

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.03.002

## 攀西地区二叠纪碱性岩成因及其铌钽成矿作用研究进展

吴镇宇, 刘琰\*

WU Zhen-Yu, LIU Yan\*

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**摘要:** 铌(Nb)、钽(Ta)元素是重要的战略性关键金属资源, 碱性岩因富集铌钽等稀有、稀土元素而备受学者们关注。近年来, 峨眉山大火成岩省内部带攀西地区发育的一系列二叠纪过碱性-准铝质-过铝质正长岩和花岗岩及其相关铌钽矿床在成岩成矿时代、地球化学特征、岩石成因及铌钽富集机制等方面取得了一些重要研究进展。主要认识有: 在地幔柱轴部, 地幔苦橄岩部分熔融形成峨眉山高钛玄武质岩浆, 其在岩浆房中发生分离结晶和液态不混溶作用, 形成小规模的A型花岗岩和碱性-准铝质正长岩。底侵的幔源岩浆对流为基性辉长岩部分熔融提供大量的热能, 形成广泛分布的过碱性-准铝质正长岩和花岗岩。与此同时, 少量新生地壳或扬子板块基底参与部分熔融过程则会形成过铝质花岗岩。研究表明, 铌钽元素富集过程受岩浆结晶分异和热液交代两个演化阶段共同控制。源自地幔的碱性岩浆通过结晶分异作用优先结晶出斜长石、角闪石、磷灰石等矿物, 导致Nb、Ta元素在正长岩体中得到初步富集。从岩体中出溶的富F-Na热液交代原岩, 并发生钠长石化、霓石化、萤石化等蚀变作用。早期岩浆成因的铌钽矿物因交代而裂解, 使Nb、Ta元素被重新活化、迁移、沉淀形成热液烧绿石和榍石。

**关键词:** 碱性岩; 岩石成因; 热液蚀变; Nb-Ta矿化; 攀西地区

中图分类号: P581; P611.1

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-03-0445-17

**Wu Z Y and Liu Y. 2024. Research Progress on Petrogenesis and Niobium-Tantalum Mineralization of Permian Alkaline Rocks in the Panxi Region. *South China Geology*, 40(3): 445–461.**

**Abstract:** Niobium (Nb) and tantalum (Ta) elements are significantly strategic key metal resources. Alkaline rocks have attracted considerable attention due to their enrichment of rare earth elements. In recent years, significant research progress has been made in Permian peralkaline-metataluminous-peraluminous syenite and granite as well as associated niobium-tantalum deposits developed in the Panxi region, Emeishan Igneous Province, focusing on their geochronology and metallogenic ages, geochemical characteristics, petrogenesis, and Nb-Ta enrichment mechanisms. In the axis of the mantle plume, the Emeishan high-Ti basalt magma, formed by partial melted mantle peridotite, created small-scale A-type granite and alkalic- metataluminous syenite in the magma chamber through fractional crystallization and liquid immiscibility. The underplating mantle-derived magma convection provided significant heat energy for the partial melting of basic gabbro, leading to the formation of widely distributed peralkaline-metataluminous syenite and granite. Simultaneously,

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-05-20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221649)

第一作者: 吴镇宇(1998—), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 2363822150@qq.com

通讯作者: 刘琰(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事碳酸岩及稀土的成因矿物学和矿床形成机制研究, E-mail: ly\_0620@126.com

peraluminous granite was formed when a small proportion of the juvenile crust or the Yangtze basement is involved in the process of partial melting. The research shows that the enrichment process of Nb-Ta is controlled by both magma crystallization differentiation and hydrothermal metasomatism. The alkaline magma from the mantle preferentially crystallizes plagioclase, amphibole, apatite, and other minerals through crystallization differentiation, leading to the initial enrichment of Nb and Ta elements in the syenite. The F-Na rich hydrothermal fluid from the syenite acts on rock by metasomatism, which results in alteration such as albitization, aegirinization, and fluorization. The early magmatic niobium-tantalum minerals were decomposed due to metasomatism, with the Nb and Ta elements being reactivated, migrated, and precipitated to form hydrothermal pyrochlore and titanite.

**Key words:** alkaline rock; petrogenesis; hydrothermal alteration; Nb-Ta mineralization; the Panxi region

铌(Nb)、钽(Ta)具有良好的耐热性和高导热性,是现代高科技产业不可或缺的关键金属,尤其在国防和能源领域中具有不可替代的作用。中国铌钽资源匮乏,贫矿多,冶炼困难,每年铌钽自主产量远不能满足国内工业需求,对国外铌钽精矿进口依存度高达99.5%[\(Gulley et al., 2018\)](#)。据2022年全国矿产资源储量数据显示,现保有铌钽氧化物( $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )储量为29.2万余吨,主要分布在内蒙古、江西、广西、四川等地[\(自然资源部信息中心, 2023\)](#)。相比于其他国家,中国除白云鄂博等少数几个矿床外,绝大多数矿床处于最低工业品位0.016%~0.028%的水平[\(何海洋等, 2018; Gulley et al., 2018\)](#)。为保障我国铌钽资源供应安全,加强其富集成矿理论和找矿工作显得尤为重要。

Nb、Ta属强不相容元素,易于进入熔体,其在大陆岩石圈上地壳的平均丰度分别为 $12 \times 10^{-6}$ 和 $0.9 \times 10^{-6}$ ,远高于原始地幔的 $548 \times 10^{-9}$ 和 $40 \times 10^{-9}$ [\(Palme and O'Neill, 2014; Rudnick and Gao S, 2014\)](#)。铌钽矿床可分为内生和外生矿床两大类型。所有的内生铌钽矿床都与火成岩有关,外生矿床多数为内生矿床经过风化和沉积等外生作用发生二次富集的风化壳型和残坡积、冲积砂型。内生矿床按岩浆性质可分为:(1)过铝质岩浆系统,为花岗岩型和花岗伟晶岩型;(2)碳酸岩-碱性岩型岩浆系统,包括碳酸岩型、碱性-过碱性花岗岩以及碱性正长岩型[\(李建康等, 2019; 王汝成等, 2020\)](#)。多数碱性岩富含Nb、Ta等稀有金属元素,是重要的铌钽资源来源。例如,全球最大的

巴西 Morro dos Seis Lagos 碳酸岩型铌钽矿床[\(Giovannini et al., 2017\)](#),正在开采的巴西 Araxá 和 Catalao II 碳酸岩-碱性杂岩型铌钽矿床[\(Mitchell, 2015; Palmieri et al., 2022\)](#)、加拿大 Nechalacho 碱性正长岩型铌钽矿床[\(Timofeev and Williams-Jones, 2015\)](#);中国没有呈大规模开采的铌矿床,仅湖北庙垭[\(Ying Y C et al., 2020; Wu B et al., 2021\)](#)和辽宁赛马[\(Ma D Z and Liu Y, 2023\)](#)等地的碱性岩富集铌资源。

峨眉山大火成岩省广泛发育碱性及偏碱性的基性火山熔岩及火山碎屑岩等,同时也记录了较多的碱性岩浆侵入事件,其中后者在攀西(攀枝花-西昌)地区分布尤为显著[\(王焰等, 2017; 徐义刚等, 2017\)](#)。自上世纪六十年代以来,攀西地区陆续发现一批碱性岩及相关的铌钽矿床和矿化点,吸引不少国内外学者开展研究工作。以往针对该地区碱性岩及相关铌钽矿床的研究主要局限于铌钽矿物赋存状态和成岩成矿时代。近些年来,其岩石成因、岩浆来源以及成矿作用方式等方面已经积累了大量相关成果,鉴于此,笔者系统总结了攀西地区碱性岩的成岩时代、地球化学特征、岩石成因与物质来源,以及相关铌钽矿床的分布、矿床地质特征和成矿机制等方面的最新研究进展,旨在为攀西地区进一步开展铌钽资源找矿工作提供参考。

