

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.154>



藏南地区错那洞钨锡多金属矿床 地质特征及成因

梁 维, 张林奎, 夏祥标, 马国桃, 黄 勇, 张 志,
付建刚, 曹华文, 缪华清, 李光明*

中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

摘要:前人尚未关注特提斯喜马拉雅铅锌金锑成矿带钨锡成矿问题,错那洞钨锡多金属矿床位于特提斯喜马拉雅东段,产于新发现的错那洞大型片麻岩穹隆构造之中.错那洞钨锡多金属矿床主要富集钨、锡、铍,伴生铜、铅、锌、铋、钼等,其矿化类型主要为矽卡岩型;此外,铍的矿化类型还有伟晶岩型.主要矿石矿物为白钨矿、锡石和硅铍石,含有少量的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉铋矿、辉钼矿等,翠砷铜铀矿、晶质铀矿和钽石的发现表明错那洞地区具铀矿成矿潜力.研究表明,错那洞钨锡多金属矿床可达到大型—超大型规模,较低的Zr含量、Zr/Hf和Nb/Ta比值表明错那洞大型片麻岩穹隆核部淡色花岗岩为高分异花岗岩;花岗岩具有富钛铁矿、贫磁铁矿特征, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} < 0.5$,锆石Ce/Ce*平均值约为23,暗示错那洞淡色花岗岩为还原性花岗岩.具还原性的高分异花岗岩是错那洞钨锡多金属矿床形成的必要条件,而片麻岩穹隆构造是其空间分布的控制因素,由此认为错那洞钨锡多金属矿受片麻岩穹隆构造和淡色花岗岩的双重控制.

关键词:特提斯喜马拉雅带;错那洞;钨锡矿;淡色花岗岩;矽卡岩;矿床学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2742-13

收稿日期: 2018-03-05

Geology and Preliminary Mineral Genesis of the Cuonadong W-Sn Polymetallic Deposit, Southern Tibet, China

Liang Wei, Zhang Linkui, Xia Xiangbiao, Ma Guotao, Huang Yong, Zhang Zhi,
Fu Jiangan, Cao Huawen, Miao Huaqing, Li Guangming*

Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: Researchers have not paid attention to the tungsten-tin mineralization of the Tethys Himalayan lead-zinc-gold-metallogenic belt. The Cuonadong W-Sn polymetallic deposit is located in a newly recognized giant gneiss dome, eastern Tethys Himalaya. The deposit is rich in W, Sn and Be, accompanied by Cu, Pb, Zn, Bi and Mo, of which mineralization type is skarn-type. Besides, the mineralization of beryllium contains pegmatite type. Main ore minerals are scheelite, cassiterite and bertrandite, with minor chalcopyrite, galena, sphalerite, bismuthinite and molybdenite. There are also some zeunerite, uraninite and thorite, indicating the uranium mineralization potential. Geological survey shows that the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit could be a large- or super large-scale ore deposit. Low concentration of Zr and relatively low ratios of Zr/Hf and Nb/Tb demonstrate that leucogranite within the Cuonadong dome is highly fractional crystallization. Meanwhile, there is absolutely little magnetite but relatively rich in ilmenite with $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} < 0.5$ and low Ce/Ce* ratio (average 23) in leucogranite, indicating charac-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41702080); 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFC0600308); 中国地质调查局项目 (No. 121201010000160901).

作者简介: 梁维(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事多金属矿成矿规律与成矿预测研究. ORCID: 0000-0001-8499-8936. E-mail: lwcugb@126.com

* **通讯作者:** 李光明, ORCID: 0000-0003-3383-3693. E-mail: li-guangming@163.com

引用格式: 梁维, 张林奎, 夏祥标, 等, 2018. 藏南地区错那洞钨锡多金属矿床地质特征及成因. 地球科学, 43(8): 2742—2754.

teristics of reductive granite. The reductive and highly fractional crystallization granite is a necessary condition for the formation of the tungsten-tin polymetallic deposit, additionally, the gneiss dome controls its spatial distribution. Therefore, the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit is both controlled by dome structure and leucogranite.

Key words: Tethys Himalaya belt; Cuonadong; W-Sn deposit; leucogranite; skarn; ore deposit.

0 引言

特提斯喜马拉雅中东段是喜马拉雅成矿带最重要的热液型金锑铅锌矿产出区域,扎西康是铅锌金锑集中发育的矿集区,也是带内研究程度最高的区域。在矿集区内发现了扎西康铅锌多金属矿(大型)、柯月铅锌矿(大型)以及则当铅锌矿、索月锑矿、吉松铅锌矿、拉木由塔金锑矿、马扎拉金锑矿等十几个矿床。矿区中部出露错那洞淡色花岗岩株,岩性复杂,有二云母花岗岩、白云母花岗岩、电气石石榴石二云母花岗岩等,形成时代为中新世。Fu *et al.* (2016) 经过地质调查发现,错那洞淡色花岗岩周缘由侏罗系浅变质岩系、片岩及寒武系片麻岩包围,经历了强烈变质与变形过程,是典型的片麻岩穹隆。前人对特提斯喜马拉雅铅锌金锑成矿带展开了大量研究,主要集中在铅锌金锑的时空分布特征、成矿地质特征、控矿要素、成矿物质来源、矿床成因等方面(聂凤军等, 2005; 侯增谦等, 2006a, 2006b; 杨竹森等, 2006; 戚学祥等, 2008; 郑有业等, 2012)。然而,前人尚未关注该带钨锡成矿问题,吴建阳等(2015)初步提出错那洞片麻岩穹隆内部具有锡矿和稀有金属成矿特点,李光明等(2017)经过工程控制认为错那洞地区可达到超大型钨锡成矿规模;并且特提斯喜马拉雅钨锡成矿具有代表性矿床(点)的地质特征也未得到总结,其成因有待进一步分析。本文通过详细的野外地质调查和室内分析,查明了钨锡成矿地质特征并探讨了错那洞钨锡矿与淡色花岗岩的成因联系。

1 区域地质概况

喜马拉雅地块呈近东西向展布于前缘冲断带(MFT)和雅鲁藏布江缝合带(IYS)之间,东西向延长超过2 000 km(Le Fort, 1975);从北往南由4个构造单元组成:特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅、低喜马拉雅和次喜马拉雅,其间分别以藏南拆离系(STDS)、主中央冲断带(MCT)、主边界冲断带(MBT)为界(Le Fort, 1975; Burchfiel *et al.*, 1992)。特提斯喜马拉雅前陆褶冲带形成于印度板块的北向俯冲、拼贴于亚洲板块之上。特提斯喜马拉雅内部发

育一套硅质碎屑岩—碳酸盐岩沉积序列,沉积环境经历了前寒武纪至泥盆纪裂谷、石炭纪—早侏罗世稳定台地、中侏罗世—白垩纪的被动大陆边缘环境(Liu and Einsele, 1994; Garzanti, 1999; Zhu *et al.*, 2008; 朱弟成等, 2009)。研究区地层主要包括上三叠统捏如组(T_3n)、下侏罗统日当组(J_1r)、下一中侏罗统陆热组($J_{1-2}l$)、中侏罗统遮拉组(J_2z)、上侏罗统维美组(J_2w)以及上侏罗统一下白垩统桑秀组(J_3K_1s) (图1)。带内地层在印亚陆陆碰撞造山过程中经历了复杂的变形作用,多发生轴向近东西向的复式褶皱和脆—韧性及脆性断裂(Huangfu *et al.*, 2016)。在碰撞造山后期地壳尺度伸展作用发育(Yin and Harrison, 2000; 侯增谦等, 2003),形成边部高原的南北向裂谷带,其边界受正断层系统控制(Pan and Kidd, 1992)。特提斯喜马拉雅带北部发育与造山带近平行的串珠状穹隆构造(Lee *et al.*, 2004),以拉轨岗日穹隆、康马穹隆和雅拉香波穹隆等为代表(张进江等, 2007; 曾令森等, 2009)。穹隆内部发育中新元古代变质地层和古生代—中生代片麻岩及沉积岩系(Harrison *et al.*, 1997; 张进江等, 2007),其岩石类型、变形特征、形成时代与高喜马拉雅结晶岩系一致,可能代表着高喜马拉雅结晶岩系物质局部隆起的产物(Robyr *et al.*, 2002)。穹隆核部集中出露二云母花岗岩,其侵位时间(35~13.5 Ma)可能代表穹隆形成时代(刘文灿等, 2004; 张进江等, 2007; 张进江等, 2011)。已有的资料表明早白垩世南部错那洞带内处于构造伸展期,大量发育同期酸性和基性火成岩,这一时期的岩浆活动与措美大火成岩年代一致,代表深部地幔柱活动(Zhu *et al.*, 2008, 2009; 朱弟成等, 2009)。淡色花岗岩在特提斯喜马拉雅广泛发育,主要受控于藏南拆离系及片麻岩穹隆核部,时代为渐新世和中新世(Zhang *et al.*, 2004; 张进江等, 2011; Zeng *et al.*, 2014; 吴福元等, 2015; 王晓先等, 2016; Zheng *et al.*, 2016)。强烈的碰撞造山使特提斯喜马拉雅带发育大量中新世的铅锌、锑铅锌、金、金锑矿(聂凤军等, 2005; 杨竹森等, 2006),形成著名的特提斯喜马拉雅锑金铅锌多金属成矿带(侯增谦等, 2003; 侯增谦等, 2006a, 2006b; 杨竹森等, 2006; 戚学祥等, 2008)。王汝成等(2017)在藏南

