

文章编号: 0258-7106 (2005) 03-0325-11

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究的几个问题探讨*

柴凤梅^{1,2}, 张招崇¹, 毛景文^{1,4}, 董连慧³, 张作衡⁴

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 新疆大学资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 文章简述了岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的主要特点和研究现状, 探讨了矿床的成矿机制, 认为其成矿的首要条件是岩浆中硫达到饱和而使硅酸盐岩浆与硫化物熔体发生熔离。综述了如何利用同位素方法确定其成矿物质来源, 介绍了如何判别硫饱和度的方法。

关键词 地质学; 岩浆作用; 熔离作用; Cu-Ni-PGE 矿床; 铈-钕同位素; 硫的饱和状态; 综述

中图分类号: P618.53

文献标识码: A

岩浆型 Cu-Ni-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(汤中立, 1992; 范育新等, 1999), 是赋存 Cu、Ni 及铂族元素的重要矿床类型。它们占世界镍、铂开采量的一半以上, 占世界铜储量的 5.5% (汤中立等, 1995; 陈毓川等, 2000; 王瑞廷等, 2003)。因此, 研究岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床对于世界经济的发展具有重要的意义。

对岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的研究始于加拿大 Sudbury 矿床(1886 年)的发现, 距今已有 150 多年的历史。由于最初受 Sudbury 矿床模式的影响, 将大型层状侵入体的底部接触带作为找寻岩浆铜镍硫化物矿床的重点, 先后发现和开发了 Bushveld、Great Dyke、Stillwater、Skaergaard 等矿床, 但是它们的矿床品位均不及 Sudbury 矿床高(Maier et al., 2001)。近半个世纪以来, 金川、Noril'sk、Voisey's Bay、Uitkomst 等一些矿床的发现, 开阔了该类矿床的找矿新思路。经过了一百多年的研究, 在矿床成矿时代、成矿地质环境、成矿机制、成矿物质来源、含矿岩体特征及成矿规律等方面取得了大量的研究成果和进展, 对矿床成因也有了进一步的认识。

尽管如此, 对于岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床仍有许多有争论的问题, 如作为研究重点, 硫化物的熔离与富集过程一直是争议的焦点。本文简述了该类矿床的主要特点和研究进展, 并对岩浆不混溶作用的形成机制、矿床成矿物质来源、岩浆中硫的饱和度判断等问题作了探讨。

1 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床分类

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床分类方案较多, 这些分类

方案多与镁铁质和超镁铁质岩石的特征有关。如: Wyllie (1967) 根据岩体规模、岩石组合以及化学成分的分类方案, Thayer (1971) 根据岩体的物源以及岩浆侵位时的状态的分类方案等。Ross 等(1981) 根据含矿岩石类型将岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床划分为 3 个大类 6 个亚类。Naldrett (1989; 1997) 在 Wyllie (1967)、Thayer (1971) 及 Naldrett 等(1971) 提出的分类基础上, 根据矿床所处的构造环境以及含矿岩石特征将其划分为 4 个大类 13 个亚类。陈浩疏等(1993) 根据构造环境及含矿岩体类型划分了 4 个大类 7 个亚类。汤中立等(1995) 根据成矿时代以及构造岩浆组合将其划分为 5 个大类。其中具代表性的分类列于表 1。由表 1 可知, 尽管不同学者的分类方案有所不同, 但他们的分类均建立在含矿岩石的类型和岩石组合及其构造环境的基础上。

2 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床分布及资源概况

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床在世界上分布极不均匀, 主要集中于加拿大、前苏联、澳大利亚、中国、南非、美国等少数几个国家(图 1)。这些矿床赋存于前寒武纪绿岩带、大陆内部裂谷、大陆边缘裂谷及活动造山带内, 多形成于太古代、古元古—中元古代、新元古代、晚古生代的二叠纪及中生代的三叠纪。世界主要的岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床特征列于表 2。由表 2 可知, 中国的岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的成矿时代集中在新元古代(如: 金川、宝坛和煎茶岭)和二叠纪(如: 喀拉通克矿床、黄山东矿床、红旗岭矿床、白马寨矿床等), 构造环境具多样性(Zhou et al., 2004), 缺乏大型层状

* 本文得到国家自然科学基金项目(40402012)、国家 305 项目(2001BA609A-07-02)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043211)的资助

第一作者简介 柴凤梅, 女, 1971 年生, 讲师, 在职博士研究生, 从事岩石学与矿床学的教学与研究。

收稿日期 2004-12-30; 改回日期 2005-4-15。李岩编辑。

表 1 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床主要分类法一览表

Table 1 Classifications of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits in the world

分类来源及分类原则	矿床类型			矿床实例
Naldrett , 1973 ; 1989 ; 1997 构造环境及含矿岩体类型	绿岩带型矿床	科马提岩矿床		Ka mbald
		拉斑玄武岩矿床	苦橄质矿床	Lynn Lake
			斜长辉长岩矿床	Montcal m
	大陆边缘裂谷型矿床	与大陆地壳有关的矿床	与科马提岩有关的矿床	Thompson
			与拉斑玄武岩有关的矿床	金川
		与大陆地壳无关的矿床	蛇绿岩型矿床	Za mbales
	克拉通矿床	与溢流玄武岩有关的矿床		Noril' sk
		与苦橄质拉斑玄武岩有关的矿床		Pechenga
		与斜长岩有关的矿床		Voisy' s Bay
		大型层状侵入体矿床		Bushveld
		陨石成因矿床		Sudbury
	活动造山带型矿床	同造山侵入体矿床		Moxie
		阿拉斯加型杂岩体矿床		Duke Island
Ross et al . ,1981 含矿岩石类型	与纯橄榄岩-橄榄岩有关的矿床	与纯橄榄岩侵入体有关的矿床		Thompson
		与火山橄榄岩有关的矿床		Abitibi
	与辉长岩有关的矿床	与镁铁质-超镁铁质侵入体有关的矿床		Lynn Lake
		与大型层状侵入体有关的矿床		Bushveld
		Sudbury 型矿床		Sudbury
	其他类型矿床	层状沉积矿床、脉型含砷矿床		温达拉
陈浩琉等 ,1993 构造环境及含矿岩体类型	前寒武纪绿岩型矿床	与超镁铁质熔岩流有关的矿床		Ka mbald
		与超镁铁质侵入体有关的矿床		Perseverance
		与拉斑玄武岩有关的矿床		Lynn Lake
	与大陆裂谷有关的矿床	与溢流玄武岩有关的矿床		Noril' sk
		大型层状侵入体矿床		Bushveld
	显生宙造山带内矿床	与镁铁质-超镁铁质侵入体有关的矿床		喀拉通克
汤中立等 ,1995 成矿时代、构造环境及岩石组合	Sudbury 型矿床		Sudbury	
	元古宙与古陨石坑有关的矿床		Sudbury	
	元古宙以后与大陆裂解有关的小型侵入体矿床		金川	
	显生宙与大陆裂谷溢流玄武岩有关的矿床		Noril' sk	
	太古宙绿岩带与科马提岩有关的矿床		Perseverance	
	早元古代大陆层状侵入体矿床		Bushveld	

