

中国和东南亚

红土型镍矿地质与勘查

● 郭远生 罗玉福 等著



地质出版社

中国和东南亚红土型镍矿 地质与勘查

郭远生 罗玉福 等著

地质出版社

· 北 京 ·

内容简介

本书主要根据云南省有色地质局近年来在印度尼西亚、缅甸和菲律宾开展红土型镍矿找矿勘查工作中取得的大量一手地质资料,较系统地介绍了中国云南和东南亚地区的10个典型红土型镍矿床的地质特征,并用较大篇幅系统地总结了云南省有色地质局近年来在境外找矿实践中逐步探索出来的经济有效的红土型镍矿快速找矿勘查评价方法。本书在较系统地收集世界红土型镍矿地质资料和研究成果的基础上,从区域成矿构造背景、区域空间分布特征、成矿母岩年龄和成矿时代、成矿气候、成矿母岩、风化壳特征、矿床类型及品位、镍的赋存状态、伴生矿产及有益有害元素含量共9个方面,对中国、东南亚及世界其他地区红土型镍矿进行了较系统的对比研究,把世界红土型镍矿床细分为6种类型,并简要地分析了气候、大地构造环境、构造隆升形式、地形地貌、排水条件、超镁铁质成矿母岩的具体岩性及其蛇纹石化程度等因素对红土型镍矿床类型的影响和控制。此外,本书还对世界红土型镍矿的成矿条件和找矿标志进行了较系统的总结,对成矿规律和矿床成因进行了研究和总结,并就成矿母岩、地质构造、风化壳成熟度与镍矿化强度之间的关系进行了探讨。最后,介绍了红土型镍矿的开发利用技术现状,并对红土型镍矿的市场前景进行了预测。

本书是集红土型镍矿地质与红土型镍矿找矿勘查于一体的综合性专著,既是了解中国和东南亚红土型镍矿地质及世界其他地区红土型镍矿地质概况的重要文献,也是指导境外红土型镍矿找矿勘查与开发的一本实用工具书。本书可供地勘部门矿山企业及地质类高等院校从事相关工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国和东南亚红土型镍矿地质与勘查/郭远生等著.

—北京:地质出版社,2013.11

ISBN 978-7-116-08629-6

I. ①中… II. ①郭… III. ①红土型矿床-镍矿床-地质构造-中国、东南亚 ②红土型矿床-镍矿床-地质勘探-中国、东南亚 IV. ①P618.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第275351号

责任编辑:祁向雷 宫月萱

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)82324508(邮购部);82324571(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:19 图版:18面

字 数:490千字

版 次:2013年11月北京第1版

印 次:2013年11月北京第1次印刷

定 价:98.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08629-6

(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)

《中国和东南亚红土型镍矿地质与勘查》 编写委员会

主任 郭远生 罗玉福
副主任 崔银亮 陈百友 谭木昌

各章主要撰写人员：

前言 罗玉福
第一章 杨学善
第二章 陈百友 罗荣生 豆松 张道红 李志群
 孙绍有 何灿 盖春宽
第三章 崔银亮 徐金祥 陈百友
第四章 何灿 郭远生 谭木昌
第五章 张学书 谭木昌
结语 崔银亮

其他参加编写人员：

刘宝明 高俊 杨应平 李国清 罗太旭 李彦春 吕建中
杨永刚 孙媛 朱淑桢 彭万坤 孙世坤 邵宗良 刘传高
秦金虎 杜再飞 毕海龙 黄振华 王忠 汤集刚 李晶福
秦俊学 李锡 肖述刚 杨宁 陈仪 郎学君 罗国红
范良军 杨彦武 韦堃 何沁璇 何敏芳 杨艳 张义琳
肖川子 刘文佳 姜永果

序

红土型镍矿床是世界上资源总量最大的镍矿类型。东南亚是世界上红土型镍矿最丰富的地区之一。近年来,随着镍需求量和价格的增长、全球可开采的硫化镍矿床越来越少和红土型镍矿床冶炼技术的不断进步,勘查和开发资源丰富的红土型镍矿床已是成为热点。云南省有色地质局大力实施“走出去”战略,先后在缅甸、印度尼西亚和菲律宾开展了红土型镍矿找矿勘查工作,累计探获镍金属资源量 760 多万吨,发现超大型矿床 1 个、大型矿床 3 个、中型矿床 3 个,取得了一系列重大找矿成果和显著的经济效益,积累了丰富的找矿经验和勘查技术。

该书在较全面收集、综合研究中国和东南亚及世界其他地区红土型镍矿床地质资料的基础上,主要依据该局近年来在东南亚镍矿找矿取得的大量第一手地质资料和研究成果编写而成。本书首次较系统地介绍了 10 个典型红土型镍矿床的地质特征及快速评价方法。率先通过全球红土型镍矿床的对比研究,揭示了其在区域成矿背景、风化壳特征、矿床特征、矿床类型、成矿时代等方面的相似性和差异性。对世界红土型镍矿床进行了创新性的详细分类,侧重研究了红土型镍矿床的成矿条件、成矿规律、矿床成因、开发利用与市场预测,总结了找矿标志。

该书的主要特色是理论研究和找矿实践相结合、成矿理论研究和找矿预测方法相结合、国内矿床实例与国外矿床实例相结合,内容丰富,资料翔实,具有较强的综合性、实用性、创新性和指导性。

