

DOI: 10.12401/j.nwg.2023076

纳米比亚达马拉造山带地质、构造演化特征 与铀成矿作用

孙宏伟^{1,2,3}, 任军平^{2,3,*}, 唐文龙^{2,3}, 许康康^{2,3}, 吴兴源^{2,3}, 曾威^{2,3}, 王佳莹^{2,3}, 贺福清^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
3. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170)

摘要: 纳米比亚达马拉造山带是新元古代—早古生代泛非造山活动在西南非洲的体现, 笔者系统梳理达马拉造山带内地质单元、岩浆作用、变质活动、构造动力学机制和铀成矿作用特征。该造山带主要由北部地体、北带边缘、北部带、中央带、南部带、南带边缘及南部前陆 7 个地质单元组成。依据板块运动特征, 将其构造演化划分为板内裂谷期(750 Ma)、持续扩张期(730~600 Ma)、洋陆俯冲期(580~560 Ma)、俯冲碰撞期(550~540 Ma)及碰撞晚期(530~460 Ma)5 个阶段。造山带内赋存大量的铀矿资源, 主要形成于 510~490 Ma, 其成因与碰撞晚期构造及岩浆活动密切相关, 成矿专属性特征明显。根据对现有资料的分析及总结, 笔者认为富 U 的前达马拉基底是白岗岩型铀成矿物质的主要来源, 成矿母岩浆是同化混染与分离结晶共同作用的结果, 构造活动为富 U 岩浆的侵位及富集沉淀提供有利场所。

关键词: 达马拉造山带; 构造演化; 铀矿; 纳米比亚

中图分类号: P541; P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0035-14

Geological, Tectonic Evolution Characteristics and Uranium Mineralization of the Damara Orogenic Belt in Namibia

SUN Hongwei^{1,2,3}, REN Junping^{2,3,*}, TANG Wenlong^{2,3}, XU Kangkang^{2,3}, WU Xingyuan^{2,3},
ZENG Wei^{2,3}, WANG Jiaying^{2,3}, HE Fuqing^{2,3}

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Damara orogeny in Namibia is part of the Neoproterozoic to early Paleozoic Pan-African orogeny in Southwest Africa. This paper systematically combs the characteristics of geological units, magmatism, metamorphism, tectonic dynamics mechanism and uranium mineralization in the Damara orogenic belt. The orogenic belt is mainly composed of seven geological units: the northern terrane, the northern margin, the northern

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-26; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 商务部技术援外项目“援赞比亚东北地区航空物探与地质地球化学填图”(2015)352, 中国地质调查局项目“南部非洲国际合作地质调查”(DD20221801、DD20230125)联合资助。

作者简介: 孙宏伟(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查研究工作。E-mail: shwcub@163.com。

* 通讯作者: 任军平(1980-), 男, 正高级工程师, 从事地质矿产勘查与研究工作。E-mail: rjp2333@126.com。

zone, the central zone, the southern zone, the southern margin, and the southern foreland. Based on the characteristics of plate movement, the tectonic evolution of this orogenic belt has been divided into five stages, mainly including intraplate rift (750 Ma), continuous expansion (730~600 Ma), ocean-continent subduction (580~560 Ma), subduction collision (550~540 Ma) and late collision (530~460 Ma). This orogenic belt is endowed with plenty of uranium resources, mainly formed at 510~490 Ma, closely related to tectonic and magmatic activities in origin, with a peculiar metallogenic specialization. According to the analysis and summary of existing data, this article believes that the pre-Damara basement, which is rich in uranium, is the main source of ore-forming materials of the alaskaite type uranium deposit. The parent magma related to mineralization is the result of combined action of assimilation, contamination and fractional crystallization. The tectonic activity provides a favorable site for the emplacement, enrichment and precipitation of the uranium-rich magma.

Keywords: Damara orogenic belt; tectonic evolution; uranium ore; Namibia

铀矿作为战略性矿产资源,广泛应用于工业、国防、核电及医学等领域(Cuney et al., 2008; 蔡煜琦等, 2015; 吴涛涛等, 2018; 耿涛等, 2023)。全球铀矿资源分布不均,供需失衡较为严重,特别是中国铀矿资源禀赋较差。尽管中国铀矿的找矿潜力巨大,但短期内难以满足快速增长的工业需求,也使得中国铀矿对外依存度不断攀升(张金带等, 2012; 蔡煜琦等, 2015; 唐超等, 2017; 陈军强等, 2021)。

非洲铀矿资源丰富,储量约占世界铀矿总储量的20%,其中纳米比亚是非洲最大的铀资源生产国,约占全球天然铀产量的10%(宋继叶等, 2022; 张晓等, 2023; 朱清等, 2023)。与此同时,纳米比亚也是中国最大的海外铀资源来源地之一。近年来,国内外众多学者从矿床类型(Nex et al., 2001; Kinnaird et al., 2007; 高阳等, 2012; 陈金勇等, 2013, 2017; 顾大钊等, 2016)、成矿时代(Nex, 1997; Longridge et al., 2008; Freemantle, 2010; 王生云, 2013; 陈金勇等, 2014)、铀矿物质来源(Nex et al., 2002; 陈金勇等, 2014; 范洪海等, 2015; 黄冉笑等, 2021, 2022)等不同角度对纳米比亚铀矿进行研究,提出地层、构造及岩体控矿等多种成矿模式及找矿模型,在成矿规律和矿产分布方面取得诸多进展。然而,达马拉(Damara Belt)造山带演化过程与铀成矿作用尚未被系统分析,其区域铀成矿作用研究仍显不足。笔者通过对达马拉造山带的物质组成、岩浆作用、变质-变形、区域构造演化及典型矿床等方面内容进行梳理总结,进一步总结归纳达马拉造山带构造演化与铀成矿作用的关系,以期为中国地勘单位开展铀矿勘查提供基础地质资料与技术支持,服务于国际矿业产能合作及“一带一路”倡议。

1 达马拉带的物质组成及内部构造单元

泛非造山作用(820~500 Ma)是地球演化史中的重要构造事件,大量板块和地体经聚合及增生作用形成了一系列大陆造山带(Coward, 1983; Unrug, 1992; Chakraborty et al., 2023),是冈瓦纳(Gondwana)大陆重要的组成部分之一。泛非(Pan-African)造山带横贯非洲大陆,自东向西主要包括莫桑比克带(Mozambique Belt)、赞比西带(Zambezi Belt)、卢弗里安弧形构造带(Lufilian Belt)和达马拉带等(Grantham et al., 2003, 2019; Oriolo et al., 2017; 孙宏伟等, 2019, 2021; Sun et al., 2021; 许康康等, 2021)。达马拉造山带位于非洲西南端,形成于新元古代—早古生代(650~460 Ma),是北部刚果(Congo)克拉通与南部喀拉哈里(Kalahari)克拉通碰撞的产物(图 1a)(Coward, 1983; 宁福俊等, 2018; Goscombe et al., 2018)。达马拉造山带主要是由陆内分支、Gariiep 带和 Kaoko 带 3 部分组成,其中 Kaoko 带向北延伸至安哥拉境内(Prave, 1996; Poli et al., 2001)。在纳米比亚境内,达马拉造山带主要有 2 个分支,正北方向的海岸线分支和北东向的陆内分支(Kinnaird et al., 2007; Fan et al., 2017),文中主要介绍其陆内分支部分。

达马拉造山带(陆内分支)南北宽约为 400 km。依据地层、断裂及主要线性构造、变质程度、岩浆活动、地质年代和航磁异常等特征的不同,该造山带自北向南划分为北部地体、北带边缘、北部带、中央带、南部带、南带边缘及南部前陆 7 个部分(图 1b)(Martin et al., 1977; Corner, 1983; Goscombe et al., 2005)。中央带以 Omaruru 断裂为界又分为北中央带和南中央带 2 部分,位于 Omaruru 断裂和 Okahandja 断裂之间

