

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.12002

李佑国,费光春,龙训荣,何朝鑫,2022. 滇西北烂泥塘斑岩铜矿床原生晕异常结构研究[J]. 沉积与特提斯地质, 42(1):30-39.

Li Y G, Fei G C, Long X R, He C X, 2022. A study of primary halo anomaly structure of the Lannitang porphyry copper deposit in northwest Yunnan, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(1):30-39.

滇西北烂泥塘斑岩铜矿床原生晕异常结构研究

李佑国, 费光春, 龙训荣, 何朝鑫

(成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:烂泥塘矿床是云南香格里拉地区典型的斑岩型铜矿床,主矿体产于在地表以下300~500米,地表矿化带仅见脉状铜矿体和铜矿化体。为研究云南香格里拉烂泥塘斑岩铜矿床的原生晕异常结构,本文以异常结构模式理论和方法为基础,对矿床地表和坑道岩矿石样品开展了元素组合、异常特征和水平分带规律研究。结果表明,烂泥塘铜矿床地球化学系统的结构由成矿元素及其共伴生元素富集与亏损的原生晕组成,Cu和Mo的正异常占据了核心部位,Sc、Ti、V、Cr、W的负异常在空间上与Cu和Mo的正异常重合;S的正异常,Mn、Co、Zn、Cd的负异常出现在Cu、Mo正异常的边缘;Zn、Cd的正异常以及Ag、Pb、Hg、Sb的正异常在成矿带外围出现,Ag、Pb、Hg、Sb属于远矿指示元素;铜矿化带中CaO、K₂O、Na₂O的含量相对较低,为低背景或负异常,而其外围地区为中背景区或高背景区。研究结果显示,用Cu和Mo的几何平均值与Sc、Ti、V、Cr四个元素几何平均值的比值作为地球化学指标所圈定的衬值地球化学异常,能够更好地指示铜矿化体的空间位置。

关键词:斑岩铜矿床;原生晕;异常结构;烂泥塘;滇西北

中图分类号:P632⁺.2

文献标识码:A

A study of primary halo anomaly structure of the Lannitang porphyry copper deposit in northwest Yunnan, China

LI Youguo, FEI Guangchun, LONG Xunrong, HE Chaoxin

(College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Lannitang deposit in Shangri-La county, Yunnan Province, is a typical porphyry copper deposit. The main orebodies are distributed 300~500 meters below the surface and the vein-type orebodies develop in the surface. In order to decipher the primary halo anomaly structure, based on the theory and method of anomaly structure, the element association, anomaly characteristics and horizontal zonation of surface of tunnel rocks and ore samples of the deposit are conducted. Research results show that the structure of the geochemical system of the Lannitang copper deposit consists of a primary halo of enriched and depleted ore-forming elements and their associated elements. The positive anomalies of Cu and Mo occupy the ore primary haloes, and the negative anomalies of Sc, Ti, V, Cr and W coincide with the positive anomalies of Cu and Mo. Positive anomalies of S, and negative anomalies of Mn, Co, Zn and Cd appear at the edge of positive anomalies of Cu and Mo. The positive anomalies of Zn, Cd, Ag, Pb, Hg, and Sb appear in the periphery of the metallogenic belt. Ag, Pb, Hg, and Sb belong to distal indicator elements or supra ore halo elements. The contents of CaO, K₂O and Na₂O of the samples

收稿日期: 2021-09-16; 改回日期: 2021-12-10

作者简介: 李佑国(1963—),男,博士,教授,地球化学及矿物、岩石、矿床学专业,现从事矿产地质研究工作。E-mail: lyguo@cdu.edu.cn

资助项目: 特提斯构造地质构造编图及区域对比研究(92055314);中国地质调查项目“云南春都—烂泥塘斑岩铜矿田构造分析与靶区预测”(12120113096200)

in the copper mineralization zone are relatively low, which belong to low background or negative anomaly, while the peripheral area belong to middle background area or high background area. It is suggest that the ratio of the geometric mean of Cu and Mo to the geometric mean of Sc, Ti, V and Cr can be used as a marker to delineate the contrast geochemical anomaly, which can better define the spatial location of copper mineralization bodies.

Key words: porphyry copper deposit; primary halo; anomaly structure; Lannitang; northwestern Yunnan province

0 引言

矿床原生晕模型产生于 20 世纪 30 年代,原生晕被认为是成矿元素及其伴生元素在成矿作用中富集的结果。热液矿床原生晕在空间上呈现出明显的分带现象,前苏联学者提出了如下典型的轴向分带序列(自前缘→尾部的顺序为):Ba—(Sb、As、Hg)—Cd—Ag—Pb—Zn—Au—Cu—Bi—Ni—Co—Mo—U—Sn—Be—W。

Goldberg et al., (2003) 提出了新的原生晕概念模型,认为在一个完整原生晕系统中还存在成矿元素的负异常,原生晕系统具有带状分布的特征,成矿元素的正异常位于原生晕系统的核部(或中心),带状分布的铁族元素(Sc、Ti、Cr 等)负异常位于原生晕系统的核部,但出现在成矿元素正异常的边部(Goldberg et al., 2003)。前人研究表明(马生明等, 2009, 2011; 弓秋丽等, 2009),元素的富集、贫化是矿床中固有的客观规律,矿致地球化学异常包括富集元素的正异常和贫化元素的负异常。

斑岩型铜矿床是一种特殊的热液矿床,在普朗斑岩型铜矿床的矿体部位,存在明显的 Cu、Ag、Au、Mo、Zn、W 等原生晕(Chen et al., 2008)。赤湖斑岩型铜钼矿床原生晕的内部为 Cu、Mo,外部为 As、Sb、Au、Ag、Pb、Bi 等的致矿异常结构(刘仲存等, 2020)。刘光永等人(2014)在研究福建省紫金山铜金矿床时,将深部出现的 Fe-Mn-Pb-Zn 的元素组合作为斑岩矿床的外带特征。

斑岩矿床原生晕见有钟状分带模式和背斜状分带模式(黄书俊, 1983),不同蚀变带具有不同的元素富集与亏损的特征,其地表原生晕具有正异常、负异常的空间叠加现象,如伊朗 Darreh-Zar 斑岩铜矿床的地表原生晕中,Cu 和 Mo 的富集带,具有 Zn、Mn、Ti 和 Co 强烈亏损的特征(Parsapoor et al., 2017)。GJS 戈维特指出,在斑岩铜矿床周围,成矿元素的分布有着明显的分带现象:Cu 在矿床中心的上方具有峰值,S 在矿带的边缘出现峰值,Zn 和 Mn 在矿带上方一般是贫化的,但在边缘有正异常,Mo

