氧化型与还原型矽卡岩金矿床地质与成矿特征对比研究

邱锦鸿[1]，卢圣祥[2]，王守旭[2]，鹿峰宾[2]，周荣志[2]，邱昆峰[1*]
（1. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院；2. 山东黄金地质矿产勘查有限公司）

摘要：中国矽卡岩金矿床资源丰富，累计探明金储量1 871 t，占全国金储量的11 %。根据成矿侵入岩地球化学特征，矽卡岩金矿床可分为氧化型与还原型2类。尽管前人对全球矽卡岩金矿床开展了系统性研究，但针对氧化型、还原型矽卡岩金矿床的对比分析仍显不足，其氧化还原性差异的成因机制尚不明确。通过系统梳理前人研究成果，从成矿构造背景、侵入岩特征、蚀变矿物组合、成矿流体特征及成矿模式等方面进行对比研究，得出以下结论：①2类矽卡岩金矿床主要形成于大洋岛弧与大陆边缘造山带环境。②氧化型矽卡岩金矿床的侵入岩以高氧逸度（f_{O_2}>(f_{O_2}(FMQ)+2)）、磁铁矿发育为特征，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$>0.4；而还原型矽卡岩金矿床的侵入岩以发育钛铁矿及磁黄铁矿为主，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$≪0.75。③氧化型矽卡岩金矿床矽卡岩蚀变以透辉石为主，石榴子石含量显著高于辉石，金属元素组合为Au-Cu-Mo-Pb-Zn；还原型矽卡岩金矿床矽卡岩蚀变则以钙铁辉石为主，辉石与石榴子石含量相近，金属元素组合为Au-As-Te-Bi。④2类矽卡岩金矿床成矿流体均呈现高温高盐度向中低温低盐度演化的趋势，但还原型矽卡岩金矿床流体富含CH_4。⑤矽卡岩金矿床成矿模式表现为高温富金属热液岩浆流体，通过构造驱动形成进矽卡岩蚀变（石榴子石、透辉石等）；随温度降低，在矽卡岩蚀变（含水硅酸盐矿物）主导下，岩石破裂促进金银等矿化形成，最终低温阶段大气降水混入，形成石英-碳酸盐脉，标志成矿结束。不同的是，氧化型矽卡岩金矿床常伴随铜钼矿化形成，而还原型矽卡岩金矿床则常伴有钨锡矿化产出。通过进一步总结矽卡岩金矿床研究中存在的科学问题，提出未来需结合扩散年代学、矿物纳米结构分析及机器学习等前沿技术深化成矿机制研究。

关键词：矽卡岩；氧化型矽卡岩金矿床；还原型矽卡岩金矿床；成矿构造背景；侵入岩特征；蚀变矿物组合；成矿流体特征；成矿模式

中图分类号：TD11　P618.51
文献标志码：A
文章编号：1001-1277(2025)09-0001-15
doi：10.11792/hj20250901

引　言

矽卡岩为广泛在中酸性侵入岩与碳酸盐岩接触带形成的一套蚀变硅酸盐矿物集合体[1]，通常富含Ca、Mg、Fe、Al、Mn硅酸盐矿物（如石榴子石、辉石等）[2-6]。在时间和空间上与矽卡岩有一定关系的矿床，通常称之为矽卡岩矿床。近年来，随着国际金价攀升，矽卡岩金矿床的勘探与研究热度显著提升。全球范围内相继发现美国Crown Jewel、加拿大Nickel Plate、中国北衙等大型高品位矽卡岩金矿床[7-10]，可见该类金矿床的成矿潜力与资源地位。中国矽卡岩金矿床资源丰富，累计探明金储量1 871 t，占全国金储量的11 %，其时空分布与岩浆-热液活动密切相关，兼具规模大、矿种多样和经济价值高的特点。因此，矽卡岩金矿床的研究具有重大科学及社会意义[11-19]。

根据矽卡岩金矿床侵入岩地球化学性质（如氧逸度f_{O_2}、钛铁矿与磁铁矿含量，以及岩体$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$值，可以将矽卡岩金矿床分为氧化型与还原型2类[20-24]。其中，氧化型矽卡岩金矿床代表有厄瓜多尔Nambija、美国McCoy、中国铜陵及北衙等金矿床。还原型矽卡岩金矿床的代表有美国Crown Jewel、加拿大Nickel Plate、中国黑龙江老柞山、中国甘肃德乌鲁等金矿床（见图1）。针对矽卡岩金矿床，前人做了许多相关方面的研究：矽卡岩金矿床的成矿地质作用[2,3,12,25-26]、成矿构造背景[12,15,27-28]、相关岩浆岩[12]、矿床地质及地球化学特征[14,29-31]、蚀变

收稿日期：2025-03-18；修回日期：2025-05-02
基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFC2906900）；自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心开放课题（LDKF-2023BZX-10）；山东黄金地质矿产勘查有限公司与中国地质大学（北京）产学研合作项目（23B1014）
作者简介：邱锦鸿（2000—），男，硕士研究生，研究方向为地质学；E-mail：jinhongqiu@qq. com
*通信作者：邱昆峰（1986—），男，教授，博士，从事矿床学研究工作；E-mail：kunfengqiu@qq. com

岩石矿物学[7,32-33]、成矿流体来源及其演化[12,34-36]。然而，对于该2类矽卡岩金矿床的系统对比研究仍较薄弱，其氧化还原性差异的成因机制尚未明晰。本文通过分析全球18个代表性矽卡岩金矿床（见表1、表2），系统对比地质与成矿特征，以期为找矿勘查提供理论依据。

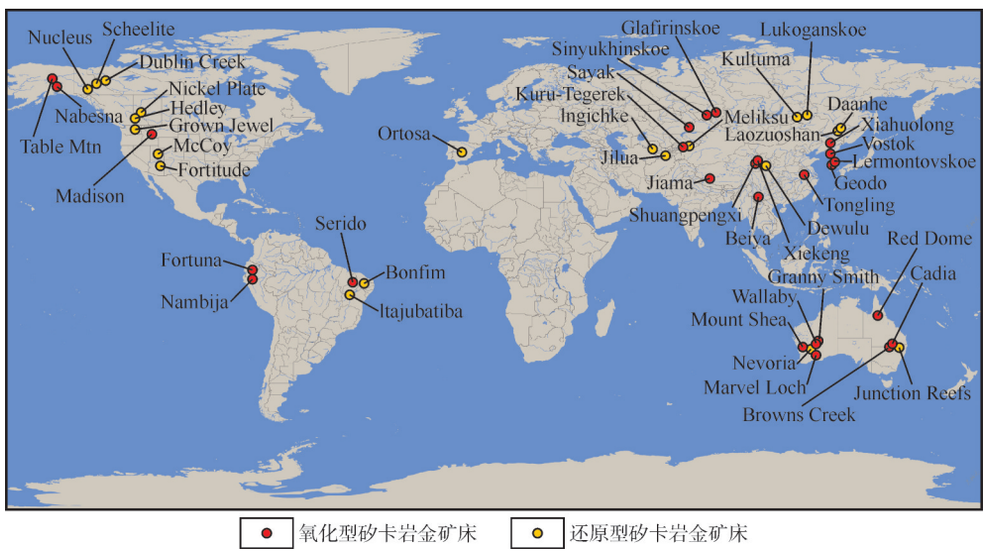


图1　全球代表性氧化型与还原型矽卡岩金矿床分布图（据文献[22]修改）

Fig. 1　Global distribution map of representative oxidized and reduced skarn-type gold deposits

1　成矿构造背景

矽卡岩矿床的构造分类需综合考虑同一构造背景下矿床的共生特征及其与特定环境的关联性[37]。据此，MEINERT等[12]将矽卡岩矿床成矿构造背景分为大洋岛弧、大陆边缘造山带、大陆内部断裂凹陷带、裂谷四大类（见图2）。例如：在大洋岛弧环境下，钙质铁铜矽卡岩矿床最为发育，并伴生钴、镍、铬和金等。而一些矽卡岩金矿床则发育在与大洋火山弧相关的弧后盆地[38]。此类矽卡岩矿床与其他背景下产出的矽卡岩矿床最大区别是其与闪长质等中性侵入岩有关，形成大量内矽卡岩，钠质交代作用强烈，几乎不发育锡、铅矿化。总的来说，这些特征反映了地壳、围岩和岩体的原始海水性质[12,20]。绝大多数矽卡岩矿床与大陆地壳向下俯冲形成的大陆边缘造山带有关。这种构造背景下的岩石类型复杂多样，从闪长岩到花岗岩均存在。该构造背景下矽卡岩矿床的矿种类型多样与局部地质环境不同有关[39]。

与低角度俯冲相关的岩浆可能参与更多地壳相互作用，俯冲板块在移动过程中可能诱发局部断裂作用[40]，下行板块的沉陷可能导致局部裂陷。在该过程中，岩浆弧可能扩大或向内陆更远的地方迁移。此环境下产出的矽卡岩矿床岩体成分主要为花岗质，富钼或钨钼，而贫锌、铋、铜和氟。这种背景下的矽卡岩矿床含多种金属成分，并且局部可能形成重要的铜、砷矿体。有些矽卡岩矿床与俯冲相关的岩浆活动无关，而与俯冲期后的S型岩浆作用，以及与先前稳定克拉通的裂谷作用有关。此类构造背景下的矽卡岩矿床岩体成分通常为花岗质，且含有云英岩蚀变和异常放射性，产生的经济矿床以富锡、氟为特征，并伴生钨、铍、硼、锂、铋、锌、铅、铀、氟和稀土等。

氧化型与还原型矽卡岩金矿床地质特征对比见表3。结合全球典型矽卡岩金矿床分布与特征对比可进一步发现，尽管不同构造背景下矽卡岩金矿床的成矿特征各异，氧化型与还原型矽卡岩金矿床的成矿构造背景具有明显的共性。该2类矽卡岩金矿床主要集中分布于大洋岛弧与大陆边缘造山带环境，这可能与俯冲作用引发的岩浆活动、流体运移及氧化还原条件变化密切相关。这一规律为区域找矿勘查提供了重要的构造背景约束。

2　侵入岩特征

火成岩成分与矽卡岩矿床类型具有显著的成因联系[41-45]。例如：与锡和钼的矽卡岩矿床相关侵入岩相比，与铁和金矽卡岩矿床相关的侵入岩更富MgO，而贫K_2O或SiO_2。这可能反映出，与铁和金矽卡岩矿床相关的侵入岩岩浆来源更原始，而与锡和钼矽卡岩矿床相关的侵入岩岩浆则可能经历了更强烈的分异演化或地壳混染作用。

在主量元素方面，绝大多数矽卡岩矿床侵入岩均为钙碱性、铝质或过铝质。在微量元素方面，铁和金矽卡岩矿床侵入岩具有较低$w(Rb)/w(Sr)$值，而锡和钼矽卡岩矿床恰恰与其相反，显示出较高$w(Rb)/w(Sr)$值，这反映铁和金矽卡岩矿床在成矿过程中侵

