

夏甸金矿床金红石机器学习成因判别与成矿作用分析

王荣超¹,杨晓奇^{1*},杨晓鹏¹,高腾¹,唐伟洋¹,陈树杰¹,陈煜东²

(1. 招金矿业股份有限公司; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院)

摘要:金红石是胶东金矿床中的常见副矿物,但金红石成因及蕴含的成矿信息仍不明确。对招平断裂南端的夏甸金矿床金红石展开了岩相学、原位地球化学分析、机器学习等综合研究,结果显示,夏甸金矿床金红石主要发育于招平断裂下盘的硅化、黄铁绢英岩化蚀变岩中,呈碎裂-交代结构,与黄铁矿、黄铜矿等矿石矿物共生。通过系统收集全球已发表不同成因类型及矿床类型中金红石数据,采用随机森林模型,针对夏甸金矿床金红石微量元素特征开展成因判别,发现夏甸金矿床金红石具有典型热液成因特征,能够指示金成矿作用。此外,利用随机森林模型将金红石判别为“胶东型”金矿床成因类型,其较高的真正类率指示该类矿床与其他类型矿床金红石微量元素特征存在显著区别。其中,对判别起重要作用的元素为Cr、Si、W、Fe、Cu、V、Ta。这些元素富集指示该区基底的高级变质岩在成矿作用期间发生元素活化,并进入金成矿系统,同时指示强烈的水岩反应在夏甸金矿床的形成过程中作用显著。

关键词:金红石;元素地球化学;机器学习;成因判别;夏甸金矿床;招平断裂

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)04-0079-06

doi:10.11792/hj20250415

引言

胶东半岛是中国重要的金矿成矿区,目前已经探明黄金资源储量超过5 000 t,其大地构造位置处于华北克拉通东南缘,郯庐断裂东侧,太平洋板块西侧,属于多构造单元叠加复合部位^[1]。胶东半岛在中生代为活动大陆边缘,构造-岩浆活动广泛发育,产出多期次花岗质侵入岩、中基性脉岩及大量金矿床。胶东金矿床的成因机制存在较大争议,主要存在幔源流体成矿、岩浆热液成矿、大气降水成矿、变质流体成矿等观点^[2-12]。胶东半岛主要产出了招远—莱州、栖霞—蓬莱、牟平—乳山3个金成矿带,其中超过85%的黄金资源产于招远—莱州金成矿带内^[1-2,13]。招平断裂是招远—莱州金成矿带内的主要区域性控矿构造,控制了区域内如大尹格庄、夏甸等大型、超大型金矿床的产出。夏甸金矿床是招平断裂南端的典型“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿床,矿体主要产于招平断裂下盘厚大的破碎蚀变带内^[13-16]。因此,厘定夏甸金矿床的矿床成因对判别胶西北地区金矿床成因及推动找矿勘查工作具有重要作用。

金红石是胶东金矿床中普遍发育的副矿物,广泛存在于“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿床及“玲珑式”

石英脉型金矿床中。前人研究表明,从赋矿围岩到矿体,金红石Ti含量逐渐减少,在矿体周围可以形成Ti晕,因此,金红石的地球化学特征可以作为矿化标志及找矿依据。同时,金红石富含的Fe、W、Si、Al、Nb等多种微量元素也被用于探讨金沉淀成矿机理及矿床成因^[17]。夏甸金矿床是胶西北地区典型的“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿床,在前期的生产及科研过程中,揭露了金红石广泛发育于蚀变围岩及矿化带中,为研究胶东金矿床成因提供了良好的条件。本文借助数据科学研究范式,通过构建金红石微量元素数据库,建立随机森林模型,判别夏甸金矿床金红石成因,进一步探讨了矿床成因及成矿作用机制。

1 成矿地质背景

夏甸金矿床位于招平断裂南端,区域内主要出露太古宇胶东群,下元古界粉子山群、荆山群,上元古界蓬莱群,白垩系火山沉积岩及第四系(见图1)。其中,胶东群岩性包括黑云斜长变粒岩、斜长角闪片麻岩等,主要包含斜长石、石英、黑云母、辉石、角闪石等矿物,大部分斜长石已经绢云母化。荆山群主要分布于矿区中部及南部,与胶东群变质岩不整合接触,岩性包括黑云斜长变粒岩、含石墨石榴子石黑云斜长片