可以在矿带内或只在边缘有正异常(刘崇民, 2006)。

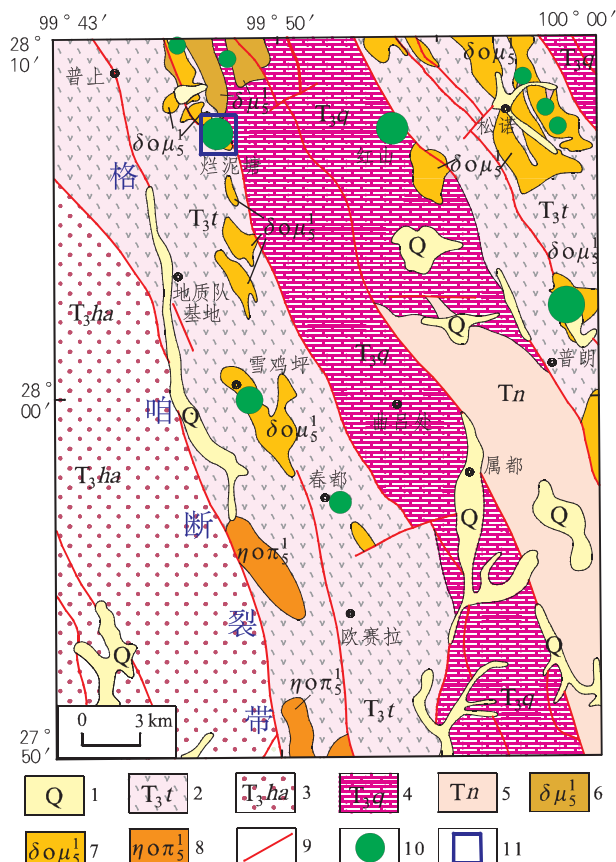
烂泥塘斑岩铜矿床的赋矿岩石及其热液蚀变类型一直存在不同的认识(苟体忠, 2010; 俞一凡, 2016; 孟明亮, 2018; 郭剑衡, 2019),从矿区原生晕的角度来考察矿区岩石与矿化的关系,有助于揭示斑岩铜矿化与岩石蚀变的空间关系,目前该矿床的原生晕研究尚未见报道。

本文以烂泥塘斑岩铜矿床为例,在系统研究矿床中成矿元素及其伴生元素含量在平面图上变化规律及其与矿体的空间关系之后,确定了异常地段内富集与贫化的指示元素,通过地球化学低背景、高背景,正异常和负异常的空间位置关系,探讨了该矿床原生晕的异常结构及其空间分带在找矿中的指示作用。

1 地质概况

烂泥塘斑岩铜矿床位于云南省香格里拉县格咱乡境内,其大地构造位置位于印支期义敦—中甸岛弧带南段红山复背斜西翼,格咱断裂带东侧(图 1)(侯增谦, 2004; 曾普胜, 2004; 李文昌, 2009)。据云南香格里拉烂泥塘铜矿详查报告及内部资料^①,烂泥塘矿床铜品位多为 0.4% ~ 1%,平均品位为 0.5%,铜金属量超过 200 万吨,达到大型铜矿床规模。区内印支期闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英二长斑岩等岩体呈近南北向分布(图 1^②),岩浆活动时间主要为 237 Ma ~ 206 Ma(郭剑衡, 2019)。烂泥塘、雪鸡坪、春都、红山,普朗等铜矿床在平面图上集中呈带状分布(图 1)。

烂泥塘矿区内出露地层为三叠系图姆沟组二段(T_3t^2)和曲嘎寺组三段(T_3q^3),岩性主要为板岩和变质砂岩。印支期浅成侵入岩呈复式岩体产出,包括闪长玢岩、硅化闪长玢岩、(黄铁)绢英岩化闪长玢岩和石英闪长玢岩等岩体。断裂构造(F_1)及其次生小断裂对浅成岩体和热液矿化有一定控制作用(图 2^①),铜矿化与绢英岩化蚀变带关系密切(孟明亮等, 2018)。



1—第四系:冲积、坡残积物;2—图姆沟组:板岩、粉砂岩夹安山岩;3—哈工组:灰至灰黄色岩屑砂岩;4—曲嘎寺组:灰色板岩、灰岩;5—三叠系中统尼汝组:灰岩、白云质灰岩;6—印支期闪长玢岩;7—印支期石英闪长玢岩;8—印支期石英二长斑岩;9—断层;10—铜矿床;11—烂泥塘矿区范围

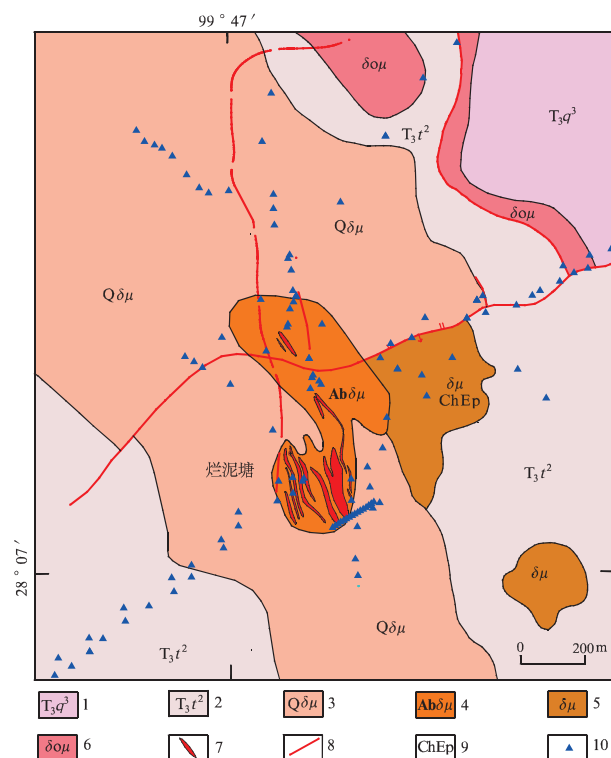
图1 烂泥塘—普朗地区区域地质图(据云南省地质调查院,2012 改编^②)

Fig. 1 Geological sketch map of the Lannitang-Pulang area (modified after the reference Yunnan Institute of Geological Survey, 2012^②)

