



移动阅读

卿成实, 张志, 张林奎, 等, 2023. 西藏隆子县扎西康铅锌多金属矿床 XV 号矿体元素分带特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 130–144. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09002)

QING C S, ZHANG Z, ZHANG L K, et al., 2023. The element zonation characteristics of No. XV ore body in Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit, Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 130–144. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.09002)

西藏隆子县扎西康铅锌多金属矿床 XV 号矿体 元素分带特征研究

卿成实, 张 志, 张林奎, 李光明, 董随亮, 王艺云, 高 轲

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 作为特提斯喜马拉雅新生代构造–成矿事件中最为典型的 Pb–Zn 矿化代表的扎西康铅锌多金属矿床, 近年来新发现的 XV 号矿体, 规模仅次于主矿体 V、VI 号矿体, 由于其发现时间晚, 所以研究程度低。为了更好剖析该矿体地质特征, 通过研究 XV 号矿体的元素分带特征, 结果表明: ① 矿体围岩地层对 Pb、Ag、Sb 元素有着良好的供给能力, 但 Zn 的富集成矿与地层关系不大, 铅锌矿化与一套完整的高温—中温—低温元素组合 Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn 及 Zn 密切相关。② XV 号矿体主要由含矿热液携带成矿元素往上运移的过程中不断析出成矿, 未见明显的叠加改造痕迹。③ 矿体深部仍然具有一定的成矿潜力。XV 号矿体分带模型的建立, 是对特提斯喜马拉雅新生代构造–成矿事件的良好响应, 能较好代表在该事件下 Pb–Zn 矿化的普遍特征, 同时在深部潜力预测等方面也具有重要的意义。

关键词: 元素分带; 聚类分析; 因子分析; 扎西康; 西藏

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标识码: A

The element zonation characteristics of No. XV ore body in Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit, Tibet

QING Chengshi, ZHANG Zhi, ZHANG Linkui, LI Guangming, DONG Suiliang,
WANG Yiyun, GAO Ke

(Chengdu Centre, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Represented as the most typical sample of lead-zinc mineralization in the Cenozoic tectonic-metallogenesis of Tethys Himalaya, the Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit's newly discovered No. XV ore body has a third largest scale after the main No. V and No. VI ore bodies. Due to its late discovery time and low research degree, the element zonation research had been conducted to make contributes to geological characteristics of this orebody. The conclusions demonstrate: ① The strata around ore body had a good supply capacity of Pb, Ag and Sb elements, while the enrichment of Zn elements had little to do with the strata. The lead-zinc mineralization was closely related to a complete set of high-medium-low temperature association of elements such as Hg, Ag, Sb, Bi, Pb, Sn, Cd, Cu, Mn, and Zn. ② During the migration upward, ore bearing hydrothermal solution was continuously

收稿日期: 2022-01-28; **改回日期:** 2022-05-16; **责任编辑:** 黄春梅; **科学编辑:** 郭林楠

作者简介: 卿成实 (1986—), 男, 工程师, 主要从事矿床学与成矿预测研究, E-mail: 196251150@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金项目 (91955208); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助 (2019QZKK0806); 科技部国家重点研发计划 (2021YFC2901903); 西南地区铜镍锡铍等矿产地质调查项目 (DD20221690); 西藏山南地区铍锡多金属矿调查评价项目 (DD20190147) 和国家自然科学基金青年基金项目 (42002097) 联合资助

precipitating and mineralizing without obvious overprinted metallogenic process. ③ There was still certain metallogenic potential at depth. The establishment of the zonation model of No. XV ore body would be a proper response to the Cenozoic tectonic-metallogenesis of Tethys Himalaya under which there was a good representation of the general Pb-Zn mineralization. At the meantime, it was also an important significance deep potential prediction.

Key words: element zonation; clustering analysis; factor analysis; Zhaxikang; Tibet.

0 引言

作为青藏高原的重要组成部分,特提斯喜马拉雅经历了复杂的构造-岩浆-成矿过程,而在大陆碰撞阶段的后碰撞地壳伸展成矿作用下,形成了一系列包括特提斯喜马拉雅金锑铅锌矿带在内的多条多金属成矿带,显示出巨大的资源潜力(芮宗瑶等, 2004; 侯增谦等, 2006a)。而特提斯喜马拉雅成矿带中的铅锌矿尤以扎西康铅锌多金属矿床最为著名,也是近年来的研究热点(李应栩等, 2018; 金雄伟等, 2020; 张志等, 2020; 郭镜等, 2021; 李光明等, 2021)。矿床具有两期成矿年龄(周清等, 2014; Sun et al., 2018), 第一期为印度-亚洲大陆主碰撞造山阶段(侯增谦等, 2006b; 成矿时代 >40 Ma), 第二期为后碰撞伸展阶段的中新世(侯增谦等, 2006c), 这与特提斯喜马拉雅成矿带的两期主要成矿时代吻合,说明扎西康矿床的形成可能是特提斯喜马拉雅成矿作用的直接结果。前人对扎西康矿床成因研究方面还存在较大分歧,主要包括地下热泉成因(杨竹森等, 2006; 孟祥金等, 2008), 喷流沉积-热泉改造成因(李关清, 2010; 张建芳等, 2010; 郑有业, 2012), 岩浆热液成因(徐云峰等, 2013; 张政等, 2016; Duan et al., 2016; Wang et al., 2017; Xie et al., 2017; Zhou et al., 2018)和叠加改造成因(梁维等, 2013, 2014a)等。目前矿床的开采和研究工作主要集中在矿区内规模最大的 V 号矿体,对于矿区内其他规模较大、品位较高的矿体研究匮乏,不利于全面系统地研究矿床成因机制。

近年来,新的勘探线、钻孔和矿井的布置和深部探矿的突破为我们全面认识该矿床的地质特征提供了条件。成都地质调查中心在扎西康矿区南部新发现了一组隐伏铅锌矿体,定名为 XV 号矿体。该矿体在矿区内规模仅次于主矿体 V、VI 号矿体,由于发现时间晚,研究程度低,深部找矿潜力尚不明确。

众多勘查实践表明,研究矿体的元素分带特征是判断异常分布、地球化学特征及剥蚀程度,推测

隐伏矿体,评价深部成矿-找矿潜力,进行找矿预测的一个有效方法(代西武等, 2000; 李惠等, 2005; 成杭新等, 2007)。由于青藏高原后碰撞伸展成矿作用相应地形成了斑岩型 Cu(侯增谦等, 2004;)、脉型 Au-Sb、夕卡岩型和热液脉型 Pb-Zn-Ag(孟祥金等, 2008)以及现代热泉型 Cs-Au(李振清等, 2006)等成矿系统(梁维, 2014b),其中 Pb-Zn-Ag 成矿作用在带内仅在扎西康矿床有较好的体现,大量未知的铅锌矿体亟待探索。因此本文通过研究 XV 号矿体的元素分带特征,建立相应的分带模型,可以作为区域上一般 Pb-Zn 矿化的指示标志,丰富特提斯喜马拉雅新生代构造-成矿方面的研究素材,并为开展下一步找矿预测提供相应的地球化学依据。

1 矿床地质特征

扎西康矿区位于特提斯-喜马拉雅成矿带东段,属于康马-隆子地层分区,矿区内主要出露侏罗系(图 1),包括下—中侏罗统陆热组($J_{1-2}l$)、中侏罗统遮拉组(J_2z)和上侏罗统维美组(J_3w),以及第四系(Q)。其中陆热组地层是矿区最主要的含矿地层,岩性主要为钙质板岩夹凝灰岩;遮拉组地层主要见酸性火山岩及少量玄武岩发育;维美组地层岩性则以粉砂岩、石英砂岩及一套以英安岩为主的中酸性火山岩等为主;第四系则以残坡积物为主。

矿区内断裂构造发育,多为近南北向张性断层,其中 F7 是矿区内的主要储矿构造,主要控制 V 号矿体的产出, F2 主要控制 VI 号矿体,而 XV 号矿体的产出则主要受 F3 的影响。这些张性断层在形成后,受后期地质活动影响也使得矿(化)体发生了进一步压碎和破坏。

矿区内燕山期火山活动频繁,喷出岩主要为陆热组安山岩-安山质凝灰岩和维美组的斑状英安岩及流纹斑岩等。侵入岩主要包括早白垩世辉绿岩和辉长岩脉,以及始新世花岗岩。在区域上,从矿床南边的错那洞片麻穹窿核部淡色花岗岩内部及其接触带到外围表现为 W、Sn、Bi、Rb 等高温元素 $\rightarrow$ Pb、Zn、Ag、Sb 等中温元素 $\rightarrow$ Au、Sb、Ag、Hg、

