



移动阅读

伍建兢, 孙聪伍, 2025. 滇南金平中岭岗花岗岩风化壳型铌矿床特征及找矿潜力[J]. 沉积与特提斯地质, 45(2): 329-340. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.10004

WU J J, SUN C W, 2025. Characteristics and prospecting potential of the granitoid weathering crust-type Zhonglinggang niobium deposit, Jinping County of Yunnan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(2): 329-340. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.10004

滇南金平中岭岗花岗岩风化壳型铌矿床特征及找矿潜力

伍建兢^{1,2}, 孙聪伍^{3*}

(1. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 3. 云南省有色地质局三〇八队, 云南 昆明 650214)

摘要: 铌是我国重要的战略性紧缺矿产资源之一。近年来, 云南省地质调查院开展的矿产勘查工作中发现滇南地区碱性花岗岩体风化壳型铌矿体, 铌矿勘查有望取得突破。本文基于滇南中岭岗花岗岩风化壳型铌矿床的详细野外地质勘查, 梳理矿体特征, 开展岩石地球化学和矿相学研究。研究表明, 中岭岗花岗岩 SiO_2 含量为 71.74%~74.17%, 平均值为 72.95%; 全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 含量为 8.82%~10.13%, 平均值为 9.45%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 0.69~0.91, 平均值为 0.82; Nb 含量为 112×10^{-6} ~ 170×10^{-6} , Ta 含量为 5.271×10^{-6} ~ 9.27×10^{-6} , Nb/Ta 比值为 14.99~22.39; 富集 Nb、Ta、Th 等高场强元素和 Rb 大离子亲石元素, 亏损 Ba、Sr、Ti 等元素, 显示本区花岗岩具有壳幔混源的地球化学特征。铌矿主要形成于碱性花岗岩岩浆结晶分异演化和后期的风化堆积, 矿体为富铌花岗岩体风化后形成的花岗岩风化壳型铌矿床, 而载铌矿物主要是烧绿石。基于这一理论认识, 结合区域矿产调查及对比研究, 认为云南省金平县马鞍底乡—大寨乡一带仍具有较好的铌多金属矿找矿潜力。

关键词: 铌矿; 花岗岩风化壳; 矿床地球化学; 找矿潜力; 金平县

中图分类号: P611.2+1; P618.79

文献标识码: A

Characteristics and prospecting potential of the granitoid weathering crust-type Zhonglinggang niobium deposit, Jinping County of Yunnan Province

WU Jianjing^{1,2}, SUN Congwu^{3*}

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallization and Resource Exploration and Utilization, Ministry of Land and Resources, Kunming 650051, China; 3. No. 308 Geological Brigade of Yunnan Nonferrous Geology Bureau, Kunming 650214, China)

Abstract: Niobium is one of the most important strategic scarce mineral resources in our country. In recent years, the Yunnan Institute of Geological Survey has discovered alkaline granitoid weathering crust-type niobium orebodies during mineral exploration, which is expected to lead to a breakthrough in niobium ore exploration in the future. In this paper, systematic geochemical studies have been conducted on granitic bodies, and detailed field geological exploration and indoor microscopic studies have been carried out to investigate the characteristics of orebodies and ore mineral compositions. The results show that the SiO_2 contents of these granitoids average 72.95%; the $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ values range from 8.82% to 10.13%, averaging 9.45%; the $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratios are between

收稿日期: 2024-04-30; 改回日期: 2024-07-04; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 张向飞

作者简介: 伍建兢 (1978—), 高级工程师, 主要从事找矿勘查和矿床地质研究。E-mail: 1340868765@qq.com

通信作者: 孙聪伍 (1982—), 高级工程师, 主要从事固体矿产资源勘查。E-mail: 512160611@qq.com

资助项目: 云南省国土资源厅项目 (K2015056)

0.69 and 0.91, averaging 0.82, with the contents of Nb ranging from 112×10^{-6} to 170×10^{-6} , Ta from 5.27×10^{-6} to 9.27×10^{-6} , and Nb/Ta ratios ranging from 14.99 to 22.39. The granitoids are enriched in high field strength elements (HFSEs) such as Nb, Ta, and Th, as well as large ion lithophile elements (LILEs) like Rb, while depleted in Ba, Sr, and Ti. The formation of niobium ore is primarily attributed to the fractional crystallization of alkaline granitoid magma and following weathering. While the gneissic granitoid weathering crust-type niobium deposit was formed after the weathering of niobium-rich granitoids. The niobium-bearing pyrochlore is an important component for the formation of high-grade niobium orebodies. Based on regional mineral resource survey and comparative studies, this paper proposes that there is still great prospecting potential for revealing niobium polymetallic orebodies in the area from Maandi to Dazhai towns in Jinping County.

Key words: niobium deposit; granitoid weathering crust; ore deposit geochemistry; prospecting potential; Jinping County

0 引言

铌是一种稀有金属,因其独特的物理化学性质,如耐热性好、熔点高、延展性好、耐腐蚀性强及热导率高等,目前被广泛应用于国防、能源、高新技术和医疗领域(翟明国等, 2019; 李建康等, 2019; 李雪, 2023)。目前多个国家和国际组织将铌列为关键战略性矿产之一(图 1), 如日本 2012 年制定的《矿产资源保障战略》、欧盟委员会 2017 年发布的以及美国内政部 2018 年发布的公告、澳大利亚 2019 年制定的《澳大利亚关键矿产战略 2019》,我

国 2012 年制定的《战略性新兴产业关键技术推进重点》、2021 年由 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心发布的报告,都明确将铌列为战略性关键金属(critical metal)(翟明国等, 2019; 侯增谦等, 2020; 李文昌等, 2022)。

全球铌矿资源分布不均,巴西铌矿资源约占全球总量的 95%(主要由碳酸盐矿物组成),其次为加拿大,约占全球的 3.5%,其他铌矿资源主要富集的国家有安哥拉、澳大利亚、中国、格陵兰、马拉维、俄罗斯、南非和美国(李建康等, 2019; 饶灿等, 2023)。我国铌矿资源分布也不均匀,主要集中于

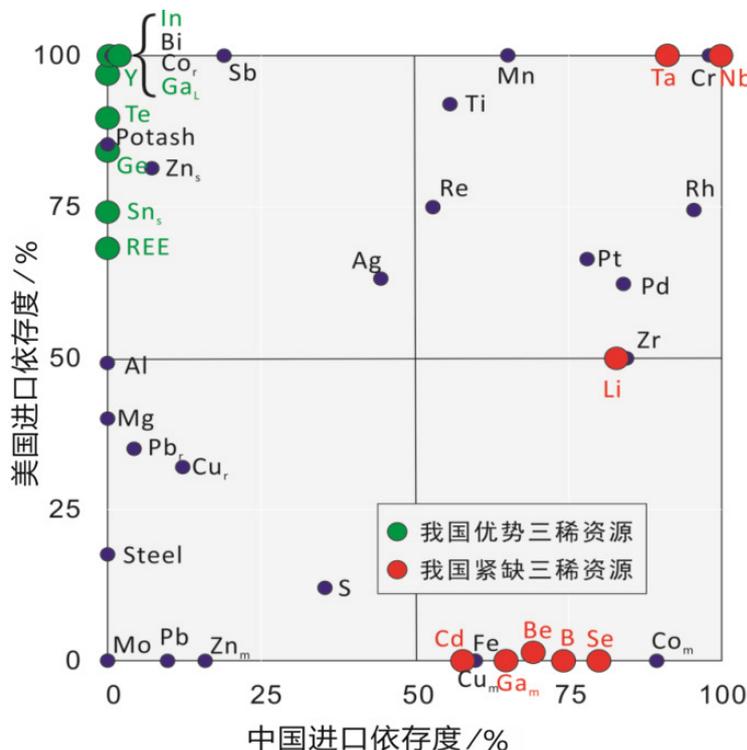


图 1 中美两国战略性矿产对外依存度对比图 (据 Gulley, 2018; 李文昌等, 2022)

