

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.002

非洲大陆岩石圈演化与成矿关系

邱瑞照¹, 赵国春², 邱磊², 刘勇³, 孙凯^{2,4}, 肖庆辉³, 周肃², 赵宏军¹, 任晓栋²,
范玉须⁵, 高千²

QIU Ruizhao¹, ZHAO Guochun², QIU Lei², LIU Yong³, SUN Kai^{2,4}, XIAO Qinghui³,
ZHOU Su², ZHAO Hongjun¹, REN Xiaodong², FAN Yuxu⁵, GAO Qian²

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学, 北京 100083;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

4. 中国地质调查局天津地调中心, 天津 300170;

5. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039

1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

5. General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China

摘要: 岩石圈深部过程与成矿关系研究是当今地球科学的前沿, 对于深化成矿地质背景了解、总结成矿规律、有效开展资源潜力评价、提高矿产勘查效果等具有重要意义。以岩石圈角度划分的非洲大陆新大地构造单元为基础, 分析了矿产资源的时空分布特征, 讨论了克拉通型、造山带型、裂谷型等不同类型岩石圈的成矿特色。根据非洲大陆形成和岩石圈演化, 区分非洲大陆不同类型岩石圈的壳-幔状态, 即物质形成时代、结构形成时代, 结合主要矿产空间分布、矿床类型及矿产组合, 划分出现今非洲大陆 27 个成矿区带。从地质过程的“动态”视角审视和划分非洲大陆成矿区带, 是以深部过程与成矿为主线的有益探索和尝试, 为在非洲地区开展资源评价与选区提供了新的思路 and 参考。

关键词: 岩石圈类型; 岩石圈演化与成矿; 成矿区带划分; 非洲大陆; 地质调查工程

中图分类号: P544; P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)01-0019-15

Qiu R Z, Zhao G C, Qiu L, Liu Y, Sun K, Xiao Q H, Zhou S, Zhao H J, Ren X D, Fan Y X, Gao Q. Relationship between lithospheric evolution and mineralization in Africa Continent. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 19-33

Abstract: The research on the relationship between deep lithospheric process and mineralization is the forefront of Geoscience. It is of great significance to deepen understanding of metallogenic geological setting, summarize metallogenic regularity, effectively assess resource potential and improve the effect of mineral exploration. Based on the new tectonic units of the African Continent divided by lithosphere, the temporal-spatial distribution of mineral resources was analyzed, and the metallogenic characteristics in different types of lithosphere such as craton, orogeny and rift were analyzed. According to the formation and lithospheric evolution of the African Continent, the crust-mantle status of different types of lithosphere in the African Continent was distinguished, that is, the age of material formation and the age of structure formation. Combined with the spatial distribution of main mineral resources, genetic types of ore

收稿日期: 2021-06-21; **修订日期:** 2021-08-23

资助项目: 国家国际科技合作专项《中美环太平洋成矿带成矿规律对比与资源评价技术研究》(编号: 2011DFA22460)、中国地质调查局项目《全国陆域及海区地质图件更新与共享》(编号: DD20190370) 和内蒙古自治区地质勘查基金中心院士项目《内蒙古阿拉善珠斯楞—乌力吉地区铜金多金属成矿作用与找矿预测研究》(编号: [2020] 院士-01)

作者简介: 邱瑞照(1963-), 男, 博士, 研究员, 从事境外地质矿产、深部地质与区域成矿研究。E-mail: qiuerrzz@163.com

deposits and assemblage of mineral resources, 27 metallogenic belts in the present African Continent were divided. It is a useful exploration and attempt to examine and divide the metallogenic belt of the African Continent from the “dynamic” view of geological process, which is based on the relationship between deep geological process and mineralization. It would provide a new idea and reference for mineral resource evaluation and prospects generation in Africa.

Key words: lithosphere type; relationship between lithosphere evolution and mineralization; division of metallogenic belts; African Continent; geological survey engineering

地质与地球物理相结合是 20 世纪 90 年代以来地球科学发展的重要趋势,得到越来越多学者的认同和重视。国际岩石圈计划的研究重点从岩石圈的结构、构造和演化转向大陆深部过程和动力学^[1],是地球科学发展的主要前沿领域之一^[2]。进入 21 世纪,人类面临更加严峻的资源挑战,迫使人们把视角转移到深部,深部过程与成矿研究成为前沿^[3-4]。本文采用最新的划分方案,即从岩石圈角度划分非洲大陆构造单元^[5],该方案以西非、刚果、卡拉哈里克拉通东缘一线的岩石圈不连续为界,把非洲大陆划为西部以克拉通型为主、东部以裂谷型为主的 2 个一级构造单元;一级构造单元中的克拉通型、造山带型和裂谷型分别为其二级构造单元,二级构造单元中的不同类型岩石圈为其三级构造单元,在不同类型岩石圈内的块体,可根据需要进一步划为四级构造单元或成矿区带。该方案不同于以往学者^[6-8]以冈瓦纳大陆自南往北拼合为主线,之后再进一步细分区带的方案。本文以非洲大陆岩石圈角度划分的新构造单元^[5]为基础,在分析主要矿产资源时空分布、探索岩石圈演化与成矿关系的基础上划分成矿区带,以期起到抛砖引玉的作用。

1 地质矿产特征

1.1 地质概况

非洲的地质填图始于 19 世纪,随着 20 世纪中叶殖民统治纷纷瓦解和 20 世纪 90 年代初殖民时代彻底结束,各国国家地质调查局相继建立,非洲大陆大部分地区都绘制了地质图,然而多数地区的地质图只是按小比例尺绘制的。世界地质图委员会(CGMW)是国际地质科学联合会(IUGS)的附属机构,负责协调多个大陆地质图的编制,包括比例尺为 1:150 万的非洲地质图(1985~1990,第 3 版)、非洲成矿图(2002)和非洲构造图(2010),其他组织还制作了各种比例尺的区域和全大陆地图^[6]。随着地质填图、矿业开发和地质科学研究的推进,对非洲地区地质矿产的认识也不断深入。

非洲大陆是一个非常古老的大陆,跨越了至少 3800 Ma 的地球历史,也是地球上已知含有太古宙克拉通(>2.5 Ga)地壳面积最大的地区,几乎整个大陆都被前寒武纪基底覆盖,显生宙盖层面积有限(图 1)。非洲大陆前寒武纪地层广泛发育,占据该大陆约 80% 以上的地区^[7],仅在西北部边缘和南部边缘发育显生宙造山带(图 1)。非洲大陆各时代地层均有发育,以太古宇、古元古界和中—新元古界最重要,其次为古生界。太古宇主要分布在南非、津巴布韦、博茨瓦纳、坦桑尼亚、刚果(金)、乌干达、苏丹、几内亚、利比里亚、塞拉利昂、埃塞俄比亚等国,岩性主要为一套中深变质的铁镁质—长英质火山岩、火山碎屑岩系,上部含较多沉积岩。古元古界主要分布在西部非洲和中部非洲一带,岩性为一套中浅变质的中基性—中酸性火山岩、火山碎屑岩和沉积岩系;中—新元古界主要分布在南部非洲和中部非洲一带,主要为一套浅变质—未变质的碎屑岩系和碳酸盐岩系。古生界主要分布在摩洛哥、阿尔及利亚、突尼斯、南非等国,其次为纳米比亚、津巴布韦、博茨瓦纳、莫桑比克、马拉维、马达加斯加等国;在几内亚、尼日利亚、刚果(金)、马里、毛里塔尼亚等国也有少量分布,主要为一套碎屑岩、碳酸盐岩和含煤沉积。非洲地区的中生界分布较局限,主要为火山岩、火山碎屑岩和碎屑沉积岩。非洲新生代的地层以现代碎屑沉积和风沙沉积为主。

非洲现代大陆的框架是在新元古代晚期—早古生代早期泛非造山事件中形成的,由几个主要的太古宙克拉通和较小的克拉通碎片组成,克拉通是年龄为 3.6~2.5 Ga 的大陆碎片的集合体,被较年轻的造山带缝合在一起;非洲结晶基底由变质沉积岩、变质火成岩和火成岩组成,它们的年龄从古太古代到新生代不等。在前寒武纪结晶块体中,太古宙克拉通核的花岗质片麻状绿岩带基本上被元古宙的造山带包围,通常称为活动带。非洲大陆构造线走向主要为南北向或北东—南西向,前寒武纪地层全部强烈褶皱并有花岗岩、混合岩侵入。中新生