该书反映了云南省有色地质局近年来在境外红土型镍矿找矿勘查方面取得的丰硕找矿成果和获得的宝贵地质资料,而且在一定程度上反映了世界红土型镍矿成矿理论和快速有效勘查技术的最新成果,它填补了国内同类勘查和研究的空白,既是了解中国和东南亚及世界其他地区红土型镍矿地质的重要文献,也是指导红土型镍矿找矿勘查的一本实用工具书。

该书的出版对我国地勘单位和矿业企业在境内外进行红土型镍矿找矿勘查和矿业开发具有较强的指导意义,对地矿工作者研究红土型镍矿床具有积极的推动作用。

裴荣富
二〇一三年十一月

前 言

镍是制造不锈钢、合金钢、电镀钢、电池等的重要工业原料，广泛应用于民用工业和军工制造业中。我国镍矿已利用矿区所占储量占全国总储量的95.3%。2010年，我国镍消费量达到 $54 \times 10^4 \text{t}$ ，约占全球镍消费量的36.5%；而同年我国矿山镍产量仅 $7.7 \times 10^4 \text{t}$ ，仅占我国镍消费量的14.26%。随着我国城镇化和工业化的快速发展，我国镍供应缺口将进一步扩大。

近年来，云南省有色地质局大力实施“走出去”战略，选择国家紧缺矿产资源和国外优势矿产资源，与国内外一些知名企业和公司合作，先后在缅甸、老挝、柬埔寨、印度尼西亚、菲律宾、刚果等国开展镍、钴、铜、金、铁、铝土矿等风险找矿勘查与矿业开发工作，取得了可喜的找矿勘查成果和经济效益，其中东南亚（尤其是印度尼西亚和缅甸）镍矿风险找矿勘查与矿业开发工作成果尤其突出，成效显著。自2005年以来，云南省有色地质局先后与中国有色矿业建设集团公司、印度尼西亚富域（伟丰）公司、浙江华光冶炼集团有限公司、香港金宝矿业有限公司、陕西奥威矿业科技公司、云南红河恒昊矿业公司、辽宁罕玉集团有限公司等合资或合作，先后开展了缅甸曼德勒省达贡山红土型镍矿勘探、缅甸曼德勒省达贡山红土型镍矿综合工程勘察、缅甸钦邦莫苇塘红土型镍矿勘查、印度尼西亚伊里安查亚省拉姆拉姆镍矿勘查、菲律宾卡拉曼宿红土型镍矿勘查、印度尼西亚北马露姑省苏巴印红土型镍矿勘查与开发、印度尼西亚北马露姑省马布里镍矿勘查与开发、印度尼西亚东南苏拉威西省北科纳威镍矿勘查与开发、印度尼西亚中苏拉威西省冷博镍矿勘查、印度尼西亚北马露姑省葛贝岛镍矿普查共10个勘查项目，其中前5个项目为劳务型合作项目，后5个项目为合资合作的权益型项目，其中冷博和葛贝岛项目只进行了普查阶段的勘查工作，由于某些客观原因，未进行详查地质工作。累计完成的主要实物工作量为：1:25000地质测量 40.33km^2 ；1:10000地质测量 164.3km^2 ；1:2000地质测量 50.5km^2 ；1:10000地形测量 30km^2 ；1:2000地形测量 66.93km^2 ；1:1000地形测量 4.312km^2 ；钻探总进尺79066.95m；浅井总进尺13788m；基本分析样采集、加工、化验56063件。累

计探获镍金属资源储量 $760 \times 10^4 \text{t}$ ，镍平均品位 1.46%，铁矿石资源量 $1 \times 10^8 \text{t}$ ，伴生钴金属资源量 $32 \times 10^4 \text{t}$ ；预测镍金属远景资源量 $400 \times 10^4 \text{t}$ 。

鉴于云南省有色地质局在实施地质“走出去”战略中，相继在缅甸、印度尼西亚等国镍矿勘查中获得了重大突破，为了总结找矿方法和勘查经验，开展学术交流，云南省有色地质局决定编写《中国和东南亚红土型镍矿地质与勘查》专著。

该专著基于前人和云南省有色地质局丰富的找矿实践原始资料编写而成，侧重国内外红土型镍矿床地质特征和找矿方法研究，主要由前言、第一章概论、第二章典型红土型镍矿床、第三章红土型镍矿成矿条件和成矿规律、第四章红土型镍矿的找矿勘查与评价方法、第五章红土型镍矿开发利用技术简介与市场预测、结语共 7 个部分组成。

参编人员由云南省有色地质局对外合作处、地质矿产处、总工程师办公室和 308 队相关人员组成。具体分工是：前言由罗玉福编写；结语由崔银亮编写；第一章由杨学善编写；第二章第一节由罗荣生和豆松编写，第二节由张道红和李志群编写，第三节由孙绍有、何灿编写，第四节由盖春宽编写，第五节由陈百友编写；第三章第一节和第二节由徐金祥和陈百友编写，第三节和第四节由崔银亮编写；第四章由何灿、郭远生、谭木昌编写；第五章由张学书、谭木昌编写。全书由陈百友编纂、初审，最终由编委会领导小组审定。

本书是云南省有色地质局一线地质工作者地质找矿实践的智慧结晶，其特色是理论和实践相结合、生产和研究相结合、国内实例和国外实例相结合。编写本书的意义在于海外勘查不但出找矿成果，还要出理论成果和方法成果。本书的出版既对现实找矿勘查工作具有指导意义，又填补了国内同类勘查和研究的空白。总之，该书是云南省第一，全国首部具有前瞻性、理论性和指导性的科技专著。

