

doi: 10.12029/gc20210225002

刘金龙, 李仁民, 周永恒, 王力, 王冠, 姜平, 陈良玺, 董存杰. 2023. 镍矿床分布、成矿背景和开发现状[J]. 中国地质, 50(1): 118–132.

Liu Jinlong, Li Zhumin, Zhou Yongheng, Wang Li, Wang Guan, Jiang Ping, Chen Liangxi, Dong Cunjie. 2023. Distribution, geology and development status of nickel deposits[J]. Geology in China, 50(1): 118–132(in Chinese with English abstract).

镍矿床分布、成矿背景和开发现状

刘金龙¹, 李仁民¹, 周永恒¹, 王力², 王冠³, 姜平⁴, 陈良玺¹, 董存杰¹

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110000; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061; 3. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 4. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:【研究目的】在全球能源转型的背景下, 世界对镍的需求快速增长, 价格持续上升。寻找更多的镍矿资源, 满足经济发展, 是当前地质界的重要任务。【研究方法】本文总结了镍矿成因类型、成矿时代、成矿特征及成矿背景, 梳理全球镍资源储量和矿山产量, 分析镍金属供应现状和消费趋势, 提供了寻找新的镍矿床的背景知识(材料)。【研究结果】全球具有经济意义的镍矿可分为岩浆型和风化壳型, 前者主要分布在加拿大、澳大利亚、俄罗斯、中国等, 后者主要分布在印度尼西亚、新喀里多尼亚、巴西和菲律宾等。【结论】为缓解世界镍资源供求矛盾, 应该做好全球镍资源的配置, 加强镍矿有效供给, 加大勘查力度, 提高资源利用效率, 构建循环利用体系。

关键词: 镍矿; 岩浆型; 风化壳型; 成矿背景; 开发现状; 矿产勘查工程

创新点: (1) 总结了全球镍矿成因类型、成矿时代、成矿特征及成矿背景; (2) 为缓解世界镍资源供求矛盾, 应该做好全球镍资源的配置, 加强镍矿有效供给, 加大勘查力度, 提高资源利用效率, 构建循环利用体系。

中图分类号: P618.63 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0118-15

Distribution, geology and development status of nickel deposits

LIU Jinlong¹, LI Zhumin¹, ZHOU Yongheng¹, WANG Li², WANG Guan³,
JIANG Ping⁴, CHEN Liangxi¹, DONG Cunjie¹

(1. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110000, Liaoning, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China; 3. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, Heilongjiang, China; 4. Harbin Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] In the context of the global energy transition, the demand for nickel is growing rapidly and the price continues to rise. Finding more nickel metal resources to satisfy economic development is an important task of the current geological community. **[Methods]** The study summarized the genetic type, metallogenic age, metallogenic characteristics and geological

收稿日期: 2021-02-25; 改回日期: 2022-03-21

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20201163、DD20190438)资助。

作者简介: 刘金龙, 男, 1988年生, 博士, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查与研究工作; E-mail: liujinlong0815@yeah.net。

通讯作者: 李仁民, 男, 1983年, 高级工程师, 主要从事东北亚地区地质矿产调查与研究工作; E-mail: 45569520@qq.com。

background of nickel deposits, sorted out the global nickel reserves and mine production, and estimated the supply current situation and consumption trend of nickel metal, with the aim to provide background knowledge (information) for the search of new nickel deposits. **[Results]**The economically significant nickel deposits in the world include magmatic and weathered crust types. The magmatic type nickel deposit is mainly distributed in Canada, Australia, Russia and China, and the weathered crust type nickel deposit is mainly distributed in Indonesia, New Caledonia, Brazil and Philippines. **[Conclusions]**In order to alleviate the contradiction between supply and demand of nickel resources, we should achieve in the allocation of global nickel resources, strengthen the effective supply, increase exploration efforts, improve resource utilization efficiency, and build a recycling system.

Key words: nickel deposits; magmatic type; weathered crust type; metallogenic setting; development status; mineral exploration engineering

Highlights: (1) This study summarized the types, metallogenic age, metallogenic characteristics and geological background of nickel deposits in the world. (2) In order to alleviate the contradiction between supply and demand of nickel resources, we should achieve in the allocation of global nickel resources, strengthen the effective supply, increase exploration efforts, improve resource utilization efficiency, and build a recycling system.

About the first author: LIU Jinlong, male, born in 1988, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in regional geological mineral survey and research; E-mail: liujinlong0815@yeah.net.

About the corresponding author: LI Zhumin, male, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in Northeast Asian regional geological mineral survey and research; E-mail: 45569520@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20201163, No.DD20190438).

1 引言

镍的开发利用已有2000多年的历史,在人类物质文明发展过程中起着重要作用。早在公元200年,俄国巴特里王朝就开始利用镍合金模压金币。但是,广泛的开采利用是在工业革命之后。镍具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化、铁磁性强、可塑性强、容易形成合金等特点,被誉为“钢铁工业的维生素”。因此,镍金属主要用于制造不锈钢、高镍合金、合金结构钢等,广泛被用于飞机、导弹、宇宙飞船、雷达、车辆、轮船等军工和民用机械制造业。镍还可作为陶瓷颜料和防腐镀层,在电子工业、化学工业方面应用也极为广泛。此外,镍在新兴产业中也占有举足轻重的地位,主要体现在电池领域,如镍氢电池、镉镍电池、镍锰电池及近年来快速发展的MHX-Ni蓄电池(王岩等,2020)。镍氢电池是目前电动汽车领域应用最为成熟的二次电池,是国家扶持的重点发展清洁能源,特别是在混合动力汽车方面。伴随新能源汽车发展,作为关键材料的镍有望迎来最高的增长点。

近些年资源战悄然上演,各国相继发布了关键矿产政策或清单,关键性矿产影响政治格局。如美国新的矿产资源安全法(2019年)、欧盟发布的《欧

盟原材料2050愿景与科技和创新路线图》(2018年)、日本出台的《稀有金属保障战略》(2009)、加拿大发布的《矿产和金属规划2019》(2019年)、俄罗斯发布的《俄罗斯矿产资源法》(2010)、2015年英国更新的风险矿产清单等,都将镍资源提高到战略高度。鉴于此,本文总结了全球镍矿成因类型、成矿时代、成矿特征及成矿背景,梳理镍资源储量和矿山产量,并分析镍产业结构和趋势,提出缓解全球镍资源供求矛盾的建议。

2 镍矿床成因类型及成矿时代

根据已知矿床产出的地质环境、围岩性质、矿物的物质组成以及矿床成因,世界绝大部分具有经济效益的镍矿床包括风化壳型(红土型)和岩浆型(硫化物型、硫化镍型),二者储量分别约占60%和40%。虽然风化壳型镍矿占有更多的储量,但岩浆型镍矿被视作更重要的勘探目标,有64%的镍来自岩浆型镍矿(Mudd, 2010)。岩浆型矿床与镁铁-超镁铁质岩石有关,其分布广泛、资源丰富、品级较高、选冶技术较简单;红土型镍矿为超镁铁质岩石风化而成,具有埋藏浅、规模大特点,但冶炼技术较复杂,成本较高。除以上2种类型外,还有热液硫化镍-砷化镍型、沉积硫化镍型等目前经济效益较小

的矿床类型(Mudd and Jowitt, 2014),未来将可能是作为重要的矿物来源。

2.1 岩浆型镍矿

岩浆型Ni-Cu±PGE硫化物矿床是指与镁铁质—超镁铁质岩浆成矿作用有关的、以硫化物为主的矿床,硫化物在岩石中占比重极小,主要为磁黄铁矿(Fe_7S_8)、镍黄铁矿($[\text{Fe}, \text{Ni}]_9\text{S}_8$)和黄铜矿(CuFeS_2)(汤中立, 1992; Naldrett, 1997)。镍、铜、钴和铂族是主要具有经济效益金属,金、银、铬和铅则是伴生金属。该类矿床产出构造环境多种多样,包括裂谷有关的大陆溢流玄武岩(诺里尔斯克(Noril'sk)、杜鲁斯(Duluth))、与陨石坑有关的基性岩体(萨德伯里(Sudbury))、科马提岩—玄武岩和相关的侵入岩((坎巴尔达)(Kambalda)、汤普森(Thompson))、拉斑玄武质侵入体(瓦伊塞湾(Voisey's Bay))。Naldrett(1989, 1997)以成矿构造环境和容矿岩石为基础,将岩浆型矿床划分为4类:大陆裂谷边缘、克拉通—大陆内部环境、活动造山带、同火山绿岩带。Leshner(2004)强调了岩浆型镍矿床的成矿构造类型和容矿岩石特征,包括其不同的地质时代、不同的大陆相关伸展构造背景、与镁铁质—超镁铁质岩浆类型的联系以及与围岩的相互作用。此外,其他学者也提出了不同的方案(Eckstrand, 1995; Leshner and Keays, 2002; Leshner, 2004; Naldrett, 2004; Arndt et al., 2005; 汤中立等, 2006)。

