2019年6月
June, 2019

矿 床 地 质
MINERAL DEPOSITS

第38卷 第3期
38 (3): 586~598

文章编号: 0258-7106 (2019) 03-0586-13 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2019. 03. 009

北喜马拉雅错那洞穹隆铍铷稀有金属矿床地质特征及找矿方向*

夏祥标,李光明,张 志,梁 维,张林奎,向安平
(中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081)

摘 要 错那洞穹隆是北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)中发现的新成员,穹隆由核-幔-边3部分组成。核部由寒武纪花岗质片麻岩组成,幔部由早古生代云母片岩和矽卡岩化大理岩组成,边部由变质沉积岩组成。在穹隆核部侵入有大量淡色花岗岩和伟晶岩脉。通过系统的地表工程控制,在穹隆幔部中新发现了环穹隆展布、层位稳定的矽卡岩带和厚大的铍铷稀有金属工业矿体。通过对错那洞穹隆东部矿带典型矿区的解剖,初步把矿床的类型定为热液型稀有金属矿床,在碳酸盐赋矿层位中形成富铍、铷、钨、锡的矽卡岩型矿床。铍铷稀有金属矿具超大型的资源潜力,钨锡也达大型规模。错那洞铍铷稀有金属矿主要的矿床类型为矽卡岩型。此外,还有伟晶岩型稀有金属矿、锡石硫化物型锡多金属矿。文章研究矿体特征和总结矿床类型,提出了下一步的找矿方向。

关键词 地质学;稀有金属;地质特征;找矿方向;错那洞;北喜马拉雅
中图分类号:P618.72; P618.44 **文献标志码**:A

Geological characteristics and prospecting direction of Cuonadong Be-Rb rare metal deposit in Cuonadong gneiss dome of North Himalaya

XIA XiangBiao, LI GuangMing, ZHANG Zhi, LIANG Wei, ZHANG LinKui and XIANG AnPing
(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract

The Cuonadong gneiss dome is a newly discovered dome in the North Himalaya Gneiss Domes (NHGD) belt, Studies show that the Cuonadong gneiss dome is composed of three parts, the core is composed of Cambrian granitic gneiss, the mantle part is composed of Early Paleozoic mica schist and skarn marble, and the outer part is mainly composed of metamorphic sedimentary rocks. Leucogranites and a large number of pegmatite veins intruded into the core of the Cuonadong gneiss dome. A stable skarn zone and thick Be-Rb rare metal orebodies were newly found by the sparse exploration engineering surface in the mantle part around the core of the dome. Through the anatomy of a typical mining area in the east of the Cuonadong dome, the type of the deposit was preliminarily identified as a hydrothermal rare metal deposit. Skarn deposits formed in Carbonate formation are rich in Be, Rb, W and Sn. Beryllium and rubidium ore resources are estimated to be of up to superlarge size, and paragenetic W-Sn ore resources are of large scale. The main genetic type of the deposit is skarn type; besides, pegmatite rare meta ore and cassiterite-sulfide polymetallic ore were also found. Based on the study of characteristics of orebody and the summary of deposit types, the authors point out the next prospecting direction.

* 本文得到科技部国家重点基础研发计划项目(编号:2018YFC0604103)和中国地质调查局"西藏山南地区铍锡多金属矿调查评价"项目(编号:DD20190147)联合资助

第一作者简介 夏祥标,男,1982年生,高级工程师,长期从事青藏高原地质矿产、成矿规律方面的研究。Email:cdxiaxiangbiao@163. com

收稿日期 2018-06-15;改回日期 2018-09-23。赵海杰编辑。

http://www.kcdz.ac.cn

Key words: geology, rare metal, geological characteristics, prospecting direction, Cuonadong, North Himalaya

北喜马拉雅片麻岩穹隆带(NHGD)自东往西分布有也拉香波、错那洞、然巴、康马、萨嘎、麻布加、拉轨岗日、马拉山等片麻岩穹隆(张金阳等,2003;Lee et al.,2000;2004;2006;2007;Leech,2008;张进江等,2007;2011;高利娥等,2011;2013;辜平阳等,2013;Gao et al.,2014;张志等,2017)(图 1a),前人称之为拉轨岗日变质核杂岩带(李德威等,2003)。针对这些穹隆,学者们分别在年代学、地球化学、构造等方面开展了大量研究 (Debon et al.,1986;Chen et al.,1990;Lee et al.,2000;2004;2006;2007;张进江等,2007;曾令森等,2009;Smit et al.,2014;Gao et al.,2014;Zeng et al.,2014;Liu et al.,2016),但针对其成矿方面的研究较少。错那洞片麻岩穹隆位于特提斯喜马拉雅东段,也拉香波片麻岩穹隆南侧,藏南拆离系以北,是扎西康铅锌多金属矿整装勘查区新发现的一个片麻岩穹隆(张志等,2017)。笔者所在的研究团队在穹隆幔部的矽卡岩/矽卡岩化大理岩带中发现了钨、锡以及铍、铷等稀有金属矿化,此成矿元素组合在北喜马拉雅片麻岩穹隆带地质调查中尚属首次发现,并提出错那洞穹隆具超大型铍钨锡矿成矿潜力(李光明等,2017;张志等,2017)。这一发现改变了长期以来喜马拉雅成矿带主要为中低温铅锌锑金成矿带的传统认识,说明该成矿带同时具有铍铷、锡钨等中高温矿产的巨大成矿潜力(李光明等,2017)。本文在对错那洞穹隆地质结构研究的基础上,选取具有代表性的日纳矿区,重点介绍矿区矽卡岩的产出状态、矽卡岩矿体特征及矿石成分,进而总结出错那洞稀有金属矿的3种矿床类型,明确了下一步的找矿方向,希望对北喜马拉雅片麻岩穹隆带下一步的稀有金属找矿工作有所指导。

1　区域地质概况

错那洞穹隆位于扎西康铅锌多金属矿整装勘查区的中南部(图 1b)。区内出露地层以侏罗系为主,少量三叠系分布于扎西康整装区的东北部,具体包括上三叠统涅如组(T_3n),下侏罗统日当组(J_1r)、中下侏罗统陆热组($J_{1\text{-}2}l$)、中侏罗统遮拉组(J_2z)、中侏罗统维美组(J_2w),岩性以碎屑岩为主。区内地层在印亚陆陆碰撞造山过程中经形成一系列轴向近东西向的复式褶皱,同时发育东西向、北西向的断裂。

区内岩浆岩活动强烈,以中生代和新生代为主。中生代岩浆岩有辉绿岩、辉长岩、英安岩等,具双峰式火成岩特征,为措美大火成岩省的一部分(朱弟成等,2013)。新生代岩浆岩为淡色花岗岩,可分为始新世及中新世2期次岩浆活动。始新世淡色花岗岩为青藏高原主碰撞时中下地壳部分熔融的产物(胡古月等,2011);中新世淡色花岗岩为S型花岗岩,属变泥质岩部分熔融的产物(林彬等,2016)。

复杂的地质作用使扎西康整装勘查区发育大量铅锌锑金多金属矿床,形成藏南地区独具特色的铅锌金锑多金属成矿带,代表性的矿床有扎西康、柯月、则当等 (张志等,2017)。

2　错那洞片麻岩穹隆构造、岩石组成

错那洞片麻岩穹隆可分核、幔、边3部分(图2a),核部和幔部发育有大量伟晶岩脉(李光明等,2017;张志等,2017)。穹隆后期遭受多期次淡色花岗岩侵入,局部具有热穹隆的性质。核部由寒武纪花岗质片麻岩组成,花岗质片麻岩的构造可分为眼球状与条带状构造2种。核部花岗质片麻岩年龄为499.7 Ma (张志等,2017),与北喜马拉雅穹隆带核部片麻岩时代基本一致,均为印度陆块北部变质基底岩石经泛非—早古生代造山活动的产物(许志琴等,2005)。幔部由古生代强变质变形的二云母片岩夹矽卡岩化大理岩组成。二云母片岩具有蚀变矿物分带特征,由内向外依次为夕线石、蓝晶石、十字石、石榴子石、堇青石等蚀变(张志等,2017)。在二云母片岩内稳定产出一套矽卡岩化大理岩带,为铍、锡、钨、铷等稀有金属矿的赋矿部位。边部为侏罗系、三叠系浅变质岩,岩性为板岩、变砂岩,地层产状围绕穹隆向外呈放射状,靠近穹隆的地层中A型褶皱发育(张志等,2017)。穹隆可见后期多期侵位的淡色花岗岩,初步划分为3期:第一期为弱定向性二云母花岗岩(21 Ma) (林彬等,2016);第二期为二云母花岗岩(18~16 Ma) (张志等,2017);第三期为电气石白云母花岗岩(14 Ma) (张志等,2017)。