## 1 区域地质背景

峨眉山大火成岩省位于扬子板块西缘[\(图 1a\)](#),

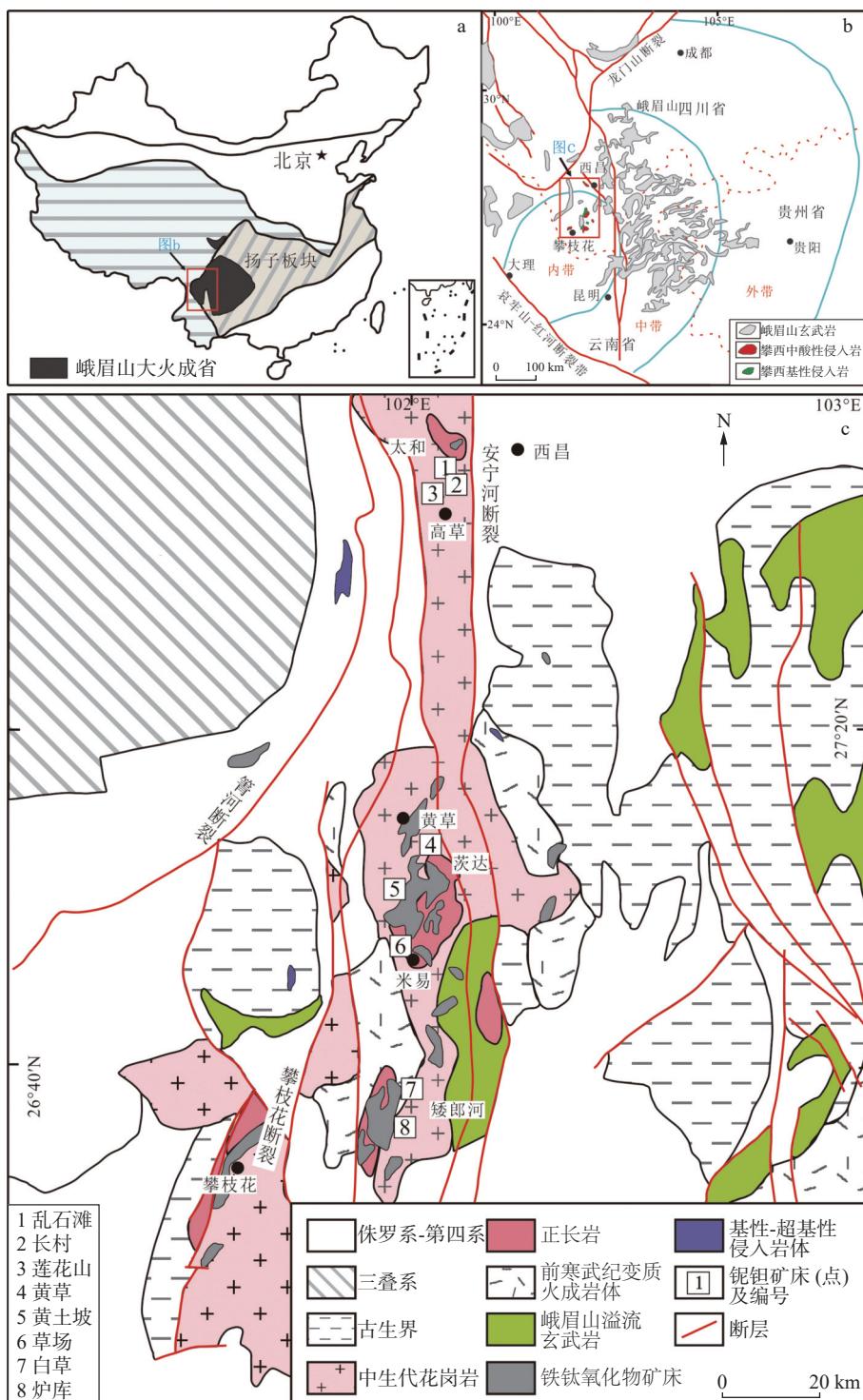


图 1 攀西地区区域地质及铌钽矿床(点)分布地质图

Fig. 1 The map of regional geology and niobium-tantalum deposit (point) distribution in the Panxi region

据王汾连(2014)修改

形成于晚二叠纪-早三叠纪(胡瑞忠等, 2005), 主要发育一套厚层的大陆溢流玄武岩, 以拉斑玄武岩为主, 有少量的碱性玄武岩和玄武安山岩, 同时伴有超镁铁质侵入岩和辉绿岩岩墙, 其分布呈南

北近 1000 km, 东西近 900 km, 面积为  $2.5 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ (张招崇等, 2001)。大火成岩省的发展历史历经复杂的地质过程, 在时空上与扬子板块西缘构造演变紧密相关, 而深部过程随古特提

斯洋的存在与消亡而兴衰(张云湘和袁学诚, 1988)。该区地史演化大致经历了前克拉通阶段、克拉通形成和稳定发展阶段、克拉通分裂阶段和陆内改造阶段(尹福光等, 2007)。区内构造复杂, 活动断裂频发, 受 SN 走向的安宁河、磨盘山-绿汁江、箐河-程海断裂带控制, 其次为 NE 和 NW 向的断裂带(刘肇昌, 1996)。

峨眉山大火成岩省分布区从晚太古代到新生代地层均有出露, 由结晶基底、褶皱基底和上覆盖层三部分组成, 三者分别为出露于康定-米易等地的康定群、中元古代会理群和盐边群、新元古代晚期-新生代沉积地层。区内岩浆活动频繁, 岩石类型从超基性岩至碱性岩均有出露, 按时代可划分吕梁期、晋宁期、澄江期、海西期、印支期、燕山期和喜马拉雅期等(四川省地质矿产局, 1991)。

攀西地区位于峨眉山大火成岩省的中内部带, 紧邻松潘-甘孜构造带, 处于安宁河断裂带西侧(图 1b)。沿此断裂带发育众多大型层状镁铁-超镁铁质岩体, 由北向南依次是太和( $258.8\pm2.3$  Ma,  $259\pm3$  Ma, Shellnutt et al., 2011; Zhong H et al., 2011)、白马( $258.2\pm2.2$  Ma,  $261\pm2$  Ma, Shellnutt et al., 2009; Zhong H et al., 2011)、新街( $259\pm3$  Ma, Zhou M F et al., 2002)、红格( $259\pm1.3$  Ma, Zhong H et al., 2007)和攀枝花( $263\pm3$  Ma, Zhou M F et al., 2005)岩体, 其形成时代与峨眉山溢流玄武岩喷发时间一致(Fan W M et al., 2008)。此外还伴随出露大量花岗岩和正长岩, 由此形成了一个狭窄的侵入岩带(图 1c), 由北向南依次为太和花岗岩体( $261.4\pm2.3$  Ma, Xu Y G et al., 2008)、黄草正长岩体( $258.9\pm0.7$  Ma, Shellnutt et al., 2012)、茨达花岗岩体( $258.4\pm0.6$  Ma, Shellnutt et al., 2012)及矮郎河花岗岩体( $255.2\pm3.6$  Ma, Xu Y G et al., 2008)。这些岩体相伴生的岩脉常常伴随着铌钽矿化, 是四川地区重要的铌钽矿化带, 发育典型矿床如炉库、白草等(Zeng Z Y and Liu Y, 2022; 王汾连等, 2012)。

## 2 矿床地质特征、类型及时代

攀西地区线性断裂构造发育, 各期次岩浆作

用强烈, 岩石类型众多, 热液活动频繁, 稀有和稀土金属物化探异常区域广泛分布, 是扬子板块西缘具有巨大潜力的稀有金属矿化带。自 20 世纪 60 年代以来, 四川省属各地勘单位开展了大量铌钽矿产勘探工作, 涉及西昌、会理、米易、攀枝花等地, 现已探明炉库、白草两个中小型铌钽矿床, 查明铌钽矿化异常点 36 处(贺金良, 2004; 杨铸生等, 2007)。

### 2.1 矿床地质特征

白草铌钽矿床位于安宁河断裂带西侧, 区内主体出露有辉长岩、橄榄岩、玄武岩等基性-超基性层状岩体, 以及碱性正长岩体和岩脉, 围岩主要为昔格达组黄色细砂岩和绢云母片岩(张云湘和袁学诚, 1988)。正长岩脉通常产于基性-超基性层状侵入体中, 受 NNE 或 SN 向次级断裂与裂隙控制呈平行展布(图 2), 多为细粒黑云母正长岩、

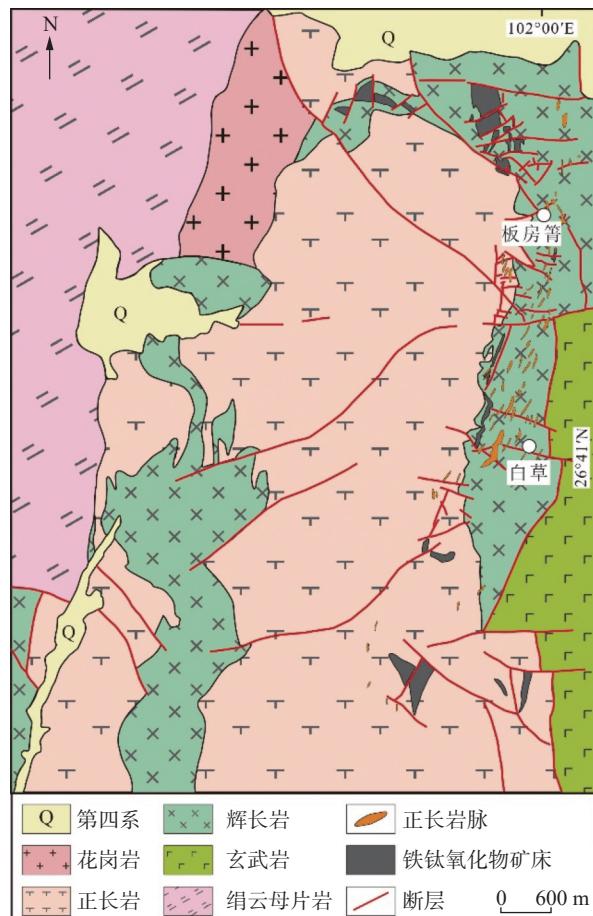


图 2 攀西地区白草铌钽矿区地质简图

Fig. 2 The geologic map of the Baicao niobium-tantalum deposit in the Panxi region

据王汾连(2014)修改

中细粒-粗粒碱性正长岩, 碱性正长伟晶岩等。岩脉的产状陡倾, 倾角一般大于 50°, 规模大小不一, 一般脉长 100~250 m, 宽 1~5 m。铌钽矿化与碱性正长岩脉关系密切, 富含铌钽的正长岩脉多为灰白色中粗粒或伟晶结构, 普遍发育钠长石化和霓石化作用。局部出露的正长伟晶岩, 矿物晶体粗大, 黑云母聚集呈厚板片状, 最厚可达 1 cm, 碱性长石粒径多为 0.5~1 cm, 岩体多呈脉状, 透镜状等。矿区矿石的平均品位 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.19%、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.013% (王汾连, 2014)。

## 2.2 矿床类型

攀西铌钽矿床(矿化点)的空间分布取决于断裂构造和岩浆热液活动, 常沿构造-岩浆活动频发的区域展布, 主要受安宁河断裂及其次级断层或裂隙控制, 矿床和矿点多集中于断裂的交汇区域, 可划分为三个铌钽矿化区: 会东小街-鲁吉矿化区、冕宁里庄-西昌高草矿化区、攀枝花黄草-务本

矿化区(贺金良, 2004)。稀有金属矿化带主要成矿元素为 Nb、Ta、REE、Zr 等, 矿化主要发育在伟晶岩、碱性正长岩、碱性花岗岩以及少量酸性火山岩和角岩中(杨铸生等, 2007)。按赋矿主岩和成矿作用可划分为六类(表 1, 王汾连等, 2012), 其中碱性岩型为主要成矿类型, 花岗岩型和火山岩型等同样具有很大的成矿潜力。

岩浆演化过程中, 碱性岩浆在岩浆房常富集大量 Nb、Ta、REE 等高场强元素, 故使得碱性正长岩和伟晶岩成为铌钽资源重要来源(王汝成等, 2020)。攀西地区则以白草、炉库矿床为典型代表, 其常见于各类伟晶岩脉和正长岩脉, 脉体即矿体(王汾连等, 2013), 富矿岩脉一般以含有霓石、霓辉石、钠铁闪石、钠长石等富钠碱性矿物为特点(Wang F L et al., 2015)。在碱性正长岩型和伟晶岩型矿床中, 铌钽元素多以烧绿石、铌铁矿、钽铁矿、褐钇铌矿等矿物形式结晶, 矿物颗粒细小且

