

赵路通,王京彬,王玉往.西南天山陆相砂砾岩型铜铅锌矿床成矿特征与成矿作用研究进展.吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(4): 1177-1198. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230057.

Zhao Lutong, Wang Jingbin, Wang Yuwang. General Characteristics and Research Progresses in Metallogenesis of the Continental Sandstone-Hosted Cu-Pb-Zn Deposits in the Southwest Tianshan. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1177-1198. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230057.

西南天山陆相砂砾岩型铜铅锌矿床成矿特征 与成矿作用研究进展

赵路通¹, 王京彬², 王玉往³

- 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012
- 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 厦门 361000
- 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012

摘要:西南天山造山带中—新生代沉积盆地(库孜贡苏盆地、乌鲁—乌恰盆地、柯坪盆地、库车盆地)发育包括乌拉根超大型铅锌矿床和萨热克大型铜矿床在内的一系列以沉积岩容矿的铜铅锌矿床,构成我国西北地区一条重要的贱金属成矿带。已有研究表明区域上沉积岩容矿型铜铅锌矿床主要包括砾岩型铜矿床、砂岩型铅锌矿床和砂岩型铜矿床3个类型,本文在简要介绍各类型矿床主要地质特征的基础上,重点总结了其在成矿时代、成矿流体性质和来源及成矿物质(金属和硫)来源等方面的研究进展。结果表明:区域上砾岩型铜矿床形成于早白垩世末,即形成于盆地构造转换期,砂岩型铅锌矿床和铜矿床形成于中新世晚期,其形成与大型逆冲推覆构造关系密切。砾岩型铜矿床成矿流体以有机流体为主,砂岩型铅锌矿床成矿流体以盆地建造水为主,而砂岩型铜矿床成矿流体则表现为有机流体和盆地建造水混合的特征,成矿过程有大气降水的加入。造山带物质和沉积硫酸盐是区内各类型矿床金属及硫的主要来源。本文指出应加强砂岩型铜矿床成矿年代和砂岩型铅锌矿床成矿作用的研究,以及与新发现的海相砂岩型铜矿床的对比研究。

关键词:西南天山造山带;砾岩型矿床;砂岩型矿床;铜铅锌矿床;成矿作用;成矿时代

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230057

中图分类号:P611;P618.4

文献标志码:A

General Characteristics and Research Progresses in Metallogenesis of the Continental Sandstone-Hosted Cu-Pb-Zn Deposits in the Southwest Tianshan

Zhao Lutong¹, Wang Jingbin², Wang Yuwang³

- Sino-Zijin Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China
- Zijin Mining Group Co., Ltd., Xiamen 361000, Fujian, China
- Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China

收稿日期:2023-03-14

作者简介:赵路通(1983—),男,高级工程师,主要从事矿产普查与勘探方面的研究,E-mail:zhaolutong0123@163.com

基金项目:国家“305”科研项目(2015BAB05B04-03);国土资源部行业基金项目(201511016-02)

Supported by the National “305” Scientific Research Program (2015BAB05B04-03) and the Industry Fund of the Ministry of Land and Resources (201511016-02)

Abstract: A great number of sediment-hosted Cu - Pb - Zn deposits, including the ultra-large Urogen Pb - Zn deposit and the large Sareke Cu deposit, are found in the Meso-Cenozoic sedimentary basins (Kuzigongsu basin, Wulu - Wuqia basin, Keping basin and Kuqa basin) within the southwest Tianshan orogeny. These basins compose a significant base mental metallogenic belt in NW China. Numerous studies suggest that those deposits mainly include three types: The conglomerate-hosted Cu deposits, the sandstone-hosted Pb - Zn deposits, and the sandstone-hosted Cu deposits. Based on the main geological characteristics of each deposit type, this paper summarizes the research progress concerning the ore-forming ages, nature and source of the ore-forming fluids, and material source (metals and S). Results indicate that the conglomerate-hosted Cu deposits were formed at the end of the Early Cretaceous during the basin tectonic transition. The sandstone-hosted Pb - Zn and Cu deposits were formed in the Late Miocene and were both closely related to large retrograde thrust tectonics. The ore-forming fluid of conglomerate-hosted Cu deposits dominated by organic fluids, the sandstone-hosted Pb - Zn deposits by basin brine, and sandstone-hosted Cu deposits by a mixture of organic fluids and basin brine, with atmospheric precipitation contributing to the ore-forming process. The orogenic zone materials and the sedimentary sulfate are the main sources of metals and S for all deposit types in this region. This paper suggests enhancing research on the ore-forming age of sandstone-hosted Cu deposits, mineralization of the sandstone-hosted Pb - Zn deposits, and comparative study with newly discovered marine sandstone-hosted Cu deposits.

Key words: southwest Tianshan orogenic belt; conglomerate-hosted deposit; sandstone-hosted deposits; Cu - Pb - Zn deposits; mineralization; ore-forming age

0 引言

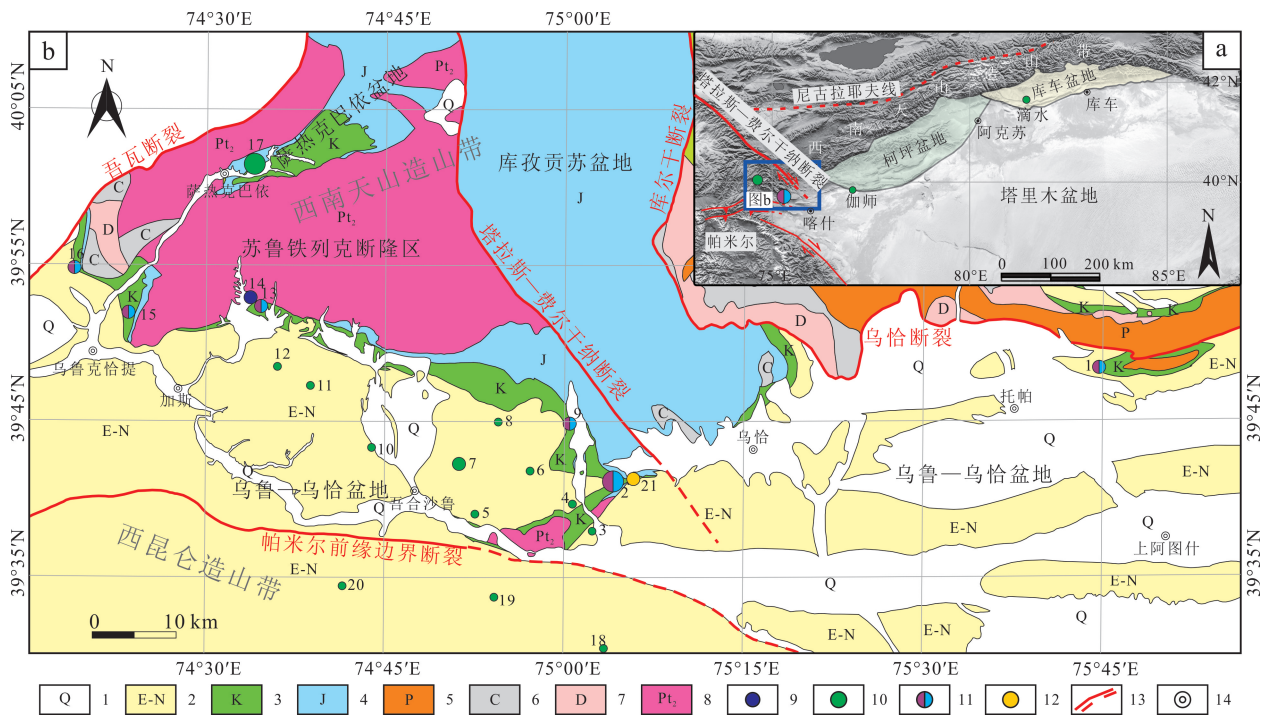
沉积岩容矿铜铅锌矿床是世界上铅锌的主要来源和铜的重要来源,加强这类矿床的成因研究对于提高和完善矿床成矿理论和指导找矿勘查具有重要意义。新疆西南天山是中亚造山带南缘的重要组成部分,中—新生代以来构造运动强烈,经历了复杂的盆—山耦合演化过程,自西向东发育库孜贡苏盆地、乌鲁—乌恰盆地、柯坪盆地、库车盆地等中—新生代沉积盆地,在这些盆地中先后发现铜铅锌矿床、矿点达百余处,以陆相砂岩、砂砾岩等沉积岩容矿为主,使之成为我国西北地区一条重要的贱金属成矿带^[1]。该区砂砾岩型铜铅锌矿床作为沉积岩容矿铜铅锌矿床成矿谱系的重要矿床类型,具有巨大的找矿潜力,受到国内外学者的广泛关注。

本文在前人研究的基础上,收集了已报道的西南天山砂砾岩型铜铅锌矿床相关资料,总结了该区砂砾岩型铜铅锌矿床的地质特征、成矿物质来源、成矿流体性质和成矿时代等方面的研究进展,以期进一步深化对该区砂砾岩型铜铅锌矿床成矿作用和成矿规律的认识,推进相关找矿勘查工作。

1 区域地质背景

西南天山沉积岩容矿铜铅锌贱金属成矿带处于西南天山造山带与塔里木板块北缘结合部位(图1a),该区经历了元古宙基底形成、古生代南天山洋演化所引发的增生造山和新生代印度—欧亚大陆汇聚所导致的碰撞造山过程,以发育新生代大规模走滑断裂系统、逆冲推覆构造系统及相伴产生的中—新生代沉积盆地和玄武质岩浆活动为典型特征。区域上自西向东依次分布着库孜贡苏盆地、乌鲁—乌恰盆地、柯坪盆地和库车盆地,这些盆地多遭受新生代大型逆冲推覆构造系统的叠加和改造。

库孜贡苏盆地和乌鲁—乌恰盆地夹持于西南天山造山带和西昆仑造山带结合部位,自早侏罗世开始,区域挤压作用致使基底元古宇和古生界下陷,山体相对抬升,乌鲁—乌恰盆地开始形成,同时强烈的挤压致使塔拉斯—费尔干纳断裂系活化(图1b),形成库孜贡苏拉分断陷盆地^[4]。库孜贡苏盆地和乌鲁—乌恰盆地在早—中侏罗世整体接受湖相—沼泽相含煤系沉积建造,晚侏罗世接受冲积扇相砾岩沉积。早白垩世晚期,南天山造山带西段经历一期盆山调



1. 第四系; 2. 新近系-古近系; 3. 白垩系; 4. 侏罗系; 5. 二叠系; 6. 石炭系; 7. 泥盆系; 8. 中元古界; 9. 铀矿床; 10. 铜矿床(点); 11. 铅锌矿床; 12. 镉矿床; 13. 断裂/推测断裂; 14. 地名。矿床: 1. 托帕铅锌矿床; 2. 乌拉根铅锌矿床; 3. 吉勒格铜矿床; 4. 花园铜矿床; 5. 吾东铜矿点; 6. 杨树沟铜矿床; 7. 吾合沙鲁铜矿床; 8. 阿克套铜矿床; 9. 康西铅锌矿床; 10. 马什热普大阪铜矿点; 11. 硝若布拉克铜矿点; 12. 索库尔铜矿点; 13. 加斯铅锌矿床; 14. 巴什布拉克铀矿床; 15. 喀炼铁厂铅锌矿床; 16. 江格结尔铅锌矿床; 17. 萨热克铜矿床; 18. 玛依咯克铜矿床; 19. 休木喀尔铜矿点; 20. 萨热吉铜矿点; 21. 帕恰布拉克镉矿床。a 据文献[2]修编; b 据文献[3]修编。

图 1 西南天山砂砾岩容矿型铜铅锌成矿带主要沉积盆地和矿床分布图

Fig.1 Main basins and ore deposits distribution of sandstone-hosted Cu - Pb - Zn metallogenic belt in the southwest Tianshan area

整^[5], 乌鲁—乌恰盆地构造沉降整体接受下白垩统辫状河相红层沉积建造, 而库孜贡苏盆地因构造抬升, 下白垩统仅分布在其次级盆地萨热克巴依盆地中。早白垩世晚期—晚白垩世, 南天山发生区域隆升事件, 库孜贡苏盆地由于显著的构造抬升, 缺失上白垩统沉积, 盆地逐渐消亡并成为南天山的一部分, 其后被新生代前陆盆地叠加改造。与此同时, 乌鲁—乌恰盆地整体构造沉降, 受同时期新特提斯洋扩张的影响, 海水自西向东进入塔里木盆地, 形成塔里木海湾。晚白垩世—始新世, 乌鲁—乌恰盆地经历了 5 次大规模的海侵—海退旋回, 整体形成一套陆表海—海陆交互相潮坪—潟湖—滨岸沉积体系。始新世晚期或渐新世最早期, 海水逐渐退出^[6-10], 乌鲁—乌恰盆地转变为以陆相为主的沉积环境^[11]。渐新世末, 印度板块与欧亚板块碰撞的应力传递到西南天山造山带, 乌鲁—乌恰盆地快速沉降, 向大型内陆凹陷盆地发展, 并于中新世早期转变为前陆盆地性质, 接受一套巨厚的陆相红层沉积建造。上新

