

何德宝, 范洪海, 耿瑞瑞, 等. 纳米比亚罗辛矿区铀成矿潜力评价[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(2): 291-306. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.02.006

HE Debao, FAN Honghai, GENG Ruirui, et al. Evaluation of uranium metallogenic potential in Rössing mining area, Namibia [J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(2): 291-306(in Chinese).

## 纳米比亚罗辛矿区铀成矿潜力评价

何德宝, 范洪海, 耿瑞瑞, 陈金勇, 王勇剑, 陈东欢, 陈旭

- 1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 北京 100029
- 2 核工业北京地质研究院, 北京 100029
- 3 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029

**摘要** 纳米比亚罗辛铀矿是开采最早的白岗岩型铀矿, 产量位列全球十大铀矿山之列, 但其后备资源严重不足, 急需开展资源勘查, 扩大资源量, 保障矿山可持续发展。在资料二次开发基础上, 对矿区主要铀矿床(点)进行野外地质调查、重点地段大比例尺地质填图和能谱测量, 开展典型铀矿床(点)解剖, 识别出不同矿床铀矿化特征、控矿要素, 认为白岗岩型铀矿是区域构造-岩浆演化产物, 其为花岗质岩浆结晶而成, 其成矿物质来自古老基底的深熔作用, 源区岩性多样以及基底熔融的不均一性造成白岗岩含矿性的差异。矿床定位受NNE向的区域性断裂、穹隆转折端及构造变异部位控制, 含矿白岗岩沿构造、地层薄弱面侵入并结晶成矿, 矿后由于热液蚀变及表生淋滤作用部分地段矿体叠加富集。在总结罗辛地区铀成矿地质背景, 研究典型矿床特征和控矿要素基础上, 厘定铀成矿预测要素, 提取铀矿产地缓冲区、白岗岩分布区、区域构造缓冲区、大理岩外接触带、蚀变发育区、航空放射性铀异常区及地面 $\gamma$ 能谱异常区等预测要素, 采用综合信息地质单元法开展铀成矿预测。在矿权区范围内新圈定铀成矿预测区14片, 预测铀资源潜力约14万t, 表明罗辛矿床外围铀成矿潜力巨大, 应加大勘查投入力度, 5个A类预测区是下一步勘查工作的重点, 其中A<sub>1</sub>(Z17-19)预测区经钻探揭露已落实为特大型铀矿床, 找矿成果显著。

**关键词** 白岗岩型铀矿; 潜力评价; 预测区圈定; 罗辛铀矿床

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)02-0291-16

## Evaluation of uranium metallogenic potential in Rössing mining area, Namibia

HE Debao, FAN Honghai, GENG Ruirui, CHEN Jinyong, WANG Yongjian, CHEN Donghuan, CHEN Xu

- 1 National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-Mining and Nuclear Remote Sensing, Beijing 100029, China
- 2 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China
- 3 CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China

基金项目: 中核集团自主研发项目罗辛矿区及外围资源扩大研究(编号: 地SD05)

收稿日期: 2025-02-25 改回日期: 2025-03-15

第一作者: 何德宝, 男, 1981年生, 高级工程师, 博士, 主要从事热液型铀矿研究及成矿预测工作。E-mail: hedeobao@126.com

通信作者: 范洪海, 男, 1963年生, 正高级工程师, 博士, 从事铀矿地质研究及成矿潜力评价工作。E-mail: fhh270@263.net

Supported by CNNC Self-Developed Project, Research on Resource Expansion in the Rössing Mine and its Peripheral Areas (No. 地SD05)

Received date: 2025-02-25 revised date: 2025-03-15

First author: HE Debao, male, born in 1981, senior engineer, PhD, focusing on the research of hydrothermal uranium deposit and metallogenic prediction. E-mail: hedeobao@126.com

Corresponding author: FAN Honghai, male, born in 1963, senior engineer, PhD, focusing on uranium geological research and resource estimation work. E-mail: fhh270@263.net

**Abstract:** The Rössing mine in Namibia is the earliest alaskite-type uranium mine, ranking the top 10 globe uranium mines. However, the backup resources are seriously insufficient, therefore it is urgent to carry out exploration to expand resources and ensure the sustainable development of the mine. Based on the secondary data development, the authors carried out field geological survey, large-scale geological mapping, and ground energy spectrum measurement on the main uranium deposits in the mining area, studied the typical uranium deposit and identified uranium mineralization characteristics and ore-controlling factors. It was considered that the alaskite-type uranium deposit was the products of regional tectonic-magmatic evolution, which was crystallized from granitic magma. The ore-forming material was derived from the anatexis of the ancient basement rocks. The diversity of source rocks and the heterogeneity of melting resulted in the capacity variations in the ore-bearing alaskite. The localization of the deposit is controlled by NNE-trending regional faults, dome (fold) turning ends and structural variation sites. Ore-bearing pluton intruded along the structural and weak stratigraphic planes, with post-mineralization hydrothermal alteration and supergene leaching and enrichment. On the basis of summarizing the geological background, metallogenic and ore-controlling pattern of uranium mineralization, this paper defined the prediction factors of uranium mineralization and extracted the prediction factors including uranium deposits buffer zones, alaskite distribution areas, regional tectonic buffer zones, marble exocontact zones, alteration development zones, aerial radiometric uranium anomaly zones and ground gamma spectrometry anomaly zones. Using the comprehensive information geological unit method, uranium metallogenic prediction was conducted and 14 new uranium prospective sectors were delineated in the Rössing mining licence area with approximately 140 000 tons potential resources. This achievement indicated significant uranium potential in the periphery of the Rössing deposit and worthy more exploration efforts. The 5 predicted level-A prospects are the focus for the next exploration. Among which, the A<sub>1</sub> (Z17-19) sector has been verified as a super-large uranium deposit through drilling, demonstrating remarkable prospecting achievements.

**Keywords:** alaskite-type uranium deposit; potential evaluation; Rössing uranium deposit; Namibia

据 UDEPO 数据库统计,截至 2021 年全球常规铀资源 1 457 万 tU,纳米比亚已查明常规铀资源量 107.2 万 tU,占全球总铀资源量 7.4%,其中白岗岩型铀资源量为 91 万 tU,世界排名第一<sup>[1]</sup>。在全球十大铀矿山中,纳米比亚占据 2 席,湖山、罗辛铀矿山分别为第 2 位和第 7 位,2019 年产量分别为 3 400、2 077 tU<sup>[2]</sup>。据 2019 年数据,湖山矿山保有资源量 12.2 万 tU,而罗辛矿山保有资源量仅 2.7 万 tU<sup>[1]</sup>,罗辛矿山寻找后备资源工作迫在眉睫。据罗辛矿山资料前人勘查工作主要集中在 SJ、SH、SK 及 Z20 矿床,矿床外围开展了航空放射性能谱测量及无人机遥感地质填图,仅在部分异常点带有少量浅钻查证,矿区未开展成矿潜力评价工作。本文在梳理矿山资料基础上,开展了典型矿床研究,总结了区域铀成矿规律,对矿权区内白岗岩型铀矿成矿潜力进行评价,圈定成矿预测区,为矿山勘查部署提供依据。

## 1 区域背景

罗辛铀矿山位于纳米比亚中西部,属于达马拉造山带南部中央带(图 1)。该造山带为卡拉哈里克拉通与刚果克拉通汇聚形成,经历陆内裂谷、扩张和俯冲阶段,通过关闭莫桑比克南部霍马斯洋而形成,在洋盆发育与闭合的过程中,经历多期的沉积作用<sup>[3]</sup>。达马拉造山带中央带地层主要由前达马拉结晶基底阿巴比斯组(Abbabis)和新元古代达马拉层序组成,两者呈不整合接触<sup>[4]</sup>。达马拉地层层序由前寒武系变质基底组成,包括河流相沉积地层诺西布群(Nosib)和冰川相、海相沉积地层斯瓦科普群(Swakop),诺西布群包括艾杜西斯组(Etuisis)和可汗组(Khan),斯瓦科普群包括罗辛组(Rössing)、楚斯组(Chuosis)、卡里毕比组(Karibib)及卡塞布组(Kuiseb)。诺西布群下部地层沉积物主要来