表 1 攀西地区主要铌钽矿床、矿点分布及矿化类型

Table 1 Major Nb-Ta deposits or points of distribution and mineralization types in the Panxi region

矿床及 矿点	含矿岩层/岩脉	成矿元素	稀有金属矿物类型	蚀变作用	矿床 成因类型	成矿 时期
西昌 乱石滩	碱性伟晶 正长岩脉	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、铌钙矿、榍石 褐钇铌矿、褐帘石、独居石、锆石	钠长石化、萤石化 霓石化	碱性 伟晶岩型	印支期
西昌 长村	碱性伟晶 正长岩脉	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、榍石、褐钇铌矿 褐帘石、独居石、锆石	钠长石化、萤石化 霓石化	碱性 伟晶岩型	印支期
西昌 莲花山	英碱正长岩脉	Nb、Ta、Y、 LREE、Zr	褐钇铌矿、褐帘石、铌铁矿、 独居石、锆石	钠长石化、霓石化	碱性 岩型	印支期
西昌 谢家坟	霓石石英 正长岩	Nb、Ta、Y、LREE	烧绿石、褐钇铌矿、铌铁金红石	钠长石化、霓石化	碱性 岩型	燕山期
西昌 高草	正长岩与角岩 接触带	Nb、Ta、Y、LREE	烧绿石、褐钇铌矿、铌铁金红石	角岩化、硅化 磁铁矿化	碱性 岩型	印支期
德昌 茨达	钠铁闪石花岗岩 霓石正长岩	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Hf	铌钽铁矿、褐钇铌矿、烧绿石 含铌金红石、锆英石	钠长石化、霓石化 钠铁闪石化	花岗岩型	印支期
米易 黄草	碱性伟晶岩脉 正长岩脉	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、铌钙矿、榍石 褐钇铌矿、褐帘石	钠长石化、萤石化 霓石化	碱性 伟晶岩型	印支期
米易 黄土坡	碱性伟晶岩	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、铌钙矿、榍石 褐钇铌矿、褐帘石	钠长石化、萤石化 霓石化	碱性 伟晶岩型	印支期
米易 草场	碱性花岗岩 正长岩脉	Nb、Ta、Y、 LREE、Zr	褐钇铌矿、褐帘石、铌铁矿 独居石、锆石	黑云母化 褐帘石化	花岗岩型	印支期
攀枝花 白草	碱性伟晶岩脉 碱性正长岩	Nb、Ta、Zr、Y、 TREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、铌钙矿、 榍石、独居石褐钇铌矿、 硅钛铈铁矿、褐帘石、锆石	钠长石化、萤石化 霓石化、碳酸盐化	碱性 伟晶岩型	印支期
攀枝花 炉库	碱性伟晶岩脉 碱性正长岩	Nb、Ta、Zr、Y、 TREE、U、Th	烧绿石、铌铁矿、星叶石、 铌钙矿、榍石、褐钇铌矿、 褐帘石、硅钛铈铁矿、独居石、锆石	钠长石化、萤石化 霓石化、碳酸盐化	碱性 伟晶岩型	印支期
会东 干沟	会理群酸性 火山岩	Nb、Ta、Zr、Y、 LREE、U、Th	铌钽铁矿、硅铈铌钽矿、烧绿石 独居石、氟碳铈矿	钾化、绢云母化 硅化、碳酸盐化	火山岩型	晋宁期

自形,常呈现明显的岩浆结晶特征(李建康等,2019)。 $Nb^{4+}$ 和 $Ti^{4+}$ 地球化学活动性和原子半径十分相似,故 $Nb^{4+}$ 常常以类质同象形式代替 $Ti^{4+}$ 进入榍石或金红石矿物晶格内参与成矿,例如白云鄂博矿床和湖北庙垭矿床中含有丰富的富铌金红石(苏立,2018;Wu B et al., 2021),这些也是我国重要的伴生铌资源。

与碱性岩型矿床相比,过铝质岩浆系统的花岗岩型矿床中铌钽资源更丰富,矿床规模更大,但铌钽矿石的品位相对较低,矿物颗粒细,选冶困难(姚春彦等,2021)。该类矿床的花岗岩在成分上富Na、K以及 $SiO_2$ ,暗色矿物较少,长石以钾长石和钠长石为主。花岗质岩浆演化程度高,结晶分异作用显著,矿体在横向或纵向上易于形成各种岩相分带,分异作用越发育,岩相带规模越大,稀有金属矿化就越强烈,一般出现白云母或锂云母则代表了岩浆演化的最晚阶段(李建康等,2019;王汝成等,2020)。在稀有金属花岗岩型铌钽矿床中,钽资源更占优势,矿物相多以结晶钽铁矿、钽锰矿、细晶石等为特征,如江西宜春414铌钽矿床(吴鸣谦,2017)。

### 2.3 成岩成矿时代

峨眉山大火成岩省的年代学研究始于二十世纪七、八十年代,随着分析技术和方法不断创新和优化(如锆石U-Pb定年、榍石U-Pb定年、黑云母或全岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年),实验测试精度不断提高,已经积累了大量各种岩性的精确年龄数据。概括来说,无论是基性辉长岩或玄武岩,还是碱性正长岩或酸性花岗岩,它们的成岩年龄一般集中在二叠纪晚期的10 Ma内,即262~252 Ma(Shellnutt, 2014; 秦江峰等, 2021)。此期间内,峨眉山大火成岩省受到了大规模中-新生代复杂构造-热事件影响,深部地幔物质发生部分熔融,在岩浆演化和侵位过程中有地壳物质混染,并与地表系统建立起联系,形成了众多铌钽等稀有元素金属矿床和矿化点(胡瑞忠等, 2005; 王焰等, 2017)。

攀西地区沿安宁河断裂两侧发育了一系列的正长岩体和花岗岩体,前人对多地出露的正长岩和花岗岩进行了大量的精确定年工作,其年代学统计结果见表2。攀枝花与矮郎河两地的岩浆活

动比宾川凝灰岩形成时间 $238\pm3$  Ma(Xu Y G et al., 2008)要早,具体为攀枝花正长岩的锆石U-Pb年龄为 $253.1\pm1.9$  Ma,正长岩脉黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 $254.6\sim251.6$  Ma;矮郎河过铝质花岗岩锆石U-Pb年龄约为256 Ma(表2)。值得注意的是,猫猫沟霞石正长岩锆石U-Pb年龄为 $261.6\pm4.4$  Ma,太和A型花岗岩锆石U-Pb年龄为 $261.4\pm2.3$  Ma(表2),该两地成岩年龄与峨眉山大火成岩省的喷发时间 $259.1\pm0.5$  Ma(Zhong Y T et al., 2014)最为接近,是峨眉山地区地幔柱岩浆活动的直接响应。

发育铌钽矿化的碱性岩体成岩年龄及相关矿床的成矿年龄一直受到学者们的关注,如白草、炉库等地(贺金良, 2004; 杨铸生等, 2007)。白草和炉库矿床中铌钽矿化正长岩的岩浆锆石年龄为 $257.8\pm1.3$  Ma和 $256.7\pm4.4$  Ma;榍石为该铌钽矿床的主要富铌钽矿物之一,其结晶年龄可以反映出铌钽矿化的时间,白草矿床正长岩中岩浆榍石的结晶年龄为 $256.7\pm3.3$  Ma(表2)。在误差范围内,含矿正长岩脉的形成年龄与富铌岩浆榍石的结晶年龄一致,即成岩与成矿事件近于同期发生。

## 3 岩石地球化学及成因

如前所述,攀西地区二叠纪长英质深成侵入体以正长岩和花岗岩最为常见。根据岩石中 $SiO_2$ 的饱和度与碱性矿物(霞石、霓石、钠铁闪石)的含量,正长岩可划分为石英正长岩和碱性正长岩(主要是霞石正长岩和霓石正长岩),碱性正长岩以攀枝花、猫猫沟、白草、炉库等地为代表。花岗岩主要表现以碱性为特征,除此之外,白马、矮郎河等地也出露过铝质花岗岩。总的来说,这些岩石的微量元素和同位素地球化学组成各有异同,既有新生中下地壳源区岩浆的特点,又有部分幔源岩浆的特征(Shellnutt and Zhou M F, 2007)。

### 3.1 元素地球化学

攀西地区二叠纪侵入岩的主量元素以富硅富碱、贫 $CaO$ 和 $MgO$ 为特征,其中过铝质花岗岩通常具有较高的 $SiO_2$ 含量,最高可达75%以上,碱性花岗岩和正长岩的 $SiO_2$ 含量依次减少(Lu P F

