

新疆古生代斑岩铜矿叠加成矿模式

陈华勇^{1*}, 吴超¹, 肖兵¹, 王云峰²

¹中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640

²贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025

Chen HuaYong¹, Xiao Bing¹, Wu Chao¹, Wang YunFeng²

¹Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

²College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: With the advance of green energy transformation in the 21st century, the demand for copper has surged dramatically and porphyry copper deposits as the main suppliers of global copper resources have received great attention from both academic and industrial communities. Although a set of classic models have been established for Cenozoic porphyry copper deposits, the porphyry copper deposits located at Paleozoic Central Asian Orogenic Belt exhibit unique characteristics and their genesis mechanisms are not fully understood. Taking important porphyry copper deposits in Xinjiang as research objects, this study reveals that these deposits generally experienced multiple magmatic activities with time spanning up to 100-200 Ma and often underwent superimposed and/or modification mineralization stages after porphyry mineralization. For example, the Tuwu-Yandong deposit has mineral assemblages of anhydrite, chalcopyrite, calcite, and chlorite after porphyry mineralization; the Yuhai-Sanchakou mining area exhibits post-porphyry veins of epidote, quartz, chlorite, zeolite, and calcite; and the Halasu copper belt had late alteration and mineralization with copper-bearing sulfide veins and argillic alteration. Fluid inclusion studies further confirm that new fluid systems would overprint on the hydrothermal fluid system in the porphyry stage. Based on these observations, we propose a new mineralization model of superimposed and modification for Paleozoic porphyry copper deposits in Xinjiang. In the early stage of island arc evolution, pre-mineralization magmatic activities may form unmineralized alterations in the mining areas such as early sodic-calcic alteration and epidote alteration at the Halasu belt. With the maturity of the island arc, tectonic triggers such as flat subduction facilitated high oxygen fugacity, water-rich magmatic activities which partly have adakite-like geochemical features and formed the porphyry-type mineralization and alteration in the mining areas such as diorite porphyry in Tuwu-Yandong and diorite porphyry and granodiorite porphyry

基金项目: 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFC2903301), 新疆自治区重点研发计划 (批准号: 2023B03014)

作者简介: 陈华勇(1976-), 男, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事造山带金属矿产成矿模式研究及找矿勘探应用。E-mail: huayongchen@gig.ac.cn, ORCID: 0000-0001-9106-9297

at Halasu. Further tectonic evolution including change of subduction polarity or postcollisional asthenospheric upwelling led to new magmatic hydrothermal activities superimposed on preexisting porphyry-type mineralization and alteration. Moreover, post-mineralization tectonic metamorphism may also introduce new mineralizing materials or cause remobilization of preexisting ores. The aforementioned models underscore the importance of specific tectonic or magmatic activities that may superimpose on pre-existing porphyry mineralization systems in long-lived arcs with sustained multistage magmatic activities. These activities, beyond the classic types of porphyry mineralization alteration, require special attention due to their exploration potential to introduce new mineralizing components.

Keywords: Paleozoic porphyry copper deposit, superimposed mineralization, Xinjiang, Central Asian Orogenic Belt

摘要: 随着 21 世纪绿色能源转型的推进, 全球铜的需求急剧上升, 斑岩型铜矿作为全球铜资源的主要来源, 受到了学术界和矿业界的高度重视。尽管目前已建立了基于新生代斑岩铜矿的经典模型, 但古生代中亚造山带的斑岩铜矿却展现出独特的特征, 其成因机制尚未完全明确。本研究以新疆地区的重要斑岩铜矿为研究对象, 揭示了这些矿区普遍存在多期岩浆活动, 时间跨度可长达 1-2 亿年, 并在斑岩成矿期后, 常常出现叠加改造成矿阶段。例如, 土屋-延东矿床在斑岩成矿期后出现了硬石膏、黄铜矿、方解石和绿泥石的矿物组合; 玉海-三岔口矿区则出现了绿帘石、石英、绿泥石、沸石、方解石等斑岩期后的脉体; 哈腊苏铜矿带发育含铜硫化物脉和粘土化蚀变的后期蚀变矿化。成矿流体研究进一步证实, 在斑岩期热液流体系统结束后会出现新的流体系统叠加。基于这些观察, 我们提出了新疆古生代斑岩铜矿的叠加改造成矿模式。在岛弧演化的早期, 成矿前的岩浆活动可能会在矿区形成蚀变, 但这些蚀变通常与矿化无关, 如哈腊苏成矿带的早期钠钙化和绿帘石化蚀变。随着岛弧的成熟, 特殊的构造机制如平坦俯冲, 形成了高氧逸度、富水的岩浆活动。这些岩浆活动部分具有埃达克质地球化学特征, 并形成了矿区的斑岩型矿化与蚀变, 如土屋-延东的斜长花岗斑岩和哈腊苏的闪长斑岩及花岗闪长斑岩。伴随构造的进一步演化, 包括俯冲极性的转变或后碰撞阶段软流圈上涌, 导致了新的岩浆热液活动叠加在先成的斑岩型矿化与蚀变之上。此外, 成矿后的构造变质作用也可能引入新的成矿物质或导致早期成矿物质的再富集。本研究模型指示了对于长期活动的、存在多期岩浆活动的长寿弧, 除了经典的斑岩矿化蚀变类型, 还应特别关注那些可能叠加在先成斑岩成矿系统上的特定构造或岩浆活动, 因为它们可能带来新的矿化并提高勘查潜力。

关键词: 古生代斑岩铜矿, 叠加矿化, 新疆, 中亚造山带

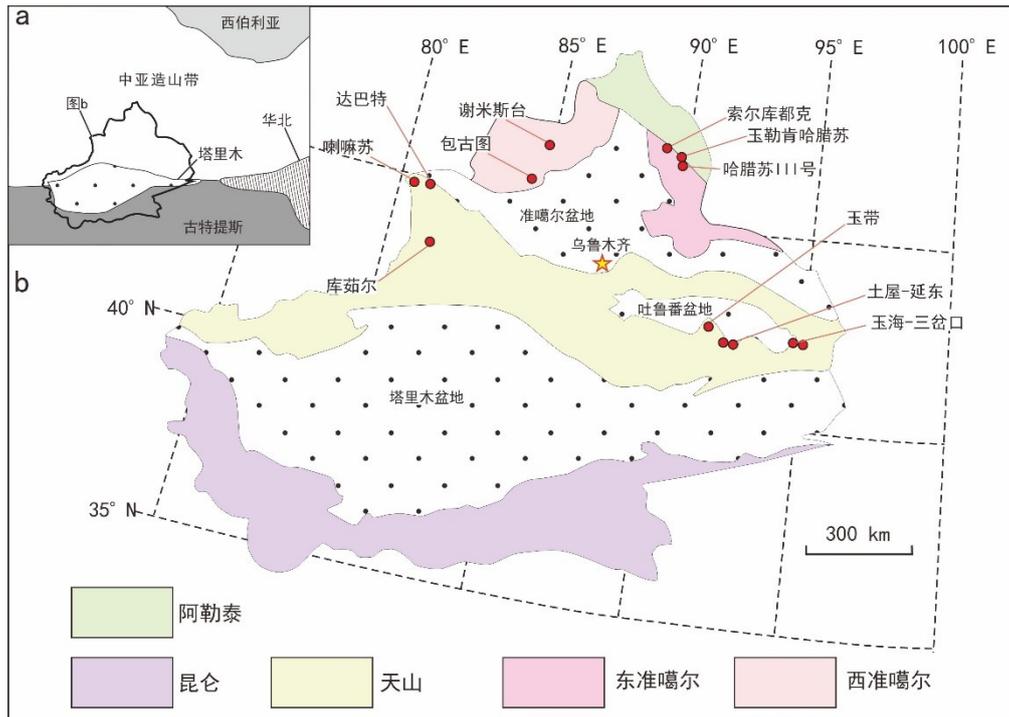
中图分类号: P611 P612 **收稿日期:** 2024-10-15

0 引言

斑岩型铜矿由于其重要的经济价值和分布的广泛性,已成为全球最主要的矿床类型之一。长期以来国内外学者围绕斑岩铜矿开展了大量的研究,并已经建立起较为成熟和广泛接受的成矿模式(侯增谦, 2004, Cooke et al., 2005, Sillitoe, 2010, Richards, 2011, Sun et al., 2015)。直到今天,斑岩型铜矿相关科学问题与勘查应用等仍然是全球矿床模型研究的热点和前沿(陈华勇和吴超, 2020, Chiaradia, 2022, Wu et al., 2022, Meng et al., 2024)。斑岩铜矿成矿模型初步诞生于上世纪 70 年代(Lowell and Guilbert, 1970),并主要由西方矿床学家加以发展和完善,其构建模型的主要成矿实例来自于美洲科迪勒拉山系的中新生代大陆边缘弧,包括众多著名的智利超大型斑岩铜矿床。进入 21 世纪以来,由我国学者为主导的矿床学家在青藏高原识别出不同于美洲“安第斯型”的大陆俯冲环境斑岩铜矿系列,最为著名的如冈底斯斑岩铜矿带,并提出了大陆碰撞环境新的斑岩成矿模式(侯增谦和杨志明, 2009, 侯增谦等, 2020)。总体而言,无论是安第斯成矿带还是冈底斯成矿带的斑岩铜矿形成时代都比较年轻,多为中生代。与之不同的是,中亚成矿带所发现的斑岩铜矿多形成于古生代,著名的超大型矿床如额云托勒盖(蒙古)、科翁腊德(哈萨克斯坦)等,这些矿床的形成机制被认为与经典安第斯型斑岩矿床基本一致(申萍等, 2015)。位于中亚造山带核心部位的我国新疆地区自上世纪 90 年代以来也发现了一系列的斑岩铜矿,比较著名的如东天山的土屋-延东斑岩铜矿和阿勒泰的哈腊苏斑岩铜矿等,虽然这些矿床的规模不及境外斑岩矿床巨大,但也展现出较好的成矿潜力,如土屋-延东铜矿储量已接近 300 万吨金属铜(Wang et al., 2019)。随着近年来对于新疆主要斑岩铜矿的深入研究,越来越多的证据表明中亚造山带核心区的古生代斑岩铜矿普遍具有后期叠加和富集成矿的现象,这与经典的斑岩成矿模式存在较大差异(Wu et al., 2015, Xiao et al., 2017, Wu et al., 2018, Wang et al., 2019),可能代表了古弧盆体系中斑岩铜矿比较常见的成矿形式,值得进一步提炼其标志和总结规律,为相似地区斑岩铜矿成矿模式的完善与找矿勘查提供更为准确的依据。

图 1 新疆斑岩铜矿床分布图(据 Chen et al., 2018 修改)

Fig.1 Distributions of porphyry copper deposits in Xinjiang (modified according to Chen et al., 2018)



1 新疆古生代斑岩铜矿构造背景与地质特征

古生代的斑岩型铜矿床主要分布于新疆北部（图 1），包括以土屋-延东为代表的东天山地区、以喇嘛苏-赛博、达巴特为代表的西天山地区、以哈腊苏和索尔库都克为代表的东准噶尔地区，以及以包古图、谢米斯台为代表的西准噶尔地区等。东天山地区经历了从奥陶纪到二叠纪完整的古亚洲洋俯冲、弧-陆碰撞造山及造山后伸展的演化过程，产生了大量的岩浆岩和 Cu-Ni-Au-Fe-Mo-Pb-Zn-Ag 矿化，其中斑岩型铜矿主要与南天山北向俯冲作用有关。东准噶尔地区的斑岩型铜矿矿床包含早泥盆世、晚泥盆世和早石炭世三个成矿期(Wu et al., 2015)。这其中，早泥盆世和尔赛斑岩铜矿的花岗闪长斑岩具有岛弧岩浆岩和埃达克岩特征，源于俯冲洋壳部分熔融，代表了岛弧构造环境(杜世俊等, 2010)。当古亚洲洋平坦俯冲至准噶尔岛弧之下时，俯冲板片所产生超临界流体诱发新生下地壳部分熔融而形成晚泥盆世的哈腊苏斑岩铜矿(Wu et al., 2015)。早石炭世的希勒库都克 Cu-Mo 矿床可能形成于同碰撞向后碰撞造山转换背景下(龙灵利等, 2011, 王玉往等, 2012)。西准噶尔斑岩铜矿主要集中于晚古生代，其中喇嘛苏斑岩铜矿的成矿岩浆具有埃达克质岩的地球化学特征，与向南俯冲的准噶尔洋壳部分熔融有关(Tang et al., 2010)。西天山地区发育成熟的谢米斯台岛弧和不成熟的达巴特岛弧，其中石炭至二叠纪的洋中脊俯冲与斑岩型铜矿床的形成有关(申萍等, 2010)。

