

我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向

孙艳,王登红,王成辉,李建康,赵芝,王岩,郭唯明

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

内容提要:铷是重要的稀有金属和战略性新兴产业矿产。按目前工业指标衡量,我国铷资源相对丰富,主要分布在江西、新疆和广东等12个省份,规模以超大型和大型为主,但品位低,均以伴生资源产出,开发利用难度大。花岗岩型和花岗伟晶岩型是我国铷矿的主要类型,主要分布在江南隆起东段、武功山-北武夷山、南岭中段、浙中-武夷山、康滇、阿尔泰、华北陆块北缘等稀有金属成矿带。我国近年铷矿的找矿工作虽然有新进展,发现和提交了广东龙川天堂山超大型铷矿,但基本上还是伴生矿产,铷矿资源先天不足的基本格局尚未有实质性改变。鉴于战略性新兴产业的快速发展,尤其是在环境保护要求越来越高的形势下,促进新能源及相关产业的发展已经是当务之急,而铷有可能在新能源领域发挥重要作用,因而有必要提前谋划独立铷矿、高品质铷矿的找矿工作,重点找矿方向宜考虑摸清现有铷矿资源家底、从新兴产业需求侧的角度来分析哪些类型的铷矿有可能得到现实的开发利用、进而有针对性地总结找矿标志、圈定找矿靶区、适度开展钻探验证,并布署相关的高端利用、综合回收方面的研究工作。

关键词:铷矿;成矿规律;铷成矿带;新进展;找矿方向

稀有金属、稀土金属、稀散金属(简称“三稀”)在“十二五”期间就是培育发展战略性新兴产业所需要的功能材料、结构材料,在“十三五”期间受到了新兴产业尤其是新能源产业的进一步重视。在众多稀有金属资源中,铷除应用于军工领域外,还应用于众多民用领域。人们最先发现铷的重要的性质,是因为它们是“长眼睛”的金属——具有优异的光电性能(Norton, 1973; Li Jingping et al., 2005)。2018年5月,美国内务部将铷列为35种关键矿物资源之一。铷及其化合物的应用主要包括生物医学研究、电子、光纤通信、特种玻璃和烟火等。利用铷原子研制的量子计算机标准预计于2025年发布,这种计算机比普通计算机拥有更强大的计算能力,可以断定铷的需求也将会大大增加(USGS, 2019)。科学家们利用铷原子设计的磁流体发电和热电发电也在不断的尝试创新和产业化。寻找独立铷矿、高品质铷矿迫在眉睫。本文

在总结前人资料和找矿进展的基础上,探讨了中国铷矿的成矿规律,指出了铷的找矿方向和建议,以期对指导我国铷矿的找矿勘查工作部署和综合利用起到积极的促进作用。

1 铷资源概况及开发利用情况

1.1 铷资源概况

铷资源主要赋存于花岗伟晶岩、卤水和钾盐矿床中,现在主要从花岗伟晶岩中回收铷,工业矿物是锂云母和铯沸石(曾称铯榴石)。现今世界铷矿产生和储量没有官方数据来源,约65%的铷是从花岗伟晶岩中开采的,25%采自光卤石和盐类矿床(Shao Juenian et al., 2010)。国外伟晶岩中 Rb_2O 储量约17万t,其中津巴布韦10万t,占58%;纳米比亚5万t,占29%;加拿大1.2万t,占7%。这三个国家 Rb_2O 储量为16.2万t,占国外伟晶岩型 Rb_2O 资源的95%。加拿大是世界上铯沸石矿最丰

注:本文为国家重点研发计划“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范”项目(编号2017YFC0602700)“我国锂能源金属成矿规律、靶区优选与重点查证”课题(编号2017YFC0602701);“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”(编号DD20160056);“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”(矿产地质志)项目(编号DD20160346)资助的成果。

收稿日期:2019-05-01;改回日期:2019-06-03;网络发表日期:2019-06-05;责任编辑:周健。

作者简介:孙艳,女,1981年生。博士,副研究员,构造地质学专业。Email:sunyan517@vip.163.com。通讯作者:王成辉,男,1982年生。博士,副研究员,矿床学专业。Email:chhwang@qq.com。

引用本文:孙艳,王登红,王成辉,李建康,赵芝,王岩,郭唯明. 2019. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向. 地质学报, 93(6):1231~1244, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019183.
Sun Yan, Wang Denghong, Wang Chenghui, Li Jiankang, Zhao Zhi, Wang Yan, Guo Weiming. 2019. Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China. Acta Geologica Sinica, 93(6):1231~1244.

富的国家,曼尼托巴的伯尼克湖-坦科矿区,铯沸石矿储量达 35 万 t(Zhang Shuanghua,1998)。

目前我国 Rb_2O 储量约为 18.4 万 t,基础储量约 31.1 万 t,查明资源量约 195.8 万 t,其中硬岩型 Rb_2O 约 190.4 万 t,占全国 Rb_2O 资源量的 97%。卤水型 Rb_2O 约 5.4 万 t,占全国资源量的 3%。江西宜春是我国最主要的铷供应地,江西查明 Rb_2O 资源量居全国第一,占比 34%。其次为新疆,占全国查明铷资源量 33%。广东因河源龙川天堂铷矿的发现,查明 Rb_2O 资源量跃居全国第三位,占比 15%。其次是湖南(占比 9%)、内蒙(占比 3%)、四川(占比 2%)、青海(占比 2%)、湖北(占比 1%)。河南、广西和陕西也有少量铷资源分布(图 1)。

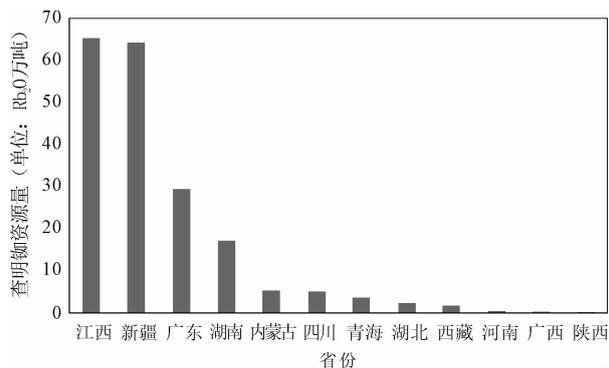


图 1 我国查明铷资源量分布省份

Fig. 1 The distribution of rubidium resources in different provinces, China

1.2 铷资源开发利用情况

目前世界铷矿生产和储量没有官方数据来源,已知纳米比亚和津巴布韦定期进行生产,但没有生产数据。2018年,有8个以开发锂资源为主要目标的项目处于不同的开发阶段,包括澳大利亚 King Col、加拿大 Jubilee 湖、纳米比亚 Soris、加拿大温尼伯河伟晶岩等项目,开采对象是伟晶岩中富锂、钽、铯和铷等稀有金属的铯沸石和锂辉石(USGS,2019)。

全球铷产品(包括铷盐和铷金属)的主要消费国家是美国、日本、德国和俄罗斯。近十年资料显示,美国国内消费量约为 2000kg/年,全部依赖进口,其一直从加拿大马尼托巴湖的伯尼克湖矿区进口铯沸石,直至 2015 年底该矿山停产。

日本是近几十年来世界上铷生产和应用发展最快的国家,特别在有机合成催化剂方面发展迅速;美国则是世界上最早生产和应用铷的国家之一,其应

用主要集中在高科技领域,有 80%应用于开发高新技术,20%用于电子器件、特种玻璃、催化剂等传统领域(李锡铭,1989^①;Zhang Shuanghua,1998;Sun Yan et al.,2013)。

我国的铷资源主要是从锂云母、铁锂云母和光卤石提取的。新疆是我国最早的铷生产基地,江西宜春是当下最主要的产地。我国盐湖和卤水中富含大量的铷资源,母液储量大,但铷浓度不高,通常和大量化学性质相似的锂、钠、钾、铯共存,给工业上分离和利用带来困难(Zheng Xiyu et al.,2002)。故如何在经济和环境并重的前提下高效提取铷,成为了当下的研究热点(Li Haimin et al.,2003)。

1.3 我国铷资源禀赋特征

铷的地球化学特征具有特殊性,目前尚未发现独立的铷矿物。我国也尚未发现独立的铷矿床,铷常与 Li、Be、Nb、Ta 等其他稀有金属矿种共(伴)生(表 1)。许多发生锂、钽、铯等稀有金属矿化的矿床中,一般都存在铷矿化。在花岗岩型矿床中,江西宜春 414、湖南尖峰岭、内蒙赵井沟等花岗岩型矿床,铷与钽铷锂铯等稀有金属共(伴)生;在四川甲基卡、河南卢氏 202(蔡)矿区和新疆可可托海等花岗岩伟晶岩型矿床中,铷与锂铍钽铷等稀有金属共(伴)生;在盐湖和地下卤水中,铷与锂、铯、钾等元素共(伴)生。

与国外资源相比,我国铷资源品位低(图 2)、开发利用难度大。根据铷的赋存状态,硬岩型铷矿可分为赋存于云母中的云母型铷矿资源和赋存于长石中的长石型铷矿资源。在我国制定的铷矿工业指标中,硬岩型铷资源的最低工业品位为 0.1%~0.2%(Shao Juenian et al.,2010),但该指标主要针对含锂云母的碱性长石花岗岩类与花岗伟晶岩类矿床,不适用于铷赋存在长石或其他矿物中的矿床。然而,我国许多铷矿勘查工作未区别对待铷资源的赋存状态,一律采用 0.1%的工业品位圈定铷资源的规模和储量,因而报道了大量“数字惊人但事实上难以被开发利用”的铷矿资源。比如甘肃国宝山铷矿,铷含量为 0.06%,但主要赋存在长石中(Sun Yan,2013;Lai Yang et al.,2016),短期内无法被开发利用。通过与国外典型铷矿对比可知,除湖南道县正冲铷矿和内蒙古石灰窑铷多金属矿中 Rb_2O 含量达 0.5%以上,其余矿床 Rb_2O 含量基本都处于 0.1%~0.2%之间,即便属于含锂云母的碱性长石花岗岩类与花岗伟晶岩类矿床,也只是符合最低工业品位,综合开发利用难度大。

