南蒙古欧玉陶勒盖斑岩型矿床研究进展

杨 波¹,赵元艺² YANG Bo¹, ZHAO Yuanyi²

1.中国地质大学(北京),北京 100083;

2.中国地质科学院矿产资源研究所/国土资源部成矿作用与矿产资源评价重点实验室,北京 100037

1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment/Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:南蒙古欧玉陶勒盖矿床是世界上已知最大的斑岩型铜金矿床之一,处在中古生代哈萨克-蒙古岩浆弧内,是中国"一带一路"项目中中国企业"走出去"的重要方向之一。铜金储量高、矿床品位好、矿化范围广、矿体规模巨大,属世界级超大型斑岩型铜 (金)矿床,开发潜力巨大。在收集大量资料的基础上,通过整理和分析,建立成因模型,并划分出北Heruga区域、Javkhlant区域、西 Hugo深部区域、西Hugo深部区域、Ulaan Khud北部矿点5个找矿远景区。欧玉陶勒盖矿床所在成矿带沿哈萨克-蒙古岩浆弧向 两端延伸,向西经新疆土屋铜矿延伸至哈萨克斯坦境内的科翁腊德和阿克脱盖斑岩铜矿,向东延伸至中国境内多宝山、铜山地区。 关键词:南蒙古;欧玉陶勒盖;斑岩型矿床;岛弧

中图分类号:P618.41;P618.51 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)01-0090-22

Yang B, Zhao Y Y. New progress in the study of the Oyu Tolgoi porphyry deposit in southern Mongolia. *Geological Bulletin* of China, 2017, 36(1):90–111

Abstract: The Oyu Tolgoi deposit, one of the largest porphyry Cu (Au) deposits in the world, is characterized by high copper and gold reserves, high grade, wide range and large scale mineralization of the orebody. China–Mongolia border extends for 80km, which belongs to China's "One Belt, One Road" project and hence is one of the important directions for the going out policy of China's enterprises. On the basis of the information collected and analyzed by the authors, it is considered that North Heruga region, Javkhlant region, West Hugo deep region, West Hugo deep region, Ulaan Khud northern region are five strategic targets. On such a basis, the authors set up a metallogenic model. The authors hold that the Oyu Tolgoi deposit is located in the metallogenic belt which extents along the Kazakh–Mongolian magmatic arc to the two ends. In the west, the belt extends through the Tuwu copper deposit of Xinjiang to the Kounrad porphyry copper deposit and another porphyry copper deposit in the territory of Kazakhstan; in the east, it extends to Duobaoshan and Tongshan area within the territory of China.

Key words: southern Mongolia; Ouyu Tolgoi; porphyry deposits; island arc

1 矿区概况

欧玉陶勒盖(Oyu Tolgoi)斑岩铜金矿床是世界 上已知最大的斑岩型铜金矿床之一,在21世纪初由 加拿大艾芬豪蒙古矿业公司(Ivanhoe Mines Mongolia Inc.,现今绿松石山资源公司的前身)于欧玉陶 勒盖地区发现并开采。该矿床铜金储量大、矿床品 位高、矿化范围广、矿体规模巨大,属世界级超大型

收稿日期:2016-04-18;修订日期:2016-05-25

资助项目:中国地质调查局项目《周边国家重要成矿区带对比研究及编图》子项目《中蒙边境大型-特大型铜-金、铀和稀有金属矿集 区对比研究》(编号:12120115066201)

作者简介:杨波(1991-),男,硕士,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: yangbo@cugb.edu.cn

通讯作者:赵元艺(1966-),男,博士,研究员,矿床学、从事地球化学研究。E-mail: yuanyizhao2@sina.com

91

斑岩型铜(金)矿床。欧玉陶勒盖地区海拔为1140~1215m,地势起伏平缓,相对高差小于50m,地表除少量岩石出露外,大部分被残留坡积物和沙漠覆盖^[1-5]。根据2014年绿松石山资源公司调查,欧玉陶勒盖矿床共有矿石量42.01×10⁸t,其中有铜23.38×10⁶t,金1099.99t,银6288.07t,钼31.52×10⁴t;Cu平均品位为0.56%,Au平均品位为0.27g/t,Ag平均品位为1.64g/t,Mo平均品位为0.008%。

1.1 地理位置

欧玉陶勒盖斑岩铜金矿床位于蒙古国南戈壁 省,北距蒙古国首都乌兰巴托市550km,南距中蒙边 境80km,矿区中心地理坐标为北纬43°01′、东经 106°51′。该矿床主要由4部分组成,由南向北依次 为欧玉南部(South Oyu,简称SO)、欧玉西南部 (Southwest Oyu,简称SWO)、欧玉中部(Central Oyu,简称CO)和雨果杜梅特(Hugo Dummett,简 称HD)矿床群,后根据矿产勘查及矿床开发情况, 由北向南又细分为雨果杜梅特北部(Hugo North)、 雨果杜梅特南部(Hugo South)、欧玉中部(Central Oyu)、欧玉(South Oyu)南部、欧玉西南部(Southwest Oyu)、荷茹嘎北部矿床(Heruga North)和荷茹 嘎(Heruga)7个矿床。

矿区周围交通便利,最近的机场距离矿区仅 25km(图1)。现今矿区周围已通有2条公路,另外, 从蒙古国首都乌兰巴托到矿区及曲辕犁(Choir)到 矿区的公路也正在铺设之中,这2条公路的投入使 用将极大地推动矿区生产效率,并大幅提升经济效 益。蒙古国计划修建从塔本陶勒盖(Tavan Togoli) 到中国包头市的铁路,这条铁路距矿区仅36km,这 对缓解中国铜资源紧缺现状将有一定程度地改善, 对矿区的开发也有一定的推动作用¹¹⁻²¹。

1.2 开发历史

根据欧玉南部发现的一系列挖掘痕迹和少量 矿渣判断,早在青铜器时代,此处就有小规模的开 采。20世纪80年代初期,蒙古-俄罗斯联合地球化 学调查报告中显示,中部欧玉地区有 Mo 异常。 1983年,Garamjav(现为绿松石山资源公司高级地质 工程师)首次对欧玉陶勒盖地区进行考察,在该处 发现铜改造和混染的证据。1996年,Garamjav牵头 Magma Copper公司进入欧玉陶勒盖地区考察。同



图 1 欧玉陶勒盖交通位置^[1] Fig. 1 Traffic location of Oyu Tolgoi

年,BHP Billiton(必和必拓公司,以下简称 BHP)收 购Magma Copper公司。1997年,BHP公司开展了 一项覆盖整个欧玉陶勒盖矿区的南戈壁滩沙漠勘 察项目,涉及地质填图、水流和沉积物检测、激发极 化调查等,并在同年9~10月进行第一阶段钻孔施 工,共完成6个钻孔,总深度达1100m。1998年4月 开始,BHP又继续进行第二阶段,陆续完成了13个 钻孔的施工,总深度达2000m,其中有4个钻孔矿化 较好。同年8~9月进行第三阶段施工,完成4个钻 孔,总深度达800m。由于整个钻孔施工阶段的结果 并未达到预期效果,所以该项目被暂停以待审核。 1999年,由于经济效益原因,BHP公司削减勘探预 算经费,导致欧玉陶勒盖矿区的勘探工作停滞不 前。2000年,出于经济情况考虑,BHP公司进行战 略调整,将包括欧玉陶勒盖工作区在内的238 km² 的勘查权区转让给了艾芬豪矿业(Ivanhoe Mines)公 司。同年5月,艾芬豪矿业公司开始了反向循环找 矿计划,共布置钻孔109个,总深度达8898m,初期 只是针对BHP公司OT-3钻孔的辉铜矿表生富集 矿化,钻探结果矿化极好,后来还在钻孔中发现浅 成的高品位铜矿化,大大推动了欧玉陶勒盖矿区的 开发进程。2001年,艾芬豪矿业公司继续进行反向 循环找矿,并在同年7月完成第一个深钻OTD-150。钻孔位于欧玉南部区域,深度达590m,在钻孔 70~578m均发现金矿化和铜矿化,Au平均品位为 1g/t,Cu平均品位为0.81%。OTD-150也是首次在 矿区发现有新的区域含有斑岩型矿化,同时伴生有 高品位的Au、Cu、Mo。鉴于该钻孔显示出的巨大 潜力,艾芬豪公司进一步扩大勘察规模,并广布钻 孔。2002年3月,艾芬豪公司提交了第一份勘察报 告,指出欧玉南部共有矿石量588Mt(以铜当量0.3% 为边界品位)。2002年底,艾芬豪公司在欧玉陶勒 盖矿区的远北部分布置一处钻孔来验证高激发极 化效应,该钻孔切穿了长达638m的斑铜矿化、高品 位黄铜矿化的矿体,这也导致后期发现雨果杜梅特 矿床。2003年,艾芬豪矿业公司进一步圈定雨果杜 梅特矿区范围,截至2003年中期,雨果杜梅特矿区 共有钻探机18台,雇工200余人,是当时世界上最 大的勘察项目。2004—2008年,艾芬豪矿业公司在 进一步勘察的同时发展合作融资,为欧玉陶勒盖矿 区的开发做深入准备。2009年,欧玉西南部深钻中 发现的高品位铜-钼矿化和金矿化使荷茹嘎矿床得

以发现。进一步的深钻工作又发现了位于荷茹嘎 矿床和欧玉西南部矿床间的荷茹嘎北部矿床。 2010年,艾芬豪矿业公司宣布将在2013年进入商业 化开采。截至2012年底,欧玉陶勒盖工程第一期建 设已经完成了99%,总资产投资约60亿美元,预计 第一期最后总投资将达62亿美元。2013年1月2日 开始第一批矿石加工,2013年1月31日生产出第一 批铜-金精矿^[1-3,5-6]。

