Vol. 36 No. 1 Mar. 2015

文章编号:1671-4814(2015)01-021-07

碳酸岩研究新进展*

叶海敏,张 翔

(南京地质矿产研究所,南京 210016)

摘要:主要从时空分布、岩石学、矿物学、地球化学及 C-O-Sr-Nd-Pb 同位素特征等方面对碳酸岩进行全面总 结,结合近 20 年来的实验岩石学资料,论述了其岩浆的分异演化过程、地幔交代作用及源区物质组成。碳酸岩具 有极高的 Sr、Ba 和稀土含量(平均 ΣREE=3731),Sr-Nd-Pb 放射性同位素、C-O 稳定同位素和惰性气体组成以及 实验岩石学证据,均指示碳酸岩来自地幔,几乎没有受到地壳物质的混染。碳酸岩研究仍存在诸多争议,但本文认 为,越来越多的证据显示碳酸岩的形成与大火成岩省以及地幔柱活动有密切的时空联系。

关键词:碳酸岩;岩石学;地球化学;地幔源区;地幔柱 中图分类号:P588.1 **文献标识码:**A

关于碳酸岩的岩浆成因问题一直以来都存在争 议,直到 60 年代初,地质学家亲眼目睹坦桑尼亚 Oldoinyo Lengai 火山喷出富碱的碳酸岩熔岩、火山 角砾和凝灰质火山物质之后,学者们才广泛接受碳 酸岩岩浆成因的观点^[1]。纵观全球的岩浆活动,碳 酸岩所占的比例极其微小,但却提供了大量来自地 球内部的信息。碳酸岩不同寻常的组成、独特的找 矿意义、与金伯利岩的关系以及倍受争议的岩石成 因引起世界地质学家的关注与研究^[2-7],这些研究不 仅深化了对碳酸岩起源和成因的认识,也为了解大 陆地幔的特征和演化提供了重要信息,表明碳酸岩 已是当今幔源火成岩和深部地质研究的重要的方 面。

中国作为碳酸岩第四大产出国,具有丰富的碳酸岩及其矿产资源,地质学家们也逐渐认识到碳酸岩在指示地幔交代作用、地壳深部结构、地幔物质组成以及碳酸岩在成岩、成矿等方面的特殊性与重要性,对碳酸岩的研究也在不断加强^[8-11]。但在对碳酸的研究中也出现一些错误认识,比如认为碳酸岩是壳源产物等,这是对碳酸岩研究中需要注意和避免的问题。本文从岩石学、矿物学、同位素地球化学、实验岩石学以及岩浆来源、地幔源区等方面介绍近20年来国内外碳酸岩的研究进展。

1 岩石学、时空分布和构造环境

关于碳酸岩的划分,目前普遍采用 1979 年国际 地科联(IUGS)推荐的方案,属于岩浆成因的碳酸盐 类岩石称为碳酸岩,属于沉积成因的称为碳酸盐岩。 碳酸岩既有喷出岩,也有侵入岩,是碳酸盐矿物含量 >50%(体积百分数)的火成岩,其 SiO₂ 含量很低 (<20%),属于超基性岩类。碳酸岩具有复杂的矿 物组成^[12],常见的矿物有方解石、白云石、铁白云石 和菱铁矿等钾、钠质碳酸盐矿物,其它矿物有透辉 石、钠质辉石、角闪石、金云母、磷灰石、烧绿石、磁铁 矿和橄榄石等。此外,碳酸岩又以含稀有矿物而著 称,例如含斜锆石(ZrO₂)、钛锆钍矿[Ca、Zr(Ti、 Nb、Fe)₂O₇]、钙锆钛矿(CaZr₃TiO₉)、氟碳铈矿 [(REE)(CO₃)F]和氟菱钙铈矿[(REE)₂Ca (CO₃)₂F₂]等。

