第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：陈昱澍，曹华文，唐利. 基于黄铁矿微量元素机器学习的西秦岭金矿床成因类型判别[J]. 西北地质，2026，59(5)：263−273. DOI：10.12401/j.nwg.2026039

Citation：CHEN Yushu, CAO Huawen, TANG Li. Machine Learning-Based Discrimination of the Genetic Types of Gold Deposits in the West Qinling by Using Pyrite Trace Elements[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(5): 263−273. DOI: 10.12401/j.nwg.2026039

基于黄铁矿微量元素机器学习的西秦岭金矿床成因类型判别

陈昱澍[1,2]，曹华文[1,*]，唐利[2,*]

（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，深时数字地球前沿科学中心，北京 100083）

摘 要：西秦岭是中国重要的金多金属成矿带，区内发育造山型、卡林型和类卡林型3类金矿床。仅依靠单一矿床（数量少）、传统技术方法（单一手段）研究矿床成因存在局限性，而采用机器学习驱动的黄铁矿微量元素大数据统计可以对矿床成因类型判别提供新的视角。为实现西秦岭金矿床成因类型的高效精准判别，笔者收集了区域内15个典型金矿床的3 062条黄铁矿微量元素数据，结合支持向量机（SVM）、随机森林（RF）机器学习方法以及主成分分析（PCA）多元统计方法开展综合研究。SVM和RF模型分类准确率分别达到94.2%和97.1%，并揭示出黄铁矿的Au、As、Sb是区分3类金矿床的核心指示元素。基于此，笔者构建的黄铁矿ln(Au)-ln(As)-ln(Sb)三元判别图可有效实现3类矿床的区分。本研究为西秦岭金矿床的成因类型判别提供了新的思路，也为黄铁矿微量元素的机器学习在矿床学研究中的应用提供了案例。

关键词：金矿床成因；黄铁矿；微量元素；机器学习；西秦岭

中图分类号：P618.43 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0263-11

Machine Learning-Based Discrimination of the Genetic Types of Gold Deposits in the West Qinling by Using Pyrite Trace Elements

CHEN Yushu[1,2], CAO Huawen[1,*], TANG Li[2,*]

（1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China；
2. School of Earth Sciences and Resources, Frontier Science Center for Deep-Time Digital Earth, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China）

收稿日期：2026-05-29；**修回日期**：2026-06-18；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：深地国家科技重大专项（2025ZD1009201），中国地质调查局项目（DD20240206201）和“深时数字地球”中央高校基本科研业务费（2652023001）联合资助。

作者简介：陈昱澍（2004−），男，硕士研究生，主要从事矿床成因和成矿规律的研究。E−mail：1492610310@qq.com。

***通讯作者**：曹华文（1988−），男，副研究员，博士生导师，长期从事岩石学、矿床学研究。E−mail：caohuawen1988@cdut.edu.cn。

唐利（1990−），男，教授，博士生导师，长期从事关键矿产矿床成因研究和教学工作。E−mail：ltang@cugb.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: The West Qinling orogen is an important gold and polymetallic metallogenic belt in China, where orogenic, Carlin and Carlin-like gold deposits are widely distributed. Nevertheless, there remain considerable controversies over the genetic classification of gold deposits based on conventional geological studies. Pyrite is a dominant gold-bearing mineral in gold deposits, and its trace element compositions can effectively constrain metallogenic conditions and deposit genesis. To achieve efficient and accurate discrimination of genetic types of gold deposits in the West Qinling orogen, this study systematically compiled 3 062 sets of pyrite trace element data from 15 typical gold deposits in the region. Combined with machine learning algorithms including Support Vector Machine (SVM) and Random Forest (RF), as well as multivariate statistical methods such as Principal Component Analysis (PCA), classification models were established. The classification accuracies of the SVM and RF models reach 94.2% and 97.1%, respectively. The results reveal that Au, As and Sb in pyrite are the key indicator elements for distinguishing the three types of gold deposits. On this basis, a ternary discrimination diagram of ln(Au)–ln(As)–ln(Sb) for pyrite was constructed, which can effectively differentiate the three genetic types of gold deposits. This study provides a new approach for genetic type discrimination of gold deposits in the West Qinling orogen, and also offers a reference case for the application of machine learning in mineral deposit research.

Keywords: genesis of gold deposits; pyrite; trace elements; machine learning; West Qinling

黄铁矿作为金矿床中普遍发育且贯穿成矿全过程的重要载金矿物,其晶格中赋存的微量元素(如 Au、As、Co、Ni、Cu、Sb、Se 等)对成矿流体性质、物质来源及物理化学条件具有敏感的示踪能力(Reich et al., 2013; 李承鸿等, 2026)。前人研究表明,黄铁矿中特定元素的含量、比值及组合特征(如 Co/Ni 值、Au-As 相关性等)能够有效区分不同成因类型的金矿床(Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014)。例如,高 Co/Ni 值常指示岩浆热液成因,而低 Co/Ni 值则与沉积或变质热液作用相关(Tang et al., 2021; 辛明宇等, 2025)。然而,单一或少数几个元素的判别图解往往因元素间复杂的地球化学行为及不同矿床类型间的重叠效应而存在多解性,难以全面揭示矿床的成因信息。因此,系统、定量地解译黄铁矿微量元素所蕴含的成因信息,对于深化金矿床成矿理论研究和指导找矿勘查具有重要的科学意义。

近年来,随着激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)等高精度微区原位分析技术的快速发展与广泛应用(Ammann, 2007),全球范围内积累了海量的黄铁矿微量元素数据,为大样本量、多维度的数据挖掘和统计建模提供了宝贵的数据基础。在此背景下,机器学习以其强大的高维数据处理能力、非线性关系识别能力及模式分类能力,逐渐成为矿床地球化学研究领域的重要工具(唐茂淼等, 2025; 滕文航等, 2025; 王智宇等, 2025)。已有研究成功将随机森林(RF)、支持向量机(SVM)等机器学习算法及主成分分析(PCA)学习法应用于不同成因类型矿床的黄铁矿微量元素判别中,有效克服了传统双变量图解的主观性和局限性(邓依等, 2024; 樊松浩等, 2026; 牛警徽等, 2026)。通过无监督或监督学习,能够从复杂、高维的微量元素数据中提取出对矿床成因最为敏感的特征组合,实现矿床类型的客观、定量识别,展示了大数据驱动下矿物地球化学研究的巨大潜力。

