

宓奎峰, 柳振江, 李春风, 等. 内蒙古乌努格吐山大型铜钼矿床元素迁移及成矿过程探讨[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1270-1287.
Mi Kuifeng, Liu Zhenjiang, Li Chunfeng, et al. Metallogenic processes and migration of ore-forming elements in the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1253-1287(in Chinese with English abstract).

内蒙古乌努格吐山大型铜钼矿床元素迁移及成矿过程探讨

宓奎峰 柳振江 李春风 刘瑞斌 王建平 邹君宇 王忠宝

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:乌努格吐山斑岩型铜钼矿是德尔布干成矿带中的典型矿床之一。该文在分析岩石地球化学特征的基础上,采用等浓度线法和坪台法对成矿元素的迁移特征进行定量计算和分析,借此探讨了成矿过程。结果显示:由于温度不断降低, SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 发生迁移并形成了不同的矿物,质量迁移比例由内向外逐渐增大,并且形成的矿物与乌努格吐山蚀变分带特征矿物石英、钾长石、绢云母、水白云母的出现相一致,主量元素的迁移导致乌努格吐山形成明显的蚀变分带。成矿元素 Cu、Mo 在各蚀变分带中均显示极度带入的特征,矿化强则带出比率高。在斜长石的蚀变过程中,由于 CO_3^{2-} 的络合作用 Mo 被析出转移到热液流体中去,然后发生迁移。Zn、Pb 等则从内带向外带由带出变成带入,最终在最外带中富集。

关键词:乌努格吐山;斑岩型铜钼矿;元素迁移;岩石地球化学;成矿过程

中图分类号:P618.41;P618.65 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2014)04-1270-18

1 引言

乌努格吐山铜钼矿床位于内蒙古自治区呼伦贝尔市新巴尔虎右旗境内,是德尔布干成矿带内典型的斑岩型矿床之一(图1)。该成矿带矿床成矿时间与中国其他区域内三叠纪大规模成矿作用^[1]成矿时间相一致,除乌努格吐山之外还发育有额仁陶勒盖浅成低温热液 Ag 矿、甲乌拉热液脉型 Pb-Zn-Ag 矿和查干布拉根热液脉型 Ag-Pb-Zn 矿等典型矿床。乌努格吐山矿床铜金属储量达 223 万 t,钼金属储量 26 万 t,均达大型^[2],同时伴生铷和银,是国内已探明

的第四大铜钼伴生矿床。自 2007 年起,该矿床已由中国黄金集团内蒙古矿业有限公司正式露天开采。

自 1979 年发现工业矿体以来,先后有学者从不同角度对乌努格吐山矿床开展研究,并取得了重要的成果。例如,蔡宏渊^[3]、宋国利^[4]、陈殿芬^[5]等各自总结了该矿床的岩性特征、围岩蚀变、矿体赋存条件及形态、矿体分带性等成矿地质条件。许多学者采用 Rb-Sr、K-Ar 和锆石 U-Pb 等方法开展了成矿岩体年代学研究,获得黑云母二长花岗岩年龄 176.9~201.6 Ma^[6-10],二长花岗斑岩 178.1~188.3 Ma^[6-9],采用辉钼矿 Re-Os 方法获得成矿年龄 178 Ma 左右^[6, 8, 9, 11],表明成矿

收稿日期:2014-03-13; 改回日期:2014-06-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416600)、中国地质调查局地质矿产资源调查评价专项(1212011220923)和地质资源勘查国家级实验教学示范中心建设项目联合资助。

作者简介:宓奎峰,男,1989年生,博士生,矿床学专业;E-mail:mikuifeng@126.com。

通讯作者:柳振江,男,1983年生,讲师,主要从事矿床学教学与科研工作;E-mail:lzj@cugb.edu.cn。

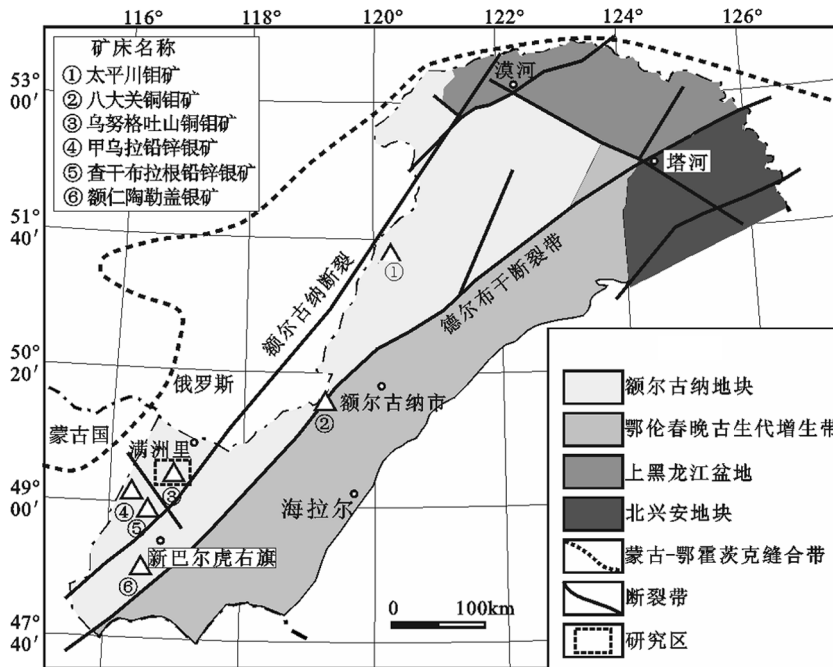


图1 德爾布干成礦帶區域構造及典型礦床分布圖(據文獻[18-20]修編)

Fig.1 Sketch map showing distribution of regional structures and typical deposits in the Deerbugan metallogenic belt (modified after References [18-20])

作用发生于早侏罗世。任国栋^[12]、叶欣^[13]和李诺^[14]等开展了流体包裹体研究,其中李诺等^[14]将成矿流体阶段划分为早、中、晚3阶段,主成矿作用发生在中阶段;王之田^[15]、秦克章^[16]通过对REE元素的研究,总结了斑岩体含矿性的评价标志;陈殿芬^[5]、陈志广^[9]利用S、Sr、Nd、Pb等同位素示踪认为成矿斑岩源于加厚下地壳底部;而就成矿物质,王之田^[17]通过元素迁移认为,Mo系由围岩活化迁移而来,而成矿斑岩主要提供Cu、Ag、Pb、Zn。并有不同学者初步建立了该矿床的成矿模式^[10-11,14]。

乌努格吐山矿床具有明显的硅化、钾化、绢云母化和伊利石化等围岩蚀变及分带特征^[3],通过定量计算并分析矿化蚀变过程中主要元素的迁移活动情况,可以进一步深化对其成矿过程的认识。据此,本文以野外观察和室内分析相结合,系统采集了乌努格吐山斑岩型铜钼矿床的代表性岩矿石样品,在分析其元素地球化学特征的基础上,采用坪台法^[21]和等浓度线法^[22]2种元素迁移计算手段,详细探讨了矿区Cu、Mo等成矿相关元素的迁移、富集过程。

2 地质背景

乌努格吐山矿床位于德爾布干成礦帶南端,位于外贝加尔褶皱系与大兴安岭褶皱系的衔接处,构造特征受北东向的德爾布干断裂及额爾古納断裂共同控制(图1)。区域地层主要出露有乌奴耳组结晶灰岩、砂板岩、安山岩以及上侏罗统安山岩-英安岩-流纹岩中酸性陆相火山岩建造。岩浆活动主要为印支期和燕山期,其中以燕山早期最具代表性。

矿区内地层基本不发育,侵入岩主要包括黑云母二长花岗岩、二长花岗斑岩以及后期侵入的流纹斑岩、安山玢岩(表1,图2),但均多已遭受硅化、钾化、伊利石化和绢云母化等蚀变作用(图3)。受区域性北东向断裂的影响,矿区次级断裂构造十分发育,根据断裂的相互穿插关系可将矿区内断裂分为2组:一组为NE向,一组为NW向或NWW向。近EW向F7断裂把矿区分割成南、北2个矿段(图2),NW向的F8断裂破坏了矿体的连续性,使断层上下盘遭受了不同程度的剥蚀。

矿区赋矿岩石为二长花岗斑岩岩体,呈筒状分

表1 乌努格吐山铜钼矿区主要岩浆岩特征

Table 1 The characteristics of main magmatic rocks in Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit

侵入时期	岩石名称	代号	产状	结构	含矿性	年龄/Ma	分析方法	数据来源
	安山玢岩	$\alpha\mu$	脉状	斑状	不含矿			
	英安质凝灰角砾岩	$\xi i\pi$		晶屑岩屑砂状	局部弱矿化			
	闪长玢岩	$\delta\mu$	脉状	斑状	含矿围岩			
燕山早期	二长花岗斑岩	$\gamma i\pi$	岩株状	斑状	携矿围岩	179	锆石 U-Pb	[9]
	流纹斑岩	$\lambda\pi$	脉状	斑状	不含矿	181±4	锆石 U-Pb	[9]
	黑云母二长花岗岩	$\gamma\beta$	中深成相岩基	中粗粒花岗	含矿围岩	202±2	锆石 U-Pb	[9]
						197.9±2.7	锆石 U-Pb	[38]

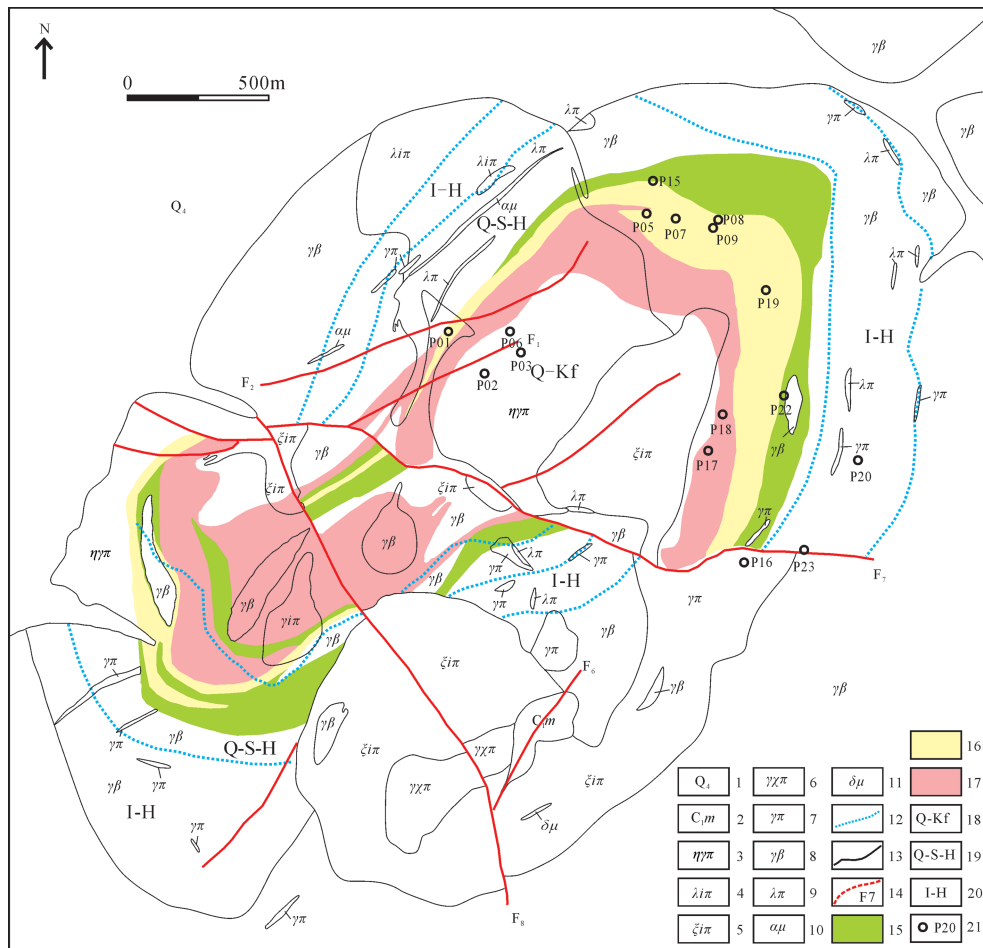


图2 乌努格吐山铜钼矿地质简图

1—第四系;2—石炭系下统结晶灰岩;3—二长花岗斑岩;4—流纹质晶屑凝灰岩;5—英安质凝灰角砾岩;6—花斑岩;7—花岗斑岩;8—黑云母二长花岗岩;9—流纹斑岩;10—安山玢岩;11—闪长玢岩;12—蚀变带界线;13—地质界线;14—断层;15—铜矿化区;16—铜钼矿化区;17—钼矿化区;18—石英钾长石化带;19—石英绢云母水白云母化带;20—伊利石水白云母化带;21—采样点号