1.3 开发状况

该地区矿业公司林立,欧玉陶勒盖矿床的开 发项目由欧玉陶勒盖有限责任合作公司(Ovu Tolgoi LLC,以下简称 OT LLC)负责, OT LLC 66%的股份由绿松石山资源公司(Turquoise Hill Resources Ltd,以下简称TRQ,前身为艾芬豪蒙古 矿业公司) 控股, 剩余 34% 的股份由 Erdenes 欧玉陶 勒盖有限责任合作公司(Erdenes OT LLC,是蒙古 国国家控股)掌握。在欧玉陶勒盖矿床的实际开 发中,由于力拓公开有限公司(Rio Tinto plc)掌握 了TRQ股份的51%,所以矿床的实际开发基本由 力拓公司负责。另外,OT LLC的采矿权基虽然覆 盖了矿区大部,但Entrée Gold 合资公司(Entrée Gold Joint Venture,以下简称EJV)掌握着 Shivee 陶 勒盖和Javkhlant这2个地区的采矿权,在生产过程 中,EJV自己探而不采,只是交给OTLLC,之后2 个公司按比例分配获得的收益:如果开采深度大 于 560m, OT LLC 获得 80% 的收益, 如果小于 560m,则获得70%的收益。

1.4 储量品位

前人对2013年前欧玉陶勒盖矿床储量品位和 开发情况进行过介绍⁶,根据TRQ公司官网¹¹的最 新信息,2013年,欧玉陶勒盖矿床产出铜7.67×10⁴t, 金4.451t。2014年,公司共投入资本约9.06亿美元, 产出铜148400t,金16.698t。欧玉陶勒盖矿床的资 源概况如表1所示,可以明显看出,该矿床资源潜力 巨大,开发前景极好。

1.5 研究意义

如前文所述,欧玉陶勒盖铜金矿床为全球罕见 的超大型斑岩型铜金矿床,对该矿床的研究不仅有 利于探究该矿床铜金储量高、矿床品位好、矿化范 围广、规模巨大等特点的成因,特别是,该矿集区毗 邻中国,通过对该矿集区的研究,可以极大地提高 中蒙边境尤其是中国一侧金属矿床的理论研究水

而日	矿床	矿石昰/M+	Cu/%	$\Delta u/(\alpha, t^{-1})$	$\Lambda \alpha / (\alpha, t^{-1})$	Mo/%		金属	属储量	
火日	ッ <i>レ</i> 下	ッ′口 <u>里</u> /IVII	Cu/ /0	Au(g·t)	Ag/(g·t)	1010/ /0	铜/Mt	金/t	银/t	钼/10 ⁴ t
欧玉西南部矿	「床-露天(以Cu当量边	界品位为0.2	2%进行	i计算)						
	探明值	432	0.52	0.41	1.37	0.005	2.26	161.39	540.20	2.22
	控制值	740	0.38	0.23	1.12	0.006	2.84	155.27	757.67	4.08
扬	采明+控制	1172	0.44	0.3	1.21	0.005	5.11	316.66	1297.87	6.30
	推测值	390	0.29	0.16	0.87	0.004	1.12	55.34	307.93	1.72
欧玉西南部矿	「床-地下 (以Cu当量边	界品位为0.3	37%进行	亍计算)						
	探明值	14	0.4	0.78	1.15	0.004	5.49	9.70	14.43	0.05
	控制值	93	0.35	0.59	1.19	0.003	3.23	50.07	100.98	0.32
拣	采明+ 控制	107	0.35	0.61	1.18	0.003	3.78	59.76	115.44	0.37
	推测值	159	0.39	0.32	0.85	0.003	6.14	46.44	124.23	0.40
雨果杜梅特矿	「床群(以Cu当量边界品	晶位为0.37%	进行计	算)						
	OT LLC	98	1.97	0.46	4.48	0.003	1.92	40.99	398.20	0.29
探明值	EJV	1	1.43	0.12	2.86	0.004	1.58	0.11	2.92	0.004
	整个北雨果地区	99	1.96	0.46	4.46	0.003	1.94	41.11	401.12	0.299
	OT LLC	749	1.56	0.34	3.35	0.003	1.17	234.39	2288.32	2.585
探明值	EJV	128	1.65	0.55	4.12	0.003	2.12	64.38	481.60	0.45
	整个南雨果地区	877	1.57	0.37	3.46	0.003	13.79	298.78	2769.95	2.99
	OT LLC	847	1.61	0.36	3.48	0.003	13.59	275.39	2686.51	2.86
探明值	EJV	129	1.65	0.55	4.11	0.003	2.13	64.52	484.52	0.45
	整个北雨果地区	976	1.61	0.38	3.56	0.003	15.72	339.88	3171.06	3.31
	OT LLC	811	0.77	0.27	2.34	0.003	6.26	200.09	1728.30	2.81
推测值	EJV	179	0.99	0.34	2.68	0.003	1.76	55.65	437.09	0.45
	整个北雨果地区	990	0.81	0.28	2.4	0.003	8.03	255.74	2165.39	3.27
推测值	南雨果地区	845	0.77	0.07	1.78	0.007	6.52	52.76	1372.29	5.62
荷茹嘎矿床()	以Cu当量边界品位为	0.37%进行计	'算)							
E.	JV推测值	1700	0.39	0.37	1.39	0.011	6.63	579.12	2153.29	19.23
TI	RQ推测值	116	0.41	0.29	1.56	0.011	0.47	30.62	164.97	1.27
整个荷茹嘎矿	床资源储量的推测值	1,816	0.39	0.37	1.4	0.011	7.09	609.74	2318.25	20.50
整个欧玉陶勒	」 盖矿集区									
	探明值	544	0.78	0.43	1.93	0.005	4.25	212.22	955.75	2.59
	控制值	1711	0.99	0.32	2.33	0.004	16.96	504.11	3628.60	7.44

表1 欧玉陶勒盖矿产资源概况 Table 1 Geological section showing mineral resources of Oyu Tolgoi area

注:计算过程中四舍五入,所以计算的总值并不总是等于各个值相加之和;OT LLC一欧玉陶勒盖有限责任合作公 司;EJV—Entrée Gold合资公司;TRQ—绿松石山资源公司

0.35

0.27

平,促进中国隐伏矿床找矿勘查工作的纵深探索。 同时,蒙古国在中国"一带一路"项目中占有重要位 置,而针对该矿床的中文资料较稀缺,给"一带一 路"项目的展开和中国企业"走出去"都造成很大不 便,因此,针对欧玉陶勒盖铜金矿床的研究具有重 要理论和实际意义。

探明+ 控制

推测值

2 产出环境

2.23

1 64

2.1 地 层

蒙古南戈壁地区出露的地层自下而上包括奥 陶系一二叠系,上覆不整合白垩系和第四系。奥陶 系为泥质岩、砂岩、石英砾岩和石英岩;志留系为泥

0.004 21.21 716.34 4584.34

 $0.008 \quad 23.38 \quad 1019.99 \quad 6288.07 \quad 31.52$

9.98

2255

4201

0.94

0.56

质岩、砂岩、火山碎屑岩和砾岩;泥盆系为安山岩和 枕状玄武岩;下石炭统为硅质岩、灰岩、砂岩、砾岩、 火山碎屑岩,上石炭统主要为厚层流纹岩、流纹英 安岩、英安岩、安山岩、玄武岩和熔结流纹凝灰岩; 二叠系主要为砂岩和钠闪碱流岩;白垩系主要为砂 岩、硅质岩、含恐龙化石砾岩夹层状玄武质熔岩^[6]。 矿区范围内出露的地层主要为志留系、泥盆系和石 炭系火山-沉积岩(图2),以及白垩系陆源碎屑沉积 岩盖层和第四系沉积岩。其中,志留系主要由细-粗粒的陆源砂砾岩组成,泥盆系和石炭系的代表性 岩性组合为互层状玄武质或安山质熔岩、粗面质流 纹岩、凝灰岩和细-粗粒陆源碎屑沉积岩^[7-9]。

2.2 构 造

欧玉陶勒盖矿床位于中古生代哈萨克-蒙古 岩浆弧内,该岩浆弧以与蒙古国南部岛弧有关地 块的一条100~250km宽的弧形带为代表(图2)。 这些地块主要由火山岩组成,且其中侵入有大量 石炭纪一二叠纪花岗岩。该岩浆弧的北边和南边 以由早一中古生代弧后和弧前层序,以及被增生 楔层序隔开的晚新元古代一早古生代图瓦-蒙古 岩浆弧火山岩与中一新元古代构造基底裂块组成 的基底地块构造复杂的岩套为界(图2)^[10-12]。欧玉 陶勒盖矿床处在 Badarch 等提出的古尔班赛汗地块 内^{13]},该地块在蒙古国南部形成一条长600km、宽 200km的带。区内北西向和东西向断层起控岩、控 矿作用,北东向和北西向断层交会部位矿化多形成 工业矿,欧玉陶勒盖铜(金)矿床位于断层交会处, 其中,北东向断层或破碎带可能与区域性北东向左 行走滑断裂构造活动有关。

2.3 岩浆岩

侵入岩方面,虽然欧玉陶勒盖矿床只在局部出露于地表,且主要被白垩纪和新生代盖层岩石掩盖,但是在周围区域该矿床的厚度可达2000m。因此,局部地层的分布情况是根据岩心分析得出的。 主要岩石地层单元是以斑状普通辉石玄武岩为主的欧玉陶勒盖层序,该层序构成一个厚约10m的火山杂岩体。普通辉石玄武岩呈块状,其上覆盖火山碎屑岩、复成分砾岩和酸性火山灰流凝灰岩,这些岩石又被厚度超过300m的纹层状炭质粉砂岩-砂岩覆盖。这些岩石中侵入有与矿化有关的斑状石英二长闪长岩(图3)及U-Pb年龄介于373~375Ma之间的成矿期后黑云母花岗闪长岩侵入体^[5,15]。底部含有 纹层状粉砂岩、杂砂岩和石英岩的异地Heruga层序 逆冲到欧玉陶勒盖层序之上,其上覆盖总厚度为 1500m的玄武质角砾岩、粗安岩和火山碎屑岩。矿 区及外围出露的泥盆纪正长岩、花岗岩,石炭纪闪 长岩、花岗岩、花岗闪长岩、正长岩,二叠纪碱性花 岗杂岩,构成几何形态各异、产出规模不等的岩墙 或岩基。其中,长石角闪斑岩、长石斑岩和硅化热 液角砾岩墙与铜(金)矿化带具有密切的时空分布 关系^[4,14]。