目 录

序

前言

第一章 概论	(1)
第一节 镍的性质和用途	(1)
一、镍的基本性质	(1)
二、镍的主要化合物及其性质	(1)
三、镍的地球化学特性	(2)
四、镍的用途	(4)
第二节 红土型镍矿的概念和基本地质特征	(4)
一、红土型镍矿的概念	(5)
二、红土型镍矿的基本地质特征	(5)
三、红土型镍矿产出的地质构造背景	(11)
第三节 红土型镍矿的分类	(11)
一、矿石分类	(11)
二、矿床分类	(12)
第四节 世界红土型镍矿的资源概况及勘查、开发利用现状	(13)
一、世界红土型镍矿的资源概况	(13)
二、世界红土型镍矿的勘查、开发利用现状	(16)
第二章 典型红土型镍矿床	(21)
第一节 中国红土型镍矿床	(21)
一、云南省元江镍矿床	(21)
二、云南省潞西市邦滇寨镍矿床	(35)
第二节 缅甸红土型镍矿床	(47)
一、达贡山镍矿床	(47)
二、莫苇塘镍矿床	(64)
第三节 印度尼西亚红土型镍矿床	(77)
一、马布里镍矿床	(79)
二、苏巴印镍矿床	(89)
三、北科纳威镍矿床	(101)

第四节	菲律宾红土型镍矿床	(141)
一、	苏里高 (Surigao) 镍矿床	(142)
二、	诺诺克 (Nonoa) 镍矿床	(147)
三、	里奥图巴 (Rio Tuba) 镍矿床	(151)
第五节	中国、东南亚及世界其他地区红土型镍矿对比	(154)
一、	区域成矿构造背景及相关特征对比	(154)
二、	区域空间分布特征对比	(160)
三、	成矿母岩年龄和成矿时代对比	(162)
四、	成矿气候及相关特征对比	(165)
五、	成矿母岩对比	(170)
六、	风化壳特征对比	(171)
七、	矿床类型及品位对比	(181)
八、	镍的赋存状态对比	(188)
九、	伴生矿产及有益有害元素含量对比	(190)
十、	小结	(191)
第三章	红土型镍矿的成矿条件及成矿规律	(194)
第一节	红土型镍矿的成矿条件	(194)
一、	原岩成分	(194)
二、	气候	(195)
三、	地形地貌	(196)
四、	水文地质	(197)
五、	地质构造	(199)
六、	时间	(200)
第二节	红土型镍矿床的成矿规律	(201)
一、	时间分布规律	(201)
二、	空间分布规律	(202)
三、	镍矿化强度与若干成矿要素之间的联系	(207)
四、	红土型镍矿的矿床类型与若干成矿要素之间的联系	(211)
第三节	矿床成因	(213)
一、	红土型镍矿的成矿环境	(213)
二、	成矿机理讨论	(214)
三、	成矿阶段划分	(216)
第四节	找矿标志	(217)
一、	大地构造背景标志	(217)
二、	风化壳标志	(217)
三、	岩性标志	(218)
四、	地形地貌标志	(218)
五、	地球物理标志	(218)
六、	地球化学标志	(218)

七、遥感标志	(219)
第四章 红土型镍矿的找矿勘查评价方法	(220)
第一节 红土型镍矿找矿勘查程序	(220)
一、境外红土型镍矿找矿勘查的风险及难点	(220)
二、红土型镍矿的“三段五步法”找矿勘查程序	(220)
三、“三段五步法”程序中各专业工作部署	(223)
第二节 红土型镍矿的地质找矿方法	(224)
一、红土型镍矿的主要找矿方法	(224)
二、红土型镍矿的快速找矿方法	(224)
三、新技术、新方法在红土型镍矿找矿与勘查中的应用	(226)
第三节 红土型镍矿勘查评价	(234)
一、勘查技术手段与勘查评价方案	(234)
二、勘查工程布置与应用	(236)
三、勘查施工方法与技术	(236)
第四节 红土型镍矿资源量估算方法	(237)
一、矿床工业指标确定	(237)
二、矿体圈定	(240)
三、资源量估算方法的选择	(242)
四、矿体主要参数的确定	(245)
五、利用 MICROMINE 软件估算资源量的基本过程	(246)
六、利用计算机辅助、采用传统方法估算的基本过程	(255)
七、资源量估算结果的对比与评价	(256)
第五章 红土型镍矿开发利用技术概况与市场预测	(258)
第一节 红土型镍矿开发利用技术及其应用概况	(258)
一、红土型镍矿开发利用技术概况	(258)
二、不同类型、不同层位红土型镍矿石的适宜处理工艺	(259)
三、红土型镍矿主要处理技术的应用概况	(260)
四、红土型镍矿开发利用技术的发展方向	(270)
第二节 红土型镍矿市场预测	(271)
一、镍的用途及以往世界镍消费水平	(271)
二、世界镍资源现状及以往世界矿山镍产量与构成	(272)
三、红土型镍矿市场预测	(274)
结语	(281)
参考文献	(283)
图版 I 东南亚红土型镍矿区的地形地貌图	(293)
图版 II 印度尼西亚和菲律宾红土型镍矿采矿场景	(295)
图版 III 东南亚镍红土风化壳、红土型镍矿石及有关岩石野外照片	(297)
图版 IV 东南亚红土型镍矿石及有关岩石的显微结构和构造照片	(306)

