

# 地幔柱成矿系统:以峨眉山地幔柱为例

胡瑞忠, 陶 琰, 钟 宏, 黄智龙, 张正伟

中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002

HU Rui zhong, TAO Yan, ZHONG Hong, HUANG Zhi long, ZHANG Zheng wei

Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

HU Rui zhong TAO Yan ZHONG Hong et al Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province, southwest China *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 042-054

**Abstract:** The theory of mantle plumes casts a new light on explaining intraplate magmatism and mineralization in the dynamics of the Earth. Several important ore deposit types have strong links with the Emeishan igneous province which is thought to be related to a mantle plume. Using the Emeishan as a case study, we discuss the metallogeny of various deposit types and the relationship between the mineralization and magmatism of a mantle plume. Magmatic Cu-Ni-PGE deposits are important ones in the mineralization system of the Emeishan mantle plume. Studies on the geochemistry and mineralization of typical Cu-Ni-PGE deposits, indicate that the ore-bearing intrusions have genetic link with the Emeishan Continental Flood Basalt (ECFB). The parental magma of ore-bearing intrusion is a high Mg basalt originated from high degree partial melting in center of the mantle plume. The Cu-Ni-PGE deposits are originate within the inner zone of the mantle plume, from which low Ti basalts are erupted. The paper provides a summary study of geology and geochemistry of the four giant V-Ti magnetite deposits in the Pan Xi area, and concludes that the parental magma of the deposits originated from the Emeishan mantle plume. The magmas experienced crustal contamination. Furthermore, multiple pulses of magma, magma mixing, double diffusion at the crystallization frontier led to the formation of the rhythmic ores. We also discuss the large scale native copper mineralization in the border areas between Yunnan and Guizhou Provinces. Geochronological and geochemical evidence indicates that this copper mineralization is associated with magma fractionation during the terminal stage of lava eruptions and the inception of hydrothermal activation. Taking the Huize Pb-Zn deposit as an example, we have studied the genetic relationship between Emeishan basalt and Pb-Zn deposits in terms of ore-forming age, ore-forming material source, ore-forming fluid source and metallogenothermal dynamics. The results show that the metallogeny of the Pb-Zn deposits in the district has a close relationship with the emplacement of the ECFB.

**Key words:** Emeishan mantle plume; mineralization system; magmatic Cu-Ni-PGE deposit; V-Ti magnetite deposit; native copper deposit; Pb-Zn deposit

**摘要:** 地幔柱沟通了地核、地幔、地壳各个圈层之间的物质与能量交换, 提供了板内构造岩浆活动及成矿作用的一种重要的动力学机制。峨眉山地幔柱是晚古生代全球最显著的地幔柱活动之一, 形成了多种有重大资源经济价值的矿床类型。以峨眉山地幔柱为例, 对几种典型矿床类型的产出特征及成因进行了系统分析, 阐述了地幔柱成矿系统中各种成矿作用与地幔柱构造岩浆活动的关系及成矿机理。(1) 通过对部分典型岩浆硫化物矿床的地质地球化学特征和矿化特征分析, 揭示了峨眉山大火成岩省不同矿化特征的岩浆硫化物矿床形成于统一的地幔柱岩浆活动体系, 并与峨眉山玄武岩为同源演化关系, 岩浆演化过程及硫化物熔离富集过

收稿日期: 2005-02-01; 修回日期: 2005-02-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3 SW-125); 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 胡瑞忠(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 矿床地球化学专业。E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

程存在的差异造成了矿化类型的变异。(2)对攀西地区4个超大型钒钛磁铁矿矿床进行了详尽的地质地球化学分析,论述了成矿岩浆的性质、与峨眉山玄武岩的关系及成岩演化过程和成矿模式,表明成矿母岩浆来自于地幔柱,但经历了较大程度的地壳混染作用,提出岩浆的多次补给混合及结晶锋面上发生的双扩散造成的液态分层导致了韵律条带矿石的形成。(3)阐述了滇黔相邻地区玄武岩型自然铜和黑铜矿铜矿化现象,指出玄武岩岩浆气液阶段的自变质作用和玄武岩构造变质热液蚀变改造作用两种方式造成铜矿化富集,岩浆气液阶段的自变质作用可能持续到236~223 Ma,构造变质热液蚀变改造作用发生在139~149 Ma。(4)以云南会泽铅锌矿为重点,通过成矿时代、成矿物质来源、成矿流体来源及成矿热动力条件的综合分析,探讨了峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系,论证了川—滇—黔铅锌多金属成矿域成矿作用与地幔柱活动存在成因上的密切联系。

关键词:峨眉山地幔柱;成矿系统;岩浆硫化物矿床;V-Ti磁铁矿矿床;玄武岩型铜矿;铅锌矿

中图分类号:P611 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2005)01-0042-13

## 1 地幔柱及成矿作用概述

Wilson在1963年提出地幔热点假说<sup>[1]</sup>,经过数十年的科学探索,地幔柱作为一种重要的地球动力学机制得到了地球化学、地球物理等众多证据的支持,并成为当前固体地球科学研究的前沿领域之一。微量元素地球化学及同位素示踪研究揭示地幔柱可形成于大洋岩石圈的再循环作用<sup>[2~4]</sup>,削减洋壳被俯冲带到地幔深部或核幔边界,经过1~2 Ga滞留后获得热浮力上升。深部地球物理层析成像研究表明,地幔柱来自于核幔边界或660 km深处上下地幔不连续界面的热边界层,在地幔中上升形成蘑菇状结构特征的特殊地幔体<sup>[5~7]</sup>,在到达岩石圈底部时地幔柱头的直径可达1 000~2 000 km,地幔柱绝热减压上升,部分熔融导致大量玄武质岩浆的喷发及侵入<sup>[8]</sup>,同时,造成岩石圈拉张减薄,伴随地壳隆升并形成裂谷等<sup>[9]</sup>。

板块构造理论的诞生导致了成矿理论研究的一次重大飞跃,促进了对板块边缘成矿体系和成矿机制认识的深刻变革,但板块构造理论在解释板块内部成矿现象方面遇到了一系列困难,如成矿作用的动力来源问题、板块内部不同类型的矿床在成因机制上的关联问题等<sup>[10]</sup>。地幔柱为板内构造岩浆活动及成矿作用提供了一种动力学机制,而且,在地幔柱理论框架下,全球成矿体系不再局限于板块之间的相互作用,地幔柱沟通了地核、地幔、地壳各个圈层之间的物质与能量交换。因此,研究地幔柱成矿作用对完善和发展成矿理论、进一步揭示成矿规律具有重要的科学意义。

地幔柱以大规模幔源岩浆活动为突出表现,成矿作用也以幔源岩浆矿床为主,成矿元素包括Cu、Ni、PGE、Fe、Ti、V、Cr等,可形成具有重大资源意

义的岩浆Cu-Ni-PGE矿床、V-Ti磁铁矿矿床、铬铁矿矿床等。西伯利亚地幔柱活动形成了Noril'sk-Talnakh超大型Ni-Cu-PGE矿床,其Ni矿储量位居世界第一、PGE储量位居世界第二(Ni为2 000万t,Cu为3 000万t,PGE为5 000 t)<sup>[11]</sup>。Bushveld杂岩体是世界上已知最古老的地幔柱岩浆成矿系统,也是世界最大的“聚宝盆”,据估算主要矿产储量有PGE 61 738 t、磁铁矿10亿t、Ni(伴生)2 280万t、Cu(伴生)995万t、Cr(矿石)40亿t、V(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)1 680万t、Au(伴生)1 152 t等<sup>[12]</sup>。另外,部分金伯利岩和碳酸盐岩也被认为与地幔柱作用有关,与之相联系的有金刚石矿床,稀有、稀土元素矿床<sup>[9]</sup>。

地幔柱作为一种重大的构造运动方式,其表现是多方面的,不仅地幔柱自身的熔融作用形成幔源岩浆矿床,而且通过壳幔相互作用,如地幔热流的上升诱发地壳的重熔以及各种地壳浅部的地质响应,可以形成壳源岩浆矿床、热液矿床等。近年来,一些研究人员认为许多大型、超大型热液矿床的形成与地幔柱活动有关,如卡林型金矿、Kidd Creek块状硫化物矿床、甚至Olympic Dam矿床等也都被认为与地幔柱活动有关<sup>[9,13]</sup>。

中国在成矿学方面也较早地运用了地幔柱理论<sup>[14~16]</sup>,主要侧重于与地幔柱间接相关的矿床研究及区域成矿分析,探讨重要成矿域大规模成矿与地幔柱活动的关系。近年来对由地幔柱活动直接形成的岩浆矿床的研究也取得了一些新的进展。但总体上,对地幔柱成矿作用的系统研究还比较薄弱。当前,地幔柱的地球物理、地球化学模型已基本确立<sup>[9]</sup>,峨眉山地幔柱活动形成了多种矿床类型、并在不同的空间上分布,为探讨地幔柱成矿系统提供了良好的研究对象<sup>[7]</sup>。本文以峨眉山地幔柱为例,对几种典型矿床类型的产出特征及成因进行分析,以