总体看来,区内岩浆岩丰富,断裂构造极为发 育,为成矿提供优越条件,使欧玉陶勒盖铜(金)矿 床备受世界瞩目。

3 地质特征

3.1 矿体分布形态及产出规模

欧玉西南部是一个向南西倾斜的富金矿斑岩 系统,呈管状的几何形状,其垂直高度可达700m;欧 玉南部的原生斑岩型铜矿化主要发育在玄武质火 山岩及规模较小的、构造作用强烈的石英二长闪长 岩中(图4-a),近圆形,范围约600m×400m;隐伏的 雨果杜梅特矿床在长约4km的侧向区段内向北缓 倾,深度为1000m(图3),北雨果杜梅特矿床的西翼 和上部边缘具有一条独特的富金矿带(图3),呈锥 形产出,宽约650m,长850~1300m;穿越位于欧玉南 部矿床正南的一条正断层,向北缓倾的隐伏的荷茹 嘎矿床和荷茹嘎北矿床向下断陷,深度接近2000m, 形成一条北东向的矿化走廊,其潜在的矿化带至少 高700m,宽700m^[5-6,16-17],另外,与雨果北矿床的情况 类似,Heruga矿床上覆盖了一条独特的富含辉钼矿 的矿带,其翼部富含金^[9]。

3.2 矿石结构构造

成矿与一系列受构造控制的志留纪一泥盆纪 长石斑岩、长石角闪斑岩岩株、岩脉有关,呈细网脉 状和浸染状产出,具有典型的中粒斑状结构、块状 构造,斑晶主要为斜长石和角闪石^[5]。

3.3 矿物组合

欧玉陶勒盖矿床中,铜(金)矿石的矿物组合相 对简单:金属矿物以黄铜矿和磁铁矿为主,黄铁 矿、斑铜矿和辉铜矿次之,局部有辉钼矿;脉石矿 物有石英、绢云母、黑云母、绿泥石、高岭石、伊利 石等。高品位的金总是与浸染状或脉状黄铜矿-磁铁矿带伴生,或以自然金的形式与黄铜矿、斑铜



图 2 家古国欧玉网朝盖斑石型铜-金矿床构造环境、区现地质环境和矿区地质环境。 Fig. 2 Tectonic, regional and local geological setting of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au deposit, Mongolia a—大地构造位置图;b—区域地质图;c—矿区地质图



 图3 蒙古国欧玉陶勒盖斑岩铜-金矿系统雨果杜梅特矿床有代表性的地质横剖面和纵剖面图(据参考文献[12] 修改)
(图示出了矿石分布与火山容矿岩石、上覆火山沉积岩套、主要诱发性(causative)石英二长岩侵入体和成矿 晚期到成矿期后黑云母花岗闪长岩的关系。该矿床群出露于地表、向上倾伏的欧玉中部剖面和欧玉西南部 剖面及进一步向南的深埋、向下断陷的Heruga矿体和Heruga北矿体明显具有类似的关系)
Fig. 3 Representative geological cross section and long section through the Hugo Dummett deposit of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, Mongolia

a一雨果杜梅特南矿床的 NE6200 号剖面;b一雨果杜梅特北矿床的 N4767200 号剖面;c一雨果杜梅特南

矿床的矿石品位框的轮廓线和雨果杜梅特北矿床的横剖面;d—穿越雨果杜梅特矿床部分 区段的纵剖面(以图解的方式显示出该矿床的地质环境和品位分布情况)



图 4 欧玉陶勒盖矿区的部分矿化现象^① Fig. 4 Partial mineralization in Oyu Tolgoi a一受构造作用强烈处的矿化;b一斑铜矿及含金的斑铜矿

矿连生(图4-b),或以包裹体的方式存在于铜的硫 化物中^{16-7,18]}。

在雨果杜梅特矿区,硫化物多呈带状产出,中 心为斑铜矿,往外是黄铜矿,边部为黄铁矿^[17]。

3.4 围岩蚀变

欧玉陶勒盖矿化沿一条18km长的北北东向走 廊分布(图2),从北向南包含雨果杜梅特北、雨果杜 梅特南、欧玉中部、欧玉南部、欧玉西南部、荷茹嘎 北和荷茹嘎7个矿床。这些矿床中的蚀变组合一般 包括:钠钙性蚀变(阳起石-磁铁矿-钠长石-磷灰 石-榍石和绿色黑云母)、黑云母-磁铁矿、钾长石、 石英-绢云母(白云母)、电气石-绢云母(只出现在 局部)、中-高级泥化蚀变、青磐岩化蚀变^[7,19]。

雨果杜梅特北部矿床与南部的蚀变类型和矿 化现象类似¹¹⁹,主要含矿围岩均为石英二长闪长 岩。高品位的矿化(>2.5% Cu)多发生在构造作用 强烈的石英脉中,主要为斑铜矿、辉铜矿、黄铜矿, 其中以斑铜矿为主。黄铁矿、硫砷铜矿、黝铜矿-砷 黝铜矿次之,而且多出现在雨果杜梅特南部矿床, 常见蚀变矿物为明矾石、叶蜡石、水铝石、地开石、 黄玉、萤石等。

有证据表明,欧玉陶勒盖的矿床是在一个层状 火山复合杂岩体的根部带中形成的^[20]。深部钻探结 果表明,位于这些矿床之下的诱发性石英二长闪长 岩向下延伸到地下深部。该石英二长闪长岩可能 代表了与该层状火山机构具有相同母岩浆的一个 次火山侵入体。欧玉陶勒盖的矿床存在明矾石,这 与高硫化低温热液系统有关的岩盖的情况一致,后者的明矾石套叠在早期斑岩矿化之上^[20-22]。

3.5 同位素年代学

前人的同位素年代学研究结果显示,晚泥盆世 与欧玉陶勒盖矿床矿化有关的成矿前和成矿时的 石英二长闪长岩侵入体的 U-Pb 年龄为 372Ma, 而 后期花岗闪长岩侵入体的年龄为366Ma,富黑云 母钾硅酸盐蚀变带中黑云母的K-Ar年龄为411± 3Ma^{II}。由于该样品中含有绿泥石,表示经历了退变 质过程,所以该年龄反映了成矿年龄的下限。欧玉 西南部矿床、欧玉中部矿床和雨果杜梅特南部矿床 的辉钼矿样品Re-Os年龄为373~370±1.2Ma,代表 了欧玉陶勒盖矿床矿化的时间^{112]}。同时,这一时间 与距欧玉陶勒盖铜(金)矿床仅 140km 的查干苏布 尔加(TsagaanSuvarga)铜钼矿床370.4±0.8Ma的成矿 年龄相近,表明晚泥盆世是南蒙古构造-岩浆带重 要的斑岩矿化期188。这些数据表明,与欧玉陶勒盖 矿床有关的斑岩侵入体年龄应限定在南蒙古国泥 盆纪—石炭纪。

3.6 岩石地球化学

由欧玉陶勒盖矿床所采样品的主量元素分析 数据(表2)可以看出,SiO2质量分数变化范围为 42.96%~72.98%,变化范围较大,平均值为58.9%,以 中酸性岩浆岩为主。2件花岗闪长岩的SiO2质量分 数为62.77%和63.73%,平均值为63.25%;K2O+ Na2O的质量分数较高,为9.66%和7.35%,平均值为 8.51%,呈碱性;MgO、CaO含量较低,平均值分别为

表2 矿区岩浆岩主量元素测试结果^[17] Table 2 Analytical results of main elements of magmatic rocks in the mining area

											%
样品号	岩 性	SiO ₂	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	${\rm TiO}_2$	P_2O_5
EGD001(75)	花岗闪长岩	62.77	16.66	4.86	0.124	0.9	2.29	4.53	5.13	0.439	0.18
OTD514(1631)	黑云母花岗闪长岩	63.73	15.19	3.8	0.07	1.89	2.97	4.6	2.75	0.472	0.2
EGRCD066(172)	英安岩	66.12	15.91	3.61	0.113	1.07	2.57	3.98	3.75	0.439	0.19
OTD1218(1048)	英安岩	67.42	16.47	3.83	0.047	0.95	0.95	1.84	3.75	0.444	0.23
OTD404(399)	英安岩	67.47	15.68	3.3	0.081	0.51	2.02	4.53	2.49	0.323	0.16
EGRCD073(120)	石英二长闪长岩	60.23	17.84	5.8	0.052	1.56	3.43	4.33	4.15	0.556	0.28
OTRCD388(504)	石英二长闪长岩	68.91	13.14	3.98	0.012	0.49	0.17	0.11	3.91	0.807	0.29
OTD258(82)	石英二长闪长岩	68.9	16.42	4.38	0.016	0.54	0.13	0.5	3.79	0.396	0.17
OTD343(1247)	石英二长闪长岩	59.23	17.12	7.91	0.121	1.38	0.26	0.25	4.69	0.533	0.03
OTD514(1289)	石英二长闪长岩	70.98	13.01	2.94	0.015	0.47	0.1	0.2	3.59	0.193	0.06
OTD514(1405)	石英二长闪长岩	68.6	13.75	3.35	0.048	0.97	0.84	0.22	5.65	0.331	0.14
OTD514(2161)	石英二长闪长岩	65.13	16.01	2.91	0.038	0.56	2.41	4.18	4.87	0.305	0.11
OTD786(150)	石英二长闪长岩	59.45	16.75	4.77	0.135	1.43	4.14	6.85	1.23	0.479	0.25
OTD976B(266)	玄武岩	42.96	14.26	11.6	0.2	4.98	9	1.66	2.6	1.64	0.56
OTD976B(552)	玄武岩	48.83	18.08	8.73	0.209	3.76	5.3	5.46	0.62	0.771	0.36
OTD976B(772)	玄武岩岩墙	49.32	14.97	10.59	0.175	5.78	9.74	2.84	2.53	0.743	0.27
OTD976B(1382)	玄武岩	46.28	15.67	11.6	0.219	8.85	3.43	0.72	3.12	1.138	0.28
UUD001A(590)	玄武岩	48.14	15.16	9.72	0.118	5.13	6.75	4.83	0.95	1.431	0.34
OTD1220(552)	玄武岩	48.54	13.43	10.35	0.163	6.62	11.26	3.25	0.71	0.669	0.26
OTD318(223)	玄武岩	44.99	15.7	12.53	0.224	7.46	10.47	2.5	1.14	1.032	0.24

