



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：中亚成矿带典型巨型矿床地球化学特征与找矿标志

作者：王学求，谢淼，柳青青，静秀明

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026134

投稿时间：2026-09-09

录用时间：2026-10-09

预出版时间：2026-10-09

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

中亚成矿域典型巨型矿床地球化学指纹特征——以穆龙套金矿和阿尔马雷克斑岩铜矿为例

王学求^{1,2}, 谢淼^{1,2}, 柳青青^{1,2}, 静秀明^{1,2}

Wang Xueqiu^{1,2}, Xie Miao^{1,2}, Liu Qingqing^{1,2}, Jing Xiuming^{1,2}

1. 自然资源部地球化学探测重点实验室, 河北 廊坊 65000

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300300

1. Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources, Langfang 65000, Hebei, China

2. Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Tianjin 300300, China

Geochemical Fingerprinting Characteristics of the Typical Giant Deposits in the Central Asian Metallogenic Domain - Case Studies of Muruntau gold deposit and Almalyk porphyry copper deposit

Abstract: [Objective] Mineral resources are rich in the Central Asian Metallogenic Domain. In Uzbekistan the world's second-largest gold deposit - Muruntau gold deposit and the largest porphyry copper deposit in the Central Asian Metallogenic Domain-the Almalyk porphyry copper deposit have been discovered by geochemical survey. Research on its geochemical characteristics is of significance for finding similar deposits in China. [Methods] Through investigating the geochemical characteristics at regional and deposit scales, [Results] this study systematically reveals the multi-scale structural features of geochemical anomalies for the two types of deposits. [Conclusion] The main conclusions are as follows: In the Muruntau gold district, soil and rock-chip surveys in residual-slope areas effectively delineated anomalies. Penetrating geochemical surveys in peneplained aeolian-sand-covered areas also effectively delineated anomalies. At the regional scale, Au, As, Sb, Hg, Pt, and Pd were highly superimposed. They were supernormally enriched along the ore-controlling anticline and carbonaceous wall rocks. At the deposit scale, high-value Au and As anomalies were located above the main orebodies. The Almalyk porphyry copper deposit shows typical geochemical characteristics. At the regional scale, Cu-Mo-Au-Pb-Zn multi-element anomalies overlap with each other. At the deposit scale, they show clear zoning. This is a classic annular zoning pattern. Mo is the inner zone. Cu-Au is the intermediate zone. Pb-Zn is the outer zone. These two deposit types are typical in the Central Asian Metallogenic Domain. [Significance] They represent two sets of geochemical characteristics and prospecting

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目 (U2244219); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230900901)

This research was financially supported by the National Natural Science Foundation of China Geoscience Joint Fund Project (Grant No. U2244219); China Geological Survey Geological Survey Project (Grant No. DD20230900901).

第一作者及通信作者: 王学求 (1963—) 男, 研究员, 从事勘查地球化学研究。Email: wxueqiu@mail.cgs.gov.cn

indicators. They can provide a reference for finding similar deposits in Xinjiang, China, within the Central Asian Metallogenic Domain. This reference covers the transition from regional selection to deposit-scale exploration.

Keywords: Central Asian Metallogenic Domain; Geochemical characteristics; Giant deposit; Muruntau gold deposit; Almalyk porphyry copper deposit

摘要: 中亚成矿域矿产资源极为丰富。苏联时期通过地球化学金属量测量先后发现世界第二大金矿-穆龙套金矿、中亚成矿域最大的阿尔马雷克斑岩型铜矿。建立找矿标志对中国寻找类似巨型型矿床具有迫切的现实意义。通过区域尺度与矿区尺度地球化学特征研究,系统揭示了2种矿床的多尺度异常结构特征。得出:穆龙套金矿区,残坡积物地区土壤岩屑测量和准平原化风积物覆盖区穿透性地球化学测量均可有效圈定异常;区域尺度上巨量元素 Au、As、Sb、Hg、Pt、Pd 高度叠合,并沿控矿背斜和碳质围岩发生超常富集;矿区尺度上 Au、As 高值异常位于主矿体上方。阿尔马雷克斑岩铜矿呈现典型的地球化学特征;区域尺度上 Cu-Mo-Au-Pb-Zn 多元素异常相互叠合,矿区尺度上则表现为明显分带特征,以 Mo 异常为核心内环、Cu-Au 为中环、Pb-Zn 为外环的经典环带状分带模式。上述2类矿床分别代表了中亚成矿域两种典型矿床地球化学特征与找矿标志,可为中亚成矿域中国新疆境内寻找同类型矿床从区域选区到矿区勘查提供参照。

关键词: 中亚成矿域; 地球化学特征; 穆龙套造山型金矿; 阿尔马雷克斑岩型铜矿; 穿透性地球化学测量

中图分类号: P612; P595 文献标识码: A
DOI:10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2026134

0 引言

中亚成矿域矿产资源极为丰富，在全球经济和社会发展中占有举足轻重的位置。已发现世界第二大金矿，乌兹别克斯坦穆龙套金矿。世界最大铜矿之一，乌兹别克阿尔马雷克蒙古欧玉陶勒盖斑岩铜矿，以及世界最集中的铀矿产地，哈萨克斯坦铀资源量居世界第二产量全球第一。这一巨型成矿带横跨乌拉尔山脉、中亚五国、中国新疆、北山、内蒙古全境直至中国东北大兴安岭地区，总面积逾千万平方千米，其金属资源总量和矿床密度在全球成矿域中首屈一指。除金（Au）、铜（Cu）、铀（U）外，中亚成矿域还蕴藏巨量铅锌、镍钴、铬铁矿、稀土及稀有金属，部分矿种的储量和产量长期位居国际前列，对中亚诸多共建“一带一路”国家的资源安全和矿业经济具有深远影响。然而，受制于复杂的地质构造、广袤的荒漠覆盖及长期低程度的勘查投入，该带仍有大量隐伏矿体和深部矿化系统未被充分揭示，尤其在哈萨克斯坦中东部、蒙古南戈壁及中国新疆东天山—北山接壤区，找矿潜力极为突出，是全球为数不多资源潜力尚未充分发掘的成矿区域。乌兹别克斯坦穆龙套金矿和阿尔马雷克斑岩型铜矿都是苏联时期在 20 世纪 50 年代前，根据地球化学金属量测量计划圈定的异常发现的典型巨型矿床（Kotlyar, 1996; Поцелуев, 2004）。但遗憾的是穆龙套金矿发现年代，没有高灵敏度金分析技术，未能提供金异常图（Kotlyar, 1996）。90 年代开始，中国与乌兹别克斯坦合作开展地球化学填图，取得金异常分布数据（Xie et al., 1994; 王学求和谢学锦, 2000）。因此，系统研究中亚成矿域典型矿床地球化学指纹特征，对指导中国新疆及毗邻地区的类似巨型矿床调查评价及隐伏矿勘查具有迫切的现实意义。全文分为两大部分：第一部分梳理穆龙套金矿的发现历史、对比区域尺度、矿床尺度地球化学特征并总结找矿标志，第二部分梳理阿尔马雷克斑岩型铜矿的发现历史、对比区域尺度、矿床尺度地球化学特征并总结找矿标志。

1 中亚成矿域地质矿产简介

古亚洲成矿域与环太平洋成矿域、特提斯成矿域并列为全球三大巨型成矿域，中亚成矿域是古亚洲成矿域的核心组成部分（涂光炽, 1999; 陈宣华等, 2011）。该成矿域横跨乌拉尔山脉、中亚五国、中国新疆、北山、蒙古全境及中国东北大兴安岭地区，整体夹持于北部西伯利亚克拉通与南部塔里木、华北克拉通之间，其构造演化受控于古亚洲洋长达 11 亿年的持续开合与多块体拼贴过程，区别于单一陆陆碰撞成因的特提斯成矿域，以多岛洋俯冲、微陆块增生、碰撞造山及后碰撞伸展的完整演化序列为核心特征（肖文交等, 2019），造就了区内类型最全、规模最大、分带最清晰的矿床组合（Xiao and Kusky, 2009），形成世界级斑岩铜矿集区（Gao et al., 2018; 高俊等, 2019）。其中，乌兹别克斯坦的阿尔马雷克超大型斑岩铜矿（Goldfarb et al., 2014; Dolgoplova et al., 2017）成矿规模最大，地球化学分带明显，是中亚成矿域俯冲弧岩浆成矿作用的标志性矿床。在南天山地区，晚石炭世—早二叠世古亚洲洋盆逐步闭合，区域进入强烈陆陆碰撞造山阶段，地壳强烈挤压褶皱、大型韧性剪切带与推覆构造广泛发育，变质流体大规模循环萃取地层中金、锑、铅锌等成矿元素，最终形成中亚标志性穆龙套型造山金矿（崔敏利等, 2017）。