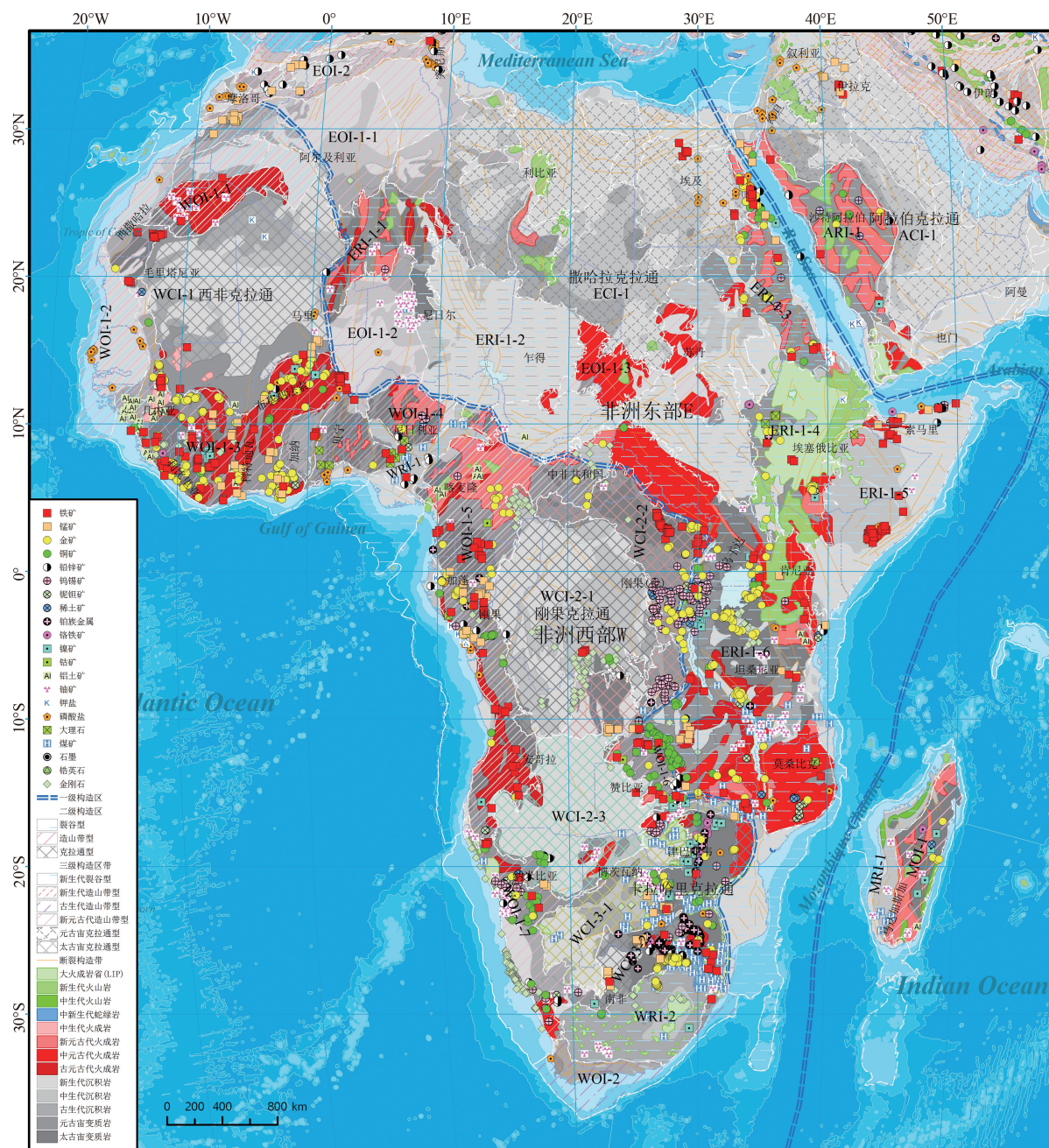


图 1 非洲大陆新构造单元和主要矿产地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of African Continent with new tectonic units and main mineral resources

WC—西部克拉通型; WO—西部造山带型; WR—西部裂谷型; EC—东部克拉通型; EO—东部造山带型; ER—东部裂谷型

代,伴随大西洋张开与南美大陆分离,在非洲大陆东部发育裂谷系,形成世界著名的东非大裂谷,沿大裂谷两侧有大范围的中新生代火山岩分布。因此,前人对非洲大陆的区域构造单元分区/划分^[6-8],总体上以前寒武纪基底岩石的认识为基础^[9-16],结合活动带或褶皱带^[10-22]的资料展开。目前,不同学者对非洲大陆的构造分区/大地构造单

元划分有所差异^[6-8],但都以冈瓦纳大陆自南往北拼合为主线,之后再进一步细分区带。目前最具代表性^[8]的是将非洲大陆构造单元划分为活动带、盆地、褶皱带、稳定克拉通和微大陆 4 种构造单元类型(图 2):①活动带,包括西非活动带和东非造山带,前者进一步划分为图阿雷格地块和贝宁-尼日利亚地块,后者进一步划分为阿拉伯-努比亚地盾和莫

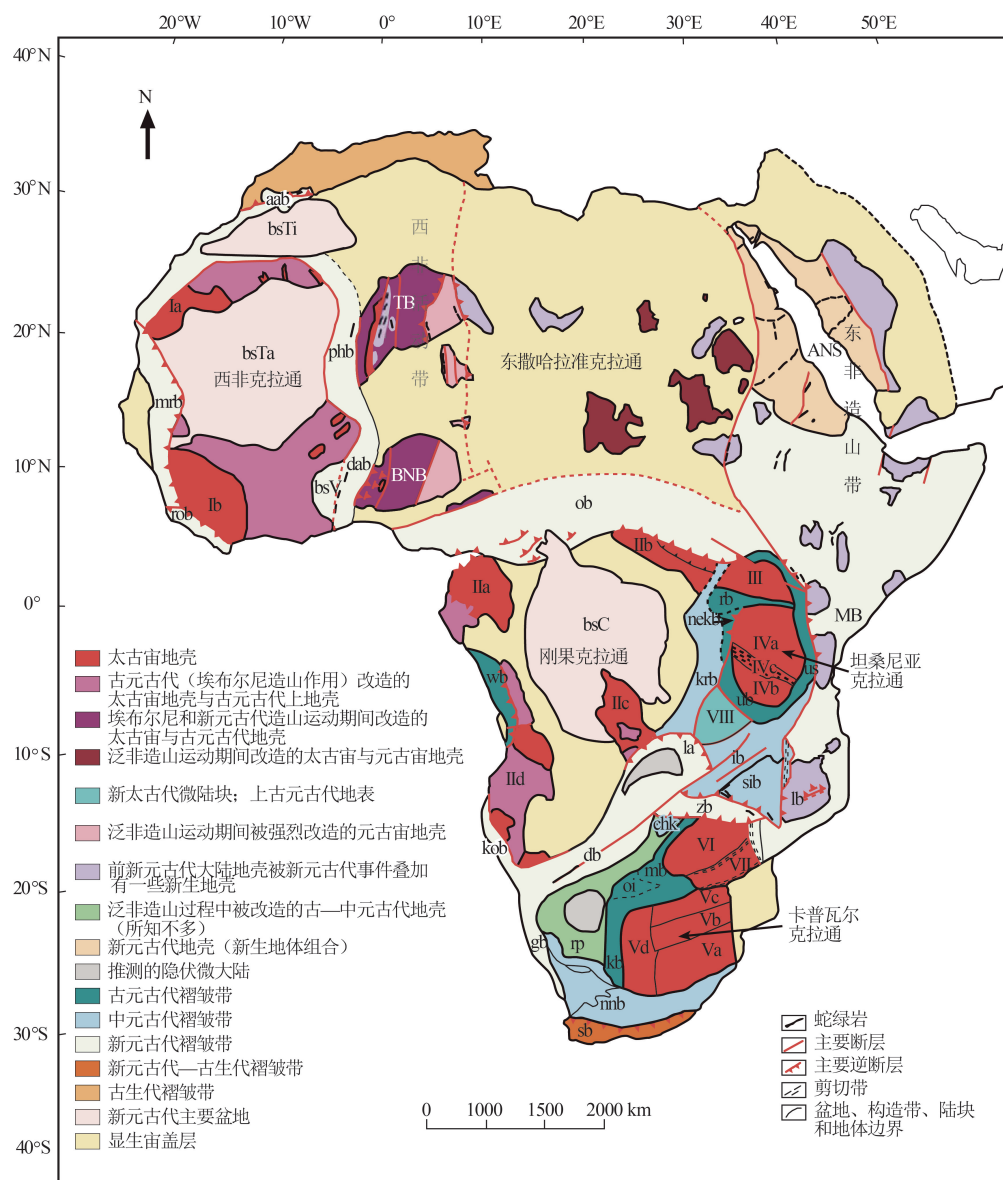


图2 非洲基岩地质图及地壳分区(据参考文献[8]修改)

Fig. 2 Simplified geological map showing outcropped bedrocks and crust division in African

