

胶东上庄与夏甸金矿床金红石化学成分 标型特征研究

陈 辉, 鲁安怀, 李 斌, 王智琳, 杨 斌, 谷湘平

(有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 对上庄与夏甸金矿的含矿花岗岩、绢英岩以及黄铁绢英岩中的金红石化学成分标型特征进行了详细的研究, 探讨了其中 Fe、Si、Ti、W 元素含量变化的规律。研究表明, 上庄金矿与夏甸金矿中的金红石为变质成因, 主要通过黑云母蚀变释放 Ti 而形成金红石, 此类金红石主要赋存在黑云母的边缘、解理及裂隙之间。金红石中 Ti 含量存在由绢英岩向黄铁绢英岩的下降趋势。矿体周围能够形成 Ti 晕, 可作为强烈矿化的标志。另外, 金红石中 W 的含量从花岗岩到绢英岩再到黄铁绢英岩呈现不断富集的趋势, 表明金红石中 W 的含量变化可指示金矿化的强弱, 高 W 金红石的出现指示金矿的形成, 这为胶东金矿的找矿研究提供了新的思路。

关键词: 金红石; 化学成分标型; 胶东; 上庄金矿; 夏甸金矿

中图分类号: P578.2⁺3; P618.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0839-14

Typomorphic features of the rutiles from the Shangzhuang and Xiadian Au deposits in Jiaodong Peninsula

CHEN Hui, LU An-huai, LI Bin, WANG Zhi-lin, YANG Bin and GU Xiang-ping

(Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The Jiaodong (eastern Shandong) hydrothermal gold deposits consisting of several world-class gold deposits have been producing a great majority of gold in China. The main types of mineralization are characterized by the distribution of gold within quartz veins and altered rocks, with the latter being more important. There are still many controversies about the evolution of metallogenic indicators and tracer elements in Jiaodong gold deposits. As rutile has great stability in the petrogenesis and metamorphism, the authors investigated detailed typomorphic characteristics and the chemical composition of rutiles from the fresh granites, sericitolites and beresites in Shangzhuang and Xiadian gold deposits and made dating by electron microprobe analysis. The genetic type of rutile and its change of Fe-Si-Ti-W content were discussed. Detailed studies reveal that rutiles in Shangzhuang and Xiadian gold deposits are mainly of metamorphic origin and were mainly formed by the alteration of biotite with the release of Ti. Moreover, this kind of rutile is mainly distributed at the edge of biotite. Ti values of rutiles exhibit a decreasing trend from sericite to beresite, forming a Ti halo that can be used as a sign of gold enrichment. In addition, W content in rutile has another enrichment trend from fresh granite through sericitolite to beresite, indicating that W can be used as an indicator to trace gold migration. These signatures can be regarded as evaluation indices for delineating

收稿日期: 2018-03-22; 接受日期: 2018-04-13

作者简介: 陈 辉(1993-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学, E-mail: 775465193@qq.com; 通讯作者: 鲁安怀(1962-), E-mail: ahlu@pku.edu.cn。

the gold target and can provide new models for the study of gold deposits.

Key words: rutile; typomorphic characteristics; Jiaodong; Shangzhuang gold deposit; Xiadian gold deposit

胶东地区汇集多个世界级的金矿床,是我国金矿的最主要产区。金矿床严格按断裂带分布,主要的成矿带包括招远-莱西金矿带、栖霞-蓬莱金矿带、牟平-乳山金矿带以及胶莱盆地边缘。前人研究表明,金成矿的时代多集中在125~120 Ma(杨立强等,2006,2014)。胶东金矿的成矿地质作用研究已非常深入,在成矿地质背景、蚀变分带划分,成矿物质来源、成矿成岩时代等问题上均取得了丰富的研究成果(Deng *et al.*, 2015a, 2015b; Yang *et al.*, 2016)。普遍认为胶东金矿床属热液型金矿床,矿化类型主要有石英脉型与蚀变岩型,其中以蚀变岩型最为重要(张旗,2013;宋明春等,2014;丁正江等,2015;张晓飞等,2015)。然而,胶东蚀变岩型金矿成矿元素迁移富集机制及其指示矿物学方面的研究较为欠缺,成矿指示物与示踪元素演化研究方面仍有很多争议,尤其矿物演化示踪成矿过程的研究不深入,制约了对金流体演化成矿过程的示踪研究。特征矿物精细矿物学的研究为解决蚀变岩型金矿的演化成矿过程提供了重要的研究思路。

金红石是一种重要的特征指示矿物,在成岩、变质与金成矿过程中具有极大的稳定性,广泛存在于各类岩石中,为常见的副矿物之一(肖益林等,2011;周红英等,2013)。作为高强度元素和过渡元素的载体,金红石在矿物演化过程中扮演着重要角色,如Nb、Ta的含量变化范围能够指示金红石的源区,Fe的含量可作为判断金红石成因类型的重要指标(Addy and Garlick, 1974; Sobolev and Yefimova, 2000; Sutton *et al.*, 2005; Escudero *et al.*, 2012a, 2012b; 王娟等,2017)。本文以上庄金矿和夏甸金矿两个典型的蚀变岩型金矿床为例,选取金红石这一重要的成因指示矿物为研究对象,分析矿床中花岗岩、绢英岩及黄铁绢英岩中发育的不同类型的金红石主要元素含量变化趋势,特别是蚀变岩型金矿中金红石的元素含量变化,并对金红石化学成分标型性特征进行了研究,以查明金红石在热液体系演化及金属元素运移沉淀过程扮演的角色,结合胶东金矿地质地球化学特征,揭示金矿演化分布规律,以期找矿提供指示和理论依据。

1 区域地质和矿床地质背景

胶西北位于新华夏系巨型构造的胶北隆起区域,主要的断裂带为三山岛断裂带、龙莱断裂带以及招平断裂带。本区出露的地层主要为太古宇胶东群、古元古界荆山群和粉子山群、新元古界蓬莱群(图1)。太古宇胶东群走向较为多变,主要由斜长角闪岩、黑云母片粒岩、片岩、片麻岩组成;古元古界荆山群和粉子山群主要由黑云斜长片麻岩、大理岩、石榴子石矽线片麻岩组成;新元古界蓬莱群主要由石英岩、板岩、千枚岩、大理岩等组成。区域岩浆岩主要由郭家岭型花岗闪长岩、玲珑型黑云母花岗岩、滦家河型钾长花岗岩以及基性脉岩组成。

研究区上庄金矿区内断裂构造十分发育,且与金矿的形成有密切的关系(图2)。金矿主要受次级断裂带——望儿山断裂带控制,蚀变破碎带发育,由内向外蚀变、矿化的程度逐渐降低,矿体主要分布于黄铁绢英岩中(罗贤东等,2014)。矿区内出露的主要岩石为郭家岭花岗闪长岩的上庄岩体及玲珑二长花岗岩,二长花岗岩平缓地覆盖于上庄岩体之上。矿床主体为Ⅱ~Ⅷ号矿体,其中Ⅱ号矿体为隐伏矿体(杨斌等,2015)。由于热液作用反复多期,围岩蚀变持续时间长,主要的蚀变为钾化、绿泥石化、黄铁矿化、绢英岩化、碳酸盐化,同时伴有金属矿化以及银金矿化(刘庚寅等,2014)。

夏甸金矿主要受次级断裂带——招平断裂带控制(图3),区内NE、NNE向断裂构造极其发育,成矿作用非常频繁。矿区东南部为上盘,发育胶东群变质岩,主要岩性为斜长角闪岩和黑云变粒岩;矿区西北部为下盘,主要岩性为二长花岗岩以及中粒黑云母花岗岩(臧维生等,1987)。矿床主体为Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ、Ⅷ号矿体,主要的蚀变类型有钾长石化、硅化、绢英岩化、黄铁矿化、碳酸盐化,与金有关的矿化为黄铁矿化和绢英岩化。

2 金红石的产出特征

在上庄金矿郭家岭花岗闪长岩中,金红石呈他形(图4a),往往析出于黑云母的边缘,有极

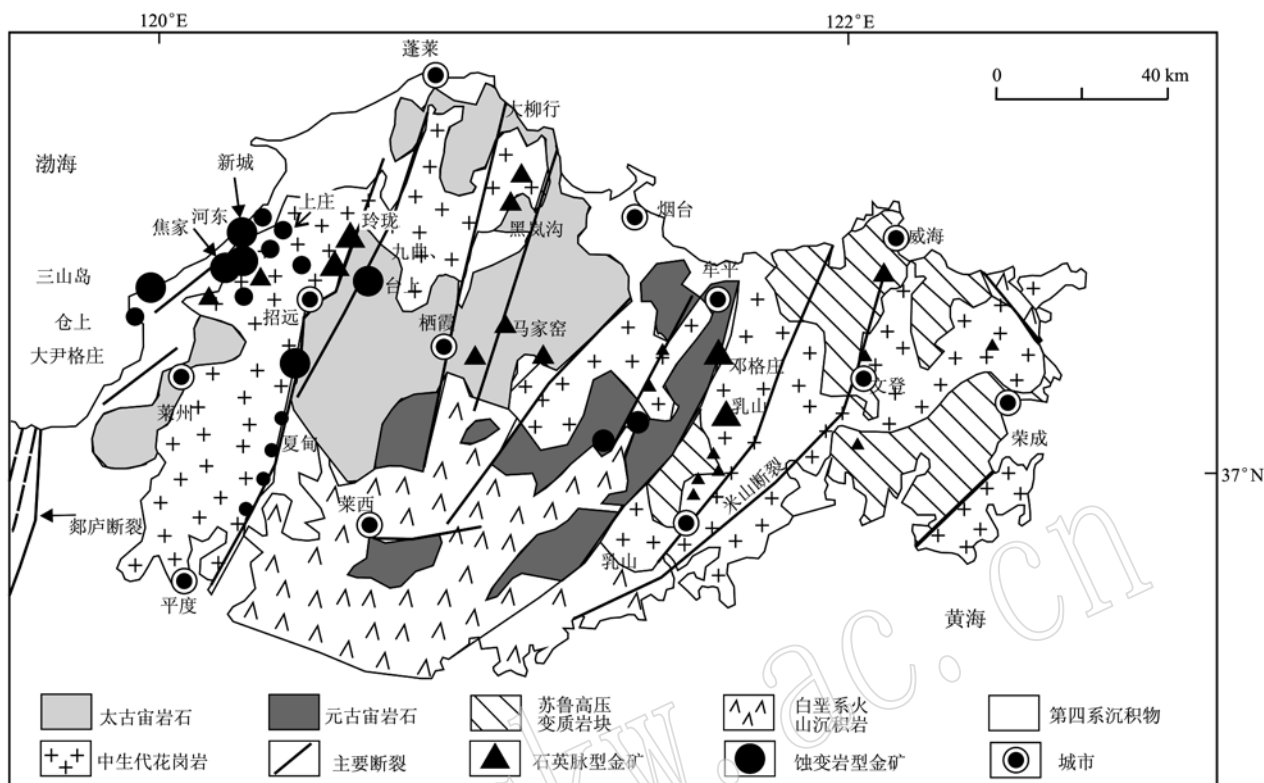


图1 胶东区域地质图[据丁正江等(2015)修改]

