

国外地质资料选编十六

国外与基性超基性岩有关的 硫化铜镍矿床资料专辑

地质科技情报研究所

前 言

在伟大领袖毛主席的无产阶级革命路线指引下，在无产阶级文化大革命和批林批孔运动推动下，全国地质战线出现了一派朝气蓬勃的大好形势。我国与基性和超基性岩有关的铜镍及其他有关矿产的普查和勘探工作也已取得了不少成绩。为适应当前我国的革命和生产的需要，我们根据“洋为中用”的方针，编译了“国外与基性和超基性岩有关的铜镍矿床资料专辑”，供广大地质工作者参考。

与基性和超基性岩有关的铜镍硫化矿床，是世界上的一种主要镍矿类型，同时又是铜和铂族金属的重要来源。这类矿床对于综合找矿、综合利用是很有价值的。本专辑共收入了22篇文章，主要包括非洲南部、澳大利亚、加拿大、斯堪的纳维亚半岛和苏联诺里尔斯克等硫化铜镍矿产地的地质资料，涉及到岩体和矿床构造，以及对矿床成因、控制因素和赋存规律的探讨等。其中较多是工作中取得的实际资料，但也有些文章或某些部分只限于理论上的探讨。望读者批判地吸收，取其精华，去其糟粕，并请对专辑的选题、编辑等工作提出意见，以便今后改进。

本专辑的编译工作中得到湖北地质学院、甘肃省地质局第六地质队、河北省地质十队、地质矿产研究所等单位有关同志的大力支持和协作，在此表示感谢。

由于我们的政治和业务水平有限，编译中难免有错误和不妥之处，希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

硫化镍矿床及其分类和成因	1
津巴布韦(罗得西亚)宾杜腊区特罗津镍矿	23
津巴布韦(罗得西亚)埃姆普列斯镍铜矿床	33
博茨瓦纳塞利伯-皮克威镍铜矿简介	42
南非(阿扎尼亚)布什维尔德杂岩体和与其有关的矿床之概述	43
西澳大利亚的镍	49
西澳大利亚州卡姆巴尔达矿床鲁农镍铁硫化矿矿心剖面的解释研究	55
西澳大利亚州卡·博伊德·罗克斯杂岩体地质及与其有关的镍矿矿化	77
加拿大与超基性侵入岩有关的含镍硫化矿床	101
安大略省萨德伯里的主岩体和亚岩带	122
马尼托巴省东南部伯德河地质及硫化矿床	130
马尼托巴省瓦鲍登镇曼尼布里奇镍矿地质特征	142
汤普森和林累克镍矿带	153
加拿大某些含镍超基性岩侵入体的地球化学	165
芬兰斯堪的纳维亚的镍矿	187
芬兰某些铜镍矿床的构造控制条件	203
科拉半岛贝辰加地区硫化铜镍矿床的分布规律	211
苏联诺里尔斯克铜镍矿床的成因特点——普查和预测的基础	224
诺里尔斯克含镍侵入体及其硫化矿石	232
卢奥斯塔里岩体基性岩中铜镍矿化的新类型	267
萨德伯里与诺里尔斯克侵入体的岩石学和矿化的某些规律的对比	271
铜-铁-镍-硫系中的相关系及其对岩浆矿床的应用	278

硫化镍矿床及其分类和成因

A. J. 纳尔德雷特

前言

本文的目的是提出硫化矿床的分类,以有助于了解矿床成因和指导普查找矿。在本文内,矿床成因,更正确点说是指硫化物的富集和侵位方式。在许多实例中,可清楚地看出,硫化镍矿床是作为不易混合的硫化物-氧化物流体侵入的。因此,其侵位方式远比为什么矿床形成于某一地区且与某些岩石有关之类的问题更不难理解。本文所采用的方法是:将镍矿按与其有关的超基性岩体或基性岩体的一定类别进行分类,同时还指出了无重要矿床的岩体的类别,探讨地幔中硫的可能性状及它对各有关超基性岩的成因的意义;然后再行讨论特定的、可能含矿的火山岩组合的特征。

超基性岩和与其有关的基性岩岩体的分类

在当今对超基性岩和与其有关的基性岩进行分类的试探中,怀利(1967)强调的是岩体的规模、形态和化学成分,而塞耶(1971)所着重的是原地(自生的)结晶岩体、作为固体(外源的)侵位的岩体和部分的固态部分的液态(复成的)侵位的岩体之间的区别。表1(据纳尔德雷特和加斯帕里尼,1971)中所提出来的分类强调的是矿体侵位的构造位置,但同时也注意到了怀利和塞耶所使用过的标准。

首先是区分在造山构造环境*里侵位的岩体和在非造山环境下侵位的岩体。下面首先讨论造山环境。目前,大多数超基性岩体似可归于三个主要类别。其中,第一类包括在造山带最初的火山活动阶段、主要褶皱作用开始之前侵位的岩体。本类已知有两个主要类型,即重力分异成因的岩床(类别1—(i)a和b)和无分异现象和分异较弱的透镜体类别(1—(ii))。岩床又分为两个亚类——(a)有大量的橄榄岩和辉岩,此外还有正常的辉长岩和(或)苏长岩;(b)有较少的超基性岩和较多的斜长岩、斜长辉长岩和富含钛铁矿或含钛磁铁矿的条带。属于亚类(a)的岩床,如同亚类(b)中的某些岩床一样,显然是褶皱作用以前的,虽然属于亚类(b)的另外一些岩床(如卡米斯科舍侵入体)呈现明显不整合,并且还不能很好确定它们是早期侵入的。

透镜状岩体在太古代绿岩带内很常见(在巴伯顿山地区11,000呎厚的科马蒂组中可占30%),元古代绿岩带中一般(如翁加瓦半岛上开普史密斯-韦克姆贝),而显生宙绿色岩(巴芬湾、纽芬兰岛、兰布勒区,以及可能还有新西兰德维尔岛-莫斯本岩带内的蛇纹岩)中则相对较少。

* 应用板块构造理论来解释显生宙时,所谓造山环境,系指两个板块之间边界上岩石圈消亡带上所发生的火山活动、沉积作用和褶皱运动。所谓非造山环境,系意味着稳定板块(大陆板块或大洋板块),经受初步裂谷作用的板块,抑或是经受大规模裂谷作用,致使最终在增长板块的边缘造成新洋壳的发育。在使用上述概念来说明前寒武纪时,并不一定意味着在该期也有板块活动发生。

