

中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征^{*}

申萍¹ 潘鸿迪² SEITMURATOVA Eleonora³

SHEN Ping¹, PAN HongDi² and SEITMURATOVA Eleonora³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

2. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710052

3. 沙特巴耶夫地质研究所, 地层实验室, 阿拉木图 050010

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. Laboratory of Geological Formations, K. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty 050010, Kazakhstan

2014-07-02 收稿, 2014-09-28 改回.

Shen P, Pan HD and Seitmuratova E. 2015. Characteristics of the porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 315–332

Abstract The Central Asian Metallogenic Domain with many large and super-large porphyry Cu deposits is an important metallogenic domain of porphyry Cu deposits in the world. This study focuses on the geology, ages, ore-forming fluids, and elemental geochemistry for nine important porphyry Cu deposits in the Central Asian Metallogenic Domain on the basis of published data, our new ages, elemental data, fluids and detailed field work, and summarizes the characteristics of these deposits. These deposits have some characteristics as follow: (1) these deposits have a wide age range from Paleozoic to Mesozoic, but focus on Devonian and Carboniferous. (2) Most deposits are associated with calc-alkaline intermediate to felsic magma and minor with alkaline magma. The host rocks are dominant granodiorite, diorite, and tonalite and minor monzonite. (3) Most host magma from these deposits derived from the mantle, minor from the mantle with an involvement of crust or wall rocks. (4) Most deposits formed in the island-arc setting, minor in a continental-arc setting and in a transitional continental- to island-arc setting. (5) These deposits have been divided three types (porphyry Cu-Au, Cu (Au, Mo) and Cu-Mo deposits). (6) The ore-forming fluids from most deposits contain the dominant oxidized ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{SO}_2-\text{CO}_2$) and the fluids from minor deposits are the reduced ($\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CH}_4-\text{CO}_2$) fluids. (7) The mineralization system has single porphyry system and minor porphyry-skarn and porphyry-epithermal systems.

Key words Porphyry Cu deposit; Zircon SIMS U-Pb age; Oxidized and reduced ore fluids; Host magma; Tectonic setting; Central Asian Metallogenic Domain

摘 要 中亚成矿域发育许多大型和超大型斑岩铜矿床, 是世界上重要的斑岩铜矿成矿域。我们对 9 个大型和超大型斑岩铜矿床进行了研究, 包括地质特征、含矿岩体地球化学、SIMS 锆石 U-Pb 定年和成矿流体成分等, 结合前人成果, 我们认为中亚成矿域斑岩铜矿床具有如下特点: (1) 成矿时代为古生代和中生代, 成矿高峰期为泥盆纪和石炭纪; (2) 含矿岩浆为钙碱性中酸性岩浆和少量的碱性岩浆, 含矿岩体为花岗闪长岩、闪长岩、英云闪长岩和少量的二长岩; (3) 含矿岩浆大多数源于新生的洋壳, 少量有古老的基底物质和围岩物质参与; (4) 成矿构造背景主要为岛弧, 少量为陆缘弧和岛弧向陆缘弧过渡的环境; (5) 矿床可分为三类, 包括斑岩型 Cu-Au、Cu (Au, Mo) 和 Cu-Mo 矿床; (6) 成矿流体可分为两类, 包括氧化性 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{SO}_2$ 体系和少量的还原性 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CH}_4-\text{CO}_2$ 体系; (7) 成矿系统可分为三类, 包括简单的斑岩系统和少量的斑岩-矽卡岩成矿系统和斑岩-浅成低温热液成矿系统。

关键词 斑岩铜矿床; 锆石 SIMS U-Pb 年龄; 氧化和还原流体; 含矿岩浆; 成矿构造背景; 中亚成矿域

中图法分类号 P597.3; P618.41

* 本文受国家自然科学基金项目(U1303293、41390442、41272109)、中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G07) 和国际科技交流与合作专项(2010DFB23390) 及国家“305”项目(2011BAB06B01) 联合资助。

第一作者简介: 申萍, 女, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 从事矿床学研究, E-mail: pshen@mail.iggcas.ac.cn

斑岩铜矿床提供了世界工业需求量近 75% 的铜、50% 的钼和 20% 的金以及大多数的铼 (Sillitoe, 2010), 因此, 斑岩铜矿床的研究和勘探一直受到矿床学界和各国政府的高度关注, 成为矿床学界经久不衰的研究主题。世界上大多数斑岩铜矿床产于环太平洋, 包括东太平洋的中安第斯陆缘弧 (Kay *et al.*, 1999; Richards *et al.*, 2001; Cooke *et al.*, 2004, 2005) 和西太平洋岛弧 (Sillitoe, 1993, 2010; Richards *et al.*, 2001; Kerrich *et al.*, 2000), 在特提斯成矿域内发育一系列与陆陆碰撞有关的斑岩铜矿床, 包括冈底斯成矿带和玉龙成矿带 (Hou *et al.*, 2003, 2004, 2009, 2011; Qu *et al.*, 2007)。一些经典的模式源于环太平洋成矿域 (Lowell and Guilbert, 1970; Hollister *et al.*, 1974; Hedenquist and Richards, 1998; Richards, 2003; Cooke *et al.*, 2004; Sillitoe, 2000, 2010) 和特提斯成矿域 (Hou *et al.*, 2003, 2004, 2009, 2011; Qu *et al.*, 2007)。

中亚成矿域西起俄罗斯境内的乌拉尔山脉, 向东经哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、吉尔吉斯斯坦以及我国的新疆、甘肃北部、内蒙和蒙古国, 至俄罗斯远东和我国东北地区, 涵盖了中亚的广袤地区 (图 1), 发育许多斑岩铜矿床, 其中不乏大型和超大型斑岩铜矿床, 从全球角度看, 阿克都卡 (Aktogai-Aidarly) ($\text{Cu} > 12\text{Mt}$), 额尔登特 (Erdenet) ($\text{Cu} > 11\text{Mt}$), 欧玉托勒盖 (Oyu Tolgoi) ($\text{Cu} > 35\text{Mt}$, $\text{Au} > 1280\text{t}$) 和阿尔马雷克 (Kal'makyr-Dalnee) ($\text{Cu} > 24\text{Mt}$, $\text{Au} > 2250\text{t}$) 被列入世界前三十位 (Richard, 2003; Cooke *et al.*, 2005; Seltnann and Porter, 2005; Seltnann *et al.*, 2014), 因此, 就斑岩铜矿床而言, 中亚成矿域具有与环太平洋和特提斯成矿域同等重要的地位。但是, 由于气候、交通、开发要求及研究程度等因素的制约, 中亚成矿域的研究广度和深度均远逊于大致同等规模的环太平洋成矿域与特提斯成矿域 (涂光炽, 1999)。

目前, 许多学者对中亚成矿域斑岩铜矿床进行了研究,

包括成矿构造背景 (Xiao *et al.*, 2009, 2010, 2013; Yakubchuk, 2005; Zhang *et al.*, 2006; Yakubchuk *et al.*, 2012; Wainwright *et al.*, 2011; Seltnann *et al.*, 2014; Shen *et al.*, 2009, 2013; Goldfarb *et al.*, 2013)、矿床地质地球化学 (Kudryavtsev, 1996; Bespaev and Miroshnichenko, 2004; 聂凤军等, 2004, 2010a, b; 江思宏等, 2010; 侯万荣等, 2010; Shen *et al.*, 2010a, b; Han *et al.*, 2006; Yakubchuk, 2005; Seltnann *et al.*, 2014)、成岩成矿年龄 (李诺等, 2007; Chen *et al.*, 2010, 2013; 陈志广, 2010; 江思宏等, 2010; Shen *et al.*, 2012, 2014a, b; Zeng *et al.*, 2014)、成矿流体地球化学 (Kudryavtsev, 1996; Shen *et al.*, 2010b; Han *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012) 等, 取得了丰硕的成果。在此基础上, 我们对中亚成矿域 9 个大型斑岩铜矿床 (包括哈萨克斯坦的波谢库尔、努尔卡斯甘、博尔雷、科翁腊德、阿克都卡和科克赛、中国新疆的包古图、土屋-延东、蒙古国的额尔登特等) 进行了研究 (图 1), 对中亚成矿域斑岩铜矿的基本特征进行了初步总结, 包括矿床分类、成矿流体特点、成矿系统、成矿年龄、含矿岩浆和成矿构造背景等, 期望为中亚成矿域斑岩铜矿研究的突破提供资料。

1 类型

在中亚成矿域, 大型和超大型斑岩铜矿床主要出露于哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、蒙古国和我国北方地区, 包括哈萨克斯坦的波谢库尔、努尔卡斯甘、博尔雷、科翁腊德、阿克都卡和科克赛, 乌兹别克斯坦阿尔马雷克, 塔吉克斯坦的 Taldy Bulak, 中国新疆的包古图、土屋-延东, 蒙古国的欧玉陶勒盖、额尔登特、查干苏布尔加, 中国内蒙古的乌奴格吐山和多宝山等 (图 1、表 1)。

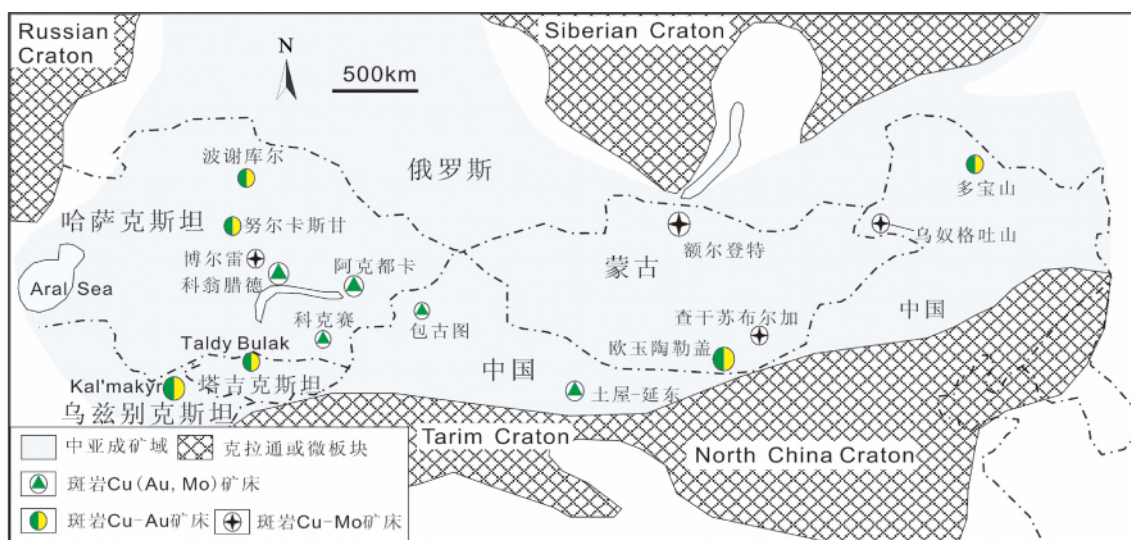


图 1 中亚成矿域构造简图和主要斑岩铜矿床分布图

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Central Asia metallogenic region, showing major porphyry deposits

表1 中亚成矿域主要斑岩铜矿床金属储量和品位以及成岩成矿时代(矿床位置见图1)

Table 1 Tonnage and grade data of major porphyry copper deposits in the Central Asia Metallogenic Domain (refer to Fig. 1 for locations)

