

DOI: 10.12401/j.nwg.2023155

# 基于机器学习和全岩成分识别东昆仑祁漫塔格 斑岩-矽卡岩矿床成矿岩体和贫矿岩体

刘嘉情<sup>1,2,3,4</sup>, 钟世华<sup>1,2,3,4,\*</sup>, 李三忠<sup>1,2,3,4</sup>, 丰成友<sup>5</sup>, 戴黎明<sup>1,2,3,4</sup>, 索艳慧<sup>1,2,3,4</sup>,  
郭广慧<sup>1,2,3,4</sup>, 牛警徽<sup>3</sup>, 薛梓萌<sup>1,2,3,4</sup>, 黄宇<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国海洋大学, 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266100; 5. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 东昆仑祁漫塔格成矿带是中国西北地区重要的铜钼铁铅锌多金属成矿带, 发育卡尔却卡、野马泉、维宝、乌兰乌珠儿等许多与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩矿床。随着新一轮找矿突破战略行动的开展, 进一步加强对祁漫塔格成矿带花岗岩成矿潜力的研究, 已成为推动该地区金属矿产储量增长的重要突破口。为此, 笔者在系统收集祁漫塔格成矿带典型斑岩-矽卡岩多金属矿床成矿岩体和贫矿岩体(即非成矿岩体)的全岩主量和微量元素数据基础上, 选取 28 种常见的全岩地球化学特征, 借助机器学习算法——随机森林, 开展机器学习模型训练, 建立能够识别该地区斑岩-矽卡岩多金属矿床成矿岩体和非成矿岩体的新方法。根据模型评价指标, 笔者训练得到的随机森林分类模型准确率为 0.90, 证明该方法能够有效识别成矿岩体和非成矿岩体。该研究为祁漫塔格成矿带斑岩-矽卡岩多金属矿床的找矿勘查提供了新思路, 将极大地提高找矿效率、降低找矿经济和人力成本, 从而更好的服务新一轮找矿突破战略行动。相关机器学习代码已上传至 GitHub, 地址为 <https://github.com/ShihuaZhong/2023-Qimantagh-RF-whole-rock-classifier>。

**关键词:** 成矿潜力; 全岩主微量元素; 随机森林; 机器学习; 祁漫塔格; 东昆仑

中图分类号: P62; P588.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0041-16

## Identification of Mineralized and Barren Magmatic Rocks for the Pophryry-Skarn Deposits from the Qimantagh, East Kunlun: Based on Machine Learning and Whole-Rock Compositions

LIU Jiaqing<sup>1,2,3,4</sup>, ZHONG Shihua<sup>1,2,3,4,\*</sup>, LI Sanzhong<sup>1,2,3,4</sup>, FENG Chengyou<sup>5</sup>, DAI Liming<sup>1,2,3,4</sup>, SUO Yanhui<sup>1,2,3,4</sup>,  
GUO Guanghui<sup>1,2,3,4</sup>, NIU Jinghui<sup>3</sup>, XUE Zimeng<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Yu<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China; 3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, Shandong, China; 5. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China)

收稿日期: 2023-07-25; 修回日期: 2023-09-11; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42203066)和山东省自然科学基金项目(ZR2020QD027)联合资助。

作者简介: 刘嘉情(1999-), 女, 硕士研究生, 岩石学、矿物学、矿床学专业。E-mail: [liujiaqing11292022@163.com](mailto:liujiaqing11292022@163.com)。

\* 通讯作者: 钟世华(1989-), 男, 博士, 副教授, 从事地质大数据与成矿研究。E-mail: [zhongshihua@ouc.edu.cn](mailto:zhongshihua@ouc.edu.cn)。

**Abstract:** The Qimantagh Orogenic Belt in the East Kunlun is an important Cu–Mo–Fe–Pb–Zn polymetallic mineralization belt in the northwest of China, and many porphyry–skarn deposits that are genetically related to granitoids are founded, such as Kaerqueka, Yemaquan, Weibao, and Wulanwuzhuer. With the development of a new round of strategic action to find mineral breakthroughs, further strengthening the study of granite mineralization potential in the Qimantagh Orogenic Belt has become an important breakthrough to promote the growth of metal mineral reserves in the region. In this paper, based on the systematic collection of whole–rock major and trace element data of mineralized and barren magmatic rocks of typical porphyry–skarn polymetallic deposits in the Qimantagh Orogenic Belt, 28 common whole-rock geochemical features are selected, and the machine learning algorithm (Random Forest) is used for the training of the machine learning model to establish a machine learning model capable of identifying the mineralized and barren magmatic rocks of porphyry–skarn polymetallic deposits in the region. A new method is developed to identify the mineralized and barren magmatic rocks in the porphyry–skarn polymetallic deposits in this area. According to the model evaluation metric, the accuracy of the Random Forest classification model trained in this paper is 0.90, which proves that the method can effectively recognize mineralized and barren magmatic rocks. This study provides a new idea for the prospecting and exploration of porphyry–skarn polymetallic deposits in the Qimantagh Orogenic Belt, which will greatly improve the efficiency of prospecting, reduce the economic and labor costs of prospecting, and thus better serve the new round of strategic action of prospecting and breakthrough. The machine learning code has been uploaded to GitHub at <https://github.com/ShihuaZhong/2023-Qimantagh-RF-whole-rock-classifier>.

**Keywords:** ore–forming potential; whole–rock major and trace elements; random forest; machine learning; Qimantagh; East Kunlun

祁漫塔格成矿带作为东昆仑造山带的重要组成部分,东起乌图美仁乡一带,西至阿尔金断裂,北与柴达木盆地相邻,西南与库木库里盆地相接,东西长约为 550 km(丰成友等, 2010; 钟世华等, 2018; Zhong et al., 2021a; 张向飞等, 2023)。区内岩浆活动强烈,持续时间长,岩性从超基性岩到酸性岩均有出露,但以花岗岩类岩体为主(Mao et al., 2014; Zhong et al., 2018, 2021a; 田龙等, 2023)。长期以来,对祁漫塔格成矿带花岗岩类的研究是人们关注的焦点,这是由于花岗岩类作为陆壳的最重要组成部分,花岗岩类的研究对认识该地区陆壳生长方式、查明青藏高原地质演化规律均具有重要意义(Yu et al., 2017a; Chen et al., 2018)。此外,更为重要的是,祁漫塔格成矿带是中国西北地区著名的铜铅铁铅锌多金属成矿带,发育了卡尔却卡、野马泉、维宝、鸭子沟等一大批斑岩–矽卡岩多金属矿床(李世金等, 2008; 丰成友等, 2011; 高永宝等, 2012; 钟世华等, 2017),而这些矿床的形成与该地区酸性岩浆活动密切相关(Zhong et al., 2018, 2021a)。因此,深入开展花岗岩成因研究、查明花岗岩成矿潜力,已经成为实现该地区金属矿产储量增长的重要突破口。

大量的研究显示,形成斑岩–矽卡岩矿床的中酸性成矿岩体与贫矿岩体(又称为非成矿岩体)具有显著不同的地球化学特征(Rezeau et al., 2019; Rezeau et al., 2020; Pizarro et al., 2020)。研究发现,能够成矿的中酸性岩体通常具有高氧逸度和富水的特征(Richards, 2011; Sun et al., 2013; Rezeau et al., 2020),这是由于高氧逸度、富水的岩浆可以确保深部金属不会过早达到饱和,而以硫酸盐相形式被迁移至浅部成矿系统(Ballard et al., 2002)。基于对成矿岩体的这些认识,大量用于识别斑岩系统成矿岩浆的地球化学勘查指标被提出,如基于全岩成分的 Sr、Y、La、Yb 以及 Sr/Y 和 La/Yb 等(Richards, 2011; Chiaradia et al., 2012)。这些地球化学指标的提出和建立,极大丰富了全球斑岩系统成矿岩浆的识别方法与找矿勘查理论,推动了该类型矿床的成因研究(Hedenquist et al., 1998; Du et al., 2020)。然而,仅基于少数岩浆特征及对应的元素含量或比值建立的地球化学勘查方法也容易受到热液蚀变、结晶分异、岩浆同化混染等其他因素干扰,从而导致误判。例如,普朗斑岩铜矿的成矿岩浆由于岩浆混合和同化混染,使岩浆氧逸度发生了剧烈震荡(Leng et al., 2018)。此外,随着测试手段和分析仪器

的持续进步以及人类生产和科研活动的不断实践, 斑岩系统成矿岩体的数据数量正在以可见的速度增加。然而, 如何利用如此丰富“海量”的地球化学数据获取更多的成矿信息, 传统的地质数据处理方法已显得捉襟见肘(Petrelli et al., 2016; Nathwani et al., 2022)。因此, 急需采用新的技术方法, 通过充分利用地质大数据, 查明成矿岩浆特征, 建立识别成矿岩浆新方法, 指导找矿勘查和深化矿床成因研究。

因此, 在系统收集祁漫塔格成矿带典型斑岩-矽卡岩多金属矿床的成矿岩体和非成矿岩体的全岩主量和微量元素数据基础上, 选取 28 种常见的全岩地球化学特征, 借助最常用的机器学习算法之一——随机森林, 开展机器学习模型训练, 建立能够识别成矿岩体(斑岩-矽卡岩多金属矿床)和非成矿岩体的新方法。研究结果可以为该地区斑岩-矽卡岩多金属矿床的找矿勘查提供有效方法, 从而更好的服务新一轮找矿突破战略行动。