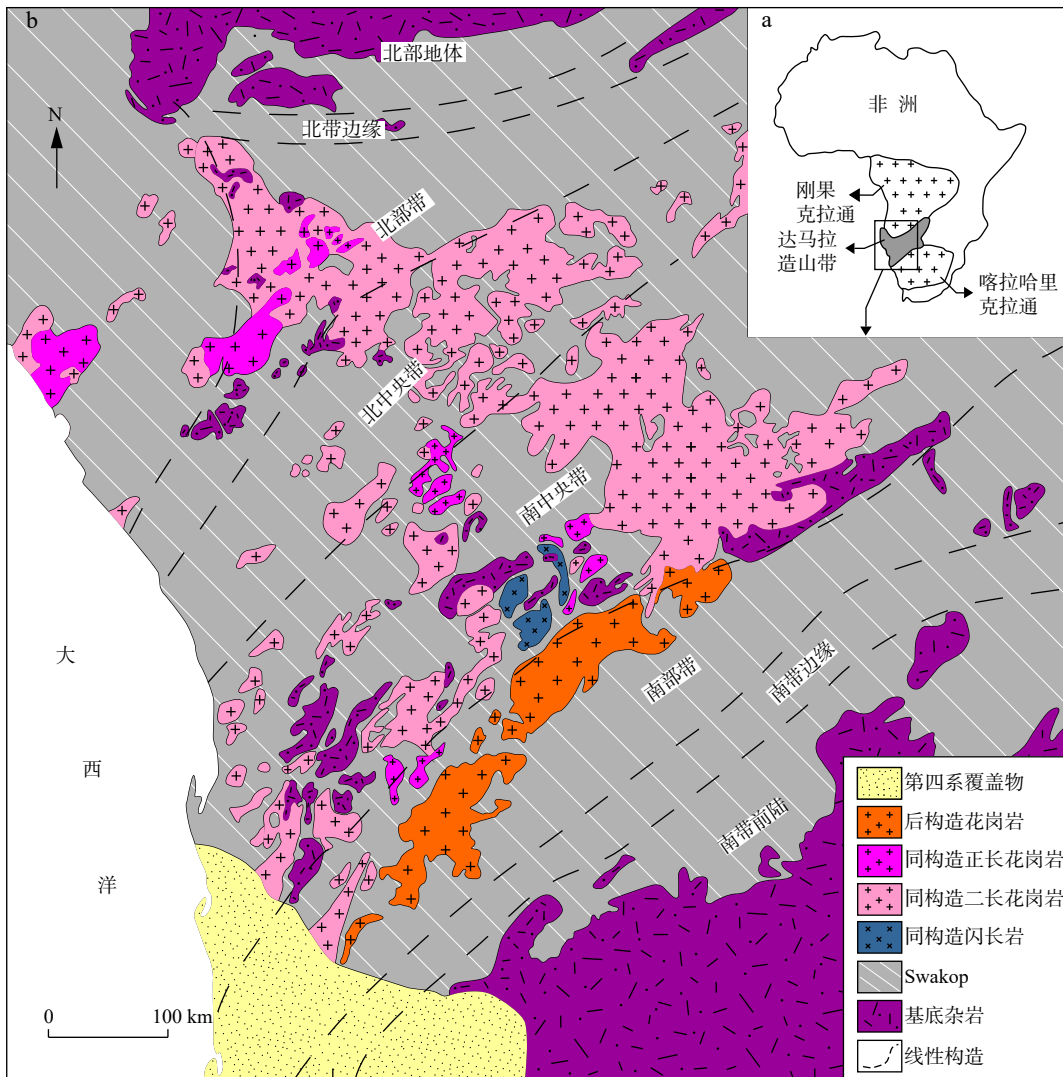


图 1 纳米比亚达马拉造山带地质特征图(据 Miller, 1983b; Osterhus et al., 2014 修改)

Fig. 1 Geological map of the Damara orogeny in Namibia

的南中央带是纳米比亚铀矿床的主要分布区, 包括 Husab 铀矿、Rössing 铀矿及 Valencia 铀矿等大型铀矿床均处于该构造区块(宁福俊等, 2018; Shanyengana et al., 2020; 黄冉笑等, 2022)。

北部地体主要以厚层碳酸盐岩和磨拉石建造构成; 北带边缘和北部带被一逆断层分开, 北带边缘岩性与北部地体相似, 以碎屑沉积岩建造为主; 北部带内发育较多的花岗质碱性岩浆岩(Henry et al., 1990)。中央带是整个构造带内岩浆活动最为发育的区域, 以大量发育花岗质侵入岩和穹窿构造为显著特征(Stanistreet et al., 1991)。其中, 北中央带主要以碎屑沉积岩、片岩、石英岩、片麻岩及花岗侵入岩为主, 而南中央带则由高温-低压变质沉积岩类、广泛发育的花岗岩及伟晶岩侵入体、基底杂岩和北东向-北北东

向穹窿组成(Downing et al., 1981; Miller, 1983a)。南部带是指 Okahandja 断裂与 Gomab 断裂之间的区域, 主要由新元古代的 Nosib 群和 Swakop 群碎屑岩及变质岩组成, 局部发育少量火山岩、蒸发岩, 并伴有少量铁镁质火山活动(Kukla et al., 1991)。南部边缘带是由航磁测量解译出的断裂或由线性构造带推测而来, 主要发育一套硅质岩及碳酸盐岩(Corner, 1983)。南部前陆由 Naukluft 推覆杂岩体以及上覆于喀拉哈里克拉通基底杂岩之上的碎屑沉积岩组成(Corner, 1983)。

2 区域地层

区域内地层主要由早期的 Nosib 群和晚期

Swakop 群组成, Nosib 群不整合于 Abbabis 基底杂岩体之上(Nash et al., 1971; Coward, 1983; Longridge et al., 2008; 高阳等, 2012)。Nosib 群为裂谷-填充序列, 由下部的 Etusis 组和上部的 Khan 组构成, Etusis 组主要岩性为石英岩、长石砂岩及少量砾岩; Khan 组主要由泥岩、钙质泥岩及碳酸盐岩组成。Swakop 群主要为一套深水沉积序列, 底部为 Rössing 组, 岩性变化较大, 包括大理岩、砂砾岩、石英岩、泥质片岩和董青片麻岩等均有出现(Coward, 1983; Longridge et al., 2008); 其上为 Chuos 组, 由 Sturtian 期冰碛岩和条带状铁质建造共同组成(Hoffmann et al., 1996); Chuos 组之上为 Karibib 组, 由大理岩、钙质泥岩及少量泥质片岩组成; 顶部为 Kuiseb 组, 岩性以泥岩、泥质片岩为主(Hoffmann et al., 2004)。

3 达马拉带的岩浆作用

达马拉造山带内岩浆活动十分发育, 整体出露面积约为 75 000 km², 主要以发育大量中酸性侵入岩及少量基性岩脉为特征, 其中 90% 以上为花岗岩, 其余为花岗闪长岩类、钙碱性辉长岩及少量基性岩脉(Haack et al., 1982; Miller, 1983a; Kisters et al., 2004)。

根据成岩时代及岩体特征, 前人将达马拉造山带内岩体划分为 5 个侵入序列(赵希刚等, 2015; 刘晨阳, 2016)。
①Trakkopje 序列(601±79 Ma), 由花岗闪长岩、花岗岩、石英二长岩等组成的岩套, 花岗岩体常以岩基形式产出, 岩石多呈斑状结构, 片麻理十分发育。
②Hakskeen 序列(516±23 Ma), 主要由红色花岗岩组成, 多分布在 Rössing 穹隆北部, 以小岩体、岩脉和层状侵入体产出, 岩石以等粒结构和红色为特征。
③Gawib 序列(500~490 Ma), 主要由花岗岩、浅色花岗岩和伟晶岩组成, 分布在 Rössing 穹隆以东地区, 岩石多具斑状结构且黑云母含量较多, 叶理构造较为发育。
④Donkerhuk 序列(458±25 Ma), 主要分布在 Rössing 穹隆以东地区, 岩性包括灰白色中粒黑云二长花岗岩和棕褐色含斑钾长花岗岩, 常以大型岩基形式出现。
⑤Rössing 序列(542~468 Ma), 主要以花岗岩、淡色花岗岩及花岗伟晶岩为主, 岩石多具中粗粒结构或伟晶状花岗结构, 地球化学特征显示其碱含量高, 淡色花岗岩主要产于背斜及穹隆构造附近, 脉状侵入体则主要分布于 Rössing 穹隆区。

由于区内淡色花岗岩(又称白岗岩)中赋存大量铀矿资源, 前人对其开展了大量研究, 根据成岩时代、

结构构造、矿物成分和矿化特征划分为至少 6 类(Nex, 1997; Longridge et al., 2008; Freemantle, 2010; 王生云, 2013; 陈金勇, 2014)。

A 型: 浅灰白色、淡粉色, 细-中粒结构, 以白色长石为主, 副矿物很少, 主要侵入于 Khan 组, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据显示其成岩年龄为(547.4±3.6) Ma(王生云, 2013)。

B 型: 白色, 中粗粒结构或伟晶结构, 含有石榴子石、电气石, 以石榴子石为标志矿物, 主要产于 Chuos 组和 Karibib 组, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据显示其成岩年龄为(537.8±4.3) Ma(王生云, 2013)。

