

新疆黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带岩浆通道成矿特征及其找矿意义*

宋谢炎¹, 邓宇峰², 颀 炜³, 郑文勤¹

(1 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 3 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098)

摘 要 自20世纪80年代以来, 中亚造山带南缘的北天山黄山-镜儿泉成矿带先后发现了黄山、黄山东、黄山南、图拉尔根等4处大型铜镍硫化物矿床, 香山和葫芦2处中型矿床, 以及一系列小型矿床和矿化岩体, 使该地区成为世界最重要的造山带型铜镍硫化物成矿带, 探明镍金属储量近100万t。近年来, 又陆续发现了一些新的矿床和含矿岩体, 说明仍然有很好的找矿潜力。中国学者针对这些含矿岩体的年代学、岩石学和矿床成因开展了大量研究, 获得了不少重要成果, 特别是, 最近笔者通过对北天山岛弧系统俯冲-碰撞过程中不同阶段玄武岩浆作用特点和规律的梳理, 对铜镍硫化物成矿的时代和构造条件形成了新的、更清晰的认识。然而, 目前对该成矿带干墩断裂南北两侧含矿岩体及所含矿体形态、产状、规模显著差异成因意义的系统研究仍然十分薄弱, 阻碍了对该成矿带岩浆通道成矿规律的深入理解。文章在上述新的研究成果基础上, 对该成矿带铜镍硫化物岩浆通道成矿规律和控制因素进行了系统分析, 目的是更好地理解造山带铜镍硫化物成矿规律, 并为未来的找矿方向提供依据。文章提出碰撞后早期阶段是成矿的最佳时期, 黄山-镜儿泉带的铜镍硫化物成矿作用是碰撞后早期阶段俯冲板片断离、软流圈上涌和强烈部分熔融、以及区域性右行走滑几种地质要素耦合的结果。

关键词 地质学; 岩浆铜镍硫化物矿床; 俯冲-碰撞过程; 岩浆通道系统; 找矿潜力; 黄山-镜儿泉成矿带

中图分类号: P618.41; P618.63; P578.2

文献标志码: A

Ore-forming processes in magma plumbing systems and significances for prospecting of Huangshan-Jingerquan Ni-Cu sulfide metallogenetic belt, Xinjiang, NW China

SONG XieYan¹, DENG YuFeng², XIE Wei³ and ZHENG WenQin¹

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2 School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 3 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract

Since 1980's, a series of Ni-Cu sulfide deposits have been discovered in the Huangshan-Jingerquan metallogenetic belt in the North Tianshan at the southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt, including four large deposits (Huangshan, Huangshandong, Huangshannan and Tulaergen), two medium-sized deposits (Xiangshan and Hulu) as well as a series of small deposits and mineralized complexes. These deposits contain Ni metal reserves of ~1.0 million tons. The discoveries make the Huangshan-Jingerquan the largest Ni-Cu metallogenetic belt worldwide. Some new discoveries along this belt in the last few years indicated a great prospecting potential.

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 41630316, 41772067, 41473050)资助

第一作者简介 宋谢炎, 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 从事岩浆矿床及幔源岩浆作用研究。Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2021-10-30; 改回日期 2022-11-30。孟秋熠编辑。

There are a lot of significant achieves on studies of metallogeny of the deposits and geochronology and petrology of the hosting mafic-ultramafic complexes along the belt in the past decades. Particularly, based on the studies of basaltic magmatism in the periods of subduction, collision and post-collision of the North Tianshan arc system, the timing duration and condition for the Ni-Cu sulfide mineralization along the Huangshan-Jingerquan belt have been better constrained. The differences in size, shape and occurrence of the intrusions and hosted ore bodies at the two sides of the Gandun fault have been rarely concerned about. Therefore, the processes of sulfide transportation and deposition along the metallogenetic belt have not been well addressed. We proposed that the early stage of post-collision is the best time for Ni-Cu mineralization. The Cu-Ni sulfide mineralization is the result of the coupling of several geological factors, such as subducted slab break-off, upwelling and intense partial melting of asthenosphere mantle, and regional dextral strike-slip in the early stage of post-collision.

Keywords: geology, magmatic Ni-Cu sulfide deposit, subduction-collision process, magma plumbing system, Ni-Cu prospecting potential, Huangshan-Jingerquan metallogenetic belt

全球大陆约40%的镍、95%以上的铂族元素和23%的钴蕴藏在岩浆硫化物矿床中,在中国,几乎全部的镍、铂族元素以及50%的钴来自这类矿床,其重要性不言而喻(宋谢炎等,2009;王焰等,2020)。由于岩浆硫化物矿床的成矿物质来源于地幔,而地幔柱可以诱发部分熔融程度高、规模大且连续的玄武岩浆活动,因此,与地幔柱有关的镁铁-超镁铁质岩体及科马提岩通常被认为是寻找大型-超大型岩浆硫化物矿床的优选对象。然而,世界各地的造山带也陆续发现了不少岩浆硫化物矿床,如:非洲博茨瓦纳Tati和Selebi-Phikwe中元古代铜镍成矿带(Maier et al., 2008)、西班牙古生代Aguablanca铜镍铂族元素矿床(Piña et al., 2010)、挪威古生代Bruvann铜镍矿床(Tucker et al., 1990)等,说明部分造山带也具备了岩浆硫化物成矿的地质条件(宋谢炎等,2019)。尽管这些矿床的金属品位和储量普遍低于与地幔柱有关的岩浆硫化物矿床,但由于造山带的面积远大于大火成岩省的面积,其找矿前景不容忽视。然而,造山带往往经历了俯冲、碰撞、碰撞后等多个构造演化阶段,不同阶段玄武岩浆活动的部分熔融程度和岩浆产量往往有很大区别,镁铁质岩体常常是多阶段岩浆侵入形成的杂岩体,不同岩相既可能是侵入接触关系,也可能是分异演化关系,而且岩浆的性质和成矿潜力也常有较大区别。因此,弄清哪个阶段的玄武岩浆活动最有利于成矿、具有哪些岩石学和矿物学特征,对于指导找矿目标岩体和岩相的选择具有非常重要的意义,并直接影响着找矿勘查的效果。

中国不仅造山带特别发育,而且在扬子地块周

缘的元古代造山带和其他多个古生代造山带都发现了岩浆硫化物矿床(Song et al., 2009; 2011; Qin et al., 2011; Xie et al., 2014; Deng et al., 2014; Zhu et al., 2017; Yao et al., 2018; Mao et al., 2018),是发现造山带型铜镍硫化物矿床最多的国家,这些矿床镍金属的储量总计约为300万t,约占中国全部铜镍矿床镍总储量的30%(宋谢炎等,2018a)。其中,青海东昆仑造山带夏日哈木超大型镍钴矿床是世界造山带中唯一镍金属储量超过100万t的岩浆硫化物矿床(Li et al., 2015; Song et al., 2016; 2020; Chen et al., 2021)。为提高这类矿床的找矿效率,取得新的深部找矿突破,有必要通过对典型成矿带的剖析,进一步明确以下问题:①造山带发育的哪个阶段最有利于大规模成矿;②含矿岩体不同岩相的地质特征、成因含义和找矿意义的差异;③有哪些比较直接的岩石学和矿物学找矿标志;④造山带铜镍硫化物成矿有哪些关键控制因素。

中亚造山带南缘中国境内发现了一系列大、中、小型铜镍矿床,其中黄山-镜儿泉成矿带发现的矿床数量最多、镍金属总储量较大,是世界造山带型铜镍硫化物成矿作用最强烈的成矿带、地质现象非常丰富(图1a~c,宋谢炎等,2018b)。2000年以来,该成矿带单个矿床成因研究取得了大量高水平的成果(Zhou et al., 2004; Mao et al., 2008; 2016; Qin et al., 2011; Song et al., 2011; Zhang et al., 2011; Deng et al., 2014, 2022; Wang et al., 2018),同时,也有一些重要的找矿新发现(王亚磊等,2017; Sun et al., 2019; Deng et al., 2020; 李卫东等, 2020)。本文以岩浆通道成矿模型为指导,结合前人的研究成果,根据笔者近年来对黄山-镜儿泉成