世末, 乌鲁—乌恰盆地沦为半荒漠或沙漠化沉积; 更新世至今, 为前陆逆冲推覆构造发育期, 新近系发生广泛的褶皱变形。

柯坪盆地是在塔里木板块北缘古生代叠合盆地基础上发展起来的新生代前陆盆地, 盆地北以哈拉峻—阿合奇断裂为界, 与南天山晚古生代陆源盆地相邻, 南到巴楚附近, 与塔里木盆地相接^[12]。盆地基底构造层(柯坪断隆)为寒武系—二叠系, 整体为一套被动陆缘沉积建造。三叠纪—侏罗纪一直处于隆起状态, 在白垩纪局部接受沉积但地层厚度不大。古近纪柯坪地区经历短暂的海侵过程, 形成一套蒸发潮坪相—潟湖相沉积建造^[13]。渐新世末—中新世, 由于印度板块在和欧亚板块碰撞引起塔里木盆地北部向西南天山造山带下发生陆内俯冲, 西南天山迅速崛起, 在其山前拗陷中形成了巨厚的陆相红层沉积建造, 柯坪前陆盆地形成。上新世—更新世, 柯坪断隆沿柯坪塔格沙井子断裂以逆冲推覆构造形式被推覆到巴楚隆起带上, 形成典型的逆冲推覆构

造带^[14]。

库车盆地位于西南天山造山带与塔里木盆地的交接部位,是渐新世以来伴随着西南天山向南的逆冲推覆作用形成的再生前陆盆地。其经历了早古生代被动大陆边缘和晚古生代南天山洋盆俯冲闭合及碰撞造山过程,整体为一套被动陆缘和弧盆沉积体系^[15-17],构成盆地的下基底构造层。晚二叠世由于塔里木板块与伊犁地体的持续碰撞,塔里木板块向伊犁地体发生 A 型俯冲作用,在南天山南缘开始形成库车前陆盆地^[18],接受一套磨拉石沉积建造,三叠纪前陆盆地进一步发展,形成一套粗粒的冲积-扇三角洲相为主的沉积建造,至侏罗纪初期最终完成前陆盆地的演化^[19]。侏罗纪—古近纪,库车地区进入应力松弛的断陷盆地演化阶段,整体为一套湖相—河流相沉积建造,古近纪盆地北部还经历短暂的海侵过程。中生界—古近系以广泛的角度不整合叠置在前中生界变质基底之上,构成盆地的上基底构造层^[20-21]。渐新世末,印度板块与欧亚板块碰撞的应力使南天山造山带再生活动,库车地区进入了再生前陆盆地演化阶段,中新世—上新世盆地接受巨厚的陆相红层沉积建造,更新世至今盆地经历大规模逆冲推覆构造作用。

2 矿床分布和成矿特征

2.1 矿床类型及分布

西南天山砂砾岩型铜铅矿床主要存在砾岩型铜矿床、砂岩型铅矿床和砂岩型铜矿床 3 种成矿类型,其中:砾岩型铜矿床主要分布在库孜贡苏盆地次级盆地萨热克巴依盆地中,以萨热克大型铜矿床为代表,少量矿点分布在乌鲁—乌恰盆地西北部;砂岩型铅矿床主要分布在乌鲁—乌恰盆地,发育乌拉根超大型铅矿床以及江格结尔、喀炼铁厂、加斯、托帕、康西等小型铅矿床;砂岩型铜矿床广泛地分布在西南天山的前陆盆地中,形成花园、吉勒格、吾合沙鲁(乌鲁—乌恰盆地)、伽师(柯坪盆地)及滴水(库车盆地)等中、小型铜矿床及众多的矿化点(图 1)。上述主要矿床基本地质特征列入表 1。

2.2 容矿围岩

砾岩型铜矿床在库孜贡苏盆地主要赋矿围岩为上侏罗统库孜贡苏组顶部砾岩、砂砾岩,局部矿化发育于下白垩统克孜勒苏群细砂岩中(图 2)。

砂岩型铅矿床在乌鲁—乌恰盆地主要赋矿围岩为下白垩统克孜勒苏群砂岩、砂砾岩,部分矿体赋

存于古新统阿尔塔什组(乌拉根)或始新统卡拉塔尔组(托帕)底部坍塌角砾岩中,不同矿床铅锌矿体赋存层位也有所差别(图 2)。

砂岩型铜矿床在乌鲁—乌恰盆地主要赋矿围岩为中新统安居安组细砂岩,部分矿体赋存于渐新统一中新统克孜洛依组砂岩中(图 2),在柯坪盆地主要赋存于渐新统苏维依组砂岩中,在库车盆地主要赋存于中新统一上新统康村组砂岩中,少量赋存于中新统吉迪克组砂岩中(图 3)。区域上砂砾岩型铜铅矿床的矿体整体呈层状、似层状和透镜状产出,与围岩产状一致,矿体分别受控于各盆地的次级褶皱构造,如萨热克巴依向斜(萨热克铜矿)、乌拉根向斜(乌拉根铅矿)以及柯坪塔格背斜(伽师铜矿)和铜矿山背斜(滴水铜矿)等。

2.3 矿化特征

萨热克砾岩型铜矿床北矿带中金属矿物主要为辉铜矿(图 4a)和斑铜矿,南矿带中可见较多的黄铜矿(图 4b)、黄铁矿及少量方铅矿、闪锌矿(图 4c),整体构成 Cu—Pb—Zn 元素组合。脉石矿物主要为方解石及少量石英、绿泥石和石膏。金属矿物主要呈浸染状分布在砾岩/砂岩间隙,局部构成团块状、薄膜状集合体。热液矿化大致分为三个期次:早期硅化整体发育较弱,多呈石英细脉或细网脉分布于砾石裂隙中,多伴生辉铜矿化;中期碳酸盐化广泛发育,伴生辉铜矿、黄铜矿和黄铁矿,为主成矿阶段;晚期绿泥石化仅局部发育,伴生少量辉铜矿化和黄铁矿化。

砂岩型铅矿床中金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和白铁矿(图 4d—f)。脉石矿物以方解石为主,还可见少量的白云石、伊利石和石膏,乌拉根和托帕矿区还可见少量天青石(图 4g)。不同的矿床存在明显的成矿元素组合差异,乌拉根和加斯矿床为 Pb—Zn 元素组合,而江格结尔和托帕矿床还出现较多含铜金属矿物,如孔雀石(图 4h)、辉铜矿、黄铜矿和斑铜矿,构成 Pb—Zn—Cu 元素组合。另外,不同矿床 Pb、Zn 矿化程度也有所差别,如乌拉根矿床富 Zn 贫 Pb ($w(\text{Zn})$ 为 2.27%, $w(\text{Pb})$ 为 0.39%)^[22],江格结尔矿床则以相对富 Pb 为特点($w(\text{Zn})$ 为 2.01%, $w(\text{Pb})$ 为 2.08%)^[23]。砂岩、砂砾岩中矿石多发育浸染状和条带状构造,角砾岩中多发育细脉状和块状构造。详细的热液矿化期次难以区分,但整体上砂岩、砂砾岩中矿化发育稍早于角砾岩中^[23]。

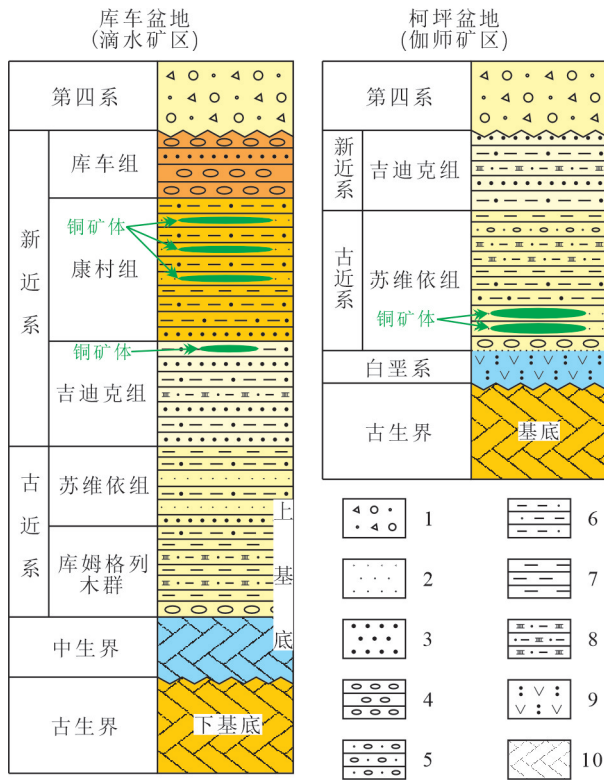
表 1 西南天山主要沉积岩容矿铜铅锌矿床特征

Table 1 Geological features of major sandstone-hosted Cu - Pb - Zn deposits in the southwest Tianshan area

矿床类型	典型矿床	金属组合	矿石矿物组成	矿石结构	矿床构造	矿体形态	赋矿围岩	围岩蚀变	控矿构造
砾岩型铜矿床	萨热克	Cu - Pb - Zn	辉铜矿、斑铜矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、孔雀石、蓝铜矿、铜蓝	粒状结构、胶结结构、溶蚀边结构、共结边结构、交代残余结构、交代网状结构、固溶体分离结构	浸染状构造、薄膜状构造、团块状构造、斑点状构造、脉状构造	层状、似层状、透镜状	库孜勒苏组(主体) 克孜勒苏群(局部)	硅化、碳酸盐化、绿泥石化	萨热克 依向斜
	乌拉根	Pb - Zn	闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿、菱锌矿、白铅矿、褐铁矿	粒状结构、环带状结构、胶结结构、交代结构、放射状结构	浸染状构造、脉状构造、条带状构造、块状构造、角砾状构造、晶洞构造	层状、似层状	克孜勒苏群(主体) 阿尔塔什组(局部)	碳酸盐化、黄铁矿化、天青石化、石膏化、沥青化	乌拉根 斜
	加斯	Pb - Zn	闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿、菱锌矿、白铅矿	粒状结构、环带状结构、胶结结构、交代结构、放射状结构	浸染状构造、脉状构造、条带状构造	层状、似层状	克孜勒苏群	碳酸盐化、黄铁矿化、石膏化	单斜
砂岩型铅锌矿床	江格结尔	Pb - Zn - Cu	闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿、菱锌矿、白铅矿、黄铜矿、斑铜矿、孔雀石	粒状结构、环带状结构、胶结结构、交代结构、放射状结构	浸染状构造、条带状构造、角砾状构造、斑点状构造	层状、似层状	克孜勒苏群	碳酸盐化、黄铁矿化、石膏化	单斜
	喀炼铁厂	Pb - Zn - Cu	闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿、黄铜矿、孔雀石	粒状结构、环带状结构、胶结结构、交代结构、放射状结构	浸染状构造、条带状构造、角砾状构造、斑点状构造	层状、似层状	克孜勒苏群	碳酸盐化、黄铁矿化、石膏化	炼铁厂 斜
	托帕	Pb - Zn - Cu	闪锌矿、方铅矿、白铁矿、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、菱锌矿、白铅矿、孔雀石	粒状结构、环带状结构、胶结结构、交代结构、放射状结构	浸染状构造、脉状构造、条带状构造、角砾状构造、晶洞构造	透镜体、似层状	克孜勒苏群(主体) 卡拉塔尔组(局部)	碳酸盐化、黄铁矿化、天青石化、石膏化	塔什普什 背斜

