

文章编号:1672-6561(2013)01-0024-10

内蒙古道伦达坝铜多金属矿床微量元素 地球化学特征

要梅娟^{1,2,3}, 刘家军^{2,3}, 翟德高^{2,3}, 王建平^{2,3}, 邢永亮^{2,3}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国地质大学(北京) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床位于大兴安岭南段西坡, 矿体主要产于粉砂质板岩与黑云母花岗岩的接触带。对该矿床的地层和岩浆岩进行了稀土元素和微量元素地球化学研究。结果表明: 稀土元素质量分数为 $(18.09 \sim 532.08) \times 10^{-6}$, 平均为 235.60×10^{-6} , 磁黄铁矿的稀土元素质量分数最低, 硅化砂岩最高; 轻稀土元素与重稀土元素质量分数之比为 7.02~12.53, 平均为 9.95; Eu 异常为 0.22~0.72, 平均为 0.42, 呈明显的 Eu 负异常; Ce 异常为 0.97~1.07, 平均为 1.02, 无明显 Ce 异常; La 与 Yb 质量分数球粒陨石标准化后的比值 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 6.57~18.72, 平均为 10.61, 曲线呈明显右倾型; La 与 Sm 以及 Gd 与 Yb 质量分数球粒陨石标准化后的比值 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为 2.87~4.12 和 1.48~2.46, 轻稀土元素分异程度强于重稀土元素; 重要成矿元素 Sn、Cu、Ag 等浓集系数很高。对矿石矿物组合进行仔细观察和矿物化学研究认为: 二叠系建造是该矿床主要的矿源层, 其最终富集成矿与黑云母花岗岩等中酸性侵入体有成因联系; 硅化砂岩有利于圈闭成矿物质, 二者接触带是有利的成矿和找矿部位。

关键词: 铜矿床; 微量元素; 地球化学; 成矿机制; 道伦达坝; 内蒙古

中图分类号: P618.41 **文献标志码:** A

Geochemistry Characteristic of Trace Element in Daolundaba Copper-polymetallic Deposit of Inner Mongolia

YAO Mei-juan^{1,2,3}, LIU Jia-jun^{2,3}, ZHAI De-gao^{2,3}, WANG Jian-ping^{2,3}, XING Yong-liang^{2,3}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Daolundaba copper-polymetallic deposit in Inner Mongolia is located in the west side of southern Da Hinggan Mountains. Ore bodies are mainly formed in the contact zone of silty slate and biotite granite. Geochemistry of rare earth element (REE) and trace element was studied for the formation and magmatite of deposit. The results showed that mass fraction of REE was $(18.09 \sim 532.08) \times 10^{-6}$ with an average of 235.60×10^{-6} ; the mass fraction of REE in pyrrhotite was lowest, and that of siliceous sandstone was highest; ratio of mass fractions of light REE (LREE) and heavy REE (HREE) was 7.02~12.53 with an average of 9.95; Eu anomaly was 0.22~0.72 with an average of 0.42, and was obviously negative; Ce anomaly was 0.97~1.07

收稿日期: 2012-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030423, 41173062, 40973035);

国家重点基础研究发展计划("九七三"计划)项目(2009CB421003, 2006CB403500);

高等学校学科创新引智计划项目(B07011)

作者简介: 要梅娟(1981-), 女, 山西霍州人, 中国科学院国家天文台助理研究员, 理学博士, E-mail: yaomeijuan1016@126.com。

with an average of 1.02, and was not obvious; ratio of mass fractions of La and Yb with chondrite standardization ($w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$) was 6.57-18.72 with an average of 10.61, and the curve was significantly right-leaned; ratio of mass fractions of La and Sm with chondrite standardization ($w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$) and that of Gd and Yb ($w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$) were 2.87-4.12 and 1.48-2.46, respectively, and the differentiation of LREE was stronger than that of HREE; concentration coefficients of important metallogenic elements including Sn, Cu and Ag were very high. The observation of ore mineral assemblage and the study on mineral chemistry suggested that Permian construction was the main source of ore in deposit, the ore concentration was genetically related to intermediate-acidic intrusion including biotite granite; siliceous sandstone was favorable to trap metallogenic material, and the contact zone was important for mineralization and prospecting.

Key words: copper deposit; trace element; geochemistry; metallogenic mechanism; Daolundaba; Inner Mongolia

0 引言

大兴安岭地区作为中国北方一个十分重要的金属省,已发现多处锡、钨、银、铜、铅、锌等多金属矿床以及稀土、稀有金属矿床和矿点^[1-13]。铜多金属矿床作为一个重要的成矿系列,近年来越来越引起重视^[8-16]。处于该成矿带南段的道伦达坝铜多金属矿床位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌旗境内。2004~2005年矿区内圈定的矿体储量估算结果为:铜金属储量为 8.71×10^4 t;钨金属储量为 2.81×10^4 t;锡金属储量为 2.85×10^4 t;银金属储量为 296.63 t。金属矿石可综合利用的矿石储量表明该矿床达到大型规模^[15]。笔者应用电子探针技术对道伦达坝多金属矿床中的矿石矿物进行了定量分析,并且通过分析岩石和矿物的稀土元素、微量元素地球化学特征,为探讨道伦达坝的成矿机制提供参考。

1 研究区概况

内蒙古道伦达坝大地构造位置位于西伯利亚板块和华北板块以及松辽板块结合部(图 1^[17])。在这三大古陆板块中间,有一走向为北东—北北东向的华力西褶皱带。研究区内岩浆岩活动频繁,分布广泛,自华力西期到燕山晚期均有侵入活动。该褶皱带中最大的地质体被称为锡林浩特微板块。道伦达坝铜多金属矿区正处于该板块的北部边缘地带,出露地层为下元古界宝音图群黑云斜长片麻岩及二叠系林西组砂板岩,岩浆活动十分强烈,均为印支期侵入岩,主要分布于矿区东偏南部,总面积约 1 km^2 ,主要岩石类型为中细粒黑云母花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩、细粒黑云母花岗岩及细粒花岗闪长岩。其中,以黑云母花岗岩为主,二长花岗岩和花岗闪长岩次之。

