

# 岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床 研究现状及进展

蔡鹏捷<sup>1)</sup>, 国显正<sup>1)</sup>, 郑有业<sup>1, 2)</sup>, 孙述海<sup>2)</sup>, 刘嘉<sup>1, 3)</sup>, 陈鑫<sup>2)</sup>, 俞军真<sup>2)</sup>, 许荣科<sup>1)</sup>

1) 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉, 430074;

2) 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉, 430074; 3) 湖北省地质调查研究院, 武汉, 430030

**内容提要:** 岩浆型 Ni—Cu—PGE(platinum group elements, 铂族元素)硫化物矿床是重要的铜镍矿床类型, 探讨该类型矿床产出环境, 成矿作用, 矿床成因机制具有重要意义。本文通过对该类型矿床时空分布规律, 矿床成矿过程, 成矿理论, 勘查技术等方面入手, 搜集大量资料, 综述该类型矿床在成岩成矿年代学、地球化学特征、矿床形态、成矿理论和成矿判别标志等方面的研究现状, 结果表明: 岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床在容矿岩石、成矿作用方式或主要金属组份、成矿构造环境等特点具有不同分类方式, 并且硫化物(矿层)的分布都具有重力分异的特点; 在时空分布规律方面国外 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床主要形成时间是在中元古代以前, 而中国主要形成时间是在中元古代以后; 其中早古生代晚期(390~430 Ma)的该类矿床目前仅发现于中国, 以夏日哈木超大型矿床为代表; 成矿模式存在“岩浆通道成矿”和“小岩体成大矿”之争, 二者在成矿位置、岩浆上侵方式、外来地壳硫的加入存在差异; 依据全岩  $m/f$  与  $Mg^{\#}$  比值判定岩体含矿性, 结合铂族比值、磁铁矿的  $(Ni+Cr)/(Si+Mg)$  比值、磁铁矿 Ti 含量等可作为该类型矿床勘查评价的重要参考指标。

**关键词:** 岩浆型 Ni—Cu—PGE(platinum group elements, 铂族元素)硫化物矿床; 时空分布; 成矿过程; 成矿理论; 勘查评价指标

岩浆型 Ni—Cu—PGE(platinum group elements, 铂族元素)硫化物矿床一般是指富镍、铜、铂族元素, 同时与镁铁质—超镁铁质岩浆作用相关的硫化物矿床(吕林素等, 2007)。据不完全统计, 该类矿床中 Ni 和 PGE 的产量超过世界总产量的 50%, 其中 Cu 的储量占世界储量的 5.5%(汤中立, 1995; 王瑞廷等, 2004); Ni 和 Cu 的储量分别占我国 Ni 和 Cu 的总储量的 86% 和 11.9%, 铂族元素占我国铂族元素总储量的 90% 以上(傅飘儿, 2012)。岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床不仅对国民经济发展有重要意义, 同时也是研究地幔岩浆演化、壳幔过程、大陆动力学过程等方面的重要介质(Naldrett, 1984; Barnes et al., 2005; Jugo, 2009), 因此, 该类矿床的勘查及理论研究具有重要价值和意义。

世界上最早对岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的研究是从加拿大 Sudbury 矿床(1856 年)的发现开始, 中国铜镍硫化物矿床的研究自 1956 年四川

力马河重新开发利用之时, 也已有几十年的历史。汤中立等(2002, 2007)以小岩体成大矿理论为基点, 对岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床进行分类和区域成矿规律方面的总结, 李文渊(2007)从大地构造分布和成岩成矿类型讨论了世界铜镍硫化物矿床的研究进展, 张照伟等(2016)从中国岩浆铜镍矿的找矿方向进行了靶区的划分, 吕素林等(2007)从时空分布及其地球动力学背景角度探讨了中国岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床。目前国内外对该类型矿床的研究主要是基于成矿系统研究(Lightfoot et al., 2015; Barnes et al., 2016), 基于同位素方法的成矿物质来源研究(Samalens et al., 2017)以及对成矿机理的矿物微区分析(David et al., 2017; Zhu Yongfeng et al., 2016)。本文通过对 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的成岩成矿年代学、矿床几何形态、成矿作用、同时结合相关勘查技术, 旨在对同类型矿床研究与勘查提供一定的科学借鉴。

注: 本文为教育部长江学者和创新团队发展计划(编号: IRT14R54)、中国地调局项目(编号: 121201011000150004)的成果。

收稿日期: 2017-11-29; 改回日期: 2018-05-22; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.013

作者简介: 蔡鹏捷, 男, 1988 年生。博士研究生。主要从事矿产普查与勘探研究。Email: caipengjie@cug.edu.cn。通讯作者: 许荣科, 男, 1967 年生。博士, 副教授。主要从事矿产勘查与区域成矿研究和教学工作。Email: xurongke1968@126.com。

## 1 岩浆型铜镍硫化物矿床类型及时空分布

早期 Ross 和 Travis (1981) 据容矿岩石不同将岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床分为 3 大类: 纯橄榄岩—橄榄岩类、辉长岩类和其他类型。Naldrett (1984) 则根据岩浆组合类型, 将其分成 6 类: 科马提岩类、溢流玄武岩类、铁质苦橄岩类、斜长岩—花岗质岩—橄长岩类、混杂苦橄—拉斑玄武岩类和陨石撞击熔岩类。汤中立等 (1987) 根据中国的硫化物的成矿作用及成矿方式, 可分为岩浆原地熔离型矿床和岩浆深部熔离—贯入式矿床 (单式贯入矿床、复式贯入矿床、脉冲式贯入矿床和晚期贯入矿床) 2 大类。Naldrett (2004) 按主要金属组份不同将岩浆硫化物矿床分为 Cu—Ni—PGE 和 PGE—(Ni—Cu) 两大类矿床。Naldrett (1997) 据岩浆铜镍硫化物矿床形成构造环境, 将其分为绿岩带型, 大陆内部, 大陆边缘裂谷和显生宙造山带型。汤中立 (2002) 提出了一个大型、超大型岩浆硫化物矿床分类方案: ①元古宙与古陨石坑有关的苏长岩—辉长岩型矿床; ②元古宙以后与大陆边缘裂解有关的小型

侵入体矿床; ③显生宙与大陆裂谷有关的相当于溢流玄武岩的侵入体矿床; ④太古宙绿岩带与科马提岩有关的矿床; ⑤古元古代大陆层状侵入杂岩体中硫化物与铂族矿床。汤中立等 (2007) 将中国的小岩体镍铜 (铂族) 矿床进一步细分为: 古大陆内的小侵入体矿床、造山带内的小侵入体矿床和与大陆溢流玄武岩有关的小侵入体矿床三类。上述的几种分类主要是依照容矿岩石、成矿作用及构造环境的划分, 分类方式随着对铜镍矿研究的加深也更为细致。最新对岩浆型铜镍硫化物矿床分类是 Naldrett (2013), 根据岩浆类型组合增加了碱性玄武岩 (表 1), 同时将构造环境补充, 更为直观地表现了铜镍矿的特征。

世界级的岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床分布极其不均匀, 主要集中于加拿大 (Sudbury; Voisey's Bay; Thompson; Abitibi)、美国 (Stillwater; Duluth)、俄罗斯 (Noil'sk Camp; Pechenga)、中国 (金川、夏日哈木)、南非 (Bushveld) 和澳大利亚 (Perseverance, Kambalda) 等少数几个国家 (Naldrett, 1999; Hoatson et al., 2006) (图 1)。在构造环境除 Sudbury 陨石撞击外, 主要产于稳定克拉



图 1 世界上主要岩浆 Ni—Cu 硫化物矿床分布图 (据 Naldrett, 1999 修改)

Fig. 1 Distribution map of the main magmatic Ni—Cu sulfide deposits in the world (modify by Naldrett, 1999)

表1 岩浆 Ni—Cu—(PGE) 硫化物矿床分类 (据 Naldrett, 2013)  
Table 1 Classification of magmatic Ni—Cu—(PGE) sulfide deposits  
(modified from Naldrett, 2013)

分类	典型代表	岩浆作用的大地构造背景
科马提岩	Wiluma—Norsean 绿岩带 (Kambalda, Mt Keith、Perseverance 等)、Abitibi、Zimbabwe	绿岩带(裂谷?)
	Thompson、Raglan	大陆边缘裂谷
溢流玄武岩	Noril'sk、Duluth、Muskox	裂谷(三叉结合点)
	Insizwa	大陆边缘裂谷
	Wrangelia	岛弧裂谷
铁质苦橄岩	Pechenga	大陆边缘裂谷
斜长质—花岗岩—拉斑玄武岩	Voisey's Bay	裂谷
混合苦橄—拉斑玄武岩	Montcalm	绿岩带(裂谷?)
	金川	大陆边缘裂谷
	Niquelandia	大陆裂谷
	Moxie、Aberdeenshire Gabbros、Rana	造山带(汇聚带)
	Acoje	蛇绿岩带(洋壳)
撞击熔体	Sudbury	陨石撞击
乌拉尔—阿拉斯加型碱性玄武岩	Duke Island、Tumagain Am、Sakt Chuck、Quetico	汇聚边缘带 弧前构造(?)

通上的张裂带或陆内裂谷、大火成岩省地幔、增生弧环境。

国外的大型—超大型 Ni—Cu—PGE 硫化物成矿事件(表 2),主要集中在 2700~2600Ma, 2000~1800Ma, 1090~1120Ma, 250Ma(图 2), 与新生地壳事件密切相关。中国约有 80 个岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床, 其中有 2 个超大型(金川、夏日哈木), 14 个大型, 20 个中型, 其余均为小型甚至矿点(表 3), 形成时代主要集中在新元古代早期(1000~800Ma), 早古生代晚期(390~430Ma) 和晚古生代晚期(295~250Ma)。这其中与地幔活动相关的初始地壳的生长、原始科马提质和拉斑质玄武岩的演化以及同源溢流的玄武岩相关的矿化镁铁—超镁铁质侵入岩的形成都是岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的条件(Hoatson et al., 2006; 吕林素等, 2007)。在矿床规模上国外 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床多以大型—超大型为主, 而中国多以大、中型为主。

表2 国外大型—超大型 Ni—Cu—(PGE) 硫化物矿床及有关岩体成岩成矿时代(据吕林素等, 2007, 修改)  
Table 2 Geochronological data of Ni—Cu—(PGE) sulfide deposits and related mafic—ultramafic rocks  
in foreign countries (modified from Lü Linsu et al., 2007&)

矿床名称	测试方法	测试对象	年龄值(Ma)	资料来源
Mt. Keith	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	2705±4	Nelson et al., 1997
Kambalda	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	2705±4	Nelson et al., 1997
Honeymoon Well	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	2705±4	Nelson et al., 1997
Abitibi	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	2700	Ayeret et al., 2002
	Re-Os 法	含硫化物基性超基性岩	2733	Puchtelet et al., 2009
	Sm-Nd 法	含硫化物基性超基性岩	2692	Puchtelet et al., 2009
Great Dyke	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物杂岩体(锆石)	2587±8	Mukasa et al., 1998
	Sm-Nd 法	杂岩体全岩	2586±16	Mukasa et al., 1998
Bushveld	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物杂岩体(锆石)	2058.9±0.8	Buick et al., 2001
	Re-Os 法	含硫化物杂岩体	2043±11	Schoenberger et al., 1999
	Re-Os 法	含硫化物杂岩体	2011±90	Reisberger et al., 2006
Pechenga	Sm-Nd	含硫化物基性超基性岩	1980±40	Hanski et al., 1990
	Re-Os 法	同沉积黑色页岩	2004 ± 9	Hannah et al., 2006
	Re-Os 法	含硫化物矿石、基性—超基性岩	1700~1900	Walker et al., 1997
Sudbury	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	1850±1	Krogh et al., 1984
Thompson	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	1880±5	Hulbert et al., 2005
	Re-Os 法	硫化镍富矿石	1885±49	Hulbert et al., 2005
Vosiey's Bay	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩和橄长岩(锆石)	1332.7±1.0	Amelin et al., 1999
Duluth	Re-Os 法	含硫化物基性超基性岩	1120	Ripley et al., 1998
	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩(锆石)	1099±0.7	Paces et al., 1993
Noril'sk—Talnakh	Re-Os 法	硫化镍富矿石	251±0.3	Kamo et al., 2003
	Re-Os 法	含硫化物基性超基性岩	250 ± 1~2	Walker et al., 1994

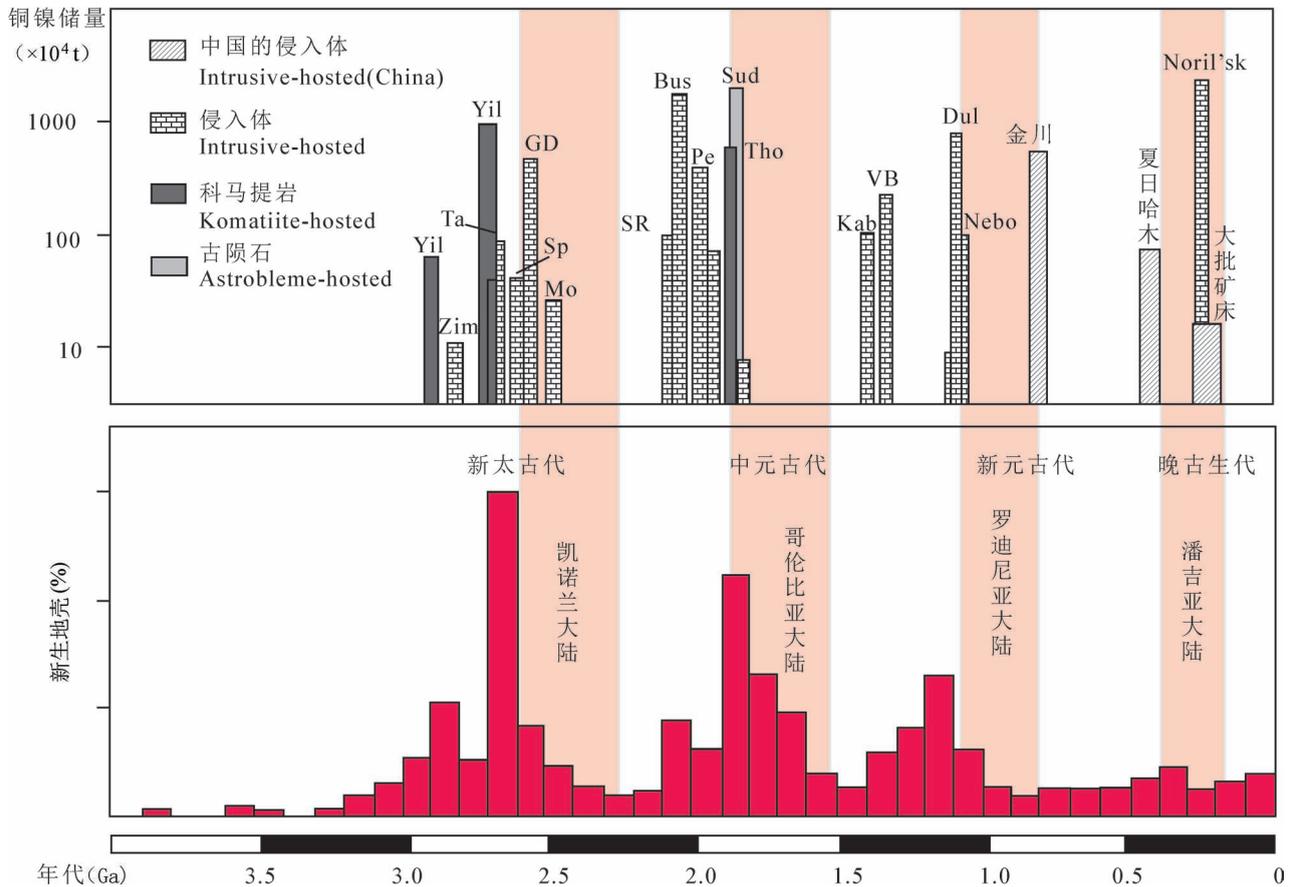


图 2 世界岩浆铜镍硫化物矿床与地壳生长关系图(据 Maier and Groves,2011 修改)

Fig. 2 Secular distribution between Ni - Cu deposits and crust growth(modified from Maier and Groves,2011)

Ave—Avebury; Bus—Bushveld; Dul—Duluth; Fin—Finnish Ni belt; GD—Great Dyke; Kab— Kabanga; Mo—Monchegorsk; Nebo—Nebo—Babel; Pe—Pechenga; SP—Selebi Phikwe; SR—Santa Rita; Sud—Sudbury; Ta—Tati; Tho— Thompson; VB—Voisey’ s Bay; Yil—Yilgarn; Zim—Zimbabwe

从不同类型岩浆 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床成岩成矿时间特点(图 3)可见国外主要形成时间是在中元古代以前,而中国主要形成时间是在中元古代以后,其中早古生代晚期(390~430 Ma)的该类矿床目前仅发现于中国,以夏日哈木超大型矿床区别于世界上其他的超大型—大型铜镍硫化物矿床而具有重要意义。在形成环境上,岩浆 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床多以古大陆边缘裂解,科马提岩,层状杂岩体和陨石冲击为主,而我国该类矿床产出环境主要在造山带和溢流型玄武岩为主。

