

·专题研究·

纳米比亚欢乐谷地区白岗岩岩石学及地球化学特征

王生云, 范洪海, 陈东欢, 陈金勇, 顾大钊, 高 阳, 聂江涛

(核工业北京地质研究院, 北京 100029; 中核铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 对纳米比亚欢乐谷地区的白岗岩进行了详细的岩石学和地球化学特征研究, 初步讨论了白岗岩成因。研究结果表明, 欢乐谷地区白岗岩的矿物组成和化学成分显示了较大的变化范围, 白岗岩岩性主要为正长花岗岩和二长花岗岩, 部分为碱长花岗岩、英云闪长岩和花岗闪长岩等。根据岩石和矿物的颜色、结构、矿物学特征、矿化特点等, 可将其划分为 A、B、C、D、E、F 6 种类型, 并且从 A 类至 F 类, 白岗岩的形成时间顺序为由早到晚。白岗岩具有高硅、高碱和低锰、镁、钠、磷、钙的特点, 为高钾钙碱性系列-钾玄岩系列的准铝质-过铝质岩石。不同类型的白岗岩主量元素特征未显示出它们是同源岩浆演化的产物, 而可能是达马拉造山运动晚期构造演化不同阶段的产物。

关键词: 岩石学; 地球化学; 白岗岩; 达马拉造山带; 纳米比亚欢乐谷地区

中图分类号: P588.12⁺1; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0131-12

Petrology and geochemistry of alaskite in the Gaudeanmus area, Namibia

WANG Sheng-yun, FAN Hong-hai, CHEN Dong-huan, CHEN Jin-yong, GU Da-zhao, GAO Yang and NIE Jiang-tao

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, CNNC, Beijing 100029, China)

Abstract: The Gaudeanmus area lies within the southern Central Zone of the NE-trending branch of the Damara orogen. Petrographical and geochemical characteristics of alaskite as well as its petrogenesis and geological features in the Gaudeanmus area of Namibia were studied in this paper. The alaskite sample displays variable mineral and chemical composition. The alaskites in this area range in composition from tonalite to alkali-feldspar granite. The alaskites have been divided into six distinct types based wholly on observable field characteristics of color, grain size, texture, radiometric measurements by scintillometer and macro-scale mineralogy. Cross-cutting and structural relationships were used to create a chronological sequence from type A which is the oldest to type F which is the youngest. Geochemical analyses show that the alaskites contain high silica and alkali, with relatively low manganese, magnesium, sodium, phosphorus and calcium. The alaskites show peraluminous to metaluminous characteristics and belong to high-K calc-alkaline to shoshonite series. Major elements of different types of alaskites do not show characteristics of homogeneous evolution, so they are inferred to be products of different stages of orogeny.

Key words: petrography; geochemistry; alaskite; Damara orogen; Gaudeanmus area, Namibia

收稿日期: 2012-11-19; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 核能开发项目“非洲中南部古老地块铀矿综合识别评价技术及应用研究”

作者简介: 王生云(1984-), 男, 工程师, 岩石地球化学专业, E-mail: wsy2008wsy@126.com。

纳米比亚罗辛白岗岩型铀矿是世界著名的铀矿床,该矿床类型独特,以其产于白岗岩中而闻名于世(Berning *et al.*, 1976)。伴随着地质找矿工作的不断深入,在罗辛铀矿床周边的欢乐谷(Gaudeanmus)、罗辛南(Rössing South)、瓦伦西亚(Valencia)、Ida 穹窿、Goanikontes 等地区也发现了一批与白岗岩密切相关的铀矿床(点)(Nex, 2001a, 2003; Basson and Greenway, 2004)。由于白岗岩与铀成矿作用关系密切,因此受到了国内外地质学界的广泛关注。鉴于白岗岩型铀矿独特的成矿类型及白岗岩在纳米比亚铀矿找矿工作中的重要意义,本文对纳米比亚欢乐谷地区的白岗岩进行岩石学及地球化学特征研究,以期对白岗岩型铀矿成矿地质背景的研究提供基础地质资料,并为该区铀矿床的成因研究提供岩石学及地球化学方面的依据。

1 地质概况

横贯非洲大陆的达马拉造山带(Damara Orogen)属于泛非造山带的一部分,为新元古代至早古生代(650~460 Ma)形成的造山带,是 Kalahari 和 Congo 克拉通碰撞的产物(Coward, 1983; Oliver, 1994)。达马拉造山带分为北东向的陆内分支和南北向的海岸线分支,陆内分支通过纳米比亚和博茨瓦纳一直延伸到津巴布韦。该两个分支根据断层、航磁解译的线性构造带等又可细分为不同的带(Miller, 1983; Corner, 1983)。Congo 克拉通和 Kalahari 克拉通之间 400 km 宽的陆内分支可以划分为几个主要的北东向构造地层域(图 1, Martin and Porada, 1977; Miller, 1983),由北至南分别是:① 北部地台。主要由厚层的 Otavi 组碳酸岩及上覆的 Mulden 群磨拉石建造组成;② 北部带。一般认为北部带是褶皱-逆断层带,该带中的逆断层可能是由早期裂谷阶段形成的正断层再次活化而形成(Henry *et al.*, 1990);③ 北部中央带。主要由褶皱、向北逆冲断陷火山岩、沉积岩及相关的岩体组成;④ 南部中央带。与白岗岩相关的铀矿化几乎都发育在该带中(Roesener and Schreuder, 1998);⑤ Okahandja 线性构造带。该线性构造带将中央带明显的穹盆构造与南部地区的线性构造划分开来;⑥ 南部带。主要由南东向的逆冲推覆加积柱状体地层组成(Kukla *et al.*, 1991);⑦ 南部边缘带。陆内分支的中央带北部的界限为 Otjihorongo 逆断层,南部的界限为

Okahandji 线性构造带。Omaruru 线性构造带将内陆分支的中央带分为北部中央带和南部中央带两部分,南部中央带以岩相特征、出现基底内露层和达马拉花岗岩的出现区别于北部中央带(Nex *et al.*, 2001a, 2001b)。

欢乐谷地区位于达马拉造山带陆内分支的南部中央带。该带以广泛分布基底为核的穹窿构造、侵入大量的花岗岩类(Miller, 1983)和经历了低压高温变质作用(高角闪岩相至麻粒岩相)为显著特征(Basson and Greenway, 2004; Kinnaird and Nex, 2007)。研究区主要由前达马拉基底和新元古代达马拉层序组成,达马拉层序不整合于前达马拉基底之上(图 2)。前达马拉 Abbabis 基底杂岩以长英质眼球状片麻岩为主,含有少量的片岩、石英岩、大理岩、斜长角闪岩和钙硅质岩等;中央带中最古老的多旋回 Abbabis 基底正片麻岩的原岩年龄在 $2\,093 \pm 51$ ~ $1\,038 \pm 58$ Ma 之间(U-Pb SHRIMP, Kröner *et al.*, 1991)。达马拉层序主要由下部的河流相 Nosib 群和上部的泥质、钙质岩石及冰川相、海相的 Swakop 群组成。区内岩浆活动频繁,出露规模较大,期次多,结合前人研究成果和本次地质调查结果,认为岩浆活动产物主要有 4 类:同构造花岗岩、红色细粒花岗岩、白岗岩和基性岩脉(Marlow, 1983)。本文主要研究与铀成矿作用密切相关的白岗岩。