新疆斑岩型铜矿一方面具有与经典斑岩铜矿模型一致的特征。例如，斑岩型矿化以浸染状，细脉浸染状和网脉状的形式分布于岩体或者火山围岩中，常见黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、磁铁矿、辉铜矿、闪

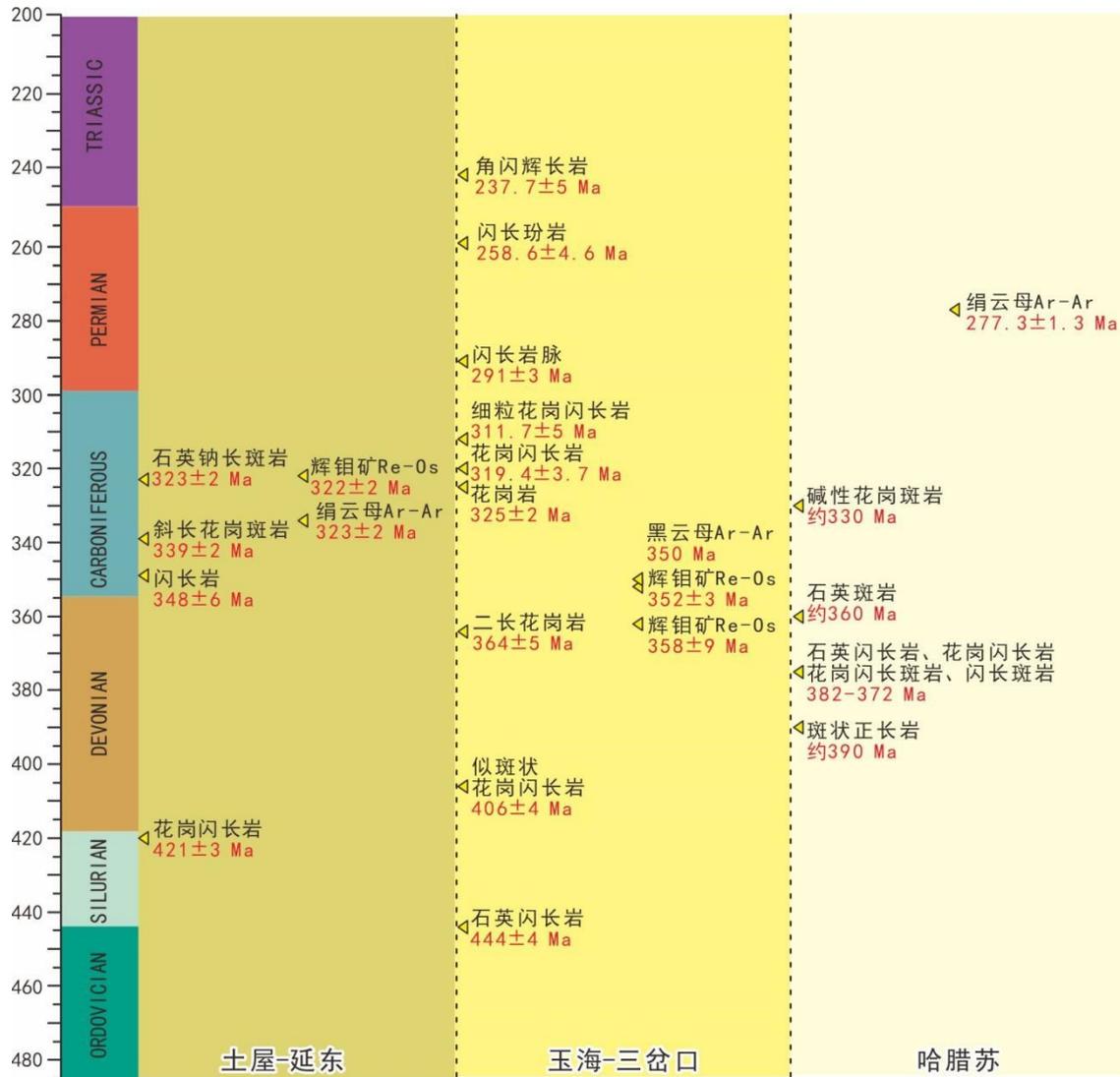
锌矿、斑铜矿、磁黄铁矿等金属矿物，而且蚀变类型包括早期的钾化和青磐岩化以及后期的绢英岩化，其中钾化（哈腊苏）或者绢英岩化（土屋-延东）都可能与斑岩成矿关系密切。成矿类型多样，有铜、钼和金矿化，其中以铜和金矿化为主。成矿岩体为中酸性钙碱质岩浆，岩性包括斜长花岗斑岩（土屋-延东）、闪长斑岩（哈腊苏和包古图）和花岗闪长岩斑岩（喇嘛苏）等，普遍具有埃达克岩地球化学特征。不仅如此，这些矿床在斑岩成矿期后普遍经历变形或者热液流体叠加过程，并可能改造先形成的斑岩型矿化或形成新的成矿作用。

2 新疆斑岩铜矿叠加成矿特征实例剖析

东天山与阿尔泰成矿带是新疆最主要的斑岩铜矿聚集区，代表性矿床包括东天山的土屋-延东和玉海-三岔口，阿尔泰的哈腊苏等。近年来的研究显示，虽然这些矿床都表现出较为典型的斑岩型蚀变和矿化特征，它们均具有明显的后期热液叠加和改造成矿作用。这些后期热液作用类型多样，可直接叠加在早期斑岩系统之上，亦可局部导致早期蚀变矿化发生改变，并形成新的矿化类型，使铜矿化进一步富集。下面将结合本文作者近年来最新的研究成果，从岩浆作用、成矿期次与流体特征三个方面对代表性矿床的叠加改造现象进行总结归纳。

图2 土屋延东、玉海-三岔口和哈腊苏铜矿带岩浆活动与成矿时代格架。(1)-肖兵等(2015); (2)-Xiao et al.(2017); (3)-Wang et al.(2018b); (4)-Wang et al.(2018a); (5)-Wang et al.(2022); (6)-王云峰(2018); (7)-Wu et al.(2015); (8)-Yang et al.(2014); (9)-Wu et al.(2024)。

Fig.2 Magmatic activity and metallogenic epoch framework of Tuwu-Yandong, Yuhai-Sanchakou and Halasu copper belts. (1)-Xiao et al.(2015); (2)-Xiao et al.(2017); (3)-Wang et al.(2018b); (4)-Wang et al.(2018a); (5)-Wang et al.(2022); (6)-王云峰(2018); (7)-Wu et al.(2015); (8)-Yang et al.(2014); (9)-Wu et al.(2024)。



2.1 多期次构造岩浆叠加作用

已有的年代学研究表明，土屋-延东铜矿发育三期岩浆活动(Xiao et al., 2017) (图2)。首先是晚志留世到早石炭世的岩浆活动(420–348 Ma)，在此期间古天山洋向北俯冲于大南湖-头苏泉岛弧带之下，形成花岗闪长岩、企鹅山群火山岩、四顶黑山黑云母花岗岩、大南湖二长花岗岩、镜儿泉花岗岩和咸水泉花岗闪长岩等；其中最早的晚志留世的花岗闪长岩(图2)与天山哈尔里克岛弧带西段的早古生代奥尔达乌台克闪长岩地化特征相似，暗示哈尔里克岛弧带、大南湖-头苏泉岛弧带和卡拉塔格弧后(间)盆地可能构成了统一的早古生代弧盆体系(肖兵等, 2015)；企鹅山群玄武岩轻重稀土分异明显，亏损高场强元素，具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和较低的 $I_{Sr}(t)$ 值，主要来源于交代地幔楔的部分熔融；安山岩由玄武岩经历辉石、铁钛氧化物和磷灰石结晶分异而形成；闪长岩来源于俯冲板片产生的熔体与地幔相互作用形成的。早石炭世(348–323 Ma)是土屋-延东铜矿斑岩铜矿最主要的岩浆活动时代，在此期间古天山洋俯冲角度变缓，

形成具有埃达克质地球化学特征的斜长花岗斑岩和高镁闪长岩，并导致早期土屋-延东铜矿斑岩矿化；其中斜长花岗斑岩有着高的 $\epsilon_{Nd}(t)$, Mg#, Cr 和 Ni 含量，高的 SiO_2 ，低的 $I_{Sr}(t)$ 和 K_2O ，表明古天山洋板片可能在大洋高原、海山或洋中脊俯冲等因素驱动下产生部分熔融，并与地幔楔橄榄岩反应形成斑岩矿化初始岩浆。至晚石炭世（323 Ma 左右），由于俯冲板片的回撤导致软流圈的上涌，引起下地壳部分熔融，形成石英钠长斑岩和石英斑岩。其中石英钠长斑岩和石英斑岩与斜长花岗斑岩有着相似的 Sr-Nd-Hf 同位素组成，但却具有更低的 Eu/Eu* 值，表明其来源于新生下地壳的熔融，并在地壳内经历了斜长石的结晶分异作用(Xiao et al., 2017)。

在玉海矿床出露的主要为酸性-基性侵入岩，包括石英闪长岩、花岗岩和辉石闪长岩(Wang et al., 2018a) (图 2)。其中，石英闪长岩和花岗岩主要呈岩基状产出，花岗岩体侵入了石英闪长岩中，而辉石闪长岩主要呈岩脉状侵入到石英闪长岩及花岗岩中。最早的石英闪长岩形成于早志留世 (443.1 ± 4.1 Ma)，富集 LREEs 和 LILEs (例如，K、Ba、Pb 和 Sr)，亏损 HREEs 和 HFSEs (例如，Nb、Ta 和 Ti)，具有高的 Sr/Y、La/Yb 和 Ba/Th 比率，正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ ，低的 $I_{Sr}(t)$ ，以及低的 Nb/U 和 Ta/U 比值。这表明，石英闪长岩是由俯冲的年轻洋壳部分熔融而形成。石炭纪的花岗岩 (325.4 ± 2.5 Ma) 显示出与石英闪长岩相似的地球化学特征，但具有较低的 Mg# (27–33)，以及更高的 Th/U 和 Th/La 比值，表明其母岩浆可能来源于没有显著地幔组分参与的新生下地壳。早二叠世的辉石闪长岩 (291 ± 3.0 Ma) 具有较低的 SiO_2 和高 MgO (3.96–4.33 wt.%；Mg# = 40–44)，正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ ，低的 $I_{Sr}(t)$ ，轻微富集 LREEs、Ba、U、K 和 Pb，略微亏损 Nb、Ta 和 Ti，Th/U 比值高，Ni 含量低和 Ce/Pb 比值低。以上特征表明辉石闪长岩可能起源于被俯冲板块衍生流体交代的亏损地幔的部分熔融，且在地壳内上升时发生了地壳混染。类似地，三岔口矿床最早的石英闪长岩(约 446 Ma)，以及之后的斑状花岗闪长岩(约 406 Ma)、花岗闪长岩(约 319 Ma)和细粒花岗闪长岩(约 312 Ma)形成于北天山洋壳向北俯冲的背景之下(Wang et al., 2022)。其中，石英闪长岩和斑状花岗闪长岩由俯冲洋壳部分熔融形成；花岗闪长岩和细粒花岗闪长岩较低的 Nb/U、Ta/U 和 Mg# 值以及高(La/Yb)_N 值，暗示其来源于新生下地壳的熔融；三岔口闪长玢岩(约 258 Ma) 具有正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和 $\epsilon_{Hf}(t)$ ，低 SiO_2 和 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i，以及高 MgO、Mg#、Ti/Y 和 Ti/Zr 值，表明它可能源自亏损的地幔，而中生代角闪岩辉长岩(约 238 Ma) 源自 E-MORB 型地幔源区(Wang et al., 2022)。