超基性岩体和与其有关的基性岩体的分类

表 1

类 别	实 例	构 造 环 境	其 他
A 与造山带有关的岩体 1 与优地槽火山岩作用同时形成的岩体 (i) 重力分异岩床及杂岩体 (a) 富超镁铁质亚类	加拿大阿比提比带 南非(阿扎尼亚)巴伯顿山区 澳大利亚东部金田	侵入于优地槽岩系中。岩体结晶先于主要褶皱期	基性和超基性岩的比例变化大,可能是由于在结晶过程中残余岩浆周期性的“流出”所致
(b) 斜长岩亚类	魁北克省多尔湖杂岩体 魁北克省贝尔河杂岩体 安大略省提敏斯地区卡米斯科舍杂岩体	虽然该亚类中有些岩体是整合的,其结晶先于褶皱作用,但余者为不整合贯入的,并不一定是早期侵入的	
(ii) 超基性岩透镜体	阿比提比造山带 安大略西北部 开普史密斯-布克姆贝带和拉布拉多地槽 德兰士瓦东部巴伯顿山区 澳大利亚东部金田	与火山活动密切有关,大都与火山岩层系整合产出在褶皱作用过程中无固结后的移动	透镜体是以橄榄石晶体在苦橄岩岩流体中的悬浮体的形式形成的 薄透镜体(具有不对称的冷凝作用,无穿插特征和罕见的绳状形态)层系,在某些实例中说明是喷出的。
2. 阿尔卑斯型岩体 (i) 大型仰冲岩席 (ii) 蛇绿岩杂岩体	新喀里多尼亚 巴布亚 沃里蒂斯 特罗多斯 艾兰湾	发育在显生宙消亡板块的边缘;(i) 作为岩席逆冲在形成大陆和高弧地壳岩系的沉积岩和火山岩之上;(ii) 作为复理石沉积层中的冲断扇状推复体;(iii) 作为与混杂岩共生的可辨认的岩石单位或杂乱的岩块;(iv) 作为可能的底辟岩体展布于缝合带上。	被认为是大洋岩石圈的碎片,其下部超基性部分主要是地幔内结晶的物质,而上部玄武岩-辉长岩质部分主要是大洋壳的第二和第三层
(iii) 混杂岩发育区内的变形蛇绿岩杂岩体和杂乱无章的岩块	俄勒冈州的坎宁山 华盛顿州的特温锡斯特斯 佛蒙特蛇纹岩 伊朗 加利福尼亚弗兰西斯科岩系		
(iv) 可能的底辟	魁北克省艾伯特山		
3. 阿拉斯加型带状侵入体	阿拉斯加和不列颠哥伦比亚侵入体,其中包括:杜克岛;联盟湾;杜拉敏;乌拉尔侵入体	在主要褶皱活动和变质作用晚期或其后(但是在花岗岩岩基就位之前)沿造山带侵入的	该类岩体之所以具有明显的带状特征,主要是由于岩浆依次多期侵入,每期侵入体都比前一期更偏超基性,而且趋向于穿过前期侵入体的核心侵入

续表

类 别	实 例	构 造 环 境	其 他
4. 与主要地壳缝合线有关的侵入体	马尼托巴省绿帘岩带侵入体；安大略省英格兰河片麻岩带中的侵入体	沿地壳缝合线（具有复杂的褶皱活动、深变质作用、以及明显的重力异常和地壳厚度的“活动带”）中的主断裂侵入的	对该类超基性岩体研究得尚差；超基性岩体的大部是否是在变形期侵位的，或者是否是侵入于其后遭受强烈变形的岩层中，尚待进一步查明。 英格兰河片麻岩带中的岩体可能是该类别的真实代表，虽然马尼托巴省有前多岩体都是受地层控制的
B. 侵入于较稳定地区的岩体 5. 大规模的似层状杂岩体	布什维尔德；斯提耳沃特；马斯科克斯；德卢斯；斯格拉派特；萨德伯里	稳定或相对稳定的克拉通	由于重力结晶沉降作用而产生原地分异；有时残余岩浆发生移动和有新鲜岩浆涌入
6. 大规模的岩床和岩席，属溢流玄武岩的侵入等同物	新泽西州帕利塞德岩床 南非（阿扎尼亚）英西兹瓦·英吉利侵入体 南极洲的杜非克侵入体	总的来说，侵入于克拉通地区，其中有断块作用，造陆上升活动和溢流玄武岩岩流喷出	由于重力结晶沉降作用而产生原地分异；从岩石化学上来看，此类侵入体属与之密切共生的溢流玄武岩的侵入等同物
7. 与非造山火山活动有关的中型侵入体	斯开尔噶德	位于非造山区	由于重力结晶沉降作用而发生原地分异；有时，则成为与其伴生的火山岩的分异岩浆房。
8. 与非造山成因火山作用有关的小型岩席和侵入体	该类侵入体的种类繁多，其中包括与火山活动伴生的拉斑玄武岩类到碱性岩类，如在苏格兰洛德河谷中石炭二叠纪火山岩和图伦第三纪火成岩发育区。		
9. 环带状杂岩体中的碱性超基性岩，以及金伯利岩筒	颇多	克拉通	

第二类为阿尔卑斯型超基性岩体（后文将详述之）。第三类为一组特殊的同心环带状超基性岩体，见于阿拉斯加山脉、不列颠哥伦比亚山脉，也见于乌拉尔，属阿拉斯加型侵入体。它们看来是在褶皱作用基本停止之后在造山旋回的晚期侵入的。欧文(1967)和芬德利(1969)指出，它们构成一套具有特殊的岩石成分和化学成分且稍偏碱性的岩石。

第四类为与造山同期或造山晚期的、受断裂控制的超基性岩体，均与主要地壳缝合线或“活动带”有关。此类缝合线具有某些或全部下述特征：主断裂带、缝合线上或某一侧的明显变质岩条带、正的和有时有平行的负的重力异常带，以及地壳底部非同寻常

的地震剖面。最初，认为马尼托巴省汤普森-瓦鲍登带超基性岩体是该类岩体的典型。后来查明，虽然该带上某些岩体可能受断裂控制，但是其他岩体均呈现明显的层状，因而可能是属于构造期以前的。该类型岩带内，所有超基性岩岩体是否是在变形作用后产生的，以及该类受构造控制的岩体是否具有重要意义，在关于汤普森和其他岩带的资料尚未收集得更多之前，应暂不做定论。将来，该类中某些重要实例很可能被纳入第一类中去。

