

云南金平白马寨铜镍(铂族)矿床地质特征、 Ar-Ar 定年及矿床成因研究

谭木昌¹, 念红¹, 张学书^{1,2}, 秦德先², 范柱国², Franco Pirajno³

1. 云南省有色地质局, 昆明 650051; 2. 昆明理工大学, 昆明 650093;

3. 西澳大利亚州地质调查局, 100 Plain Street WA 6004 澳大利亚

摘要: 白马寨铜(铂族)硫化物矿床赋存于二叠纪峨眉山大火成岩省内的基性-超基性侵入岩体之中。矿床地质特征表明矿床可能遭受了二叠纪后的区域构造及热事件的改造作用, 这些特征主要有: 含矿岩体中部分硫化物与热液蚀变矿物如黑云母、蚀变成因角闪石和绿泥石等紧密共生; 硫化矿石相对富集 Cu、Pd 和 Au; 含矿岩石的 Ar-Ar 法同位素坪年龄值为 160~170 Ma, 晚于峨眉山大火成岩省的年龄等。本文提出了两种可能的改造成矿模式: ①后期热液沿变形的块状硫化矿的角砾化边缘带入, 对原生矿石、岩石产生改造作用形成新的硫化物; ②块状-浸染状原生矿石产生变形时, 热液流体优先渗入到浸染状矿石中, 从而对原生矿石产生改造作用。

关键词: 峨眉山玄武岩; 基性-超基性侵入岩; Ni-Cu-(PGE) 矿化; 白马寨; 云南

中图分类号: P618.41; P618.63; P597+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)06-0612-10

Characteristics, Ar-Ar Isotopic Dating and Ore Genesis of the Baimazhai Cu-Ni(PGE) Deposits, Yunnan

TAN Mu-chang¹, NIAN Hong¹, ZHANG Xue-shu^{1,2}, QING De-xian²,
FAN Zhu-guo², FRANCO Pirajno³

1. Yunnan Bureau of Non-ferrous Metal Geological Survey, Kunming 650051, China; 2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Geological Survey Bureau of Western Australia, 100 Plain Street, WA 6004, Australia

Abstract: The Baimazhai Cu-Ni(PGE) sulphide deposit in the southeast Yunnan Province occurs in mafic-ultramafic rock swarms of Permian Emeishan large igneous provinces. The deposit is a hydrothermal modified deposit with geological and petrologic characteristics and microscopic determination. The genesis of the ore-bearing mafic-ultramafic intrusions is dispersive hydrothermal reworking. Sulphides are associated with the hydrothermal altered minerals, such as biotite, amphiboles and chlorites, showing that the sulphide ores have suffered deformed and hydrothermal alteration and have become disseminated and brecciated ores. The sulphide ores have higher Cu, Pd and Au than ores elsewhere, indicating that the ores has been affected by hydrothermal alteration. The Ar-Ar age of the ore and ore-bearing rocks (160–170 Ma) shows that the Baimazhai intrusions have been reworked by a regional tectonic thermal event in the Jurassic period. Based on the reworked strength, this paper proposes two possible metallogenic models.

Key words: Emeishan basalt; mafic-ultramafic intrusion; Ni-Cu-(PGE) sulphide deposit; Baimazhai; Yunnan

中国已知规模最大的 Ni-Cu-(PGE) 矿床为形成于古-中元古代的金川铜镍矿床, 其铜镍储量达 500 万吨, 平均含 Ni 1.2%、Cu 0.7%, 并伴生 Pt、

Pd 等多种贵金属, 仅次于俄罗斯诺里尔斯克和加拿大萨德贝里矿床, 排名世界第三^[1]。另外, 新疆阿尔泰和天山造山带中的黄山和喀拉通克矿床也是十分

重要的 Ni-Cu-(PGE) 矿床。上述矿床均赋存于成因上可能与地幔热柱有关的基性-超基性侵入岩中^[2~4]，尽管可能有玄武岩盖层遭剥蚀的关系，但它们并不与大陆溢流玄武岩浆的火山作用共生。而中国西南部的 Ni-Cu-(PGE) 和 Fe-V-Ti 氧化物矿床在空间及成因上则与晚二叠世峨眉山大火成岩省(简称 ELIP; 图 1)大陆溢流玄武岩共生,金平白马寨 Ni-Cu-(PGE)矿床为其中之一。

峨眉山大火成岩省中除白马寨外,其它岩浆型矿床主要有:杨柳坪及力马河 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床^[5],以铂族为主的冷水管、巴定及大岩子矿床^[6]、红格 Fe-V-Ti 氧化物矿床^[7,8]和攀枝花、新街 V-Ti-Fe-PGE 矿床^[6]。ELIP 的零星碎块在越南北部亦有分布,越南北部科马提-玄武岩组合中赋存有版福 Ni-Cu-PGE 矿床^[9]。此外,滇黔交界处发现有 Keweenaw 型铜矿床^[10](杏仁状玄武岩及共生的沉积岩中的自然铜矿)^[11]。白马寨南东 35 km 处的牛栏冲镍矿床赋存于与玄武岩共生产出辉长岩岩床中(图 2)。目前学术界对白马寨铜镍矿的成因仍然存在不同的认识,前人在强调岩浆熔离分异作用外,部分学者还强调岩浆熔离分异-脉冲贯入-后期热液改造等因素对成矿的影响^[12,13]。一些研究者^[14~17]则提出地壳混染是导致白马寨岩体硫化物饱和的主要因素。也有研究者注意到热液作用对后期成矿的影响^[12,14,17]。

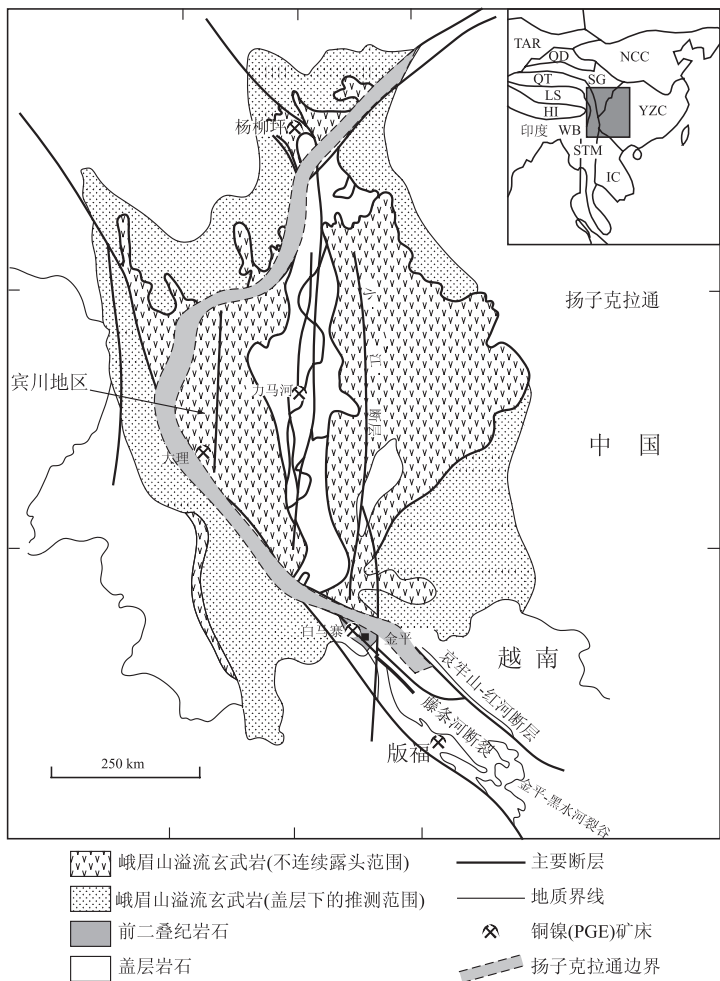
本文主要论述白马寨 Ni-Cu-(PGE)矿床的地质特征及岩矿石 Ar-Ar 同位素年龄特征。白马寨矿床具有特殊的地质特征,主要表现在:赋含矿体的基性-超基性岩体普遍发育弥漫状热液蚀变作用,并对硫化矿石具有很大程度的改造作用。Ar-Ar 测年数据亦据支持本文提出的改造成矿观点。

