DOI:10. 19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 01002
董涛,杜斌,段召艳,曹晓民,宋旭峰,董红国,张有名,李冰,2022. 滇西北香格里拉地区钨矿成矿规律及找矿方向[J]. 沉积与特提斯地质, 42(1):62 – 74.
Dong T, Du B, Duan Z Y, Cao X M, Song X F, Dong H G, Zhang Y M, Li B, 2022. Metallogenic regularity and prospecting direction of tungsten deposits in Shangri-La area, NW Yunnan Province, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(1):62 – 74.

滇西北香格里拉地区钨矿成矿规律及找矿方向

董　涛[1,2], 杜　斌[1,2], 段召艳[1,2], 曹晓民[1,2],
宋旭峰[1,2], 董红国[1,2], 张有名[1], 李　冰[1]

(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)

摘要:滇西北香格里拉地区已成为我国重要的铜钼资源勘查开发基地,区内的燕山期岩浆岩带呈南北向纵跨义敦岛弧、甘孜－理塘结合带及扬子西缘坳陷带,并伴随着钨钼多金属矿化,形成了休瓦促、麻花坪等大中型钨多金属矿床。区内的钨矿床与花岗岩有直接成因和空间联系,具有剩余重力低异常、弱正磁异常、钨锡钼铋组合异常及钨锡自然重砂异常特征。本文通过休瓦促、麻花坪典型矿床分析,总结钨矿时空规律、控矿因素及成矿模式,结合区域重力、航磁、化探、重砂等异常,综合分析该区具有寻找石英脉型、矽卡岩型、岩浆热液型钨多金属矿的找矿潜力,并探讨了钨矿找矿方向。

关　键　词:找矿方向;成矿规律;钨矿床;香格里拉;滇西北
中图分类号:P618. 67　　**文献标识码:**A

Metallogenic regularity and prospecting direction of tungsten deposits in Shangri-La area, NW Yunnan Province, China

DONG Tao[1,2], DU Bin[1,2], DUAN Zhaoyan[1,2], CAO Xiaomin[1,2], SONG Xufeng[1,2],
DONG Hongguo[1,2], ZHANG Youming[1], LI Bing[1]

(1. *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming* 650216, *China*; 2. *Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming* 650051, *China*)

Abstract: The Shangri-La area, NW Yunnan province, has become an important Cu-Mo exploration and development base in China. The Yanshanian intrusions longitudinally cross the Yidun terrane, Gantze-Litang suture zone, and western margin of the Yangtze Block from north to south, accompanied by W-Mo polymetallic mineralization in the region. Several large-/medium-sized tungsten deposits are discovered in this belt, e. g. , the Xiuwacu and Mahuaping deposits. The tungsten metallogenesis is genetically-spatially related to the coeval granitoids, and the deposits are characterized by low residual gravity anomaly, week positive magnetic anomaly, W-Sn-Mo-Bi anomaly association, and W-Sn natural placer abnormal. Basing on the systematic studies of the typical Xiuwacu and Mahuaping deposits, this study aims to comprehensively analyse the potential quartz-vein type, skarn type, hydrothermal type tungsten polymetallic deposits by means of anomalies of regional gravity, aeromagnetism,

收稿日期: 2021-09-03; **改回日期:** 2021-12-18
作者简介: 董涛(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事找矿勘查和矿床地质研究。E-mail:20974687@ qq. com
资助项目: 本文受国家自然科学重点基金项目(92055314)、云南省自然资源厅项目(4530000HT201902580)和四川省科技计划项目应用基础研究面上项目(2018JY0175)联合资助

geochemistry and placer. The prospecting direction of tungsten in the region is discussed.
Key words: exploration direction; metallogenic law; tungsten deposits; shangri-La; NW Yunnan

0　引言

金属钨是国际上公认的战略性矿产,广泛应用于国防和国民经济各个领域,特别是洁净能源、信息产业、航天航空和国家安全等许多高新技术领域。世界上的钨矿床分布不均匀,我国钨矿产资源丰富,储量和产量长期居世界首位,但由于相关地质找矿工作的投入不足,加上当前社会经济的快速发展,目前我国钨资源优势逐渐减弱,资源安全形势严峻(王明燕等,2014;毛景文等,2019;蒋少涌等,2020)。考虑到钨矿产的重要战略价值,加强对其成因研究及找矿勘查十分必要。

香格里拉地处西南三江特提斯复合造山带,是中国重要的铜钼多金属资源勘查开发基地之一,产出有普朗超大型斑岩型铜矿、铜厂沟大型斑岩 - 矽卡岩型铜钼矿等矿床,成矿地质背景优越,找矿潜力巨大(邓军等,2011,2014,2016;Deng et al.,2014a,b;李文昌等,2010a,2016;Li et al.,2017)。国内众多学者在该区针对铜钼矿开展了大量的成岩成矿作用、矿床特征、成矿年代、成矿流体及物质来源等基础矿床学研究(莫宣学等,1993;潘桂棠等,2003;曾普胜等,2003,2004,2006;侯增谦等,2001,2003,2004;范玉华和李文昌,2006;冷成彪等,2008;曹殿华等,2009;李文昌等,2010b,2011,2012,2013;任江波等,2011;黄肖潇等,2012;曹康等,2014;Li et al.,2011,2014,2017;杨立强等,2015;Wang et al.,2014a,b;Yu et al.,2014,2020;王新松,2014;王新松等,2011,2015;刘学龙等,2016;Yang et al.,2017a,b,2018;余海军,2018;江小均等,2019;董涛等,2020),厘定了区内出露岩体的成矿专属性,即与印支期洋壳俯冲有关的闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英二长闪长玢岩、石英二长斑岩等中酸性岛弧岩浆,伴随有铜多金属成矿作用;与燕山期碰撞后伸展有关的二长花岗岩 - 花岗闪长岩等加厚地壳部分熔融产生的酸性岩浆,与钼多金属成矿作用密切。但随着近年勘查工作的深入,研究发现燕山期岩浆岩带由北向南纵跨义敦岛弧、甘孜 - 理塘结合带进入扬子西缘坳陷带,并伴随着钨钼多金属矿化,从北向南形成了休瓦促钨钼矿(中型)、沙都格勒钨钼矿(小型)、热林钨钼矿(矿点)、亚杂铅锌矿(共伴生锡)、红山铜钼矿(共伴生钨)、铜厂沟铜钼矿(伴生钨)、麻花坪钨铍矿(大型)等钨锡矿床点,显示出较好的钨矿找矿潜力。本文在系统总结前人研究成果的基础上,通过休瓦促钨钼矿、麻花坪钨铍矿典型矿床研究,总结钨矿时空规律,控矿因素及成矿模式,结合区域重力、航磁、化探、重砂等异常,探讨钨矿找矿方向,为该区下一步工作部署提供一定的依据及思路。

1　区域地质背景

香格里拉地区位于西藏 - 三江造山系和上扬子陆块区结合部位(图 1a),纵跨四个三级构造单元:西侧的中咱 - 中甸地块,北部的义敦岛弧带南段,东侧的甘孜 - 理塘蛇绿混杂岩带向南急剧收缩部位,南部的扬子陆块西缘盐源 - 丽江坳陷带(图 1b)。

中咱 - 中甸地块,古生代属于扬子古陆西部被动边缘的一部分,晚古生代中晚期由于甘孜 - 理塘洋的开启,而裂离扬子陆块,构成微陆块中的稳定地块。陆块具有典型的基底与盖层的二元结构,基底为石鼓群、巨甸岩群的变质复理石细碎屑岩、碳酸盐岩、中性火山岩;盖层为古生代 - 晚古生代的浊积岩、火山岩、陆源碎屑岩、碳酸盐岩、磨拉石建造。盖层的古生界碳酸盐沉积建造内产出区域变质型大理石矿、中—低温热液型铜铅锌矿床,古近纪老君山地区山间盆地产出沉积型铜矿、砂金矿及与富碱斑岩有关的斑岩型铜金矿等。

义敦岛弧南段,即为格咱岛弧,夹持于乡城 - 格咱断裂和安家村断裂、楚波 - 熏洞断裂之间,向南至丽江石鼓与金沙江结合带交合,是甘孜 - 理塘洋向西俯冲的产物。晚三叠世(210 ~ 230Ma),发育与俯冲相关的钙碱性岛弧型浅成—超浅成中—酸性侵入岩,岩性以石英闪长玢岩 - 石英二长斑岩 - 花岗闪长斑岩 - 黑云母花岗岩为主,同时形成斑岩 - 矽卡岩型 Cu 多金属矿床(以普朗、雪鸡坪斑岩型 Cu 矿床和郎都矽卡岩型 Cu 矿床为代表);晚白垩世(86 ~ 75Ma),发育伸展构造背景加厚地壳部分熔融形成的 S 型或 I 型花岗岩,岩性以似斑状石英二长岩 - 二长花岗斑岩为主,同时形成斑岩 - 矽卡岩 - 热液型 Cu-W-Mo 多金属矿床(表 1)。

