

云南省铍矿床成矿规律初探

张传昱^{1,2,3}, 曹晓民^{2,3}, 李文昌^{1,2,4}, 唐忠^{1,2,3}, 余海军^{1,2,3}, 陈曹军^{2,3},
程涌^{1,5}, 李蓉^{2,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 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. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216; 4. 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 5. 昆明冶金高等专科学校, 云南 昆明 650033)

摘要: 云南省铍矿床主要类型为伟晶岩型、岩浆热液脉型、蚀变花岗岩型和云英岩型等4类, 其中, 以前3类最为重要, 占云南省铍资源总量的95%以上。铍矿床在成因上与壳源高分异花岗岩关系紧密, 空间上主要分布在滇东南个旧、都龙地区和滇西高黎贡山、香格里拉地区。矿床的形成时代在滇东南地区为晚白垩世, 在滇西地区为渐新世。滇东南铍成矿作用是对燕山晚期华南西部岩石圈伸展的响应, 而滇西铍成矿的动力学背景则是印度大陆与欧亚大陆碰撞造山作用。在此基础上提出贡山-腾冲-盈江、龙陵和马关-麻栗坡3个找矿远景区, 在这3个远景区应以寻找伟晶岩型铍矿为主要方向。

关键词: 铍矿; 关键矿产; 成矿规律; 云南省

中图分类号: P618.72; P612

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0452-13

A preliminary study of metallogenic regularity of beryllium deposits in Yunnan Province

ZHANG Chuan-yu^{1,2,3}, CAO Xiao-min^{2,3}, LI Wen-chang^{1,2,4}, TANG Zhong^{1,2,3}, YU Hai-jun^{1,2,3},
CHEN Cao-jun^{2,3}, CHENG Yong^{1,5} and LI Rong^{2,3}

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. MNR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, China; 3. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China; 4. Chengdu Geological Survey Center, Chengdu 610081, China; 5. Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China)

Abstract: The main types of beryllium deposits in Yunnan Province include pegmatite type, magmatic-hydrothermal vein type, altered granite type and greisen type. The pegmatite type, magmatic-hydrothermal vein type and altered granite type are the most important types of deposits, which account for more than 95% of the total resources of beryllium in Yunnan Province. These deposits are closely related to the high-differentiation granite of crust source and mostly distributed in Gejiu and Dulong regions in southeast Yunnan as well as in Gaoligong Mountain and Shangri-la regions in western Yunnan. The deposits were formed in the late Cretaceous in southeast Yunnan and Oligocene in west Yunnan. Beryllium mineralization in southeast Yunnan resulted from a response to lithospheric extension in western South China in late Yanshanian period. The geodynamic background of beryllium minerali-

收稿日期: 2020-09-25; 接受日期: 2021-01-11; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 云南省科技计划项目(2019FD065, 2019FA018); 云南省科学技术奖-杰出贡献奖项目(2017001); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0771)

作者简介: 张传昱(1988-), 男, 工程师, 主要从事成矿规律与成矿预测研究, E-mail: chuanyu.zhang@foxmail.com。

zation in western Yunnan seems to have been the collision orogeny between the Indian and Eurasian continents. In this paper, the authors propose three prospecting areas, namely Gongshan-Tengchong-Yingjiang, Longling and Maguan-Malipo prospective areas. In the three prospective areas, researchers should focus on finding pegmatite-type beryllium deposits.

Key words: beryllium deposits; critical mineral resources; metallogenic regularity; Yunnan Province

Fund support: Yunnan Science and Technology Planning Project (2019FD065, 2019FA018); Commonwealth Project from Yunnan Science and Technology Department (2017001); Scientific Research Fund Project of Education Office of Yunnan Province (2020J0771)

铍是一种广泛应用于航空航天、原子能、计算机、智能手机、汽车以及冶金工业等领域的稀有金属,具有耐极端温度和高导热性等特有物化性能,被称为“超级金属”,是极为稀缺的重要战略资源。全球铍资源分布较集中,美国拥有资源及技术的双重优势,而我国铍资源储量有限且品位较低,对外依存度居高不下(王登红等, 2017, 2019; 梁飞, 2018; 王登红, 2019; 翟明国等, 2019; 李娜等, 2019)。随着我国高新技术产业的蓬勃发展,对铍的需求量与日俱增,因此,加强对铍资源的调查研究与找矿勘查已经迫在眉睫。

国际上对铍矿床的研究在 20 世纪 70~80 年代有过一轮热潮,主要是前苏联和美国学者对铍矿床开展了综合分类和一些基础性研究工作(李建康等, 2017a)。近些年来,随着铍资源的需求不断增长,铍矿床的研究被重新重视起来,国内外学者在铍矿床的成矿物质来源(Foley *et al.*, 2016)、流体特征(Borovikov *et al.*, 2016; Damdinova *et al.*, 2019)、成矿时代(Jia *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; 代鸿章等, 2019; Ayuso *et al.*, 2020; 马骏等, 2020)、矿床成因(Schilling *et al.*, 2015; Ding and Li, 2016; Dailey *et al.*, 2018; 杨富全等, 2018; 文春华等, 2019; 朱艺婷等, 2019)、矿化分带(Damdinova *et al.*, 2015)以及矿床类型划分(Barton and Young, 2002; Bulnaev, 2006; 李建康等, 2017a)等方面开展了大量研究工作。

目前,我国有 16 个省(区)探明有铍矿资源,其中新疆、内蒙古、四川和云南四省(区)的储量约占总储量的 88%(李建康等, 2017a)。然而,铍矿作为云南省的优势矿种,勘查和研究程度总体偏低,前人虽对云南省伟晶岩和含铍宝石矿的分布特征及成因方面做过较多研究(高子英等, 1993; 柏万灵, 1994; 孙克祥, 1996; 张世涛等, 1999; 张良钜等, 1999; 李

文等, 2002; 张金富等, 2003; 王登红等, 2004; 李兆麟等, 2007; 李再会等, 2014; 陶琰等, 2015; 李建康等, 2017b; 张振发等, 2018),但对铍矿床的研究较少,王登红等(2017)认为云南南秧田钨矿和麻花坪钨铍矿铍资源潜力巨大,值得重视;李建康等(2017a)简单概括了滇西南和滇东南铍成矿带的矿化特征和找矿方向。此外,前人对个别矿床开展过成矿地质特征、流体包裹体以及年代学等方面的研究(冉明佳等, 2011; 邢永辉等, 2014; 熊风等, 2015; 贾福东等, 2020; 马骏等, 2020)。本文在系统梳理云南省铍矿产地的基础上,从铍矿成矿地质背景及控矿因素角度出发,分析了铍矿床的主要类型,总结了铍矿床的时空分布特征和形成规律,为云南省铍矿后续找矿工作提供参考。

1 云南省铍资源概况

云南省铍矿资源量位于全国前列,到目前为止全省共发现含铍矿产地 30 余处,其中大型矿床 1 处($10\ 000\ \text{t} < \text{BeO}$ 储量 $\leq 40\ 000\ \text{t}$),中型矿床 2 处($2\ 000\ \text{t} \leq \text{BeO}$ 储量 $< 10\ 000\ \text{t}$),小型矿床 8 处(BeO 储量 $< 2\ 000\ \text{t}$),还有矿点 20 余处(表 1)。在已探明的矿床中,中型以上矿床的储量占总储量的比例为 85%,其中大型占 50%。基于 Barton 和 Young (2002)的分类方法,按成矿岩浆系统的铝饱和指数(ACNK)可将内生铍矿床分为 3 大类,分别为过铝性($\text{ACNK} > 1.0$, $A > \text{CNK}$)、偏铝性($\text{ACNK} < 1.0$, $A > \text{CNK}$)和碱性($\text{ACNK} < 1.0$, $A < \text{CNK}$)成矿系统。云南省铍矿床在大类上均属于过铝性成矿系统,按成因又可分为伟晶岩型、岩浆热液脉型、蚀变花岗岩型和云英岩型,其中以前 3 者为主,集中分布在滇东南和滇西地区(图 1)。

