

doi: 10.12029/gc20200305001

林成贵,程志中,陈辉,吕志成,庞振山,陈鑫,沈和明. 2023. 四川省红泥坡铜矿原生晕特征及找矿方向[J]. 中国地质, 50(3): 837–852.
Lin Chenggui, Cheng Zhizhong, Chen Hui, Lü Zhicheng, Pang Zhenshan, Chen Xin, Shen Heming. 2023. Primary halo characteristics and prospecting direction of Hongnipo copper deposit, Sichuan Province[J]. Geology in China, 50(3): 837–852(in Chinese with English abstract).

四川省红泥坡铜矿原生晕特征及找矿方向

林成贵^{1,2},程志中^{1,2},陈辉^{1,2},吕志成^{1,2},庞振山^{1,2},陈鑫³,沈和明⁴

(1. 中国地质调查局发展研究中心,北京 100037;2. 自然资源部矿产勘查技术指导中心,北京 100037;3. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北 武汉 430074;4. 四川省地质矿产开发局 403 地质队,四川 乐山 614200)

摘要:【研究目的】四川省红泥坡铜矿是近年来在扬子准地台西缘康滇地轴中段发现的一处大型铜矿,由于矿体埋藏较深,地表被第四系覆盖,其深部和外围找矿难以突破。【研究方法】本文通过对矿区 P-3 勘查线上的 5 个钻孔进行原生晕样品采集,并对 349 个样品中的 18 个元素进行了分析测试和原生晕特征研究。【研究结果】主成矿元素 Cu 主要分布在天生坝组下段和落函组上段,多元统计分析显示 Cu 与 Ag、Co、Mo、As、Sb 等元素的相关性较好,利用格里戈良分带指数法获得矿体原生晕轴向分带序列为(由上到下):F、Nb、La→Au、Ag、Bi、Mo→Cu、Zn、Pb、As→Sn→Co、Sb。【结论】通过构建地球化学参数找矿指标,建立了红泥坡铜矿的找矿预测模型,初步认为红泥坡铜矿的 1 号矿体向西部还有一定的延伸。

关键词:找矿方向;深部找矿预测;原生晕;红泥坡铜矿;矿产勘查工程;四川省

创 新 点:本文通过红泥坡铜矿的原生晕特征研究,构建了地球化学勘查指标和找矿预测模型,提出了下一步的找矿方向。

中图分类号:P618.41 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)03-0837-16

Primary halo characteristics and prospecting direction of Hongnipo copper deposit, Sichuan Province

LIN Chenggui^{1,2}, CHENG Zhizhong^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}, LÜ Zhicheng^{1,2},
PANG Zhenshan^{1,2}, CHEN Xin³, SHEN Heming⁴

(1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Technical Guidance Center for Mineral Resources Exploration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China; 3. The Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. 403 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Leshan 614200, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

收稿日期:2020-03-05;改回日期:2020-05-30

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0601506)和中国地质调查局项目(DD20160052)联合资助。

作者简介:林成贵,男,1990年生,博士生,工程师,主要从事勘查地球化学和深部找矿研究工作;E-mail: linchenggui1991@163.com。

通讯作者:程志中,男,1969年生,博士,教授级高级工程师,主要从事勘查地球化学研究工作;E-mail: chengzhizhong69@163.com。

[Objective] The Hongnipo copper deposit in Sichuan Province is a large new-discovered copper deposit in recent years in the middle section of the Kangdian axis on the western edge of the Yangtze platform. Due to the deep burial of the ore body, the surface is covered by the Quaternary, and it is difficult to break through in deep and peripheral ore exploration. **[Methods]** This article collected primary halo samples from 5 boreholes on the P-3 exploration line in the mining area, and analyzed and tested 18 elements out of 349 samples, as well as studied the characteristics of primary halos. **[Results]** The main ore-forming element Cu is mainly distributed in the lower section of Tianshengba Formation and the upper section of Luodang Formation. Multivariate statistical analysis shows that Cu has a good correlation with Ag, Co, Mo, As, Sb and other elements. The axial zoning sequence of the primary halo of the ore body is obtained by using the Grigoryan zoning index method: F, Nb, La → Au, Ag, Bi, Mo → Cu, Zn, Pb, As → Sn → Co, Sb. **[Conclusions]** Through the construction of geochemical exploration indexes, the prospecting prediction model of Hongnipo copper deposit is established, and it is preliminarily believed that the No. 1 ore body of Hongnipo copper mine still extends to the west.

Key words: prospecting direction; deep prospecting prediction; primary halo; Hongnipo copper deposit; mineral exploration engineering; Sichuan Province

Highlights: This paper established the geochemical exploration indexes and the prospecting prediction model by studying the primary halo characteristics of the Hongnipo copper deposit, and proposed the next direction of mineral exploration.

About the first author: LIN Chenggui, male, born in 1990, doctor candidate, engineer, mainly engaged in the study of exploration geochemistry and deep prospecting; E-mail: linchenggui1991@163.com.

About the corresponding author: CHENG Zhizhong, male, born in 1969, doctor, professor of engineering, mainly engaged in the study of exploration geochemistry; E-mail: chengzhizhong69@163.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program (No.2017YFC0601506) and the project of China Geological Survey (No. DD20160052).

1 引言

四川省会理县拉拉地区是中国西南重要的铜多金属矿床产地(李泽琴等,2002;朱志敏等,2009;Chen and Zhou,2012)。目前已发现的大中型铜矿有落函、老虎山、老羊汗滩沟、石龙、菖蒲箐等(肖渊甫等,2010;朱志敏等,2014;黄从俊等,2015),它们大部分赋存于区域F1断层以北的下元古界河口群落函组变质火山-沉积岩系中(朱志敏,2012)(图1),而F1以南地区由于第四系覆盖较厚(厚度在20~180 m),使得该区的找矿工作进展缓慢。近几年来,通过在F1以南的红泥坡地区开展系统的地质勘查工作,结合深部探矿工程,发现了新的找矿层位,开拓了找矿思路和空间,实现“拉拉外围找拉拉”的重大突破(校轶,2018;陈辉等,2021)。然而,由于红泥坡铜矿总体研究程度较低,加上地表露头矿的缺失,找矿主体对象开始转向寻找深部隐伏矿,找矿难度逐渐增大,使得深部探矿工程的布设举步维艰。因此,如何准确地判断矿体向深部的延伸情况是研究区深部找矿预测的关键。

原生晕测量是一种较为成熟的深部找矿预测手段。几十年来,随着找矿预测理论和分析方法的

不断发展和进步,原生晕找矿方法在深部找矿中发挥了至关重要的作用,在深部盲矿体的寻找上取得了巨大的成功,如安徽铜陵狮子山铜矿、福建紫金山铜金矿(邵跃,1997)、胶西北上庄金矿(孙华山等,2008)、云南都龙锡锌多金属矿(陈俊霖等,2017)等。本文选择见矿效果较好的P-3勘查线剖面,开展原生晕测量,以5个钻孔原生晕样品为研究对象,测试了18种成矿指示元素,利用多元统计方法确定了各成矿指示元素的组合关系,并通过格里戈良分带指数法计算了1号主矿脉的原生晕轴向分带序列,指出了深部和外围找矿方向,为下一步的深部找矿工作提供依据。

2 地质背景

2.1 区域地质背景

拉拉地区位于扬子准地台西缘康滇地轴中段,属东西走向的金沙江断裂褶皱带与川滇攀西大裂谷南北向构造带的交接复合部位(陶文等,2014;胡夕鹏等,2016;向杰等,2020)。大地构造上处于扬子地块西缘川滇被动大陆边缘裂谷系中段(潘桂棠等,2009)(图1b)。该区前震旦系河口群发育一套较完整的海相优地槽火山-沉积岩组合和晚期浅—