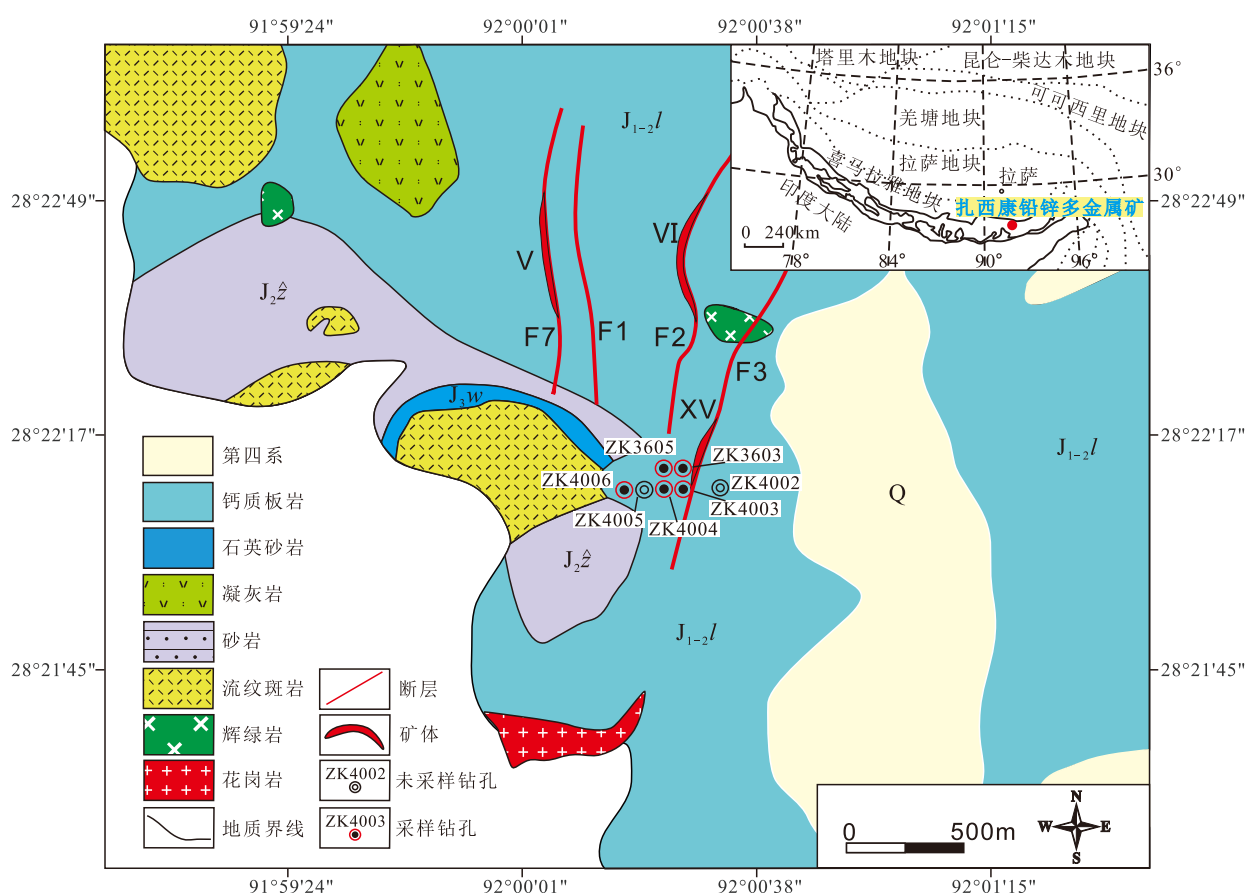


图1 扎西康矿区地质图(含采样钻孔)

Fig. 1 The geological map of Zhaxikang mining area (including sampling drills)

As 等中低温元素的异常组合(周清等, 2014; 吴建阳等, 2015; Zhou et al., 2018), 同时扎西康矿床两期矿化时间 21~17 Ma 和 16~12 Ma(周清等, 2014; Sun et al., 2018)与错那洞穹隆形成过程中的最主要的两期岩浆事件对应, 说明错那洞穹隆内的花岗岩的侵位与矿床成矿存在密切关系(梁维等, 2021), 这套花岗岩的侵位也正好对应了青藏高原后碰撞伸展背景下的中新世成矿事件(侯增谦等, 2006c)。

矿区内主矿体为 V、VI 号矿体, 其中 V 号矿体为正在开采的唯一矿体, 为原生矿, VI 号矿体属于氧化矿。XV 号矿体(图 2)为近年来新发现的隐伏铅锌矿体, 受 F3 断裂控制, 斜切围岩产出, 与围岩呈断层接触关系。这三组矿体的主要特征如下(表 1):

由于整体研究程度较低, XV 号矿体尚未开展详实的矿物生成顺序与成矿期次研究。根据表 1, XV 号矿体总体性质与 V 号矿体相似, 以 V 号矿体作为类比, 根据前期野外(图 3)及镜下观察(图 4), 扎西康矿床主要分为铅锌热液成矿期(A)和表

生期(B)。其中铅锌热液成矿期为主成矿期, 进一步划分成 5 个成矿阶段, 即①黄铁矿-铁锰碳酸盐阶段、②黄铁矿-方铅矿-闪锌矿-铁锰碳酸盐阶段、③黄铁矿-毒砂-铁锰碳酸盐阶段、④含锑硫盐矿物-石英阶段、⑤石英阶段(图 5)(卿成实, 2015)。由深到浅, 方铅矿、闪锌矿由粒状逐渐向脉状、浸染状变化, 并被后期石英脉胶结, 伴随细脉状毒砂及含 Sb 硫盐矿物发育。

2 元素分带特征

2.1 样品采集与分析

通过采集钻孔岩心围岩样品, 以控制扎西康矿区 XV 号矿体的原生晕发育特征, 选择钻孔 ZK3603、ZK3605、ZK4003、ZK4004、ZK4006 进行样品采集, 具体位置见图 1, 按照 20 m 间距全孔采样, 并在矿体附近加密至 10 m 间距, 其中 ZK3603 采样 51 件, ZK3605 采样 43 件, ZK4003 采样 52 件, ZK4004 采样 51 件, ZK4006 采样 53 件, 样品共计 250 件, 覆盖了矿体附近及远端位置。测试分析在

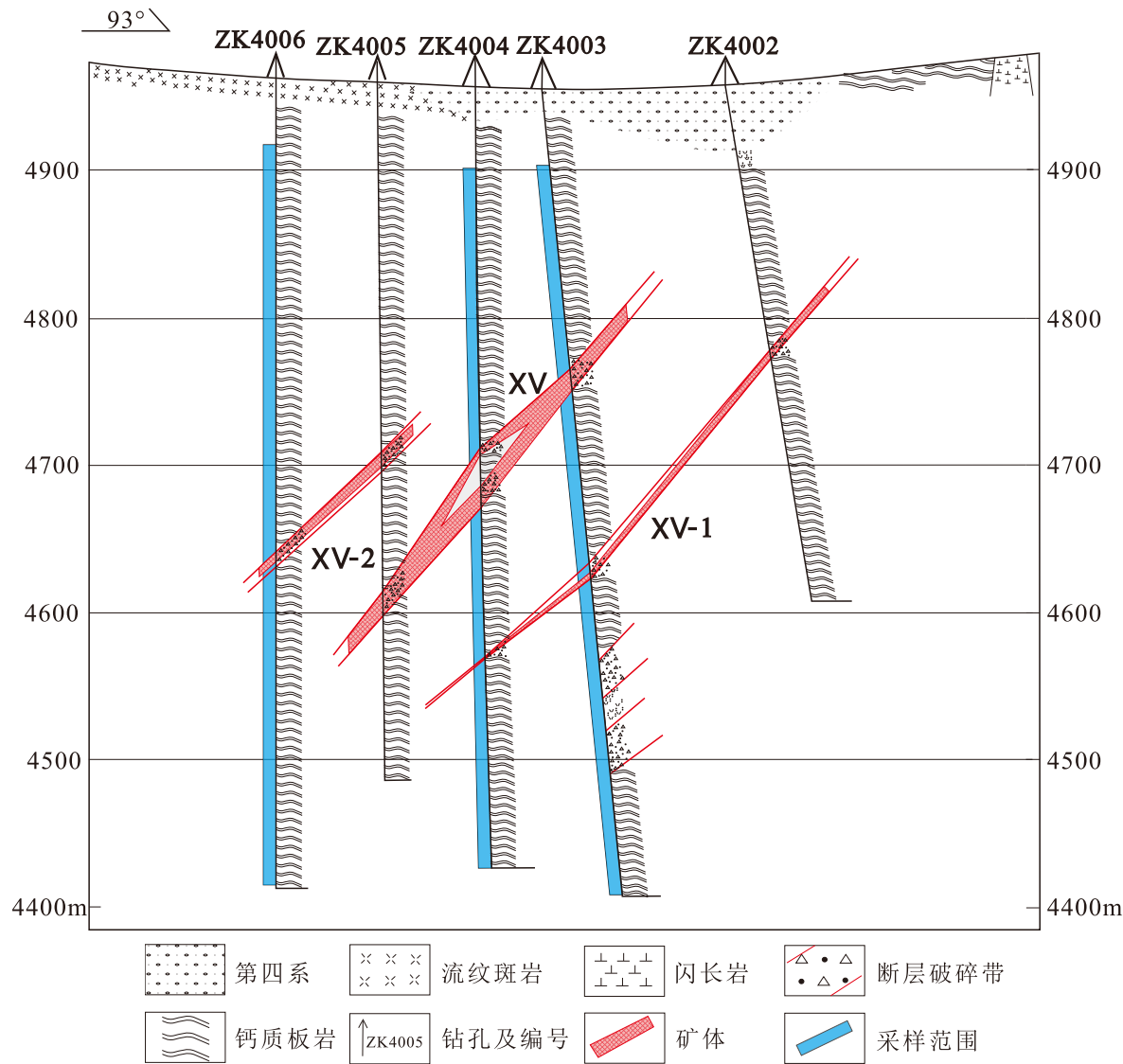


图 2 XV 号矿体 40 号勘探线剖面图
Fig. 2 No.40 exploration line profile of No. XV ore body

自然资源部西南矿产资源监督检测中心进行,选取元素为 Au、Hg、Ag、Sn、As、Sb、Bi、Cd、Co、Cu、Mo、Mn、Pb、W、Zn、Na, 测试仪器为 BS-124S 分析天平-1、ELEMENT-II 高性能高分辨等离子质谱仪, 检测环境温度 24℃, 湿度 50%, 测试标准参照《DZ/T 0279—2016 区域地球化学样品分析方法》, 测试方法为电感耦合等离子体质谱法, 其中 Au、Hg 单位为 10^{-9} , Ag、Sn、As、Sb、Bi、Cd、Co、Cu、Mo、Pb、W、Zn 为 10^{-6} , Mn、Na 为 10^{-2} , 样品分析结果统计信息见表 2。从统计信息来看, 各元素含量具有较大的变化范围, 具有较大的偏度和峰度绝对值, 显示出非对称非正态分布的特征, 能体现出元素异常的浓度分级, 因此可以开展进一步异常特

