

印度尼西亚苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿产 资源定量评价*

胡 鹏¹, 张海坤¹, 曹 亮¹, 程 湘¹, 战明国², 潘罗忠³, 戴 昱⁴, 潘贝红²

(1 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 广西 南宁 530023;
3 中国东盟地学合作中心, 广西 南宁 530023; 4 广西壮族自治区区域地质调查研究院, 广西 桂林 450304)

摘 要 应用“三步式”矿产资源定量评价方法, 在对苏门答腊岛典型斑岩型铜(钼)矿床成矿特征进行分析基础上, 构建该类铜(钼)矿床的描述性模型, 认为该区斑岩型铜(钼)矿床与苏门答腊岛弧新生代中酸性次火山岩系关系密切, NW向苏门答腊断裂及其次级断裂起到控岩控矿的作用; 结合该区已知铜(钼)矿床(点)分布及1:100万低密度地球化学测量成果, 圈定了4处铜(钼)成矿远景区; 根据密度模型公式估算出该区在90%、50%和10%预测概率下的矿床数; 利用蒙特卡洛模拟方法预测该区斑岩型铜(钼)矿产在不同预测概率下的铜(钼)资源量, 结果显示苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿产资源潜力巨大。

关键词 地质学; 矿产资源定量评价; 斑岩型铜(钼)矿; “三步式”评价方法; 苏门答腊岛; 印度尼西亚
中图分类号: P618.41; P618.65 **文献标志码**: A

Quantitative assessment of porphyry copper (molybdenum) mineral resources in Sumatra, Indonesia

HU Peng¹, ZHANG HaiKun¹, CAO Liang¹, CHENG Xiang¹, ZHAN MingGuo², PAN LuoZhong³,
DAI Yu⁴ and PAN BeiHong²

(1 Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2 Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploitation, Nanning 530023, Guangxi, China; 3 China-Asian Geoscience Cooperation Center (Nanning), Nanning 530023, Guangxi, China; 4 Regional Geological Survey Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 450304, Guangxi, China)

Abstract

Using the method of “three-part” quantitative assessment, the authors analyzed the metallogenic characteristics of typical porphyry copper (molybdenum) deposits in Sumatra, Indonesia, and constructed a descriptive model of this type of deposits. The model suggests that the porphyry copper (molybdenum) deposits are closely related to the Cenozoic intermediate-acid arc subvolcanic rock system in Sumatra, and are controlled by the NW-trending Sumatra fault and its secondary faults. Based on the geologically favorable factors, the distribution of copper (molybdenum) deposits, and the 1:1 000 000 low-density geochemical survey, the authors delineated four copper (molybdenum) prospective areas. According to the density model formula, the number of undiscovered deposit was estimated under the prediction probability of 90%, 50%, and 10% respectively, and the copper (molybdenum) resources of porphyry copper (molybdenum) deposits were estimated by Monte Carlo simulation method under different probabilities. The assessment shows that Sumatra has a large potential of copper (molybdenum) re-

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目“印度尼西亚苏门答腊岛铜多金属资源潜力评价(编号:DD20160114)”和广西壮族自治区地质矿产勘查开发局地质勘查基金项目“广西与东盟特提斯构造过程与大规模成矿作用对比研究(编号:桂地矿外任[2018]1号)”联合资助

第一作者简介 胡 鹏,男,1984年生,高级工程师,长期从事境外地质矿产研究。Email:157521303@qq.com

收稿日期 2020-02-27;改回日期 2020-08-21。秦思婷编辑。

sources of the porphyry copper (molybdenum) deposits.

Key words: geology, quantitative assessment of mineral resources, porphyry copper (molybdenum) deposit, “three-part” assessment method, Sumatra, Indonesia

“一带一路”战略已成为中国在新时期的国家发展战略,与沿线国家和地区矿产资源领域的合作是“一带一路”战略中的重要组成部分(刘伯恩,2015;汪莹等,2016)。“一带一路”沿线国家和地区矿产资源丰富,与中国具有很强的互补性,加强与沿线国家矿产勘查及资源开发方面的投资与合作,对提升沿线国家矿产资源利用程度、提高中国资源抗风险能力具有重要意义(唐金荣等,2015;陈喜峰等,2017)。印度尼西亚作为“一带一路”沿线重要国家之一,其矿产资源丰富,铜资源量居世界第五位,金资源量居世界第四位(胡鹏等,2018)。苏门答腊岛位于印度尼西亚群岛西缘,是印度尼西亚铜、金、银、铅、锌等矿产资源最为丰富的岛屿之一。

美国“三步式”矿产资源定量评价方法是美国地质调查局推荐使用的一种用于大区域小比例尺度下的矿产资源潜力评价方法(肖克炎等,2006)。该方法核心原理为相似类比理论,其假定:某种矿床类型的品位、吨位以及空间分布与已发现的相同类型矿床具有相似的概率分布特征,因此在特定地质环境下某种矿床类型的未发现矿床数以及未知资源量可以由已发现的相同矿床类型的品位、吨位以及空间分布的概率分布特征来定量表示(Singer, 1993)。

“三步式”矿产资源定量评价方法包括3个步骤:圈定成矿远景区、建立品位-吨位模型、未知矿床数的估计。该方法的优势在于其内在一致性,表现为3个方面:①圈定的成矿远景区与描述性模型一致,即成矿远景区要严格按照矿床描述性模型中矿床产出的地质环境来圈定;②品位-吨位模型与描述性模型和评价区的已知矿床一致,用于建模的矿床必须符合描述性模型中矿床的特征,以保证用于建立品位-吨位模型的已知矿床属于同一类型;③研究区已知矿床和矿床数的估计与品位-吨位模型一致,即预测的矿床数量必须与品位-吨位模型中百分位数相匹配(Singer, 1993)。如预测矿床数量的一半左右应该大于品位-吨位模型的中位数,大约10%的矿床应该与模型中前10%的矿床一样大。这种内在一致性为未知资源量无偏估计奠定了坚实的基础(Singer, 1993)。该方法自从推出后得到了广泛的应用,并取得了良好的预测效果(Lisitsin, 2010; 肖克炎

等,2006;严光生等,2007)。

本文利用“三步式”矿产资源定量评价方法,在对苏门答腊岛典型斑岩型铜(钼)矿床成矿特征研究基础上,建立了适用于该区的斑岩型铜(钼)矿床描述性模型;并结合该区已知矿床空间分布以及1:100万低密度地球化学调查结果,圈定了斑岩型铜(钼)矿床的成矿远景区,估算了该区斑岩型铜(钼)矿产的矿床数及其资源总量,以期为当地矿产资源政策制定以及中国矿企在该区进行矿业开发投资提供地质依据。

1 研究区地质概况

苏门答腊岛位于巽他陆块的西南边缘,处于印度-澳大利亚板块向欧亚板块俯冲的前缘地区(Barber et al., 2005)。受俯冲作用的影响,苏门答腊岛发育由巽他海沟、弧前盆地、岛弧构造带、弧后盆地组成的典型沟-弧-盆构造体系(图1)。

根据不同的地层系统、沉积古地理、古生物、岩浆旋回和构造运动特征可将苏门答腊岛划分为东苏门答腊地体(亲冈瓦纳板块)、西苏门答腊地体(亲华夏板块)以及卧依拉(Woyla)推覆体(图2)。东苏门答腊地体大部分位于弧后地区,出露地层包括石炭系—第四系,岩性主要为粉砂岩、页岩和灰岩,大部分被新生代沉积物和火山岩覆盖(Barber et al., 2003)。西苏门答腊地体出露地层包括石炭系—二叠系,岩性主要为灰岩和火山岩。东苏门答腊地体和西苏门答腊地体以中央构造带为界(高小卫等, 2015;张海坤等,2017;胡鹏等,2018)。卧依拉(Woyla)推覆体主要由晚侏罗世—早白垩世蛇绿岩套组成。

