

## 云南镍钴矿成矿规律及找矿方向

邢 程<sup>1, 2, 3)</sup>, 董 涛<sup>1, 2, 3, 4)\*</sup>, 杨新强<sup>1, 2, 3)</sup>, 王 涛<sup>1, 2, 3)</sup>,  
段召艳<sup>1, 2, 3)</sup>, 杜 斌<sup>1, 2, 3)</sup>, 李云飞<sup>1, 2, 3)</sup>, 张有名<sup>1, 2, 3)</sup>

1) 云南省地质调查院, 云南昆明 650216;

2) 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051;

3) 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051;

4) 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093

**摘 要:** 镍、钴是我国重要的紧缺战略性矿产, 其保障程度对国家稳定和发展具有重要意义。云南省作为有色金属王国, 已发现了镍矿床(点)42 处, 钴矿床(点)48 处, 查明资源量位于全国前列, 具有较好的镍、钴矿找矿潜力。本文在前人研究工作基础上, 梳理了云南省镍、钴矿床的成因类型、时空分布和成矿作用, 总结成矿规律, 并探讨找矿方向。云南省镍、钴矿床可划分为岩浆型、岩浆热液型、海相火山岩型、受变质型、中-低温热液型和风化型 6 种矿床类型。镍、钴矿主要集中于扬子陆块及三江造山带, 镍矿床主要形成于印支期及喜马拉雅期, 钴矿床主要形成于喜马拉雅期、晋宁期及印支期。岩浆型和风化型镍、钴矿床与印支期扬子陆块的基性-超基性岩侵入活动关系密切, 中-低温热液型钴矿与喜马拉雅期的构造活动相关, 海相火山岩型和受变质型钴矿则是位于扬子陆块内与晋宁期火山活动相关的昆阳群和大红山岩群中。通过对全省镍、钴矿成矿作用分析和成矿规律总结, 结合潜力评价工作成果, 全省共圈定 8 处找矿远景区。为云南省新一轮找矿突破战略行动镍、钴矿勘查部署提供思路。

**关键词:** 镍矿床; 钴矿床; 成矿规律; 找矿方向; 云南省

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.052401

## Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Nickel and Cobalt Deposits in Yunnan Province

XING Cheng<sup>1, 2, 3)</sup>, DONG Tao<sup>1, 2, 3, 4)\*</sup>, YANG Xinqiang<sup>1, 2, 3)</sup>, WANG Tao<sup>1, 2, 3)</sup>,  
DUAN Zhaoyan<sup>1, 2, 3)</sup>, DU Bin<sup>1, 2, 3)</sup>, LI Yunfei<sup>1, 2, 3)</sup>, ZHANG Youming<sup>1, 2, 3)</sup>

1) Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming, Yunnan 650216;

2) Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization,  
Ministry of Natural Resources, Kunming, Yunnan 650051;

3) Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming, Yunnan 650051;

4) Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093

**Abstract:** Nickel and Cobalt are critical strategic minerals in short supply in China. Ensuring their availability is of utmost importance for national stability and development. As the hotspot for non-ferrous metals, Yunnan Province has 42 nickel deposits and 48 cobalt deposits, and these identified resources are in the forefront of the country, with good nickel and cobalt prospecting potential. Based on previous research, this study reviews the genetic types, temporal and spatial distribution, and mineralization of nickel and cobalt deposits in Yunnan Province, summarizes the metallogenic regularity, and discusses the prospecting direction. Nickel and cobalt deposits in Yunnan Province can be divided into 6 types: magmatic type, magmatic hydrothermal type, Marine volcanic type, metamorphic type, medium-low temperature hydrothermal type and weathering type. Nickel and

本文由云南省自然资源厅“云南省矿产资源国情调查项目”(编号: 云自然资财[2021]53 号; 云自然资财[2022]25 号; 云自然资财[2023]19 号)资助。

收稿日期: 2024-03-01; 改回日期: 2024-05-07; 网络首发日期: 2024-05-28。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 邢程, 男, 1988 年生。硕士, 高级工程师。主要从事矿产地质勘查及找矿预测研究。E-mail: 85088658@qq.com。

\*通信作者: 董涛, 男, 1983 年生。硕士, 正高级工程师。主要从事地质找矿及成矿规律研究。E-mail: 20974687@qq.com。

cobalt deposits are mainly concentrated in the Yangtze landmass and Sanjiang orogenic belt, nickel deposits are mainly formed in the Indosinian and Himalayan ages, cobalt deposits are mainly formed in the Himalayan, Jinning and Indosinian ages. The magmatic and weathering nickel and cobalt deposits are closely related to the basic-ultrabasic rock intrusion activities of the Indosinian Yangtze landmass. The medium-low temperature hydrothermal cobalt deposits are related to the tectonic activities in the Sanjiang orogenic belt formed by the Himalayan orogenic activities. The marine volcanic type and sedimentary metamorphic type cobalt deposits are located in the Kunyang Group and Dahongshan Group in the Yangtze landmass, which are related to the volcanic activities of the Jingning Age. Based on the analysis and summary of mineralization rules of nickel and cobalt deposits in the province, combined with the results of potential evaluation, a total of 8 prospecting potential areas are delineated in this paper. Therefore, this study provides insights for the exploration and deployment of nickel and cobalt ore in a new round of prospecting breakthrough strategic action in Yunnan Province.

**Key words:** nickel deposit; cobalt deposit; metallogenic regularity; prospecting direction; Yunnan Province

镍、钴矿被广泛应用于新能源汽车、军事、航空、化工和医疗等领域,2016 年被列入我国 24 种战略性矿产(黄晓兵, 2018; 刘金龙等, 2023)。随着低碳经济时代的来临及我国新能源汽车快速发展,作为关键材料的镍、钴需求呈现出迅猛增长的趋势,我国已是全球第一大镍、钴金属消费国,但后备资源严重不足,对外依存度较高,镍超过 70%依靠进口,钴则高达 90%以上(李文渊, 2022; 张照伟等, 2023),如今随着国际上镍、钴主要生产国家矿业政策的变化,如,刚果(金)钴矿石禁运和增加关税及印度尼西亚发布的镍矿出口禁令,对我国镍、钴矿原材料资源供给产生了深远影响,使得我国镍、钴资源形势更加严峻(于晓飞等, 2022)。

镍、钴矿作为云南省优势矿产之一,已查明镍、钴矿资源量位列全国第 4、5 位。云南省复杂的构造岩浆成矿作用,形成了类型丰富的镍、钴矿,如白马寨铜镍矿、墨江金厂—元江安定镍矿、水泄铜钴矿等大型矿床。前人开展了大量的地质勘查及成矿作用研究,多集中于单个矿床的成岩成矿年代学、矿床地质特征、矿床成因、矿石赋存状态等(谢桂青等, 2004; 应汉龙等, 2005; 王焰, 2008; 徐昭啟, 2012; 周辅增, 2015; 熊伊曲等, 2015; 王良果, 2015; 卢宜冠, 2018; 周凯等, 2020),而对区域及全省成矿规律、找矿方向等方面研究较少且时间较远(薛步高, 1996, 2001, 2008; 徐金祥等, 2013)。本文系统梳理了云南省镍、钴矿的矿床类型、时空分布和成矿作

用,总结了成矿规律,结合潜力评价成果,探讨了找矿方向,为云南省新一轮找矿突破战略行动镍、钴矿勘查部署提供依据。

1 镍、钴矿床类型与分布特征

1.1 主要矿床类型

镍、钴矿属于典型的幔源型元素,全球镍、钴矿床类型多样,成因复杂。全国镍矿的矿床类型主要分为岩浆型、风化型和海相沉积型(姜德波, 2014; 孙涛, 2014a, b; 刘金龙 2023)。钴矿大部分为铜、镍、铅锌和铁的伴生矿产,很少独立成矿。前人对钴矿的矿床类型提出了多种方案(王辉等, 2019; 赵俊兴等, 2019; 张洪瑞等, 2020)。

本文矿床类型划分,采用“中国矿产地质志”划分方案。该方案以矿床的成矿作用为主导,突出了成矿主岩,云南省镍、钴矿共划分出岩浆型、岩浆热液型、海相火山岩型、受变质型、中-低温热液型和风化型 6 种矿床成因类型(表 1)。

云南省已发现镍矿床(点)42 处,大型 1 处,中型 5 处,小型 20 处,矿点 16 处。矿床类型共划分为岩浆型、岩浆热液型和风化型 3 种,从数量来看,以岩浆型为主,风化型和岩浆热液型相对较少;从查明资源量来看,以风化型为主,该类型多为大、中型矿床,查明资源量占全省的 79.24%,其次为岩浆型矿床,矿床规模以中、小型为主,查明资源量占全省 18.95%,岩浆热液型已查明资源较少。由此

表 1 云南省镍、钴矿矿床类型划分表  
Table 1 Table of nickel and cobalt deposit types in Yunnan Province

一级分类	二级分类	三级分类	矿种	代表矿床
内生矿床	岩浆作用矿床	岩浆型矿床	镍、钴	白马寨铜镍矿、新安里镍铜矿、大雪山镍铜矿
		岩浆热液型矿床	镍	金厂金镍矿、团天镍矿
		海相火山岩型矿床	钴	大红山铁铜矿、三达山铜钴矿
	变质作用矿床	受变质型矿床	钴	万宝厂钴铜矿、铜厂冲钴铜矿
	含矿流体作用矿床	浅成中-低温热液型矿床	钴	厂街钴铜矿
外生矿床	表生作用矿床	风化型矿床	镍、钴	老厂钴铜矿、墨江金厂—元江安定镍矿

可知, 岩浆型和风化型是云南省镍矿的主要矿床类型(图 1a)。

云南省已发现钴矿床(点)48 处, 多以共、伴生为主, 作为主矿产的仅有易门老厂钴铜矿, 云南省钴矿多为小型, 只有新平大红山铁铜矿伴生钴资源量达中型。矿床类型共划分为岩浆型、海相火山岩型、受变质型、中-低温热液型和风化型 5 种, 从数量来看, 风化型、岩浆型和中-低温热液型较多, 其次为受变质型, 海相火山岩型相对较少; 从查明资源量来看, 海相火山岩型和中-低温热液型为主, 查明资源量占全省的 62.27%, 其次为风化壳和岩浆型矿床, 查明资源量占全省 31%, 受变质型已查明资源相对较少(图 1b)。由此可知, 中-低温热液型、风化型和岩浆型是云南省钴矿的主要矿床类型, 但海相火山岩型作为云南省铁、铜的主要矿床类型, 分布较广, 数量较多, 该类型伴生的钴矿也不可忽视。

## 1.2 时空分布规律

### 1.2.1 空间分布特征

云南省镍矿分布极不均匀, 主要集中在滇东南的富宁—麻栗坡地区和金平地区, 其次为滇中的楚雄地区、新平—墨江地区, 滇西地区零星分布。大地构造位置主要集中于扬子陆块(VI)西部和南部, 少数分布于羌塘—三江造山带(VII)和冈底斯—喜马拉雅造山带(VIII)中(图 2, 图 3a)。其中岩浆型镍矿床分布范围最广, 但都基本分布在扬子陆块内, 白马寨、金宝山等矿床也已证实为峨眉山大火成岩省事件的产物(李文渊, 2022); 其次为风化型镍矿床, 主要分布于北回归线以南的热带-亚热带地区, 集中在羌塘—三江造山带东缘, 冈底斯—喜马拉雅造山带中目前仅发现 1 处(芒市邦滇寨镍矿); 岩浆热液型镍矿数量较少, 均位于羌塘—三江造山带中。从资源量分布特征来看, 新平—墨江地区占比最高, 占全省镍资源量的 74.73%。