表 1　代表性氧化型矽卡岩金矿床主要特征

Table 1　Main characteristics of representative oxidized skarn-type gold deposits

矿床名称（金储量/t）	国家地区	构造背景	岩浆源区	岩浆岩特征	矽卡岩蚀变矿物组合	成矿年龄/Ma	成矿流体特征	参考文献
北衙（~320）	中国云南	大洋岛弧	~840 Ma的下地壳	岩性为二长花岗斑岩和花岗岩，具有较高$w(K_2O)/w(K_2O)$值，属高钾质钠长石岩类，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.58~0.92	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、方解石、磁铁矿；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、角闪石、石英、黄铁矿、黄铜矿	~37	富金矿石石英流体包裹体完全均一温度为180 ℃~365 ℃，盐度为1.6 %~16.5 %；绿泥石测温表明，成矿温度为300 ℃~340 ℃	[9,46-48]
朝山（~8.4）	中国安徽	大陆边缘造山带	幔源碱性玄武岩浆	岩性为辉石闪长岩，$w(K_2O)/w(K_2O)$值为1.23，属钾质，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.42，见钾化和黑云母化蚀变	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、硅灰石、方柱石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、石英、绢云母、磁铁矿、黄铜矿	~140	石英流体包裹体完全均一温度为315 ℃~335 ℃；盐度较高，为17.5 %~22.5 %；成矿深度为2.5~3.2 km	[49]
下活龙（~6.5）	中国吉林	大洋岛弧	地幔楔部分熔融上侵	岩性主要为准铝质高钾钙碱性闪长玢岩，富集轻稀土元素	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、石英、方解石、黄铜矿、黄铁矿	~120	成矿流体性质总体由中高温中低盐度向低温（120 ℃~196 ℃）低盐度（0.87 %~3.85 %）转变，成矿流体属于含CH_4的H_2O-CO_2-NaCl体系	[50]
双朋西（0.846）	中国青海	大洋岛弧	下地壳高玄武岩部分熔融	岩性为花岗闪长岩，含磁铁矿，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.53~0.59	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括阳起石、绿帘石、石英、透闪石、磁铁矿、黄铜矿、辉铋矿、辉铜矿	~234	成矿流体属于中高温、中高盐度、中等密度、低中压力的富CO_2流体；S、Pb同位素显示，成矿物质主要来自深源岩浆流体；H-O同位素组成显示，主成矿期与岩浆水热液关系密切	[51-52]
谢坑（~1.14）	中国青海	大洋岛弧	下地壳	岩性主要为辉长岩，见磁铁矿	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括阳起石、绿帘石、石英、透闪石、磁铁矿、黄铜矿	~243	成矿流体具有中高温、中等盐度与高盐度共存的特征。H-O同位素组成显示，主成矿期与岩浆水热液关系密切。S同位素显示，成矿流体来源于深部岩浆	[53]
甲玛	中国西藏	大陆边缘造山带	新生下地壳部分熔融	岩性为二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩，属高钾钙碱性，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.47~0.71	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁榴石、透辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石英、绿帘石、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿	~15	成矿流体具有高温高盐度，富含CO_2、CH_4、N_2特征；H-O同位素组成显示，成矿流体由岩浆水向大气降水增加方向演化；S、Pb同位素组成表明，成矿物质主要来源于壳幔岩浆混合作用	[18,54-55]
Geodo（~2.14）	韩国	大洋岛弧		岩性为石英二长闪长岩、二长闪长岩，发生磁化，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$>0.4	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石榴子石、透辉石、磁铁矿；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、石英、方解石、黄铜矿、辉铋矿、黄铁矿	~110	成矿流体具有中高温中等盐度特征；H-O同位素组成显示，流体由岩浆水向大气降水增加方向演化；绿泥石温度计显示，成矿温度为~200 ℃	[56]
Nambija（~150）	厄瓜多尔	大陆边缘造山带		岩性为花岗闪长岩、英云闪长岩，见磁铁矿	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石榴子石、透辉石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、绿帘石、石英、方解石、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	~145	辉石流体包裹体显示高温高盐度特征，并向中高温中低盐度演化；从顺行到逆行矽卡岩蚀变，成矿流体演化显示出连续性，成矿深度~4 km	[57]
Kuru-Tegerek（~50）	吉尔吉斯斯坦	大陆边缘造山带	下地壳高钾质玄武岩熔融	岩性为辉长闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长辉长岩，在辉长闪长岩和二长辉长岩中均见磁铁矿	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石榴子石、透辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、石英、磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿	~310	成矿流体经历早期低盐度蒸汽态到逆行矽卡岩蚀变时期的高温高盐度，再到后期高温低盐度的演化，温度持续下降，~300 ℃发生金沉淀	[58]

表2 代表性还原型矽卡岩金矿床主要特征

Table 2 Main characteristics of representative reduced skarn-type gold deposits

矿床名称（金储量/t）	国家地区	构造背景	岩浆源区	岩浆岩特征	矽卡岩蚀变矿物组合	成矿年龄/Ma	成矿流体特征	参考文献
老柞山后期（~32）	中国黑龙江	大洋岛弧	新生下地壳或岩石圈地幔	岩性为闪长岩、闪长玢岩；属于准铝质、高钾钙碱性Ⅰ型花岗岩；f_{O_2}(FMQ)=0.24，f_{O_2}=-11.88	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铝榴石、钙铁辉石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、阳起石、透闪石、磁黄铁矿、毒砂、辉钼矿、闪锌矿	~107	富金矿石石英流体包裹体完全均一温度从高温转为中低温，盐度从中高盐度降至低盐度；属H_2O-NaCl-CH_4±CO_2体系；H-O同位素表明，含矿流体主要来源于岩浆水；S同位素表明，成矿物质主要来源于岩浆	[59-61]
大安河	中国黑龙江	大洋岛弧	壳幔混合	与成矿相关的侵入岩主要为花岗闪长岩、辉石闪长岩；显示还原性质（f_{O_2}(FMQ)=0.17，f_{O_2}=-15.11）	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、透闪石、磁黄铁矿、毒砂、闪锌矿	185~183	成矿流体性质从高温中高盐度变为中高温低盐度；激光拉曼分析和H-O同位素表明，成矿流体总体为低氧逸度或还原的H_2O-NaCl-CH_4±CO_2体系，初始含矿流体具有岩浆热液流体性质	[59]
Nickel Plate（~15.2）	加拿大不列颠哥伦比亚	大洋岛弧	地壳源	岩性主要为黑云母闪长岩、石英闪长岩，相对贫钾长石和石英；$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.19	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、绿帘石、磁黄铁矿、毒砂、辉铋矿、碲-铋矿物	~200	辉石和石榴子石流体包裹体显示，成矿流体具有高温中等盐度特征；金成矿温度~370 ℃，故成矿深度不深	[62]
德乌鲁（~1.54）	中国甘肃	大洋岛弧	富集地幔基性岩浆与地壳岩浆混合	与成矿相关的侵入岩主要为石英闪长岩，岩石内钛铁氧化物主要为钛铁矿，$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.59~0.73	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、阳起石、黑云母、毒砂、辉铋矿	~239	流体包裹体研究显示，成矿温度为345 ℃；成矿深度2.9~6.5 km	[63-64]
Crown Jewel（~47.7）	美国华盛顿	大洋岛弧	地壳源	岩性为花岗闪长岩、石英二长岩，发育含钛铁矿；$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.16	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿帘石、绿泥石、阳起石、黑云母、毒砂、辉铋矿、碲-铋矿物	~165	石英硫化物脉中石英流体包裹体显示高温中等盐度；H-O同位素表明，含矿流体主要来源为岩浆水，后期混有大气降水；成矿深度约4 km	[65]
Lukoganskoe	俄罗斯外贝加尔	大洋岛弧	深部壳幔熔融	岩性为花岗闪长岩、花岗岩；含钛铁矿；$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.13~0.4	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石榴子石、钙铁辉石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石英、绿帘石、方解石、磁铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、辉铋矿	150~160	流体包裹体研究显示，成矿流体经历从高温中高盐度逐渐变为中高温低盐度的过程；H-O同位素表明，成矿流体主要来源岩浆水，后期混有大气降水；S同位素表明，成矿物质源于地幔—地壳	[66]
Meliksu（~0.9）	吉尔吉斯斯坦	大陆边缘造山带	深部岩体熔融	岩性为英云闪长岩、花岗岩、二长辉长岩，发育钛铁矿化；花岗闪长岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$<0.4	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、石榴子石、硅灰石、符山石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括石英、绿泥石、角闪石、磷灰石、磁黄铁矿、黄铜矿		流体包裹体研究显示，成矿期均一温度较高（400 ℃~500 ℃），盐度为中等盐度；成矿深度约9 km；S同位素研究显示，成矿物质源于富含海水硫酸盐的沉积岩	[67]
Nevoria（~11.88）	澳大利亚	大陆边缘造山带	深部岩体熔融	岩性为花岗伟晶岩，见钛铁矿；$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.02~0.24	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、绿帘石、石英、方解石、毒砂、磁黄铁矿、辉铋矿	~2 635	富金矿石英流体包裹体显示，在高温中等盐度发生金的沉淀；流体包裹体富含CH_4-CO_2；成矿深度约11 km	[68]
Ortosa（~3.7）	西班牙阿斯图里亚斯	大陆边缘造山带		岩性为含钛铁矿石英二长闪长岩；$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$=0.08~0.18	进矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括钙铁辉石、钙铝榴石、硅灰石；退矽卡岩蚀变，蚀变矿物包括绿泥石、石英、磁黄铁矿、毒砂、辉铋矿、碲-铋矿物		成矿期流体温度为100 ℃~400 ℃，且盐度较低；富含CH_4	[69]