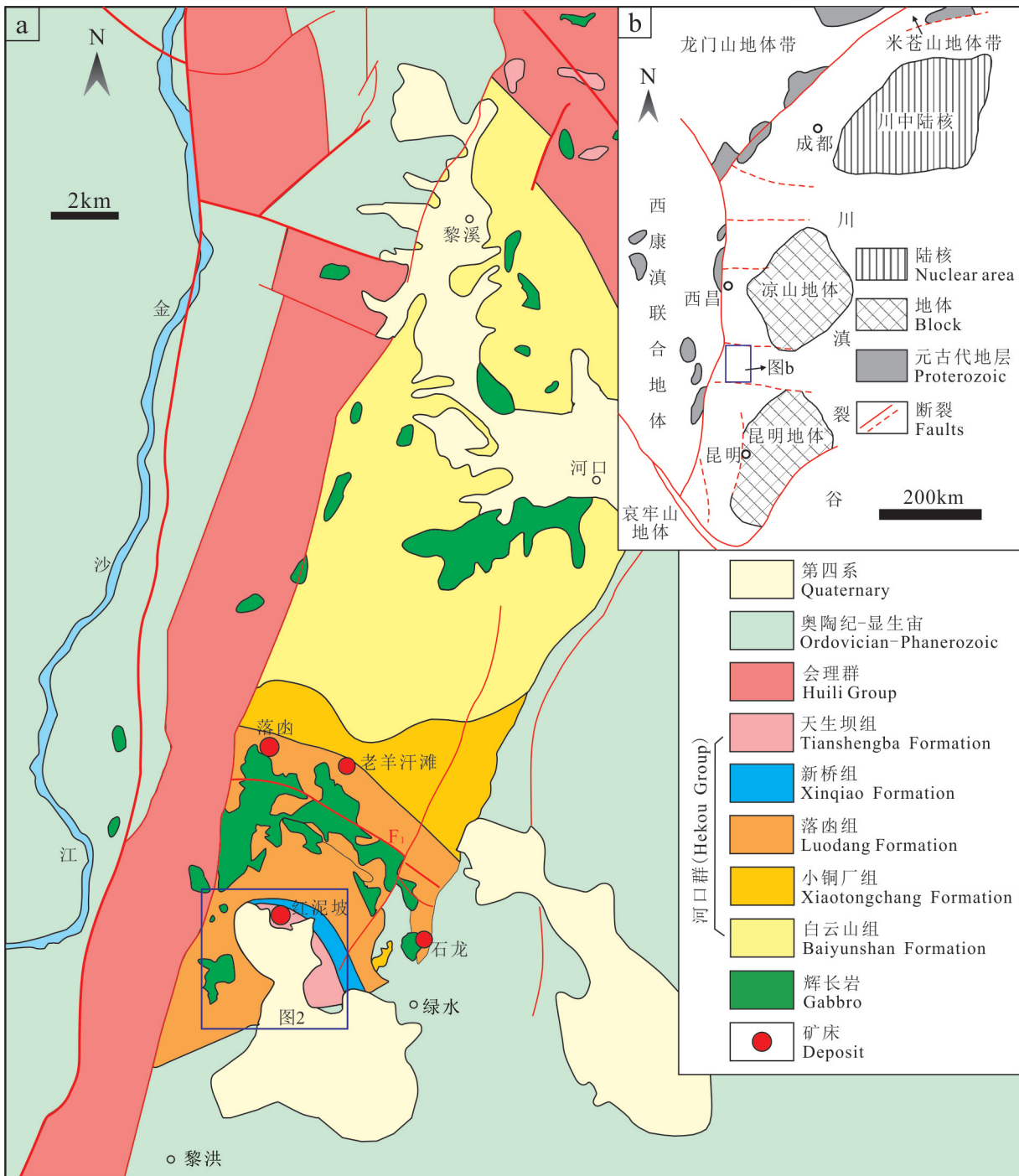


图1 四川省拉拉矿田地地质简图(a)和大地构造位置(b)(底图据向杰等,2019)
 Fig.1 Simplified geological map (a) and tectonic location (b) of the Lala orefield, Sichuan Province
 (modified from Xiang Jie et al., 2019)

滨海相冒地槽沉积组合的岩石建造。东西向和南北向两种构造作用叠加形成了前震旦系的基底构造格架(王生伟等,2016),拉拉地区经历了震旦系以来多期次和继承性的构造活动,这些构造控制着区内的岩

浆活动、沉积建造和构造变形。岩浆活动由侵入到喷出,从超基性到中、酸性都有不同程度的发育。总之,本区地质构造复杂、岩浆活动频繁、漫长的地史演化,为各类矿床的形成提供了有利的时、空和物质条件,

构成了区内良好的成矿地质背景。

区内出露的地层以下元古界河口群为主(图1a),主要由正常沉积和富钠质的细碧-角斑岩系的熔岩、火山碎屑岩以及次火山岩建造组成的一套沉积-火山变质岩组成(张武鹏等,2016)。构造较为发育,不同时期、不同性质的构造互相叠加、复合,构成了本区独特的地质构造格架。主要表现为早期南北向水平侧压力、晚期东西向水平侧压力形成的一系列北北东向的褶皱和断层。形成了河口一拉拉地区为东西轴向的河口复式背斜,往南至红泥坡地区为东西轴向的红泥坡宽缓向斜,背、向斜地层被后期东西向及南北向两组区域性断裂分割(周家云等,2008)。区内主要出露前震旦纪岩浆岩,且与本区的地质构造密切相关。

2.2 矿床地质特征

红泥坡铜矿床位于四川省会理县绿水镇境内,是典型的“拉拉式”铜矿,经历了2期成矿作用,早期成矿与火山作用有关,后期发生了热液叠加改造作用(陈辉等,2021)。矿床赋存于下元古界河口群天生坝组和落函组(图2)。天生坝组总体走向为近南北向,可分为钠长石变粒岩系列和片岩系列。钠长石系列为一套厚层块状变钠质火山岩-磁铁石英钠长岩、石英钠长岩、斑状石英钠长岩;片岩系列为二云片岩、白云石英片岩、钙质白云石英片岩、含石榴石石英白云片岩等。落函组是一套变质海相火山-沉积岩,主要分为黑云母片岩系列和钠长石变粒岩系列两类岩石。黑云母片岩系列包括石榴黑云片岩、(磁铁矿化)黑云片岩,钠长石变粒岩系列包括钠长变粒岩、磁铁石英钠长变粒岩。黑云母片岩类矿化明显较钠长石变粒岩类好。

红泥坡宽缓复向斜位于红泥坡一黎洪,是由早期南北向水平侧压力和晚期东西向水平侧压力共同作用叠加复合而成,为河口背斜南翼单斜构造上发育的次级构造(张武鹏等,2016),红泥坡铜矿则位于红泥坡宽缓复向斜中偏北段。轴向为NE向,核部由河口群沉积-喷发旋回变质岩组成,上部大部分由第四系浮土和三叠系白果湾组覆盖,两翼由于后期构造破坏而不完整,向斜东翼北部发育次一级的老厂背斜和石龙向斜。

区内侵入岩主要为晋宁期造山运动的基性岩(脉),沿河口背斜核部呈岩脉出露,主要岩性为辉

长岩(图2)。主要见于天生坝组及落函组中、上部的磁铁石英钠长岩中,呈岩脉、岩床状产出,大部分辉长岩脉顺层贯入地层中。其他脉岩主要有煌斑岩、辉绿岩、辉绿辉长岩。岩脉长一般几十厘米至几米,大部分斜交地层产出,穿插辉长岩体。

2.3 矿体地质特征

矿体多呈似层状、透镜状顺层产出,发育明显的膨缩现象,偶见分枝复合及尖灭再现现象,产状较缓,与围岩基本一致,矿化稳定,连续性好(胡夕鹏等,2016)。目前,矿区共圈定矿体5条(向杰等,2019;陈辉等,2021)(图3)。其中,①号矿体以工业硫化铜矿体为主,产于天生坝组下段底部;②号矿体以低品位硫化铜矿体为“主、少量工业硫化铜矿体,产于落函组上段上部;③号矿体为低品位硫化铜矿体,产于落函组上段上部;④号矿体为工业硫化铜矿体,产于落函组上段中部;⑤号矿体为低品位硫化铜矿体,产于落函组上段上部,与②号矿体层位基本相当。

矿石结构以粒状变晶结构交代残余结构为主,矿石构造主要有浸染状、细脉状和条带状构造。矿石矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、雌黄铁矿,少量的斑铜矿、辉钼矿、方铅矿、辉铜矿等;脉石矿物有石英、钠长石、黑云母、白云母、白云石等(胡夕鹏等,2016)。矿区内与矿化有关的围岩蚀变主要有黑云母化、硅化、碳酸盐化、钠长石化、炭化等。

3 样品与方法

红泥坡铜矿1号矿体是矿区最厚大、资源量最丰富的矿体,赋存于天生坝组下段,在空间上呈轴部厚两翼变薄的背形产出(图3)。本次研究的原生晕样品来源于红泥坡铜矿P-3勘查线剖面,剖面长度约1.5 km,从5个钻孔中采集原生晕样品共计349件。采样方法为连续捡块法,地层中采样间距一般在10 m,在矿化(体)地段加密至3~5 m(图3)。样品的分析测试工作由国土资源部郑州矿产资源监督检测中心完成,分析测试Ag、Sn、B、Au、Bi、F、K₂O、Fe₂O₃、Co、Ni、Cu、Zn、Nb、Mo、La、Pb、As、Sb等18种元素(氧化物),分析质量优秀,数据可靠。

4 元素组合特征

4.1 参数统计

红泥坡铜矿受地层控制明显,为了摸清各元素

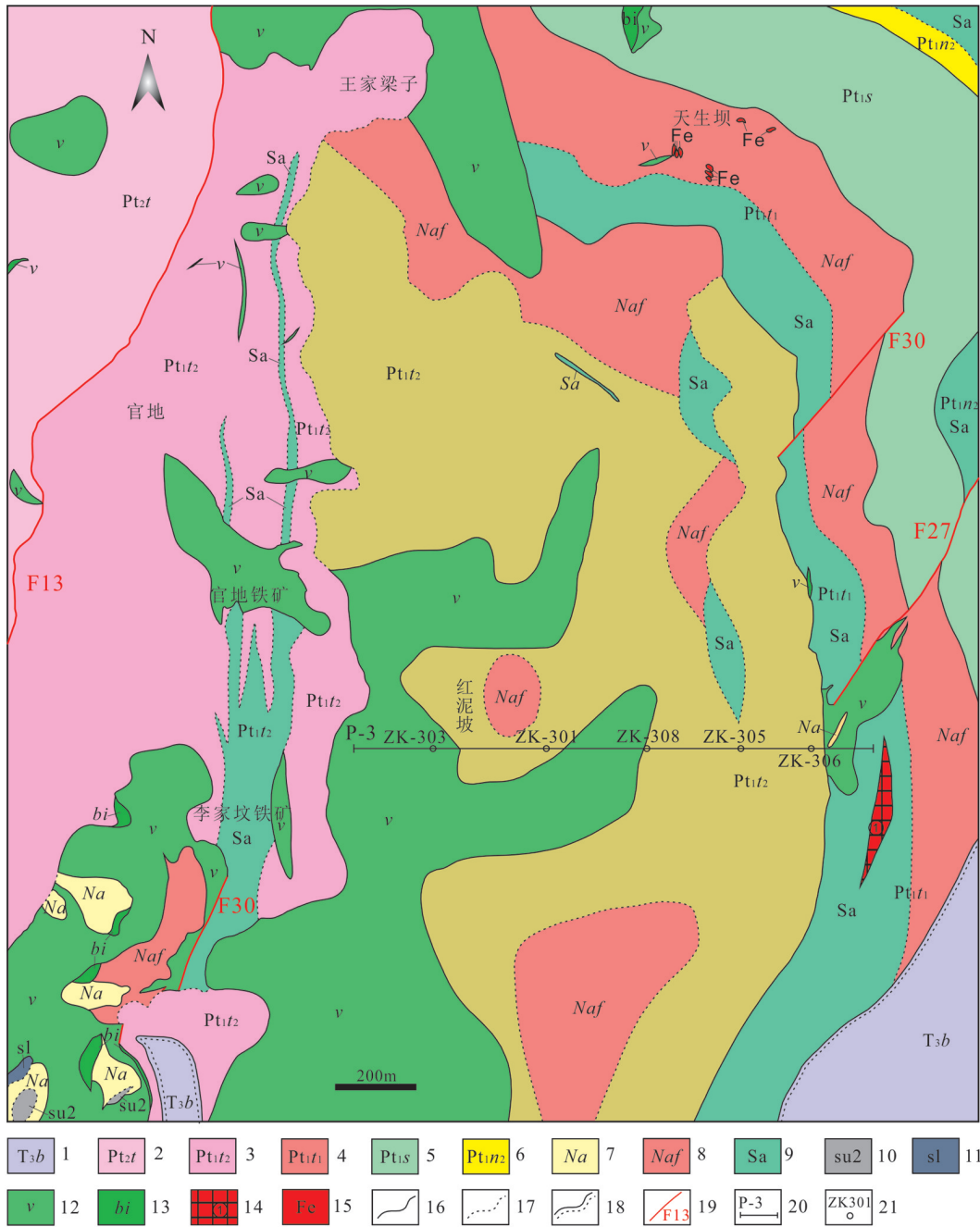


图2 红泥坡铜矿地质简图(据四川省地质矿产开发局403地质队,2013^①改绘)

