

文章编号:0258-7106 (2006) 01-0001-09

中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用*

汤中立¹, 闫海卿¹, 焦建刚¹, 李小虎²

(1 长安大学, 陕西 西安 710054; 2 兰州大学, 甘肃 兰州 730000)

摘要 中国镍(铜、钴)、铂族等许多重要金属矿产都产出于岩浆硫化物矿床,该类矿床是矿床地质研究的热点之一。笔者综合构造背景、侵入方式、岩体规模、矿床模式、主成矿元素等因素,对中国岩浆硫化物矿床提出了新的分类: 古大陆内的小侵入体矿床; 与大陆溢流玄武岩有关的侵入体矿床; 造山带内小侵入体矿床; 蛇绿岩型矿床。认为小侵入体(小岩体)岩浆矿床是中国主要的矿床类型,并在此基础上,从小岩体矿床的相关概念、3种地质背景、3种火山岩-岩体-矿床组合形式以及成矿的主要因素等方面详细阐述了小岩体成矿作用。结合国内外勘查实践指出,小岩体岩浆矿床仍具有很大的找矿潜力,是中国应继续重点研究的主要矿床类型。最后,还讨论了小岩体矿床不仅在基性-超基性岩体中广泛发育,而且在中酸性岩体中也具有重要的经济价值和研究意义。

关键词 地质学;岩浆硫化物矿床,分类,小岩体,成矿作用,中国

中图分类号: P611.1⁺1

文献标识码: A

New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies

TANG ZhongLi¹, YAN HaiQing¹, JIAO JianGang¹ and LI XiaoHu²

(1 Chang an University, Xi an 710054, Shaanxi, China; 2 Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

Many important metallic resources, such as Ni (Cu, Co) and PGE, exist in magmatic sulfide deposits. Such ore deposits now constitute a hot spot in geological research. The authors have divided the magmatic sulfide deposits in China into four types based on such factors as their tectonic settings, intrusive forms, ore deposit modes and main metallogenic elements. They are: (1) small-intrusion deposits in paleo-continent; (2) small-intrusion deposits in continental flood basalt; (3) small-intrusion deposits in orogenic belt; and (4) deposits connected with ophiolites. According to this classification, the authors hold that the main magmatic metallogenic type in China is small-intrusion mineralization. This paper describes characteristics of this type from small intrusion-related concept, three geological settings, three volcanic-intrusive assemblages and ore-forming key factors. Based on ore exploration experience acquired both at home and abroad, the authors consider that there still exist great potentialities in the prospecting for small-intrusion deposits and that this problem deserves further study. It is also pointed out that small-intrusion ore-forming processes not only widely occur in mafic-ultramafic intrusions, but also have important economic value and research significance in intermediate-acid intrusions.

Key words: geology, magmatic sulfide deposit, classification, small intrusion, ore-forming process, China

* 本文得到中国地质调查局项目(200110200058)和国家自然科学基金重点项目(40534020)的联合资助

第一作者简介 汤中立,男,1934年生,教授,中国工程院院士,主要从事岩浆矿床、区域成矿、地质矿产勘查及矿山环境研究。

收稿日期 2005-04-07; 改回日期 2005-11-23。

以往,关于中国岩浆硫化物矿床的分类,大多以矿床成因这一要素为主,同时也考虑了地质背景、岩石等控矿因素(汤中立等,1987;刘月星等,1998),这种分类对于引导该类矿床的深入勘查与研究,起到了积极的作用。但是,随着地质工作的深入,诸如地质背景、小岩体成矿等因素对于认识和发现矿床来说,日益显得更为重要。因此,有必要突出这些因素,提出一个新的分类。

在整个20世纪内,国内外都十分重视寻找与大型层状杂岩体有关的岩浆硫化物矿床,因为世界上最大的一些矿床就产在这类大型层状杂岩体中。如含世界第一大铂族金属矿的布什维尔德(Bushveld)层状杂岩体(Cawthorn et al., 2002),其面积超过 $60 \times 10^3 \text{ km}^2$;含世界第二大镍矿的萨德贝里层状杂岩体(Faggart et al., 1985),其面积大于 1000 km^2 等。中国自20世纪50年代以来,对国土进行了不同程度的系统勘查,未曾发现这类大型层状杂岩体,却在许多很小的岩体中,发现了岩浆硫化物矿床。其中,含世界第三大镍矿的金川岩体,面积仅为 1.34 km^2 。因此,关于小岩体的成矿作用,越来越受到人们的关注。

1 岩浆硫化物矿床分类

中国岩浆硫化物矿床的分类列于表1;其分布情

况见图1。

2 中国岩浆硫化物矿床的主要类型与典型实例简介

2.1 古大陆内的小侵入体矿床

这类矿床一般发育于元古代古大陆边缘,形成于古大陆裂解时期。岩浆成矿过程是指来自深源地幔的镁铁质-超镁铁质岩浆,在深源或中途岩浆房内,发生了熔离作用和结晶分异作用,由上而下形成了硅酸盐岩浆、含硫化物硅酸盐岩浆、富硫化物硅酸盐岩浆和硫化物矿浆的4层结构,然后,在适当的动力学条件下,一次或多次侵入地壳的现存空间或分别侵入地壳的不同空间成岩、成矿。通常,先侵入的硅酸盐岩浆比较分散,形成由几个至几十个(甚至更多)岩体组成的岩体群或岩体带,范围比较大;但后侵入的成矿岩体一般只有一个或几个,通常聚集成一个或几个矿集区(金川式、赤柏松式等)。关于小侵入体,汤中立(2002)曾提出过一种划分意见:以岩体面积 10 km^2 为小侵入体的上限,小于 10 km^2 称小侵入体。与小侵入体有关的成矿作用,即为小侵入体成矿,是侵入岩体的主要成矿方式,如金川、赤柏松、铜铜子、小南山等。以金川超大型 Ni-Cu-Pt 矿床为例(图2)。