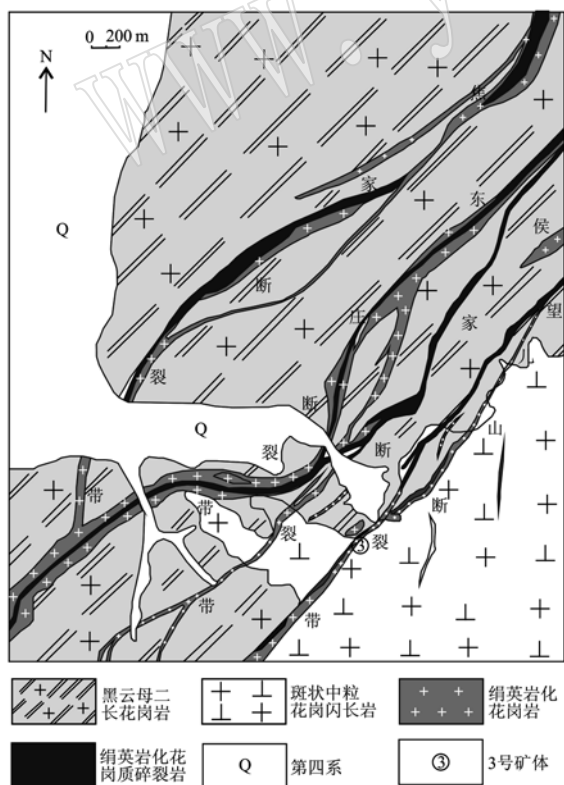
Fig. 1 Regional geological map in Jiaodong (modified after Ding Zhengjiang *et al.*, 2015)

图2 上庄金矿矿区地质图[据于洪军(2009)修改]

Fig. 2 Sketch geological map of Shangzhuang gold deposit (modified after Yu Hongjun, 2009)

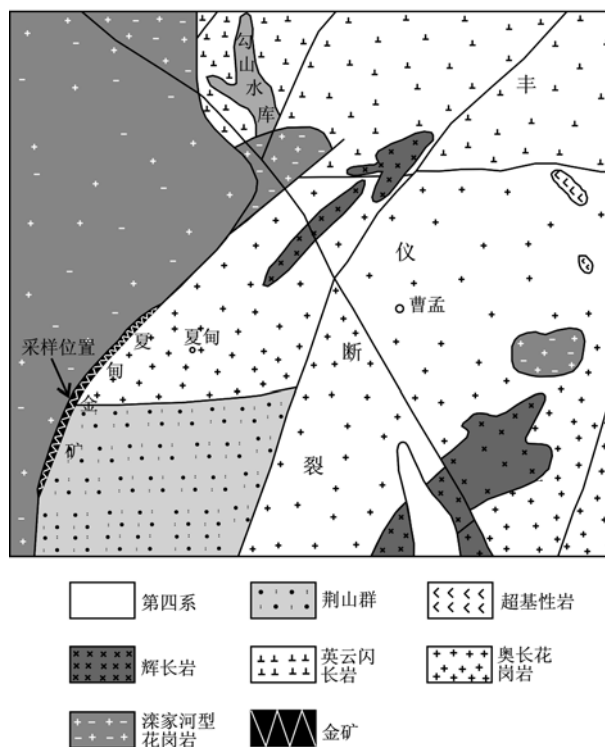


图3 夏甸金矿矿区地质图[据李彩凤等(2015)修改]

Fig. 3 Sketch geological map of Xiadian gold deposit (modified after Li Caifeng *et al.*, 2015)

少量存在于黑云母裂隙与解理中。此类金红石形状不规则,在其赋存的黑云母中常常出现蚀变形成的绿泥石以及他形的磁铁矿,并与他形块状的磷灰石共生,形成黑云母-绿泥石-金红石-磁铁矿-磷灰石矿物组合。在绢英岩中,金红石在单偏光镜下呈黑色针状晶体,大量充填于石英脉中,无固定的生长方向,形成金红石-石英矿物组合(图4b)。在黄铁绢英岩中,伴随着大量晶型完好的黄铁矿出现,在强硅

化的过程中,在黄铁矿的周围赋存有颗粒非常细小的针状金红石(图4c),有连生体与似树枝晶(图4d),与黄铁矿共生,形成金红石-自形黄铁矿组合。

在夏甸金矿黑云母花岗岩中,金红石呈他形析出于黑云母边缘以及内部裂隙与解理之间(图4e),在黑云母内部往往出现由于蚀变形成的细小的粒状磁铁矿和不规则的绿泥石,偶尔会伴随大颗粒块状的磷灰石出现,形成黑云母-绿泥石-金红石-磁铁矿-

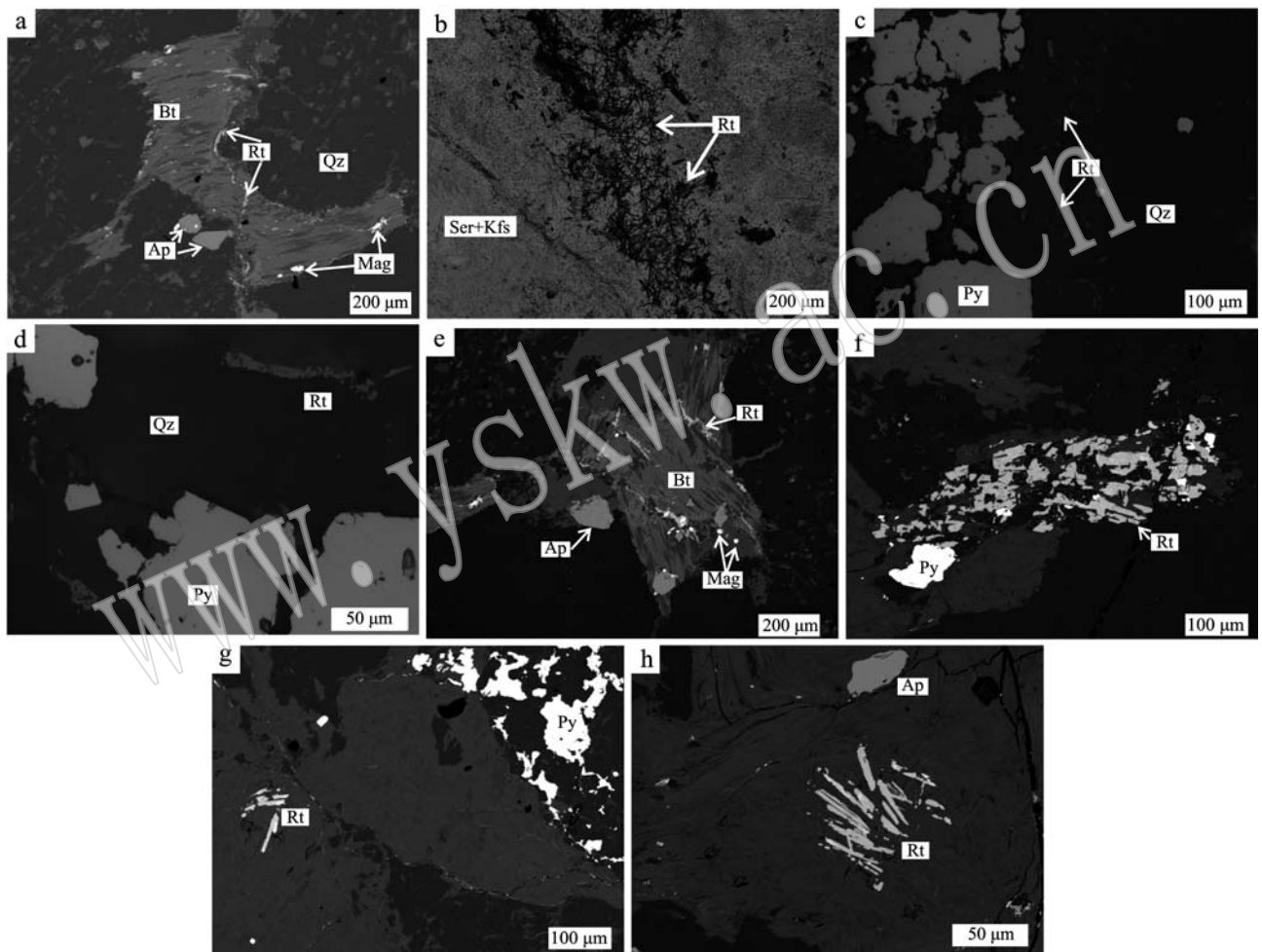


图4 不同时期金红石及典型矿物

Fig. 4 Rutiles of different periods and typical minerals in Jiaodong deposits

a—上庄花岗岩中他形金红石,背散射图像;b—上庄绢英岩中针状金红石充填于石英脉,单偏光;c—上庄黄铁绢英岩中针状金红石,背散射图像;d—上庄黄铁绢英岩中针状金红石,背散射图像;e—夏甸花岗岩中他形金红石,背散射图像;f—夏甸绢英岩中块状金红石与他形黄铁矿共生,背散射图像;g—夏甸黄铁绢英岩中树枝状金红石,背散射图像;h—夏甸黄铁绢英岩中树枝状金红石与磷灰石伴生,背散射图像;Rt—金红石;Bt—黑云母;Qz—石英;Mag—磁铁矿;Ap—磷灰石;Ser—绢云母;Kfs—钾长石;Py—黄铁矿