Fig. 1 External dependence comparison chart between China and US (modified after Gulley, 2018; Li et al., 2022)

内蒙古、湖北、福建和新疆等地,近年来在东北和云南等地也不断有不同类型铌矿的报道(黄亮等, 2022; 李雪, 2023; 王强等, 2024)。内蒙古白云鄂博是我国铌矿资源量最大的矿床,已探明铌资源量约278万吨,远景资源量660万吨,占全国探明铌储量的63.4%和工业储量的82.7%(邓攀等, 2019; 李建康等, 2019; 王汝成等, 2020)。铌矿的矿床类型主要分为内生和外生两大类,内生矿床可进一步分为过铝质岩浆系列矿床和碱性岩-碳酸岩岩浆系列矿床,外生矿床为原生矿床经过次生物理化学作用后导致的铌矿再富集,以碳酸岩风化壳型铌矿床最有代表性(李建康等, 2019)。

花岗岩型及花岗伟晶岩型铌矿床是我国主要的铌矿床类型。近十年来,由于找矿思路的调整,云南省地质调查院在金平县中岭花岗岩体内发现了伟晶岩脉,且在强烈的风化作用下,花岗岩和伟晶岩在低凹山谷地带形成了巨量风化壳堆积。经对风化壳样品测试分析,发现铌矿品位达 $112 \times 10^{-6} \sim 170 \times 10^{-6}$,远高于地壳丰度的 12.0×10^{-6} ,表明该区铌元素经过了富集作用,达到了风化壳型铌矿的最低工业品位 $160 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ (文俊等, 2021)。鉴于金平县中岭地区花岗岩及伟晶岩的大面积分布,对该区开展风化壳型铌矿地质特征及找矿潜力的研究,有望指导该区域取得铌矿找矿的新突破。

1 区域地质背景

金平县中岭花岗岩体位于滇东南地区,扬子西缘多岛弧盆系与华南古陆块结合部位(图2a),夹持于红河断裂与哀牢山深大断裂之间的哀牢山山体(图2b)。以红河断裂为界,其东西两侧从晚二叠世开始拼合(任治机, 1989),缝合带西部为青藏滇板块,东部为扬子板块。由于哀牢山山体是从扬子板块通过哀牢山断裂推覆而来,因而以哀牢山断裂为界,北东属个旧-右江盆地区,南西为哀牢山山体。由于经历了多次长期的地质历史发展演化过程,该区地质构造复杂,变质变形、岩浆活动强烈,成矿条件优越,矿产资源丰富。受红河断裂、哀牢山断裂构造格架控制,区内主断裂、变质地体及矿化带均呈北西向展布(崔银亮, 2007)。哀牢山山体南端延入越南境内,主要由下元古界哀牢山群组成,岩石由片麻岩、变粒岩、混合岩、大理岩组成,并有大量片麻状二长花岗岩分布,岩石普遍变质程度

较深,矿物具定向排列,呈片麻状构造。缺失中—上元古界地层,后期发育华力西期和印支期超基性—酸性岩侵入活动,演化历史与东西两侧地质单元不同。

2 矿区地质特征

金平县中岭铌矿区出露哀牢山群小羊街组一段(Pt_1x^1)和二段(Pt_1x^2)(图3),一段主要由灰—灰黑色斜长变粒岩、角闪二长片麻岩组成,下部被大面积片麻状二长花岗岩侵位而保留不全,顶部与哀牢山群小羊街组上段整合接触;二段主要出露二云片岩、斜长变粒岩、黑云斜长片麻岩。由于岩浆侵入作用,地层出露不全。矿区断裂构造发育,为北西向展布的主构造F1-F2断裂。F1压扭性断裂位于矿区北东部的勐坪一带,属区域主构造红河断裂的次级断裂构造,延伸方向 $295^\circ \sim 325^\circ$ 。F1在矿区分布于片麻状二长花岗岩体内,沿断裂有铁铜矿化现象,穿越矿体KT3,断裂南东端延伸与新寨-勐坪断裂呈锐角相交。F2位于矿区南东侧,属桥头街断裂的次级断层,向南东延伸至马鞍底一带可见大量基性—超基性岩侵入体分布,并发育马鞍底铁矿、普玛铁矿等中—大型钛磁铁矿矿床。F3属矿区NEE向的次级断裂,沿该断裂侵入岩与小羊街组一段地层呈断层接触。

矿区酸性岩浆岩发育,中生代三叠纪片麻状二长花岗岩(T_{ny})占矿区范围约99%。岩体风化较强烈,构成了该区风化壳铌矿的含矿母岩。片麻状二长花岗岩呈浅灰、灰白色,主要由钾长石(25%~42%)、斜长石(25%~38%)、石英(20%~30%)、角闪石(3%~5%)及黑云母(少)、铁泥质(少)、金属矿物(少)、楣石(少)、锆石(少)等组成,呈细粒花岗变晶结构,块状构造(图4)。岩体中心相对低洼和平缓地带汇聚了厚大的风化壳,厚度最大可达74.08 m,构成中岭岗铌矿床的主要矿体。

中岭岗矿区矿体按自然产出形态分为三个矿体,即KT1、KT2、KT3(图3)。KT1品位最高,厚度最大;KT2规模最大;KT3向北、东均未圈闭,潜力较大。矿体主要呈疏松沙土状,上部及中部为近距离搬运的强风化松散坡积堆积物,下部呈半风化碎粒、碎块状,矿体底板以新鲜完整的片麻状二长花岗岩为界。在空间分布上,3个风化残坡积矿体呈不规则形分布于片麻状二长花岗岩体上。矿体与围岩接触界线清楚,多呈“突变”式接触。矿体

地表边界与片麻状二长花岗岩出露界线一致, 总体形态不规则, 底板片麻状二长花岗岩因风化深度不同而呈波浪状。从矿体成分看, 坡积成分搬运距离较短, 其厚度与片麻状二长花岗岩风化深度有关, 一般风化程度越深, 厚度越大。

T1 呈不规则椭球状面型分布, 面积 1.48 km²。钻孔控制矿体厚度 21.40~74.08 m、平均 42.98 m, 厚度变化系数 31%, 属矿体厚度变化稳定型。单工

程矿体品位 Nb₂O₅ 0.015%~0.038%, 矿体 Nb₂O₅ 品位平均 0.021%, 品位变化系数 35%, 属有用组分分布均匀型。矿体品位总体显示由北东向南西增高的趋势(图 5)。

KT2 呈近东西向不规则长条状面型分布, 面积 3.91 km²。钻孔揭露矿体厚 15.18~63.80 m、平均 31.76 m, 厚度变化系数 40%, 属矿体厚度稳定型。单工程矿体品位 Nb₂O₅ 0.014%~0.37%, 矿体 Nb₂O₅