西秦岭地区作为中国乃至全球重要的金矿集区,广泛发育造山型、卡林型及类卡林型等多种成因类型的金矿床,区内成矿地质条件复杂,矿床成因类型及判别标志长期存在争议(刘家军等, 2019)。尽管前人基于矿床地质、流体包裹体及稳定同位素地球化学等手段(刘协鲁等, 2015),对西秦岭地区金矿床进行了大量研究并提出了系统的成因认识,但不同矿床类型在黄铁矿微量元素组成上仍存在显著的重叠。传统的元素图解往往难以提供明确的区分界限,尤其是对卡林型与类卡林型、造山型与类卡林型之间的判别仍缺乏稳健的地球化学指标。鉴于此,笔者系统收集西秦岭地区典型金矿床的黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素数据,采用支持向量机、随机森林和主成分分析等学习方法,构建多元素组合判别图解,定量揭示不同类型金矿床黄铁矿微量元素的地球化学差异,探讨其成因指示意义,以期为西秦岭地区金矿床成因类型的快速识别与精准判别提供新的数据驱动依据和地球化

学参考。

1　区域地质背景

西秦岭造山带作为华北克拉通、扬子克拉通与秦岭微板块长期洋陆俯冲、陆陆碰撞及陆内造山作用形成的复合型大陆造山带(Mattauer et al., 1985), 是中国重要的金多金属成矿省, 其构造格局以商丹缝合带和勉略缝合带为界划分构造单元, 可进一步细分为 4 个金成矿亚带(刘家军等, 2019; 图 1)。该区大地构造演化历经早古生代商丹洋俯冲闭合、晚古生代—早中生代勉略洋俯冲、闭合与碰撞、中新生代陆内造山三大阶段。其中, 晚三叠世全面碰撞及后碰撞伸展为金成矿高峰期, 燕山期构造–岩浆活动对成矿起叠加改造作用(严文婷等, 2026)。区域地层发育齐全, 寒武系、泥盆系和三叠系为主要赋矿层位, 尤以三叠系浊积岩和寒武系碳硅泥岩系的金丰度高、成矿潜力大。构造以 NW–SE 向深大断裂、复式褶皱、脆–韧性剪切带及次级断裂交汇为核心控矿要素, 构成导矿与容矿体系。岩浆活动以印支期与燕山期中酸性岩最发育, 与金成矿作用具有密切的时空及成因关联, 为成矿提供热源、流体及部分成矿物质(陈雅鹏等, 2024; 赵江林等, 2024)。区域金矿床以造山型、卡林型、类卡林型为主, 受地层、构造、岩浆岩耦合控制, 整体呈北、中、南成矿亚带分布(图 1), 同时伴生铅、锌、汞、锑、钨、钼、铜等矿产(表 1)。泥盆系富集层控型铅锌矿床, 中、南成矿亚带构成重要汞锑成矿带, 整体形成以金为优势矿种和多金属共生的内生金属成矿系统, 资源潜力与研究价值显著。

2　典型金矿床地质特征

2.1　造山型金矿床

西秦岭的造山型金矿主要沿商丹断裂与礼县–山阳断裂间 NWW 向狭长带展布, 赋存于泥盆系—石炭系绿片岩相浅变质碎屑岩–碳酸盐岩系, 受区域脆–韧性剪切带及平行主干断裂严格控制。金属矿物以黄铁矿、磁黄铁矿为主, 次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等, 非金属矿物以石英、方解石、绢云母、铁白云石为主。金以显微自然金、银金矿为主要产出形式, 多见粒间金、裂隙金与包裹金, 少量不可见金以晶格固溶体赋存于硫化物中。矿体多呈脉状、似层状、透

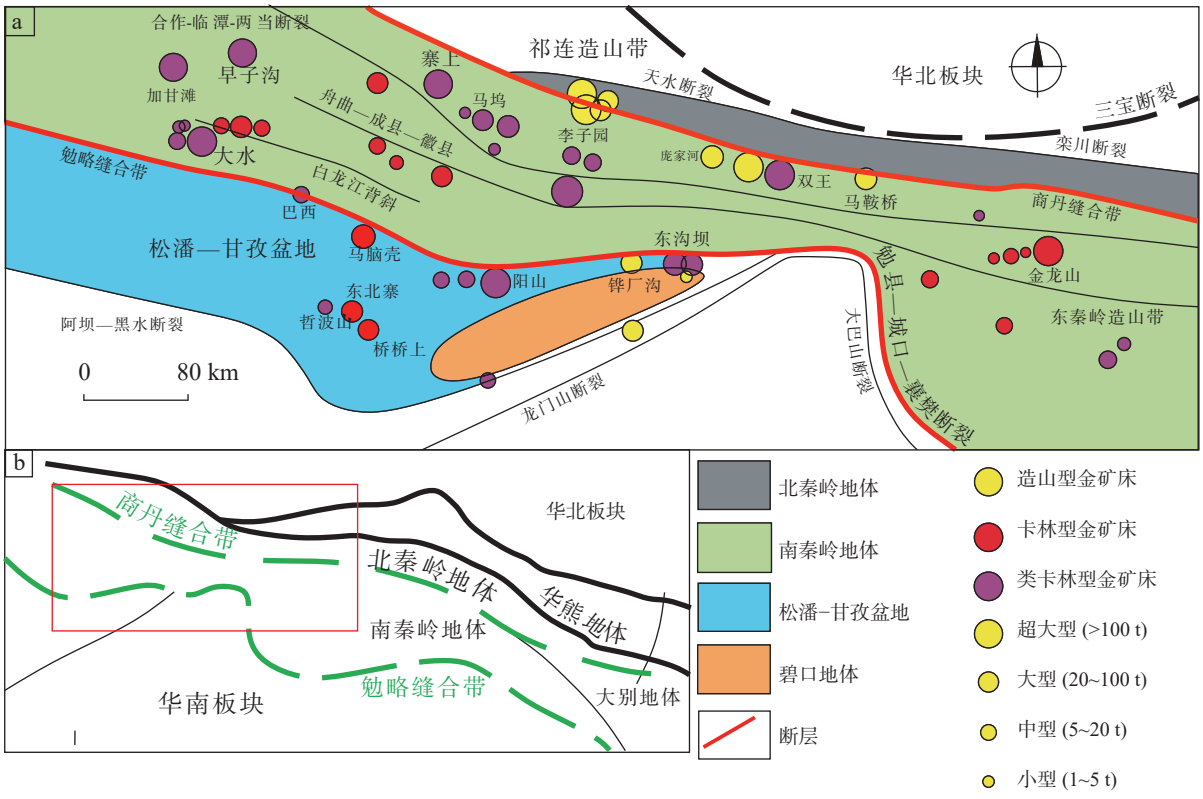


图1　西秦岭地质简图(据刘家军等，2019 修改)

Fig. 1　Simplified geological map of the West Qinling

表 1 西秦岭地区典型金矿床主要地质特征

Tab. 1 Main geological characteristics of typical gold deposits in the West Qinling Orogen