现有岩浆硫化物矿床成矿理论认为,地幔高程度部分熔融形成的镁铁—超镁铁质岩浆溶解成矿金属,经历岩浆结晶分异、不混熔硫化物熔浆与硅酸盐岩浆熔离等岩浆过程,Ni-Cu及PGE硫化物得以富集成矿(Keays, 1995; Arndt et al., 2005)。但该过程受成矿金属元素和硫在幔源硅酸盐岩浆中溶解度的限制,需要大规模的岩浆才足以聚集巨量的成矿物质,即超大型岩浆硫化物矿床的形成要求大型(层状)岩体或通道岩体(Snow and Schmidt, 1998)。汤中立(1992, 1996)在系统研究中国岩浆镍矿床后,提出了“小岩体成大矿”的重要认识(图1a),认为“深部熔离—贯入成矿作用”是该类型矿床形成的重要机制。深部熔离—贯入成矿机制,是指母岩浆侵入到现存空间之前,在深部就发生了熔离作用和部分结晶作用,使母岩浆分离成不含矿岩

浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几个部分,然后对现存空间一次或多次上侵—贯入成矿(汤中立和李文渊, 1991)。

几乎在整个地质历史时期都有镍矿床的生成,总体上岩浆型镍矿床比红土型镍矿床形成的早。最古老的岩浆型矿床为形成于太古宙绿岩带中的科马提岩型镍矿床,见于西澳蜜月矿(Honeymoon, ~2.7 Ga)、坎巴尔达(~2.7 Ga; Nelson, 1997),加拿大戈登湖(Gordon Lake, ~2.7 Ga; Ayer et al., 2002),津巴布韦香格纳尼(Shangani, 2.7 Ga)、特洛伊(Trojan, 2.7 Ga; Prendergast, 2003)等,成矿时代集中在3.0~2.6 Ga。

元古宙是镍矿最重要的成矿时期,矿床一般与大型似层状侵入体有关,受陆内大断裂带或活动带控制,如加拿大汤普森(~1.9 Ga; Hulbert et al., 2005)、林恩湖(Lynn Lake, ~1.9 Ga)、南非梅伦斯基礁(Merensky Reef, ~2.0 Ga)、普拉特里夫(Platreef, ~2.0 Ga; Kruger et al., 1986)、俄罗斯佩城加(Pechenga, ~2.0 Ga; Hanski et al., 1990)等。中—新元古代镍矿床相对较少,多数与基性侵入岩有关,产于地台区的活动带,如加拿大五大湖(Great Lakes, ~1.1 Ga; Davies and Sutcliffe, 1985)、中国金川(~0.83 Ga; Li et al., 2004)等。

古生代—中生代镍矿数量较多,分为2种:一种镍矿是与大型断裂活动带溢流玄武岩有关,如俄罗斯诺里尔斯克—塔尔纳赫(Noril'sk—Talnakh)(~251 Ma; Kamo et al., 2003)。另一种是受造山期大型断裂控制与分异镁铁质—超镁铁质侵入岩有关,该类镍矿在中国大规模发育,如石头坑德(~419 Ma; 李良, 2018)、夏日哈木(~422 Ma; 王冠, 2014)、红旗岭(~216 Ma; Wu et al., 2004)等。新生代有经济价值的岩浆镍矿极少。

2.2 风化壳型镍矿

风化壳型镍矿是指在热带或亚热带气候条件下,超基性岩(纯橄岩、橄辉岩、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)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,从而形成可供工业利用的矿床(Ernst and Jowitt, 2013)。风化壳型镍矿也可以产生在岩浆型镍矿床之上,但比较少见。近些年,氧

化镍矿的消耗比例逐步增加,作为氧化镍矿的重要组成部分,风化壳型镍矿的研究越来越受到重视(Dalvi et al., 2010)。形成风化壳型镍矿一般必须具备以下几个主要条件:基岩一般为矿源丰富的橄榄岩或蛇纹石,易于化学风化;要有炎热、多雨的气候条件,利于岩石分解和充分氧化,保证有足够的时间进行淋滤和再沉积;要有排水良好的地貌条件,保证有持久的氧化环境(陈百友等,2013)。

根据风化壳剖面矿化带发育特征,风化壳型镍矿分类方法多样。一般情况下,风化壳镍矿剖面自下而上包括5部分:风化基岩带、腐泥土带、黏土带、褐铁矿带和铁砾岩带(图1b)(陈正和雷蕴芬,1988)。风化壳剖面在不同地区各个带发育不尽相同,一般在腐泥土带的地方黏土带不发育,而黏土带发育的地方腐泥土带不发育。因此,风化壳型镍矿又可进一步分为2个亚类型:一种是氧化镍矿床,即以剖面上部的黏土带及褐铁矿带为主的矿床,该类型镍多以类质同象和氧化物的形式存在于铁的氧化物、氢氧化物和黏土矿中;另一种是硅酸镍矿床,即以剖面下部腐泥土带和风化基岩带为主的矿床,镍主要以类质同象赋存于表生的含水硅酸盐矿物之中(Freyssinet et al., 2005)。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),而那些气候潮湿、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,故在很多著名的风化壳型镍矿区中褐铁矿带往往直接覆盖在腐岩带之上(陈正和雷蕴芬,1988)。

风化壳型镍矿成矿时代均为中、新生代。西欧及乌克兰地区的矿床多数为中生代;近赤道的古巴、新喀里多尼亚和东南亚地区的矿床多数为新生代(陈百友等,2013)。

2.3 其他镍矿

除以上2种类型外,还有各类目前经济效益较小的矿床类型,未来将可能是作为重要的矿物来源,如热液硫化镍-砷化镍型和沉积硫化镍型。热液硫化镍-砷化镍矿床多数与岩浆期后的热液活动有关,或者与较酸性的岩浆活动有关。矿体一般产于岩体的破碎带或与围岩的接触带之中。主要围岩为泥质、硅质变质沉积岩及中酸性火山岩。矿体多数呈脉状、似层状或透镜状产出,规模较小。由于生成的地质条件不一,矿石矿物组合和有用元素种类含量差别较大。较常见的金属矿物有红砷镍矿、砷镍矿、辉砷镍矿、砷钴矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、斑铜矿、辉银矿、方硫镍矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿、自然金等。围岩蚀变较明显,主要

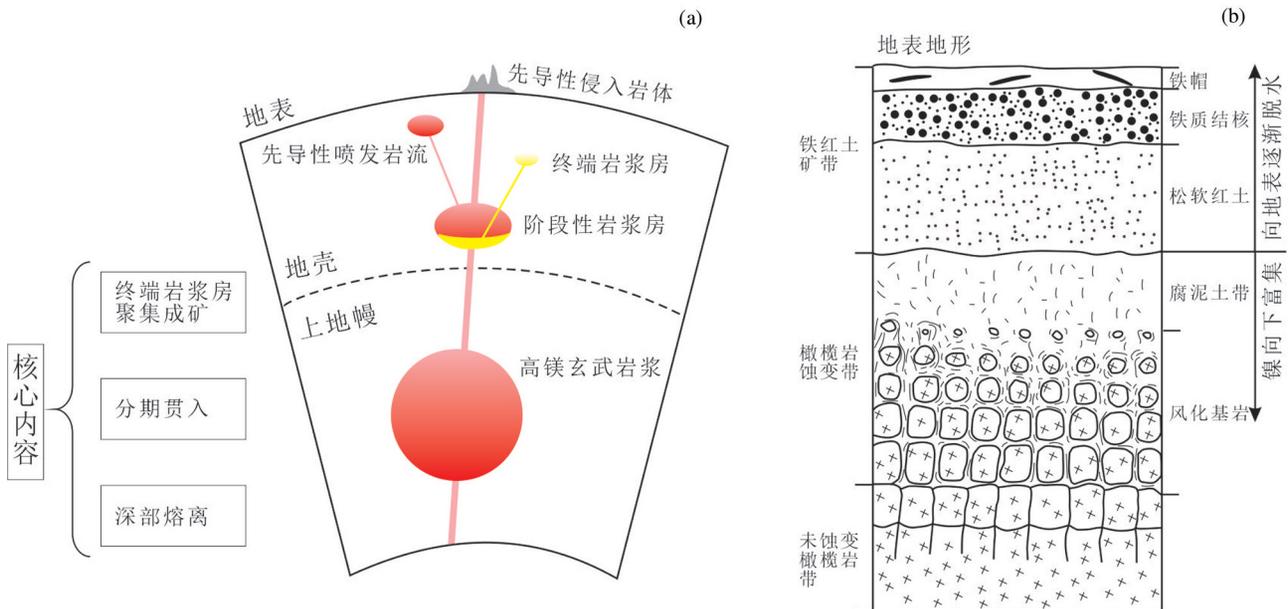


图1 典型岩浆型镍矿成矿模式图(a)(据汤中立和李文渊,1991)和风化壳型镍矿垂直分带剖面示意图(b)(据陈浩琄等,1993)
Fig.1 Schematic diagrams of metallogenetic model of typical magmatic nickel deposit (a) (after Tang Zhongli and Li Wenyan, 1991) and weathering crust type nickel deposit vertical zoning section (b) (after Chen Haoliu et al., 1993)

有碳酸盐化、硅化、绿泥石化等。矿源主要来自超镁铁质岩,属晚期热液成因。该类矿床规模较小,品位不均匀(陈浩疏等,1993)。

沉积型硫化镍矿床特点是硫化物矿化直接与沉积岩有关,矿层有一定层位,分布面积达几平方千米,厚度几厘米至几米。呈层状或不连续透镜状产出,矿床规模较大,但品位较低。在澳大利亚,该类矿床产于太古宙镁铁质到长英质火山序列之中。硫化镍矿化出现于富钙、铁、镁的岩层内,或者产于火山岩流单元之间的泥质、硅质、碳质沉积岩夹层之中。矿石矿物组合主要有镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和磁铁矿。矿石以浸染状为主,少量为填隙状。大部分矿石含镍低于2%,一般为0.5%~0.8%,Ni/Cu比值一般为5。在同一层位上矿化的岩石与不含矿的岩石整合接触,二者经常相互过渡。镍可能是火山间歇期喷溢到海底的某些热水溶液的一种组合,矿床可能是火山-喷气成因(陈浩疏等,1993)。