云南省钴矿主要集中在滇东的富源地区和滇中的易门—新平地区, 其次为滇西的兰坪—永平地区, 大地构造位置主要集中于扬子陆块(VI)和羌塘—三江造山带(VII)。虽分布广泛, 但极不均匀, 多以“区”、“带”的形式聚集在一定区域内, 但不同的矿床类型又具有不同的空间分布特征。其中中-低温热液型钴矿都分布于羌塘—三江造山带中, 且主要集中在兰坪—永平地区和普洱地区; 岩浆型钴矿作为岩浆型镍、铜矿的伴生矿产, 分布特征与岩浆型镍矿一致; 海相火山岩型及受变质型主要都集中于扬子陆块内的昆阳裂谷带, 矿床与昆阳群及大红山岩群关系密切; 风化型矿床可分为两类, 一类为镍矿伴生钴矿床, 该类分布与风化型镍矿一致, 一类为风化型钴矿, 主要集中在富源地区, 为峨眉山玄武岩风化形成(铁池坪子、雨晒谷等), 目前勘查程度较低, 多为矿点, 少量分布在易门地区(易门老厂钴矿), 为昆阳群风化形成。从资源量分布特征来看, 易门—新平地区 and 兰坪—永平地区占比超全省 70%。

### 1.2.2 成矿时代

云南省镍矿成矿时期主要为印支期及喜马拉雅期, 少量为燕山期。岩浆型镍矿床成矿时代为印支期, 为基性-超基性岩侵入同期形成, 风化型矿床形成时代为喜马拉雅期, 但成矿母岩主要为华力西期—印支期基性-超基性岩, 所以印支期基性-超基性岩是全省镍矿最主要的成矿母岩。云南省钴矿成矿时期主要为喜马拉雅期、晋宁期及印支期。受变质型和海相火山岩型形成时代主要为晋宁期, 岩浆型形成时代为印支期, 中-低温热液型和风化型矿床形成时代主要为喜马拉雅期(图 3c)。

## 1.3 成矿系列

根据程裕淇等(1979)创立的矿床成矿系列理论, 按矿床成矿系列“四个一”划分原则(陈毓川, 1994, 1997; 陈毓川等, 2006, 2015, 2016, 2020, 2022; 王登红等, 2020), 即在一定的地质构造单元及构造

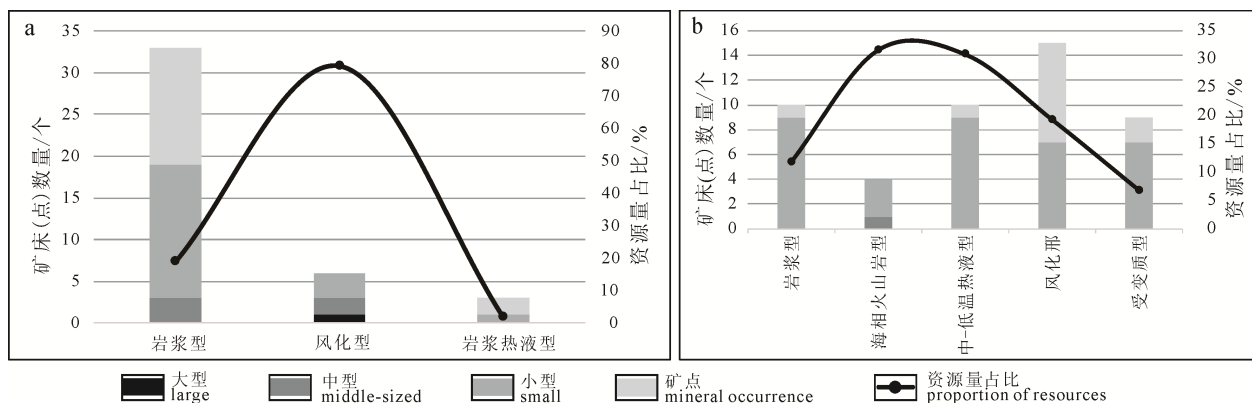


图 1 云南省镍矿(a)、钴矿(b)矿床类型、矿产地数量和资源量占比统计图

Fig. 1 Statistical graph of deposit types, mineral origin quantity and resource proportion of nickel deposit (a) and cobalt deposit (b) respectively in Yunnan Province

部位,与一定的地质成矿作用有关,形成一组具有成因联系的矿床组合自然体,为矿床成矿系列。将云南省镍、钴矿床成矿系列初步厘定为7个成矿系列、10个成矿亚系列(表2)。

2 镍、钴矿成矿作用

2.1 岩浆型矿床成矿作用

云南省岩浆型镍矿集中分布在扬子陆块内,与峨眉山地幔柱的形成密不可分,如白马寨、金宝山

等矿床(李文渊, 2022),成矿背景属于峨眉山大火山岩省环境。成矿元素主要为镍、铜、铂族元素,部分矿床伴生钴,成矿物质主要来自上地幔,铂族元素主要起源于地幔高度熔融而形成的苦橄岩,铜镍主要起源于地幔低度熔融形成的低钛玄武岩,岩体在侵入时均受到地壳混染作用(卢宜冠, 2018)。云南省岩浆镍矿床主要赋存在铁质超基性岩中,次为基性岩,具有岩浆分异程度高,分带性明显等特征。成矿模式主要有异地熔离分异贯入型和原地熔

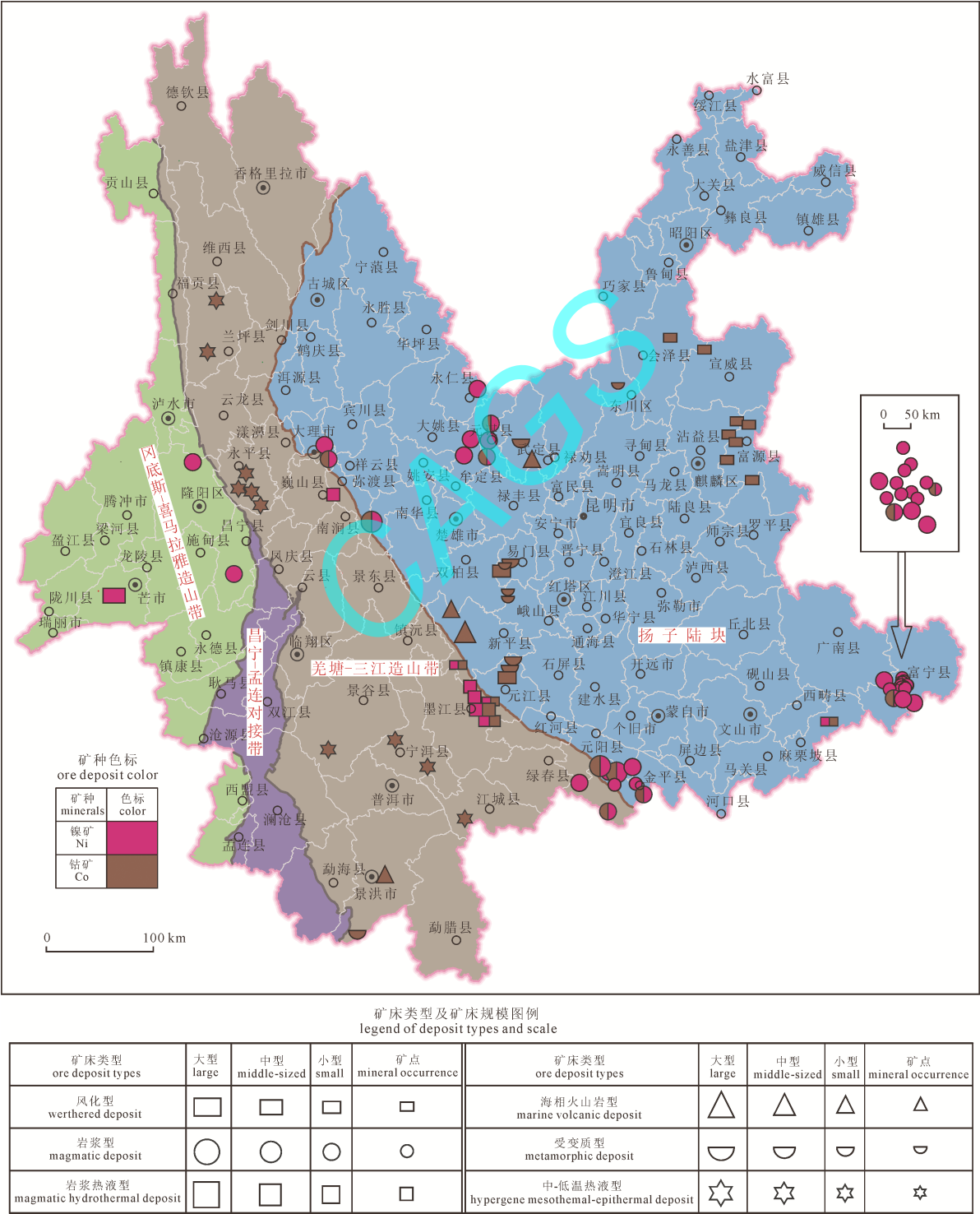


图2 云南省镍、钴矿分布图  
Fig. 2 Distribution map of nickel and cobalt deposits in Yunnan Province



离分异型 2 种类型,两种成矿模式在区域上相伴出现(徐金祥等, 2013)。异地熔离分异贯入型,成矿过程概况为地幔岩浆与地壳发生混染作用,在深部就发生熔离和部分结晶作用,使母岩浆分离成不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几个部分,然后对现存空间一次或多次上侵-贯入成矿(汤中立等, 1991),形成以致密块状、角砾状矿石为主的硫化物矿床。该类型矿床规模大、品位高,如白马寨铜镍矿、金宝山铂钯矿伴生镍、钴。第二类型为原地熔离分异型,该类型成矿过程为岩浆侵入,岩、矿浆就地分异,铜、镍矿富集成矿。该类型矿床品位一般较低,规模较小,如新安里铜镍矿、牛栏冲铜镍矿、营盘街镍矿等。

本文选取白马寨镍矿床,对岩浆型镍矿地质特征进行简述。矿区位于哀牢山断裂与藤条河断裂之间,区内已发现十余个基性-超基性岩体,岩体侵入及其形态明显受北东向、北西向断裂构造和地层褶皱构造的控制,其中I、II、III号岩体规模较大,含矿性较好,尤其是III号岩体含矿性最好、矿体规模最大(图 4),显示具有“小岩体成大矿”的特征。III号岩体长仅 190 m,厚 47 m,倾向延伸 530 m,岩体自中心向外可划分为橄榄岩、橄辉岩、辉石岩、辉长岩 4 个明显的岩相带,核心部位被块状硫化物矿体占据,构成中心环带结构。围岩普遍发生角岩化,岩体与砂岩接触时,出现花斑角岩或长英角岩,与板岩接触时出现硅化板岩。

