

云南维西地区锑金多金属矿成矿规律研究

雷阳艾, 朱振东*, 梁元钊, 闭邵林, 谢 行, 程迁群

云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

云南维西地区位于西南三江成矿带中段澜沧江褶皱带, 是我国重要的中低温热液多金属成矿集中区, 长期以来受限于复杂的地质构造条件和单一的找矿思路, 锑金多金属矿勘查进展缓慢。本文基于区域成矿演化背景、典型矿床解剖、地球化学异常响应及控矿要素系统分析, 构建了“地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型, 突破了三江成矿带传统“笔架山式”单一沉积改造型锑矿、华南“木利式”单一热液蚀变型锑矿的找矿局限, 明确了印支期俯冲带构造活动驱动的岩浆热液与二叠系含矿地层耦合控矿的核心机制, 阐明了锑-金-铅锌多金属共生分异受成矿流体氧逸度、硫逸度联合制约的规律, 给三江中段锑金多金属矿系统成矿预测提供思路。通过忍根河矿段原生晕垂向分带研究, 识别出“前缘晕As-Sb-Hg-近矿晕Au-Ag-Pb-Zn-尾晕Co-Ni-Cr”的完整分带序列, 并在已知矿体尾部发现前缘晕与尾晕元素叠加的地球化学参数反转现象, 为深部隐伏矿体定位提供了关键依据。成果为维西地区上怒洛矿区勘查部署提供了直接科学依据, 也为三江成矿带中段同类型矿床找矿突破提供了可借鉴的技术方法。

关键词

锑金多金属矿, 成矿规律, 四位一体找矿模型, 找矿突破, 云南维西

Study on Metallogenic Regularity of Antimony-Gold Polymetallic Deposits in Weixi Area, Yunnan

Yang'ai Lei, Zhendong Zhu*, Yuanzhao Liang, Shaolin Bi, Hang Xie, Qianqun Cheng

No.310 Team, Yunnan Nonferrous Geological Bureau, Dali Yunnan

Received: May 26, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 雷阳艾, 朱振东, 梁元钊, 闭邵林, 谢行, 程迁群. 云南维西地区锑金多金属矿成矿规律研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(7): 1043-1063. DOI: 10.12677/ag.2026.167094

Abstract

The Weixi area in Yunnan Province is located in the Lancang River fold belt in the middle part of the Sanjiang metallogenic belt in Southwest China. It is an important medium-low temperature hydrothermal polymetallic metallogenic concentration area in China. For a long time, due to complex geological structural conditions and single prospecting ideas, the exploration of antimony-gold polymetallic deposits has been slow. Based on the systematic analysis of regional metallogenic evolution background, typical deposit anatomy, geochemical anomaly response and ore-controlling factors, this paper constructs a four-in-one comprehensive information prospecting model of “strata-structure-magma-fluid”, which breaks through the prospecting limitations of the traditional “Bijashan type” single sedimentary transformation type antimony deposit in Sanjiang metallogenic belt and the “Muli type” single hydrothermal alteration type antimony deposit in South China. The core mechanism of ore-controlling coupling between magmatic hydrothermal fluid driven by tectonic activity of Indosinian subduction zone and Permian ore-bearing strata is clarified, and the law that the symbiotic differentiation of antimony-gold-lead-zinc polymetallic is jointly restricted by the oxygen fugacity and sulfur fugacity of ore-forming fluid is clarified. It provides ideas for metallogenic prediction of antimony-gold polymetallic ore system in the middle section of Sanjiang. Through the study of the vertical zoning of the primary halo in the Rengenge ore section, the complete zoning sequence of “front halo As-Sb-Hg-near halo Au-Ag-Pb-Zn-tail halo Co-Ni-Cr” was identified, and the geochemical parameter inversion phenomenon of the superposition of front halo and tail halo elements was found at the tail of the known ore body, which provided a key basis for the location of deep concealed ore bodies. The results provide a direct scientific basis for the exploration and deployment of the Shangnulu mining area in the Weixi area, and also provide a technical method for the prospecting breakthrough of the same type of deposits in the middle section of the Sanjiang metallogenic belt.

Keywords

Antimony Gold Polymetallic Ore, The Metallogenic Regularity, Four-in-One Prospecting Model, Prospecting Breakthrough, Weixi Yunnan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

西南三江成矿带是全球最复杂的造山带之一，也是我国最重要的多金属成矿带，拥有丰富的铜、铅、锌、金、银、锑、钨、锡等矿产资源[1]-[4]。维西地区地处三江成矿带中段澜沧江褶皱带，夹持于金沙江断裂与澜沧江断裂之间，经历了多期次的构造-岩浆-沉积演化，形成了复杂的地质构造格局和优越的成矿地质条件[5]-[7]。区内已发现锑、金、铅、锌、铜、铁等多种矿产，其中锑矿资源尤为丰富，已发现锑矿(化)点 14 处，是云南省重要的锑矿产地之一。

然而，长期以来，维西地区锑金多金属矿的勘查研究程度较低，存在诸多亟待解决的问题：一是对区域成矿规律的认识不够深入，传统观点认为三江中段锑矿仅为沉积改造型或单一热液型，忽视了岩浆活动对成矿的贡献[8] [9]；二是找矿模型单一，多沿用华南“木利式”或湘中“古台山式”锑矿找矿思路，未能充分结合本区独特的地质构造背景[3] [10]；三是深部找矿技术方法滞后，以往工作多集中于地表浅

部,对深部隐伏矿体的定位预测缺乏有效手段[8][11]。这些问题严重制约了本区锑金多金属矿的找矿突破。

近年来,维西地区的地质勘查工作得到了加强。本文依托“云南省维西县上怒洛铅锌矿详查”项目,通过系统的野外地质调查、室内测试分析及综合研究,深入剖析了区域成矿地质背景和典型矿床地质特征,系统总结了锑金多金属矿的成矿规律和控矿要素,构建了“地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型,并成功应用于找矿实践,在忍根河矿段实现了中型锑金多金属矿床的找矿突破。本次研究不仅丰富了三江成矿带中段锑金多金属矿的成矿理论,也为区域同类型矿床的勘查提供了重要指导[7][12]。

2. 区域成矿地质背景

2.1. 大地构造位置

研究区处于三江印支褶皱系弧形转弯急剧挤压变窄部位,以楚波断裂为界,西部属三江印支褶皱系维西褶皱带,东部为扬子准地台盐源丽江台缘拗陷。从更大的大地构造尺度看,本区隶属于羌塘-三江造山系昌都-兰坪-思茅地块北段,是古特提斯洋俯冲闭合、印度板块与欧亚板块碰撞造山的关键地带[5]-[7]。区内深大断裂发育,北北西向康普断裂、叶枝-雪龙山断裂、楚格扎断裂纵贯全区,这些断裂不仅控制了地层展布和岩浆活动,也为成矿流体的运移和矿质沉淀提供了通道和空间(图 1(a)) [7][11]。

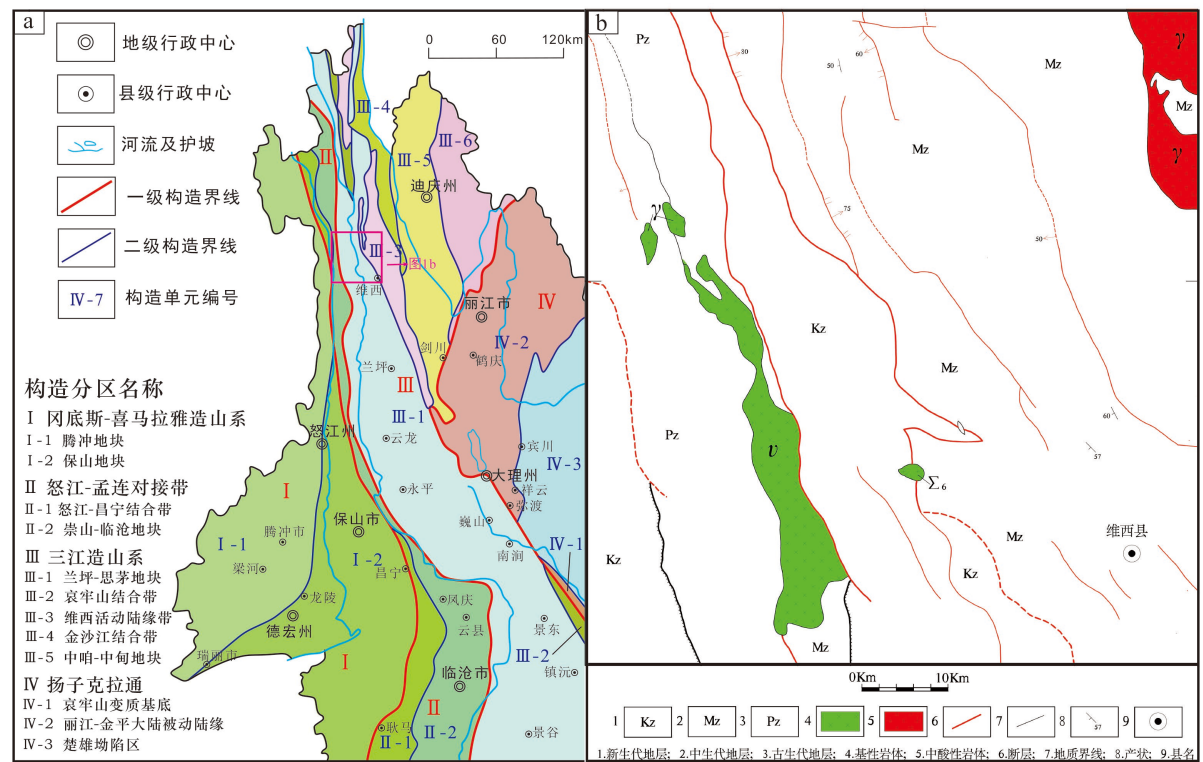


Figure 1. Geotectonic location map (a) and regional tectonic map of Weixi area (b)

图 1. 维西地区大地构造位置图(a)和区域构造图(b)

2.2. 地层与含矿建造

本次 1:1 万大比例尺地质填图结果显示,研究区出露地层序列完整,自二叠系至第四系均有不同程度出露。其中二叠系下统与上三叠统石钟山组与锑金多金属成矿作用的时空耦合关系最为密切,是区内最重要的含矿建造(图 1(b)) [7][10]。

