doi: 10.12097/gbc.2022.12.012

甘肃省主要岩浆作用金矿床类型及其成矿作用

王玉玺[1], 蒲万峰[1], 李通国[2], 杨涛[2], 王军[3], 李康宁[1], 刘景显[1], 袁臻[1]
WANG Yuxi[1], PU Wanfeng[1], LI Tongguo[2], YANG Tao[2], WANG Jun[3], LI Kangning[1], LIU Jingxian[1], YUAN Zhen[1]

1. 甘肃省金矿资源勘查利用技术创新中心, 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州文理学院, 甘肃 兰州 730000

1. *Gold Mine Resource Exploration and Utilization Technology Innovation Center of Gansu Province/The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou* 730050, *Gansu, China;*
2. *Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou* 730000, *Gansu, China;*
3. *Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*

摘要: 甘肃作为黄金资源大省之一,金矿类型多样,成矿作用复杂,其中岩浆作用成矿是金矿床的主要成矿机制之一,构造-岩浆-成矿的找矿研究思路更适用于岩浆作用金矿床。甘肃岩浆岩省可划分为 10 个构造岩浆岩带,分布范围广、规模大的主要有北山构造岩浆岩带、秦岭-大别构造岩浆岩带、塔里木构造岩浆岩带、祁连山构造岩浆岩带、阿尔金构造岩浆岩带、北秦岭构造岩浆岩带等,这些区域也是金矿床分布较集中区域,主要岩浆作用金矿床类型有岩浆型矿床、接触交代型矿床、斑岩型矿床、岩浆热液型矿床和火山岩型矿床五大类。结合甘肃省构造岩浆岩带划分及其主要特征和金矿床分布,重点分析研究了北山构造岩浆岩带和秦岭-大别构造岩浆岩带的岩浆作用金矿床与岩浆岩的时空分布特征、主要类型金矿床的成矿物质来源和物理化学条件,总结了控矿因素,提出有利于金矿找矿的主要岩浆岩类型、空间范围和技术方法。

关键词: 岩浆作用;成矿类型;成矿作用;矿产勘查工程;金矿;甘肃省
中图分类号: P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)06-0869-16

Wang Y X, Pu W F, Li T G, Yang T, Wang J, Li K N, Liu J X, Yuan Z. The main types of magmatism gold deposits and their mineralization in Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 869-884

Abstract: As one of the provinces with large gold resources, Gansu Province has various types of gold ore mineralization and complex metallage, among which magmatic metallogenic is one of the main metallogenic mechanisms of gold deposits, and the prospecting research idea of tectonic-magmatism-metallogenic is more suitable for magmatic gold deposits. The magmatic rock province of Gansu Province can be divided into 10 tectonic magmatic rock belts, which are mainly Beishan tectonic magmatic belt, Qinling-Dabie tectonic magmatic belt, Tarim tectonic magmatic belt, Qilian Mountain tectonic magmatic belt, Altyn tectonic magmatic belt, North Qinling tectonic magmatic belt, etc., these areas are also relatively concentrated areas of gold deposits, and the main types of magmatic

收稿日期: 2022-12-08; **修订日期:** 2023-06-01
资助项目: 甘肃省科技计划《甘肃省战略性矿产深部勘查技术与找矿预测研究》(编号: 22YF7GA050)、陇原青年英才培养计划(编号: 202401)、中央引导地方科技发展资金项目《基于宇宙射线缪子的三维矿藏勘探技术研发》(编号: YDZX20216200001297)、陇原青年人才项目《地学大数据综合产品研发与应用——甘肃金川超大型铜镍矿深部及外围找矿研究》(编号: 2020RCXM152)、甘肃省自然资源厅科技项目《西秦岭中生代构造岩浆活动与金大规模成矿》(编号: 202201)、甘肃省地矿局创新资金项目《甘南地区金矿找矿靶区优选研究》(编号: 2022CX10)和中国地质调查局项目《甘肃省合作矿集区深部找矿预测》(编号: DD2019057010)
作者简介: 王玉玺(1985-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事矿产勘查和矿床学研究。E-mail:wangyx15@lzu.edu.cn

gold deposits are magmatic deposits, contact metasomatic deposits, porphyry deposits, magmatic hydrothermal deposits and volcanic rock deposits. Combined with the division of tectonic magmatic rock belts and their main characteristics and the distribution of gold deposits in Gansu Province, this paper focuses on the analysis and study of the temporal and spatial distribution characteristics of magmatic gold deposits and magmatic rocks, the mineral-forming sources and physicochemical conditions of the main types of gold deposits in the Beishan tectonic magmatic belt and the Qinling−Dabie tectonic magmatic belt, summarizes the ore control factors, and proposes the main magmatic rock types, spatial ranges and technical methods that are conducive to gold prospecting.

Key words: magmatization; mineralization types; mineralization; mineral exploration engineering; gold deposits; Gansu Province

岩浆作用矿床是指在岩浆成矿作用过程中形成的各类矿床，包括与侵入岩浆作用和火山岩浆作用相关的矿床。广义的岩浆成矿作用是指成矿过程中有岩浆活动参与的各种成矿作用，包括正岩浆、伟晶岩、接触交代、热液作用等，是形成矿床类型最丰富的成矿机制之一。狭义的岩浆成矿作用专指正岩浆作用阶段的成矿作用，主要是含矿岩浆的结晶与分异作用，使成矿物质聚集而形成矿床的作用，金川基性—超基性岩型铜镍矿床最典型（汤中立，1996）。

甘肃地处四大板块交汇处，受不同大地构造单元的控制，可分为四大构造岩浆省，即北山、塔里木−华北、柴达木−祁连、羌塘−扬子−华南构造岩浆省。不同时代的岩浆岩均与区域构造关系密切，区域构造的形成、演化为区域岩浆活动提供了有利条件，进而形成不同方向的构造岩浆岩带，这些构造岩浆岩带在时间上表现为阶段性、长期性，在空间上表现为继承性、迁移性、叠加性和新生性（汤中立等，1998；殷先明等，2005；张新虎等，2013）。Au 元素的地球化学特征和活化迁移机制决定了构造岩浆活动必然与金矿成矿关系密切，甘肃省主要岩浆岩带的金矿成矿类型及成矿作用有哪些特征？本文在总体介绍甘肃省岩浆岩分布概况和岩浆作用成矿类型的基础上，重点探讨岩浆作用金矿床类型及其成矿作用特征，分析总结控矿因素和找矿方向，指导与岩浆作用相关的金矿找矿实践。

1 岩浆岩分布特征

以区域构造为主导，按照火山岩和侵入岩的空间分布，将甘肃省的岩浆岩省划分为 10 个构造岩浆岩带，分别为北山构造岩浆岩带、塔里木构造岩浆岩带、阿尔金构造岩浆岩带、祁连山构造岩浆岩带、柴达木构造岩浆岩带、阿拉善构造岩浆岩带、华北构造岩浆岩带、北秦岭构造岩浆岩带、秦岭−大别构造岩浆岩带和可可西里−巴颜喀拉构造岩浆岩带。不同构造岩浆岩带在地质构造演化过程中显示出活动强度的时代差异性，金矿成矿作用同样存在类型、规模和品位的差异（图 1）。本文重点介绍北山构造岩浆岩带和秦岭−大别构造岩浆岩带的分布与金矿床特征。

1.1 北山构造岩浆岩带

北山构造岩浆岩带位于塔里木板块和西伯利亚板块之间，东、西分别延伸至内蒙古和新疆地区。在震旦纪—寒武纪已经形成多岛洋盆格局，存在一系列孤立古陆块；到中奥陶世后，转变为洋盆闭合环境，导致板块、微板块、陆块、微陆块之间碰撞作用的发生，形成了特有的沟−弧−盆构造岩浆体系及火山沉积建造；奥陶纪—志留纪末（或泥盆纪初），塔里木板块和西伯利亚板块共同向哈萨克斯坦板块发生相向汇聚运动，基底古陆不断扩大；从石炭纪开始，北山地区开始又一次大规模的汇聚运动，火山活动以中性喷溢开始，经中酸性喷发，最后酸性爆发，构成一个完整的喷发旋回。早石炭世板块汇聚运动形成红柳园组、白山组、扫子山组等火山建造，二叠纪汇聚运动形成双堡塘组、金塔组和方山口组火山建造。北山石炭纪火山岩以钙碱性为主，早二叠世为碱性和钙碱性系列，晚二叠世方山口组为板内钙碱性火山岩。相关金矿有 460 式热液脉型金矿、南金山式火山岩型金矿、新老金厂式火山岩型金矿、花牛山式矽卡岩型金矿、北山式破碎带蚀变岩型金矿、东虎沟式热液脉型金矿。

