

岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势 与小岩体成矿系统

汤中立¹, 钱壮志^{1,2}, 姜常义¹, 闫海卿¹, 焦建刚¹,
刘民武^{1,2}, 徐章华¹, 徐刚¹, 王亚磊¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过 2009 年西安 Ni-Cu (Pt) 岩浆矿床国际学术研讨会和近 10 年来的勘查研究现状, 可以看出岩浆硫化物矿床勘查领域的发展趋势为: 与大型层状岩体有关的铂族矿床仍然受到关注; Sudbury 矿床的特殊性和不可参照性取得了共识; 小岩体矿床是勘查研究的主流; 通道成矿作用受到重视。以大型层状岩体 Bushveld 为例, 介绍了其中的 Merensky 矿层、UG-2 矿层和北翼接触带的 Platreef 矿床。由于中国没有发现这种大型层状岩体, 因此应当重视那些中小型层状岩体中可能赋存的铂族矿床。迄今为止, 除了 Sudbury 矿床这个特殊的实例之外, 国内外所有具有经济意义的 Ni-Cu 矿床都寄生于小岩体中并自成一个成矿系统。这个小岩体成矿系统包含成矿背景、邻近深大断裂、原始岩浆、先导性岩浆成岩作用、继发性岩浆成矿作用以及深部熔离-分期贯入-终端岩浆房聚集成矿等。近 10 年的勘查实践进一步说明, 这类小岩体矿床仍是中国今后的主要勘查研究方向。最后, 介绍了 Noril'sk-Talnakh 和 Voisey's Bay 矿床的深部熔离-通道成矿机制, 这种机制增添了小岩体成矿作用的多样性; 但是, 其现存空间是开放性岩浆通道还是封闭性终端岩浆房, 还有待更多的研究和实践。

关键词: 岩浆硫化物矿床; 大型层状岩体; 铂族矿床; 小岩体成矿系统; Ni-Cu(PGE) 矿床

中图分类号: P611.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)01-0001-09

Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System

TANG Zhong-li¹, QIAN Zhuang-zhi^{1,2}, JIANG Chang-yi¹, YAN Hai-qing¹, JIAO Jian-gang¹,
LIU Min-wu^{1,2}, XU Zhang-hua¹, XU Gang¹, WANG Ya-lei¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of West Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits can be seen from the Xi'an International Ni-Cu (PGE) Deposit Symposium 2009 and the achievements of exploration research over the past decade as following: the PGE deposits related to the large-layered intrusions still receive much attention; it is agreed that the Sudbury deposit is unique and worthy of little reference; small intrusion metallogenic system becomes the main stream of the research; the theory of magma plumbing mineralization receives much attention. Bushveld, which is a large-layered intrusion, is taken as an example with brief introduction for the Merensky ore bed, UG-2 ore bed and Platreef ore deposit in the north wing of the contact zone. As there is no large rock mass discovered in China, the exploration of potential PGE deposits hosted in small- and medium-scale layered rock mass should be paid much attention. Except the particular instance of Sudbury deposit, most of the Ni-Cu deposits with economic values discovered all over the world were hosted in the small intrusions as individual metallogenic system. The system includes metallogenic background, adjacent to deep fault, primary magma, and the digenesis of pilot magma, the

收稿日期: 2010-12-25

基金项目: 国土资源部深部探测技术与实验研究专项项目 (Sinoprobe-05-01); 国土资源部公益性行业科研专项项目 (200911007-5; 201011058); 中国地质调查局项目 (1212010630508)

作者简介: 汤中立(1934-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士, 从事岩浆矿床、区域成矿、地质矿产调查及矿山环境研究。E-mail: zltang@sohu.com

mineralization of secondary magma and the segregation in deep-stage chamber, the pulsing penetration-mineralization in terminal magma chamber, etc. The exploration result over the past decade suggests that the type of small intrusion deposit is still the main target of research and exploration in China in the future. The metallogenic mechanism of deep liquation and conduit system of Noril'sk-Talnakh and Voisey's Bay deposits is introduced and adds the diversity of small intrusions mineralization. However, it is to be answered by the future research and practice whether the ore-host space is an open conduit system or an closed terminal magma chamber.

Key words: magmatic sulfide deposit; large layered intrusion; PGE deposit; small intrusion metallogenic system; Ni-Cu(PGE) deposit

0 引言

2009 年 6 月在西安成功举办了“Ni-Cu(Pt)岩浆矿床国际学术研讨会”,国际经济地质协会(SEG)对本次会议进行了专题报道。汤中立、Naldrett、Lesher 做了主题报告,有 100 多位中外学者出席会议并做报告。会议充分展示了近期的研究成果,增

进了国内外的学术交流,提高了中国在该领域的研究水平。依据会议资料,结合近 10 年来国内外研究现状,可以看出这一领域的发展趋势为:与大型层状岩体有关的铂族矿床仍然受到关注;Sudbury 矿床的特殊性和不可参照性取得了共识;小岩体矿床是发展主流;通道成矿作用受到重视^[1-3]。现将有关矿床实例列于表 1。