二叠系下统(P₁): 该套地层呈北北西向条带状展布于研究区西部, 野外实测剖面显示其总厚度约 1200 m, 岩性以灰黑色炭质板岩、含粉砂白云质绢云板岩为主, 局部夹薄层生物碎屑灰岩及蚀变基性火山岩透镜体。炭质板岩页理发育, 黄铁矿呈星散状、细脉状广泛分布, 局部见黄铁矿集合体沿层理面富集。

本次采集的 28 件系统地球化学样品测试结果表明, 该套地层 Sb 平均含量达 12.6×10^{-6} , Au 平均含量为 8.3×10^{-9} , 分别为地壳克拉克值的 4.2 倍和 2.8 倍, 是区域最主要的初始矿源层[13] [14]。其致密坚硬的岩性特征对向上运移的成矿流体具有显著的遮挡效应, 促使矿质在其内部的层间破碎带或上覆地层的裂隙系统中沉淀富集, 同时也为成矿流体的侧向运移提供了隔水边界[7] [12]。

上三叠统石钟山组(T_{3s}): 该组地层广泛出露于研究区东部, 总厚度约 1800 m, 整体呈角度不整合覆盖于二叠系地层之上, 由碳酸盐岩、碎屑岩及火山碎屑岩互层组成。根据岩性组合与沉积旋回特征, 自下而上可划分为三段, 其中石钟山组二段第一亚段(T_{3s}¹⁻²)与成矿关系最为密切[7] [10]。

该亚段以中厚层状白云质灰岩为主, 夹少量泥质灰岩和粉砂岩。野外观察发现, 其内部普遍发育溶蚀孔洞和构造裂隙, 孔隙度和渗透率显著高于上下地层。白云质灰岩化学性质活泼, 易与含矿热液发生交代反应, 形成矽卡岩化或热液交代型矿体; 同时, 发育的裂隙系统也为矿液充填提供了良好空间, 形成脉状、网脉状充填型矿体[6] [15]。该亚段不仅是区域沉积改造型菱铁矿的主要赋矿层位, 也是热液型锑铅锌矿最重要的容矿围岩。

其他地层除上述两套核心含矿地层外, 侏罗系花开左组(J_{2h})、坝注路组(J_{3b})及白垩系景星组(K_{1j})等地层中也见有零星的锑金矿化显示, 但矿化规模小、品位低, 且多受局部小型断裂控制, 均未形成具有工业价值的矿体[7] [16]。第四系主要为冲洪积物和残坡积物, 仅在局部地段见有氧化型锑矿化。

2.3. 构造特征

小比例尺地质调查共识别出断裂多条, 结合区域构造演化分析表明, 研究区构造格局以断裂构造为主、褶皱构造为辅, 总体构造线呈北北西向展布, 与三江特提斯造山带区域构造线方向完全一致[5] [7] [11]。其中, 深大断裂作为区域构造格架的核心, 控制了成矿带的整体分布; 次级断裂与褶皱构造则直接制约了矿床和矿体的空间定位与产出形态[7] [11]。

深大断裂系统: 北北西向康普断裂、叶枝 - 雪龙山断裂、楚格扎断裂是区内的三条主干深大断裂, 均形成于印支期古特提斯洋俯冲闭合阶段, 在喜山期印度 - 欧亚板块碰撞过程中发生强烈复活, 经历了印支期挤压逆冲、喜山期走滑拉张的多期构造叠加, 兼具压性、张性和扭性的复合活动性质[5] [7]。

野外构造剖面实测显示, 康普断裂破碎带宽度达 5 m~20 m, 带内广泛发育构造角砾岩、碎裂岩和糜棱岩, 角砾成分以二叠系板岩为主, 胶结物为硅质和碳酸盐质, 普遍发育硅化、黄铁矿化等蚀变现象[7] [12]。这些深大断裂切割深度可达地壳中下部, 不仅控制了区域地层展布和岩浆岩的侵位空间, 更作为深部岩浆与成矿流体向上运移的主要通道, 直接制约了巴迪 - 白济汛、攀天阁 - 康普两大锑金多金属成矿带的空间展布[7] [11]。

次级断裂系统: 区内次级断裂按走向可划分为北北西向、北东向和近东西向三组, 其形成时代、力学性质和控矿作用存在显著差异:

北北西向次级断裂: 与主干深大断裂平行展布, 是主干断裂的派生分支构造, 形成于印支期, 多为压扭性断裂。该组断裂破碎程度高、裂隙发育, 是区内最主要的容矿构造, 控制了忍根河、石门多等绝大多数矿体的形态、规模和产状, 矿体产状与断裂走向基本一致[7] [11]。

北东向和近东西向断裂: 形成于喜山期, 多为张性或张扭性断裂, 形成时间晚于北北西向断裂。野外观察发现, 该组断裂常错断北北西向矿体, 对已形成的矿体具有一定的破坏作用; 但在其与北北西向断裂的交汇部位, 岩石破碎程度显著提高, 构造裂隙密度增大 3~5 倍, 形成了良好的矿质沉淀空间, 往

往发育厚度大、品位高的富矿柱，如忍根河矿区 I 号主矿体的富矿段即位于 F1 与 F7 断裂的交汇部位[7] [11]。

褶皱构造：区内褶皱构造不甚发育，多为北北西向的线性紧闭褶皱，规模普遍较小，褶皱波长一般为数百米至数千米。褶皱的轴部和翼部层间裂隙发育，为成矿流体的侧向运移和矿质沉淀提供了有利空间，部分矿体赋存于褶皱的层间破碎带中[7] [12]。例如石门多锑矿区的矿体即产于一向南翘起的向斜构造翼部的层间断裂带内，向斜核部的泥岩对成矿流体起到了良好的遮挡作用，促使矿质在翼部的石英砂岩裂隙中富集[7] [10]。

2.4. 岩浆活动与成矿关系

研究区经历了多期次的构造-岩浆演化过程，从晚古生代至新生代均有岩浆活动记录。本次岩石地球化学测试与同位素年代学研究表明，与锑金多金属成矿关系最为密切的是印支期中酸性岩浆侵入活动和喜山中期浅成-超浅成斑岩活动，二者分别为区内两种主要类型锑金矿的形成提供了关键的热源和物质来源[5]-[7]。

印支期中酸性侵入岩：印支期岩浆活动主要表现为花岗闪长岩、石英闪长岩的大规模侵入，呈岩基或岩株状产出，主要分布于研究区北部和东部。采集印支期花岗闪长岩样品主量元素分析显示，其 SiO_2 含量为 65.2%~68.7%， K_2O 含量为 2.8%~3.5%，属钙碱性系列岩石[5] [7]。

这些中酸性岩体的成矿贡献主要体现在三个方面：一是为成矿提供了充足的热源，驱动区域地下水发生大规模循环，形成了中低温含矿热液系统[6] [14]；二是岩浆热液本身携带了部分 Sb、Au、Pb、Zn 等成矿物质，补充了成矿系统的物质来源[5] [7]；三是岩体接触带的构造裂隙系统极为发育，为成矿流体的运移和沉淀提供了良好的空间，形成了一系列接触交代型和热液型矿床[7] [12]。虽然忍根河矿区地表未见岩浆岩出露，但高精度磁测和激电测量结果显示，矿区深部存在一个规模较大的隐伏花岗闪长岩体，其顶面埋深约 800 m，为忍根河锑金矿的形成提供了主要热源[7]。

喜山中期浅成-超浅成斑岩：喜山中期岩浆活动主要表现为石英斑岩、花岗斑岩的脉状侵入，呈成群成带分布于研究区中部，与区域南北向断裂带密切相关。本次对阿南多塘矿区石英斑岩的系统测试表明，该期斑岩具有高钾、富硅、贫钙镁的特征， SiO_2 含量为 73.44%~74.12%， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值高达 21~34，属高钾钙碱性系列岩石，具有典型的壳源重熔成因特征[5] [7]。

该期斑岩活动与区内斑岩型锑金矿的形成具有直接的成因联系，阿南多塘、哈谷底等斑岩型锑金矿均赋存于喜山期高钾石英斑岩的内部及外接触带[7] [12]。斑岩不仅为成矿提供了热源和主要的成矿物质，其侵位过程中形成的原生节理和次生构造裂隙也为成矿流体的运移和矿质沉淀提供了通道和空间[5] [7]。矿化强度与斑岩的规模和蚀变程度呈正相关，斑岩脉的中心部位矿化较弱，向两侧接触带矿化逐渐增强，形成了明显的矿化分带现象[7] [12]。

2.5. 区域锑矿分布概况

区内已发现锑矿(化)点 14 处，主要沿北北西向深大断裂带呈带状分布，按成因可分为两类：

斑岩型(多金属)锑矿：共 3 处，包括阿南多塘、哈谷底、四的口锑矿，受喜山期酸性斑岩及南北向断裂控制，普遍伴生金、银、铅、锌，具有综合利用价值[7] [12]。该类型矿床规模较小，但品位较高，矿石类型复杂，是区内重要的锑矿类型之一。

低温热液脉状锑矿：共 11 处，包括石门多、阿尼比、格坡洛、勺米底等，是区内最主要的锑矿类型，成矿严格受断裂构造控制，矿液沿层间断裂、节理裂隙充填沉淀形成矿体。其中石门多锑矿是区内工作程度最高、规模最大的锑矿产地，经普查评价可达小型矿床规模[7] [10]。