2 白岗岩岩石学特征

欢乐谷地区白岗岩产出形态复杂多变,与围岩的侵入关系十分明显,通常呈不规则交叉的网状岩脉或沿着区域地层的层理或变质沉积岩的片理以岩墙形式侵入(图 3a、3b、3c)。白岗岩岩墙的宽度从几厘米到超过 100 m,宽度变化很大。部分白岗岩形成大的岩体,切穿围岩层理或使围岩发生弯曲变形。白岗岩岩石结构变化较大,细晶结构至伟晶结构均有出现,岩石主要为中粗粒结构和伟晶结构,少量白岗岩文象结构发育。白岗岩主要由石英、碱性长石、斜长石组成,大部分岩石中均可见黑云母,并且在部分白岗岩中电气石、磁铁矿和石榴子石以矿物集合体形式出现。

Nex(2001a, 2003)对欢乐谷地区以西 30 km 处的 Goanikontes 地区白岗岩做了详细的研究,根据野外岩石的相互接触关系、岩石学特征和岩石的放射

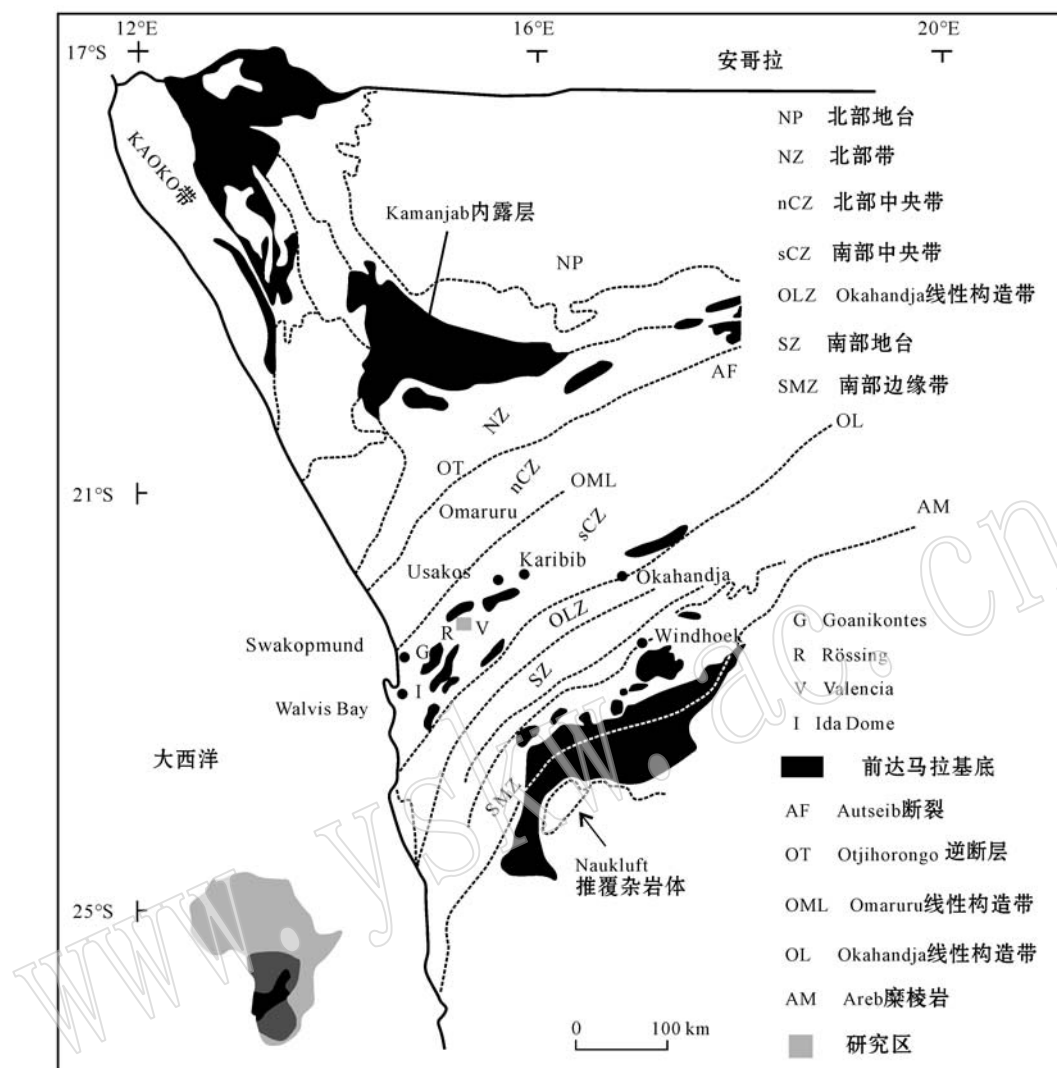


图1 达马拉造山带划分简图及中央带内的铀异常点分布图(据 Miller, 1983)

Fig. 1 Map of the principal subdivisions of the Damara orogen, showing the location of significant uranium anomalies within the Central Zone (after Miller, 1983)

性等宏观地质特征,将白岗岩划分为A、B、C、D、E、F 6种类型,并且从A类至F类白岗岩,其形成时间为由早至晚。Basson 和 Greenway (2004)将Nex在Goanikontes地区划分的6种白岗岩类型与罗辛地区的白岗岩进行了对比研究,将此划分类型应用到罗辛矿区。根据详细的野外地质观察,Nex提出的白岗岩划分方案同样适用于欢乐谷地区。欢乐谷地区的白岗岩也可根据岩石、矿物的颜色、岩石的结构、宏观的矿物学特征、矿化特点等分为6类(表1、图3g~3l)。伽玛能谱测量结果显示(图4),A、B、C类矿化不发育或矿化程度很低,岩石相对富Th, Th/U值大于1;D类和E类白岗岩有明显的矿化,岩石相

对富U,且D类白岗岩是主要的含矿岩石,铀矿化在其中分布极不均匀,岩石以石英呈烟灰色、长石呈白色为典型特征。并可根据各类白岗岩的相互穿插关系(图3c、3d、3e、3f)确定从A类至F类白岗岩由早到晚的形成顺序。

2.1 A类白岗岩

A类白岗岩在6类白岗岩中形成时间相对最早,在欢乐谷地区出露相对较少,为浅灰白-淡红色,中细粒结构,块状构造,岩石塑性变形发育(图3c、3d、3g)。岩石主要由石英(20%~35%)、钾长石(30%~55%)、斜长石(15%~35%)、黑云母(<3%)及少量白云母(图5a)组成。副矿物为锆石、