Fig.2 Sketch geological map of the Wunugetushan Cu-Mo deposit

1-Quaternary; 2-Lower Carboniferous crystalline limestone; 3-Monzonitic granite porphyry; 4-Rhyolitic crystal fragment tuff; 5-Dacitic tuff breccia; 6-Granophyre; 7-Granite-porphry; 8-Biotite adamellite; 9-Rhyolite; 10-Andesitic porphyrite; 11-Dioritic porphyrite; 12-Boundary of alteration zone; 13-Geological boundary; 14-Fault; 15-Cu mineralization area; 16-Cu-Mo mineralization area; 17-Mo mineralization area; 18-Quartz-K-feldspathized zone; 19-Quartz-sericite hydromuscovitized zone; 20-Illite-hydromuscovitized zone; 21-Sampling site

张鹏程, 卢树东, 付友山, 等. 内蒙古自治区新巴尔虎右旗乌努格吐山矿区铜钼矿勘探报告[R]. 北京: 内蒙古金矿业有限公司, 2006.

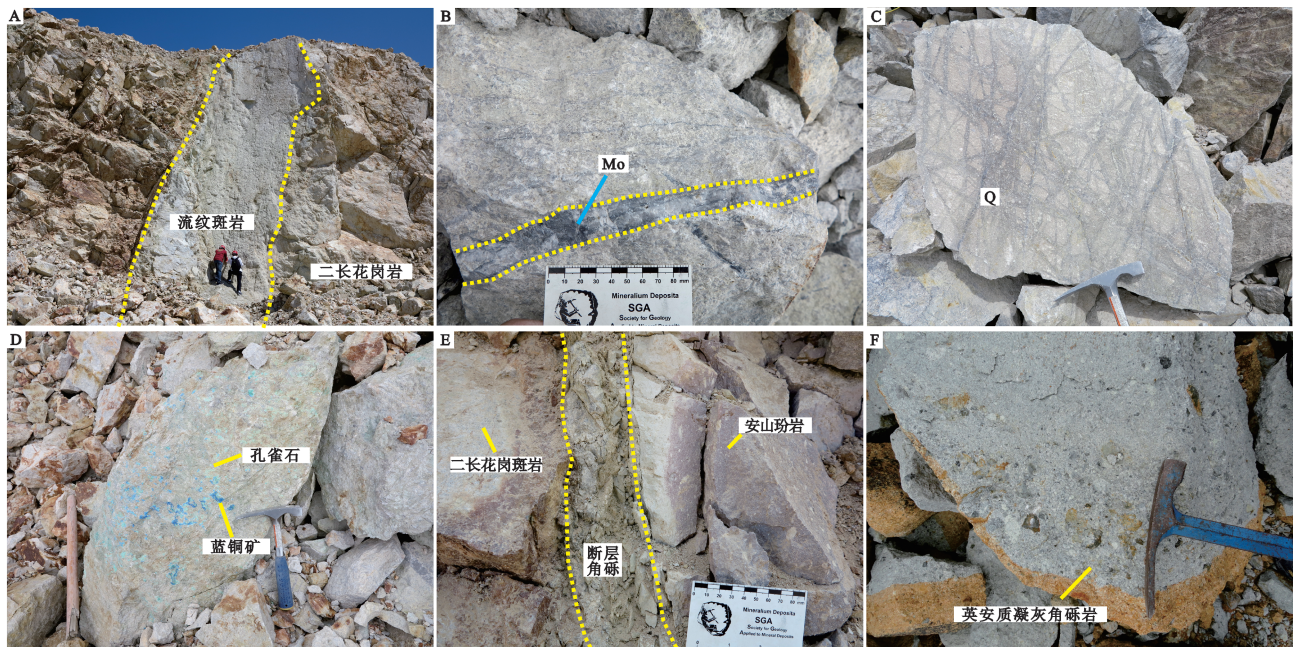


图3 乌努格吐山斑岩型铜钼矿围岩及矿石特征

A—流纹斑岩侵入早期二长花岗岩中; B—含石英细脉二长花岗斑岩, 脉中并含有辉钼矿细脉(Mo); C—含网状石英脉(Q)二长花岗斑岩;
D—孔雀石化二长花岗斑岩; E—安山玢岩沿断层侵入二长花岗斑岩; F—英安质凝灰角砾岩

Fig. 3 Characteristics of ore and wall rock in the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit

A—Early adamellite intruded by rhyolite; B—Adamellite porphyry with quartz veinlets, containing molybdenite veinlets; C—Monzogranite-porphyry with network quartz veins; D—Monzogranite-porphyry with secondary copper minerals (azurite and malachite); E—andesitic porphyrite that intruded into monzogranite-porphyry along the fault; F—Dacitic tuff breccia

布,部分二长花岗斑岩呈岩枝状侵入到早期黑云母二长花岗岩中,成矿后侵入的流纹斑岩、安山玢岩脉切穿矿体。矿石矿物组成相对简单(图3),主要由黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿及少量方铅矿、闪锌矿、辉铜矿、斑铜矿等,其中辉钼矿通常在石英脉中以细网脉状产出(图3-C),或者呈浸染状、片状产于二长花岗斑岩等赋矿岩体的裂隙中,经表生氧化作用常见到黄色土状钼化产出。而黄铜矿多呈浸染状、细脉状产出,多与黄铁矿、斑铜矿等其他硫化物共生。岩石表面有时发育孔雀石化和蓝铜矿化(图3-D)。脉石矿物主要为石英、长石(斜长石、钾长石)、黑云母、角闪石等,此外还可见绢云母、绿泥石等,岩石裂隙中还可见少量的方解石、石膏等后期形成的矿物。

根据标型蚀变矿物类型、组合特征、连续发育程度以及矿化的关系,乌努格吐山铜钼矿蚀变可划分为3个带(图2):①石英-钾长石化带(Q-Kf),伴

有伊利石、水白云母、绢云母和硬石膏产出,为Mo矿体主要赋存部位,局部可见Cu矿化;②石英-绢云母-水白云母化带(Q-S-H),是Cu矿体主要赋存部位,局部见Mo矿化;③伊利石-水白云母化带(I-H),其原岩结构残留或消失,黄铁矿脉发育,局部可见Cu、Pb、Zn矿化和少量Mo矿化。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集及地质特征

本次测试中所采集的样品覆盖了乌努格吐山矿区各类代表性岩矿石,主要包括黑云母二长花岗岩、铜钼矿化二长花岗斑岩和不含矿二长花岗斑岩、流纹斑岩、安山玢岩、英安质凝灰角砾岩以及闪长玢岩等共计31件,采样位置及岩性详见表2。

3.2 分析方法及结果

本次所采集的31件样品经前期处理后进行大量、微量元素以及稀土元素分析。测试分析工作在

表2 乌努格吐山铜钼矿床岩石采样位置

Table 2 Sampling sites of the Wunugetushan Cu-Mo deposit

样品编号	定名	点号	纬度	经度	海拔 H/m
WS-01	铜钼矿化二长花岗斑岩	P01	N49°25' 40.42"	E117°17' 31.58"	805
WS-02	绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P01	N49°25' 40.42"	E117°17' 31.58"	805
WS-03	安山玢岩	P01	N49°25' 40.42"	E117°17' 31.58"	805
WS-04	绢云母化二长花岗斑岩	P02	N49°25' 36.12"	E117°17' 37.90"	799
WS-06	硅化铜钼矿化二长花岗斑岩	P01	N49°25' 40.42"	E117°17' 31.58"	805
WS-07	绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P01	N49°25' 40.42"	E117°17' 31.58"	805
WS-09	绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P03	N49°25' 38.25"	E117°17' 44.20"	806
WS-11	安山玢岩	P03	N49°25' 38.25"	E117°17' 44.20"	806
WS-18	硅化绢云母化二长花岗斑岩	P05	N49°25' 52.30"	E117°18' 06.30"	825
WS-21	安山玢岩	P06	N49°25' 40.37"	E117°17' 42.27"	820
WS-22	含石英脉绢云母化二长花岗斑岩	P06	N49°25' 40.37"	E117°17' 42.27"	820
WS-25	绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P07	N49°25' 51.75"	E117°18' 11.38"	819
WS-26	高岭土化二长花岗斑岩	P07	N49°25' 51.75"	E117°18' 11.38"	819
WS-27	硅化二长花岗斑岩	P07	N49°25' 51.75"	E117°18' 11.38"	819
WS-30	流纹斑岩	P08	N49°25' 51.59"	E117°18' 18.83"	793
WS-31	流纹斑岩	P08	N49°25' 51.59"	E117°18' 18.83"	793
WS-32	硅化绢云母化黑云母二长花岗斑岩	P08	N49°25' 51.59"	E117°18' 18.83"	793
WS-34	安山玢岩	P09	N49°25' 50.82"	E117°18' 17.92"	789
WS-35	流纹斑岩	P09	N49°25' 50.82"	E117°18' 17.92"	789
WS-52	硅化含黄铁矿二长花岗斑岩	P15	N49°25' 55.62"	E117°18' 07.45"	795
WS-56	硅化二长花岗斑岩	P16	N49°25' 16.88"	E117°18' 23.11"	792
WS-58	含石英脉绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P17	N49°25' 28.23"	E117°18' 16.93"	790
WS-59	英安质凝灰角砾岩	P18	N49°25' 31.91"	E117°18' 19.43"	794
WS-63	硅化绢云母化二长花岗斑岩	P19	N49°25' 44.49"	E117°18' 27.15"	787
WS-66	闪长玢岩	P20	N49°25' 27.20"	E117°18' 43.05"	798
WS-67	黑云母二长花岗斑岩	P20	N49°25' 27.20"	E117°18' 43.05"	798
WS-76	流纹斑岩	P20	N49°25' 42.00"	E117°18' 37.97"	802
WS-79-1	绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩	P22	N49°25' 33.80"	E117°18' 30.17"	820
WS-79-2	高岭土化铜钼矿化二长花岗斑岩	P22	N49°25' 33.80"	E117°18' 30.17"	820
WS-87	含石英脉弱钾化花岗斑岩	P23	N49°25' 18.16"	E117°18' 33.71"	802
WS-88	高岭土化二长花岗斑岩	P23	N49°25' 18.16"	E117°18' 33.71"	802

澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。其中,全岩主量元素分析结果见表3,采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融,X射线—荧光光谱法分析,报13种构岩元素及烧失量(LOI),检测元素而后换算成氧化物,氧化物的检测限为1%~100%,其中 Fe_2O_3 数据指全铁含量, FeO 单独分析,使用酸消解、重铬酸钾滴定测量。稀土、微量元素分析采用硼酸锂熔融、等离子质谱定量,报31种元素,即Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、La、Lu、Nd、Pr、Sm、Tb、Th、Tm、U、Y、Yb、Cs、Ga、Hf、Nb、Rb、Sr、Tl、Ba、Cr、Sn、Ta、V、W、Zr。其余微量元素分析采用四酸消解,质谱/光谱仪综合分析,稀土、微量元素测试结果分别列于表4和表5。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

主量元素中,受矿化过程中硅化等蚀变作用的影响,矿区样品的 SiO_2 含量普遍偏高,其中流纹斑岩含量最高,分布于76.91%~79.5%;二长花岗斑岩和黑云母二长花岗斑岩为62.6%~81.82%;安山玢岩在65%附近;闪长玢岩 SiO_2 仅为51.8%。矿区岩石中 Al_2O_3 含量均在10%以上,其中二长花岗斑岩和黑云

母二长花岗斑岩平均含量分别为15.9%和12.6%;而在安山玢岩和闪长玢岩中含量均大于17%;矿区内岩石样品普遍发育有绢云母化蚀变,导致其 Al_2O_3 含量平均13.8%,铝饱和指数 A/CNK 变化范围(1.06~8.48)>1,属铝饱和型(图4)。 Na_2O 含量分布区间较大,二长花岗斑岩和黑云母二长花岗斑岩中大都分布于0.10%~0.40%,另有个别样品大于2%,最大为3.62%;而各类侵入岩脉中 Na_2O 含量出现较大的差异,其中安山玢岩、流纹斑岩、凝灰质角砾岩的平均含量分别为1.42%、0.25%、0.13%;闪长玢岩中含量较高,为3.15%。矿区岩石中 K_2O 明显高于 Na_2O 含量,二长花岗斑岩、黑云母二长花岗斑岩的含量为4%~5%;安山玢岩和流纹斑岩的平均含量分别为5.6%、1.35%,可以明显看出,矿区内岩石显示出高钾的特征,在 SiO_2-K_2O 岩石系列判别图中,样品投点于高钾钙碱性和钾玄岩系列(图5)。矿区岩石中 CaO 含量极低,部分样品中含量未能检测出。 MgO 的含量差异较大,其中二长花岗斑岩、黑云母二长花岗斑岩的含量在0.2%~0.6%,流纹斑岩和安山玢岩的含量分别降低至0.3%、0.12%左右,但是凝灰质角砾岩和安山玢岩的含量分别为0.67%和2.81%。总

表3 乌努格吐山铜钼矿岩石主量元素组成(%)

分析项目	WS-01	WS-02	WS-03	WS-04	WS-06	WS-07	WS-09	WS-11	WS-18	WS-21	WS-22	WS-25	WS-26	WS-27	WS-30	WS-31	WS-32	WS-34	WS-35	WS-52	WS-56	WS-58	WS-59	WS-63	WS-66	WS-67	WS-76	WS-79-1	WS-79-2	WS-87	WS-88	
SiO ₂	73.94	66.5	64	74.32	85.4	72.8	70.4	65.42	81.82	62.69	76.07	70.4	62.6	73.23	76.91	77.88	79.45	64.89	79.51	74.89	76.19	78.6	67.93	73.2	51.8	73.7	79.5	75.78	72.15	66.5	68.1	
TiO ₂	0.37	0.77	0.79	0.4	0.21	0.44	0.37	0.7	0.04	0.82	0.25	0.44	0.52	0.42	0.06	0.06	0.04	0.65	0.11	0.22	0.16	0.17	0.22	0.22	0.22	0.91	0.15	0.05	0.2	0.26	0.3	0.27
Al ₂ O ₃	14.42	18.1	19.01	13.45	7.25	15.8	15.5	16.88	10.82	20	13.48	15.2	23.6	14.71	13.72	13.18	10.93	17	12.31	13.21	12.45	11.65	13.76	14.7	19.3	13.2	12	12.46	13.41	15.4	15.2	
Fe ₂ O ₃	1.68	2.94	1.91	0.16	1.21	1.48	0.72	1.91	0.96	1.8	1.57	2.11	1.4	2.04	0.46	0.05	1.65	1.59	0.1	2.9	2.31	0.16	2.13	2.07	3.7	0.3	0.34	2.91	4.4	2.02	1.42	
FeO	0.19	0.38	0.13	0.06	0.13	0.19	0.06	0.13	0.19	0.26	0.32	0.64	0.25	0.26	0.19	0.06	0.38	1.91	0.06	0.19	0.45	0.32	2.42	0.38	3.33	1.02	0.19	0.32	0.38	1.84	1.14	
MnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.31	0.43	0.22	0.33	0.45	0.58	0.29	0.41	0.15	0.1	0.24	0.29	0.12	0.39	0.35	0.25	0.67	0.42	2.81	0.3	0.12	0.42	0.45	0.36	0.56
MnO	0.58	0.44	0.32	0.35	0.28	0.53	0.31	0.43	0.22	0.33	0.45	0.58	0.29	0.41	0.15	0.1	0.24	0.29	0.12	0.39	0.35	0.25	0.67	0.42	2.81	0.3	0.12	0.42	0.45	0.36	0.56	
CaO	0.01	0.06	0.1	0.03	0.02	0.02	0.22	0.36	<0.01	0.25	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.32	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	0.01	0.11	0.48	0.48	0.12	0.15	1.91	3.15	0.17	1.03	0.18	0.24	0.09	0.22	0.07	0.1	0.16	2.59	0.11	0.19	0.19	0.43	0.13	0.22	3.75	3.62	0.57	0.14	0.15	2.76	2.9	
Na ₂ O	4.48	3.12	7.43	7.3	1.99	3.78	7.78	6.17	3.21	5.75	3.71	4.28	2.42	4.53	4.15	4.85	3.36	3.76	4.91	4.04	3.8	6.67	5.32	5.05	1.38	4.07	4.06	3.9	4.22	5.12	5.18	
P ₂ O ₅	0.07	0.12	0.15	0.06	0.09	0.1	0.13	0.22	0.03	0.08	0.07	0.06	0.07	0.04	0.03	0.02	0.03	0.14	0.04	0.04	0.05	0.06	0.1	0.08	0.19	0.05	0.03	0.04	0.12	0.12	0.12	
LOI	2.96	6.51	5.3	1.63	2.21	4.17	2.06	3.56	2.24	6.78	3.51	4.08	8.12	3.22	3.75	3.4	2.51	6.36	2.83	3.64	3.28	1.55	5.5	3.59	4.37	2.06	3.06	3.4	4.44	4.22	3.69	
Total	98.91	99	99.62	98.24	98.9	99.4	99.5	98.92	99.7	99.79	99.63	98	99.3	99.08	99.5	99.7	98.74	99.58	100.1	99.71	99.23	99.87	99.59	100	99.4	99.6	99.9	99.9	99.6	99.6	99.7	
DI	85.83	77.2	84.98	93.34	91.9	83.7	93.3	89.83	90.24	81.86	86	82.6	73.2	85.37	88.78	91.37	88.61	81.1	92.26	85.44	86.11	94.35	76.95	85.7	42.3	89.6	91.8	85.51	82.49	83.5	85.6	
SI	8.02	6.12	3.11	4.16	7.41	8.5	2.87	3.64	4.5	3.53	6.95	6.91	6.28	5.39	2.89	1.91	3.95	2.39	2.24	5.05	4.71	3.06	5.1	4.99	15.4	2.88	2.2	5.36	4.63	2.57	4.53	
ε ₄₃	0.7	0.42	2.83	1.91	0.11	0.51	3.39	3.73	0.29	2.18	0.45	0.73	0.3	0.74	0.52	0.7	0.34	1.77	0.69	0.55	0.48	1.41	1.16	0.91	2.83	1.92	0.58	0.49	0.64	2.59	2.55	

来说,乌努格吐山矿区内岩石具有富硅碱,贫钛、钙、镁,过铝质的特征。

4.2 微量元素

黑云母二长花岗岩ΣREE分布于2个范围,分别为67×10⁻⁶~77×10⁻⁶以及106×10⁻⁶~117×10⁻⁶,ΣREE较小的黑云母二长花岗岩通常发育有硅化蚀变,并且其δEu也仅仅是略微亏损,而较大ΣREE的黑云母二长花岗岩Eu明显亏损。二者的LREE/HREE也略有差异,分别分布于6以及7~14这2个范围,说明在成矿过程中发生了HREE元素的相对带出。流纹斑岩的ΣREE分布于48×10⁻⁶~94×10⁻⁶,其δEu在0.45~0.64,和矿区另一侵入岩安山玢岩存在着显著性差异,安山玢岩的ΣREE在158×10⁻⁶~175×10⁻⁶,其δEu为0.78~0.95。根据野外各侵入岩之间的接触关系以及下文中Eu的相对元素得失量的计算,蚀变过程中随着Eu元素不断带入,δEu由内向外逐渐呈现递增的趋势。矿区各种侵入岩的LREE/HREE分布不均一,但均呈轻稀土富集型(图6)。

矿区各类侵入岩具有相同的特征,其Rb、Th、U、K元素明显富集,La、Ce、Nd、Sm等元素相对富集,Sr、P、Y相对亏损。二长花岗岩斑岩以及黑云母二长岩中富集Rb、K等高场强元素(HFSE),亏损Ti、Hf等,这可能是由于花岗岩源自下地壳的部分熔融。

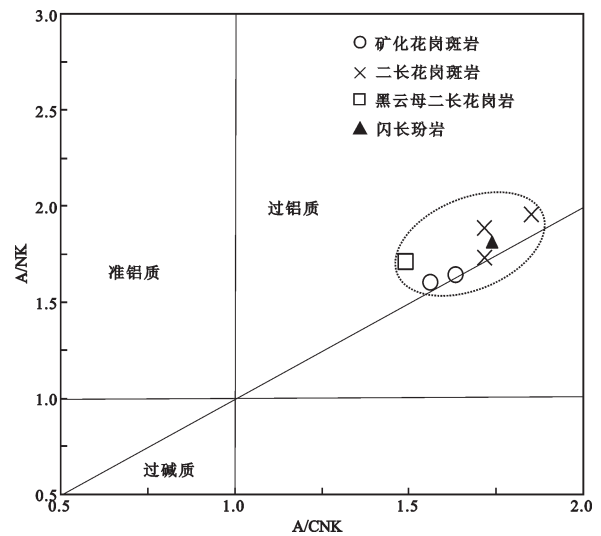


图4 乌努格吐山铜钼矿岩石 A/CNK-A/NK 判别图解 (底图据文献[23])

Fig. 4 A/CNK-A/NK discriminant diagram of rocks in the Wunugetushan Cu-Mo deposit (base map after Reference [23])

