

金属矿床地质与勘查译丛

第13辑 岩浆镍—铜—铂硫化物矿床



中国有色金属工业总公司矿产地质研究院

桂林·1988

前言

隐伏矿床的普查和勘探,是现阶段国内外矿产勘查界所面临的严峻挑战。在这种形势下,深入研究各种矿产在全球范围内和整个地球历史上的分布规律和形成条件具有重要的战略意义。事实上,最近二三十年来,国内外地质工作者在这一方面做了大量的工作,国外的许多进展尤为引人注目。分门别类地、全面深入地研究这种进展,无疑将促进我国成矿作用研究和矿产勘查的发展。基于这样一种考虑,我们着手进行“国内外岩浆镍—铜—铂硫化物矿床对比研究”这一情报研究课题。我们试图在研究国内外情况的基础上,剖析国内外矿床的相似性和差异,寻求进一步扩大我国镍、铜、铂资源基地的战略和途径。

本专辑是上述情报研究课题的产品之一,是我们从所收集的大量国外资料中选择的最基本材料。我们希望这些材料有助于我们的同行和关心地球科学这一领域发展的人们比较系统、全面地了解国外岩浆镍—铜—铂硫化物矿床研究的进展和发展趋势。

重要进展

最近二三十年来,与镁铁岩和超镁铁岩有关的镍—铜—铂硫化物矿床的勘查和研究,一直是国外勘查界和学术界十分关注的领域,无论在实践上还是理论上都取得了显著的进展,这种进展至少可以体现在以下方面。

1. 重大发现与资源供应格局的变化

在现阶段,以至在相当长的时期内,硫化镍矿床仍然是优质镍资源的重要来源之一,其中伴生的铂族元素、钴等亦具有重大的价值。显然,与五十年代以前相比,世界硫化镍资源供应的格局发生了深刻的变化,亦即打破了加拿大萨德伯里矿区垄断硫化镍供应的局面。这种变化主要是由于战后在世界许多地区发现和开发一些重要的新类型或新矿床所致。例如,六十年代以来在苏联诺里尔斯克地区一系列新的矿床的发现,以及美国德卢斯矿床的查明,使得与裂谷作用有关的溢流玄武岩侵入相中的硫化镍矿床一跃成为一种重要的矿床类型。六十年代以来与绿岩带科马提岩有关的硫化镍矿床的发现,改变了澳大利亚、南部非洲镍的局面,并扩大了加拿大镍矿生产基地。五十年代以来我国金川等地硫化镍矿床的重大突破,根本上改变了我国缺乏镍资源的面貌,我国开发的镍矿床成为世界硫化镍矿床的一种重要新类型。最近廿年来,南部非洲镍的产量已达6万多吨,跃居世界重要的产镍区之列。这些地区硫化镍矿床的发现不仅为改变世界镍资源供应格局发挥了重要的作用,而且为岩浆硫化镍矿床成矿作用理论研究的深入发展创造了条件。

2. 镁铁岩和超镁铁岩及其有关矿床的构造—岩石分类

分类是人们对客观事物内在联系和区别的认识的一种反映,也是对客观事物本质认识水平的量度。分类的合理性取决于客观事物被揭露的深度和广度。合理的分类有助于人们对纷繁的实际资料的归纳和对比,有利于研究工作的深入发展。

随着IGCP161(“与镁铁岩和超镁铁岩有关的岩浆硫化物矿床”)研究工作的开展,现在出现了比较完善的、详细的镁铁岩和超镁铁岩及其有关矿床的构造—岩石分类方案(见本专辑第一篇译文),这一分类方案较为充分地考虑到国外镁铁岩和超镁铁岩及其有关的硫化镍矿床的研究成果,抓住了关键性因素(大地构造环境、岩浆岩岩石组合),并且具有简明实用的特点,因而越来越广泛地被采用。其不足之处在于忽略了中国的情况,需要加以补充。尽管如此,这一分类方案基本上体现了当代地球科学,特别是镁铁岩和超镁铁岩的研究水平,有着重要的理论和实际意义,可以说是一项重大进展。

3. 科马提岩及其有关矿床的发现

十多年前科马提岩尚未为人所知,如今已被公认为与玄武岩类、安山岩类和流纹岩类同等重要的火山岩类。继1969年南非巴伯顿山地科马提岩的发现,这类岩石及其有关矿床的研究使风靡全球,很快便积累了丰富的实际资料。1979年8月,经美国地质协会发起,在加拿大魁北克省瓦尔德沃开了科马提岩彭罗斯会议,旨在总结现有的认识,阐明科马提岩研究在学术上和经济上的重大意义,提出存在问题及今后研究的领域。此后,于1982年出版了内容丰富的专著《科马提岩》,涉及到科马提岩的区域分布、岩石学和地球化学特征及其鉴定、蚀变和变质作用、成因岩石学和经济地质学研究。在许多地学期刊上和国际会议中,科马提岩及其成矿作用亦是经常讨论的课题。一个地区岩石学发现及其研究成果像这样影响之宽广,传播之迅速都是空前的,具有现代时代的特征。这种现象本身也说明科马提岩研究的重要性。

现已查明,科马提岩在世界上广泛分布,是太古代火山活动的基本组成部分,也发育于元古代和显生宙。至此,岩石学研究中持续了半个多世纪之久的重大争论:在地史上是否存在高镁熔岩或超基性熔岩活动,基本得已澄清。科马提岩提供了大量的有关太古代地壳和上地幔的信息,对认识地球发展的早期阶段的火山作用,以及了解地壳和上地幔的热演化和构造演化都有重要的意义。此外,有几种类型的矿床与科马提岩有关。在科马提岩岩流及有关的高位侵入体中发现了一些重要的镍—铜硫化物矿床,其中有时含有一定数量的铂族元素。此外,亦有证据表明,某些金、锑矿床与超镁铁熔岩流伴生,或者与来源于科马提岩的沉积岩有关。因此,科马提岩研究亦具有重要的经济意义,受到经济地质学家和矿产勘查家的重视。

4. 岩浆同化作用

在当代硫化镍矿床成因研究中,岩浆同化作用,即来源于地幔的原始岩浆与地壳物质的混合,已成为一个重要的课题。在许多地区开展了这方面的研究,认识日渐深入。

众所周知,萨德伯里火成侵入体与其他大型层状侵入体相比,有三个独特之处:缺乏小规模旋回单元,缺乏由矿物含量变化所造成的可见层理,岩石中石英含量特高。Irvine (1975年)认为这种现象是由于岩浆强烈混染富含石英的物质所致。岩体中存在大量部分同化的包体,以及苏长岩的初始 Str^{26}/Sr^{87} 比值较高(0.706)证实了这一观点。岩浆中 SiO_2 含量特高会造成岩浆粘度增加,从而阻止垂直岩浆流的对流和漂选效应,故不能形成岩体中的小规模旋回单元和可见层理。他还认为,镁铁岩浆的硅化可以引起硫化物过饱和,并且指出这种硅化作用是萨德伯里硫化物矿石富集的机制。

近年来硫的同化作用的研究颇为盛行。一些矿床的硫同位素资料表明,硫的同化作用较为普遍地存在于某些镍—铜—铂硫化物矿床中,特别是在与裂谷作用有关的溢流玄武岩侵入相中的岩浆硫化物矿床中(如诺里尔斯克地区的矿床、德卢斯岩体中的矿床)。地壳硫在镁铁岩浆中的混染,补充了成矿过程中硫的供应,导致岩浆中硫的过饱和及硫化物的析出。

