

Anthony J. Naldrett

岩浆硫化物矿床

Magmatic Sulfide Deposits

(地质·地球化学·勘查)

国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室

中国地质调查局西安地质调查中心

李文渊 张照伟 高永宝 等编译

地质出版社

岩浆硫化物矿床

Magmatic Sulfide Deposits

(地质 地球化学 勘查)

原著 Anthony J. Naldrett

编译 李文渊 张照伟 高永宝 王 伟 谢春林
郭周平 姜寒冰 谭文娟 乔耿彪 赵国斌
余吉远 全守村 栗亚芝 杨鹏飞 彭素霞
谢 燮 张江伟 孙 佳 李 行 杨 星

编辑 乔玉兰 李西林 李 辉

单位 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室
中国地质调查局西安地质调查中心

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书对全世界重要的岩浆铜镍硫化物矿床和铂族金属矿床及其研究进展进行了全面阐释, 主要从岩浆铜镍及铂族金属矿床成矿的视角, 对该类矿床的成矿特征和成矿机制进行了探讨; 概述了典型岩浆铜镍硫化物矿床及铂族金属矿床的特征、分类和矿床成因, 并对其指导矿床勘查进行了思考。全书共分为 10 章, 插图 325 幅, 书后还附有附录及该学术领域重要的参考文献等。

本书可供从事岩浆铜镍硫化物矿床的科技人员参考使用。

Translation from the English language edition:

Magmatic Sulfide Deposits. Geology, Geochemistry and Exploration

by Anthony J. Naldrett

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004

Springer-Verlag is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目 (CIP) 数据

岩浆硫化物矿床 / 李文渊等编译. —北京: 地质出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-116-08661-6

I. ①岩… II. ①李… III. ①硫化铜—岩浆矿床②镍—硫化物—岩浆矿床③铂—硫化物—岩浆矿床 IV. ①P618.63②P618.41③P618.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 295716 号

Yanjiang Liuhuawu Kuangchuang

责任编辑: 乔玉兰 王 超 宫月萱 陈军中

责任校对: 黄苏晔

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324567 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 82310759

印 刷: 西安中地信息工程有限公司

开 本: 889mm × 1194mm 1/16

印 张: 27

字 数: 780 千字

版 次: 2013 年 12 月北京第 1 版

印 次: 2013 年 12 月北京第 1 次印刷

审 图 号: GS (2012) 1589 号

定 价: 85.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-08661-6

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

译者的话

国际地球科学计划 (International Geoscience Programme, 简称 IGCP) 479 项铂族元素可供性项目 (IGCP-479: Sustainable Use of Platinum Group Elements), 于 2004 年底在香港大学召开了题为“镁铁-超镁铁岩有关岩浆矿床系统新进展 (Recent Advances in Magmatic Ore Systems in Mafic-Ultramafic Rocks)”的学术会议, 会上看到了世界著名铜镍矿床学家 Anthony J. Naldrett 的新著《岩浆硫化物矿床的地质、地球化学和勘查》(*Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration*. 2004, New York, Springer. Berlin Heidelberg, 1~727)。2005 年参加北京召开的第 8 届国际矿床地质大会, 笔者更加感受到了世界对岩浆铜镍硫化物矿床的关注。笔者于 20 世纪 90 年代在拙著《中国岩浆铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学》和参加编著《金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比》中, 曾参考过 Anthony J. Naldrett 1989 年出版的《岩浆硫化物矿床》(*Magmatic sulfide deposits*. 1989, New York, Oxford University Press, 1~186) 专著, 收益很大。Anthony J. Naldrett 的新著《岩浆硫化物矿床: 地质、地球化学和勘查》对原著进行了大幅度的扩充, 对全世界重要的岩浆铜镍硫化物矿床和铂族金属矿床及其研究进展进行了全面阐释, 新著达 700 多页, 共分为 10 章, 插图 325 幅, 书后还附有附录、索引, 以及该学术领域重要的参考文献, 是一本非常重要的参考书。因此萌生了翻译此书的想法, 以供目前全国矿产资源潜力评价工作中镍矿床研究的参考之需。

Anthony J. Naldrett 是加拿大多伦多大学的荣誉教授、加拿大皇家科学院院士, 一生致力于岩浆铜镍硫化物矿床的研究, 培养了一大批活跃在国际岩浆铜镍硫化物矿床研究领域和勘查界的学生, 桃李满天下。Anthony J. Naldrett 在国际矿床学界的学术影响甚广, 代表了现今欧美矿床学界的主流思想, 并波及俄罗斯。据作者称, 这本专著就是应俄罗斯诺里尔斯克矿业公司的要求而撰写的, 俄罗斯诺里尔斯克矿业的矿床地质学家还为该专著提供了图件。2007 年初, Anthony J. Naldrett 教授访问长安大学, 顺道访问了中国地质调查局西安地质调查中心, 交流中我们提到对他著作的赞赏和翻译成中文的兴趣, 他听后非常高兴。这更坚定了我们翻译此书的信心。为此, 我们从倡导学术氛围, 提高业务水平出发, 组织所里的青年科技人员翻译了此书。

该书主要从岩浆铜镍与铂族金属矿床成矿的视角, 对该类矿床的成矿特征和成矿机制进行了卓有成效的探讨。第 1 章概述了岩浆硫化物矿床的分类和矿床成因认识。书中 Anthony J. Naldrett 教授对岩浆铜镍硫化物矿床和岩浆铂族金属矿床重新进行了分类, 其岩石-构造成因分类是最具有影响的。值得注意的是, 在他的岩浆铜镍硫化物矿床分类中, 专门划出了一类与蛇绿岩带(洋壳)大地构造背景有关的混杂苦橄-拉斑玄武岩铜镍硫化物矿床类型, 这与我们传统概念的认识不一致。一般认为蛇绿岩的超基性岩中主要形成豆荚状铬铁矿, 很少有岩浆铜镍矿床形成。我们就此问题请教 Anthony J. Naldrett 教授时, 他称这是菲律宾矿床一个不成熟的例证。其实, 我国汤中立院士等(2006)所著《中国镍铜铂岩岩浆硫化物矿床与成矿预测》一书中, 曾提出了陕西煎茶岭镍矿床属于蛇绿岩的有关认识也是同样的例证。总之, 蛇绿岩带(洋壳)构造背景的岩浆铜镍硫化物矿床的具体成矿作用尚需进一步研究, 并在勘查实践中探索。第 2 章是理论研究, 特别评述了近 10 年来在岩浆铜镍硫化物矿床成因研究中, 硅酸盐熔体中硫溶解度的概念和影响因素, 介绍了广为应用的岩浆/硫化物熔体比值的“ R 因子”。第 3 章至第 8 章分别介绍了与科马提岩、溢流玄武岩火山作用有关的矿床, 俄罗斯贝辰加地区矿床, 加拿大沃尔斯贝矿床, 中国的金川矿床, 加拿大的萨德伯里矿床等 6 类典型矿床的特征及其成因认识。在该书第 4 章与溢流玄武岩火山作用有关的矿床论述中, 尽管作者强调了大陆溢流玄武岩与岩浆铜镍矿床形成的亲密关系, 但还是认识到俄罗斯诺里尔斯克矿床形成是一个偶然事件的结果。第 9 章介绍了铂族元素矿床, 对与大型层状杂岩有关的和其他的铂族金属矿床进行了阐