侵入体矿床,多为含矿小岩体矿床。澳大利亚的矿床则较为古老,多分布于太古代绿岩带中(如 Kambalda-Perseverance-Mt-Keith 矿带),均与科马提岩有关。加拿大的矿床类型最为丰富(如:陨石成因的 Sudbury 矿床,绿岩带型的 Abitibi 矿床、Lynn lake 矿床,大陆裂谷型的 Thompson 矿床,岩浆通道型的 Voisey's Bay 矿床)。前苏联则既有最年轻的矿床(如形成于二叠纪末—三叠纪初的 Noril'sk 矿床),又具有世界上最大的与铁质苦橄岩有关的矿床(如 Pechenga 矿床)。南非则具有世界上最大的层状侵入体矿床(Bushveld-Uitkomst 矿床)。美国主要有与溢流玄武岩有关的矿床(如 Duluth 矿床)及与层状侵入体有关的含 PGE 的矿床(如 Stillwater 矿床)。

3 岩浆不混溶作用的形成机制

关于岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的成因先后有学者提出了岩浆熔离说、热液交代说、变质成矿说,但自从 Vogt

(1894)提出岩浆硫化物不混溶机制(即岩浆熔离说)以来,就一直被广为接受(王瑞廷,2002)。只有加拿大的 Sudbury 被认为是陨石撞击成因的典例(Naldrett, 1989; 1997; 2004a; 陈浩疏等,1993;汤中立等,1995)。研究岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿机理实际上就是研究母岩浆如何产生、演化,成矿元素如何运移、富集、沉淀形成矿床的。一般认为,岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成首先是基性-超基性岩浆中的硫化物达到饱和而与硅酸盐岩浆发生熔离,在此过程中亲铜元素进入分离出的硫化物熔体。硫化物熔体进而在一定的空间内与足够的硅酸盐岩浆混合导致亲铜元素品位提高(Naldrett, 1999; 2004a)。这些高品位的亲铜元素保存在合适的空间内就可以形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床。由此可见,形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的首要条件是来自地幔的硅酸盐岩浆中的硫达到饱和而使硫化物熔体与硅酸盐岩浆发生熔离。

硫在上地幔中的含量约为 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$

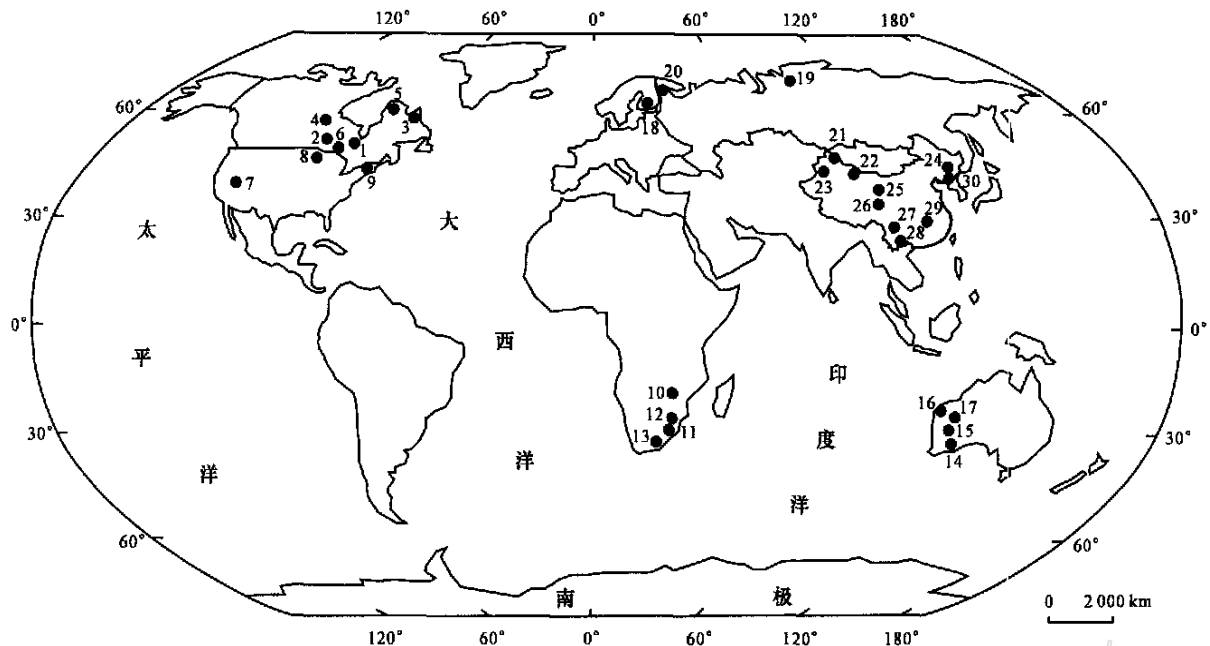


图1 世界主要岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床分布图(据 Naldrett, 1997; 2004a; Zhuo et al., 2004; Tang et al., 2004)
矿床名称: 1—Sudbury 矿床; 2—Thompson 矿床; 3—Voisey's Bay 矿床; 4—Lynn Lake 矿床; 5—Raglan 矿床; 6—Abitibi 矿床; 7—Stillwater 矿床; 8—Duluth 矿床; 9—Moxie 矿床; 10—Great Dyke; 11—Bushveld 矿床; 12—Utikomst 矿床; 13—Insizwa 矿床; 14—Kambalda 矿床; 15—Perseverance 矿床; 16—Muni Muni 矿床; 17—Mt. Keith 矿床; 18—Penikat 矿床; 19—Noril'sk 矿床; 20—Pechenga 矿床; 21—喀拉通克矿床; 22—黄山矿床; 23—箐布拉克矿床; 24—红旗岭矿床; 25—金川矿床; 26—拉水峡矿床; 27—金宝山矿床; 28—白马寨矿床; 29—大坡岭矿床; 30—赤柏松矿床

Fig.1 The distribution of magmatic Cu-Ni-PGE deposits in the world (after Naldrett, 1997; 2004a; Zhuo et al., 2004; Tang et al., 2004)

Deposits: 1—Sudbury; 2—Thompson; 3—Voisey's Bay; 4—Lynn Lake; 5—Raglan; 6—Abitibi; 7—Stillwater; 8—Duluth; 9—Moxie; 10—Great Dyke; 11—Bushveld; 12—Utikomst; 13—Insizwa; 14—Kambalda; 15—Perseverance; 16—Muni Muni; 17—Mt. Keith; 18—Penikat; 19—Noril'sk; 20—Pechenga; 21—Kalatongke; 22—Huangshan; 23—Jinbulake; 24—Hongqiling; 25—Jinchuan; 26—Lashuixia; 27—Jinbaoshan; 28—Baimazhai; 29—Dapoling; 30—Chibaisong

(Lorand, 1990; McDonough et al., 1995; Keays, 1995; Rehkamper et al., 1999; Maier et al., 1998; Lambert et al., 1998a), 主要以硫化物(以镍黄铁矿为主)形式存在(Keays, 1995)。当上地幔中硅酸盐矿物发生熔融时,硫化物将随之一起熔融,在此过程中进入硅酸盐岩浆中的硫的数量主要是由地幔源特征和熔融程度决定的(Naldrett, 1973; Keays, 1995; Lightfoot et al., 1997)。有研究表明,当部分熔融程度达到 25% 时,上地幔中的硫将全部进入岩浆(Keays, 1995)。