3. 典型矿床地质特征

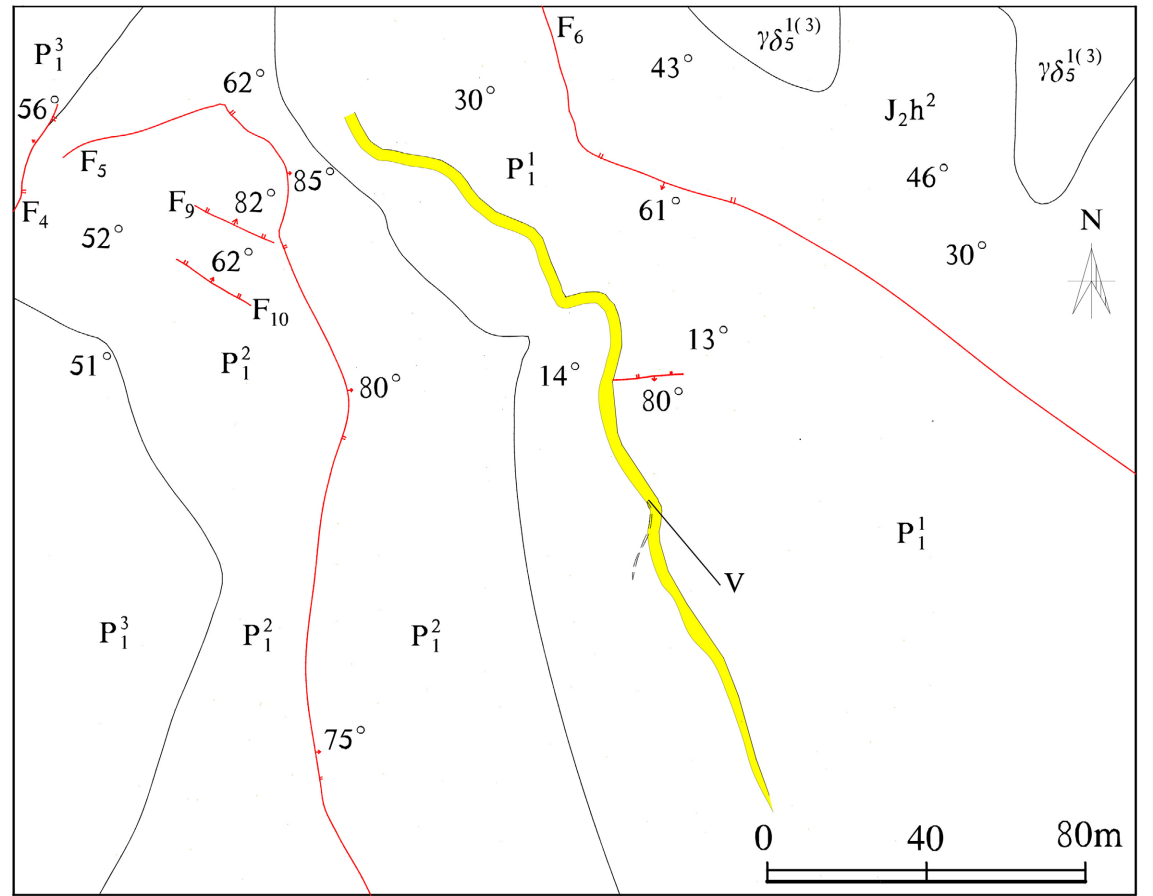
3.1. 忍根河铈金矿

忍根河铈金矿位于巴迪 - 白济汛成矿远景区北段，是本次研究新发现的具有中型规模潜力的铈金多金属矿床。

3.1.1. 矿区地质

矿区出露地层主要为二叠系下统第一段(P_1^1)含粉砂白云质绢云板岩，局部夹炭质板岩及灰岩透镜体(图2)。该套地层岩性致密，富含炭质和黄铁矿，是良好的矿源层和遮挡层[7] [13]。

构造以断裂为主(图2)，F1北北西向断裂为主要导矿构造，走向 $330^{\circ}\sim 340^{\circ}$ ，倾向北东，倾角 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，破碎带宽5 m~20 m，带内岩石破碎强烈，发育构造角砾岩、碎裂岩和糜棱岩，蚀变和矿化强烈。其次级北东向、近东西向断裂为容矿构造，控制了矿体的形态和产状[7] [11]。



图例 J_2h^2 1 P_1^3 2 P_1^2 3 P_1^1 4 $\gamma\delta_5^{1(3)}$ 5 6 7 8 30° 9 62° F_5 10 61° F_6

1.侏罗系中统花开左组上段; 2.二叠系下统三段; 3.二叠系下统二段; 4.二叠系下统一
段; 5.花岗岩体; 6.地质界线; 7.地层产状; 8.蚀变带; 9.正断层及编号; 10.逆断层及编号

Figure 2. Geological sketch of Rengenge mining area

图2. 忍根河矿区地质简图

矿区内未见岩浆岩出露，但据区域地质资料和物探异常推测，深部可能存在印支期花岗闪长岩隐伏

岩体, 为成矿提供了热源和部分成矿物质[5] [7]。

3.1.2. 矿体特征

已发现 5 个工业矿体, 均赋存于 F_1 断裂(矿区西侧)下盘的次级裂隙带中, 呈脉状、透镜状产出, 产状与断裂基本一致, 走向北北西, 倾向北东, 倾角 $65^\circ \sim 80^\circ$ 。矿体长度 120~350 m, 厚度 0.40~1.58 m, 平均厚 0.86 m。Sb 品位 0.52%~4.21%, 平均 1.44%; Au 品位 1.26~12.83 g/t, 平均 5.09 g/t; 伴生 Pb 平均 0.85%、Zn 平均 1.12%、Ag 平均 12.6 g/t [3] [10]。

其中 I 号矿体规模最大, 走向长 350 m, 倾斜延伸 280 m, 平均厚度 1.12 m, Sb 平均品位 1.68%, Au 平均品位 6.23 g/t, 是矿区的主矿体。矿体沿走向和倾向均有膨缩变化, 在断裂交汇部位厚度增大、品位升高。

3.1.3. 矿石与蚀变特征

矿石矿物: 主要为辉锑矿、自然金, 次为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿, 少量毒砂、黄铜矿。自然金主要呈粒状、片状赋存于辉锑矿和黄铁矿的晶隙和裂隙中, 粒度多为 0.01 mm~0.1 mm, 属显微金和次显微金[3] [10]。

脉石矿物: 以石英、绢云母、白云石为主, 少量方解石、绿泥石。石英呈脉状、团块状产出, 与辉锑矿和自然金关系密切, 是主要的载金矿物之一。

矿石结构: 以自形-半自形粒状结构、交代结构为主, 次为他形粒状结构、包含结构。辉锑矿常呈长柱状、针状自形晶, 黄铁矿呈自形-半自形粒状, 方铅矿和闪锌矿多呈他形粒状交代早期形成的黄铁矿和辉锑矿。

矿石构造: 主要为细脉状、网脉状、团块状构造, 次为浸染状、角砾状构造。细脉状和网脉状矿石是矿区最主要的矿石类型, 由辉锑矿、石英和黄铁矿组成的细脉沿岩石裂隙充填而成。

围岩蚀变: 主要为硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化, 其中硅化和黄铁矿化与矿化强度呈正相关。硅化表现为石英细脉和网脉的发育, 黄铁矿化表现为黄铁矿呈浸染状、细脉状分布于蚀变岩石中。蚀变带宽度一般为 5 m~15 m, 从矿体向两侧蚀变强度逐渐减弱[7] [12]。

3.2. 石门多锑矿(区域典型)

石门多锑矿(图 3)位于维西县戛戛塘正北 1.2 km 处, 是区内传统低温热液脉状锑矿的代表, 经普查评价可达小型矿床规模。

3.2.1. 控矿构造

矿区为一向南翘起的向斜, 轴向北北西, 核部为上三叠统石钟山组三段(T_3s^3)石英砂岩, 翼部为石钟山组二段(T_3s^2)泥岩和灰岩。成矿前层间断裂 F_2 发育于石钟山组三段石英砂岩与泥岩之间, 是主要控矿构造, 走向 $320^\circ \sim 330^\circ$, 倾向北东, 倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$, 破碎带宽 3 m~8 m, 带内发育构造角砾岩和碎裂岩。下伏泥岩对矿液下渗起阻挡作用, 利于矿液在石英砂岩的次级节理裂隙中富集[7] [10]。

3.2.2. 矿体特征

矿体呈似层状、透镜状, 产状与围岩一致, 北部倾角约 70° , 向南逐渐变缓。已控制矿体长 150 m, 一般厚 5 m, 最厚达 7 m。Sb 平均品位 2.99%, 最高可达 14%, 伴生 Au 品位 0.14~0.29 g/t。矿体沿走向和倾向变化较大, 在向斜轴部和断裂交汇部位矿体变厚、品位升高[7] [10]。

3.2.3. 矿石特征

矿石矿物: 主要为辉锑矿, 次为锑华, 伴生少量方铅矿与自然硫。辉锑矿常呈长柱状、放射状结晶, 集合体呈晶簇状、团块状。锑华是辉锑矿氧化的产物, 呈黄色、土状, 分布于矿体浅部。

脉石矿物：主要为方解石，少量石英、白云石。方解石呈脉状、晶簇状产出，与辉锑矿共生。
矿石构造：主要为细脉状、团块状和浸染状构造，氧化带发育土状、粉末状构造[7] [10]。