述。第10章总结了岩浆铜镍及铂族金属矿床成因认识,并对其指导矿床勘查进行了思考。

参加翻译的同志大多是近年来毕业的矿床专业的研究生。从策划翻译到印刷成册,花费近两年时间,基本上都是利用工作之余。译出初稿后,全体译者进行了一次交流互校。第1章由张照伟翻译,李文渊、李行校对;第2章由谢春林翻译,李行校对;第3章由赵国斌翻译,杨星、谢燮校对;第4章由余吉远、全守村翻译,杨星、张江伟校对;第5章由杨鹏飞翻译,张照伟、高永宝校对;第6章由郭周平翻译,乔耿彪校对;第7章由张照伟翻译,李文渊校对;第8章由乔耿彪翻译,郭周平校对;第9章由姜寒冰、谭文娟、栗亚芝翻译,高永宝校对;第10章由王伟翻译,孙佳、彭素霞校对。初稿译出后,全体译者进行了一次译文学术交流会,既提高了翻译水平,又达到了交流学习的目的。为保证译文质量,又邀请了岩浆铜镍矿床专家李行和杨星对译著和图件进行了把关,《西北地质》编辑部负责编辑。目前呈现到读者面前的这本译著,就是各位译校者、老专家、编辑辛勤劳动的结晶。

进入21世纪,世界上岩浆铜镍硫化物矿床的研究有了长足的进步,特别是其标志性的两大进展:其一是板块构造理论解释不了岩浆铜镍硫化物矿床的形成,成岩成矿理论广泛与地幔柱理论联系起来,大型-超大型岩浆铜镍硫化物矿床物质起源可能与源于核幔边界的地幔柱有关;其二是小岩体成大矿的认识有了越来越多的地质实例,但同时也进一步认识到要形成大规模的岩浆铜镍硫化物矿床,必然伴随有大规模岩浆事件,以提供更大规模的岩浆。大规模岩浆铜镍硫化物矿床的形成,是地质历史上重大地质事件的典型反映。应该说,该书在这方面的反映还不够全面,或者说至少还没有强调它的重要意义。从创新的角度讲,我们需要在总结汲取前人认识的基础上,加强这方面认识的创新。从科学发展的角度来讲,创新是一项汲取和批判前人认识不断提出问题的过程,凡是有生命力的科学领域都是不断涌现新思想的学科,我们翻译并刊出这本书的目的也在于此。

中国是世界上重要产镍国家之一,并且以金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床的产出而备受世界关注。近10余年来,改变世界矿业格局的几处大型-超大型岩浆铜镍硫化物矿床外围均有新的矿床发现,特别是原居于世界第三位的俄罗斯诺里尔斯克矿床,由于新的矿床发现,其硫化镍金属储量已超过了金川。金川矿床外围及深部找矿,已成为全世界矿业界关注的问题。由于镍价的飞速上涨和地幔柱理论对该类矿床形成的解释,国内冷寂了多年的岩浆硫化物矿床,近年来也重新激起了人们的研究和勘查热情,一批有志于岩浆铜镍硫化物矿床勘查和研究的年轻同志也参与其中。在这种情形下,我们将Anthony J. Naldrett的经典之作*Magmatic sulfide deposits*重新梳理并由地质出版社出版,相信它对加深岩浆铜镍矿床的理解和进一步认识具有重要意义,特别是在当前铜、镍金属矿产紧缺的情况下,这部译著的翻译和出版是很有价值的。

本译著的出版得到了国家自然科学基金项目:祁连-龙首山元古宙大火成岩省及巨量铜镍聚积(40772062);“十一五”国家科技支撑计划专题:秦祁昆成矿域成矿规律及矿产预测示范(2006BAB01A01)和金川铜镍硫化物矿床深部及外围找矿勘查(2006BAB01B08);国土资源大调查项目:祁连-龙首山大火成岩省与金川型铜镍矿关系研究(1212010911032)和青海省化隆县甘都地区铜镍矿调查评价(1212010918024);中国地质调查局科技外事部研究项目:新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究(1212011121092);中国地质调查局资源评价部青藏专项(青海片区)资源调查项目:岩浆铜镍硫化物矿床成矿与找矿方向调查(12120114044401)的资助。

李文渊

2011年8月11日于西安

作者的话

自从我从剑桥大学毕业获得地质学专业学士学位之后，我就开始在全世界寻找能把我的知识得到很好应用的地方。1957年，加拿大刊出了可以为母语是英语的年轻人提供好的工作环境，于是，我们3个同学一起预订了英国的特快船票，计划在7月下旬离开利物浦去加拿大的蒙特利尔。我坐在轮船的4号卧铺，于1957年7月28日到达蒙特利尔。周末的放松之后，我离开朋友们去多伦多寻找工作。我永远记得在王子街道和港湾街道附近灰色建筑群中开始寻找工作的那个星期一的上午。我首先去了新斯科舍省一个古老的银行，在那里有猎鹰桥（Falconbridge）的办事处。猎鹰桥（Falconbridge）的总地质师 Geof Mitchell 先生和他的代理人 Bill Taylor 先生面试了我并给我提供了一个在萨德伯里矿区工作的岗位。我对勘探工作非常感兴趣，但是他们不同意我做勘探工作。我看着罗列的所有可能职位，开始意识到在矿业行业里金属的价格决定雇佣关系。铜金属价格的下降意味着没有人愿意接受我这个来自英国又没有经验的年轻地质师去做勘探工作。两天后我乘坐火车去了萨德伯里，从那时候起我就与岩浆硫化物结上了不解之缘，尤其是镍矿。

主要有两种岩浆硫化物矿床类型：一类是富硫化物矿床，总体来说硫化物含量超过30%，以开采镍、铜（钴）为主，PGE 作为副产品；另一类是硫化物含量不到5%，PGE 很有经济价值，镍、铜作为副产品。在我前20年从事的研究工作，主要是第一类矿床。尽管有很少量的PGE，但我还是很感激这些，因为它们可以告诉我这些矿床的起源和形成过程。同时当它们变成具有商业利益的时候，受它们在保护环境日益增加的作用驱动，引导我研究富PGE矿床。