克拉通和微大陆: I—西非克拉通(I a—Reguibat Shield; I b—曼莱奥(Man-Lèò)地盾); II—刚果克拉通(II a—加蓬—卡梅伦地盾(Gabon-Kamerun shield); II b—博穆—基巴利地盾(Bomu Kibalian Shield); II c—开赛地盾(Kasai Shield); II d—安哥拉地盾(Angolan shield)); III—乌干达克拉通(Wgandan craton); IV—坦桑尼亚克拉通(Tanzanian craton)(IV a—北部地体; IV b—南部地体; IV c—多多马地体(Dodoma terrane)); V—卡普瓦克拉通(Kaapvaal craton)(V a—南部地体; V b—中部地体; V c—皮尔斯堡(Pietersburg)地体; V d—西部地体); VI—津巴布韦克拉通(Zimbabwe craton); VII—林波波地块(Limpopo block); VIII—班加韦卢地块(Bangweleu block); IX—东撒哈拉准克拉通(East Saharan Metacraton)。西非活动带: TB—图阿雷格(Tuareg)地块; BNB—贝宁—尼日利亚地块(Benin-Nigerian block)。东非造山带: ANS—阿拉伯—努比亚地盾(Arabian-Nubian shield); MB—莫桑比克造山带(Mozambique orogenic belt)。褶皱带: 古元古代带: ub—本汀(Ubendian); us—乌萨迦兰(Usagaran); rb—鲁文佐里(Ruwenzory); kb—海斯(Kheis); oi—奥夸构造窗(Okwa inlier); mb—马贡迪(Magondi); wb—中非西部; nekb—基巴兰(Kibaran)东北部。古中元古代地区: rp—罗波思(Rehoboth)。中元古代带: krb—基巴兰(Kibaran); ib—伊鲁米(Irumide); sib—南伊鲁米(Southern Irumide); chk—乔莫—科洛莫(Chomo-Kolomo); nnb—纳马夸—纳塔尔(Namaqua-Natal)。新元古代带: zb—赞比西(Zambezi); la—卢非利(Lufilian)弧; db—达马拉(Damara); kob—考克(Kaoko); gb—加里坡(Gariep); ob—乌班吉德斯(Oubanguides); aab—小阿特拉斯山(Anti-Atlas); phb—法鲁斯(Pharusian); dab—达哈梅彦(Dahomeyan); rob—洛克里德斯(Rockellides); mrb—毛里塔尼亚(Mauritanides); lb—卢里奥(Lurio); sb—萨尔达尼亚(Saldania)。新元古代盆地: bsC—刚果(Congo); bsTa—陶德尼(Taoudeni); bsTi—廷杜夫(Tindouf); bsV—沃尔特(Volta)

桑比克造山带;②盆地,包括刚果、陶德尼、廷杜夫和沃尔特 4 个新元古代盆地;③褶皱带,包括古元古代、古—中元古代、中元古代、新元古代 4 个时期的 27 个褶皱带;④稳定克拉通和微大陆,包括西非克拉通、刚果克拉通、乌干达克拉通、坦桑尼亚克拉通、卡普瓦尔克拉通、津巴布韦克拉通、林波波地块、班格韦卢地块 8 个克拉通和微大陆。

岩石圈深部过程与成矿关系研究是当今地球科学发展的前沿^[3-4]。从历史大地构造出发,一般对区域构造单元的划分很少或未考虑深部特征。如果考虑深部特征,从岩石圈角度如何划分? 划分标准或依据是什么? 虽然尚在争论和探索中,但众多学者^[8, 23-27]进行了有益探索,并取得重要进展。基于大陆根柱构造概念,邓晋福等^[23]首次提出新生代以来中国大陆岩石圈尺度的大地构造分区,地壳浅部主要表现为 3 种形态,即西部挤压造山带、东部大陆裂谷带和中部克拉通块体群,它们分别对应山根与造山岩石圈根、地幔热柱和大陆(岩石圈)根,认为浅部构造是对壳幔深部构造的一种响应。北美学者^[24-25]根据北美大陆克拉通与相邻造山带的幔根构造差异,把克拉通边缘和相邻活动带之间延伸的区域称为岩石圈不连续。笔者在研究中国大陆岩石圈深部物质组成时,重新厘定了岩石圈不连续的概念和内涵,即岩石圈块体之间,或者不同类型岩石圈之间的壳—幔结构、岩石组成(合)、地热、陆壳、岩石圈厚度等岩石圈成分要素和结构要素的不连续,它不同于一般意义上的深断裂或超壳断裂,而是地质、地球物理意义上的综合不连续概念^[26-27],并以此作为大地构造单元划分的标志,厘定了中国大陆、中国及邻区大地构造单元^[27-29],探讨岩石圈演化与大规模成矿关系^[27-33]。这些研究为探索非洲大陆岩石圈演化与成矿关系提供了基础。根据地质和地球物理综合研究,非洲大陆可划分为克拉通型、造山带型、裂谷型 3 类岩石圈^[5],不同类型岩石圈的地球动力学性质不同,必然具有不同的成矿关系。

1.2 矿产特征

非洲大陆数千年来一直在不同地区开采各种矿产,在过去的半个世纪里,发现了许多世界级的矿床,蕴藏着丰富的矿产资源。已有资料表明,至少有 17 种矿产的蕴藏量位居世界第一,铂、锰、铬、钨、铌等矿产蕴藏量占世界总储量的 80% 以上,磷酸盐、钽、黄金、钻石、锆、钴、钒等矿产占 50% 以上,

铀、钽、铍、铝矾土、氟石、锆、石墨等矿产占 30% 以上^[5, 7, 34]。非洲大陆矿产资源丰富(图 1),形成的矿产与不同时期地质演化密切相关。已有资料表明,太古宙的岩石中,仅在南非就产出世界上半以上的黄金;津巴布韦大岩墙(Great Dyke, 2.5Ga)产出了非洲绝大部分的铬^[7]。古元古代,南部非洲大部分地区已经趋于稳定和刚性,在南非大陆沉积盆地内蕴藏着世界级的金、铀、锰、铁、萤石、铜—锌等矿床;而中部非洲和西部非洲主要经历了造山运动,伴生金、金刚石、锰、铀等矿产,例如,加纳的金、金刚石、锰等矿产,加蓬的富铀和富锰矿床。中元古代,非洲和南美洲构成超级大陆,除中部非洲东部的裂谷作用和造山作用外,其余大部分时期都是沉积作用。新元古代,非洲大陆的裂谷作用和火山作用,在赞比亚—刚果(金)铜带形成世界级的钴和铜矿床。古生代,除西北部阿特拉斯(Atlas)和南部开普(Cape)造山带外,非洲大陆主体稳定;古生代海侵在早志留世、中泥盆世和早石炭世达到顶峰;晚石炭世—二叠纪,南冈瓦纳大陆漂移到南极附近,开启了被称为卡鲁旋回的大陆沉积阶段,卡鲁旋回的沉积物主要集中在大陆裂隙中,含有大量的煤系和铀。中—新生代,伴随冈瓦纳大陆的裂解,在非洲大陆形成陆内裂谷盆地,沿大西洋、印度洋、红海和亚丁湾形成大陆边缘盆地,形成以内生金刚石、油气、盐类、放射性金属及各种砂矿为特色的矿床(图 1)。

根据中国地质调查局发展研究中心“全球矿产资源信息系统”资料对非洲 2503 个矿床进行统计(图 3),

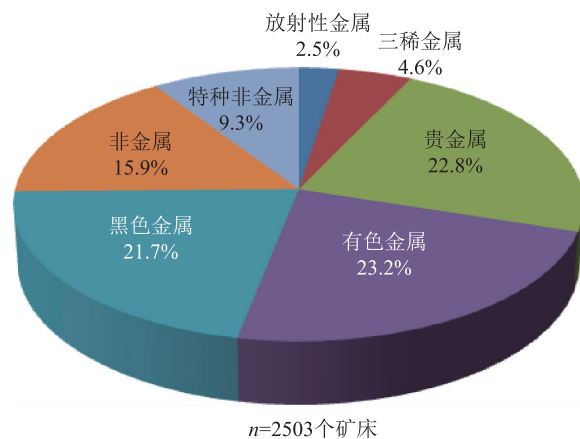


图 3 非洲大陆矿产类型统计

Fig. 3 Statistics for types of mineral resources in African Continent

有色金属矿床 580 个,占比 23.2%,贵金属矿床 570 个,占比 22.8%,黑色金属矿床 542 个,占比 21.7%,这 3 类矿床的比达 67.6%。另外三稀金属矿床 116 个,占比 4.6%,放射性金属矿床 63 个,占比 2.5%;金属矿床占比 74.8%;非金属矿床占比 25.2%,其中特种非金属(金刚石)矿床达 9.3%。

对 1614 个矿床类型进行统计(图 4),占比超过 10% 的有脉状矿床、剪切带型和 BIF 型矿床;占比 5%~10% 的有伟晶岩型、岩浆分异型、沉积型、层控型、红土型;占比 2%~5% 的包括表生矿床、VMS 型、黑色页岩型、金伯利岩型、变质型、矽卡岩型;占比 2% 以下的包括碱性杂岩型、碳酸岩型、斑岩型。

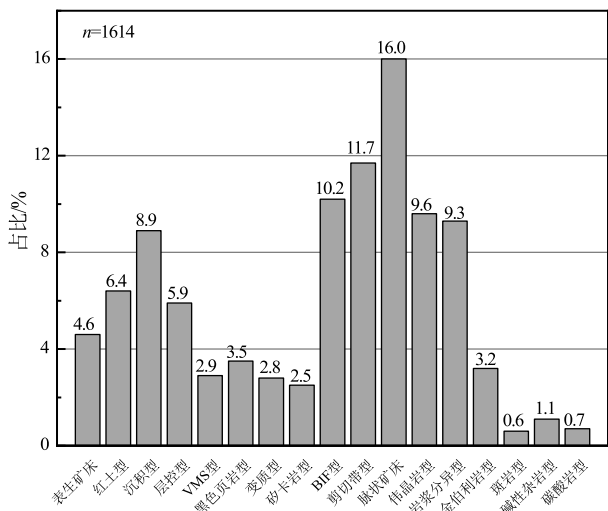


图 4 非洲大陆不同矿床类型统计

Fig. 4 Statistics of different types of ore deposits in African Continent

表 1 非洲大陆地质构造演化主要特点及其伴生矿产

Table 1 Geological features of tectonic evolution and associated mineral resources in African Continent