表1 中国岩浆硫化物矿床的类型

Table 1 Types of magmatic sulfide deposits in China

构造环境侵位方式	主要岩石	矿床实例	矿床规模	主矿元素类型
古大陆				
小侵入体	二辉橄榄岩 辉绿辉长岩 辉长岩、辉绿岩 辉长岩	金川 赤柏松 铜铜子 小南山	超大型 中型 小型 小型	Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt
与溢流玄武岩有关的侵入体	闪长岩-辉长辉绿岩-辉石岩 闪长岩-辉长岩-橄辉岩 辉长岩-辉石岩-橄辉岩 辉绿辉长岩-橄辉岩 辉长岩-橄辉岩	大坡岭 力马河 白马寨 金山山 杨柳坪	小型 中型 中型 大型 大型	Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt Pt, Pd, Ni, Cu
造山带				
小侵入体	顽火辉石岩 辉长岩-橄辉岩-二辉橄榄岩 苏长岩-橄辉苏长岩	红旗岭 黄山 喀拉通克	大型 大型 大型	Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt Ni, Cu, Co, Pt
蛇绿岩	滑镁岩-斜辉辉橄岩 辉石岩-橄辉岩-斜辉辉橄岩	煎茶岭 德尔尼	大型 大型	Ni Cu, Zn, Co, S

岩浆硫化物矿床规模划分标准:超大型镍矿—Ni > 500 $\times 10^3 \text{ t}$;大型镍矿—Ni > 100 $\times 10^3 \text{ t}$;中型镍矿—Ni > 20 $\times 10^3 \text{ t}$;小型镍矿—Ni < 20 $\times 10^3 \text{ t}$;超大型铜矿—Cu > 2500 $\times 10^3 \text{ t}$;大型铜矿—Cu > 500 $\times 10^3 \text{ t}$;中型铜矿—Cu > 50 $\times 10^3 \text{ t}$;小型铜矿—Cu < 50 $\times 10^3 \text{ t}$ 。

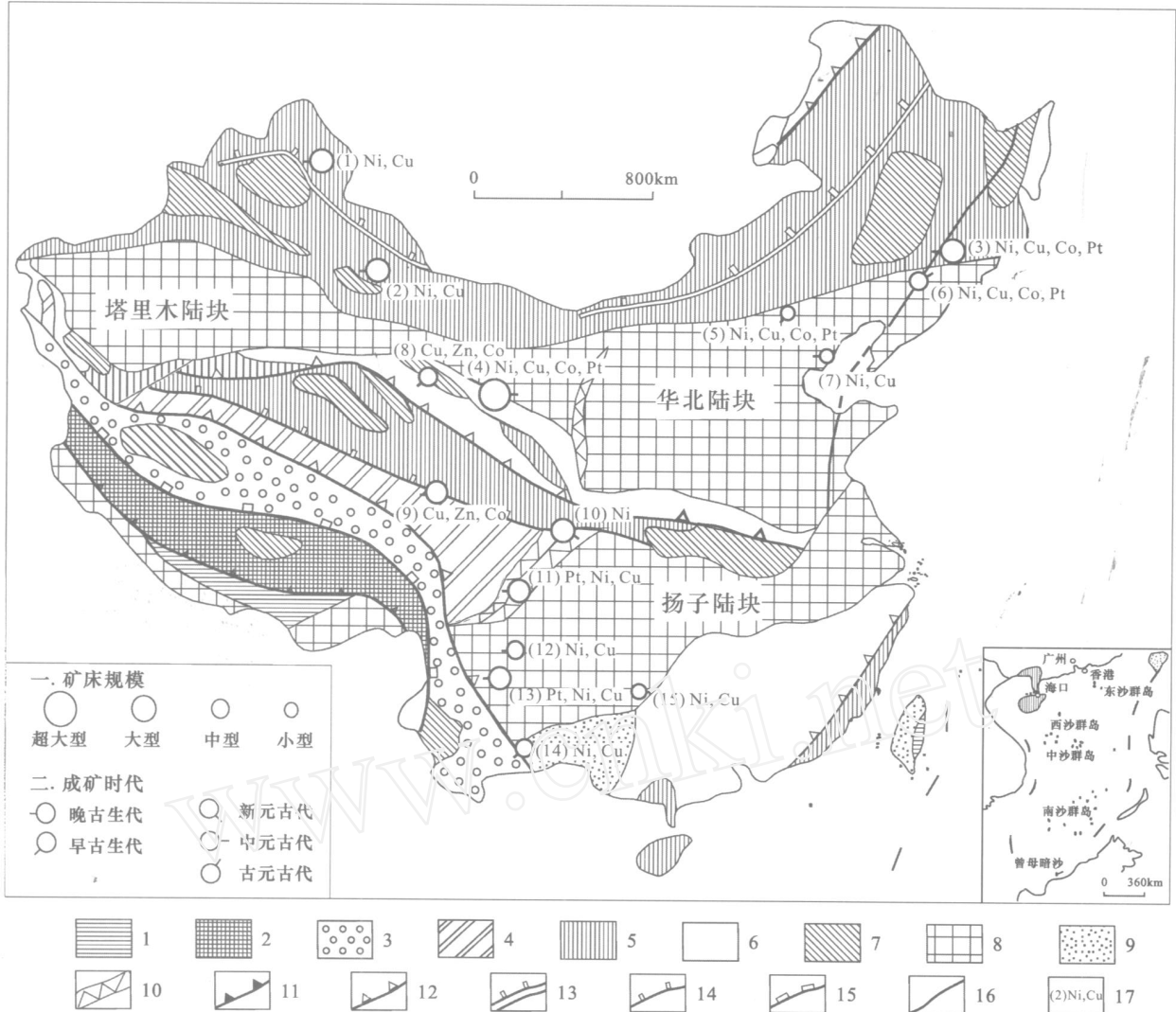


图 1 中国典型镍铜铂族岩浆硫化物矿床分布略图(地质背景据 Zhang 等,1984)

1~8—造山带:1—新生代(喜马拉雅);2—白垩纪(晚燕山);3—侏罗纪(早燕山);4—三叠纪(印支);5—晚古生代(华力西);6—早古生代(加里东);7—微古陆块;8—前寒武纪陆块;9—叠置在古老褶皱带上的弧后和陆内盆地;10—叠瓦大山脉;11—欧亚/印度板块缝合线;12—古俯冲消减带;13—晚古生代缝合线;14—中生代缝合线;15—新生代缝合线;16—郯庐断裂;17—典型矿床与主成矿元素:(1)—喀拉通克,(2)—黄山,(3)—红旗岭,(4)—金川,(5)—小南山,(6)—赤柏松,(7)—铜洞子,(8)—石居里,(9)—德尔尼,(10)—煎茶岭,(11)—杨柳坪,(12)—力马河,(13)—金山,(14)—白马寨,(15)—大坡岭