2 地质背景

位于中国西南云贵川及越南北部地区的 ELIP 覆盖面积至少为 25 万 km²^[18,19](但据 Xiao 等^[20]认为该数据仅是一个保守的估计)(图 1)。ELIP 的西界为哀牢山-红河断裂带(ASRR),该断裂为一条分隔云岭褶皱带及扬子克拉通的地壳断裂(图 1)。

ELIP 主要由拉斑玄武岩系列岩石组合及少量苦橄质和流纹质熔岩组成,除熔岩以外,还发育基性-超基性层状侵入杂岩、岩墙及岩床、正长岩以及其它碱性侵入岩等岩石组合^[21~25]。熔岩的最大厚度为攀西裂谷宾川地区的玄武岩,其厚度大约为 5400 m,向东逐渐减少至 500 m 以下^[26,27]。

ELIP 分布范围内的基性-超基性侵入岩的 SHRIMP 法锆石 U-Pb 年龄范围为 259 ± 3~262 ± 3 Ma^[2,14,15,28,29]。Lo 等^[30]曾报道过高精度的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果在 251.2 ± 1 Ma 至 252.1 ± 1.4 Ma,然而 Boven 等^[22]亦使用



内插图表示 ELIP 区域的位置和中国及邻区主要构造单元; NCC-华北克拉通, YZC-扬子克拉通, QT-羌塘板块, LS-拉萨板块; QD-柴达木板块; TAR-塔里木板块, HI-喜马拉雅褶皱带; WB-缅甸西部板块; STM-掸-泰-马板块; IC-印支板块

Inset shows position of the ELIP region and main tectonic units of China and adjacent countries; NCC-North China Craton; YZC-Yangtze Craton; QT- Qiangtang Block; LS-Lhasa Block; QD- Qaidam Block; TAR-Tarim Block; HI-Himalaya fold belt; WB-West Burma Block; STM-Shan-Thai-Malay Block; IC-Indochina Block

图 1 峨眉山大火成岩省(ELIP)区域地质简图及 Ni-Cu-(PGE)矿床分布略图(据文献[21])

Fig. 1 The regional tectonic context of Emeishan large igneous province and the distribution of major Cu-Ni-(PGE) deposits(after ref. [21])

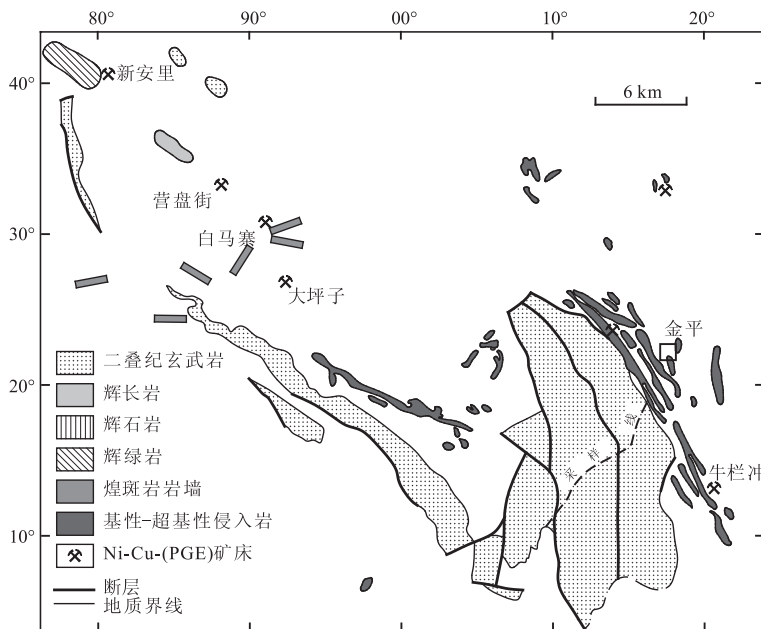


图2 金平地区地质简图: 示白马寨及其它铜镍矿床位置

Fig. 2 The geological sketch map of the Jinping area: showing locations of the Baimazhai and the other Cu-Ni deposits

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法对攀枝花层状杂岩体进行过测年, 结果为 246 ± 4 Ma, 其中一件辉石岩样品的年龄值为 254 ± 5 Ma。其它 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄值^[31] 较小, 在 147 至 42 Ma 之间, 他们认为这些较年轻的年龄值是由于侏罗纪—白垩纪(燕山造山期)及始新世(喜马拉雅—阿尔卑斯造山期)之间时期的构造事件的热液活动的结果。这些特征对白马寨矿床具有重要意义, 因为上述构造运动中的一个或多个热事件可能对白马寨矿床的赋矿岩石及硫化物矿石产生改造作用。

3 矿床地质

白马寨 Ni-Cu 矿床位于扬子地台西南缘的金平—黑水河裂谷中(图 1、2)。矿区出露地层主要为下奥陶统碎屑沉积岩、志留系及泥盆系粉砂岩、页岩及灰岩。矿区内发现有十余个侵入岩体, 包括辉长岩、橄榄岩、橄榄辉石岩、正长岩及煌斑岩。这些岩体主要受北东、北西向断裂构造控制。其中 I、II、III 号岩体规模较大, 含矿性较好, 均呈岩墙产出, 侵入于下奥陶统第三段变质砂岩、砂质板岩、板岩和第四段变质长石砂岩和砂质板岩中。岩体的岩石组合为辉长岩-辉石岩-橄榄岩, 部分岩体具有同心环状分异分带结构。从核部向外依次可分为橄榄岩、橄榄辉石岩、辉石岩和辉长岩四个相带。