## 1 区域背景

东昆仑造山带是一条位于青藏高原北部的巨型构造岩浆岩带, 其东西长约为 1 500 km。造山带北起柴达木盆地南缘, 南至巴颜喀拉-松潘甘孜板块, 东起秦岭-大别造山带, 西至阿尔金造山带(许志琴等, 2012; 潘彤, 2017), 并大致以乌图美仁乡为界分为东西两段。东昆仑造山带经历了前寒武纪、早古生代、晚古生代—早中生代和晚中生代—新生代旋回 4 个造山旋回(莫宣学等, 2007; 董连慧等, 2015; 田龙等 2023)。这些旋回记录了原特提斯洋、古特提斯洋以及新特提斯洋的形成、扩张与消亡过程(Zhong et al., 2017)。除了晚中生代—新生代旋回外, 其他造山旋回都伴随着大量的岩浆活动, 其中以晚古生代和早中生代(特别是三叠纪)的岩浆活动最为激烈(莫宣学等, 2007)。

祁漫塔格成矿带主体位于东昆仑西段, 东西长约为 550 km, 横跨青海和新疆, 总体呈西宽东窄的楔形, 北西向延伸展布(许长坤等, 2012; Zhong et al., 2017)。祁漫塔格地区出露地层时代跨度大、分布零散, 且大都经历了不同程度的后期改造(景宝盛等, 2013; 潘彤, 2017)。已有研究证实, 中元古界长城系小庙组和狼牙山组、奥陶系滩间山群以及石炭系缙敖苏组和大干沟组与区域斑岩-矽卡岩矿化关系密切, 是主要的赋

矿地层(丰成友等, 2010, 2011; 高永宝, 2013)。长城系小庙组主要为片岩和大理岩等, 与区域钨锡矿化关系密切(高永宝等, 2011; 许长坤等, 2012); 蓟县系狼牙山组主要由变质碎屑岩和碳酸盐岩组成, 夹少量火山岩(丰成友等, 2011; 赵一鸣等, 2013); 滩间山群又被称为祁漫塔格群, 为一套海相火山-沉积组合(张晓飞等, 2012; 庄玉军等, 2023); 大干沟组和缙敖苏组均是一套主要由灰岩组成的碎屑岩-碳酸盐建造(丰成友等, 2010, 2012)。祁漫塔格成矿带区域构造活动十分剧烈, NW 向、NNW 向、压扭性断裂组成了区域主体构造骨架(舒晓峰等, 2012), 不同级别和序次的断裂构造交汇聚合位置, 往往是成岩成矿的有利部位, 而 NE 向和 SN 向断裂大多为成矿后构造(钟世华等, 2017)。研究区岩浆岩分布十分广泛, 时代上从前寒武纪到早中生代均有分布, 但以志留纪—泥盆纪(435~370 Ma)和中晚三叠世—早侏罗世花岗岩(245~196 Ma)最为发育(丰成友等, 2012; Zhong et al., 2021b), 主要形成于早古生代旋回和晚生代—早中生代旋回的(后)碰撞阶段。

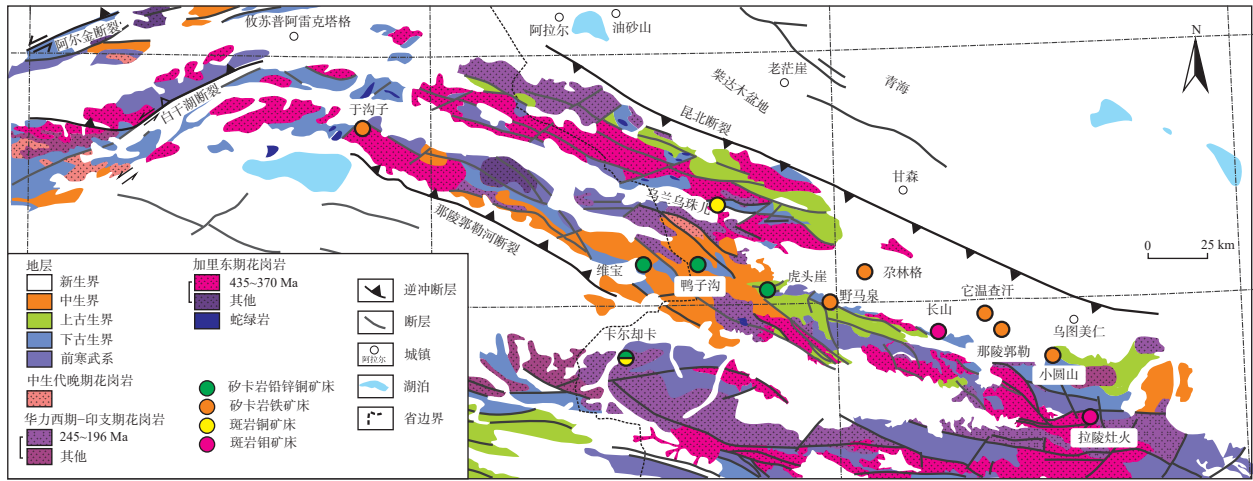
祁漫塔格成矿带是近几年查明的有较大找矿远景的斑岩-矽卡岩型铜钼铁铅锌多金属成矿带(毛景文等, 2012), 分布有 20 余处大中型金属矿床, 矿化类型多样(图 1), 成矿元素丰富, 代表性矿床有维宝、尕林格、虎头崖、野马泉、卡尔却卡、四角羊、肯德可克等(丰成友等, 2011; Yu et al., 2017b; 高永宝等, 2018; Zhong et al., 2021b)。来自辉钼矿 Re-Os 和热液白云母 Ar-Ar 等的年龄结果证实, 这些矿床的形成大都与三叠纪花岗岩类有关(李世金等, 2008; 丰成友等, 2011; 田承盛等, 2013; 于森等, 2015; Xia et al., 2015)。近些年, 随着勘查和研究工作的深入, 在祁漫塔格许多铜钼铁铅锌多金属矿区发现了含矿化的泥盆纪花岗岩体, 证实在该地区存在两期斑岩-矽卡岩多金属矿化(Zhong et al., 2021a, 2021b)。除这些与花岗岩类有关的矿床外, 与基性-超基性岩有关的铜镍硫化物矿床是该地区另一种重要的矿床类型, 以夏日哈木超大型铜镍硫化物矿床为代表(杨兴科等, 2016; 许骏等, 2021)。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

文中共收集来自东昆仑祁漫塔格地区的 582 条成矿岩体与非成矿岩体的主微量元素数据, 包括 246





图中显示了文中涉及的矿床的类型和位置；其中，沙丘、玛兴大阪、哈西雅图矿床位于图幅右侧，未在图中显示出来

图1 祁漫塔格成矿带地质图(据 Zhong et al., 2021b 修改)

Fig. 1 Geological map of the Qimantagh metallogenic belt

条成矿岩体的全岩数据和 336 条非成矿岩体的全岩数据(表 1)。其中, 246 条成矿岩体数据来自以下 4 种类型矿床: 斑岩钼矿(17 条)、斑岩铜矿(23 条)、矽卡岩铜铅锌矿床(87 条)、矽卡岩铁矿床(119 条)。虽然矽卡岩钨锡矿床和矽卡岩铅锌矿床在祁漫塔格成矿带也十分发育, 但是文中没有使用来自这些矿床类型的成矿岩体数据。这是由于已有研究表明, 来自这些矿床的成矿岩体特征与文中使用的 4 种矿床类型的成矿岩体特征具有显著差异。例如, 斑岩钼矿、斑岩铜矿、矽卡岩铜铅锌矿床、矽卡岩铁矿床的成矿岩体通常具有较高的氧逸度特征, 而矽卡岩钨锡矿床的成矿岩体氧逸度则较低。

对于每一条全岩数据, 选择 28 种特征用于机器学习模型训练, 其中包括 7 种主量元素(Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K)、14 种稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)、5 种微量元素(Ba、Rb、Nb、Sr、Y)以及由以上微量元素派生的 2 个比值(Sr/Y、La/Yb)。选择以上元素特征用于机器学习模型训练是由于已有的研究表明这些元素在成矿岩体与非成矿岩体类型判别上具有重要意义(Nathwani et al., 2022)。

文中汇编了成矿岩体和非成矿岩体全岩地球化学数据库中各个特征的统计学规律(表 2, 图 2)。尽管成矿岩体和非成矿岩体的许多特征的分布范围存在重叠, 但是有一些特征也表现出显著的差异, 如 Nb、Sm、Eu、Gd、Dy、Y 等(表 2, 图 2)。成矿岩体 Nb 含量为  $3.1 \times 10^{-6} \sim 59.0 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $13.9 \times 10^{-6}$ ; 非成矿

岩体 Nb 含量为  $0.5 \times 10^{-6} \sim 89.7 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $16.6 \times 10^{-6}$ 。成矿岩体 Sm 含量为  $1.5 \times 10^{-6} \sim 14.8 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $4.9 \times 10^{-6}$ ; 非成矿岩体 Sm 含量为  $1.4 \times 10^{-6} \sim 22.6 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $7.2 \times 10^{-6}$ 。来自成矿岩体 Eu 含量为  $0 \sim 2.3 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $0.8 \times 10^{-6}$ ; 非成矿岩体 Eu 含量为  $0.1 \times 10^{-6} \sim 6.8 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $1.2 \times 10^{-6}$ 。成矿岩体 Gd 含量为  $1.2 \times 10^{-6} \sim 14.3 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $4.4 \times 10^{-6}$ ; 非成矿岩体 Gd 含量为  $1.3 \times 10^{-6} \sim 20.6 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $6.6 \times 10^{-6}$ 。成矿岩体 Dy 含量为  $1.1 \times 10^{-6} \sim 23.0 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $4.0 \times 10^{-6}$ ; 非成矿岩体 Dy 含量为  $0.7 \times 10^{-6} \sim 24.5 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $6.1 \times 10^{-6}$ 。成矿岩体 Y 含量为  $6.8 \times 10^{-6} \sim 164.8 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $24.2 \times 10^{-6}$ ; 非成矿岩体 Y 含量为  $3.7 \times 10^{-6} \sim 157.0 \times 10^{-6}$ , 其平均值远大于成矿岩体, 为  $32.4 \times 10^{-6}$ 。