回过头来，非常感激我在休假期间获得的理论知识。1972年我第一次被大家认可并接受了 Perth Wilf Ewers 先生的邀请与联邦科学与工业研究组织一起工作，澳大利亚西部是他们研究的一部分，重点研究在东部金矿区与科马提岩相关的镍硫化物矿田。这一年我研究了这个类型的矿床，认识到并不是所有的岩浆硫化物矿床都和萨德伯里的一样！1980年的第二次休假，我接受了 Gero von Gruenewaldt 的邀请参与到比勒陀利亚（Pretoria）大学的灌木区研究所，和他们的观点一致并发展了我的PGE矿床理论。这也是与南非10年亲密合作研究非洲南部矿床的开始，没有这个开始，这部著作的第9章就无从写起。

20世纪80年代末期，我的科学研究方向发生了改变，平时一些零碎的知识信息被整理过滤后，思想豁然开朗。作为一个与 Vilen Zharikov 联合的结果，我已经与俄罗斯科学院矿物学实验所科学家们建立了很好的关系。从那以后，我与一些外国科学家就科学课题密切协作。1990年我收到了诺里尔斯克联合总经理 Anatoly Vasily Filatov 的邀请，邀请我访问诺里尔斯克矿区。1991年1月我和4个访问者一起第一次访问诺里尔斯克矿区。这次访问使我学到了很多并与诺里尔斯克的许多地质学家结成了朋友，非常感激他们向我展示了他们杰出的工作，从而更增深了我对岩浆硫化物矿床地质方面的理解。尤其感谢诺里尔斯克前任总经理 Valeri Andrew Fedorenko of TsNIGRI，他的智慧和诺里尔斯克的地质知识对我和其他许多在诺里尔斯克共同研究的科学家来说都是无价的。这部著作的第4章是在我访问诺里尔斯克矿区的研究激励下完成的。

随着对诺里尔斯克矿床研究达到高潮，一个新的矿床出现在人们的视野里！一家钻石资源的小公司，在 Labrador（加拿大纽芬兰的陆地部分）中部研究钻石指示矿物的过程中发现了镍硫化物。他们请我作为他们的顾问以增加他们这方面的知识，我同意了，这产生了一个由加拿大自然科学与工程研究委员会、最初的钻石公司及他们的继任者沃尔斯贝镍矿公司协作资助的研究项目。沃尔斯贝的发现激起了全世界的兴趣，这就意味着许多著名的研究人员热衷于在该项目中协同合作，并且我尽力总结了第6章的结论部分。

尽管我时常远离家乡四处奔波研究，但我的家还是萨德伯里。我 1957 年就开始在那里工作，总是不定期地回到那里。通过后来这 40 ~ 50 年的研究，我对萨德伯里地质理解的发展是令人振奋的，并且这些给了我参观访问的特权，也取得了一些小的成就。我的这些发展是基于对 Robert Dietz 所提出的碰撞假设的侧面思考，正是这些发展促使许多以前对于描述层状岩体和镍矿床没有引起兴趣的地质工作者来到萨德伯里，并在此施展才能。多角度的研究萨德伯里是非常重要的，我尽力在第 8 章介绍了萨德伯里较突出的特点。

最后要特别感谢那些在我的科研道路上给予我很多帮助的人。女王大学教授 Edward Hawley，当我读大学的时候他就是萨德伯里矿床的总裁，是他教给我如何抓住关键，正确地提出问题。Gunnar Kullerud 在 1963 年通过了女王的考察并邀请我作为地球物理实验室 1964 年至 1967 年的博士后和他一起工作。通过与 Gunnar 和其他人一起工作，我学会了怎样运用实验数据来解决地质问题，还使我结识了许多年轻的从事实验方面的朋友，还有一些 60 年代中期在 Washington DC 工作的理论岩石学方面的朋友。毫无疑问，在美国地质调查局就理论方面是一段平静的日子，但那段时间的经验是我解决地质问题的方法。1967 年 Les Nuffield 教授邀请我从华盛顿回到加拿大，并在多伦多大学给了我一个职位，非常感激早年为我提供了发展科学研究的空间和平台；对一个年轻的教授来说，那段时间的科学研究也使我面对每天的备课和系里管理挥洒自如，变得非常简单。总之，我感谢我的学生们、博士后和科研同事对这部著作的贡献，他们的智慧和努力对多伦多大学在岩浆硫化物矿床的研究成果上功不可没。

托尼·纳瑞特
多伦多大学名誉教授
2004 年 4 月

目 录

译者的话

作者的话

1 概况	(1)
1.1 岩浆硫化物矿床的分类	(1)
1.2 矿床的规模和组成	(9)
1.3 对矿床成因的一般认识	(11)
2 理论研究	(13)
2.1 硅酸盐熔融体中硫的溶解度	(13)
2.2 亲铜金属在硫化物与硅酸盐熔融体中的分配	(18)
2.3 相关的相平衡	(24)
2.4 硫化物液体的分离结晶作用	(34)
2.5 硫的外部来源	(37)
3 与科马提岩有关的矿床	(39)
3.1 太古代与科马提岩有关的矿床	(39)
3.2 元古代早期与科马提岩有关的矿床	(60)
4 与溢流玄武岩火山作用有关的矿床	(82)
4.1 西伯利亚诺里尔斯克地区的 Ni - Cu - PGE 矿床	(83)
4.2 北美苏必利尔湖矿区	(145)
4.3 与南非卡鲁溢流玄武岩有关的矿床	(157)
4.4 溢流玄武岩省的成矿环境	(168)
5 俄罗斯贝辰加地区矿床	(169)
5.1 区域地质	(169)
5.2 贝辰加构造地质	(169)
5.3 富铁苦橄岩地球化学特征	(174)
5.4 富铁苦橄岩与含矿辉长岩 - 异剥橄榄岩侵入体的同源岩浆关系	(174)
5.5 辉长岩 - 异剥橄榄岩侵入体	(175)
5.6 硫化物岩浆矿床	(179)
5.7 贝辰加矿床的成因模式	(184)
6 加拿大拉布拉多地区沃尔斯贝及其他矿床	(185)
6.1 发现和勘探史	(185)
6.2 地质概况	(185)
6.3 沃尔斯贝侵入体的地质特征	(187)
6.4 岩石特征和岩石类型	(193)
6.5 橄榄石和斜长石成分	(195)
6.6 沃尔斯贝岩石地球化学特征	(197)
6.7 沃尔斯贝侵入体的矿化	(203)
6.8 地质模型	(211)
6.9 对于沃尔斯贝片麻岩的讨论	(213)