碳酸岩的结构有粗粒结构和细粒结构^[13],前者 以 sövites(粗粒方解石碳酸岩,其矿物组合为方解 石+磷灰石+磁铁矿+烧绿石)为代表,后者以 alvikites(细粒方解石碳酸岩,其矿物组合为方解石+ 磁铁矿+氟碳铈矿+独居石)为代表,若主要矿物是 白云石,则称为 rauhaugite(粗粒白云石碳酸岩)和

^{*} 收稿日期:2014-04-28 改回日期:2014-08-11 责任编辑:谭桂丽 基金项目:国家自然科学基金项目(项目编号:40703009,41373021)资助。 第一作者简介:叶海敏,1973 年生,女,副研究员,地球化学专业。

beforsite(镁白云石碳酸岩)。演化完整的单个碳酸 岩杂岩体,岩浆演化序列通常为粗粒方解石碳酸岩 →细粒方解石碳酸岩+白云石碳酸岩→铁质碳酸岩 →细脉、网脉状钙质碳酸岩;在分异演化序列的晚期 阶段常常出现稀土、重晶石和萤石的成矿作用^[14]。

值得注意的是,碳酸岩无论是喷出岩还是侵入 岩,最显著的特征标志是在其岩浆通过的上部地壳 围岩中发生富含碱质(钠或钾)的霓长岩化作用,形 成含有霓石、钠(铁)闪石、钠长石、金云母、钾长石为 特征的霓长岩,这是碳酸岩浆脱碱引起围岩碱质交 代用形成的,且存在一定的分带性,即碳酸岩体的深 部围岩以钠质霓长岩化作用、浅部以钾质霓长岩化 作用为特征[15,16]。这些特征说明碳酸岩浆形成时 可能富含碱质。1993年6月,现代活火山 Oldoinyo Lengai 喷出碱质碳酸盐岩熔岩,其 Na₂O 含量高达 27%~34%,K2O含量达5%~14%,这些特征明显 不同于所发现的任何古老碳酸岩(Na₂O+K₂O含 量一般<3%)。通过对比,一些地质学家推测碳酸 岩浆形成时可能富含碱质,在上升侵位过程中与围 岩发生碱质交代作用,致使围岩发生霓长岩化作用 而脱碱,使多数古老碳酸岩的主要元素地球化学特 征不同于 Oldoinyo Lengai 碱质碳酸熔岩^[3]。

碳酸岩虽然极为稀少,但却遍布全球各大洲(包括南极洲),被发现的数量在不断增长。目前全世界已知的碳酸岩约527处,其中喷出岩49处^[15],主要集中在南美洲、北美洲、非洲、俄罗斯及其周边国家、蒙古、印度、巴基斯坦、阿富汗,其中非洲占35%,并与东非裂谷紧密相联^[14,15]。碳酸岩年代跨度较大,最古老的碳酸岩为 Greenland 的 Tupertalik 碳酸岩(3.0Ga)^[16],最新的碳酸岩是1993年6月喷发的坦桑尼亚 Oldoinyo Lengai 碳酸岩^[8]。已知的碳酸岩中仅约50%具有明确的测年数据。我国内蒙古白云鄂博、新疆且干布拉克^[17-18],四川耗牛坪^[19],山东莱芜-淄博^[20]、云南武定地区、湖北庙垭、山西紫金山、河北矾山、甘肃礼县^[10]和陕西大石沟等地27处 有碳酸岩零星产出^[21]。

碳酸岩与基性、超基性或碱性硅酸岩密切伴生 组成杂岩体。但碳酸岩体积一般相对较小,仅占杂 岩体面积 10%左右。根据伴生硅酸盐的种类大体 分为六类^[22]:黄长岩-霞石岩-响岩-粗面岩、霞石岩-霓霞岩、碧玄岩-粗面岩(碱性辉石岩)、响岩-粗面岩 (似长正长岩)、粗面岩(正长岩)和金伯利岩。碳酸 岩主要产出在相对稳定的板内环境,大多与裂谷和 板内拉张环境有关^[14],少数为与碰撞有关的大洋碳 酸岩^[2]。碳酸岩以岩脉、岩床、岩颈、熔岩流等形式 产出,多呈线状或成群分布,并具有同一地区多次侵位的特点,最典型地区是格陵兰,共有5期侵位的碳酸岩^[14,15]。