苏门答腊岛岩浆活动较为强烈,基性-酸性岩浆均有出露。侵入岩出露以燕山期花岗岩为主,次为印支期—海西期花岗岩体。火山岩分布时代较为广泛,石炭纪—第四纪均有分布,主要岩性为安山-玄武质集块岩、流纹-英安质凝灰岩。由于澳大利亚板块的俯冲作用,形成了苏门答腊岛NW向右旋走滑断裂系统。其中,中央构造带是规模最大的一条纵贯全区的NW向走滑剪切带(Hutchison, 1994; Bar-

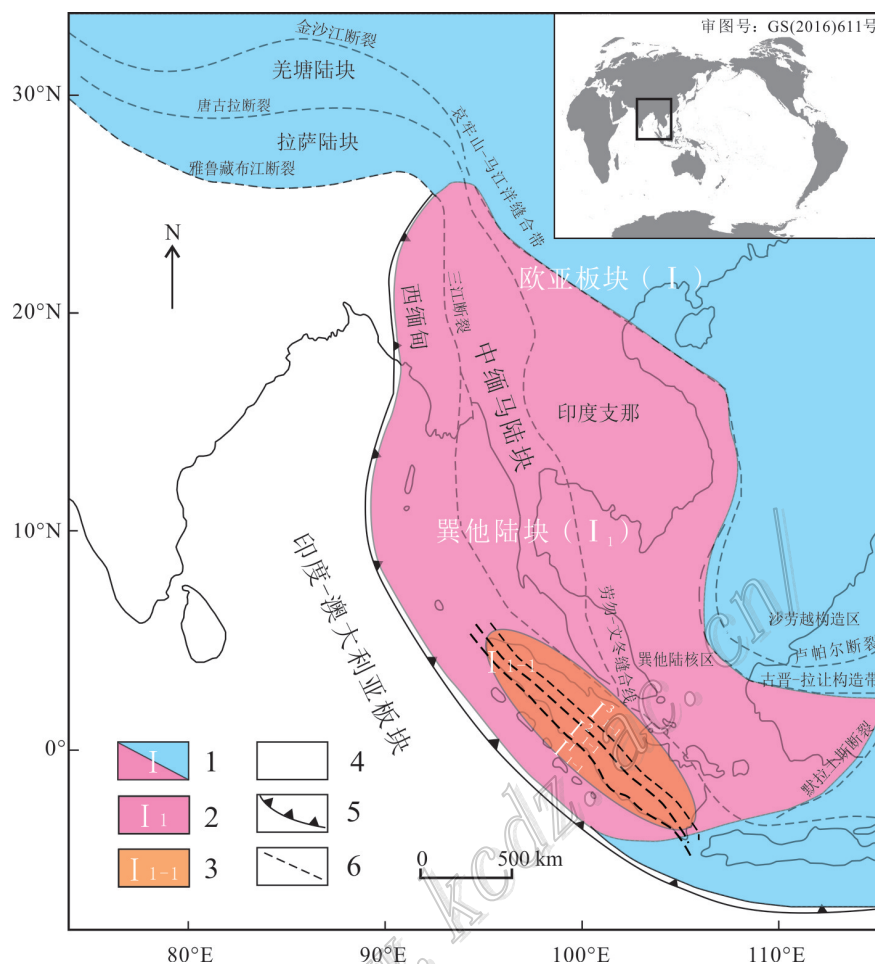


图1 苏门答腊岛构造单元划分示意图(修改自张文佑,1986)

1—欧亚板块(I);2—巽他陆块(I_1);3—苏门答腊岛活动陆缘(I_{1-1}),其中 I_{1-1}^1 —弧前盆地, I_{1-1}^2 —岛弧, I_{1-1}^3 —弧后盆地;4—印度-澳大利亚板块;5—俯冲带;6—构造界线

Fig. 1 Structural unit map of the Sumatra Island

1—Eurasian plate (I); 2—Sunda block (I_1); 3—Sumatra active continental margin (I_{1-1}), divided into I_{1-1}^1 —Fore arc basin, I_{1-1}^2 —Island arc, I_{1-1}^3 —Back arc basin; 4—Indian-Australian plate; 5—Subduction zone; 6—Structural boundary

ber et al., 2005; McCaffrey, 2009)。

研究区属于欧亚板块与印度-澳大利亚板块过渡带——喜山期铜(金)成矿区的苏门答腊-爪哇铜、金成矿带。铜矿床类型主要为斑岩型铜(钼、金)矿床、矽卡岩型铜(铅、锌)矿床,金矿床类型主要为浅成低温热液矿床。

铜(钼)在研究区属绝对优势矿种。据 Barber 等(2005)统计,苏门答腊岛共发现各类金属矿床 68 处,其中,铜(钼)矿有 16 处。在 16 处铜(钼)矿中,具有较大储量和找矿前景的矿床包括唐塞铜-钼矿、Lubuk Sulasih 铜铅锌矿、拉瓦士铜铅锌矿、坦邦萨瓦铜金矿等。斑岩型铜(钼)矿床是苏门答腊岛铜矿产资源的重要来源,根据目前苏门答腊岛区内已知的

矿床储量数据统计显示,仅唐塞斑岩型铜(钼)矿单个矿床铜储量占岛内已知铜储量的 80% 以上。因此,斑岩型铜(钼)矿产的资源总量预测,对岛内铜资源总量的评估具有重要的意义。

2 典型斑岩型铜(钼)矿床地质特征

唐塞斑岩铜(钼)矿床位于苏门答腊岛北部亚齐省,班达亚齐东南约 100 km 处,为岛内规模最大的斑岩型铜(钼)矿床。矿区主要出露 Woyla 群变质岩,包括变质火山岩以及少量大理岩和绿色片岩。矿区构造主要发育 NW-SE 向断裂,次要为近 SN 向和 NE 向断裂。矿区中部发育 1 个由石英闪长(斑)