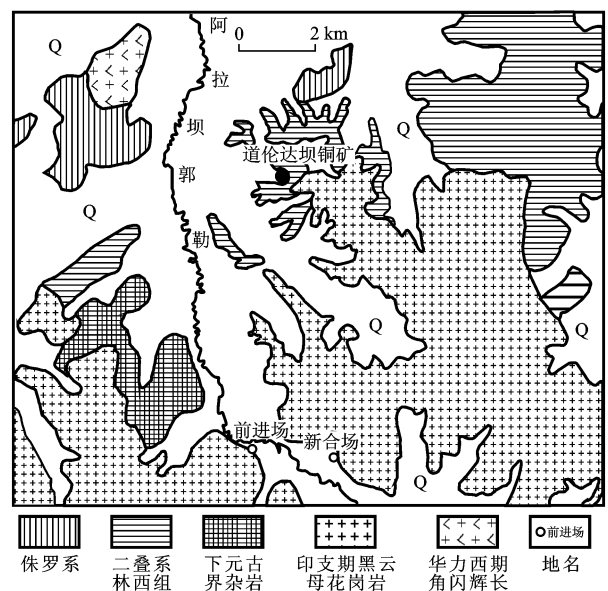


图 1 内蒙古道伦达坝地质概况

Fig. 1 Geological Map of Daolundaba in Inner Mongolia

该矿区出露地层主要为二叠系林西组砂板岩,第四系全新统草原砂土、坡洪积物,岩浆活动强烈,主要形成黑云母花岗岩及酸性脉岩,其中与成矿有关的是印支期黑云母花岗岩。北东向构造为区内主要构造,次为北西、东西向构造,北东向构造控制了铜、钨、锡矿产的分布。矿区内已发现的铜矿体具有明显的分布规律:沿断裂破碎带充填成矿;矿化富集部位集中于背斜核部与花岗岩体接触带附近。铜矿化沿断裂破碎带的断层面、花岗岩体与地层的接触面以及地层的层间裂隙分布;其分布大体呈右行雁行排列,与花岗岩体中的花岗细晶岩脉分布有同样的展布特征。

该区内共发现 13 条矿化带,矿化带自东向西编号依次为 7~19 号。其控制的矿化区域长 800 m,宽 400 m,面积 0.32 km^2 。矿化带总体呈北东向 45°

延展,无论是在平面上还是在剖面上,多呈近平行舒缓波状展布,且具有等距离特征。大多数矿体与围岩界线不清楚,其中规模较大者有8、10、16号矿体。

该矿体顶、底板围岩为粉砂质板岩及黑云母花岗岩。岩性均具不同程度的蚀变,蚀变宽度一般为几米,近矿围岩一般都具有不同程度的矿化,矿体与围岩界线呈渐变过渡关系。近矿围岩蚀变为硅化、黄铁绢云岩化、碳酸岩化、绿泥石化、高岭土化、钾长石化,其中硅化、云英岩化、萤石化与矿体关系最为密切。硅化是该矿区最普遍、最广泛的热液蚀变现象,从气成-高温热液、高温热液至中温热液阶段都存在。矿体及接触带附近的岩石几乎都被硅化,表现形式多样,由隐晶质到细粒石英,乃至石英脉均可见到。

矿石结构主要以交代熔蚀结构、乳滴状结构、镶边结构、填隙结构和半自形粒状结构为主。矿石成分复杂,金属矿物高、中、低温矿物及表生矿物皆可见到,分布不均匀且含量不高。矿石构造较为复杂,主要以脉状、网脉状、交错脉状和团斑状为主。金属矿物有毒砂、锡石、黑钨矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿、砷黝铜矿、黝锡矿、闪锌矿、方铅矿等。其中,主要矿物为磁铁矿,局部富集,含量(质量分数,后文同)高达90%。矿石中非金属矿物有石英、萤石、钾

长石、绢云母、绿泥石、碳酸盐等。

2 试验方法

对内蒙古道伦达坝铜多金属矿区典型的矿石矿物(包括硫化物黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿和闪锌矿等)进行电子探针测试。样品的电子探针分析(EPMA)在中国地质大学(北京)实验中心电子探针室完成。仪器型号:日本 EPMA-1600;工作条件:加速电压 15 kV,探针电流 20×10^{-8} A,电子束斑直径 $0.5 \mu\text{m}$ 。

微量元素测试在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。其中,Ag、Bi、Cd、Co、Cs、Cu、Ga、Hf、In、Li、Mo、Nb、Pb、Sb、Sc、Ta、Th、U、W、Zn、Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、La、Lu、Nd、Pr、Sm、Tb、Tm、Y、Yb 用等离子体质谱法(ICP-MS)测试;Cr、Ni、Ba、P、Rb、Sr、Ti、V 用等离子光谱法(ICP-OES)测试;Zr 用压片法 X 射线荧光光谱法(XRF)测试;As、Ge、Hg、Se 用原子荧光光谱法(AFS)测试;Sn 用发射光谱法(ES)测试。

