碳酸岩分布特征及成矿意义

苟瑞涛[1,2)]，曾普胜[1,2)]，刘斯文[1)]，麻菁[1,2)]，王聚杰[1,2)]，代艳娟[1,3)]，王兆全[1,2)]

1) 国家地质实验测试中心，北京，100037；2) 中国地质大学(北京)，北京，100083；3) 昆明理工大学，昆明，650000

内容提要：将全球不同时代的碳酸岩体经过 Arcgis 软件进行坐标投点，得到了世界主要的碳酸岩体和碳酸岩有关矿产的分布特征图，结合全球主要构造，本文探讨了不同时代碳酸岩的产出和分布与深大断裂的关系。碳酸岩的空间分布主要与板块内部环境和造山带伸展环境中的拉张岩石圈构造背景有关，这种背景下的深大断裂容易切割到地球深处，为碳酸岩岩浆上涌提供通道，从而控制着碳酸岩的形成和分布。碳酸岩从太古代至新生代均有分布，年代越新出现的频率越高。碳酸岩的岩石学特征标志是其岩浆通过的上部地壳围岩中发生霓长岩化作用，形成一套含有霓石、钠(铁)闪石、钠长石、金云母、钾长石等为特征的霓长岩。碳酸岩体在平面和剖面上的分布，与其共生的碱性岩和超基性岩分布亦具有一定的规律性。碳酸岩的主量元素主要包括 CO_2、CaO、MgO、FeO、Fe_2O_3、MnO 以及 SiO_2 等，根据碳酸岩中的 CaO、MgO 和(FeO+Fe_2O_3+MnO)以及碱质之间的重量百分比可将碳酸岩划分为钙质碳酸岩、镁质碳酸岩和铁质碳酸岩以及碱质碳酸岩四大类。碳酸岩的微量元素主要是 F、P、Nb-Ta、REE(LREE)、Zr(Hf)、碱金属(K、Na、Rb、Cs、Li)、碱土金属(Sr、Ba)以及衍生的 Fe 等强不相容的大离子亲石元素(LIPLE)，通常是张性深大断裂导致的深部地幔低度部分熔融的产物，易在碳酸岩中富集成矿，形成一系列具有重要价值的金属和非金属矿床。碳酸岩中同位素及包裹体的研究，均不同程度反映了碳酸岩浆的深部来源及其演化特征。因此，碳酸岩特殊的产出背景、特有的矿物共生组合、围岩蚀变、岩石学特征以及地球化学特征等研究资料，还可以为人们了解深成岩浆的演化和探索地球深部信息提供证据。最近十几年的研究中，人们发现可能存在一种新的壳源成因的碳酸岩。

关键词：碳酸岩；时空分布；深大断裂；成矿作用；稀土

碳酸岩是指含碳酸盐矿物(如方解石、白云石、菱铁矿等)体积大于50%、二氧化硅重量小于20%的火成岩石(Streckeisen，1980；Woolley，1989)，但是由于许多碳酸岩成分复杂，故使这一术语早前应用比较混乱(Kresten，1983；Qiu Yuzhuo，1986)。碳酸岩地质地球化学特征与常见的沉积成因的碳酸盐岩(如石灰岩和白云岩)明显不同，通常将沉积成因的主要由碳酸盐矿物组成的岩石称为碳酸盐岩(carbonate rock)，而将由岩浆形成的主要由碳酸盐矿物组成的岩石称为碳酸岩或火成碳酸岩(carbonatite)(Song Wenlei et al，2012)。碳酸岩以其特定的大地构造背景、独特的地质地球化学特征、较深的物质来源以及巨大的经济价值，一直倍受地质学家的关注(Dawson，1962；Woolley，1987；Kogarko et al.，1995；Yang Xiaoyong et al.，2000；Woolley，2001；Hou Zengqian et al.，2015)。碳酸岩常与 REE、Nb、Ta、P、Fe、U、Th 以及重晶石、碱、萤石等矿床密切相关，因此，通过对其深入研究，了解碳酸岩的产出和分布环境、总结碳酸岩的岩石学和地球化学特征，分析有关元素的成矿作用，具有重要的理论意义和实际价值(Woolley，1987；Wang Zhiyu et al.，2012)。

1 碳酸岩的构造背景和时空分布

总结近30年前人对碳酸岩的研究，系统整理全球主要碳酸岩体的位置和年龄数据，可以得到不同

注：本文为国家自然科学基金项目(编号 41072073)、国土资源部公益性行业科研专项(编号 201211078)和国土资源大调查项目(编号 12120113002500)资助成果。

收稿日期：2016-01-30；改回日期：2018-04-03；网络发表日期：2019-05-22；责任编辑：郝梓国

作者简介：苟瑞涛，男，1990年生，硕士研究生，主要研究矿床学、岩石学。Email：944925357@qq.com。通讯作者：曾普胜，男，1964年生，研究员，长期从事矿床学、岩石学和地球化学研究。Email：zengpusheng@vip.sohu.com。

引用本文：苟瑞涛，曾普胜，刘斯文，麻菁，王聚杰，代艳娟，王兆全. 2019. 碳酸岩分布特征及成矿意义. 地质学报，93(9)：2348～2361，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019130.

Gou Ruitao，Zeng Pusheng，Liu Siwen，Ma Jing，Wang Jujie，Dai Yanjuan，Wang Zhaoquan. 2019. Distribution characteristics of carbonatites of the world and its metallogenic significance. Acta Geologica Sinica，93(9)：2348～2361.

时代碳酸岩体在全球的分布图(图 1)。

碳酸岩在全球七大洲均有出露。目前全世界已知的碳酸岩体共 527 处,其中喷出岩 47 处(Woolley et al., 2008)。已知的碳酸岩中约 50%具有明确的测年数据(Ye Haimin et al., 2015)。在加拿大地块、东非地块、科拉半岛、澳大利亚以及古亚洲洋等地区出露的碳酸岩体年代偏老,而在巴西、特提斯—喜马拉雅造山带以及东非裂谷带等地区中出露的碳酸岩体年代则较新。已知的最古老的碳酸岩杂岩体是位于加拿大的肖特湖(Lac Shortt)岩体,年龄为 2691Ma(Woolley et al., 2008);最年轻的碳酸岩体则是位于坦桑尼亚的伦盖伊火山(Oldoinyo Lengai),在 20 个世纪 90 年代仍在活跃(Dawson et al., 1995)。根据对全世界碳酸岩体测年数据的总结,碳酸岩的出露与年代分布具有一定的规律,基本上年代越新碳酸岩出现的频率越高(Woolley et al., 1989)(图 1)。

结合全球主要断裂带的分布不难看出,碳酸岩的空间分布几乎都与深大断裂带有关,它们的形成和分布常常受深大断裂控制。在全球范围内,与碳酸岩相关的深大断裂基本分布在两大地区,一是板块内部环境,包括大陆板内环境和大洋板内环境,前者代表如加拿大,东非等地区,后者如佛得角以及南印度洋等地区;另一类是造山带环境中的强烈伸展地带,如中国攀西地区等(图 1)(Hou Zengqian et al., 2015)。

1.1　大陆板内环境

目前已发现的碳酸岩体大多数分布于大陆板内,通常产于拉张岩石圈构造背景裂谷环境(Yang Xueming et al., 1998a, 1998b)。

Bai Ge et al. (1985)总结指出,在某些大陆板内地区,由于地壳薄而刚硬,产生的深大断裂易切割到地球的深处,对地球深部的碳酸岩浆形成及上涌到达地表起着重要作用。在深大断裂发育的地区,碳酸岩体通常呈线状沿着断裂分布(图 1)。Yang Xueming et al. (1998a, 1998b)认为,热地幔柱上隆可能是岩石圈发生拉张构造的主要原因,多表现为岩石圈变薄和深大断裂的产生。全球典型的地区有:

(1)东非区:位于非洲克拉通的东部,受东非裂谷带的控制,大量的碳酸岩沿断裂呈线状分布。该区的碳酸岩大多形成时代较新,以喜马拉雅期和燕山期为主。但刚果(金)的碳酸岩体的形成时代多在前寒武纪(图 1)。该区出露许多世界上著名的碳酸岩体,如坦桑尼亚的伦盖伊火山(Oldoinyo Lengai)岩体,乌干达的波特尔堡(Fort Portal)岩体等(Woolley, 2001)。

(2)科拉半岛—斯堪的那维亚半岛区:主要位于俄罗斯地块和波罗的海地块的边缘,受平行于地块边缘的深大断裂控制。该区的碳酸岩多形成于古生代及前寒武纪(图 1),典型的碳酸岩体有俄罗斯的科夫多尔(Kovdor)岩体、挪威的费恩(Fen)岩体以及瑞典的阿尔诺(Alnö)岩体等(Kogarko et al., 1995; Woolley et al., 2008)。

(3)加拿大区:主要位于加拿大地块的东南部和南部地区,沿北拉夫林基亚断裂带分布(Bai Ge et al., 1985)。除此之外,在加拿大北部也有碳酸岩体零星出露。除个别岩体外,该区的碳酸岩形成于前寒武纪(图 1)。该区的代表性岩体有奥卡(Oka)岩体、肖特湖(Lac Shortt)岩体以及曼尼托岛(Manitou Islands)岩体等(Woolley, 1987; Woolley et al., 2008)。

(4)西伯利亚区:主要分布在西伯利亚地块东侧,主要受地块边缘深大断裂控制,形成时代多集中在古生代及前寒武纪,但是也有新生代岩体出露(图 1)。该区的代表岩体有阿尔巴拉斯塔赫(Arbarastakh)岩体(Kogarko et al.,1995; Woolley et al., 2008)等。

(5)格陵兰区:碳酸岩体主要沿格陵兰地块的南缘分布。该区的岩体形成时代从前寒武至喜马拉雅期均有分布(图 1)。代表岩体有萨法托克(Sarfartoq)岩体以及格罗尼达尔-伊卡(Gronnedal-Ika)岩体等(Xu Cheng et al., 2004; Woolley et al., 2008)。

(6)巴西区:碳酸岩体主要分布在巴西克拉通的东缘,主要受圣弗朗西斯科基底断裂控制,代表性岩体有阿拉萨(Araxá)岩体、塔皮拉(Tapira)岩体以及依帕内玛(Ipanema)岩体等。

