

云南云龙县大雪山镍矿成矿规律及找矿预测

程迁群*, 朱振东#, 梁元钊, 罗洪昌, 李克省, 雷阳艾, 陈晨, 黄继松

云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

收稿日期: 2024年11月26日; 录用日期: 2025年2月3日; 发布日期: 2025年2月12日

摘要

大雪山镍矿位于西南三江特提斯保山地块, 是特提斯东段至今发现的首例岩浆镍-铜硫化物矿床, 成矿过程主要受岩浆熔离作用控制。本研究在野外地质调查的基础上, 查明了区域内基性-超基性岩体的空间分布特征和大雪山岩体的岩相分带特征, 并以“三位一体”找矿理论为指导依据, 厘定了矿床的成矿地质体, 归纳总结了矿床的成矿结构面类型, 确立了岩浆熔离作用和同化混染作用为矿床的主要成矿作用。在此基础上, 构建了大雪山矿床的成矿地质模型, 并结合地质、化探、遥感等多方面有利信息, 在大雪山地区及外围圈定了找矿预测区域, 对未来的镍-铜矿找矿勘查工作具有重要的指导意义。

关键词

基性-超基性岩, 成矿规律, 找矿预测, 大雪山镍矿, 云南云龙

Metallogenetic Regularity and Prospecting Prediction of the Daxueshan Nickel Deposit in Yunlong County, Yunnan Province

Qianqun Cheng*, Zhendong Zhu#, Yuanzhao Liang, Hongchang Luo, Kesheng Li, Yangai Lei, Chen Chen, Jisong Huang

Team 310 of Yunan Nonferrous Metals Geological Bureau, Dali Yunnan

Received: Nov. 26th, 2024; accepted: Feb. 3rd, 2025; published: Feb. 12th, 2025

Abstract

The Daxueshan Nickel deposit is located in the Baoshan Block of the Sanjiang Tethys belt in

*第一作者。

#通讯作者。

southwest China. It's the first case of magmatic Ni-Cu sulfide deposit that has been discovered in the eastern part of the Tethyan orogenic belt. The mineralization process is mainly controlled by magmatic liquation. This study is based on field geological surveys to clarify the spatial distribution characteristics of the basic-ultrabasic rock bodies in the region and the petrographic zoning of the Daxueshan intrusion. Guided by the "trinity" mineral exploration theory, the metallogenic geological entities of the deposit were delineated, and the types of metallogenic structural surfaces were summarized. It was established that magmatic differentiation and assimilation contamination are the main metallogenic processes of the deposit. Building upon this, a metallogenic geological model for the Daxueshan deposit was constructed, integrating geological, geochemical, and remote sensing data to delineate mineral exploration prediction areas in the Daxueshan region and its periphery, which holds significant guiding relevance for future nickel-copper mineral exploration efforts.

Keywords

Basic-Ultrabasic Rock, Metallogenic Regularity, Prospecting Prediction, Daxueshan Nickel Deposit, Yunnan Yunlong

Copyright © 2025 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

大雪山镍矿位于云龙县石竹坪 - 大雪山一带，青藏滇缅印度尼西亚巨型“歹”字型构造体系之中部。大地构造单元属冈底斯 - 喜马拉雅造山系(一级)，保山地块(二级)的保山陆表海(三级)；成矿区带属于特提斯成矿域(一级)之三江(造山带)成矿省(二级)之保山陆块 Pb-Zn-Ag-Fe-Au-Cu-Sn-Hg-Sb-As 成矿带(三级)。大雪山镍矿的研究程度较低，仅做过少量的地质特征和成矿地质条件方面的研究[1]，以及少量大雪山岩体的年代学和同位素地球化学研究[2][3]。保山地块大雪山基性 - 超基性侵入岩体具有重要 Ni-Cu 金属矿化[4]，它是巨型特提斯域东段中发现的首例该类型矿床，为填补该区域岩浆铜镍硫化物矿床研究提供了良好契机。大雪山矿床的成矿规律及找矿预测研究，对指导该区域内的铜镍硫化物矿床找矿和勘探具有重要的指示意义。