矿体主要产于岩体内部,I、II、III号岩体中共圈

定 11 个矿体,以 1、2、10 号矿体规模最大。其中 1 号矿体为矿区主要矿体,该矿体赋存于III号岩体中,产状与岩体基本相同,为块状富硫化矿,其主体部分围岩为橄榄岩,向深部则斜穿入橄榄岩、辉石岩和辉长岩相带中,块状矿石普遍具条带状、似眼球状及片麻状压碎构造,矿体边部常有极薄的、具有流动构造的角砾状矿石,具典型的后期矿浆贯入成因矿体特征。控制走向长 425 m,宽 40~72 m,平均 51 m,厚度 0.7~21 m,平均 9.3 m, Ni 品位 2.05%~4.85%,平均品位 3.88%。矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿,次为黄铁矿、镍辉钴矿等。矿石具块状、细脉状、浸染状等。镍主要呈硫化镍赋存在镍黄铁矿和磁黄铁矿中,少量赋存于镍辉钴矿、硫铋镍矿、紫硫镍铁矿等矿物中。

石贵勇等(2006)测得镍铜硫化物矿石 Re-Os 等时线年龄(259±18) Ma,王登红等(2007)测得镍铜硫化物矿石 Re-Os 等时线年龄(249±32) Ma,王焰(2008)研究认为白马寨岩体均有类似峨眉山苦橄岩的成分。结合成矿地质背景,认为成矿时代为晚二叠世。

白马寨铜镍矿床的岩相分带环带状结构、矿石结构构造特征,具有明显的成因指示意义。铜镍矿的成矿作用过程可表述为:来自地幔的、富有动力的岩浆,在深部岩浆房就已发生岩、矿浆的熔离分异,产生比重差异显著的岩浆、含矿岩浆和富矿熔浆分层熔融体。由于比重的显著差异,在构造-岩浆活动作用过程中,处于岩浆房上部的、比重较小的岩浆首先沿构造通道上侵就位。之后,则是含矿

表 2 云南省与镍、钴矿床相关的矿床成矿系列  
Table 2 Metallogenic series of deposits related to nickel and cobalt deposits in Yunnan Province

成矿系列	成矿亚系列	代表矿床
扬子陆块与晋宁期岩浆作用有关铜、铁、钴矿床成矿系列	扬子陆块与晋宁期海相火山作用有关铜、铁、钴矿床成矿亚系列	大红山铁铜矿
扬子陆块与晋宁期变质作用有关铜、铁、钴矿床成矿系列	康滇基底断隆带与晋宁期受变质作用有关铜、铁、钴矿床成矿系列	万宝厂钴铜矿
康滇地轴及扬子西缘与峨眉地幔柱有关的铁、钒、钛、铜、镍、铂族金沙、蛇纹石、石棉矿床成矿系列	大理—弥渡—金平与铁质基性-超基性岩有关的铜、镍、铂族金属、钴矿床成矿亚系列	金宝山铂钯矿、白马寨铜镍矿
	会理—元谋与铁质基性-超基性岩有关的铜、镍、铂族金属、钴矿床成矿亚系列	朱布铂钯矿
	富宁地区与铁质基性-超基性岩有关的铜、镍、铂族金属、钴矿床成矿亚系列	尾铜铜镍矿
扬子陆块与喜马拉雅期表生作用有关钴矿床成矿系列	滇东北与峨眉山玄武岩有关的钴矿床成矿亚系列	铁池坪子钴土矿
	康滇基底断隆带与昆阳群风化壳有关的钴矿床成矿亚系列	老厂钴铜矿
羌塘—三江造山带与喜马拉雅期表生作用有关镍、金、钴矿床成矿系列	墨江地区与基性-超基性岩风化壳有关的镍、钴矿床成矿亚系列	墨江金厂—元江安定镍矿
羌塘—三江造山带与喜马拉雅期热液作用有关铜、钴矿床成矿系列	昌都—兰坪—思茅地块与喜马拉雅期中-低温热液作用有关铜、钴矿床成矿亚系列	厂街钴铜矿
冈底斯—喜马拉雅造山带与印支期岩浆作用有关镍、铜矿床成矿系列	保山地区与印支期基性-超基性岩有关的镍、铜成矿亚系列	大雪山镍铜矿

岩浆侵入、叠加，并在岩浆初步就位后进一步地产生岩浆分异，形成具海绵陨铁结构的矿体。与此同时，处于岩浆房最底部的富矿熔浆沿岩浆通道贯入侵入体尚未冷凝的核心部占位成矿；侵位后残余的矿浆和由含矿岩浆原地分异析出的矿浆，最后沿岩体边缘或岩体冷凝裂隙贯入、充填，形成致密块状、角砾状的脉状矿体，使矿体形态、矿石构造复杂化(徐金祥等, 2013)。

2.2 风化型矿床成矿作用

云南省风化型镍矿床赋矿层位相对单一，仅赋存在华力西期—印支期的基性-超基性岩风化壳内，岩石蛇纹岩化强烈，矿体主要赋存在风化壳的蛇纹岩残余构造层、绿高岭石化蛇纹岩层中。风化型钴矿除伴生赋存在风化型镍矿床中，还赋存于峨眉山玄武岩的风化壳以及昆阳群落雪组泥质白云岩风化壳中。云南省风化型镍、钴矿床的形成需具备富含

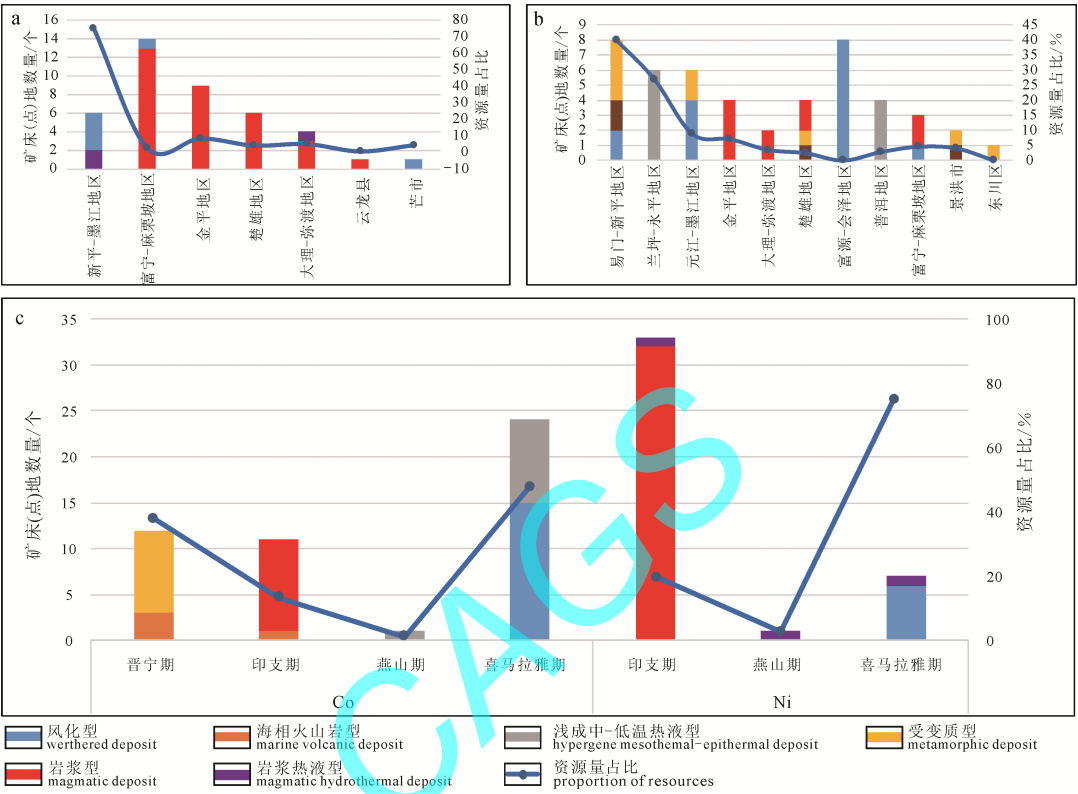


图 3 云南省镍矿(a)、钴矿(b)空间分布统计图及钴、镍矿时间分布统计图(c)  
Fig. 3 Spatial distribution of nickel ore (a) and nickel ore (b), and the statistical chart of time distribution of nickel and cobalt deposits (c) in Yunnan Province

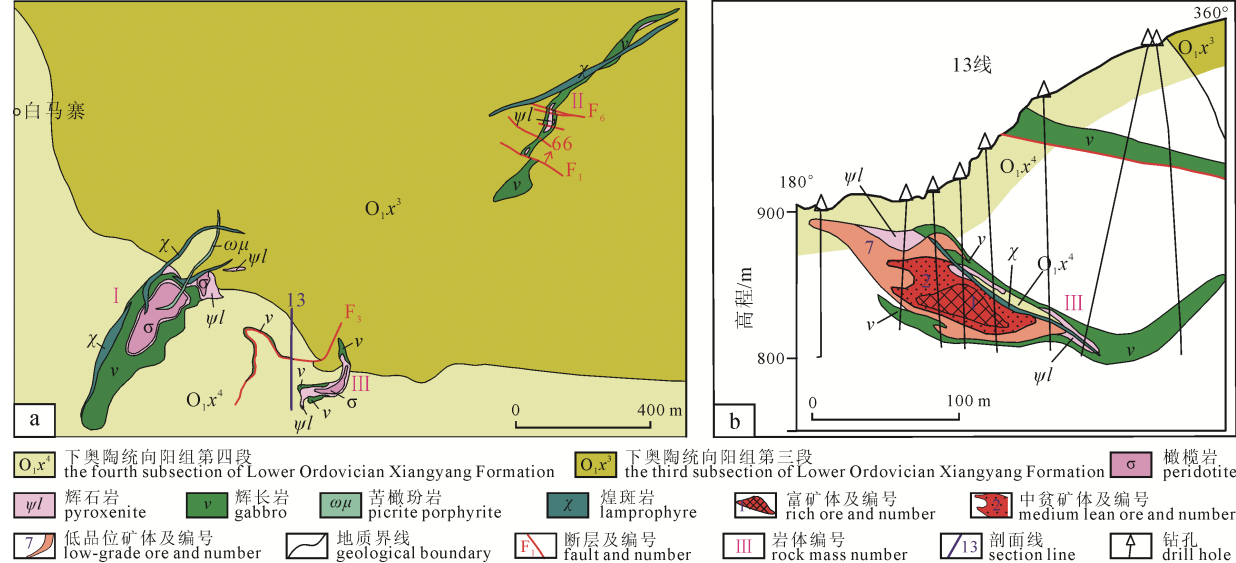


图 4 白马寨镍矿地质简图(a)和 13 号勘探线剖面图(b) (据云南省有色地质局三〇八队, 2010 修改)  
Fig. 4 Geologic map of baimazhai (a) and profile of exploration line 13 (b)  
(modified from 308 Team of Yunnan Nonferrous Geological Bureau, 2010)

镍、钴的成矿母岩大面积出露, 岩石节理裂隙发育以及强烈的风化作用, 有利于形成含矿风化壳, 还需具有低洼平坦的地形条件, 且风化壳上覆盖层封盖较好的地段, 有利于风化壳的保存。

云南省易门—新平—墨江一带是风化型镍、钴矿床最重要的地区, 该区域内已查明矿床较多, 且规模较大, 区内已有 1 处大型镍矿床(金厂—安定镍矿), 3 处中型镍矿床(白蜡度、咪哩、米底)及 1 处小型单一的钴矿床(易门老厂)。本文选取金厂—安定镍矿, 对风化型镍、钴矿成矿作用进行简述。