期促进对地幔柱成矿系统的进一步探索。

## 2 峨眉山地幔柱简介

### 2.1 峨眉山地幔柱活动的证据

扬子地台西缘大面积分布晚古生代玄武岩,在川滇黔桂四省一个大约 50 万 km<sup>2</sup> 的菱形区域大量出露,火山岩系厚度从 5 000 多 m(云南宾川)到几百 m(贵州)不等,为全球晚古生代最主要的大火成岩省(LIP)之一<sup>[18]</sup>。地质地球化学、地球物理研究表明,峨眉山大火成岩省是晚古生代峨眉山地幔柱活动的产物。

(1)大规模玄武岩快速喷发。传统意义上的峨眉山玄武岩是指分布于扬子克拉通西缘的晚二叠世玄武岩,出露面积约 0.3×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup><sup>[19,20]</sup>,但包括四川盆地大量的隐伏玄武岩及哀牢山—红河断裂带以西大规模侧向挤出的部分在内,总的初始覆盖面积超过 0.5×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup><sup>[21~23]</sup>。玄武岩出露厚度在西岩区最大,如宾川上苍剖面厚 5 386 m、中岩区米易龙帚山为 3 000 m 左右,东岩区较薄,厚度数百米。根据岩相古地理研究,晚二叠—早三叠世沉积地层飞仙关组、嘉陵江组的成分中,玄武岩陆源碎屑占 80%以上,统计计算处于康滇古陆核心部位的峨眉山玄武岩最大剥蚀厚度超过 5 km<sup>[24]</sup>。Zhu 等(2003)结合对地球物理剖面的综合分析,估计峨眉山玄武岩初始厚度在西岩区和中岩区分别为 8 km 和 5 km<sup>[25]</sup>,其规模可以和世界其他一些典型的大火成岩省相类比<sup>[26]</sup>。

近年来对峨眉山玄武岩及相应的侵入岩开展了大量的高精度同位素年龄测定,峨眉山玄武岩主喷发期基本上可限定在 256 Ma 左右<sup>[23,27~30]</sup>,对玄武岩层序古地磁测量揭示喷发时限为 1~2 Ma<sup>[31]</sup>。

(2)高地幔潜能温度及高镁玄武岩岩浆。峨眉山大火成岩省多处发现苦橄岩产出,研究表明部分苦橄岩全岩组成基本接近原始岩浆成分<sup>[32,33]</sup>,据苦橄玄武岩橄榄石斑晶中熔融包裹体的成分测定<sup>[31]</sup>, $w(\text{MgO})=11.07\% \sim 16.77\%$ ,平均 13.56%,原始岩浆为高镁玄武岩岩浆。徐义刚等(2001)结合熔融条件分析并根据低钛玄武岩 REE 组成反演岩浆起源条件,认为岩浆形成温度大于 1 450 °C<sup>[32,33]</sup>,远远高于正常软流圈的潜能温度(1 280 °C)。对峨眉山大火成岩省 Cu Ni PGE 矿化岩体的研究也表明,其原始岩浆为高程度部分熔融形成的高镁玄武岩岩浆<sup>[34]</sup>。

(3)大规模岩浆喷发前有公里级的地壳抬升。He 等(2003)通过对峨眉山玄武岩下伏茅口组灰岩地层系统的对比研究,证实峨眉山大火成岩省在玄武岩喷发之前发生过显著、快速的穹隆抬升,抬升时间估计不超过 3 Ma,抬升幅度在穹隆中心部位超过 1 km<sup>[35]</sup>。反映出地壳对地幔柱活动的动力学响应。

(4)引发环境的灾变。地幔柱活动将深部地球巨大的物质与能量快速释放到地表,不可避免地导致气候环境的灾变,Zhou 等(2001)指出峨眉山地幔柱活动与 Guadalupian 生物灾变事件在时间上高度吻合,认为存在直接的关联<sup>[23]</sup>。

(5)地球物理证据。与地幔柱有关的大火成岩省的地震波研究表明,在上地幔顶部有一高速附加层。地震波层析成像揭示峨眉山大火成岩省同样存在这样的高速附加层<sup>[36]</sup>。热力学计算及对矿物组合的地震波动参数拟合研究表明<sup>[25]</sup>,峨眉山大火成岩省下地壳和上地幔之间 P 波速为 7.1~7.8 km/s 的高速附加层,是由来自地幔柱岩浆在此结晶分异形成的。另外,层析成像在 80~160 km 深度区间存在一个 P 波速大于 8.3 km/s 的高波速区,被认为是地幔柱部分熔融后的残余(地幔柱化石)<sup>[37]</sup>。

### 2.2 峨眉山地幔柱岩浆活动模型

Xu 等(2001,2004)对峨眉山大火成岩省岩石地球化学及地幔柱动力学效应开展了综合研究,建立了峨眉山地幔柱岩浆活动体系<sup>[37,22]</sup>,揭示出峨眉山地幔柱岩浆活动在时空上的变化规律。研究认为,低 Ti 玄武岩主要为地幔柱岩浆活动早期中心部位岩石圈高度拉张减薄环境下大量地幔上涌、高程度部分熔融作用形成(原始岩浆 MgO 含量超过 10%~12%,相当于高镁玄武岩);高 Ti 玄武岩则是在地幔柱活动相对较弱的阶段特别是地幔柱活动中心的边缘地带、岩石圈较厚、熔融程度相对较低的条件下形成。研究表明,地幔柱活动中心在大理—丽江—攀枝花一带,并将峨眉山地幔柱岩浆活动模型划分出内带、过渡带及外带(图 1),内带以低钛玄武岩为主,而过渡带及外带基本上为高钛玄武岩<sup>[33]</sup>。

### 2.3 峨眉山地幔柱成矿作用类型

高振敏等(2004)研究认为<sup>[17]</sup>,峨眉山地幔柱活动形成了大量成矿元素的工业富集,矿床类型和矿化类型多种多样。其中,由地幔柱岩浆活动直接形成的矿床有:与基性超基性岩岩浆硫化物熔离作用有关的 Cu Ni PGE 岩浆硫化物矿床,与基性超基

性岩岩浆结晶分异作用有关的 V-Ti-Fe 岩浆氧化物矿床, 与溢流玄武岩火山喷气作用有关的火山岩型

表明, 硫不饱和的熔融是形成 Cu-Ni PGE 矿床重要的岩浆条件, 成矿原始岩浆一般为地幔较程度熔融形成的高镁玄武岩或苦橄质岩浆<sup>[40, 41]</sup>。因此, 地幔柱构造岩浆活动的内在规律与 Cu-Ni PGE 矿床对成矿岩浆条件的要求, 构成了地幔柱成矿系统中 Cu-Ni PGE 矿床成矿作用的基本限定。

### 3.1 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni PGE 矿床的时空分布

峨眉山大火成岩省岩浆 Cu-Ni PGE 矿化岩体主要产出在峨眉山地幔柱活动模型内带低钛玄武岩分布区(图 1), 并在地壳强烈抬升剥蚀区出露, 如元谋岩群、会理小关河岩群。成矿岩体出露在整个川滇构造带上, 呈线形分布, 包括最北端的丹巴地区、南西部的大理-丽江地区。典型矿床主要有金宝山铂钯矿、朱布 Cu-Ni PGE 矿床、力马河镍矿、杨柳坪 Cu-Ni PGE 矿床等。过渡带及外带高钛玄武岩分布区缺乏 Cu-Ni PGE 矿床的产出。

锆石 U-Pb 年龄测定表明, 朱布岩体成岩年龄为  $(256 \pm 1) \text{ Ma}$ <sup>[42]</sup>, 力马河为 260 Ma(周美夫, 私人通讯, 2005)。金宝山、力马河目前还没有获得精确可靠的同位素年龄测定结果, 但根据已有同位素年龄测定资料并结合岩体产状综合分析, 其也被认为是与峨眉山玄武岩喷发同期形成的<sup>[43]</sup>。

### 3.2 成矿岩体的地球化学亲缘性及与峨眉山玄武岩的关系

峨眉山大火成岩省岩浆 Cu-Ni PGE 矿床各成矿岩体的微量元素地球化学特征相似, Nd 同位素组成亦非常接近,  $\epsilon_t(\text{Nd})$  变化范围在  $0.0799 \sim -0.2729$ , 表现出相同的成因属性。另一方面, 金宝山、朱布、力马河、杨柳坪等矿床岩矿石的微量元素组成与低钛峨眉山玄武岩(LTEFB)的微量元素组成相似(图 2), 各成矿岩体的 Nd 同位素组成也落在峨眉山玄武岩的组成范围之内。