表 1 与岩体规模有关的岩浆硫化物矿床

Tab. 1 Magmatic Sulfide Deposit Concerned with Intrusion Scale

序号	岩石类型	分布地区	形成时代	岩体规模(矿床规模)	形态产状	构造背景	相关矿产	成矿机制
1	Bushveld 杂岩体	南非	2.06 Ga ^[3]	65 000 km ² , 厚约 9 km(超大型)	层状	与地幔柱有关 ^[4]	PG E-Cr-Fe	就地结晶分异(熔离)
2	Great Dyke	津巴布韦	(2.579±0.007) Ga ^[5]	长 550 km, 宽 4~11 km(超大型)	层状岩墙	与地幔柱有关 ^[6]	PG E-Cr	就地结晶分异(熔离)
3	Stillwater	美国	(2.705±4) Ga ^[7]	长 47 km, 宽 8 km(超大型)	层状	与地幔柱有关 ^[6]	PG E-Cr	就地结晶分异(熔离)
4	Sudbury	加拿大	1.85 Ga ^[8]	60 km×30 km(超大型)	盆状	陨击 ^[8]	Ni-Cu-PGE	地壳熔融结晶分异(熔离)
5	Noril'sk-Talnakh	俄罗斯	(251.2±0.3) Ma ^[9]	3~6 km ³ (超大型)	岩席	溢流玄武岩	Ni-Cu-PGE	深部预富集通道成矿
6	Pechenga	俄罗斯	(1.980±0.010) Ga ^[10]	约 6 km ³ (超大型)	透镜状	大陆边缘裂谷	Ni-Cu-PGE	深部预富集通道成矿
7	Voisey's Bay	加拿大	1.334 Ga ^[11]	约 3 km×2 km(超大型)	脉状	大陆裂谷	Ni-Cu-PGE	深部预富集通道成矿
8	金川	中国	(1 508±31) Ma ^[12] (831.8±0.6) Ma ^[13]	长 6 500 m, 宽 20~527 m, 面积 1.34 km ² (超大型)	岩墙状	大陆边缘裂谷	Ni-Cu-PGE	深部预富集(熔离)贯入
9	红旗岭	中国	(225.50±0.85) Ma ^[14] (216±5) Ma ^[15]	1 号岩体长 980 m 宽 150~280 m, 7 号 岩体长 750 m, 厚 18~40 m(大型)	1 号透镜状 7 号岩墙状 3 号岩盆状	碰撞后伸展环境	Ni-Cu-PGE	深部预富集(熔离)贯入
10	金宝山	中国	(260.6±3.5) Ma ^[16] (260.7±5.6) Ma ^[16]	长 2 560 m, 宽 760~1 240 m, 厚 25~109 m(大型)	岩席	溢流玄武岩	PGE	深部预富集(熔离)贯入
11	白马寨	中国	(259±18) Ma ^[17]	长 190 m, 宽 47 m(中型)	扁柱体	溢流玄武岩	Ni-Cu-PGE	深部预富集(熔离)贯入
12	喀拉通克	中国	(282.5±4.8) Ma ^[18] (287±5) Ma ^[19]	岩体面积 0.075 km ² (大型)	透镜状	碰撞后伸展环境	Ni-Cu	深部预富集(熔离)贯入
13	黄山	中国	(269±2) Ma ^[20] (305.4±2.4) Ma ^[21]	长约 3.8 km, 宽约 0.8 km(大型)	透镜状	碰撞后伸展环境	Ni-Cu	深部预富集(熔离)贯入
14	图拉尔根 I 号岩体	中国	(300.5±3.2) Ma ^[22]	长约 740 m, 宽 20~60 m, 面积 0.026 km ² (大型)	岩墙状	碰撞后伸展环境	Cu-Ni(Co)	深部预富集(熔离)贯入
15	黑山	中国		面积 0.25 km ² (大型)	似鸭梨状		Ni-Cu	深部预富集(熔离)贯入

1 大型层状岩体是铂族金属主要来源

大型层状岩体是指那些形成时代早、规模巨大(几万到几百平方千米以上)、具有层状结构的镁铁质-超镁铁质侵入岩体。这些岩体往往是超大型铂族、钼、铁磁铁矿、铬铁矿的资源储库,如表 1 中的

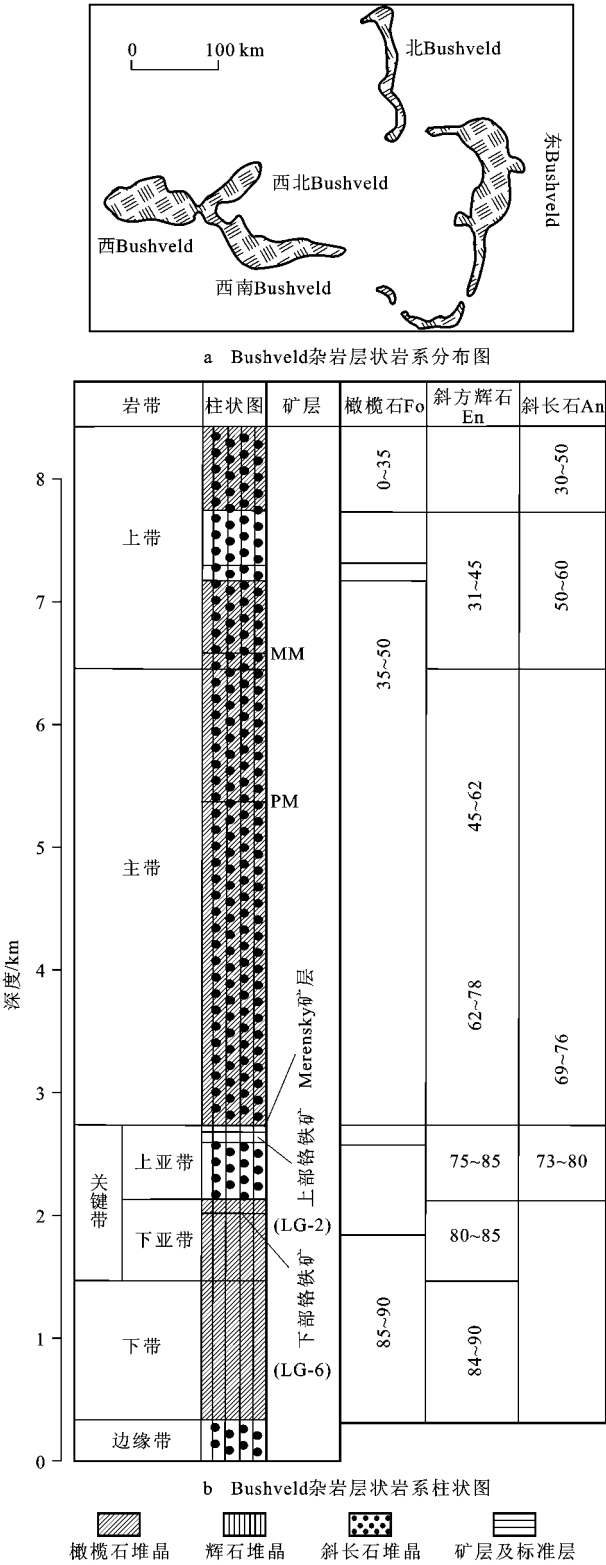
Bushveld 杂岩体、Great Dyke、Stillwater 等。现以 Bushveld 为例进行简述。