阿尔马雷克斑岩铜矿、穆龙套造山金矿分别代表了中亚成矿域俯冲岩浆型铜金成矿与碰撞造山型金成矿两大核心成矿类型，二者成矿机制典型、地球化学标志清晰。当前，中

亚成矿域的新疆段一直没有类似境外巨型典型矿床发现。文章以地球化学方法找到的 2 个典型巨型矿床：乌兹别克斯坦穆龙套金矿以及坦阿尔马雷克斑岩型铜矿为例（图 1），解剖其地球化学特征，建立找矿标志，以便指导在中国境内的找矿工作。

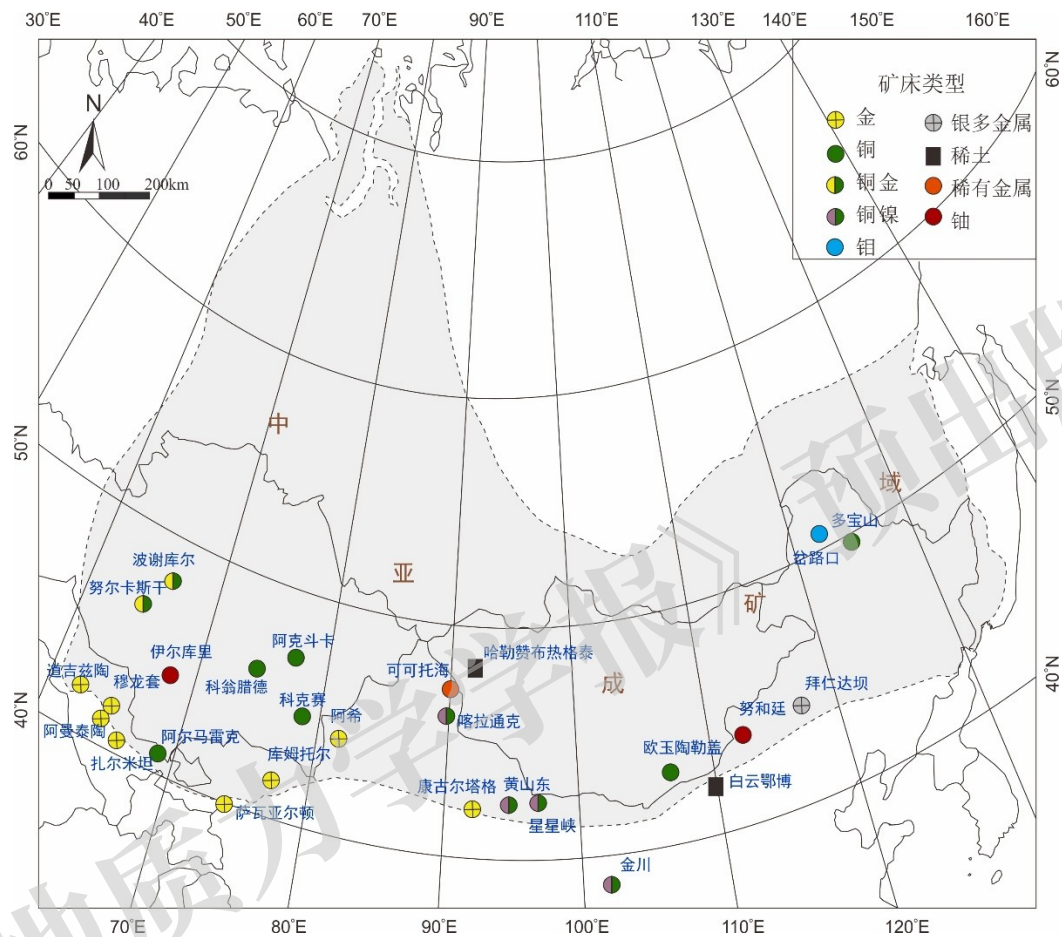


图 1 中亚成矿域及典型大型以上矿床分布

Fig. 1 Central Asian metallogenic domain with typical large to giant deposits

2 穆龙套金矿地球化学特征与找矿标志

2.1 发现历史

穆龙套金矿区位于乌兹别克斯坦撒马尔罕市克齐库姆地区。1957 年发现，探明黄金储量 6100 吨，是世界第二大金矿，开创了地球化学发现金矿的范例。

上个世纪 30 年代，俄罗斯科学院组建克孜勒库姆勘探队在该区开展了大范围的金矿地质调查工作，发现了克孜勒库姆一带石英脉中含金。1957 年，开展地球化学金属量测量（化探）发现 砷 (As) 异常，异常核心区位于穆龙套地区，此次工作为 1:50 000 土壤金属量测量，采样采集残坡积土壤和岩屑。整体采样符合当时苏联化探普查规范。使用 20 世纪

50年代半定量发射光谱。该方法 As、Sb、W 检出限可以满足找矿指示需求，但无法检测金。但在穆龙套圈定非常显著砷异常（图2），因为砷是金的伴生元素，引起地质学家高度关注，经对砷异常检查发现含金石英脉和网脉型矿化。1958年在穆龙套矿床范围内的探槽中发现了第1条具工业价值的石英脉。详查发现，不仅石英脉中含金矿化，而且在围岩中也含有金矿化。随后，1965年开始钻探，发现金矿体（Поцелуев, 2004）。1969年开始开采穆龙套金矿，并于当年冶炼出首块金锭。

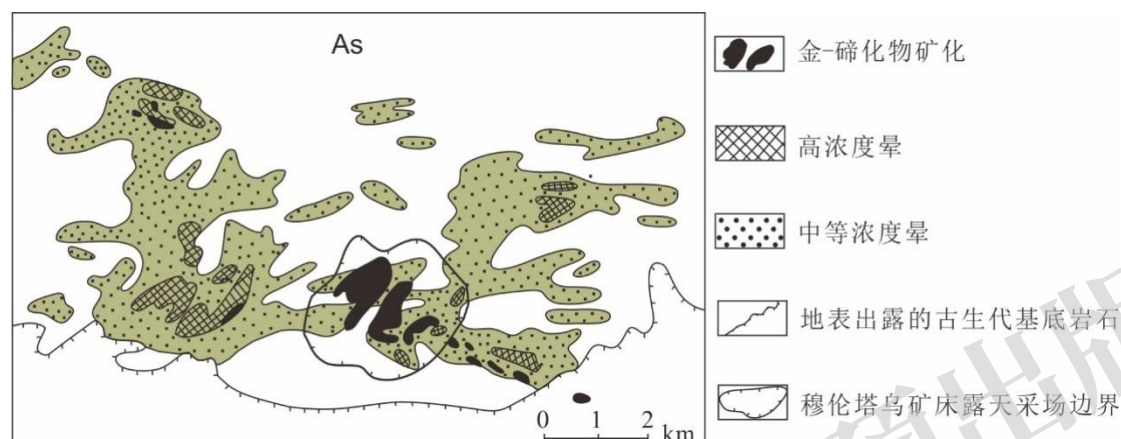


图2 穆龙套金矿及砷异常分布（Поцелуев, 2004）

Fig. 2 Muruntau gold deposit and distribution of arsenic anomalies (Поцелуев, 2004)

2.2 矿床地质特征

穆龙套金矿赋矿围岩为奥陶系—志留系别萨潘组（Besapan 组）浅变质碳质浊积复理石地层，整套地层厚度大于 1000 米，岩性主要由碳质千枚岩、炭质粉砂岩、硅质板岩互层组成，属于低绿片岩相变质建造。该套地层有机质含量显著偏高，层内广泛发育同生期微细粒黄铁矿，沉积—成岩阶段即可对金元素实现预富集，同时能够为后续热液成矿过程提供充足的还原硫（刘春涌等, 2007），被多数学者认为是穆龙套矿床的核心矿源层。

矿区深部发育晚古生代花岗质隐伏岩基，地表零星出露同期岩墙，区域岩浆活动整体强度较弱，仅为成矿过程提供有限的热源条件，未大规模参与成矿物质补给 (Marakushev et al., 1992)。整体成矿流体体系以变质流体为绝对主体，岩浆热液及岩浆物质对金成矿的贡献程度极低，成矿作用主要受控于区域变质构造演化过程 (Graupner et al., 2006; Kostitsyn, 1996)。