上述基性-超基性岩带东部为一套厚约 4500 m 的溢流玄武岩系。煌斑岩岩墙为后期产物, 侵入上

述沉积地层、火山岩系、辉长岩及橄榄辉石岩中。

4 矿化特征

白马寨 Ni-Cu 矿床赋存于三个基性-超基性岩体群中(即编号为 I, II, III 的岩体; 图 3), 但只有 III 号岩体中的矿体具有经济意义(Ni 和 Cu 品位可分别高达 4.5% 和 2.3%)。III 号岩体中的矿床赋含有 5 万吨镍金属量, 镍的总资源量大约为 10 万吨。III 号岩体总体呈一香蕉形态, 外部为基性岩, 内核为赋含块状硫化矿石的超基性岩(图 4)。整个岩体均显示出弥漫型蚀变特征, 矿物组合上由含量不等的角闪石、绿泥石、石英、滑石及碳酸盐等矿组成。但切割岩体产出的煌斑岩并未受到该热液蚀变作用的影响。矿区区内已探明 11 个工业矿体, 其中 I 号岩体内有 3 个矿体; II 号岩体内有 2 个矿体; III 号岩体^[E1] 内有 6 个矿体, 另外还有 7 个表外矿体, 其中 1、2 号矿体最大, 占总储量的 97%。1、3 号矿体最富^[E2], 其品位在 3% 以上。这些矿体

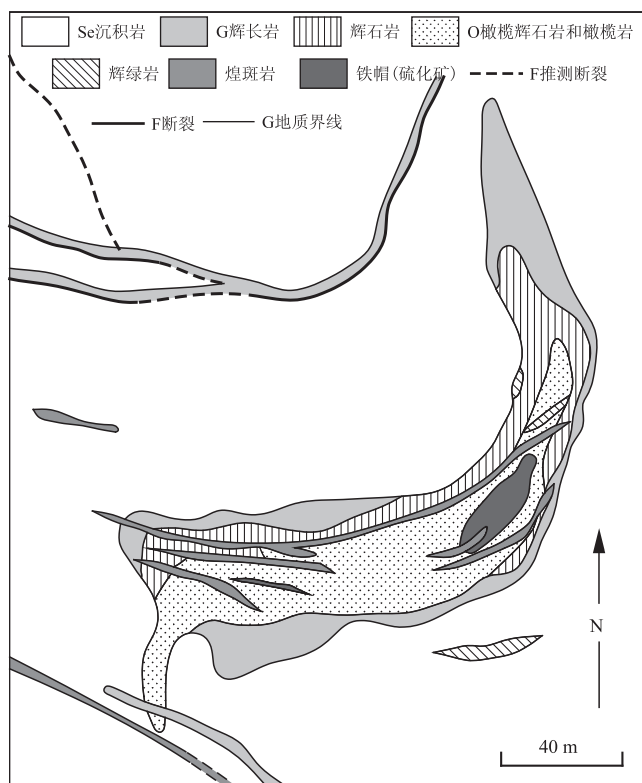
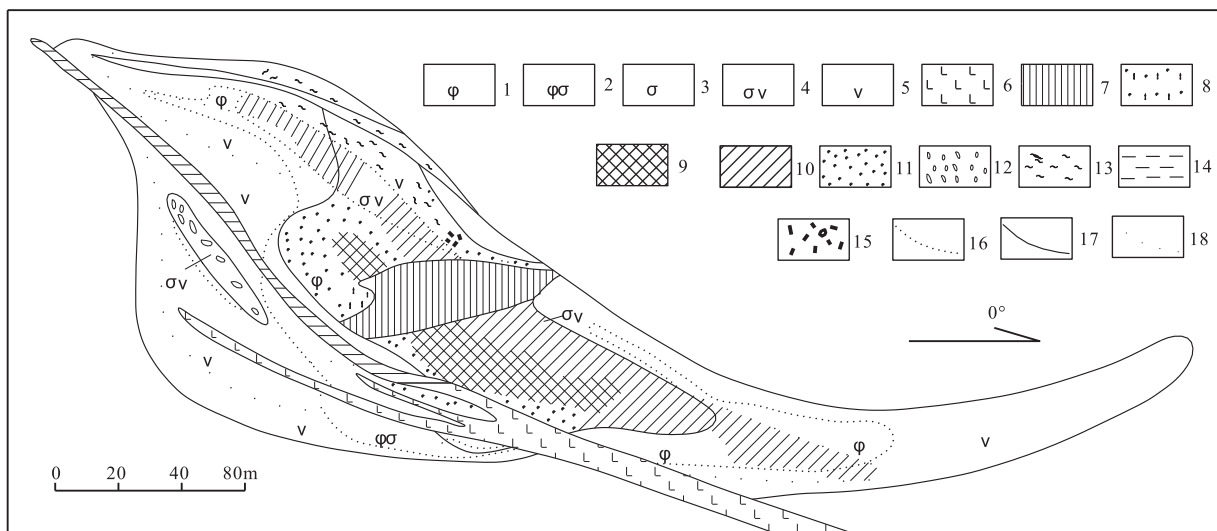


图3 白马寨矿区 III 号岩体地质简图

Fig. 3 The geological sketch map of No. III intrusion in the Baimazhai Cu-Ni mine

分别具有不同的产状特征,但主要分布在岩体内部,部分分布在岩体与围岩的接触带附近,如3号矿体。矿体表现为不规则的板状、透镜状甚至脉状。以1号矿体为例,该矿体分布在Ⅲ号岩体的中心,形似扁

柱,中部厚、边部薄,以致密块状矿石为主,边部有角砾状矿石,局部为煌斑岩脉穿插。矿体平均长425 m,宽51 m,厚9.3 m。平均 Ni、Cu、Co 含量分别为 3.68%、1.99%、0.182%。



1-橄榄岩;2-橄辉岩;3-辉石岩;4-辉石岩岩墙;5-辉长岩;6-煌斑岩;7-块状矿石;8-角砾状矿石;9-海绵陨铁状矿石;10-交代浸染状矿石;11-细粒浸染状矿石;12-斑块状矿石;13-细脉浸染状矿石;14-片状矿石;15-斑点状矿石;16-岩石边界线;17-工业矿体边界;18-表外矿体边界

1-Peridotite, 2-Olive Pyroxenite, 3-Pyroxenite, 4-Pyroxenite Dyke, 5-Gabbro, 6-Lamprophyre, 7-Massive Ore, 8-Brecciated Ore, 9-Sideronitic Ore, 10-Metasomatic Disseminated Ore, 11-Fine-grained Disseminated Ore, 12-Patched Ore, 13-Veinlet Disseminated Ore, 14-Flaky Ore, 15-Mottled Ore, 16. Rock boundary, 17-Economic Ore's limit, 18-Sub-economic Ore's boundary

图4 白马寨铜镍硫化物矿床矿石类型分布略图

Fig. 4 A combined profile of ore-types in the Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit

白马寨铜镍矿床内主要有三种主要类型的矿石:浸染状、蚀变改造型浸染状及块状矿石(图4)。

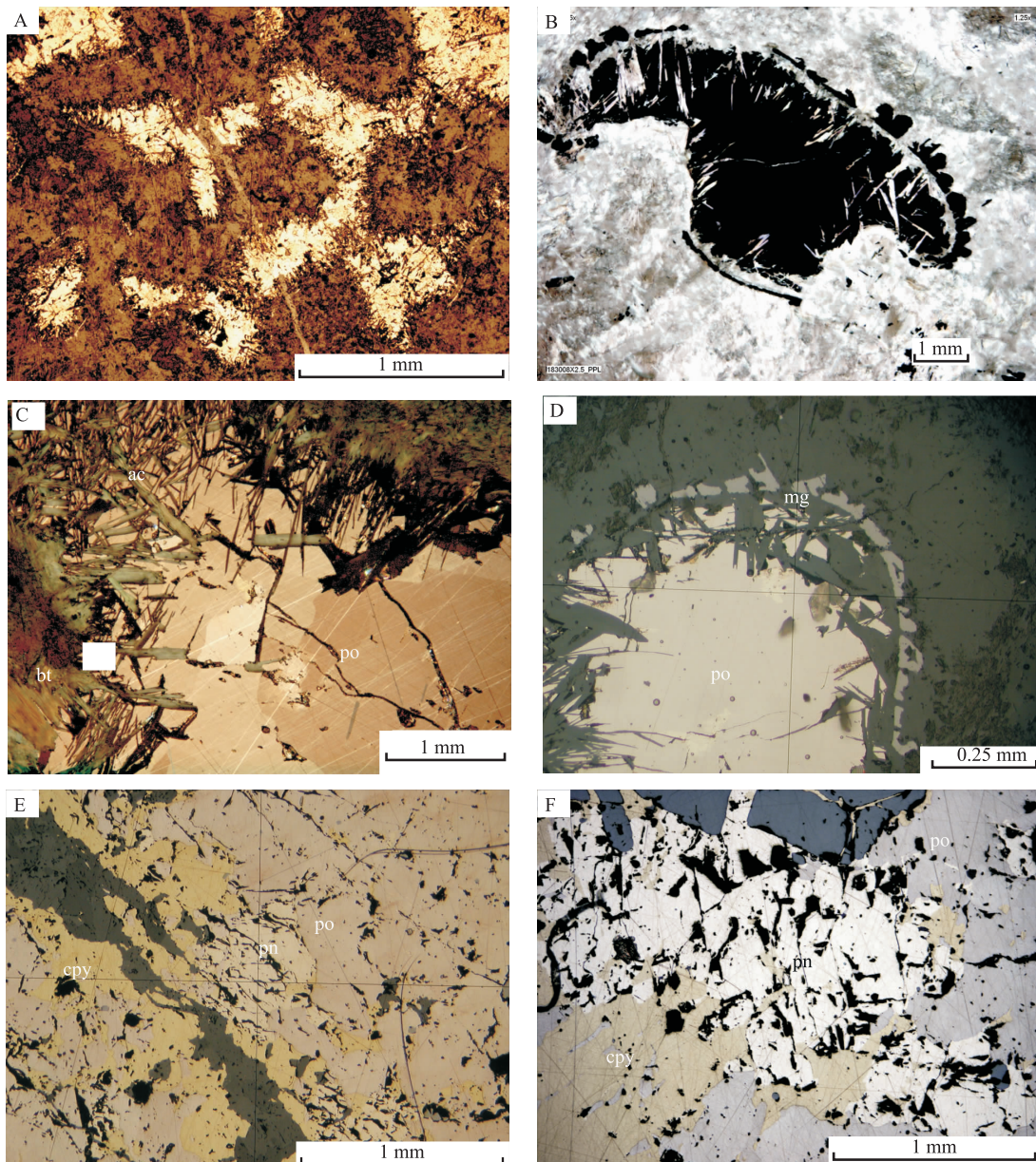
浸染状矿石赋存于辉长岩及辉石岩中,主要沿块状矿体的边缘分布并构成块状矿的外壳。硫化物粒度为0.5~3.5 mm,不均匀地分布于硅酸盐矿物颗粒之间,硫化物体积含量在6%~12%。主要金属硫化物成分为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和紫硫镍矿及少量磁铁矿、钛铁矿和铬尖晶石。赋存于辉长岩中的硫化物比赋存于辉石岩中硫化物粒度更细。矿石中磁黄铁矿:镍黄铁矿:黄铜矿之比值为53:2:1。

蚀变改造型浸染状矿石在矿体中的分布如图4所示(图例中“交代浸染状矿石”)。各矿石类型在浸染状矿石带之内构成一扁柱体,与矿体形态相同,金属硫化物含量为15至30 vol.%,硫化物在形态上呈不规则状或卵圆形(图5A、B),局部成密集的细脉状。主要矿物成分为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、铬尖晶石和钛铁矿及痕量的方铅矿、镍辉钴矿、派克矿(Ni₃(Bi,Pb)₂S₂)等。矿石中磁

黄铁矿:镍黄铁矿:黄铜矿之比值为14:1.4:1。典型特征是硫化矿物与棕色黑云母(可能为金云母)、阳起石一透闪石及绿泥石等矿物共生,这些非金属矿物不仅构成基质,而且共生产在硫化矿物的边缘,构成一种特殊的结构(图5A、B、C、D)。

块状硫化矿为一扁平板状矿体,位于赋矿侵入岩体的中心部位,局部呈侵入产状穿切了岩体(图4)。块状矿体穿切岩体的特征可能是硫化物矿浆侵入时的原始侵入构造特征或是由于后期构造作用改造的结果。主要矿物成分为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿(图5E、F)和磁铁矿及少量方铅矿、派克矿(硫铋镍矿)、银镍黄铁矿、镍辉钴矿、马基诺矿(四方硫铁镍矿)、碲铅矿和银金矿。矿石中磁黄铁矿:镍黄铁矿:黄铜矿之比值为12:1.7:1。

除上述浸染状、蚀变改造浸染状及块状矿石以外,还有角砾状和斑点状矿石(指磁黄铁矿和黄铜矿的不规则集合体)。角砾状矿石的角砾成分为砂岩和辉长岩,碎屑角砾的胶结物为硫化物。角砾状矿石与块状矿石的矿物成分相同,但相对要更为富含



A、B-蚀变改造型浸染状磁黄铁矿，基质已蚀变为阳起石、黑云母和绿泥石组成的矿物组合；C-磁黄铁矿(po)的边缘与黑云母(bt)和阳起石共生(ac)；D-磁黄铁矿(po)边缘常为磁铁矿的环带所围绕；E、F-为块状矿石中黄铜矿(cpy)、磁黄铁矿(po)和镍黄铁矿(pn)组合交代特征

A、B-alteration-modified disseminated pyrrhotite, the host matrix is pervasively altered to an assemblage that consist of actinolite, biotite and chlorite; C-the margins of pyrrhotite (po) are intergrown with biotite (bt) and actinolite (ac); D-the margin of pyrrhotite (po) is commonly rimmed by a ring of magnetite; E、F-show the association of chalcopyrite (cpy), pyrrhotite (po) and pentlandite (pn) in the massive sulphides ore

图5 白马寨矿床矿石光片的反光显微照片

Fig. 5 Reflect microscope graphs of the polished ore section, Baimazhai

黄铜矿，矿物成分有磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。矿物颗粒大小为 0.1~0.3 mm。斑点状矿石产于辉长岩中，硫化物构成大小在 5~15 mm 之间的豆状集合体。

5 白马寨矿床同位素定年

白马寨矿床 Ni-Cu 硫化物和经热液蚀变改造

的赋矿围岩常被时代不明的煌斑岩脉所切割。白马寨侵入岩的侵入时代时很可能是峨眉山玄武岩的同期产物，与峨眉山玄武岩共生的基性-超基性岩赋存有岩浆型铜镍矿矿床。但上述侵入体亦可能是峨眉山玄武岩期后的产物或后期热事件的产物。