Bushveld 杂岩体主要由层状镁铁质-超镁铁质岩石组成,东西长 450 km,南北宽 250 km,其面积大于 60 000 km²,形成时代为 2.06 Ga^[3]。多期次岩浆活动形成厚近 10 km 的岩层,最后的火成事件是

Lebowa花岗岩套, 侵位于镁铁质-超镁铁质岩石的中心部位, 将 Bushveld 岩层切割分为东、西、西南、西北几个半圆形的块体和一个向北部伸出的翼状体(图 1)。

镁铁质-超镁铁质岩套分 5 个带, 从下而上分别为: ①边缘带(厚 0~800 m), 由苏长岩和少量辉石岩组成; ②下带(厚 800~1 300 m), 主要由古铜辉石岩、斜方辉石橄榄岩、纯橄榄岩组成; ③关键带(厚 1 300~1 800 m), 又分上、下两个亚带^[23-24], 下亚带主要由古铜辉石岩、铬铁矿和一些斜方辉石橄榄岩组成, 上亚带以出现斜长石堆晶为标志, 下部由斜长岩、苏长岩和少量古铜辉石岩组成, 上部(从 UG-1 铬铁矿层基底单元开始)是由铬铁矿、斜方辉石橄榄岩、古铜辉石岩、苏长岩和斜长岩组成, 顶部是 Merensky 矿层; ④主带(厚 3 000~3 400 m), 由苏长岩、辉石岩和斜长岩组成; ⑤上带(厚 2 000~2 800 m), 由铁辉长岩和铁闪长岩组成^[25-26]。岩体结构最显著的特征具有典型的层状构造和韵律结构, 从下带到上带镁橄榄石 Fo 由 85~90 演变到 80~82、35~50、0~35; 顽火辉石 En 由 84~90 演变到 80~85、70~85、62~78、45~62、31~45; 钙长石 An 从临界带到上带由 73~80 演变到 69~76、50~60、30~50。

硫化物、铬铁矿、磁铁矿相伴生的层状矿床出现在 Bushveld 杂岩体中。其中最重要的是上临界带中的 Merensky 矿层、UG-2 铬铁矿层(图 1)和发育于北翼接触带的 Platreef 矿床。Merensky 矿层分布较广, 在西南、西北、东和北 Bushveld 皆有发育。在西北 Bushveld 的 Merensky 单元最厚, 约 25 m, 西南和东 Bushveld 厚约 10 m。Merensky 矿层 Ni 平均质量分数为 0.15%, Cu 为 0.06%, PGE 为 6.21×10^{-6} , 铂族金属量 26 161 t; UG-2 铬铁矿层在西南、西北、东 Bushveld 皆有发育。UG-2 铬铁矿层的铂族资源比 Merensky 矿层更大, UG-2 铬铁矿层旋回厚度由 15 m 变化到 400 m, 在西 Bushveld 主要的铬铁矿厚度为 70~130 cm, 堆晶相铬铁矿质量分数 60%~90%, 填隙相为斜长石和斜方辉石, 下部是粒状结构, 向上部为嵌晶结构, 上覆为斜方辉石橄榄岩和二辉橄榄岩或含长辉石岩, 在这里 UG-2 铬铁矿层总厚达 50 m。UG-2 铬铁矿层 Ni 平均质量分数为 0.04%, Cu 为 0.02%, PGE 为 5.70×10^{-6} , PGE 金属量 32 730 t; Platreef 矿床不是层状的, 但属于接触带层控型矿床, 分布于 Bushveld 岩体的北翼, 是一组与 Bushveld 杂岩的下带、临界带、主带和上带相当的镁铁质-超镁铁质岩组成, 向西倾斜 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 翼长约 110 km, 岩体由北向南分别与



注: MM—Bushveld 杂岩的主要磁铁矿层; PM—Bushveld 杂岩的辉石标准层(辉石是作为易变辉石和普通辉石出现)^[27]。

图 1 Bushveld 杂岩体中岩石类型层序中斜方辉石 En 和橄榄石 Fo 及斜长石 An 的变化

Fig. 1 Contents of the Anorthite in Plagioclase and MgNo in Orthopyroxene and Olivien of the Bushveld Complex

花岗岩、白云岩、铁石英岩、页岩和石英岩相接触,在接触带上发育了Platreef矿床。Platreef矿床在形成过程中受到很大的混染,总是出现白云岩捕虏体,尽管数量上有所变化,在下盘与白云岩接触处最发育,范围最广(直径达到100 m)。较小的捕虏体大部分变成钙-硅酸盐岩,20 m厚的蛇纹石化辉石岩,包含蛇纹石化的橄榄岩和磁铁矿覆盖钙-硅酸盐岩捕虏体。Platreef矿层Ni平均质量分数为0.41%,Cu为0.20%,PGE为 4.12×10^{-6} ,PGE金属量6582 t^[8]。

由此可见,大型层状岩体中的铂族矿床一般呈薄层状,分布范围很大,质量分数达到 10^{-6} ,具有微量硫化物伴生致使Ni平均质量分数可达0.04%~0.15%,Cu可达0.02%~0.06%等特点,另外Platreef矿床是层状岩体边部的接触带型矿床,白云岩的同化混染有利成矿。伴生硫化物稍高,Ni平均质量分数可达0.41%,Cu可达0.20%。铂族矿床的这些产状特点对在其他类似层状岩体中找矿具有重要参照意义。

2 Sudbury 矿床属陨击成因,没有找矿参照意义

Sudbury矿床是加拿大19世纪最早发现的一个超大型Ni-Cu硫化物矿床,岩体呈盆状,面积约1300 km²,形成时代1.85 Ga^[8]。岩盆自下而上由细粒的边缘苏长岩(Sublayer)、粗粒苏长岩、辉长岩和花斑质岩石组成。矿体分布于岩盆底部接触带苏长岩中、底部港湾处以及岩体周边向外放射状分布到石英闪长岩岩枝中。长期以来,由于岩体具有层状结构,被认为是典型的通过就地熔离-重力分异形成的大型层状岩体铜镍硫化物矿床,从而引起地质学家和矿业公司将大型层状岩体作为铜镍硫化物矿床研究和勘查的目标,并投入了很大力量在Bushveld、Duluth、Great Dyke、Kieglapait、Muskox、Skaergaard以及Stillwater等大型层状岩体的底部寻找Cu、Ni硫化物矿床。经过半个多世纪的努力,都没有发现具有重要经济意义的硫化物矿床。后来的深入研究发现Sudbury矿床属陨击成因,同位素和热力学模式研究认为整个侵入体可能为一碰撞成因的熔融岩席,硫化物来自撞击区内深部镁铁质岩体中早已存在的硫化物的熔融,全世界只有这一个实例,没有参照意义^[28-31]。