	造山型	卡林型	类卡林型
时空分布	北成矿亚带(商丹–礼县–山阳断裂带)、成矿时代集中于晚三叠世(220～200 Ma)	中、南成矿亚带，成矿时代跨度大(220～100 Ma)，峰值为170 Ma	中、北成矿亚带，成矿时代集中于晚三叠世(220～200 Ma)，与印支岩浆活动同步
矿石矿物组合	黄铁矿、磁黄铁矿为主，次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂；非金属矿物为石英、方解石、绢云母、铁白云石	含砷黄铁矿、毒砂为主，伴生辉锑矿、雄黄、雌黄、辰砂、重晶石；非金属矿物为石英、方解石	黄铁矿、含砷黄铁矿为主，伴生黄铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿，部分含碲化物、铋化物；非金属矿物为石英、方解石、铁白云石
成矿流体来源	以变质流体为主	以大气降水补给的地层水为主，少量混入岩浆水、变质水	岩浆水、变质水、建造水的混合流体

镜状，具膨大收缩、尖灭再现特征。主成矿期为晚三叠世，与碰撞造山过程耦合(王义天等，2018)。围岩蚀变以硅化、黄铁矿化、绢云母化、碳酸盐化最为发育，蚀变强度与矿化呈正相关。典型矿床包括八卦庙、李子园、铧厂沟、马泉、老豆等，整体表现为变质流体主导、构造控矿为主、中低温热液充填交代的典型造山型金矿床特征(孟明亮等，2025)。

2.2 卡林型金矿床

西秦岭的卡林型金矿主要赋存于寒武系—三叠系浅变质至未变质的细碎屑岩–碳酸盐岩建造，以碳质硅质岩、碳质板岩、粉砂岩、灰岩及浊积岩为主。受层间破碎带、褶皱核翼部及次级断裂控制，矿区岩浆岩不发育。矿石以含砷黄铁矿、毒砂为主要载金矿物，伴生辉锑矿、雄黄、雌黄、重晶石等低温热液矿物，非金属矿物以石英、方解石为主。金以超显微纳米金与晶格金为主，基本不出现明金，为该类型矿床的最典型特征。围岩蚀变以硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、毒砂化、绢云母化为主，多呈面型展布，蚀变强度与矿化呈正相关(董长青等，2026)。典型矿床包括拉尔玛、马脑壳、金龙山等，整体表现为层控显著、低温浅成、微细浸染、以流体–岩石水岩反应为主的卡林型金矿床特征。

2.3 类卡林型金矿床

西秦岭的类卡林型金矿主要赋存于寒武系至三叠系浅变质细碎屑岩–碳酸盐岩建造，岩性以粉砂岩、板岩、灰岩及角砾岩为主。矿体受脆–韧性剪切带与断裂构造控制，且在空间上与印支期中酸性花岗岩体密切相关(陈衍景等，2004)，多产于岩体周边 1～3 km 范围内，以次级断裂、隐爆角砾岩带及岩体接触带为主要容矿空间。金属矿物以黄铁矿、含砷黄铁矿为主，常伴生黄铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿，部分矿床含碲化物和铋化物，非金属矿物以石英、方解石、铁白云石为主。金以显微自然金为主，次为晶格金，载金矿物包括黄铁矿、含砷黄铁矿及碲化物等，成矿元素组合以 Au-As-Sb-Bi-Te-Pb-Zn 为特征，部分矿床发育 Au-W 组合；S、C 同位素指示成矿物质具岩浆与地壳混合来源，成矿时代集中于晚三叠世(220～200 Ma)，与印支期岩浆活动近于同步(朱赖民等，2009)。围岩蚀变以硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、绢云母化为主，兼具岩浆热液与浅成低温热液蚀变特征(董子良等，2024)。

3 数据收集和机器学习数据处理

3.1 黄铁矿微量元素数据收集

笔者系统收集并整理了西秦岭地区造山型、卡林型和类卡林型金矿床的 2 766 条黄铁矿微量元素数据，构建黄铁矿微量元素数据集(表 2)。收集的黄铁矿微量元素包括 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Sn、Sb、Au、Bi、Pb 等 14 种元素(表 3)。

(1)As、Au、Ag 是黄铁矿中的重要元素。其中 As 在黄铁矿中的元素含量占比较大。3 种类型金矿床中，卡林型金矿床 As 含量最高，其次是类卡林型，最后是造山型，且在卡林型金矿床中的黄铁矿的 As 含量变化量最大。因此，As 元素可以作为判别卡林型金矿床的重要指标。

(2)Mo 和 Sn 是平均含量最低的元素，大量数据低于检测限。

(3)黄铁矿微量元素箱线图表明(图 2)，卡林型金矿床的黄铁矿具有强烈的 As、Sb 异常，造山型金矿床具有较高的 Co、Ni、Bi 含量，类卡林型金矿床则显示 Ag、Pb、Zn 的中等富集。3 类矿床中的黄铁矿的 As、

表 2　西秦岭金矿床黄铁矿微量元素数据统计结果

Tab. 2　Statistical results of trace element data of pyrite from gold deposits in the West Qinling area

矿床成因类型	数量(个)	矿床名称及数据来源文献
造山型金矿床	812	马泉(董长青等，2026)、南板(Fan et al.，2025)、铧厂沟(Liu et al.，2016)、老豆(靳晓野，2013)、庞家河(Ma et al.，2021)、八卦庙(Yu et al.，2023)
卡林型金矿床	1 080	金龙山(Zhang et al.，2014)、秋岭(Li et al.，2020；Chen et al.，2015)、阳山(Li et al.，2014；Li et al.，2019)、马脑壳(王雪梅等，2025)
类卡林型金矿床	874	双王(Wu et al.，2018；Yang et al.，2022)、大水(Fan L et al.，2025)、早子沟(Du et al.，2021)、大桥(Wu et al.，2018)

表 3　西秦岭地区各类型金矿床黄铁矿微量元素数据统计

Tab. 3　Statistical analysis of trace element data for pyrite from different types of gold deposits in the West Qinling area