1—三叠系白果湾组砂岩;2—昆阳群淌塘组炭质板岩;3—河口群天生坝组上段钠质火山岩夹磁铁石英钠长岩;4—河口群天生坝组下段钠质火山岩夹磁铁白云钠长片岩;5—河口群新桥组石榴角闪黑云片岩;6—河口群落函组上段石英钠长岩;7—石英钠长岩;8—磁铁石英钠长岩;9—白云石英片岩;10—二云母片岩;11—板岩;12—辉长岩;13—侵入角砾岩;14—铜矿体及编号;15—铁矿体;16—地层界线;17—岩层界线;18—不整合接触界线;19—断层及编号;20—剖面线及编号;21—钻孔位置及编号

Fig. 2 Simplified geological map of Hongnipo copper deposit area (modified from 403 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 2013^①)

1—Sandstone of the Baiguowan Formation of Triassic; 2—Carbonaceous slate of the Tangtang Formation, Kunyang Group; 3—The upper member of the Tianshengba Formation of the Hekou Group; 4—The lower member of the Tianshengba Formation of the Hekou Group; 5—Pomegranate hornblende schist of Xinqiao Formation, Hekou Group; 6—Quartz sodium feldspar in the upper member of the Luodang Formation, Hekou Group; 7—Quartz sodium feldspar; 8—Magnetite quartz sodium feldspar; 9—Dolomite quartz schist; 10—Muscovite-biotite schist; 11—Slate; 12—Gabbro; 13—Intrusive breccia; 14—Copper ore body and number; 15—Iron ore body; 16—Stratigraphic boundary; 17—Rock boundary; 18—Unconformity contact boundary; 19—Faults and number; 20—Profile line and number; 21—Drilling and number

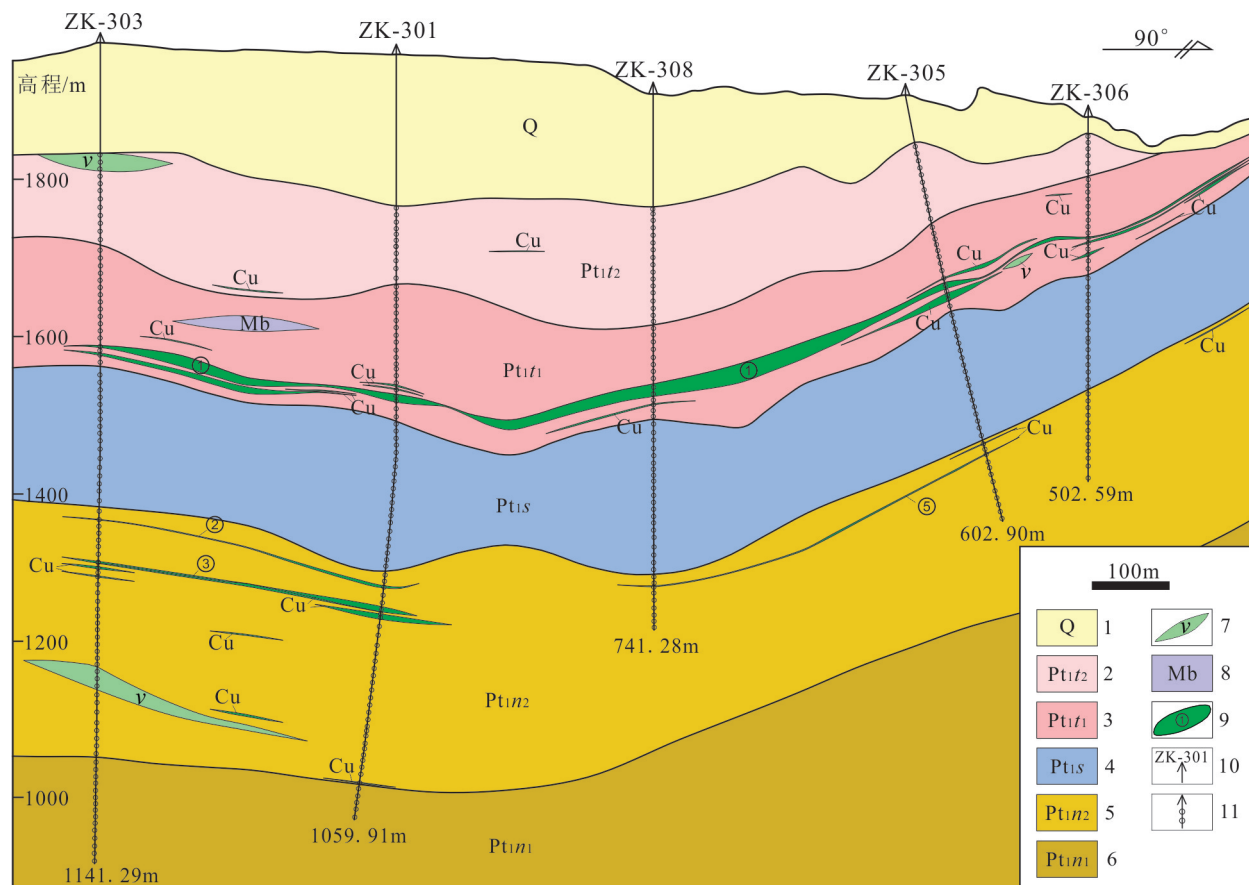


图3 P-3勘探线地质图和采样点位图

1—第四系;2—天生坝组上段;3—天生坝组下段;4—新桥组;5—落函组上段;6—落函组下段;7—辉长岩脉;8—大理岩;9—铜矿体及编号;10—钻孔及编号;11—采样点位

Fig.3 The map of geological and sampling point in P-3 exploration line

1—Quaternary; 2—Upper member of Tianshengba Formation; 3—Lower member of Tianshengba Formation; 4—Xinqiao Formation; 5—Upper member of Luodang Formation; 6—Lower member of Luodang Formation; 7—Gabbro vein; 8—Marble; 9—Copper ore body and number; 10—Drilling and number; 11—Sampling points

在不同地层的含量,将349个原生晕样品按不同的地层进行参数统计(表1)。结果显示,在元素分布方面,Ni元素主要分布在天生坝组上段,Ag、Co、Cu、As、Sb等元素主要分布在天生坝组下段,Au、Fe₂O₃等元素(氧化物)主要在新桥组较为富集,Sn、Bi、F、K₂O、Pb、Zn、Ni、La、Mo等元素(氧化物)主要富集在落函组上段,B元素在落函组下段含量更高,成矿元素Cu在天生坝组下段和落函组上段较为富集,因此,它们是与铜成矿最为密切的地层。在标准离差方面,Ni、Fe₂O₃等元素(氧化物)主要在天生坝组上段的标准离差较高,Ag、Bi、Co、Cu、Mo、As等元素在天生坝组下段的标准离差较高,Au元素主要在新桥组的标准离差较高,Sn、F、Pb、Zn、Ni、La、

Sb等元素主要在落函组上段的标准离差较高,B、K₂O元素(氧化物)在落函组下段的标准离差较高,成矿元素Cu在天生坝组下段的标准离差含量达到10259,说明Cu在该地层的分布很不均匀,部分地段容易聚集成矿。在变异系数方面,变异系数大于1的元素(氧化物)有Ag、Sn、B、Au、Bi、K₂O、Co、Cu、Pb、Zn、Nb、Mo、As、Sb,说明这些元素的在该区属于强分异元素。其中Cu、Bi、Co等元素在天诺坝组下段的变异系数较高,因此,天生坝组下段可能是铜富集成矿最有利的地层。

4.2 相关分析

原生晕研究中的相关分析可以有效地揭露元素之间的相互关系和相关密切程度(张传昱等,

表1 各地质单元(氧化物)的元素特征
Table 1 Statistical table of element characteristics of each geological unit