应用 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法对白马寨矿区侵入岩(橄榄岩,辉石岩及辉长岩)进行了年龄测定。年龄测定由

桂林地质矿产研究院进行。年龄测定结果如表 1 及图 6 所示。如表 1 所示,计算得出的年龄值范围在 170.02±3.4 至 160.48±3.32 Ma 之间(相当于中侏罗世)。该年龄值与 ELIP 的二叠-三叠纪界限年龄值相差较大(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄值为 259±3 Ma 至 262±3 Ma 之间;⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄值为 246±4 Ma 至 254±5 Ma)。本文研究过程中使用⁴⁰Ar/³⁹Ar 法所获得的范围在 160~170 Ma 的年龄值与 Ali 等^[31]报道过的年龄值一致,这一年龄值可能是由于 177~135 Ma 导致拉萨板块与羌塘-印支板块会聚(图 1)的碰撞事件影响的结果^[31],该构造事件以燕山造山期(190~90 Ma)的花岗闪长岩

的侵入作用为特征。

表 1 ³⁹Ar-⁴⁰Ar 法全岩年龄测定数据

Table 1 ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating data

样号	岩石类型	年龄类型	年龄/Ma
BMZ 01	G 辉长岩 ^[E3]	t_p	167.96±1.8
		t_{iso}	170.02±3.4
		t_f	167.97±3
BMZ 10	辉石岩	t_p	164.17±2.5
		t_{iso}	160.48±3.32
		t_f	164.16±3.8
BMZ 11	橄榄岩	t_p	166.78±1.8
		t_{iso}	164.51±3.29
		t_f	166.97±3

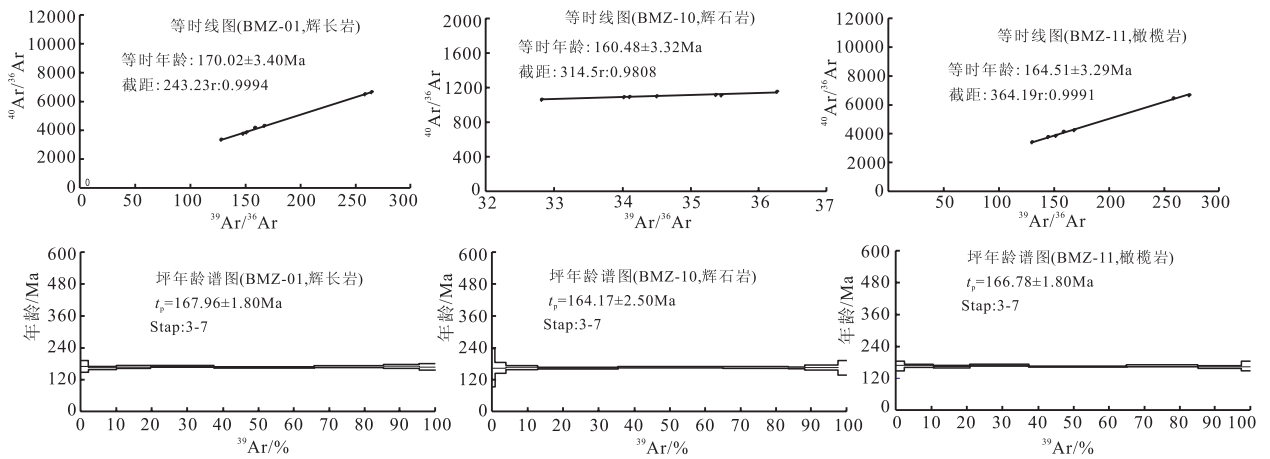


图 6 白马寨铜镍矿床含矿围岩全岩³⁹Ar-⁴⁰Ar 法定年坪年龄和等时年龄图

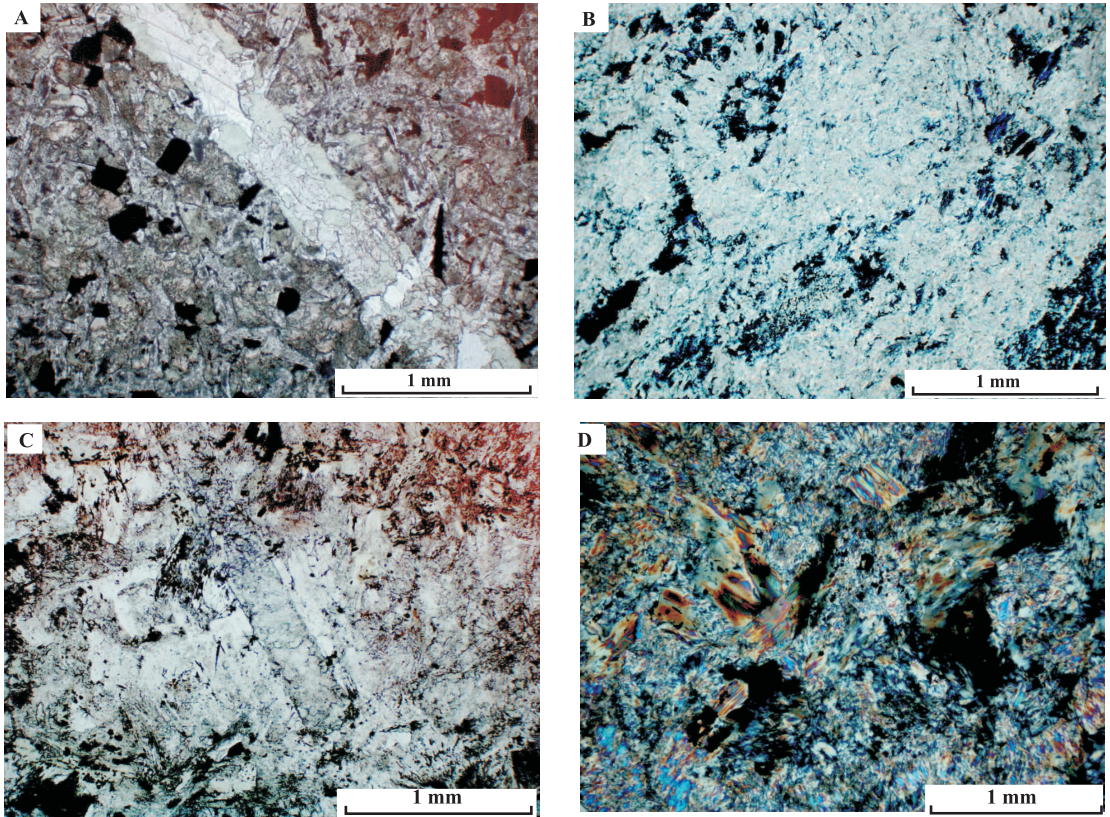
Fig. 6 ³⁹Ar-⁴⁰Ar age spectrums and isochrones of the ore-bearing rock in Baimazhai