第一章 概 论

镍是一种与钢铁工业紧密相关的有色金属，并在国防工业上有着广泛用途，是一种不可或缺的战略资源，具有重要的经济地位。

第一节 镍的性质和用途

一、镍的基本性质

镍位于元素周期表第四周期第八副族中，它是铁系元素组的最后一个元素，其在元素周期表中的位置决定了镍及其化合物的一系列物理化学特性。一方面，镍的许多物理化学性质与钴、铁相似；另一方面，由于镍在元素周期表中又与铜毗邻，因此在亲氧和亲硫方面又接近于铜。

1) 镍的化学性质：镍的元素符号为 Ni，原子序数为 28，原子量为 58.69；镍属不活泼金属，具有很高的化学稳定性；镍的抗蚀性能强，硫酸、盐酸、有机酸和碱性溶液对镍的侵蚀极慢，只有稀硝酸是镍的强侵蚀剂，强硝酸能使镍表面钝化而具抗蚀性；在空气或氧气中，镍表面能形成防止其继续氧化的 NiO 薄层（邱竹贤，2004；吴良士等，2007）。

2) 镍的物理性质：镍是一种银白色的金属；它的熔点为 $(1453 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、沸点约为 2732°C 、相对密度为 $8.9 \sim 8.908(20^\circ\text{C})$ 、莫氏硬度为 5、延伸率为 $25\% \sim 45\%$ 、比热容为 $420 \sim 620\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ； $99.8\% \sim 99.99\%$ 纯度的镍在 20°C 时的电阻率变动于 $6.8 \sim 9.9\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ($10 \sim 8\Omega \cdot \text{cm}$) 之间；镍具有不挥发、延展性好、韧性强、可以拉成细丝、锻造和轧制成各种机械的特点；它是元素周期表中仅有的 3 个磁性金属之一，但加热至 365°C 时便失去磁性（邱竹贤，2004）。

二、镍的主要化合物及其性质

镍的化合物主要有 4 类，即镍的氧化物、镍的硫化物、镍的砷化物和羰基镍（彭容秋，2005）。

1) 镍的氧化物：镍与氧可生成 3 种化合物，即氧化亚镍（NiO）、四氧化三镍（ Ni_3O_4 ）和三氧化二镍（ Ni_2O_3 ）；三氧化二镍仅在低温时稳定，加热至 $400 \sim 450^\circ\text{C}$ 时即转换为四氧化三镍，进一步提高温度后变成氧化亚镍。因此，在高温下只有氧化亚镍稳定。

2) 镍的硫化物：镍与硫可生成 4 种化合物，即 NiS_2 、 Ni_6S_5 、 Ni_3S_2 和 NiS；在高温下，只有低硫化镍 Ni_3S_2 是稳定的。

3) 镍的砷化物：镍与砷可生成两种化合物，即砷化镍（NiAs）和二砷化三镍（ Ni_3As_2 ）；砷化镍在自然界为红砷镍矿，它氧化可生成挥发性的 As_2O_3 和不挥发性 $\text{NiO} \cdot \text{As}_2\text{O}_3$ 。所以，要更完全脱硫，必须反复进行氧化和还原焙烧。

4) 羰基镍：冶金上最有意义的是 Ni 与 CO 生成的羰基镍，即 $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ；它是挥发

性化合物；其沸点为 43℃，在 180~200℃时，又逆向分解为金属镍，这是羰基法提镍的理论基础。

三、镍的地球化学特性

1. 镍的丰度

镍在地球中的平均含量（丰度）为 16000×10^{-6} 。镍在地球各个圈层中的平均含量分别为：地壳 89×10^{-6} 、上地幔 1500×10^{-6} 、下地幔 2000×10^{-6} 、地核 48000×10^{-6} 。由此可见，镍的含量由地壳向地核迅速增加，地核中镍的含量为地壳中的 500 多倍。

地壳中镍的含量分布也是不均匀的，由大陆地壳（ 61×10^{-6} ）向大洋地壳（ 140×10^{-6} ）增高（刘英俊等，1984）。

镍在各类岩浆岩中的平均含量变化很大，其中超基性岩的平均含量是酸性岩的 250 倍，与地幔岩大体相当（表 1-1）。因此，通常把镍看作地幔岩的特征性元素。此外，世界不同地区超基性岩中镍的平均含量变化也比较大（表 1-1），这在很大程度上反映了地幔岩元素分布的不均匀性，正是这个原因造成了世界镍矿床分布的区域性（刘英俊等，1984）。

表 1-1 各类岩浆岩中镍的平均含量

单位： 10^{-6}

地 区	超基性岩	基性岩	中性岩	酸性岩	正长岩
德 国	3600	160	40	25	2~4
苏 格 兰	650	230	80	20	—
芬 兰	790	47	—	2~8	8
格 陵 兰	1000	150	20	—	—
美 国	—	160	15	10	6
世界平均值	2000	160	55	8	4

