

doi: 10.12097/gbc.2024.06.024

青海野马沟地区萤石矿地质特征及找矿远景

杨晓鸿, 张宇宏*, 李彦强, 王元昊, 邵继, 戴佳文

YANG Xiaohong, ZHANG Yuhong*, LI Yanqiang, WANG Yuanhao, SHAO Ji, DAI Jiawen

青海省核工业地质局, 青海 西宁 810001

Qinghai Nuclear Industry Geological Bureau, Xining 810001, Qinghai, China

摘要:【研究目的】萤石矿和铀矿因其不可替代性和战略价值,均属于国家战略矿种,对萤石矿成矿条件、成矿机制、成矿特征及找矿远景进行研究,对于寻找萤石矿,进一步探讨萤石矿与火山岩型铀矿成矿空间与成因上的潜力关联,具有重要的现实意义和理论需求。【研究方法】通过野外地质调查、岩矿鉴定及区域地质综合分析,对萤石矿矿床地质特征及其对火山岩型铀矿找矿启示进行研究。【研究结果】青海省都兰县海德乌拉火山岩型铀矿床勘查工作过程中,在矿区西侧野马沟地区发现了7条共生的具有工业价值的萤石矿体。区内萤石矿体连续性好,矿体走向长100~300 m,真厚度0.94~11.23 m, CaF_2 品位23.02%~48.27%。萤石表现为多期次活动特征,主要受北西向断裂系统控制。含矿岩性为隐爆角砾岩、构造角砾岩、石泡流纹岩、晶屑凝灰岩等,围岩蚀变主要有硅化、高岭土化、碳酸盐化、黄铁矿化等。【结论】研究认为,矿床类型为受构造控制的低温热液充填型脉状萤石矿床,与火山岩型铀矿成矿地质背景相似,推测萤石矿体深部及外围可能蕴藏丰富的铀矿资源,后续工作应注重区域萤石+铀综合找矿工作,通过系统的勘查有望实现找矿突破。

关键词: 萤石; 铀矿; 地质特征; 找矿潜力; 野马沟; 青海

创新点: 首次探讨了青海海德乌拉萤石矿与火山岩型铀矿综合找矿的思路。

中图分类号: P619.14; P619.21⁺5 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)04-0724-10

Yang X H, Zhang Y H, Li Y Q, Wang Y H, Shao J, Dai J W. Geological characteristics and prospecting potential of the fluorite deposit in the Yemagou area, Qinghai. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(4): 724-733

Abstract: [Objective] Fluorite and uranium deposits, due to their irreplaceability and strategic value, are both classified as national strategic mineral resources. Investigating the metallogenic conditions, mechanisms, characteristics, and prospecting potential of fluorite deposits holds significant practical and theoretical importance for locating fluorite resources and exploring the spatial and genetic associations between fluorite and volcanic-hosted uranium mineralization. [Methods] This study integrates field geological surveys, petrographic analysis, and regional geological synthesis to investigate the geological characteristics of fluorite deposits and their implications for prospecting volcanic-hosted uranium deposits. [Results] During the exploration of the Haidewula volcanic-hosted uranium deposit in Dulan County, Qinghai Province, seven economically viable fluorite ore bodies were discovered in the Yemagou area west of the mining zone. These fluorite ore bodies exhibit strong continuity, with strike lengths of 100~300 m, true thicknesses of 0.94~11.23 m, and CaF_2 grades ranging from 23.02% to 48.27%. Fluorite mineralization displays multi-stage activity, primarily controlled by NW-trending fault systems. Host rocks include crypto-explosive breccia, tectonic breccia, spherulitic rhyolite, and crystal tuff, with wall-rock alterations dominated by silicification, kaolinization, carbonatization, and pyritization. [Conclusions] The study

收稿日期: 2024-06-13; 修订日期: 2024-10-09

资助项目: 青海省科学技术厅重点研发项目(编号: 2025-SF-141)、青海省省级财政资金地勘项目《青海省都兰县海德乌拉地区矿产资源调查评价》(编号: 2024524016jc016)、中央组织部“西部之光”人才计划(编号: 青组字[2023]189号)、青海省“昆仑英才”计划(编号: 青人才字[2024]1号)、赵鹏大院士创新中心

作者简介: 杨晓鸿(1982-),男,高级工程师,从事地质调查、矿产勘查等。E-mail: 2629102058@qq.com

* 通信作者: 张宇宏(1989-),男,工程师,从事铀及多金属矿潜力评价及勘查。E-mail: 864754890@qq.com

concludes that the deposit is a structurally controlled low-temperature hydrothermal vein-type fluorite deposit, sharing a similar metallogenic setting with volcanic-hosted uranium deposits. It is inferred that the deep and peripheral zones of the fluorite ore bodies may host substantial uranium resources. Future efforts should focus on integrated fluorite-uranium prospecting in the region, with systematic exploration expected to achieve breakthroughs.

Key words: fluorite; uranium deposit; geological characteristics; prospecting Potential; Yemagou; Qinghai Province

Highlights: This study pioneers the exploration of integrated prospecting strategies linking the Haidewula fluorite deposit and volcanic-hosted uranium mineralization.

萤石除用于玻璃、水泥、冶金等传统行业外,还被广泛应用于新能源、风能、半导体等新兴领域,是中国重要的战略性非金属矿产之一(李敬等, 2020); 铀是保障国家安全的战略性资源和清洁能源,在国防科技和国民经济建设中具有双重地位。因此,加大萤石与铀矿找矿勘查力度是中国新时代推进生态环境保护的重要途径。

火山岩型铀矿多共伴生热液脉状萤石矿化,二者共同产于火山岩中断裂构造带内,如大兴安岭四子王旗铀矿(白彦等, 2019)、广东仁化棉花坑铀矿(张蕊等, 2023)、赣南上窖铀矿等(吴德海等, 2019),均报道火山岩型铀矿共生萤石矿体,因此,萤石矿化可作为铀矿直接找矿的标志。近年来,青海野马沟地区铀矿找矿取得重大进展,区内陆续发现海德乌拉、野马沟等铀矿,同时在该带开展的以萤石为主矿种的格尔木市大格勒矿区找矿取得了较好的效果,野外地质调查显示,萤石与铀矿化具有密切的空间-成因关联性。本次研究结合野马沟地区最新的地质找矿成果,对区内萤石矿成因及综合找矿潜力进行分析,以期对邻区萤石+铀矿综合找矿工作提供思路。

1 区域地质背景

昆仑造山带位于青藏高原北缘,大地构造位置处于古亚洲构造域与特提斯构造域叠合部位,是中央造山带的重要组成部分(莫宣学等, 2007; Song et al., 2018; 陈国超等, 2020; Bi et al., 2022)。昆仑造山带保留了新生代青藏高原隆起,柴达木板块和祁漫塔格板块之间的俯冲、碰撞、增生造山事件(李瑞保, 2012; Li et al., 2018),以及古特提斯洋闭合等构造演化信息(Wang et al., 2019; Tang et al., 2020)。以中—新生代阿尔金走滑断裂带为界,其可分为东、西昆仑造山带;以昆中、昆南缝合带为界,东昆仑造山带又可以分为北祁漫塔格带、中昆仑带、南昆仑带及巴颜