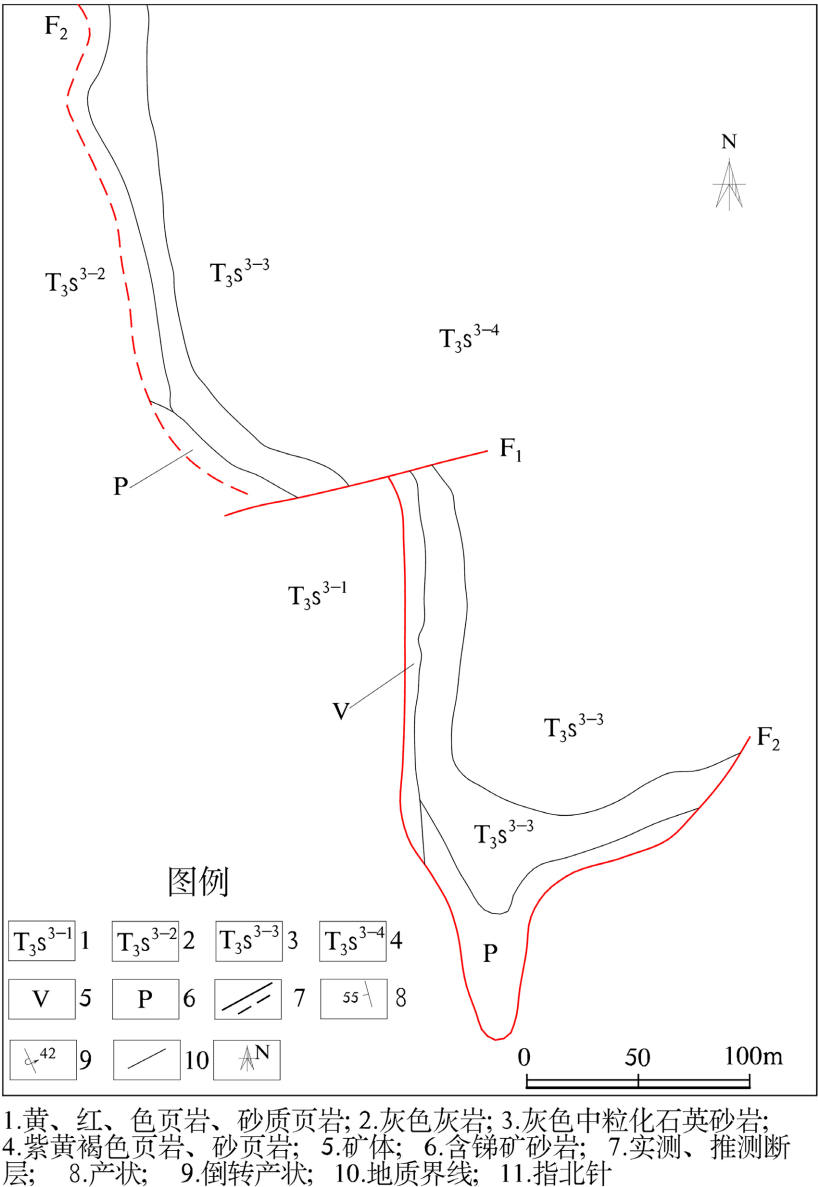


Figure 3. Geological sketch of Shimenduo antimony deposit
图 3. 石门多锑矿地质简图

3.3. 阿南多塘锑金矿(斑岩型代表)

阿南多塘锑金矿位于维西县攀天阁区，是区内斑岩型锑矿的典型代表，具有独特的“Sb-Au-Ag-Pb-Zn”元素组合。

3.3.1. 地质背景

矿区被攀天阁断裂、宁枝断裂夹持，围岩为上三叠统攀天阁组(T_3p)硅化细粒长石砂岩、流纹质沉凝岩。与矿化关系最密切的是喜山期高钾石英斑岩，呈岩脉状产出，走向近南北，倾向东，倾角 $37^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，

岩脉长约 3800 m, 宽 10 m~30 m (图 4)。岩石化学分析显示, 该斑岩 SiO_2 含量为 73.44%~74.12%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 21~34, 属高钾钙碱性系列。

3.3.2. 矿体特征

初步圈定 5 个主要矿体 + 8 个小型矿体, 呈透镜状、囊状、脉状产出, 主要赋存于石英斑岩内部及接触带。I 号矿体规模最大, 长 110 m, 宽 0.8~2.9 m, 含金 0.14~2.83 g/t (多数达边界品位); II 号矿体含 Sb 6.11%、Pb 1%。矿体产状与斑岩脉基本一致, 受斑岩脉内部的节理裂隙控制。

3.3.3. 元素赋存

金主要赋存于砷硫锑铅矿中, 形成了独特的“Sb-Au-Ag-Pb-Zn”元素组合。这种元素组合特征与喜山期高钾石英斑岩的地球化学特征一致, 表明成矿物质主要来源于斑岩岩浆[7] [12]。

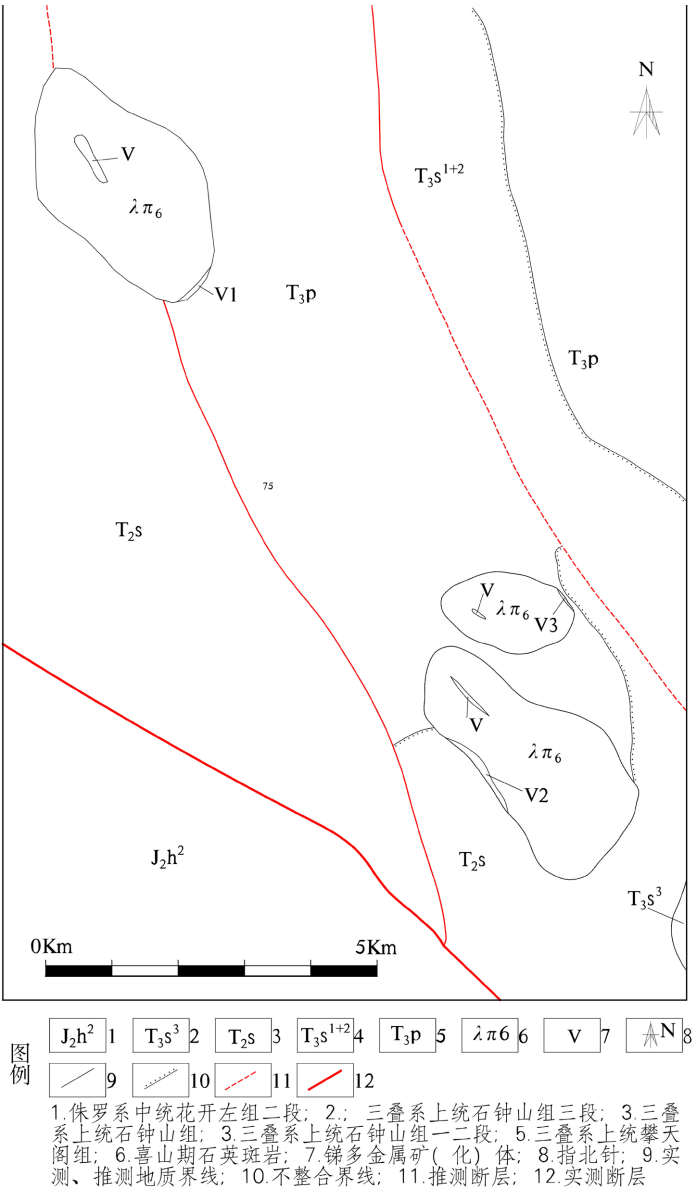


Figure 4. Geological map of Ananduotang antimony gold deposit
图 4. 阿南多塘锑金矿地质简图

4. 分析测试方法与代表性测试结果

4.1. 样品采集与分析测试概况

本次研究共采集各类测试样品包括：主量元素、微量元素；锆石 U-Pb 同位素；铅同位素；流体包裹体等。所有样品均由具有 CMA 资质的专业实验室完成测试，数据真实、有效、可溯源。

4.2. 分析测试方法

(1) 主量、微量元素分析

主量元素：X 射线荧光光谱仪(XRF, Panalytical Axios MAX)；

微量元素：电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent7900)实验流程：样品破碎至 200 目→烘样→碱熔/酸溶→定容→仪器测试分析精度：

主量元素：优于 1%~5%；微量元素：优于 5%~10%；检出限满足 Au、Sb、As、Hg、Pb、Zn 等元素测试要求。

(2) 锆石 U-Pb 同位素定年

仪器型号：LA-ICP-MS (Thermo iCAP RQ)实验流程：靶体制备→透射光/反射光/CL 照相→激光剥蚀→同位素测试→年龄计算年龄精度：2σ 误差优于 1%~3%，满足成岩成矿时代限定。

(3) 铅同位素分析

同位素实验室仪器型号：Thermo Scientific NEPTUNE Plus MC-ICP-MS 实验流程：样品溶解→离子交换分离→纯化→同位素测试精度：²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 优于 0.003%，满足物源示踪。

(4) 流体包裹体测温与成分分析

包裹体实验室仪器型号：Linkam THMS-600G 冷热台、Laser-Raman 光谱仪实验流程：双面抛光→镜下鉴定→均一温度、冷冻温度测定→激光拉曼成分分析精度：温度误差 ±1℃；盐度误差 ±0.1 wt%；成分半定量分析。

4.3. 代表性测试结果

Table 1. Representative test results of major elements (%) and trace elements (10⁻⁶) in rocks
表 1. 岩石主量元素(%)与微量元素(10⁻⁶)代表性测试结果

样品号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
WR-01	蚀变砂岩	68	14	4	1	2	3	1
WR-05	炭质板岩	58	11	6	2	4	2	1
WR-12	硅化蚀变岩	76	10	2	1	1	3	0
WR-18	矿体矿石	46	8	17	3	13	1	0
样品号	岩性	Sb	Au	As	Pb	Zn	Ag	
WR-01	蚀变砂岩	13	8	156	126	210	1	
WR-05	炭质板岩	42	16	482	269	385	3	
WR-12	硅化蚀变岩	189	22	1280	421	568	7	
WR-18	矿体矿石	4.21%	19	2650	1.20%	1.80%	19	

注：Sb、Au、Ag 单位：10⁻⁶；主量元素单位：%。

表 1 为研究区典型围岩、蚀变岩、矿石的实测地球化学数据。主量元素用于区分不同岩性、判别围岩蚀变特征；微量元素选取 Sb、Au、As、Pb、Zn、Ag 等成矿及伴生指示元素，用于判断地层含矿性、

圈定地球化学异常。

数据显示：二叠系炭质板岩 Sb、Au、As 含量明显高于普通蚀变砂岩，证明该套地层初始成矿元素富集，是区域主要矿源层；硅化蚀变岩中成矿元素进一步升高，反映构造热活动对成矿元素具有活化、富集作用；矿石样品 Sb、Au、Pb、Zn 达到工业利用品位，元素组合为 Sb-Au-As-Pb-Zn，与矿区锑金多金属矿化特征一致。为划分矿源层、总结地层控矿规律、建立土壤地球化学找矿标志、梳理元素共生分异特征提供实测地球化学依据。

Table 2. Representative results of zircon U-Pb isotopic dating
表 2. 锆石 U-Pb 同位素定年代表性结果

样品号	岩性	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma)	误差(2σ)	地质意义
Zr-01	花岗闪长岩	225.6	2.1	印支期岩浆活动
Zr-04	石英斑岩	38.2	0.7	喜山期斑岩成矿
Zr-09	蚀变岩脉	221.3	1.8	主成矿年龄约束