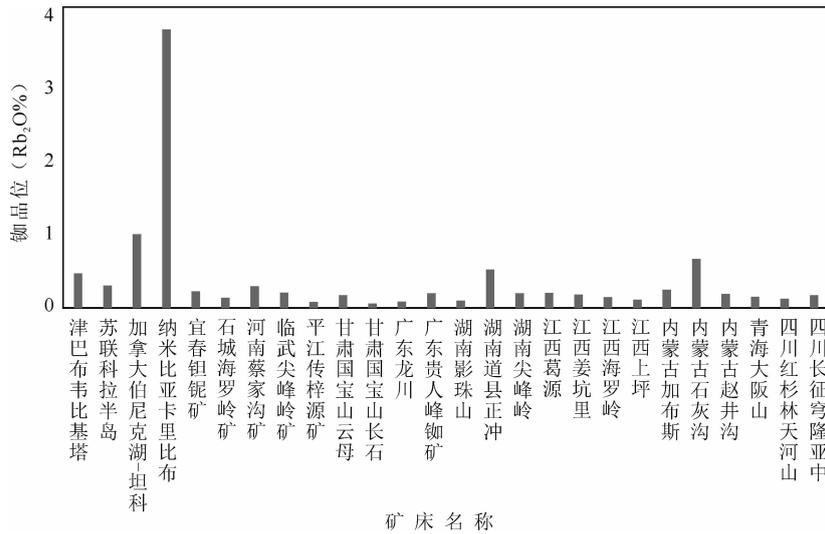


图 2 我国主要铷矿及国外大型铷矿品位对比图

Fig. 2 Grade comparison chart of the main rubidium ores in China and large rubidium ore abroad

2 中国铷矿类型

铷没有独立矿床,主要和其他矿产共伴生,国外的铷矿主要有伟晶岩型矿床(加拿大坦科)、光卤石-钾盐矿床(苏联、德国)、盐湖卤水型矿床(美国大盐湖、约旦死海等)、油气田水型矿床(美国斯马克维尔)、矿泉水型矿床(德国、巴西、日本)及海水型矿床(红海等)六类。早期的铷、铯矿产资源战略分析报告中,国内铷矿被分为花岗岩型矿床、伟晶岩型矿床、热液型矿床、盐湖卤水型矿床及油气田水型矿床五类(李锡铭,1989^①)。本文将油气田水型矿床和地下卤水型矿床统一归并为地下卤水型矿床,云英岩型矿床单独分类,将我国铷矿划分为花岗岩型、花岗伟晶岩型、云英岩型、岩浆热液型、盐湖型、地下卤水型六类。铷资源主要集中于为花岗岩型、花岗伟晶岩型和盐湖型中,只有少量为岩浆热液型、地下卤水型和云英岩型(图 3)。在表 2 列出的 54 个铷矿床中,超大型铷矿有 26 个,大型铷矿 11 个,出现了规模越大的矿产地数量越多的反常现象,这与铷的工业指标不完善有一定关系(图 4)。

我国花岗岩型铷矿多形成在中生代。南岭富铷地区地壳活动非常强烈,特别在燕山期有广泛的断裂运动 and 大规模岩浆活动,造成大面积岩浆岩分布。南岭以外地区的含矿花岗岩,其控矿构造因地而异。如在川西、云南,含矿花岗岩沿南北向大断裂侵入。此外也常见于背斜构造中,受褶皱控制。富铷的花岗岩出露面积较小,常呈岩株、岩枝、岩脉和岩床等形式产出,多构成复式岩体。含矿花岗岩多为复式

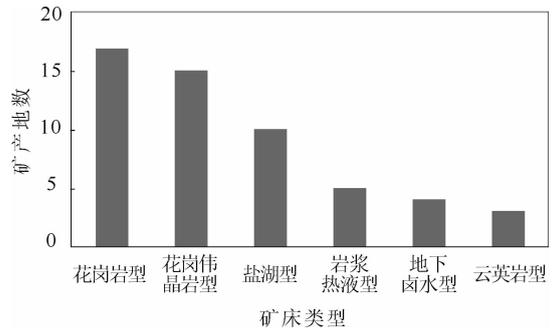


图 3 中国铷矿床类型分布

Fig. 3 The type distribution of rubidium deposits in China

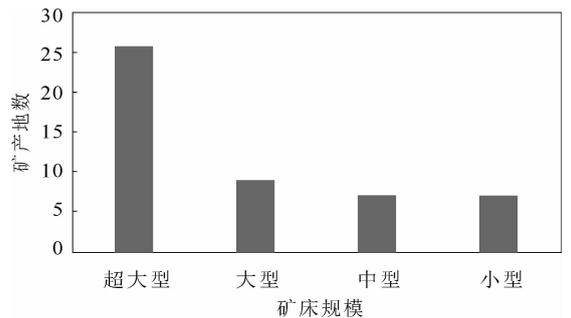


图 4 中国铷矿床规模分布

Fig. 4 The scale distribution of rubidium deposits in China

岩体的晚期相,铷含量从早到晚期规律性升高,与挥发分和 SiO₂ 含量同步增长。改造型花岗岩中铷的含量远超过同熔型花岗岩中含量,主要是原始成岩物质来源不同导致,另外所处的构造环境和经受改造的程度不同,对铷的含量分布也有很大影响。花岗岩中含钾矿物是铷的主要富集和载体矿物。铷的含量在花岗岩中分布比较稳定,从岩体顶部向下逐

表1 中国主要伴生铷矿床一览表

Table 1 List of major rubidium deposits in China

序号	省份	矿床名称	矿种组合	矿床类型	规模	成矿时代	Rb 赋存矿物	资料来源
1	福建	下柳源铌钽矿点	Nb-Ta-Rb	花岗岩伟晶岩型	小型	燕山期	云母	福建省地质2团7中队,1971 ^①
2	福建	东坑	Rb	岩浆热液型	大型	燕山	蚀变白云母、 蚀变黑云母	Yang Fen, 2017
3	甘肃	国宝山	Rb	花岗岩型	超大型	海西期	微斜长石(分布率 71.13%)、(锂)云母	Sun Yan, 2013; Zhou Huiwu et al., 2015; Lai Yang et al., 2016
4	广东	龙川天堂山	Rb-Sn	云英岩型	超大型	燕山期	云母	Jia Hongxiang et al., 2016
5	广东	贵人峰铷矿	Mo-Rb	岩浆热液型	小型	燕山期	黑云母、绢云母	Zhang Min, 2016
6	广东	八面山-白垩下钽铌铷矿	Nb-Ta-Rb	云英岩型	中型	燕山期	黑云母(铁锂云母)	广东省地质局七二三地质队四分队, 1974 ^①
7	河南	卢氏县202(蔡)矿区	Nb-Ta-Li-Be-Rb	花岗岩伟晶岩型	中型	海西期	锂云母	陕西省地质局第三地质队, 1970 ^①
8	湖南	上石	Be-Li-Nb-Ta-Rb	花岗岩伟晶岩型	超大型	燕山期	云母	Xiao Chaoyang et al., 2003; Wang Denghong et al., 2019
9	湖南	影珠山	Nb-Ta-Be-Rb	花岗岩型	大型	燕山期	白云母	湖南省地质局402队, 1972 ^①
10	湖南	香花岭矿区	Nb-Ta-Li-Rb-Be	花岗岩型	超大型	燕山期	云母	湖南冶金238勘探队, 1976 ^① ; Du Fangquan et al., 1991
11	湖南	上堡小头冲矿段	Nb-Ta-Rb	花岗岩型	小型	燕山期	云母	湖南省地质局408队, 1970 ^①
12	湖南	道县正冲	Rb-Li	云英岩型	超大型	燕山期	云母	湖南地矿局湘南地质队, 1984 ^① ; Wang Jingbin, 1990
13	湖南	尖峰岭	Ta-Nb-Rb	岩浆热液性	超大型	燕山期	黑鳞云母、 锂(白)云母	Wen Chunhua et al., 2017
14	湖南	传梓源	Nb-Ta-Be-Rb	花岗岩伟晶岩型	大型	燕山期	云母	湖北省第5地质队, 1973 ^①
15	江西	黄陂洞	Rb-Cs-Nb-Ta-Li	花岗岩型	中型	燕山期	锂云母、天河石	江西省地质调查院, 2016 ^①
16	江西	葛源	Ta-Nb-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	云母	江西省地质调查院, 2016 ^①
17	江西	姜坑里	Nb-Ta-Li-Rb	花岗岩型	大型	燕山期	云母	江西省地质调查院, 2016 ^②
18	江西	海罗岭	Rb-Li-Zr	花岗岩型	大型	燕山期	云母	江西省地质局909大队, 1977 ^⑤
19	江西	414矿区	Li-Nb-Ta-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	锂(白)云母	江西冶金地勘公司7队, 1973 ^①
20	江西	上坪	W-Be-Rb-Cs	岩浆热液型	小型	燕山期	云母	江西省地质调查院, 2016 ^⑤
21	江西	黄沙坪	Li-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	白云母	江西省地质矿产勘查开发局物化探大队, 2014 ^④
22	内蒙古	乌拉山小东沟65号及42伟晶岩脉	白云母-Rb	花岗岩伟晶岩型	小型	吕梁期/ 古元古代	白云母	内蒙105地质队, 1972 ^⑦
23	内蒙古	七一山	W-Mo-Rb	花岗岩型	大型	海西期	云母	甘肃省地矿局第4地质队, 1983 ^③
24	内蒙古	加布斯	Ta-Nb-Li-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	云母	内蒙古元古资源开发科技服务有限公司, 2005 ^⑥
25	内蒙古	石灰窑	Ta-Nb-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	云母	Shi Hao, 2015; Sun Yan et al., 2015.
26	内蒙古	赵井沟	Ta-Nb-Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	锂云母	Chai Hua, et al., 2013; Gao Yun et al., 2017.
27	青海	大坂山	长石-Nb-Ta-Rb	花岗岩伟晶岩型	中型	加里东期	云母	青海省核工业地质局, 2004 ^② ; Xu Xinwen, 2009
28	青海	石乃亥	Nb-Ta-Rb	花岗岩伟晶岩型	大型	印支期	云母	青海省核工业地质局, 2003 ^② ; Xu Xinwen et al., 2009
29	四川	金川	Li-Be-Cs-Rb	花岗岩伟晶岩型	小型	燕山期	云母	四川省地质局阿坝地质队, 1961 ^②
30	四川	红杉林天河山	Rb	花岗岩伟晶岩型	大型	燕山期	云母	四川省地质局四〇二地质队 ^② ; Liu Yuhong et al., 2013
31	四川	六巴赫德	Li-Nb-Ta-Be-Rb	岩浆热液型	超大型	燕山期	云母	四川省2012年储量评审意见
32	四川	甲基卡矿区东矿段(No 134, 154, 151, 155)	Li-Be-Nb-Ta-Rb-Cs	花岗岩伟晶岩型	超大型	燕山期	云母	四川省地质局404队, 1973 ^④ ; Wang Denghong et al., 2005.