2. 区域地质背景

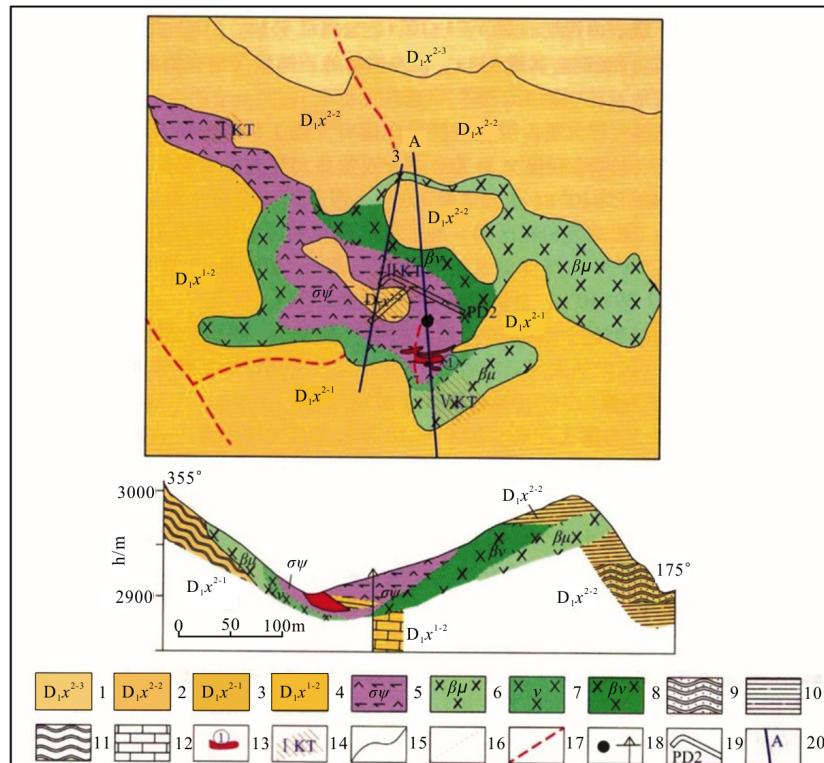
区域内出露地层包括古生界石炭系下统(C_1)、泥盆系中统(D_2)、泥盆系下统(D_1)、志留系中统(S_2)、志留系下统(S_1)、奥陶系上统(O_3)、寒武系上统(E_3)、古生界崇山群地层，其中以石炭系分布最广，经燕山褶皱，地层走向主要呈南北向。研究区属兰坪 - 思茅多金属成矿带西缘的保山南北向构造成矿带，褶皱主要有核桃坪复背斜，瓦房街向斜等，断裂发育。在核桃坪复背斜东翼有一组近南北向张断裂发育，全区还发育棋盘格式构造，由于南北向构造带在区内与崇山北北西向构造带复合，该区成矿地质条件有利。岩浆岩以喜马拉雅期、印支期、华力西晚期酸性花岗岩为主，大雪山、下麦庄一带主要为华力西期的基性岩和基性 - 超基性岩。区域地质构造复杂，各期构造岩浆活动频繁，成矿地质条件优越，矿产丰富。

3. 矿床地质特征

3.1. 基性 - 超基性岩体特征

大雪山镍矿床赋存在一处小型、不规则基性 - 超基性岩侵入岩体中(大雪山岩体)。该岩体的长轴呈 NW 向，长度约 700 m，宽度 50~300 m，地表出露面积 0.08 km²。大雪山岩体侵位于晚古生界下泥盆统

底部, 根据矿区地层出露的岩性特点可细分为 D_1^{1-2} 、 D_1^{2-1} 、 D_1^{2-2} 、 D_1^{2-3} , 岩性分别为灰岩、粉砂质页岩、泥岩、砂岩和泥岩(图 1)。矿床位于区域火烧岩背斜东侧倾末端。背斜两翼均遭受断裂破坏, 背斜轴线近东西, 向东倾伏, 倾伏角约 16° , 轴面向北倾, 倾角 $20^\circ\sim35^\circ$; 背斜核部地层为 D_1^{1-2} , 两翼分别为 D_1^{2-1} 和 D_1^{2-2} 。系统野外调研和镜下观察表明, 大雪山侵入岩体主要由三种岩相组成, 包括橄榄辉石岩、辉长岩和辉绿岩, 不同岩相之间渐变过渡。大雪山岩体侵入到下泥盆统(D_1), 与保山地块区域上的晚石炭世 - 早二叠世溢流玄武质岩石密切共生。在矿区中部华力西晚期沿断裂侵入的橄榄岩、辉长辉绿岩体分布于下泥盆统板岩中, 为近于顺层分布的不规则小岩盆, 东西长 700 m, 南北宽 300 m, 厚 18~28 m, 面积约 0.2 km²。岩体边界不规则, 局部与围岩成犬牙交错状。在岩体外围分布的小岩脉, 铜镍矿化弱。



1、下泥盆统向阳寺组第二段第三层; 2、下泥盆统向阳寺组第二段第二层; 3、下泥盆统向阳寺组第二段第一层; 4、下泥盆统向阳寺组第一段第二层; 5、橄榄辉石岩; 6、辉绿岩; 7、辉长岩; 8、辉长辉绿岩; 9、砂质板岩; 10、砂页岩; 11、板岩; 12、灰岩; 13、镍铜矿体(1959 年普查报告)及编号; 14、镍铜矿体地表投影位置(2005 年核实报告)及编号; 15、地质界线; 16、岩相界线; 17、推测断层; 18、未见矿钻孔(平面/剖面); 19、平硐及编号(2005 年核实报告); 20、剖面位置及编号