矿床类型	元素	Cr(10^{-6})	Mn(10^{-6})	Co(10^{-6})	Ni(10^{-6})	Cu(10^{-6})	Zn(10^{-6})	As(10^{-6})
卡林型	最大值	1 259	1 307	9 290	5 661	4 300	14 900	358 874
	最小值	0.750	0.010	0.040	0.020	1.740	0.090	0.900
	平均值	6.400	14.20	287.8	158.8	312.7	159.3	24 373
造山型	最大值	344.0	1 199	11 189	8 229	19 871	19 652	252 415
	最小值	0.070	0.016	0.020	0.017	0.003	0.100	21.80
	平均值	25.30	18.90	230.4	575.4	2 328	2 745	14 879
类卡林型	最大值	3 673.2	2 114	2 200	13 500	109 647	173 533	252 415
	最小值	0.010	0.020	0.010	0.020	0.010	0.010	0.340
	平均值	117.3	380.1	162.2	180.5	1 732	2 762	15 558
矿床类型	元素	Mo(10^{-6})	Ag(10^{-9})	Sn(10^{-6})	Sb(10^{-6})	Au(10^{-9})	Bi(10^{-6})	Pb(10^{-6})
卡林型	最大值	9.32	400	0.060	716 800	2 513	4 052	23 640
	最小值	0.010	0.010	0.040	0.050	1.000	0.010	0.130
	平均值	0.070	10.10	0.010	13 656	71.40	15.90	614.9
造山型	最大值	339.0	1 885	9 896	3 521.9	36 003	4 052	32 467
	最小值	0.030	0.020	0.010	0.010	0.001	0.100	0.090
	平均值	11.10	35.20	49.20	99.80	705.5	66.30	398.9
类卡林型	最大值	282.1	500.0	10.7	10 623	1100	914.7	8 531
	最小值	0.010	0.010	0.020	0.010	0.010	0.010	0.030
	平均值	14.80	20.90	5.60	426.9	38.30	25.90	231.8

Au、Mo、Cu、Ni、Ag 等元素含量无明显重叠，是区分矿床成因类型的有效地球化学指标。其中，As、Au 的分类效果最突出；Sb、Pb、Bi、Zn 等元素含量存在少量重叠，但整体仍可区分，其在卡林型金矿床中的含量显著高于另外两类；Cr、Mn、Sn 等元素含量几乎完全重合，说明在 3 类矿床中这些元素在黄铁矿中的含量无明显差异，无法用于矿床成因类型判别。

3.2　机器学习方法

(1)主成分分析是基于协方差矩阵特征分解的无监督线性变换方法，目标在尽可能保留原始数据有效信息的前提下实现高维数据降维。对原始存在多重共线性、信息冗余的多维变量做正交线性变换，生成一组互不相关、按方差从大到小排序的新变量(主成分)，筛选前 k 个累计方差贡献率达标(常用 85%)的主成分替代全部原始特征，剔除低方差冗余维度，PCA 作为高效的学习方法，目前已应用于元素共生组合规律划分、矿床地球化学分区等领域。

(2)支持向量机是一种以最大化分类间隔为优化目标的有监督机器学习模型，可实现分类与回归任务。在样本特征空间寻找最优分离超平面，让两类距离超

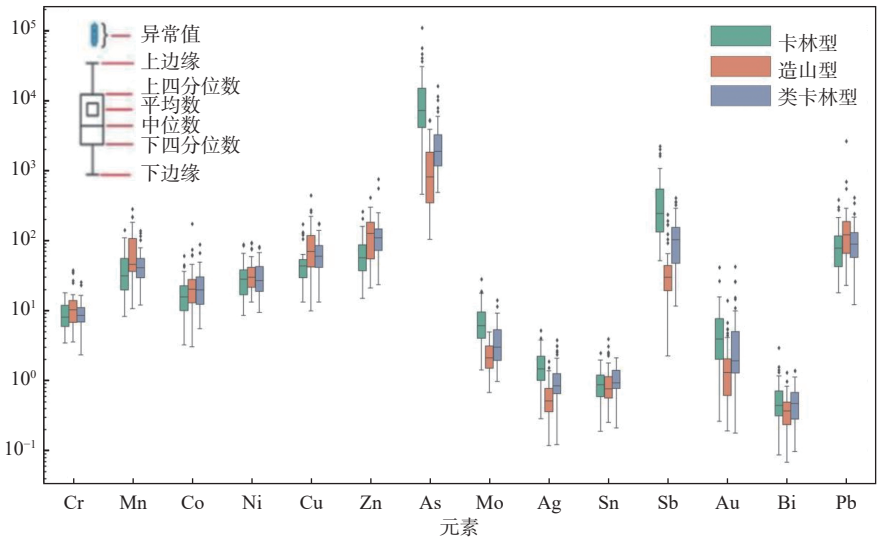


图2 西秦岭地区三类金矿床黄铁矿的 14 种元素含量的箱线图

Fig. 2 Box plots of contents of 14 elements in pyrite from three types of gold deposits in the West Qinling area

平面最近的样本(支持向量)与超平面间隔最大化,通过约束优化求解最优超平面参数,是矿床判别、微量元素分类常用模型。

(3)随机森林是一种基于决策树集成的机器学习算法,广泛应用于分类和回归任务。它通过构建多棵决策树,并结合 Bagging 思想(即有放回抽样)来提高模型的准确性,最终的预测结果是通过所有决策树的投票或平均值来决定。

3.3 数据预处理

由于黄铁矿微量元素来自不同文献,涵盖了西秦岭不同地区不同成因类型金矿床的黄铁矿微量元素数据,导致一些黄铁矿的部分微量元素的数据缺失。因此,在建立模型之前,需要对数据集进行预处理(董赛娜等,2024)。

(1)将低于检测限的数据以及个别文献不完全包含这 14 种元素的数据视为缺失值。为防止人为因素占比过大,需要对数据集中的元素进行筛选,剔除缺失值大于 50% 的元素,最终保留 Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Sn、Sb、Au、Bi、Pb 等 14 种微量元素。

(2)对缺失的黄铁矿微量元素含量使用 Scikit-learn 的 KNNImputer 函数进行补全。KNNImputer 函数的本质在于通过距离度量找到数据集中与目标样本最接近的 k 个邻居,并利用这些邻居的值来估算目标样本的缺失值。

(3)通过对数变换使数据更接近正态分布,从而满足统计分析方法的假设条件。对数变换能够缩小极端值之间的差异,使数据更加平稳,有利于后续的建模和分析。在某些情况下,两个变量之间的关系可能是非线性的,通过对数变换后,它们之间的关系可能变为线性或更接近于线性。

3.4 数据分割

经过数据筛选和预处理后,保留了 3 062 条符合标准的数据集,将其中的 80% 用于训练机器学习模型,剩下的 20% 则用于测试训练模型的性能。

3.5 参数调整

不仅样本数量大小影响 SVM 和 RF 模型,而且模型的参数也对模型分类结果起至关重要的作用。SVM 共 C 和 gamma 2 个参数,。通过网格搜索法和 5 折交叉验证法,最后确定模型参数 C 为 1,gamma 为 0.25(图 3)。在 RF 算法构建分类模型的过程中,森林中每个决策树的最大深度、树的数量和最大特征数