矿床	位置	矿石量 (Mt)	Cu (wt%)	Cu (10 ⁴ t)	Mo (wt%)	Mo (10 ⁴ t)	Au (g/t)	Au(t)	参考文献	容矿岩石和年龄(Ma)	成矿年龄(Ma)	参考文献
Cu-Au												
波谢库尔	哈萨克 斯坦	1300(1)	0.31(1)	410(1)	0.014(2)	2.7(2)	0.28(2)	49(2)	(1) Yakubchuk <i>et al.</i> , 2012; (2) Kudryavtsev, 1996	英云闪长斑岩, Rb-Sr 等时限年龄 481 ± 23		Kudryavtsev, 1996
努尔卡斯甘	哈萨克 斯坦	518	0.78	393	-	-	0.45	229	Yakubchuk <i>et al.</i> , 2012	闪长岩和闪长斑岩; 泥盆纪		Heinhorst <i>et al.</i> , 2000; Singer <i>et al.</i> , 2008
Taldy Bulak	塔吉克 斯坦	432	0.17	73	0.01	4.2	0.46	196	Seltmann <i>et al.</i> , 2014	闪长斑岩; 奥陶纪		Seltmann <i>et al.</i> , 2014
阿尔马雷克矿床组	乌兹别 克斯坦	6150	0.39	2400	0.0023	14	0.37	2250	Singer, <i>et al.</i> , 2008	二长闪长岩和花岗闪长岩, SHRIMP 锆石 U-Pb ~ 315	辉钼矿 Re-Os 等时限年龄 317.6 ± 2(2)	(1) Seltmann and Porter, 2005; (2) 薛春纪等, 2013
欧玉托勒盖	蒙古	7160	0.5	3580			0.7	1280	聂凤军等, 2010a, b	石英二长闪长岩锆石 U-Pb 374 ± 3 ~ 372 ± 1(1)	辉钼矿 Re-Os 等时限年龄 372 ± 2 和 373 ± 1.2(2)	(1) Wainwright <i>et al.</i> , 2011; (2) Stein, 2003, unpublished data
多宝山	中国黑 龙江	644	0.52	335	0.02	13	0.16 ~ 0.35	73	杜琦等, 2010	花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 479.5 ± 4.6(1), 485 ± 8(2), LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 477.2 ± 4(3)	辉钼矿 Re-Os 等时限年龄 475.9 ± 7.9(3), 485.6 ± 3.7(4)	(1) 杜琦等, 2010; (2) 葛文春等, 2007; (3) Zeng <i>et al.</i> , 2014; (4) Liu <i>et al.</i> , 2012
Cu-Mo												
博尔雷	哈萨克 斯坦		0.34	60	0.011		0.03		Seltmann <i>et al.</i> , 2004	花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 316.3 ± 0.8(1)	辉钼矿 Re-Os 模式年龄 315.9(2)	(1) Chen <i>et al.</i> , 2013; (2) Chen <i>et al.</i> , 2010
额尔登特	蒙古	1775	0.62	1100	0.025	44			Gerel and Munkhtsengel, 2005	石英闪长岩和花岗闪长斑岩, SHRIMP 锆石 U-Pb 242.4 ± 3.1(1), SIMS 锆石 U-Pb 240.8 ± 1.7(2)	辉钼矿 Re-Os 年龄 240.6 ± 0.6(3)	(1) 江思宏等, 2010; (2) 本文; (3) Watanabe and Stein, 2000
查干苏布尔加	蒙古	240(1)	0.54(1)	130(1)	0.02(2)	4.8(2)	0.08(2)	19(2)	(1) Gerel, 1998; (2) Seltmann <i>et al.</i> , 2014	正长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 365.7 ± 3.6(1)	辉钼矿 Re-Os 等时限年龄 370.0 ± 5.9(1); 370.4 ± 0.8(2)	(1) 殷万荣等, 2010; (2) Watanabe and Stein, 2000
乌奴格吐山	中国内 蒙古	485	0.46	223	0.019	5.4			陈志广, 2010	二长斑岩锆石 U-Pb 179 ± 2(1), 188.3 ± 0.6(2)	辉钼矿 Re-Os 等时限年龄 178 ± 10(2)	(1) 陈志广, 2010; (2) 李诺等, 2007
Cu(Au, Mo)												
科翁腊德	哈萨克 斯坦	790(1)	0.61(1)	482(1)	0.0035(1)		0.017(2)		(1) Zhukov <i>et al.</i> , 1997; (2) Kudryavtsev, 1996	花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 325(1); 二长花岗岩 U-Pb 锆石 SHRIMP 327.3 ± 2.1(2)		(1) Heinhorst <i>et al.</i> , 2000; (2) Chen <i>et al.</i> , 2013
阿克都卡矿床组	哈萨克 斯坦	3130(1)	0.4(1)	1250(1)			0.01 ~ 0.04(2)	83(2)	(1) Cooke <i>et al.</i> , 2005; (2) Seltmann <i>et al.</i> , 2014	石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 335.7 ± 1.3; 花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 327.5 ± 1.9		Chen <i>et al.</i> , 2013
科克赛	哈萨克 斯坦	700	0.47	330	-	-	0.13	91	Yakubchuk <i>et al.</i> , 2012	英云闪长斑岩 SIMS 锆石 U-Pb 438.3 ± 3.1		本文
包古图	中国新疆	225	0.28	63	0.01	1.8	0.1	14	Shen <i>et al.</i> , 2010a, b	闪长岩 SIMS 锆石 U-Pb 313 ± 2	辉钼矿 Re-Os 模式年龄 312.4 ± 1.8	Shen <i>et al.</i> , 2012
土屋-延东	中国新疆	469	0.43	200			0.08	37	Yakubchuk <i>et al.</i> , 2012	英云闪长斑岩 SIMS 锆石 U-Pb 332.2 ± 2.3(延东)(1)和 332.8 ± 2.5(土屋)(2)	辉钼矿 Re-Os 模式年龄 318 ± 5 ~ 325 ± 3Ma(3)	(1) Shen <i>et al.</i> , 2014a; (2) Shen <i>et al.</i> , 2014b; (3) 芮宗瑶等, 2002

1.1 按所含金属划分

斑岩型铜矿床按所含金属分为斑岩 Cu-Au、Cu-Mo、Cu-Mo-Au 等矿床, Au > 0.4 g/t 的斑岩铜矿称为富 Au 斑岩 Cu 矿 (Sillitoe, 1993), Au > 0.2 g/t 的斑岩铜矿称为斑岩 Cu-Au 矿 (Sinclair, 2007)。按照这一分类原则, 中亚成矿域斑岩型铜矿床分为富 Au 斑岩 Cu 矿床、斑岩 Cu-Au 矿床、斑岩 Cu (Au, Mo) 矿床和斑岩 Cu-Mo 矿床等四种类型。鉴于目前发表的大多数文章将中亚成矿域富 Au 斑岩 Cu 矿床归为斑岩 Cu-Au 矿床 (Goldfarb *et al.*, 2013; Seltmann *et al.*, 2014), 为了避免歧义, 我们将富 Au 斑岩 Cu 矿床和斑岩 Cu-Au 矿床统称为斑岩 Cu-Au 矿床。其中, Au > 0.4 g/t 斑岩铜矿床包括哈萨克斯坦的努尔卡斯坦、乌兹别克斯坦的阿尔马雷克、塔吉克斯坦的 Taldy Bulak 和蒙古国的欧玉托勒盖; Au > 0.2 g/t 斑岩铜矿床包括哈萨克斯坦的波谢库尔和中国内蒙古的多宝山 (图 1、表 1)。

在中亚成矿域, 一些斑岩铜矿包含大量的钼 (Mo > 0.01%) 和很少量的金 (Au < 0.08 g/t), 这些矿床属于斑岩 Cu-Mo 矿床, 如哈萨克斯坦的博尔雷、蒙古国的额尔登特和查干苏布尔加、中国的乌奴格吐山等。此外, 在中亚成矿域, 一些斑岩铜矿包含少量的金 (Au < 0.2 g/t) 和或少量的钼 (Mo < 0.01%), 这些矿床属于 Cu (Au, Mo) 矿床, 如哈萨克斯坦的科翁腊德、阿克都卡和科克赛、中国新疆的包古图、土屋-延东等。

1.2 按成矿特点划分

此外, 斑岩型 Cu 矿床按照矿床特点分为经典的斑岩铜矿床和还原性斑岩铜矿床 (Rowins, 2000), 后者发育磁黄铁矿和富 CH₄ 成矿流体等, 显示还原性特点。我们对中亚成矿域斑岩铜矿床进行了研究, 首次确定新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿为还原性斑岩铜矿 (申萍等, 2010^①)。因此, 中亚成矿域除发育经典的斑岩铜矿床外, 还发育少量的还原性斑岩铜矿床。

2 典型矿床特点

2.1 斑岩 Cu-Au 矿床

2.1.1 哈萨克斯坦的波谢库尔

波谢库尔 Cu-Au 矿床位于中哈萨克斯坦西北部 (图 1), 该矿床含有 410 万吨铜和 100 吨金 (表 1)。矿区出露中下寒武统火山岩和早奥陶纪英云闪长斑岩岩脉。矿化出现在英云闪长斑岩和附近的火山岩中。英云闪长斑岩和附近的火山岩均发生强烈的蚀变, 包括黑云母-磁铁矿、石英-绢云母和石英-绢云母-方解石-绿泥石等蚀变 (Kudryavtsev, 1996)。

2.1.2 哈萨克斯坦的努尔卡斯坦

努尔卡斯坦 Cu-Au 矿床位于中哈萨克斯坦西北部, 波谢

库尔矿床西南约 200 km 处 (图 1)。该矿床含有 393 万吨铜和 229 吨金 (表 1)。矿区出露晚志留-泥盆纪中基性火山-沉积岩和侵入其中的一个花岗岩类杂岩体 (Zhukov *et al.*, 1997), 容矿岩石为杂岩体中的闪长岩、二长岩和花岗闪长岩 (Zhukov *et al.*, 1997), 矿化类型包括与早期闪长岩有关的细脉浸染状铜矿化和与晚期闪长岩和隐爆角砾岩有关的高硫型浅成低温热液金矿化 (Zhukov *et al.*, 1997; Seltmann *et al.*, 2014)。斑岩型铜成矿作用与钾化和青磐岩化有关; 浅成低温热液金成矿作用与绢云母-绿泥石-方解石蚀变有关 (Zhukov *et al.*, 1997; Seltmann *et al.*, 2014)。

2.1.3 塔吉克斯坦的 Taldy Bulak

Taldy Bulak Cu-Au 矿床位于塔吉克斯坦北部边境处 (图 1)。该矿床含有 72 万吨铜和 195 吨金 (表 1)。矿区出露晚寒武-中奥陶世海相沉积岩、中奥陶世中基性火山岩, 中奥陶世闪长斑岩侵入其中 (Seltmann *et al.*, 2014), 矿化与闪长斑岩岩株有关。该岩株发育密集的裂隙和强烈的蚀变。

2.1.4 乌兹别克斯坦的阿尔马雷克

阿尔马雷克 Cu-Au 矿床组位于乌兹别克斯坦首都塔什干东南 65 km 处 (图 1)。该矿床组包括 Kal'makyr、Dalnee、Sarcheku 和 Kyzata 4 个铜矿床, Kal'makyr 和 Dalnee 矿床最大, 该矿床组含有 2400 万吨铜和 2250 吨金 (表 1)。矿区发育泥盆-石炭纪火山-沉积岩和石炭-二叠纪中酸性侵入岩。成矿作用与晚石炭世石英二长斑岩有关, 热液蚀变发育, 从岩体向外依次出现石英钾长石黑云母化带、石英绢云母绿泥石化带、石英伊利石水白云母化带和青磐岩化带。铜矿化与绿泥石化和黄铁矿化关系密切, 钼矿化与绢云母化和绿泥石化有关, 金矿化与黄铁矿化和硅化关系密切 (薛春纪等, 2013)。

2.1.5 蒙古的欧玉托勒盖

欧玉托勒盖 Cu-Au 矿床位于蒙古首都乌兰巴托南 650 km 处 (图 1)。该矿床含有 3580 万吨铜和 1280 吨金 (表 1)。矿区出露志留-泥盆纪中基性火山-沉积岩和侵入其中的一系列二长岩和闪长岩岩株和岩脉, 成矿作用与晚泥盆纪石英二长闪长岩和花岗闪长岩有关 (聂凤军等, 2010a, b; Wainwright *et al.*, 2011)。热液蚀变包括 Ca-Na 硅酸盐蚀变、黑云母-磁铁矿、钾长石、石英绢云母化、中高级泥化和青磐岩化蚀变, 矿化与绢云母化关系密切。

2.1.6 中国内蒙古的多宝山

多宝山 Cu-Au 矿床位于矿区位于内蒙古嫩江县城北 146 km 处 (图 1)。该矿床含有 335 万吨铜和 73 吨金 (表 1)。矿区出露中奥陶统多宝山组一套滨海-浅海相的火山熔岩和火山碎屑岩、碎屑火山沉积岩组合。侵入岩主要为花岗闪长岩、花岗闪长斑岩, 其次为石英闪长岩和更长花岗岩等。与成矿关系密切的是花岗闪长岩和花岗闪长斑岩。热液蚀变

① 申萍等. 2010. 大型斑岩型铜(钼、金)矿床预测和靶区评价技术与应用研究 (2006BAB07B01). P137-153

从岩体向外依次为石英核、钾硅化带、黑云母-钾长石化带、石英绢云母化、绿泥石化、绿帘石化带、青磐岩化带。石英绢云母化、绿泥石-绢云母化为主要含矿蚀变带(杜琦等, 2010)。

2.2 斑岩 Cu(Au, Mo) 矿床

2.2.1 哈萨克斯坦的科翁腊德

科翁腊德铜矿床位于巴尔喀什湖西北部(图1)。该矿床含有480万吨铜(表1)。矿区出露早石炭纪火山-沉积岩,中石炭世托克劳杂岩体侵入其中,容矿岩石是托克劳杂岩体中的花岗闪长斑岩和花岗闪长岩。蚀变包括三种类型:(1)钾化和白云母-石英-电气石蚀变;(2)石英-绢云母和石英-绢云母-硬水铝石蚀变;(3)青磐岩化蚀变和石英-高岭石-泥化蚀变(Kudryavtsev, 1996)。脉状和角砾状矿化与绢云母化有关。

2.2.2 哈萨克斯坦的阿克都卡

阿克都卡铜矿床组位于巴尔喀什湖东北部(图1),该矿床组包括阿克都卡、阿尔达雷和卡兹卡亚矿床,含有1200万吨铜(表1)。矿区出露早石炭纪火山岩,科尔达杂岩体侵入其中,容矿岩石是科尔达杂岩体中的英云闪长斑岩。热液蚀变包括英云闪长斑岩中的石英-黑云母蚀变和石英-绢云母蚀变以及围岩中的青磐岩化蚀变。浸染状和少量的脉状矿化与石英-绢云母化蚀变有关。

2.2.3 哈萨克斯坦的科克赛

科克赛铜矿床位于巴尔喀什湖东南部(图1)。该矿床含有164万吨铜(表1)。矿区出露早石炭纪酸性火山-沉积岩和侵入其中的英云闪长斑岩岩枝,矿化与英云闪长斑岩岩枝有关。蚀变包括早期的石英-钾长石-绿泥石蚀变、随后的石英-绢云母-绿泥石蚀变和叠加其上的方解石-重晶石蚀变(Seltmann *et al.*, 2004, 2014)。

