

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.006

# 模糊证据权方法在纳米比亚白岗岩型铀矿预测中的应用

王佳莹<sup>1,2</sup>, 曾威<sup>1,2,3\*</sup>, 张祺<sup>1,2</sup>, 陈军强<sup>1,2</sup>, 滕菲<sup>1,2</sup>, 李威<sup>4</sup>, 刘行<sup>1,2</sup>

WANG Jiaying<sup>1,2</sup>, ZENG Wei<sup>1,2,3\*</sup>, ZHANG Qi<sup>1,2</sup>, CHEN Junqiang<sup>1,2</sup>, TENG Fei<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>4</sup>, LIU Xing<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170;
3. 吉林大学, 吉林 长春 130061;
4. 四川省地质调查院, 四川 成都 610000

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;
4. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610000, Sichuan, China

**摘要:** 纳米比亚埃龙戈地区位于达马拉构造带中部, 是全球重要的铀成矿带, 但纳米比亚第四系覆盖较重, 严重影响了铀矿找矿效果。为摸清纳米比亚铀资源现状, 开展铀资源潜力评价工作, 充分利用和深度挖掘现有资料, 圈定了预测靶区, 为中国矿业企业在海外投资提供支撑。在对纳米比亚埃龙戈地区白岗岩型铀矿床控矿因素系统总结的基础上, 建立了综合信息找矿模型; 在 GeoDAS GIS 平台上, 利用非线性理论、奇异性理论及分形滤波技术, 实现了对该区隐伏构造、航放铀异常等弱缓信息的提取; 基于模糊证据权方法开展综合信息矿产预测, 圈定铀找矿远景区 7 个。通过模型检验, 验证了本次预测工作的有效性。认为 I 级远景区内第四系覆盖区还存在巨大的找矿潜力, II 级远景区也具有较好的成矿条件, 但工作程度较低, 有望实现找矿突破。

**关键词:** 成矿预测; 找矿远景区; 模糊证据权; 白岗岩型铀矿; 达马拉构造带; 纳米比亚

**中图分类号:** P619.14    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-2552(2023)08-1318-16

**Wang J Y, Zeng W, Zhang Q, Chen J Q, Teng F, Li W, Liu X. Application of fuzzy weights of evidence method in metallogenic prediction for alaskite-type uranium deposits in Namibia. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1318-1333**

**Abstract:** The Erongo area of Namibia, located in the central of Damara tectonic belt, is an important uranium metallogenic belt in the world. However, the Quaternary coverage in Namibia is heavy, which seriously affects the prospecting effect of uranium deposits. In order to find out the status of uranium resources in Namibia, we have carried out the uranium resources potential evaluation, which has made full use of and deeply excavate the existing data, delineated the prediction target area, and provided support for Chinese mining enterprises to invest overseas. Based on the systematic summary of the ore-controlling factors of the alaskite-type uranium deposits in the Erongo area of Namibia, a comprehensive information prospecting model is established. On the GeoDAS GIS platform, nonlinear theory, singularity theory and fractal filtering technology are used to extract weak and slow information such as hidden structure and

**收稿日期:** 2021-04-30; **修订日期:** 2022-03-23

**资助项目:** 中国地质调查局项目《铀铁铜铝等战略性矿产资源调查》(编号: DD20230027)、《渤海湾盆地氦气资源调查评价》(编号: DD20221668)、《纳米比亚-博茨瓦纳铀矿资源调查》(编号: DD20201148)

**作者简介:** 王佳莹(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿床学研究。E-mail: cugwjy@qq.com

\* **通信作者:** 曾威(1985-), 男, 正高级工程师, 从事矿床学研究。E-mail: 314818431@qq.com

aero-released uranium anomaly in this area. Based on the fuzzy evidence weight method, the comprehensive information mineral prediction is carried out, and 7 uranium prospecting areas are delineated. The validity of this prediction is verified by model test. The paper holds that there is still huge prospecting potential in the Quaternary coverage area of the Grade I prospect area, and the grade II prospect area also has good ore-forming conditions, which is expected to achieve a breakthrough in prospecting because of the low working degree.

**Key words:** metallogenic prediction; ore prospect areas; fuzzy weights of evidence; alaskite-type uranium deposit; Damara tectonic belt; Namibia

纳米比亚是全球最重要的铀资源国之一,其探明的铀资源量居全球第四位,非洲首位(陈军强等,2021;金若时等,2022)。同时,纳米比亚也是中国海外铀资源的重要来源地,湖山(Husab)铀矿和罗辛(Rössing)铀矿每年为中国提供大量的天然铀资源,是中国核电发展的重要铀资源保障基地之一。纳米比亚已发现大型和超大型铀矿床 10 余处,铀资源找矿潜力巨大,但纳米比亚第四系覆盖严重,严重影响了铀矿找矿效果。

因为纳米比亚铀矿资源对中国能源资源保障的重要性,对其进行资源潜力评价,摸清纳米比亚铀资源的现状和可能的潜力,划定科学的找矿有利区,具有重要意义。一方面掌握纳米比亚铀资源储量信息及进一步的找矿前景,可为国家资源决策提供技术支撑;另一方面圈定找矿有利区可以为中国矿业企业在海外找矿获取有效的预测靶区指明方向,提高找矿效果,支撑中资矿企在海外的矿业投资。因此,在遥感解译、航磁解译、航空放射性能谱等多元数据处理的基础上,结合地质数据开展纳米比亚铀矿的资源潜力评价工作,圈定找矿远景区,实现对现有资料的二次开发和深度挖掘,可以节省大量的调查和勘查资金,降低境外投资风险,对支撑服务中资企业在纳米比亚开展铀矿投资具有一定的指导意义。

纳米比亚铀矿床主要分布于达马拉造山带中央区带,矿床类型以白岗岩型为主,其资源储量约占纳米比亚总资源储量的 83%,其次为钙结岩型铀矿,约占 17%(左立波等,2015;2017)。白岗岩型铀矿是目前纳米比亚开采的唯一铀矿类型,因此本次成矿预测仅选择白岗岩型铀矿,预测区域为达马拉中部铀成矿区,所选预测区包含了纳米比亚已发现的所有铀矿床,采用方法为模糊证据权法。

证据权法是一种离散的多元统计方法,20 世纪 80 年代末,加拿大数学地质学家 Agterberg(1989)和 Bonham-Carter(1994)等将证据权法发展并应用于

矿产资源评价领域。在此基础上,Cheng et al. (1999)开发了模糊证据权方法,弥补了普通证据权方法在图层离散化时损失部分信息的不足。Cheng (2006;2008)将非线性理论特别是分形/多重分形理论、奇异性理论、广义自相似理论及模糊证据权方法引入到矿产资源评价领域,建立了较完善的基于 GeoDAS GIS 平台的找矿信息提取和成矿预测方法。该技术被广泛应用于新疆天山沙漠覆盖区、内蒙古大兴安岭草原覆盖区及福建武夷山植被覆盖区等矿产预测中,取得了较好的预测效果(成秋明等,2007;张生元等,2009;成秋明,2012;王佳营等,2019;2021;万丽等,2021)。该方法具有完善的数学地质理论做支撑(Cheng, 2006;2008;成秋明,2006;成秋明等,2009),展示了其科学性和创新性。特别是利用多重分形奇异性分析方法处理后的化探数据,可以很好地识别出覆盖区的弱缓异常信息;利用广义自相似异常分析方法(S-A 方法)分解后的物化探异常,可以很好地去除背景值的叠加影响;采用模糊证据权方法进行信息综合,可以保证证据图层信息的完整性(成秋明,2006;成秋明等,2009)。

本文利用广义自相似理论、局部奇异性理论及 S-A 分形滤波技术,在 GeoDAS GIS 平台上开展了纳米比亚埃龙戈地区微弱、低缓找矿信息的识别和提取,并基于模糊证据权方法开展了综合信息矿产预测,圈定铀矿找矿远景区,为下一步开展铀矿勘查工作提供依据。

## 1 研究区成矿地质背景

纳米比亚铀矿床主要分布于达马拉造山带中央区带,达马拉构造带是泛非造山运动的产物。Kalahari、Congo 和 Rio de la Plata 克拉通在新元古代—早古生代(650~460 Ma)发生拼合碰撞,形成了 NEE 向的达马拉带和 NNW 向的卡奥科带(Kaoko)和加力普带(Gariep)(Miller, 1983;2008;Porada, 1989;Goscombe et al., 2008)。达马拉构造

带自北向南可划分为北部地体、北部带、北部中央带、南部中央带、南部带、南部边缘带和南部地体(图1, Martin et al., 1977; 宁福俊等, 2018)。研究区位于达马拉构造带西段, 主体属于北部中央带和南部中央带, 地跨北部带和南部带, 纳米比亚几乎所有铀矿床均分布于此。达马拉造山带的主要构造走向为NE向, 在中央带发生了4次主要的构造变形事件(D1~D4), 形成了显著的穹窿构造和NNE向断裂构造, 并伴随形成了大量的同碰撞、