2 地球化学特征

1989年,Woolly^[23]根据主量元素 CaO、MgO 和(FeO+Fe₂O₃+MnO)之间的重量百分比,将碳 酸岩划分为三大类(图 1a):钙质(CaO:CaO+ MgO+FeO+Fe₂O₃+MnO>0.8)、镁质(CaO: CaO+MgO+FeO+Fe₂O₃+MnO<0.8,MgO> FeO+Fe₂O₃+MnO)和铁质(CaO:CaO+MgO+ FeO+Fe₂O₃+MnO<0.8,MgO<FeO+Fe₂O₃+ MnO)。SiO₂、TiO₂、Fe₂O₃、MnO、BaO、Co、Cr、V、 Th和 REE 含量从钙质到镁质再到铁质逐步升高; Na₂O+K₂O含量在三类碳酸岩中基本近似(一般



图 1 碳酸岩 Cao-MgO-(Fe₂O₃ + FeO + MnO)图(a)和 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(b)^[23]

Fig. 1 Cao-MgO-(Fe₂O₃ + FeO + MnO) diagram (a) and chondrite-normalized REE distribution patterns(b) of carbonatites

(图 a:蓝色实心圆和图 b 蓝色曲线引自新疆且干布拉克 碳酸岩^[17,18])

<3),但在一些特殊碳酸岩中则异常高,被称为钠质 碳酸岩,例如 Oldoinyo Lengai 火山;P₂O₅ 在所有碳 酸岩中含量高且变化大。

碳酸岩微量元素变化范围较大,总体具有高 Sr、Ba、Th、U、Nb、Ta、LREE 和 LREE/HREE,低 Zr、Hf、Ti和 HREE 含量,明显不同于沉积成因的 石灰岩和白云岩(图 1b)。BaO/SrO 比值在钙质碳 酸岩中约为 0.4,镁质和铁质碳酸岩约为 1,富钡铁 质碳酸岩>1;Th/U 比值变化较大,从钙质的 6 到 镁质的 7 再到铁质的近 40,反映 Th 含量增加;碳酸 岩的 Zr/Hf 比值平均为 113^[24],远大于球粒陨石的 Zr/Hf 比值(36),这被解释为地幔发生碳酸质交代 作用的指示剂^[25]。而随着 Hf、Zr、Ti 的亏损在地幔 捕虏晶中不断被发现,Hf/Hf* Zr/Zr*和 Ti/Ti*比 值则被认为是有力的指示剂^[26]。

目前普遍认为大多数碳酸岩的常规全岩化学分 析数据不能反映源区组成[27],例如大多数碳酸岩有 霓长岩化,说明存在碱金属流失,或许还有其它元素 损耗。而碳酸岩放射性与稳定同位素组成却能反映 源区特征。Bell and Simonetti^[28]基于世界碳酸岩 同位素组成研究,对碳酸岩放射性与稳定同位素组 成进行了总结:(1)大多数碳酸岩的 Sr-Nd-Pb 同位 素组成主要分布在 HIMU(高 μ 地幔端元), EMI(I 型富集地幔)和 FOZO(地幔集中带)地幔端元之间 (图 2)^[29]。碳酸岩总体具有较高的 Sr-Nd 含量,其 值远高于地壳的 Sr-Nd 值,同时具有较低的 Pb 含 量,其值远低于地壳是 Pb 值,因此碳酸岩的 Sr-Nd-Pb 同位素对地壳混染作用具有"免疫力",同时也说 明碳酸岩与沉积型碳酸盐岩具有完全不同的 Sr-Nd-Pb 同位素组成,这是与沉积型碳酸盐岩最重要 的区别。(2)部分碳酸岩具有不耦合的 Hf-Nd 同位 素组成,例如格陵兰的 Qaqarssuk, Sarfartoq 和 Tupertalik 碳酸岩。(3)碳酸岩 C-O 同位素组成类似 于原始地幔的 C-O 同位素组成(图 3)。(4)巴西、加 拿大和俄罗斯碳酸岩的惰性气体和 N 同位素组成 同样类似于原始地幔的组成特征。不同时代的碳酸 岩,无论是亏损还是富集 Sr-Nd 同位素组成,均具 有相似的¹²⁹ Xe/¹³⁰ Xe 和⁴⁰ Ar/³⁶ Ar 比值,暗示这些碳 酸岩的挥发份来自相同的软流圈地幔。