C 型: 白色、浅红色, 中粗粒结构或伟晶结构, 以含电气石和磁铁矿为标志, 主要产于 Khan 组和 Etusis 组, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据显示其成岩年龄为(525.4±2.6) Ma(王生云, 2013)。

D 型: 白色, 中粗粒结构或伟晶结构, 烟灰色石英十分发育, 富铀矿物大量出现, 分布最为广泛, 主要侵入于 Rössing 组、Khan 组、Karibib 组和 Kuiseb 组, 成岩年龄为(508±2) Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb)(Briqueu et al., 1980; Longridge et al., 2008)~(497±5.5) Ma(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb)(王生云, 2013)。

E 型: 淡红色, 细粒至伟晶状结构, 可见烟灰色石英, 以发育氧化晕圈为标志, 圈外为粉红色, 圈内为灰白色, 主要产于 Khan 组和 Rössing 组, 其成岩年龄为(500±10)~(494±8) Ma(SHRIMP 锆石 U-Pb)(Jacob et al., 2000)。

F 型: 红色, 粗粒至伟晶状结构, 以发育红色巨晶钾长石、乳白色石英为主要特征, 副矿物为磁铁矿, 主要侵入于 Etusis 组和 Khan 组。对于其成岩时代存在不同认识, Jacob 等(2000)认为其与 E 型花岗岩成岩时代基本一致, 但陈金勇等(2014)获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 数据显示其成岩年龄为(511.4±4.3) Ma, 早于 D 型花岗岩。

达马拉期后岩浆侵入活动较弱, 仅见一些粗玄岩和细晶岩沿断裂分布。此外, 中生代冈瓦纳大陆的裂解和地幔柱活动期间达马拉带内发育少量基性岩脉, 多切穿早期形成的白岗岩体, 成岩时代与 D 型白岗岩受到后期热液改造作用的时间相近(陈金勇等, 2014), 加之基性岩浆在部分伟晶质岩浆演化过程中对铀矿化的富集作用(黄冉笑等, 2022)。因此, 认为基性岩浆的活动与 D 型白岗岩铀矿化富集有着密切的关系(范洪海等, 2015; 陈金勇等, 2017; 黄冉笑等, 2022)。

4 达马拉带的变质-变形过程

达马拉造山带内岩石经历的变质作用程度不同, 主要以高温-低压变质活动为主, 变质作用从西向东呈逐渐变低的趋势, 一般为角闪岩相, 在靠近大西洋沿岸的地区可以达到麻粒岩相(Hartmann et al., 1983; Masberg et al., 1992; Goscombe et al., 2004; Miller et al., 2008)。

达马拉造山带内发育多期次的褶皱、断裂、韧性剪切带以及穹窿构造, 并且这些构造作用相互叠加, 共同组成了现今较为复杂的构造面貌。对于区内的构造期次, 目前争论较多, 包括2期、3期和4期等不同划分(Jacob et al., 1974; Coward, 1983; Miller, 1983b; Oliver et al., 1994; Anderson et al., 1997; Poli et al., 2001; Kisters et al., 2004; Johnson et al., 2005; Ward, 2009)。综合前人研究, 笔者认为主要包括3期(D1、D2、D3)变形过程, 并伴随大量的岩浆侵入活动(D2和D3构造变形事件对白岗岩的侵位机制具有重要的影响)。D1期主要集中于580~560 Ma, 以发育平行于层理的叶理和断裂构造、层内南东向的平卧褶皱及低角度逆断层为主要特征, 部分黑云母和石英呈定向排列, 石榴石和堇青石等矿物出现(Kasch, 1983a, 1983b; Miller, 1983b, 2008; Steven, 1993; Poli et al., 2001; Kisters et al., 2004); D2期主要集中于550~540 Ma, 以发育北东向的直立紧闭褶皱、平卧褶皱及低角度逆断层为主要特征, 矽线石和堇青石出现, 花岗质岩浆活动十分发育(Steven, 1993; Poli et al., 2001; Miller, 2008); D3期主要集中于535~500 Ma, 以发育大规模开阔褶皱和大型南东向直立褶皱、北东走向穹窿、高角度逆断层和逆冲断层为主要特征, 尖晶石和堇青石出现, 并伴随大量花岗质伟晶岩的形成(Kasch, 1983a, 1983b; Kisters et al., 2004)。

由于区内覆盖严重且构造叠加活动强烈, 很难在地表观测到线性构造断裂现象(主要依靠航空物探资料解译识别), 但穹窿构造十分发育, 也是达马拉造山带内的典型构造特征。关于穹窿构造的形成机制, 存在多种解释, 包括褶皱作用(Smith et al., 1961; Smith, 1965; Coward, 1983)、花岗质基底的底劈作用(Ramsberg, 1972)及塑性地层的滑脱作用(Oliver, 1994)等多种说法。尽管对于穹窿构造的形成机制认识不同, 但均认为穹窿构造在富铀岩浆的运移和就位过程中发

挥了重要作用(Jacob, 1974; Coward, 1983; Kasch, 1983a, 1983b; Miller, 1983a; Oliver, 1994; Anderson et al., 1997; Poli et al., 2001; Kisters et al., 2004; Johnson, 2005; Ward, 2009)。

5 达马拉带的区域构造演化史

达马拉造山带整个过程形成时代约为750~460 Ma(Miller, 2008), 经历前造山期(以陆内裂谷和扩张作用为主)、造山期(以俯冲和陆陆碰撞作用为主)及造山后期, 以喀拉哈里克拉通和刚果克拉通的碰撞而告终。前人对其演化过程进行研究(Martin et al., 1977; Martin, 1983; Miller, 2008; Anthonissen, 2009), 认为其主要经历了以下5个阶段(图2)。①早期(840~750 Ma)由于地幔柱活动导致板块处于伸展环境, 逐渐形成多个裂谷系统(图2a), 同期形成早期的裂谷火山-沉积岩系, 包括碎屑沉积岩、双峰式火山岩及碱性侵入岩等。②随着拉张作用的进行(730~600 Ma), 软流圈物质上涌, 地壳底部发生部分熔融作用, 上地壳大规模拗陷, 接受巨厚的碎屑沉积, 并伴有拉斑玄武岩的形成(图2b)。③580~560 Ma, 岩石圈破裂后由于重力影响, 洋壳下沉, 开始发生由南向北的A型俯冲作用(图2c), 下地壳发生部分熔融, 并伴随早期的花岗质岩浆侵入活动(D1)。④随着俯冲作用的不断进行(550~540 Ma), 喀拉哈里克拉通与刚果克拉通发生陆陆碰撞(图2d), 在地表形成大量褶皱、断裂及逆冲推覆构造, 导致早期岩石发生变质作用, 同时有新的花岗质岩浆侵入(D2)。⑤530~460 Ma(图2e), 进一步的挤压作用导致地壳加厚, 达马拉构造带开始隆升, 热效应增强, 变质变形活动再次覆盖早期岩石并发育大量花岗质岩浆活动(D3)。与此同时, 在结晶分异和同化混染作用的共同影响下, 淡色花岗岩及花岗伟晶岩中发育大量富U矿物, 并在有利部位形成了多处铀矿床。

6 达马拉带内部铀矿化特征

达马拉造山带内主要有白岗岩型和钙结岩型2种类型的铀矿床, 前者是达马拉造山期后的富U岩浆和热液在有利的部位叠加富集成矿, 以Rössing铀矿、Husab铀矿等为代表(高阳等, 2012; 左立波等, 2017; Shanyengana et al., 2020); 后者是富铀岩石在长期的干