## 2.2 机器学习模型

文中采用随机森林(Random Forest, 简称 RF)对成矿岩体和非成矿岩体进行识别。采用随机森林的原因包括: ①该算法训练过程简单, 已被广泛用于解决地质学中的分类问题(李苍柏等, 2020)。②预研究也证实, 随机森林也是常见的机器学习算法中对识别成矿岩体和非成矿岩体全岩地球化学数据最有效的方法。随机森林算法是由 Breiman 提出的一种强大的集合学习方法, 是一种结合了“Bagging”思想与随机特征选取技术的有监督机器学习算法(图 3)。算法的基本思想是使用有放回的抽样方法(Bootstrap)从原始训练样本中有放回地重复随机抽取 N 组训练样本, 建立一个具有 N 棵决策树的随机森林模型(Breiman,

表1 文中使用的成矿岩体和非成矿岩体数据来源表

Tab. 1 Data sources of mineralized and barren magmatic rocks used in this study

编号	位置	矿床类型	岩体类型	数据量	数据来源
1	卡尔却卡	矽卡岩铜铅锌矿床	成矿岩体	19	高永宝, 2013; 张雨莲等, 2014; 姚磊, 2015; Zhong et al., 2021b
		斑岩铜矿	成矿岩体	17	李碧乐等, 2010; 李积清等, 2016; Zhong et al., 2018
2	虎头崖	矽卡岩铜铅锌矿床	成矿岩体	55	李侃等, 2015; 时超等, 2017; 姚磊, 2015; 张晓飞等, 2016; 张爱奎等, 2012, 2016; Zhong et al., 2021b
3	鸭子沟	矽卡岩铜铅锌矿床	成矿岩体	8	舒树兰等, 2014
4	维宝	矽卡岩铜铅锌矿床	成矿岩体	5	Zhong et al., 2018
			非成矿岩体	3	Zhong et al., 2018
5	拉陵灶火	斑岩钼矿	成矿岩体	10	陈静等, 2013; 钟世华, 2018
			非成矿岩体	5	Chen et al., 2018
6	小灶火	斑岩钼矿	成矿岩体	4	陈静等, 2018
7	长山	斑岩钼矿	成矿岩体	3	Zhong et al., 2018
8	乌兰乌珠儿	斑岩铜矿	成矿岩体	6	谈生祥等, 2011
9	野马泉	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	68	高永宝等, 2012; 张杰等, 2018
10	尕林格	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	48	薛宁等, 2009; 李玉春等, 2013a; 张雷, 2013
11	那陵郭勒河	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	11	李玉春等, 2013b
12	沙丘	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	2	杨涛等, 2017
13	它温查汗	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	10	吴祥珂等, 2011
			非成矿岩体	5	Yan et al., 2019
14	玛兴大阪	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	4	高永宝, 2013
			非成矿岩体	5	南卡俄吾等, 2014
15	于沟子	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	4	南卡俄吾等, 2015
			非成矿岩体	5	孔会磊等, 2015, 2016
16	哈西雅图	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	5	张明玉等, 2018
			非成矿岩体	5	刘彬等, 2013
17	小圆山	矽卡岩铁矿床	成矿岩体	10	李国臣等, 2012; 高永宝, 2013
18	肯德可克	-	非成矿岩体	5	徐博, 2020
19	冰沟	-	非成矿岩体	6	李瑶, 2017
20	白干湖	-	非成矿岩体	14	陈邦学等, 2019
21	阿格腾	-	非成矿岩体	21	郝杰等, 2003
22	阿确墩	-	非成矿岩体	22	陆济璞等, 2005
23	其木来克	-	非成矿岩体	9	陆济璞等, 2006
24	阿牙克	-	非成矿岩体	3	崔美慧等, 2011
25	伊涅克阿干	-	非成矿岩体	9	王秉璋, 2012; 马文等, 2013
26	希热芒崖	-	非成矿岩体	9	王秉璋, 2012
27	鸭子泉	-	非成矿岩体	5	姚磊, 2015
28	祁漫塔格	-	非成矿岩体	124	Wang et al., 2014
29	巴音郭勒	-	非成矿岩体	8	
30	哈得尔干	-	非成矿岩体	23	
31	扎日玛日那	-	非成矿岩体	5	
32	玉苏普阿勒克	-	非成矿岩体	12	

表2 文中汇编的成矿岩体和非成矿岩体的全岩地球化学特征表

Tab. 2 Whole-rock geochemical characterization of mineralized and barren magmatic rocks compiled in this study

元素特征	成矿岩体		非成矿岩体	
	含量	平均值	含量	平均值
SiO <sub>2</sub>	49.6~78.1	70.2	47.5~78.0	68.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.5~18.3	13.3	2.6~18.4	13.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5~12.6	3.2	0.9~13.4	4.1
MgO	0.1~1.1	0.6	0.1~1.1	0.6
CaO	0.3~10.0	2.5	0.2~13.4	2.7
Na <sub>2</sub> O	0.7~4.9	3.0	0.7~6.2	3.0
K <sub>2</sub> O	0.7~7.7	4.0	0.3~7.8	3.9
Ba	36.0~2420.0	502.5	13.0~2086.0	588.0
Rb	21.0~580.0	193.7	6.5~566.0	166.3
Nb	3.1~59.0	13.9	0.5~89.7	16.6
La	6.1~148.0	34.2	5.1~170.0	39.8
Ce	20.9~196.0	66.2	11.1~362.0	80.0
Pr	1.6~33.9	7.5	1.5~41.8	9.7
Nd	6.0~108.0	26.4	5.9~148.0	35.5
Sm	1.5~14.8	4.9	1.4~22.6	7.2
Eu	0~2.3	0.8	0.1~6.8	1.2
Gd	1.2~14.3	4.4	1.3~20.6	6.6
Tb	0.2~3.2	0.7	0.2~3.5	1.1
Dy	1.1~23.0	4.0	0.7~24.5	6.1
Ho	0.2~5.1	0.8	0.2~5.2	1.2
Er	0.7~15.2	2.4	0.5~15.0	3.4
Tm	0.1~2.6	0.4	0.1~2.3	0.5
Yb	0.7~17.6	2.6	0.5~17.0	3.3
Lu	0.1~2.9	0.4	0.1~2.4	0.5
Sr	12.4~743.0	206.5	1.1~927.0	226.7
Y	6.8~164.8	24.2	3.7~157.0	32.4
Sr/Y	0.1~64.9	11.1	0.1~75.8	11.0
La/Yb	0.9~46.5	15.6	0.9~75.2	15.3

注：主量元素含量为%；微量元素含量为10<sup>-6</sup>。

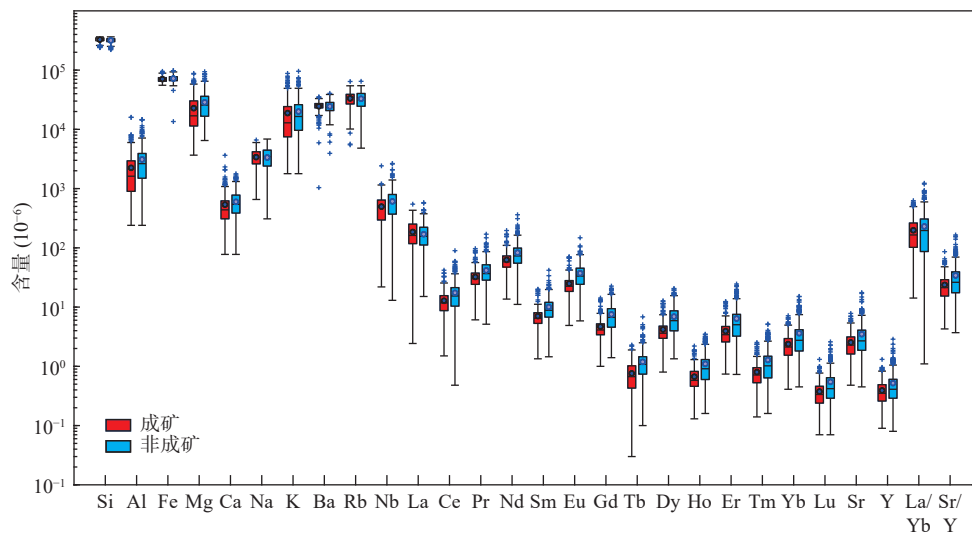


图2 文中使用的成矿岩体和非成矿岩体的28种全岩特征箱状图

Fig. 2 Box illustrations of the 28 features of the mineralized and barren magmatic rocks used in this study

2001)。具体来说,该算法首先利用 bootstrap 抽样从原始训练集抽取  $k$  个样本,每个样本的样本容量都与原始训练集一样。然后,对这  $k$  个样本分别建立  $k$  个决策树模型,从而得到  $k$  种分类的结果。最后,根据  $k$  种分类结果再对每个记录结果进行投票表决决定其最终分类。大量的理论和实证研究都表明随机森林模型具有很高的预测准确率,对异常值和噪声具有很好的容忍度,且不容易出现过拟合,被广泛应用于成矿预测(李慧, 2022)、岩体类型识别(王子烨, 2020)等。随机森林模型具有以下常用的超参数:分类器的个数  $n\_estimators$ (即树的数量)、决策树选择的最大特征数目  $max\_features$ 、决策树的最大深度  $max\_depth$ (温博文等, 2018),不同的超参数组合对模型分类性能具有不同的影响(刘晓生等, 2019; 袁颖等, 2019)。为获得模型最优的分类性能,笔者使用网格搜索(grid search)对模型进行参数优化。对于成矿岩体与非成矿岩体数据库当  $n\_estimators$  值为 91,  $max\_features$  值为 14,  $max\_depth$  值为 11 时,模型获得最高准确率。