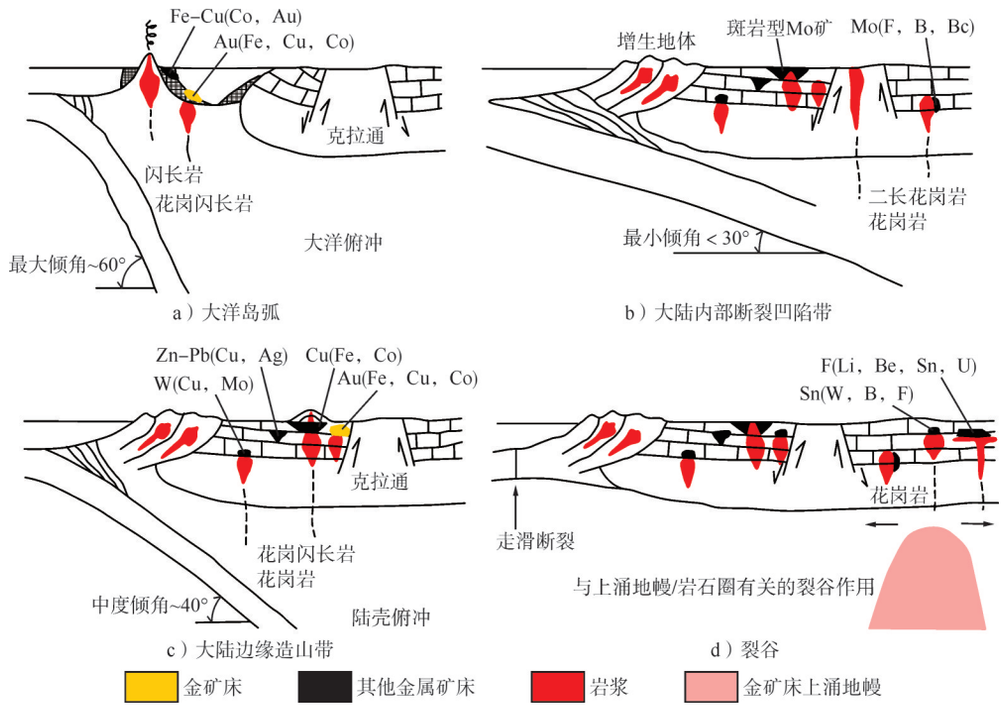


图2　矽卡岩矿床产出的主要构造背景示意图(据文献[7]修改)

Fig. 2　Schematic diagram of the tectonic setting of skarn deposits

表3　氧化型与还原型矽卡岩金矿床地质特征对比

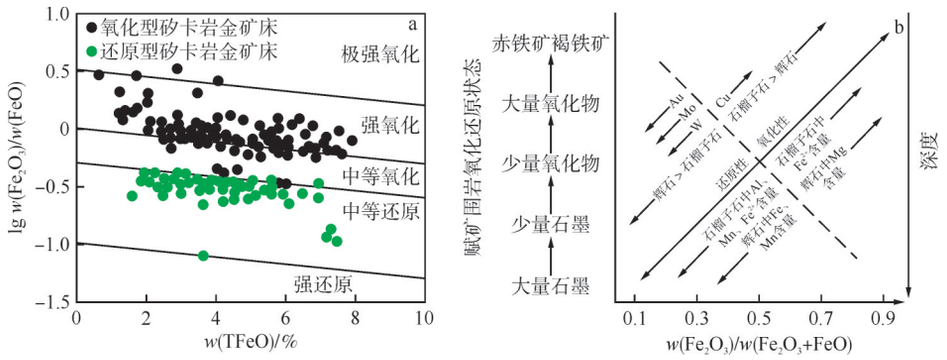
Table 3　Comparison of geological characteristics of oxidized and reduced skarn-type gold deposits

对比项目	氧化型矽卡岩金矿床	还原型矽卡岩金矿床
成矿构造背景	大洋岛弧和大陆边缘造山带	
侵入岩特征	发育磁铁矿、赤铁矿，几乎不含磁黄铁矿，磁化率较高，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)>0.4$，显示高氧逸度($f_{O_2}>(f_{O_2}(FMQ)+2)$)	发育钛铁矿、磁黄铁矿，含微量或不含磁铁矿，磁化率低，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)\ll0.75$
矿石矿物	黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、辉铜矿、辉铋矿等	磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、黄铁矿、钛铁矿、赫锑铋矿、辉锑铋矿、自然铋等
矽卡岩矿物	石榴子石含量高于辉石，辉石以透辉石为主，总体较为贫铁	石榴子石与辉石含量总体相当，石榴子石主要为钙铝榴石，辉石主要为钙铁辉石
金属元素组合	Au-Cu-Mo-Pb-Zn	Au-As-Te-Bi
成矿流体特征	包裹体富含H_2O-CO_2，含少量CH_4	包裹体富含H_2O-CH_4-CO_2
代表性矿床	中国北衙、甲玛、朝山、下活龙、双朋西、谢坑，韩国Geodo，厄瓜多尔Nambija，吉尔吉斯斯坦Kuru-Tegerek	中国老柞山、大安河、德乌鲁，加拿大Nickel Plate，美国Crown Jewel，俄罗斯Lukoganskoe，吉尔吉斯斯坦Meliksu，澳大利亚Nevoria，西班牙Ortosa

入岩分异程度较小，锡和钼矽卡岩矿床侵入岩则显示出更大的分异[12]。

通过对前人资料的整理与分析(见图3)，氧化型矽卡岩金矿床成矿岩体岩性主要为含辉石、高钾质的花岗岩、二长花岗岩、二长斑岩，其次为辉长岩、闪长岩、闪长玢岩等。发育磁铁矿、赤铁矿，几乎不含磁黄铁矿，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)>0.4$，磁化率较高，显示高氧逸度($f_{O_2}>(f_{O_2}(FMQ)+2)$)，($f_{O_2}(FMQ)$为缓冲剂铁橄榄石-磁铁矿-石英的氧逸度，当氧逸度高于$f_{O_2}(FMQ)+2$时，通常表示较强的氧化环境；而氧逸度低于$f_{O_2}(FMQ)-2$则表示还原环境)[70-72]。典型代表有韩国Geodo金矿床，其成矿岩体为石英二长闪长岩，属过铝质钙碱性二长花岗岩。岩石中含磁铁矿，未见钛铁矿与磁黄铁矿，具有相对氧化特征($w(Fe_2O_3)/w(FeO)>0.4$，见图3)[73]。中国云南北衙金矿床，其与成矿相关的侵入岩主要为二长花岗斑岩和花岗岩，全岩$w(K_2O)/w(Na_2O)$值为2.2～24.8，为高钾质岩类。全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$值为0.58～0.92，氧化性较强[9,38]。中国安徽朝山金矿床，其与成矿相关的岩体岩性为辉石闪长岩，岩石中含磁铁矿与榍石，全岩成分中Fe_2O_3含量较高，同样体现出较强的氧化性[40]。

还原型矽卡岩金矿床成矿岩体主要为含角闪石-黑云母花岗闪长岩，其次为闪长岩、辉长闪长岩、石英



注：氧化型矽卡岩金矿床包括中国朝山、北衙、下活龙、双朋西、谢坑、甲玛，韩国Geodo，厄瓜多尔Nambija，吉尔吉斯斯坦Kuru-Tegerek；还原型矽卡岩金矿床包括中国德乌鲁、老柞山，美国Crown Jewel，加拿大Hedley、Nickel Plate，俄罗斯Lukoganskoe。

图3 氧化型与还原型矽卡岩金矿床成矿岩体 lg $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$–$w(TFeO)$ 图解(a)(底图据文献[50])、矽卡岩金矿床的氧化还原状态(b)(底图据文献[22])

Fig. 3 lg $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$–$w(TFeO)$ plot of ore-forming rock mass in oxidized and reduced skarn-type gold deposits (a), redox states of skarn-type gold deposits (b)

闪长岩等，成矿岩体形成时代较晚[74]。岩石发育钛铁矿、磁黄铁矿，含微量或不含磁铁矿，全岩 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)\ll0.75$，磁化率低，显示低氧逸度特征[23,75-77]。成矿岩体通常具有从镁铁质相到长英质相的多相特征，镁铁质相发育在一些杂岩体中，或作为独立岩体存在，可以解释为一期岩浆的结晶分异作用或多期岩浆活动的混合产物[23,76,78-80]。代表性矿床有美国Crown Jewel金矿床，其成矿岩体形成年龄为162～169 Ma，岩性主要为花岗闪长岩、石英二长岩，具有含铝质钙碱性，岩体中含微量或不含磁铁矿，属钛铁矿系列，全岩 $w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)$ 值为0.16[7]；中国甘肃德乌鲁金矿床，其与成矿相关的侵入岩主要为石英闪长岩，属高钾钙碱性Ⅰ型花岗岩。岩石内钛铁氧化物主要为钛铁矿，反映了低氧逸度特性，闪长岩全岩样品的硫同位素组成为–12‰～–2.8‰，与典型钛铁矿系列花岗岩的亏损^{34}S同位素组成特征一致[54,75,81-82]。

研究表明，形成于不同构造环境中的岩浆岩氧逸度具有差异，原因在于它们继承了各自源区的特点[70]，形成于俯冲环境中的岩体通常具有较高氧化性[83]。板块俯冲作用发生过程中，洋壳及其上覆沉积物在高压下脱水，形成俯冲带流体。二价铁在俯冲带流体中具有更高的相容性，导致俯冲带熔体中三价铁含量相对升高。同时，俯冲带流体上升过程中会交代地幔楔橄榄岩，使大量Fe进入流体中，形成磁铁矿，释放出H_2[72]（$3Fe+Cl_2+4H_2O \xlongequal{} Fe_3O_4+6HCl+H_2$）。$H_2$很容易逸散到大气中，导致残余熔体中 $w(Fe^{3+})/w(Fe^{2+})$ 值升高。随着板块俯冲的进行，熔体保持较高的 $w(Fe^{3+})/w(Fe^{2+})$ 值，形成高氧逸度的岛弧岩浆，岛弧岩浆岩则继承了其源区的强氧化性特征[84-85]。然而，还原性岩体的成因却存在多种认识：①上覆沉积物中的还原性物质导致岩浆的氧化性降低[86]；②原本氧化性较强的岩浆在演化分异过程中混合了沉积型岩浆岩，导致氧逸度下降[87]；③原始地幔流体分异或地球脱气[88]；④成矿流体运移过程中萃取了含碳地层中的有机质等物质[89-90]。这些解释均认为，岩体的还原性均由后期演化分异导致，母岩浆通常显示氧化性。然而，也有一部分学者认为，母岩浆始终为还原性[91-92]。弄清岩体的氧化还原性质，对矽卡岩金矿床的研究同样具有重要意义。

3 蚀变矿物和元素组合

矽卡岩金矿床成矿系统的蚀变矿物、元素组合受岩浆温度、水岩相互作用等因素控制。岩浆侵入引发的接触变质作用在与围岩反应时，温度逐渐降低导致矽卡岩蚀变成分分带现象[12,93]，早期变质作用在相对高温（600 ℃～800 ℃）的状态下持续进行[94]，形成进矽卡岩蚀变，体现为变质反应温度整体呈上升趋势[95]，而后随着温度的下降和流体演化，在远离岩体处形成退矽卡岩蚀变。进矽卡岩蚀变矿物主要为一些无水矿物，如石榴子石、辉石、硅灰石、符山石等，在变质反应的后阶段，一些含水的退矽卡岩蚀变矿物会取代早期进矽卡岩蚀变矿物，主要有绿帘石、阳起石、绿泥石、绢云母、金云母、石英、方解石、硬石膏等，还包括多种金属硫化物和含金矿物。由此造成的2类矽卡岩金矿床差异为：氧化型矽卡岩金矿床的蚀变矿物组合中，石榴子石含量显著高于辉石，且钙铁榴石占石榴子石一定分量，辉石以透辉石为主，总体较为贫铁，由于氧逸度高，氧化型矽卡岩金矿床在退矽卡岩蚀变矿物中，石英含量要高于还原型；而还原型矽卡岩金矿床石榴子石与辉石总体含量相当，石榴子石主要为钙铝榴石，以富铁的钙铁辉石为特征[96]。然