错那洞穹窿幔部的大理岩带出露厚度约200 m,内部发育不同程度的矽卡岩化,整体围绕错那洞穹

http://www.kcdz.ac.cn

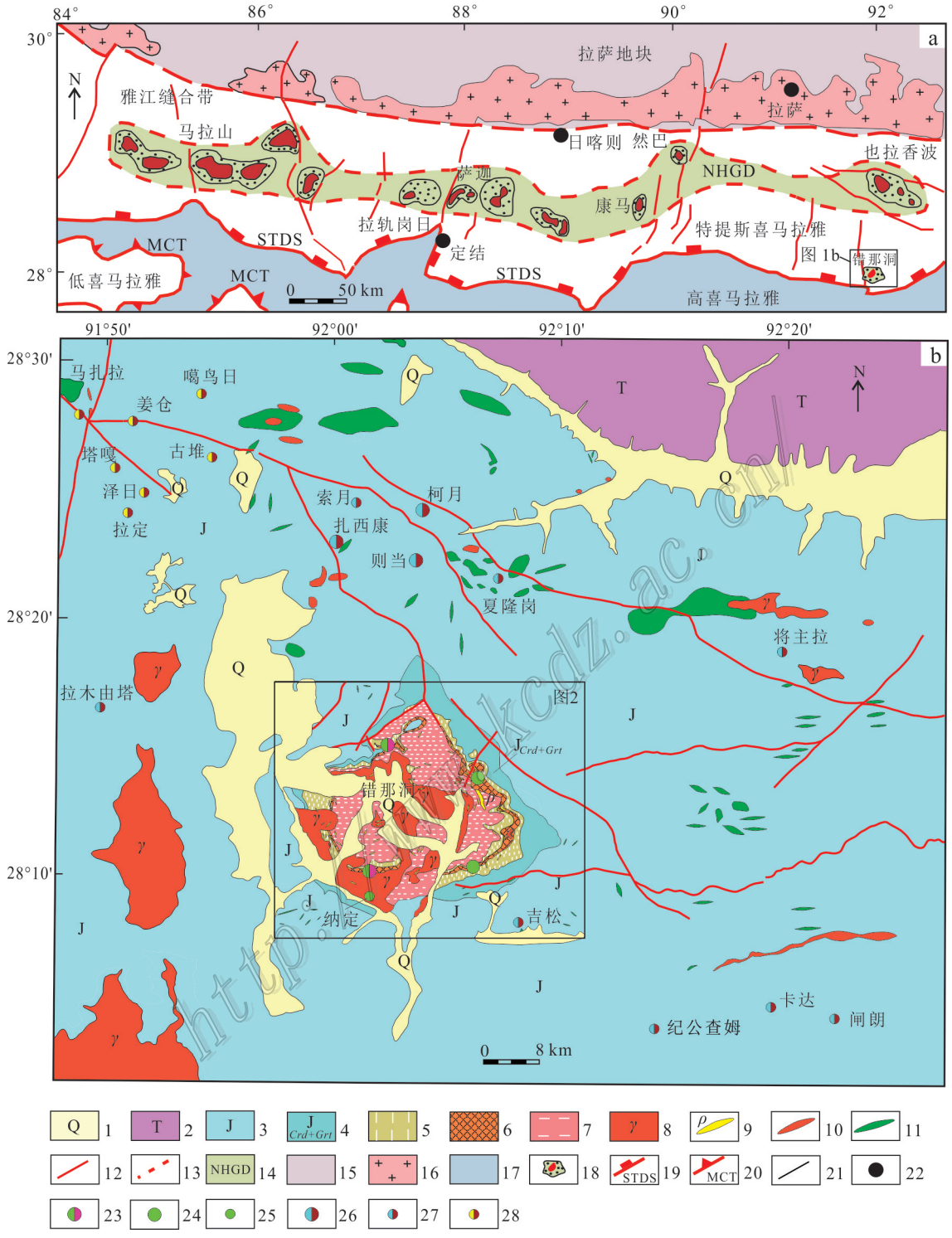

图 1 北喜马拉雅片麻岩穹隆分布图(a,据许志琴等,2015 修编)及扎西康整装勘查区地质简图(b,据张志等,2017 修编)

1—第四系砂砾、黏土;2—三叠系砂岩、板岩;3—侏罗系砂岩、板岩;4—侏罗系含堇青石、石榴子石砂岩、板岩;5—古生代石英片岩;6—古生代矽卡岩化大理岩;7—寒武纪花岗质片麻岩;8—淡色花岗岩体;9—伟晶岩脉;10—花岗岩脉;11—辉绿岩脉;12—断裂;13—推断断裂;14—北喜马拉雅片麻岩穹隆带;15—拉萨地块;16—冈底斯岩基;17—高喜马拉雅;18—片麻岩穹隆;19—藏南拆离系;20—主中央逆冲断裂带;21—地质界限;22—城市;23—大型铍钨矿点;24—大型铍矿点;25—小型稀有金属矿点;26—大型铅锌矿床;27—小型铅锌矿床;28—小型锑金矿床

Fig. 1　Simplified geological map of the North Himalayan Gneiss Domes (a, modified after Xu et al., 2015) and the Zhaxikang integrated exploration area (b, modified after Zhang et al., 2017)

1—Quaternary gravel and clay; 2—Triassic sandstone and slate; 3—Jurassic sandstone and slate; 4—Jurassic sandstone and slate with cordierite and garnet; 5—Paleozoic quartz schist; 6—Paleozoic skarn marble; 7—Cambrian granitic gneiss; 8—Leucogranites; 9—Pegmatite vein; 10—Granite vein; 11—Diabase vein; 12—Fault; 13—Inferred fault;14—Northern Himalayan gneiss domes belt; 15—Lhasa terrane;16—Gangdise batholith; 17—High Himalaya; 18—Gneiss dome; 19—Southern Tibet detachment system; 20—Main central thrust fault zone; 21—Geological boundary; 22—City; 23—Large ore spot of beryllium and tungsten; 24—Large ore spot of beryllium; 25—Small ore spot of rare metals; 26—Large deposit of lead and zinc; 27—Small deposit of lead and zinc; 28—Small deposit of antimony and gold

窿呈环带分布。在错那洞穹隆四周的祥林、余纳杂、日纳、曲嘎尔北4个矿区(图 2a),经工程控制均发现产出稳定的矽卡岩型铍铷矿体。祥林矿区预测资源量 BeO 4.55 万吨,Rb_2O 3.06 万吨,WO_3 20.00 万吨,Sn 31.80 万吨。日纳矿区预测资源量 BeO 2.03 万吨,Rb_2O 1.15 万吨。余纳杂矿区预测资源量 BeO 1.48 万吨,Rb_2O 0.76 万吨。曲嘎尔北矿区预测资源量 BeO 5.50 万吨,WO_3 7.10 万吨。其中日纳矿区矽卡岩型矿体最具代表性。

3　日纳铍铷稀有金属矿床地质特征

3.1　矿区地质

日纳矿区位于错那洞穹窿东南部,核、幔、边三层结构保存完整,岩石片理倾向东南(图3)。核部为花岗质片麻岩,靠近下拆离断层部位的花岗片麻岩内穿插有不规则伟晶岩脉。幔部为二云母片岩夹矽卡岩化大理岩,大理岩内部穿插有大量伟晶岩脉。边部为三叠系砂岩、砂质板岩。

日纳矿区发育的岩浆岩较为简单,主要为二云母花岗岩(γ^2)及白云母花岗岩(γ^3)、伟晶岩脉(ρ)。二云母花岗岩分布于矿区的西部,呈北东向长条状展布,可能沿北东向断裂侵位。白云母花岗岩位于矿区的东北部,形态不规则。