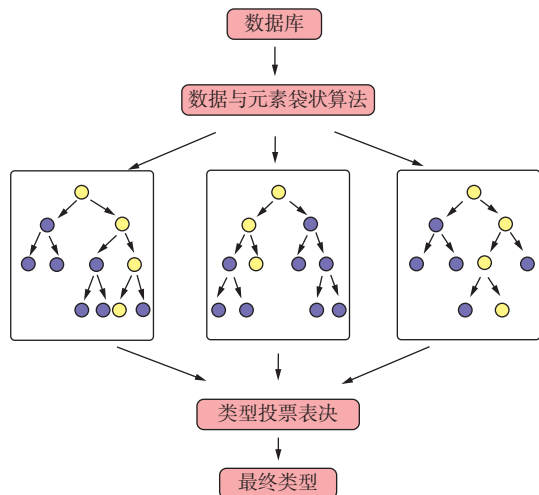


图3 随机森林模型原理图

Fig. 3 Random Forest model diagram

### 2.3 模型训练与评价

在使用随机森林模型对数据库进行训练前,首先将数据库中 582 条数据以 8 : 2 的比例随机划分为训练集与测试集。且为消除量纲和数量级的影响,同时降低模型训练时长,笔者使用 Standard Scale 数据标准化方法对数据库中的数据进行特征缩放,使数据库中的数据变换到均值为 0、标准差为 1 的范围。此外,考虑到成矿岩体与非成矿岩体的数据数量具有一定的不平衡现象(比例约为 3 : 2),而数据不平衡会影响模型训练结果(Kotsiantis et al., 2006; Chawla, 2009)。因

此,文中采用过采样方法(SMOTE)使数据库达到平衡后再进行机器学习训练。此外,笔者模型训练过程中对训练集数据还进行了五倍交叉验证,目的是减少由于单一训练集可能产生的高偏差。使用参数优化后的随机森林模型对测试集中的数据进行判别,获得随机森林模型的最终分类表现得分。

在文中采用准确率与受试者特征曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, 简称 ROC 曲线)综合评价随机森林模型的性能。准确率表示预测结果中被预测是正确的比率。受试者特征曲线是对机器学习模型的性能进行评价的指标,是以假阳性率(False Positive Rate, 简称 FPR)为横坐标,真阳性率(True Positive Rate, 简称 TPR)为纵坐标,在  $[0, 1]$  范围内画出曲线。其中,假阳性率是预测的正例中实际上为负的,在所有负例中的占比;真阳性率是预测的正例中实际上也为正的,在所有正例中的占比。假阳性率越低、真阳性率越高,模型分类性能越好。AUC 值(Area Under Curve, 曲线下的面积)指前文提到的 ROC 曲线与坐标轴围成的面积。AUC 值能够量化反映分类模型的性能,取值范围为  $[0, 1]$ ,并且越接近 1 时,模型分类效果越好(潘北斗等, 2022)。当 AUC 值在  $0.5 \sim 0.7$  时,分类模型具有较低的准确性;AUC 值在  $0.7 \sim 0.9$  时,分类模型有一定的准确性;AUC 值在  $0.9$  以上时,分类模型有较高的准确性(Lv et al., 2011)。

$$\text{准确率} = \frac{TP+TN}{TP+FN+FP+FN} \quad (1)$$

$$\text{真阳性率} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$\text{假阳性率} = \frac{FP}{TN+FP} \quad (3)$$

式中:  $TP$ (True Positive), 即实际为正例且被划分为正例的样本数;  $FN$ (False Negative), 即实际为正例但被划分为负例的样本数;  $FP$ (False Positive), 即实际为负例但被划分为正例的样本数;  $TN$ (True Negative), 即实际为负例且被划分为负例的样本数。

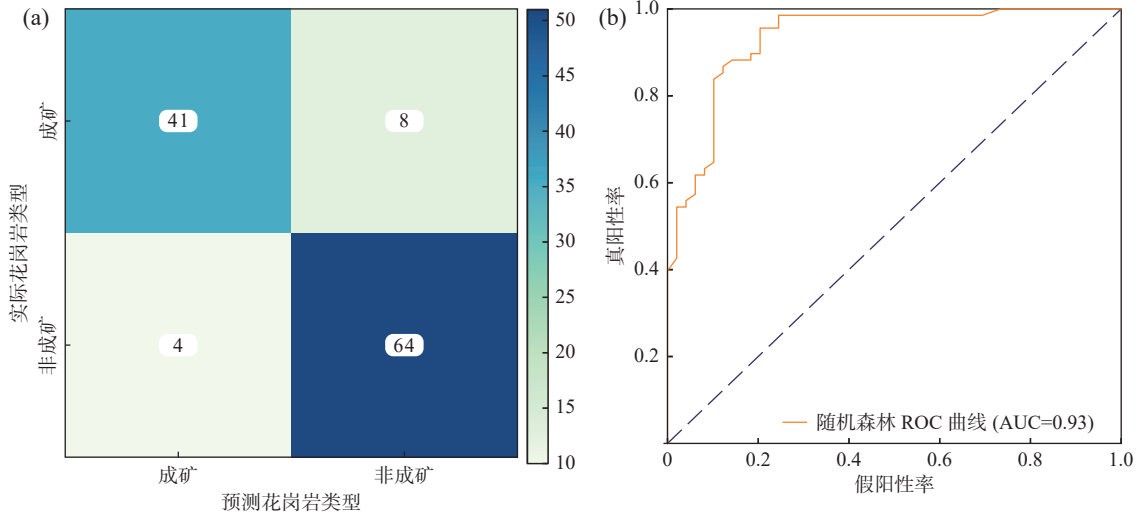
## 3 研究结果

使用训练好的随机森林模型对测试集中成矿岩体与非成矿岩体进行预测,其结果见表 3 和图 4。总的来说,模型分类准确率较高,为 0.90,证明文中训练得到的随机森林模型能够有效地识别祁漫塔格成矿带成矿岩体和非成矿岩体。此外,文中训练得到的

表3 随机森林模型分类结果表

Tab. 3 Classification results of Random Forest model

模型	岩体类型	总体准确率	准确率	AUC
随机森林	成矿岩体	0.90	0.84	0.93
	非成矿岩体		0.94	



a. 混淆矩阵图; b. 受试者特征曲线

图4 训练的随机森林模型对测试集的评价图

Fig. 4 Classification result for the test set using the trained of Random Forest model

## 4 讨论

### 4.1 机器学习模型表现

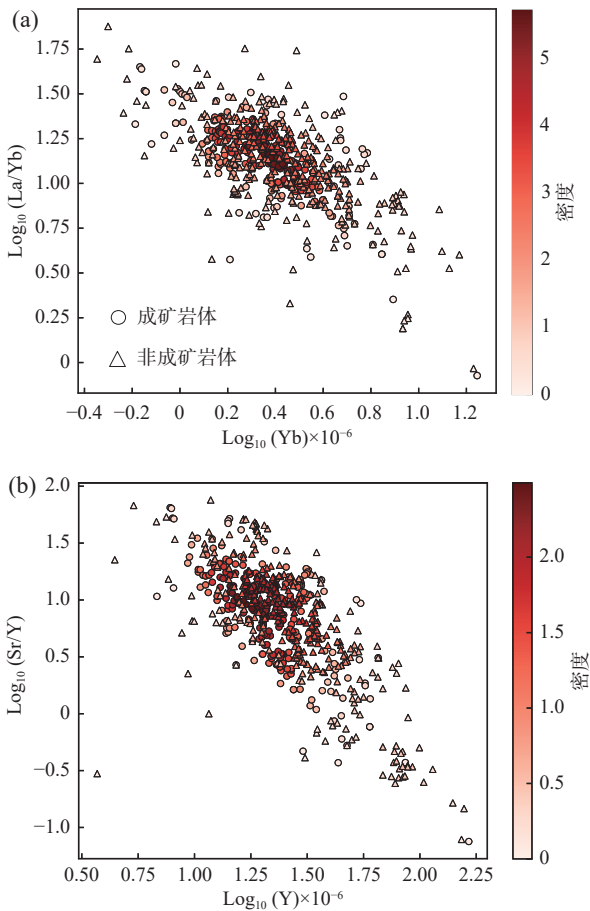
机器学习作为人工智能的一个子集,其目标是利用计算机模拟或实现人类的学习行为,以获取新的知识或技能(Jordan et al., 2015; Bergen et al., 2019)。与传统方法相比,机器学习优势显著:①机器学习更加注重从数据中提取新知识,因此机器学习模型的训练和使用对先验知识的依赖大幅降低(Lin et al., 2020; Wang et al., 2021)。②自动获得输入-输出之间的规律,几乎不需人工干预,这样即节省了大量的专家手工标定时间,同时避免了人为因素所引入的误差(Petrelli et al., 2016)。③在保证准确性的前提下,大大提高了分析效率,因此在处理、分析海量数据时更具(Zhong et al., 2023)优势。④与传统分类方法仅能关注少数几个特征不同(如根据二元图解),用于机器学习模型训练的特征数量、种类不受限,因此能够更充分的挖掘数据背后的复杂关系(Zhong et al., 2023)。近些年,针对斑岩-矽卡岩矿床成矿岩体的研究呈爆

