

澳大利亚兰杰一号铀矿之生命周期： 地质、资源、生产与修复

林子瑜¹, 聂逢君¹, 张士红^{2,3}, 徐翹翔¹, 余倩¹

LIN Ziyu¹, NIE Fengjun¹, ZHANG Shihong^{2,3}, XU Chixiang¹, YU Qian¹

1. 东华理工大学, 江西 抚州 344000;

2. 中国地质科学院, 北京 100037;

3. 中国地质大学(北京), 北京 100083

1. *East China University of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China;*

2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

3. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

摘要: 兰杰一号铀矿及其所属的鳄鱼河铀矿田产于北澳太古宙克拉通内古元古代裂谷背景下发展起来的松溪造山带, 矿体产于新太古代—古元古代结晶—变质基底/晚古元古代—中元古代康博尔吉红层建造不整合界面之下, 铀矿化分3个时代, U_1 为1720~1680Ma, U_2 为1420~1040Ma, U_3 为474±6Ma, U_1 是主矿化时代。该矿床于1969年后期通过航空放射性测量被发现, 1970's经勘探圈定了No.1和No.3两个铀矿体, 总计资源储量124681t@0.23% U_3O_8 。1980年10月正式露采, 至2018年12月, 总计生产了128739t U_3O_8 。1985财年开始, ERA(澳大利亚能源资源有限责任公司)向世界核能市场共计销售了产于兰杰铀矿的119882t U_3O_8 。2009年, 发现了No.3深部矿, 探明资源储量为43857t@0.22% U_3O_8 , 这部分资源将以地下开采方式利用。预计到2026年, 采区地貌景观和生态环境将得到恢复。进一步讨论了澳北元古宙不整合面型铀矿找矿的方向, 持续稳定的铀矿开采与生产的意义, 以及投资澳大利亚铀矿业需要注意的政治与法律问题。这些内容可以为国内矿业企业及地勘单位合理部署澳洲铀矿勘查与开发提供参考。

关键词: 兰杰铀矿; 元古宙不整合面型; 核燃料; 铀生产; 环境修复

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2019)11-1867-10

Lin Z Y, Nie F J, Zhang S H, Xu C X, Yu Q. The life of Ranger 1 uranium mine in Australia: Geology, resources, production and rehabilitation. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(11):1867-1876

Abstract: The tectonic setting of Ranger uranium deposit, also ARUF, is Pine Creek orogen, which was developed from the Paleoproterozoic rift in the Archean craton of North Australia. The orebodies lie under the interface between the Neoarchean-Paleoproterozoic crystallization - metamorphic basement and Late Pale-Mesoproterozoic Kombolgie red bed formations. There are three epochs of uranium mineralization, which are U_1 :1720~1680Ma, U_2 :1420~1040Ma and U_3 :474±6Ma. U_1 is the main mineralization epoch. The deposit was discovered by aerial radioactivity survey in late 1969. No. 1 and No. 3 orebodies were delineated by exploration in the 1970's, with a total resource of 124681t@0.23% U_3O_8 . From October 1980 to December 2018, a total of 128739t U_3O_8 was produced by open-pit mining. Since fiscal year 1985, ERA has sold 119882t U_3O_8 from Ranger uranium mine to the nuclear energy market in the world. In 2009, No. 3 deep orebody was discovered, with reserves of 43857t@0.22% U_3O_8 , which will be exploited by underground mining. It is expected that the geomorphological landscape and ecological environment of

收稿日期: 2019-05-26; 修订日期: 2019-07-30

资助项目: 中国核工业地质局项目《铀资源大数据分析与找矿战略研究》(编号: 201928-3)

作者简介: 林子瑜(1962-), 男, 教授, 从事铀矿地质与地学信息研究。E-mail: 519754018@qq.com

通讯作者: 聂逢君(1962-), 男, 教授, 博士, 从事沉积盆地分析与铀矿成矿找矿研究。E-mail: niefj@263.net

the mining area will be restored by 2026. This paper further discusses the prospecting direction of Proterozoic unconformity uranium deposits in northern Australia, the significance of sustained and stable uranium mining and production, and the political and legal issues that need attention in investing in Australian uranium mining. These contents can provide references for China's mining enterprises and geological exploration units to rationally deploy Australian uranium exploration and development.

Key words: Ranger uranium mine; Proterozoic unconformity; nuclear fuel; uranium production; environmental rehabilitation

澳大利亚多年来一直是世界铀资源储量和生产量前三甲之一,元古宙不整合面型、多金属铁氧化物角砾杂岩型(IOCg)、砂岩型、表生型(钙结岩型)铀矿是其四大主要铀矿类型。元古宙不整合面型铀矿是世界上最重要的铀矿类型之一,有许多超大型的铀矿被发现,如加拿大萨斯卡切温省阿萨巴斯卡盆地中的麦克阿瑟河(McArthur River)、雪茄湖(Cigar Lake),澳大利亚北领地鳄鱼河铀矿田中的兰杰一号(Ranger 1)、贾比卢卡(Jabiluka)等。这些世界级的铀矿床为全球核燃料市场提供了约1/4的铀产量^[1]。

澳大利亚兰杰一号铀矿是迄今为止世界上开采和生产时间最长的铀矿山,也是世界上最大的铀矿山之一,目前仍在生产铀产品(U_3O_8)。其成生、发现、勘探、开采、生产、销售,再到环境修复,构成

一个完整的铀矿生命周期,提供了一个铀矿地质与生产的经典案例。本文基于ERA(Energy Resource Company of Australia limited)近40年的公司年报^①和一系列相关地质研究报告与论文文献撰写而成,以为国内矿业企业及地勘单位合理部署澳洲铀矿勘查与开发提供参考。

1 地理位置

兰杰一号铀矿位于澳大利亚北领地东、南鳄鱼河(Alligator River)之间的小镇贾比鲁(Jabiru)以东8km处,沿阿纳姆(Arnhem)公路西去奥北重要城市达尔文(Darwin)约260km,矿区西北部有贾比鲁东小型机场。地理坐标南纬 $12^{\circ}41'00''$ 、东经 $132^{\circ}55'00''$ (图1)。