理论上认为,经上地幔部分熔融形成的岩浆中硫的含量可以在 2.5% (经过 1% 部分熔融形成的钾质和超钾质岩浆) ~ 0.05% (经 50% 部分熔融形成的科马提岩浆) 之间。然而,现今大多数的基性岩浆和科马提岩浆只含有 0.2% ~ 0.01% 的硫(Maier et al., 1998),很少超过 0.5% (Leshner et al., 1981; Keays, 1995),这主要是由于硅酸盐岩浆只能溶解少量的硫所致。实验研究表明,硫在硅酸盐熔体中的溶解度不但与熔体成分有关,而且是温度、压力、氧逸度、硫逸度的函数

(Naldrett, 1989; Wendlandt, 1982; Lightfoot et al., 1997)。在 Fe-O-S 及 Fe-Ni-S 体系中,硫的溶解度与温度成正比,与压力成反比;常压条件下,与硅酸盐熔体中的 SiO₂ 含量成反比,与 FeO 的含量成正比(Irvine, 1975; Lightfoot et al., 1997; 刘月星, 1997; 朱永峰, 1998)。已有实验证明,基性岩浆中硫的溶解度为 0.05% ~ 0.26% (Wendlandt, 1982; Maier et al., 1998),科马提岩浆中硫的溶解度为 0.3% ~ 0.5% (Shima et al., 1975; Naldrett, 1989)。

当溶入硅酸盐岩浆中的硫达到饱和时, S 就会与 Ni、Cu、Fe、Co 及 PGE 等元素结合而形成一种不混溶的硫化物熔体,它的量主要由体系的氧逸度、硫逸度决定(Shima et al., 1975; 朱永峰, 1998)。这种不混溶的硫化物将从硅酸盐熔体中熔离出来聚集在一起而呈“珠滴”状,它们或者由于重力作用沉淀下来保留在源区,或者呈不混溶的硫化物液滴悬浮于硅酸盐岩浆中随其一起上升(Naldrett, 1973),这取决于硫在硅酸盐岩浆中的溶解度,体系的氧化-还原状态、硅酸盐岩浆的粘度

表 2 岩浆型铜镍硫化物矿床特征一览表

Table 2 Characteristics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits in the world

时代	构造环境	与矿床有关的岩石类型	矿床实例及年龄	储量/Mt, w _S /%	岩浆系列
显生宙	大陆内部裂谷(克拉通)	溢流玄武岩侵入体	Noril'sk(前苏联), 246 Ma(Re-Os 法, Walker et al., 1994; 蒋少蒲等, 2000)	1309, 1.77(Naldrett, 2004b)	拉斑玄武岩
		活动造山带	白马寨(中国) 258 Ma(Wang et al., 2004)	0.06, 4(Wang et al., 2004)	拉斑玄武岩
		铁质中性-基性侵入体	喀拉通克(中国) 287 Ma(锆石 SHRIMP, 韩宝福等, 2004)	24, 0.65(Zhang et al., 2004)	钙碱性玄武岩
		铁质超基性侵入体	红旗岭(中国) 216 Ma(锆石 SHRIMP, Wu et al., 2004)	0.2, 3~5(Xi et al., 2004)	拉斑玄武岩
元古宙	大陆边缘裂谷	铁质超基性-基性侵入体	黄山东(中国) 282 Ma(Re-Os 法, 毛景文等, 2002)	69, 2, 0.52(Qin et al., 2003)	拉斑玄武岩
			香山(中国) 286 Ma(单颗粒锆石 U-Pb 法, 秦克章, 2000)	8, 0.5(Qin et al., 2003)	拉斑玄武岩
		铁质超基性侵入体	煎茶岭(中国) 878 Ma(Re-Os 法, 王瑞廷, 2002)	65, 3, 0.49(Qin et al., 2003)	拉斑玄武岩
		超镁铁质侵入体(纯橄橄榄岩)	Thompson(加拿大) 1.8 Ga(Naldrett, 1971)	150, 2.32(Naldrett, 2004b)	科马提岩浆
		镁铁质基性岩	宝坛(中国) 982 Ma(Re-Os 法, 毛景文等, 2001)	不详	科马提岩浆
		铁质超基性侵入体	金川(中国) 1.5 Ga(Sm-Nd 法, 汤中立, 2002) 1.408 Ma(Re-Os 法, Keays, 2004); 827 Ma(SHRIMP, 李献华等, 2004)	515, 1.06(Naldrett, 1999)	苦橄质拉斑玄武岩
		铁质基性-超基性侵入体	Pechenga(前苏联) 1.9 Ga(Naldrett, 2004b)	339, 1.18(Naldrett, 2004a)	铁质苦橄岩
		溢流玄武岩侵入体	Duluth(美) 1.12 Ga(Re-Os 法, Ripley et al., 1998)	4000, 0.2(Naldrett, 1999)	拉斑玄武岩
		斜长岩	Voisey's Bay(加拿大) 1.334 Ga(Re-Os 法, Lambert et al., 1999)	137, 1.59(Naldrett, 2004b)	拉斑玄武岩
		与辉长岩有关的大型层状侵入体	Bushveld(南非) 2.05 Ga(Re-Os 法, Schoenberg et al., 1999)	2300, 0.35(汤中立, 2002)	拉斑玄武岩
太古宙	绿岩带	陨石成因	Sudbury(加拿大) 1.85 Ga(Re-Os 法, Walker et al., 1991)	1648, 1.2(Naldrett, 1999)	拉斑玄武岩
		超镁铁质熔岩	Kambalda(西澳) 2.7 Ga(Re-Os 法, Foster et al., 1996)	66, 2.9(Naldrett, 1999)	科马提岩浆
			Abitibi(加拿大) 2.7 Ga(Re-Os 法, Lahaye et al., 2001)	不详	科马提岩浆
		超镁铁质侵入体(纯橄橄榄岩)	Perseverance(西澳) 2.7 Ga(Leshner et al., 2002)	52, 1.9(Naldrett, 1999)	科马提岩浆
		镁铁-超镁铁质侵入体	Lynn Lake(加拿大) 2.75 Ga(Ruttan, 1955; Naldrett, 1971)	不详	苦橄质拉斑玄武岩
		与辉长岩有关的大型层状侵入体	Stillwater(美) 2.7 Ga(Re-Os 法, Lambert et al., 1998b)	不详, 0.5(Maier et al., 2001)	拉斑玄武岩

以及熔体的温度持续的时间(解广轰等,1998)。如果岩浆粘度较大而且温度下降较快,硫化物“珠滴”则来不及沉降到岩浆底部,只能悬浮于硅酸盐岩浆中形成球状(粒)或浸染状矿石构造;如果岩浆粘度较小而且温度下降较慢,硫化物“珠滴”则可以沉降于岩浆底部,从而形成块状矿石构造(Naldrett,1973;谭劲等,1998)。

如果在岩浆形成的早期硫就达到饱和,那么硫化物从硅酸盐岩浆中熔离出来,就使岩浆中的 Cu、Ni、PGE 等元素的浓度大大降低,以后即使有大量的硫加入,也难以形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(Lightfoot et al.,1997)。研究表明,大多数玄武岩岩浆(MORB 除外)在形成之初离开上地幔时硫都是不饱和的(Keays,1995;Naldrett,1997;1999),而世界上大型岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床都位于与之相关的岩体底部,这表明岩浆最后就位时硫是饱和的。那么硫一定是在岩浆演化的过程中通过某种作用达到了饱和。