喀拉地体(图 1-a)。前人对东昆仑地区的研究主要包括旧大陆岩石圈的改造,岩浆的起源与演化,以及塑造该地区的俯冲和增生构造。东昆仑造山带主要发育北西西向、北西向及北东向断裂,带内地层发育较完整,主要出露中—新元古代—中生代地层,以晚三叠世八宝山组火山岩最发育,岩石类型复杂,主要为基性岩和酸性岩,具有双峰式火山岩的特征(雷勇亮, 2021)。区内岩浆活动频繁,侵入岩、火山岩均发育,以火山岩为主。主要出露华力西期、印支期侵入岩,侵入岩形态展布及长轴伸展与区域构造线方向一致,受构造控制明显。另外,区内脉岩较为发育,多呈脉状侵位于火山岩地层中。

2 矿区地质特征

2.1 地 层

野马沟地区位于南昆仑带,成矿带划属东昆仑 Ni-Au-Fe-Pb-Zn-Cu-Ag-W-Sn-Co-Bi-Hg-Mn-玉石-萤石-硅灰石-页岩气-重晶石-大理岩-石灰岩-石墨-硫铁矿成矿带(青海段),昆仑南部 Cu-Au-Co-Ni-V-Mn-Fe-页岩气-硫铁矿-石墨-大理岩-矿泉水成矿亚带,大地构造位置位于纳赤台蛇绿混杂岩带,区域上纳赤台蛇绿混杂岩带呈近东西向夹持于昆中断裂与昆南断裂之间,是晋宁、加里东期 2 次板块裂离及俯冲碰撞过程中形成的一个近东西向延伸的复合型俯冲增生杂岩带(赵生辉等, 2024)。区内主要出露晚三叠世八宝山组(T_3bb)及第四系(Q)。晚三叠世八宝山组(T_3bb)岩性组合由下到上分别为火山岩段(T_3bb^1)和碎屑岩段(T_3bb^2)。火山岩段主要分布于野马沟北部,分为上下两部分,下部为早期中基性火山岩夹少量薄层碎屑岩,出露岩性主要为灰绿色(杏仁状)玄武岩、紫褐色粗面岩、杂色沉火山角砾岩,薄层状紫红色粉砂岩夹层,岩层之间呈整合接触关系;上部晚期酸性火山岩角度不整合覆盖于下部早期中基性火山岩之上,出露岩性主要为流纹岩及

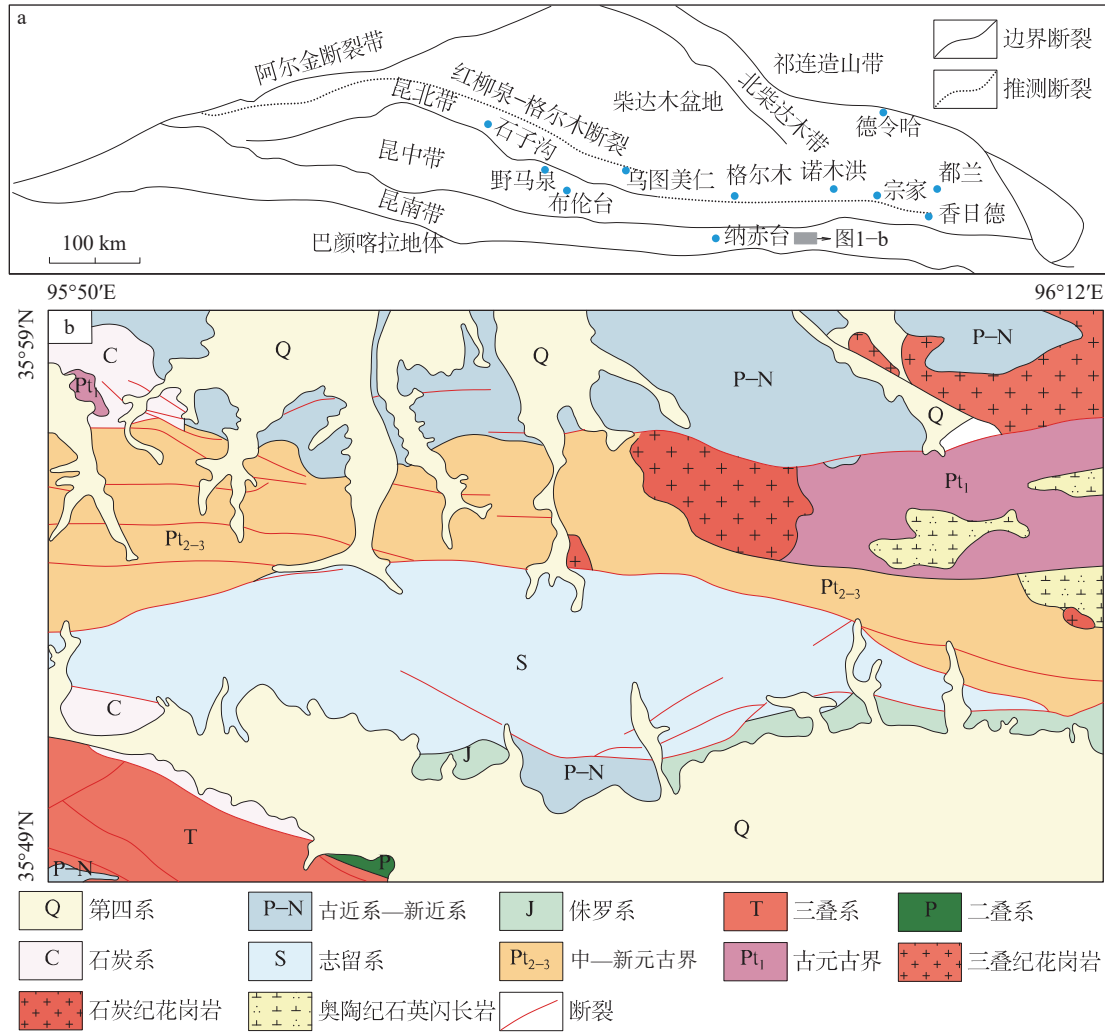


图 1 东昆仑造山带构造简图(a, 据 Dong et al., 2018 修改)和野马沟地区地质简图(b, 据雷勇亮等, 2021 修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the East Kunlun Orogenic Belt(a) and simplified geological map of the Yemagou area (b)

凝灰岩、火山角砾岩。碎屑岩段在野马沟南部大面积出露, 整体呈近东西向带状展布, 岩性主要为紫红色岩屑长石细砂岩, 局部夹薄层紫红色含砾砂岩及紫红色复成分砾岩, 地层产状变化较大。第四纪地层(Q)主要分布在南部, 以坡、冲洪积砂砾石、粘土等为主(图 2)。