源于阿巴比斯组 (Abbabis) 基底, 其与上覆斯瓦科普群和下伏阿巴比斯组基底均呈不整合

接触关系<sup>[3]</sup>。各组岩石组合特征、厚度以及接触关系见表 1、图 2。

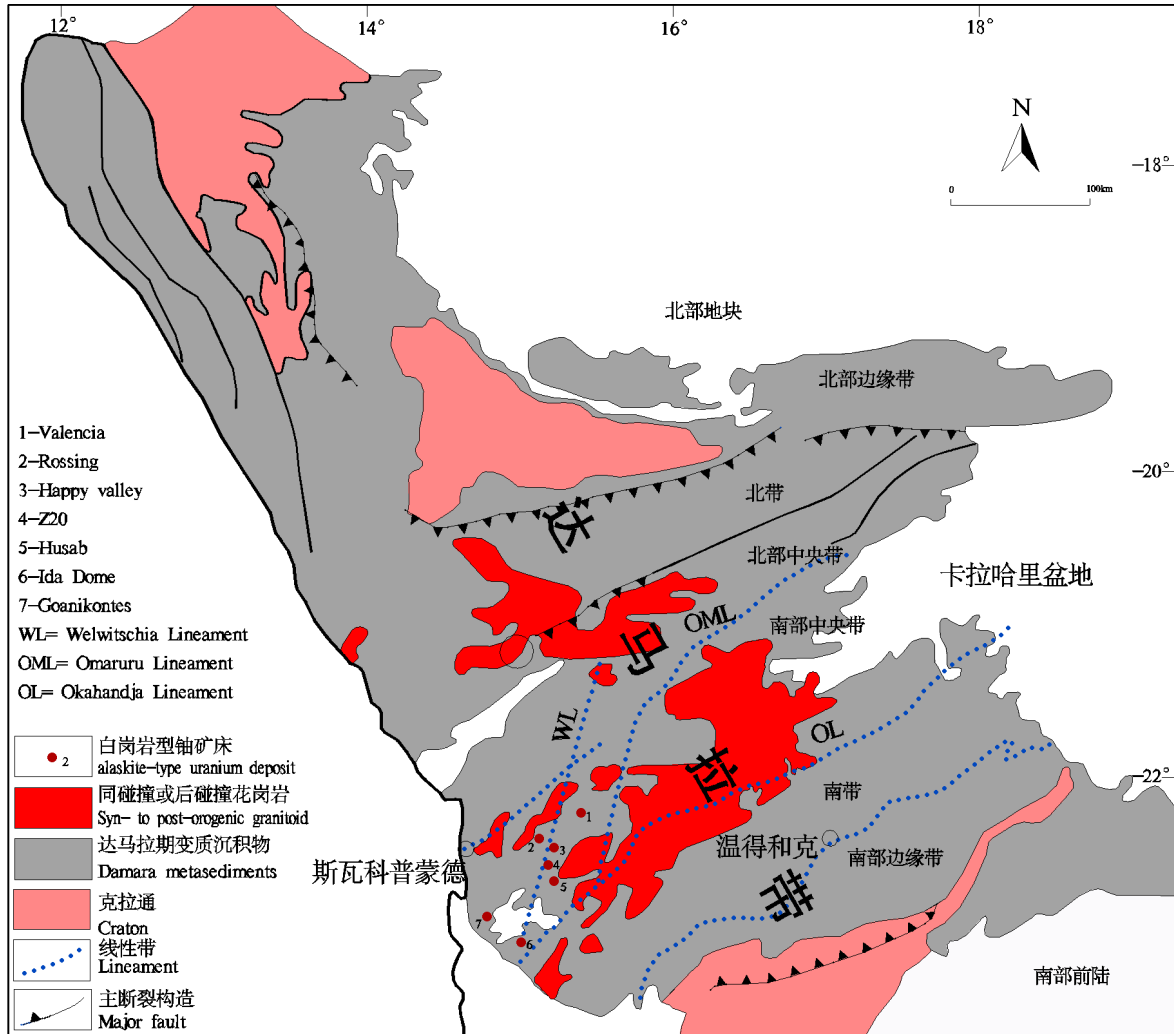


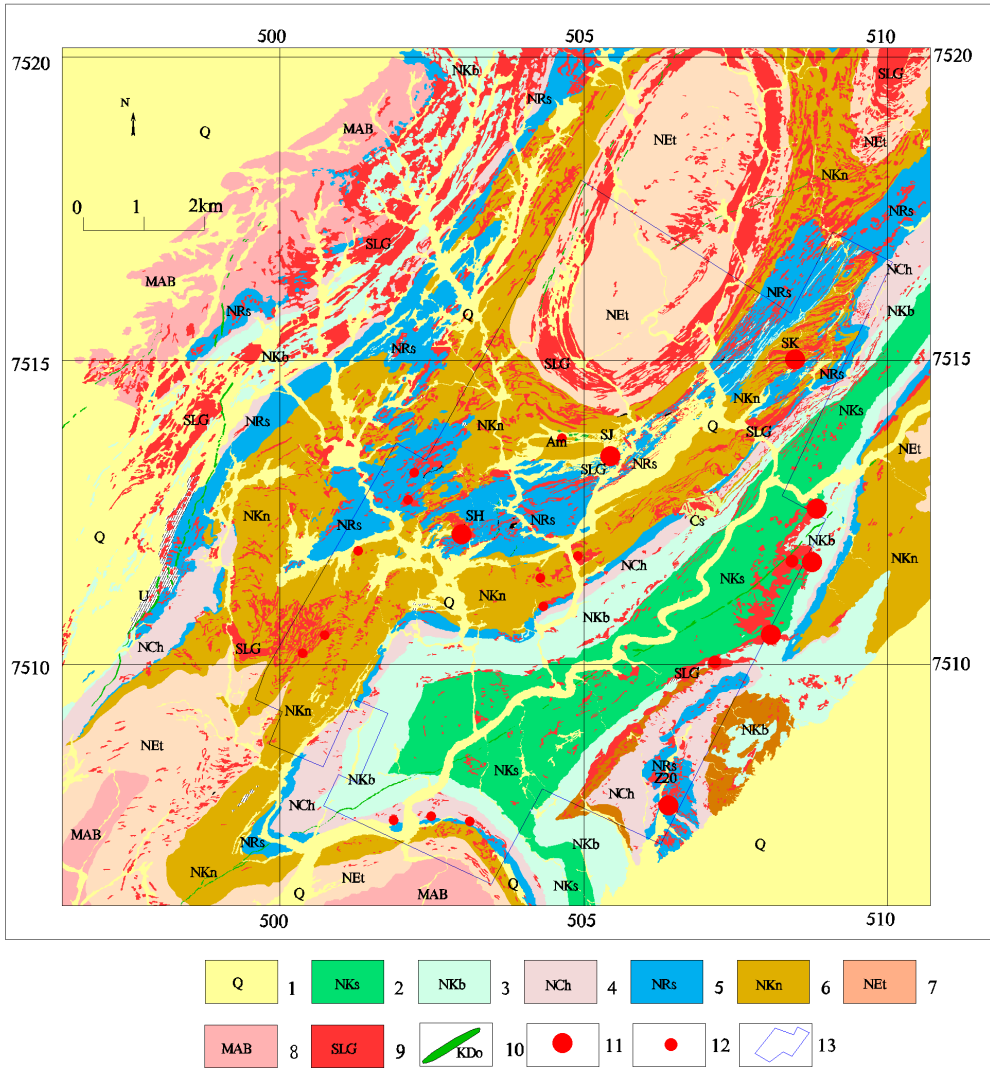
图 1 达马拉造山带构造地质简图及主要白岗岩型铀矿分布(据参考文献[4]修改)

Fig. 1 Structural geological map of Damara orogenic belt and distribution of main alaskite-type uranium deposits (modified after reference [4])

表 1 达马拉造山带地层组合及其特征 (据参考文献 [5] 修改)

Table 1 Stratigraphic assemblage and characteristics of the Damara orogenic belt (modified after reference [5])

群	组	代号	厚度/m	主要岩性
斯瓦科普群 (Swakap)	卡塞布组 (Kuiseb)	NKs	>3 000	砂质、泥质片岩、片麻岩, 混合岩、钙硅质岩及石英岩
	卡里毕比组 (Karibib)	NKb	1 000	大理岩、钙硅质岩、泥质片岩和片麻岩
	楚斯组 (Chuoss)	NCh	700	混积岩、钙硅质岩、含砾片岩、石英岩、冰碛岩
	罗辛组 (Rössing)	NRs	200	大理岩、黑云母堇青石片麻岩、云母角闪片岩、混合岩、长石质石英岩、变质砾岩
诺西布群 (Nosib)	可汗组 (Khan)	NKn	1 100	混合条带斑点石英长石辉石角闪片麻岩、云母片岩和片麻岩、混合岩、辉石石榴片麻岩、角闪岩、石英岩、变质砾岩
	艾杜西斯组 (Etusis)	NEt	3 000	片麻状花岗岩、眼球状片麻岩、石英长石片麻岩、泥质片岩和片麻岩、石英岩、钙硅质岩、混合岩、大理岩
阿巴比斯组 (Abbabis)		结晶基底, 长英质眼球状片麻岩、片岩、斜长角闪岩、石英岩、大理岩、钙硅质岩杂岩体		



1—第四系冲积物、坡积物；2—卡塞布组片岩、片麻岩；3—卡里毕比组大理岩、石英岩、片岩；4—楚斯组混积岩、钙硅质岩、石英岩、冰碛岩；5—罗辛组大理岩、泥质片岩、片麻岩、角闪岩、钙硅质岩、石英岩、混合岩；6—可汗组条带状、斑状片麻岩、角闪岩、变砾岩；7—艾杜西斯组片岩、石英岩、大理岩；8—阿巴比斯组变质杂岩；9—白岗岩；10—粗玄岩脉；11—铀矿床；12—铀矿点；13—罗辛矿权范围。

1-Quaternary alluvium; 2-Kuiseb formation of Schist and gneiss; 3-Karibib formation of marble, calc-silicate rock, pelitic and semi-pelitic schist and gneiss; 4-Chuos formation of diamictite, calc-silicate rock, pebbly schist, quartzite, tillite; 5-Rössing formation of marble, pelitic schist and gneiss, biotite hornblende schist, migmatite, calc-silicate rock, quartzite, metaconglomerate; 6-Khan formation of banded and mottled amphibole gneiss, hornblende-biotite schist, biotite schist and gneiss, amphibolite, metaconglomerate; 7-Etusis formation of schist and gneiss, quartzite, marble; 8-Abbabis complex; 9-Alaskite; 10-Coarse basaltic dike; 11-Uranium deposit; 12-Uranium occurrence; 13-The boundary of Rössing mining licence.

图 2 罗辛矿区地质简图

Fig.2 Geological sketch of Rössing mine

750~460 Ma, 达马拉造山带经历了板内裂谷发育、板块破裂、板块分离、板块汇聚、板块俯冲以及陆-陆碰撞、岩浆侵入的板块演化全过程<sup>[6]</sup>。在卡拉哈里克拉通和刚果克拉通碰撞过程中,达马拉造山带发生了至少4期构造变形事件,形成区域上以NE向穹隆及断裂为主的构造变形<sup>[7]</sup>。D<sub>1</sub>期构造大致发生在

580 Ma,由克拉通的初步汇聚形成一系列S—SSE向的开阔等斜褶皱及与逆冲推覆断层相关的褶皱<sup>[8]</sup>。D<sub>2</sub>构造活动发生在550 Ma左右,由于克拉通进一步汇聚,形成了NE向直立的紧闭—等斜褶皱,低角度的逆断层及与褶皱轴面大致平行的轴面面理<sup>[7,9]</sup>。D<sub>3</sub>期构造形成在约540 Ma,卡拉哈里克拉通与刚果克拉通相互碰

撞作用产生了一系列NE向平缓褶皱和大型NE走向直立穹隆<sup>[10]</sup>。D<sub>4</sub>期构造活动发生在516~505 Ma之间,该期构造为板块俯冲后弧后伸展运动,以韧性向脆性的过渡转变和NNE向千岁兰断裂的左旋走滑为特征<sup>[11]</sup>,在可汗组和罗辛组中形成密集的NNE向左旋剪切断裂<sup>[12]</sup>。