3 试验结果

通过镜下观察(图2)和电子探针测试(表1~3),得到以下结果。

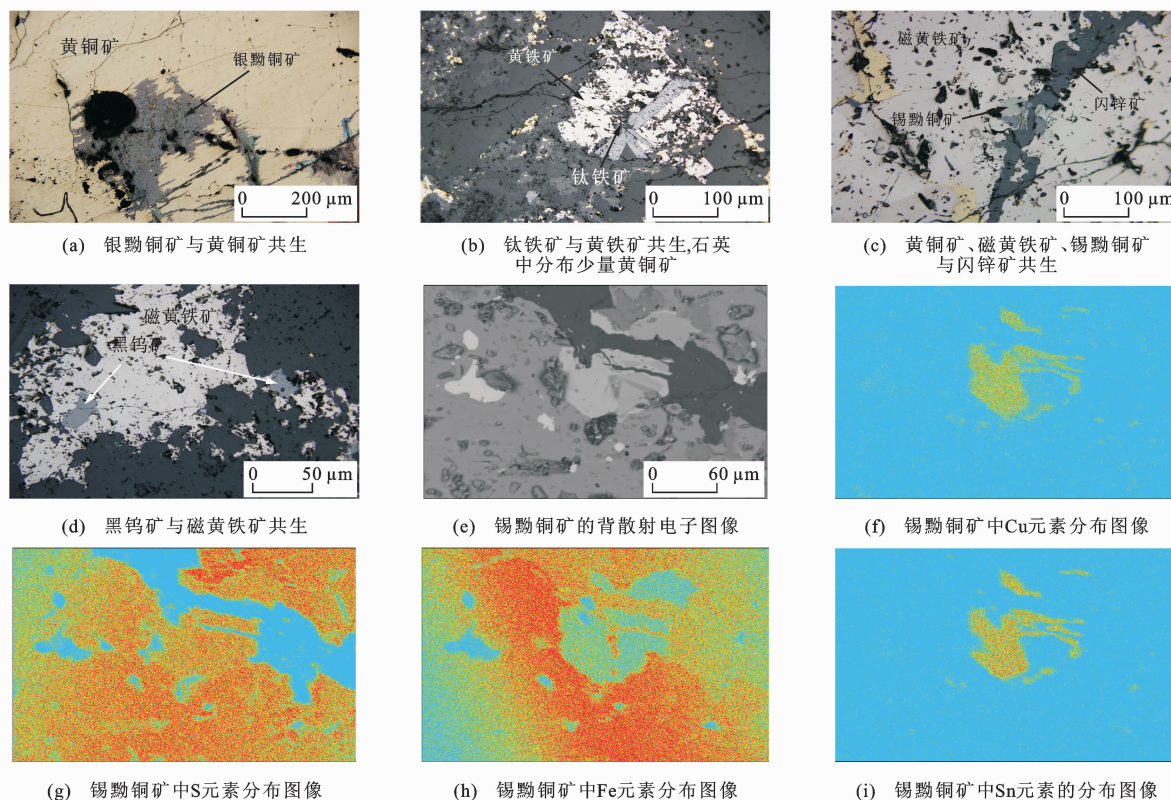


图2 道伦达坝矿石矿物组合图及锡黝铜矿元素的面扫描图像

Fig. 2 Photos of Mineral Assemblages and Surface Scanning of Elements of Sn Panabase in Daolundaba

表 1 黑钨矿的电子探针成分

Tab. 1 Electron Microprobe Components of Wolframite

%

样品号	w(MnO)	w(FeO)	w(MgO)	w(CaO)	w(WO ₃)	总计	数据来源
07DL-17	1.72	22.93			75.66	100.31	本文
07DL-17	4.79	18.35			76.93	100.07	
07DL-17	1.60	21.85			75.74	99.19	
901-2	0.62	23.40	0.16	0.01	76.81		文献[18]
901-2	0.54	23.39	0.21		75.86		
901-2	0.54	23.78	0.15		76.42		
830-1	0.41	23.68	0.12	0.02	76.67		
801-11	1.97	21.76	0.07	0.03	77.20		
801-11	1.36	22.51	0.11	0.02	74.42		
828-3	1.35	23.12	0.14	0.03	76.33		
801-7	1.14	23.29	0.01	0.01	76.56		
803-8	1.42	23.05	0.12	0.04	75.08		

注:w(·)为元素或化合物含量。

表 2 硫化物电子探针分析结果

Tab. 2 Electron Microprobe Analysis Results of Sulfides

%

样品号	硫化物	w(S)	w(Fe)	w(Co)	w(Cu)	w(Zn)	w(Ag)	w(Au)	w(Sn)	w(Sb)	w(Te)	w(As)	w(Se)	w(Ni)	w(Pb)	总计	数据来源
07DL-12	锡黝铜矿	28.47	14.32	0.23	26.92	0.60	0.42		27.10	1.82						99.88	本文
07DL-10	锡黝铜矿	28.88	15.58		26.62	2.60			26.19							99.87	
07DL-19	锡黝铜矿	29.40	14.73	0.66	26.85				27.85		0.26	0.22				99.97	
07DL-19	锡黝铜矿	29.58	14.60	0.30	27.94				26.91		0.27	0.37	0.23			100.20	
07DL-19	锡黝铜矿	29.39	13.50	0.23	28.54				27.67		0.40	0.29	0.17			100.19	
07DL-19	黄铜矿	34.98	29.80	0.46	34.39									0.19		99.82	文献[18]
	黄铜矿	34.94	30.83	0.04	34.93	0.02	0.09				0.02		0.06			100.93	
07DL-19	磁黄铁矿	39.40	58.13	0.97	0.05						0.34	0.45	0.40			99.74	本文
07DL-12	磁黄铁矿	38.25	59.38	0.81	0.20							0.03	0.85			99.52	
	磁黄铁矿	36.56	62.58	0.11	0.01											99.26	文献[18]
	磁黄铁矿	38.78	60.48	0.08	0.03	0.01		0.68						0.01	0.07	100.14	
07DL-10	银黝铜矿	25.69	12.16		11.94	6.80	43.25				0.16					100.00	本文
07DL-12	黄铁矿	53.10	46.63	0.11		0.42										99.86	
07DL-19	黄铁矿	52.12	45.78	0.92												99.22	
	黄铁矿	54.08	46.27	0.04	0.03									0.01		100.43	文献[18]
	黄铁矿	52.71	46.73	0.10	0.02	0.01	0.01				0.06		0.03			99.67	
	黄铁矿	52.49	46.37	0.09			0.01	0.18			0.02					99.16	
	黄铁矿	53.15	46.51	0.05		0.07		0.21							0.01	100.00	
07DL-19	闪锌矿	33.79	11.31		0.96	53.01										99.07	本文
	闪锌矿	34.31	9.93	0.02	6.40	49.95		0.06						0.02		100.69	
	毒砂	18.31	33.61	1.48			0.02					47.32		0.03	0.09	100.86	文献[18]
	毒砂	19.08	34.67	0.65			0.06					45.76		0.02	0.01	100.25	
	毒砂	19.43	33.01	2.14			0.04	0.01				45.80		0.11		100.54	
	方铅矿	13.43	0.85	0.03	1.35	1.25	0.65								81.72	99.28	

表3 道伦达坝铜多金属矿床的稀土元素和微量元素组成特征

Tab. 3 Composition Characteristics of Trace Elements and Rare Earth Elements in Daolundaba Copper-polymetallic Deposit

