



引文格式: 杨富全, 谷高中, 张忠利, 等. 新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征及时空分布规律[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 250–269. DOI: 10.12401/j.nwg.2024122

Citation: YANG Fuquan, GU Gaozhong, ZHANG Zhongli, et al. A Review of Geological Characteristics and Time-Space Distribution of Rare Metal Deposits in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 250–269. DOI: 10.12401/j.nwg.2024122

新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征及时空分布规律

杨富全^{1,2}, 谷高中³, 张忠利³, 李强¹, 李宁⁴

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆维吾尔自治区地质局阿勒泰地质大队, 新疆 阿勒泰 836500; 4. 太原理工大学地球科学与测绘工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 在总结前人研究和野外调查基础上, 笔者综述了新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征和时空分布规律。稀有金属矿主要为花岗伟晶岩型, 其次是花岗岩型, 少量碱性花岗岩型、碱性正长岩型、火山热液型、碱性伟晶岩型和矽卡岩型, 主要分布于阿尔泰, 其次是西南天山和东天山。稀有金属成矿年龄变化于 151~476 Ma, 主要集中在 180~290 Ma(早侏罗世—二叠纪), 不同地区成矿时间存在差异。二叠纪为后碰撞环境, 三叠纪—侏罗纪为板内环境, 区域大规模伸展是形成大规模稀有金属矿的地球动力学背景。东天山和西南天山稀有金属成矿与岩浆侵入作用有关, 但阿尔泰除阿斯喀尔特、大喀拉苏等少数矿床外, 多数稀有金属矿与赋矿花岗岩不存在直接的成因联系。

关键词: 稀有金属矿床; 地质特征; 时空分布; 中亚造山带; 新疆

中图分类号: P618.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0250-20

A Review of Geological Characteristics and Time-Space Distribution of Rare Metal Deposits in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang

YANG Fuquan^{1,2}, GU Gaozhong³, ZHANG Zhongli³, LI Qiang¹, LI Ning⁴

(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. National 305 Project Office of Xinjiang, Urumuq 830000, Xinjiang, China; 3. Altay Geological Party of the Geological Bureau, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Altay 836500, Xinjiang, China; 4. College of Geological and Surveying Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: This paper reviews the geological characteristics, spatial and temporal-distribution, and tectonic settings of rare metal deposits in the Xinjiang Central Asian Orogenic Belt. The rare metal deposits are predominantly of granitic pegmatite type, followed by granite type, with a small amount of alkaline granite type, alkaline syenite type, alkaline pegmatite type, volcanic hydrothermal type, and skarn type. They are mainly distributed in the Altay, followed by the East Tianshan and Southwest Tianshan. The rare metal mineralization took

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2024-06-30; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天池英才”引进计划, 中央返还两权价款资金综合研究项目(Y15-1-LQ10)和国家自然科学基金项目(41802112、41702100)联合资助。

作者简介: 杨富全(1968–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床地质和成矿规律研究。E-mail: fuquanyang@163.com。

place during 467 to 151 Ma and the majority of the deposits are formed in the 290 to 180 Ma (Permian to Early Jurassic). In addition, there are differences in the rare metal mineralization time between different regions. The Permian and Triassic to Jurassic mineralization occurred in post-collision and continental environments, respectively, and the regional large-scale extension background is favorable for the large-scale rare metal mineralization. The rare metal deposits in East Tianshan and Southwest Tianshan are closely related to magmatic intrusion. However, most of the rare metal deposits in the Altay (except for Arskartor and Dakalas, etc) are no genetic relationship with their ore-hosting granites.

Keywords: rare metallic deposits; geological characteristics; time-space distribution; Central Asian Orogenic Belt; Xinjiang

稀有金属(锂、铍、铌、钽、铷、锶、锆、钨、钼、镱)是中国的关键金属,其中锂、钽 2018 年对外依存度超过 60%(Gulley et al., 2018; 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 2020)。新疆北部(阿尔泰、准噶尔、天山和北山)是中亚造山带的重要组成部分(图 1),古亚洲洋板块的俯冲、碰撞和后碰撞造就了独特的成矿体系,主要形成岩浆型、火山岩型、斑岩型、矽卡岩型、造山型、浅成低温热液型和伟晶岩型成矿系统,铁、铜、镍、铅、锌、金和稀有金属为其优势矿种。稀有金属矿主要分布于阿尔泰,少量分布于西南天山和东天山,其他地区零星分布。新疆阿尔泰是世界上著名的稀有金属伟晶岩和工业白云母成矿带,在 9 个伟晶岩矿集区中发育十万条伟晶岩脉,产出世界级的可可托海稀有金属矿床,还有柯鲁木特、卡鲁安等稀有金属矿床。东天山主要发现

了国宝山(属于甘肃,与新疆交接,文中也把该矿一并探讨)、白石头泉或张宝山、沙东等铷矿床,少量 Li-Be-Nb-Ta 矿床。西南天山产出与碱性岩有关的铌钽等矿床。王登红等(2003)、任宝琴等(2011)、郭正林等(2013)、秦克章等(2013)、郭旭吉等(2015)、Zhou 等(2016)、杨富全等(2018)、张辉等(2019)、高景刚等(2023)、陈衍景等(2024)等开展了阿尔泰伟晶岩型稀有金属矿的成矿年代学、成矿规律和成因研究。韩宝福(2008)、申萍等(2021)开展了中哈俄阿尔泰稀有金属矿床对比和成矿规律研究。邹天人等(2006)开展了新疆稀有金属矿床成矿模式、成矿规律和成矿预测。吴昌志等(2021)对中亚造山带铷矿床的主要特征与研究进展进行了综述。谢明材等(2020)对塔里木北缘与碱性岩有关的稀土-稀有金属矿的成矿作用进行了研究。

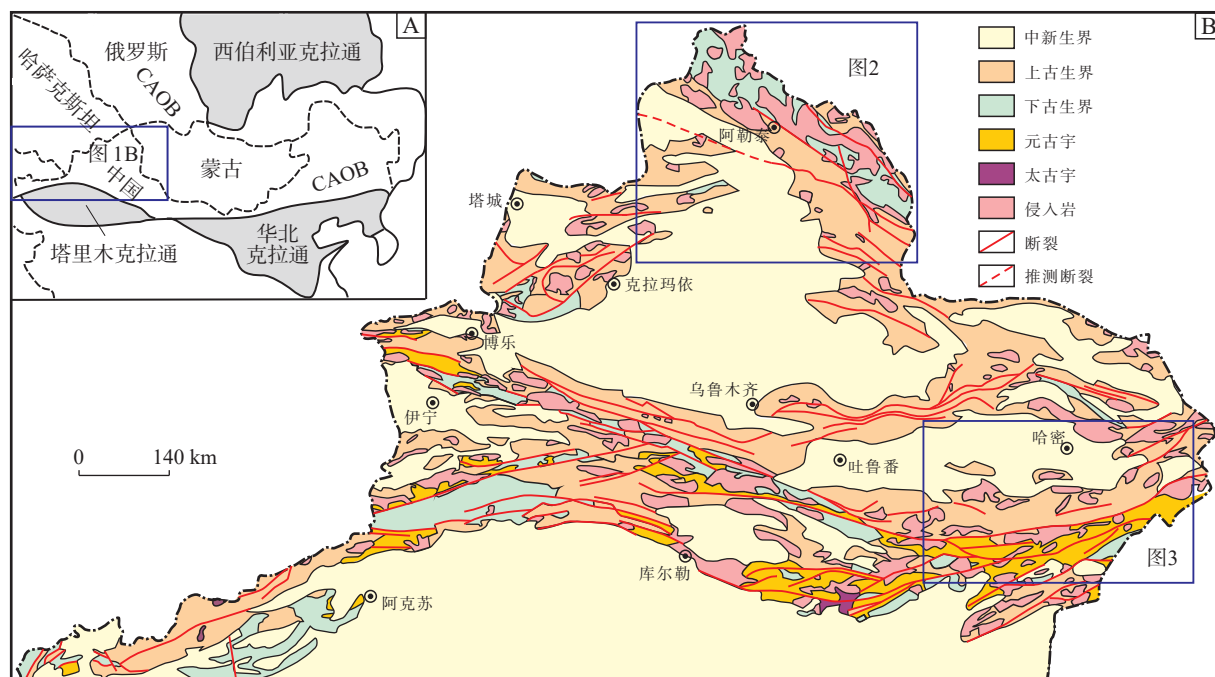


图1 新疆中亚造山带地质简图(图 A 据 Chen et al., 2002; 图 B 据董连慧等, 2013 修改)

Fig. 1 Simplified geological of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang

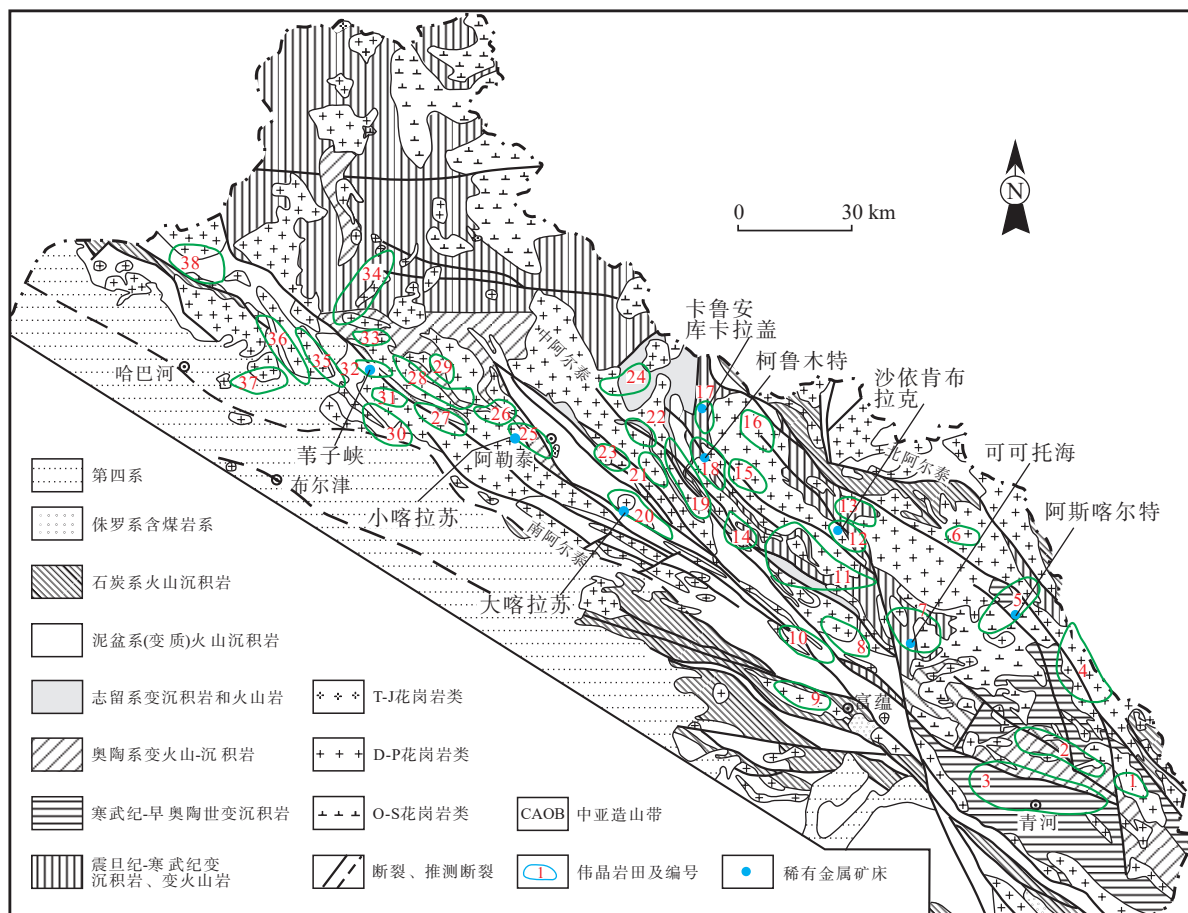
基于收集前人勘查报告及研究成果,结合大量矿床(点)野外调研,综合论述了新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征、空间分布和成矿时代,探讨了侵入岩与稀有金属伟晶岩成矿关系,构造演化与稀有金属成矿作用,旨在推动新疆中亚造山带开展新一轮稀有金属找矿勘查工作。

1 区域成矿背景

新疆中亚造山带经过了基底演化(前寒武纪)阶段、古亚洲洋形成与早期演化(寒武纪—晚志留世)阶段、晚古生代古亚洲洋演化与大陆初期主碰撞(早泥盆世—晚石炭世)阶段、后碰撞构造(二叠纪)阶段和陆内发展

(三叠纪之后)阶段,不同造山带地质特征与构造演化存在差异(董连慧等, 2013; Han et al., 2018; Han et al., 2020; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2023; Gao et al., 2024)。

