

与 REE-HFSE 成矿有关的碱性岩浆系统

周金胜^{1,2}, 李五福³, 王强^{1,2,4}, 王秉璋³, 王涛³, 马林^{1,2}

1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院 深地科学卓越创新中心, 广州 510640; 3. 青海省地质调查院, 西宁 810012; 4. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要:碱性岩是自然界中分布极少的一类岩石,其起源于富集地幔并与稀有金属矿床伴生,因此是揭示深地物质组成和过程难得的理想研究对象。本文介绍了一些涉及碱性岩的相关概念,着重介绍了与稀有金属(REE-HFSE)成矿最为密切的阿格帕质岩和麦斯克质岩;简要阐述了与成矿相关碱性岩浆的起源、结晶条件和岩浆性质、岩浆动力学过程以及伴生的碳酸岩;列举了一些与碱性岩有关的 HFSE-REE 矿床的矿物学特征、成矿岩浆过程及岩浆性质,着重介绍了碱性岩(包括碳酸岩)侵入体周围的霓长岩化作用,包括其岩石学特征、规模、空间分带性以及 REE-HFSE 元素的行为等,以期为这类矿床的勘探工作提供一定的启示。最后就一些碱性岩与 REE-HFSE 成矿方面值得重视的科学问题提出建议。

关键词:碱性岩;碳酸岩;岩浆分层;稀有金属;霓长岩化;阿格帕质岩

中图分类号:P588.15 文章编号:1007-2802(2023)05-1101-13 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.110

Alkaline magma system related to the REE-HFSE mineralization

ZHOU Jin-sheng^{1,2}, LI Wu-fu³, WANG Qiang^{1,2,4}, WANG Bing-zhang³, WANG Tao³, MA Lin^{1,2}

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Center for Excellence in Deep Earth Science, Guangzhou 510640, China;

3. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China;

4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The alkaline rock is a kind of rock which is rarely distributed in nature. It was originated from the enriched mantle and is associated with rare metal deposits. Thus it is an irreplaceable and ideal research object for revealing material composition and process of the deep Earth. In this paper, we have introduced some relevant concepts to alkaline rocks, especially the Agpaitic and Miaskitic rocks that are most closely related to the rare metals (REE-HFSE) mineralization, have briefly described the origin, crystallization conditions and properties, dynamic processes of alkaline magmas related to mineralization and significance of their associated carbonatites, have enumerated mineralogical characteristics of some HFSE-REE deposits related to alkaline rocks and the processes and properties of alkaline magmas associated with the mineralization, have emphatically introduced the fenitization around alkaline rock (including carbonatite) intrusions and its petrological characteristics, scale, spatial zonation and behavior of REE-HFSE elements in order to provide some enlightenment for the exploration of such kind of deposits, and have finally proposed some noteworthy recommendations on scientific issues in association with alkaline rocks and the REE-HFSE mineralization.

Key words: alkaline rock; carbonatite; magmatic layering; rare metal; fenitization; Agpaitic rock

0 引言

碱性岩在自然界中分布极少,出露面积在所有岩浆岩中占比不超过 1%。然而,碱性岩却有着与其分布比例不相称的非常高的关注度,其原因主要

包括:①碱性岩浆独特的化学组成导致其能够结晶出在常见岩浆中无法形成的矿物种属,因而是矿物学研究的天然宝库,例如位于俄罗斯西北部科拉半岛的 Khibina 和 Lovozero 碱性杂岩体,产出有 500 余种矿物,同时也是 100 多种新矿物的发现地 (Arza-

收稿编号:2023-118,2023-5-31 收到,2023-9-1 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42021002);中国科学院广州地球化学研究所“涂光炽优秀青年学者计划”项目(TGC202202)

第一作者简介:周金胜(1989—),男,博士,副研究员,研究方向:岩浆动力学及成矿效应。E-mail: jinshengzhou@gig.ac.cn.

mastsev et al., 2008); ②基性-超基性碱性岩常常具有富集的元素和同位素特征,记录了地幔富集和地幔演化的关键信息,因而是地幔动力学研究的理想对象(Hirschmann et al., 2003; Pilet et al., 2008); ③碱性岩富集的岩浆源区和独特的岩浆演化过程,使得部分稀有金属元素(REE-HFSE)能够高度富集,形成罕见的稀有金属矿床,例如大量的 REE、Nb、Ta、Zr、Hf、U 等矿床均与碱性岩有关(赵振华和周玲棣, 1994; Beard et al., 2023)。这些稀有金属大多是我国目前十分紧缺的战略性矿产资源,对外依存度很高,如 Nb 的对外依存度接近 100%、Ta 为 91%、Zr 为 84% 等(Gulley et al., 2018; 王汝成等, 2020)。因此,重视和加强对碱性岩石(尤其是阿格帕质岩和碳酸岩)的研究,不仅对揭示深地物质组成和过程具有科学意义,也是保障国家战略性矿产资源安全的紧迫需要。

1 碱性岩浆系统

1.1 碱性岩的定义和重要类型

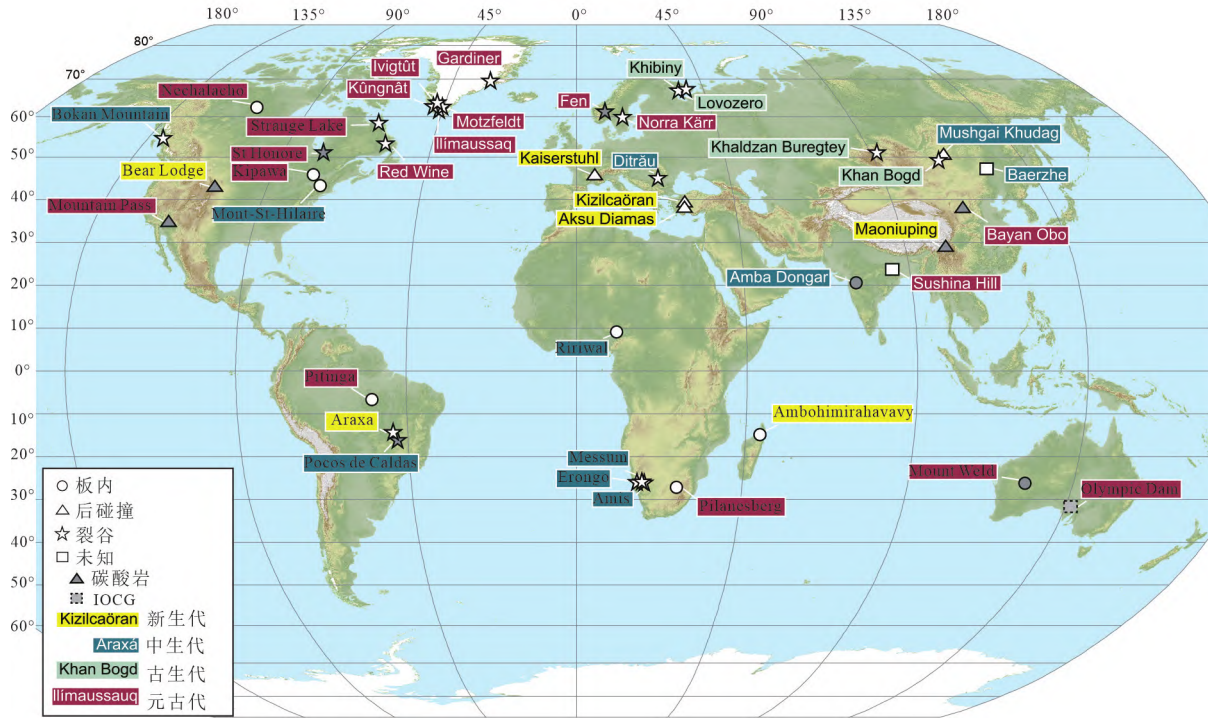
碱性岩尽管是一个被大家熟知的名词,然而对其确切的定义却有着不同的方式,也存在各式各样的定义方案。大致而言,分类依据主要包括岩石主量元素成分和矿物组成两种,前者根据岩石全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)对二氧化硅(SiO_2)图解(即 TAS 图解),位于分界线之上的均可以称为碱性岩(Le Maitre et al., 2002),该方案理解起来较为简单,应用也最广。第二种方案则是依据岩石的矿物组成,然而这种方案却有着一个认识演变的过程。最早对碱性岩的认识是岩石中含有过多的碱,超过了长石类矿物所能容纳的最大量,多余的碱则会形成似长石类矿物或碱性镁铁质矿物,同时似长石又无法与石英共生,因而存在似长石和碱性镁铁质矿物以及缺少石英就成为定义碱性岩的关键矿物学标志,即 QAPF 图解(Q 为石英, P 为斜长石, A 为碱性长石, F 为似长石)中的下半部(Le Maitre et al., 2002),这也是狭义的碱性岩定义,而且这一定义依然被很多教科书沿用(徐夕生和邱检生, 2010)。这里需要特别说明的是,上述 TAS 图解限定的碱性岩比狭义的碱性岩范围宽得多, TAS 图解限定的碱性岩可以延伸至酸性端元,即存在碱性花岗岩;而在狭义的碱性岩定义中,由于强调硅不饱和的内涵,因而不存在碱性酸性岩的概念,演化程度最高的碱性岩为正长岩或响岩。另外,根据化学成分(TAS 图解)确定的碱性岩,如果全岩的($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) > Al_2O_3 (分子量),则称为过碱性岩(peralkaline rocks)。过碱性