对于非造山地区中的岩体，其分类大体按怀利所提出来的划分。第五类是指大规模的、似层状的、层状的杂岩体，其中包括：布什维尔德、马斯科克斯、斯提耳沃特、德卢斯和萨德伯里侵入岩体。第六类是一些特殊的、非常大的火成岩岩席，如象南极洲的杜菲克侵入体（岩体面积超过8,000平方公里，厚6—7公里）和南非（阿扎尼亚）的英西兹瓦杂岩体。第七类为中等规模的侵入体，如象斯开尔嘎德岩体。第八类中包括许多具有不同形状和成分的小岩体。后两类岩体都与火山作用有密切关系。最后，与碳酸岩有关的碱性超基性岩和各类金伯利岩均归于第九类。

与各类超基性岩体有关的含镍硫化矿床

上述各类岩体中，有的是许多重要含镍硫化矿床的母岩，而也有的岩体含这类矿很少或根本不含这类矿床。这已表示于表2和图1中。世界上各矿床或镍矿产地在表2中是按与其有关的超基性-基性岩体的类别进行划分的。矿产的储量和产量数字是作者所能得到的数字。有的数字是公开发表的，取自文献、杂志和各公司的勘探报告，而其他无非是一些推测数字。苏联镍矿产地的数字尤其不够准确，表内所列只不过是现有储量和产量数字的标记而已。诺里尔斯克-塔尔纳赫镍矿产地是世界上大矿之一，但这在表2中并不明显。

图1是表2资料的综合。其垂直座标表示各地与不同类别母岩有关的金属镍的储量和产量（以百万吨计）。水平线以上的图形表示具有经济价值的矿床，而该线以下的表示限界的或无经济价值的矿床。有无经济价值是作者主观臆断的，其根据是，如果矿床是位于安大略省东部萨德伯里附近，那么它是否是可采的。第一类超基性岩体被划分为重力分异岩体（1-(i)）和超基性透镜体（1-(ii)）。在图上，第五类和第六类，以及第七类和第八类均被组合在一起。

在第五和第六类的柱状图上，作为加拿大那一部分的萨德伯里占有绝对优势，这一点由图上清楚可见。该柱状图下部的无经济价值矿床是指斯提耳沃特和德卢斯杂岩体底部的那些矿床。对于表示第七和第八类岩体的柱状图来说，由于其中包括诺里尔斯克-塔尔纳赫矿床在内，所以实际上它还更重要些。然而，如果不算萨德伯里矿床，那么造山类超基性岩岩体要比非造山类岩体更为重要一些。其中，1-(ii)类超基性岩透镜体将占居首位。这主要是因为澳大利亚西部最近的发现，此外还由于津巴布韦（罗得西亚）和加拿大也有发现。对于1-(i)类岩床来说，虽然其中贝辰加产地的数字是引用了国际镍矿公司所查明的1940年的储量，而且显然上述数字与30年来的产量和现有的储量之间没有多大联

世界上的主要硫化镍矿

表 2

产 地	母 岩	已开采量加储量 (以百万吨金属镍为单位)	Cu/(Cu+Ni) 平均值	年 代 (亿年)
西澳大利亚 东部金田	1—(ii) 类透镜体 1—(i) 类岩床杂岩体	E 1.84 M 3.00 E 0.03	0.062 0.036 0.260	$>26.67 \pm 0.27$
加 拿 大				
阿比提比、谢班多温和金湾	1—(ii) 类透镜体	E 0.2	0.226	27.5—28.0
林累克和杜姆巴顿	1—(i) 岩床	E 0.25	0.380	可能—27.5
开普史密斯-韦克姆贝	1—(ii) 类透镜体	E 0.65 M 0.07	0.252	可能早于 17—18
汤普森-瓦鲍登带	4 类	E 2.0	0.064	可能早于 17—18 可能属太古代
戈登湖	4 类	E 0.02	0.296	27.5—28.0
萨德伯里	5 类	E 9.7	0.468	以前定为 17.04, 但更可能为 19—20
大湖-尼科尔	8 类	M 0.21		可能 11
腊克伦敦	类别不详, 产于格临 维耳角闪岩和副片麻岩 中的一个分异岩床中	E 0.014	0.507	不详
贾恩特镍矿	类别不详, 复杂的带 状侵入体, 其中有橄榄 岩筒产于辉岩和角闪石 岩体中	E 0.012		始新世
南 部 非 洲				
埃姆普列斯 [津巴布韦 (罗得西亚)] 特洛扬·马德 齐瓦·因亚蒂和向干尼 [津 巴布韦(罗得西亚)] 皮克威 和塞利伯 (博茨瓦纳)	可能属 1—(i) 类岩床 1—(ii) 类 4 类? 林波波变质岩带内岩 床状角闪岩岩体	E 0.29 E 不详, 但估计为 0.2 E 0.39	0.328 0.048 0.511	在 29—33 之间 $>19.4 \pm 0.6$
布什维尔德火成杂岩体 [南非(阿扎尼亚)]	5 类 矿产于伟晶岩岩筒和 梅林斯基层	E 0.22 (梅林斯基矿因含铂而 致使大部已开采)	0.344	19.5 ± 1.5
美 国				
斯提耳沃特杂岩体	5 类	M 不详, 但多数大于 0.32	0.500	27.5
德卢斯	5 类	M 不详, 但超过 0.2 很多	0.750	11.15 ± 0.15
苏 联				
贝辰加	1—(i) 类岩床	不详, 但 1940 年数字 E 0.32	0.321	17.2—17.8
诺里尔斯克-塔纳纳赫 芒切戈尔斯克	7 类 7 类	不详, 但大大超过 1.0 估计为 0.064	0.714 0.286	中三叠世 古生代
芬 兰				
哥打赫蒂	类别不详	E 0.08		确切年代不详, 但 $>17.5—18.6$

* E 表示有经济价值的矿床, M 表示限界的和无经济价值的矿床 (所谓“限界”矿床是资本主义国家指品位低, 或选冶困难, 或埋藏深, 或其它开采利用条件较差致使无利可图的矿床——编者注)

系，但是，看来此类岩体的意义不会是很大的。在这类岩床中，从镍矿的观点来看，超基性岩体的亚类（a）是较为有意义的。日前在亚类（b）斜长岩岩体中的矿床主要见于汤普森-瓦鲍登岩带。前面已经说过，该类岩体的类别尚未最后划定，与其有关的矿床将有可能被列入第一类中去。

第二和第三类，即阿尔卑斯型和阿拉斯加型岩体，对找含镍硫化矿床来说，显然是较差的。产有贾恩特镍矿的侵入体被认为是阿拉斯加型岩体（泰勒，1967），但是其特点是具有拉斑玄武岩性质，而且与其他阿拉斯加型岩体相比，具有较为不规则的分带现象。阿尔卑斯型岩体中可能有针镍矿-钴-镍砷化物矿床（据波洛克，1959），但其规模都很小，且总的来看，与本文所讨论的硫化矿床相比，在性质上是完全不同的。碱性超基性岩（第九类）对找硫化镍矿来说，也不象是很有利的。