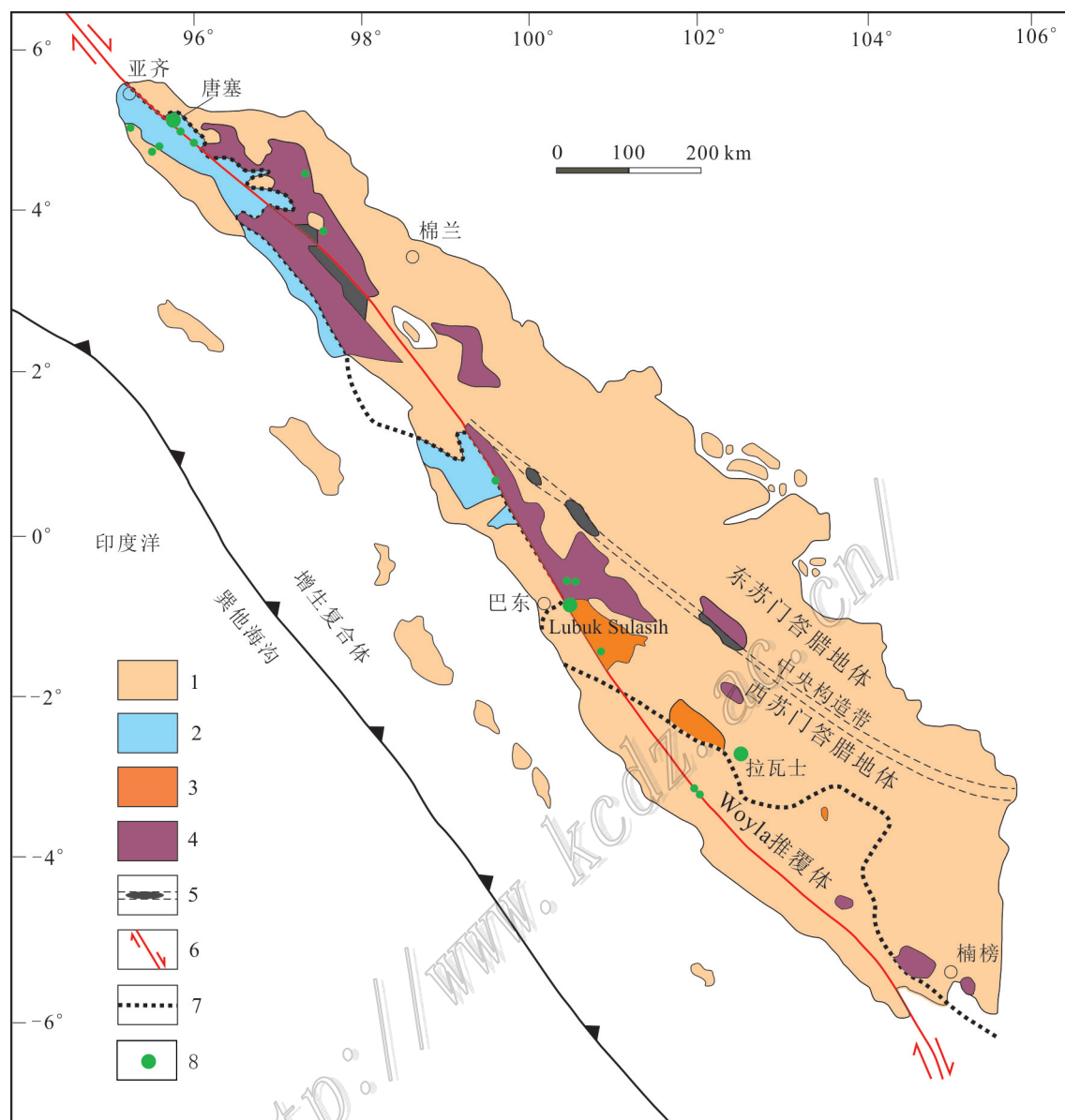


图2 苏门答腊岛地质简图(修改自 Advokaat et al., 2018)

1—新生代火山岩及沉积物;2—侏罗纪—早白垩世 Woyla 群;3—中-晚二叠世—三叠纪 Peusangan 群;4—石炭纪—早二叠世 Tapanuli 群;
5—中央构造带;6—苏门答腊大断裂;7—Woyla 缝合线;8—铜矿床

Fig. 2 Simplified geological map of Sumatra Island (modified after Advokaat et al., 2018)

1—Cenozoic volcanic rocks and sediments; 2—Jurassic—Early Cretaceous Woyla Group; 3—Middle-Late Permian—Triassic Peusangan Group;
4—Carboniferous—Early Permian Tapanuli Group; 5—Central Structural belt; 6—Sumatra fault; 7—Woyla suture; 8—Copper deposit

岩、英安斑岩组成的中新世复式岩株——唐塞斑岩,该岩株侵入于中始新世 GleSeukeun 复合深成杂岩体中,而该深成杂岩体侵入到中生代 Woyla 群变沉积岩和变火山岩中,呈 NW-SE 向展布,明显受苏门答腊 NW 向断裂系统控制。矿区铜(钼)矿化发育于唐塞斑岩内(图3),显示出典型的斑岩控矿特征。

唐塞斑岩体内的主要蚀变类型有黑云母化、绿

泥石-绿帘石化、绢云母-绿泥石-石英化、石英-绢云母化和石英-绢云母-红柱石化(Van Leeuwen et al., 1987)。其中,石英-绢云母-绿泥石化分布最为广泛,与矿化空间高度一致;特别是在唐塞斑岩体的中心部位,发育强石英-绢云母-绿泥石化带,并可见富铜、钼矿化。

铜(钼)矿石主要发育在石英闪长(斑)岩内,呈

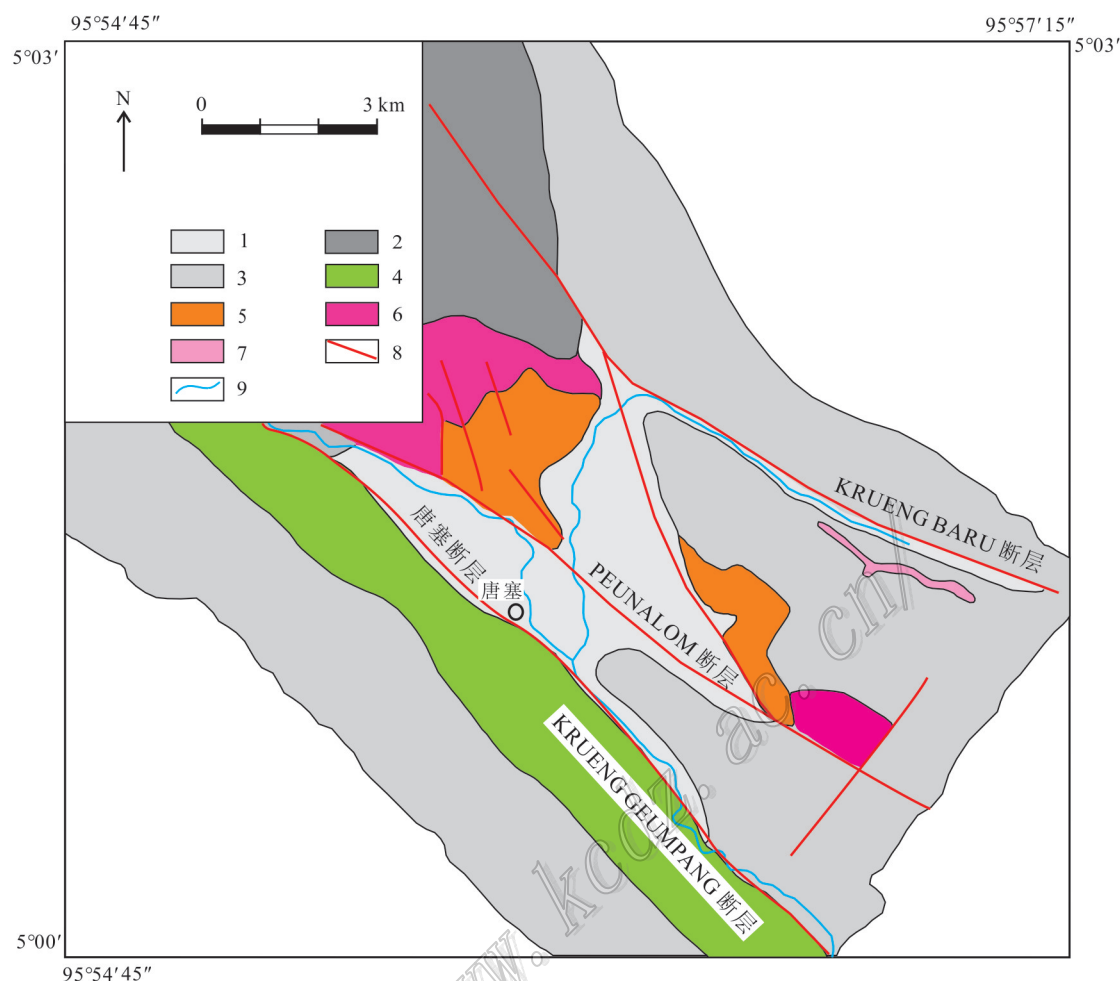


图3 唐塞斑岩型铜(钼)矿区地质简图(修改自胡鹏等,2018)