表 1 云南省主要铍矿产地一览表

Table 1 The list of major beryllium ore areas in Yunnan Province

编号	位置	矿床名称	矿种组合	矿床类型	矿床规模	成岩年龄/Ma	成矿年龄/Ma
1	滇西	香格里拉麻花坪	W-Be	岩浆热液脉型	大型		石英 ESR 法: 21.5 (冉明佳等, 2011); 白云母 Ar-Ar 法: 24 (李建康等, 2017a)、34.89±0.34 (Jia <i>et al.</i> , 2018)、32.06±0.11 (马骏等, 2020)
2		贡山普拉底	Be	伟晶岩型	小型		
3		泸水石缸河	Sn-W-Be	云英岩型	矿点		
4		腾冲宝华山	Be-Nb-Ta-Li-Sn	伟晶岩型	小型		
5		盈江卡场	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	矿点		
6		陇川麻栗脑	Be	伟晶岩型	小型		
7	滇西	梁河章巴	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	矿点		
8		龙陵回欢	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	小型		
9		龙陵达摩山-黄草坝	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	矿点		
10	滇西	龙陵黄连沟	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	中型	锆石 U-Pb 法: 60.9±1.4 (Chen <i>et al.</i> , 2007)、59.9±2.7 (陶球等, 2015)	白云母 Ar-Ar 法: 30.8±1.8、31.51±2.4 (王登红等, 2005)、28 (李建康等, 2019)
11		龙陵大坡	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	小型		
12	滇西	龙陵茅草寨	Be-Nb-Ta	伟晶岩型	矿点		
13		凤庆慈园	Be	伟晶岩型	矿点		
14		西盟马散	Be	伟晶岩型	矿点		
15	滇东南	个旧牛屎坡	Sn-Be	蚀变花岗岩型	中型	锆石 U-Pb 法: 81.0±0.52、83.0±0.35 (Cheng and Mao, 2010); 81.7±0.60 (张颖等, 2011)	
16	滇东南	个旧老厂	Sn-W-Be	岩浆热液脉型	小型	全岩 Rb-Sr 法: 81.0±4.9 (伍勤生等, 1984); 锆石 U-Pb 法: 850±0.85 (程彦博等, 2008)、83.3±1.6 (程彦博等, 2009)	白云母 Ar-Ar 法: 82.7±0.7 (杨宗喜等, 2009)、88.7~85.5 (Cheng <i>et al.</i> , 2013)
17	滇东南	马关炭窑	Be	蚀变花岗岩型	小型	锆石 U-Pb 法: 87.6±1.4 (李进文等, 2013)	
18	滇东南	麻栗坡瓦渣	W-Be	伟晶岩型	小型	锆石 U-Pb 法: 83.3±1.5 (冯佳睿等, 2010)、86.66±0.42 (Feng <i>et al.</i> , 2013)、87.5±0.6 (Zhao <i>et al.</i> , 2018)	
19	滇东南	麻栗坡大丫口	Be	伟晶岩型	矿点		

注:表中除年龄数据外,均源于云南省地质矿产局(1993)^①。

2 铍矿床地质特征

2.1 伟晶岩型

伟晶岩型是重要的铍矿床类型,该类型矿床数量占云南省铍矿总数的 80% 以上,其中较为典型的有龙陵黄连沟铍矿(图 2)和腾冲宝华山铍矿。

伟晶岩型铍矿床在成因上常与燕山晚期-喜马

拉雅期高侵位花岗岩有关。含矿伟晶岩主要分布于花岗岩体的内外接触带,矿田或较大脉群常受背斜轴部压扭性断裂带控制。分布于内接触带的伟晶岩脉主要沿花岗岩的原生节理、裂隙充填,分布于外接触带的伟晶岩脉主要沿地层围岩中的片理、构造裂隙、层间剥离带贯入。伟晶岩脉形态多呈脉状,其次有板状、透镜状、巢状等。多数岩脉较规则,部分形态复杂,常见分叉、复合、膨大、收缩现象(云南省地

① 云南省地质矿产局. 1993. 云南省区域矿产总结.

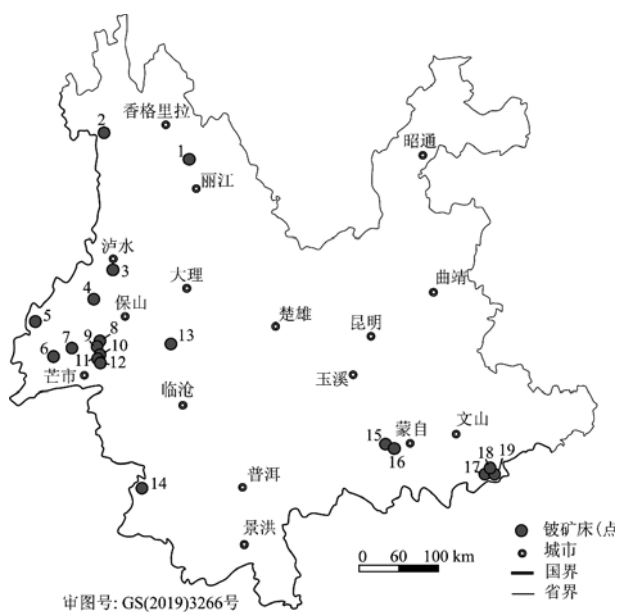


图1 云南省主要铍矿床(点)分布图(铍矿床编号与表1对应)

Fig. 1 The distribution of main beryllium deposits in Yunnan Province (the number of beryllium deposits correspond to Table 1)

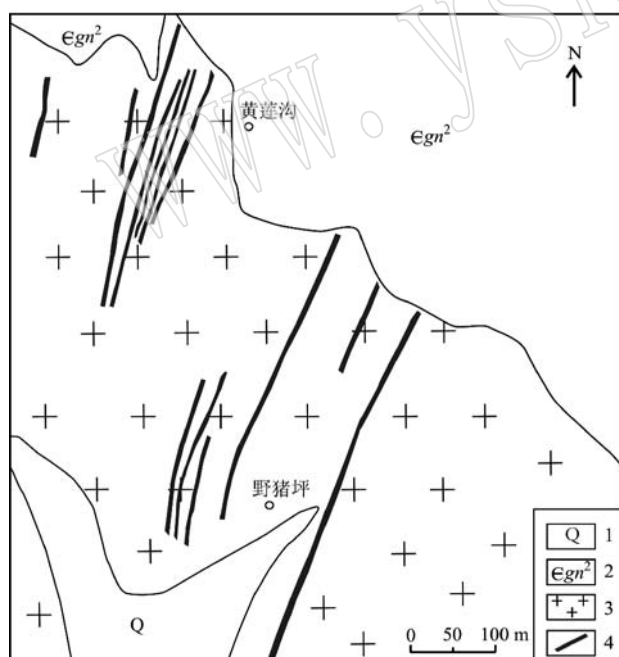


图2 黄连沟铍矿黄家寨矿段地质简图(据邢永辉等, 2014)

Fig. 2 Geological sketch map of Huangjiazhai ore block of the Huangliangou beryllium deposit (after Xing Yonghui et al., 2014)

1—第四系; 2—变质砂岩板岩; 3—燕山期花岗岩; 4—矿体

1—Quaternary; 2—metamorphic sandstone and slate;

3—Yanshanian granite; 4—orebody

质矿产局, 1993)^①, 脉长一般 30~200 m, 最长可达 1 000 余米, 厚度一般 3~8 m, 最厚可达 40 m。在黄连沟铍矿床中, 含矿伟晶岩按长石及云母含量不同可分为 5 类: ① 微斜长石-白云母型伟晶岩; ② 钠长石-微斜长石-白云母伟晶岩; ③ 钠长石-白云母伟晶岩; ④ 钠长石-铁锂云母伟晶岩; ⑤ 细粒长英岩。