时代	地质构造作用特征
中新生代	主要表现为强烈的裂谷作用和大范围的基性—超基性、中酸性岩浆侵入和喷出活动,以及现代沉积作用等,形成内生金刚石矿床、油气、贱金属和放射性金属矿床及各种砂矿矿床
古生代	主要表现为多期多阶段的大规模海水进退和盆地升降作用,含煤地层发育和含铀砂砾岩冲积
前寒武纪	多期多阶段的板块拼合作用、裂谷作用、火山喷发作用、岩浆侵入活动、大规模花岗岩化、混合岩化作用和多期次的变质作用,形成的主要金属、非金属矿包括金、铜、铬、铂族、锰、铁、镍、钒、钛、铀、石墨、金刚石等

对矿产类型、矿床类型统计表明(图 3、图 4),非洲大陆矿产资源以金属矿产占绝大多数,多数矿床类型与岩浆作用密切相关,而其岩浆作用的一个重要特点是各类岩浆岩侵入到克拉通、活动带、沉积盆地等地质单元,且岩石种类繁多、时代跨度大(太古宙—全新世)。这些侵入体可能以岩管、火山杂岩、岩墙、岩床、岩屑、火山岩、重要层状侵入体(如南非布什维尔德、津巴布韦大岩墙)和大型火成岩区(省)的形式出现;岩石成分从超镁铁质到镁铁质和长英质不等,还存在碳酸岩和金伯利岩侵入体,这些侵入体蕴藏一些最重要的矿藏,如稀土元素、磷酸盐和铜与碱性侵入体有关,而所有重要的原生金刚石矿床都产于克拉通,并与金伯利岩管道和岩墙有关。不同时代和类型的侵入体也是活动带的重要组成部分,在某些地方发育重要的矿床,如常见由碱性花岗岩和正长岩组成的环状杂岩,尤其是在经历过泛非造山作用的地区产出的环状杂岩,常含有锡、钽、铌、钨、稀土元素、铍、萤石等矿产。因此,在空间上,非洲大陆大多数黄金和所有原生金刚石(金伯利岩中)、铂、铬和钒矿床与太古宙克拉通核有关,许多贱金属矿床赋存于较年轻的元古宙变质活动带,大型显生宙盆地和全新世沉积物中含有大量的煤、石油、天然气和重矿物砂(图 1)。各种矿藏、矿床和矿点的类型和分布与非洲大陆的地质构造格局密切相关(表 1)。鉴于非洲大陆的地壳记录了至少 3.8 Ga 的构造演化史,在其形成演化发展中,涵盖了全球超大陆的聚合与裂解历史^[35],经历了多期、多阶段的构造作用、岩浆作用、变质作用和沉积作用,形成丰富的矿产资源,可能诠释了成矿作用高峰期的出现往往与超大陆的聚合与裂解及岩石圈/软流圈系统变迁有关认识^[27-29]。

2 岩石圈与成矿关系

20 世纪 90 年代以来,地质学家们普遍认识到壳—幔相互作用,特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统变迁对成岩成矿有重要的控制作用,把成矿作用与成矿物质供给—传输—集聚过程和大陆形成演化联系起来,从壳幔相互作用和物质—能量交换传递的新视角研究大陆成矿作用过程已成为重要的方向^[36-39],其中岩石圈不连续,可能是把大陆成矿作用与壳—幔相互作用、岩石圈演化等深部过程

联系起来的重要纽带^[26]。盆地与能源矿产关系密切,不同类型盆地在空间上的分布差异反映了不同地区深部过程、深部地球动力学背景的差异^[40],如把裂谷看作是岩石圈在拉伸过程中破裂了的地区形成的狭长凹陷。这样,无论金属矿产,还是能源矿产可能都与岩石圈演化有密切关系。非洲大陆经历了多期、多阶段的构造作用、岩浆作用、变质作用和沉积作用,根据地质和地球物理综合研究,非洲大陆由克拉通型、造山带型、裂谷型 3 类岩石圈组成^{[5]①};克拉通型又可分为以西非、刚果和卡拉哈里克拉通为代表的太古宙克拉通型,以及新元古代撒哈拉克拉通型;造山带型分为新元古代、古生代和新生代造山带型岩石圈;裂谷型均为新生代裂谷型岩石圈(图 1)。由于不同类型岩石圈具有不同的地球动力学性质和形成过程,因此其成矿特征各具特色。

2.1 克拉通型岩石圈

太古宙克拉通型岩石圈代表非洲大陆最古老的岩石,是克拉通的太古宙核,这些核(>2.5 Ga)由各种花岗岩类和相关绿岩带组成^[7, 11, 17],黄金、原生金刚石(金伯利岩中)、铂、铬和钒矿床与太古宙克拉通核有关,具有“老物质老结构”的特点(表 2)。从成矿角度看具有重要意义,如卡拉哈里克拉通的卡普瓦尔核和津巴布韦核;大刚果克拉通的坦桑尼亚、博穆(刚果(金)东北部)、乌干达北部、卡赛和恩特姆(Ntem)核,以及西非克拉通的科勒马-曼恩(Kenema-Man)和雷圭巴特(Reguibat)核,含有多世界级的矿床(不同时代)^[34],其中,最重要的是金、铂族金属、金刚石、铁和锰。

太古宙克拉通型岩石圈稳定的特点,在地质演化过程往往表现为被动的角色,不断被周围造山带改造,因此,主要金属矿床大多围绕克拉通周围的造山带分布(图 1),而残留的克拉通型岩石圈在地表通常表现为盆地,常被造山带包裹并作为造山带的前陆盆地,同类的克拉通型岩石圈是新元古代撒哈拉克拉通型岩石圈,对应的地表浅部也是前陆盆地。研究表明^[41~42],构造流体大规模运移聚集有利于油气田的形成,其机理如图 5 所示,前陆盆地的碎屑楔可被前进式的逆冲带前缘超覆,构造(加上原有的沉积物负荷)载荷效应有助于生物成分烃的成熟和其他流体的排出(图 5 中的①和③),流体的迁移可导致前陆盆地内金属矿床的形成,烃的迁移和圈闭可形成有价值的油气田。Oliver^[41]指出,岩脉与造山带逆冲体下的大陆边缘沉积物,由于构造加载排出流体(图 5 中的①),这些流体携带热、矿物、石油(petroleum)或造油气的煤岩成分(ingredients for petroleum)进入前陆盆地和陆块的可渗透地层;在其运移过程中,可使流经的沉积物加热和活化某些物质,当沸腾流体冷却时,可使有用元素沉淀,形成类似美国中部和东部的密西西比河谷型铅-锌矿;在圈闭处,被埋藏圈闭的烃可形成油气田,如撒哈拉南部盆地、中东的油气田等。研究表明^[41~42],掩埋于逆冲体下面的大陆边缘沉积物受压,其间的孔隙流体,以及随着埋深加大含水矿物脱水形成的流体,会被逆冲推覆构造大量挤出形成大规模的流体流,并沿逆冲带向前陆盆地内运移和聚集,形成油气田。这就解释了为何不少盆地成为油气资源重要产地的同时,也是盐类矿床的重要

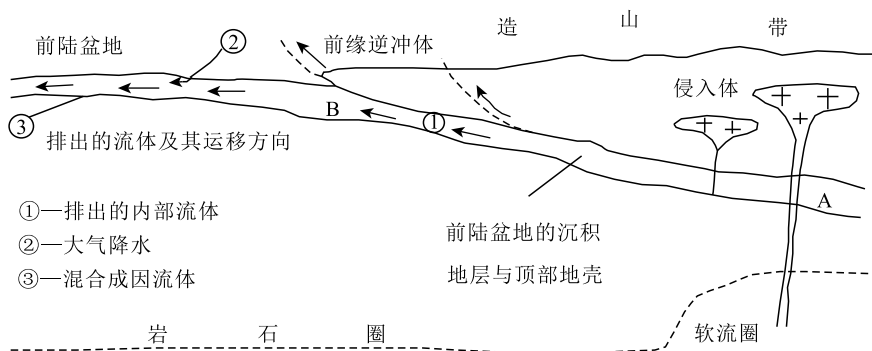


图 5 造山带与前陆盆地之间的不连续(AB)示意图(据参考文献[29]修改)

Fig. 5 Sketch map of discontinuity (AB) between orogenic belt and foreland basin

AB—为造山带与前陆盆地 2 个构造单元之间的不连续(discontinuity)