幔部大理岩重结晶明显(图 4a),内部多见有伟晶岩透镜体(图 5b),具糜棱岩化现象。局部可见大理岩层内发育鞘褶皱(图 5a),表明大理岩变形强烈。镜下在方解石颗粒间见有石英和云母(图 4b),推断其原岩含有砂质成分。大理岩重结晶后,原始的变形样式多被掩盖。这些迹象表明大理岩带为一构造薄弱空间,易于含矿热液的侵位。大理岩带内发育不同程度的矽卡岩化,为钨锡铍铷稀有金属矿体的含矿部位。矽卡岩(矿化)带有2层,第一层位于二云母片岩中间,厚度约200 m,环穹隆四周稳定产出,内部有多层矽卡岩化,为错那洞穹隆主要的矽卡岩带。第二层位于下拆离断层上部,厚度2~5 m不等,局部彭大。在两层矽卡岩(矿化)带内均发现铍铷矿体,并伴有钨锡矿化。

3.2　矽卡岩特征

矽卡岩带作为容矿、赋矿的有利空间,利于矿质富集。日纳矿区矽卡岩初步划分为条带状矽卡岩(图 4c、d)和似层状矽卡岩,以前者为主。条带状矽卡岩中矿物颗粒较细小,似层状矽卡岩中矿物颗粒较粗大。矽卡岩矿物组合有绿帘石(图 4e、f)、透辉石(图 4g)、石榴子石(图 4h)、透闪石(图 4i)、符山石等,以透辉石、透闪石、符山石为主。矽卡岩化以这些矽卡岩矿物的出现为标志。

条带状矽卡岩表现为绿色矽卡岩与灰白色大理岩互层(图 4c),二者比例近似于1∶1。矽卡岩单层厚度10~100 cm不等,矽卡岩矿物以浅绿色的符山石、绿帘石、绿泥石为主,矿物颗粒呈中细粒状,镜下在矽卡岩矿物颗粒间见有方解石、硅铍石、白钨矿等矿物。矽卡岩内部见 < 1 cm的石英网脉,脉中可见白钨矿,应为后期热液改造的结果。从矽卡岩的矿物组成和分布特征分析,条带状含矿矽卡岩是选择性交代的结果,矽卡岩分带性不明显,属于少量流体形成的类矽卡岩。

似层状矽卡岩厚度多在1~10 m之间,矽卡岩内部发育有伟晶岩脉、伟晶岩透镜体。局部矽卡岩矿物围绕伟晶岩呈单向生长(图 5e)、梳状生长(图 5f),具单向固结结构,在伟晶岩残留石英核里偶见绿柱石晶体(图 5g)。单条伟晶岩脉体宽度 < 50 cm,长度 < 2 m,在脉体边部见有零星白钨矿。矽卡岩矿物颗粒普遍较粗大,代表性矿物有透辉石(图 4g)、透闪石(图 4i)、符山石等。这些特征表明似层状矽卡岩明显受热液改造。

日纳矿区条带状(类)矽卡岩可能为远端岩浆热液交代作用的产物。似层状矽卡岩与伟晶岩脉在空间关系上紧密相伴,为伟晶岩和大理岩接触交代作用形成。

http://www.kcdz.ac.cn

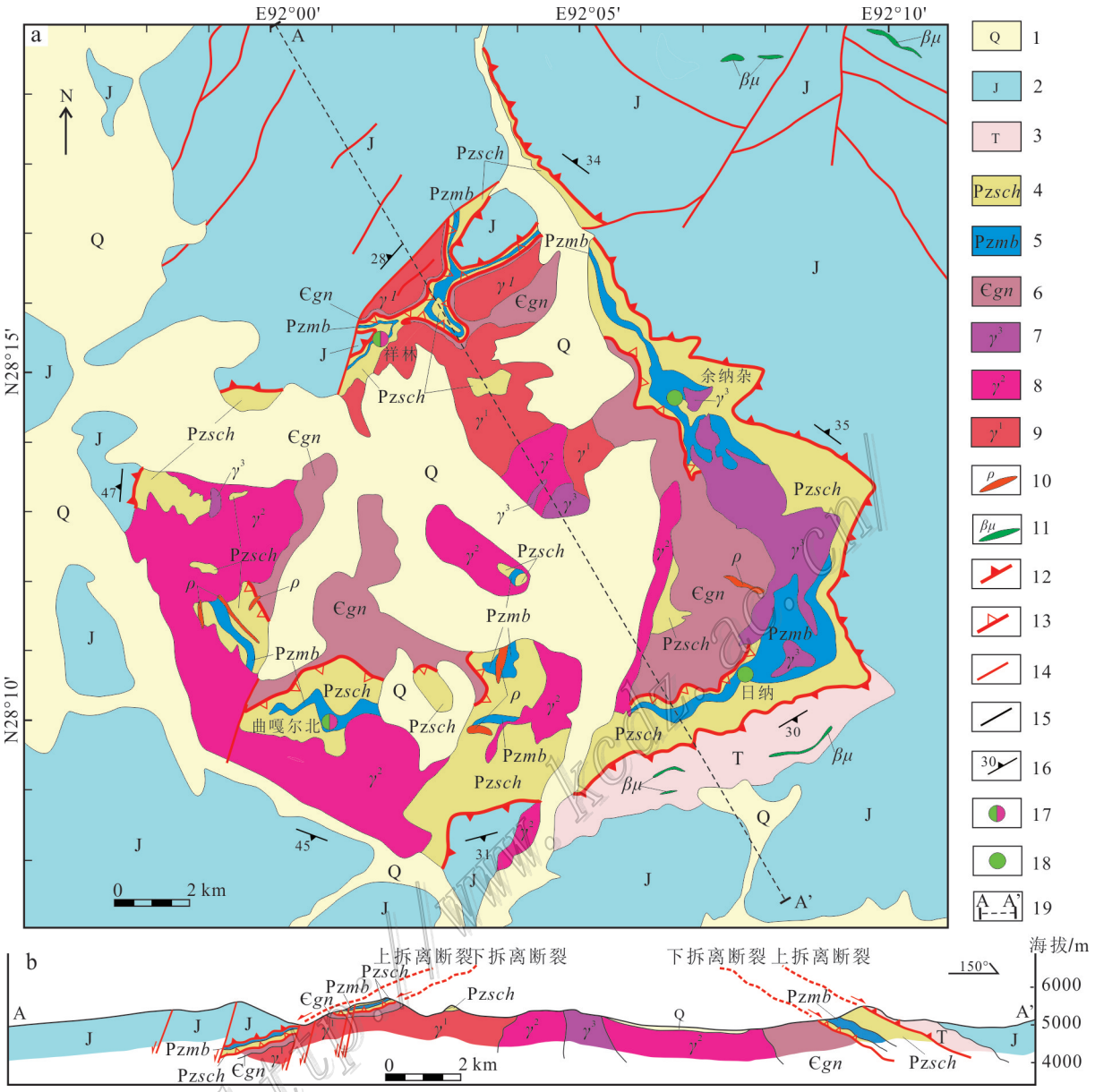

图 2 错那洞穹隆地质图(a)及图切剖面(b)

1—第四系砂砾、黏土;2—侏罗系砂岩、板岩;3—三叠系砂岩、板岩;4—古生代二云母石英片岩;5—古生代矽卡岩化大理岩;6—寒武纪花岗质片麻岩; 7—中新世(第三期)白云母花岗岩;8—中新世(第二期)二云母花岗岩;9—中新世(第一期)弱变形二云母花岗岩;10—伟晶岩脉;11—基性岩脉;12—上拆离断裂(带);13—下拆离断裂(带);14—断裂;15—地质界线;16—片理产状;17—大型铍钨矿点;18—大型铍矿点;19—A-A’地质剖面

Fig. 2 Generalized geological map of the Cuonadong gneiss dome (a) and geological profile (b)

1—Quaternary gravel and clay; 2—Jurassic sandstone and slate; 3—Triassic sandstone and slate; 4—Paleozoic two mica quartz schist; 5—Paleozoic skarn marble; 6—Cambrian granitic gneiss; 7—Miocene (the third phase) muscovite granite; 8—Miocene (the second phase) two mica granite; 9—Miocene (the first phase) weakly deformed two mica granite;10—Pegmatite vein; 11—Diabase; 12—Upper detachment fault; 13—Lower detachment fault; 14—Fault; 15—Geological boundary; 16—Schistosity attitude; 17—Large ore spot of beryllium and tungsten; 18—Large ore spot of beryllium; 19—A-A’geological section