伟晶岩脉中主要造岩矿物有微斜长石、钠长石、石英、白云母; 副矿物有锰铝榴石、磷灰石、黄玉等; 稀有金属矿物种类丰富, 主要有绿柱石、铌钽铁矿、锰铌铁矿、锰钽铁矿、锰钽矿、铌铁金红石、黑稀金矿、细晶石、钽锡矿、锂辉石、锆石、独居石、磷钇矿、铯榴石等(邢永辉等, 2014; 陶琰等, 2015)。伟晶岩型铍矿围岩蚀变强烈, 主要有钠长石化、电气石化、硅化、黄玉化, 局部发育绿泥石化、褐铁矿化和高岭土化, 其中钠长石化与铍矿化关系最密切, 钠长石化强烈地段往往就是矿化富集部位。

2.2 岩浆热液脉型

云南省岩浆热液脉型铍矿数量较少, 但资源量巨大, 以香格里拉麻花坪大型钨铍矿为代表, 其查明资源量占云南省铍资源量一半以上。此外, 在个旧地区的老厂岩体附近也有此类型矿床发育, 但规模不大。

麻花坪钨铍矿区位于金沙江构造带玉龙雪山-哈巴雪山复背斜核部, 区内主要断裂为呈南北向展布的层间断裂带, 断裂东侧出露地层主要为下泥盆统云母石英片岩、石英岩, 西侧出露地层为中上泥盆统大理岩、白云质大理岩。矿区地表除云煌岩脉外, 未见酸性岩浆岩出露, 但深部可能存在隐伏花岗岩体(马骏等, 2020)。铍矿化发育于断裂西侧的碳酸盐岩地层中(图 3), 矿化石英脉沿大理岩底部发育的破劈理和裂隙充填, 形成楔形和似层状矿体(图 4)。马骏等(2020)对麻花坪钨铍矿中萤石矿物内的流体包裹体进行了显微测温 and 流体成分研究, 结果表明, 成矿流体为富 CO_2 和 F 的中低温、低盐度流体。

矿石中金属矿物主要有白钨矿、绿柱石、蓝柱石, 少量黑钨矿、硅铍石、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等, 非金属矿物主要为方解石, 次为萤石、白云石, 少量石英。矿石结构常见变余镶嵌粒状变晶结构、交代包含嵌晶结构、交代溶蚀结构、交代残余结构、交代

① 云南省地质矿产局. 1993. 云南省区域矿产总结.

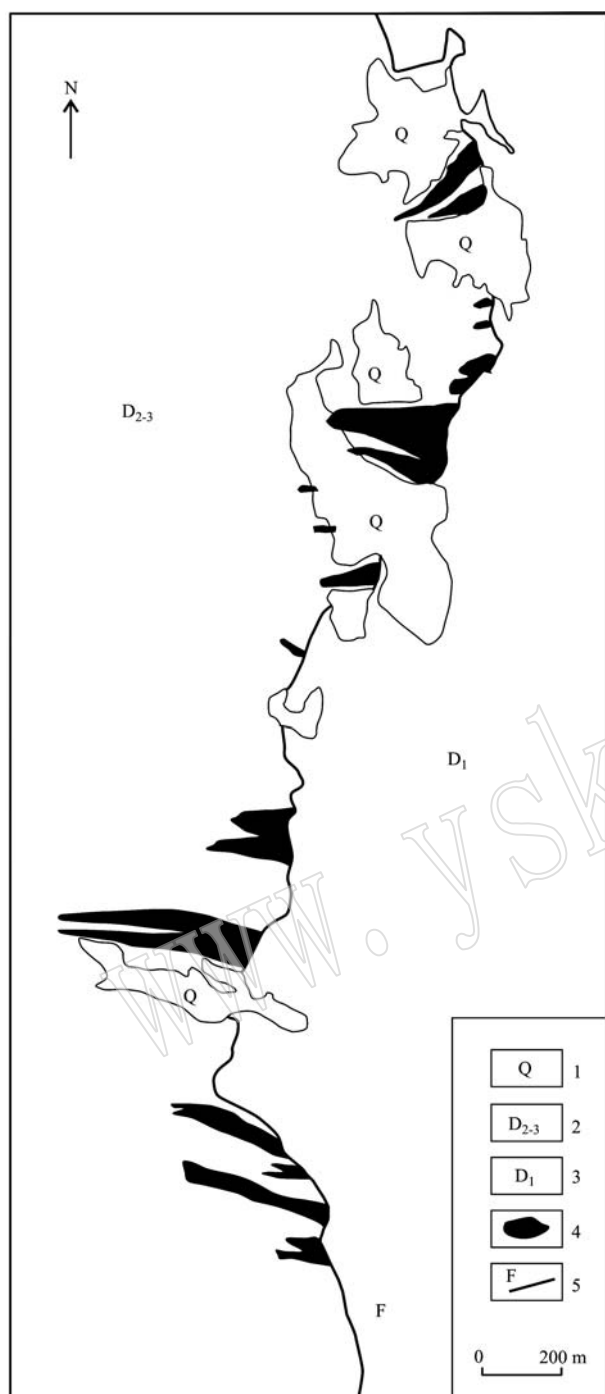


图3 香格里拉麻花坪钨铍矿地质简图(据冉明佳等, 2011)

Fig. 3 Geological sketch map of the Mahuaping W-Be deposit in Shangri-la (after Ran Mingjia *et al.*, 2011)

1—第四系; 2—中上泥盆统大理岩; 3—下泥盆统绢云粉砂岩;
4—矿体; 5—断层

1—Quaternary; 2—Middle-Upper Devonian marble; 3—Lower Devonian sericite siltstone; 4—orebody; 5—fault

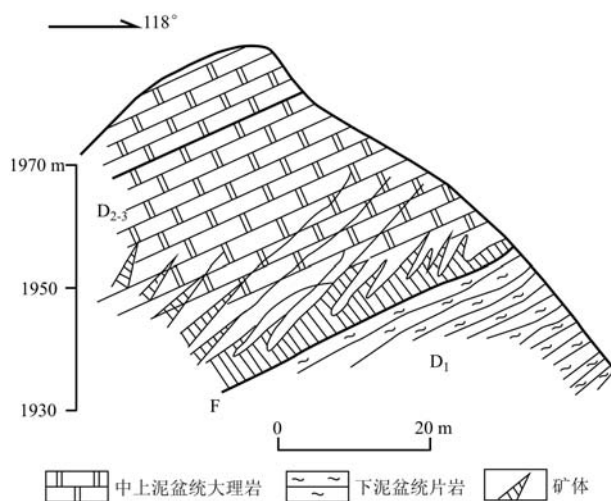


图4 麻花坪矿区矿体形态剖面图(据冉明佳等, 2011)

Fig. 4 The profile of orebodies in the Mahuaping W-Be deposit (after Ran Mingjia *et al.*, 2011)

骸晶结构。矿石构造主要有近平行的密集微细脉状构造、斑块状构造、纹层状构造,次为对称似条带状构造、梳状-对称梳状构造、晶簇构造等(冉明佳等, 2011; 熊凤等, 2015)。

围岩蚀变以硅化、白云母化、萤石化为主,次有黄铁矿化、菱铁矿化及高岭土化,其中白云母化和萤石化与矿化富集关系密切。

2.3 蚀变花岗岩型

云南省蚀变花岗岩型铍矿床分布广泛,空间上往往与伟晶岩型铍矿相伴。成矿岩浆岩种类一般有白云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母碱性花岗岩及钠化花岗岩岩。此类岩体属复式岩基晚期的高侵位花岗岩,一般规模不大,多为岩株状。铍矿化多发育于岩体顶部及边部的断裂、裂隙中。矿体主要呈巢状、透镜状及脉状产出,一般规模不大。典型矿床有个旧牛屎坡铍矿和马关炭窑铍矿。

该类型铍矿床中造岩矿物主要有微斜长石、条纹长石、钠长石、黑云母、白云母、石英、锰铝榴石、黄玉、高岭石。副矿物有锡石、黑钨矿、锆石、金红石、磷钼矿、独居石等。稀有金属矿物主要有绿柱石、铌钽铁矿、黑稀金矿、锂云母等。有用矿物呈浸染状、星散状、斑点状分布在造岩矿物间(云南省地质矿产局, 1993)^①。此类铍矿床普遍蚀变发育,其中钠长石化与矿化相关性最好,钠长石化强烈部位往往即为

① 云南省地质矿产局. 1993. 云南省区域矿产总结.