中国阿尔泰地理上分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰(图2),中阿尔泰属于喀纳斯-可可托海古生代岩浆弧,南阿尔泰为克兰泥盆纪—石炭纪弧后盆地(何国琦等,2004)。中阿尔泰位于红山嘴断裂与阿巴宫断裂、巴寨断裂之间的喀纳斯-可可托海一带,由早古生代变质岩系组成。南阿尔泰南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻,主要由上志留—下泥盆统康布铁堡组和中—上泥盆统阿勒泰镇组变质火山—沉积岩系组成,少量中—上志留统库鲁木提群、下—中泥盆统阿舍勒组、上泥盆统齐也组和下石炭统红山



伟晶岩田编号: 1. 阿木拉宫; 2. 布鲁克特-纳林萨拉; 3. 阿拉捷克-塔拉特; 4. 米尔特根; 5. 琼湖-道尔久; 6. 阿拉尔; 7. 可可托海; 8. 柯布卡尔; 9. 富蕴西; 10. 库木尔特; 11. 库卫-结别特; 12. 丘曲拜; 13. 阿拉依格尔; 14. 蒙库; 15. 阿拉山; 16. 柯鲁木特-吉得克; 17. 阿祖拜; 18. 群库尔; 19. 虎斯特; 20. 大喀拉苏-可可西尔; 21. 胡鲁宫; 22. 巴塞; 23. 阿巴宫; 24. 吐尔贡; 25. 小喀拉苏; 26. 切米尔切克; 27. 塔尔朗; 28. 切别林; 29. 阿拉尕克; 30. 阿克赛依-阿克苏; 31. 阿克巴斯塔乌; 32. 萨尔加克; 33. 乌鲁克特; 34. 切伯罗衣-阿克贡盖特; 35. 海流滩-冲乎尔; 36. 也留曼; 37. 哈巴
河东; 38. 加曼哈巴

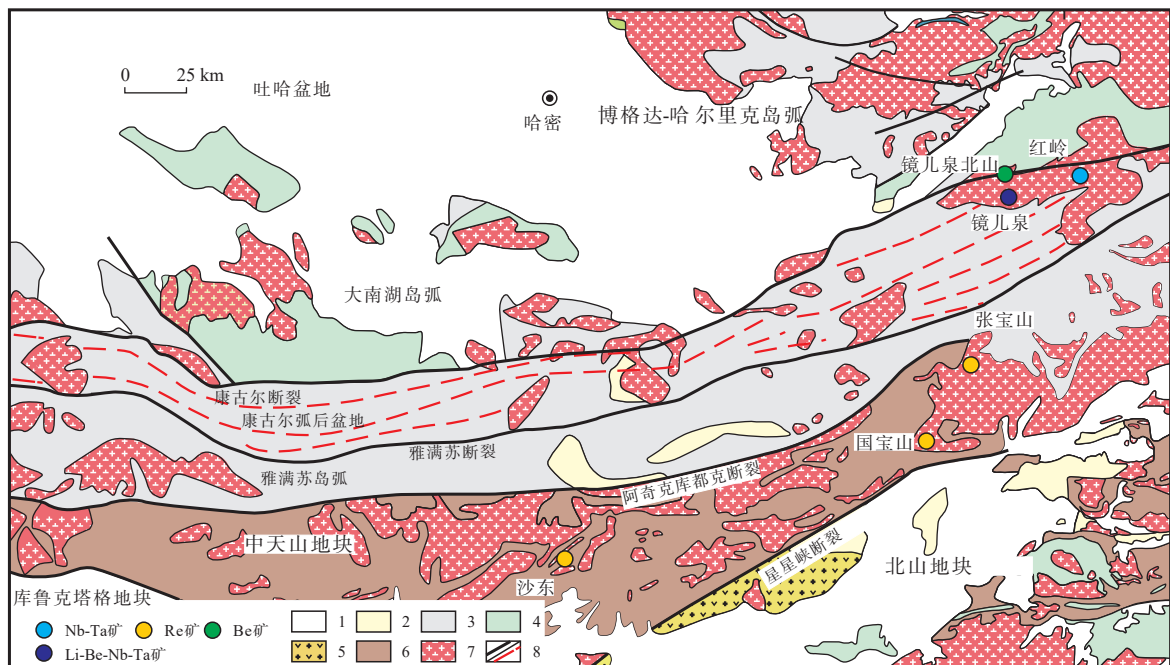
图2 新疆阿尔泰地质、伟晶岩和主要稀有金属矿分布简图(据邹天人等, 2006; Yang et al., 2013; 杨富全等, 2018 修改)

Fig. 2 Simplified geological map showing distribution of pegmatit and major rare metal deposits in Altay, Xinjiang

嘴组(变质)火山-沉积岩系。阿尔泰侵入岩分布广泛,具有多期次、多类型、多成因、多来源的特征,形成于多种构造环境。侵入岩年龄变化于 523~151 Ma(刘源等, 2013; 丁建刚等, 2020), 从早寒武世开始持续到侏罗纪。

东天山划分为博格达-哈尔克构造带、觉罗塔格构造带、中天山地块和北山地块(图 3)。觉罗塔格构造带进一步划分为大南湖-头苏泉岛弧、康古尔弧后盆地和雅满苏岛弧。大南湖-头苏泉岛弧带主要由泥盆纪—石炭纪火山沉积岩系组成。康古尔弧后盆地由石炭纪火山岩和二叠纪火山岩组成。雅满苏岛弧

主要由石炭纪海相火山沉积岩系, 少量二叠纪碎屑岩、火山岩和碳酸盐岩组成。中天山地块以阿奇克库都克-沙泉子断裂为界, 与雅满苏岛弧带相邻; 南缘以红柳河断裂带与北山构造带相邻。出露中元古界星星峡群、卡瓦布拉格群和新元古界天湖群等, 岩性主要为片岩、片麻岩、大理岩和石英岩等, 经历了绿片岩相或角闪岩相变质作用。东天山侵入岩发育, 石炭纪斑岩与斑岩型铜矿有关, 二叠纪发育基性-超基性岩, 并伴随岩浆型铜镍硫化物矿床, 三叠纪花岗岩分布广泛, 与斑岩、矽卡岩和伟晶岩型钼、钨和稀有金属成矿有关。



1. 新生代沉积物; 2. 二叠纪火山沉积岩系; 3. 石炭纪火山沉积岩系; 4. 奥陶纪—泥盆纪火山沉积岩系;
5. 早古生代蛇绿岩带; 6. 前寒武纪变质岩; 7. 花岗岩类; 8. 断层、剪切带

图3 东天山地质及主要稀有金属矿分布略图(底图据王京彬等, 2006)

Fig. 3 Simplified geological map showing distribution of the major rare metal deposits in East Tianshan

西南天山构造上属于塔里木-中朝板块的塔里木北缘古生代活动陆缘。地层主要为泥盆系碎屑岩、碳酸盐岩夹火山岩, 石炭系为碎屑岩、碳酸盐岩, 部分二叠系碎屑岩夹有灰岩、火山岩。侵入岩以中酸性岩石为主, 少量超基性岩、基性岩和碱性岩。塔里木北缘及邻区发育一套以碱性花岗岩、石英正长岩、正长岩、霓辉石正长岩、霓霞正长岩为主, 包含碱性辉长岩、霓辉石闪长岩、钠铁闪石正长岩、霓辉石花岗岩等在内的碱性侵入岩体, 其西起阿图什、东到尉犁以东, 呈带状分布, 长约为 1 100 km, 形成于二叠纪(邹天人等,

2006; 谢明材等, 2020; 孙政浩等, 2021)。

2 稀有金属矿类型和空间分布

新疆中亚造山带稀有金属矿主要为花岗伟晶岩型(文中简称伟晶岩型), 其次是花岗岩型, 少量火山热液型(西准噶尔白杨河铍铀钼矿)、碱性花岗岩型(波孜果尔)、碱性正长岩型(克其克果勒钼钽矿)、碱性伟晶岩型(依兰里克稀土钼钽钨矿)、矽卡岩型(沙东钨铀矿、星星峡铍矿化点)。新疆中亚造山带稀有

金属矿床主要分布于阿尔泰,其次是西南天山和东天山,西准噶尔、西天山等地区零星分布。

新疆阿尔泰发现的10万条伟晶岩脉,集中在两个亚矿带(哈龙-青河稀有金属成矿亚带和加曼哈巴-大喀拉苏稀有金属成矿亚带)的9个矿集区和38个伟晶岩田,主要分布于中阿尔泰,其次是南阿尔泰,少量位于北阿尔泰(别也萨麻斯)(丁建刚等, 2020; 杨成栋等, 2020)。阿尔泰稀有金属矿产资源丰富,有大型和中型稀有金属矿床8处,小型矿床81处,此外,还有数量众多的稀有金属矿点和矿化点(刘国仁等, 2017)。哈龙-青河稀有金属成矿亚带位于红山嘴大断裂和阿巴宫大断裂之间的哈龙-青河早—中古生代侵入岩带上。该亚带含有5个矿集区(青河、可可托海、库威-结别特、柯鲁木特-吉得克和卡拉额尔齐斯)的23个伟晶岩田,既有伟晶岩型又有花岗岩型,著名矿床有可可托海、卡鲁安、柯鲁木特、阿斯卡尔特。加曼哈巴-大喀拉苏稀有金属成矿亚带呈NW-SE向延伸,主要位于南阿尔泰,伟晶岩一般产于花岗岩内、外接触带及深变质的片岩、片麻岩和混合岩中。该亚带含有4个矿集区(大喀拉苏-可可西尔、小喀拉苏-切别林、海流滩-也留曼和加曼哈巴)的15个伟晶岩田,代表性矿床有大喀拉苏、小喀拉苏(蒙库卡拉苏)、也留曼。稀有金属矿化主要是伟晶岩型,伟晶岩的内部结构带与哈龙-青河稀有金属成矿亚带相比要差一些,锂矿化相对较弱(邹天人等, 2006)。

东天山稀有金属矿主要分布于中天山地块(沙东钨铀矿、国宝山铀矿、张宝山铀矿、星星峡铍矿化点、红柳井铌钽矿),其次是康古尔弧后盆地(镜儿泉铍铌钽矿、镜儿泉北山铍矿、红岭铌钽矿)。主要类型为伟晶岩型和花岗岩型,少量矽卡岩型,以铀成矿为特色,规模最大,达到大型(沙东)和超大型规模(国宝山、张宝山)。

西南天山的稀有金属矿床分布于塔里木盆地北缘稀土、铌、钽、锆、金云母、蛭石、宝玉石成矿区中的塔里木板块北缘碱性杂岩带,主要集中在拜城和哈拉峻地区,库尔勒附近有少量分布。拜城主要有波孜果尔超大型铌钽矿、克其克果勒铌钽矿、玛依达稀有金属矿、依兰里克稀土铌钽锆矿、黑英山铍铌钽矿。哈拉峻地区碱性花岗岩主要有霍什布拉克、塔木、古尔拉克、克孜勒克孜塔克、巴什苏洪、喀拉多维、克孜尔托等,其中前5个岩体中发现了铌钽和稀土矿化。以岩体为中心具有水平及垂向矿化分带性,岩体内为

①岩浆岩型:(碱性辉长岩)钒钛磁铁矿(如普昌钒钛磁铁矿)、稀土。②碱性花岗岩型、碳酸岩型:铌、钽、稀土、稀有、分散元素(如卡拉多维铌钽稀有矿、巴什苏洪铌钽矿)。③岩体接触带为角闪型-矽卡岩型:铁、钼、锡、铋、锌、金(如塔木锡铅锌矿)。岩体外围为脉型的金多金属(如艾西买金矿)。哈拉峻地区主要稀有金属矿有巴什苏洪(或巴什索贡)铌钽矿、卡拉多维铌钽稀有矿、苏洪东铌钽矿、塔木铌矿。巴什苏洪铌钽矿地表主要产于碱性花岗岩脉中及两侧伟晶岩化蚀变带中。库尔勒附近有阔克塔格稀土铌钽锆矿、巴什库勒铍矿。西南天山稀有金属主要为碱性花岗岩型、碱性正长岩型、花岗伟晶岩型和碱性伟晶岩型,以铌钽成矿为特色(邹天人等, 2002, 2006; 徐海明等, 2012; 肖昱等, 2021; 余元军等, 2021)。

西准噶尔主要有和布克赛尔县白杨河超大型火山热液型铍铀钼矿。西天山稀有金属矿有昭苏县夏塔铍矿、昭苏县东图廓勒铍矿、精和县沙音土拜铍矿(邹天人等, 2006)。赛里木沃托格赛尔河北岸1处小型铌钽矿和两处铌钽矿点,产于长城系哈尔达坂群中二叠世二长花岗岩边部及围岩中,矿床类型主要为花岗细晶岩型、石英脉型及伟晶岩型,伴生元素有钨、锡、钼、锂等。