收稿日期:2024-10-09;修回日期:2025-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(42202332)

作者简介:王荣超(1972—),男,高级工程师,博士,研究方向为成矿理论与找矿勘查;E-mail:rongchaowang@126.com

*通信作者:杨晓奇(1986—),男,高级工程师,从事矿产资源预测评价与勘查设计工作;E-mail:yangxiaoqi1986@126.com

麻岩、透辉石大理岩等。

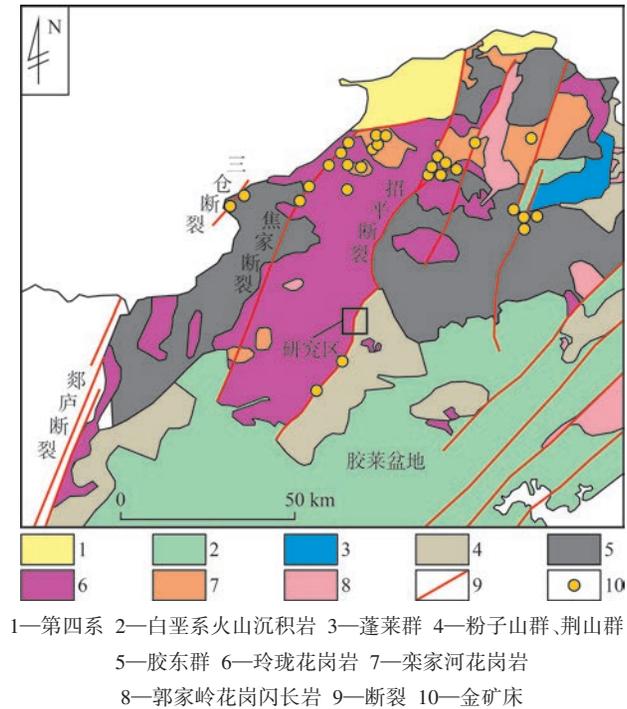


图1 胶西北地区地质简图(据文献[18]修改)

Fig. 1 Geological sketch of the northeastern Jiaodong area

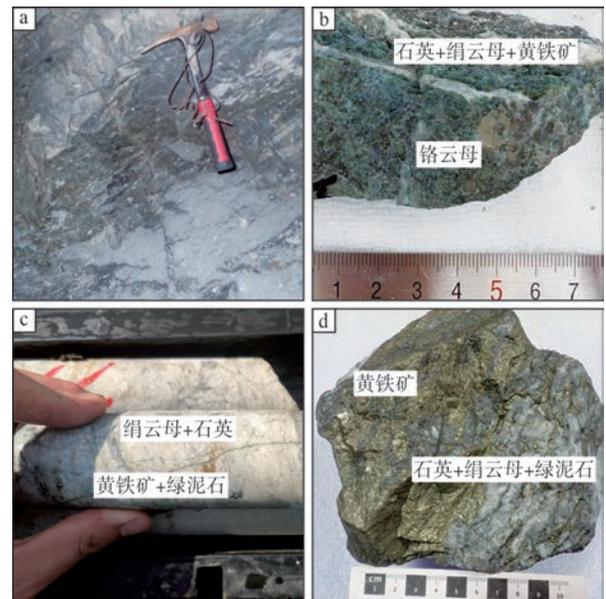
矿区内广泛出露侏罗纪玲珑花岗岩。玲珑花岗岩在矿区主要呈灰白色—肉红色,为中细粒等粒结构、块状构造,岩石中常见胶东群残留体。玲珑花岗岩主要呈岩基状分布于招平断裂下盘,是夏甸金矿床的主要赋矿围岩之一。

矿区内主要控矿构造为招平断裂,其主裂面沿胶东群、荆山群变质岩和玲珑花岗岩界面分布,平均产状约 $128^{\circ}\angle 45^{\circ}$,在走向和倾向方向上呈舒缓波状产出。主裂面相近部位破碎程度高,发育糜棱岩、碎裂岩,发育致密的黑色断层泥。此外,主断裂面下盘发育大量北东向或北西向次级构造,为次级断裂或节理,控制了部分金矿化的产出。