矿体,其他蚀变常见钾长石化、云英岩化、白云母化、电气石化以及后期的绢云母化、高岭土化等。

3 铍矿床成矿规律

3.1 铍矿床空间分布特征

云南省铍矿资源分布不均衡,空间上主要集中在滇东南个旧、都龙地区和滇西高黎贡山、香格里拉地区。

滇东南地区铍矿类型以伟晶岩型和蚀变花岗岩型为主。区内铍矿产出于燕山晚期花岗岩体周缘,围绕个旧和都龙两个复式花岗岩体分布有多个不同类型的铍矿床(点),如瓦渣伟晶岩型铍矿、炭窑蚀变花岗岩型铍矿、个旧牛屎坡蚀变花岗岩型铍矿(图5)。

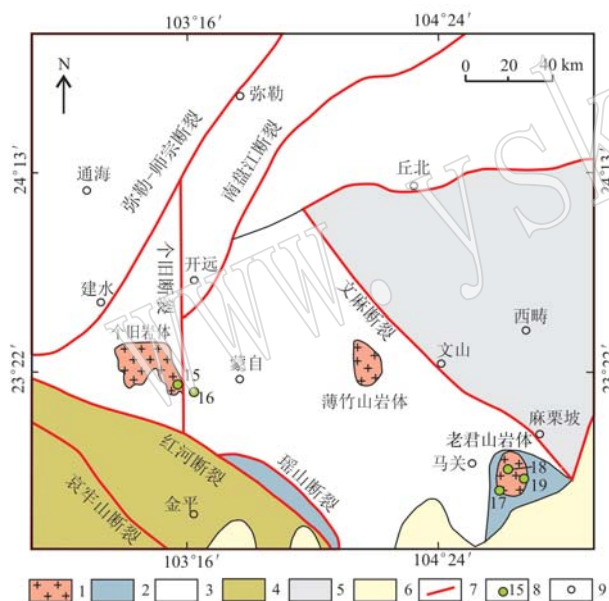


图5 滇东南地区铍成矿带地质简图[据周建平(1997)、李开文等(2013)修改]

Fig. 5 Geological sketch map of the beryllium metallogenic belt in southeast Yunnan(modified after Zhou Jianping *et al.*, 1997; Li Kaiwen *et al.*, 2013)

1—燕山期花岗岩; 2—基底片麻岩; 3—扬子陆块; 4—哀牢山地块; 5—华南褶皱系; 6—越北古陆; 7—断层; 8—铍矿床(编号与表1对应); 9—城市

1—Yanshanian granite; 2—basement gneiss; 3—Yangtze block; 4—Ailao Mountain block; 5—South China fold system; 6—North Vietnam old land; 7—fault; 8—beryllium deposit (the number of beryllium deposits correspond to Table 1); 9—city

滇西地区铍矿类型以伟晶岩型为主,分布于高黎贡山伟晶岩带、西盟伟晶岩带、凤庆-临沧伟晶岩带、石鼓伟晶岩带、哀牢山伟晶岩带(图6)。其中,高黎贡山伟晶岩带中铍矿床分布最广、规模最大,可分为北、中、南3段,北段和南段铍矿产出较多,北段代表性矿产地有贡山普拉底白云母绿柱石矿和贡山独龙底绿柱石矿;南段伟晶岩脉数量较多,脉长100~1000 m,厚3~20 m(高子英等,1993),铍矿床大量集中产于腾冲—梁河、龙陵一带,其中规模较大、具代表性的有腾冲宝华山稀有多金属矿、龙陵黄

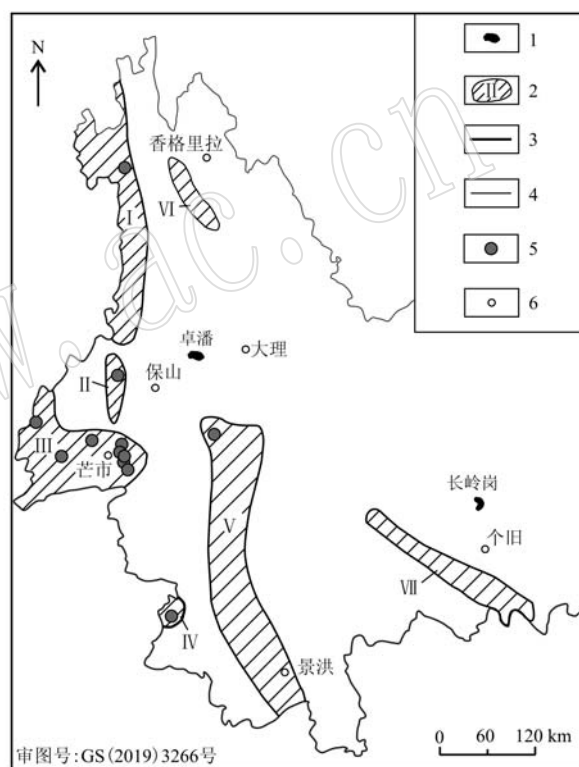


图6 滇西花岗伟晶岩分布示意图[据高子英等(1993)修改]

Fig. 6 Distribution of granitic pegmatite in western Yunnan (after Gao Ziying *et al.*, 1993)

1—碱性正长岩; 2—伟晶岩带及编号; 3—国界; 4—省界; 5—伟晶岩型铍矿; 6—城市; I—高黎贡山北段伟晶岩带; II—高黎贡山中段伟晶岩带; III—高黎贡山南段伟晶岩带; IV—西盟伟晶岩带; V—凤庆-临沧伟晶岩带; VI—石鼓伟晶岩带; VII—哀牢山南段伟晶岩带

1—alkali syenite; 2—pegmatite belt and its serial number; 3—national boundaries; 4—provincial boundaries; 5—pegmatite type beryllium; 6—city; I—northern Gaoligong Mountain pegmatite belt; II—middle Gaoligong Mountain pegmatite belt; III—southern Gaoligong Mountain pegmatite belt; IV—Ximeng pegmatite belt; V—Fengqing-Lincang pegmatite belt; VI—Shigu pegmatite; VII—southern Ailao Mountain pegmatite belt

连沟铍矿、龙陵回欢铍矿等。哀牢山南段伟晶岩脉产于花岗岩体与哀牢山群变质岩的外接触带,脉长几米~150 m,厚 5~15 m(高子英等,1993)。该带内产出非常多的绿柱石矿点,少量达到宝石级,如元阳诰封碑宝石矿、元阳核桃树海蓝宝石矿等。此外,滇西地区金沙江构造带内还产出以香格里拉麻花坪钨铍矿为代表的岩浆热液脉型铍矿,矿床数量少但规模巨大,是一种重要的铍矿化类型。

3.2 铍矿床成矿时代

在个旧牛屎坡铍矿区,与铍矿成矿关系密切的岩体为隶属于个旧复式岩基的神仙水岩体。神仙水岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 81.0±0.52、83.0±0.35(Cheng and Mao, 2010)和 81.7±0.60 Ma(张颖等,2011)。与个旧老厂锡铍矿相关的岩体为同样属于个旧复式岩基的老厂岩体,其全岩 Rb-Sr 年龄为 81.0±4.9 Ma(伍勤生等,1984),LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 85.0±0.85(程彦博等,2008)和 83.3±1.6 Ma(程彦博等,2009)。老厂锡铍矿与成矿关系密切的白云母 Ar-Ar 年龄为 82.7±0.7(杨宗喜等,2009)和 85.5~88.7 Ma(Cheng *et al.*, 2013)。麻栗坡瓦渣钨铍矿位于老君山岩体东北缘,矿床赋存于第 1 期中粗粒二云母花岗岩中,该期花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 83.3±1.5 Ma(冯佳睿等,2010),LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 86.66±0.42(Feng *et al.*, 2013)和 87.5±0.6 Ma(Zhao *et al.*, 2018)。马关炭窑铍矿位于老君山岩体西南缘的第 1 期花岗岩中,该岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 87.6±1.4 Ma(李进文等,2013)。