克拉通碰撞形成大量侵入岩,其中96%为花岗质岩石,4%为钙碱系列的辉长质和花岗闪长质的岩浆岩,少量为中基性岩石,主要

岩石类型有基底片麻状花岗岩、Salem型斑状花岗岩、黑云母花岗岩、白岗岩、辉绿岩脉及粗玄岩脉<sup>[8]</sup>。白岗岩是白岗岩型铀矿床的主要赋矿围岩,其为岩浆晚期产物,形成时间为 $547.4 \pm 3.6 \sim 511.4 \pm 4.3$  Ma。根据白岗岩侵位形式、颜色、粒度、结构和放射性等特征将其划分A-F六种类型<sup>[13]</sup>,其中D型和E型白岗岩是含矿岩体,不同类型白岗岩特征及其成岩年龄见表2。

表2 白岗岩分类及其主要特征及成岩年龄

Table 2 The classification, characteristic and ages of the alaskites

类型	岩石特征	取样位置	成岩年龄/Ma
A	呈不规则褶皱状,浅灰白色,细粒-中粒、糖粒状结构,以白色长石为主	欢乐谷	$547.4 \pm 3.6$ (LA-ICP-MSU-Pb 锆石) (据参考文献[14])
B	白色,不等粒结构(细粒至伟晶结构),常见石榴子石、黑云母、电气石	欢乐谷	$537.8 \pm 4.3$ (LA-ICP-MSU-Pb 锆石) (据参考文献[12])
C	淡红-乳白色,中粒-伟晶结构,含微斜长石和斜长石,副矿物为磁铁矿、褐铁矿和电气石	欢乐谷	$525.4 \pm 2.6$ (LA-ICP-MSU-Pb 锆石) (据参考文献[12])
D	呈不规则网状,白色,中-粗粒状结构,原生铀矿化的白岗岩主要由白色长石、烟灰色石英组成,见 $\beta$ 硅钙铀矿和磷灰石	欢乐谷	$506 \pm 8.1$ (SHRIMP-U-Pb 锆石) (据参考文献[15]); $497 \pm 5.5$ (LA-ICP-MSU-Pb 锆石) (据参考文献[12])
		湖山	$496.1 \pm 4.1$ Ma (EPMAU-Th-Pb 晶质铀矿) (据参考文献[16])
E	红-粉红色,颜色及粒度多变,见浅红色长石,有氧化晕圈,矿物组成与D型相似,或者全部由烟灰色(黑色)石英和粉红色长石构成		
F	红色,粗粒-伟晶结构,粉红色粗粒条纹长石,乳白色石英,副矿物为磁铁矿和褐铁矿	欢乐谷	$511.4 \pm 4.3$ (LA-ICP-MSU-Pb 锆石) (据参考文献[17])

## 2 铀矿床特征及主要控矿因素

### 2.1 铀矿床特征

达马拉造山带南部中央带为白岗岩型铀矿床集中发育区,除正在开采的罗辛(SJ)、湖山(Husab)矿床外,区域上还有IdaDome、Goanikontes、Valencia和欢乐谷等矿床(图1),矿区内达到矿床规模的有SJ、Z20、SH、SK和Z17-19等,矿床类型均为白岗岩型。下面以罗辛矿床和Z17-19矿床为例介绍白岗岩型铀矿床特征。

#### 2.1.1 罗辛矿床特征

罗辛矿床是开采最早的白岗岩型铀矿床。1975年开始露天开采,至今已开采铀资源量约14万t。罗辛矿床位于SJ穹隆南侧的向斜上,呈NW-SE向展布,宽度约500~600 m,长约4 km,钻探控制最深矿化垂幅超过1 000 m,开采铀矿石平均品位为0.03%左右<sup>[18]</sup>。

罗辛矿床含矿白岗岩主要是D型白岗岩,呈脉状或不规则透镜状沿地层接触带及构造碎裂带侵入罗辛组、可汗组地层,宽度由几厘米到200 m不等,与地层片理、片麻理平行或成一定角度相交。矿物成分为石英、微斜长石及微斜条纹长石,黑云母含量较少,常呈团块状聚集。铀矿物主要是晶质铀矿、 $\beta$ -硅钙铀矿和铀钼铀矿,副矿物有独居石、锆石、榍石、黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿和萤石等。铀成矿年龄为 $510 \pm 3$  Ma<sup>[19]</sup>。

矿床定位受地层、构造和岩体控制。矿化白岗岩侵入罗辛组和可汗组接触带,当罗辛组减薄、缺失时矿化白岗岩则侵入楚斯组和可汗组接触带内<sup>[16]</sup>。矿体发育在紧闭褶皱的拐弯处,主矿体发育受SJ构造带控制,白岗岩侵位沿着地层中断裂、裂隙、节理和轴面劈理等薄弱面发育,可汗组、罗辛组广泛发育大理岩,促进铀的沉淀、富集<sup>[12,20]</sup>。

### 2.1.2 Z17-19 矿床特征

Z17-19 铀矿床位于罗辛矿床与湖山矿床之间,由 Z17、Z19 航空放射性异常带组成。出露的白岗岩总体呈 NE 向透镜体状展布,长约 5 km,最宽处约 600 m,最窄处不足 50 m(图 2)。白岗岩以 D 型白岗岩为主,矿化带呈脉状、条带状和团块状,其中地面能谱铀含量最高可达  $1\ 800 \times 10^{-6}$ 。Z17-19 含铀矿物以原生晶质铀矿为主,粒径介于 50~600  $\mu\text{m}$  之间,呈自形、半自形被黑云母、微斜长石、钾长石和石英等矿物包裹,或分布在造岩矿物粒间,发育少量铀石、铀钍石及硅钙铀矿<sup>[21]</sup>。

经钻探揭露,矿床平均品位为 0.018%,最大值 0.249%。矿床 Z17 地段白岗岩矿体倾向 115°,倾角介于 45°~60°之间,单孔矿体累计厚度最高可达 310.70 m,主要呈脉状顺层侵入于卡塞布组的含石榴子石黑云母片岩中。白岗岩中的石英呈烟灰色,整体上白岗岩蚀变较弱,局部矿化较强的白岗岩发生伊利石化和硅化等,局部可见有黄色次生铀矿物——硅钙铀矿。矿床南部 Z19 地段白岗岩矿体倾向 330°,倾角介于 45°~60°之间,主要呈脉状顺层侵入于卡里毕比组大理岩与卡塞布组含石榴子石黑云母片岩及阿兰迪斯组黑云母片岩接触带附近。单孔矿体累计厚度最高可达 148.80 m,铀矿化品位最高为 0.178%,铀矿物以晶质铀矿为主,次生铀矿物硅钙铀矿发育。Z19 号带铀矿化品位明显高于 Z17 号带,大部分钻孔均有铀品位超过 0.1% 的矿段,铀矿化较强的白岗岩明显发生赤铁矿化、碱交代、伊利石化和高岭石化蚀变,推测 Z19 号带矿体被晚期热液改造,铀进一步富集。

### 2.2 铀成矿主要控制因素

通过对区域成矿地质背景、地质演化特征分析以及对罗辛、Z17-19 和其他白岗岩铀矿(点)调查评价,归纳、总结了白岗岩型铀矿控制因素。白岗岩铀成矿主要受穹隆构造、褶皱、区域性断裂构造、地层(接触带)、白岗岩、脉岩及晚期热液蚀变等多种因素控制<sup>[22]</sup>。

穹隆构造:区域白岗岩型铀矿床发育位置统计结果表明,矿床定位于 NE 向-NNE 向穹隆构造的边缘,尤其是其转折部位。穹隆转折端

由于应力集中的部位常常断裂构造发育,是岩体侵位的有利地段,同时造山运动的晚期由于应力方向转换造成穹隆的长轴方向发生了逆时针转动,产生了楔形张性空间<sup>[23]</sup>,是含矿白岗岩体侵位的有利空间。如罗辛铀矿就产出于罗辛穹隆的长轴转折端。

断裂构造:区域上铀矿床的定位主要受千岁兰断裂带控制(图 1)。罗辛矿床定位受穹隆转折端与 NE 向 SJ 断裂控制,主矿体发育在 SJ 断裂蚀变带内。湖山矿床受 NE 向断裂和褶皱控制<sup>[24]</sup>,断裂带是白岗岩侵入的重要通道<sup>[11]</sup>。断裂构造不仅致使岩层破碎,有利矿物质活化、迁移与富集,也是后期热液活动、矿化叠加富集的重要场所。

地层接触带:罗辛、湖山在内的大部分矿床的矿化白岗岩主要侵入于可汗组与罗辛组,部分铀矿化发育在卡里毕比组和卡塞布组接触带,如瓦伦西亚矿床、欢乐谷地区和 Z17-19 矿床。其中,罗辛组和卡里毕比组的大理岩是一个铀成矿有利因素,含矿岩浆向上侵入过程中,与罗辛组和卡里毕比组的大理岩发生脱碳反应,增加了包裹体气相中  $\text{CO}_2$  含量,使岩浆更易沸腾,促进铀的沉淀<sup>[16]</sup>。

白岗岩:是铀矿赋存的唯一围岩,主要是 D 型白岗岩,其次为 E 型白岗岩。白岗岩呈脉状、群脉状和透镜状沿层理、不同岩性接触面及构造破碎带侵入罗辛组、可汗组及卡塞布组中。白岗岩是岩浆演化晚期产物,其来自古老基底的深熔作用<sup>[25]</sup>,而源区岩性的复杂性以及熔融的不均一性形成了不同类型的白岗岩<sup>[26-27]</sup>。

热液蚀变:含矿白岗岩形成后发育一期热液蚀变<sup>[28]</sup>,早期的铀矿体经历了热液蚀变铀矿物迁移再富集,罗辛矿床、湖山矿床和 Z17-19 矿床富矿体地段都存在明显的热液改造现象。矿区热液蚀变主要发育硅化、赤铁矿化、钾化、绢云母化、绿泥石化和高岭石化等<sup>[21,29,30]</sup>。