2.2.4 中国新疆的包古图

包古图铜矿床位于新疆西准噶尔地区(图1)。该矿床含有63万吨铜(表1)。矿区出露早石炭世中酸性火山-沉积岩,晚石炭世中性侵入岩侵入其中。矿化与中性侵入岩岩株有关(Shen *et al.*, 2010a)。热液蚀变包括岩体内部的黑云母蚀变和围岩的青磐岩化蚀变和叠加其上的晚期的绢云母化。浸染状和少量的脉状矿化与石英-绢云母化蚀变有关。需要说明的是,该矿床与经典的氧化性斑岩型Cu矿具有明显不同的特征,即发育原生磁黄铁矿,成矿流体富含还原性气体 CH_4 (Shen *et al.*, 2010b),矿床属于还原性斑岩铜矿,其还原特点是由于含矿的中性岩浆侵位时与含碳质围岩发生了同化混染作用所致(Shen and Pan, 2013)。

2.2.5 中国新疆的土屋-延东

土屋-延东铜矿床组位于新疆东天山地区(图1)。该矿床组包括土屋、土屋东、延东和延西4个铜矿床,含有200万吨铜(表1)。矿区出露下石炭统火山-次火山岩和石炭纪酸

性侵入岩,成矿作用与早石炭世英云闪长斑岩有关(Han *et al.*, 2006; Shen *et al.*, 2014a, b)。热液蚀变从岩体向外依次出现黑云母化带和青磐岩化带,其上叠加有绢英岩化和绿泥石-绢云母化蚀变带,矿化与绢英岩化和绿泥石-绢云母化有关(Shen *et al.*, 2014a, b)。

2.3 斑岩 Cu-Mo 矿床

2.3.1 哈萨克斯坦的博尔雷

博尔雷 Cu-Mo 矿床位于巴尔喀什湖西北部,科翁腊德矿床西北约45km处(图1)。该矿床含有60万吨铜(表1)。矿区出露石炭纪长英质火山-沉积岩和石炭纪侵入岩,矿化与石炭纪侵入岩有关,包括石英闪长岩、花岗闪长岩和花岗斑岩。蚀变包括钾化和青磐岩化蚀变以及叠加其上的石英-方解石蚀变。

2.3.2 蒙古的额尔登特

额尔登特 Cu-Mo 矿床位于蒙古首都乌兰巴托西北240km处(图1)。该矿床含有1100万吨铜和44万吨钼(表1)。区域出露的前寒武纪和早古生代基底岩石被晚二叠纪色楞额杂岩体侵入,该岩体由花岗岩、辉长岩和闪长岩组成,随后,晚石炭-早三叠纪额尔登特杂岩体(包括闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩)侵入其中,成矿作用与额尔登特杂岩体的闪长岩和花岗闪长岩有关(江思宏等, 2010)。热液蚀变从岩体向外出现石英钾长石化带、石英绢云母化带和伊利石白云母化带,矿化与绢云母化关系密切(Gerel and Munkhtsengel, 2005; 江思宏等, 2010)。

2.3.3 蒙古的查干苏布尔加

查干苏布尔加 Cu-Mo 矿床位于蒙古首都乌兰巴托南600km处(图1)。该矿床含有130万吨铜和4.8万吨钼(表1)。矿区出露石炭纪中性火山岩和沉积岩以及侵入其中的晚泥盆纪查干苏布尔加岩体,该岩体由正长花岗岩和花岗闪长岩组成(Watanabe and Stein, 2000),包括闪长岩、花岗岩、花岗闪长斑岩、正长花岗斑岩和二长花岗斑岩,其中后三类岩石与铜矿成矿有密切的空间分布关系。热液蚀变从岩体向外依次为硅化、钾长石化、绢云母化、泥化和青磐岩化,其中绢云母化和硅化与铜矿化关系密切(侯万荣等, 2010)。

2.3.4 中国内蒙古的乌奴格吐山

乌奴格吐山 Cu-Mo 矿床位于内蒙古,据中俄边境30km处(图1)。该矿床含有223万吨铜和5.4万吨钼(表1)。矿区出露中生代火山岩,乌奴格吐岩体侵入其中,该岩体主要由石英二长斑岩和流纹质角砾岩筒组成(陈志广, 2010),其中石英二长斑岩与铜矿成矿有密切的空间分布关系。热液蚀变包括内部的石英-钾长石化带和外部的石英-绢云母化带和叠加其上的伊利石-白云母-碳酸盐化带(陈志广, 2010)。

3 分析方法及结果

含矿岩体的主量和微量元素分析样品采自7个矿床的

表2 中亚成矿域主要斑岩铜矿床含矿岩体常量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 2 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of host rocks from major porphyry copper deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

矿床	波谢库尔				努尔卡斯坦			博尔雷		科翁腊德	
含矿岩石	英云闪长斑岩				闪长岩			石英闪长岩		花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩
样品号	12HSB03-4	12HSB03-6	12HSB03-7	12HSB03-14	12HS03-1	12HS03-2	12HS04-4	9HS13-3	9HS13-8	9HS13-12	9HS15-3-2
SiO ₂	72.41	68.18	67.95	66.93	67.19	68.92	65.15	67.34	62.39	65.88	67.48
Al ₂ O ₃	14.55	16.26	14.86	15.87	15.99	16.4	15.28	14.71	16.18	16.81	15.81
Fe ^T	1.65	2.99	2.48	2.33	2.25	2.7	4.56	3.96	5.21	4.69	3.59
MgO	0.97	1.54	1.39	1.49	0.67	0.58	1.17	1.61	2.68	2.43	1.39
CaO	0.66	0.91	2.97	2.71	1.88	0.66	3.27	3.22	4.65	0.532	2.02
Na ₂ O	4.09	5.36	4.15	4.56	2.43	0.14	3.61	3.15	4.02	1.83	4.27
K ₂ O	3.42	1.83	2.04	2.14	6.16	6.91	3.78	3.76	2.47	3.9	2.01
MnO	0.02	0.03	0.08	0.07	0.09	0.24	0.07	0.073	0.10	0.06	0.08
TiO ₂	0.31	0.34	0.33	0.33	0.37	0.45	0.39	0.425	0.61	0.63	0.41
P ₂ O ₅	0.14	0.16	0.16	0.16	0.17	0.22	0.17	0.097	0.16	0.23	0.15
LOI	1.56	2.26	2.88	2.76	2.18	2.94	2.02	1.13	1	2.43	2.27
Total	99.78	99.86	99.30	99.36	99.38	100.16	99.47	99.47	99.48	99.43	99.48
FeO	0.91	1.01	1.09	1.16	0.85	1.63	1.91	2.10	2.84	1.83	2.24
Mg [#]	0.66	0.73	0.70	0.70	0.59	0.39	0.52	0.58	0.63	0.71	0.53
Li	4.52	6.23	5.71	7.48	9.33	7.06	11.4	15.5	29.2	22.7	16.3
Be	0.692	0.78	0.78	0.888	1.24	1.32	1.07	1.5	1.45	2.11	1.39
Sc	5.64	5.26	6.05	6.18	6.06	9.66	5.7	9.67	14.2	9.18	4.08
V	75.4	86	92.8	82.1	68.1	108	85.6	80.4	113	98.9	49.7
Cr	6.45	5.69	12.7	5.35	2.23	1.92	1.88	10.3	42.8	16.5	4.64
Co	5.38	23.4	9.26	9.72	24.6	23	5.07	10.3	15.9	7.59	7.15
Ni	3.94	8.29	6.91	6.38	1.17	1.76	1.17	7.28	21.6	9.92	4.93
Ga	12.1	16.7	14.3	16.6	15.3	22.2	13.8	15.5	16.1	18.1	14.5
Rb	48.5	36.8	43.6	45.5	145	184	67.4	152	75.8	291	60.2
Sr	226	308	224	256	134	47.7	556	294	444	187	357
Y	17.6	15.7	13.5	15	16.5	19.4	15.3	23.5	20.5	13.9	8.93
Cs	0.925	0.929	1.21	1.36	2.09	4.39	0.911	6.28	8.34	16.5	11.1
Ba	752	253	283	319	537	573	760	616	849	400	502
La	21.8	35.5	12.6	14.2	17.2	20	13	33.5	26.6	30.2	17.6
Ce	43.9	61	22.4	25	29	30	25	62.4	49.4	54.2	36.2
Pr	5.24	7.71	2.46	2.86	3.22	3.48	3.12	7.11	5.86	6.33	4.37
Nd	19.9	24.4	10.5	12.3	12.5	12	12.2	24.9	22.3	23.4	16.9
Sm	4.04	4.2	2.6	2.54	2.69	2.46	2.69	4.5	4.08	4.26	2.9
Eu	1.34	1.48	0.795	0.777	0.706	0.448	0.922	0.81	1.05	0.934	0.745
Gd	3.22	3.91	1.92	2.06	2.53	2.4	2.3	4.03	3.72	3.32	2.04
Tb	0.538	0.547	0.34	0.359	0.458	0.426	0.431	0.713	0.638	0.541	0.325
Dy	3.04	2.86	2.15	2.29	2.78	2.89	2.4	3.96	3.48	2.72	1.67
Ho	0.545	0.559	0.439	0.45	0.516	0.521	0.446	0.803	0.692	0.5	0.287
Er	1.54	1.7	1.24	1.37	1.51	1.72	1.44	2.46	2.15	1.42	0.872
Tm	0.234	0.226	0.223	0.216	0.251	0.252	0.229	0.433	0.371	0.253	0.14
Yb	1.55	1.52	1.4	1.54	1.67	1.82	1.63	2.92	2.49	1.65	1.02
Lu	0.249	0.219	0.208	0.235	0.31	0.289	0.252	0.433	0.374	0.243	0.142
Pb	299	2.18	52.4	43.4	15.8	7.56	5.51	19.7	18	94.7	43.8
Th	3.19	3.4	2.85	3.17	4.23	7.54	4.36	26.2	12.2	18.8	6.42
U	0.75	0.94	0.841	0.85	2.93	3.93	1.44	5.03	5.18	6.88	2.16
Nb	5.46	6.59	5.24	5.8	6.54	10.7	6.66	10.2	7.8	8.5	4.98
Ta	0.361	0.397	0.346	0.432	0.476	0.782	0.474	1.07	0.727	0.896	0.454
Zr	81.8	106	94.2	113	115	171	132	125	203	119	74.6
Hf	2.74	3.12	2.93	2.97	3.54	5.17	3.6	4.52	5.82	3.79	2.45

续表 2

Continued Table 2

矿床	科翁腊德		阿克都卡			科克赛			额尔登特		
含矿岩石	花岗闪长岩		英云闪长斑岩			花岗闪长斑岩			花岗闪长岩		
样品号	9HS15-6-1	9HS15-6-2	9HS49-5	9HS49-7	9HS49-8	9HS76-3	9HS76-4	9HS76-5	ME2-2	ME2-3	ME2-4
SiO ₂	67.54	66.1	69.22	64.04	66.74	71.01	70.94	67.79	67.41	63.86	68.13
Al ₂ O ₃	16.08	17.53	15.48	17.04	16.15	14.12	16.35	15.34	14.87	15.77	14.95
Fe ^T	2.8	2.43	0.94	4.6	2.04	2.97	1.85	2.47	2.92	4.05	3.64
MgO	1.46	1.58	1.12	1.53	1.86	1.53	1.08	1.75	1.17	1.63	1.44
CaO	2.16	3.44	0.96	3.2	1.42	0.437	0.28	1.32	2.58	3.43	1.41
Na ₂ O	4.7	2.93	3.4	4.37	3.95	4.26	1.78	4.23	4.35	4.53	4.57
K ₂ O	2.16	3.4	5.53	2.18	4.16	1.61	3.76	3.52	3.44	3.35	3.36
MnO	0.05	0.06	0.02	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03	0.041	0.06	0.051
TiO ₂	0.43	0.45	0.47	0.55	0.53	0.47	0.44	0.45	0.48	0.61	0.55
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.22	0.22	0.21	0.14	0.09	0.19	0.11	0.15	0.14
LOI	1.92	1.39	2.13	1.66	2.37	2.83	2.88	2.35	2.2	2.15	1.36
Total	99.45	99.47	99.48	99.42	99.45	99.42	99.46	99.44	99.58	99.60	99.61
FeO	1.66	1.65	0.41	2.26	1.20	0.84	0.37	0.59	1.37	2.12	1.49
Mg [#]	0.61	0.63	0.83	0.55	0.74	0.77	0.84	0.84	0.61	0.58	0.63
Li	18.1	18.9	6.66	7.38	8.72	12	9.7	6.5	11.6	7.62	13.5
Be	1.45	1.80	1.18	1.42	1.07	1.13	0.932	0.998	1.52	1.62	1.47
Sc	5.59	4.93	4.57	5.73	3.54	9.68	4.89	6.46	5.88	8.8	7.53
V	63.1	57.2	72.8	129	60.7	93.5	46.8	80.2	63.5	93.8	74.5
Cr	7.88	7.67	7.62	9.76	4.71	18	18.2	17.9	13.6	19.6	16.2
Co	7.06	5.64	2.67	7.7	3.76	10.9	5.51	4.59	7.84	10.9	9.99
Ni	4.94	5.19	2.77	7.93	3.79	11.4	13.7	7.68	7.41	10.9	8.67
Ga	16.2	14.1	12.2	18	9.63	10.9	9.69	12	16.6	17.7	15.8
Rb	60.5	88.9	83.9	54.2	58.3	40.7	46.8	72.4	70.6	66	72.9
Sr	670	211	451	1036	453	167	153	141	514	664	634
Y	9.83	8.25	9.74	8.95	5.77	14.8	4.65	6.75	12.5	12.5	13.1
Cs	9.76	18.2	1.44	1.43	1.52	1.02	0.755	0.911	2.79	2.42	2.03
Ba	711	507	1168	918	640	208	497	782	910	1137	903
La	20.7	12.2	25.1	16.6	10.1	26.7	10.2	11.3	20.7	20.9	17.1
Ce	40.9	26.2	44.5	33.2	19	46.8	19.2	21.4	39.6	38.6	34.4
Pr	4.99	3.39	5.55	4.22	2.35	5.53	2.29	2.52	4.63	4.63	4.31
Nd	19.1	12.2	21.4	16.6	9.43	20.8	8.26	8.8	17.9	18.6	17.1
Sm	3.29	2.27	3.52	2.84	1.73	3.73	1.37	1.54	3.21	3.36	3.33
Eu	0.919	0.5	1.05	0.82	0.541	0.921	0.384	0.503	0.806	1.07	0.826
Gd	2.48	1.71	2.6	2.03	1.21	3.12	1.09	1.4	2.59	3.09	2.65
Tb	0.366	0.295	0.392	0.328	0.183	0.516	0.16	0.236	0.426	0.5	0.486
Dy	1.84	1.52	1.77	1.57	0.956	2.64	0.831	1.23	2.31	2.55	2.55
Ho	0.342	0.283	0.331	0.301	0.168	0.516	0.153	0.221	0.437	0.462	0.465
Er	0.986	0.849	0.968	0.859	0.538	1.51	0.517	0.691	1.26	1.32	1.46
Tm	0.163	0.14	0.162	0.148	0.088	0.24	0.084	0.111	0.217	0.215	0.229
Yb	1.02	0.972	1.06	0.946	0.639	1.57	0.624	0.74	1.38	1.33	1.48
Lu	0.154	0.153	0.153	0.145	0.097	0.226	0.097	0.107	0.221	0.213	0.229
Pb	17.9	37.9	9.08	8.02	4.76	4.5	1.81	3.96	12.3	11.4	7.19
Th	7.47	7.35	5.78	5.1	5.69	7.36	5.46	5.91	9.42	8.14	6.78
U	1.99	2.11	3.75	1.45	0.513	1.93	1.58	2.75	2.76	2.28	1.71
Nb	4.92	4.65	3.46	3.25	2.30	6.53	5.09	7.52	6.03	4.30	4.98
Ta	0.443	0.417	0.224	0.230	0.144	0.463	0.455	0.638	0.578	0.244	0.487
Zr	95.7	92.8	52.0	66.2	31.4	69.6	51.3	65.2	160	198	178
Hf	3.08	2.92	2.00	2.42	1.36	2.19	1.75	2.26	5.97	6.96	5.93