该区的碳酸岩体多形成于燕山期(图 1)(Bai Ge et al., 1985; Woolley et al., 2008)。

(7)印度区:碳酸岩体多数沿印度地块边缘分布,主要分布在印度半岛西北部和南端。西北部的碳酸岩体受到纳尔马达深断裂控制,形成时代以燕山期为主,代表岩体如安巴-顿加尔(Amba-Dongar)岩体等。印度半岛南端分布的碳酸岩体主要形成于前寒武纪,代表岩体为塞瓦特尔(Sevattur)岩体等(Xu Cheng et al., 2004; Woolley et al., 2008)。

(8)澳大利亚区:碳酸岩体主要分布在澳大利亚

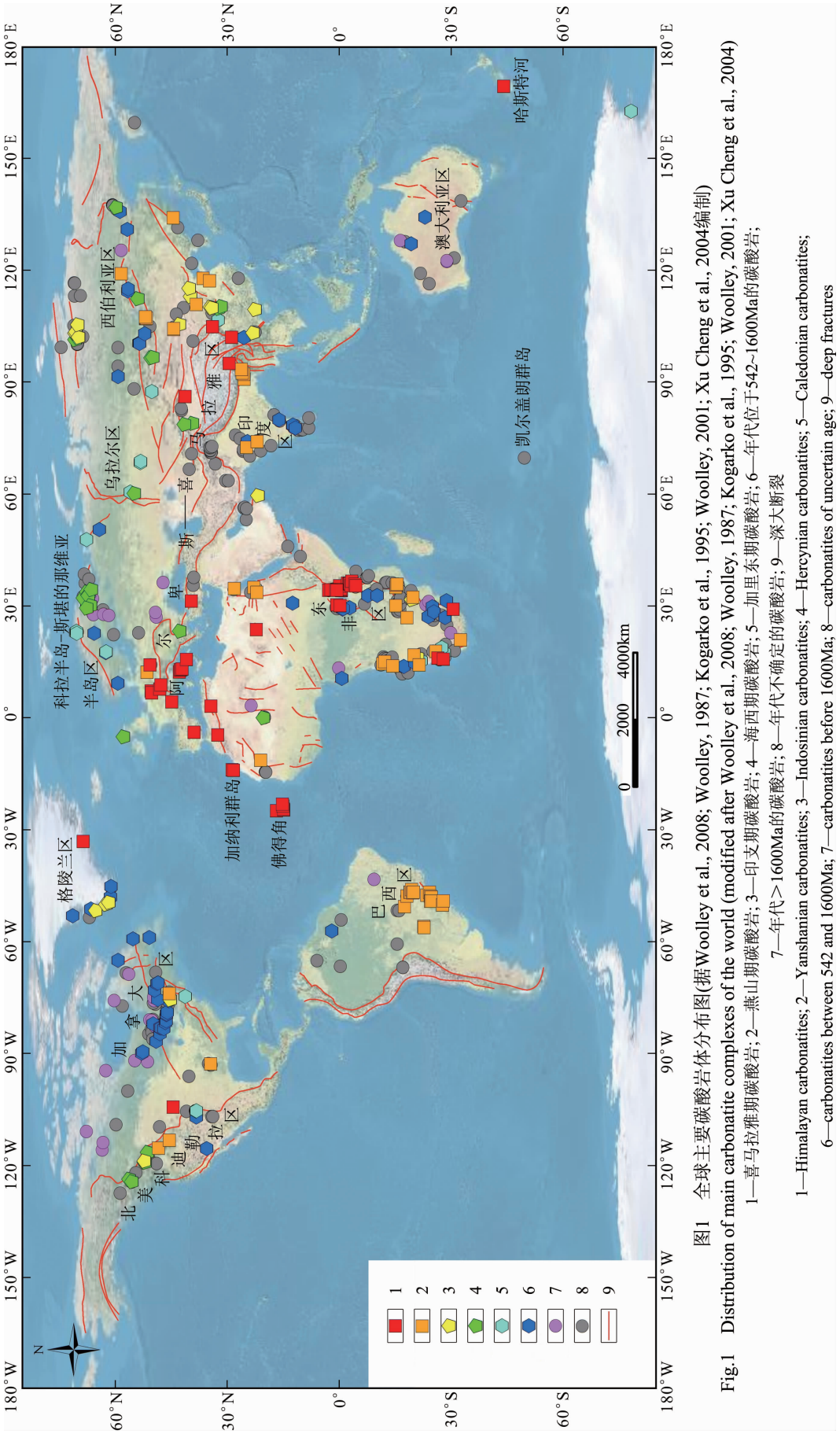


图1 全球主要碳酸岩体分布图(据Woolley et al., 2008; Woolley, 1987; Kogarko et al., 1995; Woolley, 2001; Xu Cheng et al., 2004编制)

Fig.1 Distribution of main carbonatite complexes of the world (modified after Woolley et al., 2008; Woolley, 1987; Kogarko et al., 1995; Woolley, 2001; Xu Cheng et al., 2004)

1—喜马拉雅期碳酸岩; 2—燕山期碳酸岩; 3—印支期碳酸岩; 4—海西期碳酸岩; 5—加里东期碳酸岩; 6—年代位于542~1600Ma的碳酸岩; 7—年代>1600Ma的碳酸岩; 8—年代不确定的碳酸岩; 9—深大断裂

1—Himalayan carbonatites; 2—Yanshanian carbonatites; 3—Indosinian carbonatites; 4—Hercynian carbonatites; 5—Caledonian carbonatites; 6—carbonatites between 542 and 1600Ma; 7—carbonatites before 1600Ma; 8—carbonatites of uncertain age; 9—deep fractures

地块的西部,推测可能受隐伏断裂控制,形成时代较早,多在前寒武纪(图 1)。代表岩体有威尔德山(Mt Weld)岩体以及云谷(Yungul)岩体等(Woolley et al., 2008)。

1.2 大洋板内环境

大洋板内环境中的碳酸岩体主要分布在非洲西部的佛得角(Cape Verde)和加纳利群岛(Canary Islands)(Hoernle et al., 2002),主要形成于喜马拉雅期(Woolley et al., 2008),代表岩体为富埃特文图拉(Fuerteventura)等(Woolley, 2001)。除此之外,在新西兰岛哈斯特河(Haast River)以及南印度洋的凯尔盖朗群岛(Kerguelen Islands)也可见碳酸岩体出露,前者形成于喜马拉雅期(Woolley et al., 2008),后者形成时代不详(图 1)。

1.3 造山带环境

在造山带环境中,碳酸岩体多产生于挤压而派生的拉张岩石圈构造背景(Yang Xueming et al., 1998a, 1998b)。碳酸岩岩体的出露大多受到板块构造的影响,并且常常是两大构造单元的分界线或结合部位,在这些地区,由于两大构造单元的相互作用,往往由于挤压作用而派生出引张岩石圈构造,从而产生切割到地球深部的深大断裂。这些深大断裂控制着碳酸岩的形成和分布。全球范围内典型的地区有:

(1)阿尔卑斯－喜马拉雅区:碳酸岩体受到印度板块和欧亚板块的碰撞作用而产生的特提斯－喜马拉雅造山带内一系列走滑－伸展深大断裂控制,形成时代较新,多集中在喜马拉雅期。该区碳酸岩体的分布范围从西部的阿尔卑斯地区一直延伸到东部的喜马拉雅地区,如法国南部到巴基斯坦西北部(Tilton et al., 1998)再到中国的攀西地区(Xu Cheng et al., 2002; Hou Zengqian et al., 2006)皆可见碳酸岩体的出露(图 1)。该区的代表岩体有法国的夏布里耶斯(Chabrieres)岩体、保加利亚的斯维德尼亚(Svidnya)岩体(Woolley et al., 2008)、巴基斯坦的罗什尔曼(Loe Shilman)岩体以及中国的牦牛坪岩体和大陆槽岩体(Xu Cheng et al., 2004; Woolley et al., 2008)等。

(2)乌拉尔区:主要分布受乌拉尔造山带影响,岩体出露较少,形成时代集中在加里东期－海西期(图 1)。代表岩体有维斯涅沃戈尔斯基(Vishnevogorskii)岩体等(Bai Ge et al., 1985; Kogarko et al.,1995; Woolley et al., 2008)。

(3)北美科迪勒拉区:碳酸岩体主要分布在北美洲西部,主要受到太平洋板块和美洲板块造山作用的影响,沿北美洲西海岸的深大断裂控制着碳酸岩体的分布。该区的碳酸岩体形成时代不均,自前寒武纪至喜马拉雅期均有出露(图 1)。代表性岩体有美国的芒廷帕斯(Mountain Pass)岩体和铁山(Iron Hill)岩体等(Woolley, 1987; Woolley et al., 2008)。

1.4 碳酸岩时空分布差异性探讨

由图 1 可以看出,不同环境下产出的碳酸岩时代不同,如大洋板内环境主要产出新生代碳酸岩,而大陆板内环境和造山带环境各时段的碳酸岩均有明显产出。即使同在大陆板内环境,有些地区如澳大利亚主要产出前寒武碳酸岩,东非区则大量产出新生代碳酸岩,而在格陵兰这样的地区碳酸岩的产出却从前寒武到新生代均有。

根据碳酸岩分布的制约因素分析,由于碳酸岩的产生受地球深断裂控制,对于新生代时期的深断裂,无论是陆块边缘的东非裂谷,还是大洋板内环境,都只有较新时代的碳酸岩记录;而古老稳定陆块,如北美和澳大利亚,缺少新生代深断裂活动的条件,因此主要保留前寒武纪的碳酸岩;而对于格陵兰类似的古老地块被裂解之后,在其裂解边缘,可以被后期的碳酸岩叠加,导致新－老碳酸岩共存;造山带地区可将不同时期的碳酸岩混杂到一起,因此可出现不同时期的碳酸岩共存。

1.5 碳酸岩分布的制约因素

结合图 1,上文主要分析了全球碳酸岩分布和深大断裂的联系。从更深层次上来说,制约不同时代碳酸岩分布的因素除深大断裂外,可能还包括:①地幔柱的影响。目前,主流的观点认为,多数碳酸岩的产出均与地幔柱活动有关,包括大洋板块内部和大陆板块内部环境(Yang Xueming et al., 1998a, 1998b; Xu Yigang, 2002; Bell et al., 2010),如印度地块西北部地区和大西洋加纳利群岛产出的碳酸岩体(Woolley et al., 2008)(图 1)。②板块俯冲的影响。笔者认为,在俯冲板块变陡的阶段,深部地幔物质通常容易沿着板片断离(slab breakoff)形成的板片窗上涌,碳酸岩可形成于此种环境,如山东微山地区的碳酸岩－碱性岩杂岩体(Bai Ge et al., 1985; Ma Jing et al., 2015)(图 1)。