1.2 秦岭−大别构造岩浆岩带

秦岭−大别构造岩浆岩带在甘肃主要为西秦岭构造岩浆岩带，主要包括中秦岭、南秦岭和摩天岭构造岩浆岩亚带，经历了 5 个演化阶段：①元古宙结晶基底形成和演化阶段；②新元古代板块俯冲−碰撞−联合大陆形成演化阶段；③古生代秦岭海洋消亡演化阶段；④印支时期陆内裂陷及俯冲−碰撞造山发展阶段；⑤中—新生代地壳隆升−调整发展演化阶段。

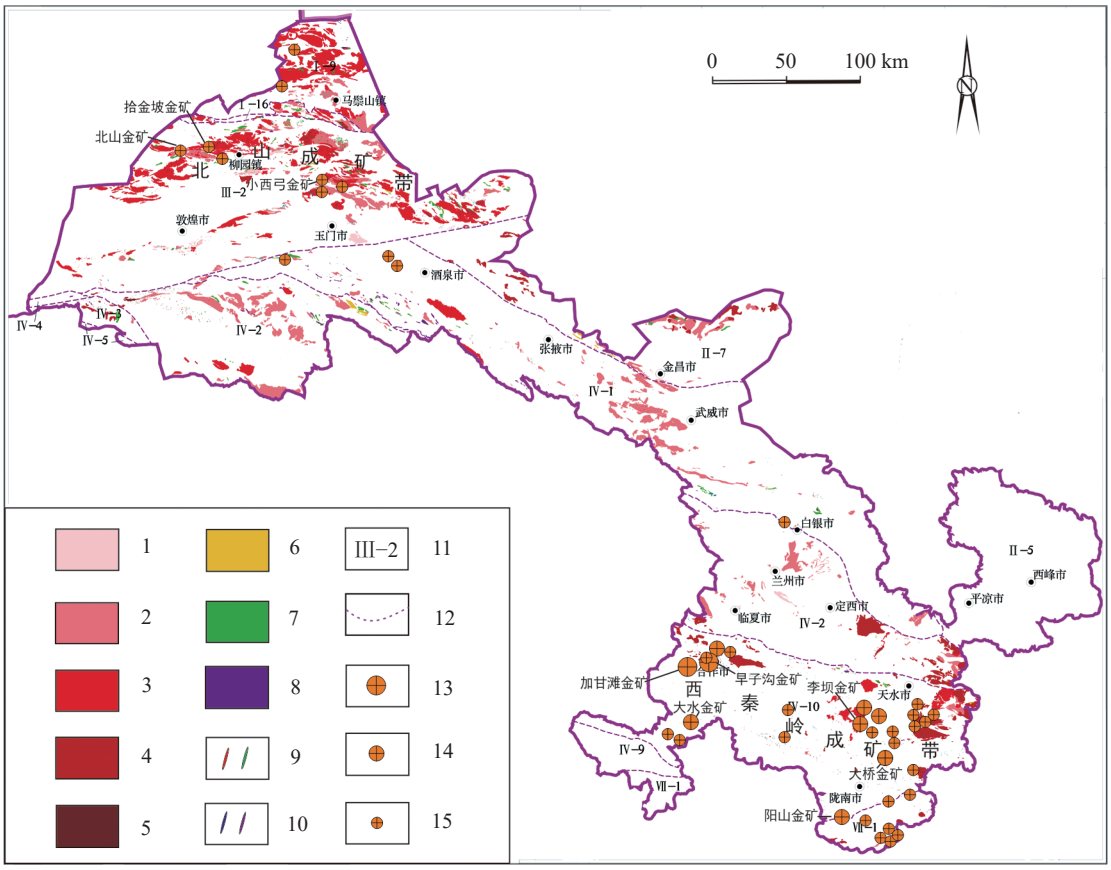


图 1　甘肃省岩浆岩与金矿分布简图(据李通国等, 2021 修改)

Fig. 1　The sketch map of the distribution of magmatic rocks and gold deposits in Gansu Province

1—前南华纪中酸性侵入岩; 2—南华纪−早泥盆世中酸性侵入岩; 3—中泥盆世−中三叠世中酸性侵入岩; 4—晚三叠世−侏罗纪中酸性侵入岩; 5—白垩纪中酸性侵入岩; 6—偏碱性−碱性岩类偏碱性−碱性岩类; 7—基性岩类; 8—超基性岩类; 9—酸性岩脉及基性岩脉; 10—碱性、偏碱性岩脉及石英脉; 11—构造岩浆岩带编号; 12—构造岩浆岩带界线; 13—特大型金矿; 14—大型金矿; 15—中型金矿

中秦岭构造岩浆岩亚带主要发育中二叠世—三叠纪中酸性侵入岩, 代表性岩体有夏河阿夷山岩体、合作美武岩体、武山温泉岩体、礼县“五朵金花”(校场坝、闾井、柏家庄、中川、碌础坝)、徽县糜署岭岩体、太白岩体等。岩性为闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩。该亚带是西秦岭地区重要的金矿成矿带, 中酸性岩体是重要的金矿控矿因素。

南秦岭构造岩浆岩亚带的岩浆活动相对弱, 主要在中部迭部—舟曲—武都—迷坝、南部玛曲忠格扎拉—格尔克合(大水)及其西南当日一带出露规模不大的岩株、岩枝及岩脉。主要岩体有舟曲憨班、官亭镇、宕昌燕麦层、武都小金厂、康县迷坝、玛曲忠格扎拉、忠曲、格尔括合、红曲、决格宗等岩体, 以迷坝岩体最大, 呈岩基状, 向东延入陕西境内。岩性主要为石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩及脉状花岗闪长斑岩、花岗斑岩等, 岩体多呈岩瘤状、岩株状及脉状产出。该亚带西段大水一带岩浆活动与金矿成矿关系密切, 产出有大水等金矿。

摩天岭构造岩浆岩亚带侵入活动较强烈, 发育新元古代—三叠纪中基性—中酸性侵入岩类, 以岩株、岩枝产出。代表性岩体有碧口新元古代辉石闪长岩体、佛头包志留纪石英闪长岩体及婆娘山三叠纪二长花岗岩、阳坝三叠纪花岗闪长岩等。另外, 在石鸡坝—阳山一带出露一些花岗质岩脉, 与金矿成矿关系密切, 如著名的阳山金矿, 花岗岩的 LA−ICP−MS 锆石 U−Pb 年龄为 220.3±4.1 Ma(Mao et al.,2014), 岩石 SiO_2 含量为 67.7%～74.9%, A/NCK=1.11～5.46, ∑REE 为 24.22×10^{-6}～97.26×10^{-6}, 轻、重稀土元素分馏明显, 具弱负 Eu 异常(δEu=0.7～0.79), 岩石形成于后碰撞构造环境。本文分析该构造岩浆岩带与金矿的成矿关系, 西秦岭地区与金矿成矿密切相关的岩浆岩分布集中区有礼县“五

朵金花”、夏河一带近东西向分布的闪长玢岩和玛曲-忠曲岩体。相关金矿有李坝金矿、锁龙金矿、加甘滩金矿、早子沟金矿、以地南金矿、大水金矿等。

2 岩浆作用金矿床分类

岩浆作用矿床类型主要有岩浆型矿床、接触交代型矿床、斑岩型矿床、岩浆热液型矿床和火山岩型矿床五大类。

(1)岩浆型矿床

岩浆型金矿是在岩浆岩成岩阶段伴随Au元素富集,并形成金矿床。在甘肃主要以共伴生矿产分布,金川铜镍矿共生大型金矿床,金成矿阶段与铜镍硫化物形成基本同时,超基性岩浆熔离是岩浆与成矿流体共同作用的结果。成矿作用可分为结晶分异成矿作用、岩浆熔离成矿作用和岩浆爆发成矿作用。

(2)接触交代型矿床

该类型矿床以矽卡岩型为主要成矿类型,是中酸性岩浆或后期热液与碳酸盐岩或富钙镁质岩发生接触交代作用,因地质体界面的地球化学差异引起成矿元素富集沉淀。该类型矿床矿体展布主要沿地质体界面分布,呈似层状、透镜状,矿石结构构造复杂多样,共伴生元素较多,围岩蚀变种类多。该类型矿床呈多阶段成矿,稳定同位素的变化范围较大,进一步表明成矿流体来源多样,早期以岩浆热液作为主要成矿流体,后期或主成矿期以地层中的建造水参与形成主要成矿流体。该类矿床以瓜州县花牛山金矿为代表,一般矿床及外围经历过大规模的岩浆侵入活动,同期或后期断裂活动为富含成矿物质的运移和沉淀提供了空间。