已有研究表明, 成矿岩体与低钛峨眉山玄武岩的成矿元素盈亏相对应, 大部分低钛峨眉山玄武岩不是原始岩浆的直接喷出物, 而是高镁玄武岩岩浆经深部橄榄石结晶分异及(或)硫化物熔离亏损后的残余熔体<sup>[32, 33, 46]</sup>。在图 3 所示的 MgO-Ni 关系图上, 两类峨眉山玄武岩和典型 Cu-Ni PGE 成矿岩体具有良好的成分变化趋势。高钛峨眉山玄武岩表现了地幔部分熔融作用的趋势, 而低钛玄武岩与矿化岩体则构成另一条与之相交的趋势线。Cu-Ni PGE 矿石在地幔部分熔融趋势线之上, 是硫化物熔离富

Cu、Fe 矿床以及 PGE 热液活动形成的 PGE 热液矿床; 由地幔柱活动间接形成的矿床主要有与壳幔相互作用有关的岩浆热液矿床(稀有元素 Be、Li、Nb、Ta 矿床、REE 矿床), 与地壳响应有关的中低温热液矿床(Au、Pb、Zn)等。

## 3 峨眉山地幔柱成矿系统中的岩浆 Cu-Ni PGE 矿床

地幔柱成矿系统中, 岩浆 Cu-Ni PGE 矿床是最重要的矿床类型之一, 世界上许多重要的岩浆 Cu-Ni PGE 矿床成矿岩体, 如 Bushveld、Noril'sk、Great Dyke、Duluth Complex 等都被认为是地幔柱岩浆活动的产物<sup>[9, 13, 38]</sup>。峨眉山大火成岩省岩浆 Cu-Ni PGE 矿化岩体广泛分布, 构成峨眉山地幔柱成矿系统中一个非常重要的成矿系列。

岩石地球化学研究已基本确立了地幔柱岩浆活动体系<sup>[39, 32]</sup>, 揭示出地幔柱岩浆活动在时空上的变化规律。同时, 对岩浆 Cu-Ni PGE 矿床的理论研究

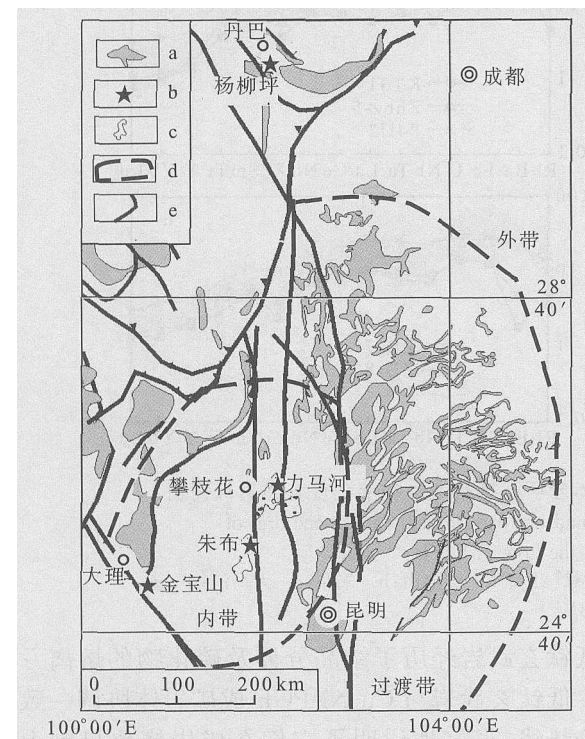


图 1 典型 Cu-Ni PGE 矿床的分布 (地幔柱活动分带及玄武岩分布, 据 Xu 等, 2004<sup>[37]</sup>)

Fig. 1 Locations of the typical Cu-Ni PGE deposits in ELIP a—玄武岩; b—典型 Cu-Ni PGE 矿床产出位置; c—矿化岩体群范围; d—地幔柱岩浆活动分带界线; e—断裂

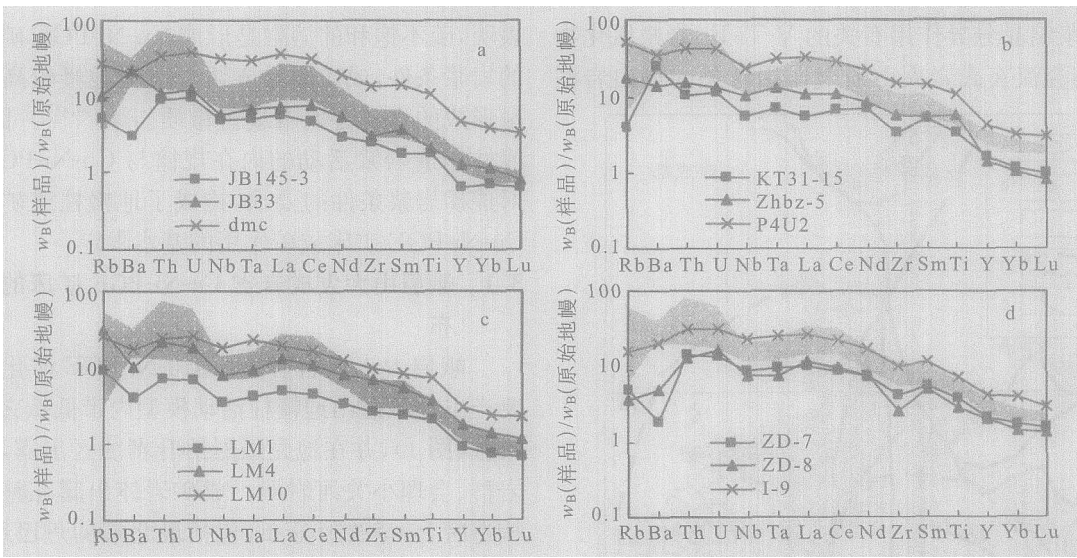


图2 峨眉山低钛玄武岩与典型 Cu Ni PGE 矿化岩体矿石原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 2 Primitive mantle normalized trace element abundance pattern of the rocks and ores of the typical deposits in ELIP and the Low-Ti ECFB

阴影部分示低钛峨眉山玄武岩微量元素分布区间, 其数据据文献 [22]。a—金山; b—朱布; c—力马河; d—杨柳坪。原始地幔据文献 [44], 杨柳坪矿床数据据 Song 等 (2003) [45]

集作用的结果; 而成矿岩体的基性岩分异相及低钛峨眉山玄武岩却落在地幔部分熔融趋势线之下, 体现了硫化物熔离亏损及结晶分异的组合效果。两条趋势线的交点明确指示 MgO 含量大于 10%, 表明成矿岩体均由 MgO 含量大于 10% 的高镁玄武岩浆演化而形成。Ni 是典型的相容元素, 在熔体中的含量与熔融程度应保持正相关关系, 低钛峨眉山玄武岩熔融程度远远高于高钛玄武

些低钛玄武岩经历了结晶分异及硫化物的熔离亏损。低钛玄武岩与 Cu Ni PGE 成矿岩体协调一致的趋势线, 很好地说明了它们在成岩演化机制上的相互对应关系。

### 3.3 矿化特征及矿化类型变异

尽管峨眉山大火成岩省产出的 Cu Ni PGE 成矿岩体岩石地球化学性质相似, 表现出良好的地球化学亲缘关系, 但由于岩浆演化过程及硫化物熔离富集程

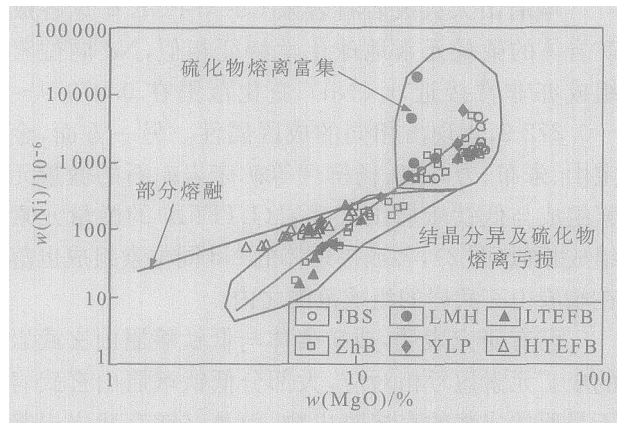


图3 峨眉山大火成岩省玄武岩及典型 Cu Ni PGE 成矿岩体矿石 MgO-Ni 关系

Fig. 3 Variation of Ni versus MgO of the Emeishan basalts and the typical deposits in ELIP

JBS—金山; ZhB—朱布; LMH—力马河; YLP—杨柳坪; LTFEB—低钛峨眉山玄武岩; HTEFB—高钛峨眉山玄武岩

岩 [32], 因此, 部分熔融作用无法解释低钛玄武岩 Ni 含量显著低于高钛玄武岩的现象, 只能说明这

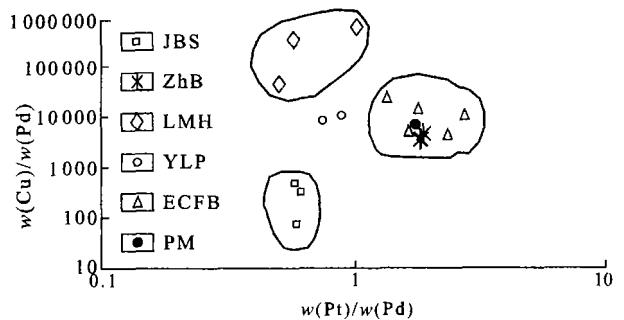


图4 Pt/Pd Cu/Pd 变异图

Fig. 4 Pt/Pd Cu/Pd diagram

JBS—金山; ZhB—朱布; LMH—力马河; YLP—杨柳坪; PM—原始地幔

度的差异, 使得不同矿床在成矿元素组成、矿体产出形态和矿石结构构造上仍存在较大差别(表 1)。

根据贵、贱金属的分异程度, Cu Ni PGE 矿床可分为富铜镍贫 PGE 型(力马河)、贫铜镍富 PGE 型(金山)和铜镍铂钯富集型(朱布)三种类型。如图 4 所示, 金山铂族元素的相对富集程度最高, 力