a—subhedral rutile in granite of Shangzhuang, back-scattering image; b—acicular rutile filled in quartz veins in sericitolite of Shangzhuang, plain-light; c—acicular rutile in beresite of Shangzhuang, back-scattering image; d—acicular rutile in beresite of Shangzhuang, back-scattering image; e—subhedral rutile in granite of Xiadian, back-scattering image; f—massive rutile associated with subhedral pyrite in sericitolite of Xiadian, back-scattering image; g—dendritic rutile in beresite of Xiadian, back-scattering image; h—dendritic rutile associated with apatite in beresite of Xiadian, back-scattering image; Rt—rutile; Bt—biotite; Qz—quartz; Mag—magnetite; Ap—apatite; Ser—sericite; Kfs—potash feldspar; Py—pyrite

磷灰石矿物组合;在绢英岩中,金红石呈团块状且颗粒较大,赋存于石英的边缘(图4f),并且伴有极少量的他形黄铁矿与此类金红石共生,形成金红石-石英-它形黄铁矿矿物组合;在黄铁绢英岩中,金红石同样与半自形黄铁矿相伴,在背散射图像中可看出为树枝状(图4g),偶尔可见有磷灰石的出现,形成金红石-半自形黄铁矿-磷灰石矿物组合(图4h)。

综合比较来看,金红石可分为3种类型:第1种为存在于黑云母边缘以及交生位置的他形金红石;第2种为颗粒较细小的针状以及树枝状金红石;第3种为颗粒较大以及自形程度较好的自形粒状金红石。

3 样品及分析方法

上庄金矿样品采自Ⅲ号矿体-530中段的不同蚀变时期,包括郭家岭花岗岩、绢英岩以及黄铁绢英岩。夏甸金矿的样品采自Ⅱ号矿体-730中段不同的蚀变时期,包括黑云母花岗岩、绢英岩以及黄铁绢英岩。在完成样品的镜下观察后,采用电子探针(EPMA)的方法(雷浩等,2014),对不同时期的金红石进行了电子探针分析。电子探针分析测试在中南大学地球科学与信息物理学院电子探针实验室完成,仪器型号为EPMA-1720型,测试条件:加速电压15 kV,电流10 nA,束斑直径为1 μm 。测试元素包括Mg、Si、Ti、Al、Ca、Mn、Nb、Fe、W、Ta,采用ZAF3校正。

在结构测试中,由于研究对象金红石含量少,尤其是上庄金矿的金红石颗粒及其细小,故仅在夏甸金矿中选取有代表性的相对大的颗粒的金红石做了X射线微区衍射分析。该分析在中南大学地球科学与信息物理学院 Rigaku Rapid IIR 微区衍射仪上完成,设定X射线发生器的电压为40 kV,电流为250 mA,X射线准直管直径为0.03 mm,样品的衍射效应记录在二维圆柱形IP成像板上,曝光时间为6 h。

4 金红石晶体结构

夏甸金矿金红石的晶体结构分析结果见图5。采用标准数据(PDF No. 21-1276)对夏甸金矿金红石的衍射数据进行了计算,得到绢英岩中金红石晶胞参数为: $a=4.593 \text{ \AA}$, $b=4.593 \text{ \AA}$, $c=2.956 \text{ \AA}$;黄铁绢英岩中金红石晶胞参数为: $a=4.589 \text{ \AA}$, $b=4.589 \text{ \AA}$, $c=2.954 \text{ \AA}$ 。从晶体结构分析中可知本区

TiO_2 确为金红石,且由于其他元素的替代性,导致金红石晶胞参数略微减小。

5 金红石化学成分特征

上庄金矿金红石41个测试点的电子探针分析见表1。

由表1可见,郭家岭花岗闪长岩中金红石的 TiO_2 含量为95.34%~99.08%(平均97.55%);FeO含量为0.24%~1.57%(平均0.55%); SiO_2 含量为0.09%~0.82%(平均0.40%); WO_3 的含量为0.02~0.43%(平均0.10%); Nb_2O_5 含量为0.01%~0.23%(平均0.11%)。绢英岩中金红石的 TiO_2 含量为91.45%~99.73%(平均95.48%), SiO_2 含量为0.25%~0.65%(平均0.41%);FeO含量为0.21%~1.97%(平均0.90%); WO_3 的含量为0.07%~4.83%(平均2.03%); Nb_2O_5 含量为0.05%~0.46%(平均0.25%)。在黄铁绢英岩中,金红石 TiO_2 的含量为90.21%~98.77%(平均92.84%); SiO_2 的含量为0.16%~2.50%(平均1.06%);FeO的含量为0.60%~2.94%(平均1.50%); WO_3 的含量为0.19%~5.07%(平均2.45%); Nb_2O_5 的含量为0.16%~0.47%(平均0.33%)。

夏甸金矿金红石57个测试点的电子探针分析结果见表2。

由表2可见,黑云母花岗岩中金红石 TiO_2 的含量为94.68%~99.93%(平均98.74%),FeO的含量为0.17%~1.20%(平均0.61%); SiO_2 含量为0.00~2.39%(平均0.33%); WO_3 的含量为0.00~0.78%(平均0.12%); Nb_2O_5 含量为0.00~2.16%(平均0.44%)。绢英岩中金红石的 TiO_2 含量为88.16%~98.97%(平均93.55%); SiO_2 含量为0.04%~3.22%(平均0.85%);FeO的含量为0.13%~2.58%(平均1.28%); WO_3 的含量为0.08%~5.59%(平均2.66%); Nb_2O_5 的含量为0.15%~1.18%(平均0.60%)。黄铁绢英岩中金红石 TiO_2 的含量为86.11%~98.54%(平均90.86%); SiO_2 的含量为0.15%~0.72%(平均0.37%);FeO的含量为0.07%~3.40%(平均0.86%); WO_3 的含量为0.23%~6.07%(平均3.42%); Nb_2O_5 的含量为0.38%~3.42%(平均1.49%)。