地层	元素	Ag	Sn	B	Au	Bi	F	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Co	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo	La	Pb	As	Sb	
N=57	M	0.08	1.68	17.62	1.42	0.08	925.0	1.19	10.95	39.40	64.45	117.0	52.65	8.81	0.84	32.40	3.1	2.33	0.19	
	Pt _{t2}	X	0.14	1.93	26.11	2.35	0.12	980.9	1.35	11.09	41.19	84.80	319.8	84.07	9.52	1.20	33.17	7.7	4.79	0.28
	S	0.12	1.12	25.83	2.59	0.11	373.8	1.02	6.10	17.74	83.59	540.5	87.22	6.68	1.39	12.67	15.5	9.10	0.37	
	Cv	0.91	0.58	0.99	1.10	0.92	0.38	0.76	0.55	0.43	0.99	1.69	1.04	0.70	1.17	0.38	2.00	1.90	1.36	
N=80	M	0.14	1.98	28.60	1.95	0.16	1164.5	1.97	11.20	36.25	42.20	478.0	51.85	7.17	1.38	30.15	4.0	4.53	0.21	
	Pt _{t1}	X	1.54	2.02	34.68	4.46	0.42	1256.0	1.94	11.15	61.97	52.09	3508.8	98.18	9.70	7.01	32.35	13.7	36.78	0.53
	S	2.94	0.84	28.76	8.14	0.96	445.1	0.90	2.99	71.41	28.96	10259	200.61	9.76	16.53	14.91	30.1	83.49	0.83	
	Cv	1.90	0.42	0.83	1.82	2.30	0.35	0.47	0.27	1.15	0.56	2.92	2.04	1.01	2.36	0.46	2.19	2.27	1.56	
N=95	M	0.10	2.47	7.68	0.96	0.11	1261.0	1.40	14.10	36.90	30.85	160.1	85.80	18.16	1.20	37.90	3.8	2.01	0.18	
	Pt _s	X	0.32	3.15	11.85	20.32	0.22	1425.5	1.48	14.19	38.89	32.50	654.7	154.82	22.10	3.38	43.51	17.8	8.77	0.23
	S	0.81	3.02	14.28	104	0.27	548.1	0.63	2.40	20.42	15.19	1606	281.04	17.62	8.33	22.92	83.6	21.91	0.20	
	Cv	2.50	0.96	1.21	5.12	1.26	0.38	0.43	0.17	0.53	0.47	2.45	1.82	0.80	2.47	0.53	4.71	2.50	0.88	
N=97	M	0.34	3.19	28.12	2.71	0.25	1413.0	2.52	12.40	39.80	41.20	423.5	80.90	15.78	2.21	41.20	6.1	5.69	0.27	
	Pt _{n2}	X	0.78	5.62	40.84	11.96	0.46	1560.3	2.46	11.96	53.20	61.64	989.6	319.49	33.85	8.55	48.56	29.4	20.46	0.52
	S	1.13	5.63	44.54	18.53	0.50	660.4	0.99	3.89	48.95	55.82	1606	852.06	43.54	13.59	27.95	101.0	30.43	0.89	
	Cv	1.46	1.00	1.09	1.55	1.10	0.42	0.40	0.33	0.92	0.91	1.62	2.67	1.29	1.59	0.58	3.43	1.49	1.71	
N=20	M	0.14	2.19	35.53	1.79	0.12	1038.5	1.78	12.05	39.35	65.45	143.8	43.85	12.42	1.76	33.60	4.3	2.16	0.21	
	Pt _{n1}	X	0.20	2.23	65.69	3.59	0.21	1231.3	2.00	11.31	38.80	69.87	441.5	59.66	15.32	7.21	32.04	4.9	5.66	0.28
	S	0.21	0.64	74.61	3.63	0.24	581.1	1.11	3.56	14.74	43.39	681	60.82	10.88	11.58	8.47	2.9	7.08	0.19	
	Cv	1.04	0.29	1.14	1.01	1.16	0.47	0.56	0.32	0.38	0.62	1.54	1.02	0.71	1.61	0.26	0.60	1.25	0.68	

注:Pt_{t2}为天生坝组上段;Pt_{t1}为天生坝组下段;Pt_s为新桥组;Pt_{n2}为落函组上段;Pt_{n1}为落函组下段;N为样品数;M为中位数;X为平均值;S为标准偏差;Cv为变化系数=S/X。Au元素单位为10⁻⁹,K₂O、Fe₂O₃的单位为10⁻²,其余元素的单位为10⁻⁶。

2013;卢树东等,2016)。从红泥坡铜矿原生晕相关系数矩阵(表2)中可以看出,与主成矿元素Cu相关性较好的元素有Ag、Co、Mo、As、Sb,显然Cu的矿化沉淀与含Ag、Co、Mo、As、Sb的矿物密切相关,这些元素可以作为主成矿元素的伴生元素;与Au、Bi、F、Ni、Pb、Zn、Fe₂O₃等元素(氧化物)相关性较差;与Sn、B、K₂O、Nb、La等元素(氧化物)呈负相关关系。

为了更加直观地分析元素组合规律,将349个原生晕样品进行R型聚类分析,采用原始数据的相关系数,得到的谱系图(图4)。根据成矿指示的相关系数关系,当以相关系数为0.11(置信度为0.05)为界,可以分成3大类组合,第一类组合为Cu、Ag、Mo、Sb、Bi、Co、As、Au、Fe₂O₃,第二类组合为Sn、La、Nb、F、K₂O、Pb、Zn,第三类组合为B、Ni。当以相关系数为0.54时,第一类组合又可划分为4个亚类组合,Cu、Ag、Mo、Sb、Bi、Co、As、Au、Fe₂O₃,显然,与成矿元素更加密切相关的元素为Ag、Mo、Sb、Bi、

Co、As,可能与热液成因有关,它们的异常区或高背景区主要沿侵入岩体内、外接触热液蚀变带或断裂构造带展布,这些元素的局部富集是区域成矿的重要前提。

4.3 因子分析

从相关性分析(表2)和聚类分析(图4)结果可知,B、Ni与其他16种成晕元素关系不明确,尤其是与主成矿元素呈负相关关系,因此,本次研究选取除B、Ni外的16种元素进行因子分析。根据因子累积方差贡献,提取前5个主因子并进行了极大方差正交旋转,前5个因子反映了16种元素变量的大部分地球化学信息,故可认为其包含了原始变量绝大部分的信息(刘冲昊等,2012;鲍霖等,2014)。如表3所示,F1的主要载荷因子组成为Cu、Ag、As、Sb、Co、Mo,为铜的矿化因子,代表了主要成矿热液活动阶段带入的元素组合,表明铜的矿化与硫化物矿化关系密切;F2的主要载荷因子组成为Sn、La、Nb、

表 2 红泥坡铜矿原生晕相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of primary halo in Hongnipo copper deposit

元素	Ag	Sn	B	Au	Bi	F	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Co	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo	La	Pb	As	Sb
Ag	1.000																	
Sn	0.060	1.000																
B	0.032	0.044	1.000															
Au	0.145	0.134	-0.019	1.000														
Bi	0.211	0.161	0.107	0.169	1.000													
F	0.144	0.328	0.106	0.065	0.126	1.000												
K ₂ O	-0.088	0.207	0.330	-0.034	0.057	0.523	1.000											
Fe ₂ O ₃	0.101	0.118	-0.268	0.152	0.135	0.153	-0.286	1.000										
Co	0.458	-0.095	0.048	0.120	0.627	0.139	-0.094	0.175	1.000									
Ni	0.084	-0.196	0.125	-0.026	0.137	-0.041	0.105	-0.058	0.358	1.000								
Cu	0.702	-0.011	-0.010	0.067	0.122	0.045	-0.126	0.081	0.367	0.063	1.000							
Zn	0.200	0.114	0.020	0.047	0.130	0.114	0.105	0.068	0.221	0.285	0.049	1.000						
Nb	-0.081	0.558	-0.050	0.001	-0.012	0.168	0.161	-0.082	-0.190	-0.206	-0.074	-0.007	1.000					
Mo	0.604	0.462	0.287	0.120	0.320	0.199	0.066	0.099	0.256	0.042	0.354	0.215	0.075	1.000				
La	-0.024	0.746	0.090	0.095	0.080	0.263	0.181	0.045	-0.218	-0.253	-0.090	0.147	0.481	0.360	1.000			
Pb	0.123	0.165	0.090	0.039	0.153	0.042	0.022	0.072	0.079	0.009	0.021	0.327	0.025	0.240	0.170	1.000		
As	0.627	0.011	0.096	0.011	0.252	0.187	-0.026	0.023	0.648	0.157	0.558	0.218	-0.074	0.446	-0.067	0.231	1.000	
Sb	0.536	-0.022	0.068	0.021	0.339	0.004	0.047	0.018	0.427	0.282	0.341	0.398	-0.103	0.386	-0.110	0.194	0.470	1.000

注:原生晕样品数为349个,置信度为0.05。

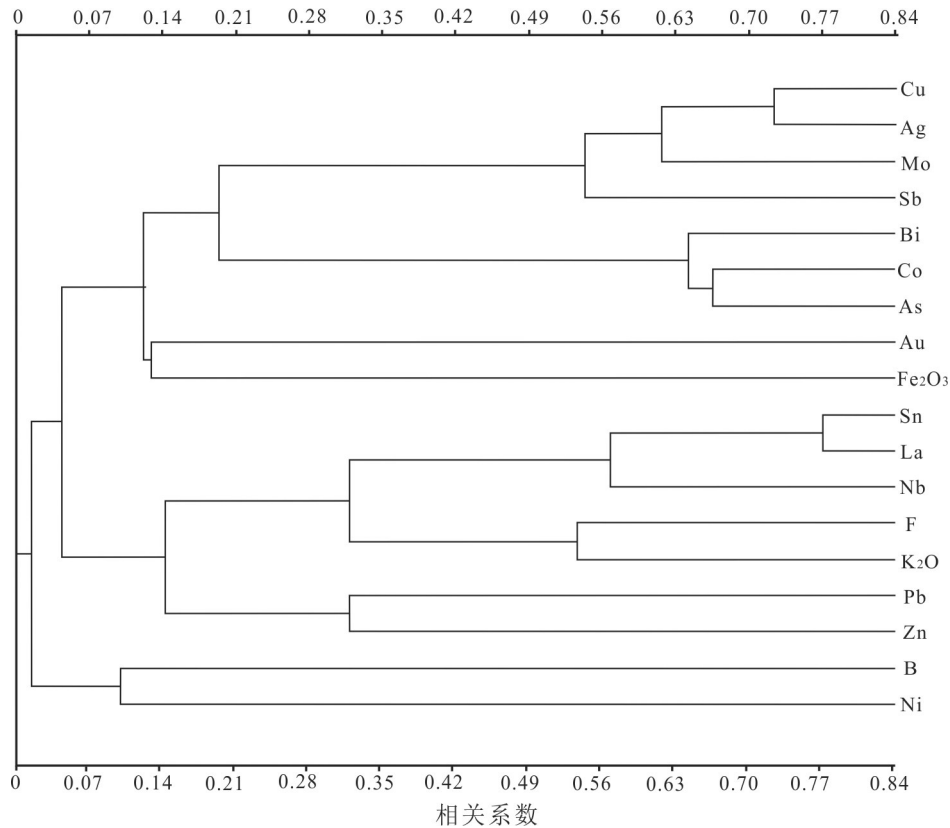


图4 红泥坡铜矿原生晕R型聚类分析谱系图

Fig.4 R-type cluster analysis pedigree of primary halos in Hongnipo copper deposit