3 岩石成因

在空间上,大多数碳酸岩都与碱性岩、超基性基 性岩密切伴生,这暗示两者之间有成因联系。同时 两者的伴生形式又有多样性(如上所述),指示碳酸 岩成因具有复杂性。碳酸岩与硅酸岩的成因联系一



图 2 东非裂谷碳酸岩的¹⁴³ Nd/¹⁴⁴ Nd-⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 和 ²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb-²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 相关关系图^[29]



直是争论的焦点问题,主要有两种观点^[1,7,30]:一种 观点认为两者是同一构造事件的产物,但具有不同 的源区,碳酸岩熔体来源于独立源区,硅酸岩与碳酸 岩仅借用相同的上升通道到达地表;另一种观点认 为它们具有相同的源区,是富 CO₂ 的碱性硅酸岩浆 不混溶或分离结晶的产物。以上两种观点衍生出三 种成岩方式(图 4)^[7,31-36]:(1)富 CO₂ 原始地幔橄榄 岩低度部分熔融的产物(<0.1%);(2)碳酸质碱性 硅酸盐熔体的分离结晶作用;(3)高压或低压状态下 碳酸质硅酸盐熔体的不混溶作用。目前,这三种成 岩方式均已被实验岩石学所验证。

熔体实验证明,富 CO₂ 原始地幔橄榄岩低程度 部分 熔 融 发 生 在 2.2 ~ 7.0 GPa 压 力 状 态 下^[31-32,37],其产物具有高 Mg^{#[38]}、高(Mg+Fe)/Ca











Fig. 4 Lithogenesis of carbonatites

1-富 CO₂ 原始地幔橄榄岩低程度部分熔融的产物(<0.1%);2-碳酸质碱性硅酸盐熔体的分离结晶作用;3-碳酸质硅酸盐熔体的不混溶作用;CM-碳酸质熔体;SM-硅酸质熔体;ASR-碱性硅酸岩

比值、中度碱性^[39]和类似镁质碳酸岩组成的特征^[7]。然而,世界侵入或喷出地表的大多数碳酸岩 浆为更贫镁富钙的钙质碳酸岩,而钙质碳酸岩熔体 是在 1.5GPa 压力条件下与异剥橄榄岩相平衡^[37]。

实验岩石学证明分离结晶模式可以产生碳酸 岩^[7],在0.2~0.5 GPa 压力下,碳酸质碱性硅酸盐 熔体先结晶出碱性基性岩,而后残留熔体形成碳酸 岩。俄罗斯科拉半岛碳酸岩杂岩体具有完整的同心 状结构带,分布顺序为纯橄榄岩→斜长方辉岩→黄 长岩→霓辉岩→磷霞岩→碳酸岩,代表典型的结晶 分离产物^[40]。然而,此时碳酸岩的组成更富硅,而 非碳酸质的^[41]。在多数碳酸岩杂岩体中,单斜辉石 是伴生硅酸岩最基本的组成矿物,也是富钙矿物,在 分离结晶模式中优先结晶并带走大量 CaO,导致残 余熔体无法结晶出大量方解石。此外,分离结晶作 用不能产生 Nb 和 REE 的富集^[42]。