### 2.3 铀成矿预测要素

根据矿体特征及控矿要素分析,识别了铀成矿区域成矿地质环境、成矿特征及易判别的物理化学遥感及放射性综合信息特征,厘定了罗辛矿区铀成矿预测要素(表 3)。

表3 罗辛矿区铀成矿预测要素一览表

Table 3 Lists of prediction elements in Rössing mining area

区域预测要素	描述内容	分类		
区域成矿地质环境	大地构造单元	达马拉造山带南部中央带	重要	
	区域构造	罗辛穹隆东南侧-西南侧褶皱转折端, NE向次级褶皱发育区; NE向奥玛鲁鲁断裂和千岁兰断裂夹持区	必要	
	含铀白岗岩	区域发育多期白岗岩,呈脉状、透镜体状侵入罗辛组、可汗组及卡塞布组片岩、片麻岩中。其中D型、E型白岗岩中铀矿化明显	必要	
	有利地层	罗辛组、可汗组及卡塞布组片岩、片麻岩中层理发育,为白岗岩侵入提供了良好的场所,此外,不同时代地层接触面、不整合面也是白岗岩侵入的有利空间	必要	
	区域成矿特征	成矿类型	白岗岩型(表生淋滤叠加)	重要
		铀矿化信息	铀矿床、矿点、矿化点和异常点	必要
		控矿构造	NE向褶皱、断裂带控制白岗岩体侵入,白岗岩体整体呈NE向,其产状与地层层理一致。研究区南部部分地段受褶皱转折扭动呈近EW向	必要
		岩脉	含矿白岗岩呈岩脉状顺层侵入片岩、片麻岩中	重要
	围岩蚀变	不同地段铀矿围岩蚀变差异明显。全区发育硅化、绿泥石化、绢云母化、高岭土化等, SJ矿床浅部次生铀矿化发育, SK碱交代强烈, Z19赤铁矿化强烈, Z25、Z23电气石化蚀变明显	重要	
	物化遥及放射性综合信息特征	放射性特征	航空放射性测量值岩体中 $\geq 12 \times 10^{-6}$ 的铀高场区 地面 $\gamma$ 铀异常区	重要 重要
电磁异常特征		电磁测量推断白岗岩产状及深度 电磁测量解译推断的线型构造	重要 次要	
遥感特征		遥感解译推断的断裂、褶皱	重要	
		遥感提取赤铁矿化、伊利石化和绿泥石化等热液蚀变信息	次要	

### 3 铀成矿预测及资源潜力估算

通过对罗辛、Z17-19、湖山、SH、Z23和Z25等矿床(点)研究基础上,厘定了铀成矿预测要素,参照《区域铀矿资源潜力评价指南:EJ/T 551—2018》开展铀成矿预测区圈定及资源量估算<sup>[31]</sup>。

#### 3.1 铀成矿预测要素识别与提取

在对预测区典型铀矿床研究基础上,总结成矿、控矿规律,识别出7种预测要素:铀矿产地缓冲区、白岗岩分布区、区域构造缓冲区、大理岩外接触带、蚀变发育区、航空放射性铀异常区及地面能谱异常区。

##### 3.1.1 铀矿产地预测要素

根据铀矿床规模不同,对矿床、矿点进行缓冲,其中超大型矿床缓冲半径2 km,一般矿床缓冲半径为1 km,矿点缓冲半径为500 m,异常点缓冲半径100 m。

##### 3.1.2 白岗岩体(脉)预测要素

白岗岩是铀矿的主要赋矿围岩,其中D型、E型白岗岩含铀矿物。由于地质图中无法区分不同类型白岗岩,所有白岗岩面文件参与预测,细脉状白岗岩线文件按10 m半径缓冲成区

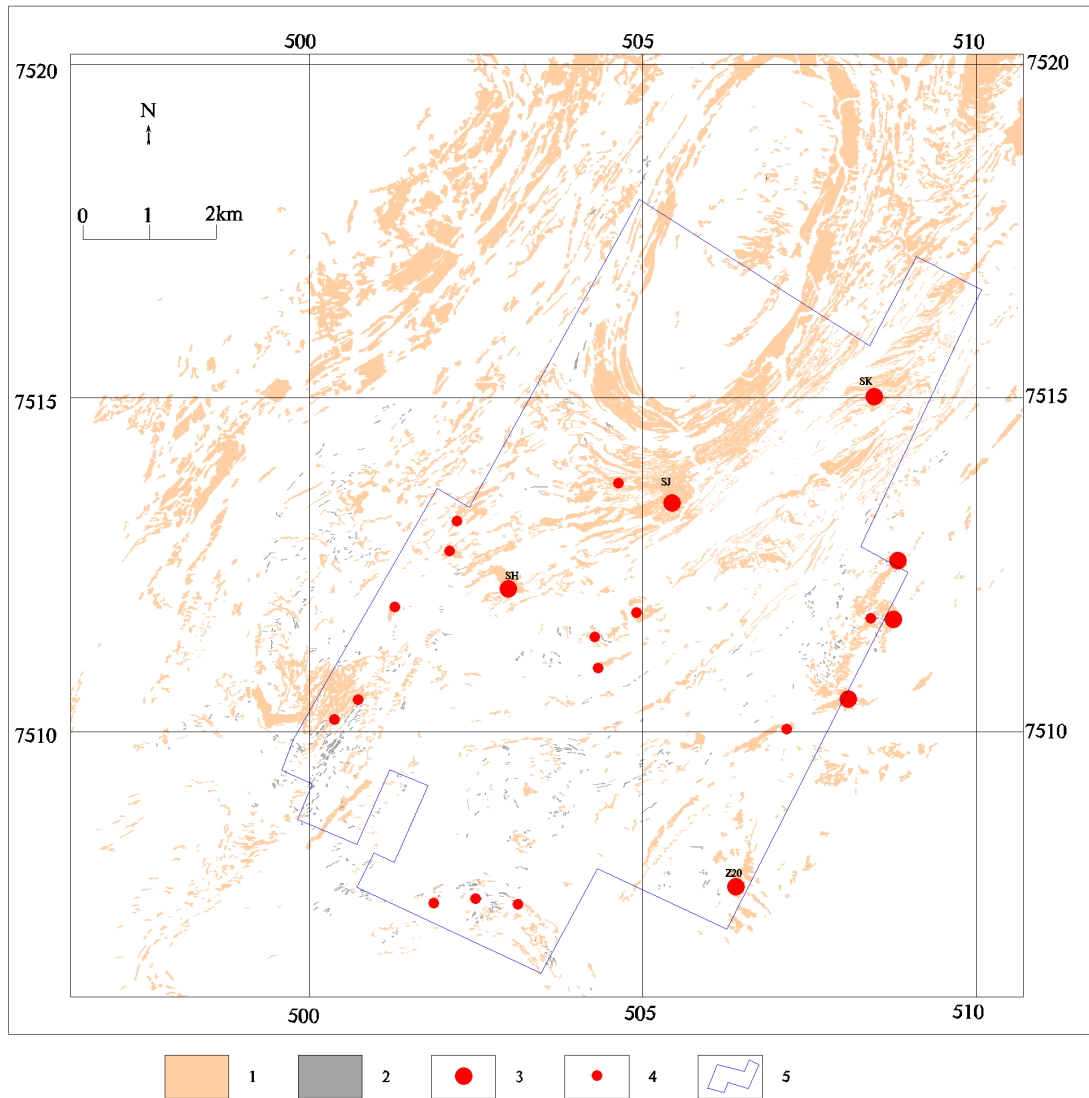
参与预测(图3)。

##### 3.1.3 构造缓冲区预测要素

白岗岩发育受褶皱、构造和韧性剪切带等多种因素控制。总体来看,白岗岩脉呈NE向分布,受褶皱影响,部分地段呈NNE向、近EW向展布。提取区域性NE向构造,以1 km为范围进行缓冲作为铀成矿有利范围。小型构造以100 m为半径进行缓冲作为成矿有利范围(图4)。

##### 3.1.4 大理岩预测要素

铀矿勘查、采冶结果表明,大理岩是铀沉淀富集的一个有利条件。大理岩本身铀含量极低,但其易破碎,为铀矿沉淀、富集提供了环境条件<sup>[20]</sup>。罗辛铀矿含矿白岗岩侵入的地层有罗辛组、可汗组和卡塞布组,但其都发育在大理岩外接触带。SJ矿床罗辛组大理岩发育,Z17-19矿床富集部位发育在卡里毕比组大理岩与卡塞布组片岩接触带的白岗岩中,欢乐谷矿床在大理岩底部接触带白岗岩中揭露到铀矿体。Z21、Z25矿体也发育在大理岩接触带附近。因此提取罗辛组、卡里毕比组大理岩外接触带200 m缓冲区为铀成矿预测要素(图5)。



1—白岗岩；2—细脉状白岗岩缓冲区（10 m）；3—铀矿床；4—铀矿点、矿化点；5—罗辛矿区范围。

1-Alaskite; 2-The buffer of alaskite vein (10 m); 3-Uranium deposits; 4-Uranium occurrences, prospectives; 5-The boundary of Rössing mining licence.