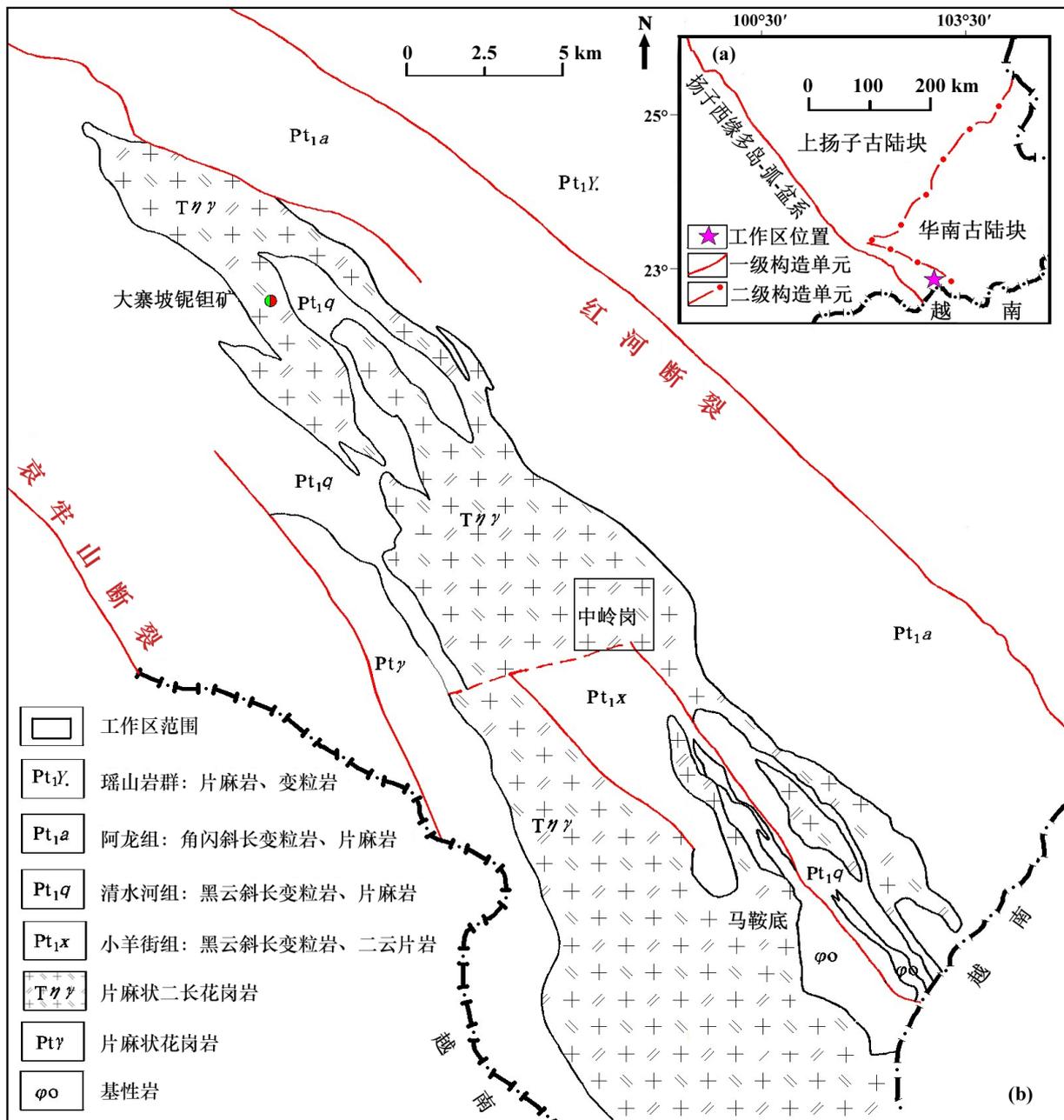


图 2 云南金平中岭岗铌矿区区域地质图

Fig. 2 Regional geological map of Zhonglinggang niobium deposit, Jinping County of Yunnan Province