硅化闪长玢岩是烂泥塘地区出露面积最大的岩体,分布于铜矿(化)体的外围,呈 NNW 向分布(图2),岩体中见有绢云母化、绿泥石化、硅化等蚀变现象及石英细脉而区别于石英闪长玢岩和闪长玢岩。绢英岩化闪长玢岩分布在烂泥塘附近,是铜矿(化)体的赋矿围岩,以显著绢云母化、硅化,丰富的石英—硫化物细脉或网脉为特点,岩体中的石英含量约 7%~20%,多数为硅化作用或后期流体作用所形成。

烂泥塘矿床铜矿化带在地表呈带状近南北向延伸,赋矿岩石主要为绢英岩化闪长玢岩(图2),伴随石英—绢云母—黄铁矿化的增强,铜矿品位增加,富矿部位往往有石英硫化物矿脉叠加矿化现

象。主矿体主要集中分布在地表以下 300~500 米一带,属于大型斑岩铜矿床,地表仅见脉状铜矿体或矿化体(俞一凡,2016)。在矿区东部和北部,可见规模不等的铅锌矿脉并伴有 Ag、Au、Cu 等矿化现象。



1—三叠系曲嘎寺组三段板岩、变质砂岩、灰岩;2—三叠系图姆沟组二段绢云板岩、变质砂岩夹酸性火山岩;3—印支期硅化闪长玢岩;4—印支期绢英岩化闪长玢岩;5—印支期闪长玢岩;6—印支期石英闪长玢岩;7—铜矿(化)体;8—断层;9—青盘岩化;10—岩石化探采样点

图2 烂泥塘矿区地质图^①

Fig. 2 Geological map of the Lannitang area

2 样品采集与分析测试

化探原生晕样品采自烂泥塘矿区地表基岩或近地表坑道中,根据地表的通行条件、基岩露头、岩性变化、矿化及岩石蚀变等情况,地表基岩的采样间距一般为 20~50 米,矿化地段或地表坑道,采样间距加密至 5 米。采样位置使用经过校正的手持 GPS(型号 etrex 301)坐标,在采样点附近 5 米范围内连续拣块组成一个样品,每个样品质量约 300~500 克,共采集样品 130 件(图2)。测试元素参照热液矿床原生晕中常见成晕元素、反映围岩蚀变的常量元素以及类似矿床研究中所选的分析指标,共

测试了 22 种元素,包括 Ag、As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Mo、Pb、Rb、S、Sb、Sc、Sr、Ti、V、W、Zn、Ca、K 和 Na,由西南冶金测试所完成,采用等离子发射光谱法、X 射线荧光法、原子荧光法、质谱法等方法测试。

3 岩石中元素组合特征

3.1 元素富集贫化特征

烂泥塘矿区 130 件岩石样品分析值的统计结果列于表 1 中,从中可以看出岩石中元素的富集贫化特征。样品中 Ag、As、Cd、Cu、Hg、Mo、Pb、S、Sb、Zn 等元素的含量变化大,其几何平均值明显高于大陆上地壳成分值(表 1),算术平均值/几何平均值大于 2.3,变异系数大于 1.5,属于明显富集的元素。

Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、W 的含量变化相对较小,其变异系数除了 Mn 外(1.05)。其他元素小于 0.9,其几何平均值除 V 以外,都小于大陆上地壳成分值(表 1),属于贫化元素。V 的几何平均值为 141.92×10^{-6} ,与大陆地壳成分值相当(张宏飞和高山,2012),这可能与研究区的区域背景值相对较高有关,总体上看,V 还是属于贫化元素。

从元素的几何平均值来看,烂泥塘矿区的 Rb 高于上地壳,而 Sr 则低于上地壳,这与该区域的岩石主要是中酸性成分是一致的。

矿区内的岩石样品,CaO 的含量变化较大,其中位数和算术平均值明显低于大陆上地壳成分值,变异系数为 1.41(表 1),所以 Ca 属于明显贫化的元素。K₂O 和 Na₂O 的含量变化相对较小,变异系数为 0.37 和 0.71;其中,K₂O 的平均含量与大陆上地壳成分值相当,而 Na₂O 的平均含量明显低于大陆上地壳成分值,所以 K 和 Na 属于贫化的常量元素。

3.2 相关性分析

相关性分析是利用相关系数来衡量各元素之间的相关性和亲和性。从烂泥塘铜矿床地表原生晕各元素相关系数表(表 2)中可以看出,部分元素间的相关系数大于 0.5,具有高度相关的特点。如 Ag、Pb、Hg、Sb 中任意两个元素间的相关系数大于 0.58(表 2);Sc、Ti、V 中任意两个元素的相关系数大于 0.56;Cu-Mo、K-Rb、Pb-Zn-Cd、Ca-Mn 等元素间高度相关;此外,S-As、Ca-Sr、Cu-Mo-Co、Mn-Zn-Cd 等元素间的相关性良好,显示了其地球化学亲和性

表 1 烂泥塘矿区岩石含量统计表(样品数 n=130)
Table 1 Statistics of contents in the Lannitang copper deposit (n=130)

元素	含量单位	最小值	最大值	中位数	几何平均值	算术平均值	样本方差	变异系数	大陆上地壳成分值*
Ag	10 ⁻⁹	30	10400	198	217.0	501.3	1159.6	2.31	53
As	10 ⁻⁶	0.15	256.36	4.26	5.51	14.21	31.99	2.25	4.8
Cd	10 ⁻⁶	0.015	41.45	0.135	0.172	0.781	3.74	4.79	0.09
Co	10 ⁻⁶	0.68	77.91	13.6	10.26	15.2	11.71	0.77	17.3
Cr	10 ⁻⁶	4.65	108.54	15.58	18.01	23.77	21.23	0.89	92
Cu	10 ⁻⁶	1.49	4377	69.05	86.47	367.58	724.14	1.97	28
Hg	10 ⁻⁹	5.27	107747	142.75	175.84	1612.4	10059	6.24	50
Mn	10 ⁻⁶	12.3	3212	356.9	260.1	573.4	604.4	1.05	774.4
Mo	10 ⁻⁶	0.12	56.76	2.03	2.47	6.25	9.58	1.53	1.1
Pb	10 ⁻⁶	2.62	4126	30.25	42.03	172.86	588.5	3.40	17
Rb	10 ⁻⁶	7.17	241.29	97.9	88.04	101.05	47.14	0.47	84
S	10 ⁻⁶	30	115562	1029.8	1683.8	9822	16433	1.67	621
Sb	10 ⁻⁶	0.15	137.98	1.08	1.46	4.76	14.37	3.02	0.40
Sc	10 ⁻⁶	3.68	40.38	12.99	13.39	14.24	5.10	0.36	14.0
Sr	10 ⁻⁶	44.25	5205.9	293.52	269.3	436.36	657.23	1.51	320
Ti	10 ⁻⁶	180.8	8119.7	2895.5	2652.6	3280.6	1960	0.60	3935.3
V	10 ⁻⁶	13.99	392.87	147.95	141.92	150.53	47.00	0.31	97
W	10 ⁻⁶	0.17	4.85	1.12	1.04	1.22	0.729	0.60	1.90
Zn	10 ⁻⁶	5.94	8507	84.36	72.99	192.42	766.3	3.98	67
CaO	%	0.03	14.03	0.52	0.64	2.07	2.91	1.41	3.59
K ₂ O	%	0.13	6.51	2.84	2.59	2.84	1.05	0.37	2.80
Na ₂ O	%	0.06	6.87	1.95	1.47	2.12	1.50	0.71	3.27