岩在很多文献中常常被认为是下文中提到的阿格帕质岩的同义词,然而,二者并非等同(Le Maitre et al., 2002)。

碱性岩有众多种属,这里重点介绍两个与稀有金属成矿密切相关的岩石学概念:阿格帕质岩(Agpaitic rocks)和麦斯克质岩(Miaskitic rocks)。之所以介绍这两个概念,是因为这两类岩石,尤其是阿格帕质岩,都与很多大型的稀有金属矿床伴生(Sørensen, 1992; Marks and Markl, 2017),具有十分重要的成矿专属性。阿格帕质岩较为少见,作为岩体主要组成的情况较少(例如 Ilímaussaq、Khibina 和 Lovozero 岩体),更多的则是零星出现在更为常见的麦斯克质杂岩体中,且阿格帕质岩的侵位时代更年轻(Schönenberger and Markl, 2008),有研究表明两类岩石都可能构成岩浆演化关系(Schönenberger and Markl, 2008; Andersen et al., 2017)。传统的定义中,这两类岩石均指霞石正长岩,区别在于含高场强元素(HFSE, 包括 Nb、Ta、Zr、Hf、P、U、Th 等)的矿物不同:对于阿格帕质岩, HFSE 主要赋存在异性石、层硅铈钛矿等矿物中;而麦斯克岩中, HFSE 则主要赋存在锆石、榍石、钛铁矿等矿物中。最近,也有学者建议,应该扩大这两类岩石概念所包括的岩石类型范围,而不仅仅局限于霞石正长岩,即阿格帕质岩是指所含原始岩浆结晶的含高场强元素矿物主要为复杂的 Na-Ca-HFSE 矿物(例如异性石、层硅铈钛矿,以及铈钠石、钠铁非石、星叶石、钠锆石、硅钾锆石、斜钠锆石、三水钠锆石、闪叶石、硅钠钛矿、基性异性石、硅钠锆石、钾钙板锆石)的一类岩浆岩;而在麦斯克质岩中,赋存 HFSE 的矿物则主要为锆石/斜锆石、榍石/钙钛矿等(Marks and Markl, 2017)。在与碱性岩直接相关的稀有金属矿床中(例如 REE、Nb、Zr 等),大部分的成矿岩石均为阿格帕质岩或与其伴生的岩石,著名的矿床实例包括俄罗斯科拉半岛的 Khibiny 和 Lovozero 矿床(Arzamastsev et al., 2008),格陵兰南部的 Ilímaussaq 矿床(Marks and Markl, 2015),加拿大西北部的 Nechalacho 矿床(Möller and Williams-Jones, 2016a, 2016b)等(图 1)。

1.2 镁铁质碱性岩浆的起源

类似于亚碱性系列,长英质碱性岩浆可能存在结晶分异、地壳熔融等多种成因,较为复杂,这里重点介绍地幔起源的镁铁质碱性岩浆。由于富集的同位素和微量元素地球化学特征,大部分镁铁质碱性岩浆均被认为来自于富集地幔源区(Foley, 1992; Hirschmann et al., 2003; Kogiso et al., 2003; Pilet et



据 Beard 等(2023)修改

图 1 全球典型的与碱性岩-碳酸岩相关的 HFSE-REE 矿床

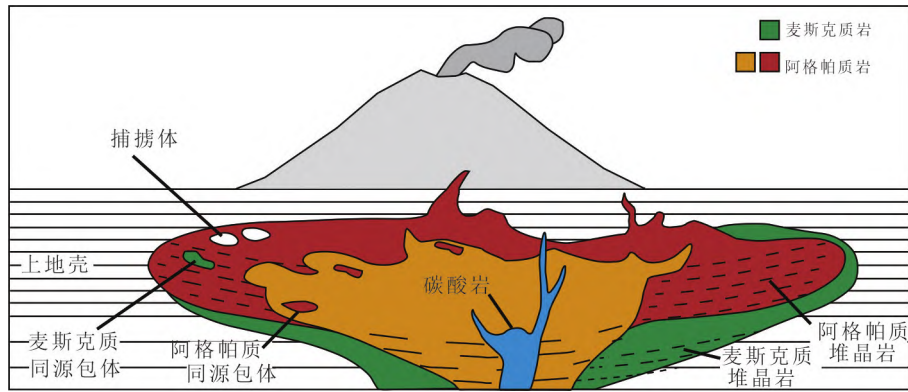
Fig. 1 Global typical HFSE-REE deposits related to alkaline rocks-carbonatites

al., 2008), 不确定的是富集位置到底是在软流圈地幔中还是在岩石圈地幔中(Kogarko et al., 2010; Upton et al., 2003)。关于镁铁质碱性(又分为钠质和钾质)岩浆地幔源区的研究非常多(Zhou et al., 2022), 这里重点关注与稀有金属成矿相关的碱性杂岩体。这类岩石极端富集卤素、HFSE、REE 和其他稀有元素, 这很难由常见的地幔岩石经历低程度部分熔融以及随后的结晶分异形成, 因此, 目前普遍认为形成极度富饶的镁铁质碱性岩浆, 需要对这些元素在地幔源区进行交代预富集(Upton and Emeleus, 1987; Arzamastsev et al., 2001; Goodenough et al., 2002; Upton et al., 2003; Hou et al., 2015b)。例如, 著名的格陵兰南部 Ilímaussaq 碱性杂岩体, 其初始岩浆被认为是来自于被之前俯冲物质交代过的岩石圈地幔(Upton and Emeleus, 1987; Goodenough et al., 2002; Halama et al., 2003; Upton et al., 2003; Köhler et al., 2009; Hutchison et al., 2019, 2021)。这些交代过的地幔岩石可能为含金云母、角闪石、磷灰石以及碳酸盐的石榴子石或尖晶石二辉橄榄岩(Upton and Emeleus, 1987; Upton, 1991; Paslick et al., 1995; Arzamastsev et al., 2001; Marks et al., 2008; Köhler et al., 2009; Melluso et al., 2016)。值得注意的是, 全球约四分之三的碳酸岩

均与碱性岩共生(Yaxley et al., 2022), 很多与碱性岩相关的稀有金属矿床中也可见到碳酸岩(Arzamastsev et al., 2008), 说明含碳物质(CO₂、石墨或其他)与稀有金属在地幔源区的预富集有着某种可能的成因关联。

1.3 岩浆的结晶条件和性质

目前很多观点认为, 碱性杂岩体中不同的岩相单元均来自于同一岩浆源区, 而且部分不同成分的岩石(例如阿格帕质岩和麦斯麦克质岩)可能构成岩浆演化关系(Schönenberger and Markl, 2008; Andersen et al., 2017)。一般而言, 镁铁质岩浆更容易驻留在中下地壳, 然而, 与稀有金属成矿有关的镁铁质碱性杂岩体却有着非常浅的就位深度(<5 km; Marks and Markl, 2017; 图 2), 例如格陵兰南部的 Ilímaussaq 碱性杂岩体的流体包裹体约束的侵位深度约为 100 MPa, 相当于 3~4 km 的古深度(Konnerup-Madsen and Rose-Hansen, 1984)。部分碱性杂岩体则具有较深的侵位深度, 例如加拿大的 Nechalacho 矿床, 阿格帕质岩的侵位深度约为 400 MPa(Möller and Williams-Jones, 2016a, 2016b)。碱性杂岩体中的部分矿物可以从较深的地方开始结晶, 例如浅成就位的 Ilímaussaq 岩体中的方钠石, 其流体包裹体约束的结晶深度为 300~400 MPa, 对应



据 Marks 和 Markl(2017) 修改

图 2 典型富 HFSE-REE 的碱性岩浆系统(浅部)剖面图

Fig. 2 Profile of a typical HFSE-REE-rich alkaline magma system

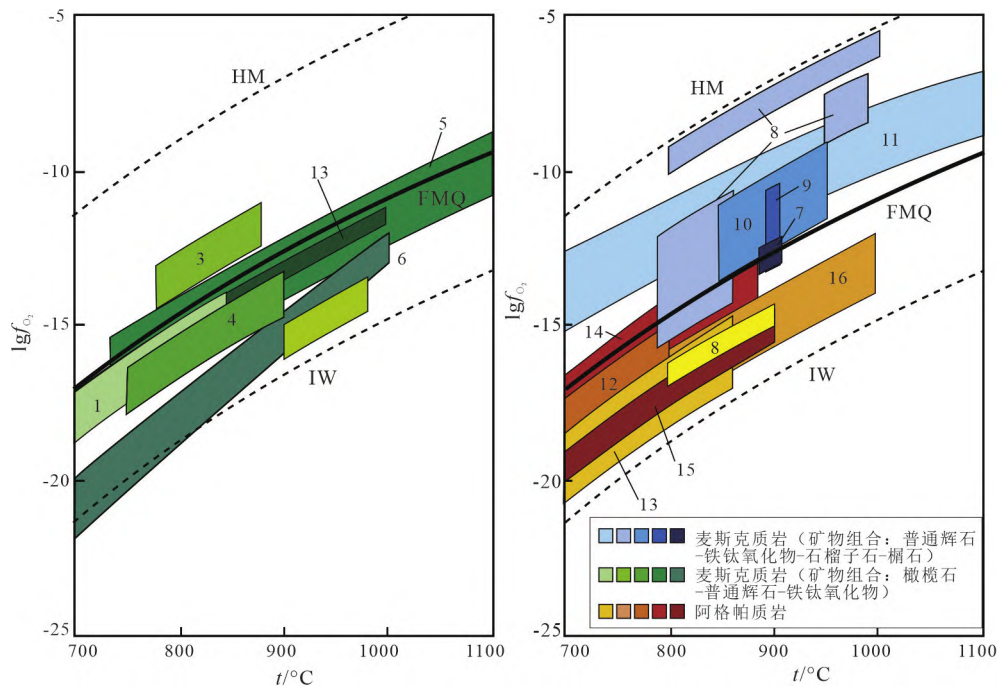
10~12 km 的结晶深度 (Markl et al., 2001; Krumrei et al., 2007)。另外,对喷出地表的阿格帕质火山岩的岩浆系统重建表明,岩浆的结晶分异在约 40 km 深处就已经开始 (Braunger et al., 2021),这意味着与稀有金属成矿相关的碱性岩浆系统,可能具有与亚碱性岩浆类似的穿地壳岩浆通道系统 (Zhou et al., 2020)。与稀有金属成矿相关的碱性杂岩体具有较宽的结晶范围,例如格陵兰南部的 Ilímaussaq 岩体的结晶温度从 1000 °C 以上持续到低于 500 °C (Markl et al., 2001), Motzfeldt 岩体从 ~850 °C 持续到 500 °C (Schönenberger and Markl, 2008),加拿大的 Nechalacho 杂岩体的固结温度为 ~900 °C 到低于 500 °C (Möller and Williams-Jones, 2016a)。这些岩体均显示碱性岩浆的固相线温度可以低至 500 °C,反映了独特的化学组成对岩浆固相线的显著影响,可能与碳酸岩组分有关 (Weidendorfer et al., 2017)。另外,在碱性杂岩体固结过程中,部分矿物呈现出过冷结晶的特征,例如 Ilímaussaq 岩体中异性石呈现明显的扇形分带 (Borst et al., 2018),类似于喷出相碱性火山岩 (Zhou et al., 2021)。