3 小岩体成矿系统

3.1 小岩体矿床

小岩体矿床是指那些经过深部预富集的含矿岩

浆上侵形成的“岩体规模相对小”的岩浆矿床。岩浆岩体的面积可以大到 $n(n < 10 \text{ km}^2)$,小到零零几平方千米;一般为1 km²至几平方千米或1 km³至几立方千米,或更小。在岩体的内部和(或)附近的围岩中形成的矿体却“相对大而富”(表1中序号为5~15的矿床皆属小岩体矿床)。由此可见,除Sudbury矿床外,世界最大的这类矿床如Noril'sk-Talnakh、金川、Pechenga、Voisey's Bay等,中国所有这类矿床都是小岩体矿床,可见这类矿床是岩浆镍铜硫化物矿床的主要类型。

小岩体矿床的主要特征就是岩体小、矿床大而富。以金川矿床为例,岩体面积为1.34 km²,延深约1 km,楔形变小至尖灭,岩体体积小于1 km³,镍储量约 $546 \times 10^4 \text{ t}$,铜储量约 $389 \times 10^4 \text{ t}$ 。如此巨量的金属怎么产在这么小的岩体之中?有的学者估算这样大的金属储量至少需要30~300 km³的镁铁质岩浆参与成矿^[32-33]。金川矿床现有岩体不足1 km³,90%以上参与成矿但本身矿质亏损的那些岩浆到哪里去了?这是所有小岩体矿床成因都要回答的问题。

3.2 小岩体的成矿模式

依据上述特征,结合小岩体矿床的成矿过程建立了小岩体的成矿模式(图2)。

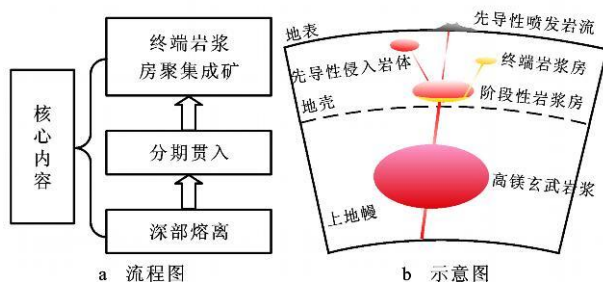


图2 小岩体成矿模式

Fig. 2 Model of Small Intrusions Mineralization

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。来自深部地幔的岩浆多次涌进地壳深部的岩浆房中,由于物理化学条件的变化发生分离结晶作用以及可能的(不是必须的)与围岩发生同化混染或有外来硫加入,致使岩浆达到硫过饱和,发生熔离作用,在重力作用参与下,岩浆房中的液体分异成为不含矿岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆等部分,然后向现存空间(地表或地壳浅部)一次或多次脉动式喷发-贯入成岩成矿。一般来说,经过结晶、分异、熔离后的不含矿岩浆的体积,比贫矿岩浆、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喷溢出地表或侵入到

不同的空间,形成喷发岩流(Noril'sk-Talnakh、白马寨)或侵入岩体群(金川、喀拉通克、红旗岭等)。剩余的岩浆、贫矿岩浆、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、图拉尔根等),也可以分别贯入不同的空间成岩、成矿(红旗岭1、3、7号)。相对于就地熔离的矿床而言,这种深部熔离-贯入矿床的岩体体积小得多,含矿率和矿石品位也高得多,所以这种成矿作用导致形成小岩体大矿床,即所谓的“小岩体成大矿”。这个模式简要概括为深部熔离预富集-分期贯入-终端岩浆房聚集成矿。

3.3 小岩体成矿系统

3.3.1 成矿背景

这类矿床的地质背景主要有大陆陆内或边缘裂解背景下的 小侵入体矿床(金川、Pechenga、Voisey's Bay);造山带后碰撞伸展背景的小侵入体矿床(喀拉通克、红旗岭、黄山、黄山东、图拉尔根、葫芦、香山等);大火成岩省背景下的 小侵入体矿床(Noril'sk-Talnakh、白马寨、金宝山等)。

3.3.2 邻近深大断裂

小岩体矿床一般都邻近深大断裂,这种断裂有时耦合于重要的地壳缝合带,如俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 地区的 20 多个岩体均沿 Noril'sk-Kharaelakh 深断裂带分布,主要集中分布于 Talnakh、Noril'sk 矿集区中。这些岩体侵入未变质的泥盆系一下二叠统沉积地层,形成厚度 0~300 m、呈长宽比很大的岩席。3 个含矿岩席中, Kharaelakh 呈三角形,而 Talnakh 和 Noril'sk 岩体则呈宽度小于 2 km、长度达 15~20 km 的“隧道状”岩席。这种产状显示岩浆在快速上侵喷出地表的同时,后继性的含矿岩浆沿深断裂的次一级层状裂隙侵入成岩成矿。

中国的小岩体矿床也表现出这一特征,如金川南侧华北地块与祁连山之间的缝合带,红旗岭南缘辉发河深断裂带,喀拉通克北缘额尔齐斯北西向深断裂带,白马寨北西之哀牢山—红河深断裂带等,它们及其次级羽状裂隙为地幔岩浆上升成岩、成矿,提供了通道和储矿空间。

深断裂是重大构造岩浆事件的产物,也是地壳应力长期聚集和突然释放的表现形式之一。由于深断裂的减压作用,导致深部岩浆房的不含矿岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆脉动式快速上侵,大量的不含矿岩浆喷出地表或侵入浅部空间,贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可能由于相对较重沿着深大断裂的次级裂隙侵入到终端岩浆房成岩成矿。

3.3.3 原生岩浆

小岩体矿床的原生岩浆主要有高镁拉斑玄武岩浆、苦橄质岩浆和科马提岩浆^[34]。本文中表 1 涉及的矿床大多属玄武质岩浆、苦橄质岩浆及其演化的产物。

3.3.4 深部岩浆作用(先导性岩浆、继发性岩浆)