最近有人指出,东布什维尔德含铂岩筒以及麦伦斯基层中普遍发育多种形态的石墨,与闪石类、层状硅酸盐、硫化物和铂族元素密切共生,其C同位素组成数据表明,这种碳是壳源物质混染所致。在碳混入镁铁岩浆之后,碳起初为富含挥发分岩浆的整体组成部分之一,在岩浆初步冷凝分化后,则成为与熔体伴生的超临界态的C—O—H—S(CI)相的组成部分。在熔体演化的大部历程中,碳成为岩浆氧逸度的缓冲剂,对铂族元素成矿有重要的意义。

总之,岩浆同化作用,作为镍—铜—铂硫化物矿床的一种形成机制,已经受到比较普遍的重视,并为许多矿床的实际资料所证实。

5. 岩浆混合作用

随着布什维尔德和斯蒂尔沃特层状镁铁岩和超镁铁岩体及其中铂族元素矿床矿物学和地球化学研究的发展,有关岩石和矿床成因问题的探讨日益深入,新的看法不断涌现。用以解释火成层理的岩浆流流体动力学概念逐渐完善,并极大地影响到目前对铂族元素矿床成因的认识。探讨岩浆混合作用

及其在层状铂族元素矿床生成中的意义,受到比较普遍的关注。

所谓岩浆混合作用,指的是成分不同的新的脉动岩浆或基岩浆中贯入到已经侵位的分异岩浆的一定层位,并与之混合的现象。布什维尔德杂岩体麦伦斯基铂矿层即被认为是新的富含古铜辉石的岩浆贯入到正在结晶斜长石的岩浆房,并与之混合的结果。两种岩浆的混合,不仅带来了新的成矿物质,并导致硫化物的过饱和。在斯蒂尔沃特岩体的研究中,亦提出了所谓“双扩散对流岩浆混合”模式。这种概念得到较多的地质学、矿物学、地球化学方面资料的证实,并且能够解释层状铂族元素矿床成因研究中遇到的一些难题(如,分配系数特高,硫化物如何富集岩浆中低含量的铂族元素等)。因此,岩浆混合作用,作为一种成矿机制,已经得到比较广泛的承认,并在深入研究中不断完善。

6. 实验研究及其应用

岩浆硫化物矿床成矿实验研究,是矿床研究的重要组成部分之一,有助于对矿床中出现的矿物组合和矿石结构构造进行解释,从而阐明矿床成因。在过去廿年中这方面取得了相当大的进展。迄今已对岩浆硫化物矿床有关的物理化学系统(如Fe—S系、Ni—S系、Cu—S系、Fe—Ni—S系、Cu—Fe—S系、Cu—Ni—S系、Fe—S—O系、Cu—Fe—Ni—S系、Fe—Co—Ni—S系、FeS—FeO—Fe₃O₄—SiO₂系,以及一些有铂族元素参予的硫化物系统、硫化物与氧化物、硅酸盐相平衡等)进行了大量的研究,积累了丰富的文献资料,对阐明天然矿石的形成条件和生成机制很有意义的低温相平衡关系研究逐渐增多,控制硫逸度硫化物系统实验研究不断加强,铂族元素矿床贱金属硫化物中铂族元素的溶解度和分配的实验研究亦有所进展。此外,对于硫在硅酸盐熔体中的地球化学性质,以及Ni、Cu和铂族元素在橄榄石、硫化物熔体和硅酸盐熔体中的分配亦作了广泛的实验研究,取得了许多成果。

实验研究的进展为岩浆硫化物矿床成矿理论(如硫化物溶离说)奠定了可靠的基础,并为认识矿石的形成环境和演化提供了新的依据。目前,实验研究成果还被用来评价钒铁岩和超钒铁岩体的含矿性、拟定有关矿床的勘查准则(详见本专辑“岩浆硫化物的分凝作用定量模拟的找矿意义”一文)。

重视寻找诺里尔斯克型矿床

诺里尔斯克型铜—镍—铂硫化物矿床,即与陆内裂谷作用有关的溢流玄武岩侵入相中的岩浆硫化物矿床,是一种很重要的矿床类型,其查明的Ni金属的总资源量约为1900万吨(其中储量为700多万吨),属于这种类型的矿床还有美国德卢斯杂岩体中的硫化镍矿床和南非因希兹瓦矿床。对于这种类型的矿床,已作过较多的地质勘探和矿床研究,其基本特征在于:含矿岩体产于陆内裂谷环境,与大面积的溢流玄武(或暗色岩)有密切的空间上和成因上的联系,其成分大致相当于拉斑玄武岩浆;其成岩成矿时代可以跨越很长的时间域(从元古代到中生代);在其成矿过程中,硫的同化作用普遍具有重要的意义;矿床有时伴生丰富的铂族元素(如诺里尔斯克地区诺矿床)。

国内外矿床对比研究表明,我国现有的主要硫化镍工业矿床(如金川、红旗岭等),在构造—岩石环境方面,与诺里尔斯克型矿床有较大差异。然而,就构造—岩石环境和成矿时代而言,诺里尔斯克型矿床较之其他重要类型(如萨德伯里型、与科马提岩有关的矿床等)在世界上的分布会更加广泛。A.J.Naldrett等人(1980)曾提出东非索马里阿法尔地区是寻找诺里尔斯克型矿床的有望地区。我们认为,在我国亦存在着发育诺里尔斯克型矿床的构造—岩石环境,例如攀西古裂谷带二叠纪峨眉山玄武岩分布区便具备发育诺里尔斯克型矿床的基本条件。为了促进这方面的工作,在本专辑中着重系统介绍诺里尔斯克型矿床新的研究成果,其中包括该类型矿床的地质构造环境、岩浆活动、镍—铜—铂硫化物矿床基本特征,以及矿床成因和矿床预测。我们相信,通过对这种矿床类

型的深入了解,并充分利用近年来攀西裂谷研究的大量成果,我们就有可能找到扩大我国镍—铜—铂硫化物资源基地的新途径。

扩大我国铂族元素基地的途径

铂族元素广泛用于汽车制造、电子、化工、首饰及医疗等领域。目前世界年需求量已超过210吨,随着燃料电池的投产和广泛使用,铂族元素的需求量还将进一步扩大,估计到2000年世界年需求量将要翻一番。