对于与稀有金属成矿有关的碱性岩浆系统,氧逸度(f_{O_2})是一个非常重要的物理化学参数,作为一个强度变量其可能对岩浆成分演化的方向以及关键成矿物质的迁移和富集有着重要影响 (Marks and Markl, 2017)。对于亚碱性岩浆,当岩浆具有比较高的氧逸度(氧化性岩浆)时,磁铁矿会先结晶,导致熔体向 TFeO 亏损和 SiO₂ 富集的方向演化;而当岩浆具有比较低的氧逸度(还原性岩浆)时,磁铁矿的结晶会受到抑制,加上橄榄石的分异,会导致熔体向着 TFeO 富集和 SiO₂ 亏损的方向演化。碱性岩浆同样具有类似的两个演化序列,即要么朝着深色富

铁和硅不饱和的方向演化,要么向淡色的贫铁的趨勢分异。前者具有低的氧逸度(FMQ 缓冲体系之下)和水含量,早期结晶的矿物组合为橄榄石-普通辉石-铁钛氧化物,且为富 Fe 的橄榄石和富钛铁尖晶石的磁铁矿(或者钛铁矿) (Marks et al., 2001; Schilling et al., 2011a, 2011b);而后者则具有相对较高的氧逸度(FMQ 缓冲体系之上),早期结晶的矿物组合为普通辉石-铁钛氧化物-石榴子石(以及榴石),石榴子石一般为钙铁榴石或钛榴石,磁铁矿一般具有贫 Ti 特征 (Marks et al., 2008; Zaitsev et al., 2012)。与稀有金属成矿相关的碱性岩大都具有较为还原的特征(图 3),例如 Ilímaussaq 岩体,结晶过程中岩浆的氧逸度从 FMQ-1 下降到 FMQ-4 (Markl et al., 2001),邻近的 Motzfeldt 岩体的氧逸度为 FMQ - 0.5 ~ FMQ - 2 (Schönenberger and Markl, 2008)。因此,部分学者主张,岩浆还原性的特征是导致碱性岩形成 HFSE 和 REE 矿床的决定性因素之一,因为低的氧逸度和水含量会导致岩浆 Fe 的富集和碱度的增加,并抑制岩浆中卤素的丢失,从而导致残余熔体中这些稀有金属的超常富集 (Marks and Markl, 2017)。然而,对加拿大 Nechalacho 岩体的研究表明,该岩体结晶过程中氧逸度的变化范围为 FMQ+0.2~FMQ+1.3,具有偏氧化的特征 (Möller and Williams-Jones, 2016a)。因此,岩浆氧逸度与碱性岩稀有金属成矿之间的关系,还有待进一步探究。另外,碱性岩浆结晶的最晚期以及热液阶段,氧逸度可能会出现明显升高 (Marks and Markl, 2015; Möller and Williams-Jones, 2016a)。

1.4 岩浆动力学过程

类似于基性的亚碱性岩浆,镁铁质碱性岩体内同样可以发生一系列的岩浆过程,例如晶体的沉降



据 Marks 和 Markl(2017) 修改

HM 为赤铁矿-磁铁矿缓冲体系;FMQ 为铁橄榄石-磁铁矿-石英缓冲体系;IW 为铁-方铁矿缓冲体系;

数字代表全球范围内不同的碱性杂岩体

图 3 碱性岩浆系统结晶的氧逸度范围

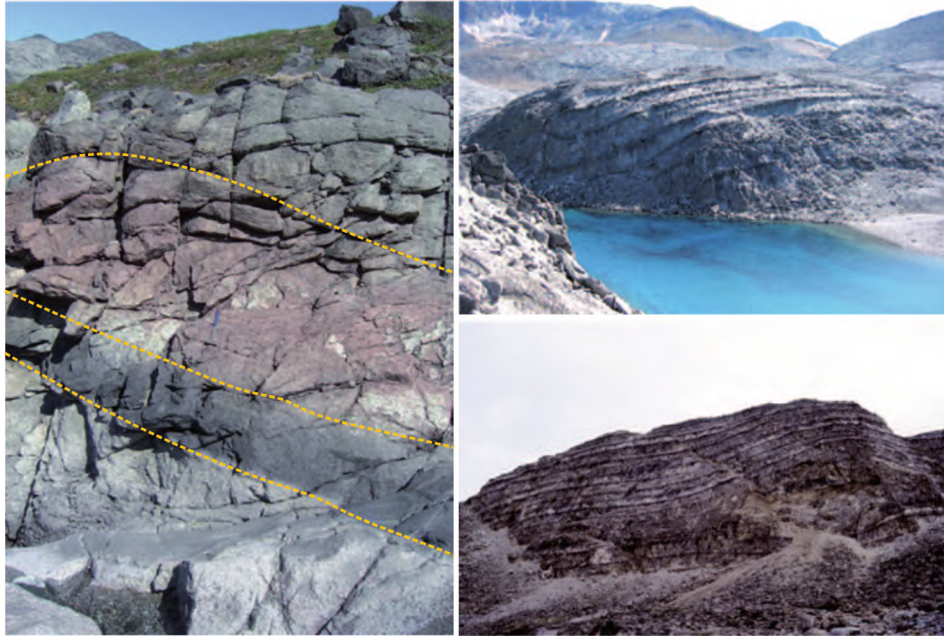
Fig. 3 Oxygen fugacity ranges for the magmatic crystallization of the alkaline rock system

和堆晶、岩浆对流、晶粥压实、液态不混溶、岩浆混合以及岩浆混染等(周金胜和王强,2022)。由于密度的差异,早期结晶的高密度自形矿物会沉降到岩浆房底部,形成堆晶格架,随后格架间隙中的熔体结晶形成粒间物质,如果粒间物质占堆晶岩的25%~50%,则称之为正堆晶岩,这种情况下堆晶矿物之间以点接触为主;如果粒间物质占堆晶岩的7%~25%,则称作中堆晶岩,堆晶矿物之间以点或线接触;如果粒间物质<7%,则称为补堆晶岩,堆晶矿物之间以线接触为主(Irvine,1982)。然而,这是最为简单的理想情况,实际在很多镁铁质层状岩体中,以镁铁质矿物为主的暗色层与长石或其他浅色矿物较多的浅色层交替出现,形成韵律分层(Namur et al.,2015;Smith and Maier,2021)。

显然,韵律分层很难用单一的晶体沉降过程来解释,这一类似于沉积构造的特殊岩浆现象,再加上部分富含有用金属的层位构成品位极高的含矿层(钟宏等,2007;张招崇,2018;Yao and Mungall,2022),岩浆分层引起了众多岩石学家的浓厚兴趣,提出了很多机制来解释这一分层现象,大体上可以分为动力学过程和非动力学过程两大类(Namur et al.,2015)。动力学分层过程指岩浆房中熔体、晶体和晶粥体的物理运动导致了分层现象的出现,可能

的机制包括液相线矿物的机械沉降和分选(Irvine,1987;Namur et al.,2011;Holness et al.,2012)、岩浆的补给和混合(Hoatson and Keays,1989;Harney et al.,1990;Eales et al.,1990;Karykowski et al.,2017)、岩浆对流(Kogarko and Khapaev,1987;Wilson et al.,1987;Naslund et al.,1991;Holness et al.,2017)、岩浆流动和流动分异(Irvine,1987;Gorring and Naslund,1995;Irvine et al.,1998;Maier et al.,2013)、液态不混溶(McBirney and Nakamura,1974;Namur et al.,2012);非动力学分层过程是由岩浆参数(例如压力、温度、成分、氧逸度、黏度等)的波动或晶粥体中晶体的自组织导致,可能的机制有晶体成核和生长速率的波动(McBirney and Noyes,1979;Brandeis et al.,1984)、奥斯特瓦尔德熟化(Ostwald Ripening;Boudreau and McBirney,1997)等。

对于镁铁质碱性杂岩体,同样可见丰富的韵律分层现象(Upton et al.,1996;Lindhuber et al.,2015;Hunt et al.,2017)。例如Ilímaussaq岩体(图4),几乎所有的岩石类型(包括阿格帕质岩和麦斯克质岩)中都可见韵律分层,但阿格帕质岩中的韵律分层更为显著,例如在阿格帕质的条带霞石正长岩中,韵律单元重复出现了29次,绵延数公里长(Marks and Markl,2017)。类似于亚碱性岩体,该碱



据 Marks 和 Markl (2015) 修改

图 4 格陵兰 Ilímaussaq 碱性杂岩体中的韵律分层

Fig. 4 Rhythmic layering in the Ilímaussaq Alkaline Complex, Greenland

性岩体的韵律分层也存在多种解释,包括多次饱和的岩浆间歇性结晶(Sørensen, 1969)、岩浆房内的对流翻转(Bohse et al., 1971)、多层岩浆房的结晶(Bailey et al., 2006)、周期性的岩浆补给(Pfaff et al., 2008)等。韵律层中的矿物主要为角闪石、异性石和碱性长石,单一韵律单元内的矿物分层可能与三种矿物的密度分选有关(Lindhuber et al., 2015)。