征分析相关的研究。

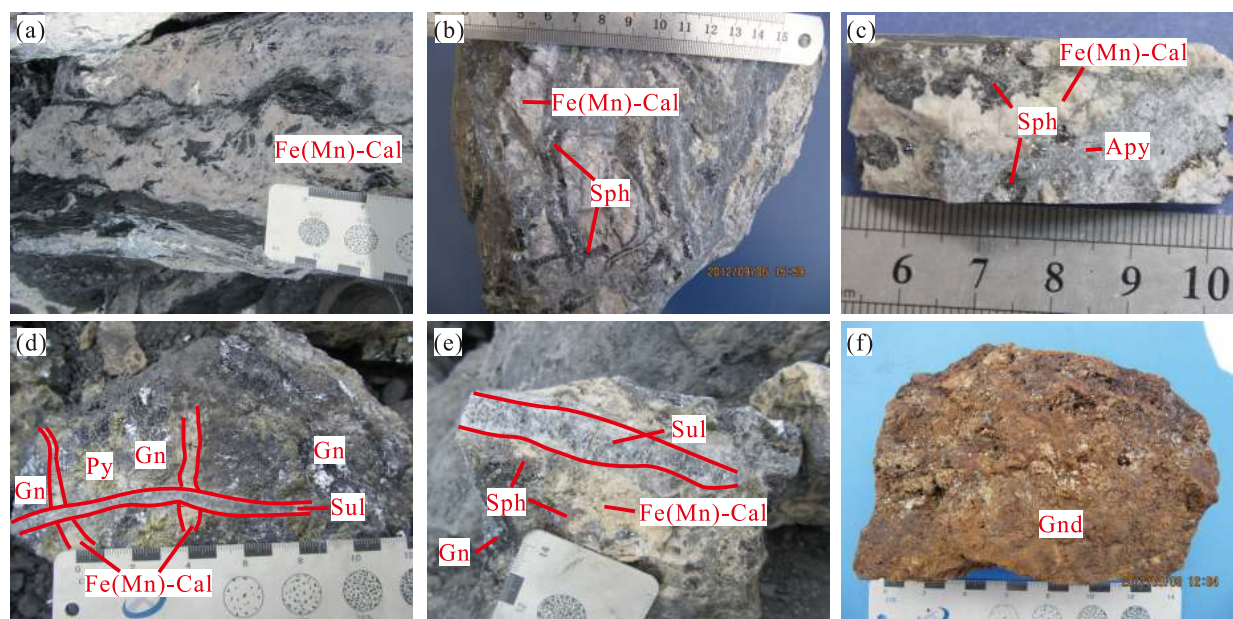
2.2 元素背景值及异常下限的确定

将 3.1 中围岩样品所涉及的 36 线、40 线控制的 XV 号矿体作为一个整体研究对象, 基于这些样品的分析结果, 本研究采用 Tukey 提出的勘查数据分析技术 (Exploratory Data Analysis 即 EDA) (Tukey, 1977) 来计算矿区围岩各元素的背景值和异常下限。该方法受原始数据结构本身影响较小, 计算结果同时能有效“抵抗”异常点带来的干扰, 能较为客观地反映地质实际 (Nguyen Tien Thanh et al. 2013)。该方法采用箱图法来计算背景值和异常下限。在箱图中, 定义了 5 个参数 (四分位数间距 igr , 负异常上限 lif , 栅栏外上限 lof , 正异常下限 uif , 栅栏外

表 1 扎西康矿区 V、VI、XV 号矿体主要地质特征

Table 1 Main geological characteristics of No. V, No. VI and No. XV ore body

矿体	V	VI	XV
赋矿地层	陆热组 钙质板岩夹凝灰岩	陆热组 钙质板岩夹凝灰岩	陆热组 钙质板岩夹凝灰岩
控矿断裂	F7 (近南北向)	F2 (近南北向)	F3 (北东—南西向)
矿体规模	走向长 1419 m, 倾向延深 993 m	走向长 1575 m, 倾向延深 469 m	走向长 386 m, 倾向延深 400 m
矿体形态	不规则脉状、长透镜状	似层状	长透镜状
矿石构造	块状, 条带状 (脉状)、浸染状、角砾状	角砾状	块状、网脉状、角砾状
矿石矿物	铁闪锌矿、辉锑铅矿、方铅矿、硫锑铅矿, 少量车轮矿、银黝铜矿、硫锑铅银矿、方锑矿等	铁锰质氧化铅锌矿、铅矾等	闪锌矿、方铅矿等
脉石矿物	黄铁矿、石英、方解石、菱铁矿、菱锰矿等	石英、方解石、褐铁矿、菱铁矿、菱锰矿等	黄铁矿、石英、方解石等
围岩蚀变	硅化、碳酸盐化	褐铁矿化、硅化、碳酸盐化	硅化、碳酸盐化
与围岩接触关系	断层接触	断层接触	断层接触



a. A 期第 (1) 阶段中无矿铁锰碳酸盐脉; b. A 期 (2) 阶段闪锌矿呈脉状分布; c. A 期 (3) 阶段毒砂脉穿插于早期闪锌矿—铁锰碳酸盐脉; d. A 期 (4) 阶段含锑硫盐矿物脉穿插早期形成的方铅矿、黄铁矿、铁锰碳酸盐脉; e. A 期 (4) 阶段含锑硫盐矿物脉穿插早期形成的闪锌矿、铁锰碳酸盐; f. B 期地表风化形成的铁帽。Gn—方铅矿; Sph—闪锌矿; Py—黄铁矿; Apy—毒砂; Sul—含 Sb 硫盐矿物; Fe(Mn)-Cal—铁锰碳酸盐; Gnd—铁帽。

图 3 扎西康矿床各矿化阶段矿物共生组合与穿插关系手标本照片 (据卿成实, 2015)

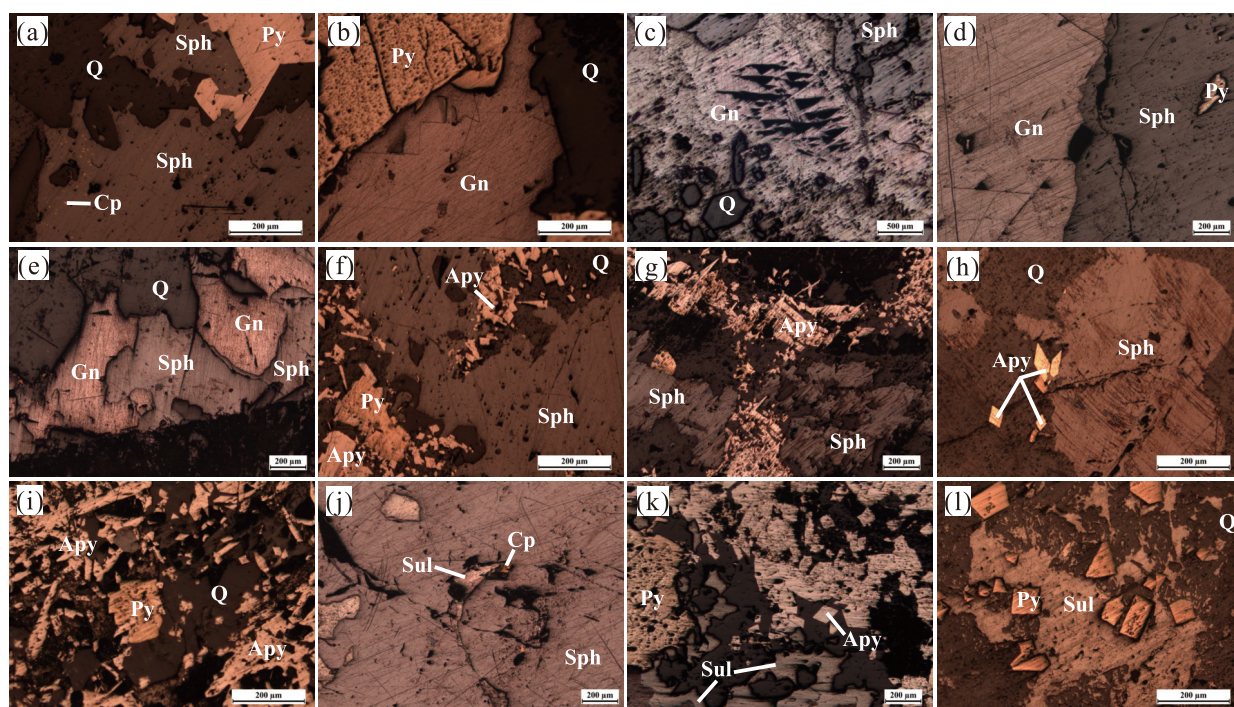
Fig. 3 The paragenetic association and interpenetration relationship of minerals from different metallogenic stages of Zhaxikang deposit

下限 uof), 首先对数据进行从小到大排序, 确定数据的最大值、最小值、25% 分位值 ($Q1$)、50% 分位值 ($Q2$, 也作为背景值)、75% 分位值 ($Q3$); 然后通过下列式 (1)—式 (5) (胡以铿, 1991) 来确定四分

位数间距 iqr , 负异常上限 lif , 栅栏外上限 lof , 正异常下限 uif , 栅栏外下限 uof :

$$iqr = |Q3 - Q1|, \quad (1)$$

$$lif = Q1 - 1.5 \times iqr, \quad (2)$$



注：以上矿物照片均为单偏光下拍摄。a. 黄铜矿以固溶体分离结构形式存在于闪锌矿中；b. 自形程度较好的方铅矿；c. 镜下方铅矿的黑色三角孔表现出一定定向性；d. 方铅矿和闪锌矿呈舒缓共边结构；e. 方铅矿、闪锌矿互相交代；f、g. 毒砂沿闪锌矿裂隙交代；h. 毒砂呈自形程度较好的菱形；i. 集合体呈放射状的毒砂；j. 含锑硫盐矿物沿早期闪锌矿的裂隙中充填；k. 含锑硫盐矿物结晶形态极不规则；l. 自形程度较好的粒状黄铁矿产于含锑硫盐矿物之后。Gn—方铅矿；Sph—闪锌矿；Py—黄铁矿；Apy—毒砂；Sul—含 Sb 硫盐矿物；Q—石英。