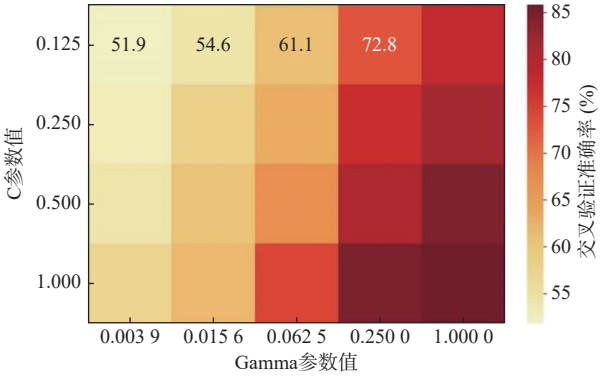


图3 SVM 网格搜索超参数 C 和 gamma 模型的 F1 得分

Fig. 3 F1 scores of SVM models with hyperparameters C and gamma optimized by grid search

等参数影响着随机森林模型的分类结果。使用网格搜索和 5 折交叉验证的方法寻找最优参数。RF 分类算法在最大深度为 25, 树的数量为 121, 最大特征值为 4 时, 是 RF 分类模型最优的模型参数组合(图 4)。

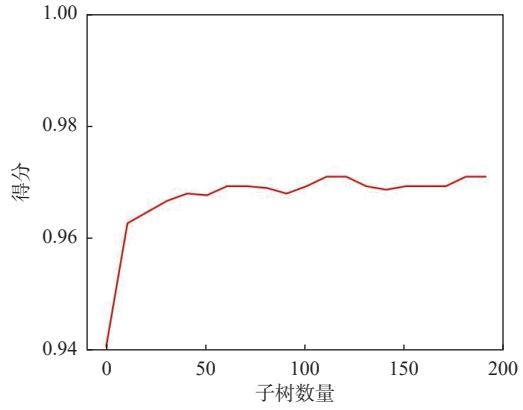


图4　子树数量从 0～200 的得分曲线

Fig. 4　Score curve with the number of subtrees ranging from 0 to 200

4　结果与讨论

通过 RF 和 SVM 模型得出的混淆矩阵(图 5a、5b)。从 RF 混淆矩阵可以看出, 造山型金矿床有 8 个误分类样本, 类卡林型金矿床有 10 个误分类样本, 而卡林型金矿床的准确度低于二者(图 5a)。SVM 与 RF 的混淆矩阵相比, 卡林型金矿床误分率较高, 存在 19 个卡林型金矿床误分为类卡林型金矿床, 造山型金矿床有 9 个误分类样本, 类卡林型金矿床有 9 个误分类样本(图 5b)。

RF 分类模型不仅是有效的集成方法, 还能够提供特征重要性评估, 可以展示参与分类的元素对分类模型的重要性。为了得到对分类模型重要性较高的几个元素, 需要利用测试集测试过的较准确的模型对元素的特征重要性值进行排列。结果表明, Au、As、Sb 等元素的重要性较为靠前(图 6), 这些元素对 3 类矿床的成因类型判别可能较为有效。

采用降维方法对黄铁矿微量元素数据进行主成分(PCA)分析, 即在保留主要信息的前提下把多指标转化为少数几个综合指标。使用主成分分析将黄铁矿微量元素数据从高维降为低维, 并且利用其中的两个主成分作图, 从而使数据信息化。研究结果表明, PC1-PC4 保留了原始数据的 69.60%; 第一主成分 PC1 具有最大的方差, PC2 次之, 二者一共保留了原始数据的 49.38%, 能在一定程度上代表原始数据。元素载荷图结果表明, Au 元素对 PC1 贡献大(图 7), 指示其对 3 类矿床的成因类型判别具有一定价值, 这与元素特征值重要性排序较为吻合(图 6)。元素载荷图中方向一致代表元素在 PC1、PC2 维度中相关性较强, 在金矿成因类型判别中具有类似的作用。

如前文所述, SVM 和 RF 分类模型具有良好的性能, 然而这种基于多变量的分类模型很难进行可视化。虽然传统的二维判别图会丢失一些信息, 但是却更直观和更方便, 因此二维判别图通常是学者们比较青睐的选择。例如, Gregory et al.(2015)率先利用随机森林方法构建了可区分 6 种不同类型黄铁矿的分类器, 为

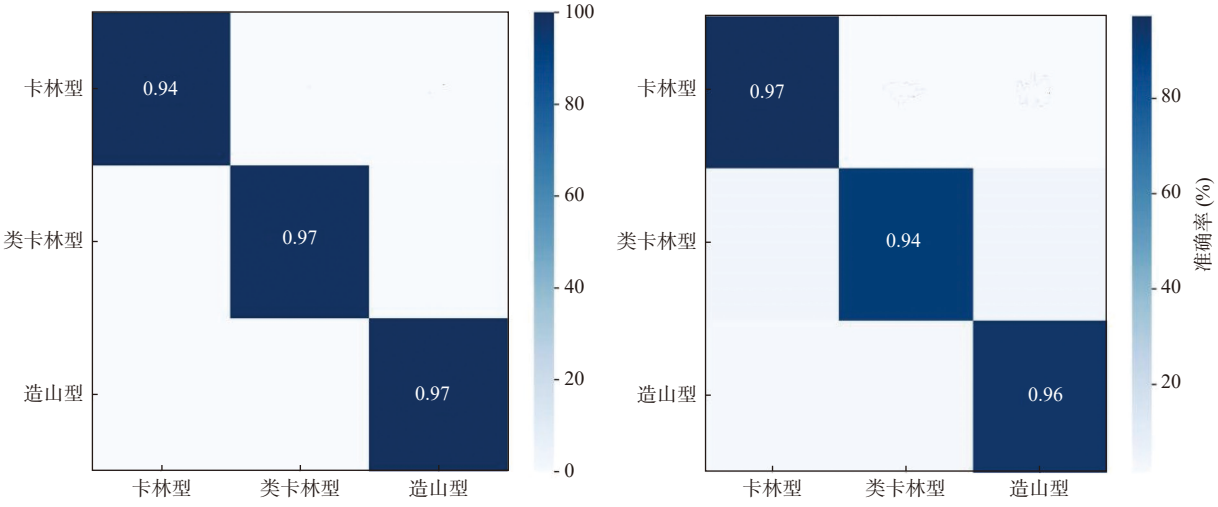


图5　RF(a)和 SVM(b)分类模型在测试集的混淆矩阵

Fig. 5　Confusion matrices of (a) RF and (b) SVM classification models on the test set