6 岩浆型硫化物矿床的热液改造成矿模式

本次研究通过白马寨矿区岩石薄片及矿石光片鉴定结果表明,硫化物组合在岩浆期后经历了硫化物的活化迁移及重新沉淀成矿的作用过程。这一特征在蚀变型浸染状矿石中最为显著(图 7)。硫化物矿物的活化迁移作用十分普遍,并与区域性高级变质作用有关^[32]。目前,关于热液蚀变对岩浆型硫化物矿物的改造作用知之甚少,但正如 Tomkins 等^[33]所指出的,在前进变质作用过程中的脱水反应所产生的热液流体具有溶解硫化矿物的能力,并使其组成成分产生活化迁移作用,导致原生矿石产生结构及矿物成分上的改变。黑云母和绿泥石等蚀变矿物的出现表明卤素挥发性元素(如 Cl)的作用十分强烈。许多作者都认为卤素元素的活动可导致富含 PGE 及 PGM 相的物质的活化迁移^[34~36]。黑云母,绿泥石和角闪石与硫化物共生是挥发性成分活动

的又一证据^[37]。原生铜镍硫化矿物的后生蚀变作用造成了富铜矿石的形成,并伴随有富 Pt、Pd 及碲化物和含铋矿物的矿物相的形成^[37,38]。而且上述金属硫化物亦与含水硅酸盐矿物(如绿泥石和绢云母)共生。更重要的是,根据显微观察蚀变改造型矿石富含 Au、Ag。而事实上本区矿石亦是如此,经过蚀变改造的矿石更为富集 Cu、Au 和 Pd(表 2)。

白马寨矿区热液作用导致的活化迁移作用与该区岩浆期后构造热事件有关。这些构造-热事件所产生的热液流体渗入到合适的构造裂隙中,对先前已存在的基性-超基性岩侵入岩及硫化物产生改造作用。在白马寨,侵入岩体的热液蚀变特征十分普遍,如硅酸盐矿物为含水相的矿物广泛交代(图 7),热液流体可能对块状矿石体的整体并未产生根本性改变,但区域性构造作用对其边部产生了改造作用,从而形成干扰性矿体边缘及角砾状的硫化物,同时加速了热液流体的渗入作用,并交代形成浸染状及粒间充填状矿石类型。蚀变改造型硫化物(图 5)是



A-牛栏冲镍矿附近的玄武岩中的蚀变特征,基质中及呈细脉状产出的绿泥石、绿帘石及碳酸盐矿物。不透明矿物为蚀变为金红石的钛铁矿;但玄武岩结构仍然可以分辨;平面偏光;B-超基性岩中的滑石-碳酸盐蚀变特征,正交偏光;C-辉长岩中的绿泥石、碳酸盐及石英的蚀变特征。长石形态仍然可以分辨。平面偏光;D-赋含蚀变改造型硫化物的辉石岩中的阳起石、绿泥石及黑云母等蚀变矿物

A-basaltic rock from the nearby Jinping area(Niulanchong Ni deposit) altered to chlorite, carbonate and epidote, both in matrix and as cross-cutting veinlets; opaque is ilmenite altered to titanite; here the basaltic texture is still recognizable; plane polarized light; B-Talc-carbonate alteration of pyroxenite; cross polarized light; C-Gabbros altered to chlorite, carbonate and quartz; the shape of a feldspar lath is still recognizable, plane polarized light; D-actinolite, chlorite and biotite alteration of pyroxenite hosting alteration-modified sulphides

图7 白马寨矿床赋矿围岩及周边地区岩石中的弥漫型热液蚀变的显微照片

Fig. 7 Dispersivity hydrothermal alteration in the wallrock in the Baimazhai deposit

表2 白马寨矿床硫化矿石成分表

Table 2 The sulphide ore compositions in the Baimazhai deposit

矿石 类型	Ni (%)	Cu (%)	Co (%)	S (%)	Au ($\times 10^{-9}$)	Ag ($\times 10^{-9}$)	Pt ($\times 10^{-9}$)	Pd ($\times 10^{-9}$)	As ($\times 10^{-9}$)	Bi ($\times 10^{-9}$)
块状矿石(3)	3.76	1.69	0.197	35.03	103	9.8	360	640	40	50
角砾状矿石(2)	2.77	1.25	0.129	25.75	1140	10	400	400	50	40
蚀变改造型矿石(4)	0.93	0.87	0.054	8.16	230	4.8	100	150	20	21
浸染状矿石(橄榄岩)(4)	0.63	0.68	0.039	5.48	80	4.8	110	150	30	17
浸染状矿石(辉石岩)(4)	0.72	1.47	0.045	6.99	170	3.2	110	180	30	8
斑点状矿石(辉石岩)(4)	0.57	0.46	0.035	5.43	280	3.8	50	50	50	3

注:括号内数字为样品数

区域构造热事件活动的结果,而且非原生磁黄铁矿、镍黄铁矿及黄铜矿等硫化物矿物相的中一些微量元素如 Bi、Pb 等产生了活化迁移、再分配作用,并重新沉淀形成异源硫化物(如硫铋镍矿等)。热液改造成矿的示意性模式如图 8 所示。该模式提出了两种改造成矿方式:① 块状硫化矿体产生变形后,其受

到构造改造和角砾化的边缘为热液的带入并对原生矿石、岩石产生改造作用创造了有利的条件;② 原始岩浆型块状硫化物矿体为一岩浆成因浸染状矿石的外壳所包裹,在块状—浸染状原生矿石体系产生变形时,热液流体渗入到渗透性较好的浸染状矿石中,从而对原生矿石产生改造作用。两种情况下,硫化

矿物与围岩的接触带构成一个高强度的地球化学梯度带及热液流体渗入的有利构造部位。

7 讨论及结论

热液蚀变岩石及共生的蚀变改造硫化矿石的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年结果表明,白马寨 Ni-Cu-(PGE)矿床具有明显的热液流体改造特征,该热液改造作用很可能与侏罗纪作用于该地区构造热事件有关^[39]。热液流体与岩浆型硫化物之间相互作用的具体特征尚不清楚,仍需要更详细的研究工作。

张学书等^[40~43]和 Zhang 等^[44,45]曾从地球化学特征上论述过金平地区二叠纪玄武岩的地幔成因以及白马寨铜镍矿床在成因上与玄武岩的演化关系,认为两者之间存在着岩浆演化上的成因联系。如前所述,Ali 等^[31]应用 Ar-Ar 法进行同位素年龄测定,确定了印支板块与扬子克拉通西缘地区的二叠纪后受峨眉山溢流玄武岩浆作用影响的构造热事件的时代,该构造热事件的时代年龄值集中在 175、142、98~42 Ma 三个区间, Ali 等^[31]将此年龄值的原因归结于将西部的印度板块与印支板块和东部华

南板块及北西部的松潘—甘孜盆区分隔开来的缝合带的走向滑动作用及区域构造碰撞运动的影响。本文认为本研究过程中所获得的大约为 170 Ma 的 Ar-Ar 法测定的年龄值很可能代表发生于中侏罗世期间的一次热事件的作用结果, Ali 等^[31]认为大约为 175 Ma 的年龄值是分隔华北与华南板块的秦岭一大别缝合带的作用结果。无论哪种情况,白马寨硫化物成矿系统的热液改造作用均可能是海西期后沿 ASRR 断裂带的构造运动的结果。白马寨地区基性—超基性岩浆体系中的富含铜的镍矿石的形成可以用热液成矿模式来进行解释, Cu(及 Pd)的富集作用是在岩浆期后阶段,硫化物与晚期热液流体相互作用的结果。

致谢:本文是在 2006 年张学书博士论文研究成果基础上,结合近年来特别是 2009~2011 年间对白马寨铜镍矿及其外围找矿实践基础上所获得的研究成果。撰写过程得到白马寨镍矿的大力支持。昆明理工大学秦德先教授、云南省有色地质局任治机高级工程师、西澳大利亚大学 Zoran Seat 教授等提出了宝贵意见,桂林矿产地质研究院的陈民扬教授进行了³⁹Ar/⁴⁰Ar 法同位素年龄测定,西澳大利亚地质调局(GSWA)的 Michael Prause 和 Susanne Dowsett 制作了文中插图,在此一并致谢。

参考文献 (References):

[1] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits — geology, geochemistry and exploration[M]. Springer-Verlag, 2004.

