

稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化

王汝成¹⁾, 郭斌²⁾, 谢磊¹⁾, 车旭东¹⁾, 向路¹⁾, 刘晨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) 东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室, 南昌, 330013

内容提要:花岗岩是大陆地壳的主要组成, 是陆壳的特征性物质。花岗岩的形成及演化往往伴随着金属元素的不断富集和广泛的成矿作用, 进而形成与之相关的大陆成矿体系。稀有金属成矿是大陆成矿体系的重要内容, 毫无疑问, 与花岗岩有关的稀有金属成矿作用是大陆演化的直接产物, 因此, 稀有金属成矿学是大陆动力学的研究内容之一。花岗伟晶岩是锂、铍、钽最重要的成矿母岩, 碱性岩(花岗岩、伟晶岩和碳酸岩)与铌、锆等成矿作用有关。全球稀有金属成矿时代集中在太古代 3.0~2.6Ga、古元古代 1.8Ga、新元古代 1.0~0.9Ga、古生代 450~400Ma、早中生代 250~200Ma、晚中生代 160~130Ma 和新生代中新世 35~10Ma, 直接反映了稀有金属成矿与超大陆演化重大事件具有密切的成因关系。最古老的稀有金属成矿作用始于乌拉-诺基兰超大陆, 形成了现今分布于北美、非洲南部、西澳等地的重要钽成矿带, 其它时期成矿作用相继对应于哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆、冈瓦纳超大陆和潘吉亚超大陆聚合、裂解作用, 并终结于新生代发生的印度板块与亚洲板块的碰撞作用。值得关注的是, 稀有金属矿物与稀有金属成矿总是共演化, 锂辉石、锂电气石、绿柱石和铌铁矿-钽铁矿等几种重要的稀有金属矿物最早出现的时代都在太古代 3.0~2.6Ga。

关键词:稀有金属成矿; 伟晶岩; 碱性岩; 超大陆; 稀有金属矿物

大陆动力学是在当代板块构造理论基础上发展起来的固体地球科学研究领域, 主要研究大陆的成因和演化、大陆地壳中的岩浆成因和动力学、大陆岩石圈的变形和活动性、大型沉积盆地的成因和演化、矿产资源和能源效应等(Xu Zhiqin et al., 2008; Zhai Mingguo, 2015)。花岗岩是大陆地壳的主要组成, 是陆壳的特征性物质。花岗岩的形成和演化反映并记录了大陆自形成后的“分分合合”、“循环往复”, 特别是陆壳不断再造及其物质循环引起花岗岩浆成分的演变, 导致金属元素的不断富集和广泛的成矿作用, 形成大陆成矿体系。毫无疑问, 这些成矿作用是大陆物质演化的真实记录, 它们与大陆演化的密切联系受到越来越多的重视, 大陆成矿作用与重大地质事件的关系引人瞩目(Mao Jingwen et al., 2005; Zhai M G et al., 2013; Hazen et al., 2014), 尤其是与超大陆聚合和裂解事件、板块构造作用等具有鲜明时空关联的特征(Cawood et al.,

2013; Zhai M G et al., 2020)。因此, 稀有金属成矿学是大陆动力学的重点研究内容之一。

1 稀有金属与稀有金属花岗岩

稀有金属主要包括稀碱轻金属(锂、铷、铯、铍、锶)、稀有难熔金属(铌、钽、锆、钨)和钨、锡、铀等(矿产资源工业要求手册编委会, 2010), 主要为大离子亲石元素和高场强元素(McDonough et al., 1995; Linnen et al., 2005)。相较于陨石和地幔来讲, 陆壳中稀有元素明显富集(表1)。稀有金属成矿与花岗岩关系最为密切, 在S型花岗质和A型花岗质岩石中稀有金属含量富集倍数是陆壳1~2个数量级以上。

根据花岗岩的地球化学特征(铝饱和指数ASI和 P_2O_5 含量), 与稀有金属成矿有关的花岗岩可分为三种类型(表2): 过碱质花岗岩、准铝质-过铝质低磷花岗岩($P_2O_5 < 0.1\%$)和过铝质高磷花岗岩

注: 本文为国家自然科学基金(批准号: 91855209, 42072062, 42063006)资助的成果。

收稿日期: 2020-09-29; 改回日期: 2020-12-25; 网络发表日期: 2021-01-04; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 王汝成, 男, 1962年生, 教授, 矿物学专业。长期从事稀有金属矿物学和成矿学研究工作。Email: rcwang@nju.edu.cn。

引用本文: 王汝成, 郭斌, 谢磊, 车旭东, 向路, 刘晨. 2021. 稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化. 地质学报, 95(1): 182~193, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021049.
Wang Rucheng, Wu Bin, Xie Lei, Che Xudong, Xiang Lu, Liu Chen. 2021. Global tempo-spatial distribution of rare-metal mineralization and continental evolution. Acta Geologica Sinica, 95(1): 182~193.

($\text{P}_2\text{O}_5>0.1\%$)(Linnen et al. , 2005),它们的岩石学、稀有金属成矿特征显示明显的差异。

表 1 不同储库和岩石中稀有元素丰度($\times 10^{-6}$)

Table 1 Abundances of rare elements in different reservoirs and rocks ($\times 10^{-6}$)

	C-1 碳质球粒 ¹	N-MORB ²	陆壳 ³	A 型流纹岩 ⁴	S 型流纹岩 ⁵	Tanco 伟晶岩 ⁶
Li	1. 5	4. 3	16	344	3440	3427
Be	0. 025		1. 9	68	39	169
Zr	3. 82	74	132			
Nb	0. 240	2. 33	8	81	51	56
Sn	1. 65	1. 1	1. 7	21	200	128
Cs	0. 17	0. 0070	2	40	580	2641
Hf	0. 103	2. 05	3. 7			
Ta	0. 0136	0. 132	0. 7	37	24	300
W	0. 093	0. 01	1			
Th	0. 029	0. 120	5. 6			
U	0. 0074	0. 047	1. 3			

资源来源:1—McDonough et al. , 1995;2—Sun et al. , 1989; 3—Rudnick et al. , 2004; 4—Congdon et al. , 1991; 5—London et al. , 1988; 6—Stilling et al. , 2006。

表 2 三种类型稀有金属花岗岩的化学成分($\%, \times 10^{-6}$)

Table 2 Chemical compositions of three types of rare-metal granites ($\%, \times 10^{-6}$)

	过碱质	准铝-过铝质低磷	准铝-过铝质高磷
SiO ₂	72. 11	74. 45	71. 45
TiO ₂	0. 381	0. 19	0. 03
Al ₂ O ₃	10. 30	14. 24	15. 81
Fe ₂ O ₃	3. 04	0. 55	0. 34
FeO	1. 95	0. 80	0. 56
MnO	0. 20	0. 26	0. 29
MgO	0. 07	0. 28	0. 18
CaO	1. 01	0. 30	0. 50
Na ₂ O	4. 54	4. 52	4. 63
K ₂ O	4. 47	4. 18	3. 49
P ₂ O ₅	0. 03	0. 03	1. 11
LOI	2. 36	1. 02	1. 42
F(%)	0. 90	0. 72	1. 17
ACNK	0. 74	1. 14	1. 30
ANK	1. 20	0. 84	0. 72
Li	281. 2	442. 4	2049. 4
Be	155	40. 5	115. 2
Cs	2. 58	23. 7	215. 3
Hf	167. 8	14. 6	9. 2
Nb	1356. 9	72. 4	70. 6
Rb	1133. 1	990. 4	1812. 8
Sc	0. 2	5. 8	0. 9
Sn	254	116. 8	978. 9
Ta	120. 5	79. 3	127. 5
Th	149	23. 0	7. 1
U	53. 7	9. 2	18. 7
Zr	8952. 4	91. 3	34. 0

注:据 Linnen et al. (2005)数据平均。

(1)过碱质花岗岩铝饱和指数(ASI)显著小于 1,以含碱性铁镁矿物(如钠铁闪石、霓石)或似长石(如霞石)的花岗岩或正长岩为主。主要与铌、锆、稀土等成矿有关,典型成矿矿物包括烧绿石(Nb)、锆石和锆硅酸盐(Zr)、氟碳酸盐和稀土硅酸盐(REE);部分碱性花岗岩中铍也可能富集成矿(以硅铍钇矿为特征)。过碱性花岗岩主要分布在克拉通的边缘或板内裂谷带,如俄罗斯科拉半岛、加拿大 Quebec、Labrador 省、东非地区等地是碱性岩成矿的重要地区(Dostal, 2016),我国以位于华北克拉通东北缘的巴尔哲碱性花岗岩(Zr-Nb-Be-REE 成矿)最为典型(Qiu K F et al. , 2019;Yang W B et al. , 2020)。