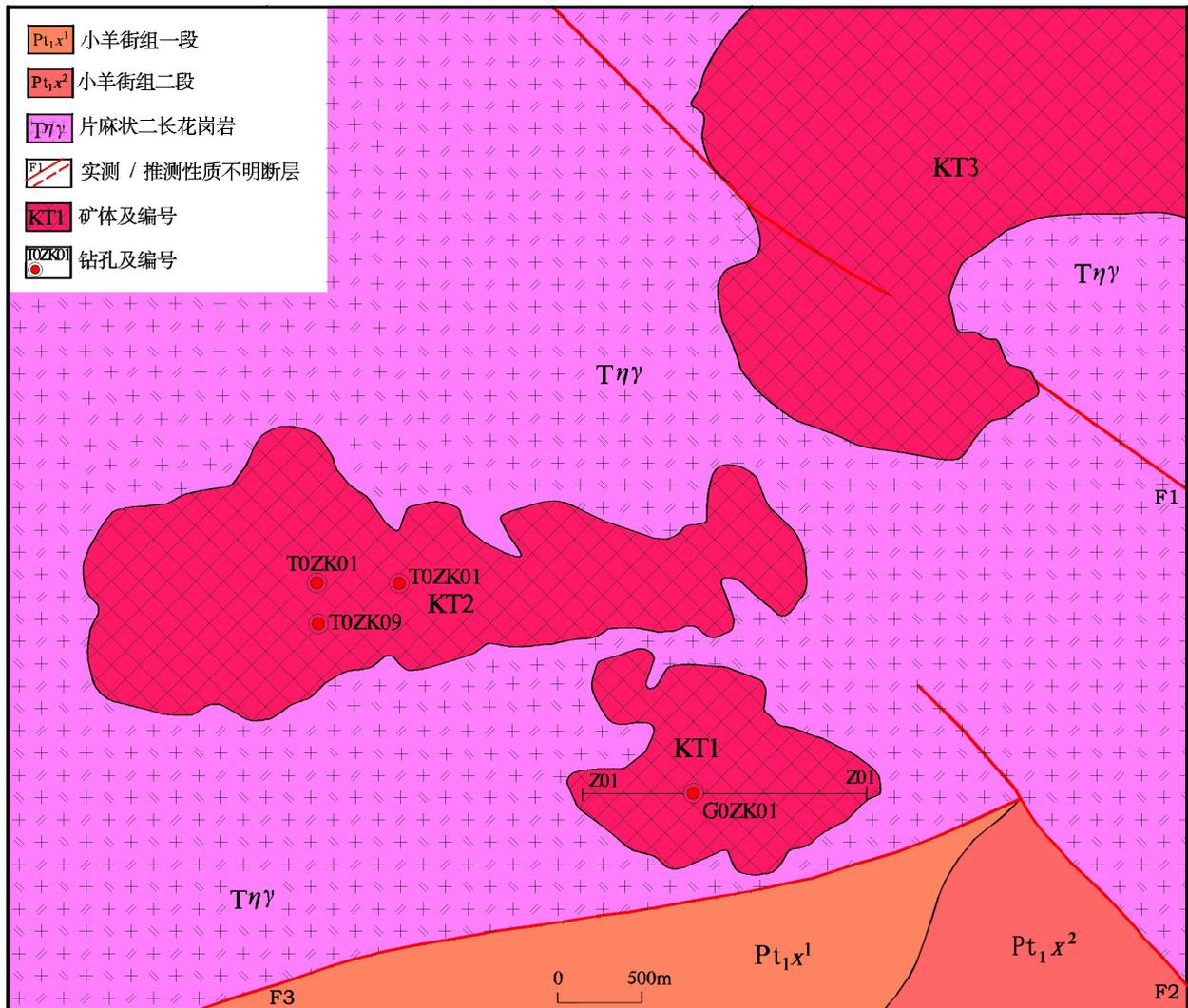


图3 中岭岗铌矿区地质图

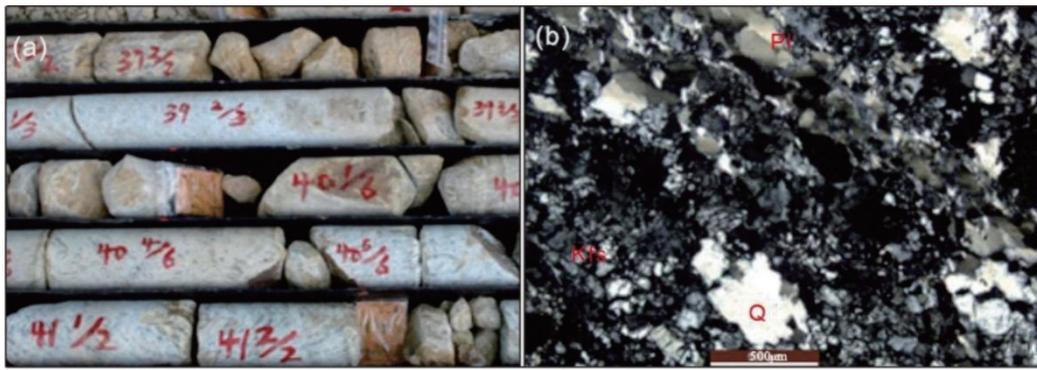
Fig. 3 Geological map of Zhonglinggang niobium deposit

品位平均 0.017%。品位变化系数 38%，属有用组分分布均匀型。

KT3 呈南北向不规则状面型分布，面积 2.83 km²。矿体由剥土控制，厚度不清。单样品位最低 Nb₂O₅ 0.009%，最高 Nb₂O₅ 0.026%，矿体平均品位 Nb₂O₅ 0.015%，品位变化系数 26%，属有用组分分布均匀。

三个矿体铌元素品位均超过最低工业品位要求，但由于含矿岩性成分在垂向上存在差异，矿体明显具有上、中、下三层(段)结构(图 6)。(1)上层为第四系残坡积物(Qh^{edl})，呈不整合覆盖于片麻状二长花岗岩风化壳上。主要由黏土，片麻状二长花岗岩碎块、碎粒(岩体风化破碎坡积物)，少量石英脉、伟晶岩脉碎块及磁铁矿碎粒等组成。部分地

段近地表有 0~20 cm 的褐黑色腐殖土，厚 0~18.85 m，矿化总体较均匀。(2)中层为强风化层 Tηγ(qfh)：呈疏松砂土状，矿物成分与原岩基本一致，仅风化后长石高岭土化，角闪石、黑云母等暗色矿物褪色，具弱褐铁矿染。厚 0~63.42 m，矿化总体较均匀，仅局部较高。该层与下部的半风化片麻状二长花岗岩间无明显界线，岩性基本一致，风化破碎程度呈由强至弱的渐变关系。(3)下层为半风化层 Tηγ(bfh)：岩石风化较强，呈碎粒、碎块状，局部有几十厘米至数米不等风化较弱。矿物成分与强风化层基本一致，仅其风化破碎程度存在差异。厚 0~44.07 m，矿化总体较均匀，仅局部较高。该层与下部的弱风化片麻状二长花岗岩(矿体底板)间界线较明显，岩石矿物成分基本一致。



Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石

图 4 中岭岗矿区片麻状二长花岗钻孔岩心 (a) 及镜下照片 (b)

Fig. 4 Drill core photos (a) and photomicrographs (b) of gneissic monzogranite at Zhonglinggang deposit

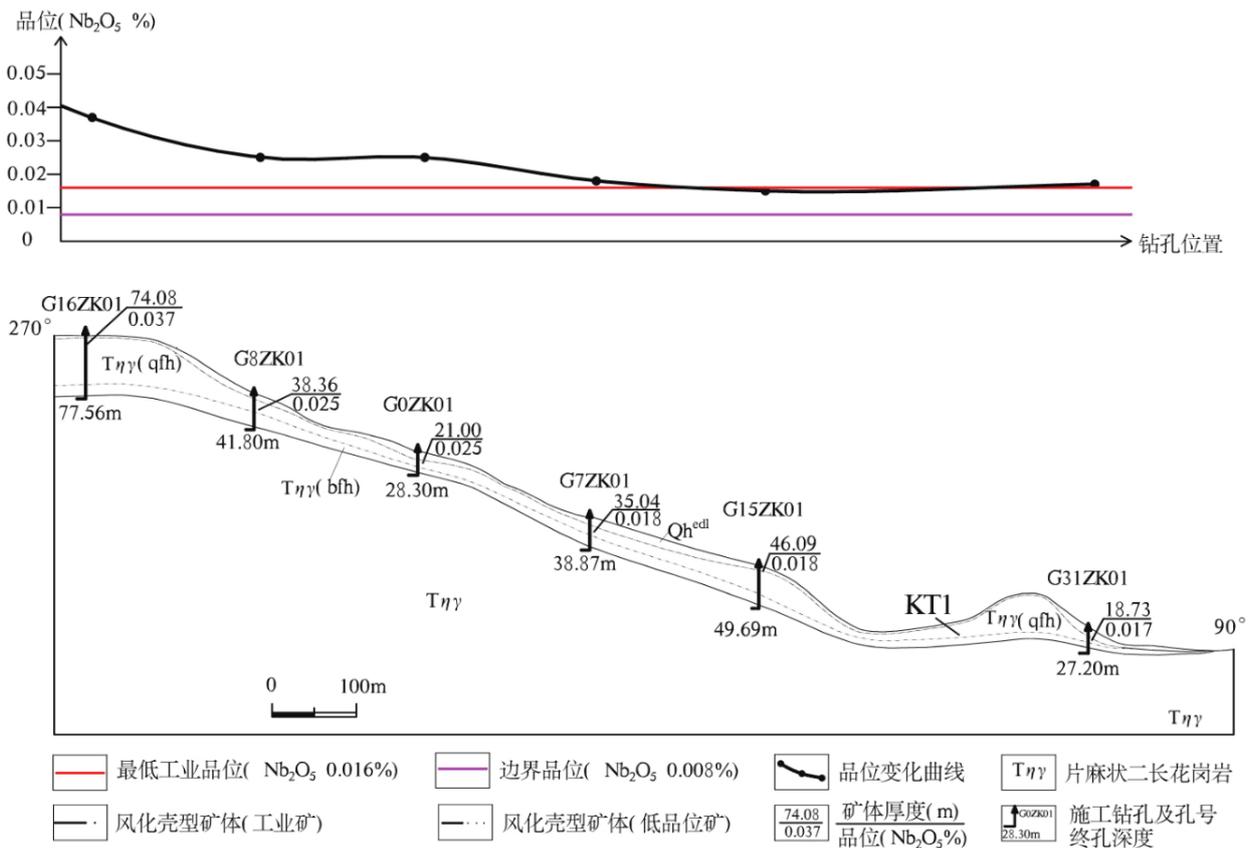


图 5 中岭岗矿区 KT1 纵 I 勘探线剖面品位变化图

Fig. 5 Grade change diagram of I exploration section of KT1 at Zhonglinggang niobium deposit

3 样品采集与分析方法

3.1 样品采集

本研究主要针对中岭岗铌矿矿体进行了采样, 岩性均为灰白色二长花岗岩, 采自矿区已施工的 4 个钻孔(T0ZK01、G0ZK01、T0ZK09、T15ZK01)的

底部, 每个钻孔采集 1 件样品, 共采集样品 4 件。二长花岗岩中 Nb₂O₅ 品位在 0.011%~0.041% 之间。所采样品均用于全岩岩石地球化学主量元素、微量元素和稀土元素测试分析。