续表 1

矿床类型	典型矿床	金属组合	矿石矿物组成	矿石结构	矿石构造	矿体形态	赋矿围岩	围岩蚀变	控矿构造
砂岩型铜矿床	吾合沙鲁	Cu(Ag)	孔雀石、赤铜矿、硅孔雀石、氯铜矿、自然铜、辉铜矿、黄铁矿、黄铜矿	粒状结构、胶状结构、胶结结构、交代结构	浸染状构造、条带状构造、薄膜状构造、结核状构造、树枝状构造	似层状	安居安组(主体) 克孜洛依组(局部)	碳酸盐化	吾合沙鲁向斜
	花园	Cu(Ag)	孔雀石、赤铜矿、硅孔雀石、氯铜矿、自然铜	粒状结构、胶状结构、胶结结构、交代结构	浸染状构造、条带状构造、薄膜状构造	透镜体状、似层状	安居安组	碳酸盐化	确尔布拉克向斜
	吉勒格	Cu	孔雀石、赤铜矿、硅孔雀石、氯铜矿、自然铜、辉铜矿	粒状结构、胶状结构、胶结结构、交代结构	浸染状构造、条带状构造、薄膜状构造、结核状构造、树枝状构造	似层状、扁豆状、透镜体状	安居安组	碳酸盐化	吉勒格斜
脉状铜矿床	伽师	Cu	辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿、孔雀石、蓝铜矿	粒状结构、胶结结构、交代结构	浸染状构造、块状构造、团块状构造、条带状构造、斑点状构造	层状、似层状	苏维依组	碳酸盐化	柯坪塔格背斜
	滴水	Cu	孔雀石、硅孔雀石、铜蓝、蓝铜矿、黑铜矿、辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿	粒状结构、胶结结构、交代结构	浸染状构造、块状构造、团块状构造、条带状构造、斑点状构造	层状、似层状	康村组	碳酸盐化	铜矿山背斜



1. 残坡积物; 2. 细砂岩; 3. 粗砂岩; 4. 砾岩; 5. 砂砾岩; 6. 砂质泥岩; 7. 泥岩; 8. 膏岩; 9. 凝灰岩; 10. 基底变质岩。地层柱中颜色仅为区别不同地层。

图 3 柯坪盆地和库车盆地地层柱状图与赋矿层位

Fig.3 Strata and hosted strata histogram of Keping basin and Kuche basin

蚀变呈透镜体状、团块状分布或分支、尖灭再现。整体上,赋矿层位中褪色发育部位与原岩部位界线明显,两者分界线在砾岩型铜矿床和砂岩型铅锌矿床中以波浪状(图 5a)、不规则状(图 5b)、参差渐变状(图 5d,e)等不整合接触为主,而在砂岩型铜矿床则主要表现为整合接触(图 5f),分界线沿砂岩层理/斜层理延伸可达几十米至几百米,构成一个稳定的氧化还原障界面,褪色砂岩中越靠近氧化还原障界面矿化强度越高,越过界面矿化强度迅速减弱。

微观层面围岩蚀变主要包括碳酸盐化、硅化、绿泥石化和天青石化,其中以碳酸盐化为代表,在各类型矿床中广泛发育。蚀变矿物主要为方解石,多呈微细粒自形一半自形晶,在砂砾岩中主要呈浸染状分布于砂砾间隙,在角砾岩中多数呈细脉状产出,局部呈晶洞状(图 4f)、团块状产出。硅化和绿泥石化主要发育在萨热克铜矿床,石英呈细脉或细网脉状,绿泥石呈细脉状、粒状或薄膜状分布于围岩裂隙中,整体发育较弱。天青石化主要发育在乌拉根铅锌矿

床,在砂砾中多数以细粒他形一半自形晶呈浸染状与方解石共生,在角砾岩中可呈脉状、网脉状和团块状产出(图 4g)。

2.5 膏岩、有机质与金属成矿

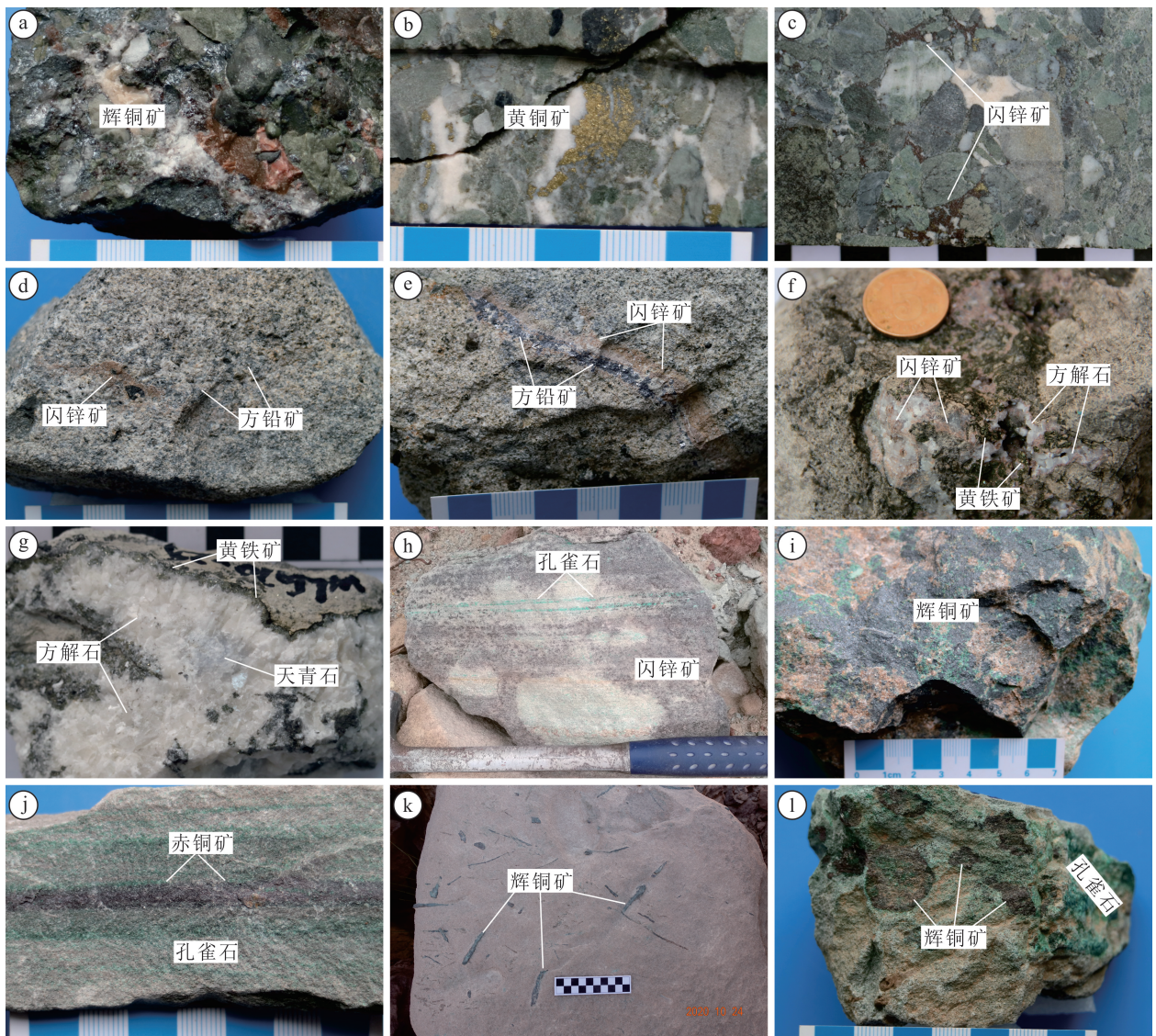
区内砂砾岩型铜铅锌矿床与蒸发岩建造和有机质具有密切的时空联系。乌鲁—乌恰盆地、柯坪盆地和库车盆地新生界赋矿红层沉积建造中均发育厚大的蒸发岩层位,乌拉根/托帕铅锌矿床部分矿体直接赋存于阿尔塔什组/卡拉塔尔组坍塌角砾岩(泥灰岩、膏泥岩)中,脉石矿物中多可见石膏和天青石,乌拉根矿区东部产出有帕恰布拉克大型锑(天青石)矿床^[24]。在库车盆地膏岩层中发现原生沉积的自然铜、自然锌及铅、银、钴、铁的硫化物,证实蒸发岩建造为砂岩型铜矿床的重要矿源层^[25]。蒸发岩建造在萨热克巴依盆地分布较少,仅在含矿层下部的杨叶组石英砂岩和康苏组煤岩层理或节理裂隙中可见到薄层状石膏,其与金属成矿的关系尚待深入研究。

有机质几乎在所有类型矿床中均可见到,主要以沥青形式存在,在乌拉根矿床最为突出。乌拉根矿床铅锌矿体赋存于下白垩统克孜勒苏群,该群是区域上重要的油气储层,产出有阿克莫大型气田;同时,C-O-S 同位素^[26-27]、有机物的热成熟度^[28]、有机碳^[29]、ΣS 浓度^[30]以及稀土元素的研究^[31]均表明油气的运移是造成克孜勒苏群发生区域性褪色蚀变的重要原因,褪色过程中油气通过细菌的硫酸盐还原作用^[32-33]产生的 H₂S,是导致其后铅锌沉淀成矿的重要原因。萨热克矿区富矿石产出位置与围岩有机碳含量密切相关^[34],吾合沙鲁和伽师矿区多可见金属矿物围绕有机质形成树枝状、结核状构造。

3 成矿作用

3.1 成矿金属物质来源

对于沉积岩容矿的铜铅锌矿床,含矿建造中的红色沉积建造、蒸发岩建造和古老变质基底均被认为是成矿金属的可能来源^[35]。区内砂砾岩型铜铅锌矿床 Pb 同位素示踪显示,尽管不同类型矿床成矿特征各异、形成的盆地背景不同,但其成矿金属均来自自造山带物质^[26, 28, 34, 36-38],即来自盆地内造山带的碎屑沉积物。详细的对比分析表明,盆地基底(物源区)及红层沉积建造组成的不同,其对成矿作用的影响也不同。



a. 萨热克矿区浸染状辉铜矿化；b. 萨热克矿区团块状黄铜矿化；c. 萨热克矿区浸染状闪锌矿化；d. 乌拉根矿区浸染状铅锌矿化；e. 乌拉根矿区脉状铅锌矿化；f. 乌拉根矿区闪锌矿、黄铁矿和方解石呈晶洞状产于角砾岩中；g. 乌拉根矿区方解石呈粗脉状产于角砾岩中，伴生黄铁矿和天青石；h. 江格结尔矿区砂岩中浸染状闪锌矿和孔雀石矿化；i. 伽师矿区团块状辉铜矿化；j. 吾合沙鲁矿区砂岩中条带状赤铜矿和孔雀石矿化；k. 吾合沙鲁矿区围绕有机质形成的树枝状辉铜矿化；l. 伽师矿区结核状辉铜矿化。

图 4 研究区砂砾岩容矿铜铅锌矿床典型矿石类型

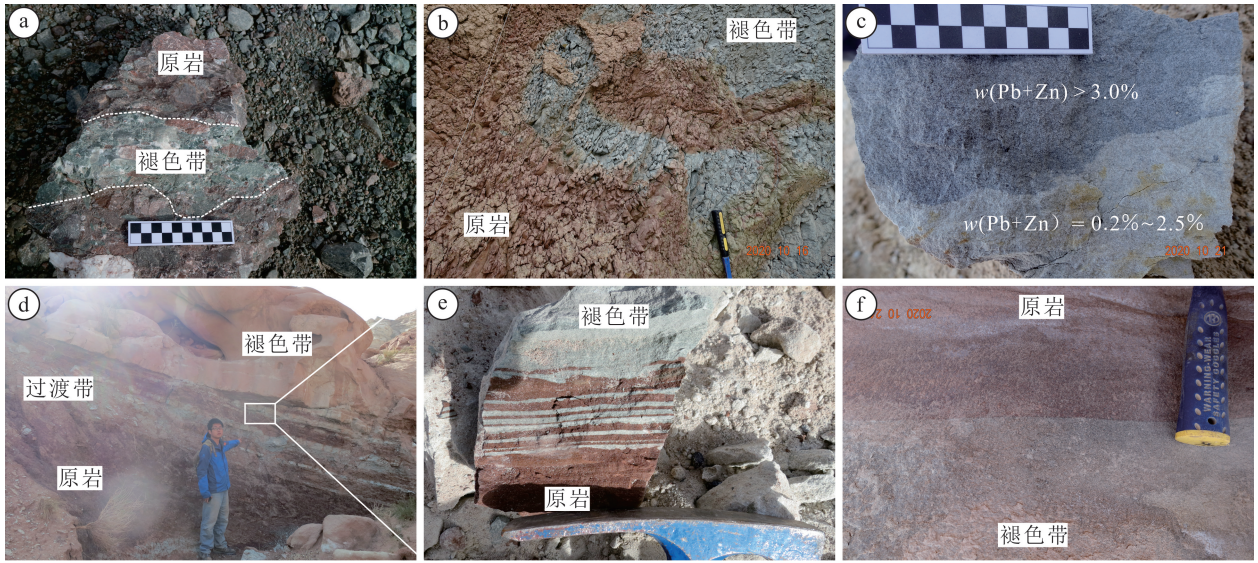
Fig.4 Typical ores of major sandstone-hosted Cu - Pb - Zn deposits in the study area