续表 1

序号	省份	矿床名称	矿种组合	矿床类型	规模	成矿时代	Rb 赋存矿物	资料来源
33	四川	长征穹隆亚中	Rb-Be	花岗伟晶岩型	大型	燕山期	云母	http://www.sohu.com/a/213152110_99958491
34	西藏	纳定	Rb-Be-海蓝宝	花岗伟晶岩型	超大型	喜马拉雅期	白云母	西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2009 ^② ; Li Guangming et al., 2017; Wang Rucheng et al., 2017
35	新疆	阿拉山-乌赛依	Be-Rb	花岗伟晶岩型	小型	海西期	云母	新疆地质局阿勒泰地质队, 1962 ^② ; Zhang Yongmei et al., 2011.
36	新疆	波孜果尔	Nb-Ta-Rb-Zr-U-Ree	花岗岩型	中型	海西期	云母	中国地质科学院矿产资源研究所, 2011 ^⑤
37	新疆	方正	Rb	花岗岩型	超大型	燕山期	云母、天河石	新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2015 ^⑤
38	云南	新歧	W-Sn-Nb-Ta-Li-Rb-Cs-Sc	花岗岩型	超大型	喜马拉雅期	云母、钾长石	Shen Ganfu, 2002
39	新疆	可可托海	Be-Li-Nb-Ta-Cs-Rb	花岗伟晶岩型	超大型	海西-燕山	云母	Zou Tianren et al., 2006
40	新疆	大红柳滩	Li-Rb-Be	花岗伟晶岩型	—	燕山期	云母	Zou Tianren et al., 2006
41	湖北	潜江凹陷油田卤水	K-Li-Rb-Cs-Br-I-B	地下卤水型	超大型	—	—	Wang Chunlian et al., 2018
42	青海	别勒滩	Rb	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
43	青海	察尔汗	Rb	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
44	青海	西台吉乃尔盐湖	Li-Rb-Cs	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
45	青海	东台吉乃尔盐湖	Li-Rb-Cs-Sr	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
46	青海	一里坪	Li-Rb-Cs-Sr	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
47	青海	昆特依盐湖	Li-Rb-Zr-Sr	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
48	青海	东达布逊湖	Li-Rb-Sr	盐湖型	超大型	第四纪	—	青海稀有稀散为主三稀资源综合研究与重点评价成果报告
49	四川	威远	Rb-Cs	地下卤水型	中型	震旦纪	—	李锡铭, 1989 ^①
50	重庆	邓井关	Rb-Cs	地下卤水型	中型	—	—	李锡铭, 1989 ^①
51	四川	平落坝	B-K-Na-Br-Rb-Li	地下卤水型	—	—	—	李锡铭, 1989 ^① ; Lu Zhi, 2011
52	西藏	扎布耶	Li-Rb-Cs	盐湖型	大型	第四纪	—	Lin Ye, 1996
53	西藏	多格错仁	Li-Rb-Cs-K	盐湖型	超大型	第四纪	—	郑绵平等, 2003 ^③
54	西藏	结则茶卡	Li-Rb-Cs-K	盐湖型	大型	第四纪	—	郑绵平等, 2003 ^③

注:表中 Rb 的查明资源量数据引自国家地质资料数据中心全国馆数字地质资料馆(<http://www.ngac.org.cn/>)、期刊文章和报纸摘要等;—表示未获得数据;铷矿床规模:小型<500 t;500 t≤中型<2000 t;大型≥2000 t。

渐降低。铷的分布和钾密切相关,钾含量增加,铷的含量也随之增加。铷置换黑云母中的钾比长石容易,因此黑云母常为花岗岩中铷的富集矿物(Rare Metal Group, Institute of geology and minerals, 1975;Liu Yingjun et al., 1984)。

我国富铷花岗伟晶岩分布广泛,构成许多大的伟晶岩区,如康滇及新疆阿尔泰地区。与成矿花岗岩有关的伟晶岩多见于花岗岩体的外接触带附近,多偏离背斜轴部中心而聚集在背斜的翼部或倾没部分。伟晶岩中交代作用与稀有金属成矿关系最为密切,交代作用愈发育,稀有金属矿化的可能性愈大。

从早到晚、从伟晶岩的边缘到内部表现为白云母化、钠长石化和锂云母化。锂云母化和钠长石化同时大量发育的伟晶岩,常伴随锂、铍、铌、钽、铷、铯的综合型稀有金属矿化。构造稳定条件下形成的伟晶岩岩脉,呈带性好,稀有元素比较集中,脉体中矿物个体较大。伟晶岩的产状对铷富集也有一定影响。直立产出的伟晶岩脉,铷等稀有元素常在脉的上部或顶部富集,缓倾斜脉体重,铷等稀有金属矿物多富集在脉体的上盘一边(Rare Metal Group, Institute of Geology and Minerals, 1975)。铷在伟晶岩中分散率较高,全部分散在含钾矿物中,如钾长石(含铷

0.01%~2.88%)、白云母(含铷 0.014%~1.6%)、锂云母(含铷 0.2%~4.5%)等,不同矿物中铷的含量经常由早期至晚期逐渐升高。铷在不同类型伟晶岩中的含量不同,一般由早期弱分异伟晶岩到晚期全分异伟晶岩,铷的含量不断升高,可达 0.1%~0.7%。但在晚期钠长石-锂辉石伟晶岩中,铷的含量会相对下降到 0.12%~0.1%,这是因为晚期伟晶岩中主要含 Na 和 Li, K 的含量相对下降,铷的类质同像能力受到影响(Liu Yingjun et al., 1984)。

在花岗岩体的前锋、顶部或沿岩体内断裂发育程度不同的云英岩化,在云英岩化过程中有铷、铯、钽的富集和锡石、黑钨矿等形成,从而形成云英岩型铷矿。矿体分布与云英岩体一致,形态呈似层状、厚板状、不规则筒状产出,矿体厚度大。该类型矿床是湘南及广东地区铷矿的重要类型。铷广泛参与岩浆期后气成-热液作用,花岗岩经气成-热液交代作用,特别是经受云英岩化作用后,铷产生转移或重新分配及富集,含量大大增加。对云英岩化作用来说,在酸性淋滤阶段白云母化或石英云英岩化花岗岩中,铷含量下降,淋滤阶段带出的铷在云英岩化后期的沉淀阶段富集于云母云英岩中,致使铷含量明显提高。云英岩中铷主要集中在铁锂云母和锂云母等矿物中。

岩浆热液型铷矿是来自深部的岩浆热液在一定物理化学条件下,在有利的构造和岩石中充填、交代及沉积形成的矿床。矿体常产生于岩体内外接触带或与超浅成侵入岩或次火山有关。由于成矿时温度较高,矿液中富含挥发分,因而在近矿围岩和岩体内都发生强烈的蚀变,最重要的蚀变种类是云英岩化、钠长石化、钾长石化、电气石化、黄玉化等,半碱性系列花岗岩被交代而成的钠长岩容易形成 Li、Rb、Ta、Nb 矿产。该类型典型矿床为湖北的尖峰岭稀有金属矿及四川的六巴赫德矿床。温度较低的典型热液作用对铷地球化学无特殊意义,因为铷不表现亲硫性,因此在热液有关的金属硫化物矿床中铷的含量低或缺失(Liu Yingjun et al., 1984)。

盐湖型铷矿床主要分布在青海和西藏,具体可分为碳酸盐型、硫酸盐型和卤化物型 3 种。盐湖卤水中铷储量大,但含量低(平均含量 10.8mg/L),且卤水中存在的铷、铯常与钾、钠、锂、钙、镁等元素共生,这些元素物理、化学性质与铷、铯十分接近,给分离提取带来很大困难,合理利用盐湖中的铷资源成为目前我国盐湖界的研究热点(Yan Ming et al., 2006)。我国柴达木盆地盐湖卤水中铷的含量达