3.2 测试方法

本次样品的分析测试工作均在云南省地质矿

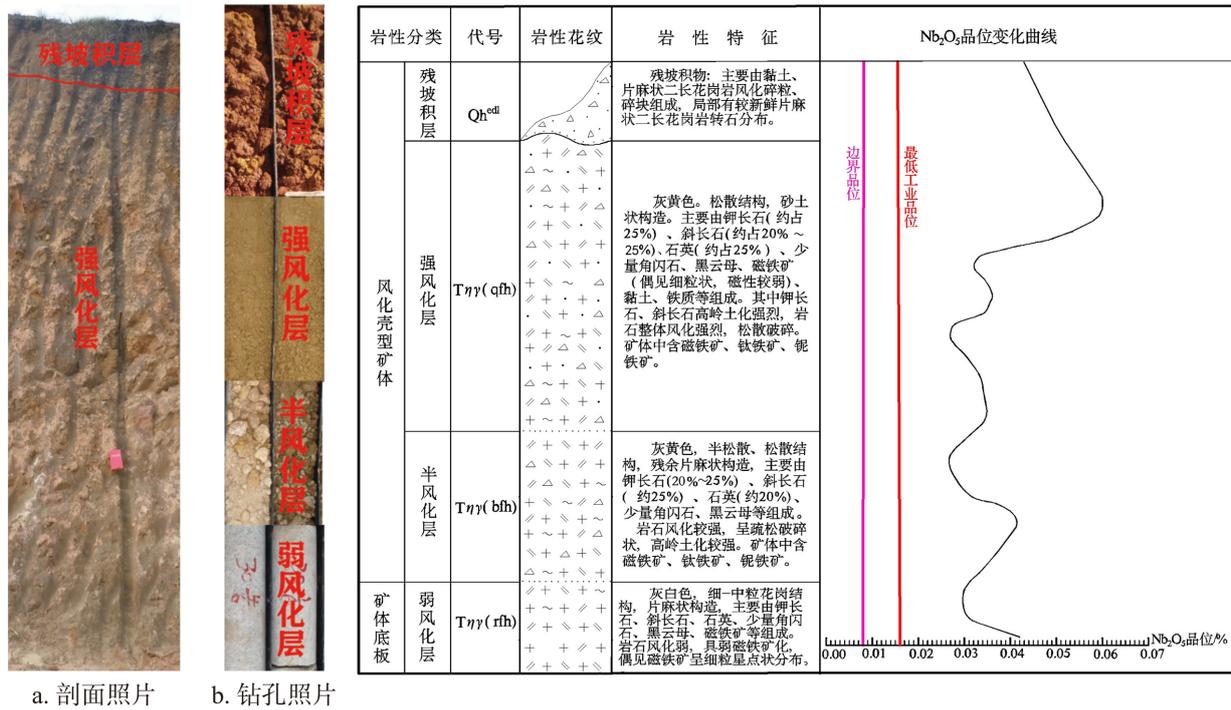


图6 中岭岗铌矿体垂直分带及品位变化曲线图

Fig. 6 Vertical zoning and grade change diagram of Zhonglinggang niobium deposit

产勘查开发局中心实验室(自然资源部重点实验室)完成。主要元素测试采用X射线荧光光谱分析法(XRF),分析误差小于3%。微量元素和稀土元素测试采用Jena电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)。

4 结果与讨论

4.1 矿石矿物组成

岩矿鉴定和化学分析结果显示,铌矿石共由氧化物、硅酸盐、磷酸盐、碳酸盐、硫酸盐六类共16种矿物组成。氧化物主要为烧绿石、磁铁矿、石英、金红石、锐钛矿、褐铁矿、赤铁矿、铌钽铁矿;硅酸盐类矿物主要为非晶质钾长石、绢云母、绿泥石;磷酸盐类矿物有磷灰石、独居石;硫化物为黄铁矿;碳酸盐矿物主要为方解石。原矿X-射线粉晶衍射图的背景值较高,且背景有弯曲现象,说明矿石的铁质和非晶质含量较高,而结晶矿物主要为磁铁矿、石英和磷灰石。根据矿石矿物组统计,在残坡积矿体中,磁铁矿和土状赤铁矿集合体构成矿石的主体,而载铌矿物烧绿石是形成高品位铌矿的重要组分。

4.1.1 主要矿物特征

钛铁矿:化学组成为FeTiO₂,含量0.2%~1.3%,黑色,不透明,半金属光泽,板状-他形粒状,粒度

在0.005~0.3 mm。经电镜能谱分析,含Fe 12.02%~44.68%,含Ti 1.86%~31.79%(换算成TiO₂ 53.9%),Mn 1.75%~5.16%。还发现钛铁矿中包裹细小的锆石、铌铁矿,铌铁矿中含Nb 40.49%(换算成Nb₂O₅ 57.8%),含少量Si、Al、Mg等杂质。

褐钇铌矿:化学组成为YNbO₄,与锆石、独居石等共生。黑色,不透明,半金属光泽,柱状、他形粒状,粒度0.1~0.2 mm。

烧绿石:化学组成为(Ca, Na)2Nb₂O₆(OH, F)。棕色,半透明,油脂光泽,八面体状、他形粒状,粒度0.1~0.2 mm。

金红石:化学组成为TiO₂,是自然界中钛的三种同质多相变体(金红石、锐钛矿和板钛矿)之一,组成中常有铁、铌、钽等类质同象混入物。深红棕色,金刚光泽,柱状,粒度0.1~0.2 mm。

独居石:化学组成为(Ce, La)[PO₄]。黄绿色,油脂光泽,板状、他形粒状,粒度0.05~0.2 mm。

磷钇矿:化学组成为Y[PO₄],主要产于花岗岩、伟晶岩(脉)中,与锆石、钛铁矿、独居石等共生,米白色,油脂光泽,双锥状、他形粒状,粒度0.1~0.2 mm。

磁铁矿:化学组成为Fe²⁺Fe³⁺O₄,矿石中普遍存在。在片麻状二长花岗岩及其风化壳中,有两种产

出状态:一种呈细粒星散状或细粒稀疏浸染状产出,另一种为沿后期石英脉、伟晶岩脉的裂隙或脉侧呈团块状、脉状产出。经光谱分析和能谱分析,该类磁铁矿中含锰、钛较高,为含锰钛磁铁矿。含量0.2%~2.6%,黑色,不透明,半金属光泽,八面体状-他形粒状,粒度在0.01~0.3 mm。

锆石:化学组成为ZrSiO₄,含量0.05%~0.1%,无色,金刚光泽,双锥柱状,粒度在0.005~0.2 mm。

4.1.2 主要有用组分在矿石中的赋存状况

铌多赋存于钛铁矿中,钛铁矿含Nb₂O₅可达

57.8%,是矿石中主要的含铌矿物之一。钛铁矿中的铌占原矿总铌的40.49%;钛铁矿中包裹锆石、铌铁矿。其他含铌矿物还有褐钇铌矿,褐钇铌矿中的铌约占原矿总铌的4.2%。

中岭岗矿体(床)呈风化残坡积形式上覆于片麻状二长花岗岩体上,按矿石自然类型属风化壳型残坡积矿床。

4.2 岩石地球化学特征

花岗岩主要元素分析结果见表1。样品主要元素含量变化范围较大,SiO₂含量71.74%~74.17%,

表1 岩石地球化学全分析结果表
Table 1 Major and trace element geochemical analysis results of the bulk rock