图 4 扎西康矿床部分矿石显微照片 (据卿成实, 2015)

Fig. 4 Some ore micrographs of Zhaxikang deposit

$$lof = Q1 - 3.0 \times iqr, \quad (3)$$

$$uif = Q3 + 1.5 \times iqr, \quad (4)$$

$$uof = Q3 + 3.0 \times iqr, \quad (5)$$

位于 lof 和 uif 之外的所有数据即为异常, 其中位于 lof 和 uof 之外的数据称为远异常。从式(4)看出, 异常下限仅由四分位数间距 iqr 确定, 少量特异值对结果影响很小, 较多的特异值也不会对结果产生灾难性后果(李前志等, 2015)。因此, 在本次背景值及异常下限的计算过程中, 不需要针对异常高值点进行剔除。按照富集系数 K =元素背景含量/区域丰度(查仁荣, 1992), 计算出各元素的富集系数(表 3 和图 6)。

由于富集程度等级按照系数 K 的大小可划分为: ①贫乏型或亏损型, $K < 0.5$; ②低背景型, $0.8 > K > 0.5$; ③背景型, $1.2 > K > 0.8$; ④弱富集型, $1.5 > K > 1.2$; ⑤强富集型, $K > 1.5$ 。根据表 3、图 6 可以发现, 对于参与测试分析的元素来说, 相比藏南地壳丰度, 强富集型的元素主要有 Sb、As、Pb、Cd、Hg、Ag; 弱富集型的元素主要有 Bi; 背景型元素主

要有 Zn、W、Mo; 低背景型元素主要有 Sn; 贫乏型或亏损型元素主要有 Au、Co、Cu、Mn、Na。

通过对比矿区外围部分成矿元素的背景值(表 1)可以发现, Sb、Pb、Zn 元素在矿区内的背景值均略高于矿区外, 但相差不大, 反映出成矿流体中的这些元素在成矿过程中可能表现出了向地层的扩散现象, 但整体规模较小; Au 在矿区内外背景值一致, 说明成矿流体对 Au 的富集影响较小; Ag、W 在矿区内的背景值低于矿区外, 其中仅 Ag 表现出了较大的差距, 这可能是由于 Ag 的地球化学性质较为活泼, 因此在矿区内外表现出了一定迁移的现象。结合富集程度的分类, 矿区围岩地层对 Sb、As、Pb、Ag 元素的富集有提供物质来源的能力, 前人针对 V 号矿体的研究中也指出后期的成矿过程中出现了地层萃取的现象(张建芳等, 2010; 王艺云等, 2012; 王达, 2018), 因此 XV 号矿体的围岩地层中可能也具备 Sb、As、Pb、Ag 元素萃取的条件。而 W、Zn、Sn、Au、Cu 同属于背景型—贫乏型元素, 地层对这些元素的供给能力则不足以使它们大量

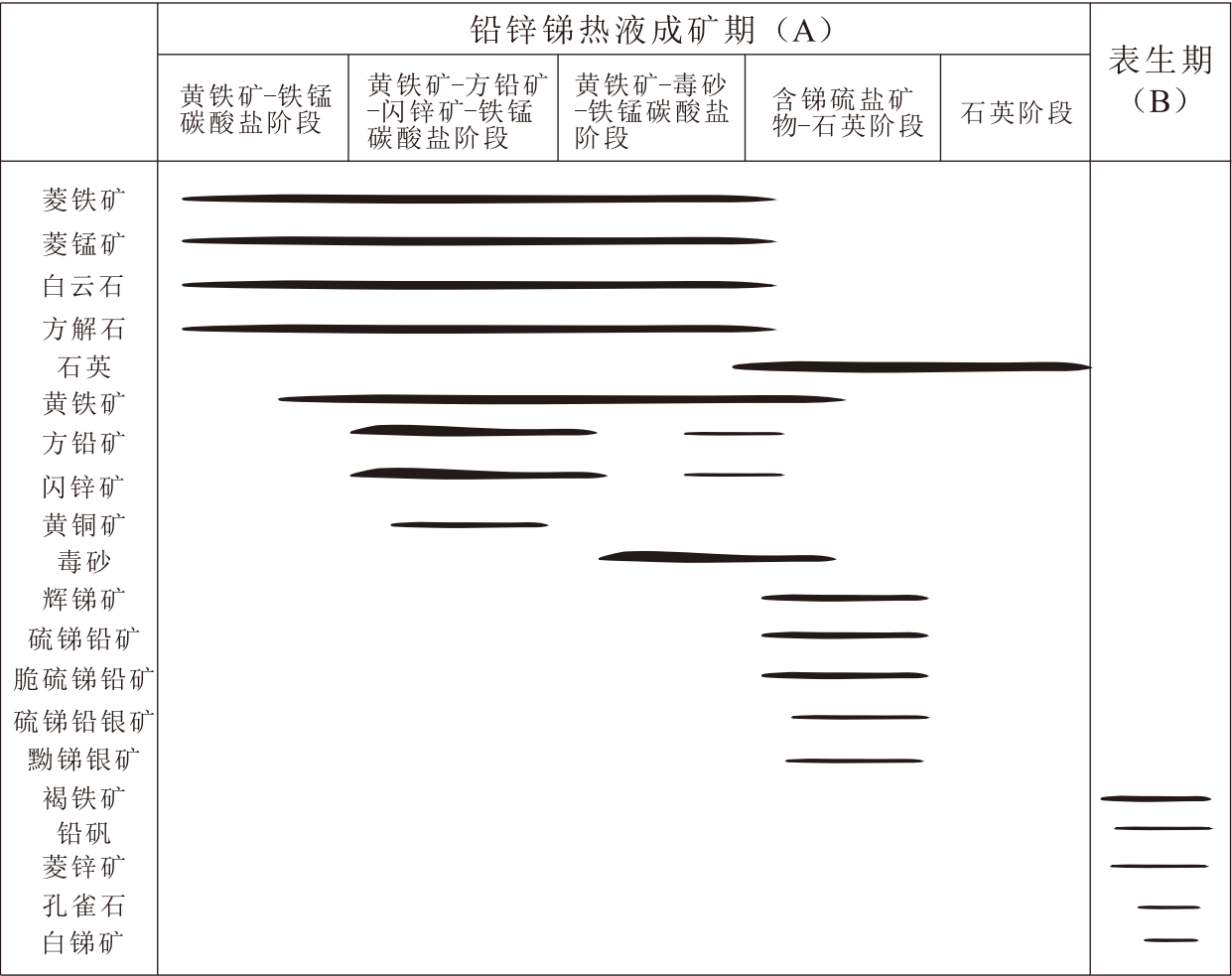


图 5 扎西康矿床矿物生成顺序 (据卿成实, 2015)
Fig. 5 The mineral arisen sequence of Zhaxikang deposit

表 2 样品分析结果统计信息表 (10⁻⁶)
Table 2 Statistical information of sample analysis results (10⁻⁶)

元素	样品数	最小值	最大值	中位数	平均值	标准偏差	偏度	峰度
Au	250	0.000 1	0.044 2	0.000 5	0.001 0	0.003 4	10.48	119.65
Hg	250	0.002 4	1.770 0	0.017 5	0.044 9	0.147 6	9.41	97.53
Ag	250	0.02	1 771.00	0.12	11.88	125.92	12.54	164.61
Sn	250	0.92	18.20	1.93	2.50	1.97	4.53	26.07
As	250	4.10	23 940.00	18.43	152.62	1 537.48	15.06	232.87
Sb	250	0.49	8 277.00	3.51	63.53	573.32	12.86	176.16
Bi	250	0.02	16.89	0.21	0.29	1.06	15.58	245.11
Cd	250	0.03	489.40	0.18	5.17	37.37	10.28	120.25
Co	250	1.41	55.19	8.75	11.02	8.16	3.34	12.59
Cu	250	3.12	1 030.00	13.06	20.71	65.53	14.82	228.52
Mo	250	0.08	4.89	0.69	0.79	0.37	5.94	59.76
Mn	250	185	31 385	368	1 286	3 729.82	6.37	43.29
Pb	250	4.93	480 800.00	22.08	2 925.92	32 534.50	13.53	192.43
W	250	0.06	29.00	0.90	1.23	2.26	10.35	115.54
Zn	250	31.90	136 200.00	72.99	1 583.38	10 846.24	9.75	106.42
Na	250	658	31 758	3 300	4 240	3 650.23	4.71	25.85

表 3 XV 号矿体围岩样品元素含量背景值及异常下限 (10⁻⁶)

Table 3 Background value and anomaly threshold of wall rock samples from No. XV ore body (10⁻⁶)

元素	背景值	异常下限	矿区外围背景值	藏南地壳丰度	富集系数 (藏南地壳)
Sb	3.51	13.56	1.68	0.16	21.92
As	18.43	48.11		1.59	11.59
Pb	22.08	58.56	16.34	6.50	3.40
Cd	0.18	0.40		0.05	3.38
Hg	0.02	0.07		0.007 1	2.48
Ag	0.12	0.63	0.72	0.052	2.25
Bi	0.21	0.36		0.17	1.25
Zn	72.99	193.70	60.64	66.00	1.11
W	0.90	1.74	1.69	0.92	0.98
Mo	0.69	1.17		0.87	0.80
Sn	1.93	3.57		3.08	0.63
Mn	368	1 454		900	0.41
Cu	13.06	26.40		44.00	0.30
Au	0.000 5	0.001 5	0.000 5	0.001 7	0.28
Na	3 300	5 942		12 300	0.27
Co	8.75	19.60		68.00	0.13