1.5 伴生的碳酸岩

有一类岩石在时间和空间上与碱性岩具有十分密切的联系,那就是碳酸岩。全球约 76% 的碳酸岩与碱性岩共生(Woolley and Kjarsgaard, 2008)。国际地科联(IUGS)推荐的碳酸岩定义为含有大于 50% 摩式含量的岩浆碳酸盐矿物,且全岩 SiO_2 的质量分数要低于 20%(Le Maitre et al., 2002)。然而,这一定义过于严苛,自然界中很多火成碳酸质岩石难以满足这些条件,因而很多学者采用了更为宽泛的定义,即只要体积上含 30% 以上岩浆碳酸盐矿物的岩石均可称为碳酸岩(Mitchell, 2005)。尽管碱性岩和碳酸岩具有亲密的空间关系,但绝大部分的碳酸岩仅出现在大陆岩石圈之上,而碱性岩在大陆和大洋岩石圈之上均可出现(Humphreys-Williams and Zahirovic, 2021)。关于碳酸岩浆的起源,主要存在三种不同的认识(张招崇等, 2022):地幔源区含碳酸盐的橄榄岩或榴辉岩低程度部分熔融形成(Wallace and Green 1988; Yaxley and Brey, 2004);不混溶

硅酸盐和碳酸盐岩浆发生分离形成(Freestone and Hamilton, 1980; Kjarsgaard and Peterson, 1991; Brooker and Kjarsgaard 2011);含碳酸盐的碱性硅酸盐岩浆结晶分异形成(Watkinson and Wyllie, 1971)。液态不混溶的观点最为流行(谢玉玲等, 2020; Kamenetsky et al., 2021),也得到碳酸岩和碱性岩密切的共生关系所支持(Woolley and Kjarsgaard, 2008);然而也有部分碳酸岩的周围缺少碱性岩,且夹带有地幔的包体,表明碳酸岩浆也可能直接来源于地幔(Harmer and Gittins, 1997)。侵入状碳酸岩比喷出状碳酸岩更为常见(Kamenetsky et al., 2021),但侵入状碳酸岩的全岩成分令人费解。很多侵入状碳酸岩的碱含量非常低(平均 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 0.6\% \sim 0.7\%$),然而在全球唯一一个还在活跃的碳酸岩火山(坦桑尼亚 Oldoinyo Lengai 火山),其喷发产物却具有非常高的碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 38\% \sim 41.5\%$)及卤素(高达 4.5% 的 F 和 5.7% 的 Cl)含量(Zaitsev and Keller, 2006),再加上碳酸岩侵入体周围常常发育碱交代的蚀变晕(即霓长岩化)(Elliott et al., 2018),说明大部分碳酸岩侵入体发生过碱丢失。因此有学者指出,侵入状碳酸岩的全岩成分不能代表碳酸岩浆的成分,而是其发生过碱丢失的残余成分或堆晶岩(许成等, 2017; Kamenetsky et al., 2021),初始的碳酸岩浆实际具有更高的碱含量和更低的 Ca 含量。

碳酸岩还以其盛产 LREE 和 Nb 矿床著名,全球绝大部分的 LREE(La、Ce、Pr 和 Nd)和 Nb 矿床均与碳酸岩有关(Van Gosen et al., 2017; Yaxley et al., 2022),然而这些与碳酸岩有关的稀土矿床中 HREE 的含量却微不足道(Anenburg et al., 2021; Yaxley et al., 2022)。至于碳酸岩岩浆中为何如此富集 LREE,目前一个主要观点是碳酸盐-硅酸盐熔体的不混溶,因为在不混溶的碳酸盐-硅酸盐熔体分离时,大部分的 LREE 会进入碳酸岩熔体中,尤其是当硅酸盐熔体具有含水、高度聚合和贫 Ca 的特征(Nabyl et al., 2020)。但这种分配关系在地幔起源的初始碱性熔体——碳酸岩熔体中并不明显,因而只有当碱性岩浆发生了高度的分异,变成响岩质岩浆时,LREE 才会优先分配进入分离出的碳酸岩熔体中(Nabyl et al., 2020),这可能是 REE 矿化的碳酸岩总是与正长岩相关,而很少与基性-超基性的碱性岩相关的原因(Moore et al., 2015; Doroshkevich et al., 2016; Anenburg et al., 2021)。与碳酸岩相关的 Nb 矿床,是全球 Nb 资源的主要来源(Schulz et al., 2017),主要赋存在碳酸岩中的烧绿石中。同样,导致 Nb 富集的可能机制是 Nb 优先进入碱性熔体中分离出的碳酸盐熔体中,或持续的分异贫 Nb 矿物导致残余碳酸盐岩浆高度富 Nb(Yaxley et al., 2022)。

2 相关的 HFSE-REE 成矿

不同于亚碱性镁铁质层状岩体,其常伴生铂族元素(PGE)、Ni、Cu、Co、Cr、V 等金属矿床(Zhou et al., 2005; Mungall and Naldrett, 2008; Godel, 2015; 秦克章等, 2018; 王焰等, 2020; Smith and Maier, 2021; 宋谢炎等, 2022; 苏本勋等, 2023),而碱性杂岩体则主要产出 HFSE、REE、U、Th 以及 P 矿床(Sørensen, 1992; Schöenberger et al., 2008; Hou et al., 2015b; Marks and Markl, 2017; Kogarko, 2018; 王汝成等, 2020; 李五福等, 2022; Beard et al., 2023; 王秉璋等, 2023)。含 REE-HFSE 元素的矿物种类繁多,然而能够被开采利用的只有少数几种。目前全球约 70%~80% 的轻稀土(LREE, 包括 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu)主要来自氟碳铈矿,其次为独居石;而重稀土(HREE, 包括 Gd、Y、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)则主要来自磷钇矿和离子吸附型的黏土。从矿床类型上看,大部分的 LREE 主要产在碳酸岩中,赋存在碳氟化合物(氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、直氟碳钙铈矿)、含水的碳酸盐矿物(碳铈铈矿)和磷酸盐(独居石),尽管更稀少且更昂贵的 HREE 目前主要来

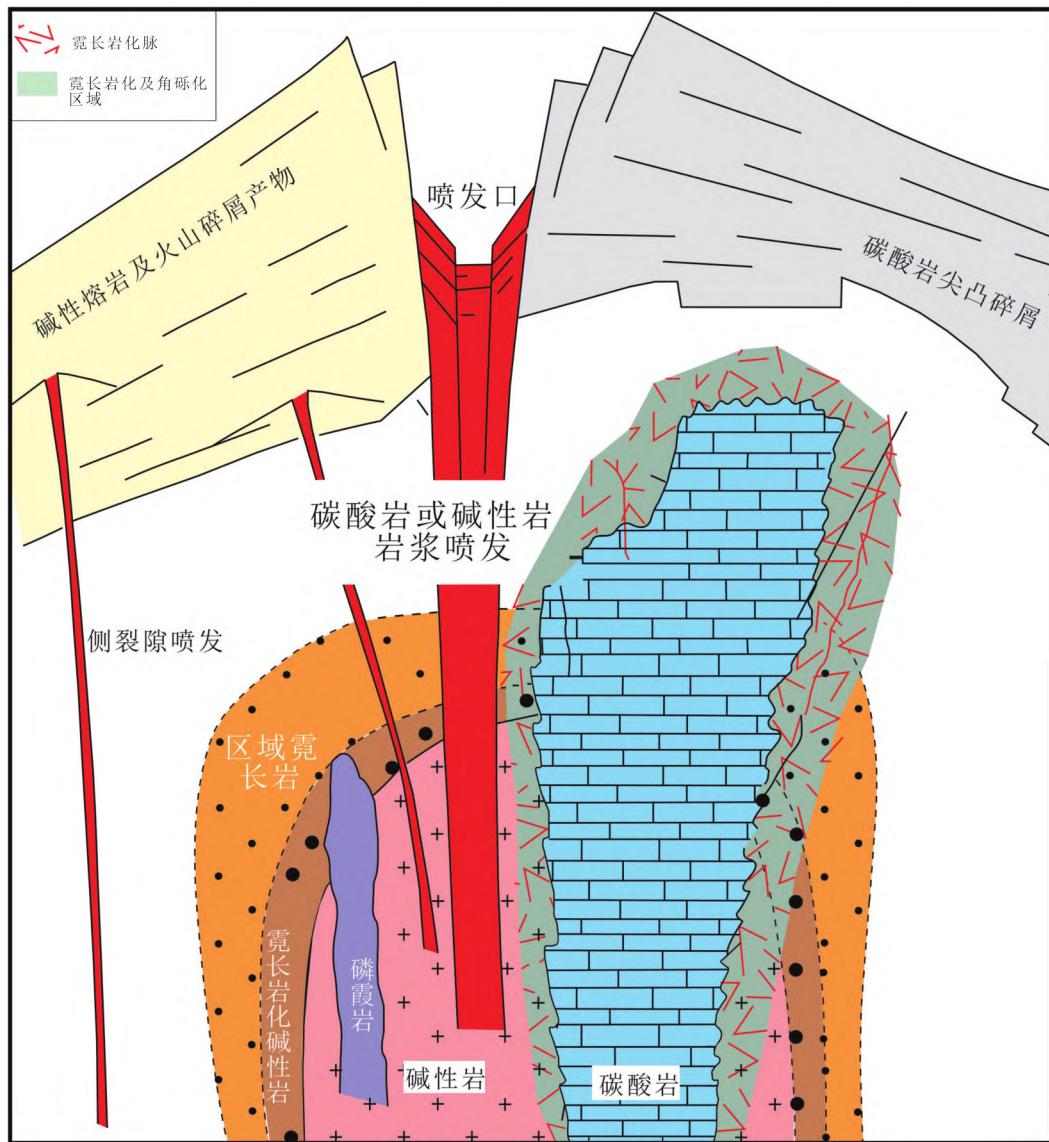
自我国华南离子吸附型的黏土矿床,然而近些年碱性杂岩体也被认为是 HREE 的重要勘探目标(Van Gosen et al., 2017)。在与碱性岩有关的矿床中,REE 主要赋存在氟磷灰石、异性石、菱黑稀土矿、铈铈钙铈矿、磷钇矿、独居石、硅铈钇矿、氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、直氟碳钙铈矿、碳硅铈钙石、层硅铈钇矿、铈硅磷灰石、褐帘石、钽铈矿、红钇石等矿物中。大部分的 Nb 主要来自碱性岩和碳酸岩中的烧绿石族矿物,但与 Nb 地球化学性质极为相似的 Ta 则主要来自含稀有金属伟晶岩和花岗岩中的钽铁矿(Schulz et al., 2017)。全球最大的 Zr 和 Hf 矿床产在俄罗斯的科拉半岛的碱性岩中,主要的含 Zr 矿物为斜锆石、异性石等,其为主要矿石矿物磷灰石和磁铁铁的副产品(Jones III et al., 2017)。