1—冲积物;2—变质沉积岩;3—变质火山岩;4—蛇纹岩;5—唐塞斑岩;6—Gle Seukeum 复式岩体;7—淡色花岗岩;8—断层;9—河流

Fig. 3 Geological sketch map of the Tangse mining area (modified after Hu et al., 2018)

1—Alluvial deposits; 2—Metamorphic sedimentary rocks; 3—Metamorphic volcanic rocks; 4—Serpentinite; 5—Tangsai porphyry; 6—Gle Seukeum composite rocks; 7—Leucogranite; 8—Fault; 9—River

灰白色,自形-半自形粒状结构,脉状构造、浸染状构造,其金属矿物组成主要为黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿等,非金属脉石矿物主要以石英、绢云母为主。黄铜矿呈他形粒状,部分颗粒与黄铁矿伴生,浸染状零星分布在矿石中;辉钼矿呈他形粒状,多沿裂纹发育;黄铁矿呈他形-半自形粒状,细脉状分布,局部轻微白铁矿化,部分颗粒内包嵌黄铜矿包体。

矿床流体包裹体的类型单一,主要发育气液两相包裹体;主成矿阶段流体具有中高温(280~386℃)、中等盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ (11.46%~15.27%)、中等密度(0.73~1.11 g/cm³)的特征;成矿深度为1.64~7.72 km,平均为4.68 km,矿床形成于中等深度环境; $\delta^{34}\text{S}$ 集中分布于1.32‰~2.23‰,平均值为1.80‰,表现为

岩浆硫来源的特征;H-O同位素数据显示成矿流体主要为岩浆水,后期有大气降水混入(胡鹏等,2018)。以上矿床地质特征以及地球化学数据显示该矿床为中-高温斑岩型铜(钼)矿床。

3 斑岩型铜(钼)矿产资源总量预测

苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿产资源总量预测工作采用美国“三步式”矿产资源定量评价方法,该方法关键技术包括3个步骤:①建立所预测矿床类型的描述性模型,并圈定该矿床类型的成矿远景区;②利用与预测矿床类型相适应的品位-吨位模型来估计未发现矿床的品位、吨位质量特征;③估计成

矿远景区内所预测矿床类型在不同概率下的未知矿床数。最后,结合建立的品位-吨位模型以及未知矿床数的概率估计,使用蒙特卡罗统计试验方法对成矿远景区内资源量进行模拟计算。

3.1 圈定成矿远景区

矿床描述性模型是圈定成矿远景区的重要依据。Cox等(1986)提出,矿床描述性模型的主要内容包括2个部分:第一部分为矿床产出的一般地质背景,包括大地构造背景、成矿时代范围、岩石类型、岩石结构-构造、成矿环境等;第二部分为矿床本身特征的描述,包括矿石矿物组合、矿石结构-构造、围岩蚀变、地球化学特征、地球物理特征等。根据苏门答腊岛已知典型斑岩型铜(钼)矿床的研究成果,并结合1:100万低密度地球化学测量结果,本次建立了适用于苏门答腊岛地区的斑岩型铜钼矿描述性模型:

(1) 大地构造位置:印度-澳大利亚板块与欧亚板块俯冲带,三级构造单位为苏门答腊岛弧构造带;

(2) 成矿时代:新生代(胡鹏等,2018);

(3) 岩石类型:矿化主要发育在新生代石英闪长(斑)岩、英安斑岩岩株中,岩株规模不大,侵入于由闪长岩、石英闪长岩、花岗岩组成的深成杂岩体中;

(4) 矿石结构构造:自形-半自形粒状结构、交代结构、细脉状构造、浸染状构造;

(5) 矿石矿物组合:黄铜矿-辉钼矿-辉铜矿;

(6) 围岩蚀变:岩体内蚀变主要为绿泥石-绿帘石化、绢云母-绿泥石-硅化、石英-绢云母化组合,其中绢云母-绿泥石-硅化在岩株的中心部位与矿化的关系最为密切;

(7) 控矿构造:苏门答腊NW向右型走滑断裂系统;

(8) 低密度化探特征:1:100万低密度地球化学测量结果中,分布在岛弧构造带内的Cu、Mo、Au异常与已知矿床点套合好,为斑岩型铜(钼)矿产远景区的圈定提供重要的参考依据;

(9) 伴生矿床类型:浅成低温热液型金(银)矿、矽卡岩型铜多金属矿;

(10) 找矿标志:已知斑岩型铜矿(床)点的分布;1:100万低密度地球化学Cu、Mo及与Cu(Mo)矿化关系密切的Au元素综合异常。

需要注意的是,苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿床主要分布在苏门答腊岛岛弧构造带内的NW向右型走滑断裂两侧(图2),苏门答腊岛西部的弧后盆地并

不利于该类矿床的形成;而由于该岛河流主要由中部高海拔地区流向西部低海拔地区,造成Mo元素异常主要分布在弧后盆地第四系冲积物区域内,这些异常对远景区圈定影响不大。

根据上述斑岩型铜(钼)矿描述性模型中矿床产出的地质要素,同时结合预测区内已知矿床(点)的空间分布,以及1:100万低密度地球化学测量结果,在苏门答腊岛内圈定了4个斑岩型铜(钼)成矿远景区(表1,图4)。

3.2 建立品位吨位模型

建立矿床品位和吨位模型是为了对成矿远景区内未发现矿床的品位和资源量进行潜力预测和评价。未发现矿床的矿石吨位和品位被认为与相同地质背景下已发现的同类型矿床具有相似的分布规律,预测区内未发现矿床的品位和吨位特征可由标准的品位-吨位模型估计得到(Singer, 1993)。Cox等(1986)和Bliss(1992)根据全球矿床的数据发布了69个矿床类型的品位-吨位模型。经Singer等学者完善,目前在蒙特卡洛模拟软件(MARK3)中已经集成了114种不同类型矿床的品位-吨位模型(Duval, 2012)。

由于苏门答腊岛地质工作程度较低,已获取的矿床品位、吨位数据资料不足以建立本地区的品位-吨位模型,所以本次采用斑岩型铜矿全球通用品位-吨位模型来代替本区的模型,但在使用之前需要进行 t -检验(肖克炎等,2006)。

根据2008年美国地质调查局(USGS)发布的全球斑岩型铜矿品位、吨位数据建立模型(Singer, 2008),得出斑岩型铜矿品位、吨位的累积频率分布图及频数分布直方图(图5a~d),其峰度偏度检验基本都服从对数正态分布。

研究区内有2个已知勘探程度较高的斑岩型铜矿床(唐塞铜矿、苏利特河铜矿)的品位、吨位数据,通过Excel软件中内置的 T -text函数对研究区矿床吨位进行 t -检验,将之与全球通用模型的吨位进行比较,得到 t -检验的概率为 $0.091 > 0.01$,可以认为研究区矿床的吨位与全球斑岩型铜矿床的吨位之间无显著不同,全球品位-吨位模型适用于苏门答腊岛未发现斑岩铜矿床。