场所(图1)。

2.2 造山带型岩石圈

非洲大陆造山带型岩石圈分为新元古代、古生代和新生代造山带型,主体是新元古代造山带型。太古宙克拉通型岩石圈中,卡拉哈里克拉通由卡普瓦拉克拉通和津巴布韦克拉通构成,其间被古元古代林波波-马冈迪(Limpopo-Magondi)造山带焊接。中元古代造山带,包括纳塔尔-纳马夸(Natal-Namaqua)、雷霍博斯(Rehoboth)、恩加米兰(Ngamiland)和乔马-卡洛莫(Choma-Kalomo)造山带,以太古宙-古元古代卡拉哈里克拉通为核心。在刚果克拉通外围分布古元古代造山带,如西尼罗河、鲁文佐里、乌本迪安和乌萨加兰带、加蓬中非西部带和安哥拉地盾南部带,以及中元古代基巴兰、卡拉格韦-安科勒、伊鲁米和南部伊鲁米造山带。在西非克拉通,科勒马-曼恩(Kenema-Man)和雷圭巴特(Reguibat)的太古宙核被比里姆火山沉积带的古元古代岛弧和安第斯弧地体包裹。这些活动造山带的时代不同,代表了古元古代—新元古代的造山带变质根,这些造山带在地质时期的不同阶段经历了再活化,因此它们的规模、构造作用和变质作用的程度和性质,以及所赋存的矿床有很大的不同。在一些活动带内还发育沉积盆地。这些经历了不同程度变质作用的沉积物通常是贱金属矿床的宿主,它们包括赞比亚和刚果(金)的大型新元古代铜钴矿床,南非中元古代纳马夸活动带的布什曼兰层序,纳米比亚新元古代达马拉、加里普和考科带的铜、铅、锌矿床等。活动造山带中的花岗岩体侵入形成了重要的锡、钨、钽、稀土元素等矿床,如纳米比亚的达马拉带、南非和纳米比亚的纳马夸带、刚果(金)东部的基巴兰带、布隆迪的卡拉格韦-安科莱恩(Karagwe-Ankolean)带、卢旺达和乌干达西南部,以及埃塞俄比亚、索马里、厄立特里亚、苏丹、埃及的努比亚地盾等(图1)。

泛非构造运动是冈瓦纳大陆拼合的标志,以其广泛性对非洲大陆的形成具有特殊意义。该运动对围绕在西非克拉通、刚果克拉通和卡拉哈里克拉通周围的古元古代和中元古代造山带的壳幔成分或结构进行了改造^[5]。随后的造山运动只发生在非洲的西北部和最南端,对非洲大陆主体影响小。因此,经历古生代、中生代和新生代裂谷作用后残留下来的造山带型岩石圈(图1),都统称为新元

古代造山带型岩石圈,具有“老物质新结构”特点(表2)。

2.3 裂谷型岩石圈

裂谷型岩石圈形成于伸展背景,对应的往往是沉积盆地,是具有较高热流值的“热盆”。非洲大陆沉积盆地的年龄差异很大,太古宙—全新世沉积盆地是非洲各种重要矿产的聚集地。在南非的卡普瓦拉克拉通上,保存了一系列时代不等(3.0~1.8 Ga)的盆地^[7]。盆地大小随年龄变化,年龄最老的沉积盆地一般最小,最年轻的最大的。一些更年轻、更大的盆地延伸到相邻的变质活动带上,不同程度地受到与活动带复活、不同阶段变质作用或构造作用相关的影响。在南非,卡鲁盆地是最大的显生宙沉积盆地,时代为晚石炭世—早侏罗世。在南部非洲、中部非洲和东部非洲都发现了时代相近的裂谷盆地,并延伸到冈瓦纳大陆的其他大部分地区,这些盆地拥有舌鳎属植物群,这些植物群分布区已经形成了非洲许多重要的煤田。在北部非洲,古生代—新生代大型盆地覆盖在泛非和更古老的基底之上,它们是白垩纪大型裂谷作用与新生代东非大型裂谷作用共同形成的产物。需要注意的是,上述盆地对应的并非都是裂谷型岩石圈,有的已经被改造,现今裂谷型岩石圈主体分布在非洲大陆东部,形成于中生代,是伴随大西洋张开和非洲大陆与南美大陆分离的产物,属于非洲大陆东部在泛非造山带型岩石圈基础上发育的裂谷型岩石圈,具有“老物质新结构”(新元古代/新生代)的特点,有别于克拉通型岩石圈上具低热流特点的前陆盆地“冷盆”,呈现“热幔冷壳”特征(表2),产出矿床以油气田、盐类和各种砂矿为主(图1)。

3 成矿区带划分

成矿区带是具有较丰富矿产资源或矿产资源潜力的地区,是区域成矿规律研究和矿产勘查与预测评价的基础^[43-46]。矿床在时空分布上非常不均匀,这种不均匀性是地球岩石圈结构、区域地球化学场、地质构造演化历史等诸多因素的综合反映^[45-46]。成矿区带划分对深化成矿规律认识、提高勘查效果、圈定最有投资价值的远景区等具有重要意义。目前,国家级的成矿区带划分一般采用三分法:成矿域、成矿省、成矿带(区);省级的一般采用五分法:成矿域、成矿省、成矿带(区)、成矿亚带(区)、

表 2 非洲大陆成矿区带划分
Table 2 Division of metallogenetic belts in African Continent

一级	二级	三级	成矿区带(四级)			壳-幔时空 结构状态
			成矿区/带名称与编号	矿床类型	典型矿床*	
非洲 西部 W	克拉通型 WCI	西非太古宙 克拉通型 WCI-1	陶尼提盆地磷酸盐-钾 盐-金刚石砂矿-砂金矿 成矿区; WCI-1	沉积型磷酸盐、金刚石砂 矿、砂金矿	Ansongo - Agaula 中型锰矿、 Banmba 金矿、磷酸盐、Samit 铀矿	老物质老结构 (太古宙/太古宙)
		刚果太古宙 克拉通型 WCI-2	扎伊尔河流域金刚石-铅 锌-金成矿区; WCI-2-1	金刚石砂矿、砂金矿、沉积 型铅锌矿	Tshikapa 大型金刚石砂矿	
			东扎伊尔铁锰-金-钨锡 成矿带; WCI-2-2	BIF 型铁锰矿、绿岩型金 矿、花岗岩型钨锡多金属	Isiro 超大型铁矿、Kitenge 绿岩 型金矿	
			埃托沙金-铀-金刚石成 矿区; WCI-2-3	沉积型铀矿、砂金矿、金刚 石砂矿	Top Hat 金矿、Ngamiland 铀 矿、Dipalata 金刚石砂矿	
		卡拉哈里太 古宙克拉 通型 WCI-3	卡拉哈里金刚石-铀-钾 盐-煤成矿区; WCI-3-1	金伯利岩型、砂岩型金刚 石、沉积型	Orapa 超大型金刚石矿、Kubu 铀矿	
			东卡拉哈里铬-铂族金属 -镍-金成矿区; WCI-3-2	岩浆分异型铬-铂族金属- 镍矿、绿岩型金矿、金伯利 岩型金刚石	津巴布韦大岩墙、Bushveld	
	造山带型 WOI	新元古代造 山带型 WOI-1	雷吉贝特隆起; WOI-1-1	BIF 型铁锰矿、沉积型 铀矿	Agouyme 铀矿、Guelb Zednes 大型铁矿	老物质新结构 (太古宙- 中元古代/ 新元古代)
			奥加塔-塞内加尔油气- 岩盐成矿区; WOI-1-2	油气, 岩盐	Bou Craa 磷酸盐矿	
			西非地盾铁锰-金多金属 成矿区; WOI-1-3	BIF 型铁锰矿、绿岩型金 矿、红土型铝土矿、金和金 刚石砂矿	Guelb Zednes 大型铁矿、Prestea- Beta 超大型金矿	
			尼日利亚-沃尔特铁-金- 钨锡成矿区; WOI-1-4	BIF 型铁矿、石英脉型钨 锡矿	Shieni group 大型铁矿、Ririwari 锡矿、Niamtougou-Kara 铀矿	
			西扎伊尔铜-铁-金-铀多 金属成矿带; WOI-1-5	砂岩型铜矿、BIF 型铁矿、 沉积型铀矿	Mékambo 超大型铁矿、M Passa 超大型铜多金属矿	
			卢菲利安弧铜-铅锌-铀 多金属成矿带; WOI-1-6	砂岩型铀矿、沉积型铜(铅 锌)矿	坎桑希(Kansanshi)大型铜-铀- 金-钼多金属矿	
			达马拉铜-铅锌-铀多金 属成矿带; WOI-1-7	伟晶岩型型、花岗岩型锡 多金属矿	Otjihase 中型铜-银-金多金属 矿、尤斯泰灵(Uis Tailings)超 大型锡-铋钼多金属矿	
		古生代造 山带型 WOI-2	开普褶皱带磷酸盐-砂金 成矿带; WOI-2	沉积型磷酸盐矿、金-铂 砂矿	Outeniqua 磷酸盐矿	老物质老结构 (晚古生代/ 晚古生代)
	裂谷型 WRI	喀麦隆-尼 日尔裂谷型 WRI-1	喀麦隆-尼日尔铅锌-铜- 铁-油气成矿带; WRI-1	热液型铅锌矿、沉积型 煤矿	Ishiagu 大型铅锌矿、Obi-Lafia 煤矿	老物质新结构 (中生代/ 新生代)
		卡鲁裂谷型 WRI-2	卡鲁盆地镍-铁-铜-金- 铀金刚石成矿区; WRI-2	金伯利岩型金刚石、沉积 型铀矿、煤矿	Cradock 脉状铂矿、中型 Prieska 铜锌矿、大型 Ficksburg 金刚石矿	