注：藏南壳体地壳丰度据黎彤等（1999），矿区外围背景值据卿成实等（2014）

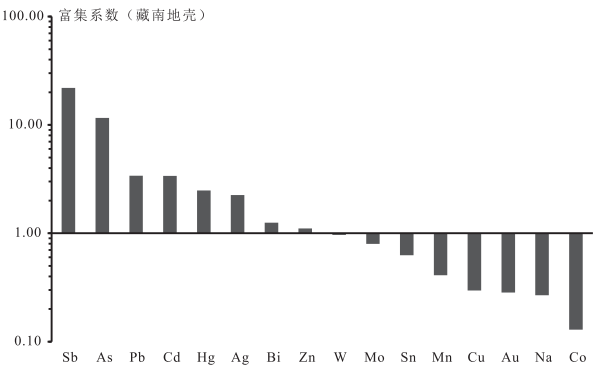


图 6 XV 号矿体围岩样品元素富集系数图

Fig.6 Element concentration coefficients of wall rock samples from No. XV ore body

富集,甚至聚集成矿,矿体中这类元素形成的对应矿物可能有另外的来源。

2.3 R 型聚类分析

为进一步研究元素组合特征,进行降维分类,以便确定合适的异常指示元素,将扎西康矿区 XV 号矿体围岩样品视作一个整体,使用 SPSS 软件进行 R 型聚类分析,得到结果如图 7。当距离系数选择 15 时,可以将元素主要分为 4 个大类:第一大类由 Ag、Pb、Sb、Bi、Hg、Cd、Zn、Cu、Sn、Mn 组成,代表了矿区与 Pb、Zn 矿化最为相关的元素组合。在该分类下取距离系数为 10 进一步细分,可得到 (Ag、Pb、Sb、Bi、Hg)、(Cd、Zn、Cu)和 (Sn、Mn) 的亚类聚类,其中 Pb 与 Zn 虽是典型共生元素,但

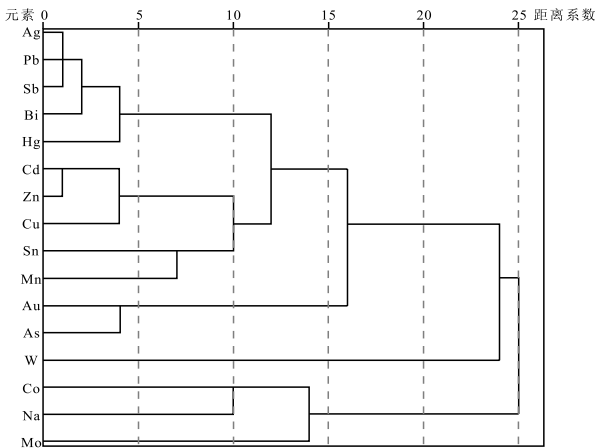


图 7 XV 号矿体围岩样品 R 型聚类分析图

Fig. 7 R cluster analysis of wall rock samples from No. XV ore body

却分属于不同亚类,推测其中一种元素可能在物质来源上受到了另外的补充。第二大类由 Au、As 构成,说明矿区内 Pb、Zn 的富集与 Au、As 的富集可能并非同一个成矿作用所致。第三大类由 W 单独聚类,表明该元素在整个体系中的富集作用相对独立。第四大类由 Co、Na、Mo 组成,元素组合类型未表现出明显的规律性。

2.4 因子分析

因子分析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),本研究通过对测试元素进行因子分析,得到与 Pb、Zn 属

于同一因子的元素组合,便可确立最佳指示元素,同时还能与 R 型聚类分析的结果相互验证。

本文使用 SPSS 软件进行因子分析的相关计算。首先对数据进行因子分析的条件进行判别,即进行 KMO(Kaiser and Rice, 1974)与巴特利特检验(Bartlett et al., 1937),其中样品的取样足够度 Kaiser-Meyer-Olkin 度量为 0.75,大于 0.5, Bartlett 球形检验显著性为 0,小于 0.05,符合因子分析的条件。

对于扎西康矿区 XV 号矿体样品,选取特征值大于 1 的因子,当提取 5 个因子时,方差累计可达到 88.07%,已经包含了原始变量的大部分信息,之后在前 5 个初始因子构成的公因子空间中进行因子旋转,得到旋转成分矩阵(表 4),以各元素最大旋转成分值为依据可得到如下分类:

F1: Hg、Ag、Sb、Bi、Pb;

F2: Sn、Cd、Cu、Mn、Zn;

F3: Au、As;

F4: Co、Mo、Na;

F5: W。

从上述分类来看,F1 的因子组成代表了与 Pb 矿化最为相关的元素组合,以中低温元素为主。F2 的因子组成主要为与 Zn 矿化密切相关的元素组合,以中高温元素为主。F1 与 F2 因子共同构成

了矿区与铅锌成矿作用最为相关的元素组合,高温—中温—低温元素均囊括其中,代表了一套完整的热液体系。F3 的因子组成主要代表了矿区 Au、As 元素的富集,并独立于 Pb、Zn。F4 因子的主要构成 Co、Mo、Na,这三种元素的含量变化在矿区内表现较为一致,由于三者同属于背景型—贫乏型元素,它们与 Pb-Zn 矿化关系不大,在整个体系中也处于比较次要的地位。F5 因子仅由 W 构成,代表了高温热液在矿区地层中活动的痕迹,同样与 Pb-Zn 矿化关系不大。

结合 R 型聚类分析和因子分析的结论,R 型聚类分析中第一大类的元素组合与因子分析中 F1、F2 因子组成相对应,第二大类与 F3 完全对应、第三大类元素与 F5 完全对应,第四大类与 F4 完全对应,反映出扎西康矿区 XV 号矿体围岩地层最主要的元素富集作用由 Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn、Zn、Au、As 体现,代表了一套完整的高温—中温—低温热液体系,其中 Au、As 的富集与 Pb、Zn 等存在一定差异,可能并非受同一成矿作用影响的结果。与铅锌矿化关系最为密切的元素组合为 Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn、Zn,同样涵盖了完整的高温—中温—低温元素组合,因此这套元素组合可作为下一步开展原生晕异常分布研究的良好指示元素。由于 Pb 属于强富集型元素

表 4 XV 号矿体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. XV ore body

因子	1	2	3	4	5
Hg	0.764	0.584	0.076	-0.102	-0.035
Ag	0.911	0.385	0.074	-0.065	-0.020
Sb	0.920	0.336	0.143	-0.067	-0.013
Bi	0.986	-0.042	0.100	-0.053	0.020
Pb	0.948	0.292	0.082	-0.061	-0.018
Sn	0.408	0.632	0.376	0.128	0.256
Cd	0.366	0.893	0.136	-0.085	-0.030
Cu	0.188	0.917	-0.042	0.050	-0.042
Mn	0.037	0.651	0.577	-0.072	0.032
Zn	0.246	0.927	0.047	-0.085	-0.015
Au	0.457	0.148	0.865	-0.030	0.001
As	-0.016	0.032	0.964	-0.017	-0.006
Co	-0.051	0.028	0.033	0.850	-0.032
Mo	-0.084	-0.073	-0.038	0.743	0.118
Na	-0.028	-0.021	-0.041	0.826	-0.090
W	-0.027	-0.005	0.005	-0.009	0.980

提取方法:主成分;旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

而 Zn、Sn、Au、Cu、Mn 等属于背景型—贫乏型元素,因此扎西康矿区的铅锌成矿作用中 Zn 可能主要为非地层的其他热液来源,Pb 的来源可能还有围岩地层的供给。

2.5 元素原生晕异常分布

2.5.1 元素异常分布

岩石测量异常分级,一般按三级含量来划分和圈定。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。发现了内带异常,就能较容易地找到矿体(邵跃等,1997)。一般情况下,以研究区域异常下限的 1、2、4 倍作为划分外、中、内带的界限(蒋敬业等,2006),采用以上方法,选择通过 R 型聚类分析和因子分析确定的指示元素 Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn、Zn 进行元素含量分级,以 ZK3603、ZK3605、ZK4003、ZK4004、ZK4006 分别构成 36 线、40 线剖面,做出矿区 XV 号矿体围岩样品元素含量等值线图(图 8):

根据图 8,矿区 XV 号矿体围岩样品的元素异常分布为:

Hg: 整体异常分布不均,高值区域集中在海拔 4 600~4 650 m、4 750 m 和 4 850 m 以上的区域,负异常则主要集中在海拔 4 600 m 以下的范围。

Ag: 整体高值异常区域集中在海拔 4 600~4 750 m 范围,深部异常较弱,负异常集中在浅部区域。

Sb: 整体异常高值区域集中在海拔 4 600~4 750 m 范围,深部未发育明显异常,以背景值区域为主,负异常集中在海拔 4 700 m 之上的位置。

Bi: 整体异常分布以背景值和外带异常为主,高值异常区域集中在海拔 4 750 m 位置,范围较小,负异常广泛集中在海拔 4 600~4 900 m 范围。

Pb: 与 Ag 的异常分布重合度较高,整体高值异常区域集中在海拔 4 600~4 750 m 范围,深部异常较弱,除高值异常区域外几乎全为负异常发育区域。

Sn: 整体异常强度较低,仅在海拔 4 450 m、4 600~4 650 m、4 750 m 位置见小范围高值异常区域发育,负异常集中在海拔 4 700 m 之上的位置。

Cd: 整体异常分布范围较广,集中在海拔 4 500~4 750 m 范围,高值区域集中在海拔 4 600 m 及 4 750 m 位置,在异常区域外几乎全是负异常分布。

