## 格陵兰麻利索克(Maniitsoq)镍铜矿潜力评价

侯晓宇<sup>1,2</sup>,赵元艺<sup>2</sup>,刘春花<sup>2</sup> HOU Xiaoyu<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuanyi<sup>2</sup>, LIU Chunhua<sup>2</sup>

1.中国地质大学(北京),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矿产资源评价重点实验室,北京100037

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:麻利索克(Maniitsoq)位于格陵兰首府努克以北约160km处,是近年新发现的超大型高品位镍铜矿床。北美镍业公司对 该矿床进行了一系列的勘查活动,累计施工钻探29840m,其中MQ-16-117钻孔268.70~342.75m段长74.05m的岩心中,Ni含 量1.08%,Cu含量0.54%。由于中国科技界和企业对走出去参与格陵兰地区的矿产勘查开发甚感兴趣,因此系统研究该矿床的 地质特征与资源潜力很有必要。全面收集、分析了该矿床的有关资料,并和中国的金川镍矿进行对比,结果显示,麻利索克镍 铜矿为"小岩体成大矿"的典型代表,属于深部"熔离-贯入成矿"成矿机制;根据以往的勘查资料,评价其镍的金属量为195× 10<sup>4</sup>t,为世界级规模,建议中国企业重点关注。

关键词:麻利索克;格陵兰;镍铜矿床;潜力评价

中图分类号:P618.41;P618.63 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)08-1493-07

# Hou X Y, Zhao Y Y, Liu C H. Assessment of potential of the Maniitsoq Ni-Cu deposit in Greenland. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1493-1499

**Abstract:** The Maniitsoq deposit is located about 160km north of Nuuk, the capital of Greenland. The deposit is a very large highgrade nickel-copper deposit discovered in recent years. The mine owners North American Nickel Company has carried out a series of exploration activities in the deposit, the cumulative drilling has reached 29840m, of which a 74.05m long core at he depth of 268.70~342.75m in MQ-16-117 drill hole has nickel content of 1.08% and copper content of 0.54%. As the Chinese scientists and enterprises are very interested in going abroad to participate in mineral exploration and development of Greenland area, the systematic understanding of geological characteristics of the deposit, and resource potential is extremely necessary. The authors comprehensively collected and analyzed the relevant data of the deposit, and compared it with China´s Jinchuan nickel ore deposit. The results show that the Maisuoke nickel-copper deposit is a "small rock body forming a large deposit" and a typical representative of the "deep liquation-injection mineralization" ore-forming mechanism. Based on the previous survey data, the authors hold that the metal content of the nickel is 19.5 million tons, which has reached the world class scale, and the Chinese enterprises should pay due attention to this situation.

Key words: Maniitsoq; Greenland; nickel copper deposit; potential evaluation

收稿日期:2017-04-11;修订日期:2017-05-23

**资助项目:**中国地质调查局项目《中亚及邻区铜镍铀资源潜力评价与应用示范》(编号:121201103000150006)、国家海洋局项目《极地天 然气水合物与矿产资源利用战略研究》(编号:JDTS05)和中国地质调查局项目《中蒙边境大型-特大型铜-金、铀和稀有金属矿 集区对比研究》(编号:12120115066201)

作者简介:侯晓宇(1993-),男,在读硕士生,从事矿床地球化学研究。E-mail:xiaoyuHou1@126.com

通讯作者:赵元艺(1966-),男,博士,研究员,从事矿床学、地球化学研究。E-mail:yuanyizhao2@sina.com

格陵兰岛是世界第一大岛,处于北极圈内,面积216.6×10°km²,相当于中国国土面积的22.6%,首府努克。格陵兰岛除有限居民点外,几乎都是无人区,约有5.69万人,全岛约4/5的地区在北极圈内(图1)。麻利索克矿床位于格陵兰岛的西南海岸的努克以北160km,矿床临近SEQI港,这里常年有浮冰,并允许全年运输,是现代服务集装箱港口,同时也是达到欧洲标准的后勤支持和沿海补给服务区。笔者对该矿床的认识主要来源于北美镍业公司网站资料。北美镍业公司对该矿床进行了大量物相分析,现今处于找矿阶段<sup>11-4</sup>。