总之,新疆中亚造山带不同地区成矿类型和成矿元素明显不同。①阿尔泰稀有金属成矿带空间上集中于中阿尔泰,其次是南阿尔泰,矿床类型主要是伟晶岩型,少量花岗岩型,成矿元素复杂,主要是Li、Be、Nb、Ta,可可托海还富集Rb、Cs、Hf。②西准噶尔稀有金属矿不发育,主要为火山热液型铍铀钼矿。③东天山稀有金属矿主要类型为伟晶岩型和花岗岩型,少量矽卡岩型,以铀成矿为特色。④西南天山的稀有金属矿主要集中在拜城和哈拉峻地区,成矿作用与碱性岩有关,主要为碱性花岗岩型、碱性正长岩型和碱性伟晶岩型,以Nb、Ta成矿为特色。

3 主要矿床特征

3.1 卡鲁安盖锂矿

卡鲁安盖锂矿位于中阿尔泰柯鲁木特-吉得克矿集区,包括813、814、815、816、817、809、807、806、803、802号脉,其中807、806规模最大,锂资源量达到大型规模。矿区南部的650号脉又称为库卡拉盖锂矿,是该矿区最早发现的含锂伟晶岩脉。

矿区出露地层为中—上志留统库鲁木提群下亚群红柱石、矽线石、堇青石、十字石黑云母石英片岩(图 4)。

矿区东侧外围出露哈龙花岗岩基(650 脉距岩体距离 2~3 km)。伟晶岩脉受近 SN 向与近 EW 向构造裂隙

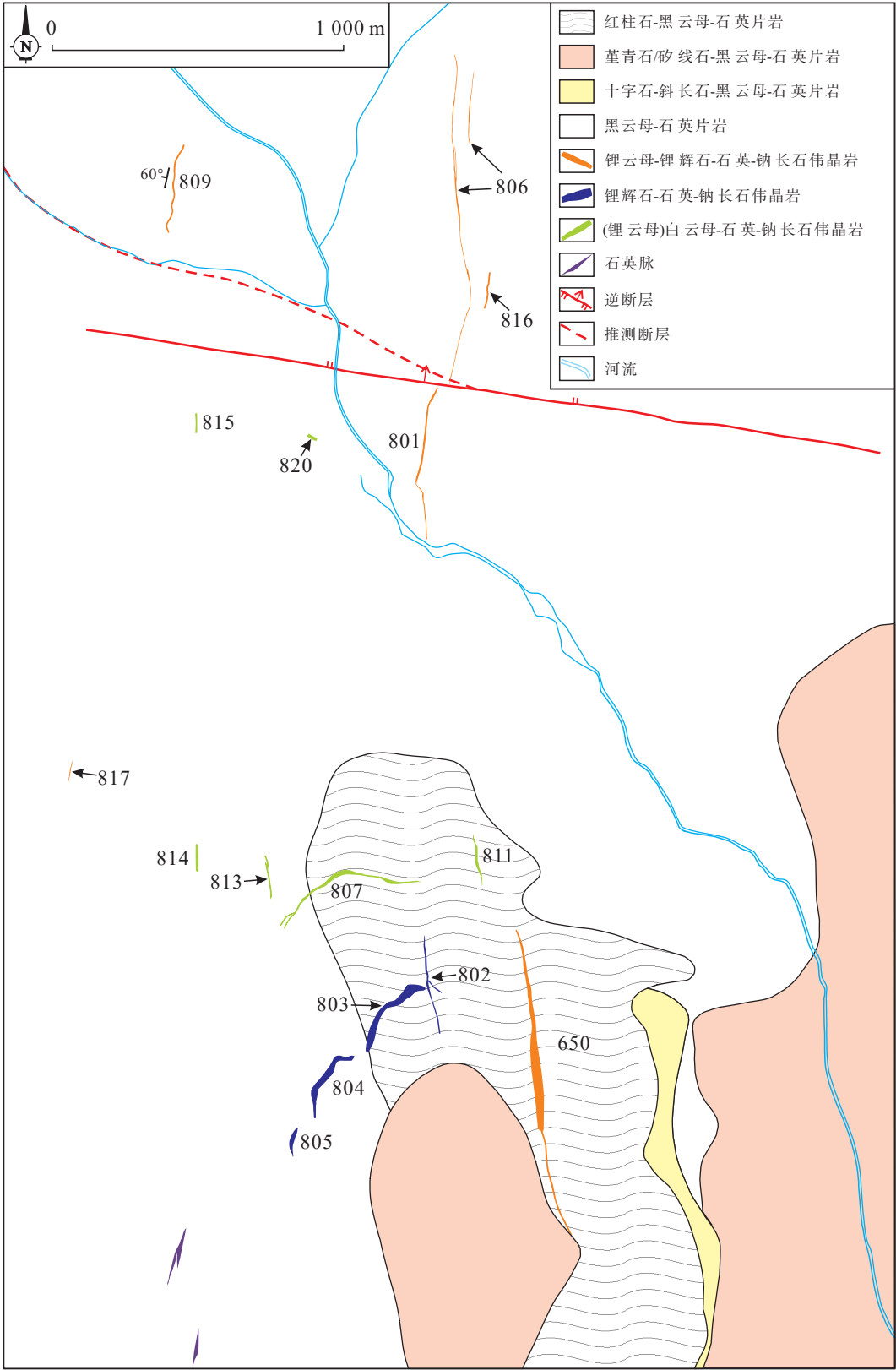


图4 卡鲁安-库卡拉盖矿区地质略图(据申茂德等, 2016)
Fig. 4 Geological sketch map of the Kalu'an-Kukalagai Li deposit

控制。807 脉产于黑云石英片岩中,为斜交片岩侵入的不规则脉状体,呈 NNE 向展布,向 SE 倾伏,在倾向及走向上均呈弧形展布(图 5)。地表断续出露长达 1 300 m,厚 1.5~2.7 m。深部钻孔控制最大延长 860 m,最大厚度 15.62 m,平均厚度 6.13 m,具有分支复合及膨胀狭窄现象。807 号脉垂向上可分成两种类型的伟晶岩脉,上部为含锂云母石英-钠长石伟晶岩脉,下部为石英-钠长石-锂辉石伟晶岩脉,两者过渡界线在标高 2 400 m。根据矿物共生组合特征,上部可划分出石

英白云母结构带和含锂云母石英钠长石结构带;下部可划分出石英白云母结构带、石英钠长石结构带和石英钠长石锂辉石结构带。上部和下部脉体边缘壳由细晶结构组成。围岩蚀变为白云母化和电气石化。以 Li 矿化为主, Li_2O 平均品位为 1.2%,伴生 BeO 平均品位 0.046%、 Ta_2O_5 和/或 Nb_2O_5 平均品位为 0.016 2%。矿石矿物有锂辉石、锂云母、白云母、石英、钠长石、铌钽矿、微斜长石、石榴石、氟锂辉石、绿柱石、黄玉、磷灰石、电气石等(申茂德等, 2016; 三金柱等, 2020)。

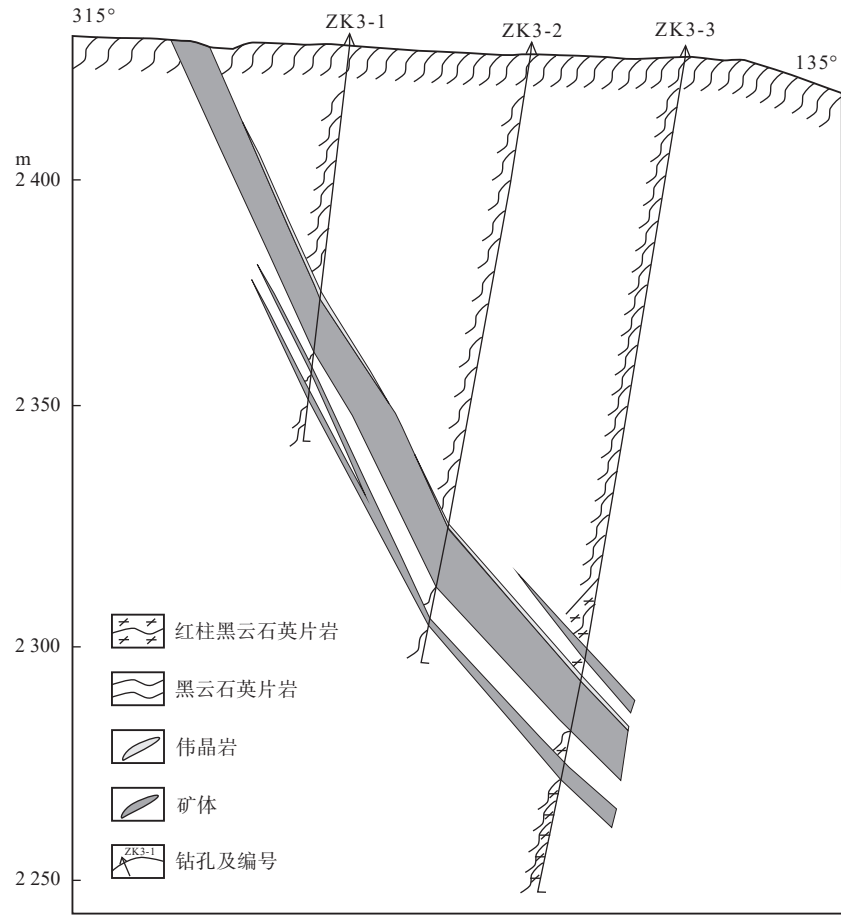


图5 卡鲁安锂矿 807 脉 3 勘探线剖面图(据新疆维吾尔自治区有色地质工程公司内部资料)
Fig. 5 Cross-section of 3 prospecting line of the 807 pegmatite vein in the Kalu'an Li deposit

3.2 波孜果尔 Nb-Ta 矿

波孜果尔铌钽矿位于拜城县城正北直距约 43 km 处,属于西南天山。波孜果尔矿区出露地层为志留系穷库什太组大理岩、片理化泥质粉砂岩、绢云黑云石英片岩和结晶灰岩。矿区内侵入岩为霓石花岗岩和黑云母钾长花岗岩,侵入于穷库什太组二岩段大理岩中(图 6)。矿化赋存于霓石花岗岩中,具有全岩矿化特征。霓石花岗岩呈不规则椭圆形小岩株,由顶部向下依次为:霓石似伟晶岩→霓石钠长花岗岩→钠闪石

-霓石花岗岩。富含萤石和方解石,并富含碱性长石。矿体厚板状, NW-SE 向延伸,矿体长为 2.8 km,宽为 0.5~1.1 km,矿体平均厚度为 173 m,面积约为 2.1 km²。矿石类型分为粒状镶嵌结构霓石花岗岩矿石、似片麻状霓石花岗岩矿石、似斑状霓石花岗岩矿石和碎裂状花岗岩矿石。矿石构造主要为稀疏浸染状构造,偶见细脉浸染状构造。矿石矿物以烧绿石为主,次为独居石、磷钇矿、钽石、硅钙钽石、硅钙锆石等;脉石矿物以钠长石、微斜长石、石英为主,少量霓石、钠闪石和

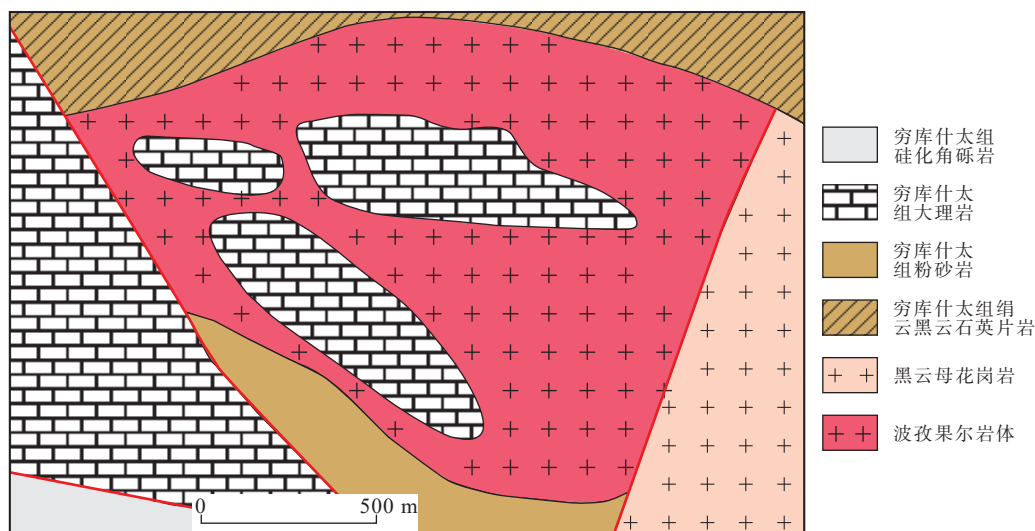


图6 波孜果尔 Nb-Ta 矿区地质略图(据刘春花, 2011)

Fig. 6 Geological sketch map of the Boziguo'er Nb-Ta deposit

微量的钛铁矿、磁铁矿、磷灰石、云母等。烧绿石(黄绿石)呈浸染状均匀分布于脉石矿物颗粒间。铌矿的 Nb_2O_5 氧化物量为 32.24 万 t, 平均品位为 0.041 8%; 钽矿的 Ta_2O_5 氧化物量为 2.21 万 t, 平均品位为 0.002 8%; 铷矿的 Rb_2O 氧化物量为 64.13 万 t, 平均品位为 0.083 1%。铌矿为大型矿床, 钽矿为超大型矿床(徐海明等, 2012; 刘春花, 2014; 董连慧, 2018)。