碳酸岩液态不混溶模式最早由 Le Bas^[5]提出, 随后实验研究支持了碱性系统中碳酸盐-硅酸盐不 混溶的可能性^[34]。同样,在熔融包裹体的测温实验 研究中,可以观察到硅酸盐熔体分解成不混溶的硅 酸盐和碳酸盐两部分^[36]。这一模式已被大多数研 究者所接受。然而,少数碳酸岩和与其伴生的硅酸 岩的同位素不平衡现象^[2,4],以及碳酸岩略晚于硅 酸岩侵位的事实对这一模式提出了质疑。

4 地幔源区

对碳酸岩源区的研究一直是个棘手的问题。源 区性质主要根据同位素特征来判定,毫无疑问,碳酸 岩来自地幔。然而,是源自岩石圈地幔还是软流圈 地幔?是否与地幔柱有关?目前这些问题仍存在争 议。

Bell and Tilton^[29]通过对东非裂谷周边年轻碳 酸岩(<200Ma)Sr-Nd-Pb 同位素的研究,发现其 Sr-Nd-Pb 同位素数据呈现有规律的线性负相关关 系(图 2),集中位于 HIMU 和 EMI 地幔端元之间, 称东非碳酸岩线(EACL,East African Carbonatite Line),类似洋岛玄武岩(OIB),这种混合趋势普遍 认为与地幔柱活动有关^[29,43],但碳酸岩浆既可能源 自深部的软流圈地幔,也可能来自岩石圈地幔。有 学者认为碳酸岩源自软流圈(图 5),认为软流圈自 地球形成初期,就存在呈团块分布的富集地幔储库, 如 HIMU 型、EMI 型地幔或更加富集的地幔,是来 自核幔边缘的地幔柱导致这些地幔储库熔融,熔体 在上升至地表的过程中交代了岩石圈地幔^[28];也有 学者认为碳酸岩源自受到交代的岩石圈地幔,地幔

无论碳酸岩源自岩石圈或软流圈地幔,其交代





2015 年

作用必定发生在岩石圈(~75 km),导致岩石圈同 位素的不均一性。但是,交代作用的性质有多种解 释,有含水或碳质流体、煌斑质或金伯利质熔体、碳 酸质熔体和富挥发份碱质硅酸岩熔体等。目前同位 素证据显示,碳酸岩熔体是岩石圈与软流圈的交换 作用产生的,但这种交换作用仅仅是地幔柱活动的 结果,还是其它地幔扰动也能产生类似的结果(如岩 石圈折沉等)?这些问题还依靠更多的地球化学、地 球物理和野外地质信息等综合研究来解决。

5 碳酸岩与大火成岩省

很早以前地质学家们已经注意到碳酸岩与裂谷 环境具有密切关系^[5,44]。例如,东非拥有世界 35% 的碳酸岩围绕东非大裂谷分布;在加拿大,碳酸岩主 要沿苏必利尔克拉通狭窄的"腰部"-卡普斯卡辛构 造带(KSZ)侵位。无论碳酸岩岩浆源自何处,因其 极低的粘度,只有沿岩石圈薄弱带(裂谷或断层),才 能穿过相对厚的岩石圈而侵入地壳。因此,碳酸岩 常被作为岩石圈薄弱带的识别标志,而这些薄弱带 可能已存在了数亿年。在一些复杂地块,变质碱性 岩与碳酸岩的识别标志着存在古老裂谷区,这些古 老裂谷区随大洋闭合和构造变形而消失[45]。然而 近几年,越来越多的证据揭示碳酸岩与大火成岩省 也有类似碳酸岩-裂谷环境的密切时空关系[46],例 如:(1) 45Ma 至今的东非火成岩省与广泛分布的大 量碳酸岩;(2) 66 Ma 的德干(Deccan)高原溢流玄 武岩火成岩省与 Amba Dongar, Sarnu-Dandali (Barmer)和 Mundwara 碳酸岩;(3) 130 Ma 的埃腾 迪卡-巴拉那(Etendeka-Parana)溢流火成岩省与Jacupiranga 和 Messum 碳酸岩;(4) 250 Ma 的西伯 利亚(Siberian)大火成岩省是著名的碱性岩省,有多 个碳酸岩体;(5) 370 Ma 的科拉(Kola)碱性岩省, 同时期玄武质岩浆广泛分布在东欧克拉通;(6)615 ~555 Ma的劳伦西亚以东、波罗地以西的中爱泼斯 特(Central Iapetus)岩浆岩省;(7)在加拿大苏必利 尔克拉通,许多碳酸岩与 1114~1085 Ma 基维诺 (Keweenawan)火成岩省和 1880 Ma 泛苏必利尔基 性-超基性岩浆活动具有密切联系;(8) Phalaborwa 和 Shiel 碳酸岩与卡普瓦尔克拉通的 2055 Ma 布什 维尔德事件有关。