(3)斑岩型矿床

该类矿床的成矿地质体一般为多期次侵位的中酸性—酸性侵入体,属钙碱性—高钾钙碱性岩石系列,矿体一般赋存于斑岩体内部、顶部或内外接触带。斑岩型金矿床常与铜共伴生,矿化蚀变分带较明显,不同分带显示出不同特征的氢氧同位素组成和成矿流体来源,其中与高硫型金铜相关的成矿流体为中温(200~350℃)、低盐度(<5%)气相流体。该类型金矿床的成矿物质主要来源于岩浆,具有壳幔混源特点,Au元素主要与Cl和S形成络合物进行迁移,成矿深度一般1~4 km,矿床的空间结构受成矿侵入体顶部接触带、物理化学界面和区域构造带联合控制。

(4)岩浆热液型矿床

岩浆热液型金矿床一般为中低温热液金矿床,矿化类型包括石英脉型、破碎蚀变岩型、微细浸染型、爆破角砾岩型等,成矿地质体为侵入体,在侵入岩成岩后,经热液交代作用、充填作用等形成矿床。北山南带呈弧形集中分布一系列岩浆热液型金矿床,该类型金矿床以断裂结构面为主,另有硅钙面、层间构造、古岩溶构造等成矿结构面。总体可分为2类:一类以金和银共伴生为主,成矿温度在250℃左右,另一类以金、砷、锑等共伴生,成矿温度一般低于250℃。矿床蚀变矿物种类多样,以多阶段成矿为特点,不同成矿阶段的成矿流体温度变化大,早阶段为450~350℃,主成矿阶段为350~200℃,成矿晚阶段通常为200~150℃。稳定同位素特征显示出成矿早期以岩浆水为主,晚期阶段大气降水参与的特征。该类型金矿体的赋存空间结构受控于区域构造带、侵入体外接触带、侧伏和物理化学界面等。成矿深度为2~15 km。

(5)火山岩型矿床

火山岩型金矿床是与陆相火山岩-次火山岩密切相关的矿床,成矿地质体为火山机构和次火山岩体,与各种火山建造有关,以中酸性岩为主。矿床多形成于火山喷发的间歇期或火山活动末期,在次火山岩成岩后,成矿流体通过热液交代作用形成。甘肃境内以海相火山岩型金矿为主,代表性矿床有肃北县南金山金矿和白银厂伴生金矿床。该类矿床的矿化类型呈现出矿床上部多为脉状、角砾岩型矿体,下部为似层状、透镜状矿体的特征。成矿流体以岩浆流体为主,或者岩浆流体与大气降水的混合,具有相对低的均一温度(<300℃)和盐度(<10%)。Au等成矿元素在流体中主要以氯络合物形式存在,主成矿阶段近矿蚀变主要为石英绢云母化、硅化、冰长石化、绿泥石和绿帘石化。该类型矿床形成深度浅,一般位于次火山岩侵入体内外接触带500~1000 m内,最大不超过2000 m。

3 时空分布特征

3.1 北山金成矿带

北山金成矿带包括敦煌三危山-疏勒河断裂以北至红石山断裂区域,成矿带根据构造特征划分为3个成矿带,北带以沙泉子—明水—月牙山以北为界,方山口—红柳大泉南至三危山—疏勒河间为南

带, 中间为中带。北山成矿带中金矿成矿类型包括岩浆热液型、斑岩型、火山岩型、接触交代型、变质岩型等。

3.1.1　金矿床与成矿相关岩体空间分布

北山北带以火山−次火山热液型和岩浆热液型金矿为主。火山−次火山岩型金矿代表为南金山金矿, 赋矿岩性为火山碎屑沉积岩夹英安岩、英安质凝灰岩, 同期或晚期东西向、北东向 2 组断裂是主要的导矿构造, 矿体呈似脉状、透镜状和囊状, 矿石以致密块状、浸染状和细脉-网脉状为主, 围岩蚀变以次生石英岩化、硅化、绢云母−绿泥石化、碳酸盐化为主。成矿均一温度为 180~250℃, 同位素特征显示出流体的多来源特征, 铅主要来自造山带, 硫可能来自地壳深部, 氧同位素显示岩浆水和大气降水混合特征(聂凤军等, 2002a)。华力西期岩浆活动为金矿形成提供了充足热源, 成矿时代略晚于该区中酸性岩成岩时代。岩浆热液型金矿代表为 460 金矿, 赋矿岩石为华力西期石英闪长岩和似斑状石英闪长岩, 岩体内部存在断裂带, 为成矿提供了有利构造部位, 以裂隙充填为主, 矿体呈透镜状、条带状, 围岩蚀变以硅化、黄铁绢英岩化、青磐岩化等为主, 早期区域性断裂控制岩体产出, 次级断裂控制矿体分布, 成矿时代为华力西晚期。这一地区以 Au、Mo 元素异常套合为依据, 对存在黑褐色锰土和铁钼华露头区域开展金(钼)矿找矿工作, 有望寻找流沙山式金(钼)矿床。

中带是北山成矿带金矿的主要分布区, 成矿类型包括斑岩型、岩浆热液型、火山岩型、接触交代型金矿床。斑岩型金矿床以马庄山金矿为代表, 石英斑岩和流纹斑岩与金矿床空间关系密切, 在马庄山南北两侧的深大断裂多期活动作用下, 发育北西向、东西向和南北向断层破碎带, 其中东西向压扭性断裂带是重要的控矿构造(曾长华等, 2002), 直接控制着金矿体的展布形态。金矿体多呈脉状和细脉浸染状, 围岩热液蚀变主要有次生石英岩化、碳酸盐化、绢云母化、高岭石化和叶腊石化, 与金矿化空间分布关系最密切的是次生石英岩化(曾长华等, 2002), 石英流体包裹体 Rb−Sr 年龄为 298±28 Ma, 表明成矿时代为晚石炭世(李华芹等, 1999)。岩浆热液型金矿床以金窝子金矿为代表, 金矿体产于华力西期黑云花岗闪长岩体破碎带中, 断层破碎带呈北东—北东东向和南北—北北东向分布, 控制着金矿体的空间分布形态, 矿体呈石英大脉和网脉状分布, 围岩热液蚀变主要有绢云母化、硅化、绿泥石化和碳酸盐化, 与金矿化空间关系密切的是绢云母化。金窝子矿床的成矿年龄为 228±22 Ma 和 230±5.7 Ma(李华芹等, 1999), 与其所在的黑云母花岗闪长岩同位素年龄相差 26~24 Ma, 认为金成矿作用与华力西期黑云母花岗闪长岩关系不大, 可能是印支期构造−岩浆活动的产物(陈富文等, 1999)。接触交代型金矿床以花牛山金矿为代表, 该类型矿床矿体展布主要沿地质体界面分布, 呈似层状、透镜状, 矿石结构构造复杂多样, 共伴生元素较多, 围岩蚀变种类多。该类型矿床呈多阶段成矿, 稳定同位素的变化范围较大, 进一步表明了成矿流体来源的多样性, 早期以岩浆热液作为主要成矿流体, 后期或主成矿期以地层中的建造水参与形成主要成矿流体。一般该类矿床及外围经历过大规模的岩浆侵入活动, 同期或后期断裂活动为富含成矿物质的运移和沉淀提供了空间。

南带金矿床集中分布在 2 个区带, 北部拾金坡—金场沟一带和南部新老金厂—小西弓一带(图 2), 成矿类型以岩浆热液型金矿、火山岩型、变质型为主。拾金坡—金场沟一带以岩浆热液型金矿为主, 均与中酸性深成侵入岩有关, 矿床主要分布在中酸性侵入岩体内部破碎带、岩体与围岩接触带或岩体附近围岩中, 矿体多呈单脉、脉群或蚀变破碎带产出(王玉玺等, 2012)。发现较早的拾金坡金矿含矿花岗岩为志留纪, 金矿体多为近东西向平行斜列分布的含金石英脉, 呈脉状、薄板状、透镜状产出, 可见膨胀收缩、分枝复合特征。围岩蚀变以硅化、绢云母化、黄铁矿化、钾长石化、绿泥石化、碳酸盐化等为主。控制岩浆岩的展布形态的近东西向深大断裂派生北西向次级断裂控矿(图 3)。成矿时代为印支早期(黄铁矿 Rb−Sr 年龄 230 Ma、U−Pb 年龄 238 Ma), 成矿时代晚于成岩时代, 但成岩作用对于成矿作用具有决定性作用。南部新老金厂—小西弓一带以火山岩型和岩浆热液型金矿为特征。火山岩型金矿床以新老金厂金矿为代表, 下二叠统安山岩、英安岩和流纹岩出露较广, 其中英安质火山岩与金矿床具有密切的空间关系(聂凤军等, 2003)。受北侧柳园−大奇山深大断裂影响, 区内近东西向和北东向压扭性断裂及北西—北西西向张扭性破碎带分布广泛, 金矿体往往分布在北西向与近东西向断裂交会