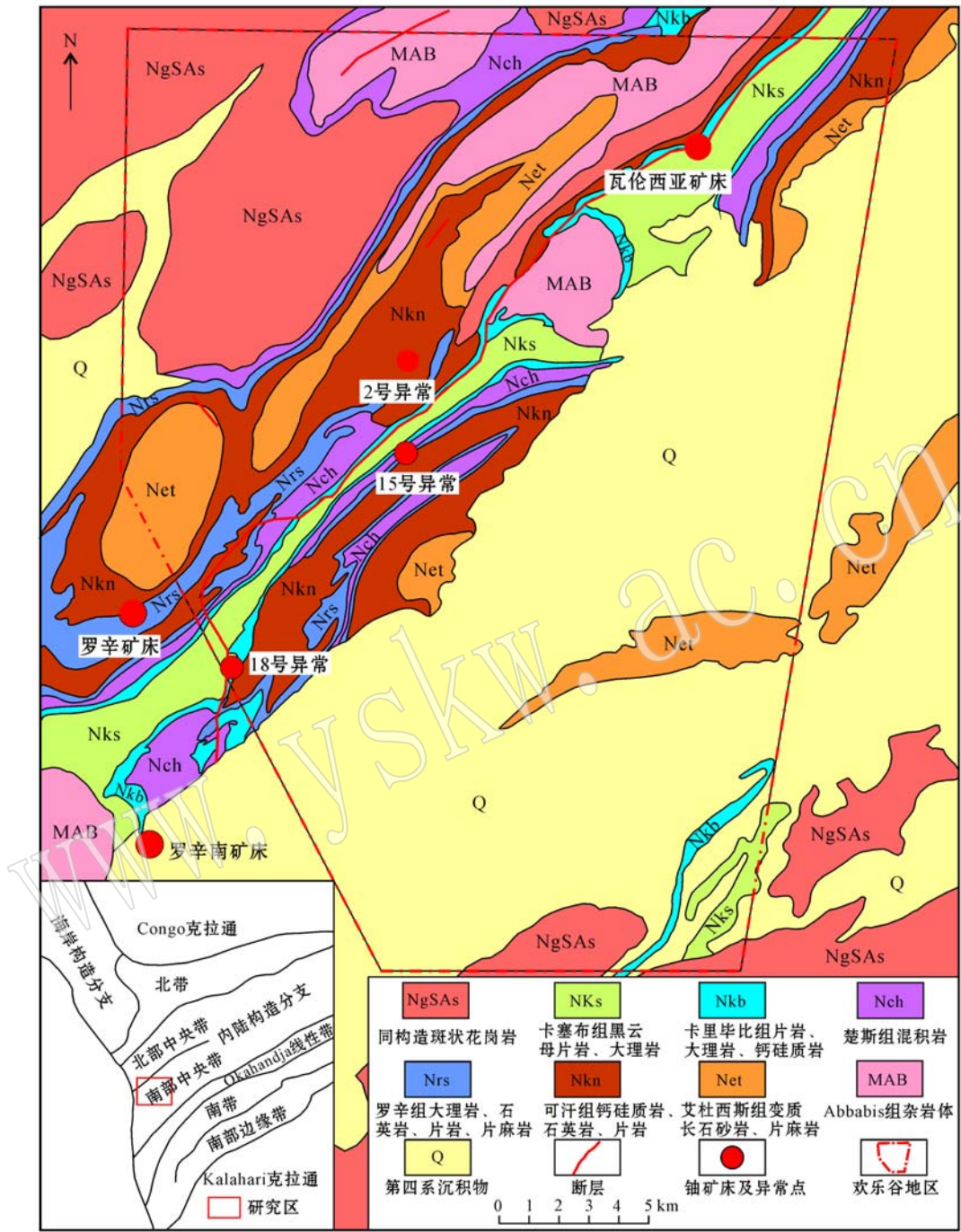


图 2 欢乐谷地区地质略图(王生云等,2013)

Fig. 2 Geologic map of Gaudeamus area, Namibia(after Wang Shengyun *et al.*, 2013)

磷灰石,还有少量的绿帘石及针铁矿等。岩石中斜长石绢云母化较为强烈;大部分岩石中均可见黑云母,黑云母轻微绿泥石化。根据斜长石与石英折射率的比较及测得的斜长石的消光角,判断斜长石的牌号为 12~16,为奥长石。

2.2 B 类白岗岩

B 类白岗岩呈现浅灰白色,岩石粒度变化较大,细粒伟晶结构,多呈板状侵入体,岩石揉皱构造较为发育(图 3d、3e)。矿物组成为石英(20%~35%)、微斜长石(20%~35%)、斜长石(20%~35%)及少量

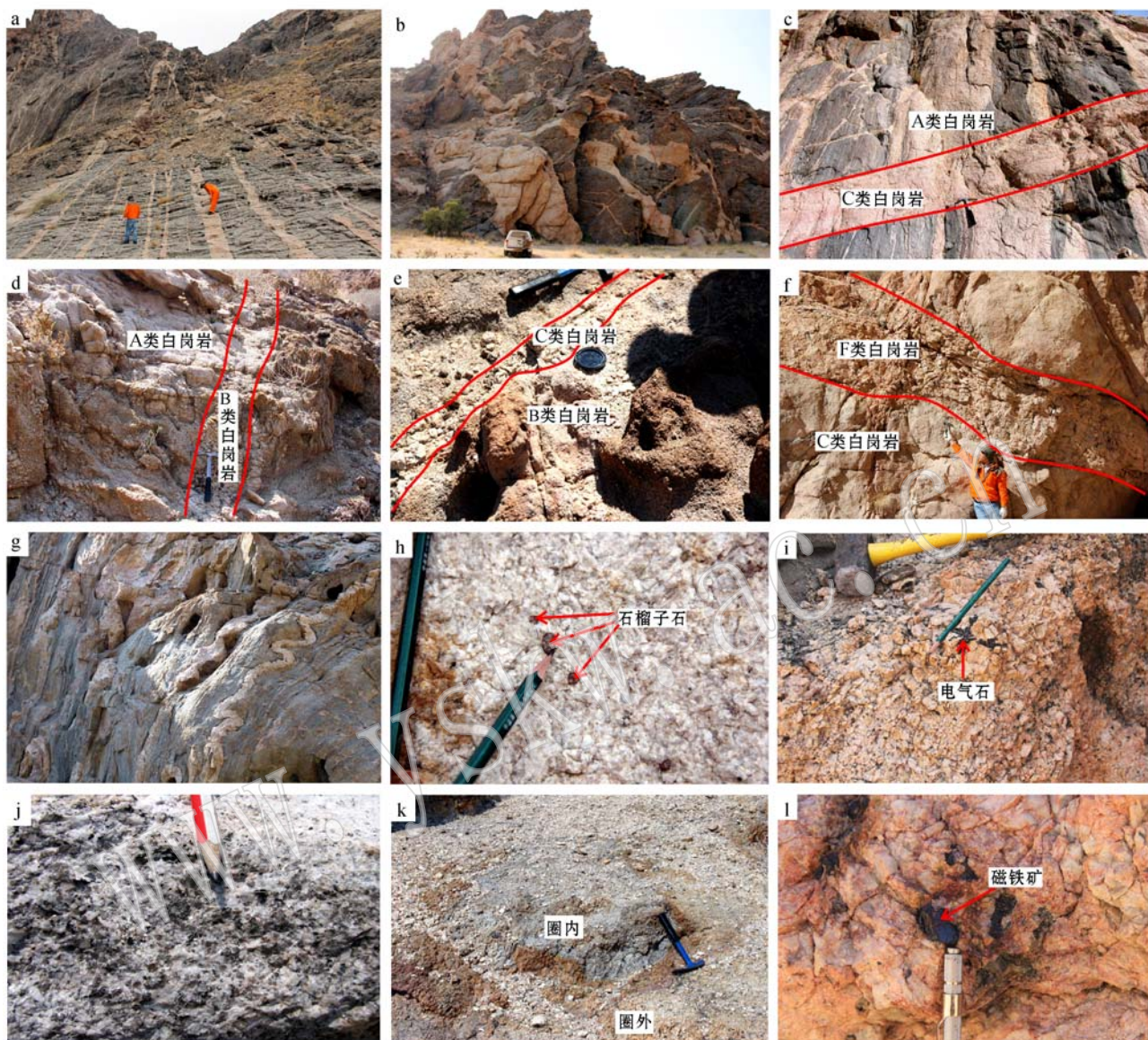


图3 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩野外地质照片

Fig. 3 Field photographs for the alaskite in Gaudanmus area, Namibia

a—白岗岩呈岩墙形式产出; b—白岗岩呈网脉状产出; c—C类白岗岩侵入A类白岗岩; d—B类白岗岩侵入A类白岗岩; e—C类白岗岩侵入至B类白岗岩中; f—F类白岗岩侵入至C类白岗岩中; g—A类白岗岩揉皱构造发育; h—含石榴子石B类白岗岩; i—含电气石C类白岗岩; j—典型D类白岗岩; k—E类白岗岩含有晕圈; l—典型F类白岗岩

a—alaskite occurring as dyke; b—alaskite occurring in stockwork form; c—C-type alaskite that intruded into A-type alaskite; d—B-type alaskite that intruded into A-type alaskite; e—C-type alaskite that intruded into B-type alaskite; f—F-type alaskite that intruded into C-type alaskite; g—A-type alaskite tightly folded; h—garnet-bearing B-type alaskite; i—tourmaline-bearing C-type alaskite; j—typical D-type alaskite; k—E-type alaskite with prominent oxidation haloes; l—F-type alaskite with magnetite