与一定类型超基性岩体有关的矿床的缺失

多数硫化镍矿床都被认为是含硫化物的岩浆（一般均与硅酸盐类母岩浆伴生）侵位的结果。为了使富镍硫化物岩浆得以发育，在早期阶段就需要有硫化物相生成，并且使

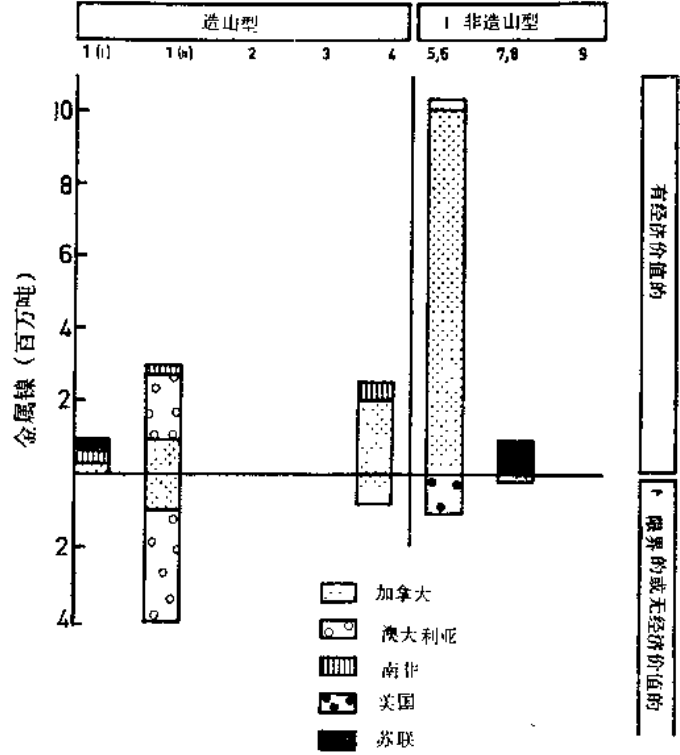


图1 硫化镍矿的现有储量加上过去的产量和与矿有关的各类超基性岩的关系 岩体的类别详见表1

注：图中南非系南非(阿扎尼亚)。

其在尚未由于橄榄石的结晶和转移而使镍发生枯竭之前就与硅酸盐岩浆达到均衡状态。如果我们假设硫是来源于原始地幔，那么早期饱和则意味着在硅酸盐岩浆生成时，其中的硫应该是特别富集的。本节涉及到当前对各种不同类别超基性岩体的成因的一些设想，以及如何用这些设想来阐述岩体中的硫的富集问题。

目前关于阿尔卑斯型超基性岩体成因的一些观点

在讨论阿尔卑斯型超基性岩体中为什么没有大型硫化镍矿床之前，先谈一下什么是“阿尔卑斯型”这一概念还是必要的。过去，这一名词的使用不够严谨，以致包括了所有阿尔卑斯型褶皱中的一切超基性岩体。塞耶（1960）注意到了区分阿尔卑斯型岩体与似层状侵入体之间的许多特点。其中有些特征说明，阿尔卑斯型岩体远非仅是一些受到构造变形的似层状侵入岩体。格林（1964）提出证据说明，有些阿尔卑斯型超基性岩是在高压下结晶的，并且主张这种岩体可能代表着上地幔的某些部分的完全活动化作用。塞耶（1967）强调指出，许多阿尔卑斯型橄榄岩都与辉长岩密切共生，并且认为，这种共生现象是由于上地幔内重力结晶沉降所引起的分异作用以及随后以结晶软块体的形式向上侵入于地壳中所造成的。霍普森（1964）、查利斯（1965）和麦克塔格特（1971）对上述观点提出挑战，并把一些阿尔卑斯型岩体解释为受构造变形的高度分异岩体。

在对阿尔卑斯型超基性岩的理解方面，重要进展是从蛇绿岩杂岩体的研究中获得。虽然，蛇绿岩一词在过去使用得也不够严密，例如把所有含钠的枕状玄武岩、超基性岩和燧石等密切共生在一起的岩体都说成是蛇绿岩。然而大多数作者（穆尔斯和瓦因，1971；杜威和伯德，1971；丘奇，1972）现今都严格地用它来说明一套特定的地层系列，该系列由超基性岩、基性岩和火山岩组成，有时顶部冠有燧石。在图2中以理想的剖面形式表示了这类地层系列（据穆尔斯对沃里诺斯杂岩的再造图，1969）。杂岩体的底盘占杂岩体的最大部分，是由褶皱较发育的具条带状构造的斜辉辉橄岩和纯橄岩构成，并被纯橄岩、辉岩和辉长岩岩墙所穿切。从岩体的条带状构造上看不出岩体的整个轮廓以及和上覆岩层界线与条带状构造有什么关系。豆荚状铬铁矿矿床产于斜辉辉橄岩的上部。辉岩带盖在斜辉辉橄岩上，而辉岩之上为辉长岩，然后则是岩席状、块状辉绿岩，再后是枕状辉绿岩，最上面为燧石岩。辉岩和辉岩以上的岩体各部分之间的界线都大体是相互平行的，并且其中未见到与下部条带状斜辉辉橄岩内相似的褶皱现象。

具有很多上述基本地层特征的蛇绿岩杂岩体见于整个阿尔卑斯-喜马拉雅山脉、日本、北美海岸山脉弗兰西斯科系、乌拉尔造山带和阿巴拉契亚带中的魁北克和纽芬兰地区。该杂岩体通常都与复理石沉积共生在一起。在许多情况下，杂岩体被断层破坏，超基性和基性岩体的某些部分可能被分割而相距较远，在较剧烈的情况下，所有这些可能形成杂乱无章的、以复理石沉积为基质的、由超基性岩块、辉长岩块和其他岩块构成的混杂岩。看来象是，大多数以前作为阿尔卑斯岩体而划分出来的超基性岩体，实际上是在不同程度上受到了构造变形的蛇绿岩杂岩体的碎块而已。而本文中，对阿尔卑斯型岩体将使用此种较严格的定义。