矿区内金矿化主要产于招平断裂下盘黄铁绢英岩化蚀变带和红化蚀变带,形态相对简单,倾角一般为 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$,呈脉状、似层状、透镜状或不规则状产出,常具有分支复合现象。矿石主要呈细脉浸染状构造、网脉浸染状构造,硫化物多以团块状出现在石英碎晶的边缘处(见图2),矿石内常见早期石英或蚀变岩角砾。通常,蚀变岩型矿石的产出靠近招平断裂主裂面或其他强构造活动处,受构造控制明显,常具有定向特征。矿石矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,金主要以银金矿的形式产出^[13-14,19-20]。

2 分析及判别方法

样品均采自招平断裂主裂面下盘的矿化蚀变带中,岩性包括黄铁绢英岩化碎裂状花岗岩、绢英岩化



a—黄铁绢英岩化蚀变岩型矿体 b—铬云母化蚀变岩
c—绢英岩化花岗岩 d—黄铁绢英岩化花岗岩

图2 夏甸金矿床代表性矿石照片

Fig. 2 Representative ore photographs of the Xiadian Gold Deposit

碎裂状花岗岩及碎裂状花岗岩。

2.1 金红石微量元素分析方法

金红石微量元素分析采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)完成,测试单位为中南大学地球科学与信息物理学院。测试过程中,首先将样品放置在密封的消解室中,保持高纯度的氦气与氩气持续冲洗。测试条件设置如下:光斑直径为 $35\mu\text{m}$,激光的频率为 5Hz ,能量密度为 $2.5\text{J}/\text{cm}^2$ 。每个激光点分析时间为 90s ,其中包括 30s 的背景测量、 40s 的分析信号和 20s 的冲洗时间。监测元素包括 ^{29}Si 、 ^{53}Cr 、 ^{57}Fe 、 ^{65}Cu 、 ^{89}Y 、 ^{91}Zr 、 ^{94}Nb 、 ^{95}Mo 、 ^{177}Hf 、 ^{181}Ta 、 ^{182}W 、 ^{208}Pb 。

2.2 机器学习判别方法

随机森林算法是一类集成学习算法,其基本思想是将多个分类器组合,形成一个效果更佳、预测更准的集成分类器,从而达成精确分类的目的。每棵决策树的构建都是通过对训练数据的随机抽样生成的,意味着每棵树都是基于不同的子集数据进行训练的,这能有效降低系统性判别偏差。此外,随机森林算法引入了特征随机选择机制,在每次划分节点时,从所有特征中随机选择一个子集,然后从这个子集中选择最优特征来进行划分。这种随机性有助于减少过拟合,提高模型的泛化能力。随机森林算法的预测过程是通过将每棵决策树的预测结果进行整合而得出最终预测结果。对于分类问题,通常采用投票的方式,即选择票最多的类别作为最终预测结果。

总体而言,随机森林算法具有以下特点:①能够处理大量高维数据,并且不需要对数据进行特征缩放;②具有较强的抗过拟合能力,能够在不剪枝的情况下处理高维数据;③能够评估特征的重要性,提供有用的特征选择信息;④容易并行化处理,适合在大规模数据集上进行训练^[21-22]。

本文的金红石微量元素数据收集自文献[23-29],数据按照金红石成因类型(热液成因、变质成因、岩浆成因、碎屑来源)及矿床类型(“胶东型”金矿床、造山型金矿床、VHMS(火山成因块状矿化物)型矿床、侵入岩相关金矿床、斑岩型铜金矿床)整理收集后,进行数据预处理(包括异常值剔除、缺失值插值、中心对比变换等)。金红石微量元素数据使用5折交叉验证,划分为训练集及验证集,并将夏甸金矿床金红石微量元素数据作为预测集。准确率、精度、召回率、F1值、Kappa系数等评价指标及混淆矩阵用于评价训练模型。

3 金红石结构及地球化学特征

3.1 金红石矿物学特征

在夏甸金矿床中,金红石常出现在热液蚀变带,与半自形钾长石、钠长石、绢云母,以及暗色矿物(如榍石、角闪石、云母等)共生。夏甸金矿床中发现的金红石多发育于绢英岩化、黄铁绢英岩化花岗岩和红化花岗岩中。金红石多呈自形一半自形,且以柱状、板状及颗粒状分布于岩(矿)石中。反射光下,金红石呈现弱非均质性,反射率显著低于黄铁矿,并与黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物紧密共生(见图3)。