穆龙套矿田构造发育程度极高，褶皱、断裂构造体系极为发育，为矿体形成与定位提供了重要构造条件。矿田核心褶皱构造主要为穆龙套背斜与南部向斜，二者均为塔斯卡兹甘背斜北翼派生的次级褶皱构造，塔斯卡兹甘背斜轴部贯穿矿田南部区域，整体控制了矿田褶皱格局（图3，图4）。矿田内发育3条主干断裂，其中南部断裂为矿田的边界控制性断裂，构成矿田南部界线。该断裂主体呈近东西向展布，断面产状陡直，多近直立或向南陡倾斜，延伸至矿田东部区域后，断裂走向逐渐转为北东向，对矿区地层展布、构造格局及矿化分布具有明显约束作用。

矿床受多条巨型背斜和韧性剪切带复合控制，定位在近东西向桑伦陶—塔姆迪陶主干剪切带与北东向穆龙套—道古兹陶走滑剪切带的交汇部位，整体产于复式背斜核部。剪切带活动衍生出断裂裂隙、层间滑脱带与褶皱转折端等扩容空间，为含矿流体运移、汇聚及金质沉淀提供优质通道与储集空间，矿化垂向延伸超过 1000m。

矿区不发育独立大型矿体，整体构成陡立主干石英脉、顺层细脉与网状微脉交织的柱状网脉矿化体系，矿石可划分为金-石英脉型、金-石英-硫化物型、金-有机碳型3类（Smirnoff, 1997）（图4）。其中硫化物平均含量为0.5%~1.5%，主要脉石矿物为石英，还有少量钾长石、黑云母、方解石、电气石和钠长石。矿石矿物主要是黄铁矿和毒砂，偶尔有白钨矿。更少量的矿物是闪锌矿、方铅矿、辉铋矿、自然铋和其他许多矿物。

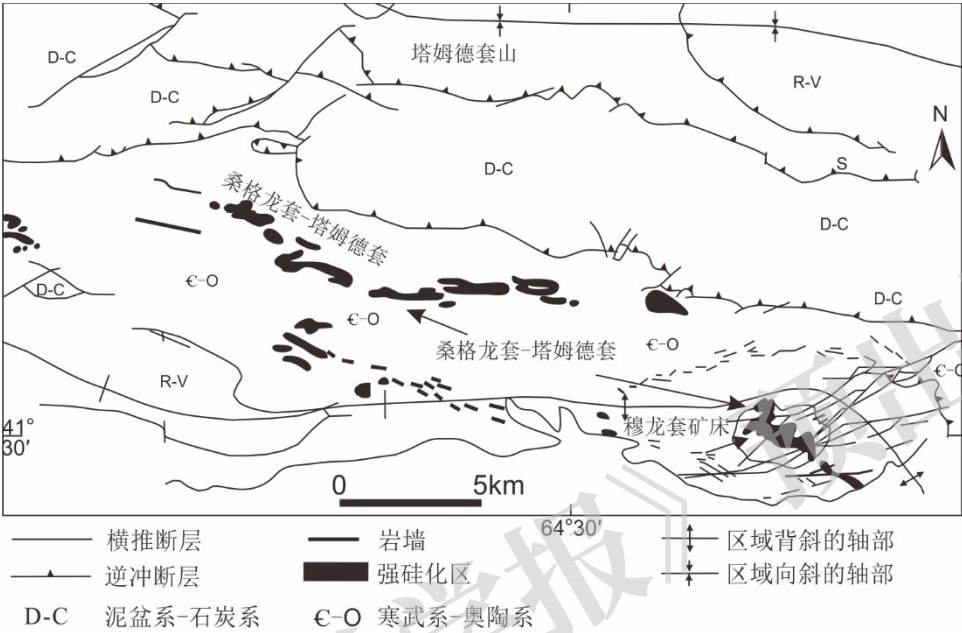
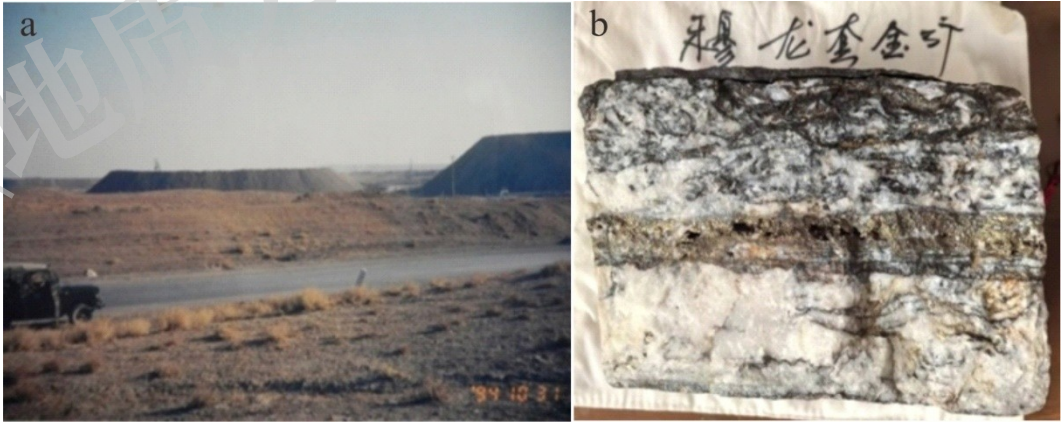


图3 穆龙套金矿受背斜控制简化地质图（Drew et al., 1996）

Fig. 3 Simplified geological map showing the anticlinal control of the Muruntau gold deposit (Drew et al., 1996)



(a) 穆龙套金矿矿区照片

(b) 穆龙套金矿矿石照片

图4 穆龙套金矿矿区照片及矿石照片

Fig. 4 Photographs of the Muruntau gold mining area and ore

(a) Photographs of the Muruntau gold mining area; (b) Photographs of the Muruntau gold ore

2.3 地球化学特征与找矿标志

穆龙套金矿是南天山造山带海西期陆陆碰撞背景下形成的巨型造山型金矿，矿床能够形成超大规模金矿体，主要受控于背斜褶皱构造提供的充足容矿空间以及矿源层中 Au、As、Sb、Hg 及 Pt、Pd 的巨量富集。

区域尺度上，由于赋矿的别萨潘组碳质浊积复理石（有机碳>0.5%）本身具有 Au、As、Sb、Hg 及 Pt、Pd 的高背景值，沉积成岩阶段已形成初始预富集。依托 1:100 万区域地球化学填图数据可见，Au、As、Sb、Hg 多元素异常在空间上高度叠加（图 5）。其中，Au、As、Sb、Hg 等元素的异常下限分别为 4.57ng/g，61.4ug/g，9.05ug/g，53.5ng/g，区域异常覆盖面积可达 20000km²，异常富集系数达 3.1，穆龙套金矿的成矿富集系数高达 3×10³，吨位指数可达 6.1×10¹²，均远超大型矿床的最低标准，指示该矿床经历了元素的超常富集过程。相关参数的计算公式参考王学求等（2025）。上述指标共同表明该区具备极强的成矿物质储备能力与元素超常富集潜力，是形成巨型金矿床的核心地球化学依据。