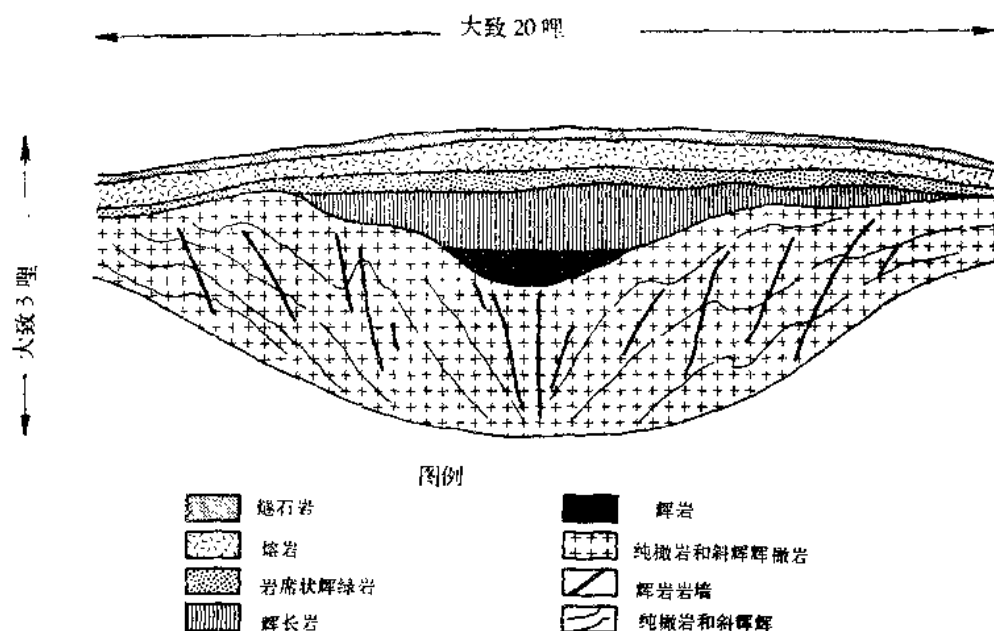


图 2 蛇绿岩杂岩体的理想横剖面(据穆尔斯对沃里诺斯杂岩体的再造图,1969)

图中最后一个图例的“纯橄岩和斜辉辉”系“纯橄岩和斜辉辉橄岩”中之条带之误

在新喀里多尼亚和巴布亚,具有许多蛇绿岩地层特征的一些超基性岩大岩片逆冲在中生代和第三纪沉积岩和火山岩之上(见图 8)。从这些大岩片的规模和它们下面断面向太平洋方向倾斜的方式来看,似乎无疑地可以说明,它们乃是大洋岩石圈的一部分(据科尔曼,1971;穆尔斯和瓦因,1971),而某些作者则把斜辉辉橄岩和其上覆岩层之间的界线作为莫霍面来解释(杜威和伯德,1971)。虽然蛇绿岩岩块的侵位方式尚不清楚,但是,许多蛇绿岩体都与古俯冲消亡带伴生这一点则已是确凿无疑的了。因而看来,它们大多数不是俯冲板块的碎块,就是推覆板块的碎块,这些板块冲入海沟(俯冲消亡带的标志)的松软沉积物里或者挤到海沟附近较为固结的地层的主要破碎带内。

在关于艾兰湾蛇绿岩杂岩体的著作中,欧文和芬德利(1972)证明,最下部10,000呎的斜辉辉橄岩是在高压下达到平衡的。该带内未见斜长石;可是氧化铝既见于辉石,又见于铬尖晶石中。橄辉石和紫苏辉石是共同在均衡状态下进行结晶的,故未见反应现象。最下部岩带的组构经过了强烈变质,很少见到有堆积结构的证据。相反,上覆长石质橄辉岩、辉岩和辉长岩是在较低的压力下进行结晶的,其结构说明是经过火成堆积作用形成的。根据底部斜辉辉橄岩中没有隐密变化(在整个岩相剖面中,橄辉石成分的变化不大于百分之二克分子镁橄辉石),他们提出,如果上述岩石是火成堆积岩,则它们所赖以结晶成岩的岩浆必须具有惊人的厚度才行,即可能是十万呎之巨。上覆长石质岩石中的隐密变化与多数层状侵入体中的类似,它们可能是在相对较低的压力下由拉斑玄

玄武岩岩浆经重力分异而成。欧文和芬德利的结论是，高压形成的斜辉辉橄岩代表着难熔化的固态物质，它是在部分地幔于深部熔化，并且部分熔融体已经移去之后残留下来的。继此溶解阶段之后，难溶解的固态残余部分便不再受溶解而向地幔上部移动。拉斑玄武岩岩浆则位于残余体的上部，可能分布在一条扩散中脊处。