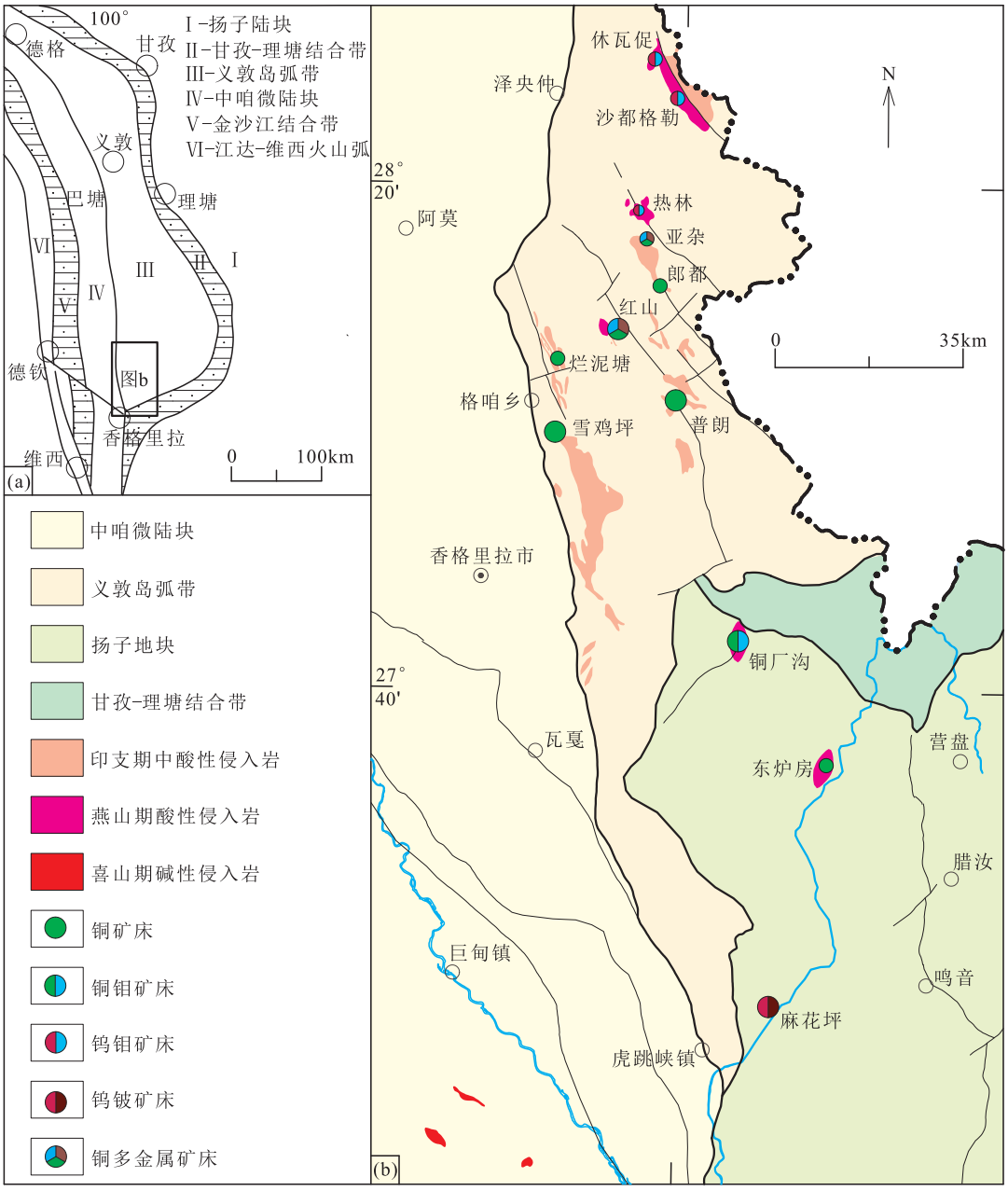


图 1 香格里拉地区大地构造位置(a)和矿产地质简图(b;据李文昌等,2010a 修改)

Fig. 1 Geological map of Shangri-La area(a) and distribution map of deposits(b; after Li et al.,2010a)

甘孜－理塘结合带为晚二叠世—晚三叠世早期形成的甘孜－理塘洋盆向西俯冲消减于中咱地块之下的残余部分(潘桂棠等,2003),位于安家村断裂以北,主要出露二叠系、三叠系及剪切带构造混杂岩。

扬子陆块西缘盐源－丽江坳陷带位于楚波－熏洞断裂以东,安家村断裂以南。主要出露上古生界及三叠系。断裂多呈北东、北西向展布,旁侧次级节理、裂隙发育,控制了斑岩体及矿产分布。铜厂沟、东炉房、陆家村等地区,出露燕山晚期和喜马拉雅期各类斑岩,不同程度地伴随钨钼铜铅锌金多金属成矿(表 1)。

2 典型矿床特征

2.1 休瓦促石英脉型钨钼矿

休瓦促石英脉型钨钼矿床位于香格里拉市格咱乡,由东、西两个矿段组成,矿床规模为中型。出露地层为上三叠统喇嘛垭组,岩性为灰至深灰色粉砂质板岩及变质砂岩,与岩体接触部位发生热变质作用形成十几米至上百米的角岩化带。侵入岩发育,

表 1　香格里拉地区主要钨多金属矿床及其地质特征表

Table 1　Main tungsten polymetallic deposits and their geological characteristics in Shangri-La area

序号	矿床名称	矿床规模	成矿元素	矿床品味	矿床类型	围岩	矿体产出位置	矿石矿物	与成矿有关岩体及时代	
1	休瓦促钨钼矿床	中型	钼、钨	钨品位 0.289%；钼品位 0.502%	石英脉型	变质砂岩、板岩	岩体内北西向构造裂隙中	白钨矿、辉钼矿、毒砂、黄铜矿、黄铁矿	二长花岗斑岩	晚白垩世
2	沙都格勒钨钼矿床	小型	钼、钨	钨品位 0.18%	石英脉型	变质砂岩、板岩	岩体内北东向构造裂隙中	白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、锡石	二长花岗斑岩	晚白垩世
3	热林钨钼矿床	矿点	钼、钨	WO_3 品位 0.071%～0.21%，Mo 品位 0.031%～0.23%	石英脉型	变质砂岩、板岩	岩体内北西向构造裂隙中	白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿	二长花岗斑岩	晚白垩世
4	亚杂铅锌矿（共伴生锡）	中型	铅锌(锡)	锡品位 0.67%	石英脉型	英安斑岩	围岩北西向构造裂隙中	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、锡石	二长花岗斑岩	晚白垩世
5	红山铜钼矿（共伴生钨）	大型	铜钼(钨)	钨共生 0.349%，钨伴生 0.019%	矽卡岩型	大理岩、变质砂岩、板岩	岩体外接触带北西向矽卡岩带中	黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、辉钼矿、白钨矿	花岗闪长岩	晚白垩世
6	麻花坪钨铍矿床	大型	钨、铍	钨品位 0.41%	岩浆热液型	大理岩、云母石英片岩	构造岩性界面之大理岩中	白钨矿、黑钨矿、绿柱石，硅铍石、萤石	隐伏花岗岩	晚白垩世?

由晚三叠世早期似斑状黑云母花岗岩及晚白垩世晚期二长花岗斑岩构成休瓦促复式岩体(图 2a)。众多学者研究认为休瓦促钨钼矿床的形成与晚白垩世岩浆活动密切相关(李建康等,2007;孟健寅,2014; Wang et al.,2014b;王新松等,2015;余海军和李文昌,2016;Gao et al.,2017,2018;张向飞,2018;高雪,2018;江小均等,2019;王忠强等,2020),其岩石具有较高的 SiO_2(70% ～ 76%)及全碱含量(7.5%～10.7%),为准铝质到弱过铝质(A/CNK:0.96～1.07),具有较低的 Mg、Ca、P 含量,相对富集轻稀土元素、Rb、U、Th 和 Ta,而相对亏损重稀土元素、Ba、Sr 和 Eu,总体呈现出高分异 I 型花岗岩特征。休瓦促岩体具有相对较高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$(0.7075～0.7098)和 $\delta^{18}O$(5.9‰～8.4‰)值,负的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(－8.0～－6.9)和 $\varepsilon_{Hf}(t)$(－7.6～－3.2)值,以及古老的 Nd 及 Hf 同位素的模式年 1.3～1.7Ga,指示着其主要源于加厚的中基性下地壳部分熔融(Wang et al.,2014b)。