参数	07DL-07	07DL-29	07DL-04	07DL-31-1	07DL-15	07DL-20	07DL-31-2	07DL-31-3	07DL-10
$w(\text{La})/10^{-6}$	30.87	42.02	49.32	62.10	51.78	32.52	32.29	95.19	3.47
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	67.030	99.340	110.400	128.000	115.600	74.270	70.790	227.300	7.814
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	8.293	11.910	13.140	16.190	14.900	9.345	8.858	30.830	1.001
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	32.20	43.51	50.49	56.08	54.89	35.25	34.49	112.20	3.50
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	6.598	7.967	9.938	9.489	10.020	6.377	7.083	19.710	0.684
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.218	1.673	1.348	0.549	0.861	1.050	0.928	1.457	0.063
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	5.784	6.251	8.233	6.035	6.997	6.140	7.227	16.966	0.575
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	1.008	1.089	1.419	0.906	1.087	0.926	1.061	2.092	0.075
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	5.730	5.979	7.767	4.517	5.359	5.366	5.772	10.430	0.383
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	1.025	1.101	1.410	0.769	0.885	1.044	1.022	1.885	0.063
$w(\text{Er})/10^{-6}$	2.933	3.183	3.991	2.218	2.459	3.158	2.975	5.774	0.190
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.427	0.470	0.568	0.333	0.359	0.489	0.449	0.895	0.029
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	2.686	2.937	3.697	2.236	2.293	3.338	2.978	6.280	0.211
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.413	0.451	0.592	0.360	0.350	0.528	0.453	1.068	0.036
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	8.39	9.49	12.87	12.81	7.91	15.03	40.64	13.21	0.27
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	21.09	22.48	23.98	29.23	28.08	30.66	47.17	45.38	5.24
$w(\text{Ge})/10^{-6}$	1.35	1.10	1.39	1.03	2.27	2.45	2.27	3.83	0.16
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	4.28	6.04	9.34	9.37	5.70	5.18	2.49	17.86	0.27
$w(\text{In})/10^{-6}$	0.07	0.18	0.29	0.39	23.50	7.21	5.31	0.83	171.36
$w(\text{Ti})/10^{-6}$	3 264	3 752	4 517	1 916	2 820	1 970	2 598	1 662	10
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	11.14	11.91	14.58	7.88	11.17	7.06	8.18	10.01	0.74
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	145.13	131.88	156.13	532.00	423.25	310.88	461.00	608.75	7.86
$w(\text{Se})/10^{-6}$	10.17	9.78	11.63	7.44	6.70	13.22	15.85	7.94	0.37
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	106.8	252.8	193.0	58.2	53.3	17.1	12.6	65.9	6.2
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.86	0.81	0.97	0.56	0.77	0.41	0.34	0.79	0.01
$w(\text{Th})/10^{-6}$	13.18	13.69	17.23	8.85	17.74	11.60	9.69	17.78	0.42
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	0.30	0.51	0.19	1.28	0.89	2.80	3.09	0.74	113.14
$w(\text{U})/10^{-6}$	2.70	2.88	2.70	3.26	3.90	2.28	3.00	5.26	0.07
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	123.8	198.3	274.5	315.6	195.8	189.7	143.3	658.2	11.4
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	21.21	39.61	24.92	17.03	28.43	3.12	3.92	25.33	47.20
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	703.6	1 833	879.0	678.8	1 004.0	574.3	474.7	1 235.0	19.7
$w(\text{Y})/10^{-6}$	27.95	30.17	38.71	20.34	22.66	22.35	21.06	44.50	1.23
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	166.22	227.88	262.31	289.78	267.84	179.80	176.38	532.08	18.09
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	7.31	9.62	8.48	15.68	12.53	7.57	7.04	10.72	10.58
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	7.75	9.65	8.99	18.72	15.22	6.57	7.31	10.22	11.09
$w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	1.74	1.72	1.80	2.18	2.46	1.48	1.96	2.18	2.20
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$	2.94	3.32	3.12	4.12	3.25	3.21	2.87	3.04	3.19
$\delta(\text{Eu})$	0.60	0.72	0.46	0.22	0.31	0.51	0.40	0.24	0.31
$\delta(\text{Ce})$	1.01	1.07	1.04	0.97	1.00	1.03	1.01	1.01	1.01

注:07DL-07、07DL-29、07DL-04 测试黑云母花岗岩;07DL-31-1、07DL-15 测试灰色硅质岩;07DL-20、07DL-31-2 测试石墨化围岩;07DL-31-3 测试硅化砂岩;07DL-10 测试磁黄铁矿; $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值; w_{REE} 为稀土元素(REE)总含量; w_{LREE} 为轻稀土元素(LREE)总含量; w_{HREE} 为重稀土元素(HREE)总含量; $\delta(\cdot)$ 为元素异常。

磁黄铁矿呈淡粉红色,它形粒状,粒径大小不一,一般小于1 cm。在其部分晶体颗粒间隙或裂隙中可以见到与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等共生。2个磁黄

铁矿样品中,Fe含量为58.13%~59.38%,平均为58.76%;S含量为38.25%~39.4%,平均38.83%;此外,还含有少量的Co、Cu、As、Sn、Ni等。

黄铜矿为铜黄色,它形,颗粒大小不一,主要分布在毒砂、磁黄铁矿、闪锌矿等的颗粒间隙及裂隙中,常与闪锌矿、方铅矿、黝锡铜矿等一起出现。电子探针测试结果显示,Fe 含量为 29.8%,Cu 为 34.39%,S 为 34.98%,此外还含有少量 Co、Ni 等。

黄铁矿分为 2 种:①浅黄色黄铁矿,半自形晶;②胶状黄铁矿,具有环带结构。6 个黄铁矿电子探针数据显示,Fe 含量为 45.78%~46.73%,平均为 46.38%,S 为 52.12%~54.08%,平均为 52.94%,此外还含有少量 Co、Ni 等。胶状黄铁矿 S 与 Fe 的含量之比 $w(S)/w(Fe)$ 从同心状内环向外环依次为 1.127、1.132、1.142。这表明样品 $w(S)/w(Fe)$ 低于理论值,S 相对亏损,推测 As 替代了部分 S^[18]。