Fig. 1 Distribution of typical magmatic sulfide deposits in China (geological setting after Zhang et al. , 1984)

1—Himalayan orogenic belt; 2—Late Yanshanian orogenic belt; 3—Early Yanshanian orogenic belt; 4—Indosinian orogenic belt; 5—Variscan orogenic belt; 6—Caledonian orogenic belt; 7—Micro-palaeoblock; 8—Precambrian block; 9—Superimposed basin; 10—Superimposed mountain range; 11—Suture zone between Eurasian plate and Indian plate; 12—Palaeo-subduction zone; 13—Late Paleozoic suture zone; 14—Mesozoic suture zone; 15—Cenozoic suture zone; 16—Tanlu fault; 17—Typical deposits and major metallogenic elements: (1)—Kalatongke, (2)—Huangshan, (3)—Hongqiling, (4)—Jinchuan, (5)—Xiaonanshan, (6)—Chibaisong, (7)—Tongdongzi, (8)—Shijuli, (9)—De'erni, (10)—Jianchaling, (11)—Yangliuping, (12)—Limaher, (13)—Jinbaoshan, (14)—Baimazhai, (15)—Dapoling

金川矿床位于华北板块西南缘(汤中立等, 2002), 出露面积 1.34 km², 主要含矿岩石类型为二辉橄榄岩。岩体呈陡倾岩墙状产出, 围岩为斜长片麻岩、白云质大理岩、斜长角闪岩、混合花岗岩, 成岩时代为中元古代 [Sm-Nd 等时线年龄为 (1 508 ±31)

Ma(汤中立等, 1992)], 成矿时代为中元古代 [Re-Os 年龄为 (1 408 ±34) Ma(Keayset al. , 2004)]。

2.2 古大陆内与大陆溢流玄武岩有关的小侵入体矿床

该类矿床是指与大规模大陆溢流玄武岩喷出相

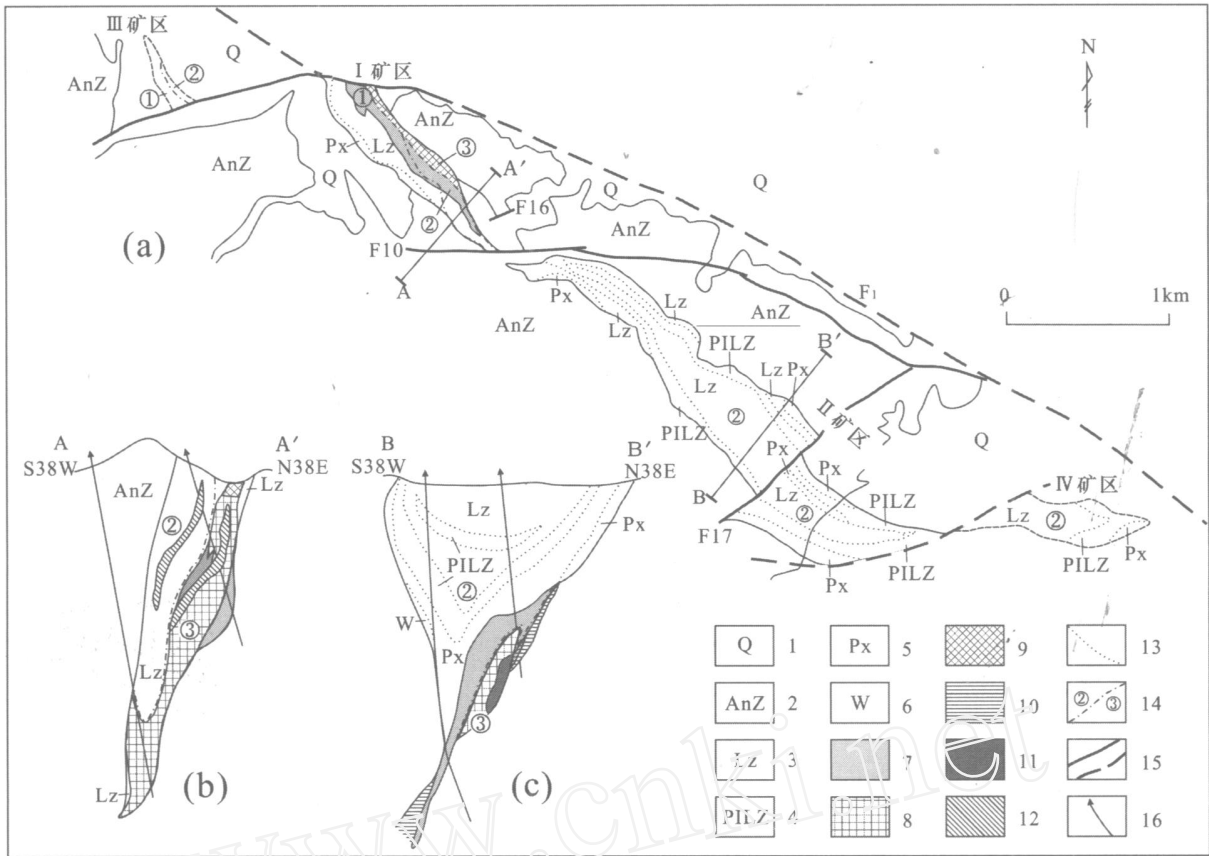


图2 金川岩体平面(a)及剖面(b,c)地质略图(据闫海卿等,2005)

- 1—第四系;2—前寒武系;3—二辉橄榄岩;4—斜长二辉橄榄岩;5—橄榄二辉岩;6—二辉岩;7—星点状结构的矿体;8—网状结构的富矿体;
- 9—氧化矿体;10—交代矿体;11—块状硫化物矿体;12—上盘星点状结构的矿体;13—侵入体岩相界线;14—侵入期次编号及界线;
- 15—实测及推断路层;16—钻孔

Fig.2 Geological plan (a) and sections (b and c) of Jinchuan intrusion(after Yan et al. , 2005)

- 1—Quaternary; 2—Precambrian; 3—Lherzolite; 4—Plagioclase lherzolite; 5—Olivine websterite; 6—Websterite; 7—Disseminated ore body;
- 8—Network ore shoot; 9—Oxidized ore body; 10—Metasomatic ore body; 11—Massive sulfide ore body; 12—Hanging disseminated ore body;
- 13—Petrofacies boundary; 14—Intrusion stage and its serial number; 15—Measured and inferred faults; 16—Drill hole