## 2 矿床成矿过程

### 2.1 部分熔融程度

部分熔融程度关乎原始岩浆中成矿元素的含量,低程度的部分熔融可以导致不相容元素 S 的富集,但若富集到硫饱和水平则会导致不混溶的硫化

物残留在地幔。计算部分熔融程度可以帮助了解原始岩浆元素的大致含量,如含有 250 μg/g S 的原始地幔经过 20% 的部分熔融产生岩浆的 S 含量为 1000~1200 μg/g 左右 (McDonough et al., 1995),部分熔融程度低的大洋中脊玄武岩的 S、Ni 和 Pt 的含量分别为 119 μg/g、1960 μg/g 和 6.2 μg/g (Salters et al., 2013),而部分熔融程度高的科马提岩的 S、Ni 和 Pt 的含量分别为 290~1030 μg/g、2030 μg/g 和 13 μg/g (Maier et al., 2013),由此可见,高的部分熔融程度会导致原始母岩浆具有高的 S、Ni 和 Pt 的含量。

Pt/Pt\* 与 Pd/Ir 的值可以用来判别岩浆来源是结晶分异或地幔残留物质的部分熔融 (Bea et al., 1997)。利用收集的各类矿床数据进行投图(图 4),可见金川、夏日哈木、力马河、煎茶岭、Thompson、McCreedy 等 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床具有部分

表3 中国 Ni—Cu—(PGE) 硫化物矿床及有关岩体成岩成矿时代(据吕林素等,2007,修改)

Table 3 Geochronological data of Ni—Cu—(PGE) sulfide deosits and related mafic—ultramafic rocks in China (modified from Lü Linsu et al., 2007&amp;)

矿床名称	测试方法	测试对象	年龄值(Ma)	资料来源
金川	SHRIMP U-Pb 法	含硫化物橄长岩(锆石)	827±8	李献华等,2004
		含斜长石二辉橄榄岩(斜锆石)	812±26	Liet al., 2005
		斜长二辉橄榄岩(锆石)	平均 837	闫海卿等,2005
	Re-Os 法	硫化镍富矿石	911±20	Duet al., 1996
		硫化镍富矿石	877±34	Keayset al., 2004
			870±19	
			1408±140	
		硫化镍富矿石	852±25	Yanget al., 2005
		硫化镍富矿石	833±35	杨刚等,2005
		块状硫化物矿石	840±79	杨胜洪等,2007
浸染状硫化物矿石	1126±96	杨胜洪等,2007		
海绵陨铁状硫化物矿石	1220±57	闫海卿等,2005		
海绵陨铁状和块状矿石(全岩)	1043±28	张宗清等,2004		
望江山	SHRIMP U-Pb 法	闪长岩(锆石)	819±10	Zhou Meifu et al., 2002a
	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩(锆石)	808±14	Zhou Meifu et al., 2002a
	SHRIMP U-Pb 法	二辉橄榄辉长岩(锆石)	811±8	李惠民等,2005
宝坛	SHRIMP U-Pb 法	锆石	827±7	Liet al., 1999
	Re-Os 法	硫化镍富矿石	982±21	毛景文等,2001
煎茶岭	Sm-Nd 法	纤胶蛇纹岩(全岩)	927±29	庞春勇等,1993
	Re-Os 法	硫化镍富矿石	878±27	王瑞廷等,2003
冷水箐	SHRIMP U-Pb 法	锆石	782±53	杜利林等,2005
	SHRIMP U-Pb 法	闪长岩(锆石)	811.6±3	Zhou Meifu et al., 2006
天宇	LA-ICP-MS U-Pb 法	含硫化物基性超基性岩	290.2±3.4	唐冬梅等,2009
赤柏松	LA-ICP-MS U-Pb 法	锆石	2459±59~ 2136±18	路孝平,2004; 裴福萍等,2005
	SHRIMP U-Pb 法	锆石	2188±8	路孝平,2004
	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩(锆石)	134±7	裴福萍等,2005
	SHRIMP U-Pb 法	含矿二辉橄榄岩	164±2	李立兴等,2009
	红旗岭	<sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 法	含长角闪橄长岩(黑云母)	225.50±0.85
SHRIMP U-Pb 法		浅色辉长岩(锆石)	216±5	Wuet al., 2004
漂河川	SHRIMP U-Pb 法	含斜长辉石岩(锆石)	217±3	Wuet al., 2004
喀拉通克 I 号	SHRIMP U-Pb 法	苏长岩(锆石)	287±5	韩宝福等,2004
	Re-Os 法	硫化物矿石	282.5±4.8	张作衡等,2005
	Re-Os 法	浸染状和块状硫化物矿石	305±15	韩春明等,2006
喀拉通克 II 号	Re-Os 法	硫化物矿石	290.2±6.9	张作衡等,2005
黄山东	SHRIMP U-Pb 法	黑云母橄长苏长岩(锆石)	274±3	韩宝福等,2004
	Re-Os 法	细脉状、浸染状和块状硫化物矿石	282±20	毛景文等,2002
黄山	SHRIMP U-Pb 法	闪长岩(锆石)	269±2	Zhou Meifu et al., 2004
	Sm-Nd 法	浸染状和块状硫化物矿石	305.4±2.4	李华芹,1998
香山	颗粒锆石 U-Pb 法	苏长辉长岩(锆石)	285±1.2	秦克章等,2002
	Re-Os 法	硫化物矿石(镍黄铁矿)	298±7.1	李月臣等,2006
葫芦	Re-Os 法	海绵陨铁状硫化物矿石	283±13	陈世平等,2005
白石泉	SHRIMP U-Pb 法	石英闪长岩(锆石)	285±10	吴华,2006a
		辉长闪长岩(锆石)	284±9	
		辉长岩(锆石)	284±8	
LA-ICP-MS U-Pb 法	矿化辉长岩(锆石)	281.2±0.9	毛启贵等,2006	
Re-Os 法	含硫化物基性超基性岩	286±14	王虹等,2007	
坡一	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩(锆石)	278±2	李华芹等,2006
坡十	颗粒锆石 U-Pb 法	角闪辉长岩(锆石)	274±4	姜常义等,2006
坡北	Re-Os 法	含矿超镁铁岩(硫化物)	420±20	王虹等,2007
杨柳坪	<sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 法	石英	250	王登红等,2007
	Re-Os 法	硫化物矿石	160±18	王登红等,2007

矿床名称	测试方法	测试对象	年龄值 (Ma)	资料来源
新街	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩 (锆石)	259±3	Zhou Meifu et al., 2002b
力马河	SHRIMP U-Pb 法	浅色辉长岩 (锆石)	263±3	Zhou Meifu et al., 2005
	SHRIMP U-Pb 法	辉长岩 (锆石)	258.5±3.5	Wanget al., 2004
白马寨	Re-Os 法	硫化物矿	249±32	王登红等, 2003
	Re-Os 法	富镍硫化物矿	259±18	石勇贵等, 2006
兴地 II 号	Sm-Nd 法	二辉橄榄岩、辉长苏长岩 (全岩)	1209±37	杨合群等, 1997
	Sm-Nd 法	二辉橄榄岩、辉长苏长岩 (全岩)	1210±83	李华芹等, 2004
拉水峡	Sm-Nd 法	超镁铁岩 (全岩)	1084	张照伟等, 2012
菁布拉克	SHRIMP U-Pb 法	辉石闪长岩 (锆石)	434.4±6.2	张作衡等, 2007
	Sm-Nd 法	硫化物矿石	300±50	李华芹, 1998
夏日哈木	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体辉长岩	393.5 ± 3.4Ma	李世金等, 2012
	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体辉长岩	439.1 ± 3Ma	姜常义等, 2015
	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体辉长苏长岩	423 ± 1Ma	王冠等, 2014
	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体辉长岩	411.6 ± 2.4Ma	Liet al., 2015
	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体超基性岩	431 ± 2.4Ma	Liet al., 2015
	LA-ICP-MS U-Pb 法	II 岩体超基性岩	424 ± 1 Ma	Penget al., 2016
	SHRIMP U-Pb 法	辉长苏长岩	405.5 ± 2.7	Songet al., 2016
	SHRIMP U-Pb 法	二辉岩	408.1 ± 2.9	Songet al., 2016
	SHRIMP U-Pb 法	二辉岩	406.1 ± 2.7	Songet al., 2016
清水泉	LA-ICP-MS U-Pb 法	角闪辉长岩	467±1.4	马中平等, 2011
牛鼻子梁	LA-ICP-MS U-Pb 法	I 号岩体闪长岩	388±1.8	钱兵等, 2015
	LA-ICP-MS U-Pb 法	II 岩体二辉橄榄岩	402±2.8	钱兵等, 2015
	LA-ICP-MS U-Pb 法	III 岩体斜长二辉橄榄岩	402.8±2.6	钱兵等, 2015
尕秀雅平	LA-ICP-MS U-Pb 法	辉长岩	408.0±1.5	周伟等, 2015a
石头坑德	LA-ICP-MS U-Pb 法	辉长岩	423.5±3.2	周伟等, 2015b
图拉尔根	SHRIMP U-Pb 法	I 号杂岩体	300.5± 3.2	三金柱等, 2010
	SHRIMP U-Pb 法	II 号杂岩体	357.5± 2.5	三金柱等, 2010

熔融的趋势,而黑山、牛鼻子梁、Nebo—Babel、Creat Dyke 等 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床则以结晶分异趋势为主。

不同岩浆源铜镍硫化物矿床的  $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$  的值不同,与科马提岩相关的比值变化在 1.3~3.5,而一般与玄武岩浆有关的比值则在 5.7~55.6 (Naldrett et al., 1986)。金川不同类型铜镍矿石的  $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$  的值也具有不同特征 (王瑞廷, 2002),其比值从就地熔离型星点状矿石→深熔贯入型海绵陨铁状矿石→晚期贯入型块状矿石,呈现出依次递减的趋势,反映了其硫化物深部熔离出的早晚顺序。而后期热液叠加作用形成的矿石,其  $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$  的值比岩浆型矿石高出 2 个数量级。因此,矿石的类型与岩浆部分熔融程度密切相关。

## 2.2 硫饱和和机制

岩浆硫化物矿床无一例外是幔源岩浆经历了复杂的演化最终达到硫饱和并发生硫化物熔离而形成的,铂族元素在硫化物和硅酸盐之间的分配系数  $D^{Sul/Sil}$  在  $10^3 \sim 10^5$  (Peach et al., 1990; Stone et al., 1990), Cu 的  $D^{Sul/Sil}$  在  $10^2 \sim 10^3$  (Bennett et al.,

2000), Ni 的  $D^{Sul/Sil}$  在 300~1000 (Bennett et al., 2000),可见硫化物饱和对 Cu—Ni—PGE 矿床的形成意义重大,因此硫饱和和机制对于 Cu—Ni—PGE 矿床的成因尤为重要。影响硫饱和和机制的主要有岩浆的结晶分异、温压条件、外来物质的加入、岩浆混合以及地壳硫的加入等因素。岩浆的结晶分异主要由富 Fe 矿物的分异 (橄榄石、辉石、磁铁矿),使 FeO 含量迅速降低,从而使硫的溶解度降低而达到饱和。贫硫化物但却富 PGE 层状岩体如 Sonju Lake 被认为是拉斑玄武岩结晶分异形成的 (Park, 2004); 温压对饱和和机制的影响主要表现为硫化物饱和和熔体中硫的含量随压力升高而降低,但随温度升高而增大;  $H_2O$  的加入也能够促进硫饱和,相同条件下含 1%  $H_2O$  的基性岩硅酸盐熔体中硫化物饱和时硫的含量 (SCSS) 比无水基性岩要低 135~280  $\mu g/g$ ,如 Ripley 等 (2007) 认为 1% 的  $H_2O$  在 Duluth 岩体成矿过程中起到重要作用。高温高压下超临界态的  $CO_2$  参与金属成矿物质的搬运与聚集,可能是大量的 Cu 和 Ni 等金属聚集的关键因素之一 (Fu Piao'er, 2012)。  $CO_2$  的加入对硫化物饱和的影响一直存在争议,争议的焦点在于  $CO_2$  的加入对  $f_{O_2}$  的改变认

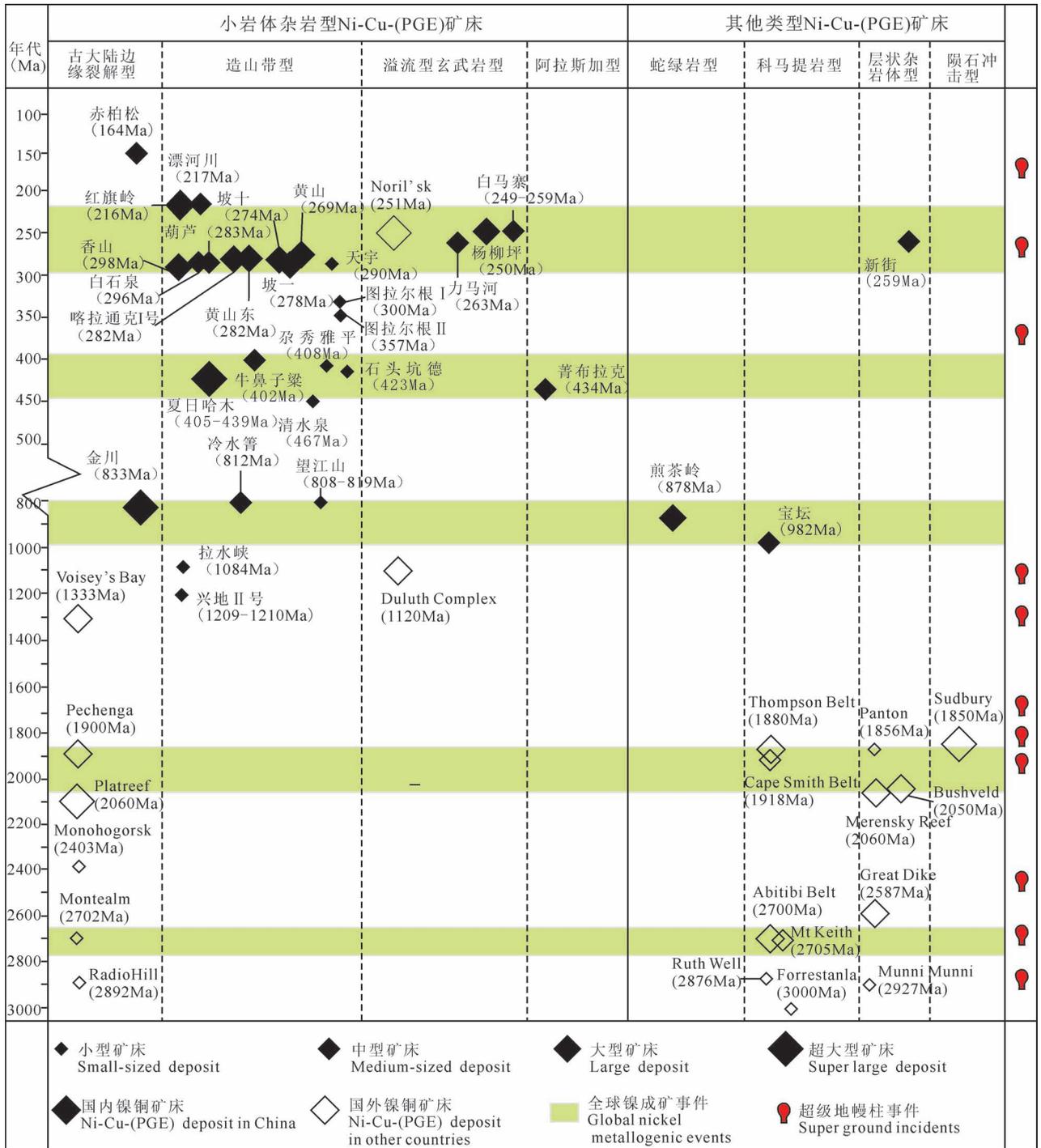


图3 不同类型岩浆型铜镍硫化物矿床成岩成矿年龄统计图(据李德东等,2014,修改,数据来源同表2、表3)

Fig. 3 Comparative map showing the ore-forming and rock-forming age of the major Ni—Cu—PGE sulfide deposits and related mafic—ultramafic rocks from different tectonic environment(modified from Li Dedong et al., 2014&)

识不一。有观点认为在玄武质岩浆中 CO<sub>2</sub> 的含量与 Fe<sup>3+</sup>/(全 Fe)之间没有明显的关系,也有学者认为富 CO<sub>2</sub> 流体可导致岩浆体系 f<sub>O<sub>2</sub></sub> 升高(Wenzel et al., 2002);有研究表明混染碳酸岩可能导致 f<sub>O<sub>2</sub></sub> 降

低(Mollo et al., 2010),同样的 CH<sub>4</sub> 的加入或者混染石墨也会导致 f<sub>O<sub>2</sub></sub> 降低(Thakurta et al., 2008),而 f<sub>O<sub>2</sub></sub> 降低会降低 SCSS(Jugo,2009)。富含硫的围岩进入岩浆可以使其中的硫化物达到饱和(Lesher et al., 1993),如 Duluth 矿床与 Voisey's Bay 矿床均是