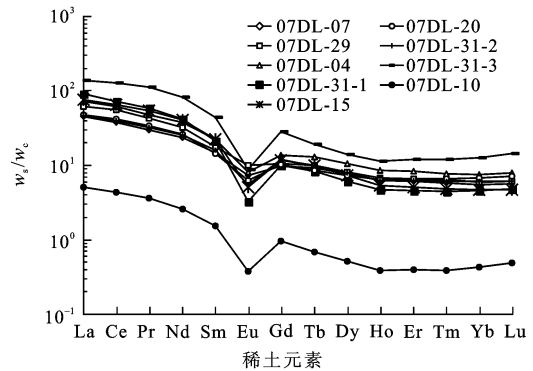
毒砂呈亮白色,自形、半自形,粒状,颗粒直径 0.1~3 mm,被磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等交代形成骸晶结构、浸蚀结构、交代残余结构及交代星状结构。4 个电子探针结果显示,毒砂样品中 Fe 含量为 32.25%~34.43%,平均为 33.44%,As 为 45.53%~46.73%,平均为 46.20%,S 为 18.35%~19.87%,平均为 19.09%,此外还含有少量 Co、Ni,其中 1 个样品中还含有少量 Ag^[18]。

闪锌矿为灰绿色,它形粒状。铁闪锌矿中含有乳滴状的黄铜矿固溶体,在闪锌矿的边部可以见到其被黄铜矿交代形成的反应边结构。在闪锌矿样品中,Fe 平均含量为 10.62%,Zn 为 51.48%,S 为 34.05%,此外还含有少量 Co 和 Cu。

锡黝铜矿通常呈它形粒状,分布于磁黄铁矿或黄铜矿中,为浅灰绿色。电子探针结果显示:锡黝铜矿 S 含量为 28.47%~29.58%,平均为 29.14%;Fe 含量为 13.50%~15.58%,平均为 14.55%;Sn 含量为 26.19%~27.85%,平均为 29.14%;Cu 含量为 26.62%~28.54%,平均为 27.37;此外,还含有少量 Co、Zn、Ag、As 等。

稀土微量元素测试结果(图 3)表明,稀土元素含量 w_{REE} 为 $(18.09 \sim 532.08) \times 10^{-6}$,平均为 235.60×10^{-6} ,其中磁黄铁矿稀土元素含量最低,硅化砂岩的稀土元素含量最高;轻稀土元素含量 w_{LREE} 与重稀土元素含量 w_{HREE} 之比 $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 为 7.02~12.53,平均为 9.95,轻稀土元素明显富集;Eu 异常 $\delta(\text{Eu})$ 为 0.22~0.72,平均为 0.42,呈明显的 Eu 负异常;Ce 异常 $\delta(\text{Ce})$ 为 0.97~1.07,平均为 1.02,无明显 Ce 异常;轻、重稀土元素分异显著, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 6.57~18.72,平均为 10.61,曲线呈明显右倾型; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 和 $w(\text{Gd})_{\text{N}}/$

$w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为 2.87~4.12 和 1.48~2.46,轻稀土元素分异程度强于重稀土元素。



w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量,数据来自文献[19]

图 3 道伦达坝铜多金属矿床稀土元素配分模式

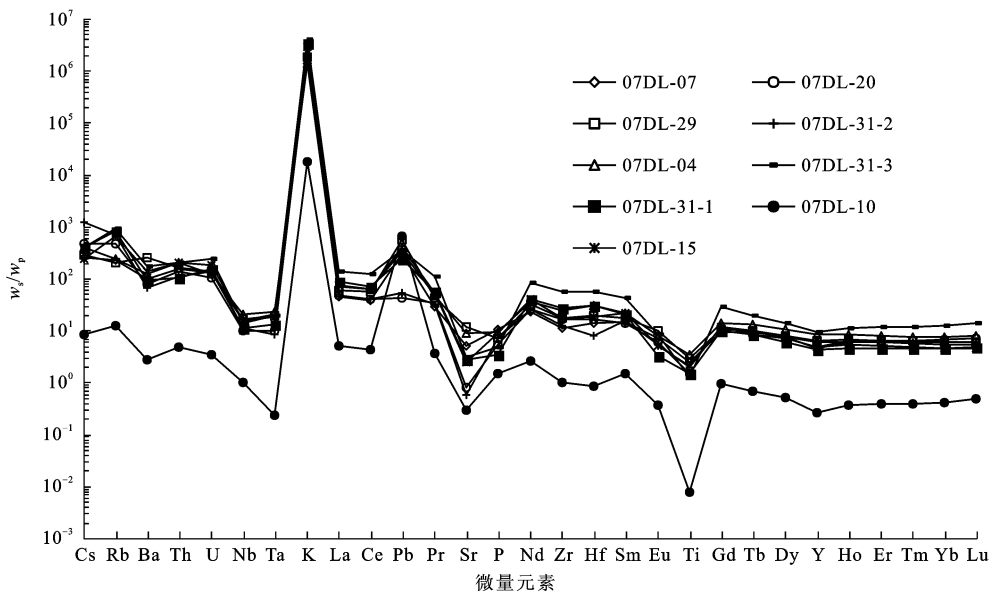
Fig. 3 Distribution Pattern of Rare Earth Elements in Daolundaba Copper-polymetallic Deposit

围岩的大离子亲石元素中,Rb 含量为 $(131.88 \sim 608.75) \times 10^{-10}$,Ba 为 $(474.7 \sim 183.3) \times 10^{-10}$,Th 为 $8.85 \sim 17.78 \times 10^{-10}$,U 为 $2.28 \sim 5.26 \times 10^{-10}$;高场强元素中,Nb 为 $7.06 \sim 14.58 \times 10^{-10}$,Ta 为 $(0.34 \sim 0.97) \times 10^{-10}$,Zr 为 123.8~6 582,Ti 含量变化较小。微量元素蛛网图(图 4)显示,矿区围岩具有明显的富 K 特征,Ti 负异常(Ti 含量为 0.166%~0.452%),大离子亲石元素(Rb、Ba 等)、LREE 和相容元素(Cr、Ni、V、Sc)相对富集,Nb、Ta、Ti、P 和 Sr 负异常。