1:5 万土壤地球化学测量在该区圈定 1 个以钨钼铜异常为主的甲类综合异常,以 W 规模大、浓度高、与 Mo 紧密伴生为特点(图 2b)。异常区 W 平均含量 48.7×10^{-6},最高 250×10^{-6},异常面积 $26km^2$,规模 158.3NAP;Mo 平均含量 13.0×10^{-6},最高 34×10^{-6},异常面积 $15.25km^2$,规模 49.6NAP;Cu 平均含量 268.7×10^{-6},最高 1204×10^{-6},异常面积 $12.25km^2$,与已知的休瓦促钨钼矿套合好。休瓦促复式岩体全岩元素平均含量 W 为 23.3×10^{-6}、高出地壳丰度值近 8 倍,Mo 为 5.95×10^{-6},高出地壳丰度值 3 倍,表明该岩体具有很好的 W、Mo 含矿性。1:10 万航磁特征:△T 磁异常为弱正磁异常(图 2c),呈北北西向长椭圆状,异常值为 20～72nT,与该区二长花岗岩体出露范围基本一致,推断弱正磁异常主要为岩体内磁铁矿等磁性矿物引起。

矿区发育节理与含矿石英细脉,相伴绿泥石化、绿帘石化、云英岩化、绢云母化、碳酸盐化等近矿围岩蚀变,蚀变越强,钨钼矿化越强,在空间上密切共生。矿化类型有石英脉型(形成工业矿体)及少量斑岩型(未形成工业矿体)。石英脉型钨钼矿体赋存于岩体内部构造裂隙中,受北西向断裂的控制(图 3),主矿体呈脉状、透镜状、似层状产出,走向延伸 185～735m,倾向延伸 150～217m,平均厚 2.2～9.5m,WO_3 品位 0.141% ～ 0.388%、Mo 品位 0.071%～1.074%(见表 2)。矿石矿物以白钨矿、辉钼矿为主,少量黄铜矿、黄铁矿,呈粗粒－伟晶结构、半自形—它形粒状结构,具团块状构造、细脉状、细脉浸染状、星点状构造。辉钼矿多呈扇形片状

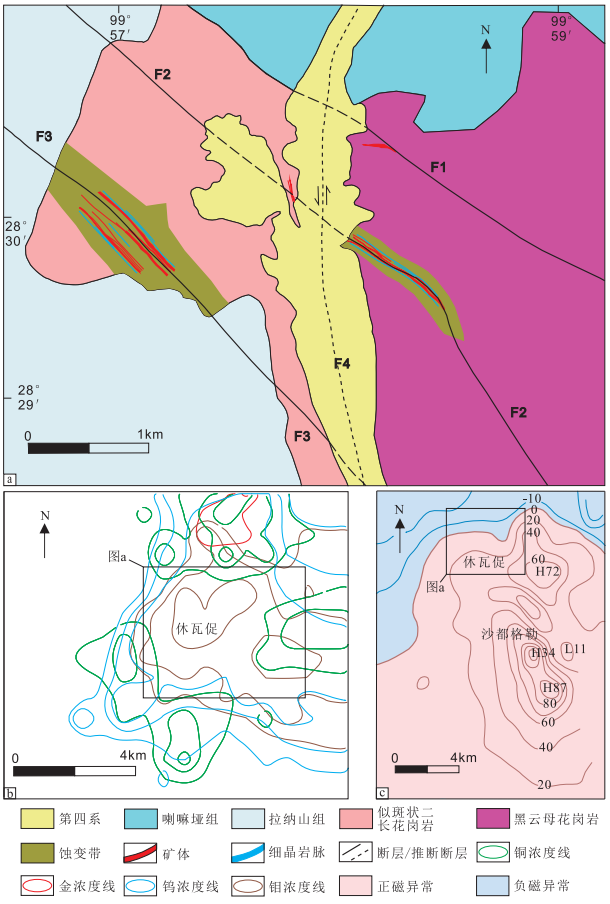


图 2 休瓦促矿区地质简图(a,据张向飞,2018 修改)及物化探异常图(b、c)

Fig. 2 Simplified geological map(a, after Zhang et al., 2018) and geophysical and geochemical anomaly maps of the Xiuwacu deposit(b, c)

集合体、菊花状集合体状,晶体粗大,粒径可达 6cm;白钨矿呈自形粒状晶体产出,往往与辉钼矿共生,也有单独存在于石英脉中(图 4)。

成岩成矿时代的研究表明,休瓦促钨钼矿区二长花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 76.8 ±3.8 ~85.6 ±0.5Ma(王新松等,2015;余海军和李文昌,2016;张向飞等,2017;江小均等,2019),辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 82.4 ±1.1 ~84.5 ±1.1Ma(李健康等,2007;孟健寅,2014),二者年龄在误差范围内基本一致,说明该区的钨钼成矿作用受晚白垩世岩浆活动控制,体瓦促钨钼矿床成岩成矿时代为晚白垩世。

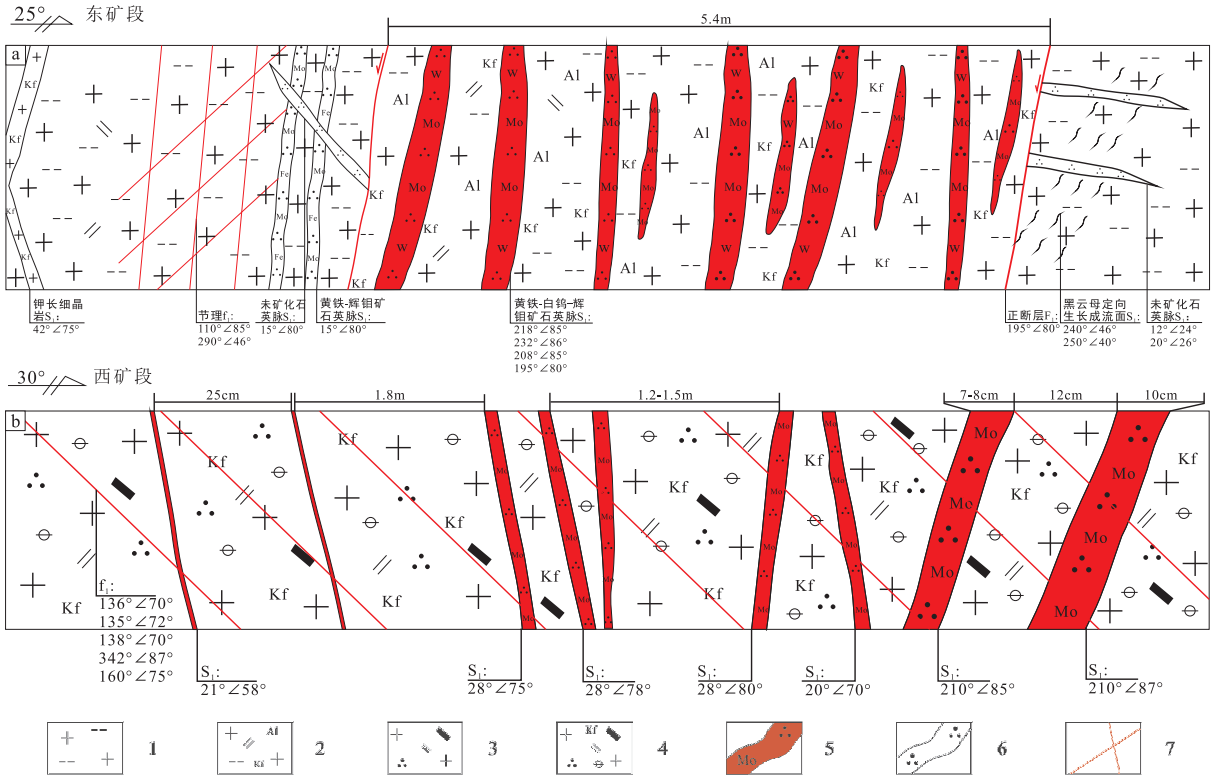
2.2 麻花坪岩浆热液脉型钨铍矿

麻花坪钨铍矿位于香格里拉市虎跳峡镇境内哈巴雪山南侧的麻花坪村一带,是一个钨、铍、水晶、萤石多矿种的综合矿床,为岩浆热液脉型矿床(冉明佳等,2015;熊凤等,2015),WO_3 资源量达到大型矿床规模,BeO 资源量达到超大型矿床规模。

矿区出露下泥盆统灰—深灰色绢云石英片岩、云母石英片岩、绢云千枚岩,中上泥盆统灰白—浅灰色大理岩、白云质大理岩(图 5a①)。矿区位于虎跳峡背斜的西翼,为向西倾的单斜构造,发育 1 条近南北向的断层 F_{11} 及近东西向的横张裂隙及剪切裂隙带,为矿区的主要控矿容矿构造。矿区地表未出露与矿化有关的酸性岩浆岩,仅有云煌斑岩脉零星穿插于泥盆系浅变质碎屑岩、大理岩中,一般顺层产出,规模较小。据区调资料,矿区 335°方向约 2km 处有闪长玢岩脉侵入体出露。近矿围岩蚀变明显而强烈,主要有硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、白云母 - 萤石化及褪色色蚀变等,尤其以白云母化、萤石化与矿化富集更为密切②。