图3 罗辛矿区白岗岩与矿床分布叠合图

Fig. 3 Overlay map of the alaskite and uranium deposits in the Rössing mine

### 3.1.5 热液蚀变预测要素

热液蚀变范围主要是通过遥感蚀变提取，与铀成矿关系密切的蚀变为赤铁矿化、伊利石化和绿泥石化等，3种蚀变范围叠加作为一个预测要素(图6)。

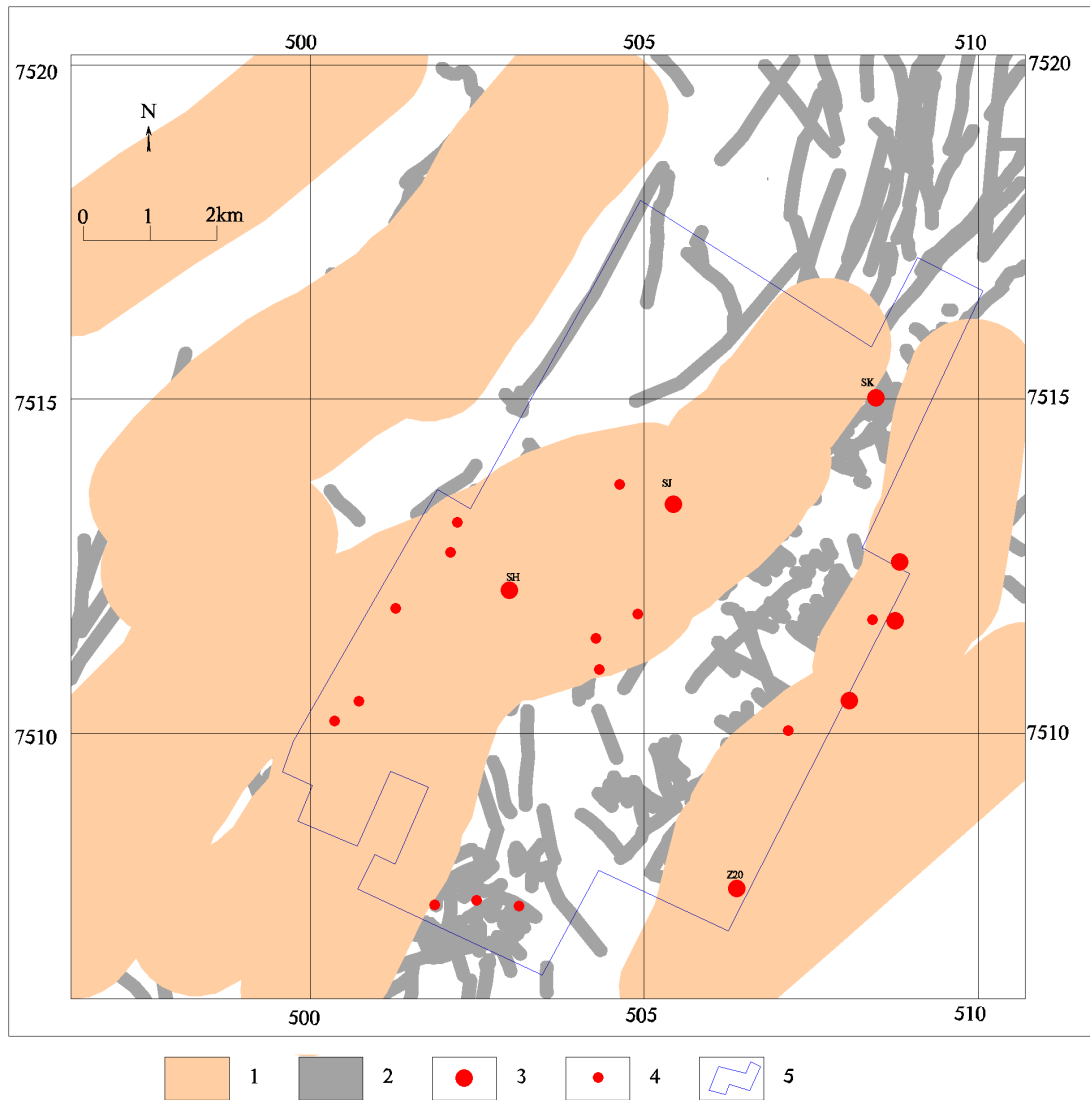
### 3.1.6 航空放射性异常预测要素

航空放射性U、Th和K数据处理常见的比值参数有Th/U、U/K、(Th+U)/K、(K+U)/Th、KU/Th和U<sup>2</sup>/Th等。通过对不同参数成图对比，认为单U含量异常是最直接的指示因素，整体上能够反映出白岗岩矿化范围。根据航空放射

性异常范围与已知铀矿床(点)分布关系分析提取了航空放射性 $U \geq 12 \times 10^{-6}$ 异常区作为预测要素(图7)。

### 3.1.7 地面 $\gamma$ 能谱预测要素

实地调查结果表明：地面 $\gamma$ 能谱铀异常范围能够精细反映铀矿化分布范围。笔者对重点航空放射性铀异常Z17-19、Z21和Z25-Z23-SH地段开展了地面 $\gamma$ 能谱测量，分别提取地面 $\gamma$ 能谱异常区参与成矿预测。分别以 $46 \times 10^{-6}$ 、 $78 \times 10^{-6}$ 和 $90 \times 10^{-6}$ 为异常下限圈定异常范围作为预测要素(图8)。



1—区域性构造缓冲区 (1 000 m); 2—小型构造缓冲区 (100 m); 3—铀矿床; 4—铀矿点、矿化点; 5—罗辛矿区范围。  
 1-The buffers of regional structures (1 000 m); 2-The buffers of normal faults (100 m); 3-Uranium deposits; 4-Uranium occurrences, prospectives; 5-The boundary of Rössing mining licence.

图 4 罗辛矿区构造缓冲区分布及铀矿床位置叠合图

Fig. 4 Overlayer map of structural buffers and uranium deposits in the Rössing mine

另外,重点异常地段开展了电磁剖面测量,解译了白岗岩深部发育情况,为成矿预测的预测深度提供了依据。

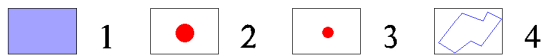
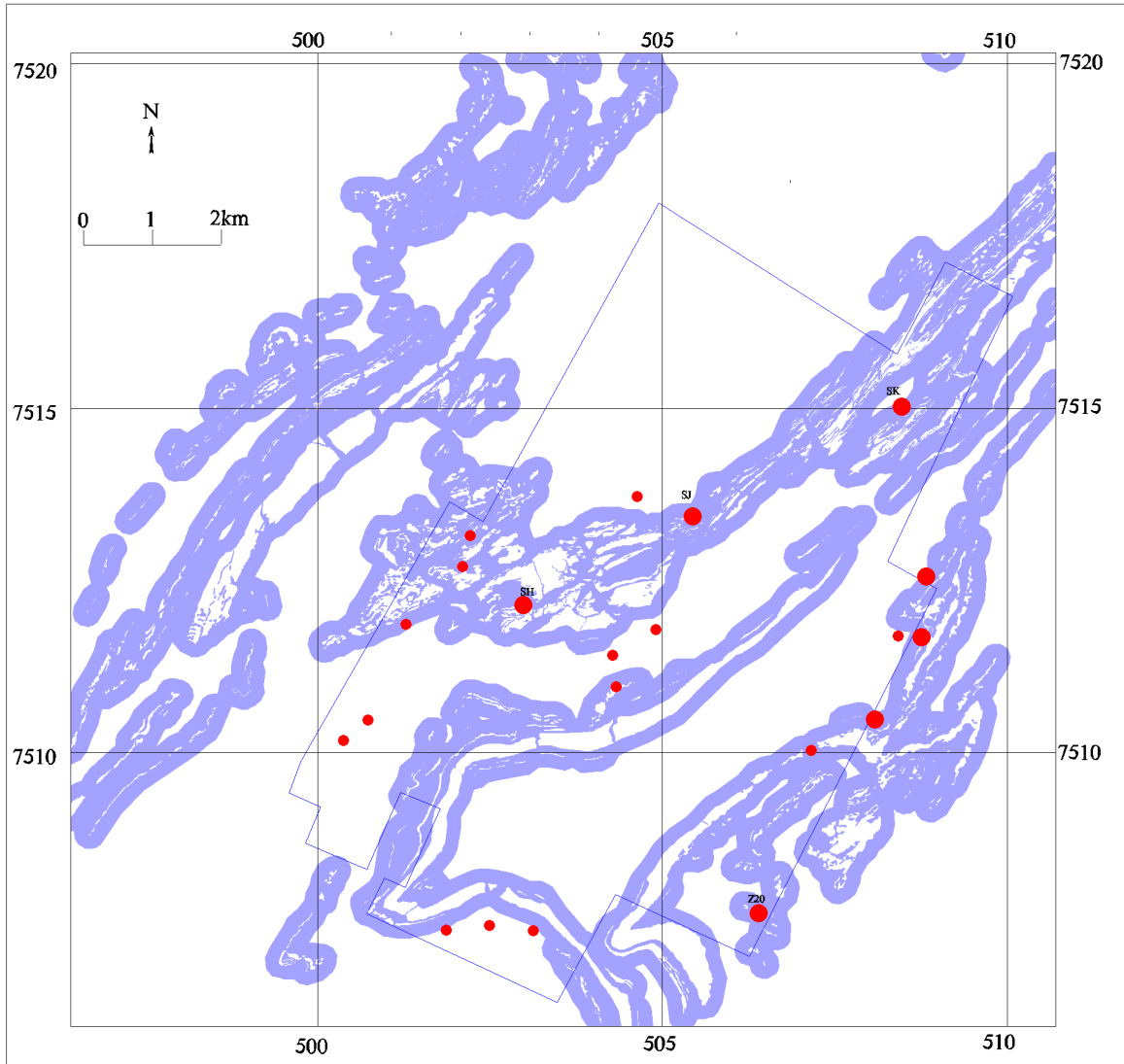
### 3.2 铀成矿预测过程

采用综合信息地质单元法,利用地质综合信息计算各个预测单元成矿有利度(后验概率等),并以单元成矿有利度为依据划分预测区。笔者选择 MRAS 软件平台以特征分析法进行成矿有利度计算,并圈定预测区。

以 100 m×100 m 为单元网格,以矿产地缓冲区、白岗岩、地面 γ 能谱异常区及航空放射性

异常区为基本要素,选取相似系数法开展预测要素分析,以 SJ、SK、SH、Z25、Z21 和 Z25 等矿床(点)为模型,用特征分析法,计算各预测网格单元中成矿有利度值,初步圈定成矿有利区。

将确定的 7 个预测要素作为特征分析法的预测专题图层,以矿床(点)点文件作为矿点图层,12 个矿床(点)所在预测区为模型进行预测分析。选用矢量长度法(平方和法)作为变量权的计算方法,根据标志权系数的计算结果分析,选择合适阈值,所有预测要素都参与成矿有利度计算,得到每个预测区的成矿有利度分



1—大理岩外接触带缓冲区 (200 m); 2—铀矿床; 3—铀矿点、矿化点; 4—罗辛矿区范围。

1-Contact zones (200 m) of marble; 2-Uranium deposits; 3-Uranium occurrences, prospectives; 4-The boundary of Rössing mining licence.