[2] Zhou M F, Lesher C M, Yang Z X, Li J W, Sun M. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. Chem Geol., 2004, 209: 233—257.

[3] Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, Keays R R, Lesher C M. Magmatic Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits in China[J]. Chem. Geol., 2002, 209: 233—257.

[4] Wang Y W, Wang J B, Wang L J, Wang Y. CNREE characteristics of the Kalatongke Cu-Ni deposit, Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78: 396—403.

[5] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, Sun M, Wang Y L. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China[J]. Miner Dep., 2003, 38: 831—843.

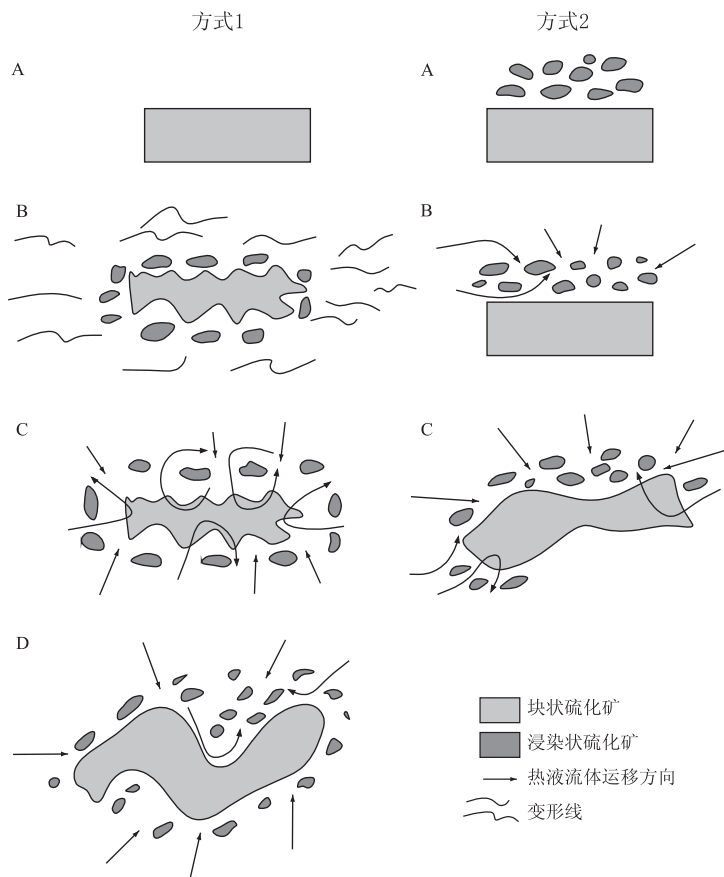


图 8 改造型矿石成因模式示意图
Fig. 8 Metallogenic model for ore derived from hydrothermal reworking

- [6] Yao S H, Zhang Z C, Wang D H, Chen B L, He L X, Zhou G. Kalatongke magmatic copper-nickel sulfide deposit [A]. Mao J W, Goldfarb R, Seltmann R, Wang D H, Xiao W J, Hart C. Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan [C]. Int. Sym. IGCP-473 Proj. Guidebook Ser10, 2003; 31-152.
- [7] Zhong H, Zhou X H, Zhou M F, Sun M, Liu B G. Platinum-group element geochemistry of the Hongge Fe-Ti-V deposit in the Pan-xi area, southwestern China [J]. Miner. Dep., 2002, 37; 226-239.
- [8] Zhong H, Yao Y, Hu S F, Zhou X H, Liu B G, Sun M, Zhou M F, Viljoen M J. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Hongge layered intrusion, southwestern China [J]. Int. Geol. Rev., 2003, 45; 317-382.
- [9] Glotov A I, Ployakov G V, Hoa T T, Balykin P A, Akimtsev V A, Krivenko A P, Tolstykh N D, Phuong N T, Thanh H H, Hung T Q, Petrova T E. The Ban-Phuc Ni-Cu-PGE deposit related to the Phanerozoic komatiite-basalt association in the Songda rift, northwestern Vietnam [J]. Can. Mineral., 2001, 39; 573-589.
- [10] Brown A C. Stratiform copper deposits: Evidence for their post-sedimentary origin [J]. Min. Sci. Eng., 1979, 10; 152-170.
- [11] 朱炳泉, 胡耀国, 张正韦, 常向阳. 滇-黔地球化学边界似基韦诺(Keweenaw)型铜矿床的发现 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 48(S2): 49-59.
Zhu Bingquan, Hu Yaoguo, Zhang Zhengwei, Chang Xianyang. Discovery of copper deposits with features of the Keweenawan type in the border area of Yunnan and Guizhou provinces [J]. Sciences in China (D), 2003, 48(S2): 49-59. (in Chinese with English abstract)
- [12] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995; 117-125.
Tang Zhongli, Li Wenyuan. Geological comparison and metallogenic model of Jinchuan Copper and Nickel (Pt-bearing) sulfide deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995, 117-125.
- [13] 宋立军, 吴冲龙, 朱杰勇, 尹潘, 梁雄兵, 张中旺, 佟彦明. 白马寨铜镍硫化物地球化学特征及成矿 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(4): 39-46.
Song Lijun, Wu Chonglong, Zhu Jieyong, Yin Pan, Liang Xiongbing, Zhang Zhongwang, Tong Yanming. Geochemical characteristics and mineralization of Baimazhai Cu-Ni sulfide deposit, Yunnan Province [J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(4): 39-46.
- [14] Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. Origin of the Permian Baimazhai Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Jinping, Southern Yunnan Province, SW China [A]. Proceedings of the IGCP 479 workshop, Hong Kong, Abstract [C]. 2004; 76-78.
- [15] Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2006, 152; 309-321.
- [16] 王焰. 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, 2008, 27; 332-341.
Wang Yan. 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, 2008, 27; 332-341. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙晓明, 王生伟, 石贵勇, 熊德信. 云南白马寨 Cu-Ni 硫化物矿微量和铂族元素地球化学和矿床成因意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27; 239-246.
Sun Xiaoming, Wang Shengwei, Shi Guiyong, Xiong Dexin. Trace and platinum group elements (PGE) geochemistry of sulfide ores and related intrusive rocks from the baimazhai Cu-Ni deposit of Yunnan Province, China [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27; 239-246. (in Chinese with English abstract)
- [18] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in the generation of the Emeishan flood basalts as the Permian-Triassic boundary [J]. Geology, 1995, 23; 889-892.
- [19] Chung S L, Jahn B M, Wu G Y, Lo C H, Bolin C. The Emeishan flood basalts in SW China: A mantle plume initiation model and its connection with continental breakup and mass extinction at the Permian-Triassic boundary [J]. Am. Geophys. Union Geod., 1998, 27; 47-58.
- [20] Xiao L, Xu Y G, Chung S L, He B, Mei H. Chemostratigraphic correlation of upper Permian lavas from Yunnan Province, China: Extent of the Emeishan Large Igneous Province [J]. Int. Geol. Rev., 2003, 45; 754-766.
- [21] Xu Y G, He B, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. Lithos, 2001, 58(3-4): 145-168.
- [22] Boven A, Pasteels P, Punzalan L E, Liu J, Luo X, Zhang W, Guo Z, Hertogen J. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ geochronological constraints on the age and evolution of the Permo-Triassic Emeishan volcanic province, southwest China [J]. Journal Asian Earth Science, 2002, 20(2): 157-175.
- [23] Zhang Z C, Hao Y L, Wang F, Mahoney J J. Petrology, mineralogy and geochemistry of the Emeishan continental flood basalts, SW China: Evidence for activity of mantle plumes [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78; 40-51.
- [24] Xiao L, Xu Y G, Xu J F, He B, Pirajno F. Chemostratigraphy of flood basalts in the Garze-Litang region and Zongza Block: Implications for western extension of the Emeishan Large Igneous Province, SW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78; 61-67.
- [25] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. Distinct mantle sources of low-Ti and high Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction [J]. Earth Planet. Sci. Lett. 2004, 228; 525-546.
- [26] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 峨眉山大火成岩省的