普遍认为大火成岩省是由地幔柱产生的,碳酸 岩是大火成岩省的早期产物,位于地幔柱边缘,距中 心约 1000km 处^[47],是低程度熔融的结果,其后是 地幔柱中心高程度部分熔融的溢流玄武岩的大规模 喷发^[48]。

6 展望

目前,碳酸岩地球化学研究有了新的发展趋势 一原位微区分析技术。现有的碳酸岩研究主要依靠 全岩地球化学和同位素分析,然而,全岩分析体现的 是岩石混合、均一化后平均组成,不能反映不同源区 的贡献或岩浆分异演化对岩石的影响。近些年来快 速发展的原位微区分析技术(电子探针、LAMC-ICPMS和 SIMS 告等),使单矿物原位 Sr、Nd、Hf、 O同位素分析成为可能。单矿物的原位同位素分 析,特别是早期结晶矿物相(例如斜锆石、锆石、磷灰 石等),为研究碳酸岩岩浆的本质及其演化提供了更 有价值的参考信息。

致谢:感谢张传林研究员对研究工作的支持和 帮助,感谢审稿人提出的建设性意见。

参考文献

- [1] Le Bas M J. Nephelinites and carbonatites[C]// Fitton J G, Upton B G. Alkaline Igneous Rocks. Geological Society, London, Special Publications, 1987, 30: 53-83.
- [2] Bell K. Radiogenic isotope constraints on relationships between carbonatites and associated silicate rocks: a brief review[J]. Journal of petrology, 1998, 39: 1987-1996.
- [3] Dawson J B, Pinkerton H, Pyle D M, et al. June 1993 eruption of Oldoinyo Lengai, Tanzania: exceptionally viscous and large carbonatite magmas [J]. Geology, 1994, 22: 799-802.
- [4] Harmer R E, Gittins J. The case for primary, mantlederived carbonatite magma [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 1895-1903.
- [5] Le Bas M J. Carbonatite-Nephelinite Volcanism [C]// John Wiley. London, 1977: 347.
- [6] Le Bas M J. Diversification of carbonatite [C]// Bell
 K. Carbonatites: Genesis and Evolution. Unwin Hyman, London, 1989: 428-445.
- [7] Lee W J, Wyllie P J. Processes of crustal carbonatite formation by liquid immiscibility and differentiation, elucidated by model systems [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 2005-2013.
- [8] 杨学明,杨晓勇,陈天虎,等.白云鄂博富稀土元素 碳酸岩岩墙的地球化学特征及稀土富集机制[J].矿 床地质,1998,17(增刊),527-532.
- [9] 许成,黄智龙,刘丛强,等.四川牦牛坪稀土矿床碳 酸岩地球化学[J].中国科学(D辑),2002,32,635-643.