1.34%和2.63%; Al₂O₃平均值为15.93%。3件英安岩 的SiO₂质量分数变化范围较小,为66.12%~67.47,平 均值为67%;K2O+Na2O的质量分数变化范围为 5.59%~7.73%,平均值为6.78%;MgO、CaO含量较 低,平均值分别为0.84%和1.85%;Al₂O₃平均值为 16.12%。8件石英二长闪长岩的SiO2质量分数变化 范围较大,为59.23%~72.98%,平均值为65.18%; K₂O+Na₂O的质量分数变化范围为4.02%~9.05%, 平均值为6.07%; MgO平均值为0.93%, CaO平均值 为1.44%; Al₂O₃平均值为15.51%。7件玄武岩的 SiO2质量分数变化范围较大,为42.96%~49.32%,平 均值为47.01%; K2O+Na2O变化范围为3.64%~ 6.08%,平均值为4.70%;MgO平均值为6.08%,CaO 平均值为7.99%;Al₂O₃平均为15.32%。岩石总体上 均表现为富硅、富碱、贫钙、贫镁的特征,但玄武岩 中钙镁质较高,花岗闪长岩的碱性程度最高,玄武 岩最低。

根据微量元素测试结果(表3),经球粒陨石标 准化后在图5中投出的点位呈右倾模式,所有这些 数据点都显示出轻稀土元素富集、重稀土元素略有 亏损的特点,这可能是普通角闪石分馏造成的。除 花岗闪长岩(EGD 001)中出现强烈正Eu异常,表明 斜长石发生聚集外,其他地方的Eu异常可以忽略。

4 矿床成因

4.1 流体包裹体特征

前人在欧玉中部进行了一系列扫描电镜、流体 包裹体分析和针对脉石英中Al、Ti、K和Fe的高分 辨率电子探针测试工作^[23],深化了对于欧玉中部矿 化阶段的认识。根据Müller等^[23]的认识及测试结 果,将A型脉中的石英划分为4个世代,包括OTi, OTii,OTiii和OTiv。

OTi阶段主要形成了A型网状脉及围岩上的硅 化,观测到的包裹体为玻璃质包裹体(G+V),均一 温度大于582℃。石英中Ti温度计显示,这一阶段 的结晶温度为598~880℃,主要形成大量石英。

OTii阶段是大量硫化物矿化的阶段,观测到的包裹体为气液两相(V+L)和固气液三相(S+V+L),均一

表3 矿区岩浆岩微量和稀土元素测试结果^[17] Table 3 Analytical results of trace and rare earth elements of magmatic rocks in the mining area

																			10^{-6}	
样	EGD	OTD514	EGRDC	OTD1218	OTD	EGRCD	OTRCD	OTD	OTD	OTD514	OTD514	OTD	OTD	OTD	OTD	0TB	OTD976B	UUDO1A	OTD	OTD
品	001	(1631.2-	066	(1048-	404	073	388	258	343	(1289.15-	(1405.85-	514	786	976B	976B	976B	(1382.5-	(590-	1220	318
号	(75)	1631.7)	(172)	1048.8)	(399)	(120)	(504)	(82.5)	(1247)	1293.7)	1410.15)	(2161.35)	(150)	(266-267)	(552)	(772)	1383.5)	593)	(522)	(223)
岩	花岗	黑云母	英	英	英	石英二	石英二	石英二	石英二	石英二	石英二	石英二	石英二	玄	玄	玄武	玄	玄	玄	玄
性	闪	花岗闪	安	安	安	长闪	长闪	长闪	长闪	长闪	长闪	长闪	长闪	武	武	岩	武	武	武	武
	长岩	长岩	岩	岩	岩	长岩	长岩	长岩	长岩	长岩	长岩	长岩	长岩	岩	岩	岩墙	岩	岩	岩	岩
Sc	8	7	6	6	4	7	13	5	6	2	4	3	6	35	17	37	31	30	40	40
Be	3	2	2	2	1	2	< 1	2	2	< 1	1	2	2	3	2	2	2	2	2	2
V	34	75	64	76	81	147	172	89	116	61	63	95	124	261	243	296	333	244	271	417
Cr	< 20	30	60	< 20	< 20	< 20	30	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	30	30	90	90	490	180	80
Co	6	8	8	4	4	9	3	7	14	8	4	2	8	36	27	35	33	41	36	43
Ni	< 20	< 20	30	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	20	< 20	200	30	40
Cu	40	50	100	70	60	4520	3.26%	210	1070	4.62%	2.82%	1360	130	120	50	340	650	50	130	200
Zn	70	80	110	/0	10	40	00	120	200	100	90	50	90	120	20	90	250	110	80	150
Ga	20	20	19	18	18	20	11	25	20	13	15	18	17	20	20	1/	18	2.4	15	20
Ge A -	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.5	1.5	1.5	2	1.0	1.5	2.5	1.0	20	2.1	1.7	2.4	2.5	2
AS	< 5	< 5	20	12	15	0	/	197	33	170	//	< 5	24	45	29	52	< 5	5/	40	17
KU Sr	280	771	868	95	217	876	00 728	215	145	20	98	514	34 457	702	1185	59 604	82	516	544	502
v	217	10.4	11.9	16.5	0.5	25.2	12	21.7	21.2	4	95	14.4	17.5	24	10.0	18.5	22.9	26.2	19.4	20.1
ı 7r	507	130	1/1	135	73	170	13	133	145	4	122	105	103	170	68	58	54	20.2	51	37
Nh	15.6	77	83	69	3.1	77	3.6	73	73	24	6.2	5.6	6.4	32.8	3.6	4 5	27	86	3	23
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	41	8	2	48	13	8	73	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Δσ	< 0.5	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.8	< 0.5	< 0.5	11.3	13	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5	< 0.5	< 0.5
In	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.3	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sn	1	1	25	<1	<1	<1	2	<1	1	2	< 1	<1	<1	< 1	<1	<1	< 1	1	< 1	<1
Sb	77	79	22.1	11.6	15.1	81	89	11.5	69	37	62	84	11	77	11.7	97	94	9.2	10.8	1
Cs	3.2	2.2	2.8	4.7	3.2	2.3	0.8	2	3.7	1.7	2.3	1.8	2.3	6.1	9.8	0.5	8.3	1.5	0.6	0.4
Ba	442	964	1080	174	134	829	335	926	723	147	443	971	244	683	239	396	176	512	302	307
La	22.3	15	16	14.5	7.31	17.4	5.71	14.4	13.3	2.76	3.6	13.2	16.2	39.2	11.4	10.3	7.91	21	8.44	7.51
Ce	49.7	30.8	33	28.9	14.9	37	10.9	28.7	29.3	5.33	8.07	24.4	32	77.3	25.8	21.3	19	48.1	17.8	16.9
Pr	6.38	3.87	4.13	3.69	1.92	4.97	1.47	3.63	3.92	0.68	1.12	2.93	4.1	9.23	3.64	2.82	2.93	6.41	2.49	2.47
Nd	22.3	13.3	14.1	12.5	6.9	18.2	6.22	12.8	14.6	2.49	4.76	10.2	14.4	31.6	14.5	11.3	12.6	23.8	10.2	11.2
Sm	5.08	2.72	2.94	2.73	1.63	4.27	1.72	3.04	3.46	0.54	1.26	2.18	3.24	6.46	3.46	2.8	3.43	5.57	2.65	3.2
Eu	10.1	0.859	0.831	0.876	0.571	1.32	0.651	0.974	1.12	0.227	0.41	0.734	1.13	2.27	1.31	1.06	1.28	2.05	0.977	1.23
Gd	4.7	2.24	2.57	2.72	1.53	4.18	2.19	3.21	3.33	0.6	1.37	2.09	3.26	6.03	3.44	3.02	4.05	5.55	2.95	3.73
Tb	0.8	0.33	0.38	0.45	0.25	0.68	0.38	0.54	0.57	0.1	0.23	0.34	0.5	0.87	0.54	0.5	0.71	0.85	0.49	0.61
Dy	4.96	1.83	2.09	2.71	1.47	3.99	2.29	3.38	3.53	0.62	1.37	2.11	2.87	4.5	3.17	3	4.28	4.61	3.08	3.6
Но	1.01	0.35	0.41	0.56	0.31	0.8	0.45	0.71	0.74	0.13	0.3	0.45	0.56	0.81	0.62	0.61	0.87	0.91	0.64	0.7
Er	3.09	0.99	1.2	1.71	0.96	2.42	1.3	2.17	2.27	0.38	0.97	1.43	1.68	2.15	1.81	1.76	2.51	2.58	1.96	2.04
Tm	0.483	0.146	0.168	0.263	0.147	0.363	0.186	0.327	0.344	0.058	0.149	0.225	0.255	0.29	0.265	0.259	0.358	0.369	0.285	0.296
Yb	3.32	0.9	1	1.75	1.01	2.37	1.15	2.15	2.21	0.4	0.98	1.5	1.71	1.76	1.66	1.64	2.24	2.25	1.78	1.85
Lu	0.568	0.139	0.151	0.281	0.186	0.384	0.167	0.328	0.35	0.076	0.159	0.242	0.282	0.268	0.253	0.253	0.333	0.33	0.256	0.278
Hf	13.2	3.6	3.7	3.5	1.9	4.3	1.2	3.6	3.8	2.1	3.3	2.7	2.8	4.4	2	1.5	1.6	5.1	1.5	1.3
Та	0.79	0.49	0.53	0.39	0.15	0.42	0.12	0.42	0.44	0.2	0.37	0.29	0.34	1.94	0.16	0.24	0.11	0.51	0.14	0.09
W	< 0.5	4.1	1.8	1.3	< 0.5	4	3.4	< 0.5	4.8	1.8	3.4	3.8	2	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.5
Tl	0.63	0.2	0.49	0.87	0.51	0.3	2.14	1.66	1.43	0.92	0.68	0.4	0.19	0.18	0.09	0.13	1.29	0.11	< 0.05	0.1
Pb	8	8	23	10	8	< 5	53	30	< 5	93	32	< 5	12	5	< 5	6	12	7	< 5	8
Bi	0.1	0.1	0.4	0.3	0.1	0.7	0.6	0.3	0.1	2.3	0.6	< 0.1	0.9	< 0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	< 0.1	< 0.1
Th	7.54	3.67	3.54	2.64	0.84	3.39	0.75	4.03	3.33	0.67	3.08	2.32	2.79	3.81	1.1	1.47	0.72	2.78	1.17	0.6
U	3.74	1.51	1.57	1.17	0.68	2	0.64	2.48	1.92	0.32	0.68	1.64	1.37	0.99	0.24	0.57	0.32	0.62	0.49	0.27