引起硫饱和的机制主要有:

(1) 岩浆的混合作用: Irvine(1975)和 Campbell 等(1983)的实验研究表明,原始的富含 FeO 的热岩浆与分异的贫 FeO 的冷岩浆混合可以改变硫的饱和曲线,使硫进入过饱和区。Irvine 等(1983)研究表明,两种或两种以上成分差异较大的岩浆混合,可以促进岩浆房中的硫饱和并形成不混溶的硫化物。国外的一些学者研究表明,Bushveld 杂岩体的 Merensky 矿层的形成是由 2 种不同的岩浆混合的结果,并且其中有一种岩浆含有大量的地壳成分(Lambert et al.,1998a);Stillwater 杂岩体的 J-M 矿层的形成是 2 种不同的岩浆(超镁铁质 U 型岩浆和斜长岩质 A 型岩浆)在岩浆房内混合的结果(Campbell et al.,1983;Lambert et al.,1998b;熊永良,1994)。李文渊(1996)在对金川矿床中的 PGE 分布特征研究后认为,金川含矿岩体可能由 2 种不同岩浆混合而成。

(2) 岩浆温度的快速降低:这种机制在侵入体的边部表现最为明显。由于岩浆与围岩接触而使热量散失,温度迅速下降而使硫达到饱和。在 Bushveld 杂岩体底部出现的硫化物、Duluth 矿床、Skaergaard 矿床和 Great Dyke 矿床被认为是岩浆温度迅速下降而形成的(Maier et al.,1998)。

(3) 岩浆的快速分异:岩浆在结晶出铬铁矿及磁铁矿时,其中的 FeO 含量迅速降低,从而使硫的溶解度降低而达到饱和(Haughton et al.,1974)。此机制可以解释 Bushveld 杂岩体中的铬铁矿中含有大量金属硫化物这一现象。

(4) 围岩混染:这种机制是形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床最重要的机制(如 Sudbury, Duluth, Voisey's Bay 和 Petchenga 矿床)。它可以通过 2 种方式使得硫化物达到饱和(Maier et al.,2002):①Irvine(1975)实验研究证明,富含 SiO₂ 的物质的加入可以降低岩浆中硫的溶解度。Naldrett(1989)研究表明,岩浆中 SiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO 及氧逸度等的变化对硫的溶解度有明显的影响。Lightfoot(1997),Ripley 等(2003)研究表明,Noril'sk 矿床的 Nadezhdinsky 矿化层的形成主要是由富含 SiO₂ 的地壳物质的加入引起的,而与富

含硫的围岩无关;张招崇等(2003a)对喀拉通克矿床研究后认为,该矿床的硫化物不混溶作用的发生主要与地壳富硅物质的混染有关,没有外来硫的加入。②Leshner 等(1993;1996)的研究证明,富含硫的围岩进入岩浆可以使其中的硫化物达到饱和,如 Duluth 矿床与 Voisey's Bay 矿床均是由于含硫围岩的加入形成的(Lambert,1998a);Noril'sk 矿床硫同位素数据表明,沉积围岩中的膏盐层与硫化物层对其形成具有一定的贡献(Ripley et al.,2003)。然而,目前对于围岩中的硫如何进入岩浆这一问题,仍然有多种见解。Ripley 等(1988)认为,围岩中的硫可以通过气运作用进入岩浆而使其达到饱和;Maier 等(2002)认为,围岩中的硫可以通过液化作用和部分熔融作用进入岩浆中。

由此可见,引起岩浆中的硫达到饱和的机制主要有:岩浆的结晶分异、温度压力的快速变化、地壳物质的混入以及不同成分岩浆的混合。然而对于任何一个岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床来说,其岩浆中的硫达到饱和的机制可以是一种,也可以是几种,如 Kambalda 矿床主要是由温压条件的变化形成的(Foster et al.,1996);而 Duluth 矿床、Voisey's Bay 矿床、Noril'sk 矿床及红旗岭矿床的形成则既有围岩混染作用又有岩浆的结晶分异作用(Naldrett,1997;Maier et al.,1998;Wu et al.,2004);Bushveld 矿床及 Stillwater 矿床既有两种岩浆混合作用也有岩浆温压的快速变化及围岩的混染作用(Lambert,1998a;1998b;Maier et al.,1998)。

4 岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿物质来源

形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的物质基础是硫及金属元素,而且研究物质来源对于理解开放体系的母岩浆演化的动力学过程有重要的作用(Lambert,1998a)。确定物源的最有效的手段是对其稳定同位素和放射性同位素进行研究。

了解岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床中硫来源的最好的方法是直接研究它的硫同位素特征(Lambert,1998a),很多矿床的硫同位素特征揭示了壳源硫的混入对矿床的形成起着重要的作用(Godlevskii et al.,1963;Ripley,1981;Zientek et al.,1990;Lambert,1998a),如 Duluth 矿床和 Voisey's Bay 矿床。

Sr-Nd、Rb-Sr、U-Th-Pb 等放射性同位素测试是较为常用的了解物质来源的工具,然而,Sr-Nd、Rb-Sr 是亲石元素,与金属元素具有明显不同的地球化学特征,而且它们在硫化物中的分配系数很小($D < 1$,Naldrett,1989),因此不利于研究岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床中的金属来源;虽然 Pb 在岩浆硫化物体系中的分配系数 $D = 50$,但它也是一种亲石元素,不能进入到金属晶格中,因此也只是提供一种金属来源的间接信息,而且它主要与 Cu、Ni 一起富集于热液硫化物体系中,所以,也不利于研究岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床中的金属来源。

Re-Os 同位素测试是近年来发展起来的了解金属矿床中金属来源及矿床年龄的最常用的方法,也是目前国际上广泛用于岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床研究的最新手段。这是由于 Re、Os 均是亲铜元素,并具有较高的硫化物熔体/硅酸盐熔体分配系数($D > 100$, Lesher et al., 1993; 1996),它们皆在不混溶硫化物中富集,同时 Os 也是铂族元素,因而可以直接提供成矿流体及岩浆中贵金属来源的信息。另外,Re 相对于 Os 来说主要分布于地壳中,因此地壳中有较高的 Re/Os 比值以及高的放射成因 Os,而亏损的岩石圈地幔和接近球粒陨石的软流圈地幔则有较低的 Re/Os 比值以及低的放射成因 Os,地壳中物质的混入可以引起 Re/Os 比值的明显变化,使之可以用来检验岩浆是否受到过地壳物质的混染。Re-Os 同位素体系可以作为岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿作用有效的示踪剂和成矿过程中地壳物质混入程度的灵敏的指示剂(Foster et al., 1996; Lambert et al., 1999)。目前常用 $\gamma_{Os}(t)$ 作为指示地壳物质加入成矿体系的参数。 $\gamma_{Os}(t)$ 是表示样品钨同位素组成在某一特定时间 t 相对于当时球粒陨石平均值的钨同位素组成差异,即 $\gamma_{Os}(t) = \left[\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_{\text{样品}}(t) / \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_{\text{球粒陨石}}(t) - 1 \right] \times 100$ (Walker et al., 1989; 1994)。其中, $\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_{\text{球粒陨石}}(t) = \left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_{\text{初始}} + \frac{^{187}\text{Re}}{^{188}\text{Os}} (e^{\lambda t} - e^{-\lambda t})$, $\left(\frac{^{187}\text{Os}}{^{188}\text{Os}} \right)_{\text{初始}} = 0.09531$, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os} = 0.40185$, T (地球形成年龄) = 4.558 Ga (Shirey et al., 1998), $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$ (Smoliar et al., 1996)。若 $\gamma_{Os}(t)$ 值高,亦即样品具有较高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值,说明体系富放射成因 Os,表明地壳物质加入成矿体系较多;反之则表明地壳物质加入成矿体系较少。此外,Re-Os 同位素体系封闭性好,受后期改造很弱,可以用它直接准确地测定金属矿床的成矿时代(Stein et al., 1998; 毛景文等, 2002)。因此,Re-Os 的特殊地球化学性质使之在岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的研究方面发挥了巨大的作用。