注：世界平均值据维诺格拉多夫（1962）；其他数据据刘英俊等（1984）。

镍在海水中（盐度 35‰）的含量为 6.6×10^{-6} （K. H. 魏德波尔，1969）。天然水中的镍含量更低，一般为 0.2×10^{-9} 。一般而言，沉积岩的镍含量也是很低的，如碳酸盐岩的平均含量为 20×10^{-6} ，砂岩 2×10^{-6} ，深海沉积物 30×10^{-6} （维诺格拉多夫，1962）。但在含有硫化物的炭质页岩和黏土中，镍的含量大大增加，如我国华南下寒武统黑色页岩系的黑色条纹状泥质硅质岩中含镍 230×10^{-6} （范德廉，1973），比现代浅海黏土沉积物还高。另据 K. B. 克劳斯科夫（1955）和 D. F. 达维德桑（1961），黑色页岩中镍的含量分别是 $(20 \sim 300) \times 10^{-6}$ 和 $(50 \sim 540) \times 10^{-6}$ （刘英俊等，1984）。

镍在土壤中的丰度为 40×10^{-6} ，变化范围一般为 $(10 \sim 1000) \times 10^{-6}$ 。镍在土壤中的含量与原岩的镍含量有关，例如花岗岩上部的土壤只含有痕量镍，而蛇纹岩上部的土壤含镍可达 0.5% 以上（刘英俊等，1984）。

2. 内生作用中镍的地球化学

镍的电子构型是 $3d^8 4s^2$ ，最外层两个电子很容易失去，故自然界中多形成 2^+ 价离子。由于镍 3d 电子层有 8 个电子，接近于它的最大电子容量（10 个电子），3d 电子很难失

去, 因此 3^+ 价镍离子很少出现。镍具有亲铁、亲硫双重性, 但以亲硫性较强 (刘英俊等, 1984)。

Ni^{2+} 的地球化学参数和 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 十分相近, 因此它们彼此之间可以发生类质同象置换。镍在造岩矿物中主要和 Fe、Mg 进行等价类质同象置换进入铁镁硅酸盐矿物中。铁镁硅酸盐中又以正硅酸盐橄榄石中含镍最高, 辉石中镍的含量则明显降低。在岩浆结晶过程中, 按照鲍温反应序列由早到晚镍的含量按橄榄石 (0.4%) —斜方辉石 (0.04% ~ 0.09%) —单斜辉石 (0.02% ~ 0.05%) —角闪石 (0.01% ±) —黑云母 (0.015% ±) —斜长石 (0.001% ±) 顺序降低, 即镍明显具有在早期阶段形成的橄榄石中富集的倾向 (刘英俊等, 1984)。

由于 Ni 具有很强的亲硫性, Ni 只有在介质中硫砷等离子极缺乏时才进入硅酸盐矿物的晶格中。因此, 岩浆阶段镍要富集成矿, 在其含量一定的前提下, 硫 (砷) 的逸度起着支配作用。如果岩浆熔融体中硫的逸度较高, 超过硫化物的溶度积时, 含镍的硫化物熔融体 (或晶体) 就可以在硅酸盐矿物结晶之前分离出来, 避免镍随硅酸盐矿物晶出而分散, 从而形成铜—镍硫化矿床 (刘英俊等, 1984)。

随着岩浆结晶分异作用向后演化, 岩浆温度、硫化物的溶解度及 Mg、Fe 含量降低, 硫的活度和 Ca、Al、Si、Na、K 含量增高, 可以导致硫化物晚期熔离作用的发生 (刘英俊等, 1984)。

在热液作用阶段, 饱含挥发分的残余热液黏度小、流动性大, 容易向岩体边部或近矿围岩渗透或充填, 使岩体或围岩发生蚀变作用。常见的蚀变作用有蛇纹石化、滑石化、次闪石化、绿 (黝) 帘石化、绿泥石化和碳酸盐化。这些蚀变作用可以把镍从铁镁硅酸盐矿物的晶格中萃取出来形成含矿溶液。含矿热液在压力梯度的作用下向岩体边部或捕虏体等软弱部位运移, 或沿着早期形成的矿物颗粒间隙或围岩裂隙以及矿物解理充填交代, 形成细网脉状和小透镜体状镍矿体。当含矿热液迁移到化学性质活泼的大理岩夹层、捕虏体以及近矿大理岩围岩时, 可产生接触交代作用, 形成规模不大、形状极为复杂的矽卡岩型含镍多金属矿体, 以黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、紫硫镍矿为矿物组合特征。随着温度的降低 (中、低温阶段), S、As、Ni 进一步聚集, 形成针镍矿、辉砷镍矿、紫硫镍矿等镍的独立矿物, 还伴生典型热液作用的亲硫元素 (Se、Te、Au、Ag、Pt 族) 等 (刘英俊等, 1984)。

由此可见, 内生作用中镍的主要富集阶段是早期和晚期的岩浆熔离作用, 而热液作用仅仅使镍再次富集, 进一步提高矿床的工业价值 (刘英俊等, 1984)。

3. 表生作用中镍的地球化学

镍的硫化矿体在表生带随着 E_h 值的增大经历了如下的地球化学过程: 在深部 (E_h 值低) 发生镍黄铁矿和磁黄铁矿的紫硫镍矿化, 释放出来的 Fe^{2+} 离子主要以菱铁矿的形式沉淀下来; 当 E_h 值较高时, 残余的磁黄铁矿氧化形成黄铁矿和白铁矿; 在地下水面以下较还原的环境中, 上述硫化物 (包括表生紫硫镍矿和黄铁矿组合) 都是稳定的; 而在地下水面以上 E_h 值更高的条件下, 所有的硫化物都分解形成铁的氧化物和含水氧化物沉淀, 淋滤出来的镍离子渗透到地下水面以下, 交代紫硫镍矿中的铁, 或者形成表生针镍矿, 从而提高矿石品位 (刘英俊等, 1984)。