4 讨论

Eu 负异常表明有斜长石的分离结晶或者原始岩浆熔体与基性斜长石平衡。由于稀土元素离子半径(0.097 7~0.116 nm)与 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} 的离子半径(分别为 0.074、0.078 nm)相差较远^[20-21],稀土元素离子替换磁黄铁矿矿物晶格中的阳离子比较困难,推测硫化物中的 REE 可能主要赋存在磁黄铁矿的流体包裹体中。图 3 显示磁黄铁矿稀土元素配分曲线与围岩特征一致,且稀土元素含量远低于围岩,暗示成矿流体来自于围岩。同时,Eu 在还原条件下呈二价状态与其他三价稀土元素分离,而 Ce 在还原条件下呈三价状态,只有在氧化条件下才呈四价状态与其他稀土元素分离。图 3 还显示磁黄铁矿和蚀变围岩的稀土元素具明显 Eu 负异常,而 Ce 无明显异常,说明成矿流体的物理化学条件为还原环境。

Ti 是惰性元素,在交代和变质作用中迁移量很少,常常留在原地,因此 Ti 在各类岩石中的含量变化较小。大离子亲石元素(Rb、Ba 等)、LREE 和相



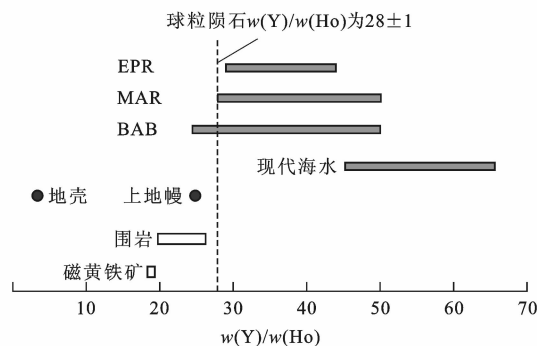
w_p 为原始地幔含量,数据来自文献[22]

图4 道伦达坝铜多金属矿区微量元素蛛网图

Fig. 4 Spider Diagram of Trace Element in Daolundaba Copper-polymetallic Deposit

容元素(Cr、Ni、V、Sc)相对富集,Nb、Ta、Ti、P和Sr负异常,具有弧岩浆的特征,可能反映了一种后碰撞岛弧构造环境,且在演化过程中经历了充分的分离结晶作用。与稀土元素特征相同,磁黄铁矿的微量元素配分曲线也与围岩特征一致,反映了围岩对成矿作用的贡献。本区地层Ni含量为 $(6.5 \sim 14) \times 10^{-6}$,Cr为 $(3.05 \sim 28.06) \times 10^{-6}$,明显低于洋中脊玄武岩(Ni含量为 $(90 \sim 130) \times 10^{-6}$,Cr为 $(251 \sim 411) \times 10^{-6}$)和板内玄武岩(Ni含量为 $(90 \sim 130) \times 10^{-6}$,Cr为 $(352 \sim 536) \times 10^{-6}$),而与岛弧钙碱性玄武岩相似,暗示岩浆在上升过程中曾经历了橄榄石、尖晶石和单斜辉石的分离结晶作用^[23],表现为大陆边缘弧火山岩的地球化学特点,是地幔物质较低程度部分熔融和地壳物质严重混染的产物。

前人利用Y和Ho对成矿流体及现代海底热液进行了研究^[24-28]。Y和Ho具有相同的价态和离子半径,八次配位时,两者的离子半径分别为0.1019、0.1015 nm^[23],因此Y和Ho常常具有相同的地球化学性质,在许多地质过程中, $w(Y)/w(Ho)$ 并不发生改变。地球上大多数岩浆岩和碎屑沉积物都保持着球粒陨石的 $w(Y)/w(Ho)$ 为 28 ± 1 ^[24]。本文中围岩的 $w(Y)/w(Ho)$ 为20.61~27.45,平均为24.98,磁黄铁矿 $w(Y)/w(Ho)$ 为19.52。图5显示硫化物 $w(Y)/w(Ho)$ 很接近,但略低于围岩,二者均靠近上地幔,但向地壳偏离,暗示成矿物质主要来源于上地幔受到地壳物质的混染。



白色条带代表道伦达坝的围岩和磁黄铁矿样品;现代海水、BAB(弧后盆地)、MAR(中大西洋洋脊)和EPR(东太平洋洋脊)热液流体数据来自文献[25-27]

图5 道伦达坝铜多金属矿床中围岩、磁黄铁矿、现代海底热液和海水的 $w(Y)/w(Ho)$ 比较

Fig. 5 Comparison of $w(Y)/w(Ho)$ Among Wallrock and Pyrrhotite from Daolundaba Copper-polymetallic Deposit, Modern Submarine Hydrothermal Fluid and Seawater

5 结语

内蒙古道伦达坝铜多金属矿床的形成与二叠系建造的层位控矿作用及其成矿元素高含量有关。硅质岩和石墨化围岩Sn、Cu、Pb、Zn等元素含量很高,浓集系数远大于1,具初始富集特征,是该矿床重要矿源层;此外,区内印支期的黑云母花岗岩的成矿元素含量显著高于地壳克拉克值,为成矿元素二次富集提供了重要的物质基础。围岩硫化物中Ag含量较高,如在磁黄铁矿中可达 158×10^{-6} ,在蚀变围岩

表 4 道伦达坝铜多金属矿床的成矿元素组成

Tab. 4 Composition of Metallogenic Elements in Daolundaba Copper-polymetallic Deposit