表 2 攀西地区部分碱性正长岩和花岗岩岩石年龄统计

Table 2 Age data of major alkaline syenite or granite rocks in the Panxi region

地点/矿床	样品号	岩性	测试方法	年龄(Ma)	参考文献
太和	TH-14	A型花岗岩	锆石SHRIMP	261.4 ± 2.3	Xu Y G et al., 2008
茨达	CD-0401	花岗岩	锆石 SHRIMP	261 ± 4	Zhong H et al., 2007
	GS04-143	花岗岩	锆石CA-TIMS	258.4 ± 0.6	Shellnutt et al., 2012
矮郎河	HG-1	过铝质花岗岩	锆石SHRIMP	255.2 ± 3.6	Xu Y G et al., 2008
	ALH-0401	花岗岩	锆石SHRIMP	251 ± 6	Zhong H et al., 2007
	ALH-0401	I型花岗岩	锆石LA-ICP-MS	256.8 ± 2.8	Zhong H et al., 2011
	ALH-0702	I型花岗岩	锆石LA-ICP-MS	256.2 ± 3.0	Zhong H et al., 2011
窝水	GS05-067	花岗岩	锆石SHRIMP	260.5 ± 2.3	Shellnutt and Zhou M F, 2007
	GS05-067	正长岩	锆石CA-TIMS	259.6 ± 0.5	Shellnutt et al., 2012
攀枝花	WB-0604	正长岩	锆石SHRIMP	253.1 ± 1.9	Zhong H et al., 2009
	WB-0604	正长岩	锆石LA-ICP-MS	255.8 ± 1.8	Zhong H et al., 2011
	EM-PZH11	正长岩	黑云母 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	251.6 ± 1.6	Lo et al., 2002
	EM-PZH01	正长岩	黑云母 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	254.6 ± 1.3	Lo et al., 2002
白马	GS03-122	铁橄榄石正长岩	锆石SHRIMP	252 ± 2.5	Shellnutt and Zhou M F, 2008
	G0S3-092	正长岩	锆石SHRIMP	259 ± 5	Shellnutt et al., 2009
	GS04-016	正长岩	锆石SHRIMP	258 ± 4	Shellnutt et al., 2009
	MY-6	正长岩	锆石SHRIMP	262 ± 2	Zhou M F et al., 2008
	CD-0401	花岗岩	锆石LA-ICP-MS	256.2 ± 1.5	Zhong H et al., 2011
	TJ-0401	正长岩	锆石LA-ICP-MS	257.8 ± 2.6	Zhong H et al., 2011
	TJ-0602	正长岩	锆石LA-ICP-MS	258.5 ± 2.3	Zhong H et al., 2011
	BM-1-9	铁质正长岩	锆石 LA-ICP-MS	259 ± 1.0	Zhang Z Z et al., 2021
	BM-2-9	铁质正长岩	锆石 LA-ICP-MS	258.9 ± 1.0	Zhang Z Z et al., 2021
	BM-3-5	花岗岩	锆石 LA-ICP-MS	258.7 ± 1.0	Zhang Z Z et al., 2021
黄草	HC-2	辉石正长岩	锆石SHRIMP	266.5 ± 5.1	Xu Y G et al., 2008
	GS05-059	铁橄榄石正长岩	锆石CA-TIMS	258.9 ± 0.7	Shellnutt et al., 2012
猫猫沟	LQ-3	霞石正长岩	锆石SHRIMP	261.6 ± 4.4	Luo Z Y et al., 2007
	EM-MMG05	正长岩	黑云母 <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	252.0 ± 1.3	Lo et al., 2002
白草	BC2003	铌钽矿化正长岩	锆石 LA-ICP-MS	257 ± 0.8	Zeng Z Y and Liu Y, 2022
	BC-3	铌钽矿化正长岩	锆石 LA-ICP-MS	257.8 ± 1.3	王汾连, 2014
	BC2004	正长岩	榍石 LA-ICP-MS	256.7 ± 3.3	李素欣等, 2023
炉库	LK12-15	铌钽矿化正长岩	锆石 LA-ICP-MS	256.7 ± 4.4	王汾连, 2014
红格	HGZ-1-12	正长岩	锆石 SHRIMP	257.2 ± 1.5	李华芹等, 2017
大黑山	DHS-1	正长岩	锆石CA-TIMS	259.1 ± 0.5	Shellnutt et al., 2012
米易	MY-5	石英正长岩	锆石SHRIMP	259.8 ± 3.5	Xu Y G et al., 2008
季家湾	JJW	正长岩	锆石 LA-ICP-MS	259.8 ± 1.7	Zhang Z Z et al., 2019
横山	HS	石英正长岩	锆石LA-ICP-MS	260.1 ± 1.4	Zhang Z Z et al., 2019
猴子山	HZS2	角闪正长岩	锆石 LA-ICP-MS	260.2 ± 1.8	Zhang Z Z et al., 2020

and Liu P P, 2023), MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的含量与 SiO<sub>2</sub> 含量呈负相关, K<sub>2</sub>O 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量呈正相关(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Zhong H et al., 2007, 2009)。在微量元素中, 正长岩在稀土元素配分模式图(图 3)中呈现 LREE 富集型, Eu 元素负异常(Eu/Eu\* < 1)明显, 具有 Ba、Sr、Ti、

P 等元素亏损, Nb、Ta、U 元素富集等的特点(王汾连, 2014)。这些岩石可能是由峨眉山高钛玄武质岩浆分离结晶形成, 几乎不发生或存在最低限度的地壳物质混染作用(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Shellnutt, 2014)。碱性花岗岩地球化学特征与正长岩基本类似, 具 LREE 轻度富集, Ba、

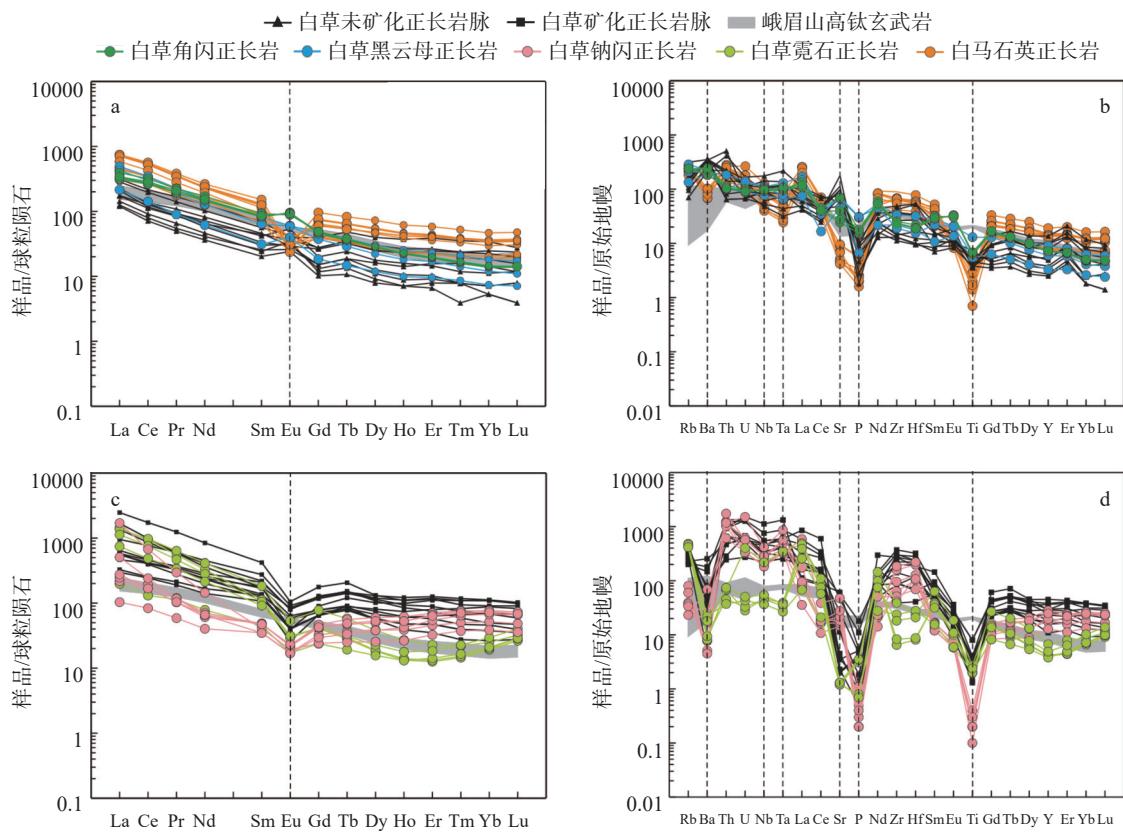


图 3 攀西白草和白马岩体正长岩稀土配分模式图与微量元素蛛网图

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized rare earth element diagrams of syenite in Baicao deposit, Panxi region

白草铌钽矿化和未矿化正长岩数据 Wang F L et al. (2015); 峨眉山高钛玄武岩数据 Xiao L et al. (2004); 白草角闪正长岩、黑云母正长岩、钠闪正长岩、霓石正长岩以及白马石英正长岩数据 吴镇宇(2024); 球粒陨石和原始地幔数据 Sun and McDonough (1989)

Sr、Ti 元素亏损的特征,除茨达等少数地区花岗岩显示出有少量地壳成分加入,其余碱性花岗岩没有发现太多的地壳混染的证据(Zhong H et al., 2007; Shellnutt et al., 2011)。过铝质花岗岩稀土元素配分模式图显示轻微 LREE 富集,具有强烈 Eu 负异常,微量元素比值蛛网图显示 Ba、Ta、Nb、Sr、Ti 元素亏损,Th、U 元素富集,这些岩石通常被认为有年轻地壳物质的参与(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Zhong H et al., 2007; Zhang Z Z et al., 2021)。

### 3.2 同位素地球化学

攀西地区二叠纪正长岩与花岗岩的全岩 Sr-Nd 同位素、锆石 Hf-O 同位素、以及全岩 B 同位素数据汇总见表 3。从整体来看,正长岩与花岗岩样品的初始 Sr ( $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 分布在 0.704 ~ 0.706 与 0.709 ~ 0.711 两个区间内;  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值差异更显著,绝大多数样品位于 2 ~ 3.5 与 -6 ~ -2 两个区间

内(图 4, Zhong H et al., 2007, 2009; Zhou M F et al., 2008; 王汾连, 2014; 张泽中, 2019; Lu P F and Liu P P, 2023)。该地区岩石的 Sr、Nd 同位素参数出现不同的分布情况,反映出攀西二叠纪正长岩和花岗岩在物质来源和岩石成因方面的差异,一方面,低 ( $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值和高  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  组成的岩石反映出有幔源特征,如白草和炉库正长岩等;另一方面,高 ( $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值和低  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  则表明其源区可能有中下地壳组分的贡献(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Shellnutt, 2014),如白马和矮郎河花岗岩等。攀西地区基性高钛玄武岩与正长岩和花岗岩具有紧密的时空关联,在微量元素组成上具有幔源物质属性的特征(Zhong H et al., 2007; Zhou M F et al., 2008)。白草和炉库铌钽矿床含矿正长岩脉的 Sr-Nd 同位素组成也进一步说明正长岩浆的幔源成因(王汾连, 2014)。

由于不同地幔储库与地壳储库之间的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$

表 3 攀西地区主要正长岩和花岗岩同位素特征

Table 3 Isotopes geochemical data of major syenites and granites in the Panxi region