2.2 构造

区内断裂构造发育, 主要产出近东西向、北东向、北西向 3 组断裂, 构造生成顺序: 北东向→北西向→近东西向, 区内局部发育规模较小的构造破碎带, 宽 2~8 m, 长度小于 300 m。其中, 北西向 F10 断裂发育时间最早, 萤石矿体主要受该断裂控制, 矿体分布于断裂破碎带及下盘一定空间内, 地表控制长 1.2 km, 向南被第四系覆盖, 倾向北东, 倾角 40°~

60°, 被后期近东西向断裂 F1 错断, 断距达 300 m。北东向断裂分布于东部, 长度 200~1000 m, 倾向北西, 倾角变化较大。近东西向断裂横穿于矿区中部, 长 2.3 km, 宽 10~20 m, 倾向南, 性质为正断层, 为区内最晚的断裂, 切割了北东向及北西向断层, 并且具有左旋的特征。

2.3 岩浆岩

野马沟岩浆岩以脉岩形式发育, 出露有花岗斑岩、辉绿岩、闪长玢岩、流纹斑岩等, 以花岗斑岩脉为主, 多呈近东西向、北西向展布, 长 100~2088 m, 宽 5~70 m, 与围岩呈侵入接触关系。野马沟东部的海德乌拉地区出露面积较小的花岗岩岩株, 以及区内大量发育的花岗斑岩脉岩说明矿区深部有中性岩体存在, 可为成矿提供物质来源。

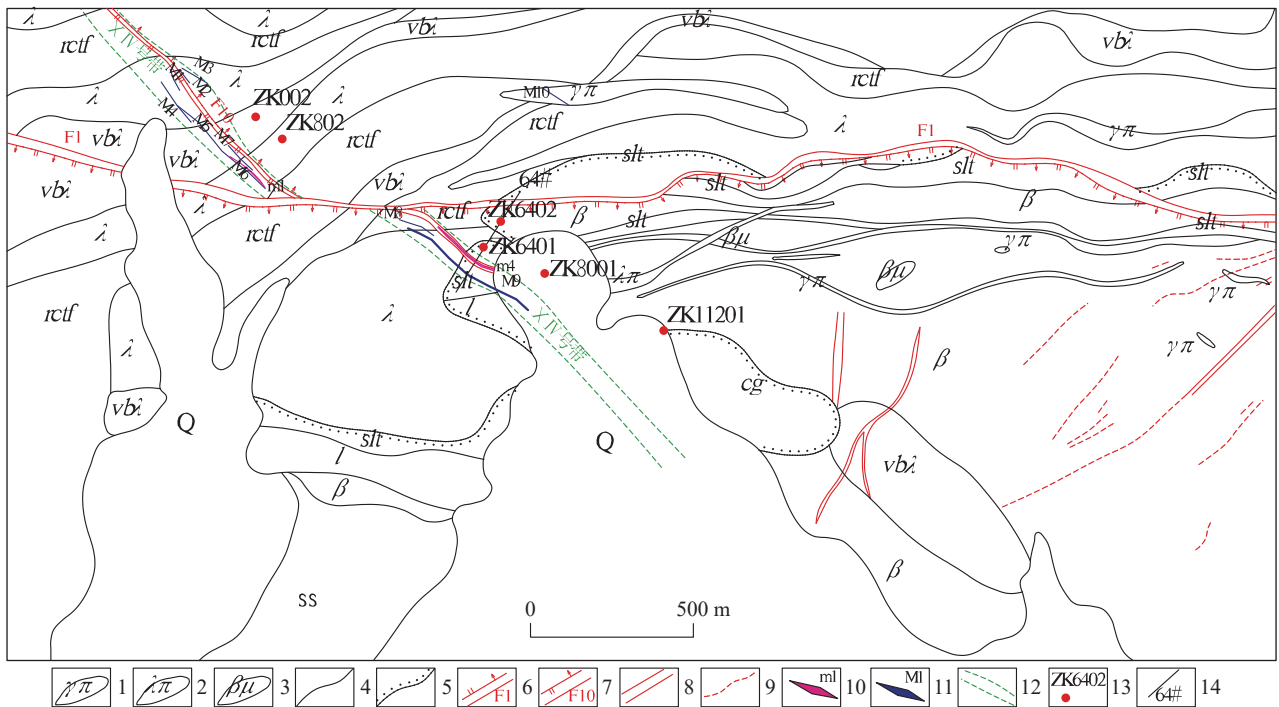


图2 野马沟地区地质图

Fig. 2 Geological map of the Yemagou area

1—花岗斑岩脉;2—流纹斑岩脉;3—辉绿岩脉;4—整合地质接触界线;5—角度不整合地质界线;6—正断层及编号;7—逆断层及编号;8—性质不明断层;9—裂隙带;10—萤石矿体及编号;11—铀矿体及编号;12—矿化带及编号;13—已施工钻孔及编号;14—勘探线及编号;Q—第四系砂砾石层;cg—八宝山组砂砾岩段砾岩;ss—八宝山组砂砾岩段砂岩;slt—八宝山组砂砾岩段粉砂岩;λ—八宝山组火山岩段流纹岩; rctf—八宝山组火山岩段流纹质晶屑凝灰岩;vbλ—八宝山组火山岩段含火山弹(豆状)流纹岩;τ—八宝山组火山岩段粗面岩; β—八宝山组火山岩段(杏仁状)玄武岩

2.4 矿体特征

在野马沟地区发现了7条具有工业价值的萤石矿体,并且矿体连续性好,萤石矿体走向上推测长100~300 m,真厚度0.94~11.23 m, CaF_2 品位为23.02%~48.27%,赋矿围岩为隐爆角砾岩、构造角砾岩、(豆状)流纹岩、晶屑凝灰岩等(表1),与其共生的14条铀矿体除M2外大部分为异体共生,区内铀矿体走向上长49~450 m,真厚度0.7~9.21 m, U 品位为0.0307%~0.7236%,含矿岩性为碎裂岩化流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩或构造角砾岩,主要具赤铁矿化和萤石化。m1矿体出露地表,走向北西,倾角70°,地表槽探TC02及ZK002、ZK802控制走向延伸约110 m,控制斜深200 m,厚11 m, CaF_2 品位为23.02%。矿体由萤石、石英夹破碎火山岩角砾组成,围岩为流纹质晶屑凝灰岩。m4矿体经钻孔控制,走向北西延伸300 m,真厚度4.82 m, CaF_2 品位为29.07%,主要发育紫黑色角砾状萤石,与铀矿化密切相关,围岩为构造角砾岩、含角砾晶屑岩屑凝灰岩。

其他矿体均为盲矿体或覆盖矿体,钻探查证显示,矿体在倾向上延伸未完全控制,在深部有分支复合现象,多呈透镜状、长脉状(图3)。矿石类型以石英-萤石型为主,少量为方解石-萤石型。