国外铂族元素的总资源量为10万吨,其中储量为30750吨。与年需求量相比,铂族元素的资源量和储量是极其丰富的。但是,问题在于这种矿产的地理分布极不均衡,现在世界探明储量主要集中在南非(约占79.9%)和苏联(约占9.2%),这两个国家铂族元素的产量占世界总年产量的90%以上(大约各占一半)。此外,铂族元素分布的不均衡性还表现在其产出的地质环境方面。尽管铂族元素可以广泛分布于许多类型的矿床中,但是其最主要的工业类型却只有两种,即层状基性—超基性岩杂岩体中的铂族元素矿床,以及伴生铂族元素的基性—超基性岩镍—铜硫化物矿床。前一种类型的铂族元素储量占世界探明储量的80%以上,并且基本上产于南非布什维尔德火成杂岩体中,近年来美国斯蒂尔沃特超基性杂岩体中发现的铂族元素矿床亦属这种类型,不过其储量远逊于布什维尔德岩体中的矿床。后一种类型,即产于镍—铜硫化物矿床中的伴生铂族元素的储量占世界探明铂族元素储量的20%左右,主要分布在苏联和加拿大等国。我国的铂族元素亦主要来自这种类型。铂族元素地理上和地质上分布的这种不均衡性引起了普遍的关注。许多研究人员积极投入铂族矿物和矿床的研究,试图通过加深对铂族元素地球化学循环的理解,来促进寻找和开发新的铂族元素矿床。目前,在世界范围内正在比较广泛地开展寻找新的布什维尔德型矿床的工作。但是现在看来我国缺乏发育这种类型矿床的地质环境。要扩大我国铂族元素储量和资源基地,比较现实的途径还是寻找含伴生铂族元素的镍—铜硫化物矿床,特别是铂族元素品位高、储量可观的诺里尔斯克型矿床。苏联铂族元素保有储量(约5900吨)基本上赋存在这种类型的矿床中。因此,本专辑专辟一篇介绍国外岩浆硫化物矿床中铂族元素矿物学、地球化学和矿床学研究的一些成果,尽管国外目前铂族元素研究的重点并不在这一方面。

本专辑的文献收集、选择和汇编由余传善(主编)和孙严承担,参加文献翻译和校对工作的还有(按姓名汉语拼音顺序):陈大经、陈远胜、邓少汉、邓燕华(桂林冶金地质学院)、酆今放、李辛一、刘德馨、梁学谦、梁友彬、林德松、彭省临、谭运金、余平、张正。

加拿大多伦多大学A.J. Naldrett教授为我们提供了部分资料和技术咨询,此外,在工作中还得到情报室主任李志锋高级工程师的关心和帮助,我们谨向他们表示衷心的感谢。

限于业务水平和语言能力,本专辑中疏漏和谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1987.8.

目 录

第一篇 总论

编者按.....	(1)
硫化镍矿床的分类、成分及成因.....	(2)
铜镍硫化物矿床的地质—工业分类.....	(62)
南部非洲镍矿床综述.....	(67)
苏联铜镍矿床成矿地质—构造和岩石条件.....	(78)

第二篇 成因研究

编者按.....	(88)
诺里尔斯克地区铜—镍成矿作用.....	(89)
铜镍硫化物矿床地质—成因模式(以诺里尔斯克型矿床为例).....	(94)
含硫化氢气体的沉积物——诺里尔斯克地区含矿侵入体岩浆硫化作用中硫的来源.....	(100)
西伯利亚地台北西部含镍与不含镍辉长—粗玄岩岩体中硫的来源.....	(102)
具辰加赋矿地层的含硫化物层位对铜镍矿床分布的影响.....	(111)
物理的和化学的因素对与科马提岩有关的硫化镍矿床成因模式的制约.....	(117)
西澳坎巴尔达地区含镍沉积物及其有关的镍矿床.....	(124)
诺里尔斯克型和西澳大利亚型铜镍硫化物矿床特征的对比.....	(143)
美国明尼苏达州德卢斯杂岩体敦卡罗德铜镍矿床的岩石化学研究.....	(154)
镍在橄榄石和硫化物之间的分配及其在铜镍硫化物矿床研究中的应用.....	(171)
南非布什维尔德杂岩体中岩浆的补充贯入和主要元素与微量元素行为的不协调.....	(180)

第三篇 矿床勘查

编者按.....	(187)
芬兰劳肯坎加斯铜镍矿床的勘查史.....	(188)
西澳雷狄欧山镍—铜硫化物矿床地球物理勘查史.....	(200)
岩浆硫化物分凝作用定量模拟的找矿意义.....	(206)
铜镍矿床大比例定量预测.....	(221)

第四篇 铂族元素

编者按.....	(228)
岩浆硫化物矿床中的铂族元素.....	(229)
岩浆硫化物矿床铂族元素地球化学模式.....	(239)
诺里尔斯克铜—镍硫化物矿床中的铂族矿物组合.....	(249)
布什维尔德杂岩体UG—2铬铁岩层中一些铂族元素的分布.....	(259)

第一篇 总论

编者按

本篇汇集了四篇综合性文章,涉及到全球性、南部非洲和苏联的镍—铜硫化物矿床的总结和评述。其中最重要的是A. J. Naldrett撰写的“硫化镍矿床的分类、成分及成因”。这篇文章可以说是近廿年来国外(特别是西方国家)硫化镍矿床研究成果的出色概述。

这里有必要对A. J. Naldrett教授——最近廿年来在岩浆镍—铜—铂硫化物矿床研究领域作出重要贡献的学者作简单介绍。他长期在加拿大多伦多大学地质系从事矿床地质学教学和研究工作,尤其在镁铁岩和超镁铁岩及镍铜硫化物矿床和铂族元素研究方面闻名遐迩。他是加拿大皇家学会会员,曾荣获加拿大采矿冶金研究所1974年度巴罗奖章、加拿大地质协会1980年度邓肯R. 德里奖章、(美国)经济地质学家协会1982年度银质奖章——表彰他在矿床地质学的发展上所作出的杰出贡献。1961年Naldrett完成了题为“萨德伯里矿区的钴的地球化学”的硕士论文,此后他的研究便集中在与镁铁岩和超镁铁岩有关的硫化镍矿床方面。他对镍矿化的性质和成因提出了许多新见解,反映在他发表的60多篇重要的论文和著述中,这些文献涉及到硫化镍矿床的矿物学、岩石学、实验相化学、痕量元素地球化学、大地构造学、经济地质学等方面。值得指出的是,他很注重野外地质工作,并用地质事实检验实验室研究结果。他将Fe—S—O系和Fe—Ni—S系研究结果与萨德伯里矿区野外和矿山调查结果结合起来,提出了这类矿床详细成因模式。Naldrett对加拿大安大略和西澳大利亚与太古代科马提岩系的超镁铁岩流和岩床有关的硫化镍矿的确认和继续研究,极大地发展了对硫化镍矿床的认识。近年来,他致力于硫化镍矿床中铂族元素分布的研究,并不断有新成果问世。本专辑共选译了他的或者他与合作者的四篇论文。

Г. И. КАВАРДИН在“铜镍硫化物矿床的地质—工业分类”一文中,简明扼要地阐明了这种类型矿床的形成条件,并以矿石建造(主要是矿石中Cu—Ni比值)为准则,提出了铜镍硫化物矿床的地质—工业分类,划分标志明确,而且反映了工业—经济特征和加工条件,对于矿床评价和预测有较大的实用价值。

南部非洲以盛产与镁铁岩、超镁铁岩有关的铬铁矿和铂族金属著称于世,而长期以来其硫化镍矿床并不引人注目。但是最近的资料表明,在过去的廿年中南部非洲硫化镍矿床的研究和勘查取得了重大的进展,其镍的年产量已达6万吨之多,跃居世界最大的产镍区之列,并且有着广阔的发展远景。这里选择的“南部非洲镍矿床综述”一文,根据大量的资料,以矿床的地质环境为背景探讨了南部非洲镍矿床的时间和空间分布问题,阐明了不同建造或岩石类型的成矿意义,有助于我们了解世界这一新的产镍区的概貌。