2 碳酸岩的主要特征

2.1 碳酸岩的岩石学特征

碳酸岩杂岩体包括侵入岩,也包括喷出岩,最大的特征标志是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,形成一套含有霓石、钠(铁)闪石、钠长石、金云母、钾长石等为特征的霓长岩 Yang Xueming et al., 1998a, 1998b; Kogarko et al., 1995)。几乎所有的碳酸岩都不同程度地与碱性岩共同产出,其根源主要是张性构造背景下,低度部分熔融的产物中的强不相容元素(碱质、C、Ca、Mg 等)的聚集。

碳酸岩往往与橄榄岩、辉石岩、辉长岩、霞石岩、霓霞岩、响岩、粗面岩、黄长岩和正长岩等超基性岩、基性岩和碱性岩共同构成碳酸岩-碱性岩杂岩体,简称碳酸岩杂岩体(Bai Ge et al., 1985; Woolley et al., 1989; Hao Ziguo et al., 2002; Ma Jing et al., 2015)。通常碳酸岩体积相对较小,仅占杂岩体的 10%左右(Ye Haimin et al., 2015)。

在剖面上,随着岩浆定位深度不同,碳酸岩杂岩体内各种岩石的比重也不同。在较深处的碳酸岩杂岩体,以硅酸盐岩石,尤其是超基性岩为主。随着深度减小,超基性岩的比重逐渐让位于碱性超基性岩和碱性岩,碳酸岩的数量相对增多,在浅成或超浅成岩体内碳酸岩数量大大增多(Bai Ge et al., 1985)。

在平面上,这些碳酸岩往往与共生的基性、超基性岩和碱性岩呈同心环状(Bai Ge et al., 1985; Qin Chaojian et al., 2001),通常由中心到边缘。其岩相分带有以下几类:

(1) 碳酸岩→霓霞岩→辉石岩(Qin Chaojian et al., 2001),硅质逐渐增多,例如挪威的费恩(Fen)碳酸岩杂岩体(Bai Ge et al., 1985)。

(2) 碳酸岩→碱性辉石岩→霓霞岩或橄榄岩→霓长岩(Qin Chaojian et al., 2001),碱质逐渐增多,例如俄罗斯科夫多尔(Kovdor)碳酸岩杂岩体(Kogarko et al., 1995)。

(3) 碳酸岩→霓霞岩/辉石岩→霞长岩→霓长岩(Qin Chaojian et al., 2001),硅质和碱质同时增多,例如美国铁山(Iron Hill)碳酸岩杂岩体(Woolley, 1987)。

由于碳酸岩杂岩体既包括碳酸岩,也包括超基性岩、基性岩和碱性岩等,再加上杂岩体的围岩常发育着很宽的霓长岩化带,以及与围岩间发生的交换反应等,致使碳酸岩体的矿物多样而复杂。综合前人的研究工作(Heinrich, 1980; Qin Bingrang, 1991)可知,碳酸岩体中的矿物主要有方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿、菱锶矿和氟碳铈矿等碳酸盐矿物,含量在 80%以上。次要矿物常见的种类有碱性长石、辉石、云母、磷灰石、蛭石、霓石、碱性闪石、橄榄石等。副矿物主要为磁铁矿、钛铁矿等。此外,碳酸岩中还含氟碳铈矿、斜锆石、钛锆钍矿、钙锆钛矿和氟菱钙铈矿等稀有和稀土金属矿物(Ye Haimin et al., 2015)。

2.2 碳酸岩地球化学特征

2.2.1 碳酸岩的主量元素

碳酸岩的化学成分变化很大,多数岩石富 CO_2 和 CaO。SiO_2 含量不等,一般≤20%。还有少数岩石含较高的 MgO, FeO, Na_2O 和 K_2O(Woolley, 1982; Woolley et al., 1989)。因此,Woolley et al. (1989)根据碳酸岩中主量元素 CaO、MgO 和(FeO+Fe_2O_3+MnO)之间的重量百分比,将碳酸岩划分为钙质碳酸岩、镁质碳酸岩和铁质碳酸岩以及碱质碳酸岩四大类。Yang Xueming et al. (1998a)研究指出,碳酸岩浆演化序列通常是:粗粒钙质碳酸岩→细粒钙质碳酸岩+镁质碳酸岩→铁质碳酸岩→细脉-网脉状钙质碳酸岩。因此结合碳酸岩的地球化学成分、矿物成分和结构构造,可将碳酸岩分类如下(表 1)。

2.2.2 碳酸岩微量元素

碳酸岩的微量元素主要是 F、P、Nb-Ta、REE(LREE)、Th、Zr(Hf)等。在碳酸岩中,碱金属(K、Na、Rb、Cs、Li)、碱土金属(Sr、Ba)以及衍生的 Fe 等在一定程度上也属于微量组分。

表 1 碳酸岩分类表(据 Kresten, 1983; Qiu Yuzhuo, 1986; Woolley et al., 1989 修编)

Table 1 Classification of carbonatites (modified after Kresten, 1983; Qiu Yuzhuo, 1986; Woolley et al., 1989)

分类	主量元素	产状		
钙质碳酸岩	CaO/(CaO+MgO+FeO+Fe_2O_3+MnO)>0.8	粗粒钙质碳酸岩(Sovite)(产于岩体核部)	→	细粒钙质碳酸岩(Alvikite)(产于岩体边缘或脉岩)
镁质碳酸岩	CaO/(CaO+MgO+FeO+Fe_2O_3+MnO)<0.8 且 MgO>FeO+Fe_2O_3+MnO)	粗粒镁质碳酸岩(Rauhaugit)(产于岩体核部)	→	细粒镁质碳酸岩(Beforsite)(产于岩体边缘或脉岩)
铁质碳酸岩	CaO/(CaO+MgO+FeO+Fe_2O_3+MnO)<0.8 且 MgO<FeO+Fe_2O_3+MnO)	产于岩体核部或脉岩中		
碱质碳酸岩	Na_2O+K_2O 含量较高	钠碳酸岩(Natrocarbonatite)或碳酸熔岩(Lengaite)(以喷出岩产出)		

F 在碳酸岩体中含量较高,有时 F 可以在碳酸岩中高度富集形成碳酸岩型萤石矿床。

P 也是碳酸岩最为特征的元素之一,最常以磷灰石的形式出现。

Nb 和 Ta 一般在碳酸岩杂岩体形成的晚期富集,随着成岩作用的进行,赋存在烧绿石中出现。

REE 是碳酸岩最为特征和重要的元素。对其他岩石而言,REE 通常都作为微量元素出现(Tian Liming et al., 2017; Zhao Honggang et al., 2018),然而在类似白云鄂博这样的大型稀土矿区(Zhang Yong et al., 2016),却作为主要的成矿元素富集出现。富 REE,尤其 LREE 的高度富集,几乎是所有地区火成碳酸岩的共性(Wang Xibin et al., 2002, Hao Ziguo et al., 2002)。

碱土元素 Sr、Ba 等同样在碳酸岩中的含量较高,主要是与 Ca 的关系比较密切,主要赋存在 Ca、Mg 的碳酸盐中,其含量明显远远高于沉积型碳酸盐中碱土金属元素的含量(Bai Ge et al., 1985)。

2.2.3　同位素地球化学特征

碳酸岩中同位素的研究,目前主要涉及 Sr、Nd、Pb、C、O 同位素(Yang Xueming et al., 1998a, 1998b; Yang Xiaoyong et al., 2000; Xu Cheng et al.,2004)。

Xu Cheng et al.(2004)选取世界各地年代跨度从元古代至今的碳酸岩体中的 Sr、Nd 和 Pb 同位素成分,经总结研究发现其 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ 的值为 0.70125～0.70686,$(^{143}Nd/^{144}Nd)_0$ 值为 0.51050～0.51266,并且具有放射性成因的铅同位素组成。经过与常见岩石类型的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成的对比,认为碳酸岩的源区可以看作为富集地幔(EM I 或者 EM II)和具有高 U/Pb 比值的地幔(HIMU)的混合结果。

Yang Xueming et al.(1998a, 1998b)对碳酸岩的 C 和 O 同位素研究后发现,原生碳酸岩的平均 $\delta^{18}O$ 数值变化范围 0.4‰～2.7‰ (SMOW),而碳酸岩的 $\delta^{13}C$ 数值的变化范围在 −0.2‰～−0.8‰ (PDB)之间,因此指出,$\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 数值反映了碳酸岩的氧来源于地幔。

2.2.4　包裹体特征

碳酸岩的矿物中最常见的是磷灰石和方解石中的包裹体,另外白云石和铁白云石中也有少量的包裹体。在这些包裹体中,最常见的是盐水溶液包裹体,其次是 CO_2 包裹体和熔融包裹体。这些包裹体的共同特征是,它们都含有比例不等的深源 CO_2 包裹体(Zhou Jin et al., 2003)。

对碳酸岩矿物包裹体的研究表明,碳酸岩可以形成于熔体和流体两种介质条件下,碳酸盐矿物同样也可以如磷灰石般形成于岩浆和热液阶段,即 Na-K-Ca-Mg-H_2O-CO_2 流体体系中(Qin Chaojian et al., 2001)。在碳酸岩的起源和演化过程中伴随有岩浆的不混溶作用,发生并且碳酸岩浆具有较低的黏度和密度(Zhou Jin et al., 2003)。

2.3　碳酸岩的物质来源探讨

从前人对碳酸岩的岩石化学特征、微量元素特征、同位素地球化学特征以及包裹体特征的大量研究中均指示出,典型的火成碳酸岩系来源于富集地幔。典型的碳酸岩－碱性基性岩岩体如白云鄂博,碳酸岩与共生的镁铁质碱性岩的 REE 与微量元素的分配型式近似,Sr、Nd、Pb 同位素特征亦相近,均呈现出幔源特征(Hao Ziguo et al., 2002)。

在最近十几年的碳酸岩研究中,人们认识到除了幔源成因,部分地区还可能存在壳源成因的碳酸岩。一般认为,壳源成因的碳酸岩由碳酸盐岩部分熔融而形成的。根据前人的研究,一般认为引起碳酸盐岩熔融的因素主要如下:①中酸性侵入体引起碳酸盐岩熔融形成碳酸岩(Zhao Bin et al., 2004; Wang Jincao et al., 2006);②基性岩浆高温热流引起碳酸盐岩熔融形成碳酸岩(Chen Hua et al., 2010; Ren Jiande et al., 2007; Mao Liquan et al., 2017);③强烈区域变质作用造成碳酸盐岩部分熔融形成碳酸岩(Liu Yan et al., 2006);④大理岩深熔形成碳酸岩(Dong Chunyan et al., 2009; Yang Junquan et al., 2012; Xin Houtian et al., 2012)。