黑云母和白云母; 黑云母大部分发生绿泥石化, 部分发生白云母化。副矿物为石榴子石、电气石、磷灰石、锆石、钛铁矿和磁铁矿等(图 3h、5b)。斜长石为奥、钠长石($An\ 8\sim14$)。

2.3 C类白岗岩

C类白岗岩呈白色-浅粉红色, 形状不规则, 该类白岗岩在欢乐谷区广泛发育。大部分C类白岗岩形成宽度为0.5~100 m的白岗岩岩席(图 3c、3e、3f、

表 1 欢乐谷地区不同类型白岗岩特征表
Table 1 Features of different types of Gaudeanmus area alaskite

类型	岩石颜色	岩石结构	矿物鉴别特征	放射性值
A	浅灰白、淡红色	中细粒花岗结构	长石颜色以白色为主	低
B	白色	细粒伟晶结构	含有石榴子石、电气石和黑云母	低
C	白到浅粉红色	中粒伟晶结构	石英洁净, 含有磁铁矿、褐铁矿和电气石	低, 局部高
D	白色、灰黑色	中粗粒花岗结构	原生铀矿化的围岩, 白色长石, 烟灰色石英, 部分岩石风化面可见 β 硅钙铀矿	很高
E	红到粉红色, 有氧化晕圈	细粒伟晶结构	与 D 型相似, 或者全部由烟灰色、黑色石英和粉红色长石组成	高-很高
F	红色	粗粒伟晶结构	红色粗粒-伟晶状钾长石, 乳白色石英, 磁铁矿和褐铁矿	低

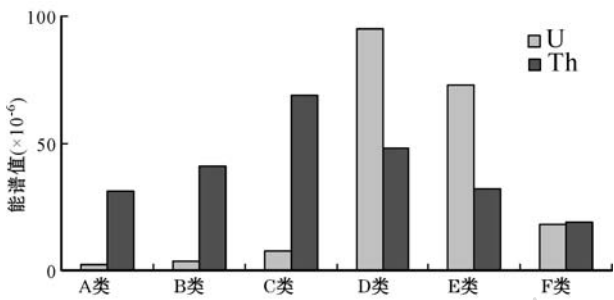


图 4 不同类型白岗岩铀钍含量柱状图
Fig. 4 Histogram of energy spectrum values of different types of alaskite

3i)。矿物组成为石英(20%~30%)、钾长石(40%~55%)、斜长石(15%~30%)及少量黑云母和白云母,大部分黑云母已蚀变为绿泥石,并析出针状、毛发状金红石(图 5c)。副矿物为电气石、锆石、磷灰石、绿帘石、榍石、金红石和钛铁矿、磁铁矿等。斜长石受到后期构造应力的作用,其双晶纹发生扭曲,整个双晶面呈波状消光,斜长石(An 4~30)主要为钠长石。

2.4 D 类白岗岩

D 类白岗岩为主要含铀岩石,主要为中粒至粗粒结构,大部分呈不规则状、网脉状侵入体。岩石的主要特征是:石英呈烟灰色、灰黑色,长石呈乳白色(图 3j),并且在地表岩石中可以看到 β 硅钙铀矿等次生铀矿物。岩石矿物组成为石英(20%~40%)、钾长石(30%~60%)、斜长石(5%~20%),含少量黑云母和白云母,黑云母发生轻微绿泥石化。副矿物主要为锆石、磷灰石、独居石、金红石、绿帘石、榍石、石榴子石、黄铁矿、方铅矿、钛铁矿、赤铁矿及铀矿物(晶质铀矿、硅钙铀矿、铀钛铀矿)等。斜长石相比其他类型白岗岩中的斜长石整体较干净,发生轻微的绢云母化和泥化,发育蠕英石和钠长石净边(图 5d),斜长石的牌号为 15~23,为奥长石,而后期生长

的钠长石净边测得的牌号为 3~10。

2.5 E 类白岗岩

E 类白岗岩颜色、粒度变化较大,以广泛分布不规则氧化晕圈区别于其他的白岗岩(Corner and Henthorn, 1978)。这些不规则的晕圈大部分核部一般为灰白色,边部呈红色(图 3k),有些晕圈的核部和边部均呈现红色,而且在同一白岗岩岩体中可出现不同颜色的晕圈。矿物组成为石英(20%~35%)、斜长石(15%~30%)、条纹长石(30%~40%)、微斜长石(20%~35%)及少量黑云母和白云母,部分黑云母和斜长石分别发生绿泥石化和绢云母化。副矿物有锆石、磷灰石、堇青石、绿帘石、钛铁矿、磁铁矿和硅钙铀矿等(图 5e),斜长石的牌号为 14~25,主要为奥长石。

2.6 F 类白岗岩

F 类白岗岩呈砖红色,粗粒至伟晶结构,以含有乳白色石英和大颗粒红色长石为典型特征(图 3l)。岩石中可含有团块状磁铁矿。岩石主要由石英(25%~40%)、钾长石(25%~50%)和斜长石(10%~15%)组成,含少量黑云母。副矿物有锆石、磷灰石、钛铁矿、磁铁矿等(图 5f),斜长石的牌号为 21~24,主要为奥长石。

3 元素地球化学特征

纳米比亚欢乐谷地区白岗岩的主量元素含量如表 2 所示。从表中可以看出,欢乐谷地区白岗岩化学成分变化相对较大。岩石具有相对较高的硅含量, SiO_2 含量介于 67.44%~78.61%之间; Al_2O_3 含量在 11.58%~16.05%之间;碱质含量较高, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 7.43%~11.97%,并且白岗岩钾含量较高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(1.29~4.42)较大;岩石贫锰、镁、磷、钙等,为淡色岩石。岩石铝饱和指数(A/CNK)