地点/矿床	岩性(含矿性)	$(^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	锆石 $\delta^{18}\text{O}(\text{\textperthousand})$	$\delta^{11}\text{B}(\text{\textperthousand})$	文献来源
茨达	花岗岩	0.7023 ~ 0.7053	-0.25 ~ 0.24				
矮郎河	花岗岩	0.7102 ~ 0.7111	-6.34 ~ -6.26				Zhong H et al., 2007
攀枝花	正长岩	0.7037 ~ 0.7058	2.37 ~ 3.45				Zhong H et al., 2009
	正长岩	0.7045 ~ 0.7047	1.74 ~ 2.79				Lu P F and Liu P P, 2023
	正长岩	0.7039 ~ 0.7089	-5.9 ~ 3.7				Zhou M F et al., 2008
	正长岩	0.7045 ~ 0.7063	2.24 ~ 2.96	5.7 ~ 11.0	4.1 ~ 4.9		
白马	花岗岩	0.7052 ~ 0.7097	-4.56 ~ -2.09	4.0 ~ 1.7	4.8 ~ 7.4		Lu P F and Liu P P, 2023
	正长岩				5.47 ~ 6.51		Zeng Z Y and Liu Y et al., 2022
红格	正长岩	0.7054 ~ 0.7058	0.14 ~ 0.92	3.6 ~ 8.6	4.6 ~ 5.4		Lu P F and Liu P P, 2023
	正长岩	0.7055 ~ 0.7090	-0.3 ~ 0.4	0.3 ~ 6.2		-10.96 ~ -10.01	
	正长岩(无矿)	0.7044 ~ 0.7054	-0.2 ~ 0.7			-13.45 ~ -11.96	王汾连, 2014
	正长岩(含矿)	0.7049 ~ 0.7076	-0.2 ~ 0.0	-0.2 ~ 7.7		-17.95 ~ -14.54	
白草					5.67 ~ 6.41		
	正长岩				(岩浆锆石) 2.24 ~ 5.93 (热液锆石)		Zeng Z Y and Liu Y et al., 2022
	正长岩体	0.7032 ~ 0.7051	-0.2 ~ 0.3	1 ~ 6.6		-12.45 ~ -11.82	
	正长岩(无矿)	0.7063 ~ 0.7064	-0.3 ~ -0.1	1.7 ~ 7.7			王汾连, 2014
炉库	正长岩(含矿)	0.7055 ~ 0.7091	-0.1 ~ 0.2	0.1 ~ 9.5		-16.40 ~ -15.79	
	正长岩				5.37 ~ 6.35		Zeng Z Y and Liu Y et al., 2022
米易猴子山	角闪正长岩	0.7049 ~ 0.7050	2.4 ~ 2.5	8.9 ~ 11.0			
米易纪家湾	正长岩	0.7045 ~ 0.7046	2.0 ~ 2.2	6.0 ~ 10.3			张泽中, 2019
米易横山	石英正长岩	0.7100 ~ 0.7103	-5.2 ~ -3.9	-5.4 ~ 1.3			

和  $\delta^{18}\text{O}$  的值差异很大, 二者同位素变化可以用来记录岩浆混合和分异的演化过程(李献华等, 2009), 故锆石 Hf-O 同位素组成能有效识别和区分地幔源区俯冲板块物质的存在和中下地壳热液蚀变物质组分的添加。攀西白草和炉库铌钽矿床中正长岩中的岩浆锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值( $5.47\text{\textperthousand} \sim 6.51\text{\textperthousand}$ )高于亏损地幔值( $\delta^{18}\text{O}=5.3\pm0.3\text{\textperthousand}$ ), 热液锆石  $\delta^{18}\text{O}$  值( $2.24\text{\textperthousand} \sim 5.93\text{\textperthousand}$ )低于亏损地幔值, 这暗示大气降水参与了铌钽成矿流体的形成(Zeng Z Y and Liu Y, 2022)。峨眉山大火成岩省中部带的元阳花岗岩中锆石具有较低的  $\delta^{18}\text{O}$  值( $3.2\text{\textperthousand} \sim 4.8\text{\textperthousand}$ ), 被认为是热液蚀变洋壳与地幔源混合部分熔融的结果(Xu J et al., 2021)。Lu P F and Liu P P(2023)根据 Sr-Nd-Pb 同位素组成把攀枝花正长岩与花岗岩、红格正长岩和白马正长岩划分为同位素亏损岩石系列, 将白马花岗岩归为同位素富集岩石系列, 通过对两系列岩石进行 Hf-O 同位素两端元

模拟来讨论岩浆作用, 模拟结果表明, 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为正且  $\delta^{18}\text{O}$  值低于地幔值的同位素亏损岩石系列为高温蚀变洋壳物质与地幔混合部分熔融组成的岩浆冷却形成; 相反,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为负值且  $\delta^{18}\text{O}$  值高于地幔值的同位素富集岩石系列为扬子板块的古老或经历热液蚀变的地壳物质与地幔混合部分熔融的产物(图 5)。

自然界中的 B 同位素( $^{10}\text{B}$ 、 $^{11}\text{B}$ )相对质量相差很大, 同位素分馏作用十分显著, 同时在岩浆过程中对流体很敏感, 故常被用来示踪与流体相关的地球化学过程(蒋少涌, 2000)。攀西白草、炉库铌钽矿床中 B 同位素变化明显, 其含矿正长岩脉  $\delta^{11}\text{B}$  值( $-18.0\text{\textperthousand} \sim -14.5\text{\textperthousand}$ )比正长岩体和无矿正长岩脉  $\delta^{11}\text{B}$  值( $-13.4\text{\textperthousand} \sim -10.0\text{\textperthousand}$ )低, 暗示白草、炉库含矿正长岩脉在岩浆-热液过渡阶段发生岩浆自交代作用, 使  $^{11}\text{B}$  同位素倾向于随富 F-Na 流体共同出溶, 最终导致在岩浆-熔体结晶阶

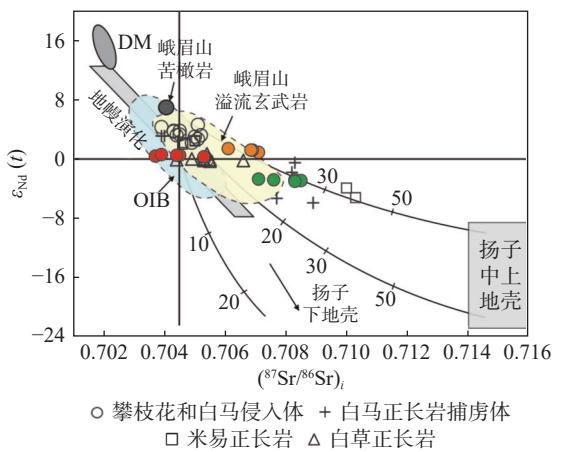
图 4 攀西地区白草和白马正长岩( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs.  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解

Fig. 4 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs.  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagram for syenite of Baicao and Baima complex in Panxi region

底图修改自 Zhou M F et al. (2008); 攀枝花和白马侵入体、白马正长岩捕虏体数据据 Zhou M F et al. (2008); 米易正长岩数据据张泽中(2019); 白草正长岩数据据王汾连(2014); 白草矿化正长岩和贫矿正长岩、白马石英正长岩数据据吴镇宇(2024); 亏损地幔 DM 和地幔演化线据 Zindler and Hart (1986); 洋岛玄武岩 OIB 数据据 Sun and McDonough (1989); 扬子克拉通中上地壳和下地壳数据据 Chen J F and Jahn (1998)

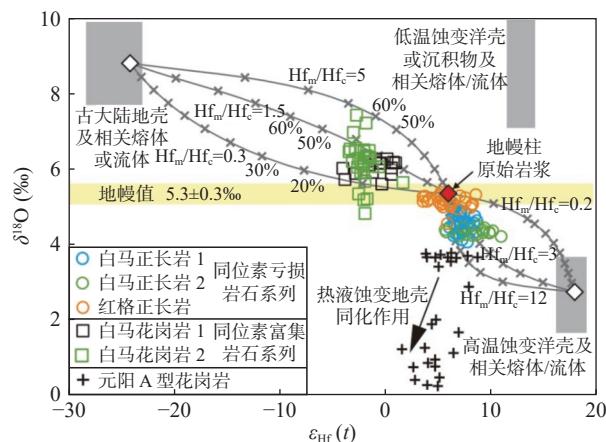
图 5 攀西地区同位素亏损与富集系列岩石的锆石  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  同位素组成图解

Fig. 5 Zircon  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  diagram of the isotopically depleted and enriched rock group in the Panxi region

据 Lu P F and Liu P P (2023); 元阳 A 型花岗岩资料据 Xu G W et al. (2022); 地幔的  $\delta^{18}\text{O}$  值据 Valley (2003); 低温蚀变洋壳及其沉积物及相关熔体/流体、高温蚀变洋壳及其相关熔体/流体、古大陆壳及其相关熔体/流体数据据 Zhu Y S et al. (2017).  $\text{Hf}_m$  为地幔橄榄岩中 Hf 的含量,  $\text{Hf}_c$  为相关混染物中 Hf 的含量

段形成的含矿岩脉相较早期的无矿岩脉和正长岩体具有较低的  $\delta^{11}\text{B}$  值(王汾连, 2014; Wang F L et

al., 2015)。

### 3.3 岩石成因

峨眉山二叠纪花岗岩和正长岩的成因一直以来存在争论, 目前主要有以下几种观点: (1) 基性玄武质岩浆强烈分离结晶作用(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Zhong H et al., 2007, 2009, 2011; Zhang Z Z et al., 2019, 2020; Lu P F and Liu P P, 2023); (2) 基性高钛玄武质岩浆液态不混溶(Zhou M F et al., 2008, 2013; Shellnutt et al., 2009); (3) 幕源铁镁质基性岩石或新生地壳部分熔融(罗震宇等, 2006; Luo Z Y et al., 2007; Shellnutt and Zhou M F, 2007; Shellnutt et al., 2008; Xu Y G et al., 2008; Zhong H et al., 2007, 2009; 王汾连, 2014; Zhang Z Z et al., 2021; Lu P F and Liu P P, 2023)。