3　与碳酸岩有关的成矿作用

结合碳酸岩的岩石学和地球化学特征可知,与碳酸岩有关的矿产元素主要是与深部地幔低度部分熔融关系密切的不相容元素或大离子亲石元素(LIPLE),如 LREE、Nb-Ta、Zr(Hf)、F、P、碱金属(K、Na、Rb、Cs、Li)、碱土金属(Sr、Ba),以及衍生的 Fe 等,这些元素在碳酸岩浆的上涌过程中容易富集形成的一系列金属和非金属矿(图 2),很多矿种具有重要的战略意义,有计划地合理开发利用这些资源对于国家经济可持续发展具有重要意义。

在总结前人研究资料的基础上,表 2 列举了与碳酸岩有关的金属矿产和非金属矿产及其典型矿床。随着经济的发展和科学技术的进步,碳酸岩越

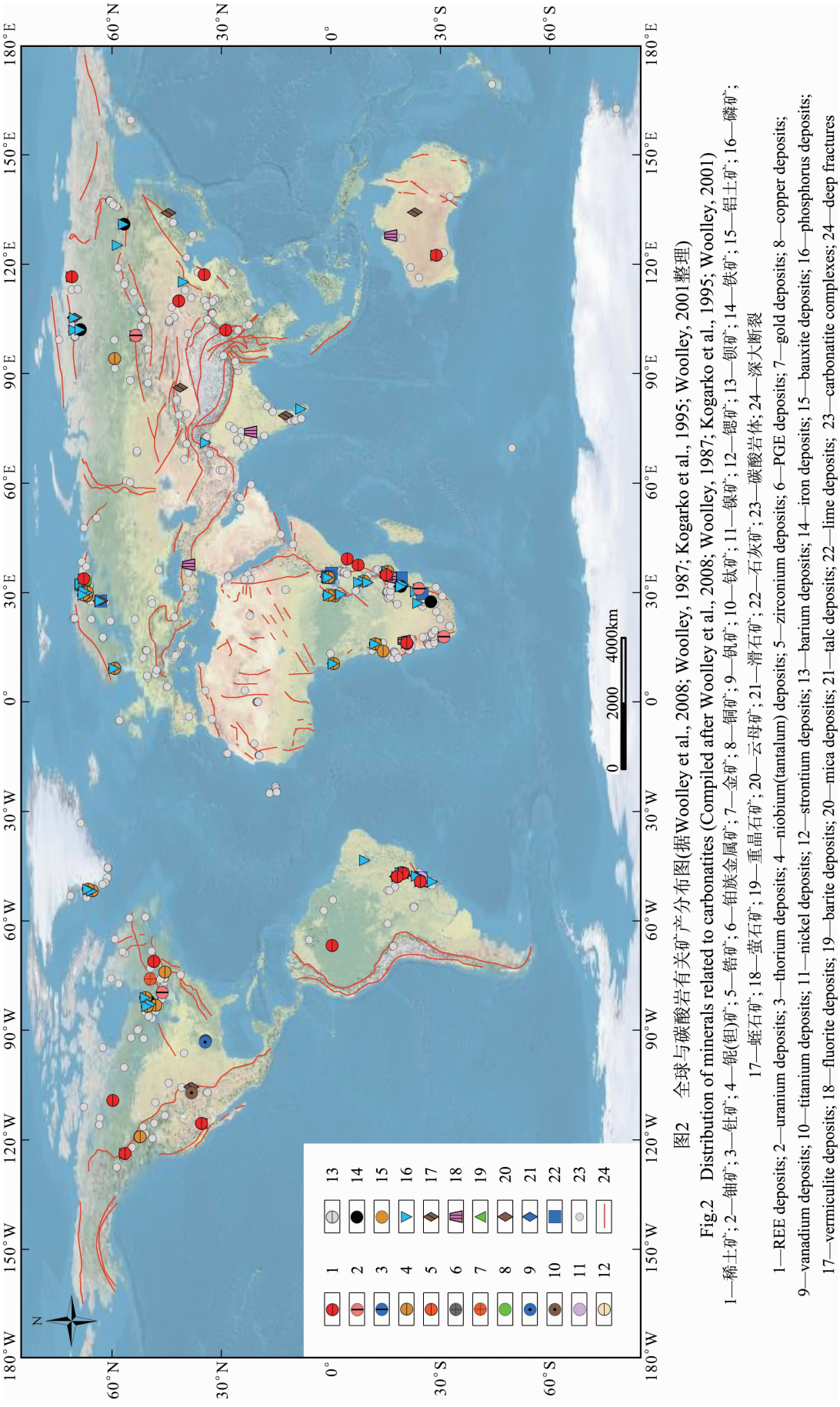


图2 全球与碳酸岩有关矿产分布图(据Woolley et al., 2008; Woolley, 1987; Kogarko et al., 1995; Woolley, 2001整理)

Fig.2 Distribution of minerals related to carbonatites (Compiled after Woolley et al., 2008; Woolley, 1987; Kogarko et al., 1995; Woolley, 2001)

1—稀土矿; 2—铀矿; 3—钍矿; 4—铌(钽)矿; 5—锆矿; 6—铂族金属矿; 7—金矿; 8—铜矿; 9—钒矿; 10—铁矿; 11—镍矿; 12—锶矿; 13—钡矿; 14—铁矿; 15—铝土矿; 16—磷矿; 17—蛭石矿; 18—萤石矿; 19—重晶石矿; 20—云母矿; 21—滑石矿; 22—石灰矿; 23—碳酸岩体; 24—深大断裂

1—REE deposits; 2—uranium deposits; 3—thorium deposits; 4—niobium(tantalum) deposits; 5—zirconium deposits; 6—PGE deposits; 7—gold deposits; 8—copper deposits; 9—vanadium deposits; 10—titanium deposits; 11—nickel deposits; 12—strontium deposits; 13—barium deposits; 14—iron deposits; 15—bauxite deposits; 16—phosphorus deposits; 17—vermiculite deposits; 18—fluorite deposits; 19—barite deposits; 20—mica deposits; 21—talc deposits; 22—lime deposits; 23—carbonatite complexes; 24—deep fractures

表 2　碳酸岩有关矿产(据 Woolley et al. , 2008; Bai Ge et al. , 1985 修编)

Table 2　Distribution of mineral related to carbonatite (modified after Woolley et al. , 2008; Bai Ge et al. , 1985)

分类	矿产	代表矿床	国家	资料来源
金属矿产	稀土矿	白云鄂博	中国	Liu Tiegeng, 1990; Liu Jian et al. , 2011; Wang Xiang. 2018
		牦牛坪	中国	Xu Cheng et al. , 2002
		微山	中国	Yu Xuefeng et al. , 2010
		芒廷帕斯(Mountain Pass)	美国	Castor, 2008
		托姆托尔(Tomtor)	俄罗斯	Kavchenko, 1995
	钛矿	铁山(Iron Hill)	美国	Richardson et al. , 1996
		尼格拉山(Serra Negra)	巴西	Woolley et al. , 2008
	锆矿	帕拉波罗 (Palabora)	南非	Notholt et al. , 1990
		苏库鲁(Sukulu)	乌干达	Van Straaten, 2002
	钒矿	钾硫温泉(Potash Sulpher Springs)	美国	Woolley, 1987
	贵金属矿	帕拉波罗(Palabora)	南非	Notholt et al. , 1990
	铀矿	曼尼托岛(Manitou Islands)	加拿大	Woolley, 1987
		Sandkopsdrif	南非	Verwoerd, 1986
	钍矿	Sandkopsdrif	南非	Verwoerd, 1986
		白云鄂博	中国	Liu Jian et al. , 2009, 2011
	锶矿	Kangankunde	马拉维	Malunga, 1997
	钡矿	Sallanlatvi	俄罗斯	Kogarko et al. , 1995;Petrov, 2004
	铌(钽)矿	阿拉萨(Araxá)	巴西	Biondi, 2005
		白云鄂博	中国	Liu Jian et al. , 2009, 2011; Wang Xiang. 2018
		邦加(Bonga)	安哥拉	Zheng luo et al. , 2014
	金矿	肖特湖 (Lac Shortt)	加拿大	Woolley et al. , 2008
	铜矿	帕拉波罗 (Palabora)	南非	Woolley, 2001
		Salmagorskii	俄罗斯	Kogarko et al. , 1995; Petrov, 2004
	铁矿	马格内特湾(Magnet Cove)	美国	Woolley, 1987
		白云鄂博	中国	Liu Jian et al. , 2009, 2011
	镍矿	帕拉波罗 (Palabora)	南非	Notholt et al. , 1990
		雅库皮兰加(Jacupiranga)	巴西	Notholt et al. , 1990
	铝土矿	Khibina	俄罗斯	Petrov, 2004
非金属矿产	磷矿	科夫多尔(Kovdor)	俄罗斯	Kogarko et al. , 1995
	萤石矿	安巴－顿加尔(Amba-Dongar)	印度	Bai Ge et al. , 1985;Notholt et al. , 1990
	蛭石矿	布库苏(Bukusu)	乌干达	Bai Ge et al. , 1985; Woolley, 2001
	重晶石矿	芒廷帕斯(Mountain Pass)	美国	Notholt et al. , 1990
	滑石矿	Siilinjarvi	芬兰	Notholt et al. , 1990
	云母矿	科夫多尔(Kovdor)	俄罗斯	Kogarko et al. , 1995
	石灰矿	科鲁(Koru)	肯尼亚	Van Straaten, 2002

来越凸显出其巨大的经济价值。它们是许多金属矿产和资源的重要存储库(图 2, 表 2),并且还是某些金属矿产和资源的唯一来源(Woolley, 2001)。根据前人的研究资料,与碳酸岩有关的重要矿产资源简述如下。

3.1　稀土矿产

稀土是与碳酸岩有关的最重要的战略资源。碳酸岩是所有火成岩中 REE 含量最高并且轻重稀土分异最大的岩石之一,REE 平均含量为 3000～10000μg/g,高于原始地幔 500～1000 倍,La/Lu 比值可达 200～2000(Woolley et al. , 1989)。如此高的 REE 含量也使得稀土矿物成为碳酸岩中较常见的矿物。前人通过对比稀土元素在硅酸盐熔浆和碳酸盐熔浆之间的分配关系发现,稀土族元素更倾向于在碳酸岩中富集,富气相中携带相当数量的稀土族元素,尤其是较轻的稀土族元素(Roedder, 1986)。