图 5 罗辛矿区大理岩外接触带缓冲区与矿床位置叠加图

Fig. 5 Overlay map of contact zones of marble and uranium deposits in the Rössing mine

类。结合地质背景、预测要素空间分布特征分析成矿有利度值与成矿的关系,剔除已知矿床内预测区及罗辛矿权范围外预测区,优选铀预测区 14 片,其中 A 类 5 片、B 类 4 片和 C 类 5 片(图 9)。

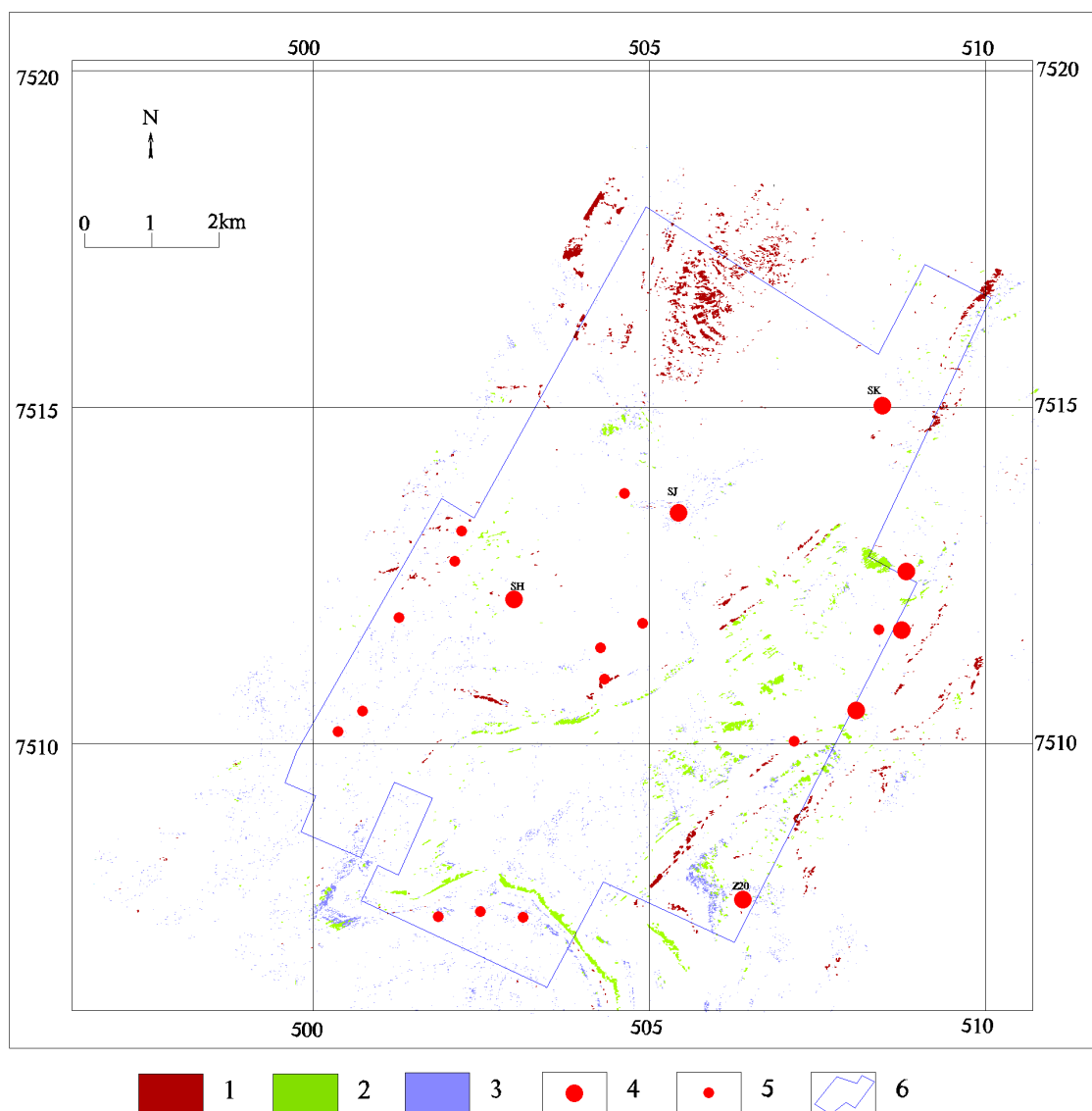
### 3.3 铀资源潜力估算

选择 SJ、SK、SH、Z20 和欢乐谷矿床为模型区,根据地质成矿条件将未知地区与已知成矿区对比,采用体积法预测罗辛矿区 500 m 以浅

铀资源为 14 1361 t。

根据区域白岗岩型铀矿床资源储量、品位等参数,建立罗辛地区铀矿床品位-吨位模型,预测评价单元中可能存在的矿床数按 0.9、0.5 和 0.1 的概率为 7、11 和 16;根据建立的模型进行蒙特卡罗模拟,预测罗辛矿区 500 m 以浅资源为 153 687 t,品位为 0.014 %。

两种预测方法预测资源误差为 8 %,预测结果可信度高。取体积法预测结果,即矿区



1—赤铁矿化蚀变范围; 2—绿泥石化蚀变范围; 3—伊利石化蚀变范围; 4—铀矿床; 5—铀矿点、矿化点; 6—罗辛矿区范围。  
 1—Zones of hematitization; 2—Zones of illitization; 3—Zones of chloritization; 4—Uranium deposits; 5—Uranium occurrences, prospectives; 6—The boundary of Rössing mining licence.

图 6 罗辛矿区赤铁矿化、伊利石化和绿泥石化蚀变与铀矿床位置叠合图

Fig. 6 Distribution of zones of hematitization, illitization, chloritization and uranium deposits in the Rössing mine

500 m 以浅铀资源为 141 361 t。

### 3.4 预测区成矿潜力评价

根据预测区分类, A 类预测区成矿条件好, 最有希望发展为铀矿床的预测区。针对 A 类预测区分析其成矿条件。

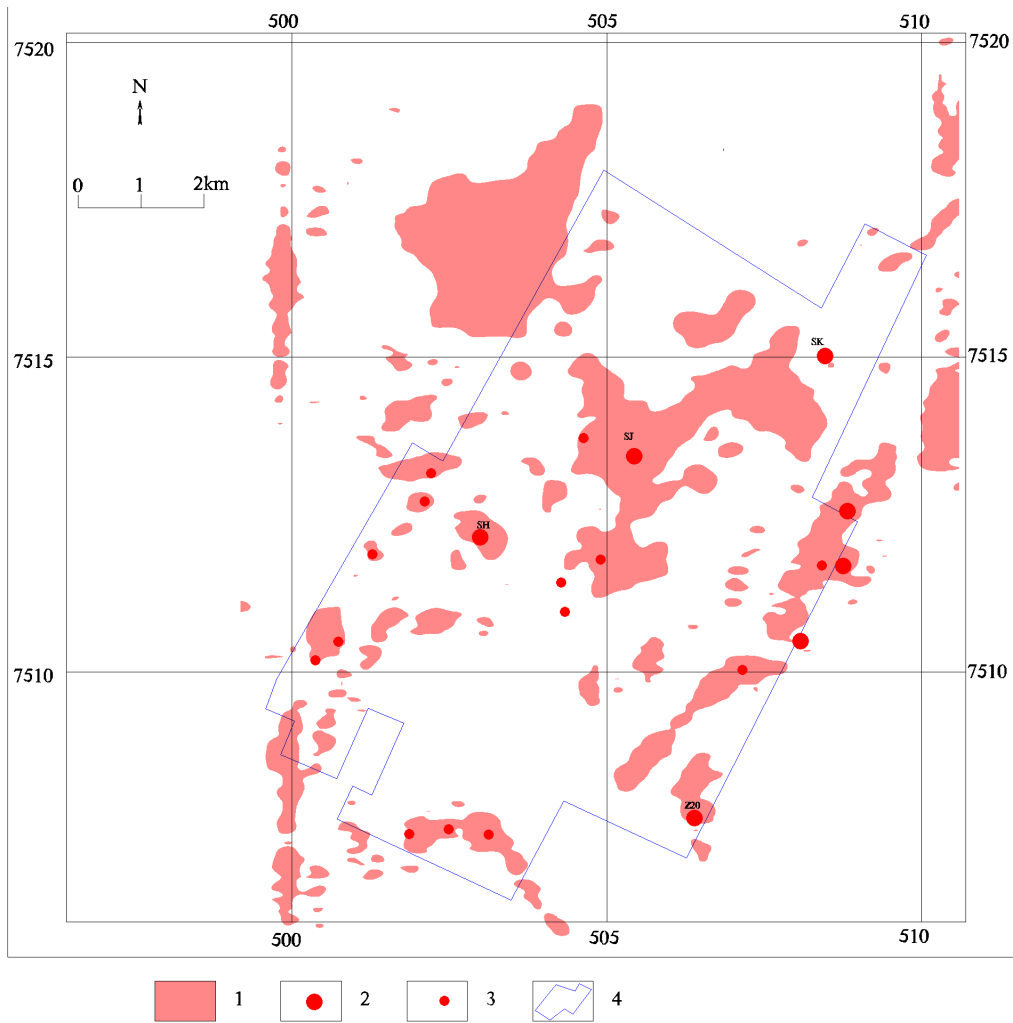
#### 3.4.1 A1 预测区

A1 预测区为 Z17-19 异常带, 面积为 5 km × (100~600)m, 地表白岗岩呈透镜体大面积出露, 整体呈 NE 向带状分布, 主要为 D 型

含矿白岗岩。地面  $\gamma$  能谱异常明显, 最高达  $1.845 \times 10^{-6}$ , 航空放射性异常明显, 异常带分布在卡塞布组与卡里毕比组接触带。经钻探揭露评价已落实为特大型铀矿产地, 矿床平均品位为 0.018%, 最大值 0.249%, 单孔铀矿体累计厚度最大可达 310.70 m (钻孔 Z1701-01)。

#### 3.4.2 A2 预测区

A2 预测区为 Z21 异常带, 异常带规模为 1 km × (50~100)m, 航空放射性异常明显, 地面  $\gamma$  能谱异



1—航空放射性U异常范围 ( $U \geq 12 \times 10^{-6}$ )；2—铀矿床；3—铀矿点、矿化点；4—罗辛铀矿权区。

1—Abnormal range of airborne uranium ( $U \geq 12 \times 10^{-6}$ )；2—Uranium deposits；3—Uranium occurrences, prospectives；4—The boundary of Rössing mining licence

图7 罗辛地区航空放射性U异常区与矿床位置叠合图(航空放射性数据据罗辛矿山资料修改)

Fig. 7 Overlay map of airborne radioactive uranium anomaly and uranium deposits in the Rössing mine (Modified after the information provided by Rössing mine)