兰杰矿区面积 79km^2 ,周围有世界遗产名录中的卡卡杜(Kakadu)国家公园,该公园面积约

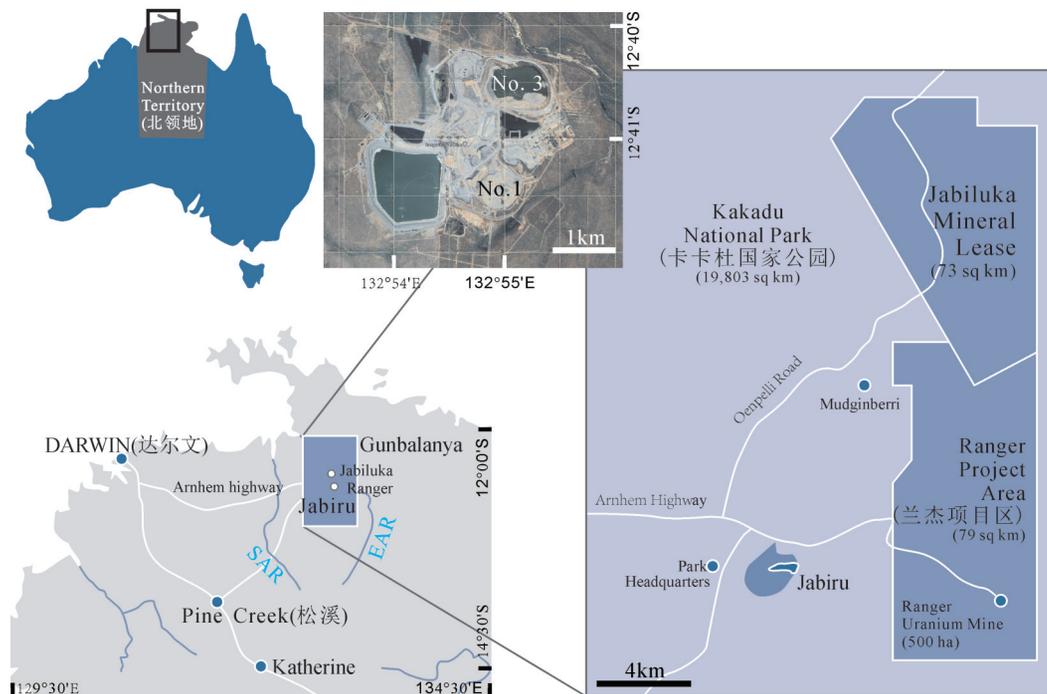


图1 兰杰铀矿位置^①

Fig. 1 Location of Ranger uranium mine

EAR—东鳄鱼河;SAR—南鳄鱼河

20000km²。兰杰矿床以北约 20km 为贾比卢卡 (Jabiluka) 铀矿床, ERA 拥有其矿产许可租约。这个世界级的项目处于长期维护中, 需要得到米拉尔 (Mirarr) 传统业主的同意后才会被 ERA 开发。

2 地质背景

松溪造山带 (Pine Creek Orogen, PCO) 是在北澳太古宙克拉通内古元古代裂谷背景下发展起来的, 由变形和变质的古元古代岩石 (2020~1800Ma)

形成, 后被年轻的地台沉积不整合覆盖^[2-4]。该造山带呈北西—南东走向, 以新太古代—古元古代构造窗形式出现在北领地, 鳄鱼河铀矿田 (ARUF) 产于其东北部。ARUF 中已探明兰杰一号、贾比卢卡 2 个超大型铀矿床, 以及纳巴拉克 (Nabarlek) 中型铀矿床, 库恩加拉 (Koongarra) 等一系列小型铀矿床 (点) (图 2)。铀矿化发生在古元古界\晚古—中元古界不整合面下的变质基底岩石中, 与剪切带、断层、角砾岩带有关, 属于元古宙不整合面型铀矿床

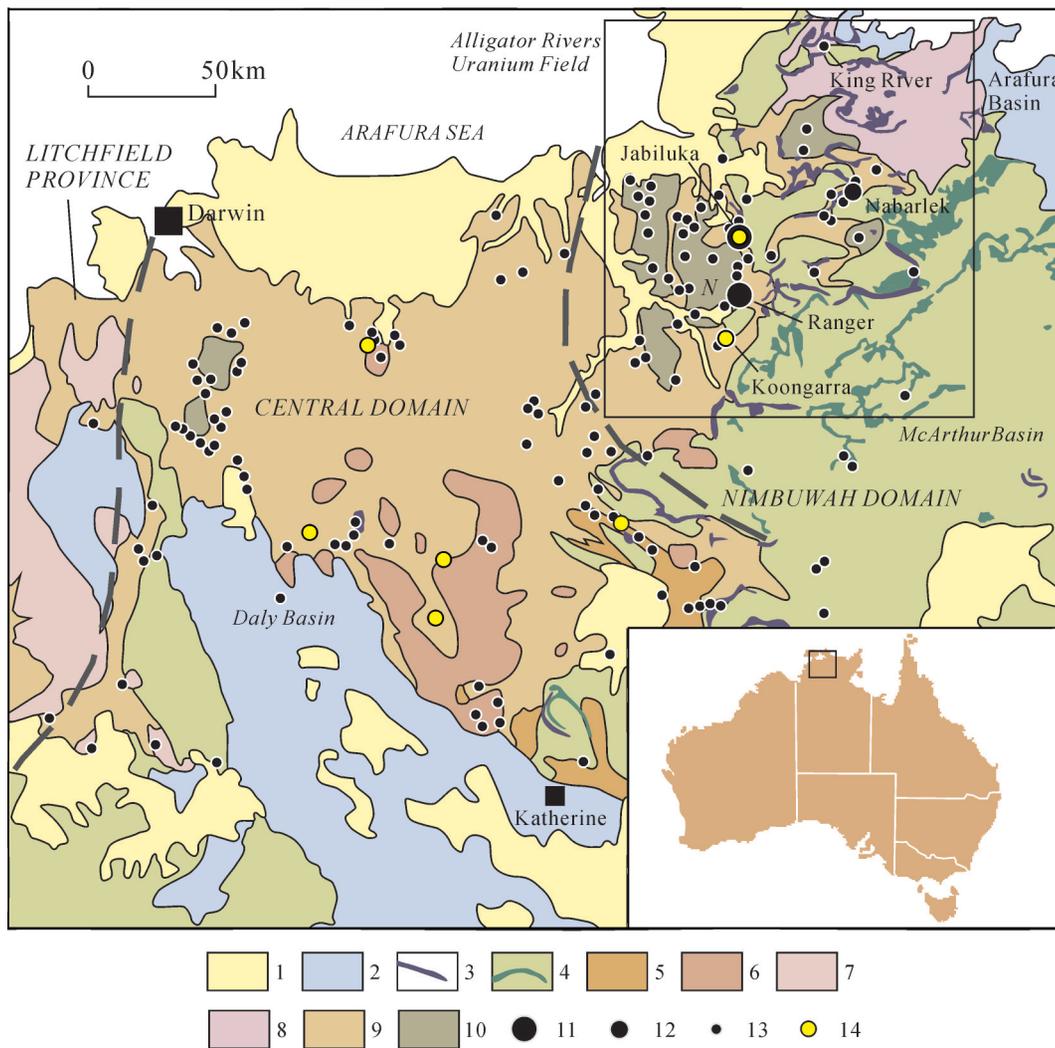


图 2 松溪造山带区域地质图^[4]