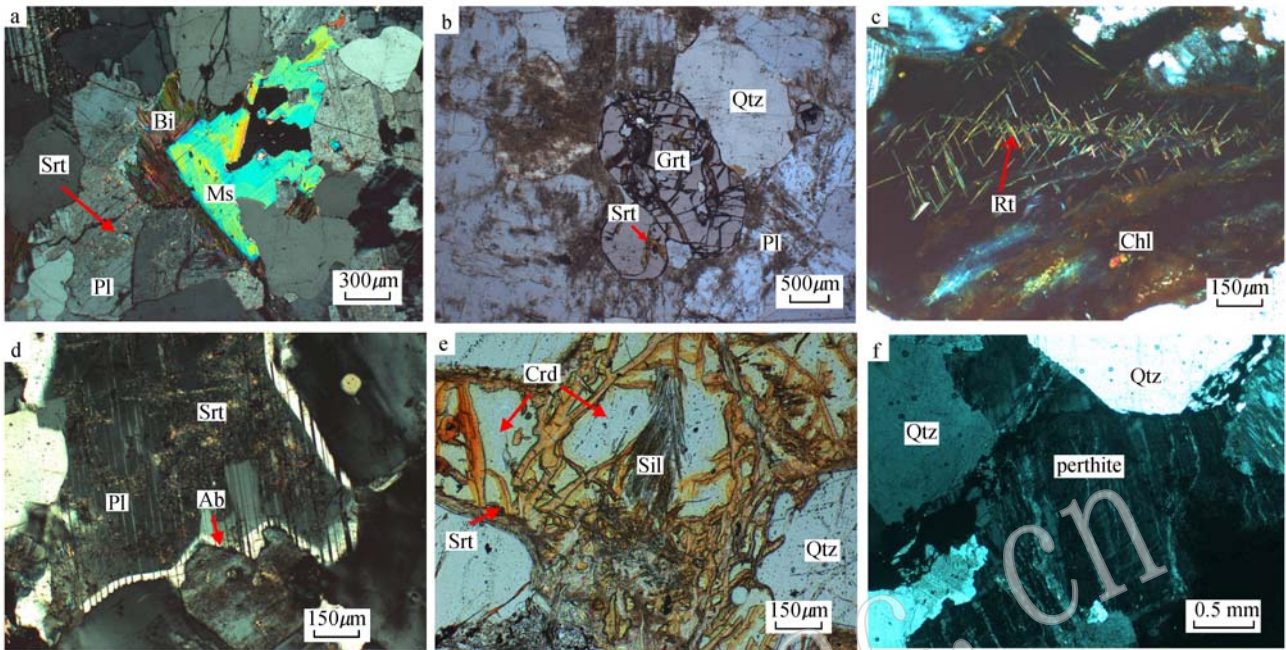


图5 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩显微照片

Fig. 5 Microphotographs of alaskite in Gaudeamus area, Namibia

a—A类白岗岩中的黑云母及白云母，正交偏光；b—B类白岗岩中的石榴子石，单偏光；c—C类白岗岩中黑云母析出金红石，正交偏光；d—D类白岗岩中斜长石发育钠长石净边，正交偏光；e—E类白岗岩堇青石和矽线石，正交偏光；f—F型白岗岩中条纹长石，正交偏光；Qtz—石英；Pl—斜长石；Grt—石榴子石；Srt—绢云母；Bi—黑云母；Ab—钠长石；Ms—白云母；Chl—绿泥石；Rt—金红石；Crd—堇青石；Sil—矽线石；perthite—条纹长石

a—biotite and muscovite in A-type alaskite, crossed-nicols; b—garnet-bearing B-type alaskite, plainlight; c—rutile separated from biotite in C-type alaskite, crossed nicols; d—albite developed along the margin plagioclase in D-type alaskite, crossed nicols; e—E-type alaskite with cordierite and sillimanite, crossed nicols; f—F-type alaskite with perthite, crossed nicols

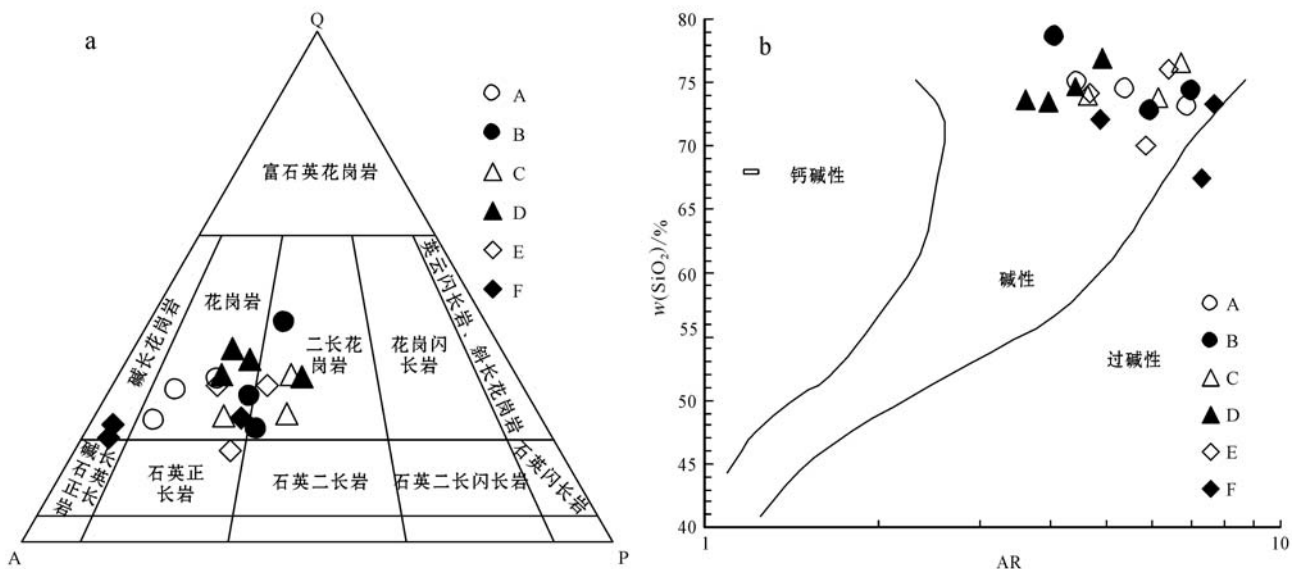
图6 白岗岩 QAP(a)(据 Maniar 和 Piccoli, 1989)和 $\text{SiO}_2 - \text{AR}$ (b)图解(据 Wright, 1969)

Fig. 6 QAP triangular diagram(a, after Maniar and Piccoli, 1989) and alkalinity ratio diagram(b, after Wright, 1969) for alaskite

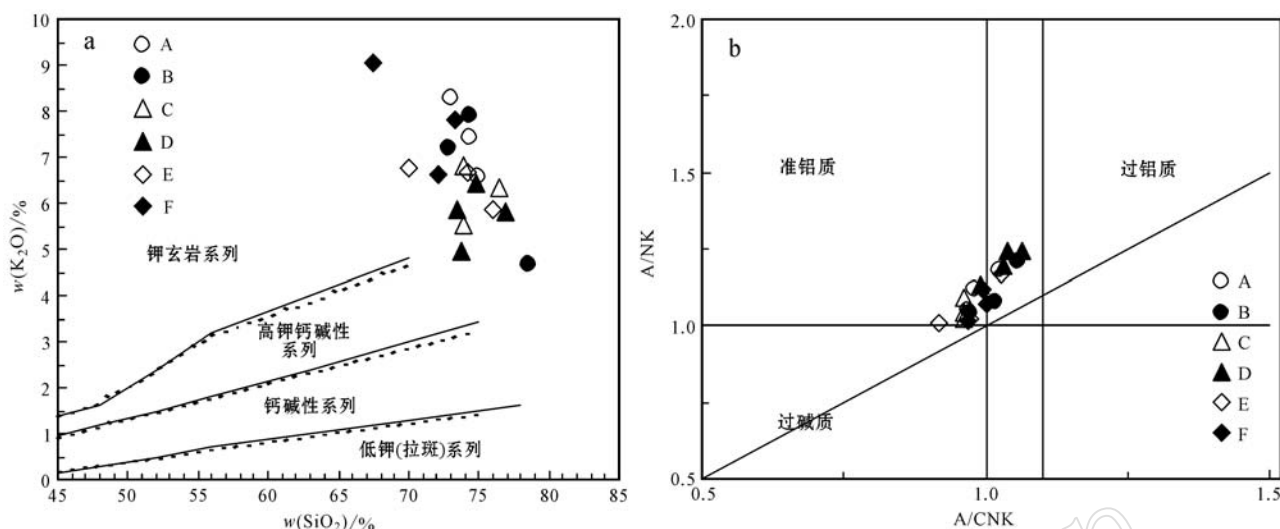


图7 白岗岩 K_2O-SiO_2 (a) 和 $A/NK-A/CNK$ 图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 7 K_2O versus SiO_2 diagram (a) and aluminous index diagram (b) for alaskite (after Peccerillo and Taylor, 1976)