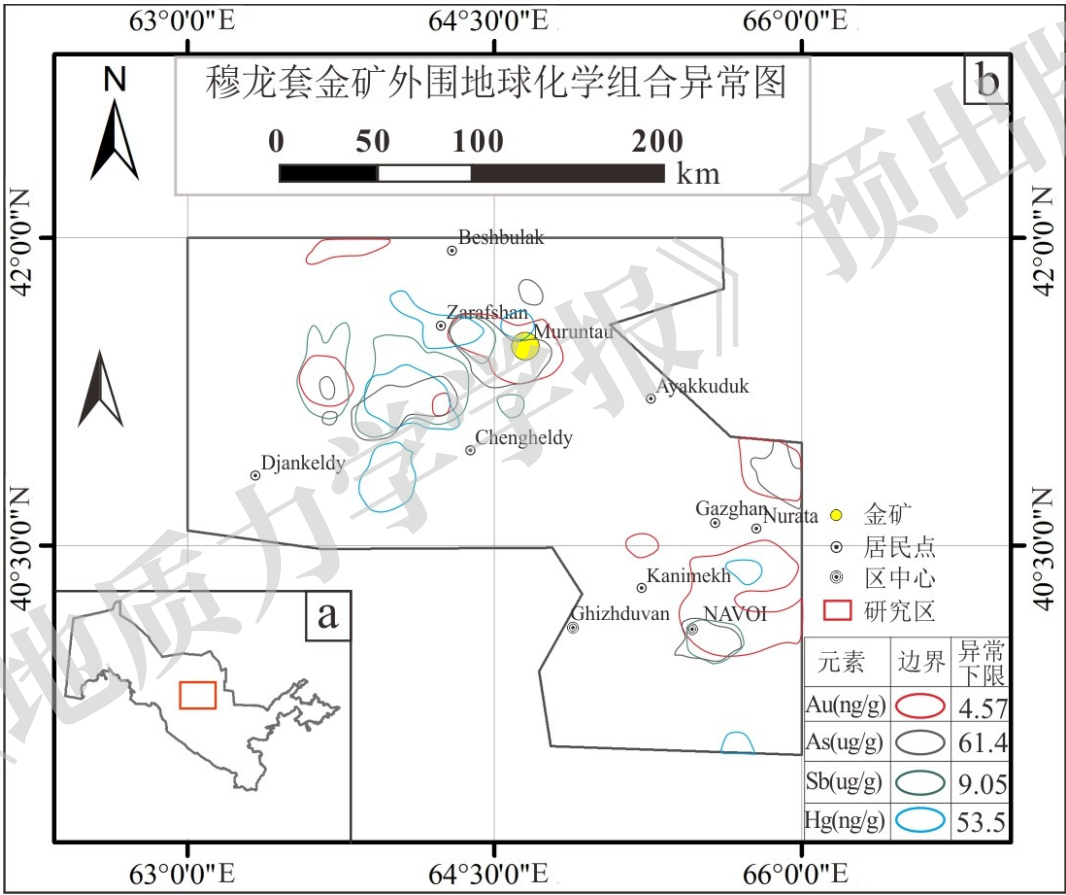
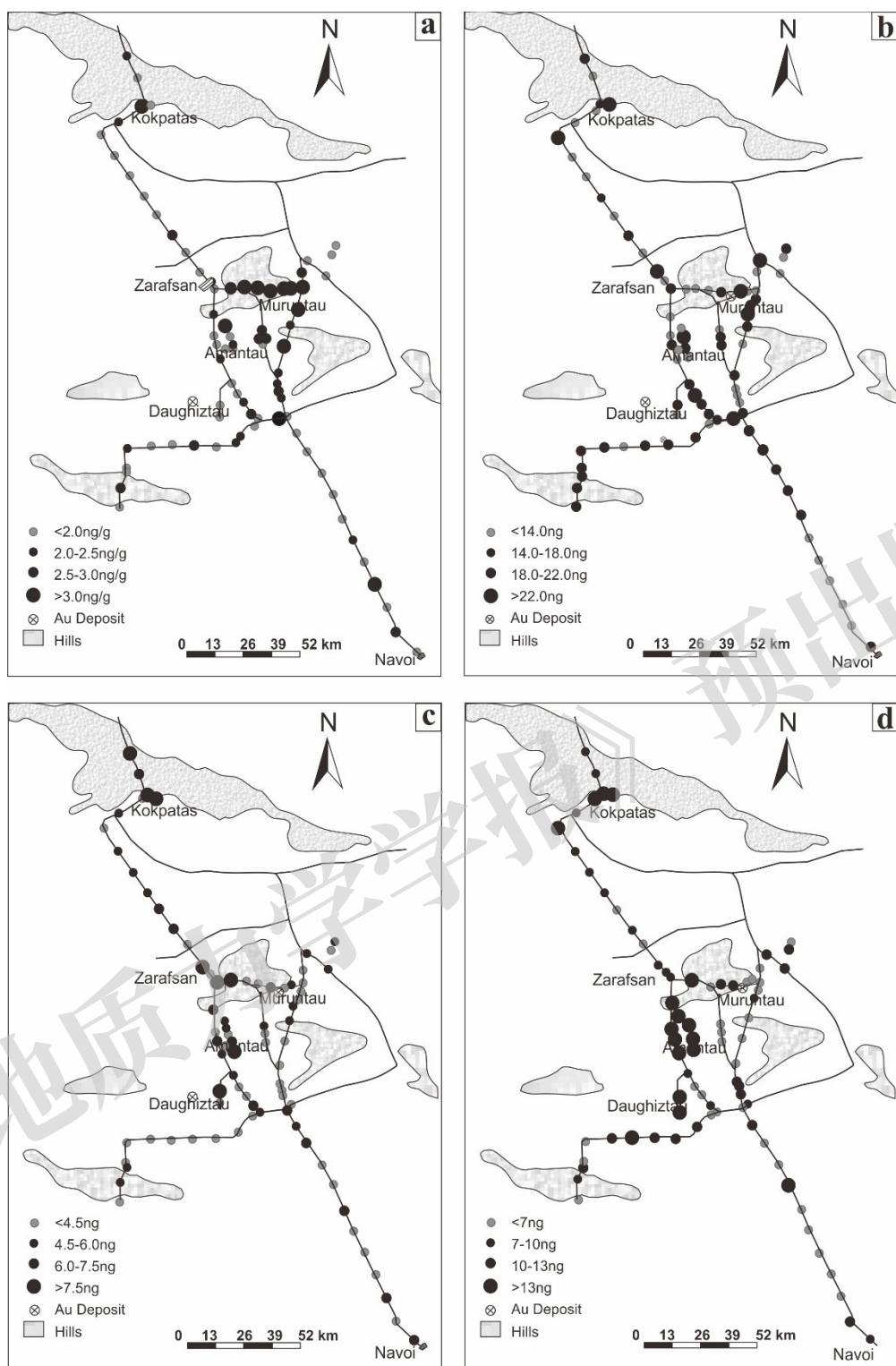


图 5 穆龙套金矿区位及外围地球化学组合异常图 (a) 乌兹别克斯坦简图； (b) 穆龙套金矿外围地球化学组合异常图

Fig. 5 Location of the Muruntau Gold Deposit and Peripheral Geochemical Composite Anomaly Map (a) Simplified map of Uzbekistan; (b) Geochemical composite anomaly map of the periphery of the Muruntau gold deposit.

该区穆龙套金矿所在区域经历了准平原化、地形平坦，地表风成沙广泛分布（图 4）。为了弥补苏联时期金属量测量计划未分析金的缺陷和风积物覆盖是否可以发现矿区异

常，布设一条北西—南东向长剖面，同时穿插数条短剖面横切已知金矿床；采样间距 5~10 km，矿床周边加密采样，开展水提取 Au 与地气 As、Sb、Hg 的连续测量（图 6）。地气采样装置参考王学求等（1997）：将尖头钢钎打入地下 60 cm，把锥形采样器旋入钻孔实现孔口密封；通过采样器内置导管抽取地下气体，气体先经过 0.4 μm 微孔滤膜阻挡粉尘，再通入特殊处理的聚氨酯泡沫捕集器；泡沫捕集介质密封保存运回实验室。采用仪器中子活化分析（INAA）测定 As、Sb、Hg 等元素，土壤样品采集深度 20~30 cm，清除表层松散砂，采集钙积层上方富含黏土层微细粒样品（小于 125 μm ），分析水提取态 Au（王学求等，1997），采用原子吸收光谱（AAS）测定。结果表明，Au、As 高值异常集中落在已知金矿点位之上，其中 Au 峰值超过 3 ng/gppb，As 峰值超过 22 ng；从矿化中心沿剖面向两侧，Au、As 含量同步逐级衰减，异常峰值位置与矿化区段完全匹配。Sb、Hg 异常值主要集中在 Amantau 矿田附近，其中 Sb 超过 7.5 ng，Hg 超过 13 ng。而穆龙套矿体上方值 Sb 在 6~7.5 ng 之间，Hg 在 10~13 之间。二者同属于造山型金矿，相比较于穆龙套金矿来说，Amantau 属于该成矿系统的中低温端元，成矿温度更低，流体运移更远，富含的 Sb、Hg 在此大量沉淀。总体来说，Au、As、Sb、Hg 均实现了显著富集。结合穆龙套金矿在区域和矿田尺度下的地球化学特征，现总结地球化学找矿标志如下（表 1）。



a—水提取 Au; b—地气 As; c—地气 Sb; d—地气 Hg (Xie et al., 1999)

图 6 穆龙套金矿带剖面地球化学特征

Fig. 6 Geochemical characteristics along the profile of the Muruntau gold belt (a) Water-extracted Au; (b) Geogas As; (c) Geogas Sb; (d) Geogas Hg (Xie et al., 1999)