镍、铜是中国长期紧缺的战略性资源,格陵兰 岛的找矿勘查及研究程度较低,尤其是镍铜矿的成 矿规律及其资源潜力,有待深入研究。本文旨在对 麻利索克镍铜矿床的地质特征、成矿模型及资源潜 力评价进行总结,通过与中国金川岩浆铜镍金属硫 化物矿床的对比,加深对麻利索克矿床成矿作用的 认识,为中国矿山企业"走出去"提供参考,同时指 导中国相似类型矿床的研究<sup>[1-4]</sup>。

北美镍业公司是 Maniitsoq 矿床的拥有者并进 行了大量勘查工作。该公司于2011年8月1日获得 麻利索克镍铜矿床勘查许可证。2012—2016年,北 美镍业公司进行了一系列钻井勘查,共计29840m。

2011—2014年,进行了多次系统的VTEM(航 空瞬变电磁法系统)勘探调查<sup>51</sup>、地面重力勘探调查 和深时域电磁勘探调查,并进行了地表面共计



图 1 麻利索克矿床位置 Fig. 1 The location of the maniitsoq deposit

14590m的地球物理测井勘查,发现在 IHC、Fossi-lik和邻区有高品位的镍铜矿床。

2012—2015年,北美镍业公司进行了 VTEM 瞬 变电磁法勘查,利用 Worldview-3 卫星遥感勘查地 球表面,并进行了 20245m 的测井勘查。在 Imiak Hill,MQ-12-001 钻孔 11.82~16.94m 处长 5.12m 的 岩心中,Ni含量 2.20%,Cu含量 0.55%<sup>[4]</sup>。

2015年,进行VTEM勘查,并进行采样钻探,全年 共计5655m。在MQ-15-082钻孔93.00~116.70m处 长23.7m的岩心中,Ni含量1.98%,Cu含量0.62%<sup>[4]</sup>。北 美镍业公司利用worldview-3(wv-3)卫星进行地质勘 查<sup>[6]</sup>。较以前的遥感卫星,具有更高的空间分辨率图 像,镍铜多金属矿床的颜色特征更加明显,根据遥感 特征,更容易在外围找到更多潜在镍铜矿<sup>[7]</sup>。

2016年,在矿化较好的区域进行了一系列的钻 井勘探,共计9595m,在MQ-16-117钻孔,268.70~ 342.75m 处长74.05m 的岩心中,Ni含量1.08%,Cu 含量0.54%<sup>[4]</sup>。北美镍业公司还进行了地表的地球 物理勘查(IP/EM),并且后续跟进了Worldview-3 卫星遥感勘探和VTEM电磁法勘查及井间电磁探 测(BHEM)。

1 地质背景

格陵兰岛经历了从太古宙一第四纪约4.0Ga的 地质发展周期,主要由一系列太古宙和古元古代造 山作用形成的结晶基底组成。格陵兰岛是除南极 大陆以外唯一未被系统开发的大岛,成矿地质条件 优越,矿床类型丰富,尤其是金属矿产资源丰富,矿 种齐全,找矿潜力大。

格陵兰镍矿(点)星罗棋布,镍矿的勘查热度伴随着近年来格陵兰寻找 PGE(铂族元素)的升温而 大幅提高。格陵兰镍矿的主要成矿类型为岩浆岩 型,镍矿床均产于各种基性-超基性岩体中。岩浆 熔离性铜镍矿的主要找矿方向为太古宙和元古宙 结晶基底火山沉积变质岩建造及元古宙、古生代的 火山-沉积盆地,古近纪玄武岩分布区<sup>13</sup>。前人在格 陵兰岛对该类矿产的探寻已有一段历史,目前已发 现的典型镍矿床(点)有11处,如费斯肯纳色特杂岩 体,矿区岩石以片麻岩、斜长角闪岩、斜长-辉长岩 和橄榄岩为主,PGE 与铬铁矿共生于基性-超基性岩 单元中。斜长角闪岩平均含 Ni 400×10<sup>-6</sup>;菲斯克峡 湾-艾米扣基性-超基性岩体(Fiskefjord-Amikoq)矿 体产于纯橄岩、橄榄岩中,最高含 Cr 3.7%, Ni 2.8%, 全岩 PGE 4.5g/t<sup>[3]</sup>。