(2)准铝-过铝质低磷花岗岩铝饱和指数在 1. 0 左右,P₂O₅ 含量低于 0. 1wt%,以钙碱性花岗岩为主(不同程度地含有普通角闪石),但是,准铝质花岗岩向过铝质花岗岩的过渡和复合是这类岩石的重要特征,特别是准铝质花岗岩以铌成矿为主,而过铝质花岗岩中钼成矿作用尤为强烈;这类花岗岩另一个重要特征是其中的黑云母普遍显著富铌(可达 1000 $\times 10^{-6}\sim 2000\times 10^{-6}$),且可富锂、氟,这些黑云母可确定为黑磷云母(protolithionite)至铁锂云母(zinnwaldite)(Wang Rucheng et al. , 2019)。在华南地区这样的花岗岩可能较为普遍,如江苏苏州花岗岩体、江西黄山-灵山花岗岩体等(Zhu Z Y et al. , 2018),它们基本上沿江绍断裂带分布,构成我国一类非常特殊的稀有金属花岗岩。

(3)过铝质高磷花岗岩铝饱和指数大于 1. 0, P₂O₅ 含量高于 0. 1wt%,主要为钠长石花岗岩(钠长石为细粒自形-半自形的板条状晶体,在手标本上以色白为特征,似糖粒,故这类钠长石经常被称为糖粒状钠长石),也包括花岗伟晶岩,是锂、铍、铌、钽成矿最重要的岩石,锂云母、锂辉石、锂电电气石、磷铝锂石、钽铁矿、细晶石、铍磷酸盐矿物(磷钙铍石、磷钠铍石等)等稀有金属矿物普遍分布,锆石高度富铪;以法国中央高原的 Beauvoir 花岗岩(Cuney et al. , 1992)、我国江西宜春雅山花岗岩体(Huang X L et al. , 2002)、捷克 Cinovec 花岗岩(Breiter et al. , 2017)等为典型代表。

2 全球稀有金属花岗岩的时代特征

自约 40 亿年前地球上大陆壳出现的迹象开始,花岗岩(或花岗质岩石,最早期为 TTG 类岩石)就一直主导大陆地壳的组成(Zhai Mingguo et al. , 2016)。虽然有学者认为原地深熔作用可以导致花

岗质熔体的形成,但是花岗岩的形成过程绝大多数情况下是和岩浆过程有关,花岗岩浆的形成、结晶和演化过程通常伴随源岩物质中成矿元素的活化、熔体中成矿元素的迁移与岩浆-热液体系中成矿元素富集,该过程可以使地壳中仅有几 ppm 的稀有金属元素富集数十至数百倍,从而形成具有经济价值的矿床(Černý et al., 2005)。大规模的岩浆活动必然导致巨量金属成矿元素的堆积,全球大量花岗岩集中产区构成了稀有金属主要成矿区,特别是花岗伟晶岩和碱性岩成矿的规模化特征尤为显著,它们所代表的稀有金属成矿特征对于揭示其与大陆演化的关系尤为重要。

2.1 花岗伟晶岩与稀有金属成矿

顾名思义,花岗伟晶岩是具有花岗岩的成分特征、矿物晶体极其粗大且有系统变化的一类岩石。一般认为,伟晶岩在成因上是母体花岗岩分异形成的,但是也有人认为伟晶岩是地壳深熔作用的直接产物(Simmons et al., 2016)。花岗伟晶岩是最为常见、也是最为重要的一类伟晶岩,与稀有金属成矿关系非常密切,这类伟晶岩也特称为“稀有金属花岗伟晶岩”(London, 2016)。花岗伟晶岩是高度富集稀有金属(包括 Li、Rb、Cs、Be、Sn、Zr、Nb、Ta 等)的一类岩石,尤其是目前国际上钽资源的最重要类型(Simandl et al., 2018; Wang Rucheng et al., 2020),此外也是唯一可开采的铯资源类型(以加拿大 Tanco 伟晶岩最为重要,铯矿物为铯沸石)。继卤水型锂矿之后,伟晶岩型锂辉石矿床作为硬岩型锂矿也成为第二大可利用类型(Gourcerol et al., 2019)。

典型意义上的伟晶岩从未见于在洋盆,也未见于洋中脊。但花岗伟晶岩在全球分布非常广泛,各个大陆都有大量存在,不管是古老克拉通,还是年轻造山带(图 1),并且绝大多数情况下成带分布,如北美 Superior 克拉通、西澳 Yilgarn 和 Pilbara 克拉通、非洲的 Kaapvaal 克拉通等都有大量巨大的伟晶岩省存在(Melcher et al., 2017),欧洲海西期造山带遍布葡萄牙、西班牙、法国、德国、捷克等地区都出露类型多样的稀有金属伟晶岩,喜马拉雅造山带是全球最年轻陆缘造山带,近年来也已发现巨大稀有金属成矿潜力(Wang Rucheng et al., 2017)。

McCauley et al. (2014)、Melcher et al. (2017)统计了不同时代花岗伟晶岩的分布,本文以此为基础并结合最新的文献资料整理形成稀有金属花岗岩的全球分布图(图 2)。Grew et al. (2018)报道了非

洲斯维兰 Sinceni 稀有金属花岗伟晶岩,年龄约 3.0 Ga,这是目前已知的最老的花岗伟晶岩。因此,可以推测花岗伟晶岩的出现不会早于 3.0 Ga,亦即它们可以从中、晚太古代开始出现,集中分布于北美、西澳、非洲南部,这些伟晶岩都是全球最重要的钽资源产地,如西澳 Wodginia 伟晶岩(2.9 Ga)、津巴布韦 Bikita 伟晶岩(2.6 Ga)等,印度 Allapatna 地区也报道有约 2.6 Ga 的稀有金属花岗岩、伟晶岩;加拿大 Tanco 伟晶岩是目前研究程度最高、目前正开采的最大的伟晶岩之一,结晶年龄约 2.6 Ga,长约 1.6 km、高 0.8 km,中心部位宽度可达 100 m,钽矿石资源量超过 200 万吨(Ta_2O_5 , 0.2 wt%, Černý et al., 1996)。

古元古代伟晶岩主要分布在北欧、南美,芬兰 Haapaluoma 是该时代最重要的伟晶岩地区,年龄约 1.8 Ga,巴西亚马逊克拉通 Pitinga、São João del Rei 等地区伟晶岩的铌铁矿 U-Pb 年龄约 2.0 Ga,该伟晶岩矿床每年开采约 250 吨钽和 1.2 万吨锡。中、新元古代伟晶岩则分别分布在北美和中非地区,纳米比亚、布隆迪等国家的伟晶岩的年龄大约在 1.0 Ga。

早古生代伟晶岩广泛分布于非洲地区,特别是莫桑比克的伟晶岩大多形成于 450~460 Ma,我国也有少量这一时期的花岗伟晶岩,秦岭地区的伟晶岩(河南卢氏官坡、商南地区等)伟晶岩铌铁矿、锡石定年均在 420~400 Ma 之间,华南这一时期的花岗岩较多,已确定的同期伟晶岩有江西西港伟晶岩(420 Ma)、福建南平伟晶岩(390~400 Ma)。晚古生代伟晶岩则主要集中在西欧,广泛分布于从葡萄牙-西班牙(伊比利亚地区)、到法国(中央高原地区)、到德国-捷克所构成的褶皱带内,如 Bohemian 地区的伟晶岩的年龄主要介于 330~340 Ma。

中生代伟晶岩以东南亚和中国出露最为集中。东南亚是重要的三叠纪锡稀有金属成矿省,越南中部广义省 La Vi 是重要的 Li-Cs-Ta 成矿区(Hien-Dihn et al., 2017),我们对该地一个稀有金属伟晶岩中铌铁矿进行了微区 U-Pb 定年,获得的年龄是 240 Ma 左右(待发表)。近年来我国阿尔泰地区的伟晶岩进行的铌铁矿定年获得的多个年龄大多介于 220~200 Ma(Zhou Q F et al., 2018);川西甲基卡 and 新疆大红柳滩、白龙山等地锂辉石伟晶岩的铌铁矿年龄均介于 200~220 Ma(Yan Q H et al., 2016; Li P et al., 2019),构成了松潘-甘孜-甜水海巨型硬岩型锂矿带(Xu Zhiqin et al., 2018)。我