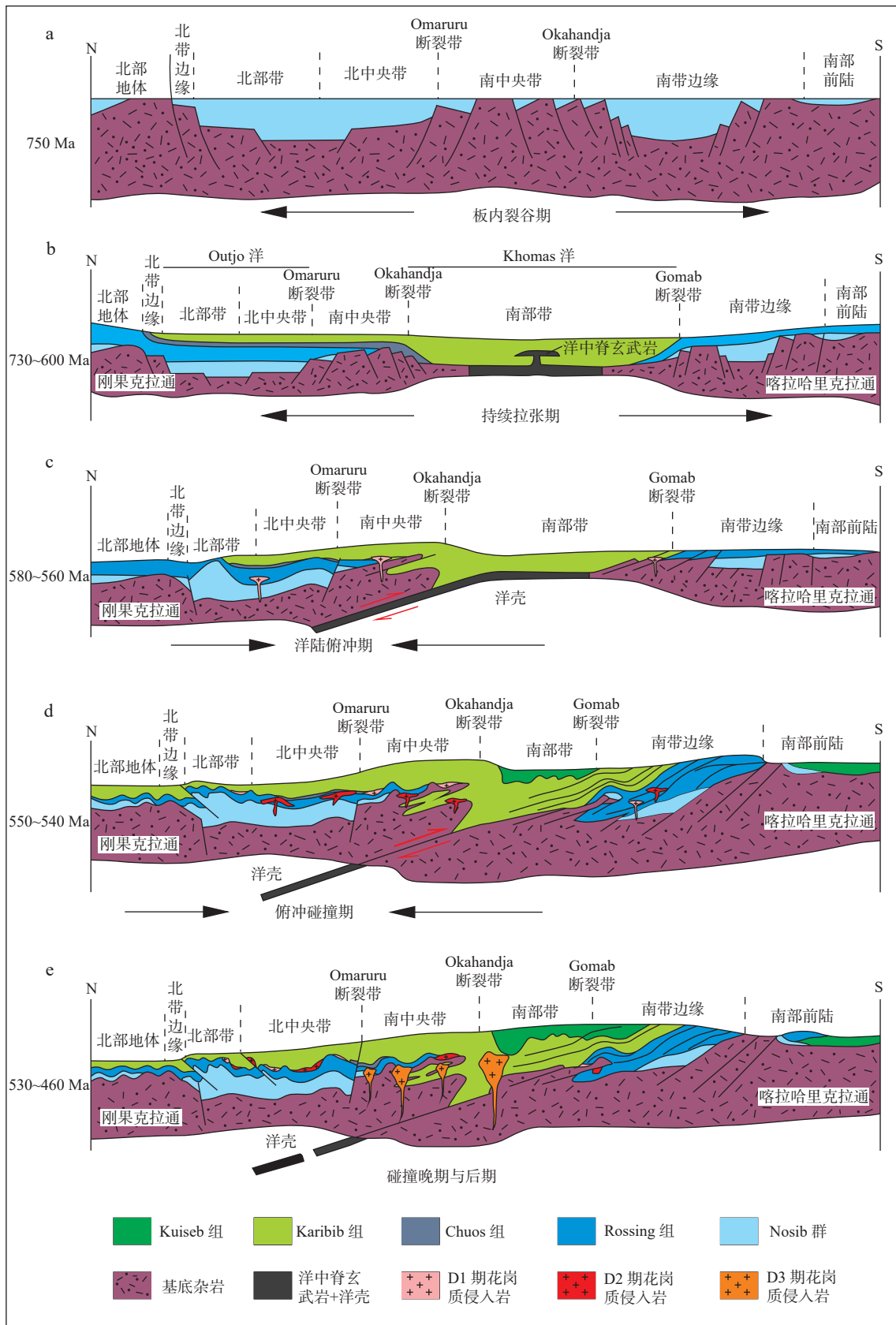


图 2 达马拉造山带形成过程示意图(据 Miller, 2008; Anthonissen, 2009 修改)

Fig. 2 The formation process of Damara orogenic belt

旱气候条件下, 经过风化剥蚀所形成, 其分布也与白岗岩型铀矿密切相关, 以 Langer Heinrich 铀矿、Trekkopje 铀矿为代表(顾大钊等, 2016; 陈秀法等, 2021)。区内铀矿床以规模大、品位低、露天开采闻名于世。达马拉造山带内白岗岩型铀矿的控矿因素较多且特征十分明显, 其中构造、岩浆岩和地层为主要的控矿要素, 后期热液活动导致的热液叠加作用, 对其成矿作用影响也十分显著(高阳等, 2012; 王生云, 2013; 陈金勇等, 2014; 范洪海等, 2015; 左立波等, 2017; Shanyengana et al., 2020; 黄冉笑等, 2021)。

6.1 控矿要素

达马拉造山带内的铀矿床主要分布于穹窿构造边缘及北东-南西断裂的两侧, 构造活动与铀矿化分

布密切相关。构造运动中形成的断裂破碎带、构造转向处、剪切拖曳带、地层薄弱处、脆性-韧性剪切带及穹窿构造等区域为岩浆迁移和花岗岩侵位提供了重要通道, 尤其是晚期构造运动中, 对早期构造变质变形进行叠加, 是最为有利的控矿构造(Miller, 1983a; Oliver, 1994; Anderson et al., 1997; Poli et al., 2001; Kisters et al., 2004; Ward, 2009)。

达马拉造山带内的铀矿化与白岗岩密切相关, 成矿期主要集中在造山运动晚期及后期。因此, 碰撞造山期后(D3)产生的D、E型白岗岩对铀矿化具有直接指示意义, 而其他白岗岩, 尤其是俯冲碰撞期以前的花岗岩则未发生铀矿化, 可见铀矿化岩体具有一定专属性(表1)(陈金勇, 2014)。

表1 达马拉造山带内主要铀矿产出层位特征表

Tab. 1 Characteristics of main uranium mineralization horizons in Damara orogenic belt

铀矿床	矿化白岗岩产出层位	白岗岩类型	矿化白岗岩类型
Rössing	Khan组与Rössing组接触带及其组内	C~E	D
Husab	Khan组与Rössing组接触带及Rössing组内部, 少量分布于Chuos组内部	A~F	D、E
Etango	Etusis组与Khan组及Khan组与Rössing组接触带	A~F	D、E
Hildenhof	Khan组与Chuos组及Khan组与Rössing组接触带; Khan组及Rössing组内部	C~F	D、E
Ida Dome	Khan组与Rössing组接触带及其各自组内	A~E	D、E
Holland's Dome	Khan组与Rössing组接触带, Khan组内部	C~E	D、E
Valencia	Khan组与Rössing组及Karibib组与Kuiseb组接触带	A~F	D、E
Goanikontes	Etusis组与Khan组, Khan组与Rössing组接触带, Khan组内部	B~F	D、E

达马拉造山带内的铀矿床中赋矿白岗岩主要侵入于Khan组与Rössing组或Khan组与Chuos组的接触带(表1)(Nex, 1997; Freemantle, 2010; 陈金勇等, 2014, 2017; 黄冉笑等, 2021), 铀矿化受到地层控制特征明显。这主要是由于地层接触部位为构造薄弱处, 利于岩体侵位及就位, 同时富碳酸盐岩及大理岩地层可能在岩浆烘烤下发生脱碳效应, 促进U元素的富集沉淀(陈金勇等, 2017)并最终成矿。

6.2 流体特征

流体包裹体研究显示, 达马拉造山带内白岗岩中主要存在2期成矿流体, 早期为高温低盐度热液, 温度大多为470~530℃, 盐度 ω 为3.55~9.60 wt%NaCl(均值为6.14 wt%NaCl), 属岩浆晚期(主成矿期)热液。晚期为中-低温低盐度热液, 温度集中于150~220℃, 盐度 ω 为4.65~19.05 wt%NaCl(均值为11.5 wt%NaCl), 为后期(叠加改造期)的热液(陈金勇, 2014; 范洪海等, 2015)。

6.3 成矿物质来源

对于达马拉造山带内铀矿化的成矿物质来源存在较大争议, 早期认为其成矿源岩为变沉积岩, 即富U沉积岩在变质改造过程中导致U富集沉淀成矿(Smith, 1965; Barnes et al., 1978)。后期随着研究的深入, 对白岗岩为成矿源岩逐步达成共识(Marlow, 1981; Brynard et al., 1988; Nex et al., 2001), 但对于白岗岩的成因仍存在一定争议。Brynard等(1988)认为矿化白岗岩是红色花岗岩熔融的产物, 是早期未发生熔体抽离的富U基底在深部重熔而形成的。Nex等(2001)和陈金勇等(2014)则认为富U的前达马拉基底是白岗岩型铀矿主成矿期的成矿物质来源。黄冉笑等(2021)通过对E型伟晶岩矿物组成和化学性质演化规律的研究认为成矿花岗伟晶岩是同化混染与分离结晶共同作用的结果, 并推测岩浆演化过程中基性组分(FeO、MgO、TiO₂)的混入直接影响到相关U元素的沉淀富集。陈金勇等(2017)初步判断后期热液中