通过对世界上许多大型和超大型岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(如 Stillwater、Bushveld、Duluth、Sudbury、Voisey's Bay、Noril'sk、Kambalda、金川、黄山东、红旗岭、宝坛、煎茶岭) Re-Os 同位素体系的研究,揭示出这类矿床的成矿物质既可以完全源于地幔,如 Kambalda 矿床(Foster, 1996),也可以完全源于地壳,如 Sudbury 矿床(熊永良, 1994; 蒋少涌等, 2000),但多数情况则是壳幔混合源,如 Stillwater、Bushveld、Duluth、Sudbury、Voisey's Bay、Noril'sk、黄山东及宝坛矿床,这表明地壳混染作用对此类矿床的形成具有重要的作用。传统上认为由幔源物质形成的矿床在成矿过程中绝大多数均有不同比例的地壳物质的参与(熊永良, 1994; 蒋少涌等, 2000)。

虽然 Re-Os 同位素方法的应用使人们对岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的成矿物质来源有了新的认识,使得其成矿动力学模型的建立有了一定的发展,但是目前对于壳源物质混合的时间和方式仍存在不同的看法,如:既可能是岩浆上侵过程中同化混染了壳源物质,也可能是岩体固结后,后期

热液活动淋滤活化了围岩中的放射成因 Os,并带入成矿体系中(蒋少涌, 2000; Ripley et al., 1998; Marcantonio et al., 1994)。另外,Re-Os 同位素数据与部分地球化学数据还有相互矛盾之处,还存在着一些难以解释的问题,如 Kambalda 矿床的 Re-Os 同位素数据表明,它的物质来源与科马提岩底部的沉积物无关(Foster et al., 1996),但其 $\delta^{34}\text{S}$ 值与沉积物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相同则表明有沉积物的混入;Noril'sk 矿床的 Re-Os 同位素数据指示,其物源为硫饱和的富集地幔,并没有地壳物质的参与,而 Noril'sk 矿床的常量元素、微量元素以及放射性同位素数据却表明地壳物质的加入对该矿床的形成起了重要的作用。因此,在使用 Re-Os 同位素数据时只有结合其他的地球化学资料,才可能正确揭示出岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成过程。

5 岩浆中硫的饱和度判断

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿的关键是岩浆中的硫达到饱和,但是依据现存岩石中的硫含量无法判断岩浆在上侵(或喷发)过程中是否达到了饱和,也无法确知硫饱和的时间与位置。然而,现存岩石的一些特征参数与岩浆中硫的状态有一定的相关性,可以通过对它们的研究来判断岩浆中的硫是否达到饱和,从而为矿床研究提供有力的证据。

(1) 利用橄榄石中的镍含量判断硫是否达到饱和

Ni 既有亲石性又有亲硫性。Ni 与 Mg 具有相近的有效离子半径(约 $7 \times 10^{-23} \text{ m}$), Ni 可以作为 Mg 的类质同像混入物进入含镁较高的橄榄石晶格中,同时 Ni 在橄榄石中的分配系数小于其在硫化物中的分配系数。也就是说,在硫不饱和的岩浆中 Ni 优先进入富含 Mg 的橄榄石中;当岩浆中的硫达到饱和时, Ni 则与硫优先结合形成不混溶的硫化物,此时结晶的橄榄石中的 Ni 含量将大大降低,而其中的 MgO 并不发生变化。一般在硫不饱和的岩浆中结晶的橄榄石中的 Ni 与 MgO 呈正相关关系(Stanley et al., 1978),因此可以通过橄榄石的 Ni-MgO 关系图解了解岩浆中硫的状态(Maier et al., 1998)。Li 等(1999)对 Voisey's Bay 矿床中橄榄石的研究表明,含矿岩石中橄榄石的 Ni 含量低于不含矿岩石。Li 等(2001)在对加拿大的 Pants Lake 侵入体与 Voisey's Bay 矿床的对比研究中发现, Pants Lake 中的橄榄石的 Ni 含量较后者高。Li 等(2002)在对南非的 Uitkomst 矿床的研究后发现,含矿的方辉橄榄岩中橄榄石的 $w_{\text{Ni}} = 1\,500 \times 10^{-6}$,而在不含矿的方辉橄榄岩中橄榄石的 $w_{\text{Ni}} = 2\,900 \times 10^{-6} \sim 3\,600 \times 10^{-6}$,而且认为,含矿辉石岩中橄榄石的 Ni 含量的急剧降低不是由橄榄石的结晶造成的,而是由于硫化物的熔离引起的。

(2) 利用岩浆中的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 判断硫是否达到饱和

Pd 与 Cu 均是亲硫元素,在岩浆分异过程中具有相似的行为,但是 Pd 的硫化物/硅酸盐分配系数($D = 35\,000$)远高于 Cu 相应的分配系数($D = 245 \sim 1\,383$)(Maier et al., 1998; Keays, 1995; Vogel et al., 1997),因此硫对 Pd、Cu 的地球化学行为的影响程度有明显的区别,即 Pd 在硫不饱和的岩浆中

相对于 Cu 明显富集,而在硫饱和的岩浆中明显亏损。所以可以利用岩浆中的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 判定岩浆中硫的状态,也就是说,硫不饱和的岩浆中的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 小于硫饱和的岩浆中的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 。Maier 等(1998)研究认为, $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}} > 6\,500$ (原始地幔)表明岩浆经过了硫化物的熔离作用,反之则表明岩浆中的硫处于不饱和状态。为了更加直观地判断硫的状态, Vogel 等(1997)设计了 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 关系图解,张招崇等(2003b)则将其用一公式表示,即如果:

$$\lg(w_{\text{Pd}}/10^{-9}) > 0.632 \lg(w_{\text{Cu}}/10^{-6}) + 0.267,$$

就表明硫不饱和,反之则为饱和。Vogel 等(1997)研究了澳大利亚 NVP(Newer 火山岩省)的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 之后认为,它们经历了硫的饱和过程。王瑞廷等(2004)对金川矿床的研究表明,该矿床的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 值远大于原始地幔的相应比值,说明了金川矿床的母岩浆经历了硫的饱和,发生了硫化物的熔离。王瑞廷等(2005)通过对煎茶岭矿床的研究,指出其小于原始地幔的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Pd}}$ 值揭示了其成矿母岩没有经历硫的饱和,岩浆熔离作用较弱的特征。