在超基性岩风化壳剖面中, pH 值由上到下变大, 即由弱酸性变为弱碱性; 在氧化带

的顶部 pH 值约为 5，在下部的腐岩带 pH 值可达 8.5；当 pH 值为中等或低时（风化壳的上部），镍载于铁-镍混合物的矿物相中；当 pH 值达中等以上时，镍载于硅酸镍相中。即使在富铁相中，镍亦具有一定的溶解度，特别是在褐铁矿脱水转换为赤铁矿的过程中，镍被大量析出并发生迁移，所以在成熟度很高的红土风化壳剖面顶部的块状褐铁矿中，镍含量通常小于 0.5%。因此，可以认为，随着时间的延续，镍会从氧化带里慢慢地淋滤出来并在腐岩带里再沉淀，形成红土型镍矿，这也是红土型镍矿通常在腐岩带中富集的原因。当含镍风化壳成熟度非常高时，镍主要在腐岩带的下部富集，以新喀里多尼亚最为典型。当含镍风化壳成熟度中等时，镍主要在腐岩带的中、上部富集，如印度尼西亚、菲律宾、缅甸等国红土型镍矿中的镍主要在腐岩带的中、上部富集（Barry Maynard, 1983；陈正等, 1988）。

综上所述：由于镍具有很强的亲硫性，因此在基性、超基性岩浆中，当含硫很丰富时，镍优先与硫结合，与铁、铜、钴等亲硫元素一起形成硫化物熔浆，并从硅酸盐岩浆中分离出来，在一定的条件下形成硫化镍矿床；当岩浆中硫的含量不足时，镍则作为镁的类质同象混入物，进入富镁的硅酸盐矿物中；在后期较酸性的岩浆中，镍往往与砷、钴、硫一起进入热水溶液，生成镍和钴的砷化物和硫化物的脉状矿床；在表生条件下，镍不易氧化，但活动性强，当富含镍的岩石受风化淋滤时，镍可以从中析出，并在一定的层位富集形成红土型镍矿床（J. Barry Maynard, 1983）。

四、镍的用途

由于镍具有良好的机械强度和延展性，难熔耐高温，并具有很高的化学稳定性，在空气中不易氧化等特征，因此在民用工业和军工制造业中具有广泛的用途。概括起来，镍在工业上的用途可分为 6 类（彭容秋, 2005）。

1) 用作金属材料，包括制作不锈钢、合金结构钢、耐酸合金钢、耐热合金钢和 3000 余种合金，其中典型的金属材料有：镍-铬基合金、镍-铬-钴合金、镍-铬-钼合金、铜-镍合金、钛-镍形状记忆合金、储氢合金等。

2) 用于电镀，主要用在钢材及其他金属的基体上，其防腐性能要比镀锌层高 15% ~ 20%。

3) 在石油化工的氢化过程中作为催化剂。

4) 用于制作化学电源的材料，如 Cd - Ni、Fe - Ni、Zn - Ni 电池和 H₂ - Ni 密封电池。

5) 制作颜料和染料。

6) 制作陶瓷和铁素体。

目前，世界镍的消费构成大致为：不锈钢占 65%，其他合金钢占 5%，非铁合金（主要是镍基合金和铜基合金）占 10% ~ 15%，电镀、镍镉电池和翻砂等占 15%。

第二节 红土型镍矿的概念和基本地质特征

红土型镍矿是超基性岩在地壳浅部经风化淋滤作用富集而成的，具有规模大、埋藏浅、综合利用价值高（常伴生或共生铁、钴、铬、锰、钒等）及易于勘探和开采等特点。

一、红土型镍矿的概念

概括地说，红土型镍矿（Nickel Laterites）是指在热带或亚热带气候条件下，超基性岩（纯橄榄岩、橄榄岩、蛇纹岩等）遭受强烈化学风化作用，镍从含镍的硅酸盐矿物（橄榄石、顽火辉石等）中分解出来，随地表水往下渗透，并在风化壳中生成富含镍的次生矿物，使原来呈分散状态的镍得到富集，从而形成的可供工业利用的风化壳型镍矿床。

二、红土型镍矿的基本地质特征

（一）含镍红土风化壳特征

从含镍风化壳顶部向下到基岩，通常可以看到逐步变化并清楚地显示出分带性的现象。典型的、发育完整的含镍红土风化壳，按照其成分和内部结构的不同可分为4个带，自上而下分别为褐铁矿带、黏土带、腐岩带及风化基岩带（图1-1）。各带的基本特征如下：

1) 褐铁矿带（又称赭石带、残余红土带）：一般位于地下水面上，常呈疏松土状，原岩结构（特别是褐铁矿带上部）往往被完全破坏。

褐铁矿带主要由针铁矿、赤铁矿、高岭石等矿物组成，次要矿物有锰氧化物、石英、蒙脱石、三水铝石及少量残存的铬尖晶石、磁铁矿等。该带镍的含量相对较低，一般为0.3%~1.2%，少数达1.6%。工业矿层通常位于褐铁矿带的中下部，有时还包括褐铁矿带的上部。