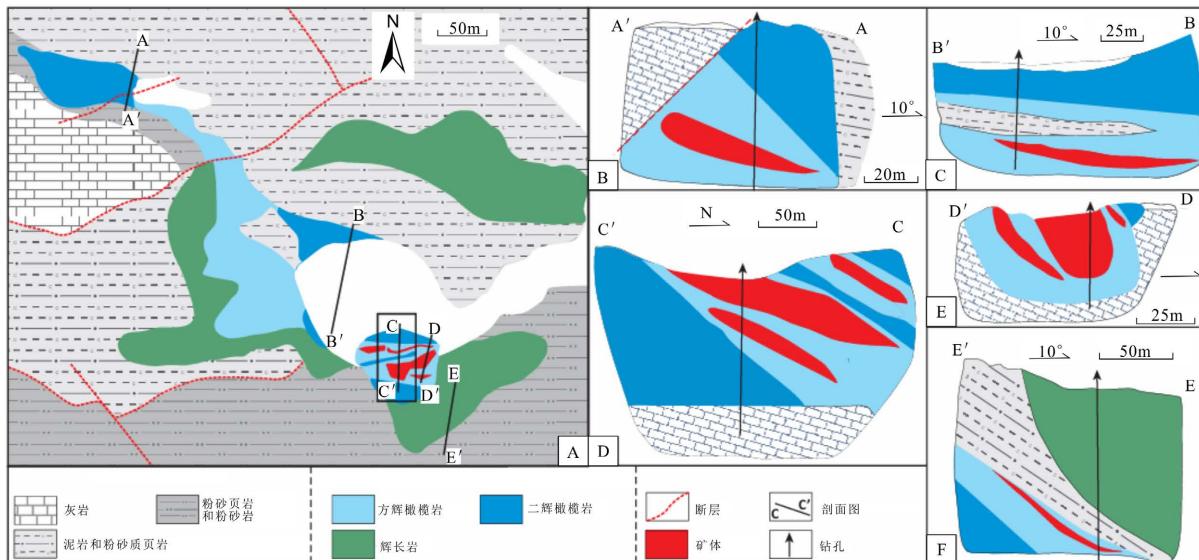
Figure 1. Geological sketch of Daxueshan paper mill nickel-copper deposit in Yunlong County (according to China Mineral Geology, Yunnan Volume, 2021)

图 1. 云龙县大雪山纸厂镍铜矿床地质简图(据中国矿产地质志 - 云南卷, 2021)

3.2. 矿体地质特征

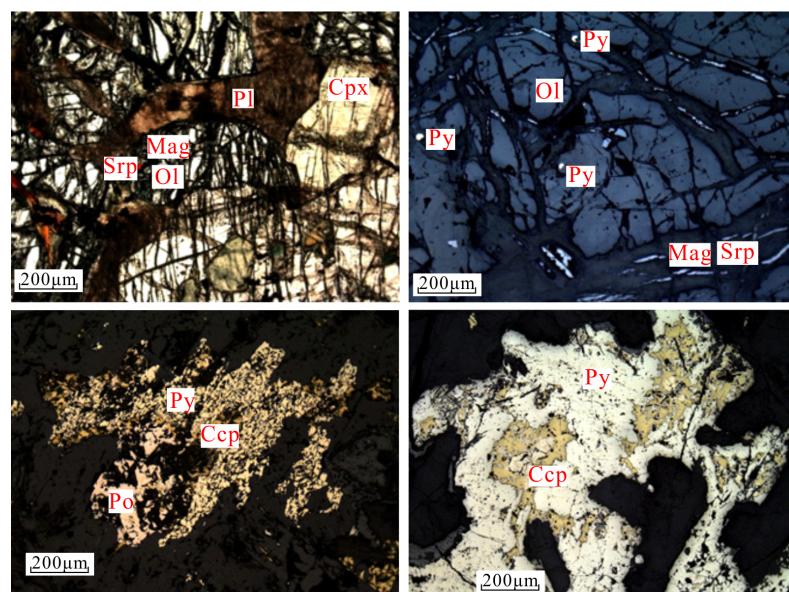
目前已探明大雪山矿床的矿石量为 52 万吨, 其中 Ni 金属量 4000 吨, 平均品位为 0.67%, Cu 金属量 2400 吨, 平均品位为 0.46%。矿体形态简单, 多为似层状或透镜状, 产状相对较稳定, 矿体倾角 $20^\circ\sim30^\circ$, 局部稍陡, 最大达 60° 左右。矿化特征显示其应属与基性 - 超基性岩有关的熔离型铜、镍硫化物矿床, 与矿化有关的基性超基性岩体(岩床)顺层侵入于下泥盆统之中。原探明的 N01-N04 号矿体全产于纸厂基性 - 超基性岩体中下部 V 号磁异常内, 主矿体赋存于岩体中橄榄辉长岩相底部, 少数矿体贯入底部围岩 - 炭

质板岩之中。早期地质勘查结果显示，原探明的I号矿体是唯一产出到地表的矿体(图2(a))。含矿岩性为超基性单元的橄榄辉长岩，主矿体赋存于该岩相底部，少数矿体贯入底部围岩之中。矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等；脉石矿物有蛇纹石、橄榄石、辉石、长石等(图3(a)、图3(b))。硫化矿主要为他形粒状结构(图3(c)、图3(d))；氧化矿则具海绵状、蜂窝状结构。矿石构造有致密块状、细脉浸染状、角砾状、团斑状、散点状等。



(a) 大雪山含矿岩体平面图；(b~f) 大雪山含矿岩体剖面图

Figure 2. Plane section of rock mass of Daxueshan copper-nickel deposit
图2. 大雪山铜镍矿床岩体平剖面图[2]



Amp——角闪石；Bi——黑云母；Cpx——单斜辉石；Mag——磁铁矿；Ol——橄榄石；Pl——斜长石；Ser——绢云母；Srp——蛇纹石；Py——黄铁矿；Ccp——黄铜矿；Pn——镍黄铁矿；Po——磁黄铁矿

Figure 3. Microscopic characteristics of rock and ore in Daxueshan nickel-copper deposit
图3. 大雪山镍铜矿床岩、矿石镜下特征