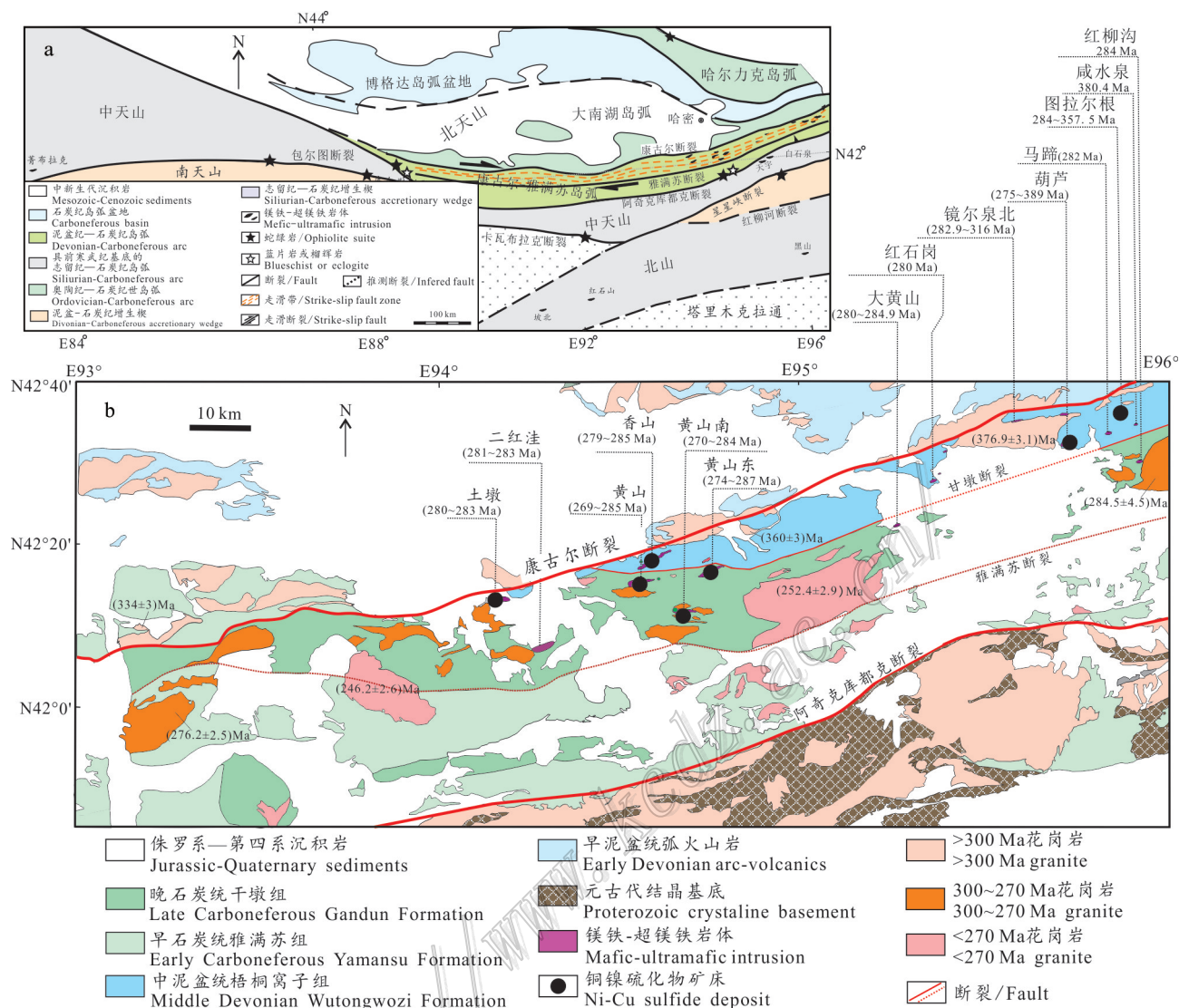


图1 中亚造山带北天山岛弧区域构造图(a)以及黄山-镜尔泉成矿带镁铁-超镁铁岩体分布简图(b)(据 Xiao et al., 2013; Song et al., 2013; 2021)

Fig. 1 Tectonic domains at southern margin of CAOB in NW China(a). The North Tianshan arc system is bounded by the Kelameili and Aqikkuduk faults and consists of the Harlik-Dananhu island arc in the North and the Kanggur-Yamansu arc in the South. Distribution of the mafic-ultramafic complexes along the Kanggur-Yamansu arc, the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu metallogenic (b) belt is located to the North of the Yamansu fault(after Xiao et al., 2013; Song et al., 2013; 2021)

矿带含矿岩体地质特征和成矿规律的研究,以及含矿岩相及含矿岩体围岩同位素年代学的研究成果(Song et al., 2021; 邓宇峰等, 2021),试图对该造山带铜镍硫化物成矿和找矿的上述4个问题进行系统分析和探讨,以期对造山带找矿方向提供参考。

1 中亚造山带南缘铜镍硫化物成矿的时空特点

中亚造山带是全球规模最大的显生宙造山带,

横贯中国北方,俄罗斯,蒙古国和多个中亚国家,发育多条重要成矿带。包括阿尔泰地区的铜-金-多金属成矿带;蒙古南部的斑岩铜矿带;哈萨克斯坦的金-铀成矿带和铁-锰-铜-多金属和稀有金属成矿带等(朱永峰等, 2007)。与周边国家相比,岩浆硫化物矿床是中国境内特有的优势矿种之一。例如,东段的吉林红旗岭大型铜镍矿床(Wei et al., 2013)、中段内蒙古的小南山和额布图等矿化岩体(党智财等, 2016),但绝大多数大中型铜镍硫化物矿床及含矿岩

表 1 中亚造山带南缘中国境内古生代镁铁-超镁铁质岩体年龄、含矿性对比

Table 1 Comparison of age and mineralization of Paleozoic mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian orogenic belt in China

构造单元	岩体	岩体形态	镍/铜储量/万 t	围岩	方法	年龄/Ma	岩性	含矿性	资料来源
准噶尔北缘	喀拉通克	串珠状,长 5 km,宽 1.5 km	25/42	下石炭统南明水组	LA-ICP-MS	308.1±3.6	闪长岩	无	Gao et al., 2013
						283.3±1.3	Y3 苏长岩	有	
					SHRIMP	281.1±1.5	G21 辉长岩	有	冯延清, 2017a
						320.5±2.5	Y5 辉长岩	无	
北天山黄山-镜儿泉成矿带	黄山东	菱形,长约 5.3 km,最宽 2.0 km	36/17	上石炭统干墩组	LA-ICP-MS	275±4	角闪辉长岩	无	Wang et al., 2014
					LA-ICP-MS	277±1	角闪辉长岩	无	陈继平等, 2013
					SIMS	280.3±1.9	橄榄辉长岩	无	Mao et al., 2018
					SIMS	281.4±2.2	橄榄二辉岩	有	Mao et al., 2018
					SHRIMP	283.4±3.0	橄榄辉长岩	无	Song et al., 2021
					LA-ICP-MS	284.2±2.0	斜长二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
	黄山	蝌蚪状,长约 2.5 km,最宽 0.7 km	33.8/17.3	上石炭统干墩组	LA-ICP-MS	282.7±1.4	辉长苏长岩	有	Song et al., 2021
					SHRIMP	280.5±1.9	二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
					SIMS	284±3	辉长岩	有	Qin et al., 2011
					SHRIMP	283±2	辉长苏长岩	无	Song et al., 2021
					SHRIMP	269±2	闪长岩	无	Zhou et al., 2004
					SHRIMP	284.1±2.3	二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
	黄山南	椭圆形,长约 5.2 km,宽约 1.3 km	据私人公司数据估计为大型	上石炭统干墩组	SHRIMP	279.2±2.6	二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
					SIMS	282.5±1	辉长岩	无	Zhao et al., 2015
					SIMS	278±2	辉长岩	无	Mao et al., 2016
					SHRIMP	270±5	辉长岩	无	Song et al., 2013
					SHRIMP	270±5	辉长岩	无	Song et al., 2013
北天山黄山-镜儿泉成矿带	二红洼	椭圆形,长约 3.33 km,宽约 2.6 km	弱矿化	上石炭统干墩组	LA-ICP-MS	283±2	橄榄辉长岩	无	Sun et al., 2013
					SHRIMP	281.3±3.5	二辉橄榄岩	无	Song et al., 2021
	土墩	椭圆形,长约 1.4 km,宽约 0.7 km	1.5/0.3	上石炭统干墩组	SHRIMP	280±3	辉长岩	无	Song et al., 2013
					SHRIMP	282.8±1.7	橄榄辉长岩	无	Song et al., 2021
	大黄山	椭圆形	弱矿化	上石炭统干墩组	SHRIMP	284.9±1.9	斜方橄榄岩	无	作者未发表数据
					SHRIMP	280.0±2	辉长岩	无	
					LA-ICP-MS	282.2±0.9	闪长岩	无	
	香山	藕节状,长约 10 km,宽 0.1~3 km	5/2	下泥盆统梧桐窝子组	SIMS	280±1	角闪辉长岩	有	Han et al., 2010
					SIMS	278.6±2	钛铁辉长岩	钛铁矿化	肖庆华等, 2010
					SIMS	283±2	辉长岩	无	李德东等, 2012
					LA-ICP-MS	280.1±1.5	角闪辉长岩	钛铁矿化	Shi et al., 2018
					LA-ICP-MS	279.2±1.4	钛铁辉长岩	钛铁矿化	Shi et al., 2018
北天山黄山-镜儿泉成矿带	红石岗	椭圆形, 0.57 km ²	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	LA-ICP-MS	280±1	辉长岩	无	师震等, 2019
	红石岗北	椭圆形,长 1.5 km,宽 0.9 km	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	LA-ICP-MS	276.1±5.4	橄榄辉长岩	无	王亚磊等, 2017
	葫芦	岩盆状,长约 1.4 km,宽 0.72	8/4	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	282.9±1.8	橄榄二辉岩	有	Song et al., 2021
					LA-ICP-MS	274.5±4	辉长闪长岩	无	孙涛等, 2010
					SIMS	282±1	辉长岩	无	Han et al., 2013
					SIMS	381±1.3	层状角闪辉长岩	无	
					SIMS	377±3	层状辉长岩	无	Zhao et al., 2018
					SIMS	389±3	岩墙状辉长岩	无	
	马蹄	马蹄形,长约 800 m,宽约 200 m	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	281.8±2.2	二辉橄榄岩	无	Song et al., 2021
	图拉尔根	超镁铁质岩墙,长约 800 m,宽 20~60 m	12/8	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	300.5±3	辉长岩	无	三金柱等, 2010
					SHRIMP	357.5±3	辉长岩	无	三金柱等, 2010
					SHRIMP	281.0±2.2	二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
	四顶黑山	豆荚状,长 28 km,宽 0.2~2 km	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	LA-ICP-MS	320.9±3	辉长岩	无	王国强等, 2012
	镜儿泉北	透镜状	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	281.7±2.5	二辉橄榄岩	有	Song et al., 2021
					SHRIMP	316±3.2	粗粒辉长岩	无	Song et al., 2021
	咸水泉	岩墙状,长 300 m,宽 50 m	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	380.4±3.3	辉长岩	无	Song et al., 2021
	红柳沟	岩墙状,长 800 m,宽 300 m	弱矿化	下泥盆统梧桐窝子组	SHRIMP	281.4±2.3	苏长岩	无	Song et al., 2021