3 镍成矿特征及地质背景

世界镍矿资源比较丰富(图2),世界级岩浆型镍矿床主要集中于加拿大(萨德伯里、瓦伊斯湾、汤普森、林恩湖(Lynn Lake)、拉格兰(Raglan)和阿比提比(Abitibi))、澳大利亚(坎巴尔达、佩斯沃兰斯(Perseverance)、雅卡宾迪(Yakabindie)、蜜月(Honeymoon Well)、姆尼姆尼(Muni Muni)和米特基斯(Mt. Keith))、俄罗斯(诺里尔斯克(Noril'sk)、佩城加(Pechenga))、中国(金川、夏日哈木)、南非(大岩墙(Great Dyke)、布什维尔德(Bushveld)、乌蒂科姆斯特(Utikomst)和因斯瓦(Insizwa))和美国(斯蒂尔瓦特(Stillwater)、杜鲁斯和莫西(Moxie))等少数几个国家。风化壳型镍矿床主要分布在印度尼西亚、新喀里多尼亚、巴西和菲律宾等(即南北纬22°之间)。

3.1 亚洲镍矿

亚洲镍矿资源分为岩浆镍和风化壳镍,岩浆镍

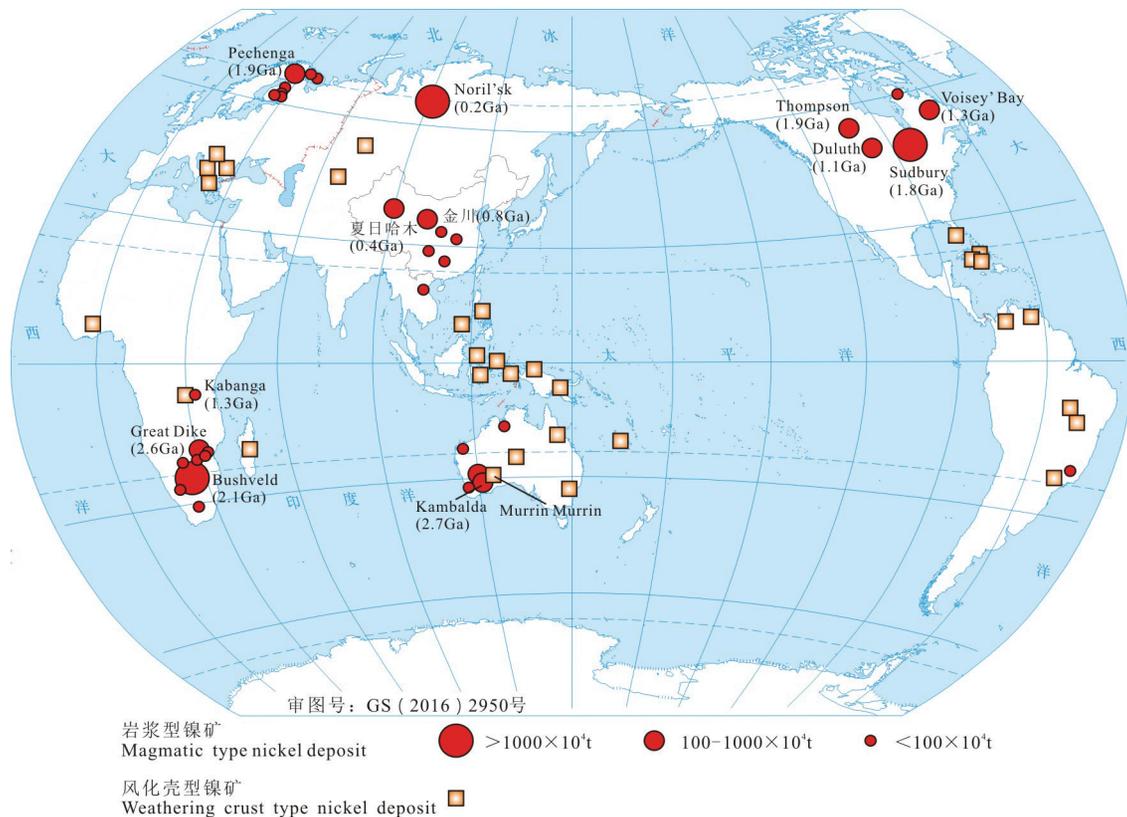


图2 全球主要镍矿分布简图(据Hoatson et al., 2006; 王岩等, 2020)

Fig.2 Schematic diagram of the distribution of major nickel deposits in the world (after Hoatson et al., 2006; Wang Yan et al., 2020)

主要分布在俄罗斯和中国。俄罗斯(不包括欧洲领土)岩浆镍矿床可分为2个成矿区,分别是北叶尼赛—哈坦加成矿区和北滨贝加尔成矿区。北叶尼赛—哈坦加成矿区位于西伯利亚地台西北缘,该成矿区是俄罗斯储量和产量最大的地区,占有全俄2/3以上的镍储量(Kozlov and Zverev, 2018)。含矿侵入体一般呈链条状沿区域性深断裂分布,围岩为泥盆纪到晚三叠世的碳酸盐岩和泥沙质沉积岩,镍矿体与辉长岩、辉绿岩分异侵入体有成因与空间关系,富矿体常产于底部,代表矿床有超大型的十月、塔尔纳赫、诺里尔斯克1号和大型的马斯洛夫铜镍硫化物矿床。该成矿区成矿作用与中生代地幔柱活动有关,属岩浆熔离—贯入型矿床(舒思齐等, 2015)。北滨贝加尔成矿区位于西伯利亚地台南缘与贝加尔造山带衔接带上,该成矿区镍储量占全俄的8%。矿床空间与成因上均与晚古生代深成辉长橄榄岩有关,矿体多呈不规则脉状、透镜状,代表性矿床有金佳什和上金佳什(Malitch et al., 2014)。

中国岩浆型镍矿无论是在储量还是在开采量上都占有明显的优势,探明储量约占全国总量的93%,其中包括超大型矿床3处,大型12处(娄德波等, 2018)。大部分矿床均产于造山带或克拉通边缘等相对活动区,其中以西北地区最为重要的,发育甘肃金川、青海夏日哈木、新疆坡北(以坡一、坡十为主)、喀拉通克、图拉尔根、黄山东及黄山等大型矿床(孙涛等, 2014; 曹亮等, 2020; 王居里等, 2021)。因产于中国境内,故不拟赘述。

亚洲的风化壳型镍矿主要发育在南乌拉尔—北哈萨克斯坦地区和东南亚地区。南乌拉尔—北哈萨克斯坦地区的风化壳型镍矿常与风化的超基性岩,特别是蛇纹岩伴生。该类矿床中,镍和钴含量较高,镍含量为1.8%~2.5%,矿体接近地表,易于露天开采,但规模较小(陈百友等, 2013)。东南亚地区风化壳型镍矿主要分布在印度尼西亚、菲律宾及缅甸,其中以印度尼西亚和菲律宾为主。印度尼西亚风化壳型镍矿主要分布在群岛的东部,矿带从中苏拉威西省到哈尔马赫拉、奥比、格贝、加格、瓦伊格奥群岛,以及巴布亚的乌头半岛和塔纳梅拉地区等,由于印度尼西亚超基性岩广泛分布,因此其风化壳镍矿有良好的找矿前景。菲律宾风化壳镍矿主要分布在群岛两侧的超基性岩带中,集中分布

在东达沃和巴拉望其它有较大规模的镍矿床的省为北苏里高和三描礼士,经统计现在共有24个镍矿床及远景区。缅甸风化壳镍矿主要分布在受印缅山脉超基性岩带控制,分布在中部盆地西缘(付伟等, 2011)。

3.2 欧洲镍矿

欧洲岩浆型镍矿主要发育在北部,而风化壳型主要分布在南部。北部的岩浆镍分布于斯堪的纳维亚半岛和科拉半岛,分属挪威、瑞典、芬兰和俄罗斯,成矿时代为太古宙、元古宙、古生代。欧洲北部岩浆镍矿,主要分布于太古宙波罗的地盾内部(佩城加—伊曼德拉裂谷(Pechenga—Imandra))及其外部(科塔拉赫蒂(Kotalahti)裂谷)的裂谷带中,重要的成矿带有佩城加—伊曼德拉成矿带、科塔拉赫蒂成矿带、基尔姆科斯基(Kylmkoski)成矿带(Maier and Groves, 2011)。

佩城加—伊曼德拉是一个元古宙裂谷带,沿着整个科拉半岛延伸700 km,并绵延至芬兰和挪威,该带可分为3段。东段从瓦祖加(Varzuga)至芒切哥尔斯克,长350 km,最宽45 km,该段的北部及东部沉陷于新太古代,下元古界由伊曼德拉—瓦祖加(Imandra—Varzuga)群变质火山岩和火山沉积岩构成;中段为隆起区,仅少量下元古界沉积;西段相当佩城加矿范围,长100 km,最宽40 km,由变质火山岩、火山沉积岩和少量沉积岩组成。带内含镍侵入体主要沿复向斜中凝灰岩层理分布(如佩城加、凯维斯塔(Kevista)矿),或沿复向斜与太古宙基底片麻岩间接接触带分布(如蒙切哥尔斯克(Monchegorsk)、费多尔瓦(Fedorva)、洛斯塔里(Luostari)矿)。而分布在复背斜岩块内的镁铁质、超镁铁质岩体的数量较少,且镍含量较低,仅少数具工业矿化(如阿拉雷卡(Allarechka)矿; Groves et al., 2005; Maier and Barnes, 2010)。