Fig. 2 Geological map of the Pine Creek orogen

1—中-新生代盆地; 2—古生代盆地; 3—约 1723Ma, 昂佩利辉绿岩; 4—小于 1800Ma, 晚古元古代—中元古代盆地; 麦克阿瑟盆地之康博尔吉亚群铁镁质火山单元; 5—1829~1825Ma, 伊迪丝河群, 埃尔谢拉纳群; 6—1835~1818Ma, 库伦岩套, 吉姆吉姆花岗岩套; 7—1863~1853Ma, 阿里亚岩套, 瓦加特花岗岩套; 8—1867~1862Ma, 尼姆瓦赫花岗岩套; 9—2020~1860Ma, 副变质岩和正变质岩 (包括尼姆瓦赫域中的卡希尔建造); 10—新太古代 (包括尼姆瓦赫域中的纳纳姆布杂岩); 11—大型铀矿床; 12—中型铀矿床; 13—小型铀矿床和铀矿点; 14—重要金矿床, 图示松溪造山带的位置和地质, 包括尼姆瓦赫 (Nimbuwah) 域、中央 (Central) 域和利奇菲尔德 (Litchfield) 域, 以及 Ranger 1 矿床在鳄鱼河铀矿田中的位置, 新太古代纳纳姆布杂岩被标记为“N”

(Proterozoic Unconformity)。Skirrow 等^[4]对该区区域地质背景进行了详细描述。

(1) 新太古代结晶基底

新太古代克拉通结晶基底(2670~2510Ma)^[5-7]以花岗岩-片麻岩穹隆形式出露于尼姆瓦赫域和中央域;在兰杰和贾比卢卡铀矿床西部的新太古代纳纳姆布杂岩中,测得长英质正片麻岩的岩浆年龄为 $2520\pm 3\text{Ma}$ ^[6]。

(2) 古元古代变质基底

在尼姆瓦赫域,伍德卡特(Woodcutters)超群(2020~1860Ma)大陆-海相盆地和火山岩不整合覆盖在新太古代纳纳姆布杂岩上,或与之呈断层接触,然后被卡希尔(Cahill)和诺兰吉(Nourlangie)片岩(以前称为Myra Falls变质岩)覆盖。其中,卡希尔地层由硅质片岩-泥质片岩(包括含炭质单元)、碳酸盐岩、钙硅酸盐岩及角闪岩组成,是ARUF中兰杰、贾比卢卡和其他几个铀矿床的赋矿地层;诺兰吉片岩赋存有纳巴勒克铀矿床^[8]。

尼姆瓦赫造山事件(1865~1855Ma)导致尼姆瓦赫域中级变质,中央域较低级变质,并伴有尼姆瓦赫岩套的变形和花岗质岩体侵入^[5,7-8]。兰杰铀矿床伟晶岩中独居石U-Pb年龄测定为 $1847\pm 1\text{Ma}$ ^[9],被解释为尼姆瓦赫事件的最晚期阶段^[9],或在尼姆瓦赫事件后侵位^[8]。伊迪丝河群(Edith River)和埃尔谢拉纳群(El Sherana)火山作用及更新的盆地形成时间为1829~1825Ma,与1835~1818Ma的库伦(Cullen)岩套和吉姆吉姆(Jim Jim)岩套的岩浆作用相伴^[5]。根据全岩Rb-Sr同位素数据,Stuart-Smith等^[10]最初将PCO中央域约1780Ma的低级变质构造热叠加定义为舒布里奇(Shoobridge)事件。然而,尼姆瓦赫域广泛分布的白云母、黑云母Rb-Sr和K-Ar全岩年龄约为1800Ma^[11],以及兰杰铀矿床新的独居石U-Pb年龄为 $1800\pm 9\text{Ma}$,使得Mercadier等认为舒布里奇事件可能从约1800Ma延伸至约1780Ma^[12]。

古元古代形成的沉积岩、火山碎屑岩和火山岩序列,在1870~1780Ma的一系列挤压事件中变形变质^[9],这些事件包括尼姆瓦赫事件(约1870Ma)、莫德克里克(Maud Creek)事件(约1850Ma)和舒布里奇事件(约1800Ma)^[13]。

(3) 晚古一中元古代地台盖层

晚古一中元古代(1780~1400Ma),麦克阿瑟

(McArthur)盆地凯瑟琳河群(Katherine river)近水平产状的地台碎屑岩不整合覆盖在古元古代变质基底上。

康博尔吉(Kombolgie)建造,即PCO东部麦克阿瑟盆地内凯瑟琳河群的基底部分,不整合沉积在1818Ma之前的变质基底上,由石英砂岩、砾岩、小型镁铁质火山岩和火山碎屑岩组成,产状普遍平坦^[8-9]。

舒布里奇事件在本区表现为区域低级变质,康博尔吉建造未受其影响,这被视为康博尔吉建造的最大年龄^[12]。该区域经受了許多康博尔吉后挤压事件,包括1755~1730Ma^[14]和1690~1665Ma^[15]的挤压事件。根据成岩伊利石的⁴⁰Ar/³⁹Ar坪年龄,康博尔吉建造早在 $1798\pm 13\text{Ma}$ 就开始了成岩过程,成岩温度达230℃^[16-18]。

康博尔吉建造和基底被昂佩利(Oenpelli)辉绿岩侵入,来自纳巴勒克铀矿床钻孔岩心的斜锆石U-Pb年龄为 $1723\pm 6\text{Ma}$ 。Sweet等^[19]根据麦克阿瑟盆地凯瑟琳河群顶部的西支火山岩(1712~1705Ma)、侵入上凯瑟琳河群约1720Ma的吉姆布(Jimbu)微晶花岗岩及与南部麦克阿瑟盆地的相关性,提出康博尔吉建造的最小年龄为1720Ma。总的来说,这些年龄将康博尔吉建造沉积的时间限制在1800~1723Ma。