年代学研究表明，哈腊苏斑岩铜矿带存在成矿前，成矿期和成矿后三期主要的岩浆活动(图 2; Yang et al., 2014, Wu et al., 2015)。首先是以碱性斑状正长岩为代表的中泥盆世成矿前岩浆活动。作为矿带内最早的岩浆侵入事件，这一时期的岩浆活动比主要的成矿作用早约八百万年，可能与古亚洲洋板片在准噶尔岛弧的俯冲作用有关。这种俯冲作用导致了地壳的部分熔融，形成了富钾的碱性岩浆。尽管不含矿，但是这些岩石的侵入表明在该区域开始剧烈的构造活动。在此背景下矿区是岩浆侵位的有利位置，为后

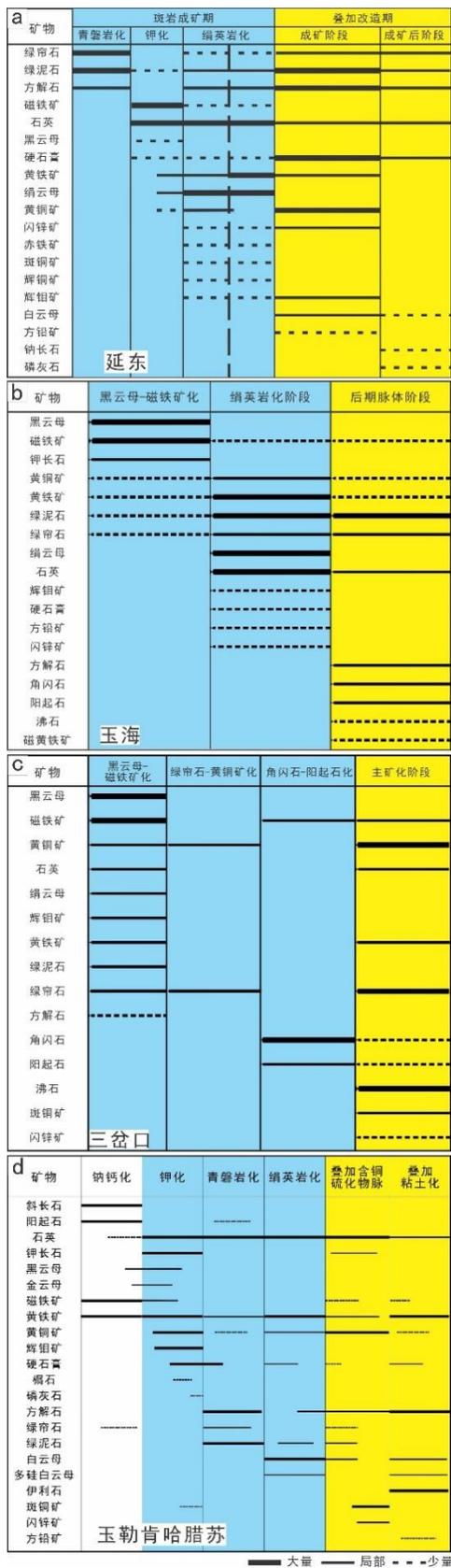
续的成矿活动奠定了空间基础。在晚泥盆世成矿期（382-372 Ma），以石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗闪长岩斑岩和闪长斑岩为代表的岩浆活动与铜矿化作用直接相关。在这一时期古亚洲洋板片平坦俯冲至准噶尔岛弧之下，诱发新生下地壳部分熔融，形成具有较高的氧逸度和水含量、有利于铜等成矿元素富集的岩浆作用。成矿期岩浆活动之后约 25Ma，矿区出现早石炭世（350-320 Ma）的成矿后岩浆活动。这段跨越 2500 万年的岩浆平静期可能反映了平坦俯冲作用导致地幔冷却，而随后的后碰撞伸展环境下的地壳减薄和软流圈上涌形成了以石英斑岩和碱性花岗斑岩为代表的成矿后岩浆作用。尽管矿区内的以上岩浆作用通常不含矿或矿化较弱，但是区域广泛分布同期与岩浆作用有关的斑岩矿化，如希勒库都克斑岩铜钼矿床(龙灵利等, 2011)和松喀尔苏斑岩型铜金矿床(张栋等, 2013)。这些岩浆活动可能与区域构造应力的释放和地壳热事件有关，反映了区域构造环境从挤压向伸展的转换(Wu et al., 2015)。

2.2 复杂的成矿期次与矿化组合

根据脉次穿插关系、蚀变矿物组合、矿物共生关系以及蚀变矿物短波红外（SWIR）分析，土屋-延东斑岩铜矿成矿期次从早到晚划分为斑岩成矿期、叠加改造期和表生期，而且铜矿化主要发生在叠加改造期和斑岩成矿期(王云峰等, 2016)。其中延东铜矿的斑岩成矿期包括青磐岩化、钾化和绢英岩化三个阶段（图 3a）。青磐岩化是最早的蚀变，主要影响企鹅山群火山岩地层，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、方解石和石英。钾化阶段以黑云母、石英和磁铁矿为主，伴有少量黄铁矿、绢云母、黄铜矿等。绢英岩化主要发生在斜长花岗斑岩岩体和企鹅山群火山岩围岩中，主要矿物有石英、绢云母、白云母、黄铁矿。叠加改造期是铜、钼的主要成矿阶段，特征矿物组合为黄铜矿-硬石膏-方解石-绿泥石，交代前期石英-磁铁矿脉和石英-硫化物脉。黄铜矿也以黄铜矿-绿泥石-辉钼矿脉等形式产出。在钻孔中也可见粗粒黄铜矿-绿泥石-硬石膏-方解石穿切早期的石英-绢云母-硫化物（图 4a-c），这种组合明显不同于世界上典型的斑岩铜矿(主要发育网脉状石英-硫化物脉)。研究表明，延东铜矿的成矿过程涉及复杂的热液活动和多阶段的蚀变作用，铜矿化主要集中在叠加改造期，而斑岩成矿期相对较弱。类似地，土屋斑岩成矿期包括青磐岩化、钾化和绢英岩化三个阶段(Wang et al., 2019)。最早的青磐岩化蚀变出现在企鹅山群火山岩地层中，以绿帘石、绿泥石、方解石和石英为特征，其中硫化物基本不发育。钾化阶段以磁铁矿黑云母化和斜长石被钾长石交代为特征，常见黑云母被蚀变成后期绿泥石。绢英岩化阶段则以石英、黄铜矿、绢云母、黄铁矿等矿物为主，分为早期和晚期亚阶段，早期以黄铁矿、绢云母为特征，晚期则以石英黄铜矿脉为特征。土屋-延东铜矿的叠加改造期可以进一步细分为成矿阶段和成矿后阶段。成矿阶段的早期以绿帘石、黄铜矿为主，晚期则以方解石-硬石膏-绿泥石-黄铜矿组合为主。成矿后阶段矿物有绿帘石、绿泥石、方解石、石英及硬石膏等，呈脉状产出。辉钼矿化主要在这一时期形成，以细脉状或浸染状产出(Wang et al., 2018b)。

图3 延东 (a)、玉海 (b)、三岔口 (c) 和玉勒肯哈腊苏矿床 (d) 矿化期次表

Fig.3 The paragenesis of Yandong(a), Yuhai(b), Sanchakou(c) and Yulekenhalasu deposit(d)



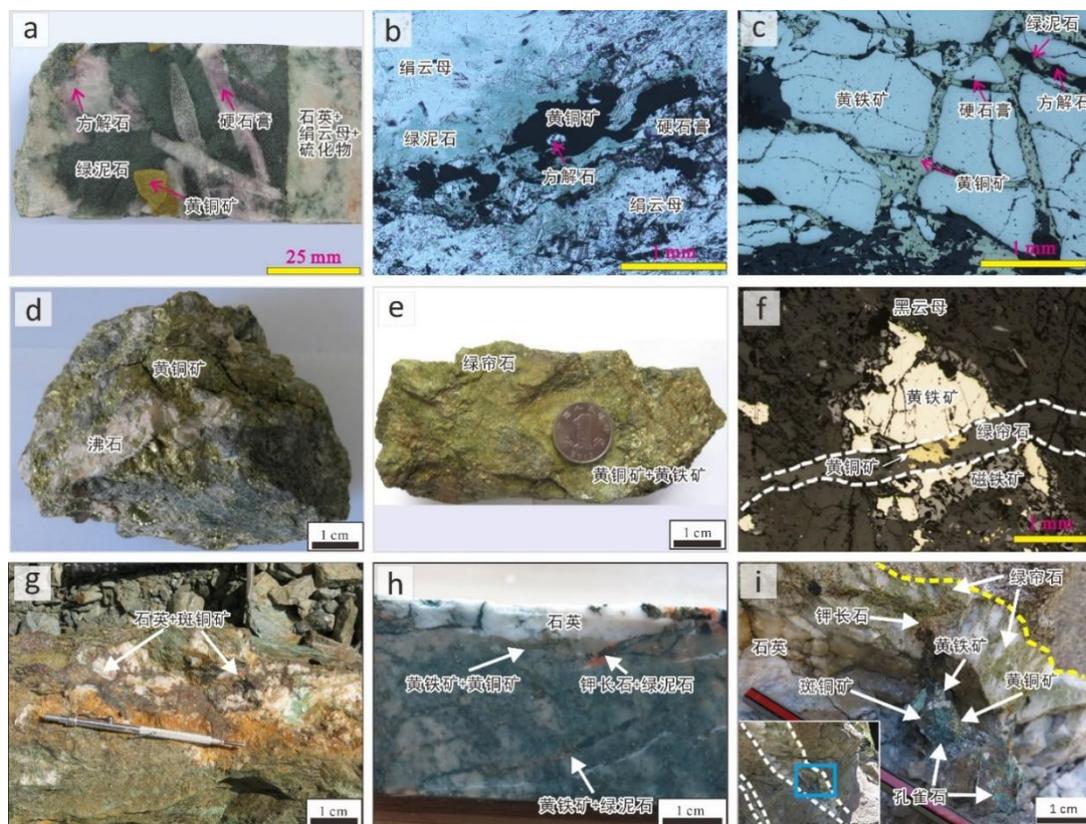
基于脉次间的穿插关系及矿物共生组合的不同，玉海铜矿床的蚀变与矿化作用可划分为三个主要阶

段(王云峰, 2018): 黑云母-磁铁矿化阶段、绢英岩化阶段和后期脉体阶段(图 3b)。黑云母-磁铁矿化阶段特征为黑云母、磁铁矿和钾长石的共生。这一阶段主要出现在石英闪长岩中, 其中黑云母呈片状或板状分布, 磁铁矿则为粒状, 两者均与黄铜矿、黄铁矿、绿泥石和绿帘石有关联。黄铜矿通常与黄铁矿和磁铁矿伴生, 粒径较小。绢英岩化阶段以绢云母、黄铁矿、黄铜矿、石英、绿帘石和绿泥石为主要矿物。绢英岩化在石英闪长岩中呈带状分布, 从矿区东侧向西侧逐渐减弱。角闪石和黑云母等暗色矿物经蚀变后形成绿泥石和黄铁矿, 而长石则分解为绢云母和石英。黄铜矿多以浸染状或细脉浸染状与绿帘石共生, 部分以石英-黄铜矿-黄铁矿脉形式出现。辉钼矿也在此阶段出现, 与绿帘石-黄铜矿-绢云母关系密切。后期脉体阶段的特点是出现绿帘石、石英、绿泥石、沸石和方解石等脉体, 宽度在 0.1-10cm 之间, 主要分布在石英闪长岩中。此外, 还有沸石-黄铜矿脉和石英-黄铜矿-磁黄铁矿-黄铁矿脉等。角闪石化主要在辉石闪长岩及其附近的花岗岩和石英闪长岩中出现, 以角闪石-阳起石-磁铁矿组合为主。石英闪长岩中可见局部绿帘石化, 但分布不规则。根据矿脉的穿插关系和矿物共生组合, 三岔口铜矿床成矿作用可以划分为四个主要阶段: 黑云母-磁铁矿阶段、绿帘石-黄铜矿阶段、角闪石阶段和主矿化阶段(图 3c)。黑云母-磁铁矿阶段以黑云母和磁铁矿为主要成分, 伴生有黄铜矿、石英等矿物。黑云母呈浅棕色至棕绿色片状, 磁铁矿则为粒状, 常与黑云母共生。这一阶段在石英闪长岩中广泛发育, 与玉海铜矿区相似, 但黑云母-磁铁矿化更为显著。黄铜矿主要与绿帘石共生, 而黄铁矿和辉钼矿则较少见, 后者与黄铜矿、绿帘石紧密相关, 标志着钼的主要矿化阶段。绿帘石-黄铜矿阶段以石英、黄铜矿和绿帘石为主要矿物。黄铜矿在此阶段以绿帘石-黄铜矿组合为主, 局部形成石英-黄铜矿细脉。这一阶段的矿化主要出现在花岗闪长岩中, 向外减弱, 且未观察到黑云母-磁铁矿化, 表明它晚于前一阶段。此外, 该阶段未见沸石, 暗示它与随后的主成矿阶段不同。角闪石阶段的蚀变主要发生在镁铁-超镁铁质岩石接触的中酸性岩体中。角闪石和磁铁矿是该阶段的主要成分, 角闪石呈绿色, 磁铁矿则为不规则粒状, 常与角闪石伴生。最后的主成矿阶段是铜的主要矿化阶段, 黄铜矿与沸石、绿帘石、石英等矿物共生, 形成脉状、细脉浸染状和浸染状矿体(图 4d-f)。这一阶段的矿化广泛分布于三岔口矿区, 特别是切穿闪长玢岩和角闪辉长岩, 表明它形成于闪长玢岩之后。此外, 该阶段也伴有辉钼矿化, 但数量较少(王云峰, 2018)。