续表 2

一级	二级	三级	成矿区带(四级)			壳—幔时空 结构状态
			成矿区/带名称与编号	矿床类型	典型矿床*	
非洲 东部 E	克拉通 型 ECI	撒哈拉新元古 代克拉通型 ECI-1	撒哈拉油气—岩盐成矿区: ECI-1	油气、岩盐、同生沉积型 锰矿	Tasdermt、Tirani 同生沉积型 锰矿	新物质老结构 (新生代/ 新元古代)
	造山带型 EOI	新元古代造 山带型 EOI-1	阿海特—伊利济盆地油 气—岩盐成矿区;EOI-1-1	油气、岩盐、砂金	Marada 钾盐矿	新物质老结构 (新生代/ 新元古代)
			姆登煤—铀成矿区: EOI-1-2	沉积型、砂岩型铀矿、岩盐	Imouraren—Tatintarat 超大型 铀矿	
			努比亚西部地盾油气—岩 盐成矿区;EOI-1-3	岩盐、油气	Massif Central 金矿	
	裂谷型 ERI	新生代造 山带型 EOI-2	阿特拉斯铅—银—锰成 矿带;EOI-2	热液型、沉积型	EL Abed 大型铅—银— En—Nam 同生沉积型锰矿	新物质新结构 (新生代/ 新生代)
		新生代裂 谷型 ERI-1	霍加尔隆起金—铀—铂— 铬—钨锡多金属成矿区: ERI-1-1	岩浆分异型、石英脉型钨 锡矿	Hoggar 铂—铬—铁矿、Laouni 脉 状锡—钨矿、Tinef 铀矿、 Timgaouine 金矿	老物质新结构 (新元古代/ 新生代)
			撒哈拉南部盆地岩盐—油 气成矿区;ERI-1-2	岩盐、油气	Sudan 磷酸盐	
			红海地盾铜—金—钨锡—铅 锌多金属矿带;ERI-1-3	火山沉积型、剪切带型 金矿	Hadal Auatib 火山沉积型铜— 金属矿、Jebel Eyob 石英脉型钨 锡矿、Kamoeb 剪切带型金矿、 Atlantis II Deep 沉积型铅— Ujima 红土型(镍、铬、钴)矿、 Ingessana Hills 中型铬铁矿、 Colluli 钾盐矿	
			阿姆哈拉高地金—镍—钾 盐成矿区;ERI-1-4	钾盐、红土型镍矿	Bur Galan 钨锡矿、Manja Vihin Mn 矿、Dusa Mareb 大型沉积 铀矿、Bur Galan 大型铁矿	
			索马里钨锡—铋—铀—铁 锰成矿区;ERI-1-5	伟晶岩型钨锡—铋—铀、沉 积型铀矿、BIF 型铁—锰矿	Tarime—Afrika Mashariki 大型 金矿、Liganga—Ligangu 大型含 钛磁铁矿、Nyamailo 大型钨 锡(钨)多金属矿	
			东非裂谷铀—钨锡多金属 成矿带;ERI-1-6	砂金矿、岩浆分异型含钛 磁铁矿、伟晶岩型钨锡矿		
阿 拉 伯 半 岛 A	克拉通型 ACI	阿拉伯克 拉通型 ACI-1	阿拉伯铁锰多金属矿带: ACI-1	铁锰多金属	Yayacik 铁矿、Karaboya 锰矿	老物质老结构 (新元古代/新元古代)
	裂谷型 ARI	阿拉伯西 南裂谷型 ARI-1	阿拉伯西南铜—铅锌多金 属矿带;ARI-1	热液型、岩盐	As Safra 铜—银—银矿	老物质新结构 (新元古代/新生代)
马 达 加 斯 加 M	造山带型 MOI	新元古代造 山带型 MOI-1	马达加斯加铬—镍—金—铜 成矿带;MOI-1	岩浆熔离型铬铁矿、红土 型镍矿、红土型铝土矿、 砂金	安巴托维红土型镍矿、 Andriamena 铬铁矿	老物质新结构 (太古宙—中元古 代/新元古代)
	裂谷型 MRI	新生代裂谷 型 MRI-1	Morondava 煤—铀成矿带: MRI-1	沉积型、砂金	Sakaraha 煤矿、Makay 铀矿	新物质新结构 (新生代/新生代)

注: * 矿床资料据中国地质调查局发展研究中心“全球矿产资源信息系统”;WC—西部克拉通型;WO—西部造山带型;WR—西部裂谷型;EC—东部克拉通型;EO—东部造山带型;ER—东部裂谷型

矿田^[44]。本文采用“基于地质过程解析的资源评价与选区方法”思路^[33],在地质历史、岩石圈类型、岩石圈演化与成矿、区分岩石圈壳-幔状态(即物质形成时代和结构形成时代)等基础上,划分非洲大陆成矿区带^[5]。

根据地质演化历史,非洲大陆岩石圈演化与成矿过程可简要地概括为:太古宙,非洲以壳幔分异、垂向地壳增生为主导形成克拉通型岩石圈,相伴形成 BIF 型铁(锰)矿、绿岩型金矿、Cr、Ni、PGE 等矿产;稳定的太古宙克拉通型岩石圈,在随后的古元古代和中元古代造山作用过程中,大陆地壳生长方式以水平增生为主,改造太古宙克拉通型岩石圈的同时形成围绕克拉通的造山带型岩石圈,并使大陆范围扩展。

新元古代,席卷整个非洲大陆的泛非构造热事件,导致包裹西非克拉通、刚果克拉通和卡拉哈里克拉通的古元古代和中元古代造山带“活化”,其壳幔成分或结构不同程度地受到改造,成为新元古代造山带型岩石圈,具有“老物质新结构”(太古宙—中元古代/新元古代)的特点,并成为金属矿床产出的主要场所(图 6);东部冈瓦纳大陆和西部冈瓦纳大陆各地块之间碰撞,形成既有新生陆壳、洋壳,又有太古宙—中元古代陆壳的东非造山带型岩石圈,以及含古老碎片的撒哈拉新元古代克拉通型岩石圈,使非洲大陆主体形成。

古生代,非洲大陆主体稳定,主要表现为多期多阶段的大规模海陆交互沉积和盆地升降作用,形成含煤岩系、含铀砂砾岩、砂岩型铜矿等^[47-48](图 6),岩石圈结构稳定。

中生代,伴随大西洋张开和非洲大陆与南美大陆分离,非洲大陆东部在泛非造山带型岩石圈基础上发育裂谷型岩石圈,具有“老物质新结构”(新元古代/新生代)的特点,以及“热幔冷壳”特征,伴随产出以油气田、铀矿、盐类和各种砂矿为主的矿床(图 6)。

综上,非洲大陆丰富的矿产资源形成,与岩石圈物质和结构形成、演化有密切关系。根据非洲大陆形成历史、岩石圈演化,结合主要矿产空间分布、矿床类型、矿产组合,以及壳-幔结构状态,可划分出 31 个成矿区带(图 6;表 2),其中非洲大陆 27 个,阿拉伯半岛和马达加斯加各 2 个。所划成矿区带(表 2)相当于陈毓川等^[44]方案中的成矿亚带(区)。

4 讨 论

4.1 成矿区带

自 20 世纪初成矿省(metallogenic province)概念提出以来,得到广泛应用,众多学者从全球构造尺度阐述了主要类型矿床的形成和分布规律^[49-54]。裴荣富等^[54]划分了全球 21 个巨型成矿区带,非洲—阿拉伯成矿区为其中之一。成矿区带的划分往往与构造区带/构造单元划分密切相关,但两者界线有时并不完全相同。以近 30 年来中国的区域构造单元/成矿域分类为例,有的学者将其划分为三大成矿域^[55]:古亚洲成矿域、滨太平洋成矿域及特提斯—喜马拉雅成矿域;有的划分为四大成矿域^[56]:①中国北方构造域/成矿域;②秦祁昆构造域/成矿域;③中国西南部构造域/成矿域;④东部沿海构造域/成矿域。近年趋向于划分为五大成矿域^[44-45, 54]:①前寒武纪成矿域,包括扬子、鄂尔多斯和塔里木;②古亚洲成矿域;③秦—祁—昆成矿域;④特提斯—喜马拉雅成矿域;⑤滨西太平洋成矿域(包括东北、华北和华南成矿区)。从上述分类看,这些以历史地质学和浅部证据为主要依据的二维平面分类,二级分类趋同,一级分类只是如何归属二级或三级单元的差异。从历史大地构造出发,以往对区域构造单元/成矿单元的划分,很少或未考虑深部特征。因此,本文所划成矿区带(表 2),在图面(图 6)、分级上相当于陈毓川等^[44]方案中的成矿亚带(区),不同的是基于岩石圈构造单元和岩石圈演化与成矿关系为基础划分的。