6.10	与耐尔火成岩带有关的其他矿床	(213)
7	中国金川矿床	(221)
7.1	矿床地质	(221)
7.2	岩石学	(223)
7.3	岩石地球化学	(224)
7.4	橄榄石成分	(228)
7.5	岩石成因	(229)
7.6	矿化特征	(231)
7.7	成矿作用	(237)
7.8	金川矿床的成因模式	(237)
8	加拿大安大略省萨德伯里矿区矿床	(239)
8.1	引言	(239)
8.2	地质背景	(240)
8.3	萨德伯里杂岩体组成单元	(246)
8.4	萨德伯里杂岩体岩石地球化学特征	(250)
8.5	硫化物矿体	(260)
8.6	不同矿石类型中金属品位	(267)
8.7	矿石矿物学	(268)
8.8	矿床与杂岩体之间的成因联系	(272)
8.9	萨德伯里火成杂岩的起源及其矿化的讨论	(272)
8.10	结论	(282)
9	铂族元素 (PGE) 矿床	(284)
9.1	幔源岩石和镁铁质 - 超镁铁质熔岩中的铂族元素	(284)
9.2	铂族元素聚集的机制	(288)
9.3	根据矿体形态和组成对铂族元素矿床的分类	(290)
9.4	层状侵入体中的矿床	(291)
9.5	非层控矿床	(338)
9.6	乌拉尔山铂金矿带矿床	(346)
9.7	小结	(355)
10	结论及基本概念在勘查工作中的应用	(357)
10.1	Ni - Cu 矿床勘查中的概念应用	(357)
10.2	对层状侵入体中铂族元素矿床的勘查: 概念与方法	(379)
	附录 不同类型矿石镍、铜和贵金属在全硫化物中的百分含量	(388)
	参考文献	(393)

1 概 况

岩浆铜镍硫化物矿床的形成是由于岩浆中亲铜元素分异进入硫化物液滴之后，硫化物液滴与镁铁质或超镁铁质岩浆分离、富集引起的。

矿床的规模、品位和有经济意义的金属比例都是变化很大的，详细情况见表 1.1。该表从资源量，矿石产量（包括已开采部分），品位、金属储量、矿石价值、矿石单价、矿石质量及金属量等方面进行了数据总结，详细情况见图 1.1。该图标示出了许多有经济价值的岩浆硫化物矿床的 Ni + Co, Cu 和 PGE 的品位。

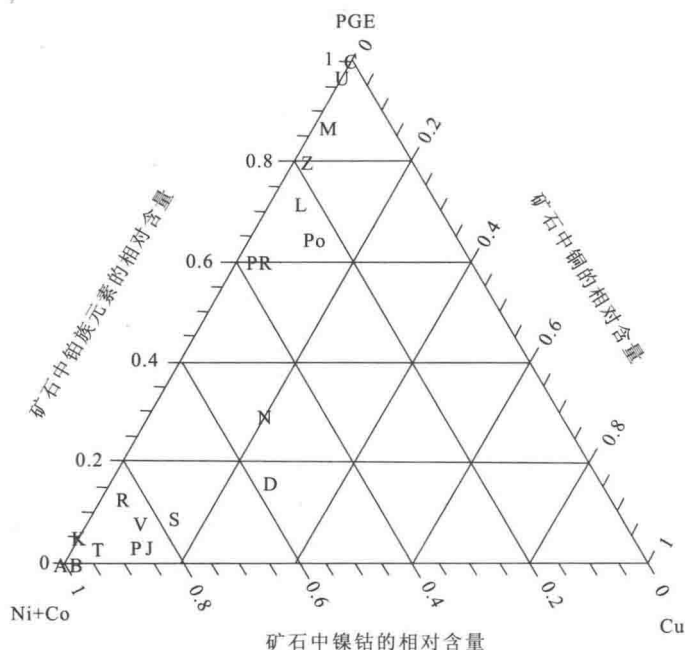


图 1.1 与表 1.1 对应的岩浆硫化物矿床矿石中镍钴、铜及铂族元素的相对含量

V—沃尔斯贝（加拿大）；D—德卢斯杂岩（美国）；K—坎姆巴达（澳大利亚）；M—梅林斯基层（布什维尔德）；

N—诺里尔斯克（俄罗斯）；P—贝辰加（俄罗斯）；S—萨德伯里（加拿大）；T—汤普森（加拿大）；

J—金川（中国）；L—莱克德莱斯（加拿大）；PR—普拉特层（布什维尔德）；Po—抛提

某杂岩（芬兰）；R—瑞格兰（加拿大）；U—UG-2—铬铁矿（布什维尔德）；

Z—津巴布韦大岩墙；A—密特凯斯（澳大利亚）；B—珀斯沃瑞斯

（澳大利亚）；C—斯蒂尔沃特（美国）

1.1 岩浆硫化物矿床的分类

岩浆硫化物矿床自然形成两种主要类型，一类主要是 Ni 和 Cu，并且它们的矿石中含有 20% ~ 90% 的硫化物而形成的有经济价值的矿床；另一类主要是 PGE，它基本不含在硫化物中，矿石中只含有 0.5% ~ 5% 的 PGE 而形成有经济价值的矿床（图 1.1）。

由于某种原因，富硫化物型在该图中存在于镍的顶点，不在该范围内许多较小矿床或者矿区也列入该区域，贫硫化物富 PGE 型矿床出现在 PGE 顶点附近。Platreef 矿床例外，它包含一系列层控型的、弱的浸染状硫化物和俄罗斯的诺里尔斯克及美国的德卢斯地区的一些矿床。在萨德伯里下盘中的富铜