最新探矿工程以边界品位镍 0.20% 计算, 目前重新圈定了 3 个隐伏矿体。它们分别位于大雪山基性 - 超基性岩体中的 I、II、IV 号 3 个磁异常内, 对应矿体编号为 IKT、IHK、IV KT(图 2)。矿体形态与 I 号矿体相似, 多为似层状或透镜状, 主要产出在超基性岩单元的底部或靠近其底部呈悬浮状产出(图 2(b-f)), 矿化强连续性好, 基本未见夹石存在于矿体中。深部矿体分布特征与地表矿体基本相同。在基性单元的辉长岩中基本不见镍矿化。矿层中发育蛇纹石化、纤闪石化, 并可见较多绢云母、纤闪石、角闪石等含水矿物填隙于岩体的橄榄石之间, 金属矿物同含水矿物具有交代现象。该区主产镍矿, 其次为铜矿, 伴生少量钴矿, 并未发现其他伴生矿产。矿石一般较完整, 质地坚硬, 解理、裂隙不发育。围岩中见硅化及黄铁矿化, 另见极少量石英等。

4. 矿床三位一体地质模型

4.1. 成矿地质体

研究表明, 大雪山镍矿床的成矿地质体为基性 - 超基性侵入岩体, 一般多位于深大断裂的次级断裂内, 为镁铁 - 超镁铁质杂岩体, 多呈群分布。在区域上, 成矿地质体一般位于岩体群的中心部位; 含矿岩体规模较小, 一般在 1~3 km² 之间。岩体形态上, 多以岩脉、透镜状产出(图 4)。此外, 含矿岩体具有明显的垂直和水平岩相分带特征, 自岩体边部向中心可分为: 边缘辉长辉绿岩、辉绿岩相; 辉长岩、橄榄辉长岩相; 橄榄辉石岩、辉石橄榄岩相 3 个岩相带。

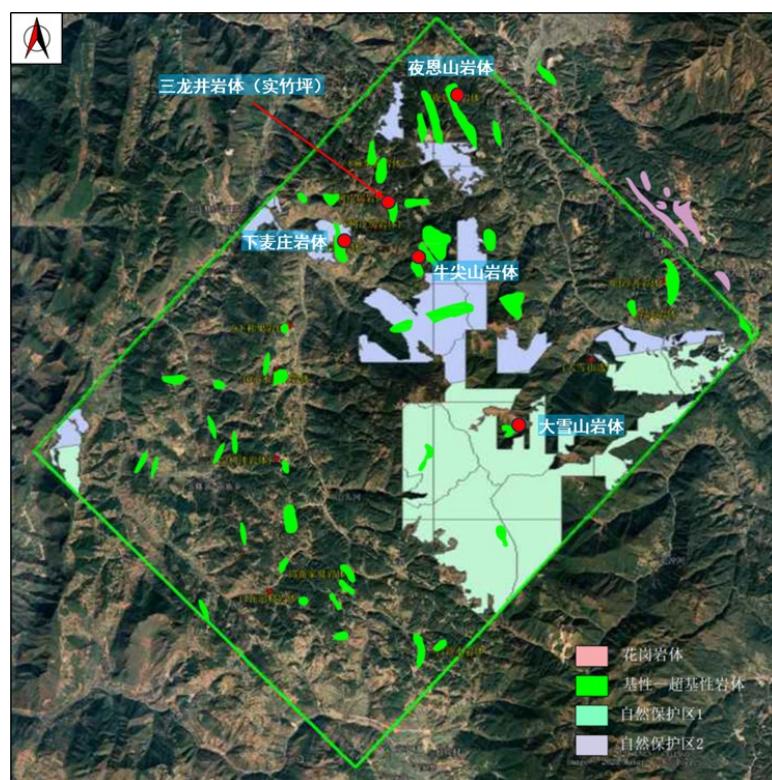


Figure 4. Spatial distribution diagram of intrusive rock mass in the study area
图 4. 研究区侵入岩体空间分布示意图

4.2. 成矿结构面

铜镍硫化物矿床的成矿结构面可以分为岩相岩性界面、岩体底部和侧伏端界面、岩体边界断裂带界

面及原生节理界面。研究区内的成矿结构面为岩相界面、岩体底部界面、断裂构造和接触带界面等。

(1) 岩相界面常见于多期次岩浆作用形成复式岩体中，以大雪山为例，自岩体中心向外岩相为橄榄岩相-辉长岩相-辉绿岩相，铜镍硫化物矿体主要产于富镁铁的橄榄岩相。富镁铁的岩浆发生硅酸岩与硫化物熔离作用，由于硫化物的比重较大，在重力分异作用下向下部聚集，因此矿体出现于富镁铁的橄榄岩相的底部。

(2) 部分矿体沿着断裂直接入围岩地层(板岩)中，并造成围岩发生不同程度的热液蚀变。含矿岩性为超基性单元的方辉橄榄岩，主矿体赋存于该岩相底部，少数矿体贯入于底部围岩之中，具有热液充填矿床特征。

(3) 大雪山纸厂矿区三个矿体(IKKT, IIKKT, IVKKT)，顶板围岩主要为橄榄辉石岩，底板为炭质板岩，板岩中常见硅化及黄铁矿化。板岩作为岩浆的上部盖层，部分板岩变为捕虏体进入岩体内，使伴随岩浆带来的成矿元素、挥发份、水分等不至于流失，为铜镍矿的富集提供了很好的物质条件、矿源基础和赋矿空间[1]。因此，接触带的板岩也是重要的成矿结构面。