模型在识别成矿岩体时的准确率为 0.84,而在识别非成矿岩体时的准确率则高达 0.94(表 3)。这表明,该模型在预测成矿岩体时的表现略低于在预测非成矿岩体时的表现。根据 ROC 曲线,也可以获得类似的结果。AUC 值为 0.93,大于 0.90,说明模型在预测成矿岩体和非成矿岩体时的准确率高。

发性增长,积累了丰富的地球化学资料,这为从大数据角度开展成矿岩浆识别方法研究提供了可能。最近,一些学者也在该领域做出了一些有益尝试。Nathwani 等(2022)利用汇编的全球斑岩铜矿床成矿岩体和成矿岩体的全岩主量和微量元素数据,提出了基于全岩成分的成矿岩浆机器学习识别方法;Zhou 等(2022)和 Zou 等(2022)则通过汇编全球斑岩铜矿床成矿岩体和成矿岩体的锆石微量元素数据,建立了基于锆石成分数据区分岩体成矿能力的机器学习分类器;利用秘鲁 Quellaveco 斑岩铜矿区的锆石阴极发光(CL)图像,Nathwani 等(2023)提出了基于锆石形态特征识别成矿岩体的机器学习方法。这些研究开创了基于人工智能技术开展岩体成矿潜力研究的先河,为建立斑岩铜矿床地球化学找矿勘查新方法、从更深层次窥探斑岩铜矿床成因机制提供了新的思路。文中用于机器学习训练的成矿岩体数据来自多种矿床类型:除斑岩铜矿床外,还包含斑岩钼矿、斑岩铜矿、矽卡岩铜铅锌矿床和矽卡岩铁矿床。文中获得的模型准确率与 AUC 值,2 个模型性能评价指标均不低于 0.90,表明机器学习模型不但对识别斑岩铜矿床成



矿岩体有效,对识别其他斑岩-矽卡岩矿床的成矿岩体也同样表现优异。为了进一步显示机器学习方法在区分成矿岩体和非成矿岩体时的优势,图5展示了传统研究广泛使用的全岩 Yb-La/Yb 和 Y-Sr/Y 图解在祁漫塔格地区的表现情况。可以看出,来自祁漫塔格地区的成矿岩体数据和非成矿岩体数据在2个图解上高度重合,显示出至少对于祁漫塔格地区斑岩-矽卡岩多金属矿床,传统的地球化学方法难以有效区分它们的成矿岩体和非成矿岩体。



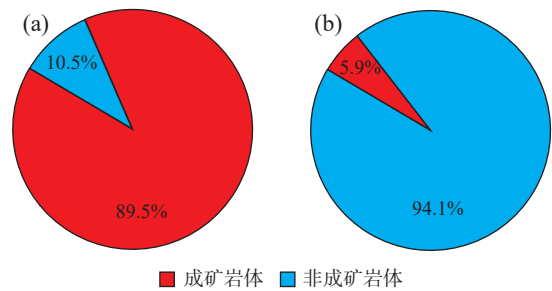
a. Yb-La/Yb 密度图解; b. Y-Sr/Y 密度图解

图5 祁漫塔格地区成矿岩体和非成矿岩体全岩密度图解

Fig. 5 Whole-rock density diagrams for the mineralized and barren rocks from the Qimantagh metallogenic belt

由于测试集中的花岗岩数据可能与训练集中的部分数据来源于同一地区,因此基于测试集得到的模型准确率存在高估的可能,无法真实地反映分类模型的好坏。为此,笔者选取了36条新数据用于外部独立验证(图6),包括19条成矿岩体全岩数据(Guo et al., 2022; Xu et al., 2023)、17条非成矿岩体全岩数据(Ren et al., 2023)。这些全岩数据来自祁漫塔格周边

地区,因此均没有出现在训练数据库中。运用文中获得的随机森林模型对这些花岗岩数据进行判别,结果显示分类准确率为0.92。其中,对成矿岩体分类准确率为0.90(图6a),对非成矿岩体分类准确率为0.94(图6b)。结果证明,文中提出的随机森林模型对识别东昆仑祁漫塔格成矿带及周边地区的成矿花岗岩体和非成矿花岗岩体十分有效。为便于研究人员使用,文中训练得到的随机森林模型代码已经上传至<https://github.com/ShihuaZhong/2023-Qimantagh-RF-whole-rock-classifier>。



a. 成矿岩体分类结果图(数据来源于 Guo et al., 2022; Xu et al., 2023); b. 非成矿岩体分类结果图(数据来源于 Ren et al., 2023)

图6 外部独立验证数据集的分类结果图

Fig. 6 Plot of classification results for external independent validation dataset

#### 4.2 模型应用前提和展望

综上所述,文中训练的随机森林模型在识别祁漫塔格成矿带及周边地区的成矿岩体和非成矿岩体时,具有较高的准确率。此外,与传统方法相比,机器学习模型也可极大提高找矿效率,节省人力和物理成本。因此,将文中训练的模型用于该地区找矿勘查,将具有广阔的应用前景。不过,为获得真实可靠的预测结果,在运用文中模型评估岩体成矿潜力时需要注意其应用前提。

(1)文中是基于祁漫塔格成矿带的成矿岩体和非成矿岩体数据训练得到的机器学习模型,因此该模型主要适用于祁漫塔格成矿带及其周边地区,而将该模型应用于其他地区时需谨慎。同时,用于训练的数据库也仅包含了来自该地区斑岩铜矿、斑岩钼矿、矽卡岩铜铅矿床以及矽卡岩铁矿床的成矿岩体数据,因此该模型无法准确识别祁漫塔格成矿带其他矿床(如矽卡岩钨锡矿床、矽卡岩铅锌矿床)的成矿岩体。

(2)全岩地球化学成分极易受到后期热液蚀变的影响,会对预测结果产生影响。对斑岩成矿系统,热液蚀变通常发育在岩体周边甚至内部,导致许多成矿

岩体的成分因受热液事件的改造,已经不能代表其原始成矿信息。这可能可以解释为何文中得到的机器学习模型在预测成矿岩体时的准确率低于非成矿岩体。因此,为提高预测准确率,用于成矿潜力评价的花岗岩体应该尽可能新鲜。

(3)考虑到全岩成分易受其他因素干扰,未来可探索利用锆石、磷灰石等岩浆副矿物成分取代全岩成分或者综合使用副矿物和全岩成分,开展机器学习模型训练。这不仅是由于锆石、磷灰石等副矿物在花岗岩类岩石中广泛存在,更重要的原因是相比于全岩成分,副矿物(特别是锆石)成分稳定,形成后几乎不受后期热液活动的影响。可以预见,综合锆石等副矿物微量元素特征得到的机器学习模型将能够进一步提高成矿岩体和非成矿岩体预测的准确性。相较于花岗岩中常见的锆石、磷灰石等副矿物,花岗岩在固结成岩之后全岩的地球化学成分易受到热液活动与变质作用的影响,地球化学成分发生较大的改变,已不能完全记录花岗岩成矿信息。因此,为建立更加准确的成矿岩体与非成矿岩体的机器学习模型,应尝试使用副矿物地球化学成分与全岩地球化学成分相结合的地球化学数据库,共同对成矿岩体与非成矿岩体进行判别。

## 5 结论

(1)文中汇编了来自祁漫塔格成矿带成矿岩体和非成矿岩体的28种常见全岩地球化学特征,结合随机森林算法,提出了一个用于识别该地区斑岩-矽卡岩型多金属矿床成矿岩体和非成矿岩体的机器学习分类模型。

(2)模型评价指标显示,文中训练得到的机器学习模型的准确率为0.90,表明该模型能够有效识别来自祁漫塔格(及周边)地区花岗岩的成矿潜力。与传统成矿预测方法相比,该方法能够大大降低成矿预测的人力和物力成本,提高找矿效率。

(3)该模型仅适用于预测花岗岩类能否形成斑岩铜矿、斑岩钼矿、矽卡岩铜铅锌矿床或矽卡岩铁矿床;同时,将该模型应用于祁漫塔格以外地区时 also 需谨慎。此外,考虑到花岗岩全岩成分易受热液蚀变等因素干扰,为提高成矿预测准确率,应尽可能选择新鲜花岗岩用于预测。

## 参考文献(References):

- 陈邦学,徐胜利,杨有生,等.东昆仑西段其木来克一带晚二叠世侵入岩的成因及其构造意义[J].地质通报,2019,38(6):1040-1051.
- CHEN Bangxue, XU Shengli, YANG Yousheng, et al. Genesis and tectonic significance of Late Permian Qimulaikhe intrusive rocks in the west of East Kunlun Mountains, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(6): 1040-1051.
- 陈静,谢智勇,李彬,等.东昆仑拉陵灶火钼多金属矿床含矿岩体地质地球化学特征及其成矿意义[J].地质与勘探,2013,49(5):813-824.
- CHEN Jing, XIE Zhiyong, LI Bin, et al. Geological and geochemical characteristics of the ore-bearing intrusions from the Lalingzaohuo Mo polymetallic deposit and its metallogenic significance [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(5): 813-824.
- 陈静,胡继春,逯永卓,等.东昆仑小灶火地区钼矿化正长花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J].黄金科学技术,2018,26(4):465-472.
- CHEN Jing, HU Jichun, LU Yongzhuo, et al. Geochronology, Geochemical Characteristics of Molybdenum Ore-bearing Syenogranite from Xiaozhaohuo Area in East Kunlun and Its Geological Significance[J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26(04): 465-472.
- 崔美慧,孟繁聪,吴祥珂.东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧:中基性火成岩地球化学、Sm-Nd同位素及年代学证据[J].岩石学报,2011,27(11):3365-3379.
- CUI Meihui, MENG Fancong, WU Xiangke. Early Ordovician island arc of Qimantag Mountain, eastern Kunlun: Evidences from geochemistry, Sm-Nd isotope and geochronology of intermediate-basic igneous rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3365-3379.
- 董连慧,刘德权,唐延龄,等.试论新疆成矿体系与时空演化模式[J].*矿床地质*, 2015, 34(6): 1107-1129.
- DONG Lianhui, LIU Dequan, TANG Yanling, et al. Five-era metallogenic system of mineral deposits in Xinjiang and its spatial and temporal evolution mode[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(6): 1107-1129.
- 丰成友,李东生,吴正寿,等.东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J].*西北地质*, 2010, 43(4): 10-17.
- FENG Chengyou, LI Dongsheng, WU Zhengshou, et al. Major Types Time Space Distribution and Metallogenesis of Polymetallic Deposits in the Qimantage Metallogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(4): 10-17.
- 丰成友,王雪萍,舒晓峰,等.青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(6): 1806-1817.
- FENG Chengyou, WANG Xueping, SHU Xiaofeng, et al. Isotopic Chronology of the Hutouya Skarn Lead-Zinc Polymetallic Ore