续表 1

Continued Table 1

构造单元	岩体	岩体形态	镍/铜储量/万 t	围岩	方法	年龄/Ma	岩性	含矿性	数据来源
北天山白 鑫滩-海 豹滩成矿 带	白鑫滩	葫芦状,长约 3.1 km, 最宽 760 m	8.4/6.5	中奥陶统恰干布 拉克组	SHRIMP	286.5±3.5	角闪辉长岩	无	作者未发表数据
					LA-ICP-MS	287.3±3.1	橄榄辉长岩	有	赵冰冰等, 2018
					LA-ICP-MS	285±2	橄榄辉长岩	有	冯延清, 2017b
					LA-ICP-MS	286±2	橄榄苏长岩	有	Feng et al., 2018
北天山白 鑫滩-海 豹滩成矿 带	路北	岩盆状,长约 6.5 km, 宽 0.7~1.6 km	2.48/1	下石炭统小热泉 子组	TIMS	279.7±0.2	斜长二辉橄榄岩	有	Deng et al., 2020
					LA-ICP-MS	277.8±3.4	辉长岩	无	
					LA-ICP-MS	288±2	角闪辉长岩	无	Chen et al., 2018
	月牙湾	月牙状,约 0.8 km ²	0.26/0.45	下泥盆统大南 湖组	LA-ICP-MS	281.3±2.0	橄榄辉长岩	有	Sun et al., 2019
	圪塔山口	岩墙状,长 400 m,宽 10~40 m	中型	下泥盆统大南湖组	SIMS	282.6±1.9	辉长岩	无	
中天山	菁布拉克	纺锤状,2.5 km 长, 1.3 km 宽	0.42/0.11	古元古代那拉 提群	SHRIMP	431±6	辉石闪长岩	无	Yang et al., 2009
					LA-ICP-MS	281.2±0.9	辉长岩	有	毛启贵等, 2006
	天宇	岩墙状,长 2 km, 宽 40~70 m	小型矿床	中元古界星星 峡群	SIMS	280±2	辉长岩	无	Tang et al., 2011
	雅西	透镜状,2.8 km 长, 600 m 宽,1.43 km ²	弱矿化	中元古界星星 峡群	SHRIMP	297.3±4.9	辉长岩	无	Li et al., 2019
					SHRIMP	297.3±4.9	辉长岩	无	Li et al., 2019
北山	黑山	鸭梨状,长约 0.8 km, 宽约 0.47 km	12/4	中-上元古界青白 口系	TIMS	356.4±0.6	辉长岩	无	Xie et al., 2012
					TIMS	366.6±0.6	橄榄辉长苏长岩	无	Xie et al., 2012
					SHRIMP	357±4	辉长岩	无	Xie et al., 2012
	笔架山	纺锤状,长> 5.6 km, 宽约 2.1 km	弱矿化	下石炭统红柳 园组	SIMS	279.2±2.3	辉长岩	无	Qin et al., 2011
	红石山	鸭梨状,长约 5 km, 宽约 1 km,	3.36	下石炭统红柳 园组	LA-ICP-MS	281.6±2.6	橄榄辉长岩	无	Ao et al., 2010
					SIMS	286.4±2.8	橄长岩	无	Su et al., 2012
					SIMS	279.7±4.8	闪长岩	无	Qin et al., 2011
北山	罗东	眼球状,长约 2 km, 宽约 1.2 km	弱矿化	下石炭统红柳 园组	SIMS	284±2.3	辉长岩	无	Su et al., 2015
	坡一	透镜状,长约 22 km, 宽约 0.8 km	20/16.4	中元古界白湖群	SIMS	278±2	橄长岩	无	Xue et al., 2016
					SIMS	271±6.2	辉长岩	无	Xue et al., 2016
					SIMS	271±6.2	辉长岩	无	Ao et al., 2010
	坡十	近圆形,直径约 1.8 km	8.8/1.3	中元古界白湖群	SIMS	284±2.2	橄榄辉长岩	无	Qin et al., 2011
					SIMS	275.5±1.2	橄榄辉长岩	无	Ao et al., 2010
	启星	近椭圆形,长约 14.7 km, 宽约 7.3 km	弱矿化	元古界	SIMS	286.5±2.5	橄榄辉长苏长岩	有	Xue et al., 2019
东北地区	红旗岭	岩墙群	27.1/7	二叠纪黄莺屯组	SHRIMP	216±5	1 号辉长岩	有	Wu et al., 2004
					SHRIMP	272±3.6	5 号辉长岩	无	Hao et al., 2015
					SHRIMP	258.8±3.4	6 号辉长岩	无	Hao et al., 2015
	漂河川	透镜状,长约 0.63 km, 宽<0.25 km	1.1/0.35	二叠纪黄莺屯组	SHRIMP	217±3	4 号辉长岩	有	顾强等, 2007
内蒙古	黄花岗	岩墙状,长 1 km,宽 0.2 km	弱矿化	太古界五台系	LA-ICP-MS	262.4±1.1	辉长岩	无	党智财等, 2016
	额布图	岩墙状,长 0.42 km,宽 0.15 km	Ni: 3.5	元古代宝音图群	SHRIMP	294.2±2.7	斜方辉石岩	有	Peng et al., 2013
	小南山	岩墙状,长 1.2 km, 宽 10~140 m	弱矿化	元古代白云鄂 博群	LA-ICP-MS	272.7±2.9	辉长岩	无	党智财等, 2016
	布克	透镜状	弱矿化	新太古界乌拉山 岩群	LA-ICP-MS	258.1±1.8	方辉橄榄岩	无	党智财等, 2018

体分布于西段的新疆北部及相邻的甘肃西部(表1)。而且,除吉林红旗岭岩体群较年轻外(216~272 Ma, Wu et al., 2004; Hao et al., 2015),其他含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄均介于 260~435 Ma (Yang et al., 2009; Xie et al., 2012; 2014; 表1)。如表1所示,新疆北部泉成矿带的 Ni 金属储量约 100 万 t,是仅次于金川的中国第 2 大 Ni 资源基地。近年来又发现了大黄山、红石岗等矿化岩体(表1),该地区整体显示出较优越的成矿条件和较好的找矿潜力。

新疆北部由北向南可以划分为阿尔泰地块、准噶尔地块、天山褶皱带(进一步分为北天山、中天山和南天山)和塔里木地块等构造单元(图1a)。主要的岩浆硫化物含矿岩体分布在准噶尔地块北缘(喀拉通克)、北天山(黄山-镜儿泉成矿带)、中天山(西部的菁布拉克,东部的天宇和白石泉),以及塔里木地块北缘的北山褶皱带(坡北、红石山、罗东和黑山等;苏本勋等,2009;唐冬梅等,2009;颀炜等,2011; 2013; Xia et al., 2013)(表1)。其中,黄山-镜儿泉成矿带发现的镁铁-超镁铁质岩体及矿床最多(表1),近年来,该成矿带的西延方向发现了一系列矿床及含矿岩体,如:白鑫滩、路北、海豹滩等(Feng et al., 2018; 赵冰冰等,2018; Deng et al., 2020)。尽管这些岩体的岩石组合及年龄与该成矿带东部的岩体相似,但其围岩时代不同,与东部岩体成因联系的研究还不够充分,因此,暂时将其称为“北天山白鑫滩-海豹滩成矿带”(表1)。本文重点讨论黄山-镜儿泉成矿带的岩浆通道成矿特点及其隐含的找矿信息。

2 黄山-镜儿泉成矿带的基本格架及成矿岩浆通道的特点

黄山-镜儿泉成矿带北东东向展布于北天山岛弧系统的康古尔-雅满苏岛弧带北部(图1a、b),夹持于区域性的康古尔断裂和雅满苏断裂之间,长约 500 km,宽度小于 50 km;已经探明黄山、黄山东、黄山南和图拉尔根等 4 个大型矿床,土墩、葫芦、香山等 3 个中小型矿床,还有若干矿化岩体(王玉往等,2004; 2006; Sun et al., 2013; 赵云等,2016; 王亚磊等,2017; 师震等,2019; Song et al., 2021)。该成矿带的含矿岩体主要侵位于梧桐窝子组和干墩组中,尽管大量的地质和物探工作都显示侵位于这 2 套地层含矿岩体在几何形态、成矿规模等方面都存在显著差异,但其中蕴含的成因和找矿信息并未受到足够重视。

2.1 黄山-镜儿泉成矿带的基本格架

黄山-镜儿泉成矿带的干墩组和梧桐窝子组分别出露于干墩断裂的南北两侧(图1c)。梧桐窝子组厚约 5000 m,主要由浅变质的中酸性凝灰岩夹砂岩构成。干墩组厚约 6000 m,下部为碳质、粉砂质板岩夹大理岩,上部为变质砂(砾)岩夹薄层硅质岩。这 2 套地层的变质程度局部达到绿片岩相。根据古生物地层学方法和区域对比,烟墩幅 1:20 万地质图将干墩组和梧桐窝子组分别厘定为下石炭统和上石炭统。

然而,近年来锆石 U-Pb 年代学研究表明,侵入梧桐窝子组的中酸性岩体和镁铁-超镁铁质岩体形成于 370~389 Ma(图2d,周涛发等,2010; 三金柱等,2010; 王国强等,2012; Zhao et al., 2018),远远老于晚石炭世。考虑到地层古生物学方法的局限性,邓宇峰等(2021)对干墩组变质砂岩和碳质板岩以及梧桐窝子组变质砂岩和凝灰岩的碎屑锆石进行了 LA-ICPMS 定年,获得梧桐窝子组和干墩组碎屑锆石最小 U-Pb 年龄分别为 386~395 Ma 和 307~315 Ma,据此将它们的沉积时代纠正为中泥盆世和晚石炭世(图1c)。这不仅解决了地层与侵入岩时代的矛盾,也为黄山-镜儿泉成矿带成矿岩浆通道系统的分析提供了重要信息。

2.2 侵位于干墩组中的镁铁-超镁铁质岩体及其矿床的特征

侵位于干墩组的镁铁-超镁铁质岩体大多呈菱形、椭圆等形态,不仅规模较大,而且含矿性较好。其中黄山、黄山东和黄山南岩体赋存大型矿床,土墩岩体赋存小型矿床,新发现的大黄山岩体有明显的岩浆硫化物矿化,二红洼岩体仅有弱矿化,而红柳沟岩体无矿化(表1)(Song et al., 2021)。值得注意的是,这些岩体的不同岩相之间既有侵入接触关系,也有分异演化关系,表明有多次岩浆侵入,是典型的镁铁-超镁铁杂岩体(毛景文等,2002; 邓宇峰等,2011a; 2012; 秦克章等,2012; 毛亚晶等,2014)。铜镍硫化物矿化主要产于超镁铁质岩相中,仅个别岩体的镁铁质岩相含矿。以下仅以最典型的黄山和黄山东岩体为例,对这些岩体主要的岩石学和矿床学特征加以描述。