4.3. 成矿作用特征

(1) 岩浆熔离作用

岩浆型铜镍硫化物在岩浆侵位过程中或侵位后硫化物熔离聚集成硫化物珠滴，因密度大于硅酸盐而沉降到岩体底部和边缘，主要形成就地熔离型矿体。大雪山矿床的成矿作用以就地熔离型为主，金属硫化物呈浸染状不均匀分布于岩体中，矿体就位于方辉橄榄岩相的底部。矿石主要呈星点状，稀疏浸染状，稠密浸染状和块状构造。金属硫化物结晶一般晚于橄榄石等硅酸盐矿物，受到空间限制，多呈它形-半自形晶结构。但也见结晶早的橄榄石包裹着浑圆状硫化物。硫化物较多时形成局部海绵陨铁结构磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿，高温时呈固溶体状，随着温度的降低，逐渐分离形成叶片状或乳浊状结构。部分黄铜矿和镍黄铁矿呈微细脉状穿插于磁黄铁矿中。

大雪山侵入岩体中超基性单元的橄榄石组分 Fo 值(~81)远低于地幔橄榄石 Fo 值(~91)，说明该岩体的母岩浆经历了一定的演化过程[3]。通过使用橄榄石与岩浆 FeO 和 MgO 交换系数，刘金宇(2020)计算出橄榄石 Fo 值降低 8 mol%，对应的岩浆发生 20 wt% 的橄榄石结晶，由此可知大雪山岩体母岩浆经历了大量的橄榄石结晶分异(>20%)，最终形成了 Fo 值在 77~81 之间变化的橄榄石。根据前人的理论研究，这样大量的铁镁矿物结晶分异作用会造成残余岩浆的硫溶解度下降，从而导致岩浆熔离出硫化物[3]。

(2) 同化混染作用

同化混染作用系指岩浆熔化、熔解或交代围岩及捕虏体而使岩浆成分发生改变的作用。同化混染作用是形成岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床最重要的机制。刘金宇(2020)对大雪山基性-超基性岩石、区域瓦马玄武岩矿区下泥盆统地层的 Sr-Nd 含量和同位素进行了分析测试，二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、辉长岩、玄武岩和地层粉砂岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{t})$ 值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始值均使用锆石 U-Pb 年龄 300.5 Ma 计算[3]。结果显示大雪山基性-超基性岩分布较为集中，超基性岩单元与辉长岩同位素组成相似，它们具有富集的 Nd (t) 值和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 变化范围分别在 -7.1 至 -5.7 和 0.7116 至 0.7143，与保山地块其他地区具有富集同位素组成的玄武质岩石样品以及下麦庄基性-超基性侵入体类似。与此相比，瓦马玄武岩具有亏损的特征，体现在更高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{t})$ 值(-0.8 至 -0.3)和更低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ (0.706 至 0.7071)。瓦马玄武岩成分接近原始地幔值，落在大洋地幔同位素演化线右侧。刘金宇(2020)进行了二端元混合模拟计算，结果显示大雪山基性-超基性岩岩体落在以瓦马玄武岩作为亏损端元、粉砂质围岩作为富集单元的混合线上，表明其经历较高程度的地壳混染(15%~18%)，说明地壳混染可以解释大雪山岩体的形成。结合全岩微量元素、Sr-Nd-Os 同位素和锆石 Hf 同位素特征以及岩相中大量斜方辉石的产出(方辉橄榄岩相)，刘金宇(2020)认为壳源物质

混染(估算得到混染程度约 25%~30%)是导致大雪山矿床形成的另一重要机制。

通过总结以往资料以及相关学者的研究成果可以认为大雪山纸厂镍铜矿床的主要成矿机制为：成矿母岩浆中橄榄石的结晶分异作用和岩浆受到壳源物质混染一起造成了大雪山岩浆体系中硫化物的熔离，从而在岩浆后期演化过程中形成镍-铜矿床。

4.4. 成矿模式

研究区地处澜沧江深大断裂以西，冈底斯-念青唐古拉褶皱系(I 级单元内福贡-镇康褶皱带(II 级单元)中部)，老窝-瓦房街南北向构造带上，核桃坪复背斜北端偏西翼构造转折带部位。构造以南北向构造为主，其次为与南北向构造带相伴生的北西和北东向两组扭断裂。南北向构造控制着区域地层及构造的分布与发育，为区域主要构造形迹。北西向构造为压扭性断裂，北东向构造为张性断裂，两组断裂相互交切，构成棋盘格式构造形态。区内构造活动频繁，岩浆岩的分布主要受区域性断裂控制，具有多期多阶段复式岩体的特点。在燕山晚期及华力西晚期花岗岩和基性岩岩浆分别沿断裂构造侵入，为锡铁、铅、锌、铜、镍、钴等矿的富集提供了大量的成矿物质。