麻利索克镍铜矿床所在区域主要地质构造单元 为太古宙克拉通(3.85~2.5Ga),主要位于格陵兰西南 和东南,由表壳岩层和高度变质片麻岩组成<sup>18-91</sup>。

格陵兰麻利索克镍铜矿床是一个古老的(3Ga)严 重侵蚀区域,属于费斯克峡湾(Finnefjeld)域<sup>[10]</sup>。该地 区广泛分布含Ni的超镁铁质苏长岩带,代表地壳地幔 融化引发的浸染作用<sup>[11]</sup>,其主要是苏长岩与后成闪长 岩的侵入作用,苏长岩和闪长岩可侵入到岩浆运移系 统的深层结构。在费斯克峡湾(Fiskefjord)南部的大多 数区域,同样也发生闪长岩的小规模侵入作用<sup>[12-13]</sup>。

麻利索克镍铜矿床的围岩主要为太古宙片麻

岩、角闪岩及一些年轻的花岗岩侵入体<sup>[13-15]</sup>。主要 金属硫化物矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿和 黄铜矿。通过对苏长岩侵入带进行瞬变电磁法勘 查,由电磁强度与矿石构造的关系可以得出麻利索 克矿床的矿石构造类型,其中,电磁强度与矿石构 造主要对应关系如下:强-块状和半块状,中等-网 脉状,弱-浸染状。由航磁异常图可见,格陵兰苏长 岩带中,矿石构造包括半块状、块状、角砾状、浸染 状、气孔状构造等(图2-a)<sup>[6]</sup>。野外岩石露头显示了 苏长岩和闪长岩一些典型露头特征。典型的侵入 体呈现出深棕色,受风化作用而易碎,中粗粒隐晶 质结构,无定型,混杂状,逐步过渡到主控的岩石, 主要为英云闪长质片麻岩(图2-b)<sup>[6]</sup>。



图2 航磁异常(a)、钻探施工现场(b)与矿相图(c、d)
Fig. 2 Helicopter TDEM results, drilling construction site and the microscope photographs of ores
a-航磁异常图(据参考文献[6]修改);b-野外勘查钻探照片(据参考文献[4]修改);
c-显微镜下磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿在斜长石中;d-扫描电镜矿物定量 评价(据参考文献[6]修改);Pn-镍黄铁矿;Po-磁黄铁矿;Cp-黄铜矿

从新鲜的未风化岩心制片进行镜下观察,在薄 片中,大多数苏长岩为中等粒状,矿物为斜方辉石 及斜长石,并具有或多或少的粒状结构。间隙部位 聚集的矿物主要是磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿, 这些矿物高度弯曲,呈非混相液滴状(图2-c)<sup>116</sup>。

通过扫描电镜矿物定量评价(图 2-d),可知麻 利索克矿石的主要矿物有磁黄铁矿、镍铬铁矿、黄 铁矿、辉石类和闪石<sup>66</sup>。

2 成矿机制与资源潜力

2.1 成矿机制

2.1.1 成矿物质来源

侵入岩石与原始的地幔极其相似,富含镁、镍、 铬,因此不太可能经历明显的地壳分异作用。可能 是因为大地构造运动使地壳表面破裂,从而导致很 长一段时期的岩浆上涌,并有证据表明表面地壳堆 积的铁硫化物角闪岩层与局部的侵入体有关,而且 这可能是大量硫化物饱和物的来源。在 Maniitsoq 可以见到没有熔融的地表和苏长岩侵入下面的角 砾岩地层上的证据。因此,镍源可能是地幔<sup>[16-17]</sup>。 2.1.2 岩浆熔离与铜镍硫化物结晶沉淀作用

Cu、Ni和铂族元素在地壳中的丰度值均较低, 但是在麻利索克镍铜硫化物矿床中,岩体内富集了 大量的Cu、Ni和铂族元素,试想将岩体中的成矿元 素均分于岩体中,其平均含量将高出丰度值很多<sup>[18]</sup>, 表明麻利索克含矿岩体侵位之前在深部便熔离为 富含成矿元素的超基性岩浆,这些岩浆沿着深部裂 隙侵入到地壳深处后,在特定的物化条件下再次逐 渐熔离并结晶成岩成矿。