温度为265~305℃,冰点温度为-22~-11.2℃,捕获温度为296~340℃,盐度为15%~22.6%。石英中Ti温度计显示,这一阶段的温度大约由700℃降至340℃,伴随着早期石英分解的过程,磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿等矿物在这一阶段大量形成。

OTiii阶段形成了发育在早期石英裂隙中的 网状脉,但未发生矿化,观测到的包裹体为气液 两相(V+L),均一温度为229~259℃,冰点温度 为-1.9~-1.5℃,捕获温度为256~289℃,盐度为3%~ 3.5%。该阶段主要形成石英。

OTiv阶段石英-方解石、微型角砾岩切穿A型脉,形成一些伴生矿物。观测到的包裹体为气液两相(V+L),均一温度为190~204℃,冰点温度为-2.5~-1.4℃,捕获温度为212~228℃,盐度为2.8%~4.4%,根据捕获温度计算,该阶段的结晶温度应处于212~335℃之间,形成自然金、自然银、辉铋矿等。

4.2 Sr-Nd-Pb-Hf同位素特征

在欧玉陶勒盖矿区,雨果杜梅特矿床是近年发现的有较大矿产潜力的矿床,因此此处的新进工作

也很多,针对欧玉陶勒盖矿床的Sr-Nd-Pb-Hf同 位素特征也以此矿床为基础进行研究。根据Dolgopolova等^[17]采自矿区范围内钻孔中的岩浆岩数据 结果(采样位置见图2),得到矿区岩浆岩Sr-Nd-Pb-Hf同位素的相关数据列于表4、表5、表6,作为 讨论这些同位素特征的基础。

初始阶段的 ^{\$7}Sr/^{\$6}Sr 值均位于 0.7036~0.7045 之 间,接近玄武岩的初始比值,只有 3 个例外。其中 OTD1218 为安山岩,采自雨果杜梅特矿区北部,其 比值为 0.7087,可能是受到混染; 2 件来自钻孔 OTD514 的石英二长闪长岩具有较高的 ^{\$7}Rb/⁸⁶Sr 值,而初始 ^{\$7}Sr/⁵⁶Sr 值却低于 0.703,上述数据偏差可 能均由实验偏差所致,因此在更正错误的过程中扣 除了这些比值。其他石英二长闪长岩的 ^{\$7}Rb/⁸⁶Sr 均 小于 0.5。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值的变化范围大致为 3.4~7.4,具有 高 ^{\$7}Sr/^{\$6}Sr 值的英安岩的平均值为 4.5,表明 Rb-Sr 体系受到混染,Sm-Nd数据更有意义,结晶时体系 内的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为正值^[17]。正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和低 ^{\$7}Rb/⁸⁶Sr 值表明存在一个长期的亲石元素亏损过程,这种亏

表4 Sr和Nd同位素测试数据结果^[17] Table 4 Results of Sr and Nd isotope test

样品号	岩性	147Sm/144Nd	143Nd/144Nd	$^{143}\mathrm{Nd}/^{144}\mathrm{Nd}_{\mathrm{t}}$	$\epsilon_{\rm Nd}(t)$	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	$^{87}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr}_{\mathrm{t}}$	$T_{\rm dm}$	$T_{\rm dm^*}$
EGD001(75)	花岗闪长岩	0.13773	0.512789	0.51247	5.6	1.716	0.71248	0.704	589	600
OTD514(1631.2-1631.7)	黑云母花岗闪长岩	0.12364	0.512637	0.51233	3.5	0.225	0.705528	0.7043	3.5	739
EGRDC066(172)	英安岩	0.12606	0.512638	0.51233	3.4	0.267	0.705885	0.7045	756	831
OTD1218(1048-1048.8)	英安岩	0.13204	0.512715	0.5124	4.5	2.054	0.719224	0.7087	676	716
OTD404(399)	英安岩	0.14282	0.512804	0.51247	5.7	0.747	0.707855	0.704	597	593
EGRCD073(120)	石英二长闪长岩	0.14184	0.512814	0.51248	6	0.334	0.705754	0.704	572	570
OTRCD388(504)	石英二长闪长岩	0.16719	0.51289	0.51249	6.3	0.35	0.705627	0.7038	624	538
OTD258(82.5)	石英二长闪长岩	0.14359	0.512796	0.51246	5.5	0.38	0.706051	0.7041	620	614
OTD343(1247)	石英二长闪长岩	0.14328	0.512827	0.51248	6.2	3.314	0.720915	0.7036	557	550
OTD514(1289.15-1293.7)	石英二长闪长岩	0.13111	0.512766	0.51245	5.5	6.496	0.72591	0.6922	585	615
OTD514(1405.85-1410.15)	石英二长闪长岩	0.16004	0.512929	0.51254	7.4	2.988	0.718426	0.7028	457	423
OTD514(2161.35)	石英二长闪长岩	0.12921	0.512773	0.51246	5.8	0.529	0.706611	0.7039	562	592
OTD786(150)	石英二长闪长岩	0.13603	0.512791	0.51246	5.9	0.215	0.705068	0.7039	574	588
OTD976B(266-267)	玄武岩	0.12359	0.512538	0.51225	1.4	0.186	0.705104	0.7041	892	998
OTD976B(552)	玄武岩	0.14427	0.512814	0.51247	5.9	0.051	0.704155	0.7039	589	581
0TB976B(772)	玄武岩岩墙	0.14981	0.512776	0.51242	4.9	0.246	0.70553	0.7043	713	680
OTD976B(1382.5-1383.5)	玄武岩	0.16459	0.51293	0.51254	7.2	3.91	0.723961	0.7038	489	441
UUDO1A(590-593)	玄武岩	0.14149	0.512784	0.51245	5.4	0.084	0.704254	0.7038	626	628
OTD1220(522)	玄武岩	0.15707	0.512801	0.51245	4.9	0.074	0.704478	0.7041	736	662
OTD318(223)	玄武岩	0.17274	0.51283	0.51242	4.9	0.083	0.704528	0.7041	878	681

注:*T*_{dm}=单阶段(线性)DM年龄。假定参数:¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd_{CHUR}=0.1967;¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd_{CHUR}=0.512638;¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd_{DM}=0.222; ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd_{DM}=0.513114

样品号	U/Pb	Th/Pb	$Pb/10^{-6}$	U/Th	$^{238}U/^{204}Pb$	$^{232}Th/^{204}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$
EGD001(75)	0.47	0.94	8	0.5	29.9	62.4	17.4	15.46	37.41
OTD514(1631.2-1631.7)	0.19	0.46	8	0.41	11.9	29.9	17.69	15.49	37.49
EGRDC066(172)	0.07	0.15	23	0.44	4.3	9.9	17.84	15.49	37.6
OTD1218(1048-1048.8)	0.12	0.26	10	0.44	7.3	17.1	17.86	15.47	37.56
OTD404(399)	0.09	0.11	8	0.81	5.3	6.8	17.88	15.46	37.55
EGRCD073(120)	0.4	0.68	5	0.59	25.4	44.5	17.42	15.43	37.25
OTRCD388(504)	0.01	0.01	53	0.85	0.7	0.9	17.76	15.45	37.44
OTD258(82.5)	0.08	0.13	30	0.62	5.1	8.6	17.64	15.44	37.35
OTD343(1247)	0.38	0.67	5	0.58	24.4	43.7	17.45	15.44	37.28
OTD514(1289.15-1293.7)	0	0.01	93	0.48	0.2	0.5	17.76	15.44	37.43
OTD514(1405.85-1410.15)	0.02	0.1	32	0.22	1.3	6.2	17.8	15.47	37.51
OTD514(2161.35)	0.33	0.46	5	0.71	20.8	30.5	17.68	15.46	37.52
OTD786(150)	0.11	0.23	12	0.49	7.2	15.1	17.8	15.46	37.5
OTD976B(266-267)	0.2	0.76	5	0.26	12.5	49.8	17.67	15.47	37.46
OTD976B(552)	0.05	0.22	5	0.22	3	14.2	17.94	15.46	37.59
0TB976B(772)	0.1	0.25	6	0.39	6	15.9	17.92	15.46	37.51
OTD976B(1382.5-1383.5)	0.03	0.06	12	0.44	1.7	3.9	17.8	15.46	37.48
UUDO1A(590-593)	0.09	0.4	7	0.22	5.6	25.8	17.91	15.48	37.64
OTD1220(522)	0.1	0.23	5	0.42	6.1	15.1	17.7	15.44	37.34
OTD318(223)	0.03	0.08	8	0.45	2.1	4.8	17.78	15.44	37.44

表 5 Pb 同位素测试数据结果^[17] Table 5 Results of Pb isotope test

损可能是由于岩浆形成前地幔或年轻地壳存活时间过短。这些特点与岛弧环境下的Gurvansayhan岩 层具有较高的一致性,表明矿区形成背景属于岛弧 环境。

据表6可知,锆石具有高的Hf含量,且¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值较低(小于0.01),¹⁷⁶Lu衰变形成的¹⁷⁶Hf比例非常 低,对锆石形成后的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf影响甚微,加之,锆 石性质稳定并具有很高的 Hf 同位素封闭温度, 故而, 锆石的 Hf 同位素组成代表了锆石结晶时 体系的 Hf 同位素组成^[24-25]。2件花岗闪长岩的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值范围为 0.282855~0.283015, ε_{Hf}(*t*)值为 10.8~16.1; 3件英安岩的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值范围为 0.282833~0.282992, ε_{Hf}(*t*)值为9.9~15.6;7件石英二 长闪长岩的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值范围为0.282855~0.283004,