在盆地基底构成上，萨热克巴依盆地和乌鲁—乌恰盆地不同矿床 Pb 同位素组成对比分析表明 (图 6)，萨热克矿床 Pb 同位素组成指示其成矿物质源区为中元古界阿克苏群和古生界，而乌拉根和吾合沙鲁矿床 Pb 同位素组成则表明其成矿物质源区主要为中元古界阿克苏群，这与乌鲁—乌恰盆地基底主体相对于萨热克巴依盆地缺少古生界相一致。乌鲁—乌恰盆地江格结尔、喀炼铁厂和托帕矿床相对乌拉根矿床发育铜矿化，与之相应，三个矿床相对

乌拉根矿床其基底也含有古生界，暗示同一盆地不同部位其基底构成不同也可能是导致成矿差异的重要原因之一。在蒸发岩建造上，吾合沙鲁矿床 Pb 同位素组成相对乌拉根矿区显示出与蒸发岩建造明显的相关性，这与乌鲁—乌恰盆地蒸发岩在新生界红层沉积建造中大量分布，而在中生界红层沉积建造中较为缺失相一致。

3.2 成矿流体性质和来源

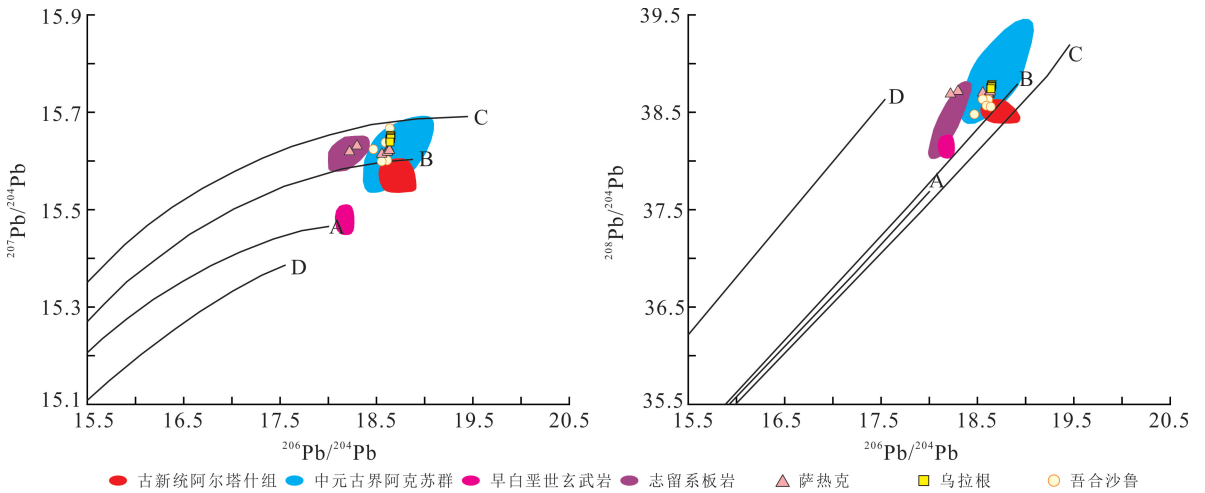
流体包裹体和 C-H-O 同位素研究表明，区



a. 萨热克矿区库孜贡苏组砾岩褪色为灰绿色; b. 乌拉根矿区克孜勒苏群砂岩褪色为灰白色; c. 乌拉根矿区铅锌矿化强度与褪色蚀变程度呈正相关性; d、e. 乌拉根矿区克孜勒苏群砂岩由上向下褪色蚀变程度逐渐减弱; f. 吾合沙鲁安居安组砂岩中原岩和褪色部分形成稳定的氧化还原原界面。

图 5 研究区砂砾岩容矿铜铅锌矿床围岩褪色蚀变特征

Fig.5 Bleaching characteristics of the wall rocks in the sandstone-hosted Cu - Pb - Zn deposits in the study area



底图据文献[39];阿尔塔什组和阿克苏群数据引自文献[40];早白垩世玄武岩数据引自文献[41];志留系板岩数据引自文献[42]。A.地幔; B.造山带; C.上地壳; D.下地壳。

图 6 萨热克巴依盆地和乌鲁—乌恰盆地主要地层单元及矿床 Pb 同位素构造模式图

Fig.6 Pb isotope tectonic model of the main stratigraphic units and deposits in Sarekebayi basin and Wulu - Wuqia basin

内砂砾岩型铜铅锌矿床成矿流体主要可以分为三类:

1) 以有机流体为主,以萨热克铜矿床为代表。萨热克矿床流体包裹体类型包括富液相包裹体、含子晶三相包裹体、CO₂包裹体和含油气包裹体,包裹体气相成分含有 CO₂、N₂、CH₄ 等成分,流体整体具有中低温中高盐度的特征,经历了从成矿早阶段(硅

化)偏氧化性流体向主成矿阶段(碳酸盐化)还原性流体的演化过程^[43]。流体 δD - δ¹⁸O_{H₂O} 图(图 7a)指示成矿流体主要为有机流体,矿区所在萨热克巴依盆地中侏罗统杨叶组和康苏组煤层及含煤黑色泥岩是区域上最主要烃源岩^[48],矿石中有机碳 δ¹³C_{PDB} 同位素组成与康苏组煤层 δ¹³C_{PDB} 同位素组成相似,表明有机流体与侏罗系烃源岩关系密切^[34]。矿区

方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 同位素组成(图 7b)表明流体中的碳质主要来自海相碳酸盐岩的溶解,与盆地基底古生界碳酸盐同位素组成相似,暗示盆地基底古生界海相碳酸盐岩溶解可能为成矿流体的另一个重要来源^[50]。

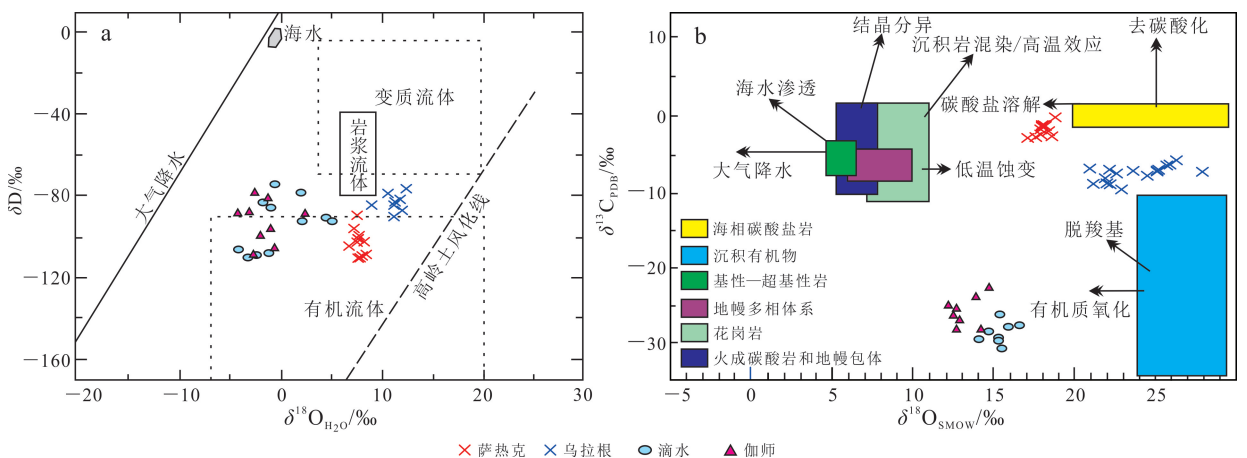
2)以盆地建造水为主,以乌拉根铅锌矿床为代表。乌拉根矿床流体包裹体主要为气液两相包裹体,流体整体具有低温中低盐度的特征^[40, 51]。流体 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图(图 7a)指示成矿流体以盆地建造水为主,矿区方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 同位素组成(图 7b)显示流体中的碳质主要来自沉积有机物的脱羧基作用,鉴于其与矿床褪色砂岩中方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 组成($-7.7\text{‰} \sim -5.1\text{‰}$)^[52] 相一致且褪色是油气运移和充注所致,流体中有机质可能主要来自地层中先存的油气等有机物。

3)盆地建造水与有机流体混合型,以伽师和滴水铜矿床为代表。伽师和滴水矿床流体包裹体类型主要为纯液相包裹体和气液两相包裹体,包裹体气相成分包含 CO_2 、 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 N_2 等成分,流体整体具有中低温中低盐度的特征,伽师矿床整体为还原性流体,滴水矿床则经历了从成岩期还原性流体向改造期弱氧化性流体的演化过程^[46-47]。流体 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图(图 7a)显示盆地建造水和有机流体混合的特征,其相对萨热克和乌拉根矿床整体偏向大气降水线,表明成矿流体中还有大气降水的加入^[24]。流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 同位素组成(图 7b)显示流体中的碳质主要来自沉积有机物的氧化作用。

3.3 硫的来源与形成机制

前人对区内砂砾岩型铜铅锌矿床开展了大量的硫同位素研究工作^[22, 26-29, 36, 38, 40, 46-47, 53-57],统计显示区内砾岩型和砂岩型铜矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为负值且有较大的分布范围(图 8),与滇中地区陆相砂岩型铜矿床^[58-59] 以及国外砂岩型铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值特征相吻合^[60],成矿所需的硫主要源自硫酸盐细菌还原作用和/或热化学还原反应(TSR/BSR)^[61],部分较大的 $\delta^{34}\text{S}$ 负值($< -30\text{‰}$)还指示部分硫可能来源于有机硫^[62]。由于区内砾岩型和砂岩型铜矿床成矿流体的温度普遍 $> 80\text{ }^\circ\text{C}$,超过了 BSR 发生的温度限制($T < 80\text{ }^\circ\text{C}$)^[63],因此成矿所需还原硫可能主要通过 TSR 过程产生,或通过异地 BSR 过程产生并随成矿流体运移。盆地中一新生界沉积硫酸盐可能是成矿所需还原硫的主要来源。

乌拉根矿区主要金属矿物(方铅矿、闪锌矿和黄铁矿)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 $-27.9\text{‰} \sim 22.0\text{‰}$,平均为 -4.90‰ ,也显示出以负值为主且较宽泛的特点(图 8),表明硫有多种来源。其矿石硫同位素具有闪锌矿(平均为 1.57‰ , $N = 47$) $>$ 黄铁矿(平均为 -4.57‰ , $N = 35$) $>$ 方铅矿(平均为 -8.37‰ , $N = 91$)的特点,未达到硫同位素分馏平衡(黄铁矿 $>$ 闪锌矿 $>$ 方铅矿),反映这些硫化物可能不是同期流体作用的产物。矿区成矿前经历了多期油气的运移和充注,引发了克孜勒苏群砂岩大规模褪色蚀变及阿尔塔什组膏盐层的溶解坍塌^[52],岩相学也揭示出大量与有机质密切共生的成矿前黄铁矿的存在^[23, 40],成矿前油气通过 BSR 过程为成矿作用提



a 底图据文献[44];萨热克数据源自文献[45];乌拉根数据源自文献[22,40];伽师和滴水数据源自文献[46-47]。b 底图据文献[49]。

图 7 砂砾岩容矿型铜铅锌矿床 C-H-O 同位素示踪判别图

Fig.7 C-H-O isotopic composition of fluids from sandstone-hosted Cu-Pb-Zn deposits