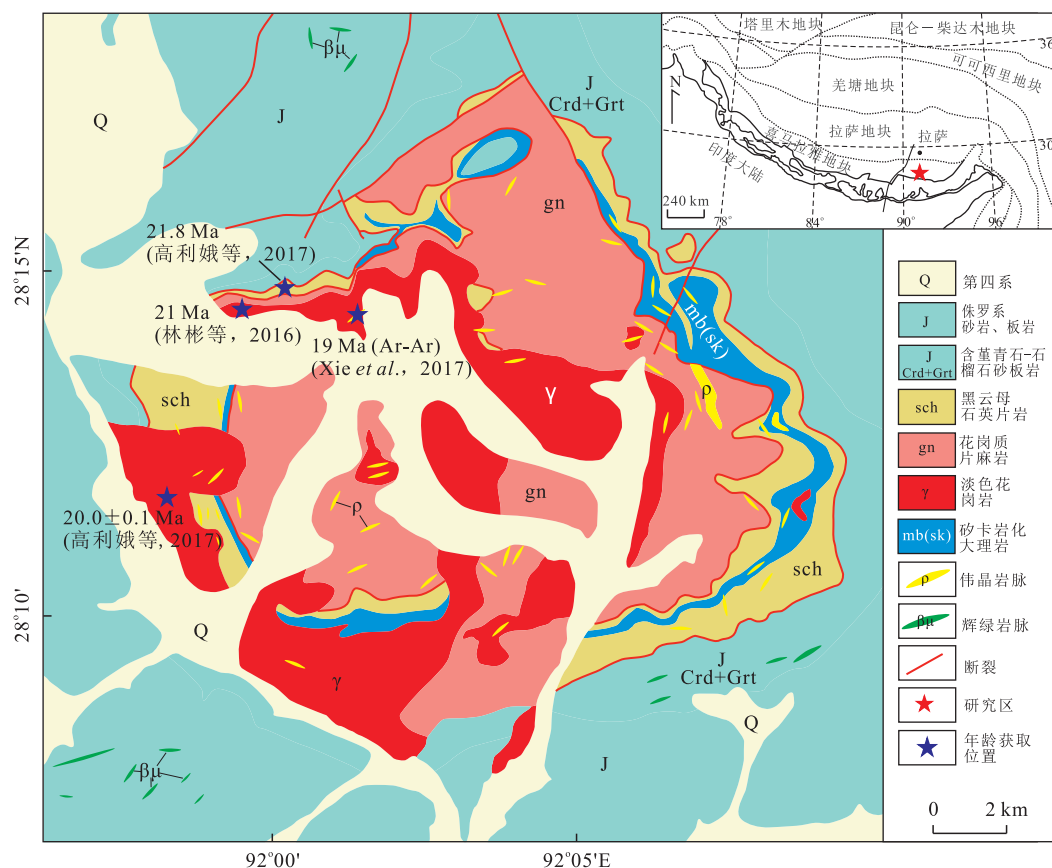


图 1 错那洞钨锡多金属矿床地质图

Fig.1 Geological map of the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

的淡色花岗岩中发现了稀有金属成矿的迹象,表明特提斯喜马拉雅不仅具备铋金铅锌成矿潜力,可能还是重要的稀有金属富集区。扎西康矿集区是特提斯喜马拉雅金铋铅锌矿集中爆发的区域,其中部发育错那洞片麻岩穹隆,与雅拉香波变质片麻岩穹隆具有相似的结构构造特征及物质组成,是特提斯喜马拉雅南部穹隆带中典型代表。区内错那洞片麻岩穹隆中发育一套矽卡岩,初步工程勘察结果显示其具有成为超大型钨锡矿的潜力,是藏南新发现的首个稀有金属矿床,对特提斯喜马拉雅稀有金属成矿的研究和勘查具有重要意义(李光明等,2017;张志等,2017)。

2 矿区地质特征

地质调查工作已经查明了错那洞片麻岩穹隆的属性,错那洞钨锡多金属矿床具有矽卡岩型矿床的特征,此外伟晶岩型也是铋的重要矿化类型。错那洞钨锡多金属矿床的空间分布严格受控于错那洞片麻岩穹隆构造,是喜马拉雅片麻岩穹隆带稀有金属成矿的典型代表。

2.1 错那洞片麻岩穹隆

扎西康矿集区中部发育错那洞淡色花岗岩,以该花岗岩和寒武纪片麻岩为核部,向上依次为由离断层和下拆离断层控制的角闪岩、石榴石片岩、红柱石片岩等中高级变质岩和侏罗系浅变质碎屑岩盖层。

错那洞片麻岩穹隆核部主要由错那洞花岗岩和糜棱状花岗质片麻岩组成(图 1)。中部侵入岩主体为淡色花岗岩,偶见少量二云母花岗岩(图 2a)。花岗岩具中—细粒结构,块状构造;主要矿物为斜长石、石英,次要矿物为白云母(图 2b),含少量黑云母、绿柱石和石榴子石,副矿物为锆石、独居石、钛铁矿、磁铁矿、磷灰石等;岩相分带不明显,构造变形较弱。在岩体中心花岗岩变形较弱,在岩体边部可见暗色矿物被拉长,呈弱定向排列;越靠近边部花岗岩变形程度越强。

花岗质片麻岩是错那洞片麻岩穹隆核部出露最广泛的岩石,具有中—粗粒结构,斑状构造、片麻状构造及眼球状构造。主要矿物为石英、长石、黑云母和少量白云母,副矿物为锆石、磁铁矿、黄铁矿等(图 2d)。片麻岩面理发育,面理主要由暗色矿物(黑云母)或矿物集合体连续定向排列构成,分布较为均

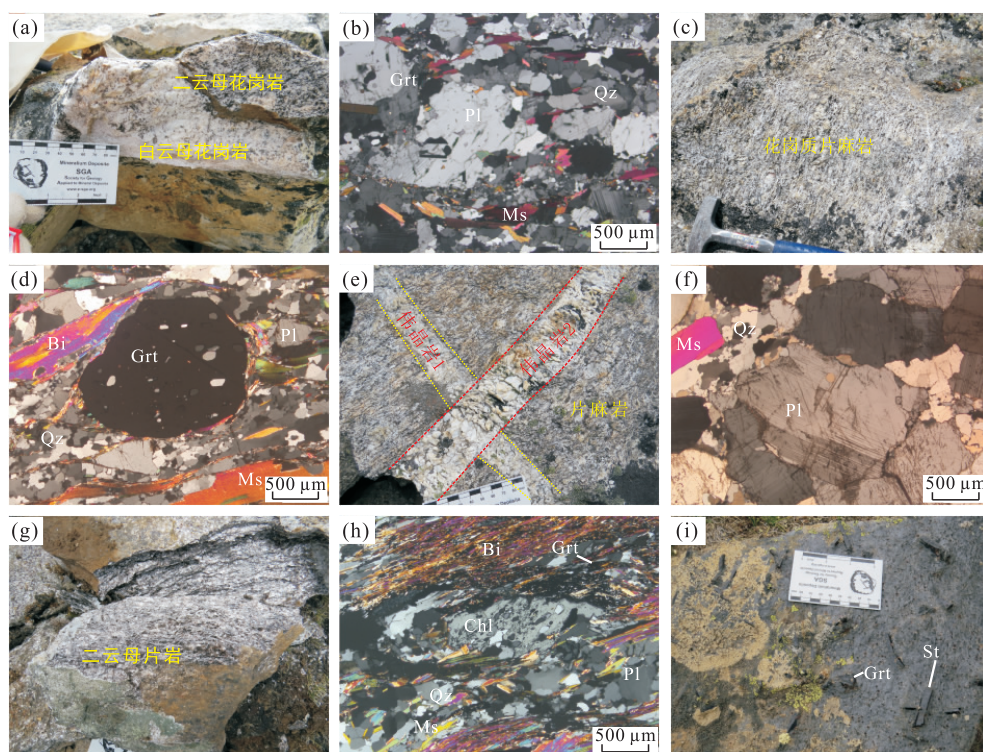


图 2 错那洞片麻岩穹隆物质组成

Fig.2 Composition of the Cuonadong gneiss dome in southern Tibet

a.二云母花岗岩(深色)和白云母(白色)花岗岩;b.白云母花岗岩未变形,主要矿物为石英、斜长石、白云母,含有少量的石榴石(正交偏光);c.花岗质片麻岩中石英发生强烈的形变;d.花岗质片麻岩中石榴石发生形变(正交偏光);e.片麻岩中发育两期伟晶岩脉;f.伟晶岩由长石、石英和白云母等组成,未发生变形(正交偏光);g.强变形的石榴二云母片岩;h.石榴二云母片岩发生剪切变形(正交偏光);i.石榴十字石片岩中粗大的石榴石和十字石.Qz.石英;Pl.斜长石;Bi.黑云母;Chl.绿泥石;Grt.石榴石;Ms.白云母;St.十字石