根据最新的调查统计(U. S. Geological Survey, 2018),2017 年全球总稀土储量 12000 万吨,年产量 13 万吨,其中中国的稀土储量为 4400 万吨,年产量为 10.5 万吨,两项数据均居世界首位。除中国外,澳大利亚、俄罗斯、巴西、美国等国也是世界上稀土矿的主要产出国家。

与碳酸岩杂岩体相关的稀土矿床分为岩浆型和热液型,主要分布在中国和美国(Song Wenlei et al. , 2013)。目前国外主要的稀土矿有美国的芒廷帕斯(Mountain Pass)稀土矿(Castor, 2008)、俄罗斯的托姆托尔(Tomtor)稀土矿(Kavchenko,

1995)。中国主要的稀土矿有内蒙古的白云鄂博稀土矿(Liu Tiegeng, 1990; Liu Jian et al., 2009, 2011; Fei Hongcai et al., 2012)、牦牛坪稀土矿(Xu Cheng et al., 2002; Tian Shihong et al., 2006)以及山东微山稀土矿(Tian Jingxiang et al., 2002; Li Jiankang et al., 2009; Yu Xuefeng et al., 2010)等。

3.2 稀有金属矿产

与碳酸岩有关的稀有金属包括以下三类:

(1)难熔稀有金属矿产:主要包括与碳酸岩有关的钛矿、锆矿和钒矿(图 2, 表 2)。钛矿主要有岩浆型和红土型两种,岩浆型的代表为美国铁山(Iron Hill)矿床(Richardson et al., 1996)等,红土型代表为巴西尼格拉山(Serra Negra)矿床(Woolley et al., 2008)等。锆矿主要包括岩浆型和风化壳型,岩浆型的代表矿床有南非帕拉波罗(Palabora)矿床(Notholt et al., 1990)和俄罗斯的科夫多尔(Kovdor)矿床(Petrov, 2004)等;风化壳型锆矿目前已知仅乌干达苏库鲁(Sukulu)矿床一处(Van Straaten, 2002; Woolley et al., 2008)。钒矿比较少见,代表矿床为美国钾硫温泉(Potash Sulpher Springs)矿床。

(2)稀有贵金属矿产:非常罕见,目前仅知的与碳酸岩有关的贵金属矿床为南非帕拉波罗(Palabora)矿床。(Notholt et al.,1990),系岩浆型矿床。

(3)放射性稀有金属矿产:主要包括放射性铀矿和钍矿(图 2, 表 2)。目前已知与碳酸岩有关的铀矿均为岩浆型(Woolley et al., 2008),代表矿床如加拿大曼尼托岛(Mannitou Islands)(Woolley, 1987)以及南非的 Sandkopsdrif(Verwoerd, 1986)等。与碳酸岩有关的钍矿以岩浆型为主,代表矿床有巴西阿拉萨(Araxá)(Biondi, 2005)、南非 Sandkopsdrif(Verwoerd, 1986)以及中国白云鄂博(Liu Jian et al., 2009, 2011)等。

3.3 碱土金属

与碳酸岩有关的碱土金属主要为锶矿和钡矿(图 2, 表 2),比较少见。

锶矿的代表为马拉维的 Kangankunde 矿床,系热液型矿床(Malunga, 1997)。

钡矿的代表为俄罗斯的 Sallanlatvi 矿床,系热液型矿床(Kogarko et al., 1995; Petrov, 2004)。

3.4 其他重要金属矿产

除了稀土金属,稀有金属以及碱土金属,与碳酸岩有关的金属矿产还包括铌(钽)矿、金矿、铜矿、铁矿、镍矿以及铝土矿等(图 2, 表 2)。

铌(钽)矿成因类型多样,一般在碳酸岩杂岩体形成的晚期富集,随着成岩作用的进行,主要赋存在烧绿石中出现。根据前人研究资料(Woolley et al., 2008),与碳酸岩有关的铌(钽)矿主要有红土型、岩浆型、风化壳型以及热液型等。目前,最大铌矿床为巴西阿拉萨(Araxá)(Biondi, 2005),为红土型;中国白云鄂博铌储量居世界第二位(Liu Jian et al., 2011),可能为岩浆与热液混合成因。

金矿比较罕见,目前已知代表矿床为加拿大肖特湖(Lac shortt)(Woolley et al., 2008)。

铜矿属于比较少见的一类与碳酸岩有关的硫化物矿床,最著名的矿床为南非帕拉波罗(Palabora),系岩浆成因(Woolley, 2001),黄铜矿和斑铜矿为其最主要的矿石矿物(Bai Ge et al., 1985)。俄罗斯的 Salmagorskii 是另一处较大的此类铜矿,同样为岩浆型(Kogarko et al., 1995; Petrov, 2004)。

铁矿,矿石矿物主要为磁铁矿,一般为碳酸岩杂岩体在成矿早期析出富集成矿,经常与矿产资源伴生,分布比较广泛,以岩浆型和热液型为主。国外此类矿床的代表有美国马格内特湾(Magnet Cove),中国的典型矿床为白云鄂博(Liu Jian et al., 2009, 2011; Wang Xiang. 2018)。另外,乌干达的布库苏(Bukusu)为残积型矿床,该类型较少见。

镍矿是一类在碳酸岩体少见的金属矿产,目前仅在南非帕拉波罗(Palabora)和巴西雅库皮兰加(Jacupiranga)有镍矿产出,前者属岩浆型,后者为红土型(Woolley et al., 2008)。

铝土矿,比较少见,俄罗斯的 Khibina 为典型代表(Petrov, 2004)。

3.5 非金属矿产

主要包括与碳酸岩有关的磷矿、萤石矿、蛭石矿、重晶石矿、滑石矿、云母矿以及石灰矿等(图 2, 表 2)。

磷矿分布非常广泛,矿石矿物以磷灰石为主,磷灰石在碳酸岩体内既可呈致密大块体,也可分散其中。有时磷灰石会与磁铁矿互成条带状产于碳酸岩内,形成有价值的矿床。此类矿床的典型代表为俄罗斯的科夫多尔(Kovdor)磁铁矿-磷灰石型矿床(Bai Ge et al., 1985; Kogarko et al., 1995)等。

萤石矿,与碳酸岩比较密切的一类矿产,多为多为碳酸岩热水交代成因。典型矿床如印度安巴-顿加尔(Amba-Dongar)(Bai Ge et al., 1985; Notholt

et al., 1990)等。

蛭石矿,多为岩浆和热液成因,属常见的一类非金属矿产。代表矿床如乌干达的布库苏(Bukusu)(Bai Ge et al., 1985; Woolley, 2001)等。

重晶石矿,不单独成矿,多与稀土、萤石等矿产伴生,代表矿床如美国的芒廷帕斯(Mountain Pass)等。

滑石矿,一般与其他非金属矿产伴生产出,代表矿床为芬兰的 Siilinjarvi(Notholt et al.,1990)等。

云母矿的矿石矿物为金云母,一般形成于碳酸岩之前(Bai Ge et al., 1985),为岩浆成因。代表矿床为俄罗斯科夫多尔(Kovdor)(Kogarko et al., 1995)等。

石灰矿,以开采石灰为主,可用于水泥生产等工农业用途。目前该类矿床主要集中在非洲,代表矿床为肯尼亚的科鲁(Koru)(Van Straaten, 2002)等。

3.6　碳酸岩成矿的控制因素探讨

碳酸岩中可能富集成矿的不同元素,在各个地质时代均可表现为较大的变化范围。成矿元素组合差异主要的控制因素有两个:①深部地幔的拉张程度。反映在物理化学条件上则主要是不同的熔融程度,部分熔融程度越低,则岩浆中碳酸岩岩浆的比例越大,甚至以碳酸岩岩浆为主体,如东非大裂谷的伦盖伊火山(Woolley, 2001);随着部分熔融程度的增加,硅酸盐岩浆的比例增加,形成碳酸岩-碱性杂岩,如内蒙古白云鄂博(Hao Ziguo et al., 2002; Wang Kaiyi et al., 2012)和俄罗斯科拉半岛的科尔多夫(Kogarko et al., 1995);部分熔融程度进一步增加,则可能全为硅酸盐岩浆,可形成煌斑岩或碱性岩,如中国云南的卓潘岩体(Chen Xifeng et al., 2015)。②地壳混染程度。沿深断裂上升的碳酸岩-碱性杂岩岩浆,经地壳混染后可形成英碱正长岩或粗面岩,如中国川西牦牛坪地区(Tian Shihong et al., 2006; Hou Zhengqian et al., 2008)。经地壳混染的碳酸岩-碱性杂岩岩浆甚至可以形成以壳源为主的二长花岗岩等,如中国滇西北衙(He Wenyan et al., 2015; Xu Xingwang et al., 2007)和马厂箐(Bi Xianwu et al., 2005)等地。

成矿与碳酸岩-碱性杂岩的岩性密切相关,并与碳酸岩-碱性杂岩的时代有一定关系。全球地质历史演化过程中,元古代的碳酸岩-碱性杂岩有关的矿产较为集中,如著名的白云鄂博矿稀土-铌-铁矿床(Bai Ge et al., 1985; Ling Mingxing et al., 2013)、滇中迤纳厂铌-稀土-铁-铜矿床(Zhao Xinfu et al., 2010; Wen Ligang et al., 2017)等;其他时代的碳酸岩-碱性杂岩有关的矿床多在地幔柱或大火成岩省(LIPs)活动的中后期形成,并且通常与深大断裂关系密切,如中国东部郯庐断裂南端的微山稀土矿床(Yan Guohan et al., 2008; Li Jiankang et al., 2009; Zhou Weiwei, 2013)、印度安巴-顿加尔(Amba-Dongar)萤石矿床(Bai Ge et al., 1985; Notholt et al., 1990)以及安哥拉邦加(Bonga)铌矿床(Zheng luo et al., 2014)等;有些碳酸岩及其矿产的形成可能也与板块边缘遭受有限的洋壳俯冲的部分熔融有关(Hou Zengqian et al., 2015)。超壳岩石圈断裂是碳酸岩及其有关矿床形成的必要条件(Woolley, 1982; Ma Jing et al., 2015)。

4　结论

(1) 深大断裂控制着碳酸岩体的空间分布。碳酸岩的形成常常与深大断裂控制的张性构造背景有关,这些断裂容易切割到地球深处,为碳酸岩浆上涌提供通道。

(2) 作为碳酸岩的共性,碳酸岩中通常富集强不相容的大离子亲石元素(LIPLE),如 LREE、Nb-Ta、Zr(Hf)、F、P、碱金属(K、Na、Rb、Cs、Li)、碱土金属(Sr、Ba)以及衍生的 Fe 等。它们是张性深大断裂导致的深部地幔低度部分熔融的产物,因此,碳酸岩及其附属物与成矿作用密切相关。

(3) 碳酸岩特殊的产出背景、特有的矿物共生组合、围岩蚀变、岩石学特征以及地球化学特征等,指示了碳酸岩岩浆来自于地球深部,可以为人们了解深成岩浆的演化和探索地球深部信息提供证据。

(4) 除了幔源成因,还可能存在壳源成因的碳酸岩。

致谢:感谢郝梓国老师和审稿人对文稿提出的建设性修改意见。

References

Bai Ge, Yuan Zhongxin. 1985. Geology and Mineral Resources of Carbonatite. Bulletin of the institute of mineral deposit. Chinese Academy of Geological Sciences, 13 (1): 1～192(in Chinese with English abstract).