碰撞后花岗岩类(Coward, 1983; Miller, 1983; Oliver, 1994; Poli et al., 2001)。研究区岩浆岩主要包括基底阿巴比斯(Abbabis)杂岩中的片麻状花岗岩, 同碰撞期的斑状花岗岩、黑云母花岗岩、花岗闪长岩、淡色花岗岩、正长花岗岩等, 碰撞后的淡色花岗岩、正长花岗岩等(Miller, 2008)。铀成矿作用主要与碰撞后期花岗岩浆活动关系密切(Nex et al., 2001; Corvino et al., 2013)。研究区地层主要由前达马拉基底和新元古代达马拉层组

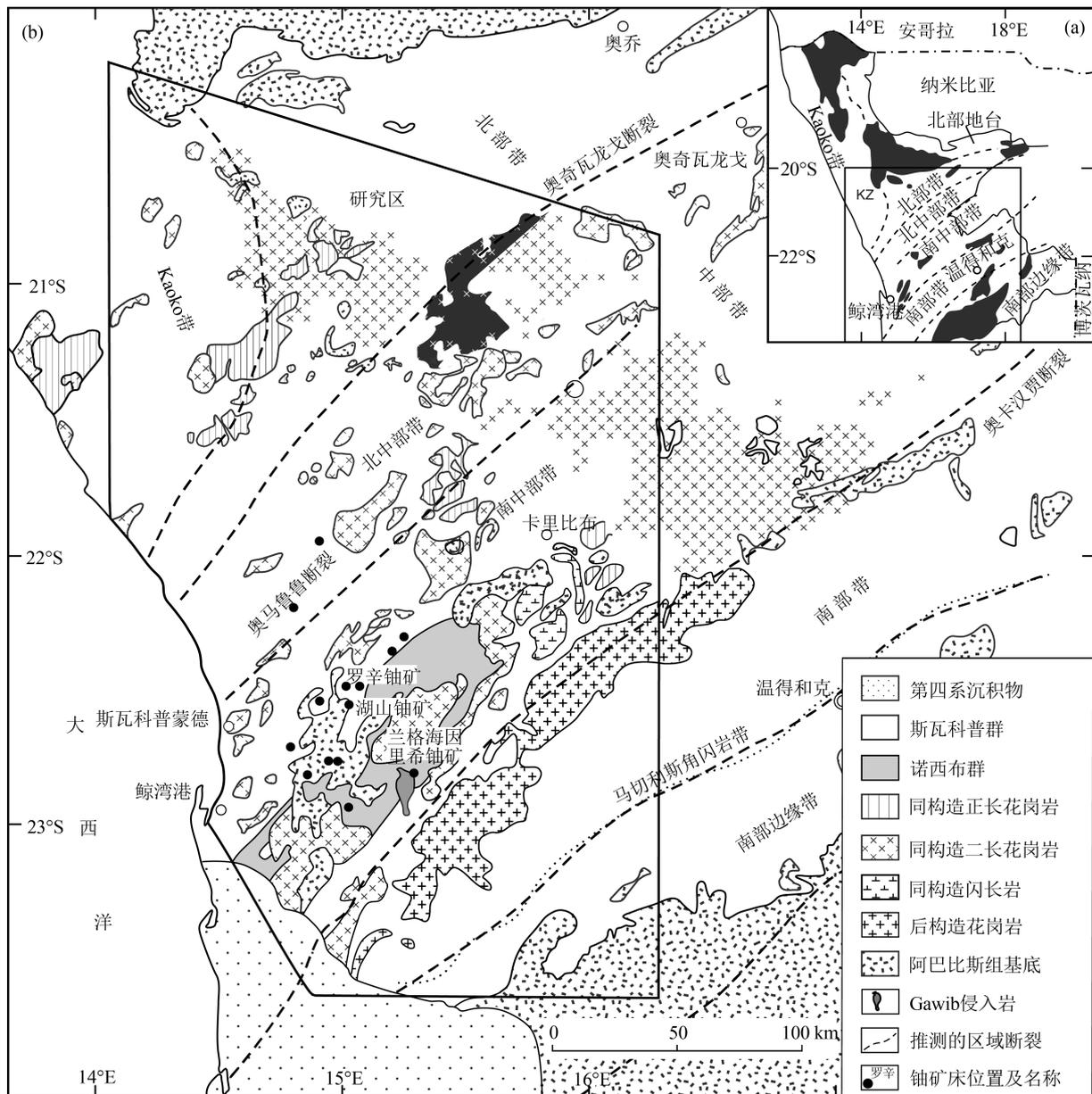


图1 纳米比亚埃龙戈地区地质简图(据宁福俊等, 2018 修改)

Fig. 1 Generalized geological map of the Erongo area, Namibia

成,前达马拉基底为阿巴比斯组(Abbabis)杂岩体,原岩形成于古元古代—中元古代(Kröner et al., 1991)。达马拉层序主要由下部诺西布群(Nosib)和上部斯瓦科普群(Swakop)组成,不整合于前达马拉基底之上(图 1)。诺西布群包括埃图西斯组(Etusis)和可汗组(Khan)。埃图西斯组主要岩性为石英岩、砾岩和石英长石片麻岩;可汗组主要为一套变质细碎岩沉积。需要注意的是,Nosib 群中见有基性和酸性火山岩,其时代为  $752 \pm 7$  Ma(De Kock et al., 2000)。斯瓦科普群可分为罗辛组(Rössing)、楚斯组(Chuoss)、卡里比组(Karibib)及卡塞布组(Kuiseb),斯瓦科普群主要由一套变碎屑岩和碳酸盐岩组成。研究区地形较平坦,第四系松散沙砾石覆盖严重,占研究区总面积的 34.6%(图 2)。

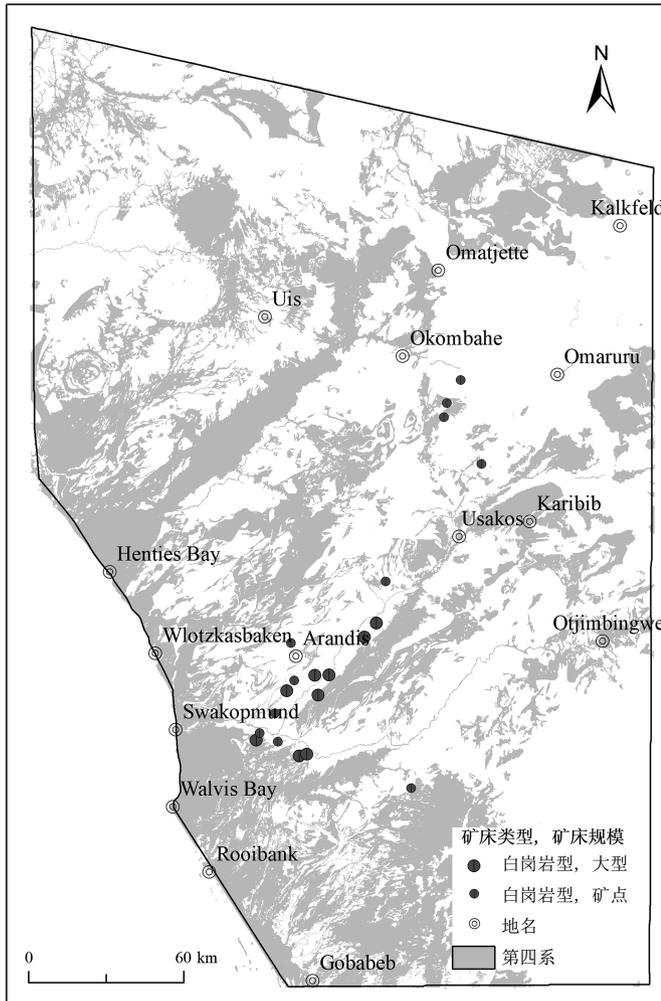


图 2 纳米比亚埃龙戈地区第四系覆盖分布图

Fig. 2 Quaternary coverage map of the Erongo area, Namibia

## 2 空间数据库建立和工作流程

### 2.1 空间数据库建立

空间数据库构建是将用于信息提取和预测的地质、矿产、物探、遥感等原始信息统一集成到一个地理信息系统平台下。本次研究将 ArcGIS 系统作为数据集成、数据管理和数据分析平台。

地质数据库:本次使用的地质数据为 1:25 万地质图,包括地层、侵入岩、岩脉、断裂等信息。

矿产数据库:研究区共收集到白岗岩型铀矿床(点)18 个,包括大型矿床 9 个,矿点 9 个。矿产数据包括经纬度、矿床规模、所处阶段、运营状态、开采方式、储量、资源量、品位、产量、回采率等属性信息。

地球物理数据库:包括航空放射性能谱数据和航磁数据(航放数据)。航放数据包括经纬度、U、Th、K 等信息,共 804770 个数据点,点距  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ ;航磁数据包括经纬度、磁场值,共 316540 个数据点,点距  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 。航磁数据经化极处理后用于成矿预测。

遥感数据库:利用 Landsat 8 数据进行构造和岩性解译,利用 Aster 数据进行铁染、镁羟基、铝羟基、青磐岩化、碳酸盐化、白云母化、钠长石化 7 类遥感异常信息的提取。利用 ENVI 5.3 软件合成研究区影像图,对图像进行辐射校正、大气校正、几何校正等预处理,再经滤波、增强、拼接等处理,得到研究区的数字图像。