注: * 据 Rudnick and Gao, 2003 (转引自张宏飞和高山,2012)

表 2 烂泥塘铜矿床地表原生晕中各元素相关性

Table 2 The analyses of correlation about the surfer mining area in theLannitang copper deposit

	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Pb	Rb	Sb	Sc	Sr	Ti	V	W	Zn	S	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
Ag	1																					
As	0.212	1																				
Cd	0.403	0.325	1																			
Co	-0.041	0.020	-0.008	1																		
Cr	-0.125	0.120	-0.076	0.006	1																	
Cu	-0.009	-0.081	0.021	0.377	-0.228	1																
Hg	0.824	0.086	0.018	-0.011	-0.059	-0.032	1															
Mn	0.085	0.380	0.417	0.496	0.136	-0.085	-0.011	1														
Mo	-0.019	-0.106	0.034	0.228	-0.275	0.512	-0.017	-0.225	1													
Pb	0.890	0.361	0.573	-0.096	-0.104	-0.073	0.737	0.196	-0.067	1												
Rb	0.056	0.132	-0.078	-0.322	0.276	-0.191	-0.019	-0.212	-0.068	0.001	1											
Sb	0.599	0.250	0.222	-0.132	-0.142	-0.027	0.581	-0.005	-0.021	0.717	-0.036	1										
Sc	-0.016	0.020	-0.165	0.145	0.228	-0.205	-0.026	-0.013	-0.234	-0.077	0.200	-0.225	1									
Sr	-0.020	-0.039	-0.019	0.143	-0.168	0.118	-0.047	0.035	0.091	-0.069	-0.037	0.103	-0.005	1								
Ti	-0.043	-0.029	-0.123	0.157	0.179	-0.133	-0.072	0.118	-0.195	-0.114	-0.034	-0.222	0.624	-0.030	1							
V	-0.105	0.006	-0.191	0.134	-0.072	-0.064	-0.135	-0.140	-0.050	-0.186	0.125	-0.283	0.795	0.062	0.563	1						
W	0.248	0.087	-0.054	0.121	-0.002	-0.028	0.126	0.086	-0.041	0.091	0.316	-0.013	0.138	0.011	0.263	0.217	1					
Zn	0.438	0.360	0.978	0.039	-0.062	-0.003	0.059	0.502	-0.035	0.605	-0.066	0.235	-0.136	-0.021	-0.102	-0.178	-0.016	1				
S	0.115	0.372	0.167	0.415	-0.092	0.199	-0.028	0.051	0.193	0.104	0.038	0.047	0.341	0.099	0.084	0.328	-0.027	0.140	1			
CaO	-0.009	0.322	0.305	0.181	0.001	-0.120	-0.083	0.599	-0.178	0.076	-0.171	-0.008	0.031	0.272	0.196	-0.047	-0.013	0.325	0.050	1		
K ₂ O	-0.009	0.023	-0.135	-0.278	-0.006	-0.114	-0.085	-0.267	-0.054	-0.080	0.873	-0.091	0.235	0.017	0.069	0.268	0.376	-0.119	0.003	-0.170	1	
Na ₂ O	-0.207	-0.219	-0.101	0.465	-0.191	0.225	-0.158	0.010	0.159	-0.247	-0.614	-0.253	0.238	0.172	0.323	0.376	-0.036	-0.121	0.158	0.017	-0.466	1

注:样品数 n=130,在 5% 和 1% 置信度下,相关系数临界值为 0.172 和 0.225

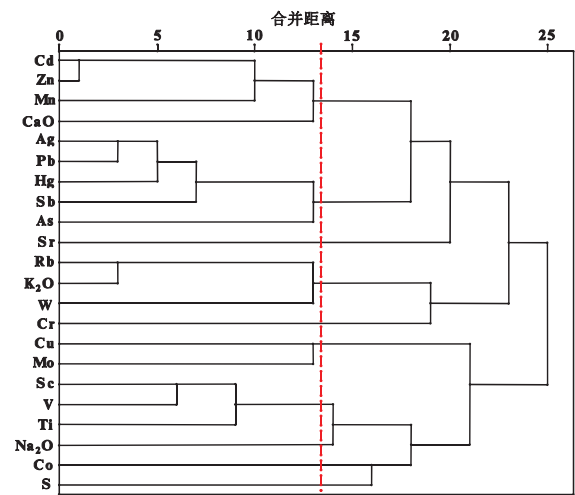


图 3 烂泥塘铜矿床原生晕样品中各元素聚类分析图解

Fig. 3 The cluster analysis diagram of the primary halo from the Lannitang copper deposit

以及原生晕中的元素组合特征。

3.3 聚类分析

聚类分析遵循“物以类聚”的原则,将性质相近的指示元素归为一类。采用 Person 相关系数法对烂泥塘铜矿床地表原生晕中 22 种元素进行 R 型聚类分析,得到分类谱系图(图 3)。从分类谱系图中可以看出,当聚类合并的距离为 13.5 时,元素可分

为 Cu、Mo (I); Sc、Ti、V (II); Ag、Pb、Hg、Sb、As (III); Zn、Cd、Mn、CaO (IV) 和 K₂O、Rb、W (V) 5 个群。其中,群 I 为斑岩铜矿床的主要成晕元素;群 II 为基性岩浆中富集,中酸性岩浆中贫化的元素;群 III 为热液矿床中的前缘元素;群 IV 为热液矿床中迁移距离相对较远,容易在青磐岩化蚀变带中富集的元素;群 V 是与钾化蚀变相关的元素。上述指示元素出现在不同的聚类群,表明它们都在成矿作用过程中发生了运移、富集,反映其沉淀时的物化条件和沉淀顺序有所不同。