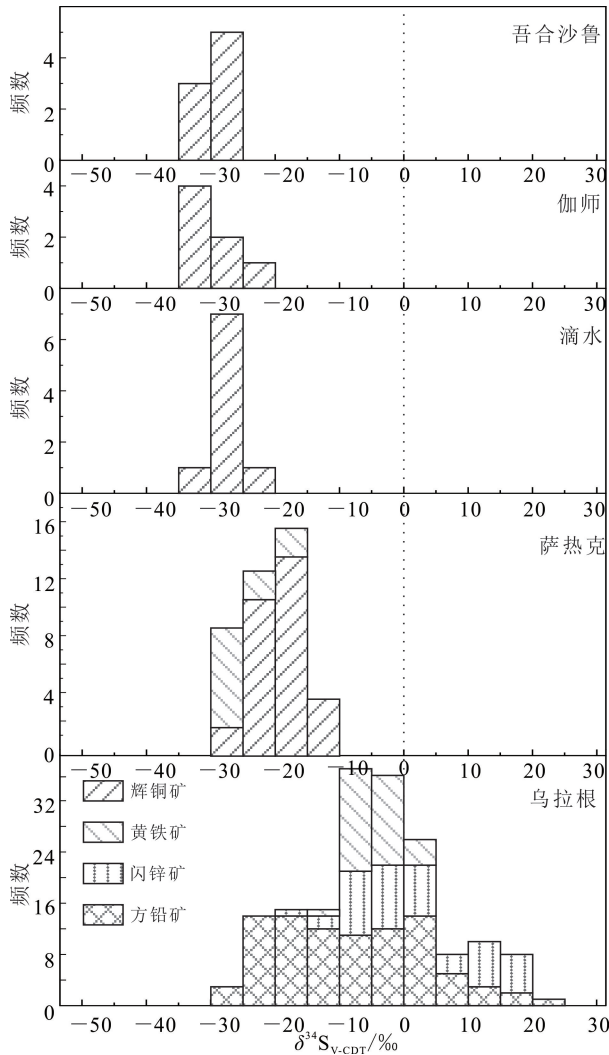


图 8 砂砾岩容矿铜铅锌矿床 S 同位素组成直方图

Fig.8 S isotopic composition of fluids from sandstone-hosted Cu - Pb - Zn deposits

供了直接的还原硫或硫酸盐还原反应的还原剂^[61]。陈兴等^[27]依据闪锌矿及其共生方解石、菱铁矿发育的纳/微米莓球状、丝/管状结构,认为成矿所需H₂S可能主要通过硫酸盐原地 BSR 过程产生;Xue 等^[28]则认为其主要通过异地 BSR 过程和部分原地 TSR 过程共同形成。流体包裹体研究显示主要成矿阶段其流体温度 > 120 °C^[40, 51],表明在成矿阶段 TSR 过程可能发挥了重要作用,但目前关于 BSR 和 TSR 的具体过程以及对成矿作用的贡献尚不清楚。另外,虽然矿区范围内油气等有机质发育,但有机质中的硫含量微不足道^[28-29],因此,有机质热裂解成因 H₂S 可以近似忽略不计。矿区阿尔塔什组膏盐层因油气溶解而形成坍塌角砾岩,可能为还原硫的直接来源^[40]。

3.4 成矿时代和成矿动力学背景

沉积岩容矿型铜铅锌矿床成矿年代一直是研究该类矿床的难题,近年来通过闪锌矿/方铅矿 Rb - Sr 和 Sm - Nd、磷灰石裂变径迹(AFT)、沥青/黄铁矿 Re - Os、方解石 U - Pb 等测年方法的应用(表 2),结合地质关系限制,该区砂砾岩型铜铅锌矿床的成矿时代逐渐明晰。

萨热克矿区铜矿体主体赋存于上侏罗统库孜贡苏组中,最新赋矿层位为下白垩统克孜勒苏群第二岩性段(K₁Kz², 图 2),限定矿区成矿作用应晚于 K₁Kz² 沉积时代。矿区所在库孜贡苏盆地在早白垩世中晚期(克孜勒苏群第三至第五段沉积期)发生构造隆升,缺失克孜勒苏群第四和第五岩性段,沉积碎屑锆石裂变径迹年龄表明其构造隆升时间为(119 ±

表 2 西南天山沉积岩容矿 Cu - Pb - Zn 矿床成矿年龄

Table 2 Age of sandstone-hosted Cu - Pb - Zn deposits in the southwest Tianshan area

矿床	年龄/Ma	方法	数据来源
萨热克铜矿床	115.8	黄铁矿 Re - Os(等时线年龄)	[64]
	55.1 ± 1.6	闪锌矿/方解石 Sm - Nd	[65]
	55.4 ± 2.2	闪锌矿/方铅矿 Rb - Sr	[40]
乌拉根铅锌矿床	45、18.9~18.7、10.7~6.7	黄铁矿 Re - Os (模式年龄)	[23]
	11.80、10.9、10.6	方解石 U - Pb (等时线年龄)	[38]
	133.5~35.2	磷灰石 AFT	[66]
吾合沙鲁铜矿床	16~14	磷灰石裂变径迹年龄	[67]
	38.55~34.6	自生伊利石 K - Ar	[68]
区域油气	22.60~18.79	自生伊利石 K - Ar	[68]
	57~50	沥青 Re - Os	[66]

6) Ma^[66],即 K_1K_2 沉积时代不晚于(119±6) Ma, 矿区成矿作用应晚于(119±6) Ma。矿区黄铁矿 Re-Os 同位素等时线年龄为(115.8±4.7) Ma^[64], 与地质关系相吻合,限定萨热克矿床形成时代为早白垩世末。

库孜贡苏盆地早白垩世晚期构造抬升可能受控于晚侏罗世欧亚板块南部边缘拉萨地体拼贴的远程效应影响^[2, 5],地形差引起的重力作用和构造挤压造成的定向压力可能为驱动成矿流体运移的主要驱动力。

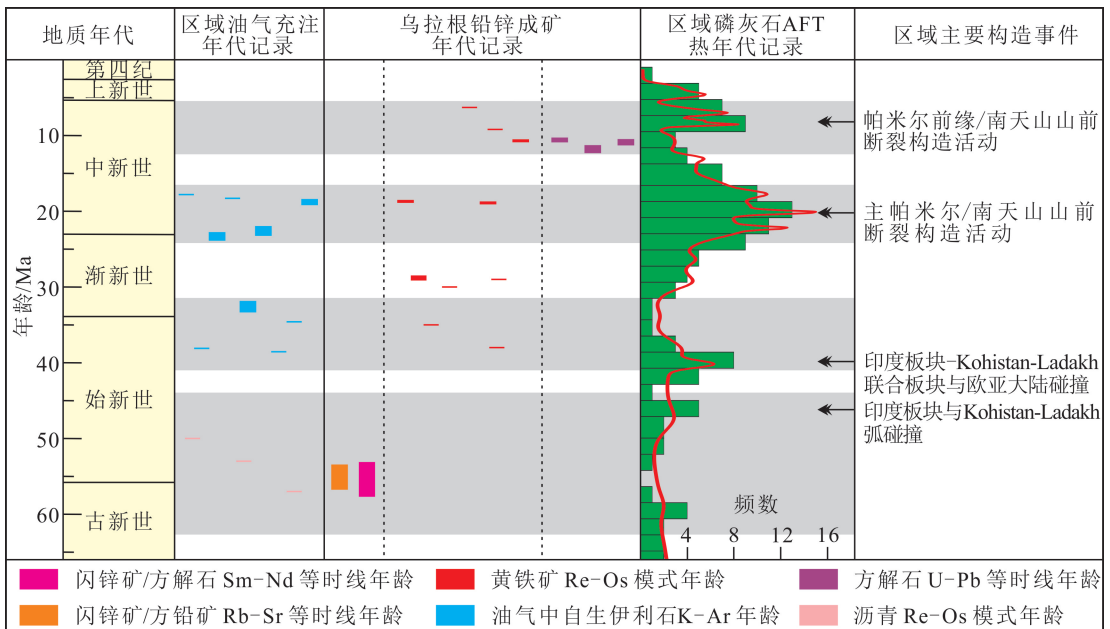
萨热克矿区南矿带发育玄武质(辉绿岩)岩脉侵入下白垩统克孜勒苏群第二岩性段中,岩脉两侧砂岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩发育大规模的褪色蚀变并伴生孔雀石矿化,且辉绿岩呈角砾状被含矿方解石+石英脉捕获或被穿插^[64],结合年代学研究揭示出的区域上玄武质岩浆活动在早白垩世集中于120~110 Ma 之间的特征^[41, 69-73],矿区辉绿岩脉侵入时代最有可能稍早于或与成矿作用近于同期。

萨热克成矿深度一般为 0.75~1.68 km^[74],最大深度可达 1.84 km,与杜玉龙等^[75]根据黑云母地质温度-压力计推测辉绿岩的成岩最小深度(2.15 km)在垂向上接近,同时,方维萱等^[76]研究表明含铜蚀变辉绿岩及其外接触带发生绿泥石化相蚀

变温度平均为 175~238 °C,与成矿流体包裹体测温结果相一致,均表明矿区玄武质岩浆的活动与成矿作用具有耦合关系,岩浆作用可能为成矿流体中硫酸盐发生 TSR 提供了热源。

乌拉根矿区铅锌矿体主体赋存于下白垩统克孜勒苏群褪色砂岩中,而砂岩的褪色蚀变是区域油气运移充注的结果,限定铅锌矿床成矿作用应晚于油气运移充注的时代。沥青 Re-Os 和自生伊利石 K-Ar 研究结果表明,区域上克孜勒苏群中油气在 50~57、38.55~34.6 和 22.60~18.79 Ma 经历了多期次的运移充注过程^[66-68],因此铅锌成矿时代应晚于 18.79 Ma。乌拉根矿区磷灰石裂变径迹分析结果(49.5~35.2 Ma)^[37]和方铅矿、闪锌矿、方解石的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄(55.4~55.1 Ma)^[65]以及较为分散的黄铁矿 Re-Os 模式年龄(45~6.7 Ma)^[40]可能主体上反映了油气运移及相关构造热事件的记录(图 9)。Zhao 等^[23]对乌拉根矿区成矿前、成矿期和成矿期后方解石开展原位 U-Pb 分析获得的三组等时线年龄(11.80、10.9、10.6 Ma)与地质关系相符,将铅锌成矿时代限定为中新世晚期。

前人依据矿床围岩蚀变和矿化特征,认为砂岩型铜矿床主体属于同生沉积-改造型成因^[13, 46-47, 77-80],



底图据文献[23]修编。沥青 Re-Os 模式年龄数据据文献[66]。

图 9 乌拉根铅锌矿床成矿年代学与区域主要构造事件对比图

Fig.9 Comparison of the mineralization chronology of Urugen Pb-Zn deposit with the main regional tectonic events

成矿作用主要发生于赋矿层成岩晚期。吾合沙鲁矿区铜矿体主体赋存于中新统安居安组(20.73~14.12 Ma)^[81]中,该组砂岩中磷灰石裂变径迹分析结果(16~14 Ma)^[66]与地质关系相符,可能主体上也反映了矿区成矿作用发生的时代。

渐新世末开始,受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,西南天山快速隆起并向南发生逆冲推覆构造作用,南北挤压的构造应力使得乌鲁—乌恰、柯坪和库车前陆盆地内部普遍存在异常超高压区^[82],驱动盆地流体由造山带向前陆方向运移,同时驱动盆地基底油气沿断裂构造带向上运移^[83]。不同盆地沉积演化、逆冲推覆构造发育及油气运移的耦合可能是导致区域上砂岩型铜矿床成矿时代差异的主要原因。

4 成矿过程与成矿模型

对于砂砾岩型铜铅锌矿床形成过程而言,充足的金属来源(矿源层)、合适的搬运介质和运移通道(矿质搬运)以及有利的沉淀机制和容矿空间(矿质聚集)是成矿作用发生的3个必要环节。本文基于上述对西南天山砂砾岩型铜铅锌矿床地质特征、成矿作用和成矿时代及成矿动力学背景的总结,构建了区内该类型矿床的成矿过程和成矿模式。

4.1 砾岩型铜矿床

砾岩型铜矿床成矿过程主要经历了沉积成岩期和热液矿化期两个期次。

沉积成岩期:侏罗纪伴随塔拉斯—费尔干纳断裂的发展,库孜贡苏拉分断陷盆地形成,接受一套以侏罗系为主体的红色含煤系碎屑岩沉积建造,成为砾岩型铜矿床的矿源层。在含矿建造形成过程中,有机质与地层建造水组成初始成矿流体,随着埋深加大和温度升高,沉积物中的有机质不断成熟、向烃类物质转化并加入到初始成矿流体中,初始成矿流体通过长期的水岩作用,使得基底岩系和红色沉积建造中的硫酸盐、碳酸盐等溶解并萃取出矿金属元素,形成真正的有机成矿流体,其中金属元素可能与有机质形成有机化合物等稳定形式存在。

热液矿化期:早白垩世末期,随着库孜贡苏盆地构造抬升,重力作用和构造挤压驱动成矿流体沿着断裂上升至浅部渗透率较高的上侏罗统库孜贡组砾岩层时,成矿有机流体受到下白垩统克孜勒苏群不透水砂质泥岩的圈闭而聚集,同时可能受到同期岩浆活动引起的热异常影响,流体中溶解的硫酸盐