科塔拉赫蒂元古代(~1.9 Ga)裂谷带从科科拉(Kokkola)到芬兰、俄罗斯边境拉多拉(Ladora)湖,与俄罗斯地台古生界沉积岩相接,长430 km,呈北西—南东方向横跨芬兰中部,带内横向剪切构造控制着成矿岩体分布,带内发育科塔拉赫蒂、埃诺科斯基(Enonkoski)、沃诺斯(Vuonos)等矿。科塔拉赫蒂成矿带镁铁—超镁铁质岩体侵入围岩为陆源沉积岩,经强烈混合岩化作用已变成脉状片麻岩,含矿

围岩镍区域背景值较高(Marsh et al., 1992)。

基尔姆科斯基铜镍矿带分布在芬兰南部,古元古代含镍镁铁质-超镁铁质侵入体分布受北西向断裂控制,延长280 km,发育瓦玛拉(Vammala)、基尔马科斯基(Kylmakoski)矿。含镍侵入体的围岩为变质陆源沉积岩-脉状云母片麻岩,为坦佩雷(Tampere)片岩带的组成部分(Hoatson et al., 2006)。

科塔拉赫蒂和基尔姆科斯基成矿带的镁铁质-超镁铁质岩体除受北西西-南东东方向断裂系统控制外,还明显与围绕芬兰中部花岗岩类杂岩体的云母片麻岩相伴产出。这两个铜镍矿带被一个走向北东东的断裂带连结,形成一个“U”形的镍矿潜力带,西北端伸入瑞典、挪威境内。瑞典中部和北部几个较重要铜镍矿床产于脊状辉长岩侵入体内,侵入体受控于古元古代前褶皱的变质沉积岩系的背斜部位;挪威境内该期矿床成因上与变质基性火山岩有关。科塔拉赫蒂矿带北部的奥托昆普(Outokumpu)矿床时代为~2.3 Ga,维汉蒂(Vihanti)矿为2.1~2.0 Ga,矿带东南部的科塔拉赫蒂矿为~1.9 Ga;基尔姆科斯基成矿带矿床向西北延伸至瑞典、挪威境内矿床有年轻化趋势,为1.9~1.7 Ga(Hoatson et al., 2006)。

海于格松-纳尔维克(Haugesund-Narvik)矿带分布挪威中西部,呈北北东向延伸,大地构造属加里东褶皱带,下伏元古代基底,镁铁质-超镁铁质侵入岩体发育,数量较多,年龄为550~500 Ma。代表矿床有布鲁万(Bruvann)矿,该矿镁铁质-超镁铁质层状侵入体位于强烈褶皱的纳尔维克(Narvik)群云母片麻岩,但品位较低(Hoatson et al., 2006)。带内其他几个含矿镁铁质岩体呈岩株或岩席状岩墙产出,均为小型镍矿,但品位较高。

风化壳型镍矿主要分布在欧洲南部的巴尔干半岛及爱琴海、亚得利亚海域,可划分迪纳里克(Dinaric)和赛尔博-马其顿(Serbo-Macedonian)镍矿带,沉积时期为白垩纪,代表性大型、特大型镍矿床包括有尤布尔(Euboea)、拉姆那(Larmna)、拉扎诺沃(Rzanovo)、比廷克(Bitincke)等矿床(陈百友等, 2013)。

3.3 美洲镍矿

美洲岩浆镍矿集中于加拿大,美国、格林兰岛等分布较少,风化壳型镍矿分布在中、南美洲。加拿大

是传统镍优势国家,镍矿几乎全部为岩浆镍矿。

北美的重要镍矿床均分布于加拿大地盾内,最主要的镍成矿区(带)有萨德伯里成矿区、阿比提比镍矿带、汤普森镍矿带、开普史密斯(Cape Smit)镍矿带、隆加(Torngat)镍矿带等。萨德伯里成矿区位于安大略省南部,区内已知矿床50余处,大型20余处(如莫里(Murray)、法尔康布里奇(Falcombridge)、列瓦克(Levack)、弗洛德-斯托比(Frood-Stobie)矿),均产于一个东西长约60 km,南北宽约30 km的大椭圆形岩盆状岩体边缘(Hoatson et al., 2006)。

岩体的围岩为古元古代白水群的砂岩、石英岩、角闪岩和凝灰岩。这些地层构成了一个缓倾斜的向斜,岩体呈巨大的岩盆状侵入岩中间,岩盆最后达3 km以上。岩相分异明显,由下而上,由边缘向中心为苏长岩、似伟晶岩状苏长岩、辉长岩和文象斑岩,并有分异的石英闪长岩和花岗岩侵入。岩体向中心倾斜,一般倾角30°,局部近直立。铜镍矿床直接赋存在苏长岩底部,主要矿床分布于岩体南缘接触带,北缘的矿床相对较少,矿体向盆中心延伸,有的垂直深度达1500 m尚未尖灭。该矿区成矿时代为~1856 Ma,成因类型为撞击熔体(陨击型)型铜镍矿(Krogh et al., 1984)。

汤普森镍矿带位于马尼托巴省中部,矿床多数产于早前寒武纪基性变质火山岩系的超基性岩体内,矿化与蛇纹石化橄榄岩有关,属于岩浆镍矿床,成矿时代为~1850 Ma。矿带长5.5 km以上,矿石有两种类型:一种为橄榄岩内的浸染状矿石,矿化规模大,但品位低;另一种为接触带角砾状矿石,品位较高,可达3%,但矿体规模较小。矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿, Ni/Cu=5。该成矿带代表矿床有汤普森、阿马克斯1号(诺斯)(Amax area 1(Nose))、鲍登(Bowden)、巴哥(Bucko)、马尼布里奇(Manibridge)、纳姆湖(Namew Lake)矿(Hulbert et al., 2005)。

阿比提比镍矿带位于安大略省南部,矿床成矿时代为2.7 Ga,镍矿与科马提岩有关,代表性矿床包括亚历克斯(Alexo)、杜蒙(Dumont)、戈登湖、朗缪尔(1和2号)(Langmuir (No. 1 and 2))、马布里奇(Marbridge)、蒙卡尔姆(Montcalm)、红石、谢班多万(Shebandowan)、德克穆特(Texmont)等(Ayer et al., 2002)。开普史密斯镍矿带位于魁北克省北部,

带内发育艾克思博—恩加瓦(Expo—Ungava)、拉格兰矿,成矿时代为~1.9 Ga(Parrish, 1989)。隆加镍矿带位于加拿大拉巴尔丹省和纽芬兰省交界的拉布拉多海岸,矿床与橄长岩性质的侵入体有关,代表矿床有超大型瓦伊斯湾矿,成矿时代为(1333±1) Ma(Amelin et al., 1999)。

美国镍矿主要为岩浆镍,少量发育风化壳镍矿,总体分布零散,品位较低,主要分布在俄勒冈州西南部、蒙大拿州中南部、阿拉斯加东南部等(Paces and Miller, 1993)。美国最著名的岩浆镍矿产于杜鲁斯岩体,该岩体以一完整的岩块形式出露地表,从美国的明尼苏达州的杜鲁斯朝东北方向一直延伸到加拿大边境,长150 km,宽50 km,略呈弯月状向北西突出,杂岩体由一系列的橄长岩、苏长岩和斜长岩等层状岩系组成。岩浆镍矿化沿岩体西北边缘发育,赋存于橄长岩系之中。已发现的重要矿床有斯布鲁斯(Spruce)、米纳麦克斯(Minnamax)、顿卡路(Dunka Road)和瓦特亨(Water Hen)矿,成矿时代为1099 Ma(Paces and Miller, 1993)。多数矿体产于离接触带300 m范围的橄长岩单元中,矿石主要为稀疏浸染状,块状矿石很少,矿石矿物有磁黄铁矿、黄铜矿、方黄铜矿和镍黄铁矿,矿石含镍较低,平均只有0.2%,但含铜较高,可达0.8%,杂岩体中铜镍矿化普遍。杜鲁斯杂岩体位于苏必利尔克拉通西南缘,岩体受克拉通边缘元古代活动断裂带控制,是与陆内裂谷作用有关的岩浆活动形成的含铜镍基性杂岩体的一个范例(Nicholson et al., 1992)。

中、南美洲镍矿十分丰富,其中风化壳型镍矿占绝对优势,主要分布在古巴、巴西、危地马拉、多米尼亚、波多黎各、哥伦比亚、委内瑞拉等近赤道国家。中美洲国家如古巴、危地马拉等,发育的风化壳型镍矿原岩为中、新生代造山活动逆冲蛇绿岩套蚀变蛇纹岩。南美洲如巴西南部的风化壳镍矿原岩主要为前寒武纪绿岩带的超镁铁质岩,新生代时期在热带—亚热带气候条件下遭受强烈风化作用后成矿。巴西的奥图尔(O'Toole)镍矿是中、南美洲最重要的岩浆镍矿,该矿与科马提岩有关,形成于~2.7 Ga(Brenner et al., 1990)。