另外,两个矿区中 MgO 、 Al_2O_3 、 MnO 、 Ta_2O_5 的质

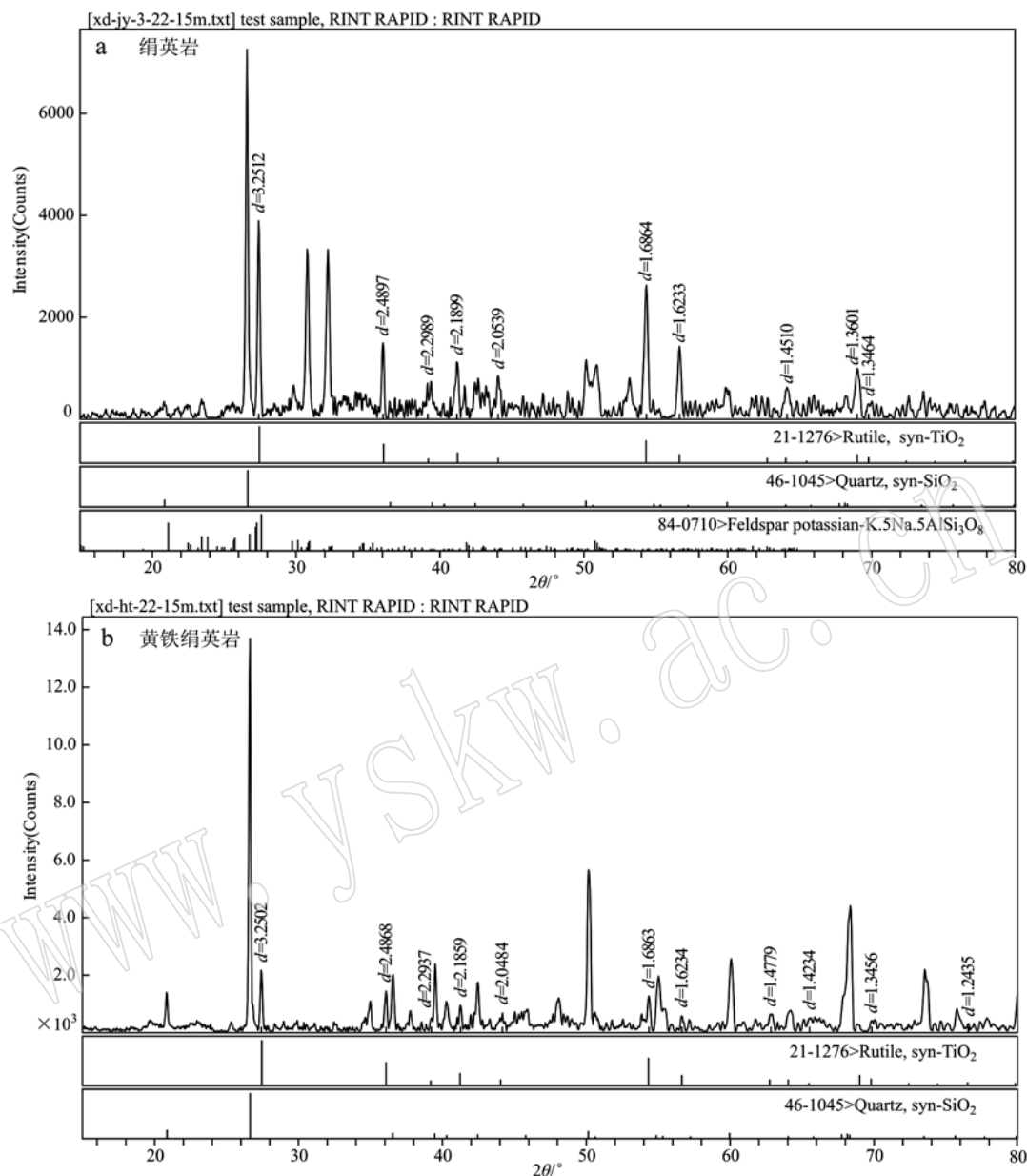


图5 金红石的X射线微区衍射谱图
Fig. 5 X-ray micro-diffraction pattern of rutile

量分数很多低于检测限,且测得的数据偏低。

6 金红石化学成分与找矿意义

对上庄和夏甸这两个胶东金矿典型的蚀变岩型金矿中的金红石进行系统分析得知,金红石中含有 SiO_2 、 FeO 、 CaO 、 Nb_2O_5 、 Al_2O_3 、 WO_3 、 Ta_2O_5 、 MgO 和 MnO 含量很低,甚至低于检测线。根据前人的研究, Fe 、 Si 、 Al 、 W 、 Nb 、 Ta 等元素能够替代金红石中的 Ti (Graham and Morris, 1973; Harris, 1989; Scott,

2005),另外,在金红石中元素的替代主要受控于替代元素半径的大小、原子价和晶场(Scott, 2005)。在研究区的金红石中, FeO 、 WO_3 、 Nb_2O_5 与 TiO_2 存在明显的负相关性(图6a、6b、6d),暗示了 Fe 、 W 、 Nb 元素能够替代金红石中的 Ti ;另外, $\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{WO}_3 + \text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ 与 TiO_2 同样存在明显的负相关性(图6e、6f),暗示了 Al 、 Ta 也能够替代金红石中的 Ti 。 Fe 、 W 、 Nb 等元素也可能替代金红石中的 Ti 。结合前人研究,在压力与温度不断增加的过程中, Si 离子半径能够不断增大,使其更接近 Ti 离子的

表 1 上庄金矿金红石电子探针成分分析结果
Table 1 Electron microprobe analyses of rutile from the Shangzhuang deposit

岩性	点号	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	WO ₃	MgO	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	CaO	Total	晶体化学式	w _B /%
郭家岭花岗岩 闪长岩	1	99.08	0.22	0.22	0.28	-	-	-	0.12	-	0.03	99.96	(Ti _{0.991} Si _{0.003} Al _{0.003} Fe _{0.003}) _{1.000} O ₂	
	2	98.72	0.21	0.11	0.24	0.06	-	-	0.16	-	0.04	99.53	(Ti _{0.987} Si _{0.003} Al _{0.002} Fe _{0.003}) _{0.995} O ₂	
	3	98.67	0.31	0.15	0.34	0.43	-	-	0.16	0.28	0.04	100.38	(Ti _{0.987} Si _{0.004} Al _{0.002} Fe _{0.004} W _{0.001}) _{0.997} O ₂	
	4	98.00	0.09	0.12	0.25	-	-	0.02	0.01	-	0.00	98.50	(Ti _{0.98} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.003}) _{0.986} O ₂	
	5	97.80	0.36	0.18	0.49	0.28	0.01	-	0.23	-	0.05	99.39	(Ti _{0.978} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.005} W _{0.001}) _{0.992} O ₂	
	6	97.26	0.40	0.65	0.43	0.05	0.08	0.02	0.10	-	0.78	99.76	(Ti _{0.973} Si _{0.005} Al _{0.01} Fe _{0.005} Ca _{0.011}) _{0.995} O ₂	
	7	96.75	0.64	0.29	0.64	0.02	0.07	-	0.06	0.11	0.23	98.81	(Ti _{0.968} Si _{0.009} Al _{0.005} Fe _{0.007} Ca _{0.003}) _{0.992} O ₂	
	8	96.29	0.53	0.25	1.57	-	0.04	-	0.06	-	0.18	98.92	(Ti _{0.963} Si _{0.007} Al _{0.004} Fe _{0.017} Ca _{0.003}) _{0.994} O ₂	
	9	95.34	0.82	0.65	0.68	0.03	0.29	0.04	0.09	-	0.15	98.08	(Ti _{0.953} Si _{0.011} Al _{0.01} Fe _{0.008} Mg _{0.006}) _{0.979} O ₂	
	平均值	97.55	0.40	0.29	0.55	0.10	0.05	0.01	0.11	0.04	0.17			
绢英岩	10	99.73	0.26	0.17	0.34	0.07	0.01	-	0.13	0.01	0.05	100.76	(Ti _{0.997} Si _{0.004} Al _{0.003} Fe _{0.004}) _{1.008} O ₂	
	11	97.30	0.29	0.14	0.31	1.21	-	0.01	0.24	0.05	0.05	99.58	(Ti _{0.973} Si _{0.004} Al _{0.002} Fe _{0.003} W _{0.004}) _{0.986} O ₂	
	12	97.06	0.46	0.18	0.35	0.75	0.05	0.06	0.05	0.24	0.20	99.38	(Ti _{0.971} Si _{0.006} Al _{0.003} Fe _{0.004} W _{0.003} Ca _{0.003}) _{0.99} O ₂	
	13	97.01	0.39	0.14	0.40	0.61	-	0.01	0.15	-	0.03	98.72	(Ti _{0.97} Si _{0.005} Al _{0.002} Fe _{0.004} W _{0.002}) _{0.983} O ₂	
	14	96.77	0.25	0.12	0.21	0.59	0.01	-	0.13	-	0.05	98.13	(Ti _{0.968} Si _{0.003} Al _{0.002} Fe _{0.002} W _{0.002}) _{0.977} O ₂	
	15	96.76	0.37	0.16	0.34	0.65	0.01	-	0.40	-	0.05	98.72	(Ti _{0.968} Si _{0.005} Al _{0.002} Fe _{0.004} W _{0.002}) _{0.981} O ₂	
	16	96.45	0.56	0.16	0.76	2.34	-	-	0.26	0.30	0.08	100.91	(Ti _{0.964} Si _{0.007} Al _{0.003} Fe _{0.008} W _{0.008}) _{0.99} O ₂	
	17	96.41	0.40	0.27	0.58	0.83	0.05	-	0.25	-	0.13	98.92	(Ti _{0.964} Si _{0.005} Al _{0.004} Fe _{0.006} W _{0.003}) _{0.982} O ₂	
	18	94.80	0.65	0.26	0.70	0.98	0.01	0.01	0.38	-	0.10	97.88	(Ti _{0.948} Si _{0.009} Al _{0.004} Fe _{0.008} W _{0.003}) _{0.972} O ₂	
	19	94.45	0.44	0.18	1.20	2.34	0.02	0.05	0.14	0.22	0.11	99.14	(Ti _{0.944} Si _{0.006} Al _{0.003} Fe _{0.013} W _{0.008}) _{0.974} O ₂	
	20	94.21	0.43	0.24	1.83	4.07	0.08	0.03	0.26	-	0.06	101.20	(Ti _{0.942} Si _{0.006} Al _{0.004} Fe _{0.02} W _{0.014}) _{0.968} O ₂	
	21	94.01	0.36	0.15	0.86	2.15	0.02	-	0.15	0.16	0.18	98.02	(Ti _{0.94} Si _{0.005} Al _{0.002} Fe _{0.01} W _{0.007} Ca _{0.003}) _{0.967} O ₂	
	22	93.48	0.41	0.16	1.80	4.26	-	-	0.46	0.10	0.05	100.71	(Ti _{0.935} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.02} W _{0.015} Nb _{0.003}) _{0.981} O ₂	
	23	92.25	0.57	0.21	1.85	4.83	-	0.01	0.41	-	0.05	100.17	(Ti _{0.922} Si _{0.008} Al _{0.003} Fe _{0.021} W _{0.017} Nb _{0.002}) _{0.973} O ₂	
	24	91.45	0.25	0.17	1.97	4.73	-	0.02	0.32	0.38	0.30	99.58	(Ti _{0.915} Si _{0.003} Al _{0.003} Fe _{0.022} W _{0.016} Nb _{0.002} Ca _{0.004}) _{0.965} O ₂	
	平均值	95.48	0.41	0.18	0.90	2.03	0.02	0.01	0.25	0.10	0.10			