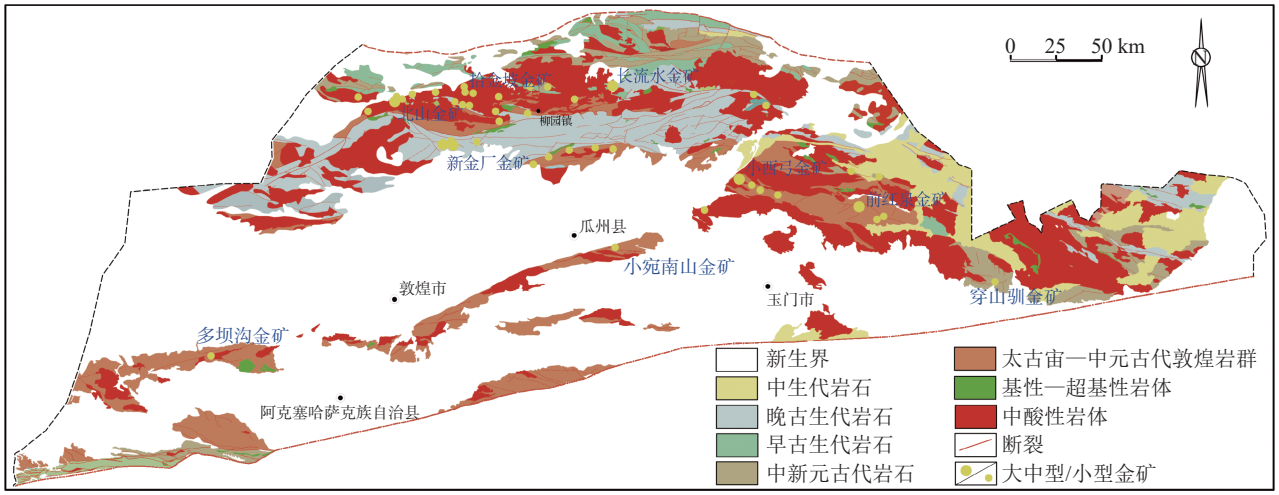


图 2 北山南带金矿床与花岗岩分布简图

Fig. 2 The sketch map of the distribution of gold deposits and granites in the southern Beishan belt

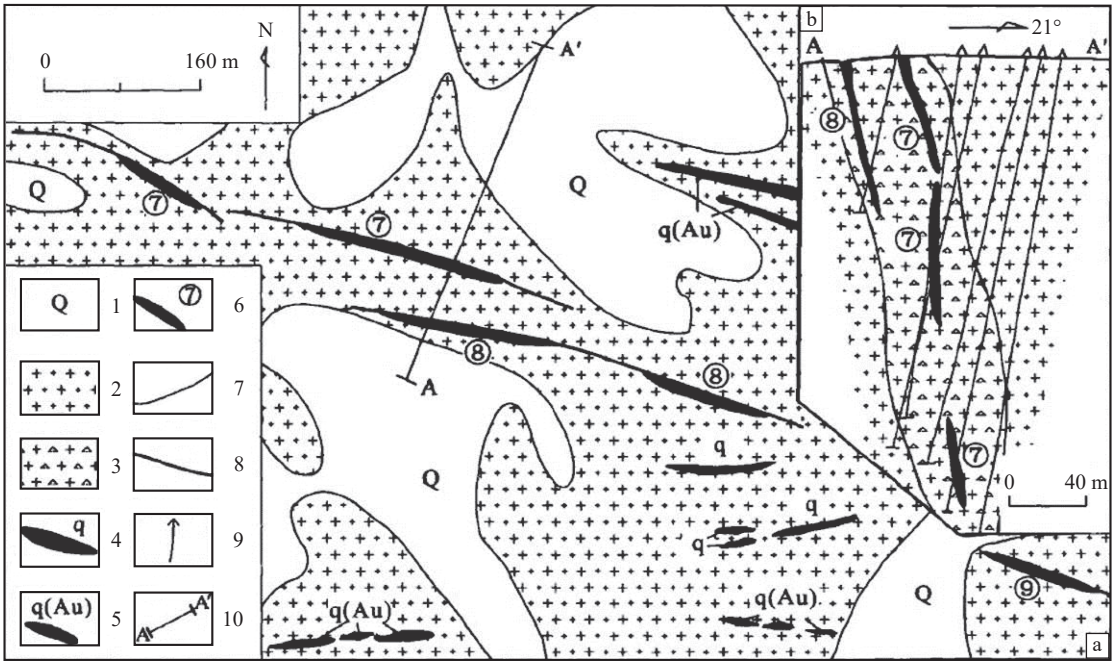


图 3 拾金坡金矿区地质平面(a)与剖面略图(b)(据安国堡, 2006)

Fig. 3 Geological map (a) and section (b) of the Shijinpo gold deposit

1—第四系冲、洪、残积物; 2—华力西中期斑状花岗岩; 3—蚀变碎裂斑状花岗岩; 4—石英脉; 5—含金石英脉; 6—金矿体及编号; 7—地质界线; 8—断裂; 9—钻孔; 10—剖面线

处。总体分为新金厂和老金厂 2 个矿段, 在新金厂矿段, 金矿化在英安岩和辉绿岩脉内多呈石英细脉和网脉产出, 矿体以似板状和透镜状为主。在老金厂矿段, 金矿化产出与新金厂相似, 矿体多为脉状和透镜状, 顶部常存在含金次生氧化富集带。2 个矿段的热液蚀变均以硅化、绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化为主, 其中与金矿化空间分布关系最密切的为硅化和绢云母化(聂凤军等, 2003; 王玉玺等, 2019)。

3.1.2 成岩与成矿时代关系

金矿床 (点) 在地壳演化历史中的时间分布规律, 特别是确定金矿床 (点) 形成的“高峰时间阶段”, 对于阐明区域金矿床 (点) 的成矿机理和指导隐伏矿床 (点) 找矿勘查评价工作具有重要意义。北山地区最古老的金矿化时间为 1700~600 Ma, 含金石英脉分

布在中元古代变质岩地层中即是很好的例证。一般来讲, 金主要来自被剥蚀的基底岩层, 它们常在地台坳陷区沉淀形成金矿体、矿胚或矿源层, 沉积环境和岩相古地理条件是上述矿化体产出的主导控制因素, 代表性金矿床有小西弓和前红泉金矿, 它们的形成明显具有后期改造的特征, 与华力西期构造−岩浆活动关系密切。华力西期是北山地区构造−岩浆活动和金成矿作用的鼎盛时期, 主要受板块多期次碰撞造山活动影响, 代表性金矿床有老金厂、新金厂、马庄山、流沙山、照壁山、拾金坡、460 金矿等。总之, 上述金矿床 (点) 的基本地质特征可概括为成矿环境复杂、分布范围广泛、数量和类型较多, 但是都与中酸性岩浆活动具有密切的成因联系。进入中生代后, 北山地区北东向、近东西向区域性深大断裂再活化, 中西部又出现明显的岩浆活动迹象, 金窝子含金花岗岩和南金山金矿附近闪长岩的存在即是很好的例证, 二者的同位素年龄分别为 230±6 Ma 和 244.15±0.32 Ma, 与印支期岩浆侵入活动有关, 为金矿床的形成提供了物质和热力来源。印支期代表性金矿床有南金山和金窝子金矿床(表 1)。

3.2　西秦岭金成矿带

3.2.1　*金矿床与成矿相关岩体空间分布*

秦岭造山带是一条经历长期多次造山作用形成的复合型造山带, 主要以北侧商丹和南侧勉略 2 条缝合带为界, 自北向南分为北秦岭板块、南秦岭板块和扬子板块北缘(Meng et al.,1999,2000; 张国伟等, 2001)。以宝成铁路为界, 秦岭造山带还可大致划分为东秦岭造山带和西秦岭造山带。

西秦岭造山带是中国重要的金矿资源分布区之一, 已发现一系列特大型、大型及众多中小型金矿床和矿点, 如大水、早子沟、加甘滩、李坝、锁龙、寨上、大桥、柴家庄、李子园等金矿。同时, 西秦岭造山带晚三叠世花岗岩类分布广泛, 现已发现中酸性岩体 200 余个, 总面积约 4000 km^2(张旗等, 2009)。中酸性侵入岩分布呈南、北两带, 北带西起达里加经铁沟—兴时沟、温泉, 向东至东秦岭大堡一带, 出露岩体 70 余个; 南带西起年木耳经阿姨山、德乌鲁—黑河、太阳山、柴家庄至磨扇沟, 出露岩体 50 余个(殷勇等, 2009)。