3.3 伟晶岩脉特征

糜棱岩化的大理岩因构造作用形成层间滑脱，其间伟晶岩脉体特别发育。伟晶岩与大理岩接触交代形成矽卡岩或矽卡岩化大理岩。伟晶岩脉有“顺

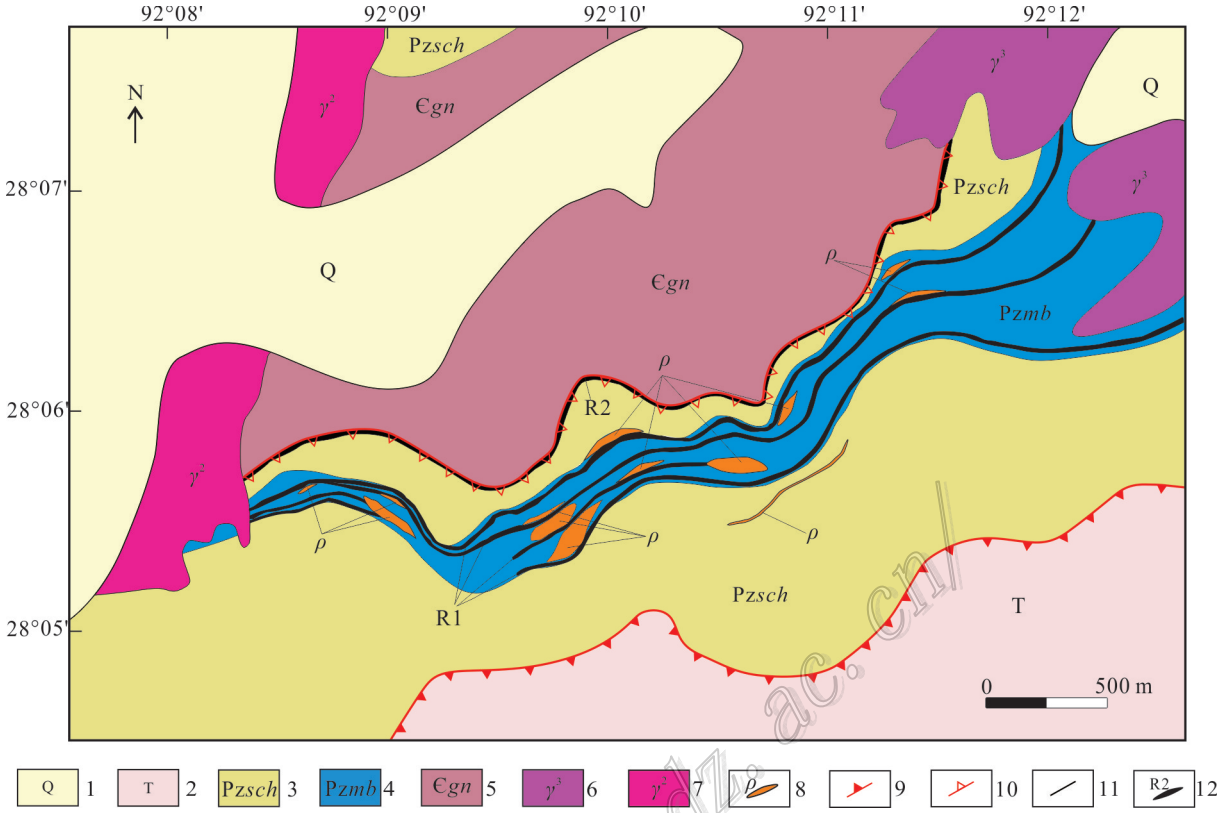

图 3　日纳矿区地质简图

1—第四系砂砾、黏土;2—三叠系砂岩、板岩;3—古生代二云母石英片岩;4—古生代矽卡岩化大理岩;5—寒武纪花岗质片麻岩;6—中新世(第三期)白云母花岗岩;7—中新世(第二期)二云母花岗岩;8—伟晶岩脉;9—上拆离断裂;10—下拆离断裂;11—地质界线;12—矽卡岩矿体及编号

Fig. 3　Simplified geological map of the Rina mining district

1—Quaternary gravel and clay; 2—Triassic sandstone and slate; 3—Paleozoic two mica quartz schist; 4—Paleozoic skarn marble; 5—Cambrian granitic gneiss; 6—Miocene (the third phase) muscovite granite;7—Miocene (the second phase) two mica granite; 8—Pegmatite vein; 9—Upper detachment fault; 10—Lower detachment fault; 11—Geological boundary; 12—Skarn orebody and its serial number

层”透镜状、“顺层”脉状、“切层”放射状。

“顺层”伟晶岩透镜体顺片理侵位后,经历了成穹过程的变形,在大理岩或片岩内拉伸呈透镜状,形成“石香肠”构造(图 5b),伟晶岩内明显可见长石拉伸呈眼球状(图 5c)。伟晶岩主要组成矿物为钠长石、石英及白云母。其中,钠长石粒径约 1 cm,含量约 70%。石英颗粒均较小(粒径约 3 mm),含量约 20%。白云母多为碎小片状,含量约 10%。无显著的伟晶岩分带结构。在“顺层”伟晶岩透镜体与大理岩接触部位未见有矽卡岩化。

“顺层”脉状伟晶岩脉大致顺片理面侵位,脉体未见明显变形。其中,伟晶岩主要组成矿物为钠长石、石英及白云母。钠长石粒径可达 3~5 cm,含量 70%,局部钠长石有“多米诺”骨牌现象。石英颗粒均较小(粒径约 5 mm),含量约 20%。白云母多为碎小片状,含量约 10%。无显著的伟晶岩分带结构,岩石灰白色,泛黄,局部见少量电气石。在穹隆幔部沿二云母片岩片理面侵位的伟晶岩内见有晶型粗大的绿柱石(图 6e、f)。在似层状矽卡岩内多见有“顺层”脉状伟晶岩脉,二者空间上紧密相伴。

“切层”放射状伟晶岩脉沿围绕穹隆放射状的裂隙侵入,露头上表现为伟晶岩脉切穿岩石片理面(图 5i),局部在伟晶岩脉边部见有少量锡石(图 6a、b)和白钨矿。伟晶岩主要组成矿物为钠长石、石英、白云母。钠长石、白云母通常伟晶,巨晶状,粒径可达 5~10 cm。石英颗粒通常较小,粒径最大可达 1 cm。钠长石通常呈面状分布,含量约 75%,石英含量约 15%,白云母含量约 10%。伟晶岩通常斑杂状,无显