2.5 矿石特征

萤石呈浅紫色、紫色、深紫色,透明—半透明。以粗晶自形—半自形粒状结构、细晶半自形—他形粒状结构为主,微晶他形粒状结构和碎裂状结构次之。矿石构造主要有块状构造、角砾状构造、条带状构造、细脉状-网脉状构造(图4-a)。矿物组合较简单,矿石矿物(即萤石)含量23.02%~43.23%,脉石矿物以石英、方解石为主。各矿物特征如下:萤石颜色多为灰紫色、紫黑色、黄白色、浅绿色,一般呈自形、半自形和他形晶集合体(图4-b~d),常见穿插双晶,伴有弱硅化现象。矿石有多期交代富集的特征,第一期一般为紫色萤石,常呈脉状产出;第二期为紫黑色萤石,呈栉状、梳状构造,垂直于裂隙面生长;第三期在矿区较为少见,多呈黄绿色,初步认为由微量

表 1 野马沟地区萤石矿体特征

Table 1 Characteristics of fluorite ore bodies in Yemagou area

矿体 编号	控制工程	规模/m		产状/°		品位/%	赋矿岩性	热液蚀变组合
		长度	真厚度	倾向	倾角			
m1	21HTC02	110	11.23	50	70	23.02	流纹质晶屑凝灰岩	绿帘石化
m2	ZK802	100	1.09	50	50	39.27	隐爆角砾岩	硅化
m3	ZK002	100	2.25	40	58	31.76	构造角砾岩	高岭土化
m4	ZK6401、ZK8001	300	4.82	20~27	43~58	29.07	构造角砾岩、含角砾晶屑屑岩屑凝灰岩	碳酸盐化、绿泥石化
m5	ZK6402、ZK8001	300	1.28	27~32	58	43.23	流纹岩	硅化
m6	ZK6402	100	0.94	32	58	25.71	构造角砾岩	绿帘石化
m7	ZK11201	100	1.41	34	70	41.32	构造角砾岩	硅化、黄铁矿化

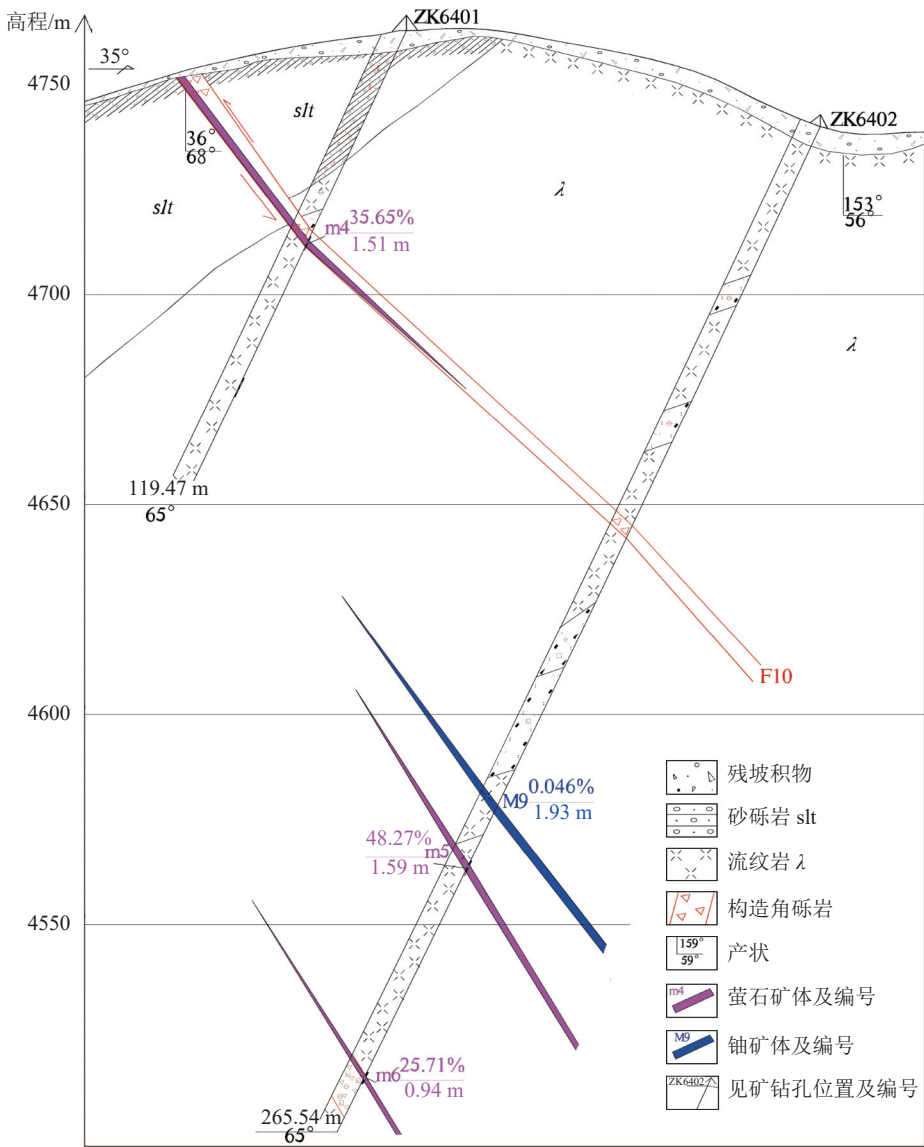


图 3 野马沟地区 64#线勘探线剖面图

Fig. 3 Section view of 64# line exploration line in Yemagou area

重金属元素污染所致(图4-d, e)。石英多为乳白色、灰白色, 少为灰黑色, 油质光泽。脉状石英常穿插粒状集合体中。方解石多呈灰白色—浅灰色, 常含较多铁锰质矿物而呈较杂的灰黑色—灰黄等颜色; 单晶呈菱形体, 解理发育; 多呈脉状和不规则团块状产出(图4-d)。

2.6 矿化蚀变特征

萤石矿体矿化蚀变较强, 分布范围受构造控制明显, 与矿化密切的围岩蚀变主要包括硅化、绿帘石化、高岭土化、碳酸盐化、黄铁矿化等。不同矿体热液蚀变组合略有差异(表1)。硅化: 灰白色、烟灰色, 呈细脉状、网脉状穿插到围岩中, 局部硅质增高, 岩石变得坚硬。蚀变带产状与控矿构造基本一致, 规模严格受构造控制。绿泥石化: 局限于构造蚀变带中, 呈脉状或带状以鳞片状集合体赋存于矿脉的两

侧, 尤其是边部表现最明显, 蚀变强烈者原岩面貌全非, 使蚀变带的边部岩石颜色变成墨绿色(图4-b, f), 主要分布在构造两侧, 尤其在构造面上较发育。绿帘石化: 深绿色, 集合体呈柱状、粒状, 为明显的玻璃光泽, 多呈团块状产出。高岭土化: 以白色粉末状、土状分布在矿体边缘及附近, 主要在地表常见。绢云母化: 绢云母化较为次要, 多分布于硅化带外侧, 与高岭土化相伴出现, 经热液交代作用形成, 呈鳞片状、稠密散染状与石英共生。碳酸盐化: 在构造蚀变带中, 以细脉形式顺裂隙面渗入, 其蚀变常贯穿于整个成矿过程中, 成矿前与成矿后的蚀变以裂隙充填脉为主, 矿物粒度较小; 成矿时作为重要的脉石矿物与萤石镶嵌产出, 晶体颗粒粗大, 局部可达到厘米级。黄铁矿化: 矿区较少见, 多与晚阶段碳酸盐脉共生, 呈团块状集合体或细小脉状产出(图4-h, n)。

