

纳米比亚罗辛大型白岗岩型铀矿床*

张晓康^{1,2}, 聂凤军^{2* *}, 吴科锐^{1,2}, 刘春花², 王丰翔²

(1 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

罗辛(Rossing)铀矿床位于纳米比亚中西部,距首都温得和克(Windhoek)约 200 km,是世界上最大的白岗岩型铀矿床(图 1)。该矿床目前为世界天然铀资源的主要提供者之一,生产的铀矿约占世界年产量的 7%。20 世纪初期,人们在罗辛地区的伟晶岩中发现了放射性物质的存在,以后陆续圈定出一些放射性异常带。1956 年,英美资源集团(Anglo American Prospecting Company)在该地区从事勘探工作,但成果有限。1966 年,力拓矿业集团(Rio Tinto)获得了罗辛铀矿的采矿权,并持有罗辛铀矿运营商罗辛铀业公司(Rossing Uranium)69%的股份。迄今为止,矿区范围内已知铀资源量为 52 700 t (Shanyengana, 2014),矿石平均品位为 0.03%~0.04%。在过去的 38 年中,这座露天铀矿开采出 105 463 t 的铀,在纳米比亚的经济和社会发展中发挥了重要作用。

1 成矿环境

从大地构造位置上看,罗辛铀矿位于晚前寒武纪一早古生代泛非(Pan African)构造带的达马拉造山带(Damara Orogen)中部(图 1a),并且与后碰撞重熔型白岗岩紧密相关(Cuney, 2014)。达马拉造山带为北部的刚果克拉通和南部的卡拉哈里(Kalahari)克拉通碰撞作用的产物(Basson et al., 2004)。达马拉造山带中部主要地层包括:早前寒武纪的阿巴比斯(Ababis)变质基底杂岩,岩性以眼球状片麻岩和石英长石片麻岩为主;埃土西斯(Etutisis)组变质砾岩、石英岩、片岩、片麻岩等;可汗(Khan)组石英岩、变质

砾岩、黑云母片(麻)岩、混合岩、石英长石辉石角闪片麻岩、钙硅质岩等;罗辛(Rossing)组发育上、下两套大理岩、堇青石片麻岩和石英岩,受到强烈的构造变形作用,地层片理沿 NE 向展布;楚斯(Chuoss)组冰碛岩、钙硅质岩和石英岩等;卡里毕比(Karibib)组厚层状大理岩、钙硅质岩、片岩和片麻岩等。铀矿化主要见于可汗组和罗辛组地层中。造山运动期间该地区发生了强烈的左行挤压塑性变形,形成了规模较大的 NE 向韧性剪切带和穹窿构造;NNE 向的千岁兰(Welwitsshia)断裂带是由航空磁测解译出的一条线性构造带,该断裂切穿了前期变形作用的产物,发生了左行走滑运动,罗辛铀矿床及其附近的瓦伦西亚(Valencia)、罗辛南(Rossing South)等铀矿床(点)均位于该断裂带附近。造山作用过程中伴随有花岗岩体的侵入(大部分年龄在 510 Ma 左右),造山作用后,该区基本上处于比较稳定的构造环境,造山期后富铀的岩浆热液在有利的构造部位形成富集型铀矿床。与铀矿床有关的岩体主要是白岗岩,可依据形成年代、颜色、粒度、矿物组成、元素地球化学特征及铀矿化程度等将其分为 6 种类型,即 A、B、C、D、E、F 型白岗岩(Nex et al., 2001)。其中, A、B、C 型三类白岗岩形成较早,不含矿,但 Th 的含量较高; D、E 型两种白岗岩形成较晚,是主要的铀矿化岩石。中生代,该地区有中基性岩浆活动。