表 1 峨眉大火成岩省典型 Cu Ni PGE 矿床特征对比  
Table 1 Characteristics of the typical Cu Ni PGE deposits in ELIP

矿床	岩体形态	矿体产状	矿石结构	成矿元素组成特征	矿石品位
金山	岩席	似层状、凸镜状	浸染状	贫 Cu Ni 富 PGE; Pt < Pd	矿石 Pt+Pd 品位一般在 1~5 g/t, 最高可达 17 g/t, 铜质量分数平均为 0.14%; 镍质量分数平均为 0.17%。
朱布	岩株	边缘矿体(漏斗状)	浸染状	Cu Ni PGE 型; Pt > Pd	铂钯品位 0.5~1.5 g/t, 铜 0.1%~0.4%, 镍 0.5%~1.5%。
力马河	岩株	囊状	块状、陨铁状	富 Cu Ni 贫 PGE; Pt < Pd	PGE 含量很低, 铂、钯为 (10~20) × 10 <sup>-9</sup> ; 致密块状矿石镍品位在 5% 左右。
杨柳坪	岩席	似层状、凸镜状	块状、浸染状	Cu Ni PGE 型; Pt < Pd	矿石品位一般 Cu 为 0.16%~0.7%, Ni 为 0.4%~1.2%, PGE 为 1.4~2.3 g/t。

马河显著亏损铂族元素, 朱布及杨柳坪矿床的 Cu Ni 与 PGE 组成相对原始岩浆未发生显著变化。杨柳坪矿床部分矿石样品 Cu 含量的相对亏损, 可能与岩体受强烈的后期蚀变改造导致 Cu 被热液活化迁出有关<sup>[47]</sup>。研究表明, 金山、朱布和力马河矿床, 分别代表了峨眉山地幔柱岩浆 Cu Ni PGE 成矿作用不同成矿机制的端员类型。

金山含矿岩体为由原始岩浆经深部结晶分异及硫化物熔离作用形成的富含橄榄石及分散状硫化物的“晶糊”侵位形成<sup>[48]</sup>。由于 PGE 将优先进入硫化物相, 早先熔离出的少量硫化物将高度富集 PGE。因此, 金山相对贫铜、镍的铂族元素矿化, 应与熔离作用中极高的硅酸盐熔体比例或低程度的硫化物熔离作用有关。该矿床铂钯比值显著偏离地幔铂族元素组成, 可能是岩浆演化早期析出了铂的合金相, 从而造成铂部分丢失的结果。

朱布岩体的成矿元素组成特征, 较好地保持了地幔部分熔融原始岩浆的特点, 可以认为该岩体基本上是未经深部硫化物熔离分异的原始岩浆侵位的产物。Zhu 等(2004)认为与该岩体有关的朱布矿床边缘矿层的形成, 是 Soret 分异作用的结果<sup>[23]</sup>, 其矿体产状受温度梯度控制的浓度扩散效应制约, 从而形成岩体边部漏斗状的 Cu Ni PGE 硫化物矿层。

力马河矿床也是深部硫化物熔离作用的产物, 由高度富含硫化物的岩浆侵位及矿浆贯入所形成, 成矿机制类似于金川镍矿<sup>[49, 50]</sup>。力马河矿床强烈亏损铂族元素, 反映其早期少量熔离硫化物相(富 PGE)的丢失, 铜镍的高度富集则是大量硫化物二次熔离作用的结果。

杨柳坪矿床在贵、贱金属的相对含量上与朱布矿床一样, Cu Ni 与 PGE 比例相对于地幔部分熔融形成的原始岩浆未发生显著分异, 但与朱布矿床在

岩矿体产状上明显不同。Song 等(2003)的研究认为, 杨柳坪岩体是由原始岩浆在岩浆通道中受结晶分异及围岩混染诱发而形成的含硫化物岩浆以岩流形式侵位的产物<sup>[49]</sup>。

## 4 V-Ti 磁铁矿矿床

位于峨眉山大火成岩省中部的攀枝花—西昌(攀西)地区是中国钒钛磁铁矿的主要成矿带, 储量占全国同类矿床的 95% 以上。钒钛磁铁矿产于峨眉山大火成岩省中部层状镁铁超镁铁质杂岩带<sup>[20]</sup>。该杂岩带分布于北起冕宁南至攀枝花的范围内, 南北断续延伸达 300 km, 宽 10~15 km。该区域分布有镁铁超镁铁质岩体 30 余个, 其中攀枝花、红格、白马、太和 4 个岩体赋存超大型钒钛磁铁矿矿床(图 5)。赋矿层状岩体与峨眉山玄武岩、正长岩(或碱性花岗岩)密切共生, 且岩体与玄武岩基本上同时形成于 260 Ma 左右(文献[23]及钟宏未发表数据)。

### 4.1 矿床地质特征

按岩石类型和岩石组合特征, 层状岩体有镁铁质(如攀枝花、白马、太和)和镁铁超镁铁质(如红格、新街)两种类型。镁铁质侵入体以辉长岩为主, 含少量橄榄辉长岩、橄长岩、斜长岩, 岩体下部和韵律层底部可见少量超镁铁质岩石。镁铁超镁铁质侵入体由辉长岩、辉石岩和橄榄辉石岩组成, 近年来在新街、红格岩体的下部或底部的铁矿层和硫化物中发现有铂族元素(PGE)矿化<sup>[53~57]</sup>。上述两类含矿层状岩体的韵律旋回及韵律层的基本特征是: 在每一韵律层内, 自下而上岩石的基性程度逐渐降低; 岩石内铁镁造岩矿物和铁钛氧化物含量递减; 含矿性由下而上渐弱, 矿石变贫, 矿层变薄; 矿石矿物结



构及成分也同时产生相应递变。

各岩体中的钽钛磁铁矿体主要赋存于岩体中下部, 厚大的主矿层多集中在 I、II 堆积旋回的底部。

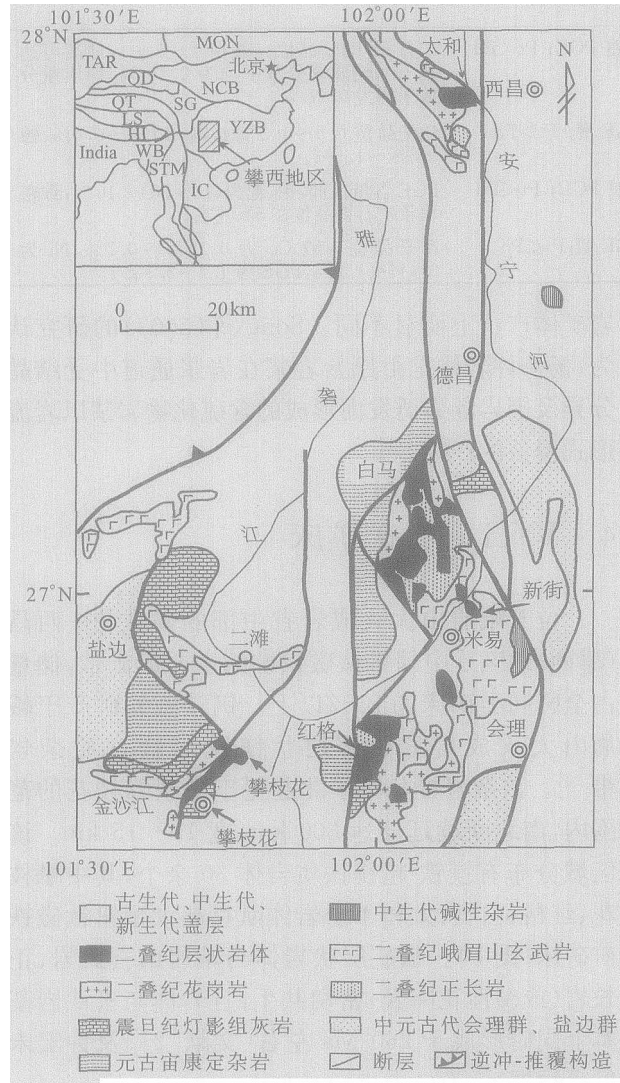


图5 攀西地区含矿层状岩体分布图  
(据刘杖等, 1985<sup>[51]</sup>修改)

Fig. 5 The geological sketch map showing the distribution of layered intrusions in Panxi area