表6 锆石颗粒的Hf同位素测试数据结果¹²⁷ Table 6 Analytical results of Hf isotope of zircon grains

样品	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2se	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	$\epsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM}$	$T^{\rm C}_{\rm DM}$	样品	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2se	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	$\epsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM}$	$T^{\rm C}_{\rm DM}$
		EGD	0001(75)花岗	闪长岩						OT	D404(399)英	转发岩			
#	0.282939	0.000028	0.00112	0.034039	13.8	434	482	3-1	0.282869	0.000044	0.002829	0.057074	11.4	543	640
2-1	0.282969	0.000024	0.000962	0.026533	14.5	392	425	4-1	0.282875	0.000032	0.002757	0.062702	11.7	533	625
2-2a	0.282966	0.000028	0.00195	0.062927	10.8	406	536	5-1	0.282962	0.00005	0.002993	0.065397	14.9	403	421
3-1	0.282918	0.000034	0.001793	0.047955	12.8	467	537	6-1	0.282992	0.000054	0.003417	0.074112	15.6	359	363
3-2	0.282994	0.000038	0.001556	0.04543	15.5	357	365	7-1	0.282979	0.00004	0.001322	0.03862	15.1	378	395
4-1	0.282905	0.000022	0.001144	0.035847	12.8	483	555	8-1	0.28296	0.000036	0.002852	0.068474	15	406	423
4-2	0.282932	0.00003	0.001384	0.039721	13.3	446	506			EGRCE	00073石英二	长闪长岩			
5-1	0.283015	0.000028	0.001428	0.04525	16.1	327	319	1-1	0.282907	0.000026	0.000953	0.029113	12.7	480	556
5-1	0.282993	0.000044	0.001949	0.064825	15.6	358	363	2-1	0.282938	0.000028	0.001335	0.039506	13	438	508
6-1	0.282909	0.000024	0.000963	0.030032	12.3	478	566	3-1	0.282951	0.000028	0.001965	0.059567	14.2	419	456
7-1	0.282938	0.000042	0.00072	0.022334	13.5	435	493	4-1	0.282982	0.000032	0.001739	0.051859	15.6	373	377
8-1	0.282933	0.00003	0.001082	0.033313	13.4	444	502	5-1	0.282927	0.000032	0.001534	0.045024	13.5	453	508
	OT	D514(1631.	2 - 1631.7)黑	《云母花岗闪	日长岩			6-1	0.282936	0.000032	0.001654	0.051622	13.5	440	494
1-1	0.282855	0.000018	0.000907	0.02096	11.1	553	667	7-1	0.28297	0.00002	0.001177	0.03674	14.8	390	414
2-1a	0.282398	0.000019	0.000756	0.02226	-1.9	1190	1610	8-1	0.282948	0.000024	0.001339	0.041191	14.1	422	464
3-1	0.282913	0.000026	0.001366	0.03158	12.9	473	541	9-1	0.282929	0.000026	0.001161	0.035237	13.6	449	502
4-1	0.282881	0.00004	0.002061	0.03968	12.2	520	601			OTD258	8(82.5)石英二	二长闪长岩			
5-1	0.282906	0.000019	0.001929	0.04516	12.8	484	553	1-1	0.28289	0.000022	0.001232	0.03246	11.9	505	599
6-1	0.282887	0.000019	0.001588	0.04391	12.2	510	594	2-1	0.282878	0.00004	0.001799	0.04676	11.5	525	626
7-1	0.282908	0.00002	0.000987	0.02624	13.5	478	531	3-1	0.282873	0.000026	0.002004	0.05492	11.6	532	629
8-1	0.282889	0.00002	0.001372	0.038	12.4	506	586	4-1	0.282885	0.000026	0.00186	0.05147	11.8	516	608
		EGR	DC066(172)	英安岩				5-1	0.282886	0.000024	0.00102	0.02793	11.8	510	608
1-1	0.282913	0.000026	0.000988	0.027727	13.2	471	533	6-1	0.282855	0.000024	0.001573	0.04569	10.9	556	672
2-1	0.282901	0.000018	0.000487	0.013837	12.8	487	561			OTD343	(1247)石英二	二长闪长岩			
3-1	0.282887	0.000032	0.001593	0.040817	12.5	510	586	1-1	0.282906	0.000022	0.002556	0.07513	12.7	487	558
4-1	0.282833	0.000028	0.00181	0.050008	9.9	590	728	2-1	0.282936	0.00002	0.003954	0.12591	13.7	446	491
5-1	0.28288	0.000022	0.000973	0.027289	11.8	518	614	3-1	0.282898	0.000022	0.001821	0.05564	12.6	495	569
6-1	0.282857	0.000032	0.001411	0.031149	11	552	666	4-1	0.282904	0.000026	0.003684	0.10883	12.8	492	554
7-1	0.282883	0.00003	0.000967	0.026329	12.6	513	587	5-1	0.282957	0.000032	0.003354	0.10021	14.2	413	448
8-1	0.282929	0.00003	0.00106	0.027155	14.5	448	475	6-1	0.28296	0.000028	0.00327	0.10616	14.8	406	426
9-1	0.282936	0.000026	0.000638	0.017412	13.8	438	486	7-1	0.282958	0.000022	0.002889	0.088	15	408	423
10-1	0.282899	0.000019	0.000857	0.023267	12.1	490	581	8-1	0.282867	0.000032	0.002368	0.0659	11.4	543	643
11-1	0.282891	0.000022	0.001242	0.026441	12.6	503	577		OT	D514(1289	.15 - 1293.7)	石英二长闪	长岩		
12-1	0.282914	0.000032	0.001528	0.041416	13.3	471	529	1-1	0.282923	0.000028	0.000958	0.022392	13.1	458	524
		OTD121	8(1048 - 104	8.8)英安岩				1-2	0.282931	0.000018	0.001539	0.041356	13.5	448	502
1-1	0.28292	0.000032	0.001473	0.045817	12.8	464	537	2-1	0.282906	0.000022	0.002083	0.058041	12.7	485	555
2-1	0.282961	0.000032	0.003209	0.075023	14.8	405	427	3-1	0.282958	0.000044	0.00207	0.048401	14.7	409	434
3-1	0.282898	0.000028	0.001954	0.044489	12.4	496	575	4-1	0.282917	0.000024	0.000767	0.022203	13.2	465	528
4-1	0.282944	0.000028	0.001645	0.050147	13.9	429	473	5-1	0.282932	0.000024	0.000981	0.027112	13.9	444	489
5-1	0.282943	0.000034	0.0027	0.085581	13.8	432	477	6-1	0.28292	0.00005	0.001799	0.036867	13.1	464	527
6-1	0.282917	0.000034	0.00113	0.033764	13.3	466	524		OT	D514(1405.	85 - 1410.15)石英二长闪	长岩		
7-1	0.282843	0.000034	0.002238	0.062646	10.3	578	706	1-1	0.28298	0.00003	0.002793	0.089237	15.4	377	386
8-1	0.282935	0.000024	0.002148	0.065627	14	442	483	2-1	0.282973	0.00004	0.001094	0.033263	15.1	387	404
		OT	D404(399)英	医安岩				3-1	0.282928	0.000026	0.000682	0.021226	13.6	449	502
1-1	0.282896	0.000026	0.001963	0.044372	12.4	499	579	4-1	0.282918	0.000028	0.001572	0.048052	13.2	465	525
2-1	0.282908	0.000026	0.003299	0.081775	12.7	487	553	5-1	0.282959	0.000042	0.001273	0.040162	14.2	407	447

样品	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2se	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	$\epsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM}$	$\mathrm{T}T^{\mathrm{c}}_{\mathrm{dm}}$	样品	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2se	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	$\epsilon_{\rm Hf}(t)$	$T_{\rm DM}$	$T^{\rm C}_{\ \rm DM}$	
	OT	D514(1405.8	85 - 1410.15)石英二长闪	长岩				OTD786(150)石英二长闪长岩							
6-1	0.282998	0.00003	0.001636	0.051386	16.1	350	343	1-1	0.282925	0.000038	0.001935	0.061221	14	455	494	
7-1	0.282936	0.000036	0.001699	0.053117	13.8	439	486	2-1	0.28294	0.000032	0.001148	0.037736	14.2	433	471	
8-1	0.282961	0.000028	0.000624	0.019083	14.4	403	438	2-2	0.282872	0.000028	0.000924	0.029004	11.6	530	631	
		OTD514(2	2161.35)石英	二长闪长岩				3-1	0.282973	0.000032	0.002367	0.072977	15.2	387	400	
1-1C	0.283004	0.00005	0.001414	0.03607	16	342	339	4-1	0.282943	0.000024	0.001186	0.037768	13.9	429	474	
1-1R	0.282921	0.000028	0.001155	0.035493	13	460	527	5-1	0.282876	0.000028	0.000967	0.029741	12.1	523	611	
2-1	0.282911	0.000026	0.001005	0.030507	12.7	474	550	6-1	0.282903	0.000026	0.000545	0.016929	13.2	484	546	
3-1	0.282961	0.000028	0.001164	0.037105	14.4	403	436	7-1	0.282931	0.000028	0.001228	0.03909	13.6	447	499	
4-1	0.282936	0.000022	0.000937	0.028299	13.8	439	487	9-1	0.282923	0.000026	0.001093	0.032077	13.4	457	513	
5-1	0.282945	0.000034	0.001566	0.034624	14.1	426	467	9-2	0.28293	0.000032	0.00148	0.047809	14.1	447	486	
6.1	0.282025	0.000022	0.001611	0.053454	13	457	523	10.1	0 282042	0.000046	0.000838	0.027386	14.2	120	467	

续表1

ε_{Hf}(t)值为10.9~16.1。图6反映了单锆石颗粒中U-Pb年龄和Hf同位素的关系,所有数据点都接近中古生代的亏损地幔,这一特征与具有高¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值和ε_{Hf}(t)值的亏损地幔源岩浆锆石¹⁵⁵相似,表明岩浆中基本不含有早期大陆地壳物质,同时说明,这些中酸性岩浆岩来自被改造的早古生代地壳或是由源自亏损地幔岩浆形成的年轻地壳。

矿区岩浆岩的 Pb 同位素比值变化范围较小,2件 花岗闪长岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为17.4和17.69,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为15.46和15.49,²⁰⁸Pb/²⁰⁴P值为37.41和37.49;3件 英安岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为17.84~17.88,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb值为 15.46~15.49,²⁰⁸Pb/²⁰⁴P值为37.55~37.60;8件石英二 长闪长岩的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为17.42~17.80,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为15.43~15.47,²⁰⁸Pb/²⁰⁴P值为37.25~37.51;7件玄 武岩²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值为17.67~17.94,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb值为 15.44~15.48,²⁰⁸Pb/²⁰⁴P值为37.44~37.64,低U/Pb值 表示体系未受到较多放射性成因Pb的混染。在