同典型的硫化镍矿床的全面、深入的研究相比,控制矿床的区域地质构造和岩浆作用的研究往往显得不足,而查明矿床的大地构造环境对于找矿说来却具有战略性的意义。因此,从这个意义而言,“苏联铜镍矿床成矿地质—构造和岩石条件”一文值得一读。本文作者曾执笔《苏联矿床》中有关岩浆铜镍硫化物矿床部分,长期从事苏联硫化镍矿床研究。他在这篇文章中剖析了苏联铜镍硫化物矿床时间和空间上的分布,划分了成矿构造环境类型,并阐明了各构造环境的区域岩浆活动特征及其与成矿作用的关系。

硫化镍矿床的分类、成分及成因

A.J. Naldrett (多伦多大学)

序 言

长期以来,人们普遍认为,硫化镍矿床的形成是不混溶硫化物流体从镁铁质或超镁铁质含硫化物岩浆中分离出来的结果,后来主要由于致密硫化物的重力沉降导致这种流体的聚集。尽管如此,仍有一些地质学家对这一观点持怀疑态度,有些人认为硫化镍矿床是由于热液交代作用所造成;有些人认为是火山喷气作用的结果;还有些人则认为主要是由于原来低品位的岩浆矿床在变质作用过程中品位升高所致。地质学家们曾就硫化镍矿床的成因问题作过广泛的研讨。毫无疑问,有些含硫化镍的矿床是热液成因的(例如那些与加拿大萨斯喀彻温北部的不整合型铀矿伴生的硫化镍矿床);有些矿床不是岩浆的,而是火山喷气成因的(例如西澳的谢尔洛克湾的矿床);而变质作用和构造形变也影响并导致某些矿床中矿石品位提高。在大多数硫化镍矿床中,可找到岩浆诱发的热液活动的痕迹。然而,笔者(Naldrett 1979)认为,就大部分硫化镍矿床的初始富集而言,这些热液活动和变质作用所产生的影响都不及岩浆作用那么重要。本文将提供一些与这一问题有关的证据,有一些恕不赘述,读者可参考所列举的有关文献。

如果我们接受岩浆模式这一前提,就得面对以下一系列问题:

- 1 已知的镁铁质和超镁铁质岩体有哪些类型?
- 2 就硫化镍矿床而言,这些镁铁质和超镁铁质岩体中哪些已证明是含矿性好的?
- 3 何以见得它们含矿性好?
- 4 形成这些岩体的岩浆成分同所生成的矿石成分之间的关系如何?
- 5 这些各别的成分对岩浆和矿床的起源及随后的发展有何制约?

本文试图按我们现有的认识水平对这些问题进行论述。

I 镁铁岩、超镁铁岩以及有关的硫化镍矿床的分类

地质学家们已对镁铁质和超镁铁质岩体的分类做过许多尝试,其中较早的是Wyllie (1967)在《超镁铁岩及有关的镁铁岩》这本教科书中的分类。Naldrett (1973)利用了其中的许多详细分类提出了一个新的分类方案,其中包括过去未被认识的科马提岩类;后来他和Cabri (1976)又对这一分类方案作过修订。但是以Naldrett的方案作为硫化镍矿床分类的基础,仍嫌不足,因为许多硫化镍矿床都产于岩石高度变形、变质的地区,以致难以确定其成因。因此,在国际地质对比计划第161项“与镁铁岩和超镁铁岩有关的岩浆硫化镍矿床”的第一次会议上,代表七个国家的一些地质学家们以Naldrett和Cabri的分类为基础提出了一新的分类方案(表1)。这个分类表中还列举了各种岩石及与之伴生的硫化矿床的实例,此方案包括三个主要亚类:(A)同火山期的岩体;(B)克拉通地区的岩体;(C)造山运动期间侵位的岩体。下面将对这些岩石分别进行论述。

1.1 与克拉通内火山活动同期的岩体

在太古代及元古代绿岩带的勘查经验告诉我们,同火山期超镁铁岩有两种类型,即科马提岩类和拉斑玄武岩类;而拉斑玄武岩又可分为苦橄拉斑玄武岩和斜长拉斑玄武岩两种不同的亚类。因为斜长拉斑玄武岩亚类中超镁铁岩所占比例甚微,所以本文论述的中心主要是科马提岩类和苦橄拉斑玄武岩亚类。

表 1

镁铁和超镁铁岩体的分类

岩体类型	实 例	有关的矿床实例
A. 同火山期岩体 (那些与克拉通内火山作用有关的岩体除外)		
1. 科马提岩套		
(a) 熔岩流	安大略, Munro Township 西澳, 东Goldfields	安大略, angmuir 西澳, 次巴尔夫 津巴布韦, 桑格里 津巴布韦, 丹巴, Epoch
(b) 层状岩床	巴伯顿, Klapmuiden岩床	
(c) 纯橄岩—橄辉岩透镜体	西澳, 东Goldfields 魁北克, Dumont	西澳, Persverance 西澳, Six-Mile
(d) 类型不定的再造岩体	马尼托巴	马尼托巴, 汤普森带
2. 拉斑玄武岩套		
(a) 同火山期的层状苦橄拉斑玄武岩侵入体	安大略, Dundonald岩床 Centre Hill杂岩体 Kukagi Lake 西澳, 东Goldfields	苏联, 贝辰加 马尼托巴, Lynn Lake 西澳, Carr Boyd
(b) 斜长岩岩体	魁北克, Dore Lake杂岩体 Bell River杂岩体 安大略, Kamiscotia杂岩体, 提明斯	无已知矿床
3. 亲缘不明或未证实的岩体		
(a) 层状侵入体	安大略, Montcalm辉长岩	安大略, Montcalm Ni-Cu矿床
(b) 构造再造岩体	博茨瓦纳, 林波波活动带侵入体	博茨瓦纳, Pikwe, Selibe, 菲尼克斯
B. 克拉通地区的侵入体		
1. 与溢流玄武岩有关的侵入体	明尼苏达, 德卢斯杂岩体 苏联, 诺里尔斯克—塔尔纳赫特 兰斯凯, 因希兹瓦—英吉利杂岩 体, 南美洲, Dufek侵入体	明尼苏达, 德卢斯杂岩体矿床 苏联, 诺里尔斯克—塔尔纳赫 特兰斯凯, 因希兹瓦—英吉利 瀑布峡
2. 与溢流玄武岩无确证关系的大型层状侵入体		
(a) 席状岩体		
(1) 具有重复层理的岩体	南非, 布什维尔德杂岩体	南非, 布什维尔德杂岩体 Bronzite筒状矿体, 麦伦斯基层 UG 2层, 布什维尔德铂族元素

续表 1

②无重复层理的岩体 (b) 岩墙状岩体	蒙大拿, 斯蒂尔沃特杂岩体	蒙大拿, 斯蒂尔沃特杂岩体 Ni-Cu硫化物 Pt-Pd矿石
	加拿大, Muskox杂岩体 加拿大, 萨德伯里 津巴布维, Great Dyke 西澳, Kimberlana Dyke Skaergaard Rhum	加拿大, 萨德伯里 南非, Losberg
3. 其他中小型侵入体		
4. 碱性超镁铁岩体		无已知实例
C. 造山活动期间侵位的岩体		
1. 同造山期侵入体	苏格兰, 阿伯丁郡辉长岩 挪威, Røna - 塞尔兰区 阿拉斯加, La Perousse	挪威, Røna 阿拉斯加, La Perousse
2. 构造侵位岩体		
(a) 蛇绿岩杂岩体	新喀里多尼亚 纽芬兰, 群岛湾 魁北克, Mt. Albert	无重要实例
(b) 可能的地幔底群		无重要实例
3. 阿拉斯加型杂岩体	阿拉斯加 Duke岛 尤尼恩湾	阿拉斯加, Salt Chuck