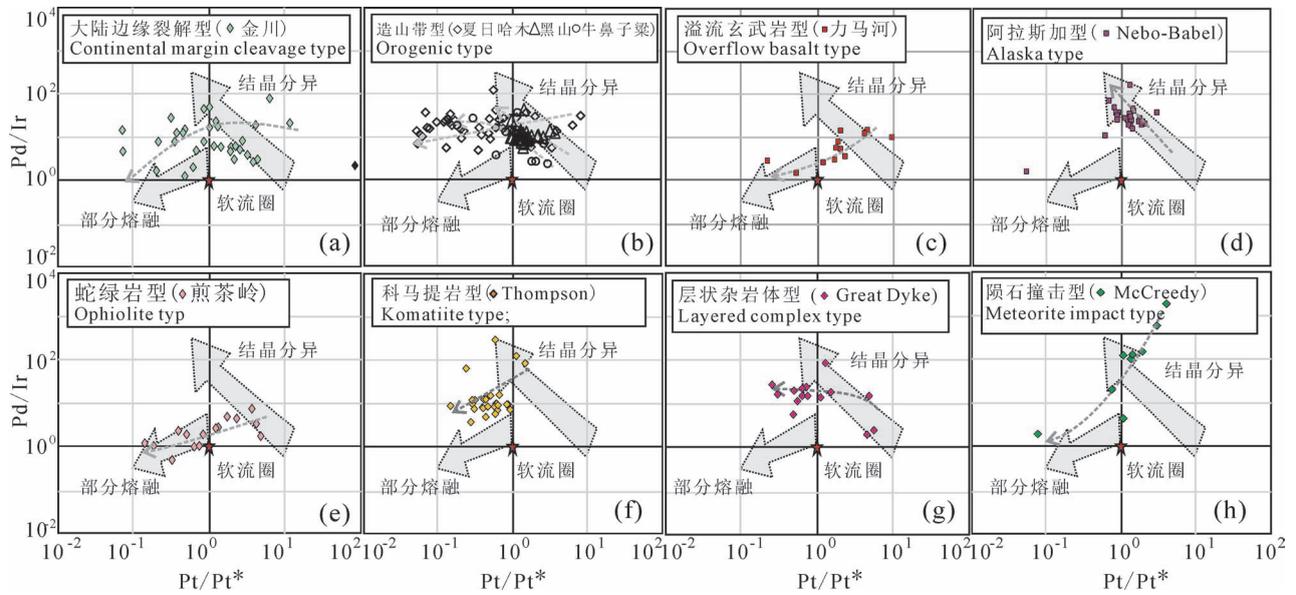


图4 结晶分异和部分熔融过程中的PGE分异趋势(底图据 Bea et al., 1997.数据来源 Good et al., 1993;王瑞廷,2002;陶琰等,2007;Seat et al., 2009;Dare et al., 2011;徐刚,2013;Maier et al., 2015;曾认宇等,2016)

Fig. 3 PGE segregation during crystallization and partial melting (According to Bea et al., 1997. Data from Good et al., 1993; Wang Ruiting, 2002& Tao Yan et al., 2007& Seat et al., 2009; Dare et al., 2011; Xu Gang, 2013& Maier et al., 2015; Zeng Renyu et al., 2016&)

由于含硫围岩的加入而形成(Lambert et al., 1998)。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成矿具有一定的贡献(Ripley et al., 2007)。但有时传统的  $\delta^{34}\text{S}$  不能有效表征混染太古代地层的硫,需同时测试  $\delta^{33}\text{S}$ ,从而计算  $\Delta^{33}\text{S}$  来判断岩浆系统是不是混染了太古宙地层的硫(Farquhar et al., 2003; Bekker et al., 2009)。围岩 Si 加入, HAOT (高铝橄榄拉斑玄武岩, high-Al olivine tholeiite) 岩浆加入 15% 的  $\text{SiO}_2$  会导致 SCSS 降低  $569 \mu\text{g/g}$ ,并会导致斜方辉石的结晶而不是橄榄石的结晶,由于 Ni 在斜方辉石/熔体的分配系数大于橄榄石/熔体之间的分配系数,因此更多的 Ni 会进入到硫化物,这个过程可能对于 Ni 赋存岩相为苏长岩的矿床起到重要作用。此外岩浆混合作用对岩浆中 S 发生过饱和起到重要作用(Ripley et al., 2007)。实验研究证实了原始的富 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(Campbell et al., 1983)。

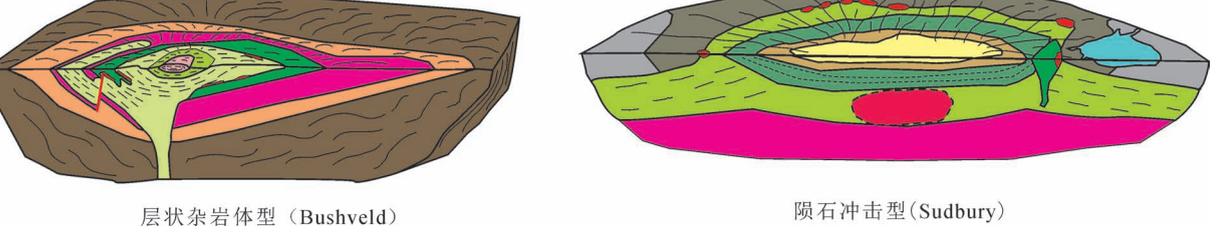
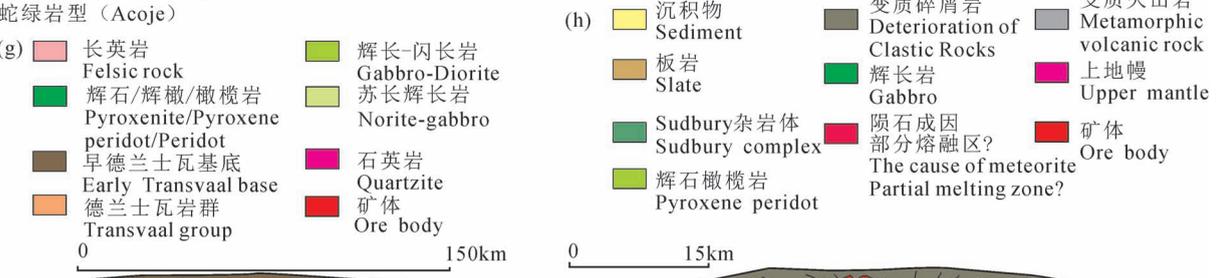
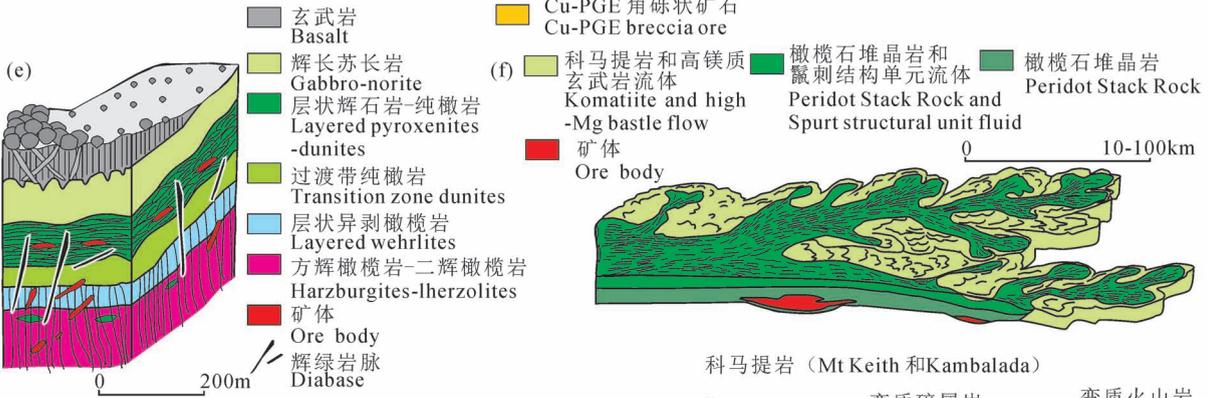
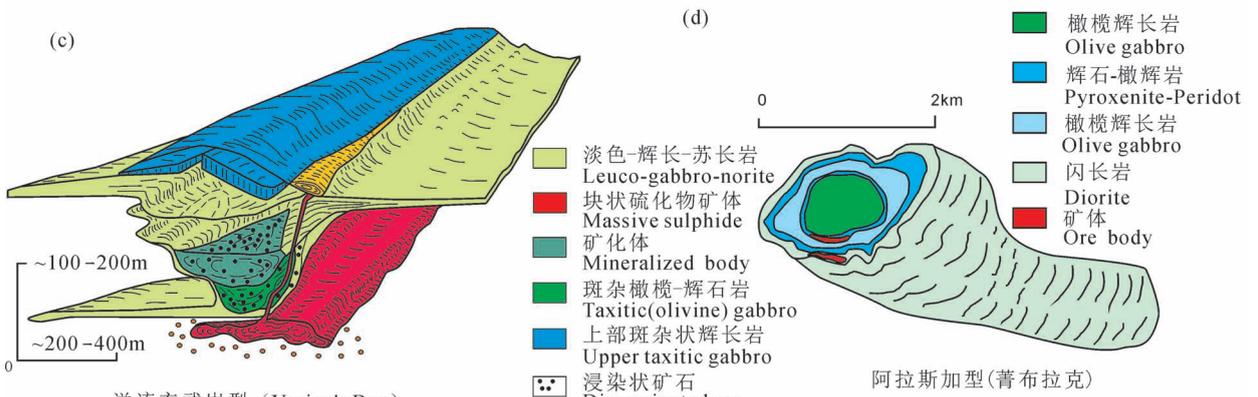
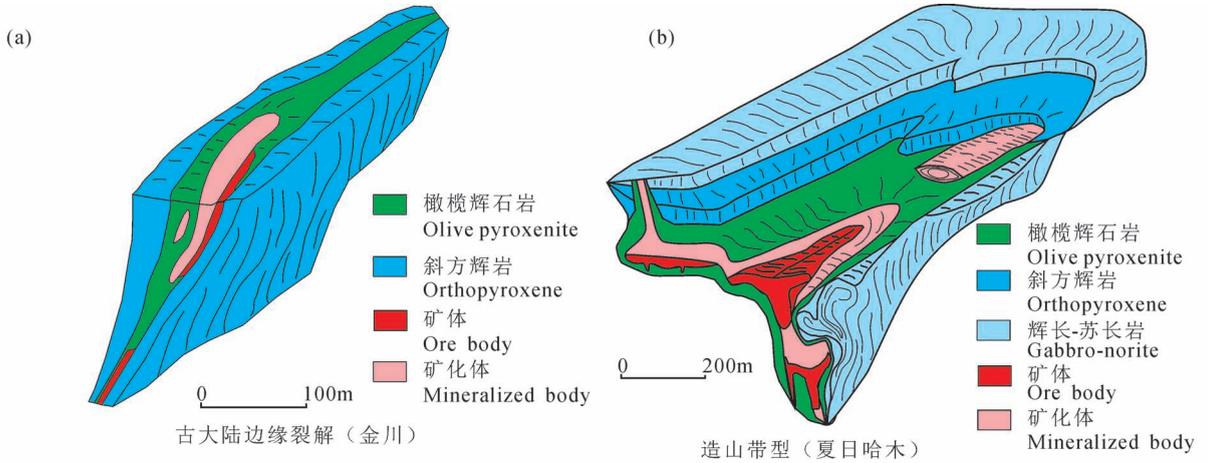
### 2.3 熔离作用

造山带环境成矿岩浆体系中,成矿金属的聚集和硫化物熔离是超大型镍铜硫化物矿床形成的关键。Cu、Pd、Ir 的含量常用来判断硫化物熔离(Qi et al., 2008)。Pd、Ir 高度相容于硫化物,其硫化物熔

体/硅酸盐熔体之间的分配系数  $D^{\text{Sul/Sil}}$  在  $10^3 \sim 10^5$  (Fleet et al., 1991), Cu 的  $D^{\text{Sul/Sil}}$  在  $10^2 \sim 10^3$  远低于 PGE,当硫化物熔离时 Cu/Pd 会迅速降低(Momme et al., 2003);相反,在硫未饱和的岩浆中 Cu 和 Pd 均显示不相容特征,而在硫未饱和岩浆的结晶分异过程中 Pd/Ir 会升高(Momme et al., 2002)。汤中立等(1990, 1995, 1996)发现金川岩体的面积只有  $1.34 \text{ km}^2$ ,岩体体积的 47.8% 都是矿体;中国吉林的红旗七岩体体积 96% 都是由海绵陨铁状富矿组成的,这些矿床不是就地熔离作用形成的,而是母岩浆侵入现存空间之前,在深部发生熔离作用和部分结晶分异作用,使母岩浆分离为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆、矿浆部分,汤中立等(1996)将这种机制概括为“深部熔离—贯入成矿”,这种成矿作用是小岩体成大矿的具体表现,而就地熔离成矿作用是次要的,与深部熔离—贯入成矿表现出来的矿石组构也不一样。通常就地熔离矿体以星点状矿石为主,深部熔离贯入矿体以海绵状矿石为主,晚期贯入矿体块状矿石为主。

### 2.4 矿体就位特征

查明岩体及矿体的就位特征对矿石质量以及指导勘查工作具有重要意义。根据成矿岩体的规模可划分成两大类:小岩体杂岩型和其它类型(李德东



层状杂岩体型 (Bushveld)

陨石冲击型 (Sudbury)

图5 不同类型岩浆 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床形态及分布特征:(a) 古大陆边缘裂解型;(b) 造山带型;(c) 溢流型玄武岩型;(d) 阿拉斯加型;(e) 蛇绿岩型;(f) 科马提岩型;(g) 层状杂岩体型;(h) 陨石冲击型(据 Barnes et al., 2016 修改)

Fig. 2 Schematic illustration of the spectrum of characteristic geometries of composite mafic and mafic-ultramafic intrusions known to host magmatic Ni—Cu—PGE sulphide mineralisation; (a) Continental margin cleavage type; (b) Orogenic type; (c) Overflow basalt type; (d) Alaska type; (e) Ophiolite type; (f) Komatiite type; (g) Layered complex type; (h) Meteorite impact type. (modified from Barnes et al., 2016)

等, 2014)。

#### 2.4.1 小岩体杂岩型

小岩体杂岩型根据构造环境, 岩体产出状态及岩石组合又可分为古大陆边缘裂解型: 其岩体出露规模较小, 岩体出露面积多数在 1 km<sup>2</sup> 左右, 典型代表有中国的金川铜镍矿, 含矿岩浆有序侵位显示岩浆在深部岩浆房停歇过程中曾发生熔离分异, 形成岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的分层结构。成矿及后期构造变形过程中矿化控制因素主要表现为两个方面: 同源岩浆控制和后期构造控制。其同源岩浆控制表现在含矿超基性岩体岩相分异和似层状的结构。由于矿床形成时间较早, 后期构造活动必然改造其矿体形态, 由最易于就位的层状或似层状岩体逆时针旋转而成向西南倾斜的板状或透镜状岩体(高辉等, 2009a)(图 5a)。

造山带型: 其岩体出露规模也较小, 中国大多数 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床都是属于此类型, 最新发现的夏日哈木超大型铜镍硫化物矿床也属于此类型(图 5b)。成矿母岩浆在深部岩浆房分异为含少量硫化物的岩浆、含较多硫化物的岩浆和矿浆, 这些含矿岩浆和矿浆分阶段脉动式上侵, 在上侵过程中和进入终端岩浆房后, 硫化物继续熔离, 是形成夏日哈木镍矿床的主导机制(杜玮等, 2014)。

溢流玄武岩型: 其分异性较好, 矿体呈层状、透镜状, 与岩体产状一致或者本身就是岩体的一部分(Barnes et al., 2016)。典型代表有 Noril'sk—Talnakh 和中国的力马河岩体(图 5c)。

阿拉斯加型: 小岩体规模也较小, 典型代表为普布拉克, 这类岩体最明显的特征为岩体具有环状分布, 从中心向外岩石由超基性逐渐变为基性, 矿体一般位于超基性岩体, 呈筒状产出, 受重力分异作用矿体处于岩浆底部(张江伟等, 2012)(图 5d)。

#### 2.4.2 其他类型

蛇绿岩型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床主要代表有菲律宾的 Acoje(Yumul, 2001), 中国的煎茶岭(王瑞廷, 2002)。Acoje 的铬铁矿和镍(PGE)矿床主要赋存在过渡带中的纯橄岩和层状堆积的超基性岩层

内(图 5e)。Acoje 的硫化物虽然是经过了低温热液变质作用叠加改造, 但其成因仍是岩浆主导(Orberger et al., 1988)。其铬铁矿床, PGE 和镍矿床的形成都与高镁质玄武岩和玻质融体有关(Yumul, 2001)。

科马提岩型含矿岩体面积约十几平方千米, 典型矿床代表有 Mt. Keith、Kambalada、Thompson 和 Abitibi 等(图 5f), 岩体多呈层状、似层状的岩席(床), 一般自下而上可有超镁铁岩层—辉长辉绿岩层—闪长岩层—细碧角斑岩层—角砾岩和凝灰岩层组成。镍硫化物产在科马提岩中, 特别是科马提岩的下部——拉斑质玄武岩与科马提岩的接触带。岩石基性程度较高, 上部由多层薄岩流层组成, 最上部岩石具良好的鬃刺结构。特征的鬃刺结构是岩流喷发时密度较大的橄榄石及硫化镍沉降到岩流下部富集, 上部熔体急剧冷却发育而成的(刘源等, 2013)。铜镍硫化物矿体呈似层状、透镜状产于超基性岩底部, 矿石主要由斑杂状、星散状为主, 局部有贯入式块状矿体(李德东等, 2014)。