注: $Mg^{\#} = (100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+}))$

含矿岩体(波谢库尔、努尔卡斯甘、博尔雷、科翁腊德、阿克都卡、科克赛、额尔登特等)流体包裹体激光拉曼测量样品来自3个矿床(科翁腊德、包古图、额尔登特)主成矿阶段形成的石英-硫化物脉,年龄样品来自2个矿床的含矿岩体(哈萨克斯坦的科克赛斑岩 Cu 矿床和蒙古国的额尔登特 Cu-Mo 矿床)。

3.1 分析方法

3.1.1 主量和微量元素分析

挑选了22个岩石弱蚀变的样品,在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行了岩石化学全分析和微量元素分析。主元素的测定是采用硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法(XRF),实验仪器为荷兰 FHLISP 公司的 PW2404 顺序扫描型 X 射线荧光光谱仪;微量和稀土元素测定是采用德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENTI 电感耦合等离子体质谱仪。主量元素分析精度和准确度优于 5%,微量元素分析精度和准确度一般优于 10%,稀土元素优于 5%。

3.1.2 SIMS 锆石 U-Pb 定年

对科克赛斑岩 Cu 矿床和额尔登特斑岩 Cu-Mo 矿床的含矿岩体进行了 SIMS 锆石 U-Pb 定年研究。用磁选和重液分选技术分选出锆石,将其颗粒以及标准锆石 TEMORA2 和 91500 一起安装到 Temora 粘贴在环氧树脂靶上,抛光一半以揭露锆石内部结构。对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光(CL)图象分析,挑选合适的锆石颗粒和靶点部位。锆石 U、Th、Pb 的测定在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)上进行。详细的分析流程见 Li *et al.* (2009)。

3.1.3 包裹体气相成分分析

选择科翁腊德、包古图、额尔登特成矿阶段形成的石英-硫化物脉中的石英,采用激光拉曼光谱分析技术,在中国科学院地质与地球物理研究所对包裹体气相成分进行了分析,所用仪器为法国 HORIBA Scientific 生产的 LabRam HR800 激光共焦显微拉曼光谱仪。

3.2 分析结果

3.2.1 主量和微量元素

7个含矿岩体主量和微量元素分析结果见表2。

由于热液蚀变发育,不能完全排除蚀变的影响,因此,本次研究选择不活泼元素进行岩石地球化学研究。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图中(图2),大部分成分点落在闪长岩、花岗闪长岩区,属于亚碱性系列,少量落在二长岩区,属于碱性系列。结合岩相学研究结果和岩石 SiO₂ 含量(表2),中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体岩性主要为花岗闪长岩、闪长岩、英云闪长玢岩和二长岩等。

岩石的稀土配分模式呈右倾型(图3),Eu 异常不明显,

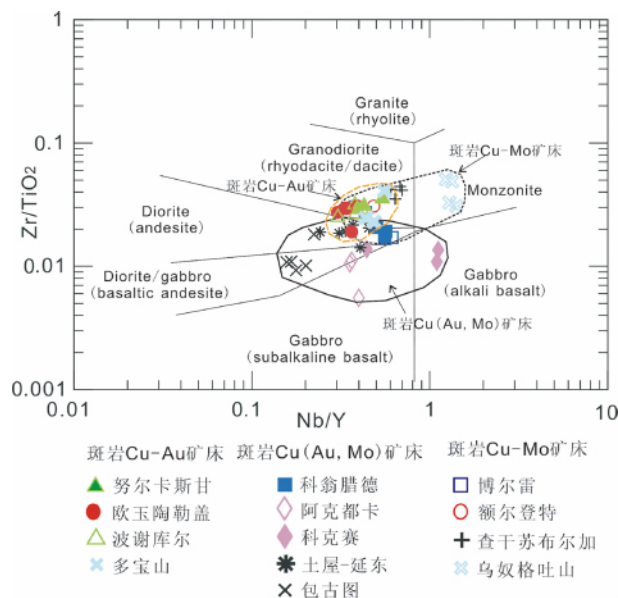


图2 中亚成矿域主要斑岩铜矿床含矿岩体 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(据 Winchester and Floyd, 1977)

图中 Oyu Tolgoi 数据来自 Dolgoplova *et al.* (2013), 多宝山数据来自葛文春等(2007), Tsagaan Suvarga 数据来自侯万荣等(2010); 乌奴格吐山数据来自陈志广等(2008); 包古图和土屋-延东数据来自 Shen and Pan (2013), Shen *et al.* (2014a, b); 其它数据来自本次工作。图3数据来源同此图

Fig. 2 Zr/TiO₂ vs. Nb/Y classification diagrams of samples analyzed from the host rocks from the main porphyry copper deposits in the Central Asia Metallogenic Domain (after Winchester and Floyd, 1977)

在微量元素标准化蛛网图上(图3),富集大离子亲石元素(Cs、Ba、LREE)、亏损高场强元素(Nb、P、HREE)和Ti。

3.2.2 SIMS 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石的阴极发光(CL)图像(图4a, b)研究表明,锆石呈现清晰的韵律环带结构,具有岩浆锆石的特征。测试结果在表3中。

9HS76-5 样品: 19个测点中有17个测点落在谐和线上,谐和年龄值为 438.3 ± 3.1 Ma, MSWD = 0.32(图4c)。因此,438 Ma 应代表科克赛 Cu 矿床含矿岩体的侵位年龄,为早志留世。

ME2-4 样品: 20个测点较集中,落在谐和线上,谐和年龄值为 240.8 ± 1.7 Ma, MSWD = 0.0096(图4d)。因此,240 Ma 应代表额尔登特 Cu-Mo 矿床含矿岩体的侵位年龄,为中三叠世。

3.2.3 包裹体成分

对哈萨克斯坦的科翁腊德、新疆的包古图和蒙古国的额尔登特矿床主成矿阶段的含矿石英脉进行了石英流体包裹体岩相学研究,结果表明,流体包裹体主要为气液、气体和含子矿物包裹体等三种类型,子矿物主要是石盐和钾盐,而在

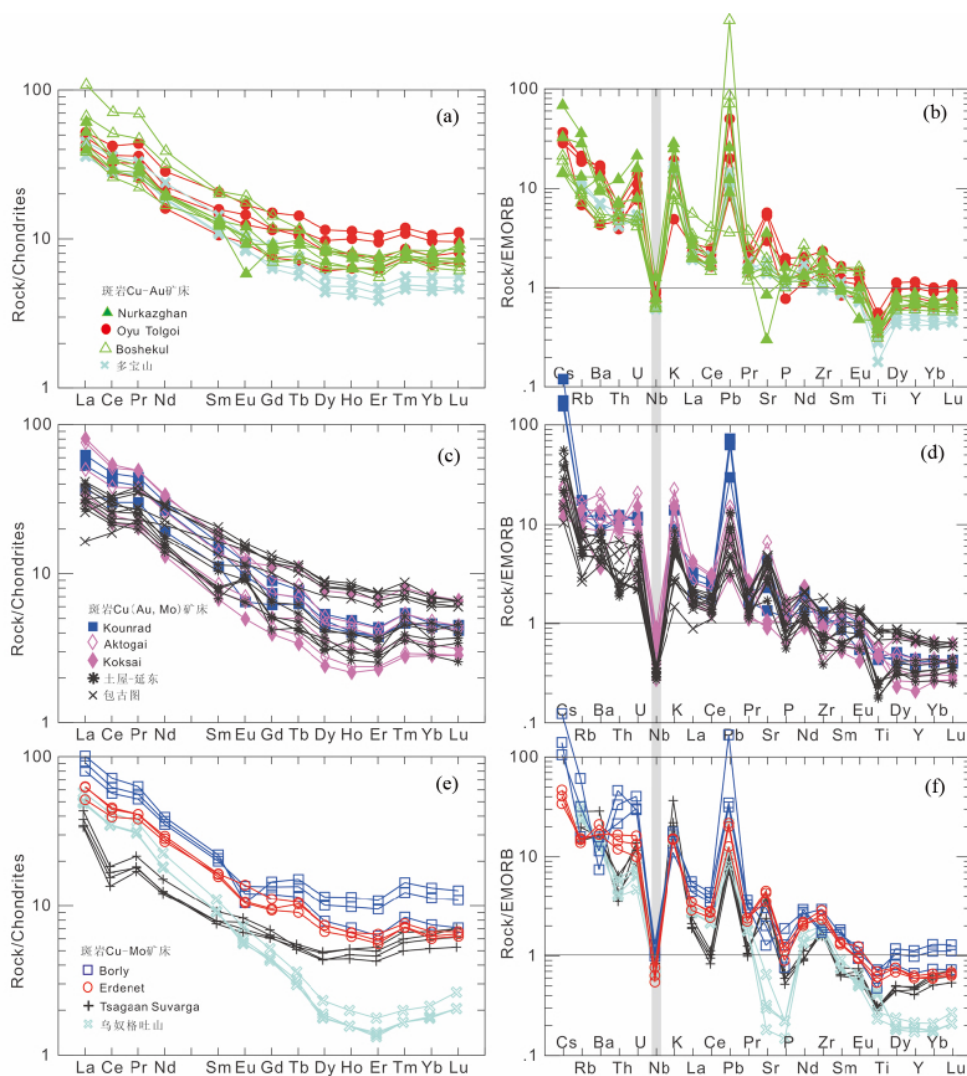


图3 中亚成矿域主要斑岩铜矿床含矿岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, c, e, 标准化值据 Nakamura, 1974) 和 E-MORB 标准化微量元素蛛网图(b, d, f, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a, c, e, normalization values after Nakamura, 1974) and E-MORB-normalized trace elements patterns (b, d, f, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the host rocks from porphyry Cu-Au deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

科翁腊德和额尔登特矿床石英包裹体中还发育硫化物子矿物(黄铜矿)。在此基础上,采用激光拉曼光谱分析技术进行包裹体气相成分进行了分析,分析结果见图5。

科翁腊德斑岩铜矿成矿流体富含 SO_2 ,有少量的 CO_2 (图5a, b);额尔登特斑岩铜矿床成矿流体富含 CO_2 (图5c);包古图斑岩铜矿床成矿流体则富含 CH_4 (图5g),有少量 CO_2 (图5h)。

4 讨论

4.1 成岩成矿年龄

科克赛矿区出露早石炭纪酸性火山-沉积岩和侵入其中的英云闪长斑岩岩枝(Seltmann *et al.*, 2004, 2014)。目前对

含矿岩体的年龄未见报道。我们进行的SIMS高精度U-Pb定年结果为 $438.3 \pm 3.1\text{Ma}$,限定了成岩年龄为早志留世。额尔登特石英闪长岩和花岗闪长斑岩SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $242.4 \pm 3.1\text{Ma}$ (江思宏等, 2010),我们进行的SIMS锆石U-Pb年龄为 $240.8 \pm 1.7\text{Ma}$,与前人研究结果一致。