4.2 资源评价与选区

将地质与地球物理相结合,是 20 世纪 90 年代以来的重要趋势,但是地质与地球物理结合的难点在于:各种地球物理方法实际上只是对现今岩石圈的“快照”,获得的岩石圈结构、Moho 面和 L/A(岩石圈与软流圈边界)深度只是反映现今的状态,并不一定代表地质历史时期或成矿作用发生时的结构状态和物质组成^[57];特别是对复杂的非洲大陆,多次拼合、造山作用可使同一地区的岩石圈不连续受到多次“改造”,并且对于造山带型岩石圈而言,其 Moho 面、L/A 深度和形态均有随时间变化的特征。邓晋福等^[39]指出,用现今地球物理场去解释区域成矿作用有关的规律时应特别小心,一个最好的途径是,尽量结合地质演化历史,特别是岩浆构造

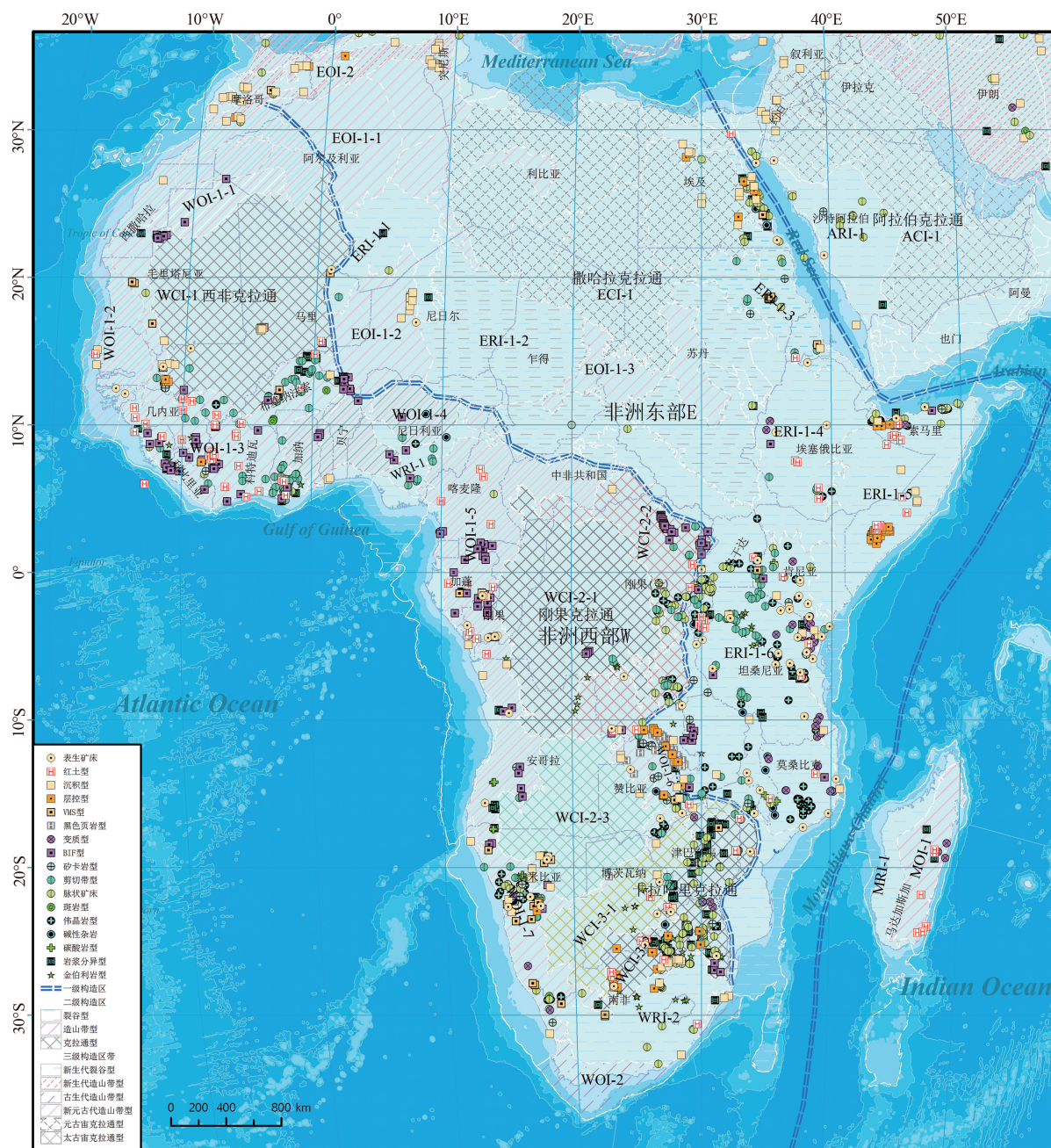


图6 非洲大陆成矿区带划分

Fig. 6 Division of metallogenic belts in African Continent

WC—西部克拉通型;WO—西部造山带型;WR—西部裂谷型;EC—东部克拉通型;EO—东部造山带型;ER—东部裂谷型

事件的分析,才可能对地球物理场的形成过程给予比较合理的地质解释。

众所周知,成矿与找矿是2个完全不同的概念,成矿往往是“过去时”,而找矿是“现在时”,因此,对于选区和找矿部署而言,这是个非常现实的课题,着眼点不能仅是某个地区“曾经拥有”某类矿床或

曾发生过某种成矿作用,更重要的是辨别现今该区的矿产资源存留状态差异,才能为资源潜力选区、潜力评价提供依据。为此,邱瑞照等^[58]提出通过“地质过程解析”进行“综合评价与选区”的新思路,后续提出“基于地质过程解析的资源评价与选区方法”^[33],并总结了使用该方法的知识结构、有关术语

解释和工作步骤。该方法强调在阐明地质过程、成矿过程的基础上,开展资源评价与选区圈定。以地质历史和重大地质事件为序,根据构造-岩浆-成矿事件序列,对比重大事件,区分不同时期重大地质事件的性质、影响范围及其与大规模成矿作用的关系;从壳幔深部演化角度,阐明地质过程,更好地认识成矿过程,为选区部署提供依据。在方法上,①以构造-岩浆-成矿事件为序,依据具有时代特征的地质记录(岩浆活动、沉积历史、成矿特点等),结合深部地球物理资料,综合解析地质过程;②识别大规模成矿作用,是否发生,涉及哪些区域;③资源评价与选区,即后续地质作用改造后,现今资源存留状态,区分出哪些地区至今还保留得相对完整(潜力区)。本文根据非洲地质和地球物理特征划分的不同岩石圈类型及构造单元^[5],结合地质演化历史,探讨岩石圈演化与成矿关系,进而在区分出不同构造单元的岩石圈壳-幔状态(即物质形成时代和结构形成时代)的基础上划分非洲大陆成矿区带,是应用“基于地质过程解析的资源评价与选区方法”^[33]思路和方法的尝试。

4.3 岩石圈壳-幔时空结构及其意义

非洲大陆不同成矿区带的岩石圈壳-幔物质时空结构状态见表2。需要说明的是,关于岩石圈“老物质老结构”、“老物质新结构”、“新物质新结构”的名词含义,这里包含了岩石圈物质的形成时代和结构形成时代2个概念。实际上,各类矿产是壳幔相互作用的产物,而一个地区/国家大规模成矿作用,取决于最后且最强一次的岩浆作用,同时也是岩石圈的壳幔物质和结构形成的主要时期^[27]。因此,从岩石圈深部地质演化出发^[47],考虑岩石圈壳幔时空结构、从地质过程角度进行资源评价与选区是必要之举^[33]。如泛非运动导致围绕西非克拉通、刚果克拉通和卡拉哈里克拉通的古元古代和中元古代造山带物质组成或结构的变化,成为“老物质新结构”的新元古代造山带型岩石圈(表2),因此,找矿目标仍以古元古代和中元古代形成的矿床为主;再如非洲东部的裂谷型岩石圈分布区域,整体而言,虽然它们是由中生代对流地幔输入改造新元古代泛非期造山型岩石圈而形成的裂谷型岩石圈,但在对流地幔输入方式上是玄武岩喷发叠加在泛非期造山型岩石圈陆壳上的,在垂向输入方式上是线状的,因此玄武岩覆

盖下的陆壳仍然主要是泛非期形成的,即在非洲东部目前被玄武岩覆盖的大片区域依然是寻找泛非期矿床的重要区域^[59]。再如,分布于华北中东部地区的“迁安式”铁矿,虽然其物质是新太古代—古元古代形成的,但其结构是晚中生代形成的,属于“老物质新结构”。在晚中生代“华北克拉通破坏”之前深埋于中下地壳,属于无经济价值的“呆矿”,晚中生代“华北克拉通破坏”才使其出露浅表,经济价值显现,从这个意义上说,可以认为华北“迁安式”铁矿是晚中生代形成的。因此,认识一个国家/地区的岩石圈物质和结构的形成时代对于深化成矿认识、总结成矿规律、资源潜力评价和找矿部署等具有重要意义。

5 结 论

(1)矿产类型、矿床类型统计表明,非洲大陆矿产资源以金属矿产占绝大多数,多数矿床类型与岩浆作用密切相关,非洲大陆记录至少3.8 Ga的构造演化历史,涵盖了全球超大陆的聚合与裂解历史。丰富矿产资源的形成,可能诠释了成矿作用高峰期的出现往往与超大陆的聚合与裂解及岩石圈/软流圈系统变迁有关的认识。

(2)非洲大陆由克拉通型、造山带型、裂谷型三类岩石圈组成,克拉通型岩石圈稳定的特点,在地质演化过程往往表现为被动角色,不断被周围造山带改造;造山带型岩石圈形成于挤压环境,以叠加与改造为特色;裂谷型岩石圈形成于伸展背景,对应的往往是沉积盆地,由于非洲大陆不同类型岩石圈具有不同的地球动力学性质和形成过程,其成矿特征不同且各具特色。

(3)根据非洲大陆形成和岩石圈演化,区分非洲大陆不同类型岩石圈的壳-幔状态,即物质形成时代、结构形成时代,结合主要矿产空间分布、矿床类型及矿产组合,划分出27个成矿区带,为在非洲地区开展资源评价与选区提供了新的思路和参考。

参考文献

- [1] 肖庆辉.大陆动力学的科学目标和前沿[J].国土资源科技管理, 1996, (3): 34-36.
- [2] 张国伟,董云鹏,姚安平.关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考[J].中国地质, 2002, 29(1): 7-13.
- [3] 刘光鼎.深部探测: 诠释成矿过程、拓展深部资源[J].地球物理学报, 2015, 58(12): 4317-4318.