0.57~30mg/L,在卤水中主要呈离子状态存在,在沉积物中多呈氯化物存在于其他盐类沉积物中。

本文讨论的地下卤水型铷矿是指赋存于地下深部、与油、气、岩盐矿床产出有关的铷高矿化度地下水。形成深层卤水首先需要足够的储存空间和有利的生产环境。我国四川盆地、江汉盆地、赣州盆地等几个大型构造盆地均为深层卤水主要储集区和埋藏地,盆地中的广厚的沉积层及良好的封闭性为深层卤水的形成创造了良好的条件。海源、陆源和深源是目前公认的三种盐类物质来源(Li Cijun et al., 1992)。铷在卤水中主要呈离子状态存在。

表 2 我国主要铷矿成因类型

Table 2 Main genetic types of rubidium ore in China

矿床类型		矿床实例
类型	具体类型	
花岗岩型	花岗岩型	江西宜春 414、内蒙石灰窑
	花岗伟晶岩型	新疆可可托海、四川甲基卡
	云英岩型	湖南道县正冲、广东龙川天堂山
岩浆热液型	石英脉型	江西于都上坪钨矿床
	接触交代型	四川康定县六巴赫德矿床
盐湖型	碳酸盐型	西藏扎布耶盐湖
	硫酸盐型	东台吉乃尔湖、西台吉乃尔湖、一里坪
	氯化物型	青海察尔汗盐湖
地下卤水型		湖北潜江凹陷油田卤水、四川威远、重庆邓井关

3 中国铷矿时空分布规律

3.1 中国铷矿的主要成矿时代

我国硬岩型铷矿成矿作用发生的时间跨度大,从古元古代到新生代均有发育(图 5),但以中生代为主,燕山期最为发育,73%的矿床形成于燕山期。80%的超大型、大型矿床与燕山期岩浆构造活动有关。其次是海西期和喜马拉雅期。古元古代、加里东期和印支期各有一个铷矿。古元古代的铷矿为内蒙乌拉山小东沟伟晶岩型铷矿,矿床规模为小型。加里东期矿床为青海大坂山伟晶岩型钽铌铷矿床,矿床规模为中型。甘肃国宝山大型铷矿、内蒙古七一山大型铷矿、新疆阿拉山-乌塞伊铍中型铷矿、河南卢氏 202(蔡)矿区中型铷矿和新疆波孜果尔铌钽铷中型铷矿属海西期成矿。

华南地区花岗岩中,铷在加里东期以前的老时代花岗岩中分布比较均匀,在加里东晚期以后趋向增加,随花岗岩时代变新,铷含量趋向增高,在燕山早期达到高峰(Liu Yingjun et al., 1984)。我国著名的超大型铷矿,如湖南道县湘源、江西 414、川西甲基卡、内蒙石灰窑、广东龙川天堂山等铷矿均形成

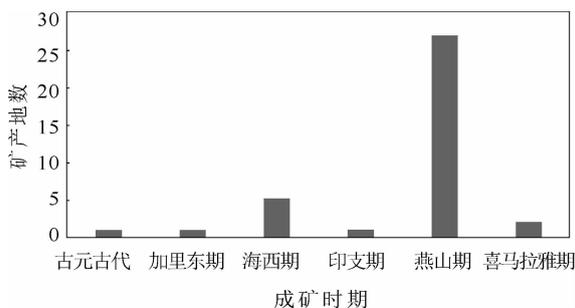


图5 中国主要硬岩型铷矿成矿时期分布直方图
(数据据表1)

Fig. 5 Histogram of rock rubidium mineralization age in China (data from table 1)

于燕山期。也有矿床结晶始于海西期,但由于结晶时间较长,在封闭环境中经过缓慢结晶,一直延续到燕山期的可可托海花岗伟晶岩矿床(Zou Tianren et al., 2006)。云南新歧钨锡铋钽铷多金属矿床和西藏纳定铷钹海蓝宝矿床均为喜马拉雅期形成的超大型铷矿。

分布于青藏高原的盐湖型铷资源分布时代多为第四纪。深层卤水由老到新主要分布于震旦纪(四川威远)、寒武纪(四川泸州、湖北竹溪)、奥陶纪(四川彭水)、石炭纪(四川邻水)、二叠纪(四川自贡、开县)、三叠纪(四川、湖北、黔北、新疆)、侏罗纪(四川、湖北、云南、甘肃、青海、西藏)、白垩纪(四川眉山、湖北、河南、云南)和第三纪(新疆、云南、山东、湖北、西藏),其中三叠纪是我国最主要的深层卤水分布时期。不同时代干燥炎热的气候为深层卤水的生成创造了条件(Li Cijun et al., 1992)。

3.2 中国铷矿的空间分布规律

我国铷资源具有分布范围广,但相对集中的特征(图6)。硬岩型铷矿资源几乎涵盖了我国主要的褶皱造山系,包括阿尔泰造山带、天山造山带、昆仑山造山带、松潘-甘孜造山带、秦岭造山带、华北北缘褶皱系、华南褶皱造山系等地区。根据中国铷矿的分布特征,本文在全国Ⅲ级成矿带(Xu Zhigang, et al., 2008)的基础上,将铷聚集程度比较高、又具有特定成矿背景的区域划分为15个铷成矿带(表3、图6)。

华南褶皱系岩浆活动频繁,特别是燕山期岩浆活动和稀有金属成矿关系极为密切,是我国最重要的稀有金属基地之一。该区包含了江南隆起东段(Ⅲ-1)、武功山-北武夷山(Ⅲ-2)、南岭中段(Ⅲ-3)及浙中-武夷山(Ⅲ-4)4个Ⅲ级铷成矿带,涵盖了江西宜春414、湖南尖峰岭、正冲、香花岭、广东龙川天堂

山等铷多金属矿床。大多数富铷矿床,特别是大型矿床,与岩浆活动中晚期热液蚀变体或伟晶岩脉关系密切,形成岩体型花岗岩型铷矿或脉状花岗伟晶岩型铷矿。

康滇Ⅲ级铷成矿带位于松潘-甘孜褶皱系和三江褶皱系,以印支、燕山期岩浆活动为主,是我国著名的锂铍铷成矿带。存在两类铷矿,其一是伟晶岩型,产有甲基卡、李家沟、可尔因和金川等多个富铷的超大型锂多金属矿,川西伟晶岩带中多个矿床均富含铷(Li Jiankang et al., 2007);其二是四川盆地内富含铷的地下卤水。四川盆地深层卤水往往发现于石油天然气勘探开发之中,常与油气共存于同一地质体内,形成气水同产现象。盆地气田水除NaCl浓度较高外,普遍不同程度富含Br、I、K、B、Li、Rb、Cs等多种元素,含量均能达到或超过开采利用品位,构成优质液态矿产资源。川西北气田卤水中Rb⁺平均含量为37.5 mg/L,川东北气田卤水中Rb⁺含量为32.2 mg/L,均高出综合利用工业品位(10 mg/L)3倍(Lin Yaoting et al., 1999)。目前卤水中以提取K、Br等资源为主, Li、Rb等提取因为分离难度大,基本处在在实验阶段。以平落坝构造为例,卤水中铷的浓度为32.55 mg/L,卢智等通过开展一系列Rb提取实验,在安全和环境友好的前提下,萃取法可提取RbCl纯度为99.2%的富集液, Rb的萃取率达94%,该实验成果对高钾卤水中铷提取技术的工艺放大和工业生产起到了重要的参考指导作用(Lu Zhi, 2011)。

新疆阿尔泰铷成矿区位于阿尔泰陆缘活动带,成矿类型以花岗伟晶岩型为主,10余万条伟晶岩脉成群、成带绵延400多千米,构成举世闻名的阿尔泰稀有金属成矿带。可可托海矿床Rb₂O储量达12642.1 t,属于超大型铷矿床。3号脉中白云母平均含Rb₂O 0.4953%,包含了全脉铷总量的22.83%,是主要工业矿物(Zou Tianren et al., 2006)。

在华北陆块北缘铷成矿带,近年来在内蒙中部赵井沟铷矿、石灰窑铷矿以及加布斯、乌拉山矿床等地投入了不少的勘查工作量,取得了显著的新进展。该区已知铷多金属矿均为花岗岩型矿床,同时伴有一定规模的花岗伟晶岩型铷矿,具有较大的找矿和开发利用前景。

塔里木板块北缘铷成矿带位于塔里木北缘陆缘活动带内的哈尔克早古生代沟弧带中,主要控矿构造为活动陆缘深断裂带(Zou Tianren et al., 2006)。波孜果尔碱性花岗岩型稀土-铋-钽-锆-铷矿床呈