2.1.3 裂隙贯入作用过程

富含成矿元素的岩浆沿一定的通道上侵,当岩 浆侵入到成岩空间,如大断裂,岩浆流动速度会迅 速减慢,当岩浆处于相对平静的环境,由于温度的 逐渐降低,压力随之减小,岩浆再次发生熔离作用, 在岩浆中形成更富集的成矿元素。

在岩浆上侵到现存空间之前,在深部岩浆房 中,由于温度、压力等条件发生变化,导致岩浆达到 硫饱和,进而发生熔离作用,生成不混溶硫化物,向 底部分异聚集后,再上侵贯入到现存空间。岩浆侵 入后,随着温度、压力的降低,金属硫化物出现熔 离,并产生结晶沉淀作用,最先结晶的是硅酸盐矿 物<sup>109</sup>,随后金属硫化物则以胶结物的形式,充填于硅 酸盐矿物颗粒的空隙中<sup>[20]</sup>。金属硫化物从固溶体中 分离而出后,受到重力分异作用,在母岩的底部聚 集结晶成矿。通过以上分析,结合北美镍业公司对 成矿作用的总结,可以得出麻利索克镍铜矿床的浅 部成矿过程<sup>[6,13]</sup>(图3-a):①地表发生拉张构造运动, 盆地形成,随后发生了苏长岩侵入作用;②经历了 高等的变质作用,导致片麻岩部分熔融及大量长英 质矿物的侵入作用;③发生压实、剪切、形成褶曲作 用,固结成矿。

麻利索克矿床处于克拉通边缘<sup>[21]</sup>,结合北美镍 业公司对成矿作用的总结,得出麻利索克镍铜矿床 的深部成矿过程<sup>[21]</sup>(图3-b):①大规模镁铁质-超镁 铁质岩浆从地幔贯入;②岩浆在地壳中发生分馏与 混染;③硫化物饱和,发生分凝作用与堆积作用;④ 同期及后期的构造地质作用。

2.2 麻利索克镍铜矿床资源潜力分析

2.2.1 麻利索克镍铜矿床Ni、Cu、Co百分含量及 TPM值的含量

本文通过对北美镍矿业公司近几年在 Fossilik 地区及 Imiak 山已有钻探测井样品使用平均算数的 方式进行分析计算,得出麻利索克镍铜矿床钻井探 测区域的样品 Ni、Cu、Co平均品位及 PEG 值(PEG 是金、铂、钯的总量)。其中,Ni品位为0.83%,Cu品 位为0.224%,Co品位为0.03%,TPM=0.15g/t。

根据麻利索克相关区域地质特征及麻利索克 钻井靶区实际情况,成矿面积评估为1.0km<sup>2</sup>,由勘探 钻井可探取深度实际情况,评估成矿深度为300m, 结合矿石比重,矿化率实地情况,资源潜力评估方 法<sup>[23-25]</sup>如下。

数学模型:由于麻利索克镍铜矿床为裂隙贯入 式成矿,整个矿体呈倒锥形,因此将矿体构建为锥 体,建立数学模型,结合锥体体积计算方法评估矿 体资源潜力,*M*=1/3×*S*×*H*×λ×γ×α。

 $\alpha$ 表示品位,S表示面积,H表示深度, $\gamma$ 表示比重,G表示质量,V表示物体的体积,M表示储量, $\lambda$ 表示矿化率。

2.2.2 麻利索克金属量的计算

根据"小岩体成大矿"的理论,以及麻利索克相 关区域地质特征和麻利索克钻井靶区,估计成矿面 积约1km<sup>2</sup>。

金属资源量的计算:区域含矿面积S=1.0km<sup>2</sup>= 1.0×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>。按照钻井可探取深度,深度为H=300m,



图 3 麻利索克镍铜矿床成矿模式图(据参考文献[6]修改) Fig. 3 The mineralized model of the maniitsoq deposit a-浅部成矿模式图;b-深部成矿模式图