插图表示中国主要块体的分布, 阴影部分为攀西地区的相对位置(据 Chung 和 Jahn, 1995<sup>[52]</sup>修改); NCB—华北块体; YZB—扬子块体; SG—松潘 甘孜增生杂岩带; QT—羌塘; LS—拉萨; HI—喜马拉雅; TAR—塔里木; MON—蒙古; QD—柴达木; WB—缅甸西部; STM—掸 泰 马来; IC—印支

矿体呈层状、似层状产出, 与火成层理产状一致。矿石结构构造随岩体的韵律旋回变化而递变。自形粒状镶嵌结构和海绵陨铁结构的致密块状 稠密浸染状矿石, 通常出现在每个堆积旋回底部的超镁铁质岩相中, 构成主矿层。上部辉长岩相发育不同浸染构造的条带状矿石。矿石矿物主要是含钽、钛磁铁矿(由钛铁矿、钛尖晶石、磁铁矿、镁铝尖晶石组成的

复合矿物)、粒状钛铁矿及少量磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿和镍黄铁矿。脉石矿物及副矿物为钛普通辉石、透辉石、钛普通角闪石、基性斜长石及少量黑云母、金云母、磷灰石和榍石等。矿石平均品位(质量分数)为 TFe 25.51% ~ 33.23%, TiO<sub>2</sub> 6.55% ~ 11.76%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.21% ~ 0.30%。

#### 4.2 含矿层状岩体的岩石化学、地球化学特征

攀西地区各含矿层状岩体的 Mg/Fe 比值主要峰值在 0.5~0.7, Mg<sup>#</sup> 较低<sup>[51, 55]</sup>, 表现出异常富铁钛、贫硅、碱质偏高的特征, 表明岩石属于铁质 富铁质的镁铁 超镁铁质岩类。岩石的 MgO、Mg<sup>#</sup> 与 TiO<sub>2</sub> 呈负相关而与 Cr、Ni 呈正相关关系。各岩体的每一堆积旋回中的 SiO<sub>2</sub> 含量自下而上呈周期性增加, 而 TFe、TiO<sub>2</sub>、V、Cr、Ni 则呈周期性降低。在含 PGE 矿化的红格岩体中, 每一旋回中的 Pd/Ir、Cu/Pd 比值也自下向上逐渐增大。各个大的韵律旋回之间的上述特征则表现为突变趋势<sup>[55]</sup>。

近年来的同位素地球化学研究表明, 红格、新街层状岩体的底部与围岩接触部分的 Ni(<sup>87</sup>Sr)/Ni(<sup>86</sup>Sr) 值为 0.706 0~0.707 3, ε(Nd) 值为 -1.28 ~ -5.26, 显示其受到一定程度的地壳混染作用影响<sup>[56, 57]</sup>。岩体内部的 Ni(<sup>87</sup>Sr)/Ni(<sup>86</sup>Sr) 和 ε(Nd) 值则变化较小, 分别为 0.705 7~0.706 3 和 +0.12 ~ +2.79, 表现为轻微亏损的地幔源区特征, 意味着地壳混染程度相应减小。

#### 4.3 层状岩体的岩浆演化与成矿作用

攀西地区的峨眉山玄武岩绝大部分为高钛玄武岩, 其母岩浆来自于地幔柱但经历了较大程度的地壳混染作用<sup>[22]</sup>。层状镁铁 超镁铁质侵入体与峨眉山玄武岩空间上密切共生, 且基本上同时形成。层状岩体的微量元素、Sr Nd 同位素地球化学与相邻峨眉山玄武岩也具有相似性, 揭示两者可能来源于相同岩浆源区, 但岩浆演化过程有差异<sup>[56, 57]</sup>。

攀枝花、红格、白马、太和岩体的分布均受控于近南北向的区域性断裂, 附近剥蚀残留的玄武岩(如龙昂山)厚度也很大, 这说明这些岩体很可能处于大量玄武岩浆向上运移的通道部位。各岩体每一旋回中矿层及矿石结构构造、化学成分等都显示多级韵律变化, 而各旋回界限处表现为突变, 反映了新岩浆的多次补给作用以及岩浆结晶分异过程的周期性变化<sup>[51, 20, 55~57]</sup>。

前人运用液态重力分异和结晶重力堆积、对流循环和原地结晶等观点来解释钽钛磁铁矿的成矿过

程,但未能圆满地解释层状岩体和有关矿床的复杂结构构造特征<sup>[51, 20, 58, 59]</sup>。最近,基于对红格、新街的钒钛磁铁矿、PGE 矿化进行研究并结合国外学者对 Bushveld、Stillwater 等杂岩体的研究成果,我们认为岩浆混合模式可以较为合理地解释攀西地区层状岩体中钒钛磁铁矿、Cu Ni PGE 矿化的形成过程<sup>[55, 57]</sup>。该模式提出,新注入的岩浆与残余岩浆发生的混合作用或岩浆混染作用对钒钛磁铁矿层、硫化物富集层位、PGE 矿化的形成至关重要。不同成分的岩浆发生混合导致物理化学条件(温度、氧逸度、硫逸度等)的突然变化,铬铁矿或磁铁矿首先结晶出来,极大地降低熔体中硫的溶解度,造成硫过饱和,因此分凝形成硫化物,早期硫化物同时高度富集 PGE。上述过程中形成的密度大的铁钛氧化物及硫化物可逐渐下沉到岩体或韵律层的底部形成主要含矿层位。另外,结晶锋面上发生的双扩散(热扩散、成分扩散)对流作用可造成岩浆发生液态分层,从而制约了次一级韵律层或韵律条带的形成。

## 5 自然铜矿化

最近,在滇、黔相邻地区峨眉山玄武岩的层间构造蚀变带,发现了新类型的自然铜和黑铜矿矿化现象<sup>[60, 61]</sup>。铜矿石类型为板片状、网脉状、浸染状,金属矿物以自然铜和黑铜矿为主,脉石矿物以焦沥青和石英为主。过去在峨眉山玄武岩顶部的气孔状熔岩中发现了杏仁状自然铜,但很少构成连续的铜矿体。最近识别出的与硅质沥青岩化有关的铜矿化,位于该熔岩层上下部的熔结凝灰岩中,富铜矿石往往与沥青和有机质紧密伴生,自然铜和黑铜矿的矿化与峨眉山玄武岩喷发韵律有密切的层位关系<sup>[62]</sup>。对这一类成岩成矿现象的研究,是最近几年才开始的。2001 年以来,朱炳泉等在滇黔边界地球化学急变带<sup>[63]</sup>进行野外地质调查过程中,发现了很丰富的自然铜、黑铜矿矿化现象,初步定名为似基韦诺型铜矿床<sup>[61]</sup>。随后,毛景文等(2003)采用碳氧同位素研究自然铜矿床的成矿过程,认为岩石中的沥青为火山喷发后异地石油贯入及挥发的结果<sup>[64]</sup>,但这种推断还缺乏充足的证据来详细说明。

据我们最近研究,峨眉山玄武岩内蚀变凝灰岩上部覆盖的火山角砾岩,常被碳泥质、硅质组分胶结,碳泥质层中见煤炭和硅化木。有些铜含量高的岩石除去铜和有机质等挥发份外,则为硅质岩( $\text{SiO}_2$

达到 95%)。从其低  $\text{Fe}、\text{Mn}、\text{MnO} / \text{TiO}_2 (< 0.1)$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2 (< 10)$  等特征看,应是非热水沉积硅质岩。因此,最后一次火山喷发可能晚于碳泥质岩的沉积,进一步的热泉活动使凝灰岩发生阳起石化、绿帘石绿泥石化(岩浆期后气液阶段自变质作用)。阳起石 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$  坪年龄 236 ~ 223  $\text{Ma}^{[61]}$ ,标志着峨眉山玄武岩自大爆发以来有关岩浆热液活动的终结。

在后期热液蚀变作用过程中,形成了硅质沥青岩。其中焦沥青的重烃已完全裂解,表明热液作用温度大于 180  $^{\circ}\text{C}$ ;镜质反射率确定的  $t_{\text{max}}$  可达 350 ~ 450  $^{\circ}\text{C}^{[61]}$ ;而其中方解石内流体包裹体的均一温度为 140 ~ 160  $^{\circ}\text{C}$ 。蚀变矿物片沸石的 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$  坪年龄(139 ~ 149  $\text{Ma}^{[61]}$ ),反映了侏罗纪末—早白垩世初的区域性构造热事件。构造变质热液作用形成的蚀变凝灰岩与自然铜矿化关系密切。在矿石光片中,自然铜与胶态硅质物密切共生,且具有相互穿插的结构特点,直接证明了铜的迁移主要通过硅酸介质进行。有关实验研究表明,铜能被  $\text{SiO}_2$  胶体表面的 H 离子携带,但随着物理化学条件的变化,铜可以  $\text{CuO}$  形式析出,广泛沉淀在凝灰岩和碳泥质岩的孔隙中<sup>[61]</sup>。在这一过程中,碳泥质岩石内的有机碳则生成烃类、形成沥青或形成  $\text{CO}$ ,从而导致强还原环境的出现。在强还原环境下, $\text{CuO}$  进一步与  $\text{CO}$ 、烃类物质发生还原反应,形成自然铜矿化。