表 1 穆龙套金矿地球化学找矿标志表

Table.1 Geochemical Exploration Indicators for the Muruntau Gold Deposit

矿床	尺度	方法/介质	元素组合	异常特征	对应地质特征
穆龙套	区域	1:100 万区域化探, 水系沉积物	Au、As、Sb、Hg、Pt、Pd	多元素套合性较好	别萨潘组碳质浊积复理石建造
				穆龙套 Au、As 高值异	
穆龙套	矿田	地气、土壤微细粒活动态测量	Au、As、Sb、Hg	常与已知矿点位置高度吻合, Amantau 的 Sb、Hg 异常更高	黄铁矿化、毒砂、石墨化等围岩蚀变和矿体

穆龙套金矿典型地球化学指纹特征与找矿标志如下：

- （1）成矿及伴生元素 Au、As、Sb、Hg 沿控矿背斜及两翼发生超常富集和空间上高度叠合，表明背斜为巨量成矿物质聚集提供了巨大容矿空间；
- （2）含矿围岩有机碳含量普遍高于 0.5%，奥陶系—志留系别萨潘组碳质浊积复理石地层为专属含矿岩性标志，高含量有机质与同生黄铁矿为金及铂族元素初始预富集提供了关键条件。
- （3）金有三类赋存形式，分别为硫化物吸附金，石英脉载金，碳质岩吸附金，是判别穆龙套式造山型金矿的重要矿相标志。
- （4）Au-As-Sb-Hg-Pt-Pd 多元素共生组合异常是穆龙套金矿的典型找矿标志。

3 斑岩型铜矿地球化学特征与找矿标志

3.1 发现历史

乌兹别克斯坦阿尔马雷克（Almalyk）铜矿是中亚造山带库拉玛成矿带内规模最大的巨型斑岩铜金矿集区，铜资源量约 2.4×10⁷t（曹积飞等，2023），也是苏联时期区域化探找矿成果的典型代表（Zenin，1937）。

该铜矿区的找矿线索可追溯至古代，库拉玛山区留存有公元 11—12 世纪的古采矿与古冶炼遗迹，古人已在此开采地表氧化铜矿、砂金及铅矿，未形成现代矿床地质认知，但遗留的老采坑、炉渣等线索（Гарьковен，1979），为近代地质找矿工作提供了重要依据。

19 世纪 70—80 年代，俄国地质学者 Mushketov 等人开展中亚区域地质踏勘，首次记录阿尔马雷克矿区外围的铅锌矿化露头及古采遗迹，识别出方铅矿矿脉，完成了矿点初步发现。1925—1927 年，苏联地质学家 Mashkovtsev、Nasledov 开展系统区域地质填图，进一步查明卡利马克尔矿区外围矽卡岩带、脉状矿带的铅锌、铜矿化特征，并将该矿化点正式纳入苏联时期地质矿产档案。

1932—1933 年，苏联时期地质工作和采用岩屑采样的金属量测量方法，对阿尔马雷克地区钻孔岩芯及风化露头样品进行铜含量分析，绘制等铜含量线，这一工作为后续勘查奠定了基础（Zenin，1937）。后续识别出一套典型斑岩型铜矿元素组合分带（Kotlyar，1996），Mo 位于中心，Cu 异常环绕 Mo 异常在南部分布，Au 异常环绕 Mo 异常分布于北部，Pb、Zn 异常位于最外围环绕 Cu、Mo、Au 异常分布。基于这套经典的斑岩型矿床元素分带规律，开展系统性勘查工程，最终发现中亚成矿域最大的斑岩型铜矿。受第二次世界大战（二战）影响，矿区勘探工作一度中断。1947—1951 年，矿区重启深部钻探与综合勘查工

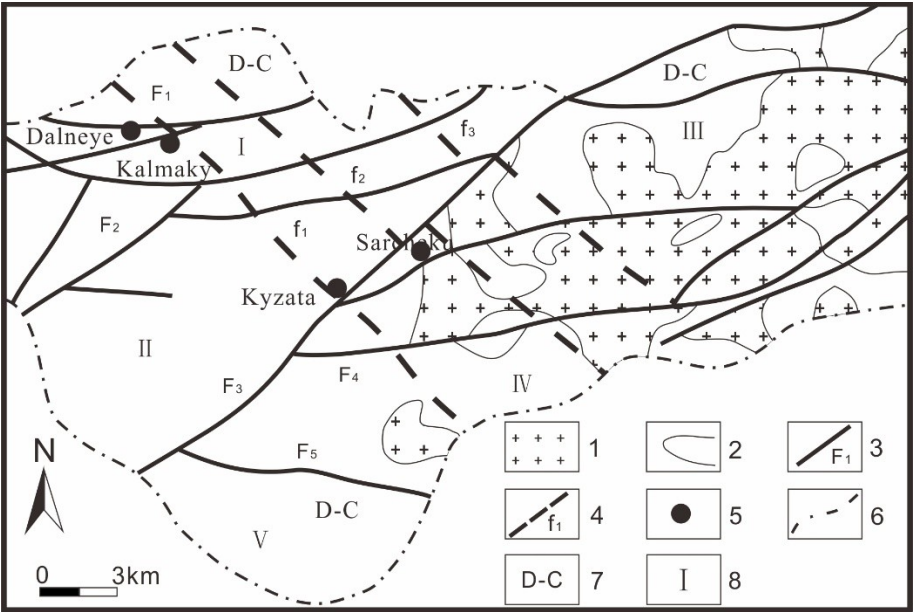
作，厘清了卡利马克尔、达尔涅两大核心矿段的空间分布与地质特征，精准确定矿床成矿时代为晚石炭世，明确其斑岩型铜金矿床成因。1954 年，矿区启动露天矿山基建工作，1959 年卡利马克尔矿山正式投产。后续通过持续的深部及外围找矿勘查，陆续探明达尔涅、萨雷切库、Yoshlik-1 等一系列配套矿床，最终形成了规模宏大、资源禀赋优异的世界级阿尔马雷克斑岩铜金矿集区。

3.2 矿床地质特征

阿尔马雷克铜矿出露地层主要包括泥盆系与石炭系。泥盆系中酸性火山岩及火山碎屑岩为主要赋矿围岩，整体铜元素背景含量较高，为成矿作用奠定了良好的物质基础，下石炭统碳酸盐岩与陆源碎屑岩主要分布于矿区外围，局部可见弱矽卡岩化矿化现象（曹积飞等，2023）。矿区岩浆活动频繁且强烈，成矿作用与晚石炭世浅成中酸性斑岩岩浆活动密切相关，岩浆活动具有清晰的期次性。早期闪长岩、二长闪长岩岩浆活动无明显矿化贡献，晚期花岗斑岩、煌斑岩岩脉仅对先期矿体产生轻微改造，而晚石炭世石英二长斑岩、花岗闪长斑岩岩株为矿区专属成矿母岩（蔡宏渊等，1995a；蔡宏渊等，1995b；Typecebekov et al., 2006）。岩浆侵位与主成矿时代集中于 320~310Ma，属于俯冲环境下高钾钙碱性弧岩浆，由下地壳混染少量幔源物质熔融形成（曹积飞等，2023），浅成岩株的侵位特征为成矿物质聚集、沉淀提供了有利的地质条件。

铜矿体呈巨大的网脉集合体、椭球体或平卧板状，也见少量透镜状、脉状矿体。矿区元素分带规律明显，铜、金具有显著的正相关关系，岩体核部相对富集钼，向外逐渐过渡为 Cu、Au 主矿化富集区，矿区外围零星发育铅锌多金属矿化。金属矿物主要有黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿，次要的金属矿物有赤铁矿、辉钼矿、自然金、斑铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、碲化物等，铜、钼硫化物矿物及自然金彼此共生；脉石矿物主要有石英、钾长石、黑云母、绿泥石、绢云母、硬石膏、方解石等（Typecebekov et al., 2006；薛春纪等，2013）。

矿区围岩蚀变呈现斑岩型矿床典型的同心环状分带特征，自岩体中心向外依次发育钾硅酸盐蚀变带、石英-绢云母蚀变带及青磐岩化蚀变带（刘春涌，2005）。其中，中心钾硅酸盐蚀变带以高温钾长石化、黑云母化为标志，对应钼矿化富集；中部石英-绢云母蚀变带为矿区最主要的铜金矿赋存空间，是工业矿体的核心富集区段；外围低温蚀变带矿化强度快速衰减，存在微弱矿化迹象。总体来看，阿尔马雷克铜金矿是形成于陆缘弧俯冲构造环境的典型斑岩型矿床，弧岩浆活动提供成矿物质与热液流体，浅成斑岩岩株控制矿体空间就位，网状断裂裂隙系统为热液循环与矿质沉淀提供储集空间，三者共同制约了矿区超大规模铜金矿床的形成与富集。