1.1.1 科马提岩

确切地说, 何谓科马提岩这一问题至今仍混淆不清。这一岩石名称是 M. J. Viljoen 和 R. P. Viljoen (1969) 对巴伯顿山地科马提河地区广泛发育的一些岩石的命名。现在看来, 最初对科马提岩所下的定义某些方面, 特别是后来 Brooks 和 Hart (1974) 对此所做的解释都带有局限性。Arndt 等人 (1977) 对科马提火成岩套重新下了定义, 他们认为科马提火成岩套与拉斑玄武岩套、钙碱性或碱性岩套一样, 是一组特殊的岩石; 此后, Naldrett 和 Smith 对科马提火成岩套重新定义, 即这种岩套包括纯橄榄岩 ($\text{MgO} > 40\%$, 换算为无水重量百分比, 下同) — 橄榄科马提岩 (MgO 为 $20 \sim 24\%$) — 玄武科马提岩 (MgO 为 $12 \sim 20\%$) — 镁质玄武岩 (MgO 为 $10 \sim 12\%$) — 玄武岩 (MgO 低于 10%) 等一系列岩石。

Arndt 和 Brooks 在一九七九年召开的科马提岩彭罗斯会议上所做的报告中对玄武岩的分类提出的一系列变通的方案, 现在看来还可能会有新的变更。在彭罗斯会议上还有人提出一种似乎合理的建议: 应将科马提岩这一术语重新定义, 以包体所有的超基性火山岩 (含碎屑岩而不含玄武质岩浆形成的堆积岩)。超镁铁包括 MgO 含量的下界被人为地规定为 18% (重量百分比)。科马提玄武岩这一术语适用于 MgO 含量低于 18% 的、与科马提岩在空间分布和化学成分上都有一定联系的岩石。这仅是目前提出的一种初步建议。为了避免混乱, 本文采用的是 Naldrett 和 Smith 的定义, 因为他们的术语仅在原已通用的术语基础上稍作改动。

在某特定的地区内一般都可见到科马提岩的喷出变种和侵入变种, 有时喷出变种居多 (例如

Munro Township), 有时侵入变种为主, 并常常呈大规模的块状纯橄岩透镜体产出 (例如Yakabindie地区)。现已查明, 通常含有20~30% MgO (最高达35%) 的橄辉岩质流体是存在的, 其中还携有20~30% 的悬浮状橄辉石斑晶。这些斑晶的沉淀、聚积以及压滤、压实乃至可能的某些堆积增生导致纯橄岩和富镁橄辉岩的形成。

板状及骸晶状橄辉石和单斜辉石晶体的生长是上覆熔体的特别, 这种熔体中的斑晶已沉淀在某些熔岩流 (或某些近地表侵入体) 中。这种板状、骸晶状橄辉石和单斜辉石结构被称为鬃刺结构。在其他的一些熔岩流中斑晶的沉淀似乎受到阻碍, 在这种情况下一般不会出现鬃刺结构带, 尽管斑晶四周仍普遍生长着骸晶并有填隙骸晶辉石的出现。由于鬃刺结构的存在意味着成核作用受抑制和过冷却现象的存在, 因此人们认为鬃刺结构带基本上相当于特定的岩浆之流体部分。以此标准推测, 具有鬃刺结构并含有约23% MgO 的熔岩流大概是在1425℃左右高温下喷出的; 含有35% MgO 的熔岩流则是在约1650℃高温下喷出的。Nesbitt和Sun (1976) 等许多地质学家都对玄武岩是否属科马提岩套这一问题进行过广泛深入的研究。这个问题的症结在于这样一个事实: 与橄辉科马提岩和玄武科马提岩系有紧密联系的、因而被推定为其中一部分的玄武岩同那些与超镁铁质科马提岩无密切联系因而被归划为拉斑玄武岩类的玄武岩在主要元素和许多微量元素含量方面完全相同。

Arndt等人 (1977) 对一厚达120米的分异科马提熔岩流进行过描述。这一熔岩流基底为堆积橄辉岩, 其上为辉石岩 (主要是普通辉石, 也有一些紫苏辉石), 再往上为辉长岩 (向上渐变为石英辉石岩), 岩流顶部为30米厚的橄辉石和辉石鬃刺岩带。这里的辉长岩成分与覆于熔岩流之上的玄武质科马提岩-镁质玄武岩-玄武岩系中的玄武岩成分完全相同, 说明经过分离结晶作用形成的所有这些不同类型岩石之间具有一定的联系, 有关的微量元素资料也证实了岩石间的这种相互联系。然而, 在某些地区, 包括Munro Township的其他地方, 微量元素资料排除了这种联系的存在, 而表明: 玄武质科马提岩和玄武岩的产生是不同的地幔熔融事件的结果。

尽管在解释某些岩石的化学成分问题上存在一定的困难, 有些通则似乎有助于我们辨别这些岩石组合, 特别是岩石系列的超镁铁质端。

Naldrett和Cabri (1976) 等人曾指出, 在安大略省的Munro Township, 科马提岩以及伴生的玄武岩一般可方便地依据岩石中 Al_2O_3 与 FeO ($FeO + MgO$) 的含量关系曲线同富铁拉斑玄武岩区分开来 (这里全铁换算为 FeO)。按照这种方法, 在图1A中绘出了Munro岩石以及Dundonald岩床 (属苦橄拉斑玄武岩亚类的分异岩床) 内堆积岩的含量关系曲线。从图中可清楚看出这两类岩浆岩的差异: 科马提岩图点都位于经验斜线之上, 而拉斑玄武岩在下。Arndt等人指出: 比较而言, 科马提岩中 TiO_2 的含量要低于拉斑玄武岩 (如图2A中 TiO_2 与 MgO 的含量关系曲线所示), 这是区分这两类岩浆岩的又一特征。尽管Dundonald岩床的堆积橄辉岩和辉岩的图点落在科马提岩区域内, 但根据岩石中 TiO_2 之含量仍可有效地地区分出这一岩床中的辉长岩变种, 并可辨别出科马提岩与喷出拉斑玄武岩。

如果考虑到世界上其他一些地区的科马提岩, 可不难发现, Naldrett和Turner (1977) 所记载的西澳Yakabindie的科马提岩在 Al_2O_3 与 FeO ($FeO + MgO$) (图1B) 以及 TiO_2 与 MgO (图2B) 含量关系图解上显示类似于Munro岩石的特征。同时, Naldrett和Turner还证实, Yakabindie地区与科马提岩伴生的玄武岩的特点是 Ni 、 Cr_2O_3 含量高 (前者的平均含量为146 ppm, 含量变化范围为100~181 ppm; 后者的平均含量为138 ppm, 含量变化范围为 $<10 \sim 336$ ppm)。在含量关系图解中, Yakabindie地区的岩石图点与Nesbitt (1971) 报导的西澳斯科舍地区 (卡尔古利以北80公里处) 的有关岩石的图点分布在一起。然而, 与加拿大和西澳的岩石相反, 某些巴伯顿科马提岩, 特别是Badpaa和巴伯顿型玄武科马提岩以及Getuk型岩石的低铝变种的图点都在图1中的经验斜线之下。Arndt (1975) 对这些据目前所知仅在巴伯顿地区产出的岩石的独特成分进行了研究, 并对