Cu: 异常高值区域分布较为集中,在 4 600~4 650 m 之间,其余部分的异常强度整体较弱,多为背景值

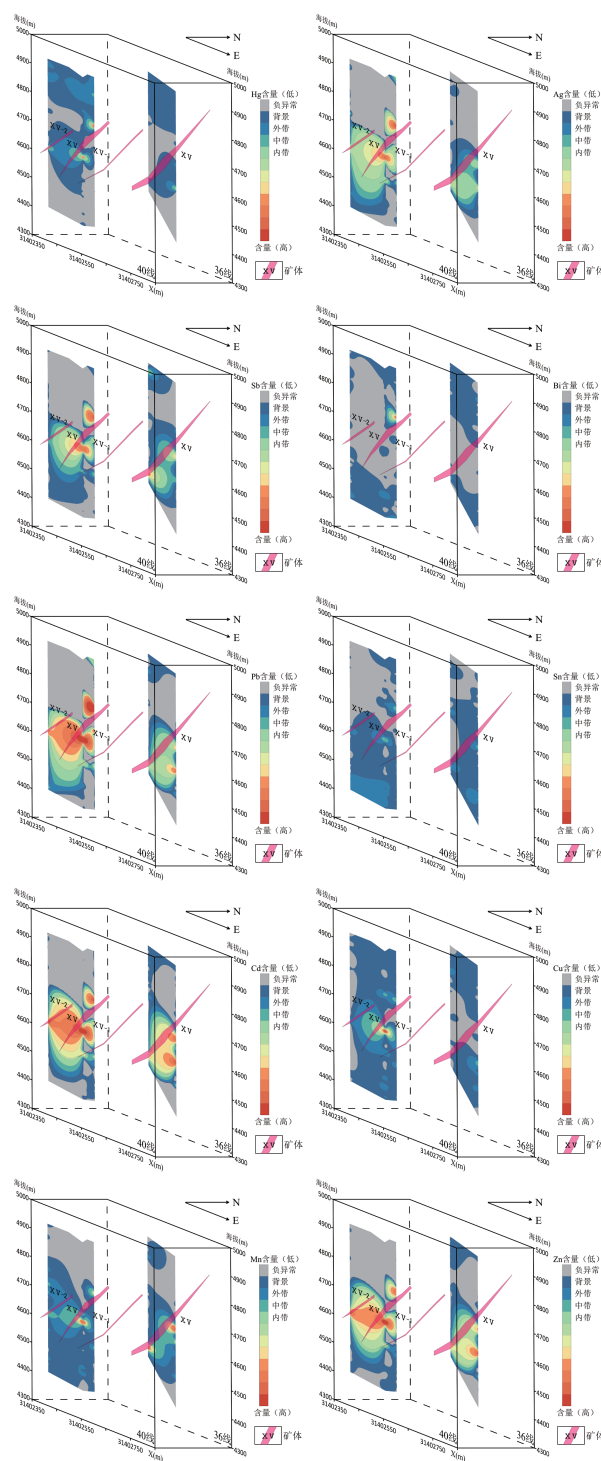


图 8 扎西康矿区 XV 号矿体围岩样品元素含量等值线图
Fig. 8 The elements contour map of wall rock samples from No. XV ore body

区域。

Mn: 整体异常高值区域集中在海拔 4 600~4 750 m 范围,负异常集中在海拔 4 800 m 之上的范围。

Zn: 整体异常分布与 Cd 重合度较高,高值区

域集中在海拔 4 600 m 及 4 750 m 位置,在异常区域外几乎全是负异常分布。

2.5.2 原生晕分带序列的确立

由于研究区各剖面钻孔数量众多,主要成矿元素表现出较好的异常发育,同时,对于分带序列的计算方法,由于使用人在计算方法的理解、熟练程度、分段划分以及取数等方面的差异,造成计算结果出入较大,因此结合矿区实际,可以直接采用经验图解法(邵跃等, 1997; 蒋敬业, 2006)来判断,以 3.5.1 中主要元素的内带异常范围进行叠加,重点分析分布在矿体附近的原生晕内带异常,根据各元素出现率,可以总结出扎西康矿区 XV 号矿体主要指示元素沿矿体轴向(由深到浅)的分带规律(图 9),由此可以发现: Sb、Pb、Zn、Ag、Cd 的分带最为连续,从深到浅持续出现, Hg、Cu、Sn、Mn 的分带极不连续,且分布区间较短。同时元素的分带在海拔 4 550~4 650 m,海拔 4 750 m 位置可见两段集中式分布,各元素分带在这两段深度中均有展现,指示了不同期次热液叠加的结果,而这两个位置也是矿化最好的区域。此外由于主要成矿元素 Pb、Zn 的分带直到剖面深部仍未结束,也说明了矿体继续延伸的可能。

2.5.3 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,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。

前人通过大量研究,基于元素在不同温度下的沉淀析出顺序总结出了热液矿床由上至下的分带序列: (As—Sb—Hg—Ba—Sr)(前缘晕)—(Cu—Ag—Zn—Cd—Pb—Au)(近矿晕)—(Cr—Ni—Ti—V—P—Nb—Be—Fe—Sn—W—Ga—In—Mo—Re—Co—Bi)(尾晕)(邵跃等, 1997)。根据 R 型聚类分析和因子分析的结论, Ag、Cu、Sb、Bi、Cd、Hg、Sn、Mn 等元素是 XV 号矿体 Pb、Zn 成矿作用的良好指示元素,对这些指示元素进行分类,按照前缘晕: Sb、Hg,近矿晕: Pb、Zn、Ag、Cu、Cd,尾晕: Bi、Sn、Mn,分别计算各元素衬度,根据各晕的元素组合计算出前缘晕、近矿晕、尾晕的平均衬度,以平均衬度大于 1 作为晕的发育边界,对前缘晕、近矿晕、尾晕发育范围进行叠加,可以得到矿区 XV 号矿体原生晕分带模式(图 10)。

根据原生晕分带模式,可以发现: XV 号矿体的原生晕发育较为单一,在海拔 4 450~4 700 m 范

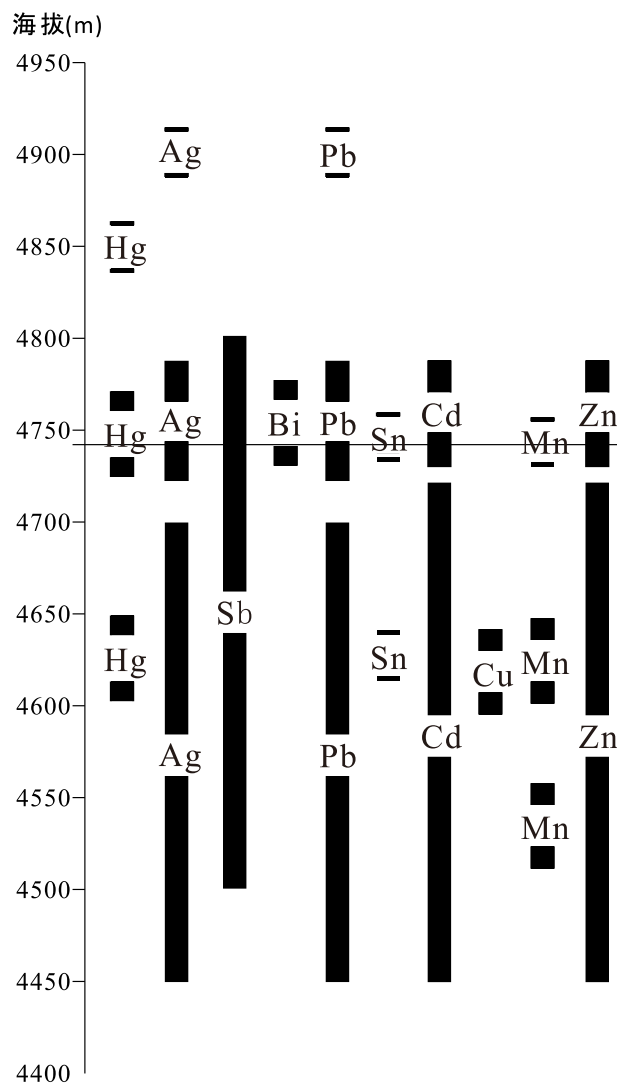


图 9 扎西康矿区 XV 号矿体主要指示元素轴向分带规律图
Fig. 9 The main indicator elements axial zoning pattern diagram of No. XV ore body

围是 XV 号矿体完整原生晕主要发育的位置。其余位置见零散小范围分布。前尾晕共存的位置集中在海拔 4 850 m 以上及海拔 4 600~4 700 m 范围,前者范围较小,晕发育的强度较弱,且未见明显的矿化现象,说明该处位置的矿体可能已被剥蚀;后者对应矿化最为明显的区域,近矿晕向下延伸范围较广,说明矿体在深部的延伸仍未结束,但是由于剖面深部基本上只分布有尾晕,同时未见前缘晕分布,因此 XV 号矿体在更深位置的潜力相对有限。

2.6 矿体分带模型

根据 XV 号矿体的原生晕分带特征,可以建立矿体在垂向上的分带模型(图 11):

从分带模型中可以看出,对于 XV 号矿体来说,

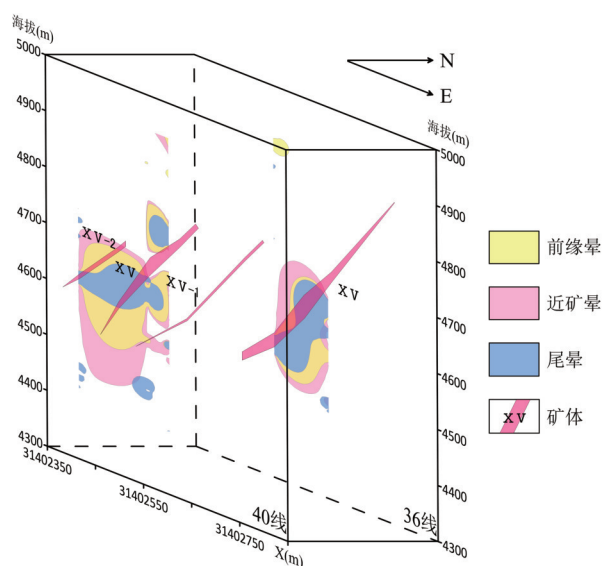


图 10 扎西康矿区 XV 号矿体原生晕分带模式图

Fig. 10 Primary halo zoning pattern of No. XV ore body

其成矿过程可能如下:

(1) 物源准备

XV 号矿体围岩地层对 Sb、Pb、Ag 元素的富集有提供物质来源的能力;同时由于 Zn 属于背景型元素,它的富集成矿与地层供源的关系不大,应主要是由非地层来源的热液提供。

(2) 元素富集类型

XV 号矿体的矿化与 Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn 及 Zn 关系最为密切,是一套完整的高温—中温—低温元素组合,可作为区域上寻找同类型 Pb-Zn 矿化的良好指示元素;而 Au、As 的富集与 Pb、Zn 等存在一定差异,可能并非同一成矿作用影响下的结果。

(3) 成矿过程

从分带模型上来看,XV 号矿体经历了两次热液活动,在海拔 4 850 m 之上,为较早的一期,规模较小,只有小范围的原生晕异常,但未见明显的矿化现象,推测可能是此处的矿体已被剥蚀所致。而海拔 4 500~4 700 m 范围则是矿体最主要的矿化范围。含矿热液携带成矿元素向上运移,在此过程中由于温度条件变化,开始大量析出成矿元素,使得 Pb、Zn 富集成矿;随着成矿热液继续运移到海拔 4 800 m 之上,元素的沉淀析出变少,整个成矿过程逐渐结束。从分带结构上来看,XV 号矿体的形成过程相对简单,没有表现出复杂的叠加改造作用的痕迹,但垂向上的延伸达数百米,在区域上极有可能存在一个较大热源为热液活动提供动力。

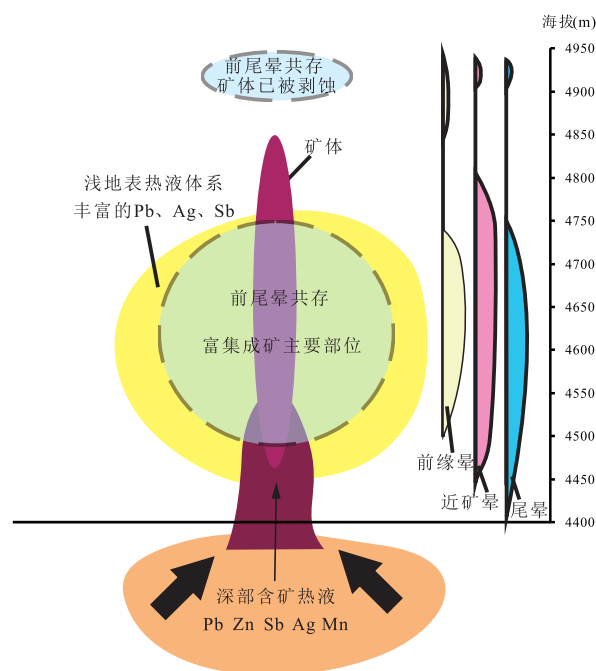


图 11 扎西康矿区 XV 号矿体分带模型示意图

Fig. 11 No. XV ore body zoning model of Zhaxikang mining area

(4) 深部潜力

矿体由浅到深的原生晕分布依次表现为前缘晕—近矿晕—尾晕,其中近矿晕最远延伸至海拔 4 450 m,尾晕一直贯穿到剖面最深处,但前缘晕仅在海拔 4 500 m 位置便停止向下发育,说明在目前已有的勘查阶段下,深部隐伏新矿体的标志还未显现,已知 XV 号矿体会继续向下延伸,仍然具有一定深部成矿的潜力。

(5) 对特提斯喜马拉雅新生代构造—成矿事件的响应

矿区附近的错那洞穹窿构造带,形成于喜马拉雅造山带在后碰撞阶段所经历的强烈伸展过程,从时间尺度上来看,扎西康矿床的成矿年龄(21~17 Ma 和 16~12 Ma,周清等,2014; Sun et al., 2018)与穹窿中最为重要的两期花岗岩成岩年龄(18~17 Ma 和 16~14 Ma,梁维等,2021)高度吻合。由于喜马拉雅在后碰撞阶段总体处于伸展背景,期间形成了各种张性构造及拆离系断裂等,为成矿热液提供了有利的空间(Sun et al., 2018; Zhou et al., 2018; 梁维等, 2021)。在岩浆侵位引发的高地热梯度作用下,出溶流体在向外扩散的过程中也从地层中萃取了部分成矿元素(梁维等, 2021),这也与扎西康矿区地层具有丰富的供源能力的结论相匹配。区域上,从

穹窿核部向外表现为一套高温元素(W、Sn、Bi、Rb等)→中温元素(Pb、Zn、Ag、Sb等)→中低温元素(Au、Sb、Ag、Hg、As等)的异常组合,扎西康矿床正好好处在中温元素的异常区域内(周清等, 2014; 吴建阳等, 2015; Zhou et al., 2018),在垂向上具备一套完整的高温—中温—低温元素组合,同时由于XV号矿体并未经历像V号矿体那样复杂的叠加改造现象(梁维, 2014b),它的分带模型更能代表特提斯喜马拉雅成矿带后碰撞阶段下Pb-Zn矿化的普遍特征,也是这次新生代构造—成矿事件在元素异常分布上的良好契合。在区域构造—成矿方面,补充了特提斯喜马拉雅新生代构造—成矿方面的研究素材,为同类型铅锌矿的找矿勘探提供了相应的地球化学依据。

3 结论

(1)扎西康矿区XV号矿体围岩地层对Sb、Pb、Ag有着良好的供给能力,而Zn的富集成矿则与地层关系不大。

(2)XV号矿体的矿化与Hg、Ag、Sb、Bi、Pb、Sn、Cd、Cu、Mn及Zn关系最为密切,是一套完整的高温—中温—低温元素组合,但Au、As的富集与Pb、Zn等存在一定差异,可能并非同一成矿作用影响下的结果。

(3)XV号矿体的形成过程相对简单,主要为含矿热液携带成矿元素往上运移的过程中不断析出成矿,但未表现出复杂的叠加改造作用的痕迹。

(4)现有勘查阶段下,深部隐伏新矿体的标志还未显现,但已知XV号矿体会继续向下延伸,仍然具有一定深部成矿的潜力。

(5)XV号矿体的元素分带模型的,契合了特提斯喜马拉雅新生代构造—成矿事件,为研究特提斯喜马拉雅成矿带后碰撞阶段下的Pb-Zn矿化提供了良好素材,在区域上对同类型铅锌矿的勘探也可起到相应的指示作用。

致谢: 论文编写过程中得到了西藏华钰矿业股份有限公司的大力支持,审稿专家对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示由衷的感谢!

References

Bartlett M S., 1937. "Properties of sufficiency and statistical tests" [J].
Proceedings of the Royal Statistical Society, Series A (160):

268–282.

Cheng H X., Zhao C D., Zhuang G M., 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 with English abstract).

Dai X W., Yang J M., Zhang C Y., 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).

Duan J L., Tang J X., Lin B., 2016. Zinc and lead isotope signatures of the Zhaxikang Pb–Zn deposit, South Tibet: implications for the source of the ore-forming metals[J]. *Ore Geology Review*, 78: 58–68.

Guo J., Jiao Y J., Liang S X., 2021. Comprehensive electrical prospecting of hydrothermal vein type deposits in carbonaceous rocks in the Tethyan Himalayan Pb–Zn–Sb–Au metallogenic belt: A case study of the Zhaxikang Pb–Zn–Sb polymetallic deposit in southern Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (4): 612–624 (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q., Lü Q T., Wang A J., et al., 2004. Continental Collision and Related Metallogeny: A Case Study of Mineralization in Tibetan Orogen[J]. *Mineral Deposits*, 22 (4): 319–333 (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q., Mo X X., Yang Z S., et al., 2006a. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 33 (2): 340–351 (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q., Mo X X., Yang Z S., et al., 2006b. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types [J]. *Geology in China*, 33 (2): 340–351. (in Chinese with English abstract).

Hou Z Q., Qu X M., Yang Z S., et al., 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 25 (6): 629–651 (in Chinese with English abstract).

Hu Y J., 1991. *Multivariate Analysis in Geochemistry* [M]. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

Jiang J Y., Cheng J P., Qi S H., et al., 2006. *Applied Geochemistry* [M]. China University of Geosciences Press, Wuhan, 145–179. (in Chinese with English abstract).

Jin X W., Ma G T., Zhang L K., et al., 2020. Spatial distribution and genesis of the surface soil's salinization in Zhaxikang mine area, southern Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (4): 83–94 (in Chinese with English abstract).

Kaiser H F., Rice J., 1974. Little jiffy, mark IV[J]. *Educational and Psychological Measurement*, 34 (1): 111–117.

Li G Q., 2010. *Element and Isotope Geochemistry of Zaxikang Sb–Pb–Zn Polymetallic Deposit, Tibet*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract).

Li G M., Zhang L K., Zhang Z., et al., 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (2): 351–360 (in Chinese with English abstract).