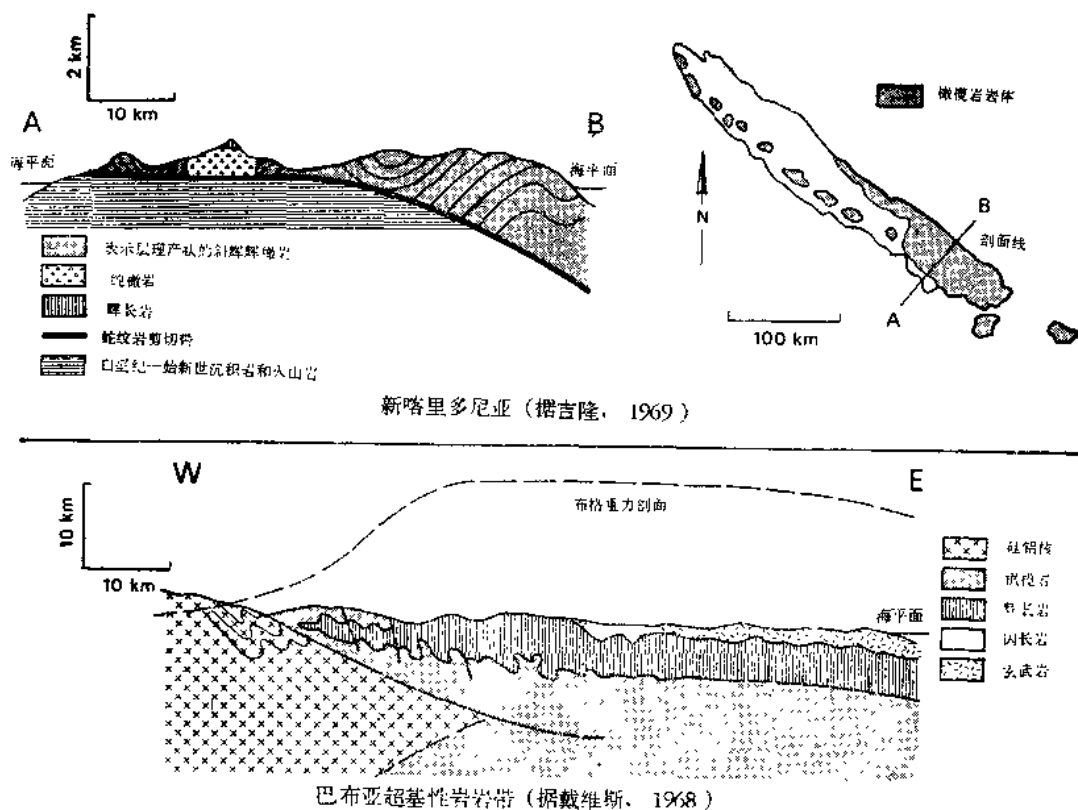


图3 新喀里多尼亚和巴布亚超基性岩体示意图

欧文和芬德利为说明他们的论点所使用的论据是目前经过详细研究过的多数蛇绿岩杂岩体中所常见的。因此，在本文中，阿尔卑斯型超基性岩体被解释为属于上地幔中的一部分，是呈固态构造侵位的。它们应属难熔的固态残余物，是在地幔发生部分熔化和超基性的或拉斑玄武岩质的熔融体转移之后而残留下来的。

地幔内硅化物的物理状态、分布及其在部分熔融过程中的性状

图4表示在地壳和地幔上部压力条件下含0.1重量百分比的水的地幔岩*的熔融区间。该区间以熔融百分比等值线图划出了在各种温度和压力下地幔岩将受熔融的情况。

* 地幔岩 (Pyrolite) 是一种假想的岩石，是由三分辉橄岩和一分拉斑玄武岩组成的，并常用作代表原始地幔。

地幔中硫化物液线温度的大致范围也表示于图上。上限是根据夏普(1969)关于磁黄铁矿最高熔融温度的资料。斜线表示地幔中富硫化物液体的液线温度很可能下降的地带。必须注意的是,该类液体中将含有(i)少量氧,以及(ii)镍,还可能有铜,而这些物质有使液线温度比纯磁黄铁矿的最大值发生下降的趋势。

图上还划有表示当今海洋地温的曲线。

由图上可见,地温曲线穿切硫化物的理想熔融场,以致在深度超过70—80公里处大多数硫化物可能都被熔化。硅酸盐类物质在这一带内也将发生溶解;虽然由于水分很少(仅~0.1重量%)其溶解的百分比也很小(1—3%)*。似乎是,当由于构造应力的影响使该带发生扰乱时,稠密的硫化物将出现向下渗透的趋势,因而使该部分地幔中的硫发生枯竭。硫化物开始溶解的深度在陆地上大概要比海洋上大得多。然而上述论断

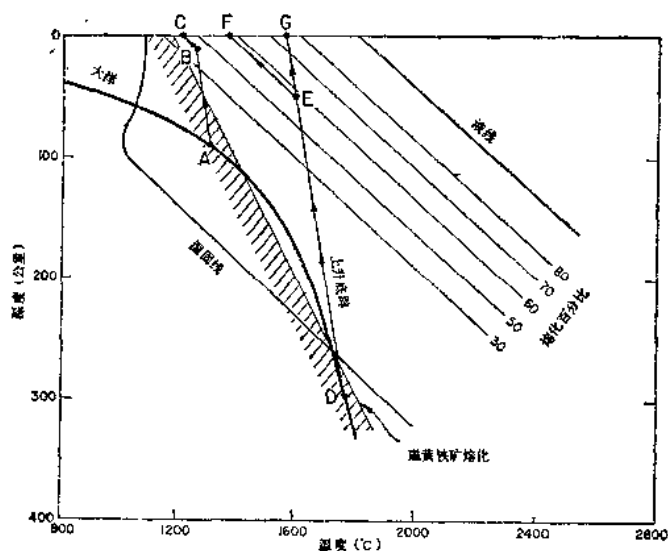


图4 含0.1重量% H_2O 的地幔岩熔融场的温度压力投影图

等值线表示不同深度和温度条件下的熔融百分比;画有斜线条的地方表示地幔中铁镍硫化物完全溶化成硫化物氧化物液体的地带;线上标有“大洋”字样者表示大洋地温

是根据当今的等温线做出来的。在地史的早期,地温梯度似乎较陡(据哈特等,1970),使硫化物发生熔化和枯竭所需要的深度减小。使硫化物保持液态并使它们产生沉降的深度还不十分清楚。如果把夏普关于磁黄铁矿的资料外推到比65千巴(为测定压力)还大时,那么在磁黄铁矿溶解梯度(每公里深增加 $2.1^{\circ}C$)同从200到700公里范围内地温的合理平均值(每公里深增加 $0.67^{\circ}C$)之间的梯度差说明,在深度大约300公里处,地温可能降回到硫化物溶解场以下,从而有效地使沉降作用停顿下来,并可能在此深度上形成一个硫化物富集带。

* 该带内有硅酸盐熔体存在是造成这里地震波传递度降低的一种解释。

此种机理（根据这种机理，硅酸盐岩浆一般被认为是地幔中生成的）是靠某种重力不稳定性发展起来的（可能是由于构造作用，由于从消亡带下降盘上升的水蒸气或岩浆，或者可能作为正常对流毁灭的结果），其结果是炽热的物质从深部向上运动，沿着一条绝热冷却曲线，转移到一个低压区。该曲线的梯度（ dt/dp ）比地温梯度要小得多。因而，来自深部的物质要比周围的物质更热些，而且，如果它上升到相当高的高度时，将发生大量的部分熔化。

图4 AB和DEG线段代表着从大洋地温线上A和D两点向上发生地幔岩底辟时将遵循的绝热曲线。在从A点发生底辟时，预计在B点上，当大约40%熔融以后，部分熔融物质将从底辟体的残余固态物（“难熔的残余物”）中分离出来，然后以非绝热状态（以其本身的液线温度）在C点上升到地表。对于来自D点的底辟来说，则有两种可能的方式。在第一种情况下，假设在E点大约在55%熔融以后，熔化部分开始分离，然后以非绝热状态上升到地表F点。而在另一种情况下，假设底辟是以绝热状态沿全程（AEG）上升到地表面，而没有发生使熔融物质脱离难熔的残余体的过程。在这种特殊情况下，底辟的熔融百分比将达到75%。

在与上述论断相似的各种情况下，部分熔融物质的成分将取决于流体脱离难熔的残余体时的深度和底辟中部分熔融作用的发育程度。总的来说，在部分熔融程度超过35%的地方，熔融物质愈多，其成分愈偏超基性，这就成了一个比较重要的变量。