匀,透入性较好.其中浅色矿物石英往往出现较强变形(图 2c),形成旋转斑晶(图 2d).花岗质片麻岩锆石 U-Pb 同位素年龄约为 498 Ma(张志等,2017),表明其形成于晚寒武纪,与高喜马拉雅变质基底及拉轨岗日穹隆带核部片麻岩时代相同,代表泛非时期岩浆活动产物(Wang *et al.*, 2012; Naeem *et al.*, 2016).

错那洞片麻岩核部出露大量的伟晶岩,或呈巨块状被花岗岩穿切(图 2a),或呈脉状切穿片麻岩,且至少发育 2 期伟晶岩(图 2e).伟晶岩主要由斜长石、石英、白云母和少量黑云母组成.斜长石和白云母粒径较大,可达 1~2 cm(图 2f),石英呈较小的他形颗粒,充填于斜长石与白云母之间.伟晶岩锆石 U-Pb 定年获得了 33 Ma 和 23 Ma 两个值,明显早于淡色花岗岩形成时代.Xie *et al.*(2017)获得云母 Ar-Ar 年龄为 19 Ma,与早期花岗岩形成时代一致.

在片麻岩及淡色花岗岩核部与侏罗系沉积盖层之间为变形变质非常强烈的过渡带,二者呈断层接触,分别包括核部与过渡带接触的下拆离断层和盖层与过渡带接触的上拆离断层.过渡带在穹隆东侧

最为发育,在不少断崖上都清晰可见“核—幔—壳”3 层结构(图 3a).

中部变形带为错那洞穹隆的滑脱系,主要由一套较强变形变质的二云母片岩组成(图 2h).滑脱系与上覆盖层以上拆离断层为界,与穹隆核部以下拆离断层分界.滑脱系内岩石变质作用从外向内依次增强,且具有一定的规律性:夕线石+石榴石→蓝晶石+石榴石→十字石+石榴石(图 2i)→石榴石+十字石+堇青石→堇青石+石榴石,呈现典型的巴罗式变质分带特征(张志等,2017).

二云母片岩遭受韧性变形而形成糜棱状岩石,发育糜棱状结构(图 2h);在强变形的糜棱状石英二云母片岩中,暗色矿物和浅色矿物分异显著,呈明显的面状分布特征,形成条带状糜棱岩.线理主要表现为矿物拉伸线理,由矿物颗粒强烈塑性拉长、定向排列构成.强变形表现出露头尺度的 S-C 组构,变形较弱的岩石中可见 C 与 S 面理斜交形成的 S-C 组构,而在强变形糜棱岩中 S 面趋于与 C 面平行.变形产生强烈的线理构造,至少存在 3 期可识别的线理构造(张志等,2017).在强变形带中,发育一条大理岩

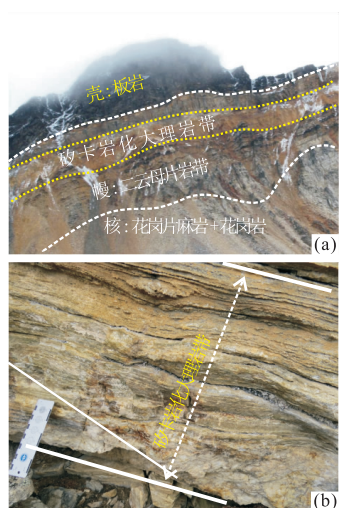


图 3 错那洞钨锡多金属矿矿体产出的空间位置

Fig.3 Ore position of the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

a. 错那洞片麻岩穹隆“核—幔—壳”结构, 显示矿体为矽卡岩化大理岩, 存在于穹隆结构中部强变形的石榴二云片岩带中; b. 大理岩层中矽卡岩, 翠绿色为绿泥石, 褐色为绿帘石

带, 宽度为 5~300 m, 长度大于 2 300 m, 局部可见强烈的矽卡岩化。

错那洞穹隆盖层主要为侏罗系日当组浅变质岩, 原岩为泥岩和砂岩, 为一套半深海斜坡相复理石建造, 经低级变质作用形成变质砂岩或含炭钙质板岩。外围岩层褶皱变形较为强烈, 形成大量倒转褶皱和次级褶皱。

2.2 错那洞矽卡岩带

矿体主要产于错那洞片麻岩穹隆的石榴云母片岩接触带中, 接触带中部发育一套矽卡岩化大理岩, 围绕穹隆呈环状分布, 在穹隆东侧保存较为完好(图 1)。矽卡岩化大理岩具层状或似层状构造, 一般为 2 层, 层位相对稳定, 具有一定的厚度变化, 平均厚度大于 20 m, 局部宽度大于 50 m(可能受褶皱影响)。在大理岩的局部区域, 特别是岩脉或者伟晶岩等出露的区域发育较强的矽卡岩化, 呈条带状、囊状等形态产出, 构成主要的矿体。矽卡岩的主要类型为石榴子石透辉石矽卡岩、透闪石绿帘石矽卡岩等。

矽卡岩中的锡石、白钨矿等特征矿物是新发现的初具规模的钨锡多金属矿, 初步工程勘查控制的资源量为 BeO 大于 3.4×10^4 t, Sn 大于 8×10^4 t, WO_3 大于 5×10^4 t, 具备超大型矿床的潜力(李光明等, 2017)。

错那洞矽卡岩位于花岗岩与侏罗纪围岩之间的强变形片岩带中, 在错那洞地区东北部陡崖清晰地反映出矽卡岩在片麻岩穹隆结构中的位置(图 3a)。空间上, 矽卡岩带围绕穹隆核部呈环带状分布, 在穹隆东部最

为发育且连续性较好, 西部和南部零星出露(图 1)。矽卡岩带厚度为 2~10 m, 东部厚度较大且保存较完好, 平均厚度约为 5 m, 西部和南部残留体厚度较小, 平均为 1~2 m。东侧厚度均匀的区域矽卡岩厚度也较均匀, 矽卡岩宏观上呈翠绿色, 主要矿物为绿泥石, 零星出现深褐色的绿帘石(图 3b, 4a)。矽卡岩中残存少量石英砂颗粒, 表明原岩并不是纯灰岩, 含有砂质成分。手标本显示大量绿帘石呈柱状自形晶集合体(图 4a), 透闪石呈半自形—他形充填于绿帘石颗粒之间, 少量透辉石与自形石榴石与透闪石共生(图 4b)。根据矿物组合关系, 错那洞矽卡岩主要包括石榴石透辉石矽卡岩和透闪石绿帘石矽卡岩, 而后者是主要的含矿矽卡岩。笔者在矽卡岩层中发现一套浅灰白色大理岩, 单层平均厚度约为 1 m(图 4c), 主要发育于错那洞东部, 呈残留体残存状; 主要由自形粗粒方解石和少量白云母(图 4d)组成, 方解石粒间分布少量细小石英颗粒(图 4d), 暗示大理岩原岩可能为砂质灰岩。