- 形成机制及空间展布:来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2):194-202.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, Wang Kangming, Sha Shaoli. Generation and spatial distribution of the emeishan large Igneous province: New evidence from stratigraphic records [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [27] Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A, Frey F A. Geologic, geochemical and geophysical consequence of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. Geology, 2004, 32: 917-920.
- [28] Guo F, Fan W M, Wang Y J, Li C W. When did the Emeishan mantle plume activity start? geochronological and geochemical evidence from ultramafic-mafic dikes in southwestern China[J]. Int. Geol. Rev., 2004, 46: 226-234.
- [29] 石贵勇, 孙晓明, 王生伟, 熊德信, 屈文俊, 杜安道. 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, 2006, 22: 2451-2456.
- Shi Guiyong, Sun Xiaoming, Wang Shengwei, Xiong Dexin, Qu Wenjun, Du Andao. Re-Os isotopic dating and its geological implication of Baimazhai Cu-Ni sulphide deposit, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2451-2456. (in Chinese with English abstract)
- [30] Lo C H, Chung S L, Lee T Y, Wu G Y. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2002, 198: 449-458.
- [31] Ali J R, Lo C H, Thompson G M, Song X Y. Emeishan basalt Ar-Ar overprint ages define several tectonic events that affected the western Yangtze platform in the Mesozoic and Cenozoic[J]. Journal of Asian Earth Science, 2004, 23: 163-178.
- [32] Marshall B, Vokes F M, Larocque A C L. Regional metamorphic remobilization: Upgrading and formation of ore deposits[J]. Rev. Econ. Geol., 2000, 11: 19-38.
- [33] Tomkins A G, Pattison D R M, Zaleski E. The Hemlo gold deposit, Ontario: An example of melting and mobilization of a precious metal-sulfosalt assemblage during amphibolite facies metamorphism and deformation[J]. Econ Geol., 2004, 90: 1063-1084.
- [34] Boudreau A E, McCallum I S. Concentration of platinum-group elements by magmatic fluids in layered intrusions[J]. Econ. Geol., 1992, 87: 1830-1848.
- [35] McCallum M E, Loucks R R, Carlson R R, Cooley E F, Doherty T A. Platinum metals associated with hydrothermal copper ores of the New Rambler mine, Medicine Bow Mountains, Wyoming[J]. Econ. Geol., 1976, 71: 1429-1450.
- [36] McCandless T E, Ruiz J. Osmium isotopes and crustal sources for platinum-group mineralization in the Bushveld complex, South Africa[J]. Geology, 1991, 19: 1225-1228.
- [37] Farrow C E G, Watkinson D H. An evaluation of the role of fluids in NI-Cu-PGE-bearing mafic ultramafic systems[J]. Geol Assoc Can Short Course Notes, 1999, 13: 31-67.
- [38] Watkinson D H, Melling D R. Hydrothermal origin of platinum-group mineralization in low-temperature copper sulfide-rich assemblages, Salt Chuk intrusion, Alaska[J]. Econ. Geol., 1992, 87: 175-184.
- [39] Hou Z Q, Chen W, Lu J R. Collision event during 177-135 Ma on the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau: evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for basalts on the western margin of the Yangtze platform[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76: 194-204.
- [40] 张学书, 范柱国, 秦德先, 陈爱兵, 邓明国, 刘光亮. 金平地区二叠纪玄武岩地球化学特征[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2005, 30(4): 13-17.
- Zhang Xueshu, Fan Zhuguo, Qin Dexian, Chen Aibing, Deng Mingguo, Liu Guangliang. Geochemistry of Permian flood basalts in Jinping area[J]. J. Kunming Univ. Sci. Tech. (Science and Technology Edition), 2005, 30(4): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [41] 张学书, 秦德先, 范柱国, 念红, 刘光亮. 云南省金平白马寨铜镍矿区镁铁-超镁铁岩群地球化学特征[J]. 地质与勘探, 2005, 41(4): 51-56.
- Zhang Xueshu, Qin Dexian, Fan Zhuguo, Nian Hong, Liu Guangliang. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic swarms in the Baimazhai nickel and copper deposit, Jinping, Yunnan[J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(4): 51-56. (in Chinese with English abstract)
- [42] 张学书, 秦德先, 范柱国, 刘光亮. 金平地区二叠纪玄武岩与铜镍矿成因关系初探[J]. 地质与勘探, 2004, 40(5): 49-55.
- Zhang Xueshu, Qin Dexian, Fan Zhuguo, Liu Guangliang. Genetic relation between Permian flood basalts and nickel-copper deposits in the Jinping area[J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(5): 49-55. (in Chinese with English abstract)
- [43] 张学书, 秦德先, 蒋建华, 范柱国, 刘光亮. 金平地区二叠纪玄武岩形成环境初探[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2004, 29(6A): 1-6.
- Zhang Xueshu, Qin Dexian, Jiang Jianhua, Fan Zhuguo, Liu Guangliang. Primary study on the origin of Permian flood basalts in Jinping area[J]. J. Kunming Univ. Sci. Tech. (Science and Technology Edition), 2004, 29(6A): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [44] Zhang X S, Franco P, Qin D, Fan Z, Liu G, Nian H. Baimazhai, Yunnan Province, China: A hydrothermally modified magmatic nickel-copper-PGE sulfide deposit[J]. International Geology Reviews, 2006, 48(8): 725-741.
- [45] 张学书. 金平-黑水河裂谷基-超基性岩特征、成矿系列及成矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- Zhang Xueshu. Mafic-ultramafic rocks, metallogenetic series and prospecting targeting in the Jinping-Song Da rift[D]. Kunming: University of Science and Technology of Kunming, 2006. (in Chinese with English abstract)