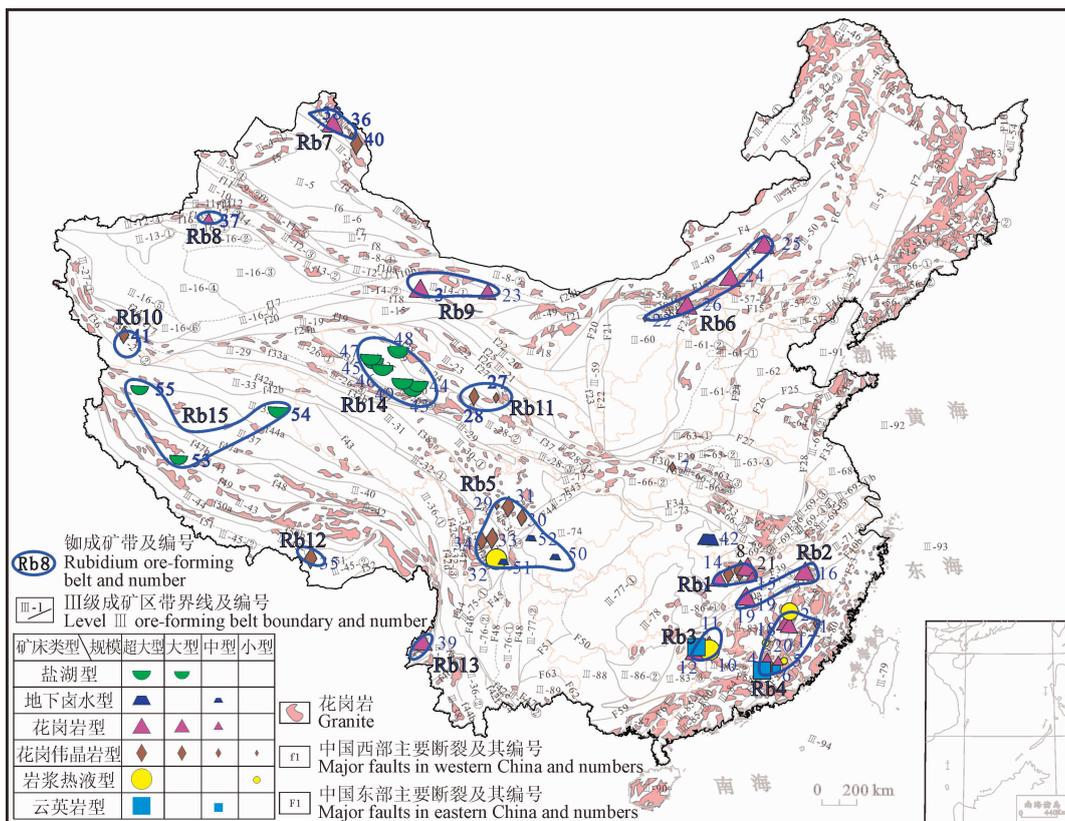


图6 我国主要铷矿分布及铷成矿带划分图(图中矿床编号同表1)

Fig. 6 Distribution of rubidium ore and division of rubidium-forming belts in China (the number of the deposit in the figure same as in table 1)

1km² 圆形小岩株出露, REE-Nb-Ta-Zr-Rb 在岩株出露各部位均一矿化, 在霓石花岗岩顶部内接触带的霓石似伟晶岩和霓石钠长花岗岩及外接触带(大理岩)内的霓石钠长花岗岩脉中, REE、Nb、Ta、Zr 形成特富矿体, 显示矿化富集与富含 F 和 Na 的碱性岩浆分异作用紧密联系。Nb、Ta、Zr 资源量均达到大型规模, REE 达中型规模且主要为重稀土, Rb 达超大型规模 (Zou Tianren et al., 2006; Xu Haiming et al., 2010)。

甘蒙北山南部铷成矿带位于哈萨克斯坦-准噶尔板块和塔里木板块的板块缝合线上, 断裂构造极为发育, 区域上岩浆岩活动强烈, 岩石类型齐全, 其中以中酸性侵入体为主。花岗岩类的形成时代总体可分为前寒武纪、加里东期、海西期、印支期和燕山期, 其中海西期花岗岩分布面积在 70% 以上, 区内东七一山和国宝山均为海西期花岗岩型铷矿 (Yang Yueqing et al., 2013; Zhou Huiwu et al., 2015)。东七一山岩体中铷、锂、铌、钽共同富集成工业矿体, 铷矿化均匀, Rb₂O 平均含量为 0.1% ~ 0.13%, Li₂O 平均含量为 0.095 ~ 0.14%, Nb₂O₅ + Ta₂O₅

平均含量为 0.0128% ~ 0.0165%, 可综合回收利用 (Zhou Moqing et al., 1981)。国宝山铷矿 Rb₂O 含量 0.1007 ~ 0.2028%, 平均为 0.1338%, 铷品位仅仅达到了最低工业品位 (Sun Yan, 2013)。但 71.13% 的铷以类质同象方式赋存于微斜长石中 (Lai Yang et al., 2016), 且未发现达到工业品位的 Nb、Ta、Li 矿化, 开发利用难度大。

西昆仑-喀喇昆仑铷成矿带介于塔里木板块与羌塘板块两大板块之间 (Jiang Chunfa et al., 1992)。区内已知矿床类型, 多属稀有金属伟晶岩型。如中国地质调查局网站 2018 年报道的大红柳滩大型伟晶岩型锂矿。该区工作程度相对较低, 如加强工作, 将有望成为新的重要的锂铷等稀有金属资源基地。

南祁连-柴达木北缘铷成矿带的代表性矿床是大坂山长石-铷多金属矿和石乃亥铌钽铷稀有金属矿床。大坂山矿床处于南祁连南部弧后前陆盆地, 断裂构造发育, 为加里东期大型花岗伟晶岩型矿床。石乃亥中型花岗伟晶岩型铷矿床地处青海南山晚古生代一早中生代裂隙槽内, 区内构造发育, 印支期岩

浆活动强烈,且与矿化密切相关(Xu Xinwen et al., 2009)。

北喜马拉雅铷成矿区是近年热门的成矿区,区内错那洞超大型铍锡钨多金属矿床以 Be 为主,共生 Sn、W,伴生 Li、Rb 等有益组分。2009 年西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队提交的纳定超大型花岗伟晶岩 Rb-Be-海蓝宝矿床,根据坐标位置,判断纳定铷矿位于错那洞穹隆南部的藏南喜马拉雅淡色花岗岩内(Li Guangming et al., 2017)^②。Wang Rucheng et al. (2017)在喜马拉雅淡色花岗岩区调查了 15 个淡色花岗岩体,12 个岩体中发现

了稀有金属矿物,加之近年的找矿突破,显示该铷成矿带具有良好的稀有金属成矿潜力。

新生代形成的百花脑碱长花岗岩含 Sn、W 等有色金属,但也是潜在的超大型 Rb、Cs、Y、Sc 和石英、钠长石矿床(Shen Ganfu et al., 2002)。伴随着 2017 年对小龙河锡稀土多金属矿田新认知(Li Jianzhong et al., 2017)和 2018 年大松坡地区铌钽矿的发现,腾冲-梁河铷成矿带也逐渐被人们所认知。在我国南方,稀有金属花岗岩风化壳异常发育,经过风化后,质地疏松,利于采选,潜在经济价值巨大。

表 3 中国成铷带划分表

Table 3 Rubidium-forming belts in China

成铷带(Ⅲ级)		典型矿产地	对应全国Ⅲ级区带
编号	名称		
Rb1	江南隆起东段	湖南上石、湖南传梓源、江西黄陂洞	Ⅲ-70
Rb2	武功山-北武夷山	江西 414、广东八面山-白岌下钽铷矿	Ⅲ-71
Rb3	南岭中段	湖南香花岭、湖南道县正冲、湖南尖峰岭	Ⅲ-83
Rb4	浙中-武夷山	广东龙川、江西姜坑里、江西上坪	Ⅲ-81、Ⅲ-82
Rb5	康滇	四川金川、四川李家沟、四川甲基卡	Ⅲ-30、Ⅲ-31
Rb6	华北陆块北缘	内蒙古石灰窑、内蒙古赵井沟、内蒙古加布斯、内蒙古乌拉山	Ⅲ-49、Ⅲ-50、Ⅲ-58
Rb7	阿尔泰	新疆阿拉山-乌赛依、新疆方正	Ⅲ-1、Ⅲ-2
Rb8	塔里木板块北缘(哈尔克山)	新疆波孜果尔	Ⅲ-12
Rb9	甘蒙北山南部	内蒙七一山、甘肃国宝山	Ⅲ-14
Rb10	西昆仑-喀喇昆仑	新疆大红柳滩、新疆白龙山	Ⅲ-27
Rb11	南祁连-柴达木北缘	青海大坂山、青海石乃亥	Ⅲ-23、Ⅲ-24
Rb12	北喜马拉雅	西藏纳定	Ⅲ-45
Rb13	腾冲-梁河	云南百花脑	Ⅲ-25
Rb 14	柴达木盆地	青海察尔汗、青海别勒滩	Ⅲ-25
Rb15	羌塘-狮泉河-申扎	西藏扎布耶	Ⅲ-35、Ⅲ-37、Ⅲ-41

青藏高原新生代构造盆地中分布了富铷的第四纪盐湖。碳酸盐型盐湖以西藏扎布耶盐湖为代表,硫酸盐盐湖以西台吉尔湖、东台吉尔湖和一里坪等为代表,氯化物型盐湖以察尔汗盐湖为代表;地下卤水主要分布在四川盆地三叠系、柴达木盆地新生代地层和潜江拗陷第三系。

4 找矿新发现及今后找矿方向

4.1 找矿新发现

自 2010 年《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》发布以来,稀有稀土稀散矿产及其开发利用受到广泛重视。铷作为重要的稀有金属之一,近年来在找矿和应用方面更是有不少的新发现和突破,其中找矿影响力较大的有内蒙古石灰窑、内蒙古赵井沟、甘肃国宝山、广东龙川等矿床,开发利用方面影响较大的是广州设立“铷谷”。

赵井沟矿区矿化岩体的蚀变作用十分发育,主

要有钠长石化、天河石化和云英岩化。钠长石化和天河石化促使 Rb 置换 K,而云英岩化对云母中铷的富集起到了决定性作用。矿区 Rb_2O 含量变化于 0.13%~0.53%,平均值为 0.21%,超过含锂云母的碱性长石花岗岩类与花岗伟晶岩类矿床中铷的最低工业品位。同时该矿区强烈的钠长石化作用使 Nb、Ta 以富集,形成了铌铁(锰)矿-钽铁(锰)系列矿物,具有较大的综合利用价值。