矿化带总体上沿 F_{11} 断裂带呈南北向展布,南北长 3km,东西宽 0.4 ~0.5km。圈定大小 25 条矿体,矿体由蚀变微细脉和细脉组成,每组脉又由若干条单脉组成,在构造岩性界面附近矿脉密集,含脉率高达 40 ~70 条/m,有脉幅宽、蚀变强、矿化强的特征。F_{11} 下盘为变质碎屑岩,富含 Al、Si、Fe 等,形成以黑钨矿为主的矿化石英细脉,走向近东西,倾角陡直,划为 6 条长 150 ~400m、宽 100 ~200m 的脉带,单条脉厚 0.05 ~2.4 m,脉距 0.3 ~2 m,矿石品位富、变化大,WO_3 品位一般为 0.01% ~3%,最高达 21.31%;矿石矿物主要为黑钨矿,脉石矿物为水晶、白云母、萤石等,围岩蚀变以硅化、褪色现象为主。F_{11} 上盘为大理岩,富含 Ca,以白钨矿化为主,形成白钨矿 - 石英脉型和白云母 - 萤石型两类矿体,呈成楔状、似层状产出,产状 355° ~20°∠55° ~86°,主矿体走向延伸 145 ~516 m、倾向延伸 40 ~120m(图 5b)、厚 11.52 ~96.98m,WO_3 平均品位 0.211% ~0.360%,BeO 平均品位 0.126% ~0.463%(表 3);矿石矿物以白钨矿(图 5c、d)、绿柱石为主,脉石矿物为萤石、白云母、石英等。矿石呈鳞片粒状 - 粒状鳞片变晶结构、交代结构,具细脉状构造、斑点斑块状构造,似条带 - 条纹状构造,梳状 - 对称梳状构造。

冉明佳等(2011)曾对矿区的黑钨矿石英脉和绿柱石石英脉样品中的石英进行电子自旋共振(ESR)年龄测定,获得年龄值分别为 13.7Ma 和 21.5Ma,但其 ESR 记录的是最新一次的热扰动时间,不能确切反映真正的成矿年龄。马俊等(2020)对矿区白钨矿 - 白云母 - 萤石中白云母进行 ^{40}Ar-^{39}Ar



1—印支期灰黑色黑云母花岗岩;2—印支期灰白－灰黑色高岭土化黑云母花岗岩;3—燕山期石英二长花岗岩;4—燕山期钾化和绿泥石化石英二长花岗岩;5—矿化石英脉;6—未矿化石英脉;7—节理

图 3　休瓦促矿区矿体特征素描图(据江小均等,2019 修改)

Fig. 3　Sketch of the ore body characteristics in Xiuwacu deposit(after Jiang et al.,2019)

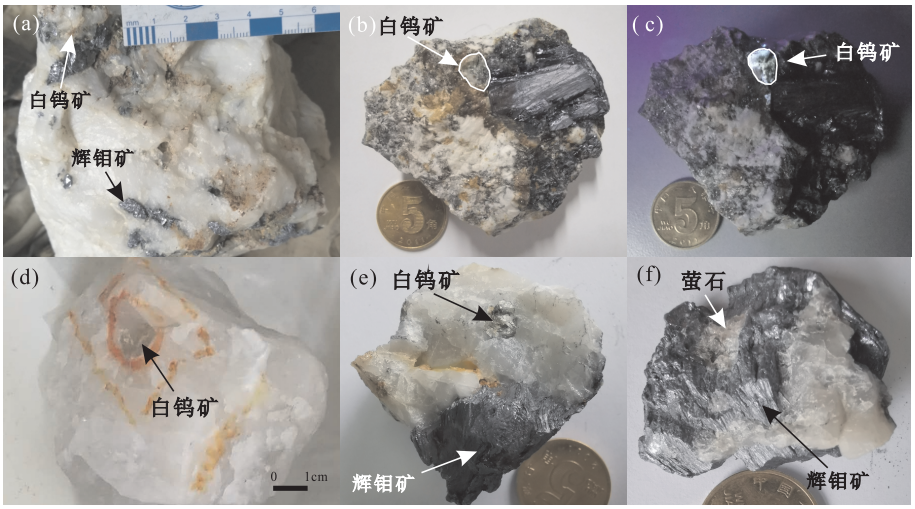


图 4　休瓦促矿区矿石矿物特征(据王忠强等,2020)

Fig. 4　Photos showing ore mineral characteristics of the Xiuwacu deposit (after Wang et al., 2020)

法测年,年龄为 32.06 ±0.11Ma,矿石显微照片显示白云母形成应晚于白钨矿。云南省地质矿产局第三地质队大队(1989)③把矿区内白云母分为细鳞片白云母及粗鳞片－片状白云母,细鳞片白云母常呈近于平行的细－微细脉、网格状、分枝状等不规则形态穿切于萤石白钨矿中,粗鳞片－片状白云母呈梳状穿切细鳞片白云母中,说明白钨矿的形成早于白云母。结合矿区外围出露有闪长玢岩脉侵入体,推测矿区深部可能存在燕山期中酸性岩体,与钨铍成矿关系密切。

表 2 休瓦促矿区主要矿体特征一览表

Table 2 Characteristics of main ore bodies in Xiuwacu deposit

矿段	矿体编号	产状	矿体规模(m)			品位(%)	
			走向延伸	倾向延伸	平均厚度	WO_3	Mo
东矿段	KT1	215°∠65°~85°	610	217	2.6	0.234	0.185
	KT2	215°∠55°~82°	450	158	2.6	0.388	0.66
	KT3	225°∠52°~88°	185	175	2.2	0.341	1.074
	KT4	205°∠59°~86°	508	无深部工程控制	4.1	0.141	0.071
西矿段	KT5	40°∠67°~76°	640	150	9.5	0.258	0.371
	KT6	45°∠55°~75°	595	170	2.6	0.141	0.187
	KT7	45°∠50°~80°	585	170	3.2	0.183	0.171
	KT8	40°∠70°~84°	735	180	9.0	0.227	0.202

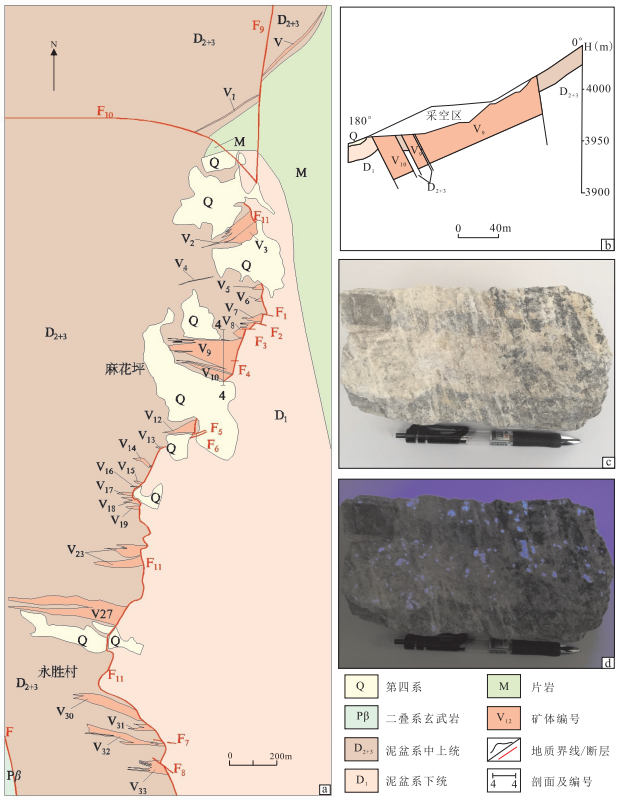


图 5 麻花坪矿区地质简图(a)、剖面图(b)及矿石特征(c,d)①

Fig. 5 Simplified geological map (a), section map (b) and photos showing ore characteristics (c, d) of the Mahuaping deposit①

3 成矿规律

通过休瓦促钨钼矿床和麻花坪钨铍矿床系统研究,结合区域地质背景特征,深入剖析香格里拉地区钨矿的成矿规律。

3.1 时空规律

该区的钨多金属矿床分布表现出明显的时空分带性,休瓦促、沙都格勒、热林、红山、麻花坪钨多金属矿床(点)主要围绕酸性侵入岩呈近南北向展布。钨钼矿成岩成矿时间主要集中在 86~77Ma 之间(徐兴旺等,2006;李建康等,2007;尹光候等,2009;王新松等,2011,2015;孟健寅,2014;余海军等,2015;余海军和李文昌,2016;张向飞等,2017;高雪,2018),为燕山晚期,尽管燕山晚期侵入体由北往南穿越不同的构造单元,但其成岩成矿具有高度的一致性,成矿以钨钼为主,共伴生铜铅锌等多金属组分,应形成于统一的成岩成矿地质事件。