- [10] 喻学惠,莫宣学,苏尚国,等.甘肃礼县新生代火山喷 发碳酸岩的发现及意义[J].岩石学报,2003,19(1): 105-112.
- [11] 王凯怡,范宏瑞,谢奕汉.白云鄂博地区岩浆型与热 液型碳酸岩墙元素地球化学判别的初步研究[J]. 岩 石学报,2002,18(3):340-348.
- [12] Kapustin Y L. Mineralogy of carbonatites [C]// New Delhi. Amerind Publishing, 1980.
- [13 Le Bas M J. Sövite and alvikite: two chemically distinct carbonatites C1 and C2 [J]. South African Journal of Geology, 1999, 102: 109-121.
- [14] Woolley A R. The spatial and temporal distribution of carbonatites [C]// Bell K. Carbonatites: Genesis and Evolution. Unwin Hyman, London, 1989: 15-37.
- [15] Woolley A R, Kjarsgaard B A. Carbonatite occurrences of the world; map and database[J]. Geological Survey of Canada Open File, 2008,5796.
- [16] Bizzarro M, Simonetti A, Stevenson R K, et al. Hf isotope evidence for a hidden mantle reservoir [J]. Geology, 2002, 30: 771-774.
- [17] Ye H M, Li X H, Lan Z W. Geochemical and Sr-Nd-Hf-O-C isotopic constraints on the origin of the Neoproterozoic Qieganbulake ultramafic-carbonatite Complex from the Tarim Block, Northwest China [J]. Lithos, 2013, 182-183: 150-164.
- [18] Zhang C L, Li X H, Li Z X, et al. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim block, western China: geochronology, geochemistry, and tectonic implication [J]. Precambrian Research, 2007, 152: 149-169.
- [19] Wang D H, Yang J M, Yan S H. A special orogenic type REE deposit in Maoniuping Sichuan. China: geology and geochemistry [J]. Resource Geology, 2001, 51: 177-188.
- [20] Ying J F, Zhou X H, Zhang H F. Geochemical and isotopic investigation of the Laiwu-Zibo carbonatites from western Shandong Province, China, and implications for their petrogenesis and enriched mantle source [J]. Lithos, 2004, 75: 413-426.
- [21] Yang Z M, Woolley A. Carbonatites in China: A review [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27 (5): 559-575.
- [22] Woolley A R. Igneous silicate rocks associated with carbonatites: their diversity, relative abundances and implications for carbonatite genesis [J]. Periodico di Mineralogia, 2003, 72: 9-17.
- [23] Woolley A R, Kempe D R C. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element dis-

tribution [C]// Bell K. Carbonatites: Genesis and E-volution. Unwin Hyman, London, 1989: 1-14.

- [24] Bizimis M, Salters V J M, Dawson J B. The brevity of carbonatite sources in the mantle: evidence from Hf isotopes [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145: 281-300.
- [25] Dupuy C, Liotard J M, Dostal J. Zr/Hf fractionateon in intraplate basaltic rocks: carbonate metasomatism in the mantle source [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(6): 2417-2423.
- [26] Ionov D. Trace element composition of mantle-derived carbonates and coexisting phases in periodtite xenoliths from alkali basalts [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 21931-1941.
- [27] Woolley A R, Church A A. Extrusive carbonatites: a brief review [J]. Lithos, 2004, 85: 1-14.
- [28] Bell K, Simonetti A. Source of parental melts to carbonatites-critical isotopic constraints [J]. Mineralogy and Petrology, 2010, 98:77-89.
- [29] Bell K, Tilton G R. Nd, Pb and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: evidence for mantle mixing and plume inhomogeneity [J]. Journal of Petrology, 2001, 42: 1927-1945.
- [30] Beccaluva L, Barbieri M, Born H, et al. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquia [J]. Journal of Petrology, 1992, 33: 1371-1404.
- [31] Wyllie P J, Huang W L. Peridotite, kimberlite and carbonatite explained in the system CaO-MgO-SiO₂-CO₂[J]. Geology, 1975, (3): 621-624.
- [32] Wallace M E, Green D H. An experimental determination of primary carbonatite magma composition [J]. Nature, 1988, 335: 343-346.
- [33] Koster van Groos A F, Wyllie P J. Experimental data bearing on the role of liquid immiscibility in the genesis of carbonatites [J]. Nature, 1963: 801-802.
- [34] Kjarsgaard B A, Hamilton D L, Peterson T D. Peralkaline nephelinite/carbonatite liquid immiscibility: comparison of phase composition in experiments and natural lavas from Oldoinyo Lengai [C]// Bell K, Keller J. Carbonatite Volcanism: Oldoinyo Lengai and the Petrogenesis of Natrocarbonatites. IAVCEI Proceedings in Volcanology 4. Berlin: Springer, 1995: 163-190.
- [35] BrooKer R A. The effect of CO₂ saturation on immiscibility between silicate and carbonate liquids: an experimental study [J]. Journal of Petrology, 1998, 1905-1915.
- [36] Veksler I V, Petibon C, Jenner G A, et al. Trace ele-