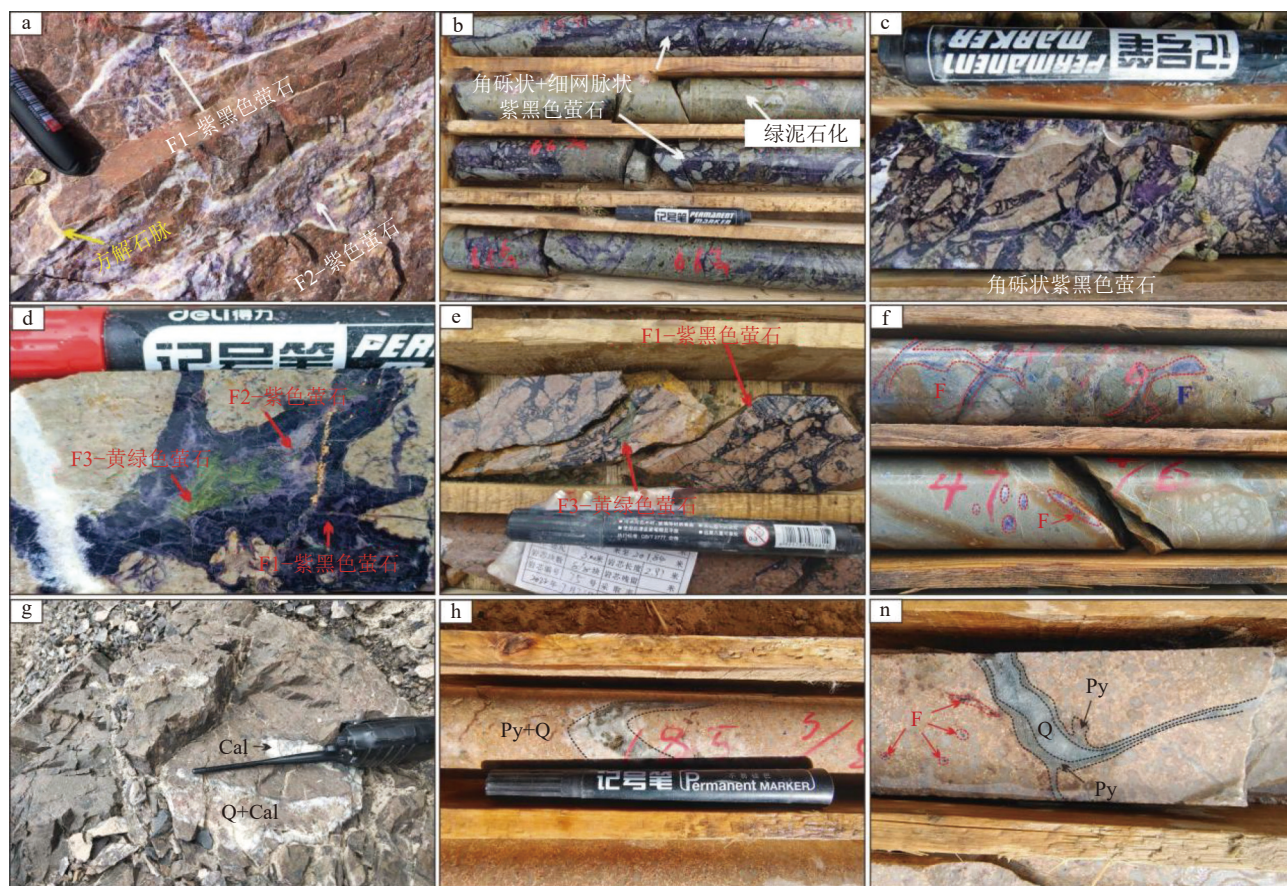


图4 野马沟地区萤石矿体特征

Fig. 4 Characteristics of fluorite ore body in Yemagou area

a—网脉状萤石边侧发育方解石脉; b—紫黑色网脉+角砾状萤石; c—角砾状萤石; d—多期次萤石; e—角砾状萤石裂隙中发育晚期黄绿色萤石; f—绿泥石化蚀变; g—围岩裂隙发育石英-方解石脉; h—石英脉中发育团块状立方体晶型黄铁矿; n—石英脉边侧脉状晚期立方体晶型黄铁矿化。Cal—方解石; Q—石英; Py—黄铁矿

3 矿床成因类型

前人研究表明,萤石矿的成因分类主要包括沉积改造型、热液充填型和伴生型三大类(陈毓川等, 2010; 王吉平等, 2015)。综合前文所述,总结野马沟地区萤石矿床地质特征如下。

(1)矿区位于古亚洲构造域与特提斯构造域叠合部位-东昆仑造山带,处在昆仑南部 Cu-Au-Co-Ni-V-Mn-Fe-萤石等成矿亚带,萤石矿体产出与区域火山岩地层密切相关,主要分布于隐爆角砾岩、构造角砾岩及碎裂岩化石泡流纹岩或晶屑凝灰岩地层中,形态产状受北西向次级构造及裂隙密集带控制,呈团块状、角砾状、细脉状展布,局部可见矿化呈网脉状分布。

(2)矿区内矿石矿物主要为萤石,脉石矿物为石英、方解石、黄铁矿等。萤石矿成矿活动具有多期次交代富集特征,可见早期矿脉被后期矿脉切穿的现象,其中第一期为紫色萤石,常呈脉状产出;第二期为紫黑色萤石,呈栉状、梳状构造,垂直于裂隙面生长;第三期为黄绿色不规则团块状萤石,为早期萤石包裹。围岩蚀变主要为一套低温热液蚀变矿化组合,包括硅化、高岭土化、绿泥石化等。

(3)区内与海德乌拉铀矿化密切共生的萤石包裹体均一温度为 183~287℃,成矿盐度为 7.17%~17.26% NaCleqv,显示中低温、低盐度特征,其来源为大气降水与岩浆期后热液混合(朱坤贺等, 2024),野马沟萤石矿体与海德乌拉矿区萤石产出特征相似,推测具有相似的流体性质。

(4)区内海德乌拉铀矿床沥青铀矿成矿时代为 234.6 ± 1.2 Ma,形成于晚三叠世。野马沟地区与海德乌拉矿区为同一矿带,均产出于东昆仑成矿带上基底穹状隆起的塌陷式火山盆地中,成矿作用可能与古特提斯构造域布青山-阿尼玛卿洋北向俯冲-碰撞后的伸展环境有关(朱坤贺等, 2022)。

内蒙古四子王旗满提、贵勒斯太热液脉状充填型萤石矿,矿体产出主要受不同方向的断裂控制,部分地段萤石矿与地层相切(白彦等, 2019)。野马沟地区萤石矿体与铀矿化关系密切,在火山岩裂隙中呈脉状、块状、角砾状产出,矿体形态严格受断裂构造控制。较简单的矿物组合、低温蚀变矿物组合等显示出典型热液成因的特征。结合区域已知成矿温