3.2 控矿因素

区内钨多金属矿床主要控矿因素有:岩浆岩、岩浆侵位地层、构造裂隙系统,它们之间既有密切的联系,又有一定的独立性,并在成矿系统中发挥着不同的作用。

在岩浆中,钨是高度不相容亲石元素,其在地壳中的丰度约是地幔的 250 倍(Newsom et al.,1996;Knig et al.,2011;Rudnick and Gao,2014;祝红丽等,2020),在地壳物质发生部分熔融时,钨元素倾向进入熔体相,因此花岗质岩浆可以为钨矿床的形成提供初始的成矿物质来源。另外,花岗岩的岩浆演化作用对钨的富集与成矿十分重要,岩浆演化过程可以促进钨元素在残余岩浆中富集(Groves and McCarthy,1978;Huang and Jiang,2014),与钨矿相关的花岗岩具有显著的 Eu、Sr、Ba、Ti 负异常。香格里拉地区燕山期花岗质岩浆发育,由北向南为休瓦促二长花岗斑岩、热林二长花岗斑岩、红山花岗闪长岩、铜厂沟花岗闪长斑岩等,岩石化学成分上以富硅、富碱,贫水,低 Al_2O_3、CaO、MgO 呈准铝质-弱过铝质,REE 呈“海鸥式”分布,富 Ta、Zr、Nb、Ga、Y,贫 Ba、Sr、Eu,具有高度演化的 I 型或 S 型花岗岩的特

表 3　麻花坪矿区主要矿体特征一览表

Table 3　Main ore bodies in Mahuaping deposit

矿体编号	产状	矿体规模(m)			品位(%)	
		走向延伸	倾向延伸	平均水平厚度	WO_3	BeO
V3	355°~5°∠55°~70°	145	40	31.51	0.318	0.463
V9	5°∠55°~70°	296	70	96.98	0.353	0.264
V10	5°∠55°~70°	234	60	17.61	0.360	0.251
V23	0°∠60°~70°	210	50	54.75	0.211	0.129
V27N	20°∠71°~86°	516	120	29.99	0.319	0.150
V27S	20°∠71°~86°	489	120	52.77	0.328	0.170
V30	20°∠71°~80°	204	70	24.71	0.246	0.136
V32	15°∠67°~85°	349	75	11.52	0.222	0.126

征,其源区主要为壳源物质,没有或者有少量幔源物质的加入(侯增谦等,2001;李文昌等,2013),香格里拉地区的钨矿化与其关系密切。

钨矿床的形成与岩浆热液活动具有密切的联系(许泰等,2019),因此含矿热液运移的通道,矿质沉淀的构造空间及构造裂隙的存在直接影响着矿床的形成和发育。当矿区内发育塑性特征的变质岩时,花岗岩侵位其中,侵位晚期受区域 NW—SE 向张裂隙作用形成白钨矿-辉钼矿石英脉和未矿化石英脉(江小均等,2019),如休瓦促、热林石英脉型钨钼矿体主要赋存于岩体内部构造裂隙中。当矿区内发育化学性质活泼岩性时,成矿热液沿接触带或构造裂隙交代围岩,形成浸染状矽卡岩型钨矿体或发育于细脉或裂隙中的岩浆热液脉型钨矿体,如麻花坪热液脉型钨铍矿早期 SN 向背斜褶皱及逆冲为主的层间剪切带形成聚矿空间,EW 向横张裂隙充填形成热液脉钨铍矿床(冉明佳等,2011)。

根据矿石矿物种类,钨矿床主要分为白钨矿床和黑钨矿床。白钨矿或者黑钨矿的形成一般由围岩成分、成矿流体物理化学性质等因素决定,通常情况下,黑钨矿床的围岩成分多为高硅铝质岩石,而白钨矿床的围岩成分多为碳酸盐岩或其它钙质岩石(祝红丽等,2020;李佳黛和李晓峰,2020)。香格里拉休瓦促、热林、红山、铜厂沟等地区花岗质岩浆均侵位于三叠系变质碎屑岩、火山岩及碳酸盐岩中,有利的成矿环境促进了大规模白钨矿的成矿作用,形成矽卡岩型或石英脉型钨矿体。麻花坪矿区以 F_{11} 断层为界,东部为变质碎屑岩富含 Al、Si、Fe 等,形成黑钨矿化;西部为大理岩富含 Ca,形成白钨矿化。说明了钨成矿作用与地层存在较为密切的联系。

3.3　矿化信息规律

钨矿与花岗岩有直接成因和空间上的联系,花岗岩在布格重力场表现为重力低异常带,剩余重力异常为负异常带;花岗岩外接触矽卡岩带或次级构造带,常为钨矿产的赋存部位,多显示正磁异常。在剩余重力异常图上(图 6a),香格里拉地区主体为一个巨大的近南北向重力低异常区,为布斯-中甸-丽江重力低异常带,出现成串珠状的局部重力低,有休瓦促、热林、红山、中甸、麻花坪等,与已知花岗岩及钨钼矿床点对应较好。区域航磁化极异常特征(图 6b)以贯穿中部的近南北向的正异常带为主,异常最大值为 200nT,其余地区以负异常为主,局部有零星正异常,异常最小值为 -100nT。北部正磁异常与出露、半隐伏的休瓦促、热林、红山等花岗岩对应较好。香格里拉地区重力低异常带中常伴有正磁异常,尤其局部重力低值中心的边缘又配套有磁异常,可能花岗岩接触带是钨矿的找矿有利地区。

钨锡为高温元素,往往指示隐伏岩体的存在,香格里拉地区钨锡钼铋组合异常呈串珠状近南北向展布(图 6c),有休瓦促、热林、红山、阿热、铜厂沟、麻花坪等异常浓集中心,特别是钨异常明显,浓度分带清楚,与酸性侵入岩对应较好。北部休瓦促、热林异常中心已有花岗斑岩出露且伴随有石英脉型钨钼矿化,中部红山、铜厂沟异常中心已揭露到半隐伏的花岗闪长斑岩及斑岩型钼矿-矽卡岩型钨钼铜矿化,南部麻花坪已有岩浆热液型钨铍矿,显示其深部可能存在酸性含矿岩体。

自然重砂在以往钨矿找矿工作中发挥了重要作用,香格里拉地区自然重砂主要为铜族、铅锌族、钨族及锡石、自然金、辉锑矿异常,其中圈定钨锡自

然重砂异常 6 个(图 6d),Ⅰ级异常 2 个(休瓦促、麻花坪)、Ⅱ级异常 3 个(热林、红山、铜厂沟)、Ⅲ级异常 1 个。休瓦促有白钨矿、锡石、铜族矿物、铅族矿物重砂异常。麻花坪钨重砂异常分布于虎跳峡背斜的南端,重砂白钨矿异常普遍存在,且含量较高,异常面积 311.78km^2,与麻花坪钨铍矿对应关系好。

综合重力、航磁、化探及重砂异常特征(表 4),香格里拉地区钨多金属矿床具有剩余重力负异常,航磁弱正磁异常,钨锡钼铋化探综合异常及白钨矿、铜族矿物、铅族矿物重砂异常。

3.4 成矿模式

3.4.1 成矿物质来源

香格里拉地区钨多金属矿床的金属硫化物具有较为相似且组成非常稳定均一的硫同位素,休瓦促 δ^{34}S 值在 2.07‰ ~ 4.33‰之间(王新松等,2015),热林 δ^{34}S 值为 3.5‰ ~ 5.4‰(孟健寅,2014);红山 δ^{34}S 值范围在 3.52‰ ~ 6.11‰之间(李文昌等,2013);麻花坪 δ^{34}S 值为 5.4‰ ~ 13.2‰(据云南省地质矿产局第三地质队大队,1989 年)。硫同位素与岩浆热液所形成的矿床的硫同位素值接近(Ohmoto,1972),说明钨多金属成矿作用与岩浆热液密切相关。

香格里拉地区钨多金属矿床金属硫化物铅同位素组成,休瓦促^{206}Pb/^{204}Pb 为 18.646 ~ 18.936,^{208}Pb/^{204}Pb 为 38.857 ~ 39.404,^{207}Pb/^{204}Pb 为 15.650 ~ 15.710(王新松等,2015);红山^{206}Pb/^{204}Pb 为 18.561 ~ 18.712,^{208}Pb/^{204}Pb 为 38.971 ~ 39.332,^{207}Pb/^{204}Pb 为 15.621 ~ 15.695(李文昌等,2013);麻花坪^{208}Pb/^{204}Pb 为 38.37 ~ 38.60,^{207}Pb/^{204}Pb 为 15.50 ~ 15.65,^{206}Pb/^{204}Pb 为 18.62 ~ 18.66(据云南省地质矿产局第三地质队大队,1989);均显示上地壳和造山带铅特征,以壳源为主,成矿物质来源与碰撞造山后的构造演化可能存在密切关系。