与烃类物质发生热化学还原作用形成 H_2S 等还原硫,引发金属元素的沉淀形成矿床(图10a)。

4.2 砂岩型铅锌矿床

砂岩型铅锌矿床成矿过程主要经历了沉积成岩期、油气运移和充注期及热液矿化期三个期次。

沉积成岩期:侏罗纪—早白垩世,乌鲁—乌恰盆地整体拗陷,接受一套红色含煤系碎屑岩沉积建造,成为砂岩型铅锌矿床的矿源层。晚白垩世—古近世,盆地遭受海侵,形成一套海相碎屑岩—碳酸盐岩—膏岩沉积建造。

油气运移和充注期:古近世—中新世早期,可能受上覆碳酸盐岩、膏岩不透水层和持续沉积、压实以及盆地深部低温脱水的影响,盆地下部中生界红层沉积演化为发育着流体循环的封闭环境,期间沉积有机质成熟成烃及油气多期次的运移和充注,引发了克孜勒苏群大规模的褪色和阿尔塔什组膏岩的溶解,在局部有利地质条件下聚集形成古油气藏环境;同时硫酸盐与烃类物质发生BSR过程形成 H_2S 等还原硫,为后续矿质沉淀创造了条件。

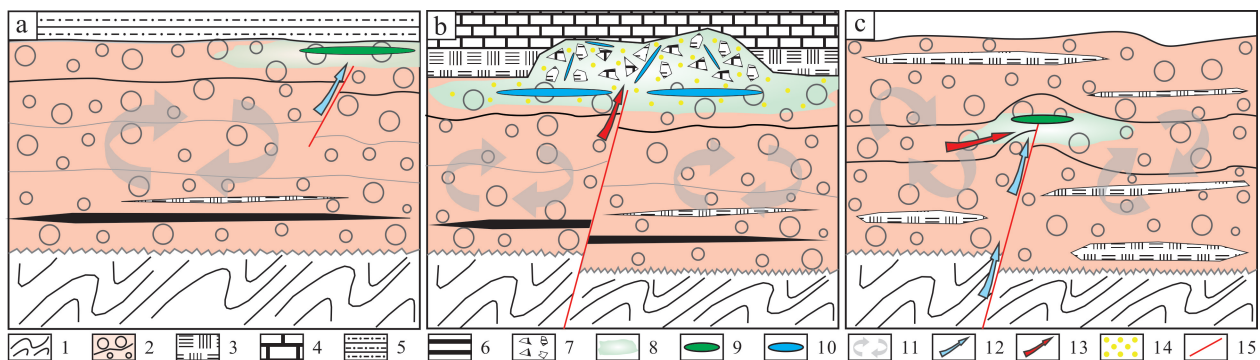
热液矿化期:中新世晚期,随着大型逆冲推覆构造的发育,盆地深部含矿流体沿断裂上升,当其进入到先存油气藏环境时,通过原油直接提供还原硫或者通过TSR过程,引发金属元素的沉淀形成矿床(图10b)。

4.3 砂岩型铜矿床

砂岩型铜矿床成矿过程主要经历了沉积成岩期和热液矿化期两个期次。

沉积成岩期:渐新世末,随着西南天山的快速隆起,乌鲁—乌恰、柯坪和库车前陆盆地形成,普遍接受一套以中新统为主体的红色碎屑岩夹膏岩沉积建造,成为砂岩型铜矿床的矿源层。在含矿建造埋藏后的成岩阶段早期,下渗大气降水及压实作用所释放的盆地建造水组成初始成矿流体,随着埋深加大和温度升高,石膏及黏土矿物的相转变逐渐释放出层间水和结构水,这些流体一起加入初始流体中并在红层建造中循环流动,与岩石发生长期的水岩作用,使得碎屑岩与膏岩层中的硫酸盐、卤化物等溶解,萃取出矿金属元素,形成真正的含矿流体,此时金属元素由于缺乏合适的沉淀富集机制而没有成矿。

热液矿化期:中新世晚期—上新世,发育大型的逆冲推覆构造,在驱动盆地含矿流体沿砂岩等高孔隙度和渗透性的层位运移的同时引发盆地基底古生



a. 砾岩型铜矿床成矿模式图; b. 砂岩型铅锌矿床成矿模式图; c. 砂岩型铜矿床成矿模式图。1. 基底建造; 2. 红层建造; 3. 膏岩; 4. 灰岩; 5. 泥岩/砂质泥岩; 6. 煤层; 7. 坍塌角砾岩; 8. 褪色蚀变带; 9. 铜矿体; 10. 铅锌矿体; 11. 初始成矿流体; 12. 有机流体; 13. 盆地建造流体; 14. 还原硫(H_2S); 15. 断裂。

图 10 西南天山砂砾岩容矿型铜铅锌矿床成矿模式图

Fig.10 Sketch models of sandstone-hosted Cu - Pb - Zn metallogenic belt in the southwest Tianshan area

界油气沿断裂上升,两者在褶皱层间引张地段、背转折端等构造圈闭部位发生聚集和混合,可能由于氧化还原障的存在,有机流体与盆地建造水以及有机流体内部有机与无机成分之间的平衡被打破,有机质发生氧化作用而硫酸盐被还原为 H_2S 等还原硫,引发金属元素的沉淀形成矿床(图 10c)。矿床成矿期后发生不同程度的表生氧化作用,使矿体进一步富集。

5 展望和结论

5.1 研究展望

1)西南天山砂岩型铜矿床的形成与大型逆冲推覆构造关系密切,但该区逆冲推覆构造的发育自中新世至今为一个多阶段并持续的过程,砂岩型铜矿床也多遭受后期表生氧化改造作用,这给精确厘定矿床成矿时代带来挑战。详细的岩相学观察加合适定年方法的选择是准确厘定其成矿时代的保证。

2)区内砂岩型铅锌矿床成矿前经历了多期次的油气运移和充注过程,该油气与萨热克铜矿床成矿流体均来自于盆地侏罗系烃源岩的生排烃作用,两种有机流体为何会有如此大的成矿差异性? 铅锌矿床成矿流体以盆地建造水为主,该建造水是来自于盆地中生界红层沉积建造水还是变质基底建造水亦或是两者的混合? 如果是中生界红层沉积建造水,其与成矿前油气是怎样的继承和发展关系? 这些问题尚需开展详细分析研究。

3)近年来在乌鲁-乌恰盆地南部古近系渐新统一始新统巴什布拉克组及始新统乌拉根组和卡拉

塔尔组中发现海相砂岩型铜矿床(玛依喀克铜矿床)^[84],整体矿化特征与盆地北部吾合沙鲁、花园等陆相砂岩型铜矿床相似。在大地构造上,目前发现的陆相砂岩型铜矿床整体位于西南天山逆冲推覆带前缘,而海相砂岩型铜矿床则位于西昆仑帕米尔逆冲推覆带前缘。海相砂岩型铜矿床的发现一方面为区域上砂砾岩型铜铅锌矿床找矿勘查工作拓展了新的空间,另一方面对其成矿作用、成矿时代和矿床成因的进一步研究,以及与陆相砂岩型铜矿及铅锌矿床的对比分析,将对丰富和完善该区砂砾岩型铜铅锌矿床成矿理论及矿床成矿模型具有重要意义。

5.2 结论

1)西南天山砂岩型铜矿床形成于早白垩世末,对应库孜贡苏盆地由断陷至抬升的构造转换阶段,重力作用和构造抬升挤压驱动盆地流体迁移,同期的岩浆活动可能为成矿形成提供热源。砂岩型铅锌矿床和铜矿床形成于中新世晚期,与大型逆冲推覆构造作用密切相关,造山隆升和构造挤压是成矿流体运移的主要驱动力。

2)区内砂砾岩型铜铅锌矿床成矿金属物质均来自造山带物质,但盆地基底及红层沉积建造组成的差异对成矿作用的影响也不同。

3)沉积硫酸盐可能是区内砂砾岩型铜铅锌矿床成矿所需还原硫的主要来源,砾岩型和砂岩型铜矿床还原硫主要通过 TSR 过程或异地 BSR 过程形成,而成矿前 BSR 过程和成矿期 TSR 过程则共同构成了砂岩型铅锌矿床还原硫形成机制。

4)区内砾岩型铜矿床成矿流体以有机流体为

主,碳质主要来源于海相碳酸盐的溶解;砂岩型铅锌矿床成矿流体以盆地水为主,碳质主要来源于有机质的脱羧基作用;而砂岩型铜矿床成矿流体则表现为有机流体和盆地建造水混合的特征,成矿过程还有大气降水的加入,碳质主要来源于有机质的氧化作用。

致谢:紫金集团紫金锌业有限责任公司为本文野外调查的开展提供了大力支持,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 刘增仁,朱红英,贾润幸,等.西南天山中—新生界层控砂砾岩型铜铅锌矿成矿规律[J].地质力学学报,2022,28(1):50-66.
Liu Zengren, Zhu Hongying, Jia Runxing, et al. Metallogenic Regularity of Meso-Cenozoic Strata-Bound Glutenite-Type Cu-Pb-Zn Deposits in the Southwestern Tianshan Mountains [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(1): 50-66.
- [2] Yang W, Jolivet M, Dupont-Nivet G D, et al. Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution of Southwestern Tian Shan: Evidence from Detrital Zircon U/Pb and Apatite Fission Track Ages of the Ulugqat Area, Northwest China [J]. Gondwana Research, 2014, 26: 986-1008.
- [3] 方维萱,贾润幸,郭玉乾,等.塔西地区富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制[J].地球科学与环境学报,2016,38(6):727-752.
Fang Weixuan, Jia Runxing, Guo Yuqian, et al. Hydrocarbon-Rich Basin Fluid with Reductibility and Metallogenic Mechanism for Glutenite-Type Cu-Pb-Zn-U Deposits in the Western of Tarim Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(6): 727-752.
- [4] 蔡东升,卢华复,贾东,等.南天山古生代板块构造演化[J].地质论评,1995,41(5):432-443.
Cai Dongsheng, Lu Huaifu, Jia Dong, et al. Paleozoic Plate Tectonic Evolution of Southern Tianshan [J]. Geological Review, 1995, 41(5): 432-443.
- [5] 杨威,郭召杰,姜振学,等.西南天山前陆盆地侏罗纪—白垩纪盆地格局:来自碎屑锆石年代学的证据[J].大地构造与成矿学,2017,41(3):533-550.
Yang Wei, Guo Zhaojie, Jiang Zhenxue, et al. Jurassic-Cretaceous Basin-Range Pattern in the Southwestern Tian Shan Foreland Basin: Evidence from Detrital U-Pb Zircon Geochronology [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(3): 533-550.
- [6] 唐天福.新疆塔里木盆地西部晚白垩世至早第三纪海相沉积特征及沉积环境[M].北京:科学出版社,1992.
Tang Tianfu. Characteristics of Late Cretaceous to Early Tertiary Marine Sedimentation and Depositional Environment in the Western Tarim Basin, Xinjiang [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [7] Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Grothe A, et al. Timing, Cause and Impact of the Late Eocene Stepwise Sea Retreat from the Tarim Basin (West China) [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2014, 403: 101-118.
- [8] 刘家军,李恩东,龙训荣,等.西南天山大山口金矿床中石英⁴⁰Ar-³⁹Ar快中子活化年龄及其意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2004,34(1):37-43.
Liu Jiajun, Li Endong, Long Xunrong, et al. The Metallogenic Age of Dashankou Gold Deposit in Xinjiang, Southwestern Tianshan Mountains [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(1): 37-43.
- [9] Tang Z H, Dong X X, Wang X, et al. Oligocene-Miocene Magnetostratigraphy and Magnetic Anisotropy of the Baxbulak Section from the Pamir-Tian Shan Convergence Zone [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(10): 3575-3592.
- [10] 郝诒纯,曾学鲁.从有孔虫的特征探讨中新世西塔里木古海湾的演变[J].微体古生物学报,1984,1(1):1-18.
Hao Yichun, Zeng Xuelu. On the Evolution of the West Tarim Gulf from Mesozoic to Cenozoic in Terms of Characteristics of Foraminiferal Fauna [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1984, 1(1): 1-18.
- [11] 周志毅,陈丕基.塔里木生物地层和地质演化[M].北京:科学出版社,1990.
Zhou Zhiyi, Chen Piji. Tarim Biostratigraphy and Geologic Evolution [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [12] 赵祖应,唐晓东.西克尔新近系砂岩型铜矿床地质特征及开发利用前景[J].新疆地质,2003,21(1):141-142.
Zhao Zuying, Tang Xiaodong. Geological Characteristics and Prospects for Development and Utilization of Xiker Neoproterozoic Sandstone Copper Deposit [J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(1): 141-142.