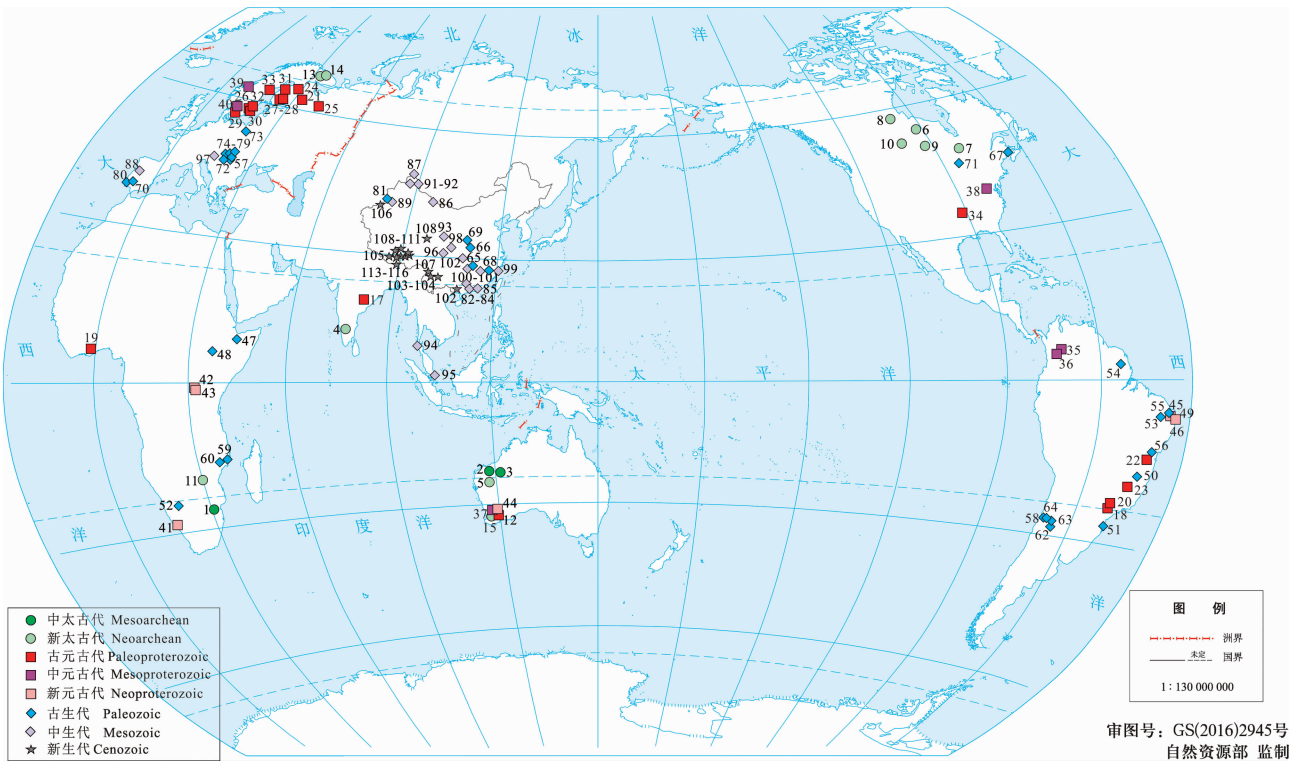


图 1 全球稀有金属花岗伟晶岩的分布(资料据附件 1)

Fig. 1 Global distribution of rare-metal granitic pegmatites (see appendix 1 for data sources)

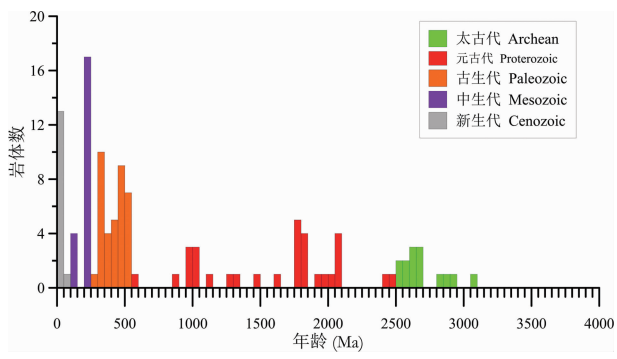


图 2 全球稀有金属花岗伟晶岩的年龄分布(资料同图 1)

Fig. 2 Histogram of age distribution of rare-metal granitic pegmatites (same data as in Fig. 1)

国华南燕山期稀有金属花岗岩众多,是全球最为重要的钨锡稀有金属成矿区,但是稀有金属伟晶岩相对少见,在许多稀有金属成矿花岗岩的顶部可见“伟晶岩壳”(Yin L et al. , 1995),发育良好者可具有花岗伟晶岩的岩石学特征,并可发生稀有金属矿化(Wu M Q et al. , 2018)。

喜马拉雅新生代(中新世为主)淡色花岗岩带东西展布超过 1000km,是目前确认的全球年代最新的稀有金属成矿带,该带中的错那洞、珠峰前进沟、普士拉等地伟晶岩中铌铁矿、锡石、独居石等矿物进行的微区 U-Pb 定年工作显示,这些伟晶岩的成岩

年龄集中在两个阶段:20~25 Ma 和 14~16 Ma (Xie L et al. , 2020;Liu C et al. , 2020)。

2.2 碱性岩与稀有金属成矿

与稀有金属成矿有关的碱性岩包括两大类,一类是碱性花岗岩,另一类则为碳酸岩。

碱性花岗岩是一类 $AN\text{K}[(\text{Na}+\text{K})/\text{Al 摩尔比值}] > 1$ 的岩浆岩,既包括硅过饱和的花岗岩/流纹岩、硅饱和的正长岩/粗面岩、以及硅不饱和的霞石正长岩/响岩等。大部分碱性岩富高场强元素,特别是 Zr、Nb、U、REE 等,是这些稀有元素成矿的重要岩石类型。碱性花岗岩常见于大陆裂谷带(如著名的东非裂谷地区),也可在古老克拉通的边缘出现,在碰撞后或造山后的拉张背景也是碱性岩形成的重要场所。Marks et al. (2017)收集整理了全球钠质岩石的分布和年龄信息(图 3, 4)。

碱性岩可能最早出现于太古代,约 3.5~3.6Ga,但是第一个碱性岩浆活动高峰期出现在约 2.6~2.8 Ga(Blichert-Toft et al. , 1996),均位于北美、非洲、澳洲古大陆上,岩性主要为正长岩、霞石岩、煌斑岩等。

第二个碱性岩浆活动高峰是在古元古代 2.0 Ga 左右,分布在加拿大的大量过碱性花岗岩-正长岩是全球非常重要的 Zr-Nb-REE 成矿区,如西北地



图 3 全球稀有金属碱性岩的分布(数据源自 Marks et al. , 2017)

Fig. 3 Global distribution of rare-metal alkaline rocks (data source: Marks et al. , 2017)

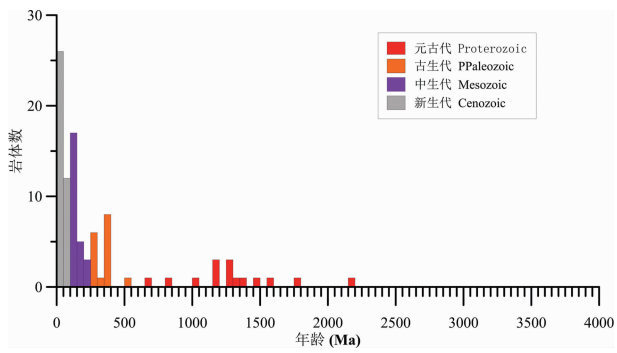


图 4 全球稀有金属碱性岩的年龄分布(资料同图 3)

Fig. 4 Histogram of age distribution of rare-metal alkaline rocks (same data as in Fig. 3)

区 Thor Lake 碱性岩(2.1~2.0 Ga, Sheard et al. , 2012),是超大型铅-铋-稀土矿床。

中、新元古代碱性岩在全球广泛分布,著名的格林兰岛 Ilimaussaq 碱性岩大约形成于 1.3~1.1 Ga,位于克拉通内的裂谷带,加拿大 Strange Lake 环状碱性岩体形成于 1.2 Ga,稀有金属资源量达到 140 百万吨(0.933wt%REE,1.93wt% ZrO₂,0.18wt% Nb₂O₅,0.05wt% HfO₂,0.08wt% BeO);我国亦有相关报道,Zhu et al. (2020)最近发表了东秦岭方城地区的新元古代碱性岩,年龄约为 900~800Ma,岩性主要为霓霞正长岩,铌钽成矿现象较好。