关的岩浆侵入成岩成矿形成的矿床。这种成矿方式的特点之一,就是含矿岩体通常侵入到溢流玄武岩内或溢流玄武岩附近的围岩中,因此,岩体的分布与溢流玄武岩有密切的空间关系,这也是与“岩浆侵入体矿床”的主要区别。这类矿床一般可聚集成多个矿集区。按主成矿元素可将该类矿床分为 Ni-Cu-Co-Pt 和 Pt-Pd-Ni-Cu 两个亚类,前者以 Ni、Cu 为主,如白马寨、大坡岭等,后者以 Pt、Pd 为主,如金山山、杨柳坪等。以金山山大型 Pt-Pd 矿床为例(图3)。该矿床位于扬子板块西缘,主要含矿岩石类型为辉绿辉长岩、橄榄岩。岩体呈缓倾层状、席状产出。围岩为泥盆系白云岩、灰岩、泥岩及砂岩。成

岩、成矿时代为晚古生代^①。

2.3 造山带内小侵入体矿床

这类矿床发育在造山带内,一般形成于碰撞造山后的弛张时期。中国的这类矿床主要形成于华力西期。其成矿机制与古大陆内小岩体矿床基本相似,但也有所区别。以喀拉通克大型 Ni-Cu-Co-Pt 矿床为例(图4)。来自镁铁质岩浆的主要硫化物矿物以低 REE 含量为特征(Wang et al. ,2004),而区别于古大陆内的小侵入体矿床。该矿床位于天山-兴安造山系的准噶尔造山带北缘;主要含矿岩石类型为苏长岩和橄榄苏长岩,岩体呈陡倾斜侵入体产出;围岩为下石炭统砾岩、凝灰质粉砂岩、板岩及硅质

① 杨廷祥,等. 1989. 云南省弥渡县金山铂钨矿典型矿床研究报告. 云南省地质矿产局第三地质队。(内部资料)。

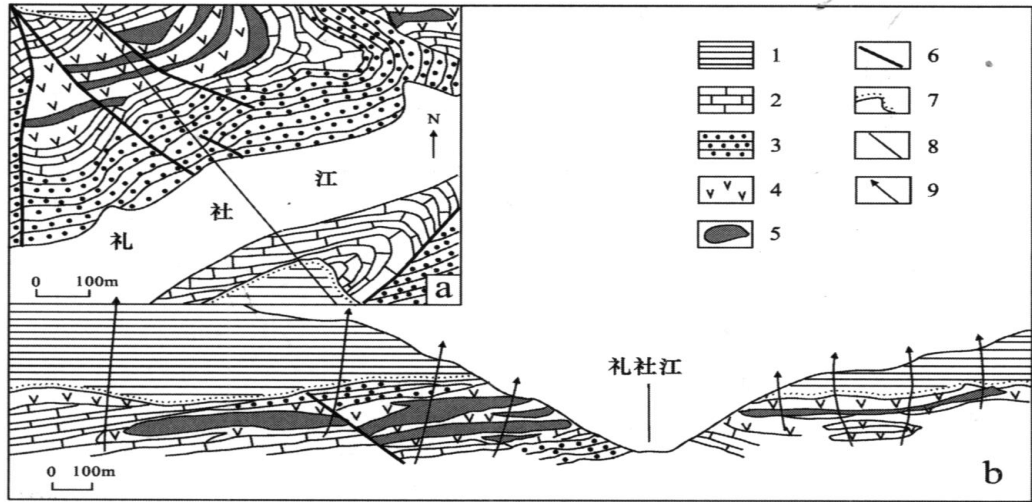


图 3 金山矿床地质平面(a)与剖面图(b) (据杨星等,1993)

- 1—三叠系;2—泥盆系灰岩;3—泥盆系砂岩;4—超基性岩;5—铂矿体;6—断层;7—不整合线;8—勘探线;9—钻孔
- 1—Triassic; 2—Devonian limestone; 3—Devonian sandstone; 4—Ultrabasic rock; 5—Platinum ore body; 6—Fault; 7—Unconformity; 8—Exploration line; 9—Drill hole

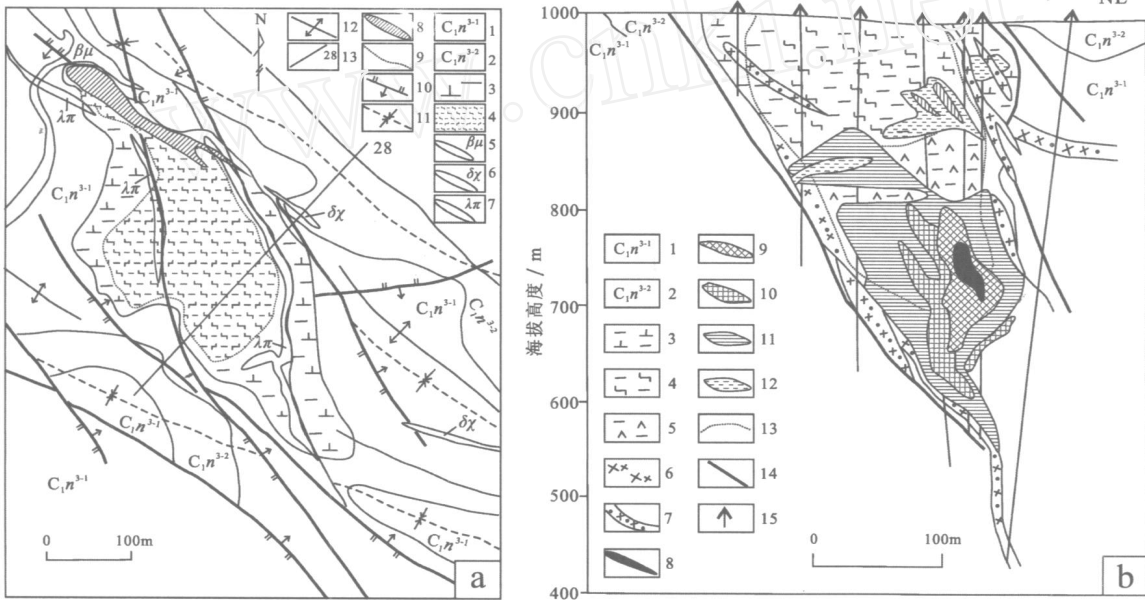


图 4 喀拉通克一号矿体地质图(a)及 28 线勘探剖面图(b) (据李文渊,1996)