(4) 古生代沉积盆地

古生代沉积盆地的残余物保存在南部中央域(Daly盆地)、利奇菲尔德域、东北部尼姆瓦赫域(Arafura盆地)等地。

3 矿床地质、铀矿化与蚀变

3.1 矿床地质

兰杰一号铀矿床是鳄鱼河铀矿田中的2个超大型铀矿床之一。在兰杰一号铀矿区范围内,结晶基底为新太古代纳纳姆布杂岩,古元古代卡希尔群构成变质基底,晚古一中元古代康博尔吉地台沉积建造不整合覆盖其上(绝大部分已被剥蚀)。兰杰一号铀矿No.1和No.3矿体钻孔勘探和采坑揭示了这些岩石地层序列(图3、图4)。

兰杰铀矿赋存于卡希尔群中,包括石英片岩、云母片岩、副斜长角闪岩、钙硅酸盐和碳酸盐岩。在兰杰矿区,卡希尔群被细分为4个层序^[21]:
①下盘岩系:是太古宙结晶基底纳纳姆布杂岩的一

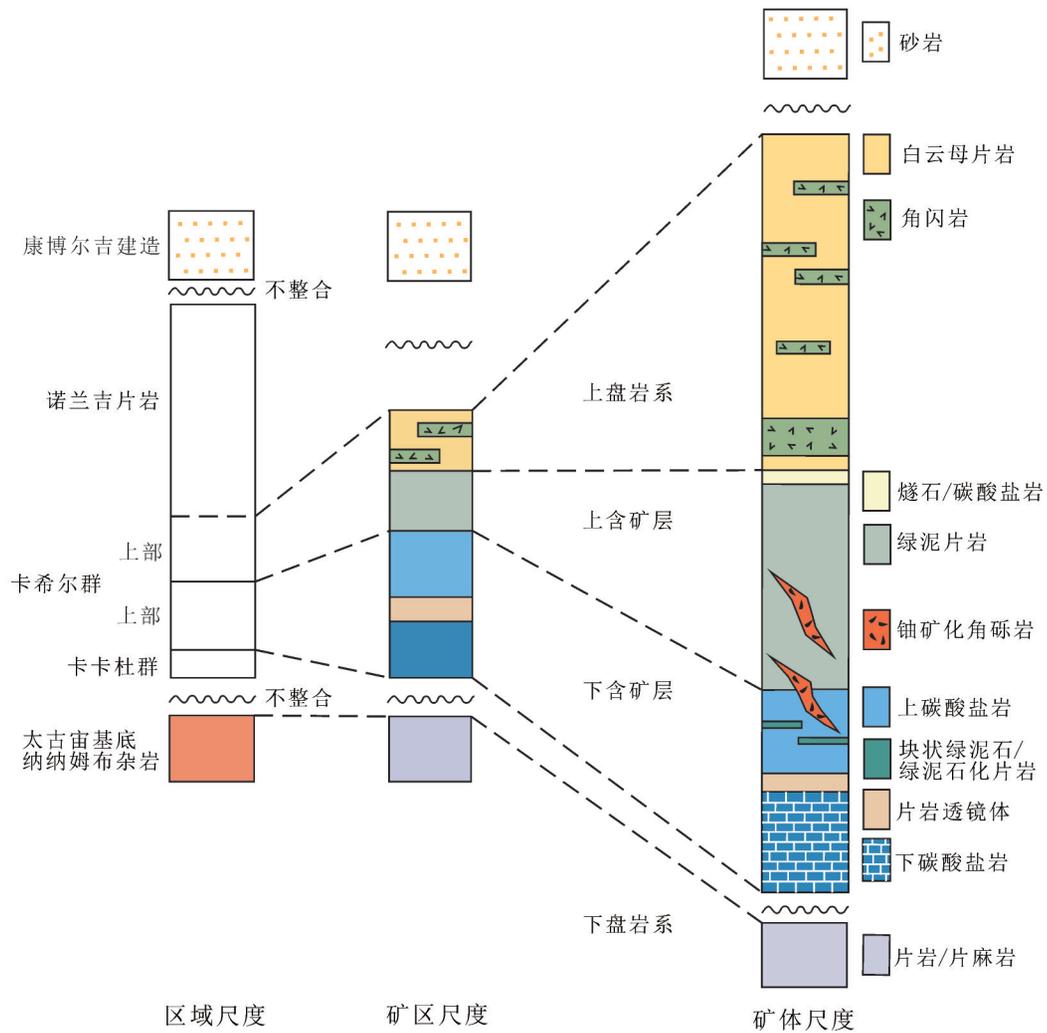


图3 兰杰铀矿区域—矿区—矿体尺度岩石地层^[20]

Fig. 3 Regional, local and mine scale lithostratigraphy of Ranger uranium deposit

部分,由片岩、片麻岩和花岗岩组成,在No.1矿体采坑中有出露。②下含矿层(厚约300m):由厚层碳酸盐岩-再结晶镁质或白云质大理岩组成,与片岩和燧石互层。碳酸盐岩位于下盘剪切带之上,分为上、下2个单元,由厚度不大的透镜状片岩分隔;片岩由石英、绢云母和透镜状绿泥石组成。③上含矿层(厚约500m):由石英-长石-黑云母片岩和微片麻岩组成,含少量碳酸盐岩碎片。该层序发育逆冲推覆构造和断层,推覆体倾向东^[22]。④上盘岩系:由粗粒云母-石英-长石片岩构成,夹角闪岩单元。

区域上,康博尔吉建造不整合覆盖在卡希尔群之上;在兰杰矿区No.3矿体采坑西面,可见马马达韦尔(Mamadawerre)砂岩局部留存,其他部分已被剥蚀。

3.2 铀矿化与蚀变

铀矿体产于当前地表或接近地表,紧邻晚古—中元古代麦克阿瑟盆地不整合面的下方,与断层、剪切构造及角砾岩带有关。

铀矿化主要赋存于上、下含矿层、透镜状片岩、伟晶岩脉和基性岩脉中^[22]。原生铀矿化以脉状和浸染状晶质铀矿(Uraninite)为主,伴有铀石(Coffinite)和钽铀矿(Brannerite)^[23]。在氧化带中,镁磷铀云母(Salecite)、硅镁铀矿(Skodowskite)和铜铀云母(Torbernite)作为次生矿物出现^[24]。蚀变组合以镁绿泥石、绢云母和石英为主,其次为黄铁矿和白云石^[23]。