- District in Qimantage Area of Qinghai Province and Its Geological Significance[J]. *Journal of Jilin University*, 2011, 41(6): 1806–1817.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 665–678.
- FENG Chenyou, WANG Song, LI Guochen, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 665–678.
- 高永宝. 东昆仑祁漫塔格地区中酸性侵入岩浆活动与成矿作用[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- GAO Yongbao. The Intermediate-acid Intrusive Magmatism and Mineralization in Qimantag, East Kunlun Mountains[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- 高永宝, 李侃, 钱兵, 等. 东昆仑卡而却卡铜铅铁多金属矿床成矿年代学: 辉钼矿 Re-Os 和金云母 Ar-Ar 同位素定年约束[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(1): 96–107.
- GAO Yongbao, LI Kan, QIAN Bing, et al. The Metallogenic Chronology of Kaerqueka Deposit in Eastern Kunlun: Evidences from Molybdenite Re-Os and Phlogopite Ar-Ar Ages[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(1): 96–107.
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1647–1665.
- GAO Yongbao, LI Wenyuan, QIAN Bing, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1647–1665.
- 高永宝, 李文渊, 马晓光, 等. 东昆仑杂林格铁矿成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(2): 36–47.
- GAO Yongbao, LI Wenyuan, MA Xiaoguang, et al. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, eastern China[J]. *Journal of Lanzhou University*, 2012, 48(2): 36–47.
- 高永宝, 李文渊, 张照伟. 祁漫塔格白干湖-夏勒赛钨锡矿带石英脉型矿石流体包裹体及氢氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1829–1839.
- GAO Yongbao, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions of quartz-vein ores in the Baiganhu-Jialesai W-Sn mineralization belts, Qimantage, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1829–1839.
- 郝杰, 刘小汉, 桑海清. 新疆东昆仑野牛泉石英闪长岩与英安斑岩的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素年龄[J]. *地质通报*, 2003, 22(3): 165–169.
- HAO Jie, LIU Xiaohan, SANG Haiqing. Hornblende and biotite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of the Yeniuquan quartz diorite and dacite-porphry in the East Kunlun orogenic belt, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(3): 165–169.
- 景宝盛, 单金忠. 新疆东昆仑维宝地区铅锌矿床找矿标志及找矿方向[J]. *地质找矿论丛*, 2013, 28(4): 499–507.
- JING Baosheng, SHAN Jinzhong. Prospecting criteria and ore prospecting orientation of lead-zinc deposit in Weibao area of East Kunlun region, Xinjiang[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 2013, 28(4): 499–507.
- 孔会磊, 李金超, 黄军, 等. 东昆仑小圆山铁多金属矿区斜长花岗斑岩锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学及找矿意义[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 521–532.
- KONG Huilei, LI Jinchao, HUANG Jun, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the plagiogranite porphyry from the Xiaoyuanshan iron-polymetallic ore district in East Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 521–532.
- 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 等. 青海祁漫塔格小圆山铁多金属矿区英云闪长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(1): 8–16.
- KONG Huilei, LI Jinchao, LI Yazhi, et al. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of the Tonalite from Xiaoyuanshan Iron-Polymetallic Ore District in Qimantag Mountain, Qinghai Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(1): 8–16.
- 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 等. 青海东昆仑卡尔却卡地区野拉塞铜矿床成因类型及成矿机制[J]. *岩石学报*, 2010, 26(12): 3696–3708.
- LI Bile, SUN Fengyue, YU Xiaofei, et al. Genetic type and Mineralizing Mechanism of the Yelasai Copper Deposit in Kaerqueka area Eastern Kunlun Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12): 3696–3708.
- 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 等. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. *地球学报*, 2020, 41(2): 309–319.
- LI Changbai, XIAO Keyan, LI Nan, et al. A Comparative Study of Support Vector Machine, Random Forest and Artificial Neural Network Machine Learning Algorithms in Geochemical Anomaly Information Extraction[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2020, 41(2): 309–319.
- 李积清, 陈静, 史青瑞, 等. 东昆仑卡尔却卡矿区似斑状二长花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Sr-Nd 同位素制约[J]. *矿物岩石*, 2016, 36(3): 87–95.
- LI Jiqing, CHENG Jing, SHI Qingrui, et al. The Genesis of Porphyritic Monzogranite of the Kaerqueka Deposit in the East Kunlun: Evidence, from Zircon U-Pb Dating and Sr-Nd Isotopic Compositions[J]. *Mineral Petrol*, 2016, 36(3): 87–95.
- 李侃, 高永宝, 钱兵, 等. 东昆仑祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 630–645.
- LI Kan, GAO Yongbao, QIAO Bing, et al. Geochronology, geochemical characteristics and Hf isotopic compositions of granite in the Hutouya deposit, Qimantag, East Kunlun[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 630–645.
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成



- 矿年代学研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(7): 949-955.
- LI Shijin, SUN Fengyue, FENG Chengyou, et al. Geochronological Study on Yazigou Polymetallic Deposit in Eastern Kunlun Qinhai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(7): 949-955.
- 李瑶. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区古生代花岗岩成因及大地构造意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- LI Yao. Genesis and Tectonic significance of Paleozoic Granites in Aqedun area, East Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- 李国臣, 丰成友, 王瑞江, 等. 新疆白干湖钨锡矿田东北部花岗岩锆石 SIMS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. *地球学报*, 2012, 33(2): 216-226.
- LI Guochen, FENG Chengyou, WANG Ruijiang, et al. SIMS Zircon U-Pb Age, Petrochemistry and Tectonic Implications of Granitoids in Northeastern Baiganhue W-Sn Orefield, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(2): 216-226.
- 李慧. 基于证据权重法和机器学习的赣南钨矿成矿远景预测[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- LI Hui. Mineral Prospectivity Mapping of Tungsten Deposits in Southern Jiangxi Province Based on Weights of Evidence and Machine Learning[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- 李玉春, 李彬, 陈静, 等. 东昆仑拉陵灶火矿区花岗闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2013a, 33(03): 110-115.
- LI Yuchun, LI Bin, CHEN Jing, et al. Sr-Nd-Pb Isotopic Characteristics of Ore-Bearing Granodiorites from Lalingzaohuo Deposit and it's Geological Significance[J]. *Journal of Mineral Petrol*, 2013a, 33(03): 110-115.
- 李玉春, 张爱奎, 张培青, 等. 青海祁漫塔格沙丘地区侵入岩地质、地球化学特征及找矿意义[J]. *西北地质*, 2013b, 46(3): 70-82.
- LI Yuchun, ZHANG Aikui, ZHANG Peiqing, et al. The Geological and Geochemical Characteristics of the Intrusive Rock and Prospecting Significance in Shaqiu Areas, Qimantage Metallogenic Belt, Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 2013b, 46(3): 70-82.
- 刘建楠. 青海野马泉铁锌矿床多期次构造—岩浆热年代学成矿意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2018.
- LIU Jiannan. The Metallogenic Significance of Multistage Tectonic Magmatic, the Morchronology of Yemaquan Iron-Zinc Deposit, Qinghai[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences For, 2018.
- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 等. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2093-2106.
- LIU Bin, MA Changqian, JIANG Hongan, et al. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2093-2106.
- 刘晓生, 章治邦. 基于改进网格搜索法的 SVM 参数优化[J]. *江西理工大学学报*, 2019, 40(1): 5-9.
- LIU Xiaosheng, ZHANG Zhibang. Parameter optimization of Support Vector Machine based on improved grid search method[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2019, 40(1): 5-9.
- 陆济璞, 李江, 覃小锋, 等. 东昆仑祁漫塔格伊涅克阿干花岗岩特征及构造意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(4): 46-54.
- LU Jipu, LI Jiang, TAN Xiaofeng, et al. The Yinieke agan granite mass in Qimantag eastern Kunlun and its tectonic significance[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(4): 46-54.
- 陆济璞, 戴梅芳, 李江, 等. 东昆仑祁漫塔格希热芒崖晚石炭世花岗岩地球化学特征及其构造背景[J]. *华南地质与矿产*, 2006, (4): 1-8.
- LU Jipi, DAI Meifang, LI Jiang, et al. Geochemical Characteristics and It's Tectonis Setting of Xiremangya Lata Carboniferous Granite in the Qimantage Mountains, East Kunlun[J]. *South China Geology*, 2006, (4): 1-8.
- 马文, 丁玉进, 李社宏, 等. 祁漫塔格中部元古代高钾(变质)侵入岩体的发现及其地质意义[J]. *西北地质*, 2013, 46(1): 32-39.
- MA Wen, DING Yujin, LI Shehong, et al. The Discovery and Geological Significance of Proterozoic Intrusive Rock with High-K in the Central of Qimantage Area[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(1): 32-39.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1437-1471.
- MAO Jingwen, ZHOU Zhenhua, FENG Chengyou, et al. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1437-1471.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 49(3): 403-414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 49(3): 403-414.
- 南卡俄吾, 贾群子, 唐玲, 等. 青海东昆仑哈西亚图矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学特征[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 702-712.
- NAMHKA N, JIA Qunzi, TANG Ling, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Haxiyatu iron-polymetallic ore district in Eastern Kunlun[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 702-712.
- 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 等. 青海东昆仑哈西亚图铁多金属矿区石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征[J]. *地质通报*, 2014, 33(6): 841-849.
- NAMHKA N, JIA Qunzi, LI Wenyuan, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of quartz diorite from the Haxiyatu iron-polymetallic ore district in Eastern Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6): 841-849.
- 潘北斗, 李宝, 王福臣, 等. 不同类型矿床(点)空间关联关系定