介于 0.92~1.06 之间; 分异指数(DI)较高, 变化于 90.01~98.22, 反映原始岩浆已经历明显的结晶分异作用。碱度率(AR)介于 3.6~7.65 之间。在 QAP 图解(图 6a)中, 投影点落入碱长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩的区域, 与镜下观察基本一致, 矿物组成和化学成分显示了较大的变化范围; 在 SiO_2-AR 图解(图 6b)中, 投影点均落入碱性岩区; 在 SiO_2-K_2O 图解(图 7a)中, 大部分投影点落入高钾钙碱性和钾玄岩系列; 在 $A/NK-A/CNK$ 图解(图 7b)中, 样品投影于准铝质-过铝质范围。综上所述, 白岗岩为高钾钙碱性系列-钾玄岩系列的准铝质-过铝质岩石。

6 类白岗岩中, A 类白岗岩含有相对较高的 CaO 含量(0.63%~0.99%, 均值 0.85%); B 类白岗岩的 A/CNK 值相对较大(0.97~1.06, 均值 1.02); C 类白岗岩具有最低的 MgO 含量(0.07%~0.11%, 均值 0.09%)和最小的 A/CNK 值(均值为 0.96); D 类白岗岩的 TiO_2 和 MgO 含量相对较高(均值分别为 0.23% 和 0.37%), 而 P_2O_5 含量相对最低(均值为 0.03%); F 类白岗岩具有相对较高的 K_2O 含量(6.61%~9.06%, 均值 7.82%)和较大的 K_2O/Na_2O 值(1.92~4.42, 均值 2.91)。

4 岩石成因

对达马拉造山带中白岗岩的成因有不同的认识, 可能是来自前达马拉基底的熔融(Jacob *et al.*,

1986)或达马拉层序下部地层的熔融(Smith, 1965; Hawkesworth and Marlow, 1983), 也可能是由达马拉钙碱性侵入岩的熔融产生的类似于 A 型花岗岩的岩石(Mestres-Ridge, 1992)。

欢乐谷地区白岗岩虽然具有相对较高的 SiO_2 含量(67.44%~78.61%, 均值 73.92%)、 K_2O+Na_2O (7.43%~11.97%, 均值 9.78%)和 K_2O/Na_2O 值(1.29~4.42, 均值 2.28)以及较低的 CaO 含量(0.34%~1.17%, 均值 0.74%)和 MgO 含量(0.031%~0.56%, 均值 0.21%)。但 FeO^T/MgO 值(1.11~20.77, 均值 3.88)低, 岩石中出现白云母、石榴子石、电气石和堇青石等富铝矿物, 未发现碱性角闪石和辉石等矿物, 结合白岗岩中大离子亲石元素 Rb、K、Th、U、Pb 相对富集, Ba、Nb、Sr、P、Ti 相对亏损, Nb/Ta 和 Zr/Hf 值较为接近地壳平均值的特征认为, 欢乐谷地区白岗岩应该属于 S 型花岗岩(王生云, 2013)。

详细的野外地质观察发现, 白岗岩侵入达马拉层序下部地层和前达马拉基底中(McDermott, 1986; Herd, 1996; McDermott *et al.*, 1996; Nex, 1997), 并且在达马拉层序下部的 Nosib 群组地层中只发育了很少量岩石的部分熔融。因而, 白岗岩应该不是达马拉层序中的变质沉积岩部分熔融的产物。白岗岩中白云母、石榴子石、堇青石、电气石等富铝矿物的出现, 表明白岗岩可能源自前达马拉基底变质沉积岩的部分熔融。

在 Maniar 和 Piccoli (1989) 提出的 $Al_2O_3-SiO_2$

表 2 欢乐谷地区白岗岩主量元素分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Representative XRF whole-rock major element geochemical data for alaskite from Gaudeanmus area

白岗岩类型	A			B			C			D
样品编号	10H-74	10H-86	10H-143	10H-87	10H-104	11H-3	10H-35	10H-100	10H-114	10H-130
SiO ₂	74.94	74.43	73.07	78.61	74.41	72.83	73.84	76.49	73.91	74.75
TiO ₂	0.10	0.09	0.05	0.02	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.12
Al ₂ O ₃	13.46	13.24	14.06	11.58	13.48	14.77	13.85	12.58	14.19	13.31
Fe ₂ O ₃ ^T	0.460	0.540	0.310	0.600	0.340	0.471	0.430	0.280	0.500	0.710
FeO	0.250	0.255	0.138	0.450	0.154	0.300	0.196	0.132	0.236	0.348
MnO	0.007	0.012	0.011	0.048	0.010	0.004	0.007	0.004	0.011	0.067
MgO	0.210	0.280	0.091	0.120	0.160	0.132	0.110	0.070	0.100	0.240
CaO	0.990	0.930	0.630	0.740	0.550	0.433	0.610	0.430	0.990	0.970
Na ₂ O	2.59	2.30	2.68	2.76	2.63	3.60	3.61	3.30	4.26	2.54
K ₂ O	6.56	7.42	8.28	4.67	7.90	7.21	6.80	6.34	5.52	6.45
P ₂ O ₅	0.044	0.120	0.180	0.036	0.170	0.122	0.120	0.110	0.097	0.034
LOI	0.51	0.48	0.52	0.61	0.19	0.37	0.48	0.22	0.29	0.66
TOTAL	99.87	99.84	99.88	99.80	99.89	100.00	99.90	99.86	99.91	99.85
A/CNK	1.022	0.980	0.968	1.058	0.971	1.017	0.961	0.962	0.960	1.030
A/NK	1.184	1.120	1.051	1.207	1.047	1.076	1.041	1.023	1.093	1.192
R ₁	2 541	2 406	1 984	3 175	2 173	1 881	2 047	2 442	2 114	2 569
R ₂	383	376	350	315	332	344	344	297	391	380
DI	93.55	94.42	96.98	94.32	97.13	96.8	97.1	98.16	95.17	93.13
AR	4.45	5.37	6.88	4.04	7.02	5.92	6.14	6.72	4.62	4.40

白岗岩类型	D			E			F		
样品编号	ZK11-11-8	ZK11-11-20	ZK0-11-9	10H-61	10H-97	10H-98	10H-88	10H-139	11H-19
SiO ₂	73.47	73.72	76.91	74.24	75.99	69.99	67.44	73.32	72.07
TiO ₂	0.29	0.31	0.21	0.09	0.04	0.03	0.20	0.02	0.14
Al ₂ O ₃	13.06	13.64	11.69	13.61	13.07	16.05	14.13	14.04	14.37
Fe ₂ O ₃ ^T	1.690	1.140	1.090	0.620	0.210	0.270	5.770	0.510	0.704
FeO	1.250	0.577	0.800	0.298	0.100	0.114	2.588	0.225	0.329
MnO	0.027	0.021	0.022	0.024	0.011	0.022	0.030	0.005	0.009
MgO	0.560	0.350	0.310	0.230	0.170	0.091	0.250	0.031	0.456
CaO	0.990	1.170	0.810	0.880	0.340	0.860	0.520	0.360	0.896
Na ₂ O	2.53	3.44	2.46	2.69	3.94	5.22	2.05	3.27	3.45
K ₂ O	5.84	4.93	5.80	6.69	5.84	6.75	9.06	7.80	6.61
P ₂ O ₅	0.035	0.036	0.031	0.087	0.099	0.500	0.059	0.048	0.097
LOI	1.29	1.05	0.47	0.68	0.18	0.12	0.39	0.50	1.05
TOTAL	99.78	99.81	99.80	99.84	99.89	99.90	99.90	99.91	99.85
A/CNK	1.063	1.039	0.991	1.026	0.974	0.919	1.000	0.970	0.994
A/NK	1.245	1.240	1.132	1.166	1.021	1.010	1.072	1.016	1.120
R ₁	2 623	2 532	2 882	2 429	2 298	1 226	1 508	1 897	2 034
R ₂	396	416	334	376	302	412	348	317	405
DI	90.17	91.24	93.64	93.99	98.21	97.56	90.01	98.22	93.6
AR	3.95	3.60	4.90	4.67	6.39	5.85	7.28	7.65	4.86