铀矿化既有层控的特点,又强烈表现为受构造控制,相对高品位的铀矿化主要发生在上含矿层角

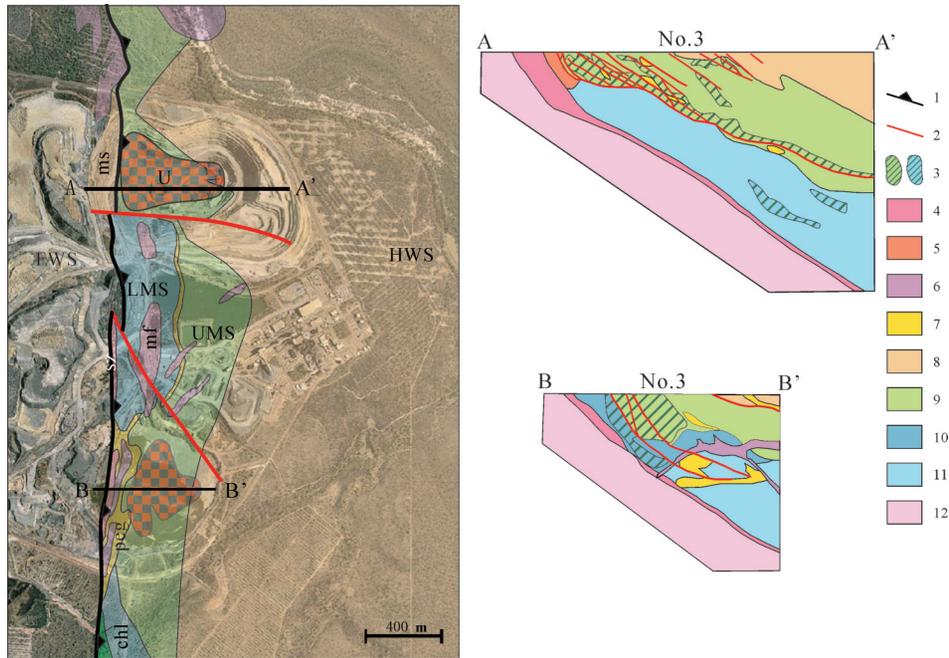


图4 兰杰铀矿 No.1和No.3矿体岩石地层和构造^[20]

Fig. 4 Lithostratigraphy and structure of No. 1 and No. 3 orebodies in Ranger uranium deposit

1—剪切带构造;2—断裂;3—U, 铀矿化;4—sz, 下盘剪切带;5—ms, 马马达韦尔砂岩;6—mf, 铁镁质侵入岩(昂佩利辉绿岩);
7—peg, 伟晶岩;8—HWS, 上盘岩系变质泥质岩;9—UMS, 上含矿层绿泥石化变质泥质岩;10—LMS, 下含矿层燧石岩;
11—下含矿层碳酸盐岩;12—FWS, 下盘岩系纳纳姆布混杂片麻岩

砾岩和复杂断裂带内。在下含矿层和下盘片麻岩之间发育一条大的韧-脆性剪切带,北北西—北北东走向,在剖面上呈铲形,向东倾斜,倾角中等(图4)。剪切带两壁岩石(部分再胶结)的碎屑定向排列,剪切带厚度向东变薄,下盘片麻岩在剪切带下部受到不规则的绿泥石化;上含矿层/下含矿层接触面上的岩石,具有高度剪切和石墨化特征。在No.1采矿坑中,高品位矿脉(平均1% U_3O_8)形成平行的矿脉组,这些矿脉组与围岩强烈角砾岩化和绿泥石化有关^[22],并被平均0.15% U_3O_8 的低品位区围绕。在No.3采矿坑中,高品位矿石界定了变质沉积岩中强烈角砾岩化窄带,呈北北西走向(图4)。

兰杰一号铀矿床铀矿化和相关蚀变位置受区域性尼姆瓦赫构造热事件期间开始的再活化剪切带控制,全岩地球化学数据和矿物共生观测显示^[4]:①强烈的富镁绿泥石蚀变和角砾化,集中在卡希尔建造上的含矿层片岩中。②下含矿层碳酸盐岩及其上覆片岩中的硅化,含石英±镁-铁电气石±白云母±黄铁矿±白铁矿和少量晶质铀矿(早期 U_1)。③主要阶段铀矿石和杂岩角砾岩的形成,包括斑状粒玄岩碎屑,角砾

岩基质由晶质铀矿(U_1)、镁绿泥石±镁-铁电气石和少量黄铁矿、黄铜矿组成;晶质铀矿原位离子探针U-Pb分析测得同位素年龄为1720~1680Ma。④热液成因的第二代含无序石墨碳和石英的晶质铀矿细脉(U_2),同位素年龄为1420~1040Ma。⑤晚期块状沥青铀矿脉(U_3),同位素年龄为474±6Ma。

4 资源储量与矿山生产

4.1 资源储量

1969年后期,PeKo-EZ合资公司在兰杰地区开展航空放射性测量时发现异常,当年10月,地面小组到达现场进行核实,钉下了第一枚矿产发现声明桩。70年代经过地质勘查,圈定了No.1和No.3两个矿体。

No.1矿体利用50m×50m网格钻探控制,以0.1% U_3O_8 边界品位圈矿,获得探明的资源储量52292t@0.336% U_3O_8 ,控制的资源储量586t@0.191% U_3O_8 ,总计资源储量52878t@0.333% U_3O_8 ;No.3矿体利用100m×100m网格钻探控制,以0.05% U_3O_8 边界品位圈矿,获得控制的资源储量

43100t@0.182% U_3O_8 , 推断的资源储量为 28703t@0.198% U_3O_8 , 总计资源储量 71803t@0.188% U_3O_8 ; No.1 和 No.3 两个矿体合计资源储量为 124681t@0.23% U_3O_8 , 相当于 105730t@0.20% U^① (表 1)。No.3 矿体在深部倾伏方向(北东—南东向)尚未得到控制,后被探明为 No.3 深部矿(No.3 Deeps)。

4.2 矿体开采与继续勘探

1980年2月,为开发能源资源,尤其是兰杰一号铀矿项目,组成澳大利亚能源资源有限责任公司(ERA, Energy Resource Company of Australia limited),并于1980年7月11日在澳大利亚股票交易所(ASX)挂牌上市。公司股份结构见表2。

