et al. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum (in Chinese). China Min Mag, 2019, 28: 63–68 [邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析. 中国矿业, 2019, 28: 63–68]
27 Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G. Introduction to tectonics of China. Gondwana Res, 2013, 23: 1189–1206
28 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
29 Wang C H, Wang D H, Chen C, et al. Progress of research on the Shiziling rare metals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting (in Chinese). Acta Geol Sin, 2019, 93: 1359–1373 [王成辉, 王登红, 陈晨, 等. 九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义. 地质学报, 2019, 93: 1359–1373]

30 Zhang H, Lü Z H, Tang Y. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang (in Chinese). Miner Depos, 2019, 38: 792–814 [张辉, 吕正航, 唐勇. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向. 矿床地质, 2019, 38: 792–814]
31 Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B, et al. On the structural bachgrouns 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]
32 Wang R C, Wu F Y, Xie L, et al. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. Sci China Earth Sci, 2017, 60: 1655–1663 [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]
33 McCauley A, Bradley D C. The global age distribution of granitic pegmatites. Can Miner, 2014, 52: 183–190
34 Zhai M G, Zhang Q, Chen G N, et al. Adventure on the research of continental evolution and related granite geochemistry (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1414–1420 [翟明国, 张旗, 陈国能, 等. 大陆演化与花岗岩研究的变革. 科学通报, 2016, 61: 1414–1420]
35 Xiang L, Wang R, Romer R L, et al. Neoproterozoic Nb-Ta-W-Sn bearing tourmaline leucogranite in the western part of Jiangnan Orogen: Implications for episodic mineralization in South China. Lithos, 2020, 360-361: 105450
36 Mao J W, Xie G Q, Guo C L, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2007, 23: 2329–2338 [毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 2007, 23: 2329–2338]
37 Wang Y X, Zhao Z H. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr super large 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]
38 Yang W B, Niu H C, Shan Q, et al. Ore-forming mechanism of the Baerzhe super-large rare and rare earth elements deposits (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2009, 25: 2924–2932 [杨武斌, 牛贺才, 单强, 等. 巴尔哲超大型稀有稀土矿床成矿机制研究. 岩石学报, 2009, 25: 2924–2932]
39 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]
40 Wu B, Wang R C, Yang J H, et al. Zr and REE mineralization in sodic lujavrite from the Saima alkaline complex, northeastern China: A mineralogical study and comparison with potassic rocks. Lithos, 2016, 262: 232–246
41 Yin R, Wang R C, Zhang A C, et al. Extreme fractionation from zircon to hafnon in the Koktokay No. 1 granitic pegmatite, Altai, northwestern China. Am Miner, 2013, 98: 1714–1724
42 Chen Z, Yang H N, Yan W, et al. Distributions and divisions of mineral resources in the sea areas of China: Placer deposit and ferromanganese nodule/crust (in Chinese). Mar Geol Quart Geol, 2006, 26: 101–108 [陈忠, 杨慧宁, 颜文, 等. 中国海域固体矿产资源分布及其区划——砂矿资源和铁锰(微)结核-结壳. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26: 101–108]
43 Zhang B. Hainan’s marine resources and their exploitation. World Sci Technol Res Dev, 1998, 20: 106–110 [张本. 海南海洋资源与开发. 世界科技研究与发展, 1998, 20: 106–110]
44 Chen H Z. Present situation and utilization trend of zirconium resources of Hainan (in Chinese). China Metal Bull, 2018, 4: 97–98 [陈华祝. 海南锆矿资源开发利用现状分析建议. 中国金属通报, 2018, 4: 97–98]
45 Wang R J, Wang D H, Li J K, et al. Rare Earth and 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]
46 Department of Natural Resources of Guangdong Province. Announcement on the registration of mineral resources reserves (in Chinese). http://nr.gd.gov.cn/gdlr_notice/2/content/post_494105.html [广东省自然资源厅. 广东省国土资源厅2010年12月份矿产资源储量登记公告. http://nr.gd.gov.cn/gdlr_notice/2/content/post_494105.html]
47 Sun H W, Wang J, Ren J P, et al. Present situation and utilization trend of zirconium resources in the world (in Chinese). Conserv Util Miner Res, 2019, 5: 98–105 [孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 全球锆矿资源现状与利用趋势. 矿产保护与利用, 2019, 5: 98–105]
48 Liu H Y, Ma Z. Analysis of the zirconium resources security in China (in Chinese). China Min Mag, 2017, 26: 6–10 [刘皓阳, 马哲. 中国锆资源安全分析. 中国矿业, 2017, 26: 6–10]
49 Zhang J W, Wang H D, Gong W Y, et al. Analysis on the development and utilization situation of zirconium resources in China (in Chinese). Conserv Util Miner Res, 2019, 5: 106–110 [张建文, 王海东, 龚文勇, 等. 中国锆矿资源开发利用形式分析. 矿产保护与利用, 2019, 5: 106–110]
50 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
51 Xu H M, Zou T R, Fang J Z, et al. Geochronology and genesis of the Boziguoer Nb-Ta deposit in Xinjiang (in Chinese). Miner Depos, 2012, 1 (Suppl): 625–626 [徐海明, 邹天人, 方景珍, 等. 新疆波孜果尔铌钽矿成矿床时代及成因研究. 矿床地质, 2012, 1(Suppl): 625–626]