表 1.1 矿石品位 (包含已开采部分) 和矿石中的金属量^①以及矿石价值^②与矿石单价及 PGE 占总价值的比例

矿床 (矿区)	矿石量 /10 ⁴ t	矿石品位/%				矿石中的金属量/10 ⁻⁶						
		Ni	Cu	Co	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	总 PGE	
诺里尔斯克 ^② (Noril'sk)	1309.3	1.77	3.57	0.061	1.84	7.31	0.191	0.093	0.026	0.036	9.50	
萨德伯里 ^③ (Sudbury)	1648.0	1.20	1.08	0.038	0.46	0.58	0.056	0.044	0.019	0.008	1.17	
德卢斯 ^④ (Duluth)	4000.0	0.20	0.60	0.019	0.15	0.49	0.007	0.007	0.003	0.003	0.66	
金川 ^⑤ (Jinchuan)	515.0	1.06	0.75	0.019	0.13	0.10	0.005	0.010	0.010	0.011	0.26	
贝辰加 ^⑥ (Pechenga)	339.0	1.18	0.63	0.045	0.12	0.17	0.005	0.007	0.004	0.006	0.32	
汤普森 ^⑦ (Thompson)	150.3	2.32	0.16	0.046	0.10	0.54	0.046	0.072	0.033	0.041	0.83	
密特凯斯 ^⑧ (Mt Keith)	478.0	0.60	0.01	0.014	—	—	—	—	—	—	0.00	
沃尔斯贝 ^⑨ (Voisey's Bay)	136.7	1.59	0.85	0.090	0.07	0.10	0.005	0.007	0.002	0.002	0.19	
坎姆巴达 ^⑩ (Kambalda)	67.0	2.90	0.21	0.207	0.30	0.42	0.065	0.197	0.047	0.097	1.13	
珀斯沃瑞斯 ^⑪ (Perseverance)	52.0	1.90	0.10	—	—	—	—	—	—	—	0.00	
瑞格兰 ^⑫ (Raglan)	24.7	2.72	0.70	0.054	0.82	2.27	0.150	0.374	0.065	0.080	3.76	
布什维尔德 (总) (Bushveld)	11 549.9	0.13	0.06	—	2.87	1.80	0.307	0.539	0.100	0.054	5.67	
— UG-2 ^⑬	5742.6	0.04	0.02	—	2.66	1.71	0.428	0.710	0.131	0.062	5.70	
— 梅林斯基层 ^⑭ (Merensky)	4210.0	0.15	0.06	—	3.57	1.85	0.216	0.449	0.082	0.051	6.21	
— 普拉特层 ^⑮ (Platreef)	1597.3	0.41	0.20	—	1.77	2.01	0.114	0.165	0.038	0.033	4.12	
大岩墙 ^⑯ (Great Dyke)	2574.0	0.21	0.14	—	2.77	2.13	0.130	0.289	0.052	0.047	5.42	
斯蒂尔沃特 ^⑰ (Stillwater)	32.3	0.05	0.02	—	5.30	19.11	0.270	0.100	0.096	0.043	24.91	
抛提某 ^⑱ (Portimo)	218.6	0.08	0.18	—	0.38	1.54	—	—	—	—	1.92	
莱克德莱斯 ^⑲ (Lac des Iles)	94.1	0.05	0.06	—	0.18	1.66	0.008	—	0.000	—	1.85	

续表

矿床 (矿区)	金属量 (包含已开采部分) /10 ³ t			金属量 (包含已开采部分) /t							
	Ni	Cu	Co	Pt t	Pd t	Rh t	Ru t	Ir t	Os t	总 PGE t	
诺里尔斯克 ^② (Noril'sk)	23 201	46 728	801	2412	9753	250	122	34	47	12 438	
萨德伯里 ^③ (Sudbury)	19 776	17 798	621	763	961	92	73	31	13	1933	
德卢斯 ^④ (Duluth)	8000	24 000	757	585	1959	27	27	11	12	2621	
金川 ^⑤ (Jinchuan)	5459	3888	99	65	51	3	5	5	6	135	
贝辰加 ^⑥ (Pechenga)	4000	2150	152	41	59	2	2	1	2	107	
汤普森 ^⑦ (Thompson)	3486	243	69	15	80	7	11	5	6	124	
密特凯斯 ^⑧ (Mt Keith)	2868	57	67	—	—	—	—	—	—	—	
沃尔斯贝 ^⑨ (Voisey's Bay)	2174	1162	123	10	13	1	1	0	0	26	
坎姆巴达 ^⑩ (Kambalda)	1943	144	139	20	28	4	13	3	7	75	
珀斯沃瑞斯 ^⑪ (Perseverance)	988	49	—	—	—	—	—	—	—	—	
瑞格兰 ^⑫ (Raglan)	672	173	13	20	56	4	9	2	2	93	
布什维尔德 (总) (Bushveld)	15 276	6881	—	33 111	20 803	3548	6231	1157	623	65 473	
— UG-2 ^⑬	2412	1034	—	15 279	9809	2457	4077	752	356	32 730	
— 梅林斯基层 ^⑭ (Merensky)	6315	2652	—	15 012	7790	909	1891	345	214	26 161	
— 普拉特层 ^⑮ (Platreef)	6549	3195	—	2820	3204	182	263	60	53	6582	
大岩墙 ^⑯ (Great Dyke)	5405	360	—	7130	5483	335	744	135	120	13 946	
斯蒂尔沃特 ^⑰ (Stillwater)	15	7	—	171	616	9	3	3	1	804	
抛提某 ^⑱ (Portimo)	175	393	—	83	337	—	—	—	—	420	
莱克德莱斯 ^⑲ (Lac des Iles)	50	58	—	17	156	1	—	—	—	174	

矿床 (矿区)	矿石价值/百万美元											PGE 占 总价值比例/%
	Ni	Cu	Co	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	总	矿石单价 美元/t	
诺里尔斯克 ^② (Noril'sk)	191 870	77 101	18 029	49 864	59 734	4 591	352	98	135	401 774	307	29
萨德伯里 ^③ (Sudbury)	163 548	29 367	13 972	15 765	5998	1 682	210	91	38	230 670	140	10
德卢斯 ^④ (Duluth)	66 160	39 600	17 033	12 093	12 224	5 000	78	31	34	147 753	37	17
金川 ^⑤ (Jinchuan)	45 146	6415	2238	1354	316	46	15	15	17	55 562	108	3
贝辰加 ^⑥ (Pechenga)	33 080	3548	3420	847	366	34	7	4	6	41 312	122	3
汤普森 ^⑦ (Thompson)	28 828	402	1555	310	502	126	31	14	18	31 786	212	3
密特凯斯 ^⑧ (Mt Keith)	23 718	95	1506	—	—	—	—	—	—	25 319	53	—
沃尔斯贝 ^⑨ (Voisey's Bay)	17 975	1917	2768	212	82	12	3	1	1	22 971	168	1
坎姆巴达 ^⑩ (Kambalda)	16 069	237	3123	417	175	79	38	9	19	20 166	301	4
珀斯沃瑞斯 ^⑪ (Perseverance)	8171	82	—	—	—	—	—	—	—	8252	159	0
瑞格兰 ^⑫ (Raglan)	5556	286	298	421	349	68	27	5	6	7015	284	12
布什维尔德 (总) (Bushveld)	126 332	11 353	—	684 404	129 811	65 035	18 008	3344	1800	1 040 086	90	87
—UG-2 ^⑬	19 946	1706	—	315 817	61 208	45 037	11 783	2173	1029	458 698	80	95
—梅林斯基层 ^⑭ (Merensky)	52 225	4376	—	310 298	48 610	16 662	5465	997	618	439 251	104	87
—普拉特层 ^⑮ (Platreef)	54 161	5271	—	58 289	19 993	3336	760	173	153	142 137	89	58
大岩墙 ^⑯ (Great Dyke)	44 703	5946	—	147 377	34 212	6146	2149	390	346	241 269	94	79
斯蒂尔沃特 ^⑰ (Stillwater)	124	12	—	3533	3846	160	9	9	4	7698	239	98
抛提某 ^⑱ (Portimo)	1446	649	—	1717	2101	—	—	—	—	5913	27	65
莱克德莱斯 ^⑲ (Lac des Iles)	412	96	—	350	975	14	—	—	—	1848	20	72

