

# 西藏扎西康铅锌多金属矿床原生晕特征

卿成实<sup>1</sup>, 丁俊<sup>1,2</sup>, 周清<sup>2</sup>, 吴建阳<sup>2</sup>, 董磊<sup>2</sup>, 董随亮<sup>2</sup>, 夏祥标<sup>2</sup>,  
李晓霞<sup>3</sup>, 冯韶东<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081;  
3. 西藏华钰矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:** 原生晕法在长期大量的勘探实践中, 已被证明是一种能有效研究异常分布、地球化学特征、剥蚀程度, 推测隐伏矿体, 评价深部潜力, 进行找矿预测的地球化学勘探方法。在西藏扎西康铅锌多金属矿床的实际勘查基础上, 研究矿体的元素分带性特征, 即原生晕轴向分带特征, 可为研究控矿因素、成矿物质来源、围岩蚀变、成矿期次、矿床成因等方面提供地球化学依据。本文通过采集扎西康矿区0号线剖面ZK006、ZK007、ZK009、ZK010等4个钻孔的岩石样品, 选取Cu、Pb、Zn、W、Mo、Sb、Bi、Ga、Sn、In、Au、Ag等成矿元素进行分析, 来研究该矿床的原生晕地球化学特征及规律。结果表明, 元素异常及原生晕集中分布在4400m以下, 成矿物源不仅由周围地层提供, 还可能来自于深部的隐伏岩体, 成矿过程可能经历了多期次的叠加作用。这些研究成果暗示扎西康的工业矿体在深部还有继续下延的良好前景。

**关键词:** 原生晕; 相关性分析; 因子分析; 铅锌多金属矿床; 扎西康; 西藏

中图分类号: P618.4; P632<sup>+</sup>.2

文献标识码:A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1113-14

## Primary halo characteristics of the Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit, Tibet

QING Cheng-shi<sup>1</sup>, DING Jun<sup>1,2</sup>, ZHOU Qing<sup>2</sup>, WU Jian-yang<sup>2</sup>, DONG Lei<sup>2</sup>, DONG Sui-liang<sup>2</sup>,  
XIA Xiang-biao<sup>2</sup>, LI Xiao-xia<sup>3</sup> and FENG Shao-dong<sup>3</sup>

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Tibet Huayu Mining Development Co., Ltd., Lhasa 850000, China)

**Abstract:** In previous exploration, researchers commonly considered that the primary halo method is an effective geochemical means for studying the distribution, geochemistry and denudation of the anomaly, and this method can also help predict concealed orebodies and assess mineral resource potential in the depth. Based on previous exploration of the Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit in Tibet, the authors studied vertical zoning of the deposit, and the results achieved can provide reliable geochemical information in such aspects as factors affecting mineralization, metal source, wall rock alteration, metallogenic stages and ore genesis. Primary halo study was carried out by analyzing Cu, Pb, Zn, W, Mo, Sb, Bi, Ga, Sn, In, Au, Ag and some other metallogenic elements in rock samples from four selected drill holes of ZK006, ZK007, ZK009 and ZK010 along No. 0 exploration line in the mining area. It is shown that the element anomalies and primary halos mainly occur below the altitude of 4 400 m, metal sources might have been derived from both strata and concealed rock mass in the depth,

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-10-22

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113036000); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2011CB403105)

作者简介: 卿成实(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向: 矿床学与成矿预测, E-mail: 196251150@qq.com; 通讯作者: 丁俊, 男, 研究员, 矿床学与成矿预测研究方向, E-mail: cddjun@163.com。

and mineralization might have experienced multiple-stage superposition. The authors hold that the economic ore-bodies of the Zhaxikang deposit might have a good prospect of downward extension in the depth.

**Key words:** primary halo; correlation analysis; factor analysis; lead-zinc polymetallic deposit; Zhaxikang; Tibet

原生晕是基于成矿作用中形成、赋存于基岩中的地球化学异常，反映了最直接的原生地球化学特征（邵跃等，1997）。众多矿床勘查实际表明，研究矿体周围发育的原生晕特征，是判断异常分布、地球化学特征、剥蚀程度，推测隐伏矿体、评价深部潜力，进行找矿预测的一个有效方法（朱章森等，1986；程金柱等，1988；李惠等，1999，2005；代西武等，2000；成杭新等，2007）。基于此的岩石地球化学方法找矿，已在世界范围内被公认为是寻找隐伏矿床的最有效方法之一（Beus *et al.*., 1977；Levinson, 1980；吴承烈等，1998）。

位于北喜马拉雅锑（金）多金属构造成矿带东段的扎西康铅锌多金属矿床，资源量已逾大型，目前开采深度已近400 m（海拔4 500 m附近），对于更深位置的成矿规律研究显得尤其重要。根据前人的研究，矿床成因存在较大分歧，主要包括地下热泉或是硅质岩围岩成因（杨竹森等，2006；孟祥金等，2008）、喷流沉积—热泉改造成因（李关清，2010；张建芳，2010；郑有业等，2012）、岩浆热液成因（林彬等，2013；徐云峰等，2013）、叠加改造型成因（梁维等，2013，2014）、MVT型铅锌矿床成因（程文斌等，2013）。在元素分带性方面，前人研究集中在矿石样品的Pb、Zn、Sb、Ag元素品位和厚度变化（徐云峰等，2013），缺少其他成矿元素在剖面上的分布规律研究。因此针对扎西康铅锌多金属矿床的勘查实际，研究矿体的元素分带性特征，即原生晕轴向分带特征，可为研究控矿因素、矿质来源、围岩蚀变、成矿期次、矿床成因等方面提供相应的地球化学依据。

## 1 矿床地质特征

扎西康铅锌多金属矿床在大地构造上位于特提斯喜马拉雅，印度河—雅鲁藏布江缝合带（IYS）与高喜马拉雅变质岩片之间的北喜马拉雅沉积岩区东部，近东西向的羊卓雍—拿日雍复式向斜的东南端。北喜马拉雅沉积岩区内由西而东形成了萨拉岗、车穷卓布、哲古、马扎拉、扎西康等多个锑（金）矿床，构成了一条典型的北喜马拉雅锑（金）多金属构造成矿带。区内地层系统属喜马拉雅地层区中的康马—隆

子和北喜马拉雅两个地层分区，以康马—隆子地层分区为主，北喜马拉雅地层仅在南部出露。

### 1.1 地层

矿区内地层有下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）和第四系（Q）（图1）。下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）为一套以黑色含碳酸盐板岩与泥灰岩、砂岩互层为主的地层，夹有燧石团块、凝灰质砂岩，属深—浅海相沉积。地层主要表现为一倾向北东的单斜地层，产状较缓，倾角一般在30°以下，多发生有层间滑动，并伴有石英脉充填。在矿区西南边被一系列的北东向断裂错断，呈阶梯型分布。

### 1.2 构造

矿区内地层有下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）和第四系（Q）（图1）。下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）为一套以黑色含碳酸盐板岩与泥灰岩、砂岩互层为主的地层，夹有燧石团块、凝灰质砂岩，属深—浅海相沉积。地层主要表现为一倾向北东的单斜地层，产状较缓，倾角一般在30°以下，多发生有层间滑动，并伴有石英脉充填。在矿区西南边被一系列的北东向断裂错断，呈阶梯型分布。

### 1.3 岩浆岩

矿区内地层有下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）和第四系（Q）（图1）。下侏罗统日当组（J<sub>1r</sub>）为一套以黑色含碳酸盐板岩与泥灰岩、砂岩互层为主的地层，夹有燧石团块、凝灰质砂岩，属深—浅海相沉积。地层主要表现为一倾向北东的单斜地层，产状较缓，倾角一般在30°以下，多发生有层间滑动，并伴有石英脉充填。在矿区西南边被一系列的北东向断裂错断，呈阶梯型分布。

### 1.4 矿石特征

扎西康矿床的矿体呈脉状充填于南北向断裂裂隙中，围岩蚀变较弱，主要发育硅化和碳酸盐化，其它围岩蚀变较少。原生矿石主要有致密块状铅锌矿、浸染状铅锌矿和针—柱状辉锑矿（含银）、自形—半自形黄铁矿和毒砂，最近在深部发现浸染状—脉状黄