Fig. 6 Zircon grain age of samples from Oyu Tolgoi

Pb构造模式图中,矿区岩浆岩Pb同位素组成基本 分布在地幔附近,玄武岩和安山岩的投点数据最 接近泥盆系的洋中脊玄武岩成分,表明其物质来 源可能为幔源。

5 地球物理方法应用

欧玉陶勒盖矿床最初采用激发极化法和高精度 磁法作为主要物探勘查手段寻找隐伏原生硫化矿体, 这是因为欧玉陶勒盖铜金矿体富含硫化物且围岩蚀 变强,具有高极化率电性,矿体可产生明显的高视充 电率异常,所以欧玉矿区物探勘查方法以此方法效果 最佳。由于不同矿化区矿体围岩岩性和次生富集带 发育程度不同,其磁性特征各异,因此可引起不同性 质的磁异常,如正高磁异常或弱-负磁异常。物探结 果表明,矿区主要的激电异常均为矿致异常,这对于 指导工程验证、寻找深部隐伏矿体至关重要而有效。 此外,白大明等1%发现矿区内金属次生富集带不产生 明显的激电视充电率异常,而产生视电阻率低异常, 原生硫化矿体引起视充电率高异常,是该矿区激电异 常地质解释的重要经验。不同赋矿围岩的磁性不同, 造成矿体磁异常不同,产在蚀变石英二长闪长岩的矿 体引起低磁或负磁异常,而产在辉石玄武岩的矿体产 生明显的高磁异常,这对区分和寻找不同类型矿体具 有指导意义。

6 遥感方法应用

在2013年,Son等¹⁶利用ASTER技术对欧玉陶 勒盖矿区的岩浆岩分布和蚀变带分布进行研究。





通过该技术获得的数据,Son等^[26]进行了串扰修正 和额外的辐射校正,并结合SWIR-BRLO模型和匹 配滤波,以期获得欧玉陶勒盖区更精确的岩石矿物 学信息,并进一步寻找潜在成矿区域。

Son 等^[26]认为, 欧玉中部主要蚀变类型为绢英 岩化, 西南欧玉矿床也位于一个绢英岩化带上, 在 欧玉陶勒盖北部深大岩体的位置,也发现绢英岩 化,主要蚀变矿物为明矾石,在欧玉中部和西南 部,主要为明矾石、高岭土、绢云母,雨果杜梅特矿 床和欧玉中部常出现绢云母+绿泥石的蚀变矿物 组合(图8、图9)。在岩性方面,通过TIR-BRLO 模型,可以检测出具有区域辐射特征的石英和碱

2017年



图 8 ASTER SWIR-BRIO 模型中欧玉陶勒盖矿区蚀变模式^[26] Fig. 8 Alteration patterns of Oyu Tolgoi region extracted by ASTER SWIR-BRLO models DG-泥盆系花岗岩;VS-火山沉积岩;HD-雨果杜梅特;CO-欧玉中部; SWO-欧玉西南部;OT North Pluton-欧玉北部深成岩体;SO-欧玉南部



图 9 放大后的欧玉陶勒盖矿区图(a)和欧玉陶勒盖矿区蚀变矿物简图(b)²⁶(地名代号注释同图 8) Fig. 9 Enlarged image of the Oyu Tolgoi ore district (a) and simplified bed-rock alteration (b)

性岩,石英常出现在泥化带中,因此Son等²⁶认为,利用ALBRLO模型可以从一个特定的区域内识别 出碱性岩(图10)。 尽管缺乏部分提交数据、TIR频带噪声和空间 分辨率,但经由ASTER手段得出的结果与矿区的 实地考察情况基本吻合,表明在矿床勘探的初始阶



图 10 ASTER SWIR-BRIO 模型中欧玉陶勒盖矿区岩浆岩分布^[26] Fig. 10 Igneous rocks mapping result of the Oyu Tolgoi area extracted by ASTER TIR-BRLO models AG--花岗岩;B-黑云母花岗岩;I-岛弧;S-沉积物;地名代号同图8

段及初期制图时,ASTER 手段可以提供较可靠的蚀变情况、岩浆岩分布等信息。尤其当环境恶劣,实地调查艰难时,ASTER 可以作为一个有效的初期调查手段。

7 成矿模型及找矿方向

7.1 成矿模型

本文 Sr-Nd 数据的正 *ε*_{Nd}(*t*)值和低 ^{s7}Rb/⁸⁶Sr 值与前人的研究结果均反映,南蒙古欧玉陶勒盖地 区形成于洋底岛弧环境,该岛弧随后被石炭纪的次 火山喷发物和块状碎屑覆盖。欧玉陶勒盖地区的 泥盆纪和石炭纪地层记录了多期岛弧、大型斑岩铜 (金)系统、喷发和多相变形的演化框架,成矿围岩 为泥盆系阿拉嘎巴彦群的玄武质火山岩和次火山 岩,后期被晚泥盆世的石英二长闪长岩脉所侵 入。斑岩型铜(金)矿床在空间上和时间上与中性 到高钾钙碱性石英二长闪长岩(372Ma)和花岗闪长 岩(366Ma)的侵入体相关,表明欧玉陶勒盖铜(金)矿 床产出于泥盆纪一石炭纪火山岛弧环境^[6]。其成矿 模型如图11所示。

7.2 找矿方向

2013年以来,TRQ公司对欧玉陶勒盖矿区一 直进行有针对性的找矿和勘探,进行了钻井布置和 数据采集、整理、筛选等一系列工作,并在2014年 度,继续建立数据库,其中包括地磁学、地球物理模 型、年代学及地质填图工作。在该项工作的基础 上,得出5个潜在成矿区域(图12)。

(1)北Heruga区域:Heruga矿床位于欧玉陶勒 盖矿区南端,北Heruga区域属于Heruga矿床延伸的 区域,位于地表下方,顶部距离地表约1100m,向北 延伸,发现矿化现象,成矿潜力较大。

(2)Javkhlant区域:位于欧玉陶勒盖矿区南端, 是整个欧玉陶勒盖矿化走廊的最南端,在2010年进 行钻孔验证,在孔深30~1422m处发现品位为0.92% 的Cu,成矿潜力较大。

(3)西 Hugo 浅部区域:位于南欧玉矿床的北部,有一小块斑岩体侵入中央断层底盘,在这片区域发现低品位的矿化,成矿潜力较大。

(4) 西 Hugo 深部区域:位于西 Hugo 的深部区域, TRQ公司在2013年对此处进行了钻孔验证, 在 孔 深 500m 处发现品位为 0.54%的 Cu 及品位为 0.32g/t的 Au, 并认为此处是北 Hugo 区域和南 Hugo

区域矿化的延伸,成矿潜力较大响。

(5)Ulaan Khud北部矿点:位于欧玉陶勒盖矿 区北端,该矿点的发现使得欧玉陶勒盖矿化走廊向 北延伸了3km。此处的矿化带在地下60~80m的白 垩系粘土和碎石层开始出现,表明Ullaan Khud北部 矿点是一个接近于地表的、具有露天开采潜力的矿 床,成矿潜力较大⁶⁰。

另外,根据Son等²⁶¹利用ASTER技术划分的 蚀变分带,与矿化关系密切的蚀变主要为绢英岩 化。这类蚀变在欧玉陶勒盖矿区的北西方向和南 西方向均有大量出现(图9),且这些区域的岩性主 要为泥盆纪花岗岩。根据构造特点,进行有目的 布钻,或许是该矿区矿化向两侧的延伸。

上述区域预示着欧玉陶勒盖矿区的成矿潜力 依然巨大,通过进一步的勘探和研究有可能继续将 欧玉陶勒盖矿化走廊从深度及广度上进行延伸,尤 其是向中国境内方向上的延伸,对于开展国内资源 勘查有重要意义。

7.3 成矿带延伸情况

蒙古国南戈壁地区及与其相邻的哈萨克斯坦 和中国均属于中亚成矿域,发现了一系列斑岩型 铜-金/钼矿床(表7),矿床位置见图13^[9,27]。其中包 括哈萨克斯坦的努尔卡斯甘(410Ma)、科翁腊德 (330Ma)、阿克托盖(约320 Ma)矿床,蒙古国南部 的巨型欧玉陶勒盖铜-金矿床(372~370Ma)、早石 炭世查干苏布尔加铜-钼矿床(325~365Ma)及中国 新疆东部的土屋-延东铜-金矿床(330Ma)。查干 苏布尔位于欧玉陶勒盖矿床以北,而土屋-延东矿 床(330Ma)则位于这个蒙古矿集区与上面描述的哈 萨克斯坦的矿床之间。

欧玉陶勒盖所在成矿带主要沉积地层为泥盆 系泥岩、砂砾岩、玄武质熔岩、安山岩和凝灰岩,局部 可见奥陶纪—石炭纪中酸性火山岩和沉积岩^[28-29]。 泥盆纪玄武岩的主量和微量元素特征显示,其火 山活动为岛弧环境,查干苏布尔加斑岩型铜矿绢 云母³⁹Ar-⁴⁰Ar年龄为364.9±3.5Ma,辉钼矿Re-Os年 龄为370.4±0.8Ma,花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄 为369±3Ma。从欧玉西南部、欧玉中部和雨果杜 梅特南部采集的辉钼矿Re-Os年龄为373~370± 1.2Ma,属晚古生代斑岩型铜金钼成矿系统^[28-29]。 此岛弧构造复杂,以叠瓦状逆冲岩片、破碎地块、 混杂岩、强应变带为主,与西边大南湖-哈尔力克



图 11 成矿模型 Fig. 11 Mineralization model



图 12 成矿远景区^[1] Fig. 12 Metallogenic prospective area

构造带构造背景一致。

此外,中国二连一东乌旗地区与蒙古国南戈壁 地区相同,主要为呈北东东一北东向展布的古生界 海相、浅海相碎屑岩、中基性火山岩、碳酸盐岩建造 及泥盆纪、石炭纪一二叠纪花岗岩、花岗闪长岩体。二连一东乌旗地区一直到黑龙江多宝山地区与蒙古国南戈壁地区具有相近的区域成矿地质背景,且石炭纪一二叠纪花岗岩、花岗闪长岩发育^[28]。

表7 欧玉陶勒盖矿床及其附近重要的斑岩型铜-金/钼矿床的矿石量、品位和年龄数据 Table 7 Ore grade and age data for the Oyu Tolgoi deposit and its neighboring important porphyry Cu-Au/Mo deposits