2.2.1 黄山岩体

黄山岩体呈蝌蚪状,长 2.5 km,最宽处 700 m,西部膨大、向东收窄-尖灭(图3a)。主体从下至上主要由角闪二辉橄榄岩、角闪辉石岩、角闪辉长苏长岩和

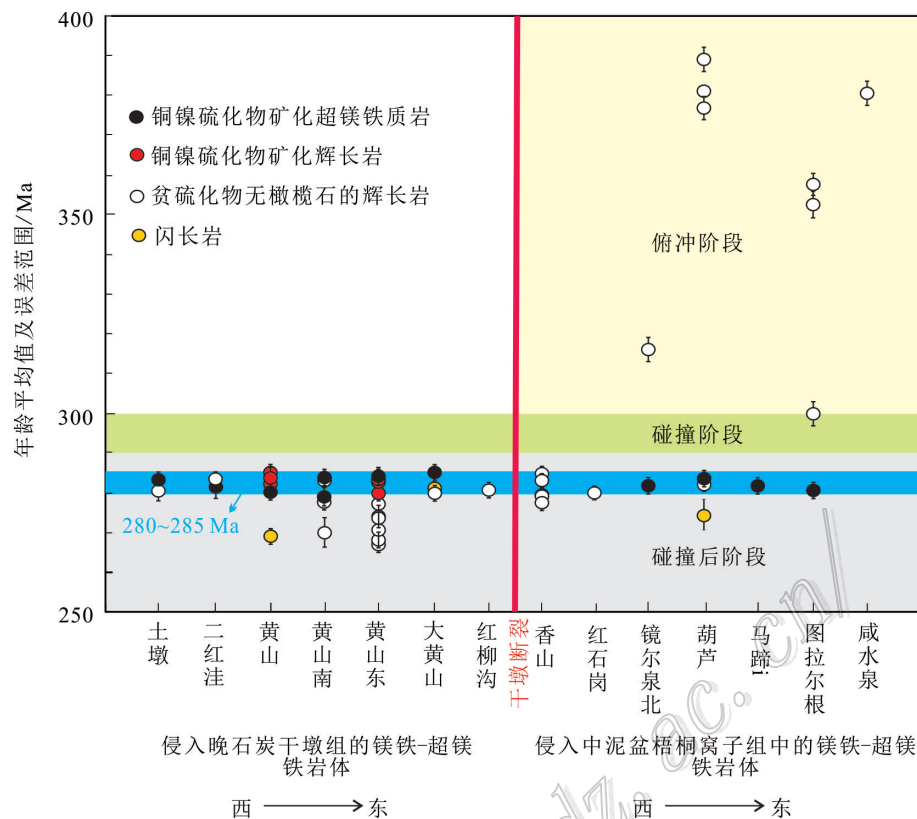


图2 黄山-镜儿泉成矿带镁铁-超镁铁岩体锆石 U-Pb 年龄分布图(据 Song et al., 2021)

含硫化物矿化的镁铁和超镁铁岩相的年龄集中于 280~285 Ma, 老于 300 Ma 无铜镍硫化物矿化的辉长岩相仅出现在侵入于梧桐窝子组的岩体中, 而小于 280 Ma 无矿化的辉长岩既可以出现在侵入于梧桐窝子组的岩体中, 也可以出现在侵入于干墩组的岩体中。无硫化物矿化的辉长岩不含橄榄石

Fig.2 Integration of zircon U-Pb ages of the mafic and ultramafic facies in the complexes of the Huangshan-Jingerquan belt (after Song et al., 2021)

The sulfide mineralized mafic and ultramafic rocks have been dated between 280~285 Ma taking into account measurement error. The gabbros older than 300 Ma are not only sulfide-barren and occur only in the complexes emplaced in the Wutongwozi Formation. Whereas the gabbros and diorite younger than 280 Ma are sulfide barren and occur in both the Wutongwozi and Gandun formations. The sulfide-barren gabbros are also olivine-free

角闪辉长岩构成, 呈现正常的岩浆分异序列; 但岩体底部的辉长苏长岩与之上的二辉橄榄岩, 以及岩体东部地表二辉橄榄岩与下覆辉长苏长岩, 以及岩体东端闪长岩与辉长岩之间均呈侵入接触关系, 反映出多次岩浆侵入(钱壮志等, 2009; 邓宇峰等, 2011a; Deng et al., 2014)。锆石 U-Pb 年龄显示镁铁-超镁铁质岩相形成于 280~285 Ma(Qin et al., 2011; Song et al., 2021), 而闪长岩形成于 (269.0 ± 2.0) Ma(Zhou et al., 2004)。

铜镍硫化物矿体产于二辉橄榄岩和辉石岩相的底部, 主要由浸染状和稠密浸染状矿石构成, 铜和镍的平均品位分别为 0.23% 和 0.45%, 金属储量分别为 17.3 万 t 和 33.8 万 t。

2.2.2 黄山东岩体

黄山东岩体呈规则的菱形, 长约 5.3 km, 最宽

处约 2 km, 主体由角闪辉长岩和角闪橄榄辉长岩构成, 两者呈突变接触关系; 二辉橄榄岩呈透镜状或似层状侵入角闪橄榄辉长岩相; 岩体边缘闪长岩与其他各个岩相均呈侵入接触关系(图 3b, 邓宇峰等, 2011b)。二辉橄榄岩、辉长苏长岩和橄榄辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 280~284 Ma(Song et al., 2021; Mao et al., 2018)。而角闪辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 267~277 Ma(陈继平等, 2013; Wang et al., 2014)。因此, 黄山东岩体也是多次岩浆侵入的产物。

层状或透镜状矿体主要产于二辉橄榄岩相和辉长苏长岩相中, 主要由浸染状矿石构成, 铜和镍平均品位分别为 0.2% 和 0.4%, 金属储量分别为 17 万 t 和 36 万 t。

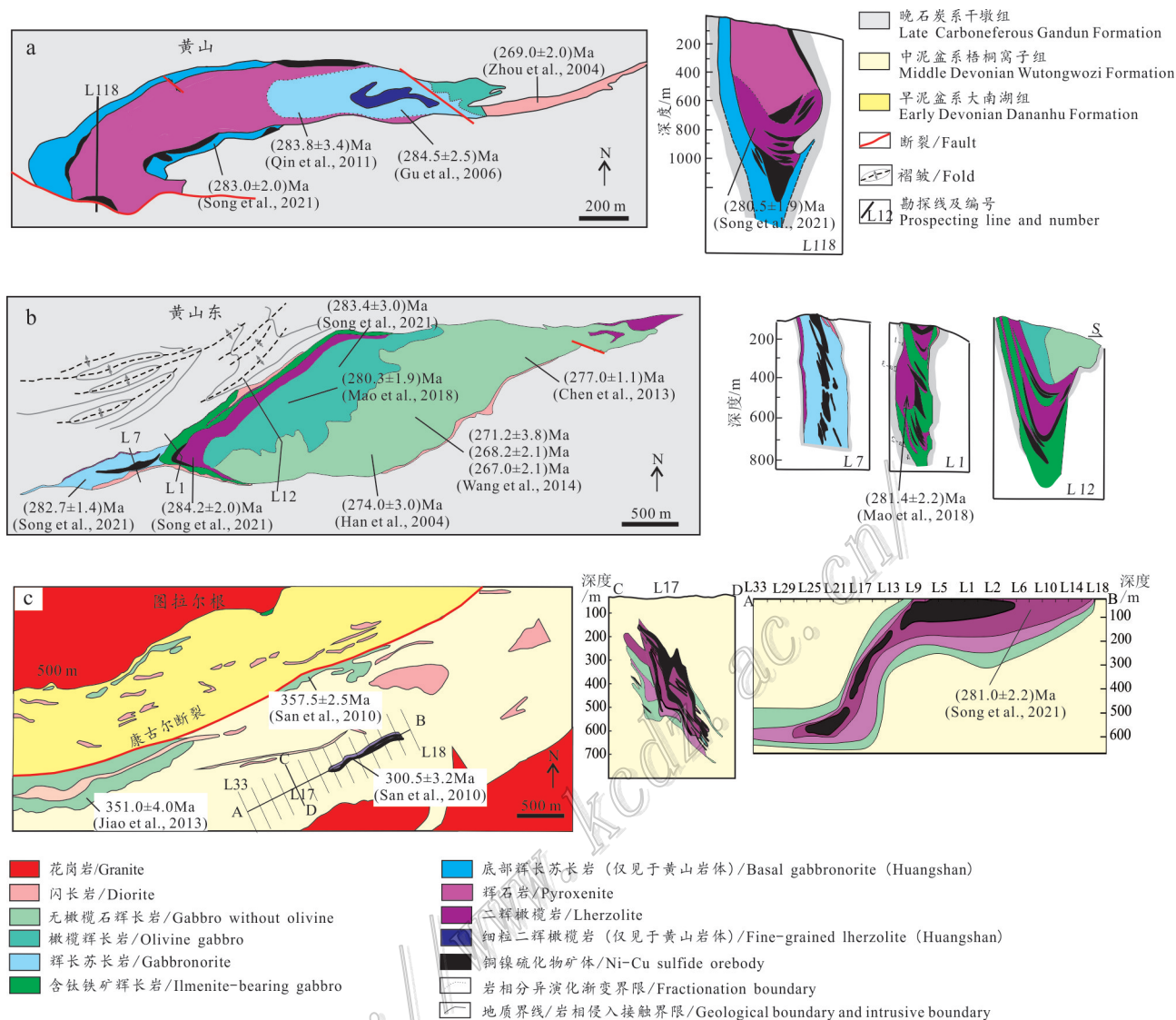


图3 黄山-镜儿泉成矿带典型含矿岩体地质简图及年龄数据(据秦克章等,2012;Deng et al., 2014;Song et al., 2021)

a. 黄山岩体; b. 黄山东岩体; c. 图拉尔根岩体

Fig. 3 Simplified geological maps of the typical Ni-Cu sulfide mineralized mafic-ultramafic complexes along the Huangshan-Jingerquan belt(after Qin et al., 2012; Deng et al., 2014; Song et al., 2021)

a. Huangshan complex; b. Huangshandong complex; c. Tulaergen complex

2.3 侵位于梧桐窝子组中的超镁铁质岩体及矿床的特点

侵位于梧桐窝子组地层中的超镁铁质岩体多为岩墙状,仅葫芦岩体为岩盆状,规模较大的岩体或岩墙含矿性较好(Song et al., 2021)。其中,大型矿床有图拉尔根;中型矿床包括香山和葫芦;其他规模小的岩墙含矿较差(表1)。以下仅以图拉尔根和葫芦岩体为例加以描述。