(3) 利用岩浆中的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Zr}}$ 判断硫是否达到饱和

Cu 与 Zr 在硅酸盐岩浆结晶过程中均具有不相容性,不易进入橄榄石、长石等硅酸盐矿物晶格,但是, Cu 是亲硫元素, Zr 却不具亲硫性,因此,在硫化物不饱和的岩浆中, $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Zr}}$ 值应保持不变,当硫达到饱和而使硫化物熔离时, $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Zr}}$ 值将大大降低。Lightfoot 等(1994)研究认为, $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Zr}} < 1$ 可以表明岩浆中的硫达到了饱和。Li 等(1999)研究了 Voisey's Bay 矿床的 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Zr}}$ 值,显示岩浆中的硫达到了饱和。Li 等(1999)通过对 Noril'sk 矿床的研究,明确指出了硫化物达到饱和的位置及亲铜元素亏损的程度。

利用元素含量比值判别岩浆中硫的饱和状态,选择的元素对在物化性质上应有一定的差异。除上述几种元素对外, $w_{\text{Ti}}/w_{\text{Pd}}$ 、 $w_{\text{Cu}}/w_{\text{Ni}}$ 等也可以用来判断硫的饱和状态。常用的判别岩浆是否经历过硫饱和的方法还有许多,如同位素特征、岩石地球化学特征等。由于运用一种方法只能提供有限的信息,所以在实际中,只有将几种特征结合才可以提供有利判据。

尽管前人的工作为岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的深入研究奠定了坚实的基础,但是仍然存在一些值得进一步研究的问题,如:①岩浆中硫的饱和及硫化物的熔离是成矿的基础,但是对于硫饱和的时间和方式还存在着多种看法;②岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成涉及了多种组分,目前用以定量研究矿床形成的地球化学模式只是考虑了硅酸盐与硫化物这 2 个组分,因此不够准确,还有待改进;③矿床的合理开发在于对矿床成矿过程的正确了解,目前有关该类矿床的成矿规律及成矿模式研究还不够深入,多为定性研究,其成矿动力学模型有待加强;④用于矿床研究的一些地球化学参数还处于探索阶段,有利于矿床开发的综合指标还有待进一步建立。只有对岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床特征有了全面的了解,才有助于该类矿床的合理开发与利用。

References

- Campbell I H and Barnes S J. 1983. A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes[J]. *J. Petrol.*, 24: 133 ~ 165.
- Chen H L, Wu S B, Fu D B, et al. 1993. Nickel deposits[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 199 (in Chinese).
- Chen Y C, Zhao X, Zhang Z Y, et al. 2000. The geosciences in the new century: An important progress in geosciences[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 69 (in Chinese).
- Fan Y X and Zhang M J. 1999. Progress on the study of super-large Cu-Ni sulphide deposit[J]. *Acta Geologica Gansu*, 8 (2): 47 ~ 52 (in Chinese with English abstract).
- Foster J G, Lambert D D and Frick L R. 1996. Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites [J]. *Nature*, 382: 703 ~ 706.
- Godlevskii M N and Grinenko L N. 1963. Some data on the isotopic composition of sulfur in the sulphides of the Noril'sk deposit[J]. *Geochem.*, (1): 35 ~ 41.
- Han B F, Ji J Q, Song B B, et al. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Karatungk and Huangshan, Xinjiang[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 49 (2): 2324 ~ 2328 (in Chinese).
- Haughton D R, Roeder P L and Skinner B J. 1974. Solubility of sulfur in mafic magmas [J]. *Econ. Geol.*, 69: 451 ~ 467.
- Irvine T N. 1975. Crystallization sequences of the Muskox intrusion and other layered intrusions: II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39: 991 ~ 1020.
- Irvine T N, Keith D W and Todd S G. 1983. The J-M platinum-palladium reef of the Stillwater Complex, Montana: II. Origin by double diffusive convective magma mixing and implications for the Bushveld complex[J]. *Econ. Geol.*, 78: 1287 ~ 1334.
- Jiang S Y, Yang J H, Zhao K D, et al. 2000. The Re-Os isotope system as a tracer and a method to date in ore deposits[J]. *J. Nanjing Univ. (Nature Sci.)*, 36(6): 669 ~ 677 (in Chinese with English abstract).
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. *Lithos*, 34: 1 ~ 18.
- Keays R R, Ihlenfeld C, McInnes B I A, et al. 2004. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Cu-Ni-PGE sulfide deposit, China[A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F, Pang K N, ed. *Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks* [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 41 ~ 42.
- Lahaye Y N, Barnes S J, Frick L R, et al. 2001. Re-Os isotopic study of komatiitic volcanism and magmatic sulfide formation in the southern Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada [J]. *Can. Mineral.*, 39 (2): 473 ~ 490.
- Lambert D D, Foster J G, Frick L R, et al. 1998a. Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits: New insights from the Re-