古生代碱性岩分布相对局限,但是规模宏大,特别是科拉半岛的碱性岩是全球最重要的碱性岩区之一,其中著名的 Khibina 和 Lovozero 碱性岩体年龄约 370Ma,出露面积分别为 1327km² 和 650km²,以霞石正长岩为主,是全球最大的铅矿床(也是重要的磷矿床),异性石是该地区最特征的铅矿物,也因其鲜艳的紫色而成为宝石矿物(Linnen et al. , 2014; Dostal, 2016)。

印支期碱性岩分布与同期的大火成岩省密切相关,我国攀西裂谷带、华北克拉通、华南克拉通边缘都有一系列碱性岩存在,其中部分具有较好的稀土稀有金属成矿能力。位于华北克拉通边缘的辽宁凤城赛马碱性岩体形成于 230~240 Ma,以(霓)霞正长石为主,也可见碱性伟晶岩,发生强烈的 Zr-Nb-REE-U 成矿作用(Wu B et al. , 2016);在攀西地区出露的二叠纪碱性岩,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(Wang Lianfen et al. , 2015)。

燕山期稀有金属碱性岩主要分布在我国东部地区,东北地区的巴尔哲碱性岩是重要的 Zr-Nb-Be 矿床,形成于约 130Ma(Yang W B et al. , 2020),与此几乎同期的稀有金属碱性岩还有河北雾灵山正长

岩、苏州碱长花岗岩等;更年轻的碱性花岗岩更分布于中国东部沿海地区,包括山东崂山、福建魁岐钠闪石花岗岩(年龄 100~90Ma),Zr-Nb 成矿可发生于岩体的晚期相。

全球碳酸岩体大约有 500 多个,主要分布在非洲、亚洲、北美和格陵兰、欧洲、南美洲等地区(Woolley et al., 2008),其中部分与碱性花岗岩密切共生,构成碱性杂岩体。碳酸岩产出的构造背景主要是板内裂谷带和板块边界,部分与造山后拉张垮塌环境有关。碳酸岩与碱性花岗岩具有相似的锆、铌、稀土成矿特征,主要成矿矿物为锆石、斜锆石、烧绿石、铌铁矿、易解石、氟碳铈矿等。根据成矿碳酸岩的定年结果,最老的碳酸岩出现在中元古代(2.1~1.6 Ga),此后在新元古代(~1.0Ga)、古生代(650~550 Ma、520~340Ma)、中生代(250~100 Ma)都不断有碳酸岩形成,最年轻的碳酸岩形成于约 10Ma。统计情况还显示,年龄越新,碳酸岩体数量越多,具体原因尚不清楚,可能的原因是早期已形成的碳酸岩受到后期构造的改造未能保留古老岩石信息。

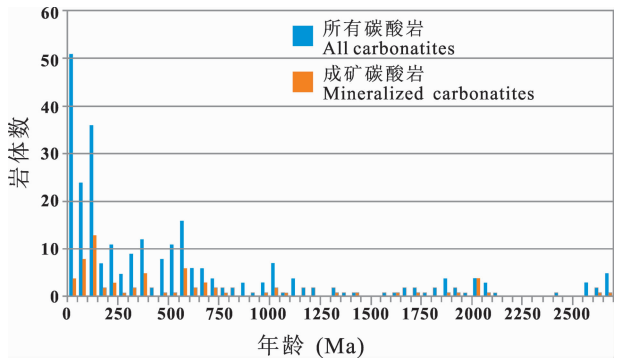


图 5 全球碳酸岩的年龄分布(据 Simandl, 2015 修改)
Fig. 5 Histogram of age distribution of carbonatites (modified after Simandl, 2015)

3 稀有金属成矿与大陆循环的耦合关系

全球大陆壳的形成可能始于 40 亿年前,大陆壳形成后历经多次“聚散离合”,发生多次超大陆聚合和裂解作用,包括:① 乌尔(Ur)超大陆(约 3000Ma);② 基诺兰(Kenorland,也有称为 Superia 或 Sclavia,约 2600~2400Ma);③ 哥伦比亚超大陆(或 Nuna,约 1800Ma);④ 罗迪尼亚超大陆(约 1000~800Ma);⑤ 冈瓦纳大陆(约 650~390Ma);⑥ 潘吉亚超大陆(约 250Ma)(Condie et al., 2009; Lu

Songnian, 2010; Li Sanzhong et al., 2014; Shu Liangshu et al., 2019)。大陆形成演化的核心问题是花岗岩(Zhai Mingguo et al., 2016),建立超大陆形成和演化史的重要途径之一也是源于花岗岩的锆石的年代学和同位素地球化学(主要为 Hf 同位素),因此花岗岩可以记录和反映大陆形成和演化历史。全球稀有金属花岗伟晶岩和碱性岩在形成时间上具有显著的阶段性,主要集中于以下几个时间段(图 6):中一晚太古代(3.0~2.5Ga)、古元古代(2.1~1.8 Ga)、中一新元古代(1.3~0.9 Ga)、古生代(550~300 Ma)、中生代(250~100Ma)、和新生代(25~15 Ma)。稀有金属成矿所体现出的多时代性与全球大陆重大事件密切相关。

地球形成后经历了陆壳开始出现、陆壳成熟和大陆形成、和大陆再造等过程,另一方面大陆块经历了聚合形成全球尺度的超大陆及其后的裂解过程。地球在过去 30 亿年内发生了多次全球意义上的大陆聚合与超大陆形成事件(Rogers et al., 2003; Condie et al., 2009),并引发了广泛、多次、大规模花岗岩岩浆活动,与此类似,与稀有金属成矿有关的花岗伟晶岩和碱性岩的形成时代,基本契合了超大陆拼合和裂解的重大历史时期。

太古代是地球历史是非常关键的时期,早期陆壳在该时期渐趋于成熟,最早的稀有金属伟晶岩也正是在此时期出现,特别是全球最大的伟晶岩型钽矿都是形成于 3.0~2.6 Ga,说明在乌尔超大陆形成时期开始发生稀有金属成矿作用,Bradley (2011)则认为这一时期主要对应于诺基兰超大陆。形成于古元古代的哥伦比亚(或 Nuna)超大陆是第一个真正意义上的全球超大陆(Zhao Guochun et al., 2002),以北欧为代表的古元古代集中出现了一系列于钽钼成矿有关的花岗伟晶岩带。分布于美、非、澳洲的中一新元古代(1.3~0.9 Ga)稀有金属花岗岩和碱性岩显然对应于罗迪尼亚超大陆聚合。早古生代年龄峰(主要集中在 500~400Ma)与冈瓦纳超大陆契合,包括西欧、巴西、澳大利亚、印度、纳米比亚和埃塞俄比亚等地广泛分布的伟晶岩。300Ma 左右形成的伟晶岩与潘基亚超大陆聚合有关的碰撞事件密切相关,包括北美 Appalachians 山脉、欧洲海西造山带和欧亚大陆的乌拉尔造山带的伟晶岩。

与全球特征相比,我国与稀有金属成矿有关的岩石具有独特性(Wang Rucheng et al., 2020)。① 根据已有稀有金属矿床的年龄数据,我国最早出现的稀有金属成矿期为元古代,以白云鄂博碱性岩最

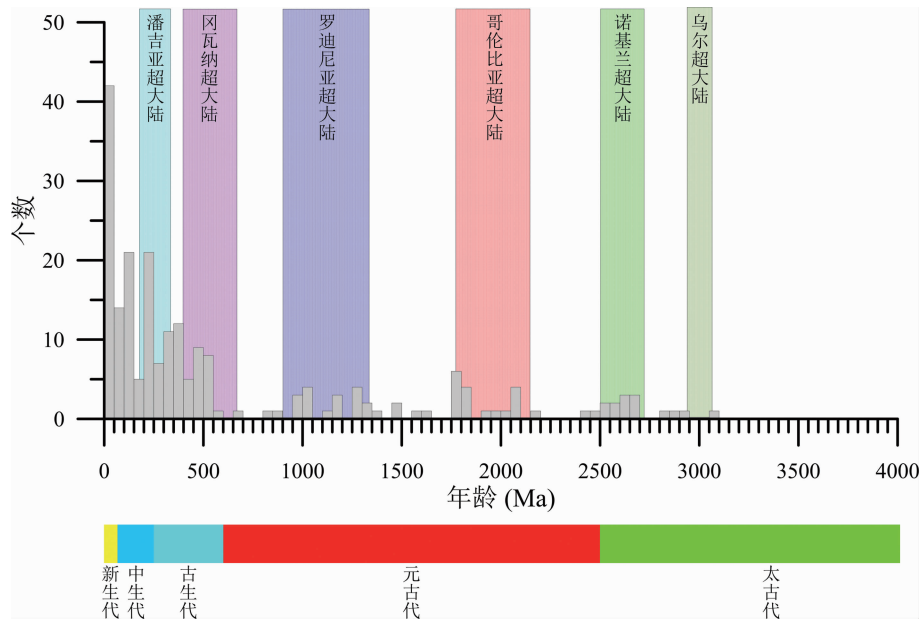


图 6 稀有金属伟晶岩和碱性岩的年龄分布

Fig. 6 Histogram of compiled age distribution of rare-element pegmatites and alkaline rocks