2.3.1 图拉尔根岩体

图拉尔根岩体由3个小岩体组成,其中I号岩

体呈岩墙状,长800 m,宽20~60 m,从边部到中心分别为角闪辉长岩、橄辉岩和二辉橄榄岩(图3c),三者呈突变接触;其中,角闪辉长岩和二辉橄榄岩的锆石U-Pb年龄分别为(300.5±3.2)Ma和(281.0±2.2)Ma(三金柱等,2010;Song et al., 2021)。II号和III号岩体位于I号岩体的西北侧,均为辉长岩体,无硫化物矿化,锆石U-Pb年龄为(357.5±2.5)Ma(三金柱等,2010),说明玄武质岩浆活动的时间较长。

铜镍硫化物矿化仅出现在I号岩体的二辉橄榄岩和橄辉岩中(图3c),矿体成透镜状或不规则状,铜

和镍的平均品位分别为0.4%和0.6%,金属储量分别为8万t和12万t。矿体主要由浸染状矿石构成,稠密浸染状富矿往往产于矿体上部,小的透镜状或囊状块状矿体产于超镁铁质岩相内或梧桐窝子组围岩中(三金柱等,2010;焦建刚等,2012;Zhao et al., 2018)。

2.3.2 葫芦岩体

葫芦岩体是侵位于梧桐窝子组中唯一的岩盆状岩体,长约1400 m,最宽720 m,从下至上主要由橄辉岩、方辉橄岩和二辉橄岩构成;橄辉岩中锆石的U-Pb年龄为 (282.9 ± 1.8) Ma (Song et al., 2021)。岩体边缘辉长岩及闪长岩的锆石U-Pb年龄为282 Ma及275 Ma(孙涛等,2010;Han et al., 2013),而岩体底部辉长岩的锆石U-Pb年龄为377~388 Ma(Zhao et al., 2018),与超镁铁质岩为侵入接触关系,表明也有多次岩浆侵入。铜镍硫化物矿化主要产于橄辉岩的底部(Zhao et al., 2018; Song et al., 2021)。

值得注意的是,含矿岩体不同岩相间的这种侵入或演化接触关系在造山带铜镍硫化物含矿岩体中是比较常见的。例如,东昆仑造山带的夏日哈木岩体,含矿的橄辉斜方辉石岩、斜方辉石岩和二辉岩之间为分异演化关系,但这些超镁铁质岩相与辉长苏长岩之间为侵入接触关系。二辉岩的锆石U-Pb年龄为 (406.1 ± 2.7) Ma和 (408.1 ± 2.9) Ma,而不同部位的辉长苏长岩既有 (405.5 ± 2.7) Ma的年龄(Song et al., 2016),也有 (431.3 ± 2.1) Ma的年龄(Li et al., 2015)。这些现象说明造山带铜镍硫化物含矿岩体普遍存在多阶段玄武岩浆的侵入,但不同阶段侵入的岩浆成矿潜力有很大差异。

3 黄山-镜儿泉成矿带成矿作用与区域构造演化的关系

3.1 玄武岩浆作用及成矿与北天山洋演化的关系

尽管黄山-镜儿泉成矿带内部没有二叠世的玄武岩出露,但近年来,主要含矿岩体都获得了许多高精度的锆石U-Pb年龄数据(表1),为铜镍硫化物成矿与区域玄武岩浆作用关系的研究提供了条件。然而,鉴于超镁铁质岩锆石含量稀少,前人用于U-Pb定年的锆石多选自不含矿的辉长岩或闪长岩,同一岩体往往获得多个年龄,而且年龄跨度很大。例如,葫芦岩体辉长闪长岩的年龄为 (274.5 ± 4) Ma(孙涛等,2010),而辉长岩的年龄为 (282.0 ± 1) Ma(Han et al., 2013)和377~389 Ma(Zhao et al., 2018)(表1),这

些岩相的年龄结果与它们之间的侵入接触关系是协调一致的,说明该岩体的确有多次岩浆侵入。然而,多数岩体含铜镍硫化物矿化的超镁铁质岩相却没有年龄数据(表1),显然,镁铁质岩相的年龄并不一定代表含矿超镁铁质岩相的年龄,也不能代表成矿年龄。因此,成矿作用究竟发生在康古尔-雅满苏岛弧构造演化的哪个阶段并不清楚。

针对这些问题,Song等(2021)对黄山-镜儿泉成矿带11个岩体含铜镍硫化物矿化的镁铁及超镁铁质岩相开展了系统的锆石U-Pb年代学研究,结合前人的年龄数据,发现含矿镁铁和超镁铁质岩相年龄集中于285~280 Ma(图2,表1)。同时,铜镍硫化物矿化的镁铁质和超镁铁质岩相均含有橄榄石,说明与成矿有关的玄武岩浆活动不仅时间非常短暂,而且部分熔融程度较高。而无铜镍硫化物矿化的镁铁质岩石均不含橄榄石,其年龄既可以大于285 Ma,也可以小于280 Ma,说明相关玄武岩浆部分熔融程度较低,但玄武岩浆活动延续时间很长。研究表明中亚造山带南缘具有典型的增生造山带的构造演化特点(Xiao et al., 2004; 2013),北天山洋最终闭合于晚石炭世末(300~290 Ma, Han et al., 2018; Xie et al., 2022a),稍早于285~280 Ma。因此,尽管不能完全排除塔里木地幔柱活动的贡献(Qin et al., 2011),康古尔-雅满苏岛弧玄武岩浆活动更可能与板块构造活动有关,从板块俯冲阶段一直延续到碰撞后伸展阶段(图2)(Song et al., 2021)。俯冲和碰撞后伸展阶段的玄武岩浆部分熔融程度较低,形成了389~300 Ma以及280~265 Ma的不含矿的镁铁质岩体或岩相。300~285 Ma年龄的缺失很可能代表同碰撞阶段玄武岩浆活动的短暂缺失(Xie et al., 2022b)。在碰撞后早期阶段,由于密度差导致俯冲陆壳与俯冲板片之间的断离,形成软流圈快速上涌的“窗口”并发生强烈的减压熔融。俯冲洋壳携带的水更有利于软流圈在较低的温度下发生较高级度的部分熔融,产生大量部分熔融程度高的玄武岩浆,有利于铜镍硫化物成矿。一旦这部分水被消耗掉,这种高级度部分熔融过程便停止。这为黄山-镜儿泉成矿带285~280 Ma的镁铁-超镁铁质岩相的形成及岩浆硫化物成矿提供了重要的物质基础(图2)。由于俯冲洋壳板片断离形成的软流圈上涌窗口非常狭窄,因此,尽管黄山-镜儿泉成矿带长达500 km,但宽度却不足50 km(图1b、c)。

因此,尽管俯冲、碰撞和碰撞后伸展阶段都可以

发生玄武岩浆活动,也都有形成铜镍硫化物矿床的潜力,但碰撞后早期阶段最有利于铜镍硫化物的大规模成矿。同时,由于增生造山带岩石圈较薄、强度较低,有利于俯冲洋壳在较浅的深度断离和较高程度部分熔融的发生,更有利于铜镍硫化物成矿。而碰撞造山带往往造成岩石圈加厚、强度较高,俯冲板片断离深度可能较大,不利于软流圈及周围地幔的剧烈熔融,从而对铜镍硫化物成矿不利,这很可能是碰撞造山带很少发现铜镍硫化物矿床的原因之一。例如中国西藏冈底斯带和三江成矿带发生了大规模斑岩成矿作用,但没有发现铜镍硫化物矿床。

3.2 成矿岩浆通道的恢复

岩浆通道成矿模型认为岩浆铜镍硫化物成矿的关键过程包括:①幔源镁铁质岩浆上升进入地壳后,同化混染地壳硫,导致岩浆中硫化物熔离;②这些硫化物被快速上升的岩浆携带到岩浆通道转折、膨大部位或较大的岩浆房,因岩浆流速降低使硫化物重力沉降、聚集成矿,局部还可能会有硫化物熔浆向下渗漏形成富矿脉(Barnes et al., 2016; 宋谢炎等, 2010; 2018a)。该模型很好地解释了加拿大 Voisey's Bay 矿床的特点——主要矿体产于岩浆通道系统上部的橄长岩-辉长岩岩体的底部,而代表岩浆通道的岩脉中只形成了一些小的透镜状矿体(宋谢炎等, 2012; Lightfoot et al., 2015; Barnes et al., 2016)。说明岩浆通道不同部位成矿特点存在显著的差异,因此,对这些特征的分析有助于指导深部找矿。

岩石地球化学研究表明北天山 275~210 Ma 的过铝质花岗岩形成于伸展环境(唐俊华等, 2007; Xie et al., 2022a),说明黄山-镜儿泉成矿带在 275 Ma 以后,区域构造应力由剪切逐渐变为伸展。因此,尽管由于强烈覆盖,干墩断裂的产状和性质都不明确,但根据其横切干墩组的特点判断它可能是 275 Ma 之后的伸展事件的产物,是向南倾的正断层。该断层的活动使南侧上盘向下滑动,使得北侧下盘早石炭统雅满苏组因遭受更强烈的剥蚀消失殆尽,从而使中泥盆统梧桐窝子组暴露地表(邓宇峰等, 2021)。因此,侵入梧桐窝子组的图拉尔根、香山等岩墙状矿化岩体代表着深部的岩浆通道,而侵位于晚石炭统干墩组的黄山、黄山东等岩体则代表了岩浆通道系统上部的岩浆房(Song et al., 2021; Deng et al., 2022),这与加拿大 Voisey's Bay 成矿岩浆通道系统的状况极为相似。深部狭窄的岩浆通道使得岩浆流速较高,有利于岩浆将硫化物携带到浅部宽大的

岩浆房卸载成矿,因此,浅部大的岩浆房更有利于形成大矿。尽管梧桐窝子组岩中墙状矿化岩体代表的岩浆通道与干墩组中含矿岩体代表的上部岩浆房并非一一对应,但仍然能够反映黄山-镜儿泉成矿带成矿岩浆通道系统的基本特征。这些特征与加拿大 Voisey's Bay 矿床的岩浆通道成矿特征非常相似,都表明深部岩浆通道相矿化规模较小,而岩浆通道系统上部岩浆房是成矿最有利的部位。