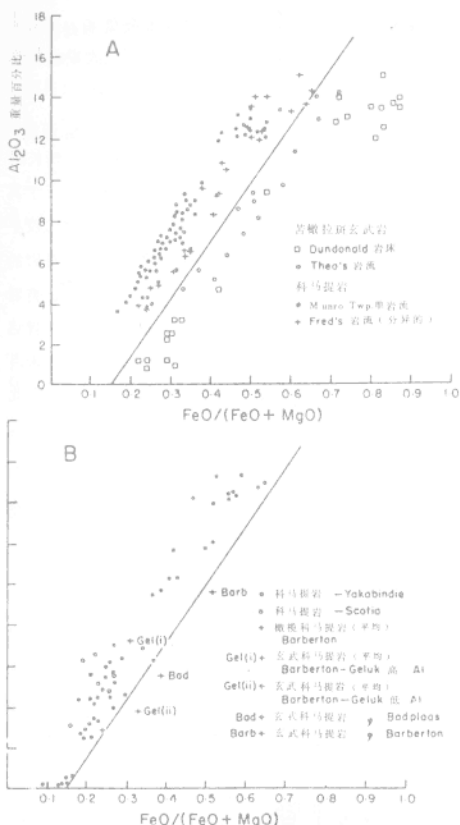


图1 阿比提比绿岩带 (A) (Theo's岩流是与Dundonald类型相同的分异岩床之外延部分) 以及南非和西澳一些地区 (B) 的岩石中FeO/(FeO + MgO) (重量百分比) 与Al₂O₃含量关系曲线。注意: 这里岩石全铁含量以FeO表示, 所有的岩石分析结果均换算为无H₂O和CO₂或烧失量组分 (据Naldrett和Cabri, 1976)

渐变为细粒辉岩, 而辉岩之上是不常见的富含MgO (13~15%, 重量百分比) 的玄武碎屑岩。在Alexo矿山, 有一管状玄武碎屑岩体切断了Dundonald岩床之上的科马提熔岩流, 使这些熔岩流角砾岩化并与一层状的玄武碎屑岩层汇合, 另一个科马提熔岩流覆盖在层状玄武碎屑岩层上。上述情况表明, 这两类岩浆活动是同时进行的。这类玄武碎屑岩的成分 (SiO₂ - 50%, MgO - 14%, TiO₂ - 0.9~1.52%, 重量百分比) 被认为相当于导致熔岩流和岩床产生的岩浆的原始成分, 其中

其成因问题提出了一些看法。

这里需要注意的是: 某一特定岩石尽管通过了上面概述过的化学筛, 但不必是科马提质的。例如: 大部分洋脊玄武岩和岛弧玄武岩图点都落在图1的科马提岩区, 大部分蛇绿岩杂岩体的超镁铁岩也都投影在科马提岩区。除了化学标准之外, 我们所提及的其他一些特征 (象熔岩的存在, 可能存在的富橄榄石的次火山通道和一些有代表性的岩样中出现的鬃刺结构等) 都可用来确证我们所面对的是一套科马提岩。与其他具有相似的MgO/FeO比值的火山岩相比, 大多数公认的科马提岩所具有的其他化学特性还有: 其稀土元素含量通常较低, 特别是铈、钇和镧含量低。

1.1.2 拉斑玄武岩

1.1.2.1 苦橄拉斑玄武岩亚类

属这一类的超镁铁岩呈分异岩床或熔岩流的基底堆积物产出; 有时也以熔岩流顶盖的玄武碎屑岩或隐晶质 (或细粒) 的辉石岩带产出; 或以可能与岩床有关的火口角砾岩形式出现。Dundonald岩床——这一亚类岩石的类型岩床, 其基底为厚达320米的橄榄石岩层, 上覆为130米厚的普通辉石岩, 再向上是厚达260米的辉长岩带, 其顶层是文象斑岩带 (最厚处可达60米)。在属于这一亚类的分异熔岩流下部也发现了类似的岩层结构, 但在这些分异岩流中, 辉长岩向上

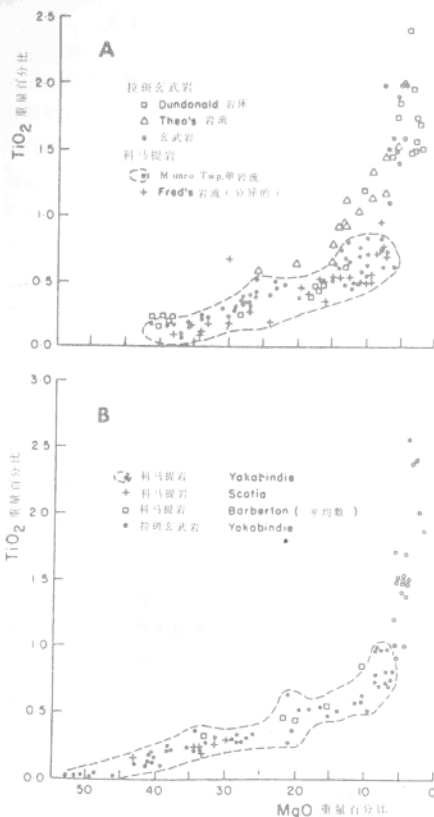


图2 阿比提比绿岩带 (A) 以及南非和西澳一些地区 (B) 岩石的 TiO_2 和 MgO 含量 (重量百分比) 关系图
(据 Naldrett 和 Cabri, 1976)

面积为 240×80 平方公里的德卢斯杂岩体, 南非的因希兹瓦-英吉利杂岩体以及西伯利亚诺里尔斯克-塔尔纳赫地区的小侵入体 (面积至多为 1×10 平方公里) 都属于这一类侵入体。它们都与溢流型拉斑玄武岩伴生。溢流玄武岩的特点是不相容元素的含量高于其他拉斑玄武岩类, 其中铈和钕的同位素比值表明这些溢流玄武岩是由此前未熔融的地幔衍生而来。

1.2.2 大型层状杂岩体

从表 1 可见, 这一类岩体可细分为席状岩体和岩墙状岩体两个亚类, 前者包括布什维尔德、斯提尔沃特、马斯科克斯和萨德伯里等杂岩体。萨德伯里杂岩体与其他杂岩体的不同处在于它缺少由不同岩石构成的重复的层理, 因而成为独立的一类。上述这些杂岩体的总成分往往为镁铁质而不

还包括 $10 \sim 20\%$ 的标准橄榄石。这种玄武岩碎屑岩被视为橄辉拉斑玄武岩或苦橄岩。

1.1.2.2 斜长拉斑玄武岩亚类

这一类岩体主要由斜长岩、辉长斜长岩或斜长辉长岩组成, 其特点在于其岩层富含钛质磁铁矿。超镁铁岩比较罕见, 而且一般局限在富含堆积辉石岩的岩层中。Dore Lake 杂岩体是这一类岩体中研究得最全面的实例之一 (尽管这一岩体的大部分已发生蚀变)。岩体内的层理通常与围岩内的褶皱整合表明此岩体是在褶皱之前侵入的。然而, 距安大略省提敏斯以西 24 公里的 Kamiskotia 杂岩体, 尽管出露差, 但看上去很可能是非整合岩体。