- [4] 莫宣学. 岩浆作用与地球深部过程[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1487-1493.
- [5] 邱瑞照. 非洲大陆成矿区带划分[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1937-1940.
- [6] Schlüter T. Geological Atlas of Africa [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] Sunday W P. Regional geology of Africa [C]//Lecture Notes in Earth Science. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991: 1-722.
- [8] Begg G C, Griffin W L, Natapov L M, et al. The lithospheric architecture of Africa: Seismic tomography, mantle petrology, and tectonic evolution[J]. Geosphere, 2009, 5(1): 23-50.
- [9] Cahen L, Snelling N J, Delhail J, et al. The geochronology and evolution of Africa [M]. London, Clarendon Press, 1984: 1-512.
- [10] Boher M, Abouchami C J, Michard A, et al. Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 345-369.
- [11] Kouamelan A N, Peucat J J, Delor C. Archean (3.15 Ga) relics at the heart of Birrimian (2.1 Ga) magmatism in the Ivory Coast, West African craton [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series II, Sciences De La Terre et Des Planets, 1997, 324: 719-727.
- [12] Hofmann A, Kröner A, Brandl G. Field relationships of mid- to late-Archean high-grade gneisses of igneous and sedimentary parentage in the Sand River, Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa [J]. South African Journal of Geology, 1998, 101: 185-200.
- [13] Dirk P H G M, Jelsma H A. Crust-mantle decoupling and the growth of the Archaean Zimbabwe craton [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 34: 157-166.
- [14] Mapeo R B M, Kampunzu A B, Armstrong R A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoids from the Kraaipan granite-greenstone terrane of SE Botswana: Implications for the evolutions of the northwestern edge of the Kaapvaal craton [C]//Orleans, Abstracts, 20th Colloquium of African Geology, 2004: 279.
- [15] Hanson R E. Proterozoic geochronology and tectonic evolution of southern Africa [C]//Yoshida M, Windley B F, Dasgupta S. Proterozoic east Gondwana: Supercontinent assembly and breakup. The Geological Society of London, Special Publication, 2003, 206: 427-463.
- [16] Becker T, Brandenburg A. The petrogenesis of the Alberta Complex within the Rehoboth basement inlier of Namibia [J]. South African Journal of Geology, 2002, 105: 147-162.
- [17] Bruguière O, Dada S, Lancelot J R. Early Archean component (>3.5 Ga) within 3.05 Ga ortho-gneiss from northern Nigeria: U-Pb zircon evidence [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 125: 89-103.
- [18] Robb L J, Armstrong R A, Waters D J. The history of granulite-facies metamorphism and crustal growth from single zircon U-Pb geochronology: Namaqualand, South Africa [J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1747-1770.
- [19] Caby R. Terrane assembly and geodynamic evolution of central-western Hoggar: A synthesis [J]. Journal of African Earth Sciences, 2003, 3: 133-159.
- [20] Katongo C, Koller F, Kloetzli U, et al. Petrography, geochemistry, and geochronology of granitoid rocks in the Neoproterozoic-Paleozoic Lufilian-Zambezi belt, Zambia: Implications for tectonic setting and regional correlation [J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 40: 219-244.
- [21] De Waele B, Fitzsimons I C W. The age and detrital fingerprint of the Muva Supergroup of Zambia: Molassic deposition to the southwest of the Ubendian Belt [C]//Geoscience Africa, Abstracts, 2004: 162-163.
- [22] Johnson S P, Rivers T, De Waele B. A review of the Mesoproterozoic to Early Paleozoic magmatic and tectonothermal history of Central Southern Africa: Implications for Rodinia and Gondwana [J]. Journal of the Geological Society, 2005, 162: 433-450.
- [23] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [24] Kutina J. Metallogeny of mantle-rooted structure extending across the western edge of the Proterozoic North American craton [J]. Glob. Tect. Metall., 1991, 4(1/2): 21-51.
- [25] Kutina J. Regional mantle-rooted discontinuities extending transversely to the margins of cratons and adjacent mobile belts [J]. Glob. Tect. Metall., 1995, 5(1/2): 7-18.
- [26] 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用 [J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊): 32-40.
- [27] 邱瑞照, 李廷栋, 周肃, 等. 中国大陆岩石圈物质组成及演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [28] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大地构造单元新格局——从岩石圈角度的思考 [J]. 中国地质, 2006, 33(2): 401-409.
- [29] 邱瑞照, 谭永杰, 朱群, 等. 中国及邻区重要成矿带成矿规律对比研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [30] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大陆大规模成矿作用、油气田形成——来自岩石圈的约束 [J]. 中国地质, 2006, 33(4): 852-865.
- [31] 邱瑞照, 谭永杰, 朱群, 等. 中国及邻区大陆形成过程与大规模成矿作用 [J]. 中国地球科学联合会年刊, 2014: 2650-2653.
- [32] 邱瑞照, 周肃, 谭永杰, 等. 中国北方大陆及邻区岩石圈演化与大规模成矿作用关系 [J]. 中国地质, 2009, 36(3): 544-563.
- [33] 邱瑞照. 基于地质过程解析的资源评价与选区方法 [C]//李金发. 中国地质调查百项技术. 北京: 地质出版社, 2016: 374-375.
- [34] Susan F K, Sharad M, Richard P V, et al. The great mineral fields of Africa introduction [J]. Episodes, 2016, 39(2): 85-105.
- [35] Paul F. Hoffman. Supercontinents [C]//Encyclopedia of Earth system science. San Diego California. Academic Press, 1992: 323-328.
- [36] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国岩石圈—软流圈系统大灾害与成矿环境 [J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309-315.
- [37] 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 青藏高原岩石圈不均一性及其动力学意义 [J]. 中国科学(D), 2001, 31(A1): 55-60.
- [38] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4): 289-299.
- [39] 邓晋福, 滕吉文, 彭聪, 等. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-212.
- [40] Burke M M, Fountain D M. Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust—new laboratory measurements from the Ivrea Zone [J]. Tectonophysics, 1990, 182

- (1/2): 119-146.
- [41] Oliver J. Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena[J]. *Geology*, 1986, 14(2): 99-102.
- [42] 肖庆辉, 李晓波, 刘树臣, 等. 当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿研究领域[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 1-525.
- [43] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 中国矿床成矿系列初论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-104.
- [44] 陈毓川. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [45] 裴荣富, 吴良士, 熊群尧, 等. 中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [46] 于晓飞, 吕志成, 孙海瑞, 等. 全国整装勘查区成矿系统研究与矿产勘查新进展[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(5): 1261-1288.
- [47] 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 中非卢菲里安地区铀矿化特征与资源潜力分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6): 1660-1674.
- [48] 曾瑞垠, 祝新友, 张雄, 等. 海相砂岩型铜矿研究进展及若干问题——以中非加丹加铜矿和云南东川铜矿对比研究为例[J]. *地质通报*, 2020, 39(10): 1608-1624.
- [49] Hutchison C S. Economic deposits and their tectonic setting[M]. New York: Macmillan, 1983.
- [50] Mitchell A H G. Mineral deposits and global tectonic settings[M]. London: Academic Press Inc. Ltd., 1981.
- [51] Sawkins F J. Metal deposits in relation to plate tectonic[M]. Springer-verlag, 1984.
- [52] 翟裕生, 邓军, 李小波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [53] 张培元, 周永芳, 王家枢. 世界金刚石矿床的形成和分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [54] 裴荣富, 荣奎斯特 D V, 梅燕雄, 等. 1: 25 000 000 世界大型超大型矿床成矿图[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [55] 郭文魁. 1: 4000000 中国内生金属成矿图[M]. 北京: 地图出版社, 1987.
- [56] 李春昱(译). 矿床与全球构造[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- [57] 邱瑞照. 中国大陆岩石圈物质组成[C]//李金发. 中国地质调查百项理论. 北京: 地质出版社, 2016: 15-18.
- [58] 邱瑞照, 周肃, 李文渊, 等. 中亚地区矿产资源勘查开发方向[J]. *地质通报*, 2009, 28(2/3): 307-314.
- [59] Qiu R Z, Li T D, Xiao Q H, et al. A new pattern of the tectonic units in continental Africa in terms of lithosphere[J]. *China Geology*, 2021, 4: 1-15.