U 主要来源于原生铀矿物的再分配。

6.4 成矿模式

基于对 Rössing 铀矿、Husab 铀矿及 Valencia 铀矿等典型铀矿床的研究,前人依据控矿因素的不同提出多种达马拉造山带铀矿的成矿模式,早期主要包括 3 种。①地层成因说,依据铀矿化主要分布在 Rössing 组与 Khan 组或 Khan 组与 Chuos 组接触界线附近(Jacob, 1974; Marlow, 1981)。②构造成因说,依据铀矿化主要产于断裂构造两侧、穹隆构造边缘或穹隆的转折部位等(Kinnaird et al., 2007; 高阳等, 2012; 陈金勇等, 2013)。③岩浆成因说,依据铀矿主要产于白岗岩体附近或白岗岩体即为矿体(Berning et al., 1976; Nex

et al., 2001; 陈金勇, 2013)。由于不同矿床所体现出的主要控矿特征不尽相同,其成因模式亦存在较大差异,但综合来看达马拉造山带内铀矿的形成更可能是岩浆-构造-地层等多重因素共同耦合的结果(高阳等, 2012; 陈金勇等, 2013; Corvino et al., 2013; 黄冉笑等, 2022),前达马拉变质基底提供铀物质来源;地层与构造多因素控矿,多期次构造事件形成的断裂和穹隆分别为含 U 岩浆的运移和结晶沉淀创造了通道和空间,变沉积层内不同地层间氧化/还原属性的转变为岩浆内 U 元素的结晶沉淀和富集提供有利条件;后期热液作用导致早期铀矿体发生活化运移,在断裂破碎带重新富集成矿(图 3)。

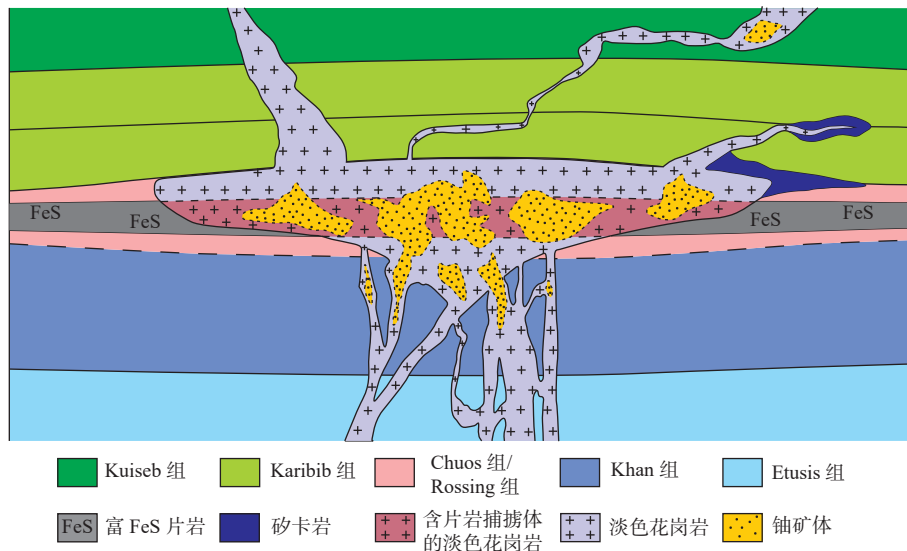


图 3 达马拉造山带铀矿成因模式图(据 Corvino et al., 2013 修改)

Fig. 3 Genetic model of uranium deposits in the Damara orogenic belt

基于以上认识,前人进一步细化其成因模式(Corvino et al., 2013; 陈金勇等, 2014; 范洪海等, 2015; 孙宏伟等, 2020; 黄冉笑等, 2022),即在达马拉碰撞造山过程中由前达马拉基底和达马拉变沉积岩发生部分熔融首先形成斑状花岗岩、黑云母花岗岩和 A、B、C、F 型白岗岩(550~540 Ma)。随着软流圈的上涌(510~500 Ma),由前达马拉富 U 基底重熔形成的岩浆(也受分离结晶作用影响),沿断裂向上运移,侵入并就位位于 Rössing 组与 Khan 组或 Khan 组与 Chuos 组接触部位(D、E 型富 U 白岗岩),这些富含还原物质和大理岩的地层形成有效的氧化/还原障,导致 U 元素的富集沉淀,也是区内铀矿化的主要时期。约 150 Ma,由于热液活动导致部分 U 发生活化运移,在断裂破碎带等有利部位富集形成沥青铀矿、脉状铀石等铀

矿物。对于钙结岩型铀矿,则主要是由于新生代以来地壳抬升,富 U 地层和白岗岩体遭受风化剥蚀,并受地表水淋滤,沉淀固结形成硅钙铀矿、钒钾铀矿等次生铀矿物。

7 典型矿床

7.1 Husab 铀矿

Husab 铀矿位于纳米比亚共和国中西部 Erongo 行政区 Swakopmund 市东约 50 km 处,为中广核集团控股的海外大型铀矿床,铀资源量可达 30 万 t(以 U_3O_8 计)(荣建锋等, 2016; 张怀峰等, 2018)。

矿区内地层主要为 Nosib 群 Khan 组, Swakop 群 Rössing 组、Chuos 组、Karibib 组和 Kuiseb 组(图 4)。

矿区内侵入岩主要以白岗岩为主, 主要发育 B、C、D、E 和 F 型白岗岩 (Nex, 1997)。矿化岩体主要侵入 Khan 组与 Rössing 组不整合接触带及其上部的

Rössing 组内, 少量侵入 Chuos 组内。矿体主要产于 D 和 E 型白岗岩内部, 锆石 U-Pb 数据显示其成岩成矿时代为 $(496 \pm 4.1) \text{Ma}$ (Cross et al., 2009)。

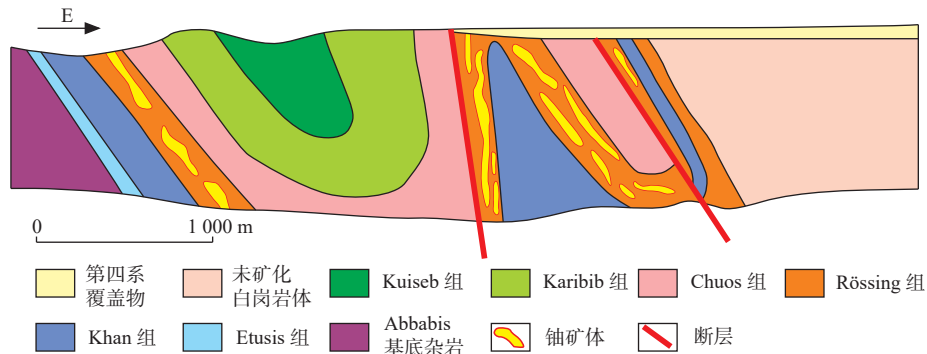


图 4 Husab 铀矿 I 号矿体剖面示意图 (据荣建锋等, 2016 修改)

Fig. 4 Geological section of Zone 1 in Huseb uranium deposit

矿体主要赋存于背斜转折端, 呈似层状、脉状或透镜状, 延伸方向大致与地层的走向或层理平行, 没有明显的变形特征 (荣建锋等, 2016; 张怀峰等, 2018)。矿化蚀变主要包括高岭土化、蛇纹石化、绢云母化和绿泥石化等 (刘晨阳, 2016)。

Husab 铀矿中铀主要呈独立铀矿物形式存在, 铀矿物形式为铀的氧化物、铀钛氧化物及铀硅酸盐等, 少量以类质同象的形式存在于钍矿物内。矿区内主要原生矿石矿物为晶质铀矿, 其次为少量的钍铀矿、钛铀矿和铌钛铀矿, 后期热液作用形成的矿石矿物主要为铀石, 其次为硅钙铀矿和黄硅钾铀矿 (Freemantle, 2010; 黄冉笑等, 2021, 2022)。

Husab 铀矿为典型的白岗岩型铀矿床, 后期遭受不同程度的热液叠加成矿和热液蚀变, 是达马拉造山

期内花岗质岩浆同化混染与分离结晶作用的产物 (Freemantle, 2010; 黄冉笑等, 2021, 2022)。

7.2 Rössing 铀矿

Rössing 铀矿是世界上规模最大、开采时间最长 (自 1975 年至今) 的露天铀矿床之一, 矿床位于纳米布沙漠中, 在 Swakopmund 市北东约 60 km 处 (韩军等, 2021)。Rössing 铀矿床具有储量大 (2.81 万 t)、品位低 (平均品位为 0.03%)、可露采等特征 (Berning et al., 1976; 张晓康等, 2015)。

Rössing 铀矿床位于 Rössing 穹窿南部, 矿区出露地层主要为 Rössing 组、Khan 组、Etusis 组 (图 5)。矿区内侵入岩主要以白岗岩为主, 主要发育 A~F 型白岗岩。原生铀矿化和大部分次生矿化都集中产于 D 型白岗岩中, 其成岩成矿年龄为 $(510 \pm 3) \text{Ma}$ (Basson et