含矿体积(视为锥形)为 $V=1/3 \times S \times H=1/3 \times 300 \times 1.0 \times 10^6 = 1.0 \times 10^8 \text{m}^3$ , 矿石比重  $\gamma = 5$ , 则矿石质量  $G=1.0 \times 5 \times 10^8 = 5 \times 10^8 \text{t}$ , 平均Ni品位  $\alpha_1 = 0.83\%$ , 平均Cu品位  $\alpha_2 = 0.224\%$ , 平均Co品位  $\alpha_3 = 0.03\%$ , 平均TPM为 0.152g/t, 矿化率  $\lambda = 47\%$ , 储量计算公式为 $M = \lambda \times \gamma \times V \times \alpha$ ,则镍储量为 0.47 × 5 × 10<sup>8</sup> × 0.83% = 1.9505 × 10<sup>6</sup>t, 铜储量为 0.47 × 5 × 10<sup>8</sup> × 0.224\% = 5.264 × 10<sup>5</sup>t, 钴储量为 0.47 × 5 × 10<sup>8</sup> × 0.03\% = 7.05 × 10<sup>4</sup>t, TPM为 0.47 × 5 × 10<sup>8</sup> × 0.152 = 3.572 × 10<sup>7</sup>g = 35.72t<sub>o</sub>

#### 3 与金川镍铜矿床对比

麻利索克镍铜矿床与中国金川镍铜矿床的构造环境、岩体特征和成矿特征对比结果如表1所示。麻利索克和金川2个含矿侵入体规模都不大,但金川镍铜矿床产出了世界级的超大型铜镍铂族金属矿床,符合"小岩体成大矿"理论<sup>[22,33]</sup>,麻利索克很可能是下一个世界级镍铜硫化物矿床,尽管成矿

成岩年龄、岩体岩相学有大的差异<sup>[33]</sup>,但地质特征相似,具有可比性<sup>[26]</sup>。

通过对比,麻利索克镍铜矿床与金川铜镍矿床 在成岩特征、矿床特征上具有相似性,均属于裂隙 贯入式岩浆矿床<sup>[31]</sup>。

成矿作用是在富有动力的岩浆环境下在上侵过 程中发生的,岩浆熔融体富含挥发组分,上侵活动剧 烈。岩浆在运移过程中与围岩发生相互作用、组分交 换和成矿物质的富集,早期的硫饱和机制-地壳混染 或岩浆温度降低是岩浆在通道运移或侵位过程中成 矿的必要条件。在深部熔离-贯入成矿作用过程中, 含矿岩浆上侵和后续岩浆补给、混合是镁铁-超镁铁 岩体中硫化物被聚集在通道内形成超大型铜镍铂族 金属矿床的重要机制<sup>[26-27]</sup>。

4 结 论

(1)麻利索克镍铜矿床与中国金川岩浆铜镍金

### 表1 麻利索克与金川超大型岩浆铜-镍-铂族金属硫化物矿床地质特征对比 Table 1 Geological comparative study of two Ni-Cu-Co sulfide deposits of Maniitsoq and Jinchuan

|         | 矿床名称       | 麻利索克矿床                        | 金川矿床                                     |
|---------|------------|-------------------------------|--|
|         | 构造环境       | 格林兰西南部太古宙片麻岩基底中               | 中朝地台与元古宙海之间的裂谷带中                         |
| 成 岩 特 征 | 岩体分布       | 格陵兰西南部苏长岩侵入带中                 | 沿推覆大断裂上盘呈带状分布                            |
|         | 规模         | 勘查中                           | 1.34km <sup>2</sup> ,岩墙状,长6500m,宽几米至500m |
|         | 岩浆系列       | 科马提岩系列、玄武岩系列                  | 拉斑玄武岩系列                                  |
|         | 岩石组合       | 橄榄岩、苏长岩、镁铁质辉长岩和富镁闪长岩。粒度多数     | 二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、二辉岩、纯橄榄              |
|         |            | 为中等粒度到中粗粒度                    | 岩,粒度为中细粒相-中粗粒相-中粒相呈依次侵入的顺序               |
|         | 围岩         | 片麻岩、角闪岩及一些年轻的花岗岩侵入体           | 顶板为花岗片麻岩、混合岩、斜长角闪岩、大理岩。底板为大              |
|         |            |                               | 理岩、黑云母片麻岩等                               |
|         | 成岩时代       | 2500~3000Ma                   | 1477.4~1539.4Ma                          |
| 矿床特征    | 矿体分布       | 苏长岩带以点状产出                     | 在区域上岩带成点状单独产出                            |
|         | 矿石类型       | 半块状矿石、块状矿石、角砾状矿石、浸染状矿石、网脉状矿石、 | 浸染状矿石、海绵陨铁状矿石、块状矿石,稠密浸染状、脉状、             |
|         |            | 气孔状矿石                         | 块状矿石、云雾状                                 |
|         | 主要金属矿物     | 镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿             | 磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿、马基诺狂、墨铜矿、             |
|         |            |                               | 紫硫镍铁矿、褐硫钾镍铁矿等                            |
|         | 成矿元素组合及其特点 | 平均Cu·Ni(Co)・PGE               | Cu·Ni(Co)•PGE                            |
|         |            | 0.83% Ni 0.224% Cu 0.03% Co   | 1.06% Ni .0.73% Cu .0.02%~0.05% Co       |
|         |            |                               | Ni/Cu=1.46                               |
|         | 成矿机制       | 深部熔离-裂隙贯入式                    | 就地熔离矿体、深熔-贯入矿体、晚期贯入矿体、接触交代矿              |
|         |            |                               | 体、热液叠加矿体                                 |
|         | 资料来源       | [2-4,6,11,13,16]              | [28-33]                                  |