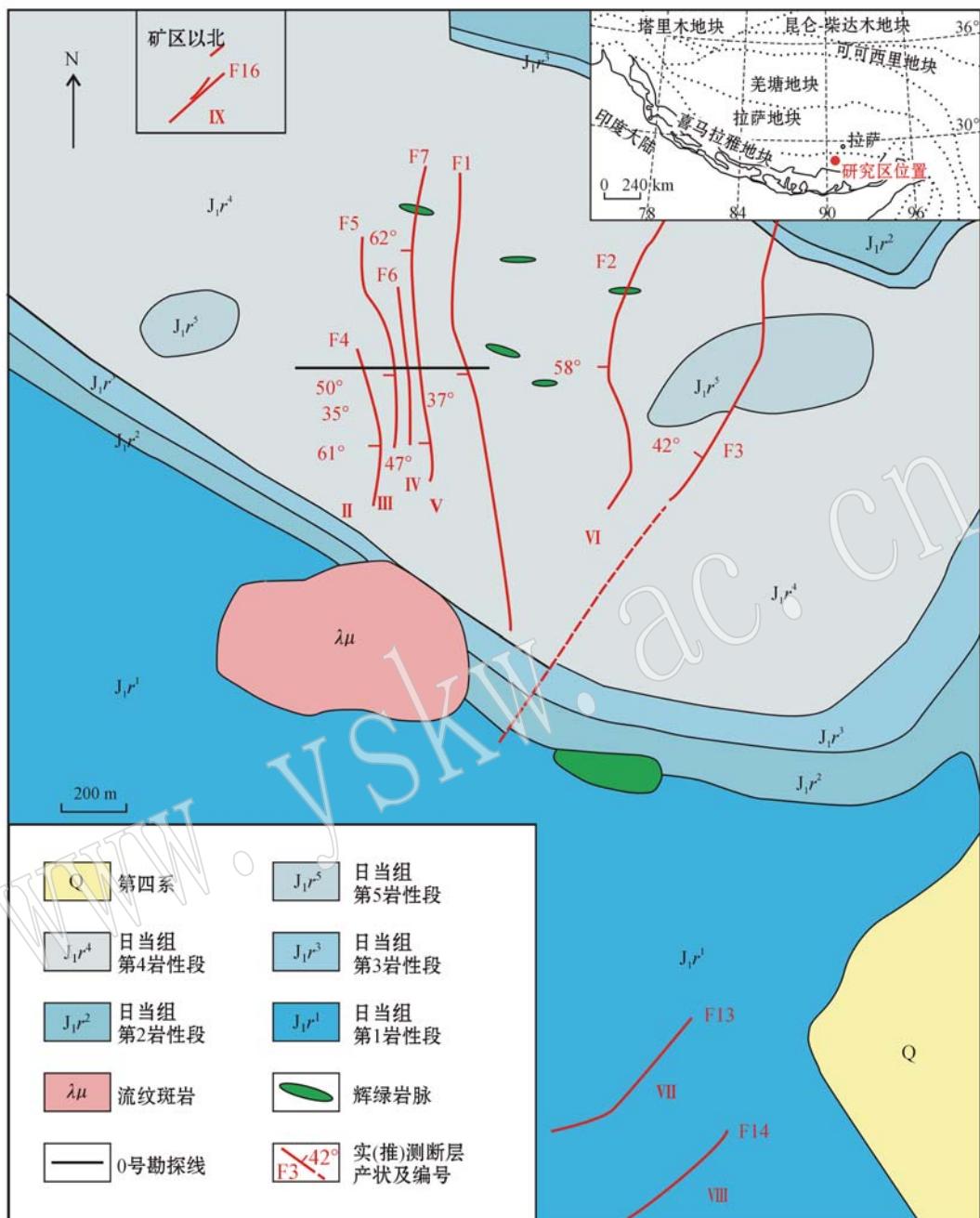


图1 扎西康矿区地质图(矿体产于各南北向断裂中)(图据张刚阳, 2012; 梁维, 2014)

Fig. 1 Geological map of the Zhaxikang mining area (orebodies located in the NS-trending fracture)  
(after Zhang Gangyang, 2012; Liang Wei, 2014)

铜矿矿石。地表及浅部形成氧化型矿石。矿石构造包含树枝状构造、似条带状构造、脉状-网脉状构造、晶洞构造、块状构造、梳状构造、浸染状构造、角砾状构造、同心环状构造、薄膜状构造等；矿石结构主要有自形晶结构、半自形晶结构、他形晶结构、浸蚀结构、交代结构、交代残余结构、骸晶结构、乳浊状结

构、揉皱结构等。金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、毒砂、辉锑矿、硫锑铅矿、硫锑铅银矿、针状纤硫锑铅矿、黄铁矿、黄铜矿等，脉石矿物主要为石英、方解石、绿泥石。在表生风化作用下地表还形成有铁锰质的次生氧化物，另见少量孔雀石。

## 2 0号勘探线原生晕特征研究

### 2.1 原生晕样品的采集

本研究对0号勘探线剖面中ZK006、ZK007、ZK009、ZK010钻孔进行了围岩及矿石样品采集,具体采样点分布如图2所示。为保证原生晕研究能同时控制围岩及矿体部分,并重点突出矿体及其附近的原生晕特征,在远离矿体部位以按照间隔50 m等间距采样;在靠近矿体的位置按照20 m间隔等间距采样。测试分析在国土资源部西南矿产资源监督检测中心完成,测试元素为Cu、Pb、Zn、W、Mo、Sb、Bi、

Ga、Sn、In、Au、Ag,测试仪器为BS-124S分析天平-1、Z-5000原子吸收分光光度计-2、ELEMENT-II高性能高分辨等离子质谱仪,检出精度优于 $10^{-9}$ ,相对标准偏差(RFB)控制在3%以内,检测环境温度24℃,湿度50%。

### 2.2 元素统计分析特征

通过对多个元素进行分析,寻找出元素两两之间的密切程度,以此反映一些地质特征,分析元素间的相关性便能更好找出特征指示元素,以开展进一步工作。由于矿石样品中一些分析元素含量过高,影响巨大,因此仅对0号勘探线钻孔样中的围岩样品进行相关性分析,结果见表1。