- 量研究——以中南半岛及临近地区为例[J]. 地质与勘探, 2022, 58(3): 532–544.
- PAN Beidou, LIU Bao, WANG Fuchen, et al. Quantitative study on spatial correlation of different types of deposits (occurrences): A case study of Indochina Peninsula and adjacent areas[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(3): 532–544.
- 潘彤. 青海成矿单元划分[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(1): 16–33.
- PAN Tong. Classification of Metallogenic Units in Qinghai, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(1): 16–33.
- 时超, 李荣社, 何世平, 等. 东昆仑祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿成矿时代及其地质意义——黑云二长花岗岩地球化学特征和锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *地质通报*, 2017, 36(6): 977–986.
- SHI Chao, LI Rongshe, HE Shiping, et al. A study of the ore-forming age of the Hutouya deposit and its geological significance: Geochemistry and U-Pb zircon ages of biotite monzonitic granite in Qimantag, East Kunlun Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(6): 977–986.
- 舒树兰, 何书跃, 李彬, 等. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿床地质地球化学特征及找矿前景分析[J]. *西北地质*, 2014, 47(2): 62–72.
- SHU Shulan, HE Shuyue, LI Bin, et al. Geology, Geochemical Characteristics and Prospecting Analysis of Yazigou Polymetallic Deposit, East Kunlun, Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(2): 62–72.
- 舒晓峰, 王雪萍, 张雨莲, 等. 青海虎头崖地区多金属矿床成因类型的厘定及找矿方向[J]. *西北地质*, 2012, 45(1): 165–173.
- SHU Xiaofeng, WANG Xueping, ZHANG Yulian, et al. Determination of Multifarious Genesis and Prospecting of Polymetallic Metallogenic Deposit in Hutouya, Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(1): 165–173.
- 谈生祥, 郭通珍, 董进生, 等. 青海乌兰乌珠尔地区晚志留世过铝质花岗岩地质特征及意义[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(1): 36–43.
- TAN Shengxiang, GUO Tongzhen, DONG Jinsheng, et al. Geological characteristics and significance of the peraluminous granite in late silurian epoch in Wulanwuzhuer region of Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University(Natural Science)*, 2011, 29(1): 36–43.
- 田承盛, 丰成友, 李军红, 等. 青海它温查汉铁多金属矿床<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学研究及意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 169–176.
- TIAN Chengsheng, FENG Chengyou, LI Junhong, et al. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology of Tawenchahan Fe-polymetallic deposit in Qimantag Mountain of Qinghai Province and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 169–176.
- 田龙, 康磊, 刘良, 等. 东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 28–45.
- TIAN Long, KANG Lei, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 28–45.
- 王秉璋. 祁漫塔格地质走廊域古生代—中生代火成岩岩石构造组合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- WANG Bingzhang. The study and investigation on the assembly and coupling Petrotectonic assemblage during Paleozoic-Mesozoic period at Qimantag geological corridor domain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 温博文, 董文瀚, 解武杰, 等. 基于改进网格搜索算法的随机森林参数优化[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(10): 154–157.
- WEN Bowen, DONG Wenhan, XIE Wujie, et al. Parameter optimization method for random forest based on improved grid search algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(10): 154–157.
- 徐博. 藏北安多地区中侏罗统布曲组碳酸盐岩微相分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- XU Bo. Carbonate Microfacies Analysis and Evolutions of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Amdo area, northern Tibet[D]. Chendu: Chendu University of Technology, 2020.
- 许长坤, 刘世宝, 赵子基, 等. 青海省东昆仑成矿带铁矿成矿规律与找矿方向研究[J]. *地质学报*, 2012, 86(10): 1621–1678.
- XU Changkun, LIU Shibao, ZHAO Ziji, et al. Metallogenic Law and Prospect Direction of Iron Deposits in the East Kunlun Metallogenic Belt in Qinghai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(10): 1621–1678.
- 许骏, 邓小华, 祝新友. 祁漫塔格成矿带地质特征和成矿时空分布规律[J]. *新疆地质*, 2021, 39(4): 671–678.
- XU Jun, DENG Xiaohua, ZHU Xingyou. Geological Characteristics and Spatio-Temporal Distribution of Mineralization in the Qimantag metallogenic Belt[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(4): 671–678.
- 许志琴, 杨经绥, 李化启, 等. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1697–1709.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Huaqi, et al. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1697–1709.
- 薛宁, 安勇胜, 李五福, 等. 青海野马泉地区正长花岗岩的基本特征及成因[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2009, 27(2): 18–22.
- XU Ning, AN Yongsheng, LI Wufu, et al. Characteristic and genesis of normal granite in the Yemaquan of Qinghai[J]. *Journal of Qinghai University*, 2009, 27(2): 18–22.
- 杨兴科, 韩珂, 范阅, 等. 东昆仑祁漫塔格成矿带典型矿田构造背景与岩浆-热力构造特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(2): 201–212.
- YANG Xingke, HAN Ke, FAN Yue, et al. Tectonic Background and

- Magma-thermodynamic Structural Features of Typical Orefields in Qimantage Ore Belt, Eastern Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(2): 201–212.
- 姚磊. 青海祁漫塔格地区三叠纪成岩成矿作用及地球动力学背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- YAO Lei. Petrogenesis of the Triassic granitoids and skarn mineralization in the Qimantag area, Qinghai Province, and their geodynamic setting[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 杨涛, 李智明, 张乐, 等. 东昆仑它温查汉西花岗岩地质地球化学特征及其构造意义[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(3): 452–464.
- YANG Tao, LI Zhiming, ZHANG Le, et al. Geological and Geochemical Characteristics of the Tawenchahanxi Granites in East Kunlun and Its Tectonic Significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(3): 452–464.
- 于淼, 丰成友, 刘洪川, 等. 青海杂林格砂卡岩铁矿富Cl角闪石矿物地球化学特征与其成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2015, 34(5): 721–740.
- YU Miao, FENG Chengyou, LIU Hongchuan, et al. The Significance of Mineralization and Geochemistry of the Cl-rich Amphiboles from the Galinge Skarn Iron Deposit in Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2015, 34(5): 721–740.
- 袁颖, 于少将, 王晨晖, 等. 基于网格搜索法优化支持向量机的围岩稳定性分类模型[J]. *地质与勘探*, 2019, 55(2): 608–613.
- YUAN Ying, YU Shaojiang, WANG Chenhui, et al. Evaluation model for surrounding rock stability based on support vector machine optimized by grid search method[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(2): 608–613.
- 王子焯. 基于测度学习的喜马拉雅淡色花岗岩岩体识别[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- WANG Ziyue. Mapping of Himalaya Leucogranites Based on Metric Learning[D]. HU BEI: China University of Geosciences, 2020.
- 吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 等. 青海祁漫塔格玛兴大坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及Nd-Hf同位素组成[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3380–3394.
- WU Xiangke, MENG Fancong, XU Hong, et al. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Maxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3380–3394.
- 赵一鸣, 丰成友, 李大新, 等. 青海西部祁漫塔格地区主要砂卡岩铁多金属矿床成矿地质背景和矿化蚀变特征[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 1–19.
- ZHAO Yiming, FENG Chengyou, LI Daxing. Metallogenic setting and mineralization-alteration characteristics of major skarn Fe-polymetallic deposits in Qimantag area western Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 1–19.
- 张爱奎, 莫宣学, 袁万明, 等. 东昆仑西部野马泉地区三叠纪花岗岩成因与构造背景[J]. *矿物学报*, 2016, 36(2): 157–173.
- ZHANG Aikui, MO Xuanxue, YUAN Wangming, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of Yemaquan Triassic Granite from the West of the Eastern Kunlun Mountain Range, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016, 36(2): 157–173.
- 张爱奎. 青海野马泉地区晚古生代—早中生代岩浆作用与成矿研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- ZHANG Aikui. Studies on late Paleozoic-early Mesozoic magmatism and mineralization in Yemaquan area, Qinghai province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 张雷. 东昆仑野马泉地区三叠纪构造岩浆作用与成矿关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- ZHANG Lei. Studies on Triassic Tectonic Magmatism and Relationship with Mineralization in Yemaquan Area, East Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- 张明玉, 丰成友, 王辉, 等. 东昆仑祁漫塔格地区晚三叠世正长花岗岩岩石成因及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(2): 197–210.
- ZHANG Mingyu, FENG Chengyou, WANG Hui, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic syenogranite in Qimantag area, East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(2): 197–210.
- 张杰, 康晓波, 鲁慧, 等. 哀牢山中段地质灾害空间分布规律研究——以元江县为例[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(3): 720–731.
- ZHANG Jie, KANG Xiaobo, LU Hui, et al. Study on spatial distribution of geological disasters in middle part of Ailao mountain: A case of Yuanjiang County[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(3): 720–731.
- 张晓飞, 李智明, 贾群子, 等. 青海祁漫塔格虎头崖多金属矿区花岗斑岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(3): 749–765.
- ZHANG Xiaofei, LI Zhiming, JIA Qunzi, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Granite Porphyry in Hutouya Polymetallic Deposit, Qimantage Area, Qinghai Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(3): 749–765.
- 张晓飞, 宋忠宝, 李智明, 等. 北祁连浪力克矿区闪长玢岩地质地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2012, 45(S1): 113–116.
- 张向飞, 陈莉, 曹华文, 等. 中国新疆—中亚大地构造单元划分及演化简述[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 1–39.
- ZHANG Xiangfei, CHEN Li, CAO Huawen, et al. Division of Tectonic Units and Their Evolutions within Xinjiang, China to Central Asia[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 1–39.
- 张雨莲, 贾群子, 宋忠宝, 等. 青海省卡尔却卡铜多金属矿床A区斑岩型和B区砂卡岩型成矿岩体特征对比[J]. *西北地质*, 2014, 47(4): 114–122.