### 2.2 矿产预测流程

在系统研究纳米比亚埃龙戈地区区域地质特征和典型矿床特征的基础上,全面分析控矿因素,构建综合信息预测模型,进而提取地质、地球物理、遥感等有用找矿信息,以 GeoDAS GIS 预测软件为平台,运用局部奇异性原理提取弱缓异常,运用分形滤波技术区分背景与异常,运用模糊证据权方法进行信息综合,形成预测后验概率图,进而确定找矿远景区,具体的研究思路流程见图 3。

## 3 综合信息找矿模型的构建

研究区现已发现白岗岩型铀矿 18 个,其中大型矿床 9 个,矿点 9 个。前人对纳米比亚白岗岩型铀矿成矿机制及控矿因素进行了较系统的总结(Nex et al., 2001; Corvino et al., 2013; 聂江涛等, 2013; 陈

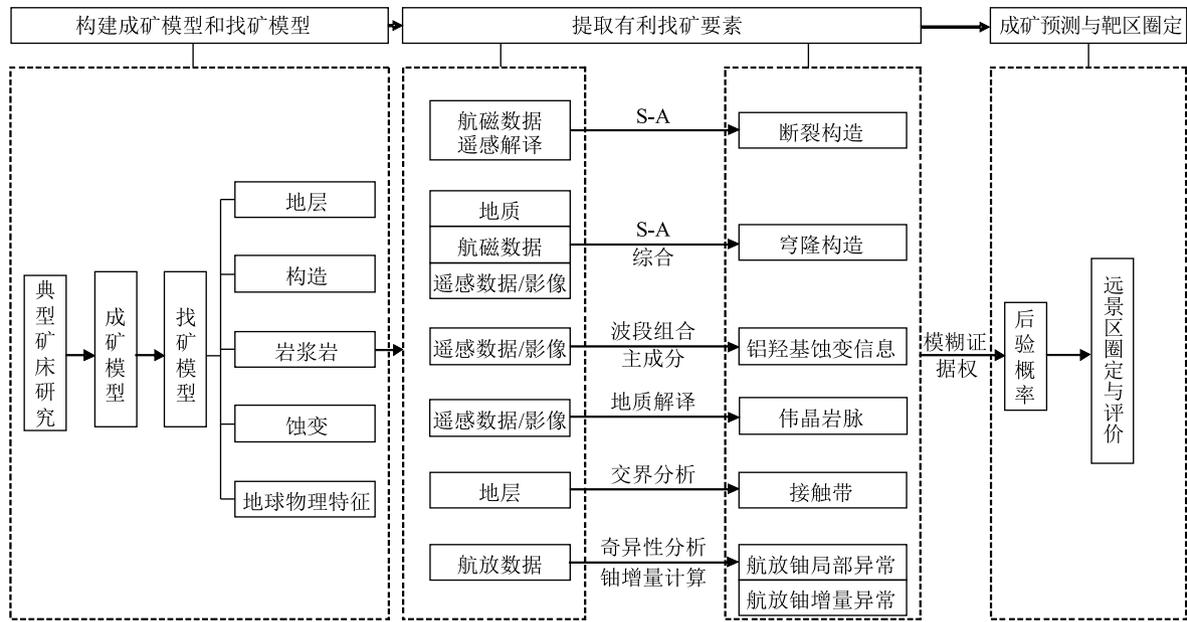


图3 纳米比亚埃龙戈地区综合预测流程图

Fig. 3 Flow chart of mineral prediction for the Erongo area, Namibia

金勇,2014;顾大钊等,2014;赵希刚等,2015;陈金勇等,2016;2017;荣建锋等,2016)。本文在前人研究基础上,系统总结了构造、地层、岩浆岩、地球物理、遥感等对成矿的控制作用。

### 3.1 构造对成矿的控制作用

研究区主要构造线方向为NE向,受达马拉构造运动影响,形成了一系列的NE向穹窿构造和NNE—NE向断裂构造。区域性的NNE向千岁兰断裂明显控制了富矿白岗岩体的产出,而矿体的空间就位一般与穹窿构造有关,大多数铀矿体都赋存于穹窿构造边部(图4)。达马拉中央带经历了3~4期构造变形,一般认为D1~D2期以水平方向的韧性剪切为主,形成了大量平卧褶皱,D3期构造以直立变形和脆性断裂为主(Barnes, 1981; Coward, 1983; Longridge, 2012),形成了大量鞘褶皱和穹窿构造,为铀的富集成矿提供了理想的就位空间,而脆性断裂为含铀流体的运移提供了良好的通道。

### 3.2 地层对成矿的控制作用

沿地层不同岩性界面极易发育层间构造,为白岗岩的侵入提供了构造空间,是铀成矿的有利部位。尤其罗辛组(NRs)与可汗组(NKn),或者楚斯组(Nch)与可汗组(罗辛组缺失时)接触界线附近是研究区白岗岩的主要赋存场所。罗辛组以大理

岩为主,大理岩一方面遇到岩浆和热液时与流体发生反应,释放出 $\text{CO}_2$ ,促使围岩中的铀活化迁移;另一方面,互层的大理岩为U元素的沉淀提供了良好的地球化学屏障(Longridge, 2012; Corvino et al., 2013)。因此,罗辛组、卡里比布组大理岩与变质碎屑岩互层产出,更有利于成矿(赵希刚等,2015)。

统计了研究区已发现的18个白岗岩型铀矿床(点)的产出位置(图4),其中产在斯瓦科普群(底部为罗辛组)和诺西布群(顶部为可汗组)接触带较远(大于2 km)的矿床(点)有6个,全部为铀矿点;距离在1~2 km的矿床(点)数为3个,其中大型矿床2个,矿点1个;距离在0.5~1 km的矿床(点)数为4个,其中大型矿床3个,矿点1个;距离在0.5 km以内的矿床(点)数为6个,其中大型矿床4个,矿点1个。

### 3.3 岩浆岩对成矿的控制作用

研究区白岗岩型铀矿具有一定的成矿专属性,区内白岗岩按矿物颜色、粒度、暗色矿物含量及铀矿化程度可以划分为A、B、C、D、E和F6种类型(Nex, 1997),而铀矿化主要产在D型白岗岩中,少量产于E型白岗岩中。前人测得与铀成矿作用关系密切的D型白岗岩的形成时代约为500 Ma,与晶质铀矿形成时代 $502 \pm 3$  Ma一致(Longridge et al.,

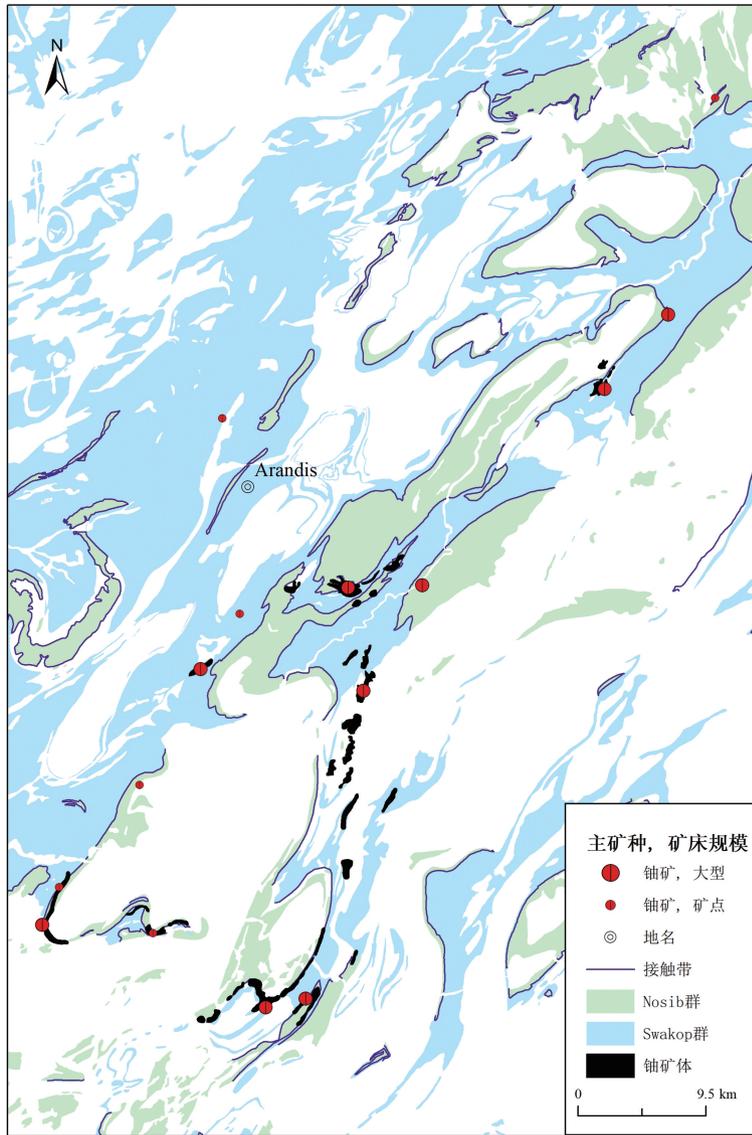


图 4 白岗岩型铀矿床(点)与地层接触带分布位置图

Fig. 4 Distribution of alaskite-type uranium deposits and stratigraphic contact zones