注：测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成，主量元素使用 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法测试，所用仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪，相对误差小于 5%。

图解(图 8a)中,大部分白岗岩样品落入后造山花岗岩类区域;在花岗岩类 R₁ - R₂ 构造判别图解(图 8 b)中,白岗岩样品主要分布于造山晚期向造山后演化的区域。因此,欢乐谷地区白岗岩可能形成于达马拉造山带造山运动晚期由构造挤压向拉伸转换的

构造体制之下。前人研究表明,达马拉造山带陆内分支中央带中的白岗岩为造山运动晚期的产物(Nex *et al.*, 2001a; Basson and Greenway, 2004; Osterhus and Jung, 2010)。初步认为欢乐谷地区不同类型白岗岩应该是达马拉造山运动晚期构造演化不同

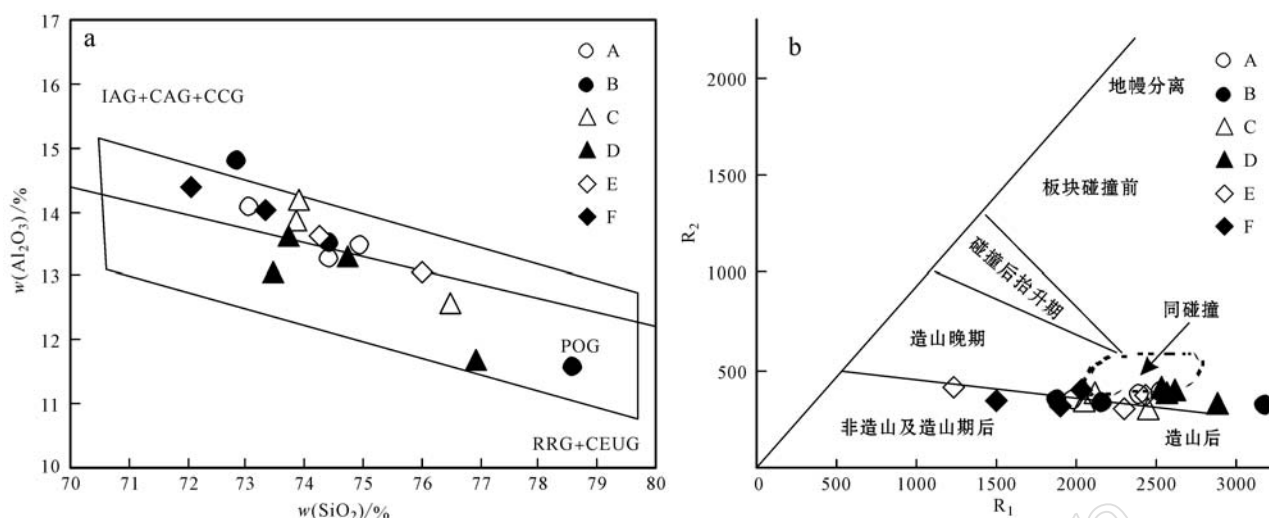


图8 白岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (a, 据 Maniar 和 Piccoli, 1989) 和 $R_2 - R_1$ (b, 据 Batchelor *et al.*, 1985) 图解

Fig. 8 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and $R_2 - R_1$ (b, after Batchelor *et al.*, 1985)

diagrams for alaskite

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; POG—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类;

CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

IAG—*island arc granites*; CAG—*continental arc granites*; CCG—*continental collision granites*; POG—*post-orogenic granites*;

RRG—*rift-related granites*; CEUG—*continental epirogenic uplift-related granites*

阶段的产物。

5 讨论

达马拉造山带陆内分支中央带的铀成矿作用主要与花岗质侵入岩密切相关,该花岗质侵入岩在当地被称为白岗岩(Nex *et al.*, 2001a, 2003)。对于罗辛矿床中富铀的花岗质岩石,Smith(1965)称其为伟晶岩,Nash(1971)称其为钾质花岗岩。

根据我国岩石学专业委员会推荐的专业术语命名方案,白岗岩中的石英在长英质矿物中的含量为20%~60%,钾长石在长石中的含量高于90%。Le Maitre(1989)也有一个相似的白岗岩定义:白岗岩为碱长花岗岩的变种,几乎全部由石英和碱性长石组成,暗色矿物<1%。详细的野外地质调查与室内薄片鉴定表明,欢乐谷地区所谓的白岗岩的岩石结构、主要造岩矿物的含量变化较大,岩性变化可从花岗闪长岩变化为碱长花岗岩,暗色矿物含量在1%~8%,并不符合准确白岗岩的定义。但在整个中央带及研究区,由于该类岩石以较低的色率明显区别于其它类型的花岗质岩石,并且白岗岩这一称呼在一线地质调查中已被广泛接受,因此本文仍沿用这一称呼。

London(1992)指出了几条伟晶岩区别于普通花岗岩的特征:伟晶岩中矿物颗粒极其粗大,岩石中矿物粒度变化极大,各向异性组构发育,在不同尺度上岩石地球化学特征具有多相性,在单个伟晶岩体内或沿着伟晶岩体存在地球化学的分馏。

欢乐谷地区的部分白岗岩具有类似伟晶岩的特征:在某些岩石中矿物颗粒粗大,特别是F类白岗岩;在不同类型的白岗岩中发现了粒度的变化,但是在同一岩体中未发现岩石结构的分带性;偶然可发现各向异性组构、石英长石文象结构、石英长石的交互生长结构的发育;在单个的白岗岩体中没有宏观的矿物分带性。但是欢乐谷地区的白岗岩不完全具备伟晶岩的特征,因此它不是典型的花岗伟晶岩。

最初的铀成矿模式认为,所有的白岗岩来源于同一源区,且同时形成(Berning *et al.*, 1976)。详细的野外地质观察发现,欢乐谷地区白岗岩不是同时形成,而且并非所有的白岗岩都成矿。根据白岗岩的相互穿切关系可以确定,A类白岗岩至F类白岗岩其形成时间由早到晚。在6类白岗岩中,D类白岗岩为主要的含矿岩石,其典型特征为石英呈烟灰色、灰黑色,长石呈白色。相比其他类型白岗岩,D类白岗岩的 TiO_2 和 MgO 含量相对较高(均值分别为0.23%和0.37%),而 P_2O_5 含量相对最低(均值

为 0.03%); Sylvester(1998)提出花岗岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值可作为源区部分熔融温度的指示剂,当岩石的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 100$ 时,部分熔融温度 $< 875^\circ\text{C}$ (称为高压型); $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 100$ 时,部分熔融温度 $> 875^\circ\text{C}$ (称为高温型)。由表 2 可知,欢乐谷地区 A、B、C、E、F 类白岗岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值均大于 100,说明其形成温度小于 875°C ,而 D 类白岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值小于 100,说明 D 类白岗岩形成温度相对较高($> 875^\circ\text{C}$)。而且,不同类型白岗岩中斜长石牌号相近,岩石中(副)矿物组合未显示出规律性变化,而且从 A 类白岗岩至 F 类白岗岩,其主量元素含量并未呈现规律性变化(图略)。所以,不同类型白岗岩主量元素特征并未显示出它们是同源岩浆演化的产物,不同类型白岗岩可能具有各自的源区。

6 结论

(1) 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩根据其岩石或矿物的颜色、岩石的结构、宏观的矿物学特征、矿化特点等,将欢乐谷地区白岗岩划分为 A、B、C、D、E、F 6 种类型;根据各类白岗岩的相互穿插关系,确定它们的形成时间顺序为由早到晚。

(2) 欢乐谷地区白岗岩的岩石结构、矿物组成和化学成分显示了较大的变化范围,该区的白岗岩并不是传统意义上的白岗岩和花岗伟晶岩。

(3) 岩石地球化学研究表明,不同类型白岗岩主量元素特征未显示出它们是同源岩浆演化的产物,不同类型白岗岩可能具有各自的源区,是达马拉造山带晚期构造演化不同阶段的产物。

致谢 野外工作期间,得到了朱西养研高、付俭生研高、张杰林研究员、范光研究员、王俊虎工程师、许志斌工程师以及项目组其他成员的大力帮助;室内工作得到了漆富成老师、戎嘉树老师的悉心指导,在此一致表示深深的感谢!