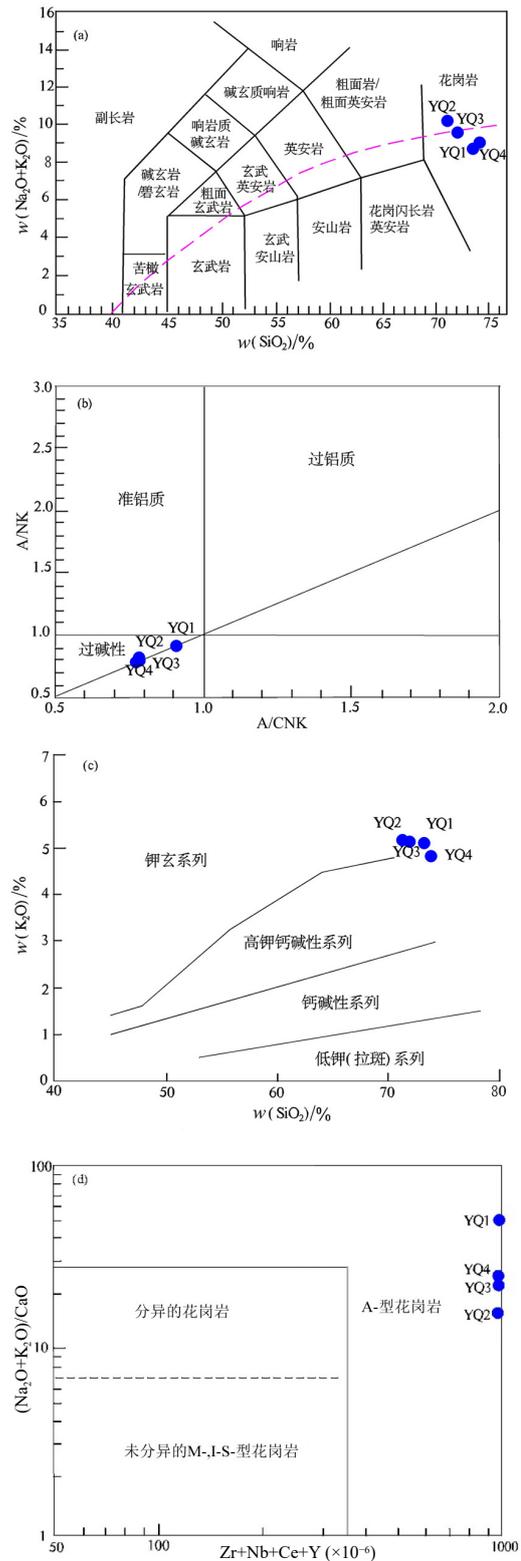
样品编号	元素含量 ($\times 10^{-2}$)											
	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	P ₂ O ₅	
G0ZK01YQ1	73.6	5.22	3.6	0.21	0.06	0.12	11.11	3.02	1.54	0.35	0.02	
G0ZK08YQ1	71.74	5.31	4.82	0.65	0.08	0.15	11.89	3.04	1.94	0.39	0.04	
S0ZK01YQ1	72.3	5.25	4.52	0.47	0.05	0.14	11.24	2.92	2.52	0.34	0.03	
S0ZK01YQ2	74.17	4.95	4.13	0.37	0.08	0.11	10.1	4.42	0.99	0.28	0.03	
样品编号	元素含量 ($\times 10^{-2}$)						元素含量 ($\times 10^{-6}$)					
	Nb ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	H ₂ O ⁺	Pb	Zn	Au	Ba	Co	Cr	Cu	Ga	
G0ZK01YQ1	0.008	0.45	0.64	1.51	0.62	<0.05	316	1.59	16.6	49.5	29.8	
G0ZK08YQ1	0.012	0.12	0.11	0.56	0.25	<0.05	107	1.6	16.6	20.6	31.6	
S0ZK01YQ1	0.01	0.08	0.15	0.34	0.16	<0.05	62.1	1.62	15.1	16.8	32.2	
S0ZK01YQ2	0.016	0.1	0.13	0.4	0.21	<0.05	506	3.38	16.6	19.2	29.1	
样品编号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)											
	Li	Nb	Ni	Rb	Sc	Sr	Th	Ta	U	V	Zr	
G0ZK01YQ1	16.6	170	4.45	130	3.16	23	22.2	9.27	4.42	46.2	900	
G0ZK08YQ1	17.2	112	4.58	137	3.07	20.9	14.3	7.47	2.06	44.8	452	
S0ZK01YQ1	16.5	118	4.57	114	3.67	19.3	14.3	5.27	1.95	42.6	481	
S0ZK01YQ2	43.6	129	6.3	142	6.07	54.3	15.3	7.32	1.63	46.3	631	
样品编号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)											
	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	
G0ZK01YQ1	408.3	10.59	5.11	0.619	14.12	1.842	61.17	0.78	80.41	22.34	15.83	
G0ZK08YQ1	839.9	11.33	6.778	0.506	15.62	2.199	43.1	1.167	55.17	15.95	11.57	
S0ZK01YQ1	545.9	68.75	37.1	2.643	61.59	13.34	241.6	4.451	255.3	63.45	58.84	
S0ZK01YQ2	441	29.5	17.4	1.28	30.8	5.94	186	2.38	176	49.5	31.5	
样品编号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)				元素含量 ($\times 10^{-9}$)							
	Tb	Tm	Y	Yb	Hf	Pt	Pd					
G0ZK01YQ1	1.986	0.733	17.61	4.876	48.3	3.16	3.58					
G0ZK08YQ1	1.934	1.093	30.55	7.79	24.4	3.33	4.49					
S0ZK01YQ1	11.3	4.997	315.2	30.5	22.2	5.62	5.47					
S0ZK01YQ2	4.92	2.42	138	15.1	34.5	7.76	8.82					
样品编号	其他参数											
	ΣREE	ΣCe	ΣY	ΣCe/ΣY	A/NCK	K ₂ O/Na ₂ O	A/NK	Rb/Sr	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Yb) _N	
G0ZK01YQ1	646.32	588.67	57.65	10.21	0.93	1.45	0.96	5.65	2.43	2.34	8.46	
G0ZK08YQ1	1044.66	966.20	78.46	12.31	0.80	1.10	0.87	6.56	2.34	1.62	3.73	
S0ZK01YQ1	1714.96	1167.7	547.23	2.13	0.80	1.16	0.86	5.91	2.58	1.63	5.34	
S0ZK01YQ2	1131.74	885.28	246.46	3.59	0.79	1.20	0.83	2.62	3.71	1.65	8.30	

平均值为 72.95%; MgO 的含量 0.05%~0.08%; K₂O 含量较高, 为 4.95%~5.31%, 平均值为 5.18%; Al₂O₃ 含量 10.1%~11.89%, 平均值为 11.09%; 全碱含量(Na₂O+K₂O)较高(图 7a), 为 8.82%~10.13%, 平均值为 9.45%; Na₂O/K₂O 比值介于 0.69~0.91, 平均值为 0.82; K₂O/SiO₂ 比值介于 0.067~0.74, 平均值为 0.071, 在 K₂O-SiO₂ 图中, 属于高钾钙碱性-钾玄系列(图 7c)。铝饱和度(A/CNK)范围在 0.79~0.93 之间, 平均值为 0.83, 在 A/NK-A/CNK 图中, 所有样品均属于过碱性花岗岩(图 7b)。(Na₂O+K₂O)/CaO 介于 16~42, Zr+Nb+Ce+Y 值为 1 340×10⁻⁶~1 496×10⁻⁶, 显示 A 型花岗岩特征(图 7d)。与全球范围的 A 型花岗岩相比, 表现出相似的富 Si 和 K, 贫 Al、Ca 和 Mg 的特征(杨武斌等, 2011)。