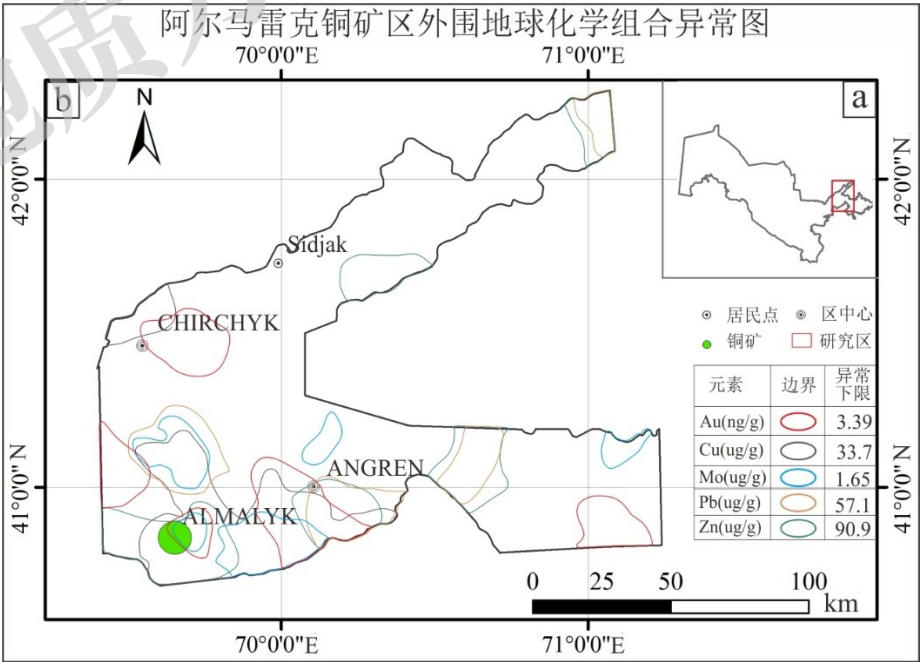
1—花岗闪长斑岩；2—地质界限；3—断裂及编号；4—隐伏断裂及编号；5—铜矿床；6—矿田边界；7—泥盆系-石炭系；8—构造单元

图7 阿尔马雷克铜矿矿田地质构造简图（薛春纪等，2013）

Fig. 7 Simplified geological and structural map of the Almalyk copper ore field (Xue et al., 2013)

3.3 地球化学特征与找矿标志

基于 1：100 万地球化学调查数据，阿尔马雷克铜矿在区域尺度上 Au、Cu、Mo、Pb、Zn 等多元素异常相互套合（图 8，）。各元素异常下限分别为 Au 3.39ng/g，Cu 33.7ug/g，Mo 1.65ug/g，Pb 57.1ug/g，Zn 90.9ug/g。



a—乌兹别克斯坦简图；b—阿尔马雷克外围地球化学组合异常图

图8 阿尔马雷克铜矿区位及外围地球化学组合异常图

Fig. 8 Location of the Almalyk copper Deposit and Peripheral Geochemical Composite Anomaly Map (a)

Simplified map of Uzbekistan; (b) Geochemical composite anomaly map of the periphery of the Almalyk copper deposit.

矿区尺度上，整体表现为显著的元素空间分带特征（图9）。中心为钼异常，矿床成矿核心部位对应斑岩岩浆侵入中心，发育高强度、高集中度的 Mo 元素异常，钼作为高温热液标志性元素，最早随深部岩浆热液析出富集，严格局限于岩体中心蚀变核部，构成整个异常体系的核心内环，对应深部高温钾化蚀变带，是判断斑岩成矿中心的关键标识。

Cu、Au 异常呈环带状依次展布且空间分布具有明显方位差异。其中 Cu 元素异常主要集中于钼异常南侧，环绕核心钼异常连续分布，对应中低温绢英岩化蚀变带，铜元素大规模富集沉淀，构成矿床主体矿化范围；Au 元素异常则主要围绕钼异常北侧展布，与铜异常南北分域，共同构成矿区核心成矿元素组合，体现了本区斑岩成矿 Cu-Au-Mo 共伴生的典型特征。

Pb、Zn 作为低温远程热液元素，迁移能力更强、沉淀温度更低，在矿区最外侧形成大范围环绕异常，完整包裹内部 Mo、Cu、Au 异常圈层，对应矿区外围青磐岩化低温蚀变带。该套内高温 Mo、中温 Cu、Au、低温 Pb、Zn 的有序分带结构，完整记录了斑岩岩浆热液从中心向外侧运移、降温、分异、沉淀的全过程，是阿尔马雷克矿床重要的找矿地球化学标志。结合阿尔马雷克斑岩型铜矿在区域和矿田尺度下的地球化学特征，现总结地球化学找矿标志如下（表2）。

等，2025）。异常富集系数：主成矿元素富集系数均大于 3.0，其中铜 3.65，金 7.89，钼 2.63；伴生元素富集系数均大于 2.0，其中银 6.73，铅 5.3，锌 2.1。金工业边界品位为 0.37g/t，成矿富集系数达 370，金资源量为 $2.25\times10^3\text{t}$ ，矿床吨位指数为 2.25×10^{12} ，成矿规模突出；铜为矿区核心主成矿元素，工业边界品位 0.38%，成矿富集系数 152，整体富集能力优异，铜金属资源量可达 $2.4\times10^7\text{t}$ ，矿床吨位指数 9.6×10^{11} 。钼工业边界品位仅 0.0023%，成矿富集系数为 20，富集强度相对较弱，钼金属资源量为 $1.4\times10^5\text{t}$ ，矿床吨位指数 1×10^{11} ，具备良好的共伴生综合利用潜力。

表 3 阿尔马雷克铜金矿关键金属富集系数（部分数据引自 Singer et al., 2008；申萍等，2015）

Table.3 Enrichment factors of key metals in the Almalyk Cu–Au deposit (some data are from Singer et al., 2008; Shen et al., 2015)

元素	地壳丰度	异常富集系数	矿床边界品位	成矿富集系数	矿床金属资源量	矿床吨位指数
Au	1.0×10^{-9}	7.89	0.37g/t	370	$2.25\times10^3\text{t}$	2.25×10^{12}
Ag	70×10^{-9}	6.73				
Cu	25×10^{-6}	3.65	0.38%	152	$2.4\times10^7\text{t}$	9.6×10^{11}
Mo	1.1×10^{-6}	2.63	0.0023%	20	$1.4\times10^5\text{t}$	1.27×10^{11}
Pb	14.8×10^{-6}	5.265				
Zn	65×10^{-6}	2.046				

阿尔马雷克铜矿的地球化学分带模式与斑岩 – 热液系统模式高度一致（图 10）。斑岩成矿系统的热源与成矿流体均源自深部岩浆房。深部岩浆沿构造薄弱带上侵、浅部就位并逐步凝固结，形成中酸性斑岩岩体。岩浆结晶演化过程中持续释放 500~900 °C 高温高盐度岩浆热液，携带 Cu、Mo、Au 等成矿组分沿岩体顶部及周边裂隙向上、向外运移。含矿流体在运移过程中不断降温、发生流体沸腾与强烈水岩反应，形成显著的温度梯度分带：成矿核心热液温度可达 600°C，向外依次过渡为 300°C、200°C 低温热液域，精准对应斑岩体系钾化、绢英岩化、青磐岩化的圈层蚀变分带规律。深部岩浆流体向上演化可形成酸性热液，在斑岩矿体上部有利裂隙空间可叠加高硫化浅成低温热液 Au-Cu 矿化。随着流体进一步向外围扩散并与大气降水混合、流体酸度中和、温度持续降低，可在远端地热系统中形成低硫化型 Au-Ag 矿化，大气降水的混入也是外围低温热液系统发育的重要控制因素。该经典模型呈现的“中心 Cu-Mo-Au、外围 Pb-Zn-Ag”元素分异规律，与阿尔马雷克矿床核部 Mo 富集、中部 Cu-Au 南北分域、外围 Pb-Zn 环带分布的地球化学异常特征高度匹配，有效揭示了矿区流体降温分异、元素有序沉淀的成矿机理，为研究区斑岩型铜矿的元素分带机制与成矿模式建立提供了坚实的理论支撑。