综上所述,与铜矿化有关的蚀变作用主要有两种,一种是早期岩浆气液阶段的自变质作用(236 ~ 223  $\text{Ma}$ ),形成绿泥石化凝灰岩;另一种是构造变质热液蚀变作用(139 ~ 149  $\text{Ma}$ ),伴随沥青化和硅化等,形成变质熔结凝灰岩和硅质沥青岩。

## 6 峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系

位于扬子地块西南缘的川—滇—黔铅锌多金属成矿域是中国重要的  $\text{Pb}、\text{Zn}、\text{Ag}、\text{Ge}$  生产基地之一,目前已在该成矿域发现铅锌矿床、矿点和矿化点 400 多个<sup>[65]</sup>,其中绝大部分铅锌矿床、矿点和矿化点的外围有大面积峨眉山玄武岩出露,在云南省宣威县境内还有 1 个铅锌矿化点直接产在峨眉山玄武岩中。对峨眉山玄武岩浆活动与成矿的关系,不同学者有不同的认识<sup>[66-68]</sup>。随着峨眉山地幔柱及其与成矿关系研究的不断深入,越来越多的资料显示,川—滇—黔铅锌多金属成矿域成矿作用与地幔柱活



动存在密切成因联系<sup>[16,17]</sup>。云南会泽铅锌矿是该成矿域中很具代表性的超大型矿床,以下特征表明,该矿床成矿与地幔柱活动存在密切成因联系。

### 6.1 成矿时代

川—滇—黔铅锌多金属成矿域 400 多个矿床(点)集中分布于峨眉山玄武岩以下各时代地层中(只有 3 个矿化点在三叠纪地层中),推测矿床成矿时代可能与峨眉山玄武岩岩浆活动时代相近<sup>[69]</sup>。脉石矿物方解石 Sm-Nd 等时线法成功获得会泽超大型铅锌矿床 1 号矿体和 6 号矿体的成矿年龄分别为(225±38) Ma 和(226±15) Ma<sup>[70]</sup>,虽然这些成矿时代相对低于峨眉山玄武岩成岩年龄,但有研究表明,岩浆活动与成矿作用一般存在一定的时差,该时差最大值可超过 60 Ma<sup>[71,72]</sup>; Leach 等(2001)对北美 6 个主要的 MVT 铅锌矿区的古地磁定年统计结果也显示,矿化过程可以持续 25 Ma<sup>[73]</sup>。

### 6.2 成矿物质来源

Pb 同位素分析资料表明,会泽超大型铅锌矿床 95 件矿石矿物和矿石样品的 Pb 同位素组成相对稳定,绝大部分样品的  $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 、 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$  和  $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$  分别集中于 18.40~18.50、15.66~15.76 和 38.70~39.00 狭小范围内<sup>[69]</sup>,该范围位于矿区和区域不同时代碳酸盐地层、基底岩石和峨眉山玄武岩的 Pb 同位素组成范围之内,暗示本区成矿物质具有“多源性”,矿区不同时代碳酸盐地层、基底岩石和峨眉山玄武岩均可能提供成矿物质。会泽超大型铅锌矿床的 Sr 同位素组成也相对稳定,35 件矿石矿物(闪锌矿、黄铁矿)和脉石矿物(方解石)的  $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$  变化在 0.7137~0.7170,均值为 0.7163<sup>[68]</sup>,该值不仅明显高于地幔(0.704±0.002, Faure, 1977)和峨眉山玄武岩(0.7039~0.7078; 85 件样品)的  $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$ ,也相对高于矿区赋矿地层(C<sub>1b</sub>)的  $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$ (0.7087~0.7093; 3 件样品),但明显低于基底岩石的  $N_i(^{87}\text{Sr})/N_i(^{86}\text{Sr})$ (0.7243~0.7288; 5 件样品),同样表明,本区成矿物质具有“多源性”,矿区不同时代地层、基底岩石和峨眉山玄武岩均可能提供成矿物质。

### 6.3 成矿流体来源

目前有关会泽超大型铅锌矿床成矿流体来源还存在很大争论。原生矿石中矿石矿物的  $\delta^3\text{S}$  值主要集中在 13‰~17‰<sup>[64]</sup>,表明硫来源于海水硫酸盐的还原,区域上多个时代的碳酸盐地层中含有重晶

石、石膏等硫酸盐矿物,且其硫同位素组成( $\delta^3\text{S}$ : 13‰~17‰)与矿石相近,证实成矿流体中的硫主要来源于碳酸盐地层。以下事实表明,会泽超大型铅锌矿床成矿流体具有“多来源”特征,伴随峨眉山玄武岩岩浆活动过程中的去气作用(包括地幔去气作用和岩浆去气作用)形成的流体参与了矿床的成矿作用。

(1) 矿区矿石中脉石矿物方解石的 C、O 同位素组成相对均一,其  $\delta^3\text{C}_{\text{PDB}}$  介于 -2.1‰~-3.5‰、 $\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}$  介于 16.7‰~18.6‰; 在  $\delta^3\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}$  图中(图略)集中于岩浆碳酸岩与海相碳酸盐岩之间的狭小范围内;脉石矿物方解石的 C、O 同位素组成与赋矿地层(C<sub>1b</sub>)有明显的差别,后者的  $\delta^3\text{C}_{\text{PDB}}$  和  $\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}$  分别为 -0.80‰~0.74‰和 22.6‰~23.2‰; 在  $\delta^3\text{C}_{\text{PDB}}$ - $\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}$  图中(图略)落于海相碳酸盐岩范围,据此, Huang 等(2003)认为本区成矿流体为壳幔混合流体,其中壳源组分由矿区或区域碳酸盐地层提供,幔源组分与区域大面积峨眉山玄武岩岩浆活动有关<sup>[74]</sup>。

(2) 矿区脉石矿物方解石流体包裹体的 H、O 同位素组成,其  $\text{D}$  为 -50.2‰~-59.8‰、 $\delta^8\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  为 7.02‰~8.82‰<sup>[71]</sup>,在  $\text{D}$ - $\delta^8\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  图上(图略)集中于岩浆水区域的狭小范围内,该范围同时也在变质水区域内。水/岩交换反应过程中 H、O 同位素分馏计算结果表明(计算过程略),本区成矿流体中的 H<sub>2</sub>O 为一种来源于大气降水、岩浆水和变质水的混合水。至于三种类型的水在成矿流体中所占比例还有待深入研究。不难看出,其中的岩浆水与峨眉山玄武岩岩浆活动有关。

### 6.4 成矿热动力

流体包裹体温压测定结果表明,会泽超大型铅锌矿床成矿温度在 250℃左右,成矿深度为 2.00~2.50 km(张振亮,未刊资料)。如果按最大地温梯度 1℃/30m,可以计算出在成矿深度范围内的温度最大不超过 100℃,远小于成矿温度,可见成矿过程中必然有其他热动力。会泽超大型铅锌矿床铅同位素均为正常铅<sup>[69]</sup>,因而可排除放射性元素衰变产生的放射性热源提供主要热动力的可能性。区域上与成矿时代相近的岩浆活动只有峨眉山玄武岩,而峨眉山玄武岩为具有巨大热能的地幔柱活动产物,所以峨眉山玄武岩岩浆活动是成矿热动力最理想的提供者。

## 7 结论

(1) 地幔柱大规模的幔源岩浆活动及地壳响应可以形成多种具有重大资源经济价值的矿床类型, 峨眉山地幔柱成矿作用具有多样性和系统性。

(2) 峨眉大火成岩省岩浆 Cu-Ni PGE 矿化岩体广泛分布, 构成峨眉山地幔柱成矿系统中一个非常重要的成矿系列。不同成矿岩体岩石地球化学性质相似, 表现出良好的地球化学亲缘性, 并与峨眉山玄武岩为同源演化关系, 成矿岩浆为地幔柱早期中心地带高程度部分熔融形成的高镁玄武岩岩浆, 矿化岩体主要分布在峨眉山地幔柱活动模型的内带低钛玄武岩分布区。

(3) 峨眉山大火成岩省中部的攀枝花—西昌(攀西)地区产出的超大型钒钛磁铁矿矿床与峨眉山玄武岩同期形成并具有同源性, 成矿母岩浆来自于地幔柱但经历了较大程度的地壳混染作用, 岩浆的多次补给混合及结晶锋面上发生的双扩散造成的液态分层导致了韵律条带矿石的形成。

(4) 自然铜矿化由玄武岩岩浆气液阶段的自变质作用和玄武岩构造变质热液阶段的蚀变改造作用两种方式形成, 岩浆气液阶段的自变质作用可能持续到 236~223 Ma, 构造变质热液蚀变改造作用阶段发生在 139~149 Ma。

(5) 川—滇—黔铅锌多金属成矿域成矿与地幔柱活动存在密切成因联系。会泽超大型铅锌矿床成矿流体具有“多来源”特征, 伴随峨眉山玄武岩岩浆活动过程中, 去气作用形成的流体参与了矿床的成矿作用。

## References:

[ 1 ] WILSON J T. A possible origin of the Hawaiian islands[ J ] . *Can J Phys*, 1963, 41: 863-870.