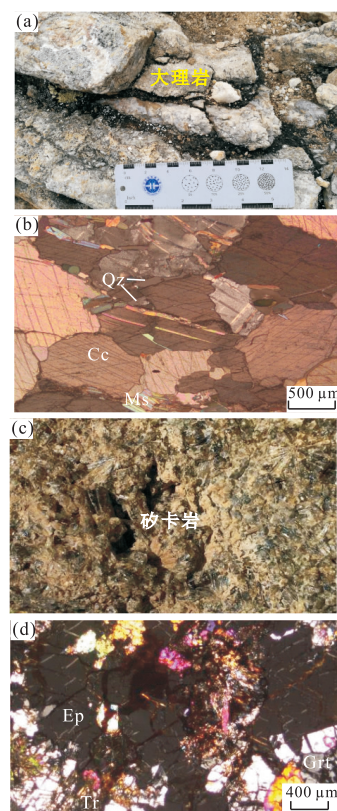


图 4 错那洞钨锡多金属矿床大理岩及矽卡岩特征

Fig.4 Characteristics of skarnization marble in the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

a. 大理岩具有成层性; b. 大理岩中方解石与白云母共生, 其间充填他形石英(正交偏光); c. 含大量自形绿帘石集合体的矽卡岩; d. 显微镜下少量透辉石、透闪石和石榴石与绿帘石共生(正交偏光)。Qz. 石英; Di. 透辉石; Ep. 绿帘石; Cc. 方解石; Grt. 石榴石; Ms. 白云母

3 钨锡矿化特征

错那洞稀有金属矿床作为藏南首次发现的钨锡多金属矿床,其主要成矿金属包括钨、锡、铍等元素,其中钨、锡是最富集的金属元素,而铍是最引人注目的元素。同时,地球化学勘查发现,错那洞矽卡岩中还伴生有铈铷铌钽、铅锌铜、铋钼、金银等有益组分。工程控制情况显示, WO_3 平均品位为 0.21%,Sn 平均品位为 0.36%, BeO 平均品位为 0.08%,伴生 Cu 品位介于 0.17%~0.59%,Ag 品位介于 11.99~61.82 g/t;初步控制矽卡岩型北带钨锡矿体长度为 3 200 m,平均厚度为 7.55 m,东带铍矿体长度大于 12 000 m,厚度介于 6~14 m(李光明等,2017)。

矿石矿物主要有锡石、白钨矿和硅铍石、绿柱石,含有少量的闪锌矿、黄铜矿、方铅矿、辉钼矿、辉铋矿和泡铋矿,同时含有较多的高放射性矿物如铷铀矿、晶质铀矿及钍石等。脉石矿物主要为石英、黄铁矿、萤石、透辉石、透闪石、斜长石、石榴石、方解

石、赤铁矿、绿泥石、绿帘石等。

锡石(SnO_2)是错那洞钨锡多金属矿床主要的富锡矿物。虽然矽卡岩中石榴子石、辉石、绿帘石、角闪石等矿物都可能含锡,但难以开采利用。矽卡岩中的锡石呈明亮的暗褐色到深色自形晶体,具有弱金刚光泽,不透明,直径最大可达 1 cm,双锥状(图 5a)。显微镜下锡石与石英共生,显示出环带特征,呈浅褐色或略带红色,颜色分布不均匀,中心颜色稍深(图 5c)。能谱分析显示锡石呈不规则状与白钨矿、萤石(图 6a,6b,6e)共生,产于透闪石绿帘石矽卡岩中(图 5f,6a);Sn 元素在矽卡岩中仅存在于锡石之中(图 6d),其周围主要为硅酸盐矿物(图 6e)。

白钨矿(CaWO_4)是错那洞最富集的金属矿物,是 W 元素最重要的赋存矿物。在荧光灯下显示出大量具有浅蓝色荧光特征的白钨矿产于矽卡岩之中(图 5b),反射光表明白钨矿具有较强的内反射效应,呈浅红色到深褐色,集合体呈不规则粒状,油脂光泽(图 5d),与石英、萤石、锡石等共生(图 5d,6a)。W 元素主要存在于白钨矿之中,少量存在于锡石及

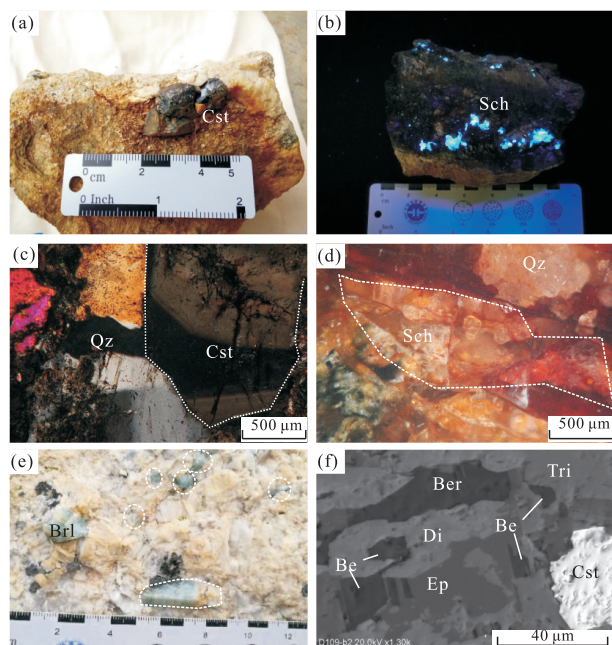


图 5 错那洞钨锡多金属矿床矿石宏观及微观特征

Fig.5 Macro- and micro-features of ores in the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

a.矽卡岩中的锡石呈自形状集合体产出;b.荧光灯下,矽卡岩中白钨矿发出天蓝色荧光;c.锡石与石英共生,且锡石具有结晶环带(正交偏光);d.白钨矿与石英共生,显示出强内反射特征(反射光);e.伟晶岩中富 Be 的绿柱石具有典型的六方柱晶形;f.硅铍石和羟硅铍石是矽卡岩中重要的富 Be 矿物,且与锡石具有共生关系(BSD 图像)。Cst.锡石;Sch.白钨矿;Qz.石英;Brl.绿柱石;Be.硅铍石;Ber.羟硅铍石;Di.透辉石;Ep.绿帘石;Tri.透闪石

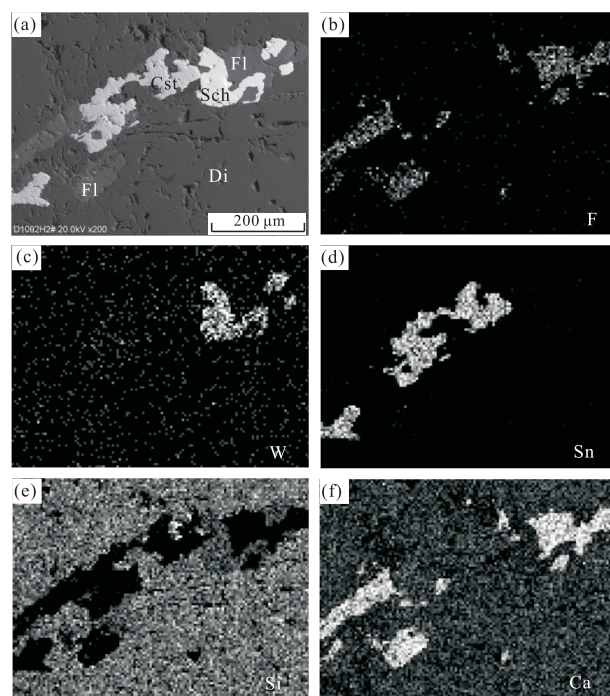


图 6 错那洞钨锡多金属矿床典型矿物交生关系及对应的能谱面扫描图

Fig.6 Relationship of typical ore minerals and its corresponding distribution of main elements by scanning electron microscope within the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

a.扫描电镜下主要矿物(白钨矿、锡石及萤石)的交生关系,显示钨锡矿形成于同一时间;b~f.对应图 a 视域中 F、W、Sn、Si 和 Ca 等元素分布特征。Cst.锡石;Sch.白钨矿;Fl.萤石;Di.透辉石

矽卡岩矿物中(图 6c)。

硅铍石和绿柱石($\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_3]_6$)是错那洞地区 2 种最重要的富铍矿物,硅铍石又分为似晶石和羟硅铍石,绿柱石是错那洞片麻岩核部大面积分布的伟晶岩中常见的副矿物,是错那洞稀有金属矿的重要矿石矿物(吴建阳等,2015)。错那洞绿柱石呈浅蓝色到深绿色自形晶,六方柱状,柱面有纵纹,玻璃光泽,晶体大小变化较大,大的长约 10 cm,直径为 4~5 cm,小的不足 0.5 cm,直径小于 0.3 cm(图 5e)。绝大部分绿柱石透明度较差、裂纹也较多,只有少数绿柱石的晶形完好,透明度和颜色可以达到宝石级别。矽卡岩中铍(BeO)的平均品位可达 0.08%,却很难用肉眼辨别出富 Be 矿物。但是扫描电镜分析结果显示,矽卡岩中大量存在微小(几微米到十几微米)的似晶石($\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$)以及含水的铍硅石矿物——羟铍硅石($\text{Be}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{HO})_2$),其中 Be 质量分数分别为 16.0% 和 35.7%,而羟铍硅石具有较高的 Be 含量。显微分析表明两种富铍矿物可以共生,主要分布于硅酸盐矿物间隙或者以硅酸盐矿物中的包裹体形式存在(图 5f),与锡石等成矿矿物共生表明 W、Sn、Be 可能形成于同一热液作用过程。