矿 床	位置	矿石量		品 位		所會	全属	年 龄/Ma
多宝山	中国(黑龙江)	951Mt	0.46% Cu	0.02% Mo	0.13g/t Au	4.4 Mt Cu	120t Au	476
铜山	中国(黑龙江)	180Mt	0.47% Cu	0.023% Mo		0.9 Mt Cu	0.04Mt Mo	约476
欧玉陶勒盖	蒙古国	4.2G	0.56% Cu	0.008% Mo	0.27g/t Au	2337Mt u	1019.99t Au	370
查干苏布尔加	蒙古国	240Mt	0.53% Cu	0.02% Mo	0.08g/t Au	1.3Mt Cu	19t Au	325~365
土屋-延东矿床群	中国(新疆)	652Mt	0.67% Cu		0.08g/t Au	4.2Mt	22t	330
科翁腊德	哈萨克斯坦	>800Mt	0.62% Cu	0.0035% Mo	0.1~0.76g/t Au	>5Mt Cu	>600t Au	330
阿克托盖矿床群	哈萨克斯坦	1.72Gt	0.34%Cu		0.04g/t Au	5.8Mt	68t Au	约320
努尔卡兹甘	哈萨克斯坦	200Mt	0.89% Cu	0.1% Mo	0.38g/t Au	1.8Mt Cu	76t Au	410



图 13 中部欧亚阿尔泰和外贝加尔-蒙古造山拼贴体示意性构造图^[30-31] (图中显示去除中生代—新生代盆地和表面覆盖层之后选定的斑岩型铜-金/钼矿床) Fig. 13 Simplified tectonic map of the Altay and Transbaikal-Mongolian orogenic collages in central Eurasia, showing the location of selected porphyry Cu-Au/Mo deposits, after removal of Mesozoic-Cenozoic basins and superficial cover

如图 13 示,欧玉陶勒盖矿床附近还发现众多的斑岩型矿床,这些矿床时代相近(表6)、构造背 景相似,在 Nb/Yb-Th/Yb 图解(图 14-A)中,表6 中矿床的岩体成分点投影在 E-MORB(富集型大 洋中脊玄武岩)和OIB(洋岛玄武岩)之间,这些样品

点也投影在火山弧花岗岩类范围内(图14-B)^[27],多 宝山矿床、铜山矿床、欧玉陶勒盖矿床、查干苏布 尔加矿床、土屋-延东矿床群、阿克托盖矿床群和 努尔卡兹甘矿床均位于岛弧环境,科翁腊德矿床 形成于岛弧和陆缘弧过渡环境,因此笔者认为,这



些超大型、大型矿床是形成于同一岛弧,即中一晚 古生代哈萨克-蒙古岩浆弧上的斑岩型矿床,其成 矿过程与岛弧发育过程密切相关。该岛弧经中国 的新疆土屋铜矿向西延伸至哈萨克斯坦境内的科 翁腊德(330Ma)和阿克脱盖斑岩铜矿(320Ma),向 东可以延伸至中国境内的多宝山斑岩型矿床 (475~485Ma)。该成矿带所处岛弧长约4300km, 存活时间根据位于其上的各个斑岩型矿床的形成 时间计算,约为160Ma。

8 结 论

(1)划分出北 Heruga 区域、Javkhlant 区域、西 Hugo浅部区域、西Hugo深部区域、Ulaan Khud北 部矿点5个找矿远景区。另外,发现与矿化关系密 切的绢英岩化型蚀变在欧玉陶勒盖矿区的北西方 向及南西方向均大量出现,且这些区域的岩性主 要为泥盆纪花岗岩,或许是该矿区矿化向两侧的 延伸。

(2)欧玉陶勒盖矿床所在的成矿带沿哈萨克-蒙古岩浆弧向两端延伸,在西边,经中国的新疆土 屋铜矿向西延伸至哈萨克斯坦境内的科翁腊德和 阿克脱盖斑岩铜矿,在东边,向东延伸至中国境内 的多宝山、铜山地区,应尤其注意欧玉陶勒盖矿化 带在中国境内方向上的延伸,这对中国矿产资源的 寻找与研究具有重要意义。

致谢:数据收集阶段得到国土资源部信息中心 张秋明研究员、中国科学院地质与地球物理研究所 申萍研究员、中国地质大学(北京)汪傲、李运、常玉 虎硕士研究生的大力帮助,编写论文的过程中得到 中国地质科学院矿产资源研究所聂凤军研究员的 悉心指导,在此深表感谢。

参考文献

- [1]Turquoise Hill Resources Ltd. Oyu Tolgoi 2014 Tecnhnical Report [EB/OL](2014)[2016-03-10]http://www.turquoisehill.com.
- [2]刘益康,徐叶兵.蒙古 Oyu Tolgoi 斑岩铜金矿的勘查[J].地质与勘察,2003, 39(1):1-4.
- [3] 聂凤军,江思宏,张义,等.中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征 及成因[J].矿床地质,2003,23(2):176-189.
- [4]肖伟,王义天,江思宏,等.南蒙古及邻区地质矿产简图及地形地貌 特点[J].地球学报, 2010,31(3):473-484.
- [5]张义,聂凤军,江思宏,等.蒙边境欧玉陶勒盖大型铜-金矿床的发现 及对找矿勘查工作的启示[J].地质通报,2003,22(9):708-712.
- [6]方俊钦,聂凤军,徐备,等.蒙古国欧玉陶勒盖斑岩型铜(金)矿田的 找矿新进展[J].地质科技情报,2013,32(5):188-194.

[7]Prello J, Cox D, Garamjrv D, et al. Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-

Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulfidantion Cu mineralization with a cretaceous chalcocite Blanket[J].Economic Geology, 2001,96:1407–1428.

- [8]Wainwright A J. Volcanostratigraphic framework and magmatic evolution of the Oyu Tolgoi porphyry Cu– Au district, South Mongolia[D]. Ph. D. thesis, Vancouver, University of British Columbia, 2008:1–263.
- [9]Seltmann R, Porter T M, Pirajno F.Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79:810–841.
- [10]Zonenshain L P, Kuzmin M I, Natapov L M. Mongol– Okhotsk fold belt[C]//Page B M. Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis, Geodynamic Series 21. American Geophysical Union, Washington, 1990: 97–108.
- [11]Yakubchuk A. Geodynamic evolution of accreted terranes of Mongolia against the background of the Altaids and Transbaikal-Mongolian collages[M]. Geodynamics and Metallogeny of Mongolia: Guidebook Series 11, IAGOD, NHM, London, 2005:13-24.
- [12]Kirwin D J, Forster C N, Kavalieris I, et al.The Oyu Tolgoi copper-gold porphyry deposits, South Gobi, Mongolia[M].Geodynamics and Metallogeny of Mongolia:Guidebook Series 11, IAGOD, NHM, London, 2005:155-168.
- [13]Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002,21: 87–110.
- [14]Kirwin D J, Wilson C C, Turmagnai D, et al. Exploration history, geology, and mineralization of the Kharmagtai gold-copper porphyry district,South Gobi Region, Mongolia[M]. Geodynamics and Metallogeny of Mongolia:Guidebook Series 11, IAGOD, NHM, London, 2005:175–191.
- [15]Kavalieris I. Notes on 21 samples for zircon U–Pb geochronology from the Oyu Tolgoi Project,South Gobi Desert, Mongolia[J]. Report Ivanhoe Mines Mongolia,2005:1–48.
- [16]白大明,聂凤军,江思宏.蒙古国欧玉陶勒盖铜(金)矿床物探找矿 技术分析[]].地球学报,2010,31(3):443-438.
- [17]Dolgopolova A, Seltmann R, Armstrong R, et al.Sr-Nd-Pb-Hf isotope systematics of the Hugo Dummett Cu-Au porphyry deposit (Oyu Tolgoi, Mongolia)[J]. Lithos,2013,164/167 : 47-64.
- [18]张新元,聂秀兰.蒙古国南部欧玉陶勒盖铜(金)矿田找矿勘查与成矿理论研究新进展[]].地球学报,2010,31(3):373-382.

- [19]Khashgerel B E,Rye R O,Hedenquist J W,et al.Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu–Au system, South Gobi, Mongolia[J]. Economic Geology,2006,101(3): 503–522.
- [20]Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010,105:3-41.
- [21]Hedenquist J W, Arribas J A, Reynolds T J. Evolution of an intrusioncentered hydrothermal system: far Southeast–Lepanto porphyry and epithermal Cu–Au deposits, Philippines[J]. Economic Geology, 1998,93: 373–404.
- [22]Khashgerel B E, Rye R O, Kavalieris I, et al. The sericitic to advanced argillic transition: stable isotope and mineralogical characteristics from the Hugo Dummett porphyry Cu–Au deposit, Oyu Tolgoi district,Mongolia[J]. Economic Geology ,2009,104:1087–1110.
- [23]Müller A,Richard H,Armstrong R,et al.Trace elements and cathodoluminescence of quartzin stockwork veins of Mongolian porphyry-style deposits[J]. Miner Deposita, 2010,45:707–727
- [24]吴福元,李献华,郑永飞,等.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007,23(2):185-220.
- [25]Peter D K,Roland M. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon.Review s in Mineralogy and Geochemistry[J].2003,53(1):327– 341.
- [26]Son Y S, Kang M K, Yoon W J.Lithological and mineralogical survey of the Oyu Tolgoi region, Southeastern Gobi, Mongolia using ASTER reflectance and emissivity dataLu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 205–216.
- [27] 申萍,潘鸿迪.中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征[J].岩石学报, 2015,31(2):315-332.
- [28]王守光,黄占起,苏新旭,等.一条值得重视的跨国境成矿带——南 戈壁-东乌旗铜多金属成矿带[J].地学前缘,2004,11(1): 249-255.
- [29]李俊建,张锋,任军平,等.中蒙边界地区构造单元划分[J].地质通报, 2015,34(4):636-662.
- [30]Seltmann R, Shatov V, Yakubchuk A. Mineral deposits database and thematic maps of Central Asia, Scale 1.5 million: ArcView 3.2 and MapInfo 6.0(7.0) GIS Packages, Explanatory Notes, CER-CAMS[M]. Natural History Museum,London, UK,2004:1–117.
- ①Ochir Gerel,Geoscience Center Mongolian University of Science & Technology. Mineral Deposits in Mongolia (PPT report) in China Academy Of Geological Sciences, 2015.