度,认为野马沟地区萤石矿床的成因类型为受构造控制的低温热液充填型脉状矿床。

4 找矿标志及找矿远景分析

4.1 找矿标志

基于野外地质工作及矿床地质特征,野马沟地区萤石矿成因类型定为热液型,虽然成矿与岩性无成矿专属性,但硅化、碳酸盐化、高岭土化、黄铁矿化等蚀变组合与萤石矿体关系密切,是野外的直接找矿标志。区内北西向构造为主要控矿构造,萤石矿体分布于北西向断裂破碎带及下盘一定空间内,是重要的找矿标志。萤石与铀矿化在空间产出上密切相关,二者可互为找矿标志。区域 F 高值异常区是萤石矿的间接找矿标志之一。

4.2 找矿远景分析

研究区大地构造位于东昆仑南坡俯冲碰撞杂岩带(IV-9-1),主要出露晚三叠世八宝山组火山岩,构造以北西向为主,控制着区内萤石及铀矿体的展布,为主要的导矿构造,热液蚀变发育,成矿潜力较大。该带内已经发现了找矿效果明显的格尔木市大格勒等矿区。区内发现的 7 条萤石矿体,真厚度为 0.94~11.23 m, CaF_2 品位为 23.02%~48.27%,矿体受断裂构造控制明显,而控矿构造 F10 在矿区内长达 1.2 km,东南部第四系覆盖区仍有较大的延伸空间,矿区未开展系统的工程验证,其在走向及倾向上的延伸不明,均未封闭,仍具有较大找矿空间。总体研究程度较低,具备较大的萤石找矿潜力。

5 对火山岩型铀矿找矿的启示

区内萤石矿体与铀矿体同时富集于切割火山沉积岩及部分岩体的断裂裂隙,分布于基性-酸性火山岩裂隙及断层破碎带中,同一矿体围岩为构造角砾岩、流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩等。因此,萤石矿床成矿过程及成矿模式对区内火山岩型铀矿找矿工作具有重要的指导意义。

5.1 火山岩型铀矿成矿特征

火山岩型铀矿指在时间-空间-成因上与火山岩、次火山岩密切相关的铀矿床,往往产出于特定的火山机构。该类矿床在世界范围内广泛产出,集中分布在环太平洋成矿带、西伯利亚阿尔卑斯喜马拉雅一带。中国火山岩型铀矿主要分布在东南沿海一带,近年来在华北地台沽源红山子铀成矿带、东昆仑

成矿带均有所突破(朱坤贺等, 2022)。火山岩型铀矿在空间和成因上与萤石矿化存在密切的关联性, 往往在铀矿的顶部伴生萤石矿化。如位于赣杭构造带的火山岩型热液铀矿床(相山铀矿田邹家山铀矿床)和位于南岭构造带的花岗岩型铀矿床(长江铀矿区棉花坑铀矿床)都广泛发育紫黑色—紫色萤石化和浅绿色—白色/无色透明萤石化蚀变(朱鹏飞等, 2018; 张蕊等, 2023)。海德乌拉铀矿体主要赋存于火山岩的岩性界面、隐爆角砾岩及其裂隙中, 成矿主阶段(Ⅱ)矿物组合包括沥青铀矿+赤铁矿+紫黑色萤石+粉红色方解石±石英, 紫黑色萤石多呈粒状、团块状分布于铀矿石裂隙内部, 并在矿石中可见到萤石脉(朱坤贺等, 2024)。

5.2 火山岩型铀矿成矿影响因素

区内铀矿化分布于基性—酸性火山岩裂隙及断层破碎带中, 同一矿体围岩为构造角砾岩、流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩, 无成矿专属性。

构造控矿条件是研究区最重要的成矿条件之一, 构造蚀变带是主要的控矿构造, 特别是构造蚀变带复合部位与裂隙为成矿流体运移、迁移、富集提供了良好的通道和沉积场所, 北西西向区域性断裂是研究区重要的导矿构造, 也是能对成矿起作用的相关因素。北西向次级断裂及北东向小断裂创造了成矿流体储存的环境, 构成容矿构造。受昆中断裂带影响, 区域上北西—北东向断裂构造控制着晚三叠世岩浆热液及晚期次火山岩浆热液活动, 也控制着区内富F的气水热液流体的上升。

区内成矿物质主要为岩浆热液, 晚三叠世岩浆侵入活动形成了野马沟广泛分布的花岗斑岩脉岩, 脉岩的出露及野马沟东部海德乌拉地区零星出露的几处花岗岩岩株, 充分说明在矿区深部存在规模较大的中酸性岩体, 岩浆的侵入活动可为成矿提供成矿物质及热液, 富含氟及挥发分的岩浆热液通过构造通道运移富集成矿, 伴随着多次的侵入和交代, 形成了品位较高的富矿体(李永利, 2020; 何虎虎等, 2023)。

5.3 综合找矿启示

萤石在热液铀矿床中起着极其重要的作用, 萤石与铀成矿的关系极其密切, 尤其是紫黑色萤石, 通常作为重要的找矿标志之一(朱鹏飞等, 2018)。野马沟铀矿是继该区域海德乌拉铀矿床后发现的又一个典型的火山岩型铀矿床, 已圈定铀矿化带长 1.85 km, 宽 90~170 m, 走向北西, 倾向北东。控制铀矿

(化)体 30 多条, U 平均品位 0.04%~0.16%。矿体均赋存在流纹岩中, 主要蚀变有紫黑色萤石化、赤铁矿化、碳酸盐化、硅化等, 其中紫黑色萤石与铀矿化密切相关, 二者产出呈正相关关系, 特别是构造中萤石化发育地段铀含量较高, 为最直接的找矿标志之一(李永利, 2020)。研究表明, 富铀和氟的低温、低盐度流体在形成萤石矿后, 流体中原先与氟结合在一起的铀酰络氟离子在运移到花岗岩与围岩接触带附近时, 因物理-化学条件改变, 或流体发生脱气作用, 导致铀在合适的容矿空间发生沉淀而成矿(张云海等, 2019)。野马沟中一大型萤石矿中, 萤石与铀矿为共(伴)生矿体, 二者成因上、空间特征上关系密切。在火山岩型铀矿的顶部往往伴生有萤石矿化(钟福军等, 2015; 李长华等, 2018; 白彦等, 2019)。铀矿体多发育紫黑色萤石矿化, 其作为有效的铀矿找矿标志, 近年来取得了理想的找矿效果(白彦等, 2019)。萤石与铀矿均为中低温共生的矿物组合, 在条件有利的地段单独或共同富集成矿, 如 m4 矿体铀矿与萤石矿一体共生产出。区域上开展的 1:20 万自然重砂测量工作, 重砂样品中含萤石一般为 3~8 粒/30 kg, 最高可达 0.0043 g/30 kg, 重砂异常涵盖了野马沟地区圈定的大部分放射性异常(图 5)。对重砂异常展布特征进行分析, 野马沟一带圈定了面积达 38 km² 的萤石异常, 套合区域的 U 元素异常, 二者呈现东西走向, 在找矿勘查中可互为找矿的指示元素。野马沟萤石矿床东侧区域, 已经圈定了一批相似的 U 异常带, 铀与萤石矿床综合找矿潜力巨大, 但后期开展的 1:5 万、1:2.5 万地球化学测量均未分析 F 元素, 未圈定相应的异常, 使萤石找矿工作一直止步不前。因此, 实际找矿工作要注重评价脉状萤石矿床外围及深部铀矿化潜力, 注重综合找矿工作。