而，更大的差异体现在金属矿物上，氧化型矽卡岩金矿床以黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿为特征，而还原型矽卡岩金矿床则以毒砂、磁黄铁矿、辉铋矿为特征。闪锌矿在低硫环境的矿床中更为常见，而在高硫环境下较为稀缺[97]，侵入岩以高氧逸度为特征的氧化型矽卡岩金矿床整体硫含量更高[98-100]，所以还原型矽卡岩金矿床相对氧化型矽卡岩金矿床在退矽卡岩蚀变矿物中闪锌矿更为常见（见图4）。

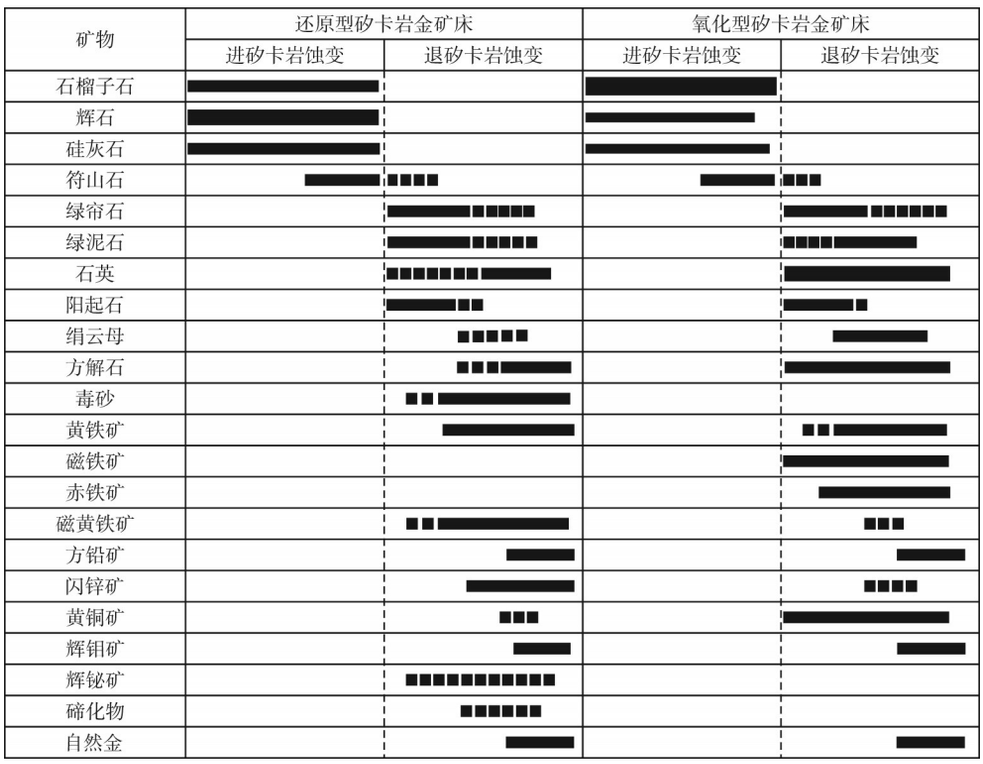


图4　氧化型与还原型矽卡岩金矿床矽卡岩蚀变矿物对比（据文献[50]修改）

Fig. 4　Comparison of alteration minerals in oxidized and reduced skarn-type gold deposits

在金属元素组合方面，还原型矽卡岩金矿床有其代表性的一套典型Au-As-Te-Bi金属元素组合，包括斜方砷铁矿（$FeAs_2$）、黑铋金矿（Au_2Bi）、自然铋、碲铋矿物（碲铋矿、辉碲铋矿、赫碲铋矿、硫碲铋矿、叶碲铋矿）等[26,74-75,101]。而根据对前人资料数据的整理结果，发现氧化型矽卡岩金矿床也存在一套区别于还原型矽卡岩金矿床的Au-Cu-Mo-Pb-Zn金属元素组合。值得注意的是，金属元素组合并非绝对判别标志[7,32,64]。例如：韩国Geodo金矿床，其成矿岩体体现出较高的氧逸度，以及Fe^{3+}在总Fe元素中占比较大，并且与金同时产出的还有大量黄铜矿和磁铁矿，为典型的氧化型矽卡岩金矿床，但KIM等[56]发现，在Geodo金矿床矿石中有较多的辉铋矿和辉碲铋矿产出，与典型还原型矽卡岩金矿床相同，金与含碲铋的矿物密切相关。

对于上述所提的矽卡岩金矿床中金与含碲铋的矿物相关性，许多学者做了大量研究。例如：根据400 ℃以下Bi-Te、Bi-Au、Bi-S系统的二元相图，液态Bi携带37 %的Au原子、18 %的Te原子和5 %的S原子，因此，在400 ℃以下的环境中，液态Bi可以从热液中提取Au[102-104]；由于辉铋矿的熔点（约775 ℃）高，在Bi-Au-S体系的熔体中不可能形成辉铋矿，因此辉铋矿和金共生现象可能在温度降低或硫逸度升高时，Au_2Bi发生硫化反应分解[105-106]，形成自然铋和自然金，而自然铋在硫逸度高的环境下容易形成辉铋矿。此类与自然金共生矿物的原因分析仍可作为未来对矽卡岩金矿床的研究议题。

4　成矿流体特征

4.1　流体包裹体

KWAK[107]通过对流体包裹体研究总结，发现根据距离岩体的远近，存在高温（>700 ℃）高盐度（>50 %，含多种子矿物）和中高温中低盐度2类流体包裹体，这与大多数矽卡岩矿床呈现近端与远端分带的特征相对应。大多数矽卡岩矿床在前期阶段成矿流体盐度都较高，包裹体中记录了多种类型的矿物子晶，如NaCl、KCl、$CaCl_2$、$FeCl_2$、$CaCO_3$、CaF_2、C、$NaAlCO_3(OH)_2$、Fe_2O_3、Fe_3O_4、AsFeS、$CuFeS_2$和ZnS等[12,107]。

特定矽卡岩矿物（如辉石、石榴子石）中流体包裹体的研究对记录矽卡岩矿床成矿流体演化提供了很

大帮助[34]。流体包裹体也为大多数矽卡岩系统在进化和退化矽卡岩事件之间的温度和盐度变化提供了直接证据[108]。例如：FONTBOTÉ等[10]在对厄瓜多尔Nambija金矿床研究时，对辉石和绿帘石进行了流体包裹体分析，辉石中流体包裹体具有高温（约580 ℃）高盐度（高达60 %）特征，这些流体包裹体的关键参数可近似反映该阶段流体的长期演化特征。从而推断这种高盐度流体可能是中等盐度（8 % ~ 10 %）岩浆流体在约500 ℃温度下沸腾的结果。而绿帘石包裹体的中高温（300 ℃ ~ 400 ℃）中低盐度（2 % ~ 20 %）流体包裹体则反映了晚期退变质阶段成矿流体温度、盐度均下降的特征，这与绝大多数矽卡岩金矿床成矿流体演化是一致的[10]。根据流体包裹体的盐度及压强可大致推算成矿深度，发现矽卡岩型金矿床成矿深度（<10 km）均不大。

流体包裹体气相组成对揭示成矿环境的氧化还原状态具有指示意义。对流体包裹体中蒸汽和不混溶液体的研究显示，CO_2占主导地位，这是矽卡岩矿物稳定性的关键变量[12]。在还原型矽卡岩金矿床体系中，CH_4含量略高于CO_2[36,109]。例如：西班牙Ortosa金矿床及澳大利亚Nevoria金矿床，其流体包裹体均发现较多的CH_4气相包裹体。而在氧化型矽卡岩金矿床体系中，CO_2含量高于CH_4[35]，且流体包裹体通常为H_2O-CO_2-NaCl体系，部分矿床包裹体中也见CH_4，但占比较小，如中国西藏甲玛金矿床。

矽卡岩金矿床包裹体中CH_4等还原性物质的来源有多种解释：①地幔流体分异[110-111]，其认为原始地幔流体中的CH_4流体在地球演化过程中向外逸散，在增生地幔中被捕获。②费托反应[91,112]，该反应为CO_2或CO在催化剂表面形成具有活性的碳质物，其与H_2反应形成CH_4。③石墨或碳质岩石的变质作用[86,113-114]，该观点认为CH_4可能来自碳质围岩平衡的外来流体或水岩作用过程中岩浆流体内碳质组分的还原作用。④有机物热解或微生物作用[115-116]，一些生物的新陈代谢活动及有机质的热分解会生成CH_4。⑤俯冲板片及上覆沉积物的脱水作用[117-118]，俯冲板片上含碳沉积物中C和H_2O发生反应生成CH_4，随后通过挥发作用释放，岩浆中碳质流体在镁铁质矿物蚀变过程中生成CH_4[119-121]。

4.2 稳定同位素

C-H-O-S稳定同位素为厘定成矿流体来源及演化提供了关键地球化学约束[12,122-123]。TROCH等[124]的研究证明，岩浆水和大气降水在矽卡岩矿床演化中的重要性。大多数矽卡岩矿床中石榴子石、辉石和伴生石英的$\delta^{18}O$值为4 ‰ ~ 9 ‰，与岩浆水一致[125]。而后期产出的方解石、石英的$\delta^{18}O$值接近大气降水的$\delta^{18}O$值，大多数情况下矽卡岩矿床$\delta^{18}O$值展现出存在岩浆水与大气降水的混合。同样，来自不同矽卡岩矿床的其他含水矿物，如黑云母、角闪石、绿帘石等的$\delta^{18}O$值与δD值也显示出这一特征。

氧化型与还原型矽卡岩金矿床的H-O同位素值显示，成矿流体大多数为岩浆水和大气降水的混合（见图5-a），$\delta^{18}O$值多为4 ‰ ~ 9 ‰，部分接近零。δD值集中在-90 ‰ ~ -80 ‰，与绝大多数矽卡岩金矿床相似。对各种硫化物矿物（如黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿、毒砂、方铅矿）的S同位素研究表明，不同矽卡岩金矿床$\delta^{34}S$值存在差异，但值变化均较小，显示其可能来源于岩浆[12,126]。总体而言，相较于还原型矽卡岩金矿床，氧化型矽卡岩金矿床的$\delta^{34}S$值通常不会为特别小的数值（见图5-b）。