属硫化物矿床的地质特征相似,两者都符合"小岩体成大矿"的理论体系,表现为"深部熔离-贯入成矿"成矿机制。

(2)麻利索克铜镍硫化物矿床资源潜力巨大, 其镍金属量资源潜力为195×10<sup>4</sup>t,铜金属量资源潜 力为52×10<sup>4</sup>t,钴金属量资源潜力为7×10<sup>4</sup>t,麻利索 克镍铜矿床极有可能是下一个世界级矿床。

(3)麻利索克镍铜矿床基础设施完备,交通便 利,临近SEQI港口,允许全年运输,利于生产开发, 值得企业关注。

**致谢:**成文过程中得到中国地质大学(北京)彭 润民教授的支持和帮助,审稿专家提出了宝贵的修 改建议,在此一并表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- [1]聂凤军,石成龙,赵元艺,等.北极圈及邻区金属矿床地质特征、形成作用与找矿潜力[J].中国地质,2012,39(4):865-868.
- [2]李九玲,卢伟,赵元艺,等.格陵兰重要金属矿简介及分布规律[J]. 地质科技情报,2013,32(5):18-24.
- [3]卢伟.格陵兰重要金属矿产成矿规律与找矿方向研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2014.

- [4]North American Nickel Inc. PwC Website Greenland- Taxes on corporate income[DB/OL] (2016- 01) [2016- 03]http://s1.q4cdn. com/825764637/files/doc\_presentations/2016/NAN\_Corpo rate\_Presenation\_November\_2016.pdf.
- [5]李怀渊,张景训,江明忠,等. 航空瞬变电磁法系统 VTEMplus 的 应用效果[J].物探与化探,2016,40(2):360-364.
- [6]North American Nickel Inc.Greenland maniitsoq projects[EB/OL] (2016-01)[2016-03]http://www.northamericannickel.com/English/ projects/greenland/maniitsoq/default.aspx. 2016.
- [7]杨日红,陈秀法,赵宏军,等.遥感技术在格陵兰岛西南部费斯肯 纳色特一带找矿中的应用[J].地质与勘探,2013,49(4):751-757.
- [8]Szilas K, Berger A, Kokfelt T F, et al. Geochemistry of the supracrustal rocks and the associated intrusive TTG suites of the Archaean craton in South–West Greenland and southern West Greenland, 61° 30′-64°N[J]. Danmarks Greenlands Geologiske Undersegelse Rapport, 2011, 114:88–90.
- [9]Larsen L M, Pedersen A K. A minor carbonatite occurrence in southern WestGreenland:the Tupertalik intrusion[J]. Rapport Greenlands Geologiske Undersegelse, 1982, 110: 3–43.
- [10]Garde A A. Post- kinematic diorite intrusions in Archaean basement rocks around outer Fiskefjord, southern West Greenland[J]. Bulletin of the Geological Society of Denmark, 1991, 39:167–177.
- [11]Garde A A, McDonald I, Dyck B, et al. Searching for giant, ancient impact structures on Earth:The Mesoarchaean Maniitsoq structure,

West Greenland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 4: 337/338:197-210.