2009;王生云,2013;陈金勇,2014)。D型白岗岩为达马拉造山晚期,前达马拉富铀基底发生部分熔融的产物(陈金勇等,2017),岩浆沿千岁兰断裂上侵就位于次级断裂、地层层间薄弱带和穹隆构造处。

### 3.4 地球物理找矿要素

工作区整体场值范围为 $-1265.57\sim 1904.36$  nT,其中,区内多为负磁区,高磁区与北部多个圆形花岗岩穹隆高度吻合,此外,达马拉构造带南部中央区带整体为高磁区,可见多条NE向和NNE向异常带,与区域NE向断裂构造和NNE向千岁兰断裂吻

合较好。小的磁异常与该区带内若干小的穹隆构造吻合较好。

航空放射性铀异常多呈NE向带状展布,与已知铀矿床(点)吻合较好,部分与Abbabis组基底岩石吻合较好。此外,U高值区大致与区内花岗岩对应。达马拉构造带南部中央区带Th背景较高,Th高值区主要与Abbabis组变质岩与部分达马拉花岗岩吻合较好。K高值区主要与区内各类花岗岩吻合较好。第四系覆盖区仅局部显示较弱的异常,异常信息受到了明显的抑制和屏蔽。

### 3.5 遥感找矿要素

陈金勇等(2017)研究表明,研究区存在约153 Ma的热液叠加改造,促进铀的进一步富集。与后期铀富集相关的热液蚀变包括有硅化、高岭石化、伊利石化、黄铁矿化等,尤其硅化、高岭石化、伊利石化叠加段是富矿的产出部位(赵希刚等,2015)。因此,通过遥感提取铝羟基(反映高岭石化和伊利石化)等蚀变信息,并对研究区白岗岩进行地质解译,对白岗岩型铀矿预测至关重要。

通过对典型矿床特征、控矿要素、地球物理、遥感等找矿信息的详细分析,总结了研究区白岗岩型铀矿成矿预测的综合信息找矿模型(表1)。

## 4 空间信息提取

在找矿模型构建的基础上,对白岗岩、构造、地层、蚀变、地球物理等找矿信息进行了提取,尤其对航放、构造等弱缓信息进行了深入提取。

### 4.1 地质找矿信息提取

#### (1) 白岗岩信息提取

白岗岩是主要的成矿母岩,对成矿预测起到关键作用。本次预测变量白岗岩主要来自地质图中提取和遥感解译。本区含铀白岗岩岩性为席状淡色花岗岩,中粒至粗粒结构,大部分呈不规则状、网脉状。石英呈烟灰色、灰黑色,长石呈乳白色。伟晶岩在ASTER数据中的波谱特征表现为B1、B6、

表1 纳米比亚埃龙戈地区白岗岩型铀矿找矿模型

Table 1 Table of prospecting model for alaskite-type uranium deposit in the Erongo area, Namibia

找矿要素分类		要素显示特征
区域成矿背景	区域构造	位于达马拉构造带,达马拉构造带为新元古代—早古生代形成的碰撞型造山带,主构造线方向以NE向为主,其次为NNE向断裂,其他方向断裂为从属构造
	地球物理场	达马拉构造带南部中央区带为高磁区,其他为中低磁区;达马拉构造带南部中央区带具有高的铀钍背景值
地质找矿要素	地层	斯瓦科普群与诺西布群接触带,以及不同地层、岩性交界部位,如罗辛组/可汗组,或者楚斯组/可汗组接触界线附近。
	构造	NE向、NNE向深断裂构造控制着白岗岩的展布,为U元素运移提供了通道,穹隆构造边部控制矿体就位
	岩浆岩	D型或E型白岗岩脉
	围岩蚀变组合	主要蚀变有高岭石化、伊利石化、硅化、黄铁矿化、绿帘石化和绿泥石化。与成矿关系最密切的是硅化、伊利石化、高岭石化
地球物理找矿要素	航磁	高磁区与穹隆构造吻合度高,航磁解译的NE向、NNE向断裂构造控制白岗岩的分布
	航放	铀异常与矿床(点)吻合度高

B8波段呈吸收谷,B3、B4波段呈反射峰。通过对预测区ASTER遥感数据B3、B6、B8波段进行组合,得到的影像可较清晰地对预测区白岗岩进行识别,白岗岩一般呈粉色线状分布于深色调的围岩地层中(图5-a、b、d)。同时结合高精度谷歌影像图,可见白岗岩脉体在高分影像图上呈灰色或灰白色,通常表现出很浅的色调、很高的反射率,并呈线状、席状分布。此外,由于白岗岩脉体有非常强的抵御风化的能力,经常在地面上突出呈现出正地形。白岗岩颗粒较粗,在影像上往往呈球状风化(图5-c、e)。通过解译发现,白岗岩脉主要呈NE向席状展布,少数呈近SN向和EW向展布,受控于穹隆构造,分布于穹隆构造边部或转折端。由数条相互平行的岩脉组成,单脉宽1~10 m,延伸200~1000 m,岩脉群宽可达500~800 m,延伸可达3000 m。与前人描述的D型白岗岩形态一致(Nex,1997)。

## (2) 构造信息提取

前文研究表明,NE向、NNE向深断裂和穹隆构造是重要的控矿要素。但预测区1:25万地质图上实测的断裂构造和穹隆构造有限,且规模较小。本次工作通过地质、地球物理、遥感等综合信息对研究区断裂和穹隆构造进行推断解译。首先,对收集到的航磁数据做化极处理,在此基础上提取穹隆构造,同时结合遥感解译的环形构造,综合解译出研究区的穹隆构造(图6)。研究区线性构造不明

显,千岁兰断裂作为区域性深断裂地表构造特征也不明显,仅以负磁异常为典型特征。对化极后的航磁异常图进行了S-A分解,得到的异常图可见很好的线性关系(图6),尤其在达马拉构造带南部中央区带,清晰可见多条NE向和NNE向异常带,解译出的断裂构造分别与NE向达马拉构造带和NNE向千岁兰断裂吻合。在GeoDAS软件中对解译的断裂构造和穹隆构造进行缓冲区分析(buffer分析),当断裂构造缓冲距离为4 km时,有63%的矿床(点)落入断裂缓冲区;当缓冲距离为5 km时,有73%的矿床(点)落入断裂缓冲区;当穹隆构造缓冲距离为2 km时,有58%的矿床(点)落入穹隆缓冲区;当缓冲距离为4 km时,有79%的矿床(点)落入缓冲区。

## (3) 地层信息提取

提取了预测区斯瓦科普群和诺西布群的接触带,在GeoDAS软件中进行交界分析,根据已知矿床(点)对与接触带的距离变化范围,设定缓冲方式为多环,环间距200 m,共20环。当缓冲距离为1 km时,有53%的矿床(点)落入缓冲区,当缓冲距离为2 km时,有68%的矿床(点)落入缓冲区,且大型矿床均分布于距离接触带2 km以内。