① 金属量, 不含溶解和损失的部分。

② 根据纳瑞特分析数据估算。

③ 储量与 Ni 品位来源于纳瑞特; Cu/Ni, Co/NJ 和 PGE/Ni 的比值来源于纳瑞特。

④ 吨位, Ni 和 Cu 品位来源于 Listerud 和 Meinecke (1977); Co/NJ 和 PGE/Ni 比值来源于 Naldrett (1989)。

⑤ 吨位和 Ni 品位来源于 Chai 和 Naldrett (1992); Cu/Ni, Co/Ni, PGE/Ni 比值来源于 Tang (1993), 表 4。

⑥ Ni 数据来源于 Green (personal communication 1999); Cu/Ni 和 PGE/Ni 比值来源于 Brugmann et al. (2000)。

⑦ 镍储量来源于 INCO 公司, Cu/Ni 比值来源于 Theyer (1980), Co/Ni 和 PGE/Ni 比值来源于 Bleeker 的数据 (1990)。

⑧ Ni 数据来源于 AGSO 会议展版, Canberra, 1996。

⑨ 吨位, Ni, Cu 和 Co 品位来源于 Lightfoot 和 Naldrett (1999); PGE 数据来源于 PGE/Ni ratios of 190 samples with >20% sulfide from Naldrett et al. (2000a)。

⑩ 吨位和 Ni 品位来源于 Stone 和 Masterton (1998); Cu/Ni 和 PGE/Ni 比值来源于 Naldrett (1989); Co/Ni 比值来源于 Leshner (1989), 表 5.1。

⑪ Ni 数据来源于 AGSO 会议展版, Canberra, 1996; Ni/Cu 比值来源于 Keays and Davidson (1976)。

⑫ 数据来源于 Leshner, ed (1999)。

⑬ PGE 吨位来源于 Vermaak (1995) 表 2.7; PGE 品位来源于 Vermaak (1995) 表 2.1; Ni 和 Cu 品位利用 Naldrett (1989) Ni/ (Pt + Pd) 和 Cu/Ni 比值计算。

⑭ PGE 吨位来源于 Vermaak (1995) 表 2.7; PGE 品位来源于 Vermaak (1995, p. 17); Ni 和 Cu 品位来源于 Naldrett (1989)。

⑮ PGE 数据来源于 Vermaak (1995); Ni/ (Pt + Pd) 和 Cu/ (Pt + Pd) 比值来源于 Naldrett and Wilson 的研究报告 (1990)。

⑯ Stillwater 和 East Boulder mines 已有的和潜在的 (Pt + Pd) 吨位和品位储量来自于 Zientek et al. (2002); Pt/Pd 比值来自 Vermaak (1995); Ni 和 Cu 计算使用了 Zientek et al. 的 Pt 和 Pd

数据及 Naldrett 的 (1989) Ni/ (Pt + Pd) 与 Cu/ (Pt + Pd) 比值。

⑰ 信息来源于互联网的 Arctic Platinum Partnership (Gold-fields and Outokumpu), July 2002。

⑱ Pt 和 Pd 吨位数据来源于 Cordilleran Round-up. Vancouver, January 2000; 金属: Pd 值来源于 Naldrett (private data)。

⑲ 价格是 2003 年 4 月的数值: Ni = 8.27 美元/kg (3.75 美元/磅); Cu = 1.65 美元/kg (0.75 美元/磅); Co = 22.05 美元/kg (10.00 美元/磅); Pt = 20.67 美元/g (643 美元/盎司);

Rh = 6.24 美元/g (194 美元/盎司); Ir = 2.89 美元/g (90 美元/盎司); Os = 2.89 美元/g (90 美元/盎司)。

矿石标绘在插入区，但这些来源于接触交代矿石（第 8 章），不是单独的矿床，在萨德伯里矿区有较少的矿化亚型。

本书中，岩浆硫化物矿床的最原始划分是介于图 1.1 中存在富 PGE 顶点附近的贫硫化物型和那些含有 Ni 和 Cu 且具有重大经济意义金属的较富硫化物型之间。岩浆硫化物矿床成因上与镁铁岩或超镁铁岩密切相关，也就是与岩浆类型有密切联系（成矿专属性）。同时岩浆类型与所侵位的构造背景密不可分。

矿床（或矿区）资源量估算（包含已开采部分）和含有 Ni, Cu 及 PGE 硫化物矿石的主要矿床的经济价值在表 1.1 中已详细列出。

以 Ni - Cu 为主和以 PGE 为主的重要矿床的位置如图 1.2 所示。

根据岩浆类型组合，将其进一步分为 6 类镍铜矿床（表 1.2）。

表 1.2 基于岩石构造背景镍铜硫化物矿床的分类表

类型	相关岩浆作用	矿区（矿床）及时代	岩浆作用的大地构造背景
NC - 1	科马提岩	威卢纳 - 诺斯曼（Wiluna-Norseman）绿岩带（坎姆巴达；太古代） 阿比提比（Abitibi；太古代） 津巴布韦（太古代）	绿岩带（裂谷？）
		汤普森（古元古代） Raglan（古元古代）	大陆边缘裂谷
NC - 2	溢流玄武岩	诺里尔斯克（显生宙） 德卢斯（新元古代） 马斯考克斯（Muskox；新元古代）	裂谷（三叉结合点）
		Insizwa（显生宙）	大陆边缘裂谷
		吴兰格里亚（Wrangelia；显生宙）	岛弧裂谷
NC - 3	铁质苦橄岩	贝辰加（Pechenga；中元古代）	大陆边缘裂谷
NC - 4	斜长岩 - 花岗质 - 橄长岩	沃尔斯贝（新元古代）	裂谷
NC - 5	混杂苦橄 - 拉斑玄武岩	Moncalm（太古代）	绿岩带（裂谷？）
		金川（中元古代）	大陆边缘裂谷
		Niquelandia（中元古代）	大陆裂谷
		Moxie（显生宙） Aberdeenshire Gabbros（显生宙） Rona（显生宙）	造山带（挤压）
		Acoje（显生宙）	蛇绿岩带（洋壳）
NC - 6	撞击熔体	萨德伯里（中元古代）	陨石撞击

NC - 1 类（第 3 章）包含了那些与科马提岩相关的矿床。已知的矿床分成两个亚类，一类是与太古代科马提岩相关的（如西澳大利亚矿床津巴布韦矿床和加拿大的 Abitibi 矿床）；另一类是与元古代的科马提岩相关的（如加拿大的拉格伦和汤普森中的矿床）。