3.3 预测未知矿床数

“三步式”资源定量评价的第三步是估算成矿远景区内存在但数量未知的矿床数目。未发现矿床数目通常在90%、50%、10%概率下进行估算,不同的

表 1 苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿床成矿远景区

Table 1 Delineated prospective areas of porphyry Cu (Mo) deposits in Sumatra

编号	名称	面积/km ²	远景区描述
I	亚齐 Cu-Mo 成矿远景区	14583	该远景区位于苏门答腊岛西北部亚齐省,大地构造位置处于苏门答腊岛弧构造带,岩浆活动较为强烈,广泛发育新生代中酸性侵入体等重要控矿岩浆岩;断裂主要为苏门答腊 NW 向断裂系统及其次级断裂 区内已发现唐塞斑岩型铜(钼)矿以及 Woyla 金矿、米哇金矿等矿床;1:100 万低密度地球化学测量显示较强的 Cu-Au 综合化探异常,其中有 Cu01 面积大,几乎分布于整个远景区,异常有多个明显三级浓集分带中心
II	北苏门答腊 Cu-Mo 成矿远景区	20358	该远景区位于北苏门答腊省,大地构造位置处于苏门答腊岛弧构造带,岩浆活动较为强烈,主要为中新世火山岩及二叠纪—侏罗纪中酸性侵入岩;断裂为苏门答腊 NW 向断裂系统及其次级断裂 区内已发现包括 Muarasipongi、Martabe、锡哈约等多处金、银、铜矿床(点);1:100 万低密度地球化学测量显示区内发育较强的 Cu-Au-Mo 综合化探异常,其中 Cu05 具有较大找矿意义,异常分带明显,出现三级异常,且具有明显的浓集中心
III	巴东 Cu-Mo 成矿远景区	11134	该远景区位于苏门答腊岛西苏门答腊省,大地构造位置处于苏门答腊岛弧构造带,岩浆岩主要为三叠纪—白垩纪、始新世—中新世侵入岩及新生代火山岩,区内发育 NW 向、EW 向 2 组断裂,其中, NW 向为主的断裂及其次级断裂控矿 区内已发现包括 Lubuk Sulasih 铜铅锌矿、Lanawang 铜锌矿、苏利特河铜矿等矿床(点);1:100 万低密度地球化学测量显示区内发育较强的 Au-Cu 综合化探异常,其中 Cu06、Cu07 等异常找矿意义大,异常分带和浓集中心明显
IV	明古鲁 Cu-Mo 成矿远景区	30337	该远景区位于苏门答腊岛明古鲁省,大地构造位置处于苏门答腊岛弧构造带,区内大面积出露新生代、侏罗纪—白垩纪火山岩,其中,新生代火山岩为远景区内热液型矿床重要的控矿岩浆岩;区内构造活动强烈,发育有 NE 向、NW 向、EW 向 3 组断裂,矿床点分布明显受 NW-SE 向苏门答腊断裂系统控制 区内现已发现包括拉瓦士铜铅锌矿、Lebong Tandai 金银矿、Lebong Donok 金矿等多处铜、金、银矿床(点);1:100 万低密度地球化学测量显示区内发育较强的 Cu-Mo-Au 综合化探异常,其中有 Cu10、Cu11 等异常找矿意义大,异常分带及浓集中心明显

概率既反映了估计的不确定性,也反映了成矿的有利度(Singer, 2008)。

在“三步式”评价中,估算未发现矿床数量没有固定的方法(Singer, 1993)。Cox(1993)利用靶区统计法(counting targets)对波多黎各地区斑岩型铜-金未知矿床数进行预测,该方法将所圈定远景区进行优劣分级,最终将不同级别远景区的数量作为不同概率下的未知矿床数目。中国常用的是德尔菲法,因为大部分地区都积累了丰富的地质、物探、化探、遥感等资料,同时,结合当地的地质专家往往可得到良好的预测效果(姜德波等, 2010)。

矿床密度模型为未发现矿床数量的估算提供了有用的公式,就像品位-吨位模型是未发现矿床质量和规模的模型一样(Singer, 1993)。在世界范围内,基于对 108 个开发程度较高的区域中得到 10 种不同类型矿床进行统计分析发现:矿床数目与矿床的规模成比例,成矿远景区的面积和该种类型矿床规模也成比例(Singer et al., 2001; Mosier et al., 2007)。利用这些变量进行回归, Singer(2008)建立了所有矿床类型的通用密度模型公式。密度模型公式可以通过输入成矿远景区的面积和该远景区内所预测矿床类

型吨位的中位数在任何矿床中使用,并且该密度模型提供了在 90%、50%、10% 概率下矿床数的估算方程(Singer et al., 2011)。该方法适用于地质研究程度较低的地区,而且使用不受矿床类型的限制,既可以用来作为专家判断的指南,也可以直接用来估计大多数矿床的数量,已在世界多地取得了良好的预测效果(Singer, 2018)。该方法最新修订的公式如下(Singer et al., 2011):

$$\log_{10}(Density_{50}) = 4.21 - 0.499 * \log_{10}(s) - 0.225 * \log_{10}(a) \quad (1)$$

$$\log_{10}(Density_{90}, Density_{10}) = \log_{10}(Density_{50}) \pm 1.290 * 0.3484 * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{1}{109}\right) + (3.173 - \log_{10}(a))^2 * \frac{(-0.3292 - \log_{10}(s))^2}{109 - 1}\right) * 2.615 * 1.188} \quad (2)$$

$$N = \frac{a}{100000} * 10^{\log_{10}(Density)} \quad (3)$$

Density_x 指在 X% 概率下的每 100 000 km² 内的估计矿床数, X 可取 10%、50%、90%; a 指成矿远景区面积, 单位: km²; s 指矿床吨位的中位数, 单位: 百万吨; N 为预测矿床数; 1.290 为在 10% 置信水平下自