矿区内出露地层主要为中一下志留系、上三叠统一碗水组、第四系。区内岩浆岩以超基性岩为主, 另有极少量辉长岩、辉绿岩岩脉, 超基性岩体呈不对称的岩盖产出, 是区内风化型矿体的成矿母岩, 岩性主要为斜辉辉橄岩、次为纯橄岩、二辉辉橄岩及橄榄岩(图 5)。区内超基性岩受自变质作用和后期热液蚀变作用, 蛇纹石化强烈, 变成了蛇纹岩。谢桂青等(2001)测得岩体中得蛇纹石岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $(302 \pm 7.3)$  Ma, Sm-Nd 等时线年龄为  $(304 \pm 16)$  Ma, 认为其形成于晚石炭世—早二叠世。

矿区内风化壳发育和保存良好, 总体呈面型毯状盖在蛇纹岩岩体之上, 随岩体形态变化而起伏, 风化壳的厚度受所处地形条件、地貌特征、覆盖层及经受冲刷强弱情况的影响。在垂向上, 风化

壳划分 6 层, 自上而下为残破积黏土层、赭土层、蛇纹岩残余构造层、绿高岭石化蛇纹岩层、淋漓蛇纹岩层、原生蛇纹岩层。矿体主要产于蛇纹岩残余构造层、绿高岭石化蛇纹岩层。蛇纹岩残余构造层分布广泛, 呈松散土状, 保有蛇纹岩的残余结构, 厚度 0~26 m, 一般 2~6 m, Ni 品位 0.4%~1.8%, Co 品位 0.04%~0.1%; 绿高岭石化蛇纹岩层呈粒状及块状, 易破碎, 次层分布最广、最稳定, 厚度亦大, 一般 6~10 m, 最大 35 m, Ni 品位 0.5%~1.6%, 上部较下部富。矿体形状与风化壳形状吻合, 矿带断续长 20.8 km, 宽 500~1 700 m, 较大的 4 个矿体(J-V、J-IV、A-III、A-I)长 1 200~2 500 m, 宽 700~900 m, 平均厚度 6.0~10.2 m。矿石矿物组合主要为蛇纹石、绿高岭石、铁(锰)氧化物、镍绿泥石、暗镍蛇纹石、蛋白石和石髓组成, 主要含镍矿物为绿高岭石、暗镍蛇纹石、铁(锰)氧化物、镍绿泥石。矿石中 Ni、Co 主要呈类质同象分散于铁镁硅酸盐矿物中, 部分呈吸附状态赋存于铁(锰)氧化物中, 陈百友等(2013)物相分析结果显示, 矿石中硅酸镍和氧化镍含 Ni 占 99.9%。

矿区气候温湿, 降雨量比较集中, 超基性岩体出露面积大, 地形较平缓, 岩石节理裂隙发育, 有利于化学风化作用, 具备形成风化壳的良好条件。区内随深大断裂侵入的超基性岩体(成矿母岩),

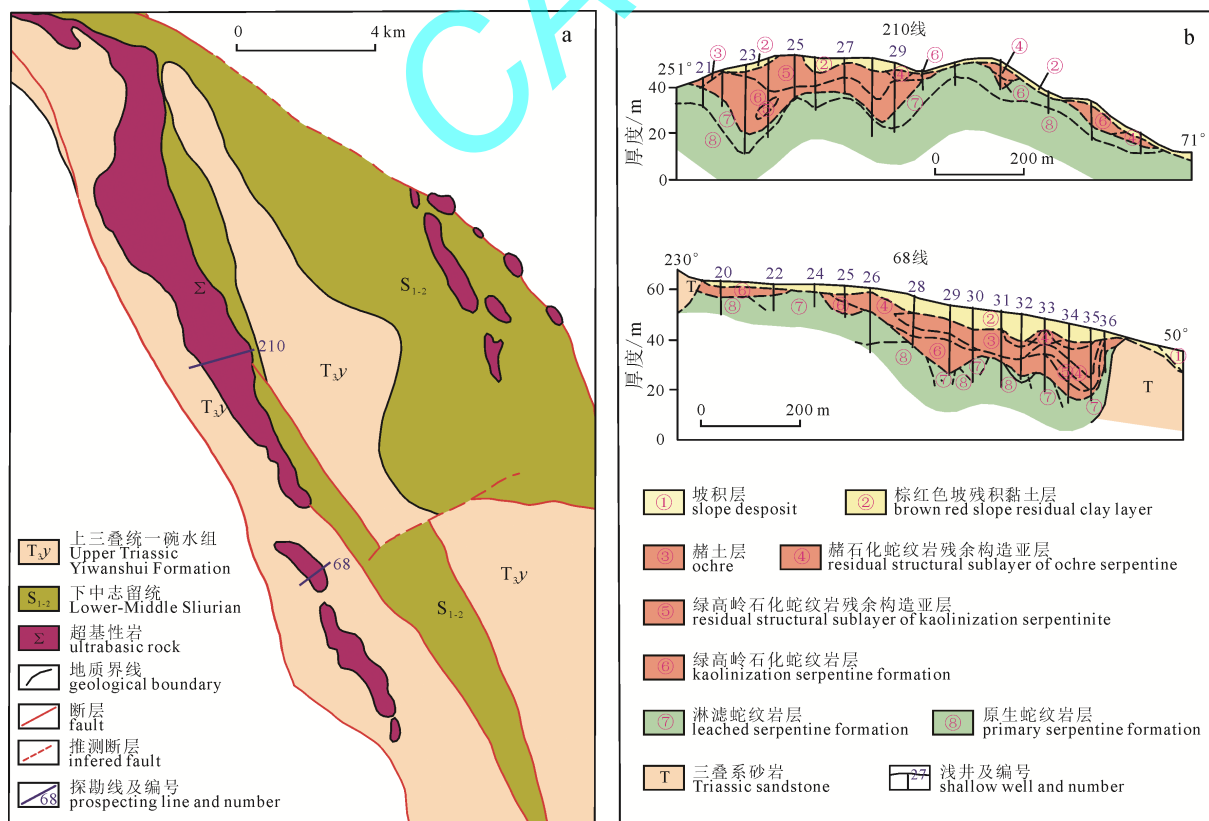


图 5 金厂—安定风化型镍矿地质简图(a)和勘探线剖面图(b)(据云南省地质厅墨江地质队, 1959 修改)  
Fig. 5 Geological schematic map of Jinchang-Aiding weathering type nickel ore(a), Exploration line profile(b) (modified from Mojiang Geological Team, Department of Geology, Yunnan Province, 1959)



在地表环境下,经风化及地下水淋滤作用,镍随硅酸盐矿物的分解,形成含镍水溶液向下渗透,当渗透至高岭石化蛇纹岩层时,由于水溶液 pH 值增高,镍就停积下来,所以在岩体风化壳中部含镍高。经过高岭石化蛇纹岩层后,向下至蛇纹岩层,则有暗镍蛇纹石、镍绿泥石、镍绢石、镍石棉等次生镍硅酸盐矿物形成,局部富集。岩体中风化分解出来的钴呈氧化物或氢氧化物混杂在一起,多富集在岩体顶部和上部风化壳中(刘洪滔等, 2021)。

### 2.3 中-低温热液型矿床成矿作用

全省以钴为主矿种的中-低温热液型矿床仅 1 个小型(永平厂街钴铜矿)及 1 个矿点,其余均为共生,钴矿累计查明资源量占全省的 28.52%,是云南省钴矿的重要类型。该类型矿床主要分布在兰坪—永平地区及普洱地区,大地构造位置属于羌塘—三江造山系的昌都—兰坪—思茅地块,对成矿起主导作用的是构造因素。矿床沿区域性大断裂成带分布,矿体严格受北西向构造控制,并直接充填于构造破碎带中,尤其赋存于大断裂带的次级构造破碎带中。围岩蚀变亦受构造控制,褪色现象广泛,其他蚀变多分布于褪色蚀变带之中。故破碎带内出现复杂的多种重叠的蚀变。赋矿层位主要为侏罗系坝注路组及下白垩统景星组一段,少量分布在侏罗系花开左组,赋矿岩性主要为碎屑岩,矿体多呈脉状、透镜状,与铜矿共生。

本文以永平厂街钴铜矿对该类型矿床成矿作用进行简述。

永平厂街钴铜矿区出露地层主要为中侏罗统花开左组、上侏罗统坝注路组和第四系。矿区内构

造发育,主要有北西向和北东向两组断裂,以北西向的  $F_9$ 、 $F_{111}$  区域性断层将矿区分为  $F_9$  以东的单斜构造、 $F_9$  与  $F_{111}$  之间的地堑式构造及  $F_{111}$  以西的弥勒山挠曲 3 个部分。弥勒山挠曲中构造破碎带十分发育,大多数矿体直接充填于北西向  $F_9$ 、 $F_{111}$  断裂的次级断裂以及褶皱引起的层间破碎带中。区内围岩蚀变主要有硅化、菱铁矿化、黄铁矿化、重晶石化、褪色等(图 6)。

矿区共圈定 56 条矿体,矿体呈脉状、透镜状、扁豆状、串珠状、囊状,在构造复合部位,常呈囊状厚大矿体,主矿体为  $V_{11}$ ,为隐伏矿体,赋存于  $F_{111}$  断层以南的坝注路组下段砂质泥岩中,呈透镜状、囊状,受 11 号破碎带控制,展布方向与破碎带一致,走向  $305^\circ$ ,倾向各段略有不同,矿体长 560 m,倾斜延伸 300 m,厚度 0.66~36 m,平均 5.54 m,Co 平均品位 0.08%,Cu 平均品位 1.37%。钴矿物组合有钴毒砂、含钴毒砂、钴黄铁矿、含钴黄铁矿、铁硫砷钴矿、辉砷镍钴矿、辉钴矿等,铜矿物组合有砷黝铜矿、黄铜矿、铜蓝、孔雀石等。矿石结构比较复杂,构造主要有角砾状、块状、粉末状、网脉状及浸染状。钴赋存状态有两种,一是分散状的钴,主要呈钴化物分布于黄铁矿、白铁矿、含钴黄铁矿、毒砂及含钴毒砂中,二是独立钴矿物,有钴黄铁矿、钴毒砂、铁硫砷钴矿、辉砷镍钴矿及辉钴矿。

前人对厂街—水泄铜钴矿流体包裹体测试,得出成矿流体为中低温(以中温为主),中等盐度、中等密度的流体,成矿压力较低,成矿深度较浅,成矿过程可能发生在压力较小的近地表或裂隙中(李峰等, 1994; 彭关灵, 2015; 苏岩, 2020)。据单矿物