冉明佳等(2011)利用石英 ESR 方法报道了滇

西地区麻花坪钨铍矿成矿平均年龄为 21.5 Ma,李建康等(2017a)、Jia 等(2018)和马骏等(2020)分别报道了该矿床中与矿体共生的白云母 Ar-Ar 年龄为 24、34.89±0.34 和 32.06±0.11 Ma。黄连沟铍矿赋存于黄连沟岩体中,该岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 60.9±1.4 Ma(Chen *et al.*, 2007),其与成矿密切相关的伟晶岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 59.9±2.7 Ma(陶琰等,2015),白云母 Ar-Ar 年龄为 30.8±1.8、31.51±2.4(王登红等,2005)和 28 Ma(李建康等,2019)。贡山地区黑马锡铍矿的铁锂云母 Ar-Ar 年龄为 40 Ma(李建康等,2019)。

总体上,云南省主要铍矿床成矿时代集中在晚白垩世和渐新世(表 1)。其中,滇东南地区铍矿床成岩成矿年龄比较集中,范围为 88~81 Ma;滇西地区铍矿床成岩成矿年龄范围为 60~20 Ma,其中成矿年龄集中在 40~20 Ma。空间上自东向西成岩成矿年龄呈现出变轻的趋势,表明两地区铍矿化可能是不同构造-岩浆事件的结果。

3.3 铍矿床形成与花岗岩的关系

云南省铍矿床的形成与省内复式花岗岩基中晚期岩体关系紧密。空间上,铍矿床往往产于复式岩基中晚期岩体内部或岩体与围岩的接触带附近,其中具有代表性的有隶属于个旧岩基的神仙水岩体、老厂岩体,隶属于都龙岩基的老君山第 1 期岩体以及隶属于潞西岩基的黄连沟岩体等。这些晚期岩体具有高硅、富铝、富碱、富集轻稀土、Rb、Th、U、Hf 等元素,而亏损重稀土、Ba、Sr、Nb、Ti 等特点(表 2),显示出壳源特征并经历了高度的演化和分异。在时间上,铍矿床的成矿年龄与其赋存岩体的成岩

表 2 与铍矿床关系密切花岗岩体地球化学特征
Table 2 Geochemical characteristics of granites closely related to beryllium deposits

岩体名称	神仙水	老厂	老君山(第 1 期)	黄连沟
岩性	中粗粒黑云母花岗岩	中细粒黑云母花岗岩	中粗粒二云二长花岗岩	中细粒二云母花岗岩
所属复式岩基	个旧	个旧	老君山	潞西
相关矿床	牛屎坡	老厂	瓦渣、炭窑	黄连沟
成岩年龄/Ma	83~81	85~81	87~83	60~59
w(SiO ₂)/%	61.14~75.70	71.25~76.49	71.90~74.48	71.16
w(K ₂ O+Na ₂ O)/%	8.13~12.55	6.72~8.53	8.32~8.94	8.16
w(K ₂ O)/w(Na ₂ O)	1.32~5.40	0.83~2.52	1.16~1.62	0.92
里特曼指数(σ)	2.11~8.06	1.35~2.21	2.29~2.77	2.36
铝饱和指数(A/CNK)	0.82~1.14	1.13~2.15	1.11~1.28	1.47
稀土元素特征	轻稀土元素富集,重稀土元素亏损;钕亏损强烈	轻稀土元素富集,重稀土元素亏损;钕亏损强烈	轻稀土元素富集,重稀土元素亏损;钕亏损强烈	轻稀土元素富集,重稀土元素亏损;钕亏损强烈
微量元素特征	富集 Rb、Th、U、K、La、Nd、Zr、Hf,亏损 Ba、Sr、Ta、P、Ti	富集 Rb、Th、U,亏损 Ba、Sr、Ti	富集 Rb、Hf、Th、La、Zr,亏损 Ba、Sr、Nb、Ti	富集 Rb、Hf,亏损 Ba、Sr
参考文献	张颖等(2011)	程彦博等(2008)、贾润幸等(2014)	冯佳睿等(2010)、Zhao 等(2018)	Chen 等(2007)

年龄较为一致,例如个旧地区的老厂锡铍矿成矿时限为 88~82 Ma,老厂岩体成岩年龄为 85~81 Ma,显示出成岩与成矿在时间上是一致的。这些晚期岩体经历了多期次、多阶段的岩浆分异作用,岩浆常常富含 Be 和挥发分。以潞西复式花岗岩基为例,在演化晚期形成的黄连沟岩体中 Be 含量高达 155×10^{-6} (云南省地质矿产局, 1990),高出花岗岩维氏值(5.5×10^{-6})数十倍,说明花岗岩为铍矿床形成提供了丰富的物质基础。综合铍矿床与花岗岩的时空分布规律和成矿元素特征,初步认为云南省铍矿床与壳源高分异花岗岩关系最为密切,这类岩体即是铍矿床的成矿母岩。

3.4 铍矿床成矿动力学背景及成矿模式

前人研究表明,华南地区在中生代—新生代曾发生过多期岩石圈伸展—减薄事件(毛景文等, 2004, 2008; 华仁民等, 2005)。滇东南地区位于华南板块最西端,经历了复杂的地质演化过程。从晚三叠世至中晚侏罗世,该区构造体制由特提斯构造域逐渐转化为太平洋构造域(Zhou *et al.*, 2006),岩石圈从挤压作用转变为伸展作用(华仁民等, 2005; 谢昕等, 2005; Zhou *et al.*, 2006)。晚白垩世,该区处于岩石圈伸展动力学环境下(刘玉平等, 2007; 杨宗喜等, 2008; Cheng *et al.*, 2010; 李进文等, 2013),在个旧—马关—麻栗坡一带发生大规模壳源花岗质岩浆侵位,叠加于早期形成的岩体之上,最终形成了个旧、都龙等复式花岗岩基。滇西地区位于“三江”特提斯构造域的西南缘,主要受中新特提斯洋的演化和印度—欧亚大陆碰撞过程的影响。早白垩世,新特提斯洋开始北向俯冲,于古近纪关闭,随后印度与欧亚大陆碰撞拼合(莫宣学等, 2007; 邓军等, 2012; Deng *et al.*, 2014)。上文述及,滇西地区铍矿成矿年龄范围为 40~20 Ma,此时印度与欧亚大陆处于碰撞造山过程中,构造—岩浆活动十分强烈,形成了大量壳源花岗质岩浆岩,如腾冲—梁河花岗岩和龙陵黄连沟花岗岩等。滇西北的金沙江虎跳峡一带在 35 Ma(Lacassin *et al.*, 1996)左右发生过强烈的挤压、走滑、逆冲推覆作用,并由此造成上地壳在走滑推覆作用下发生深熔作用形成过铝质高钾钙碱性花岗质岩浆(马骏等, 2020),该期构造—岩浆事件为麻花坪钨铍矿的形成提供了良好的地质条件。

不同的构造运动导致滇东南和滇西地区分别于燕山晚期和喜马拉雅期发生了大规模壳源花岗质岩浆侵位。这些岩浆往往富含 Be 和挥发分(F、B、H₂O

等),在深部和较封闭的条件下,岩浆缓慢结晶,常常形成伟晶岩型铍矿床,如滇西黄连沟铍矿和滇东南瓦渣铍矿;在花岗岩体的顶部和边部,常常发育大量的节理和原生裂隙,岩浆演化晚期形成的大量岩浆期后热液贯入其中,与花岗岩发生强烈的交代蚀变作用,因热液性质、成分以及围岩的不同,在岩体顶部和接触带附近形成蚀变花岗岩型铍矿床或者云英岩型铍矿床,典型矿床有滇西地区的石缸河铍矿和滇东南地区的牛屎坡铍矿;在更浅的部位,铍矿床也可以完全赋存于地层中,随着岩浆期后热液沿断裂通道持续向上运移,当热液流经碳酸盐岩地层时,与其发生充填、交代作用,形成岩浆热液脉型铍矿床,如滇西香格里拉麻花坪钨铍矿。

综上,根据各类型铍矿床的构造背景及成矿特征,并结合前人(Barton and Young, 2002; 李建康等, 2017a)对世界和中国铍矿床的成矿模式研究,本文提出云南省铍矿床的综合成矿模式(图 7)。