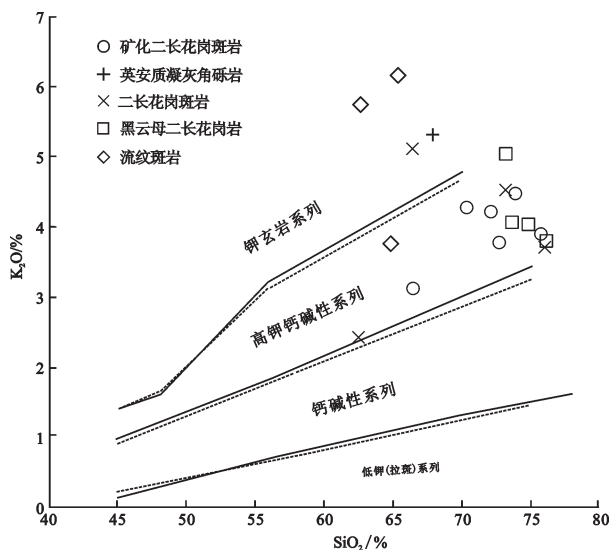


图5 乌努格吐山铜钼矿岩石 SiO_2 - K_2O 岩浆系列判别图
(底图据文献[24, 25])

Fig. 5 SiO_2 - K_2O discrimination plot of rocks in the Wunugetushan Cu-Mo deposit (base map after References [24, 25])

在矿区岩石中, Sr 呈明显亏损的特征, 这可能与斜长石的分离有关。乌努格吐山矿区各侵入岩样品在稀土元素配分曲线图和微量元素蛛网图中都表现出非常好的一致性(图6)。

5 元素迁移

由于乌努格吐山矿床热液蚀变严重, 根据样品采集的位置将样品归为石英-钾长石带(Q-Kf)、石英-绢云母-水白云母带(Q-S-H)以及伊利石-水白云母带(I-H)3类。对元素进行定量迁移, 首先要确定不活动元素。不活动元素是指其本身在开放系统中没有增益和亏损, 或者其增益和亏损相对系统自身和系统中其他活动元素而言可以忽略, 因此能够用来监测系统过程中的物质带入带出和体积变化^[28]。确定蚀变过程中的不活动元素主要包括经验判断法、等浓度图解法及坪台法等。本文拟采用坪台法和等浓度线法这2种方法对花岗岩岩石(黑云母二长花岗岩、矿化二长花岗斑岩、二长花岗斑岩)中的成矿元素进行评价。

5.1 等浓度线法

5.1.1 确定不活动元素

依据龚庆杰^[29]利用相关性分析的研究, 选取

Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 、 Nb 、 Hf 、 Ta 、 Th 、 U 、 Zr 和 Y 等元素作为备选的不活动元素, 选择 WS-19(黑云母二长花岗岩)、WS-79-1(绢云母化铜钼矿化二长花岗斑岩)和原点元素(各元素含量为0)做相关性分析, 在显著性检验 $r=0.994$ 水平上确定出不活动元素群和协变元素群如表7所示。

由相关系数矩阵可见, 元素群 Al_2O_3 - U - Zr 显著相关, 因此选择后 Al_2O_3 - U - Zr 作为不活动元素群。

5.1.2 迁移计算结果

选择 Al_2O_3 - U - Zr 作为不活动元素群, 同时选择黑云母二长花岗岩样品 WS-67 作为原岩, 对矿区内的主要岩石类型做 Isocon 图(制图过程中使用 excel2013 软件, 并且对于 Hf - Ta - Zr 3 种元素做方程拟合, 相关系数 R^2 都在 0.98 以上)。

在 $C_i^A-C_i^0$ 图解中(图7), 活动性较弱或不活动的元素位于等浓度线附近, 在等浓度线以上的元素表示相对原岩含量增高, 在等浓度线以下的元素表示相对原岩含量降低。根据 Grant 方程可以算出元素质量迁移量 ΔC_i 、元素质量变化百分率 $\Delta C_i/C_i^0$, 元素质量迁移量 (ΔC_i) 为正值时表示该元素发生带入作用, 即富集; 元素质量迁移量 (ΔC_i) 为负值时表示该元素发生带出作用, 即贫化^[30]。

5.2 坪台法

5.2.1 确定质量比率

确定质量比率(MR)的过程如下: 坪台法通常选取 Ta、Nb、U、La、Zr、Hf、Al、Th、Sc、Ti、Yb 和 Y 共 12 种元素来计算质量比率(MR)^[31], 首先计算 3 类样品中的 12 种元素的平均值, 而后计算 (Q-S-H)/(Q-Kf)、(I-H)/(Q-Kf)、(I-H)/(Q-S-H) 的比值, 通过最终计算彼此比值的平均数(图8)来确定质量比率(MR), 以期对元素迁移进行定量描述。

在蚀变过程中不活动元素蛛网图(图8)中: Ta 和 Nb 比较孤立, 首先可以排除其作为不活动元素。由于 Zr、Hf 两元素相似的地球化学性质, 可将其视为协变元素, 也不做考虑。Yb、Y 这 2 种元素形成一坪台, 坪台值(即不同类岩石某一元素平均含量的比值)的分别为 1.0811 和 1.0834, 但与其他元素误差较大, 也排除掉。U 和 La、Al 和 Th、Sc 和 Ti、Yb 和 Y 这 4 组元素分别形成 4 个坪台, 并且这 4 个坪台的中位值相差约 10%, 在数据处理的允许误差范围之内, 因此可将 4 个坪台合并成 1 个坪台, 8 个数据变化在 0.8481~

表4 乌努格吐山铜钼矿岩石稀土元素组成 (10^{-6})
Table 4 The REE concentrations (10^{-6}) of rocks in the Wunugutushan Cu-Mo deposit

分析项目	WS-01	WS-02	WS-03	WS-04	WS-06	WS-07	WS-09	WS-11	WS-18	WS-21	WS-22	WS-25	WS-26	WS-27	WS-30	WS-31	WS-32	WS-34	WS-35	WS-52	WS-56	WS-58	WS-59	WS-63	WS-66	WS-67	WS-76	WS-79-1	WS-79-2	WS-87	WS-88	
La	20.8	17.5	25.4	26.4	11.2	29.6	17.8	30.5	17.7	29.7	26.5	20.3	14.1	17.4	12.9	9.2	25.7	34.6	22.1	16.8	25	35	14.9	15.4	7.7	24	10.1	22.8	11.4	13.5	14.7	
Ce	40.6	39.2	74	53.1	20.4	57	38.3	71.8	34.1	76.8	47.4	39.9	50.8	33.7	31.3	22.7	46.5	75.7	43.3	31.2	43.9	65	32.1	30.1	30.1	49.1	22.9	44.8	21.7	32.2	33.2	
Pr	4.5	4.8	8	5.9	2.3	6.3	4.1	7.8	3.7	8.5	5	4.3	5.5	3.6	3.8	2.5	5	8.8	4.7	3.5	4.6	7	3.6	3.3	3.8	5.3	2.8	4.8	2.3	3.7	3.6	
Nd	15.7	19.5	30.4	21.6	8.7	23.1	15.4	27.9	12.9	32.4	17.4	15.2	19.9	12.8	14.8	9	17	33.6	16.9	12.5	15.4	24.4	13.5	12.2	17	18.7	10.1	16.9	8.2	14.7	13.6	
Sm	2.5	3.7	5.4	4.1	1.5	4.4	2.5	4.4	2.7	5.6	3.1	2.6	3	2.1	3.6	1.6	3.3	6.3	2.8	2.3	2.8	4.2	2.5	2	3.9	3.7	2.3	3.1	1.3	2.8	2.4	
Eu	0.7	0.9	1.4	0.9	0.5	1	0.9	1.2	0.2	1.7	0.7	0.7	0.9	0.5	0.6	0.2	0.3	1.5	0.5	0.4	0.4	0.6	0.9	0.6	1.3	0.5	0.4	0.5	0.3	0.9	0.8	
Gd	1.8	2.7	4.2	3.7	1.2	4.1	1.9	3.2	3	5.2	2.8	2.1	2	1.5	1.8	1	3.3	5.1	1.8	2	2.7	4.3	2.2	1.6	4.1	3.6	1.6	2.9	0.8	2.6	1.8	
Tb	0.3	0.4	0.6	0.6	0.2	0.7	0.2	0.4	0.6	0.8	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.7	0.2	0.3	0.5	0.8	0.4	0.2	0.6	0.6	0.3	0.5	0.1	0.4	0.3
Dy	1.5	2.1	3.8	3.7	1.1	4.9	1.2	2.1	4.2	4.7	2.9	1.6	1.2	1.2	0.9	0.9	3.8	3.7	1	1.9	3.4	5	2	1.2	3.9	4.1	1.5	3.1	0.6	2.4	1.5	
Ho	0.3	0.4	0.7	0.8	0.2	1.1	0.2	0.4	0.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8	0.7	0.2	0.4	0.8	1.1	0.4	0.2	0.9	0.9	0.3	0.7	0.1	0.5	0.3	
Er	0.9	1.2	2	2.3	0.6	3.3	0.6	1.1	2.9	3	1.7	0.9	0.6	0.6	0.5	0.5	2.6	1.9	0.5	1.2	2.4	3.4	1.2	0.5	2.3	2.8	0.8	2	0.3	1.4	0.8	
Tm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.5	0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.6	0.2	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	
Yb	0.9	1.1	1.8	2.4	0.5	3.5	0.5	0.9	3.3	2.5	1.8	0.9	0.6	0.8	0.5	0.5	3.1	1.8	0.5	1.5	2.9	3.7	1.2	0.4	2.3	3.3	0.8	2.4	0.5	1.3	0.9	
Lu	0.1	0.2	0.3	0.4	0.1	0.5	0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1	0.2	0.5	0.6	0.2	0.1	0.3	0.5	0.1	0.4	0.1	0.2	0.1	
Y	8.2	10.9	21	21.1	6.9	32.3	6.7	13.7	27.4	36.3	17.2	8.3	6.1	6.1	4.7	4.7	25.7	19.3	5.1	12.7	23.2	32.2	12.3	5.5	22.4	27.4	8.3	20	3.5	17.4	8.9	
ΣREE	91.7	93.7	126.9	52.4	145	83.5	91.5	116	91.2	78.9	119.4	79.9	58.8	110.5	70.5	117.4	105.9	72.7	70.7	83.2	61.6	86.8	81.8	96.2	73.4	128	162	175.6	98.7	73.9	49.8	
ΣLREE	85.8	85.4	112.6	48.4	126	78.7	75.6	105.1	84.9	74.2	104.3	72.2	27.7	96.9	66.2	101.1	93.6	63.7	64.9	79	57.1	76.5	76.8	82.8	69.8	101	144	161.1	94.3	69.6	46.3	
ΣHREE	5.9	8.3	14.3	4	18.6	4.8	15.9	10.9	6.3	4.7	15.1	7.7	31.1	13.6	4.3	16.3	12.3	9	5.8	4.2	4.5	10.3	5	13.4	3.6	26.8	18.1	14.5	4.4	4.3	3.5	
LREE/HREE	14.54	10.3	7.87	12.1	6.77	16.4	4.75	9.64	13.48	15.79	6.91	9.38	0.89	7.13	15.4	6.202	7.61	7.078	11.19	18.81	12.69	7.427	15.36	6.18	19.4	3.77	7.95	11.11	21.43	16.2	13.2	
La _N /Yb _N	16.58	11.4	7.89	16.07	6.07	25.5	3.85	10.56	16.18	15.6	5.95	8.03	0.44	6.18	27.62	5.22	6.81	7.45	11.72	25.97	14.82	6.78	16.86	5	30.8	2.56	8.52	13.79	31.7	18.5	13.2	
δEu	0.96	0.83	0.69	1.1	0.71	1.21	0.21	0.71	0.89	0.82	0.27	0.56	0.1	0.44	0.99	0.413	0.502	1.003	1.128	0.974	1.089	0.591	1.058	0.34	1.14	0.24	0.95	0.784	0.637	0.64	0.45	
δCe	1.01	1.02	1.01	1.11	1.05	1.1	1.04	1.04	1.11	1.08	1.11	1.08	1.11	1.23	1.03	1.07	1.02	1.01	0.96	0.97	0.97	0.93	0.97	1.07	1.09	1.04	1	1.04	1.08	1.17	1.19	