3.2 金红石地球化学特征

夏甸金矿床金红石微量元素分析结果见表1。由表1可知:金红石具有较高的Si、Fe、Nb、W含量,其

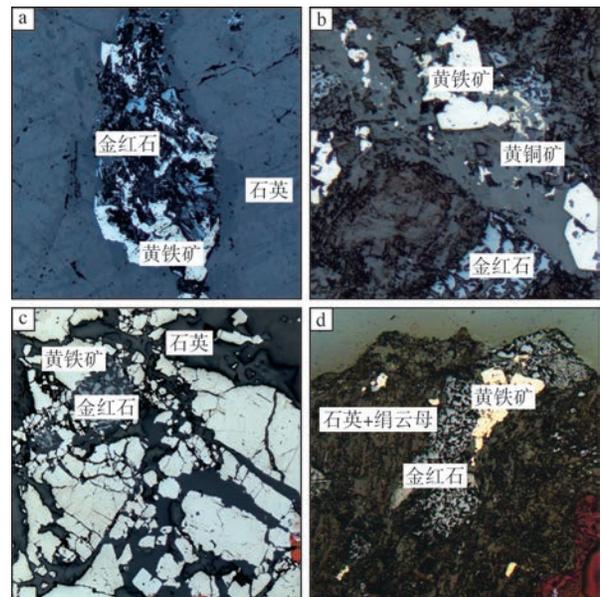


图3 夏甸金矿床金红石显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of rutile from the Xiadian Gold Deposit

平均质量分数分别为 $2\ 558.97 \times 10^{-6}$ 、 $3\ 485.37 \times 10^{-6}$ 、 $1\ 355.15 \times 10^{-6}$ 、 $3\ 577.75 \times 10^{-6}$,均超过了 $1\ 000 \times 10^{-6}$;但是,这些元素具有较大的标准差,表明其含量分布范围较大。金红石中Cu、Mo、Hf、Pb含量较低,平均质量分数分别为 1.90×10^{-6} 、 0.44×10^{-6} 、 7.92×10^{-6} 、 4.28×10^{-6} ,均小于 10×10^{-6} 。金红石中V、Cr、Y、Zr、Ta等元素具有中等含量,其平均质量分数分别为 697.57×10^{-6} 、 50.58×10^{-6} 、 60.76×10^{-6} 、 70.77×10^{-6} 、 113.55×10^{-6} 。

3.3 金红石随机森林模型判别结果

夏甸金矿床金红石随机森林模型评价指标见图4,金红石随机森林模型混淆矩阵及判别结果见图5。由图4、图5可知:金红石矿床类型判别的随机森林模型性能高于金红石成因判别模型;金红石成因类型判别模型的准确率为0.75、精度为0.77、召回率为0.72、

表1 夏甸金矿床金红石微量元素分析结果

Table 1 Trace element analysis results of rutile from the Xiadian Gold Deposit

元素	最大值	平均值	最小值	标准差	25%分位点	50%分位点	75%分位点
Si	10 884.56	2 558.97	257.89	2 514.22	1 220.88	1 551.94	3 172.35
V	1 977.11	697.57	34.00	543.87	255.70	564.16	1 024.84
Cr	375.60	50.58	4.50	69.07	12.96	25.63	67.66
Fe	16 118.35	3 485.37	614.38	3 865.97	1 224.45	1 570.95	5 165.49
Cu	7.68	1.90	0.06	1.34	1.11	1.68	2.20
Y	258.48	60.76	0.23	76.68	6.88	21.29	84.26
Zr	286.69	70.77	1.45	61.93	28.78	65.16	80.92
Nb	5 246.93	1 355.15	4.04	1 305.15	192.25	1 099.01	1 735.04
Mo	3.65	0.44	0.01	0.61	0.06	0.25	0.62
Hf	19.26	7.92	0.09	5.41	2.73	8.22	11.42
Ta	594.52	113.55	0.11	142.14	13.41	68.80	139.36
W	21 539.10	3 577.75	7.79	6 314.27	128.09	617.19	2 928.97
Pb	11.69	4.28	0.15	3.15	1.58	3.40	5.96