层状杂岩体型含矿岩体一般出露面积较大, 10 km<sup>2</sup> 左右, 岩体韵律分层性比较明显, 下部以橄榄岩相为主, 上部以辉长岩相为主, 晚期还有正长岩侵入。典型代表有南非布什维尔大型层状铂族金属(含铜镍铬)矿床(Mukasa et al., 1998)(图 5g)。

陨石冲击型, 目前全世界仅 Sudbury 矿床一例, 主要指的是外来作用引发的大规模岩浆活动的产物, 典型的同心环状岩体分布, 这是通过陨石撞击导致下部岩层活化, 从而诱发铜镍硫化物矿床形成(Reisberg et al., 2006)(图 5h)。

总之, 铜镍矿床的成矿过程是个复杂的过程, 不伦是部分熔融, 硫饱和, 熔离作用或者最后矿体的就位形态其实都对于成矿都是一个铜镍硫化物沉淀的约束。部分熔融程度直接影响了原始岩浆中成矿元素的含量, 硫饱和直接影响成矿, 熔离则是影响成矿元素的赋存状态与矿石类型, 不同构造环境形成的容矿岩体岩石组合及规模不同, 其矿床形态存在差异, 其中小岩体杂岩型矿体特征显著不同于其他

类型。小岩体杂岩型的特征就是含矿岩体较小,矿化集中分布;而其他类型的岩体规模相对较大,矿化相对较分散。但也存在共同点:硫化物都具有重力分异的特点,基本都赋存于岩相变化的接触部位,或者构造突变部位。

### 3 矿床评价及成矿机制认识

#### 3.1 小岩体成大矿

所谓的“小岩体成大矿”,是汤中立院士基于对金川铜镍矿床的深入研究,于20世纪80年代初提出的成矿认识,并通过长时间地对中国西北地区与成矿有关的小型镁铁—超镁铁质岩体的系统研究,完善了该认识。小岩体成大矿机制(汤中立,2004;汤中立等,2011,2012,2015)的主控因素如下:首先,小岩体的原生岩浆来自地幔的中等深度、熔融程度中等的拉斑质苦橄岩浆或大深度、熔融程度较高的科马提岩浆,而地幔浅部或较浅部熔融程度较低的玄武岩浆和碱性苦橄岩浆并不产生这类矿床(Arndt et al., 2005)。其次,岩浆进入现存空间前发生深部熔离、结晶分异等预富集作用,其表现是深部地幔的岩浆多次涌动进入地壳深部岩浆房或过程中,受到物理化学条件的变化以及与围岩发生同化混染或因外来硫的加入,从而导致岩浆在较深的部位达到硫化物饱和,发生熔离作用和部分结晶作用,继而分异为不含矿、含矿(对应形成浸染状矿石)、富矿(对应形成网状矿石)和矿浆(对应形成块状矿石)等几部分岩浆。小岩体成大矿机制的核心是深部预富集机制、脉动式贯入和终端岩浆房聚集成矿(图6)。

#### 3.2 岩浆通道成矿

岩浆通道成矿的认识是学者们通过对Noril'sk—Talnakh和Voisey's Bay的研究而提出的。学者们认为岩浆通道成矿机制是岩浆源富含丰富的金属硫化物物质,因此岩浆源来自深部的地幔羽流,这种岩浆源具有高度部分熔融和低Ti的特点(Zhou Meifu et al., 2008; Godel et al., 2011)。镁铁质—超镁铁质岩浆的密度是大于地壳密度的,那么它们是如何通过地壳,而形成高层位的侵入体?目前认为有两种因素提供驱动力,一个是地幔作用,提供了良好的通道,保障岩浆侵入,而羽状的岩浆通道,在地质背景的尺度下如同“毛细管”,对岩浆上升起到了一定作用力。另一个是挥发性流体提供的超高压,这种情况比较特殊,往往被忽略(Lister et al., 1991)。而对于岩浆通道成矿来说,其岩浆的流动速率必须相对较快,同时持续时间较长,因为低速、

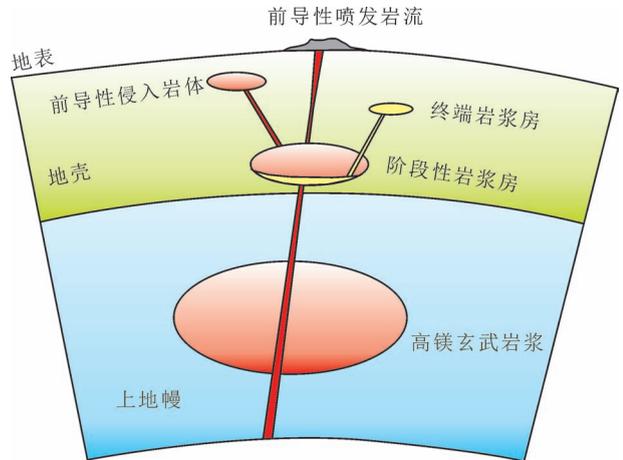


图6 镁铁质、超镁铁质小岩体成矿模式图  
(据汤中立等,2015)

Fig. 6 Model of small intrusions mineralization  
(from Tang Zhongli et al., 2015&)

间歇或者瞬时的岩浆活动只能导致单相的岩浆结晶,不利于矿化。Barnes et al. (2016) 总结了一个多级沉积改造硫化物在垂直和横向发育的管道系统的理论框架(图7)。这个框架主要分为如下几个阶段:首先,各种侵入体的几何形状是由先期存在的交叉结构控制,岩浆内同化混染形成的液态的硫化物可以来自深部的也可以发生在浅部的通道内;其次,这个系统的水平部分因为围岩熔融或分解而扩大,硫化物聚集的最终位置受到重力回流控制;随后,硫化物的初始沉积受到了包括纵向横向流体的变化控制,水平基底上的叶状岩墙,通道出口对流速减低作用,局部流体发生的涡流或扭转,阻碍流体的岩床—岩墙过渡区等多种因素的控制;最后,岩浆密度逐渐超过周围地壳的密度,上升的动力降低,岩浆开始回流到低层的通道内,形成了网状的岩浆,晶体和硫化物从低层的岩浆腔沉淀到岩墙分支中。这个模式,不同于以前液滴沉降是由于流速减低导致的,而是通过排水,动力筛分和向下侵入形成的。在这个模式图中没有涉及侵入体最终的凝固阶段,这是因为在侵入体停止流动后,硅酸盐(硫化物)熔体池内仍然发生原位分馏和内部分化(Barnes et al., 2016)。

此外,众多学者(Arndt et al., 2005; Barnes et al., 2005; Lightfoot et al., 2005; Li et al., 2009; Keays et al., 2010; Ripley et al., 2012)认为地壳硫的加入也是岩浆通道成矿机制的重要因素之一。因此,岩浆通道成矿机制主控因素是持续性岩浆流动,地壳S的加入在岩浆上升的途径中,有利于岩浆上

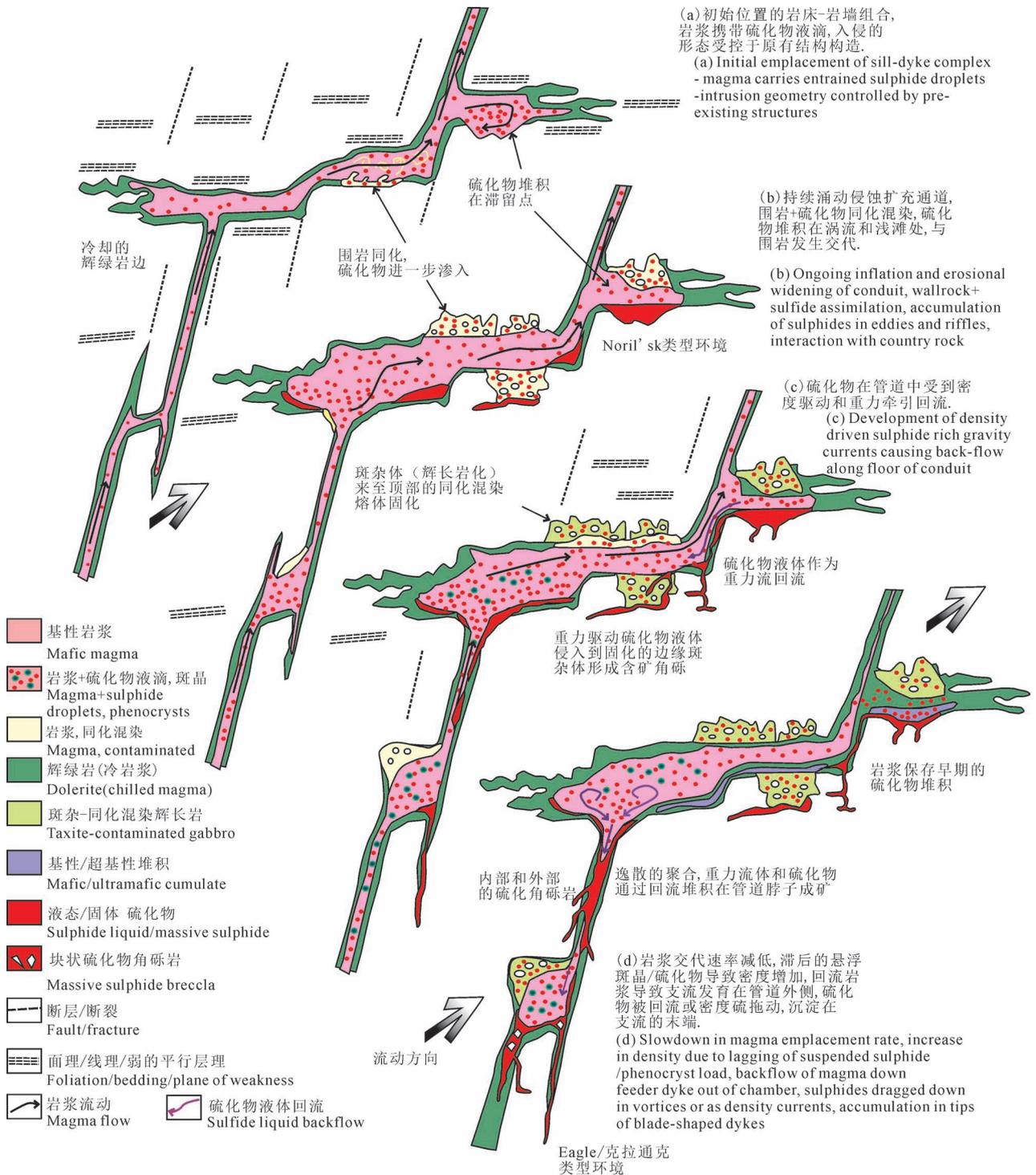


图 7 理想的岩浆管道系统的地壳部分组成的示意图(据 Barnes et al., 2016)

Fig. 7 Schematic illustration of components of the crustal portion of an idealised magmatic plumbing system(from Barnes et al., 2016)

升侵入和成矿的几何通道形态。

总体来说,两种成矿机制的相同点:都是来源于高镁拉斑玄武岩浆,都与深大断裂构造有关、受到地幔驱动力作用、发生结晶分异与熔离预富集,此外硫

饱和机制中都认为有外来硫的混染的作用。但具有争议的是:① 成矿位置是“终端岩浆房”还是“岩浆通道”,实质就是硫化物是深部熔离还是就地熔离。Maier 等(2011)综合上述两种成矿方式,将世界上

典型的岩浆铜镍硫化物矿床放在一个统一的岩浆通道系统内(图8),中国的金川铜镍矿位于这个系统的最底层。② 岩浆上侵方式存在争议——是脉动式还是连续式? ③ 外来S,要形成浆Ni—Cu—PGE硫化物矿床,都需要的是一个富集金属元素的S不饱和母岩浆,在一定条件下达到硫化物饱和和预富集。通道成矿理论的支持者(Ripley, 2003; Keays et al., 2010; Ripley et al., 2012)基于一系列铜镍硫化物矿床的S同位素分析结果,强调地壳硫的加入是成矿的必要条件。Irvine (1973)通过实验发现,富硅的地壳物质的加入,会导致镁质岩浆中S的溶解度降低,从而发生S的饱和熔离,Irvine (1973)认为地壳物质的加入被认为是导致岩浆S达到饱和的重要原因(Irvine, 1977)。因此,小岩体成大矿理论的支持者认为在深部岩浆房中,不同岩浆的混合,结晶分异作用,壳源成分的污染,外来硫的加入等都可导致发生硫饱和或过饱和(汤中立等, 2015)。小岩体成大矿理论基于深部熔离,客观地揭示了岩浆上侵是脉动式,大量不含矿的岩浆侵入到不同空间或喷溢至地表(形成岩群或岩流),剩余少量的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆依次贯入终端岩浆房聚集成岩成矿,而岩浆通道成矿认为成矿是一种开放式的系统,岩浆为连续式上侵。

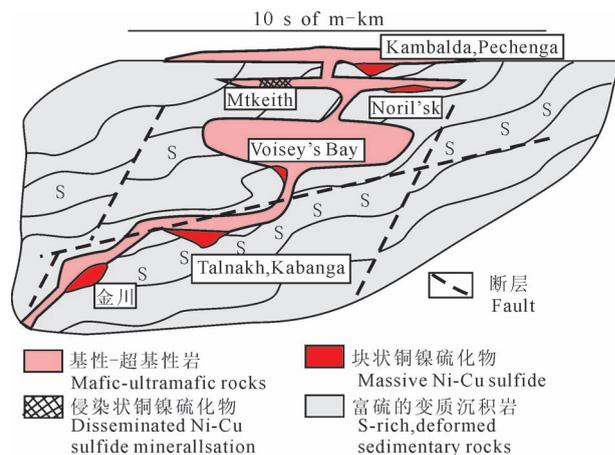


图8 岩浆铜镍硫化物矿床形成模式

(据 Maier et al., 2011)

Fig. 8 Metallogenic model for the magma Ni—Cu sulfide deposit (from Maier et al., 2011)

对于岩体的成因和成矿具有重要的指示意义。H. Д. 索波列夫(1959)最先提出利用基性—超基性岩的镁铁比值进行分类和判定其含矿性。计算公式为(吴利仁, 1963):

$$M/F = \frac{n(\text{MgO})}{n(\text{FeO}) + 2n(\text{Fe}_2\text{O}_3) + n(\text{MnO}) + n(\text{NiO})}$$

但该公式具有一定的局限性,计算时必须将铬尖晶石的Mg、Fe含量剔除,因为少量的铬尖晶石具有大量的MgO、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类质同像,由于它们的混入会引起较大误差。因此,吴利仁(1963)针对索波列夫提出的M/F公式,进行了一系列的研究和修正,提出了新的镁铁比值:

$$m/f = \frac{n(\text{Mg}^{2+}) + n(\text{Ni}^{2+})}{n(\text{Fe}^{2+}) + n(\text{Fe}^{3+}) + n(\text{Mn}^{2+})}$$

根据m/f值得不同,将基性—超基性岩分为镁质超基性岩(m/f > 6.5),铁质超基性岩(m/f = 2 ~ 6.5),富铁质超基性岩(m/f = 0.5 ~ 2.0),铁质基性岩(m/f = 0.5 ~ 2.0)和富铁质基性岩(m/f = 0 ~ 0.5)五类(吴利仁, 1963)。同时结合赋铜镍矿岩体的m/f特征,吴利仁(1963)认为铁质超基性岩中m/f = 4~6是有利于铜镍矿的成矿。孙鼐等(1985)结合我国祁连山一带与基性—超基性有关的矿床,对吴利仁的分类进行了成矿专属性的划分,认为铜镍矿主要形成于铁质超基性岩,同时指出在成分上具有MgO含量较低,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和FeO含量偏高的特征。代俊峰等(2016)结合前人研究和国内外典型岩浆型铜镍矿床,认为镁铁比值进行岩石分类只能利用在超基性岩,同时还要考虑岩石类型、蚀变及构造等影响;含矿岩石的m/f值大于不含矿岩石,矿石的m/f值大于围岩;蚀变和混染作用会使岩石具有很高的m/f值,而与超基性岩有关的铜镍矿床的m/f值在3.70~7.83。

本文统计了国内外有关的岩浆型Ni—Cu—PGE矿床(表4)。这些岩浆型Ni—Cu—PGE矿床的岩石m/f值的范围从0.4到14.01明显不同于代俊峰等(2016)认为的m/f值范围(3.70~7.83),因此单纯通过m/f值多少确定是否成矿还有待进一步商榷。本次通过m/f与Mg<sup>#</sup>值进行投图(图9),清楚地显示所有点都位于一条趋势线上,由此推断成矿岩体基本位于该趋势线上,因此通过该判别图判断岩体是否具有成潜力可作为参考。