http://www.kcdz.ac.cn/

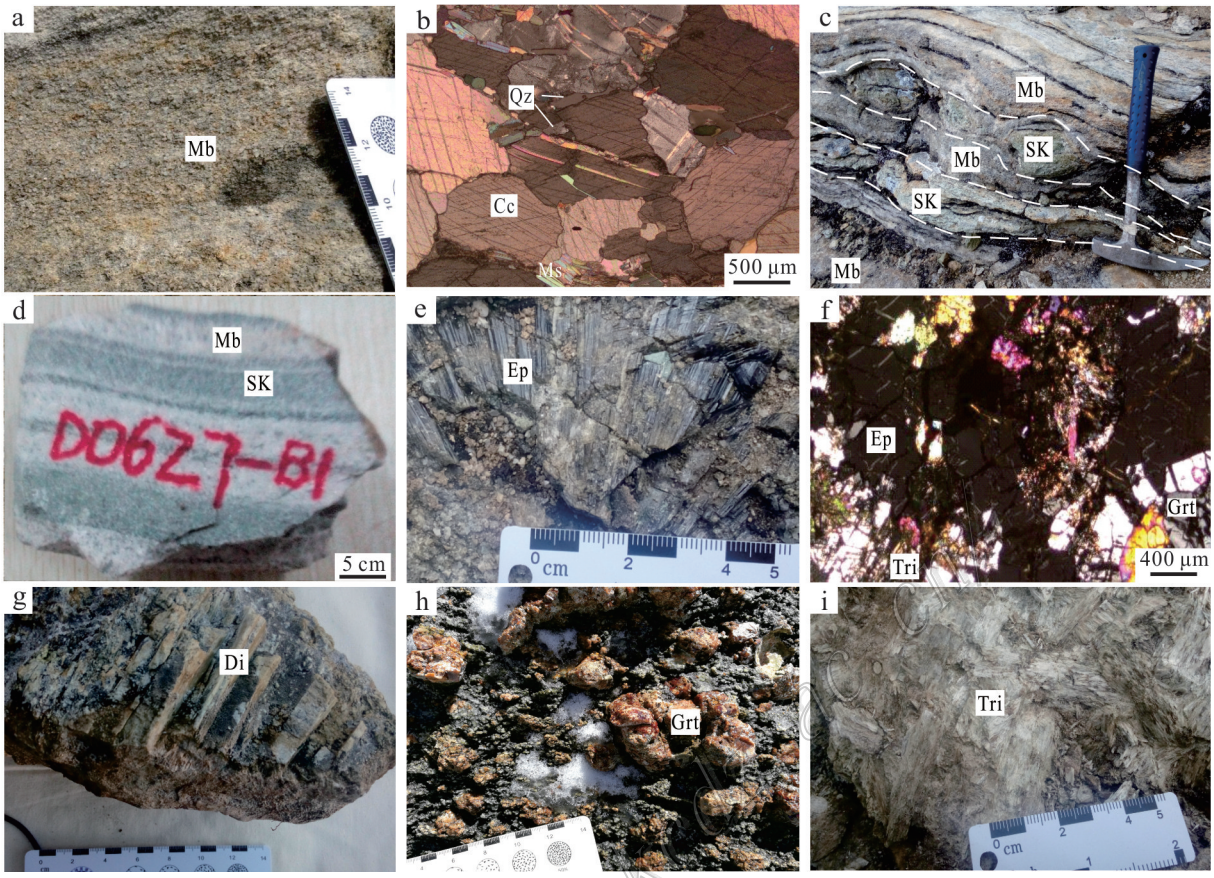

图 4 日纳矿区早古生代大理岩、矽卡岩照片

a.层状大理岩;b.大理岩中方解石与白云母共生,其间充填他形石英(+);c、d.条带状矽卡岩;e.绿帘石矽卡岩;f.显微镜下透闪石、石榴子石、绿帘石共生(+);g.透辉石矽卡岩;h.石榴子石矽卡岩;i.透闪石矽卡岩

Mb—大理岩;SK—矽卡岩;Qz—石英;Di—透辉石;Ep—绿帘石;Cc—方解石;Grt—石榴子石;Ms—白云母;Tri—透闪石

Fig. 4 Photos of Early Paleozoic marble and skarn in the Rina mining district

a. Bedded marbles; b. Microphotograph of marble showing calcite coexisting with muscovite, and quartz growing within the calcite grains (crossed nicols); c, d. Stripe skarn; e. Epidote skarn; f. Microphotograph of skarns showing tremolite and garnet coexisting with epidote (crossed nicols); g. Diopside skarn; h—Garnet skarn; i. Tremolite skarn

Mb—Marble; SK—Skarn; Qz—Quartz; Di—Diopside; Ep—Epidote; Cc—Calcite; Grt—Garnet; Ms—Muscovite; Tri—Tremolite

http://www.kcdz.ac.cn

著的分带结构,结晶粒度也不均匀。岩石灰白色,多伴有大量大小不一的绿柱石镶嵌产出。在个别“切层”放射状伟晶岩脉体与大理岩的接触面形成少量矽卡岩。

伟晶岩内碱交代作用发育,镜下原岩钾长石、斜长石,均有被钠质交代的现象。显微镜下可见,大量的钾长石发生了黏土化蚀变,并在原钾长石残晶的外围增生钠长石晶体;同样在钠长石晶体颗粒外围发育新生钠长石增生边。

少量伟晶岩脉中发育有绿柱石,表明在岩浆演化过程中伟晶岩脉自身携带有铍元素。含绿柱石的伟晶岩脉的围岩多为黑云母石英片岩和花岗质片麻岩;而围岩为矽卡岩化大理岩和矽卡岩的伟晶岩脉中难以见到绿柱石。在伟晶岩与大理岩外接触带发育矽卡岩,表明伟晶岩与大理岩发生了接触交代作用,矽卡岩中铍很可能来源于伟晶岩。

3.4 矽卡岩矿体地质特征

日纳矿区经地表工程控制,在两层矽卡岩化大理岩带内分别圈定出R1和R2铍铷矿体(图3,图7)。R1矿体位于二云母片岩内厚大的矽卡岩化大理岩内,矿体有分支复合现象,由7条地表工程控制,控制走向长度约4200 m,矽卡岩型铍铷矿体产状较为

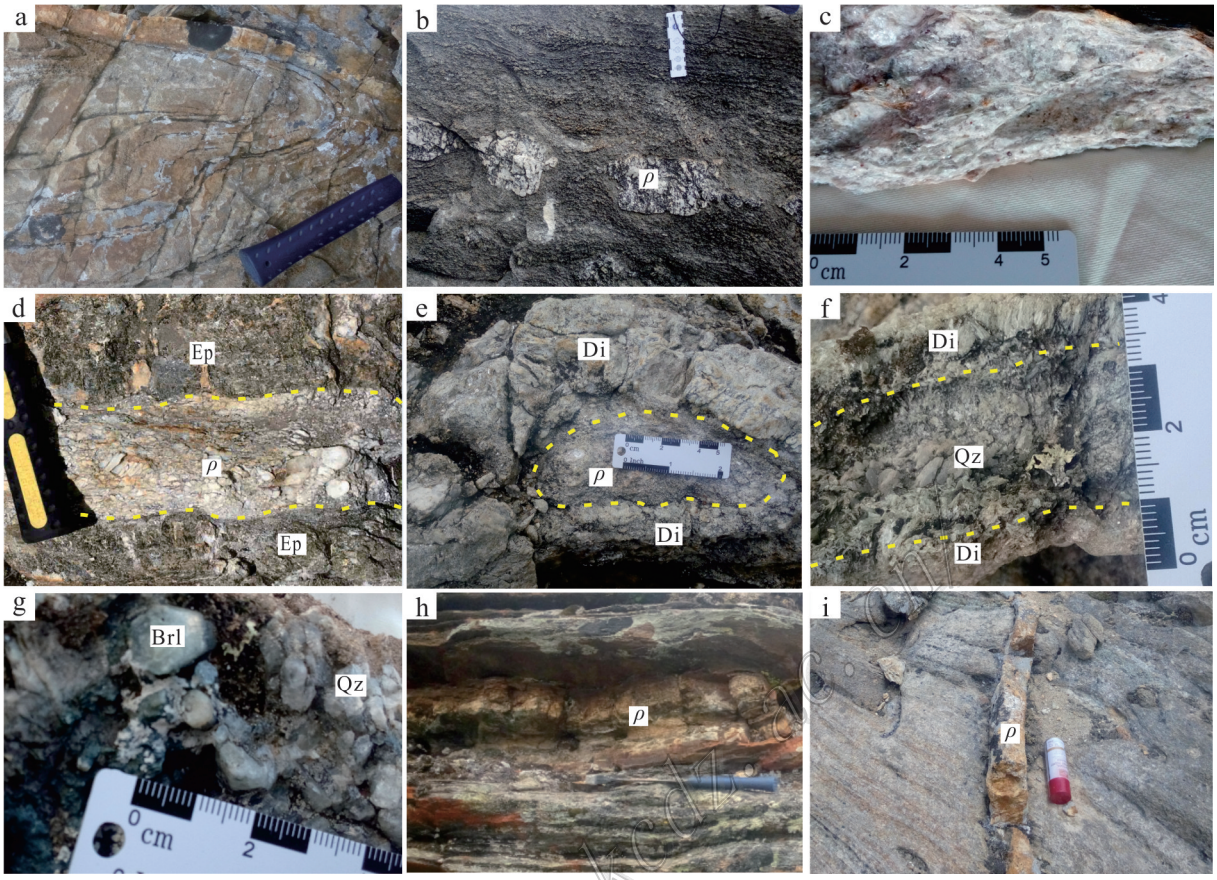

图 5　日纳矿区典型地质现象照片

a. 大理岩中发育鞘褶皱;b. 大理岩中伟晶岩形成石香肠构造;c. 含绿柱石伟晶岩脉中长石旋转碎斑;d. 伟晶岩脉两侧矽卡岩化;e. 似层状矽卡岩中伟晶岩残留体;f. 似层状矽卡岩中沿伟晶岩两侧矽卡岩矿物梳妆生长;g. 似层状矽卡岩中夹杂的伟晶岩脉中绿柱石与石英共生;h. 片岩内大致顺片理面侵入的伟晶岩;i. 大理岩内切层侵入的伟晶岩

ρ—伟晶岩脉;Ep—绿帘石;Di—透辉石;Qz—石英;Brl—绿柱石

Fig. 5　Representative photos of geological phenomena in Rina mining district

a. Sheath fold in marble; b. Boudinage structure composed of pegmatite in marble; c. The feldspar rotating in spots in (beryl) pegmatite vein; d. Skarn growing on both sides of the pegmatite dike; e. Skarn encasing pegmatite residues; f. Skarn minerals developed on both sides of pegmatite; g. Beryl associated with quartz in pegmatite dike of bedding invading the skarn; h. Pegmatite intruding roughly along schist bedding; i. Pegmatite intruding into the interbedding of marble