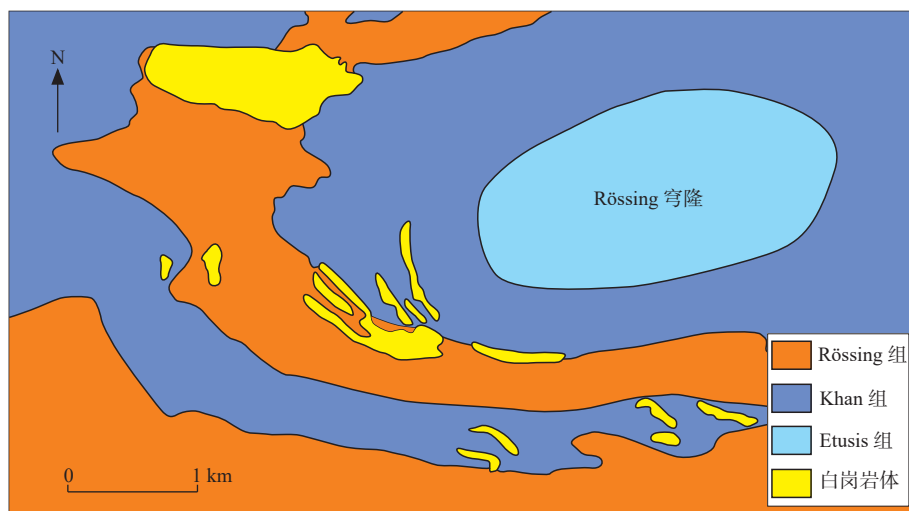


图 5 Rössing 铀矿地质图 (据 Berning et al., 1976 修改)

Fig. 5 The geological map of Rössing mine

al., 2004)。白岗岩脉(矿体)宽度由几厘米到 90 m 不等,呈脉状或不规则的透镜状。矿化蚀变主要包括硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化、伊利石化和高岭土化等(韩军等, 2021)。

矿区内铀的赋存形式以独立铀矿物为主,其中晶质铀矿、钍铀矿和钛铀矿等原生铀矿物约占 69%,多为全自形或半自行晶粒状结构,浸染状构造;反应边状铀石、铀钍石、沥青铀矿、钒钾铀矿和硅钙铀矿等次生铀矿物约占 31%,多呈隐晶结构、交代残余结构、脉状构造(Abrahams, 2009)。

Rössing 铀矿为白岗岩型铀矿床的典型代表,是在达马拉造山期岩浆形成演化阶段,由结晶分异作用形成铀预富集,而后在造山期后韧性变形作用下白岗岩再次重熔富集成矿(Corvino et al., 2013; 韩军等, 2021)。

8 结论

(1)达马拉造山带形成于 750~460 Ma, 主要经历板内裂谷期(750 Ma)、持续扩张期(730~600 Ma)、洋陆俯冲期(580~560 Ma)、俯冲碰撞期(550~540 Ma)及碰撞晚期(530~460 Ma)5 个阶段。

(2)达马拉造山带内的铀矿化与白岗岩密切相关,且成矿专属性特征明显。俯冲碰撞期以前的白岗岩则未发生铀矿化,而碰撞造山期后(D3)产生的 D、E 型白岗岩对铀矿化具有直接指示意义。

(3)达马拉造山带内原生铀矿化主要形成于 510~490 Ma, 富 U 的前达马拉基底是白岗岩型铀矿主成矿期的成矿物质来源,成矿母岩浆是同化混染与分离结晶共同作用的结果,并适当混入中基性组分,在构造薄弱处富集沉淀成矿。

参考文献(References):

蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 1051-1069.

CAI Yuqi, ZHANG Jindai, LI Ziyang, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 1051-1069.

陈军强, 曾威, 王佳营, 等. 全球和我国铀资源供需形势[J]. *华北地质*, 2021, 44(2): 25-34.

CHEN Junqiang, ZENG Wei, WANG Jiaying, et al. Analysis of supply and demand situation of uranium resources in the world and

China[J]. *North China Geology*, 2021, 44(2): 25-34.

陈金勇, 范洪海, 陈东欢, 等. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿矿物特征研究[J]. *地质论评*, 2013, 59(5): 962-970.

CHEN Jinyong, FAN Honghai, CHEN Donghuan, et al. Research on the Characteristics of Uranium Minerals of Alaskite-type Uranium Deposit in the Gaudeanmus Area, Namibia[J]. *Geological Review*, 2013, 59(5): 962-970.

陈金勇, 范洪海, 陈东欢, 等. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿矿物结构构造及其成因意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(1): 91-97.

CHEN Jinyong, FAN Honghai, CHEN Donghuan, et al. Texture and Structure of ore and genesis of the alaskite-type uranium deposit in the Gaudeanmus area, Namibia[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(1): 91-97.

陈金勇, 范洪海, 王生云, 等. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿成矿机理剖析[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(2): 202-212.

CHEN Jinyong, FAN Honghai, WANG Shengyun, et al. Discussion on mineralization mechanism of leucogranite-type uranium deposit in Gaudeanmus area, Namibia[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(2): 202-212.

陈秀法, 陈喜峰, 张振芳, 等. 非洲铀矿资源分布、地质特征与勘查开发[J]. *地质与勘探*, 2021, 57(6): 1191-1202.

CHEN Xiufa, CHEN Xifeng, ZHANG Zhenfang, et al. Distribution, geological features, exploration and development of uranium resources in Africa[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(6): 1191-1202.

范洪海, 陈金勇, 顾大钊, 等. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿流体包裹体特征及成矿作用[J]. *矿床地质*, 2015, 34(1): 189-199.

FAN Honghai, CHEN Jinyong, GU Dazhao, et al. Fluid inclusions and metallogenesis of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(1): 189-199.

高阳, 范洪海, 陈东欢, 等. 白岗岩型铀矿床: 构造和岩浆作用耦合的产物[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(5): 1058-1066.

GAO Yang, FAN Honghai, CHEN Donghuan, et al. The alaskite-type uranium deposit: A product of coupling of tectonism with magmatism[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(5): 1058-1066.

耿涛, 郭培虹, 冯治汉, 等. 北秦岭华阳川地区复杂地形条件下隐伏硬岩型铀矿的地球物理勘查方法[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 225-244.

GENG Tao, GUO Peihong, FENG Zhihan, et al. Geophysical Exploration Method of Concealed Hard Rock Type Uranium Deposit with Complex Topographic Conditions in Huayangchuan Area, North Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 225-244.

顾大钊, 范洪海, 舒良树, 等. 纳米比亚欢乐谷地区构造演化对铀成矿的制约[J]. *地质论评*, 2016, 62(1): 83-93.