3.4 非洲镍矿

非洲镍矿比较丰富,绝大部分为岩浆镍,集中

分布于南非、津巴布韦、博茨瓦纳和坦桑尼亚。风化壳型镍矿不甚发育,少量新时代矿床分布于埃及、中南部的布隆迪、津巴布韦及马达加斯。

津巴布韦镍矿有2类:一种是产于太古宙绿岩带中与科马提岩有关,另一种是与津巴布韦大岩墙有关。前者集中分布于索兹伯里到布拉瓦约地区,构成一个长近500 km的北东向镍成矿带,矿体多数产于蛇纹石化橄长岩、纯橄长岩或其他超镁铁质岩体中,以浸染状矿石为主,伴生铜,代表矿床有特洛伊伊、香格纳尼(Shangani)矿,成矿时代为~2.7 Ga(Prendergast, 2003);津巴布韦大岩墙是一个侵位于津巴布韦克拉通中部花岗岩和花岗绿岩带中,且延伸很长的岩墙状镁铁—超镁铁质岩浆侵入体。该岩墙走向近南北,总长530 km,宽2~10 km,北端受赞比西褶皱带挤压牵引向东弯曲呈“S”型(Stark et al., 2018)。津巴布韦克拉通于~2580 Ma拉伸,形成陆内裂谷,岩浆于~2530 Ma呈层状沿裂谷侵入津巴布韦克拉通内(Gwimbi and Nhamo, 2016)。岩墙遭绿片岩到角闪岩相的变质作用,代表矿床有哈特利(Hartly)、蒙多罗(Mhondoro)、亨特斯路(Hunter's Road)、米穆萨(Mimosa)矿,铜镍资源量很大(Mukasa et al., 1998)。

博茨瓦纳镍矿床产于太古宙变质基性岩体内(如塞莱比—菲克威(Selebi-Phikwe)、塔蒂(Tati)、迪科洛蒂(Dikoloti)、佛科耶(Phokoje)矿),矿床产于太古宙变质基性岩体内,赋矿岩体主要为薄的香肠状角闪岩(原岩为橄长岩或苏长岩),围岩由条带状片麻岩和花岗岩组成,矿体呈似层状、透镜状整合产于岩体中,矿床形成于大型构造带中,后期遭受褶皱及剪切作用的影响明显(Gallon, 1986)。以浸染状矿石为主。含镍一般为0.8%~1.45%,铜1.09%~1.58%,铜镍比近于1,成矿时代为~2.5 Ga(Eckstrand, 1995)。南非镍矿集中于德兰士瓦省西部的布什维尔杂岩体内,该岩体是世界上最大的超基性层状岩体,出露面积达6.7万km²,产于太古宙卡普瓦尔克拉通内部裂谷,该岩体以赋存世界上最大的铬铁矿、铂族和钒钛磁铁矿而闻名于世。该岩体发育镍矿化层位是与鲁斯顿堡(Rustenburg)镁铁质—超镁铁质层状岩套有关的梅林斯基矿层、UG2铬铁岩矿层和普拉特接触带,发育阿卡纳尼(Akanani)、莫科帕内(Mokopane)、莫罗文

(Morokweng)、本约洛(Motoyolo)等矿(唐文龙等, 2018)。镍矿化与铂族共生, 矿石含铂族金属5%~9%, 含镍0.35%, 还有铜及其他有用元素, 均可综合利用。

坦桑尼亚镍矿分布在其与布隆迪接壤地区的基巴拉(Kibaran)造山带, 成矿带内镁铁—超镁铁质岩石总体呈北东向串珠状断续分布, 西部主要为橄榄岩, 东部主要为辉长岩, 属造山后伸展作用的产物(朱永刚等, 2013)。赋矿岩石主要为该区出露的超基性侵入体(如卡班加(Kabanga)矿), 超基性岩主要有橄榄岩、辉石橄榄岩和黑色辉长苏长岩, 矿体多产于超基性岩体底部, 上覆粗粒橄榄岩、辉长苏长岩、云母片岩等, 围岩以云母片岩、石英岩、变泥岩为主, 而该区北西向北西转化的叠瓦状推覆体和褶皱构造与镁铁—超镁铁岩产出关系密切(Deblond and Tack, 1999)。

3.5 大洋洲镍矿

大洋洲是世界上镍矿资源最丰富的地区之一, 具有经济意义的矿床分布于新喀里多尼亚、澳大利亚及新西兰。按镍成因类型主要有岩浆镍和风化壳镍, 岩浆镍主要分布在西澳(即西澳成矿带), 进一步可划分为: 科马提岩型、拉斑玄武质型、热液改造型(Hoatson et al., 2006)。

澳大利亚最重大、最具有经济意义的镍矿类型是西澳伊尔加恩(Yilgarn)克拉通太古宙绿岩带内与科马提岩有关的岩浆镍矿, 其特点是含矿火山橄榄岩发育鬃刺构造, 矿体沿一定层位成群出现, 以及硫化物的分凝是在差异性流动和重力影响下进行的, 成矿时代为~2.7 Ga, 如米特基斯、坎巴尔达、佩斯沃兰斯、普洛斯彼罗(Prospero)、莱德罗斯(Redross)、斯科蒂亚(Scotia)、南温达拉(South Windarra)、斯帕戈维尔(Spargoville)、塔皮诺斯(Tapinos)、维克多(Victor)、维克多舒特(Victor Shoot)、万那威(Wannaway)等矿(Jaques et al., 2002)。另一些重要科马提岩型镍矿位于南十字(Southern Cross)(~3030~2720 Ma)和诺顿金田(Northeastern Goldfields)(>2.9~2.7 Ga)省, 如艾米丽安(Emily Ann)、福雷斯塔尼亚(Forrestania)、玛姬海斯(Maggie Hays)、拉特巴特(Ratbat)、拉夫8号(Rav 8)、拉文斯索普(Ravensthorpe)、海鸥(Seagull)、欧威尔(Trough Well)等矿(Nelson,

1997)。

拉斑玄武质型镍矿是与侵入到太古宙克拉通或元古代造山带内部裂谷的侵入岩有关, 相对于科马提岩型, 该类型遍布澳大利亚西半部分。含矿侵入体为层状复合岩体, 主要由辉长苏长岩及辉岩、斜长岩组成, 矿石由母岩浆中不混溶的硫化物液体形成的。该类型成矿年龄变化较大, 西皮尔巴拉(Pilbara)克拉通为~2930~2890 Ma(如莱迪黑尔(Radio Hill)、米特肖尔(Mt Sholl)矿), 伊尔加恩克拉通为~2800~2700 Ma(如卡尔博伊德洛克(Carr Boyd Rocks)矿), 霍尔斯特格雷克(Halls Creek)造山带为~1865~1840 Ma(如莎莉马来(Sally Malay)、哥白尼科斯(Copernicus)、布河(Bow River)、可克伍德(Corkwood)、Keller Creek矿), 马斯格雷夫(Musgrave)省为~1080 Ma(如尼波—巴别尔(Nebo—Babel)、米特哈库斯(Mt Harcus)矿)(Hoatson et al., 2006)。热液改造型镍矿分布在西澳和塔斯马尼亚岛, 赋矿岩石为火成岩和变火山碎屑岩。该类型成矿背景、时代多样, 均与附近的超基性岩有成因联系。代表的矿床有西塔斯马尼亚的阿维伯里(Avebury)矿, 西皮尔巴拉克拉通夏洛克湾(Sherlock Bay)矿、霍尔斯特格雷克造山带皮可克伍德和布河矿、伊尔加恩克拉通米特马丁(Mt Martin)矿、皮尔巴拉克拉通伊丽莎白山(Elizabeth Hill)和班布(Bamboo)矿(Hoatson and Glaser, 1990)。

风化壳镍分布在新喀里多尼亚、澳大利亚, 新生代成矿, 成矿母岩是蛇纹岩, 新喀里多尼亚是第三纪侵入, 而澳大利亚是前寒武纪或古生代侵入。重要的矿产地有新喀里多尼亚的戈罗(Goro)、康兰博(Konlambo)、奈可蒂(Nakety)、博格达(Bogota)等矿, 澳大利亚的穆林穆林(Murrin Murrin)、考斯(Cawse)、布隆(Bulong)等矿(Elias, 2002)。

4 主要国家镍资源储量和矿山产量

尽管在过去的30年中, 有近80%的镍矿已被开采, 但镍储量和资源量却在稳步增长(图3a)(USGS, 2011—2020^①)。这是因为找矿不断有突破, 勘探持续投入和采矿、加工等技术的进步(Wellmer and Becker—Platen, 2007^②; Mudd, 2010)。然而, 由于镍矿资源的有限性, 目前不确定这种模式能持续多久, 也不清楚未来对镍急剧增加的需求