ρ—pegmatite vein; Ep—Epidote; Di—Diopside; Qz—Quartz; Brl—Beryl

http://www.kcdz.ac.cn

稳定,同时伴有钨、锂矿化,其他稀有金属铯、铌、钽矿化不明显。矿体厚度 1.88~11.64 m,BeO 品位 0.04%~0.20%,Rb_2O 品位 0.042%~0.11%,Li_2O 品位 0.01%~0.26%,WO_3 品位 0.001%~0.63%,Sn 品位 0.001%~0.03%。R2 矿体位于下拆离断层上部的矽卡岩化大理岩内,由 4 条地表工程控制,控制走向长度约 2300 m。矿体厚度 1.14~3.96 m,BeO 品位 0.042%~0.14%,Rb_2O 品位 0.042%~0.097%,见有微弱的白钨矿化。

矽卡岩中含铍矿物为硅铍石和羟硅铍石(图 6i),多赋存在矽卡岩矿物颗粒间。通过扫描电镜分析,发现了矽卡岩中存在大量微小(几微米到十几微米)的似晶石($Be_2[SiO_4]$),以及含水的铍硅石矿物——羟铍硅石($Be_4[Si_2O_7](HO)_2$)。显微分析表明 2 种富铍矿物可以共生,通过能谱分析可以区分,主要分布于硅酸盐矿物间隙或者呈硅酸盐矿物中的包裹体形式存在,与锡石等矿物共生。

矽卡岩中暂未发现独立的铷矿物,经电子探针分析铷作为伴生矿主要赋存在金云母中。

矽卡岩中的最主要的含钨矿物为白钨矿($CaWO_4$),

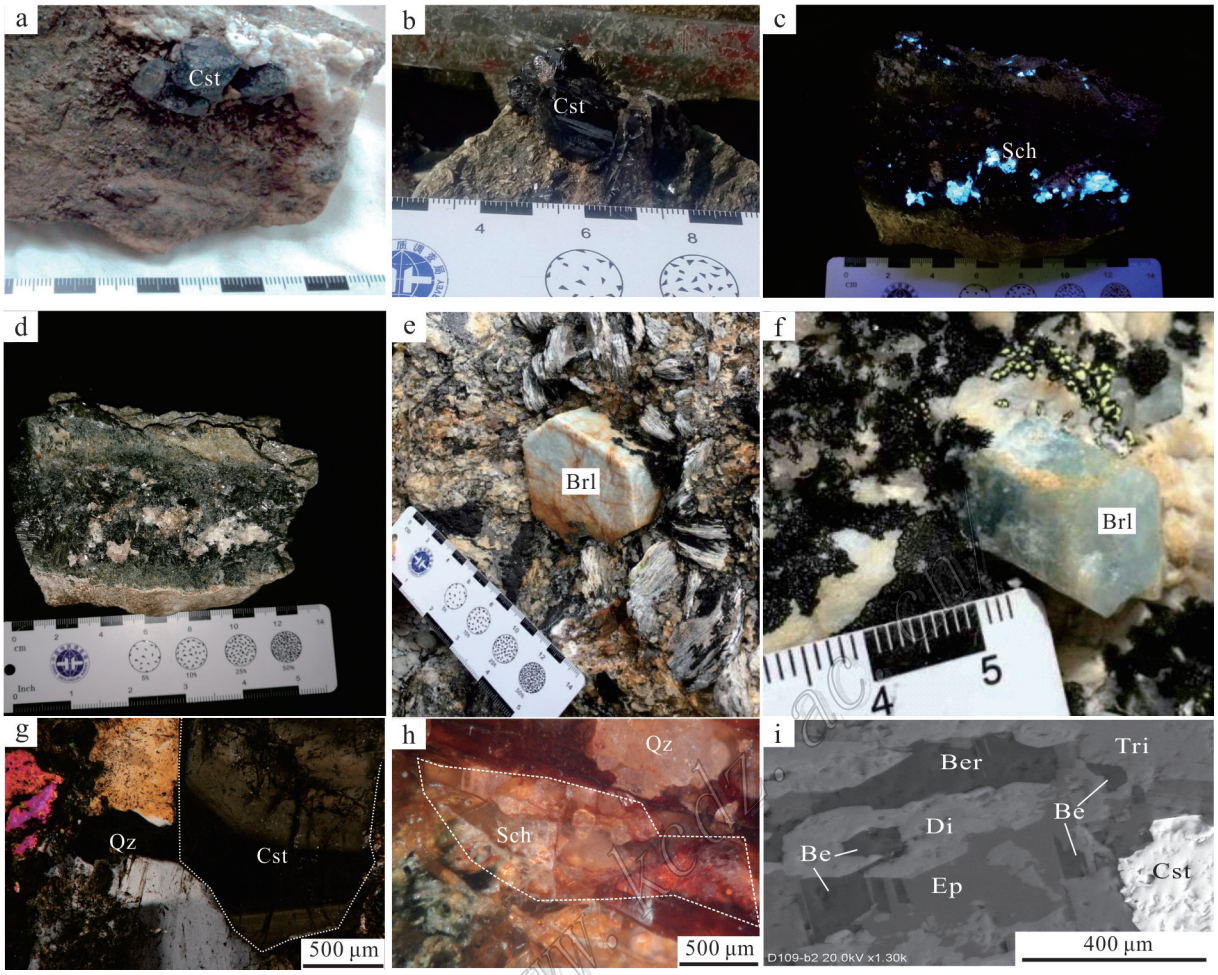

图6 日纳矿区稀有金属矿床矿石宏观及微观特征

a、b. 裂隙中的锡石呈自形状集合体产出；c. 钨灯下，矽卡中白钨矿发出天蓝色荧光；d. 自然光下的矽卡岩；e、f. 伟晶岩中绿柱石；g. 锡石与石英共生，且锡石具有结晶环带（正交偏光）；h. 白钨矿与石英共生，显示出强内反射特征（反射光）；i. 硅铍石和羟硅铍石是矽卡岩中重要的富Be矿物（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

Fig. 6 Macro- and micro-feature of ores in the Rina mining district

a, b. Euhedral cassiterite aggregates in fracture; c. Blue fluorescence of scheelite in skarns under fluorescent lamp; d. Skarn; e, f. Beryls within pegmatite showing typical hexagonal crystal shape; g. Cassiterite coexistent with quartz, and crystallized with fine zonation (crossed nicols); h. Scheelite coexistent with quartz showing strongly internal reflection (reflected light); i. Phenacite and bertrandite constituting important Be-bearing minerals in skarn (crossed nicols)

Cst—Cassiterite; Sch—Scheelite; Qz—Quartz; Brl—Beryl; Be—Phenacite; Ber—Bertrandite; Di—Diopside; Ep—Epidote; Tri—Tremolite

http://www.kcdz.ac.cn

钨物相分析结果显示，含钨的矿物中白钨矿占95.16%，黑钨矿占3.54%，钨华占1.30%。白钨矿在荧光灯下具有浅蓝色荧光特征（图6c），反射光表明白钨矿具有较强的内反射效应，颜色呈浅红到深褐色，集合体呈不规则粒状，油脂光泽（图6h），与石英、萤石、锡石等共生。

矽卡岩中的最主要的含锡矿物为锡石（SnO_2），锡物相分析结果显示，锡石中的锡占96.78%，硅酸盐中锡占1.38%，胶态锡中锡占1.12%。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6a、b）。显微镜下与石英共生（图6g），显示出环带性，具浅褐或略带红色，颜色分布不均匀，中心颜色稍深。能谱分析发现锡石呈不规则状与白钨矿、萤石共生。

矽卡岩作为赋矿岩石，严格控制矽卡岩型铍铷

矿体的产出(图 7),在厚大的矽卡岩内部或接触部位常见有伟晶岩脉。含矿伟晶岩脉与大理岩发生物质交换,Be、Rb、W 等元素在矽卡岩内富集成矿。伟晶岩在矽卡岩和类矽卡岩的形成过程中扮演着重要的角色,在岩浆演化的后期,伟晶岩岩浆携带大量成矿物质沿构造薄弱空间进入大理岩带,与大理岩发生交代作用,在外接触带附近形成矽卡岩,远离岩脉的部位形成类矽卡岩。矽卡岩化作用导致稀有金属元素在矽卡岩和类矽卡岩内富集。