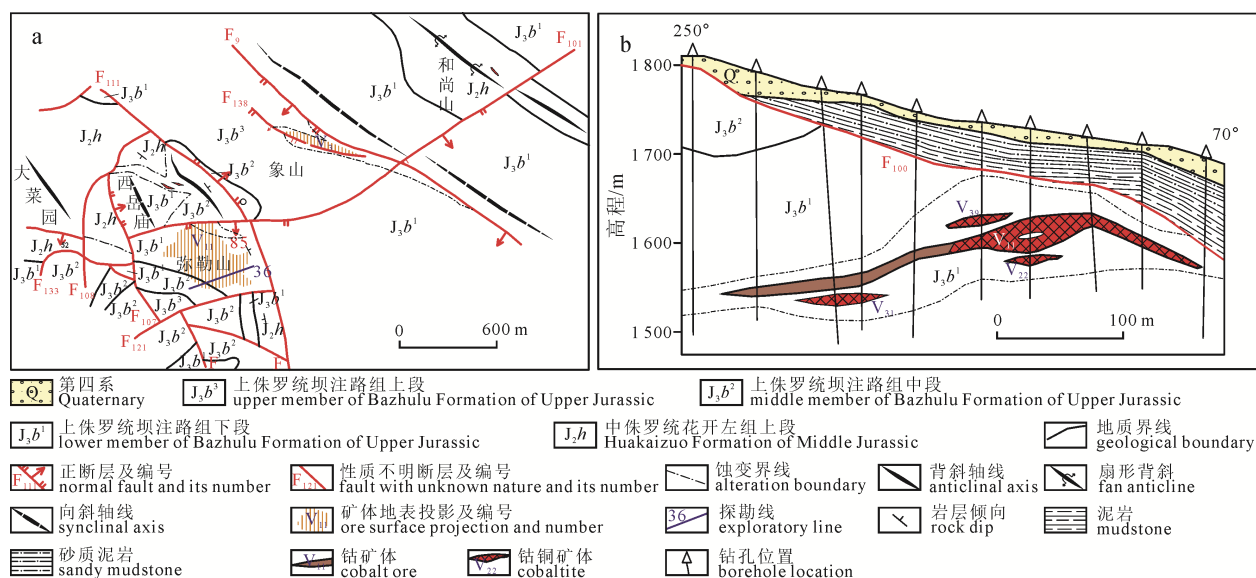


图 6 厂街钴铜矿地质简图(a)和 36 号勘探线剖面图(b)

(据地质矿产部“三江”专著编辑委员会, 1984 和杨兴裕, 1982 修改)

Fig. 6 Changjie cobalt copper geological map (a) and profile of exploration line 36 (b)

(modified from “Sanjiang” Monograph of Ministry of Geology and Mineral Resources, 1984 and YANG, 1982)



爆裂法测定结果, 含矿热液温度大于 307 °C, 钴矿化阶段为 310~370 °C, 铜矿化阶段为 265~295 °C, 脉状及细脉状铜矿生成温度为 150~165 °C, 黄铁矿阶段温度为 365 °C 以上。

在燕山晚期—喜马拉雅早—中期强烈的挤压造山运动和块体挤离的走滑拉张构造运动, 为热液的迁移和富集提供了通道和空间, 故造就了矿床严格受构造控制的特点。成矿过程可分为热液成矿期和表生作用期, 其中根据矿物生成温度的不同将热液成矿期分为 3 个阶段, 一是黄铁矿阶段, 含矿热液沿主逆冲断裂向上迁移过程中, 硫与铁形成晶型较好的黄铁矿, 剩余的硫扩散到围岩中, 与围岩中的铁结合形成散点状的黄铁矿; 二是钴矿化阶段, 热液中的钴、砷、硫等成矿物质, 交代溶蚀早期黄铁矿, 形成一系列含钴矿物和钴的化合物; 三是铜矿化阶段, 该阶段是钴矿化阶段的延续, 随热液温度的降低, 溶液中剩余的硫与铜结合, 交代溶蚀前两阶段形成的矿物, 生成黝铜矿、黄铜矿。

#### 2.4 受变质型矿床成矿作用

受变质型是云南省铜矿的重要矿床类型之一, 钴矿作为受变质型铜矿的共、伴生矿产, 主要分布在易门—元江地区。矿体主要赋存在落雪组黑色碳硅质白云岩(相变黑色层)、因民组富含凝灰岩等的杂色层中, 薛步高(1996)对易门东矿带 66 件落雪组白云岩测试平均含  $\text{Co } 12 \times 10^{-6}$ , 对易门西矿带 272 件落雪组黑色碳硅质白云岩测试平均含  $\text{Co } 28 \times 10^{-6}$ , 认为其赋矿围岩多数本身就是含钴的高值岩层。

全省受变质型钴矿的成矿过程研究较少, 但受变质型铜矿研究程度较高, 结合区域上该类型铜矿的成矿过程, 该类型矿床的成矿过程可分为同生沉积成矿阶段以及后期热液叠加的变质改造再富集成矿阶段。早期中元古代海底火山活动的喷溢或喷发释放出的大量高温气液加上海洋下渗的深循环水构成环流体系, 循环热液喷出海底提供的成矿物质, 通过物理化学作用形成同生沉积层, 该过程使因民组、落雪组成为含钴的高值岩层。在矿质沉积之后, 发生了区域变质作用, 含矿层和地层发生了同步褶皱, 出现了大量矿体, 钴矿体或铜钴矿体常在主体铜矿体上下盘或其一侧产出。薛步高(1996)提出仅有因民—落雪期主铜矿成矿期形成的黄铜矿与黄铁矿富集, 不能形成钴的工业富集, 需叠加矿化期(晋宁期及印支期—燕山期)才能形成工业矿床, 郭玉乾(2019)也提出铜钴多金属矿具有多期多阶段成矿作用过程, 钴具有独立成矿过程和铜钴叠加成矿作用过程。

目前该类型铜矿普遍具有钴矿化显示, 但钴矿

床的成矿机制研究还相对较少, 需进一步加强研究, 后期勘查需加强综合评价工作。

#### 2.5 海相火山岩型矿床成矿作用

海相火山岩型铜铁矿床共伴生钴矿在省内分布较少, 目前仅有 4 处, 但该类型已查明资源量占全省钴矿资源量的 31.52%, 除景洪三达山铜钴矿中钴为共生矿产, 其余矿床都为伴生矿产。海相火山岩型铜铁矿床是云南省内铜矿的主要矿产类型之一, 分布较广, 目前对于海相火山岩型铜铁矿床研究相对较高, 但都集中于主矿种铜、铁, 对伴生钴的物质来源, 成因等还缺少研究。该类型伴生钴矿的矿床少, 但资源量大, 对该类型钴矿的富集成矿机理研究亟待加强。

矿体主要赋存中元古代昆阳群、大红山岩群以及三叠系小定西组中, 矿体一般可分为铁矿体和铜矿体两大类, 钴一般伴生于含铁铜矿体内, 矿物组合主要以黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、菱铁矿为主, 极少有辉钼矿、辉铜矿、辉钴矿等, 钴多以类质同象的形式分布于黄铜矿中, 独立钴矿物相对较少, 矿化蚀变主要有黄铁矿化、硅化、绢云母化、碳酸盐化。

#### 2.6 岩浆热液型矿床成矿作用

岩浆热液型镍矿床在省内发育较少, 目前已知的仅有墨江金厂金镍矿(小型)、团田铜镍矿(矿点)及朵谷老银厂镍铜矿(矿点)。成矿元素主要为金、铜、镍。该类型矿床仅墨江金厂金镍矿床有一定研究, 墨江金厂金镍矿床围岩蚀变常为蛇纹石化、滑石化、黏土化、碳酸盐化等, 镍矿体中矿物组合为辉砷镍矿、锑硫镍矿、黄铁矿等, 前人将墨江金厂金镍矿床与国内外热液镍矿床的构造背景、成矿时代、矿床地质-地球化学特征、成矿条件等进行了对比, 提出金厂金镍矿床是燕山期中酸性岩浆侵入交代金厂超基性岩形成, 矿床是岩浆热液远端系统的产物(熊伊曲, 2014; 周凯等, 2020)。

### 3 镍、钴矿找矿方向

云南省 2021 年开展矿产资源国情调查项目, 并对镍、钴矿进行了潜在矿产资源评价工作(云南省地质调查局, 2022a, b), 以成矿系列理论为指导, 运用矿床模型综合地质信息预测方法, 在典型矿床研究基础上, 建立找矿预测模型, 利用地、物、化、遥等找矿信息, 根据相似类比理论, 圈定预测区, 估算预测资源量。本次潜力评价工作建立了 9 种矿床式找矿预测模型, 圈定 83 处最小预测区, 预测镍潜在资源超 60 万 t, 钴潜在资源超 30 万 t。本文在云南省钴、镍矿潜力评价成果的基础上, 结合钴、镍矿成矿规律, 圈定了 8 处找矿远景区(图 7)。

3.1 易门—元江钴矿找矿远景区

远景区大地构造位于扬子陆块(VI), 西部位于楚雄陆内盆地(VI-2-12), 东部位于康滇基底断隆带(VI-2-11), 区内矿床类型主要为受变质型、海相火山岩型和风化型(图 8a)。

楚雄陆内盆地: 大红山岩群富铁铜基性火山岩建造呈基底隆起出露, 矿床类型为海相火山岩型铜铁矿床, 钴矿作为伴生矿产, 钴主要赋存在含铁铜矿石中, 区内除大红山大型铜铁矿床外, 还有底巴都、横里等多个铜(铁)矿床(点), 云南省潜力评价在该区提出了红山、东么、底巴都等 9 处铁、铜矿预测区, 均具有寻找大、中型铜(铁)矿床的前景。钴矿作为该类型矿床的伴生矿产, 亦有很好的找矿前景。

康滇基底断隆带: 有受变质型和风化型两种矿床类型, 赋矿层位主要为昆阳群因民组、落雪组和鹅头厂组, 风化型为原生受变质型经地表风化作用形成。该区域内因民、落雪组钴元素丰度值较高。区内构造复杂, 主要构造为北北东向的褶皱和断层被北西至北北西向断裂切割, 导致昆阳群遭受多期不同方向的挤压, 形成复杂的叠加褶皱、重褶曲等复杂的褶皱现象, 区内多种构造相互叠加、改造对铜钴矿的分布具有明显控制, 构造交汇部位是重要的找矿部位。区内航磁异常为东西向两正、两负配套磁异常, 发育有 Cu、Co 化探异常, 异常与已知矿床套合较好。