3.3 镜儿泉 Li-Be-Nb-Ta 矿

镜儿泉 Li-Be-Nb-Ta 矿床位于镜儿泉西北 6 km 处, 属于东天山觉罗塔格构造带东段。矿区主要出露侵入岩(图 7), 主要为白云母花岗岩, 局部地段有二云母花岗岩的分异相, 少量黑云母花岗岩、辉长岩类。白云母花岗岩中发现伟晶岩脉 165 条, 95% 以上伟晶岩脉赋存于白云母花岗岩岩体顶部, 其中具有工业意义的有两条。其中, 1 号脉以 Li-Be-Nb-

Ta 矿化为主, 2 号脉以 Be-Nb-Ta 矿化为主。1 号伟晶岩脉长为 800 m, 宽为 1~36 m, 有明显的膨胀收缩现象, 矿脉划分为 I、II、III、IV 等 4 个膨胀体。I 号膨胀体长为 90 m, 膨大部位宽为 25 m, 收缩部位宽为 11.5 m, 结构分带由内向外依次为: 块体石英→文象伟晶岩带→中粒准文象伟晶岩带→细粒花岗伟晶岩带。IV 号膨胀体长为 225 m, 膨大部位宽为 15 m, 收缩部位宽为 2 m, 结构带由内向外依次为块体石英带→块体微斜长石带→小块体带→文象带→准文象带→细粒花岗伟晶岩带。

1 和 2 号脉矿石中主要矿石矿物为锂云母、锂辉石、绿柱石和铌钽铁矿。1 号脉中石英锂辉石矿带和小块体含锂辉石矿带平均品位: 手选锂辉石为 11.02%~28.01%, BeO 为 0.056%~0.29%, $(\text{Ta}_2\text{O}_5+\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.02%~0.06%。II 号膨胀体中石英-锂云母-锂辉

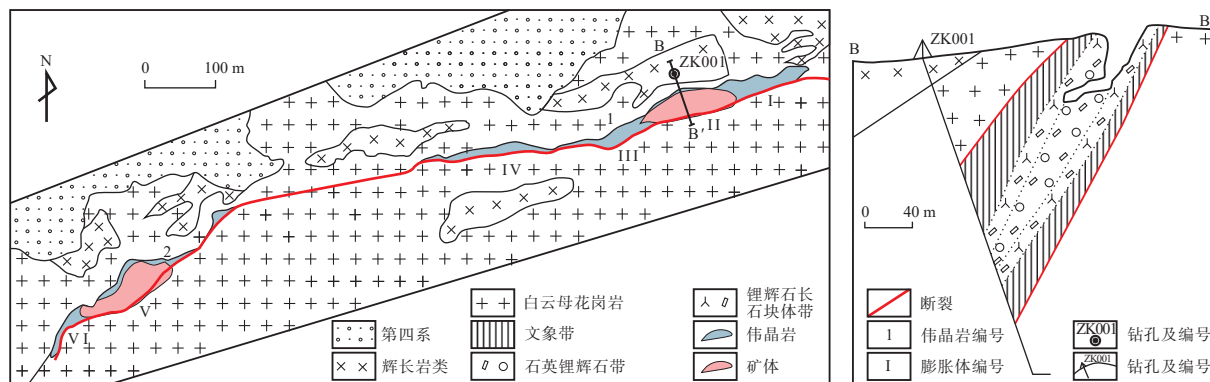


图7 镜儿泉锂铍钽矿地质简图及勘探线剖面图(据 Liu et al., 2020; 三金柱等, 2020 修改)

Fig. 7 Geological sketch map and cross-section of the Jingerquan Li-Be-Nb-Ta deposit

石带矿石品位: Li_2O 为 2.15%, BeO 为 0.21%, Nb_2O_5 为 0.032%, Ta_2O_5 为 0.019%(三金柱等, 2020)。

3.4 张宝山 Re 矿

张宝山超大型铷矿位于东天山中天山地块东部(图 3), 哈密市星星峡镇北东约 30 km 处, 与甘肃瓜州国宝山超大型铷矿相距约 35 km。白石头泉岩体划分为 5 个渐变的相带(图 8), 即淡色花岗岩(a带)、含天河石花岗岩(b带)、天河石花岗岩(c带)、含黄玉天河石花岗岩(d带)和黄玉钠长石花岗岩(2带)。在 a 和 c 带中局部有天河石伟晶岩囊状体, c 带局部发育含绿柱石伟晶岩脉和囊状(顾连兴等, 2007)。2012 年甘肃地质调查院对该矿进行评价, 在二长花岗岩、含天河

石花岗岩、天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩中圈定矿化带 3 个, 以 Rb_2O 含量 0.1% 初步圈定矿体 70 条。其中, Rb-27、Rb-28、Rb-32、Rb-35、Rb-36、Rb-37 及 Rb-46 号矿体规模较大。矿体长为 20~1 700 m, 宽度为 1~26 m, Rb_2O 品位为 0.100 1%~0.354 1%, 平均品位为 0.117 0%。矿石中主要矿物成分为天河石、石英, 含少量绿柱石、电气石和云母等。圈定 Rb_2O 基础储量为 67 080 t, 远景 Rb_2O 资源储量超 90 万 t。矿石中铷主要以类质同象的形式存在于铁锂云母矿物(0.35%~0.67% Rb_2O)和天河石(0.36%~0.41% Rb_2O)中(甘肃省地质调查院, 2016; 董连慧, 2018; 李通国等, 2018; 吴昌志等, 2021)。

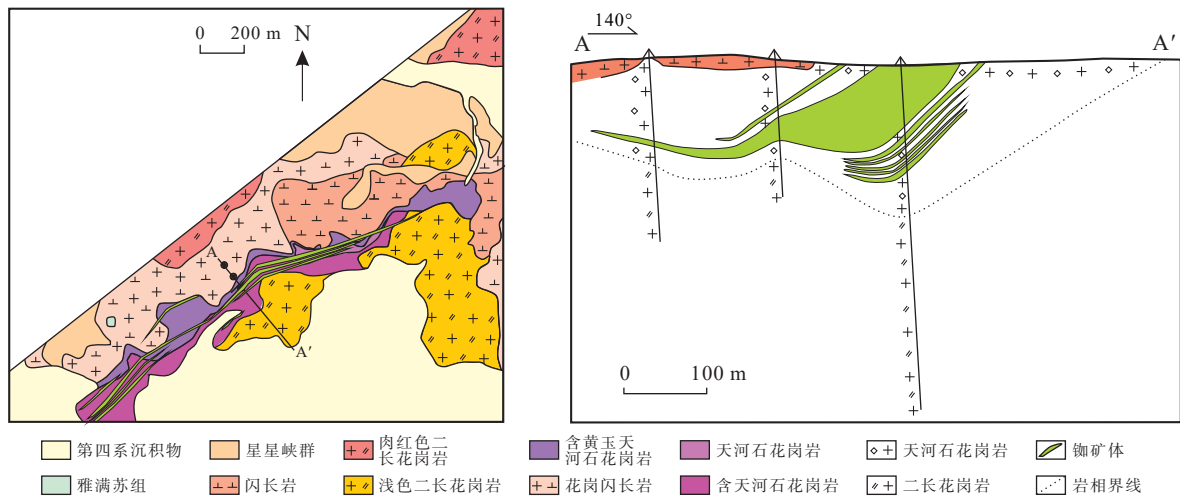


图8 东天山张宝山铷矿地质简图及勘探线剖面图(据甘肃省地质调查院, 2016; 董连慧, 2018; 刘延兵等, 2023)

Fig. 8 Geological sketch map and cross-section of the Zhangbaoshan Rb deposit

4 成矿时代

笔者收集前人及本团队在新疆中亚造山带开展的稀有金属矿年代学资料, 主要是含矿伟晶岩、含矿花岗岩、含矿碱性花岗岩、含矿碱性正长岩, 个别与成矿有关侵入体的锆石、铌钽矿、锡石、独居石 LA-ICP-MS、SHRIMP U-Pb, 白云母 Ar-Ar, 辉钼矿 Re-Os 年龄。48 个矿床(含甘肃国宝山铷矿)137 个年龄数据, 变化于 151~476 Ma(表 1, 图 9)。

阿尔泰 40 个矿床年龄变化最大, 成矿最早是也留曼 REE-Nb 矿, 形成于 476 Ma, 最晚成矿是别也萨麻斯 Li-Be-Nb-Ta 矿, 形成于 151~157 Ma。稀有金属矿年龄介于 151~476 Ma, 出现 155~295 Ma 和 335~475 Ma 两个区间, 前者具有连续成矿特征, 但主要集

中在 185~255 Ma(早侏罗世—三叠纪), 在 190~220 Ma 出现了峰值, 有 13 个矿床出现在该年龄区间, 表明 190~220 Ma 是成矿高峰期。在 230~240 Ma 区间有 8 个矿床, 也是重要成矿时期。335~475 Ma 有 8 个矿床出现了这个区间的年龄, 比较分散。拜城工业白云母 Li-Be-Nb-Ta 矿中白云母 Ar-Ar 年龄为 436 Ma, 但伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 274~275.5 Ma; 库威工业白云母-REE-Nb-Ta-Be 矿白云母 Ar-Ar 年龄为 369.8 Ma, 但伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 192.9~200.2 Ma, 两个矿床的 Ar-Ar 年龄与 U-Pb 年龄相差很大, 是否为多期成矿有待深入研究。

东天山 4 个稀有金属矿 18 个成矿年龄变化于 238~251 Ma, 峰值为 245 Ma。西南天山 3 个稀有金属矿 8 个成矿年龄介于 275~292 Ma, 峰值为 275 Ma。西准噶尔白杨河 Be-U-Mo 矿成矿作用发生在 303 Ma。

表1 新疆中亚造山带稀有金属矿成矿年龄

Tab. 1 Summary of geochronological data for rare meta deposits in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang

序号	矿床	测试对象	测试方法	年龄 (Ma)	参考文献
阿尔泰					
1	也留曼REE-Nb矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	476 ± 12	任宝琴等, 2011
2	那森恰含稀有金属工业白云母矿	白云母	Ar-Ar年龄	447.6 ± 3.2	王登红等, 2002
		白云母	Ar-Ar坪年龄	436 ± 0.5	王登红等, 2002
3	拜城工业白云母Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩 (No.40)	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	275.5 ± 4.2	任宝琴等, 2011
		伟晶岩 (No.40)	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	274.0 ± 5.3	Lü et al., 2021
4	青河塔拉特Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	385.9 ± 3.5	Lü et al., 2018
		白云母	Ar-Ar坪年龄	286.4 ± 1.6	Zhou et al., 2016
5	乔拉克赛工业白云母矿, 伴有Nb-Ta-Be矿化	白云母	Ar-Ar等时线年龄	370.3	王登红等, 2002
		白云母	Ar-Ar坪年龄	369.8 ± 0.4	王登红等, 2002
		伟晶岩	锆石 U-Pb	200.2 ± 1.9	张辉等, 2019
6	库威工业白云母-REE-Nb-Ta-Be矿	伟晶岩 (No. 554)	锆石 U-Pb	197.3 ± 1.3	张辉等, 2019
		伟晶岩	锆石 U-Pb	194.2 ± 1.8	张辉等, 2019
		伟晶岩	锆石 U-Pb	192.9 ± 1.5	张辉等, 2019
		伟晶岩	锆石 U-Pb	192.9 ± 1.5	张辉等, 2019
7	阿木拉宫Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	358.3 ± 4.6	Lü et al., 2018
8	铁木勒特Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	333.0 ± 3	Lü et al., 2018
9	将军山Rb-Nb-Ta矿	钾长花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	283.0 ± 2	杨富全未刊资料
10	阿木斯台Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	275.5 ± 4.2	Lü et al., 2012
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	269.4 ± 1.6	任宝琴等, 2011
11	加曼哈巴Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	237.5 ± 2.6	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	260.4 ± 4.0	Lü et al., 2021
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	263.8 ± 1.6	任宝琴等, 2011
12	也留曼Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	262.9 ± 3.8	Lü et al., 2021
13	塔尔浪Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	255.5 ± 2.7	Lü et al., 2021
14	萨尔加克Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	252.7 ± 3.1	Lü et al., 2021
15	阿克巴斯塔乌Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	253.0 ± 3.0	Lü et al., 2021
16	切木尔切克Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	253.5 ± 3.2	Lü et al., 2021
17	阿巴宫-塔拉特Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	246.8 ± 1.2	Lü et al., 2012
		伟晶岩中白云母	Ar-Ar坪年龄	248.4 ± 2.1	王登红等, 2002
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	258.0 ± 3.8	Lü et al., 2021
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	231.8 ± 4.7	秦克章等, 2013
18	大喀拉苏Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	229.9 ± 1.4	Feng et al., 2020
		伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	228.2 ± 0.4	Feng et al., 2020
		伟晶岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	239.6 ± 3.8	Zhou et al., 2016
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	249.7 ± 0.7	任宝琴等, 2011
19	阿克巴斯塔乌Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	240.5 ± 1.4	任宝琴等, 2011
20	切别林Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	248.2 ± 2.2	秦克章等, 2013
21	苇子峡Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	248.2 ± 2.2	秦克章等, 2013
		伟晶岩中白云母	Ar-Ar坪年龄	237.4 ± 1.2	Zhou et al., 2016
22	冲乎尔Be矿	伟晶岩	锆石 U-Pb	234.2 ± 2.4	张辉等, 2019
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	296.3 ± 9.0	秦克章等, 2013
		伟晶岩 (No. 208)	锆石 U-Pb	241.5 ± 3.1	张辉等, 2019
		伟晶岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	258.1 ± 3.1	Zhou et al., 2016
23	小喀拉苏Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	262.3 ± 2.5	Zhou et al., 2016
		伟晶岩中白云母	Ar-Ar坪年龄	233.8 ± 0.4	王登红等, 2003
		白云母	Ar-Ar坪年龄	237.7 ± 1.3	Zhou et al., 2016
		伟晶岩	锆石 U-Pb	249.2 ± 2.9	张辉等, 2019
24	磨什尕Li-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 U-Pb	239.0 ± 2.6	张辉等, 2019
25	大萨孜Be矿	伟晶岩	锆石 U-Pb	239.0 ± 2.6	张辉等, 2019