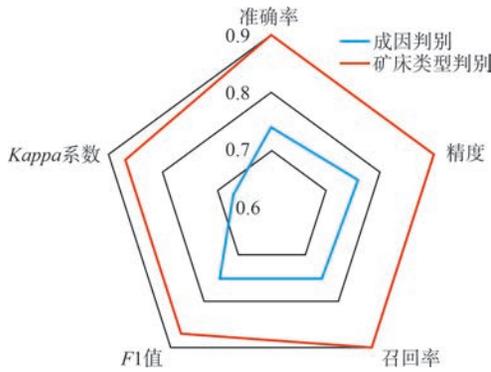
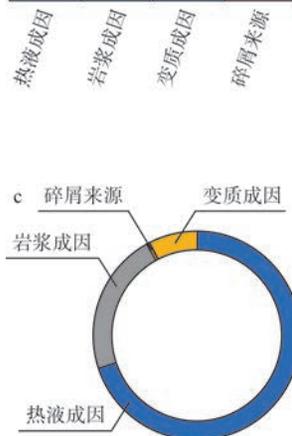


图4 夏甸金矿床金红石随机森林模型评价指标

Fig. 4 Evaluation metrics of the random forest model for rutile in the Xiadian Gold Deposit

a	0.84	0.03	0.03	0.08
	0.12	0.66	0.08	0.12
	0.07	0.03	0.61	0.26
	0.05	0.03	0.03	0.87
	热液成因	岩浆成因	变质成因	碎屑来源



b	0.97	0.01	0.01	0	0.01
	0	0.97	0.02	0	0.01
	0.06	0.03	0.82	0.05	0.04
	0.03	0	0.03	0.9	0.04
	0.06	0.03	0.1	0.17	0.64
	侵入岩相关金矿床	“胶东型”金矿床	斑岩型铜金矿床	VHMS型矿床	造山型金矿床

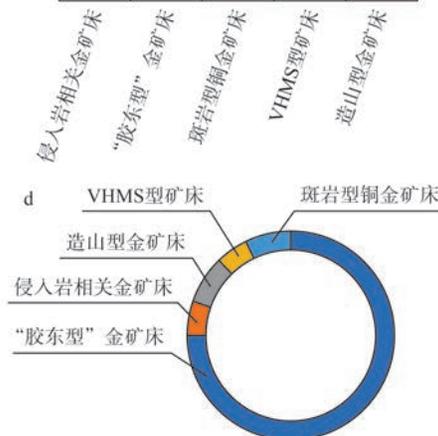


图5 夏甸金矿床金红石随机森林模型混淆矩阵及判别结果

Fig. 5 Confusion matrix and discrimination results of the random forest model for rutile in the Xiadian Gold Deposit

含钨、富钽流体沉淀形成^[15]。采用随机森林模型对夏甸金矿床成因进行判别,通过与不同成因类型金红石对比,发现夏甸金矿床金红石与热液成因金红石的地球化学特征最相似。此外,根据显微观察结果,金红石多发育于成矿较晚期的招平断裂下盘的硅化、黄铁绢英岩化蚀变岩中,其晶体呈碎裂-交代结构,与黄铁矿、黄铜矿等岩石矿物紧密共生,同样呈现出热液作用形成的特点。同时,前人对夏甸金矿床金红石进行了U-Pb测年,获得的金红石形成年龄为119.3 Ma,与成矿时间基本一致^[15]。因此,夏甸金矿床金红石由金成矿期的热液流体作用形成。

热液成因金红石的晶格中,可通过类质同象替换或离子扩散作用混入Nb、Ta、Si、Sb、W、Zr、Hf、Fe、Cr、V等元素的阳离子,这些元素的含量与金红石形成时

F1值为0.75、Kappa系数为0.66,混淆矩阵中各类型真正类率及各项判别指标均大于0.6;金红石矿床类型判别随机森林模型的准确率为0.85、精度为0.84、召回率为0.86、F1值为0.82、Kappa系数为0.82,其混淆矩阵中各类型的真正类率也均大于0.6。其中,“胶东型”金矿床的真正类率最高,高达0.97。