来自深部地幔的岩浆多期次涌进地壳中的深部岩浆房,深部岩浆房的环境是相对长期的、稳定的,只有大的构造岩浆事件(构造运动、深层地震等)促成深部岩浆房中的岩浆脉动式快速上升。岩浆房上部的不含矿岩浆先期喷出地表或侵入浅部空间,形成矿质亏损的喷发岩流或侵入岩体群,如 Noril'sk-Talnakh 上覆火山岩流中的 Nd 层^[35];四川杨柳坪地区铂族显著亏损的峨眉山玄武岩中段^[36-37];金川外围的茅草泉、塔马子沟、V 号异常等岩体;喀拉通克、红旗岭矿集区的那些无矿岩体群等。这部分先侵入的岩浆量大,密度较小,矿质亏损统称先导性岩浆。

所谓继发性岩浆是指位于深部岩浆房中下部的不含矿岩浆、含矿岩浆(贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆)。在岩浆快速上升的过程中,继发性岩浆跟随先导性岩浆上侵可以到达同一水平高度,如喀拉通克、红旗岭、Pechenga;也可能由于密度不同到达不同水平空间,继发性岩浆由于密度较大,往往侵入于较低水平高度的终端岩浆房成岩成矿,如金川、白马寨、金宝山、Noril'sk-Talnakh。

先导性岩浆一般是大规模的、大质量的;继发性岩浆一般是小质量的、小规模。先导性岩浆往往指示了岩浆深部预富集作用的存在;继发性岩浆指示了现存成矿作用的空间。

3.3.5 继发性岩浆的成矿作用

依据含矿岩浆进入现存空间方式或聚集方式,小岩体矿床有 4 种类型。

(1)复式贯入成矿:不含矿岩浆、贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆多次分别贯入现存空间成岩成矿,先侵入的是不含矿岩浆、贫矿岩浆,后侵入的是富矿岩浆、矿浆。它们一般由上而下依次分布,不含矿岩浆和贫矿岩浆没有明显的分界;贫矿岩浆和富矿岩浆可以没有明显分界(喀拉通克),也可以分界截然(金川);矿浆和富矿之间都是侵入关系,矿浆是晚期贯入的。

(2)单式贯入成矿:在有的同源岩浆成矿区(红旗岭),贫矿岩浆、富矿岩浆和矿浆既可以复式贯入同一空间(1 号岩体),也可以分别贯入不同的空间(3、7 号

岩体)聚集成矿。3 号岩体是由贫矿岩浆贯入聚集成矿,盆状岩体底部全部由星点状贫矿组成;7 号岩体呈脉状,是由富矿岩浆贯入成矿,96%的体积都由海绵陨铁状矿石组成,这两者称单式贯入成矿。

(3)中心式贯入成矿:白马寨矿床呈扁柱体,柱体的边缘到中心分别由辉长岩、辉石岩和橄榄岩组成。辉石岩有细粒边缘相,含星点状矿石,与其内的橄榄岩矿化不连续。前者呈星点状,后者呈海绵陨铁状,接触界线清楚,可能也不是同期次的产物。块状矿位于柱体中心,与海绵陨铁状矿石界限截然,属晚期贯入成矿。

(4)反向复式贯入成矿:类似于复式贯入成矿,但先侵入的是不含矿岩浆、贫矿岩浆,后侵入的是富矿岩浆,矿浆却由下而上反向分布,反映了一个独特的脉动式贯入构造背景^[38-41]。

4 通道成矿作用

4.1 通道成矿作用的提出

在大型层状岩体底部长期寻找 Ni-Cu 硫化物矿床的实践失败以后,地质学家们依据 Noril'sk-Talnakh 的研究和 Voisey's Bay 的发现与研究,提出了通道成矿作用^[35, 42-43]。所谓通道成矿作用是基于质量平衡的计算认为,成矿的岩浆房应当是一个开放系统,当新的岩浆注入时,主要由于围岩的同化混染或有外来硫的加入导致硫过饱和,发生硫化物的熔离作用,硫化物乳珠就地或沿通道移动到适当地方沉降下来形成矿体,而成矿元素亏损的岩浆随着新岩浆的不断补充而被挤出,形成新的不含矿岩体或喷出地表的熔岩流。通道中硫化物乳珠不断沉降富集的地方就形成了矿床^[35]。

4.2 Noril'sk-Talnakh 矿床成矿机制

沿着近南北向的 Noril'sk-Kharaelakh 断层, Talnakh 和 Noril'sk 是由北向南分布的相距几十千米的两个矿集区。北部矿集区主要由 Kharaelakh 和 Talnakh 矿床组成,南部矿集区主要由 Noril'sk-1 矿床组成,所有这些矿床都呈岩席状,每个矿床的岩席面积可达数十平方千米,厚度 0~300 m,岩席体积一般达几立方千米,皆属小岩体矿床。

通道成矿机制最初是在研究该矿床的基础上提出的,后来几经发展和修改,提出现在的成矿模式(图 3)^[35, 42]。来自地幔的岩浆到达深部岩浆房,由于花岗质地壳的混染,硫达到过饱和,发生硫化物的熔离作用。岩浆房上部亏损亲铜元素和铂族的岩浆继续上升喷出地表形成 Nd_{12} 熔岩流,同时这些岩浆