4 烂泥塘斑岩铜矿床原生晕异常结构及其找矿意义

由于受成矿作用的影响,烂泥塘矿区 22 种元素的含量大多数并不服从正态或对数正态分布。本文参照勘查数据分析技术(EDA 技术),其异常界限值采用下列方法确定:异常下限 = 2.5 × 上四分位 - 1.5 × 下四分位 (Bounessah et al., 2003; 陈健, 2019);异常上限 = 1.5 × 下四分位 - 0.5 × 中位数,或异常上限 = 0.5 × 下四分位 + 0.5 × 最小值。

通过异常下限值和异常上限值,本文从烂泥塘矿区选择了 20 种元素(As 和 Sr 除外),圈定了各元

素的正异常、背景区和负异常的范围,对常量组分 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 还进一步划分了低背景区和高背景区等空间分布范围(图 4)。

总体上看,富集元素(Ag 、 Cd 、 Cu 、 Hg 、 Mo 、 Pb 、 S 、 Sb 、 Zn)有明显的正异常分布,贫化元素(Sc 、 Ti 、 V 、 Cr 、 Mn 、 Co 、 W 、 Rb)以负异常为主,而常量组分(CaO 、 K_2O 、 Na_2O)主要显示出地球化学背景区特点,负异常分布常见(图 4)。

4.1 与铜矿(化)体空间位置重叠的原生晕

Cu 和 Mo 的正异常, Sc 、 Ti 、 V 、 Cr 、 W 的负异常,在空间位置上正好与已知铜矿化带位置重叠(图 4),这些元素的异常对矿化位置有明显的指示作用。

Cu 的正异常中,最大规模的异常,其分布范围总体上与绢英岩化闪长玢岩岩体相当,浓集中心反映了铜矿化所在位置,铜异常近南北向延伸,总体上与铜矿化带的空间范围一致(图 4a)。第二大铜异常分布在 F_1 断裂附近,岩性为硅化闪长玢岩,为铜的中带异常(图 2,图 4a),找矿潜力良好。 Cu 的负异常零星分布于正异常的外围,最强的负异常出现在烂泥塘的东南侧,硅化闪长玢岩中 Cu 含量仅有 2.8×10^{-6} ,表明成矿过程中, Cu 随流体迁移而形成了显著的负异常。

Mo 的正异常,其空间分布特征总体上与铜类似, Mo 异常与已知铜矿化带或铜异常所在位置套合良好(图 4b), Mo 的负异常在其正异常的外围地区比较少见,负异常主要与上三叠统有关。

通过 Cu 和 Mo 的含量,利用其几何平均值($\sqrt{\text{Cu} \times \text{Mo}}$)而得到的 Cu-Mo 组合异常,较好地反映了铜矿化带的空间位置特征(图 5a)。

Sc 的负异常总体上与铜矿化带或 Cu 的正异常分布区一致(图 4e),局部异常与上三叠统有关; Ti 的负异常与铜矿化带一致,或者位于铜矿(化)脉或 Cu 异常的外侧(图 4f); V 的负异常总体上与铜矿化带或铜异常一致(图 4g),位于矿区东西两侧 V 的负异常与上三叠统有关; Cr 的负异常总体上与铜矿化带或铜异常一致(图 4h),矿区东西两侧的 Cr 正异常与上三叠统有关。

烂泥塘附近 W 的负异常总体上与铜矿化带的空间位置相当(图 4q),刚好叠加在铜的正异常之上;出现在矿区北部的 W 正异常与 Ag 、 Pb 、 Hg 、 Sb 的正异常构成叠加关系。

通过 Sc 、 Ti 、 V 、 Cr 的含量,用其几何平均值

($\sqrt[4]{\text{Sc} \times \text{Ti} \times \text{V} \times \text{Cr}}$)而圈定的 4 元素组合异常,其负异常明显与铜矿(化)体的空间位置具有良好的重叠关系(图 5b)。

4.2 分布于铜矿化体外侧的原生晕

对照图 2 和图 4 可以看出, S 的正异常和 Mn 、 Co 、 Zn 、 Cd 的负异常,在空间位置上与铜矿化带大体相当,但分布于铜矿(化)脉体的外侧。 S 的正异常主要分布在 F_1 断层以东且位于 F_2 断层附近,空间位置上处于硅化闪长玢岩、绢英岩化闪长玢岩,青磐岩化闪长玢岩的交汇地带, S 的正异常与已知铜矿(化)脉体的空间位置并不重叠,位于铜矿(化)脉体的外侧(图 4c)。

铜矿化体所在位置位于 Mn 、 Co 、 Zn 、 Cd 的地球化学背景区, Mn 的负异常出现在铜矿(化)脉体或铜正异常的外侧,甚至围绕铜矿化体构成环带状分布特征(图 4i);与 Mn 类似, Co 、 Zn 、 Cd 的负异常总体上与铜矿化带的延伸方向一致,但并不与铜矿(化)脉体所在位置重叠,仅分布在铜矿(化)脉体或铜正异常的外侧,局部构成环带状分布特征(图 4j-l)。

Zn 和 Cd 的正异常分布在铜矿化带东约 500 米一带,显示出铅锌多金属矿化特征(图 4k,l)。

通过 Mn 、 Co 、 Zn 、 Cd 的含量,用其几何平均值($\sqrt[4]{\text{Mn} \times \text{Co} \times \text{Zn} \times \text{Cd}}$)而圈定的 4 元素组合异常,其负异常总体上围绕铜矿(化)脉体分布,铜矿(化)脉体或铜正异常所在位置处于低背景区,局部为高背景区,显示出环带状分布特征(图 5c)。

4.3 远矿指示元素

对照图 2 和图 4 可以看出, Ag 、 Pb 、 Hg 、 Sb 的正异常分布于矿区东北,铜矿化带内为背景区,几乎没有异常显示;矿区西南和东北等地区的负异常与上三叠统有关。

Ag 、 Pb 、 Zn 、 Hg 的强正异常分布于烂泥塘矿区北部(图 4m-p),异常的浓集中心明显,异常中心有铅锌矿化显示。在铜矿化带内, Ag 、 Pb 、 Hg 、 Sb 的含量多为背景区,很少出现异常现象。结合当地的地质条件和铅锌矿脉空间位置偏高的分布规律,认为 Ag 、 Pb 、 Hg 、 Sb 在热液中的迁移能力强,在本矿床中表现出远矿指示元素或前缘晕特征,其异常可以作为多金属矿化的地球化学标志。