虽然有一些重要的例外，但是一般的规律是硫化镍矿常与超基性岩浆岩共生在一起（详见后文）。由图4可见，与玄武岩岩浆的生成（部分熔融百分比达30—40%）相比，超基性岩浆的生成（部分熔融百分比达50—70%）要求底辟发源于更深（300公里以上）的地方，并且要求在部分熔融物质同难熔的残余体分离之前以绝热状态上升更大一段距离。格林（1972）已经谈到过这一点。值得指出的是，产生超基性岩浆的最小深度好象与地幔中硫化物趋于富集的最小深度是大致相符的。

从图4中同样还可看出，如果由于底辟上升到足够的高度而使其遭受大量的部分熔融，则其中的硫化物同样也将被熔化。液体硫化物的存在方式可能是多种多样的。如果部分熔融的程度足够高，而熔融带中硫化物的含量足够低，则液体硫化物可能全部都溶解在硅酸盐熔融体中并被以溶解状态带到上面来。在另一情况下，如果有过量的硫化物存在，其中有些将溶合在硅酸盐熔融体中，而过剩部分可能：

- 1) 与硅酸盐熔融体一起被挤出来，并在熔融体中呈悬浮的细微小滴被带到上面来；
- 2) 从熔融带中沉降下来；
- 3) 被保留在原地。

关于呈溶解状态存在的可能性问题，霍顿和斯金纳（1972）指出，硫在硅酸盐熔融体中的溶解度，在很大程度上取决于温度。在玄武岩熔融体的温度从1100°C上升到1200°C时，会使硫的溶解度增加五倍。

H.希马发现,当温度为 1450°C 时,苦橄岩(超基性)熔融体* (与地幔岩部分熔融过程中所形成的熔融体类似)能溶解大约0.6重量百分比的硫。在深度25公里处,当温度约为 1500°C 时,以及在50公里处,当温度为 1550°C 时,这种熔融体将与斜辉辉橄岩呈均衡状态。如果我们仅仅考虑温度效应,并且假设与霍顿和斯金纳所观测到的相类似的效应也适用于H.希马所研究的熔融体的话,那么在25—50公里深处(即大约相当于图4 E点所代表的深度)的苦橄岩熔融体内硫的最大溶解度将是地表的数值的2—5倍,即0.3到0.8重量百分比。当物质离开底辟源并沿着E-F线以非绝热状态向地表上升的过程中,温度降低足以使大部分的硫脱离溶解状态而呈液相硫化物的细微小滴出现。

斯金纳等人(1972)注意到压力对硅酸盐熔融体中的硫的可溶性的影响所可能具有的重要意义。但是,他们指出,“在整个地壳压力范围内,很明显,压力不是一个重要的变量,除非它能影响到 H_2O 的含量以及岩浆的总体成分”。压力效应在地壳下的深度范围内是不清楚的。另一个未知因素是地幔内硫化物的丰度。因此,一个明显的事实是,我们无法说明地幔中所产生的任何一部分熔融物质中是否是饱和有硫化物或者是不被它所饱和。似乎明显的是,饱和硫的溶解度大体上可能达百分之几十或更多些,并且,在硅酸盐熔融体脱离底辟源开始上升和冷却过程中,这一部分硫可能会作为不混合的硫化物液体而趋于分凝,其假设条件是,熔融体在原地已近于饱和或者至少是其中硫的含量相对较富。

如上所述,如果地幔任一部分中硫的丰度超过了部分熔融体中所能溶解的数量,那么前述1、2和3点则是可能存在的。从部分熔化的硅酸盐类部分发生聚集并脱离难熔的残余体,然后作为岩浆的分离体向上移动的趋势这个观点看来,让这种几乎无粘性液体硫化物停留在原地似乎是完全不可能的。似乎可能的情况是,这种硫化物将被从熔化带呈细微的小滴带走,然后或者是同硅酸盐熔融体一起向上移动到地表,抑或是集中起来向下渗透返回地幔。

现在回到上述讨论所牵连的硫化镍矿床在岩石中的分布问题。可以看出,形成具有重要意义硫化物富集体的不是上述难熔的残余物(即外来的、构造侵位的、阿尔卑斯型的超基性岩体),而是部分熔化的液相产物,就是说,它们形成于作为岩浆侵位上来的原地的基性或超基性岩体之中。

此外,还有一点必须记住。关于P-T- $\text{P H}_2\text{O}$ 的确切动态(在此动态下于地幔中生成各类不同岩浆;详见怀利,1971)仍须着重讨论。看来,缺少硫化镍富集体的母岩岩浆(碱性岩浆,阿拉斯加型超基性岩浆)有可能生成于80—300公里处的地幔中贫硫化物的区间。

整个地质时代内硫化镍的矿化作用和地幔内硫的贫化

硫化镍的储量和产量系作为含矿母岩年代的函数表示于图5。由图可见,绝大多数

* 该处讨论的是苦橄岩而不是拉斑玄武岩熔融体,其原因详见后文。

矿床的侵位年代* 都发生在太古代和元古代早期。大大晚于17亿年的主要矿床仅有德卢斯杂岩体(11.15亿年)和诺里尔斯克地区(中三迭世)中的一些镍矿床。镍矿形成于地质时代的早期的理由是不清楚的**，虽然一种可能的解释是：随着时间的演变，地幔中的硫已趋于枯竭。