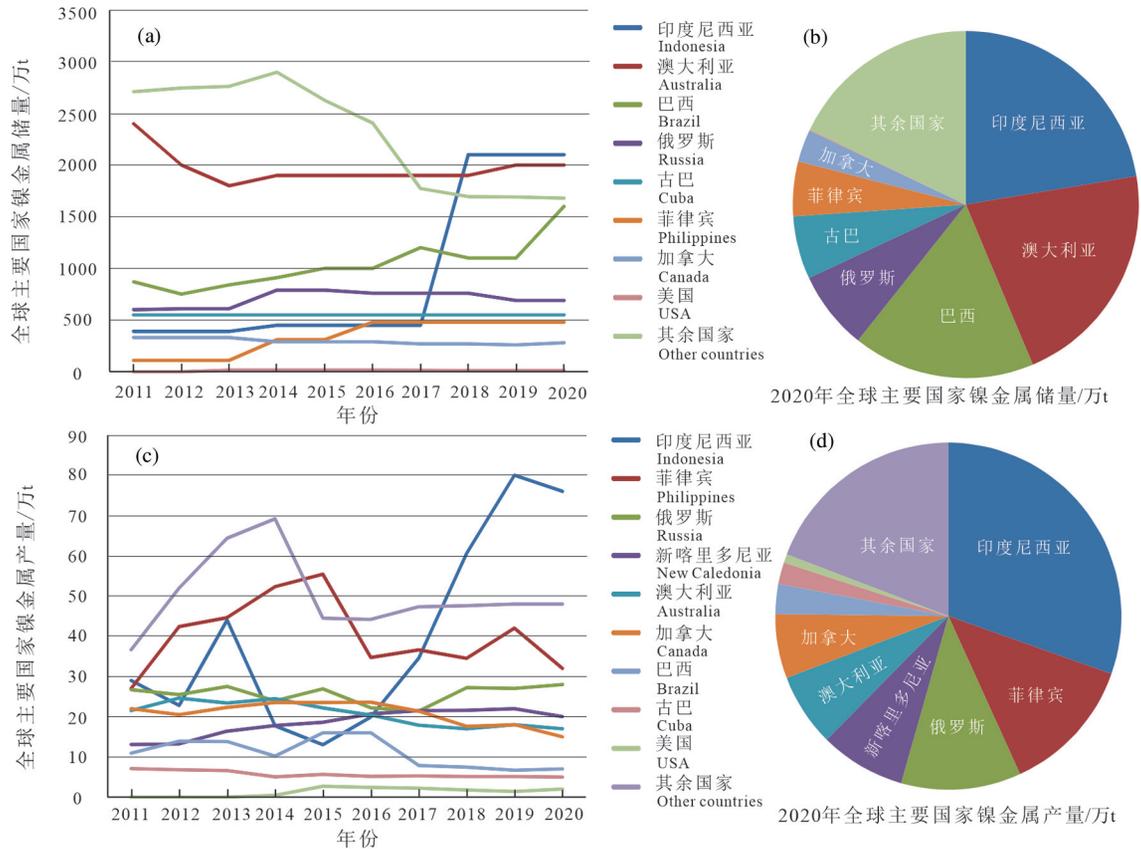


图3 全球主要国家镍资源储量和矿山产量(据USGS, 2011—2020^①)

Fig.3 Nickel resource reserves and mine production of major countries in the world (after USGS, 2011—2020^①)

是否会得到满足(IEA, 2013^②)。

世界镍资源储量丰富,广泛分布,但极度不均衡。据美国地质调查局数据(USGS, 2011—2020^①),截止2020年,全球镍金属资源储量为9400万t,主要国家有印度尼西亚(2100万t)、澳大利亚(2000万t)、巴西(1600万t)、俄罗斯(690万t)、古巴(550万t)、菲律宾(480万t)、加拿大(280万t)、美国(10万t)等(图3b,表1)。

2020年全球镍矿山金属产量为250万t,超过1万t的国家包括印度尼西亚(76万t)、菲律宾(32万t)、俄罗斯(28万t)、新喀里多尼亚(20万t)、澳大利亚(17万t)、加拿大(15万t)、巴西(7万t)、古巴(5万t)和美国(2万t)(图3d,表2)。其中印度尼西亚产量高居全球第1,占全球产量30.4%,自2014年至今,镍矿山产量大幅度增加(图3c)。巨大的变化源于印度尼西亚矿业政策的变化,2014年以前大量出口风化壳镍矿,2014—2017年全面禁止镍矿出口,2017—2019年允许低品位矿出口阶段,2020年后低

品位矿也被禁止出口。据S&P Global Market Intelligence 2020年数据,梳理了全球主要镍矿项目储量(表3)。

全球生产精炼镍的企业有诺里尔斯克(Norilsk Nickel)、淡水河谷(Vale)、嘉能可(Glencore)、必和必拓(BHPB)、金川集团(JNMC)、埃赫曼、谢里特、住友金属矿山、英美资源、South32、安塔姆(Antam)等,其中前5个公司年产量超过10万t,合计占全球总产量的61%。全球原生镍另一个重要来源是中国和印度尼西亚的镍生铁(NPI)。

5 镍产业结构和消费趋势

目前世界约三分之二的镍资源应用于不锈钢领域,约占72%;合金领域约占13%;电镀领域约占7%;电池领域约占7%;其他领域约占1%。对于镍资源产业结构而言,目前对其影响最大的因素可归结于两方面。一是镍资源应用领域最广的不锈钢行业——镍密集型行业的发展趋势;二是新兴领域发展对镍资源

表1 全球主要国家镍矿资源储量(万t)(据USGS, 2011—2020^①)Table 1 Nickel mineral resource reserves (ten thousand tons) of major countries in the world (after USGS, 2011—2020^①)

国别	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
印度尼西亚	390	390	390	450	450	450	450	2100	2100	2100
澳大利亚	2400	2000	1800	1900	1900	1900	1900	1900	2000	2000
巴西	870	750	840	910	1000	1000	1200	1100	1100	1600
俄罗斯	600	610	610	790	790	760	760	760	690	690
古巴	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
菲律宾	110	110	110	310	310	480	480	480	480	480
加拿大	330	330	330	290	290	290	270	270	260	280
美国	0	0	16	16	16	16	13	11	11	10
其余国家	2411	2446	2463	2599	2326	2156	1483	1415	1411	1400
全球储量	8000	7500	7400	8100	7800	7800	7400	8900	8900	9400

需求的冲击,其中新兴领域中新能源汽车的强劲发展展现出对镍资源的强劲需求。

不锈钢领域,近年来世界不锈钢产量总体呈现上升趋势,预计到2025年全球不锈钢产量可达到约4970万t,2030年可达到约5565万t(崔伟杰,2020)。电池领域,在能源和环保的压力下,新能源汽车产业已经迎来了快速增长期,进而推动对三元聚合物锂电池的需求。三元复合正极材料是以镍盐、钴盐、锰盐为原料,未来电池用镍或将成为镍消费的第二大领域。据IEA、UBS、McKinney等多家机构的观点,2020—2030年全球动力电池正极材料呈现高镍低钴的趋势,届时镍的需求将进一步提升。合金行业用镍主要用于高温合金,作为航空、航天、石油、化工、舰船等重要原料,未来也将快速进入增长期。电镀行业用镍主要是金属镍板和硫酸镍,世界电镀市场对镍的需求相对比较稳定,增幅不是特别明显。

因此,未来一段时间世界镍资源需求量持续增加,镍资源供应日趋紧张。为积极应对镍资源供求矛盾,世界各国纷纷采取多种措施提高镍资源稳定地位。如提升镍资源的配置,加强镍矿有效供给;加大镍资源的找矿力度及科技投入,提高勘察、开发、利用的技术水平,提高镍资源供应能力;提高资源利用效率,构建循环利用体系等。

6 结 论

(1)全球镍矿分布广泛但又不均匀,具有经济意义的可分为岩浆镍和风化壳镍。岩浆镍矿主要分布在加拿大、澳大利亚、俄罗斯、中国、南非等;风化壳镍主要分布在印度尼西亚、新喀里多尼亚、巴西和菲律宾等。

(2)全球主要开采镍的国家有印度尼西亚、菲律宾、俄罗斯、新喀里多尼亚、澳大利亚、加拿大等。主要生产镍的企业有淡水河谷、诺里尔斯克、

表2 全球主要国家镍矿山产量(万t)(据USGS, 2011—2020^①)Table 2 Productions (ten thousand tons) of nickel mines in major countries in the world (after USGS, 2011—2020^①)

国别	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
印度尼西亚	29	22.8	44	17.7	13	19.9	34.5	60.6	80	76
菲律宾	27	42.4	44.6	52.3	55.4	34.7	36.6	34.5	42	32
俄罗斯	26.7	25.5	27.5	23.9	26.9	22.2	21.4	27.2	27	28
新喀里多尼亚	13.1	13.2	16.4	17.8	18.6	20.7	21.5	21.6	22	20
澳大利亚	21.5	24.6	23.4	24.5	22.2	20.4	17.9	17	18	17
加拿大	22	20.5	22.3	23.5	23.5	23.6	21.4	17.6	18	15
巴西	10.9	13.9	13.8	10.2	16	16	7.86	7.44	6.7	7
古巴	7.1	6.82	6.6	5.04	5.64	5.16	5.28	5.1	5.1	5
美国	0	0	0	0.43	2.72	2.41	2.21	1.76	1.4	2
其余国家	27.66	42.635	54.82	59.17	35.2	34.36	36.99	36.6	37	29
全球总开采量	194	222	263	228	228	209	216	240	270	250

表3 全球主要镍矿项目储量
Table 3 Reserves (ten thousand tons) of major nickel projects in the world