3.3 岩浆通道的形成与区域走滑的关系

构造和古地磁学研究表明,在 300~240 Ma 由于准噶尔地块相对于塔里木地块向东移动,形成了天山右行走滑带(图 1a、b, Laurent et al., 2003),黄山-镜儿泉成矿带所处的康古尔-黄山韧性剪切带位于天山右行走滑带的北部。

因此,右行走滑有利于黄山-镜儿泉成矿带岩浆上升通道和含矿的镁铁及超镁铁质岩相就位空间的形成(Branquet et al., 2012),主要体现在:①无论是梧桐窝子组中超镁铁质岩墙,还是干墩组中镁铁-超镁铁质岩体,其走向均为北东东向或近东西向,基本平行于康古尔-黄山韧性剪切带的整体走向(图 1c、图 3a~c);②黄山及黄山东岩体的形态及围岩的褶皱构造均与右行走滑的应力方向协调一致(图 3b);③由于右行走滑延续时间更长,使得 280~265 Ma 不含矿的辉长岩和闪长岩沿相同的岩浆通道侵入(图 1c)。上述讨论表明,黄山-镜儿泉带的铜镍硫化物成矿作用是碰撞后早期阶段俯冲板片断离、软流圈上涌和强烈部分熔融,以及区域性右行走滑几种地质要素耦合的结果。

4 黄山-镜儿泉成矿带找矿方向分析

自 20 世纪 80 年代以来黄山-镜儿泉成矿带已经历了近四十年的找矿,发现黄山、黄山东、图拉尔根等一系列大、中、小型铜镍矿床,浅表矿的找矿难度不断加大。然而,该成矿带目前已发现的矿床分布极不均匀,如:干墩组中的大型矿床仅发现于成矿带的西部(图 1c),而卫星照片显示黄山东矿床以东是大片的戈壁覆盖区。最近大黄山含矿岩体的发现说明戈壁覆盖区仍然有找矿潜力,如何运用成矿规律的研究成果指导隐伏矿床的找矿变得越来越重要。

根据对黄山-镜儿泉成矿带成矿时代、背景、成矿岩浆通道系统地质特征及成矿规律的上述总结和分析,笔者认为:①超镁铁质岩相越发育的岩体找

矿潜力越大;②规模较大的岩体比岩墙状的岩体找矿潜力大;③含橄榄石的镁铁质岩相比不含橄榄石的镁铁质岩相找矿潜力大。根据这些找矿标志,干墩组宜于寻找黄山、黄山东那样规模较大、含矿性较好的镁铁-超镁铁质岩体,发现大型铜镍矿床的可能性较大;而梧桐窝子组中则寻找图拉尔根和香山那样含矿超镁铁质岩墙的概率较大,更可能发现小型矿床。鉴于岩浆矿床地球化学晕较窄的特点,对于戈壁覆盖区应该加大以物探工作为先导的找矿工作。

如前所述,与黄山-镜儿泉成矿带相似,许多造山带铜镍硫化物含矿岩体不同年龄的岩相间侵入接触关系很常见(Li et al., 2015; Song et al., 2016)。上述研究表明,由于造山带在俯冲、碰撞和碰撞后伸展阶段都可以发生玄武岩浆活动,但不同阶段岩浆性质和成矿潜力却可能有很大差异。尽管俯冲阶段也可以形成铜镍硫化物矿床,如黑山铜镍矿床(Xie et al., 2012; 2014),但碰撞后早期阶段是成矿的最佳时期。因此,在成矿带尺度上开展系统和扎实的理论研究是进行造山带铜镍硫化物成矿预测、明确找矿方向的基础,镁铁-超镁铁质岩体空间分布及形态、不同岩相地质关系及年龄结构等对于理解造山带岩浆通道系统铜镍硫化物成矿规律非常重要。

致谢 本研究野外工作得到新疆地勘局地质六队邓刚总工程师和李卫东工程师,以及亚克斯公司黄山铜镍矿谢军辉主任的大力协助,研究生王开元、康健参与了部分野外工作。同时,感谢审稿人的认真审稿和建设性意见。

References

- Ao S J, Xiao W J, Han C M, Mao Q G and Zhang J E. 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic-ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: Implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids[J]. *Gondwana Research*, 18: 466-478.
- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N and Saumur B M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 296-316.
- Branquet Y, Gumiaux C, Sizaret S, Barbanson L, Wang B, Cluzel D, Li G and Delaunay A. 2012. Synkinetic mafic/ultramafic sheeted intrusions: Emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt(eastern Tianshan, NW China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 240-257.
- Chen B Y, Yu J J and Liu S J. 2018. Source characteristics and tectonic setting of mafic-ultramafic intrusions in North Xinjiang, NW China: Insights from the petrology and geochemistry of the Lubei mafic-ultramafic intrusion[J]. *Lithos*, 308: 329-345.
- Chen J, Liao Q A, Zhang X H, Luo T, Guo D B and Hu Z C. 2013. Contrast of Huangshandong and Xiangshan mafic-ultramafic complex, East Tianshan[J]. *Journal of Earth Science*, 38(6): 1183-1196 (in Chinese with English abstract).
- Chen L M, Song X Y, Hu R Z, Yu S Y, Yi J N, Kang J and Huang K J. 2021. Mg-Sr-Nd I isotopic insights into petrogenesis of the Xiarihamu mafic-ultramafic intrusion, northern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Petrology*, DOI:10.1093/petrology/egaa113.
- Dang Z C, Li J J, Zhao Z L, Fu C and Tang W L. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from Xiaonanshan, Siziwang Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China* 35(4): 583-592(in Chinese with English abstract).
- Dang Z C, Li J J, Fu C, Tang W L, Liu Y, Zhao Z L, Wu X Y and Sun H W. 2018. Geochronological, mineralogical and lithogeochemical studies of the Kebu mafic-ultramafic intrusion in Urad Middle Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 278-297 (in Chinese with English abstract).
- Deng Y F, Song X Y, Chen L M, Cheng S L, Zhang X L and Li J. 2011a. Features of the mantle source of the Huangshanxi Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3640-3652(in Chinese with English abstract).
- Deng Y X, Song X Y, Xie W, Cheng S L and Li J. 2011b. Petrogenesis of the Huangshandong Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, northern Tianshan, Xinjiang: Evidence from major and trace elements and Sr-Nd isotope[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85 (9): 1435-1451(in Chinese with English abstract).
- Deng Y F, Song X Y, Zhou T F, Yuan F, Chen L M and Zheng W Q. 2012. Correlations between Fo number and Ni content of olivine of the Huangshandong intrusion, eastern Tianshan, Xinjiang, and the genetic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2224-2234(in Chinese with English abstract).
- Deng Y F, Song X Y, Chen L M, Zhou T F, Pirajno F, Yuan F, Xie W and Zhang D. 2014. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 181-198.
- Deng Y F, Yuan F, Hollings P, Song X Y, Zhou T F, Fu B, Denyszyn S and Zhao B. 2020. Magma generation and sulfide saturation of Permian mafic-ultramafic intrusions from the western part of the northern Tianshan in NW China: Implications for Ni-Cu mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 55(3): 515-534.
- Deng Y F, Song X Y, Xie W, Yuan F, Zhao Z, Wei S, Zhu J J, Kang J, Wang K Y, Liang Q L, Chen L M and Yu S Y. 2021. Determination of sedimentary ages of strata in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 362-376(in Chinese with English abstract).

- Deng Y F, Song X Y, Xie W, Chen L M, Yu S Y, Holling P and Wei S. 2022. The role of external sulfur in triggering sulfide immiscibility at depth: Evidence from the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu metallogenic belt, NW China[J]. *Econ. Geol.*, 11(8): 1867-1879.
- Feng Y, Qian Z, Duan J, Xu G, Ren M and Jiang C. 2018. Geochronological and geochemical study of the Baixintan Magmatic Ni-Cu sulphide deposit: New implications for the exploration potential in the western part of the East Tianshan nickel belt(NW China)[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 366-381.
- Feng Y Q, Qian Z Z, Duan J, Jiao J G, Xu G, Ren M and Chen B L. 2017a. Formation age, metallogenic features and exploration prospect in the deep part of the Kalatongke Cu-Ni deposits, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 36(6): 1387-1401(in Chinese with English abstract).
- Feng Y Q, Qian Z Z, Duan J, Sun T, Xu G, Jiang C, Ren M and Chen H J. 2017b. Genesis and ore-forming potential of mafic-ultramafic intrusions in the western part of East Tianshan Cu-Ni metallogenic belt, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 792-811(in Chinese with English abstract).
- Gao J F and Zhou M F. 2013. Magma mixing in the genesis of the Kalatongke dioritic intrusion: Implications for the tectonic switch from subduction to post-collision, Chinese Altay, NW China[J]. *Lithos*, 162-163: 236-250.
- Han C, Xiao W, Zhao G, Ao S J, Zhang J, Qu W and Du A. 2010. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in eastern Tianshan(Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the timing and genesis of the mineralization[J]. *Lithos*, 120(3-4): 547-562.
- Han C, Xiao W, Zhao G, Su B, Sakya P A, Ao S, Wan B, Zhang J and Zhang Z. 2013. SIMS U-Pb zircon dating and Re-Os isotopic analysis of the Hulu Cu-Ni deposit, eastern Tianshan, Central Asian Orogenic Belt, and its geological significance[J]. *Journal of Geosciences*, 58: 251-270.
- Han Y and Zhao G. 2018. Final a Malga Mation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Earth Science Review*, 186: 129-152.
- Hao L, Wei Q, Zhao Y, Lu J and Zhao X. 2015. Newly identified Middle-Late Permian mafic-ultramafic intrusions in the southeastern Margin of the Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis and its implications[J]. *Geochemical Journal*, 49: 157-173.
- Jiao J G, Tang Z L, Qian Z Z, Sun T, Duan J and Jiang C. 2012. Genesis and metallogenic process of Tulargen large scale Cu-Ni sulfide deposit in eastern Tianshan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3772-3786(in Chinese with English abstract).
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Monie P and Shu L S. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern Central Asia(NW China): New structural and geochronological data[J]. *Tectonics*, 22: 1099-1101.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, Wang Y L, Sun T and 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[J]. *Lithos*, 216/217: 224-240.
- Li D, Wang Y, Shi Y, Xie H, Wang J and Lai C. Age and geochemistry of the Carboniferous-Permian magmatism and Fe-Ti-V oxide metallogeny in the eastern Tianshan Orogen, NW China: Evidence from the Yaxi mafic-ultramafic complex[J]. *International Geology Review*, 61(7): 853-867.
- Lightfoot P C and 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 354-386.
- Maier W D, Barnes S J, Chinyepi G, Barton J M, Eglinton J B and Setchedi I. 2008. The composition of magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana[J]. *Mineralium Deposita*, 43(1): 37-60.
- 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 sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. *Mineral Deposits*, 21: 323-330(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Wu H, Chen S P, Cheng L S, Yag J M and Zhang C Q. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens(Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4): 184-203.
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, Xue S C, Feng H Y and Tian Y. 2014. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huangshan Ni-Cu deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1575-1594(in Chinese with English abstract).
- Mao Y J, Qin K Z, Tang D M, Feng H Y and Xue S C. 2016. Crustal contamination and sulfide immiscibility history of the Permian Huangshannan magmatic Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 22-37.
- Mao Y J, Qin K Z and Tang D. 2018. Revisiting the age and emplacement process of the Huangshandong Ni-Cu deposit in the Central Asian Orogenic belt, northwestern China: Implications for multiple Magma extractions from a short-lived staging magma chamber[J]. *Lithos*, 320: 583-591.
- Peng R, Zhai Y, Li C and Ripley E M. 2013. The Erbutu Ni-Cu deposit in the Central Asian Orogenic Belt: A permian magmatic sulfide deposit related to boninitic magmatism in an arc setting[J]. *Econ. Geol.*, 108: 1879-1888.
- Piña R, Romeo I, Ortega L, Lunar R, Capote R, Gervilla F, Tejero R and Quesada C. 2010. Origin and emplacement of the Aguablanca magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, SW Iberia: A multidisciplinary approach[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 122 (5/6): 915-925.
- Qian Z Z, Sun T, Tang Z L, Jiang C Y, He K, Xia M J and Wang J Z. 2009. Platinum-group elements geochemistry and its significances