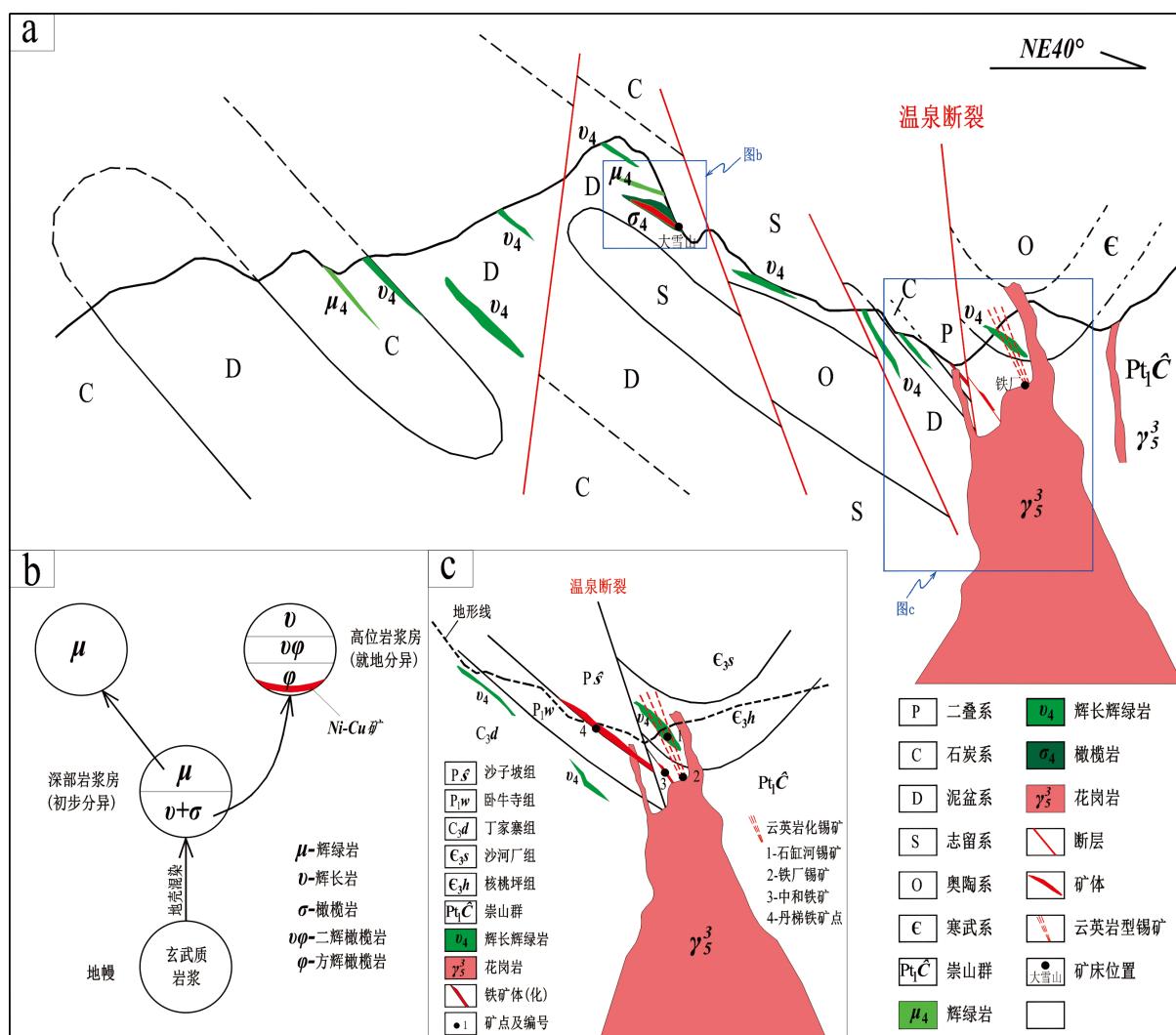


Figure 5. Metallogenic model of the study area and adjacent areas

图 5. 研究区及邻区成矿模式图

大雪山矿区成矿温度、压力等方面的研究相对薄弱。中国铜镍硫化物矿床用橄榄石和辉石地质温度计获得的成岩温度，峰值在970℃~1400℃之间，其中橄榄石的结晶温度多大于1200℃；推测硫化物矿浆的生成温度要高于1400℃。对铜镍硫化物矿床的成岩和成矿压力统计，结果表明不同的矿床差别较大。如金川矿床，根据岩浆结晶模拟计算得出，在3.3~3.8 kbar压力(深度10.9~12.5 km)下发生造岩矿物(橄榄石和斜方辉石)的分离结晶，但岩浆形成的深度可能在40 km以上；再如赤柏松岩体侵位深度在3~14 km [5]，但岩浆源区的深度可能达70 km [6]。应用Barmes *et al.* (2013)的经验公式[7]，刘金宇(2020)估算了大雪山含硫化物岩浆体系的氧化还原状态，计算的氧逸度结果为OFM + 0.2和QFM + 1.2之间(log₁₀O₂比QFM值高0.2到1.2个单位)，与中国裂谷性质的金川矿床和弧环境下的岩浆硫化物矿床相似[3] [8]。