为了便于对比,我们将中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体的锆石U-Pb年龄和辉钼矿Re-Os年龄列于表1和图6中。可见,中亚成矿域斑岩铜矿形成于不同时代,奥陶纪形成哈萨克斯坦的波谢库尔Cu-Au矿、塔吉克斯坦的Taldy Bulak Cu-Au矿、中国内蒙古的多宝山Cu-Au矿,志留纪形成哈萨克斯坦的科克赛铜矿,泥盆纪形成哈萨克斯坦的努尔卡斯甘Cu-Au矿、蒙古国的欧玉陶勒盖Cu-Au矿和查干苏布尔加Cu-Mo矿,石炭纪形成哈萨克斯坦的博尔雷Cu-Mo矿、科翁腊德铜矿和阿克都卡铜矿、乌兹别克斯坦的阿尔马雷克Cu-Au矿、

表3 科克赛斑岩 Cu 矿床和额尔登特斑岩 Cu-Mo 矿床含矿岩体锆石 SIMS U-Pb 数据

Table 3 SIMS U-Pb zircon data for host rocks from the Koksai and Erdenent porphyry deposits

Spot No.	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th/U	f_{206} (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm \%$	$t_{206/238}$ (Ma)	$\pm s$
科克赛												
9HS76-4@1	325	207	0.64	0.16	0.05536	1.57	0.54370	2.17	0.0712	1.50	443.6	6.4
9HS76-4@2	494	417	0.84	0.14	0.05529	0.93	0.52682	1.78	0.0691	1.52	430.8	6.4
9HS76-4@5	330	166	0.50	0.09	0.05561	1.08	0.54392	1.85	0.0709	1.50	441.8	6.4
9HS76-4@6	379	222	0.59	0.02	0.05615	1.10	0.54271	1.86	0.0701	1.50	436.7	6.3
9HS76-4@7	407	313	0.77	0.16	0.05595	1.00	0.54878	1.81	0.0711	1.50	443.0	6.4
9HS76-4@8	230	113	0.49	0.11	0.05502	1.08	0.53939	1.85	0.0711	1.50	442.8	6.4
9HS76-4@9	212	190	0.89	0.65	0.05452	2.46	0.51465	2.88	0.0685	1.51	426.9	6.2
9HS76-4@10	357	183	0.51	0.14	0.05565	1.08	0.54189	1.85	0.0706	1.50	439.9	6.4
9HS76-4@11	339	73	0.22	0.08	0.05587	1.01	0.54182	1.82	0.0703	1.51	438.2	6.4
9HS76-4@12	322	199	0.62	0.03	0.05587	0.95	0.54297	1.78	0.0705	1.50	439.1	6.4
9HS76-4@13	85	43	0.51	0.26	0.05571	2.42	0.53488	2.85	0.0696	1.51	433.9	6.3
9HS76-4@14	537	348	0.65	0.06	0.05597	0.90	0.54773	1.75	0.0710	1.50	442.0	6.4
9HS76-4@15	230	104	0.45	0.36	0.05420	1.75	0.52811	2.31	0.0707	1.50	440.2	6.4
9HS76-4@16	241	111	0.46	0.06	0.05639	1.13	0.53656	1.89	0.0690	1.52	430.2	6.3
9HS76-4@17	557	442	0.79	0.13	0.05536	0.84	0.53770	1.72	0.0704	1.50	438.8	6.4
9HS76-4@18	344	254	0.74	0.11	0.05547	1.17	0.53584	1.90	0.0701	1.50	436.5	6.3
9HS76-4@19	277	168	0.61	0.10	0.05625	1.22	0.54029	1.94	0.0697	1.51	434.1	6.3
9HS76-4@20	291	139	0.48	0.19	0.05506	1.25	0.53735	1.95	0.0708	1.50	440.9	6.4
额尔登特												
ME2-1@1	271	269	1.00	>1e6	0.05184	1.73	0.26937	2.30	0.0377	1.52	238.5	3.6
ME2-1@2	132	109	0.83	0.12	0.05089	3.08	0.26099	3.47	0.0372	1.59	235.4	3.7
ME2-1@3	399	68	0.17	0.09	0.05031	1.25	0.26312	1.96	0.0379	1.51	240.0	3.5
ME2-1@4	98	64	0.65	>1e6	0.05354	2.75	0.27488	3.15	0.0372	1.55	235.7	3.6
ME2-1@5	120	90	0.75	0.00	0.05040	2.17	0.25878	2.74	0.0372	1.67	235.7	3.9
ME2-1@6	94	62	0.66	>1e6	0.05188	2.38	0.27197	2.83	0.0380	1.53	240.5	3.6
ME2-1@7	137	107	0.78	0.11	0.05054	2.38	0.26207	2.85	0.0376	1.57	238.0	3.7
ME2-1@8	148	157	1.06	0.00	0.05039	2.12	0.26732	2.60	0.0385	1.51	243.4	3.6
ME2-1@9	124	84	0.68	0.27	0.05004	3.09	0.26443	3.45	0.0383	1.54	242.4	3.7
ME2-1@10	175	142	0.81	0.09	0.05031	1.77	0.26528	2.43	0.0382	1.67	241.9	4.0
ME2-1@11	154	74	0.48	0.06	0.05068	2.16	0.26027	2.66	0.0372	1.56	235.7	3.6
ME2-1@12	350	411	1.18	0.12	0.05131	1.26	0.26436	2.05	0.0374	1.61	236.5	3.7
ME2-1@13	67	44	0.65	0.36	0.05167	2.82	0.27747	3.25	0.0389	1.60	246.3	3.9
ME2-1@14	83	52	0.63	2.74	0.03257	14.80	0.17440	14.88	0.0388	1.56	245.6	3.8
ME2-1@15	118	101	0.85	0.21	0.05123	2.15	0.27039	2.66	0.0383	1.56	242.2	3.7
ME2-1@16	148	83	0.56	0.29	0.05018	3.01	0.26073	3.38	0.0377	1.53	238.5	3.6
ME2-1@17	152	138	0.91	0.41	0.05078	3.41	0.27779	3.72	0.0397	1.50	250.8	3.7
ME2-1@18	329	386	1.17	0.05	0.05098	1.29	0.27136	1.98	0.0386	1.50	244.2	3.6
ME2-1@19	233	115	0.49	0.27	0.05206	2.38	0.28007	2.84	0.0390	1.54	246.7	3.7
ME2-1@20	56	32	0.57	0.27	0.05078	4.37	0.27042	4.65	0.0386	1.58	244.3	3.8

注: f_{206} is the percentage of common ^{206}Pb in total ^{206}Pb

中国新疆的包古图铜矿和土屋-延东铜矿,三叠纪形成蒙古国的额尔登特 Cu-Mo 矿,侏罗纪发育中国内蒙古的乌奴格吐山 Cu-Mo 矿。显然,中亚成矿域斑岩铜矿形成时间跨度大,自奥陶纪至侏罗纪均有发育,集中在泥盆纪和石炭纪。

4.2 含矿岩体和岩浆来源

4.2.1 含矿岩体

中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体岩性主要为花岗闪长岩、

闪长岩和英云闪长玢岩,有少量的二长岩等。已有的研究表明,典型的埃达克岩的 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7040$,含有高的 Sr 含量和低的 Y、重稀土元素(如 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$)和的低的高场强元素(Defant and Drummond, 1990)。在中亚成矿域斑岩铜矿中,一些矿床的含矿岩体具有上述地球化学特点,而一些矿床的含矿岩体并不具有上述地球化学特点,如岩体具有较低的 Al_2O_3 和较低的 Sr 含量等(表 2)。

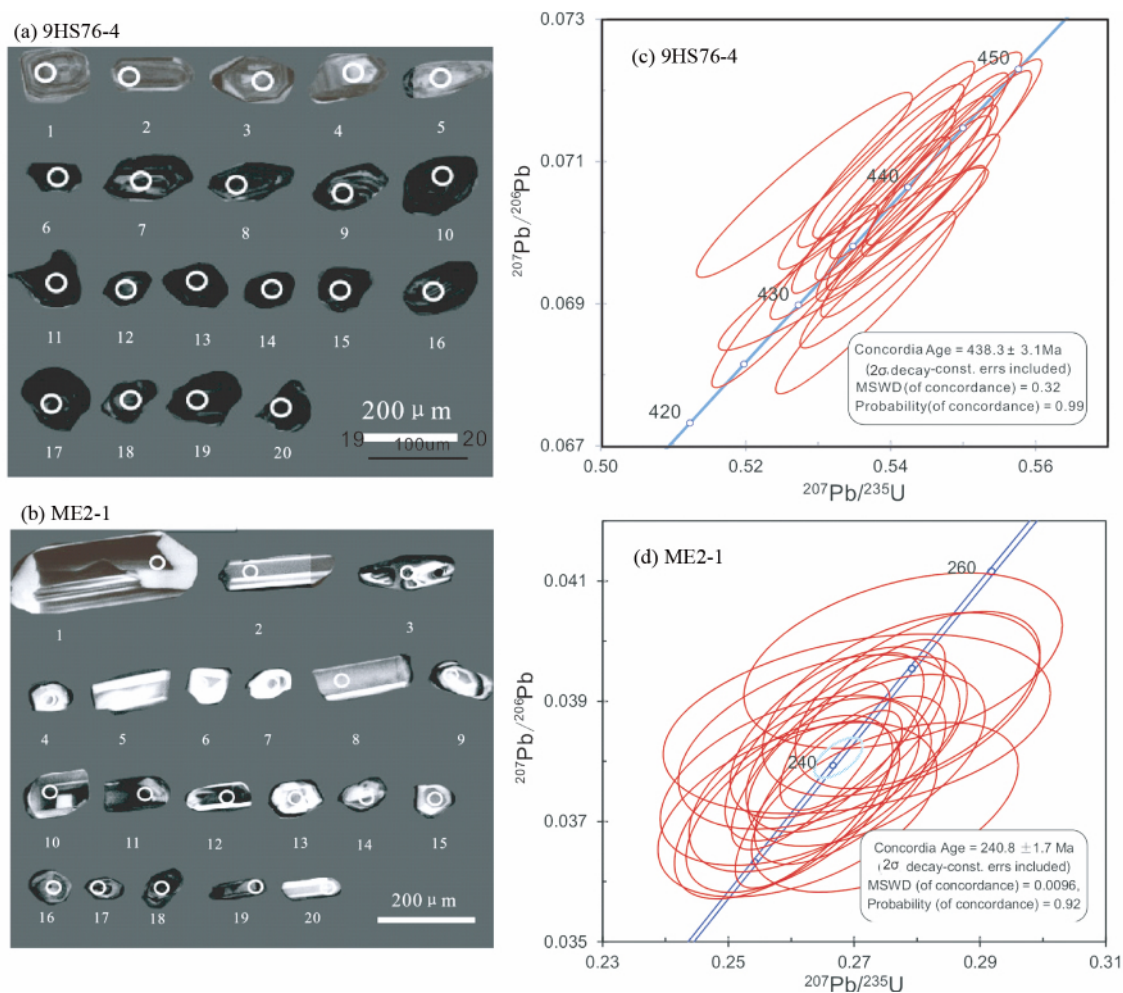


图4 科克赛和额尔登特矿床含矿岩体锆石 CL 图像 (a、b) 和锆石 U-Pb 谐和年龄 (c、d)

Fig. 4 SEM cathodoluminescence (CL) images of sectioned zircon grains (a, b) and SIMS zircon U-Pb concordia plots (c, d) from the host rocks in the Koksai and Erdenent deposits

4.2.2 含矿岩浆来源

中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩浆为钙碱性中酸性岩浆和少量的碱性岩浆。在含矿岩体主量、微量元素地球化学研究基础上,结合前人的 Sr-Nd 同位素数据 (陈志广等, 2008; 刘刚等, 2012; Shen *et al.*, 2009; Shen and Pan, 2013; Heinhorst *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2006; 侯万荣等, 2010; 江思宏等, 2010; Dolgoplova *et al.*, 2013) 探讨中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩浆来源。

中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体的稀土配分模式呈右倾型 (图 3), Eu 异常不明显, 富集大离子亲石元素 (Cs、Ba、LREE)、亏损高场强元素 (Nb、P、HREE) 和 Ti, 所有的岩石具有明显的负 Nb 异常, 表明含矿岩石形成与俯冲有关。大部分岩石具有相对高的 $Mg^\#$ 值 (>0.4) (表 2), 表明岩石可能源于地幔。乌奴格吐山含矿岩体具有较低的 $Mg^\#$ (<0.4) (陈志广等, 2008), 指示玄武质下地壳物质的卷入 (Rapp and Watson, 1995)。

前人研究认为, 中亚成矿域发育的花岗岩类岩体具有明

显的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 岩体源于新生的洋壳 (Jahn, 2000; Han *et al.*, 2006; 王京彬和徐新, 2006; Solomovich, 2007; Zhou *et al.*, 2008; Safonova, 2009)。然而, 中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值却有变化较大 (图 7), 具有以下三个特点: (1) 大多数含矿岩体具有明显的高的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 表明含矿岩浆源于新生的洋壳; (2) 少量含矿岩体具有低的正的或低的负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 结合区域地质特点, 如哈萨克斯坦的科翁腊德和博尔雷地区西侧出露前寒武纪片麻状花岗岩, 中国内蒙古的乌奴格吐山地区出露前寒武纪片麻岩和片岩 (Wu *et al.*, 2012), 蒙古国的额尔登特地区出露前寒武纪基底岩石 (Seltmann *et al.*, 2014), 表明这些含矿岩体的形成可能有古老的基底物质的参与; (3) 个别含矿岩体具有较大变化的正值, 如新疆包古图, 这是由于含矿岩体形成有围岩同化混染作用的参与所致 (潘鸿迪和申萍, 2014)。