#### 3.3.1 基性玄武质岩浆分离结晶作用

主张岩浆分离结晶作用观点的学者认为, 攀西二叠纪过碱性-偏铝质 A 型花岗岩或正长岩是峨眉山高钛玄武质基性岩浆或经历辉石堆晶的铁镁质岩浆经过分离结晶作用的产物(Shellnutt and Zhou M F, 2007; Zhong H et al., 2007, 2009, 2011; Zhang Z Z et al., 2019, 2020; Lu P F and Liu P P, 2023)。攀西茨达 A 型花岗岩中存在大量暗色的基性捕虏体, 并且与同一时期的基性侵入岩和白马玄武岩具有十分相似的 Sr-Nd 同位素特征, 两者均亏损 Sr、Eu 元素以及富集不相容元素, 进一步说明了茨达 A 型花岗岩由高钛玄武质岩浆分离结晶作用形成(Zhong H et al., 2007)。攀枝花、红格杂岩中的正长岩和花岗岩以及白马正长岩的地球化学特征相似, 均具有低 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 值 (0.704331 ~ 0.706279)、正  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (0.14 ~ 2.96)(表 3)、低  $\text{Al}_2\text{O}_3/( \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  比值 (<~0.95) 和低  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值 (0.19 ~ 1.07) 的特征, 它们与辉长岩、闪长岩和高钛玄武岩共存, 在主、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成上显示岩浆具有分离结晶的演化趋势(Lu P F and Liu P P, 2023)。米易地区正长岩和辉长岩的 Sr-Nd 和 Lu-Hf 同位素数据表明其演化自同一母岩浆, 岩浆成分与峨眉山高钛玄武岩类似, 其由地幔柱低程度部分熔融形成, 是高钛玄武质岩浆经过强烈分离结晶作用的结果(Zhang Z Z et al., 2019, 2020)。Shellnutt and Zhou M F (2007) 认为

在区域尺度上, 来自峨眉山地幔柱的基性岩浆底侵并发生对流分离结晶作用能够形成碱性 A 型花岗岩。值得注意的是, 尽管在火山裂谷环境下, 基性岩浆分离作用能够产生少量的长英质岩浆 (Peccerillo et al., 2003), 但仍无法解释攀西地区基性岩浆与长英质岩浆的质量平衡问题。

### 3.3.2 基性高钛玄武质岩浆液态不混溶

一般认为, 大型铜镍硫化物矿床(PGE)和 Fe-Ti-V 矿床是地幔橄榄岩部分熔融形成的岩浆演化至晚期的产物(Keays, 1995), 而峨眉山地幔柱高钛玄武岩与攀枝花大型钒钛磁铁矿关系密切 (Pang K N et al., 2008; Zhou M F et al., 2008), 其原始岩浆可能是类似于云南丽江报道的苦橄岩 (Zhang Z C et al., 2008)。由于上覆岩石圈较厚, 地幔橄榄岩在远离地幔柱轴体的深部位置发生低程度减压熔融, 在此过程中混入了大陆岩石圈物质并形成高钛玄武岩(徐义刚等, 2013)。这种地幔源的富 Fe-Ti 岩浆在浅部岩浆房发生演化, 因液态不混溶作用形成富硅和富 Fe-Ti 贫硅的两种单元岩浆, 密度较小的富硅单元岩浆向上运移冷却形成攀西地区正长岩, 而基性贫硅单元岩浆将进一步富集 Fe-Ti 金属, 最终导致 Fe-Ti 氧化物分离形成大型铁钛氧化物矿床, 残余硅酸盐熔体则形成层状辉长岩侵入体(Zhou M F et al., 2008, 2013)。实验岩石学同样证明, 当硅酸盐熔体中  $\text{SiO}_2$  含量达到 52%~55% 时, 熔体可以分离出贫 Fe 富硅和贫硅富 Fe 的两种不混溶熔体(Charlier and Grove, 2012)。

### 3.3.3 幕源铁镁质基性岩或新生地壳部分熔融

基性母岩浆经过分离结晶作用只能产生小批量的硅酸盐岩浆, 无法形成攀西广泛分布的正长岩和花岗岩, 而幕源铁镁质基性岩或新生地壳部分熔融则能更好地解释攀西地区大规模碱性-过铝质岩浆侵入事件(罗震宇等, 2006; Luo Z Y et al., 2007; Shellnutt and Zhou M F, 2007; Shellnutt et al., 2008; Xu Y G et al., 2008; Zhong H et al., 2007, 2011; 王汾连, 2014; Zhang Z Z et al., 2021; Lu P F and Liu P P, 2023)。在此过程中, 峨眉山地幔柱提供巨大热量和驱动力, 导致上覆岩层发生部分熔融(徐义刚等, 2013, 2017)。

猫猫沟霞石正长岩、白草和炉库正长岩属过碱性岩系, 其 Nb/Ta 比值和  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值与地幔值均非常接近, 在 Yb/Ta-Y/Nb 判别图(图略)上样品点均落在 OIB 区域附近, 表明这些岩石属于幔源岩石(罗震宇等, 2006; 王汾连, 2014)。高钛玄武质岩浆发生分离结晶作用会导致残余熔体更加亏损 Sr 元素, 而上述岩石均呈现富集 Sr 元素的特征, 这说明其来自富斜长石的源区。结合区域地质背景和地球物理数据分析, 猫猫沟、白草和炉库过碱性正长岩均为底侵的富含斜长石的基性辉长岩部分熔融形成(Luo Z Y et al., 2007; 王汾连, 2014)。类似地, 白马铁橄榄石正长岩也是由经历斜长石堆晶的峨眉山大火成岩省基性岩低程度部分熔融形成的(Shellnutt and Zhou M F, 2008; Zhang Z Z et al., 2021)。

白马杂岩中的过铝质花岗岩与正长岩在主、微量元素和同位素组成上差异明显, 白马过铝质花岗岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-4.56 \sim -2.09$ , 明显低于白马辉长岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值  $1.6 \sim 4.2$  (Shellnutt et al., 2009), 表明其不可能为基性岩部分熔融或基性岩浆分离结晶作用的产物; 同时其锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-4.0 \sim 1.7$ , Zr/Hf 比值为  $33.9 \sim 38.2$ , 且没有明显 Nb-Ta 负异常, 这暗示除扬子古老基底参与部分熔融之外, 新生中、上地壳也可能提供了物质来源 (Shellnutt and Zhou M F, 2007; Zhang Z Z et al., 2021; Lu P F and Liu P P, 2023)。不同物质来源的地幔柱部分熔融过程会产生主、微量元素和同位素组成明显差异的岩浆。矮郎河过铝质花岗岩具有 Zr、HREE、Ga 含量相对较低, Ba、Sr、Pb 含量较高, Nb 与 Ta 负异常, 高初始 ( $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值( $0.7102 \sim 0.7111$ )和负  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值( $-6.34 \sim -6.26$ )等特征, 表明其可能为底侵的幕源基性岩浆导致中上地壳和会理群古元古代变质沉积-变质火山岩部分熔融形成的(Zhong H et al., 2007), 其他学者也认为矮郎河过铝质花岗岩为中元古代和古元古代地壳部分熔融形成(Xu Y G et al., 2008)。

## 4 锆钽元素富集机制

关于 Nb、Ta 元素的成矿作用与富集机制, 学

界主要存在两种认识:(1)岩浆结晶分异说,认为Nb、Ta是通过岩浆结晶演化过程逐渐富集,碱性岩浆先结晶出贫Nb、Ta的造岩矿物,使残余熔体越来越富集挥发分和成矿元素,当含F矿物结晶时,Nb、Ta络合物失稳而沉淀晶出(Xu C et al., 2010; Stepanov et al., 2014; 陈唯等, 2024);(2)热液交代说,岩浆演化晚期形成的富F、Na的自交代流体,与早期结晶的含铌钽造岩矿物或副矿物反应,使Nb、Ta元素再次富集,最终沉淀结晶(Linnen et al., 2014; 杨成等, 2017)。随着近些年分析技术的提升,针对铌钽矿物的原位微区精细化工作不断开展,对铌钽元素富集机制的理解愈发深入,指出铌钽矿化的形成不是依靠单一的成矿作用,而是多种地质作用的共同结果(季浩等, 2024)。正如湖北庙垭碳酸岩-正长岩杂岩Nb-REE矿床和东秦岭方城碱性杂岩Nb-Ta矿的研究表明,铌钽元素富集过程受岩浆结晶分异和后期热液交代作用的共同控制,且早期岩浆阶段的初始富集作用更为重要,是最终形成铌钽矿床的基础条件(Ying Y C et al., 2020, 2023; Wu B et al., 2021; Zhu Y X et al., 2022)。

#### 4.1 成矿作用机制

攀西白草、炉库矿床是该地区典型的碱性岩型铌钽矿床,两矿床含矿岩体均为正长岩脉,其成岩年龄为257~256 Ma(王汾连, 2014; Zeng Z Y and Liu Y, 2022; 李素欣等, 2023),与峨眉山大火成岩省的喷发年龄基本吻合,表明该正长岩可能为峨眉山二叠纪地幔柱火山活动的响应(徐义刚等, 2017)。随着研究的深入,对白草、炉库矿床中铌钽成矿作用不断出现新认识:(1)矿床勘探初期,贺金良(2004)在白草、炉库矿床中发现成矿岩脉存在明显的钠长石化和霓石化等热液蚀变作用,并指出该矿床主要的成矿作用方式为气成热液作用;(2)陶琰等(2014)认为铌钽矿床是母岩浆结晶分异的产物,正长岩脉是正长岩母岩浆结晶后残余熔体进一步形成的;(3)王汾连(2014)和Zeng Z Y and Liu Y(2022)则支持岩浆结晶分异和后期热液作用共同控制铌钽成矿,早期岩浆阶段的铌钽元素初始富集是后期热液蚀变矿化的重要基础。

白草、炉库正长岩体Nb、Ta含量高,Ba、Sr元素亏损,高Sr低Nd,反映出其为峨眉山地幔柱岩浆作用的产物(Wang F L et al., 2015)。从无矿岩脉到含矿岩脉,TiO<sub>2</sub>、CaO、MgO和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量随着SiO<sub>2</sub>含量的增加而减少,Eu、Sr由正异常变为负异常,霓石和钠铁闪石含量变多,表明正长岩浆经历了强烈的分离结晶作用(王汾连, 2014)。在硅酸盐体系中,Nb、Ta属于高度不相容元素,岩浆演化早期阶段造岩矿物冷却结晶,斜长石、黑云母、霓石、钠铁闪石等矿物优先沉淀,使得残余熔体中Nb、Ta元素不断富集,当熔体中Nb、Ta元素达到饱和或相关的F、Cl络合物因失稳发生分解时,Nb、Ta开始沉降结晶成矿(Wu B et al., 2021; Ying Y C et al., 2023)。