太古代科马提岩的构造背景是有争议的，但可以确定是与裂谷有关，而元古代的则是大陆边缘裂谷岩浆发育的结果。除从太古代到元古代的科马提质岩浆作用逐渐变成少镁和较低温外，这里主要描述两个类型间的某些不同。

NC - 2 类（第 4 章）包含那些发育在溢流玄武岩岩浆作用通道中的矿床。根据该类矿床的构造背景可进一步细分为：①与陆内断裂或 3 条断裂交汇处有关的矿床（如诺里尔斯克、德卢斯、马斯考克斯）；②与大陆边缘裂谷有关的矿床（银斯洼）；③与那些已发育为大洋环境的溢流玄武岩有关的

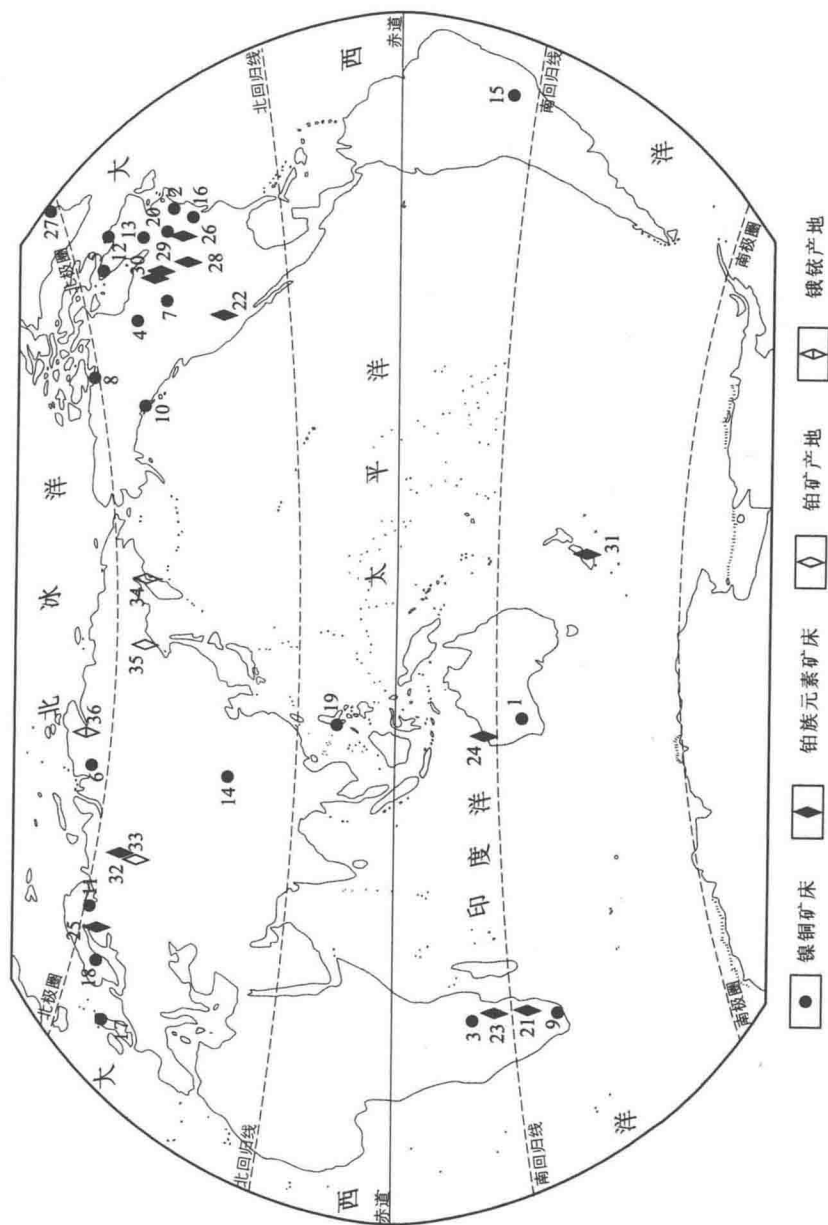


图1.2 世界最著名的岩浆硫化物镍铜及铂族元素矿床的地质分布略图 (矿床数字与表1-2和表1-3相对应)

矿床（兰格尔）。最重要的矿床属于第一亚类。

NC-3 类包含与相对特殊的铁质橄辉岩岩浆组合有联系的矿床，此类矿床仅有科拉半岛贝辰加矿区的一个重要矿床，其构造背景不太确定，但很可能是大陆边缘裂谷环境。

NC-4 类包括像加拿大拉布拉多的奈恩火成杂岩那样的与斜长岩-花岗岩-橄长岩杂岩体相关的矿床。许多年来对这种组合没有把它作为重要的岩浆硫化物矿床来考虑，但是 1995 年沃尔斯贝矿床的发现（第 6 章）改变了先前这一认识。尽管在潘兹湖无经济意义的矿化（沃尔斯贝矿床南部约 80 km，同样也具有与奈恩火成岩套一样的组合），且也构成该组合内硫化物矿化发育的例子，但沃尔斯贝至今还是该组合唯一有经济价值的矿床。正如第 10 章所讨论的，沃尔斯贝矿床显示出一种与初始组合密切相关的断裂作用环境。

NC-5 类包括成分从苦橄质到拉斑质岩浆伴生的一种混杂矿床。它们的构造背景也是千变万化。蒙卡尔姆矿床产于太古代的绿岩带内，但构造背景至今尚未确定。第 7 章所描述的金川矿床，是解释为一种与大陆边缘裂谷的断层密切联系的矿床（第 10 章）。尼雀兰德矿床是产于镁铁（超镁铁）侵入岩系列中的一种矿床，该系列的镁铁（超镁铁）侵入体主带产出在巴西中部。该侵入体产出在混合的碎屑岩-泥质岩沉积岩序与火山岩层之间，并且认为是在新元古代大陆碰撞过程中侵入到中元古代大陆断裂的变质体。美因河北部的摩克斯岩体、苏格兰东北部的加里东侵入体和挪威纳尔维克附近的罗纳岩体都处于挤压的造山环境。产于赞姆贝斯蛇绿岩的菲律宾埃珂镍硫化物矿床是唯一已知产于蛇绿杂岩中的实例。萨德伯里（NC-6）是独一无二的（第 8 章），且代表了一种类型，其矿化是由于陨石撞击所产生的岩浆熔融发育而成（见 2003 年 Naldrett 的近来总结）。