磁铁矿是岩浆型Ni—Cu—PGE硫化物矿床中常见的副矿物,Boutroy等(2014)通过对世界级的岩浆型Ni—Cu—PGE硫化物矿床研究发现次生磁

## 4 含矿性评价标志与找矿方法技术

### 4.1 含矿性评价标志

一直以来,基性—超基性岩的镁铁比值被认为

表 4 岩浆型 Ni—Cu—(PGE) 矿床的岩石镁铁比值和 Mg<sup>#</sup>

Table 4 The *m/f* and Mg<sup>#</sup> of magmatic Ni—Cu—(PGE) sulfide deposits

不同类型	典型矿床	镁铁比值	Mg <sup>#</sup>	资料来源
古大陆边缘裂解	金川	4.64~6.64	0.84~0.88	王瑞廷,2002
	赤柏松	1.58~3.63	0.62~0.78	赵全国,2006
	天宇	1.61~4.35	0.61~0.81	唐冬梅等,2009
	喀拉通克 Y9	0.82~1.14	0.36~0.53	焦建刚等,2014
	喀拉通克 Y2—Y3	1.35~2.98	0.87~0.91	杨素红,2014
	红旗岭	1.12~4.41	0.61~0.89	孙立吉,2013
造山型	黄山东	1.70~4.22	0.71~0.81	邓宇峰等,2010
	牛鼻子梁	3.78~4.83	0.79~0.83	凌锦兰,2014
	夏日哈木 I	3.96~6.32	0.79~0.86	王冠等,2014
	坡一	2.76~8.37	0.73~0.88	姜常义等,2012
	白石泉	2.89~4.64	0.74~0.82	毛启贵等,2006
大陆溢流玄武岩	杨柳坪	2.87~4.55	0.79~0.87	汤中立,2006
	白马寨	2.44~4.04	0.75~0.85	管涛等,2006
	Noril'sk	1.17~3.45	0.54~0.77	Krivolutskaya et al., 2012
	力马河	1.04~3.93	0.83~0.94	李莹,2010
蛇绿岩型	Acoje	2.98~6.83	0.75~0.87	Jret al., 1998
	煎茶岭	0.56~14.02	0.63~0.99	王瑞廷,2002
科马提岩型	Abitibi	0.70~1.68	0.40~0.63	Wyman et al., 2002
	Kambalda	0.99~1.63	0.38~0.57	Saidet al., 2010
	宝坛—元宝山	0.49~5.09	0.33~0.87	葛文春等,2001
	Thompson	5.48~8.23	0.83~0.88	Good et al., 1993
层状杂岩体型	Bushveld	0.65~1.39	0.61~0.79	高辉等,2009b
	Great Dyke	0.73~5.46	0.42~0.83	Maier et al., 2015
	新街	0.66~2.45	0.43~0.79	赵莉等,2006

铁矿相对于原生磁铁矿一般亏损微量元素 Ni、Mn、V、Ti、Al、Cr 等,利用 Ni+Cr 与 Si+Mg 图解(图 10)区

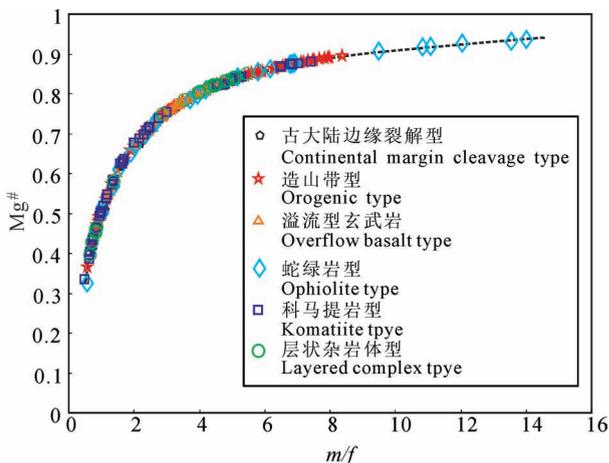


图 9 *m/f* 与 Mg<sup>#</sup> 比值图(数据来源同表 2,表 3 及表 4)

Fig. 9 Diagram showing the Ratio of *m/f* vs. Mg<sup>#</sup> (Data source the same to Table 2, 3 and 4)

$$m/f = \frac{n(\text{Mg}^{2+}) + n(\text{Ni}^{2+})}{n(\text{Fe}^{2+}) + n(\text{Fe}^{3+}) + n(\text{Mn}^{2+})}$$

$$\text{Mg}^{\#} = \frac{n(\text{Mg})}{n(\text{TFe}) + n(\text{Mg})}$$

分 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床和其他类型的矿床。

#### 4.2 找矿技术方法

基于地球化学方法寻找铜镍矿有大量成功的实例。以夏日哈木为例,与镁铁—超镁铁质岩体套合较好的磁异常和 Ni—Cu—Co 化探异常都是有利的岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的找矿靶区。综合化探方法(1:20 水系沉积物异常—1:5 万水系沉积物地球化学特征—1:1 土壤异常特征—地质及工程验证)在夏日哈木找矿中发挥了重要的指导作用(张勤山等,2016)。镍硫化物矿床通常存在于辉石橄榄岩的底部,极化率高,电阻率低。辉石橄榄岩是一种超基性岩,磁性比较强,在勘探铜镍硫化物矿床时,在高磁异常区域极化率比较高的低电阻区域是重要靶区(张晖青等,2017)。白石泉铜镍矿区多利用高分辨率浅层地震和高精度 MT 相结合,达到预测隐伏矿化体空间形态与位置的目的(吴华等,2006b)。遥感方法作为一种重要的工具,在部分岩

浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿找矿过程中发挥了重要的作用。以坡十铜镍矿提取的遥感找矿信息建立找矿模型,基于多光谱 EMT 数据,发现了罗东镁铁—超镁铁岩型镍矿,取得遥感找矿突破(杨建民等,2007)。对于陨石冲击的岩浆型铜镍矿,通过遥感手段也可以直接在陨石坑边部圈定靶区(王波等,2015)。

在实际找矿中,更多是基于地、物、化、遥成果综合集成,圈定找矿靶区(杨瑞亭等,2009)。

### 5 问题与讨论

总之,近年来,国内外在岩浆型 Ni—Cu—PGE (platinum group elements, 铂族元素)硫化物矿床类型划分,成岩成矿时代、成矿构造机制、找矿方法等方面取得了较大进展,主要表现为:

(1) 存在据容矿岩石、成矿作用方式或主要金属组份、成矿构造环境等不同分类方式。

(2) 不同分类的岩浆型 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的硫化物(矿层)的分布都具有重力分异的特点,基本都赋存于岩相变化的接触部位,或者构造突

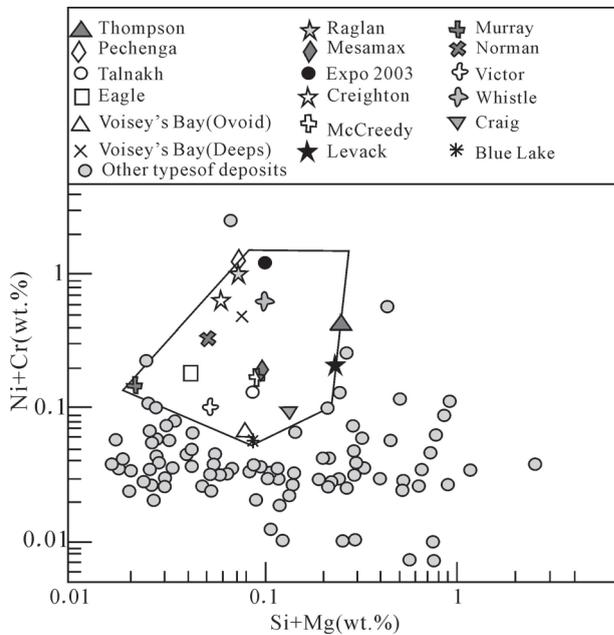


图 10 基于 Ni—Cu—PGE 矿床的原生磁铁矿电子探针数据的  $(\text{Ni} + \text{Cr})/(\text{Si} + \text{Mg})$  值图(据 Boutroy et al., 2014)  
Fig. 10 Average primary magnetite composition, analyzed by EPMA, for individual Ni—Cu—PGE deposits plotted on the Ni + Cr vs. Si + Mg discriminant diagram( from Boutroy et al., 2014)

变部位,小岩体杂岩型矿床矿体分布相对于其他类型矿床更为集中。

(3) 国外 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床主要形成时间是在中元古代以前,而中国主要形成时间是在中元古代以后,早古生代晚期(390~430 Ma)的该类矿床仅发现于中国,因夏日哈木超大型矿床的出现而具有世界意义。

(4) 有两种成矿模式“岩浆通道成矿”和“小岩体成大矿”二者在成矿位置、岩浆上侵方式、外来地壳 S 是否为成矿必要条件三方面存在差异。

(5) 在找矿勘查与含矿性评价时,基于地、物、化、遥成果综合集成圈定找矿靶区,利用全岩  $m/f$  与  $\text{Mg}^\#$  比值、铂族比值、磁铁矿的  $(\text{Ni} + \text{Cr})/(\text{Si} + \text{Mg})$  值等指标确定判定岩体含矿性,对该类型矿床勘查具有重要参考价值。

尽管在岩浆 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床成矿和找矿研究方面取得了很大的进展,但仍存在许多问题:“岩浆通道成矿”过分强调了容矿空间的作用,但却忽略了成矿尺度的问题,特别是矿化作用,仅仅依靠成矿部位进行硫饱和这对于大型及超大型矿床尺度是很难想象的,岩浆进入现存空间前发生深部

熔离、结晶分异等预富集作用也可以在“岩浆通道”成矿。对于含矿性的评价标志也需要深化,成矿过程是一个极其复杂的过程,用简单的手段进行快速评价是理想但通常也存在问题,基性—超基性岩特别是超基性岩都会不同程度的发生蛇纹石化,而蛇纹石化会对地球化学数据的判别产生干扰,因此应该综合多种标志进行判别。

此外,如全球岩浆 Ni—Cu—PGE 硫化物矿床的大地构造环境的多样性,用任何某一种成矿理论来解释,都存在局限性,其内在的原理还有待于进一步的揭示。多期岩体中铜镍矿与铂族成矿条件对比研究。控制铜镍成矿机制和关键因素有待进一步研究。特殊类型矿床的可能性探索,如不同于其他构造环境的夏日哈木超大型铜镍矿的发现,未来是否也可能在其他构造环境取得超大型岩浆 Ni—Cu—PGE 矿的找矿突破?此外大型—超大型矿床的形成机制,受到不同控制因素的制约,对恢复矿床的形成过程,查明巨量金属成矿机制具有一定挑战;在勘查方面,何种方法是最有效和经济的,使得矿床的勘查评价受到约束。

致谢:感谢西北有色地质勘查局王瑞廷高级工程师及编辑部章雨旭研究员对论文提出了宝贵修改意见。

## 参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈世平,王登红,屈文俊,陈郑辉,高晓理. 2005. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代. 新疆地质, 23(3): 230~233.
- 代俊峰,宫磊,霍永豪. 2016. 含矿基性—超基性岩的镁铁比值. 地质找矿论丛, 31(1), 42~46.
- 邓宇峰,宋谢炎,陈列猛. 2010. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁—超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究. 矿床地质, (S1): 857~859.
- 杜利林,耿元生,杨崇辉,王新社,任留东,周喜文,石玉若,杨铸生. 2005. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄. 地质学报, 79(6): 805~813.
- 杜玮,凌锦兰,周伟,王子玺,夏昭德,夏明哲,范亚洲,姜常义. 2014. 东昆仑夏日哈木镍矿床地质特征与成因. 矿床地质, 33(4): 713~726.
- 傅飘儿. 2012. 新疆北部晚古生代岩浆铜镍硫化物矿床成因: 岩石及流体地球化学制约. 导师: 张铭杰. 兰州: 兰州大学, 博士学位论文, 1~90.
- 高辉, Hronsky J, 曹殿华, 李瑞萍, 张鹏. 2009a. 金川铜镍矿床成矿模式、控矿因素分析与找矿. 地质与勘探, 45(3): 218~228.
- 高辉, 王安建, 曹殿华, 李瑞萍, 王永磊. 2009b. 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿床与金川铜镍硫化物矿床微量元素地球化学特征对比及其意义. 中国地质, 36(2): 268~290.
- 葛文春, 李献华, 梁崇荣, 王汝成, 李正祥, 周汉文. 2001. 桂北元宝山宝坛地区约 825Ma 镁铁—超镁铁岩的地球化学及其地质意

- 义. 地球化学, 30(2): 123~130.
- 管涛, 黄智龙, 许德如, 张振亮, 严再飞, 许成. 2006. 云南金平白马寨含矿镁铁—超镁铁岩体岩石地球化学. 地质科学, 41(3): 441~454.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 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. 科学通报, 49(22): 2324~2328.
- 韩春明, 肖文交, 赵国春, 屈文俊, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义. 岩石学报, 22(1): 163~170.
- 姜常义, 程松林, 叶书锋, 夏明哲, 姜寒冰, 代玉财. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因. 岩石学报, 22(1): 115~126.
- 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 凌锦兰, 郭芳放, 邓小芹, 姜寒冰, 范亚洲. 2012. 塔里木板块东北部坡—镁铁质—超镁铁质层状侵入体岩石成因. 岩石学报, 28(7): 2209~2223.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 杜玮, 王子玺, 范亚洲, 宋艳芳, 宋忠宝. 2015. 东昆仑夏日哈木镁铁质—超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景. 岩石学报, 31(4): 1117~1136.
- 焦建刚, 王勇, 钱壮志, 王斌, 鲁浩, 刘欢, 郑鹏鹏. 2014. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Y9 岩体年代学与成矿机制探讨. 矿床地质, 33(4): 675~688.
- 李德东, 王玉往, 龙灵利, 解洪晶, 石煜. 2014. 中国岩浆型铜镍硫化物矿床类型浅谈. 矿产勘查, 5(2): 124~130.
- 李华芹. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京:地质出版社, 1~264.
- 李华芹, 陈富文, 路远发, 杨红梅, 郭敬, 梅玉萍. 2004. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及铀同位素地球化学特征研究. 地球学报, 25(2): 191~195.
- 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 吴华, 程松林, 杨甲全, 代玉财. 2006. 新疆坡北基性—超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 25(4): 463~469.
- 李惠民, 相振群, 李怀坤, 陈志宏, 陆松年, 周红英, 宋彪. 2005. 望江山基性岩体中斜锆石的 SHRIMP 法 U-Pb 同位素测年; 中国矿物岩石地球化学学会第十届学术年会, 中国武汉.
- 李立兴, 王登红, 松权衡, 王成辉. 2009. 吉林通化赤柏松铜镍硫化物矿床含矿岩体之时代研究. 矿物学报, 29(S1): 55~56.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 赵俊伟, 李连松, 杨启安. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义. 西北地质, 45(4): 185~191.
- 李文渊. 2007. 岩浆 Cu—Ni—PGE 矿床研究现状及发展趋势. 西北地质, 40(2): 1~28.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 刘敦一. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 科学通报, 49(4): 401~402.
- 李莹. 2010. 攀西地区力马河镁铁—超镁铁质岩体的岩石学和地球化学研究. 导师:张招崇. 北京:中国地质大学(北京), 硕士学位论文, 1~66.
- 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 潘成泽, 毛启贵, 杜安道. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定. 岩石学报, 22(1): 245~251.
- 凌锦兰. 2014. 柴周缘镁铁质—超镁铁质岩体与镍矿床成因研究. 导师:姜常义. 西安:长安大学, 博士学位论文, 1~189.
- 刘源, 江思宏. 2013. 澳大利亚 Kambalda 科马提岩型镍矿成矿模型. 矿物学报, (S2): 1050~1051.
- 路孝平. 2004. 通化地区古元古代构造岩浆事件. 导师:吴福元. 吉林:吉林大学, 1~165.
- 吕林素, 刘珺, 张作衡, 谢桂青. 2007. 中国岩浆型 Ni—Cu—(PGE) 硫化物矿床的时空分布及其地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2561~2594.
- 马中平, 李向民, 徐学义, 孙吉明, 唐卓, 杜涛. 2011. 南阿尔金山清水泉镁铁—超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义. 中国地质, 38(4): 1071~1078.
- 毛景文, 杜安道. 2001. 广西宝坛地区铜镍硫化物矿石 982Ma Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 中国科学(D辑:地球科学), 31(12): 992~998.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 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. 矿床地质, 21(4): 323~330.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 孙敏, 袁超, 闫臻, 李继亮, 雍拥, 张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性—超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约. 岩石学报, 22(1): 153~162.
- 庞春勇, 陈民扬. 1993. 煎茶岭地区同位素地质年龄数据及其地质意义. 矿产与地质, (5): 354~360.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 赵全国. 2005. 吉林通化赤柏松辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国科学(D辑:地球科学), 35(5): 393~398.
- 钱兵, 张照伟, 张志炳, 邵继. 2015. 柴达木盆地西北缘牛鼻子梁镁铁—超镁铁质岩体年代学及其地质意义. 中国地质, 42(3): 482~493.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, (4): 302~308.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 肖庆华, 刘平平. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁—超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 26(10): 3027~3035.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 熊德信, 屈文俊, 杜安道. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2451~2456.
- 孙立吉. 2013. 红旗岭铜镍硫化物矿床地质地球化学特征及找矿技术方法研究. 导师:郝立波. 吉林:吉林大学, 博士学位论文, 1~171.
- 孙鼎. 1985. 火成岩石学. 北京:地质出版社, 1~324.
- 汤中立. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京:地质出版社, 1~200.
- 汤中立. 2002. 超大型 Ni—Cu(Pt) 岩浆矿床的划分与找矿. 地质与勘探, 38(3): 1~7.
- 汤中立. 2004. 中国镁铁、超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化. 地学前缘, 11(1): 113~119.
- 汤中立. 2006. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测. 北京:地质出版社, 1~308.
- 汤中立, 焦建刚, 闫海卿, 徐刚. 2015. 小岩体成(大)矿理论体系. 中国工程科学, 17(2): 4~18.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 闫海卿, 焦建刚, 刘民武, 徐章华, 徐刚, 王亚磊. 2011. 岩浆硫化物矿床勘查趋势与小岩体成矿系统. 地球科学与环境学报, 33(1): 1~9.
- 汤中立, 徐刚, 王亚磊, 邱根雷, 代俊峰. 2012. 岩浆成矿新探索——小岩体成矿与地质找矿突破. 西北地质, 45(4): 1~16.
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 潘振兴. 2007. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律. 地学前缘, 14(5): 92~103.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李军. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征:对东疆镁铁—超镁铁质岩体源区和成因的制约. 岩石学报, 25(4): 817~831.
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 2007. 四川力马河镁铁—超镁铁质岩体的地球化学特征及成矿分析. 岩石学报, 23(11): 2785