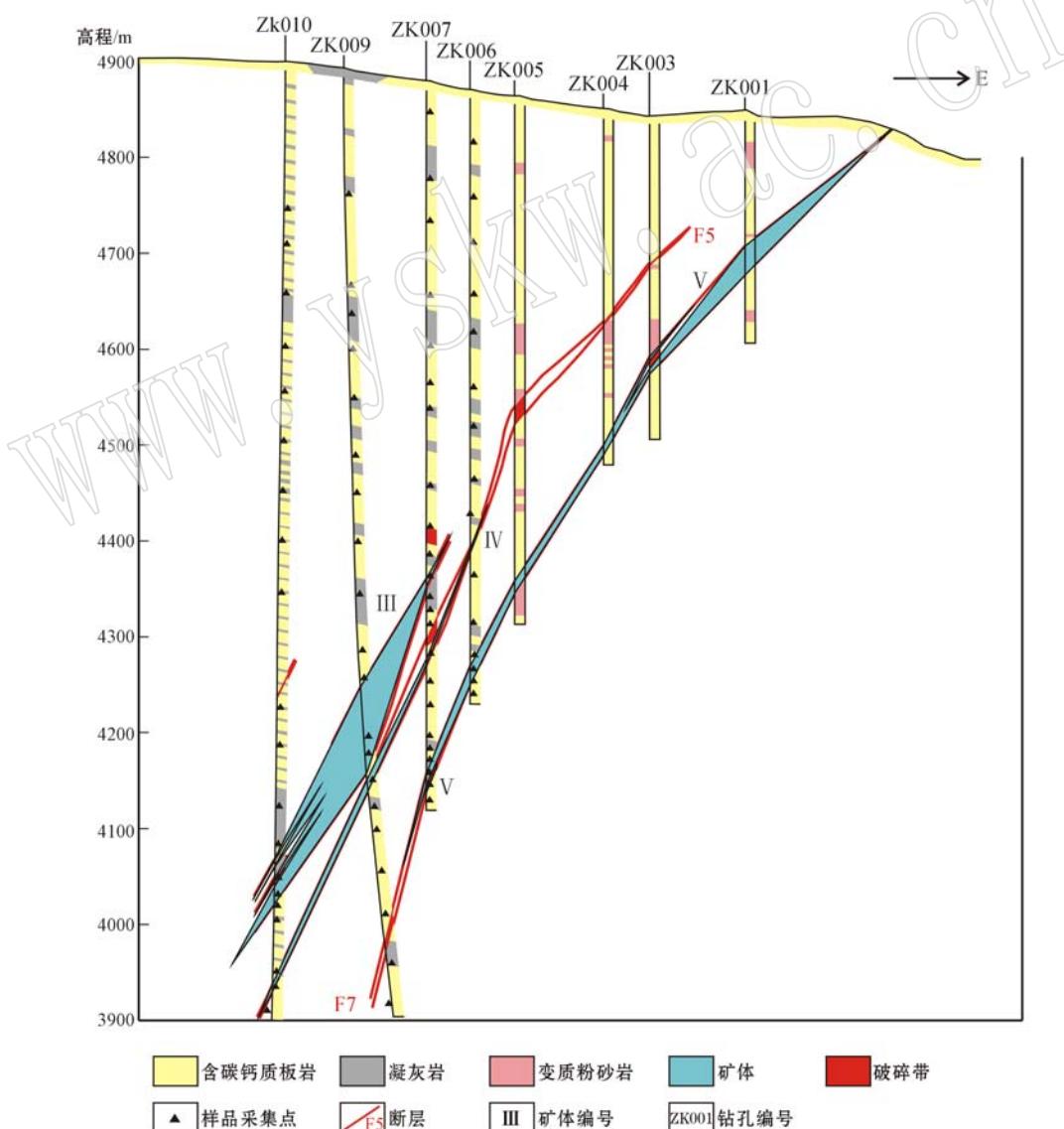


图2 0号勘探线钻孔样采集位置图  
Fig. 2 Sampling sites along No. 0 exploration line

表 1 0 号勘探线剖面围岩样品元素相关性系数表(Spearman 法计算)

Table 1 Element correlation coefficients of wall rock samples from No. 0 exploration line (based on Spearman method)

元素	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Sb	Bi	Ga	Sn	In	Au	Ag
Cu	1.00											
Pb	-0.05	1.00										
Zn	0.52**	0.34**	1.00									
W	0.13	0.61**	0.31**	1.00								
Mo	0.28*	0.14	0.25*	0.35**	1.00							
Sb	0.28*	0.47**	0.39**	0.46**	0.11	1.00						
Bi	-0.06	0.28*	-0.11	0.38**	-0.03	0.16	1.00					
Ga	0.58**	0.05	0.50**	0.38**	0.67**	0.17	-0.10	1.00				
Sn	0.24*	0.59**	0.47**	0.75**	0.33**	0.29*	0.20	0.40**	1.00			
In	0.63**	0.17	0.73**	0.30*	0.39**	0.15	-0.05	0.65**	0.59**	1.00		
Au	0.08	0.18	0.20	0.11	-0.08	0.06	-0.01	0.12	0.18	0.22	1.00	
Ag	0.04	0.52**	0.36**	0.51**	0.09	0.35**	-0.10	0.03	0.47**	0.13	0.19	1.00

\* 在置信度(双测)为 0.05 时, 相关性是显著的; \*\* 在置信度(双测)为 0.01 时, 相关性是显著的。

元素相关性分析的结果(表 1)显示, 在 99% 的置信区间下, 对于主成矿元素 Pb、Zn、Sb、Ag 来说, Pb 同 Zn、W、Sb、Sn、Ag 表现出良好的正相关性; Zn 同 Cu、Pb、W、Sb、Ga、Sn、In、Ag 表现出良好的正相关性; Sb 同 Pb、Zn、W、Ag 间表现出良好正相关性, Ag 同 Pb、Zn、W、Sb、Sn 间表现出良好正相关性。从以上元素间相关性的共性来看, 除去主成矿元素间的显著正相关性外, W、Sn 还可作为特征指示元素。

R 型聚类分析的结果(图 3)显示, 当距离系数取 20 时, Sb、Au、Pb、In、Zn、Sn、Ag 为一大类, Bi 单独为一类, Mo、Ga、Cu、W 为一类。继续细分, 可以发现, 在距离系数取 10 时, Sb、Au、Pb、In 仍为一类, Zn、Sn

为一类, Ag 单独一类, Mo、Ga、Cu、W 均分别单独成类, 说明在成矿作用中, Sb、Au、Pb、In 关系非常密切, Zn 和 Sn 密切相关, 说明二者同源可能性很高; 而 Mo、Ga、W 作为典型的高温元素, 在整个成矿作用中的富集相对于其他中低温元素来说具有较高独立性(邵越等, 1997), 结合前面的结论, 指示其可能受到叠加改造作用影响较小。随着距离系数进一步降低, 可以发现 Sb、Au 为一类, Pb、In 为一类, 其中 Sb、Au 为典型共生元素, 可能来源于同一物源, Pb、In 为同一物源提供。同时, 作为同 Pb 正相关性非常好的 Ag, 在聚类上却与 Pb 相隔稍远, 同时在 Sb、Au、Pb、In、Zn、Sn、Ag 大类中又为一个独立分类, 说明 Ag 的来源并非 Pb 那样单一, 后期叠加改造作用也很可能提供了不可忽视的比重。此外, Pb、Zn 作为典型共生元素, 当距离系数为 10 时, 二者并不在同一亚类, 推测其中一种元素可能在物质来源上受到了另外的补充, 是否与后期叠加作用有关, 还需进一步研究。

为了进一步探讨元素的分类关系, 可以利用因子分析进行降维处理, 这种方法在地质应用上可用来解释元素共生组合和成因联系等(罗先熔等, 2007)。同样对钻孔围岩样品数据进行因子分析, 结果如下:

首先对数据进行 KMO 和 Bartlett 检验(表 2), 以判别是否符合进行因子分析的条件。KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计量是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标, 统计量取值在 0 和 1 之间。当所有变量间的简单相关系数平方和远远大于偏相关系数平方和时, KMO 值接近 1, 意味着变量间的相关性越强, 原有变量越适合作因子分

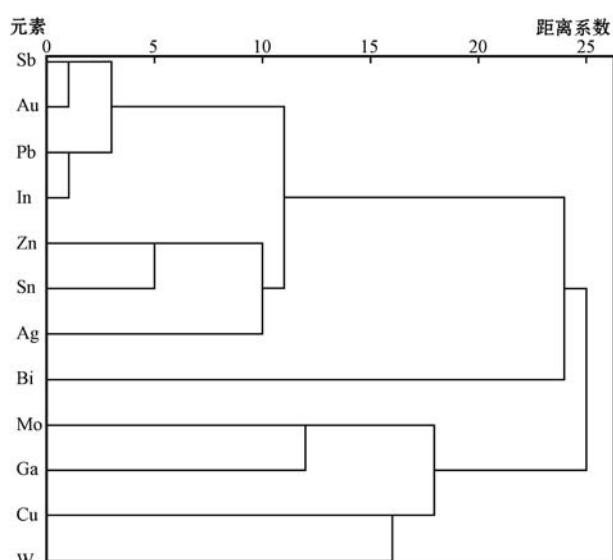


图 3 0 号勘探线剖面围岩样品 R 型聚类分析图

Fig. 3 R cluster analysis of wall rock samples from No. 0 exploration line

表 2 0号勘探线剖面围岩样品元素因子分析 KMO 和 Bartlett 检验表

Table 2 KMO and Bartlett test of wall rock samples from No. 0 exploration line

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量	0.751
近似卡方	894.367
Bartlett 的球形度检验	
df	66
Sig	0

析;当所有变量间的简单相关系数平方和接近 0 时,KMO 值接近 0,意味着变量间的相关性越弱,原有

变量越不适合作因子分析(Kaiser and Rice, 1974)。

Kaiser 给出了常用的 kmo 度量标准:0.9 以上表示非常适合;0.8 表示适合;0.7 表示一般;0.6 表示不太适合;0.5 以下表示极不适合(Kaiser and Rice, 1974)。而当巴特利特球体检验 Sig 值<0.05 时,数据才有结构效度,具备因子分析的条件(Bartlett, 1937)。根据表 2 的结果,取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量=0.751>0.5,Bartlett 球形检验 Sig 值=0<0.05,因此可以进行因子分析。