## 4.2 航放数据处理与弱缓异常提取

由航放铀道分布图(图7-a)可见,工作区铀异常基本与铀矿床(点)吻合较好,但第四系覆盖区异常信息受到了明显的抑制和屏蔽。湖山超大型铀

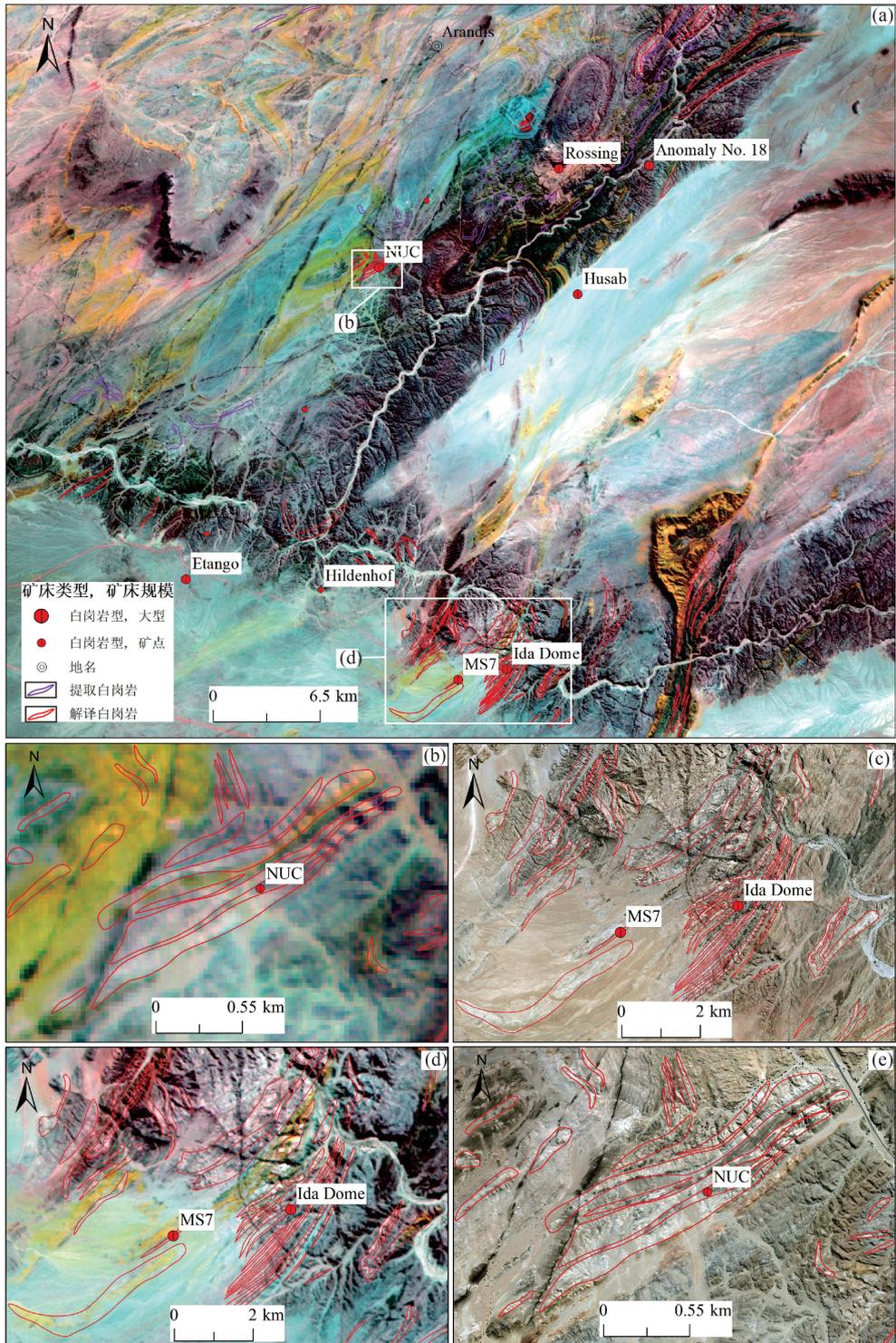


图 5 阿兰迪斯地区遥感影像图

Fig. 5 Remote sensing image of the Arandis area

a—阿兰迪斯地区 ASTER 假彩色合成遥感影像图; b—NUC 矿区 ASTER 假彩色合成遥感影像图; c—NUC 矿区谷歌高分影像图; d—Ida Dome 矿周边 ASTER 假彩色合成遥感影像图; e—Ida Dome 矿周边谷歌高分影像图

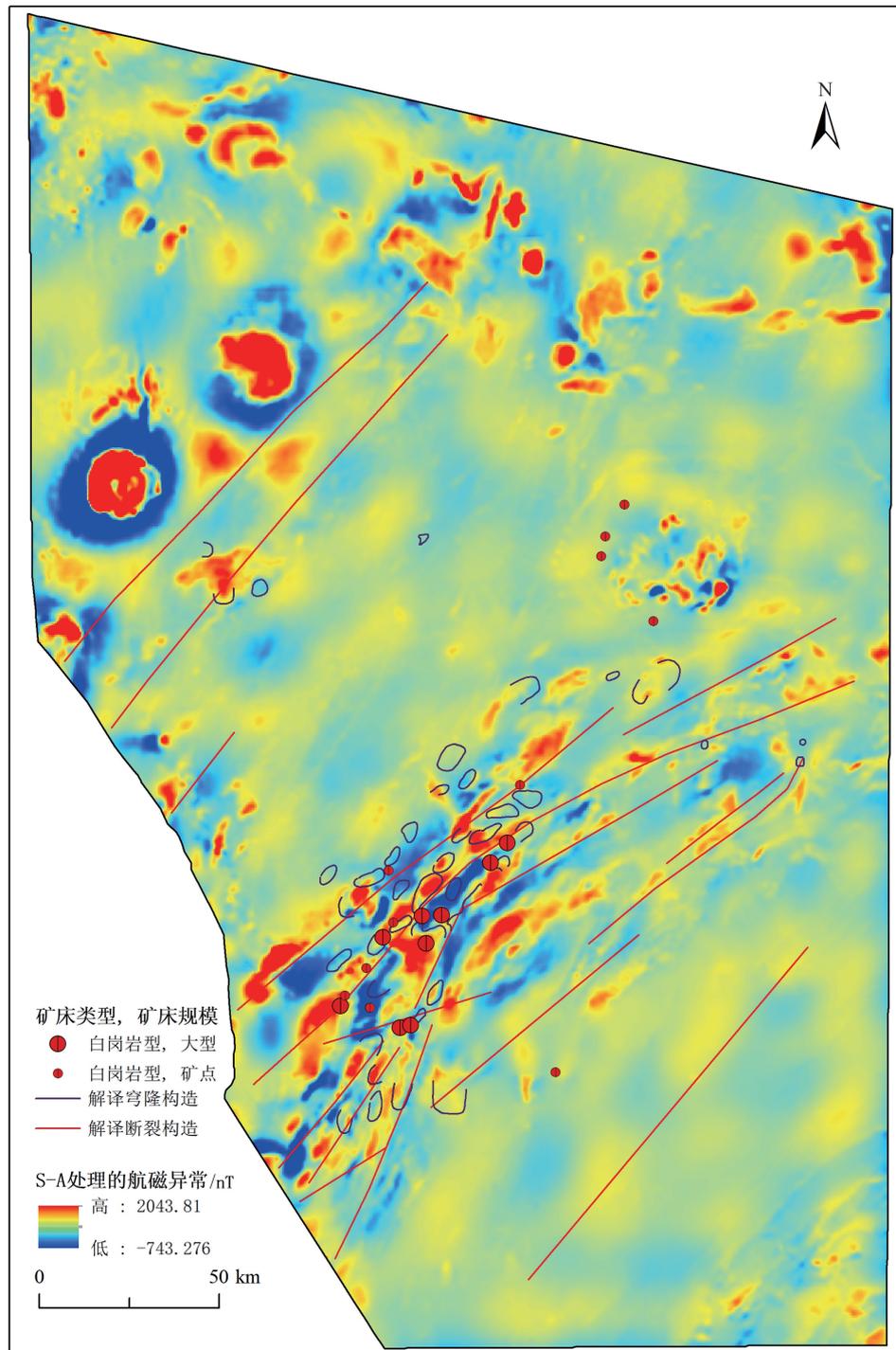


图6 S-A分解后的航磁异常图与解释的断裂和穹隆构造

Fig. 6 Aeromagnetic anomalies map after S-A decomposition is accompanied by interpretation of faults and domes

矿主体产于第四系覆盖区内,覆盖区下找矿潜力巨大,所以能够合理地识别和提取覆盖区的弱缓异常,对找矿尤为重要。预测区覆盖区域的铀含量整体偏低,达不到异常级别,但其铀含量空间分布是