序号	项目名称		所在国家	所属公司	储量/t
	英文	中文			
1	Polar Division	极地	俄罗斯	PJSC MMC Norilsk Nickel	6286000
2	Kingash	金塔什	俄罗斯	ONEXIM Group	2058419
3	Ronnbacken	伦巴肯	瑞典	Archelon AB (Publ)	1174000
4	Kun-Manie	库恩-玛尼耶	俄罗斯	Amur Minerals Corporation	867000
5	Maslovskoe	马斯洛夫斯科	俄罗斯	PJSC MMC Norilsk Nickel	727980
6	Kola Division	科拉师	俄罗斯	PJSC Mining and Metallurgical Company Norilsk Nickel	581000
7	Kevitsa	凯维察	芬兰	Boliden AB	443500
8	Caldag	卡尔达格	土耳其	VTG Holdings A.S.	375000
9	Kulymbinskaya	库林宾斯卡娅	俄罗斯	PJSC MMC Norilsk Nickel	297000
10	Kulikovskoye	库利科夫斯科耶	俄罗斯	Russian Copper Company	204000
11	Skroska	斯克罗斯卡	阿尔巴尼亚	Gerold Sh.pk.	201177
12	Szklary	什克拉里	波兰	Lockett Consulting Services Pt	100800
13	Kivijarvi	基维阿尔维	俄罗斯	ONEXIM Group	88000
14	Karikvavr-2	卡里克瓦-2	俄罗斯	Government of Russia; Murmansk Regiol Property Fund	69000
15	Souker	苏克	俄罗斯	Hannan Metals Ltd.	61800
16	Voronezh	沃罗涅日	俄罗斯	Ural Mining & Metallurgical Co	54100
17	Helongchangren	和龙-长仁	中国	Jilin Jien Nickel Industry Co.	47000
18	Krestovskoye	克里斯托夫斯科耶	俄罗斯	Unmed Owner	34000
19	Kuhmo	库莫	芬兰	Boliden AB	33800
20	Espedalen	埃斯佩丹	挪威	EMX Royalty Corporation	33500
21	Lappvattnet	拉普特奈特	瑞典	Gungnir Resources Inc.	32000
22	Aguablanca	阿瓜布兰卡	西班牙	Disa Corporación Petrolífera S; Prilou, S. L; Beta Asociados, S.L.; Grupo Empresarial Fuertes S.L.	21000
23	Sakharevskoye	萨哈列夫斯科耶	俄罗斯	Government of Russia	18000
24	Tochilnogorskoye	托奇诺戈尔斯科	俄罗斯	Government of Russia	11000
25	Lainejaur	莱内茹	瑞典	Carnaby Resources Ltd.	10100
26	Hautlampi	豪塔兰皮	芬兰	Explores Resources Inc., Private Interest	10000
27	Kungurskoye	昆古斯科耶	俄罗斯	Kungurskoye	9200
28	Ufaleynickel	乌法镍镍合金	俄罗斯	Ufaleynickel; Rezh Nickel Plant	4800
29	Sirrka	西尔卡	芬兰	O Y Alpro Ltd, TME Resources Inc	910

嘉能可、必和必拓、金川集团,中国和印度尼西亚镍铁企业。

(3)镍是新兴矿产之一,在未来一段时间镍资源需求量将持续增加,为缓解镍资源供求矛盾,应该做好全球镍资源的配置,加强镍矿有效供给,加大勘查力度,提高资源利用效率,构建循环利用体系。

注释

① USGS. 2011—2020. Minerals Commodity Summaries[R]. Reston, Virginia, United States Geological Survey.

② Wellmer F W, Becker P J D. 2007. Global Nonfuel Mineral Resources and Sustainability[R]. United States Geological Survey, 1—16.

③ IEA. 2013. Key World Energy Statistics[R]. Paris: International Energy Agency, 1—8.

References

- Amelin Yuri, Li Chusi, Naldrett, A J. 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada by precise U—Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite[J]. Lithos, 47: 33—51.
- Arndt N, Leshner M, Czamanske G K. 2005. Mantle-derived Magmas and Magmatic Ni—Cu—(PGE) Deposits[J]. Economic Geology, 100: 5—23.
- Ayer J, Amelin Yuri, Corfu F, Kamo S, Ketchum J, Kwok K, Trowell N. 2002. Evolution of the southern Abitibi greenstone belt based on U—Pb geochronology: Autochthonous volcanic construction followed by plutonism, regional deformation and sedimentation[J].

- Precambrian Research, 115: 63–95.
- Brenner T L, Teixeira N A, Oliveira J A L, Franke N D, Thompson J F H. 1990. The O'Toole nickel deposit, Morro do Ferro Greenstone Belt, Brazil[J]. *Economic Geology*, 85: 904–920.
- Cao Liang, Li Hong, Duan Qifa, Zhou Yun. 2020. New discovery of Ni–Co (Nb–Ta) mineralization spots in Aikou basic–ultrabasic rock group of Hunan Province[J]. *Geology in China*, 47(2): 544–545 (in Chinese with English abstract).
- Chen Baiyou, Liu Hongtao, Yang Ping, Sun Yuan. 2013. The basin metallogenic regularity of global Lateritic Nickel ore deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 202–206 (in Chinese with English abstract).
- Chen Haoliu, Wu Shuibo, Fu Debin. 1993. *Nickel Deposits*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–199 (in Chinese).
- Chen Zheng, Lei Yuanfen. 1988. The weathering crust oxidic Nickel–Silicate nickel ore formation[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 16(1): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Cui Weijie. 2020. Analysis and forecast of Global Nickel Resource Industry Supply and Demand pattern[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Dalvi D, Ashok, Bacon W, Gordon, Osborne R C. 2010. The past and the future of Nickel Laterites[C]//PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange, 1–27.
- Davies D W, Sutcliffe R H. 1985. U–Pb ages from the Nipigon Plate and Northern Lake Superior[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 96: 1572–1579.
- Deblond A, Tack L. 1999. Main characteristics and review of mineral resources of the Kabanga–Musongati mafic–ultramafic alignment in Burundi[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 29: 313–328.
- Eckstrand O R. 1995. Magmatic nickel–copper–platinum group elements[C]//Eckstrand O R, Sinclair W D, Thorpe R I (eds.). *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Canada: Canada Communication Group, 583–605.
- Elias M. 2002. Nickel laterite deposits—geological overview, resources and exploitation[C]//Cooke D R, Pongratz J (eds.). *Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis, and Exploration*. Hobart: Centre for Ore Deposit Research Special Publication, 205–220.
- Ernst R E, Jowitt S. 2013. Large Igneous Provinces (LIPs) and metallogeny[M]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 17–51.
- Freyssinet P, Butt C R M, Morris R C, Piantone P. 2005. Ore forming processes related to lateritic weathering[C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 681–722.
- Fu Wei, Niu Hujie, Huang Xiaorong. 2011. Metallogenic characteristics and prospecting ideas of typical lateritic nickel deposits in Southeast Asia[J]. *Journal of minerals*, 31(S1): 774–775 (in Chinese).
- Gallon M L. 1986. Structural re–interpretation of the Sele–bi–Phikwe nickel–copper sulphide deposits, Eastern Botswana[J]. *Geological Society of South Africa*, (1/2): 1663–1669.
- Groves D I, Vielreicher R M, Goldfarb R J, Condie K C. 2005. Controls on the heterogeneous distribution of mineral deposits through time[J]. *Geological Society London Special Publications*, 248(1): 11–14.
- Gwimbi P, Nhamo G. 2016. Translating mitigation measures proposed in environmental impact statements into planning conditions: Promises and practices by multinational platinum mining firms along the Great Dyke of Zimbabwe[J]. *Environmental Science & Policy*, 57: 10–21.
- Hanski E, Huhma H, Smolkin V F, Vaasjoki M. 1990. The age of the ferropicritic volcanics and comagmatic Ni–bearing intrusions at Pechenga, Kola Peninsula, USSR[J]. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 62: 123–133.
- Hoatson D M, Glaser L M. 1990. Geology and economics of platinum–group metals in Australia[J]. *Ore Geology Reviews*, 5(3): 247–247.
- Hoatson D M, Jaireth S, Jaques A L. 2006. Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 29(3/4): 177–241.
- Hulbert L J, Hamilton M A, Horan M F, Scoates R F J. 2005. U–Pb zircon and Re–Os isotope geochronology of mineralized ultramafic intrusions and associated nickel ores from the Thompson nickel belt, Manitoba, Canada[J]. *Economic Geology*, 100: 29–41.
- Jaques A L, Jaireth S, Walshe J L. 2002. Mineral systems of Australia: An overview of resources, settings and processes[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 49: 623–660.
- Kamo S L, Czamanske G K, Amelin Yuri, Fedorenko V A, Davis D W, Trofimov V R. 2003. Rapid eruption of Siberian flood volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian–Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 75–91.
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and Saturation in the formation of ore–deposits[J]. *Lithos*, 34(1/3): 1–18.
- Kozlov M V, Zverev V. 2018. Temperature and herbivory, but not pollution, affect fluctuating asymmetry of mountain birch leaves: Results of 25–year monitoring around the copper nickel smelter in Monchegorsk, northwestern Russia[J]. *Science of the Total Environment*, 640–641: 678–687.
- Krogh T E, Davis D W, Corfu F. 1984. Precise U–Pb zircon and baddeleyite ages for the Sudbury area[C]//Pye E G, Naldrett A J, Giblin P E (eds.). *The Geology and Ore Deposits of the Sudbury Structure*. Ontario: Ontario Legislative Library Technical Services & Systems, 431–446.
- Kruger F J, Cawthorn R G, Meyer P S, Walsh K L. 1986. Sr isotopic, chemical and mineralogical variations across the pyroxenite marker and in the Upper Zone of the western Bushveld Complex[J]. *Geological Society of South Africa*, 609–612.