- a: 1—下石炭统南明水组上段灰白色泥板岩、含砾中粗屑粉屑沉凝灰岩; 2—下石炭统南明水组上段含砾中粗屑粉屑沉凝灰岩、含碳质泥板岩; 3—黑云闪长岩相; 4—黑云角闪苏长岩相; 5—辉绿玢岩; 6—闪斜煌岩; 7—石英斑岩; 8—氧化矿体; 9—岩相界线; 10—逆断层; 11—向斜轴; 12—背斜轴; 13—勘探线位置及编号。 b: 1—下石炭统南明水组上段灰白色泥板岩、含砾中粗屑粉屑沉凝灰岩; 2—下石炭统南明水组上段含砾中粗屑粉屑沉凝灰岩、含碳质泥板岩; 3—黑云闪长岩相; 4—黑云角闪苏长岩相; 5—黑云角闪橄长岩相; 6—黑云角闪辉绿岩相; 7—辉长岩脉; 8—致密块状富镍高铜矿体; 9—致密块状特富铜镍矿体; 10—中等及稠密浸染状富铜贫镍矿体; 11—稀疏浸染状贫镍矿体; 12—矿化体; 13—岩相界线; 14—断层; 15—钻孔

Fig. 4 Geological plane of Kalatongke No. 1 ore deposit (a) and section of No. 28 prospecting line (b) (after Li, 1996)

- a: 1—Mud slate and conglomerate-bearing sedimentary tuff; 2—Conglomerate-bearing sedimentary tuff and carbonaceous mud slate; 3—Diorite facies; 4—Norite facies; 5—Diabase porphyrite; 6—Spessartite; 7—Quartz porphyry; 8—Oxidized ore body; 9—Petrofacies boundary; 10—Reversed fault; 11—Core of syncline; 12—Core of anticline; 13—Location and serial number of exploration line. b: 1—Mud slate and conglomerate-bearing sedimentary tuff; 2—Conglomerate-bearing sedimentary tuff and carbonaceous mud slate; 3—Diorite facies; 4—Norite facies; 5—Hyperite norite facies; 6—Diabase facies; 7—Gabbro vein; 8—Copper- and nickel-rich ore body; 9—Specimen ore body; 10—Copper-rich and nickel-poor ore body; 11—Lean ore body; 12—Mineralized body; 13—Petrofacies boundary; 14—Fault; 15—Drill hole

岩。成岩成矿时代为晚古生代,李华芹等(1998)用 Sm-Nd 法测得其年龄为 280 ~ 298 Ma,张作衡等(2005)利用 Re-Os 同位素方法测得其年龄为 (282.5 ± 4.8) ~ (290.2 ± 6.9) Ma,与另一个造山带内的小侵入体矿床——黄山东矿床 [Re-Os 年龄为 (282 ± 20) Ma(毛景文等,2002)] 可以进行对比,皆形成于造山后碰撞拉张伸展环境。

2.4 造山带内蛇绿岩型矿床

蛇绿岩岩石组合由下而上一般包括超镁铁质杂岩、辉长质堆积杂岩、镁铁质席状岩墙杂岩和镁铁质火山杂岩(含枕状构造)4部分(张旗等,2000),不同部位的成矿作用不尽相同。通常,成矿是洋壳在生成和迁移阶段,由于构造侵位而以残片被保留于造山带中所致。残片代表的部位具有多样性,因此,成矿也显示出多样性。中国的该类矿床包含了元古代的煎茶岭式、古生代的德尔尼式等几种不同部位形

成的矿床。以煎茶岭镍矿床为例。该矿床位于勉县-略阳-宁强三角地块的东北部(图5),含矿岩石类型为强烈蚀变的镁质超基性岩,主要岩性为蛇纹岩、滑镁岩、石英菱镁岩和滑石岩,原岩恢复为辉橄岩类(王秀璋等,1997)。岩体与围岩具有构造冷侵位关系。围岩为太古宙鱼洞子群的片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩,以及元古宙接官亭组绿泥钠长石英片岩,还有震旦-寒武系板岩、碳酸盐岩类。其成矿时代,Re-Os 等时线年龄为 (878 ± 27) Ma(王瑞廷,2002)。煎茶岭镍矿床为一大型矿床,以贫镍硫化物矿石为主,主要呈浸染状、斑点状构造。金属矿物除岩浆熔离型镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿之外,还有热液型针镍矿、辉镍矿等。其成因可能与蛇绿岩超镁铁质杂岩岩片有关的岩浆熔离型矿床经后期热液成矿叠加而成。