石灰窑矿区富含铷的岩体具有强烈的钠长石化和云英岩化蚀变,且蚀变越强烈,铷含量越高, Rb_2O 含量变化于 0.17%~0.93%,平均 0.55%,远高于 Rb_2O 的最低工业品位(0.1%~0.2%),部分地段白云母中铷的含量也达到工业开采的要求,具有较高的利用价值,可单独圈出矿体。

甘肃国宝山铷矿具有较强的天河石化和钠长石化蚀变,绿鳞云母中铷的含量虽较高,但该区铷主要赋存在微斜长石中,难以提取,其工业价值有待进一

步确定。笔者曾采集了最近媒体广泛报道的独立铷矿——广东省河源市天堂山铷矿的英安质晶屑岩屑凝灰岩、云英岩(黑鳞云母)、云英岩、云英化花岗岩、高硅钠长石花岗岩及中粒黑云母花岗岩样品,化学分析结果显示 Rb_2O 的含量分别为 0.04%、0.1%、0.08%、0.11%、0.04% 及 0.15%, 以中粒黑云母花岗岩铷含量最高。

4.2 今后找矿方向

我国铷资源多与锂铍铌钽等其他稀有金属共伴生,因此,铷的找矿方向与锂铍钽等找矿方向基本一致。今后铷的找矿方向应集中在华南、新疆阿尔泰山-天山-昆仑山、川西-松潘造山带等重点区域。华南地区以江西宜春 414、湖南道县正冲的岩体型铷矿,上石、传梓源的花岗伟晶岩型铷矿为代表,在找矿中不仅要重视上述两种类型铷矿,还要重视风化壳中铷资源的综合评价。赣南 700 多件风化壳型稀土矿样品的化学分析测试结果显示,不少矿区样品的铷含量已达到边界品位,除龙南县足洞重稀土矿区铷含量普遍较高外,在大田尾砂中有 2 个样品的含量超过 0.1%,已达到工业品位的下限。风化壳型铷资源易采、品位高,不可小觑。

阿尔泰山-天山-昆仑山地区则应该加强对伟晶岩脉的排查摸底工作,寻找类似于可可托海、波孜果尔等富铷的花岗伟晶岩型的锂矿。川西-松潘地区的花岗伟晶岩型矿床的找矿工作近年来取得较大进展。在甲基卡矿区外围、石渠县扎乌龙地区、九龙岩体外围的稀有金属找矿工作中都有新的突破,尤其锂的储量得到较大增长。而这些伟晶岩锂矿床中极易伴生铷资源,应注意综合调查评价。

另外,应加强尾矿中铷资源的回收利用,并适当保护细晶岩等暂时不能被开发的资源。宜春钽铌矿是特大型的钽铌锂铷矿资源产地,该矿山建有两个尾矿库,至 2009 年两尾矿库尾矿总量 694 万 t,平均品位按 Li_2O 0.98%、 Rb_2O 0.4058%、 Cs_2O 0.0716% 估算,尾矿库中蕴藏着 Li_2O 6.8 万 t、 Rb_2O 2.82 万 t、 Cs_2O 0.497 万 t 的资源储量,相当于 1 个中型锂矿、1 个超大型铷矿和 1 个大型铯矿的复合稀有多金属矿床(徐平等,2018),在回收利用锂的同时,也应加强铷、铯资源的回收利用。广西栗木矿山的尾砂中铷含量可高达 0.37%,云母为矿石中铷的富集矿物,是铷回收的目标矿物,且能很好的富集回收(Shan Zhiqiang,2013)。我国一些早期发现的铷矿资源能置于闲置或作为陶瓷原料被开发的状态。江西宜丰同安稀有金属矿床是江西特有的细

晶岩型稀有金属矿床新类型,规模特大中,锂、铯、铷、铍、钽、铌的含量均达到工业品位要求,自 70 年代起被发现后,一直没有被开发利用。这是因为锂、铷等提取成本高,作为陶瓷原料出口对当地企业而言具有更高的经济价值。

5 结论

(1)相对于目前铷的用量和工业指标而言,我国铷资源相对丰富,以硬岩型铷资源为主,占全国铷资源储量的 97%。铷资源较丰富的省份有江西、新疆和广东,分别占全国铷资源储量的 34%、33% 和 15%。与国外资源相比,我国铷资源品位低、开发利用难度大。我国制定的铷矿工业指标中,硬岩型铷资源的最低工业品位为 0.1%,但该指标主要针对云母型铷矿资源。目前我国有些勘查工作采用 0.1% 的工业品位圈定铷资源的规模和储量,报道了大量数字惊人但事实上难以被开发利用的铷矿资源。

(2)本文根据成因,将铷矿分为花岗岩型、花岗伟晶岩型、云英岩型、岩浆热液型、盐湖型、地下卤水型等六类。铷资源主要集中于花岗岩型、花岗伟晶岩型及盐湖型中,岩浆热液型、地下卤水型和云英岩型各有少量分布。盐湖和地下卤水中铷提取技术的产业化一直是制约其资源开发利用的主要瓶颈。

(3)铷成矿作用发生的时间跨度大,从古元古代到新生代均有发育。总体上铷成矿作用以中生代,特别是燕山期最为发育,73% 的矿床形成于燕山期。80% 的超大型、大型矿床与燕山期岩浆构造活动有关,属燕山期成矿。其次是海西期和喜马拉雅期。

(4)我国铷资源具有分布范围广,但相对集中的特征。硬岩型铷矿资源几乎分布在我国各主要的褶皱造山系,包括阿尔泰山造山带、天山造山带、昆仑山造山带、松潘-甘孜造山带、秦岭造山带、华北北缘褶皱系、华南褶皱造山系等地区。根据中国铷矿的分布特征和构造背景,划分了 15 个铷成矿带。我国今后铷的找矿方向应集中在华南、新疆阿尔泰山-天山-昆仑山、川西-松潘造山带等主要区域。

(5)建议我国矿政部门及时摸清现有铷矿资源家底、从新兴产业需求侧的角度来分析哪些类型的铷矿有可能得到现实的开发利用,有针对性地总结找矿标志、圈定找矿靶区、适度开展钻探验证,并部署相关的高端利用、综合回收方面的研究工作,适当保护细晶岩型铷矿等暂时不能被开发的资源。

注 释

- ① 李锡铭. 1989. 矿产资源战略分析—铷、铯. 地质矿产部全国地质资料局.
- ② 福建省地质 2 团 7 中队. 1971. 柳源铌钽矿点初查报告. 全国地质资料馆.
- ③ 广东省地质局七二三地质队四分队. 1974. 广东省平远县东石八面山-白垩下铌钽矿区普查评价报告. 全国地质资料馆.
- ④ 陕西省地质局第 3 地质队. 1970. 河南省卢氏县 202(蔡)矿区花岗伟晶岩型稀有金属矿床工业报告. 全国地质资料馆.
- ⑤ 湖南省地质局 402 队. 1972. 湖南省长沙县影珠山多种稀有金属矿初步普查报告. 全国地质资料馆.
- ⑥ 湖南冶金 238 勘探队. 1976. 湖南临武香花岭矿区细晶岩型铌钽矿脉地质评价报告书. 全国地质资料馆.
- ⑦ 湖南省地质局 408 队. 1970. 湖南耒阳县上堡含铌钽花岗岩矿区小头冲矿段详细评价报告及全矿区 1971 年地质设计. 全国地质资料馆.
- ⑧ 湖南地矿局湘南地质队. 1984. 湖南省道县湘源矿区正冲矿段钨多金属矿详细普查地质报告.
- ⑨ 湖北省第五地质队. 1973. 湖南平江梓源铌钽矿区初勘报告. 全国地质资料馆.
- ⑩ 江西省地质调查院. 2016. 江西三稀资源综合研究与重点评价成果报告.
- ⑪ 江西省地质局 909 大队. 1977. 江西省石城县海罗岭铌钽矿区地质勘探报告. 全国地质资料馆.
- ⑫ 江西冶金地勘公司 7 队. 1973. 江西【宜春】四一四矿区地质勘探总结报告. 全国地质资料馆.
- ⑬ 江西省地质矿产勘查开发局物化探大队. 2014. 江西省奉新县黄沙坪铌钽矿调查评价成果报告. 全国地质资料馆.
- ⑭ 内蒙 105 地质队. 1972. 内蒙古【乌拉特前旗】乌拉山小东沟白云母矿 65 号伟晶岩脉期探报告及 42 号伟晶岩脉评价报告. 全国地质资料馆.
- ⑮ 甘肃省地矿局第 4 地质队. 1983. 古自治区额济纳旗七一山钨钼矿区普查评价地质报告. 全国地质资料馆.
- ⑯ 内蒙古元古资源开发科技服务有限责任公司. 2005. 内蒙古自治区镶黄旗加不斯矿区钼钽矿普查总结报告. 全国地质资料馆.
- ⑰ 青海省核工业地质局. 2004. 青海省海晏县大坂山地区长石及铌钽钷等稀有金属矿普查. 全国地质资料馆.
- ⑱ 青海省核工业地质局. 2003. 青海省共和县石乃亥地区铌钽钷稀有金属矿普查报告. 全国地质资料馆.
- ⑲ 四川省地质局阿坝地质队. 1961. 四川金川地区地质普查报告. 全国地质资料馆.
- ⑳ 四川省地质局四〇二地质队. 四川小金红杉林天河山含钪花岗伟晶岩矿点检查报告. 四川省国土资源资料馆.
- ㉑ 四川省地质局 404 队. 1973. 四川省康定甲基卡矿区东矿段锂辉石伟晶岩矿床初步勘探报告. 四川省国土资源资料馆.
- ㉒ 四川道孚县亚中地区发现具有大型规模潜力铷钷矿. http://www.sohu.com/a/213152110_99958491.
- ㉓ 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2009. 西藏自治区错那县纳定矿区稀有金属矿普查(阶段性)报告. 全国地质资料馆.
- ㉔ 新疆地质局阿勒泰地质队. 1962. 富蕴县阿拉山-乌赛依伟晶岩区含细粒绿柱石伟晶岩脉地表勘探(中间)报告. 全国地质资料馆.
- ㉕ 中国地质科学院矿产资源研究所. 2011. 新疆维吾尔自治区拜城县波孜果尔铌、钽矿勘探报告. 全国地质资料馆.
- ㉖ 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2015. 新疆阿勒泰市方正铷矿预查报告.
- ㉗ 郑绵平, 刘喜方, 刘俊英, 魏乐军. 2003. 西藏羌塘盐湖资源调查评价研究报告.