References

- Basson I J and Greenway G. 2004. The Rössing uranium deposit: A product of late-kinematic location of uraniferous granites in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 38: 413~435.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chem. Geol.*, 48: 43~55.
- Berning J, Cooke R, Heimstra S, *et al.* 1976. The Rössing Uranium Deposit, South West Africa[J]. *Economic Geology*, 71: 351~368.
- Corner B. 1983. An interpretation of the aeromagnetic data covering the western portion of the Damara Orogen in South West Africa/Namibia[A]. Miller R. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[C]. Geological Society of South Africa, Special Publications, 11: 339~354.
- Corner B and Henthorn D I. 1978. Results of a palaeomagnetic survey undertaken in the Damara mobile belt, South West Africa, with special reference to the magnetisation of the uraniferous pegmatitic granites[R]. Report PEL-260 Pelindaba, Atomic Energy Board South Africa.
- Coward M P. 1983. The tectonic history of the Damara Belt[A]. Miller R. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[C]. Geological Society of South Africa, Special Publications, 11: 409~422.
- Hawkesworth C J and Marlow A G. 1983. Isotopic evolution of the Damara Orogenic Belt[A]. Miller R. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[C]. Geological Society of South Africa, Special Publications, 11: 397~408.
- Henry G, Clendenin C W, Stannistreet I G, *et al.* 1990. Multiple detachment model for the early rifting stage of the Late Proterozoic Damara orogen in Namibia[J]. *Geology*, 18: 67~71.
- Herd D A. 1996. Geochemistry and Mineralisation of Alaskite in Selected Areas of the Rössing Uranium Mine, Namibia[D]. MSc thesis, University of St. Andrews.
- Jacob R E, Corner B, Brynard H J, *et al.* 1986. The regional structural and geological setting of the uraniferous granitic provinces of Southern Africa[A]. Anhaeusser C R and Maske S. Mineral Deposits of Southern Africa, II[C]. Geological Society of South Africa, Johannesburg, 1807~1818.
- Kinnaird J A and Nex P A M. 2007. A review of geological controls on uranium mineralization in sheeted leucogranites within the Damara Orogen, Namibia[J]. *Applied Earth Science*, 116(2): 68~85.
- Kröner A, Retief E A, Compston W, *et al.* 1991. Single-age and conventional zircon dating of remobilised basement gneisses in the central Damara belt of Namibia[J]. *South African Journal of Geology*, 94: 379~387.
- Kukla C, Kramm U, Kukla P A, *et al.* 1991. U-Pb monazite data relating to metamorphism and granite intrusion in the northwestern Khomas Trough, Damara Orogen, central Namibia[J]. *Commun. Geol. Surv. Namibia*, 7: 49~54.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of

- Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Oxford: Blackwell, 193.
- London D. 1992. The application of experimental petrology to the genesis and crystallisation of granitic pegmatites[J]. Canadian Mineralogist, 30: 499~540.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. GSA Bull., 101(5): 635~643.
- Marlow A G. 1983. Geology and Rb-Sr geochronology of mineralised and radioactive granites and alaskites, Namibia[A]. Miller R McG. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[C]. Geological Society of South Africa, Special Publication 11, 289~298.
- Martin H and Porada H. 1977. The intracratonic branch of the Damara Orogen in Namibia. Discussion of geodynamic models[J]. Precambrian Research, 5: 311~338.
- McDermott F. 1986. Granite Petrogenesis and Crustal Evolution Studies in the Damara Pan-African Orogenic Belt, Namibia[D]. PhD Thesis, The Open University.
- McDermott F, Harris N B W & Hawkesworth C J. 1996. Geochemical constraints on crustal anatexis: a case study from the Pan-African Damara granitoids of Namibia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 123: 406~423.
- Mestres-Ridge D. 1992. An Investigation into the Controls on the Distribution of Betatite in the SH area, Rössing Uranium Mine[D]. Namibia. M. Sc Dissertation, University of St. Andrews.
- Miller R M. 1983. The Pan-African Damara Orogen of South West Africa/Namibia[A]. Miller R McG. Evolution of the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[C]. Geological Society of South Africa, Special Publications, 11: 431~515.
- Nash C R. 1971. Metamorphic petrology of the SJ area, Swakopmund District, South West Africa[J]. Bulletin of the Precambrian Research, 9: 77.
- Nex P A M. 1997. Tectono-metamorphic Setting and Evolution of Granitic Sheets in the Goanikontes Area, Namibia[D]. Ph.D. Thesis(Unpublished), National University of Ireland.
- Nex P A M, Kinnaird J A and Oliver G J H. 2001a. Petrology, geochemistry and mineralisation of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damara Orogen, Namibia[J]. Journal of African Earth Sciences, 33: 481~502.
- Nex P A M, Kinnaird J A and Herd D A. 2003. The occurrence, mineralogy and chemistry of betafite and pyrochlore from sheeted leucogranites of the Rössing area, Namibia: implications for the composition of Ceramics for radioactive waste disposal[R]. Economic Geology Research Institute, School of Geosciences University of the Witwatersrand, 374: 1~24.
- Nex P A M, Oliver G J H and Kinnaird J A. 2001b. Spinel-bearing assemblages and P-T-t evolution of the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[J]. Journal of African Earth Sciences, 32: 471~489.
- Oliver G J H. 1994. Mid-crustal detachment and domes in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[J]. Journal of African Earth Sciences, 19: 331~344.
- Osterhus L and Jung S. 2010. Anatexis of mafic and felsic lower crust: geochemistry and Nd, Sr and Pb isotopes of late-orogenic granodiorites and leucogranites (Damara Orogen, Namibia)[A]. European Geosciences Union General Assembly 2010, Anonymous, Geophysical Research Abstracts[C], 12.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions. Mineral Petrol., 58: 63~81.
- Roesener H and Schreuder C P. 1998. Uranium in the mineral resources of Namibia. Ministry of Mines and Energy[J]. Geological Survey Namibia, 7.1-1~7.1-62.
- Smith D A M. 1965. The geology of the area around the Khan and Swakop rivers in South West Africa[A]. Memoir of the Geological Survey of South Africa. South West Africa Series[C], 3.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 45: 29~44.
- Wang Shengyun, Fan Honghai, Chen Jinyong, *et al.* 2013. Petrogenesis and tectonic setting of prophyritic granites in Gaudeamus area, Namibia[J]. Global Geology, 32(4): 773~782(in Chinese with English abstract).
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 106: 370~384.

附中文参考文献

- 王生云, 范洪海, 陈金勇, 等. 2013. 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, 32(4): 773~782.