4 夏甸金矿床金红石成因及对成矿作用的指示

金红石是各类岩石和热液矿床中常见的副矿物,具有变质成因、岩浆成因、碎屑来源等成因^[24]。在热液成矿作用中,金红石可形成于含钛矿物相(如黑云母、钛铁矿、钛磁铁矿、榍石等)的蚀变交代,也可通过

的环境及流体特征密切相关。在夏甸金矿床中,金红石形成与金矿化同时期的热液作用有关,因此,夏甸金矿床金红石的地球化学元素特征可以用于指示成矿作用条件及矿床成因。通过与不同类型矿床的金红石地球化学特征对比,本文建立的随机森林模型将夏甸金矿床金红石判别为“胶东型”金矿床,显著区别于其他类型热液矿床,包括造山型金矿床、斑岩型铜金矿床、侵入岩相关金矿床、VHMS型矿床。“胶东型”金矿床与传统造山型金矿床成矿作用方面具有诸多相似之处。例如:二者均由中低温、中低盐度成矿流体形成,多形成于挤压—拉张转换的构造环境,金矿化多赋存于破碎带蚀变岩-石英脉系统中,以及相似的流体交代形成的蚀变作用(钾长石化、硅化、绢云母化及碳酸盐化等)^[30]。但是,机器学习模型显著区分

了“胶东型”金矿床(训练数据包括河西、焦家、玲珑、金岭等金矿床)和传统造山型金矿床,表现在混淆矩阵中“胶东型”金矿床一类中的 TPR (真正类比率)值(见图5)。因此,“胶东型”金矿床与传统造山型金矿床具有显著区别。

随机森林模型提供了特征重要性计算方法,在模型取得较高性能(表现于较高的训练评价指标)的基础上,通过使用袋外误差(Out-of-Bag Error, OBE)方法计算了各元素在金红石随机森林判别模型中的特征重要性指标。随机森林模型特征重要性指标可以较全面地在数据集上评估各元素对判别结果产生的影响^[30]。夏甸金矿床金红石随机森林判别模型特征重要性指标见图6。

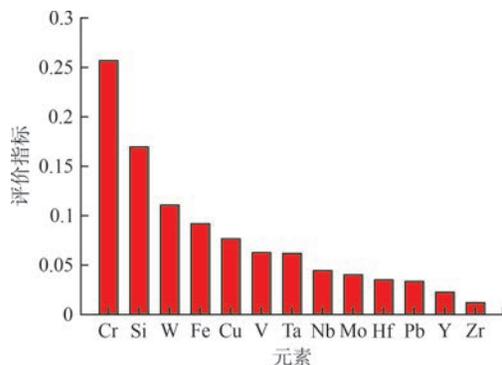


图6 夏甸金矿床金红石随机森林判别模型特征重要性指标
Fig. 6 Characteristic importance metrics of the random forest discrimination model for rutile in the Xiadian Gold Deposit

由图6可知:Cr、Si、W、Fe、Cu、V、Ta是对模型判别具有重要性的元素(特征重要性指标>0.5),且Cr元素在金红石矿床类型判别中具有较高的重要性。前人研究发现,胶东金矿床常发育铬云母化,表现为金矿化阶段铬元素在绢云母中与金同步富集,指示了Cr与Au在成矿热液过程中的同步活化、运移^[16]。在夏甸金矿床中,黄铁绢英岩化蚀变岩广泛发育铬云母化蚀变,且铬云母化蚀变通常与蚀变的前寒武系变质岩具有紧密联系。因此,夏甸金矿床Cr、W、Fe、V等元素的活化可能与成矿期含矿流体交代变质岩中含Cr的暗色矿物有关(如黑云母、角闪石等)^[31]。夏甸金矿床金红石的微量元素特征可能与区域发育的绿片岩一角闪岩相变质岩在中生代含矿流体交代过程中的再活化有关。在热液蚀变过程中,深部流体与变质岩相互作用,含钨相矿物(榍石、黑云母等)被淋滤分解,造成与Cr处于同一副族的W释放,形成了金红石的高W特征,以及其他含钨相矿物如白钨矿的沉淀。此外,诸多研究报道了胶东变质岩在中生代热液活动时期再活化的现象^[32],含矿热液交代作用促进了金的活化转移。因此,考虑到胶东金矿床部分矿床少见变质岩(如河西、上庄金矿床),夏甸及其他胶东金矿