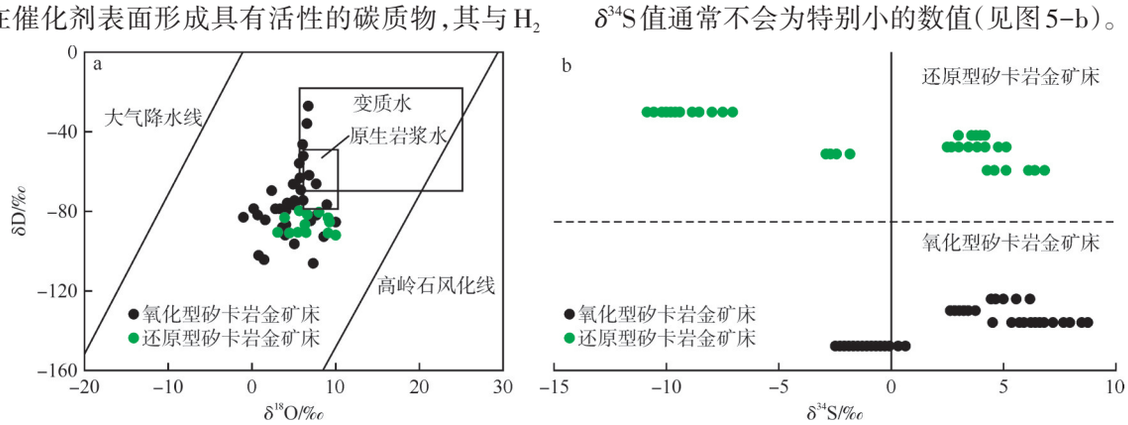


图5 矽卡岩型金矿床H-O同位素（a）、S同位素（b）图解（据文献[37]修改）

Fig. 5 Diagrams of H-O isotope (a) and S isotope (b) of skarn-type gold deposits

5 成矿模式

氧化型与还原型矽卡岩金矿床成矿模式均与斑岩型矿床相似。以氧化型矽卡岩型金矿床为例，氧化性高温岩浆流体侵入到岩体顶部脆性断裂通道中，释放大量热，导致与侵入岩接触的沉积地层发生热蚀

变;而后成矿岩体在冷凝过程中析出富含金属和硫的岩浆热液。随后,岩浆热液在热驱动和区域构造应力的多重作用下,一部分向上沿着由侵入岩侵位产生的裂隙系统运移形成蚀变分带,以及铜、钼矿化[127-128];另一部分沿着侧向扩散,与沉积地层发生强烈交代反应,通过渗透作用及局部扩散交代作用,形成石榴子石、硅灰石、透辉石等进矽卡岩蚀变矿物。进矽卡岩蚀变矿物的生成,会造成接触地层 CO_2 丢失,使得岩层孔隙度和渗透性增加,进而有利于金属元素的迁移与矿化[129]。进矽卡岩蚀变受热液流体成分、围岩成分、pH 及氧化还原状态的影响,在垂向和水平方向上都显示出明显的分带性。

随着流体温度的逐渐降低,退矽卡岩蚀变为主导,生成大量含水硅酸盐矿物。含水矿物体积增量较大,导致流体压力增大,使岩石发生破裂而产生裂隙[130],随后热液流体进一步交代进化矽卡岩蚀变矿物,形成退矽卡岩蚀变矿物,以及铜、钼、铅、锌、金、银等矿化。部分热液流体运移到远端矽卡岩带,在合适的张性断裂中充填交代,形成类似低硫型浅成低温的独立金矿化[131](见图 6-a)。成矿作用晚期,随着大气降水逐渐增多,流体温度逐渐降低,一些不含硫化物或含少量硫化物的石英-碳酸盐脉出现,标志着成矿作用基本结束[18]。还原型矽卡岩金矿床成矿模式总体相似,但侵入岩氧化还原性质的差异,导致在成矿分带上存在差异,在侵入岩顶部通常形成钨锡矿化,而远部则常见砷、锑矿化,当还原性岩浆热液运移至浅端近地表时,可能形成角砾岩型金矿化,在近地表可能发育大规模细脉或浸染状金矿化[78,101,132](见图 6-b)。

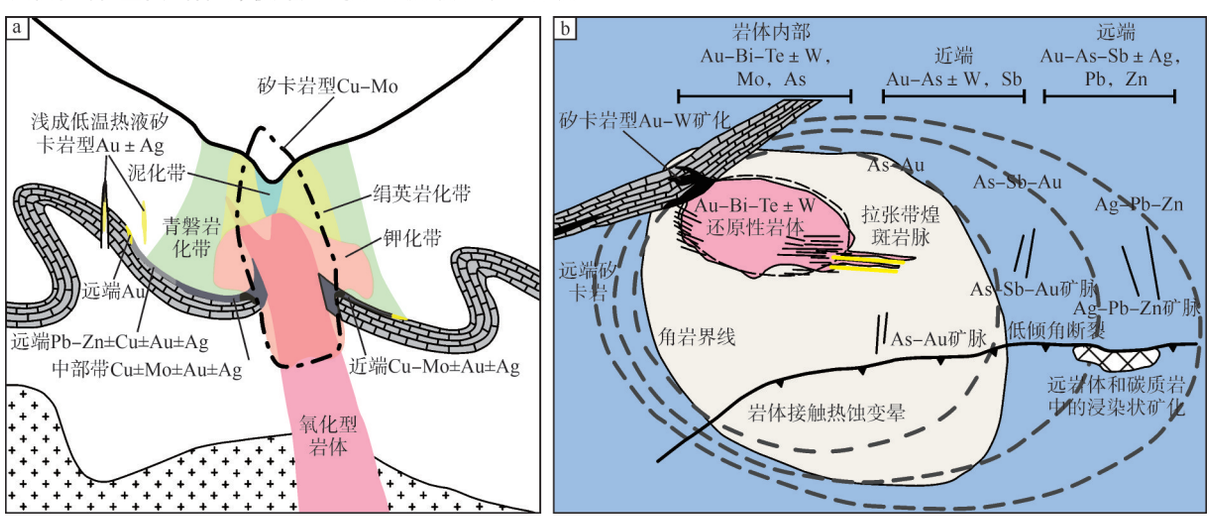


图 6　斑岩-矽卡岩型金矿床(a)(据文献[18]修改)与还原型矽卡岩金矿床(b)成矿模式(据文献[22]修改)

Fig. 6　Metallogenic patterns of porphyry-skarn-type gold deposits (a) and reduced skarn-type gold deposits (b)

6　研究展望

近年来,矽卡岩金矿床在全球范围内被大量发现,在全球金矿资源地位越发重要,但综合研究程度仍较低,还存在一些未解决的科学问题[75,78,133]:①一些矽卡岩金矿床的成因还存在着争议,如澳大利亚 Nevoria、加拿大 Lupin 等金矿床,且存在部分矽卡岩金矿床被认定为其他金矿床类型[134-135];②金在岩浆热液中的运移方式,此前有学者认为,金在低氧逸度条件下以氯络合物形式迁移,在高氧逸度条件下以硫络合物形式运移[136],但这种规律在矽卡岩金矿床中是否适用还缺少大量实例证据;③还原型矽卡岩金矿床的岩浆氧化还原初态也存在争议,一部分学者认为岩浆初始状态为还原性质,而有学者则认为母岩浆初始为氧化态,在后期演化成还原态[91,92,137-139];④矽卡岩金矿床流体包裹体中 CH_4 的来源问题也同样存在争议。

随着科学技术的不断发展,一些新的研究手段和思路可为后续矽卡岩金矿床的研究提供较高参考价值。①岩浆在地壳和地幔中驻留,随后通过岩浆管道系统侵入沉积地层,并最终成矿,在这个动态持续的过程中,岩浆发生混合、同化、变质、交代等作用,其势必会在一些矿物上留下印记,如橄榄石、石榴子石等矿物的环带结构,通过扩散年代学构建的扩散模拟系统将更好约束岩浆的演化过程[140-142];②磁铁矿作为矽卡岩金矿床中常出现的矿物,一些结构复杂的磁铁矿中富含各类微米—纳米矿物包裹体,通过细致解剖磁铁矿的结构和纳米矿物组合,建立其与成矿过程的内在联系,为反演成矿过程提供了新思路[143];③通过分析研究石榴子石的主微量元素,以记录晶体生长过

程、元素渗透机制及成矿流体的氧化还原状态[38]；④通过对石榴子石微量元素及稀土元素的研究分析，以解释岩石成因[144]；⑤利用机器学习判别矿物源区类型[145-146]；⑥通过将构造分析与地质年代学框架整合，还原矿床的形成历程[147]。这些前沿的研究手段与思路将为未来矽卡岩金矿床的研究提供重要价值。

7 结 论

1）氧化型与还原型矽卡岩金矿床成矿构造背景均主要为大洋岛弧和大陆边缘造山带。

2）在侵入岩方面，2类矽卡岩金矿床的差异主要体现在氧逸度、磁化率及Fe^{3+}含量。还原型矽卡岩金矿床侵入岩发育钛铁矿、磁黄铁矿，含微量或不含磁铁矿，磁化率低，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)\ll0.75$；氧化型矽卡岩金矿床侵入岩发育磁铁矿、赤铁矿，几乎不含磁黄铁矿，磁化率较高，全岩$w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO)>0.4$，显示高氧逸度（$f_{O_2}>(f_{O_2}(FMQ)+2)$）。

3）还原型矽卡岩金矿床中，矽卡岩蚀变矿物呈石榴子石与辉石含量总体相当，石榴子石主要为钙铝榴石，以富铁的钙铁辉石为特征且有着典型的Au-As-Te-Bi金属元素组合；而氧化型矽卡岩金矿床中，从蚀变矿物的总体含量来看，石榴子石比辉石多，辉石以透辉石为主，总体较为贫铁，Au-Cu-Mo-Pb-Zn金属元素组合区别于还原型矽卡岩金矿床。

4）氧化型与还原型矽卡岩金矿床成矿流体均表现为早期高温高盐度到晚期中低温低盐度的变化趋势特征，且还原型矽卡岩金矿床成矿流体富含CH_4；S同位素显示，不同矽卡岩金矿床$\delta^{34}S$值存在差异，但对于同一矿床而言，其$\delta^{34}S$值在矿床演化过程变化不大。

5）矽卡岩金矿床成矿模式表现为：高温富金属热液岩浆流体通过构造驱动形成进矽卡岩蚀变（石榴子石、透辉石等）；随温度降低，在退矽卡岩蚀变（含水硅酸盐矿物）主导下，岩石破裂促进形成金银等矿化，最终低温阶段大气降水混入形成石英-碳酸盐脉，标志成矿结束。不同的是，氧化型矽卡岩金矿床常伴随铜钼矿化形成，而还原型则常有钨锡矿化产出。

6）矽卡岩金矿床综合研究程度较低，仍存在一些未解决的科学问题，利用扩散年代学构建的扩散模拟系统、磁铁矿的结构与纳米矿物的组合，以及机器学习判别矿物源区类型等前沿研究手段与思路，将为未来矽卡岩金矿床研究提供重要价值。

[参 考 文 献]

[1] 黄华盛.矽卡岩矿床的研究现状[J].地学前缘，1994，1(3/4)：105-111.