References

Chai Hua, Wu Jinglong. 2013. Na-feldspar granite and its mineralization in Zhaojinggou niobium-tantalum mining area, Wuchuan County, Inner Mongolia. Inner Mongolia Science

- Technology & Economy, (15): 69~71 (in Chinese with English abstract).
- Du Fangquan, Wang Fuquan, Wang Kaiyi, Wu Qianhong. 1991. Tectonic Mineralization and Prospecting-A Case Study of the Area from Xianghuangling to Qianlishan and Its Adjacent Areas. Beijing: Geological Publishing House, 1~156 (in Chinese).
- Gao Yun, Sun Yan, Zhao Zhi, Li Jiankang, He Hanhan, Yang Yueqing. 2017. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of muscovite from the Zhaojinggou Nb-Ta polymetallic deposit in Wuchuan County of Inner Mongolia and its geological implications. Rock and Mineral Analysis, 36(5): 551~558 (in Chinese with English abstract).
- Jia Hongxiang, Pang Zhenshan, Geng Linsun, Zhang Zhihui, Jia Ruya. 2016. The diagenetic and metallogenic age and its geological significance of the Tiantianshan tin polymetallic deposit in Longchuan County, Guangdong Province. Geological Review, 62(supp): 107~108 (in Chinese).
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, Zhu Zhizhi, Zhao Min, Chai Yaochu, Shi Xide, Wang Huaida, Hu Jinqing. 1992. Opening-Closing Tectonics of Kunlun Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1~225 (in Chinese with English abstract).
- Lai Yang, Yang Lei, Li Danfeng, Zhang Wei. 2016. Study on ore characteristics in the Guobanshan Rb deposit, Gansu Province, China. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (3)71~75 (in Chinese with English abstract).
- Li Cijun, Yang Lizhong, Zhou Xun, Chen Ming. 1992. Brine Resources in Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1~113 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, Xia Xiangbiao, Dong Suiliang, Fu Jianguang, Liang Wei, Zhang Zhi, Wu Jianyang, Dong Lei, Huang Yong. 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet. Mineral Deposits, 36(4): 1003~1008 (in Chinese with English abstract).
- Li Haimin, Cheng Huaide, Zhang Quanyou. 2003. Evaluation of the technologies of comprehensive utilization and exploitation of salt resource. Journal of Salt Lake Research, 11(3): 51~64 (Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, Fu Xiaofang. 2007. Mineralization Mechanism and Continental Geodynamics of Pegmatite Types Deposits in Western Sichuan, China. Beijing: Atomic Energy Press, 1~187 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianzhong, Lu Shenglin, Wu Wenxian, Ding Jun, Wang Baodi, Zhao Zuoxin, Cui Ziliang. 2017. New cognition and discovery of rare earth deposits in the Xiaolonghe tin-REE polymetallic orefield of Tengchong in Yunnan Province. Geological Survey of China, 4(2): 9~21 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingping, Xu Sihong. 2005. The metals with eyes-rubidium and cesium. Chemical world, 2: 108~117 (in Chinese).
- Lin Yaoting, Cao Shanxing. 1999. Gas water of Sichuan basin and the project of its exploration. Journal of Salt Lake Research, 7(4): 31~38~8.
- Lin Ye. 1996. A brief discussion on the development and utilization of lithium rubidium and cesium in Tibetan salt lake and other resources. Xinjiang Nonferrous Metal, (1): 68~72 (in Chinese).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingrong. 1984. Geochemistry of Element. Beijing: Science Press, 154~169 (in Chinese).
- Liu Yuhong, Zhou Yong, Huang Hui. 2013. Geological characteristics and prospecting prospect of pegmatite-type Li-Nb-Ta polymetallic deposit in Xiaojin County, Sichuan Province. Earth, (7): 72~73 (in Chinese).
- Lu Zhi. 2011. Separation and Extraction of rubidium from deep brine of structure marine of Pingluoba. Master's thesis of

- Chengdu University of Technology, 1~44 (in Chinese with English abstract).
- Norton J J. 1973. Lithium, cesium and rubidium—the rare alkali metals. In: Brobst D A, Prah W P, eds. United States Mineral Resources. U. S. Geological Survey Professional, 820: 365~378.
- Rare Metal Group, Institute of Geology and Minerals. 1975. Types of Rare Metal Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~126 (in Chinese).
- Shao Juonian, Tao Weiping. 2010. Mineral Resources Industry Requirements Manual. Beijing: Geological Publishing House, 249~250 (in Chinese).
- Shen Ganfu. 2002. Weathering crust of Baihuanao granite: a potential superlarge-scale Rb, Cs, Y, Sc, quartz and albite ore deposit. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 21(3): 182~184 (in Chinese with English abstract).
- Shi Hao. 2015. The geological characteristics and mineralization mechanism of Shihuiyao Nb-Ta deposit in Inner Mongolia, China. Master's thesis of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan. 2013. Research on typical rubidium deposits and metallogenic regularity in China. PhD thesis of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Wang Ruijiang, Qi Feng, Li Jiankang, Mei Yanxiang. 2013. The global Status of rubidium resource of the world and suggestions on its development and utilization in China. China Mining Magazine, 22(9): 11~13+57 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi. 2015. ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar dating of the muscovite and regional exploration prospect of Shihuiyao rubidium-multi-metal deposit, Selehot, Inner Mongolia. Geological Review, 61(2): 463~468 (in Chinese with English abstract).
- U. S. Geological Survey. 2019. Mineral Commodity Summaries, mcs-2019-rubidium. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- Wang Chunlian, Huang Hua, Wang Jiuyi, Xu Haiming, Yu Xiaocan, Gao Chao, Meng Lingyang, Cai Pengrui, Yan Kai, Fang Jingling. 2018. Geological features and metallogenic model of K and Li-rich brine ore field in the Jiangling depression. Acta Geologica Sinica, 92(8): 1630~1646 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Jiankang, Fu Xiaofang. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance. Geochimica, 34(6): 541~547 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zheng Manping, Wang Chenghui, Gao Shuxue, Shang Pengqiang, Yang Xianzhong, Fan Xingtao, Sun Yan. 2019. Progress and main achievements on large and short minerals and strategic emerging industries mineral investigation project. Geological Survey of China, for publication (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin. 1990. The characteristics and genesis of the Zhengchogn rare-metal greisen porphyry. Geological Review, 36(6): 534~540 (Chinese with English abstract).
- Wang Rucheng, Wu Fuyuan, Xie Lei, Liu Xiaochi, Wang Jiamin, Yang Lei, Lai Wen, Liu Chen. 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. Science China Earth Sciences, 47(8): 871~880 (in Chinese with English abstract).
- Wen Chunhua, Shao Yongjun, Huang Gefei, Luo Xiaoya, Li Shengmiao. 2017. Geochemical features and mineralization of Jianfengling rare metal granite in Hunan Province. Mineral Deposits, 36(4): 879~892 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Chaoyang, Liu Jieqing. 2003. Geologic Traits of Li-Be-Ta-Nb-bearing deposits in Shangshi, Liyun Mountain and its prospecting foreground. Hunan Geology, 22(1): 34~37 (in Chinese with English abstract).
- Xie Wenan, Shen Zhijun, Xie Linglin. 1996. Characteristics and metallogenic pattern of rare metal, rare-earth metal and precious metal deposit. Geology and Exploration, 32(4): 19~25 (Chinese with English abstract).
- Xu Haiming, Fang Jingling, Wang Jun, Fan Li. 2010. Geological characteristics of niobium-tantalum ore deposit in Boziguo, Xinjiang. Mineral Deposits, 29(sup): 309~310 (in Chinese).
- Xu Xinwen. 2009. Type, characteristics and prospecting direction of niobium-tantalum deposit in Qinghai Province. West-China Exploration Engineering, 21(3): 144~147 (in Chinese).
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Li Houmin. 2008. The Scheme of the Mine to Genetic Classification of the Units in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~138 (in Chinese with English abstract).
- Yan Ming, Zhong Hui, Zhang Yan. 2006. Progress of separation of Rb and Cs from brine. Journal of Salt Lake Research, 14(3): 67~72 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fen. 2017. Geological characteristics and genesis of the Dongkeng rubidium deposit in Jianning, Fujian Province. Geology of Fujian, 36(3): 220~229 (Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Lü Bo, Meng Guixiang, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Wang Shouguang, Jia Linglong, Han Jiangang. 2013. Geochemistry, SHRIMP zircon U-Pb dating and formation environment of Dongqiyishan granite, Inner Mongolia. Acta Geoscientia Sinica, 34(2): 163~175 (Chinese with English abstract).
- Zhang Min. 2016. Analysis of geological characteristics of elegant peak rubidium deposit in Jiaoling of Guangdong Province. World Nonferrous Metals, (1): 40~41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanghua. 1998. Discussion on broadening the application field of rubidium strontium in China. Xinjiang Nonferrous Metal, (2): 43~47 (in Chinese).
- Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, Huang Zhiquan, Li Fuliang, Yang Weilong, Yang Yang. 2011. Study on the chronology of the granite pegmatite dike in the Wulashan area of Inner Mongolia. Acta Mineralogica Sinica, 31(S1): 143~144 (in Chinese).
- Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Xu, Li Bingxiao. 2002. Salt Lake Chronicles of China. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhou Huiwu, Li Tongguo, Zhang Youkui, Zhu Wenge, Liu Yangxiang, Zhang Hongbin. 2015. Research on characteristics and metallogenic regularity of Rb ore in Gansu Province, 35(1): 73~78 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Moqing, Chang Shuchao. 1981. Geological characteristics of granite rubidium deposit in Dongqiyishan, Inner Mongolia. Northwestern Geology, 14(1):34~41 (in Chinese).
- Zou Tianren, Li Qingchang. 2006. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1~284 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 柴华,武景龙. 2013. 内蒙古武川县赵井沟钽铌矿区钠长花岗岩及其成矿作用. 内蒙古科技与经济, (15): 69~71.
- 地质科学研究所地质矿产所稀有组. 1975. 中国稀有金属矿床类型. 北京:地质出版社, 1~126.
- 杜方权,王伏泉,王开怡,吴玺红. 1991. 构造成矿与找矿——以香花岭至千里山一带及其邻侧地区为例. 北京:地质出版社, 1~156.
- 高允,孙艳,赵芝,李建康,何哈哈,杨岳清. 2017. 内蒙古武川县赵井沟钽铌多金属矿床白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及地质意义. 岩矿测试, 36(5): 551~558.
- 贾宏翔,庞振山,耿林孙,张志辉,贾儒雅. 2016. 广东省龙川县天堂山锡多金属矿床成岩成矿时代及其地质意义. 地质论评, 62(sup): 107~108.