西秦岭造山带的金矿床在空间上与中酸性侵入体及脉岩密切伴生(图 4)。北西秦岭以天子山印支期二长花岗岩体为代表, 其周围分布有柴家庄、李子园等金矿床; 中秦岭金矿床一般产于印支期—燕山期中酸性侵入体周围, 东段的“五朵金花”(校场坝、柏家井、闾井、中川、碌础坝)岩体周围分布有李坝、锁龙、三人沟、李坝、马泉、金山、楼底下等数个金矿床及矿(化)点, 西段的美武、德乌鲁、阿姨山等岩体周边分布有录斗艘、下看木仓、以地南、三索玛等金矿。南秦岭地表中酸性侵入体分布较少, 但矿区往往发育大量的中酸性岩株、岩枝和岩脉, 在夏河—合作一带发育岩脉, 产出有早子沟、加甘滩等特大型金矿床, 早子沟金矿深部发现大量的闪长玢岩脉和石英闪长玢岩脉, 推测深部存在闪长岩体(图 5); 大水特大型金矿区发育格尔括合花岗闪长斑岩和一系列岩脉, 脉岩岩性主要有闪长玢岩、黑云母花岗闪长斑岩、细晶闪长岩等; 阳山金矿床主要发育岩脉或岩脉群产出的花岗岩类, 以斜长花岗斑岩分布最广泛(殷勇, 2011)。

表 1　北山成矿带金矿床成矿年龄与成矿有关岩体年龄对比

Table 1　Comparison table of metallogenic age of gold deposits and age of related rock bodies in Beishan metallogenic belt

位置	矿床名称	成矿时代/Ma	测试方法/测试对象	与成矿有关岩体年龄/Ma	来源文献
北山北带	马庄山	298±28	Rb−Sr/石英流体包裹体	303~301	李华芹等, 1999
	南金山	242.8	Ar−Ar/绢云母	244.15	江思宏等, 2006
	流沙山	260±10	Re−Os/辉钼矿	262~261	聂凤军等, 2003
北山中带	金窝子	230±5.7	Rb−Sr/石英流体包裹体	375~354.1	胡霭琴等, 1982, 1986; 陈富文等, 1999
	照壁山	296±5	Ar−Ar/绢云母	296	聂凤军等, 2002b
北山南带	小西弓	284～267	K−Ar/绢云母	306~289	聂凤军等, 2002a
	拾金坡	403	U−Pb/锆石	409.3	安国堡, 2006; 胡朋, 2007
	新金厂、老金厂	270	据地质特征推断	270	胡朋, 2007

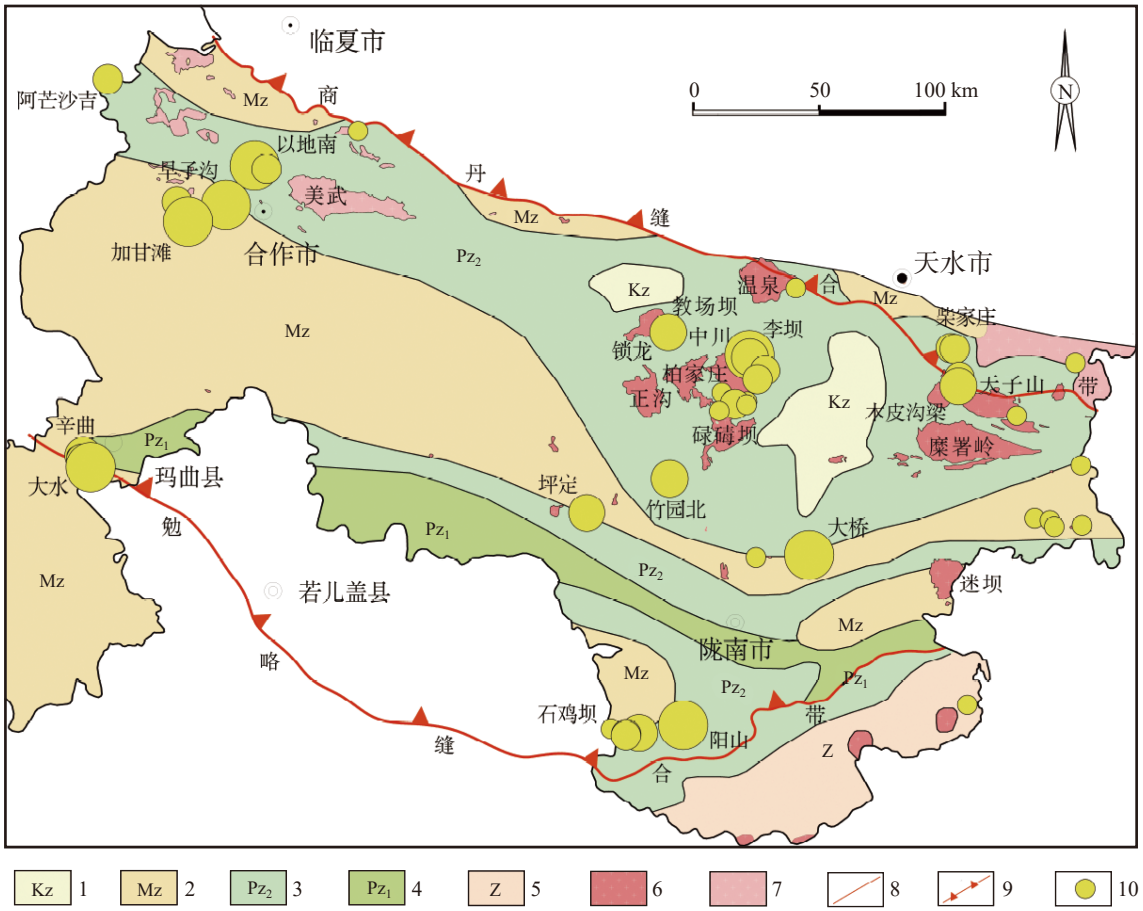


图 4 西秦岭主要金矿床及花岗岩分布图(据 Wang et al.,2019 修改)

Fig. 4 The sketch map of the distribution of main gold deposits and granites in West Qinling

1—新生界; 2—中生界; 3—上古生界; 4—下古生界; 5—震旦系; 6—印支期花岗岩; 7—燕山期花岗岩; 8—断裂; 9—断裂缝合带; 10—金矿床(点)

3.2.2 成岩与成矿时代关系

西秦岭造山带发现的岩体出露面积一般介于 1～500 km^2 之间(张国伟等, 2001; 朱赖民等, 2009; 张翔等, 2017)。自西向东包括达尔藏、太子山、美武、光头山、迷坝、中川、教场坝、碌碡坝、温泉、糜署岭、天子山等岩体或岩体群。夏河花岗闪长斑岩成岩年龄为 233.4 Ma, 玛曲格尔括合花岗闪长斑岩成岩年龄为 213.7±2.7 Ma(Sun et al.,2002)和 215.8±1.3 Ma(Han et al.,2014), 冶力关石英闪长岩成岩年龄为 245 Ma(闫海卿等, 2014), 光头山埃达克质花岗岩成岩年龄为 216 Ma(张帆等, 2009), 迷坝黑云母花岗岩成岩年龄为 220 Ma(张帆等, 2009), 西坝岩体成岩年龄为 219~218 Ma(Zhu et al., 2011), 温泉岩体成岩年龄为 217~216 Ma(Zhu et al., 2011), 糜署岭二长花岗岩成岩年龄为 213 Ma(金维浚等, 2005), 中川似斑状二长花岗岩成岩年龄为 222 Ma(Zeng et al., 2012), 天子山二长花岗岩成岩年龄为 260.0 ± 2.1 ~ 256.1 ± 3.7 Ma(Yang et al., 2012)。通过对西秦岭中酸性岩的结晶年龄统计, 总体可划分为 4 个岩浆活动期(图 6): 第一阶段侵位于 264～259 Ma, 为二叠纪末期; 第二阶段侵位于 248～232 Ma, 为早、中三叠世; 第三阶段峰值位于 220 Ma 左右, 为晚三叠世; 第四阶段峰值位于 205 Ma 左右, 为晚三叠世晚期—早侏罗世。表明西秦岭中酸性岩体主要形成于印支期。

西秦岭造山带的金矿床成矿年龄也主要发生在印支期, 如李坝金矿床含金石英脉的 Ar−Ar 年龄为 210.6 Ma(冯建忠等, 2003), 也有学者对李坝金矿床进行了系统测年, 金矿石中 3 个热液白云母的^{40}Ar/^{39}Ar 坪年龄均为 215.6 ± 1.3 Ma, 测定成矿前花岗岩墙的 SHRIMP 锆石 U−Pb 年龄为 222 ~ 217 Ma, 成矿后煌斑岩脉的^{40}Ar/^{39}Ar 坪年龄为 215 Ma, 认为李坝金矿床形成于晚三叠世(Zhu et al., 2011)。小沟里金矿床