3.5　伟晶岩脉矿化情况

针对含绿柱石的伟晶岩脉和不含绿柱石的伟晶岩脉分类取样,分析结果显示(表 1)含绿柱石的伟晶岩脉铍、铷能到边界品位以上,不含绿柱石的伟晶岩脉仅铷接近或达到边界品位。绿柱石是伟晶岩中的含铍矿物,但其含量不稳定,变化大。伟晶岩中铷以云母铷为主,少量赋存在长石中。伟晶岩脉多为铍、铷稀有金属的贫矿体或矿化体,含绿柱石的伟晶岩具有一定的找矿潜力。

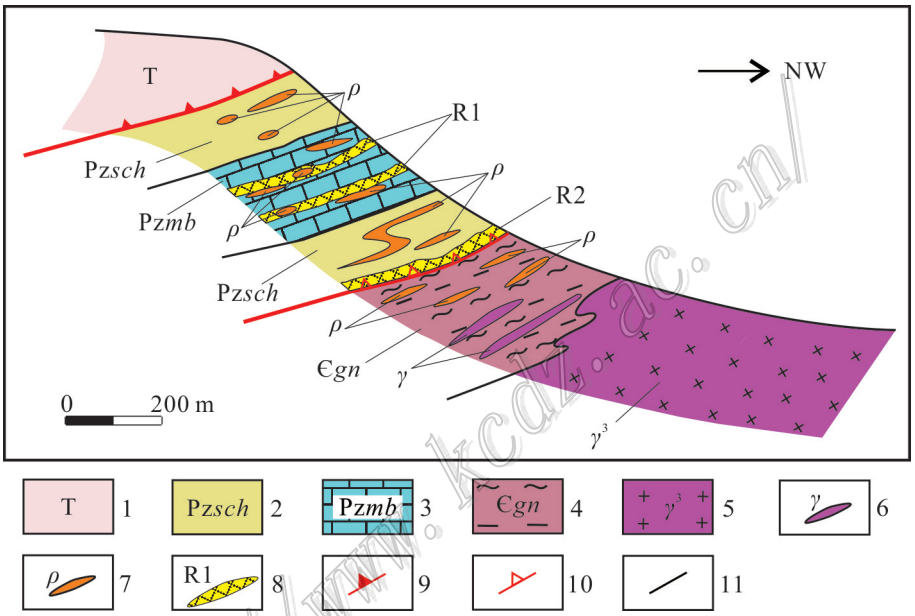

图 7　日纳矿区地质剖面示意图

1—三叠系砂岩、板岩;2—古生代二云母石英片岩;3—古生代矽卡岩化大理岩;4—寒武纪花岗质片麻岩;5—中新世(第三期)白云母花岗岩;6—花岗岩脉;7—伟晶岩脉;8—矽卡岩矿体及编号;9—上拆离断裂;10—下拆离断裂;11—地质界线

Fig. 7　Sketch geological section in the Rina mining district

1—Triassic sandstone and slate; 2—Paleozoic two mica quartz schist; 3—Paleozoic skarn marble; 4—Cambrian granitic gneiss; 5—Miocene (the third phase) muscovite granite; 6—Granite dike; 7—Pegmatite vein; 8—Skarn orebody and its serial number; 9—Upper detachment fault; 10—Lower detachment fault; 11—Geological boundary

表 1　日纳矿区伟晶岩脉稀有金属矿化情况

Table 1　Simplified table of rare metal mineralization in pegmatite veins in the Rina mining district

岩性	样品编号	w(B)/%					
		BeO	Li_2O	Rb_2O	Cs_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5
伟晶岩	Pm02-04-H01	0.0020	0.0076	0.0395	0.0014	0.0012	0.0002
伟晶岩	Pm02-02-H01	0.0033	0.0077	0.0417	0.0016	0.0005	0.0002
含绿柱石伟晶岩	D1527-H01	0.0515	0.0589	0.1076	0.0092	0.0062	0.0013
伟晶岩	D1527-H02	0.0062	0.0104	0.0360	0.0018	0.0017	0.0008
伟晶岩	D1527-H03	0.0055	0.0312	0.0629	0.0042	0.0054	0.0006
伟晶岩	D1527-H04	0.0210	0.0196	0.0392	0.0026	0.0077	0.0031
伟晶岩	D1527-H05	0.0201	0.0411	0.0647	0.0048	0.0077	0.0008

http://www.kcdz.ac.cn/

5 找矿方向

5.1 矿床类型

错那洞铍铷稀有金属矿有矽卡岩型、热液脉型和伟晶岩型3种矿床类型，以矽卡岩型为主。矽卡岩型稀有金属矿，矿体赋存在矽卡岩内，环错那洞穹隆均稳定产出，矿化以铍、铷为主，共生钨锡等有益组分。热液脉型稀有金属矿也是较为重要的矿化类型，但分布范围有限。矿体赋存在南北向张扭性构造体系内，其矿化除了铍、铷以外，特别富锡和钨，为锡矿的重要类型，可见锡石硫化物型矿化，硫化物以黄铁矿、磁黄铁矿为主，局部见少量闪锌矿、方铅矿，在错那洞北部的祥林矿区最为发育。伟晶岩型稀有金属矿在穹隆的幔部及核部均有零星分布，规模较小。矿体赋存在含绿柱石的伟晶岩脉内，目前暂未发现含绿柱石伟晶岩大脉。

5.2 找矿方向

通过对错那洞片麻岩穹隆日纳矽卡岩型稀有金属矿点的初步解剖和对错那洞铍铷稀有金属矿主要矿床类型的总结，基本明确了错那洞稀有金属矿的找矿方向。其中，铍矿主攻矿床类型为矽卡岩型铍铷稀有金属矿，含矿层位为穹隆幔部的矽卡岩、矽卡岩化大理岩。主要的找矿标志为矽卡岩，寻找典型矽卡岩型矿体是今后努力的方向，特别是含石榴子石、透辉石、硅灰石的矽卡岩，此类矽卡岩可能特别富铍。钨矿主攻矿床类型为矽卡岩型钨(锡)矿，含矿层位为穹隆幔部的矽卡岩、矽卡岩化大理岩。需要重点关注矽卡岩与岩脉、岩体的接触部位，或岩体近端的矽卡岩，这些部位可能特别富钨。此类矿床钨铍共生，不均匀伴有锡。主要找矿标志为矽卡岩、白钨矿。锡矿主攻矿床类型为锡石硫化物型矿床，矿体沿断裂充填，相对富锡，共生钨铍等。找矿方向重点关注穹隆后期的断裂带。主要找矿标志为断层破碎带、锡石、硫化物。

岩浆流体的交代作用、岩浆的热变质作用、动力变质流体的交代作用是成矿的关键，形成与错那洞高分异花岗岩及其结晶分异最晚阶段的伟晶岩有关的矽卡岩型、伟晶岩型、受断裂控制的热液脉型3种矿床类型。在主攻矽卡岩型矿床类型的同时，应充分考虑深部矿床类型可能存在变化，兼顾错那洞高分异花岗岩及其结晶分异最晚阶段的伟晶岩壳的含矿性评价。高分异花岗岩的伟晶岩壳可能是最重要的找矿靶区，具有巨大的找矿潜力。碱性长石花岗岩型稀有金属矿床和伟晶岩型稀有金属矿床也是下一步的需要关注的矿床类型。

岩体和伟晶岩脉中的钠化是重要的找矿标志。由淡色花岗岩引起的角岩化、层间滑脱构造、穹窿外围张扭性构造等是十分重要的控矿因素和找矿标志。

据资料显示，北喜马拉雅穹隆带上铍地球化学异常显著，存在明显的东西向异常带，可与滇西龙陵-贡山稀有金属成矿区连成带(李建康等，2017)，随着错那洞钨锡、铍铷稀有金属找矿的勘查示范，相继在错那洞穹隆西侧的空布岗、库局以及洛扎县拉隆、库拉岗日等地新发现穹隆构造及与错那洞相似的钨、锡、铍、铷稀有金属矿化显示，有望拉开北喜马拉雅铍铷等稀有金属找矿工作的大幕。

致 谢 在审稿过程中匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见，在野外地质调查过程中有幸得到了中国地质科学院矿产资源研究所唐菊兴研究员的指导和四川省核工业地质调查院李南昌工程师的帮助，在此一并表示衷心感谢！

References

Chen Z, Liu Y, Hodges K, Burchfiel B, Royden L and Deng C. 1990. The Kangmar dome: A metamorphic core complex in southern Xizang (Tibet)[J]. Science, 250(4987): 1552-1556.