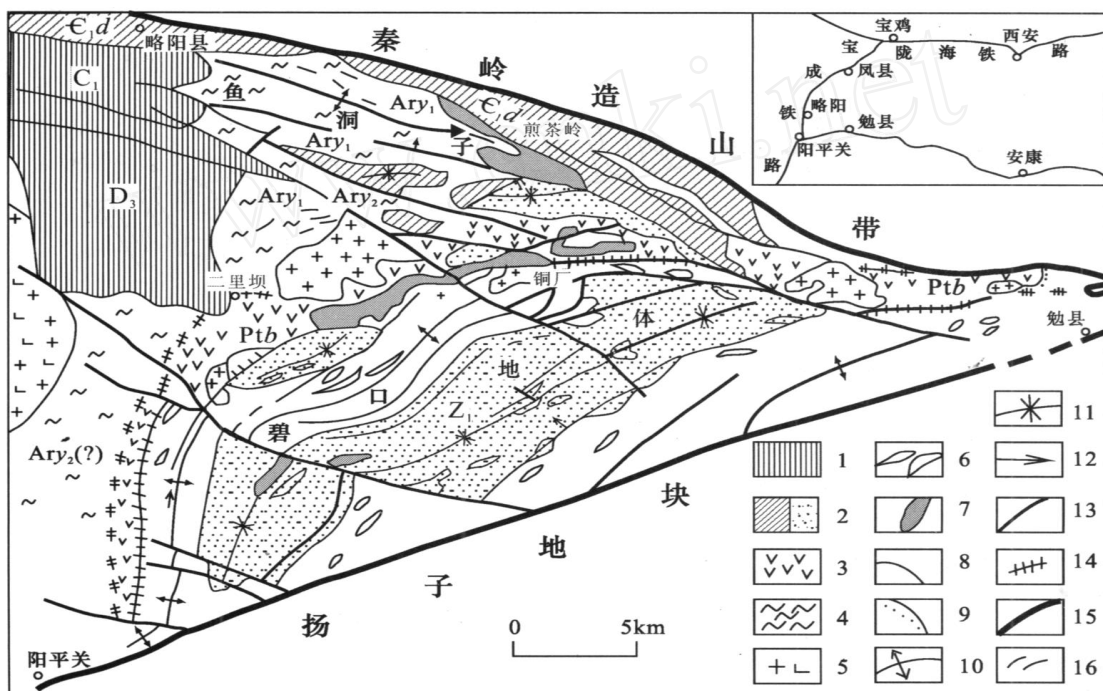


图5 煎茶岭地区大地构造位置图(据王相等,1996)

- 1—晚古生界(D₃-C₁)断陷盆地沉积;2—震旦系-寒武系(ε₁d-Z₁)碳酸盐岩、碎屑岩沉积;3—元古界碧口群(Pt b)长英质火山岩;4—太古界鱼洞子群(Ary₁、Ary₂)镁铁质火山岩;5—中酸性侵入岩;6—基性侵入岩脉;7—超基性侵入岩;8—地质界线;9—地质不整合;10—背斜轴;
- 11—向斜轴;12—构造轴倾向;13—断裂;14—地体拼接带;15—深大断裂;16—磁铁石英岩型铁矿及硅铁建造

Fig. 5 Sketch map showing geotectonic location of Jianchaling area (modified after Wang et al., 1996)

- 1—Late Paleozoic fault basin sedimentation; 2—Sedimentary formation of carbonate and detrital rocks; 3—Felsic volcanic rock; 4—Mafic volcanic rock; 5—Intermediate and acid intrusion; 6—Basic intrusive vein; 7—Ultrabasic intrusion; 8—Geological boundary; 9—Unconformity; 10—Axis of anticline; 11—Axis of syncline; 12—Dip of tectonic axis; 13—Fault; 14—Pieced terrane belt; 15—Deep fault; 16—Magnetic quartzite type iron deposit and ferrosilicon formation

3 小岩体岩浆矿床的成矿作用

由表 1 可见,中国的 4 类岩浆硫化物矿床的前 3 类均由小岩体岩浆矿床组成,仅有 1 类属蛇绿岩型矿床。小岩体不仅形成了一系列中、小型矿床,而且还形成了超大型(金川)和多个大型(红旗岭、喀拉通克、黄山、金宝山等)矿床。中国的镍、钴、铂族金属的自给,主要来自这种小岩体岩浆矿床。蛇绿岩型矿床,虽然包含了德尔尼(以富铜矿为主)、煎茶岭(以贫镍矿为主)这样的大型硫化物矿床,但在数量和质量方面,较小岩体岩浆矿床逊色得多,所以,小岩体岩浆矿床是中国岩浆硫化物矿床的主要矿床类型。

关于小岩体岩浆矿床的概念,以往曾作过表述(汤中立,2002),在此进一步归纳如下:在规模较小的侵入岩浆岩体内部和/或附近的围岩中,形成了由与岩浆作用有关的规模相对大而富的矿体组成的矿床;岩体的最大截面积一般不到 10 km^2 ,最小可能只有几米方米;岩体的矿化率(矿体体积/岩体体积 $\times 100\%$)高或较高,如金川大于 43% 、喀拉通克大于 50% 、红旗岭 7 号岩体大于 90% ;发生了明显的深部预富集成矿作用(见后述)。

3.1 矿床形成的地质背景

矿床主要形成于 3 种地质背景:古大陆边缘与裂解有关的小侵入体,其形成时代主要是早、中元古代(赤柏松、金川)及华力西期(小南山);古大陆边缘与溢流玄武岩有关的小侵入体,其形成时代主要是新元古代(大坡岭)及华力西期(力马河、白马寨、金宝山、杨柳坪等);造山带内与碰撞后张裂有关的小侵入体,其形成时代主要是华力西期(红旗岭、喀拉通克、黄山等)。

3.2 岩体-矿床的结构形式

岩体-矿床的主要结构形式有 3 种:岩体群与小岩体矿床形式,即先侵入的硅酸盐岩浆比较分散,形成由几个至几十个(甚至更多)岩体组成的岩体群或岩体带,范围比较大;但后侵入的成矿岩体一般只有一个或几个,通常聚集成一个或几个矿集区,如金川、红旗岭、喀拉通克、黄山等;大面积溢流玄武岩与小侵入岩体矿床(或侵入岩席矿床)形式,如峨眉玄武岩与力马河、白马寨、金宝山、杨柳坪等的组合形式,国外有俄罗斯西伯利亚暗色岩与 Noril'sk 矿床的组合形式;一个或几个大岩体与附近的小

岩体矿床形式,如加拿大 Nain 岩套中的 Kiglapait 大岩体(面积 500 km^2 ,厚 9 km)与附近的 Voisey's Bay 小岩体($30 \sim 100 \text{ m}$ 厚,长约 6 km)矿床(Wolfgan et al.,2001)。

3.3 成矿的关键因素

小岩体岩浆矿床成矿的最主要因素可归结为:

(1)邻近深大断裂。这种断裂有时显现为重要的地壳拼合带,如金川两侧华北地块与祁连山之间的深断裂带、黄山南侧之康古尔塔格-黄山深断裂带、红旗岭南缘辉发河深断裂带及喀拉通克北缘额尔齐斯 NW 向深断裂带等,为地幔岩浆上升成岩成矿提供了软弱带;

(2)富橄榄石岩浆(Naldrett,1999)和富斜方辉石岩浆有利于成矿。富橄榄石岩浆具有 3 重含义:富橄榄石岩浆的温度较高;富橄榄石岩浆中的 Ni 含量相对较高;更容易与富含 SiO_2 的围岩反应。如金川、黄山、白马寨、Noril'sk、Voisey's Bay(富橄榄石岩浆)等矿床。当岩浆不富橄榄石时,斜方辉石的出现可能起到上述橄榄石的标志性作用,如红旗岭 7 号、喀拉通克等(富斜方辉石岩浆)的情况即如此。