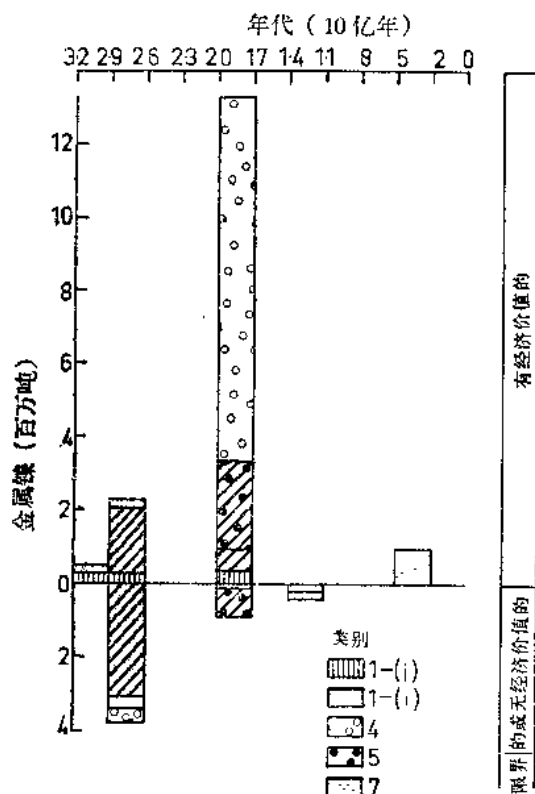


图5 硫化镍矿的现有储量加上过去的产量与含矿母岩的年代的关系

各种花纹表示各类含矿的超基性岩体；但加有斜线者例外，它表示具有此种符号的矿石的年代是最小年龄而不是绝对年龄

前文着重论述了初始硫浓度对于确定特定的硅酸盐岩浆是否引起硫化镍矿床形成方面的重要意义。如果把当前的板块理论扩大应用于太古代，那么依照这一构造理论地幔在过去30亿年过程中应当经受过数次的部分熔化。不管这一理论的引伸正确与否，在整个这一段时间内地幔都应该是遭受到过相当多的部分熔化。如前所述，从硫的溶解度方面获得的有效证据说明，如果地幔的某一地区遭受部分熔化，其中的硫化物将会富集于部分熔融体内，其中多数会产生移动，脱离贫硫的残余物。随着时间的消逝，似乎将会使地幔许多部分的硫大大贫化。哈特等人(1970)在对比研究太古代和显生宙火山岩的基础上，提出了地幔中微量元素随着时间的推移而日趋枯竭的概念。

后来由贫硫地幔内产生的部分熔融物质中硫的含量将低得多，并且，在上升到地表和发生冷却的过程中，将在比初次熔融晚得多的阶段内才能被硫所饱和。因此，这种熔融物质好象不大会形成硫化镍矿床，同时这也就是年轻的岩体中此类矿体罕见的原因。

* 萨德伯里含镍侵入体通常认为是±17.04亿年，但是锆石的年龄为19亿年，这与近来Sr—Rb测定数据相符，说明其年龄很可能是19—20亿年。

** 拉兹尼卡(1973)主张，硫化镍矿仅形成于很深的地下，较年轻的地层中的镍矿尚未被剥蚀所揭露。然而，对于萨德伯里含镍侵入体的冲击成因假说来说，要求矿床侵位于比5000呎厚的昂纳平组稍深些的部位上。本文后面将谈到的是澳大利亚西部镍矿系与火山作用有关。从矿床所产出的绿岩带的变质方式程度上，很少能看出受到巨厚的复盖的证据。诺里尔斯克地区内见有次火山侵入体。上述三个镍矿产地构成世界上硫化镍供应量的大约四分之三，并且都是产在浅部，而并非在深处。因而，拉兹尼卡关于镍矿的见解看来是无效的。

这一论点的主要假设条件是，任何一矿床中所含的硫都是岩浆源的，都是完全来源于地幔。另一方面，如果某一原始贫硫的基性熔融体，在其上升的过程中，同化了岩浆通道附近围岩中大量的硫，那么它同样会使硫得到饱和并形成岩浆型硫化镍矿床。在这方面值得注意的是，成为镍矿床年代老的这一普遍规律的重要例外的两个年轻的镍矿产地（诺里尔斯克和德卢斯）内，硫化物中含有大量来源于地壳而不是地幔的硫。戈德列夫斯基和格里年科（1963）指出，采自诺里尔斯克的15个硫化物样品中， S^{32}/S^{34} 的平均比值为22.02（相当于 δS^{34} 值为9.52‰），因而认为重硫是从含矿岩浆岩所侵入的泥盆纪硬石膏层中攫取的，同时还由于从它所侵入的煤系地层中获取了碳而使硫酸盐还原

为硫化物。经过对靠近德卢斯杂岩体底部的某些矿带的研究表明，这些矿带中均含有重硫（ $\delta S^{34} = +13$ 到 $+15$ ‰），硫化物都与石墨密切交织在一起，并且在含矿母岩中含有许多部分遭受浸渍的含明矾的包裹体。有一个地区内，即在德卢斯以北40哩的地方，硫的同位素资料是稳定的，其中有多至75%的硫都是来源于其底部含硫化物和石墨的弗吉尼亚板岩。

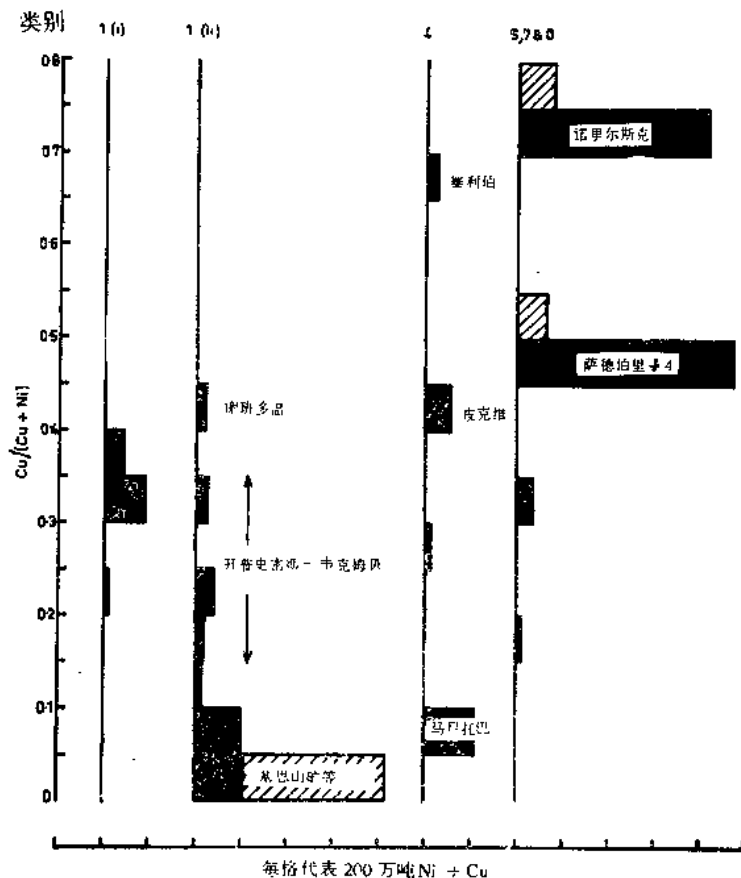


图6 硫化镍矿床内 $Cu/(Cu + Ni)$ 的比值与各类有关的超基性岩/基性岩的关系

柱的长短是与各类岩体矿床中 $Ni + Cu$ 的总含量成比例的；代表诺里尔斯克的柱是真实长度的四分之一，属例外情形。有经济价值的矿床用粗实线表示，而限界的或无经济价值的矿床则用斜线表示之。