[ 2 ] HOFMANN A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism[ J ] . *Nature*, 1997, 385: 219-229.

[ 3 ] HART S R, HAURI E H, OSCHMANN L A, et al. Mantle plume and entrainment: Isotopic evidence[ J ] . *Science*, 1992, 256: 517-520.

[ 4 ] CONDIE K C. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History* [ M ] . Oxford, UK: Cambridge University Press, 2001: 306.

[ 5 ] NATAF H C. Seismic imaging of mantle plumes[ J ] . *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 391-417.

[ 6 ] ZHAO D. Seismic structure and origin of hot spots and mantle plumes[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 251-65.

[ 7 ] ARNDT N. Hot heads and cold tails[ J ] . *Nature*, 2000, 407: 458-59.

[ 8 ] CAMPBELL I H, GRIFFITHS R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 79-93.

[ 9 ] ERNST R E, BUCHAN K L. Recognizing mantle plumes in the geological record[ J ] . *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2003, 31: 469-523.

[ 10 ] ZHAI Y S. Hundred years retrospect and developing trend of mineral deposit[ J ] . *Geology Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(5): 719-725 (in Chinese).

[ 11 ] NALDRETT A J. World class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[ J ] . *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 227-240.

[ 12 ] GRUENEWALDT G. The mineral resources of the Bushveld complex[ J ] . *Miner Sci and Eng*, 1977, 9(2): 83-95.

[ 13 ] PIRAJNO F. *Ore Deposits and Mantle Plumes* [ M ] . Dordrecht, Netherland: Kluwer Acad, 2000: 556.

[ 14 ] HOU Z Q, LI H Y. A tentative discussion on the mantle plume tectonics and metallogenic system as exemplified by the Sanjiang tethyan metallogenic domain[ J ] . *Mineral Deposits*, 1998, 17: 97-113 (in Chinese).

[ 15 ] LI H Y, NIU S Y, WANG L F. *Tectonics of Mantle Plume* [ M ] . Beijing: Seismological Press, 2002: 224 (in Chinese).

[ 16 ] WANG D H. Basic concept, classification, evolution of mantle plume and large scale mineralization to southwestern China [ J ] . *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3): 67-72 (in Chinese).

[ 17 ] GAO Z M, ZHANG Q, TAO Y, et al. An analysis of the mineralization connected with Emeishan Mantle Plume[ J ] . *Acta Mineralogical Sinica*, 2004, 24(2): 99-104 (in Chinese).

[ 18 ] MATHONEY J J, COFFIN M. *Large Igneous Province: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism* [ M ] . AGU Geophysical Monography, 1997, 100: 438.

[ 19 ] CONG B L. *The Formation and Evolution of Panxi Ancient Rift* [ M ] . Beijing: Science Press, 1988: 424 (in Chinese).

[ 20 ] ZHANG Y X, LUO Y N, YANG C X. *The Panxi Rift* [ M ] . Beijing: Geological Publishing House, 1988: 466 (in Chinese).

[ 21 ] CHUNG S L, LEE T Y, LO C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan Red River shear zone[ J ] . *Geology*, 1997, 25: 314-314.

[ 22 ] XU Y G, CHUNG S L, JAHN B M, et al. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Permian-Triassic Emeishan Flood basalts in southwestern China[ J ] . *Lithos*, 2001, 58: 145-168.

[ 23 ] ZHOU M F, MALPAS J, SONG X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW Chi

- na) and the end Guadalupian mass extinction [ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196: 113- 122.
- [ 24 ] PAN X N , ZHAO J X, ZHANG X Y, et al. *Tectonics and Rifting in Kangdian Region* [ M ] . Chongqing: Chongqing Publishing House, 1987; 298 (in Chinese).
- [ 25 ] ZHU D, LUO T Y, GAO Z M, et al. Differentiation of Emeishan flood basalts at the base and throughout the Crust of Southwest China [ J ] . *International Geology Review*, 2003, 45: 471-477.
- [ 26 ] ALI J R, THOMPSON G M, ZHOU M F, et al. Emeishan large igneous province SW China [ J ] . *Lithos*, 2005, 79: 475-489.
- [ 27 ] LO C H, CHUNG S L, LEE T Y. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian Triassic boundary events [ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 449-458.
- [ 28 ] BOVEN A, PASTEELS P, PUNZALAN L E, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronological constrains on the age and evolution of the Permian Triassic Emeishan volcanic province, Southwest China [ J ] . *J Asian Earth Sciences*, 2002, 20: 157-175.
- [ 29 ] GUO F, FAN W M, WANG Y J, et al. When did the Emeishan Mantle Plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic mafic dikes in southwestern China [ J ] . *International Geology Review*, 2004, 46: 226-234.
- [ 30 ] FAN W M, WANG Y J, PENG T P, et al.  $\text{Ar}$  and  $\text{U}$   $\text{Pb}$  geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guanxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism [ J ] . *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2318-2327.
- [ 31 ] HUANG K, OPDYKE N D. Magnetostatigraphic investigations of an Emeishan basalt section in western Guizhou Province, China [ J ] . *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 163: 1-14.
- [ 32 ] XU Y G, CHUNG S L. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions [ J ] . *Geochimica*, 2001, 30(1): 1-9 (in Chinese).
- [ 33 ] ZHANG Z C, HAO Y L, WANG F S. Picrites in large igneous provinces and their implications [ J ] . *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 105-114 (in Chinese).
- [ 34 ] TAO Y, GAO Z M, LUO T Y, et al. Inversion of primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan [ J ] . *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(1): 70-82 (in Chinese).
- [ 35 ] HE B, XU Y G, CHUNG S L, et al. Sedimentary evidence for a rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts [ J ] . *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 389-403.
- [ 36 ] LIU J H, LIU F T, HE J K, et al. Study of seismic tomography in Panxi paleo rift area of southwestern China: Structural features of crust and mantle and their evolution [ J ] . *Science in China (D)*, 2001, 44(3): 277-289.
- [ 37 ] XU Y G, HE B, CHUNG S L, et al. Geological geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood basalt province [ J ] . *Geology*, 2004, 32: 917-920.
- [ 38 ] TU G C. Glimpse of past achievements in ore exploration and research work [ J ] . *Mineral Deposits*, 2002, 21(2): 97-105 (in Chinese).
- [ 39 ] CAMPBELL I H, GRIFFITHS R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts [ J ] . *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 99: 79-93.
- [ 40 ] KEAYS R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S saturation in the formation of ore deposits [ J ] . *Lithos*, 1995, 34: 1-18.
- [ 41 ] BARNES, S J, MAIER W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids [ A ] . KEAYS R R, LESHNER C M, LIGHTFOOT P C, et al. *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration* [ M ] . Geological Association of Canada, 1999, Short Course 13: 9-106.
- [ 42 ] ZHOU M F, MALPAS J, SONG X Y, et al. SHRIMP zircon geochronology of the Emeishan Large Igneous Province (SW China): Implications for double mass extinction in Late Permian [ A ] . *Abstracts for Eleventh Annual V M Goldschmidt Conference* [ C ] . Hot Springs, Virginia, USA, 2001: 3519.
- [ 43 ] ZHOU M F, YANG Z X, SONG X Y, et al. Magmatic Ni-Cu (PGE) sulfide deposits in China [ A ] . CABRI L J. *The Geology, Geochemistry, Mineralogy, Mineral Beneficiation of the Platinum Group Elements* [ M ] . Can Inst Mining Metall Petrol Spec, 2002, 54: 619-636.
- [ 44 ] SUN S S, McDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [ A ] . SAUNDERS A D, NORRIS M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [ M ] . Oxford: Spec Publ, 1989, 42: 313-345.
- [ 45 ] SONG X Y, ZHOU M F, CAO Z M, et al. Ni-Cu (PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China [ J ] . *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 831-843.
- [ 46 ] TAO Y, LUO T Y, GAO Z M, et al. The relation between Emeishan Continental Flood Basalts and Cu-Ni PGE deposits of Xinan Trap—A case study on Jinbaoshan Ultramafic Intrusion, Yunnan [ J ] . *Geological Review*, 2004, 50(1): 9-15 (in Chinese).
- [ 47 ] WANG D H, CHU Y S, LUO F X, et al. The origin of the Cu-Ni PGE orebody in Yangliuping, Sichuan Province, and the significance of its discovery [ J ] . *Acta Geoscientia Sinica*, 2000, 21: 260-265 (in Chinese).
- [ 48 ] TAO Y, LUO T Y, ZHU D, et al. The variation of Cu-Ni PGE mineralization in Emeishan Large igneous province (abstract) [ J ] . *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(Suppl): 64 (in Chinese).