现在考虑贫硫化物富 PGE 类型的矿床，也像前述有关 Cu-Ni 矿床那样，该类型矿床的最初划分是根据岩石构造背景（表 1.3）。这类矿床将在第 9 章详细叙述，根据矿体形态和主要矿物组合，主要包括是否层状的？是否为层面或是不整合？PGE 是否与硫化物、铬铁矿或者磁铁矿展现有关等对此类矿床进一步细分。正如第 9 章所讨论的，很明显，世界上最大的 PGE 矿床产于一种以具有高含量的早期岩浆，这类岩浆又具有明显的贫三氧化二铝，富铬和二氧化硅（U 型）特征，含有更多的拉斑玄武岩成分的岩体中。许多 PGE 富集作用出现在由痕量元素指示这两种类型岩浆混合且有明显变化的侵入体的一定层位中，该组合称为 PGE-1 类（图 1.3）。

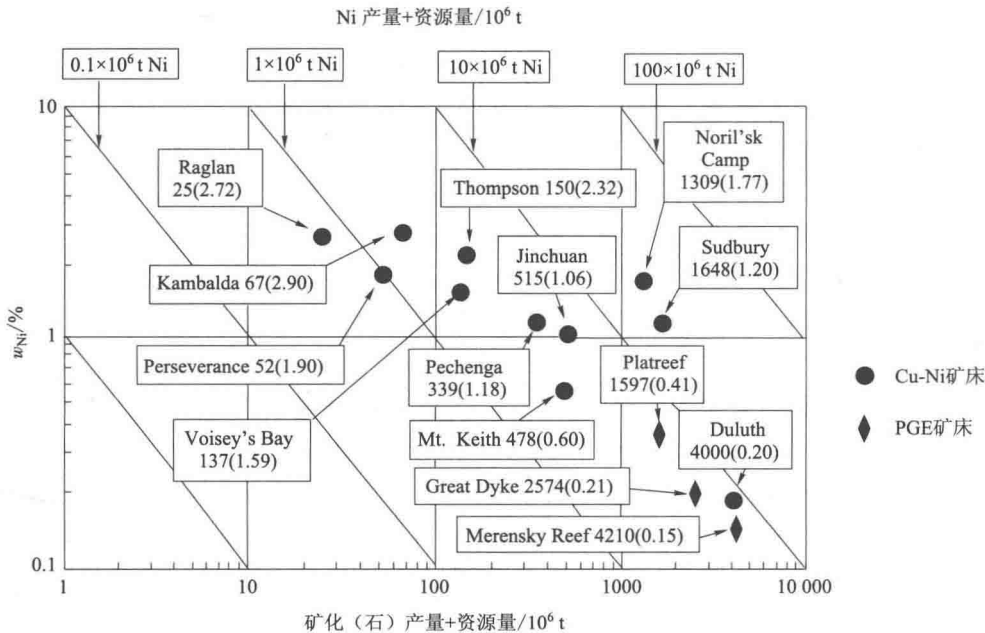


图 1.3 世界主要 Ni 和 PGE 硫化物矿床的 Ni 品位与 Ni 矿化（石）的产量 + 资源量对比图（数据见表 1.1）

表 1.3 PGE 矿床分类

类型	相关岩浆	典型矿床及时代	岩浆作用的大地构造背景
PGE - 1	U 型高比例岩浆， 较少量拉斑玄武岩	Bushveld (古元古代)	克拉通
		Stillwater (太古代)	(不确定)
		Great Dyke (太古代)	克拉通裂谷
PGE - 2	U 型岩浆和拉斑 玄武岩	Munni (太古代)	克拉通
		Penikat (古元古代)	大陆边缘裂谷
		Portimo (古元古代)	
PGE - 3	拉斑玄武岩	East Bull Lake (古元古代)	
		River Valley (古元古代)	
		Skaergaard (显生宙)	
		Cap Edvard Holm (显生宙)	
		Sonju Lake (新元古代)	裂谷
PGE - 4	钙 - 碱镁铁质	Coldwell (新元古代)	造山带
		Lac des ILES (太古代)	
			(不确定)
PGE - 5	亲碱性镁铁 - 超镁铁质	Longwoods (显生宙)	造山带
		Volkovsky (显生宙)	
		Nizhny Tagil and others of Urals Platinum Belt (显生宙)	
PGE - 5	亲碱性镁铁 - 超镁铁质	Koryakia Region (显生宙)	克拉通
		Kondyor (显生宙)	
PGE - 6	碱性镁铁 - 超镁铁质	Guli (显生宙)	裂谷

同样由 U 型岩浆和拉斑玄武岩岩浆证据显示的侵入体中的矿床，作为以拉斑玄武岩岩浆为主的该类矿床归为 PGE - 2 类。这些矿床包括芬兰和西澳大利亚的矿床。

PGE - 3 类矿床包括那些没有早期 U 型岩浆标志，但这种岩浆明显是拉斑质的，实例包括萨德伯里的东部和西部的公牛湖和河谷各个岩体、德卢斯杂岩体和内含有 Sonju 侵入体和冷泉岩体的超湖地区的 Keweenawan 岩体、东部格陵兰岛的 Kap Edvard Holm 和 Skaergaard 岩体，以及加拿大的 Lac des Hes 矿床。

钙碱性岩浆作用 (PGE - 4 类) 虽然证实无经济意义，但它是已知主要的 PGE 富集体。例如俄罗斯乌拉尔山铂矿带中的岩体，如在 Volkovsky 矿床和 Baron 远景区，PGE 富集在富钛磁铁矿、磷灰石和铜硫化物的层内 (详见第 9 章)。新西兰的 Longwoods 侵入杂岩体明显是钙碱性的，并构成新西兰南岛南部边缘向南倾伏的火山增生地体的一部分。源于侵入体的 PGE 砂矿，但是最初的 PGE 矿化来源至今还不清楚。

PGE - 5 类是一种与超镁铁侵入体有关的特殊类型矿床，通常称为乌拉尔 - 阿拉斯加型。虽然这类矿床与相关岩浆的性状尚无明确的解释，但最初的熔融体确是一种碱性的。这些岩体是世界上最重要的铂来源，包含有：Soleviev Hills, Urals; Kondyor massif, Eastern Siberia; 和 Seynav-Galmoznavmassif, Koryakia, Russia. 属乌拉尔铂矿带的 Nizhniy Tagil 地块与重结晶的纯橄榄岩内重新熔化形成的铬铁矿脉，以及和分异体有关的 Bedrock 铂矿 (这些地方的某些矿山已被开采)。Van Treeck 和 Newberry (已出版) 报道过阿拉斯加南东 Union bay 侵入体中与磁铁矿有关的热液型铂矿。

PGE - 6 类是一种成分明显呈碱性的含碳酸盐岩的镁铁质 - 超镁铁质侵入体有关的 PGE 矿化。其实例为西伯利亚地台北部早三叠世的 Guli 侵入体，该岩体是钼 - 铌砂矿的来源地。这些砂矿虽然没