表5 乌努格吐山铜钼矿岩石微量元素组成 (10^{-6})
Table 5 Trace element concentrations (10^{-6}) of rocks in the Wunugutushan Cu-Mo deposit

分析项目	WS-01	WS-02	WS-03	WS-04	WS-06	WS-07	WS-09	WS-11	WS-18	WS-21	WS-22	WS-25	WS-26	WS-27	WS-30	WS-31	WS-32	WS-34	WS-35	WS-52	WS-56	WS-58	WS-59	WS-63	WS-66	WS-67	WS-76	WS-79-1	WS-79-2	WS-87	WS-88			
Ag	0.6	0.8	0.1	0.2	0.3	0.6	0.4	0	0.2	0	0.3	0.8	0.5	0.2	<0.01	0	0.7	0	0	0.2	1.1	0.4	0.5	0.6	0.3	0.2	<0.01	0.2	0.3	0.8	1.1			
As	1.1	11.8	3.8	4.6	5.5	41.4	10.5	5.1	61.5	24	7.1	305	88.1	105.5	15.1	2.5	102	9.4	6.5	36.8	52.9	6.5	43.7	67.1	8.2	2.6	5.5	30.3	30.7	48.7	11.9			
Ba	620	340	740	400	1190	880	300	360	790	480	440	360	490	1120	130	270	470	150	530	200	740	1620	670	300	590	330	420	520	730	750				
Be	1.3	1.5	1.4	0.9	0.8	1.5	1.1	1.2	1.2	1.4	0.9	1.7	1.5	1.8	2	1.5	1.7	2.4	1.4	1.9	0.9	2.2	2.2	0.9	2.4	2.2	1.7	1.7	2.1	2.1				
Bi	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	2.6	0.3	0.5	0.1	0.1	0.3	0.6	1.1	5.8			
Cd	<0.5	0	<0.02	<0.02	<0.5	<0.5	0.1	<0.02	0	<0.02	<0.02	0.1	<0.02	<0.02	0	2	0	0	0.1	<0.5	2.2	0.1	0.3	0.4	<0.02	0	0	3.9	4.6					
Ce	41.6	39	55.2	53.7	24.2	61.5	38	65.4	38.4	65.9	52.4	41.8	33.4	37.8	33.9	23.8	53	76.3	47.3	36.7	48.7	72.2	33.1	32.7	21.3	48.9	26.1	45.5	23.3	28.1	29.8			
Co	5	11.2	1	0.1	4.3	5.5	1.3	0.7	3.2	1	7.3	13.3	6.3	7.4	0.3	0.5	4.9	17.1	0.4	4.8	12.1	0.5	5.5	4	13.8	1.2	0.2	6.7	11.6	10	5			
Cr	5	44	28	1	2	1	2	26	<1	27	6	5	5	3	<1	<1	25	<1	1	<1	1	<1	1	1	12	<1	<1	1	2	4	2			
Cs	1.4	3.4	6.2	2.4	0.4	1.5	4.3	4	0.3	5.1	0.9	0.7	1.8	0.5	6.4	4.5	0.6	4.6	7.2	0.4	1.4	0.7	6.8	1.8	7	4	14.9	0.4	0.4	4	4.5			
Cu	486	4990	154.5	127.5	1435	3020	3900	1130	1500	163	926	5060	3200	564	181	401	5140	527	573	838	5140	2560	513	3130	40.5	10.9	56.6	1960	1850	441	328			
Ga	17.2	25.2	20.3	12.8	9.6	18.9	15.4	20.5	11.9	22.7	16.5	17.2	18.3	19.2	17.8	15.1	15.8	19.9	15.5	18.1	16.7	11	16.6	17.6	18.5	14.3	16	15.2	18.2	21.4	21.7			
Ge	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1			
Hf	2.2	3	4.6	1.2	0.8	1.9	0.9	4	2.4	4.8	1.6	1.8	1.5	2	2.2	2	2.4	3.5	2.1	2	1.6	3.2	1	1.1	1.4	1.8	2	1.6	1.2	1.6	1.4			
In	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Li	14.7	54.3	171.5	8.6	5.6	45.1	16.4	50.4	6.2	90.6	20.2	21.1	39.8	12.5	66.7	84.7	6.8	60.3	98.7	5.8	6.8	10.8	19.9	12.4	14.5	8.3	37.1	5.7	5.8	5.5	6.2			
Mn	31	20	7	28	8	22	225	6	11	7	5	11	10	13	88	31	14	623	21	9	13	14	7570	13	2130	446	60	7	5	3590	2300			
Mo	2660	18.4	16.8	16.7	2650	414	171	17.1	31.8	39.6	76.9	25	46.2	50.2	5.9	3.8	40.7	9.1	2.5	102.5	22.8	1290	8.2	11.7	1.2	0.6	1.4	196	107	15.6	3.7			
Nb	2.8	1.6	6.6	4	0.9	4	2.1	6.4	10.5	7	4.1	2	2.1	3.6	7	7.3	8.5	5.7	6.1	5.3	6.9	7.2	4.4	3	4.5	10.4	6.1	5.6	2.7	5.1	5.4			
Ni	2.2	12.6	5.9	0.7	1.4	0.9	2	4.7	0.4	4.8	2.6	4.4	3.5	0.9	<0.2	0.6	0.5	11.5	<0.2	1.3	0.9	0.3	1.3	1	9.3	<0.2	<0.2	0.5	2.2	5	2.7			
Pb	3.9	5.3	19.8	12.8	2.1	8.9	13.9	15.5	2.4	24.9	3.8	6.4	9.9	2.2	22.1	15.8	3.2	22.7	23	1.8	8.2	12.1	17.1	11.4	19.3	23.4	22	3.2	11.5	27.7	27.6			
Rb	76.2	70.2	123	77.8	34.1	71.4	67.5	95.6	62.7	119.5	67.4	91.3	41.1	108.5	85.3	93.6	72.5	82.6	97.2	74.2	81.2	73.5	143	82.4	20	138	104	77.1	117	118				
Re	0.7	0	<0.002	<0.002	0.3	0.1	0	<0.002	0	0	0	0	0	0	<0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<0.002	<0.002	<0.002	0.1	0	0	<0.002			
Sb	0.5	1.7	0.8	1	0.2	9.1	0.3	0.8	1.7	3.1	0.7	5.3	2.6	1.6	0.2	0.3	4.3	0.4	0.5	1.2	6.5	0.1	0.8	1.4	1.5	0.1	0.5	0.8	1	0.2	0.2			
Sc	3.8	6.5	8.3	5.8	1.8	6.8	2.7	5.3	2	5.9	4	4.3	2.6	2.3	1.5	1.2	2	7.8	1.4	2.7	3.6	4.5	2.5	2.4	13.4	3	1.7	3.6	2.6	3.8	3.4			
Se	2	3	1	1	3	2	1	1	2	1	2	2	2	2	<1	<1	3	1	3	1	2	4	2	1	2	1	<1	2	4	1	1			
Sn	6.9	5.8	1.2	4.7	3.9	7.5	2.2	1.2	8.1	1.4	6.9	7.1	2.8	9.1	0.8	0.9	7.8	1	0.8	5.8	13.7	4.9	1	5.5	1	1.7	0.8	7	7.3	2.3	1.4			
Sr	49.6	70.8	94.6	150	30.7	40.5	285	122.5	16.9	180	52.1	76.8	74.2	19.6	65.4	19.9	14.9	261	104	48	7.2	128	141.5	178	512	100	53	17.7	17.3	250	235			
Ta	0.5	0.1	0.5	0.3	0.1	0.3	0.1	0.5	1.3	0.5	0.4	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.5	0.3	0.2	0.3	1.1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.3			
Te	0.5	0.1	<0.05	<0.05	0.5	0.2	0.1	<0.05	0.2	0.2	0.1	0.2	<0.05	0.1	<0.05	<0.05	0.1	<0.05	<0.05	0.2	0.3	0.3	0.7	0.7	0.3	0.1	<0.05	0.3	0.5	1.1	3.3			
Th	4.4	2.8	12.2	10.3	3.1	12.7	2.4	12.3	8.8	12.8	8	3.6	3.9	3.2	10.4	7.9	13	38.7	7.8	9	13.5	11.3	4.6	3.4	1.8	17.9	6.5	15.8	5	2.9	3			
Tl	0.5	0.9	2	0.7	0.3	0.6	0.5	1	0.5	1.6	0.5	1.5	1.2	0.7	1.7	1.8	0.6	1.8	2	0.5	0.9	0.6	1.4	0.9	0.4	0.7	0.8	0.4	0.4	1.1	1.2			
U	1.2	2.3	2.1	0.8	0.8	1.6	0.9	1.4	1.4	1.4	1.7	2.4	2.2	0.8	2.6	2.7	3.5	1.6	1.6	2	1.9	1.5	2.3	0.5	3.2	0.9	2.9	1.2	2.5	2.1				
V	45	82	76	52	35	51	32	74	17	59	39	39	29	2	2	9	69	4	30	21	28	16	19	155	10	1	23	45	31	25				
W	11.9	49.5	14.8	10.5	7.2	15.5	6.4	7.2	8.6	8.2	12	24.5	12.5	29.7	3.7	4.2	8	3	3.2	8	16.1	10.1	11.7	10.1	2.3	5	0.8	11.8	13.3	7.8	5.9			
Zn	3	8	27	5	3	25	43	23	18	15	4	162	74	45	19	13	168	268	25	9	30	3	61.5	32	235	117	23	13	15	809	1710			
Zr	75.4	107	176.5	31.5	26.4	50.3	25.8	147.5	52	173.5	44.8	67.6	41.8	71.7	41.5	42.9	56	128.5	52.2	57.3	39.5	97.3	29.3	30.2	50.1	41.4	42.5	41.7	33.9	54.2	44.8			