侵入到喷发岩下部的沉积岩中形成不含矿的 Lower Talnakh 侵入体,深部岩浆熔离的硫化物残留在岩浆房中。

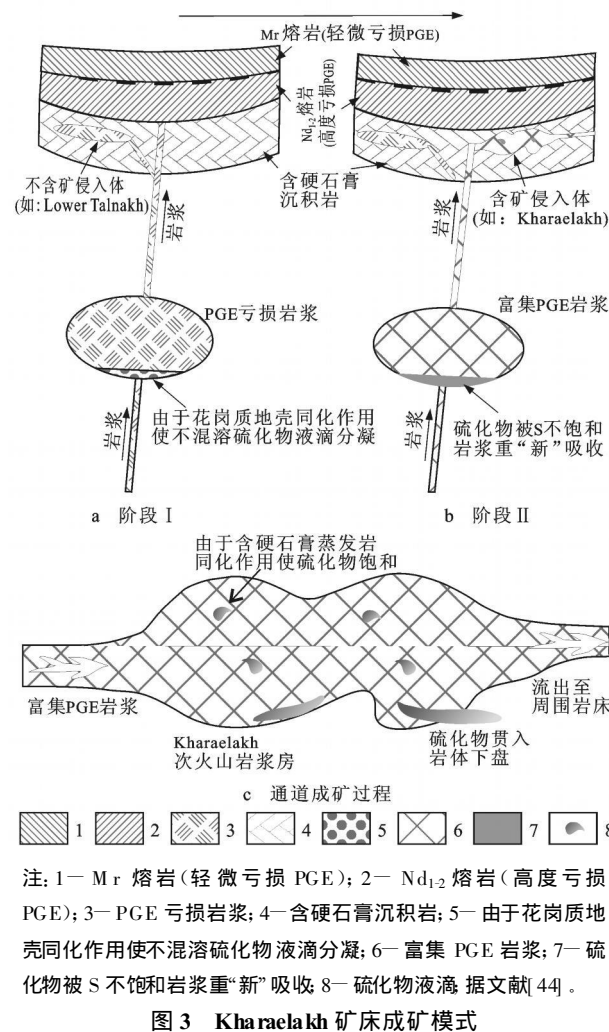


图 3 Kharaelakh 矿床成矿模式
Fig. 3 Model for the Formation of Ni-Cu PGE Sulfide Ores in the Kharaelakh Intrusion

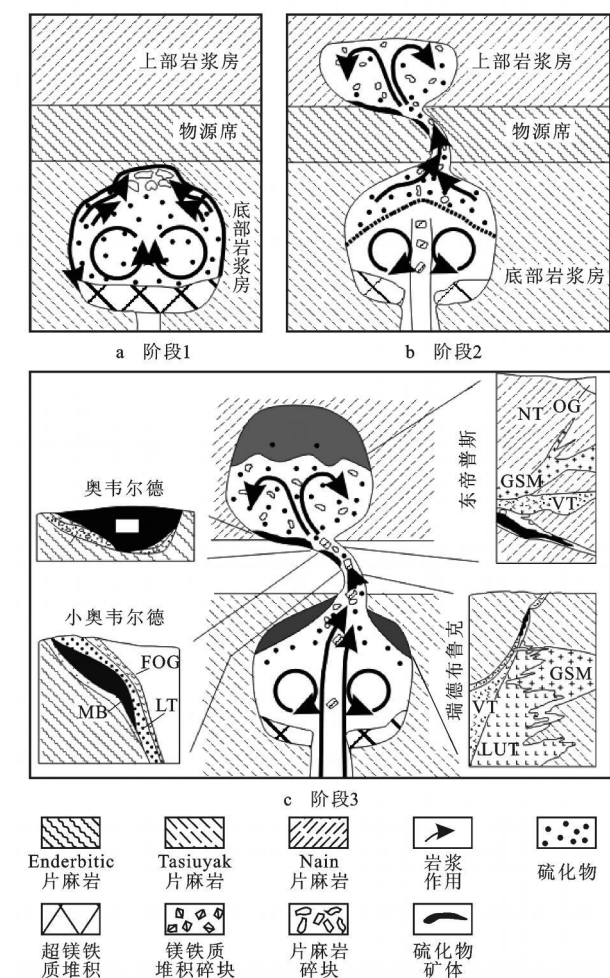
来自 Nd_{12} 熔浆在深部阶段岩浆房中分离出液相硫化物, Morongovsky 熔浆进一步上升(图 3a), 然后被新的来自地幔的硫不饱和岩浆重熔形成富集铂族的岩浆(图 3b)。富集铂族的岩浆与含硬石膏的蒸发围岩在较高的层位反应, 产生不混溶的液态硫化物, 其具有高的铂族质量分数和更高的 $\delta^{34}S$ 。液态硫化物占据 Kharaelakh 岩浆通道系统中液相骤降部位形成矿床(图 3c)。

由于后续岩浆继续涌进岩浆房, 原来残留的硫化物再吸收新岩浆中的亲铜元素和铂族, 致使硫化物更加富集亲铜元素和铂族。新的轻微亏损的岩浆喷出地表(Mr 层)(图 3a)。岩浆房中聚集了富集亲铜元素和铂族的富矿岩浆, 由于后续岩浆的不断涌入, 将富矿岩浆挤到 Kharaelakh 现存空间(图 3b),

与含硬石膏的蒸发岩的围岩同化混染成矿(图 3c)。这样一种成矿模式也基本适合 Noril'sk-1 和 Tanakh 矿床。

4.3 Voisey's Bay 矿床成矿机制

Voisey's Bay 矿床为一个 1.334 Ga 的橄长岩质侵入体, 侵入于太古代一元古代片麻岩系中, 岩体地表呈梨形, 东西延伸约 6 000 m, 东部岩体约几平方千米, 为梨的主体, 西部为断续延伸的细脉, 状如梨把。东部梨体被认为是东部上岩浆房, 西部脉体向下延深达 2 000 m, 终止于西部下岩浆房。不同类型的 Voisey's Bay 矿床就赋存于从西部下岩浆房到东部上岩浆房的岩浆通道和上岩浆房的底部相关部位。矿床的成矿机制如图 4。



注: OG—橄长岩; NT—橄长岩; GSM—花岗岩、霞石正长岩及二长岩; VT—杂色橄长岩; LUT—淡色英闪岩; FOG—枝状橄长岩; LT—斑状橄长岩; MB—岩角砾岩; 据文献[8]。

图 4 Voisey's Bay 矿床成矿机制

Fig. 4 Model for the Formation of Voisey's Bay Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit

成矿过程分为 3 个步骤(图 4): ①岩浆上升到 Tasiuyak 片麻岩内的下岩浆房内, 橄长石发生结晶

并形成超镁铁质堆积, 岩浆与崩塌顶部的片麻岩碎块反应, 使得硫饱和, 发生硫化物的熔离作用; ②新的镍不亏损岩浆涌进下岩浆房使得早期的含硫化物超镁铁质堆积破碎, 并和早期残留岩浆一起被推动流向 Nain 片麻岩中的上岩浆房, 当输送这些硫化物时, 硫化物在压力释放的适当部位沉积下来形成矿体; ③晚期岩浆继续流过这个系统, 加速硫化物和部分片麻岩包体的反应, 使得硫化物进一步富集了亲铜元素, 并输送到达上岩浆房下部而扩散开, 形成上岩浆房的底部矿体。