1.2 克拉通区域的侵入体

从表 1 中可以看出, 非造山环流的岩体的分类, 除了要辨别溢流玄武岩型岩浆侵入体与碱性侵入体之外, 更主要的是如何根据岩体的规模, 而不是侵入体或岩浆类型的基本差异进行划分。

1.2.1 与溢流玄武岩有关的侵入体

南极洲规模相当大的 Dufex 侵入体 (厚达 6 ~ 7 公里, 面积超过 8000 平方公里), 明尼苏达州

是超镁铁质，尽管这些杂岩体中都有超镁铁岩带的存在（萨德伯里除外）。不过，甚至在萨德伯里矿石中也含有大量的超镁铁质包体（从纯橄榄岩到橄榄石变辉岩），Naldrett等人（1972）认为这些包体源自隐伏层状侵入体。

1.2.3 其他类型

其中包括中、小规模侵入体以及碱性岩（象金伯利岩及碳酸盐岩）。

1.3 造山运动期间侵位的岩体

1.3.1 同造山期侵入体

属此类的镁铁质侵入体在阿巴拉契亚—加里东造山带常见。Boyd同Munro（1978）等人对Aberdeenshire和Seiland地区的Finmark的这类侵入体进行过全面论述。这两个地区的镁铁质侵入体具有如下特点：（1）同变形侵入体的特征—火成层理特别紊乱（如果这种火成层理存在的话）；有多种构造岩组构；多种火成岩的不规则分布；（2）在大地构造活动后期的部分变质、变形作用。在这一造山带内，从缅因至挪威北部（特别是挪威的加里东造山带地区）广泛发育有这种同造山期侵入体，这可能与侵蚀程度深有关。其他的显生宙造山带深部层位中可能也有类似的侵入体产出。Boone（1974）认为，在缅因，这种同造山期侵入体与大陆碰撞有关，Robins等（1974）则主张，Seiland岩省是由陡倾的贝尼奥夫带生成的。

1.3.2 构造侵位岩体：蛇绿岩杂岩体

人们认为蛇绿岩杂岩体是洋壳和上地幔的组成部分。在保存最好的蛇绿岩杂岩体实例中，典型的剖面（从下至上）是：具变质结构的基底橄榄岩带；一系列的堆积岩（从纯橄榄岩、橄榄岩到辉长岩）；一系列的枕状熔岩及伴生的通道岩墙以及顶部的深海沉积物（包括放射虫礁石）。在某些地方，侵位过程中断裂活动不多因而蛇绿岩层序完整地保存下来；但在其他某些地方，超镁铁岩则以孤立的岩块形式产在混杂堆积物中。

1.3.3 构造侵位岩体：可能的地幔底辟

MacGregor（1962）认为魁北克东Townships的Mt. Albert岩体是一个在造山运动期间形成的固体地幔物质高温底辟侵入体。他指出，岩体周围的沉积物中出现的明显的变质晕证明了此岩体的高温特征。

1.3.4 阿拉斯加型超镁铁质杂岩体

这一类杂岩体因阿拉斯加大陆东南部出露的一系列特殊的岩体而命名。沿阿拉斯加长达550公里的狭长地区产出三十多个这种岩体，大部分分布在宽约40公里的范围内。某些较大的杂岩体显示了大致的同心分带现象。当这种同心分带发育得最好时，其核心是纯橄榄岩，四周依次被橄榄单斜辉石、富磁铁矿的单斜辉石岩和角闪石岩壳所环绕。作为一种类型，Alaskan型杂岩体与阿尔卑斯型超镁铁质侵入体或层状侵入体的不同处在于它具有钙含量高的单斜辉石，而无斜方辉石或斜长石；有丰富的角闪石、富铁铬铁矿和磁铁矿。磁铁矿富集局部具有经济价值。

在马拉尔山脉、加拿大的不列颠哥伦比亚省中南部、哥伦比亚和委内瑞拉都有类似的岩体出现（见表1），其中研究得最广泛、最彻底的是Duke Island杂岩体，Irvine在一九七四年对该岩体进行过研究，对这种类型岩体作了最新的、全面的概述，并且强调说明了这类矿体所具有的碱性特征。

2 不同镁铁质和超镁铁质岩体类型 作为矿床主岩的相对意义

从表1可见,硫化镍矿床与许多不同类型的镁铁质和超镁铁质岩体伴生。然而,业已证实,其中某些类型作为硫化镍矿床的主岩比其他类型更重要。Naldrett (1973) 指出,蛇绿岩体、阿拉斯加型岩体以及碱性岩体(象金伯利岩以及含碳酸岩的环状杂岩体)中几乎无意义较大的矿床产出(即使有也是微不足道)。Naldrett和Duke (1980) 注意到,95%以上的已知硫化镍储量和资源量产于以下五种独特的岩体类型与构造环境组合(岩石构造环境)中:

(I) 与星蚀疤(陨石撞击所产生的疤痕)有关的苏长岩。这种类型只有一个实例,即加拿大的萨德伯里矿区。

(II) 与陆内裂谷作用有关的溢流玄武岩的侵入相。重要的实例有西伯利亚的诺里尔斯克矿区和明尼苏达州德卢斯杂岩体西边尚未开采的硫化物矿床。

(III) 与前寒武纪绿岩带形成早期伴生的岩浆活动所导致的两种主要岩体类型:

① 拉斑玄武岩侵入体。苏联科拉半岛的贝辰加镍矿区以及加拿大马尼托巴的Lynn Lake矿区之主岩都属这一类:

② 科马提岩和侵入体,特别是更超镁铁质的变种;超镁铁质科马提岩是某些重要的硫化物矿床的主岩,西澳大利亚坎巴尔达矿区的硫化物矿床尤其如此。现已查明,分布在马尼托巴汤普森地区的矿床之主岩以及魁北克省昂加瓦半岛北端尚未开采的高品位矿床之主岩都是科马提质的。

(IV) 通常与显生宙造山带的造山运动同期产生的拉斑玄武岩侵入体,它是某些不甚重要矿床

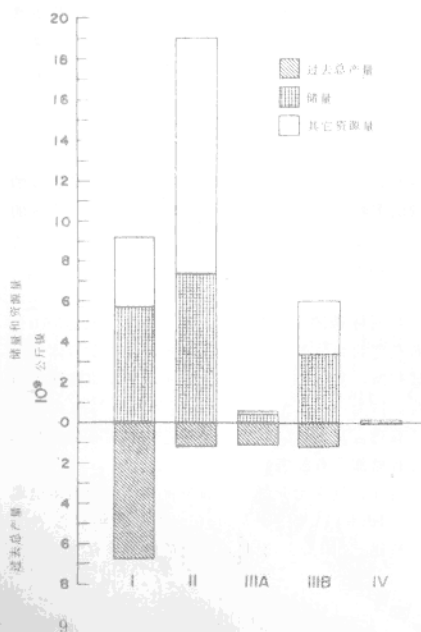


图3 岩浆硫化物矿床过去的总产量、现有储量以及其他查明资源中的镍金属含量。如正文所述,这些矿床的分类是以其岩石构造环境为基础。储量包括已知的、现可进行盈利开采的矿床,而“其他资源量”则包括那些已知的、目前尚不能进行经济开采但在可预见的未来有可能进行开发的矿床。目前还不知道萨德伯里(环境I)和诺里尔斯克(包括在环境II中的“其他资源”的数量,但保守的估计数为其储量的一半。