参数	07DL-07	07DL-29	07DL-04	07DL-31-1	07DL-15	07DL-20	07DL-31-2	07DL-31-3	07DL-10
$w(\text{Ag})/10^{-9}$	58	982	442	544	17 826	37 249	2 544	694	158 285
$w(\text{Co})/10^{-9}$	109.9	3 197.7	978.9	462.9	3 531.0	1 045.2	329.3	584.6	4 020.2
$w(\text{As})/10^{-6}$	24.37	192.29	93.36	1 484.55	173.47	49.65	169.80	279.30	813.09
$w(\text{Cd})/10^{-6}$	0.22	0.94	0.45	1.02	11.59	17.40	23.38	2.00	376.05
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	6.97	7.01	7.65	28.06	3.05	4.16	15.74	7.68	34.39
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	23.18	30.86	24.13	17.92	37.33	53.12	47.10	20.16	4.70
$w(\text{Hg})/10^{-6}$	18.97	40.50	69.65	176.53	6 066.37	22 883.97	1 612.42	293.03	23 803.97
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	6.5	8.0	6.0	6.5	14.0	11.0	7.5	7.0	15.0
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	1.57	2.48	2.23	1.58	3.24	1.58	1.90	2.97	0.79
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	13.95	14.31	13.51	55.75	10.83	15.49	26.32	8.05	23.95
$w(\text{Li})/10^{-6}$	0.57	1.30	0.65	1.36	2.32	1.03	8.42	1.27	1.95
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	5.19	5.67	6.19	12.63	>100.00	>100.00	59.65	12.14	>100.00
$w(\text{Bi})/10^{-6}$	1.31	1.54	1.59	45.45	45.22	9.67	32.15	23.03	562.21
$w(\text{W})/10^{-6}$	45.1	491.5	164.2	156.0	547.3	477.5	169.0	111.8	1 610.8
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	36.69	38.32	38.17	77.90	69.36	88.99	163.98	131.94	1.17
$w(\text{V})/10^{-6}$	43.0	75.7	56.0	59.4	42.3	92.7	117.3	36.3	2.2

中也达 37.2×10^{-6} 。Ag 是亲铜元素,与 Cu 具有相似的地球化学性质,Ag 的离子半径与 Pb 相近,因而 Ag 与 Cu、Pb 之间类质同象现象很广泛,这决定了 Ag 常与 Cu 或 Pb 共生。Cu、Ag 都属上地幔富集元素,Cu 在基性岩中含量为 87×10^{-6} ,在中性岩中仅 35×10^{-6} ,因此 Cu 的成矿前提是要有深切至上地幔的深大断裂诱发超基性—基性岩的厚大火山沉积物重熔。

除二叠系矿源层建造对该区成矿的控制外,成矿年代学资料表明,本区与成矿有关岩体主要形成于燕山早期,与该区铜矿脉穿过的最新地层为中侏罗统沉积岩系是一致的。在该区发现的镁铁质堆晶岩捕虏体的 Rb-Sr 法等时线和 Ar-Ar 法年龄集中在 237~214 Ma,而其寄主闪长岩年龄为 221~205 Ma,可以认为这些堆晶岩捕虏体是幔源岩浆侵入到地壳在岩浆房中分离结晶的产物,后被闪长岩作为捕虏体带上来。这表明中生代早期该区岩石圈深部处于活跃的伸展状态,为壳幔混合花岗岩上升、侵位提供了条件,强烈的底侵作用和伸展背景是促成幔源物质参与成岩、成矿作用的重要因素。该矿床就是在这一背景下形成的,富铜的高温幔源岩浆与被其加热熔融的下地壳物质以不同比例混合,然后上侵分异衍生为富铜的岩浆,在地壳浅部定位演化形成热液脉状铜矿床。

参考文献:

References:

- [1] 王京彬,王玉往,王莉娟. 大兴安岭南段中生代伸展成矿系统[J]. 矿床地质,2002,21(增):241-244.
WANG Jing-bin, WANG Yu-wang, WANG Li-juan. Mesozoic Extension-metallogenic System in Southern Part of Da Hinggan Mountains, China [J]. Mineral Deposits,2002,21(S):241-244.
- [2] 刘建明,张锐,张庆洲. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘,2004,11(1):269-277.
LIU Jian-ming, ZHANG Rui, ZHANG Qing-zhou. The Regional Metallogeny of Da Hinggan Ling, China [J]. Earth Science Frontiers,2004,11(1):269-277.
- [3] 聂凤军,张万益,杜安道,等. 内蒙古朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报,2007,28(4):315-323.
NIE Feng-jun, ZHANG Wan-yi, DU An-dao, et al. Re-Os Isotopic Age Dating of Molybdenite Separates from the Chaobuleng Skarn Iron-polymetallic Deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Acta Geoscientica Sinica,2007,28(4):315-323.
- [4] 聂凤军,张万益,杜安道,等. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报,2007,81(7):898-905.
NIE Feng-jun, ZHANG Wan-yi, DU An-dao, et al. Re-Os Isotopic Dating on Molybdenite Separates from