4 找矿方向

在成矿地质背景和典型矿床研究的基础上,通过对矿床时空分布规律和成矿模式的分析研究,本文提出云南省主要的铍找矿远景区如下:

(1) 贡山—腾冲—盈江找矿远景区

远景区位于怒江断裂带以西,呈南北向展布,出露较多燕山晚期—喜马拉雅期花岗质岩体,这些岩体普遍具有富集稀有元素的特点,岩体演化晚期常常形成钠长花岗岩和伟晶岩脉。目前区内已发现伟晶岩脉数千条和不同规模铍矿床(点)数十处,该区应以寻找伟晶岩型铍矿为主攻方向。

(2) 龙陵找矿远景区

远景区位于保山地块南部,出露大量燕山晚期—喜马拉雅期花岗质岩体,岩体普遍富含铍等稀有金属元素。围绕岩体及内外接触带,形成了一系列伟晶岩型、蚀变花岗岩型、云英岩型铍矿化,目前已发现数处中型、小型铍矿床,特别是在勐冒和黄连沟两处岩体周缘发育大量含铍伟晶岩脉,资源潜力较大。寻找伟晶岩型和蚀变花岗岩型铍矿可作为该区下一步找矿工作的主攻方向。

(3) 马关—麻栗坡找矿远景区

远景区内岩浆活动强烈,铍矿床主要与燕山晚期花岗质岩浆关系密切,尤其在老君山复式花岗岩体内及其内外接触带,产出较多伟晶岩型和蚀变花

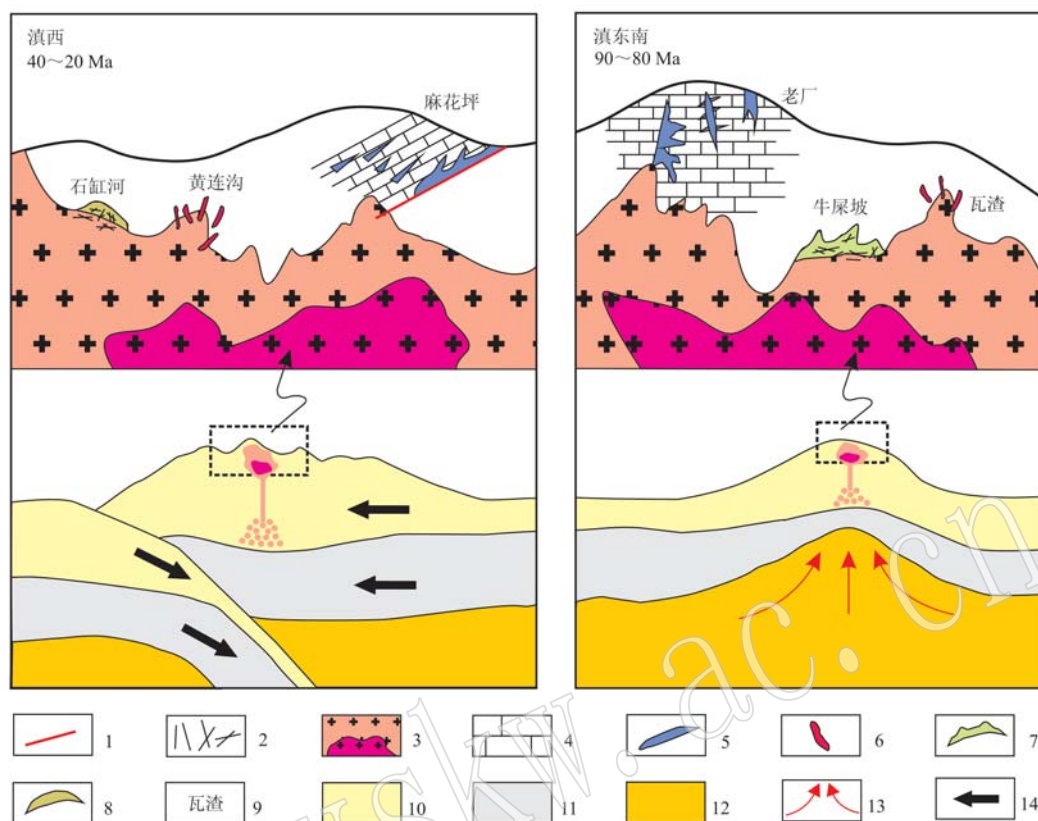


图7 云南省铍矿床大地构造-成矿模式示意图

Fig. 7 Regional tectonic and mineralization model for beryllium deposits in Yunnan Province

1—断裂; 2—岩体顶部节理裂隙; 3—复式花岗岩基; 4—碳酸盐岩; 5—岩浆热液脉型铍矿化; 6—伟晶岩脉/伟晶岩型铍矿化; 7—蚀变花岗岩型铍矿化; 8—云英岩型铍矿化; 9—典型矿床; 10—大陆地壳; 11—岩石圈地幔; 12—软流圈地幔; 13—软流圈上涌; 14—板块运动方向
1—fault; 2—joint fissure on the top of rock mass; 3—composite granitic batholith; 4—carbonatite; 5—magmatic hydrothermal vein type beryllium mineralization; 6—pegmatite vein/pegmatite type beryllium mineralization; 7—albite granite type; 8—greisen type beryllium mineralization; 9—typical deposit; 10—continental crust; 11—lithospheric mantle; 12—asthenospheric mantle; 13—asthenosphere upwelling; 14—direction of plate motion

花岗岩型铍矿。围绕老君山岩体,以寻找伟晶岩型铍矿为主攻方向。此外,该区应加强钨锡矿床中共(伴)生铍资源的综合利用。

5 结论

(1) 云南省铍矿床均属过铝性成矿系统,可进一步划分为伟晶岩型、岩浆热液脉型、蚀变花岗岩型和云英岩型等4种成矿类型。其中,以伟晶岩型、岩浆热液脉型、蚀变花岗岩型最为重要,占云南省铍资源总量的95%以上。

(2) 云南省铍矿床在成因上与壳源高分异花岗岩联系紧密,空间上主要分布在滇东南个旧、都龙地区 and 滇西高黎贡山、香格里拉地区。铍成矿主要有两期,即滇东南地区的晚白垩世铍矿化和滇西地区

的渐新世铍矿化。滇东南铍成矿作用是对燕山晚期华南西部岩石圈伸展的响应,而滇西铍成矿的动力学背景则是印度大陆与欧亚大陆碰撞造山作用。

(3) 提出了贡山-腾冲-盈江、龙陵和马关-麻栗坡3个找矿远景区,这3个远景区应以寻找伟晶岩型铍矿为主要方向。同时,应重视在钨锡成矿区寻找共(伴)生型铍资源。

References

- Ayuso R A, Foley N K, Vazquez J A, *et al.* 2020. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of volcanic rocks hosting world class Be-U mineralization at Spor mountain, Utah, U. S. A [A]. Goldschmidt Conference 2020 [C].
- Barton M D and Young S. 2002. Non-pegmatitic Deposits of Beryllium;