续表 1
Continued Table 1

岩性	点号	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	WO ₃	MgO	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	CaO	Total	晶体化学式
黄铁绢 英岩	25	98.77	0.27	0.15	0.61	0.99	-	0.01	0.31	-	0.04	101.15	(Ti _{0.988} Si _{0.004} Al _{0.002} Fe _{0.007} W _{0.003} Nb _{0.002}) _{1.006} O ₂
	26	97.25	0.41	0.17	0.60	1.00	-	0.04	0.16	0.04	0.04	99.71	(Ti _{0.972} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.007} W _{0.003} Nb _{0.001}) _{0.991} O ₂
	27	94.72	0.38	0.17	0.77	0.87	-	-	0.27	-	0.04	97.22	(Ti _{0.947} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.009} W _{0.003} Nb _{0.002}) _{0.969} O ₂
	28	93.64	0.49	0.18	1.58	2.95	0.01	0.01	0.36	0.07	0.05	99.33	(Ti _{0.936} Si _{0.006} Al _{0.003} Fe _{0.018} W _{0.001} Nb _{0.002}) _{0.966} O ₂
	29	93.49	1.16	0.47	0.95	1.37	-	0.01	0.41	0.13	0.04	98.09	(Ti _{0.935} Si _{0.015} Al _{0.007} Fe _{0.011} W _{0.005} Nb _{0.002}) _{0.975} O ₂
	30	93.41	2.36	0.85	1.63	0.19	-	0.04	0.28	-	0.04	98.79	(Ti _{0.934} Si _{0.031} Al _{0.013} Fe _{0.018} W _{0.001} Nb _{0.002}) _{0.999} O ₂
	31	93.09	0.16	0.14	1.77	4.22	-	-	0.18	-	0.02	99.57	(Ti _{0.931} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.02} W _{0.015}) _{0.97} O ₂
	32	92.75	2.28	0.69	0.82	1.60	-	-	0.20	0.21	0.03	98.59	(Ti _{0.928} Si _{0.003} Al _{0.011} Fe _{0.009} W _{0.006}) _{0.957} O ₂
	33	92.48	0.98	0.33	0.74	1.03	0.01	-	0.28	0.06	0.26	96.16	(Ti _{0.925} Si _{0.013} Al _{0.005} Fe _{0.008} W _{0.004} Nb _{0.002} Ca _{0.004}) _{0.961} O ₂
	34	92.07	0.49	0.23	2.19	3.32	0.02	-	0.39	-	0.06	98.77	(Ti _{0.921} Si _{0.007} Al _{0.004} Fe _{0.024} W _{0.011} Nb _{0.002}) _{0.969} O ₂
	35	91.76	0.32	0.14	1.69	2.82	-	-	0.36	0.14	0.02	97.24	(Ti _{0.918} Si _{0.004} Al _{0.002} Fe _{0.019} W _{0.01} Nb _{0.002}) _{0.955} O ₂
	36	91.62	1.69	0.72	1.18	2.95	0.02	-	0.37	-	0.02	98.56	(Ti _{0.916} Si _{0.022} Al _{0.011} Fe _{0.013} W _{0.01} Nb _{0.002}) _{0.974} O ₂
	37	91.22	0.24	0.14	2.06	5.07	-	-	0.47	-	0.04	99.24	(Ti _{0.912} Si _{0.003} Al _{0.002} Fe _{0.023} W _{0.017} Nb _{0.003}) _{0.96} O ₂
	38	90.67	1.72	0.61	2.19	4.33	-	-	0.41	0.16	0.03	100.12	(Ti _{0.907} Si _{0.023} Al _{0.01} Fe _{0.024} W _{0.015} Nb _{0.002}) _{0.981} O ₂
	39	90.59	1.04	0.37	2.13	4.32	-	-	0.45	0.38	0.03	99.31	(Ti _{0.906} Si _{0.014} Al _{0.006} Fe _{0.024} W _{0.015} Nb _{0.002}) _{0.967} O ₂
	40	90.46	2.50	0.93	1.56	2.86	-	0.02	0.35	0.06	0.04	98.76	(Ti _{0.905} Si _{0.033} Al _{0.015} Fe _{0.017} W _{0.01} Nb _{0.002}) _{0.982} O ₂
	41	90.21	1.56	0.94	2.94	1.81	0.39	-	0.37	0.11	0.06	98.39	(Ti _{0.902} Si _{0.021} Al _{0.015} Fe _{0.033} W _{0.006} Nb _{0.002}) _{0.979} O ₂
平均值		92.84	1.06	0.42	1.50	2.45	0.03	0.01	0.33	0.08	0.05		

注：- 代表“低于检测限”；金红石晶体化学式计算皆以 O₂ 为 1 摩尔数计算。

表 2 夏甸金矿金红石电子探针成分分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of rutile from the Xiadian deposit

岩性	点号	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	WO ₃	MgO	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	CaO	Total	晶体化学式	w _B /q%
黑云母 花岗岩	1	99.93	0.40	0.15	0.68	0.18	—	—	0.09	0.20	0.04	101.66	(Ti _{0.999} Si _{0.005} Al _{0.002} Fe _{0.008} W _{0.001}) _{1.015} O ₂	
	2	99.89	0.13	0.13	0.81	0.13	—	—	—	0.17	0.04	101.30	(Ti _{0.999} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.009}) _{1.01202}	
	3	99.87	0.29	0.17	0.60	0.15	—	0.04	0.12	0.10	0.16	101.51	(Ti _{0.999} Si _{0.004} Al _{0.003} Fe _{0.007} W _{0.001}) _{1.014} O ₂	
	4	99.71	0.05	0.09	0.23	0.06	—	0.02	0.69	—	0.19	101.04	(Ti _{0.997} Si _{0.001} Al _{0.001} Fe _{0.003} Nb _{0.004} Ca _{0.003}) _{1.009} O ₂	
	5	99.70	0.30	0.21	0.32	0.07	0.01	0.01	0.02	—	1.25	101.89	(Ti _{0.997} Si _{0.004} Al _{0.001} Fe _{0.004}) _{1.006} O ₂	
	6	99.64	0.00	0.14	0.44	0.02	—	0.02	0.92	0.12	0.39	101.69	(Ti _{0.996} Al _{0.002} Fe _{0.005} Ca _{0.006}) _{1.009} O ₂	
	7	99.58	0.36	0.21	0.47	0.08	—	0.02	—	—	0.11	100.83	(Ti _{0.996} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.004} Nb _{0.006} Ca _{0.006}) _{1.018} O ₂	
	8	99.47	0.28	0.15	0.30	—	—	0.01	0.79	0.11	0.53	101.64	(Ti _{0.995} Si _{0.004} Al _{0.002} Fe _{0.003} Nb _{0.005} Ca _{0.008}) _{1.017} O ₂	
	9	99.44	0.16	0.14	0.75	0.37	—	—	0.11	0.27	0.26	101.49	(Ti _{0.994} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.008} W _{0.001} Ca _{0.004}) _{1.011} O ₂	
	10	99.43	0.25	0.17	0.59	—	—	—	—	—	0.09	100.53	(Ti _{0.994} Si _{0.003} Al _{0.003} Fe _{0.007}) _{1.005} O ₂	
	11	99.40	0.29	0.20	0.40	—	—	—	0.01	0.01	0.07	100.37	(Ti _{0.994} Si _{0.004} Al _{0.003} Fe _{0.004}) _{1.005} O ₂	
	12	99.37	0.21	0.15	0.51	0.08	—	0.01	—	—	0.08	100.41	(Ti _{0.994} Si _{0.003} Al _{0.002} Fe _{0.006}) _{1.005} O ₂	
	13	99.17	0.56	0.23	0.38	0.26	0.01	—	0.02	—	0.22	100.85	(Ti _{0.992} Si _{0.007} Al _{0.004} Fe _{0.004} W _{0.001}) _{1.008} O ₂	
	14	99.11	0.19	0.17	0.45	0.03	0.02	—	0.84	0.00	0.31	101.11	(Ti _{0.991} Si _{0.003} Al _{0.003} Fe _{0.005} Nb _{0.005} Ca _{0.004}) _{1.01} O ₂	
	15	99.01	0.05	0.15	0.59	0.14	0.02	0.01	0.54	0.06	0.32	100.88	(Ti _{0.99} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.007} Nb _{0.003} Ca _{0.005}) _{1.008} O ₂	
	16	98.97	0.12	0.19	1.20	0.03	0.02	0.01	0.65	0.11	0.24	101.54	(Ti _{0.99} Si _{0.002} Al _{0.003} Fe _{0.013} Nb _{0.004}) _{1.012} O ₂	
	17	98.96	0.39	0.24	0.49	0.03	—	—	0.62	—	0.44	101.19	(Ti _{0.99} Si _{0.005} Al _{0.004} Fe _{0.005} Nb _{0.004} Ca _{0.006}) _{1.014} O ₂	
绢英岩	18	98.84	0.10	0.12	0.77	0.10	—	—	0.21	0.39	0.01	100.54	(Ti _{0.988} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.009}) _{1.000} O ₂	
	19	98.75	0.11	0.13	0.57	0.78	—	0.01	0.18	0.33	0.03	100.89	(Ti _{0.987} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.006} W _{0.003}) _{1.000} O ₂	
	20	98.65	0.18	0.15	0.70	0.02	—	—	—	0.22	0.02	99.94	(Ti _{0.987} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.008}) _{0.999} O ₂	
	21	98.56	0.12	0.10	0.34	—	0.01	—	0.47	0.04	0.32	99.96	(Ti _{0.986} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.004} Nb _{0.003} Ca _{0.005}) _{1.002} O ₂	
	22	97.70	0.54	0.54	0.99	0.17	0.14	0.00	0.75	—	0.13	100.96	(Ti _{0.977} Si _{0.007} Al _{0.008} Fe _{0.011} W _{0.001} Mg _{0.003} Nb _{0.005}) _{1.012} O ₂	
	23	95.71	0.70	0.63	1.19	—	0.20	0.02	0.81	0.13	0.36	99.75	(Ti _{0.957} Si _{0.009} Al _{0.01} Fe _{0.013} Mg _{0.004} Nb _{0.005} Ca _{0.005}) _{1.003} O ₂	
	24	94.95	0.17	0.15	0.41	0.08	0.02	0.02	2.16	0.30	0.12	98.39	(Ti _{0.95} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.005} Nb _{0.013}) _{0.972} O ₂	
	25	94.68	2.39	0.18	1.10	0.11	0.01	0.00	0.89	—	0.61	99.96	(Ti _{0.947} Si _{0.032} Al _{0.003} Fe _{0.012} Nb _{0.005} Ca _{0.009}) _{1.008} O ₂	
	平均值	98.74	0.33	0.20	0.61	0.12	0.02	0.01	0.44	0.10	0.25			
	26	98.97	0.09	0.10	0.13	0.20	—	—	0.15	0.26	0.02	99.90	(Ti _{0.99} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.001} W _{0.001}) _{0.995} O ₂	
	27	98.94	0.04	0.08	0.40	0.08	—	—	0.60	0.00	0.02	100.16	(Ti _{0.989} Si _{0.001} Al _{0.001} Fe _{0.004} Nb _{0.004}) _{0.99902}	
	28	98.84	0.52	0.20	0.19	0.37	—	0.03	0.24	0.17	0.06	100.63	(Ti _{0.988} Si _{0.007} Al _{0.003} Fe _{0.002} W _{0.001}) _{1.001} O ₂	
	29	98.16	0.30	0.25	0.35	0.08	0.07	—	0.59	0.44	0.07	100.30	(Ti _{0.982} Si _{0.004} Al _{0.004} Fe _{0.004} Nb _{0.004}) _{0.998} O ₂	
	30	97.21	1.46	0.36	0.53	1.01	0.04	—	0.28	0.17	0.13	101.17	(Ti _{0.972} Si _{0.019} Al _{0.006} Fe _{0.006} W _{0.003}) _{1.006} O ₂	
	31	96.83	1.06	0.43	0.46	1.14	0.03	0.05	0.20	—	0.10	100.30	(Ti _{0.968} Si _{0.014} Al _{0.007} Fe _{0.005} W _{0.004}) _{0.998} O ₂	