床金红石微量元素特征很可能与深部成矿流体和基底变质岩系作用有关,该过程与传统造山型金矿床变质围岩在变质作用过程中释放流体有所差异^[32],这可能造成了“胶东型”金矿床中金红石独特的地球化学特征。

5 结论

1)夏甸金矿床金红石普遍发育于招平断裂下盘硅化、黄铁绢英岩化蚀变岩中,多呈碎裂-交代结构,与主要载金硫化物矿物(黄铜矿、黄铁矿)为紧密共生关系。同时,随机森林模型发现夏甸金矿床金红石与热液成因金红石具有相似的地球化学特征。

2)随机森林模型显示,“胶东型”金矿床金红石微量元素特征区别于其他热液金矿床,属于单独的一类,Cr、Si、W、Fe、Cu、V、Ta是金红石成因判别的重要元素。

3)夏甸金矿床金红石微量元素特征的产生可能与前寒武系变质围岩在中生代金成矿期间的再活化作用有关。

[参考文献]

- [1] 杨立强,邓军,王中亮,等.胶东中生代金成矿系统[J].岩石学报,2014,30(9):2447-2467.
- [2] 杨立强,邓军,张良,等.胶东型金矿[J].岩石学报,2024,40(6):1691-1711.
- [3] 段磊,周鑫,杨斌,等.胶西北金成矿电化学作用探析[J].黄金,2020,41(7):12-16.
- [4] 付政凯,李岳智,王海正,等.胶东半岛夏甸金矿床与大尹格庄金矿床蚀变地球化学特征对比研究[J].黄金,2024,45(12):89-98,113.
- [5] 宋明春,李三忠,伊丕厚,等.中国胶东焦家式金矿类型及其成矿理论[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(1):87-104.
- [6] 李逸凡,李洪奎,陈国栋,等.胶东夏甸金矿床地球化学特征及其地质意义[J].地质学报,2021,95(6):1822-1842.
- [7] MAO X C, CHEN Y D, LIU Z K, et al. Hydrothermal alteration and its geochemistry of the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for fluid-rock interaction processes and mineral exploration[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 170: 106134.
- [8] 高学坎,席振铎,向胤合,等.胶东大尹格庄金矿床后窿矿区深部矿体定位预测[J].黄金,2024,45(6):60-64.
- [9] 周鑫,杨斌,刘占坤,等.胶西北大尹格庄金矿区青磐岩化与金成矿关系[J].黄金,2019,40(6):13-17.
- [10] 朱兴明,周鑫,杨斌,等.胶东金矿床蚀变岩岩石地球化学特征与水岩反应机理分析[J].黄金,2021,42(9):12-17.
- [11] 杜泽忠,程志中,姚晓峰,等.胶东谢家沟金矿床蚀变钾长石⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄及地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(5):1570-1581.
- [12] 王天齐,李红艳,王栋.胶东大尹格庄金矿碳酸盐矿物的特征、物源及其在金成矿过程中的作用[J].岩石学报,2024,40(4):1264-1284.
- [13] 王兴刚,孙涛,向胤合,等.胶西北大尹格庄金矿床与夏甸金矿床差异性研究[J].黄金,2023,44(2):67-72.