- [13] 王思程, 薛春纪, 李志丹, 等. 新疆伽师砂岩型铜矿床地质及 S、Pb 同位素地球化学[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 219 - 227.
Wang Sicheng, Xue Chunji, Li Zhidan, et al. Geology and S - Pb Isotopic Geochemistry of the Jiashi Sandstone-Type Copper Deposit, Xinjiang, China [J]. Geoscience, 2011, 25(2): 219 - 227.
- [14] 张臣, 郑多明, 李江海. 柯坪断隆古生代的构造属性及其演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 314 - 318.
Zhang Chen, Zheng Duoming, Li Jianghai. Attribute of Paleozoic Structures and Its Evolution Characteristics in Keping Fault-Uplift [J]. Oil and Gas Geology, 2001, 22(4): 314 - 318.
- [15] 车自成, 刘洪福, 刘良. 中天山造山带的形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Che Zicheng, Liu Hongfu, Liu Liang. Formation and Evolution of the Middle Tianshan Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [16] 郭召杰, 张志诚. 中天山早古生代岛弧构造带研究[J]. 河北地质学院学报, 1993, 16(2): 132 - 139.
Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng. On the Early Paleozoic Island Arc Belt of Mid-Tianshan [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1993, 16(2): 132 - 139.
- [17] Lu H F, Howell D G, Jia D, et al. Rejuvenation of the Kuqa Foreland Basin, Northern Flank of the Tarim Basin, Northwest China [J]. International Geology Review, 1994, 36(12): 1151 - 1158.
- [18] 卢华复, 贾东, 陈楚铭, 等. 库车新生代构造性质和变形时间[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 215 - 221.
Lu Huaifu, Jia Dong, Chen Chuming, et al. Nature and Timing of the Kuqa Cenozoic Structures [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 215 - 221.
- [19] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 香港: 香港文化教育出版社, 1994.
He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, et al. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang, China [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, Hong Kong: Hong Kong Culture and Education Press, 1994.
- [20] 田作基, 宋建国. 塔里木库车新生代前陆盆地构造特征及形成演化[J]. 石油学报, 1999, 20(4): 7 - 13.
Tian Zuoji, Song Jianguo. Tertiary Structure Characteristics and Evolution of Kuche Foreland Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 20(4): 7 - 13.
- [21] 刘志宏, 卢华复, 李西建, 等. 库车再生前陆盆地的构造演化[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 482 - 492.
Liu Zhihong, Lu Huaifu, Li Xijian, et al. Tectonic Evolution of Kuqa Rejuvenated Foreland Basin [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 482 - 492.
- [22] 赵路通, 张会琼. 塔西陆相砂砾岩型铜铅锌矿床成矿特征与成矿模式[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Zhao Lutong, Zhang Huiqiong. Ore-Forming Characteristics and Metallogenic Model of Glutenite-Type Cu - Pb - Zn Deposits in West Tarim [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [23] Zhao L T, Zhou G C, Gao R Z, et al. Application of Calcite U - Pb Geochronology in Sandstone-Hosted Pb - Zn Deposits: A Case Study of the Giant Urogen Deposit, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 237: 105371.
- [24] 郭海丽, 方维萱, 王磊, 等. 新疆乌恰县帕恰布拉克天青石矿床成因研究[J]. 矿物学报, 2019, 39(6): 735 - 744.
Guo Haili, Fang Weixuan, Wang Lei, et al. A Research on Genesis of the Paqialulake Celestine Deposit in Wuqia County, Xinjiang Autonomous Region, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 39(6): 735 - 744.
- [25] 曹养同, 刘成林, 陈永志, 等. 库车前陆盆地古近系-新近系铜矿化特征及铜的来源、富集分布初探[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1791 - 1804.
Cao Yangtong, Liu Chenglin, Chen Yongzhi, et al. Characteristics of Copper Mineralization in the Kuqa Foreland Basin, and Origin, Enrichment and Distribution of Copper [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1791 - 1804.
- [26] 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 等. 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床地质特征和 S - Pb 同位素组成[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 40 - 54.
Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, et al. Ore Geology, S-and Pb Isotopic Compositions of the Urogen Zn - Pb Deposit, Wuqia County, Xinjiang [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(1): 40 - 54.
- [27] 陈兴, 薛春纪. 西天山乌拉根大规模铅锌成矿中 H₂S 成因: 菌生结构和硫同位素组成约束[J]. 岩石学报, 2016, 32(5): 1301 - 1314.
Chen Xing, Xue Chunji. Origin of H₂S in Urogen Large-Scale Zn - Pb Mineralization, Western Tien Shan: Bacteriogenic Structure and S - Isotopic Constraints [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016 32 (5): 1301 - 1314.
- [28] Xue C J, Chi G X, Li Z D, et al. Geology,

- Geochemistry and Genesis of the Cretaceous and Paleocene Sandstone-and Conglomerate-Hosted Urogen Zn - Pb Deposit, Xinjiang, China: A Review [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 63: 328 - 342.
- [29] 董新丰, 薛春纪, 李志丹, 等. 新疆喀什拗陷乌拉根铅锌矿床有机质特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 129 - 145.
- Dong Xinfeng, Xue Chunji, Li Zhidan, et al. Characteristics and Geological Significances of the Organic Matter in the Wulagen Zn - Pb Deposit, Kashi Sag Xinjiang [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 129 - 145.
- [30] 韩凤彬, 陈正乐, 刘增仁, 等. 西南天山乌拉根铅锌矿床有机地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(3): 591 - 602.
- Han Fengbin, Chen Zhengle, Liu Zengren, et al. Organic Geochemistry of Wulagen Pb - Zn Deposit in Southwest Tianshan Mountains and Its Implications [J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(3): 591 - 602.
- [31] Gao R Z, Xue C J, Zhao X B, et al. Source and Possible Leaching Process of Ore Metals in the Urogen Sandstone Hosted Zn - Pb Deposit, Xinjiang, China, Constraints from Lead Isotopes and Rare Earth Elements Geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 106: 56 - 78.
- [32] Anderson G M, Thom J. The Role of Thermochemical Sulfate Reduction in the Origin of Mississippi Valley-Type Deposits II, Carbonate-Sulfide Relationships [J]. *Geofluids*, 2008, 8: 27 - 34.
- [33] Lan Q, Hu R Z, Bi X W, et al. The Source of Organic Matter and Its Role in Producing Reduced Sulfur for the Giant Sandstone-Hosted Jinding Pb - Zn Deposit, Lanping Basin, Yunnan, Southwest China [J]. *Economic Geology*, 2021, 116: 1537 - 1560.
- [34] 贾润幸, 方维萱, 胡雷雷, 等. 新疆萨热克铜矿床硫铅氧氢碳同位素地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2017, 37(5): 630 - 637.
- Jia Runxing, Fang Weixuan, Hu Leilei, et al. Sulfur, Lead, Hydrogen, Oxygen and Carbon Isotopic Geochemical Characteristics of Sareke Copper Deposit, Wuqia County, the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(5): 630 - 637.
- [35] Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: A Global Perspective [J]. *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume: 561 - 607.
- [36] 李志丹, 薛春纪, 辛江, 等. 新疆乌恰县萨热克铜矿床地质特征及硫、铅同位素地球化学[J]. *现代地质*, 2011, 25(4): 720 - 729.
- Li Zhidan, Xue Chunji, Xin Jiang, et al. Geological Characteristics and S - Pb Isotope Geochemistry of Sareke Copper Deposit in Wuqia County Xinjiang [J]. *Geoscience*, 2011, 25(4): 720 - 729.
- [37] 王硕, 孙丰月, 王冠, 等. 黑龙江省四平山金矿床成矿作用及矿床成因: 来自矿床地质、地球化学、锆石 U - Pb年代学及 H - O - S 同位素的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(5): 1626 - 1648.
- Wang Shuo, Sun Fengyue, Wang Guan, et al. Mineralization and Genesis of Sipingshan Gold Deposit, Heilongjiang, China: Evidence from Ore Deposit Geology, Geochemistry, Zircon U - Pb Ages, and H - O - S Isotopes [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(5): 1626 - 1648.
- [38] 韩凤彬. 新疆乌恰乌拉根铅锌矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- Han Fengbin. Study on Metallogensis of Wulagen Lead-Zinc Deposit in Wuqia, Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- [39] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics the Model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 135 - 162.
- [40] 高荣臻. 新疆西南天山中-新生界砂岩容矿铅锌成矿作用: 以乌拉根铅锌矿床为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Gao Rongzhen. Mineralization of Mesozoic-Cenozoic Sandstone-Hosted Zn - Pb Deposits in the Southwestern Tianshan, Xinjiang, NW China: Exemplified by the Urogen Zn - Pb Deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [41] 季建清, 韩宝福, 朱美妃, 等. 西天山托云盆地及周边中生代岩浆活动的岩石学、地球化学与年代学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1324 - 1340.
- Ji Jianqing, Han Baofu, Zhu Meifei, et al. Cretaceous-Paleogene Alkaline Magmatism in Tuyon Basin, Southwest Tianshan Mountains: Geochronology, Petrology and Geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1324 - 1340.
- [42] 杨耘. 萨瓦亚尔顿金矿床成矿物质来源的初步探讨[J]. *新疆地质*, 2001, 19(4): 34 - 38.
- Yang Yun. Preliminary Study of the Source of Ore-

- Forming Minerals of Shawayaerdun Gold Deposit [J]. *Xinjiang Geology*, 2001, 19(4): 34 - 38.
- [43] 陈越, 赵路通, 李世恒. 新疆萨热克铜矿成矿流体研究[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(6): 1164 - 1171.
Chen Yue, Zhao Lutong, Li Shiheng. Study on the Ore-Forming Fluid of Sareke Cu Deposit in Xinjiang [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(6): 1164 - 1171.
- [44] Sheppard S M F. Characterization and Isotopic Variations in Natural Waters [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1986, 16(1): 165 - 183.
- [45] 赵路通, 祝新友, 李世恒, 等. 新疆萨热克铜矿床地质及 C - H - O - S 同位素地球化学特征研究[J]. *矿产与地质*, 2018, 32(1): 18 - 26.
Zhao Lutong, Zhu Xinyou, Li Shiheng, et al. Geological and C - H - O - S Isotope Geochemical Characteristics of Sareke Copper Deposit in Xinjiang [J]. *Mineral Resource and Geology*, 2018, 32(1): 18 - 26.
- [46] 王伟, 李文渊, 唐小东, 等. 塔里木陆块西北缘滴水铜矿成矿流体特征与成矿作用[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(3): 441 - 455.
Wang Wei, Li Wenyuan, Tang Xiaodong, et al. Ore-Forming Fluid Features and Mineralization of the Dishui Copper Deposit in the Northwest of Tarim Block [J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(3): 441 - 455.
- [47] 王伟, 李文渊, 唐小东, 等. 塔里木陆块西北缘伽师铜矿成矿流体特征与成矿作用[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(4): 605 - 620.
Wang Wei, Li Wenyuan, Tang Xiaodong, et al. Ore-Forming Fluid Features and Mineralization of the Jiashi Copper Deposit in Northwestern Tarim Block [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(4): 605 - 620.
- [48] 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 2004, 23(1): 1 - 10.
Liu Jiajun, He Mingqin, Li Zhiming, et al. Oxygen and Carbon Isotopic Geochemistry of Baiyangping Silver-Copper Polymetallic Ore Concentration Area in Lanping Basin of Yunnan Province and Its Significance [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(1): 1 - 10.
- [49] 赵孟军, 王招明, 宋岩, 等. 塔里木盆地喀什凹陷油气来源及其成藏过程[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 40 - 54.
Zhao Mengjun, Wang Zhaoming, Song Yan, et al. Source and Accumulation of Oil and Gas in Kashi Sag, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 40 - 54.
- [50] 贾润幸, 方维萱, 王寿成, 等. 新疆萨热克砂砾岩型铜矿床成矿流体碳、氢-氧同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 2021, 40(6): 1299 - 1311.
Jia Runxing, Fang Weixuan, Wang Shoucheng, et al. Carbon, Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions from Ore-Forming Fluids of Sareke Sediment-Hosted Copper Deposit, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(6): 1299 - 1311.
- [51] 李世恒, 董磊磊, 赵路通, 等. 新疆乌拉根铅锌矿床成矿流体研究及成因探讨[J]. *中国锰业*, 2017, 35(6): 5 - 9.
Li Shiheng, Dong Leilei, Zhao Lutong, et al. Fluid Research & Reason Characteristics in Ore Genesis of Wulagen Lead-Zinc Deposit [J]. *China's Manganese Industry*, 2017, 35(6): 5 - 9.
- [52] 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 等. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. *矿床地质*, 2010, 84(5): 694 - 702.
Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Liu Zengren, et al. Geologic Characteristics and Genesis of the Uragen Lead-Zinc Deposit, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(5), 694 - 702.
- [53] 张舒. 南天山典型铅锌矿床地质-地球化学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
Zhang Shu. The Geology Geochemistry and Metallogenesis of the Typical Lead-Zinc Deposits, Southern Tianshan Orogeny [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [54] 郭会其. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Guo Huiqi. Geological Features of Ore Genesis of Wulagen Pb - Zn Deposit [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [55] 董传奇, 胡煜昭, 任涛, 等. 塔西乌拉根铅锌矿床硫同位素地球化学特征[J]. *矿物学报*, 2017, 37(5): 653 - 660.
Dong Chuanqi, Hu Yuzhao, Ren Tao, et al. Geochemical Characteristics of Sulfur Isotope of Uragen Pb - Zn Ore Deposit in the Western Tarim Basin [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(5): 653 - 660.
- [56] 王伟, 李文渊, 高满新, 等. 塔里木陆块西北缘萨热克砂砾岩型铜矿床构造-流体演化对成矿的制约[J]. *地质通报*, 2018, 37(7): 1315 - 1324.