至于碱性岩以及伴生的碳酸岩中为何高度富集 HFSE-REE 等元素,可能受多种因素控制。首先,这些元素在地幔源区的预富集是前提(Arzamastsev et al., 2001; Upton et al., 2003; Hou et al., 2015b; 范宏瑞等, 2020),因为仅仅靠常见地幔岩石的低程度部分熔融和后期的结晶分异,难以实现 HFSE-REE 元素的超常富集(Marks and Markl, 2017)。其次,特殊条件下的结晶分异过程,是 HFSE-REE 元素二次富集的主要机制。这种特殊的条件是指富集地幔源区起源的碱性岩浆,在低的氧逸度和水含量条件下发生结晶分异,这既是阿格帕质岩形成的条件,也是 HFSE-REE 元素的高度富集过程(Markl et al., 2001; Marks and Markl, 2015, 2017)。因为这种情况下的结晶分异过程,会抑制含卤素流体的早期出溶,从而促进残余岩浆中碱和卤素的富集,从而使得 HFSE-REE 等元素在岩浆中具有高的溶解度(Linnen and Keppler, 2002),最终形成极度富集这些元素的中性碱性岩浆(Marks and Markl, 2015)。再有,还需要抑制富含 HFSE-REE 等元素的副矿物在岩浆演化早期结晶(Linnen et al., 2014),例如磷灰石以及榍石,这就要求初始岩浆不能含有过高的 P 含量,这一点可以被俄罗斯科拉半岛的 Khibiny 碱性杂岩体所佐证,该岩体岩浆中含有高达 2% 的 P_2O_5 (Kogarko, 1990),导致该岩体尽管含有大量低品位的赋存在磷灰石中的 REE 资源,但能够被开采利用的主要是 P(Arzamastsev et al., 2008)。碱性岩-碳酸岩有关的 HFSE-REE 矿床的形成,主要受控于岩浆过程,也有实例表明,岩体周围也可以发育一定规模的热液型 HFSE-REE 矿化(Sheard et al., 2012; Estrade et al., 2015; Cheng et al., 2018)。

3 围岩蚀变——霓长岩化

从成矿学和找矿勘探的角度,碱性岩及碳酸岩引起的围岩蚀变具有十分重要的意义。由于碱性岩和碳酸岩的富碱特征,其出溶的流体中同样具有很高的碱含量,这些富碱流体侵入和渗透到围岩中与围岩反应,形成富碱蚀变晕,即霓长岩化(图5;杨学明等,2000;Le Bas,2008;王凯怡,2015;Elliott et al.,2018;刘琰和舒小超,2021)。霓长岩主要由钾长石、钠长石、碱性辉石或碱性角闪石组成(Zharikov et al.,2007),但实际情况中,霓长岩中的矿物组合和比例高度多变,受碱性流体组成以及温度和压力、原岩的矿物组成、渗透性以及结构等因素影响。

在不同的碱性岩和碳酸岩矿床中,霓长岩化晕的范围也不尽相同,如果围岩是花岗质岩石、花岗片麻岩以及变质沉积物,霓长岩化晕的范围就大;而当围岩是石英砂岩或碳酸盐岩时,霓长岩化晕的范围就较小,不同围岩性质导致的霓长岩化晕范围可以从厘米尺度波动到数公里尺度(Elliott et al.,2018)。另外,尽管都可以释放碱性流体,但碳酸岩岩体导致的霓长岩化晕往往比碱性岩体导致的范围更大,前者可以达到数公里的规模,而后者则限于百米尺度内(Arzamastsev et al.,2011)。一般而言,HFSE-REE 元素很难随流体迁移,但碱性岩和碳酸岩出溶的流体含有丰富的络合阴离子(氯、氟、硫、磷、碳酸盐等),这些阴离子与 HFSE-REE 元素



据 Le Bas (1977) 及刘琰和舒小超 (2021)

图5 碱性岩-碳酸岩侵入体周围的霓长岩化晕示意图

Fig. 5 Conceptual model of the fenitization and brecciation associated with alkaline and carbonatitic intrusions

结合形成的络合物,则在流体中具有较高的溶解度,从而促进了其随着流体迁移的能力(Williams-Jones et al., 2012; Tsay et al., 2014)。尽管如此,霓长岩化晕中的 HFSE-REE 矿化规模可能较为有限,据估算,霓长化流体仅可以迁移走其母体碱性岩中 HFSE-REE 元素总量的~12%(Sokół et al., 2022)。然而,霓长岩化流体能够反应其母体碱性岩或碳酸岩的含矿性,因而霓长岩化晕是非常重要的找矿线索(Elliott et al., 2018)。霓长岩具有多种分类方案,从构造和矿物成分上,可以分为脉状霓石-钠长石霓长岩和角砾状正长石霓长岩(Fettes and Desmons, 2007);从化学成分上,可以分为钠质霓长岩和钾质霓长岩,其中钠质霓长岩的典型特征是含有丰富的绿色钠质辉石或角闪石脉(Elliott et al., 2018),钾质霓长岩含有大量的钾长石以及少量的磷灰石、辉石和金红石(Le Bas, 2008)。无论在水平还是垂向空间上,钠质霓长岩和钾质霓长岩具有明显的空间分带性。在水平方向上,靠近碱性岩或碳酸岩岩体的为钾质霓长岩,而远端的为钠质霓长岩(Woolley, 1982)。然而在垂向方向上,钠质霓长岩更多的出现在深部,钾质霓长岩发育在浅部(Le Bas, 1981; Woolley, 1982)。两种霓长岩在水平方向和垂向方向上的分带看似具有矛盾性,这可能是由于水平方向和垂向方向形成霓长岩化的流体并非同一流体批次,例如富钾的流体更容易在浅部出溶,而富钠的流体则在深部出溶(Doroshkevich et al., 2009)。此外,在碱性杂岩体的边缘,晚期的流体与早期结晶的岩浆矿物同样可以发生交代作用,即岩体内部的霓长岩化(Mariano, 1983),这一过程也会导致 REE-HFSE 元素的迁移和富集(邬斌等, 2018; Yang et al., 2023)。总而言之,霓长岩化过程往往伴随着 REE-HFSE 元素的二次迁移,对关键成矿元素的分布有着显著影响;另外,霓长岩化晕的含矿性以及空间分布规律在找矿勘探过程中具有重要的指示意义。

4 结语

碱性岩不仅是揭示深地物质组成和过程的理想研究对象,而且产出大量的稀有金属矿床,尤其是 Nb、Ta、Zr 等金属矿床,是我国十分紧缺的战略性关键矿产资源。在今后的研究中,建议重视如下几个方面的问题:①与 REE-HFSE 成矿相关的幔源碱性岩浆,其地幔源区经历了什么样的富集过程,富集物质从何而来?②与成矿相关的碱性岩浆具有什么样的岩浆性质?岩浆通道系统具有什么样

的结构以及经历了哪些岩浆过程?哪些因素或者过程对关键元素的富集起到了控制作用?③什么因素导致不同碱性岩(包括碳酸岩)成矿元素的差异性?例如碳酸岩相关的矿床更加富集 LREE,而碱性岩相关的更加富集 HREE;④碱性岩以及碳酸岩周围的霓长岩化晕的特征和发育机制以及对勘探的启示。

致谢:感谢王孝磊教授邀请撰写本文,感谢侯通教授和匿名评审人建设性的修改意见和建议。

参考文献 (References):

- Andersen T, Elburg M, Erambert M. 2017. The miaskitic-to-agpaitic transition in peralkaline nepheline syenite (white foyaitite) from the Pilanesberg Complex, South Africa. *Chemical Geology*, 455: 166-181
- Anenburg M, Broom-Fendley S, Chen W. 2021. Formation of rare earth deposits in carbonatites. *Elements*, 17(5): 327-332
- Arzamastsev A, Yakovenchuk V, Pakhomovsky Y, Ivanyuk G. 2008. The Khibina and Lovozero alkaline massifs: Geology and unique mineralization. In: *Proceedings of the 33 IGC Excursion. The Nordic Countries*, 1-58
- Arzamastsev A A, Glaznev V N, Arzamastseva L V, Bea F, Montero P. 2001. Kola alkaline province in the Paleozoic: Evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. *Russian Journal of Earth Sciences*, 3(1): 1-32
- Arzamastsev A A, Arzamastseva L V, Zaraiskii G P. 2011. Contact interaction of agpaitic magmas with basement gneisses: An example of the Khibina and Lovozero Massifs. *Petrology*, 19(2): 109-133
- Bailey J C, Sørensen H, Andersen T, Kogarko L N, Rose-Hansen J. 2006. On the origin of microrhythmic layering in arfvedsonite-lujavrite from the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland. *Lithos*, 91(1-4): 301-318
- Beard C D, Goodenough K M, Borst A M, Wall F, Siegfried P R, Deady E A, Pohl C, Hutchison W, Finch A A, Walter B F, Elliott H A L, Brauch K. 2023. Alkaline-silicate REE-HFSE systems. *Economic Geology*, 118(1): 177-208
- Bohse H, Brooks C K, Kunzendorf H. 1971. Field observations on the kakortokites of the Ilímaussaq intrusion, South Greenland, including mapping and analyses by portable x-ray fluorescence equipment for zirconium and niobium. *Rapp Grønlands Geol Unders*, 38: 43
- Borst A M, Friis H, Nielsen T F D, Waight T E. 2018. Bulk and mush melt evolution in agpaitic intrusions: Insights from compositional zoning in eudialyte, Ilímaussaq Complex, South Greenland. *Journal of Petrology*, 59(4): 589-612
- Boudreau A E, McBirney A R. 1997. The Skaergaard layered series. Part III. Non-dynamic layering. *Journal of Petrology*, 38(8): 1003-1020
- Brandeis G, Jaupart C, Allègre C J. 1984. Nucleation, crystal growth and the thermal regime of cooling magmas. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B12): 10161-10177