错那洞除了 W、Sn、Be 等稀有金属元素矿物外,通过能谱分析还发现了数种硫化物伴生组分,如闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、辉锑矿等。闪锌矿呈他形粒状,粒径达到 1 mm,产于矽卡岩矿物之间,与石英、云母等矿物共生,且闪锌矿接触边具有溶蚀现象(图 7a);能谱分析表明闪锌矿中含有 5.6% 的 FeO,为富铁的铁闪锌矿。方铅矿呈六边形的自形粒状,颗粒大小为 6~8 μm (图 7b)。黄铜矿呈他形粒状,大小为 60~80 μm ;黄铜矿常发生溶蚀,溶蚀形成的赤铁矿沿着裂隙及矿物颗粒间隙迁移,显微镜下可见黄铜矿颗粒附近裂隙中常充填赤铁矿(图 7c)。辉锑矿呈自形粒状,切面为三角形,大小为 2~3 μm ,能谱分析表明少量 Fe 类质同象替代 Sb(图 7d)。

能谱分析显示矽卡岩中存在少量含钼铍矿物,如泡铍矿、辉铍矿和辉钼矿等。泡铍矿呈不规则的纤维状集合体,大小为 20 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,其主要元素为 Bi 和 O,含有少量 Ca(图 7e),质量分数依次为 72.6%、23.5% 和 3.9%。辉铍矿呈不规则粒状,大小为 4 $\mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$,其主要元素为 Bi 和 S,含有少量 Ca、O(图 7f),质量分数依次为 84.9%、10.2%、1.0% 和 3.9%。辉钼矿较常见,与方解石、石英共生,显微镜下呈针状,长宽比值大于 6;其主要元素为 Mo 和 S,含有少量 Pb(图 7g),质量分数分别为 44.9%、

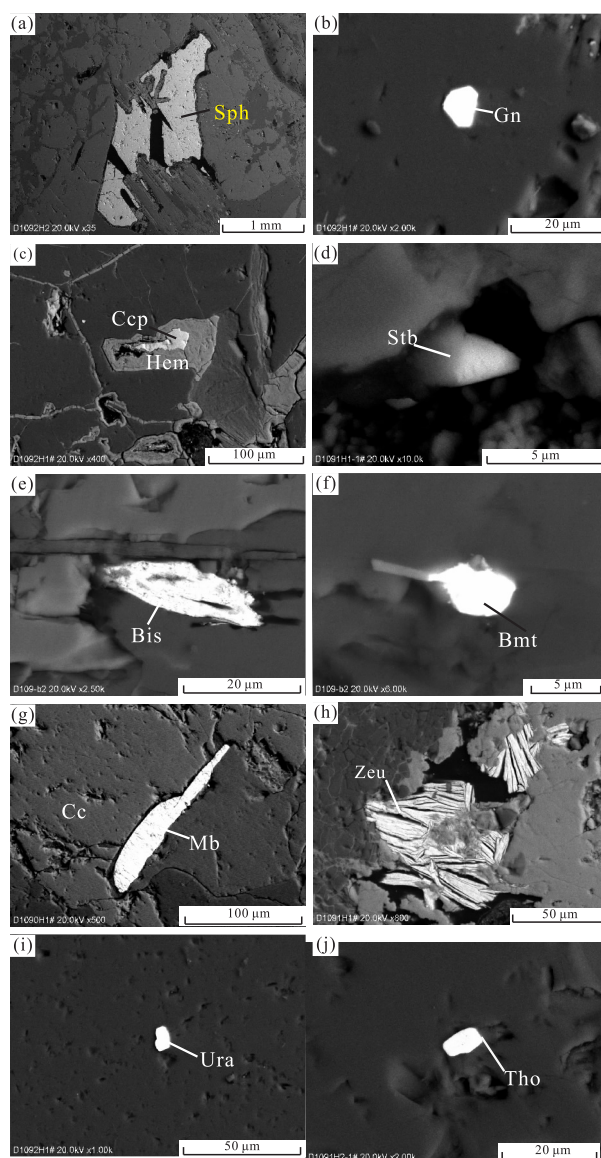


图 7 错那洞钨锡多金属矿床主要金属矿物 BSE 图像特征

Fig.7 BSE image characteristics of main metal minerals

within the Cuonadong W-Sn polymetallic deposit

a.矽卡岩中闪锌矿残留体;b.自形方铅矿晶体;c.矽卡岩中残留黄铜矿,氧化边为赤铁矿;d.自形辉锑矿晶体;e.矽卡岩中自形泡铍矿;f.他形辉铍矿;g.与方解石共生的针状辉钼矿;h.矽卡岩中放射状翠铀铜铀矿集合体;i.自形晶质铀矿;j.粒状钍石晶体.Sph.闪锌矿;Gn.方铅矿;Bis.泡铍矿;Bmt.辉铍矿;Ccp.黄铜矿;Hem.赤铁矿;Cc.方解石;Mb.辉钼矿;Zeu.翠铀铜铀矿;Ura.晶质铀矿;Tho.钍石;Sch.白钨矿;Stb.辉锑矿

47.8% 和 7.3%。

含铀、钍矿物在错那洞矽卡岩中是较为特殊的矿物,导致错那洞地区放射性较高,具放射性的矿物主要为翠铀铜铀矿、晶质铀矿及钍石。翠铀铜铀矿是错那洞最重要的富 U 矿物,为鳞片状和星点状晶形,矿物集合体多呈团簇状,显微镜下呈蓝绿色—淡

蓝绿色的干涉色,一组完全解理,平行消光,具弱多色性(付伟等,2014);在电子显微镜下为纤维状集合体,沿矽卡岩矿物、石英等矿物的粒间或裂隙充填交代(图7h)。能谱分析表明,翠砷铜铀矿主要由Cu、As、U和O组成(图7h),质量分数依次为5%、15%、48%和32%。晶质铀矿为U的氧化物,以不规则的单独晶体形式存在,大小为 $4\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$;能谱分析显示其主要成分为U和O,含有少量的Th类质同象U,U的质量分数为73%,O为20%,Th为7%(图7i)。钍石(ThSiO_4)为主要的含钍矿物,具有高放射性,呈自形晶体,大小约为 $10\times 8\mu\text{m}$;钍石主要成分为Th、Si和O,含有少量U(图7j),质量分数依次为60.3%、8.7%、24.8%和6.2%。

4 淡色花岗岩

淡色花岗岩是错那洞片麻岩穹隆核部的重要组成部分,主要包括白云母花岗岩和二云母花岗岩(图2a),以含电气石白云母花岗岩为主。淡色花岗岩具有花岗结构、块状构造,主要矿物成分有石英(45%~50%)、斜长石(20%~25%)、钾长石(5%~10%)、白云母(10%~15%)、黑云母(3%~5%)和电气石(1%~2%),局部见石榴子石(约1%),副矿物有磷灰石、锆石、黄铁矿、钛铁矿等。

错那洞花岗质岩浆锆石结晶年龄约为21 Ma(林彬等,2016;高利娥等,2017),伟晶岩中云母 Ar-Ar 年龄为19 Ma(Xie *et al.*, 2017),显示岩浆活动时代为中新世。此外,本次研究还获得12.1 Ma、14.4 Ma、16.7 Ma、20.6 Ma、18.0 Ma的淡色花岗岩锆石结晶年龄,表明错那洞岩浆活动具有长时性和多期性特征。

地球化学特征上,错那洞花岗岩具有高Si、Al、K,低Ca、Mg、Fe、Ti的特点。铝饱和指数为1.11~1.15, $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 含量为8.26%~8.53%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.83~0.90,里特曼指数为2.15~2.32, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ 为0.08~0.43(林彬等,2016),属于高钾钙碱性系列的过铝质花岗岩。微量元素上,花岗岩总体表现为富集大离子亲石元素K、Rb和放射性元素U、Th,而不同程度亏损Ba、Nb、Ta、Sr、Zr等高场强元素(林彬等,2016;高利娥等,2017),与北喜马拉雅淡色花岗岩微量元素特征相似(吴福元等,2015)。全岩稀土元素总量明显低于世界上酸性岩的平均丰度,且表现为轻—中等程度的稀土元素分馏和明显的Eu负异常;锆石微量元素具有Ce正异