6 结 语

青海野马沟地区近年针对萤石与铀矿实现重要找矿进展, 区内具备优越的铀+萤石成矿地质条件, 同时与东侧海德乌拉铀矿空间上为一个整体, 找矿潜力巨大。本文基于青海野马沟地区萤石矿地质特征, 总结找矿标志, 分析找矿远景。火山岩型铀矿成矿地质背景与萤石矿化密切相关, 萤石矿体深部及外围可能蕴藏丰富的铀矿资源, 通过系统的勘查有望实现找矿突破。

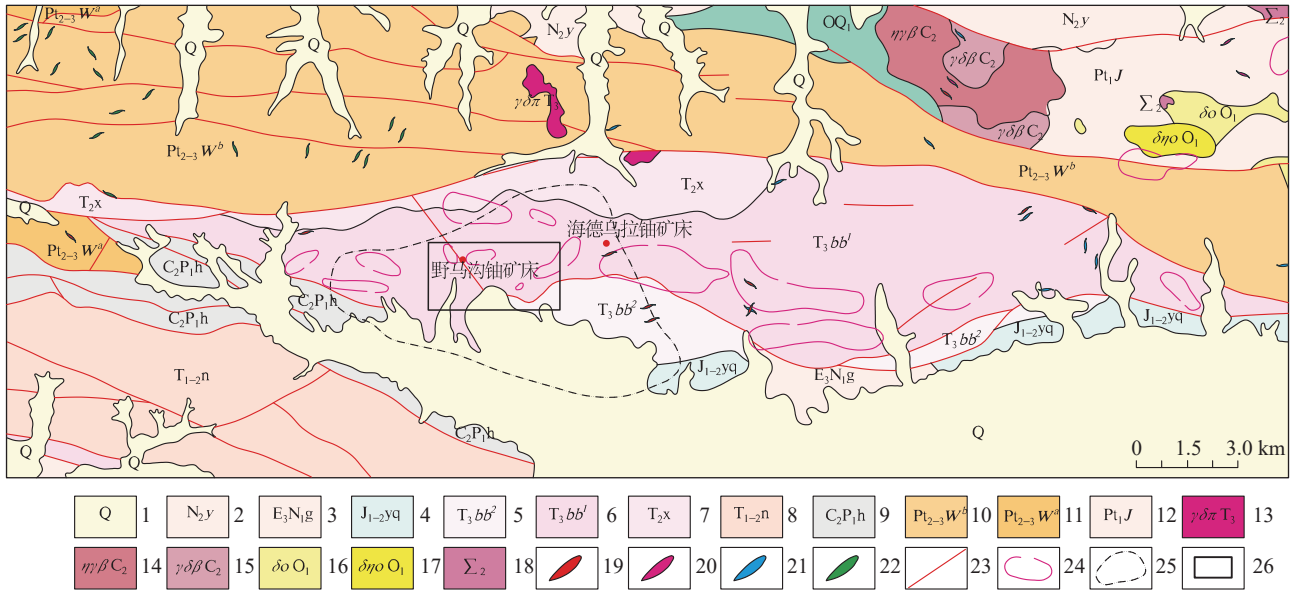


图 5 野马沟地区综合异常图(据何虎虎等, 2023 修改)

Fig. 5 Comprehensive anomaly map of the Yemagou area

1—第四系冲洪积物; 2—上新统油沙山组; 3—古近系-新近系干柴沟组; 4—中-上侏罗统羊曲组; 5—上三叠统八宝山组砂砾岩段; 6—上三叠统八宝山组火山段; 7—中三叠统希里可特组; 8—中-上三叠统闹仓堡组; 9—上石炭统-下二叠统浩特洛哇组; 10—中-新元古界万宝沟群碳酸盐岩组; 11—中-新元古界万宝沟群变火山岩组; 12—金水口岩群; 13—晚三叠世花岗闪长斑岩; 14—晚石炭世黑云母二长花岗岩; 15—晚三叠世黑云母英闪岩; 16—早奥陶世石英二长闪岩; 17—晚石炭世黑云母花岗闪岩; 18—元古宙超基岩; 19—酸性岩脉; 20—中酸性岩脉; 21—中性岩脉; 22—基性岩脉; 23—断裂构造; 24—1 : 5 万放射性 U 异常; 25—1 : 20 万重砂萤石异常; 26—研究区范围

致谢:感谢审稿专家提出的宝贵意见, 感谢项目组成员野外给予的帮助。

References

- Bai Y, Wang Z G, Wang G H, et al. 2019. Metallogenic model of fluorite deposits in Siziwangqi, Inner Mongolia—Enlightenment for prospecting of volcanic uranium deposits[J]. *Metal Mine*, (4): 121–128(in Chinese with English abstract).
- Bi H Z, Whitney D L, Song S G, et al. 2022. HP–UHP eclogites in the East Kunlun Orogen, China: *P–T* evidence for asymmetric suturing of the Proto–Tethys Ocean[J]. *Gondwana Research*, 104: 199–214.
- Cao J C. 1994. Geological characteristics and mineralization of fluorite deposits related to granite in China[J]. *Geology and Exploration*, (5): 1–6+13(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Wang D H. 2010. Classification scheme of important minerals prediction type[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–222(in Chinese with English abstract).
- Chen G H, Pei X Z, Li R B, et al. 2020. Late Paleozoic–Early Mesozoic tectonic magmatic evolution and mineralization in the eastern part of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 33–48(in Chinese with English abstract).
- David H E. 2013. The Geological and tectonic evolution of the transantarctic mountains: A review[J]. Geological Society, London, Special Publications, 381: 7–35.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth–Science Reviews*, 186: 32–261.
- He H H, Zhao S H, He X Z, et al. 2023. Application of radioactive geophysical prospecting in uranium exploration in Yemagou area, Qinghai Geological Prospecting Review, 38(3): 375–381(in Chinese with English abstract).
- Isozaki. 2019. Contrasting Two Types of Orogen in Permo - Triassic Japan: Accretionary Versus Collisional[J]. *Island Arc*, 6(1): 2–24.
- Lei Y L, Dai J W, et al. 2021. Genesis and significance of Hyde Ula aluminium type rhyolite in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(7): 1964–1982(in Chinese with English abstract).
- Li L, Sun F Y, Li B L, et al. 2018. Geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of No. I complex from the Shitoukengde Ni–Cu sulfide deposit in the Eastern Kunlun Orogen, western China: Implications for the magmatic source, geodynamic setting and genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(1): 106–126.
- Li C H, Wu Y Q, Wang S C, et al. 2018. Metallogenic conditions and prospect prediction of volcanic uranium deposits in the central and southern members of the Daxing'an Mountains[J]. *Uranium Geology*, 42(6): 329–336(in Chinese with English abstract).
- Li J, Zhang S T, Shang P Q, et al. 2020. Analysis of the current situation and strategic value of fluorite resources[J]. *Mineral Protection and Utilization*, 6: 62–68(in Chinese with English abstract).
- Li R B. 2012. Study on Late Paleozoic–Early Mesozoic orogeny in the East Kunlun Orogenic Belt (Eastern Section)[D]. Chang 'an University