远景区内已查明资源量达中型钴矿床 1 处, 小型钴矿床 8 个, 据云南省钴矿潜力评价估算, 该区钴矿资源潜力超 8 万 t。

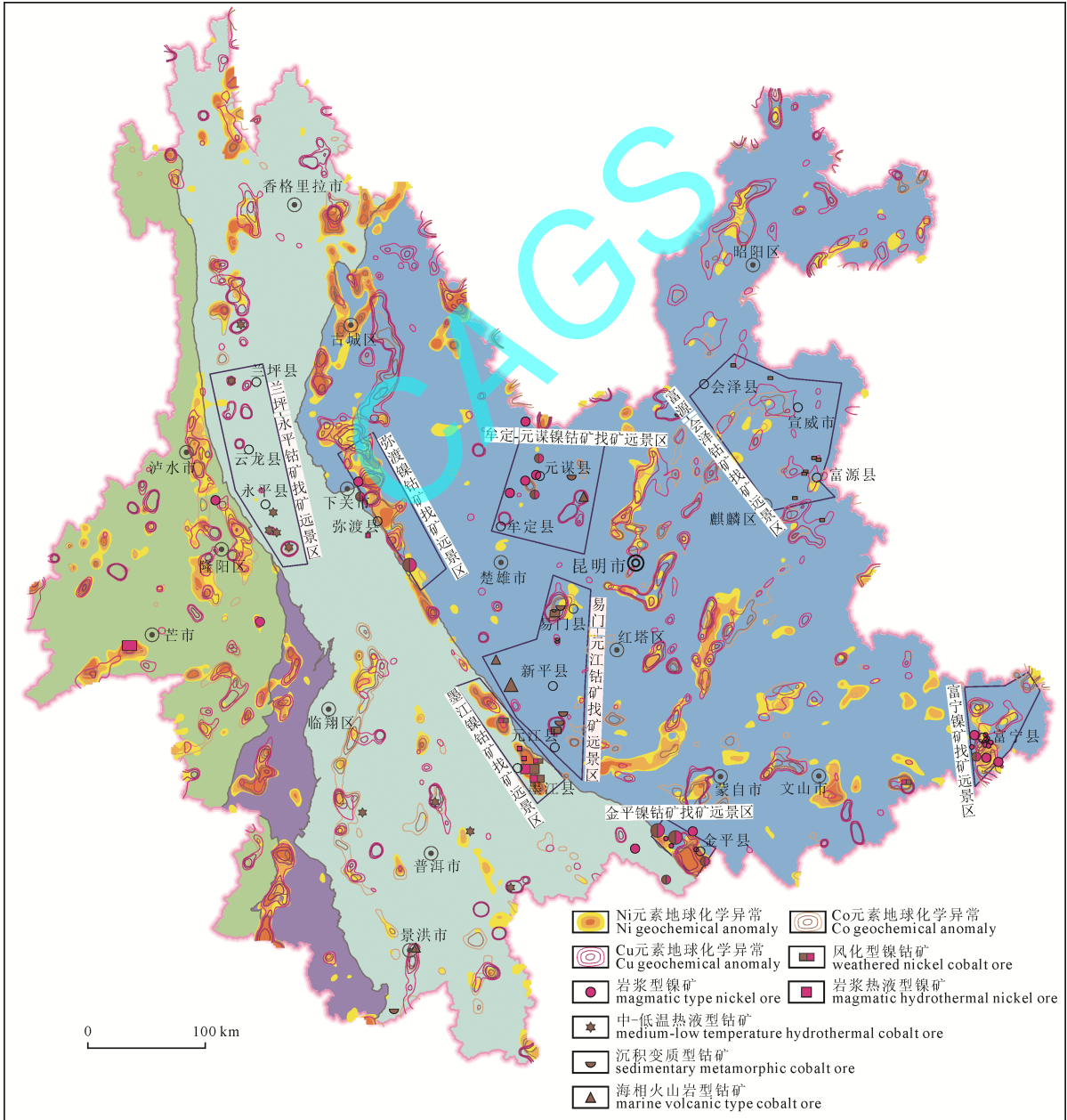


图 7 云南省镍钴矿找矿远景区分布图

Fig. 7 Distribution map of nickel cobalt prospecting prospect in Yunnan Province



### 3.2 墨江镍钴找矿远景区

远景区大地构造位于羌塘—三江造山带(VII), 是云南省重要的镍矿矿集区(图 8a)。区内存在风化型和岩浆热液型两种矿床类型, 风化型分布范围广, 规模大, 为该区的主要矿床类型; 岩浆热液型主要分布于金厂超基性岩体的构造破碎带中。

调查区内岩浆活动强烈, 超基性岩分布广泛, 成矿母岩属哀牢山超基性岩带的一部分, 岩体主要为斜辉辉橄岩, 次为辉石橄榄岩、纯橄岩、二辉辉橄岩及橄辉岩, 岩石蚀变强烈普遍蛇纹石化。区内气候温湿, 降雨量比较集中, 地形较平缓, 岩石节理裂隙发育, 有利于化学风化作用。区内 Ni、Co 水系沉积物组合异常发育, 呈北西向串珠状密集分

布, 异常强度高, 套合好。

区内已查明超大型镍矿床 1 个, 中型镍矿床 3 个, 另有多个镍矿(化)点。通过地质、矿产、化探等信息反映, 据潜力评价成果, 该区预测 2 000 m 以浅岩浆热液型镍矿资源潜力超 8 万 t、钴矿超 4 千 t, 风化型镍矿资源潜力超 24 万 t、钴矿近 9 千 t, 区内具有较大的镍(钴)矿找矿潜力。

### 3.3 兰坪—永平钴找矿远景区

远景区位于羌塘—三江造山带(VII)的昌都—兰坪—思茅地块(VII-5), 区内主要矿床类型为中-低温热液型矿床, 区内经历了晚古生代俯冲造山、中生代碰撞造山及构造反向、新生代陆内走滑等多个构造运动阶段, 地质构造复杂, 断裂、

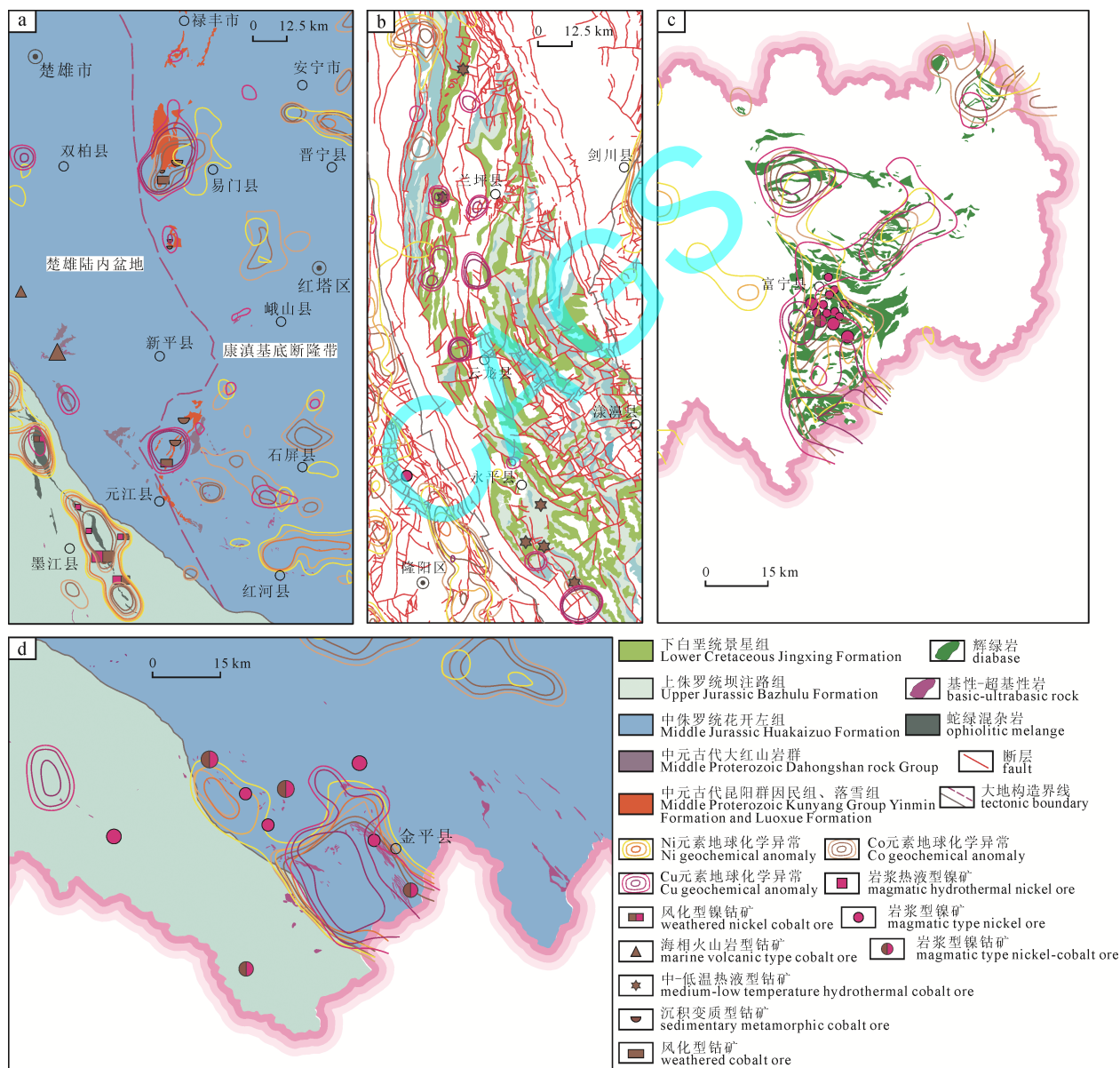


图 8 易门—元江钴找矿远景区及墨江镍钴找矿远景区(a)、兰坪—永平钴找矿远景区(b)、富宁镍找矿远景区(c)和金平找矿远景区(d)

Fig. 8 Yimen-Yuanjiang cobalt prospecting prospect area and Mojiang nickel (a), Lanping-Yongping cobalt prospecting prospect area (b), Funing nickel prospecting prospect area (c), and Jinping nickel prospecting prospect area (d)

褶皱构造发育,为中-低温热液型矿床提供了良好的成矿环境。

远景区内铜地球化学异常发育,整体呈南北走向,已查明中-低温热液型铜矿 20 余处,另有铜(钴)矿(化)点数十处,查明钴资源量超 7 千 t, 潜力评价预测该区钴矿资源潜力超 13 万 t。区内钴矿主要是以共、伴生矿产的形式赋存于铜矿中,大多数铜矿未对伴生钴进行评价,需加强中-低温热液型铜矿中伴生钴的综合评价工作。

### 3.4 牟定—元谋镍钴找矿远景区

远景区大地构造位于扬子陆块(VI),地处元谋—绿汁江断裂东侧,区内岩体属元谋构造岩浆岩带,区内镍(钴)矿主要以共、伴生矿产的形式产于铂钯矿中。

调查区内地层可分为基底和盖层,基底由远古界普登岩群和中元古界直林岩群变质岩组成,盖层主要为中—新生代红层。区内岩浆活动较为剧烈,吕梁、晋宁、华力西、印支、燕山、喜山期均有,时期以华力西期为主,次为加里东期及印支—燕山期,岩性从基性、超基性至酸性岩均有。基性-超基性岩严格受元谋—绿汁江控制,沿其西缘成带状展布,在空间上具有成带分布、成群出现特点,沿元谋—绿汁江断裂的次级平行断裂呈南北向展布,著名岩体有牟定碗厂、元谋朱布等。南北长 75 km, 东西宽 10~25 km, 岩体规模一般长几十至几百米,最长 1 720 m; 宽数十至 400 m, 该段岩体多具铂钯、铜镍矿化。远景区内航磁异常规模大,大于 50 nT 的异常带达 30 km, 主要由基性-超基性岩体和贫磁铁矿引起。区内已圈定 5 个 Cu、Ni、Co 等多元素水系沉积物异常,异常呈北北东向带状分布,呈串珠状,异常与超基性岩体吻合。

调查区已评价铂钯矿大型 1 个(安益),中型 2 个(朱布、热水塘),小型 3 个(猛林沟、碗厂、珙山箐),矿(化)点多个。已查明铂族金属资源量超 11 t, 伴生镍资源量近 3 万 t, 潜力评价预测该区铂族金属资源潜力超 40 t, 虽然该区基性-超基性岩具有富铂钯贫镍铜的特征,但该区仍具有良好的找镍潜力。

### 3.5 弥渡镍钴找矿远景区

远景区大地构造位于扬子陆块(VI)、楚雄陆内盆地(VI-2-12),区内矿床类型为岩浆型铂钯伴生镍、钴矿床。远景区地处金沙江—红河大断裂带上,构造复杂,区内出露岩浆岩规模不大,但种类繁多,明显受构造控制,以基性岩为主,超基性岩次之。基性岩分为两期,第一期为华力西期,第二期为印支晚期—燕山期,区内有规模的超基性岩体有十余