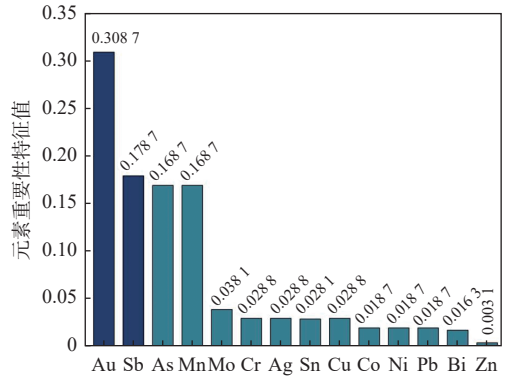


图6 元素特征重要性排序

Fig. 6 Ranking of elemental feature importance

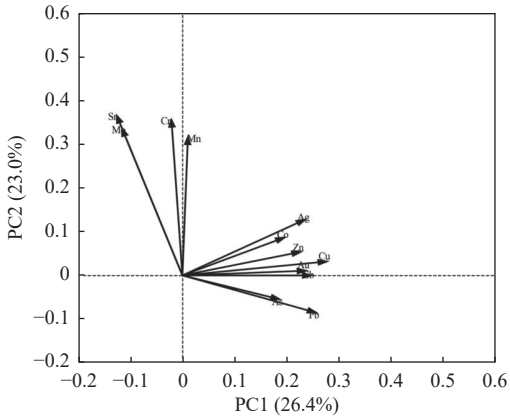


图7 元素载荷图

Fig. 7 Element loading plot

矿物微量元素的大数据判别提供了方法学基础。Sun et al.(2022)使用决策树等算法建立了区分不同 Pb-Zn 矿床类型的分类模型。Babedi et al.(2022)选取 As、Cu、Au、Co、Sb 等 5 种元素进行主成分分析，发现卡林型金矿床因 Au、As 和 Sb 含量显著偏高而易于与其他类型矿床区别。和越等(2026)基于全球 4 544 组黄铁矿微量元素数据，构建了 RF 与 SVM 模型，结果显著优于传统 Co-Ni 及 Ni-Co-As 图解，并成功将峪耳崖金矿床判别为岩浆热液型，该结果与地质证据高度吻合。邓依等(2024)依据黄铁矿微量元素进行金矿类型判别，运用 PCA 分析并获得了 Co-Ni 二元图解。Wang et al.(2024)对收集的 3 062 条数据采用决策树和 SVM 进行分类，准确率达到 91%。

笔者在大数据机器学习训练模型的基础上，综合考虑上述随机森林中元素特征值重要性顺序(图 6)、元素载荷图中元素对分类的贡献(图 7)、不同元素之间相关性系数(图 8)等结果，构建了 ln(Au)-ln(As)-ln(Sb)三元图(图 9)。研究结果表明，造山型金矿床的黄铁矿中 Au 权重在混合元素中占比较高，而类卡林型矿床中黄铁矿更富 Sb，卡林型向 As 端聚集。造山型金矿是典型的受脆–韧性剪切带控制的中温热液矿床，金以自然金、银金矿形式沉淀，不依赖含砷黄铁矿等载体，因此 Au 含量高(王庆飞等，2019)；类卡林型但相比于卡林型，As 富集程度较低，但比造山型稍高，反映仍有部分低温热液贡献(张复新和王立社，2013)卡林型金矿中的 Au 以超显微纳米金形式赋存于含砷黄铁矿中，As 含量较高，是较为可靠的特征指示元素。

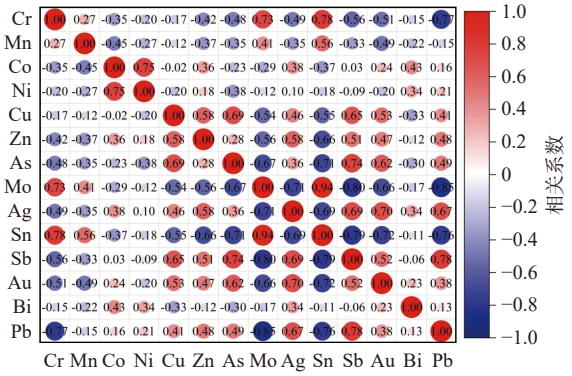


图8 黄铁矿微量元素之间的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients among trace elements in pyrite

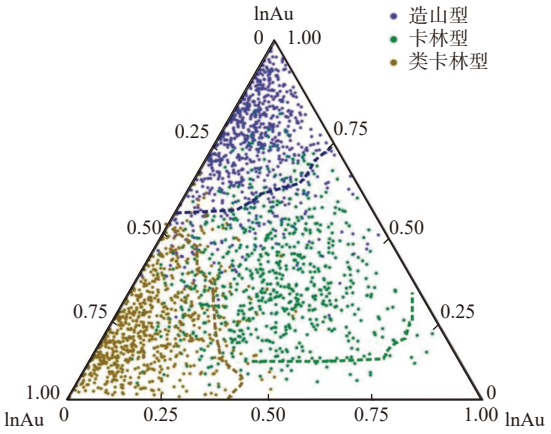


图9 三种成因类型金矿床黄铁矿 ln(Au)-ln(As)-ln(Sb)三元判别图

Fig. 9 Ternary discrimination diagram of ln(Au)–ln(As)–ln(Sb) for pyrite from three genetic types of gold deposits

5 结论

(1)西秦岭的造山型、卡林型和类卡林型金矿床具有显著不同的地质特征。造山型金矿床的赋矿围岩多样，包括泥盆系—三叠系的变质碎屑岩、火山岩及中酸性岩脉，其形成于华北–华南板块碰撞造山的

构造–变质活动。卡林型金矿床的赋矿围岩为寒武系—三叠系浅变质细碎屑岩–碳酸盐岩, 其成矿以地层预富集为基础。类卡林型金矿床的赋矿围岩为浅变质细碎屑岩–碳酸盐岩, 其成矿与印支期岩浆活动关系密切。

(2)搜集了西秦岭造山型、卡林型和类卡林型金矿床的 2 766 条黄铁矿微量元素数据, 基于随机森林(RF)、支持向量机(SVM)等机器学习方法和主成分分析(PCA), 构建了 3 类矿床的成因分类模型。随机森林、支持向量机分类模型在测试集上的分类准确度分别为 97.1% 和 94.2%。主成分分析和随机森林特征重要性排序结果分别为 Au、Sb、As。

(3)构建的黄铁矿 ln(Au)-ln(As)-ln(Sb)三元图解可以有效区分西秦岭地区的造山型、卡林型、类卡林型金矿床, 造山型金矿床的黄铁矿中 Au 权重在混合元素中占比较高, 而类卡林型更富 Sb, 卡林型向 As 端聚集。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈雅鹏, 唐利, 胡昕凯, 等. 豫西栾川矿集区南泥湖和石宝沟岩体锆石 U-Pb-Hf-O 同位素特征及地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 278−289.