常, Ce/Ce^* 平均值约为23.2。错那洞花岗岩全岩Zr含量为 $34\times 10^{-6}\sim 50\times 10^{-6}$,计算获得的锆石饱和温度约为673℃(林彬等,2016)。淡色花岗岩具有较低Nd/Ta、Zr/Hf和Sm/Nd值,分别为6.0~9.0、21.4~24.4和0.29~0.32。

5 讨论

长期以来,喜马拉雅成矿带被认为是中低温铅锌铋金成矿带(侯增谦等,2003;聂凤军等,2005;侯增谦等,2006a,2006b;杨竹森等,2006;Yang *et al.*, 2009),基于该理论,指导了藏南地区找矿突破(郑有业等,2012;李洪梁等,2017)。

5.1 错那洞片麻岩穹隆控矿特征

扎西康整装勘查区的设立是丰富传统成矿认知的基础(李光明等,2017),对扎西康大型矿集区的基础地质调查和矿产评价工作查明了区内矿床分布特征。吴建阳和李光明等(2015)首次提出在扎西康矿集区发育一个受错那洞淡色花岗岩岩浆—热液系统控制的金属成矿系统,认识到错那洞淡色花岗岩及外围可能具有钨锡矿床。通过系统的地质填图,Fu *et al.* (2016)初步建立了错那洞片麻岩穹隆模型,并查明了穹隆岩浆—构造—变质作用特征。穹隆形成过程中的金属成矿作用很早就被关注(Beaudoin *et al.*, 1991),错那洞片麻岩中稀有金属成矿作用也逐渐被认识(张志等,2017)。就矿体与错那洞片麻岩穹隆的空间关系而言,矿化矽卡岩产于强烈变形的二云母片岩变质带之中,严格受大型热穹隆控制。矽卡岩中残留较多石英颗粒及大理岩中方解石颗粒之间充填他形石英,暗示原岩为泥岩或砂岩而非灰岩,也得到了盖层为侏罗系日当组的侧面印证。

虽然不同学者从淡色花岗岩、二云母花岗岩、伟晶岩等获得了不同的U-Pb年龄(林彬等,2016;Xie *et al.*, 2017),但是21~12 Ma的结晶年龄表明错那洞片麻岩穹隆发育于青藏高原后碰撞造山过程,为地壳尺度伸展作用的结果(侯增谦等,2006a,2006b;Hou *et al.*, 2009)。强烈伸展作用有利于构造减压,深部岩浆侵位并在构造薄弱部位形成片麻岩穹隆,而钙质围岩则有利于岩浆期后流体与钙发生化学反应,形成稳定的矽卡岩层。

5.2 错那洞淡色花岗岩与成矿专属性

矽卡岩中大部分为钙硅酸盐矿物,因此矽卡岩原岩应该为钙质泥岩或钙质砂岩。与钨锡铍等成矿作用相关的萤石表明成矿流体富F,说明成矿流体

可能与淡色花岗岩岩浆期后热液作用相关。大量高放射性含 U、Th 矿物的出现,表明淡色花岗岩可能直接提供了成矿物质。W、Sn 均形成于高温环境,表明错那洞稀有金属成矿与岩浆作用相关。Be 主要以 2 种形式存在,一种是以绿柱石形式赋存于伟晶岩之中,另一种是以硅铍石的形式赋存于矽卡岩之中。上述 3 种主要金属矿物均表明成矿物质直接来源于错那洞片麻岩穹隆核部花岗质岩浆。

岩浆的结晶分异程度和氧化还原态是金属元素组合和成矿元素富集作用的 2 个决定性因素 (Blevin and Chappell, 1992; Takagi and Tsukimura, 1997; Ishihara, 2004)。错那洞淡色花岗岩具有与喜马拉雅带淡色花岗岩相似的高分异特征 (吴福元等, 2015), 其含有大量的残留锆石而新生锆石匮乏, 尤其是中新世淡色花岗岩。同时错那洞花岗岩具有较低的形成温度 (673°C ; 林彬等, 2016)、低的 Zr 含量 ($34 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$), 远低于低温条件下 Zr 结晶需要的含量 (100×10^{-6}), 暗示岩浆是经过充分分离结晶之后的残留岩浆, 导致 Zr 含量降低, 不能形成新生锆石 (吴福元等, 2015, 2017)。同时, 岩石的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值较低也表明岩浆为高分异花岗质岩浆 (Bau, 1996)。

此外, 花岗岩的氧化还原态决定金属元素组合。如 Mo、Cu 和 Au 矿化与氧化性花岗岩有关, 而 Sn、W 等矿化则与还原性花岗岩有关 (Blevin and Chappell, 1992; Thompson *et al.*, 1999; Sato *et al.*, 2004)。澳大利亚和日本的部分锡矿、钨矿与还原性花岗岩有关, 这些花岗岩也经历了强烈的分离结晶作用 (Blevin and Chappell, 1995; Ishihara, 1998)。根据磁铁矿与钛铁矿含量关系判断岩浆氧化还原性是最简单有效的方法, 磁铁矿往往出现于氧化性花岗质岩浆中, 钛铁矿则多出现于还原性花岗质岩浆中 (Ishihara *et al.*, 2000)。错那洞淡色花岗岩中磁铁矿较罕见, 出现少量的钛铁矿, 暗示其为还原性花岗岩; 同时 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}$ 值变化于 $0.08 \sim 0.43$ (林彬等, 2016), 低于 0.5, 同样表明其具有还原性 (Ishihara *et al.*, 1979)。微量元素 Ce 对氧化还原性具有一定指示意义, 锆石 Ce 异常取决于熔体中 Ce^{4+} 的含量, 在平衡分馏的情况下 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值与氧逸度正相关, 而还原条件下锆石 Ce 异常低且 Ce/Ce^* 显著降低, 如陨石、月岩等 (Wang *et al.*, 2012)。错那洞淡色花岗岩具有弱的 Ce 正异常 (林彬等, 2016; 高利娥等, 2017), 表明 Ce^{3+} 在岩浆熔体中相对于 Ce^{4+} 富集, 从另一个侧面印证了错那洞花岗岩具有还原性,

利于钨锡等稀有金属成矿。

矽卡岩矿化中萤石的出现表明成矿热液中存在 F。F 具有高的熔体/流体分配系数, 所以经历了早期岩浆水丢失的花岗质熔体往往具有高的 F 含量 (Manning, 1981)。F 作为矿化剂可以促进金属元素的活化、运移和堆积, 随着 F 浓度增加, 熔体的固、液相线和粘度等被有效降低 (Thomas *et al.*, 2000; 张德会等, 2004), 促使液-液分离, 从而使 W、Sn 高度富集 (Webster *et al.*, 1997)。同时, F 的存在增加了水溶液在硅酸盐熔体中的溶解度及电负性, 形成可萃取并搬运 W、Sn 等硬阳离子元素的理想流体, 为 W、Sn 的迁移、聚集成矿提供条件 (Thomas *et al.*, 2000; 喻晓等, 2015)。

6 结论

(1) 错那洞矽卡岩型钨锡多金属矿产于错那洞穹隆强变形的二云母片岩的矽卡岩中, 矿床以 W、Sn、Be 为主, 伴生 Mo、Bi、Sb、Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等有益组分, 还首次发现了 U、Th 等高放射性元素富集成矿。

(2) 矽卡岩型钨锡多金属矿床空间上受控于错那洞片麻岩穹隆构造, 与中新世深熔淡色花岗质岩浆作用有密切的成因联系。

(3) 错那洞核部淡色花岗岩为还原性花岗岩, 同时具有强烈的高分异特征, 对钨锡多金属矿形成具有一定的专属性。

致谢: 中国地质调查局成都地质调查中心实验测试中心徐金沙为扫描电镜分析提供了大量帮助和指导; 四川省核工业地质调查院的陈友彬、纪国忠、李南昌、余明聪在野外地质调查过程中提供了大量的帮助, 在此表示感谢。

References

- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123 (3): 323–333.
- Beaudoin, G., Taylor, B. E., Sangster, D. F., 1991. Silver-Lead-Zinc Veins, Metamorphic Core Complexes, and Hydrologic Regimes during Crustal Extension. *Geology*, 19 (12): 1217–1220. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<1217:slzvmc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<1217:slzvmc>2.3.co;2)
- Blevin, P. L., Chappell, B. W., 1992. The Role of Magma