代表尾晕元素组合;F3的主要载荷因子组成为 K_2O 、 Fe_2O_3 ,代表了与以钠长岩为主的围岩有关;F4的主要载荷因子组成为Pb、Zn,代表了后期热液活动形成的铅锌矿化阶段;F5的主要载荷因子组成为Bi、F。其中F1、F2因子的累计方差贡献较高,而F3、F4、F5因子贡献相对较低,且与铜成矿的关系尚不明确。

5 原生晕分带特征

5.1 浓度分带特征

确定各成矿指示元素(氧化物)的异常下限是准确圈定异常的基础工作(严汝珍和王文华,1989)。样品数据的处理运用多元地学空间数据管理与分析系统(GeoExpl软件),元素(氧化物)异常下限的确定方法步骤如下:首先运用迭代剔除法,以平均值加减3倍标准离差的方法逐步进行剔除数据中的特高值和特低值,直至剩余数据符合正态分布;然后按照处理后的数据算术平均值加2倍标准离差的值当作异常下限(王磊等,2020;汤磊等,2020);再按照目前广泛使用的三级浓度分带标准(即异常下限的1倍、2倍和4倍分别划分为外带、中带和内带)绘制各元素剖面浓度分布图(图5)。通过迭代剔除法计算的异常下限作为参考值,实际成图过程中适当进行了调整,使各元素能在原生晕剖面上突显最佳分带效果,符合客观实际情况。

不同的元素(氧化物)对于指导铜矿的寻找而言,都具有不同的指示意义。依据成矿指示元素的组合特征(聚类分析和因子分析),选取了Cu、Ag、Au、Bi、Co、Mo、As、Sb等8个元素,绘制了元素浓度分布图(图5),可以看出,成矿指示元素Cu、Ag、Au、Bi、Co、Mo、As、Sb的浓度分带清晰,具有内、中和外三个带,结构完整。该图还反映出以下特征:

(1)Cu元素的异常区与铜矿对应较好,内带异常区基本包含了铜矿体,异常的形态与铜矿体基本一致,天生坝组下段的1号矿体附近是内带异常分布最广泛的部位,异常向东方向沿着矿体未圈闭,向西方向暂未有钻孔控制,但通过Cu元素的内带异常分布情况来看,向西还有一定的延伸。在落函组上段的2号矿体位置出现范围较大的内带异常区,异常向两侧均为封闭。在落函组下段,在西侧的ZK-303号孔深部又出现铜内带异常,异常方向向

西可能还有延伸,间接说明热液活动的运移方向是由西向东。

(2)Ag、Au的强异常区域与铜矿体对应较好,也说明了这两个元素与主成矿元素Cu相关性较好。成晕元素Ag的内带异常主要位于天生坝组下段和落函组上段,少量位于新桥组中。成晕元素Au的内带异常在各个地层中均有分布,但其主要内带异常范围位于落函组上段,在落函组下段的ZK-303号孔深部出现内带异常,说明Au异常在深部的范围主要在西侧。

(3)前缘晕元素As、Sb的内带异常范围与铜矿体对应较好,但Sb元素的内带异常范围主要位于天生坝组下段,在落函组上段只在ZK-303号钻孔中见有内带异常出现,推测异常方向可能向西还有延伸。成晕元素As在天生坝组下段与1号铜矿体基本一致,在落函组上段和新桥组As的内带异常在矿体的西侧。反映热液的运移方向可能是由西往东沿着成矿结构面进行。

(4)尾晕元素Mo、Bi、Co的内带异常形态基本与铜矿体一致,内带异常主要分布在天生坝组下段和落函组上段,成晕元素Co在天生坝组下段的内带异常出现东边无内带异常,西侧异常为封闭的情况;在落函组上段的内带异常只出现在西侧。成晕元素Bi在落函组上段和新桥组的内带异常显示了向西侧未封闭的情况。成晕元素Mo在新桥组和落函组下段的部分内带异常区域也出现东侧无异常,异常向西延伸的情况。

通过对特征性成矿指示元素的浓度分布图可以看出,部分成晕元素在东侧并无内带异常或异常区域非常小,而在西侧的内带异常范围大,且未封闭,因此可以反映出成矿热液的运移方向可能是沿着成矿结构面由西向东运移。前缘晕元素As、Sb在深部落函组出现内带异常存在于西侧;近矿晕元素Cu、Au、Ag的内带异常存在与整个矿体或矿化体之间,向两侧为封闭;尾晕元素Mo、Bi、Co的内带异常在深部主要分布在矿体中部和西侧。据此认为矿体向西侧可能还有延伸,或断续延伸。

5.2 轴向分带特征

热液矿床的原生晕的分带特征可以指示含矿热液的运移方向,其分带序列的研究对判定矿体的剥蚀程度及深部盲矿体的追踪有着极其重要的意义

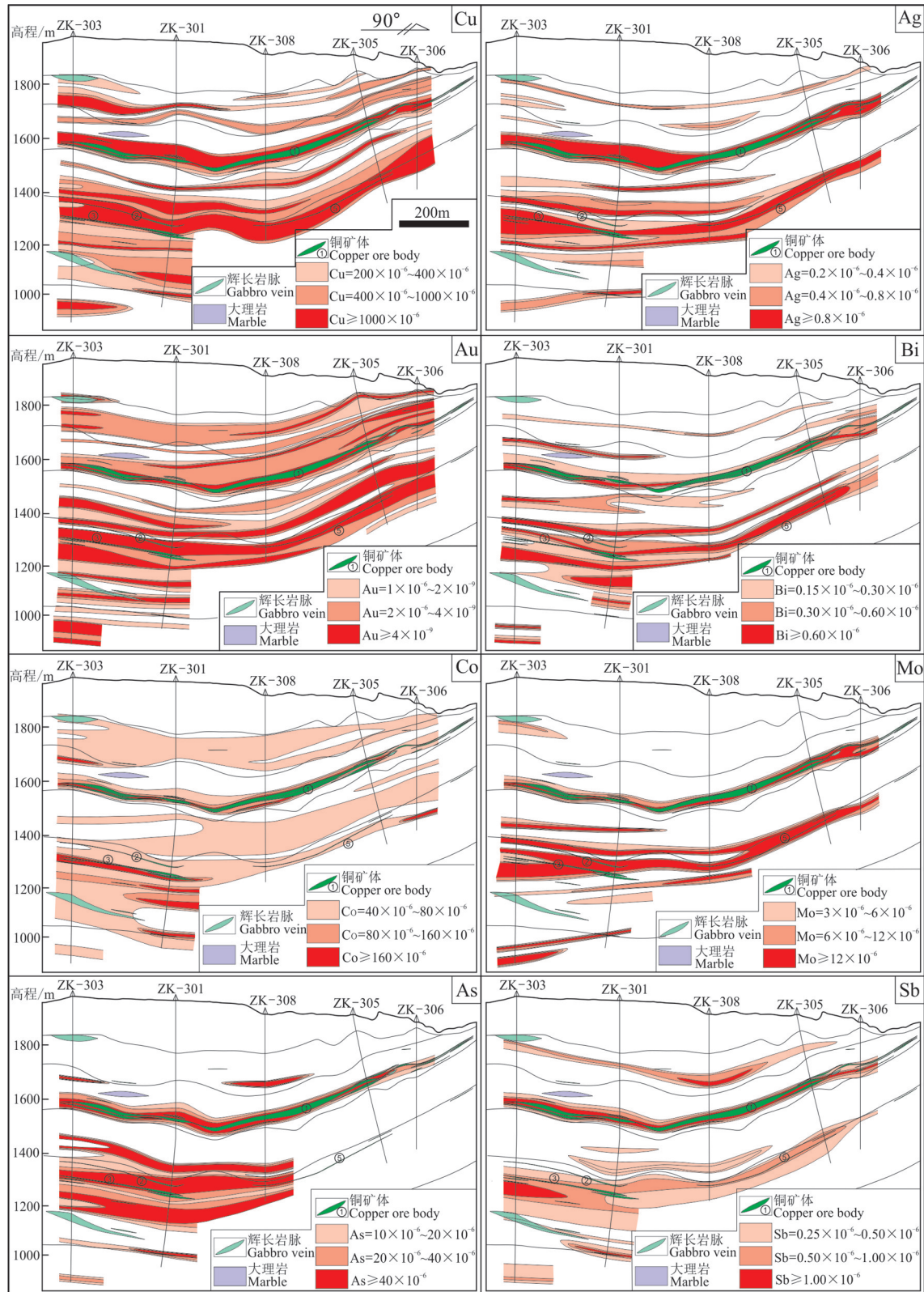


图5 红泥坡铜矿P-3线剖面各元素的浓度分布图

Fig.5 The concentration distribution of elements in the profile of P-3 exploration line

表3 红泥坡铜矿原生晕正交旋转因子载荷矩阵
Table 3 Orthogonal rotation factor load matrix of primary halos in Hongnipo copper deposit

因子	F1	F2	F3	F4	F5
Ag	0.873	0.056	0.168	0.057	-0.002
Sn	0.098	0.841	0.043	0.081	0.110
Au	0.052	0.091	0.395	-0.007	0.309
Bi	0.185	-0.011	0.232	0.424	0.554
F	0.087	0.352	-0.076	-0.146	0.705
K ₂ O	0.0334	0.4672	-0.704	-0.146	0.2451
Fe ₂ O ₃	-0.038	0.139	0.730	0.102	0.083
Co	0.526	-0.295	0.278	0.307	0.432
Cu	0.813	-0.041	0.116	-0.124	-0.063
Zn	0.159	0.032	-0.078	0.755	0.067
Nb	-0.173	0.723	0.002	-0.048	0.070
Mo	0.679	0.465	0.073	0.193	0.024
La	-0.011	0.843	0.024	0.034	0.081
Pb	0.108	0.264	-0.126	0.696	-0.178
As	0.814	-0.059	0.039	0.118	0.183
Sb	0.561	-0.147	0.050	0.466	0.076
特征值	4.0247	2.834	1.7308	1.3342	1.2424
方差%	22.3594	15.7442	9.6155	7.4125	6.9021
累积方差%	22.3594	38.1036	47.7191	55.1316	62.0337