续表 1

序号	矿床	测试对象	测试方法	年龄 (Ma)	参考文献
26	阿斯喀尔特Be-Nb-Mo矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	220.6 ± 1.6	刘文政等, 2015
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	218.2 ± 3.9	王春龙等, 2015
		似伟晶岩中辉钼矿	Re-Os 加权平均年龄	218.6 ± 1.3	王春龙等, 2015
		似伟晶岩中辉钼矿	Re-Os 等时线年龄	228.7 ± 7.1	刘文政等, 2015
		白云母钠长石花岗岩中辉钼矿	Re-Os 加权平均年龄	214.9 ± 1.2	丁欣等, 2016
		伟晶岩 I 带	锆石 SHRIMP U-Pb	220 ± 9	Wang et al., 2007
		伟晶岩 V 带	锆石 SHRIMP U-Pb	198 ± 7	Wang et al., 2007
		伟晶岩 VII 带	锆石 SHRIMP U-Pb	213 ± 6	Wang et al., 2007
		伟晶岩 II 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	186.5 ± 2.0	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 V 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	210.7 ± 6.3	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 VI 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	187.4 ± 2.7	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 VII 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	193.3 ± 6.4	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 VIII 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	198.5 ± 4.2	Zhou et al., 2015
27	可可托海稀有金属矿	伟晶岩 II 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	211.9 ± 3.2	陈剑锋, 2011
		伟晶岩 IV 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	214.9 ± 2.1	陈剑锋, 2011
		伟晶岩 V 带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	212.0 ± 4.1	陈剑锋, 2011
		缓倾斜部分伟晶岩带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	212.0 ± 1.8	陈剑锋, 2011
		伟晶岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	218 ± 2	Che et al., 2015
		伟晶岩 I 带中辉钼矿	Re-Os 等时线年龄	208.8 ± 2.4	Liu et al., 2014
		伟晶岩 II 带中白云母	Ar-Ar 坪年龄	179.7 ± 1.1	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 IV 带中白云母	Ar-Ar 坪年龄	182.1 ± 1.0	Zhou et al., 2015
		伟晶岩 VI 带中白云母	Ar-Ar 坪年龄	181.8 ± 1.1	Zhou et al., 2015
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	244.3 ± 1.1	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	195.9 ± 2.4	秦克章等, 2013
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	198.5 ± 2.5	Zhou et al., 2016
		白云母	Ar-Ar 坪年龄	178.8 ± 1.0	Zhou et al., 2016
		伟晶岩	锆石 U-Pb	约 208	张辉等, 2019
28	虎斯特Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	207.2 ± 1.6	Lü et al., 2012
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	206.8 ± 1.6	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	194.3 ± 1.6	秦克章等, 2013
		白云母	Ar-Ar 坪年龄	162.2 ± 0.9	Zhou et al., 2016
29	尚克兰Be	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	212.2 ± 1.7	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	199.1 ± 1.0	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	192.0 ± 2.3	Zhang et al., 2016
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	207.9 ± 5.1	秦克章等, 2013
30	群库尔Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	227.9 ± 2.6	张辉等, 2014
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	211.3 ± 2.4	张辉等, 2014
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	202.9 ± 0.8	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	191.8 ± 1.4	秦克章等, 2013
31	佳木开Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	238.3 ± 2.0	Lü et al., 2012
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	233.5 ± 3.7	Lü et al., 2012
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	188.3 ± 1.7	Lü et al., 2012
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	218.8 ± 1.9	Lü et al., 2012
32	库卡拉盖(650号)Li-Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	210.7 ± 1.6	Lü et al., 2012
		805脉伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	216.0 ± 2.6	马占龙等, 2015
		806脉伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	223.7 ± 1.8	马占龙等, 2015
		807脉伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	221 ± 15	马占龙等, 2015
33	柯鲁木特Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	224.6 ± 2.3	Zhang et al., 2016
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	191.6 ± 2.0	Zhang et al., 2016
34	卡鲁安Li矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	224.6 ± 2.3	Zhang et al., 2016
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	191.6 ± 2.0	Zhang et al., 2016

续表 1

序号	矿床	测试对象	测试方法	年龄 (Ma)	参考文献
34	卡鲁安Li矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	192.6 ± 2.3	Zhang et al., 2016
		803脉伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	209.5 ± 1.4	Feng et al., 2019
		802脉伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	198.3 ± 2.0	Feng et al., 2019
		805脉伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	224.3 ± 2.9	Feng et al., 2019
35	沙依肯布拉克Be矿	伟晶岩似文象结构带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	201.9 ± 2.3	杨富全等, 2018
		伟晶岩中块体微斜长石带	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	202.2 ± 3.4	杨富全等, 2018
36	阿祖拜Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	191.6 ± 2.1	Zhang et al., 2016
		伟晶岩	锆石 U-Pb	215.6 ± 0.9	周天怡, 2015
		伟晶岩	锆石 U-Pb	201.0 ± 1.3	周天怡, 2015
37	小虎斯特Li-Be-Nb-Ta矿	白云母	Ar-Ar坪年龄	154.1 ± 0.1	王登红等, 2000
38	阿拉散Be矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	190.6 ± 1.2	任宝琴等, 2011
39	库儒尔特Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	185 ± 2.7	杨富全等, 2018
40	别也萨麻斯Li-Be-Nb-Ta矿	伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	180.7 ± 0.5	任宝琴等, 2011
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	151 ± 1.8	丁建刚等, 2020
		伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	157.2 ± 0.5	吕正航等, 2015
东天山					
41	镜儿泉Li-Be-Nb-Ta矿	I号伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	218.0 ± 1.8	李寄邦等, 2020
		I号伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb	250.8 ± 1.0	凤永刚等, 2021
		II号伟晶岩	白云母 Ar-Ar	243.0 ± 2.0	陈郑辉等, 2006
42	国宝山Rb矿(甘肃)	天河石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	247 ± 3.0	贺昕宇, 2019
		含天河石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	246.8 ± 3.0	Chen et al., 2022
		含天河石花岗岩	独居石 LA-ICP-MS U-Pb	245.0 ± 1.2	Chen et al., 2022
		天河石花岗岩	独居石 LA-ICP-MS U-Pb	243.4 ± 2.0	Chen et al., 2022
		含天河石花岗岩	锡石 LA-ICP-MS U-Pb	241.8 ± 3.1	Chen et al., 2022
		天河石花岗岩	锡石 LA-ICP-MS U-Pb	242.2 ± 0.9	Chen et al., 2022
		含天河石花岗岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	239.8 ± 5.5	Chen et al., 2022
		天河石花岗岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	243.5 ± 2.3	Chen et al., 2022
		天河石伟晶岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	243.6 ± 1.9	Chen et al., 2022
		天河石伟晶岩	独居石 LA-ICP-MS U-Pb	247.1 ± 2.4	Chen et al., 2022
43	张宝山(白石头泉)Rb矿	天河石花岗岩	白云母 Ar-Ar	241.5 ± 2.7	吴昌志等, 2021
		黄玉钠长花岗岩	铌钽矿 LA-ICP-MS U-Pb	251.0 ± 1.1	吴昌志等, 2021
		含天河石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	248.0 ± 3.1	Zhi et al., 2021
44	沙东W-Rb矿	含黄玉天河石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	238 ± 5.9	Zhi et al., 2021
		花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	239 ± 2.0	Chen et al., 2018
西南天山					
45	波孜果尔Nb-Ta矿	矿化霓石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	275.1 ± 1.3	徐海明等, 2012
		矿化霓石花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	275 ± 1.4	徐海明等, 2012
		霓石钠闪碱长花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	290.6 ± 2.8	刘春花等, 2014
		霓石钠闪碱长花岗岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	289.4 ± 3.8	刘春花等, 2014
		霓石钠闪石英碱长正长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	291.6 ± 2.9	刘春花等, 2014
46	克其克果勒Nb-Ta矿	黑云母碱长正长岩	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	287.7 ± 2.9	刘春花等, 2014
		矿化霓霞正长岩	锆石 U-Pb	279	徐海明等, 2012
47	巴什苏洪铌钽矿	碱长花岗岩	锆石 SHRIMP U-Pb	277.0 ± 2.1	邹思远, 2016
西准噶尔					
48	白杨河Be-U-Mo矿	铍铀矿化萤石脉	白云母 Ar-Ar	303 ± 1.6	Li et al., 2015

综上所述, 新疆中亚造山带 48 个矿床(含甘肃国宝山铷矿)成矿年龄变化于 151~476 Ma, 主要集中在 180~290 Ma, 在 275 Ma(6 个矿床)、245 Ma(11 个矿

床)、215 Ma(8 个矿床)和 195 Ma(9 个矿床)出现峰值, 不同地区成矿时间有差异, 西南天山成矿作用早于东天山, 又早于阿尔泰成矿高峰期。

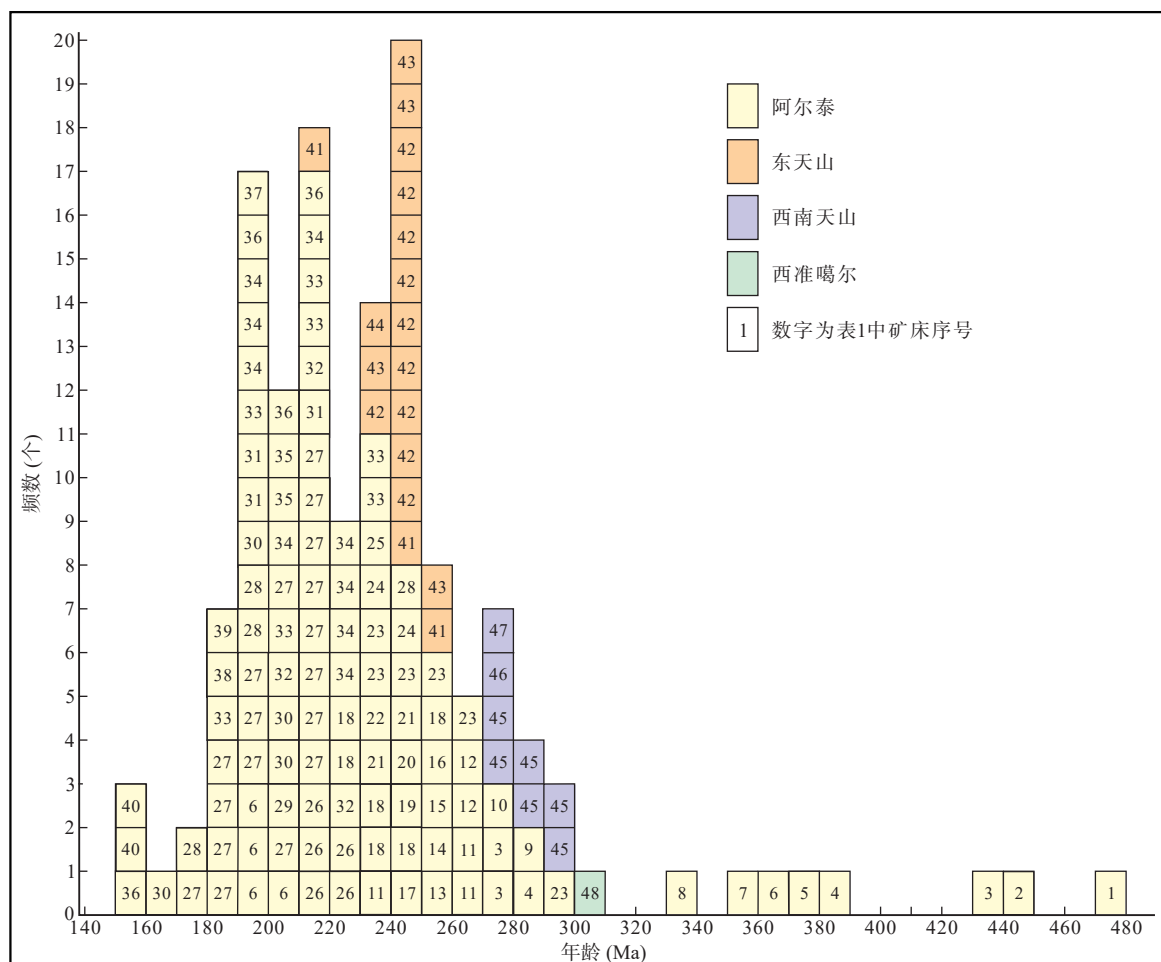


图9 新疆中亚造山带稀有金属矿床成矿年龄直方图

Fig. 9 Metallogenic age histogram of the rare metal deposits in the Central Asian Orogenic Belt of Xinjiang