目前矿山所有权人为:卡梅科公司(Cameco)占 6.45%,高杰玛澳大利亚有限公司(COGEA) 1.31%,力拓公司(Rio Tinto)68.39%,UG 澳大利亚发展有限公司 4.19%,日本澳铀资源开发公司(JAURD) 10.64%,其他 6.51%,OKG Aktiebolag 为 0.54%,Interuranium 澳大利亚公司 1.98%^②。

No.1 矿体位于兰杰一号铀矿采区南部,1981年开始露天开采,采坑范围约 2km²,至 1995 年矿石开采完毕(图 5),1996 年 12 月闭坑。在 1982—1995 年这 14 个采矿年度里, No.1 矿体累计剥采量达 56.76Mt,其中矿石(>0.1% U_3O_8) 16.47Mt,低品位矿石(0.02%~0.10% U_3O_8) 18.03Mt,废石 22.27Mt,年均开采矿石 118×10⁴t。

No.3 矿体位于兰杰一号铀矿采区北部,开采范围约 3km²; No.1 矿体采空后,ERA 于 1995/1996 年度开始准备露采矿区北部的 No.3 矿体;经过补充钻探,进一步评估 No.3 矿体,确定资源储量为 55700t@0.28% U_3O_8 。1996 年 5 月,从北领地政府获得 No.3 矿体的最终采矿许可,至 2012 年 11 月, No.3 矿体露天开采结束(表 3;图 5)。在 1997—2012 年这

16 个采矿年度里, No.3 矿体累计剥采量达 171.73Mt,其中矿石(边界品位:1997 年 0.20%, 1998—2004 年 0.12%, 2005—2012 年 0.08% U_3O_8) 34.96Mt,年均开采矿石 219×10⁴t。

2006 年度, No.3 深部倾伏方向勘探取得进展;至 2008 年度,其资源储量大幅增加;2009 年,ERA 宣布,在 No.3 露天采坑的东南方向发现深部的铀矿资源,称为 No.3 Deeps;其后经过持续勘探,到 2015 年,其资源储量(探明的+控制的+推断的)为 43857t @0.22% U_3O_8 。2015 年 6 月,ERA 董事会决定,鉴于当前运营环境,不将 No.3 Deeps 项目推进到最终可行性研究,但相关基础设施仍在维护中。为了充分开发 No.3 Deeps 资源,ERA 申请将兰杰采矿授权延期至 2021 年 1 月,该矿未来将以地下开采方式开发利用^①。

4.3 生产与销售

ERA 在兰杰铀矿的铀生产与开采同步,采用“磨矿—硫酸浸取—溶剂萃取—沉淀干燥”的工艺流程生产铀氧化物(U_3O_8)。

1981—1996 年露采 No.1 矿体,1997—2012 年露采 No.3 矿体,2013 以来,ERA 持续利用库存矿石进行铀生产。1981—2018 年这 37 个财年时间里,兰杰一号铀矿总计生产了 128739t U_3O_8 (表 3;图 6),年均 3479t U_3O_8 ;另外有 3735t @0.076% U_3O_8 矿石库存,按照 88.21% 的平均回收率和 98.92% 的平均产品纯度,可折算生产 3331t U_3O_8 。因此,兰杰铀矿 No.1 和 No.3 矿体总体上应该可以产出了 132070t U_3O_8 ,其中 No.1 矿体产出了 54378t U_3O_8 , No.3 矿体产出 77692t U_3O_8 。此外,兰杰铀矿尚存有大量低品位(0.02%~0.10% U_3O_8)的铀矿石,在合适的经济技术条件下可用于铀生产。

自 1985 财年开始,ERA 向世界核能市场供应铀

表 1 兰杰铀矿资源储量^①

Table 1 Resources list of Ranger uranium mine

矿体	资源储量类型	矿石量/10 ⁴ t	品位/% U_3O_8	金属量/t U_3O_8	金属量/t U
No.1	探明的(proven)	15.56	0.336	52292	44344
	控制的(Probabale)	0.31	0.191	586	497
	小计	15.87	0.333	52878	44841
No.3	控制的(Probabale)	23.62	0.182	43100	36549
	推断的(Possible)	14.47	0.198	28703	24340
	小计	38.09	0.188	71803	60889
合计		53.96	0.231	124681	105730

注:No.1 矿体边界品位 0.1%, No.3 矿体边界品位 0.05%

表2 ERA 股份结构¹⁾

Table 2 List of ERA's share structure

级别	股东	股份/千股	占比/%
A类 普通股	澳大利亚电锌公司(EZ)	125000	30.49
	Peko-Wallsend公司	125000	30.49
	澳大利亚公众	57500	14.02
	Rheinbraun 澳大利亚公司	25625	6.25
B类 普通股	UG 澳大利亚发展有限公司	16400	4.00
	Interuranium 澳大利亚公司	15375	3.75
	OKG Aktiebolag	4100	1.00
C类 普通股	日本澳铀资源开发有限 公司	41000	10.00
合计		410000	100.00

产品,其客户分布于美国、欧洲、中国、日本、韩国和阿联酋;作为核不扩散条约签订国,这些产品被要求用于作为核燃料,以产生低排放电力。至2018年12月,在34个财年的时间里,ERA 共计销售了产于兰杰铀矿的119882t U_3O_8 (表3;图6),年均3526t U_3O_8 。

经过37年的铀生产,兰杰矿山为原住民和澳大利亚联邦政府贡献了50多亿美元的特许权使用费,超过10亿美元的股息和10多亿美元的税收^①。

5 环境修复

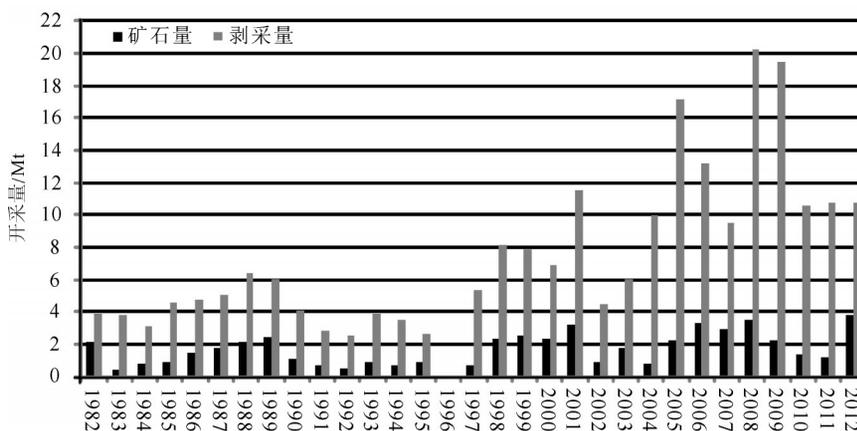
ERA 强调矿山环境的治理与恢复。2014年12月,在No.3号采坑安装排水系统,将其改造为尾矿池,承接后续铀生产所产生的尾矿。2016年1月,完成了No.1号采坑的封顶工作;2017年4月,获得最终废石盖层的监管批准,约 360×10^4 t的废石被放