续表 2
Continued Table 2

岩性	点号	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	WO ₃	MgO	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	CaO	Total	晶体化学式
绢英岩	32	96.18	1.63	0.92	0.67	0.31	0.20	—	0.20	—	0.02	100.13	(Ti _{0.962} Si _{0.022} Al _{0.014} Fe _{0.007} W _{0.001} Mg _{0.004}) _{1.008} O ₂
	33	94.69	1.02	0.44	0.51	0.97	0.05	—	0.18	0.19	0.12	98.17	(Ti _{0.947} Si _{0.014} Al _{0.007} Fe _{0.006} W _{0.003}) _{0.977} O ₂
	34	91.37	0.73	0.25	2.18	5.03	0.03	—	0.82	0.12	0.07	100.58	(Ti _{0.914} Si _{0.01} Al _{0.004} Fe _{0.024} W _{0.017} Nb _{0.005}) _{0.974} O ₂
	35	91.01	0.53	0.29	1.74	3.31	0.01	0.02	1.14	0.05	0.08	98.18	(Ti _{0.91} Si _{0.007} Al _{0.005} Fe _{0.019} W _{0.011} Nb _{0.007}) _{0.959} O ₂
	36	90.93	0.61	0.24	2.18	4.65	0.02	0.02	0.99	0.20	0.08	99.93	(Ti _{0.909} Si _{0.008} Al _{0.004} Fe _{0.024} W _{0.016} Nb _{0.006}) _{0.977} O ₂
	37	90.80	0.75	0.25	2.29	5.57	0.02	—	0.65	0.06	0.05	100.44	(Ti _{0.908} Si _{0.01} Al _{0.004} Fe _{0.025} W _{0.019} Nb _{0.004}) _{0.97} O ₂
	38	90.18	0.45	0.28	2.38	4.59	0.04	—	1.18	—	0.09	99.18	(Ti _{0.902} Si _{0.006} Al _{0.004} Fe _{0.026} W _{0.016} Nb _{0.007}) _{0.961} O ₂
	39	89.63	0.37	0.19	2.13	4.94	0.03	—	1.04	0.00	0.05	98.38	(Ti _{0.896} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.024} W _{0.017} Nb _{0.006}) _{0.951} O ₂
	40	89.40	0.36	0.21	2.04	5.55	0.06	—	0.66	0.01	0.05	98.35	(Ti _{0.894} Si _{0.005} Al _{0.003} Fe _{0.023} W _{0.019} Nb _{0.004}) _{0.948} O ₂
	41	89.08	3.22	1.85	0.98	2.32	0.28	—	0.55	0.14	0.09	98.51	(Ti _{0.891} Si _{0.043} Al _{0.029} Fe _{0.011} W _{0.008} Mg _{0.006} Nb _{0.003}) _{0.991} O ₂
	42	88.16	1.31	0.55	2.55	5.10	0.19	—	0.79	0.11	0.10	98.85	(Ti _{0.882} Si _{0.017} Al _{0.009} Fe _{0.028} W _{0.018} Mg _{0.004} Nb _{0.005}) _{0.965} O ₂
	平均值	93.55	0.85	0.41	1.28	2.66	0.06	0.01	0.60	0.11	0.07		
黄铁绢英岩	43	98.54	0.13	0.13	0.30	0.23	—	—	1.05	0.09	0.02	100.48	(Ti _{0.985} Si _{0.002} Al _{0.002} Fe _{0.003} W _{0.001} Nb _{0.006}) _{0.999} O ₂
	44	97.11	0.70	0.56	0.95	0.84	0.01	—	0.48	—	0.03	100.67	(Ti _{0.971} Si _{0.009} Al _{0.009} Fe _{0.011} W _{0.003} Nb _{0.003}) _{1.006} O ₂
	45	95.22	0.44	0.27	2.27	0.58	0.02	0.10	0.93	0.20	0.09	100.10	(Ti _{0.952} Si _{0.006} Al _{0.004} Fe _{0.025} W _{0.002} Nb _{0.006}) _{0.995} O ₂
	46	93.65	0.11	0.12	1.48	1.61	0.01	—	3.42	0.13	0.03	100.54	(Ti _{0.936} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.016} W _{0.006} Nb _{0.021}) _{0.982} O ₂
	47	92.53	0.84	0.51	1.85	2.13	0.02	0.08	0.97	0.21	0.10	99.24	(Ti _{0.925} Si _{0.011} Al _{0.008} Fe _{0.021} W _{0.007} Nb _{0.006}) _{0.979} O ₂
	48	90.14	1.10	0.61	2.44	4.53	—	0.02	0.38	0.16	0.14	99.52	(Ti _{0.901} Si _{0.015} Al _{0.009} Fe _{0.027} W _{0.016}) _{0.968} O ₂
	49	89.88	0.09	0.15	2.30	5.74	—	0.04	2.12	—	0.01	100.34	(Ti _{0.899} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.026} W _{0.02} Nb _{0.013}) _{0.961} O ₂
	50	89.76	0.83	0.40	2.32	3.37	—	0.01	2.99	0.10	0.10	99.85	(Ti _{0.898} Si _{0.011} Al _{0.006} Fe _{0.026} W _{0.012} Nb _{0.018}) _{0.971} O ₂
	51	89.57	0.07	0.15	2.40	4.20	—	—	2.38	0.07	0.01	98.84	(Ti _{0.896} Si _{0.001} Al _{0.002} Fe _{0.027} W _{0.014} Nb _{0.014}) _{0.954} O ₂
	52	89.50	1.63	1.20	1.94	2.45	0.03	—	1.47	—	0.05	98.26	(Ti _{0.895} Si _{0.022} Al _{0.019} Fe _{0.022} W _{0.008} Nb _{0.009}) _{0.975} O ₂
	53	88.07	0.97	0.56	2.72	4.37	0.02	0.04	1.75	0.03	0.16	98.71	(Ti _{0.881} Si _{0.013} Al _{0.009} Fe _{0.03} W _{0.015} Nb _{0.011}) _{0.959} O ₂
	54	87.81	0.63	0.27	2.43	6.71	0.05	0.00	0.72	—	0.07	98.69	(Ti _{0.878} Si _{0.008} Al _{0.004} Fe _{0.027} W _{0.023} Nb _{0.004}) _{0.944} O ₂
	55	87.57	0.54	0.18	2.54	6.11	0.01	0.03	1.22	—	0.05	98.24	(Ti _{0.876} Si _{0.007} Al _{0.003} Fe _{0.028} W _{0.021} Nb _{0.007}) _{0.942} O ₂
	56	87.43	1.34	0.74	2.02	5.26	0.04	0.12	1.38	0.13	0.05	98.51	(Ti _{0.874} Si _{0.018} Al _{0.012} Fe _{0.022} W _{0.018} Nb _{0.008}) _{0.952} O ₂
	57	86.11	3.40	2.01	2.46	3.18	0.01	—	1.18	0.05	0.12	98.54	(Ti _{0.861} Si _{0.045} Al _{0.031} Fe _{0.027} W _{0.011} Nb _{0.007}) _{0.982} O ₂
	平均值	90.86	0.86	0.52	2.03	3.42	0.01	0.03	1.49	0.08	0.07		

注：— 代表“低于检测限”；金红石晶体化学式计算皆以 O₂ 为 1 摩尔数计算。

半径,因此能够发生替换。金红石中 Si 含量在 400×10^{-6} 可以示踪超高压变质作用(朱珂等,2017),研究区金红石中 SiO_2 与 TiO_2 含量存在明显的负相关性(图 6c),暗示 Si 元素能够替代金红石中的 Ti。根

据计算,上庄金矿中 Si 平均含量为 $2\,901 \times 10^{-6}$,夏甸金矿中 Si 的平均含量为 $3\,108 \times 10^{-6}$,因此推测金红石中的高 Si 含量指示胶东金矿的变质环境为高压环境。