褐铁矿带可直接暴露于地表，或被冲积层及偶尔出现的褐铁矿残坡积和移积层掩覆。褐铁矿带有的是原地的，如新喀里多尼亚的褐铁矿多数是原地的；有的是经过搬运再堆积的，如古巴莫亚湾的褐铁矿大部分是搬运堆积的。原地褐铁矿带通常又被分为针铁矿段和赤铁矿段，有时被铁质壳所覆盖（Samama, 1987；陈正等, 1988；陈浩琉等, 1993）。

褐铁矿带的发育程度各地不同，差别很大，薄者不过数米，厚者可达二三十米，最厚可达100多米，具体厚度取决于构造发育程度、自然地理条件和近代侵蚀速率（Samama, 1987；陈正等, 1988）。

2) 黏土带（又称绿高岭石带、绿脱石带、绿脱石过渡带）：该带位于上覆的褐铁矿带和下伏的腐岩带之间，其生成部位约相当于地下水面上下附近（陈正等, 1988）。

黏土带主要由绿脱石（绿高岭石）、绿泥石、玉髓、针铁矿等矿物构成，此外，尚含少量针镍矿及残存的尖晶石。黏土带质地非常松软易碎，成分比较均匀，缺乏腐岩带所特有的残余岩核和腐泥土壳层结构，以出现黏土矿物（绿脱石、绿泥石）和次生玉髓等硅质矿物为特征。该带顶部以针铁矿为主，构成铁红土。有些矿床在该带顶部还有富含镍钴的锂硬锰矿堆积。该带一般含镍1%~3%，最高可达10%（Samama, 1987；陈浩琉等, 1993）。

有的矿区在黏土带不发育的部位，往往出现薄的硅质层，直接覆盖在腐岩带之上。这种硅质层由块状碧玉铁质岩组成，或由很细的玉髓蜂窝层和很细的蛋白石脉组成（陈浩琉等, 1993），习惯上被称为“硅质过渡带”，以便与“绿脱石过渡带”相区别。