CHEN Yapeng, TANG Li, HU Xinkai, et al. Zircon U-Pb-Hf-O Isotopic Characteristics and Geological Significance of Nannihu and Shibaogou Rock Mass in Luanchuan Ore Concentration Area, Western Henan Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 278−289.

陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 2004, 50(2): 134−152.

CHEN Yanjing, ZHANG Jing, ZHANG Fuxin, et al. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. Geological Review, 2004, 50(2): 134−152.

邓依, 张静, 钟日晨, 等. 基于机器学习的主成分分析方法在金矿类型判别中的应用: 以黄铁矿元素地球化学特征为例[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1801−1816.

DENG Yi, ZHANG Jing, ZHONG Richeng, et al. Application of principal component analysis method based on machine learning to gold deposit type discrimination: a case study of the geochemical characteristics of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1801−1816.

董长青, 于皓丞, 刘子锐, 等. 西秦岭马泉金矿床载金矿物地球化学特征和对金成矿作用的启示[J]. 地学前缘, 2026, 33(3): 471−491.

DONG Changqing, YU Haocheng, LIU Zirui, et al. Geochemical characteristics of gold-bearing minerals and their implications for gold mineralization in the Maquan gold deposit, Western Qinling Orogen[J]. Earth Science Frontiers, 2026, 33(3): 471−491.

董赛娜, 王达, 马国桃, 等. 基于机器学习的闪锌矿微量元素特征在铅锌矿床类型识别中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(4): 614−629.

DONG Saina, WANG Da, MA Guotao, et al. Application of machine learning to predict types of Pb-Zn deposits by using trace elemental characteristics of sphalerite[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(4): 614−629.

董子良, 胡新露. 早子沟金矿黄铁矿原位微量元素和硫同位素特征对矿床成因的指示[J]. 地球科学, 2024, 49(12): 4385−4403.

DONG Ziliang, HU Xinlu. In Situ Trace Elements and Sulfur Isotope Analysis of Pyrite from Zaozigou Gold Deposit: Implications for Ore Genesis[J]. Earth Science, 2024, 49(12): 4385−4403.

和越, 崔亮杰, 曾庆文, 等. 冀东峪耳崖金矿床成因研究: 来自黄铁矿地球化学数据机器学习的证据[J]. 岩石学报, 2026, 42(2): 557−575.

HE Yue, CUI Liangjie, ZENG Qingwen, et al. Genesis of the Yu'erya gold deposit in eastern Hebei: Constraints from machine learning evidence in pyrite geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 2026, 42(2): 557−575.

樊松浩, 王达, 朱国韬, 等. 机器学习在金矿床成因类型识别中的应用: 基于黄铁矿微量元素地球化学特征的探索研究[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 30−47.

FAN Songhao, WANG Da, ZHU Guotao, et al. Application of Machine Learning in the Genetic Classification of Gold Deposits: An Exploratory Study Based on Pyrite Trace Element Geochemistry[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 30−47.

靳晓野. 西秦岭夏河-合作地区老豆金矿矿床成因的地球化学和同位素年代学制约 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2013: 1–144.

JIN Xiaoye. Genesis of the Laodou Gold Deposit, Xiahe–Hezuo Area, West Qinling Orogen: Constraints from the Geochemistry and Isotopic Geochronology[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013: 1–144.

李承鸿, 裴秋明, 徐勇, 等. 川西康定偏岩子富氟镁石造山型金矿床成矿机制: 基于金成色值、流体包裹体和热力学模拟的限定[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 156−171.

LI Chenghong, PEI Qiuming, XU Yong, et al. Ore-Forming Mechanism of the Sellaite-Bearing Orogenic Gold Deposits in Pianyan-

zi, Kangding, West Sichuan: Constraints from Gold Fineness, Fluid Inclusions and Thermodynamic Modeling[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 156−171.

刘家军, 刘冲昊, 王建平, 等. 西秦岭地区金矿类型及其成矿作用[J]. 地学前缘, 2019, 26(5): 1−16.

LIU Jiajun, LIU Chonghao, WANG Jianping, et al. Classification and mineralization of the gold deposits in the western Qinling region, China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(5): 1−16.

刘协鲁, 王义天, 刘敏, 等. 西秦岭凤太矿集区柴蚂金矿床成因的流体包裹体和稳定同位素证据[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 873−888.

LIU Xielu, WANG Yitian, LIU Min, et al. Genesis of the Chaima gold deposit in the Fengtai ore concentration area, Western Qinling: Constrained by fluid inclusion and stable isotope results[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(5): 873−888.

孟明亮, 黎建明, 张双腾. 造山型金矿床成矿规律与综合找矿方法[J]. 世界有色金属, 2025(24): 59−62.

MENG Mingliang, LI Jianming, ZHANG Shuangteng. Orogenic Gold Deposits: Metallogenic Regularities and Comprehensive Prospecting Methods[J]. World Nonferrous Metals, 2025(24): 59−62.

牛警徽, 吴明刚, 田福泉, 等. 基于机器学习和黄铁矿微量元素识别金矿床类型[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 20−29.

NIU Jinghui, WU Minggang, TIAN Fuquan, et al. Classification of Gold Deposit Types Based on Machine Learning and Pyrite Trace Element Geochemistry[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 20−29.

唐茂焱, 雷鸣, 李健, 等. 闪锌矿地球化学大数据与人工智能融合驱动矿床成因类型智能判别[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2025, 52(6): 1210−1229.

TANG Maoyan, LEI Ming, LI Jian, et al. Intelligent discrimination of mineral deposits based on integration of geochemical big data and artificial intelligence[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(6): 1210−1229.

滕文航, 潘增锋, 王瑞. 基于机器学习的榍石微量元素特征判别岩浆岩类型[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2025, 52(5): 873−887.

TENG Wenhang, PAN Zengfeng, WANG Rui. Machine-learning-based classification of igneous rock type using titanite trace element data[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(5): 873−887.

王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用[J]. 地球科学, 2019, 44(6): 2155−2186.

WANG Qingfei, DENG Jun, ZHAO Hesen, et al. Review on orogenic gold deposits[J]. Earth Science, 2019, 44(6): 2155−2186.

王雪梅, 赵静, 李军, 等. 西秦岭马脑壳金矿床黄铁矿 Nano-SIMS 原位微区硫同位素组成及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2025, 44(6): 1349−1363.

WANG Xuemei, ZHAO Jing, LI Jun, et al. Nano-SIMS in-situ sulfur isotopic compositions of pyrites from the Manaoke gold deposit in the western Qinling orogen and their geological significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2025, 44(6): 1349−1363.

王义天, 陈绍聪, 胡乔青, 等. 陕西凤太矿集区多金属成矿作用的构造控制[J]. 岩石学报, 2018, 34(7): 1959−1976.