- ~2800.
- 王波,尹显科,张伟,裴亚伦,蒋华标. 2015. 遥感在陨石坑解译及成矿关系中的应用. *四川地质学报*, 35(4): 622~624.
- 王登红,李建康,王成辉,屈文俊,付小方,傅德明. 2007. 与峨眉地幔柱有关年代学研究的新进展及其意义. *矿床地质*, 26(5): 550~556.
- 王登红,李志伟,罗君烈,刘和林,蒋成兴. 2003. 云南铂族元素找矿基础问题. *云南地质*, 22(3): 250~259.
- 王冠,孙丰月,李碧乐,李世金,赵俊伟,奥琮,杨启安. 2014. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质—超镁铁质岩体岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义. *地学前缘*, 21(6): 381~401.
- 王虹,屈文俊,李华芹,陈世平. 2007. 哈密地区新发现铜镍硫化物矿床成岩成矿时代的测定及讨论. *地质学报*, 81(4): 526~530.
- 王瑞廷. 2002. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究. 导师: 郝英. 西安: 西北大学, 博士学位论文, 1~151.
- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. *地质论评*, 49(2): 205~211.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 王东生, 汤中立. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征. *大地构造与成矿学*, 28(3): 279~286.
- 吴华. 2006a. 东天山地壳演化及内生金属成矿作用. 导师: 邓军. 北京: 中国地质大学(北京), 博士学位论文, 1~158.
- 吴华, 徐兴旺, 莫新华, 梁光河, 程松林, 秦克章, 李军, 张宝林, 王杰, 肖骑彬, 韩照举, 金长明, 李金祥. 2006b. 东天山白石泉矿区地球物理多方法联合探查与隐伏铜镍矿定位预测. *中国地质*, 33(3): 672~681.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性. *地质科学*, 4(1): 29~41.
- 郝爱华, 顾连兴, 李绪俊, 叶松青, 郑远川. 2005. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿时代讨论. *矿床地质*, 24(5): 54~59.
- 徐刚. 2013. 甘肃北山地区黑山铜镍硫化物矿床成矿作用研究. 导师: 汤中立. 西安: 长安大学, 博士学位论文, 1~163.
- 闫海卿, 苏尚国, 焦建刚, 汤华. 2005. 金川 Cu、Ni(PGE) 岩浆硫化物矿床成矿时代研究. *地学前缘*, 12(2): 309~315.
- 杨刚, 杜安道, 卢记仁, 屈文俊, 陈江峰. 2005. 金川镍—铜—铂矿床块状硫化物矿石的 Re-Os(ICP-MS) 定年. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 35(3): 241~245.
- 杨合群, 洛长义, 朱宝清, 罗玉鹏, 张开春. 1997. 新疆兴地含铜镍基性超基性侵入体地质特征及成矿条件. *西北地质科学*, (2): 43~53.
- 杨建民, 张玉君, 姚佛军, 吴华, 邓刚, 陈疆. 2007. 遥感找矿信息在新疆东镍矿发现中的主导作用. *岩石学报*, 23(10): 2647~2652.
- 杨瑞亭, 李志杰. 2009. 综合物化探方法在葫芦铜镍硫化物矿床勘探中的应用. *黄金科学技术*, 17(3): 40~43.
- 杨胜洪, 陈江峰, 屈文俊, 杨刚, 杜安道. 2007. 金川铜镍硫化物矿床的 Re-Os“年龄”及其意义. *地球化学*, 36(1): 27~36.
- 杨素红. 2014. 新疆喀拉通克铜镍矿岩石学、岩石地球化学及矿物学研究. 导师: 钱状志. 西安: 长安大学, 博士学位论文, 1~94.
- 张晖青, 王成勇, 李玉龙. 2017. 运用物探方法在青海省东昆仑地区勘探铜镍硫化物型矿床. *科技创新与应用*, (5): 154.
- 张江伟, 张照伟, 李文渊, 谢德胜, 高永宝, 王亚磊, 郭周平, 李侃, 钱兵, 臧遇时. 2012. 新疆菁布拉克含铜镍矿杂岩体形成时代与地球化学特征. *西北地质*, 45(4): 302~313.
- 张勤山, 马楠, 郝亚青, 刘长征, 李积红. 2016. 综合化探方法在青海夏日哈木超大型铜镍矿床中的找矿应用. *物探与化探*, 40(3): 429~437.
- 张照伟, 李侃, 张江伟, 钱兵, 王亚磊, 尤敏鑫. 2016. 中国岩浆铜镍矿床的形成特点与找矿方向. *中国地质调查*, 3(3): 7~15.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 谢燮, 王亚磊, 张江伟, 郭周平, 李侃. 2012. 青海省拉水峡基性杂岩体地球化学特征及其对矿床成因的约束. *地质与勘探*, 48(5): 959~968.
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨刚. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征. *地质学报*, 78(3): 359~365.
- 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 张招崇, 闫开好, 杨建民, 屈文俊, 王志良. 2005. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 285~293.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 左国朝, 王龙生, 吕林素. 2007. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *矿床地质*, 26(4): 353~360.
- 赵莉, 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 一个开放的岩浆房系统: 攀西新街镁铁—超镁铁质层状岩体. *岩石学报*, 22(6): 1565~1578.
- 赵全国. 2006. 通化赤柏松镁铁—超镁铁质岩石的形成时代与地球化学特征及对成矿作用的制约. 导师: 许文良. 吉林: 吉林大学, 硕士学位论文, 1~85.
- 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 赵莹, 刘斌, 朱佳玮, 岳斌, 艾启兴. 2016. 金川铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学差异及其演化意义. *中国有色金属学报*, 26(1): 149~163.
- 周伟, 夏明哲, 伍学恒, 杜玮, 汪帮耀, 夏昭德, 宋艳芳, 宋忠宝. 2015a. 柴北缘杂岩雅平东和红柳沟北镁铁—超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄及其找矿意义. *地质通报*, 34(10): 1860~1868.
- 周伟, 杜玮, 王子玺. 2015b. 东昆仑石头坑德铜镍矿点镁铁—超镁铁质岩体形成时代及其地质意义: 中国矿物岩石地球化学学会第 15 届学术年会, 中国吉林长春.
- Amlin Y R, Li C S, Naldrett A J. 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite. *Lithos*, 47(1): 33~51.
- Arndt N T, Leshner C M, Czamanske G K. 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni—Cu—(PGE) deposits. *Economic Geology*: 5~24.
- Ayer J, Amlin Y, 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. *Precambrian Research*, 115(1~4): 63~95.
- Barnes S J, Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. *Economic Geology*, 100: 179~213.
- Barnes S, Cruden A, Arndt N, Saumur B. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni—Cu—PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76: 296~316.
- Bea F, Pushkarev Ev V, Garuti G, Fershtater G, Montero P, Zaccarini F. 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic—ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results. *Tectonophysics*, 276(1): 181~194.
- Bekker A, Barley M E, Fiorentini M I, Rouxel O J, Rumble D, Beresford S W. 2009. Atmospheric sulfur in Archean komatiite-hosted nickel deposits. *Science*, 326(5956): 1086.
- Bennett V C, Norman M D, Garcia M O. 2000. Rhenium and platinum group element abundances correlated with mantle source components in Hawaiian picrites: sulphides in the plume. *Earth & Planetary Science Letters*, 183(3): 513~526.
- Buick I, Maas R, Gibson R. 2001. Precise U-Pb titanite age constraints on the emplacement of the Bushveld Complex, South Africa. *Ciba*

- Found Symp, 98(11): 197~227.
- Campbell I H, Naldrett A J, Barnes S J. 1983. A Model for the Origin of the Platinum-Rich Sulfide Horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes. 24(2): 133~165.
- Chen Shiping, Wang Denghong, Qu Wenjun, Chen Zhenghui, Gao Xiaoli. 2005. Geological features and ore formation of the hulu Cu—Ni sulfide deposit, eastern tianshan, Xinjiang. Xinjiang Geology, 23(3): 230~233.
- Dai Junfeng, Gong Lei, Hou Yonghao. 2016. The Mg/Fe ratio of ore-bearing basic-ultrabasic rocks. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 31(1), 42~46.
- Dare S, Barnes S J, Prichard H. 2011. Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreedy East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrite. Mineralium Deposita, 46(4): 381~407.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Chen Liemeng. 2010. Features of the mantle source of the Huangshanxi Ni—Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan. Mineral Deposits, (S1): 857~859.
- Du A D, Sun Y L, Zou X Q. 1996. Study on Rhenium—Osmium Isotope System by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry and Its Application to copper—nickel sulfide and molybdenite to copper—nickel sulfide and molybdenite dating. Rock and Mineral Analysis, 15(4): 263~266.
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Zhou Xiwen, Shi Yuruo, Yang Zhusheng. 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb Zircon Chronology of Basalts from the Yanbian Group in the Western Yangtze Block. Acta Geological Sinica, 79(6): 805~813.
- Du Wei, Ling Jinlan, Zhou Wei, Wang Zixi, Xia Zhaoede, Xia Mingzhe, Fan Yazhou, Jiang Changyi. 2014. Geological characteristics and genesis of Xiarihamu nickel deposit in East Kunlun. Mineral Deposits, 33(4): 713~726.
- Farquhar J, Wing B. 2003. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere. Earth & Planetary Science Letters, 213(1~2): 1~13.
- Fleet M E, Stone W E, Crocket J H. 1991. Partitioning of palladium, iridium, and platinum between sulfide liquid and basalt melt; Effects of melt composition, concentration, and oxygen fugacity. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 55(9): 2545~2554.
- Fu Piao'er. 2012. Ore Genesis of Late-Paleozoic Cu—Ni Sulfide Deposit in North Xinjiang, China: Constraints from Geochemical Data and Volatile Compositions. Tutor: Zhang Mingjie. Lanzhou; Phd thesis of Lanzhou University. 1~97.
- Godel B, Seat Z, Maier W D, Barnes S J. 2011. The Nebo—Babel Ni—Cu—PGE Sulfide Deposit (West Musgrave Block, Australia): Pt. 2. Constraints on Parental Magma and Processes, with Implications for Mineral Exploration. Economic Geology, 106(4): 557~584.
- Good D J, Naldrett A J. 1993. Geology and distribution of platinum-group elements, Bucko Lake Intrusion, Thompson Belt, Manitoba. Canadian Mineralogist, 31(1): 45~60.
- Gao Hui, J. Hronsky, Cao Dianhua, Li Ruiping, Zhang Peng. 2009a. An analysis on metall ogenic model and ore-control factors of Jinchuan Cu—Ni(PGE magmatic sulfide deposit and its exploration implications. Geology and Prospecting, 45(3): 218~228.
- Gao Hui, Wang Anjian, Cao Dianhua, Li Ruiping, Wang Yonglei. 2009b. A comparison of trace element geochemical characteristics between the Platreef deposit of Bushveld Complex and the Jinchuan Cu—Ni—PGE sulfide deposit and its significance. Geology in China, 36(2): 268~290.
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Liang Xirong, Wang Rucheng, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen. 2001. Geochemistry and geological implications of mafic—ultramafic rocks with the age of 825 Ma in Yuanbaoshan—Baotan area of northern Guangxi. Geochimica, 30(2): 123~130.
- Guan Tao, Huang Zhilong, Xu Deru, Zhang Zhenliang, Yan Zaifei, Xu Cheng. 2006. Litho geochemistry of the sulfide-bearing mafic—ultramafic rock at ba imazhai, Jinping, southern Yunnan. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 41(3): 441~454.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Li Zonghuai. 2004. Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Qu Wenjun, Mao Qigui, Du Andao. 2006. Xinjiang and Mount Huangshan East Kalatongke Cu Ni ore bearing mafic ultramafic complex SHRIMP zircon U-Pb age and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 49(22): 2324~2328.
- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Qu Wenjun, Mao Qigui, Du Andao. 2006. Re-Os isotopic analysis of the Kalatongke Cu—Ni Sulfide Deposit, Northern Xinjiang, NW China, and its geological implication. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 163~170.
- Hannah J L, Stein H J, Zimmerman A, Yang G, Markey R J, Melezhik V A. 2006. Precise 2004 ± 9 Ma Re-Os age for Pechenga black shale; Comparison of sulfides and organic material. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 70(18): A228.
- Hanski E, Huhma H, Smolkin V F, Vaasjoki M. 1990. The age of the ferropicroitic volcanics and comagmatic Ni-bearing intrusions at Pechenga, Kola Peninsula, USSR. Bulletin of the Geological Society of Finland, 62(2): 123~133.
- Hoatson D, Jaireth S, Jaques A. 2006. Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential. Ore Geology Reviews, 29(3~4): 177~241.
- Holwell D A, Adeyemi Z, Ward L A, Smith D J, Graham S D, McDonald I, Smith J W. 2017. Low temperature alteration of magmatic Ni—Cu—PGE sulfides as a source for hydrothermal Ni and PGE ores: a quantitative approach using automated mineralogy. Ore Geology Reviews, 91: 718~740.
- 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. Economic Geology, 100(1): 29~41.
- Irvine T N. 1977. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation. Geology, 5(5): 273.
- Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, Xia Mingzhe, Jiang Hanbing, Dai Yucai. 2006. Litho geochemistry and petrogenesis of zhongposhanbei mafic rock body, at beishan region, Xinjing. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 115~126.
- Jiang Changyi, Guo Naxin, Xia Mingzhe, Ling Jinlan, Guo Fangfang, Deng Xiaoqin, Jiang Hanbing, Fan Yazhou. 2012. Petrogenesis of the Poyi mafic—ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2209~2223.
- Jiang Changyi, Ling Jinlan, Zhou Wei, Du Wei, Wang Zixi, Fan Yazhou, Song Yanfang, Song Zhongbao. 2015. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni bearing layered mafic—ultramafic intrusion, East Kunlun: Implications for its extensional island arc environment. Acta Petrologica Sinica, 31(4): 1117~1136.
- Jiao Jianguang, Wang Yong, Qian Zhuangzhi, Wang Bin, Lu Hao, Liu Huan, Zheng Pengpeng. 2014. Tentative discussion on rock-