- Braunger S, Marks M A W, Wenzel T, Zaitsev A N, Markl G. 2021. The petrology of the tarosero volcanic complex: Constraints on the formation of extrusive apgaitic rocks. *Journal of Petrology*, 62(6): egab015
- Brooker R A, Kjarsgaard B A. 2011. Silicate-carbonate liquid immiscibility and phase relations in the system $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CO}_2$ at 0.1–2.5 GPa with applications to carbonatite genesis. *Journal of Petrology*, 52(7–8): 1281–1305
- Cheng Z G, Zhang Z C, Aibai A, Kong W L, Holtz F. 2018. The role of magmatic and post-magmatic hydrothermal processes on rare-earth element mineralization: A study of the Bachu carbonatites from the Tarim Large Igneous Province, NW China. *Lithos*, 314–315: 71–87
- Doroshkevich A G, Viladkar S G, Ripp G S, Burtseva M V. 2009. Hydrothermal REE mineralization in the Amba Dongar carbonatite complex, Gujarat, India. *The Canadian Mineralogist*, 47(5): 1105–1116
- Doroshkevich A G, Veksler I V, Izbrodin I A, Ripp G S, Khromova E A, Posokhov V F, Travin A V, Vladykin N V. 2016. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia; Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 81–96
- Eales H V, de Klerk W J, Teigler B. 1990. Evidence for magma mixing processes within the Critical and Lower Zones of the northwestern Bushveld Complex, South Africa. *Chemical Geology*, 88(3–4): 261–278
- Elliott H A L, Wall F, Chakhmouradian A R, Siegfried P R, Dahlgren S, Weatherley S, Finch A A, Marks M A W, Dowman E, Deady E. 2018. Fenites associated with carbonatite complexes: a review. *Ore Geology Reviews*, 93: 38–59
- Estrade G, Salvi S, Béziat D, Williams-Jones A E. 2015. The origin of skarn-hosted rare-metal mineralization in the Ambohimirahavavy alkaline complex, Madagascar. *Economic Geology*, 110(6): 1485–1513
- Fettes D, Desmons J. 2007. *Metamorphic rocks: A classification and glossary of terms*. Cambridge: Cambridge University Press
- Foley S. 1992. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: Geochemical and experimental constraints. *Lithos*, 28(3–6): 187–204
- Freestone I C, Hamilton D L. 1980. The role of liquid immiscibility in the genesis of carbonatites—An experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(2): 105–117
- Godel B. 2015. Platinum-group element deposits in layered intrusions: Recent advances in the understanding of the ore forming processes. In: Charlier B, Namur O, Latypov R, Tegner C, eds. *Layered Intrusions*. Dordrecht: Springer, 379–432
- Goodenough K M, Upton B G J, Ellam R M. 2002. Long-term memory of subduction processes in the lithospheric mantle; Evidence from the geochemistry of basic dykes in the Gardar Province of south Greenland. *Journal of the Geological Society*, 159(6): 705–714
- Gorring M L, Naslund H R. 1995. Geochemical reversals within the lower 100 m of the Palisades sill, New Jersey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2–3): 263–276
- Gulley A L, Nassar N T, Xun S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16): 4111–4115
- Halama R, Wenzel T, Upton B G J, Siebel W, Markl G. 2003. A geochemical and Sr-Nd-O isotopic study of the Proterozoic Eriksfjord Basalts, Gardar Province, South Greenland; Reconstruction of an OIB signature in crustally contaminated rift-related basalts. *Mineralogical Magazine*, 67(5): 831–853
- Harmer R E, Gittins J. 1997. The origin of dolomitic carbonatites: Field and experimental constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 25(1): 5–28
- Harney D M W, Merkle R K W, Von Gruenewaldt G. 1990. Plagioclase composition in the upper zone, eastern bushveld complex; Support for magma mixing at the main magnetite layer. *Institute for Geological Research on the Bushveld Complex, University of Pretoria*
- Hirschmann M M, Kogiso T, Baker M B, Stolper E M. 2003. Alkaline magmas generated by partial melting of garnet pyroxenite. *Geology*, 31(6): 481–484
- Hoatson D M, Keays R R. 1989. Formation of platiniferous sulfide horizons by crystal fractionation and magma mixing in the Munni Munni layered intrusion, West Pilbara Block, Western Australia. *Economic Geology*, 84(7): 1775–1804
- Holness M B, Sides R, Prior D J, Cheadle M J, Upton B G J. 2012. The peridotite plugs of Rum; Crystal settling and fabric development in magma conduits. *Lithos*, 134–135: 23–40
- Holness M B, Farr R, Neufeld J A. 2017. Crystal settling and convection in the Shiant Isles Main Sill. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(1): 7
- Hou T, Zhang Z C, Keiding J K, Veksler I V. 2015a. Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the north China Craton; Implications for lithospheric mantle metasomatism and the origin of apatite ores. *Journal of Petrology*, 56(5): 893–918
- Hou Z Q, Liu Y, Tian S H, Yang Z M, Xie Y L. 2015b. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments. *Scientific Reports*, 5(1): 10231
- Humphreys-Williams E R, Zahirovic S. 2021. Carbonatites and global tectonics. *Elements*, 17(5): 339–344
- Hunt E J, Finch A A, Donaldson C H. 2017. Layering in peralkaline magmas, Ilímaussaq complex, S Greenland. *Lithos*, 268–271: 1–15
- Hutchison W, Babiak R J, Finch A A, Marks M A W, Markl G, Boyce A J, Stüeken E E, Friis H, Borst A M, Horsburgh N J. 2019. Sulphur isotopes of alkaline magmas unlock long-term records of crustal recycling on Earth. *Nature Communications*, 10(1): 4208
- Hutchison W, Finch A A, Borst A M, Marks M A W, Upton B G J, Zerkle A L, Stüeken E E, Boyce A J. 2021. Mantle sources and magma evolution in Europe's largest rare earth element belt (Gardar Province, SW Greenland); New insights from sulfur isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117034
- Irvine T N. 1982. Terminology for layered intrusions. *Journal of Petrology*, 23(2): 127–162
- Irvine T N. 1987. Layering and related structures in the Duke Island and Skaergaard intrusions: Similarities, differences, and origins. In: Parsons D, ed. *Origins of Igneous Layering*. Dordrecht: Springer,

185–245

- Irvine T N, Andersen J C Ø, Brooks C K. 1998. Included blocks (and blocks within blocks) in the Skaergaard intrusion: Geologic relations and the origins of rhythmic modally graded layers. *GSA Bulletin*, 110(11): 1398–1447
- Jones III J V, Piatak N M, Bedinger G M. 2017. Zirconium and hafnium. Reston; U. S. Geological Survey
- Kamenetsky V S, Doroshkevich A G, Elliott H A L, Zaitsev A N. 2021. Carbonatites: Contrasting, complex, and controversial. *Elements*, 17(5): 307–314
- Karykowski B T, Yang S H, Maier W D, Lahaye Y, Lissenberg C J, O'Brien H. 2017. *In situ* Sr isotope compositions of plagioclase from a complete stratigraphic profile of the Bushveld complex, South Africa: Evidence for extensive magma mixing and percolation. *Journal of Petrology*, 58(11): 2285–2308
- Kjarsgaard B, Peterson T. 1991. Nephelinite-carbonatite liquid immiscibility at Shombole volcano, East Africa: Petrographic and experimental evidence. *Mineralogy and Petrology*, 43(4): 293–314
- Kogarko L. 2018. Chemical composition and petrogenetic implications of apatite in the Khibiny apatite-nephelinite deposits (Kola Peninsula). *Minerals*, 8(11): 532
- Kogarko L N, Khapaev V V. 1987. The modelling of formation of apatite deposits of the Khibina massif (Kola Peninsula). In: Parsons D, ed. *Origins of Igneous Layering*. Dordrecht; Springer, 589–611
- Kogarko L N. 1990. Ore-forming potential of alkaline magmas. *Lithos*, 26(1–2): 167–175
- Kogarko L N, Lahaye Y, Brey G P. 2010. Plume-related mantle source of super-large rare metal deposits from the Lovozero and Khibina massifs on the Kola Peninsula, Eastern part of Baltic Shield; Sr, Nd and Hf isotope systematics. *Mineralogy and Petrology*, 98(1): 197–208
- Kogiso T, Hirschmann M M, Frost D J. 2003. High-pressure partial melting of garnet pyroxenite: Possible mafic lithologies in the source of ocean island basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4): 603–617
- Köhler J, Schönerberger J, Upton B, Markl G. 2009. Halogen and trace-element chemistry in the Gardar Province, South Greenland: Subduction-related mantle metasomatism and fluid exsolution from alkalic melts. *Lithos*, 113(3–4): 731–747
- Konnerup-Madsen J, Rose-Hansen J. 1984. Composition and significance of fluid inclusions in the Ilímaussaq peralkaline granite, South Greenland. *Bulletin de Minéralogie*, 107(2): 317–326
- Krumrei T V, Pernicka E, Kaliwoda M, Markl G. 2007. Volatiles in a peralkaline system: Abiogenic hydrocarbons and F-Cl-Br systematics in the naujaite of the Ilímaussaq intrusion, South Greenland. *Lithos*, 95(3–4): 298–314
- Le Bas M J. 1981. Carbonatite magmas. *Mineralogical Magazine*, 44(334): 133–140
- Le Bas M J. 1977. Magmatic and metasomatic processes. In: Le Bas M J (ed). *Carbonatite-Nephelinite Volcanism: An African Case History*. John Wiley & Sons, 263–278
- Le Bas M J. 2008. Fenites associated with carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 46(4): 915–932
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas M J, Bonin B, Bate-man P, Bellieni G, Dudek A, Efremova S, Keller J, Lameyre J, Sabine P A, Schmid R, Sørensen H, Wooley A R. 2002. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Lindhuber M J, Marks M A W, Bons P D, Wenzel T, Markl G. 2015. Crystal mat-formation as an igneous layering-forming process: Textural and geochemical evidence from the 'lower layered' nepheline syenite sequence of the Ilímaussaq complex, South Greenland. *Lithos*, 224–225: 295–309
- Linnen R L, Keppler H. 2002. Melt composition control of Zr/Hf fractionation in magmatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(18): 3293–3301
- Linnen R L, Samson I M, Williams-Jones A E, Chakhmouradian A R. 2014. Geochemistry of the rare-earth element, Nb, Ta, Hf, and Zr deposits. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 13: 543–568
- Maier W D, Barnes S J, Groves D I. 2013. The Bushveld Complex, South Africa: Formation of platinum-palladium, chrome-and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cumulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber. *Mineralium Deposita*, 48(1): 1–56
- Mariano A N. 1983. Fertilization in alkaline rocks. 1983 MSA Symposium, Wisconsin
- Markl G, Marks M, Schwinn G, Sommer H. 2001. Phase equilibrium constraints on intensive crystallization parameters of the Ilímaussaq Complex, South Greenland. *Journal of Petrology*, 42(12): 2231–2257
- Marks M A W, Schilling J, Coulson I M, Wenzel T, Markl G. 2008. The alkaline-peralkaline Tamazeght complex, High Atlas Mountains, Morocco: Mineral chemistry and petrological constraints for derivation from a compositionally heterogeneous mantle source. *Journal of Petrology*, 49(6): 1097–1131
- Marks M A W, Markl G. 2015. The ilímaussaq alkaline complex, South Greenland. In: Charlier B, Namur O, Latypov R, Tegner C. *Layered Intrusions*. Dordrecht; Springer, 649–691
- Marks M A W, Markl G. 2017. A global review on apaitic rocks. *Earth-Science Reviews*, 173: 229–258
- McBirney A R, Nakamura Y. 1974. Immiscibility in late stage magmas of the Skaergaard intrusion. *Carnegie Inst Washington Yearb*, 73: 348–352
- McBirney A R, Noyes R M. 1979. Crystallization and layering of the Skaergaard intrusion. *Journal of Petrology*, 20(3): 487–554
- Melluso L, Cucciniello C, le Roex A P, Morra V. 2016. The geochemistry of primitive volcanic rocks of the Ankaratra volcanic complex, and source enrichment processes in the genesis of the Cenozoic magmatism in Madagascar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 185: 435–452
- Mitchell R H. 2005. Carbonatites and carbonatites and carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2049–2068
- Möller V, Williams-Jones A E. 2016a. Petrogenesis of the Nechalacho layered suite, Canada: Magmatic evolution of a REE-Nb-rich nepheline syenite intrusion. *Journal of Petrology*, 57(2): 229–276
- Möller V, Williams-Jones A E. 2016b. Stable and radiogenic isotope constraints on the magmatic and hydrothermal evolution of the