2 矿床地质

罗辛铀矿床位于罗辛穹窿的南部,可分为 SH、SJ、SK 三个矿区(图 1b)。主采坑 SJ 矿区长 3 km,

* 本研究得到国家重点自然科学基金项目(编号: 41030421)和地质调查项目(编号: 1212010811029)的资助

第一作者简介 张晓康,男,1988 年生,硕士研究生,现攻读地质资源与地质工程专业。Email: mjkbxiaokang@163.com

* 通讯作者 聂凤军,男,1956 年生,研究员,博士生导师,从事金属矿床地质和地球化学研究。Email: nfjj@cei.gov.cn

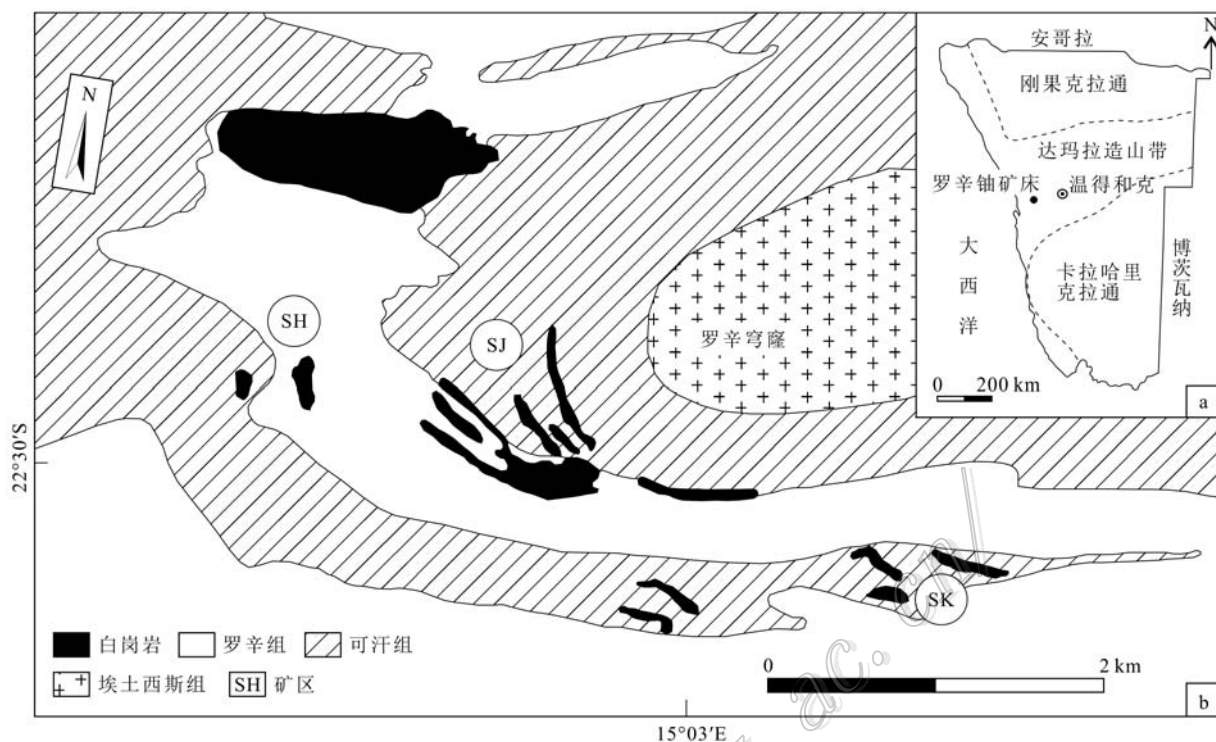


图1 罗辛铀矿床构造位置示意图(a)及罗辛矿区地质图(b)(据 Nex et al., 2002; Foster et al., 2009 修改)

宽 1.5 km, 深 350 m, 钻探控制的矿化深度超过 1000 m。白岗岩是所有原生铀矿化和大部分次生铀矿化的围岩, 许多地方的白岗岩体即为矿体, 白岗岩侵入于罗辛组、可汗组地层中, 宽度由几厘米到 90 m 以上, 呈脉状或不规则的透镜状(图 2)。白岗岩以花岗伟晶结构为主, 主要矿物为钾长石、石英及少量斜长石、黑云母和白云母, 碱性成分含量高, 属准铝质到过铝质, 国外常将其定名为碱性淡色花岗岩。矿区内白岗岩侵入体附近接触变质作用发育, 在罗辛组片麻岩与白岗岩接触带, 长石变斑晶发育; 罗辛组大理岩与白岗岩接触部位, 常见几厘米到几米厚的砂卡岩带。矿化主要受控于含铀岩浆流体与围岩中还原性硫化物(黄铁矿、黄铜矿等)之间的氧化还原转变。