图 4 (a-c) 土屋-延东矿床叠加硬石膏、黄铜矿、方解石和绿泥石脉体组合; (d-f) 玉海-三岔口矿床叠加沸石、绿帘石、黄铜矿和黄铁矿组合; (g-i) 哈腊苏矿床后期叠加含铜硫化物脉

Fig.4(a - c) The veins of anhydrite, chalcopyrite, calcite and chlorite in the Tuwu-Yandong deposit;(d - f) The

superimposed assemblages of zeolite, epidote, chalcopyrite and pyrite at Yuhai-Sanchakou deposit;(g - i) Late superimposed copper sulfide bearing veins at the Halasu deposit



哈腊苏带最北部的玉勒肯哈腊苏矿床成矿作用划分为五个期次(Wu et al., 2024): 钠钙化蚀变期、斑岩成矿期、叠加含铜硫化物脉期、叠加粘土化蚀变期和表生期(图 3d)。斑岩成矿期进一步细分为钾化、青磐岩化和绢英岩化三个阶段。钠钙化蚀变主要出现在闪长斑岩与安山质和玄武质围岩的接触带, 厚度约为 10 至 50 米。蚀变矿物主要包括磁铁矿、阳起石、斜长石(钠长石和奥长石), 以及次要的绿帘石、黑云母, 还有少量的黄铁矿和石英。该阶段的蚀变特征为磁铁矿定向交代闪长斑岩中的斑晶和基质, 硫化物以黄铁矿为主, 其中含有微量黄铜矿包裹体。斑岩成矿期的钾化蚀变带位于闪长斑岩中部偏下, 主要蚀变矿物为钾长石和石英, 伴有黑云母、石膏和磁铁矿, 以及少量金云母、磷灰石和榍石。钾长石和石英选择性交代原生硅酸盐矿物, 角闪石和黑云母被次生细粒黑云母交代, 形成浸染状和细脉状的黄铜矿。青磐岩化蚀变与钾化阶段时间相近, 表现为绿泥石和黄铁矿的细脉或团块状蚀变, 以及绿泥石和绿帘石的面型蚀变。绢英岩化蚀变则以石英、黄铁矿、白云母、伊利石和绿泥石为特征, 叠加在早期蚀变带上。叠加含铜硫化物脉期是高品质矿石的重要来源, 厚度可达数厘米, 分布在矿体核部的钾化带, 脉体边界不规则。这些脉体包含黄铁矿、黄铜矿、硬石膏、闪锌矿、斑铜矿等多种矿物组合, 且脉体与围岩截然接触并缺少蚀变晕, 部分具有梳状结构, 具有后期充填作用的特征(图 4g-i)。各种组合脉之间未

观察到穿切关系,说明其形成时代较为接近。叠加粘土化蚀变期的蚀变作用以石英、高岭土、白云母和伊利石为主要矿物组合,叠加在早期蚀变带上,与绢英岩化蚀变在矿物组合上相似,但绿泥石和黄铁矿减少,伊利石和高岭石增多。在粘土化蚀变强烈的区域,形成了黄铁矿、方铅矿、硬石膏和方解石的脉体。与北部的玉勒肯哈腊苏矿床类似,南部的哈腊苏三号矿床的成矿期次可划分为四个主要阶段:早期绿帘石蚀变期、斑岩型成矿期、叠加热液脉期和表生期(Wu et al., 2018)。斑岩成矿期进一步划分为钾化、青磐岩化和绢英岩化三个蚀变阶段。叠加热液脉期分为含硫化物叠加脉和不含硫化物叠加脉。铜矿化主要与斑岩期蚀变和含硫化物叠加脉相关,而钼矿化和金矿化主要由斑岩蚀变贡献。早期绿帘石蚀变期的蚀变作用主要发生在矿化带北部的安山质和玄武质围岩中,以绿帘石为主,伴生有黄铁矿和方解石。这一阶段的绿帘石交代了围岩中的原角闪石和斜长石,形成了草绿色的绿帘石脉或团块。斑岩成矿期中,钾化蚀变以钾长石、石英、黑云母和磁铁矿为特征,选择性交代花岗闪长斑岩中的矿物。钾化带中的黄铜矿浸染状是主要的矿化形式。青磐岩化蚀变以绿泥石、绿帘石、方解石和石英为主,绿帘石与绿泥石和方解石共生,交代了角闪石和斜长石。绢英岩化蚀变则以石英、黄铁矿、白云母和绿泥石为特征,叠加在早期钾化蚀变带上。叠加热液脉期包括含硫化物叠加脉和不含硫化物叠加脉。含硫化物叠加脉在局部形成高品位矿石,包括石英+绿泥石+黑云母+硬石膏的较粗叠加脉(图 4g),以及含石英+方解石+钾长石+绿泥石+黄铁矿的细脉(图 4h)。这些脉体与围岩截然接触,显示后期充填作用的特征。不含硫化物叠加脉则以粗粒自形石英与黑色绿泥石组合的脉体为特征。

2.3 差异明显的多阶段成矿流体

对土屋斑岩铜矿床中不同成矿阶段矿物(石英、绿帘石和硬石膏等)内的原生包裹体显微测温研究揭示了斑岩期和叠加改造期成矿阶段以及成矿后阶段流体不同的流体演化趋势(图 5a; Wang et al., 2019)。

钾化阶段:石英-磁铁矿±黑云母脉中的包裹体以气液两相气液两相型为主,大小约 2-6 μm ,均一温度为 374-479 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 4.2-10.4 wt.% NaCl eqv.。含子晶型包裹体大小约为 2-12 μm ,盐度高达 49.0-63.6 wt.%NaCl eqv.。

青磐岩化阶段:绿帘石-黄铜矿脉中绿帘石包裹体以气液两相和纯气相型为主,气液两相型包裹体大小为 5-20 μm ,气相占比 30-70%,均一温度为 457-469 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 3.9-10.1 wt.%NaCl eqv.。

早绢英岩化阶段:石英-黄铜矿±黄铁矿脉中的气液两相型包裹体大小约 2-6 μm ,均一温度为 274-391 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 1.4-12.7 wt.%NaCl eqv.。含子晶型包裹体大小多为 2-15 μm ,盐度为 38.0-53.4 wt.%NaCl eqv.。

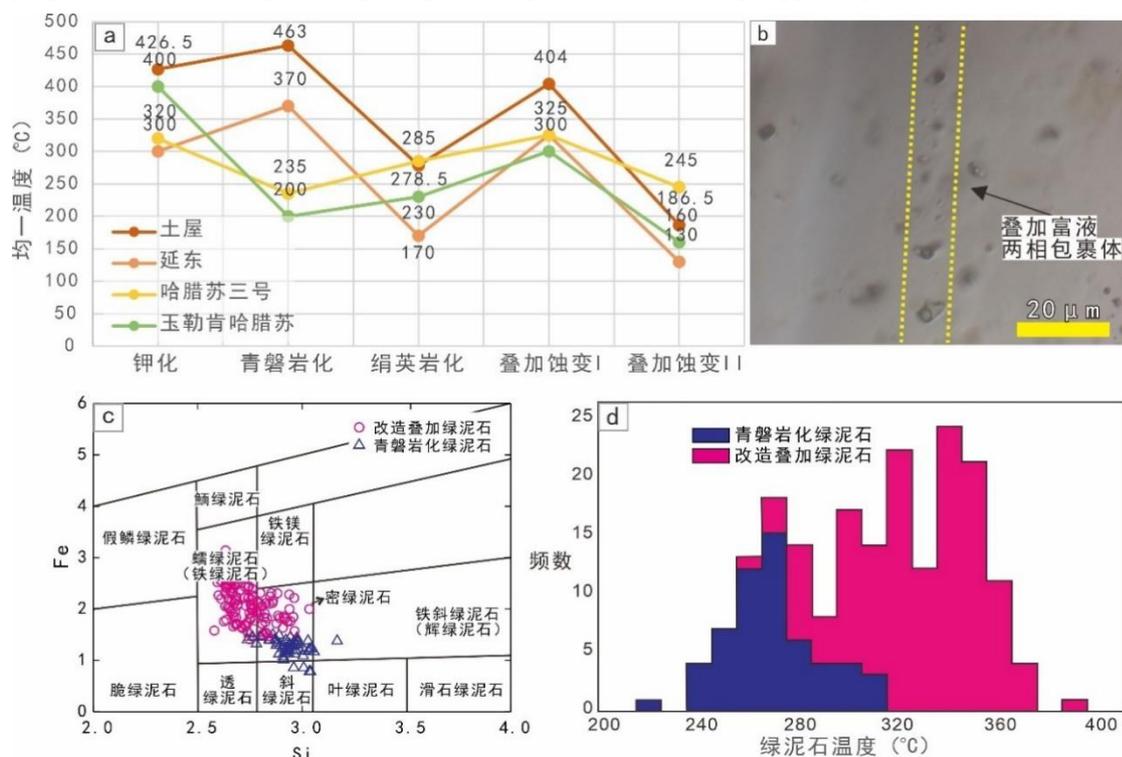
晚绢英岩化阶段:石英-黄铁矿脉中的气液两相型包裹体均一温度为 166-249 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 0.5-9.2 wt.%NaCl eqv.。含子晶型包裹体石盐子晶融化温度为 217-266 $^{\circ}\text{C}$,盐度和密度分别为 30.1-36.0 wt.% NaCl eqv.和 1.07-1.12 g/cm³。

叠加改造期成矿阶段:硬石膏中的气液两相型包裹体以矩形为主,气相占比 10-70%,均一温度为 297-511 $^{\circ}\text{C}$,盐度为 4.2-18.4 wt.%NaCl eqv.。叠加改造期成矿后阶段:石英中的气液两相型

包裹体气相占比 3–20%，均一温度、冰点分别为 115–258°C 和 -0.3 到 -8.3°C，对应盐度为 0.5–12.1 wt.% NaCl eqv.。以上研究揭示在土屋斑岩铜矿钾化阶段的流体呈现高氧逸度、高温和高盐度的特征，在该阶段流体中，Cu 的溶解度较高，因此主要沉淀磁铁矿，而绢英岩化阶段中降温、沸腾、氧逸度和盐度的降低是黄铜矿大量沉淀的机制。叠加改造期初始流体为富 S 的 H₂O–NaCl–CaCl₂ 体系。成矿流体温度从的以 360–460 °C 逐渐降为 120–180 °C，形成硬石膏和黄铜矿的组合(Wang et al., 2019)。

图 5 (a) 包裹体均一温度统计；(b) 哈腊苏三号矿床叠加包裹体组合；土屋延东铜矿青磐岩化阶段绿泥石与叠加改造阶段绿泥石类型 (c) 和形成温度 (d) 对比

Fig.5(a) Statistics of homogenization temperatures of fluid inclusions;(b) Superimposed fluid inclusion assemblages of the Halasu III deposit; comparison of chlorite type(c) and formation temperature(d) between propylitic alteration stage and superimposed stage in Tuwu-Yandong copper deposit