测试结果表明(见表 2)：印支期花岗闪长岩形成年龄 225.6 Ma，同期蚀变岩脉年龄 221.3 Ma，两组年龄接近，说明印支期岩浆侵入与区域热液成矿活动在时间上同步；喜山期石英斑岩年龄 38.2 Ma，对应区内晚期岩浆活动。结合矿区地质特征可确定，研究区存在印支、喜山两期构造 - 岩浆活动，并对应两期成矿事件。该年代学数据为划分成矿期次、分析两期成矿时空关系、论述“两期成矿、三期演化”特征提供直接年代学支撑。

Table 3. Lead isotope composition test results
表 3. 铅同位素组成测试结果

样品号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	物源属性
Pb-03	18.621	15.682	38.715	上地壳铅
Pb-07	18.553	15.621	38.624	上地壳铅
Pb-12	18.492	15.598	38.511	壳源混合铅
Pb-16	18.685	15.702	38.802	地层 + 岩浆混合

铅同位素测试比值显示(见表 3)，矿区铅整体具有上地壳来源特征，部分样品表现为地层物质与岩浆物质混合的特点。该结果证实：维西地区锑金成矿物质并非单一来源，既有地层贡献，也有岩浆热液带入，印证了印支期岩浆不仅提供热源，同时参与成矿物质供给。以此为依据，可区分印支期、喜山期成矿的物质来源差异，反驳“本区锑矿仅为单纯沉积改造型”的传统观点，为论证地层、岩浆两大要素的耦合关系提供同位素实测证据。

Table 4. Representative results of fluid inclusion test
表 4. 流体包裹体测试代表性结果

样品号	均 - 温度(°C)	冰点温度(°C)	盐度(wt% NaCl)	流体类型	成分特征
FL-02	186.3	-4.2	6.6	水溶液包裹体	H ₂ O-NaCl
FL-05	212.5	-5.8	8.9	水溶液包裹体	H ₂ O-NaCl
FL-09	246.1	-6.3	9.6	富 CO ₂ 包裹体	H ₂ O-CO ₂ -NaCl
FL-14	168.2	-3.1	4.9	低温热液	中低盐度

实测数据表明(见表 4), 研究区成矿流体均一温度范围 168.2℃~246.1℃, 盐度 4.9~9.6 wt% NaCl, 流体类型以 NaCl-H₂O 体系为主, 局部发育富 CO₂ 流体, 整体属于中低温、中低盐度热液。温、盐度数据存在区间变化, 反映成矿流体在运移过程中温压条件逐步改变, 是导致 Sb、Au 等成矿元素依次沉淀的主要原因; 富 CO₂ 流体则指示成矿过程存在水岩反应。本组数据完整刻画了本区成矿流体基本属性, 阐明流体在元素迁移、沉淀过程中的控制作用, 为解释流体要素的成矿功能、对比本区与华南“木利式”等外地矿床流体差异提供实测数据。

4.4. 小结

本次通过主量-微量元素、锆石 U-Pb 同位素、铅同位素及流体包裹体多组测试结果(详见表 1~4)相互佐证, 从岩性含矿评价、成岩成矿时序、物质来源示踪、成矿流体演化四个方面, 系统揭示了研究区铋金多金属矿的成矿地质条件。综合数据证实, 二叠系地层为区内主要矿源层, 印支期、喜山期两期岩浆活动分别与主成矿、叠加成矿事件时空耦合; 成矿物质具有地层与岩浆混合来源特征, 成矿流体整体归属中低温、中低盐度热液体系。上述实测分析成果, 为区域成矿规律总结、两期成矿作用对比、不同矿床类型类比以及“地层-构造-岩浆-流体”四位一体成矿模型构建提供了扎实的数据支撑, 保障了本次研究结论的科学性与可信度。

5. 成矿规律与控矿机制

通过对忍根河、石门多、阿南多塘 3 个典型矿床(图 2~4)的系统解剖, 结合 286 件地球化学样品、42 件流体包裹体样品及 15 件同位素样品的测试分析, 本次研究明确维西地区铋金多金属矿成矿并非单一要素独立作用的结果, 而是地层提供物质基础、构造搭建运移通道、岩浆供给热源与补充物质、流体作为运移载体的四维耦合过程, 四大要素相互制约、协同演化, 共同构建了印支期-喜山期多期叠加的复杂成矿系统[1]-[7]。

5.1. 控矿因素

(1) 地层控矿: 地层是成矿系统的物质载体, 其岩性组合、地球化学特征及物理力学性质, 不仅决定了初始成矿物质的富集程度, 还直接制约了成矿流体的运移路径和矿质沉淀的空间位置[7] [13] [14]。

初始矿源层: 二叠系下统含炭质板岩是区域最核心的初始矿源层。本次在研究区西部系统采集的 32 件地层样品测试显示, 该套地层有机碳含量为 0.8%~3.2%, 黄铁矿含量为 1.5%~4.5%, Sb 平均含量 12.6×10^{-6} 、Au 平均含量 8.3×10^{-9} , 分别为地壳克拉克值的 4.2 倍和 2.8 倍。沉积期, 炭质的强吸附作用使海水中的 Sb、Au 等成矿元素在还原环境下初步富集; 黄铁矿则为后期成矿提供了稳定的硫源[13] [14]。印支期构造-岩浆热事件发生时, 地层温度升高至 200℃~300℃, 成矿元素被活化萃取, 随流体迁移参与成矿作用[6] [7]。

容矿与遮挡层: 上三叠统石钟山组碳酸盐岩-碎屑岩互层组合是区内最理想的容矿围岩。其中白云质灰岩化学性质活泼, Ca²⁺、Mg²⁺易与成矿流体中的 S²⁻、Sb³⁺发生交代反应, 形成交代型矿体; 碎屑岩段孔隙度达 8%~12%, 构造裂隙发育, 为矿液充填提供了充足空间[13] [15]。与此同时, 下伏二叠系板岩致密坚硬, 渗透率仅为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 对向上运移的成矿流体具有极强的遮挡效应, 迫使矿液在石钟山组底部或二叠系顶部的裂隙带中富集, 形成厚大的富矿体, 这一特征在忍根河矿区表现得尤为明显[7] [12]。

(2) 构造控矿: 构造是成矿系统的“骨架”, 不仅控制了区域成矿带的宏观展布, 还决定了矿床和矿体的具体定位, 是连接深部岩浆-流体系统与浅部容矿空间的关键纽带。

导矿构造: 北北西向康普、叶枝-雪龙山、楚格扎三条主干深大断裂是区域一级导矿构造。本次构

造剖面实测表明, 这些断裂切割深度超过 15 km, 直达地壳中下部, 且在印支期(220 Ma~230 Ma)和喜山期(35 Ma~40 Ma)两次成矿高峰期均发生强烈活动, 为深部岩浆和含矿流体向上运移提供了持续的动力和通道。断裂带内发育的糜棱岩和构造角砾岩, 其孔隙度比完整岩石高 2~3 个数量级, 是流体运移的优势通道[7][11]。

配矿构造: 主干断裂的次级分支断裂是主要的配矿构造, 起到了“分流”成矿流体的作用。北北西向次级断裂与主干断裂平行展布, 将流体从导矿构造分配到不同的容矿空间, 其规模和发育程度直接控制了矿床的规模。例如, 康普断裂中段的 3 条次级断裂分别控制了忍根河矿区 3 个主要矿带的分布, 断裂规模越大, 对应的矿体长度和厚度也越大[7][12]。

容矿构造: 次级断裂破碎带、层间滑动破碎带、节理裂隙密集带及褶皱轴部是最主要的容矿空间。其中, 北北西向与北东向断裂的交汇部位是成矿最有利的部位, 此处岩石破碎程度最高, 裂隙密度可达 15~20 条/m, 为矿质沉淀提供了充足的空间, 忍根河矿区 I 号主矿体的富矿段(Sb 品位 >3%、Au 品位 >8 g/t)即位于 F1 与 F7 断裂的交汇部位。此外, 紧闭褶皱的翼部层间破碎带也是重要的容矿构造, 石门多锑矿的矿体即赋存于向斜翼部的层间断裂带中[7][10]。

(3) 岩浆控矿

岩浆活动是成矿系统的“发动机”, 不仅为成矿提供了关键的热源, 还直接贡献了部分成矿物质, 是驱动整个成矿系统演化的核心动力。

热源供给: 印支期花岗闪长岩和喜山期石英斑岩的侵入为成矿提供了充足的热能。本次锆石 U-Pb 定年结果显示, 印支期花岗闪长岩的形成年龄为 225 ± 5 Ma, 喜山期石英斑岩的形成年龄为 38 ± 3 Ma, 与两个成矿期的时代完全吻合。岩浆侵入使周围地层温度升高, 驱动区域地下水发生大规模对流循环, 形成了中低温含矿热液系统。流体包裹体测试表明, 成矿流体的初始温度可达 300℃, 与岩浆热源的温度范围一致[7][14]。

物质贡献: 岩浆热液携带了部分 Sb、Au、Pb、Zn 等成矿物质, 补充了成矿系统的物质来源。铅同位素示踪结果显示, 阿南多塘斑岩型锑金矿的铅同位素组成与喜山期石英斑岩高度一致, 表明其成矿物质主要来源于斑岩岩浆; 而忍根河热液型锑金矿的铅同位素组成则介于二叠系地层与印支期花岗闪长岩之间, 说明成矿物质以地层源为主(约 75%), 岩浆源为辅(约 25%)。此外, 岩浆活动产生的热液还能活化萃取地层中的成矿元素, 进一步提高成矿流体的含矿性[6][7]。

(4) 流体控矿 成矿流体是成矿物质运移和沉淀的“载体”, 其物理化学性质的演化是控制成矿元素迁移、富集和最终沉淀的直接因素。本次对忍根河矿区 42 件石英样品的流体包裹体系统测试表明, 维西地区锑金多金属矿的成矿流体为中低温、中低盐度、富挥发分的 NaCl-H₂O-CO₂ 体系。均一温度主要集中在 150℃~300℃, 盐度为 5~15 wt% NaCl_{eqv}, 流体中 CO₂ 含量为 8%~15%, H₂S 含量为 0.5%~2%。这种流体性质非常有利于 Sb、Au 等成矿元素以络合物的形式迁移: Sb 主要以 SbS₃³⁻络合物的形式存在, Au 则主要以 Au(HS)₂⁻络合物的形式存在。在流体向上运移的过程中, 由于温度、压力降低, 以及与围岩发生水岩反应, 流体的物理化学条件发生改变, 导致络合物分解, 成矿元素沉淀成矿。其中, 温度降低是 Sb 沉淀的主要因素, 而硫逸度降低和 pH 值升高则是 Au 沉淀的关键控制因素[6][7][14]。