(周向科等,2016)。近些年来,国内外有关矿床元素原生晕分带特征的研究,除了从矿床地球化学异常模式的研究中总结元素的分布规律外,还总结出了热液矿床分带序列及其定量计算方法,如 Beus and Grigorian(1977)提出的计算元素分带指数法,是目前应用最广泛的原生晕轴向分带指数计算方法。

为了研究原生晕在轴向上的分带规律,本次研究针对1号矿体采用应用较为广泛的C.B.格里戈良分带指数法(刘怀金等,2016;林成贵等,2020),根

据上文对原生晕元素组合特征分析,选取了与铜矿化较密切的14个元素进行分带序列计算。由于矿体的倾角较缓,在部分地段近水平展布(朱志敏,2012),因此原生晕的轴向分带与水平分带近乎一致,由上文可知,含矿热液运移方向为由西向东,矿液运移方向的分带即为轴向分带。轴向分带序列的具体计算方法为:(1)先计算各元素晕的线金属量(表4),采用该段晕中元素的平均含量减去背景值,然后再乘以该段晕的宽度计算线金属量,由于矿体近水平,中段的选择采用矿头至钻孔的距离和钻孔与钻孔之间的距离;(2)将各元素的晕进行标准化,每个元素乘以一个标准化系数,使各元素的线金属量具有同一量值;(3)根据晕的金属量标准化值计算分带指数(表5),它能量化反映元素在每个中段的相对聚集程度。每个元素分带指数最大值所在的标高即为该元素在分带序列中的位置,由此可大致确定轴向分带序列(从上到下):F、Nb、La→Au、Ag、Bi、Mo→Cu、Zn、Pb、As→Sn→Co、Sb。

通过对原生晕分带指数计算和研究可以发现,与中国热液矿床原生晕垂向分带序列相比(邵跃,1997),部分元素的位置出现了变化,如前缘晕元素As出现在中间,而Sb却出现在分带序列的最下端。Mo、Bi等尾晕元素出现靠近分带序列上部的位置,因此出现了反分带的情况,指示成矿热液有叠加的现象,预示深部矿体还有延伸,或者矿体有尖灭再现的可能。前人的研究认为,红泥坡铜矿为典型的“拉拉克式”铜矿,经历了早期火山-沉积变质期的初始富集作用和晚期岩浆热液叠加改造作用,晚期的叠加成矿使矿体品位变富(向杰等,2020)。

6 找矿预测

以元素分带指数值为基础,依据前缘晕元素或

表4 各成晕元素的线金属量
Table 4 The metal content of halo-forming element

钻孔	中段/m	Ag	Sn	Au	Bi	F	Co	Cu	Zn	Nb	Mo	La	Pb	As	Sb
ZK-306	240	647	675	1	143	475611	12222	1054659	15963	5012	2434	9552	3554	2719	132
ZK-305	210	2189	916	5	263	698025	37905	4313959	40679	3858	17184	13803	14340	37506	290
ZK-308	425	1728	702	3	141	617805	48893	6163452	94338	2000	5493	10314	14956	58957	437
ZK-301	350	820	750	4	147	518691	26285	910770	64222	4136	1912	10644	6469	16405	450
ZK-303	410	888	584	1	1	541678	44027	1143135	24115	1031	2501	10605	10258	28030	532

注:单位为 10^{-6} ·m。

表5 各成晕元素在不同中段的分带指数

Table 5 The zonal index of halo-forming element in different middle sections

钻孔	中段/m	Ag	Sn	Au	Bi	F	Co	Cu	Zn	Nb	Mo	La	Pb	As	Sb
ZK-306	240	0.017	0.173	0.027	0.037	0.122	0.031	0.027	0.041	0.129	0.006	0.024	0.009	0.007	0.034
ZK-305	210	0.031	0.131	0.072	0.038	0.1	0.054	0.062	0.058	0.055	0.025	0.02	0.02	0.053	0.041
ZK-308	425	0.025	0.103	0.037	0.021	0.091	0.072	0.091	0.139	0.029	0.008	0.015	0.022	0.087	0.064
ZK-301	350	0.015	0.139	0.068	0.027	0.096	0.049	0.017	0.119	0.077	0.004	0.02	0.012	0.03	0.083
ZK-303	410	0.019	0.124	0.029	0	0.115	0.094	0.024	0.051	0.022	0.005	0.023	0.022	0.06	0.113

元素组合中各元素分带指数累乘值与近矿晕元素或元素组合中各元素分带指数累乘值之比,能够有效构建深部矿体预测模型(章永梅等,2010;陈永清等,2011;李随民等,2016)。

本次研究选取了 As/Cu 、 $(As \times Sb \times 1000)/(Cu \times Ag)$ 、 $(As \times Sb)/(Sn \times Mo)$ 作为本次构建深部矿体预测模型的指标,该指标自矿体的头部至尾部(自东向西)出现持续升高的趋势(图5)。前缘晕元素组合中各元素分带指数累乘值与近矿晕元素组合中各元素分带指数累乘值之比,可以反映矿体的剥蚀程度, $(As \times Sb)/(Sn \times Mo)$ 指标从矿体头部(ZK-306)0.22→矿体中上部(ZK-305)0.69→矿体中部(ZK-308)6.68→矿体中下部(ZK-301)5.14→矿体尾部(ZK-303)10.20(表6),该指标随着矿体深度的增加而急剧增加,这表明矿体的剥蚀程度较浅,矿体向深部还有一定的延伸。

As/Cu 指标从矿体头部(ZK-306)0.26→矿体中上部(ZK-305)0.87→矿体中部(ZK-308)0.97→矿体中下部(ZK-301)1.80→矿体尾部(ZK-303)2.45(表6),该指标随着矿体深度的增加而增加。 $(As \times Sb \times 1000)/(Cu \times Ag)$ 指标从矿体头部(ZK-306)

0.52→矿体中上部(ZK-305)1.15→矿体中部(ZK-308)2.42→矿体中下部(ZK-301)9.88→矿体尾部(ZK-303)14.69(表6),该指标随着矿体深度的增加而急剧增加,表明这些地球化学参数指标是预测深部矿体的有效指标。前已述及,矿床成矿热液的运移方向是由矿区西部向东部运移,据此认为成矿地质体应该在矿区的西部(图6)。近年来,在拉拉铜矿区及外围开展了大量物探工作(邱林等,2016;刘晓葳等,2016;王毅和刘君,2018),其中,在红泥坡铜矿区南部利用大地电磁测深(MT)剖面解译出了深部有非常大的近直立低阻异常,异常延深超过40 km,且可以与浅部低阻异常相连接,据此推测该处可能为岩浆物质运移的通道,也就是说成矿物质和成矿热液就是从这个岩浆物质通道向外运移,到一定的环境发生沉淀,形成工业矿体。因此认为红泥坡铜矿区的西南部是下一步开展外围的找矿方向。

7 结论

(1)红泥坡铜矿主要赋存在天生坝组下段和落函组上段,对原生晕样品进行统计分析、相关性分析和因子分析表明,成矿元素Cu,主成矿元素Cu与Ag、Co、Mo、As、Sb等元素相关性较好。

(2)从成矿指示元素的分布指示成矿热液的运移方向是由西向东运移,成矿指示元素具有明显的分带,采用格里戈良分带指数法计算红泥坡铜矿1号矿体的轴向分带序列(从上到下):F、Nb、La→Au、Ag、Bi、Mo→Cu、Zn、Pb、As→Sn→Co、Sb。

(3)通过建立地球化学参数指标,构建了红泥坡铜矿的找矿预测模型,认为红泥坡铜矿的1号矿体向西南方向还有延伸。

致谢:在样品采集过程中得到四川省地质矿产

表6 红泥坡铜矿1号矿体深部预测指标

Table 6 Prediction index of no. 1 ore body in Hongnipo copper deposit

中段	As/Cu	$(As \times Sb \times 1000)/(Cu \times Ag)$	$(As \times Sb)/(Sn \times Mo)$
ZK-306	0.26	0.52	0.22
ZK-305	0.87	1.15	0.69
ZK-308	0.96	2.42	6.68
ZK-301	1.80	9.88	5.14
ZK-303	2.45	14.69	10.20