根据表 3,当提取 4 个因子时,方差累计可达到

表 3 0号勘探线剖面围岩样品元素因子分析方差累计表  
Table 3 Total variance explanation of wall rock samples from No. 0 exploration line

成份	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	5.502	45.847	45.847	5.502	45.847	45.847	4.144	34.530	34.530
2	2.409	20.076	65.923	2.409	20.076	65.923	2.727	22.726	57.257
3	1.148	9.566	75.489	1.148	9.566	75.489	1.973	16.440	73.696
4	0.920	7.663	83.152	0.920	7.663	83.152	1.135	9.455	83.152
5	0.684	5.703	88.854						
6	0.479	3.992	92.846						
7	0.375	3.123	95.969						
8	0.229	1.904	97.873						
9	0.130	1.086	98.960						
10	0.074	0.615	99.574						
11	0.045	0.371	99.946						
12	0.007	0.054	100.000						

83.152%,已经包含了原始变量的大部分信息,之后在前 4 个初始因子构成的公因子空间中进行因子旋转(表 4)。

根据表 4,F1~F4 各主成分的组成情况如下:  
F1:Pb、Sb、In、Au; F2: Cu、Zn、Sn、Ag; F3: W、Mo、Ga; F4: Bi。

由以上主成分的组成可以看出,F1 到 F4 的因子组成和 R 型聚类分析的结果相互印证,特别是同 R 型聚类分析中距离系数取 10 时的分类结果吻合程度较高,4 个主成分代表了成矿作用中不同的 4 个组成部分。F1 中 Sb、Au 是典型的元素共生组合,二者在剖面上的异常分布情况,一定程度上可以指示深部 Au 成矿的可能性。F2 组合中包含 Zn、Sn、Ag,同 R 型聚类分析的结果同样相符,同时 F1 和 F2 将 Pb 与 Zn、Sn、Ag 分开的结果也暗示了 F2 中的元素富集可能经历了更为复杂的后期叠加改造作用。F3 组合 W、Mo、Ga 是典型的高温元素组合,它们在不同深度的含量变化可以指示尾晕的特征,同时,F3

表 4 0号勘探线剖面围岩样品元素因子分析旋转成分矩阵表

Table 4 Rotated component matrix of wall rock samples from No. 0 exploration line

成分	1	2	3	4
Cu	0.168	0.670	0.414	-0.353
Pb	0.886	0.373	-0.031	0.108
Zn	0.571	0.690	-0.177	-0.002
W	0.086	0.411	0.627	0.161
Mo	0.003	-0.186	0.845	0.005
Sb	0.951	0.130	0.020	0.098
Bi	0.118	-0.006	-0.047	0.945
Ga	-0.229	0.203	0.785	-0.253
Sn	0.227	0.914	0.052	0.040
In	0.872	0.411	-0.103	0.008
Au	0.971	0.083	-0.039	0.026
Ag	0.521	0.626	0.164	0.057

提取方法: 主成分; 旋转法: 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法; 旋转在 6 次叠代后收敛。

同 R 型聚类分析的结果结合起来也说明 W、Mo、Ga 在成矿作用中相对独立,受到叠加改造作用的影响较小。F4 仅由 Bi 构成,说明这个元素在整个成矿作

用中的作用相对独立, 对 Pb、Zn、Sb、Ag 的成矿影响较小。

### 2.3 原生晕分带序列的确定

首先由于采样位置处于矿体附近, 属异常地段, 根据以上钻孔围岩中各元素含量频率直方图(图 4)可以看出, 除 Bi、Ga 外, 其余元素含量本身不符合正态分布, 即是采用传统方法确定其背景值和异常下限并不适用, 因此采用 Tukey 提出的勘查数据分析技术(Exploratory Data Analysis 即 EDA)(Tukey and John, 1980) 来计算研究区域的背景值, 得到的结果见表 5。

采用改进后的格里戈良分带指数法(王建新等, 2007)计算出以上钻孔的原生晕轴向分带由地表至深部的序列为:

ZK006: Bi-Au-Ga-Cu-W-Mo-Pb-Ag-Sb-In-Zn-Sn

ZK007: Bi-Ga-Ag-Pb-Sb-Mo-W-Zn-In-Sn-Cu-Pb-Au

ZK009: Ga-Cu-Mo-Au-Pb-Sn-Sb-In-Ag-Zn-W-Bi

ZK010: Cu-Ga-Sb-Bi-Pb-Ag-Zn-In-Sn-W-Au-Mo

由以上钻孔的原生晕轴向分带序列可以发现, 各序列并未严格按照由浅到深出现低温(前缘晕)-中温(近矿晕)-高温(尾晕)元素的分带序列。对各钻孔原生晕轴向分带序列分别讨论, 可以发现:

ZK006: 尾晕元素 Bi、Ga 出现在序列前端, W、Mo 出现在序列中部, 近矿晕元素 Pb、Ag、Zn 集中出现在中-尾部, 前缘晕元素 Sb 出现在序列尾部。

ZK007: 尾晕元素 Bi、Ga 出现在序列前端, 近矿晕元素 Cu、Pb、Au 出现在序列尾部。

ZK009: 尾晕元素 Ga、Mo 出现在序列前端, 前缘晕元素 Sb 出现在序列中部, 近矿晕元素 Ag、Zn 出现在序列尾部。

ZK010: 序列比较符合标准分布形式, 其中尾晕元素 Ga、Bi 出现在序列前部, 近矿晕元素 Au 出现在序列尾部。

4 个钻孔的原生晕轴向分带序列特征显示, 矿体极有可能为多期叠加形成, 主矿体集中在剖面中下部; Au 两次出现在序列尾部的现象, 也指示了深部可能具有一定的成矿潜力。

### 2.4 原生晕分带特征

首先, 由元素背景值与地壳丰度对比(表 5)可以发现, 研究区围岩富 Zn、Sb、Bi、Ag, 贫 Cu、W、Mo, 剩下的 Pb、Ga、Sn、In、Au 与地壳丰度较为接近。接下来对研究剖面元素含量异常进行分级。一般分为内带异常、中带异常及外带异常 3 个等级, 其中内带异

常是指异常中含量比较高的地段, 其含量虽不是矿石工业品位, 但矿体一般出现在内带异常内, 它能较好反映矿体位置(邵跃等, 1997)。一般情况下, 以研究区域异常下限的 1、2、4 倍分别作为划分外、中、内带的界限(蒋敬业等, 2006), 采用以上方法对 0 线剖面钻孔样品元素含量进行异常分级(表 6)并做等值线图(图 5)。

整体上来说, 元素的异常主要集中在海拔 4 500 m 以下, 各元素的异常分布特征分别为:

Cu: 异常主要集中在海拔 4 200 m 以下, 越靠东强度越高, 海拔 4 200 m 以上几乎没有达到外带异常部分, 同时, 在海拔 4 100~4 200 m 的主要异常富集区外围发育明显的低于背景值的负异常。

Pb: 整体上异常分布集中表现为 3 个区域, 范围分布主要为海拔 4 000~4 300 m, 从最高的海拔 4 300 m 附近的内带异常开始, 往深部内带异常也越靠西边分布, 同时, 最深部仍有小范围内带异常。

Zn: 异常分布形式和 Pb 相似, 在海拔 4 300 m 以下的深部, 同样表现出元素含量越往深、越往西越富集的趋势, 在海拔 4 300 m 之上, Zn 表现出另一组新的异常浓集中心, 同时, 在海拔 4 100~4 200 m 范围内, Zn 的异常更向东部集中, 总体来说中带和内带异常均处在偏下的位置。Zn 的异常分布, 在与 Pb 的异常分布重合度较好的基础上, 区别主要集中在海拔 4 300 m 以上的位臵, 加上异常分布的不连续, 推测海拔 4 300 m 以上的 Zn 异常分布, 可能是铅锌矿体在后期叠加改造作用下, Zn 由于地球化学活动性比 Pb 更强, 而进行一定距离迁移后再沉淀的结果, 这也与聚类分析中 Pb、Zn 并不处于同一亚类的结果一致。