5 侵入岩与成矿关系

阿尔泰多数稀有金属伟晶岩分布于侵入岩(主要为花岗岩,少量辉长岩)中或外接触带,稀有金属成矿与侵入岩的成因联系至关重要,关系到进一步找矿方向。前人研究表明(刘文政等, 2015; 王春龙等, 2015; 丁欣等, 2016), 阿斯喀尔特 Be-Nb-Mo 矿床发育伟晶岩型稀有金属矿和花岗岩型 Be 矿化, 空间上、时间上和成因上表明, 稀有金属矿的形成与白云母钠长花岗岩的演化有关。大喀拉苏 Be-Nb-Ta 矿形成于 228.2~258 Ma, 赋矿的黑云二长花岗岩年龄为 261.4 Ma(李强等, 2019), 稀有金属矿化与黑云二长花岗岩存在成因关系。将军山 Rb-Nb-Ta 矿赋存于白云母-天河石-钠长石花岗岩和天河石伟晶岩中, 形成与花岗岩有关。尚克兰 Be 矿包括似伟晶岩型、云英岩型和白云母钠长花岗岩型矿化, 铍矿化与白云母钠长花岗岩有成因

联系。可可托海矿区位于阿拉尔岩基西南, 二者是否有成因关系, 存在很大争议。部分学者(Zhu et al., 2006; Liu et al., 2014; 张亚峰等, 2015)认为与阿拉尔花岗岩存在时间、空间上的密切关系, 可可托海稀有金属矿的形成与阿拉尔花岗岩基有关; 但陈剑锋(2011)、张辉等(2014)认为, 阿拉尔花岗岩不属于稀有金属花岗岩, 不可能是形成稀有金属伟晶岩脉的母岩, 与可可托海矿床的形成没有关系。阿尔泰其他稀有金属矿的形成与围岩或周边的侵入岩不存在成因联系, 成矿时间明显晚于侵入岩, 如卡鲁安 Li 矿、库卡拉盖 Li-Be 矿、佳木开碧玺矿及群库尔 Be-Nb-Ta 矿与哈龙花岗岩基没有成因联系; 柯鲁木特 Li-Be-Nb-Ta 矿 7 件伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄变化于 188~238 Ma, 与围岩吉得克花岗岩(446 Ma 和 456 Ma)相差 218~258 Ma, 吉得克花岗岩与稀有金属成矿没有成因联系; 沙依肯布拉克 Be 矿、别也萨麻斯 Li-Be-Nb-Ta 矿也是如此。此外, 有些稀有金属矿赋存于片

岩中,周围及外围并没有发现侵入岩,如小喀拉苏 Li-Be-Nb-Ta 矿、阿巴宫-塔拉特 Be-Nb-Ta 矿等。综上所述,阿尔泰伟晶岩及稀有金属矿的形成非常复杂。

东天山的沙东 W-Rb 矿为矽卡岩型,矽卡岩是黑云母花岗岩侵位时岩浆热液交代大理岩的产物。Rb 分布于 3 号钨矿带的白云母和锂云母中,并与白钨矿有密切关系。因此,铷矿化与黑云母花岗岩有密切成因联系。张宝山和国宝山 Re 矿主要赋存于(含)天河石花岗岩、含黄玉天河石花岗岩中,少量在天河石伟晶岩脉或囊状体中,Re 主要赋存在天河石中,其次是铁锂云母中。白石头泉岩体中天河石花岗岩和含黄玉天河石花岗岩相带具有全岩矿化特征,这两个铷矿的形成与天河石花岗岩有关。镜儿泉 Li-Be-Nb-Ta 矿属于伟晶岩型,含矿伟晶岩赋存于白云母花岗岩岩体顶部,含矿伟晶岩脉形成于 218~251 Ma,白云母花岗岩和黑云母(二云母)花岗岩年龄为 220~253 Ma,结合岩浆演化,认为含矿伟晶岩是花岗岩演化的产物(Liu et al., 2020; 李寄邦等, 2020; Muhtar et al., 2020; 凤永刚等, 2021)。由此可见,东天山稀有金属矿的形成相对简单,是岩浆分异和岩浆演化的产物。

西南天山的稀有金属矿床分布于塔里木盆地北缘碱性花岗岩带,主要为碱性花岗岩型、碱性正长岩型、花岗伟晶岩型和碱性伟晶岩型,前两种类型成矿作用与碱性岩浆侵入作用有关。玛依达 REE-Nb-Ta-Zr 矿赋存于黑云母-霞石-钠长石伟晶岩中,含矿伟晶岩与碱性正长岩有关。依兰里克 REE-Nb-Ta-Zr 矿赋存于金云母-透辉石-钠长石伟晶岩中,与碳酸岩有关。

6 构造演化与成矿作用

6.1 板块俯冲与稀有金属成矿

新疆中亚造山带在中寒武世—中奥陶世(510~460 Ma)古亚洲洋板块开始向北俯冲到西伯利亚板块的阿尔泰微大陆之下(王涛等, 2010),在南阿尔泰陆缘弧环境形成也留曼伟晶岩型 REE-Nb 矿(476 Ma)(任宝琴等, 2011)。460~330 Ma 期间古亚洲洋板块继续向北俯冲,晚奥陶世—早志留世在中阿尔泰陆缘弧环境形成了那森恰和拜城伟晶岩,以工业白云母为特色,伴生稀有金属矿(448 Ma 和 436 Ma)(王登红等, 2002)。早古生代板块俯冲作用在中阿尔泰形成少量稀有金属矿和大量工业白云母,是新疆中亚造山带发

现最早的稀有金属成矿作用,但目前成矿强度不高。阿尔泰有大量白云母矿,其稀有金属含矿性及成矿潜力还值得评价。

在早—中泥盆世南阿尔泰形成岛弧和陆缘弧,在火山盆地形成与海相火山作用有关的铁、铜、铅、锌和金矿化(牛贺才登, 2006; 柴凤梅等, 2009; Yang et al., 2018)。中泥盆—早石炭世(386~333 Ma)在中阿尔泰形成伟晶岩型工业白云母为特色,伴有 Nb-Ta-Be 矿化及稀土矿化(乔拉克赛、库威)和 Li-Be-Nb-Ta 矿化(青河塔拉特、阿木拉宫、铁木勒特)。综上所述,中泥盆世—早石炭世的稀有金属成矿作用只出现在中阿尔泰,与板块俯冲作用有关(图 10),稀有金属成矿元素组合复杂,并伴生稀土和工业白云母,在评价稀有金属矿时,注意评价稀土成矿潜力。

6.2 后碰撞环境与稀有金属成矿

新疆中亚造山带在晚石炭世—晚二叠世为后碰撞阶段(Wang et al., 2006; Han et al., 2018)。二叠纪(258~296 Ma)是新疆中亚造山带重要的稀有金属成矿期之一,仅次于三叠纪,主要分布于中阿尔泰、南阿尔泰和西南天山,有 17 个矿床中出现了二叠纪年龄。西南天山已发现的稀有金属矿均分布于塔里木北缘碱性岩带,碱性岩带形成于二叠纪(252~292 Ma)(杨富全等, 2001; 刘春花等, 2014; 杨林春, 2016; 董连慧等, 2018; 肖昱等, 2021)。孙政浩等(2021)认为塔里木北缘碱性岩带发育的铌、稀土、钽、钨、铷、铯等稀有稀土金属矿化与地幔柱引起的幔源岩浆底侵有关,其构造背景可能为地幔柱对造山带的叠置。二叠纪后碰撞伸展环境下形成了稀有金属成矿作用,是新疆中亚造山带分布最广,形成的矿床数量仅次于三叠纪,但不同地区成矿元素存在差异,这一期是新疆今后找矿的重点之一。

6.3 板内环境与稀有金属成矿

新疆中亚造山带在三叠纪进入板内(或陆内)演化阶段,缺失沉积地层,只发育少量板内岩浆侵入作用。东天山已发现的稀有金属矿均形成于早—中三叠世,并与花岗质岩浆侵入作用有关,形成花岗岩型和伟晶岩矿床,以 Rb 成矿为特色。新疆阿尔泰三叠纪(200~256 Ma)是稀有金属成矿高峰期,有 26 个矿床出现了三叠纪年龄,主要为伟晶岩型,少量花岗岩型,分布于中阿尔泰和南阿尔泰。成矿元素组合复杂,Be、Li、Li-Be-Nb-Ta、Be-Nb-Mo、Li-Be-Nb-Ta-Rb-Cs-Hf。在俄罗斯山区阿尔泰南部与中、蒙、哈国接壤的

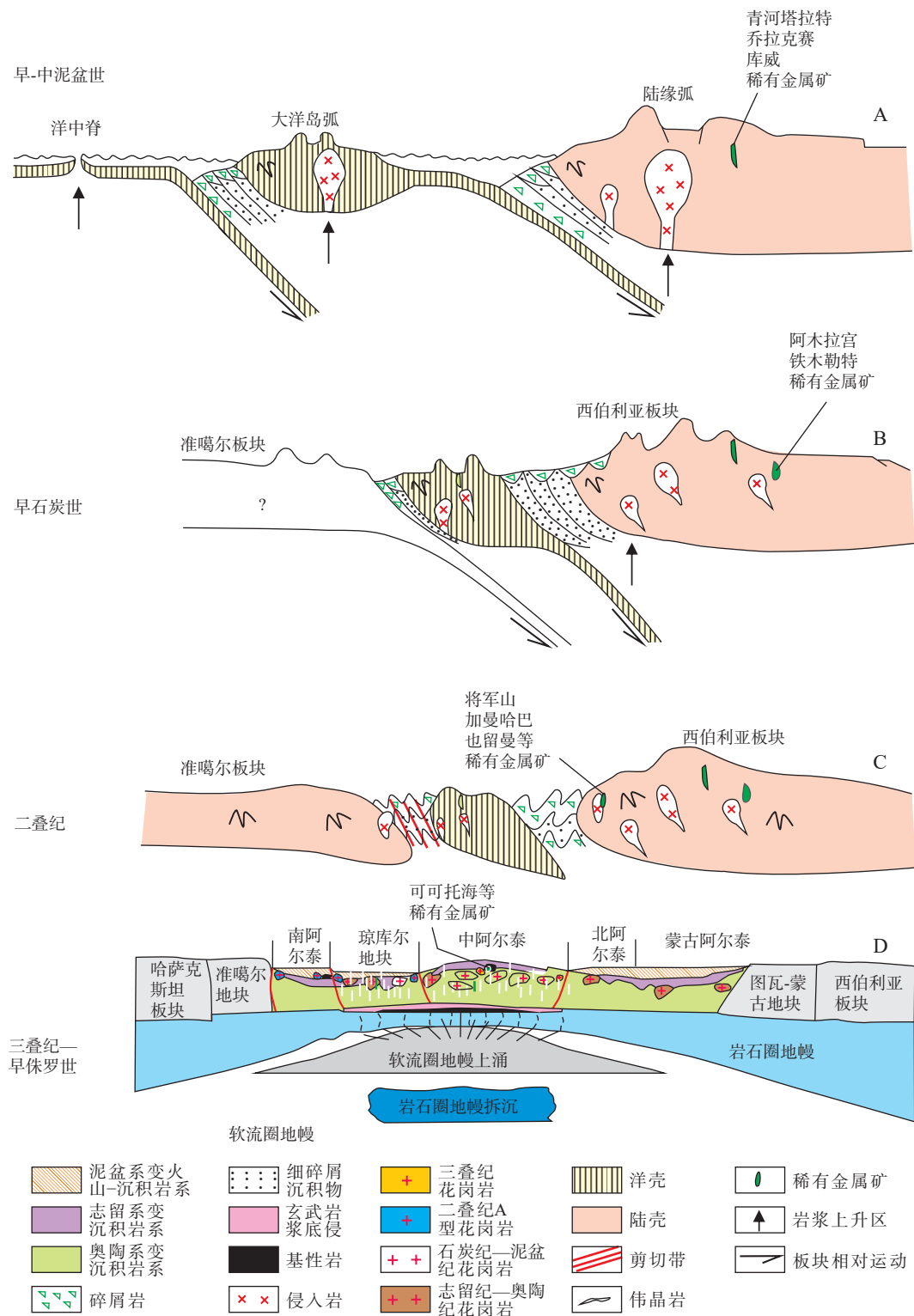


图10 新疆阿尔泰不同时代稀有金属矿形成的构造背景(A、B和C据牛贺才等, 2006; Yang et al., 2018; D据张辉等, 2019 修改)