- GU Dazhao, FAN Honghai, SHU Liangshu, et al. Structural evolution and its restriction on uranium mineralization in Gaudeamus area, Namibia[J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 83–93.
- 韩军, 陈金勇, 范洪海, 等. 纳米比亚罗辛地区白岗岩型铀矿成因研究[J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 1019–1028.
- HAN Jun, CHEN Jinyong, FAN Honghai, et al. Research on metallogenesis of the alaskite-type uranium deposits in the Rossing area, Namibia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(4): 1019–1028.
- 黄冉笑, 袁国礼, 王果胜, 等. 纳米比亚湖山铀矿床中黑云母伟晶岩型矿石特征及铀矿化机制[J]. *岩石学报*, 2021, 37(5): 1587–1610.
- HUANG Ranxiao, YUAN Guoli, WANG Guosheng, et al. Characteristics of biotite-pegmatitic ore and metallogenic mechanism of uranium in the Husab uranium deposit, Namibia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(5): 1587–1610.
- 黄冉笑, 王果胜, 袁国礼, 等. 伟晶质岩浆的同化混染与分离结晶(AFC)作用及铀成矿效应: 以纳米比亚湖山铀矿为例[J]. *地学前缘*, 2022, 29(1): 377–402.
- HUANG Ranxiao, WANG Guosheng, YUAN Guoli, et al. Assimilation-fractional crystallization (AFC) of pegmatitic magma and its implications for uranium mineralization: A case study of the Husab uranium deposit, Namibia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 377–402.
- 刘晨阳. 纳米比亚湖山铀矿床地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- LIU Chenyang. Mineral deposit geological characteristics and genesis of Husab Mine, Namibia[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- 宁福俊, 王杰, 任军平, 等. 纳米比亚达马拉构造带演化和成矿研究综述[J]. *地质调查与研究*, 2018, 41(2): 113–120.
- NING Fujun, WANG Jie, REN Junping, et al. A Preliminary Study on the Geodynamic Evolution and Mineralization in Damara Belt, Namibia[J]. *Geological Survey and Research*, 2018, 41(2): 113–120.
- 荣建锋, 林泳钊, 王照良. 纳米比亚湖山铀矿床地质概况[J]. *四川地质学报*, 2016, 36(1): 101–106.
- RONG Jianfeng, LIN Yongzhao, WANG Zhaoliang. Geologic features of the Husab uranium deposit, Namibia[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2016, 36(1): 101–106.
- 宋继叶, 蔡煜琦, 林双幸, 等. 非洲铀资源勘查开发动态与经济社会形势分析[J]. *铀矿地质*, 2022, 38(2): 283–298.
- SONG Jiye, CAI Yuqi, LIN Shuangxing, et al. Analysis on the exploration and development trends of uranium resources and economic-social situation in Africa[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(2): 283–298.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 中非加丹加-赞比亚多金属成矿带成矿演化及找矿潜力分析[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1): 121–131.
- SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Metallogenic Evolution and Prospecting Potential of Katanga-Zambia Polymetallic Metallogenic Belt in Central Africa[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(1): 121–131.
- 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.
- SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Analysis of uranium mineralization characteristics and resource potential in Lufilian area, Central Africa[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(6): 1660–1674.
- 孙宏伟, 王杰, 任军平, 等. 南部非洲花岗岩型与伟晶岩型铀矿床地质特征[J]. *地质论评*, 2021, 67(1): 265–278.
- SUN Hongwei, WANG Jie, REN Junping, et al. Geological characteristics analysis of granite type and pegmatite type tantalum deposits in southern Africa[J]. *Geological Review*, 2021, 67(1): 265–278.
- 唐超, 邵龙义, 邢万里. 中国铀矿资源安全分析[J]. *中国矿业*, 2017, 26(5): 1–7.
- TANG Chao, SHAO Longyi, XING Wanli. Analysis of safety problem of China's uranium resources[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(5): 1–7.
- 王生云, 范洪海, 陈金勇, 等. 纳米比亚欢乐谷地区斑状花岗岩成因及构造背景[J]. *世界地质*, 2013, 32(4): 773–782.
- WANG Shengyun, FAN Honghai, CHEN Jinyong, et al. Petrogenesis and tectonic setting of prophyritic granites in Gaudeamus area, Namibia[J]. *Global Geology*, 2013, 32(4): 773–782.
- 吴涛涛, 周永恒, 陈聪, 等. 蒙古国铀矿地质特征及资源潜力[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(6): 1247–1255.
- WU Taotao, ZHOU Yongheng, CHEN Cong, et al. Geological features and resource potential of uranium deposits in Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(6): 1247–1255.
- 许康康, 孙凯, 何胜飞, 等. 赞比亚西北省 Solwezi 地区石榴云母片岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *华北地质*, 2021, 44(3): 1–3.
- XU Kangkang, SUN Kai, HE Shengfei, et al. Detrital zircon U-Pb dating of the garnet mica schist and its geological implications in the Solwezi area, Northwestern Zambia[J]. *North China Geology*, 2021, 44(3): 1–3.
- 张金带, 李子颖, 蔡煜琦, 等. 全国铀资源潜力评价工作进展与主要成果[J]. *铀矿地质*, 2012, 26(6): 321–326.
- ZHANG Jindai, LI Ziyang, CAI Yuqi, et al. The main advance and achievements in the potential Evaluation of Uranium Resource in China[J]. *Uranium Geology*, 2012, 26(6): 321–326.
- 张晓, 蔡煜琦, 宋继叶, 等. 亚洲铀资源勘查开发动态与核能发展战略[J]. *铀矿地质*, 2023, 39(1): 84–99.

- ZHANG Xiao, CAI Yuqi, SONG Jiye, et al. Uranium resources exploration activities and nuclear energy development strategy in Asia[J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(1): 84–99.
- 张怀峰, 陆建军. 纳米比亚湖山铀矿地质特征、控矿因素及其成因探讨[J]. *世界地质*, 2018, 37(1): 105–123.
- ZHANG Huai Feng, LU Jianjun. Geological characteristics, ore-controlling factors and genesis analysis of Husab uranium deposit in Namibia[J]. *Global Geology*, 2018, 37(1): 105–123.
- 张晓康, 聂凤军, 吴科税, 等. 纳米比亚罗辛大型白岗岩型铀矿床[J]. *矿床地质*, 2015, 34(2): 423–426.
- 赵希刚, 朱西养, 杨永记, 等. 纳米比亚达马拉造山带白岗岩型铀矿成矿规律及找矿思路[J]. *铀矿地质*, 2015, 31(4): 445–452.
- ZHAO Xigang, ZHU Xiyang, YANG Yongji, et al. Metallogenetic regulation of alaskite-type uranium deposit and its prospecting method for Damara orogenic belt in Namibia[J]. *Uranium Geology*, 31(4): 445–452.
- 朱清, 顾本杰, 邹谢华, 等. 试论中非矿业合作的机遇与挑战[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 174–185.
- ZHU Qing, GU Benjie, ZOU Xiehua, et al. On the Opportunities and Challenges of China–Africa Mining Cooperation[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 174–185.
- 左立波, 任军平, 王杰, 等. 非洲中南部铀矿床研究现状及资源潜力分析[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(1): 128–139.
- ZUO Libo, REN Junping, WANG Jie, et al. Research status and potential analysis of uranium deposits in central and southern Africa[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(1): 128–139.
- Anderson H, Nash C. Integrated lithostructural mapping of the Rössing area, Namibia using high resolution aeromagnetic, radiometric Landsat data and aerial photographs[J]. *Exploration Geophysics*, 1997, 28: 185–191.
- Anthonissen C J. The mid-crustal architecture of a continental arc-a transect through the South Central Zone of the Pan-African Damara Belt, Namibia[D]. South Africa, University of Stellenbosch, 2009.
- Abrahams I. The nature, geology and spatial distribution of uranium minerals in the SK anomaly area, Rossing Mine, Namibia[D]. South Africa, University of the Witwatersrand, 2009.
- Basson I, Greenway G. The Rössing Uranium Deposit: A product of late-kinematic localization of uraniumiferous granites in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2004, 38: 413–435.
- Briqueu L, Lancelot J R, Valois J P, et al. U-Pb radiochronology and genesis of an uraniumiferous ore type: alaskites and their country rocks in Goanikontes, Namibia[J]. *Bulletin Centrale De Recherche Exploration Production*, 1980, 4: 759–811.
- Brynard H J, Andreoli M A G. An overview of the regional geologic and structural setting of the uraniumiferous granites in the Damara Orogen, Namibia[J]. *Proceedings of a Technical Committee Meeting on Recognition of Uranium Provinces*, IAEA, Vienna, 1988, 195–212.
- Berning J, Cooke R, Hiemstra S A, et al. The Rössing uranium deposit, Southwest Africa[J]. *Economic Geology*, 1976, 71: 351–368.
- Barnes J F H, Hambleton-Jones B B. A review of the geological and geochemical setting of uraniumiferous granites in the Damara Orogen[R]. Lecture to the IAEA working group meeting, Nancy, France, Report GEA525, Pelindaba, Nuclear Development Corporation of South Africa, 1978.
- Corvino A F, Pretorius L E. Uraniferous leucogranites south of Ida Dome, central Damara Belt, Namibia: Morphology, distribution and mineralisation[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2013, 80: 60–73.
- Cuney M, Kyser T K. Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implication for exploration[M]. Quebec, Mineralogical Association of Canada, 2008.
- Coward M P. The tectonic history of the Damara Belt-evolution of the Damara Orogen of South West Africa[J]. *Special Publication of the Geological Society of South Africa*, 1983, 11: 409–421.
- Chakraborty T, Kankuzi C F, Glodny J, et al. The timing and tectonic context of Pan-African gem bearing pegmatites in Malawi: Evidence from Rb-Sr and U-Pb geochronology[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2023, 197: 104750.
- Corner B. An interpretation of the aeromagnetic data covering the western portion of the Damara Orogen in South West Africa/Namibia[J]. *Geological Society of South Africa, Special Publication*, 1983, 11: 339–354.
- Cross A, Jaireth S, Rapp R, et al. Reconnaissance-style EPMA chemical U-Th-Pb dating of uraninite[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2009, 58(6): 675–683.
- Downing K N, Coward M P. The Okahandja Lineament and its significance for Damara Tectonics in Namibia[J]. *Geologisch Rundschau*, 1981, 70: 972–1000.
- Fan H H, Chen J Y, Wang S Y, et al. Genesis and uranium sources of leucogranite-hosted uranium deposits in the Gaudeamus area, Central Damara Belt, Namibia: study of element and Nd isotope geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2017, 91(6): 2126–2137.
- Freemantle G G. Petrographic, mineralogical and geochemical characterisation of granite-hosted uranium deposits of the central Damara orogeny, Namibia[D]. South Africa, University of the Witwatersrand Johannesburg, 2010.
- Goscombe B D, Foster D A, Gray D, et al. The evolution of the Damara orogenic system: a record of west Gondwana assembly and