W: 整体上来讲异常强度较低, 零星的外带异常集中在海拔 4 100~4 400 m 的东部, 海拔 4 400 m 之上, 几乎全是负异常。

Mo: 总体上异常强度较低, 分布零散, 外带异常集中在海拔 4 200~4 300 m, 其余大部分区域为背景值范围。

Sb: 异常强度在海拔 4 400 m 之下强度开始增高, 内带异常区域出现在海拔 4 100~4 200 m 间, 而海拔 4 400 m 以上靠西的部位异常分布低于背景值, 同时, 深部仍显示出 Sb 的内带异常。

Bi: 整体上异常强度很低, 唯一的外带异常区域出现在海拔 4 300~4 360 m 靠西位置, 范围较小, 其余部分均为背景值区域或者更低。

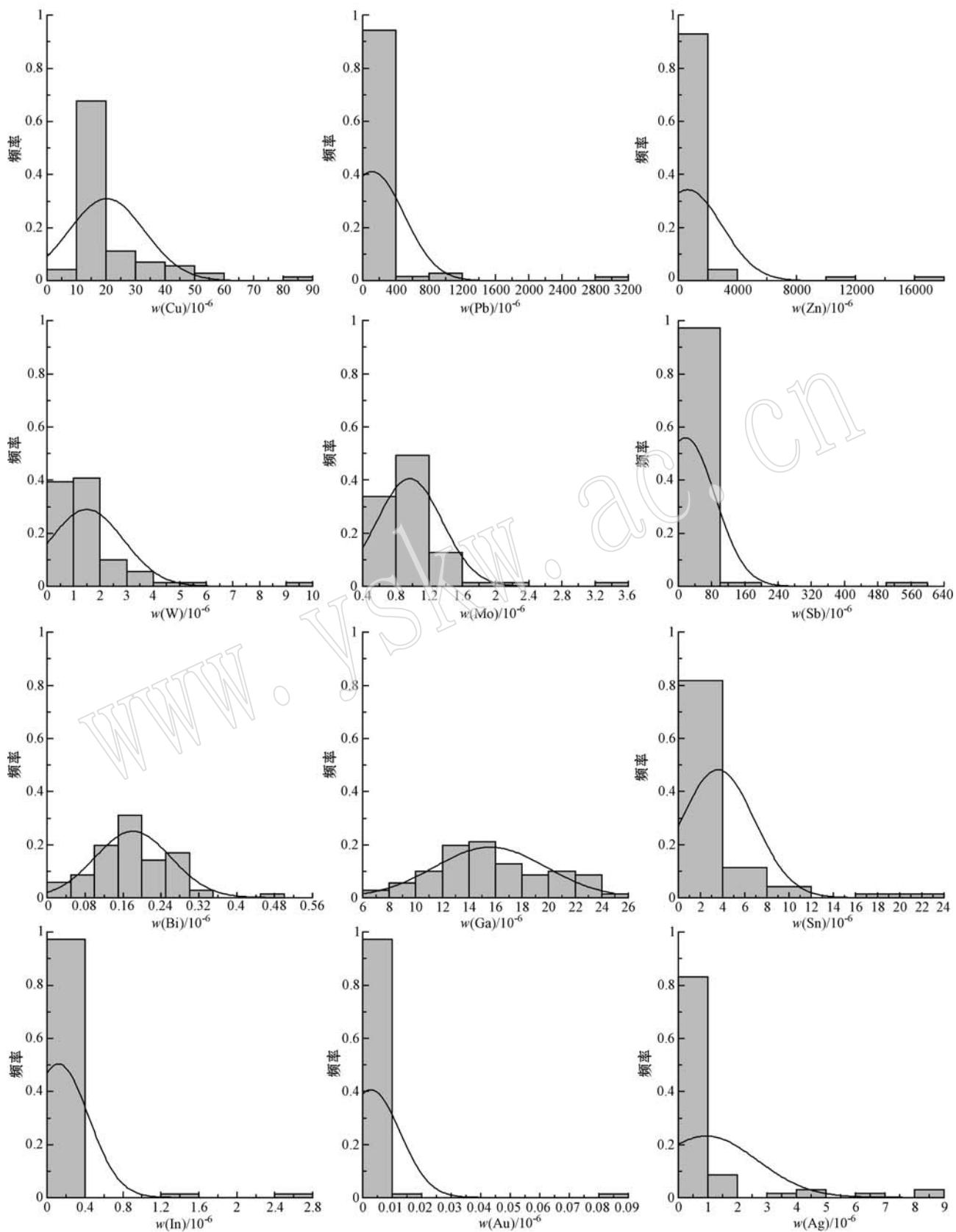


图 4 0号勘探线围岩样品元素含量频率直方图

Fig. 4 Content frequency histogram of wall rock samples from No. 0 exploration line

表 5 0 号勘探线剖面围岩元素背景值及异常下限表  $w_B/10^{-6}$ 

Table 5 Background value and anomaly threshold of wall rock samples from No. 0 exploration line

元素	地壳丰度 (Barbalace, 2007)	背景值	异常下限
Cu	50	15.620	36.365
Pb	14	18.090	90.845
Zn	75	97.720	318.595
W	160.6	1.083	2.896
Mo	1.5	0.875	1.555
Sb	0.2	3.585	18.183
Bi	0.048	0.180	0.393
Ga	18	14.680	28.825
Sn	2.2	2.540	4.948
In	0.049	0.062	0.123
Au	0.0011	0.001	0.004
Ag	0.07	0.382	1.639

表 6 0 号勘探线剖面样品元素含量异常分级表  $w_B/10^{-6}$ 

Table 6 Content anomaly grading of samples from No. 0 exploration line

元素	外带异常	中带异常	内带异常
Cu	36.365	72.730	145.460
Pb	90.845	181.690	363.380
Zn	318.595	637.190	1274.380
W	2.896	5.792	11.584
Mo	1.555	3.110	6.220
Sb	18.183	36.366	72.732
Bi	0.393	0.786	1.572
Ga	28.825	57.650	115.300
Sn	4.948	9.896	19.792
In	0.123	0.246	0.492
Au	0.004	0.008	0.016
Ag	1.639	3.278	6.556

Ga: 整体异常强度极低, 全为背景值区域, 在海拔4 100~4 270 m 发育明显负异常。

Sn: 异常强度在4 400 m 之下开始增高, 高值异常区集中在海拔4 100~4 200 m, 海拔4 400 m 以上以背景值区域和负异常为主, 异常分布同样表现出同 Pb、Zn 相似的模式。

In: 异常分布模式总体来讲以海拔4 300 m 为界, 主要分为两部分, 异常分布与 Sn 较为接近。

Au: 异常集中在海拔4 350 m 以下, 在海拔4 100~4 350 m 范围内强度最高, 深部发育小范围内带异常, 在海拔4 400 m 之上靠东的位置, 以负异常为主。

Ag: 海拔4 400 m 以下异常强度开始增高, 表现出较好的内带异常, 越往深越往西异常含量越高, 但

在海拔4 400 m 之上, 异常含量总体很低, 发育有大范围低于背景值的负异常。

综上, 以海拔4 300~4 400 m 的范围为界, 元素的异常分布区域被显著分离, 海拔4 300 m 以下的深部, 大多数元素均表现出较好的高值异常, 显示出良好的潜力。同时, Pb、Zn、Sn、In、Ag 的异常分布显示出一定的套合性。此外, 可以明显看出, 海拔4 300 m 以下的深部元素异常分带主要分为3个浓集中心, 其中以海拔4 100~4 200 m 范围内的强度最高, 范围最广, 海拔4 000~4 100 m 间的异常浓集中心次之, 最后是海拔4 200~4 300 m 范围内的异常浓集中心, 结合深部出现典型低温元素 Sb 的内带异常以及延续至最深处的 Ag 内带异常, 推测剖面上的矿体可能为经过叠加作用形成。同时, Cu、Pb、Zn、Sn、In 内带高值异常上方, 均发育有较大范围的负异常区域, 表明在成矿过程中萃取了围岩中的部分成矿元素。当成矿元素及主要伴生元素由矿体围岩直接提供时, 在矿体上、下盘围岩中可形成共轭的负异常(朴寿成等, 1996), 对于0号勘探线剖面, 负异常仅出现在主矿体上部, 说明除地层外, 成矿物质可能还有其他来源。