#### 4.2 蚀变矿化作用

攀西地区铌钽矿床经历了不同类型和程度的蚀变作用,这些蚀变作用主要是碱性交代作用(霓石-霓辉石化、钠长石化、钠铁闪石化)、萤石化、云母化(黑云母化、绢云母化)以及碳酸盐化和褐帘石化(贺金良, 2004; 杨铸生等, 2007; 王汾连, 2014)。以白草、炉库铌钽矿床为例,碱性交代作用和氟交代作用广泛发育,前者表现出以钠长石-钠铁闪石-霓石-霓辉石为主的蚀变矿物组合特征(张东等, 2024),氟-钠交代阶段为此类矿床的主要矿化阶段,即碱性交代作用愈强烈,铌钽矿化愈显著。

在白草、炉库矿床中,铌钽元素主要赋存于烧绿石、铌钙矿、富铌榍石、褐钇铌矿等矿物中,早期结晶的岩浆烧绿石和富铌榍石等可常见被富Na矿物(钠长石、霓石)交代,同时正长岩脉遭受了不同程度的钠长石化蚀变作用(王汾连, 2014; Wang F L et al., 2015; 李素欣等, 2023),这种热液交代作用有利于铌钽元素的富集(Ballouard et al., 2020; Zeng Z Y and Liu Y, 2022)。实验岩石学同时表明,F的存在能降低Nb-Ta络合物在流体中的溶解度,当F以萤石的形式沉淀时,导致处于平衡状态的Nb-Ta络合物发生失稳,开始结晶出铌钽矿物或铌钽元素进入其他矿物晶格中参与成矿(Aseri et al., 2015; Yong T et al., 2023)。岩浆烧绿石、榍石与热液榍石的主、微量元素组成不同,后者具有更高的Nb、更低的Zr和REE含量及

(La/Yb)<sub>N</sub> 比值降低, 这可能表明富 Na、F 流体交代了早期岩浆榍石(朱煜翔, 2019; 李素欣等, 2023), 使 Nb、Ta、REE、Zr 元素发生迁移与再分配行为, 成矿元素最终围绕矿物或沿裂隙附近形成热液烧绿石、榍石、褐钇铌矿等矿物。

## 5 结论

本文对峨眉山大火成岩省内部带攀西地区二叠纪碱性岩的成岩时代、地球化学特征、岩浆起源和成因, 以及相关铌钽矿床成矿时代、成矿机制的最新研究进展进行了系统总结, 得出以下主要认识:

(1) 攀西地区沿安宁河断裂带两侧出露了一系列过碱性-准铝质-过铝质正长岩和花岗岩侵入体, 其成岩年代主要集中在~258 Ma; 局部地区正长岩脉铌钽矿化年龄为~257 Ma, 其成岩和成矿年龄在误差范围内基本一致, 说明成岩和成矿作用近于同时发生。

(2) 攀西侵入岩体的成因模式是多样的, 岩浆来源既有地幔成分, 又有地壳物质混入。总的来说, 过铝质花岗岩和正长岩被认为是中上地壳或扬子板块基底部分熔融形成; 过碱性-准铝质花岗岩和正长岩(霞石正长岩)为基性辉长岩低程度部分熔融形成; 幕源玄武质岩浆分离结晶能够形成 A 型花岗岩和部分碱性-准铝质正长岩。

(3) 攀西白草、炉库碱性岩型铌钽矿床的成矿作用受岩浆结晶分异和热液交代共同控制, 前者主导的铌钽元素初始预富集过程是矿床形成的基础。岩浆不断演化使 SiO<sub>2</sub> 趋于饱和, 斜长石、角闪石、钛铁矿等贫 Nb 矿物从岩浆中分离结晶, 使得残余熔体初步富集挥发份和 Nb、Ta 等不相容元素, 形成早期的岩浆期铌钽矿物。后期热液阶段, 正长岩体自交代作用产生的富 F-Na 流体交代岩浆期的铌钽矿物并使之发生分解, 导致 Nb、Ta、REE 等元素重新活化并迁移, 形成更富 Nb、Ta 的热液烧绿石、榍石等。

## 参考文献:

- 陈唯, 应元灿, 柳加俊, 杨帆, 蒋少涌. 2024. 与碳酸岩-碱性岩有关的铌-稀土矿床成矿作用及成因机制 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(1):1-14.
- 何海洋, 何敏, 李建武. 2018. 我国铌矿资源供需形势分析 [J]. 中国矿业, 27(11):1-5.
- 贺金良. 2004. 四川攀西地区铌钽矿床成矿地质条件及找矿前景 [J]. 四川地质学报, 24(4):206-211.
- 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 张正伟. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例 [J]. 地学前缘, 12(1):42-54.
- 季浩, 李艳军, 李一鸣, 冷双梁, 杨紫文. 2024. 碱性花岗岩型稀有稀土矿床类型及成矿作用研究进展 [J]. 地质科技通报, 43(1):23-38.
- 蒋少涌. 2000. 硼同位素及其地质应用研究 [J]. 高校地质学报, 6(1):1-16.
- 李华芹, 王登红, 张利国, 任海涛, 王晓地, 贾小辉, 杨文强. 2017. 四川攀西红格矿区辉长岩和正长岩的 SHRIMP U-Pb 和 Sm-Nd 定年及其地质意义 [J]. 地质通报, 36(5):698-705.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国铌钽矿成矿规律 [J]. 科学通报, 64(15):1545-1566.
- 李素欣, 钟宏, 柏中杰, 朱维光. 2023. 攀西碱性岩型 Nb-Zr-REE 矿床的矿物学与地球化学研究 [J]. 矿物学报, 43(5):627-639.
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幕源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 39(7):872-887.
- 刘肇昌. 1996. 扬子地台西缘构造演化与成矿 [M]. 成都: 电子科技大学出版社.
- 罗震宇, 徐义刚, 何斌, 石玉若, 黄小龙. 2006. 论攀西猫猫沟霞石正长岩与峨眉山大火成岩省的成因联系: 年代学和岩石地球化学证据 [J]. 科学通报, 51(15):1802-1810.
- 秦江锋, 赖绍聰, 张泽中, 郑国顺. 2021. 峨眉山大火成岩省内带中酸性岩浆岩对地幔柱岩浆过程及地壳熔融机制的启示 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 51(6):1031-1041.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社.
- 苏立. 2018. 白云鄂博西矿铌富集机制及成矿相关性研究 [D]. 中国矿业大学 (北京) 博士学位论文.
- 陶琰, 李玉帮, 廖名扬, 熊风. 2014. 四川攀西炉库铌钽矿床成因分析 [J]. 矿床地质, 33(S1):1189-1190.
- 王汾连. 2014. 攀西地区二叠纪铌钽矿的成因研究: 以炉库和白草矿区为例 [D]. 中国科学院大学博士学位论文.

- 王汾连,赵太平,陈伟,王焰.2013.峨眉山大火成岩省赋Nb-Ta-Zr矿化正长岩脉的形成时代和锆石Hf同位素组成[J].岩石学报,29(10):3519-3532.
- 王汾连,赵太平,陈伟.2012.铌钽矿研究进展和攀西地区铌钽矿成因初探[J].矿床地质,31(2):293-308.
- 王汝成,车旭东,邬斌,谢磊.2020.中国铌钽锆铪资源[J].科学通报,65(33):3763-3777.
- 王焰,王坤,邢长明,魏博,董欢,曹永华.2017.二叠纪峨眉山地幔柱岩浆成矿作用的多样性[J].矿物岩石地球化学通报,36(3):404-417.
- 吴鸣谦.2017.江西宜春(四一四)和大吉山矿床的矿物学、地球化学及成矿作用研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 吴镇宇.2024.攀西地区二叠纪碱性正长岩成因机制及铌钽成矿[D].中国地质科学院硕士学位论文.
- 徐义刚,何斌,罗震宇,刘海泉.2013.我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J].矿物岩石地球化学通报,32(1):25-39.
- 徐义刚,钟玉婷,位荀,陈军,刘海泉,颉炜,罗震宇,李洪颜,何斌,黄小龙,王焰,陈赟.2017.二叠纪地幔柱与地表系统演变[J].矿物岩石地球化学通报,36(3):359-373+358.
- 杨成,刘成新,刘万亮,万俊,段先锋,张众.2017.南秦岭竹溪县天宝乡粗面岩地球化学特征与铌成矿[J].岩石矿物学杂志,36(5):605-618.
- 杨铸生,段惠敏,王秀京.2007.四川攀西地区铌钽矿床的地质特征及找矿方向[J].四川地质学报,27(4):248-254.
- 姚春彦,王天刚,倪培,姚仲友,郭维民,朱意萍,王威.2021.铌钽矿床类型、特征与研究进展[J].中国地质,48(6):1748-1758.
- 尹福光,孙志明,万方.2007.扬子陆块西缘构造演化及其资源效应[M].北京:地质出版社.
- 张东,杨武斌,牛贺才.2024.钠交代作用对碱性花岗岩体系中稀土富集成矿的贡献[J].岩石学报,40(3):864-872.
- 张云湘,袁学诚.1988.中国攀西裂谷文集3[M].北京:地质出版社.
- 张泽中.2019.攀西米易地区晚二叠世碱性岩成因机制及地质意义[D].西北大学硕士学位论文.
- 张招崇,王福生,范蔚茗,邓海琳,徐义刚,许继峰,王岳军.2001.峨眉山玄武岩研究中的一些问题的讨论[J].岩石矿物学杂志,20(3):239-246.
- 朱煜翔.2019.东秦岭新元古代方城碱性杂岩体的成因及Nb-Ta富集机制[D].中国地质大学(武汉)硕士学位论文.
- 论文.
- 自然资源部信息中心.2023.2022年全国矿产资源储量统计表[Z].中华人民共和国自然资源部.
- Aseri A A, Linnen R L, Che X D, Thibault Y, Holtz F. 2015. Effects of fluorine on the solubilities of Nb, Ta, Zr and Hf minerals in highly fluxed water-saturated haplogranitic melts[J]. Ore Geology Reviews, 64: 736-746.
- Ballouard C, Massuyeau M, Elburg M A, Tappe S, Viljoen F, Brandenburg J T. 2020. The magmatic and magmatic-hydrothermal evolution of felsic igneous rocks as seen through Nb-Ta geochemical fractionation, with implications for the origins of rare-metal mineralizations[J]. Earth-Science Reviews, 203: 103115.
- Charlier B, Grove T L. 2012. Experiments on liquid immiscibility along tholeiitic liquid lines of descent[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 164(1): 27-44.
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. Tectonophysics, 284(1-2): 101-133.
- Fan W M, Zhang C H, Wang Y J, Guo F, Peng T P. 2008. Geochronology and geochemistry of Permian basalts in western Guangxi Province, Southwest China: Evidence for plume-lithosphere interaction[J]. Lithos, 102(1-2): 218-236.
- Giovannini A L, Bastos Neto A C, Porto C G, Pereira V P, Takehara L, Barbanson L, Bastos P H S. 2017. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil)[J]. Ore Geology Reviews, 88: 461-480.
- Gulley A L, Nassar N T, Xun S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(16): 4111-4115.
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. Lithos, 34(1-3): 1-18.
- Linnen R, Trueman D L, Burt R. 2014. Tantalum and niobium. //In: Gunn G(Ed.). Critical Metals Handbook[M]. Wiley: 361-384.
- Lo C H, Chung S L, Lee T Y, Wu G Y. 2002. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. Earth and Planetary