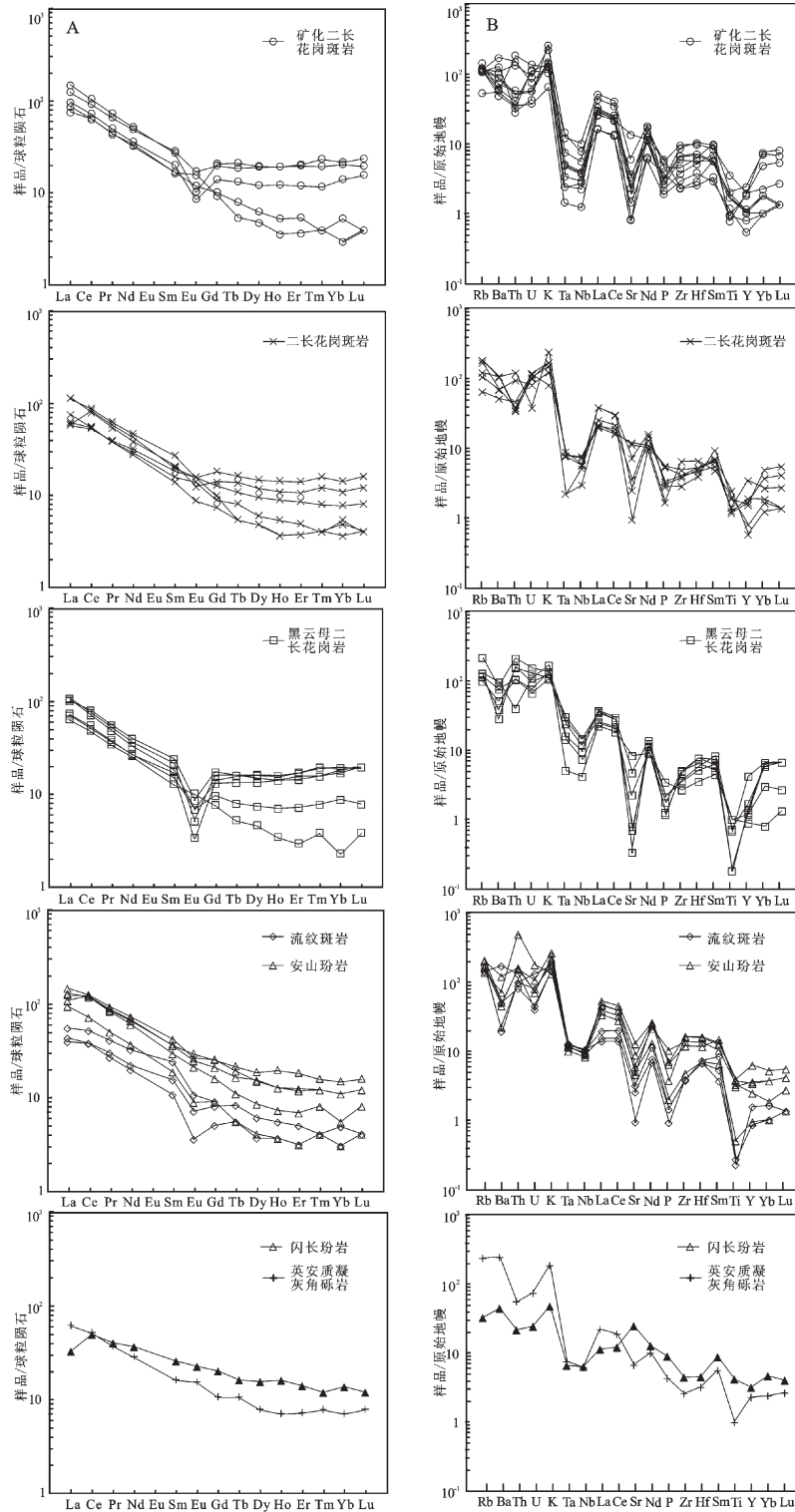


图6 乌努格吐山斑岩铜钼矿岩石稀土元素配分曲线(A)和微量元素蛛网图(B)
(球粒陨石标准化值据[26];原始地幔标准化值据[27])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (A, after Reference [26]), and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (B, after Reference [27]) for the rocks from the Wunugetushan Cu-Mo deposit

表7 相关系数矩阵
Table 7 Correlation coefficient matrix

	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Nb	Hf	Ta	Th	U	Zr	Y
TiO ₂	1									
Al ₂ O ₃	0.958	1								
Mn	0.290	0.554	1							
Nb	0.751	0.909	0.850	1						
Hf	0.941	0.999	0.596	0.930	1					
Ta	0.756	0.913	0.846	1.000	0.932	1				
Th	0.939	0.998	0.601	0.932	1.000	0.935	1			
U	0.947	0.999	0.583	0.923	1.000	0.926	1.000	1		
Zr	0.972	0.998	0.506	0.884	0.994	0.888	0.994	0.996	1	
Y	0.874	0.977	0.718	0.977	0.987	0.979	0.988	0.984	0.964	1

1.0834, 中位值为0.9542, 其对应的蚀变岩与原岩的质量比率MR(中位值的倒数)为1.05。

5.2.2 迁移计算结果

根据Gong等^[31]提出的相对得失量计算方法以及元素迁移定性描述建议, 选取WS-67为原岩样品, 进行定量分析。乌努格吐山矿区蚀变分带中元素相对得失率结果列于表8~9。

5.3 元素迁移特征

由于元素的地球化学特性以及成矿过程中温度、压力等其他环境的影响, 元素在各个蚀变分带中呈现一定的规律性。从2种方法计算的结果来看, 发生带入作用的元素主要是发生热液蚀变的元素、主成矿元素及其伴生元素。发生带出的元素既有常量元素, 又有微量元素。

主量元素中, 由内向外各种元素显示出不同的演化规律。S在石英-钾长石化带中表现出极度带入的特点, 向外其质量迁移比率逐渐加大。而矿区Fe₂O₃的迁移也呈现出由内向外质量迁移比率逐渐增大的特征, 结合矿区出现的黄铁矿化分析, S的质量迁移不仅控制了试验区内主成矿元素Cu、Mo的迁移和沉淀, 还控制了其他元素, 例如Fe的迁移和沉淀以及黄铁矿化的形成^[32]。SiO₂由内向外质量迁移比率变化显著, 在内带和外带均被带出, 在中间带则被带入, 这与在绢云母化蚀变过程中形成了大量的SiO₂相关。



Al₂O₃的质量迁移比率变化微弱, 属稳定元素。MgO由内向外逐渐被带入, 但其变化规模相对仍然较小。K₂O在内带中显示带入的特征, 而在外带则被带出, 这与钾化蚀变带的形成相关。

利用等浓度线法以及坪台法对稀土元素进行定量计算可以看出, Eu为带入元素, 并且由内向外其带出量逐渐递增。其他REE元素并无明显差异性变化, 基本呈现出由内向外逐渐带出, 并且带出量微弱递增。

通过两种质量迁移方法的计算, Se从内向外的质量迁移比率逐渐递增, 在最外带则显示为带出的特征。As从内向外的质量迁移比率均大于1000, 呈现出极度带入的特征。V从内向外也逐渐呈现带入的特征, 并在石英-绢云母-水白云母(Q-S-H)的迁移比率最高。通过对其他微量元素的分析, 迁移计算的结果呈现与王之田等^[17]相一致的微量元素分带特征, 即: 石英-钾长石化带为Mo-Cu-Ni-W-S-Se组合, 石英-绢云母化带为Cu-Mo-Co-V-F-Cl-As-Sb-Se组合, 伊利石水白云母化带为Ag-Zn-Pb-Cr-Rb-Sr-B-CO₂-As-Sb-Se组合的微量元素分带。

6 成矿过程讨论

乌努格吐山矿床主量元素迁移结果显示, SiO₂、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃由内向外带出的程度逐渐增强的特征。谭刚等^[33]对乌努格吐山矿床的流体包裹体进行研究, 其结果表明: 成矿早、中、晚3个阶段均一温度分别集中在340~460℃, 240~360℃和120~240℃。并且其中一晚阶段成矿流体不断有天水的

表8 乌努格吐山矿区蚀变分带中元素相对得失量

Table 8 The relative rates of gains and losses in alteration zoning in the Wunugetushan Cu-Mo deposit

元素	Q-Kf	Q-S-H	I-H	元素	Q-Kf	Q-S-H	I-H	元素	Q-Kf	Q-S-H	I-H
SiO ₂	-1.65	-4.43	-13.03	Cu	23491.09	20454.24	3259.55	Sb	852.38	1900.00	90.48
TiO ₂	30.16	108.68	80.95	Dy	-37.28	-44.56	-54.70	Sc	-25.40	17.88	14.29
Al ₂ O ₃	-5.05	2.15	10.39	Er	-40.48	-49.89	-62.59	Se	42.86	115.87	-4.76
Fe ₂ O ₃	166.67	506.98	446.03	Eu	4.76	20.63	61.90	Sm	-33.08	-25.87	-33.08
MgO	-15.87	28.68	46.03	Ga	-9.09	11.36	43.52	Sn	188.52	247.34	3.64
CaO	-81.12	-98.19	-49.38	Gd	-35.19	-35.10	-41.80	Sr	43.76	-38.53	130.95
Na ₂ O	-72.64	-94.58	-25.55	Ge	-52.38	-33.33	-52.38	Ta	-39.39	-72.29	-74.03
K ₂ O	28.58	-1.95	20.51	Hf	-12.70	-3.00	-20.63	Tb	-36.51	-37.57	-44.44
P ₂ O ₅	52.38	24.44	128.57	Ho	-41.80	-47.80	-57.67	Te	42.86	178.39	1995.24
Ag	42.86	112.70	352.38	La	-29.56	-17.75	-44.05	Th	-70.20	-61.16	-84.30
As	1218.68	1959.83	1009.89	Li	29.66	105.93	-32.87	Tl	-31.97	-6.58	56.46
Ba	0.08	-11.65	19.45	Lu	-42.86	-51.75	-71.43	Tm	-42.86	-54.29	-71.43
Be	-54.37	-41.80	-16.67	Mn	-74.80	-97.01	528.87	U	-65.77	-44.44	-31.55
Bi	-4.76	77.78	3185.71	Mo	15995.24	81437.57	1431.75	V	133.33	258.73	166.67
Cd	-88.10	-91.07	911.90	Nb	-42.31	-64.96	-51.92	W	42.86	197.90	30.48
Ce	-29.78	-19.65	-36.57	Nd	-27.93	-16.78	-27.93	Y	-100.00	-49.79	-54.29
Co	78.57	391.53	495.24	Pb	-66.83	-73.27	12.54	Yb	-45.17	-53.63	-68.25
Cr	90.48	464.10	185.71	Pr	-29.92	-18.42	-34.41	Zn	-75.17	-69.12	925.23
Cs	-45.24	-72.54	1.19	Rb	-55.07	-49.63	-18.91	Zr	-10.51	27.74	13.87

表9 乌努格吐山元素迁移结果示意

Table 9 The result of element migration in the Wunugetushan Cu-Mo deposit

迁移程度	石英-钾长石带	石英-绢云母-水白云母化带	伊利石-水白云母化带
极度带出	Cu、Mo、S、As	Mo、Cu、S、As、Sb、Fe ₂ O ₃ 、Cr	Cu、Bi、S、Te、Mo、As、Zn、Cd、Mn、Co、Fe ₂ O ₃
强烈带出	Sn、Fe ₂ O ₃	Co、V、Sn、W、Te	Ag、Cr、V
中等带出	V、Cr、Co	Se、Ag、TiO ₂ 、Li、Bi	Sr、P ₂ O ₅ 、Sb、TiO ₂
微弱带出	P ₂ O ₅ 、Sr、Ag、Te、Se、W、TiO ₂ 、Li、K ₂ O	MgO、Zr	Eu、Tl、MgO、Ga、W
轻微带出		P ₂ O ₅ 、Eu、Sc、Ga	K ₂ O、Ba、Sc、Zr、Pb
轻微带出	Zr、Hf、MgO	Ba、Nd、La、Pr、Ce	SiO ₂ 、Be、Rb
微弱带出	Sc、Nd、La、Ce、Pr、Tl、Sm、Gd、Tb、Dy、Ta	Sm、Ge、Gd、Tb、Sr	Hf、Na ₂ O、Nd、U、Li、Sm、Pr、Ce
中等带出	Er、Ho、Nb、Lu、Tm、Yb、Cs、Ge、Be、Rb	Be、U、Dy、Ho、Rb、Y、Er、Lu、Yb、Tm	Gd、La、Tb、CaO、Nb、Ge、Y、Dy、Ho
强烈带出	U、Pb、Th、Na ₂ O、Mn、Zn	Th、Nb、Zn、Ta、Cs、Pb	Er、Yb、Lu、Tm、Ta
极度带出	CaO、Cd、Y	Cd、Na ₂ O、Mn、CaO	Th