不同深度元素比值即原生晕分带评价值的变化是反映原生晕多种特点的重要参数, 它可以用来判定前尾晕发育特征, 矿体发育程度、剥蚀程度等特征。当矿体中地球化学参数在不同标高出现转折, 特别是在尾部转折较大时, 说明在深部可能具有一定潜力, 同时参数波动的剧烈程度, 可以作为判断矿体发育程度的指标之一(李惠等, 1999)。通常 Pb/Zn 值可以用来判断矿体头部位置, 比值越大的地方, 越接近矿体前缘, 一般矿体上部的 Pb/Zn 值大于1, 下部小于1(李惠等, 1999); 而 Ag/Mo、Ag/Cu 值从矿体头部到尾部一般呈现逐渐减小的规律(邵跃等, 1997)。根据以上元素含量比值做图得到图6。

由图6可以发现, 分带评价值总体上在海拔4 400 m 之上较为平缓, 出现强烈波动的地方较少, 仅 ZK009 在海拔4 500 m 位置有明显波动, 分带评价值变化最明显的位置主要集中在海拔3 950~4 300 m 之间, 结合图2, 发现这些位置正好是矿体发育最好的地方。除 ZK006、ZK007 外, 另外两个钻孔在最深部的分带评价值进一步趋于平缓, ZK009 在最深仍表现出一定上升趋势, 而 ZK010 呈现出降低的趋势, 表明深部潜力可能更向 ZK009 的深处集中。同时, ZK006、ZK007 的分带评价值波动最明显的位

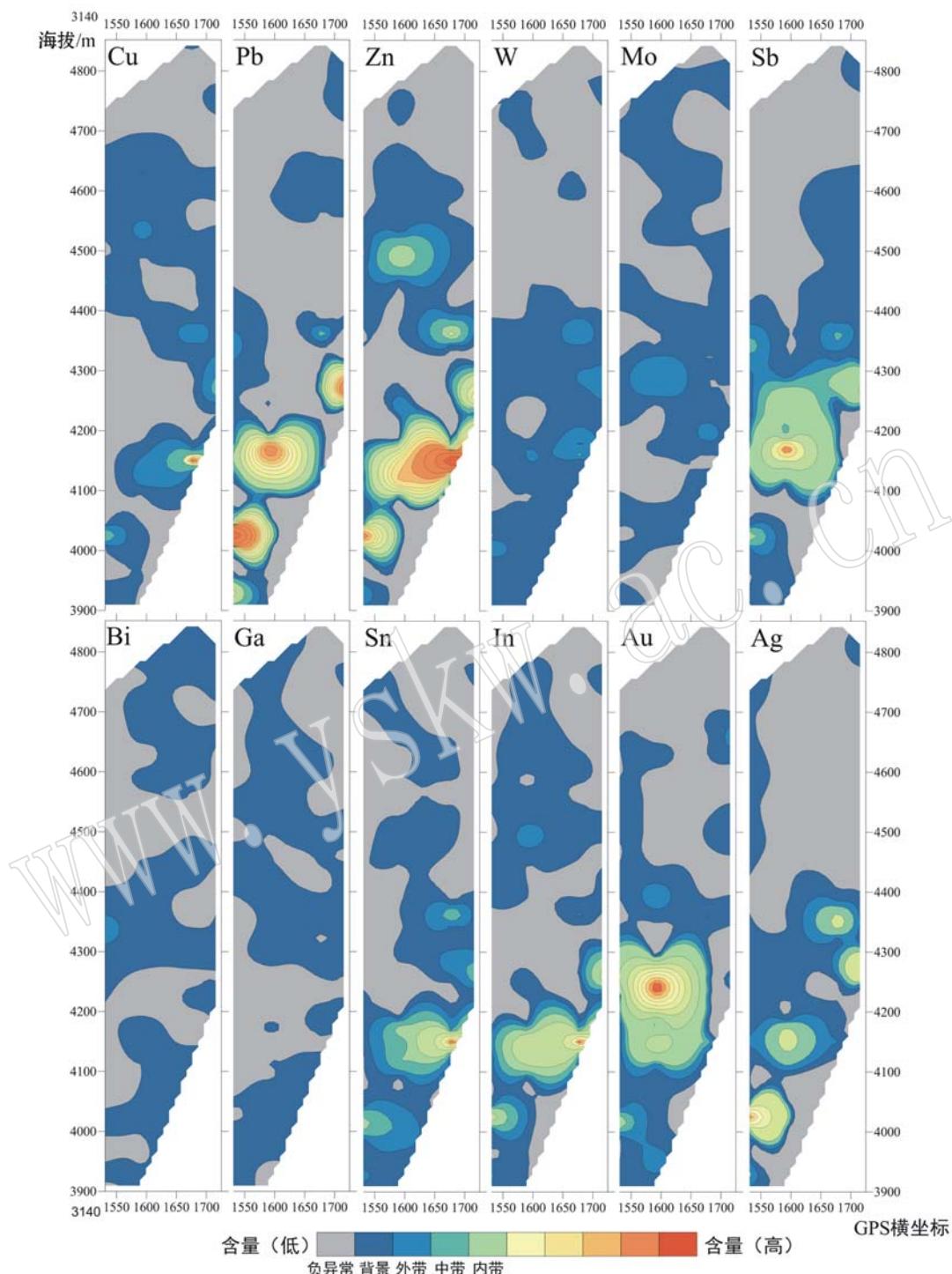


图 5 0号勘探线剖面元素含量等值线图

Fig. 5 Elements contour map of No. 0 exploration line

置在各自最深处,结合此位置深度,说明0号勘探线剖面上的矿体在海拔4 000~4 250 m处发育最好。同时分带评价值在ZK007在海拔4 300~4 400 m和ZK009在4 450~4 650 m间的较大波动可能暗示了在海拔4 300 m之上的矿体可能同海拔4 250 m以下