类似地，延东矿床斑岩成矿期和叠加改造期流体包裹体也呈现差异特征(图 5a; Wang et al., 2018b)。例如，钾化阶段的流体包裹体主要包括气液两相型、纯气相型和含子晶型。气液两相型包裹体最为常见，占比超过 80%，尺寸约 2–5μm，椭圆形，气相占比 30–70%。这些包裹体的均一温度为 304–445°C，盐度为 3.1–16.4 wt.% NaCl eqv.，初融温度和冰点分别为 -66.0 °C 至 -38.5 °C 和 -12.5 至 -1.8 °C，表明其形成于钾化阶段。早绢英岩化阶段以气液两相型和 S 型包裹体为主，尺寸为 3–7μm，气相占比 3–10%，通

常呈椭圆状或不规则状，孤立分布。气液两相型包裹体的均一温度为 241–352°C，盐度为 0.9–15.9 wt.% NaCl eqv.。晚绢英岩化阶段主要包含气液两相型和含子晶型包裹体。气液两相型包裹体通常呈椭圆或负晶形状，尺寸为 2–6 μm，气相占比 5–15%，均一温度为 146–248°C，盐度为 18.2–3.9 wt.% NaCl eqv.。叠加改造期成矿阶段的硬石膏中主要包含气液两相型包裹体，尺寸多为 3–8 μm，近似长方形，气相占比 25–80%。这些包裹体的初融温度为–57.9 至–55.3 °C，冰点温度为–9.9 至–3.2 °C，盐度为 13.8–5.3 wt.% NaCl eqv.，均一温度为 248–421°C。叠加改造期成矿后阶段主要包含气液两相型和纯液相型包裹体，尺寸约为 2–6 μm。气液两相型包裹体的初融温度为–55.4 至–36.5 °C，冰点为–9.7 至–0.3 °C，盐度为 0.5–13.6 wt.% NaCl eqv.，均一温度为 105–195°C。这些数据清晰地展现了延东铜矿成矿流体从高温、中-低盐度的岩浆流体到低温、高盐度的热液流体的演化过程(Wang et al., 2018b)。

对玉勒肯哈腊苏铜矿床不同成矿阶段的流体包裹体进行详细的流体包裹体组合 (FIA) 分析发现，不同期次流体包裹体在类型、均一温度和盐度方面显著不同，反映了斑岩期和叠加改造期流体迥异的演化趋势(图 5a; Wu et al., 2024)。钾化蚀变阶段石英脉中包含了所有类型的包裹体，且 FIA 的均一温度 (Th) 范围广泛 (100~461°C)，呈现双峰分布，包括三个世代。第一代 FIA 以椭圆形或负晶形态为主，Th 分布在 300~400°C，盐度为 7~30 wt.%，推测形成于钾化阶段。气-液两相和含子晶三相 FI 在约 400°C 均一，表明钾化阶段发生了流体沸腾。第二代 FIA 以含 CO₂ 相包裹体为主，Th 为 300~340°C，盐度为 4~6 wt.%，可能代表了后期捕获的叠加含铜硫化物脉期流体。第三代 FIA 以单相和气-液两相为主，Th 为 140~220°C，盐度为 2~14 wt.%，可能代表了统一的热液叠加事件。青磐岩化阶段的石英脉中也包含三个世代的 FIA。第一代 FIA 的 Th 为 200~320°C，盐度为 1~4 wt.%，可能源自后期含铜硫化物脉期流体的叠加。第二代 FIA 的 Th 为 164~336°C，盐度为 1.9~16.6 wt.%；第三代 FIA 的 Th 为 100~144°C，盐度为 6.9~13.7 wt.%。包裹体岩相学研究表明，第二代 FIA 可能代表了青磐岩化蚀变带的原生 FIA，而第三代 FIA 代表了更晚期的热液叠加事件。绢英岩化蚀变阶段的 FIA 由单相和气-液两相包裹体组成，分为两个世代。第一代 FIA 的 Th 为 230~387°C，盐度为 3.2~11.8 wt.%，代表了绢英岩化阶段的原生包裹体。第二代 FIA 的 Th 为 111~187°C，盐度为 1.1~6.9 wt.%，与钾化阶段和青磐岩化阶段的 FIA 特征一致，指示它们可能来源于同一次热液叠加事件。叠加含铜硫化物脉期存在三个期次的 FIA，包括单相、气-液两相和含 CO₂ 相包裹体。第一代 FIA 的 Th 约为 400°C，盐度为 11.0 wt.%。第二代 FIA 的 Th 为 260~340°C，盐度为 3.9~9.1 wt.%；第三代 FIA 的 Th 为 120~220°C，盐度为 1.4~16.8 wt.%。第一代 FIA 与钾化阶段具有相似的特征，可能是钾化阶段流体残留的包裹体。第二代和第三代 FIA 代表了后期热液叠加事件。尽管在叠加粘土化蚀变带中缺少直接测试的脉体，但可以从其他阶段的脉体中间接获得叠加粘土化蚀变期的包裹体温度数据。绢英岩化期第二世代 FIA 的 Th 为 111~187°C，盐度为 1.1~6.9 wt.%，

这种特征的 FIA 在其他阶段也存在，表明粘土化蚀变叠加早期蚀变带的地质事实。上覆黑色页岩中的石英脉包含三种类型的包裹体，其 FIA 可分为三个世代。第一代 FIA 的 Th 为 300~400°C，盐度为 7.2~13.9 wt.%，为该石英脉的原生包裹体。第二代 FIA 起源于含铜硫化物脉流体叠加，第三代 FIA 可能为粘土化蚀变阶段流体叠加(Wu et al., 2024)。

针对哈腊苏三号矿床的包裹体岩相学和测温揭示：钾化蚀变阶段石英普遍碎裂，包含所有三种类型的包裹体(图 5a; Wu et al., 2018)。包裹体的均一温度 (Th) 呈现双峰分布，依据其形态、大小和分布可细分为两组。第一组为椭圆形或负晶形态，填充率为 60~80%，随机分布，Th 峰值为 290°C，盐度为 6.2~17.8 wt.%，推测为原生包裹体。第二组包裹体细长且线状分布 (图 5b)，Th 峰值为 200°C，盐度为 0.3~4.3 wt.%，可能源自无硫化物后期脉的流体叠加。青磐岩化蚀变阶段石英和绿帘石矿物裂隙不发育，以气-液两相包裹体为主。石英中包裹体主要在 250~275°C 均一，盐度为 0.9 至 14.0 wt.%。绿帘石中包裹体一般在 270~286°C 均一，盐度为 3.1~11.2 wt.%。这些包裹体孤立分布于未破碎的晶体中，具有独特的 Th 和冰点 (Tm)，推断为原生包裹体。绢英岩化蚀变 II-C 阶段包含两组显著不同的包裹体。第一组包裹体 Th 峰值为 280°C，盐度为 0.4~10.5 wt.%。第二组包裹体具有非常低的 Th 峰值 (150°C)，类似于含硫化物后期石英脉中的包裹体，指示流体叠加。晚期叠加含硫化物脉包含单相、气-液两相和少量含子晶三相包裹体。第一组包裹体 Th 范围为 243~410°C，峰值 310°C，盐度为 1.9~9.2 wt.%。第二组包裹体 Th 峰值为 200°C，盐度为 8.7~10.7 wt.%，暗示晚期不含硫化物脉流体可能叠加。晚期叠加不含硫化物脉阶段主要包含气-液两相包裹体。其中第一类脉中的包裹体 Th 峰值为 275°C，盐度为 1.7~9.8 wt.%。第二类脉中的包裹体 Th 峰值为 200°C，盐度为 0.2~13.6 wt.%，推测为原生成因(Wu et al., 2018)。

3 古生代斑岩铜矿叠加成矿模式构建

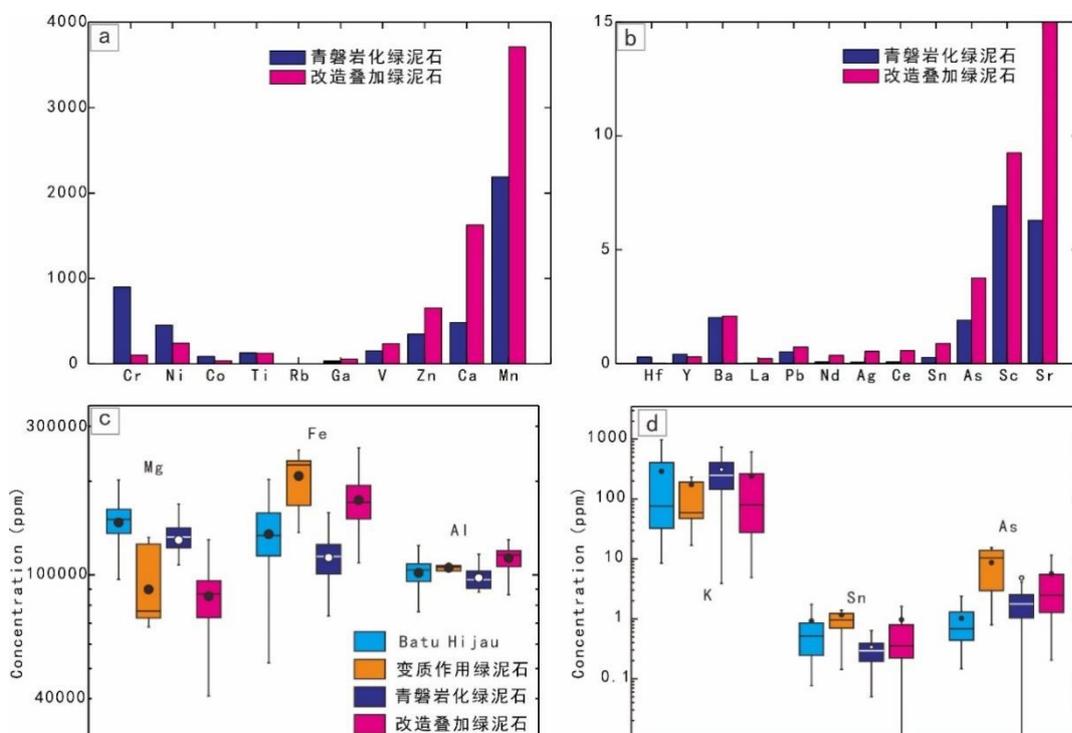
3.1 叠加成矿作用成因分析

土屋-延东矿区矿床改造叠加期的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.1~1.3‰，较斑岩成矿期 S 同位素值 (-0.8~0.6‰) 略高，但同样指示岩浆来源(Wang et al., 2019)。延东矿床叠加改造阶段的绿泥石相较于青磐岩化阶段更加富 Fe 贫硅 (图 5c)，且绿泥石温度计计算结果显示改造阶段的绿泥石温度明显高于青磐岩化阶段 (图 5d)。成分分析表明改造阶段的绿泥石相较于青磐岩化阶段的绿泥石富集 Ga、V、Zn、Ca、Mn、Nd、Ag、Ce、Sn、As、Sc 和 Sr，贫 Cr、Ni 和 Co (图 6a, b)；延东铜矿青磐岩化阶段的绿泥石与 Batu Hijau 斑岩系统中青磐岩化蚀变相关的绿泥石有着相似的组成(图 6c, d)，反映了一致的斑岩型蚀变成因(肖兵, 2016, Xiao and Chen, 2020)。然而，延东铜矿叠加改造阶段的绿泥石与 Batu Hijau 明显不同，显示了更高的 Fe、Al 和 As，而较低的 Mg 和 Sn。尽管这些特征接近变质绿泥石，但是叠加改造阶段的绿泥石与黄铜矿、方解石和硬石膏共生，以脉状产出，显示其热液成因，明显不同于区域变质形成的绿泥石(Xiao

and Chen, 2020)。叠加改造期辉钼矿 - 黄铜矿 - 硬石膏 - 方解石±绿泥石±绿帘石脉中辉钼矿 Re-Os 定年也表明叠加改造时代为 324.3 Ma(王云峰等, 2016)。土屋-延东矿床含矿岩体——斜长花岗斑岩的年龄为 334.7–332.8 Ma(Han et al., 2006, Shen et al., 2014, 王银宏等, 2014), 斑岩成矿期绢英岩化斜长花岗斑岩样品 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $328.1 \pm 1.4 \text{ Ma}$ (土屋矿床) 和 $332.8 \pm 3.8 \text{ Ma}$ (延东矿床; Wang et al., 2019), 与斜长花岗斑岩年龄一致。但是前人测试土屋-延东矿床的辉钼矿样品得到 Re-Os 等时线年龄为 $322.7 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (芮宗瑶等, 2002), 比成矿斑岩存在超过 1000 万年的时间差距, 远超过世界典型斑岩铜矿与致矿岩体的时间间隔。另一方面, 土屋、延东铜矿床叠加改造期具有相似的黄铜矿 - 硬石膏 - 绿泥石 - 方解石特征矿物组合, 说明两个矿床的叠加改造期成矿可能形成于同一岩浆热液事件(王云峰等, 2016)。而且矿区发现的石英钠长斑岩年龄为 $323.6 \pm 2.5 \text{ Ma}$ (Xiao et al., 2017), 不仅与代表叠加改造阶段的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(324.3–322.7 Ma; 芮宗瑶等, 2002, 王云峰等, 2016)一致, 而且也存在浸染状黄铜矿-硬石膏-绿泥石-方解石这一特征性矿物组合, 这表明石英钠长斑岩可能是土屋延东矿区叠加改造作用的主要来源。