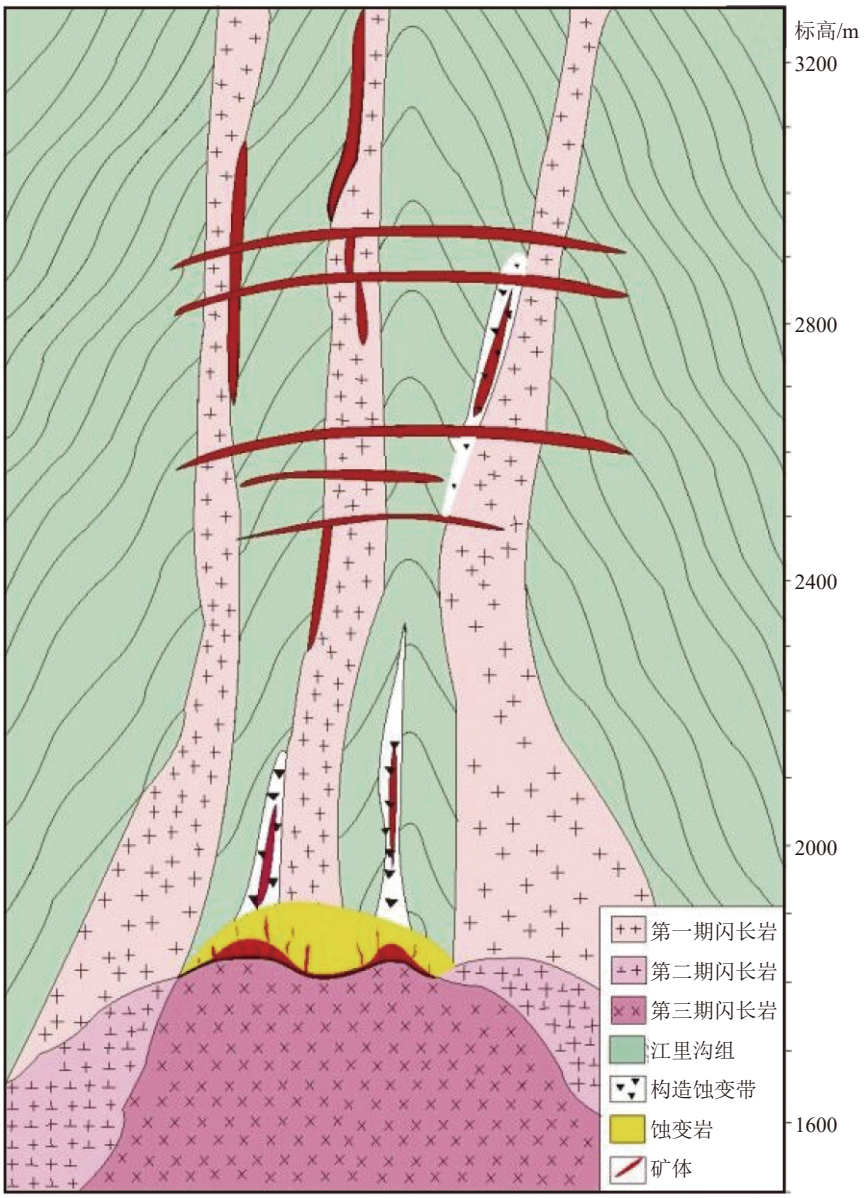


图 5　早子沟金矿深部岩脉分布及推测岩体形态示意图

Fig. 5　Distribution of deep dikes and speculative rock mass morphology of Zaozigou gold mine

含金石英脉的 Ar−Ar 年龄为 197.4 Ma(邵世才等, 2001); 许家坡金银矿床黑云母和透闪石的 K−Ar 年龄分别为 224 ~ 211.5 Ma 和 218 Ma(Li et al.,2011); 银洞沟金银矿床白云母 K−Ar 年龄和石英流体包裹体的 Rb−Sr 等时线年龄分别为 216 Ma 和 205 Ma(Li et al.,2011)。因此, 西秦岭造山带金矿与花岗岩的同位素年龄基本一致。

4　成矿物质来源及物理化学条件

4.1　北山金成矿带

北山金成矿带中岩浆作用矿床以北山南带最典型, 同造山期或造山期后是中酸性侵入岩成岩和金矿成矿主要阶段。侵入岩岩石类型有花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩、正长花岗岩等, 主要以岩基、岩株、岩枝、岩脉和岩脉群产出, 具多期次构造岩浆活动特点, 金矿床主要分布在韧性剪切带或构造交汇部位, 可能与阿尔金巨型走滑断裂持续间歇性活动有关。以拾金坡金矿和新金厂金矿、老金厂金矿为例重点讨论。

4.1.1　*成矿物质来源*

北山地区金矿床的硫、铅、氢-氧和铼-锇等同位素研究表明, 成矿物质主要来源于侵入岩及其周围

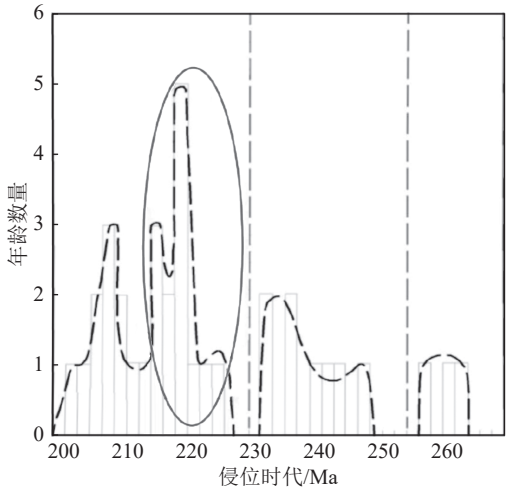
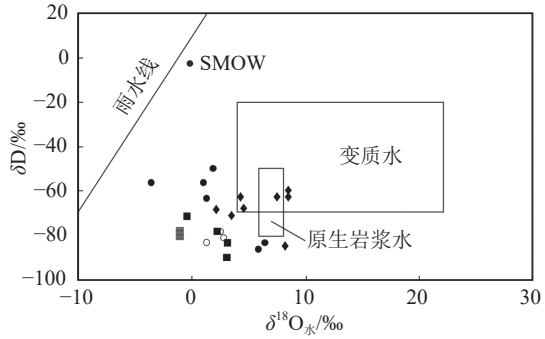


图 6 西秦岭地区中酸性岩浆侵位期次图(数据据 Sun et al., 2002; 金维浚等, 2005; Qin et al., 2009; 张帆等, 2009; Zhu et al., 2011; Yang et al., 2012; Zeng et al., 2012; Han et al., 2014; 闫海卿等, 2014)

Fig. 6 Secondary map of acid magma intrusion period in West Qinling area



○蚀变花岗岩 ▮ 花岗岩 ● 老金厂金矿 ♦ 新金厂金矿 ■ 拾金坡金矿
SMOW: 标准平均海洋水

图 7 北山地区金矿氢氧同位素图(数据据聂凤军等, 2003; 安国堡, 2006; 王琦, 2006; 胡朋, 2007)

Fig. 7 Diagram of hydrogen-oxygen isotopes in the Beishan area

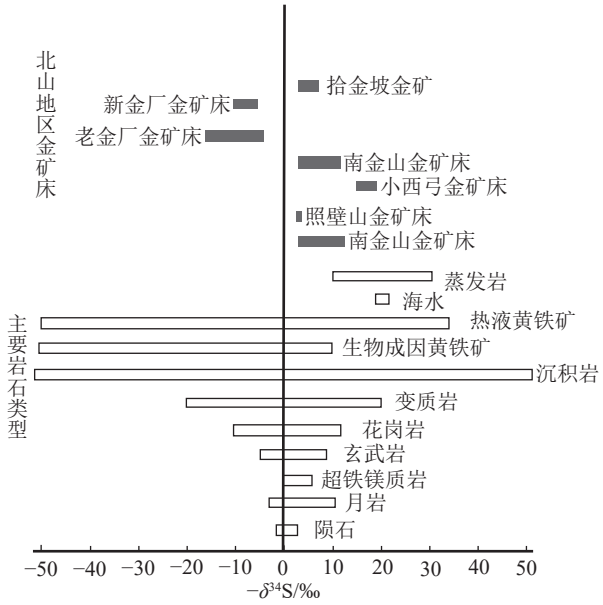


图 8 北山地区金矿硫同位素分布图(数据据聂凤军等, 2002a, b; 安国堡, 2006; 刘伟等, 2006; 胡朋, 2007; 王玉玺等, 2012)

Fig. 8 Distribution of sulfur isotopes in gold deposits in the Beishan area

地层(图 7、图 8)。拾金坡金矿区的花岗岩在上升侵位过程中带来大量的成矿物质和成矿流体,持续的热场交代萃取围岩中的成矿物质,并形成含金石英脉,而较晚期的中酸性岩浆活动形成岩墙且交切石英脉。通过拾金坡金矿石的石英氢氧同位素和斑状花岗岩石英包裹体的氢氧同位素对比,显示成矿热液主要来自花岗岩浆(王琦, 2006)(图 7);金矿石的黄铁矿硫同位素和蚀变花岗岩硫同位素组成基本一致(Stacey et al., 1975)(图 8),表明两者可能有同源继承演化的特征;拾金坡金矿床矿石中硫化物的铅同位素模式年龄介于 325.65～192.88 Ma 之间,变化范围较大,认为不代表真实的成矿年龄,显示铅的演化更复杂。矿区的斑状花岗岩及其中包体的铅同位素组成显示岩石具有深源特征(Faure, 1986)。金矿石的金属矿物以中温矿物为主,蚀变具有中温蚀变组合特征,矿石发育碎裂结构、交代结构,角砾状、细脉−网脉状构造,均显示出中温成矿特点(袁见齐等, 1985)。