- Sources, Oxidation States and Fractionation in Determining the Granite Metallogeny of Eastern Australia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1-2): 305-316. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007987>
- Blevin, P. L., Chappell, B. W. 1995. Chemistry, Origin, and Evolution of Mineralized Granites in the Lachlan Fold Belt, Australia; The Metallogeny of I- and S-Type Granites. *Economic Geology*, 90(6): 1604-1619. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1604>
- Burchfiel, B. C., Chen, Z., Hodges, K. V., et al., 1992. The South Tibetan Detachment System, Himalayan Orogen: Extension Contemporaneous and Parallel to Shorting in a Collisional Mountain Belt. *Geological Society of American Special Paper*, 269: 1-41.
- Fu, J. G., Li, G. M., Wang, G. H., et al., 2016. First Field Identification of the Cuonadong Dome in Southern Tibet: Implications for EW Extension of the North Himalayan Gneiss Dome. *International Journal of Earth Sciences*, 106(5): 1581-1596. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1368-2>
- Fu, W., Feng, Z. H., Huang, Y. G., et al., 2014. Mineralogical Characteristics and Genesis of the Uranyl Minerals in the Oxidized Zone of the Huashan Deposit, Guangxi, and Their Implications for Deep Ore Exploration. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 295-304 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L. E., Gao, J. H., Zhao, L. H., et al., 2017. The Miocene Leucogranite in the Nariyongcuo Gneiss Dome, Southern Tibet: Products from Melting Metapelite and Fractional Crystallization. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2395-2411 (in Chinese with English abstract).
- Garzanti, E., 1999. Stratigraphy and Sedimentary History of the Nepal Tethys Himalaya Passive Margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(5-6): 805-827. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(99\)00017-6](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00017-6)
- Harrison, T. M., Lovera, O. M., Grove, M., 1997. New Insights into the Origin of Two Contrasting Himalayan Granite Belts. *Geology*, 25(10): 899-902.
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hou, Z. Q., Lü, Q. T., Wang, A. J., et al., 2003. Continental Collision and Related Metallogeny: A Case Study of Mineralization in Tibetan Orogen. *Mineral Deposits*, 22(4): 319-333 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Mo, X. X., Yang, Z. M., et al., 2006a. Metallogenesis in the Collisional Orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic Setting, Tempo-Spatial Distribution and Ore Deposit Types. *Chinese Geology*, 33(2): 340-351 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Yang, Z. S., et al., 2006b. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: III. Mineralization in Post-Collisional Extension Setting. *Mineral Deposits*, 25(6): 629-651 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Z. M., Qu, X. M., et al., 2009. The Miocene Gangdese Porphyry Copper Belt Generated during Post-Collisional Extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 25-51. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.09.006>
- Huangfu, P. P., Wang, Y. J., Li, Z. H., et al., 2016. Effects of Crustal Eclogitization on Plate Subduction/Collision Dynamics: Implications for India-Asia Collision. *Journal of Earth Science*, 27(5): 727-739. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0701-9>
- Ishihara, S., 1998. Granitoid Series and Mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic Granitic Belts. *Resource Geology*, 48(4): 219-224. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.1998.tb00019.x>
- Ishihara, S., 2004. The Redox State of Granitoids Relative to Tectonic Setting and Earth History: The Magnetite-Ilmenite Series 30 Years Later. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 95(1-2): 23-33. <https://doi.org/10.1017/s0263593300000894>
- Ishihara, S., Hashimoto, M., Machida, M., 2000. Magnetite/Ilmenite-Series Classification and Magnetic Susceptibility of the Mesozoic-Cenozoic Batholiths in Peru. *Resource Geology*, 50(2): 123-129. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2000.tb00062.x>
- Ishihara, S., Sawata, H., Arpornsuwan, S., et al., 1979. The Magnetite-Series and Ilmenite-Series Granitoids and Their Bearing on Tin Mineralization, Particularly of the Malay Peninsula Region. *Geological Society of Malaysia*, 11: 103-111.
- le Fort, P., 1975. Himalayas: The Collided Range-Present Knowledge of Continental Arc. *American Journal of Sciences*, 275: 1-44.
- Lee, J., Hacker, B., Wang, Y., 2004. Evolution of North Himalayan Gneiss Domes: Structural and Metamorphic Studies in Mabja Dome, Southern Tibet. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2297-2316.
- Li, G. M., Zhang, L. K., Jiao, Y. J., et al., 2017. First Discovery and Implications of Cuonadong Superlarge Be-W-Sn Polymetallic Deposit in Himalayan Metallogenic Belt, Southern Tibet. *Mineral Deposits*, 36(4): 1003-1008

- (in Chinese with English abstract).
- Li, H. L., Li, G. M., Li, Y. X., et al., 2017. A Study on Ore Geological Characteristics and Fluid Inclusions of Jienagepu Gold Deposit in Zhaxikang Ore Concentration District, Southern Tibet, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 684–696 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B., Tang, J. X., Zheng, W. B., et al., 2016. Geochemical Characteristics, Age and Genesis of Cuonadong Leucogranite, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(3): 391–406 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. H., Einsele, G., 1994. Sedimentary History of the Tethyan Basin in the Tibetan Himalayas. *Geologische Rundschau*, 83(1): 32–61. <https://doi.org/10.1007/bf00211893>
- Liu, W. C., Wang, Y., Zhang, X. X., et al., 2004. The Rock Types and Isotope Dating of the Kangmar Gneissic Dome in Southern Tibet. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 491–501 (in Chinese with English abstract).
- Manning, D. A. C., 1981. The Effect of Fluorine on Liquidus Phase Relationships in the System Qz-Ab-Or with Excess Water at 1 kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 206–215. <https://doi.org/10.1007/bf00371960>
- Naeem, M., Burg, J. P., Ahmad, N., et al., 2016. U-Pb Zircon Systematics of the Mansehra Granitic Complex: Implications on the Early Paleozoic Orogenesis in NW Himalaya of Pakistan. *Geosciences Journal*, 20(4): 427–447. <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0062-x>
- Nie, F. J., Hu, P., Jiang, S. H., et al., 2005. Type and Temporal-Spatial Distribution of Gold and Antimony Deposits (Prospects) in Southern Tibet, China. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 373–385 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y., Kidd, W. S. F., 1992. Nyainqentanglha Shear Zone: A Late Miocene Extensional Detachment in the Southern Tibetan Plateau. *Geology*, 20(9): 775–778. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0775:nszalm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0775:nszalm>2.3.co;2)
- Qi, X. X., Li, T. F., Meng, X. J., et al., 2008. Cenozoic Tectonic Evolution of the Tethyan Himalayan Foreland Fault-Fold Belt in Southern Tibet, and Its Constraint on Antimony-Gold Polymetallic Minerogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1638–1648 (in Chinese with English abstract).
- Robyr, M., Vannay, J. C., Epard, J. L., et al., 2002. Thrusting, Extension, and Doming during the Polyphase Tectono-metamorphic Evolution of the High Himalayan Crystalline Zone in NW India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(3): 221–239. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(02\)00039-1](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(02)00039-1)
- Sato, K., Kovalenko, S. V., Romanovsky, N. P., et al., 2004. Crustal Control on the Redox State of Granitoid Magmas: Tectonic Implications from the Granitoid and Metallogenic Provinces in the Circum-Japan Sea Region. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 95(1–2): 319–337. <https://doi.org/10.1017/s0263593300001103>
- Takagi, T., Tsukimura, K., 1997. Genesis of Oxidized- and Reduced-Type Granites. *Economic Geology*, 92(1): 81–86. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.1.81>
- Thomas, R., Webster, J. D., Heinrich, W., 2000. Melt Inclusions in Pegmatite Quartz: Complete Miscibility between Silicate Melts and Hydrous Fluids at Low Pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(4): 394–401. <https://doi.org/10.1007/s004100000120>
- Thompson, J. F. H., Sillitoe, R. H., Baker, T., et al., 1999. Intrusion-Related Gold Deposits Associated with Tungsten-Tin Provinces. *Mineralium Deposita*, 34(4): 323–334. <https://doi.org/10.1007/s001260050207>
- Wang, R. C., Wu, F. Y., Xie, L., et al., 2017. A Preliminary Study of Rare-Metal Mineralization in the Himalayan Leucogranite Belts, South Tibet. *Science in China (Series D)*, 47(8): 871–880 (in Chinese).
- Wang, X. X., Zhang, J. J., Santosh, M., et al., 2012. Andean-Type Orogeny in the Himalayas of South Tibet: Implications for Early Paleozoic Tectonics along the Indian Margin of Gondwana. *Lithos*, 154: 248–262. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.011>
- Wang, X. X., Zhang, J. J., Wang, J. M., 2016. Geochronology and Formation Mechanism of the Paiku Granite in the Northern Himalaya, and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 41(6): 982–998. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.082>
- Webster, J. D., Thomas, R., Rhede, D., et al., 1997. Melt Inclusions in Quartz from an Evolved Peraluminous Pegmatite: Geochemical Evidence for Strong Tin Enrichment in Fluorine-Rich and Phosphorus-Rich Residual Liquids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2589–2604.
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science in China (Series D)*, 47(7): 745–765 (in Chinese).
- Wu, F. Y., Liu, Z. C., Liu, X. C., et al., 2015. Himalayan Leucogranite: Petrogenesis and Implications to Orogenesis and Plateau Uplift. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1–36 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. Y., Li, G. M., Zhou, Q., et al., 2015. A Preliminary Study of the Metallogenic System in the Zhaxikang Integrated Exploration Area, Southern Tibet. *Chinese Geology*, 42(6):