的矿体并非形成于同一期成矿事件。

## 2.5 原生晕分带模式

为更好确定原生晕前缘晕、近矿晕、尾晕的分布范围,本文采用平均衬度这一指标反映,即:平均衬度=组内各元素衬度之和/元素种类数量。

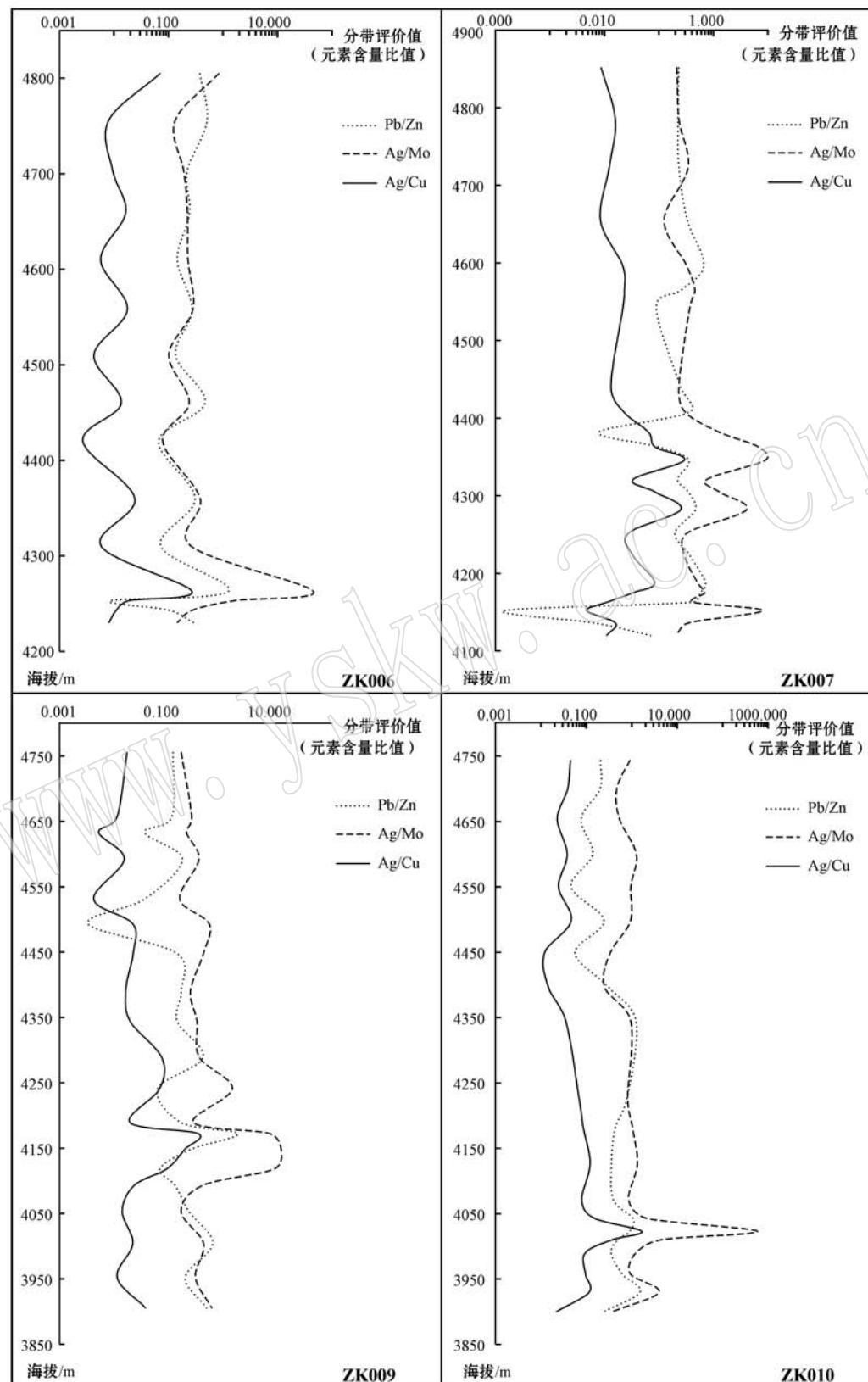


图 6 0 号勘探线各钻孔原生晕分带评价值图

Fig. 6 Geochemical zoning assessment values of each drill along No. 0 exploration line

按照前缘晕 Sb, 近矿晕 Cu、Pb、Zn、Au、Ag, 尾晕 W、Mo、Bi、Ga、Sn、In 的分类, 分别计算各元素衬度, 最终计算出各晕的平均衬度, 以此分别做出前缘晕、近矿晕、尾晕的平均衬度等值线图(图 7)。对原生晕平均衬度范围叠加, 得到 0 号勘探线剖面原生晕分带模式(图 8), 主要表现为: 原生晕发育集中在海拔 4 400 m 以下, 出现前尾晕共存的位置主要有 4 处, 指示成矿可能发生过多期叠加作用, 海拔 4 100 ~ 4 200 m 范围内的叠加晕现象最明显, 为最主要的成矿部位, 随着深度增加, 叠加晕向西转移, 与矿体延伸方向一致, 同时, 最深部仍表现出一定范围近矿晕, 说明矿体继续向下延伸可能性较高。

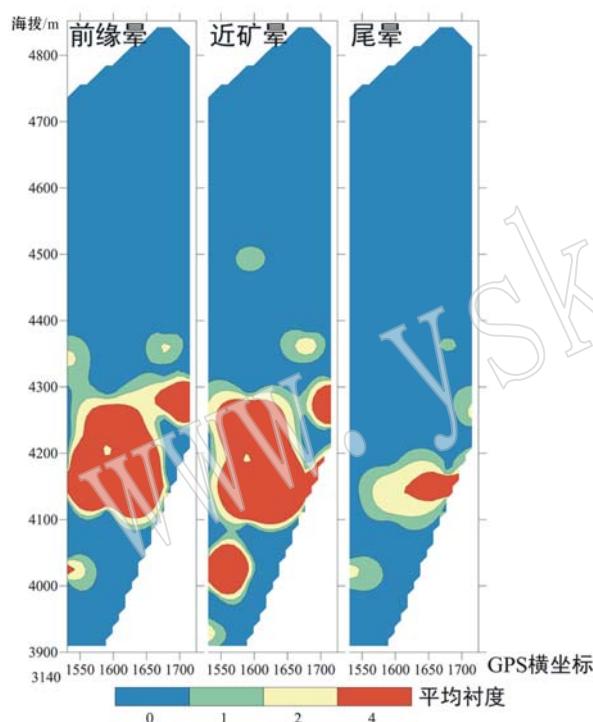


图 7 0 号勘探线原生晕平均衬度图

Fig. 7 Average contrast of primary halo of No. 0 exploration line

### 3 讨论与结论

(1) 根据统计分析的结果, 成矿作用中 Pb-Sb-In-Au、Cu-Zn-Sn-Ag、W-Mo-Ga 分别代表了 3 个具有显著差异的大类, 各大类里的元素可能为同一物源; 一些典型共生元素分属不同大类指示了矿体经受叠加改造的可能。

(2) 原生晕轴向分带序列出现了明显的同标准序列的差异, 说明矿体极有可能经历了叠加改造作用, 主矿体集中在剖面中下部; 序列尾部 Au 多次出现

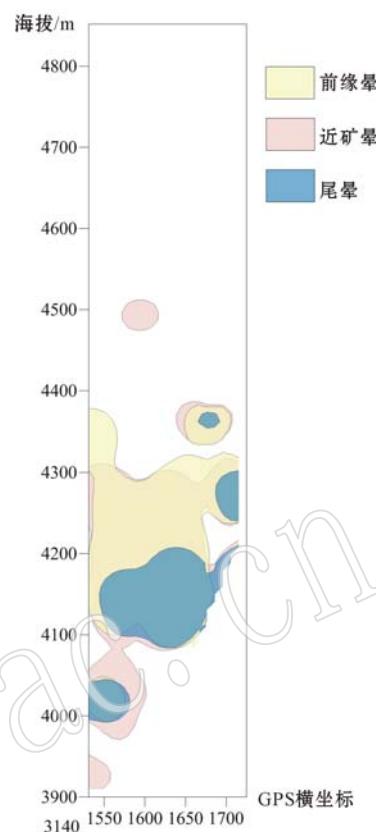


图 8 0 号勘探线原生晕分带模式图

Fig. 8 Primary halo zoning model of No. 0 exploration line

的现象指示了深部可能具有一定的成矿潜力。

(3) 元素的异常分布区域以海拔 4 300 ~ 4 400 m 的范围为界被显著分离, 高值异常集中在海拔 4 300 m 以下, 具有 3 个浓集中心。Pb、Zn、Sn、In、Ag 的异常分布显示出一定的套合性。同时, Cu、Pb、Zn、Sn、In 内带高值异常上方, 均发育有较大范围的非共轭负异常区域, 说明元素成矿的物源不仅由周围地层提供, 可能还有来自深部的补给。