- of the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, East Tianshan, China[J]. *Geological Review*, 55(6): 873-884(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Tang D M, Su B X, Mao Y J, Xue S C, Tian Y, Sun H, San J Z, Xiao Q H and Deng G. 2012. The tectonic setting, style, basic feature, reative erosion deee, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni-Bearing Permian mafic-ultramafic complexes, northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 83-116(in Chinese with English abstract).
- Qin K, Su B, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H and Liu P P. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-Bearing mafic-ultramafic Intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin(NW China): Constraints on a ca. 280 Ma Mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260.
- San J, Qin K, Tang Z, Tang D, Su B, Sun H, Xiao Q and Liu P. 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulaergen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3027-3035(in Chinese with English abstract).
- Shi Y, Wang Y W, Wang J B, Zhao L, Xie H J, Long L, Zou T, Li D and Zhou G C . 2018. Physicochemical control of the Early Permian Xiangshan Fe-Ti oxide deposit in eastern Tianshan(Xinjiang), NW China[J]. *Journal of Earth Science*, 29(3): 520-536.
- Shuai Z, Chen H, Qian Z, Xu G, Feng Y, Duan J and Ren M. 2019. Genesis and Cu-Ni metallogenetic potential of Hongshigang mafic-ultramafic intrusion in East Tiafishan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 156-169(in Chinese with English abstract).
- Song X Y and Li X R. 2009a. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment[J]. *Mineralium Deposita*, 44(3): 303-327.
- Song X Y, Hu R Z and Chen L M. 2009b. Geochemical natures of copper nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 287-305(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Xiao J, Zhu D, Zhu W and Chen L M. 2010. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 153-163(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, Crawford A J, Zheng W Q, Zhou G F, Deng G, Cheng S L and Li J. 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern Margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 127(1-2): 128-143.
- Song X Y and Chen L M. 2012. The core issue of large-scale mineralization in small intrusion: Mineralization in magmatic plumbing system principle, key features and exploration marks[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 117-127(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Chen L M, Deng Y F and Xie W. 2013. Syncollisional tholeiitic Magmatism induced by asthenosphere upwelling owing to slab detachment at the southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 170(6): 941-950.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q A and Wu S K. 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibet Plateau, China[J]. *Econ. Geol.*, 111: 29-55.
- Song X Y, Hu R and Chen L. 2018a. Characteristics and inspirations of the Ni-Cu sulfide deposits in China[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 54(2): 221-235(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Deng Y F, Xie W, Chen L M, Yu S Y and Liang Q L. 2018b. Magmatism of Huangshan-Jing'erquan regional strike-slip structure in Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(5): 505-519(in Chinese with English abstract).
- Song X Y. 2019. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 699-710(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Wang K Y, Barnes S J, Yi J N, Chen L M and Schoneveld L E. 2020. Petrogenetic insights from chromite in ultramafic cumulates of the Xiarihamu intrusion, northern Tibet Plateau, China[J]. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 105(4): 479-497.
- Song X Y, Deng Y F, Xie W, Yi J N, Fu B, Chen L M, Yu S Y, Zheng W Q and Liang Q L. 2021. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in Orogenic Belts[J]. *Lithos*, 390: 106114.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, Tang D M, Xiao Q H and Cao M J. 2009. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 873-887(in Chinese with English abstract).
- Su B X, Qin K Z and Sakyi P A. 2010. Geochronologic-petrochemical studies of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusion, Beishan area, Xinjiang(NW China): Petrogenesis and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 54(3/4): 270-289.
- Su B X, Qin K Z, Dai Y H, Sun H and Sakyi P A. 2015. Decoupling of whole-rock Nd-Hf and zircon Hf-O isotopic compositions of a 284 Ma mafic-ultramafic intrusion in the Beishan Terrane, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 1721-1737.
- Sun T, Qian Zh, Jiang C, He K, Sun Y, Wang J and Xia M. 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3339-3349(in Chinese with English abstract).
- Sun T, Qian Z Z, Li C, Xia M Z and Yang S H. 2013. Petrogenesis and economic potential of the erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and

- whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Lithos*, 182: 185-199.
- Sun Y, Wang J, Lv X, Yu M, Li Y, Mao Q G, Wang Y and Long L. 2019. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the newly discovered Cu-Ni sulfide-mineralized Yueyawan gabbroic complex, Kalatag district, northwestern eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews* 109: 598-614.
- Tang D M, Qing K Z, Sun H, Qi L, Xiao Q H and Su B X. 2009. PGE Geochemical Characteristics of Tianyu Magmatic Cu-Ni deposit: Implications for magma evolution and sulfide segregation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 680-697(in Chinese with English abstract).
- Tang D, Qin K, Li C, Qi L, Su B X and Qu W J. 2011. Zircon dating, Hf-Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Tianyu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Lithos*, 126(1-2): 84-98.
- Tang J, Gu L, Zhang Z, Wu C, San J, Wang C, Liu S and Li G. 2007. Peraluminous granite in Huangshan-Jingerquan area of eastern Tianshan: geochemistry, mineralogy and geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 921-946(in Chinese with English abstract).
- Tucker R D, Boyd R and Barnes S J. 1990. A U-Pb zircon age for the Råna intrusion, N. Norway: New evidence of basic Magmatism in the Scandinavian Caledonides in Early Silurian time[J]. *Norwegian Journal of Geology/Norsk geologisk tidsskrift*, 70: 229-239.
- Wang B, Cluzel D, Jahn B, Shu L, Chen Y, Zhai Y, Branquet Y, Barbançon L and Sizaret S. 2014. Late Paleozoic pre-and syn-kinematic plutons of the Kangguer-Huangshan shear zone: Inference on the tectonic evolution of the eastern Chinese north Tianshan[J]. *American Journal of Science*, 314(1): 43-79.
- Wang G Q, Li X M, Xu X Y, Yu J Y and Wu P. 2012. Zircon U-Pb ages of Sidingheishan mafic-ultramafic rocks in Xinjiang-Gansu border area and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2046-2051(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Wang J, Wang L, Peng X, Hui W and Qin Q. 2006 A intermediate type of Cu-Ni sulfide Xiangshanxi deposit, Hami and V-Ti magnetite deposit: Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 61-73(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Zhang Z, Chen S, Zhang J, Li K and You M. 2017. Petrogenesis and metallogenic potential analysis of mafic intrusion in the Hongshigangbei Ni-Cu sulfide mineralization in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 776-791(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Lv X and Liu Y. 2018. Petrogenesis and Ni-Cu-Co sulfide formation of mafic enclaves in Tulaergen mafic-ultramafic intrusive rocks, eastern Tianshan, Northwest China: Implications for liquid immiscibility and hydrothermal remobilization of platinum-group elements[J]. *Econ. Geol.*, 113: 1795-1816.
- Wang Y W, Wang J B, Wang L J and Fang T H. 2004. REE characteristics of Cu-Ni sulfide deposits in the Huangshan area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 935-948(in Chinese with English abstract).
- Wei B, Wang C Y, Li C and Sun Y. 2013. Origin of PGE-depleted Ni-Cu Sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 orthopyroxenite intrusion, Central Asian Orogenic Belt, northeastern China[J]. *Econ. Geol.*, 108:1813-1831.
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L and Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing Mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 781-797.
- Xia M Z, Jiang C Y, Li C, Xia Z D. Characteristics of a newly discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi Ultramafic Intrusion, Tarim Craton, NW China[J]. *Econ. Geol.*, 108: 1865-1878.
- Xiao Q, Qin K, Tang D, Su B, Sun H, San J, Cao M and Hui W. 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni-Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: Evidences from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 503-522(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan(China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304(4): 370-395.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B and Han C M. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1316-1341.
- Xie H Q, Zhang F Q, Miao L C, Li T S and Liu D Y. 2007. Characteristics of the Piaohuchuan mafic-ultramafic complex, central Jilin, Northeast China: Constrains on the nature and evolution of the northeastern North China marginal tectonic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 810-822(in Chinese with English abstract).
- Xie W, Song X Y, Nie X Y and Cheng S L. 2011. Features of the mantle source and tectonic setting of the Poshu Ni-Cu sulfide-bearing intrusion, Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 189-200(in Chinese with English abstract).
- Xie W, Song X-Y, Deng Y F, Wang Y S and Ba D H. 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 144-145: 209-230.
- Xie W, Song X Y, Deng Y F, Chen L M, Zhang X Q, Zheng W Q and Wei X. 2013. Geology and olivine geochemistry of the Heishan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Gansu, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3437-3502(in Chinese with English abstract).
- Xie W, Song X Y, Chen L M, Deng Y F, Zheng W Q, Wang Y S and Ba D H. 2014. Geochemistry insights on the genesis of the subduction-related Heishan magmatic Ni-Cu - (PGE) deposit in Gansu, NW China, at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Econ. Geol.*, 109: 1563-1583.
- Xie W, Lu Y, Song X Y, Deng Y F, Liang Q L and Yi J N. 2022a. A late Carboniferous bimodal volcanic suite before closure of the North Tianshan Ocean at the southwestern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 226: 105090.
- Xie W, Lu Y, Chen L M, Song X Y, Deng Y F and Zhao Y. 2022b. Zir-