花岗岩中微量元素中 Nb 含量为 112×10⁻⁶~170×10⁻⁶, Ta 含量为 5.27×10⁻⁶~9.27×10⁻⁶, Sr 含量为 19.3×10⁻⁶~54.3×10⁻⁶, Nb/Ta 比值为 14.99~22.39, 平均值为 18.33, 高于地壳平均值(12.22)和原始地幔平均值(17.4); Zr/Hf 比值 18.29~21.67, 平均值为 19.28, 低于原始地幔平均值(36.25); Rb/Sr 比值为 2.62~6.56, 平均值为 5.18, 高于全球上地壳平均值(0.32)。富集 Nb、Ta、Th 等高场强元素和 Rb 大离子亲石元素, 亏损 Ba、Sr、Ti 等元素。根据稀土元素分析结果, 片麻状二长花岗岩的 ΣREE 为 646.32×10⁻⁶~1 714.96×10⁻⁶, 平均值为 1 134.42×10⁻⁶, 稀土总含量高, 轻重稀土分馏不明显; (La/Sm)_N 值为 2.34~3.71, 平均值为 2.77; (Gd/Yb)_N 值为 1.62~2.32, 平均值为 1.81; (La/Lu)_N 值为 3.84~8.15, 平均值为 6.43(图 8)。

4.3 成矿来源及找矿潜力

金平县中岭铌矿形成于造山构造背景下, 含矿岩体为过碱性 A 型花岗岩(图 7d), 矿床类型属于碱性花岗岩型铌矿床, 具有以铌矿为主, 钽矿含量较低的特点(Abdalla et al., 1998)。关于 A 型花岗岩的成因机制目前主要有三种观点: (1)幔源基性岩浆的分离结晶(Turner et al., 1992); (2)长英质-中基性等多种地壳物质在一定条件下的部分熔融(Wu et al., 2002; Frost, 2011); (3)壳源岩浆与幔源岩浆的混合作用(Yang et al., 2006; Zhao et al., 2016)。研究区花岗岩显示较低的 Sr 和 Eu 的地球化学值, 此外与江西宜春 414 花岗岩型铌矿、内蒙古巴尔哲碱性花岗岩型铌矿床对比, 金平县含矿花



(a) Na₂O+K₂O-Si₂O 图解(据 Middlemost, 1994); (b) A/NK-A/CNK 图解; (c) K₂O-Si₂O 图解; (d) (Na₂O+K₂O)/CaO-Zr+Nb+Ce+Y 图解

图 7 花岗岩主要元素判别图

Fig. 7 Discriminant diagrams of granitic major elements

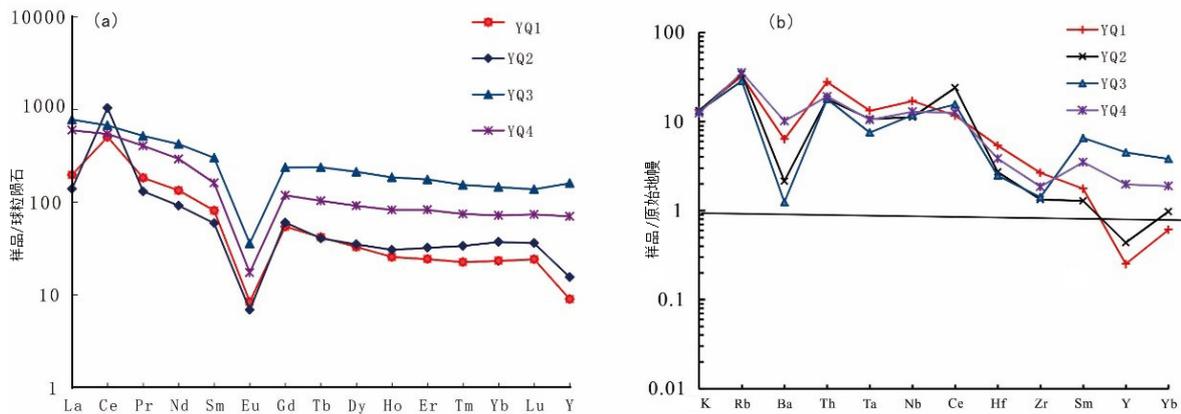


图8 中岭岗花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)

Fig. 8 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for the granitoids of Zhonglinggang niobium deposit

花岗岩具有类似的微量及稀土元素特征,为印支期碱性花岗质岩浆结晶分异的产物(陈金勇等, 2019; 万泰安, 2022; 李雪等, 2023)。结合区域地质背景(崔银亮, 2007),在元古宙晚期—印支早期于哀牢山群古老结晶基底之上形成了狭长的红河裂陷槽,印支早期由于古特提斯裂解和地幔柱上涌影响,红河裂陷槽张裂并伴随深部岩浆物质上涌,印支晚期受扬子板块域西侧地块再次俯冲碰撞,东侧抬升的基底向西逆冲推覆,伴随区域变质及混合岩化作用,形成了研究区花岗岩总体分布格局。

金平县中岭铌矿主要赋存于花岗岩风化残坡积层、强风化层,呈面形或长条形分布,连续性较好。富矿的花岗岩质岩体在强烈的风化—剥蚀—淋滤—堆积反复作用下,使富含铌、稀有元素的矿物(钛铁矿、磷钇矿、烧绿石、独居石、褐钇铌矿等)迁出,并在花岗质风化壳体中进一步聚集,最终形成了层状、似层状工业矿体。在西南三江成矿带,尤其是金平地区,广泛分布三叠纪花岗岩,具有形成风化壳铌矿的基础地质条件;此外,该区域地处热带—亚热带气候区,年均气温及降雨量均有利于风化壳的形成,广泛发育花岗岩风化壳体。更加重要的是,哀牢山断裂至红河断裂带之间山体坡度较缓,地势起伏较小,有利于风化壳的保存。

目前在矿区内共探获铌氧化物资源量 2.62 万吨,矿床 Nb_2O_5 品位平均为 0.019%。从矿区南至马鞍底乡,北至大寨乡均有较厚大的风化壳,马鞍底乡—大寨乡平距约 40 km。马鞍底一带的风化壳铌矿含量均可达最低工业品位,大寨乡亦发现有

大寨坡铌钽矿矿点,与区域化探异常吻合程度较好。因此,在云南金平县马鞍底乡—大寨乡一带仍具有较好铌多金属矿的找矿潜力。

5 结论

(1)云南省金平县中岭岗地区铌矿床成矿母岩为片麻状二长花岗岩,岩石中铌元素原始浓度大,以高硅、富碱为特征,且 $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$,属碱性花岗岩型铌矿床。

(2)风化壳从上至下可划分为残坡积层、强风化层、半风化层、弱风化层(基岩),铌矿主要赋存于风化壳残坡积层、强风化层,成矿时代为第四纪。区内风化壳厚度整体表现为山顶—山腰—山脚依次变薄,以山腰处风化壳铌矿品位最高。

(3)三叠纪花岗岩体中粒岩相带形成的风化壳铌矿品位最高,在风化壳垂向结构上,残坡积层、强风化层上半部铌矿富集程度最高,半风化层和弱风化层减弱。该区域具有较大的铌多金属矿找矿潜力。

References

- Abdalla H M, Helba H A, Hohamed, F H, 1998. Chemistry of columbite tantalite minerals in rare metal granitoids, Eastern Desert, Egypt[J]. *Mineralogical Magazine*, 62 (6): 821–836.
- Chen J Y, Fan H H, Wang S Y, et al., 2019. Ore-controlling Factors of the BaerZhe super-large deposit in Jarud Banner, inner Mongolia[J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (1): 27–35 (in Chinese with English abstract).