WANG Yitian, CHEN Shaocong, HU Qiaoqing, et al. Tectonic controls on polymetallic mineralization in the Fengxian-Taibai ore cluster zone, Western Qinling, Shannxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(7): 1959−1976.

王智宇, 王达, 邱昆峰, 等. 机器学习在矿物岩石地球化学大数据挖掘中的应用与展望[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2025, 52(5): 844−858.

WANG Zhiyu, WANG Da, QIU Kunfeng, et al. Applications and perspectives of machine learning in geochemical big data mining of minerals and rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(5): 844−858.

辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 75−86.

XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 75−86.

严文婷, 唐利, 杨谦牧, 等. 华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩成因及地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 314−327.

YAN Wenting, TANG Li, YANG Qianmu, et al. Petrogenesis and Geological Significance of the Taihua Group TTG Gneisses in the Xiong'ershan Area, Southern Margin of the North China Craton[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 314−327.

张复新, 王立社. 秦岭造山带卡林型-类卡林型金矿勘查与研究回顾[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(5): 21−27.

ZHANG Fuxin, WANG Lishe. Exploration and research review of carlin and carlin-like type gold deposits in Qinling Mountains orogenic belt[J]. Gold Science and Technology, 2013, 21(5): 21−27.

赵江林, 唐利, 田浩浩, 等. 南秦岭双元沟铜矿床成矿斑岩的黑云母和角闪石成分特征及成矿意义[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2024, 51(5): 867−879.

ZHAO Jianglin, TANG Li, TIAN Haohao, et al. Compositions and metallogenic significance of biotite and amphibole from fertile porphyry in the Shuangyuangou copper deposit in South Qinling[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(5): 867−879.

朱赖民, 张国伟, 刘家军, 等. 西秦岭-松潘构造结中的卡林型-类卡林型金矿床: 成矿构造背景、存在问题和研究趋势[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 201−204.

ZHU Laimin, ZHANG Guowei, LIU Jiajun, et al. Carlin-type and Carlin-like gold deposits in the West Qinling-Songpan tectonic node: Metallogenic tectonic setting, existing problems and research trends[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1):

201−204.

Ammann A A. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS): A versatile tool[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2007, 42(4): 419−427.

Babedi L, von der Heyden B P, Tadie M, et al. Trace elements in pyrite from five different gold ore deposit classes: A review and meta-analysis[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2022, 516: 47−83.

Chen L, Li X H, Li J, et al. Extreme variation of sulfur isotopic compositions in pyrite from the Qiuling sediment-hosted gold deposit, West Qinling orogen, central China: An in situ SIMS study with implications for the source of sulfur[J]. Mineralium Deposita, 2015, 50(6): 643−656.

Deditius A P, Reich M, Kesler S E, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 140: 644−670.

Du B, Shen J, Santosh M, et al. Textural, compositional and isotopic characteristics of pyrite from the Zaozigou gold deposit in West Qinling, China: Implications for gold metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 130: 103917.

Fan C, Yu H C, Tamer M T, et al. Ore genesis of the Nanban gold deposit, West Qinling Orogen: Insights from monazite geochronology and geochemistry of sulfides[J]. Ore Geology Reviews, 2025, 179: 106531.

Fan L, Chang J, Li J W, et al. U-Pb ages of apatite, sulfur isotopes of sulfides and possible origin of the Dashui hematite-rich, sulfide-deficient gold deposit in the West Qinling orogen, Central China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2025, 279: 106432.

Gregory D D, Large R R, Halpin J A, et al. Trace element content of sedimentary pyrite in black shales[J]. Economic Geology, 2015, 110(6): 1389−1410.

Li N, Deng J, Yang L Q, et al. Paragenesis and geochemistry of ore minerals in the epizonal gold deposits of the Yangshan gold belt, West Qinling, China[J]. Mineralium Deposita, 2014, 49(4): 427−449.

Li N, Deng J, Groves D I, et al. Controls on the distribution of invisible and visible gold in the orogenic gold deposits of the Yangshan Gold Belt, West Qinling Orogen, China[J]. Minerals, 2019, 9(2): 92.

Li R, Chen H, Large R R, et al. Ore-forming fluid source of the orogenic gold deposit: Implications from a combined pyrite texture and geochemistry study[J]. Chemical Geology, 2020, 552: 119781.

Liu C, Liu J, Carranza E J M, et al. Geological and geochemical constraints on the genesis of the Huachanggou gold deposit, Western Qinling region, Central China[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73: 354−373.

Ma J, Lü X, Li S, et al. Pyrite zonation and source of gold in the Pangjiahe orogenic gold deposit, West Qinling Orogen, Central China[J]. Ore Geology Reviews, 2021, 139: 104578.

Mattauer M, Matte P, Malavieille J, et al. Tectonics of the Qinling Belt: Build-up and evolution of eastern Asia[J]. Nature, 1985, 317(6037): 496−500.

Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(11): 2781−2796.

Reich M, Deditius A, Chryssoulis S, et al. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 104: 42−62.

Sun G T, Zhou J X. Application of machine learning algorithms to classification of Pb–Zn deposit types using LA–ICP–MS data of sphalerite[J]. Minerals, 2022, 12(10): 1293.

Tang L, Zhao Y, Zhang S T, et al. Origin and evolution of a porphyry-breccia system: Evidence from zircon U-Pb, molybdenite Re-Os geochronology, in situ sulfur isotope and trace elements of the Qiyugou deposit, China[J]. Gondwana Research, 2021, 89: 88−104.

Wang Y, Qiu K F, Telea A C, et al. Interpreting mineral deposit genesis classification with decision maps: A case study using pyrite trace elements[J]. American Mineralogist, 2024, 109(12): 2116−2126.

Wu Y F, Li J W, Evans K, et al. Ore-forming processes of the Daqiao epizonal orogenic gold deposit, West Qinling orogen, China: Constraints from textures, trace elements, and sulfur isotopes of pyrite and marcasite, and Raman spectroscopy of carbonaceous material[J]. Economic Geology, 2018, 113(5): 1093−1132.

Yang J, Yang X, Li J, et al. Constraints on the genesis of the Shuangwang gold deposit in Qinling Orogen, central China: Evidence from in situ trace element and sulfur isotope[J]. Minerals, 2022, 12(8): 995.

Yu H D, Fu Y Z, Liu X Y, et al. The gold mineral systems of the West Qinling orogen, central China: New insight from the Baguamiao gold deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 162: 105705.

Zhang J, Li L, Gilbert S, et al. LA-ICP-MS and EPMA studies on the Fe-S-As minerals from the Jinlongshan gold deposit, Qinling Orogen, China: Implications for ore-forming processes[J]. Geological Journal, 2014, 49(4−5): 482−500.