原生铀矿物主要为晶质铀矿和铌钽铀矿。晶质铀矿粒径为 0.05~0.3 mm, 呈浸染状分布在白岗岩中, 多与独居石、锆石密切共生(Berning et al., 1976)。次生铀矿物主要为 β -硅钙铀矿, 另外还有钼脂铅铀矿、硅钙铀矿、铜铀云母、钒钾铀矿、变水硅铀矿等, 不仅产于白岗岩中, 还可产于围岩地层、岩性接触带、断层及节理中。矿石矿物还有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、赤铁矿和褐铁矿等。脉石矿

物主要有萤石等。

SJ 矿区中晶质铀矿占铀矿物总量的 55%, 铌钽铀矿占 5%, 次生铀矿物(主要是 β -硅钙铀矿)占 40%; SK 矿区中铀矿物比例为: 铌钽铀矿占 65%, 晶质铀矿占 8%, 次生铀矿物占 27%; SH 矿区中的铀矿物主要是铌钽铀矿, 约占 84%(Abraham, 2009)。在当前的酸浸工艺中, 含铀硅酸盐和晶质铀矿在酸性条件下可成功的萃取出铀, 而铌钽铀矿即使在氧化条件下也很难释放出铀。考虑到 SH 和 SK 矿区中的铌钽铀矿含量都很高, 找到从铌钽铀矿中分离出铀的方法至关重要。

3 形成作用

达马拉造山运动期间, 矿区遭受了强烈的脆性-塑性变形产生了密集的网状断裂; 造山运动后期, 罗辛穹窿向南倾伏, 伴随着穹窿长轴的逆时针旋转, 产生可容纳白岗岩侵位的楔形区域; 穹窿的转折端是应力集中的部位, 断裂较发育, 这些张性空间是白岗岩理想的就位空间。千岁兰断裂的左行滑动, 会造成其次级构造的活动, 也使两盘变质沉积地层中的片理、片麻理张开, 次级断裂为岩浆的上升提供了通

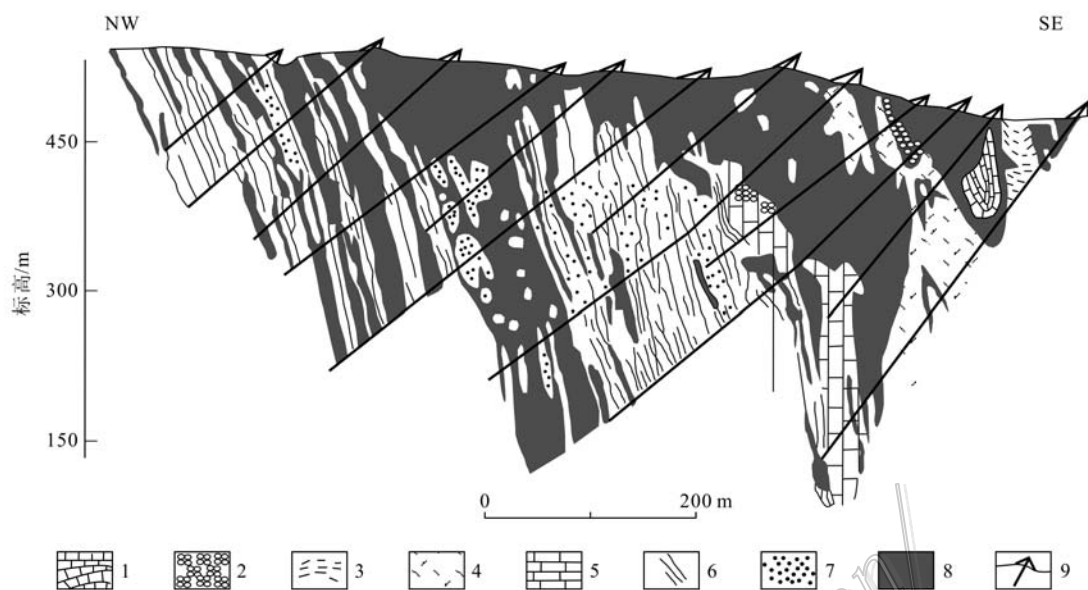


图2 罗辛矿区0号勘探线剖面图(据 Berning et al., 1976 修改)

1—罗辛组上段大理岩; 2—罗辛组砾岩; 3—罗辛组片岩; 4—罗辛组片麻岩; 5—罗辛组下段大理岩; 6—可汗组黑云母角闪石片岩;
7—可汗组辉石角闪石片麻岩; 8—含铀白岗岩; 9—钻孔