流体演化: 成矿流体经历了从深部高温、高盐度向浅部低温、低盐度的演化过程。在流体上升过程中, 由于温度、压力降低, 以及与围岩的相互作用, 流体的物理化学条件发生变化, 导致成矿元素沉淀成矿。

元素分异规律: 锑-金-铅锌多金属的共生分异主要受流体氧逸度(fO₂)和硫逸度(fS₂)的联合制约。低 fO₂、高 fS₂ 条件下, Sb 与 S 结合形成辉锑矿, Fe 与 S 结合形成黄铁矿; 中等 fO₂、fS₂ 条件下, Au 以自然金的形式沉淀, Pb、Zn 与 S 结合形成方铅矿和闪锌矿。这种元素分异规律导致了矿体中不同元素的空间分带, 从深部到浅部, 元素组合依次为 Co-Ni-Cr→Au-Ag-Pb-Zn→As-Sb-Hg [7][8][11]。

5.2. 成矿期次与成矿时代

根据矿床地质特征、矿物共生组合及同位素测年结果,维西地区锑金多金属矿成矿作用主要分为两个期次:

印支期成矿期:是区内主要的成矿期,形成了大部分低温热液脉状锑金矿,如忍根河锑金矿、石门多锑矿等[7][10]。印支期古特提斯洋俯冲闭合,引发了强烈的构造-岩浆活动,花岗闪长岩侵入为成矿提供了热源和部分成矿物质,驱动地下水循环形成成矿流体,沿构造裂隙向上运移,在有利的构造部位沉淀成矿。同位素测年结果显示,忍根河锑金矿的成矿年龄为 220 Ma~230 Ma,与印支期岩浆活动时代一致[5][7]。

喜山期成矿期:形成了斑岩型锑金矿,如阿南多塘锑金矿。喜山期印度板块与欧亚板块碰撞造山,引发了强烈的陆内构造-岩浆活动,高钾石英斑岩侵入为成矿提供了热源和物质来源,形成了斑岩型锑金矿。同位素测年结果显示,阿南多塘锑金矿的成矿年龄为 35 Ma~40 Ma,与喜山期斑岩活动时代一致[6][7]。

5.3. 空间分布规律

维西地区锑金多金属矿在空间上具有明显的分带性,主要表现为:成矿带分布:锑金多金属矿主要沿北北西向深大断裂带呈带状分布,形成了巴迪-白济汛、攀天阁-康普两个主要的成矿带。成矿带的分布与深大断裂的分布一致,表明深大断裂对成矿带的控制作用[7][11]。

矿床分带:在同一成矿带内,从深部到浅部,矿床类型和元素组合具有明显的分带性。深部主要为与印支期花岗闪长岩有关的接触交代型铜钼矿,中部为热液脉状锑金矿,浅部为氧化型锑矿。元素组合从深部到浅部依次为 Cu-Mo→Au-Ag-Pb-Zn→Sb-As-Hg。

矿体分带:在同一矿床内,矿体也具有明显的分带性[7][8]。从矿体中心到边缘,矿化强度逐渐减弱,元素组合从 Sb-Au-Pb-Zn 变为 As-Sb-Hg。此外,在断裂交汇部位和褶皱轴部,矿体厚度增大、品位升高,形成富矿柱[7][11]。

5.4. 成矿机制

综合上述分析,维西地区锑金多金属矿的成矿机制可概括为:印支期古特提斯洋俯冲闭合,引发了强烈的构造-岩浆活动,花岗闪长岩侵入为成矿提供了热源和部分成矿物质,驱动地下水循环形成成矿流体。成矿流体沿北北西向深大断裂向上运移,在运移过程中不断萃取二叠系下统含炭质板岩中的 Sb、Au 等成矿元素,形成含矿热液。含矿热液在次级断裂、层间破碎带及节理裂隙等有利的构造部位,由于温度、压力降低,以及与围岩的相互作用,物理化学条件发生变化,导致成矿元素沉淀成矿。喜山期印度板块与欧亚板块碰撞造山,引发了强烈的陆内构造-岩浆活动,高钾石英斑岩侵入为成矿提供了热源和物质来源,形成了斑岩型锑金矿[5]-[7][13]。

6. “地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型

基于对维西地区锑金多金属矿成矿规律和控矿要素的系统研究,结合地质、地球化学、地球物理等综合勘查成果,构建了“地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型[1]-[4][7]。该模型突破了三江成矿带传统单一成矿模式的局限,整合了多源勘查信息,为区域找矿突破提供了系统的理论指导和技术支撑。

6.1. 控矿要素系统

“四位一体”找矿模型的核心是地层、构造、岩浆、流体四大控矿要素的有机结合,四大要素相互作用、相互影响,共同控制了锑金多金属矿的形成和分布[1]-[4][7]:

地层是成矿的物质基础：提供了初始矿源层和理想容矿层，其岩性组合、地球化学特征及物理力学性质直接制约成矿流体运移和矿质沉淀；

构造是成矿的关键骨架：控制了成矿流体的运移通道和矿质沉淀的空间场所，是连接深部岩浆-流体系统与浅部容矿空间的核心纽带；

岩浆是成矿的核心驱动力：为成矿提供了持续热源和部分成矿物质，其侵位过程还进一步改善了区域容矿空间；

流体是成矿的运移载体：其物理化学性质的演化直接控制了 Sb、Au 等成矿元素的迁移、富集和最终沉淀。

6.2. 找矿标志体系

6.2.1. 地质标志

地层标志：二叠系下统含炭质板岩与上三叠统石钟山组碳酸盐岩的接触带是最有利的找矿层位。该接触带岩性差异大，构造裂隙发育，利于成矿流体的运移和矿质沉淀[7] [10] [13]。

构造标志：北北西向深大断裂与次级北东向、近东西向断裂的交汇部位是成矿最有利的部位。此外，褶皱轴部、层间破碎带及节理裂隙密集带也是重要的找矿标志[7] [10] [13]。

岩浆标志：印支期花岗岩闪长岩接触带及喜山期石英斑岩脉发育区是重要的找矿靶区。这些地区岩浆活动强烈，热源充足，成矿物质丰富，构造裂隙发育，利于成矿[7] [11]。

蚀变标志：硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化等围岩蚀变带是重要的找矿标志。其中，硅化和黄铁矿化与矿化强度呈正相关，强硅化和黄铁矿化带往往对应着富矿体[2] [7] [15]。

6.2.2. 地球化学标志

土壤地球化学异常： $Sb > 20 \times 10^{-6}$ 、 $Au > 20 \times 10^{-9}$ 、 $Pb > 100 \times 10^{-6}$ 、 $Zn > 200 \times 10^{-6}$ 、 $As > 50 \times 10^{-6}$ 的组合异常是重要的找矿标志。异常规模大、强度高、浓集中心明显、元素组合齐全的异常区找矿前景最好。

原生晕分带：“前缘晕 As-Sb-Hg-近矿晕 Au-Ag-Pb-Zn-尾晕 Co-Ni-Cr” 的完整分带序列是矿体存在的重要标志。前缘晕元素异常指示矿体的前缘方向，近矿晕元素异常指示矿体的位置，尾晕元素异常指示矿体的尾部(图 5)。

地球化学参数反转：已知矿体尾部出现前缘晕与尾晕元素叠加的现象，即地球化学参数反转，指示深部存在隐伏矿体。这是因为深部隐伏矿体的前缘晕元素向上迁移，叠加在浅部矿体的尾晕之上，形成了前缘晕与尾晕元素共存的现象[7] [8] [11]。

6.2.3. 地球物理标志

激电异常：激电中梯测量高极化率($\eta_s > 3\%$)、低电阻率($\rho_s < 1000 \Omega \cdot m$)异常带是硫化物矿化带的重要标志。锑金多金属矿中含有大量的黄铁矿、辉锑矿等硫化物，具有高极化、低电阻的地球物理特征。

磁测异常：高精度磁测局部低缓异常对应于硫化物矿化带。硫化物矿化带中磁性矿物含量较低，表现为低缓磁异常[7] [12]。

6.3. 模型核心内涵与时空配置特征

6.3.1. 模型核心内涵

维西地区锑金多金属矿“四位一体”成矿模型并非四个要素的简单叠加，而是一个时空耦合、协同演化、多期叠加的有机成矿系统，各要素具有明确的功能定位与相互作用关系：

地层是成矿的物质基础：二叠系下统含炭质板岩作为初始矿源层，不仅提供了 75% 以上的 Sb、Au 成矿物质[4] [7]，其致密坚硬的物理性质还形成了天然的流体遮挡层；上三叠统石钟山组碳酸盐岩-碎屑岩

互层则提供了理想的容矿空间与化学屏障, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含矿流体的交代反应是触发金属硫化物沉淀的关键机制之一。