- Os isotopic system[J]. *Econ. Geol.*, 93 (2) : 121 ~ 137.
- Lambert D D, Walker R J and Morgan J W. 1998b. Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater complex, Montana: Implications for the protogenesis of the J-M Reef[J]. *J. Petrol.*, 35 : 1717 ~ 1753.
- Lambert D D, Foster J G, Frick L R, et al. 1999. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador, Canada[J]. *Lithos*, 47, (1-2) : 69 ~ 88.
- Leshner C M, Lee R F, Groves D I, et al. 1981. Geochemistry of komatiites from Kambalda, Western Australia: I. Chalcophile element depletion, a consequence of sulphide liquid separation from komatiitic magmas[J]. *Econ. Geol.*, 76 : 1714 ~ 1728.
- Leshner C M and Campbell I H. 1993. Geochemical and fluid dynamic controls on the composition of Komatiite-hosted nickel sulphide ores in Western Australia[J]. *Econ. Geol.*, 88 : 804 ~ 816.
- Leshner C M and Stone W E. 1996. Exploration geochemistry of komatiites[A]. In: Wyman D A, ed. Trace element geochemistry of volcanic rocks: Applications for massive sulphide exploration[C]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 12. 153 ~ 204.
- Leshner C M and Keays R R. 2002. Komatiite-associated Ni-Cu-(PGE) deposits: Mineralogy, geochemistry and mineral beneficiation of platinum-group elements[J]. *Can. Inst. Mining Metall. Petrol. Spec.*, 54 : 579 ~ 617.
- Li C S and Naldrett A L. 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids[J]. *Lithos*, 47 : 1 ~ 31.
- Li C S, Naldrett A L and Ripley E M. 2001. Critical factors for the formation of a nickel-copper deposit in an evolved magma system: Lessons from a comparison of the Pants Lake and Voisey's Bay sulfide occurrences in Labrador, Canada[J]. *Mineralium Deposita*, 36 (1) : 85 ~ 92.
- Li C S, Ripley E M, Maier W D, et al. 2002. Olivine and sulfur isotopic compositions of the Uitkomst Ni-Cu sulphide ore-bearing complex, South Africa: Evidence for sulfur contamination and multiple magma emplacements[J]. *Chem. Geol.*, 188 : 149 ~ 159.
- Li W Y. 1996. Re-Os isotopic system and its application to study of magmatic Cu-Ni-PGE deposit[J]. *Advance in Earth Sciences*, 11 (6) : 580 ~ 584 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Su L, Song B, et al. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic intrusions and geological significance in Jinchuan[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 49(4) : 401 ~ 402 (in Chinese).
- Lightfoot P C, Naldrett A J, Gorbachev N S, et al. 1994. Chemostratigraphy of the Siberian Trap lava, Noril'sk district, Russia: Implications and source of flood basalt magma of Sudbury-Noril'sk symposium[Z]. Ontario Geological Survey (Special Publication), 5 : 283 ~ 312.
- Lightfoot P C and Hawkesworth C J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenland sequences[A]. In: Mahoney J J and Coffin M F, ed. Large igneous province[M]. Washington D C: American Geophysical Union. 357 ~ 380.
- Liu Y X. 1997. Mineralization and metallogenic model of copper-nickel sulphide deposit[J]. *Mineral Resou. & Geol.*, 11(4) : 225 ~ 231 (in Chinese with English abstract).
- Lorand J P. 1990. Are spinel ilmenite xenoliths representative of the sulfur content of the upper mantle[J]? *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54 : 1487 ~ 1492.
- Maier W D, Barnes S J and De Waal S A. 1998. Exploration for magmatic Cu-Ni-PGE sulphide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some south African ores[J]. *South African Geol.*, 101 (3) : 237 ~ 253.
- Maier W D, Li C S and De Wall S A. 2001. Why are there no major Ni-Cu sulfide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusions[J]? *Can. Mineral.*, 39 : 547 ~ 556.
- Maier W D, Barnes S J and Li C S. 2002. A re-evaluation of the role of crustal contamination in the formation of magmatic sulfides in the Bushveld complex[A]. In: The 9th international PGE symposium[C]. Montana, USA, July 21-25, 2002.
- Mao J W and Du A D. 2001. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Baotian Cu-Ni sulfide deposit in Guangxi and its geological implications[J]. *Sci. in China (Series D)*, 31(12) : 992 ~ 998 (in Chinese).
- Mao J W, Yang J M, Qu W J, et al. 2002. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan Mountains and its implication for geodynamic processes[J]. *Mineral Deposits*, 21(4) : 323 ~ 330 (in Chinese with English abstract).
- Marcantonio F, Reisberg L, Zindler A, et al. 1994. An isotopic study of the Cu-Ni-PGE rich Wellgreen intrusion of the Wrangellia Terrane: Evidence for hydrothermal mobilization of rhenium and osmium[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58 : 1007 ~ 1017.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Chem. Geol.*, 120 : 233 ~ 253.
- Naldrett A J and Gasparri E L. 1971. Archean nickel sulphide deposits in Canada: Their classification, geological setting and genesis with some suggestions as to exploration[Z]. *Geol. Soc. Australia (Special Publication)*, 3 : 201 ~ 226.
- Naldrett A J. 1973. Nickel sulphide deposits: Their classification and genesis with special emphasis on deposits of volcanic association[J]. *Canadian Mining and Metallurgical Bull.*, 66 : 45 ~ 63.
- Naldrett A J. 1989. Magmatic sulphide deposits[M]. New York: Oxford Univ. Press. 1 ~ 186.
- Naldrett A J. 1997. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Cu-Ni-PGE deposits: Implication for exploration[J]. *Australian J. Earth Sci.*, 44 : 281 ~ 315.
- Naldrett A J. 1999. World-class Cu-Ni-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 34 : 227 ~ 240.
- Naldrett A J. 2004a. An overview of Ni-Cu mineralization with conclusions guide in exploration[Z]. *International Geological Correlation*

- Programme 479 short course notes, 154 ~ 164.
- Naldrett A J. 2004b. Flood basalt related deposits, Noril'sk [Z]. International Geological Correlation Programme 479 short course notes, 79 ~ 86.
- Qin K Z. 2000. The orogeny of central Asia type and mineralization in North Xinjiang [R]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Zhang L C, Xiao W J, et al. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, northwestern China [A]. In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, et al., ed. Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. IAGOD Guidebook Series 10 [Z]. London. 249 ~ 260.
- Rehkamper M, Halliday A N, Fitton J G, et al. 1999. Ir, Ru, Pt in basalts and komatiites: New constraints for the geochemical behavior of the platinum-group elements in the mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(22): 3915 ~ 3934.
- Ripley E M. 1981. Sulfur isotopic studies of the Duluth Road Cu-Ni deposit, Duluth complex, Minnesota [J]. *Econ. Geol.*, 76: 610 ~ 620.
- Ripley E M and Alawi J A. 1988. Petrogenesis of pelitic xenoliths at the Babbitt Cu-Ni deposit, Duluth complex, Minnesota, USA [J]. *Lithos*, 21: 143 ~ 159.
- Ripley E M, Lambert D D and Frick L R. 1998. Re-Os, Sm-Nd and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth complex [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 3349 ~ 3365.
- Ripley E M, Lightfoot P C, Li C S, et al. 2003. Sulfur isotopic studies of continental flood in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67(15): 2805 ~ 2817.
- Ross J R and Travis G A. 1981. Nickel sulphide deposits in Western Australia in global perspective [J]. *Econ. Geol.*, 76(6): 1291 ~ 1329.
- Ruttan G D. 1955. Geology of Lynn Lake [J]. *CIM Bull.*, 48: 339 ~ 348.
- Schoenberg R, Kruger F J, Nigler T F, et al. 1999. PGE enrichment in chromitite layers and the Merensky Reef of the western Bushveld complex: A Re-Os and Rb-Sr isotope study [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 172: 49 ~ 64.
- Shima H and Naldrett A J. 1975. Solubility of sulfur in an ultramafic melt and the relevance of the system Fe-S-O [J]. *Econ. Geol.*, 70: 960 ~ 967.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 26: 423 ~ 500.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, IIIA, IVA and VIB iron meteorites [J]. *Sci.*, 271: 1099 ~ 1102.
- Stanley R H and Karleen E D. 1978. Nickel partitioning between olivine and silicate melt [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 40: 203 ~ 219.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R J, et al. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kivisuo, Finland, and Proterozoic molybdenite, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting [J]. *Mineralium Deposita*, 33: 329 ~ 345.
- Tan J, Mo X X, Zhao S R, et al. 1998. Dynamic analysis of immiscible differentiation process of magma [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 83 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L. 1992. Classification and geological contrastable significance of super large magmatic sulfide deposits [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1(1): 24 ~ 47 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Jinchuan Cu-Ni sulphide deposit model and geological contrast [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 14 ~ 209 (in Chinese).
- Tang Z L. 2002. Dividing and prospecting for super-large scale Ni-Cu (Pt) magmatic sulphide deposits [J]. *Geol. & Prosp.*, 38(3): 1 ~ 7 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L, Yan H Q, Li X H, et al. 2004. New classification of magmatic sulfide deposits in China [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F and Pang K N, ed. Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 27 ~ 28.
- Thayer T P. 1971. Authigenic, polygenic and allogenic ultramafic and gabbroic rocks as hosts for magmatic ore deposits [Z]. *Geol. Soc. Australia (Special Publication)*, 3: 239 ~ 252.
- Vogel D C and Keays R R. 1997. The petrogenesis and Platinum-group element geochemistry of the newer volcanic province, Victoria, Australia [J]. *Chem. Geol.*, 136: 181 ~ 204.
- Vogt J H L. 1894. Beiträge zur geenetischen classification der durch magmatische differentions processe unter durch previnathloyse entslandenen erzskommen, Z. Ponkt [J]. *Geol.*, 381 ~ 399.
- Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. 1989. Os, Sr, Nd and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: Implications for the chemical evolution of subcontinental mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1583 ~ 1595.
- Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, et al. 1991. Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Sudbury igneous complex, Ontario: Evidence for a major crustal component [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105: 416 ~ 429.
- Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, et al. 1994. Re-Os isotope evidence for an enriched mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion, Siberia [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 4179 ~ 4197.
- Wang C Y, Zhou M F and Keays R R. 2004. Origin of Permian Baimeishan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Jinping, southern Yunnan Province, SW China [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F and Pang K N, ed. Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in Magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 155 ~ 59.
- Wang R T. 2002. The comparative study on mineralization of Jinchuan