Bell K, Simonetti A. 2010. Source of parental melts to carbonatites-critical isotopic constraints. Mineralogy and Petrology, 98(1～4): 77～89.

Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Wu Kaixing, Su Wenchao, Zhan Xinzhi. 2005. Geochemical characteristics of the Yao'an and Machangqing alkaline-rich intrusions. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 115～126(in Chinese with English abstract).

Biondi J C. 2005. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonatite complexes. In Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform (P. Comin-Chiaramonti and C. B. Gomes, ed.). Editora da Universidade de Sao Paulo: Fapesp, Sao Paulo: 707～750.

Castor S B. 2008. The Mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California. Canadian Mineral, 46: 779～806.

Chen Hua, Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Jiang Junhua. 2010. A tentative discussion on the genesis of Ni-bearing carbonatites in Bangong Lake area , Tibet. Mineral Deposits, 29(6): 1029～1042(in Chinese without English abstract).

Chen Xifeng, Zeng Pusheng, Zhang Xueting, Xu Wenrong, Wan Dafu. 2015. Petrology and geochemistry of the Zhuopan alkaline complex in Yongping, Yunnan province: Constraints on petrogenesis and tectonic setting. Acta Petrologica Sinica, 31(9): 2597～2608(in Chinese with English abstract).

Dawson J B, Keller J, Nyamweru C. 1995. Historic and recent eruptive activity of Oldoinyo Lengai. In: Bell, K. & Keller(eds) Carbonatite volcanism. Springer-Verlag, Berlin: 4～22.

Dawson J B. 1962. Sodium carbonatite lavas from Oldoinyo Lengai, Tanganyilia. Nature, 195(4846):1075～1076.

Dong Chunyan, Liu Dunyi, Wan Yusheng, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Yang Zhensheng. 2009. Crustally derived carbonatite from the Daqingshan area: zircon features and SHRIMP dating. Acta Geologica Sinica, 83(3): 388～398(in Chinese with English abstract).

Fei Hongcai, Xiao Rongge, Wang Anjian. 2012. A research review of the formation mechanism of the ore-bearing rocks in the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongoli. Acta Geologica Sinica, 86(5):757～766 (in Chinese with English abstract).

Hao Ziguo, Wang Xibin, Li Zhen, Xiao Guowang, Zhang Tairong. 2002. Bayan Obo carbonatite REE-Nb-Fe deposit: A rare example of Neoproterozoic lithogeny and metallogeny of a damaged volcanic edifice. Acta Geologica Sinica, 76(4): 525～540(in Chinese with English abstract).

He Wenyan, Mo Xuanxue, He Zhonghua, White N C, Chen Jinbiao, Yang Kaihui, Wang Rui, Yu Xuehui, Dong Guochen, Huang Xiongfei. 2015. The geology and mineralogy of the Beiya skarn gold deposit in Yunnan, Southwest China. Economic Geology, 110(6): 1625～1641.

Heinrich E W. 1980. The geology of carbonatites. Robert E. Krieger Publishing Company, New York: 158～160.

Hoernle K, Tilton G, Le Bas M J, Duggen S, Garbe-Schönberg D. 2002. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: mantle recycling of oceanic crustal carbonate. Contributions to Mineralogy and Petrology, 142: 520～542.

Hou Zengqian, Tian Shihong, Xie Yuling, Yuan Zhongxin, Yang Zhusen, Yin Shuping, Fei Hongcai, Zou Tianren, Li Xiaoyu, Yang Zhiming. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model. Mineral Deposits, 27(2): 145～176(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Tian Shihong, Yuan Zhongxin, Xie Yuling, Yin Shuping, Yi Longsheng, Fei Hongcai, Yang Zhiming. 2006. The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: Petrogenesis, mantle source and tectonic implication. Earth & Planetary Science Letters, 244(1): 234～250.

Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Geng Yuansheng. 2015. Metallic refertilization of lithosphere along cratonic edges and its control on Au, Mo and REE ore systems. Mineral Deposits, 34(4): 641～674(in Chinese with English abstract).

Kavchenko S M. 1995. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, Northern Siberia. Economic Geology, 90: 676～689.

Kogarko L N, Kononova, V A, Orlova M P, Woolley A R. 1995. The Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part 2: Former USSR. Chapman and Hall, London: 4～224.

Kresten P. 1983. Carbonatite Nomenclature. Geologiche, Rundschau, 72(1): 389～395.

Li Jiankang, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Ying Lijuan, Zhang Jian. 2009. Ore-forming fluid evolvement and its controlling to REE (Ag) mineralizing in the Weishan deposit, Shandong. Journal of Mineralogy and Petrology, 29(3): 60～68(in Chinese with English abstract).

Ling Mingxing, Liu Yulong, Williams I S, Teng Fangzhen, Yang Xueming, Ding Xing, Wei Gangjian, Xie Luhua, Deng Wenfeng, Sun Weidong. Formation of the world's largest REE deposit through protracted fluxing of carbonatite by subduction-derived fluids. Scientific Reports, 2013: 3, 10. 1038/srep01776.

Liu Jian, Ling Mingxing, Li Yin, Sun Weidong. 2009. REE Ore-Forming Models of Giant Bayan Obo REE-Nb-Fe Ore Deposit: A Review. Geotectonica et Metallogenia, 33(2): 271～283(in Chinese with English abstract).

Liu Jian, Ling Mingxing, Li Yin, Sun Weidong. 2011. Chronology and geological significance of the basement rock of the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit. Geochimica, 40(3): 209～222(in Chinese with English abstract).

Liu Tiegeng. 1990. Discriminant analysis of genetic type of carbonate rock and discussion on genetic dolomitite in Bayan Obo Region. Acta Sedimentologica Sinica, 8(3): 93～102(in Chinese with English abstract).

Liu Yan, Berner Z, Massonne H J, Zhong Dalai. 2006. Carbonatite-like dykes from the eastern Himalayan syntaxis: geochemical, isotopic, and petrogenetic evidence for melting of metasedimentary carbonate rocks within the orogenic crust. Journal of Asian Earth Sciences, 26(1): 105～120.

Ma Jing, Zeng Pusheng, Gou Ruitao, Wang Jujie, Dai Yanjuan. 2015. Genesis and metallogenesis of alkaline complexes in China Mainland. Geology and exploration, 51(3): 466～477(in Chinese with English abstract).

Malunga G W P. 1997. Mineral potential of Malawi. Mining Investment and Development Corp. Ltd. Lilongwe, Malawi, January1997: 14.

Mao Liquan, Ma Yuan. 2017. Geochemical characteristics and genesis of carbonate intrusive mass in east Xisanyangjing of Beishan. Gansu Geology, 26(2): 31～37(in Chinese with English abstract).

Notholt A J G, Highley D E, Deans T. 1990. Economic minerals in carbonatites and associated alkaline igneous rocks. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 99: B59～B80.

Petrov S V. 2004. Economic deposits associated with the alkaline and ultrabasic complexes of the Kola peninsula. In Phoscorites and carbonatites from mantle to mine, (F. Wall and A. N. Zaitsev, ed.), Mineralogical Society, London: 469～490.

Qin Bingrang. 1991. Elementary analysis of carbonatite, carbonate and carbonate rock. Journal of Guizhou Institute of Technology, 1(20): 91～92(in Chinese).

Qin Chaojian, Qiu Yuzhuo. 2001. Recent progress in carbonatite research. Advance in Earth Sciences, 16(4): 501～507(in Chinese with English abstract).

Qiu Yuzhuo. 1986. Denominating, Naming and Translation of Carbonatite. Geology-Geochemistry, (12): 66～67(in Chinese).

Ren Jiande, Lu Shuwei, Pei Zhongchao, Yang Junfeng, Fang Huaibin, Li Chunyan, Chao Hongli. 2007. Igneous carbonatite in the Muji ar ea, Ar tux, Xinjiang, China: Evidence from geological and geochemical analyses. Geological Bulletin of China, 26(12): 1665～1670(in Chinese with English abstract).

Richardson D G, Birket T C. 1996. Residual carbonatite-associated deposits. In Geology of Canadian Mineral Deposit Types (O. R. Eckstrand, W. D. Sinclair, and R. I. Thorpe, ed.), Decade of North American Geology, Geology of Canada, no. 8: 108～119.

Roedder E. 1986. Fluid inclusions (Volume II). Translated by Lu

Huangzhang and Wang Qingduo. Changsha: Central South University of Technology Press, 46～174.

Song Wenlei, Xu Cheng, Liu Qiong, Wang Linjun, Wu Min, Zeng Liang. 2012. Experimental Petrological Study of Carbonatite and Its Significances on the Earth Deep Carbon Cycle. Geological Review, 58(4): 726～744(in Chinese with English abstract).

Song Wenlei, Xu Cheng, Wang Linjun, Wu Min, Zeng Liang, Wang Lize, Feng Meng. 2013. Review of the Metallogenesis of the Endogenetic Rare Earth Elements Deposits Related to Carbonatite-Alkaline Complex. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 49(4): 724～740(in Chinese with English abstract).

Streckeisen A. 1980. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Geologische Rundschau, 69: 194～207.

Tian Jingxiang, Zhang Ritian, Fang Yuechun, Li Xiuzhang, Xu Hongyan, Wang Bingying. 2002. Geological Characteristics and Relation with Rare Earth Elements of Alkalic Complex in Chishan of Shandong Province. Geology of Shangdong, 18(1): 21～25(in Chinese with English abstract).