- the Xiaodonggou Porphyry Mo Deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(7):898-905.
- [5] 邵济安,张履桥,肖庆辉,等.中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J].*岩石学报*, 2005,21(3):789-794.
SHAO Ji-an, ZHANG Lü-qiao, XIAO Qing-hui, et al. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic—A Possible Mechanism of Intracontinental Orogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3):789-794.
- [6] 刘翠,邓晋福,许立权,等.大兴安岭—小兴安岭地区中生代岩浆-构造-钼成矿地质事件序列的初步框架[J].*地学前缘*, 2011,18(3):166-178.
LIU Cui, DENG Jin-fu, XU Li-quan, et al. A Preliminary Frame of Magma-tectonic-Mo Metallogenic Events of Mesozoic Era in Da Hinggan Mountains and Xiao Hinggan Mountains Areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3):166-178.
- [7] 申伍军,王学求,聂兰仕.大兴安岭成矿带大型银多金属矿区域地球化学预测指标[J].*地学前缘*, 2012, 19(3):49-58.
SHEN Wu-jun, WANG Xue-qiu, NIE Lan-shi. Regional Geochemical Indicators of Large-sized Silver Polymetallic Deposits in Daxing'anling Metallogenic Belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3):49-58.
- [8] 邵济安,牟保磊,朱慧忠,等.大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J].*岩石学报*, 2010, 26(3):649-656.
SHAO Ji-an, MOU Bao-lei, ZHU Hui-zhong, et al. Material Source and Tectonic Settings of the Mesozoic Mineralization of the Da Hinggan Mts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3):649-656.
- [9] 徐志刚.内蒙古东南部铜多金属矿床成矿构造背景[C]//张德全,赵一鸣.大兴安岭及邻区铜多金属矿床论文集.北京:地震出版社,1993:22-41.
XU Zhi-gang. Tectonic Setting of Copper-polymetallic Deposits in the Southeastern Inner Mongolia [C] // ZHANG De-quan, ZHAO Yi-ming. Symposium on the Copper-polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Their Adjacent Areas. Beijing: Seismological Press, 1993:22-41.
- [10] 赵一鸣,张德全.大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M].北京:地震出版社,1997.
ZHAO Yi-ming, ZHANG De-quan. Metallogeny and Prospective Evolution of Copper-polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Their Adjacent Regions [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [11] 盛继福,傅先政.大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M].北京:地震出版社,1999.
SHENG Ji-fu, FU Xian-zheng. Metallogenic Environment and Geological Characteristics of Copper-polymetallic Deposits in Middle Part of Da Hinggan Mountains [M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [12] 王京彬,王玉往,王莉娟.大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力[J].*地质与勘探*, 2000,36(5):1-4.
WANG Jing-bin, WANG Yu-wang, WANG Li-juan. Copper Metallogenic Setting and Prospecting Potential in the Middle-southern Part of Da Hinggan Mountains [J]. *Geology and Prospecting*, 2000, 36(5):1-4.
- [13] 王长明,张寿庭,邓军.大兴安岭南段铜多金属矿成矿时空结构[J].*成都理工大学学报:自然科学版*, 2006,33(5):478-484.
WANG Chang-ming, ZHANG Shou-ting, DENG Jun. The Metallogenic Space-time Structure of Copper-polymetallic Deposits in the Southern Segment of Da Hinggan Mountains, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2006, 33(5):478-484.
- [14] 王建,李建平,王江海.滇西大理—剑川地区钾玄质岩浆作用:后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究[J].*岩石学报*, 2003,19(1):61-70.
WANG Jian, LI Jian-ping, WANG Jiang-hai. Shoshonitic Magmatism in Dali-Jianchuan Area, Western Yunnan: A Geochemical Study of Arc Magmatism in a Post-collisional Strike-slip Extensional Setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1):61-70.
- [15] 李振祥,周福华,崔栋,等.内蒙古道伦达坝铜多金属矿床地质特征及成因初探[J].*地质与资源*, 2009,18(1):27-30.
LI Zhen-xiang, ZHOU Fu-hua, CUI Dong, et al. Geology and Genesis of the Daolundaba Copper-polymetal Deposit in Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(1):27-30.
- [16] 张永正,李秀荣,杨宏智,等.大兴安岭东南段铜多金属成矿构造条件[J].*地质与资源*, 2007,16(1):38-41.
ZHANG Yong-zheng, LI Xiu-rong, YANG Hong-zhi, et al. Structural Conditions of Copper-polymetallic Mineralization in the Southeast Section of Da Hinggan Mountains [J]. *Geology and Resources*, 2007, 16(1):38-41.
- [17] 潘小菲,王硕,侯增谦,等.内蒙古道伦达坝铜多金属矿床特征研究[J].*大地构造与成矿学*, 2009, 33(3):402-410.
PAN Xiao-fei, WANG Shuo, HOU Zeng-qian, et al. Geology and Metallogenesis of Daolundaba Copper

- Polymetallic Deposits, Inner Mongolia[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(3): 402-410.
- [18] 徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 等. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11): 2957-2972.
- XU Jia-jia, LAI Yong, CUI Dong, et al. Characteristics and Evolution of Ore-forming Fluids of the Daolunda-ba Copper-poly-metal Deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(11): 2957-2972.
- [19] BOYNTON W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements; Meteorite Studies [C] // HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [20] SHANNON R D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides[J]. *Acta Crystallographica Section A*, 1976, 32(5): 751-767.
- [21] 李沛刚, 王登红, 雷志远, 等. 贵州大竹园大型铝土矿稀土元素地球化学特征及其意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(2): 31-40.
- LI Pei-gang, WANG Deng-hong, LEI Zhi-yuan, et al. Geochemical Characteristic of Rare Earth Element in Dazhuyuan Large-scale Bauxite Deposit of Guizhou Province and Its Significance [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(2): 31-40.
- [22] MCDONOUGH W F, SUN S S, RINGWOOD A E, et al. Potassium, Rubidium, and Cesium in the Earth and Moon and the Evolution of the Mantle of the Earth [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1001-1012.
- [23] 吕志成, 郝立波, 段国正, 等. 大兴安岭南段早二叠世两类火山岩岩石地球化学特征及其构造意义[J]. *地球化学*, 2002, 31(4): 338-346.
- LU Zhi-cheng, HAO Li-bo, DUAN Guo-zheng, et al. Litho-geochemical Characteristics and Tectonic Implications of Two Series of Volcanic Rocks from Early Permian Dashizhai Formation in the South Section of Da Hinggan Mountains [J]. *Geochimica*, 2002, 31(4): 338-346.
- [24] BAU M, DULSKI P. Comparative Study of Yttrium and Rare-earth Element Behaviours in Fluorine-rich Hydrothermal Fluids [J]. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 1995, 119(2/3): 213-223.
- [25] BAU M, MOLLER P, DULSKI P. Yttrium and Lanthanides in Eastern Mediterranean Seawater and Their Fractionation During Redox-cycling [J]. *Marine Chemistry*, 1997, 56(1/2): 123-131.
- [26] BAU M, DULSKI P. Comparing Yttrium and Rare Earths in Hydrothermal Fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE Behavior During Near-vent Mixing and for the Y/Ho Ratio of Proterozoic Seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 155(1/2): 77-90.
- [27] DOUVILLE E, BIENVENU P, Charlou J L, et al. Yttrium and Rare Earth Elements in Fluids from Various Deep-sea Hydrothermal Systems [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 627-643.
- [28] 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 等. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征 [J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 412-426.
- MAO Guang-zhou, HUA Ren-min, GAO Jian-feng, et al. REE Composition and Trace Element Features of Gold-bearing Pyrite in Jinshan Gold Deposit, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 412-426.

《地球科学与环境学报》增加页码的通告

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。

为了缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威、更强有力的地球科学与环境领域学术交流平台, 《地球科学与环境学报》编辑部决定从 2013 年第 2 期起增加刊载论文容量, 页码由原来的 112 页增加至 128 页, 欢迎赐稿!