为重要(1.4~1.3Ga, Fan H R et al. , 2016; Yang K F et al. , 2019),新近在桂北元宝山、黔东梵净山等地确定的铌钽成矿作用形成于新元古代晚期(~820Ma, Xiang L et al. , 2020),是华南罗迪尼亚超大陆的组成部分;②我国至少存在两条大规模的三叠纪(约 250~200 Ma)稀有金属花岗伟晶岩带,一条是以可可托海为代表的阿尔泰稀有金属花岗伟晶岩带,是中亚造山带的重要组成部分,另一条是川西松潘-甘孜到西昆仑甜水海所形成的稀有金属花岗伟晶岩带,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;③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 90Ma),是华南“燕山期成矿大爆发”中的主要组成部分;④新生代(主要为渐新世到中新世)喜马拉雅淡色花岗岩带,是最新确认的重要稀有金属成矿带,它是新特提斯构造运动的直接产物。

非洲斯威士兰 Sinceni 伟晶岩型锡矿是全球已知最老的锡矿床,形成于太古代(3.1 Ga),位于 Kaapvaal 克拉通内 (Maphalala et al. , 1993)。此外,西澳 Pibara 和 Yilgarn 克拉通内多个 Li-Cs-Ta 伟晶岩(2.9~2.6 Ga)以及非洲津巴布韦克拉通内 Bikita Li-Cs-Ta 伟晶岩(2.6 Ga)也伴有锡矿化 (Melcher et al. , 2015; Kendall-Langley et al. , 2020)。太古代锡矿规模较小,其成矿时代与乌尔超

大陆的聚合与裂解事件大致对应。全球最早的钨矿化产于太古代变质岩中,与花岗岩在成因上并无直接关联,如瑞典 Malene 层状电英岩(3.1~2.8 Ma)以及加拿大 Abitibi(2.7~2.6 Ga)和津巴布韦 Midlands(2.7 Ga)绿岩带型金矿中可见白钨矿矿化 (Chiaradia, 2003)。元古代以来钨矿床多数在成因上与花岗岩相关,钨成矿与锡成矿峰期大体上一致。南非 Bushveld 杂岩体(2.06 Ga) (Neymark et al. , 2018)以及巴西 Goiás(1.77Ga、1.58~1.57 Ga)和 Pitinga(1.83 Ga) (Lenharo et al. , 2002)、芬兰南部和俄罗斯卡累利阿地区的环斑花岗岩(1.64~1.53 Ga) (Maier et al. , 2015)周围发育了许多古元古-中元古代锡矿床,这些锡矿形成于非造山环境。新元古代锡矿和钨矿主要位于津巴布韦 Kamativi(1.03 Ga)、南非开普敦西北部 Orange River(1.0 Ga)、中部非洲(卢旺达、刚果金、布隆迪)(1.0 Ga) (Kinnaird et al. , 2016; Melcher et al. , 2015)和巴西 Rondonia 地区(1.0 Ga) (Neymark et al. , 2018),这些钨锡成矿事件与罗迪尼亚超大陆裂解时间吻合。泛非造山带的形成与冈瓦纳大陆聚合有关,在该造山带内产出一系列新元古代晚期和早古生代钨锡矿床,分布在埃及(640~620 Ma)、尼日利亚(560~450 Ma)、纳米比亚 Damara(520~500 Ma)和巴西 Araçuaí(630~480 Ma)等地区 (Kinnaird et al. , 2016; Lehmann et al. , 2020; Melcher et al. , 2015, 2017; Pedrosa-Soares,

2011)。此外,古生代锡钨矿床还分布在澳洲东部的塔斯马尼亚/拉克兰褶皱带(430~250Ma)、北美阿巴拉契亚造山带(395~380 Ma;新斯科舍)和欧洲海西造山带(330~270 Ma;厄尔士、法国中央高原和阿莫里加、加利西亚和中伊比利亚、康沃尔、摩洛哥中央高原等地区),它们的形成与冈瓦纳大陆和劳伦西亚大陆汇聚作用(潘基亚超大陆聚合事件)有关(Harlaux et al., 2018; Moscati et al., 2020; Romer et al. 2016; Zhang R Q et al., 2017)。中生代锡钨矿以东南亚(230~80 Ma)、玻利维亚(230 Ma)、北太平洋(120~70 Ma)等地区为代表(Ng et al., 2015; Romer et al., 2016; Schwartz et al., 1995)。南美安第斯山脉(玻利维亚和秘鲁)(24~16 Ma)等地区新生代锡钨矿形成于太平洋板块向南美板块俯冲作用导致的弧后拉张环境(Lehmann et al., 1990, 2020)。

与全球钨锡矿床时空分布特征对比,中国目前尚未发现太古代、古元古-中元古代钨锡矿。中国的钨锡成矿存在多期次、多旋回性,燕山期是钨锡成矿的爆发期,其次为印支期和加里东期(Mao J W et al., 2013; Jiang Shaoyong, 2020)。①我国已知最早的钨锡矿为新元古代(840~800 Ma),如桂北宝坛和九毛锡矿(Xiang L et al., 2018; Zhang S T et al., 2019)、川西岔河锡矿(Guo Chunli et al., 2007)、赣西北花山洞钨矿(Liu Jinxian et al., 2015),位于扬子克拉通西南缘以及江南造山带,它们形成于罗迪尼亚超大陆旋回中;②早古生代钨锡矿(450~410 Ma)主要分布在祁连造山带北部、东昆仑造山带西缘、江南造山带西段等地区,可能在原特提斯板块汇聚作用背景下形成(Mao J W et al., 2019);③晚古生代钨锡矿(310~280 Ma)发育在中亚造山带,其形成于古亚洲洋的闭合的背景下;④印支期钨锡矿床(250~210 Ma)主要分布在南岭、江南造山带、昌宁-孟连缝合带(Mao J W et al., 2019; Jiang Shaoyong et al., 2020),与潘基亚超大陆聚合密切相关;⑤燕山早期钨锡矿床(185~150 Ma)主要产在南岭地区,与太平洋板块向华南板块俯冲有关(Mao J W et al., 2013);⑥燕山晚期(145~75 Ma)钨锡矿床分布较广,义敦、三江、右江等地区白垩纪钨锡矿床的形成可能与新特提斯板块的俯冲作用有关,江南造山带、东南沿海、大兴安岭南段等地的钨锡矿形成于古太平洋板块向中国东部俯冲作用背景下(Guo J et al., 2018; Mao Jingwen et al., 2020);⑦新生代锡钨矿(55~14 Ma)位于三江

造山带和喜马拉雅造山带,与新特提斯运动有关(Cao H W et al., 2020; Chen X C et al., 2014; Xie L et al., 2020; Wang Rucheng et al., 2017)。

4 稀有金属矿物演化

矿物是由组成元素按照一定的键合形式构成多面体而形成的,矿石矿物是有用元素的载体,矿物与成矿是共生、共演化的(Hazen et al., 2014)。稀有金属矿物是稀有金属成矿作用的具体反映,岩石中稀有金属富集成矿过程表现为稀有金属矿物的结晶过程。随着多种稀有金属矿物微区同位素定年技术日渐成熟,对稀有金属矿物的结晶时代了解越来越多且精确,也快速增加了对稀有金属成矿时空分布特征的了解。以锂-铍-铌钽三类最重要的稀有金属元素为例,全球及我国大陆演化不同时代的分布框架可以建立起来。