- [12]聂凤军,张伟波,曹毅,等.北极圈及邻区重要矿产资源找矿勘查 新进展[J].地质科技情报,2013,32(5):1-6.
- [13]North American Nickel Inc. Independent Technical Report for the Maniitsoq Nickel- Copper- PGM Project, Greenland[EB/OL] (2016-03) [2017-03-15]http://www.northamericannickel.com/ English/projects/greenland/maniitsoq/default.aspx.
- [14]Reiners, P W, Nelson B K, Ghiorso M S. Assimilation of felsic crust by basaltic magma: Thermal limits and extents of crustal contamination of mantle-derived magmas[J]. Geology, 1995, 23:563–566.
- [15]Steenfelt A, Garde A A, Moyen J F. Mantle wedge involvement in the petrogenesis of Archaean grey gneisses in West Greenland[J]. Lithos, 2005, 79: 207–228.
- [16]Garde A A, Pattison J, Kokfelt T F, et al. The norite belt in The Mesoarchaean Maniitsoq structure, southern West Greenland: conduit-type Ni-Cu mineralisation in impact-triggered, mantle-derived intrusions[J]. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin, 2013, 28:45-48.
- [17]McKenzie D. O'Nions R K. Partial Melt Distributions from Inversion of Rare Earth Element Concentrations[J]. Journal of Petrology, 1991, 5: 1021–1091.
- [18]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society (London)Special Publications, 1989,42: 313–345.
- [19]Wittig N, Pearson D G, Webb M, et al. Origin of cratonic lithospheric mantle roots: A geochemical study of peridotites from the North Atlantic Craton, West Greenland[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274: 4–33.
- [20]Larsen L M, Rex D C. A review of the 2500Ma span of alkaline-ultramafic, potassic and carbonatitic magmatism in West Greenland[J].

Lithos, 1992, 28:367-402.

- [21]Wittig N, Webb M, Pearson D G, et al. Formation of the North Atlantic Craton: Timing and mechanisms constrained from Re-Os isotope and PGE data of peridotite xenoliths from S.W. Greenland[]]. Chemical Geology, 2010, 276:166–187.
- [22]汤中立,焦建刚,闫海卿,等.小岩体成(大)矿理论体系[J].中国 工程科学,2015,17(2):9-15.
- [23]赵增玉,潘懋,田甜,等.固体矿产资源储量估算系统中垂直断面 法的实现[]].地质与勘探,2010,46(3):547-551.
- [24]朱青凌,罗周全,刘晓明,等. 块体模型储量估算原理的应用研究[]]. 矿冶工程,2012,32(6):9-11.
- [25]李俊.固体矿产资源/储量估算方法研究现状及主要方法评价[].中国非金属矿工业导刊,2005,46(2):53-55.
- [26]高强祖,黄满湘.金川铜镍硫化物矿床成因探讨[J].西部探矿工程,2006,6:1-3.
- [27]高辉,曹殿华,范世家.岩浆铜-镍-铂族金属硫化矿床"深部熔 离-贯入"成矿作用与模式——加拿大伏伊希湾和中国金川矿床 地质特征对比[J].地质通报,2009,28(6):795-803.
- [28]焦建刚,汤中立,闫海卿,等.金川铜镍硫化物矿床中富铜矿石铂 族元素特征及矿床成因[J].西北地质,2012,45(4):244-249.
- [29]王瑞廷,毛景文,赫英,等.金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元 素地球化学特征[J].大地构造与成矿学,2004,28(3):281-284.
- [30]田毓龙,包国忠,汤中立,等.金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征[].地质学报,2009,83(10):1515-1518.
- [31]罗照华,马拉库舍夫 A A,潘妮娅 H A,等. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例[J]. 矿床地质, 2000,19(4):336-338.
- [32]汤中立. 中国的小岩体岩浆矿床[J]. 中国工程科学,2002,4(6):9-12.
- [33]杨胜洪,陈江峰,屈文俊,等.金川铜镍硫化物矿床的Re-Os年 龄及意义[J]. 地球化学,2007, 36(1):30-35.