- Wang Wei, Li Wenyuan, Gao Manxin, et al. Constraints on Tectonic, Fluid and Metallogenic System Evolution for the Formation of Sareke Sandstone Copper Deposit in Northwestern Tarim Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(7):1315-1324.
- [57] 贺根文, 周兴华, 袁慧香, 等. 赣南高陂花岗斑岩地球化学、年代学特征及其对成矿作用的启示[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(1): 161-176.
- He Genwen, Zhou Xinghua, Yuan Huixiang, et al. Geochemistry and Geochronology of Early Cretaceous Granite Porphyry in Gaobei, South Jiangxi Province and Its Implications for Mineralization [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 161-176.
- [58] 吴鹏. 楚雄盆地砂岩型铜矿床地质地球化学及找矿预测研究:以六苴、郝家河矿床为例[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- Wu Peng. Geological Geochemistry and Mineralization Prediction of Sandstone-Hosted Copper Deposits in the Chuxiong Basin: The Case Study in Liuzuo and Haojiahe Deposits [D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2019.
- [59] 黄仲金, 吴静, 吴鹏, 等. 滇中老街区铅-银矿床富碱岩脉岩石学特征、时空结构及其对成矿作用的约束[J]. *地质通报*, 2023, 42(2/3): 285-306.
- Huang Zhongjin, Wu Jing, Wu Peng, et al. Petrology and Space-Time Structure of Alkali-Rich Dikes and Its Constraints on Mineralization in the Laojiezi Lead-Silver Deposit, Central Yunnan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(2/3): 285-306.
- [60] Hitzman M, Kirkham R, Broughton D, et al. The Sediment-Hosted Stratiform Copper Ore System [J]. *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume: 609-642.
- [61] 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 等. 沉积盆地中金属成矿与油气藏的耦合关系[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 83-105.
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Li Baohua, et al. The Coupling Relationship Between Metallization and Hydrocarbon Accumulation in Sedimentary Basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 83-105.
- [62] Machel H G. Bacterial and Thermochemical Sulfate Reduction in Diagenetic Settings: Old and New Insights [J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(1/2): 143-175.
- [63] 谭凯旋, 龚文君, 李小明, 等. 地洼盆地砂岩铜矿床的构造-流体-成矿体系及演化[J]. *大地构造与成矿学*, 1999, 23(1): 35-41.
- Tan Kaixuan, Gong Wenjun, Li Xiaoming, et al. The Tectonic-Fluid-Metallogenic System of Sandstone Type Copper Deposits in Diwa Basins and Its Evolution [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1999, 23(1): 35-41.
- [64] Zhao L T, Wang J B, Wang Y W, et al. Pyrite Re-Os Geochronology of the Sareke Sediment-Hosted Cu Deposit, Xinjiang, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 104: 620-627.
- [65] Wang Y, Zhang Z C, Zhang S, et al. Palaeogene Sediment-Hosted Pb-Zn Deposits in SE Asia: The Uragen Example [J]. *International Geology Review*, 2017, 59(15/16): 1-13.
- [66] 方维萱, 王磊, 王寿成, 等. 塔西砂砾岩型铜铅锌矿床成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- Fang Weixuan, Wang Lei, Wang Shoucheng, et al. Mineralization Pattern and Mineralization Prediction of Glutenite-Type Cu-Pb-Zn Deposits in West Tarim [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [67] 张有瑜, Horst Zwingmann, Andrew Todd, 等. 塔里木盆地典型砂岩油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素测年研究与成藏年代探讨[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 637-648.
- Zhang Youyu, Zwingmann H, Todd A, et al. K-Ar Dating of Authigenic Illite and Its Applications to Study of Oil-Gas Charging Histories of Typical Sandstone Reservoirs, Tarim Basin, Northwest China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 637-648.
- [68] 张君峰, 王东良, 王招明, 等. 喀什拗陷阿克莫木气田天然气成藏地球化学[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(4): 507-513.
- Zhang Junfeng, Wang Dongliang, Wang Zhaoming, et al. Natural Gas Deposit Formation Geochemistry of Akmomu Gas Field Kashi Sag in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(4): 507-513.
- [69] 韩宝福, 王学潮, 何国琦, 等. 西南天山早白垩世火山岩中发现地幔和下地壳捕虏体[J]. *科学通报*, 1998, 43(23): 2544-2547.
- Han Baofu, Wang Xuechao, He Guoqi, et al. Study on the Mantle and Lower Crust Xenoliths in the Volcanic Rocks of Early Cretaceous, Southwestern Tianshan [J]. *China Science Bulletin*, 1998, 43(23):

- 2544 - 2547.
- [70] Sobel E R, Arnaud N. Cretaceous-Paleogene Basaltic Rocks of the Tuyon Basin, NW China and the Kyrgyz Tianshan: The Trace of a Small Plume [J]. *Lithos*, 2000, 50(1/2/3): 191 - 215.
- [71] 王彦斌, 王永, 刘训, 等. 南天山托云盆地晚白垩纪-早第三纪玄武岩的地球化学特征及成因初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(2): 131 - 139.
Wang Yanbin, Wang Yong, Liu Xun, et al. Geochemical Characteristics and Genesis of Late Cretaceous to Paleogene Basalts in Tuyon Basin, South Tianshan Mountain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(2): 131 - 139.
- [72] 梁涛, 罗照华, 柯珊, 等. 新疆托云火山群 SHRIMP 锆石 U - Pb 年代学及其动力学意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1381 - 1391.
Liang Tao, Luo Zhaohua, Ke Shan, et al. SHRIMP Zircon Dating of the Tuyon Volcanoes Group, Xinjiang, and Its Geodynamic Implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1381 - 1391.
- [73] 杜云, 田磊, 郑正福, 等. 湘西南落家冲钨锡矿床加里东期成岩成矿年龄的测定: 对华南多旋回构造-岩浆活动与成矿作用的启示[J]. *地质通报*, 2022, 41(5): 886 - 902.
Du Yun, Tian Lei, Zheng Zhengfu, et al. Sm - Nd Dating of Scheelite in Luojiachong W - Sn Deposit, Miaoershan Area, Southwestern Hunan Province: Implications for Polycyclic Tectonic-Magmatic Activities and Metallogenesis in South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(5): 886 - 902.
- [74] 方维萱, 贾润幸, 王磊. 塔西陆内红层盆地中盆地流体类型、砂砾岩型铜铅锌-铀矿床的大规模褪色化围岩蚀变与金属成矿[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(5): 585 - 619.
Fang Weixuan, Jia Runxing, Wang Lei. Types of Basin Fluids, Mechanism of Discolored Alterations and Metal Mineralization of Glutenite-Type Cu - Pb - Zn - U Deposits in Intercontinental Red-Bed Basin of the Western Tarim Basin [J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 2017, 39(5): 585 - 619.
- [75] 杜玉龙, 方维萱, 鲁佳. 新疆萨热克辉长辉绿岩类成岩温度-压力-氧逸度特征与成岩作用演化趋势[J]. *岩石学报*, 2020, 36(2): 484 - 508.
Du Yulong, Fang Weixuan, Lu Jia. Characteristics of Diagenetic Temperature-Pressure-Oxygen Fugacity of Gabbro-Diabase and Tendency of Geothermal Evolution of Magma Diagenesis in Sareke, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(2): 484 - 508.
- [76] 方维萱, 王磊, 鲁佳, 等. 新疆萨热克铜矿床绿泥石化蚀变相与构造-岩浆-古地热事件的热通量恢复[J]. *矿物学报*, 2017, 37(5): 661 - 675.
Fang Weixuan, Wang Lei, Lu Jia, et al. Chloritization Facies and Restoration of Heat Flux for Tectonic-Magmatic-Thermal Events of Sareke Copper Mine in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(5): 661 - 675.
- [77] 时文革, 姚玉增, 巩恩普, 等. 新疆滴水陆相砂岩型铜矿成因浅析[J]. *地质与资源*, 2016, 25(1): 60 - 68.
Shi Wenge, Yao Yuzeng, Gong Enpu, et al. Research on Metallogeny of the Dishui Lacustrine Sedimentary Rock-Hosted Copper Deposit in Xinjiang Region [J]. *Geology and Resource*, 2016, 25(1): 60 - 68.
- [78] 年武强, 罗卫东, 石玉军, 等. 新疆伽师砂岩型铜矿地质特征及找矿标志[J]. *甘肃地质*, 2007, 16(1/2): 28 - 33.
Nian Wuqiang, Luo Weidong, Shi Yujun, et al. Geological Characteristics and Prospecting Indicating of Sandstone Copper Deposit in Jiashi of Xinjiang Province [J]. *Gansu Geology*, 2007, 16(1/2): 28 - 33.
- [79] 张振亮, 冯选洁, 董福辰, 等. 西南天山砂砾岩容矿矿床类型及找矿方向[J]. *西北地质*, 2014, 47(3): 70 - 82.
Zhang Zhenliang, Feng Xuanjie, Dong Fuchen, et al. Type, Genesis and Exploration Direction of Glutenite-Hosted Ore Deposits in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(3): 70 - 82.
- [80] 韩文文, 陶晓风, 岳相元. 新疆滴水砂岩铜矿床特征及成因探讨[J]. *华南地质与矿产*, 2011, 27(3): 184 - 220.
Han Wenwen, Tao Xiaofeng, Yue Xiangyuan. Geological Characteristics and Metallogenesis of Dishui Sandstone-Type Copper Deposit, Xinjiang [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2011, 27(3): 184 - 220.
- [81] 张涛. 天山南麓库车坳陷新生代高精度磁性地层与构造演化[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
Zhang Tao. Cenozoic High Resolution Magnetostratigraphy in the Kuqa Depression and Evolution of the South Tianshan Mountains [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.

[82] 李振生, 刘德良, 杨强, 等. 库车前陆盆地断裂封存
的超高压封存箱[J]. 中国科技大学学报, 2006, 36
(4): 453 - 457.

Li Zhensheng, Liu Deliang, Yang Qiang, et al.
Overpressure Compartment Sealed by Faults in Kuqa
Foreland Basin [J]. Journal of University of Science
and Technology of China, 2006, 36(4): 453 - 457.

[83] 何光玉, 卢华复, 李树新. 库车再生前陆盆地油气运
移特征[J]. 地质学报, 2004, 78(6): 848 - 853.

He Guangyu, Lu Huaifu, Li Shuxin. Petroleum
Migration Features in the Kuqa Rejuvenated Foreland

Basin, Northwestern China [J]. Acta Geologica
Sinica, 2004, 78(6): 848 - 853.

[84] 张磊, 叶雷, 朱成成, 等. 塔里木盆地西缘乌恰地区
海相砂岩型铜矿的发现及对找矿的指示意义[J]. 矿
产勘查, 2020, 11(4): 656 - 663.

Zhang Lei, Ye Lei, Zhu Chengcheng, et al. Discovery
and Prospecting Significance of Marine Sedimentary
Sandstone-Type Copper Deposits in Wuqia County,
Western Margin of Tarim Basin [J]. Mineral
Exploration, 2020, 11(4): 656 - 663.

中国精品科技期刊证书

Certificate of Outstanding S&T Journals of China

2023



F5000

吉林大学学报地球科学版

根据中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价结果, 贵
刊入选“第6届中国精品科技期刊”, 即“中国精品科技期
刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

特此证明。

有效期: 2023年9月-2026年12月

证书编号: 2022-E116-JP076



精品科技期刊服务与保障系统项目组
中国科学技术信息研究所
2023年9月