- and Jianchaling nickle-copper sulfide deposits [dissertation for doctor degree] [D]. Tutor: He Y. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, Ke H, et al. 2003. Summary of the mineralization of magmatic Cu-Ni (PGE) deposits [J]. Mineral Resou. & Geol., 17 (Supp.): 281 ~ 284 (in Chinese).
- Wang R T, Mao J W, He Y, et al. 2004. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit, Jinchuan City, Gansu Province, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 28 (3): 279 ~ 286 (in Chinese with English abstract).
- Wang R T, Mao J W, He Y, et al. 2005. Geochemical characteristics of platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang County, Shannxi Province, China and their implication for genesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (1): 219 ~ 226 (in Chinese with English abstract).
- Wendlandt R F. 1982. Sulphide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperature [J]. Am. Miner., 67: 877 ~ 885.
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, et al. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jinlin Province, NE China [J]. J. Asian Earth Sci., 23: 781 ~ 797.
- Wyllie P J. 1967. Petrography and petrology [A]. In: John and Sons, ed. Ultramafic and related rocks [C]. New York: New York Press. 1 ~ 6.
- Xi A H, Li X, Gu L, et al. 2004. Hongqiling magmatic Cu-Ni sulphide deposits in North China [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F and Pang K N, ed. Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in Magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 155 ~ 59.
- Xie G H, Wang Y L, Fan C Y, et al. 1998. Genetic mechanism of the Jinchuan ultramafic intrusion and associated super-large sulphide deposits in northwest China [J]. Sci. in China (Series D), 28 (Supp.): 31 ~ 36 (in Chinese).
- Xiong Y L. 1994. The ore-forming materials for magmatic ore deposits in the light of Re-Os systematics [J]. Earth Sci. Frontiers, 1 (3-4): 199 ~ 203 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Yan S H, Cheng B L, et al. 2003a. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposits [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 22 (3): 217 ~ 224 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Hao Y L and Wang F S. 2003b. The significance of the picroite in large igneous province [J]. Earth Sci. Frontiers, 10 (3): 105 ~ 114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Yan S H, Chen B L, et al. 2004. Geology and geochemistry of mafic intrusion and copper-nickel ores of the Variscan orogenic belt, Xinjiang, NW China [A]. In: Shellnutt, Zhou M F and Pang K N, ed. Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 53 ~ 54.
- Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, et al. 2004. Tectonic setting of magmatic Ni-Cu (PGE) sulphide deposits in China [A]. In: Shellnutt J G, Zhou M F and Pang K N, ed. Proceeding of the IGCP479 Hongkong Workshop: Recent advances in magmatic ore system in mafic-ultramafic rocks [C]. Hongkong University, December 11-15, 2004. 29 ~ 32.
- Zhu Y F. 1998. Review of the solubility behavior of sulfur in magmatic melt [J]. Geol. Sci. Techn. Info., 17 (2): 35 ~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Zientek M L and Ripley E M. 1990. Sulfur isotope studies of the Stillwater complex and associated rocks, Montana [J]. Econ. Geol., 85: 376 ~ 391.

附中文参考文献

- 陈浩疏, 吴水波, 傅德彬, 等. 1993. 镍矿床 [M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 赵逊, 张之一, 等. 2000. 世纪之交的地球科学——重大地质领域进展 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 69.
- 范育新, 张铭杰. 1999. 超大型铜镍硫化物矿床研究进展 [J]. 甘肃地质学报, 8 (2): 47 ~ 52.
- 韩宝福, 李建清, 宋彪, 等. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 科学通报, 49 (2): 2324 ~ 2328.
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等. 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究 [J]. 南京大学学报, 36 (6): 669 ~ 677.
- 李文渊. 1996. Re-Os 同位素体系及其在岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究中的应用 [J]. 地球科学进展, 11 (6): 580 ~ 584.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 科学通报, 49 (4): 401 ~ 402.
- 刘月星. 1997. 铜镍硫化物矿床成矿作用及成矿模式研究 [J]. 矿产与地质, 11 (4): 225 ~ 231.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义 [J]. 矿床地质, 21 (4): 323 ~ 330.
- 毛景文, 杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982 Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (12): 992 ~ 998.
- 秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用 [R]. 中国科学院地质与地球物理研究所博士后研究报告.
- 谭劲, 莫宣学, 赵珊茸, 等. 1998. 岩浆不混溶分异过程动力学分析 [J]. 岩石学报, 14 (1): 83 ~ 89.
- 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, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比 [M]. 北京: 地质出版社. 14 ~ 209.
- 汤中立. 2002. 超大型 Ni-Cu (Pt) 岩浆矿床的划分与找矿 [J]. 地质与勘探, 38 (3): 1 ~ 7.
- 王瑞廷. 2002. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究 [博士学位论文] [D]. 指导教师: 赫英. 西北大学地质系.
- 王瑞廷, 毛景文, 柯洪, 等. 2003. 铜镍岩浆硫化物矿床成矿作用研究综述 [J]. 矿产与地质, 17 (增刊): 281 ~ 284.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征 [J]. 大地构造与成矿学, 28 (3): 279 ~ 286.

- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2005. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 21(1): 219~226.
- 熊永良. 1994. 铼-钼同位素体系对揭示矿质来源的作用[J]. 地学前缘, 1(3-4): 199~203.
- 解广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 1998. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D辑), 28(增刊): 31~36.
- 张招崇, 郝艳丽, 王福生. 2003a. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义[J]. 地学前缘, 10(3): 105~114.
- 张招崇, 阎升好, 陈柏林, 等. 2003b. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 217~224.
- 朱永峰. 1998. 硫在岩浆熔体中的溶解行为综述[J]. 地质科技情报, 17(2): 35~38.

Discussion on some problems concerning magmatic copper-nickel-PGE sulfide deposits

CHAI Feng-mei^{1,2}, ZHANG Zhao-chong¹, MAO Jing-wen^{1,4}, DONG Lian-hui³ and ZHANG Zuo-heng⁴

(1 State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 School of Resource and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3 Xinjiang Bureau of

Geology and Mineral Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4 Institute of Mineral Resources,

CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

Magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits, the major supply sources of nickel and PGE in the world market, are considered to be spatially associated with mafic-ultramafic rocks. To meet the increasing demand for Cu, Ni and Pd, it is necessary to strengthen the research work on this type of ore deposits. In this paper, some important problems concerning magmatic copper-nickel sulfide deposits are discussed, with the emphasis placed on their metallogenic mechanism. It is generally believed that sulfide saturation and segregation from silicate magma as well as the corresponding favorable structural environment play a key role in their formation. In addition, the Re-Os isotopic system as a tracer of sulfide ore formation and the geochemical indexes for measuring the condition of sulfur in magma are also discussed.

Key words: geology, magmatism, segregation, Cu-Ni(-PGE) sulfide deposit, Re-Os isotope, sulfur condition measurement, comprehensive