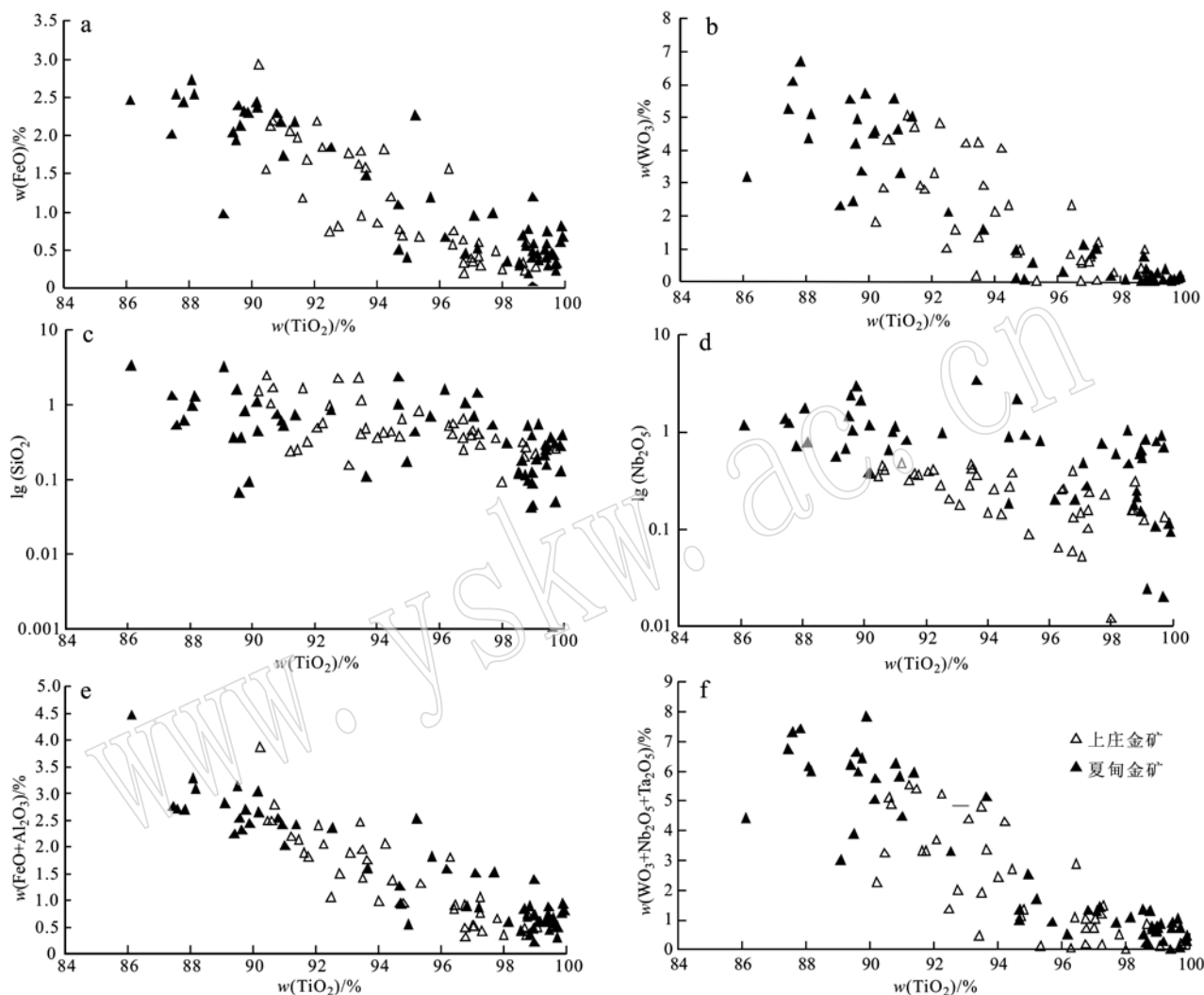


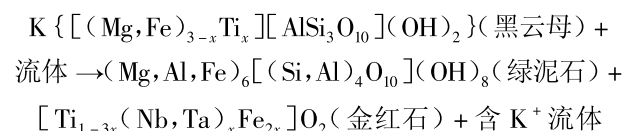
图6 金红石的微量元素与 Ti 的相关性

Fig. 6 Correlation between trace elements and Ti in rutiles

根据已有研究可知,金红石存在两种成因类型,一种为岩浆成因,一种为变质成因(陈光远等,1993)。金红石中的 Fe 含量是判断金红石成因的一种方法,变质成因的金红石 FeO 含量通常大于 0.13%(肖益林等,2011)。在化学成分上,电子探针的分析结果(表 1、表 2)表明,上庄金矿与夏甸金矿的金红石成因类型为变质成因(图 7)。

镜下观察发现,无论是上庄金矿还是夏甸金矿,花岗岩中的金红石大多分布于黑云母的边缘以及黑云母裂隙和解理中。结合前人研究可知,在高温条件下,黑云母是长英质岩石以及变质泥岩的 Ti 的载

体(李晓峰等,2005),也就是说,黑云母中富含丰富的 Ti 元素,推测变质成因的金红石的原岩为黑云母等含 Ti 量高的矿物,正是由于黑云母含有较高的 Ti,因此在蚀变过程中 Ti 析出形成了金红石。化学关系式推测如下:



在上庄金矿中,绢英岩中金红石 TiO_2 平均含量为 95.48%,而黄铁绢英岩中金红石 TiO_2 平均含量

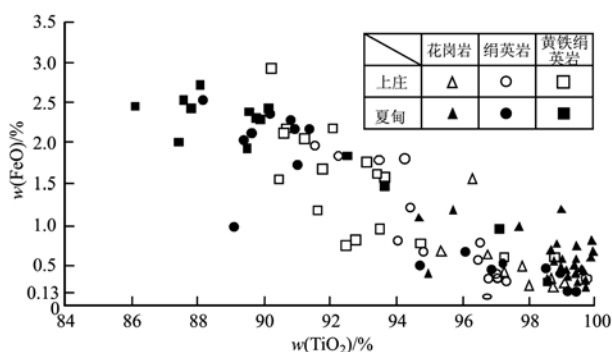


图7 金红石中 Ti-Fe 含量变化图

Fig. 7 The change of Ti-Fe content in rutile

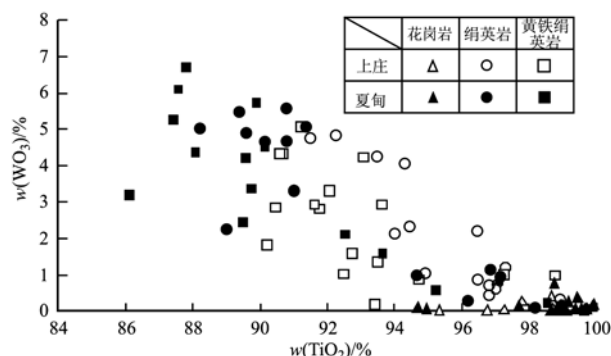


图8 金红石中 Ti-W 含量变化图

Fig. 8 The change of Ti-W content in rutile

为 92.84%；在夏甸金矿中，绢英岩中金红石 TiO_2 平均含量为 93.55%，而黄铁绢英岩中金红石 TiO_2 平均含量为 90.86%。已有研究表明， TiO_2 只能在强酸性条件下才能进入游离状态并富集（刘英俊等，1984）。在金矿床的氧化带中，金红石也不容易被分解迁移，因此 Ti 含量由矿体向远处逐渐下降，从而在矿体周围形成 Ti 晕（陈光远等，1997）。

通过对上庄和夏甸金矿中金红石钨含量的分析（图 8），发现胶东金矿成岩成矿作用过程中，随着花岗岩重融和蚀变作用的不断增强，从花岗岩→绢英岩→黄铁绢英岩，金红石中钨含量呈现不断富集的趋势。

类似于金红石中 W 元素的变化过程，Cr 元素在金矿化富集过程中也表现出类似的分布特征，呈现明显的演化富集过程。金矿化早期，Cr 元素零散分布于各类岩性中（鲁安怀等，1995，1997）。随着蚀变矿化的增强和成矿元素的富集，主成矿阶段 Cr 元素在绢云母中不断富集，形成铬绢云母，表现出较为明显的“绿化”伴生金富矿体的现象（鲁安怀等，1995，1997）。这一演化趋势充分证明 Cr 元素的活化、运移以及沉淀与金的活化、运移与沉淀是同步发生的，铬绢云母的出现，是强蚀变和金矿化的标志。“绿化”成为判定金矿化的标志。

在元素周期表中，Cr 与 W 属于同一副族，有相似的地球化学性质（马东升，2009）。类似于 Cr 的元素分布特征，W 元素在老地层中也主要呈零散分布，各岩性中的含量均低于地壳平均含量。随着蚀变和矿化过程的发展，W 元素不断富集，且主要进入金红石中。高 W 金红石的形成，伴随热液流体演化与强烈的绢英岩化和黄铁绢英岩化，并伴有金元素的富集成矿。这一过程包括老地层重熔分异过程中

W 的初步富集、绢英岩化过程中 W 的进一步富集以及黄铁绢英岩化过程中 W 的强烈富集。因此，金红石的出现及其高 W 含量可作为判定蚀变作用和金富集极为重要的指标。在胶东金矿床中，“绿化”现象较为少见，铬绢云母只在特定的蚀变带内发现。相比而言，金红石却在胶东金矿床中各岩性单元普遍发育。不同类型的金红石对应于不同蚀变分带特性，且对金矿化具有很好的指示作用。因此，通过对金红石形态、颗粒大小及其 Ti、W 等元素含量的分析，可作为判定蚀变矿化分带的重要指标。同时，高 W 金红石的出现，也可以作为富矿体的找矿标志。

7 结论

（1）上庄金矿郭家岭花岗闪长岩和夏甸金矿黑云母花岗岩中金红石主要分布在黑云母的边缘以及黑云母裂隙和解理中，为变质成因，推测原岩可能为黑云母等含 Ti 量高的矿物。

（2）金红石中 Fe、W、Si、Al、Nb、Ta 元素含量与 Ti 元素含量存在明显的负相关性，暗示它们与金红石中的 Ti 元素存在替代关系。

（3）从绢英岩到黄铁绢英岩中金红石的 Ti 含量呈减少趋势，在矿体周围能够形成 Ti 晕，可作为矿化标志和金矿的找矿依据。从花岗岩到绢英岩再到黄铁绢英岩，W 元素在金红石中不断地富集，在黄铁绢英岩中达到最高，高 W 金红石的存在能够指示金矿的富集，W 可以作为一种示踪元素。这表明胶东金矿物质成分和元素演化迁移的继承性。