- [49] TANG Z L. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China[J]. *Acta Geological Sinica*, 1996, 70: 237-243 (in Chinese).
- [50] LI C, XU Z H, WAAL S A, et al. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 159-172.
- [51] LIU D, SHEN F K, ZHANG G Z. Layered intrusions of the Panxi area, Sichuan Province[A]. ZHANG Y X. *Corpus of the Panxi Paleorift Studies in China* (1)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 85-118 (in Chinese).
- [52] CHUNG S L, JAHN B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23: 889-892.
- [53] LUO Y N. The characteristics of Ti-chromite mineralization in Xinjie layered ultramafic mafic intrusion in Panzhihua area, China[J]. *Geochimica*, 1981, 10: 66-73 (in Chinese).
- [54] ZHANG C J, WANG Y L, LI X L, et al. Geochemistry of platinum group elements in mafic ultramafic rocks from the Xinjie intrusion[J]. *Geochimica*, 1998, 27: 458-466 (in Chinese).
- [55] ZHONG H, ZHOU X H, ZHOU M F, et al. Platinum group element geochemistry of the Hongge Fe-V-Ti deposit in the Panxi Area, southwestern China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 226-239.
- [56] ZHONG H, YAO Y, HU S F, et al. Trace element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Hongge layered intrusion, southwestern China[J]. *International Geology Review*, 2003, 45(4): 371-382.
- [57] ZHONG H, YAO Y, PREVEC S A, et al. Trace element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China[J]. *Chemical Geology*, 2004, 203: 237-252.
- [58] LU J R, ZHANG G D, ZHANG C X, et al. A genetic model for layered intrusions and vanadic titanomagnetite deposits in Panzhihua Xichang area (2)[J]. *Mineral Deposits*, 1988, 7(2): 3-11 (in Chinese).
- [59] LI D H, MAO Y S. Rhythmic layering and forming mechanism of the V-Ti magnetite-bearing layered intrusions in the Panxi area, Sichuan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1982, 1: 29-41 (in Chinese).
- [60] ZHU B Q, ZHANG Z W, HU Y G, et al. New discovery of the copper mineralization on the specific strata of volcano tuff breccias in the northeast of Yunnan Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(8-9): 21 (in Chinese).
- [61] ZHU B Q, HU Y G, ZHANG Z W, et al. Discovery of the copper ore deposits of Keweenaw type on the geochemical steep zone between the Yunnan Province and Guizhou Province[J]. *Science in China* (D), 2002, 32(Suppl): 49-59 (in Chinese).
- [62] ZHANG Z W, CHENG Z D, ZHU B Q, et al. The studies on the specific strata of Emeishan basalts formation are relationship with the copper mineralization[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(5): 503-508 (in Chinese).
- [63] ZHU B Q. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 55: 171-181.
- [64] MAO J W, WANG Z L, LI H M, et al. The mineralization process depended on the carbon and oxygen isotope in copper deposits on the formation of the Permian basalts in Loudian districts, Yunnan Province[J]. *Geol Rev*, 2003, 49(6): 610-615 (in Chinese).
- [65] LIU H C, LIN W D. *Pb-Zn Metallogenesis in North East Yunnan*[M]. Kunming: Press of Yunnan University, 1999 (in Chinese).
- [66] LI L J, LIU H T, LIU J S. A discussion of the source bed of Pb-Zn-Ag deposits in Northeast Yunnan[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 1999, 8(6): 333-339 (in Chinese).
- [67] WANG J Z, LI C Y, LI Z Q, et al. The comparison of Mississippi Valley Type lead-zinc deposits in southwest of China and in mid-continent of United States[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2002, 21: 127-132 (in Chinese).
- [68] HAN R S, LIU C Q, HUANG Z L, et al. Genesis modeling of Huize lead-zinc ore deposit in Yunnan[J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 2001, 21(4): 674-680 (in Chinese).
- [69] HUANG Z L, CHEN J, HAN R S, et al. *Geochemistry and Metallogenesis of Yunnan Huize Super-large Pb-Zn Deposits and a Study on the Relationship Between the Deposits and Emeishan Basalts*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 (in Chinese).
- [70] LI W B, HUANG Z L, WANG Y X, et al. Sm-Nd isochronological age of calcite in Huize super-large Pb-Zn deposits and its geological significance[J]. *Geological Review*, 2004, 50(2): 189-195 (in Chinese).
- [71] HALLIDAY A N. The timing of early and main stage ore mineralization in Southwest Cornwall[J]. *Economic Geology*, 1980, 75: 752-759.
- [72] CHESLEY J T, HALLIDAY A N, SCRIVENER R C. Samarium-neodymium direct dating of fluorite mineralization[J]. *Science*, 1991, 252: 949-951.
- [73] LEACH D L, BRADLEY D, LEWCHUK M T, et al. Mississippi valley type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age dating research[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36: 714-740.
- [74] HUANG Z L, LI W B, CHEN J, et al. Carbon and oxygen isotope constraints on the mantle fluids join the mineralization of the Huize super-large Pb-Zn deposits, Yunnan Province, China[J]. *J Geochem Explor*, 2003, 78/79: 637-642.

#### 参考文献:

- [10] 翟裕生. 矿床学的百年回顾与发展趋势[J]. 地球科学进展,

- 2001, 16(5): 719-725.
- [14] 侯增谦, 李红阳. 试论幔柱构造与成矿系统——以三江特提斯成矿域为例[J]. 矿床地质, 1998, 17: 97-113.
- [15] 李红阳, 牛树银, 王立峰, 等. 幔柱构造[M]. 北京: 地震出版社, 2002: 224.
- [16] 王登红. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨[J]. 地质前缘, 2001, 8(3): 67-72.
- [17] 高振敏, 张乾, 陶琰, 等. 峨眉山地幔柱成矿作用分析[J]. 矿物学报, 2004, 24(2): 99-104.
- [19] 从柏林. 攀西古裂谷的形成与演化[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 424.
- [20] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 466.
- [24] 潘杏南, 赵济湘, 张选阳, 等. 康滇构造与裂谷作用[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 298.
- [32] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.
- [33] 张招崇, 郝艳丽, 王福生. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义[J]. 地质前缘, 2003, 10(3): 105-114.
- [34] 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 等. 云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 70-82.
- [38] 涂光炽. 从一个侧面看矿床事业的发展——若干重要矿床领域的新进展及找矿思维的开拓[J]. 矿床地质, 2002, 21: 97-105.
- [46] 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 等. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系——以云南金宝山超镁铁岩为例[J]. 地质论评, 2004, 50(1): 9-15.
- [47] 王登红, 楚莹石, 罗辅勋, 等. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 富矿体的成因及意义[J]. 地球学报, 2000, 21: 260-265.
- [48] 陶琰, 罗泰义, 朱丹, 等. 峨眉大火成岩省岩浆硫化物矿床主要矿化类型及其变化机理(摘要)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(增刊): 64.
- [49] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 1996, 70(3): 237-243.
- [51] 刘杖, 沈发奎, 张光宗. 攀西地区层状侵入体[A]. 张云湘. 中国攀西裂谷文集(1)[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 85-118.
- [53] 骆耀南. 攀枝花地区辛阶含铬铁矿的层状超镁铁镁铁岩岩体的矿化特征[J]. 地球化学, 1981, 10: 66-74.
- [54] 张成江, 汪云亮, 李晓林, 等. 新街镁铁超镁铁侵入体的铂族元素地球化学特征[J]. 地球化学, 1998, 27(5): 458-466.
- [58] 卢记仁, 张光弟, 张承信, 等. 攀西层状岩体及钒钛磁铁矿床成因模式(2)[J]. 矿床地质, 1988, 7(2): 3-11.
- [59] 李德惠, 茅燕石. 四川攀西地区含钒钛磁铁矿层状侵入体的韵律层及形成机理[J]. 矿物岩石, 1982, 1: 29-41.
- [60] 朱炳泉, 张正伟, 胡耀国. 滇东北发现具工业价值的火山凝灰角砾岩层控型铜矿床[J]. 地质通报, 2002, 21(8-9): 21.
- [61] 朱炳泉, 胡耀国, 张正伟, 等. 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), 2002, 32(增刊): 49-59.
- [62] 张正伟, 朱炳泉, 张乾, 等. 峨眉山玄武岩组铜矿化与层位关系研究[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 503-508.
- [64] 毛景文, 王志良, 李厚民, 等. 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中铜矿床的碳氧同位素对成矿过程的指示[J]. 地质论评, 2003, 49(6): 610-615.
- [65] 柳贺昌, 林文达. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1999.
- [66] 李连举, 刘洪滔, 刘继顺. 滇东北铅、锌、银矿床矿源层问题探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8(6): 333-339.
- [67] 王奖臻, 李朝阳, 李泽琴, 等. 川、滇、黔交界地区密西西比河谷型铅锌矿床与美国同类型矿床的对比[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21: 127-132.
- [68] 韩润生, 刘丛强, 黄智龙, 等. 论云南会泽富铅锌矿床成矿模式[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 674-680.
- [69] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 等. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [70] 李文博, 黄智龙, 王银喜, 等. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2004, 50(2): 189-195.