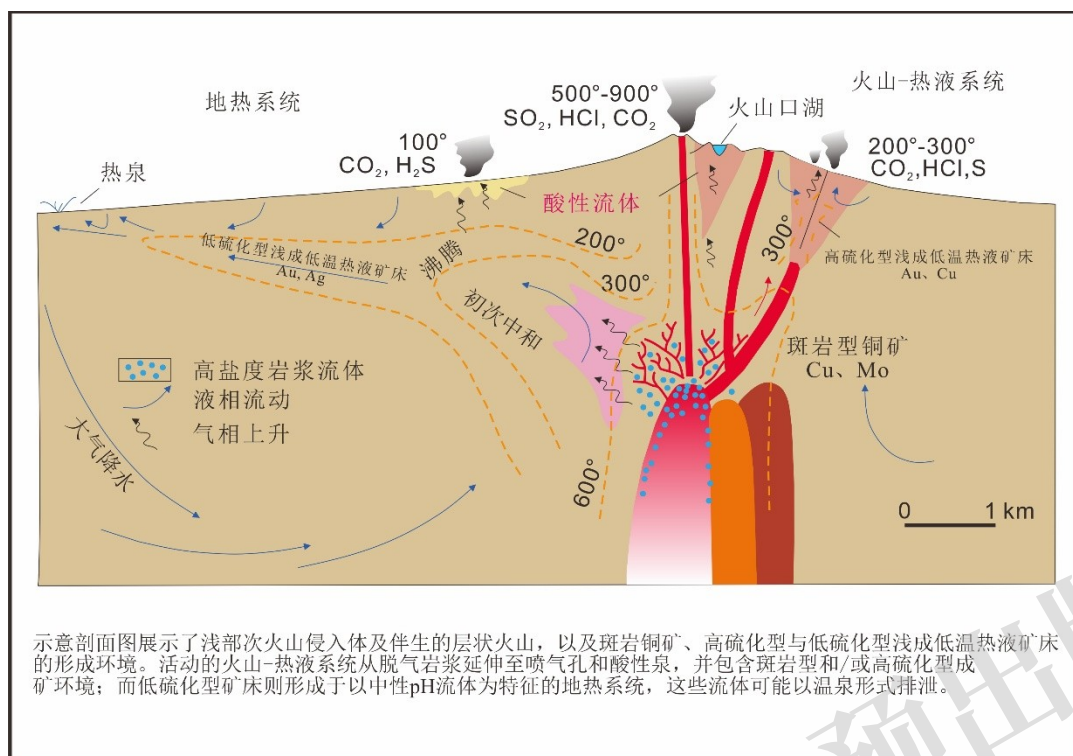


图 10 斑岩型铜矿成矿模式图（据 Hedenquist et al., 1994 修改）

Fig. 10 Metallogenic model of porphyry copper deposits (modified after Hedenquist et al., 1994)

阿尔马雷克斑岩型铜矿典型地球化学指纹特征和找矿标志：

（1）区域地球化学特征：Au、Cu、Mo、Pb、Zn 等多元素异常相互套合，各元素的异常下限分别为 3.39ng/g，33.7ng/g，1.65ug/g，57.1ug/g，90.9ug/g；主成矿元素富集系数均大于 3.0，其中铜 3.65，金 7.89，钼 2.63；伴生元素富集系数均大于 2.0，其中银 6.73，铅 5.3，锌 2.1。

（2）矿区尺度地球化学特征：具有典型元素分带特征，以 Mo 异常中心，Cu-Au 异常中带，外围 Pb-Zn 环带异常，是评价大型斑岩型铜矿关键依据。

4 结论

文章通过对中亚成矿域两类巨型矿床，穆龙套造山型金矿与阿尔马雷克斑岩型铜矿的地质地球化学特征进行系统研究，得到以下结论：

穆龙套金矿区内，残坡积物分布区土壤岩屑测量与准平原化风积物覆盖区穿透性地球化学测量均可有效圈定异常；其成矿作用受控于别萨潘组碳质浊积复理石的金沉积预富集及后期变质热液叠加改造，有机碳含量大于 0.5%，对金的初始富集起到关键作用；成矿及伴生元素 Au、As、Sb、Hg 沿控矿背斜及其两翼发生超常富集且空间上高度叠合，表明背斜为巨量成矿物质聚集提供了充足容矿空间；在矿区尺度上 Au、As 高值异常分布于主矿体上方。

阿尔马雷克斑岩铜矿呈现典型的区域尺度上 Cu-Mo-Au-Pb-Zn 多元素异常相互叠合；矿区尺度则呈现出显著的元素分带规律，形成以 Mo 异常为内环核心、Cu-Au 为中环且具有 Cu、Au 南北分带特征、Pb-Zn 为外环的经典斑岩型铜矿环带状分带模式。

中亚成矿域新疆段境内已发现萨瓦亚尔顿穆龙套型金矿，东天山土屋斑岩型铜矿，但其规模远不能与境外这类巨型矿床相比。上述两类矿床分别代表了中亚成矿域两种典型矿床地球化学特征与找矿标志，可为中亚造山带中国新疆境内大面积荒漠戈壁区寻找同类型矿床从区域选区到矿区勘查提供参照。

作者贡献声明：王学求负责论文构思、研究方法、野外采样和论文写作；谢淼负责论文写作、数据分析和文献查阅；柳青青、静秀明参与数据分析和绘图。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: Wang Xueqiu was responsible for the conceptualization of the study, field sampling, methodology, and manuscript writing. Xie Miao was responsible for data analysis and manuscript writing, Liu Qingqing and Jing Xiuming contributed to data analysis and map generation. All authors have read and approved the manuscript for submission and publication.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

References

- DREW L J, BERGER B R, KURBANOV N K, 1996. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkum desert, Uzbekistan[J]. *Ore Geology Reviews*, 11(4): 175-196.
- CAI H Y, LI F C, 1995a. Geological characteristics of the Almalyk porphyry copper deposit: Deposit geology[J]. *Mineral Resources and Geology*, 9(2): 87-94. (in Chinese)
- CAI H Y, LI F C, 1995b. Geological characteristics of the Almalyk porphyry copper deposit: Conditions for mineralization enrichment and metallogenic model[J]. *Mineral Resources and Geology*, 9(3): 180-184. (in Chinese)
- CAO J F, WENG K, MOVLANOV J J, et al., 2023. Gold-copper metallogenic characteristics and prospecting potentiality in the Central Tianshan region, Uzbekistan[J]. *Geology in China*, 50(6): 1731-1744(in Chinese with English abstract).
- CHEN X H, YANG N, YE B Y, et al., 2011. Tectonic system and its control on metallogenesis in Western Junggar as part of the Central Asia multi-core metallogenic system[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 325-338. (in Chinese with English abstract)
- CUI M L, YE J H, HE X Z, 2017. Geological setting and mineralization of large-superlarge gold deposits in "One Belt, One Road" region[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(1): 154-167. (in Chinese with English abstract)
- DOLGOPOLOVA A, SELTMANN R, KONOPELKO D, et al., 2017. Geodynamic evolution of the western Tien Shan, Uzbekistan: Insights from U-Pb SHRIMP geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotope mapping of granitoids[J]. *Gondwana Research*, 47: 76-109.
- GAO J, KLEMD R, ZHU M, et al., 2018. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 165: 7-36.
- GAO J, ZHU M T, WANG X S, et al., 2019. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: Tectonic background, fluid feature and metallogenic deep dynamic mechanism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(1): 24-71. (in Chinese with English abstract)
- GOLDFARB R J, TAYLOR R D, COLLINS G S, et al., 2014. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 48-102.
- GRAUPNER T, NIEDERMANN S, KEMPE U, et al., 2006. Origin of ore fluids in the Muruntau gold system: Constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(21): 5356-5370.