[2] EINAUDI M T，MEINERT L D，NEWBERRY R J.Skarn deposits[M]//SKINNER B J.Seventy-fifth anniversary volume.Littleton：Economic Geology Publishing Company，1981：11.

[3] MEINERT L D.Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration[J].Exploration and Mining Geology，1997，6(2)：185-208.

[4] 赵一鸣，林文蔚，毕承思，等.中国矽卡岩矿床基本地质特征[J].中国地质科学院院报，1986，7(3)：59-87.

[5] LIU L J，ZHOU T F，JIANG S Y，et al.Amphibole geochemistry in the Haobugao skarn Zn-Fe-Sn deposit in the southern Great Xing'an Range：Implications for the ore-forming process[J].Ore Geology Reviews，2024，170：106122.

[6] ZHANG D Y，JIANG Z R，MENG X，et al.The genesis and mineralization potential of the Kunshan pluton in the Xuancheng district，Eastern China[J].Ore Geology Reviews，2024，173：106237.

[7] GASPAR M，KNAACK C，MEINERT L D，et al.REE in skarn systems：A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit[J].Geochimica et Cosmochimica Acta，2008，72(1)：185-205.

[8] ETTLINGER A D，MEINERT L D，RAY G E.Gold skarn mineralization and fluid evolution in the Nickel Plate Deposit，British Columbia[J].Economic Geology，1992，87：1 541-1 565.

[9] DENG J，WANG Q，LI G，et al.Geology and genesis of the giant Beiya porphyry-skarn gold deposit，northwestern Yangtze Block，China[J].Ore Geology Reviews，2015，70：457-485.

[10] FONTBOTÉ L，VALLANCE J，MARKOWSKI A，et al.Oxidized gold skarns in the Nambija District，Ecuador[M]//SILLITOE R H，PERELLÓ J，VIDAL C E，et al.Andean metallogeny：New discoveries，concepts，and updates.Littleton：Society of Economic Geologists，2005：341-357.

[11] 陈衍景，陈华勇，ZAW K，等.中国陆区大规模成矿的地球动力学：以夕卡岩型金矿为例[J].地学前缘，2004，11(1)：57-83.

[12] MEINERT L D，DIPPLE G M，NICOLESCU S.World skarn deposits[M]//HEDENQUIST J W，THOMPSON J F H，GOLDFARB R，et al.One hundredth anniversary volume.Littleton：Society of Economic Geologists，2005：11.

[13] CHEN Y J，CHEN H Y，ZAW K，et al.Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China：An overview[J].Ore Geology Reviews，2005(1/2/3/4)：139-169.

[14] 赵一鸣，丰成友，李大新.中国矽卡岩矿床找矿新进展和时空分布规律[J].矿床地质，2017，36(3)：519-543.

[15] 赵一鸣.世界主要矽卡岩矿床[M].北京：地质出版社，2023.

[16] CHANG Z，SHU Q，MEINERT L D.Skarn deposits of China[M]//Society of Economic Geologists.Mineral deposits of China.Littleton：Society of Economic Geologists，2019：189-234.

[17] BURISCH M，BUSSEY S D，LANDON N，et al.Timing of magmatism and skarn formation at the Limon，Guajes，and Media Luna Gold ± Copper Skarn Deposits at Morelos，Guerrero State，Mexico[J].Economic Geology，2023，118(4)：695-718.

[18] 冷秋锋.西藏甲玛铜多金属矿床矽卡岩成岩与成矿作用[D].成都：成都理工大学，2016.

[19] 张振,于超,吴志栋,等.胶东玲珑金矿床成矿地质特征及矿床成因[J].黄金,2024,45(7):74-79.

[20] MEINERT L D,HEFTON K K,MAYES D,et al.Geology,zonation,and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit,Ertsberg District,Irian Jaya[J].Economic Geology,1997,92(5):509-534.

[21] LANG J R,BAKER T R.Intrusion-related gold systems:The present level of understanding[J].Mineralium Deposita,2001,36(6):477-489.

[22] LANG J,BAKER T,HART C J R,et al.An exploration model for intrusion-related gold systems[J].SEG Discovery,2000,40(1):6-15.

[23] THOMPSON J F H,NEWBERRY R J.Gold deposits related to reduced granitic intrusions[J].Reviews in Economic Geology,2000,13:377-400.

[24] THOMPSON J F H,SILLITOE R H,BAKER T,et al.Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces[J].Mineralium Deposita,1999,34(4):323-334.

[25] MEINERT L D.Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits—Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization[M]//THOMPSON J F H.Magmas,fluids,and ore deposits.Ottawa:Mineralogical Association of Canada,1995:401-418.

[26] MEINERT L D.A review of skarns that contain gold[M]//LENTZ D R.Mineralized intrusion-related systems.Ottawa:Mineralogical Association of Canada,1998:359-414.

[27] 赵一鸣.夕卡岩矿床研究的某些重要新进展[J].矿床地质,2002,21(2):113-120,136.

[28] 赵一鸣.我国一些重要夕卡岩Pb-Zn多金属矿床的交代分带[J].矿床地质,1997,16(2):25-34.

[29] 赵一鸣,毕承思,李大新.中国主要矽卡岩铁矿床的挥发组份和碱质交代特征及其在成矿中的作用[J].地质论评,1983,29(1):66-74.

[30] 赵一鸣,李大新.中国夕卡岩矿床中的角闪石[J].矿床地质,2003,22(4):345-359.

[31] LI J W,ZHAO X F,ZHOU M F,et al.Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit,eastern Yangtze craton,Eastern China:Geochronological,geochemical,and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J].Mineralium Deposita,2008,43(3):315-336.

[32] SOMARIN A K.Garnet composition as an indicator of Cu mineralization:Evidence from skarn deposits of NW Iran[J].Journal of Geochemical Exploration,2004,81:47-57.

[33] SINCLAIR A J,RADLOWSKI Z A,RAYMOND G F.Mineral inventory of a gold-bearing skarn,the nickel plate mine,Hedley,British Columbia[M]//DIMITRAKOPOULOS R.Geostatistics for the next century:An international forum in honour of Michel David's contribution to geostatistics.Dordrecht:Springer Netherlands,1994:64-72.

[34] BAKER T,LANG J R.Reconciling fluid inclusion types,fluid processes,and fluid sources in skarns:An example from the Bismark Deposit,Mexico[J].Mineralium Deposita,2003,38(4):474-495.

[35] BAKER T,VAN ACHTERBERG E,RYAN C G,et al.Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit[J].Geology,2004,32(2):117-120.

[36] FONTEILLES M,SOLER P,DEMANGE M,et al.The scheelite skarn deposit of Salau(Ariege,French Pyrenees)[J].Economic Geology,1989,84(5):1 172-1 209.

[37] KUŞCU İ,GENÇALIOĞLU K G,MEINERT L D,et al.Tectonic setting and petrogenesis of the Çelebi granitoid,(Kırıkkale-Turkey) and comparison with world skarn granitoids[J].Journal of Geochemical Exploration,2002,76(3):175-194.

[38] RAY G E,WEBSTER I C L,DAWSON G L.The stratigraphy of the Nicola Group in the Hedley district,British Columbia,and the chemistry of its intrusions and Au skarns[J].Canadian Journal of Earth Sciences,1996,33(8):1 105-1 126.

[39] NAKANO T,SHIMAZAKI H,SHIMIZU M.Strontium isotope systematics and metallogenesis of skarn deposits in Japan[J].Economic Geology,1990,85(4):794-815.

[40] MEINERT L D.Gold in skarns related to epizonal intrusions[J].SEG Reviews,2000,13:347-357.

[41] MEINERT L D.Igneous petrogenesis and skarn deposits[J].Geological Association of Canada-Special Paper,1993,40:569-583.

[42] WESTERKAMP M,VICTOR F,KÜPPER A.Tracing manufacturing processes using blockchain-based token compositions[J].Digital Communications and Networks,2020,6(2):167-176.

[43] RAY G E,WEBSTER I C L,ETTLINGER A D.The distribution of skarns in British Columbia and the chemistry and ages of their related plutonic rocks[J].Economic Geology,1995,90(4):920-937.

[44] NEWBERRY R J,SWANSON S E.Scheelite skarn granitoids:An evaluation of the roles of magmatic source and process[J].Ore Geology Reviews,1986,1(1):57-81.

[45] SWANSON S E,NEWBERRY R J,COULTER G A,et al.Mineralogical variation as a guide to the petrogenesis of the tin granites and related skarns,Seward Peninsula,Alaska[M]//STEIN H J,HANNAH J L.Ore-bearing granite systems;petrogenesis and mineralizing processes.Boulder:Geological Society of America,1990:143-160.

[46] HE W Y,MO X X,HE Z H,et al.The geology and mineralogy of the Beiya Skarn Gold Deposit in Yunnan,Southwest China[J].Economic Geology,2015,110(6):1 625-1 641.

[47] GAO X Q,SUN X M,FU Y,et al.Garnet geochemistry of the giant Beiya gold-polymetallic deposit in SW China:Insights into fluid evolution during skarn formation[J].Ore Geology Reviews,2022,150:105198.

[48] 和文言.滇西北衙超大型金多金属矿床岩浆作用与成矿模式[D].北京:中国地质大学(北京),2014.

[49] 涂伟.安徽铜陵朝山矽卡岩型金矿的特征和成因[D].北京:中国地质大学(北京),2014.

[50] 刘艳鹏.吉林省集安地区矽卡岩型金、铜铅锌矿床成矿作用与地球动力学背景[D].长春:吉林大学,2023.

[51] 薛静,戴塔根,息朝庄.青海同仁双朋西金铜矿矿床地质特征及矿床成因[J].岩石矿物学杂志,2012,31(1):28-38.

[52] 路英川,刘家军,张栋,等.西秦岭双朋西矽卡岩型金铜矿床花岗闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、岩石成因和构造意义[J].岩石学报,2017,33(2):545-564.

[53] 杨立朋.青海省循化县谢坑铜金矿矽卡岩成因[D].北京:中国地质大学(北京),2008.

[54] 祁婧.西藏甲玛矿床则古朗北矿段含矿斑岩年代学及地球化学特征[D].北京:中国地质大学(北京),2021.

[55] 彭惠娟,汪雄武,侯林,等.西藏甲玛铜多金属矿床岩浆-热液过渡阶段的矿物学证据[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(1):40-48.

[56] KIM E J,PARK M E,WHITE N C.Skarn gold mineralization at the Geodo mine,South Korea[J].Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists,2012(3):537-551.