4.3 成矿构造环境

中亚成矿域大多数含矿岩体为钙碱性系列, 富集 LILEs

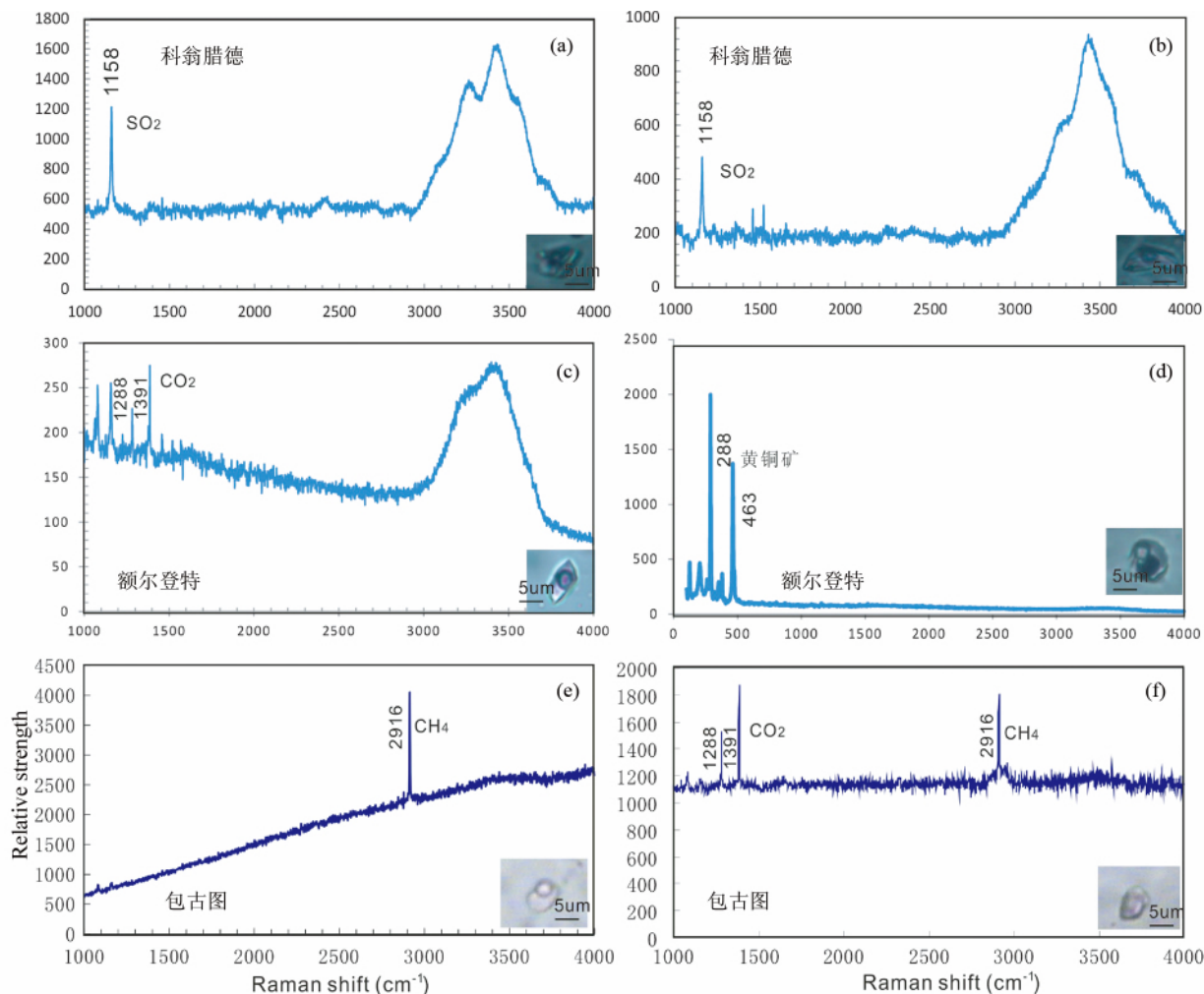


图5 中亚成矿域主要斑岩铜矿石英脉中流体包裹体的激光拉曼光谱图
(a、b) 科翁腊德斑岩 Cu 矿床; (c、d) 额尔登特斑岩 Cu-Mo 矿床; (e、f) 包古图斑岩 Cu 矿床

Fig. 5 Laser Raman spectra of the fluid inclusions of quartz veins from the main porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

和 LREEs, 具有明显的 Nb 负异常。在 Nb/Yb-Th/Yb 图中, 大多数岩体成分点投影在 E-MORB 和 OIB 之间(图 8a)。这些样品也投影在火山弧花岗岩类范围内(图 8b)。因此, 中亚成矿域大多数含矿岩体形成于岩浆弧环境。

根据本次研究获得的含矿岩体的 $Mg^{\#}$ 值, 结合前人的 Sr-Nd 同位素数据, 可见, 大多数含矿岩体具有高的 $Mg^{\#}$ 值和高的正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 形成于岛弧环境, 包括哈萨克斯坦的波谢库尔、努尔卡斯甘、阿克都卡, 中国新疆的包古图、土屋-延东, 蒙古国的欧玉陶勒盖、查干苏布尔加, 中国内蒙古的多宝山等; 一些含矿岩体具有低的正的或负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 结合矿区外围出现前寒武纪基底的特点, 这些含矿岩体(博尔雷、科翁腊德、额尔登特)形成于陆缘弧或岛弧和陆缘弧过渡的构造环境, 少量含矿岩体具有低的 $Mg^{\#}$ 值和低的正的或负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值, 这些含矿岩体(乌奴格吐山)形成于陆缘弧环境。哈萨克斯坦的科克赛、乌兹别克斯坦阿尔马雷克和塔吉克斯坦的 Taldy

Bulak 缺乏含矿岩体的 Sr-Nd 同位素数据, Xiao *et al.* (2010) 提出晚古生代这些地区属于阿拉斯加型岩浆弧, Seltmann and Alla (2009) 建议阿尔马雷克斑岩铜矿形成于陆缘弧环境, 因此, 初步认为这些矿床的含矿岩体形成于陆缘弧环境。

总体上, 中亚成矿域大多数斑岩 Cu-Au 矿床和少量斑岩 Cu(Au, Mo) 矿床形成于岛弧环境, 而阿尔马雷克斑岩 Cu-Au 矿床形成于陆缘弧环境, 斑岩型 Cu-Mo 矿床(乌奴格吐山、额尔登特)和少量斑岩 Cu(Au, Mo) 矿床(博尔雷、科翁腊德)形成于陆缘弧或岛弧和陆缘弧过渡的环境。

4.4 成矿流体及来源

4.4.1 两种成矿流体体系

根据我们获得的 3 个代表性斑岩铜矿成矿流体气相成分的结果(图 5), 结合已发表的哈萨克斯坦斑岩铜矿(Kudryavtsev, 1996)、我国土屋(Han *et al.*, 2006)、乌奴格吐

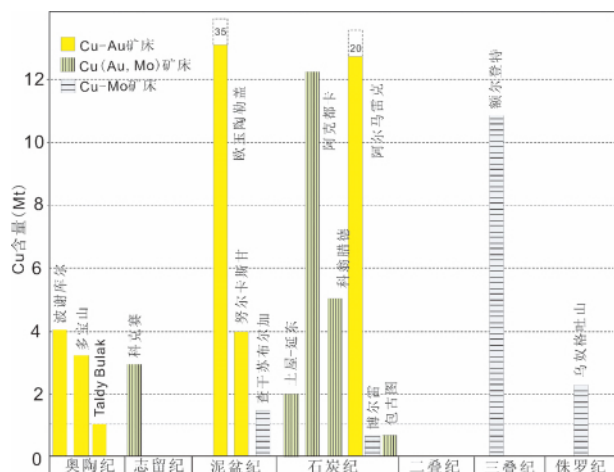


图6 中亚成矿域主要斑岩铜矿床铜储量和年龄直方图

数据来自 Singer *et al.*, 2008; Seltmann *et al.*, 2014; Seltmann and Porter, 2005; Heinhorst *et al.*, 2000; 薛春纪等, 2013; Wainwright *et al.*, 2011; 杜琦等, 2010; 葛文春等, 2007; Zeng *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2012; 江思宏等, 2010; Watanabe and Stein, 2000; 侯万荣等, 2010; 陈志广, 2010; 李诺等, 2007; 芮宗瑶等, 2002; Chen *et al.*, 2010, 2013; Kudryavtsev, 1996; Shen *et al.*, 2012, 2014a, b; Yakubchuk *et al.*, 2012 和本次研究

Fig. 6 Cu tonnage vs. age for the major porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

山(Li *et al.*, 2012)、多宝山(Liu *et al.*, 2012)的流体为 H_2O-CO_2-NaCl 体系的结果, 可以认为, 中亚成矿域成矿流体包括两种体系, 一种是 $H_2O-NaCl-CO_2-SO_2$ 体系, 包括中亚成矿域的大多数斑岩铜矿床, 如科翁腊德、额尔登特、土屋、乌奴格吐山和多宝山等; 另一种是 $H_2O-NaCl-CH_4-CO_2$ 体系, 如新疆的包古图。因此, 中亚成矿域成矿流体存在氧化性和还原性流体系统, 以前者为主。

4.4.2 成矿流体来源

已经发表的数据表明, 中亚成矿域斑岩铜矿硫化物的硫同位素分布范围较广(图9) $\delta^{34}S$ 介于 $-8‰ \sim +5‰$ 之间, 集中在 $-3‰ \sim +2‰$ 之间, 接近于陨石硫, 表明中亚成矿域斑岩铜矿硫化物的硫主要为岩浆硫, 少量硫可能来自地层。

4.5 成矿系统

中亚成矿域成矿系统包括简单的斑岩系统和少量的斑岩-矽卡岩成矿系统和斑岩-浅成低温热液成矿系统。

一般与斑岩有关的矿化除与岩体有关外, 还与岩体侵位的围岩岩性(如碳酸盐岩)有关。在中亚成矿域, 大多数岩浆弧中碳酸盐岩不发育, 岩体一般侵位于火成岩区, 其矿化类型相对单一, 形成简单的斑岩成矿系统。但是, 在一些地区也有碳酸盐岩存在, 当岩体侵位时, 碳酸盐岩发生矽卡岩化, 并发生金属矿化, 形成矽卡岩容矿的多金属矿体, 它们与斑岩型铜矿构成了一个斑岩-矽卡岩成矿系统, 以乌兹别克斯

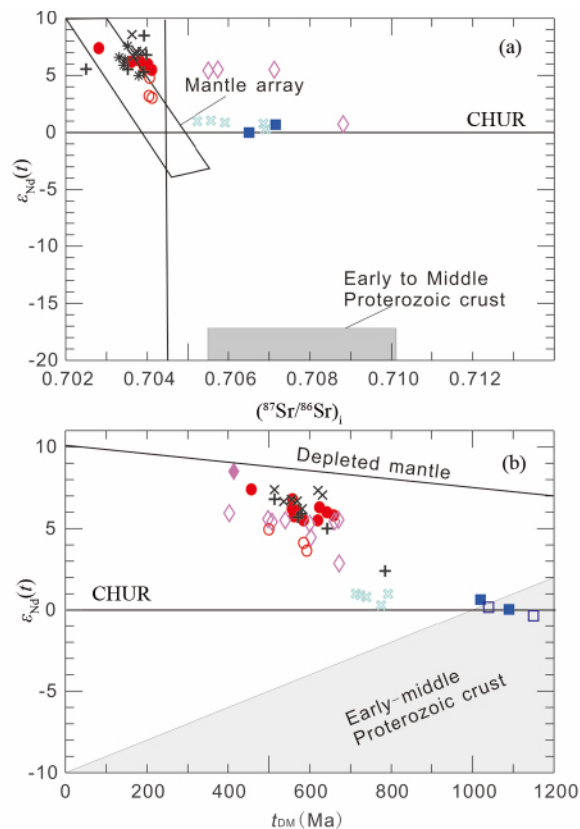


图7 中亚成矿域主要斑岩铜矿床含矿岩体 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解(a)和钕同位素演化图解(b)

早-中元古代地壳数据来自 Hu *et al.* (2000). Oyu Tolgoi 数据来自 Dolgoplova *et al.* (2013); Erdenet 数据来自江思宏等(2010); Tsagaan Suurga 数据来自侯万荣等(2010); Borly, Kounrand 和 Aktogai 数据来自 Heinhorst *et al.* (2000) 和刘刚等(2012); 乌奴格吐山数据来自陈志广等(2008); 土屋-延东数据来自 Zhang *et al.* (2006); 包古图数据来自 Shen *et al.* (2009), Shen and Pan (2013) 重新计算。矿床符号同图2

Fig. 7 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (a) and Nd isotopic evolution and Nd isotope data (b) of the host rocks for the major porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

坦阿尔马雷克矿区为代表, 该矿区出露有泥盆-石炭纪碳酸盐岩, 矿区发育斑岩型和矽卡岩型矿化(薛春纪等, 2013), 以斑岩型矿化为主, 构成了一个斑岩-矽卡岩成矿系统。

在中亚成矿域, 一些斑岩铜矿床发育高级泥化蚀变, 由于高级泥化蚀变是浅成低温热液系统的典型产物, 因此, 一些斑岩铜矿床中发育斑岩-浅成低温热液成矿系统, 以哈萨克斯坦的努尔卡斯甘矿区为代表, 该矿区发育与早期闪长岩有关的细脉浸染状铜矿化和与晚期闪长岩和隐爆角砾岩有关的高硫型浅成低温热液金矿化(Zhukov *et al.*, 1997; Seltmann *et al.*, 2014) 构成了一个斑岩-浅成低温热液成矿系统。