Fig. 10 Tectonic setting of rare metallic deposit of various ages in the Altay Metallogenic age histogram of the rare metal deposits in the Central Asian Orogenic Belt of Xinjiang

地区有十多个三叠纪花岗岩体均与稀有金属矿床有关, 如卡尔古特大型钨钼稀有金属矿、阿拉钦中型锂

钽矿、昆古尔贾林小型锂钽矿等。俄罗斯阿尔泰三叠纪花岗岩类和与西伯利亚超级地幔柱有关的幔源含

矿岩浆活动的时限基本一致, 认为是这个地幔柱演化最后阶段的产物(Dobretsov et al., 1995; Annikova et al., 2006; Sokolova et al., 2011; Gaskov, 2018)。

侏罗纪阿尔泰仍然为板内演化阶段, 稀有金属成矿为主, 主要是中—晚三叠世的成矿作用延续到侏罗纪。侏罗纪形成的矿床只有小虎斯特 Li-Be-Nb-Ta 矿(191 Ma)、阿拉散 Be 矿(185 Ma)、库儒尔特 Li-Be-Nb-Ta 矿(181 Ma)和别也萨麻斯 Li 矿(151~157 Ma), 成矿元素组合复杂。

总之, 三叠纪—侏罗纪为板内环境, 处于区域大规模伸展环境, 是新疆中亚造山带稀有金属成矿高峰期, 分布于阿尔泰和东天山, 不同地区成矿各具特色, 成矿元素组合最为复杂, 在阿尔泰具有三叠纪到侏罗纪连续成矿特征, 该期是稀有金属找矿重点成矿期。

7 结论

(1) 新疆中亚造山带稀有金属矿主要为花岗伟晶岩型, 其次是花岗岩型, 少量碱性花岗岩型、碱性正长岩型、火山热液型、碱性伟晶岩型和矽卡岩型。主要分布于中阿尔泰和南阿尔泰, 其次是西南天山的拜城和哈拉峻地区, 东天山的中天山地块和康古尔弧后盆地, 西准噶尔、西天山等地区零星分布。阿尔泰稀有金属矿床成矿元素组合复杂, 成矿类型以花岗伟晶岩型为主, 东天山以花岗岩型和矽卡岩型铷矿为特色, 西南天山以形成与碱性岩有关铌钽矿为特色。

(2) 稀有金属成矿年龄变化于 151~476 Ma, 主要集中在 180~290 Ma(早侏罗世—二叠纪), 出现了连续成矿作用, 成矿元素组合复杂, 在 275 Ma、245 Ma、215 Ma 和 195 Ma 出现峰值, 不同地区成矿时间存在差异。二叠纪为后碰撞环境, 三叠纪—侏罗纪为陆内环境, 均为区域伸展环境。

(3) 地质及年代学研究表明东天山和西南天山稀有金属成矿与岩浆侵入作用有关, 但阿尔泰除阿斯喀尔特、大喀拉苏 Be-Nb-Ta 矿等少数矿床与赋矿花岗岩存在成因联系外, 多数稀有金属矿与赋矿侵入岩不存在直接的成因联系, 岩体只是赋矿围岩。

致谢: 项目实施过程中得到原新疆维吾尔自治区有色地质勘查局郭旭吉教授级高级工程师, 原新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七〇一队, 原新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七〇六队, 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室领导和技术

人员的大力支持和帮助。文中引用了大量前人公开发表的论文以及未出版的地质报告和研究报告等, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献(References):

- 柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 等. 阿尔泰南缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1403-1415.
- CHAI Fengmei, MAO Jingwen, DONG Lianhui, et al. Geochronology and genesis of the metarhyolites in the Kangbutiebao Formation from the Lelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(6): 1403-1415.
- 陈剑锋. 阿尔泰 3 号脉缓倾斜部分的形成和演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011, 1-86.
- CHEN Jianfeng. Geochemistry of the plate part in Altai No. 3 pegmatite and its formation and evolution (Master dissertation research paper) [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011, 1-86.
- 陈衍景, 韩金生. 新疆阿尔泰造山带伟晶岩型稀有金属矿床成矿作用[J]. 地质学报, 2024, 98(5): 1452-1472.
- CHEN Yanjing, HAN Jinsheng. Pegmatite-type mineralization of rare metals in the Altai orogenic belt, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(5): 1452-1472.
- 陈郑辉, 王登红, 龚羽飞, 等. 新疆哈密镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 470-476.
- CHEN Zhenghui, WANG Denghong, GONG Yufei, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotope dating of muscovite from Jing'erquan pegmatite rare metal deposit in Hami, Xinjiang, and its Geological significance[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 470-476.
- 丁建刚, 杨成栋, 杨富全, 等. 新疆阿尔泰别也萨麻斯稀有金属矿床含矿伟晶岩与花岗岩围岩成因关系[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(1): 71-85.
- DING Jiangang, YANG Chengdong, YANG Fuquan, et al. Genetic relationship between ore-bearing pegmatite and the surrounding granite of Bieyesamasi rare metal deposit in Altay of Xinjiang, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(1): 71-85.
- 丁欣, 李建康, 丁建刚, 等. 新疆阿斯喀尔特 Be-Nb-Mo 矿床 Re-Os 同位素年龄及地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1): 60-65.
- DING Xin, LI Jiankang, DING Jiangang, et al. Molybdenite Re-Os isochron age and geological implication in Asikaerte Be-Nb-Mo deposit of Xinjiang[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1): 60-65.
- 董连慧, 周汝洪, 赵同阳, 等. 新疆侵入岩[M]. 北京: 地质出版社, 2018, 1-332.
- 董连慧. 新疆矿产资源[R]. 2018.
- 董连慧, 冯京, 刘德权, 等. 新疆铁矿床成矿规律及成矿预测评价[M]. 北京: 地质出版社, 2013.

- 凤永刚, 梁婷, 雷如雄, 等. 稀有金属伟晶岩过度冷却与侵位之关系—基于野外地质观察及年代学的思考[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(1): 100–116.
- FENG Yonggang, LIANG Ting, LEI Ruxiong, et al. Relationship between undercooling and emplacement of rare-element pegmatites—thinking based on field observations and pegmatite geochronology[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(1): 100–116.
- 甘肃省地质调查院. 新疆哈密市张宝山铷多金属矿普查报告[R]. 2016.
- 高景刚, 梁婷, 凤永刚, 等. 阿尔泰哈龙稀有金属矿集区复式岩体与伟晶岩成因关系探讨[J]. 岩石学报, 2023, 39(7): 1908–1930.
- GAO Jinggang, LINAG Ting, FENG Yonggang, et al. Genetic relationship between the complex massif and pegmatites in Halong rare metal ore concentrated area, Altay[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(7): 1908–1930.
- 顾连兴, 吴昌志, 张遵忠, 等. 东疆白石头泉含黄玉天河石花岗岩体的地球化学: 分带和岩浆演化[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 207–223.
- GU Lianxing, WU Changzhi, ZHANG Zunzhong, et al. Geochemistry of the Baishitouquan topaz bearing amazonite granite: Zoning and magma evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(2): 207–223.
- 郭旭吉, 马占龙. 新疆福海县哈龙稀有金属矿床地质特征及成因浅析[J]. 西北地质, 2015, 48(3): 355–361.
- GUO Xuji, MA Zhanlong. Geological characteristics and genesis of Halong rare metal deposit in Fuhai County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(3): 355–361.
- 郭正林, 申茂德, 郭旭吉, 等. 阿尔泰地区花岗伟晶岩稀有金属成矿机理及找矿标志浅析[J]. 新疆地质, 2013, 31(S1): 77–83.
- GUO Zhenglin, SHEN Maode, GUO Xuji, et al. Analysis of prospecting and metallogenesis of rare metal in granitic pegmatite from Altai[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(S1): 77–83.
- 韩宝福. 中俄阿尔泰山中生代花岗岩与稀有金属矿床的初步对比分析[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 655–660.
- HAN Baofu. A Preliminary comparison of Mesozoic granitoids and rare metal deposits in Chinese and Russian Altai Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 655–660.
- 何国琦, 成守德, 徐新, 等. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2004, 1–65.
- 贺昕宇. 中天山东段国宝山三叠纪高铷天河石花岗岩年代学及岩石地球化学研究[J]. 矿产勘查, 2019, 10(12): 2899–2905.
- HE Xinyu. Geochronology and geochemistry of Triassic high Rb amazonite granite from Guobaoshan in eastern segment of the middle Tianshan[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(12): 2899–2905.
- 李通国, 梁明宏, 余君鹏, 等. 甘肃省稀有(稀土)金属成矿地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018, 1–158.
- 李寄邦, 张辉, 吕正航. 东天山镜儿泉伟晶岩与花岗岩成因关系: 来自锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据[J]. 地球化学, 2020, 49(4): 385–403.
- LI Jibang, ZHANG Hui, LÜ Zhenghang. Genetic linkage between pegmatites and granites from Jingerquan, East Tianshan Mountains: Evidence from zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic data[J]. Geochimica, 2020, 49(4): 385–403.
- 李强, 杨富全, 杨成栋. 新疆阿尔泰大喀拉苏花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(4): 396–413.
- LI Qiang, YANG Fuquan, YANG Chengdong. Geochronology and geochemical characteristics of Dakalasu granite in Altay of Xinjiang, China and their tectonic significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(4): 396–413.
- 刘文政, 张辉, 唐红峰, 等. 新疆阿斯喀尔特铍钼矿床中辉钼矿 Re-Os 定年及成因意义[J]. 地球化学, 2015, 44(2): 145–154.
- LIU Wenzheng, ZHANG Hui, TANG Hongfeng, et al. Molybdenite Re-Os dating of the Asikaerte Be-Mo deposit in Xinjiang, China and its genetic implications[J]. Geochimica, 2015, 44(2): 145–154.
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1595–1614.
- LIU Chunhua, WU Cailai, GAO Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1595–1614.
- 刘春花. 新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类岩石地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- LIU Chunhua. Geochemical Characteristics of A-type Granitoids in Boziguo'er, Baicheng County, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- 刘国仁, 黄诚, 张新泰, 等. 新疆阿勒泰地区矿产资源规划研究(2016–2020 年)[R]. 2017.
- 刘源, 杨家喜, 胡健民, 等. 阿尔泰构造带喀纳斯群时代的厘定及其意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 887–898.
- LIU Yuan, YANG Jiaxi, HU Jianmin, et al. Restricting the deposition age of the Kanas Group of Altai tectonic belt and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 887–898.
- 刘延兵, 文美兰, 吴彦彬, 等. 新疆哈密新发现的铷矿床成因: 来自矿床地质和地球化学的证据[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 41–54.
- LIU Yanbing, WEN Meilan, WU Yanbin, et al. Genesis of the newly discovered rubidium deposit in Hami, Xinjiang: evidence from deposit geology and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 41–54.
- 吕正航, 张辉, 唐勇. 新疆别也萨麻斯 L1 号伟晶岩脉 Li-Nb-Ta 矿床与围岩花岗岩成因关系研究[J]. 矿物学报, 2015, 35(S1): 323.
- LÜ Zhenghang, ZHANG Hui, TANG Yong. The study of genetic relationship between Bieyesamasi No. L1 pegmatite Li-Nb-Ta ore deposits and wall rock granites, Xinjiang[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(S1): 323.
- 马占龙, 张辉, 唐勇, 等. 新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石 U-Pb 定年、