完整的,满足面积-密度的幂率分布关系,利用局部奇异性原理和奇异性指数可以很好地识别和提取因覆盖造成的弱小、隐蔽找矿信息(成秋明,2006;成秋明等,2009)。

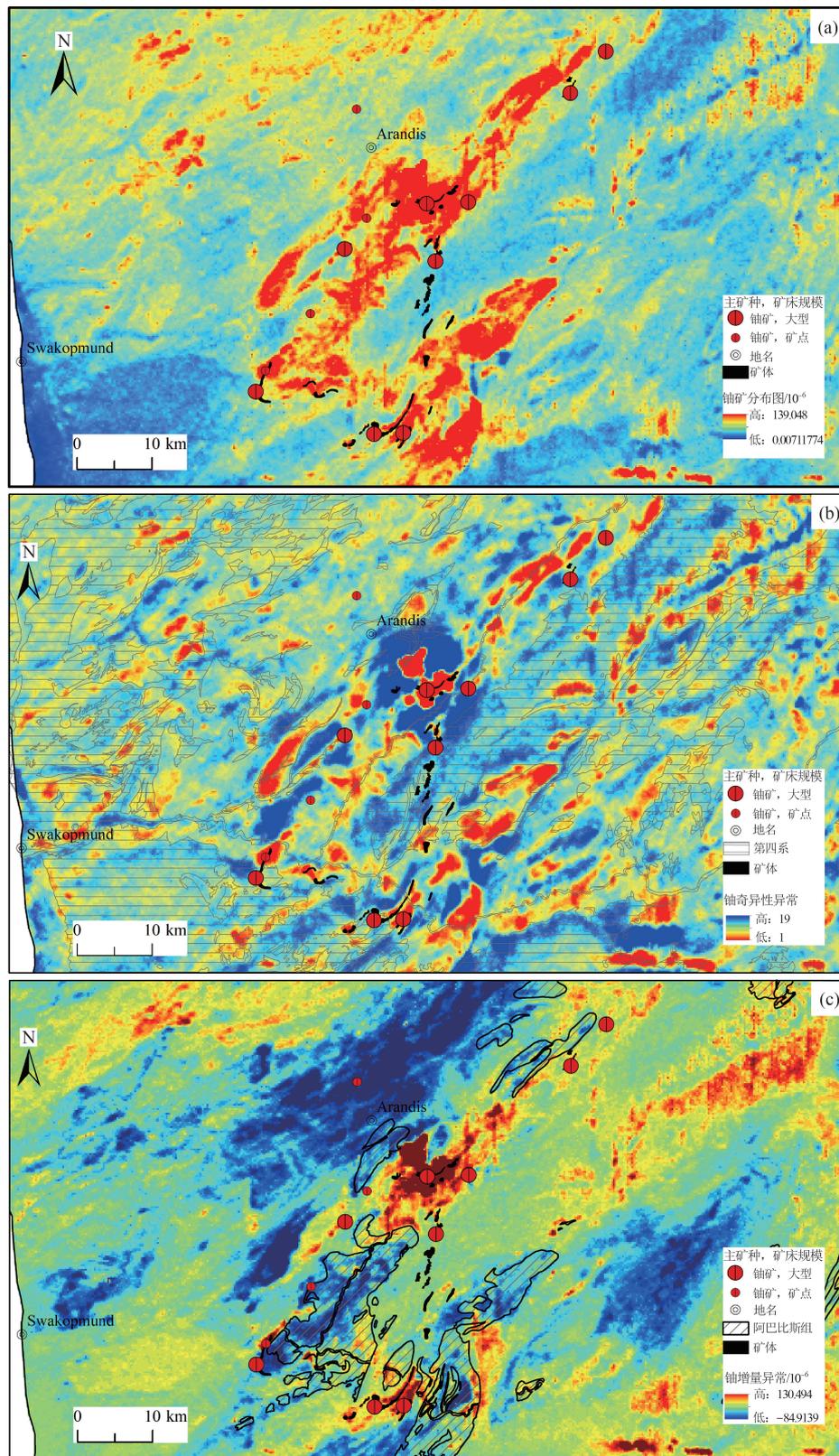


图 7 纳米比亚埃龙戈地区铀异常(a)、铀奇异性异常图(b)和铀增量异常图(c)

Fig. 7 Uranium anomaly graph (a), uranium singularity anomaly graph (b) and uranium increment anomaly graph (c) of the Erongo area, Namibia

本文对铀异常图进行奇异性分析,得到铀奇异性异常图(图7-b)。从图中可见原来大的铀异常被分解成若干小异常,而小的铀异常与铀矿体的吻合度更好,并且在第四系覆盖区识别出若干异常。罗辛铀矿周边分布了多个铀矿床,包括湖山、Valencia、Etango、Inca、Salem、Ida Dome等铀矿床。其中,湖山铀矿区内大面积被第四系覆盖,在原始铀异常分布图上基本不发育铀异常,经奇异性分析解译出一NE向椭圆形异常,与湖山铀矿体吻合较好。此外,奇异性异常与Valencia、Etango、Inca、Salem、Ida Dome等铀矿体的分布也吻合很好。

此外,为了降低部分高铀地质体对铀异常的影响,对航放中U、Th含量进行合理计算。用铀含量-(钍含量/地质单元的平均钍铀比值)算得铀增量。前达马拉基底阿巴比斯(Abbabis)杂岩具有异常高的铀含量,但铀矿床均不产于阿巴比斯杂岩中,通过计算铀增量,可以有效去除阿巴比斯组高铀背景带来的干扰(图7-c)。

## 5 基于模糊证据权法的矿产预测

### 5.1 模糊证据权法理论模型

证据权法是加拿大数学地质学家Agterberg提出的一种地质学统计方法(Agterberg, 1989; Bonham-Carter, 1994),其基本原理是把每一种成矿信息看作是二值证据图层,取值为1(表示有利成矿,下同)或0(表示不利成矿,下同),每个证据图层对成矿预测的贡献就由该证据图层取值状态(1或0)的权重来确定。假设预测区被划分为 $N$ 个网格单元,其中有 $D$ 个网格单元含有已知矿床(点),提取的每个地质变量看作独立的证据因子,对任意一个证据因子,其对成矿贡献的权重定义为:

$$W^+ = \ln \left[ \frac{P(B/D)}{P(\bar{B}/D)} \right] \quad (1)$$

$$W^- = \ln \left[ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(B/D)} \right] \quad (2)$$

其中, $W^+$ 、 $W^-$ 分别为证据因子在存在区和不存在区的权重值, $B$ 为有因子存在的单元数, $\bar{B}$ 为因子缺失的单元数, $\bar{D}$ 为不含矿点的单元数。证据层与矿床(点)的相关程度为: $C = W^+ - W^-$ 。 $C$ 值越大表示地质变量找矿指示性越好。

对于 $n$ 个证据因子,如果它们都对于已知矿(床)点的事件条件独立,则研究区的任一网格单元

出现矿点的可能性,用后验概率表示:

$$O_{(\text{后验})} = \exp \left\{ \ln \left[ \frac{D}{N-D} \right] + \sum_{j=1}^n W_j^* \right\} \quad (3)$$

其中, $W_j^*$ 为第 $j$ 个证据因子的权重值( $j = 1, 2, \dots, n$ )。 $k$ 取决于该图层属性值取值情况,取值为1时 $k$ 取“+”,取值为0时 $k$ 取“-”,证据图层属性值取值“1”或“0”,一般是以对比度 $C$ 与 $C$ 的标准偏差 $S(C)$ 的比值 $t$ (学生分布 $t$ 值, $t = C/S(C)$ )的极大值作为各证据层二值化的阈值,该阈值将各证据图层分成截然的二值图,即阈值之前的分类部分对成矿有利,赋值为1,阈值之后的分类部分对成矿不利,赋值为0(成秋明等,2007)。后验概率代表了该单元内找矿的有利度。证据权法的最终结果以后验概率等值线图的形式表达。

模糊证据权模型是成秋明和Agterberg提出的使用多值图层代替传统二值或三值图层的改进证据权模型(Cheng et al., 1999)。模糊证据权首先确定出2个极端的集合 $B_1$ 和 $B_2$ ,最有利的单元集合隶属度 $\mu_B = 1$ ,最不利的单元集合隶属度 $\mu_B = 0$ ,在此基础上通过模糊隶属度计算介于二者之间的子集合权重。计算模糊权重:

$$\begin{aligned} W_{\mu_{B(x)}} &= \ln \frac{P[\mu_{B(x)} | D]}{P[\mu_{B(x)} | \bar{D}]} \\ &= \ln \frac{\mu_{B(x)} P[B_{(1)} | D] + (1 - \mu_{B(x)}) P[B_{(2)} | D]}{\mu_{B(x)} P[B_{(1)} | \bar{D}] + (1 - \mu_{B(x)}) P[B_{(2)} | \bar{D}]} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,隶属度函数为

$$\mu_{B(x)} = \frac{C - \min_{x \in B_{(2)}} C}{\max_{x \in B_{(2)}} C - \min_{x \in B_{(2)}} C} \quad (5)$$

当满足 $B_{1(x)}$ 与 $B_{2(y)}$ 关于 $D$ 条件独立时,有

$$\ln \left( O \left( \frac{D}{B_1 B_2} \right) \right) = W_0 + W_{\mu_{B1(x)}} + W_{\mu_{B2(y)}} \quad (6)$$

其中, $B_{1(x)}$ 与 $B_{2(y)}$ 表示图层对应的不同属性取值状态。因为 $B_{1(x)}$ 和 $B_{2(y)}$ 对应更小的子集,公式(6)只需要在更小的范围内满足条件独立性即可,因此模糊证据权方法需要满足的条件独立性比普通证据权还要弱,这也从表明模糊证据权模型降低了后验概率总体上的不确定性(Cheng et al., 1999)。

### 5.2 预测变量的确定

在建立研究区找矿模型和提取找矿信息的基础上,采用数据驱动与知识驱动相结合的方式,确定了以下用于研究区成矿预测的有利预测变量(表2)。

表 2 纳米比亚埃龙戈地区有利预测变量

Table 2 Favorable prediction variable scale in the Erongo area, Namibia

编号	预测变量	有利度
1	断裂构造 buffer 分析	63%的矿床(点)分布于 4 km 缓冲区内
2	穹隆构造 buffer 分析	58%的矿床(点)分布于 2 km 缓冲区内
3	斯瓦科普群和诺西布群地层接触带 buffer 分析	68%的矿床(点)分布于 2 km 缓冲区内,大型矿床均距离接触带 2 km 以内
4	白岗岩(伟晶岩)脉 buffer 分析	白岗岩脉为赋矿主岩
5	铝羟基蚀变	伊利石化、高岭石化是非常重要的矿化蚀变标志
6	航放铀异常奇异性指数	异常点与已知矿床(点)吻合度高,矿体与异常吻合度高
7	航放铀增量	异常与已知矿床(点)吻合度高,同时有效去除高铀背景地质体的影响

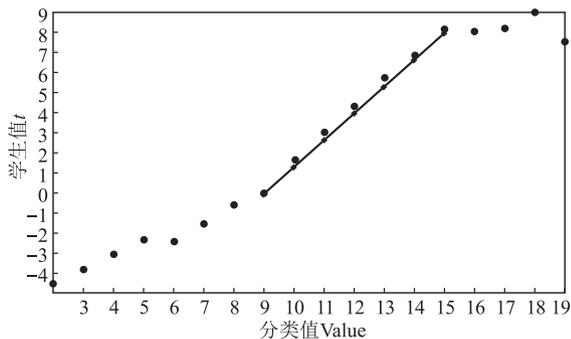
### 5.3 设置训练参数

应用模糊证据权方法,需要定义训练集区域和预测区域。训练集区域需要有足够多的已知训练集来计算证据权和定义证据图层,在许多情况下,一般训练区域和预测区域是同一块区域。