（4）特征矿物金红石可作为判决蚀变矿化分带的主要依据；高 W 金红石的出现，可作为寻找金富矿体的标志。

References

- Addy S K and Garlick G D. 1974. Oxygen isotope fractionation between rutile and water[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 45(2): 119 ~ 121.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Shao Wei. 1997. Essence of reddening in wall alteration of Jiaodong gold deposits and its genetic and prospecting significance[A]. *Anthology of the Institute of geology of the Chinese Academy of Geological Sciences*[C]. 29 ~ 30: 128 ~ 136(in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhou Xunruo, *et al.* 1993. The Genetic Mineralogy and Gold Mineralization in Guojialing Granodiorite of Jiaodong Deposit[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 164 ~ 187(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Liu X, Wang Q, *et al.* 2015. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 674 ~ 686.
- Deng J, Wang C, Bagas L, *et al.* 2015. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry[J]. *Mineralium Deposita*, 50(8): 987 ~ 1 006.
- Ding Zhengjiang, Sun Fengyue, Liu Fulai, *et al.* 2015. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3 045 ~ 3 080(in Chinese with English abstract).
- Escudero A and Langenhorst F. 2012a. Incorporation of Si into TiO₂ phases at high pressure[J]. *American Mineralogist*, 97(4): 524 ~ 531.
- Escudero A, Langenhorst F and Muller W. 2012b. Aluminum solubility in TiO₂ rutile at high pressure and experimental evidence for a CaCl₂-structured polymorph[J]. *American Mineralogist*, 97(7): 1 075 ~ 1 082.
- Graham J and Morris R C. 1973. Tungsten-and antimony substituted rutile[J]. *Mineralogical Magazine*, 39(304): 470 ~ 473.
- Harris D C. 1989. The mineralogy and geochemistry of the Hemlo gold deposit, Ontario[J]. *Geological Survey & Research*, 38: 88.
- Lei Hao, Wang Zhilin, Lu Anhuai, *et al.* 2014. A typomorphic study of sphalerite from the Hutouya Pb-Zn deposit in Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 924 ~ 936(in Chinese with English abstract).
- Li Caifeng and Chen Jianping. 2015. 3D modeling of Da Yingezhuang-Xia Dian gold deposit in Shandong Province[A]. *China Geology 2015 Conference Abstract Compendium*[C]. 246 ~ 251(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Chen Zhenyu, Wang Rucheng, *et al.* 2005. The mineralogical geochemical characteristics of the rutile in the hairy crystals of the East China Sea, Jiangsu[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 475 ~ 481(in Chinese with English abstract).
- Liu Gengyin, Kan Jing, Yang Bin, *et al.* 2014. Ore-controlling Structure Character and Evolution of the Wangershan Fault in the Hedong-Shangzhuang Region. Shandong Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(5): 742 ~ 746(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, *et al.* 1984. *Geochemistry of Element*[M]. Science Press, 76 ~ 84(in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai and Chen Guangyuan. 1995. Chromiferous Sericitization in Gold deposits and Its Significance for ore prospecting[J]. *Geology and Prospecting*, 31(2): 32 ~ 37(in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai and Chen Guangyuan. 1997. Typomorphism of aluminochromian mica in crustal evolution[J]. *Geological Review*, 43(5): 476 ~ 482(in Chinese with English abstract).
- Luo Xiandong, Yang Xiaoyong, Duan Luan, *et al.* 2014. Geochemical and geochronological study of the gold-related Guojialing pluton and Shangzhuang pluton in Jiaobei block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1 874 ~ 1 888(in Chinese with English abstract).
- Ma Dongsheng. 2009. Progress in research on geochemistry of tungsten[J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 19 ~ 34(in Chinese with English abstract).
- Scott K M. 2005. Rutile geochemistry as a guide to porphyry Cu-Au mineralization, Northparkes, New South Wales, Australia[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5(3): 247 ~ 253.
- Sobolev N V and Yefimova E S. 2000. Composition and Petrogenesis of Ti-Oxides Associated with Diamonds[J]. *International Geology Review*, 42(8): 758 ~ 767.
- Song Mingchun, Li Sanzhong, Yi Pihou, *et al.* 2014. Classification and metallogenic theory of the Jiaojia-style gold deposit in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(1): 87 ~ 104.
- Sutton S R, Karner J, Papike J, *et al.* 2005. Vanadium K edge XANES of synthetic and natural basaltic glasses and application to microscale oxygen barometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9): 2 333 ~ 2 348.
- Wang Juan, Chen Yi, Mao Qian, *et al.* 2017. Electron microprobe trace element analysis of rutile[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1 934 ~ 1 946(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yilin, Huang Jian, Liu Lei, *et al.* 2011. Rutile: An important/reservoir for geochemical information[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 398 ~ 416(in Chinese with English abstract).

- Yang Bin, Yan Fuchuan, Xi Zhenzhu, *et al.* 2015. Location prediction and prospecting breakthrough of deep ore body in Shangzhuang deposit of Jiaodong[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1): 90~91(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Ge Liangsheng, *et al.* 2006. A review of the study on the metallogenic epoch and genesis of the gold deposits in Jiaodong[J]. *Progress in Natural Science*. 16(7): 797~802(in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, *et al.* 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2 447~2 467(in Chinese with English abstract).
- Yang L Q., Deng J and Guo L N. 2016. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 585~602.
- Yu Hongjun. 2009. Genetic Mineralogy and Deep Prospects of Shangzhuang Ore Area of Canzhuang Gold Deposit in East Shandong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zang Weisheng and Chen Guangyuan. 1987. Study on the typomorphic characteristics of pyrite and the prospect evaluation of the mining area in the Xiadiangold deposit[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 6(2): 54~56(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. Discuss on the relationship between granitic rocks and Au-Cu-W-Sn-mineralization[J]. *Gansu Geology*, 22(2): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Wu Rongze, Shi Qing, *et al.* 2015. Comparative study on Ore-forming and ore-controlling structures at Linglong Gold Mine and Jiaojia Gold Mine in Jiaodong Region[J]. *Gold Science and Technology*, 23(5): 14~19(in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongying, Li Huaikun, Cui Yurong, *et al.* 2013. Rutile U-Pb Isotopic Dating Methodology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1 439~1 446(in Chinese with English abstract).
- Zhu Ke, Liang Jinlong, Shen Ji, *et al.* 2017. Geochemical significance of silicon-bearing rutile in eclogites from Dabie-Sulu ultra-high pressure metamorphic terrane[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 288~300(in Chinese with English abstract).
- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 等. 1993. 胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化[M]. 中国地质大学出版社, 164~187.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等. 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. *岩石学报*, 31(10): 3 045~3 080.
- 雷 浩, 王智琳, 鲁安怀, 等. 2014. 青海虎头崖铅锌矿床闪锌矿化学成分特征研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(5): 924~936.
- 李彩凤, 陈建平. 2015. 山东省大尹格庄-夏甸金矿田三维立体建模[A]. 中国地质2015年会论文摘要汇编[C]. 246~251.
- 李晓峰, 陈振宇, 王汝成, 等. 2005. 江苏东海毛发状水晶中金红石矿物学、地球化学特征[J]. *岩石学报*, 21(2): 475~481.
- 刘庚寅, 阚 靖, 杨 斌, 等. 2014. 山东望儿山断裂河东-上庄段控矿构造性质与演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(5): 742~746.
- 刘英俊, 曹励明, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 鲁安怀, 陈光远. 1995. 金矿床中“绿帘”——含铬绿帘云母化及其找矿意义[J]. *地质与勘探*, 31(2): 32~37.
- 鲁安怀, 陈光远. 1997. 地壳演化过程中铬铝云母标型性探讨[J]. *地质论评*, 43(5): 476~482.
- 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 等. 2014. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究[J]. *地质学报*, 88(10): 1 874~1 888.
- 马东升. 2009. 钨的地球化学研究进展[J]. *高校地质学报*, 15(1): 19~34.
- 王 娟, 陈 意, 毛 骞, 等. 2017. 金红石微量元素电子探针分析[J]. *岩石学报*, 33(6): 1 934~1 946.
- 肖益林, 黄 建, 刘 磊, 等. 2011. 金红石: 重要的地球化学“信息库”[J]. *岩石学报*, 27(2): 398~416.
- 杨 斌, 阎复传, 席振铎, 等. 2015. 胶西北上庄金矿深部矿体定位预测与找矿突破[J]. *矿物学报*, (S1): 90~91.
- 杨立强, 邓 军, 葛良胜, 等. 2006. 胶东金矿成矿时代和矿床成因研究述评[J]. *自然科学进展*, 16(7): 797~802.
- 杨立强, 邓 军, 王中亮, 等. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. *岩石学报*, 30(9): 2 447~2 467.
- 于洪军. 2009. 胶东蚕庄金矿上庄矿区成因矿物学研究及深部远景评价[D]. 北京: 中国地质大学.
- 臧维生, 陈光远. 1987. 夏甸金矿床黄铁矿标型特征研究及矿区远景评价[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 6(2): 54~56.
- 张 旗. 2013. 论金铜钨锡成矿与花岗岩的关系[J]. *甘肃地质*, 22(2): 1~13.
- 张晓飞, 吴荣泽, 石 卿, 等. 2015. 胶东地区玲珑金矿和焦家金矿成矿控矿构造对比研究[J]. *黄金科学技术*, 23(5): 14~19.
- 周红英, 李怀坤, 崔玉荣, 等. 2013. 金红石 U-Pb 同位素定年技术研究[J]. *地质学报*, 87(9): 1 439~1 446.
- 朱 柯, 梁金龙, 沈 骥, 等. 2017. 大别-苏鲁超高压榴辉岩中富 Si 金红石的地球化学意义[J]. *地学前缘*, 24(3): 288~300.

附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 邵 伟, 1997. 胶东金矿红化蚀变的实质与成因及其找矿意义[A]. 中国地质科学院地质研究所文集[C]. 29~30: 128~136.