置在不透水的红土盖层上,而红土盖又包裹了先前存放在No.1号采坑的尾矿;废石层的安置将持续到2019年底。从1980年开始,ERA 在原始的裸地上采矿;到2026年1月,矿区内所有采矿设备和建筑都将被拆除,矿坑将被回填,100多万株本地树木将被种植,兰杰一号铀矿采区将恢复到与周围环境相似的地貌景观和与周围自然栖息地相适应的状态。

6 讨论与建议

(1)地质找矿方面,兰杰铀矿属于元古宙不整合面型中基底赋存亚型。古元古代/晚古元古代—中元古代不整合面下的卡希尔群碳酸盐岩+绿片岩及其角砾岩对铀矿化具有层控性;同时,北北西—北北东走向、东倾的逆冲—伸展剪切构造系统和陡倾的脆性断裂构造网络联合控制较高品位铀矿化的产出。兰杰铀矿No.1和No.3矿体均赋存于不整合面下,且临近不整合界面;在兰杰矿区,康博尔吉红层建造已基本被剥蚀殆尽,换言之,不整合界面已不复存在。根据加拿大阿萨斯卡盆地不整合面型铀矿成矿规律和勘查实践,在面积红层留存的麦克阿瑟盆地,利用大地电磁测量技术探测发现低阻的石墨剪切带,进而寻找高品位的不整合接触面亚型铀矿(如麦克阿瑟河、雪茄湖铀矿床),这是值得期待的。

(2)铀矿开采与生产方面,1981—1996年,露采No.1矿体,按照年产3000t(U_3O_8)的设计能力进行采矿和生产;1997—2012年,露采No.3矿体,年生产能力提高到4000~5000t(U_3O_8);2013年之后,利用矿

图5 兰杰铀矿1982—2012财年采矿量/剥采量统计图(数据据参考文献^①)

(1982财年为9个月,2001财年为18个月,其他均为12个月)

Fig. 5 Statistical chart of mining/stripping volume in Ranger uranium mine, 1982–2012 fiscal year

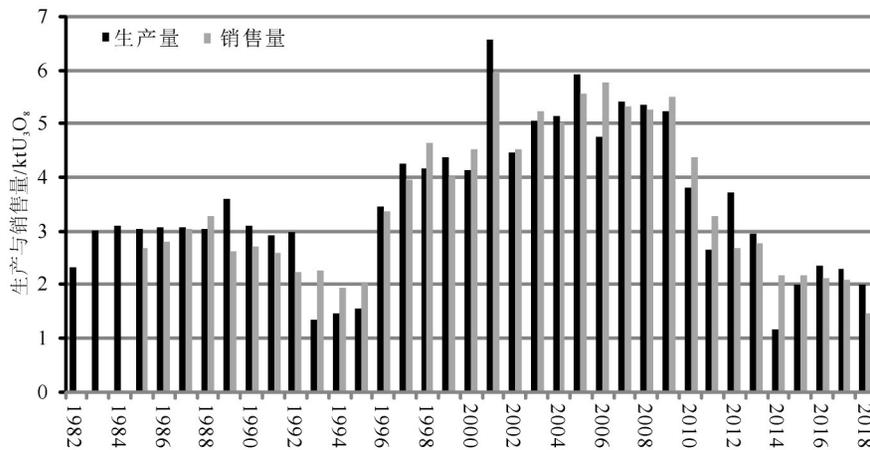


图6 兰杰铀矿 1982—2018 财年铀生产与销售量统计图(数据据参考文献①)

(1982 财年为 9 个月, 2001 财年为 18 个月, 其他均为 12 个月)

Fig. 6 Statistics of uranium production and sales in Ranger uranium mine, 1982–2018 fiscal year

石库存进行生产。这种总体上长期持续稳定的生产,使得各项基础设施得以充分利用,人员队伍较稳定;同时,可以有条不紊地安排勘探工程,渐进式地使资源储量转换升级,并探索发现新的矿体——No.3 深部矿。2011—2013 年,投资 1.2 亿美元完成 No.3 深部矿地下勘探面工程^①,以便对 No.3 深部矿资源进行近距离地下钻探。该工程将用于 No.3 深部矿未来的地下开采,同时有效地减少了探矿深度,节约了大量探矿工程费用。

(3) 政治与法律方面,澳大利亚是核不扩散条约签署国,政府将铀视为敏感的政治议题,在铀的开采与出口方面形成了自己的原则与立场。其铀资源被要求用于作为核燃料,以产生低排放电力。作为殖民地国家,矿山生产与原住民之间存在许多矛盾;由于原住民的反对,兰杰铀矿的采矿许可证未能获准延期至 2021 年之后,导致 ERA 宣布暂停对 No.3 深部矿项目开展进一步研究。此外,ERA 拥有的贾比卢卡超大型铀矿能否在短时期内征得米拉尔(Mirrarr)传统业主的同意,进而获得最终采矿许可,目前未知。事实上,1978 年签署的“兰杰协定”是澳大利亚历史上第一个有关在原住民土地上开采铀矿的协定。根据该协定,在铀矿开采方面,除非以国家名义,否则原住民有权阻止矿业公司在他们的土地上进行铀矿的勘探与开采行为^[25]。这些是中国相关部门、公司和个人在澳大利亚投资铀矿业时需要特别明确和注意的问题。

7 结 论

(1) 兰杰一号铀矿及其所属的鳄鱼河铀矿田产于北澳太古宙克拉通内古元古代裂谷背景之上发展起来的松溪造山带。

(2) 铀矿体产于新太古代—早元古代结晶—变质基底/古元古代—中元古代康博尔吉红层建造不整合界面下,具有层控和铲形韧性剪切带、脆性高角度断裂构造联合控矿的特点。

(3) 铀矿化分 3 个时代, U1 (1720~1680Ma) U2 (1420~1040Ma)、U3 (474±6Ma), U1 是主矿化时代。

(4) 该铀矿 1969 年后期通过航空放射性测量发现; 70 年代探明 No.1 矿体资源储量 52878t @0.33% U₃O₈, No.3 矿体资源储量 71803t @0.19% U₃O₈, 总计资源储量 124681t @0.23% U₃O₈。