(4) 原生晕地球化学分带评价在不同深度的变化可能暗示了在剖面海拔 4 300 m 之上的矿体同海拔 4 250 m 以下的矿体并非同期成矿作用的产物。

(5) 原生晕分带模式表明, 0 号勘探线剖面原生晕集中在海拔 4 400 m 以下, 成矿过程中可能发生过多期叠加作用, 矿体在深部继续延伸的可能性较高。

**致谢** 成都地质矿产研究所的程江老师、朱青老师在样品分析测试中提供了帮助, 黄勇师兄在论文编写过程中给予了指导, 西藏华钰矿业开发有限公司在野外工作中提供了支持, 在此一并致谢。

## References

- Barbalace K. 2007. Periodic Table of Elements [EB/OL]. [2007-04-14]. <http://EnvironmentalChemistry.com>.
- Bartlett M S. 1937. "Properties of sufficiency and statistical tests" [J]. Proceedings of the Royal Statistical Society, Series A (160): 268~282.
- Beus A A and Grigorian S V. 1977. Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits [M]. Wilmette, Illinois: Applied Publishing Ltd, 287.
- Cheng Hangxin, Zhao Chuandong, Zhuang Guangmin, et al. 2007. Primary geochemical anomaly and blind ore prospecting in the Dayanzi Pt-Pd deposit, Sichuan Province [J]. Geology and Prospecting, 43(4): 56~60 (in Chinese).
- Cheng Jinzhu and Sun Xincheng. 1988. The prospecting for blind ore bodies by means of primary halos [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 12(6): 460~467 (in Chinese).
- Cheng Wenbin, Li Guanqing, Gu Xuexiang, et al. 2013. Elemental geochemistry of the metallogenic material source and isotope geochemistry of S and Pb of Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic deposit in Southern Tibet [J]. Acta Mineralogica, supplement: 302~303 (in Chinese).
- Dai Xiwu, Yang Jianmin, Zhang Chengyu, et al. 2000. The application of primary haloes of the ore deposit to the prognosis of deep concealed orebodies exemplified by the Bushang gold deposit in Shandong Province [J]. Mineral Deposits, 19(3): 245~256 (in Chinese with English abstract).
- Kaiser H F and Rice J. 1974. Little jiffy, mark IV [J]. Educational and Psychological Measurement, 34(1): 111~117.
- Jiang Jingye, Cheng Jianping, Qi Shihua, et al. 2006. Applied Geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 145~179 (in Chinese).
- Levinson A A. 1980. Introduction to Exploration Geochemistry [M]. Wilmette, IL: Applied Publishing House, 1~624.
- Li Guanqing. 2010. Element and Isotope Geochemistry of Zaxikang Sb-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Tibet [D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Li Hui, Zhang Guoyi, Yu Bin, et al. 2005. Method of structural overprinting geochemical halo, a new and effective approach to prospecting for succeeding resources in gold deposits with resources crisis [J]. Mineral Resources and Geology, 19(6): 683~687 (in Chinese).
- Li Hui, Zhang Wenhua, Chang Fengchi, et al. 1999. The standards of the opposite direction zoning of primary halo and 'the turning points' of geochemical parameters in the direction of the axis in the blind gold deposits [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 19(2): 114~117 (in Chinese).
- Liang Wei, Hou Zengqian, Yang Zhusen, et al. 2013. Remobilization and overprinting in the Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic ore deposit, southern Tibet: Implications for its metallogenesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3 828~3 842 (in Chinese).
- Liang Wei, Zheng Yuanchuan, Yang Zhusen, et al. 2014. Multiphase and polystage metallogenic process of the Zhaxikang large-size Pb-Zn-Ag-Sb polymetallic deposit in southern Tibet and its implications [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1): 64~78 (in Chinese).
- Lin Bin, Zheng Wenbao, Xu Yunfeng, et al. 2013. The enlightenment of typical mineral chemical characteristics to Zaxikang Deposit in Southern Tibet [J]. Acta Mineralogica, supplement: 794~795 (in Chinese).
- Luo Xianrong, Wen Meilan, Ouyang Fei, et al. 2007. Exploration Geochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 218 (in Chinese).
- Meng Xiangjin, Yang Zhusen, Qi Xuexiang, et al. 2008. Silicon-oxygen-hydrogen isotopic compositions of Zaxikang antimony polymetallic deposit in Southern Tibet and its responses to the ore-controlling structure [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1 649~1 655 (in Chinese).
- Piao Shoucheng, Liu Shutian, Lian Changyun, et al. 1996. Geochemical negative anomaly and its prospecting significances [J]. Geology and Prospecting, 32(2): 46~50 (in Chinese).
- Shao Yue. 1997. Rock Measurements (Primary Halo Method) of Hydrothermal Deposits for Prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Tukey John W. 1980. "We need both exploratory and confirmatory" [J]. The American Statistician, 34(1): 23~25.
- Wang Jianxin, Zang Xingyun, Guo Xiufeng, et al. 2007. The Improved Gregorian's Zoning Index Calculating Method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(5): 884~888 (in Chinese).
- Wu Chenglie, Xu Waisheng, Liu Chongming, et al. 1998. The Exploration Geochemical Model for Major Types of Copper Deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xu Yunfeng, Zheng Wenbao, Ye Jiang, et al. 2013. Geochemistry of main metallogenic elements of Zhaxikang polymetallic deposit in southern Tibet [J]. Acta Mineralogica, supplement: 357~358 (in Chinese).
- Yang Zhusen, Hou Zengqian, Gao Wei, et al. 2006. Metallogenetic Characteristics and Genetic Model of Antimony and Gold Deposits in South Tibetan Detachment System [J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1 377~1 391 (in Chinese).
- Zhang Gangyang. 2012. Metallogenetic Model and Prospecting Potential in Southern Tibet Au-Sb Polymetallic Belt [D]. China University of

- Geosciences (Wuhan) (in Chinese).
- Zhang Jianfang. 2010. The Genesis study of Zhaxikang lead zinc antimony silver deposit, North Himalayan[D]. China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese).
- Zheng Youye, Liu Minyuan, Sun Xiang, et al. 2010. Type discovery process and significance of Zhaxikang antimony polymetallic ore deposit, Tibet[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(5): 1 003~1 014(in Chinese).
- Zhu Zhangsen and Wen Shiming. 1996. Research of the zonality model of the primary halo and evaluation of the mineralized outcrop for tin deposit of Laili Mountain[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 8(3): 209~215(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 成杭新,赵传冬,庄广民,等. 2007. 四川大岩子铂-钯矿床的原生地球化学异常特征及盲矿预测[J]. 地质与勘探, 43(4): 56~60.
- 程金柱,孙信诚. 1988. 利用原生晕找盲矿的研究[J]. 物探与化探, 12(6): 460~467.
- 程文斌,李关清,顾雪祥,等. 2013. 藏南扎西康铅锌锑银多金属矿床成矿物质来源的元素地球化学与 S、Pb 同位素研究[J]. 矿物学报, 增刊: 302~303.
- 代西武,杨建民,张成玉,等. 2000. 利用矿床原生晕进行深部隐伏矿体预测[J]. 矿床地质, 19(3): 245~256.
- 蒋敬业,程建萍,祁士华,等. 2006. 应用地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 145~179.
- 李关清. 2010. 西藏扎西康锑铅锌多金属矿床元素地球化学和同位素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李惠,张国义,禹斌,等. 2005. 构造叠加晕法是危机金矿山寻找接替资源的有效新方法[J]. 矿产与地质, 19(6): 683~687.
- 李惠,张文华,常凤池,等. 1999. 金矿盲矿预测的原生晕轴向“反(向)分带”和地化参数轴向“转折”准则[J]. 桂林工学院学报, 19(2): 114~117.
- 梁维,侯增谦,杨竹森,等. 2013. 藏南扎西康大型铅锌银锑多金属矿床叠加改造作用初探[J]. 岩石学报, 29(11): 3 828~3 842.
- 梁维,郑远川,杨竹森,等. 2014. 藏南扎西康铅锌银锑多金属矿多期多阶段成矿特征及其指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 64~78.
- 林彬,郑文宝,徐云峰,等. 2013. 典型矿物化学特征对藏南扎西康矿床成因的启示[J]. 矿物学报, 增刊: 794~795.
- 罗先熔,文美兰,欧阳菲,等. 2007. 勘查地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 218.
- 孟祥金,杨竹森,戚学祥,等. 2008. 藏南扎西康锑多金属矿硅-氧-氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应[J]. 岩石学报, 24(7): 1 649~1 655.
- 朴寿成,刘树田,连长云,等. 1996. 地球化学负异常及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 32(2): 46~50.
- 邵跃,傅学信. 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 王建新,臧兴运,郭秀峰,等. 2007. 格里戈良分带指数法的改良[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 884~888.
- 吴承烈,徐外生,刘崇民. 1998. 中国主要类型铜矿勘查地球化学模型[M]. 北京: 地质出版社, 1~225.
- 徐云峰,郑文宝,叶江,等. 2013. 藏南扎西康锌多金属矿床主成矿元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 增刊: 357~358.
- 杨竹森,侯增谦,高伟,等. 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报, 80(9): 1 377~1 391.
- 张刚阳. 2012. 藏南金锑多金属成矿带成矿模式与找矿前景研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 张建芳. 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 郑有业,刘敏院,孙祥,等. 2012. 西藏扎西康锑多金属矿床类型发现过程及意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 37(5): 1 003~1 014.
- 朱章森,温世明. 1986. 来利山锡矿原生晕分带性研究及矿化露头评价(盲矿体预测方法研究之一)[J]. 物化探计算技术, 8(3): 209~215.