4.4 原生晕对围岩蚀变的指示意义

在铜矿(化)体或铜正异常所在位置,其岩石中常量组分 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 及微量元素 Rb 的含量为

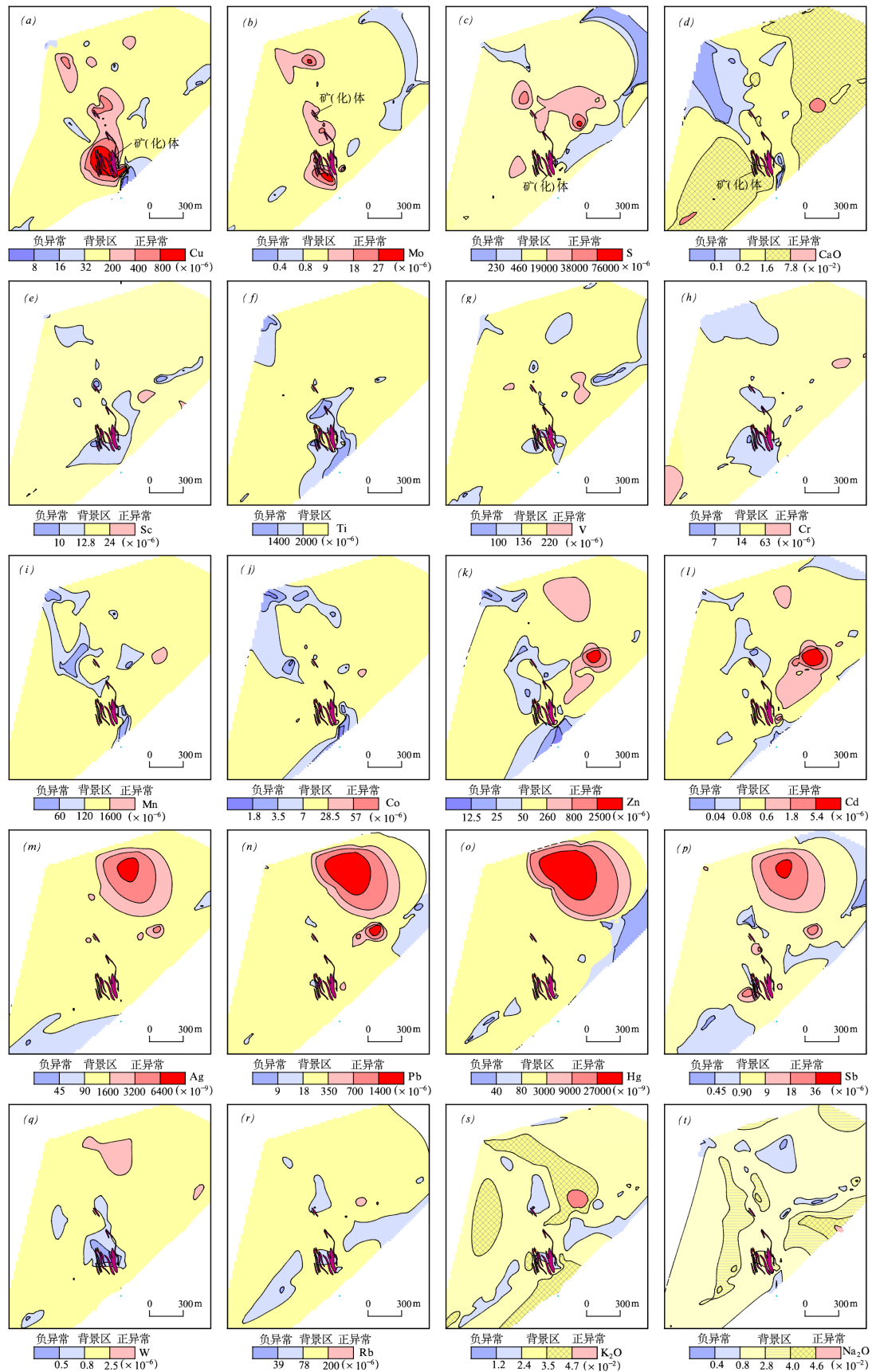


图4 烂泥塘矿区原生晕单元元素异常图

Fig. 4 The single element geochemical anomaly maps of the primary halo from the Lannitang district