- Cui Y L, 2007. The synthetic informational prognosis of metallogenic prospecting and volcanic mineralization of Longbohe copper deposit in Jinping County of Yunnan Province [D]. Kunming University of Science and Technology: 1 – 362 (in Chinese with English abstract).
- Deng P, Chen Y M, Ye J H, et al., 2019. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum[J]. *China Mining Magazine*, 28 (4): 63 – 68 (in Chinese with English abstract).
- Frost C D, 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin[J]. *Journal of Petrology*, 52 (1): 39 – 53.
- Gulleyal A L, Nassar N T, Xun S, et al., 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (16): 4111 – 4115.
- Hou Z Q, Chen J, Zhai M G, 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65 (33): 3651 – 3652 (in Chinese with English abstract).
- Huang L, Zhou J X, Sun Z B, et al., 2022. Rhyolite-type niobium mineralization discovered in the Caojian area of western Yunnan.[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41 (1): 185 – 187 (in Chinese with English abstract).
- Li J K, Li P, Wang D H, et al., 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64: 1545 – 1566 (in Chinese with English abstract).
- Li W C, Pan G T, Hong Z Q, et al., 2010. Mineralization theory and exploration technology of the multi-island arc basin-collision orogeny in the “Three Rivers” of Southwest China[M]. Beijing, Geological Bulletin of China: 273 – 274 (in Chinese with English abstract).
- Li W C, Li J W, Xie G G, et al., 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 29 (1): 1 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Li W H, Li Z Y, Zheng X, 2014. Characterization of weathered crustal phosphorus-iron niobium-rare earth deposits in carbonate rocks, Sukuru, Uganda.[J]. *Mineral Deposits*, 33: 1113 – 1115.
- Li W H, Li Z Y, Zheng X, 2014. Sukulu carbonatite weathering crust type phosphate-iron-niobium rare earth deposit, Uganda[J]. *Mineral Deposits*, 33: 1113 – 1115 (in Chinese with English abstract).
- Li X, 2023. Study on the mineralization of Yanshanian Nb-Ta rare elements in the middle-south Great Xing'an Range[D]. Jilin University: 1 – 294 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost EAK, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215 – 224.
- Rao C, Wang M Y, Wang Q, et al., 2023. Overview of magmatic-hydrothermal evolution of and rare element super enrichment in NYF pegmatites[J]. *Earth Science Frontiers*, 30 (5): 106 – 114 (in Chinese with English abstract).
- Ren Z J, 1989. The evolution of Yunnan continental crust and its relationship with mineralization[J]. *Mineral and Geology*, 5 (1): 10 – 17 (in Chinese with English abstract).
- Shi J F, Tang J R, Zhou P, et al., 2010. World prospecting model and mineral exploration[M]. Beijing: Geological Bulletin of China: 1 – 232 (in Chinese with English abstract).
- Turner S P, Foden J D, Morrison R S, 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28: 151 – 179.
- Wan T A, 2022. The Ta and Nb enrichment mechanism of the Yichun 414 deposit Jiangxi Province: A case study on the mineral characteristics of micas[D]. East China University of Technology: 1 – 69 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Li W F, Wang B Z, et al., 2024. Niobium-rare earth mineralization associated with alkaline rock-carbonate complex: Genesis of alkaline rock-carbonate complex in the Dagele Niobium-rare earth deposit, East Kunlun[J]. *Geotectonics and metallogensis*, 48 (1): 1 – 37 (in Chinese with English abstract).
- Wang R C, Che X D, Wu B, et al., 2020. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65 (33): 3763 – 3777 (in Chinese with English abstract).
- Wen J, Liu Z C, Zhu H L, et al., 2021. Characteristics and geological significance of abnormal enrichment of Nb-REE in bottom of Uper Permian Xuanwei Formation in Muchuan area, southern Sichuan[J]. *Ore Geology Reviews*, 40 (5): 1045 – 1071 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al., 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187 (1–2): 143 – 173.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al., 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89: 89 – 106.
- Yang W B, Shan Q, Zhao Z H, et al., 2011. Petrogenic and metallogenic action of the alkaline granitoids in Baerzhe area: A comparison between mineralized and barren plutons[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41 (6): 1689 – 1704 (in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al., 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. *Science Foundation in China*, 33 (2): 106 – 111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Wu K X, Chen L K, et al., 2015. Overview of mineralization characteristics of ion adsorption rare earth deposits in Gannan, China[J]. *Chinese Journal of Rare Earths*, 33 (1): 10 – 17.
- Zhang Z H, 1990. A Study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, south China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1 (5): 57 – 71.
- Zhao J L, Qiu J S, Liu L, et al., 2016. The Late Cretaceous I- and A-type granite association of southeast China: Implications for the origin and evolution of post collisional extensional magmatism[J]. *Lithos*,

240: 16–33.

Mineral Resource Institute of China Academy of Geological Sciences, 2019. Mineral geology of Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House: 241–247 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈金勇, 范洪海, 王生云, 等, 2019. 内蒙古扎鲁特旗巴尔哲超大型矿床控矿因素分析[J]. 地质力学学报, 25(1): 27–35.
- 崔银亮, 2007. 云南省金平县龙脖河铜矿火山成矿作用及综合信息成矿预测[D]. 昆明理工大学: 1–362.
- 邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等, 2019. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J]. 中国矿业, 28(4): 63–68.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国, 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 65(33): 3651–3652.
- 黄亮, 周家喜, 孙载波, 等, 2022. 滇西漕涧地区发现流纹岩型铌矿化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(1): 185–187.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 等, 2019. 中国铌钽矿成矿规律[J]. 科学通报, 64: 1545–1566.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等, 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社: 273–274.
- 李文昌, 李建威, 谢桂青, 等, 2022. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. 地学前缘, 29(1): 1–13.
- 李文辉, 李宗勇, 郑旭, 2014. 乌干达苏库卢碳酸岩风化壳型磷铌铈稀土矿床特征[J]. 矿床地质, 33: 1113–1115.
- 李雪, 2023. 大兴安岭中南段燕山期铌钽稀有元素成矿作用研究[D]. 吉林大学: 1–294.
- 饶灿, 王吴梦雨, 王琪, 等, 2023. NYF型伟晶岩岩浆热液演化与稀有稀土金属超常富集[J]. 地学前缘, 30(5): 106–114.
- 任治机, 1989. 云南陆壳的演化及其成矿的关系[J]. 矿产与地质, 5(1): 10–17.
- 施俊法, 唐金荣, 周平, 等, 2010. 世界找矿模型与矿产勘查[M]. 地质出版社: 1–232.
- 万泰安, 2022. 江西宜春414矿床铌钽富集机理: 来自云母类矿物化学研究的启示[D]. 东华理工大学: 1–69.
- 王强, 李五福, 王秉璋, 等, 2024. 与碱性岩-碳酸岩杂岩共生的铌-稀土成矿作用—兼论东昆仑大格勒铌-稀土矿床中的碱性岩-碳酸岩杂岩成因[J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 1–37.
- 王汝成, 车旭东, 郭斌, 等, 2020. 中国铌钽铅钨资源[J]. 科学通报, 65(33): 3763–3777.
- 文俊, 刘治成, 竹合林, 等, 2021. 川南沐川地区上二叠统宣威组底部Nb-REE超常富集特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 40(5): 1045–1071.
- 杨武斌, 单强, 赵振华, 等, 2011. 巴尔哲地区碱性花岗岩的成岩和成矿作用: 矿化和未矿化岩体的比较[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 41(6): 1689–1704.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 106–111.
- 中国地质科学院矿产资源研究所, 2019. 云南矿产地质[M]. 北京: 地质出版社: 241–247.