Tian Liming, Zheng Youye, Zheng Haitao. 2017. Geochronology and Petrogenesis study of Liemai muscovite granite in the eastern Tethyan Himalaya. Acta Geologica Sinica, 91(5): 992～1006 (in Chinese with English abstract).

Tian Shihong, Ding Tiping, Yuan Zhongxin. 2006. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan province: evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE. Acta Geologica Sinica, 80 (7): 1035～1044(in Chinese with English abstract).

Tilton G R, Bryce J G, Mateen A. 1998. Pb-Sr-Nd isotope data from 30 and 300 Ma collision zone carbonatites in Northwest Pakistan. Journal of Petrology, 39: 1865～1874.

U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2018[EB /OL]. http://minerals. Usgs. gov /minerals /pubs / commodity /rare earths /mcs-2018-raree. Pdf.

Van Straaten, P. 2002. Rocks for Crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. University of Guelph, Guelph: 322.

Verwoerd W J. 1986. Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks. In Mineral deposits of southern Africa, Volumes I and II (C. R. Anhaeusser and S. Mansker, ed.), Geological Society of South Africa, Johannesburg: 2173～2191.

Wang Jincao, Zhao Bin, Zhao Jinsong, Lu Tieshan, Shao Junzhi. 2006. Magmatogenic marble discovered in contact zone of Daye iron deposit. Journal of Guilin University of Technology, 26 (2): 302～303+306(in Chinese with English abstract).

Wang Kaiyi, Yang Kuifeng, Fan Hongrui, Hu Fangfang, Hu Fuyou. 2012. Addressing some problems on research of the Bayan Obo deposit. Acta Geologica Sinica, 86(5): 687～699(in Chinese with English abstract).

Wang Xiang. 2018. Analysis on the ore forming time and genesis of the Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: with a discussion on the mass extinction at the P-T boundary and "AMH Orogeny". Geological Review, 64(2): 299～345 (in Chinese with English abstract).

Wang Xibin, Hao Ziguo, Li Zheng, Xiao Guowang, Zhang Tairong. 2002. A typical alkaline rock-carbonatite complex in Bayan Obo, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 76(4): 501～526(in Chinese with English abstract).

Wang Zhiyu, Liang Jin. 2012. Research progress of carbonatites and its geological significance. Journal of the Graduates, Sun Yat-sen University (Natural Sciences, Medicine), 33(3): 30～36(in Chinese with English abstract).

Wen Ligang, Zeng Pusheng, Dai Yanjuan, Wang Zhaoquan. 2017. Major bimodal volcanic rocks and associated mineral resources in Yunnan Province, Southwest China. Acta Geologica Sinica, 91 (11): 2493～2520(in Chinese with English abstract).

Woolley A R, Kempe D R C. 1989. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In: Bell K, ed. Carbonatites: Genesis and Evolution, London U. K.: Unwin Hyman, 1～14.

Woolley A R, Kjarsgaard B A. 2008. Carbonatite occurrences of the world: map and database. Geological Survey of Canada Open File 5796: 1～21

Woolley A R. 1982. A discussion of carbonatite evolution and nomenclature, and the generation of sodic and potassic fenites. Mineral. Mag. 46: 7～13.

Woolley A R. 1989. Thespatial and temporal distribution of carbonatites. In: Bell K, ed. Carbonatites: Genesis and Evolution, London, U. K.: Unwin Hyman, 15～37.

Woolley A R. 1987. Alkaline Rocks and Carbonatites of the World, Part 1: North and South America. British Museum (Natural History) and University of Texas Press: 5～213.

Woolley A R. 2001. Alkaline Rocks and Carbonatites of the World, Part 3: Africa. London, United Kingdom, the Geological Society of London: 6～365.

Xin Houtian, Luo Zhaohua, Liu Yongshun, Wang Shuqing, Zhang Lizhong. 2012. Geological features and significance of Palaeoproterozoic carbonatite of crustal origin in Aqtashtagh Area of Southeast Tarim Basin, China. Earth Science Frontiers, 19(6): 167～178(in Chinese with English abstract).

Xu Cheng, Huang Zhilong, Liu Congqiang, Qi Liang, Li Wenbo, Guan Tao. 2002. Geochemistry of carbonatites from the Maoniuping REE deposit, China. Science in China (Series D), 32(8): 635～643(in Chinese with English abstract).

Xu Cheng, Huang Zhilong, Mu Zhaonan, Qi Liang, Yan Zaifei, Guan Tao, Shen Baojian. 2004. Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of carbonatites: a review. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 23(4): 336～343(in Chinese with English abstract).

Xu Xingwang, Cai Xinping, Zhang Baolin, Liang Guanghe, Du Shijun, Wang Jie. 2007. Genetic types and framework model of Beiya gold ore district in western Yunnan. Mineral Deposits, 26 (3): 249～264(in Chinese with English abstract).

Xu Yigang. 2002. Mantle Plumes, Large Igneous Provinces and their geologic consequences. Earth Science Frontiers, 9(4): 341～353(in Chinese with English abstract).

Yan Guohan, Cai Jianhui, Ren Kangxu, Mu Baolei, Li Fengtang, Chu Zhuyin. 2008. Nd, Sr and Pb isotopic geochemistry of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone: evidence of the magma source. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1223～1236(in Chinese with English abstract).

Yang Junquan, Wan Yusheng, Liu Yongshun, Xin Houtian, Zhang Surong, Li Mingze. 2012. Discovery of paleoproterozoic crustally derived carbonatite in the northern Altyn Tagh. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(5): 929～936(in Chinese with English abstract).

Yang Xiaoyong, Zhang Yuxu, Zheng Yongfei, Yang Xueming, Xu Baolong, Zhao Yanbing, Peng Yang, Hao Ziguo. 2000. Carbon and oxygen isotope compositions of ore-bearing dolostone in the Bayan Obo deposit as well as two typical micrite mounds and a carbonatite dyke. Acta Geologica Sinica, 74(2): 169～180(in Chinese with English abstract).

Yang Xueming, Yang Xiaoyong, LeBas M J. 1998a. Geological and geochemical characteristics of Carbonatites and their implication for tectonic settings. Advances in Earth Sciences, 13(5): 457～466(in Chinese with English abstract).

Yang Xueming, Yang Xiaoyong, LeBas M J. 1998b. Carbonatite: A probe rock for the tectonic settings of continental lithosphere and mantle metasomatism. Acta Geophysica Sinica. 41(S1): 228～235(in Chinese with English abstract).

Ye Haimin, Zhang Xiang. 2015. Advances on the carbonatite research in recent years. Resources Survey & Environment, 36 (1): 21～27(in Chinese with English abstract).

Yu Xuefeng, Tang Haosheng , Han Zuozhen, Li Changyou . 2010. Geological Characteristics and origin of rare earth elements deposits related with alkaline rock in the Chishan-Longbaoshan Area, Shandong Province. Acta Geologica Sinica, 84(3): 407～417(in Chinese with English abstract).

Zhang Yong, Xing Shuwen, Ma Yubo, Xiao Keyan, Wang Yan. 2016. Metallogenic characteristics and mineral resource potential of the REE-Mo-Pb-Zn-Au polymetallic metallogenic belt in the northern Margin of the North China Craton. Acta Geologica Sinica, 90(7): 1458～1469(in Chinese with English abstract).

Zhao Bin, Zhao Jinsong, Wang Jingcao, Ni Pei, Li Zhaolin, Rao Bing, Lu Tieshan, Shao Junzhi, Zhang Chongze, Wang Ran, Peng Zhuolun, Tu Xianglin, Chen Linli. 2004. A possible new carbonatite type: Crust-derived carbonatite. Geochimica. 33(6): 649～662(in Chinese with English abstract).

Zhao Honggang, Su Rui, Liang Jiwei, Jin Yuanxin, Ou Guangxi, Jiang Xiaohui. 2018. Petrological and geochemical characteristics of the Yamansu pluton in the Qoltag Area, East Tianshan Mountains and their intra-continental tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1780～1802(in Chinese with English abstract).

Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, Sun Min, Gao Jianfeng, Sun Weihua, Yang Jinhui. 2010. Late paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze block. Precambrian Research, 182(1～2): 57～69.

Zheng Luo, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Dong Shuyi, Peng Yiwei, Gao Haijun, Lü Pengrui. 2014. Geochemical compositions and evolution of pyrochlore and their relationships with magmatic-hydrothermal processes in the Bonga carbonatite-type Nb deposit, Huila Province, Angola. Earth Science Frontiers, (21)5: 69～89(in Chinese with English abstract).

Zhou Jin, Ni Pei, Ding Junying, Zhu Xiaoting. 2003. Fluid Inclusion Study Related to Cabonatitic Magmatic Process. Geological journal of China universities, 9(2): 293～301(in Chinese with English abstract).

Zhou Weiwei, Cai Jianhui, Yan Guohan. 2013. The Geochemical Characteristics and Geological Significance of Alkaline Complex in Chishan of Shandong Province. Northwestern Geology, 46(4): 93～105(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

白鸽, 袁忠信. 1985. 碳酸岩地质及其矿产. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 13(1):1～192.

毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴, 苏文超, 战新志. 2005. 姚安和马厂箐富碱侵入岩体的地球化学特征. 岩石学报, 21(1):115～126.

陈华, 曲晓明, 辛洪波, 江军华. 2010. 西藏班公湖地区含镍碳酸岩成因探讨. 矿床地质, 29(6): 1029～1042.

陈喜峰, 曾普胜, 张雪亭, 徐文荣, 万大幅. 2015. 云南永平卓潘碱性杂岩体岩石学和地球化学特征及成因研究. 岩石学报, 31(9): 2597～2608.

董春艳, 刘敦一, 万渝生, 徐仲元, 刘正宏, 杨振升. 2009. 大青山地区古元古代壳源碳酸岩: 锆石特征及 SHRIMP 定年. 地质学报, 83(3):388～398.

费红彩, 肖荣阁, 王安建. 2012. 白云鄂博 REE-Nb-Fe 稀土矿赋矿岩系建造研究评述. 地质学报, 86(5):757～766.

郝梓国, 王希斌, 李震, 肖国望, 张台荣. 2002. 白云鄂博碳酸岩型 REE-Nb-Fe 矿床一个罕见的中元古代破火山机构成岩成矿实例. 地质学报, 76(4):525～540.

侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008. 川西冕宁－德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型. 矿床地质, 27(2): 145～176.

侯增谦, 郑远川, 耿元生. 2015. 克拉通边缘岩石圈金属再富集与金－钼－稀土元素成矿作用. 矿床地质, 34(4): 641～674.

李建康, 袁忠信, 白鸽, 陈毓川, 王登红, 应立娟, 张建. 2009. 山东微山稀土矿床成矿流体的演化及对成矿的制约. 矿物岩石, 29(3): 60～68.

刘健, 李印, 凌明星, 孙卫东. 2009. 白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿床的稀土成矿模式综述. 大地构造与成矿学, 33(2): 271～283.

刘健, 李印, 凌明星, 孙卫东. 2011. 白云鄂博矿床基底岩石的年代学研究及其地质意义. 地球化学, 40(3): 209～222.

刘铁庚. 1990. 碳酸盐岩石成因类型的判别分析和白云鄂博“白云岩”的成因讨论. 沉积学报, 8(3): 93～102.

麻菁, 曾普胜, 苟瑞涛, 王聚杰, 代艳娟. 2015. 中国碱性杂岩的成因及其成矿作用. 地质与勘探, 51(3): 466～477.

毛立全, 马原. 2017. 北山西三羊井东碳酸岩地球化学特征及成因初探. 甘肃地质, 26(2): 31～37.

秦秉让. 1991. 碳酸岩、碳酸盐与碳酸盐岩浅析. 贵州工学院学报, 1(20): 91～92.

秦朝建, 裘愉卓. 2001. 岩浆(型)碳酸岩研究进展. 地球科学进展, 16(4): 501～507.

裘愉卓. 1986. 碳酸岩的正名、命名和译名. 地质地球化学, (12): 66～67.

任建德, 卢书炜, 裴中朝, 杨俊峰, 方怀宾, 李春艳, 晁红丽. 2007. 新疆阿图什地区木吉一带的火成碳酸岩——来自地质、地球化学分析的证据. 地质通报, 26(12): 1665～1670.

宋文磊, 许成, 刘琼, 王林均, 吴敏, 曾亮. 2012. 火成碳酸岩的实验岩石学研究及对地球深部碳循环的意义. 地质论评, 58(4): 726～744.

宋文磊, 许成, 王林均, 吴敏, 曾亮, 王丽泽, 冯梦. 2013. 与碳酸岩－碱性杂岩体相关的内生稀土矿床成矿作用研究进展. 北京大学学报(自然科学版), 49(4): 724～740.

田京祥, 张日田, 范跃春, 李秀章, 徐洪岩, 王炳颖. 2002. 山东郯山碱性杂岩体地质特征及与稀土矿的关系. 山东地质, 18(1): 21～25.

田立明, 郑有业, 郑海涛. 2017. 特提斯喜马拉雅带东段列麦白云母花岗岩年代学及成因. 地质学报, 91(5): 992～1006.

田世洪, 丁悌平, 袁忠信. 2006. 四川牦牛坪轻稀土矿床地幔流体特征——铅锶钕和氦氩同位素及稀土元素证据. 地质学报, 80(7): 1035～1044.

王凯怡, 杨奎峰, 范宏瑞, 胡芳芳, 胡辅佑. 2012. 白云鄂博矿床研究若干问题的探讨. 地质学报, 86(5): 687～699.

汪劲草, 赵斌, 赵劲松, 芦铁山, 邵俊智. 2006. 大冶铁矿接触带发现岩浆成因的大理岩. 桂林工学院学报, 26(2): 302～303＋306.

汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土－铌－铁矿床的成矿时代及成因探析——兼论 P-T 之交生物群灭绝事件和“阿蒙兴造山运动”. 地质论评, 64(2): 299～345.

王希斌, 郝梓国, 李震, 肖国望, 张台荣. 2002. 白云鄂博——一个典型的碱性－碳酸岩杂岩的厘定. 地质学报, 76(4): 501～526.

王智宇, 梁锦. 2012. 碳酸岩研究进展及其地质意义. 中山大学研究生学刊(自然科学.医学版), 33(3):30～36.

温利刚, 曾普胜, 代艳娟, 王兆全. 2017. 云南主要双峰式火山岩及相关矿产资源. 地质学报, 91(11): 2493～2520.

辛后田, 罗照华, 刘永顺, 王树庆, 张利忠. 2012. 塔里木东南缘阿克塔什塔格地区古元古代壳源碳酸岩的特征及其地质意义. 地学前缘, 19(6): 167～178.

许成, 黄智龙, 刘丛强, 漆亮, 李文博, 管涛. 2002. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学. 中国科学(D 辑:地球科学), 32(8): 635～643.

许成, 黄智龙, 穆肇南, 漆亮, 严再飞, 管涛, 申宝剑. 2004. 碳酸岩 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究评述. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 336～343.

徐兴旺, 蔡新平, 张宝林, 梁光河, 杜世俊, 王杰. 2007. 滇西北衙金矿矿床类型与结构模型. 矿床地质, 26(3): 249～264.

徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. 地学前缘, 9(4): 341～353.

阎国翰, 蔡剑辉, 任康绪, 牟保磊, 李凤棠, 储著银. 2008. 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及源区性质探讨. 岩石学报, 24(6): 1223～1236.

杨俊泉, 万渝生, 刘永顺, 辛后田, 张素荣, 李名则. 2012. 阿尔金北缘古元古代壳源火成碳酸岩的发现. 地球科学(中国地质大

学学报),37(5):929～936.
杨晓勇,章雨旭,郑永飞,杨学明,徐宝龙,赵彦冰,彭阳,郝梓国. 2000. 白云鄂博赋矿白云岩与微晶丘和碳酸岩墙的碳氧同位素对比研究. 地质学报,74(2):169～180.
杨学明,杨晓勇,LeBas M J. 1998a. 碳酸岩的地质地球化学特征及其大地构造意义. 地球科学进展,13(5):457～466.
杨学明,杨晓勇,LeBas M J. 1998b. 碳酸岩是大陆岩石圈构造背景和地幔交代作用的指示岩石. 地球物理学报,41(S1):228～235.
叶海敏,张翔. 2015. 碳酸岩研究新进展. 资源调查与环境,36(1):21～27.
于学峰,唐好生,韩作振,李长有. 2010. 山东郯山－龙宝山地区与碱性岩有关的稀土矿床地质特征及成因. 地质学报,84(3):407～417.
张勇,邢树文,马玉波,肖克炎,王岩. 2016. 华北陆块北缘稀土 Mo-Pb-Zn-Au 多金属成矿带特征及资源潜力. 地质学报,90(7):1458～1469.
赵斌,赵劲松,汪劲草,倪培,李兆麟,饶冰,芦铁山,邵俊智,张重泽. 王冉,彭卓伦,徐湘林,陈林丽. 2004. 一种可能的新碳酸岩类型:壳源成因碳酸岩. 地球化学,33(6):649～662.
赵宏刚,苏锐,梁积伟,金远新,欧光习,姜晓辉. 2018. 东天山觉罗塔格雅满苏花岗岩岩石学、地球化学特征及其板内构造意义. 地质学报,92(9):1780～1802.
郑硌,顾雪祥,章永梅,董树义,彭义伟,高海军,吕鹏瑞. 2014. 安哥拉 Huila 省 Bonga 碳酸岩型铌矿床烧绿石地球化学组成、演化及其与岩浆－热液作用过程的关系. 地学前缘,21(5):69～89.
周进,倪培,丁俊英,朱筱婷. 2003. 碳酸岩岩浆作用过程的包裹体研究. 高校地质学报,9(2):293～301.
周伟伟,蔡剑辉,阎国翰. 2013. 山东郯山碱性杂岩体地球化学特征及其意义. 西北地质,46(4):93～105.
Roedder E. 1986. 流体包裹体(下). 卢焕章,王卿铎(译). 长沙:中南工业大学出版社,46～174.

Distribution characteristics of carbonatites of the world and its metallogenic significance

GOU Ruitao[1,2)], ZENG Pusheng[*1,2)], LIU Siwen[1)], MA Jing[1,2)], WANG Jujie[1,2)], DAI Yanjuan[1,3)], WANG Zhaoquan[1,2)]

1) *National Research Center for Geoanalysis, Beijing*, 100037; 2) *China University of Geosciences, Beijing*, 100083; 3) *Kunming University of Science and Technology, Kunming*, 650000

* *Corresponding author: zengpusheng@vip.sohu.com*

Abstract

This article has systematically collected global coordinates of carbonatite complexes with different ages, and obtained the distribution map of the main carbonatite complexes and their related minerals of the world using Arcgis. Based on the main structures worlwide, this study investiged the relationship of carbonatites and deep-seated faults. Spatial distribution of carbonatites is often associated with extensional lithospheric tectonic background within intraplate and orogenic extensional environment. Under such tectonic setting, deep faults of tensional tectonic background can cut into the depth of the earth and provide upwelling channels for carbonatitic magma, thereby controlling the formation and distribution of carbonatites. Carbonatites occurred through all the geological periods from Archean to Cenozoic. But more carbonatites formed in later ages. The most significant petrological characteristic of carbonatite complexes is fenitization, containing aegirine, arfvedsonite, albite, phlogopite, potash feldspar and so on. The carbonatite complexes present certain of regularity in distribution of assocated alkaline rocks and ultramafic rocks in both plane and section. Major elements of carbonatites contain CO_2, CaO, MgO, FeO, Fe_2O_3, MnO and SiO_2. Carbonatites can divided into calcareous carbonatites, magnesial carbonatites, iron carbonatites and alkali carbonatites according to weight percentage of CaO, MgO, (FeO+Fe_2O_3+MnO) and alkali. Trace elements of carbonatite are LREE, Nb (Ta), Zr (Hf), F, P, alkali metals (K, Na, Rb, Cs, Li), alkaline earth metals (Sr, Ba), and Fe derived from above. Those trace elements are usually products of low partial melting of deep mantle caused by extensional deep faults which can form numerous important metal and nonmetal deposits in carbonatite complexes. The isotope and inclusion study of carbonatite complexes reflect the deep origin and evolution characteristics of the carbonate magma in different degrees. Therefore, carbonatite occurrence, unique mineral assemblages, wall rock alteration, petrology and geochemistry research data can provide evidence for understanding the evolution of deep magma and exploring the information of deep earth. In a recent decade's study, there is high possibility to find existence of a new crust-derived carbonatite.

Key words: carbonatite; spatial and temporal distribution; deep faults; metallogenesis; REE