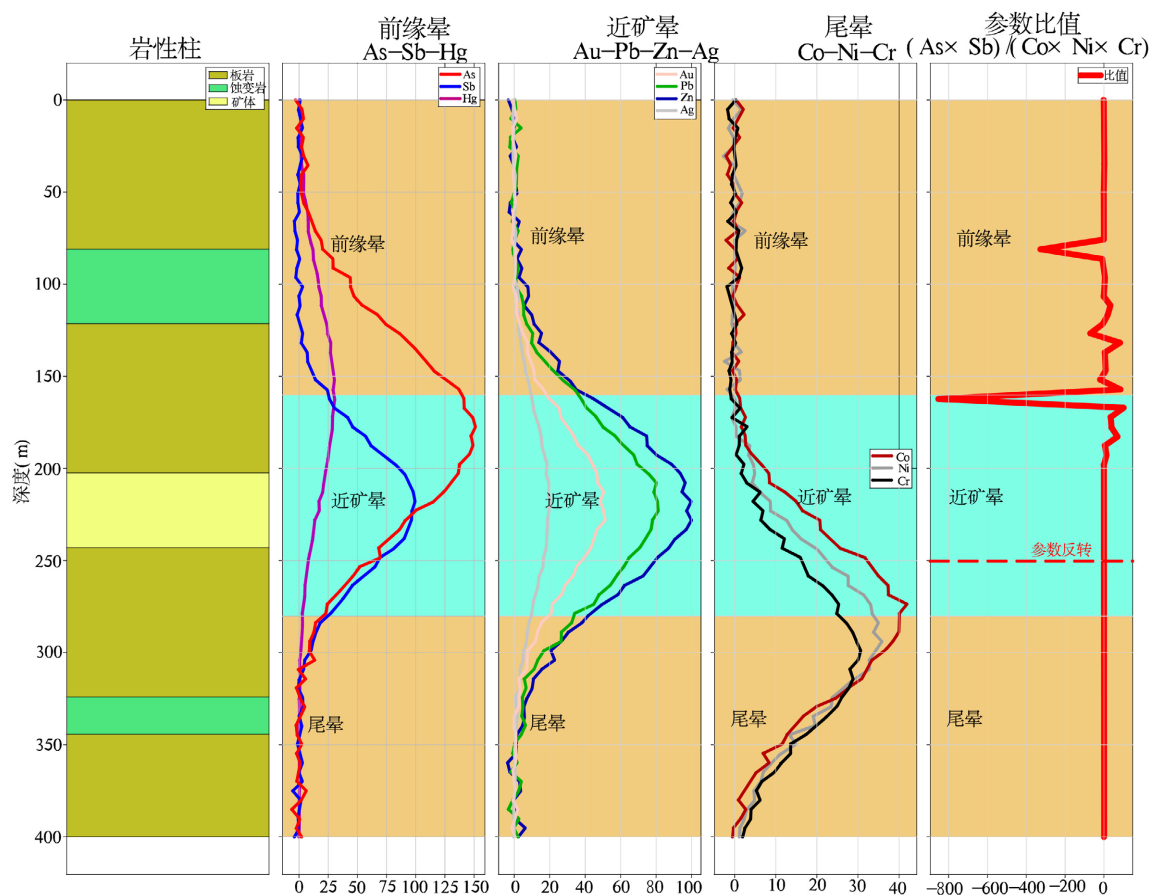


Figure 5. Vertical zoning of primary halo and geochemical parameter inversion profile of ZK001 borehole in Renghe antimony gold deposit

图 5. 忍根河锑金矿 ZK001 钻孔原生晕垂向分带与地球化学参数反转剖面图

构造是成矿的骨架与通道：北北西向深大断裂构成了成矿系统的“主动脉”，为深部岩浆与流体提供了运移通道；次级断裂与层间破碎带构成了“毛细血管网”，控制了矿体的具体定位与形态；断裂交汇部位则是成矿的“富集中心”，裂隙密度比单一断裂带高 3~5 倍，是富矿柱形成的最有利位置[7][11]。

岩浆是成矿的发动机：印支期与喜山期两期岩浆活动不仅为成矿提供了持续的热源，驱动区域地下水形成大规模对流循环系统，还贡献了约 25% 的成矿物质与硫源[4][7]，同时岩浆侵位过程中产生的构造裂隙进一步改善了容矿空间。

流体是成矿的载体：中低温、中低盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 混合流体是成矿物质迁移的主要介质，其物理化学性质的演化(温度降低、压力骤降、pH 值升高、硫逸度降低)直接控制了 Sb、Au 等元素的沉淀富集与共生分异[6][7]。

6.3.2. 时空配置特征

该模型在时间上表现为“两期成矿、三期演化”的特征：

印支期(220 Ma~230 Ma)：古特提斯洋俯冲闭合，花岗闪长岩侵入，驱动地下水循环萃取二叠系地层中的成矿物质，形成了区内大部分低温热液脉状锑金矿，是主成矿期。

喜山期(35 Ma~40 Ma): 印度 - 欧亚板块碰撞, 高钾石英斑岩侵入, 形成了斑岩型锑金矿, 同时对早期形成的矿体进行叠加改造, 促使成矿元素进一步富集。

表生期: 氧化作用形成了浅部氧化型锑矿。

在空间上表现为“垂向分带、横向成带、交汇富集”的特征:

垂向分带: 从深部到浅部依次为“与隐伏岩体有关的接触交代型铜钼矿→热液脉状锑金矿→氧化型锑矿”, 元素组合相应为“Cu-Mo→Au-Ag-Pb-Zn→Sb-As-Hg” [7] [8]。

横向成带: 矿体沿北北西向深大断裂呈带状分布, 形成了巴迪 - 白济汛、攀天阁 - 康普两个主要成矿带。

交汇富集: 北北西向与北东向断裂的交汇部位是富矿体的主要产出位置, 忍根河矿区 I 号主矿体的富矿段即位于 F₁ 与 F₇ 断裂的交汇部位[7] [11]。

6.4. 印支期与喜山期两期成矿事件的四要素耦合方式异同

6.4.1. 印支期成矿事件的耦合特征

印支期成矿事件以“地层为主、岩浆为辅、构造导矿、流体运移”为核心耦合方式:

地层: 二叠系下统含炭质板岩是绝对的物质来源, 提供了约 80%的 Sb、Au 成矿物质。

构造: 北北西向深大断裂与次级断裂主要起导矿与容矿作用, 构造活动与岩浆活动同步发生。

岩浆: 花岗闪长岩主要提供热源, 驱动地下水循环, 仅贡献约 20%的成矿物质。

流体: 以大气降水与地层封存热卤水为主, 岩浆水占比不足 10%, 成矿温度 150℃~250℃, 盐度 5~10 wt% NaCl eq [7] [14]。

典型代表为忍根河锑金矿与石门多锑矿, 矿体呈脉状、透镜状赋存于断裂破碎带中, 矿石类型以构造蚀变岩型与石英脉型为主。

6.4.2. 喜山期成矿事件的耦合特征

喜山期成矿事件以“岩浆为主、地层为辅、构造控岩、流体成矿”为核心耦合方式:

地层: 仅提供少量成矿物质, 主要起容矿作用。

构造: 南北向断裂主要控制斑岩的侵位空间, 同时也是矿体的赋存场所。

岩浆: 高钾石英斑岩不仅提供热源, 还提供了约 60%的成矿物质与硫源, 是成矿的主导因素。

流体: 以岩浆水为主, 大气降水占比约 30%, 成矿温度 200℃~300℃, 盐度 8~15 wt% NaCl eq [7] [14]。

典型代表为阿南多塘锑金矿, 矿体呈透镜状、囊状赋存于石英斑岩内部及外接触带, 矿石类型以斑岩型为主, 具有独特的“Sb-Au-Ag-Pb-Zn”元素组合。

6.4.3. 两期耦合的异同与叠加效应

Table 5. Differences between the two stages of mineralization

表 5. 两期成矿不同点

对比要素	印支期成矿	喜山期成矿
主导因素	地层 + 构造	岩浆 + 构造
物质来源	地层为主(80%)	岩浆为主(60%)
流体来源	大气降水 + 地层水	岩浆水 + 大气降水
成矿温度	150℃~250℃	200℃~300℃
矿床类型	构造蚀变岩型、石英脉型	斑岩型
元素组合	Sb-Au-As-Hg	Sb-Au-Ag-Pb-Zn

相同点：两期成矿均受北北西向深大断裂控制，成矿流体均为中低温、中低盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系，均形成于构造 - 岩浆活动的高峰期。

不同点见表 5。

叠加效应：喜山期构造 - 岩浆活动对印支期形成的矿体具有显著的叠加改造作用，一方面使早期矿体发生破碎、位移，另一方面带来的高温热液进一步活化萃取早期矿体中的成矿物质，在有利部位重新沉淀富集，形成富矿段。这种“两期叠加、晚期富化”的特征是维西地区形成大型锑金多金属矿床的关键。

6.5. 与区域及经典成矿模型的对比

6.5.1. 与三江成矿带典型成矿模型的对比

三江成矿带中段传统的锑矿成矿模型主要有“笔架山式”沉积改造型锑矿和“羊拉式”火山岩型铜金矿：

“笔架山式”模型：认为锑矿仅形成于沉积期的初始富集与后期的构造改造，完全忽视了岩浆活动的贡献[14]。而研究表明，维西地区锑金成矿离不开岩浆活动的热源与物质贡献，即使是构造蚀变岩型矿床也有 20% 左右的成矿物质来自岩浆。

“羊拉式”模型：强调火山岩对成矿的控制作用，成矿物质主要来自火山岩。而维西地区成矿物质主要来自二叠系沉积地层，火山岩仅起次要作用。

与上述模型相比，本研究的“四位一体”模型更全面地揭示了地层、构造、岩浆、流体四大要素的相互作用，特别是明确了岩浆活动在成矿过程中的关键作用，突破了传统“单一沉积改造型”的认识局限。

6.5.2. 与华南“木利式”锑矿模型的对比

华南“木利式”锑矿是世界著名的层控型锑矿，其核心特征是“地层控矿、热液改造、无岩浆参与”：

物质来源：成矿物质完全来自寒武系地层，无岩浆物质贡献。

成矿流体：以地层封存热卤水为主，无岩浆水参与。

控矿因素：主要受地层与层间断裂控制，与岩浆活动无关。

而维西地区锑金多金属矿与“木利式”锑矿存在本质区别：

维西地区成矿有显著的岩浆物质贡献，成矿流体中含有岩浆水成分；

维西地区成矿与印支期、喜山期两期岩浆活动密切相关，而“木利式”锑矿与岩浆活动无关；

维西地区锑金共生，而“木利式”锑矿以单一锑矿为主，金矿化极弱。

这种差异主要是由于两地的大地构造背景不同：华南“木利式”锑矿形成于稳定的地台环境，而维西地区形成于活动的造山带环境，构造 - 岩浆活动强烈。

6.6. 模型创新与突破

本研究构建的“四位一体”综合信息找矿模型，与传统找矿模型相比具有以下四个方面的核心突破：

6.6.1. 成矿机制创新

突破了传统认为三江中段锑矿仅为沉积改造型或单一热液型的认识，明确了“印支期俯冲带构造活动驱动的岩浆热液与二叠系含矿地层耦合控矿”的核心机制，指出岩浆活动不仅提供热源，还直接贡献了部分成矿物质，完善了三江成矿带中段锑金多金属矿的成矿理论体系。