- HEDENQUIST J W, LOWENSTERN J B, 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370(6490): 519-527.
- JIANG S H, NIE F J, SU Y J, et al., 2010. Geochronology and origin of the Erdenet superlarge Cu-Mo deposit in Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 289-306. (in Chinese with English abstract)
- KOSTITSYN Y A, 1996. Rb-Sr isotopic study of the Muruntau deposit: Magmatism, metamorphism and mineralization[J]. *Geochemistry International*, 34: 1009-1023.
- KOTLYAR B B, 1996. Geochemical exploration in the former Soviet Union[J]. *Explore*, 91: 1-10.
- LIU C Y, 2005. The Almalik super-large porphyry copper deposit in Uzbekistan[J]. *Central Asian Information*, (7): 31-35. (in Chinese)
- LIU C Y, WANG Y J, 2007. Primary discussion on the characteristics of the gold deposit in black shale series in Central Asia and the prospecting target of black shale series in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 25(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- LIU D Q, CHEN Y C, WANG D H, et al., 2003. A discussion on problems related to mineralization of Tuwu-Yandong Cu-Mo orefield in Hami, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 22(4): 334-344. (in Chinese with English abstract)
- MARAKUSHEV A A, KHOKHLOV V A, 1992. A petrological model for the genesis of the Muruntau gold deposit[J]. *International Geology Review*, 34(1): 59-76.
- SELTMANN R, PORTER T M, 2005. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, geologic and metallogenic setting and significant deposits[M]//PORTER T M, ed. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*. Adelaide: PGC Publishing, 2: 467-512.
- SHEN P, PAN H D, LI C H, et al., 2023. Lithium deposits in the Central Asian Metallogenic Domain: Metallogenic regularity and model[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3185-3209. (in Chinese with English abstract)
- SHEN P, PAN H D, SEITMURATOVA E, 2015. Characteristics of the porphyry Cu deposits in the Central Asia Metallogenic Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 315-332. (in Chinese with English abstract)
- SINGER D A, BERGER V I, MORING B C, 2008. Porphyry copper deposits of the world: Database and grade and tonnage models, 2008[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1155. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 45 p.
- SMIRNOFF V I, 1977. The Muruntau deposit[M]//*Ore Deposits of the USSR*. Vol. 3. London: Pitman Publishing: 35-40.
- SONG H X, LIU Y L, QU W J, et al., 2007. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1981-1988. (in Chinese with English abstract)
- TU G C, 1999. On the Central Asia metallogenic province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 34(4): 397-404. (in Chinese with English abstract)
- WANG X C, WANG X L, WANG L, et al., 2007. Metallogeny and reformation of the Duobaoshan superlarge porphyry copper deposit in Heilongjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 124-133. (in Chinese with English abstract)
- WANG X Q, Xie X J. 2000. *Exploration geochemistry of Gold Principles and methodology Tactics and Strategy*. Shandong Publishing House. (in Chinese)
- WANG X Q, LI L X, WU H, et al., 2025. Super enrichment of critical elements: Implications for strategic mineral resources[J]. *Earth Science Frontiers*, 32(1): 11-22. (in Chinese with English abstract)
- XIAO W J, SONG D F, WINDLEY B F, et al., 2019. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *SCIENTIA SINICA Terrae*, 49(10): 1512-1545. (in Chinese with English abstract)
- XIAO W, KUSKY T, 2009. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and related orogenic belts: Introduction[J]. *Gondwana Research*, 16(2): 167-169.
- XIE X, WANG X, XU L, et al., 1999. Orientation study of strategic deep penetration geochemical methods in the central Kyzylkum desert terrain, Uzbekistan[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 66(1-2): 135-143.
- XUE C J, DUAN S G, CHAI F M, et al., 2013. Metallogenetic epoch of the Almalik porphyry copper ore field, Uzbekistan, and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 197-204. (in Chinese with English abstract)
- XUE C J, ZHAO X B, ZHAO Y, et al., 2024. Early Permian Au-Ni major metallogenic events in western Central Asian metallogenic domain[J]. *Mineral Deposits*, 43(4): 749-784. (in Chinese with English abstract)

ZENG Q, QIN K, LIU J, et al., 2015. Porphyry molybdenum deposits in the Tianshan-Xingmeng orogenic belt, northern China[J]. International Journal of Earth Sciences, 104(4): 991-1023.

ZENIN M F, 1937. The Balikti porphyry-copper deposit in Almalyk[J]. Middle Asia Geological Materials, 5: 39-61. (in Russian)

ZHANG Y, NIE F J, JIANG S H, et al., 2003. Discovery of the Ouyu Tolgoi copper-gold deposit in the Sino-Mongolia border region and its significance for mineral exploration[J]. Geological Bulletin of China, 22(9): 708-712. (in Chinese with English abstract)

ZHU Y F, HE G Q, AN F, 2007. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain[J]. Geological Bulletin of China, 26(9): 1167-1177. (in Chinese with English abstract)

ГАРЬКОВЕЦ В Г, МУШКИН И В, ТИТОВА А П, et al., 1979. Основные черты металлогении Узбекистана[M]. Ташкент: Фан, 271 с. (in Russian)

ПОЦЕЛУЕВ А А, 2004. Геохимический спектр — генетическая информативность, поисково-оценочная значимость[C]//Поисковая геохимия: теоретические основы, технологии, результаты. Алматы: Print-S: 104-114. (in Russian)

ТУРЕСЕБЕКОВ А Х, ВАСИЛЕВСКИЙ Б Б, 2006. Геолого-генетическая модель формирования руд медно-порфировых месторождений Алмалыкского рудного района, Узбекистан[J]. Руды и металлы, (5): 67-76. (in Russian)

附中文参考文献

蔡宏渊, 李福春, 1995a.阿尔马雷克斑岩铜矿地质特征——矿床地质特征[J].矿产与地质, 9(2): 87-94.

蔡宏渊, 李福春, 1995b.阿尔马雷克斑岩铜矿地质特征——矿化富集条件及成矿模式[J].矿产与地质, 9(3): 180-184.

曹积飞, 翁凯, Movlanov Jahongir Jurabekovich, 等, 2023.乌兹别克斯坦中天山金铜成矿特征与找矿潜力评价[J].中国地质, 50(6): 1731-1744.

陈宣华, 杨农, 叶宝莹, 等, 2011.中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制[J].大地构造与成矿学, 35(3): 325-338.

崔敏利, 叶锦华, 何学洲, 2017.“一带一路”地区大型超大型金矿床地质背景与成矿作用[J].地质通报, 36(1): 154-167.

高俊, 朱明田, 王信水, 等, 2019.中亚成矿域斑岩大规模成矿特征: 大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制[J].地质学报, 93(1): 24-71.

江思宏, 聂凤军, 苏永江, 等, 2010.蒙古国额尔登特大型铜-钼矿床年代学与成因研究[J].地球学报, 31(3): 289-306.

刘春涌, 2005.乌兹别克斯坦阿尔马雷克大型斑岩铜矿床[J].中亚信息, (7): 31-35.

刘春涌, 王永江, 2007.初论中亚黑色岩系型金矿床的基本特征: 兼论新疆黑色岩系型金矿找矿方向[J].新疆地质, 25(1): 34-39.

刘德权, 陈毓川, 王登红, 等, 2003.土屋-延东铜钼矿田与成矿有关问题的讨论[J].矿床地质, 22(4): 334-344.

申萍, 潘鸿迪, SEITMURATOVA Eleonora, 2015.中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征[J].岩石学报, 31(2): 315-332.

申萍, 潘鸿迪, 李昌昊, 等, 2023.中亚成矿域锂矿床成矿规律及成矿模式[J].岩石学报, 39(11): 3185-3209.

宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 等, 2007.新疆包古图斑岩铜矿床地质特征[J].岩石学报, 23(8): 1981-1988.

涂光炽, 1999.初议中亚成矿域[J].地质科学, 34(4): 397-404.

王喜臣, 王训练, 王琳, 等, 2007.黑龙江多宝山超大型斑岩铜矿的成矿作用和后期改造[J].地质科学, 42(1): 124-133.

王学求, 李龙雪, 吴慧, 等, 2025.关键元素超常富集与战略资源效应[J].地学前缘, 32(1): 11-22.

王学求和谢学锦, 2000.金的勘查地球化学. 山东科技出版社.

肖文交, 宋东方, Brian F. WINDLEY, 等, 2019.中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J].中国科学: 地球科学, 49(10): 1512-1545.

薛春纪, 段士刚, 柴凤梅, 等, 2013.乌兹别克斯坦 Almalyk 斑岩铜矿田成矿时代及其地质意义[J].地学前缘, 20(2): 197-204.

薛春纪, 赵晓波, 赵云, 等, 2024.中亚成矿域西部早二叠世金、镍重大成矿事件[J].矿床地质, 43(4): 749-784.

张义, 聂凤军, 江思宏, 等, 2003.中蒙边境欧玉陶勒盖大型铜-金矿床的发现及对找矿勘查工作的启示[J].地质通报, 22(9): 708-712.

朱永峰，何国琦，安芳，2007.中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J].地质通报，26（9）：1167-1177.

《地质力学学报》预出版