ment partitioning in immiscible silicate-carbonate liquid systems: an initial experimental study using a centrifuge autoclave [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 2095-2104.

- [37] Dalton J A, Presnall D C. The continuum of primary carbonatitic-kimberlitic melt compositions in equilibrium with lherzolite: data from the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂ at 6 GPa [J]. Journal of petrology, 1998, 39: 1953-1964.
- [38] Sweeney R J. Carbonatite melt compositions in the earth's mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 128: 259-270.
- [39] Eggler D H. Carbonatites, primary melts, and mantle dynamics [C]// Bell K. Carbonatites: Genesis and Evolution. Unwin Hyman, London, 1989; 561-579.
- [40] Korobeinikov A N, Mitrofanov F P, Gehor S, et al. Geology and Copper Sulphide Mineralization of the Salmagorskii Ring Igneous Complex, Kola Peninsula, NW Russia [J]. Journal of Petrology, 1998, 39, 2033-2041.
- [41] Kjarsgaard B A. Phase relations of a carbonated high-CaO nephelinite at 0. 2 and 0. 5GPa [J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 2061-2075.
- [42] Srivastava R K. Petrology, geochemistry and gensis of riftrelated carbonatites of Ambadungar, India [J].

Mineralogy and Petrology, 1997, 61: 47-66.

- [43] Downes H, Balaganskaya E, Beard A, et al. Petrogenetic processes in the Kola Alkaline Province: A review [J]. Lithos, 2005: 1-28.
- [44] Bailey D K. Episodic alkaline activity across Africa: implications for the causes of continental break-up [C]// Storey B C et al. Magmatism and the causes of continental break-up. Geological Society of London Special Publication, 1992, 68: 91-98.
- [45] Burke K, Ashwal L D, Webb S J. New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites [J]. Geology, 2003, 31: 391-394.
- [46] Ernst R E, Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites[J]. Mineralogy and Petrology, 2010, 98:55-76.
- [47] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in Large Igneous Province research [J]. Lithos, 2005, 79:271-297.
- [48] Bell K, Rukhlov A S. Carbonatites from the Kola Alkaline Province: origin, evolution and source characteristics [C]// Wall F, Zaitsev A N. Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province. Mineralogical Society, London, 2004: 421-455.

Advances on the carbonatite research in recent years

YE Hai-min, ZHANG Xiang

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paper introduces a comprehensive summary about the spatio-temporal distribution, petrology, mineralogy, geochemistry and C-O-Sr-Nd-Pb isotopic features of carbonatite. On the basis of experimental petrology data in recent 20 years, the differential evolution of carbonatitic magma, mantle metasomatism and material compositions of mantle sources are discussed. The carbonatite has very high abundances of Sr, Ba and rare-earth elements (average $\Sigma REE = 3731$). The carbonatite is derived from the mantle without contamination of the crust based on the carbonatitic Sr-Nd-Pb isotopic data, C-O isotopic compositions, noble gases, and experimental phase equilibria. There are still many controversial issues about study of carbonatite, but more and more evidences indicating carbonatite related to large igneous provinces (LIPs) and mantle plume in time and space are found.

Key words: carbonatite; petrology; geochemistry; mantle source; mantle plume