(例如挪威的Röna矿床、缅甸北部的Moxie和Katahdin辉长岩中的矿床)的主岩。

不同岩石构造环境作为镍—铜硫化物矿床之主岩的相对意义如图3所示,这里既着眼于过去的产量,同时也着眼于将来的资源量进行比较。主要有三种岩石构造环境:(1)一萨德伯里;(2)与溢流玄武岩浆和陆内裂谷作用有关的环境;(3)与前寒武纪绿岩带中的火山岩(特别是科马提岩)有关的环境。下面我们将分别对这三种岩石构造环境中出现的矿床实例进行简要论述。

3 某些硫化镍矿床实例的论述: 矿床成因的推断

3.1 环境 I — 萨德伯里

萨德伯里(包括其矿床、火成岩及地质环境等问题)已成为大量文献探讨的对象,这里我们并不准备全面地对它加以论述,仅想说明其主要的特征,并特别注重新近发表的某些学术论文以及一些对矿床的成因研究有重要意义的特征。

萨德伯里的地质情况如图4所示。矿床或是靠近萨德伯里含镍侵入体外缘,或是与侵入体之外的贯入岩墙(岩枝)伴生。许多权威人士都对该侵入体作过详细的岩石学研究。近年来, Pattison (1979)着重研究了与矿床有密切关系的岩石(火成岩下层)。在此之前, Naldrett等人(1970, 1972)和Hewins(1971)也做过这方面的工作。萨德伯里含镍侵入体是沿着上覆的白水系统与下伏的古生代花岗岩和片麻岩(北面)以及元古代绿岩和硬砂岩(南面)之间的接触带侵入的。在萨德伯里最有趣的岩系也许是构成白水系基底的岩层,即Peredeny(1972)详细描述过的Onaping组。这一岩层为角砾岩层,其角砾包括大量的围岩、石英岩、花岗岩、片麻岩和辉长岩碎屑以及似火山玻璃的脱玻残余物,胶结物为小块岩石碎屑和脱玻玻屑。

最初, Speers (1957)认为萨德伯里构造为一破火山口, Onaping组是破火山口陷塌时充填的熔结凝灰岩,而含镍侵入体则是侵入于邻接破火山口断裂活动带的岩体。随后 Dietz (1964)研究了位于现在的含镍侵入体南缘的石英岩中的震裂锥,认为这一构造是围石碰撞区。1967年, French发

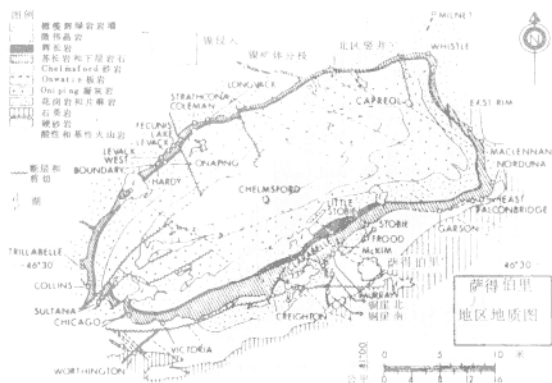


图4 萨德伯里盆地地质图

现Onaping组的围岩碎屑中的石英、长石颗粒中有成行的包裹体，他指出，这种包裹体是压力为1000千巴以上的冲击所造成的薄层状击变玻璃的残余物，从而为碰撞假说提供了有力的依据。

根据这些最初的观察结果，Peredery (1972) 把Onaping组与巴伐利亚的里斯构造中的围击角砾岩层进行了比较研究，后者被认为是碰撞回落角砾岩。同时，他还认为，Onaping组底部的不规则长英质火成岩岩体是由碰撞热生成的熔体；由当地的物质构成的角砾岩墙则相当于碰撞区附近所观察到的假玄武玻璃脉。Bray (1972) 认为碰撞所导致的深壳断裂活动触发了火成岩的侵入。碰撞假说现已广泛地、但还不是普遍地接受。

萨德伯里含镍侵入体由一层苏长岩构成，苏长岩上覆盖着边缘带，其中石英的含量向低部接触带逐渐增加。苏长岩向上渐变为辉长岩，而紫苏辉石的含量则随之逐渐下降。辉长岩中出现有堆积磁铁矿。辉石岩向上则突变成文象斑岩。从苏长岩向上变为辉长岩、文象斑岩，向下穿过边缘带，普通辉石和紫苏辉石的Fe/Mg比值逐渐增高。从苏长岩至辉长岩带，斜长石中的钙长石含量不断增加，而在边缘带中则保持相对稳定。与其他的大型层状侵入体相比，萨德伯里含镍侵入体有三个特点：一是没有小规模（<200英尺）的旋回单元；二是没有因矿物比例的改变而造成的可见层理；三是岩石中的石英含量相当高。如果对比萨德伯里和其他层状侵入体中辉石的Fe/Mg比值或斜长石中An的含量（它们被视为母岩浆分异程度的标志），那么萨德伯里岩石富含石英这一特点便一目了然（图5）。

Irvine (1975) 认为，萨德伯里的岩浆已与富石英物质高度混染，因而导致SiO₂含量的增高，但Fe/Mg比值并未相应增大。该侵入体中大量的局部同化的包体的出现以及苏长岩的Sr⁸⁷/Sr⁸⁶初始比值较高（0.706）都为这一观点提供了依据。旋回单元与火成层理的缺失也可由此得到解释，因而含量异乎寻常之高的SiO₂会导致岩浆的粘度极度增强。这样便阻碍了导致旋回单元和可见层理产生的垂直岩浆流的对流和分离效应。

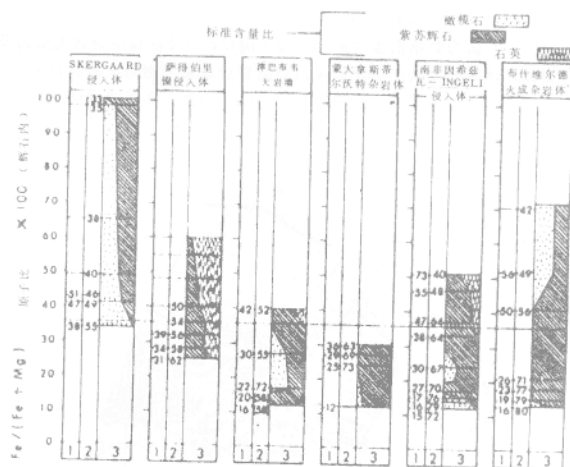


图5 许多著名层状侵入体的堆积岩中橄榄石、紫苏辉石和石英的标准矿物含量与其辉石的Fe/(Fe+Mg)比值对比图。图中同时列出了每一岩体的紫苏辉石（栏1）的Fe/(Fe+Mg)比值和斜长石的An含量（栏2）（据Naldrett and MacDonald, 1980简化。）