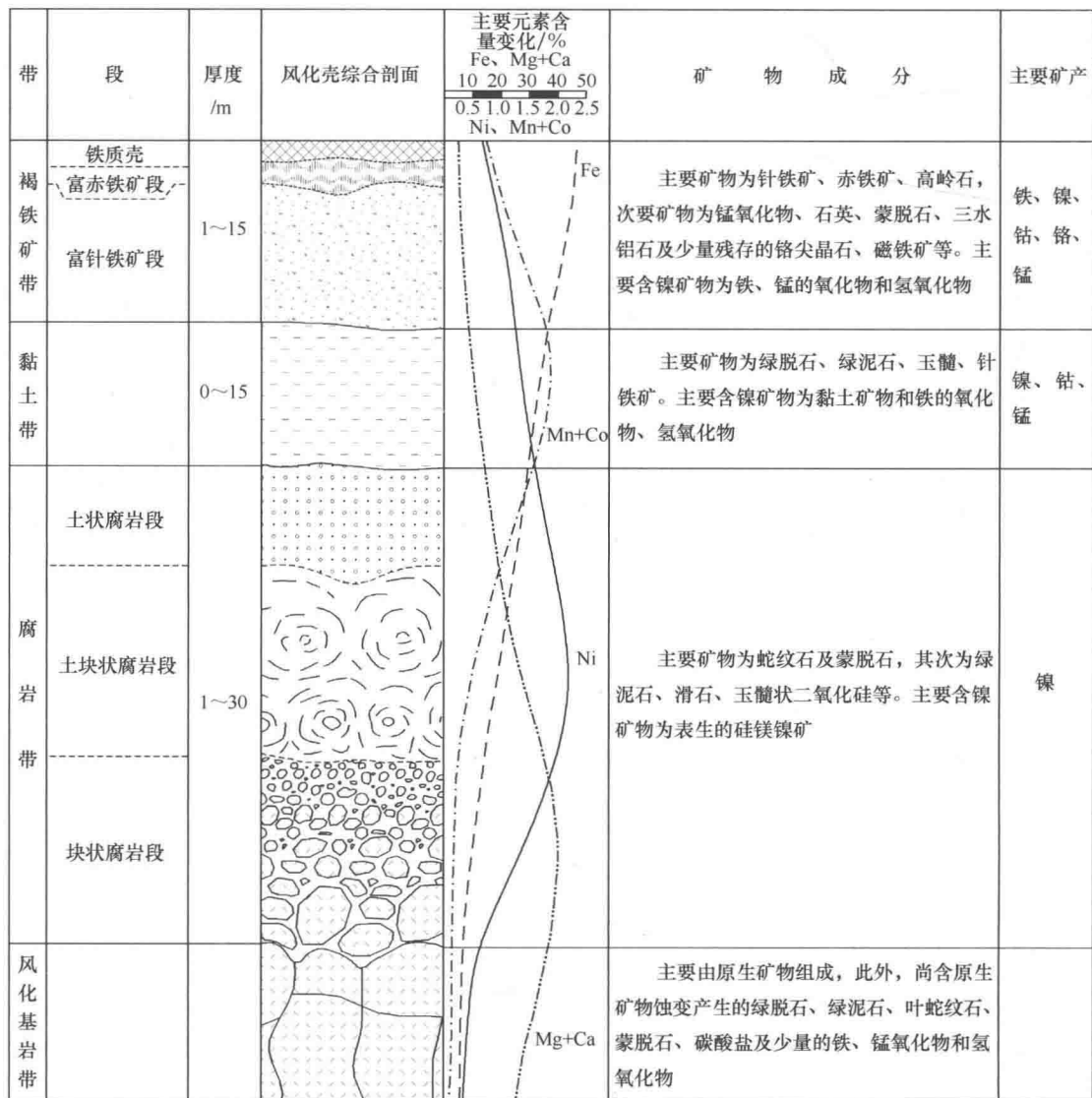


图 1-1 含镍红土风化壳剖面特征综合示意图

典型的黏土带仅局限于热带半干旱气候带或排泄条件较差的地区（如澳大利亚、巴西等地），而在那些气候潮湿、淫（季）风不断的赤道地区，往往难以生成。一般而言，黏土带发育较好的矿区较为少见，故在许多著名的红土型镍矿区中褐铁矿带往往直接覆盖在腐岩带之上（陈正等，1988）。

黏土带的厚度变化较大，一般在 0~15m 之间（J. C. Samama, 1987）。

3) 腐岩带（又称腐泥土带、淋滤蛇纹石带）：腐岩带的主要矿物成分是蛇纹石及蒙脱石，其次为绿泥石、滑石及玉髓状二氧化硅或有少量残存的尖晶石、磁铁矿等。主要含镍矿物为表生的蛇纹石、硅镁镍矿。腐岩带的基本特征是原岩（橄榄岩等）在风化过程中化学成分未发生充分改变、体积也没有变化，大多仍保留原岩的结构特征。但是，原岩

中的橄榄石和辉石遭到破坏（常被蒙皂石族矿物、石英或非晶质铁硅氢氧化物呈假象交代），内生的蛇纹石和绿泥石中镁含量降低，镍、铁则显著增高。同时，某些层状结构的硅酸盐也发生无序化。其中的腐泥土一般含镍 1% ~ 3%，最高可达 10%，若有硅镁镍矿充填脉（主要由富镍胶状叶蛇纹石组成）含镍可达 10% ~ 22%。该带为红土型镍矿的主要含矿层位，但未风化的岩核一般不含矿（陈浩疏等，1993）。

该带的矿物成分、化学成分及构造在垂向上变化很大，且往往是逐渐过渡的。根据腐岩构造，腐岩带又可进一步划分成 3 段，即上部的红黄色土状腐岩段、中部的黄绿色土块状腐岩段和下部的浅黄色至浅灰色块状腐岩段（何灿等，2008），但无论是上部还是下部，腐岩带常见未风化或弱风化的原岩残块。一般而言，残块中心通常风化较弱，边部风化相对较强，形成腐泥质外壳，即所谓的腐泥土边缘结构。在腐岩块体之间，常见暗镍蛇纹石、硅质及少量菱镁矿沿裂隙和孔隙充填（陈正等，1988）。

腐岩带的厚度可以是几厘米或 10m 以上，有时直接出露地表（J. C. Samama, 1987）。

4) 风化基岩带：该带直接发育在原生基岩之上，风化作用较弱，多沿岩石的节理和裂隙发育。其矿物成分主要取决于原岩的矿物成分，但沿节理、裂隙常有少量的铁、锰氧化物、氢氧化物及硅镁镍矿充填。该带镍含量较低，一般为 0.3% ~ 0.5%（陈浩疏等，1993）。

总之，含镍红土风化壳剖面总厚度一般为 30 ~ 50m；在不同地区、不同气候条件下，各带的发育程度有很大差异；一般而言，在褐铁矿带特别厚大的地方，腐岩带较薄；在腐岩带发育的地方，黏土带则不甚发育；而黏土带发育的地方，腐岩带则不甚发育。

（二）矿体特征

1. 矿体形态及产状

根据形态和产状，红土型镍矿体可分为 3 种基本类型，即面型矿体、裂隙型矿体和接触喀斯特型矿体。

面型矿体多呈层状、似层状覆盖于超基性岩体之上，一般规模较大，分布面积可达数千平方公里以上，厚度自数米至三四十米。矿石的垂直分带明显，并与含镍红土风化壳的典型分布特征一致。此类矿体的形态、产状和厚度均受地形控制。一般而言：该类矿体顶板起伏与地形起伏变化大致吻合，矿体底板形态受基岩裂隙、节理的影响，常呈锯齿状；在地形相对较为平缓的地段，矿体厚度较大且连续性较好；在坡度较陡的斜坡地段以及冲沟切割较深的地段，矿体较薄，连续性相对较差，局部地段甚至有基岩出露。此类矿体广泛发育于现代的热带、亚热带地区（陈正等，1988；何灿等，2008a），是红土型镍矿最常见、最重要的矿体类型。

裂隙型矿体一般呈楔状，沿构造断裂带自上向下延伸，深度可达 150m 左右。矿石垂直分带中褐铁矿带特别发育，而黏土带则往往缺乏。新喀里多尼亚、俄罗斯等地产有此类矿体（陈正等，1988）。

接触喀斯特型矿体沿超基性岩与钙质围岩接触带发育，多呈似层状、透镜状、不规则状。一般规模中等，延深较大，有的可达 200m 左右。矿石也具垂直分带现象，上部为褐铁矿带，下部为腐岩带，但多与围岩角砾和碎块混杂。俄罗斯、古巴等地产有此类矿体（陈正等，1988）。