- Leshner C M, Keays R R. 2002. Komatiite-associated Ni-Cu-PGE deposits: geology, mineralogy, geochemistry, and genesis[C]//Cabri L J (ed.). *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements*. Canada: Higher Education Research Data Collection Publications, 579-617.
- Leshner C M. 2004. Footprints of magmatic Ni-Cu(-PGE) systems[C]//Muhling J, Goldfarb R, Vielreicher N, Bierlein F, Stumpfl E, Groves D I, Kenworthy S (eds.). *SEG 2004: Predictive Mineral Discovery under Cover. Extended Abstracts*. Perth: Centre of Global Metallogeny, The University of Western Australia, Publications, 117-120.
- Li Liang. 2018. Features of the Mafic-ultramafic Rocks in the Periphery of Qaidam Block, Qinghai Province and Their Metallogenesis[D]. Changchun: Jilin University, 1-270 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Su Li, Song Biao, Liu Dunyi. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 420-422.
- Lou Debo, Sun Yan, Shan Chengdong, Sun Jia, Xiao Keyan. 2018. Geological characteristics and mineral prediction of Ni ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 67-81 (in Chinese with English abstract).
- Maier W D, Barnes S J. 2010. The Kabanga Ni sulfide deposits, Tanzania: II. Chalcophile and siderophile element geochemistry[J]. *Mineralium Deposita*, 45(5): 443-460.
- Maier W D, Groves D I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 46(8): 841-857.
- Malitch K N, Latypov R M, Badanina I Y, Sluzhenikin S F. 2014. Insights into ore genesis of Ni-Cu-PGE sulfide deposits of the Noril'sk Province (Russia): Evidence from copper and sulfur isotopes[J]. *Lithos*, 204: 172-187.
- Marsh J S, Bowen M P, Rogers N W, Bowen T B. 1992. Petrogenesis of Late Archean flood-Type basic lavas from the Klipriviersberg Group, Ventersdorp Supergroup, South Africa[J]. *Journal of Petrology*, 33(4): 817-8547.
- Mudd G. 2010. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites[J]. *Ore Geology Reviews*, 38: 9-26.
- Mudd G, Jowitt S. 2014. A detailed assessment of global Nickel resource trends and endowments[J]. *Economic Geology*, 109: 1813-1841.
- Mukasa S B, Wilson A H, Carlson R W. 1998. A multielement geochronologic study of the Great Dyke, Zimbabwe: Significance of the robust and reset ages[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 164: 353-369.
- Naldrett A J. 1989. *Magmatic Sulfide Deposits*[M]. New York: Clarendon Press, 177.
- Naldrett A J. 1997. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44: 283-315.
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits; Geology, Geochemistry and Exploration*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 727.
- Nelson D R. 1997. Evolution of the Archean granite-greenstone terranes of the Eastern Goldfields, Western Australia: SHRIMP U-Pb constraints[J]. *Precambrian Research*, 83: 57-81.
- Nicholson S W, Cannon W F, Schulz K J. 1992. Metallogeny of the midcontinent rift system of North America[J]. *Precambrian Research*, 58(1/4): 355-386.
- Paces J B, Miller J D. 1993. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagnetic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98: 13997-14013.
- Parrish R R. 1989. U-Pb Geochronology of the Cape Smith Belt and Sugluk Block, Northern Quebec[J]. *Geoscience Canada*, 16: 126-130.
- Pratt R. 1996. *Australia's Nickel Resources*[M]. Canberra: Bureau of Resource Sciences, 1-52.
- Prendergast M D. 2003. The nickeliferous Late Archean Reliance Komatiitic Event in the Zimbabwe Craton—magmatic architecture, physical volcanology, and ore genesis[J]. *Economic Geology*, 98: 865-891.
- Shu Siqi, Pei Rongfu, Xing Bo, Jin Xue, Huang Daomao. 2015. The progress in the study of the Noril'sk Cu-Ni-PGE sulfide deposit in Russia[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(6): 1100-1109 (in Chinese with English abstract).
- Snow J E, Schmidt G. 1998. Constraints on Earth accretion deduced from noble metals in the oceanic mantle[J]. *Nature*, 391(6663): 166-169.
- Stark J C, Wilde S A, Söderlund U, Li Z X, Rasmussen B, Zi J W. 2018. First evidence of Archean mafic dykes at 2.62 Ga in the Yilgarn Craton, Western Australia: Links to cratonisation and the Zimbabwe Craton[J]. *Precambrian Research*, 317: 1-13.
- Sun Tao, Wang Denghong, Qian Zhuangzhi, Fu Yong, Chen Zhenghui, Lou Debo. 2014. Summary of metallogenic regularity for the nickel deposits, China[J]. *Acta Geological Sinica*, 88(12): 2227-2251 (in Chinese with English abstract).
- Tang Wenlong, Sun Hongwei, Liu Xiaoyang, Wang Jie, Zuo Libo, Wu Xingyuan. 2018. Metallogeny and resource potential of nickel deposits in Middle-Southern Africa[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(1): 53-69 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli. 1992. Classification and geological contrastable significance of super large magmatic sulfide deposits[J]. *Acta Geological Gansu*, 1(1): 24-47 (in Chinese with English abstract).

- Tang Zhongli. 1996. The main mineralization mechanism of magma sulfide in China[J]. *Acta Geological Sinica*, (3): 237–243 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. 1991. Studies of metallogenic regularity of nickel sulfide deposits in China and their prospects[J]. *Mineral Deposits*, 10(3): 193–203 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Yan Haiqing, Jiao Jiangang, Li Xiaohu. 2006. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small instructive bodies[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guan. 2014. Metallogenesis of Nickel Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–237 (in Chinese with English abstract).
- Wang Juli, Zhang Kai, Liu Wenjian, Zhang Wang, Hu Yang, Wang Fei, Wang Peipei. 2021. Discovery of Cu–Ni sulfide mineralization in the Taipinggou area, Zhen'an County, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 48(1): 341–342 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Wang Denghong, Sun Tao, Huang Fan. 2020. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. *Acta Geological Sinica*, 94(1): 217–240 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Wilde S A, Zhang Guangliang, Sun Deyou. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu–Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781–797.
- Zhu Yonggang, Shao Yongjun, Li Langtian, Yang Yihua, Wu Jibing. 2013. Geological features and genesis of the Moeng manganese ore deposit in Botswana[J]. *Geology and Exploration*, 49(4): 777–783 (in Chinese with English abstract).
- 陈浩疏, 吴水波, 傅德彬. 1993. 镍矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1–199.
- 陈正, 雷蕴芬. 1988. 风化壳氧化镍–硅酸镍矿石建造[J]. *成都地质学院学报*, 16(1): 1–19.
- 崔伟杰. 2020. 全球镍资源产业供需格局分析及预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–85.
- 付伟, 牛虎杰, 黄小荣. 2011. 东南亚典型红土型镍矿床的成矿特征与找矿思路[J]. *矿物学报*, 31(S1): 774–775.
- 李良. 2018. 柴达木周缘镁铁质–超镁铁质岩特征及成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1–270.
- 娄德波, 孙艳, 山成栋, 孙嘉, 肖克炎. 2018. 中国镍矿床地质特征与矿产预测[J]. *地学前缘*, 25(3): 67–81.
- 舒思齐, 裴荣富, 邢波, 金雪, 黄道衷. 2015. 俄罗斯诺里尔斯克铜镍硫化物矿床研究进展[J]. *地质通报*, 34(6): 1100–1109.
- 孙涛, 王登红, 钱壮志, 付勇, 陈郑辉, 娄德波. 2014. 中国镍矿成矿规律初探[J]. *地质学报*, 88(12): 2227–2251.
- 唐文龙, 孙宏伟, 刘晓阳, 王杰, 左立波, 吴兴源. 2018. 中南部非洲镍矿成矿规律及资源潜力分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 48(1): 53–69.
- 汤中立. 1992. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义[J]. *甘肃地质学报*, 1(1): 24–47.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. *地质学报*, (3): 237–243.
- 汤中立, 李文渊. 1991. 中国硫化镍矿床成矿规律的研究与展望[J]. *矿床地质*, (3): 193–203.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 李小虎. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. *矿床地质*, 25(1): 1–9.
- 王冠. 2014. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1–237.
- 王居里, 张凯, 刘文建, 张望, 胡洋, 王飞, 汪佩佩. 2021. 陕西镇安太平沟发现类铜镍硫化物矿化[J]. *中国地质*, 48(1): 341–342.
- 王岩, 王登红, 孙涛, 黄凡. 2020. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. *地质学报*, 94(1): 217–240.
- 朱永刚, 邵拥军, 李朗田, 杨艺华, 吴继兵. 2013. 博茨瓦纳莫能锰矿床地质特征及成因[J]. *地质与勘探*, 49(4): 777–783.

附中文参考文献

- 曹亮, 李宏, 段其发, 周云. 2020. 湖南隘口基性–超基性岩群发现镍钴(镍钼)矿化点[J]. *中国地质*, 47(2): 544–545.
- 陈百友, 刘洪滔, 杨平, 孙媛. 2013. 全球红土型镍矿床的基本成矿规律[J]. *矿床地质*, 34(1): 202–206.