常值最高达  $2.982 \times 10^{-6}$ 。经地面路线调查查证, Z21 异常带矿化白岗岩有 2 条, 一条近 EW 向沿着罗辛组和楚斯组接触带呈弧形出露, 西侧主要为 D 型白岗岩, 矿化条件好, 向东 D 型白岗岩演化为 E 型白岗岩, 矿化强度变弱; 另一条白岗岩脉体呈 NE 向侵入楚斯组 3 段大理岩边部, 岩性为 D 型白岗岩。在 2 条异常带相交部位, 铀矿化富集明显, 是下一步铀矿勘查的重点地段, 该预测区具有发展为中型矿床潜力。

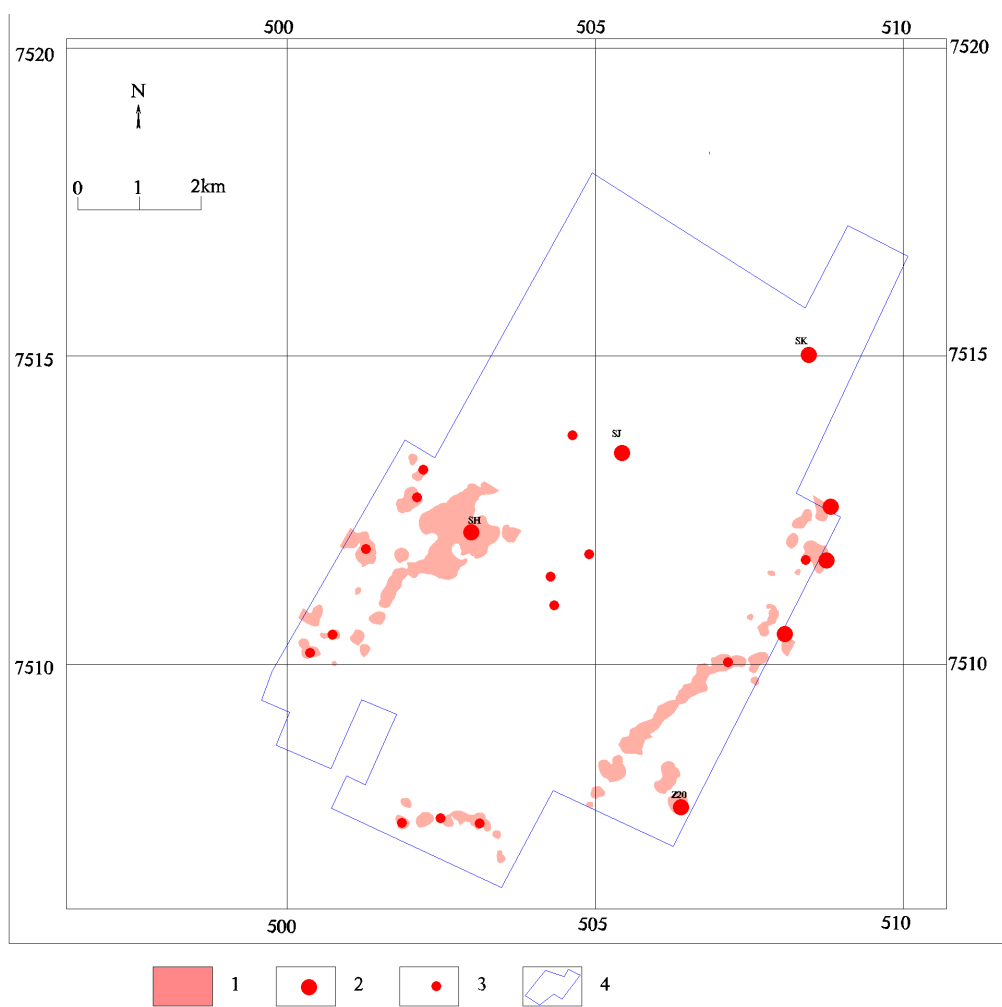
### 3.4.3 A3 预测区

A3 预测区为 Z25 异常带, 航空放射性异常明显, 异常面积达  $500 \text{ m} \times (100 \sim 400) \text{ m}$ , 地表出露大面积白岗岩, D 型、E 型含矿白岗岩发

育。能谱异常明显, 最高达  $6.000 \times 10^{-6}$ 。白岗岩蚀变强烈, 发育碱交代、赤铁矿化和绿泥石化, 富矿体呈透镜状产出, 黑云母、电气石聚集, 赤铁矿化强烈。经钻孔查证, 揭露矿化白岗岩视厚度 58.20 m, 最高品位为 0.140%, 平均品位 0.015%, 具有形成大型矿床潜力。

### 3.4.4 A4 预测区

A4 预测区位于 SH 南侧, 为航空放射性异常区, 异常带长 800 m, 宽介于 100~300 m 之间。白岗岩呈 NE 向群脉状侵入可汗组地层。地面出露白岗岩能谱异常明显, 最高达  $2.700 \times 10^{-6}$ 。推断矿化白岗岩与 SH 主体白岗岩被晚期 EW 向构造切断, 其深部可能发育较大规模矿化白岗岩, 具



1—地面γ能谱U异常区; 2—铀矿床; 3—铀矿点、矿化点; 4—罗辛铀矿权区。

1-Uranium abnormal range of ground gamma spectrometry; 2- Uranium deposits; 3-Uranium occurrences, prospectives; 4-The boundary of Rössing mining licence.

图8 地面γ能谱异常范围与矿床矿点及矿区范围叠合图

Fig. 8 Overlayer map of ground gamma spectrometry and uranium deposits in the Rössing mine

有形成中大型矿床潜力。

### 3.4.5 A5 预测区

A5 预测区位于 SH 矿床北西侧, 罗辛组和可汗组接触带附近, 白岗岩呈 NE 向脉状侵入, 异常带长约 1 km, 宽 60~150 m 不等, 岩体出露规模较大。航空放射性异常明显, 地面 γ 能谱异常平均值  $276 \times 10^{-6}$ , 最高可达  $1\ 786 \times 10^{-6}$ , 具有形成中型以上规模矿床潜力。

## 4 结 论

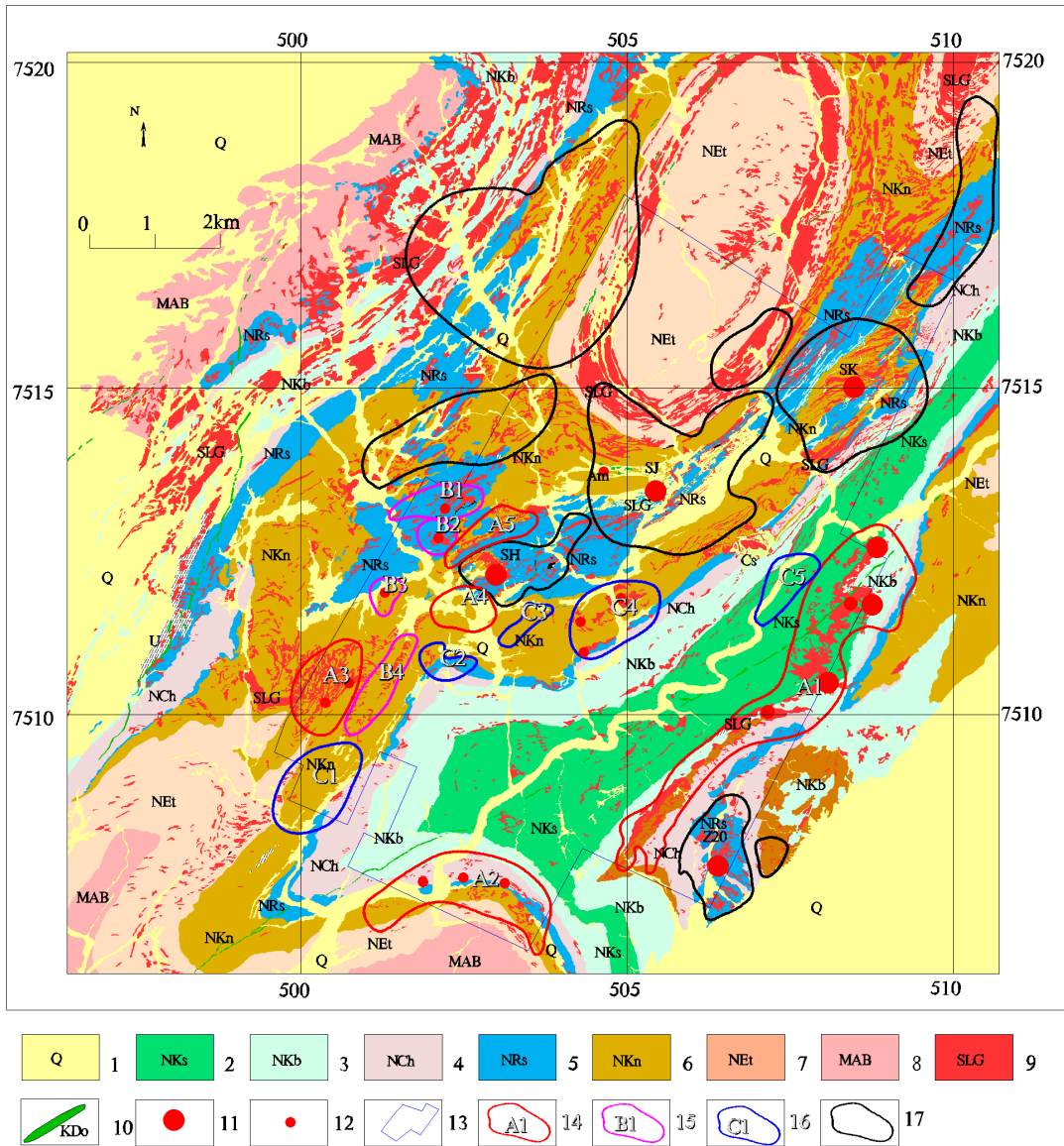
通过对纳米比亚罗辛矿区典型矿床研究, 总结白岗岩型铀成矿规律及成矿特征, 对矿区铀成矿潜力进行了评价, 为下一步铀矿勘查提供了依据。

1) 纳米比亚白岗岩型铀矿是达马拉造山带多种地质因素相互耦合的复杂地质过程产物, 其空间定位受控于穹隆、断裂、褶皱、岩体、岩石物理-化学条件、矿后热液蚀变及表生改造等多种因素制约。