(3)矿床的硫源有 2 类。其 ^{34}S 值变化很小,基本上接近 0,并呈塔式分布,显示出岩浆硫为主的特点,没有迹象表明有较多地壳硫的加入,金川、红旗岭、喀拉通克、黄山、赤柏松以及 Sudbury 等矿床均属此类;另一种情况是, ^{34}S 值变化较大,显示出硫源以壳源为主的特征,如力马河、Noril'sk、Voisey's Bay 等矿床。可见,中国的小岩体矿床成矿以幔源硫为主。

(4)发生了明显的深部预富集成矿作用。由于岩体小,矿体相对大而富,这种矿体不可能从小岩体自身产生出来。因此,岩体在就位于现存空间之前的深部或在就位过程中,由于物理化学条件的变化或与围岩发生反应,致使岩浆在深部发生了熔离作用和部分结晶作用,并分异为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几部分,然后,对现存空间一次或多次上侵贯入成矿,或对地表与浅部,一次或多次喷发-贯入成矿。一般来说,经过深部熔离、结晶、分异后的不含矿岩浆的体积,比含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的体积要大得多,在上侵过程中,不含矿岩浆大部分都侵入到不同的空间或喷溢出地表,形成岩群或岩流,剩余的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可以多次贯入同一空间成岩、成矿(金川、喀拉通克、白

马寨、力马河矿床),也可以分别贯入不同的空间成岩、成矿(红旗岭 1、7 号矿床)。比照就地熔离的矿床,这种深部熔离-贯入矿床的岩体体积就小得多,含矿率和矿石品位也高得多,所以,这种成矿作用机制导致形成小岩体、大矿床,即所谓的“小岩体,成大矿”。

4 小岩体岩浆矿床研究的发展趋势

中国的岩浆硫化物矿床主要发现和勘探于 20 世纪 90 年代之前,那时,小岩体成矿已经是中国指导这类矿床勘查研究的主要方针。20 世纪 90 年代之后,随着俄罗斯 Noril'sk-Talnank 矿床的资料($15 \times 2 \times 0.2 \text{ km}^3$,最大截面积约 3 km^2) (Fedorenko, 1994; Distler, 1994; Naldrett, 1992; Naldrett et al., 1996a) 公诸于世,以及加拿大 Voisey's Bay 矿床($< 1 \text{ km}^2$) 的发现(Naldrett et al., 1996b; 2000; Amelin et al., 1999; Lambert et al., 1999; Ripley et al., 1999; Li et al., 1999; 2000; Lightfoot et al., 1999; Ryan et al., 1995),国外也十分重视这种所谓“通道式(conduit)”的小岩体矿床,甚至有的学者提出“为什么主要的 Ni-Cu 硫化物矿床不是产出于大型层状镁铁质-超镁铁质侵入体中?”(Wolfgang et al., 2001),他们认为,按照加拿大 Sudbury 矿床的成矿作用模式进行大型层状岩浆矿床的勘查以寻找富 Cu-Ni 硫化物矿床是一种误导。

目前,从国内外来看,小岩体主要形成以 Cu-Ni 为主的 Cu-Ni-PGE 矿床,而大型层状岩体主要形成 Pt-Pd 矿床和一些低品位的 Cu-Ni 矿床。由于中国这种大型层状岩体不发育,因此,应继续勘查以小岩体为主(如表 1 所示)的 Cu-Ni-PGE 矿床。

还应指出的是,小岩体成矿作用不仅对镁铁质-超镁铁质岩十分重要,而且在中酸性岩浆岩中也很发育,许多铜、金、铁、钼、钨等重要金属矿床都与小侵入体有关。所以,小岩体成矿对于岩浆矿床来说在一定程度上不失为贯通性的因素之一,加强对小岩体成矿作用的研究具有重要的理论和实际意义。

References

Amelin Y, Li C and Naldrett A J. 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon and apatite [J]. *Lithos*, 47: 33 ~ 51.
Cawthorn R G, Merkle R K and Viljoen M J. 2002. Platinum-group el-

ement deposits in the Bushveld Complex South Africa [A]. In: Cabri L J, ed. *The geology geochemistry mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements* [C]. Ottawa, Ontario: Can. Inst. Min. Met. Spec. Vol 54. 389 ~ 429.
Fedorenko V A. 1994. Evolution of magmatism as reflected in the volcanic sequence of the Noril'sk region [A]. In: Lightfoot P C and Naldrett A J, ed. *Proc. Sudbury-Noril'sk Symp.* [C]. Ontario: Geological Survey Special Vol 5. 171 ~ 184.
Faggart B E, Basu A B and Tatsumoto M. 1985. Origin of the Sudbury Complex by meteorite impact: Neodymium isotopic evidence [J]. *Science*, 230: 436 ~ 439.
Keays R R, Ihlenfeld C, McInnes B I A and Zhou M F. 2004. Re-Os isotope dating of the Jinchuan Ni-Cu-PGE sulfide deposit, China [A]. *Proceedings of the IGCP 479 Hong Kong Workshop, Abstract Volume* [C]. Hong Kong SAR China. 41 ~ 42.
Lambert D D, Foster J G, Frick L R, Li C and Naldrett A J. 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.
Li C and Naldrett A J. 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reactions of olivine with sulphide and silicate liquids [J]. *Lithos*, 47: 1 ~ 31.
Li C and Naldrett A J. 2000. Melting reaction of gneissic inclusions with enclosing magma at Voisey's Bay: Implications with respect to ore genesis [J]. *Econ. Geol.*, 95: 801 ~ 814.
Lightfoot P C and Naldrett A J. 1999. Geological and geochemical relationships in the Voisey's Bay intrusion, Nain plutonic suite, Labrador, Canada [A]. In: Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, Farrow C F G, ed. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration*, Vol 13 [C]. Ottawa: Geological Association of Canada Short Course Notes. 1 ~ 30.
Li H Q, Xie C F and Chang H L. 1998. Study on metallogenic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in northern Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 263p (in Chinese).
Li W Y. 1996. Metallogenic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China [M]. Xi'an: Cartographic Pub. House. 288p (in Chinese).
Liu Y X, Tang H S and Wu H Z. 1998. Types and ore-control factors of Cu-Ni sulfide deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 12(2): 86 ~ 90 (in Chinese with English abstract).
Mao J W, Yang J M, Qu W J, Du A D, Wang Z L and Han C M. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulphide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance [J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323 ~ 330 (in Chinese with English abstract).
Naldrett A J. 1992. A model for the Ni-Cu-PGE ores of the Noril'sk region and its application to other areas of flood basalt [J]. *Econ. Geol.*, 87: 1945 ~ 1962.
Naldrett A J, Fedorenko V A, Asif M and Lin S. 1996a. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia [J]. *Econ. Geol.*, 91: 751 ~ 773.
Naldrett A J, Keats H, Sparkes K and Moore R. 1996b. Geology of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada [J]. *Explor.*