研究区及东部邻区有两个成矿系统：①与海西晚期方辉橄榄岩有关的岩浆型Ni-Cu硫化物成矿系统(以下简称“铁镁质岩浆型矿床”)；②与燕山晚期花岗斑岩有关的铁锡多金属成矿系统(以下简称“长英质岩体热液型矿床”)。本次研究认为：(1)两个成矿系统的成矿年代、成矿地质体、矿床类型、矿物组合，以及蚀变分带、构造控矿作用都不相同，二者差异性很大；(2)但二者在空间上紧密联系在一起，前者成矿地质体(铁镁质-超铁镁质侵入岩)平行分布于温泉断裂两侧，北侧为漕涧岩带，南侧为下麦庄-大雪山岩带，以南侧岩带成矿潜力较好；后者成矿地质体(花岗斑岩)沿温泉断裂分布，主要出露在断裂北盘。(3)两类成矿系统的成矿地质体在空间上具有叠加性。如石缸河锡矿的西矿带主要赋矿围岩为辉长辉绿岩，而成矿地质体为花岗斑岩。

由上述可知，两类成矿系统具有内在联系，表现在：①温泉断裂都是二者的主要成矿构造，成矿带走向一致；②二者空间具有叠加性。因此，本次根据“三位一体”的研究成果，融合两个成矿系统于一身，构建了研究区及邻区成矿模式(图5)。

5. 找矿预测

岩浆型铜镍硫化物矿床被认为是深部地幔岩浆上侵的产物，按照典型的成矿模式，上侵的通道或岩浆进入现存空间的通道口是富矿岩浆或矿浆的可能分布区。因此寻找这种通道或通道口，是已知矿集区取得深部突破、扩大矿区远景的主要途径之一。因此，在大雪山铜镍矿床周围或深部，具有较大的找矿潜力。综合野外地质调查，结合化探、遥感等方面信息，主要依据如下：

(1) 在野外地质调查中，在大雪山岩体北部上坪子、下麦庄地区发现了出露在地表的超基性岩体，该岩体中可见明显的浸染状、珠滴状或豆状硫化物，该岩体矿化情况和化验分析结果明显优于此次研究区中的其他岩体。而硫化物铜镍矿体通常呈似层状或透镜状赋存于岩体的底部，因此推测该岩体所在区域的深部可能存在隐伏矿体。

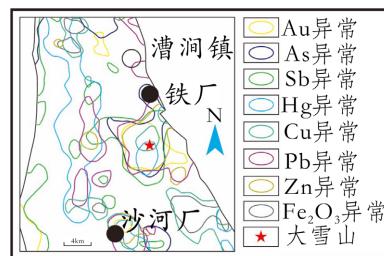


Figure 6. Regional chemical anomaly map of the Great Snow Mountain
图6. 大雪山区域化学异常图

(2) 该预测区内于2004年曾进行过开采，并且在踏勘过程中发现橄榄辉石岩边部有较好的铜镍矿化。取3个打块样，品位分别是：Cu 0.11%、Ni 0.038%；Cu 0.28%、Ni 0.24%；Cu 2.41%、Ni 1.93%。该区

岩体的矿化情况及样品分析结果明显优于研究区内的其它基性 - 超基性岩体。结合该区域的遥感和化学异常信息，将上坪子、下麦庄地区作为铜镍矿的找矿预测区。

(3) 化探异常依据：如图 6 所示，大雪山及北部区域位于 Au、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn 的异常等值线中心位置，指示该区域具有较大的成矿潜力。

(4) 遥感特征依据：如图 7 所示，大雪山及北部上坪子、下麦庄铜镍矿化区域存在环套环的热异常环形构造，反映了深部岩浆等热源体的客观存在，是铜镍等多金属成矿的有利地区。

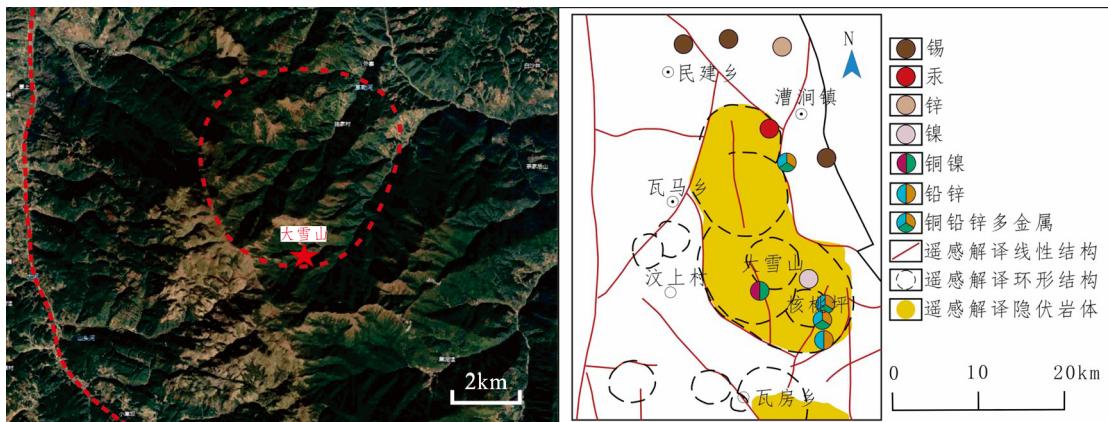


Figure 7. Interpretation map of remote sensing structure of Daxueshan Mountain
图 7. 大雪山遥感构造解译图