本文选择已知的 18 个矿床(点)作为训练集,选择整个预测区作为训练区域。为了建立运行模糊证据权方法需要设置相关的参数,以 GeoDAS 为平台,设定预测面积单元为 40000 m<sup>2</sup>,选择 18 个已知矿床(点)作为训练图层。

### 5.4 计算模糊证据权重

在训练参数设置的基础上,对各个证据图层进行模糊证据权重的计算,每个用于预测的证据图层都是分类表示的,以航放铀增量图层为例,根据栅格属性值大小,将全区自动分成 19 类,证据层将由隶属度函数(MSF)进行重分类,MSF 可在闭区间 [0,1] 上任意取值,其图形表现为一条渐变曲线。一般根据  $t$  值大小来确定各分类(Value)的 MSF 取值,GeoDAS 提供的曲线拟合功能能够实现 MSF 的自动取值(图 9)。表 3 中航放铀增量一列,分类值

图 8 PCA3 分类值 Value—学生值  $t$  散点图Fig. 8 Scatter diagram of PCA3 classification of value and students value  $t$ 

15~19 隶属度 MSF 值为 1,2~9 为 0,中间的 10~14 根据线性拟合分别得到 1~0 之间的值。隶属度函数确定以后,便可以计算模糊证据权重及相关的统计量。

其他证据图层的模糊证据权重计算方法同此,得到的 MSF 与模糊证据权重见表 3。

### 5.5 后验概率计算

根据各证据图层的模糊证据权重,选择预测区与训练区相同,进行后验概率的计算。得到后验概率图(图 9),并对后验概率值进行分级。根据所得后验概率值,可以把研究区大致分为 4 级:A 级,后验概率值为 0.05~0.130039185,属于高有利地段,用红色色块表示;B 级,后验概率值为 0.03~0.05,属于中有利地段,用黄色色块表示;C 级,后验概率值为 0.01~0.03,属于低有利地段,用浅蓝色色块表示;D 级,后验概率值为 0.000002787~0.01,属于不利找矿地段,用白色色块表示。

### 5.6 找矿远景区预测

根据后验概率大小、面积及矿床(点)的分布情况,在研究区共圈定 7 个找矿远景区(图 9),其中 I 级远景区 2 个,II 级远景区 3 个,III 级远景区 2 个。远景区主要根据后验概率大小、面积,成矿条件及已知矿床的分布情况等圈定。将后验概率高、连片面积大、成矿条件好且有已知大型矿床分布的划分为 I 级远景区;后验概率较高、连片面积较大、成矿条件较好且有已知矿点分布的划分为 II 级远景区;后验概率一般、连片面积小、成矿条件一般的划分为 III 级远景区。远景区的整体展布方向与区域地层和构造线方向基本一致,与区内主要控矿要素的分布形态吻合。结合地质背景对后验概率进行研究,远景区 I-1 和 I-2 中存在大量后验概率

表 3 各证据图层隶属度 (MSF) 与模糊证据权计算

Table 3 Membership of each evidence layer (MSF) and calculation of fuzzy weights of evidence

图层	断裂 buffer		穹隆 buffer		地层接触带 buffer		伟晶岩脉 buffer		铝羟基蚀变		U 异常奇异性指数		U 增量	
分类值	隶属度	证据	隶属度	证据	隶属度	证据	隶属度	证据	隶属度	证据	隶属度	证据	隶属度	证据
Value	MSF	权重	MSF	权重	MSF	权重	MSF	权重	MSF	权重	MSF	权重	MSF	权重
1	1	1.36	1	2.19	1	2.44	1	2.87	1	1.72	1	2.44	-	-
2	1	1.36	1	2.19	1	2.44	1	2.87	1	1.72	1	2.44	0	-1.43
3	1	1.36	1	2.19	1	2.44	1	2.87	1	1.72	1	2.44	0	-1.43
4	1	1.36	1	2.19	1	2.44	1	2.87	1	1.72	1	2.44	0	-1.43
5	1	1.36	1	2.19	1	2.44	1	2.87	-	-	1	2.44	0	-1.43
6	1	1.36	0.83	2.03	0.86	2.23	0.83	2.74	-	-	0.83	1.55	0	-1.43
7	1	1.36	0.67	1.85	0.71	1.98	0.67	2.63	-	-	0.67	0.95	0	-1.43
8	1	1.36	0.5	1.62	0.57	1.73	0.5	2.51	-	-	0.5	0.36	0	-1.43
9	0.6	1.14	0.17	0.98	0.43	1.44	0.17	2.3	-	-	0.33	-0.28	0	-1.43
10	0.4	0.95	0	0.4	0.29	1.08	0	2.19	-	-	0.17	-1.12	0.17	-0.79
11	0.2	0.62	0	0.4	0.14	0.56	0	2.19	-	-	0	-8.9	0.33	-0.29
12	0	-0.16	0	0.4	0	-0.31	0	2.19	-	-	0	-8.9	0.5	0.23
13	0	-0.16	0	0.4	0	-0.31	0	2.19	-	-	0	-8.9	0.67	0.79
14	0	-0.16	0	0.4	0	-0.31	0	2.19	-	-	0	-8.9	0.83	1.5
15	0	-0.16	0	0.4	0	-0.31	0	2.19	-	-	0	-8.9	1	3.15
16	-	-	-	-	0	-0.31	-	-	-	-	0	-8.9	1	3.15
17	-	-	-	-	0	-0.31	-	-	-	-	-	-	1	3.15
18	-	-	-	-	0	-0.31	-	-	-	-	-	-	1	3.15
19	-	-	-	-	0	-0.31	-	-	-	-	-	-	1	3.15
20	-	-	-	-	0	-0.31	-	-	-	-	-	-	-	-

注：“-”表示无值

呈面、呈带分布区域,尤其远景区 I-1 的北部及 I-2 的北部、南部第四系覆盖区还存在巨大的找矿潜力。II 级远景区也具有较好的成矿条件,但工作程度较低,有望实现找矿突破。

### 5.7 模糊证据权模型检验

如图 9 所示,利用模糊证据权法得出的白岗岩型铀矿预测后验概率高值区主要集中在阿兰迪斯及周边地区,具有成面和呈带分布的特点,主要呈 NE 向展布, I-1 和 I-2 两个最重要的远景区的展布明显与区域性千岁兰断裂相关,后验概率高值区明显与白岗岩、斯瓦科普群和诺西布群接触带及穹隆构造有关。从预测效果看,后验概率高值区与已知矿床(点)具有非常好的对应关系,尤其罗辛、Valencia、Etango、NUC、MS7、Ida Dome 等矿床的矿体均位于后验概率高值区。以上表明了本次预测工作的有效性,也表明了模糊证据权法在该地区的有效性。

## 6 结 论

(1)通过对纳米比亚埃龙戈地区白岗岩型铀矿床控矿因素的系统总结,明确了构造、地层、岩浆岩、蚀变等对成矿的控制作用。NE 向、NNE 向深断裂构造控制白岗岩的展布,穹隆构造边部控制矿体就位。斯瓦科普群与诺西布群接触带及不同地层、岩性交界部位为白岗岩的侵入提供了构造空间,大理岩为 U 元素的沉淀提供了良好的地球化学屏障。

(2)利用非线性理论、奇异性理论和分形滤波技术实现了对隐伏断裂、穹隆构造及航放弱异常提取。提取解译的构造、地层接触带、蚀变等与已知矿床关系密切,利用奇异性理论处理后的航放铀异常与已知矿体吻合度较好,表明预测信息提取充分有效。