5 认识与讨论

5.1 大型层状岩体有利铂族成矿

世界最大的铂族矿床差不多都赋存于大型层状岩体 Bushveld 中。由 Bushveld 可见, Merensky 矿层、UG-2 矿层和 Platereef 矿床的共同特征是含微量硫化物, 硫化物本身的铂族质量分数特别高, 因此形成了特别巨大的铂族矿床。类似的低硫化物富铂族矿层也发现于 Great Dyke 和 Stillwater 等大型层状岩体中, 这 3 个是从几万到几百平方千米规模不等的层状岩体。中国没有发现这种大型层状岩体, 但却找到像金宝山这样几平方千米的低硫化物富铂族的小型层状岩体, 赋存数十吨铂族, 所以从几平方千米到几百平方千米之间的这种层状岩体在中国还具有寻找铂族矿床的空间, 值得引起重视。

5.2 Ni-Cu 硫化物矿床的成矿作用

这类矿床的两种成矿机制即深部预富集(熔离)-多期贯入-终端岩浆房聚集成矿和深部预富集(熔离)-通道成矿的共同点就是在深部预富集(熔离)的基础上解释了“小岩体成大矿”。它们的不同点就是: 矿床的现存空间是封闭型的终端岩浆房还是开放型的岩浆通道? 含矿岩浆进入现存成矿空间是由于剧烈的构造应力释放促使其脉动式上侵还是由于后续岩浆的连续涌进, 卸载硫化物并挤出亏损岩浆? 笔者的观点倾向于前者。因为这类矿床是地幔镁铁质岩浆进入地壳成矿的产物, 深部岩浆房中的预富集熔离作用, 需要一个相对长期稳定的物理化学环境, 对应于地壳运动相对平静、应力逐渐集中的构造平稳阶段。岩浆沿通道上升, 通常是相对短暂的、快速的, 对应于地壳运动剧烈的应力爆发作用。这一特征显然不适于岩浆在通道中发生熔离成矿作用。

5.3 先导性岩浆的找矿指示意义

先导性岩浆喷出地表或侵入浅部空间后, 形成矿质亏损的喷发岩流或侵入岩体群。它们和继发性

岩浆形成的矿床有以下组合关系:①先导性喷发岩流和下覆地层中的侵入岩席矿床(Noril'sk)或侵入岩体矿床(白马寨)的关系;②先导性侵入岩体群与下覆地层中的侵入岩体矿床(金川)的关系;③先导性侵入岩体群与同一层位地层中侵入岩体矿床(红旗岭、喀拉通克、黄山、图拉尔根)的关系等。由于先导岩浆岩流(体)与继发性岩浆矿床往往是同源、同期不同阶段的产物,它们在地质、地球化学方面应该有密切的同源演化关系;先导性岩浆岩流(体)往往显示矿质亏损,继发性岩浆体多为矿质富集。因此,加强对先导性岩浆岩流(体)的研究与发现,就为找出继发性岩浆形成的矿床提供了基础。

参考文献:

- [1] Li C S, Rimpby E M. New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [2] Tang Z L. Small Intrusion Making Large Ore: Significance for the Exploration of Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit[C] // Li W Y. Proceedings of Xi'an International Ni-Cu (Pt) Deposit Symposium 2009. Beijing: Science Press, 2009: 67-70.
- [3] Buick I S, Maas R, Gibson R. Precise U-Pb Titanite Age Constraints on the Emplacement of the Bushveld Complex, South Africa[J]. Journal of the Geological Society, 2001, 158(1): 3-6.
- [4] Hatton C J. Mantle Plume Origin for the Bushveld and Ventersdorp Magmatic Provinces[J]. Journal of African Earth Sciences, 1995, 21(4): 571-577.
- [5] Hamilton P J, O'Nions R K, Evensen N M. Sm-Nd Dating of Archaean Basic and Ultrabasic Volcanics[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977, 36(2): 263-268.
- [6] Pirajno F. Hotspots and Mantle Plumes: Global Intraplate Tectonics, Magmatism and Ore Deposits[J]. Mineralogy and Petrology, 2004, 82(3/4): 183-216.
- [7] Premo W R, Helz R T, Zientek M L, et al. U-Pb and Sm-Nd Ages for the Stillwater Complex and Its Associated Sills and Dikes, Beartooth Mountains, Montana: Identification of a Parent Magma[J]. Geology, 1990, 18(11): 1065-1068.
- [8] Naldrett A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration[M]. New York: Springer, 2004.
- [9] Kamo S L, Czamanske G K, Krogh T E. A Minimum U-Pb Age for Siberian Flood-basalt Volcanism[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(18): 3505-3511.
- [10] Bayanova T B, Voloshin A V. U-Pb Dating of Zircon Megacrysts (8 sm) from Amazonite Rand-pegmatite of Mt. Ploskaya, Baltic Shield[C] // Committee of European Union of Geosciences Conference. EUG-10. Strasbourg: European Union of Geosciences Conference, 1999: 153.
- [11] Amelin Y, Li C S, Naldrett A J. Geochronology of the Voisey's Bay Intrusion, Labrador, Canada, by Precise U-Pb Dating of Coexisting Baddeleyite, Zircon, and Apatite[J]. Lithos, 1999, 47(1/2): 33-51.
- [12] 汤中立, 杨杰东, 徐士进, 等. 金川含矿超铁镁岩的 Sm-Nd 定年[J]. 科学通报, 1992, 37(10): 918-920.
- [13] Zhang M J, Kamo S L, Li C S, et al. Precise U-Pb Zircon-baddeleyite Age of the Jinchuan Sulfide-ore-bearing Ultramafic Intrusion, Western China[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(1): 3-9.
- [14] 郝爱华, 顾连兴, 李绪俊, 等. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床的成矿时代讨论[J]. 矿床地质, 2005, 24(5): 521-526.
- [15] Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, et al. Geochronology and Petrogenesis of the Post-orogenic Cu-Ni Sulfide-bearing Mafic-ultramafic Complexes in Jilin Province, NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 781-797.
- [16] 陶 琰, 马言胜, 苗天成, 等. 云南金宝山超铁镁岩体锆石 SHRIMP 年龄[J]. 科学通报, 2008, 53(22): 2828-2832.
- [17] 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等. 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[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2451-2256.
- [18] 张作衡, 柴凤梅, 杜安道, 等. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4): 285-293.
- [19] 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2324-2328.
- [20] Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, et al. 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[J]. Chemical Geology, 2004, 209(3/4): 233-257.
- [21] 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 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, 1998.
- [22] 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 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[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3027-3035.
- [23] Cameron E N. Evolution of the Lower Critical Zone, Central Sector, Eastern Bushveld Complex, and Its Chromite Deposits[J]. Economic Geology, 1980, 75(6): 845-871.
- [24] Cameron E N. The Upper Critical Zone of the Eastern Bushveld Complex: Precursor to the Merensky Reef[J]. Economic Geology, 1982, 77(6): 1307-1327.
- [25] Gruenewaldt G V. The Main and Upper Zones of the Bushveld Complex in the Roossenekal Area, Eastern Transvaal[J]. Transactions of the Geological Society of South Africa, 1973, 76: 207-227.
- [26] Molyneux T G. A Geological Investigation of the Bushveld Complex in Sekhukhune and Apart of the Stelpoort Valley[J]. Transactions of the Geological Society of South Africa, 1974, 77: 329-338.
- [27] Naldrett A J, Cameron G M, VonGruenewaldt G, et al. The Formation of Stratiform PGE Deposits in Layered Intrusions[M]. Dordrecht, NATO Advanced Research Workshop, 1987.