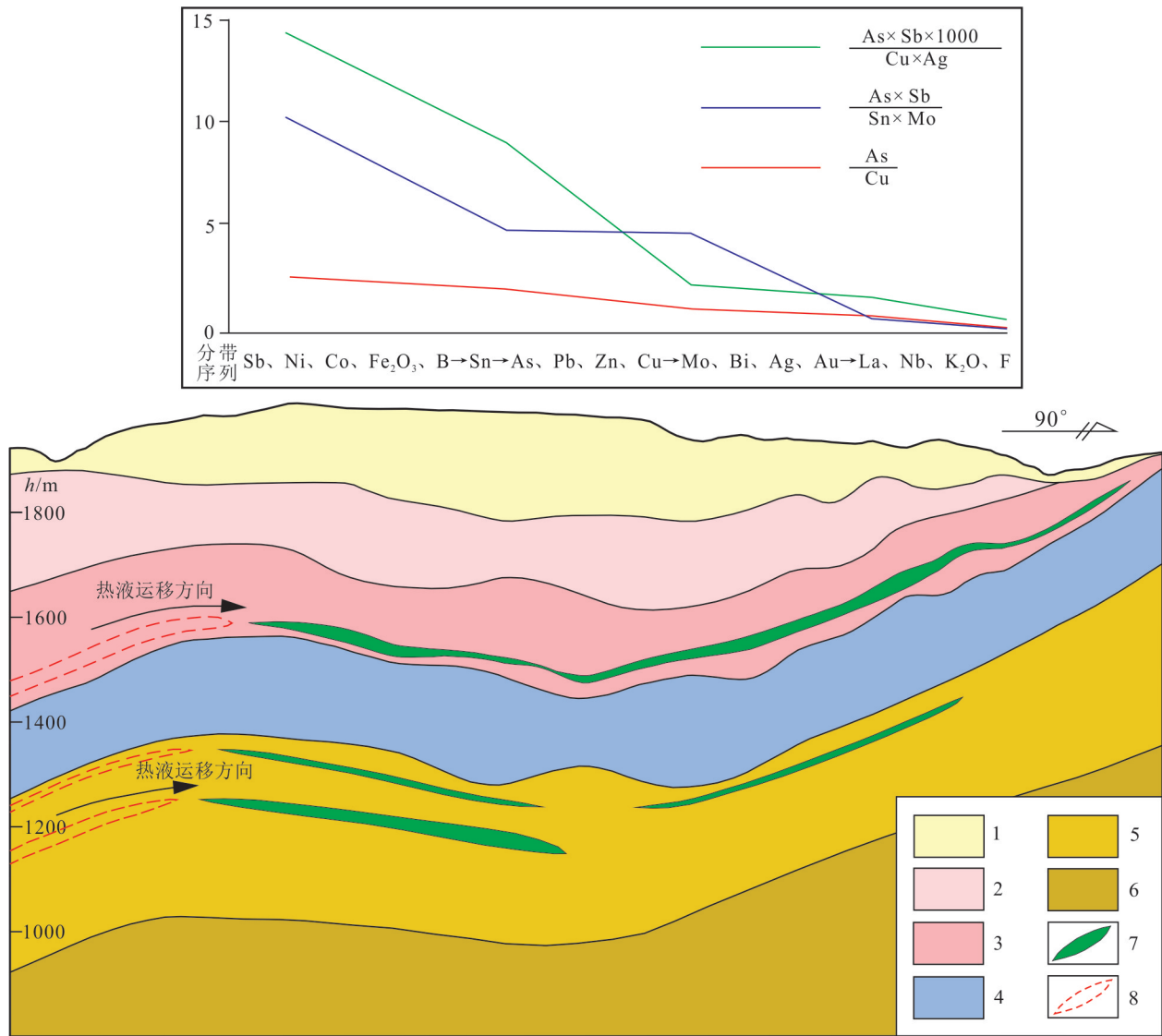


图6 红泥坡铜矿地质-地球化学找矿预测模型

1—第四系;2—天生坝组上段;3—天生坝组下段;4—新桥组;5—落函组上段;6—落函组下段;7—铜矿体;8—预测矿体

Fig.6 Geological and geochemical prospecting prediction model for Hongnipo copper deposit

1—Quaternary; 2—Upper member of Tianshengba Formation; 3—Lower member of Tianshengba Formation; 4—Xinqiao Formation; 5—Upper member of Luodang Formation; 6—Lower member of Luodang Formation; 7—Copper ore body; 8—Predict ore body

开发局403地质队龚灵明工程师等野外项目组的帮助,样品分析测试工作得到河南省岩石矿物测试中心胡家祯副所长的大力支持,匿名审稿专家和编辑部老师为本文提出了建设性意见和建议,在此一并表示衷心感谢!

注释

①四川省地质矿产开发局403地质队. 2016. 四川省会理县红泥坡矿区外围铜矿普查报告.

References

Bao Lin, Shen Junfeng, Cao Weidong, Bo Haijun, Li Jinchun, Li Ke, Wang Jiabin. 2014. Primary halo zoning of No.3 ore vein in the Gangcha gold deposit of Gansu and its ore-prospecting significance [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 38(4): 660-666 (in Chinese with English abstract).
 Beus A A, Grigorian S V. 1977. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits [M]. Illinois: Applied Publishing Ltd.
 Chen Hui, Lin Lujun, Pang Zhenshan, Cheng Zhizhong, Xue Jianling,

- Tao Wen, Ma Yixing, Gong Lingming, Shen Hongtao. 2021. Construction and demonstration of an ore prospecting model for the Lala copper deposit in Huili, Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 309–327 (in Chinese with English abstract).
- Chen Junlin, Fu Lebing, Zhao Jiangnan, Tang Yang, Zhao Xu, Liu Yan, Xie Zhiyong, Qi Yueqing. 2017. Characteristics of primary geochemical halo and deep prospecting target delineation, Guolulongwa gold deposit, east Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 161–167 (in Chinese with English abstract).
- Chen W T, Zhou M F. 2012. Paragenesis, stable isotopes, and molybdenite Re–Os isotope age of the Lala iron–copper deposit, southwest China [J]. *Economic Geology*, 107(3): 459–480.
- Chen Yongqing, Han Xuelin, Zhao Hongjuan, Cheng Zhizhong, Taang Yu, Chen Wu. 2011. Characteristics of primary halo zonation and prediction pattern of deep orebody of the Huaobaote Pb–Zn–Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 236–246 (in Chinese with English abstract).
- Huang Congjun, Li Zeqin, Wang Jiangzhen. 2015. Pb isotopic features of the Lala IOCG ore deposit on the southwestern margin of the Yangtze Block and their significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 34(2/3): 501–507 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xipeng, Zhang Jili, Li Shiyan, Yang Kaijun, Hu Hongbo. 2016. Geological features and their prospecting significance of the Hongnipo Cu deposit [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 36(2): 264–268 (in Chinese with English abstract).
- Li Suimin, Li Yucheng, Han Yuchou, Kong Linghai, Zhao Shumei, Wang Jingtao, Wang Junge. 2016. The characteristics of vertical primary halo zoning in the Louli gold deposit, Handan city, Hebei Province [J]. *Geology in China*, 43(5): 1637–1644 (in Chinese with English abstract).
- Li Zeqin, Hu Ruizhong, Wang Jiangzhen, Liu Jiajun, Li Chaoyang, LiuYuping, Yerong. 2002. Lala Fe–oxide–Cu–Au–U–REE ore deposit, Sichuan China—An example of superimposed mineralization [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(4): 258–260 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chenggui, Cheng Zhizhong, Lü Zhicheng, Yan Tingjie, Jia Ruya, Yao Xiaofeng, Mi Kuifeng, Li Kangning. 2020. Characteristics of primary halo zonation and deep ore prediction in Zaozigou gold deposit, Gansu Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50 (1): 70–84(in Chinese with English abstract).
- Liu Chonghao, Liu Jiajun, Wang Jianping, Yang Longbo, Wang Weiyu, Wang Lixin, Yu Kangwei, Wang Lingtong. 2012. Primary halo characteristics of the north ore zone in the Huachanggou gold deposit, Lueyang County, Shanxi Province [J]. *Geology in China*, 39(5): 1397–1405 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huaijin, Yang Yongqiang, Sun Yingqiang, Xin Jiang, Wen Haicheng, Li Hao. 2016. The primary halo characteristics of Bianjiadayuan Pb–Zn–Ag polymetallic deposit in Inner Mongolia, China and ore prediction to depth [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 31(2): 245–252 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaowei, Qiu Lin, Liu Kangwei, Liao Xiaofeng. 2016. Application of high–power induced polarization method on the north part of the Luodang deposit in Lala copper mining area [J]. *Northwestern Geology*, 49(3): 187–192 (in Chinese with English abstract).
- Lu Shudong, Li Bing, Wang Quanle, Qi Xiaojun, Liu Guorong, Ding Gaoming. 2016. Structural superimposed halo and metallogenic prediction in Tiyyer gold deposit, Tuoli County, Xinjiang [J]. *Gold*, 37(12): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China [J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Lin, Zhou Jun, Liu Xiaowei, Cao Ligang, Wang Pinfeng. 2016. Application of integrated geophysical methods to M163–1 aeromagnetic anomaly inspection of Lala, Huili, Sichuan Province [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(5): 603–609 (in Chinese with English abstract).
- Shao Yue. 1997. *Rock Survey (Primary Halo Method) of Hydrothermal Deposits Prospecting* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Sun Huashan, Sun Lin, Cao Xinshi, Wang Chao, Tan Jun, Liu Fujiang, Yang Kaichun. 2008. Axial/vertical zoning characteristics of primary halos and geochemical exploration indicators for deep ore body prognosis in Shangzhuang gold deposit, northwest Jiaodong peninsula, Shandong Province [J]. *Mineral Deposits*, 27(1): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- Tang Lei, Lin Chenggui, Cheng Zhizhong, Jia Ruya, Li Hongrui, Li Kangning. 2020. 3D characteristics of primary halo and deep prospecting prediction in the Zaozigou gold deposit Hezuo City Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 39(8): 1173–1181(in Chinese with English abstract).
- Tao Wen, Shen Heming, Xue Jianling. 2014. New progress in peripheral exploration of Lala copper deposit in Sichuan [J]. *Mineral Deposits*, 33(S1): 1083–1084 (in Chinese).
- Wang Lei, Hu Zhaoguo, Li Xiangmin, Yan Haizhong, Yang Chao. 2020. Geochemical characteristics of stream sediments and prediction of mining prospects in the Wulandaban—Zhazigou area, Danghe South Mountain, Gansu Province [J]. *Geology in China*, 47 (2): 516–527 (in Chinese with English abstract).