- Mining Geol., 5: 169 ~ 179.
- Naldrett A J. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis [J]. Mineralium Deposita, 34: 227 ~ 240.
- Naldrett A J, Asif M, Krstic S and Li C. 2000. The composition of ore at the Voisey 's Bay Ni-Cu sulphide deposit, with special reference to platinum-group elements [J]. Econ. Geol., 95: 845 ~ 866.
- Ripley E M, Young-Rok P, Li C. 1999. Sulfur and oxygen isotopic evidence of country rock contamination in the Voisey 's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada [J]. Lithos, 47(1-2): 53 ~ 68.
- Ryan B, Wardle R J, Gower C F and Nunn G A G. 1995. Nickel-copper sulphide mineralization in Labrador: The Voisey Bay discovery and its exploration implications [J]. Current Research, 95(1): 177 ~ 204.
- Tang Z L and Ren D J. 1987. Types and metallogenetic models of nickel sulfide deposits in China [J]. Acta Geologica Sinica, 61 (4): 350 ~ 361 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L, Yang J D, Xu S J, Tao X C and Li W Y. 1992. The Sm-Nd age of ultrabasic ore-bearing rock in Jinchuan [J]. Chinese Science Bulletin, 37(10): 918 ~ 920 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L. 2002. Magmatic ore deposits in small intrusions in China [J]. Engineering Science, 4(6): 9 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L, Bai Y L and Li Z L. 2002. Geotectonic setting of large and superlarge mineral deposits on the southwestern margin of the north China Plate [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 76(3): 367 ~ 377.
- Wang R T. 2002. The comparative study on mineralization of Jianchaling and Jinchuan nickel copper sulphide deposits [D]. Xi 'an: Department of Geology, Northwest University. (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Tang R Y, Li S, Li Y X, Yang M J and Wang D S. 1996. Qinling orogeny and metallogenesis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 300p (in Chinese).
- Wang X Z, Cheng J P, Mo C H, Liang H Y, Xia P and Shan Q. 1997. Characteristics and genesis of reworking deposits in intrusive rocks in China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 26(4): 1 ~ 12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y W, Wang J B, Wang L J, Wang Y and Tu C N. 2004. REE characteristics of the Kalatongke Cu-Ni deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 78(2): 396 ~ 403.
- Wolfgang D M, Li C, Sybrand and Waal D. 2001. Why are there no major Ni-Cu sulphide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusions? [J]. Canadian Mineralogist, 39: 547 ~ 556.
- Yan H Q, Su S G, Jiao J G and Tang H. 2005. Metallogenetic epoch of Jinchuan Ni-Cu-PGE magmatic sulfide deposit [J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 309 ~ 315 (in Chinese with English abstract).
- Yang X and Li H. 1993. Platinum-bearing basic-ultrabasic rockbodies and PGE deposits in China [M]. Xi 'an: Traffic University Publishing House. 183p (in Chinese).
- Zhang Q, Qian Q Wang Y. 2000. Rock assemblages of ophiolites and magmatism beneath oceanic ridges [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 19(1): 1 ~ 7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Chai F M, Du A D, Zhang Z C, Yan S H, Yang J M, Qu W J and Wang Z L. 2005. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karratungk Cu-Ni sulfide deposit in northern Xinjiang [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24(4): 285 ~ 293 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Liu J G and Coleman R G. 1984. An outline of the plate tectonic of China [J]. Geol. Soci. Amer. Bull., 95: 295 ~ 312.

附中文参考文献

- 李华芹, 谢才富, 常海亮. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学 [M]. 北京:地质出版社. 263 页.
- 李文渊. 1996. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学 [M]. 西安:地图出版社. 228 页.
- 刘月星, 唐红松, 吴厚泽. 1998. 中国铜镍硫化物矿床类型及控矿条件 [J]. 矿产与地质, 12(2): 86 ~ 90.
- 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 [J]. 矿床地质, 21(4): 323 ~ 330.
- 汤中立, 任端进. 1987. 中国硫化镍矿床类型 [J]. 地质学报, 61(4): 350 ~ 361.
- 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 陶先聪, 李文渊. 1992. 金川含矿超镁铁岩的 Sm-Nd 法定年 [J]. 科学通报, 37(10): 918 ~ 920.
- 汤中立. 2002. 中国的小岩体岩浆矿床 [J]. 中国工程科学, 4(6): 9 ~ 12.
- 王瑞廷. 2002. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究 [博士论文] [D]. 导师:赫英. 西安:西北大学地质系.
- 王相, 唐荣扬, 李实, 李永祥, 杨铭君, 王东升. 1996. 秦岭造山与金属成矿 [M]. 北京:冶金工业出版社. 300 页.
- 王秀璋, 程景平, 莫测辉, 梁华英, 夏萍, 单强. 1997. 中国侵入岩中改造成因金矿床基本特征及成矿机制 [J]. 地球化学, 26(4): 1 ~ 12.
- 闫海卿, 苏尚国, 焦建刚, 汤华. 2005. 金川 Ni-Cu-PGE 岩浆硫化物矿床成矿时代研究 [J]. 地学前缘, 12(2): 309 ~ 315.
- 杨星, 李行. 1993. 中国含铂基性超基性岩体与铂(族)矿床 [M]. 西安:交通大学出版社. 183 页.
- 张旗, 钱青, 王焰. 2000. 蛇绿岩岩石组合及洋脊下岩浆作用 [J]. 岩石矿物学杂志, 19(1): 1 ~ 7.
- 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 张招崇, 闫升好, 杨建民, 屈文俊, 王志良. 2005. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床同位素测年及成矿物质来源示踪 [J]. 岩石矿物学杂志, 2005(4): 285 ~ 293.