- ZHANG Yulian, JIA Qunzi, SONG Zhongbao, et al. Contrastive Study on Features of Ore-forming Rock Mass between Area-A Porphyry Type and Area-B Skarn Type in Ka'erqueka Copper Molubdenum Deposit in Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(4): 114–122.
- 钟世华. 新疆维宝铜铅锌矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2018.
- ZHONG Shihua. Genesis of the Weibao Cu-Pb-Zn deposit in Xinjiang, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2018.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 新疆维宝矽卡岩铜铅锌矿床维西矿段矿物学特征[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1066–1082.
- ZHONG Shihua, FENG Chengyou, LI Daxing, et al. Mineralogical Characteristics of the Weixi Ore Block in the Weibao Skarn-type Copper-Lead-Zinc Deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1066–1082.
- 庄玉军, 彭璇, 周艳龙, 等. 柴北缘赛什腾山滩间山群晚奥陶世富铌玄武岩成因及其地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 63–80.
- ZHUANG Yujun, PENG Xuan, ZHOU Yanlong, et al. Genesis and Geological Significance of Late Ordovician Nb-rich Basalts from Tanjianshan Group in Saishitengshan Mountain, Northern Margin of Qaidam Tectonic belt[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 63–80.
- Ballard J R, Palin M J, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 144(3): 347–364.
- Bergen K J, Johnson P A, Hoop M V, et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience[J]. *Science*, 2019, 363(6433): eaau0323.
- Breiman L. Random Forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- Chen J, Wang B Z, Lu H F, et al. Geochronology and geochemistry of Early Devonian intrusions in the Qimantagh area, Northwest China: evidence for post-collisional slab break-off[J]. *International Geology Review*, 2018, 60(4): 479–495.
- Chiaradia M, Ulianov A, Kouzmanov A, et al. Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas?[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 685–686.
- Chawla N V. Data mining for imbalanced datasets: An overview[J]. *Data mining and knowledge discovery handbook*, 2009, 875–886.
- Du J, Audetat A. Early sulfide saturation is not detrimental to porphyry Cu-Au formation[J]. *Geology*, 2020, 48(5): 519–524.
- Guo X Z, Zhou T F, Jia Q Z, et al. Highly differentiated felsic granites linked to Mo mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt, NW China: Constrains from geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes of the Duolongqiarou porphyry Mo deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 145: 104891.
- Hedenquist J W, Arribas A, Reynolds T J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system; Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits[J]. *Philippines. Economic Geology*, 1998, 93(4): 373–404.
- Jordan M I, Mitchell T M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects[J]. *Special Issue Review*, 2015, 349: 255–260.
- Kotsiantis S, Kanellopoulos D, Pintelas P. Handling imbalanced datasets: a review, *International transactions on computer science and engineering*[J]. *Synthetic Oversampling Instances Using Clustering*, 2006, 30(1): 25–36.
- Leng C B, Cooke D R, Hou Z Q, et al. Quantifying Exhumation at the Giant Pulang Porphyry Cu-Au Deposit Using U-Pb-He Dating[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(5): 1077–1092.
- Lin X, Chang H, Wang K, et al. Machine Learning for Source Identification of Dust on the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(21): e2020GL088950.
- Lv W C, Li Z H, Wu X X, et al. Maximum Entropy Niche-Based Modeling(Maxent) of Potential Geographical Distributions of *Lobesia botrana*(Lepidoptera\_Tortricidae) in China[J]. *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 2011, 3: 264–246.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C S, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. *Lithos*, 2014, (200–201): 111–125.
- Nathwani C L, Wilkinson J J, George F, et al. Machine learning for geochemical exploration: classifying metallogenic fertility in arc magmas and insights into porphyry copper deposit formation[J]. *Mineralium Deposita*, 2022, 57(7): 1143–1166.
- Nathwani C L, Wilkinson J J, Brownscombe W, et al. Texture Classification Using Deep Convolutional Neural Networks: An Application to Zircons From Porphyry Copper Deposits[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(2).
- Petrelli M, Perugini D. Solving petrological problems through machine learning: the study case of tectonic discrimination using geochemical and isotopic data[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2016, 171: 1–15.
- Pizarro H, Campo E, Bouzaro F, et al. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103771.
- Ren X, Dong Y P, He D F, et al. Late Triassic magmatic rocks in the southern East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2023, .
- Rezeau H, Jagoutz O. The importance of H<sub>2</sub>O in arc magmas for the formation of porphyry Cu deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126: 103744.
- Rezeau H, Moritz R, Wotzlaw J F, et al. Zircon Petrochronology of the Meghri-Ordubad Pluton, Lesser Caucasus: Fingerprinting Igneous Processes and Implications for the Exploration of Porphyry Cu-Mo Deposits[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(7):

- 1365–1388.
- Richards J P. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu deposits: just add water[J]. *Economic Geology*, 2011, 106(7): 1075–1081.
- Sun W D, Liang H Y, Ling M X, et al. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 103: 263–275.
- Wang Y, Qiu, K F, Müller A, et al. Machine Learning Prediction of Quartz Forming-Environments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(8).
- Wang C, Liu L, Xiao P X, et al. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China[J]. *Lithos*, 2014, (202-203): 1–20.
- Xia R, Wang C M, Qing M, et al. Molybdenite Re-Os, zircon U-Pb dating and Hf isotopic analysis of the Shuangqing Fe-Pb-Zn-Cu skarn deposit, East Kunlun Mountains, Qinghai Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 66: 114–131.
- Xu Q L, Sun Y G, Mao G Z, et al. Petrogenesis of the Ore-Related Intrusions of the Aikengdelesite Mo (-Cu) and Halongxiuma Mo Deposits: Implication for Geodynamic Evolution and Mineralization in the East Kunlun Orogen, Northwest China[J]. *Minerals*, 2023, 13(3): 447.
- Yan M J, Sun G S, Sun F Y, et al. Geochronology, Geochemistry, and Hf Isotopic Compositions of Monzogranites and Mafic-Ultramafic Complexes in the Moxingdawannan Area, Eastern Kunlun Orogen, Western China: Implications for Magma Sources, Geodynamic Setting, and Petrogenesis[J]. *Journal of Earth Science*, 2019, 30: 335–347.
- Yin S, Ma C Q, Xu J N. Geochronology, geochemical and Sr-Nd-Hf-Pb isotopic compositions of the granitoids in the Yemaquan orefield, East Kunlun orogenic belt, northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for magmatic fractional crystallization and sub-solidus hydrothermal alteration[J]. *Lithos*, 2017, 294-295: 339–355.
- Yu M, Feng C Y, Santosh M, et al. The Qiman Tagh Orogen as a window to the crustal evolution in northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017a, 167: 103–123.
- Yu M, Feng C Y, Mao J W, et al. Multistage Skarn-Related Tourmaline From the Galinge Deposit, QimanTage, Western China: A Fluid Evolution Perspective[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2017b, 55(1): 3–19.
- Zhong S H, Seltmann R, Shen P. Two different types of granitoids in the Suyunhe large porphyry Mo deposit, NW China and their genetic relationships with molybdenum mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 116–139.
- Zhong S H, Feng C Y, Seltmann R, et al. Geochemical contrasts between Late Triassic ore-bearing and barren intrusions in the Weibao Cu-Pb-Zn deposit, East Kunlun Mountains, NW China: constraints from accessory minerals(zircon and apatite)[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(6): 855–870.
- Zhong S H, Li S Z, Feng C Y, et al. Porphyry copper and skarn fertility of the northern Qinghai-Tibet Plateau collisional granitoids[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021a: 103524.
- Zhong S H, Feng C Y, Seltmann R, et al. Middle Devonian volcanic rocks in the Weibao Cu-Pb-Zn deposit, East Kunlun Mountains, NW China: Zircon chronology and tectonic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021b, 84: 309–327.
- Zhong S H, Li S Z, Liu Y, et al. I-type and S-type granites in the Earth's earliest continental crust[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 61.
- Zhou Y, Zhang Z, Yang J, et al. Machine Learning and Singularity Analysis Reveal Zircon Fertility and Magmatic Intensity: Implications for Porphyry Copper Potential[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(6): 3061–3078.
- Zou S, Chen X, Brzozowski M J, et al. Application of Machine Learning to Characterizing Magma Fertility in Porphyry Cu Deposits[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127: e2022JB024584.