个,岩性以单辉橄榄岩为主,约占岩体的 86%。

调查区航磁资料显示,剩余异常值 71~1 076 nT, 面积大,推测有马街、金宝山—上村、多依厂新村 3 个隐伏基性-超基性岩体; 1:20 万水系沉积物测量显示,区内有多个 Au、Ag、As、Bi、Cu、Mo、Pb、Zn、Ni、Co、PGE 异常,元素组合较全,套合好,规模大,强度高,具有明显的浓集中心,已知矿床与异常吻合。

远景区已发现金宝山大型铂钯(铜镍钴)矿床以及大理迎风坝、荒草坝 2 个小型矿床,查明铂族金属资源量超 12 t, 镍资源量超 3 万 t。据潜力评价成果,该区预测岩浆型镍矿资源潜力超 2 万 t, 具有寻找伴生镍、钴的铂钯矿床的良好条件。

### 3.6 金平镍钴找矿远景区

远景区大地位置主要位于扬子陆块(VI),矿床类型为岩浆型镍铜(钴)矿床(图 8d)。

区内岩浆活动复杂而强烈,喷出岩主要为峨眉山玄武岩,侵入岩为印支期超基性-基性岩,燕山期花岗岩和喜马拉雅期花岗斑岩及石英正长斑岩等。区内基性-超基性岩浆分异程度高,岩相齐全,基性-超基性岩体以藤条河断裂为界分属两个岩带,金平岩带位于藤条河断裂东侧,约有 200 个岩体,部分岩体呈对称带状或同心环带构造,外环为辉长岩,中心为辉石岩或橄榄岩,带内镍、铜矿化普遍;藤条河断裂西侧为哀牢山岩带南沿部分,以超基性岩体为主,出露较少,规模较小,岩性主要为辉长岩-辉橄岩组合。

远景区已发现白马寨、新安里 2 个中型矿床及多个小型矿床,查明镍资源量近 6 万 t, 伴生钴近 2 千 t, 据潜力评价成果,该区预测岩浆型镍矿资源潜力超 18 万 t, 钴矿资源潜力超 1 万 t, 是寻找岩浆型镍(钴)矿床的有利地区。

### 3.7 富宁镍矿找矿远景区

远景区位于扬子陆块(VI)内,沿富宁断裂展布,区内矿床类型为岩浆型(图 8c),出露地层主要为上古生界碳酸盐岩建造及中生界三叠系砂泥质复理石建造。区内构造方向近东西向、北西向,褶皱、断裂发育,褶皱常被断裂破坏。火山岩为晚二叠世早期海相喷发玄武岩,岩浆侵入活动主要分为两期,第一期为中三叠世碱性基性侵入岩和喷出岩,第二期为中三叠世基性侵入岩,第二期与镍铜矿成矿有关,受富宁断裂、董堡—那桑圩断裂等北西向断裂控制,产出岩体 19 个,多呈岩床、岩墙、岩脉成群产出,岩体具有明显的分异现象,一般自岩体边缘至中心可以分成辉绿岩相、中-细粒橄榄辉长苏长岩相、中粒辉长苏长岩相、中粒闪长岩相 4 个相带,一



般岩体分异越好成矿越有利,矿化主要集中在中-细粒橄榄辉长苏长岩相。

区内分布有多个航磁 $\Delta T$ 异常,幅值2~1 076 nT,推测有隐伏-半隐伏基性岩体(云南省地质调查局,2012)。区内还具有Cu、Ni、Co化学异常,异常套合较好,具有明显的浓集中心,异常分布与辉绿岩分布相对应。

远景区内已查明小型镍矿床5个,另有多个镍矿化点,查明镍资源量7千多t,潜力评价预测岩浆型镍矿资源潜力超5万t,是寻找基性-超基性岩中岩浆型镍矿床的有利地区。

### 3.8 富源—会泽钴矿找矿远景区

该远景区位于扬子陆块(VI)内,区内发育有大量的二叠纪峨眉山玄武岩,并已发现多处矿点,目前已知矿点主要集中在富源地区,位于天生桥—马路断裂与弥勒—师宗断裂之间,矿体产于下二叠统阳新组顶部硅质岩及二叠纪峨眉山玄武岩风化壳中,区内有较好的钴地球化学异常。该区钴成矿与玄武岩风化作用关系密切,由于断裂构造带富集岩石破碎,易于风化,故玄武岩风化作用强烈,使其中含矿物质经次生淋滤作用迁移至低洼处富集成矿,因此该区内玄武岩风化地区,特别是构造带附近是寻找风化型钴矿的有利地区。

远景区内已发现多处钴矿化点,但还未对区内资源量进行评价,据潜力评价成果,该区预测风化型钴矿资源潜力超3万t,需加强区内风化型钴矿的调查评价工作。

## 4 结语

(1)云南省镍矿矿床类型可分为岩浆型、风化型和岩浆热液型,以岩浆型和风化型为主;主要分布在富宁—麻栗坡和金平地区,其次为滇中楚雄、新平—墨江地区;成矿时期主要为印支期及喜马拉雅期。钴矿矿床类型为风化型、岩浆型、中-低温热液型、受变质型和海相火山岩型,以岩浆型和中-低温热液型为主,其次为风化型和海相火山岩型;主要分布在滇中易门—新平地区,其次为滇西兰坪—永平和滇东富源地区;成矿时期主要为喜马拉雅期、晋宁期及印支期。

(2)云南省岩浆型镍钴矿与扬子陆块内的峨眉山大火成岩事件关系密切;风化型与峨眉山大火成岩及华力西期所形成的基性-超基性岩经后期风化作用相关;海相火山岩型和受变质型与中元古代海底火山活动相关,昆阳群落雪组、因民组及大红山岩群为主要的含矿层位;中-低温热液型与新生代造山活动相关,强烈的构造活动造就了矿床严格受构造控制的特点。

(3)通过潜力评价工作预测云南省镍矿资源潜力超60万t、钴矿超30万t,本次工作圈定新平—元江钴矿、新平—墨江镍钴矿、兰坪—永平钴矿、牟定—元谋镍钴矿、弥渡镍钴矿、金平镍钴矿、富宁镍矿、富源—会泽钴矿8处找矿远景区。

## Acknowledgements:

This study was supported by Department of Natural Resources of Yunnan Province (Nos. [2021]53, [2022]25, and [2023]19).

## 参考文献:

- “三江”专著编辑委员会,1984. 中华人民共和国怒江、澜沧江、金沙江区域矿产志[R]. 昆明: 云南省地质资料馆.
- 陈百友,刘洪滔,杨平,等,2013. 全球红土型镍矿床的基本成矿规律[J]. 地球学报,34(S1): 202-206.
- 陈毓川,1994. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘,1(3/4): 90-94.
- 陈毓川,1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. 地质与勘探,33(1): 21-25.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报,80(10): 1501-1508.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等,2015. 论矿床的自然分类—四论矿床的成矿系列问题[J]. 矿床地质,34(6): 1092-1106.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等,2016. 矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报,37(5): 519-527.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等,2020. 论地球系统四维成矿及矿床学研究趋势向——七论矿床的成矿系列[J]. 矿床地质,39(5): 745-753.
- 陈毓川,裴荣富,王登红,等,2022. 八论矿床的成矿系列[J]. 地质学报,96(1): 123-130.
- 程裕淇,陈毓川,赵一鸣,1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报,1(1): 32-57.
- 郭玉乾,方维萱,赵凯,2019. 云南东川铜矿田铜钴和钴矿体发现及成因意义[C]//第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集: 396-397.
- 黄晓兵,2018. 中国钴资源安全评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李峰,黄敦义,雷为民,1994. 永平水泄铜矿床地质特征及其成因[J]. 云南地质,13(4): 341-349.
- 李文渊,2022. 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破[J]. 地质力学学报,28(5): 793-820.
- 刘代福,余臻,杨金,等,2022. 云南易门万宝厂铜钴矿床控矿因素及找矿预测[J]. 现代矿业,637(5): 50-54.
- 刘洪滔,段生杰,施玉北,等,2021. 中国矿产地质志·云南卷·铜镍钴矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘金龙,李仁民,周永恒,等,2023. 镍矿床分布、成矿背景和开发现状[J]. 中国地质,50(1): 118-132.
- 娄德波,孙艳,山成栋,等,2018. 中国镍矿床地质特征与矿产预测[J]. 地学前缘,25(3): 67-81.
- 娄德波,王登红,肖克炎,等,2014. 中国镍矿预测类型及主要战略接续区[J]. 中国地质,41(03): 715-727.
- 卢宜冠,2018. 滇西金山铂钨和白马寨铜镍矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

- 墨江地质队, 1959. 云南墨江元江镍矿储量计算报告书(第一期)[R]. 昆明: 云南省地质资料馆.
- 彭关灵, 2015. 水泄铜钴多金属成矿带控矿构造特征及其控矿作用探讨[D]. 成都: 成都理工大学.
- 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 等, 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2451-2456.
- 苏岩, 2020. 滇西永平青羊厂脉状富铜矿体地球化学特征及成因探讨[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 孙涛, 王登红, 娄德波, 等, 2014a. 中国成镍带与找矿方向探讨[J]. 中国地质, 41(6): 1986-2001.
- 孙涛, 王登红, 钱壮志, 等, 2014b. 中国镍矿成矿规律初探[J]. 地质学报, 88(12): 2227-2250.
- 汤中立, 李文渊, 1991. 中国硫化镍矿床成矿规律的研究与展望[J]. 矿床地质, 10(3): 193-203.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等, 2020. 矿床成矿系列组——六论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 94(1): 18-35.
- 王登红, 李健康, 王成辉, 等, 2007. 与峨眉地幔柱有关年代学研究的新进展及其意义[J]. 矿床地质, 26(5): 550-556.
- 王辉, 丰成友, 张明玉, 2019. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. 矿床地质, 38(4): 739-750.
- 王良果, 2015. 云南省金宝山基性-超基性杂岩体特征及找矿前景[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王焰, 2008. 云南二叠纪白马寨铜镍硫化物矿床的成因: 地壳混染与矿化的关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 332-343.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 方维萱, 等, 2001. 云南墨江金矿床硅质岩沉积环境的地球化学探讨[J]. 地球化学, 30(5): 491-497.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 毛景文, 等, 2004. 云南墨江金矿床成矿时代探讨[J]. 矿床地质, 23(2): 253-260.
- 熊伊曲, 2014. 滇西墨江金厂热液金镍矿床成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 熊伊曲, 杨立强, 邵拥军, 等, 2015. 滇西南墨江金厂金镍矿床金、镍赋存状态及成矿过程探讨[J]. 岩石学报, 31(11): 3309-3330.
- 徐金祥, 陈春, 2013. 金平地区超基性岩铜镍矿床成矿作用类型及找矿方向[J]. 地球学报, 34(S1): 101-107.
- 徐昭啟, 2012. 云南永平县水泄-厂街铜钴矿铜钴的赋存状态与选矿工艺学[J]. 云南冶金, 41(3): 5-9.
- 薛步高, 1996. 论易门铜矿区叠加钴矿化地质特征[J]. 矿产与地质, 10(6): 388-394.
- 薛步高, 2001. 云南钴矿地质特征及找矿探讨[J]. 化工矿产地质, 23(4): 210-216.
- 薛步高, 2008. 云南镍矿地质特征及找镍方向[J]. 云南地质, 27(1): 76-84.
- 杨兴裕, 1982. 弥勒山铜钴矿床中的钴矿物及成矿控制[J]. 地质与勘探, (9): 14-18.
- 应汉龙, 王登红, 刘和林, 2005. 云南墨江金厂镍-金矿床镍矿化地质特征及形成时间[J]. 矿床地质, 24(1): 45-50.
- 于晓飞, 公凡影, 李永胜, 等, 2022. 中国典型钴矿床地质特征及重点地区矿产资源预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 52(5): 1377-1418.
- 云南省地质调查局, 2012. 云南省镍矿资源潜力评价成果报告[R]. 昆明: 云南省地质资料馆.
- 云南省地质调查局, 2022a. 云南省钴矿潜力预测成果图说明书[R]. 昆明: 云南省地质调查局.
- 云南省地质调查局, 2022b. 云南省镍矿潜力预测成果动态更新图说明书[R]. 昆明: 云南省地质调查局.
- 云南省有色地质局三〇八队, 2010. 白马寨铜镍矿核查区资源储量核查报告[R]. 昆明: 云南省地质资料馆.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等, 2020. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. 矿床地质, 39(3): 501-510.
- 张照伟, 李文渊, 丰成友, 等, 2022. 中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术[J]. 西北地质, 55(2): 14-34.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等, 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报, 64: 2484-2500.
- 周辅增, 2015. 云南水泄铜钴多金属成矿带南段地球化学特征及成矿预测[D]. 成都: 成都理工大学.
- 周凯, 张洪瑞, 柴鹏, 等, 2020. 云南墨江金厂矿床金镍赋存状态及成因关系探讨[J]. 矿床地质, 39(1): 97-110.