- forming and ore-forming mechanism of Kalatongke Cu—Ni sulfide deposit and chronology of Kalatongke Y9 intrusion. *Mineral Deposits*, 33 (4): 675~688.
- Jr G, Dimalanta C B, Faustino D V, Jesus J. 1998. Translation and docking of an arc terrane: geological and geochemical evidence from the southern Zambales Ophiolite Complex, Philippines. *Tectonophysics*, 293(3): 255~272.
- Jugo P J. 2009. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas. *Geology*, 37(5): 415~418.
- Kamo S L, Czamanske G K, Amelin Y, 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. *Earth & Planetary Science Letters*, 214(1): 75~91.
- Keays R, Ihlenfeld C, McInnes B, Zhou M F, Lambert D. 2004. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Ni—Cu—PGE sulfide deposit, China. *IGCP*: 41~42.
- Keays R, Lightfoot P. 2010. Crustal sulfur is required to form magmatic Ni—Cu sulfide deposits: evidence from chalcophile element signatures of Siberian and Deccan Trap basalts. *Mineralium Deposita*, 45(3): 241~257.
- Krivolutskaya N, Sobolev A, Mikhailov V, Plechova A, Kostitsyn Y, Roschina I, Fekiacova Z. 2012. Parental melt of the Nadezhdinsky Formation; Geochemistry, petrology and connection with Cu—Ni deposits (Noril'sk area, Russia). *Chemical Geology*, 302~303: 87~105.
- Lambert D, Foster J, Frick L, Ripley E, Zientek M. 1998. Geodynamics of magmatic Cu—Ni—PGE sulfide deposits; new insights from the Re-Os isotope system. *Economic Geology*, 93(2): 121~136.
- Leshner C M, Campbell I H. 1993. Geochemical and fluid dynamic modeling of compositional variations in Archean komatiite-hosted nickel sulfide ores in Western Australia. *Economic Geology*, 88(4): 804~816.
- Li Dedong, Wang Yuwang, Long Lingli, Jie Hongjing, Shi Yu. 2014. Discussion on the classification of magmatic type of copper—nickel sulfide deposits in China. *Mineral Exploration*, 5 (2): 124~130.
- Li Huaqin. 1998. Metallogenic chronology of the nonferrous metal deposit in northern Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1~264.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Lu Yuanfa, Yang Hongmei, Guo Jing, Mei Yuping. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Strontium Isotopes of Mineralized Granitoids in the Sanchakou Copper Polymetallic Deposit, East Tianshan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25 (2): 191~195.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yuping, Wu Hua, Cheng Songlin, Yang Jiaquan, Dai Yucai. 2006. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic—ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance. *Mineral Deposits*, 25 (4): 463~469.
- Li Huimin, Xiang Zhenqun, Li Huaikun, Chen Zhihong, Lu Songnian, Zhou Hongying, Song Biao. 2005. SHRIMP U-Pb dating of zircon in the basic rock mass of the Wang Jiang mountain; the Tenth Annual Academic Meeting of the China mineral rock geochemistry society, Wuhan, China.
- Li Lixing, Wang Denghong, Song Quanheng, Wang Chenghui. 2009. Study on the age of ore bearing rock mass in the cuprus copper nickel sulfide deposit in Tonghua, Jilin, 29 (S1): 55~56.
- Li Shijin, Sun Fengyue, Gao Yongwang, Zhao Junwei, Li Liansong, Yang Qi'an. 2012. The Theoretical Guidance and the Practice of Small Intrusions Forming Large Deposits—The Enlightenment and Significance for Searching Breakthrough of Cu—Ni sulfide Deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai. *Northwestern Geology*, 45 (4): 185~191.
- Li Wenyuan. 2007. The Current Status and Prospect on Magmatic Ni—Cu—PGE Deposits. *Northwestern Geology*, 40 (2): 1~28.
- Li Xianhua, Su Li, Song Biao, Liu Dunyi. 2004. SHRIMP zircon U-Pb age and geological significance of the ultramafic intrusive rocks in Jinchuan. *Chinese Science Bulletin*, 49 (4): 401~402.
- Li Ying. 2010. Studies of Petrology and geochemistry on the Limahe mafic—ultramafic intrusion in Panxi district, SW China. Tutor: Zhang Zhaochun. Beijing: M. A. thesis of China University of Geoscience(Beijing), 1~66.
- Li Yuechen, Zhao Guochun, Qu Wenjun, Pan Chengze, Mao Qigui, Du Andao. 2006. Re-Os isotopic dating of the Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 245~251.
- Ling Jinlan. 2014. Petrogenesis of Mafic—ultramafic Intrusions and Mineralogenesis of Nickel Sulfide Deposit in the Periphery of Qaidam Block, Qinghai China. Tutor: Jiang Changyi. Xiaan: Phd thesis of Chang'an University, 1~189.
- Li Chusi, Ripley E M, Naldrett A. 2009. A new genetic model for the giant Ni—Cu—PGE sulfide deposits associated with the Siberian flood basalts. *Economic Geology*, 104(2): 291~301.
- Li Chusi, Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Wang Yalei, Sun Tao, Ripley E M. 2015. Geochronology, petrology and Hf—S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni—Cu sulfide deposit in the Qinghai—Tibet plateau, western China. *Lithos*, 216~217 (2): 224~240.
- Li X H, Su L, Chung S I, Li Z X, Liu Y, Song B, Liu D Y. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni—Cu sulfide deposit: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume? *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6(11).
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth & Planetary Science Letters*, 173(3): 171~181.
- Liu Yuan, Jiang Sihong. 2013. Komatiite nickel metallogenic model, Kambalda, Australia. *Acta Mineralogica Sinica*, (S2): 1050~1051.
- Lightfoot P C, Evans-Lamswood D. 2015. Structural controls on the primary distribution of mafic—ultramafic intrusions containing Ni—Cu—Co—(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces. *Ore Geology Reviews*, 64: 354~386.
- Lightfoot P C, Keays R R. 2005. Siderophile and Chalcophile Metal Variations in Flood Basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implications for the Origin of the Ni—Cu—PGE Sulfide Ores. *Economic Geology*, 100(3): 439~462.
- Lister J, Kerr R. 1991. Fluid - mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96(B6): 10049~10077.
- Lu Xiaoping. 2004. Paleoproterozoic tectonic magmatic event in tonghua area. Tutor: Wu Fuyuan. Jinlin; Phd thesis of Jinlin University. 1~165.
- Lü Linsu, Liu Jun, Zhang Zuoheng, Xie Guiqing. 2007. Temporal—spatial distribution and geodynamic settings of magmatic Ni—Cu—PGE sulfide deposit in China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2561~2594.
- Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Sun Jiming, Tang Zhuo, Du Tao. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for

- Qingshuiquan layered mafic—ultramafic intrusion southern Altun orogen, in northwestern China and its implication. *Geology in China*, 38 (4): 1071~1078.
- Mao Jingwen, Du Andao. 2001#. 982Ma Re-Os isotopic age and geological significance of copper and nickel sulfide ores in the Bao Tan area of Guangxi. *Chinese Science (series D: Earth Science)*, 31 (12): 992~998.
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, Du Andao, Wang Zhiliang, Han Chunming. 2002#. Re-Os Dating of Cu—Ni Sulfide Ores from Huangshandong Deposit in Xinjiang and Its Geodynamic Significance. *Mineral Deposits*, 21(4): 323~330.
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, Sun Min, Yuan Chao, Yan Zhen, Li Jiliang, Yong Yong, Zhang Ji'en. 2006#. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic—ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province; constrains on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 153~162.
- Maier W, Groves D. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni—Cu deposits. *Mineralium Deposita*, 46 (8): 841~857.
- Maier W, Mänttä S, Yang S, Oberthür T, Lahaye Y, Huhma H, Barnes S. 2015. Composition of the ultramafic—mafic contact interval of the Great Dyke of Zimbabwe at Ngezi mine; Comparisons to the Bushveld Complex and implications for the origin of the PGE reefs. *Lithos*, 238: 207~222.
- Maier W, Groves D. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni—Cu deposits. *Mineralium Deposita*, 46 (8): 841~857.
- Maier W, Peltonen P, Halkoaho T, Hanski E. 2013. Geochemistry of komatiites from the Tipasjärvi, Kuhmo, Suomussalmi, Ilomantsi and Tulppio greenstone belts, Finland; Implications for tectonic setting and Ni sulphide prospectivity. *Precambrian Research*, 228: 63~84.
- Medonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth ☆. *Chemical Geology*, 120(3~4): 223~253.
- Mollo S, Gaeta M, Freda C, Rocco T, Misiti V, Scarlato P. 2010. Carbonate assimilation in magmas: A reappraisal based on experimental petrology. *Lithos*, 114(3): 503~514.
- Momme P, Tegner C, Brooks K, Keays R. 2002. The behaviour of platinum-group elements in basalts from the East Greenland rifted margin. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143(2): 133~153.
- Momme P X N, Óskarsson E, Keays R. 2003. Platinum-group elements in the Icelandic rift system: melting processes and mantle sources beneath Iceland. *Chemical Geology*, 196(1): 209~234.
- 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. *Earth & Planetary Science Letters*, 164 (1): 353~369.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits. 1984: IV, 219.
- Naldrett A J. 1999. World-class Ni—Cu—PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227~240.
- Naldrett A J, Barnes S. 1986. The behavior of platinum group elements during fractional crystallization and partial melting with special reference to the composition of magmatic sulfide ores. *Fortschr Mineral*, 64(2): 113~133.
- Nelson D R, Nelson D R. 1997. Evolution of the Archaean granite—greenstone terrane of the Eastern Goldfields, Western Australia; SHRIMP U-Pb zircon constraints. *Precambrian Research*, 83(1): 57~81.
- Naldrett A J. 2013. Magmatic sulfide deposits. Beijing: Geochemical Publishing House, 1~423.
- Orberger B, Friedrich G, Woermann E. 1988. Platinum-Group Element Mineralization in the Ultramafic Sequence of the Acoje Ophiolite Block, Zambales, Philippines. *Geo-Platinum 87*. Springer Netherlands, 361~380.
- Paces J, Miller J R. 1993. Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota; Geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga Midcontinent Rift System. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 98 (B8): 13997~14013.
- Park Y R. 2004. Stable Isotopic Constraints on Fluid—Rock Interaction and Cu—PGE—S Redistribution in the Sonju Lake Intrusion, Minnesota. *Economic Geology*, 99(2): 325~338.
- Pang Chunyong, Chen Minyang. 1993#. Isotopic geochronological data and their geological significance in Jianchaling region, Shaanxi Province. *Mineral resources and geology*, (5): 354~360.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Yang Debin, Zhao Quanguo. 2005#. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Chibaisong gabbro in Tonghua, Jilin and its geological significance. *Chinese Science (series D: Earth Science)*, 35 (5): 393~398.
- Peach C L, Mathez E A, Keays R R. 1990. Sulfide melt—silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB; Implications for partial melting. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379~3389.
- Peng B, Sun F Y, Li B L, Wang G, Li S J, Zhao T F, Li L, Zhi Y B. 2016. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic—ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China; Implications for the genesis of magmatic Ni—Cu sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, 73: 13~28.
- Puchtel I S, Walker R J, Brandon A D, Nisbet E G. 2009. Pt—Re—Os and Sm—Nd isotope and HSE and REE systematics of the 2.7 Ga Belingwe and Abitibi komatiites. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73(20): 6367~6389.
- Qi L, Wang C, Zhou M F. 2008. Controls on the PGE distribution of Permian Emeishan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longzhoushan, Sichuan Province, SW China. *Lithos*, 106(3): 222~236.
- Qian Bing, Zhang Zhaowei, Zhang Zhibing, Shao Ji. 2015#. Zircon U-Pb geochronology of Niubiziliang mafic—ultramafic intrusion on the northwest margin of Qaidam Basin, Qinghai. *Geology in China*, 42 (3): 482~493.
- Qin Kezhang, Fang Tonghui, Wang Shulai, Zhu Baoqing, Feng Yimin, Yu Haifeng, Xiu Qunye. 2002#. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern tianshan mountains, NW-China. *Xinjiang Geology*, (4): 302~308.
- Reisberg L C, Tredoux M, Harris C. 2006. Re-Os systematics of the Platreef (Sandsloot mine) of the northern limb of the Bushveld Complex. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 70(18): A526.
- Ripley E, Lambert D, Frick L. 1998. Re-Os, Sm-Nd, and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 62(19~20): 3349~3365.
- Ripley E. 2003. Sulfur isotope exchange and metal enrichment in the formation of magmatic Cu—Ni(PGE) deposits. *Economic Geology*, 98(3): 635~641.

- Ripley E, Taib N, Li C S, Moore C. 2007. Chemical and mineralogical heterogeneity in the basal zone of the Partridge River Intrusion; implications for the origin of Cu—Ni sulfide mineralization in the Duluth Complex, midcontinent rift system. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 154(1): 35~54.
- Ripley E, Li C S. 2012. Sulfide Saturation in Mafic Magmas; Is External Sulfur Required for Magmatic Ni—Cu—(PGE) Ore Genesis? *Economic Geology*, 108(1): 45~58.
- Ross J R, Travis G A. The nickel sulfide deposits of Western Australia in global perspective[J]. *Economic Geology*. 1981, 76(6): 1291~1329.
- Said N, Kerrich R, Groves D. 2010. Geochemical systematics of basalts of the Lower Basalt Unit, 2.7 Ga Kambalda Sequence, Yilgarn craton, Australia; Plume impingement at a rifted craton margin. *Lithos*, 115(1~4): 82~100.
- Salter V, Stracke A. 2013. Composition of the depleted mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5(5): 469~484.
- Samalens N, Barnes S J, Sawyer E W. 2017. The role of black shales as a source of sulfur and semimetals in magmatic nickel—copper deposits; Example from the Partridge River Intrusion, Duluth Complex, Minnesota, USA. *Ore Geology Reviews*, 81:173~187.
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, Tang Dongmei, Su Benxun, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping. 2010. Precise zircon U-Pb age dating age of two mafic—ultramafic complexes at Tulargen Cu—Ni deposit and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3027~3035.
- Schoenberg R, Kruger F, Nägler T, Meisel T, Kramers J. 1999. PGE enrichment in chromitite layers and the Merensky Reef of the western Bushveld Complex; a Re-Os and Rb-Sr isotope study. *Earth & Planetary Science Letters*, 172(1~2): 49~64.
- Seat Z, Beresford S W, Grguric B A, Gee M, Grassineau N V. 2009. Reevaluation of the Role of External Sulfur Addition in the Genesis of Ni—Cu—PGE Deposits; Evidence from the Nebo—Babel Ni—Cu—PGE Deposit, West Musgrave, Western Australia. *Economic Geology*, 104(4): 521~538.
- Shi Guiyong, Sun Xiaoming, Wang Shengwei, Xiong Dexin, Qu Wenjun, Du Andao. 2006. Re-Os isotope dating and its geological implication of Baimazhai Cu—Ni sulfide deposit, Yunnan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2451~2456.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q, Wu S K. 2016. The Giant Xiarihamu Ni—Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, 111(1): 29~55.
- Stone W E, Crocket J H, Fleet M E. 1990. Partitioning of palladium, iridium, platinum, and gold between sulfide liquid and basalt melt at 1200°C. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 54(8): 2341~2344.
- Sun Liji. 2013. Geological and geochemical characteristics of Hongqiling Cu—Ni sulfide Deposit and Prospecting techniques for the same type deposit. Tutor: Hao Libo. Jinlin; Phd thesis of: Jilin University. 1~171.
- Sun Nai. 1985. Igneous petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1~324.
- Tang Zhongli. 1995. Metallogenic model and geological comparison of copper nickel sulfide (PGE) deposits in Jinchuan. Beijing: Geological Publishing House, 1~200.
- Tang Zhongli. 2002. Dividing and prospecting for super-large scale Ni—Cu(Pt) magmatic sulfide deposits. *Geology and Prospecting*, 38(3): 1~7.
- Tang Zhongli. 2004. The accumulation and evolution of metallogenic series of the mafic—ultramafic magmatic deposits in China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 113~119.
- Tang Zhongli. 2006. Nickel copper platinum magmatic sulfide deposits and metallogenic prognosis in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~308.
- Tang Zhongli, Jiao Jianguang, Yan Haiqing, Xu Gang. 2015. Theoretical system for (large) deposit formed by smaller intrusion. *Engineering Sciences*, 17(2): 4~18.
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, Yan Haiqing, Jiao Jianguang, Liu Minwu, Xu Zhanhua, Xu Gang, Wang Yalei. 2011. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 1~9.
- Tang Zhongli, Xu Gang, Wang Yalei, Qiu Genlei, Dai Junfeng. 2012. The New Exploration of Magmatic Mineralization; Small Intrusion Mineralization and Geological Prospecting Breakthrough. *Northwestern Geology*, 14(4): 1~16.
- Tang Zhongli, Yan Haiqing, Jiao Jianguang, Pan Zhenxing. 2007. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni—Cu (PGE) ore deposits in China. *Earth Science Frontiers*, (5): 92~103.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, Su Benxun, Xiao Qinghua, Cheng Songlin, Li Jun. 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu—Ni deposit; Constrains on source and genesis of mafic—ultramafic intrusions in Eastern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 817~831.
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Qi Liang, Luo Taiyi. 2007. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Liamhe mafic—ultramafic intrusion, Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2785~2800.
- Thakurta J, Ripley E, Li C S. 2008. Geochemical constraints on the origin of sulfide mineralization in the Duke Island Complex, southeastern Alaska. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9(7): 3562~3585.
- Walker R, Morgan J, Hanski E, Smolkin V. 1997. Re-Os systematics of early proterozoic ferropicrites, Pechenga Complex, northwestern Russia; Evidence for ancient 187 Os-enriched plumes. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 61(15): 3145~3160.
- Walker R J, Morgan J W, Hanski E T, Smolkin V. 1994. The role of the Re-Os isotope system in deciphering the origin of magmatic sulphide ores; a tale of three ores. *Sudbury, Noril'sk Symposium. Ontario Geological Survey Special, Volume: 5: 343~355.*
- Wang C, Zhou M F, Keays R. 2004. Origin of the Permian Baimazhai Ni—Cu—PGE sulfide deposit, Jinping, southern Yunnan Province, SW China. *Proceedings of the Igep*, 479: 76~78.
- Wang Bo, Yin Xianke, Zhang Wei, Pei Yalun, Jiang Huabiao. 2015. The Application of Remote Sensing Technology to Interpretation of Global Meteorite Craters and Their Relation with Ore-Formation. *Acta Geologica Sichuan*, 35(4): 622~624.
- Wang Denghong, Li Jiankang, Wang Chenghui, Qu Wenjun, Fu Xiaofang, Fu Deming. 2007. New advances in geochronologic study related to Emei mantle plume and their significance. *Mineral Deposits*, 26(5): 550~556.
- Wang Denghong, Li Zhiwei, Luo Junlie, Liu Helin, Jiang Chengxing. 2003. Basic problems in prospecting for platinum group element in Yunnan. *Yunnan Geology*, 22(3): 250~259.
- Wang Guan, Sun Fengyue, Li Bile, Li Shijin, Zhao Junwei, Ao Cong,