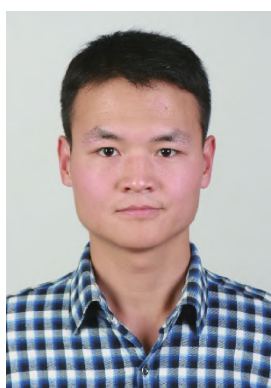
- Nechalacho Layered suite, northwest Canada. *Chemical Geology*, 440: 248–274
- Moore M, Chakhmouradian A R, Mariano A N, Sidhu R. 2015. Evolution of rare-earth mineralization in the Bear Lodge carbonatite, Wyoming: Mineralogical and isotopic evidence. *Ore Geology Reviews*, 64: 499–521
- Mungall J E, Naldrett A J. 2008. Ore deposits of the platinum-group elements. *Elements*, 4(4): 253–258
- Nabyl Z, Massuyeau M, Gaillard F, Tuduri J, Iacono-Marziano G, Rogerie G, Le Trong E, Di Carlo I, Melleton J, Bailly L. 2020. A window in the course of alkaline magma differentiation conducive to immiscible REE-rich carbonatites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 282: 297–323
- Namur O, Charlier B, Toplis M J, Higgins M D, Hounsell V, Liégeois J P, Auwera J V. 2011. Differentiation of tholeiitic basalt to A-type granite in the Sept Iles layered intrusion, Canada. *Journal of Petrology*, 52(3): 487–539
- Namur O, Charlier B, Holness M B. 2012. Dual origin of Fe-Ti-P gabros by immiscibility and fractional crystallization of evolved tholeiitic basalts in the Sept Iles layered intrusion. *Lithos*, 154: 100–114
- Namur O, Abily B, Boudreau A E, Blanchette F, Bush J W M, Ceuleneer G, Charlier B, Donaldson C H, Duchesne J C, Higgins M D, Morata D, Nielsen T F D, O’Driscoll B, Pang K N, Peacock T, Spandler C J, Toramaru A, Veksler I V. 2015. Igneous layering in basaltic magma chambers. In: Charlier B, Namur O, Latypov R, Tegner C, eds. *Layered Intrusions*. Dordrecht: Springer, 75–152
- Naslund H R, Turner P A, Keith D W. 1991. Crystallization and layer formation in the middle zone of the Skaergaard Intrusion. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 38: 165–171
- Paslick C, Halliday A, James D, Dawson J B. 1995. Enrichment of the continental lithosphere by OIB melts: Isotopic evidence from the volcanic province of northern Tanzania. *Earth and Planetary Science Letters*, 130(1–4): 109–126
- Pfaff K, Krumrei T, Marks M, Wenzel T, Rudolf T, Markl G. 2008. Chemical and physical evolution of the ‘lower layered sequence’ from the nepheline syenitic Ilímaussaq intrusion, South Greenland: Implications for the origin of magmatic layering in peralkaline felsic liquids. *Lithos*, 106(3–4): 280–296
- Pilet S, Baker M B, Stolper E M. 2008. Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas. *Science*, 320(5878): 916–919
- Schilling J, Frost B R, Marks M A W, Wenzel T, Markl G. 2011a. Fe-Ti oxide-silicate (QUILF-type) equilibria in feldspathoid-bearing systems. *American Mineralogist*, 96(1): 100–110
- Schilling J, Marks M A W, Wenzel T, Vennemann T, Horváth L, Tarasoff P, Jacob D E, Markl G. 2011b. The magmatic to hydrothermal evolution of the intrusive Mont Saint-Hilaire complex: Insights into the late-stage evolution of peralkaline rocks. *Journal of Petrology*, 52(11): 2147–2185
- Schönenberger J, Köhler J, Markl G. 2008. REE systematics of fluorides, calcite and siderite in peralkaline plutonic rocks from the Gardar Province, South Greenland. *Chemical Geology*, 247(1–2): 16–35
- Schönenberger J, Markl G. 2008. The magmatic and fluid evolution of the Motzfeldt intrusion in South Greenland: Insights into the formation of agpaitic and miaskitic rocks. *Journal of Petrology*, 49(9): 1549–1577
- Schulz K J, Piatak N M, Papp J F. 2017. Niobium and tantalum. Reston: U. S. Geological Survey
- Sheard E R, Williams-Jones A E, Heiligmann M, Pederson C, Trueman D L. 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(1): 81–104
- Smith W D, Maier W D. 2021. The geotectonic setting, age and mineral deposit inventory of global layered intrusions. *Earth-Science Reviews*, 220: 103736
- Sokół K, Finch A A, Hutchison W, Cloutier J, Borst A M, Humphreys M C S. 2022. Quantifying metasomatic high-field-strength and rare-earth element transport from alkaline magmas. *Geology*, 50(3): 305–310
- Sörensen H. 1969. Rhythmic igneous layering in peralkaline intrusions: An essay review on Ilímaussaq (Greenland) and Lovozero (Kola, USSR). *Lithos*, 2(2): 261–283
- Sørrensen H. 1992. Agpaitic nepheline syenites: A potential source of rare elements. *Applied Geochemistry*, 7(5): 417–427
- Tsay A, Zajacz Z, Sanchez-Valle C. 2014. Efficient mobilization and fractionation of rare-earth elements by aqueous fluids upon slab dehydration. *Earth and Planetary Science Letters*, 398: 101–112
- Upton B G J, Emeleus C H. 1987. Mid-Proterozoic alkaline magmatism in southern Greenland: The Gardar province. *Geological Society, London, Special Publications*, 30: 449–471
- Upton B G J. 1991. Gardar mantle xenoliths: Igdlutalik, South Greenland. *Rapport Grønlands Geologiske Undersøgelse*, 150: 37–43
- Upton B G J, Parsons I, Emeleus C H, Hodson M E. 1996. Layered alkaline igneous rocks of the Gardar Province, South Greenland. *Developments in Petrology*, 15: 331–363
- Upton B G J, Emeleus C H, Heaman L M, Goodenough K M, Finch A A. 2003. Magmatism of the mid-Proterozoic Gardar Province, South Greenland: Chronology, petrogenesis and geological setting. *Lithos*, 68(1–2): 43–65
- Van Gosen B S, Verplanck P L, Seal II R R, Long K R, Gambogi J. 2017. Rare-earth elements. Reston: U. S. Geological Survey
- Wallace M E, Green D H. 1988. An experimental determination of primary carbonatite magma composition. *Nature*, 335(6188): 343–346
- Watkinson D H, Wyllie P J. 1971. Experimental study of the composition join NaAlSiO₄-CaCO₃-H₂O and the genesis of Alkaline Rock—Carbonatite Complexes. *Journal of Petrology*, 12(2): 357–378
- Weidendorfer D, Schmidt M W, Mattsson H B. 2017. A common origin of carbonatite magmas. *Geology*, 45(6): 507–510
- Williams-Jones A E, Migdisov A A, Samson I M. 2012. Hydrothermal mobilisation of the rare earth elements—a tale of “ceria” and “yttria”. *Elements*, 8(5): 355–360
- Wilson J R, Menuge J F, Pedersen S, Engell-Sørensen O. 1987. The southern part of the Fongen-Hyllingen layered mafic complex, Norway: Emplacement and crystallization of compositionally stratified magma. In: Parsons I, ed. *Origins of Igneous Layering*. Dordrecht: Springer, 145–184