- Mineralogy, Geology, Phase Equilibria and Origin[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50(1): 591~691.
- Bai Wanling. 1994. Gemstone pegmatite in Gaoligongshan area, Western Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, (4): 282~286 (in Chinese).
- Borovikov A A, Goverdovskiy V A, Borisenko A S, *et al.* 2016. Composition and metal contents of ore-forming fluids of the Kalguty Mo-W (Be) deposit (Gorny Altai)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 57(4): 507~518.
- Bulnaev K B. 2006. Fluorine-beryllium deposits of the Vitim Highland, western Transbaikial region: Mineral types, localization conditions, magmatism, and age[J]. *Geology of Ore Deposits*, 48(4): 277~289.
- Chen F, Li X, Wang X, *et al.* 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6): 1 179~1 194.
- Cheng Yanbo and Mao Jingwen. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: Constraints on their petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 120(3~4): 258~276.
- Cheng Y, Mao J, Chang Z, *et al.* 2013. The origin of the world class tin-polymetallic deposits in the Gejiu district, SW China: Constraints from metal zoning characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 50~62.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, *et al.* 2008. Petrogenesis of the Laochang-Kafang granite in the Gejiu Area, Yunnan Province: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1 478~1 493(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, *et al.* 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 297~312(in Chinese with English abstract).
- Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, *et al.* 2019. Metallogenic epoch and metallogenic model of the Hetaoping W-Be deposit in Zhen'an County, South Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1 342~1 358(in Chinese with English abstract).
- Dailey S R, Christiansen E H, Dorais M J, *et al.* 2018. Origin of the fluorine- and beryllium-rich rhyolites of the Spor Mountain Formation, Western Utah[J]. *American Mineralogist*, 103(8): 1 228~1 252.
- Damdinova L B, Damdinov B B, Rampilov M O, *et al.* 2019. Ore formation conditions of the Aunik F-Be deposit (Western Transbaikalia)[J]. *Geology of Ore Deposits*, 61(1): 14~37.
- Damdinova L B, Smirnov S Z and Damdinov B B. 2015. Formation conditions of high-grade beryllium ore at the Snezhnoe deposit, Eastern Sayan[J]. *Geology of Ore Deposits*, 57(6): 454~464.
- Deng Jun, Wang Changming and Li Gongjian. 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 349~1 361 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, *et al.* 2014. 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.
- Ding X and Li J. 2016. Ore-Forming Mechanism of the Asikaerte Granitic Pegmatite Beryllium Deposit in Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 90(3): 1 053~1 054.
- Feng J, Mao J and Pei R. 2013. Ages and geochemistry of Laojunshan granites in southeastern Yunnan, China: Implications for W-Sn polymetallic ore deposits[J]. *Mineralogy and Petrology*, 107(4): 573~589.
- Feng Jiarui, Mao Jingwen, Pei Rongfu, *et al.* 2010. SHRMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Laojunshan granite intrusion from the Wazha tungsten deposit, Yunnan Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 845~857(in Chinese with English abstract).
- Foley N, Ayuso R, Lederer G, *et al.* 2016. Volcanogenic beryllium deposits at Spor Mountain, Utah, USA: Impact on past production and material flow cycles[A]. *Goldschmidt Conference 2016*[C].
- Gao Ziyang, Lü Boxi, Duan Jianzhong, *et al.* 1993. Granitic pegmatite in west Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, (4): 367~372 (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Lanwen, *et al.* 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 99~107 (in Chinese with English abstract).
- Jia F, Zhang C, Liu H, *et al.* 2018. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the Mahuaping W-Be deposit, Northwestern Yunnan Province, China, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(2): 864~865.
- Jia Fudong, Zhang Changqing, Hua Zhixin, *et al.* 2020. Identification characteristics, composition and genesis of euclase in Mahuaping tungsten-beryllium polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, (10): 3 185~3 192(in Chinese with English abstract).
- Jia Runxing, Fang Weixuan and Wei Xueyan. 2014. Geochemical characteristics and tectonic setting of the granites in Gejiu tin deposit, Yunnan Province[J]. *Mineral Exploration*, 5(2): 257~266(in Chinese with English abstract).
- Lacassin R, Urs Schärer P, Hervé Leloup, *et al.* 1996. Tertiary deformation and metamorphism SE of Tibet: The folded Tiger-leap

- décollement of NW Yunnan, China[J]. *Tectonics*, 15(3): 605~622.
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, *et al.* 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 64: 1 545~1 566(in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Chenghui, Feng Wenjie, *et al.* 2017b. A granitic pegmatite-type deposit of ferrolithium mica has been found in north-west yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 36(6): 1 453~1 455 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Zhou Tianren, Wang Denghong, *et al.* 2017a. Review of beryllium metallogenic regularity in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 951~978 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Wang Yonglei, *et al.* 2013. Isotopic chronological studies of Dulong tin-zinc deposit in Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 768~783 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaiwen, Zhang Qian, Wang Dapeng, *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of cassiterite from the Bainiuchang polymetallic deposit, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(2): 203~209(in Chinese with English abstract).
- Li Na, Gao Aihong and Wang Xiaoning. 2019. Global beryllium supply and demand trends and its enlightenmen[J]. *China Mining Magazine*, 28(4): 69~73(in Chinese with English abstract).
- Li Q, Yang F and Yang C. 2018. New zircon U-Pb age of granodiorite from the Shayikenbulake Be deposit in Altay, Xinjiang and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(2): 870~871.
- Li Wen, Li Zhaoling and Shi Guiyong. 2002. Geochemical characteristics of REE in pegmatite field, Ailaoshan, Yunnan[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 820~823(in Chinese with English abstract).
- Li Zaihui, Tang Fawei, Lin Shiliang, *et al.* 2014. Zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of the beryl-bearing pegmatite and its geological significance, Western Yunnan, Southwest China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(2): 554~565 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhaolin, Li Wen, Ji Junfeng, *et al.* 2007. Study on the origin and rock-forming simulation experiments of aquamarine-bearing pegmatites of Ailaoshan, Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 39~52(in Chinese with English abstract).
- Liang Fei. 2018. General Situation, Supply and Demand Forecast and Development Strategy of Beryllium Resources in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Liu Yuping, Li Zhengxiang, Li Huiming, *et al.* 2007. U-Pb Geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 967~976(in Chinese with English abstract).
- Ma Jun, Tao Yan, He Defeng, *et al.* 2020. The ore-forming age and fluid inclusion characteristics of the Mahuaping tungsten-beryllium in Yunnan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(2): 223~232(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Guo Chunli, *et al.* 2008. Gejiu tin polymetallic ore-field: Deposit model and discussion for several points concerned[J]. *Acta Geologica Sinica*, (11): 1 455~1 467(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, (1): 45~55(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, *et al.* 2007. The time limit for the India-Asia continental collision[J]. *Geological Bulletin of China*, (10): 1 240~1 244 (in Chinese).
- Ran Mingjia, Zhong Kanghui, Li Fanyou, *et al.* 2011. Analysis of the tectonic of deposit and the age of mineralization in Mahuaping of Shangri-La in Yunnan[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 21~27 (in Chinese with English abstract).
- Schilling J, Bingen B, Skår Ø, *et al.* 2015. Formation and evolution of the Høgtuva beryllium deposit, Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(3): 1~21.
- Sun Kexiang. 1996. The geological characteristics of gem metallogenesis in Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, (1): 81~90 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Xiong Feng and Deng Xianze. 2015. U-Pb age of zircon pegmatite from Huanglonggou, Longling, Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 344~345(in Chinese).
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1 189~1 209(in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Jue, *et al.* 2005. Cenozoic Mineralization in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Denghong, Sun Yan, Dai Hongzhang, *et al.* 2019. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare-scattered element minerals in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 21(1): 119~127 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Chenghui, Sun Yan, *et al.* 2017. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. *Geological Survey of China*, 4(5): 1~8(in Chinese with English abstract).