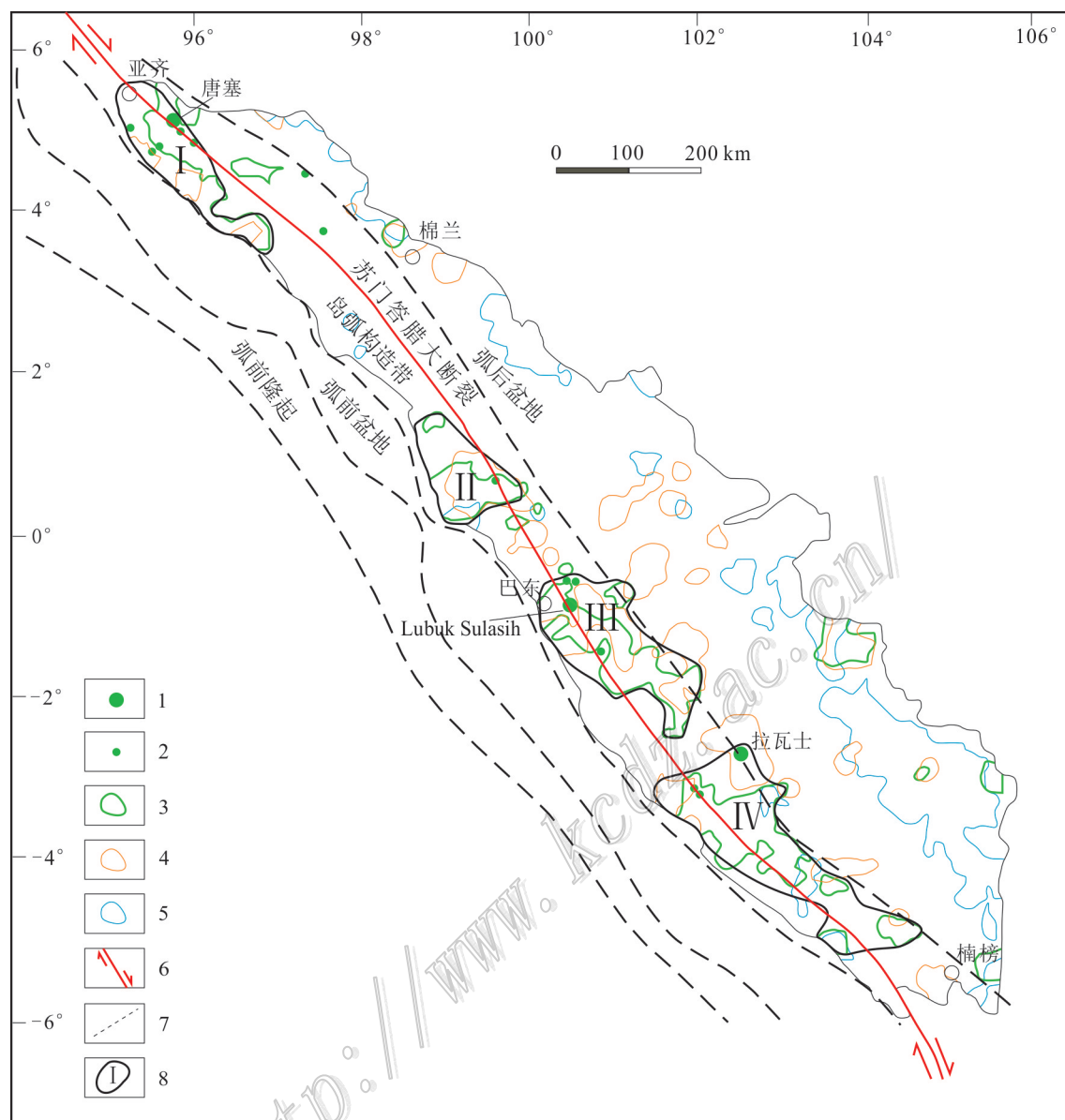


图4 印度尼西亚苏门答腊岛斑岩铜(钼)成矿远景区简图

1—大-中型铜钼矿床;2—小型铜(钼)矿床及矿点;3—Cu化探异常;4—Au化探异常;5—Mo化探异常;6—苏门答腊大断裂;7—沟弧盆体系边界;8—成矿远景区及编号

Fig. 4 Simplified geological map of prospective areas for porphyry copper(molybdenum) deposits in Sumatra Island

1—Large and medium-sized copper (molybdenum) deposits; 2—Small copper (molybdenum) deposits and ore spots; 3—Cu geochemical anomalies; 4—Au geochemical anomalies; 5—Mo geochemical anomalies; 6—Sumatra fault; 7—Ditch-arc-basin system boundary; 8—Copper (molybdenum) prospective area and its serial number

由度为106时的 t 值(t -分布中, $t=t_{10, 106df}=1.290$), 0.3484为控制区域矿床密度与吨位中位数比值的标准差, 109为控制区域的数量, 3.173为控制区域面积(km^2)lg值的平均数, -0.3292为控制区域吨位(百万吨)lg值的平均数, 2.615为控制区域面积(km^2)lg值的标准差, 1.188为控制区域吨位(百万吨)lg值的标

准差。

根据上述密度模型对苏门答腊岛斑岩铜钼矿未知矿床数进行估算, 由于研究区内已发现的斑岩型铜钼矿大多数勘探程度较低, 其目前矿石量数据无法代表其真实情况, 本次以标准品位-吨位模型中吨位的中位数来代替。将各个远景区面积以及吨位的

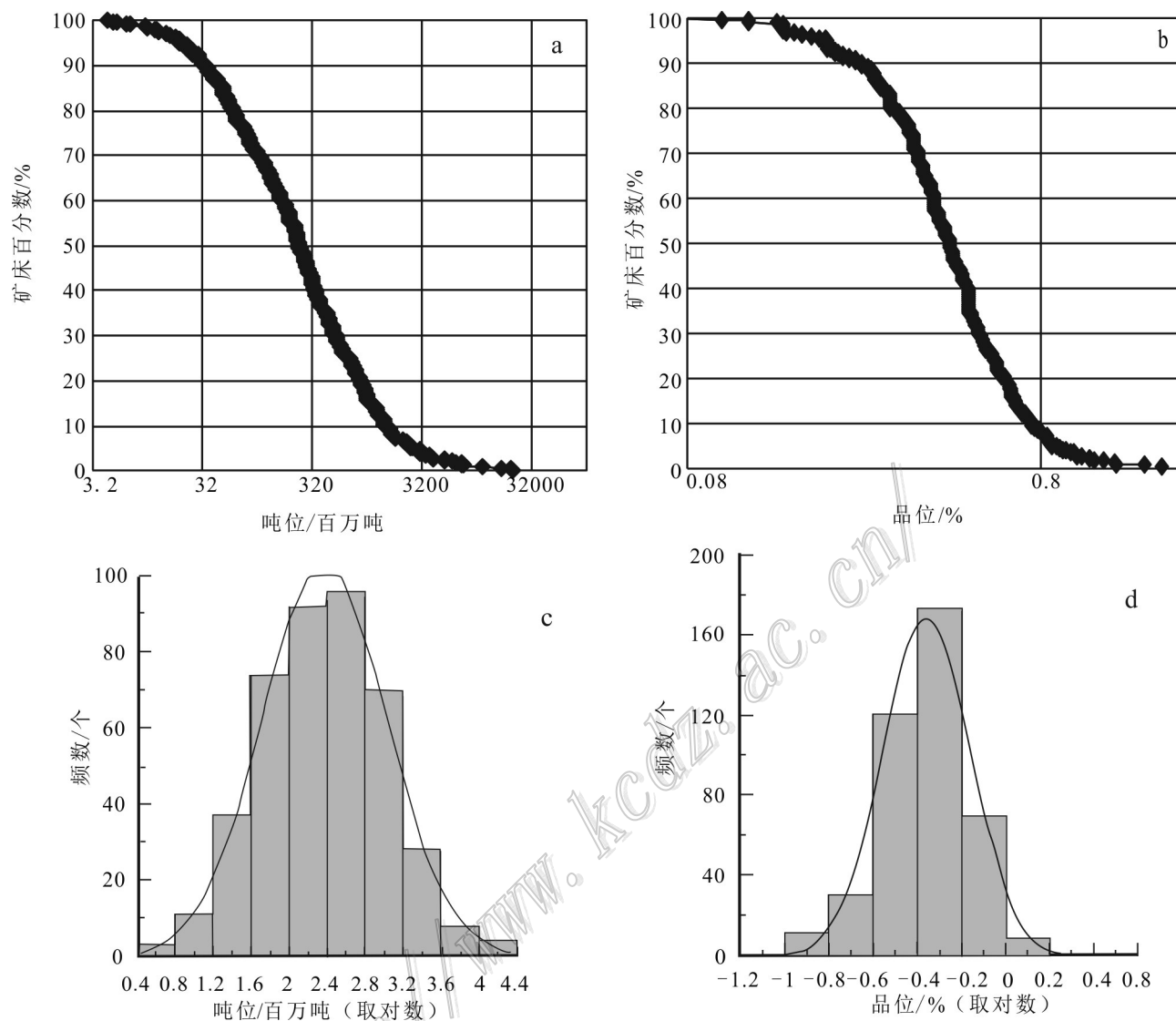


图5 斑岩型铜(钼)矿床品位-吨位模型及品位-吨位频数分布直方图(数据引自 Singer, 2008)

a. 吨位模型; b. 品位模型; c. 吨位频数分布直方图; d. 品位频数分布直方图

Fig. 5 Grade-tonnage model for porphyry copper(molybdenum) deposit and grade-tonnage frequency histogram