- Yang Qi'an. 2014. Petrography, zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mafic-ultramafic intrusion in Xiarihamu Cu—Ni deposit from East Kunlun, with implications for geodynamic setting. *Earth Science Frontiers*, 21 (6): 381~401.
- Wang Hong, Qu Wenjun, Li Huaqin, Chen Shiping. 2007. Dating and Discussion on the Rock-Forming and Ore-Forming Age of Newly-Discovered Cu—Ni—Sulfide Deposits in Hami, Xinjiang. *Acta Geological Sinica*, 81 (4): 526~530.
- Wang Ruiting. 2002. The Comparative Study on Mineralization of jianchaling and jinchuan Nickel—Copper Sulfide Deposits. Tutor: Hao Yin. Xiaan; Phd thesis of Northwest University. 1~151.
- Wang Ruiting, He Ying, Wang Dongsheng, Liu Minwu. 2003. Re-Os isotope age and its application to the Jianchaling Nickel—Copper Sulfide Deposit, Lueyang, Shaanxi Province. *Geological Review*, 49 (2): 205~211.
- Wang Ruiting, Mao Jingwen, He Ying, Wang Dongsheng, Tang Zhongli. 2004. Elements in Jinchuan super-large sulfide coppernickel deposit, Jinchang city, Gansu Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 28 (3): 279~286.
- Wenzel T, Baumgartner L, Brüggmann G, Konnikov E, Kislov E. 2002. Partial Melting and Assimilation of Dolomitic Xenoliths by Mafic Magma: the Ioko-Dovyren Intrusion (North Baikal Region, Russia). *43 (11)*: 2049~2074.
- Wu F Y, Wilde S, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu—Ni sulfide. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781~797.
- Wu Hua. 2006a. Crustal evolution and endogenic metallic metallization in eastern tianshan orogenic belt. Tutor: Den Jun. Beijing; Phd thesis of China University of Geoscience(Beijing). 1~158.
- Wu Hua, Xu Xingwang, Mo Xinhua, Liang Guanghe, Cheng Songlin, Qin Kezhang, Li Jun, Zhang Baolin, Wang Jie, Xiao Qibin, Han Zhaoju, Jin Zhangming, Li Jinxiang. 2006b. Exploration by combined geophysical methods and location prediction of buried Cu—Ni deposits in the Baishiquan area, eastern Tianshan, Xinjiang. *Geology in China*, 33 (3): 672~681.
- Wu Liren. 1963. On the metallogenic specificity of the basic rocks and ultrabasic rocks in China. *Geological Science*, 4 (1): 29~41.
- Wyman D A, Kerrich R, Polat A. 2002. Assembly of Archean cratonic mantle lithosphere and crust: plume—arc interaction in the Abitibi—Wawa subduction—accretion complex. *Precambrian Research*, 115(1): 37~62.
- Xi Aihua, Gu Lianxing, Li Xujun, Ye Songqing, Zheng Yuanchuan. 2005. Discussion on metallogenic epoch of Hongqiling Cu—Ni sulfide deposit, Jilin Province. *Mineral Deposits*, 24(5): 54~59.
- Xu Gang. 2013. The Minerogenesis of Heishan Nickel—Copper Sulfide Deposit, Gansu Beishan, China. Tutor: Tang Zhongli. Xiaan; Phd thesis of Chang'an University, 1~163.
- Yan Haiqing, Su Shanguo, Jiao Jiangang, Tang Hua. 2005. Metallogenetic epoch of Jinchuan Cu—Ni (PGE) magmatic sulfide deposit. *Earth Science Frontiers*, 12 (2): 309~315.
- Yang Gang, Du Andao, Lu Jiren, Qu Wenjun, Chen Jiangfeng. 2005. Re-Os (ICP-MS) dating of massive sulfide ores from the Jinchuan nickel copper platinum deposit. *Chinese Science (series D: Earth Science)*, 35 (3): 241~245.
- Yang Hequn, Luo Zhangyi, Zhu Baoqing, Luo Yupeng, Zhang Kaichun. 1997. The geological features and metallogenetic conditions of the copper—nickel-bearing basic—ultrabasic intrusive in xingdi, xinjiang. *Northwest geoscience*, (2): 43~53.
- Yang Jianmin, Zhang Yujun, Yao Fojun, Wu Hua, Deng Gang, Chen Jiang. 2007. Dominant role of remote sensing mineral exploration information in the discovery of the Luodong Ni deposit, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2647~2652.
- Yang Ruiting, Li Zhijie. 2009. The application of the comprehensive geophysical and geochemical prospecting methods in thehulu Cu—Ni sulfide deposit. *Gold science and technology*, 17(3): 40~43.
- Yang Shenghong, Chen Jiangfeng, Qu Wenjun, Yang Gang, Du Andao. 2007. Re-Os ages of Jinchuan copper—nickel sulfide deposit and their significance. *Geochimica*, 36 (1): 27~36.
- Yang Suhong. 2014. Study on Petrology, Litho geochemistry and Mineralogy of Kalatongke Cu—Ni sulfide deposits, Xinjiang. Tutor: Qian Zhuangzhi. Xiaan; Phd thesis of Chang'an University, 1~94.
- Yang Gang, Andao Du, Jiren Lu, Wenjun Qu, Chen Jiangfeng. 2005. Re-Os (ICP-MS) dating of the massive sulfide ores from the Jinchuan Ni—Cu—PGE deposit. *Science in China*, 48(10): 1672~1677.
- Yumul G P. 2001. The Acoje block platiniferous dunite horizon, Zambales Ophiolite Complex, Philippines: Melt type and associated geochemical controls. *Resource Geology*, 51(2): 165~174.
- Zeng Renyu, Lai Jianqing, Mao Xiancheng, Zhao Ying, Liu Pin, Zhu Jiawei, Yue Bin, Ai Qixing. 2016. Distinction of platinum group elements geochemistry in Jinchuan Cu—Ni sulfide deposit and its implication for magmatic evolution. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 26 (1): 149~163.
- Zhang Huiqing, Wang Chengyong, Li Yulong. 2017. Exploration of copper nickel sulfide deposits in East Kunlun area of Qinghai province by geophysical method. *Scientific and technological innovation and Application*, (5): 154.
- Zhang Jiangwei, Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Xie Desheng, Gao Yongbao, Wang Yalei, Guo Zhouping, Li Kan, Qian Bing, Zang Yushi. 2012. Chronology and geochemistry of jingbulake complex containing Cu—Ni mineralization, west tianshan mountain, NW china. *Northwestern Geology*, 45 (4): 302~313.
- Zhang Qinshan, Ma Nan, Hao Yaqing, Liu Zhangzheng, Li Jihong. 2016. A study of integrated geochemical exploration method and its application to the Xiarihamu superlarge Cu—Ni deposit, Qinghai Province. *Geophysical & geochemical exploration*, 40 (3): 429~437.
- Zhang Zhaowei, Li Kan, Zhang Jiangwei, Qian Bing, Wang Yalei, You Minxin. 2016. Formation characteristics and prospecting direction of magmatic Ni—Cu sulfide deposits in China. *Geological survey of China*, 3(3): 7~15.
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, Xie Xie, Wang Yalei, Zhang Jiangwei, Guo Zhouping, Li Kan. 2012. Geochemical Characteristics of the Lashuixia Basic Complex in Qinhai Province and Its Constraints on Genesis of the Deposit. *Geology and Prospecting*, 48 (5): 959~968.
- Zhang Zongqing, Du Andao, Tang Suohan, Lu Jiren, Wang Jinhui, Yang Gang. 2004. Age of the Jinchuan Copper—Nickel Deposit and Isotopic Geochemical Feature of Its Source. *Acta Geological Sinica*, 78 (3): 359~365.
- Zhang Zuoheng, Chai Fengmei, Du Andao, Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Yang Jianmin, Qu Wenjun, Wang Zhiliang. 2005. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karatungku Cu—Ni sulfide deposit in northern Xinjiang. *Acta petrologica et mineralogica*, 24 (4): 285~293.
- Zhang Zuoheng, Wang Zhiliang, Wang Yanbin, Zuo Guochao, Wang

- Longsheng, Lü Linsu. 2007. Shrimp zircon U-Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance. *Mineral Deposits*, 26 (4): 353~360.
- Zhao Li, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, Ai Yu, Yang Tiezheng. 2006. Open-system magma chamber: an example from the Xinjie mafic-ultramafic layered intrusion in panxi region, sw china. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (6): 1565~1578.
- Zhao Quanguo. 2006. Chronology and geochemical characteristics of Chibosong mafic-ultramafic rocks from Tonghua and its constraints on ore-forming process. Tutor: Xu Wenliang. Jinlin: M.A. thesis of Jilin University, 1~85.
- Zhou Meifu, Arndt N, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103(3): 352~368.
- Zhou Meifu, Kennedy A, Sun Min, Malpas J, Leshner C. 2002a. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(Volume 110, Number 5): 611~618.
- Zhou Meifu, Leshner C, Yang Zhengxi, Li Jianwei, Sun Min. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni—Cu—(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209(3~4): 233~257.
- Zhou Meifu, Ma Yuxiao, Yan Danping, Xia Xiaoping, Zhao Junhong, Sun Min. 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144(1): 19~38.
- Zhou Meifu, Malpas J, Song Xieyan, Robinson P, Sun Min, Kennedy A, Leshner C, Keays R. 2002b. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth & Planetary Science Letters*, 196(3~4): 113~122.
- Zhou Meifu, Robinson P, Leshner C, Keays R, Zhang Chengjiang, Malpas J. 2005. Geochemistry, Petrogenesis and Metallogenesis of the Panzhihua Gabbroic Layered Intrusion and Associated Fe—Ti—V Oxide Deposits, Sichuan Province, SW China. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253~2280.
- Zhou Wei, Xia Mingzhe, Wu Xueheng, Du Wei, Wang Bangyao, Xia Zhaode, Song Yanfang, Song Zhongbao. 2015a. U-Pb dating of zircons from Gaxiuyapingdong and Hongliugoubei mafic-ultramafic intrusions on the northern margin of Qaidam Basin and its geological and prospecting significance. *Geological Bulletin of China*, 34(10): 1860~1868.
- Zhou Wei, Du Wei, Wang Zixi. 2015b. East Kunlun Shitoukende copper nickel ore de mafic ultramafic intrusions forming age and its geological significance: The fifteenth annual meeting of the Chinese Academy of mineral rock geochemistry, Changchun, Jilin, China, *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*.
- Zhu Yongfeng, Tan Juanjuan, Qiu Tian. 2016. Platinum group mineral (PGM) and Fe—Ni—As—S minerals in the Sartohay chromitite, Xinjiang (NW China): Implications for the mobility of Os, Ir, Sb, and As during hydrothermal processes. *Ore Geology Reviews*, 72(4): 299~312.

## The Research Situation and Progress in Magmatic Ni—Cu—PGE Sulfide Deposits

CAI Pengjie<sup>1)</sup>, GUO Xianzheng<sup>1)</sup>, ZHENG Youye<sup>1, 2)</sup>, SUN Shuhai<sup>2)</sup>,  
LIU Jia<sup>1, 3)</sup>, CHEN Xin<sup>2)</sup>, YU Junzhen<sup>2)</sup>, XU Rongke<sup>1)</sup>

1) *Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;*

2) *The Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;*

3) *Institute of Geological Survey, Hubei Province, Wuhan, 430074*

**Abstract:** The magmatic Ni—Cu—PGE (platinum group elements) sulfide deposit is one of most important Copper—Nickel deposit types. It is of great significance to discussion about the metallogenic environment, mineralization and genetic mechanism of the type deposit. This paper has made a detailed analysis the Ni—Cu—PGE sulfide deposits on the content of temporal and spatial distribution, metallogenic process, geochemical characteristics, metallogenic theory and exploration technology on the the data gathered from diagenetic and metallogenic geochronology, geochemical characteristics, ore deposit morphology, metallogenic theory and metallogenic discrimination mark. The results include: The classification methods of magmatic Ni—Cu—PGE sulfide deposits include ore hosting rocks, ore forming styles, main metal components and metallogenic tectonic environment, and the distribution of sulfide (ore bed) has the characteristics of gravity differentiation. The formation time of the magmatic Ni—Cu—PGE sulfide deposits were mainly later than the Middle Proterozoic era in the China, and were mainly than the Middle Proterozoic era in other countries. The late Paleozoic (390~430 Ma) deposits were found only in China, especially the Xiarihamu super large ore deposit has global significance. The debate between the theory of small intrusions forming large deposits and the theory of magma channels forming

deposits originate is mainly in metallogenic location, magmatic intrusion pattern and the necessity for crust S. There are important reference indexes for judging ore bearing property, which include the ratio of m/f vs. Mg# and the content of platinum group in whole rock, the ratio of Ni+Cr vs. Si+Mg and the content of Ti in primary magnetite.

**Keywords:** Ni—Cu—(PEG); spatiotemporal distribution; metallogenic process; metallogenic theory; exploration evaluation index

**Acknowledgements:** This work was supported by "The program for Cheung Kong Scholars and Innovative Research Team of Ministry of Education" (No. IRT14R54), and "The program for China Geological Survey" (No. 121201011000150004). We would like to express our thanks to the WANG Ruitin from Northwest Geological Exploration for Nonferrous Metals and ZHANG Yuxu from Geological Review

**First author:** CAI Pengjie, male, born in 1988, PhD candidate, Survey and exploration of mineral resources. Email: caipengjie@cug.edu.cn

**Corresponding author:** XU Rongke, male, born in 1967, associate professor, Mineral exploration and regional metallogenic research and teaching work. Email: xurongke1968@126.com

Manuscript received on: 2017-11-29; Accepted on: 2018-05-22; Edited by: ZHANG Yuxu

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2018.04.013

(上接第 912 页)

(2) 发现了松辽盆地深部页岩气和地热能两种清洁低碳能源具有良好的勘探开发前景。在盆地深部断陷沙河子组和火石岭组(3350 m 以深)地层中发现页岩气气测异常 43 层,累计厚度 102 m,甲烷占全烃组分平均含量的 86%。在井深 4400~7018 m 发现 150~240 °C 高温干热岩体和 2 层富含放射性元素铀异常地层。

(3) 获得了白垩纪陆地古气候演变规律的三项重要证据。首次在全球实现了对白垩纪(距今 145~65 Ma)最完整、最连续陆相地层厘米级高分辨率的精细刻画,首次重建了白垩纪陆相百万年至十万年尺度气候演化历史,发现了大规模火山爆发排放 CO<sub>2</sub> 引发陆相气候剧烈波动的重要信息。

(4) 取得了基础地质研究三项重大进展。建立了松辽盆地陆相地层标准剖面——“金柱子”,构建了盆地早期基底双向汇聚、后期伸展反转的陆内盆地演化新机制,提出了多期海侵事件造成盆地有机质更加富集的新认识。

松科二井工程成果于 2018 年 5 月 21 日通过了专家鉴定,李廷栋、康玉柱、武强、侯增谦、杨经绥等院士及有关专家一致认为:“该成果实现了理论、技术、工程、装备的重大突破,对拓展我国深部能源勘查开发新空间、引领白垩纪古气候研究和服务‘百年大庆’建设具有重要意义。成果总体达到国际先进水平,在深部钻探技术和白垩纪陆相古气候研究方面达到国际领先水平。”

松科二井工程的顺利实施,为地球深部探测提供了关键技术和装备,拓展了松辽盆地深部页岩气、地热能等清洁能源勘查开发的新空间,引领了全球白垩纪陆相古气候研究,显著提升了我国在地质历史古气候研究领域的国际影响力。为积极落实习近平总书记关于“向地球深部进军”的要求,自然资源部中国地质调查局将进一步深化松科二井工程研究和成果转化工作。

(1) 深化地球深部探测理论技术研究和成果转化,组织

实施好松辽盆地页岩油(气)、深层油气、砂岩型铀矿、干热岩等清洁低碳能源地质科技攻坚战,带动大庆油田接替资源的勘查开发。

(2) 加快推进“地球深部探测重大项目”的申报,以及“地球深部探测与能源资源安全”国家实验室与“深部地下观测与实验”国家重大基础科学设施的建设工作。

(3) 研发 15000 m 国产超深钻探装备系列,做好我国超万米大陆科学钻探工程以及大型含油气盆地科学钻探工程的选址和实施工作。

会议期间,自然资源部、教育部、中国石油天然气集团及国际大陆科学钻探计划运行支持部的专家代表,还就松科二井钻探技术突破、松辽盆地深部能源资源前景、松科二井古气候古环境科学研究、东北地区深部探测、国际大陆科学钻探研究等进行了交流研讨。

科学技术部、教育部、自然资源部、国家自然科学基金委员会、安达市人大、中国地质调查局有关部门和直属单位、国际地质科学联合会、中国地质大学(北京)、吉林大学、中国地质大学(武汉)、中国航天科工集团、中国石油天然气集团以及松科二井工程参钻、参研单位等相关负责同志和代表参加现场会。

**The Well Completion Ceremony and Academic Seminar on-the-spot of the 2nd Well of the Deep Continental Scientific Drilling in the Songliao Basin, Northeastern China, Held**

(据中国地质学会网站

“<http://www.geosociety.org.cn/?category=bmV3cw=&catiegodry=NzY2Mw==>”和

“<http://www.geosociety.org.cn/?category=bmV3cw=&catiegodry=NzY3Nw==>”两网页,略有修改)

(章雨旭 编辑)