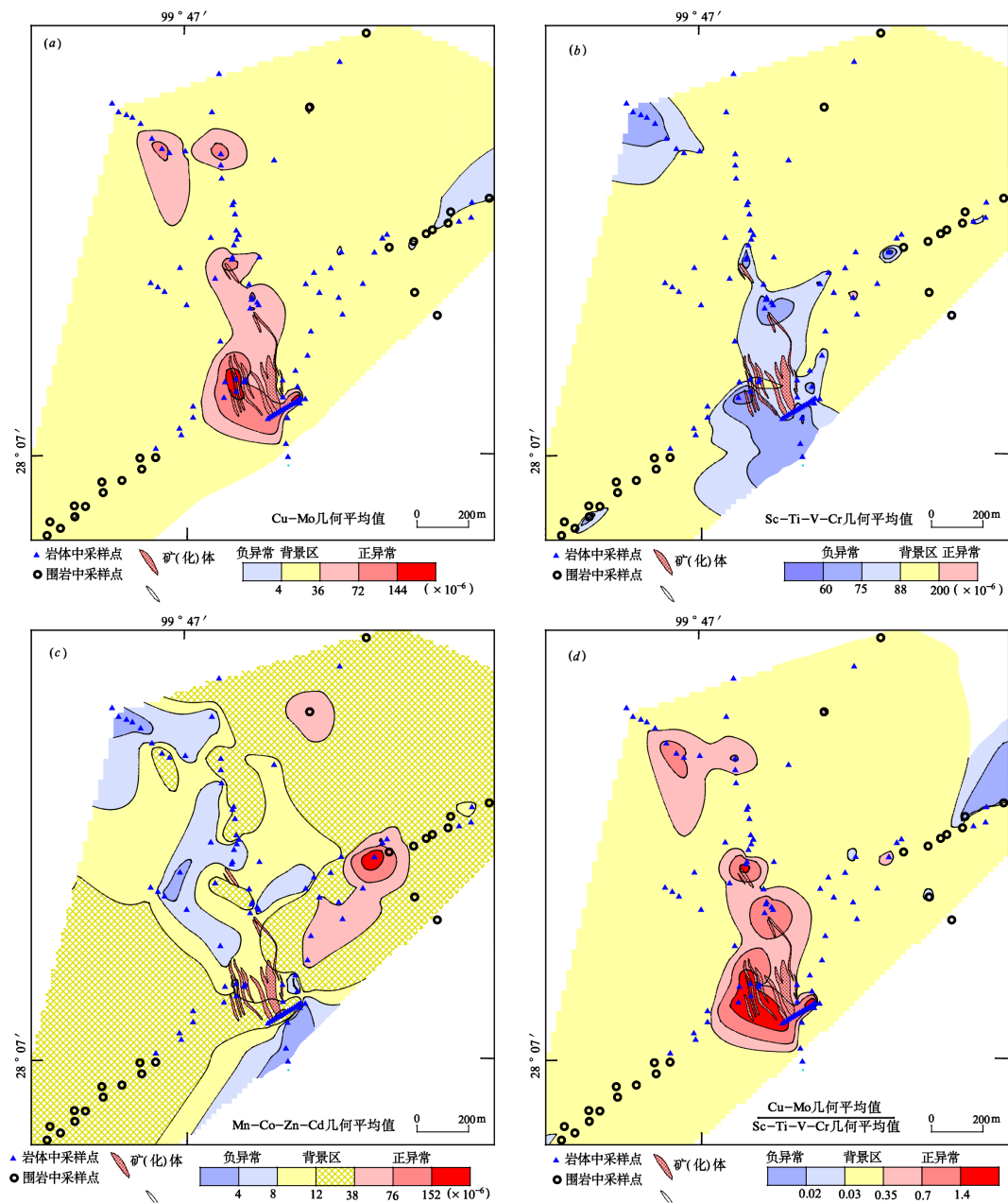


图 5 烂泥塘矿区原生晕组合异常图

Fig. 5 The association anomaly maps of the primary halo from the Lannitang district

低背景或弱的负异常(图 4d、s、t、r)。铜矿化带的 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 含量相对较低,表明在成矿作用过程中,伴随(黄铁)绢英岩化的增强,石英、绢云母、铁白云石等矿物含量的增多,常量组分 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 的含量在减少。

铜矿化带东西两侧具有相对较高的 CaO 含量(图 4d),可能是由于东西两侧的青磐岩化蚀变相对较强的缘故(刘崇民,2006)。

4.5 原生晕空间分带探讨

从烂泥塘地表原生晕平面图(图 4)来看,以铜

矿(化)体或 Cu-Mo 异常为中心,原生晕呈带状分布。在矿化部位, Cu 和 Mo 为正异常, Sc 、 Ti 、 V 、 Cr 、 W 为负异常, Mn 、 Co 、 Zn 、 Cd 、 Hg 、 Sb 、 Ag 、 Pb 为背景。在矿化带外侧,见有 Mn 、 Co 、 Zn 、 Cd 的负异常分布。在远离矿化带的北部或东部地区,可见浓集中心显著的 Zn 、 Cd 、 Hg 、 Sb 、 Ag 、 Pb 等元素的正异常分布。上述特征表明,矿床原生晕存在明显的水平分带现象。

由于烂泥塘矿床的主矿体产状陡,平均倾角 65° (郭剑衡等,2019),地表原生晕的水平分带相当

于原生晕的横向分带。就原生晕峰值正异常(+)和负异常(-)而言,从矿化中心向外,横向分带序列为:(+Cu、+Mo、-Sc、-Ti、-V、-Cr、-W)→(+S、-Mn、-Co、-Zn、-Cd)→(+Zn、+Cd)→(+Ag、+Pb、+Hg、+Sb)。

烂泥塘矿床地表所在位置相当于斑岩矿床主矿体的顶部,从原生晕轴向分带的角度上考虑,除了斑岩矿床Cu-Mo原生晕以外,前缘晕比较发育且往往分布于铜矿带的外围,尾部晕原则上没有露出地表,甚至可能为负异常。分布位置相对较高且远离铜矿化带的Ag、Pb、Hg、Sb为前缘晕指示元素,而Mn、Co、W为尾部晕指示元素。Sc、Ti、V、Cr等亲基性岩浆的元素在斑岩成矿系统中的含量相对较低而在原生晕中为负异常,可当做尾部晕考虑。综上所述,推测烂泥塘矿床的原生晕轴向分带序列(自前缘至尾部)为:(Hg、Sb、As、Ag、Pb)—(Cd、Zn)—Cu—Mo—(Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、W)。

4.6 地球化学异常结构的找矿意义

在烂泥塘铜矿床地表原生晕中出现了元素的富集和贫化现象,在铜矿化带及其外围一定范围内构成了完整的异常结构。异常结构由成矿元素及其伴生元素的正异常和负异常,贫化元素的负异常,成矿环境指示元素的负异常、低背景和高背景呈环带状展布。

成矿元素Cu和伴生元素Mo的正异常及Sc、Ti、V、Cr、W的负异常构成环带的核心部位,总体上与矿区内铜矿(化)脉群(铜矿化带)的空间位置重叠,与闪长玢岩的(黄铁)绢英岩化带所在位置相吻合;S的正异常和Mn、Co、Zn、Cd的负异常及低背景构成环带结构的外带,主要出现在铜矿化带的边部;在铜矿化带外围地区,可见Zn、Cd、Ag、Pb、Hg、Sb的正异常分布,作为远矿指示元素或前缘晕组成元素。

在烂泥塘铜矿床原生晕的地球化学结构中,常量组分CaO、K₂O、Na₂O以及微量元素Rb的低背景或负异常与铜矿化带的空间位置相对应,其外围为高背景环绕。这种元素分布特征不仅指示了矿化体的产出部位,在一定程度上还反映了矿质沉淀环境,也是一种重要的找矿标志。

考虑到Cu、Mo的正异常与Sc、Ti、V、Cr的负异常可以指示铜矿化带的空间位置,可以采用Cu-Mo几何平均值和Sc-Ti-V-Cr几何平均值的比值,即 $\sqrt{Cu \times Mo} / \sqrt[4]{Sc \times Ti \times V \times Cr}$ 作为矿化异常的地