## References:

- CHEN Baiyou, LIU Hongtao, YANG Ping, et al., 2013. The Basic Metallogenic Regularity of Global Lateritic Nickel Ore Deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34: 202-206(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1(3/4): 90-94(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, 1997. Present sityation and trend of reserch on metallogenic series of ore deposits[J]. Geology and Prospecting, 33(1): 21-25(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, 2006. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al., 2015. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits(IV)[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1092-1106(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al., 2016. Minerogenetic series for mineral deposits: Discussion on minerogenetic series (V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 519-527(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al., 2020. Four-dimensional metallogeny in earth system and study trends of mineral deposits: A discussion on minerogenetic series (VII)[J]. Mineral Deposits, 39(5): 745-753(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yuchuan, PEI Rongfu, WANG Denghong, et al., 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits(VIII)[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 123-130(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yuqi, CHEN Yuchuan, ZHAO Yiming, 1979. Preliminary

- discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 32-57(in Chinese with English abstract).
- GUO Yuqian, FANG Weixuan, ZHAO Kai, 2019. Discovery and genetic significance of copper-cobalt and cobalt ore bodies in Dongchuan copper field, Yunnan Province[C]//Abstracts of the 9<sup>th</sup> National Metallogenic Theory and Prospecting Method Symposium: 396-397(in Chinese).
- HUANG Xiaobing, 2018. Safety Evaluation of Cobalt Resources in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- LI Feng, HUANG Dunyi, PU Weimin, 1994. On the geological characteristics and genesis of Shuixie copper deposit in Yongping[J]. Yunnan Geology, 13(4): 341-349(in Chinese with English abstract).
- LI Wenyuan, 2022. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China[J]. Journal of geomechanics, 28(5): 793-820(in Chinese with English abstract).
- LIU Daifu, YU Can, YANG Jin, et al., 2022. Ore-controlling Factors and Prospecting Prediction of Wanbaochang Copper-cobalt Deposit in Yimen County, Yunnan Province[J]. Modern Mining, 637(5): 50-54(in Chinese with English abstract).
- LIU Hongtao, DUAN Shengjie, SHI Yubei, et al., 2021. Geology of mineral resources in China: Yunnan roll: Copper, molybdenum, nickel and cobalt minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIU Jinlong, LI Zhumin, ZHOU Yongheng, et al., 2023. Distribution, geology and development status of nickel deposits[J]. Geology in China, 50(1): 118-132(in Chinese with English abstract).
- LOU Debo, SUN Yan, SHAN Chengdong, et al., 2018. Geological characteristics and mineral prediction of Ni ore deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(3): 67-81(in Chinese with English abstract).
- LOU Debo, WANG Denghong, XIAO Keyan, et al., 2014. Prediction types and main successive strategic resource base areas of Ni ore deposits in China[J]. Geology in China, 41(03): 715-727(in Chinese with English abstract).
- LU Yiguan, 2018. The Genesis of Jinbaoshan Pt-Pd and Baimazhai Ni-Cu Deposits in the Western Yunnan, SW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Mojiang Geological Team, Department of Geology, Yunnan Province, 1959. Report on reserve calculation of nickel reserves in Mojiang, Yuanjiang, Yunnan Province (Phase one)[R]. Kunming: Yunnan Provincial Geological Archive(in Chinese).
- PENG Guanling, 2015. The copper and cobalt polymetallic metallogenic of Shuixie ore-controlling structural features and Discussion of ore-controlling effect[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- "Sanjiang" Monograph Editorial Committee, 1984. Annals of mineral resources in Nujiang, Lancang and Jinsha Rivers of the People's Republic of China[R]. Kunming: Yunnan Provincial Geological Archive(in Chinese).
- SHI Guiyong, SUN Xiaoming, WANG Shengwei, et al., 2006. Re-Os isotope dating and its geological implication of Baimaizhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2451-2456(in Chinese with English abstract).
- SU Yan, 2020. Geochemical characteristics and genesis of vein rich copper deposit in yongping qingyang plant, west Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- SUN Tao, WANG Denghong, LOU Debo, et al., 2014a. Geological characteristics of the nickel metallogenic belts in China and the prospecting orientation[J]. Geology in China, 41(6): 1986-2001(in Chinese with English abstract).
- SUN Tao, WANG Denghong, QIAN Zhuangzhi, et al., 2014b. Summary of Metallogenic Regularity for the Nickel Deposits, China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2227-2250(in Chinese with English abstract).
- TANG Zhongli, LI Wenyuan, 1991. Studies of metallogenic regularity of nickel sulfide deposits in China and their prospects[J]. Mineral Deposits, 10(3): 193-203(in Chinese with English abstract).
- WANG Denghong, CHEN Yuchuan, XU Zhigang, et al., 2020. Minerogenetic series group: discussion on minerogenetic series(VI)[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1): 18-35(in Chinese with English abstract).
- WANG Denghong, LI Jiankang, WANG Chenghui, et al., 2007. New advances in geochronologic study related to Emei mantle plume and their significance[J]. Mineral Deposits, 26(5): 550-556(in Chinese with English abstract).
- WANG Hui, FENG Chengyou, ZHANG Mingyu, 2019. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. Mineral Deposits, 38(4): 739-750(in Chinese with English abstract).
- WANG Liangguo, 2015. Characteristics and Metallogenic Prospect of the Jinbaoshan Mafic-Ultramafic Complex, Yunnan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- WANG Yan, 2008. Origin of the Permian Baimazhai Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposits, Yunnan: Implications for the Relationship of Crustal Contamination and Mineralization[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27(4): 332-343(in Chinese with English abstract).
- XIE Guiqing, HU Ruizhong, FANG Weixuan, et al., 2001. Geochemistry of depositional environment of siliceous rocks from Mojiang gold deposit in Yunnan Province[J]. Geochimica, 30(5): 491-497(in Chinese with English abstract).

- XIE Guiqing, HU Ruizhong, MAO Jing-wen, et al., 2004. Discussion on Metallogenic Ages of Mojiang Gold Deposit in Yunnan Province[J]. *Mineral deposits*, 23(2): 253-260(in Chinese with English abstract).
- XIONG Yiqu, 2014. The ore-forming processes of Jinchang Hydrothermal Gold and Nickel Deposit, Mojiang, Western Yunnan, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- XIONG Yiqu, YANG Liqiang, SHAO Yongjun, et al., 2015. Metallogenic process in Jinchang gold-nickel deposit, Mojiang County, SW Yunnan, China: Constraints from occurrence of gold and nickel[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3309-3330(in Chinese with English abstract).
- XU Jinxiang, CHEN Chun, 2013. Metallogenic Types and Ore-prospecting Orientations of Ultrabasic Rock Copper-nickel Deposits in Jinping Area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(S1): 101-107(in Chinese with English abstract).
- XU Zhaoqi, 2012. Research on the Occurrence of Cu & Co and Process Mineralogy of Copper-Cobalt Ore of Shuixie-Changjie Copper-Cobalt Mine in Yongping County, Yunnan[J]. *Yunnan Metallurgy*, 41(3): 5-9(in Chinese with English abstract).
- XUE Bugao, 1996. Geological characteristics of superimposed cobalt mineralization in the Yimen copper district[J]. *Mineral resources and Geology*, 10(6): 388-394(in Chinese with English abstract).
- XUE Bugao, 2001. Geological characteristics of cobalt resources in Yunnan and Its exploring guide[J]. *Geology of chemical minerals*, 23(4): 210-216(in Chinese with English abstract).
- XUE Bugao, 2008. On the geological characteristics & ore-prospecting of Ni deposit in Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 27(1): 76-84(in Chinese with English abstract).
- YANG Xingyu, 1982. Cobalt minerals and metallogenic control in the Milesan copper-cobalt deposit[J]. *Geology and Prospecting*, (9): 14-18(in Chinese).
- YING Hanlong, WANG Denghong, LIU Helin, 2005. Geology and formation time of nickel mineralization in Jinchang nickel-gold deposit, Mojiang, Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 24(1): 45-50(in Chinese with English abstract).
- YU Xiaofei, GONG Fanying, LI Yongsheng, et al., 2022. Geological Characteristics of typical Cobalt Deposits in China and Prediction of Mineral Resources in the Key Areas[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(5): 1377-1418(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Geological Survey, 2012. Report on evaluation results of nickel mineral resources potential in Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Provincial Geological Archive(in Chinese).
- Yunnan Geological Survey, 2022a. Manual for map of cobalt potential prediction results of Yunnan[R]. Kunming: Yunnan Geological Survey(in Chinese).
- Yunnan Geological Survey, 2022b. Manual for map of nickel potential prediction results of Yunnan[R]. Kunming: Yunnan Geological Survey(in Chinese).
- Yunnan Nonferrous Geological Bureau 308 Team, 2010. Verification report of Baimazhai copper-nickel mine resources reserves[R]. Kunming: Yunnan Provincial Geological Archive(in Chinese).
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al., 2020. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. *Mineral Deposits*, 39(3): 501-510(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, FENG Chengyou, et al., 2022. Study on Metallogenic Regularity of Co-Ni Deposits in China and Its Efficient Exploration Techniques[J]. *Northwestern Geology*, 55(2): 14-34(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhong, et al., 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64: 2484-2500(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fuzeng, 2015. Geochemical Characteristics and Metallogenic Prognosis of the Southern Segment of Shuixie Cu-Co Polymetallic Metallogenic Belt in Yunnan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Kai, ZHANG Hongrui, CHAI Peng, et al., 2020. On the occurrence and genesis of gold and nickel in Jinchang deposit, Mojiang County, Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 39(1): 97-110(in Chinese with English abstract).