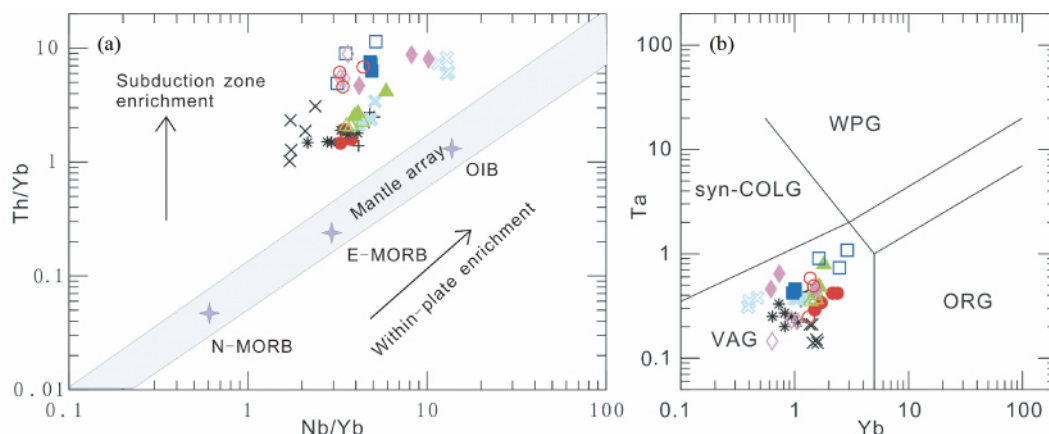


图8 中亚成矿域主要斑岩铜矿床含矿岩体 Th/Yb-Nb/Yb 图解 (a 据 Pearce and Peate, 1995) 和 Ta-Yb 图解 (b 据 Pearce *et al.*, 1984)

符号和数据来源同图2。ORG: ocean ridge granites; Post-COLG: post-collisional granites; Syn-COLG: syn-collisional granites; VAG: volcanic arc granites; WPG: within-plate granites

Fig. 8 Th/Yb vs. Nb/Yb diagram (a, after Pearce and Peate, 1995) and Ta vs. Yb diagram (b, after Pearce *et al.*, 1984) of samples analyzed from the host rocks for the major porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

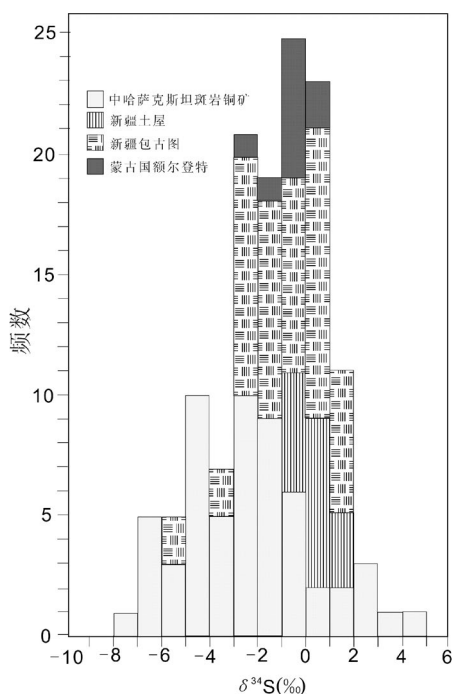


图9 中亚成矿域主要斑岩铜矿床硫化物硫同位素直方图

哈萨克斯坦铜矿据 Kolesnikov, 1991; 李光明等, 2008; 包古图据宋会侠等, 2007; Shen *et al.*, 2012; 土屋据 Han *et al.*, 2006; 额尔登特据江思宏等, 2010

Fig. 9 Histogram $\delta^{34}\text{S}$ (‰) values for main porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain

4.6 与其它成矿域对比

从前述中亚成矿域斑岩铜矿床的特点, 并与环太平洋成

矿域与特提斯成矿域斑岩铜矿床对比, 可以概括出中亚成矿域斑岩铜矿床的下列特征:

(1) 中亚成矿域大型-超大型斑岩铜矿床有着广泛的空间分布, 自哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦, 经过中国新疆北部、蒙古国, 一直到中国内蒙东部, 总体上, 大型和超大型矿床呈散在性分布, 带状分布不甚明显, 而环太平洋和特提斯成矿域斑岩铜矿床呈明显的带状分布, 前者包括东太平洋的中安第斯成矿带和西太平洋成矿带, 后者包括冈底斯成矿带和玉龙成矿带。

(2) 中亚成矿域斑岩铜矿床成矿作用发生在古生代和中生代, 成矿高峰期为泥盆纪和石炭纪。而环太平洋成矿域成矿作用从太古代到新生代, 但主要发生于中、新生代, 少量前寒武纪的斑岩铜矿出现在澳大利亚 (Kirkham and Dunne, 2000; Sinclair, 2007); 特提斯成矿域成矿作用发生在晚古生代和中、新生代, 以中、新生代为主 (Hou *et al.*, 2009, 2011)。中亚成矿域既没有前寒武纪的斑岩铜矿床, 也没有白垩纪和更晚的斑岩铜矿床。

(3) 中亚成矿域斑岩铜矿含矿岩体多为钙碱性, 少量为碱性, 岩性以花岗闪长岩-闪长岩-英云闪长岩为主, 有少量的二长岩, 大多数含矿岩浆源于新生的洋壳, 少量有古老的基底物质的参与或有围岩物质的参与。环太平洋成矿域含矿斑岩复杂 (Kerrick *et al.*, 2000), 岛弧环境含矿斑岩是钙碱性的, 含矿岩浆起源于新生的洋壳, 而陆缘弧环境含矿斑岩多为高钾钙碱性, 部分为钾质碱性和钾玄质, 含矿岩浆起源于新生的洋壳, 有陆壳物质加入。特提斯成矿域含矿斑岩多为高钾钙碱性和钾玄质, 以高钾为特征, 岩性以花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩为主, 大多数含矿岩浆起源于加厚的新生镁铁质地壳或拆沉的古老下地壳 (侯增谦和杨志明, 2009)。

(4) 中亚成矿域斑岩铜矿床成矿构造背景主要为岛弧环境, 大多数斑岩 Cu-Au 矿床和少量斑岩 Cu(Au, Mo) 矿床形成于岛弧环境, 斑岩型 Cu-Mo 矿床和少量斑岩 Cu(Au, Mo) 矿床形成于岛弧和陆缘弧过渡的环境或陆缘弧环境。环太平洋成矿域成矿构造背景多样: 在中安第斯带, 斑岩铜矿床形成于陆缘弧环境 (Kay *et al.*, 1999; Richards *et al.*, 2001), 在西太平洋, 斑岩 Cu-Au 矿床形成于岛弧环境 (Sillitoe, 1993; Richards *et al.*, 2001; Kerrich *et al.*, 2000), 而 Grasberg 和 Porgera 矿床则形成于俯冲之后的陆缘弧-岛弧碰撞带 (MacDonald and Arnold, 1994), 中国东北的一些斑岩 Cu-Au 矿形成于陆内环境 (侯增谦和杨志明, 2009)。特提斯成矿域斑岩矿床形成于大陆碰撞带, 在晚碰撞构造转换环境发育斑岩 Cu、Cu-Mo 和 Cu-Au 矿床, 后碰撞地壳伸展环境则主要发育斑岩 Cu-Mo 矿床 (Hou *et al.*, 2003; 侯增谦和杨志明, 2009)。

(5) 中亚成矿域斑岩铜矿床按所含金属内容分为斑岩型 Cu-Au、Cu(Au, Mo)、Cu-Mo 等矿床, 按成矿特点分为经典的斑岩铜矿和少量的还原性斑岩铜矿, 成矿流体发育氧化性和还原性流体系统, 以前者为主。环太平洋成矿域以经典的斑岩铜矿床占优势, 有少量的还原性斑岩铜矿床, 这些还原性斑岩 Cu-Au 矿床分布于加拿大和澳大利亚等 (Rowins, 2000)。特提斯成矿域则发育经典的斑岩铜矿床。

(6) 中亚成矿域斑岩铜矿床的矿化类型相对单一, 成矿系统主要为简单的斑岩成矿系统, 一些矿区发育斑岩-矽卡岩成矿系统 (如阿尔马雷克) 和斑岩-浅成低温热液成矿系统 (如努尔卡斯甘)。环太平洋成矿域发育斑岩-浅成低温热液成矿系统, 如菲律宾 Lepanto-FSE 矿区 (Hedenquist *et al.*, 1998)。特提斯成矿域一般不发育斑岩-浅成低温热液成矿系统, 仅在玉龙矿区浅成低温热液矿化叠加于矿化斑岩上 (Hou *et al.*, 2003), 然而, 斑岩-矽卡岩成矿系统发育, 如驱龙的知不拉、甲马及玉龙等 (Hou *et al.*, 2003, 2009)。

5 结论

中亚成矿域斑岩铜矿床特征:

(1) 成矿时代为古生代和中生代, 成矿高峰期为泥盆纪和石炭纪;

(2) 含矿岩体为花岗闪长岩、闪长岩、英云闪长岩和少量的二长岩;

(3) 含矿岩浆大多数源于新生的洋壳, 少量有古老的基底物质和围岩物质参与;

(4) 成矿构造背景主要为岛弧, 少量为陆缘弧和岛弧向陆缘弧过渡的环境;

(5) 矿床可分为三类: 斑岩型 Cu-Au、Cu(Au, Mo) 和 Cu-Mo 矿床;

(6) 成矿流体可分为两类: 氧化性 $H_2O-NaCl-CO_2-SO_2$ 体系和少量的还原性 $H_2O-NaCl-CH_4-CO_2$ 体系;

(7) 成矿系统可分为三类: 简单的斑岩系统和少量的斑岩-矽卡岩成矿系统和斑岩-浅成低温热液成矿系统。

致谢 本文一起参加野外工作的还有张林浩、西尔班·佳克巴娃、陈宣华、韩素琴、薛春纪、吕新彪、叶宝莹、施炜、袁峰、安芳等人; 研究工作得到新疆维吾尔自治区国家 305 项目办公室和哈萨克斯坦萨特巴耶夫地质科学研究所的大力支持与帮助; 两位审稿人提出了宝贵的修改意见; 在此一并感谢!

References

- Bespaev KA and Miroshnichenko LA. 2004. Atlas of Mineral Deposit Models of the Republic of Kazakhstan. Almaty, Kazakhstan (English edition by Halls C, Seltmann R and Dolgoplova A). London: CERCAMS (Centre for Russian and Central EurAsian Mineral Studies), Natural History Museum, 42.
- Chen XH, Qu WJ, Han SQ, Eleonora S, Yang N, Chen ZL, Zeng FG, Du AD and Wang ZH. 2010. Re-Os geochronology of Cu and W-Mo deposits in the Balkhash metallogenic belt, Kazakhstan and its geological significance. *Geosci. Front.*, 1(1): 115-124.
- Chen XH, Eleonora S, Wang ZH, Chen ZL, Han SQ, Li Y, Yang Y, Ye BY and Shi W. 2013. SHRIMP U-Pb and Ar-Ar geochronology of major porphyry and skarn Cu deposits in the Balkhash Metallogenic Belt, Central Asia, and geological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseaes.2013.06.011.
- Chen ZG, Zhang LC, Wan B, Zhang YT and Wu HY. 2008. Geochemistry and geological significances of ore-forming porphyry with low Sr and Yb value in Wungetushan copper-molybdenum deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 115-128 (in Chinese with English abstract).
- Chen ZG. 2010. Mesozoic tectonic-magmatic mineralization of Derbugan metallogenic belt in NE China, and its geodynamic setting. Ph. D. Dissertation. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 1-194 (in Chinese with English summary).
- Cooke DR, Wilson AJ and Davies AGS. 2004. Characteristics and Genesis of Porphyry Copper-gold Deposits. Centre for Ore Deposit Research Special Publication 5, University of Tasmania, 17-34.
- Cooke DR, Hollings P and Walshe JL. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801-818.
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665.
- Dolgoplova A, Seltmann R, Armstrong R, Belousova E, Pankhurst RJ and Kavalieris I. 2013. Sr-Nd-Pb-Hf isotope systematics of the Hugo Dummett Cu-Au porphyry deposit (Oyu Tolgoi, Mongolia). *Lithos*, 164-167: 47-64.
- Du Q, Ma XY, Han CM and Li ZY. 2010. Genetic Discussion on Porphyry Copper Deposit. Beijing: Geological publishing House, 1-97 (in Chinese).
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2007. Porphyry Cu-Mo deposits in the eastern Xing'an-Mongolian Orogenic Belt: Mineralization ages and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 3416-3427.
- Gerel O and Munkhtsengel B. 2005. Erdenetiin Ovoo porphyry copper-molybdenum deposit in northern Mongolia. In: Seltmann R, Gerel O and Kirwin DJ (eds.). *Geodynamics and Metallogeny of Mongolia with a Special Emphasis on Copper and Gold Deposits*. London: Natural History Museum, 85-103.
- Goldfarb RJ, Taylor RD, Collins GS, Goryachev NA and Orlandini OF. 2013. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia.