(data after Singer et al., 2008)

a. Tonnage model; b. Grade model; c. Tonnage frequency histogram; d. Grade frequency histogram

中位数代入到上述公式(1)、(2)、(3)中,得到斑岩型铜(钼)矿不同概率下的估计矿床数(表2)。

由表2可知,在圈出的4个成矿远景区内,苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿床在90%预测概率下矿床数为12个,在50%预测概率下矿床数为25个,在10%预测概率下矿床数为53个,均值为27个。

3.4 资源量估算

“三步式”定量评价最后一步是估算在不同概率下的资源量。由于蒙特卡罗方法能够正确地模拟随

机变量的分布,再现它的取值规律,因而通常使用该方法将品位-吨位模型与未知矿床数的概率估计值相结合得到未知矿产资源量的概率分布(杨永华, 1985)。在本次评价中,使用MARK3软件(Duval, 2012)来进行蒙特卡罗模拟,软件依据用户输入所预测矿床类型的品位-吨位模型以及在不同概率下(90%、50%、10%)的未知矿床数估计值得到品位、吨位及矿床数的概率分布曲线。具体不同概率下的资源量计算结果见表3,金属量累计分布图见图6。

表 2 远景区内斑岩型铜矿估计矿床数
Table 2 Estimated number of undiscovered deposits in copper (molybdenum) prospective areas

远景区编号	面积/km ²	不同概率下估计矿床数(个)			均值
		90%	50%	10%	
I	14583	3	6	12	6
II	20358	3	7	14	7
III	11134	2	5	11	5
IV	30337	4	8	16	8
总计	76412	12	25	53	27

估算结果显示,苏门答腊岛地区斑岩型铜(钼)矿产在 90% 预测概率下资源总量为铜 2300 万吨、伴生钼 38 万吨。在 50% 预测概率下资源总量为铜 8900 万吨、伴生钼 210 万吨。在 10% 预测概率下资源总量为铜 22000 万吨、伴生钼 660 万吨。均值为铜

表 3 斑岩型铜矿及其伴生元素的模拟资源量
Table 3 Resource estimation of porphyry Cu (Mo) deposits

金属量	不同概率下模拟的资源量			
	90%	50%	10%	均值
Cu (万吨)	2300	8900	22000	17000
Mo (万吨)	38	210	660	480
矿石量 (百万吨)	5000	19000	44000	31000

17 000 万吨,钼 480 万吨。

4 结 论

- (1) 印度尼西亚苏门答腊岛铜(钼)矿床类型以斑岩型铜(钼)矿床为主,该区斑岩型铜(钼)矿床 Cu 为主要成矿元素,Mo 为伴生元素。
- (2) 构建了苏门答腊岛斑岩型铜(钼)矿床的描

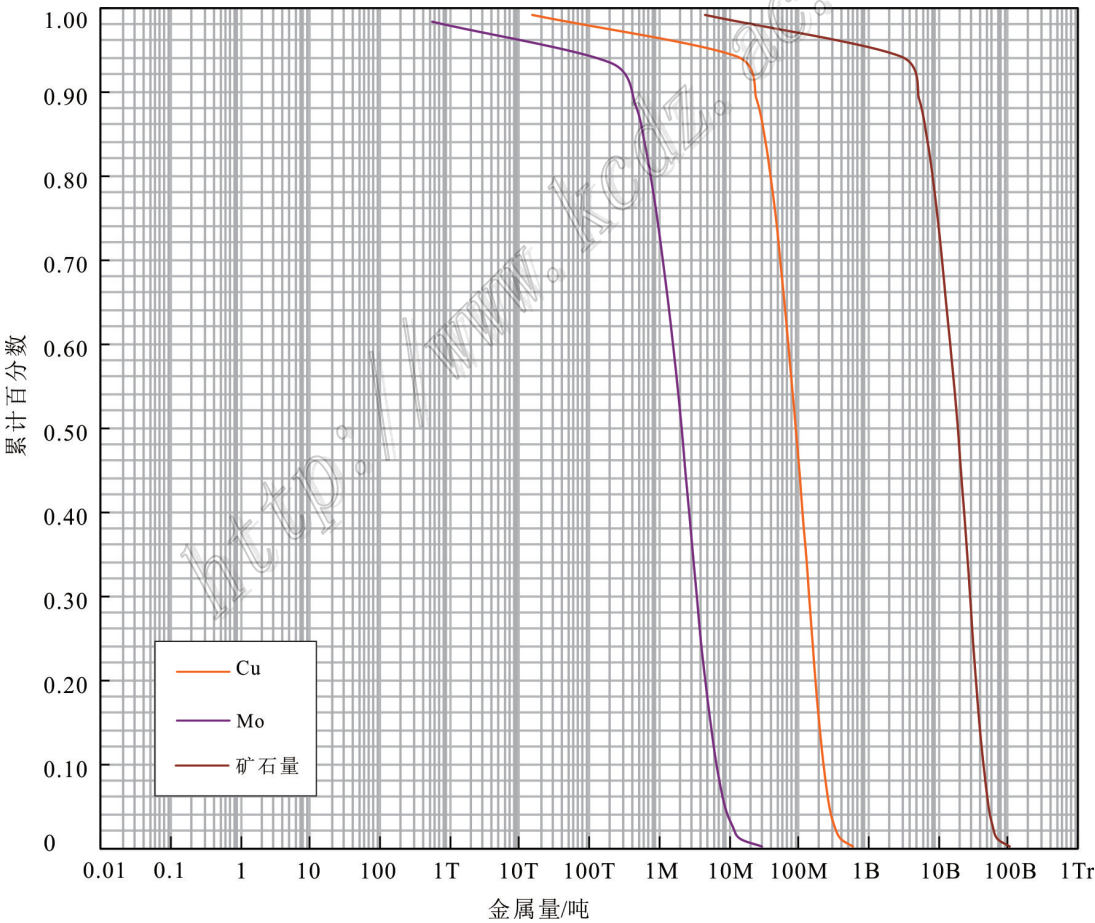


图 6 斑岩型铜(钼)矿金属量、矿石量累计分布曲线
T—千;M—百万;B—十亿;Tr—万亿

Fig. 6 Cumulative frequency plot showing the results of undiscovered copper (molybdenum) resources
T—Thousands; M—Millions; B—Billions; Tr—Trillions

述性模型,矿床主要产于苏门答腊岛弧带新生代石英闪长(斑)岩、英安斑岩等斑岩系统内,NW向苏门答腊断裂及其次级断裂控制岩体分布,也控制了铜(钼)矿化空间。

(3) 依据斑岩型铜(钼)矿床描述性模型、已知铜(钼)矿床分布、1:1 000 000低密度地球化学测量结果在苏门答腊岛共圈出4个斑岩型铜(钼)成矿远景区,估算出在90%预测概率下矿床数为12个,在50%预测概率下矿床数为25个,在10%预测概率下矿床数为53个,均值为27个。

(4) 使用蒙特卡洛方法估算出苏门答腊岛地区斑岩型铜(钼)矿在90%预测概率下资源总量为铜2300万吨、伴生钼38万吨;在50%预测概率下资源总量为铜8900万吨、伴生钼210万吨;在10%预测概率下资源总量为铜22000万吨、伴生钼660万吨;表明该地区铜资源潜力巨大。