(1)主要的原生锂矿物包括锂辉石、透锂长石、锂电气石、锂云母等。由于地壳锂含量较低,锂矿物的形成需要在地壳含量基础上进一步富集 1~2 个数量级,花岗伟晶岩是导致锂矿物结晶的最重要岩石,并与大陆地壳的生长相关的。文献报道的地质记录显示,最早的锂电气石出现在 3.1~3.0Ga 的花岗伟晶岩中(Grew et al., 2014),最早的锂辉石也是几乎同时结晶(南非 New Consort 矿山中 3.1~3.0Ga 的 LCT 伟晶岩),锂矿物出现的高峰期基本上都和超大陆的形成有关(Grew et al., 2019; Grew, 2020),包括晚太古代基诺兰(Kenorland)超大陆聚合、哥伦比亚和罗迪尼亚超大陆拼合、潘吉亚超大陆聚合等。

(2)铍矿物大体上分为两类,一类是与过铝质花岗岩、伟晶岩有关,如:绿柱石、硅铍石等硅酸盐矿物,金绿宝石等氧化物矿物,或者磷钙铍石等磷酸盐矿物,另一类是与碱性、过碱性花岗岩有关,主要是结构较为复杂的碱基铍硅酸盐矿物,如硅铍钠石(chkalovite, $\text{Na}_2\text{BeSi}_2\text{O}_6$)。绿柱石在约 3000 Ma 形成的花岗伟晶岩中普遍出现,而发现铍矿物最老的碱性岩体是在格陵兰地区的 Ilimaussaq 碱性岩(1175 Ma),其中代表的铍矿物为硅铍钠石(Grew et al., 2014)。铍矿物还大量出现于约 2500、1800、520Ma 的高分异稀有金属花岗伟晶岩,直接与相应的超大陆碰撞有关,印度板块与亚洲板块在新生代的大碰撞也产生同样的喜马拉雅铍成矿带。

(3)铌钽是典型的难熔金属,陨石中可以出现少数含铌矿物,甚至烧绿石(Rubin et al., 2017),但是

铌钽矿物最早出现于太古代。铌铁矿 U-Pb 定年表明,最古老的铌铁矿是澳大利亚 Wodgina 花岗伟晶岩中的钽铁矿,其结晶年龄为 2.9 Ga (Melcher et al., 2017),相近的年龄形成的铌钽氧化物还包括:加拿大 Tanco 伟晶岩中的钽铁矿 (2.6 Ga) 和津巴布韦 Bikita 伟晶岩的钽铁矿 (2.6 Ga, Melcher et al., 2015)。近年来世界各地铌钽矿物的直接定年结果系统揭示了铌钽矿物结晶历史和地球演化历史的关系 (Melcher et al., 2017 一文中图 18),特别是一些重要的造山事件,包括了晚太古代、新元古代/古生代交界、石炭/二叠纪交界和中生代/新生代交界。喜马拉雅造山带中,稀有金属花岗岩/伟晶岩中的铌铁矿结晶时代最晚为 13Ma。

5 结论

稀有金属成矿作用主要与两类岩石有关,一类是过铝质花岗岩或花岗伟晶岩,另一类是碱性、过碱性花岗岩、伟晶岩或碳酸岩。花岗伟晶岩是锂、铍、钽最重要的成矿母岩,全球稀有金属花岗伟晶岩的形成年龄集中在以下时期:太古代 3.0~2.6Ga、古元古代 1.8Ga、新元古代 1.0~0.9Ga、古生代 450~400Ma、早中生代 250~200Ma、晚中生代 160~130Ma 和新生代中新世 35~10Ma。碱性岩(花岗岩、伟晶岩和碳酸岩)与铌、钽等成矿作用有关,成矿时代与伟晶岩基本同期。稀有金属成矿作用与超大陆演化重大事件具有密切的成因关系,稀有金属主要成矿时代对应于乌尔-诺基兰超大陆、哥伦比亚超大陆、罗迪尼亚超大陆、冈瓦纳超大陆和潘吉亚超大陆聚合、裂解作用,并终结于新生代发生的印度板块与欧亚板块碰撞作用。稀有金属矿物与稀有金属成矿共演化,最古老的锂硅酸盐矿物(锂辉石、锂电石等)、绿柱石、铌铁矿-钽铁矿等都在太古代(约 3.0~2.6Ga)花岗伟晶岩中才开始出现。

References

- Blichert-Toft J, Arndt N T, Ludden J N. 1996. Precambrian alkaline magmatism. *Lithos*, 37: 97~111.
- Bradley D C. 2011. Secular trends in the geological record and the supercontinent cycle. *Earth-Science Reviews*, 108: 16~33.
- Breiter K, Durišová J, Hrstka T, Korbelová Z, Vaňková M H, Galiová M V, Kanický V, Rambousek P, Kněšl I, Dobeš P, Dosbaba M. 2017. Assessment of magmatic vs. metasomatic processes in rare-metal granites: A case study of the Cinovec/Zinnwald Sn-W-Li deposit, Central Europe. *Lithos*, 292~293: 198~217.
- Cao H W, Li G M, Zhang Z, Zhang L K, Dong S L, Xia X B, Liang W, Fu J G, Huang Y, Xiang A P, Qing C S, Dai Z W, Pei Q M, Zhang Y H. 2020. Miocene Sn polymetallic mineralization in the Tethyan Himalaya, southeastern Tibet: A case study of the Cuonadong deposit. *Ore Geology Reviews*, 119, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103403.
- Cawood P A, Hawkesworth C J. 2015. Temporal relations between mineral deposits and global tectonic cycles. In: *Ore Deposits in an Evolving Earth* (G. R. T. Jenkins, P. A. J. Lusty, I. McDonald, M. P. Smith, A. J. Boyce, J. J. Wilkinson (Eds.)), *Ore Deposits in an Evolving Earth*, Geological Society, London, Special Publications, 393: 9~21.
- Černý P, Blevin P L, Cuney M, London D. 2005. Granite-related ore deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 337~370.
- Černý P, Ercit T S, Vanstone P T. 1996. Petrology and mineralization of the Tanco rare-element pegmatite, Southeastern Manitoba. *Geological Association of Canada Fieldtrip Guidebook*.
- Chen X C, Hu R Z, Bi X W, Li H M, Lan J B, Zhao C H, Zhu J J. 2014. Cassiterite LA-MC-ICP-MS U/Pb and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of tin deposits in the Tengchong-Lianghe tin district, NW Yunnan, China. *Mineralium Deposita*, 49: 843~860.
- Chiaradia M. 2003. The evolution of tungsten sources in crustal mineralization from Archean to Tertiary inferred from lead isotopes. *Economic Geology*, 98: 1039~1045.
- Condie K C, Belousova E, Griffin W L, Sircombe K N. 2009. Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zirconage spectra. *Gondwana Research*, 15: 228~242.
- Congdon R D, Nash W P. 1991. Eruptive pegmatite magma: Rhyolite of the Honeycomb Hills, Utah. *American Mineralogist*, 76: 1261~1278.
- Cuney M, Marignac C, Weisbrod A. 1992. The Beauvoir topaz-lepidolite albite granite (Massif Central, France): the disseminated magmatic Sn-Li-Ta-Nb-Be mineralization. *Economic Geology*, 87: 1766~1794.
- Dostal J. 2016. Rare Metal Deposits Associated with Alkaline/Peralkaline Igneous Rocks. *Reviews in Economic Geology*, 18: 33~54.
- Fan H R, Yang K F, Hu F F, Liu S, Wang K Y. 2016. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, 7: 335~344.
- Gourcerol B, Gloaguen E, Melleton J, Tuduri J, Galiegue X. 2018. Re-assessing the European lithium resource potential-A review of hard-rock resources and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 109: 494~519.
- Grew E S, Bosi F, Ros L, Kristiansson P, Gunter M F, Halenius U, Trumbull R B, Yates M. 2018. Fluor-elbaite, lepidolite and Ta-Nb oxides from a pegmatite of the 3000Ma Sinceni Pluton, Swaziland: evidence for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites in the Mesoarchean. *European Journal of Mineralogy*, 30: 205~218.
- Grew E S, Hystad G, Toapanta M P C, Eleish A, Ostroverkhova A, Golden J, Hazen R M. 2019. Lithium mineral evolution and ecology: comparison with boron and beryllium. *European Journal of Mineralogy*, 31: 755~774.
- Grew E S, Hazen R M. 2014. Beryllium mineral evolution. *American Mineralogist*, 99: 999~1021.
- Guo J, Zhang R Q, Sun W D, Ling M X, Hu Y B, Wu K, Luo M, Zhang L C. 2018. Genesis of tin-dominant polymetallic deposits in the Dachang district, South China: Insights from cassiterite U-Pb ages and trace element compositions. *Ore Geology Reviews*, 95: 863~879.
- Harlaux M, Romer, R L., Mercadier J, Morlot C, Marignac C, Cuney M. 2018. 40 Ma of hydrothermal W mineralization during the Variscan orogenic evolution of the French Massif Central revealed by U-Pb dating of wolframite. *Mineralium Deposita*, 53: 2151.
- Hazen R M, Liu X M, Downs R T, Golden J, Pires A J, Grew E S, Hystad G, Estrada C, Sverjensky D A. 2014. Mineral evolution: Episodic metallogenesis, the supercontinent cycle, and the coevolving geosphere and biosphere. *Society of*