(3)利用 ASTER 遥感数据 B3、B6、B8 波段组

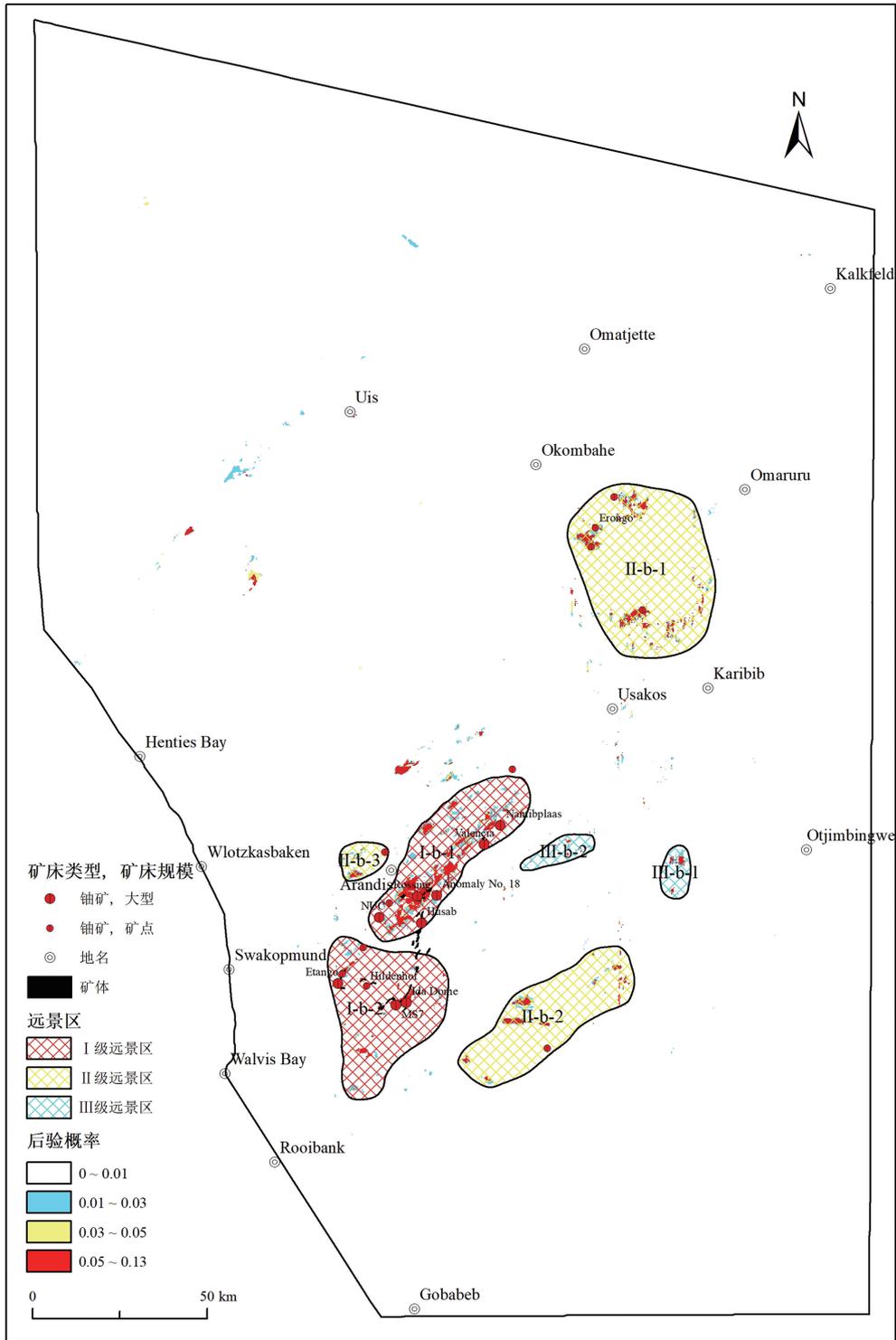


图 9 纳米比亚埃龙戈地区找矿后验概率及远景区分级图

Fig. 9 Map of posterior probability and hierarchical prospective area in the Erongo area, Namibia

合+谷歌高分影像实现了对预测区白岗岩的有效解译,通过遥感解译发现,预测区白岗岩主要呈 NE 向

展布,少数呈近 SN 向和 NW 向展布,受控于穹隆构造,分布于穹隆构造边部或转折端。

(4)确定了7个预测变量,基于模糊证据权方法进行综合信息矿产预测,圈定Ⅰ级远景区2个,Ⅱ级远景区3个,Ⅲ级远景区2个。远景区Ⅰ-1北部及Ⅰ-2的北部、南部第四系覆盖区还存在巨大的找矿潜力。Ⅱ级远景区也具有较好的成矿条件,但工作程度较低,有望实现找矿突破。

## 参考文献

- Agterberg F P. Computer programs for mineral exploration [J]. Science, 1989, 245(4913): 76-81.
- Barnes J F H. Some aspects of the tectonic history of the Khan-Swakop region of the Damara Belt, Namibia [D]. Ph. D. Thesis, University of Leeds, 1981.
- Bonham-Carter G F. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS [M]. Pergamon Press, Oxford, 1994: 1-398.
- Cheng Q M, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping [J]. Natural Resources Research, 1999, 8(1): 27-35.
- Cheng Q M. GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits [C]//Jeff H. GIS applications in earth sciences. Special Paper of Geological Association of Canada, 2006: 285-296.
- Cheng Q M. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments [J]. Mathematical Geosciences, 2008, 40(5): 503-532.
- 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.
- Corvino A F, Pretorius L E. Uraniferous leucogranites south of Ida Dome, central Damara Belt, Namibia: Morphology, distribution and mineralization [J]. Journal of African Earth Sciences, 2013, 80: 60-73.
- Coward M P. The tectonic history of the Damara Belt [C]//Miller R M. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa. Special Publication of the Geological Society of South Africa, 1983, 11: 409-421.
- De Kock G S, Eglington B, Armstrong R, et al. U-Pb and Pb-Pb ages of the Naauwpoort Formation rhyolite, Kawakeup leptite and Okongava diorite: implications for the onset of rifting in the Damara belt, Namibia [J]. Communications - Geological Survey of Namibia, 2000, 12: 81-88.
- Goscombe B D, Gray D R. Structure and strain variation at mid-crustal levels in a transpressional orogen: A review of Kaoko Belt structure and the character of West Gondwana amalgamation and dispersal [J]. Gondwana Research, 2008, 13: 45-85.
- Kröner A, Retief E A, Compston W, et al. Single-age and conventional zircon dating of remobilized basement gneisses in the central Damara belt of Namibia [J]. South African Journal of Geology, 1991, 94: 379-387.
- Longridge L, Gibson R L, Kinnaird J A. Dome formation mechanisms in the southwestern Central Zone of the Damara Orogen, Namibia [J]. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 2009, 29: 440-444.
- Longridge L. Tectonothermal Evolution of the southwestern Central Zone, Damara Belt, Namibia [D]. Ph. D. Thesis, University of the Witwatersrand, South Africa, 2012.
- Martin H, Porada H. The intracratonic branch of the Damara Orogen in South West Africa I. Discussion of geodynamic models [J]. Precambrian Research, 1977, 5(4): 311-338.
- Miller R M G. The geology of Namibia. Volume 2: Neoproterozoic to Lower Palaeozoic [M]. Geological Survey of Namibia, Windhoek, 2008.
- Miller R M G. The Pan-African Damara Orogen of South West Africa/Namibia [C]//Miller R M, The Damara Orogen. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia. Geological Society of South Africa Special Publication, 1983, 11: 431-515.
- Nex P A M, Kinnaird J A, Oliver G J H. Petrology, geochemistry and mineralization of post-collisional magmatism in the southern Central Zone, Damara Orogen, Namibia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2001, 33: 481-502.
- Nex P A M. Tectono-metamorphic setting and evolution of granitic sheets in the Goanikontes area, Namibia [D]. Ph. D. Dissertation, National University of Ireland, 1997.
- Oliver G J H. Mid-crustal detachment and domes in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia [J]. Journal of African Earth Sciences, 1994, 19: 331-344.
- 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(2): 303-321.
- Porada H. Pan-African rifting and orogenesis in southern and equatorial Africa and eastern Brazil [J]. Precambrian Research, 1989, 44(2): 103-136.
- 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.
- 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物质来源分析 [J]. 地质学报, 2016, 90(2): 219-230.
- 陈金勇. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿成矿机理研究 [D]. 核工业北京地质研究院博士学位论文, 2014.
- 陈军强, 曾威, 王佳营, 等. 全球和我国铀资源供需形势分析 [J]. 华北地质, 2021, 44(2): 25-34.
- 成秋明, 陈志军, Ali Khaled. 模糊证据权方法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, (2): 175-184.
- 成秋明, 张生元, 左仁广, 等. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术研究进展 [J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 185-198.
- 成秋明. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法 [J]. 地球科学, 2006, (3): 337-348.
- 成秋明. 覆盖区矿产综合预测思路与方法 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(6): 1109-1125.
- 顾大钊, 范洪海, 孙远强. 纳米比亚白岗岩型铀矿床找矿方法探讨 [J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 1105-1106.
- 金若时, 滕雪明. 中国北方砂岩型铀矿大规模成矿作用 [J]. 华北地质, 2022, 45(1): 42-57.
- 聂江涛, 范洪海, 张杰林, 等. 纳米比亚中西部 EPL3602 地区构造地质特征及铀矿控矿因素 [J]. 铀矿地质, 2013, 29(4): 223-230.

- 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.
- 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.
- 万丽,刘慧,曾祥健.普朗斑岩型铜矿床成矿元素多重分形特征及其矿化强度指示[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(4): 1054-1063.
- 王佳营,刘行,薛生升,等.奇异性理论在达来庙草原覆盖区找矿弱信息提取中的应用[J].华北地质,2021,44(2): 14-24.
- 王佳营,张晓军,姚春亮,等.非线性理论和模糊证据权方法在内蒙古达来庙草原覆盖区钼多金属矿产预测中的应用[J].地质调查与研究,2019,42(3): 174-184.
- 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].核工业北京地质研究院博士学位论文,2013.
- 张生元,成秋明,张素萍,等.加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(2): 281-286.
- 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.
- 左立波,任军平,邱京卫,等.纳米比亚罗辛铀矿床地质特征、地球化学特征及成矿模式[J].地质找矿论丛,2015,30(S1): 137-145.
- 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.