- [14] 马伟东,张德贤,王智琳,等.胶东大尹格庄金矿与夏甸金矿矿化特征对比研究[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):191-200.
- [15] 叶广利,杨立强,张良,等.胶东夏甸金矿床金红石成因判别与U-Pb定年[J].岩石学报,2023,39(2):340-356.
- [16] 陈辉,鲁安怀,李斌,等.胶东上庄与夏甸金矿床金红石化学成分标型特征研究[J].岩石矿物学杂志,2018,37(5):839-852.
- [17] YANG B, XIANG Y H, GU X P. Tungsten-bearing rutile from the Jiaodong gold province, Shandong, China and its implication for gold mineralization [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2017, 30(5): 975-980.
- [18] LIU Z K, MAO X C, WANG F Y, et al. Deciphering anomalous Ag enrichment recorded by galena in Dayingezhuang Au(-Ag) deposit, Jiaodong Peninsula, Eastern China [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(12): 3 831-3 846.
- [19] 崔云龙. 夏甸金矿区控矿构造特征及深部定位预测[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [20] 杨斌,周鑫,段磊,等.胶东大尹格庄金矿区构造演化与控矿作用[J].黄金,2020,41(9):35-40.
- [21] 方匡南,吴见彬,朱建平,等.随机森林方法研究综述[J].统计与信息论坛,2011,26(3):32-38.
- [22] 董师师,黄哲学.随机森林理论浅析[J].集成技术,2013,2(1):1-7.
- [23] AGANGI A, PLAVSA D, REDDY S M, et al. Compositional modification and trace element decoupling in rutile: Insight from the Capricorn Orogen, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2020, 345: 105772.
- [24] AGANGI A, REDDY S M, PLAVSA D, et al. Antimony in rutile as a pathfinder for orogenic gold deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 106: 1-11.
- [25] LIU L, XIAO Y L, WÖRNER G, et al. Detrital rutile geochemistry and thermometry from the Dabie orogen: Implications for source-sediment links in a UHPM terrane [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 89: 123-140.
- [26] PLAVSA D, REDDY S M, AGANGI A, et al. Microstructural, trace element and geochronological characterization of TiO₂ polymorphs and implications for mineral exploration [J]. *Chemical Geology*, 2018, 476: 130-149.
- [27] PORTER J K, MCNAUGHTON N J, EVANS N J, et al. Rutile as a pathfinder for metals exploration [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103406.
- [28] SCHIRRA M, LAURENT O. Petrochronology of hydrothermal rutile in mineralized porphyry Cu systems [J]. *Chemical Geology*, 2021, 581: 120407.
- [29] SCIUBA M, BEAUDOIN G. Texture and trace element composition of rutile in orogenic gold deposits [J]. *Economic Geology*, 2021, 116(8): 1 865-1 892.
- [30] 曹根深,张宇,陈华勇.造山型金矿床黄铁矿微量元素对成矿机制的指示[J].岩石学报,2023,39(8):2 330-2 346.
- [31] 祁冬梅,周汉文,宫勇军,等.岩石热液蚀变作用过程元素的活动性——河南祁雨沟金矿IV号岩体蚀变花岗岩斑岩的研究[J].岩石学报,2015,31(9):2 655-2 673.
- [32] LIU Z K, HOLLINGS P, MAO X C, et al. Metal remobilization from country rocks into the Jiaodong-type orogenic gold systems, Eastern China: New constraints from scheelite and galena isotope results at the Xiadian and Majiayao gold deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 134: 104126.

Genetic discrimination and mineralization analysis of rutile in the Xiadian Gold Deposit using machine learning

Wang Rongchao¹, Yang Xiaoqi¹, Yang Xiaopeng¹, Gao Teng¹, Tang Weiyang¹, Chen Shujie¹, Chen Yudong²
(1. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd.; 2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University)

Abstract: Rutile is a common accessory mineral in the Jiaodong gold deposits, yet its genetic significance and metallogenic implications remain poorly constrained. This study integrates petrography, in-situ geochemical analysis, and machine learning to investigate rutile from the Xiadian Gold Deposit at the southern end of the Zhaoping fault. Results reveal that rutile of the Xiadian Gold Deposit primarily occurs in silicified and sericitized alteration rocks beneath the Zhaoping fault, exhibiting cataclastic-metasomatic textures and coexisting with ore minerals such as pyrite and chalcopyrite. By compiling a global dataset of rutile from diverse genetic and deposit types, a random forest model was applied to discriminate the origin of rutile based on its trace element characteristics in the Xiadian Gold Deposit. The model identifies the rutile of the Xiadian Gold Deposit as typical hydrothermal in origin, closely linked to gold mineralization. Furthermore, the rutile is classified as "Jiaodong-type" gold deposit genesis with high true-class rates indicating distinct trace element signatures compared to other deposit types. Among them, Cr, Si, W, Fe, Cu, V, and Ta are the elements that play important roles in discrimination. Enrichment of these elements suggests elemental mobilization from high-grade metamorphic basement rocks during mineralization and highlights the critical role of intense water-rock interactions in the formation of the Xiadian Gold Deposit.

Keywords: rutile; elemental geochemistry; machine learning; genetic discrimination; Xiadian Gold Deposit; Zhaoping fault