- con Th/U ratios suggest a post-collision extensional setting for the Permian Ni-Cu sulfide deposits in the eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104837.
- Xue S C, Qin K Z, Li C, Tang D M, Mao Y J, Qi L and Ripley E M. 2016. Geochronological, petrological, and geochemical constraints on Ni-Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the Northeast rim of the Tarim craton, western China[J]. *Econ. Geol.*, 111: 1465-1484.
- Xue S C, Li C, Wang Q F, Ripley E M and Yao Z S. 2019. Geochronology, petrology and Sr-Nd-Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Qixin Magmatic Ni-Cu sulfide prospect, southern Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 103002.
- Yang S H and Zhou M F. 2009. Geochemistry of the ~430 Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related Magmatism in the South Tianshan Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 113(1-2): 259-273.
- Yao J H, Zhu W G, Li C, Zhong H, Bai Z J, Ripley E M and Li C. 2018. Petrogenesis and ore Genesis of the Lengshuiqing magmatic sulfide deposit in Southwest China: Constraints from chalcophile elements(PGE, Se) and Sr-Nd-Os-S isotopes[J]. *Econ. Geol.*, 113: 675-698.
- Zhang M J, Li C, Fu P, Hu P Q and Ripley E M. 2011. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: Intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications[J]. *Mineralium Deposita*, 46: 153-170.
- Zhao B B, Deng Y F, Zhou T F, Yuan F, Zhang D Y, Deng G, Li W D and Li Y. 2018. Petrogenesis of the Baixintan Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, East Tianshan: Evidence from geochronology, petrogeochemistry and Sr-Nd isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2733-2753(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Xue C, Zhao X, Yang Y Q and Ke J J. 2015. Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-ultramafic intrusion, eastern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 155-172.
- Zhao Y, Yang Y Q and Ke J J. 2016. Origin of Cu- and Ni-bearing magma and sulfide saturation mechanism: A case study of Sr-Nd-Pb-S isotopic composition and element geochemistry on the Huangshannan magmatic Ni-Cu sulfide deposit, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2086-2098(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Xue C, Symons D, Zhao X, Zhang G, Yang Y and Zu B. 2018. Temporal variations in the mantle source beneath the eastern Tianshan nickel belt and implications for Ni-Cu mineralization potential[J]. *Lithos*, 314-315: 597-616.
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z, Li J W and Sun M. 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[J]. *Chemical Geology*, 209(3-4): 233-257.
- Zhou T, Yuan F, Zhang D, Fan Y, Liu S, Peng M and Zhang J. 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478-502(in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, He G Q and An F. 2007. Geoloical evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1167-1177(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈继平, 廖群安, 张雄华, 罗婷, 郭东宝, 胡兆初. 2013. 东天山地区黄山东与香山镁铁质-超镁铁质杂岩体对比[J]. *地球科学*, 22(6): 1183-1196.
- 党智财, 李俊健, 赵泽霖, 付超, 唐文龙. 2016. 内蒙古四子王旗地区小南山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 35(4): 583-592.
- 党智财, 李俊健, 付超, 唐文龙, 刘跃, 赵泽霖, 吴兴源, 孙宏伟. 2018. 内蒙古乌拉特中旗克布镁铁质-超镁铁质岩体年代学、矿物学和岩石地球化学[J]. *地质学报*, 92(2): 278-297.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列锰, 程松林, 张新利, 李军. 2011a. 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[J]. *岩石学报*, 27(12): 3640-3652.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 颜炜, 程松林, 李军. 2011b. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J]. *地质学报*, 85(9): 1435-1451.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 周涛发, 袁峰, 陈列锰, 郑文勤. 2012. 新疆东天山黄山东岩体橄榄石成因意义探讨. *岩石学报*, 28(7): 2224-2234.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 颜炜, 袁峰, 赵照明, 韦帅, 祝近近, 康健, 王开元, 梁庆林, 陈列锰, 于宋月. 2021. 黄山-镜儿泉铜镍成矿带地层时代的厘定及其地质意义探讨[J]. *地质学报*, 95(2): 362-376.
- 冯宏业, 许英霞, 秦克章, 唐冬梅, 郭海兵, 三金柱, 毛亚晶. 2014. 东天山坎塔山口镁铁-超镁铁质岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其对 Ni-Cu 成矿的指示[J]. *岩石学报*, 30(6): 1558-1574.
- 冯延清, 钱壮志, 段俊, 焦建刚, 徐刚, 任萌, 陈炳龙. 2017a. 新疆喀拉通克铜镍矿镁铁质岩体形成时代、成矿特征与深部找矿前景[J]. *矿床地质*, 36(6): 1387-1401.
- 冯延清, 钱壮志, 段俊, 孙涛, 徐刚, 姜超, 任萌, 陈宏骏. 2017b. 新疆东天山铜镍成矿带西段镁铁-超镁铁质岩体成因及成矿潜力研究[J]. *地质学报*, 91(4): 792-811.
- 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 孙涛, 段俊, 姜超. 2012. 东天山地区图拉尔根铜镍硫化物矿床成因及成矿过程[J]. *岩石学报*, 28(11): 3772-3786.
- 李德东, 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 廖震. 2012. 新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序[J]. *岩石学报*, 28(7): 2103-2112.
- 李卫东, 谢登科, 邹振林, 韩飞, 钟小琴, 孟志豪, 张自涛, 颜炜. 2020. 哈密大黄山铜镍矿发现及意义[J]. *新疆地质*, 38(4): 457-462.
- 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.
- 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[J]. 岩石学报, 22(1): 153-162.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 薛胜超, 冯宏业, 田野. 2014. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. 岩石学报, 30(6): 1575-1594.
- 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 姜常义, 何克, 夏明哲, 王建中. 2009. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 地质论评, 55(6): 873-884.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 毛亚晶, 薛胜超, 田野, 孙赫, 三金柱, 肖庆华, 邓刚. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. 西北地质, 45(4): 83-116.
- 任明浩, 王焰, 倪康, 孙亚莉. 2013. 东天山二叠纪大草滩地区镁铁-超镁铁质岩体的岩浆演化过程和含矿性[J]. 岩石学报, 29(10): 3473-3486.
- 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[J]. 岩石学报, 26: 3027-3035.
- 师震, 陈宏骏, 钱壮志, 徐刚, 冯延清, 段俊, 任萌. 2019. 东天山红石岗镁铁-超镁铁质岩体成因及铜镍成矿潜力[J]. 地球科学与环境学报, 41(2): 156-169.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘, 16(4): 287-305.
- 宋谢炎, 肖家飞, 朱丹, 朱维光, 陈列锰. 2010. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 17(1): 153-163.
- 宋谢炎, 陈列锰. 2012. “小岩体成大矿”的核心——岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志[J]. 西北地质, 45(4): 117-127.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2018a. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J]. 南京大学学报(自然科学), 54(2): 221-235.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颜炜, 陈列锰, 于宋月, 梁庆林. 2018b. 新疆黄山—镜儿泉铜镍成矿带岩浆作用与区域走滑构造的关系[J]. 地球科学与环境学报, 40(5): 505-519.
- 宋谢炎. 2019. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J]. 矿床地质, 38(4): 699-710.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 唐冬梅, 肖庆华, 曹明坚. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. 岩石学报, 25(4): 873-887.
- 孙涛, 钱壮志, 汤中立, 姜常义, 何克, 孙亚莉, 王建中, 夏明哲. 2010. 新疆葫芦铜镍矿床锆石 U-Pb 年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(11): 3339-3349.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 漆亮, 肖庆华, 苏本勋. 2009. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示[J]. 地质学报, 83(5): 680-697.
- 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 三金柱, 汪传胜, 刘四海, 张光辉. 2007. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因[J]. 岩石学报, 23(8): 1803-1820.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 余吉远, 武鹏. 2012. 甘肃新疆交界地区四顶黑山镁铁质-超镁铁质岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报, 31(12): 2046-2051.
- 王亚磊, 张照伟, 陈寿波, 张江伟, 李侃, 尤敏鑫. 2017. 新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析[J]. 地质学报, 91(4): 776-791.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 方同辉. 2004. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及其意义[J]. 岩石学报, 20(4): 935-948.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 彭晓明, 惠卫东, 秦全. 2006. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床[J]. 地质学报, 80(1): 61-73.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 曹明坚, 惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿系同源岩浆分异演化产物—矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 26(2): 503-522.
- 颜炳强, 张福勤, 苗来成, 李铁胜, 刘敦一. 2007. 吉林中部漂河川镁铁——超镁铁质杂岩带的特征: 对华北东北缘构造带性质和演化的约束[J]. 地质通报, 26(7): 810-822.
- 赵冰冰, 邓宇峰, 周涛发, 袁峰, 张达玉, 邓刚, 李卫东, 李跃. 2018. 东天山白鑫滩含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 34(9): 2733-2753.
- 赵云, 杨永强, 柯君君. 2016. 含铜镍岩浆起源及硫饱和机制: 以新疆黄山南岩浆铜镍硫化物矿床 Sr-Nd-Pb-S 同位素和元素地球化学研究为例[J]. 岩石学报, 32(7): 2086-2098.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 26(2): 478-502.
- 朱永峰, 何国琦, 安芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26(9): 1167-1177.