- 1674—1683 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. L., Li, L. M., Wang, B. G., et al., 2017. Genesis of the Zhaxikang Epithermal Pb-Zn-Sb Deposit in Southern Tibet, China: Evidence for a Magmatic Link. *Ore Geology Reviews*, 80: 891—909. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.007>
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Gao, W., et al., 2006. Metallogenic Characteristics and Genetic Model of Antimony and Gold Deposits in South Tibetan Detachment System. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377—1391 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Meng, X. J., et al., 2009. Post-Collisional Sb and Au Mineralization Related to the South Tibetan Detachment System, Himalayan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1—3): 194—212. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.03.005>
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yu, X., Zhao, B., Zhang, D. H., et al., 2015. Partition Behaviors of Tungsten in Mineral/Melt and Solution/Melt Systems and Their Effects on Mineralization. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 34(3): 646—653 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. S., Gao, L. E., Tang, S. H., et al., 2014. Eocene Magmatism in the Tethyan Himalaya, Southern Tibet. *Geological Society, London, Special Publications*, 412(1): 287—316. <https://doi.org/10.1144/sp412.8>
- Zeng, L. S., Liu, J., Gao, L. E., et al., 2009. Early Oligocene Anatexis in the Yardoi Gneiss Dome, Southern Tibet and Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104—112 (in Chinese).
- Zhang, D. H., Zhang, W. H., Xu, G. J., et al., 2004. The Ore Fluid Geochemistry of F-Rich Silicate Melt-Hydrous Fluid System and Its Metallogeny—The Current Status and Problems. *Geoscience Frontier*, 11(2): 479—490 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. U-Pb Ages of Kude and Sajia Leucogranites in Sajia Dome from North Himalaya and Their Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(19): 2087—2092. <https://doi.org/10.1360/04wd0198>
- Zhang, J. J., Guo, L., Zhang, B., 2007. Structure and Kinematics of the Yalashangbo Dome in the Northern Himalayan Dome Belt, China. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 16—30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Yang, X. Y., Qi, G. W., et al., 2011. Geochronology of the Malashan Dome and Its Application in Formation of the Southern Tibet Detachment System (STDS) and Northern Himalayan Gneiss Domes (NHGD). *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3535—3544 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Liao, Q. A., Li, D. W., et al., 2003. Laguigangri Leucogranites and Its Relation with Laguigangri Metamorphic Core Complex in Sajia, South Tibet. *Earth Science*, 28(6): 695—701 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Zhang, L. K., Li, G. M., et al., 2017. The Cuonadong Gneiss Dome of North Himalaya: A New Member of Gneiss Dome and a New Proposition for the Ore-Controlling Role of North Himalaya Gneiss Domes. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 754—766 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. C., Hou, Z. Q., Fu, Q., et al., 2016. Mantle Inputs to Himalayan Anatexis: Insights from Petrogenesis of the Miocene Langkazi Leucogranite and Its Dioritic Enclaves. *Lithos*, 264: 125—140. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Zheng, Y. Y., Liu, M. Y., Sun, X., et al., 2012. Type, Discovery Process and Significance of Zhaxikang Antimony Polymetallic Ore Deposit, Tibet. *Earth Science*, 37(5): 1003—1014 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.108>
- Zhu, D. C., Chung, S. L., Mo, X. X., et al., 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury Large Igneous Province: Remnants Identified in Present-Day Southeastern Tibet and Southwestern Australia. *Geology*, 37(7): 583—586. <https://doi.org/10.1130/g30001a.1>
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Pan, G. T., et al., 2008. Petrogenesis of the Earliest Early Cretaceous Mafic Rocks from the Cona Area of the Eastern Tethyan Himalaya in South Tibet: Interaction between the Incubating Kerguelen Plume and the Eastern Greater India Lithosphere? *Lithos*, 100(1—4): 147—173. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.024>
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Zhao, Z. D., et al., 2009. Permian and Early Cretaceous Tectonomagmatism in Southern Tibet and Tethyan Evolution: New Perspective. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1—20 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 付伟, 冯佐海, 黄永高, 等, 2014. 广西花山铈矿床氧化带中铈酰矿物特征、成因及其勘查指示意义. *地球学报*, 35(3): 295—304.
- 高利娥, 高家昊, 赵令浩, 等, 2017. 藏南拿日雍错片麻岩穹窿中新世淡色花岗岩的形成过程: 变泥质岩部分熔融与

- 分离结晶作用.岩石学报,33(8):2395—2411.
- 侯增谦,吕庆田,王安建,等,2003.初论陆—陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例.矿床地质,22(4):319—333.
- 侯增谦,莫宣学,杨志明,等,2006a.青藏高原碰撞造山带成矿作用:构造背景、时空分布和主要类型.中国地质,33(2):340—351.
- 侯增谦,曲晓明,杨竹森,等,2006b.青藏高原碰撞造山带:III.后碰撞伸展成矿作用.矿床地质,25(6):629—651.
- 李光明,张林奎,焦彦杰,等,2017.西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义.矿床地质,36(4):1003—1008.
- 李洪梁,李光明,李应栩,等,2017.藏南扎西康矿集区姐纳各普金矿床地质与流体包裹体特征.矿物学报,37(6):684—696.
- 林彬,唐菊兴,郑文宝,等,2016.西藏错那洞淡色花岗岩地球化学特征、成岩时代及岩石成因.岩石矿物学杂志,35(3):391—406.
- 刘文灿,王瑜,张祥信,等,2004.西藏南部康马岩体岩石类型及其同位素测年.地学前缘,11(4):491—501.
- 聂凤军,胡朋,江思宏,等,2005.藏南地区金和锑矿床(点)类型及其时空分布特征.地质学报,79(3):373—385.
- 戚学祥,李天福,孟祥金,等,2008.藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶带新生代构造演化与锑金多金属成矿作用.岩石学报,24(7):1638—1648.
- 王汝成,吴福元,谢磊,等,2017.藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究.中国科学(D辑),47(8):871—880.
- 王晓先,张进江,王佳敏,2016.北喜马拉雅佩枯花岗岩年代学、成因机制及其构造意义.地球科学,41(6):982—998.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.082>
- 吴福元,刘志超,刘小驰,等,2015.喜马拉雅淡色花岗岩.岩石学报,31(1):1—36.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,等,2017.高分异花岗岩的识别与研究.中国科学(D辑),47(7):745—765.
- 吴建阳,李光明,周清,等,2015.藏南扎西康整装勘查区成矿体系初探.中国地质,42(6):1674—1683.
- 杨竹森,侯增谦,高伟,等,2006.藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式.地质学报,80(9):1377—1391.
- 喻晓,赵博,张德会,等,2015.钨在矿物/熔体和溶液/熔体中的分配行为及其对成矿作用的影响.矿物岩石地球化学通报,34(3):646—653.
- 曾令森,刘静,高利娥,等,2009.藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义.科学通报,54(3):373—381.
- 张德会,张文淮,许国建,2004.富F熔体—溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题.地学前缘,11(2):479—490.
- 张进江,郭磊,张波,2007.北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征.地质科学,42(1):16—30.
- 张进江,杨雄英,戚国伟,等,2011.马拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系—北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用.岩石学报,27(12):3535—3544.
- 张金阳,廖群安,李德威,等,2003.藏南萨迦拉轨岗日淡色花岗岩特征及与变质核杂岩的关系.地球科学,28(6):695—701.
- 张志,张林奎,李光明,等,2017.北喜马拉雅错那洞穹隆:片麻岩穹隆新成员与穹隆控矿新命题.地球学报,38(5):754—766.
- 郑有业,刘敏院,孙祥,等,2012.西藏扎西康锑多金属矿床类型、发现过程及意义.地球科学,37(5):1003—1014.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.108>
- 朱弟成,莫宣学,赵志丹,等,2009.西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化:新观点.地学前缘,16(2):1—20.