生热液环流、上升、混合作用,环流体系中的高盐度溶液从正在冷却的岩体顶部和围岩中提取大量金属。随着天水增加,这种作用在石英绢云母化蚀变阶段进一步发展。Mo的主要载体矿物为斜长石,伊利石-水白云母化蚀变使黑云母花岗岩中的斜长石被交代,由于CO₃²⁻的络合作用Mo被析出转移到热液流体中去,然后发生迁移。就成矿晚阶段的Pb、Zn、Ag等成矿元素,在石英-钾长石化带以及石英-绢云母-水白云母带显示出带出的特征,而在伊

利石-水白云母带中则显示极度带出的特征,并且Pb、Zn在石英-钾长石化带比石英-绢云母-水白云母带出值更高,显示出从内向外呈迁出的特征,最后在伊利石-水白云母带富集,形成了如今的矿化分带(图9)。

乌努格吐山矿区内矿石矿物的δ³⁴S集中在0~4‰^[9],分馏程度较低,与幔源硫的0±3‰值分布一致,表明硫主要来源于深部岩浆,但部分硫化物δ³⁴S比幔源硫稍大,这可能是少量地壳硫混入而导

致。同时矿区内成矿斑岩主要源于受流体交代的地幔源区,受到了部分上地壳物质的混染作用^[9]。蒙古—鄂霍茨克缝合带从蒙古的杭爱山脉一直延伸到鄂霍茨克海的乌达海湾,记录着西伯利亚板块、华北板块和古太平洋板块在古生代和中生代时期发展运动。鄂霍茨克断裂两侧岩浆岩同位素年代学研究表明,岩浆活动时代具有由西向东逐渐变新的特征(图10),指示蒙古—鄂霍茨克洋呈“剪刀”式闭合^[35]。余宏全等^[38]综合大兴安岭中北段大量单颗粒锆石的同位素年代学、岩石组合和构造特征研究,认为蒙古—鄂霍茨克洋在早中生代时期(晚三叠世)即已碰撞造山,大兴安岭中北段及额尔古纳地区发育大量与碰撞有关的花岗岩、混合岩及碰撞后伸展垮塌有关的构造和岩石产物。而前人也普遍认为乌努格吐山斑岩型铜钼矿形成于鄂霍茨克洋闭合后的碰撞环境中^[6, 9, 14, 38-40],属大陆碰撞造山带中的造山型矿床^[41],与晚侏罗世由于岩石圈减薄和陆壳重力塌陷而形成的岔路口钼矿^[42-44]存在显著差异。

7 结论

通过利用等浓度线法以及坪台法对乌努格吐山斑岩型铜钼矿床的元素进行迁移计算并对成矿过程进行探讨,得出以下结论:

(1)在矿床的形成过程中,温度不断降低,并且成矿流体的成分逐渐有天水的加入,盐度不断降低,导致 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 由内向外带出的程度逐渐增强,这与乌努格吐山蚀变分带特征矿物石英、钾长石、绢云母、水白云母的出现相一致,形成了石英-钾长石(Q-Kf)、石英-绢云母-水白云母(Q-S-H)以及伊利石-水白云母带(I-H)蚀变分带。

(2)成矿元素Cu、Mo在各蚀变分带中均显示极度带入的特征,但其带入的比率与如今的矿化分布显著相关,矿化强则带出比率高。Zn、Pb等则从内带向外带由带出变成带入,最终能够在最外带中富集。

致谢:野外工作期间,得到了中国黄金集团内蒙古矿业有限公司生产技术部赵春波经理、吕海栋、宋志伟工程师以及采矿厂高长义厂长、冯瑞、赵桂香、韩荣荣工程师等的鼎力支持,论文写作过程中得到了中国地质大学(北京)薛玉山、成少博、朱保霖硕士在数据分析、图件绘制等方面的帮助,审

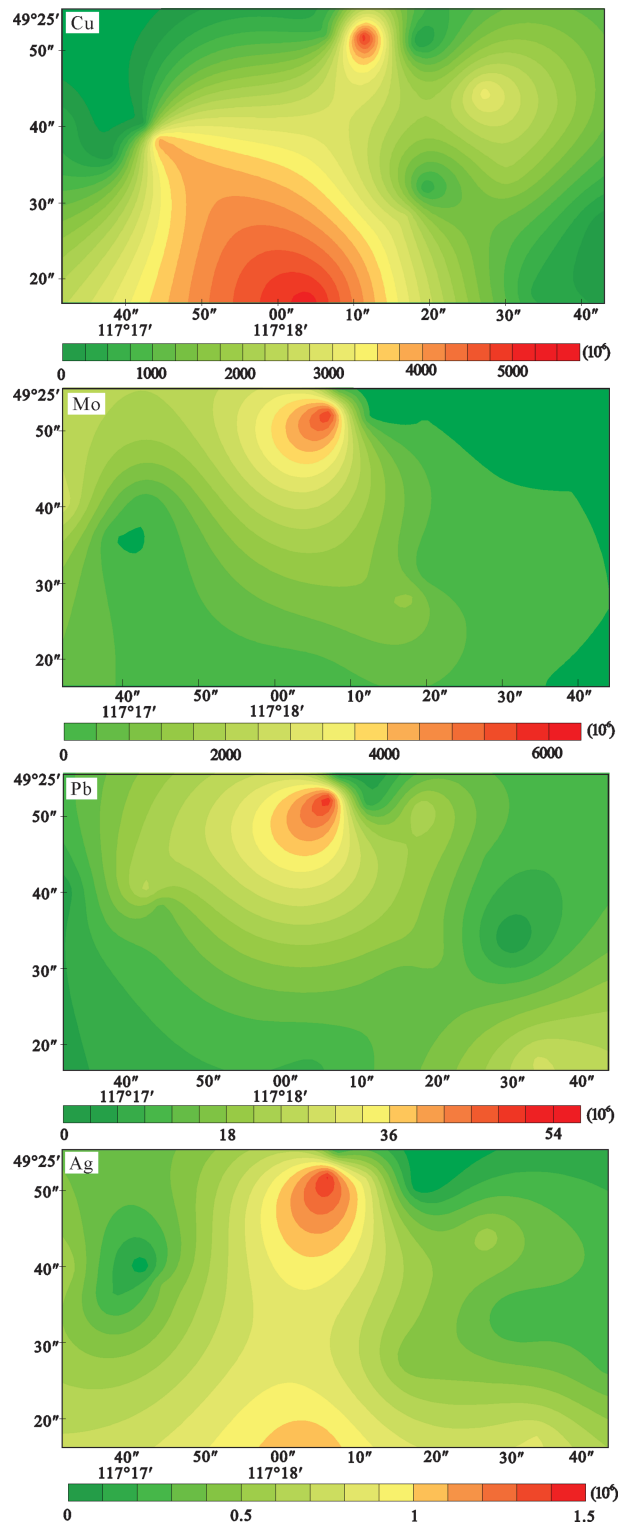


图9 乌努格吐山铜钼矿北矿段元素分布示意图
Fig. 9 Elements migration diagram of the north ore block in the Wunugetushan Cu-Mo deposit

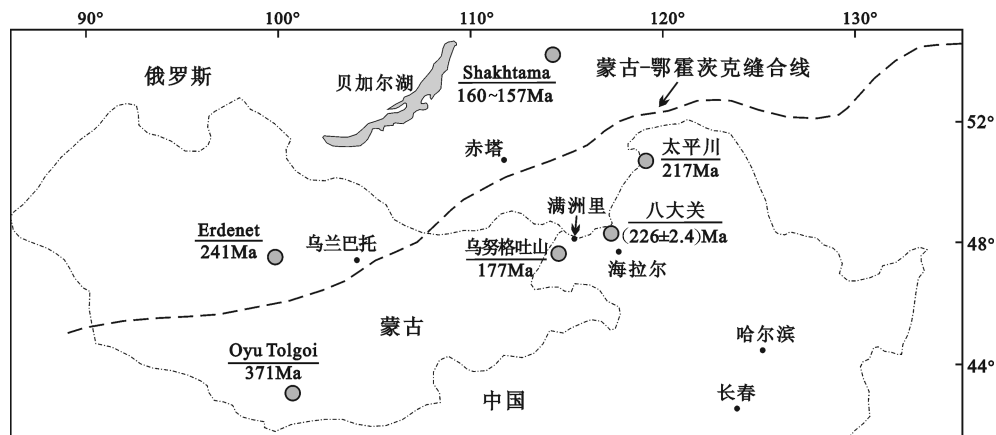


图10 鄂霍茨克断裂两侧斑岩型矿床年龄示意图(据[9, 35-37]修编)

Fig.10 Age schematic diagram of porphyry deposits on both sides of Okhotsk fracture(modified after References [9, 35-37])

稿专家及编辑杨艳博士的修改意见使本文结构和内容上更加完善,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 毛景文,周振华,丰成友,等. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1437-1471.
Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Feng Chengyou, et al. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1437-1471 (in Chinese with English abstract).
- [2] 艾金彪. 斑岩型矿床元素质量迁移定量探讨[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013: 1-90.
Ai Jinbiao. A Quantitative Discussion of Element Mass Migration in the Porphyry Deposits[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013: 1-90(in Chinese with English abstract).
- [3] 蔡宏渊,郭念伟. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床含矿杂岩,蚀变特征及其与成矿的关系[J]. 地质与勘探, 1985, (5): 13-19.
Cai Hongyuan, Guo Nianwei. The relationship between ore-bearing complex, alteration characteristics and mineralization in Wunuguetushan copper-molybdenum deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology and Prospecting*, 1985, (5): 13-19(in Chinese with English abstract).
- [4] 宋国利. 内蒙乌奴格吐山斑岩铜钼矿床地质特征[J]. 河北地质学院学报, 1985, 31(3): 46-55.
Song Guoli. Geologic characteristic of the porphyry copper and molybdenum deposit in Wunugetu mountain, Inner Mongolia[J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 1985, 31(3): 46-55(in Chinese with English abstract).
- [5] 陈殿芬,艾永德,李荫清. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床中金属矿物的特征[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 346-354.
Chen Dianfen, Ai Yongde, Li Yinqing. Characteristics of metallic minerals from the Wunuguetushan porphyry copper-molybdenum deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1996, 15(4): 346-354 (in Chinese with English abstract).
- [6] Chen Z, Zhang L, Wan B, et al. Geochronology and geochemistry of the Wunuguetushan porphyry Cu-Mo deposit in NE China, and their geological significance[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 92-105.
- [7] 秦克章,李惠民,李伟实,等. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床的成岩、成矿时代[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 180-185.
Qin Kezhang, Li Huimin, Li Weishi, et al. Intrusion and mineralization ages of the Wunuguetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, Northwestern China[J]. *Geological Review*, 1999, 45(2): 180-185(in Chinese with English abstract).
- [8] 谭刚. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011: 1-101.
Tan Gang. The Ore-Forming Processes and Mineralization of Wunuguetushan Porphyry Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011: 1-101(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈志广. 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[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2010: 1-195.
Chen Zhiguang. Mesozoic Tectonic-Magmatic Mineralization of Derbugan Metallogenic Belt in NE China, and Its Geodynamic Setting[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 1-195(in Chinese with English abstract).