图 6 土屋延东铜矿青磐岩化阶段绿泥石与叠加改造阶段绿泥石微量元素对比

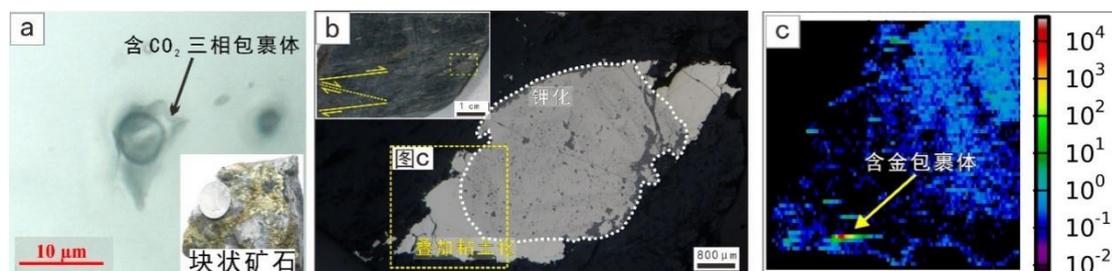
Fig.6 The comparison of trace elements of chlorite between propylitic alteration stage and superimposed stage in Tuwu-Yandong copper deposit



在玉海铜矿和三岔口铜矿的石英闪长岩中，广泛发育的黑云母-磁铁矿蚀变指示了两个矿床中的黑云母-磁铁矿化可能是在同一热事件中形成的。这一过程伴随着浸染状黄铜矿-黄铁矿-磁铁矿组合的形成。年代学研究表明，玉海地区的黑云母化、绢云母化蚀变形成年龄与辉钼矿 Re - Os 年龄一致，大约在 363 - 348 Ma(Wang Y H et al., 2016)。在玉海西矿区发现的片麻状花岗岩 (364.2 ± 5.0 Ma) 进一步证实了玉海-三岔口矿田在该时期存在岩浆事件。岩体中存在的浸染状辉钼矿、黄铜矿和绿帘石组合表明，这一岩浆事件是玉海矿床形成主要的 Cu-Mo 矿化的原因。矿床形成后，后期的构造热液对玉海矿床进行了叠加改造，形成了沸石 - 黄铜矿脉、石英 - 黄铜矿 - 磁黄铁矿 - 黄铁矿脉等。尽管如此，该阶段矿化对玉海矿区的影响相对有限。但是在三岔口矿床，绿帘石 - 黄铜矿化阶段可能与花岗闪长岩的侵入关系密切。矿化作用从花岗闪长岩向外逐渐减少，暗示矿化年龄与花岗闪长岩侵入年龄 (319 Ma) 基本一致(Wang et al., 2022)。主矿化阶段黄铜矿脉体切穿辉石闪长岩 (约 238 Ma)，主要由粗粒的绿帘石、黄铜矿、沸石和石英等矿物组成，这些矿物不太可能由基性岩浆岩分离出的岩浆热液结晶形成。流体包裹体研究表明，三岔口矿区的流体主要为中 - 低温流体，包裹体均一温度为 140-280 °C，盐度为 3-7 wt.% NaCl eqv.(孙燕等, 2009, Zhang et al., 2023)，且包裹体中富含 CO₂ (图 7a)，与东天山造山型金矿成矿流体特征相似。矿物学研究也表明，三岔口矿区与黄铜矿伴生的沸石形成于相对低温条件下。在三岔口矿区，富矿体主要分布于糜棱岩及角砾岩带附近，表明矿体受构造控制作用明显。因此，推断该阶段矿化可能主要由辉石闪长岩之后的构造变质作用引起，矿化年龄应该在 238 Ma 之后(Wang et al., 2022)。

图 7 (a) 玉海-三岔口块状矿石中含 CO₂ 三相包裹体；(b) 玉勒肯哈腊苏矿床叠加粘土化阶段的黄铁矿围绕斑岩期钾化阶段黄铁矿压力影生长；(c) 玉勒肯哈腊苏矿床叠加粘土化阶段的黄铁矿与钾化阶段黄铁矿金元素激光剥蚀扫描面分析

Fig. 7(a) CO₂-bearing three-phase fluid inclusions in Yuhai-Sanchakou massive ore ;(b) Potassic-stage pyrite grains overgrown by argillic-stage pyrite in the Yulekenhalasu deposit;(c) Laser ablation scanning analysis of gold in pyrite of the superimposed argillic and potassic alteration stage



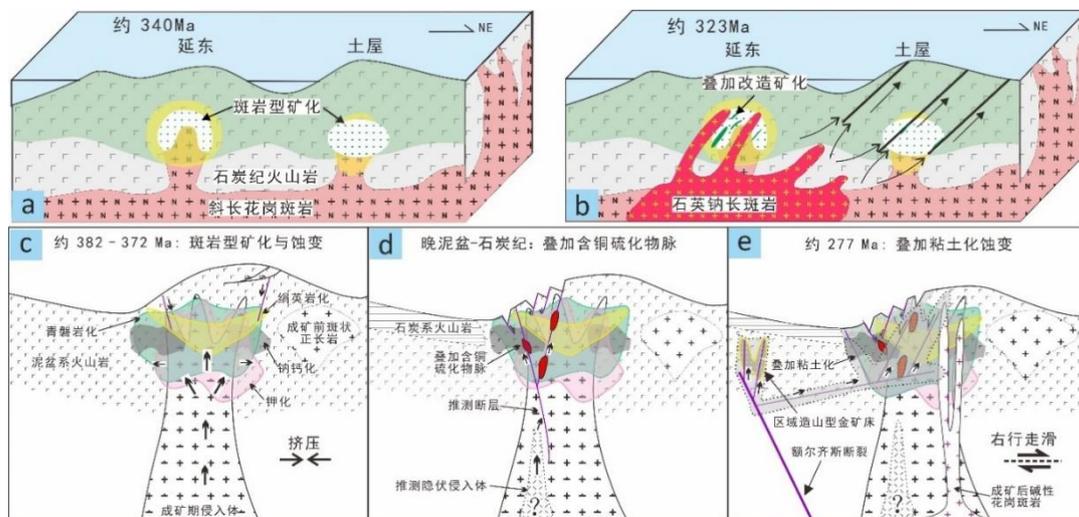
在哈腊苏斑岩铜矿带广泛分布后期叠加硫化物脉（图 4g-i）。流体包裹体组合研究发现这些叠加硫化物脉阶段的流体活动分布于早石炭世的黑色页岩之上，因此，这些叠加硫化物脉的形成时代不会早于早石炭世(Wu et al., 2018)。结合区域构造演化背景，我们推测隐伏岩体很可能形成于早石炭世至早二叠世的碰撞后环境。该矿带内出露有早石炭世的碱性花岗斑岩（约 327 Ma），玉勒肯哈腊苏矿床中也报道了 331.5 Ma 的辉钼矿 Re-Os 模式年龄。此外，哈腊苏矿带北部的希勒库都克斑岩铜钼矿床年龄为 329.4 Ma(龙灵利等, 2011)，南部的松喀尔苏斑岩型 Cu-Au 矿床年代为 338.6 Ma(张栋等, 2013)，这些都表明早石炭世该地区具有显著的成矿潜力。在矿区的碱性花岗斑岩脉（约 327 Ma）中未发现叠加硫化物脉，这指示 327 Ma 可能是叠加硫化物脉形成时间的下限。另一方面，区域早二叠世的 Cu 资源主要以岩浆 Cu-Ni 硫化物和自然 Cu 矿床的形式出现，这些矿床与碰撞后地幔衍生的岩浆活动有关(王京彬和徐新, 2006, 周涛发等, 2006)，与晚期含硫化物热液脉有明显区别。因此，我们推断产生叠加硫化物脉的隐伏岩体形成于早石炭世，与区域同期的斑岩型矿化事件同步，对应于碰撞晚期向后碰撞早期过渡的构造环境。除了叠加硫化物脉之外，玉勒肯哈腊苏矿床还经历了一期叠加粘土化蚀变阶段(图 7b; Wu et al., 2024)，而哈腊苏三号矿床则有一期贫硫化物叠加脉(Wu et al., 2018)。贫硫化物叠加脉横切早石炭世后碰撞碱性花岗岩岩脉（约 327 Ma），部分可见粘土化蚀变，表明 327 Ma 为时间上限。尽管矿带内尚未发现二叠纪岩浆活动，但区域上广泛存在早二叠世 A 型花岗岩脉（约 286~277 Ma）和花岗岩类(约 281~275 Ma; 童英和洪大卫, 2006)，这与额尔齐斯断裂 316~244 Ma 的活动时限一致。结合东准噶尔地区早二叠世可能经历的广泛壳幔相互作用(王京彬和徐新, 2006)，我们推断贫硫化物叠加脉和粘土化蚀变形成于这一时期。虽然这种叠加蚀变的确切来源仍然不明确，但考虑到区域上分布有一系列早二叠世浅成低温型和造山型金矿床，且两种类型矿床中均发育有硅化及绢英岩化蚀变，矿物学研究也揭示该期形成的黄铁矿中富集金(图 7c; Wu et al., 2024)，这暗示了早二叠世晚期后碰撞环境下形成的叠加晚期贫硫化物脉及粘土化蚀变与区域上同期的金矿化事件存在成因联系。

3.2 新疆古生代斑岩铜矿叠加成矿模式及其勘查指示

叠加改造成矿作用是指在原来早期已有矿床的基础上，又有新的成矿物质的加入，后期成矿作用与早期成矿形成于不同的地质时期，但空间上相互叠加，多具有规模大、品位高的特点，具有重要的研究意义(翟裕生等, 2009)。中亚造山带经历了长期、复杂的洋盆拉张、洋壳俯冲和陆壳增生等构造演化历史，在此过程中发生了强烈的壳幔相互作用，形成了多期岩浆-构造-成矿作用，为叠加成矿系统的形成提供了良好的条件(涂光炽, 1999, Xiao et al., 2020)。

图 8 土屋延东矿床叠加改造成矿模式 (a, b) 和哈腊苏铜矿成矿模式图 (d-f)

Fig.8 The metallogenic model of Tuwu-Yandong deposit(a, b) and metallogenic model of Halasu copper deposit(d – f)



在土屋延东矿带，古天山洋的北向俯冲始于早古生代，形成了晚志留世花岗闪长岩、企鹅山群火山岩、四项黑山黑云母花岗岩等，但是目前在大南湖-头苏泉岛弧带还没有发现与这些岩浆岩相关的斑岩铜矿化作用。随着 348 Ma 左右板片俯冲角度变缓，形成高镁闪长岩和斜长花岗斑岩（图 8a）。斜长花岗斑岩显示了高的 Al_2O_3 、 Na_2O 和 Sr 含量，而低的 Y 和 Yb，低的 Na_2O/K_2O 比值，和高的 Sr/Y 比值，显示了埃达克岩的属性(Xiao et al., 2017)。斜长花岗斑岩的锆石有着较高的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值(78–728)和较低的温度(锆石 Ti 温度计)，表明形成斜长花岗斑岩的岩浆比较氧化和富水。年代学研究也表明斜长花岗斑岩与延东铜矿斑岩矿化期的绢英岩化蚀变有关。然而，相比于分布于智利的与大型斑岩铜矿相关的岩浆岩，含矿的斜长花岗斑岩的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值和全岩 $(La/Yb)_N$ 比值明显更低，可能指示了虽然斜长花岗斑岩导致了早期的斑岩矿化，但是矿化较弱。随着 323 Ma 左右板片回撤，引起软流圈上涌，导致下地壳部分熔融，形成石英钠长斑岩和石英斑岩（图 8b），前者有明显铜矿化。然而，石英钠长斑岩相比于斜长花岗斑岩有着更低的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值，而且不具有埃达克岩的属性，表明可能并非如早期斜长花岗斑岩那样形成斑岩矿化。年代学研究表明石英钠长斑岩与叠加改造期矿化相关，这也与延东铜矿 16 号勘探线剖面中没有出现石英钠长斑岩且矿化明显较弱一致，而且石英钠长斑岩中也出现了主成矿阶段的非斑岩型矿物组合(黄铜矿+绿泥石+硬石膏+方解石)。综上所述，斜长花岗斑岩可能导致了延东铜矿斑岩矿化，带来了成矿物质，而后期的石英钠长斑岩又带来了一次热液活动，导致该矿区铜重新活化而富集，但并非之前的典型斑岩矿化。而土屋铜矿床尚未发现石英钠长斑岩，因此只有少量的 Cu 矿化形成于叠加改造期(Wang et al., 2019)。因此，在应用蚀变矿物地球化学特征对古老斑岩系统找矿勘查时，首先要对古