- Economic Geologists Inc. , Special Publication 18; 1~15.
- Hien-Dinh T T, Dao D A, Tran T, Wahl M, Stein E, Gier E. 2017. Lithium-rich albite-topaz-lepidolite granite from Central Vietnam; a mineralogical and geochemical characterization. *European Journal of Mineralogy*, 29: 35~52.
- Huang X L, Wang, R C, Chen X M, Hu H, Liu C S. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz-lepidolite granite, Jiangxi province, southern China. *Canadian Mineralogist*, 40: 1047~1068.
- Kendall-Langley L A, Kemp A I S, Grigson J L, Hammerli J. 2020. U-Pb and reconnaissance Lu-Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li-Cs-Ta type pegmatites of Western Australia. *Lithos*, 352~353, doi. org/10.1016/j.lithos.2019.105231.
- Kinnaird J A, Nex P A M, Milani L. 2016. Tin in Africa. *Episodes*, 39: 361~380.
- Lehmann B. 2020. Formation of tin ore deposits; A reassessment. *Lithos*, doi. org/10.1016/j.lithos.2020.105756.
- Lehmann B, Ishihara, S. Michel, H. Miller, J. Rapela, C. Sanchez, A. Tistl, M. Winkelmann L. 1990. The Bolivian tin province and regional tin distribution in the Central Andes-a reassessment. *Economic Geology*, 85: 1044~1058.
- Lenharo S L R, Moura M A, Botelho N F. 2002. Petrogenetic and mineralization processes in Paleo-to Mesoproterozoic rapakivi granites; examples from Pitinga and Goias, Brazil. *Precambrian Research*, 119: 277~299.
- Li P, Li J K, Chou I M, Wang D H, Xiong X. 2019. Mineralization epochs of granitic rare-metal pegmatite deposits in the Songpan-Ganzê orogenic belt and their implications for orogeny. *Minerals*, 9, 280; doi:10.3390/min9050280.
- Linnen R L, Cuney M. 2005. Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization. In: *Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits* (Linnen, R. L., Samson, I. M., eds.), Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes, 17: 45~67.
- Linnen R F, Trueman D, Burt R. 2014. Tantalum and niobium. In: *Critical Metals Handbook* (Gunn, G., ed), First edition, John Wiley & Sons, Ltd. Published, 361~384.
- Liu C, Wang R C, Wu F Y, Xie L, Liu X C, Li X K, Yang L, Li X J. 2020. Spodumene pegmatites from the Pusila pluton in the higher Himalaya, South Tibet; Lithium mineralization in a highly fractionated leucogranite batholith. *Lithos*, 358~359, DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105421.
- London D. 2016. Rare-Element Granitic Pegmatites. *Reviews in Economic Geology*, 18: 165~193.
- London D, Hervig R L, Morgan G B VI. 1988. Melt-vapor solubilities and element partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems; Experimental results with Macusani glass at 200 MPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 360~373.
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48: 267~294.
- Mao J W, Ouyang H G, Song S W, Santosh M, Yuan S D, Zhou Z H, Zheng W, Liu H, Liu P, Cheng Y B, Chen M H. 2020. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China. *Society of Economic Geologists, Special Publications*, 22: pp. 411~482.
- Maier W D, Lahtinen R, O'Brien H. 2015. Mineral deposits of Finland. Elsevier, 802 pp.
- Maphalala R M, Kroner A. 1993. Pb-Pb single zircon ages for the younger Archaean granitoids of Swaziland, southern Africa// *International colloquium on Africa geology*, pp201~206.
- Marks, M. A. W., Markl, G. 2017. A global review on agpaitic rocks. *Earth-Science Reviews*, 173: 229~258.
- McCauley A, Bradley D C. 2014. The global age distribution of granitic pegmatites. *Canadian Mineralogist*, 54: 183~190.
- McDonough W F, Sun S-S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Melcher F, Graupner T, Gäbler H E, Sitnikova M, Henjes-Kunst F, Oberthür T, Gerdes A, Dewaele S. 2015. Tantalum-(niobium-tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: constraints from Ta-Nb oxides mineralogy, geochemistry and U-Pb geochronology. *Ore Geology Reviews*, 64: 667~719.
- Melcher F, Graupner T, Gäbler H E, Sitnikova M, Oberthür T, Gerdes A, Badanina E, Chudy T. 2017. Mineralogical and chemical evolution of tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and granites. Part 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns. *Ore Geology Reviews*, 89: 946~987.
- Moscatti R J, Neymark L A. 2020. U-Pb geochronology of tin deposits associated with the Cornubian Batholith of southwest England; Direct dating of cassiterite by in situ LA-ICPMS. *Mineralium Deposita*, 55: 1~20.
- Neymark L A, Holm-Denoma C S, Moscatti R J. 2018. In situ LA-ICPMS U-Pb dating of cassiterite without a known-age matrix-matched reference material; Examples from worldwide tin deposits spanning the Proterozoic to the Tertiary. *Chemical Geology*, 483: 410~425.
- Ng S W P, Whitehouse M J, Searle M P, Robb L J, Ghani A A, Chung S L, Oliver, G J H, Sone M, Gardiner N J, Roselee M H. 2015. Petrogenesis of Malaysian granitoids in the Southeast Asian tin belt; Part 2. U-Pb zircon geochronology and tectonic model. *Geological Society of America Bulletin*, 127: 1238~1258.
- Pedrosa-Soares A C, De Campos C P, Noce C, Silva LC, Novo T, Roncato J, Medeiros S, Castañeda C, Queiroga G, Dantas E Dussin I, Alkmim F. 2011. Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geological Society, London, Special Publications*, 350(1): 25~51.
- Qiu K F, Yu H C, Wu M Q, Geng J, Ge X K, Gou Z Y, Taylor R D. 2019. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China. *American Mineralogist*, 104: 1487~1502.
- Rogers J J W, Santosh M. 2003. Supercontinents in earth history. *Gondwana Research*, 6: 357~368.
- Romer R L, Kroner U. 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-Tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting. *Gondwana Research*, 31: 60~95.
- Rubin A E, Ma C. 2017. Meteoritic minerals and their origins. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 77: 325~385.
- Rudnick R L, Gao S. 2004. Composition of the continental crust. In: *Treatise on Geochemistry* (Rudnick, R. L., Holland, H. D. and Turekian, K. K., eds.), 3: 1~64.
- Schwartz M O, Rajah S S, Askury A K, Putthapiban P. 1995. The Southeast-Asian tin belt. *Earth-Science Reviews*, 38: 95~286.
- Sheard E R, Williams-Jones A E, Heiligman M, Pederson C, Trueman D. 2012. Controls on the concentration of zirconium, niobium, and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology*, 107: 81~104.
- Simandl G J. 2015. Carbonatites and related exploration targets. In: Simandl, G. J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13~14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 3~37.
- Simandl G J, Burt R O, Trueman D L, Paradis S. 2018. Tantalum and niobium: Deposits, resources, exploration methods and market-A primer for Geoscientists. *Geosciences Canada*, 45: 85~96.
- Simmons W, Faster A, Webber K, Roda-Robles E, Boudreaux A P, Grassi L A, Freeman G. 2016. Bulk composition of Mt.