2) 在对区域地质资料二次开发基础上, 提取了预测要素进行铀成矿预测, 预测铀成矿远景区 14 片, 预测铀资源约 14 万 t, 矿山外围找矿前景十分可观。

3) 对找矿预测区的成矿条件进行了评价, 经钻探揭露, 落实特大型铀矿床一处, 为进一步铀矿勘查指明了方向。

总之, 罗辛地区白岗岩型铀矿成矿条件十分优越, 其深部和外围仍具有巨大的找矿潜力。面



1—第四系；2—卡塞布组片岩、片麻岩；3—卡里毕比组大理岩、石英岩、片岩；4—楚斯组混积岩；5—罗辛组大理岩、片麻岩、石英岩；6—可汗组片麻岩、角闪岩；7—艾杜西斯组片岩、石英岩、大理岩；8—阿巴比斯组变质杂岩；9—白岗岩；10—粗玄武岩脉；11—铀矿床；12—铀矿点、矿化点；13—罗辛矿权范围；14—A类预测区；15—B类预测区；16—C类预测区；17—已知矿床及矿权外预测区。

1-Quaternary: alluvium; 2-Kuiseb formation: Schist and gneiss; 3-Karibib formation: marble, calc-silicate rock, pelitic and semi-pelitic schist and gneiss; 4-Chuos formation: diamictite, calc-silicate rock, pebbly schist, quartzite, tillite; 5-Rössing formation: marble, pelitic schist and gneiss, biotite hornblende schist, migmatite, calc-silicate rock, quartzite, metaconglomerate; 6-Khan formation: banded and mottled amphibole gneiss, hornblende-biotite schist, biotite schist and gneiss, amphibolite, metaconglomerate; 7-Etuisis formation: schist and gneiss, quartzite, marble; 8-Abbabis complex; 9-Alaskite; 10-Coarse basaltic dike; 11-Uranium deposit; 12-Uranium ore occurrence, mineralized point; 13-The boundary of Rössing mining licence; 14-Level A prospecting area; 15-Level B prospecting area; 16-Level C prospecting area; 17-Known deposit or prospecting area outside the boundary of Rössing mining licence.

图9 罗辛地区成矿预测区及其分类

Fig. 9 The predicted prospecting area and its classification in the Rössing mine

对后备资源不足的困境,矿山应加大勘查工作投入,A类成矿预测区是下一步勘查的重点方向。同时需要加强对成矿后构造及富矿定位条件研究。

致谢:中国铀业(纳米比亚)矿业有限公司提供了大量的地质数据资料和野外工作便利条件,在此表示衷心感谢!

## 参考文献

- 1 宋继叶,秦明宽,蔡煜琦,等.纳米比亚铀资源勘查开发现状、投资环境与建议[J].地质论评,2024,70(6):2370-2380.  
SONG Jiye, QIN Mingkuan, CAI Yuqi, et al. Current situation of uranium resources exploration and development, investment environment and related exploration and development suggestions in Namibia[J]. Geological Review, 2024, 70(6):2370-2380(in Chinese).
- 2 宋继叶,蔡煜琦,林双幸,等.非洲铀资源勘查开发现状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(in Chinese).
- 3 FOSTER D A, GOSCOMBE B D, NEWSTEAD B, et al. U-Pb age and Lu-Hf isotopic data of detrital zircons from the Neoproterozoic Damara Sequence: Implications for Congo and Kalahari before Gondwana [J]. Gondwana Research: International Geoscience Journal, 2015, 28(1):179-190.
- 4 MILLER R M G. The Pan-African Damara Orogen of South West Africa/Namibia [C]//MILLER R Mc G (Ed.). Evolution of the Damara Orogen of South West Africa. Special Publication of the Geological Society of South Africa, 1983, 11:431-515.
- 5 NEX P A M. Tectono-metamorphic setting and evolution of granitic sheets in the Goanikontes area, Namibia[D]. Dublin: National University of Ireland, 1997.
- 6 COWARD M P. The tectonic history of the Damara belt [C]//Miller, R. McG. (ed.), Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia: Geological Society of South Africa, Special Publication, 1983: 409-421.
- 7 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 Gaudeanmus area, Namibia [J]. Geological Review, 2016, 62(1):83-93(in Chinese).
- 8 KASCH K W. Regional P-T variations in the Damara orogen with particular reference to early high-pressure metamorphism along the southern margin [C]//Miller R Mc G. Evolution of the Damara orogen. Special Publications of the Geological Society of South Africa, 1983, 11:243-253.
- 9 MILLER, R. Mc G. Neoproterozoic and early Palaeozoic rocks of the Damara orogen [C]//MILLER, R. Mc G. The geology of Namibia 2. Windhoek: Ministry of Mines and Energy, Geological Survey, 2008, 1-410.
- 10 LONGRIDGE L, GIBSON R L, KINNAIRD J A, et al. Constraining the timing of deformation in the southwestern Central Zone of the Damara Belt, Namibia [J]. Geological Society London Special Publications, 2011, 357(1):107-135.
- 11 BASSON I J, GREENWAY G. The Rössing uranium deposit: A product of late-kinematic localization of uraniferous granites in the central zone of the Damara Orogen, Namibia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 38(5):413-435.
- 12 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 Huaifeng, LU Jianjun. Geological characteristics, ore-controlling factors and genesis analysis of Husab uranium deposit in Namibia [J]. World Geology, 2018, 37(1):105-123(in Chinese).
- 13 NEX P A M, KINNAIRD J A, OLIVER G J H. Petrology, geochemistry and uranium mineralization of post-collisional magmatism around Goanikontes, Southern Central Zone, Damara Orogen, Namibia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2001, 33:481-502.
- 14 王生云.纳米比亚欢乐谷地区花岗岩地球化学特征及成因[D].北京:核工业北京地质研究院,2013.  
WANG Shengyun. Geochemical characteristics and genesis of granites in Happy Valley, Namibia [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2013(in Chinese).
- 15 LONGRIDGE L, GIBSON R L, KINNAIRD J A, et al. Constraining the timing of deformation in the southwestern central zone of the Damara belt, Namibia [J]. Geological Society London Special Publications, 2011, 357(1):107-135.
- 16 CROSS A, JAIRETH S, RAPP R, et al. Reconnaissance-style EPMA chemical U-Th-Pb dating of uraninite [J]. Journal of the Geological Society of Australia, 2011, 58(6):675-683.
- 17 陈金勇.纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀成矿机理研究[D].北京:核工业北京地质研究院,2014.  
CHEN Jinyong. Study on metallogenic mechanism of alaskite type uranium deposit in Happy Valley, Namibia [D]. Beijing: Beijing Research Institute of

- Uranium Geology, 2014(in Chinese).
- 18 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. ZHANG Xiaokang, NIE Fengjun, WU Kerui, et al. Rössing large alaskite-type uranium deposit, Namibia [J]. Mineral Deposits, 2015, 34(2): 423-426 (in Chinese).
- 19 BASSON I J, GREENWAY G. The Rössing uranium deposit: A product of late-kinematic localization of uraniferous granites in the central zone of the Damara Orogen, Namibia[J]. Journal of African Earth Sciences, 2004, 38(5): 413-435.
- 20 KINNAIRD 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, 2007, 116: 69-85.
- 21 陈旭, 范洪海, 何德宝, 等. 纳米比亚罗辛地区矿化白岗岩铀矿物学研究及意义[J]. 地质论评, 2024, 70(3): 907-923. CHEN Xu, FAN Honghai, HE Debao, et al. Uranium mineralogical research and significance of mineralized alaskite in Rössing area, Namibia [J]. Geological Review, 2024, 70(3): 907-923 (in Chinese).
- 22 陈金勇, 范洪海, 何德宝, 等. 纳米比亚白岗岩型铀成矿作用评述[J]. 世界核地质科学, 2023, 40(4): 889-907. CHEN Jinyong, FAN Honghai, HE Debao, et al. A review of the mineralization of leucogranite-type uranium deposit in Namibia [J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(4): 889-907 (in Chinese).
- 23 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 Prospecting, 2012, 48(5): 1058-1066 (in Chinese).
- 24 荣建锋, 徐喆, 陶意, 等. 基于 DataMine 的自动化品位控制建模软件功效及应用——以纳米比亚湖山铀矿为例[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(5): 888-897. RONG Jianfeng, XU Zhe, TAO Yi, et al. Efficacy and application of DataMine-based automated grade control model software: A case study of Husab uranium mine in Namibia[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(5): 888-897 (in Chinese).
- 25 FAN Honghai, CHEN Jinyong, WANG Shengyun, 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.
- 26 陈旭, 范洪海, 陈东欢, 等. 纳米比亚罗辛地区白岗岩成因及铀成矿作用[J]. 地学前缘, 2023, 30(5): 59-73. CHEN Xu, FAN Honghai, CHEN Donghuan, et al. Genesis of and uranium mineralization in leucogranite, Rössing, Namibia[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(5): 59-73 (in Chinese).
- 27 徐楷, 廖志权, 胡寅秋. 纳米比亚湖山铀矿床 E 类白岗岩岩石学及地球化学特征[J]. 化工矿产地质, 2024, 46(2): 132-140. XU Kai, LIAO Zhiqian, HU Yinqiu. Petrological and geochemical characteristics of E-type alaskite in the Husab uranium deposit in Namibia [J]. Geology of Chemical Minerals, 2024, 46(2): 132-140 (in Chinese).
- 28 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中硫化物特征及 S-Pb 同位素示踪[J]. 地球学报, 2020, 94(2): 587-598. CHEN Jinyong, FAN Honghai, et al. The sulfide characteristics and S-Pb isotopic composition of leucogranite-type uranium deposit in the Gaudeamus area, central Damara belt, Namibia[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(2): 587-598 (in Chinese).
- 29 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 Gaudeamus area, Namibia[J]. Geological Review, 2013, 59(5): 962-970 (in Chinese).
- 30 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 (in Chinese).
- 31 核工业标准化研究所. 区域铀矿资源潜力评价指南: EJ/T 551—2018[S]. 北京: 核工业标准化研究所, 2018. Nuclear Industry Standardization Research Institute. Regional guidebook on potential assessment of uranium resources: EJ/T 551—2018 [S]. Beijing: Nuclear Industry Standardization Research Institute, 2018.