- 姜春发,杨经绥,冯秉贵,朱志直,赵民,柴耀楚,施希德,王怀达,胡金庆. 1992. 昆仑开合构造. 北京:地质出版社,1~225.
- 赖杨,杨磊,李丹峰,张伟. 2016. 甘肃国宝山铷矿床矿石特征研究. 矿产综合利用,(3):71~75.
- 李慈君,杨立中,周训,陈明. 1992. 深层卤水资源量评价的研究. 北京:地质出版社. 1~113.
- 李光明,张林奎,焦彦杰,夏祥标,董随亮,付建刚,梁维,张志,吴建阳,董磊,黄勇. 2017. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义. 矿床地质,36(4):1003~1008.
- 李海民,程怀德,张全友. 2003. 卤水资源开发利用技术评述,盐湖研究,11(3):51~64.
- 李建康,王登红,张德会,付小方. 2007. 川西伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景. 北京:原子能出版社,1~187.
- 李建忠,陆生林,吴文贤,丁俊,王保弟,赵作新,崔子良. 2017. 云南省腾冲市小龙河锡稀土多金属矿田新知及其稀土矿的发现. 中国地质调查,4(2):9~21.
- 李静萍,许世红. 2005. 长眼睛的金属——铷和铯. 化学世界,2:108~117.
- 林耀庭,曹善行. 1999. 四川盆地油气田水及开发利用展望. 盐湖研究,7(4):31~38~8.
- 林晔. 1996. 浅谈西藏盐湖等资源中锂铷铯的开发利用研究. 新疆有色金属,(1):68~72.
- 刘英俊,曹励明,李兆麟,王鹤年,储同庆,张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京:科学出版社,154~169.
- 刘玉红,周勇,黄辉. 2013. 四川省小金县伟晶岩型锂铷钽多金属矿床地质特征及找矿远景. 地球,(7):72~73.
- 卢智. 2011. 平落坝构造海相深层卤水中铷分离提取技术研究. 成都理工大学硕士学位论文,1~44.
- 邵厥年,陶维平. 2010. 矿产资源工业要求手册. 北京:地质出版社,249~250.
- 沈敢富. 2002. 百花脑花岗岩风化壳:潜在超大型的铷、铯、钇、铀、石英和钠长石矿床. 矿物岩石地球化学通报,22(3):182~184.
- 时皓. 2015. 内蒙古石灰窑钽铌矿床地质特征及成矿机制,中国地质大学(北京),硕士论文.
- 孙艳. 2013. 我国铷典型矿床及其成矿规律研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 孙艳,王瑞江,仝锋,李建康,梅燕雄. 2013. 世界铷资源现状及我国铷开发利用建议. 中国矿业,22(9):11~13+57.
- 孙艳,王瑞江,李建康,赵芝. 2015. 锡林浩特石灰窑铷多金属矿床白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年代及找矿前景分析. 地质论评,61(2):463~468.
- 王春连,黄华,王九一,徐海明,余小灿,高超,孟令阳,蔡苋睿,颜开,方景玲. 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究. 地质学报,92(8):1630~1646.
- 王登红,李建康,付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义. 地球化学,34(6):541~547.
- 王登红,郑绵平,王成辉,高树学,商朋强,杨献忠,樊兴涛,孙艳. 2019. 大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查工程进展与主要成果. 中国地质调查,待刊.
- 王京彬. 1990. 湖南道县正冲稀有金属云英斑岩的特征和成因. 地质论评,36(6):534~540.
- 王汝成,吴福元,谢磊,刘小驰,王佳敏,杨雷,赖文,刘晨. 2017. 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,47(8):871~880.
- 文春华,邵拥军,黄革非,罗小亚,李胜苗. 2017. 湖南尖峰岭稀有金属花岗岩地球化学特征及成矿作用. 矿床地质,36(4):879~892.
- 肖朝阳,刘洁清. 2003. 连云山上石含锂铍钽铌矿床地质特征及找矿前景. 湖南地质,22(1):34~37.
- 谢文安,申志军,谢玲琳. 1996. 湖南省稀有稀土贵金属矿床特征与成矿规律. 地质与勘探,32(4):19~25.
- 徐海明,方景玲,王军,樊莉. 2010. 新疆波孜果尔钽铌矿床地质特征. 矿床地质,29(增刊):309~310.
- 徐平,陈莉,程爱美,李德斌,屈文俊. 2018. 第十四届全国矿床会议论文集.
- 徐新文. 2009. 青海省钽铌矿类型、特征及找矿方向. 西部探矿工程,21(3):144~147.
- 徐志刚,陈毓川,王登红,陈郑辉,李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案. 北京:地质出版社,1~138.
- 闫明,钟辉,张艳. 2006. 卤水中分离提取铷、铯的研究进展. 盐湖研究,14(3):67~72.
- 杨芬. 2017. 福建建宁东坑铷矿地质特征及成因分析. 福建地质,36(3):220~227.
- 杨岳清,吕博,孟贵祥,严加永,赵金花,王守光,贾玲珑,韩建刚. 2013. 内蒙古东七—山花岗岩地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及岩体形成环境探讨. 地球学报,34(2):163~175.
- 张敏. 2016. 广东省蕉岭县贵人峰铷矿床地质特征浅析. 世界有色金属,(1):40~41.
- 张霜华. 1998. 浅谈拓宽我国铷铯的应用领域. 新疆有色金属,(2):43~47.
- 章永梅,顾雪祥,程文斌,黄志全,李福亮,杨伟龙,杨洋. 2011. 内蒙古乌拉山地区花岗岩伟晶岩脉的年代学研究. 矿物学报,31(S1):143~144.
- 郑喜玉,张明刚,徐旭,李秉孝. 2002. 中国盐湖志. 北京:科学出版社.
- 周会武,李通国,张有奎,朱文戈,刘养雄,张宏斌. 2015. 甘肃省铷矿地质特征与成矿规律分析. 矿物学报,35(1):73~78.
- 周墨清,常书朝. 1981. 内蒙古东七—山花岗岩型铷矿床地质特征. 西北地质,14(1):34~41.
- 邹天人,李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京:地质出版社,1~284.

Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China

SUN Yan, WANG Denghong, WANG Chenghui* , LI Jiankang,
ZHAO Zhi, WANG Yan, GUO Weiming

MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037

** Corresponding author: chhwang@qq.com*

Abstract

Rubidium is an important kind of rare metal and strategic emerging industry mineral product. Rubidium resources in China are relatively abundant, mainly distributed in 12 provinces such as Jiangxi, Xinjiang and Guangdong provinces. The rubidium resources are mainly super-large and large-sized, but with low grade. They are all associated with Li, Be, Nb, Ta, and difficult to separate and utilize. Granitic type and granitic pegmatite type are the main types of rubidium deposits in China, which are mainly distributed in the rare metals ore-forming belts such as eastern Jiangnan Uplift, Wugongshan-North Wuyi Mountain, central Nanling Mountain, central Zhejiang-Wuyi Mountain, Kang-Yunnan, Altai and northern margin of North China continental block. Although there were some new rubidium prospecting in recent years and the first independent rubidium ore—Tiantangshan, Guangdong were reported, it is basically associated minerals. The basic pattern of the inborn deficiency of rubidium resources has not been substantially changed. Because of the rapid development of strategic emerging industries, especially under the environmental protection requirements, rubidium may play an important role in the field of new energy, it is necessary to find independent and high quality rubidium resource. First it is necessary to make clear of the Rb resource and analyze which kind of the rubidium deposits can be used. Then summary prospecting indicators, select target areas, drill to verify and do some research on high-end utilization, comprehensive recycling.

Key words: rubidium deposits; metallogenic regularity; rubidium ore-forming belt; new prospecting; guide direction