- Wang Denghong, Zou Tianren, Xu Zhigang, *et al.* 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process [J]. *Advances in Earth Science*, (4): 614~620 (in Chinese with English abstract).
- Wen Chunhua, Luo Xiaoya, Chen Jianfeng, *et al.* 2019. Relationship between Yanshanian magmatic activity and rare metal mineralization in Mufushan area of Northeast Hunan [J]. *Geological Survey of China*, 6(6): 19~28 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qinsheng, Xu Junzhen and Yang Zhi. 1984. Sr isotopic characteristics of Gejiu Sn-bearing granites and a study of oresearch indicators [J]. *Geochimica*, (4): 293~302 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zou Haibo, *et al.* 2005. Prologue of late Mesozoic large-scale magmatism in southeastern China: Early J₂ basalts [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 35(7): 587~605 (in Chinese).
- Xing Yonghui and Li Xueren. 2014. The geological feature of Huangliangou Ta-Nb-Be deposit in Longling, Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, 33(4): 544~549 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Feng, Tao Yan and Deng Xianze. 2015. Fluid inclusion characteristics and genesis of the deposit in mahua ping tungsten beryllium deposit, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(S1): 353~354 (in Chinese).
- Yang Fuquan, Wang Yongqiang, Yang Chengdong, *et al.* 2018. Metallic ore deposits in the Kelan Basin, Altay, Xinjiang: Geological characteristics and metallogenesis [J]. *Mineral Deposits*, 37(3): 441~462 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi, Mao Jingwen, Chen Maohong, *et al.* 2008. Re-Os dating of molybdenite from the Kafang skarn copper (tin) deposit in the Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1937~1944 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi, Mao Jingwen, Chen Maohong, *et al.* 2009. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of muscovite from Laochang veinlet-like Sn deposit in Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 336~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, *et al.* 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues [J]. *Science Foundation of China*, 33(2): 106~111 (in Chinese).
- Zhang Jinfu, Zhou Cunhui and Hu Changshou. 2003. Mineralization characteristics of gems in Ailaoshan structural belt, Yunnan Province [J]. *Journal of Gems and Gemmology*, (3): 27~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju and Lan Yan. 1999. Gemological characteristics and deposits geology of Yunnan emerald [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (2): 189~197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shitao, Feng Minggang, Wang Houqiang, *et al.* 1999. Geological features and genesis of emerald deposit in Maalipo County, Yunnan Province, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, (1): 50~54 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ying, Huang Zhilong, Luo Taiyi, *et al.* 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating and petrogenesis of Shenxianshui granite in Gejiu, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 515~524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenfa, Zhang Hui, Lü Zhenghang, *et al.* 2018. Zircon U-Pb geochronology and the geological significance of pegmatites from the Laojunshan area, Southeastern Yunnan [J]. *Geochimica*, 47(1): 33~47 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianping, Xu Keqin, Hua Renmin, *et al.* 1997. A discussion on genesis of the tin polymetallic sulfide deposits of southeastern Yunnan [J]. *Yunnan Geology*, (4): 309~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 29(1): 26~33.
- Zhao Z, Hou L, Ding J, *et al.* 2018. A genetic link between Late Cretaceous granitic magmatism and Sn mineralization in the southwestern South China Block: A case study of the Dulong Sn-dominant polymetallic deposit [J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 268~289.
- Zhu Yiting, Li Xiaofeng, Zhang Long, *et al.* 2019. The characteristics of tourmaline in Baiyanghe U-Be deposit and its implications for mineralization, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3429~3442 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏万灵. 1994. 滇西高黎贡山地区宝石伟晶岩 [J]. *矿产与地质*, (4): 282~286.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 2008. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束 [J]. *地质学报*, 82(11): 1478~1493.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义 [J]. *矿床地质*, 28(3): 297~312.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 等. 2019. 南秦岭镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代及成矿模式探讨 [J]. *地质学报*, 93(6): 1342~1358.
- 邓军, 王长明, 李龚健. 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程 [J]. *岩石学报*, 28(5): 1349~1361.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等. 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨 [J]. *岩石学报*, 26(3): 845~857.
- 高子英, 吕伯西, 段建中, 等. 1993. 滇西花岗伟晶岩 [J]. *云南地质*, (4): 367~372.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模

- 成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2): 99~107.
- 贾福东, 张长青, 化志新, 等. 2020. 云南麻花坪钨铍矿床蓝柱石的鉴定特征及成分与成因分析[J]. 光谱学与光谱分析, (10): 3 185~3 192.
- 贾润幸, 方维萱, 隗雪燕. 2014. 云南个旧锡矿花岗岩地球化学特征及构造环境研究[J]. 矿产勘查, 5(2): 257~266.
- 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(15): 1 545~1 566.
- 李建康, 王成辉, 冯文杰, 等. 2017b. 滇西北发现花岗伟晶岩型铁锂云母矿床[J]. 矿床地质, 36(6): 1 453~1 455.
- 李建康, 邹天人, 王登红, 等. 2017a. 中国铍矿成矿规律[J]. 矿床地质, 36(4): 951~978.
- 李进文, 裴荣富, 王永磊, 等. 2013. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究[J]. 矿床地质, 32(4): 768~783.
- 李开文, 张 乾, 王大鹏, 等. 2013. 云南蒙自白牛厂多金属矿床锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年代学[J]. 矿物学报, 33(2): 203~209.
- 李 娜, 高爱红, 王小宁. 2019. 全球铍资源供需形势及建议[J]. 中国矿业, 28(4): 69~73.
- 李 文, 李兆麟, 石贵勇. 2002. 云南哀牢山伟晶岩矿床稀土元素地球化学特征[J]. 矿床地质, 21(S1): 820~823.
- 李再会, 唐发伟, 林仕良, 等. 2014. 滇西含绿柱石伟晶岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 554~565.
- 李兆麟, 李 文, 季俊峰, 等. 2007. 中国云南哀牢山含海蓝宝石伟晶岩的起源和成岩模拟实验研究[J]. 岩石学报, (1): 39~52.
- 梁 飞. 2018. 我国铍资源特征、供需预测与发展探讨[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 23(5): 967~976.
- 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, 程彦博, 郭春丽, 等. 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, (11): 1 455~1 467.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, (1): 45~55.
- 莫宣学, 赵志丹, 周 肃, 等. 2007. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报, (10): 1 240~1 244.
- 冉明佳, 钟康惠, 李凡友, 等. 2011. 云南香格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.
- 孙克祥. 1996. 云南宝石成矿地质特征[J]. 云南地质, (1): 81~90.
- 陶 琰, 邓贤泽, 熊 风. 2015. 云南龙陵黄龙沟伟晶岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 矿物学报, 35(S1): 344~345.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1 189~1 209.
- 王登红, 陈毓川, 徐 珏, 等. 2005. 中国新生代成矿作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 王登红, 孙 艳, 代鸿章, 等. 2019. 我国“三稀矿产”的资源特征及开发利用研究[J]. 中国工程科学, 21(1): 119~127.
- 王登红, 王成辉, 孙 艳, 等. 2017. 我国铍钨钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J]. 中国地质调查, 4(5): 1~8.
- 王登红, 邹天人, 徐志刚, 等. 2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展, (4): 614~620.
- 文春华, 罗小亚, 陈剑锋, 等. 2019. 湘东北幕阜山地区燕山期岩浆演化与稀有金属成矿的关系[J]. 中国地质调查, 6(6): 19~28.
- 伍勤生, 许俊珍, 杨 志. 1984. 个旧含 Sn 花岗岩的 Sr 同位素特征及找矿标志的研究[J]. 地球化学, (4): 293~302.
- 谢 昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂ 早期玄武岩[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 35(7): 587~605.
- 邢永辉, 李学仁. 2014. 云南龙陵县黄连沟钽铌矿床地质特征[J]. 云南地质, 33(4): 544~549.
- 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, 35(S1): 353~354.
- 杨富全, 王永强, 杨成栋, 等. 2018. 新疆阿尔泰克兰盆地金属矿床地质特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 37(3): 441~462.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等. 2008. 云南个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1 937~1 944.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等. 2009. 云南个旧老厂细脉带型锡矿白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3): 336~344.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 张金富, 周存会, 胡长寿. 2003. 云南哀牢山构造带的宝石成矿特征[J]. 宝石和宝石学杂志, (3): 27~30.
- 张良钊, 兰 延. 1999. 云南祖母绿的矿床地质及宝石学特征[J]. 矿物学报, (2): 189~197.
- 张世涛, 冯明刚, 王厚强, 等. 1999. 云南省麻栗坡县祖母绿矿区的地质特征及成因初探[J]. 地质科技情报, (1): 50~54.
- 张 颖, 黄智龙, 罗泰义, 等. 2011. 云南个旧神仙水岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学研究[J]. 矿物学报, 31(3): 515~524.
- 张振发, 张 辉, 吕正航, 等. 2018. 滇东南老君山地区伟晶岩年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 47(1): 33~47.
- 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 1997. 滇东南锡多金属矿床成因商榷[J]. 云南地质, (4): 309~349.
- 朱艺婷, 李晓峰, 张 龙, 等. 2019. 新疆白杨河 U-Be 矿床中电气石的矿物学特征及其成矿指示[J]. 岩石学报, 35(11): 3 429~3 442.