- [10] 秦克章, 田中亮吏, 李伟实, 等. 满洲里地区印支期花岗岩Rb-Sr等时线年代学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(3): 235-240.
Qin Kezhang, Ryoji Tanaka, Li Weishi, et al. The discovery of Indo-Sinian granites in Manzhouli area: Evidence from Rb-Sr isochrons[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1998, 17(3): 235-240(in Chinese with English abstract).
- [11] 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床辉钼矿-钼等时线年龄及其成矿地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2551-2588.
Li Nuo, Sun Yali, Li Jing, et al. Molybdenite Re-Os isochron age of the Wunugetu porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia and its implication for metallogenic geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2551-2588(in Chinese with English abstract).
- [12] 任国栋. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床成矿模式探讨[J]. 地质与勘探, 1987, (8): 16-23.
Ren Guodong. A discussion on metallogenic model of Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit[J]. Geology and Prospecting, 1987, (8): 16-23(in Chinese with English abstract).
- [13] 叶欣, 王莉娟. 乌奴格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体与成矿作用研究[J]. 地质与勘探, 1989, 25(6): 14-21.
Ye Xin, Wang Lijuan. A study on fluid inclusion and metallogenic of a porphyry Cu and Mo deposit in Wunugetushan, Inner Mongolia, China[J]. Geology and Prospecting, 1989, 25(6): 14-21 (in Chinese with English abstract).
- [14] Li N, Chen Y J, Ulrich T, et al. Fluid inclusion study of the Wunugetu Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, China[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(5): 467-482.
- [15] 王之田, 秦克章. 满洲里-西旗斑岩铜多金属成矿系列REE地球化学特征及应用[J]. 地球化学, 1989, (4): 304-314.
Wang Zhitian, Qin Kezhang. REE geochemistry of porphyry copper multi-metal metallogenic series and its application in ore exploration in the Manzhouli- Xin- Baerhuyouqi area[J]. Geochimica, 1989, (4): 304-314(in Chinese with English abstract).
- [16] 秦克章, 王之田. 内蒙古乌奴格吐山铜-钼矿床稀土元素的行为及意义[J]. 地质学报, 1993, 67(4): 323-335.
Qin Kezhang, Wang Zhitian. Rare earth element behavior in the Wunugetushan Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(4): 323-335(in Chinese with English abstract).
- [17] 王之田, 秦克章. 乌奴格吐山下壳源斑岩铜钼矿床地质地球化学特征与成矿物质来源[J]. 矿床地质, 1988, 7(4): 3-15.
Wang Zhitian, Qin Kezhang. Geological-geochemical characteristics and metallogenic material sources of the Wunugetushan lower crust porphyry copper-molybdenum deposit[J]. Mineral Deposit, 1988, 7(4): 3-15(in Chinese with English abstract).
- [18] 武广. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色, 贵金属矿床成矿作用[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 1-221.
Wu Guang. Metallogenic Setting and Metallogenesis of Nonferrous-Precious Metals in Northern Da Hinggan Mountain[D]. Changchun: Jilin University, 2005: 1-221(in Chinese with English abstract).
- [19] 田景雄. 额尔古纳断裂构造特征及其构造背景[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 1-68.
Tian Jingxiong. The Structural Features and Tectonic Setting of Erguna Fault[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 1-68(in Chinese with English abstract).
- [20] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 615.
Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 615(in Chinese with English abstract).
- [21] 龚庆杰, 周连壮, 胡杨, 等. 胶东玲珑金矿田煌斑岩蚀变过程元素迁移行为及其意义[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 1065-1077.
Gong Qingjie, Zhou Lianzhuang, Hu Yang, et al. Element transfer behaviors and its application during lamprophyre alteration in the Linglong gold deposit, Jiaodong peninsula, China[J]. Geoscience, 2012, 26(5): 1065-1077(in Chinese with English abstract).
- [22] Grant J A. The isocon diagram: A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [23] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [24] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58(1): 63-81.
- [25] Middlemost E A. Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology[M]. London: Longman Group United Kingdom, 1985: 1-280.
- [26] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteoric studies[J]. Rare Earth Element Geochemistry, 1984, 63-114.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [28] 邓海琳, 涂光焱, 李朝阳, 等. 地球化学开放系统的质量平衡: 1. 理论[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 121-131.
Deng Hailin, Tu Guangchi, Li Chaoyang, et al. Mass balance of open geochemical systems: 1 theory[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19(2): 121-131(in Chinese with English abstract).
- [29] 龚庆杰, 韩东昱, 刘宁强. 安徽铜陵冬瓜山铜矿矽卡岩形成过程中元素质量迁移——与凌其聪等同行探讨[J]. 矿床地质, 2006, (S1): 119-122.
Gong Qingjie, Han Dongyu, Liu Ningqiang. Immobile elements

- discrimination and mass balance calculation in the skarn-forming process of the Dongguashan copper deposit, Tongling area, Anhui Province: A comment on opinions held by Ling Qicong et al. [J]. *Mineral Deposits*, 2006, (S1): 119–122(in Chinese).
- [30] 艾金彪, 马生明, 樊连杰. 内蒙古乌努格吐山斑岩型铜钼矿床元素迁移定量探讨[J]. *地球学报*, 2013, 34(2): 193–202
Ai Jinbiao, Ma Shengming, Fan Lianjie. A quantitative discussion on element mass migration in the Wunugetushan porphyry Cu–Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013, 34(2): 193–202(in Chinese with English abstract).
- [31] Gong Q, Deng J, Yang L, et al. Behavior of major and trace elements during weathering of sericite–quartz schist[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(1): 1–13.
- [32] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1–283.
Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, et al. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1–283(in Chinese with English abstract).
- [33] 谭钢, 余宏全, 印建平, 等. 内蒙古乌努格吐山大型铜钼矿床成矿流体来源及演化: 流体包裹体及氢氧同位素地球化学证据[J]. *世界地质*, 2013, 32(3): 463–482.
Tan Gang, She Hongquan, Yin Jianping, et al. Source and evolution of ore–fluid in Wunugetushan large Cu–Mo deposit, Inner Mongolia: Evidence from fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotopic geochemistry[J]. *Global Geology*, 2013, 32(3): 463–482(in Chinese with English abstract).
- [34] 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 碰撞造山型斑岩铜钼矿蚀变分带模式——以西藏冈底斯斑岩铜矿带为例[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 201–214.
Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al. The alteration zoning model of porphyry copper deposit in collision orogeny: Case studies of porphyry copper deposits in Gangdise belt, Xizang (Tibet)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 201–214(in Chinese with English abstract).
- [35] Mao J, Pirajno F, Lehmann B, et al. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79(B): 576–584.
- [36] 王成文, 金巍, 张兴洲, 等. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. *地层学杂志*, 2008, 32(2): 119–136.
Wang Chengwen, Jin Wei, Zhang Xingzhou, et al. New understanding of the Late Paleozoic tectonics in northeastern China and adjacent areas[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(2): 119–136(in Chinese with English abstract).
- [37] 李春风, 柳振江, 宓奎峰, 等. 内蒙古八大关斑岩型铜钼矿床形成时代与成因分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 1253–1269.
Li Chunfeng, Liu Zhenjiang, Mi Kuifeng, et al. The age and genesis of the Badaguan porphyry copper–molybdenum deposit in the Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 1253–1269 (in Chinese with English abstract).
- [38] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U–Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571–594.
She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, et al. U–Pb ages of the zircons from primary rocks in middle–northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 2012, 28(2): 571–594(in Chinese with English abstract).
- [39] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2085–2108.
Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 23(9): 2085–2108(in Chinese with English abstract).
- [40] 祁进平, 陈衍景, Franco Pirajno. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(2): 47–59.
Qi Jinping, Chen Yanjing, Franco Pirajno. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(2): 47–59.
- [41] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针[J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1059–1073
Chen Yanjing, Xiao Wenjiao, Zhang Jinjiang. Ore–system as a geodynamic probe[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 1059–1073 (in Chinese with English abstract).
- [42] 聂风军, 孙振江, 刘翼飞, 等. 大兴安岭岔路口矿区中生代多期岩浆活动与铝成矿作用[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 273–286.
Nie Fengjun, Sun Zhengjiang, Liu Yifei, et al. Mesozoic multiple magmatic activities and molybdenum mineralization in the Chalukou ore district, Da Hinggan Mountains[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 273–286(in Chinese with English abstract).
- [43] 刘军, 武广, 王峰, 等. 黑龙江省岔路口斑岩钼矿床流体包裹体和稳定同位素特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1231–1251.
Liu Jun, Wu Guang, Wang Feng, et al. Fluid inclusions and stable isotope characteristics of the Chalukou porphyry Mo deposit in Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1231–1251(in Chinese with English abstract).
- [44] 孟昭君, 阚学胜, 李宪臣, 等. 大兴安岭北东段森林覆盖区岔路口巨型斑岩钼多金属矿床的发现过程及意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1504–1517.
Meng Zhaojun, Kan Xuesheng, Li Xianchen, et al. The discovery and exploration process of the Chalukou giant porphyry molybdenum polymetallic deposit in forest–covered area of northeastern Da Hinggan Mountains and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1504–1517(in Chinese with English abstract).

Metallogenic processes and migration of ore-forming elements in the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia

MI Kui-feng, LIU Zhen-jiang, LI Chun-feng, LIU Rui-bin, WANG Jian-ping,
ZOU Jun-yu, WANG Zhong-bao

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit is one of the typical deposits in the Deerbugan metallogenic belt. Combining laboratory analysis with field observations, the authors quantified the migration of ore-forming elements by immobile plateau method and the formula given by Grant, and discussed the metallogenic processes. The results show that the percentages of SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 gradual increased from the inner part to the outer part due to the continuous decrease of temperature, the migration of major elements led to the formation of some minerals whose zoning is consistent with the zoning of characteristic minerals such as quartz, feldspar, sericite and muscovite in Wunugetushan alteration zone. The magma originated from the mantle and was contaminated by crustal materials during the collision between Siberia plate and Mongolia plate. Cu, Mo were brought into the alteration zone, the percentage of the gaining (X_{gp}) of Cu and Mo was gradually reduced from the inner part to the outer part. Mo came from the surrounding rocks, whereas Cu was from parent rocks. In the course of alteration of plagioclase Mo precipitated and entered hydrothermal solution due to the complexation of CO_3^{2-} , and then migrated. Pb and Zn were taken out of the inner zone and brought into the outer zone, and the elements were eventually concentrated in the outermost zone.

Key words: Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit; petrogeochemistry, element migration; tectonic environment; metallogenic processes

About the first author: MI Kui-feng, male, born in 1989, doctor candidate, majors in mineral deposit; E-mail: mikuífeng@126.com.

About the corresponding author: LIU Zhen-jiang, male, born in 1983, doctor, lecturer, engages in the study of regional metallogeny. E-mail: lzj@cugb.edu.cn.