Li H., Zhang G Y., Yu B., 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 with English abstract).
- Li Q Z, Zhou J, Liu L, et al., 2015. Comparison of low limit determination methods of petro-geochemical anomaly-Taking Sigu area of Yunnan as an example[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30 (3) : 429 – 434 (in Chinese with English abstract).
- Li Y X, Li G M, Dong L, et al., 2018. Geology and exploration potential of the Mazhala gold deposit, Cuomei, Xizang: An approach[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38 (3) : 88 – 98 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J, et al., 2006. Enrichment of Element Cesium during Modern Geothermal Action in Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (9) : 1457 – 1464 (in Chinese with English abstract).
- Li T, Yuan H Y, Wu S X, et al., 1999. Regional Element Abundances of Continental Crustal Bodies in China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 23 (2) : 2 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Liang W, Hou Z Q, Yang Z S, et al., 2013. Remobilization and Overprinting in the Zhaxikang Pb-Zn-Ag-Sb Polymetal Ore Deposit, Southern Tibet: Implications for Its Metallogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (11) : 3828 – 3842 (in Chinese with English abstract).
- Liang W, Zheng Y C, Yang Z S, et al., 2014a. 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 with English abstract).
- Liang W, 2014b. Metallogenesis of Au-Sb-Pb-Zn mineralization in Tethys Himalaya Belt, South Tibet, China[D]. China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract).
- Liang W, Li G M, Basang Y D, et al., 2021. Metallogenesis of Himalaya gneiss dome: An example from Cuonadong gneiss dome in Zhaxikang ore concentration area[J]. *Mineral Deposits*, 40 (5) : 932 – 948 (in Chinese with English abstract).
- Luo X R, Wen M L, Ouyang F, et al., 2007. Exploration Geochemistry [M]. Metallurgical Industry Press, Beijing, 218. (in Chinese with English abstract).
- Meng X J, Yang Z S, Qi X X, et al., 2008. Silicon-oxygen-hydrogen Isotopic Compositions of Zhaxikang Antimony Polymetallic Deposit in Southern Tibet and Its Responses to the Ore-controlling Structure. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (7) : 1649–1655. (in Chinese with English abstract).
- Nguyen T T, Liu X G, Chen C L, et al., 2013. Robust Statistics and EDA Technique for Identification of the Geochemical Anomalies[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 35 (3) : 307 – 313+249 (in Chinese with English abstract).
- Qing C S, 2015. The Metallogenic Material's Migration and Metallogenetic Process Study of Zhaxikang Lead and Zinc Polymetallic Deposit in Longzi Country, Tibet, China [D]. Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract).
- Qing C S, Ding J, Li G M, et al., 2014. The Wall Rock Element Distribution Research of Stara of Zhaxikang deposit in Longzi Country, Tibet, China[J]. *Metal Mine*, 33 (6) : 97 – 101 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Li G M, Wang L S, 2004. Metallic mineral resources on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 23 (1) : 20 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Shao Y, Fu X X, 1997. Rock measurements (primary halo method) of hydrothermal deposits for prospecting [M]. Geology Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract).
- Sun X, Zheng Y Y, Pirajno F, et al., 2018. Geology, S-Pb isotopes, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in southern Tibet: Implications for multiple mineralization events at Zhaxikang[J]. *Mineralium Deposita*, 53 (3) : 435 – 458.
- Tukey J W, 1977. Exploratory data analysis [M]. Reading: Addison-Wesley.
- Wang D, 2018. The isotope geochemistry research of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in Southern Tibet[D]. China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract).
- Wang D, Sun X, Zheng Y Y, et al., 2017. Two pulses of mineralization and genesis of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in southern Tibet: Constraints from Fe-Zn isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 84: 347 – 363.
- Wang Y Y, Tang J X, Zheng W B, et al., 2012. A Tentative Discussion on Ore Fabric and Genesis of the Zhaxikang Zn-polymetallic Deposit, Lhunze County, Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33 (4) : 681–692. (in Chinese with English abstract).
- Wu J Y, Li G M, Zhou Q, et al., 2015. A preliminary study of the metallogenic system in the Zhaxikang integrated exploration area, southern Tibet [J]. *Geology in China*, 42 (6) : 1674. (in Chinese with English abstract).
- Xie Y L, Li L M, Wang B G, et al., 2017. Genesis of the Zhaxikang epithermal Pb-Zn-Sb deposit in southern Tibet, China: Evidence for a magmatic link[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 891 – 909.
- Xu Y F, Zheng W B, Ye J, et al., 2013. Geochemistry of Main Metallogenic Elements of Zhaxikang Polymetallic Deposit in Southern Tibet[J]. *Acta Mineralogica*, supplement: 357 – 358 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z S, Hou Z Q, Gao W, et al., 2006. Metallogenic Characteristics and Genetic Model of Antimony and Gold Deposits in South Tibetan Detachment System[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (9) : 1377 – 1391 (in Chinese with English abstract).
- Zha R R, Zhu X N, Lin G L, 1992. Application of Element Concentration Coefficient Series in Prospecting of Ore Deposits[J]. *Xinjiang Geology*, 10 (2) : 184 – 190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J F, Zheng Y Y, Zhang G Y, et al., 2010. Genesis of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag Deposit in Northern Himalaya: Constraints from Multi-Isotope Geochemistry [J]. *Earth Science*, 35 (6) : 1000-1010. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Tang J X, Lin B, et al., 2016. Geochemical Characteristics of Trace Elements of Sphalerite in the Zhaxikang Deposit, Southern Tibet, and Their Geological Significances [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 35 (6) : 1203-1216, 1289. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Li G M, Zhang L K, et al., 2020. The early Oligocene beryl-bearing pegmatite in the Cuonadong dome, southern Tibet: Its

- forming mechanism and geological significances[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2): 14–30 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y Y, Liu M Y, Sun X, 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): 1003–1014 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Li G M, Xia X B, et al., 2014. Metallogenic model of Zhaxikang polymetallic ore concentration area in Southern Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 33 (S1): 353–354 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Li W C, Qing C S, et al., 2018. Origin and tectonic implications of the Zhaxikang Pb–Zn–Sb–Ag deposit in northern Himalaya: evidence from structures, Re–Os–Pb–S isotopes, and fluid inclusions[J]. *Miner Deposita*, 53 (4): 585–600.
- ## 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.
- 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.
- 郭锐, 焦彦杰, 梁生贤, 2021. 特提斯喜马拉雅铅锌锡金成矿带含炭质岩石中热液脉型矿床的综合电法勘探——以西藏扎西康铅锌锡多金属矿为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (4): 612–624.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等, 2004. 初论陆-陆碰撞与成矿作用-以青藏高原造山带为例[J]. *矿床地质*, 22 (4): 319–333.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等, 2006a. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景, 时空分布和主要类型[J]. *中国地质*, 33 (2): 340–351.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等, 2006b. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. *矿床地质*, (4): 337–358.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等, 2006c. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. *矿床地质*, 25 (6): 629–651.
- 胡以铿, 1991. 地球化学中的多元分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 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.
- 金雄伟, 马国桃, 张林奎, 等, 2020. 藏南扎西康矿集区土壤盐渍化空间分布及成因分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (4): 83–94.
- 李关清, 2010. 西藏扎西康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).
- 李光明, 张林奎, 张志, 等, 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展、资源潜力与找矿方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (2): 351–360.
- 李惠, 张国义, 禹斌, 等, 2005. 构造叠加晕法是危机金矿寻找接替资源的有效新方法[J]. *矿产与地质*, 19 (6): 683–687.
- 李前志, 周军, 刘磊, 等, 2015. 岩石地球化学异常下限的确定方法对比——以云南思姑锡矿区为例[J]. *地质找矿论丛*, 30 (3): 429–434.
- 李应栩, 李光明, 董磊, 等, 2018. 西藏马扎拉金矿区外围地质特征与找矿方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 38 (3): 88–98.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等, 2006. 西藏地热活动中铯的富集过程探讨[J]. *地质学报*, 80 (9): 1457–1464.
- 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔, 等, 1999. 中国大陆壳体的区域元素丰度[J]. *大地构造与成矿学*, 23 (2): 2–8.
- 梁维, 侯增谦, 杨竹森, 等, 2013. 藏南扎西康大型铅锌银锡多金属矿床叠加改造成矿作用初探[J]. *岩石学报*, 29 (11): 3828–3842.
- 梁维, 郑远川, 杨竹森, 等, 2014a. 藏南扎西康铅锌银锡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.
- 梁维, 2014b. 特提斯喜马拉雅金锡铅锌成矿带成矿作用研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 梁维, 李光明, 巴桑元旦, 等, 2021. 喜马拉雅带片麻岩穹窿成矿作用——以扎西康矿集区错那洞穹窿为例[J]. *矿床地质*, 40 (5): 932–948.
- 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. 藏南扎西康锡多金属矿硅-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 (07): 1649–1655.
- Nguyen T T, 刘修国, 陈春亮, 等, 2013. 基于稳健统计学和EDA技术的地球化学异常下限确定[J]. *物探化探计算技术*, 35 (3): 307–313+249.
- 卿成实, 2015. 西藏隆子县扎西康铅锌多金属矿床成矿物质迁移及成矿过程研究[D]. 成都理工大学.
- 卿成实, 丁俊, 李光明, 等, 2014. 西藏隆子县扎西康矿床地层围岩元素分布特征[J]. *金属矿山*, 33 (6): 97–101.
- 芮宗瑶, 李光明, 王龙生, 2004. 青藏高原的金属矿产资源[J]. *地质通报*, 23 (1): 20–23.
- 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.
- 王达, 2018. 藏南扎西康铅锌银矿床同位素地球化学研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 王艺云, 唐菊兴, 郑文宝, 等, 2012. 西藏隆子县扎西康锡多金属矿床矿石组构研究及成因探讨[J]. *地球学报*, 33 (4): 681–692.
- 吴建阳, 李光明, 周清, 等, 2015. 藏南扎西康整装勘查区成矿体系初探[J]. *中国地质*, 42 (6): 1674–1683.
- 徐云峰, 郑文宝, 叶江, 等, 2013. 藏南扎西康锡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. 藏南拆离系锡金成矿特征与成因模式[J]. *地质学报*, 80 (9): 1377–1391.
- 查仁荣, 朱星南, 林关玲, 1992. 矿床中元素富集系数序列在找矿中的作用[J]. *新疆地质*, 10 (2): 184–190.
- 张建芳, 郑有业, 张刚阳, 等, 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌银矿床成因的多元同位素制约[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 35 (6): 1000–1011.
- 张政, 唐菊兴, 林彬, 等, 2016. 藏南扎西康矿床闪锌矿微量元素地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报* [J], (06): 1203–1216, 1289.
- 张志, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 藏南错那洞穹窿早渐新世含绿柱石花岗岩伟晶岩的成因机制及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (2): 14–30.
- 郑有业, 2010. 西藏扎西康锡多金属矿床类型、发现过程及意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 37 (5): 1003–1014.
- 周清, 李光明, 夏祥标, 等, 2014. 藏南扎西康铅锌多金属矿集区成矿模式[J]. *矿床地质*, 33 (S1): 353–354.