- Science Letters, 198(3-4): 449-458.
- Lu P F, Liu P P. 2023. Constraints of combined Sr-Nd-Pb-Hf-O isotopic systematics on the petrogenesis of peralkaline, metaluminous and peraluminous granitoids in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. Chemical Geology, 624: 121423.
- Luo Z Y, Xu Y G, He B, Shi Y R, Huang X L. 2007. Geochronologic and petrochemical evidence for the genetic link between the Maomaogou nepheline syenites and the Emeishan large igneous province[J]. Chinese Science Bulletin, 52(7): 949-958.
- Ma D Z, Liu Y. 2023. Nb mineralization in the nepheline syenite in the Saima area of the North China Craton, China[J]. Ore Geology Reviews, 152: 105247.
- Mitchell R H. 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites[J]. Ore Geology Reviews, 64: 626-641.
- Palme H, O'Neill H S C. 2014. Cosmochemical Estimates of Mantle Composition[J]. Treatise on Geochemistry, 3: 1-39.
- Palmieri M, Brod J A, Cordeiro P, Gaspar J C, Barbosa P A R, de Assis L C, Junqueira-Brod T C, Silva S E E, Milanezi B P, Machado S A, Jácomo M H. 2022. The Carbonatite-Related Morro do Padre Niobium Deposit, Cataldo II Complex, Central Brazil[J]. Economic Geology, 117(7): 1497-1520.
- Pang K N, Zhou M F, Lindsley D, Zhao D G, Malpas J. 2008. Origin of Fe-Ti Oxide Ores in Mafic Intrusions: Evidence from the Panzhihua Intrusion, SW China[J]. Journal of Petrology, 49(2): 295-313.
- Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G, Ayalew D, Barbieri M, Wu T W. 2003. Relationships between Mafic and Peralkaline Silicic Magmatism in Continental Rift Settings: a Petrological, Geochemical and Isotopic Study of the Gedemsa Volcano, Central Ethiopian Rift[J]. Journal of Petrology, 44(11): 2003-2032.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. 4.1-Composition of the Continental Crust. //Holland H D, Turekian K K (eds.). Treatise on Geochemistry(Second Edition)[M]:1-51. Oxford: Elsevier.
- Shellnutt J G, Denysyn S W, Mundil R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China)[J]. Gondwana Research, 22(1): 118-126.
- Shellnutt J G, Jahn B M, Zhou M F. 2011. Crustally-derived granites in the Panzhihua region, SW China: Implications for felsic magmatism in the Emeishan large igneous province[J]. Lithos, 123(1-4): 145-157.
- Shellnutt J G, Zhou M F, Yan D P, Wang Y B. 2008. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1 Ma, 8 Ma or 18 Ma?[J]. Geological Magazine, 145(3): 373-388.
- Shellnutt J G, Zhou M F, Zellmer G F. 2009. The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap: An example from the Permian Baima igneous complex, SW China[J]. Chemical Geology, 259(3-3): 204-217.
- Shellnutt J G, Zhou M F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume[J]. Chemical Geology, 243(3-4): 286-316.
- Shellnutt J G, Zhou M F. 2008. Permian, rifting related fayalite syenite in the Panxi region, SW China[J]. Lithos, 101(1-2): 54-73.
- Shellnutt J G. 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis[J]. Geoscience Frontiers, 5(3): 369-394.
- Stepanov A, Mavrogenes J A, Meffre S, Davidson P. 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(6): 1-8.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 - 345.
- Timofeev A, Williams-Jones A E. 2015. The Origin of Niobium and Tantalum Mineralization in the Nechalacho REE Deposit, NWT, Canada[J]. Economic Geology, 110(7): 1719-1735.
- Valley J W. 2003. Oxygen Isotopes in Zircon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 343-385.
- Wang F L, Wang C Y, Zhao T P. 2015. Boron isotopic constraints on the Nb and Ta mineralization of the syenitic dikes in the ~260 Ma Emeishan large igneous province (SW China)[J]. Ore Geology Reviews, 65: 1110-1126.
- Wu B, Hu Y Q, Bonnetti C, Xu C, Wang R C, Zhang Z S, Li

- Z Y, Yin R. 2021. Hydrothermal alteration of pyrochlore group minerals from the Miaoya carbonatite complex, central China and its implications for Nb mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 132: 104059.
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. 2004. 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 and Planetary Science Letters*, 228(3-4): 525-546.
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A R, Campbell I H, Allen C M. 2010. Trace-element modeling of the magmatic evolution of rare-earth-rich carbonatite from the Miaoya deposit, Central China[J]. *Lithos*, 118(1-2): 145-155.
- Xu G W, Zhu W G, Chen L, Zhong H, Wang Y J, Bai Z J, Yao J H, Hu P C. 2022. Ancient crust-derived syenitic and A-type granitic intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 430-431: 106844.
- Xu J, Xia X P, Wang Q, Spencer C J, He B, Lai C K. 2021. Low- $\delta^{18}\text{O}$  A-type granites in SW China: Evidence for the interaction between the subducted Paleotethyan slab and the Emeishan mantle plume[J]. *Bulletin of the Geological Society of America Bulletin*, 134(1-2): 81-93.
- Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, He B, Xiao L, Xie L W, Shi Y R. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084-3104.
- Ying Y C, Chen W, Chakhmouradian A R, Zhao K D, Jiang S Y. 2023. Textural and compositional evolution of niobium minerals in the Miaoya carbonatite-hosted REE-Nb deposit from the South Qinling Orogen of central China[J]. *Mineralium Deposita*, 58(1): 197-220.
- Ying Y C, Chen W, Simonetti A, Jiang S Y, Zhao K D. 2020. Significance of hydrothermal reworking for REE mineralization associated with carbonatite: Constraints from in situ trace element and C-Sr isotope study of calcite and apatite from the Miaoya carbonatite complex (China)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280: 340-359.
- Yong T, Linnen R L, McNeil A G. 2023. An Experimental Study of Pyrochlore Solubility in Peralkaline Granitic Melts[J]. *Economic Geology*, 118(1): 209-223.
- Zeng Z Y, Liu Y. 2022. Magmatic-hydrothermal zircons in syenite: A record of Nb-Ta mineralization processes in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 589: 120675.
- Zhang Z Z, Qin J F, Lai S C, Long X P, Ju Y J, Wang X Y, Zhu Y, Zhang F Y. 2019. Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: The fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume[J]. *Lithos*, 346: 105160.
- Zhang Z Z, Qin J F, Lai S C, Long X P, Ju Y J, Wang X Y, Zhu Y, Zhang F Y. 2021. High-temperature melting of different crustal levels in the inner zone of the Emeishan large igneous province: Constraints from the Permian ferrosyenite and granite from the Panxi region[J]. *Lithos*, 402-403: 105979.
- Zhang Z Z, Qin J F, Lai S C, Long X P, Ju Y J, Wang X Y, Zhu Y. 2020. Origin of Late Permian amphibole syenite from the Panxi area, SW China: high degree fractional crystallization of basaltic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume[J]. *International Geology Review*, 62(2): 210-224.
- Zhang Z C, Zhi X C, Chen L, Saunders A D, Reichow M K. 2008. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1-2): 30-39.
- Zhong H, Campbell I H, Zhu W G, Allen C M, Hu R Z, Xie L W, He D F. 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(5): 1374-1395.
- Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, He D F, Song X Y. 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 236(1-2): 112-133.
- Zhong H, Zhu W G, Hu R Z, Xie L W, He D F, Liu F, Chu Z Y. 2009. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of the Panzhihua A-type syenitic intrusion in the Emeishan large igneous province, southwest China and implications for growth of juvenile crust[J]. *Lithos*, 110(1-4): 109-128.
- Zhong Y T, He B, Mundil R, Xu Y G. 2014. CA-TIMS

- zircon U-Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: Implications for the termination age of Emeishan large igneous province[J]. *Lithos*, 204: 14-19.
- Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 103(3-4): 352-368.
- Zhou M F, Chen W T, Wang C Y, Prevec S A, Liu P P, Howarth G H. 2013. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 4(5): 481-502.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Lesher C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large Igneous Province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(3-4): 113-122.
- Zhou M F, Robinson P T, Lesher C M, Keays R R, Zhang C J, Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280.
- Zhu Y X, Wang L X, Ma C Q, Wiedenbeck M, She Z B. 2022. Titanite as a tracer for Nb mineralization during magmatic and hydrothermal processes: The case of Fangcheng alkaline complex, Central China[J]. *Chemical Geology*, 608: 121028.
- Zhu Y S, Yang J H, Sun J F, Wang H. 2017. Zircon Hf-O isotope evidence for recycled oceanic and continental crust in the sources of alkaline rocks[J]. *Geology*, 45(5): 407-410.
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical Geodynamics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493-571.