[57] VALLANCE J, FONTBOTÉ L, CHIARADIA M, et al. Magmatic-dominated fluid evolution in the Jurassic Nambija gold skarn deposits (southeastern Ecuador)[J]. Mineralium Deposita, 2009, 44(4):389-413.

[58] SOLOVIEV S G,KRYAZHEV S,DVURECHENSKAYA S.Geology, mineralization, and fluid inclusion study of the Kuru-Tegerek Au-Cu-Mo skarn deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. Mineralium Deposita,2018,53(2):195-223.

[59] 赵春涛.黑龙江中部矽卡岩型金、铁铜多金属矿床成矿作用、成矿模式及地球动力学背景[D].长春:吉林大学,2021.

[60] 张立亚.黑龙江老柞山金矿矿床地质特征及矿化富集规律研究[D].长春:吉林大学,2008.

[61] 耿瑞,李怡欣,张姗,等.黑龙江省老柞山金矿床地质、碳-氢-氧和硫-铅多元同位素特征及矿床成因探讨[J].黄金,2024,45(10):25-31.

[62] ETTLINGER A D,MEINERT L D,RAY G E.Gold skarn mineralization and fluid evolution in the Nickel Plate Deposit, British Columbia[J].Economic Geology,1992,87(6):1 541-1 565.

[63] QIU K F,DENG J.Petrogenesis of granitoids in the Dewulu skarn copper deposit: Implications for the evolution of the Paleotethys ocean and mineralization in Western Qinling,China[J].Ore Geology Reviews,2016,90:1 078-1 098.

[64] SUI J X,LI J W,WEN G,et al.The Dewulu reduced Au-Cu skarn deposit in the Xiahe-Hezuo district,West Qinling orogen,China: Implications for an intrusion-related gold system[J].Ore Geology Reviews,2017,80:1 230-1 244.

[65] HICKEY R J.The Buckhorn Mountain (Crown Jewel) gold skarn deposit, Okanogan County, Washington[J]. Economic Geology, 1992,87(1):125-141.

[66] REDIN Y O,REDINA A A,PROKOPIEV I R,et al.The Lukoganskoe Au-Cu Skarn Deposit (Eastern Transbaikalia):Mineral composition, age, and formation conditions[J].Russian Geology and Geophysics, 2020,61(2):174-195.

[67] SOLOVIEV S G, KRYAZHEV S G, DVURECHENSKAYA S S. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Meliksu reduced tungsten skarn deposit,Alai Tien Shan,Kyrgyzstan: Insights into conditions of formation and regional links to gold mineralization[J].Ore Geology Reviews,2019,111:103003.

[68] MUELLER A G,NEMCHIN A A,FREI R.The Nevoria Gold Skarn Deposit, Southern Cross Greenstone Belt, Western Australia: Ⅱ. Pressure-temperature-time path and relationship to postorogenic granites[J].Economic-eology and the-ulletin of the Society of Economic Geologists,2004,99(3):453-478.

[69] FUERTES-FUENTE M, MARTIN-IZARD A, NIETO J G, et al. Preliminary mineralogical and petrological study of the Ortosa Au-Bi-Te ore deposit: A reduced gold skarn in the northern part of the Rio Narcea Gold Belt, Asturias, Spain[J].Journal of Geochemical Exploration,2000,71(2):177-190.

[70] CARMICHAEL I S E.The redox states of basic and silicic magmas: A reflection of their source regions?[J].Contributions to Mineralogy and Petrology,1991,106(2):129-141.

[71] SUN W D,HUANG R F ,HE L,et al.Porphyry deposits and oxidized magmas[J].Ore Geology Reviews,2015,65:97-131.

[72] 兰芸琪.新疆西天山赛博铜矿床与可克萨拉铁铜矿床对比研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.

[73] KIM E J, PARK M E, WHITE N.Skarn gold mineralization at the Geodo Mine, South Korea[J]. Economic Geology, 2012, 107(3): 537-551.

[74] 刘军,王晓彤,何军成,等.还原性矽卡岩型金矿床基本特征、研究现状及在中国前景[J].矿床地质,2024,43(1):1-28.

[75] 李建威,隋吉祥,靳晓野,等.西秦岭夏河—合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义[J].地学前缘,2019,26(5):17-32.

[76] DUNCAN R A. Physical and chemical zonation in the Emerald Lake pluton, Yukon Territory[D].Vancouver: University of British Columbia,1999.

[77] MCCOY D, NEWBERRY R J, LAYER P, et al. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska[J]. Mineral Deposits of Alaska, 1997,9:191-241.

[78] HART C J.Reduced intrusion-related gold systems[M]//GOODFELLOW W D.Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types,district metallogeny,the evolution of geological provinces, and exploration methods.St. John's: Geological Association of Canada,Mineral Deposits Division,2007:95-112.

[79] SOLOVIEV S G, KRYAZHEV S G, DVURECHENSKAYA S S, et al. Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit,Russian Altai,SW Siberia[J].Ore Geology Reviews,2019,112:103039.

[80] SOLOVIEV S G, KRYAZHEV S G. Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kashkasu W-Mo-Cu skarn deposit associated with a high-potassic to shoshonitic igneous suite in Kyrgyzstan, Tien Shan: Toward a diversity of W mineralization in Central Asia[J].Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 153: 425-449.

[81] ISHIHARA S, SASAKI A.Sulfur isotopic ratios of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids of the Sierra Nevada batholith—A reconnaissance study[J].Geology,1989,17(9):788-791.

[82] SASAKI A,ISHIHARA S.Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan[J].Contributions to Mineralogy and Petrology,1979,68(2):107-115.

[83] LIU Y S,HU Z C,ZONG K Q,et al.Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J].Chinese Science Bulletin,2010,55(15):1 535-1 546.

[84] DELANO J W.Redox history of the earth's interior since ~3 900 Ma:

Implications for prebiotic molecules[J].Origins of Life and Evolution of the Biosphere,2001,31(4/5):311-341.

[85] PARKINSON I J, ARCULUS R J.The redox state of subduction zones: Insights from arc-peridotites [J].Chemical Geology, 1999, 160(4):409-423.

[86] 李延河,段超,曾普胜,等.还原性含碳质围岩在斑岩铜矿成矿中的作用[J].地球学报,2020,41(5):637-650.

[87] 徐文刚,张德会.还原性流体与斑岩型矿床成矿机制探讨[J].地质学报,2012,86(3):495-502.

[88] SAXENA S K, FEI Y.Fluid mixtures in the C H O system at high pressure and temperature[J].Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988,52(2):505-512.

[89] LIAO S L, CHEN S Y, DENG X H, et al.Fluid inclusion characteristics and geological significance of the Xi'ao copper-tin polymetallic deposit in Gejiu, Yunnan Province[J].Journal of Asian Earth Sciences,2014,79:455-467.

[90] 吴楚,刘妍,曹明坚,等.还原性斑岩型Cu与Mo-Cu矿特征与形成机制[J].岩石学报,2015,31(2):617-638.

[91] CAO M, QIN K, LI G, et al.Abiogenic Fischer-Tropsch synthesis of methane at the Baogutu reduced porphyry copper deposit, western Junggar, NW-China[J].Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014,141:179-198.

[92] SMITHSON D M. Late Eocene tectono-magmatic evolution and genesis of reduced porphyry copper-gold mineralization at the North Fork deposit, west central Cascade Range, Washington, U.S.A.[D].Vancouver: University of British Columbia,2004.

[93] SALEMINK J, SCHUILING R D.A two-stage, transient heat and mass transfer model for the granodiorite intrusion at Seriphos, Greece, and the associated formation of contact metasomatic skarn and Fe-ore deposits[M]//LICHTNER P, HELGESON H C, MURPHY W M.Chemical transport in metasomatic processes.Dordrecht:Springer,1987:547-575.

[94] WALLMACH T, HATTON C J, DROOP G T R.Extreme facies of contact metamorphism developed in calc-silicate xenoliths in the eastern Bushveld Complex[J].The Canadian Mineralogist, 1989, 27(3):509-523.

[95] 张智宇.安徽铜山矽卡岩铜矿床特征与成因[D].北京:中国地质大学(北京),2011.

[96] DOUGLAS N, MAVROGENES J, HACK A, et al.The liquid bismuth collector model: An alternative gold deposition mechanism[C]// Geological Society Of Australia. Proceedings of 15th Austrilian geological convention.Crows Nest: Geological Society of Australia, 2000:59.

[97] 单思齐,谢桂青,刘文元,等.特提斯西段塞尔维亚Čukaru Peki超大型斑岩-浅成低温型铜金矿床的热液蚀变和硫化物分带特征及其找矿方向[J].大地构造与成矿学,2023,47(5):1 085-1 109.

[98] MOUSSALLAM Y, OPPENHEIMER C, SCAILLET B, et al.Tracking the changing oxidation state of Erebus magmas, from mantle to surface, driven by magma ascent and degassing[J].Earth and Planetary Science Letters,2014,393:200-209.

[99] BROUNCE M, STOLPER E, EILER J.Redox variations in Mauna Kea lavas, the oxygen fugacity of the Hawaiian plume, and the role of volcanic gases in Earth's oxygenation[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2017(34):8 997-9 002.

[100] KELLEY K A, COTTRELL E.The influence of magmatic differentiation on the oxidation state of Fe in a basaltic arc magma[J].Earth and Planetary Science Letters,2012,329/330:109-121.

[101] HART C J R, BAKER T, BURKE M.New exploration concepts for country-rock-hosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon[M]//TUCKER T L, SMITH M T.The Tintina gold belt: Concepts, exploration and discoveries.Vancouver: British Columbia and Yukon Chamber of Mines,2000:145-172.

[102] LIN J C, SHARMA R C, CHANG Y A.The Bi-S (bismuth-sulfur) system[J].Journal of Phase Equilibria,1996,17(2):132-139.

[103] OKAMOTO H, MASSALSKI T B. The Au-Bi (gold-bismuth) system[J].Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1983, 4(4):401-407.

[104] HASANOVA G S, AGHAZADE A I, IMAMALIYEVA S Z, et al.Refinement of the phase diagram of the Bi-Te system and the thermodynamic properties of lower bismuth tellurides[J].JOM, 2021,73(5):1 511-1 521.

[105] MCCOY D T.Mid-Cretaceous plutonic-related gold deposits of interior Alaska: Characteristics, metallogenesis, gold-associative mineralogy and geochronology[D].Firebanks: University of Alaska Firebanks,2000.

[106] CIOBANU C L, BIRCH W D, COOK N J, et al.Petrogenetic significance of Au-Bi-Te-S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia [J]. Lithos, 2010, 116(1/2):1-17.

[107] KWAK T A P.Fluid inclusions in skarns (carbonate replacement deposits)[J].Journal of Metamorphic Geology,1986,4(4):363-384.

[108] MEINERT L D, HEDENQUIST J W, SATOH H, et al.Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids[J].Economic Geology,2003,98(1):147-156.