References

- Advokaat E L, Bongers M L M, Rudyawan A, BouDagher-Fadel M K, Langereis C G and van Hinsbergen D J J. 2018. Early Cretaceous origin of the Woyla arc (Sumatra, Indonesia) on the Australian plate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 498:348-361.
- Barber A J and Crow M J. 2003. An evaluation of plate tectonic models for the development of Sumatra[J]. *Gondwana Research*, 6(1):1-28.
- Barber A J, Crow M J and Milsom J S. 2005. Tectonic evolution in Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution[J]. *Geological Society of London*, 31: 54-62
- Bliss J D. 1992. Developments in mineral deposit modeling[R]. U.S. Geological Survey. URL: <https://doi.org/10.3133/b2004>.
- Chen X F, Shi J F and Chen X F, Ye J H. 2017. Distribution characteristic and potential analysis of important solid mineral resources in 'Belt and Road' area[J]. *China Mining Magazine*, 26(11):35-44 (in Chinese with English abstract).
- Cox D P and Singer D A. 1986. Mineral deposit models[R]. U.S. Geological Survey. URL: <https://doi.org/10.3133/b1693>.
- Cox D P. 1993. Estimation of undiscovered deposits in quantitative mineral resource assessments—examples from Venezuela and Puerto Rico[J]. *Nonrenewable Resources*, 2(2): 82-91.
- Duval J S. 2012. Version 3.0 of eminers-economic mineral resource simulator[R]. U. S. Geological Survey. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20041344>.
- Gao X W, Wu X R and Yang Z Q. 2015. Magmatism and provenances of mineralization zones in Sumatra (Indonesia) and their comparisons to adjacent terrains[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 34(4):792-801(in Chinese with English abstract).
- Hu P, Cao L, Tampubolon A, Zhang H K, Liu A S and Cheng X. 2018. Sources of ore-forming fluids and materials of the Tangse porphyry Cu-Mo deposit in Sumatra, Indonesia: Constraints from H, O, S and Pb isotopic geochemistry[J]. *Geology and Exploration*, 54 (6):115-127(in Chinese with English abstract).
- Hutchison C S. 1994. Gondwana and Cathaysian blocks, Palaeotethys sutures and Cenozoic tectonics in South-East Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 83(2):388-405.
- Lisitsin V A. 2010. Methods of three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources: Examples from Victoria, Australia[J]. *Mathematical Geosciences*, 42 (5):571-582.
- Liu B E. 2015. Mining cooperation in One Belt and One Road: Opportunity, challenge and response[J]. *Land and Resources Information*, 4: 5-9 (in Chinese with English abstract).
- Lou D B, Deng G, Xiao K Y, Sun Y and Ding J H. 2010. Application of geo-economic model: A case study of copper-nickel sulfide deposits in eastern Tianshan Mountains, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10):1467-1478 (in Chinese with English abstract).
- McCaffrey R. 2009. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37: 345-366.
- Mosier D L, Singer D A and Berger V I. 2007. Volcanogenic massive sulfide deposit density[R]. U.S. Geological Survey. URL: <https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5082/>.
- Singer D A. 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources[J]. *Natural Resources Research*, 2(2):69-81.
- Singer D A and Menzie W D. 2001. Mineral deposit density—an update[R]. U.S. Geological Survey. URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1640a/>.
- Singer D A. 2008. Mineral deposit densities for estimating mineral resources[J]. *Mathematical Geosciences*, 40(1):33-46.
- Singer D A and Kouda R. 2011. Probabilistic estimates of number of undiscovered deposits and their total tonnages in permissive tracts using deposit densities[J]. *Natural Resources Research*, 20(2):89-93.
- Singer D A. 2018. Comparison of expert estimates of number of undiscovered mineral deposits with mineral deposit densities[J]. *Ore Geology Reviews*, 99(2018):235-243.
- Tang J R, Zhang T, Zhou P and Zhen R R. 2015. An analysis of mineral resources distribution and investment climate in the 'One Belt, One Road' Countries[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1918-1928 (in Chinese with English abstract).
- Van Leeuwen T M, Taylor R P and Hutagalung J. 1987. The geology of the Tangse porphyry copper-molybdenum prospect, Aceh, Indonesia[J]. *Econ. Geol.*, 82(1): 27-42.
- Wang Y, Zhou X J and Huang H Z. 2016. The "going out" cooperation strategy of China mineral resources companies under the background of 'One Belt, One Road'[J]. *Intertrade*, (6):34-37 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Ding J H and Liu R. 2006. The discussion of three-part form of non-fuel mineral resource assessment[J]. *Geological Review*,

- 52(6):75-80 (in Chinese with English abstract).
- Yan G S, Qiu R Z, Lian C Y, Warren J N, Cao L, Chen X F, Mao J W, Xiao K Y, Li J Y, Xiao Q H, Zhou S, Wang M Y, Liu D W, Yuan C H, Han J X, Wang L L, Chen Z, Chen Y M, Xie G Q and Ding J H. 2007. Quantitative assessment of the resource potential of porphyry copper systems in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 27-41 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y H. 1985. Monte Carlo method and mineral resource evaluation[J]. *Geology and Prospecting*, 21(1):8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H K, Hu P, Cao L, Tampubolon A, Liu A S and Cheng X. 2017. A-type granite of granite complex in Sarudik area, Sumatra: Zircon U-Pb age and its tectonic significance[J]. *China Mining Industry*, 26(11):174-181 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y. 1986. Land and sea geotectonics in China and adjacent areas[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈喜峰, 施俊法, 陈秀法, 叶锦华. 2017. “一带一路”沿线重要固体矿产资源分布特征与潜力分析[J]. *中国矿业*, 26(11):35-44.
- 高小卫, 吴秀荣, 杨振强. 2015. 印尼苏门答腊岛地体划分及其区域成矿背景[J]. *地质通报*, 34(4):792-801.
- 胡鹏, 曹亮, Tampubolon A, 张海坤, 刘阿睢, 程湘. 2018. 印度尼西亚苏门答腊岛唐塞斑岩铜钼矿床成矿流体及成矿物质来源——来自氢、氧、硫和铅同位素证据[J]. *地质与勘探*, 54(6):115-127.
- 刘伯恩. 2015. “一带一路”矿产资源合作:机遇、挑战与应对措施[J]. *国土资源情报*, 4:5-9.
- 娄德波, 邓刚, 肖克炎, 孙艳, 丁建华. 2010. 矿床地质经济模型法在东天山铜镍矿预测中的应用[J]. *地质通报*, 29(10):1467-1478.
- 唐金荣, 张涛, 周平, 郑人瑞. 2015. “一带一路”矿产资源分布与投资环境[J]. *地质通报*, 34(10):1918-1928.
- 汪莹, 周小靖, 黄海珠. 2016. “一带一路”背景下我国矿产资源企业“走出去”的合作策略[J]. *国际贸易*, (6):34-37.
- 肖克炎, 丁建华, 刘锐. 2006. 美国“三步式”固体矿产资源潜力评价方法评述[J]. *地质论评*, 52(6):75-80.
- 严光生, 邱瑞照, 连长云, Warren J N, 曹黎, 陈秀法, 毛景文, 肖克炎, 李锦轶, 肖庆辉, 周肃, 王明燕, 刘大文, 元春华, 韩九曦, 王靓靓, 陈正, 陈玉明, 谢桂青, 丁建华. 2007. 中国大陆斑岩铜矿资源潜力定量评价[J]. *地学前缘*, 14(5):27-41.
- 杨永华. 1985. 蒙特卡罗方法与矿产资源评价[J]. *地质与勘探*, 21(1): 8.
- 张海坤, 胡鹏, 曹亮, Tampubolon A, 刘阿睢, 程湘. 2017. 印度尼西亚苏门答腊岛 Sarudik 地区 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *中国矿业*, 26(11):174-181.
- 张文佑. 1986. 中国及临区陆海大地构造[M]. 北京: 地质出版社.