- Gondwana Research, 25(1): 48–102
- Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Mao JW, Yang JM, Wang ZL, Yan Z and Mao GQ. 2006. Geological characteristics and genesis of the Tuwu porphyry copper deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia. *Ore Geology Review*, 29(1): 77–91
- Hedenquist JW and Richards JP. 1998. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits. *Reviews in Economic Geology*, 10: 235–256
- Hedenquist JW, Arribas AJ and Reynolds TJ. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373–404
- Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P, Serykh V and Zhurutin S. 2000. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: Evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan. *Tectonophysics*, 328(1–2): 69–87
- Hollister VF, Potter RR and Barker AL. 1974. Porphyry-type deposits of the Appalachian Orogen. *Economic Geology*, 69(5): 618–630
- Hou WR, Nie FJ, Jiang SH, Bai DM, Liu Y, Yun F and Liu YF. 2010. The geology and ore-forming mechanism of the Tsagaan suvarga large-size Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 307–320 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Ma HW, Zaw K, Zhang YQ, Wang MJ, Wang Z, Pan GT and Tang RL. 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125–145
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1–2): 139–155
- Hou ZQ, Qu XM, Rui ZY, Meng XJ, Li ZQ, Beaudoin G, Rui ZY, Gao YF and Zaw K. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1–3): 25–51
- Hou ZQ and Yang ZM. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1779–1817 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Zhang HR, Pan XF and Yang ZM. 2011. Porphyry Cu(-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1–2): 21–45
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang Y, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1–2): 15–52
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 91(1–2): 181–193
- Jiang SH, Nie FJ, Su YJ, Bai DM and Liu YF. 2010. Geochronology and origin of the Erdenet superlarge Cu-Mo deposit in Mongolia. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 289–306 (in Chinese with English abstract)
- Kay SM, Mpodozis C and Coira B. 1999. Neogene magmatism, tectonism, and mineral deposits of the central Andes (22° to 33°S Latitude). In: Skinner BJ (ed.). *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geologists Special Publication, No. 7: 27–59
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia YF. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*, 43(1): 1–68
- Kirkham RV and Dunne KPE. 2000. World distribution of porphyry, porphyry-associated skarn, and bulk-tonnage epithermal deposits and occurrences. *Geological Survey of Canada, Open File*, 3792a, 26
- Kolesnikov VV. 1991. Nonferrous metals deposits series. The Balkhash Segment Alma Ata: Glym, 192 (in Russian)
- Kudryavtsev YK. 1996. The Cu-Mo deposits of Central Kazakhstan. In: Shatov V, Seltmann R, Kremenetsky A, Lehmann B, Popov V and Ermolov P (eds.). *Granite-Related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*. St. Petersburg: Glagol Publishing House, 119–144
- Li GM, Qin KZ and Li JX. 2008. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the Balkhash region, Central Kazakhstan, Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2679–2700 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Lai Y and Li WB. 2007. Fluid inclusion study of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2177–2188 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Ulrich T and Lai Y. 2012. Fluid inclusion study of the Wunugetu Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, China. *Mineralium Deposita*, 47(5): 467–482
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi collector SIMS without external standardization. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(4): Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400
- Liu J, Wu G, Li Y, Zhu MT and Zhong W. 2012. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 300–312
- Liu G, Chen XH, Dong SW, Chen ZL, Han SQ, Yang Y, Ye BY and Shi W. 2012. Late Paleozoic crustal growth and tectonic evolution in Balkhash metallogenic belt (Kazakhstan), Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 1995–2008 (in Chinese with English abstract)
- Lowell JD and Guilbert TJM. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–404
- MacDonald GD and Arnold LC. 1994. Geological and geochemical zoning of the Grasberg Igneous Complex, Irian Jaya, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1–3): 143–178
- Nakamura N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 757–773
- Nie FJ, Jiang SH, Zhang Y, Liu Y and Hu P. 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring areas. *Mineral Deposits*, 23(2): 176–189 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Jiang SH, Bai DM, Hou WR and Liu YF. 2010a. An overview of present exploration and exploitation on mineral resources of Mongolia. *Geological Review*, 56(1): 105–113 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Jiang SH, Bai DM, Hou WR and Liu YF. 2010b. Types and temporal-spatial distribution of metallic deposits in southern Mongolia and its neighboring areas. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 267–288 (in Chinese with English abstract)
- Pan HD and Shen P. 2014. Contamination and assimilation of the intermediate complex in the Baogutu porphyry Cu deposit, in Xinjiang. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(1): 80–97 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251–285
- Qu XM, Hou ZQ, Zaw K and Li YG. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 205–223
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Richards JP, Boyce AJ and Pringle MS. 2001. Geologic evolution of the

- Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96 (2): 271–306
- Richards JP. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98(8): 1515–1533
- Rowins SM. 2000. Reduced porphyry copper-gold deposits: A new variation on an old theme. *Geology*, 28: 491494
- Rui ZY, Liu YL, Wang LS and Wang YT. 2002. The eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 83–94 (in Chinese with English abstract)
- Safonova IY. 2009. Intraplate magmatism and oceanic plate stratigraphy of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific Oceans from 600 to 140Ma. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 137–154
- Seltnmann R, Shatov V, Yakubchuk A *et al.* 2004. Mineral Deposits Database and Thematic Maps of Central Asia, Scale 1: 5 million: ArcView 3.2 and MapInfo 6.0(7.0) GIS Packages. London, UK: Explanatory Notes, CERCAMS CERCAMS (Centre for Russian and Central EurAsian Mineral Studies), Natural History Museum
- Seltnmann R and Porter TM. 2005. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 1. tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits. In: Porter TM (ed.). *Super Porphyry Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*, Vol. 2. Adelaide: PGC Publishing, 467–512
- Seltnmann R and Alla D. 2009. Gold-copper giants of central Eurasia: Isolated hot spots vs. tracking metallogenic belts that formed during orogenic cycles. In: Chen Y, Charvet J and Faure M (eds.). *International Field Excursion and Workshop on Tectonic Evolution and Crustal Structure of the Paleozoic Chinese Tianshan*. Urumqi, China, 50–52
- Seltnmann R, Porter TM and Pirajno F. 2014. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 810–841
- Shen P, Shen YC, Liu TB, Meng L, Dai HW and Yang YH. 2009. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 16(2): 227–242
- Shen P, Shen YC, Pan HD, Wang JB, Zhang R and Zhang YX. 2010a. Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, West Junggar, Northwest China: Petrology, alteration, and mineralization. *Economic Geology*, 105(5): 947–970
- Shen P, Shen YC, Wang JB, Zhu HP, Wang LJ and Meng L. 2010b. Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, Xinjiang, NW China. *Chemical Geology*, 275(1–2): 78–98
- Shen P, Shen YC, Pan HD, Li XH, Dong LH, Wang JB, Zhu HP, Dai HW and Guan WN. 2012. Geochronology and isotope geochemistry of the Baogutu porphyry copper deposit in the West Junggar region, Xinjiang, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 99–115
- Shen P and Pan HD. 2013. Country-rock contamination of magmas associated with the Baogutu porphyry Cu deposit, Xinjiang, China. *Lithos*, 177: 451–469
- Shen P, Pan HD, Xiao WJ, Chen XH, Eleonorad S and Shen YC. 2013. Two geodynamic-metallogenic events in the Balkhash (Kazakhstan) and the West Junggar (China): Carboniferous porphyry Cu and Permian greisen W-Mo mineralization. *International Geology Review*, 55(13): 1660–1687
- Shen P, Pan HD and Dong LH. 2014a. Yandong porphyry Cu deposit, Xinjiang, China: Geology, geochemistry and SIMS U-Pb zircon geochronology of host porphyries and associated alteration and mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 197–217
- Shen P, Pan HD, Zhou TF and Wang JB. 2014b. Petrography, geochemistry and geochronology of the host porphyries and associated alteration at the Tuwu Cu deposit, NW China: A case for increased depositional efficiency by reaction with mafic hostrock? *Mineralium Deposita*, 49(6): 709–731
- Sillitoe RH. 1993. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implication. *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada Special Paper, 40, 465–478
- Sillitoe RH. 2000. Gold-rich porphyry deposits, descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews Economic Geology*, 13(1): 315–345
- Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41
- Sinclair WD. 2007. Porphyry deposits. In: Goodfellow WD (ed.). *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, No. 5: 223–243
- Singer DA, Berger VI and Moring BC. 2008. *Porphyry Copper Deposits of the World: Database and Grade and Tonnage Models*, 2008. U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, Open-File, Report 2008–1155
- Solomovich LI. 2007. Postcollisional magmatism in the South Tien Shan Variscan Orogenic Belt, Kyrgyzstan: Evidence for high-temperature and high-pressure collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(1): 142–153
- Song HX, Liu YL, Qu WJ, Song B, Zhang R and Cheng Y. 2007. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1891–1988 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Special Publication, Geological Society of London, 42(1): 313–345
- Tu GC. 1999. On the Central Asia metallogenic province. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 397–404 (in Chinese with English abstract)
- Wainwright AJ, Tosdal RM, Wooden JL, Mazdab FK and Friedman RM. 2011. U-Pb (zircon) and geochemical constraints on the age, origin, and evolution of Paleozoic arc magmas in the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au district, southern Mongolia. *Gondwana Research*, 19(3): 764–787
- Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23–31 (in Chinese with English abstract)
- Watanabe Y and Stein HJ. 2000. Re-Os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications. *Economic Geology*, 95(7): 1537–1542
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wu G, Chen YC, Chen YJ and Zeng QT. 2012. Zircon U-Pb ages of the metamorphic supracrustal rocks of the Xinghuadukou Group and granitic complexes in the Argun massif of the northern Great Hinggan Range, NE China, and their tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 214–233
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to Mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1219–1220
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM, Sun S and Li JL. 2010. A review of the western part of the Altai: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18(2–3): 253–273
- Xiao WJ, Windley BF, Allen MB and Han CM. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341
- Xue CJ, Duan SG, Chai FM, Muhetaer M, Typecebekov AX and Qu WJ. 2013. Metallogenetic epoch of the Almalik porphyry copper ore field, Uzbekistan, and its geological significance. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 197–204 (in Chinese with English abstract)
- Yakubchuk A. 2005. Geodynamic evolution of accreted terranes of

- Mongolia against the background of the Altaids and Transbaikalian-Mongolian collages. In: Seltmann RG, Gerel O and Kirwin DJ (eds.). *Geodynamics and Metallogeny of Mongolia: With Special Emphasis on Copper and Gold Deposits*. London: CERCAMS (Centre for Russian and Central EurAsian Mineral Studies), Natural History Museum, 13–24
- Yakubchuk A, Degtyarev K, Maslennikov V, Wurst A, Stekhin A and Lobanov K. 2012. Tectonomagmatic settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian copper province. In: Hedenquist JW, Harris M and Camus F (eds.). *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication, 16: 403–432
- Zeng QD, Liu JM, Chu SX, Wang YB, Sun Y, Duan XX, Zhou LL and Qu WJ. 2014. Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu-Mo-(Au) deposit, Northeast China, and its geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 895–909
- Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ and Zhang Q. 2006. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Mineralium Deposita*, 41(2): 188–200
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Zhang DY, Cooke D and Zhao GC. 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3–4): 191–206
- Zhukov NM, Kolesnikov VV, Miroshnichenko LM, Egembayev KM, Pavlova ZN and Bakarasov EV. 1997. Copper deposits of Kazakhstan. Reference Book Alma Ata. 149 (in Russian)
- 附中文参考文献**
- 陈志广, 张连昌, 万博, 张玉涛, 吴华英. 2008. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床低 Sr-Yb 型成矿斑岩地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 24(1): 115–128
- 陈志广. 2010. 中国东北得尔布干成矿带中生代构造-岩浆成矿作用及其地球动力学背景. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 1–194
- 杜琦, 马晓阳, 韩成满, 李宗民. 2010. 斑岩铜矿成因探讨. 北京: 地质出版社, 1–97
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu, Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义. *科学通报*, 52(20): 2407–2417
- 侯万荣, 聂凤军, 江思宏, 白大明, 刘妍, 云飞, 刘翼飞. 2010. 蒙古国查干苏布尔加大型铜-钼矿床地质特征及成因. *地球学报*, 31(3): 307–320
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型. *地质学报*, 83(12): 1779–1817
- 江思宏, 聂凤军, 苏永江, 白大明, 刘翼飞. 2010. 蒙古国额尔登特超大型铜-钼矿床年代学与成因研究. *地球学报*, 31(3): 289–306
- 李光明, 秦克章, 李金祥. 2008. 哈萨克斯坦巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究. *岩石学报*, 24(12): 2679–2700
- 李诺, 陈衍景, 赖勇, 李文博. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 23(9): 2177–2188
- 刘刚, 陈宣华, 董树文, 陈正乐, 韩淑琴, 杨屹, 叶宝莹, 施炜. 2012. 巴尔喀什成矿带晚古生代地壳增生与构造演化. *岩石学报*, 28(7): 1995–2008
- 聂凤军, 江思宏, 张义, 刘妍, 胡朋. 2004. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因. *矿床地质*, 23(2): 176–189
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 侯万荣, 刘翼飞. 2010a. 蒙古矿产勘查与开发现状评述. *地质论评*, 56(1): 105–113
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 侯万荣, 刘翼飞. 2010b. 蒙古国南部及邻区金属矿床类型及其时空分布特征. *地球学报*, 31(3): 267–288
- 潘鸿迪, 申萍. 2014. 新疆包古图斑岩铜中性复式岩体的同化混染作用. *地球科学与环境学报*, 36(1): 80–97
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩型铜矿带及其大地构造格局. *地质学报*, 76(1): 83–94
- 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 宋彪, 张锐, 成勇. 2007. 新疆包古图斑岩铜矿床地质特征. *岩石学报*, 23(8): 1981–1988
- 涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域. *地质科学*, 34(4): 397–404
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. *地质学报*, 80(1): 23–31
- 薛春纪, 段士刚, 柴凤梅, 木合塔尔·买买提, Турсебеков АХ, 屈文俊. 2013. 乌兹别克斯坦 Almalyk 斑岩铜矿田成矿时代及其地质意义. *地学前缘*, 20(2): 197–204