- Mica pegmatite, Maine, USA: Implications for the origin of an LCT type pegmatite by anataxis. *Canadian Mineralogist*, 54: 1053~1070.
- Stilling A, Černý P, Vanstone P J. 2006. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XVI. Zonal and bulk compositions and their petroge-netic significance. *Canadian Mineralogist*, 44: 599~623.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins* (Saunders, A. D., and Norry, M. J., eds.), Geological Society, London, Special Publication, 42: 313~345.
- Woolley A, Kjarsgaard B A. 2008. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundance of associated silicate rocks: Evidence from global database. *Canadian Mineralogist*, 46: 741~752.
- Wu B, Wang R C, Yang J H, Wu F Y, Zhang W L., Gu X P, Zhang A C. 2016. Zr and REE mineralization in sodic lujavrite from the Saima alkaline complex, northeastern China: a mineralogical study and comparison with potassic rocks. *Lithos*, 262: 232~246.
- Wu M Q, Sanson I M, Zhang D H. 2018. Textural features and chemical evolution in Ta-Nb oxides: Implications for deuteric rare-metal mineralization in the Yichun granite-marginal pegmatite, Southeastern China. *Economic Geology*, 113: 937~960.
- Xiang L, Wang R C, Erdmann S, Sizaret S, Lu J J, Zhang W L, Xie L, Che X D, Zhang R Q. 2018. Neoproterozoic mineralization in a hydrothermal cassiterite-sulfide deposit at Jiumao, northern Guangxi, South China: Mineral-scale constraints on metal origins and ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 94: 172~192.
- Xiang L, Wang R C, Romer R L, Che X D, Hu H, Xie L, Tian E L. 2020. Neoproterozoic Nb-Ta-W-Sn bearing tourmaline leucogranite in the western part of Jiangnan Orogen: Implications for episodic mineralization in South China. *Lithos*, 360~361, DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105450.
- Xie L, Tao X Y, Wang R C, Wu F Y, Liu C, Liu X C, Li X K, Zhang R Q. 2020. Highly fractionated leucogranites in the eastern Himalayan Cuonadong dome and related magmatic Be-Nb-Ta and hydrothermal Be-W-Sn mineralization. *Lithos*, 35~355, DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105286.
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, Wang M, Wei X P, Li P, Zhang R Q, Li C Y, Liu J J. 2016. 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 Geology Reviews*, 100: 561~573.
- Yang K F, Fan H R, Pirajno F, Li X C. 2019. The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite. *Geology*, 47: 1198~1202.
- Yang W B, Niu H C, Li N B, Hollins P, Zurevinski S, Xing C M. 2020. Enrichment of REE and HFSE during the magmatic-hydrothermal evolution of the Baerzhe alkaline granite, NE China: Implications for rare metal mineralization. *Lithos*, DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105411.
- Yin L, Pollard P J, Hu S X, Taylor R G. 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, 90: 577~585.
- Zhai M G, Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24: 275~297.
- Zhai M G, Zhu X Y, Zhou Y Y, Zhao L, Zhou L G. 2020. Continental crustal evolution and synchronous metallogeny through time in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104169.
- Zhang R Q, Lehmann B, Seltmann R, Sun W D, Li C Y. 2017. Cassiterite U-Pb geochronology constrains magmatic-hydrothermal evolution in complex evolved granite systems: The classic Erzgebirge tin province (Saxony and Bohemia). *Geology*, 45: 1095~1098.
- Zhang S T, Zhang R Q, Lu J J, Ma D S, Ding T, Gao S Y, Zhang Q. 2019. Neoproterozoic tin mineralization in South China: Geology and cassiterite U-Pb age of the Baotan tin deposit in northern Guangxi. *Mineralium Deposita*, 54: 1125~1142.
- Zhou Q F, Qin K Z, Tang D M, Wang CL, Asamoah S P. 2018. LA-ICP-MS U-Pb zircon, columbite-tantalite and ⁴⁰Ar-³⁹Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China. *Geological Magazine*, 155: 707~728.
- Zhu Z Y, Wang R C, Marignac C, Cuney M, Mercadier J, Che X D, Lespinasse M-Y. 2018. A new style of rare metal granite with Nb-rich mica: The Early Cretaceous Huangshan rare-metal granite suite, northeast Jiangxi Province, southeast China. *American Mineralogist*, 103: 1530~1544.

参 考 文 献

- 矿产资源工业要求手册编委会. 2010. 矿产资源工业要求手册. 北京:地质出版社, 830.
- 郭春丽,王登红,陈毓川,赵支刚,王彦斌,付小方,傅德明. 2007. 川西新元古代花岗岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究:岩石成因与构造意义. *岩石学报*, 23 (10):2457~2470.
- 蒋少涌,赵葵东,姜海,苏慧敏,熊索菲,熊伊曲,徐耀明,章伟,朱律运. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. *科学通报*, 65(33):3730~3745.
- 李三忠,余珊,赵淑娟,张国伟,刘鑫,曹花花,许立青,戴黎明,李涛. 2014. 超大陆与全球板块重建派别. *海洋地质与第四纪地质*, 34: 97~117.
- 刘进先,陈浩文,刘兴畅,王高,李超,张继高. 2015. 江西修水花山洞钨矿床同位素年代学研究及其意义. *资源调查与环境*, 36 (1):1~9.
- 陆松年. 2010. 超大陆的形成、解体与演化. 见:10000 个科学难题—地球科学篇,科学出版社.
- 毛景文,吴胜华,宋世伟,戴盼,谢桂青,苏蔷薇,刘鹏,王先广,余忠珍,陈祥云,唐维新. 2020. 江南世界级钨矿带:地质特征、成矿规律和矿床模型. *科学通报*, 65(33):3746~3762.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,张作衡,王义天,王志良,赵财胜,杨富全,李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究:历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用. *矿床地质*, 193~205.
- 王汾连,赵太平,王焰. 2015. 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*, 31: 1797-1805. 王汝成,车旭东,郭斌,谢磊. 2020. 中国铌钽锆铅资源. *科学通报*, 65(33):3763~3777.
- 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*, 47:871~880.
- 王汝成,谢磊,诸泽颖,胡欢. 2019. 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*, 35:69~75.
- 舒良树,王博. 2019. 巨型花岗岩带与大陆聚合—裂解作用成因联系研究进展. *高校地质学报*, 25: 161~181.
- 许志琴,李廷栋,杨经绥,嵇少丞,王宗起,张泽明. 2008. 大陆动力学的过去、现在核未来——理论核应用. *岩石学报*, 24:1433~1444.
- 许志琴,王汝成,赵中宝,付小方. 2017. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景. *地质学报*, 92:1091~1106.
- 翟明国. 2015. 大陆动力学的物质演化研究方向与思路. *地球科学与环境学报*, 37: 1~14.
- 翟明国,张旗,陈国能,王汝成. 2016. 大陆演化与花岗岩研究的变革. *科学通报*, 61:1414~1420.
- 赵国春,孙敏, Wilde S A. 2002. 早-中元古代 Columbia 超级大陆研究进展. *科学通报*, 47: 1361~1364.

Global tempo-spatial distribution of rare-metal mineralization
and continental evolution

WANG Rucheng^{*1)}, WU Bin²⁾, XIE Lei¹⁾, CHE Xudong¹⁾, XIANG Lu¹⁾, LIU Chen¹⁾

1) School of Earth Science and Engineering, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing, 210023;

2) East China University of Technology, State Key Lab of Nuclear Resources & Environment, Nanchang, 330013

** Corresponding author: rcwang@nju.edu.cn*

Abstract

Granites constitute as major and typical components the continental crust. Making the significant rare-metal enrichments and consequently tempo-spatially wide mineralization, granite-forming processes construct the continental metallogenic system. Granite-related rare-metal mineralization certainly originating from continental evolution is thus logically characterized into the continental metallogeny. Granitic pegmatites are considered the most important sources for lithium, beryllium and tantalum, meanwhile alkaline rocks (including granites, pegmatites and carbonatites) mostly contributed to niobium and zirconium mineralization. Based on compiled geochronological data, global distribution ages of rare-metal mineralization span mainly in Archean (3.0~2.6 Ga), Paleoproterozoic (~1.8 Ga), Neoproterozoic (1.0~0.9 Ga), Paleozoic (450~400 Ma), early Mesozoic (250~200 Ma), late Mesozoic (160~130 Ma) and Miocene in Cenozoic (35~10 Ma), directly linking supercontinental cycling events and synchronous rare-metal mineralization. The earliest rare-metal mineralization was recorded in Ur-Kenorland supercontinent, forming important lithium-cesium-tantalum-type pegmatite provinces particularly in northern America, southern Africa and western Australia. Other dominant metallogenic events successively correspond to assembly-breakup of Columbia, Rodinia, Gondwana and Pangea continents, and most likely ended during the Cenozoic collision between India-Asia blocks. Interestingly, rare metals display co-evolution between minerals and mineralization, as the case of the first record of spodumene, elbaite, beryl and columbite-tantalite in Archean (3.0~2.6 Ga).

Key words: rare-metal mineralization; pegmatites; alkaline rocks; supercontinents; rare-metal minerals