老斑岩系统进行精细的矿床解剖，识别出早期斑岩矿化和叠加改造相关的蚀变作用。其次，应该多关注绿泥石中的高场强元素(Ti 和 V)和绿帘石的 Sb 元素，以及伊利石结晶度，这些信息可以提供矿体指向信息，提高勘查和成矿预测的效率和准确性(王云峰, 2018, Xiao and Chen, 2020)。

与同分布在东天山地区的土屋-延东成矿带相比，玉海-三岔口矿床既发育相似的多期岩浆活动，又具有差异化的构造蚀变特征。玉海-三岔口地区同样有多期岩浆作用 (445–237.7 Ma)，在此过程中，东天山地区经历了古亚洲洋的向北单向俯冲、双向俯冲、弧-陆碰撞、碰撞后伸展及特提斯洋俯冲远程影响等阶段，构造环境多变、壳幔作用强烈。特别是部分岩体来自于俯冲洋壳及受板片脱水流体交代的地幔楔，岩浆的氧逸度、含水量及 Cu 含量较高(Xiao et al., 2017, Wang et al., 2018a)，有利于 Cu 从洋壳及地幔中的萃取、搬运和沉淀成矿。玉海铜矿 Cu 矿化在黑云母-磁铁矿阶段、绢英岩化阶段及后期脉体阶段均有发育，但以斑岩型绢英岩化阶段为主。三岔口铜矿 Cu 矿化出现在黑云母-磁铁矿阶段、绿帘石-黄铜矿阶段及主成矿阶段，Cu 矿化主要集中于晚期的主成矿阶段。两个矿区辉钼矿年龄一致 (363–348 Ma)，与三岔口黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 (353.0±6.4 Ma) 基本相同。由于在矿区仅发现玉海西片麻状花岗岩形成于 360 Ma 左右，且其内部有浸染状黄铜-绿帘石-辉钼矿矿化，因此初步认为该期蚀变可能由玉海西片麻状花岗岩 (或同时代其他岩体) 产生，具有斑岩型蚀变与矿化特征。三岔口铜矿主成矿阶段以黄铜矿-沸石±绿帘石、黄铜矿-绿帘石±黄铁矿±沸石、黄铜矿-石英-绿帘石等组合出现，它们多呈脉状，少量以细脉浸染状、浸染状产出，并非斑岩型矿化。考虑到矿区有韧性剪切带穿插通过，因此推测叠加成矿作用更可能是由构造作用及其相关的变质热液引起，其形成晚于 238 Ma。玉海矿区晚期脉体中同样有沸石-黄铜矿脉，与三岔口后期成矿阶段脉体特征相似，可能为同一期成矿作用中形成(王云峰, 2018)。但该期成矿在玉海不发育，这可能是玉海铜矿品位远低于三岔口铜矿的原因。因此，玉海-三岔口是由早期岩浆热液成矿，叠加后期构造成矿而形成。叠加成矿作用可能使原有矿床品位显著提高(如三岔口)。玉海-三岔口矿区位于岩浆、构造作用长期活动的区域，表明这些区域具有巨大的找矿潜力，应该作为大南湖-头苏泉岛弧带上今后寻找叠加改造型矿床的重点靶区。

哈腊苏铜矿带位于东准噶尔地区，经历了俯冲增生，碰撞造山，以及板内的构造环境，这些不同构造环境下的岩浆活动在哈腊苏带表现为不同阶段的热液蚀变类型。约 390 Ma 矿化前岩浆活动形成了玉勒肯哈腊苏矿床的钠钙化蚀变 (图 8c) 和哈腊苏三号矿床的早期绿帘石的蚀变。对比区域的构造演化，由古亚洲洋板片的正常角度俯冲于准噶尔岛弧构造背景下形成矿化前的斑状正长岩。研究认为此类岩浆作用源于高温，低 $f\text{O}_2$ 的源区岩体就位后分离的岩浆热液流体叠加到泥盆系北塔山组玄武质和安山质火山岩上，分解原生黑云母和角闪石等镁铁矿物，形成早期绿帘石脉和含丰富磁铁矿的钠钙化蚀变。但是由于该期岩浆活动并不利于形成斑岩矿化，故在早期蚀变带中鲜见各种硫化物。晚泥盆世花岗闪长斑岩

和闪长斑岩形成了哈腊苏矿带内的斑岩型蚀变矿化。这种岩浆源区有超临界流体加入而表现出低温和高氧逸度特征，因此成矿期岩浆活动具有较高的 Cu 矿化优势(Wu et al., 2015)，从而形成斑岩型蚀变（钾化，青磐岩化和绢英岩化蚀变）和矿化(图 8c)。随后，在成岩成矿阶段的岩浆活动高峰之后，即在 370~350 Ma，罕见岩浆岩的分布，这可能是由于长期的古亚洲洋板块平坦俯冲将充分冷却岩石圈和大洋板块 (< 600 °C)，从而抑制了源区部分熔融导致岩浆活动的“宁静期”(Wu et al., 2015)。如之前讨论，产生叠加硫化物脉的隐伏岩体形成于早石炭世(图 8d)，与区域同期的斑岩型矿化事件一致，对应于碰撞晚期向后碰撞早期过渡的环境，而早二叠世晚期后碰撞环境下形成的叠加晚期贫硫化物脉及粘土化蚀变与区域上同期的金矿化事件存在成因联系(图 8e)。从勘查角度，斑岩型矿化是带内最早的主体矿化形式，受控于富蕴断层。富蕴断层作为边界断裂，自泥盆系以来活跃至今，这样的断层系统可以作为诱导通道，在大型岩浆上方形成一系列串珠状岩体集群，而非聚集成单一大规模矿床。叠加成矿的特征也表明，虽然黄铁矿，绿泥石和绿帘石的微量元素规律可以用来指示矿化中心空间位置，但是在应用之前必须通过详细的期次研究和甄别，进行热液蚀变填图，选取单一斑岩蚀变带中蚀变矿物讨论其微量元素指向意义。玉勒肯哈腊苏矿床黄铁矿微量元素显示，黄铁矿中的斑岩矿化阶段高 Cu 含量能够很好指示矿体位置，绢英岩化阶段的 Au 元素含量分布较广，且靠近矿体含量升高。除了早期的斑岩型矿化外，研究也发现晚期成矿叠加对于提升铜资源至关重要：叠加的含铜硫化物脉中的黄铁矿高值中心并未和已知斑岩矿化中心吻合，暗示叠加矿化阶段热液中心可能位于偏矿体上盘位置(Wu et al., 2024)。哈腊苏三号矿床的青磐岩化阶段的绿泥石和绿帘石微量元素指示北矿带的热液中心位于矿带偏北，靠近地表的位置，说明深部的斑岩矿化潜力较弱，深部勘探选择须谨慎(Wu et al., 2018)。

4 结论

新疆地区的重要斑岩铜矿矿区普遍经历了多期岩浆活动，时间跨度可长达 1-2 亿年。例如，土屋-延东的岩浆活动从晚志留世延续至晚石炭世，玉海-三岔口从早志留世至早三叠世，哈腊苏则从早泥盆世至石炭纪。这些斑岩成矿岩体多形成于特殊的构造背景，并普遍具有埃达克质岩的地球化学特征。

矿区在斑岩成矿期后，常常出现叠加改造成矿阶段，在土屋-延东矿床表现为硬石膏、黄铜矿、方解石、绿泥石的矿物组合，在玉海-三岔口矿区表现为绿帘石、石英、绿泥石、沸石、方解石等斑岩期后的脉体，在哈腊苏铜矿带表现为含铜硫化物脉和粘土化蚀变。成矿流体研究表明，在斑岩期热液流体系统结束后，新的流体系统会叠加出现，导致成矿温度再次上升。

综合分析表明，土屋延东后期的石英钠长斑岩引发了新的热液活动，导致该矿区铜重新活化而富集，但并非之前的典型斑岩矿化；玉海三岔口矿床构造作用及其相关的变质热液引起矿区与沸石有关的叠加矿化；哈腊苏矿床的石炭纪岩浆活动和二叠纪的构造活动分别形成叠加于斑岩成矿系统上的硫化物

脉和粘土化蚀变。

本次研究提出的斑岩矿床叠加成矿模型指示对于存在多期岩浆活动的长寿弧，除了经典的斑岩矿化蚀变类型，还应特别关注那些可能叠加在先成斑岩成矿系统上的特定构造或岩浆活动，在精细的成矿期次研究基础上开展蚀变矿物分析工作，从而实现对于叠加斑岩成矿系统更为精准的定位预测。

致谢：研究工作得到了新疆维吾尔自治区国家 305 项目办公室、新疆地矿局第一地质大队和第四地质大队和有色 704 队的宝贵帮助，谨致谢忱

Reference

- Chen, H. Y., Wan, B., Pirajno, F., et al., 2018. Metallogensis of the Xinjiang Orogens, NW China - New Discoveries and Ore Genesis. *Ore Geology Reviews*, 100: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.035>
- Chen, H. Y., Wu, C., 2020. Metallogensis and Major Challenges of Porphyry Copper Systems above Subduction Zones. *Science China Earth Sciences*, 63: 899-918. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9595-8>
- Chiaradia, M., 2022. Distinct Magma Evolution Processes Control the Formation of Porphyry Cu-Au Deposits in Thin and Thick Arcs. *Earth and Planetary Science Letters*, 599: 117864. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117864>
- Cooke, D. R., Hollings, P., Walshe, J. L., 2005. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. *Economic Geology*, 100(5): 801-818. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.5.801>
- Du, S. J., Qu, X., Gang, D., et al., 2010. Chronology and Tectonic Setting of the Intrusive Bodies and Associated Porphyry Copper Deposit in Hersai Area, Eastern Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2981-2996.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/>
- Han, C. M., Xiao, W. J., Zhao, G., et al., 2006. Geological Characteristics and Genesis of the Tuwu Porphyry Copper Deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia. *Ore Geology Reviews*, 29(1): 77-94. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.07.032>
- Hou, Z. Q., 2004. Porphyry Cu-Mo-Au Deposits: Some New Insights and Advances. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131-144.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-2321.2004.01.010>
- Hou, Z. Q., Yang, Z. M., 2009. Porphyry Deposits in Continental Settings of China: Geological Characteristics Magmatic-Hydrothermal System and Metallogenic Model. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1779-1817.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2009.12.002>
- Hou, Z. Q., Yang, Z. M., Wang, R., et al., 2020. Further Discussion on Porphyry Cu-Mo-Au Deposit Formation in Chinese Mainland. *Earth Science Frontier*, 27(2): 20-44.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.3.8>
- Long, L. L., Wang, Y. W., Du, A. D., et al., 2011. Molybdenite Re-Os Age of Xilekuduke Cu-Mo Deposit in Xinjiang and its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 30(4): 635-644.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2011.04.004>
- Lowell, J. D., Guilbert, J. M., 1970. Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373-408. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373>
- Meng, X. Y., Mao, J. W., Simon, A., et al., 2024. Contrasting Tectonomagmatic Conditions for Coexisting Iron Oxide-Apatite Deposits and Porphyry and Skarn Cu ± Au Deposits in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, China. *Economic Geology*, 119(5): 1059-1087. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5084>
- Richards, J. P., 2011. Magmatic to Hydrothermal Metal Fluxes in Convergent and Collided Margins. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Rui, Z. Y., Wang, L. S., Wang, Y. t., et al., 2002. Discussion on Metallogenic Epoch of Tuwu and Yandong Porphyry Copper Deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 21(1): 16-22.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2002.01.003>
- Shen, P., Dong, L. H., Feng, J., et al., 2010. Distribution, Age and Metallogenic Characteristics of the Porphyry Copper Deposits in Xinjiang, China. *Xinjiang Geology*, 28(4): 358-364.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8845.2010.04.003>
- Shen, P., Pan, H. D., Zhou, T. F., et al., 2014. Petrography, Geochemistry and Geochronology of the Host Porphyries and Associated Alteration at the Tuwu Cu Deposit, NW China: A Case for Increased Depositional