研究表明,沉积岩中的 $\delta^{34}S$ 变化范围比岩浆岩和变质岩高(郑永飞等, 2000)(图 8),且二叠纪沉积岩硫化物中的硫比其他地质时期的沉积硫化物更富 ^{32}S,即 $\delta^{34}S$ 值更小(刘伟等, 2006)。老金厂矿床和新金厂矿床矿石中硫化物的硫同位素组成 $\delta^{34}S$ 值集中在 0‰～−8‰之间(胡朋, 2007),相比围岩更富集 ^{34}S,且 $\delta^{34}S$ 值均小于幔源岩石(图 8),推测新老金厂金矿石中的硫可能受到下二叠统围岩中硫的控制。老金厂矿床的围岩以较富 ^{34}S 的安山岩或流纹质安山岩为主,酸性程度高,而新金厂矿床的围岩以贫 ^{34}S 的辉绿岩为主,基性程度较高,这种差异可能导致了老金厂较新金厂的矿石硫化物 $\delta^{34}S$ 值更大(刘伟等, 2006)。老金厂和新金厂硫化物的铅同位素初始比值变化很小,说明矿床中有稳定的铅源;老金厂硫化物铅模式年龄值介于 386.24～127.14 Ma 之间,平均

值为 225 Ma, 新金厂介于 490.05～118.35 Ma 之间, 平均值为 228 Ma, 证实 2 个矿床应该是同一地质事件的产物。新金厂矿床矿石硫化物暗示其来自于岩浆或海底沉积物(李金祥等, 2004), 新金厂金矿和老金厂金矿围岩与矿石硫化物又具有较接近的铅同位素值, 均表明矿石铅可能直接来自于赋矿围岩。

4.1.2　*成矿流体地球化学特征*

流体包裹体记录了成矿作用过程中记录成矿流体运移乃至成矿作用关键机理的信息。拾金坡金矿区的岩体具有较高的 $\delta^{18}O$ 值(图 7), 可能是岩体形成后的热液蚀变引起的, 随着成矿温度的降低, 矿区含金石英脉到蚀变岩型金矿石的 $\delta^{18}O$ 水值具有减小趋势, 成矿流体可能曾与贫 $\delta^{18}O$ 的大气降水发生过混合作用(安国堡, 2006), 各类岩(矿)石的 δD 值变化于−90‰～−70‰之间(图 7), 比较接近, 表明岩浆热液与大气降水存在混合作用(胡朋, 2007)。流体包裹体的气液相成分、低盐度 $H_2O-CO_2-NaCl-CH_4$ 体系、流体包裹体连续均一温度等特征, 显示拾金坡金矿床形成于中低温环境, 可能是岩浆演化热液混合再循环大气降水, 引起成矿环境状态改变, 导致金的沉淀。

新老金厂矿石的流体包裹体气相成分均以 H_2O 和 CO_2 为主, 自老金厂东矿段向西直至新金厂矿床呈现规律性变化, H_2O 含量增加, CO_2 含量减小, 还原性增强, 新老金厂成矿流体包裹体气相成分变异源于流体混合作用(潘小菲, 2006), 分别属低盐度的 $CO_2-H_2O-NaCl\pm CH_4$ 型和低盐度的 $CO_2-H_2O-NaSO_4\pm CH_4$ 型, 反映了新金厂矿床成矿流体以岩浆来源的热液为主, 更加靠近岩浆热液活动的中心, 而东部老金厂矿床成矿流体体系有较多的大气降水加入, 导致体系还原性降低。新老金厂成矿主要发生在地表浅部, 老金厂矿床的包裹体均一温度集中在 120～180℃ 之间, 新金厂矿床的包裹体均一温度集中在 220～280℃ 之间(胡朋, 2007)。两者的温度差异可能是较冷的大气降水加入了老金厂矿床成矿过程所致。

金场沟金矿的成矿元素富集对围岩岩石具有明显的选择性, 华力西晚期的中酸性岩浆活动为金成矿提供了成矿物质、热源和运移介质, 区域性大断裂及其次生断裂为成矿提供了导矿和容矿空间。金矿石中黄铁矿的爆裂温度为 195～253℃, 绢云母生成的最高温度为 265℃, 结合共生矿物组合, 认为中低温热液活动促使了金的富集。通过硫同位素测定(刘长江, 2016), 矿区金、铅矿体 $\delta^{34}S$ 值为 +6.74‰～+7.40‰, 与花岗岩的硫同位素组合特征相似, 综合认为金场沟金矿属于岩浆热液型。

4.2　西秦岭金成矿带

4.2.1　*成矿物质来源*

西秦岭造山带金矿床地球化学特征表明, 成矿流体主要来源于岩浆期的热液, 在成矿后期有大气降水加入。李坝金矿床石英流体包裹体的氢氧同位素显示成矿流体主要来源于岩浆热液, 后期有大气降水的加入。矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}S_{CDT}$ 为 2.5‰～10.6‰, 主要介于 5‰～10‰之间(图 9), 具有岩浆来源硫的同位素特征。矿石中方解石 $\delta^{13}C$ 值主要为 −4.10‰～−6.13‰, 与初始地幔库(−6‰±2‰)相近, 表明碳主要来源于岩浆热液。

大水金矿竖井 891 中发现了英安质凝灰岩和具有喷流性质的原生黄铁矿脉(张翔等, 2019)。2 个凝灰岩样品的 Au 含量分别为 680×10^{-9} 和 2210×10^{-9}, 1 个原生黄铁矿脉的 Au 含量为 320×10^{-9}。凝灰岩与黄铁矿脉的稀土元素总量差别大, 但两者与矿区内拉辉云煌岩及花岗闪长斑岩稀土元素配分模式相似, 说明成矿流体主要来源于岩浆期后热液。矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值为−1.8‰~4.1‰, 平均值约为

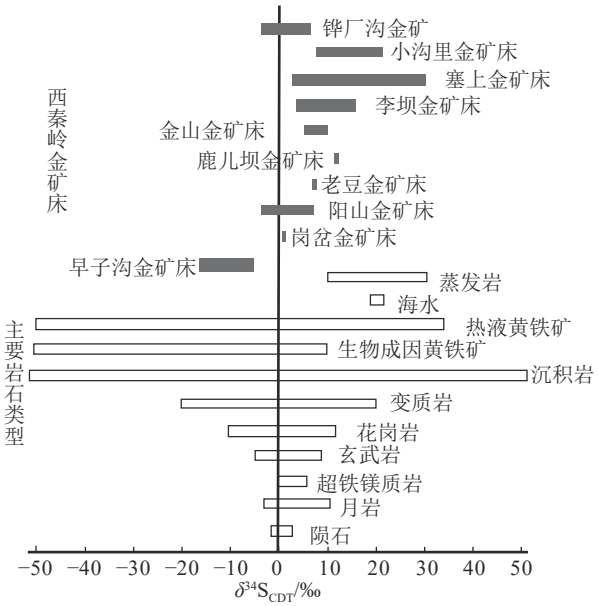


图 9　西秦岭地区金矿硫同位素分布(数据据冯建忠等, 2003; 张帆等, 2009 ;Yang et al.,2012; Zeng et al.,2012)

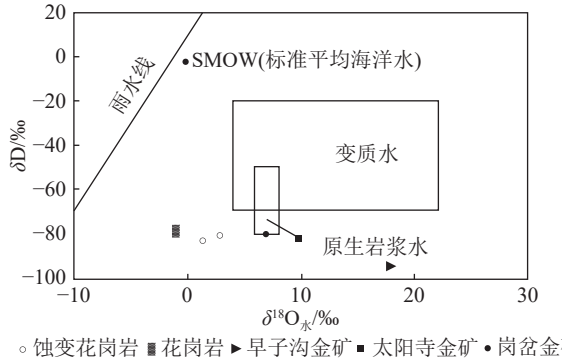
Fig. 9　Distribution of sulfur isotopes in gold ore from West Qinling area

2.7‰, 呈塔式分布, 显示岩浆来源硫的同位素特征。矿石中方解石的氢氧同位素也显示成矿流体主要来源于岩浆热液, 后期也有大气降水的加入。

西秦岭地区主要金矿 $\delta^{34}S_{CDT}$ 均具有岩浆来源硫的同位素特征(图 9)。氢氧同位素特征显示, 成矿流体主要来源于有后期大气降水加入的岩浆热液(图 10)。