Debon F, Fort P L, Sheppard S M F and Sonet J. 1986. The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic, and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section[J]. Journal of Petrology, 27(1): 219-250.

Gao L E, Zeng L S and Xie K J. 2011. Eocene high grade metamorphism and crustal anatexis in the North Himalaya Gneiss Domes, southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 56(36): 3078-3090(in Chinese with English abstract).

Gao L E, Zeng L S, Hou K J, Guo C L, Tang S H, Xie K J, Hu G Y and Wang L. 2013. Episodic crustal anatexis and the formation of Paiku composite leucogranitic pluton in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 58(27): 2810-2822(in Chinese with English abstract).

Gao L E and Zeng L S. 2014. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 130: 136-155.

Gu P Y, He S P, Li R S, Shi C, Dong Z C, Zha X F, Wu J L and Wang Y. 2013. Geochemical features and tectonic significance of granitic

gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes in southern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 756-768(in Chinese with English abstract).

Hu G Y, Zeng L S, Gao L E and Xie K J. 2011. Lanthanide kinked shape, similar to tetrad effect, observed in sub-volcanic rocks from Qiaga, southern Tibet, China[J].Geological Bulletin of China, 30(1): 82-94(in Chinese with English abstract).

Lee J, Hacher B R, Dinklage W S, Wang Y, Gans P, Calvert A, Wan J, Chen W, Blythe A E and Mcclelland W. 2000. Evolution of the Kangmar dome, southern Tibet: Structural, petrologic and thermochronologic constraints[J]. Tectonics, 19(5): 872-895.

Lee J, Hacker B and Wang Y. 2004. Evolution of North Himalayan gneiss domes: Structural and metamorphic studies in Mabja Dome, southern Tibet[J]. Journal of Structural Geology, 26(12): 2297-2316.

Lee J, Mcclelland W, Wang Y, Blythe A and Mcwilliams M. 2006. Oligocene-Miocene middle crustal flow in southern Tibet: Geochronology of Mabja dome[J]. Geological Society, London, Special Publications, 268(1):445-469.

Lee J and Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages[J]. Geology, 35(1): 45.

Leech M L. 2008. Does the Karakoram fault interrupt mid-crustal channel flow in the western Himalaya[J]?Earth and Planetary Science Letters, 276(3): 314-322.

Li D W, Liu D M, Liao Q A, Zhang X H and Yuan Y M. 2003. Definition and significance of the Lhagoi Kanggri metamorphic core complexes in Sagya, southern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 22(5): 303-307(in Chinese with English abstract).

Li G M, Zhang L K, Jiao Y J, Xia X B, Dong S L, Fu J G, Liang W, Zhang Z, Wu J Y, Dong L and Huang Y. 2017. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet[J]. Mineral Deposits, 36(4):1003-1008(in Chinese with English abstract).

Li J K, Zou T R, Wang D H and Ding X. 2017. A review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. Mineral Deposits, 36(4): 951-978(in Chinese with English abstract).

Lin B, Tang J X, Zheng W B, Leng Q F, Lin X, Wang Y Y, Meng Z , Tang P, Ding S,Xu Y F and Yuan M. 2016. Geochemical characteristics, age and genesis of Cuonadong leucogranite, Tibet[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(3): 391-406(in Chinese with English abstract).

Liu Z C, Wu F Y, Ding L, Liu X C, Wang J G and Ji W Q. 2016. Highly fractionated Late Eocene (~35 Ma) leucogranite in the Xiaru dome, Tethyan Himalaya, south Tibet[J]. Lithos, 240-243: 337-354.

Smit M A, Hacher B R and Lee J. 2014. Tibetan garnet records Early Eocene initiation of thickening in the Himalaya[J]. Geology, 42 (7): 591-594.

Xu Z Q, Yang J S, Liang F H, Qi X X, Liu F L, Zeng L S, Liu D Y, Li H B, Wu C L, Shi R D and Chen S Y. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages[J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (1): 1-12(in Chinese with English abstract).

Xu Z Q and Ma X X. 2015. The Chinese Phanerozoic gneiss domes: Subduction related type, collision-related type and combination type of subduction-collision[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3509-3523(in Chinese with English abstract).

Zeng L S, Liu J, Gao L E, Xie K J and Wen L. 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. Chinese Science Bulletin, 54(1): 104-112(in Chinese with English abstract).

Zeng L S, Gao L E, Tang S, Hou K, Guo C and Hu G. 2014. Eocene magmatism in the Tethyan Himalaya, southern Tibet[J]. Geological Society, London, Special Publications, 412:SP412. 8.

Zhang J J, Guo L and Zhang B. 2007. Structure and kinematics of the Yalaxiangbo dome in the northern Himalayan dome belt, China[J]. Chinese Journal of Geology, 42(01): 16-30(in Chinese with English abstract).

Zhang J J, Yang X Y, Qi G W and Wang D C. 2011. Geochronology of the Malashan dome and its application in formation of the Southern Tibet detachment system (STDS) and northern Himalayan gneiss domes (NHGD)[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(12): 3535-3544(in Chinese with English abstract).

Zhang J Y, Liao Q A and Li D W. 2003. Geochemical features of the high Himalayan leucogranites of Dingjie area, Tibet: Implication for magam sources[J]. Geological Science and Technology Information, 22(03): 9-14(in Chinese with English abstract).

Zhang Z, Zhang L K, Li G M, Liang W, Xia X B, Fu J G, Dong S L and Ma G T. 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[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(5): 754-766(in Chinese with English abstract).

Zhu D C, Xia Y, Qiu B B, Wang Q and Zhao Z D. 2013. Why do we need to propose the early Cretaceous Comei large igneous Province in southeastern Tibet[J]? Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3659-3670(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

高利娥,曾令森,谢克家. 2011. 北喜马拉雅片麻岩穹窿始新世高级变质和深熔作用的厘定[J]. 科学通报, 56(36):3078-3090.

高利娥,曾令森,侯可军,郭春丽,唐索寒,谢克家,胡古月,王莉. 2013. 藏南马拉山穹窿佩枯错复合淡色花岗岩体的多期深熔作用[J]. 科学通报,58(27):2810-2822.

辜平阳,何世平,李荣社,时超,董增产,查显锋,吴继莲,王轶. 2013. 藏南拉轨岗日变质核杂岩核部花岗质片麻岩的地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报,29(3):756-768.

胡古月,曾令森,高利娥,谢克家. 2011. 藏南隆子地区恰嘎流纹质次火山岩稀土元素类似四分组效应[J]. 地质通报,30(1): 82-94.

http://www.kcdz.ac.cn/

李德威,刘德民,廖群安,张雄华,袁晏明. 2003. 藏南萨迦拉轨岗日变质核杂岩的厘定及其成因[J]. 地质通报,22(05):303-307.

李光明,张林奎,焦彦杰,夏祥标,董随亮,付建刚,梁维,张志,吴建阳,董磊,黄勇. 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[J]. 矿床地质,36(4):1003-1008.

李建康,邹天人,王登红,丁欣. 2017. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质,36(4):951-978.

林彬,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林鑫,王艺云,孟展,唐攀,丁帅,徐云峰,袁梅. 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[J]. 岩石矿物学杂志,35(3):391-406.

许志琴,杨经绥,梁风华,戚学祥,刘福来,曾令森,刘敦一,李海兵,吴才来,史仁灯,陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录[J]. 岩石学报,21(1):1-12.

许志琴,马绪宣. 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片麻岩穹窿(群)[J]. 岩石学报,31(12):3509-3523.

曾令森,刘静,高利娥,谢克家,文力. 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[J]. 科学通报,54(1):104-112.

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[J]. 地质科学,42 (1):16-30.

张进江,杨雄英,戚国伟,王德朝. 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[J]. 岩石学报,27(12):3535-3544.

张金阳,廖群安,李德威. 2003. 西藏定结地区高喜马拉雅淡色花岗岩的地球化学特征与岩浆源区研究[J]. 地质科技情报,22(3):9-14.

张 志,张林奎,李光明,梁维,夏祥标,付建刚,董随亮,马国桃. 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[J]. 地球学报,38(5):754-766.

朱弟成,夏瑛,裘碧波,王青,赵志丹. 2013. 为什么要提出西藏东南部早白垩世措美大火成岩省[J]. 岩石学报,29(11):3659-3670.

http://www.kcdz.ac.cn/