(5) 1980—2018 年, 37 个财年的时间里, 兰杰一号铀矿总计生产了 128739t U₃O₈, 年均 3786t U₃O₈。

(6) 1985—2018 年, 34 个财年的时间里, ERA 向世界核能市场共计销售了产于兰杰铀矿的 119882t U₃O₈, 年均 3526t U₃O₈。

(7) 2009 年发现了 No.3 深部矿, 至 2015 年累计探明资源储量 43857t @0.22% U₃O₈, 这部分资源将以地下开采方式利用。

(8) 计划到 2026 年, 兰杰一号铀矿采区将恢复到与周围环境相似的地貌景观和与周围自然栖息地相适应的状态。

参考文献

- [1]NEA, IAEA. Uranium 2016: Resources, Production and Demand[J]. OECD Publishing, 2017.
- [2]Lally J H, Bajwah Z U. Uranium deposits of the Northern Territory[J]. Northern Territory Geological Survey, 2006.
- [3]Pirajno F, Bagas L. A review of Australia's Proterozoic mineral systems and genetic models[J]. Precambrian Research, 2008, 166(1): 54-80.
- [4]Skirrow R G, Mercadier J, Armstrong R, et al. The Ranger uranium deposit, northern Australia: Timing constraints, regional and ore-related alteration, and genetic implications for unconformity-related mineralisation[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 76: 463-503.
- [5]Worden K, Carson C, Scrimgeour I, et al. A revised Palaeoproterozoic chronostratigraphy for the Pine Creek Orogen, northern Australia: evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology[J]. Precambrian Research, 2008, 166(1): 122-144.
- [6]Hollis J A, Carson C J, Glass L M. SHRIMP U-Pb zircon geochronological evidence for Neoproterozoic basement in western Arnhem Land, northern Australia[J]. Precambrian Research, 2009, 174(3): 364-380.
- [7]Hollis J A, Glass L M, Carson C J, et al. The geological evolution of the Pine Creek Orogen: new pieces in the puzzle on orogen and craton scale[C]//Annual Geoscience Exploration Seminar (AGES). 2011.
- [8]Hollis J A, Wygralak A S. A review of the geology and uranium, gold and iron ore deposits of the Pine Creek Orogen [J]. Episodes News Mag. 2012, 35(1): 264-272.
- [9]Annesley I R, Madore C, Kwok Y Y, et al. U-Pb geochronology and petrochemistry of late Barramundi pegmatites from the Ranger U deposit, Northern Territory, Australia[C]//Uranium deposits. International workshop, Prague, 2002: 37-40.
- [10]Stuart-Smith P G, Needham R S, Page R W, et al. Geology and mineral deposits of the Cullen mineral field, Northern Territory[J]. Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Bulletin, 1993, 229: 67-77.
- [11]Page R W, Needham R S, Compston W. Geochronology and Evolution of the Late-Archaean Basement and Proterozoic Rocks in the Alligator Rivers Uranium Field, Northern Territory, Australia[C]//Ferguson J, Gobeley A B. Uranium in the Pine Creek Geosyncline. IAEA, Vienna, 1980:39-68.
- [12]Mercadier J, Skirrow R G, Cross A J. Uranium and gold deposits in the Pine Creek Orogen (North Australian Craton): a link at 1.8Ga[J]. Precambrian Research, 2013, 238: 111-119.
- [13]Needham R S, Stuart-Smith P G. Geology of the Alligator Rivers Uranium Field, Northern Territory[J]. Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Bulletin, 1988:1-224.
- [14]Bull S W, Rogers J R. Recognition and significance of an early compressional deformation event in the Tawallah Group, McArthur Basin.[C]//NT.MIC'96. New developments in Metallogenic Research, 1996:28-32.
- [15]Scott D L, Rawlings D J, Page R W, et al. Basement framework and geodynamic evolution of the Palaeoproterozoic superbasins of north-central Australia: an integrated review of geochemical, geochronological and geophysical data[J]. Journal of the Geological Society of Australia, 2000, 47(3):341-380.
- [16]Polito P A, Kyser T K, Marlatt J, et al. Significance of alteration assemblages for the origin and evolution of the Proterozoic Nabarlek unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia[J]. Economic Geology, 2004, 99(1): 113-139.
- [17]Polito P A, Kyser T K, Thomas D, et al. Re-evaluation of the petrogenesis of the Proterozoic Jabiluka unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia[J]. Mineralium Deposita, 2005, 40(3): 257-288.
- [18]Hiatt E E, Kyser T K, Fayek M, et al. Early quartz cements and evolution of paleohydraulic properties of basal sandstones in three Paleoproterozoic continental basins: evidence from in situ $\delta^{18}\text{O}$ analysis of quartz cements[J]. Chemical Geology, 2007, 238(1): 19-37.
- [19]Sweet I P, Brakel A T, Carson L. The Kombolgie Subgroup a new look at an old formation[J]. Journal of Earth Sciences, 1999, 45 (219): 232.
- [20]McCoy A, Pope A, Schaub P. Structural Setting of the Ranger Uranium Orebodies, Implications for Exploration[C]//AusIMM International Uranium Conference, 2009.
- [21]Hein K A A. Geology of the Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia: structural constraints on the timing of uranium emplacement[J]. Ore Geology Reviews, 2002, 20(34): 83-108.
- [22]Kendall C J. Ranger uranium deposits[C]//Hughes F E. Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1990, 1: 799-805.
- [23]Savory P J. Geology and grade control at ERA-Ranger Mine, Northern Territory, Australia[C]//Hallenstein C P. Australian Mining Looks North—The Challenges and Choices. AusIMM Annual Conference. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, 1994:97-101.
- [24]Hegge M R, Rowntree J C. Geologic setting and concepts on the origin of uranium deposits in the East Alligator River Region, N.T., Australia[J]. Economic Geology, 1978, 73(8):1420-1429.
- [25]汪诗明,王艳芬. 论《兰杰协定》的签署[J]. 华东师范大学(哲学社会科学版), 2016, 48(5):102-111.
- ① ERA. Annual Report 1981—2018[EB/OL] (2019-04-01) 2019-04-01]http://www.energyres.com.au/media/reports/.
- ② IAEA. Questionnaire to Member States, 2017/2018[EB/OL] (2018-08-20) [2019-03-20]https://infcis.iaea.org/NFCIS/Facility Details/266?Country=Australia&Status=All&Type=All&Scale=All&SText=2018.