- 铅同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究[J]. 地球化学, 2015, 44(1): 9–26.
- MA Zanlong, ZHANG Hui, TANG Yong, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite[J]. *Geochimica*, 2015, 44(1): 9–26.
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 1–184.
- 秦克章, 申茂德, 唐冬梅, 等. 阿尔泰造山带伟晶岩型稀有金属矿化类型与成岩成矿时代[J]. 新疆地质, 2013, 31(S1): 1–7.
- QIN Kezhang, SHEN Maode, TANG Dongmei, et al. Intrusive and mineralization ages of Pegmatite rare element deposits in Chinese Altay[J]. *Xinjiang Geology*, 2013, 31(S1): 1–7.
- 任宝琴, 张辉, 唐勇, 等. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 587–596.
- REN Baoqin, ZHANG Hui, TANG Yong, et al. LA-ICP MS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(3): 587–596.
- 三金柱, 郭旭吉, 成志军, 等. 新疆卡鲁安及外围锂能源金属矿产基地深部探测技术示范[R]. 2020.
- 申茂德, 郭旭吉, 唐冬梅, 等. 阿尔泰稀有金属成矿规律研究与靶区优选评价[R]. 2016.
- 申萍, 潘鸿迪, 李昌昊, 等. 中哈俄阿尔泰稀有金属矿床时空分布、成因及成矿规律[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3): 487–505.
- SHEN Ping, PAN Hongdi, LI Changhao, et al. Temporal-spatial distribution, genesis and metallogenic regularity of the rare Metal deposits in Altay of China, Kazakhstan and Russia[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(3): 487–505.
- 孙政浩, 秦克章, 毛亚晶, 等. 塔里木北缘波孜果尔碱性(花岗)岩铌-钽-锆-铷-稀土矿床钠铁闪石、霓石特征及意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(12): 3687–3711.
- SUN Zhenghao, QIN Kezhang, MAO Yajing, et al. Characteristics and significance of aegirine and arfvedsonite in Boziguoer Nb-Ta-Zr-Rb-REE deposit related to alkaline granite, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(12): 3687–3711.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 新疆阿尔泰印支期伟晶岩的成矿年代学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(1): 14–17.
- WANG Denghong, CHEN Yuchuan, XU Zhigang. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope dating on muscovites from indosinian rare metal deposits in Central Altay, Northwestern China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(1): 14–17.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 2002, 1–493.
- 王登红, 陈毓川, 邹天人, 等. 新疆阿尔泰阿祖拜稀有金属-宝石矿床的成矿时代—燕山期稀有金属成矿的新证据[J]. 地质论评, 2000, 46(3): 307–311.
- WANG Denghong, CHEN Yuan, ZOU Tianren, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Azubai rare metal-gem deposit in Altay, Xinjiang—New evidence for Yanshanian mineralization of rare metals[J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 307–311.
- 王春龙, 秦克章, 唐冬梅, 等. 阿尔泰阿斯喀尔特 Be-Nb-Mo 矿床年代学、锆石 Hf 同位素研究及其意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(8): 2337–2352.
- WANG Chunlong, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Geochronology and Hf isotope of zircon for the Arskartor Be-Nb-Mo deposit in Altay and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(8): 2337–2352.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 461–469.
- WANG Jingbin, WANG Yuwang, HE Zhijun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 461–469.
- 王涛, 童英, 李舫, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义—以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 595–618.
- WANG Tao, TONG Ying, LI Shan, et al. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 595–618.
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 等. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铷矿床的主要特征与研究进展[J]. 岩石学报, 2021, 37(9): 2604–2628.
- WU Changzhi, JIA Li, LEI Ruxiong, et al. Advances and general characteristics of the amazonite granite and related rubidium deposits in Central Asian Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(9): 2604–2628.
- 肖昱, 李顺庭, 任经武, 等. 新疆西南天山哈拉峻地区富碱花岗岩稀有金属含矿性研究—以巴什苏洪岩体为例[J]. 矿产勘查, 2021, 12(7): 1548–1555.
- XIAO Yu, LI Shunting, REN Jingwu, et al. Study on rare metal ore-bearing property of alkali-rich granite in Halajun area of Tianshan mountains, SW Xinjiang: a case study of Basisuhong rock mass[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(7): 1548–1555.
- 谢明材, 苏本勋, 王忠梅, 等. 塔里木北缘与碱性岩有关的稀有—稀土矿床成矿作用研究[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 420–438.
- XIE Mingcai, SU Benxun, WANG Zhongmei, et al. Research on the characteristics of rare and rare earth deposits associated with alkaline rocks in the northern margin of Tarim, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(2): 420–438.
- 徐海明, 邹天人, 方景玲, 等. 新疆波孜果尔铌钽矿成矿床时代及成因研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 625–626.
- XU Haiming, ZOU Tianren, FANG Jingling, et al. Study on age and genesis of niobium-tantalum deposit in Boziguoer, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(S1): 625–626.
- 杨成栋, 丁建刚, 杨富全, 等. 新疆阿尔泰别也萨麻斯矿区奥陶纪花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2020, 66(6): 1499–1514.
- YANG Chengdong, DING Jiangang, YANG Fuquan, et al. Geochemistry and its geological significance of the Ordovician granite from the Bieyesamasi deposit, Altay, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 2020, 66(6): 1499–1514.

- 杨富全, 张忠利, 王蕊, 等. 新疆阿尔泰稀有金属矿地质特征及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(6): 1010–1026.
- YANG Fuquan, ZHANG Zhongli, WANG Rui, et al. Geological characteristics and metallogenesis of rare metal deposits in Altay, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia* [J]. 2018, 42(6): 1010–1026.
- 杨富全, 王立本, 叶锦华, 等. 新疆霍什布拉克地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国区域地质, 2001, 20(3): 267–273.
- YANG Fuquan, WANG Liben, YE Jinhua, et al. Zircon U-Pb ages of granites in the Huoshibulake area, Xinjiang[J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(3): 267–273.
- 杨林春, 郑清连, 郑勇, 等. 西南天山巴什索贡岩体岩石地球化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 2016, 34(1): 93–99.
- YANG Linchun, ZHENG Qinglian, ZHENG Yong, et al. The geochemical characteristics and geological significance of Bashisuogong pluton in southwest Tianshan[J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(1): 93–99.
- 余元军, 万建领, 闫佐, 等. 新疆阿图什苏洪东碱性花岗岩型钽钼富矿脉的发现及意义[J]. 地质学刊, 2021, 45(3): 225–229.
- YU Yuanjun, WAN Jianling, YAN Zuo, et al. Discovery and significance of the Suhongdong alkaline granite-type Nb-Ta-enriched vein in Artux, Xinjiang[J]. *Journal of Geology*, 2021, 45(3): 225–229.
- 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心. 2019 年全球矿产资源形势分析报告[R]. 2020.
- 周天怡. 中国新疆阿祖拜伟晶岩型海蓝宝石成因研究[D]. 北京: 北京大学, 2015, 124.
- ZHOU Tianyi. Genetic study on aquamarine of Azubai pegmatitic type in Xinjiang, China (Doctor dissertation research paper) [D]. Beijing: Peking University, 2015, 124.
- 邹思远. 塔里木大火成岩省晚期岩浆事件与演化过程[D]. 杭州: 浙江大学, 2016, 33–34.
- ZOU Siyuan. Late magmatic events and evolution in Tarim volcanic diagenetic Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016, 33–34.
- 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 1–264.
- 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 等. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 845–848.
- ZOU Tianren, XU Jue, CHEN Weishi, et al. Rare and rare earth mineral deposits related to alkaline rocks on northern margin of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(S1): 845–848.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 792–814.
- ZHANG Hui, LÜ Zhenghang, TANG Yong. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 792–814.
- 张辉, 唐勇, 吕正航, 等. 新疆阿尔泰成矿带哈龙-青河一带稀有金属成矿规律及找矿靶区预测研究[R]. 2014, 1–154.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等. 阿尔泰南缘可可托海地区阿拉尔花岗 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其源区意义[J]. 地质学报, 2015, 89(2): 339–354.
- ZHANG Yafeng, LIN Xinwang, GUO Qiming, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of Aral granitic plutons in Koktokay Area in the southern Altay margin and their source significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 339–354.
- Annikova I Yu, Vladimirov A G, Vystavnoi S A, et al. U-Pb and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating and Sm-Nd and Pb-Pb isotope systematics of the Kalguty Mo-W ore-magmatic system, Southern Altai[J]. *Petrologiya*, 2006, 14(2): 90–108.
- Che Xudong, Wu Fuyuan, Wang Rucheng, et al. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 979–989.
- Chen Bin, Jahn Borming. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications[J]. *Geological Magazine*, 2002, 139(1): 1–13.
- Chen Boyang, Wu Changzhi, Brzozowski Matthew J, et al. Geochronology and tectonic setting of the giant Guobaoshan Rb deposit, Central Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141: 104636.
- Chen Chao, Lü Xinbiao, Wu Chunming, et al. Origin and geodynamic implications of concealed granite in Shadong Tungsten deposit, Xinjiang, China: Zircon U-Pb chronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotope constraint[J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29: 114–129.
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. *International Geology Review*, 1995, 37: 335–360.
- Feng Yonggang, Liang Ting, Linnen Robert, et al. LA-ICP-MS dating of high-uranium columbite from No. 1 pegmatite at Dakalasu, the Chinese Altay orogen: Assessing effect of metamictization on age concordance[J]. *Lithos*, 2020, 362–363: 105461.
- Feng Yonggang, Liang Ting, Zhang Zhongli, et al. Columbite U-Pb geochronology of Kalu'an lithium pegmatites in northern Xinjiang, China: Implications for genesis and emplacement history of rare element pegmatites[J]. *Minerals*, 2019, 9(8): 456.
- Gao Jianfeng, Wang Haohua. Permian mafic-ultramafic magmatism and sulfide mineralization in the Central Asian Orogenic Belt: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 264: 106071.
- Gaskov I V. Features of magmatism-related metallogeny of Gorny Altai and Rudny Altai (Russia)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, 59: 1010–1021.
- Gulley A L, Nassar N T, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4111–4115.
- Han Yigui, Zhao Guochun. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 129–152.

- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Su Benxun, et al. Late Paleozoic metallogenesis and evolution of the Chinese Western Tianshan Collage, NW China, Central Asia orogenic belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 124: 103643.
- Li Xiaofeng, Wang Guo, Mao Wei, et al. Fluid inclusions, muscovite Ar–Ar age, and fluorite trace elements at the Baiyanghe volcanic Be–U–Mo deposit, Xinjiang, northwest China: Implication for its genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 387–399.
- Liu Feng, Zhang Zhixin, Li Qiang, et al. New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 6: 209–219.
- Liu Siyu, Wang Rui, Jeon H, et al. Indosinian magmatism and rare metal mineralization in East Tianshan orogenic belt: An example study of Jingerquan Li–Be–Nb–Ta pegmatite deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 116: 103265.
- Lü Zhenghang, Zhang Hui, Tang Yong, et al. Petrogenesis and magmatic–hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altay, Northws[J]. *Lithos*, 2012, 154: 374–391.
- Lü Zhenghang, Zhang Hui, Tang Yong, et al. Anatexis origin of rare metal/earth pegmatites: Evidences from the Permian pegmatites in the Chinese Altai[J]. *Lithos*, 2021, 380–381: 105865.
- Lü Zhenghang, Zhang Hui, Tang Yong, et al. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U–Pb age and Hf isotope[J]. *Ore Geological Review*, 2018, 95: 161–181.
- Mao Qiqui, Wang Jingbin, Xiao Wenjiao, et al. From Ordovician nascent to early Permian mature arc in the southern Altaids: Insights from the Kalatage inlier in the Eastern Tianshan, NW China[J]. *Geosphere*, 2021, 17: 647–683.
- Muhtar M N, Wu Changzhi, Santosh M, et al. Peraluminous granitoid magmatism from isotopically depleted sources: The case of Jing'erquanbei pluton in eastern Tianshan, Northwest China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(1): 117–132.
- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn Borming, et al. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogeny[J]. *Journal of Geology*, 2006, 114: 735–751.
- Wang Tao, Tong Ying, Jahn Borming, et al. SHRIMP U–Pb Zircon geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32: 325–336.
- Sololova E N, Smirnov S Z, Astrelina E I, et al. Ongonite–elvan magmas of the Kalguty ore-magmatic system (Gorny Altai): composition, fluid regime, and genesis[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, 52: 1378–1400.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, et al. A review of the geological characteristics and mineralization history of iron deposits in the Altay orogenic belt of the Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 54: 1–16.
- Yang Fuquan, Geng Xinxia, Wang Rui, et al. A synthesis of mineralization styles and geodynamic settings of the Paleozoic and Mesozoic metallic ore deposits in the Altay Mountains, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 159: 233–258.
- Zhang Xin, Zhang Hui, Ma Zanlong, et al. A new model for the granite–pegmatite genetic relationships in the Kaluan–Azubai–Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altay[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 124: 139–155.
- Zhang Zhenlong, Yang Fuquan, Zhou Taofa, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Paleozoic ore-host volcanic sequence in the Kalatag area, East Tianshan, NW China: Implication for tectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2023, 97(5): 1372–1387.
- Zhi Jun, Lei Ruxiong, Chen Boyang, et al. Zircon genesis and geochronology for the Zhangbaoshan super-large rubidium deposit in the Eastern Tianshan, NW China: Implication to magmatic–hydrothermal evolution and mineralization processes[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 682720.
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. LA–ICP–MS U–Pb zircon, columbite–tantalite and ^{40}Ar – ^{39}Ar muscovite age constraints for the rare-element pegmatite dykes in the Altai orogenic belt, NW China[J]. *Geological Magazine*, 2016, 155(3): 707–728.
- Zhou Qifeng, Qin Kezhang, Tang Dongmei, et al. Formation age and evolution time span of the Koktokay No. 3 pegmatite, Altai, NW China: evidence from U–Pb Zircon and ^{40}Ar – ^{39}Ar Muscovite Ages[J]. *Resource Geology*, 2015, 65(3): 210–231.
- Zhu Yongfeng, Zeng Yishan, Gu Libing. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27: 61–77.