[109] GERSTNER M R, BOWMAN J R, PASTERIS J D.Skarn formation at the MacMillan Pass tungsten deposit (MacTung), Yukon and Northwest Territories; Ⅰ, P-T-X-V characterization of the methane-bearing, skarn-forming fluids [J]. The Canadian Mineralogist,1989,27(4):545-563.

[110] BEESKOW B, TRELOAR P J, RANKIN A H, et al.A reassessment of models for hydrocarbon generation in the Khibiny nepheline syenite complex, Kola Peninsula, Russia[J].Lithos,2006,91(1):1-18.

[111] LIU W, FEI P X.Methane-rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post-collisional mafic-ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo-Asian Ocean through to the post-collisional period[J].Earth and Planetary Science Letters, 2006,242(3):286-301.

[112] FIEBIG J, WOODLAND A B, D'ALESSANDRO W, et al.Excess methane in continental hydrothermal emissions is abiogenic[J].Geology,2009,37(6):495-498.

[113] KENNEY J F, KUTCHEROV V A, BENDELIANI N A, et al.The

evolution of multicomponent systems at high pressures: Ⅵ. The thermodynamic stability of the hydrogen-carbon system: The genesis of hydrocarbons and the origin of petroleum[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(17): 10 976-10 981.

[114] LIU J, MAO J W, LAI C K, et al. Contrasting geochemical signatures between fertile and barren granites and multi-isotope (Sr-Nd-Pb-S-He) study in the Lamasu-Saibo deposit, NW China: Implications for petrogenesis and ore genesis [J]. Ore Geology Reviews, 2022, 149: 105114.

[115] ROWINS S M. Reduced porphyry copper-gold deposits: A new variation on an old theme[J]. Geology, 2000, 28(6): 491-494.

[116] UENO Y, YAMADA K, YOSHIDA N, et al. Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archaean era[J]. Nature, 2006, 440: 516-519.

[117] TAKAGI T. Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan arc[J]. American Journal of Science, 2004, 304: 169-202.

[118] QIU K F, DENG J, LAFLAMME C, et al. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2023, 343: 133-141.

[119] MCCOLLOM T M, LOLLAR B S, LACRAMPE-COULOUME G, et al. The influence of carbon source on abiotic organic synthesis and carbon isotope fractionation under hydrothermal conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(9): 2 717-2 740.

[120] DIAS Á S, MILLS R A, RIBEIRO DA COSTA I, et al. Tracing fluid-rock reaction and hydrothermal circulation at the Saldanha hydrothermal field[J]. Chemical Geology, 2010, 273(3/4): 168-179.

[121] 申萍, 潘鸿迪. 中国还原性斑岩矿床研究进展及判别标志[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 967-994.

[122] SHIMAZAKI H, SHIMIZU M, NAKANO T. Carbon and oxygen isotopes of calcites from Japanese skarn deposits[J]. Geochemical Journal, 1986, 20(6): 297-310.

[123] SHIMAZAKI H, KUSAKABE M. Oxygen isotope study of the Kamioka Zn-Pb skarn deposits, Central Japan [J]. Mineralium Deposita, 1990, 25(3): 221-229.

[124] TROCH J, AFFOLTER S, HARRIS C, et al. Oxygen and hydrogen isotope analysis of experimentally generated magmatic and metamorphic aqueous fluids using laser spectroscopy (WS-CRDS)[J]. Chemical Geology, 2021, 584: 120487.

[125] SAHLSTRÖM F. Stable isotope systematics of skarn-hosted REE-silicate-magnetite mineralizations in central Bergslagen, Sweden[D]. Uppsala: Uppsala University, 2014.

[126] 朱乔乔, 谢桂青. 湖北金山店矽卡岩型铁矿田硫同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2 518-2 534.

[127] FOURNIER R O. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal systems [M] //DECKER R W, WRIGHT T L, STAUFFER P H. Volcanism in Hawaii. Reston: United States Geological Survey, 1987: 55.

[128] 王珊珊, 丁正江, 滕飞, 等. 与伟德山期岩浆岩有关的多金属成矿作用研究——以亦北矽卡岩型铜矿床为例[J]. 黄金, 2024, 45(10): 1-8.

[129] MEINERT L D. Skarns and skarn deposits[J]. Geoscience Canada, 1992, 19(4): 145-162.

[130] JAMTVEIT B, MALTHE-SØRENSSEN A, KOSTENKO O V. Reaction enhanced permeability during retrogressive metamorphism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267: 620-627.

[131] SILLITOE R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010, 105(1): 3-41.

[132] BETSI T B, LENTZ D R, MCFARLANE C. The nucleus deposit: Superposed Au-Ag-Bi-Cu mineralization systems at Freegold Mountain, Yukon, Canada[J]. Resource Geology, 2016, 66(4): 419-454.

[133] DEADY E, MOON C, MOORE K, et al. Bismuth: Economic geology and value chains[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 143: 104722.

[134] COLE A, WILKINSON J J, HALLS C, et al. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the Jilau gold-quartz vein deposit, Tajikistan [J]. Mineralium Deposita, 2000, 35(7): 600-618.

[135] GEUSEBROEK P A, DUKE N A. An update on the geology of the Lupin Gold Mine, Nunavut, Canada [J]. Exploration and Mining Geology, 2004, 13(1/2/3/4): 1-13.

[136] ZAJACZ Z, CANDELA P, PICCOLI P, et al. Alkali metals control the release of gold from volatile-rich magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 297(1/2): 50-56.

[137] XIE F W, TANG J X, CHEN Y C, et al. Apatite and zircon geochemistry of Jurassic porphyries in the Xiongcun district, southern Gangdese porphyry copper belt: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 96: 98-114.

[138] ZHU B, ZHANG H F, SHEN P, et al. Redox state of the Baogutu reduced porphyry Cu deposit in the Central Asian Orogenic belt[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 101: 803-818.

[139] WEI S N, ZHU Y F, JIANG J Y, et al. Magmatic oxidation state of the Baogutu porphyry copper deposit in the west Junggar of China: Implication for ore-formation [J]. Ore Geology Reviews, 2019, 106: 351-368.

[140] CHAKRABORTY S, DOHMEN R. Diffusion chronometry of volcanic rocks: Looking backward and forward[J]. Bulletin of Volcanology, 2022, 84(6): 57.

[141] COSTA F. Clocks in magmatic rocks[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2021, 49(1): 231-252.

[142] ZOU Y, LI Q, CHU X, et al. Older orogens cooled slower: New constraints on Orosirian tectonics from garnet diffusion modeling of metamorphic timescales, Jiaobei terrain, North China Craton[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2021, 176(11): 1-24.

[143] HUANG X W, SAPPIN A A, BOUTROY É, et al. Trace element composition of igneous and hydrothermal magnetite from porphyry deposits: Relationship to deposit subtypes and magmatic affinity[J]. Economic Geology, 2019, 114(5): 917-952.

[144] FENG Y G, CEN J B, LIANG T, et al. Lithium, phosphorus, and rare earth elements in magmatic garnets from granitic Pegmatites:

Coupled substitution and petrogenetic implications[J].Ore Geology Reviews,2023,153:105284.
[145] 周统,邱昆峰,王瑀,等.磷灰石 Eu/Y-Ce:基于大数据的源区类型判别新图解[J].岩石学报,2022,38(1):291-299.
[146] 王荣超,杨晓奇,杨晓鹏,等.夏甸金矿床金红石机器学习成因判别与成矿作用分析[J].黄金,2025,46(4):79-84.
[147] QIU K F,DENG J,YU H C,et al.The Zaozigou orogenic gold-antimony deposit,West Qinling Orogen,China:Structural controls on multiple mineralization events[J].Geological Society of America Bulletin,2024,136(9/10):4 218-4 232.

Comparative study on the geology and metallogenic characteristics of oxidized and reduced skarn gold deposits

Qiu Jinhong[1], Lu Shengxiang[2], Wang Shouxu[2], Lu Fengbin[2], Zhou Rongzhi[2], Qiu Kunfeng[1]
(1. *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing*;
2. *Shandong Gold Geological and Mineral Exploration Co., Ltd.*)

Abstract: China hosts abundant skarn-type gold deposits, with a cumulative proven gold reserve of 1 871 t, accounting for 11 % of the national total. Based on the geochemical characteristics of ore-forming intrusive rocks, skarn-type gold deposits can be classified into 2 categories: oxidized and reduced types. Although previous studies have conducted systematic investigations on skarn gold deposits worldwide, comparative analyses between oxidized and reduced skarn gold systems remain insufficient, and their redox differences are still unclear. Through a systematic review of previous research, this study compares the 2 deposit types in terms of metallogenic tectonic settings, intrusive rock characteristics, alteration mineral assemblages, ore-forming fluid properties, and metallogenic models. The key findings are as follows: ①Both types of skarn gold deposits predominantly form in oceanic island arc and continental margin orogenic belt settings.② Intrusive rocks in oxidized skarn gold deposits are characterized by high oxygen fugacity (f_{O_2}>(f_{O_2}(FMQ)+ 2)) and well-developed magnetite, with whole-rock $w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3+FeO) > 0.4$, whereas those in reduced skarn gold deposits are dominated by ilmenite and pyrrhotite, with $w(Fe_2O_3)/w(Fe_2O_3 + FeO) \ll 0.75$. ③Skarn alteration in oxidized deposits is dominated by diopside, with garnet contents significantly higher than pyroxene, and the associated metal assemblage is Au-Cu-Mo-Pb-Zn; in reduced deposits, skarn alteration is dominated by hedenbergite, with garnet and pyroxene in comparable amounts, and the metal assemblage is Au-As-Te-Bi. ④Both types exhibit a fluid evolution trend from high-temperature, high-salinity to medium-low temperature, low-salinity conditions, but fluids in reduced skarn gold deposits are enriched in CH_4. ⑤The metallogenic model of skarn gold deposits involves high-temperature, metal-rich magmatic hydrothermal fluids driven by tectonic activity forming prograde skarn alteration (garnet, pyroxene). As temperatures decrease, rock fracturing dominated by skarn-type alteration (hydrous silicate minerals) promotes Au-Ag mineralization, with meteoric water mixing during the final low-temperature stage forming quartz-carbonate veins marking the end of mineralization. A notable distinction is that oxidized skarn gold deposits are commonly associated with Cu-Mo mineralization, whereas reduced skarn gold deposits are often accompanied by W-Sn mineralization. This study also summarizes key scientific issues in current research on skarn-type gold deposits and suggests that future work should integrate advanced techniques such as diffusion chronology, nanoscale mineral structural analysis, and machine learning to further unravel metallogenic mechanisms.

Keywords: skarn; oxidized skarn gold deposit; reduced skarn gold deposit; metallogenic tectonic setting; intrusive rock characteristics; alteration mineral assemblage; ore-forming fluid property; metallogenic model