- [28] Dietz R S. Sudbury Structure as an Astrobleme[J]. The Journal of Geology, 1964, 72(4): 412-434.
- [29] Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, et al. Re-Os Isotopic Systematics of Ni-Cu Sulfide Ores, Sudbury Igneous Complex, Ontario: Evidence for a Major Crustal Component[J]. Earth Planetary Science Letters, 1991, 105(4): 416-429.
- [30] Grieve R A. An Impact Model of the Sudbury Structure[C] // Lightfoot P C, Naldrett A J. Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium. Noril'sk; Ontario Geological Survey, 1994: 119-132.
- [31] Maier W D, Li C S, Waal S A. Why Are There No Major Ni-Cu Sulfide Deposits in Large Layered Mafic-ultramafic Intrusion [J]. The Canadian Mineralogist, 2001, 39(2): 547-556.
- [32] Li C S, Xu Z H, Waal S A, et al. Compositional Variations of Olivine from the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, Western China: Implication for Ore Genesis[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39(2): 159-172.
- [33] 宋谢炎, 肖家飞, 朱 丹, 等. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 153-163.
- [34] Arndt N T, Leshner C M, Czamanske G K. Mantle-derived Magmas and Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits[C] // Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. Economic Geology 100th Anniversary Volume. Littleton: Society of Economic Geologists, 2005: 5-23.
- [35] Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, et al. Geology and Geochemistry of Intrusions and Flood Basalts of the Noril'sk Region, USSR, with Implication for the Origin of the Ni-Cu-PGE Ores[J]. Economic Geology, 1992, 87(4): 975-1004.
- [36] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Ni-Cu-(PGE) Magmatic Sulfide Deposits in the Yangliuping Area, Permian Emeishan Igneous Province, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(7): 831-843.
- [37] Song X Y, Zhou M F, Keays R R, et al. Geochemistry of the Emeishan Flood Basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implications for Sulfide Segregation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 152(1): 53-74.
- [38] 三金柱, 田 斌, 雷军文, 等. 新疆东天山新发现图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍矿床[J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 270.
- [39] 三金柱, 惠卫东, 秦克章, 等. 新疆哈密图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍-钴矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 307-316.
- [40] 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 606-617.
- [41] 刘 壮, 汤中立. 新疆哈密图拉尔根 Ni-Cu 硫化物矿床成矿模式研究[J]. 甘肃地质, 2010, 19(3): 1-8.
- [42] Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C, et al. Ni-Cu-PGE Deposits of Noril'sk Region, Siberia: Their Formation in Conduits for Flood Basalt Volcanism[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B: Applied Earth Science, 1995, 104: B18-B36.
- [43] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE Deposits: Key Factors in Their Genesis[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(3): 227-240.
- [44] Li C S, Ripley E M, Naldrett A J. A New Genetic Model for the Giant Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits Associated with the Siberian Flood Basalts[J]. Economic Geology, 2009, 104(2): 291-301.

《地球科学与环境学报》2010 年第 32 卷增刊(总第 123 期)已出版

为配合“第三届全国矿田构造与地质找矿理论方法研讨会”的召开,展示参会学者专家的最新研究成果,《地球科学与环境学报》编辑部从大量会议来稿中遴选出 99 篇优秀论文以增刊的形式结集出版。该增刊的刊期为:2010 年第 32 卷增刊(总第 123 期)。

“第三届全国矿田构造与地质找矿理论方法研讨会”于 2010 年 10 月在西安召开,是由中国地质学会地质力学专业委员会和中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会主办、长安大学与中国地质科学院地质力学研究所承办、中国科学院地球化学研究所等单位协办的。本次会议围绕区域成矿体系与矿田成矿系列找矿理论方法,金属矿田构造与找矿理论方法,煤铀油气田构造与预测理论方法,矿田构造应力场、构造地球化学、构造物理化学及成岩成矿实验,矿山地质和深部找矿与矿田整装勘查的理论方法等五个专题进行了研讨。会议提出了矿田地质学的新概念,讨论了成矿系统的时空结构及其构造控制,介绍了中国矿山地质的新成就,报道了国外大型矿床勘查策略和实例及国内危机矿山专项的重要进展,分析了矿田构造定量化测量方法、大陆碰撞构造、地质力学矿田构造的研究与发展、综合预测找矿技术方法和实践、花岗岩过程的元素行为与矿田类型以及构造岩相填图和岩穹控矿模式等新成果,报道展示了秦岭凤太矿田、东天山金铜矿田、云南、青海等地构造地球化学找矿突破和阿尔金地区铁矿找矿进展。