- crustal response[J]. *Geology of Southwest Gondwana*, 2018, 303-352.
- Goscombe B D, Gray D, Hand M. Variation in Metamorphic Style along the Northern Margin of the Damara Orogen, Namibia[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(6): 1261-1295.
- Goscombe B D, Gray D, Hand M. Extrusional tectonics in the core of a transpressional orogen: the Kaoko belt, Namibia[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(6): 1203-1241.
- Grantham G H, Maboko M, Eglinton B M. A review of the evolution of the Mozambique Belt and implications for the amalgamation and dispersal of Rodinia and Gondwana[J]. *Special Publication of the Geological Society of South Africa*, 2003, 206: 401-425.
- Grantham G H, Kramers J D, Eglinton B, et al. The Ediacarian-Cambrian uplift history of western dronning Maud Land: new ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Sr/Nd data from Sverdrupfjella and Kirwanveggen, the source of the Urfjell group and tectonic evolution of dronning Maud Land within the Kuunga orogeny and Gondwana amalgamation[J]. *Precambrian Research*, 2019, 333: 105444.
- Haack U, Hoefs J, Gohn E. Constraints on the origin of Damaran granites by Rb/Sr and delta 18O data[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 79: 279-289.
- Hartmann O, Hoffer E, Haack U. Regional metamorphism in the Damara Orogen: interaction of crustal motion and heat transfer[J]. *Geological Society South Africa, Special Publication*, 1983, 11: 233-241.
- Henry G, Clendenin C W, Stannistreet I G, et al. Multiple detachment model for the early rifting stage of the Late Proterozoic Damara orogen in Namibia[J]. *Geology*, 1990, 18: 67-71.
- Hoffmann K H, Hawkins D P, Isachsen C E, et al. Precise U-Pb zircon ages for early Damaran magmatism in the Summas Mountains and Welwitschiainlier, northern Damara belt, Namibia[J]. *Communications Geological Survey of Namibia*, 1996, 11: 47-52.
- Hoffmann K H, Condon D J, Bowring S A, et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: Constraints on Marinoan glaciations[J]. *Geology*, 2004, 32: 817-820.
- Jacob R E, Moore J M, Armstrong R A. SHRIMP dating and implications of Au mineralization, Navachab, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 31: 32-33.
- Jacob R E. *Geology and metamorphic petrology of part of the Damara orogeny along the lower Swakop river, South West Africa*[M]. Bulletin 17 Chamber of Mines, Precambrian Research Unit, University of Cape Town, 1974.
- Johnson S D. *Structural geology of the Usakos dome, Damara Belt, central Namibia*[D]. South Africa, University of Stellenbosch, 2005.
- Kinnaid J A, Nex P A M. A review of geological controls on uranium mineralisation in sheeted leucogranites within the Damara Orogen, Namibia[J]. *Applied Earth Science: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*, 2007, 116(2): 68-85.
- Kukla P A, Stanistreet I G. Record of the Damaran Khomas Hochland accretionary prism in Central Namibia: refutation of an ensialic origin of a Late Proterozoic orogenic belt[J]. *Geology*, 1991, 19: 473-476.
- Kisters A F M, Jordaan L S, Neumaier K. Thrust-related dome structures in the Karibib district and the origin of orthogonal fabric domains in the south Central Zone of the Pan-African Damara belt, Namibia[J]. *Precambrian Research*, 2004, 133: 283-303.
- Kasch K W. Continental collision, suture progradation and thermal relaxation: A plate tectonic model for the Damara Orogen in central Namibia, evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[J]. *Geological Society of South Africa, Special Publication*, 1983a, 11: 423-429.
- Kasch K W. Folding and thrust tectonics in the south-eastern portion of the Damara Orogen around Omitara, Namibia. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[J]. *Geological Society of South Africa, Special Publication*, 1983b, 11: 175-184.
- Longridge L, Gibson R L, Kinnaid J A, et al. Timing of deformation and granite emplacement in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[R]. School of Geosciences, University of the Witwatersrand Johannesburg, 2008 (Unpublished report).
- Martin H, Porada H. The intracratonic branch of the Damara Orogen in Southwest Africa. I. Discussion of geodynamic models[J]. *Precambrian Research*, 1977, 5: 311-338.
- Masberg H P, Hoffer E, Hoernes S. Microfabrics indicating granulite-facies metamorphism in the low-pressure central Damara Orogen, Namibia[J]. *Precambrian Research*, 1992, 55: 243-257.
- Martin H. *Alternative geodynamic models for the Damara Orogeny: critical discussion* [M]. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1983: 913-945.
- Marlow A G. *Remobilisation and primary uranium genesis in the Damaran Orogenic Belt, Namibia*[D]. England, University of Leeds, 1981.
- Miller R M G. The Okahandja Lineament, a fundamental tectonic boundary in the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[J]. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 1983a, 82: 349-361.
- Miller R M G. The Pan-African Damara Orogen of South West Africa/Namibia, Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[J]. *Geological Society of South Africa, Special Publications*, 1983b, 11: 431-515.
- Miller R M G. *The Geology of Namibia*[R]. Geological Survey of

- Namibia Special Publication, 2008.
- Nex P A M, Kinnaird J A, Oliver G J H, et al. Petrology, geochemistry and uranium mineralisation of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damara Orogen, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2001, 33(3/4): 481–502.
- Nex P A M. Tectono-metamorphic setting and evolution of granitic sheets in the Goanikontes area, Namibia[D]. Galway, National University of Ireland, 1997.
- Nex P A M, Herd D, Kinnaird J A. Fluid extraction from quartz in sheeted leucogranites as a monitor to styles of uranium mineralisation: an example from the Rössing area, Namibia[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2002, 2: 83–96.
- Nash C R. Metamorphic petrology of the SJ area, Swakopmund District, South West Africa[J]. *Bulletin of the Precambrian Research*, 1971, 9: 77.
- Oriolo S, Oyhantçabal P, Wemmer K, et al. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: implications for the supercontinent cycle[J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8: 1431–1445.
- Osterhus L, Jung S, Berndt J, et al. Geochronology, geochemistry and Nd, Sr and Pb isotopes of syn- orogenic granodiorites and granites(Damara orogeny, Namibia)-Arc-related plutonism or melting of mafic crustal sources?[J]. *Lithos*, 2014, 200/201: 386–401.
- Oliver G J H. Mid-crustal detachment and domes in the central zone of the Damaran Orogen, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1994, 19: 331–344.
- Prave A R. Tale of three cratons: tectonostratigraphic anatomy of the Damara orogeny in northwestern Namibia and the assembly of Gondwana[J]. *Geology*, 1996, 24: 1115–1118.
- Poli L C, Oliver G J H. Constrictional deformation in the Central Zone of the Damara Orogen Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2001, 33: 303–312.
- Ramsberg H. Theoretical models of density stratification and diapirism in the Earth[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77: 877–889.
- Shanyengana S H, Fan H H, Xue C J, et al. An example of uraniumiferous leucogranites in the Rössing South-West Deposit, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, 162: 103698.
- Stanistreet I G, Kukla P A, Henry G. Sedimentary basinal responses to a Late Precambrian Wilson Cycle: the Damara Orogen and Nama Foreland, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1991, 13: 141–156.
- Steven N M. A study of epigenetic mineralization in the central zone of the Damara orogen, Namibia, with special reference to gold, tungsten, tin and rare earth elements[J]. *Memoirs of the Geological Survey of Namibia*, 1993, 16: 166.
- Smith D A M. The Geology of the Area around the Khan and Swakop Rivers in South West Africa[D]. South Africa, University of the Witwatersrand, 1961.
- Smith D A M. The geology of the area around the Khan and Swakop rivers in South West Africa[M]. *Geological Survey of South West Africa/Namibia*, 1965, 3: 113.
- Sun H W, Ren J P, Wang J, et al. Age and geochemistry of the granitoids from the Lunte area, Northeastern Zambia: implications for magmatism of the Columbia supercontinent[J]. *China Geology*, 2021, 4(4): 658–672.
- Unrug R. The supercontinent cycle and gondwanaland assembly: component cratons and the timing of suturing events[J]. *Journal of Geodynamics*, 1992, 16(4): 215–240.
- Ward R A. Fluid and deformation induced partial melting and melt volumes in low-temperature granulite-facies metasediments, Damara Belt, Namibia[D]. South Africa, University of the Stellenbosch, 2009.