球化学指标来圈定的衬值地球化学异常,所得异常的浓集中心明显,能够更好地反映铜矿化带的空间位置(图5d)。

5 结论

烂泥塘铜矿床的地球化学异常结构是由富集元素Cu、Mo的正异常和贫化元素Sc、Ti、V、Cr、W、Mn、Co等元素形成的负异常在空间上的有序排列构成的,并与矿区内绢英岩化蚀变作用有关。

原生晕以铜矿(化)体或Cu-Mo异常为中心呈带状分布,原生晕由成矿元素及其伴生元素的正异常、负异常或地球化学背景所组成。在矿化部位,Cu和Mo为正异常,Sc、Ti、V、Cr、W为负异常,Mn、Co、Zn、Cd、Hg、Sb、Ag、Pb为背景。在矿化带外侧,有Mn、Co、Zn、Cd的负异常,在远离矿化带的外围地区,可见Zn、Cd、Hg、Sb、Ag、Pb等元素的显著正异常分布。

烂泥塘地表位于斑岩矿床主矿体的顶部,原生晕中Cu和Mo为主要成晕元素,Hg、Sb、Ag、Pb为前缘晕,Cd、Zn位于分带序列的上部,Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co和W为尾部晕。

在烂泥塘斑岩铜矿床原生晕异常结构中,就其峰值正异常(+)和负异常(-)而言,从矿化中心向外,横向分带序列为:(+Cu、+Mo、-Sc、-Ti、-V、-Cr、-W)→(+S、-Mn、-Co、-Zn、-Cd)→(+Zn、+Cd)→(+Ag、+Pb、+Hg、+Sb)。研究发现, $\sqrt{Cu \times Mo} / \sqrt[4]{Sc \times Ti \times V \times Cr}$ 比值是良好的地球化学找矿标志,用该比值圈定的衬值地球化学异常可以更好地指示铜矿化带的空间位置。

注释:

①云南华西矿业有限公司. 2012. 云南香格里拉烂泥塘铜矿详查报告[R].

②云南省地质调查院. 2012. 云南香格里拉烂泥塘铜矿详查报告[R].

参考文献(References):

- Bounessah M, Atkin B P, 2003. An application of exploratory data analysis (EDA) as a robust non-parametric technique for geochemical mapping in a semi-arid climate [J]. Applied Geochemistry, 18: 1185 - 1195.
- Chen Y Q, Huang J N, Liang Z, 2008. Geochemical characteristics and zonation of primary halos of pulang porphyry copper deposit,

- northwestern yunnan province, southwestern china[J]. Journal of China University of Geosciences, 19(4): 371–377.
- Goldberg I S, Abramson G Y, Los V L, 2003. Depletion and enrichment of primary haloes: their importance in the genesis of and exploration for mineral deposits[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 3(3): 281–293.
- Parsapoor A, Khalili M, Maghami M, 2017. Discrimination between mineralized and unmineralized alteration zones using primary geochemical haloes in the Darreh-Zar porphyry copper deposit in Kerman, southeastern Iran[J]. Journal of Afric Earth Sciences, 132:109–126.
- 陈健, 2019. EDA 异常下限分析在地质找矿中的应用[J]. 矿产勘查, 10(8): 1961–1966.
- 弓秋丽, 朱立新, 马生明, 等, 2009. 斑岩型铜矿床地球化学勘查中岩石化学指标[J]. 物探与化探, 33(1): 31–34.
- 郭剑衡, 冷成彪, 张兴春, 等, 2019. 滇西北烂泥塘斑岩铜金矿床铁氧化物 LA-ICP-MS 微量元素特征及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 27(5): 659–677.
- 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化 and 成矿系统[J]. 岩石学报, 78(1): 109–120.
- 黄书俊, 邴今放, 傅金宝, 等, 1983. 斑岩铜矿床原生晕分带模式及其控制因素[J]. 地球化学, 3:221–228.
- 马生明, 朱立新, 刘崇民, 等, 2009. 斑岩型 Cu(Mo) 矿床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报, 30(6): 821–830.
- 马生明, 朱立新, 刘海良, 等, 2011. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化学异常结构研究[J]. 地球学报, 32(4): 405–412.
- 孟明亮, 王春林, 凡韬, 等, 2018. 云南烂泥塘斑岩型铜矿床岩体地球化学特征及矿床成因分析[J]. 矿产地质, 9(2): 223–231.
- 李文昌, 尹光候, 卢映祥, 等, 2009. 中甸普朗复式斑岩体演化及⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素依据[J]. 地质学报, 83(10): 421–1429.
- 刘崇民, 2006. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 80(10): 1528–1541.
- 刘光永, 戴茂昌, 祁进平, 等, 2014. 福建省紫金山铜金矿床原生晕地球化学特征及深部找矿前景[J]. 物探与化探, 38(3): 434–440.
- 刘仲存, 毛启贵, 吕晓强, 等, 2020. 东天山赤湖地区原生晕异常结构特征对寻找斑岩型铜钼矿床的指示意义[J]. 矿产勘查, 11(3): 551–559.
- 俞一凡, 费光春, 李佑国, 等, 2016. 云南中甸岛弧烂泥塘斑岩铜矿床岩体氧逸度特征及成矿意义[J]. 矿物岩石, 36(1): 28–36.
- 张宏飞, 高山, 2012. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1–410.
- 曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等, 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 25(5):535–540.

责任编辑:黄春梅

《沉积与特提斯地质》期刊编委会发布首届青年编委名单

《沉积与特提斯地质》是由中国地质调查局主管、中国地质调查局成都地质调查中心主办的地质学期刊。日前,为进一步推进期刊高质量发展,更好地服务作者和读者,期刊主办单位及期刊编辑委员会做出组建首届青年编委的决定。在经过公开招募、自愿报名之后,编辑部共收到来自 53 家单位共 104 份简历。编委会和主办单位根据期刊特色、办刊方向、栏目需求等综合评定之后,共选出 40 位优秀青年学者成立首届青年编委,任期为三年,其具体名单如下(按姓名拼音字母排序):

白永健、蔡永丰、曹华文、陈伟、崔晓庄、邓奇、杜静国、郭林楠、黄勇、黄元耕、郎兴海、李波、李艳广、李一凡、林旭、刘洪、刘军、刘睿、刘占坤、马行陟、马旭东、欧阳永棚、邱昆峰、任强、孙昊、孙雨、孙载波、唐渊、全亚博、万友利、王军鹏、王立强、吴晨、夏国清、夏炎、杨平、叶涛、张向飞、张云辉、邹灏

《沉积与特提斯地质》编委会和编辑部向入选的青年编委表示了祝贺,也对未入选的学者表示诚挚的感谢。