- Wang Shengwei, Jiang Xiaofeng, Yang Bo, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Zhou Qing, Guo Yang, Wang Zizheng, Yang Bin. 2020. The Proterozoic tectonic movement in Kangdian area I: Kunyan intracontinental rift, mantle plume and its metallogenesis [J]. *Geological Review*, 62(6): 1353–1377(in Chinese with English abstract).
- Wang Yi, Liu Jun. 2018. Deep prospecting prediction of Lala copper mine based on CSAMT method in Huili County, Sichuan Province [J]. *Modern Mining*, 34(4): 19–25, 30 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Jie, Chen Jianping, Xiao Keyan, Li Shi, Zhang Zhiping, Zhang Ye. 2019. 3D metallogenic prediction based on machine learning: A case study of the Lala copper deposit in Sichuan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 38(12): 2010–2021 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Jie, Xiao Keyan, Chen Jianping, Li Shi. 2020. 3D metallogenic prediction based on metallogenic system analysis: A case study in the Lala copper mine of Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 135–143 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yi. 2018. Characteristics and Economic Evaluation of Hongnipo Copper Deposit in Huili, Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Xiao Yuanfu, Sun Yan, Zhao Zhiqiang, Niu Gang, Zhang Lin, Kang Congxuan. 2010. Modes of occurrence of useful associated components in the Lala copper deposit, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 37(2): 463–469 (in Chinese with English abstract).
- Yan Ruzhen, Wang Wenhua. 1989. Zoning and anomaly delineation method of borehole primary halo [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 9(2): 64–70 (in Chinese).
- Zhang Chuanyu, Zhang Jun, Li Wanting, Wang Jian, Liu Anlu. 2013. Characteristics of primary halos and prediction of the orebody No.3 in the Shangcheng gold deposit, Anhui, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(3): 159–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wupeng, Yu Can, Li Feng, Zeng Qingtian, Zhang Dabing, Zhang Zhifa, Lü Junnan. 2016. Geological characteristics and ore-controlling factors of Hongnipo copper deposit in Huili of Sichuan [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 6(2): 80–84 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, Dong Shuyi, Jing Liangbing, Wang Liqiang, Zhang Yan, Shen Yang, Huang Zhiqian, Zhang Xingshun. 2010. The geochemical features of primary halo and the evaluation of deep mineralization prospect of Liubagou gold deposit, Inner Mongolia [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 209–221 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhimin, Zeng Lingxi, Zhou Jiayun, Luo Liping, Chen Jiabiao, Shen Bing. 2009. Lala iron oxide–copper–gold deposit in Sichuan Province: Evidences from mineralography [J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(4): 485–495 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhimin. 2012. Metallogenic background and deposit types of Hongnipo copper deposit in Huili, Sichuan [J]. *Mineral Deposits*, 31(S1): 413–414 (in Chinese).
- Zhu Zhimin, Li Tingxue, Chen Liang, Tan Hongqi, Liu Yingdong. 2014. Sulfur isotope geochemistry of the Lala IOCG deposit in Sichuan Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(1): 28–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayun, Chen Jiabiao, Shen bing, Zhu Zhimin, Liu Feiyan, Luo Liping, Li Xiaoyu. 2008. Tectono–metallogenic mineralization for Lala copper deposit, Sichuan [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 98–104 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiangke, Wang Jianguo, Liu Yinchun, Lei Hengyong, Li Guangjing. 2016. Primary superimposed halo features and deep ore– prospecting in the Donggualin gold deposit, Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 43(5): 1710–1720(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍霖, 申俊峰, 曹卫东, 薄海军, 李金春, 李可, 王佳新. 2014. 甘肃岗盆金矿3号矿脉原生晕分带特征及其找矿意义[J]. *物探与化探*, 38(4): 660–666.
- 陈辉, 林鲁军, 庞振山, 程志中, 薛建玲, 陶文, 马一行, 龚灵明, 申红涛. 2021. 四川会理拉拉铜矿找矿预测模型构建与找矿示范[J]. *地学前缘*, 28(3):309–327.
- 陈俊霖, 付乐兵, 赵江南, 唐洋, 赵旭, 刘颜, 谢智勇, 祁月清. 2017. 东昆仑东段果洛龙洼金矿床原生晕分带特征与深部找矿靶区圈定[J]. *地质科技情报*, 36(1): 161–167.
- 陈永清, 韩学林, 赵红娟, 程志中, 唐宇, 陈武. 2011. 内蒙花敖包特Pb–Zn–Ag多金属矿床原生晕分带特征与深部矿体预测模型[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 36(2): 236–246.
- 黄从俊, 李泽琴, 王奖臻. 2015. 扬子西南缘拉拉 IOCG 矿床 Pb 同位素特征及意义[J]. *地质通报*, 34(2/3): 501–507.
- 胡夕鹏, 张济礼, 李世燕, 杨开均, 胡红波. 2016. 红泥坡铜矿床地质特征及找矿意义[J]. *四川地质学报*, 36(2): 264–268.
- 李随民, 李玉成, 韩玉丑, 孔令海, 赵淑梅, 王京涛, 王俊革. 2016. 邯鄹娄里金矿床原生晕垂向分带特征研究[J]. *中国地质*, 43(5): 1637–1644.
- 李泽琴, 胡瑞忠, 王奖臻, 刘家军, 李朝阳, 刘玉平, 叶林. 2002. 中国首例铁氧化物–铜–金–铀–稀土型矿床的厘定及其成矿演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 21(4): 258–260.
- 林成贵, 程志中, 吕志成, 颜廷杰, 贾儒雅, 姚晓峰, 宓奎峰, 李康宁. 2020. 甘肃省早子沟金矿原生晕分带特征及深部找矿预测[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 50(1): 70–84.

- 刘冲昊, 刘家军, 王建平, 杨隆勃, 王维钰, 王立新, 于康伟, 王凌童. 2012. 陕西省略阳县铀厂沟金矿北矿带地球化学原生晕特征及其地质意义[J]. 中国地质, 39(5): 1397-1405.
- 刘怀金, 杨永强, 孙引强, 辛江, 温海成, 李浩. 2016. 内蒙古边家大院铅锌银多金属矿床原生晕地球化学特征及深部找矿预测[J]. 地质找矿论丛, 31(2): 245-252.
- 刘晓葳, 邱林, 柳康伟, 廖晓峰. 2016. 大功率激发极化法在拉拉铜矿落鹫北部找矿中的应用[J]. 西北地质, 49(3): 187-192.
- 卢树东, 李冰, 王全乐, 祁小军, 刘国荣, 丁高明. 2016. 新疆托里县提依尔金矿床构造叠加晕研究及成矿预测[J]. 黄金, 37(12): 12-19.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 邱林, 周军, 刘晓葳, 曹礼刚, 王品峰. 2016. 综合物探在四川会理拉拉M163-1航磁异常查证中的应用[J]. 物探化探计算技术, 38(5): 603-609.
- 邵跃. 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 孙华山, 孙林, 曹新志, 王超, 谭俊, 刘福江, 杨开春. 2008. 胶西北上庄金矿床原生晕轴(垂)向分带特征及深部矿体预测的勘查地球化学标志[J]. 矿床地质, 27(1): 64-70.
- 汤磊, 林成贵, 程志中, 贾儒雅, 李鸿睿, 李康宁. 2020. 甘肃省合作市早子沟金矿原生晕三维特征及深部找矿预测[J]. 地质通报, 39(8): 1173-1181.
- 陶文, 沈和明, 薛建玲. 2014. 四川拉拉铜矿外围勘查新进展[J]. 矿床地质, 33(S1): 1083-1084.
- 王磊, 胡兆国, 李向民, 闫海忠, 杨超. 2020. 甘肃省党河南山乌兰达坂沟—扎子沟地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景预测[J]. 中国地质, 47(2): 516-527.
- 王生伟, 蒋小芳, 杨波, 孙晓明, 廖震文, 周清, 郭阳, 王子正, 杨斌. 2016. 康滇地区元古宙构造运动 I: 昆阳陆内裂谷、地幔柱及其成矿作用[J]. 地质评论, 62(6): 1353-1377.
- 王毅, 刘君. 2018. 四川会理拉拉铜矿 CSAMT 法深部找矿预测[J]. 现代矿业, 34(4): 19-25, 30.
- 向杰, 陈建平, 肖克炎, 李诗, 张志平, 张焯. 2019. 基于机器学习的三维矿产定量预测——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地质通报, 38(12): 2010-2021.
- 向杰, 肖克炎, 陈建平, 李诗. 2020. 基于成矿系统的三维定量预测研究——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地球学报, 41(2): 135-143.
- 校轶. 2018. 四川会理红泥坡铜矿床特征及经济评价[D]. 成都: 成都理工大学.
- 肖渊甫, 孙燕, 赵志强, 牛刚, 张林, 康丛轩. 2010. 四川省拉拉铜矿床有用伴生组分赋存状态研究[J]. 中国地质, 37(2): 463-469.
- 严汝珍, 王文华. 1989. 钻孔原生晕组分分带及圈定异常方法[J]. 四川地质学报, 9(2): 64-70.
- 张传昱, 张均, 李婉婷, 王健, 刘安璐. 2013. 安徽上成金矿床Ⅲ号矿体原生晕特征及深部预测[J]. 地质科技情报, 32(3): 159-165.
- 张武鹏, 余璨, 李峰, 曾庆田, 张达兵, 张志发, 吕俊男. 2016. 四川会理红泥坡铜矿地质特征及找矿标志[J]. 有色金属工程, 6(2): 80-84.
- 章永梅, 顾雪祥, 程文斌, 董树义, 景亮兵, 王立强, 张岩, 沈阳, 黄志全, 张兴顺. 2010. 内蒙古柳坝沟金矿床原生晕地球化学特征及深部成矿远景评价[J]. 地学前缘, 17(2): 209-221.
- 朱志敏, 曾令熙, 周家云, 罗丽萍, 陈家彪, 沈冰. 2009. 四川拉拉铁氧化物铜金矿床(IOCG)形成的矿相学证据[J]. 高校地质学报, 15(4): 485-495.
- 朱志敏. 2012. 四川会理红泥坡铜矿成矿背景及矿床类型[J]. 矿床地质, 31(S1): 413-414.
- 朱志敏, 李庭学, 陈良, 谭洪旗, 刘应东. 2014. 四川拉拉铁氧化物铜金矿床硫同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 20(1): 28-37.
- 周家云, 陈家彪, 沈冰, 朱志敏, 刘飞燕, 罗丽萍, 李潇雨. 2008. 四川拉拉铜矿构造成矿动力学机制[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 98-104.
- 周向科, 王建国, 刘荫椿, 雷恒永, 李光景. 2016. 云南冬瓜林金矿床原生叠加晕特征与深部找矿[J]. 中国地质, 43(5): 1710-1720.