休瓦促、热林、红山矿区辉钼矿中 Re 含量分别为 7.35 × 10^{-6} ~ 11.64 × 10^{-6}、4.24 × 10^{-6} ~ 18.49 × 10^{-6}、2.56 × 10^{-6} ~ 23.07 × 10^{-6}(孟健寅,2014),与壳源和壳幔混源岩浆热液矿床中 Re 的含量相近,可见休瓦促、热林、红山钨多金属矿床成矿物质来源应该以壳源为主,并混入少量幔源物质,具有壳幔混合的特征。

结合上述矿床的 S、Pb 及 Re 同位素含量资料分析,钨多金属矿床成矿物质主要为壳幔混合,以壳源物质为主。

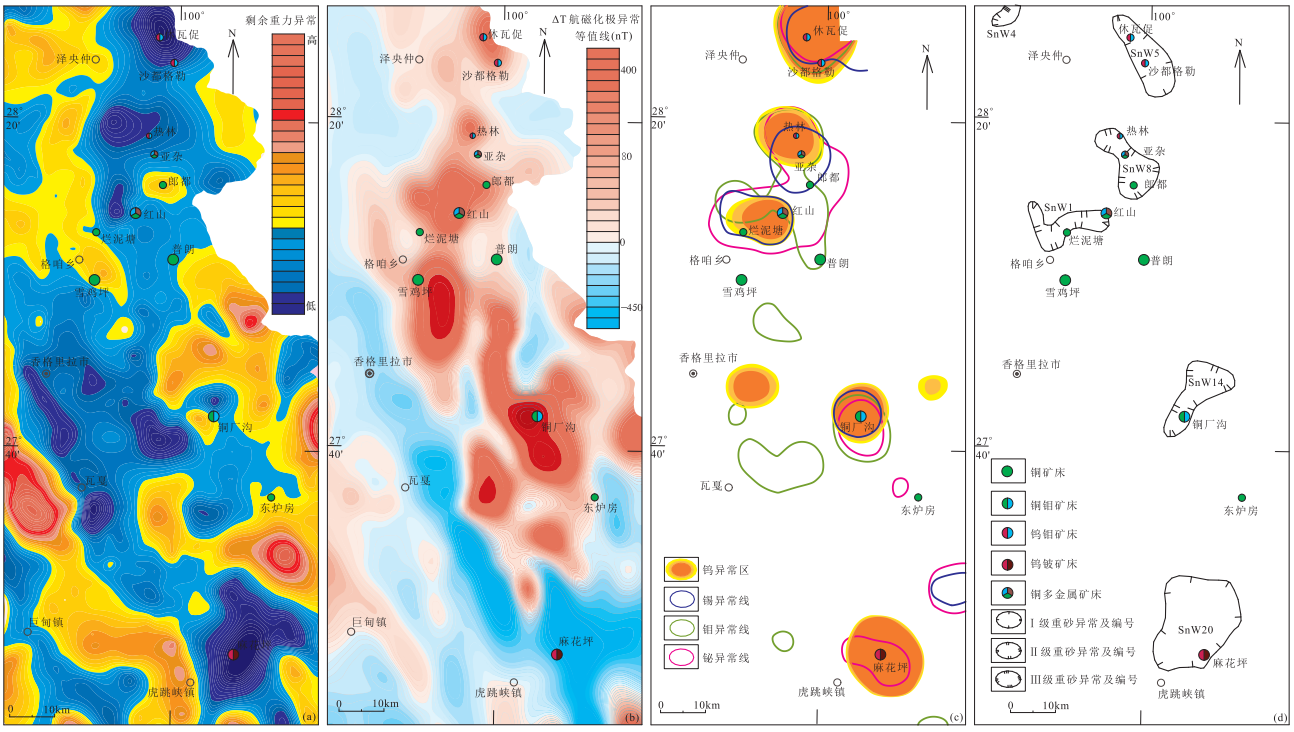


图 6 香格里拉地区物探、化探及自然重砂异常图

Fig. 6 Geophysical, geochemical and natural heavy placer anomaly map of Shangri-La area

表 4　香格里拉地区主要钨多金属矿床矿化信息表

Table 4　Mineralization information of main tungsten polymetallic deposits in Shangri-La area

序号	矿区名称	矿床类型	成矿地质条件	地球物理特征	地球化学特征
1	休瓦促钨钼矿	石英脉型	围岩为变质砂岩、板岩等。北西向断裂发育。出露印支期黑云母花岗岩及燕山期二长花岗岩。	分布有北西向不规则椭圆状剩余重力低异常,与休瓦促中酸性复式岩体对应较好。1∶10 万航磁异常总体属低缓正磁异常分布区,1∶5 万地面高精度磁测为一群规模、幅值较小的单点异常,总体北西向,呈向东北方向凸的弧形,单个异常规模小、幅值低,基本为单点异常。	1∶5 万土壤化探异常为甲类异常,以 W 规模大、浓度高、与 Mo 紧密伴生为特点,在 W、Mo 高异常区外围尚有 Cu、Au、Zn、Pb 异常。 分布有休瓦促Ⅰ级重砂异常,重砂有白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铋矿、黄铁矿及少量自然金等。
2	热林钨钼矿	石英脉型	围岩为变质砂岩、板岩夹灰岩等。北西向断裂发育。出露燕山期二长花岗岩。	1∶5 万重力为北西向不规则椭圆状剩余重力低异常,应由二长花岗岩引起。 1∶10 万航磁异常总体属低缓正磁异常。1∶2.5 万地面高精度磁测△T 多在 0-50nT 变化,在低缓背景磁场内叠加有北西条带弱磁异常,强度多在 50～100nT,少量大于 100nT,异常分布在岩体外接触带大理岩化、矽卡岩化地带呈孤立条带状展布。	1∶5 万土壤地球化学测量在该区圈定 1 个乙类综合异常,以 Cu、W、Mo 为主,伴生 Pb、Zn、Au、Ag,其中以 Cu、W、Mo 规模最大、含量最高、重合较好为特征。Cu 平均含量 248.7×10^{-6}、最高 860×10^{-6},W 平均含量 47.4×10^{-6}、最高 200×10^{-6},Mo 平均含量 25×10^{-6}、最高 140×10^{-6}。 分布有热林Ⅱ级重砂异常,重砂有白钨矿、黄铜矿、白铅矿、黄铁矿、辉钼矿及少量毒砂等。
3	红山钨铜矿	矽卡岩型	围岩为碎屑岩、灰岩等。北西向断裂及层间破碎带发育。分布有印支期石英二长斑岩及燕山期花岗闪长岩。	1∶5 万重力为近南北向圆状重力低异常,重力低异常深部揭露到燕山期隐伏花岗闪长斑岩。 1∶1 万激电中梯测量 Ms 异常为由南而北连续出现;1∶1 万高精度磁测△T 异常由南向北有规律地延伸,正负伴生;均呈北北西向条带状展布,与已知矽卡岩型矿体对应较好。	1∶5 万土壤地球化学测量圈定了红山甲类异常,为 Cu、Pb、Zn、Mo、W、Au、Ag 多元素组合异常,各元素套盒好,浓集中心突出,具三级浓度分带,由内部向外元素具 Mo、W-Cu、Au-Pb、Zn、Ag 分带,显示由高温向中低温变化特征。 分布有红山Ⅱ级重砂异常,重砂有自然铜、黄铜矿、赤铜矿、白钨矿、方铅矿、白铅矿、自然金等。
4	麻花坪钨铍矿	岩浆热液型	围岩为碎屑岩、大理岩等。发育近南北向断层及近东西向次级裂隙。推测深部存在隐伏花岗岩。	分布有麻花坪近南北向不规则椭圆状剩余重力低异常。 1∶20 万航磁异常总体属低缓负磁异常分布区。	麻花坪化探异常以 W、Bi 为主,异常呈近等轴状展布,强度高、规模大,具三级浓度分带,与已知矿床点套合好,推断由隐伏花岗岩引起。 分布有哈巴雪山Ⅰ级重砂异常,重砂矿物组合为白钨矿－铅矿物－硫化物。

3.4.2　成矿流体性质

休瓦促、热林、红山、麻花坪等钨多金属矿床主要成矿阶段流体包裹体多为气液两相水溶液包裹体,并发育富 CO_2 包裹体,流体的均一温度变化于 150～400℃(云南省地质矿产局第三地质队大队,1989;孟健寅,2014;刘学龙等,2017),早阶段为中高温、高盐度 NaCl-CO_2-H_2O 体系热液,晚阶段演变为中低温、低盐度 NaCl-H_2O 体系热液,具有相似的流体特征,指示成矿流体的源区可能具有一致或同源性,主要来源于隐伏的燕山期后造山伸展 S 型或 I 型花岗质岩浆侵入体,与区域上燕山期活动有关。

3.4.3　成矿模式

从华北到华南在燕山运动的驱动下,形成了大规模的花岗(斑)岩,同时伴随着大规模的钨、钼、锡等成矿作用,这一时期,香格里拉地区处于义敦岛弧的后造山伸展阶段,在张性环境中发育大量含矿二长花岗岩、花岗闪长斑岩体,北部为出露地表的休瓦促、热林岩株,向南在红山、铜厂沟地区以半隐伏－隐伏为主,南部麻花坪地区推测深部可能存在隐伏花岗岩体。花岗质岩浆上侵过程中含矿岩浆热