道,而更次一级的断裂和层理、片麻理等构造薄弱带则为含矿白岗岩体提供了就位的空间。在达玛拉造山运动期间,变质岩地层由于构造、热动力作用而重熔形成花岗岩浆,其中的铀元素进入岩浆。造山期之后,随着岩浆结晶分异的持续进行,岩浆结晶形成晶质铀矿、铀钼矿,含矿白岗岩岩浆沿着断裂、片理、片麻理等构造进入张性空间而就位,从而形成白岗岩型铀矿床(高阳等,2012;范洪海等,2015)。

对白岗岩的流体包裹体研究表明,SJ 矿区内的流体相对 SH 矿区具有更高的 H_2O 含量、 H_2O/CO_2 比值和流体总量,说明在 SJ 矿区内有一个更大的局部流体通量(Nex et al., 2002)。在白垩纪地壳伸展和大陆分离背景下,伴随火山活动发生高温流体运移,晶质铀矿受到热液叠加改造形成次生的 β -硅钙铀矿,而铀钼矿难熔,其中的铀难以被重新分配。值得指出的是,SH 矿区中的白岗岩邻近大理岩,大理岩释放出的 CO_2 在白岗岩周围形成更加富氧的环境,有利于铀钼矿的形成。罗辛地区气候干燥,降雨较少。硅钙铀矿和铀钼矿等次生铀矿物为靠近地表的晶质铀矿、铀钼矿经表生氧化作用形成。

4 找矿模型

罗辛铀矿的找矿标志主要包括:

(1) 产出环境为古老造山带内,与构造剪切带、

穹窿、断裂有密切的时空分布关系;

(2) 围岩地层为可汗组、罗辛组;

(3) 白岗岩是主要的含矿岩体,尤其是 D、E 两种类型的白岗岩;

(4) 矿石矿物包括原生的晶质铀矿、铀钼矿及次生的 β -硅钙铀矿、硅钙铀矿、铜铀云母、钒钾铀矿等,并伴生有金属硫化物;

(5) 变质岩地层中的片理、片麻理等张性空间为矿体就位的有利空间;

(6) 铀矿体周围的铀异常带;

(7) 大理岩与白岗岩接触部位的矽卡岩带。

5 初步结论

(1) 构造对铀矿化控制显著。穹窿倾伏的楔形区域及其转折端、次级断裂、变质沉积地层中的片理、片麻理等皆为有利的容矿构造。

(2) 并不是所有的白岗岩中都有铀矿化出现,D、E 型白岗岩是含矿主岩。

(3) SJ、SH、SK 三个矿区中的矿石矿物组成差异显著,SH 和 SK 矿区中的铀钼矿含量都很高。传统的提取工艺很难从铀钼矿中分离出铀,因此对铀提取工艺提出了新的要求。

(4) 罗辛铀矿是由岩浆结晶分异作用、后期热液叠加改造作用及表生氧化作用共同作用的产物。

References

- Abrahams I. 2009. The nature, geology and spatial distribution of uranium minerals in the SK anomaly area, Rossing Mine, Namibia[D]. South Africa, Univeristy of the Witwatersrand.
- Basson I and Greenway G. 2004. 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*, 38:413-435.
- Berning J, Cooke R and Hiemstra S. 1976. The Rössing uranium deposit, south west Africa[J]. *Econ. Geol.*, 71:351-368.
- Cuney M. 2014. Felsic magmatism and uranium deposits[J]. *Bull. Soc. Geol. France*, 185:75-92.
- Foster D, Goscombe B and Gray D. 2009. Rapid exhumation of deep crust in an obliquely convergent orogeny: The Kaoko Belt of the Damara Orogen[J]. *Tectonics*, 28: 1-24.
- Nex P, Kinnaird J and Oliver G. 2001. Petrology, geochemistry and mineralisation of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damara Orogen, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 33:481-50.
- Nex P, Herd D and Kinnaird J. 2002. Fluid extraction from quartz in sheeted leucogranites as a monitor to styles of uranium mineralization: An example from the Rössing area, Namibia [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2:83-96.
- Shanyengana S H. 2014. 纳米比亚铀矿床与美国科罗拉多铀矿床地质特征对比[D]. 中国地质大学(北京).
- 范洪海, 陈金勇, 顾大钊, 王生云. 2015. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体特征及成矿作用[J]. *矿床地质*, 34(1): 189-199.
- 高阳, 范洪海, 陈东欢, 聂江涛, 王生云. 2012. 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*, (5): 1058-1066.