52 Guo R Q, Qin Q, Zhang X F, et al. Geochronology, petrogeochemistry of western-Kuoktagh alkaline rocks in Quruqtagh area in Xinjiang and its geological implications (in Chinese). J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 2013, 43: 457–468 [郭瑞清, 秦切, 张晓帆, 等. 新疆库鲁克塔格阔克塔格西碱性岩年代学、岩石地球化学特征及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43: 457–468]
53 Liu C H, Wu C L, Gao 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]
54 Wu F Y, Yang Y H, Marks M A W, et al. *In situ* U-Pb, Sr, Nd and Hf isotopic analysis of eudialyte by LA-(MC)-ICP-MS. Chem Geol, 2010, 273: 8–34
55 Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, et al. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China. J Asian Earth Sci, 2016, 117: 184–207
56 Wu B, Wang R C, Yang J H, et al. Wadeite ($K_2ZrSi_3O_9$), an alkali-zirconosilicate from the Saima agpaitic rocks in northeastern China: Its origin and response to multi-stage activities of alkaline fluids. Lithos, 2015, 224-225: 126–142
57 Wu B, Wang R C, Liu X D, et al. Chemical composition and alteration assemblages of eudialyte in the Saima alkaline complex, Liaoning Province, and its implication for alkaline magmatic-hydrothermal evolution (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2018, 6: 1741–1757 [邬斌, 王汝成, 刘晓东, 等. 辽宁赛马碱性岩体异性石化学成分特征及其蚀变组合对碱性岩浆-热液演化的指示意义. 岩石学报, 2018, 6: 1741–1757]
58 Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. Lithos, 2008, 103: 352–368
59 Wu M Q, Tian B F, Zhang D H, et al. Zircon of the No. 782 deposit from the Great Xing'an Range in NE China: Implications for Nb-REE-Zr mineralization during magmatic-hydrothermal evolution. Ore Geol Rev, 2018, 102: 284–299
60 Chi H J, Li X Z, Zheng Z P. Littoral placers forming rule and prospecting divisions in Shandong Province (in Chinese). Shandong Geol, 2001, 17: 24–31 [迟洪纪, 李秀章, 郑作平. 山东省滨海砂矿成矿规律及远景区划. 山东地质, 2001, 17: 24–31]
61 Wang Q. Littoral placers forming conditions and prospecting divisions in Guangdong Province (in Chinese). Inner Mongolia Coal Econ, 2003, 1: 37–38, 41 [王琼. 广东省滨海砂矿成矿地质条件及找矿远景浅析. 内蒙古煤炭经济, 2003, 1: 37–38, 41]

补充材料

表S1 铌铁矿、锡石或独居石LA-ICP-MS U-Pb定年结果

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 “中国铌钽锆铪资源”

Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China

Rucheng Wang[1*], Xudong Che[1], Bin Wu[2] & Lei Xie[1]

[1] *State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*
[2] *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China*
* Corresponding author, E-mail: rcwang@nju.edu.cn