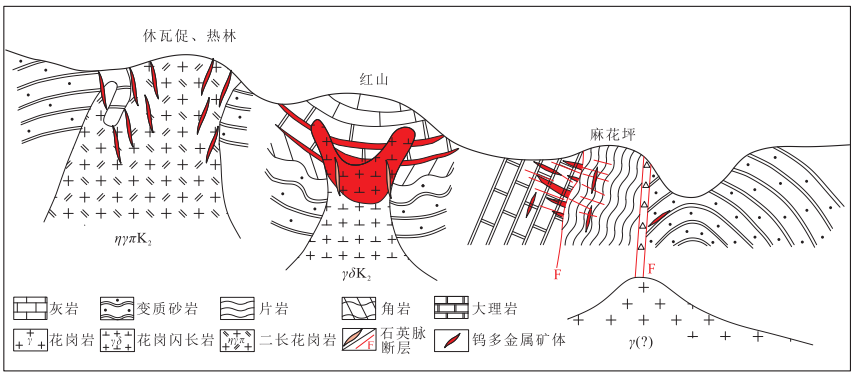


图 7 香格里拉地区钨多金属矿成矿模式图

Fig. 7 Metallogenic model of tungsten polymetallic deposits in Shangri-La area

液沿构造发育部位运移,在酸性岩体内顶部及两侧构造破碎带内形成脉状钨钼矿体,在层间滑动带或岩体接触带与碳酸盐岩接触交代形成矽卡岩型铜钨多金属矿体,沿构造破碎带运移至碳酸盐岩与碎屑岩之岩性界面,在次级横张裂隙和剪切裂隙沉淀形成热液脉状钨铍多金属矿体。区域上形成了一系列大中型的钨多金属矿床,如北段产于岩体内部的石英脉型钨钼矿(休瓦促、热林),中段产于岩体外接触带的矽卡岩型铜钨多金属矿床(红山),南段产于断层旁侧裂隙中的岩浆热液型钨铍矿床(麻花坪)等(图 7)。

4 找矿方向探讨

香格里拉地区钨矿成矿作用与酸性岩浆侵入作用相关,根据侵位深度不同形成了石英脉型(休瓦促、热林)、矽卡岩型(红山)、岩浆热液型(麻花坪)钨多金属矿床,结合重力、航磁、化探及重砂异常特征,探讨了休瓦促 - 热林、红山 - 铜厂沟、麻花坪深部及外围 3 处地区找矿方向。

休瓦促 - 热林地区,二长花岗岩出露地表,围岩主要为变质砂岩及板岩等碎屑岩,矿体受花岗岩及断裂控制,产于岩体内部及外接触带角岩中,呈雁行排列,呈脉状、透镜状及条带状,常见分支复合、尖灭再现、尖灭侧现;围绕二长花岗岩及钨钼矿床点具有较好的钨锡钼组合化探异常及Ⅰ、Ⅱ钨锡重砂异常。该区下一步主要应以寻找岩体内部及外接触带角岩中的石英脉型钨钼矿为主,围绕燕山期花岗岩内部及接触带构造带、钨钼锡铋化探异常及钨锡重砂异常布置开展工作。另在热林二长花岗岩体围岩的石英脉中发现了共伴生的锡矿(亚杂)、休瓦促后期伟晶岩中发现了共伴生的硅铍矿,后期的工作中应兼顾锡铍矿的勘查评价,同时根据含矿石英脉脉宽、脉幅及脉率加强石英脉型钨钼矿的综合评价。

红山 - 铜厂沟地区,产出有隐伏 - 半隐伏花岗闪长斑岩,围岩主要为变质碎屑岩及碳酸盐岩,矿体受花岗岩、围岩及断裂控制,产于岩体内部、外接触带矽卡岩及断层破碎带中。矿床位于剩余重力低异常梯度带上,具较强的正磁异常,主要由岩体侵位深及矽卡岩型矿体引起;具有较好的铜铅锌钨锡钼综合异常,元素多,套合好,浓集中心明显,且与红山、铜厂沟、东炉房等大中型斑岩型 - 矽卡岩型铜钼多金属矿床对应较好。下一步主要应以岩体内部及外接触带矽卡岩中斑岩型 - 矽卡岩型钨钼铜多金属的找矿为主,围绕重磁异常、铜铅锌钨锡钼综合异常及钨锡重砂异常布置开展工作。红山铜钼矿外接触带中已圈定了矽卡岩型铜钨矿体,近年深部揭露到了钼矿化的花岗闪长岩,下一步加强钨矿的评价;铜厂沟地区在斑岩型 - 矽卡岩型铜钼矿体已发现了白钨矿化信息,东炉房地区与铜厂沟成矿背景相似,且铜钼钨锡金银综合化探异常强,套合好,应加强钨矿的综合评价。

麻花坪深部及外围,地表未出露酸性岩体,围岩主要为变质碎屑岩及碳酸盐岩,矿体受围岩及断裂控制,产于主断层旁侧的羽状次级断裂中,受岩性控制,碎屑岩中为黑钨矿化,碳酸盐岩中为白钨矿化。矿床位于剩余重力低异常中心,且无磁异常,化探异常主要为钨铋组合异常,推测其深部可能存在隐伏酸性侵入岩,且侵位较深。所以,该区下一步找矿方向主要为外围及深部。重砂钨异常围绕哈巴雪山呈椭圆形分布,面积 120km^2,与麻花坪钨铍矿重合,且大大超出矿区范围,目前评价的钨铍矿体均产于背斜西翼近核部,其背斜东翼或南北端大面积分布的泥盆系中上统大理岩中,仍可见

白云母线脉或石英线脉,是寻找岩浆热液脉型铍钨矿的有利地区;目前推测深部可能存在隐伏花岗岩体,且围岩为碎屑岩及碳酸盐岩,故其深部寻找新类型钨多金属矿的空间巨大,如斑岩型－矽卡岩型钨多金属矿体。

5　结论

(1)香格里拉地区钨多金属成矿主要受燕山期下地壳熔融的酸性花岗岩,富含 Al、Si、Fe、Ca 的碎屑岩地层及次级构造控制,初步建立了钨多金属矿成矿模式。

(2)香格里拉地区钨多金属矿床表现为剩余重力负异常、正磁异常、钨锡钼组合异常及钨族重砂异常特征,探讨了休瓦促－热林、红山－铜厂沟、麻花坪深部及外围 3 处地区的找矿方向及重点。

注释:

①程家龙, 杨柳扬, 崔子良, 等, 2019. 中国矿产地质志·云南卷·锡钨矿产[R]. 昆明:云南省地质矿产勘查院.

②云南地质矿产局第三地质大队, 1985. 云南省中甸县麻花坪矿区钨铍矿初步普查地质报告[R]. 昆明:云南省国土资源厅.

③云南地质矿产局第三地质大队, 1989. 云南省中甸县麻花坪钨铍矿床地质特征及成因探讨[R]. 昆明:云南省国土资源厅.

参考文献(References):

Deng J, Wang Q F, Li G J, et al., 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China[J]. Gondwana Research, 26(2): 419－437.

Deng J, Wang Q F, Li G J, et al., 2014b. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China[J]. Earth-Science Reviews, 138: 268－299.

Gao X, Yang L Q, Meng J Y, et al., 2017. Zircon U-Pb, molybdenite Re-Os geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf-O-S isotopic constraints on the genesis of Relin Cu-Mo deposit in Zhongdian, Northwest Yunnan, China[J]. Ore Geology Reviews, 91: 945－962.

Gao X, Yang L Q, Orovan EA, 2018. The lithospheric architecture of two subterranes in the eastern Yidun Terrane, East Tethys: Insights from Hf-Nd isotopic mapping[J]. Gondwana Research, 62: 127－143

Groves D I, McCarthy T S, 1978. Fractional crystallization and the origin of tin deposits in granitoids[J]. Mineralium Deposita, 13(1):11－26.

Huang L C, Jiang S Y, 2014. Highly fractionated S-type granites from the giant Dahutang tungsten deposit in Jiangnan Orogen, Southeast China: Geochronology, petrogenesis and their relationship with W-mineralization[J]. Lithos, 202－203:207－226.

Knig S, Munker C, Hohl S, et al., 2011. The Earth's tungsten budget during mantle melting and crust formation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(8):2119－2136.

Li W C, Yu H J, Gao X, et al., 2017. Review of Mesozoic multiple magmatism and porphyry Cu-Mo (W) mineralization in the Yidun Arc, eastern Tibet Plateau[J]. Ore Geology Reviews, 90: 795－812.

Li W C, Yin G H, Yu H J, et al., 2014. The Yanshanian granites and associated Mo-polymetallic mineralization in the Xiangcheng-Luoji area of the Sanjiang-Yangtze conjunction zone in southwest China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 88(6): 1742－1756.