- Woolley A R. 1982. A discussion of carbonatite evolution and nomenclature, and the generation of sodic and potassic fenites. *Mineralogical Magazine*, 46(338): 13-17
- Woolley A R, Kjarsgaard B A. 2008. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks; Evidence from a global database. *The Canadian Mineralogist*, 46(4): 741-752
- Yang W B, Niu H C, Li N B, Hollings P, Zurevinski S, Mitchell R H. 2023. Scavenging and release of REE and HFSE by Na-metasomatism in magmatic-hydrothermal systems. *Fundamental Research*, <http://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.04.004>
- Yao Z S, Mungall J E. 2022. Magnetite layer formation in the Bushveld Complex of South Africa. *Nature Communications*, 13(1): 416
- Yaxley G M, Crawford A J, Green D H. 1991. Evidence for carbonatite metasomatism in spinel peridotite xenoliths from western Victoria, Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(2): 305-317
- Yaxley G M, Brey G P. 2004. Phase relations of carbonate-bearing eclogite assemblages from 2.5 to 5.5 GPa; Implications for petrogenesis of carbonatites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146(5): 606-619
- Yaxley G M, Anenburg M, Tappe S, Decree S, Guzmics T. 2022. Carbonatites: Classification, sources, evolution, and emplacement. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50: 261-293
- Zaitsev A N, Keller J. 2006. Mineralogical and chemical transformation of Oldoinyo Lengai natrocarbonatites, Tanzania. *Lithos*, 91(1-4): 191-207
- Zaitsev A N, Marks M A W, Wenzel T, Spratt J, Sharygin V V, Strekopytov S, Markl G. 2012. Mineralogy, geochemistry and petrology of the phonolitic to nephelinitic Sadiman volcano, Crater Highlands, Tanzania. *Lithos*, 152: 66-83
- Zharikov V A, Pertsev N N, Rusinov V L, Callegari E, Fettes D J. 2007. Metasomatism and metasomatic rocks. In: Recommendations by the IUGS Subcommission of the Systematics of Metamorphic Rocks. *British Geological Survey*
- Zhou J S, Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H. 2020. Petrologic reconstruction of the Tieshan magma plumbing system; Implications for the genesis of magmatic-hydrothermal ore deposits within originally water-poor magmatic systems. *Journal of Petrology*, 61(5): ega056
- Zhou J S, Wang Q, Xing C M, Ma L, Hao L L, Li Q W, Wang Z L, Huang T Y. 2021. Crystal growth of clinopyroxene in mafic alkaline magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117005
- Zhou J S, Huang C C, Wang Q, Ren Z Y, Ma L, Hao L L, Zhang L. 2022. Olivines and their melt inclusions in potassic volcanic rocks record mantle heterogeneity beneath the southern Tibet. *Journal of Petrology*, 63(11): egac103
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J, Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280
- 范宏瑞, 牛贺才, 李晓春, 杨奎锋, 杨占峰, 王其伟. 2020. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望. *科学通报*, 65(33): 3778-3793
- 李五福, 王涛, 王秉璋, 张新远, 谭运鸿, 袁博武, 王春涛, 韩晓龙, 金婷婷, 郑英, 曹锦山, 王泰山, 张焜, 付长垒, 陈健, 刘建栋, 李青, 张启龙, 陈丽娟. 2022. 东昆仑大格勒地区稀有和稀土矿化碱性杂岩体的发现及意义. *大地构造与成矿学*, 46(5): 924-950. [10.16539/j.ddgzyckx.2021.06.010](https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.06.010)
- 刘琰, 舒小超. 2021. 碳酸岩型稀土矿床中的霓长岩化作用概述. *矿物岩石地球化学通报*, 40(5): 1025-1033
- 秦克章, 郭正林, 唐冬梅, 李金祥, 郭旭吉, 董连慧. 2018. 准噶尔西北缘吐鲁库班套阿拉斯加型镁铁-超镁铁岩体的发现及意义. *岩石学报*, 34(7): 1897-1913
- 王谢炎, 邓宇峰, 颀炜, 郑文勤. 2022. 新疆黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带岩浆通道成矿特征及其找矿意义. *矿床地质*, 41(6): 1108-1123
- 苏本勋, 秦克章, 蒋少涌, 曹明坚, 张招崇, 张宏罗, 薛国强, 周涛发, 莫江平. 2023. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望. *岩石学报*, 39(4): 968-980
- 王秉璋, 李五福, 金婷婷, 张晗, 李玉龙, 付长垒, 刘建栋, 王涛, 薛万文, 王泰山. 2023. 东昆仑大格勒稀有金属矿化碳酸岩和橄辉岩斜锆石 U-Pb 年代学研究和找矿意义. *地球科学*, 待刊
- 王凯怡. 2015. 与碳酸岩共生的霓长岩. *地质科学*, 50(1): 203-212
- 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
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 魏博, 陈晨. 2020. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制. *科学通报*, 65(33): 3825-3838
- 郭斌, 王汝成, 刘晓东, 郭国林, 宋振涛. 2018. 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*, 34(6): 1741-1757
- 谢玉玲, 夏加明, 崔凯, 曲云伟, 梁培, 钟日晨. 2020. 中国碳酸岩型稀土矿床: 时空分布与成矿过程. *科学通报*, 65(33): 3794-3808
- 许成, 曾亮, 宋文磊, 冯梦, 邓森, 韦春婉. 2017. 造山带碳酸岩起源与深部碳循环. *矿物岩石地球化学通报*, 36(2): 213-221
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京: 科学出版社, 239-360
- 杨学明, 杨晓勇, 范宏瑞, 郭范, 张兆峰, 郑永飞. 2000. 霓长岩岩石学特征及其地质意义评述. *地质论评*, 46(5): 481-490
- 张招崇. 2018. 元古宙斜长岩体及其 Fe-Ti-P 矿床的成因. *矿物岩石地球化学通报*, 37(6): 1047-1061, 1091
- 张招崇, 侯通, 程志国. 2022. 大火成岩省的成矿效应. *地质学报*, 96(1): 131-154
- 赵振华, 周玲隼. 1994. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学. *中国科学(B辑)*, 24(10): 1109-1120
- 钟宏, 胡瑞忠, 朱维光, 刘秉光. 2007. 层状岩体的成因及成矿作用. *地学前缘*, 14(2): 159-172
- 周金胜, 王强. 2022. 地壳内的岩浆动力学过程及其资源与环境效应. *岩石学报*, 38(5): 1399-1418

(本文责任编辑:龚超颖;英文审校:张兴春)



王国光,1983年生,矿床学博士,南京大学地球科学与工程学院副教授。研究方向为地质流体与成矿作用。现任青年地学论坛理事会理事, *Frontiers in Earth Science* 杂志的 Review Editor,《矿床地质》杂志编委等。先后主持国家自然科学基金3项,国家重点研发计划专题2项,中国地质调查局整装勘查区项目1项。以第一或通讯作者发表矿床学和地质流体领域的国际SCI文章20余篇,作为客座主编在《矿床地质》出版专辑1部。通过对钦杭带北东段铜金成矿作用的细致研究,建立了钦杭带大陆再造与铜金多期成矿的新模式,相关研究成果成功应用于找矿勘查。关注超临界流体成矿作用以及超大型矿床巨量金属堆积机理研究。



高彭,1988年生,2016年在中国科学技术大学地球化学专业获博士学位,现为中山大学副教授。长期从事岩浆岩地球化学研究。2018年获中国科协“青年人才托举工程”项目支持。现任中国矿物岩石地球化学学会化学地球动力学专业委员会和青年工作委员会委员。在花岗岩岩石成因和地壳深熔作用方面取得一系列成果,以第一/通讯作者在 *Geology*、*Geochimica et Cosmochimica Acta*、*Earth-Science Reviews*、*Journal of Petrology*、*Contributions to Mineralogy and Petrology*、*Chemical Geology*、*Geological Society of America Bulletin* 和 *Lithos* 等国际一流地质学和地球化学期刊发表论文18篇,SCI总引用1000余次,H-index 15。



周金胜,1989年生,中国科学院广州地球化学研究所副研究员。主要从事地壳内的岩浆动力学过程以及关键金属成矿作用研究,先后主持国家自然科学基金面上项目和青年科学基金项目、中国科学院战略先导专项(A类)子课题、中国科学院广州地球化学研究所“涂光炽优秀青年学者”项目(A类)。以第一作者在国际刊物 *Earth and Planetary Science Letters*、*Journal of Petrology* (2篇)、*American Mineralogist* (3篇)、*Chemical Geology* 和 *Lithos* 上发表SCI论文8篇。主要学术成果包括:(1)识别出了镁铁质碱性岩浆中单斜辉石新的晶体生长过程;(2)刻画了陆内贫水体系岩浆通道系统的结构和岩浆动力学过程;(3)识别出了伟晶岩型Li矿床中脉体冷却速率影响成矿这一新的控矿因素。



颜丽丽,1992年生,2018年在中国地质大学(北京)矿物学、岩石学、矿床学专业获博士学位,2021年中国地质科学院地质研究所博士后出站,现为中国地震局地质研究所活动火山与灾害研究室副研究员。主要从事硅质火山系统的岩浆起源与演化,火山岩与侵入岩的成因联系、岩浆作用过程等方面的研究,主要学术成果包括:(1)揭示了中国东南沿海白垩纪破火山中火山岩与共生的浅成侵入体为同一岩浆分异演化的产物,两者分别代表了分异的熔体和残留的“晶粥”,建立了中国东南沿海白垩纪大规模火山-侵入杂岩成因的“晶粥”模型;(2)通过锆石、长石、石榴子石等精细的矿物学研究工作揭示了硅质火山岩浆系统的晶体-熔体分离、岩浆补给和晶粥活化等过程及其岩石学记录。在 *CMP*、*CG*、*Lithos* 等国内外高水平学术期刊上发表论文10余篇。目前兼任《华东地质》期刊青年编委。