Efficiency by Reaction with Mafic Hostrock? *Mineralium Deposita*, 49(6): 709-731. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0517-4>

Shen, P., Pan, H. D., Seitmuratova, E., 2015. Characteristics of the Porphyry Cu Deposits in the Central Asia Metallogenic Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 315-332.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/>

Sillitoe, R. H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Sun, W. D., Huang, R. F., Li, H., et al., 2015. Porphyry Deposits and Oxidized Magmas. *Ore Geology Reviews*, 65: 97-131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.004>

Sun, y., Xiao, Y. F., Li, F. C., et al., 2009. The Mineralizing Fluid Characteristics and Genesis of the Sanchakou Copper Deposit in Xinjiang. *Geology and Exploration*, 45(3): 235-239.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/>

Tang, G. J., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2010. Geochronology and Geochemistry of Late Paleozoic Magmatic Rocks in the Lamasu-Dabate Area, Northwestern Tianshan(West China): Evidence for a Tectonic Transition from Arc to Post-collisional setting. *Lithos*, 119(3-4): 393-411. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.010>

Tong, Y., Hong, D. W., Wang, T., et al., 2006. TIMS U-Pb Zircon Ages of Fuyun Post-Orogenic Linear Granite Plutons on the Southern Margin of Altay Orogenic Belt and Their Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 85-89.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2006.02.001>

Tu, G. Z., 1999. On the Central Asia Metallogenic Province. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 397-404.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/CNKI:SUN:DZKX.0.1999-04-000>

Wang, J. B., Xu, X., 2006. Post-collisional Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23-31.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2006.01.003>

Wang, Y. F., Chen, H. Y., Xiao, B., et al., 2016. Porphyritic-overlapped Mineralization of Tuwu and Yandong Copper Deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 35(1): 51-68.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2016.01.004>

Wang, Y. F., 2018. Overprinting-type Porphyry Cu Deposits and Associated Magmatism in the Eastern Tianshan, Xinjiang—Case Study of the Tuwu, Yandong, Yuhai and Sanchakou Cu deposits(Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Wang, Y. F., Chen, H. Y., Han, J. S., et al., 2018a. Paleozoic Tectonic Evolution of the Dananhu-Tousuquan Island Arc Belt, Eastern Tianshan: Constraints from the Magmatism of the Yuhai Porphyry Cu Deposit, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 282-306. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.022>

Wang, Y. F., Chen, H. Y., Xiao, B., et al., 2018b. Overprinting Mineralization in the Paleozoic Yandong Porphyry Copper Deposit, Eastern Tianshan, NW China—Evidence from Geology, Fluid Inclusions and Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 100: 148-167. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.013>

Wang, Y. F., Chen, H. Y., Baker, M. J., et al., 2019. Multiple Mineralization Events of the Paleozoic Tuwu Porphyry Copper Deposit, Eastern Tianshan: Evidence from Geology, Fluid Inclusions, Sulfur Isotopes, and Geochronology. *Mineralium Deposita*, 54(7): 1053-1076. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0859-4>

Wang, Y. F., Chen, H. Y., Falloon, T. J., et al., 2022. The Paleozoic-Mesozoic Magmatic Evolution of the Eastern Tianshan, NW China: Constraints from Geochronology and Geochemistry of the Sanchakou Intrusive Complex. *Gondwana Research*, 103: 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.11.002>

Wang, Y. H., Xue, C. J., Liu, J. J., et al., 2014. Geochemistry, Geochronology, Hf Isotope, and Geological Significance of the Tuwu Porphyry Copper Deposit in Eastern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*,

30(11): 3383-3399.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/CNKI:SUN:YSXB.0.2014-11-022>

Wang, Y. H., Zhang, F. F., Liu, J. J., 2016. The Genesis of the Ores and Intrusions at the Yuhai Cu–Mo Deposit in Eastern Tianshan, NW China: Constraints from Geology, Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotope Systematics. *Ore Geology Reviews*, 77: 312-331. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.003>

Wang, Y. W., Wang, J. B., Long, L. L., et al., 2012. Tectonic Evolution Stages of Northern Xinjiang and Tectonic Types of Porphyry-Epithermal Deposits. *Geology in China*, 39(3): 695-716.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2012.03.012>

Wu, C., Chen, H. Y., Hollings, P., et al., 2015. Magmatic Sequences in the Halasu Cu Belt, NW China: Trigger for the Paleozoic Porphyry Cu Mineralization in the Chinese Altay-East Junggar. *Ore Geology Reviews*, 71: 373-404. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.017>

Wu, C., Chen, H. Y., Liang, P., et al., 2018. Paragenesis and Fluid Evolution of the Halasu III porphyry Cu Deposit, East Junggar(NW China): Implications for the Paleozoic Multiphase Superimposing Mineralization in the Central Asian Orogenic Belt. *Ore Geology Reviews*, 100: 183-204. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.001>

Wu, C., Chen, H. Y., Lu, Y. J., 2022. Crustal Structure Control on Porphyry Copper Systems in Accretionary Orogens: Insights from Nd Isotopic Mapping in the Central Asian Orogenic Belt. *Mineralium Deposita*, 57(4): 631-641. <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01074-z>

Wu, C., Cooke, D. R., Baker, M. J., et al., 2024. Using Pyrite Composition to Track the Multi-stage Fluids Superimposed on a Porphyry Cu System. *American Mineralogist*, 109(5): 827-845. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8727>

Xiao, B., Chen, H. Y., Wang, Y. F., et al., 2015. Discovery of the Late Silurian Granodiorite and its Tectonic Significance in the Tuwu-Yandong Porphyry Copper Deposits, Dananhu-Tousuquan Island Arc, Eastern Tianshan. *Earth Science Frontier*, 22(6): 251-266.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.06.021>

Xiao, B., 2016. Magmatic Evolution, Alteration Characteristics and Genesis of the Tuwu-Yandong Cu Belt, Xinjiang(Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Xiao, B., Chen, H. Y., Hollings, P., et al., 2017. Magmatic Evolution of the Tuwu-Yandong Porphyry Cu Belt, NW China: Constraints from Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Gondwana Research*, 43: 74-91. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.09.003>

Xiao, B., Chen, H. Y., 2020. Elemental Behavior during Chlorite Alteration: New Insights from a Combined EMPA and LA-ICPMS Study in Porphyry Cu Systems. *Chemical Geology*, 543: 119604. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119604>

Xiao, W. j., Song, D. f., Windley, B. F., et al., 2020. Accretionary Processes and Metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and Perspectives. *Science China Earth Sciences*, 63(3): 329-361. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9524-6>

Yang, F. Q., Chai, F. M., Zhang, Z. X., et al., 2014. Zircon U–Pb Geochronology, Geochemistry, and Sr–Nd–Hf Isotopes of Granitoids in the Yulekenhalasu Copper Ore District, Northern Junggar, China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Lithos*, 190: 85-103. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.003>

Zhai, Y. S., Wang, J. P., Peng, R. m., et al., 2009. Research on Superimposed Metallogenic Systems and Polygenetic Mineral Deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 282-290.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/>

Zhang, D., Fan, J. J., Liu, P., et al., 2013. ⁴⁰Ar–³⁹Ar Dating of Sericite in the Songkaersu Cu–Au Deposit of Eastern Junggar, Xinjiang. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33: 61-67.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.19719/j.cnki.1001-6872.2013.04.007>

Zhang, F. F., Wang, Y. H., Liu, J. J., et al., 2023. Multiple Mineralization Events at Paleozoic Sanchakou Porphyry Cu Deposit, Xinjiang: New Insights from Geology, Geochronology, Fluid Inclusions, and H-O-C Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 163: 105726. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105726>

Zhou, T. F., Yuan, F., Tan, L. G., et al., 2006. Time Limit, Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Paleozoic Magmatism in the Sawuer Region, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1225-1237.(in Chinese with English abstract) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2006.05.014>

附中文参考文献

陈华勇, 吴超, 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战. *中国科学: 地球科学*, 50(7): 865-886. <https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0130>

杜世俊, 屈迅, 邓刚, 等, 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成岩成矿时代与形成的构造背景. *岩石学报*, 26(10): 2981-2996. <https://doi.org/>

侯增谦, 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展. *地学前缘*, 11(1): 131-144. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-2321.2004.01.010>

侯增谦, 杨志明, 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征, 岩浆热液系统和成矿概念模型. *地质学报*, 83(12): 1779-1817. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2009.12.002>

侯增谦, 杨志明, 王瑞, 等, 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用. *地学前缘*, 27(2): 20-44. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.3.8>

龙灵利, 王玉往, 杜安道, 等, 2011. 新疆希勒库都克铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 30(4): 635-644. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2011.04.004>

芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 等, 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论. *矿床地质*, 21(1): 16-22. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-7106.2002.01.003>

申萍, 董连慧, 冯京, 等, 2010. 新疆斑岩型铜矿床分布、时代及成矿特点. *新疆地质*, 28(4): 358-364. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8845.2010.04.003>

申萍, 潘鸿迪, Eleonora, S., 2015. 中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征. *岩石学报*, 31(2): 315-332. <https://doi.org/>

孙燕, 肖渊甫, 李凤春, 等, 2009. 新疆三岔口铜矿床成矿流体性质及成因. *地质与勘探*(3): 235-239. [https://doi.org/0495-5331\(2009\)45:3](https://doi.org/0495-5331(2009)45:3)

童英, 洪大卫, 2006. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 2(25): 85-89. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2006.02.001>

涂光炽, 1999. 初议中亚成矿域. *地质科学*, 34(4): 397-404. <https://doi.org/CNKI:SUN:DZKX.0.1999-04-000>

王京彬, 徐新, 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. *地质学报*, 80(1): 23-31. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2006.01.003>

王银宏, 薛春纪, 刘家军, 等, 2014. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球化学, 年代学, Lu-Hf 同位素及其地质意义. *岩石学报*, 30(11): 3383-3399. <https://doi.org/CNKI:SUN:YSXB.0.2014-11-022>

王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等, 2012. 新疆北部大地构造演化阶段与斑岩-浅成低温热液矿床的构造环境类型. *中国地质*, 39(3): 695-716. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3657.2012.03.012>

王云峰, 陈华勇, 肖兵, 等, 2016. 新疆东天山地区土屋和延东铜矿床斑岩-叠加改造成矿作用. *矿床地质*, 35(1): 51-68. <https://doi.org/10.16111/j.0258-7106.2016.01.004>

王云峰, 2018. 新疆东天山叠加改造型斑岩铜矿成岩成矿作用研究——以土屋、延东、玉海和三岔口铜矿为例(博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.

肖兵, 陈华勇, 王云峰, 等, 2015. 东天山土屋-延东铜矿矿区晚志留世岩体的发现及构造意义. *地学前缘*, 22(6): 251-266. <https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.06.021>

肖兵, 2016. 新疆土屋-延东铜矿岩浆演化、蚀变特征与矿床成因 (博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.

翟裕生, 王建平, 彭润民, 等, 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究. *地学前缘*, 16(06): 282-290. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-2321.2009.06.030>

张栋, 范俊杰, 刘鹏, 等, 2013. 新疆东准噶尔松喀尔苏铜金矿区蚀变绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地质意义. *矿物岩石*, 33(4): 61-67. <https://doi.org/10.19719/j.cnki.1001-6872.2013.04.007>

周涛发, 袁峰, 谭绿贵, 等, 2006. 新疆萨吾尔地区晚古生代岩浆作用的时限、地球化学特征及地球动力学背景. *岩石学报*, 22(5): 1225-1237. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2006.05.014>