Li W C, Zeng P S, Hou Z Q, et al., 2011. The Pulang porphyry copper deposit and associated felsic intrusions in Yunnan province, southwest China[J]. Economic Geology, 106(1): 79－92.

Newsom H E, Sims K W W, Noll Jr PD, et al., 1996. The depletion of tungsten in the bulk silicate earth: Constraints on core formation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(7):1155－1169.

Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust[J]. Treatise on Geochemistry, 3:1－64.

Wang X S, Bi X W, Leng C B, et al., 2014a. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous igneous intrusions and Mo-Cu-(W) mineralization in the southern Yidun Arc, SW China: Implications for metallogenesis and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 61: 73－95.

Wang X S, Hu R Z, Bi X W, et al., 2014b. Petrogenesis of Late Cretaceous I-type granites in the southern Yidun Terrane: New constraints on the Late Mesozoic tectonic evolution of the eastern Tibetan Plateau[J]. Lithos, 208－209: 202－219.

Yu H J, Jiang J W, Li W C, 2020. Controls of variable crustal thicknesses on Late Triassic mineralization in the Yidun Arc, Eastern Tibet[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 195: 104285, doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104285.

Yu H J, Li W C, Yin G H, et al., 2014. Zircon U-Pb ages of the granodioritic porphyry in the laba molybdenum deposit, Yunnan, SW China and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 88(4): 1183－1194.

曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等, 2009. 中甸弧雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成[J]. 地质学报, 83(10): 1430－1435.

曹康, 许继峰, 陈建林, 等, 2014. 云南普朗超大型斑岩铜矿床含矿斑岩成因及其成矿意义[J]. 矿床地质, 33(2): 307－322.

邓军, 王庆飞, 李龚健, 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. 岩石学报, 32(8): 2225－2247.

邓军, 王长明, 李文昌, 等, 2014. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究态势及启示[J]. 地学前缘, 21(1): 52－64.

邓军, 杨立强, 王长明, 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 27(9): 2501－2509.

董涛, 余海军, 段召艳, 等, 2020. 云南香格里拉盖吉夏含矿石英二长闪长斑岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 36(5): 1369－1388.

范玉华, 李文昌, 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征[J]. 中国地质, 33(2): 352－362.

高雪, 2018. 义敦地体晚白垩世与侵入岩有关的多金属成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.

侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等, 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. 地质学报, 78(1): 109 – 120.

侯增谦, 杨岳清, 王海平, 等, 2003. 三江义敦岛弧碰撞造山过程与成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 1 – 345.

侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等, 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 75(4): 484 – 497.

黄肖潇, 徐继峰, 陈建林, 等, 2012. 中甸岛弧红山地区两期中酸性侵入岩的年代学、地球化学特征及其成因[J]. 岩石学报, 28(5): 1493 – 1506.

江小均, 王忠强, 李文昌, 等, 2019. 滇西北休瓦促晚白垩世岩浆 – 成矿作用动力学机制探讨[J]. 地学前缘, 26(2): 137 – 156.

蒋少涌, 赵葵东, 姜海,等,2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展[J]. 科学通报, 65(33): 3730 – 3745.

冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等, 2008. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 124 – 130.

李佳黛, 李晓峰, 2020. 矽卡岩型钨矿床成矿作用研究进展[J]. 矿床地质, 39(2): 256 – 272.

李建康, 李文昌, 王登红, 等, 2007. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究[J]. 岩石学报, 23(10): 2415 – 2422.

李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 等, 2016. 西南三江南段有色、贵金属成矿带成矿规律及矿产预测[M]. 北京: 地质出版社.

李文昌, 余海军, 尹光侯, 2013. 西南"三江"格咱岛弧斑岩成矿系统[J]. 岩石学报, 29(4): 1129 – 1144.

李文昌, 余海军, 尹光侯, 等, 2012. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境[J]. 矿床地质, 31(2): 282 – 292.

李文昌, 尹光侯, 余海军, 等, 2011. 滇西北格咱火山 – 岩浆弧斑岩成矿作用[J]. 岩石学报, 27(9): 2541 – 2552.

李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等, 2010a. 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.

李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 等, 2010b. 西南"三江"格咱火山 – 岩浆弧中红山 – 属都蛇绿混杂岩带的厘定及其意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1661 – 1671.

刘学龙, 李文昌. 张娜, 等, 2017. 扬子西缘结合带乡城 – 洛吉钼多金属矿床及成矿系统[M]. 昆明:云南科技出版社.

刘学龙, 李文昌, 张娜, 2016. 云南卓玛成矿斑岩体锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 109 – 117.

马骏, 陶琰, 何德锋, 等, 2020. 云南麻花坪钨铍矿成矿年龄及流体包裹体特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(2): 223 – 232.

毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等, 2019. 关键矿产——国际动向与思考[J]. 矿床地质,38(4): 689 – 698.

孟健寅, 2018. 滇西中甸矿集区晚白垩世铜多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.

莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等, 1993. 三江特提斯火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社.

潘桂棠, 徐强, 侯增谦, 等, 2003. 西南"三江"多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 11 – 30.

冉明佳, 钟康惠, 杨建功, 等, 2015. 云南香格里拉麻花坪钨铍矿床地球化学特征及其成因意义[J]. 四川有色金属(2): 40 – 45,70.

冉明佳, 钟康惠, 李凡友, 等, 2011. 云南香里拉麻花坪钨铍矿聚矿构造及成矿时代分析[J]. 四川有色金属(2): 21 – 27.

任江波, 许继峰, 陈建林, 等, 2011. "三江"地区中甸弧普朗成矿斑岩地球化学特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 581 – 592.

王明燕,贾木欣,肖仪武, 等, 2014. 中国钨矿资源现状及可持续发展对策[J]. 有色金属工程, 4(2): 75 – 79.

王新松, 2014. 滇西北中甸地区燕山晚期花岗岩浆系统成岩成矿作用[D]. 北京: 中国科学院大学博士学位论文.

王新松, 毕献武, 胡瑞忠, 等, 2015. 滇西北中甸地区休瓦促岩浆热液型 Mo-W 矿床 S、Pb 同位素对成矿物质来源的约束[J]. 岩石学报, 31(11): 3171 – 3188.

王新松, 毕献武, 冷成彪, 等, 2011. 滇西北中甸红山 Cu 多金属矿床花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿物学报, 31(3): 315 – 321.

王忠强, 李超, 江小均, 等, 2020. 滇西北休瓦促钼钨矿床白钨矿原位微量和 Sr 同位素特征及其对成矿作用的指示[J]. 岩矿测试, 39(5): 762 – 776.

熊风, 陶琰, 邓贤泽, 2015. 云南麻花坪钨铍矿流体包裹体特征及矿床成因分析[J]. 矿物学报, 2011 (S1): 353 – 354.

徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 等, 2006. 滇西北红山晚白垩世花岗斑岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义[J]. 地质学报, 80(9): 1422 – 1433.

许泰, 刘雪芬, 张巨峰, 等, 2019. 石英脉型钨矿成矿研究进展[J]. 地质找矿论丛, 34(2): 196 – 200.

杨立强, 高雪, 和文言, 2015. 义敦岛弧晚白垩世斑岩成矿系统[J]. 岩石学报, 31(11): 3155 – 3170.

尹光侯, 李文昌, 蒋成兴, 等, 2009. 中甸火山 – 岩浆弧燕山期热林复式岩体演化与 Ar-Ar 定年及铜钼矿化[J]. 地质与勘探, 45(4): 385 – 394.

余海军, 2018. 格咱斑岩带复合成矿系统及找矿方向[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文.

余海军, 李文昌, 2016. 滇西北休瓦促 Mo-W 矿区印支晚期和燕山晚期岩浆活动与成矿作用: 来自锆石 U-Pb 年代学和地球化学的证据[J]. 岩石学报, 32(8): 2265 – 2280.

余海军, 李文昌, 尹光侯, 等, 2015. 滇西北铜厂沟 Mo-Cu 矿床岩体年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(11): 3217 – 3233.

曾普胜, 李文昌, 王海平, 等, 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿床: 岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 22(4): 989 – 1000.

曾普胜, 王海平, 莫宣学, 等, 2004. 中甸岛弧带构造格架及斑岩铜矿前景[J]. 地球学报, 25(5): 535 – 540.

曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 22(4): 393 – 400.

张向飞, 2018. 滇西北休瓦促钨钼矿区复式岩体成岩成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文.

张向飞, 李文昌, 尹光侯, 等, 2017. 滇西北休瓦促钨钼矿区复式岩体地质及其成矿特征 – 来自年代学、氧逸度和地球化学的约束[J]. 岩石学报, 33(7): 2018 – 2036.

祝红丽, 张丽鹏, 杜龙, 等, 2020. 钨的地球化学性质与华南地区钨矿成因[J]. 岩石学报, 36(1): 14 – 22.

责任编辑:黄春梅