- Doctoral dissertation: 1–185(in Chinese with English abstract).
- Li Y H. 2020. Characteristics and prospecting signs of uranium ore body in Yemagou in Qinghai Province[J]. Qinghai Land Economic Strategy, 13(1): 59–61(in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Luo Z H, Deng J F, et al. 2007. Granite and crustal growth in the East Kunlun orogenic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 403–414(in Chinese with English abstract).
- Song S G, Bi H Z, Qi S S, et al. 2018. HP–UHP metamorphic belt in the East Kunlun Orogen: Final closure of the Proto–Tethys Ocean and formation of the Pan–North–China Continent[J]. Journal of Petrology, 59(11): 2043–2060.
- Tang Y J, Liu B, Li M J, et al. 2020. Origin of Devonian mafic magmatism in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibetan Plateau: Implications for continental exhumation[J]. Geological Magazine, 157(8): 1265–1280.
- Wang J P, Shang P Q, Xiong X X. 2015. Metallogenic law of fluorite deposits in China[J]. Geology in China, 42(1): 18–32(in Chinese with English abstract).
- Wang Y C, Sun F Y. 2019. The Middle–Late Silurian granitoids in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China: Petrogenesis and implications for tectonic evolution[J]. Arabian Journal of Geosciences, 12(18): 568.
- Wu D H, Pan J Y, Xia F, et al. 2019. Geochemical characteristics of fluorite rare earth elements in Shangjiao uranium deposits in southern Gannan and their significance in source areas[J]. Rare Earths, 40(2): 14–27(in Chinese with English abstract).
- Xu X, Liu C F, Liu W, et al. 2020. Geochronology and geochemistry of the Late Devonian–Early Carboniferous volcanic rocks in Aksu River area, Western end of the East Kunlun Orogen[J]. Geological Journal, 55(4): 3554.
- Zhang H Y, Yang Y, Xing Y J, et al. 2019. Study on the relationship between uranium mineralization and fluorite and polymetallic minerals in the Weijing area of Siziwang Banner in Inner Mongolia[J]. Progress Report on Nuclear Science and Technology in China, 6: 200–205(in Chinese with English abstract).
- Zhang R, Wu D H, Xia F, et al. 2023. Fluorite mineralogy, geochemical characteristics and geological significance of uranium deposits in Renhua Cotton Pit, Guangdong Province[J]. Rare Earths, 44(2): 93–109(in Chinese with English abstract).
- Zhao S H et al. 2024. Uranium mine survey report in Haide Ula area, Dulan County, Qinghai Province (2021–2023)[R]. Xining: Qinghai Provincial Bureau of Nuclear Industry Geology(in Chinese with English abstract).
- Zhong F J, Pan J Y, Xia F, et al. 2015. Construction and application of geological model for prospecting of uranium prospecting in volcanic rocks in China[J]. Journal of East China University of Technology: Natural Science Edition, 38(2): 135–143(in Chinese with English abstract).
- Zhu K H, Dai J W, Wang K X, et al. 2022. Chronological characteristics and genesis of bituminous uranium deposits in the Hideula uranium deposit in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Earth Science, 47(8): 2940–2950(in Chinese with English abstract).
- Zhu K H, Wang K X, Liu X D, et al. 2024. Study on the characteristics of metallogenic fluids of Hyde Ula uranium deposits in the East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 98(2): 467–480(in Chinese with English abstract).
- Zhu P F, Cai Y Q, Guo Q Y, et al. 2018. Analysis of metallogenic geological characteristics and resource potential of uranium ore resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 25(03): 148–158(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白彦, 王智纲, 王根厚, 等. 2019. 内蒙古四子王旗萤石矿床成矿模式——兼论对火山岩型铀矿找矿的启示[J]. 金属矿山, (04): 121–128.
- 陈毓川, 王登红. 2010. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1–222.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 2020. 东昆仑造山带东段晚古生代—早中生代构造岩浆演化与成矿作用[J]. 地学前缘, 27(4): 33–48.
- 何虎虎, 赵生辉, 何学昭, 等. 2023. 放射性物探在青海野马沟地区铀矿勘查中的应用[J]. 地质找矿论丛, 38(3): 375–381.
- 雷勇亮, 戴佳文. 2021. 东昆仑造山带海德乌拉铝质 A 型流纹岩成因及其意义[J]. 岩石学报, 36(7): 1964–1982.
- 李长华, 吴燕清, 王世成, 等. 2018. 大兴安岭中南段火山岩型铀矿成矿条件及远景预测[J]. 铀矿地质, 42(6): 329–336.
- 李敬, 张寿庭, 商朋强, 等. 2020. 萤石资源现状及战略性价值分析[J]. 矿产保护与利用, 6: 62–68.
- 李瑞保. 2012. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代造山作用研究[D]. 长安大学博士学位论文: 1–185.
- 李永和. 2020. 青海省野马沟铀矿体特征及找矿标志[J]. 青海国土经略, 13(1): 59–61.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403–414.
- 王吉平, 商朋强, 熊先孝. 2015. 中国萤石矿床成矿规律[J]. 中国地质, 42(1): 18–32.
- 吴德海, 潘家永, 夏菲, 等. 2019. 赣南上窰铀矿床萤石稀土元素地球化学特征及其源区意义[J]. 稀土, 40(2): 14–27.
- 张海云, 杨勇, 邢亚杰, 等. 2019. 内蒙古四子王旗乌境地区铀成矿与萤石及多金属矿之间的关系研究[J]. 中国核科学技术进展报告(第六卷), 6: 200–205.
- 张蕊, 吴德海, 夏菲, 等. 2023. 广东仁化棉花坑铀矿床萤石矿物学、地球化学特征及其地质意义[J]. 稀土, 44(2): 93–109.
- 赵生辉等. 2024. 青海省都兰县海德乌拉地区铀矿普查报告(2021–2023 年度)[R]. 西宁: 青海省核工业地质局.
- 钟福军, 潘家永, 夏菲, 等. 2015. 我国火山岩型铀矿找矿预测地质模型的构建与应用[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 38(2): 135–143.
- 朱坤贺, 戴佳文, 王凯兴, 等. 2022. 东昆仑造山带海德乌拉铀矿床沥青铀矿年代学特征及成因[J]. 地球科学, 47(8): 2940–2950.
- 朱坤贺, 王凯兴, 刘晓东, 等. 2024. 东昆仑造山带海德乌拉铀矿床成矿流体特征研究[J]. 地质学报, 98(2): 467–480.
- 朱鹏飞, 蔡煜琦, 郭庆银, 等. 2018. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(03): 148–158.