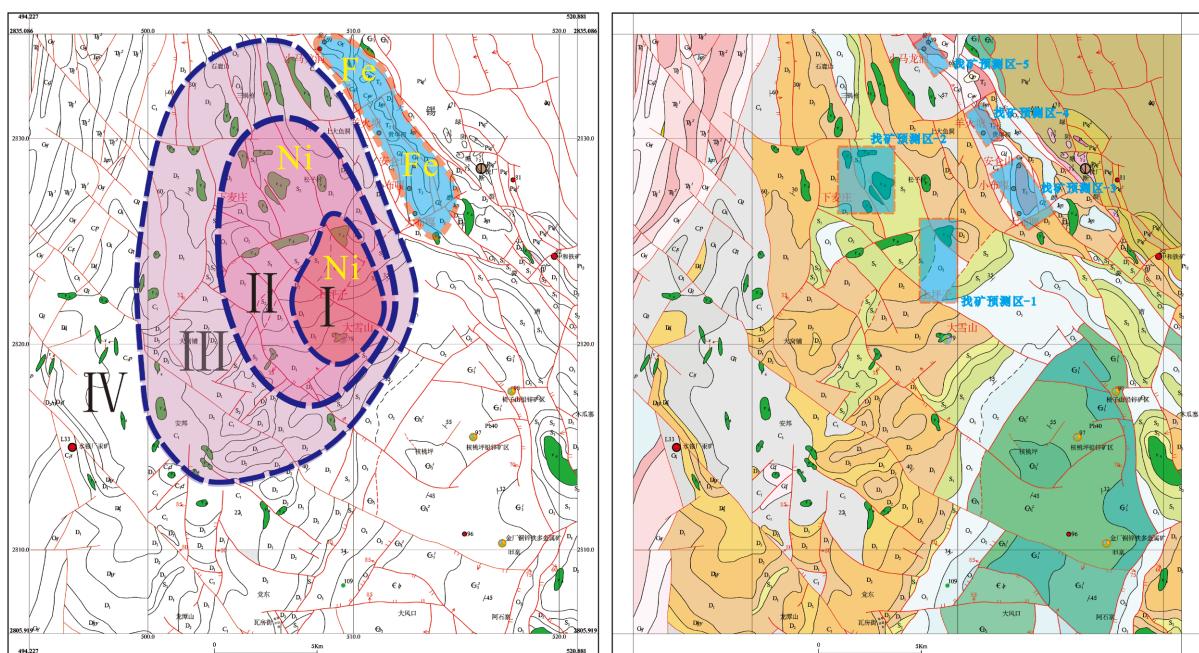


Figure 8. Mineralization alteration zoning (left) and prospecting prediction area (right) in the study area
图 8. 研究区矿化变分带(左)及找矿预测区(右)

根据野外地质调查的矿(化)点露头信息，结合宏观地质、岩相学对比、矿化元素地球化学及地物化遥特征，以大雪山纸厂、上坪子矿体为中心，将研究区镍铜、铁矿化蚀变由中心向外围，由强至弱，划分为 I→II→III→IV 四个带(图 8，左)。综合地质 - 地球化学信息，筛选出五处找矿预测区(图 8，右)。

- (1) 具有铜镍硫化物矿床成矿远景的上坪子地区(找矿预测区-1), 位于大雪山纸厂矿区北西向, 距大雪山纸厂镍矿仅 2.7 km 左右;
- (2) 具有铜镍硫化物矿床成矿远景的下麦庄地区(找矿预测区-2);
- (3) 具有 Fe 矿床成矿远景的大布嘎地区(找矿预测区-3);
- (4) 具有 Fe 矿床成矿远景的羊火塘地区(找矿预测区-4);
- (5) 具有 Fe 矿床成矿远景的小马龙洞地区(找矿预测区-5)。

基金项目

本文受云南省有色地质局科研项目“云南省维西 – 南涧钴多金属矿成矿预测与靶区优选项目(2025-01)”资助。

参考文献

- [1] 刘汉和. 滇西大雪山纸厂铜镍矿[J]. 西部探矿工程, 2007(5): 102-104.
- [2] Wang, Q., Deng, J., Li, G., Liu, J., Li, C. and Ripley, E.M. (2018) Geochronological, Petrological, and Geochemical Studies of the Daxueshan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit in the Tethyan Orogenic Belt, Southwest China. *Economic Geology*, **113**, 1307-1332. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4593>
- [3] 刘金宇. 西南三江特提斯保山地块晚古生代玄武质岩浆作用与镍-铜成矿研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [4] 关兆德. 大雪山 Ni-Cu 矿床地质报告(未发表) [R]. 云南省南方地质勘查工程总公司, 2010.
- [5] 傅德彬. 吉林赤柏松硫化铜-镍矿床的矿浆成因模式[J]. 地质学报, 1994(2): 142-157.
- [6] 汤中立, 李小虎. 两类岩浆的小岩体成大矿[J]. 矿床地质, 2006, 25(S1): 35-38.
- [7] Barnes, S.J., Godel, B., Gurer, D., Brenan, J.M., Robertson, J. and Paterson, D. (2013) Sulfide-Olivine Fe-Ni Exchange and the Origin of Anomalously Ni Rich Magmatic Sulfides. *Economic Geology*, **108**, 1971-1982. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.1971>
- [8] Li, C. and Ripley, E.M. (2011) The Giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit Tectonic Setting, Magma Evolution, Ore Genesis, and Exploration Implications. *Reviews in Economic Geology*, **17**, 163-180.