The two element pairs Nb-Ta and Zr-Hf have similar geochemical behaviors and are critical mineral resources due to their specialized applications in modern high-technology industries. Globally, based on the type of host rock, Nb, Ta, Zr, and Hf resources can be divided into granite- and granitic pegmatite-type, carbonatite-type, alkaline rock-type, and related exogenic deposits. Low reserves and a high import dependency on these metals are important issues for China. There are ca. 50 Nb-Ta deposits in China, with estimated reserves of Nb_2O_5 and Ta_2O_5 of 2.67×10^6 and 0.17×10^6 t, respectively (excluding the Nb reserves in the Bayan-Obo REE-Nb-Fe deposit). Most of these deposits are hosted in aluminous granites, including peraluminous and metaluminous granite types. Examples include the Yichun peraluminous granite-type Nb-Ta deposit in Jiangxi Province, the Guposhan metaluminous granite-type Nb deposit in Hunan and Guangxi and the granitic pegmatite-type Nanping Nb-Ta-Li deposit in Fujian Province. Other minor deposits include the carbonatite-type (e.g., the Miaoya REE-Nb deposit in Hubei Province) and the alkaline rock-type (e.g., the Ba’erzhe REE-Zr-Nb-Be deposit in Inner Mongolia). Niobium-Ta resources in China are located mainly in the western Pacific domain (e.g., the Nanling Range and Jiangnan orogenic belt), the Paleo-Asian Ocean domain (e.g., the Altay Li-Be-Nb-Ta ore belt), the Tethyan domain (e.g., the Songpan-Ganze Li-Be-Nb-Ta and Himalaya Be-Nb-Ta leucogranite ore belts), and at the margins of the Yangtze and North China cratons (e.g., the Nb deposits in the Qinlin orogenic belt). These deposits formed during the Meso-Neoproterozoic (e.g., the Bayan-Obo REE-Nb-Fe deposit during 1.4–1.3 Ga), Paleozoic (ca. 400–380 Ma), early Mesozoic (Paleo-Tethys tectonism; 250–200 Ma), late Mesozoic (the metallogenic explosion in South China; ca. 160–120 Ma), and Cenozoic (Himalaya leucogranite belt; 44–7 Ma).

An estimated 500×10^3 t of ZrO_2 is hosted in both endogenic and exogenic deposits in China. The endogenic Zr-Hf resources are commonly associated with Nb-Ta deposits, due to their similar geochemical behavior. Most of these are hosted in alkaline-peralkaline granites (e.g., the Ba’erzhe REE-Nb-Ta-Zr deposit), along with minor deposits in aluminous granite and granitic pegmatite (e.g., the Koktokay Li-Be-Nb-Ta-Zr-Hf deposit in Xinjiang). There are no occurrences of carbonatite-type Zr-Hf deposits in China. The endogenic Zr-Hf deposits are located primarily along with deep fractures or in rifted regions, including the ore belts of the Tarim and Northern China cratons (e.g., the Boziguo’er alkaline syenite-type deposit in Xinjiang), the western Yangtze Craton (e.g., the Cida alkaline granite-type deposit in Sichuan Province), and the southern Daxing’an mountain range (e.g., the Ba’erzhe alkaline granite-type deposit). These endogenic Zr-Hf deposits formed during the late Paleozoic and Mesozoic. Although endogenic deposits host the main Zr-Hf resources in China, few have been economically exploited due to their low grade and technical challenges. In contrast, domestically available Zr-Hf resources have been exploited from zircon in Quaternary exogenic deposits, including littoral placers (e.g., the Wenchang placers in Hainan Province), fluvial-alluvial placers (e.g., the No. 725 deposit in Guangxi), and weathered crust-type deposits (e.g., the No. 520 deposit in Guangxi). In these exogenic deposits, the ore minerals commonly include zircon, rutile, monazite-(Ce), ilmenite, and other heavy minerals that were derived mainly from Mesozoic granites. Hainan Province is China’s largest region of mined exogenic Zr deposits, which occur mostly in Wenchang, Qionghai, Wanning, and Lingshui counties along its southeastern coastline.

In summary, although China hosts diverse types of Nb-Ta-Zr-Hf resources and its reserves are large, most of the deposits are of low grade and difficult to utilize. Therefore, future research should focus on ore formation mechanisms, mineral exploration, and improvements in resource recycling, mineral processing, and industrial efficiency.

niobium-tantalum, zirconium-hafnium, ore deposit type, spatial-temporal characteristics, resource recycling

doi: 10.1360/TB-2020-0271