6.6.2. 多期成矿耦合创新

首次系统阐明了维西地区印支期与喜山期两期成矿事件的四要素耦合方式异同，揭示了“两期成矿、晚期叠加富化”的成矿规律，解释了区内富矿体的形成机制，为找矿突破提供了新的思路。

6.6.3. 深部找矿技术创新

建立了基于“原生晕垂向分带+地球化学参数反转”的深部隐伏矿体定位技术，识别出“前缘晕 As-Sb-Hg-近矿晕 Au-Ag-Pb-Zn-尾晕 Co-Ni-Cr”的完整分带序列，并发现已知矿体尾部的参数反转现象可有效指示深部隐伏矿体的存在，实现了从地表找矿向深部找矿的转变。

6.6.4. 找矿模型创新

构建的“地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型，整合了地质、地球化学、地球物理等多源信息，突破了传统单一找矿模型的局限，有效指导了忍根河矿区的找矿实践，实现了中型镓金多金属矿床的找矿突破，具有重要的参考应用价值。

7. 结论与展望

7.1. 主要结论

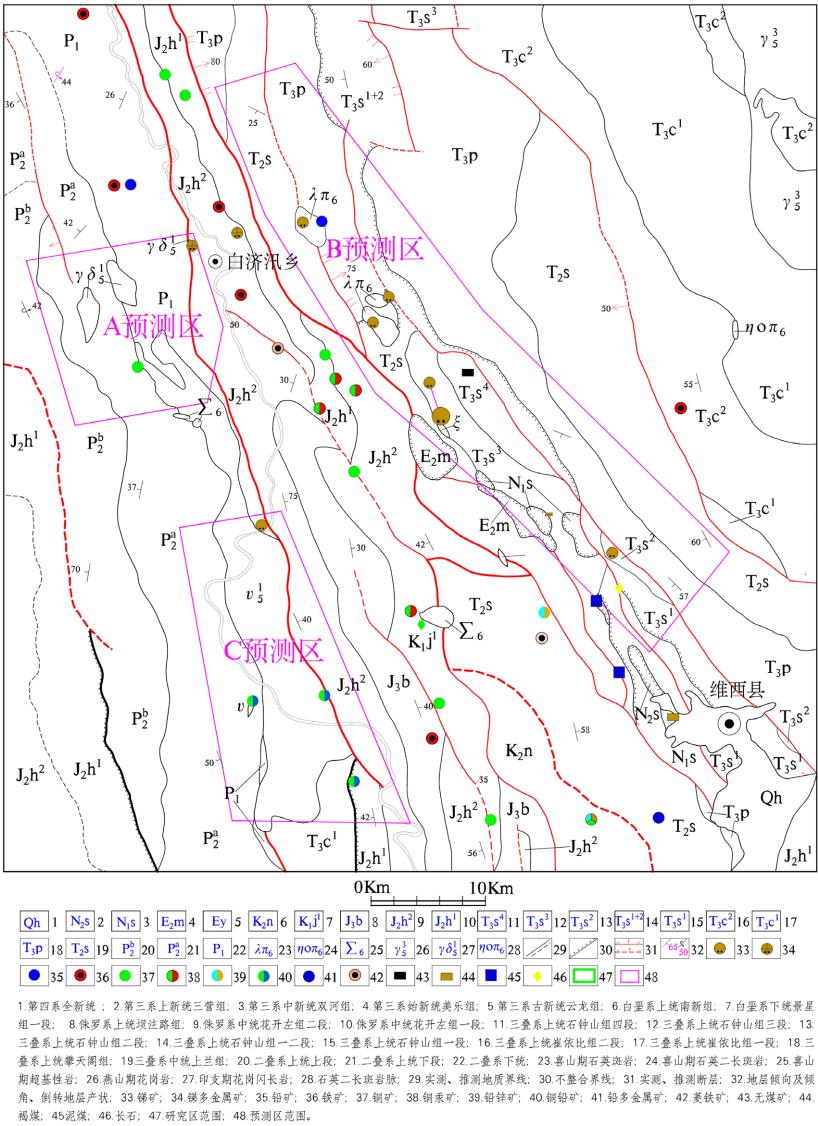


Figure 6. Regional geology and metallogenic prediction map of Weixi-Baijixun antimony-gold polymetallic deposit
图 6. 维西 - 白济汛镓金多金属矿区域地质及成矿预测图

云南维西地区锑金多金属矿成矿受地层、构造、岩浆、流体四大要素共同控制, 印支期俯冲带构造活动驱动的岩浆热液与二叠系含矿地层耦合是核心成矿机制[1]-[7]。成矿作用主要分为印支期和喜山期两个期次, 其中印支期是主要的成矿期。

构建的“地层-构造-岩浆-流体”四位一体综合信息找矿模型, 有效指导了本区找矿工作。该模型突破了传统找矿思路的局限, 明确了各控矿要素的作用和相互关系, 建立了系统的找矿标志体系[1]-[4] [7]。

识别出的“前缘晕 As-Sb-Hg-近矿晕 Au-Ag-Pb-Zn-尾晕 Co-Ni-Cr”原生晕垂向分带序列及地球化学参数反转现象, 为深部隐伏矿体定位提供了关键地球化学依据[7] [8] [11]。

通过调查工作, 圈定了三个靶区(编号 A、B、C), 见图 6, 为下一步勘查工作指明了方向。

7.2. 展望

进一步开展三个预测区工作, 扩大找矿成果。建议在 B、C 预测区部署 1:5000 地质填图和土壤地球化学测量, 圈定具体的找矿靶位, 然后进行钻探验证[7]。

加强对 C 预测区铜、钼、镍多金属矿的勘查评价, 拓展找矿新方向。以往工作多集中于锑金多金属矿, 对铜、钼、镍多金属矿的关注较少, 建议在 C 预测区内开展物探和化探工作, 查明铜、钼、镍多金属矿的成矿潜力。

深化成矿流体演化及元素迁移富集机制研究, 完善区域成矿理论。建议开展流体包裹体、同位素地球化学等方面的研究, 深入探讨成矿流体的来源、演化及成矿元素的迁移富集规律[7] [14] [15]。

推广应用本次建立的找矿模型, 在三江成矿带中段开展同类型矿床的区域找矿工作, 力争实现更大的找矿突破。维西地区的找矿经验和找矿模型对三江成矿带中段同类型矿床的勘查具有重要的借鉴意义[1]-[4] [15]。

参考文献

- [1] 邸贤栋, 杜静国, 马福, 等. 东昆仑屈库勒克东金锑矿床黄铁矿微量元素特征及其指示意义[J/OL]. 大地构造与成矿学, 1-20. <https://link.cnki.net/urlid/44.1595.P.20260417.1355.006>, 2026-06-25.
- [2] 张毅明, 汤宇磊, 韩聪, 等. 基于 XGBoost 模型的西藏山南金锑矿成矿预测[J/OL]. 黄金科学技术, 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/62.1112.TF.20260401.1914.002>, 2026-06-25.
- [3] 刘兆阳, 邓翼, 匡文龙, 等. 湘中地区古台山金锑矿床主要金属矿物及成因矿物学特征研究[J]. 黄金, 2026, 47(3): 101-107.
- [4] 邓翼, 马武良, 匡文龙, 等. 湘中古台山金锑矿床富集规律及深边部找矿预测[J/OL]. 地质通报, 1-22. <https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20260311.1641.002>, 2026-06-25.
- [5] 吴晋超, 翟德高, 宋祥法, 等. 藏南马扎拉金锑矿床黄铁矿微量元素、硫和铅同位素特征及地质意义[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/52.1102.P.20251224.0902.002>, 2026-06-25.
- [6] 王鹏, 马武良, 刘兆阳, 等. 湘中古台山矿床金锑共生分异机制研究[J/OL]. 大地构造与成矿学, 1-28. <https://link.cnki.net/urlid/44.1595.p.20251222.1926.004>, 2026-06-25.
- [7] 马小平, 赵伟策, 赵晓波, 等. 东昆仑屈库勒克东金锑矿床地质特征、控矿构造及成因[J]. 矿床地质, 2024, 43(4): 865-876.
- [8] 高俊宝, 满荣浩, 时浩, 等. 东昆仑屈库勒克东金锑矿床原生晕特征及深部找矿预测[J]. 地质与勘探, 2024, 60(5): 944-954.
- [9] 宋朝阳. 西秦岭东段崖湾-大桥地区金锑矿成矿规律与成矿预测[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [10] 宁勇云. 湘中古台山金(锑)矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 2024, 38(5): 847-861.
- [11] 刘兵, 连政, 陈威, 等. 新疆东昆仑屈库勒克东金锑矿床构造叠加晕特征及深部找矿预测[J]. 新疆地质, 2025, 43(1): 54-60.
- [12] 彭桥梁, 苏特, 李天虎, 等. 湖南沅陵沃溪金锑钨矿床地质特征与成矿地质条件探讨[J]. 西北地质, 2023, 56(6):

262-273.

- [13] 冶建虎, 马吉雄, 郭海明, 等. 青海省玛多县莫格尔雪金锑矿区地球化学特征及找矿潜力分析[J]. 黄金, 2025, 46(5): 78-83.
- [14] 刘方烁, 张文高, 毛承安, 等. 桂西龙滩金锑矿床成矿流体来源: 来自磁铁矿的矿物学和地球化学证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2025, 44(1): 123-133.
- [15] 娄元林, 陈坤, 曾昊, 等. 西藏古堆-隆子地区金锑矿床成矿规律浅析[C]//中国地球物理学会. 2024 年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京: 伯通电子出版社, 2024: 18-19.
- [16] 杨再风, 陈军, 叶霖, 等. 黔西南低温成矿区萤石矿床成矿规律: 与金锑矿床的空间关系[J]. 矿物学报, 2024, 44(1): 111-121.