4.2.2 成矿流体地球化学特征

西秦岭造山带金矿床成矿流体以富 CO_2、中温低盐度为特征, 表明成矿流体中普遍有变质流体或大气降水的混入。李坝金矿床的流体包裹体可分为 3 种类型: ①水溶液包裹体, 占包裹体总数的 25%~35%, 主要为气液两相, 由 L_{H_2O} 和 V_{H_2O} 组成, 包裹体形态以椭圆形为主, 长轴长一般为 8~20 μm。水溶液包裹体的 T_{ice} 为−9.7~−0.9ºC, 平均为−5.6 ºC, 平均均一温度变化范围为 107.9~398.4ºC, 平均为 282.4ºC, 盐度 (%) 为 1.57%~13.6% NaCl equiv., 平均为 8.5% NaCl equiv.。②CO_2−H_2O 包裹体, 约占包裹体总数的 45%~55%, 在室温下或降温过程中呈 V_{CO_2}+L_{CO_2}+L_{H_2O} 三相, CO_2−H_2O 包裹体的形态多为椭圆形, 负晶形和不规则状, 长轴长为 10~20 μm, 常含有少量 CH_4, 平均均一温度变化范围为 225.2~386.7ºC, 平均为 317.5ºC; 盐度为 1.4%~11.6%NaCl equiv.之间, 平均为 6.9%NaCl equiv.。③纯 CO_2 包裹体约占包裹体总数的 10%~15%, 其成分一般为 CO_2, 少数由 CO_2 + CH_4 组成。大多数纯 CO_2 包裹体在室温下为两相(V_{CO_2} + L_{CO_2}), 包裹体形态为椭圆形、方形、长条形和不规则形, 长轴长为 4~15 μm。李坝金矿床流体包裹体的研究表明, 成矿流体为 CO_2−H_2O−NaCl(CH_4), 以低盐度、富含 CO_2 为特征。



◦蚀变花岗岩 ▮花岗岩 ▸早子沟金矿 ▪太阳寺金矿 •岗岔金矿

图 10 西秦岭地区金矿氢氧同位素分布(数据据 Qin et al., 2009; Yang et al., 2012; 张翔等, 2017)

Fig. 10 Distribution of hydrogen-oxygen isotopes in gold ore from West Qinling area

大水金矿矿石中方解石中原生流体包裹体大小为 3~90 μm, 多为 10~25 μm, 多数为气液两相型, 无色透明, 气液比一般为 5%~10%。平均均一温度变化范围为 137~284ºC, 成矿温度峰值区间为 150~200ºC, 属于中低温成矿。流体盐度为 2.7%~9.1%NaCl equiv., 平均为 4.88%NaCl equiv., 集中于 2%~5% 之间, 流体盐度较低。成矿流体密度为 0.875~970 g/cm^3, 属于中等密度流体, 成矿压力为 40.50~101.30 MPa, 变化范围较大。根据地压变化梯度, 估算成矿深度为 1.42~3.56 km, 属于浅成深度, 与矿区中酸性侵入体的浅成特征吻合。

5 控矿因素

5.1 北山金成矿带

对北山地区规模较大的金矿床的统计表明, 产于岩体内部的金矿床主要有金窝子、照壁山、明舒井、拾金坡、金沟井、金庙沟、磨金洞、马庄山、流沙山 9 个矿床; 产于岩体内、外接触带附近的金矿床主要有狼娃山、霍勒扎德盖东、扫子山、460、金厂沟、交叉沟、花牛山 7 个矿床; 距离岩体相对较远 (一般不超过 2 km), 但成矿受岩体控制的金矿床主要有南金山、小西弓、新金厂、老金厂、210、老酮沟、小甜水井 7 个矿床。由此可见, 不论矿床的产出位置远近, 这些金矿床的成矿作用均受到岩浆活动的控制。

对深成侵入岩型金矿床而言, 不仅矿体与深成侵入岩类具有密切的空间分布关系, 而且中酸性岩浆直接从地壳深处或壳幔过渡带携带成矿物质, 并在演化的晚期分泌出含矿岩浆热液, 再者岩浆带来的巨大热能使地温梯度升高, 加热沿地表裂隙下渗的大气降水, 为矿床形成就位提供了热动力条件。对火山岩型金矿床而言, 金矿体的直接围岩是金丰度较高的海相火山−次火山岩或火山碎屑岩, 成矿物质来自亏损地幔部分熔融形成的火山岩地层, 成矿流体也部分来自深部的岩浆房, 富含挥发分和硫的岩浆热液沿火山机构的裂隙上升, 并交代淋滤含金的火山岩地层, 并在地表浅部与加热的大气降水混合。对变质岩型金矿床而言, 虽然成矿物质主要来自基底变质岩, 相当一部分成矿流体来自韧性剪切变形动力变质作用形成的流体, 但动力变质作用同时发生的重熔型中酸性岩浆亦提供了部分成矿物质和成矿流体, 而且岩浆为成矿提供了主要的热动力条件, 促使成矿物质活化、迁移及地下水循环交代,

最终形成金矿床。

5.2　西秦岭金成矿带

西秦岭造山带的金矿与中酸性侵入体密切相伴, 时代相近。据统计, 西秦岭甘肃境内已发现金矿床(点)约 279 处, 主要分布于 13 个金矿富集区, 其内分布有不同规模、不同类型的岩基、岩株, 并广泛分布大量的脉岩。矿床距离岩体一般 1~2 km, 最远 6~7 km(张旗等, 2009)。其中, 阳山金矿的勘查突破首先来自于“花岗斑岩含金”观点的提出(郭俊华等, 2002)。由此可见, 西秦岭金矿的产出严格受中酸性岩体及脉岩的控制。

岩浆作用金矿床主要受控于岩浆岩及其岩浆侵位过程形成的一系列构造变形特征。在世界范围内, 许多金矿床都与花岗质岩石在时空上密切共生在一起, 如澳大利亚太古宙的 Yilgarn 克拉通(Duuring et al.,2007)、古元古代的北澳大利亚克拉通(Piraino et al.,2008)、中国的胶东太古宙绿岩带(Qiu et al.,2002; Mao et al.,2008)和阿拉斯加东南部的白垩纪 Chugach 地体中的金矿床(崔惠文等, 1996)。有学者模拟了 Yilgarn 克拉通中高温花岗岩周围的岩石变形行为和侵入体周围含金韧性剪切带的形成过程(Qiu et al.,2002), 认为无论是在地壳伸展还是挤压应力场下, 在岩体边缘均可形成应力集中区, 并可导致韧性剪切变形作用发生, 这一结果合理解释了 Yilgarn 克拉通内的金矿床为什么与花岗质侵入体密切共生, 金矿分布受到侵入体周围断裂及韧性剪切带的严格控制(Zhang et al.,2012)。因此, 中酸性侵入体不仅为金矿的形成提供了物质来源, 也为金矿化提供了容矿空间。

6　成矿作用

北山成矿带主要有 3 个较大规模成矿作用阶段, 即前寒武纪、华力西期和印支期, 其中以华力西期的成矿作用最强烈。前寒武纪的金矿化发生在 1700~600 Ma, 主要是基底岩层的剥蚀作用形成金矿体、矿胚或矿源层, 代表性金矿床有老硐沟和小西弓, 但在华力西期岩浆活动阶段改造富集。华力西期, 构造−岩浆活动与金成矿作用均达到鼎盛时期, 北山成矿带大多数金矿床形成于这一时期, 代表性金矿床有老金厂、新金厂、马庄山、流沙山、拾金坡、照壁山、460 金矿等, 小西弓的主要成矿期也是这一时期。印支期, 区域性深大断裂等再活化作用及规模有限的岩浆活动, 为金矿床的形成提供了物源和热源, 代表性金矿床有南金山和金窝子金矿。构造−岩浆−成矿系统在北山成矿带的金矿床形成过程中均有突出显现, 尤以岩浆活动最显著(图 11)。江思宏等(2006)对北山成矿带的成矿时间进行了分析, 认为金矿化时间跨度大, 矿化产出具有时限性和局限性、矿化不均匀的特征。如北山南矿带成矿时间具多期特点, 早期矿化年龄为 298～253 Ma(金沟井 253.084 Ma, 拾金坡 323 Ma、298 Ma), 中期矿化年龄为 246～229 Ma(拾金坡 246 Ma、238 Ma、130 Ma, 新井 229 Ma), 晚期矿化年龄为 89 Ma(小金窝子), 表明北山南矿带金矿化起始于华力西中期, 鼎盛期为华力西晚期—印支期, 结束于燕山期。北山成矿带不同金成矿类型各具特点, 但总体与岩浆活动关系较密切。岩浆热液型金矿大都在古生代花岗岩类侵入体内部及其与围岩的接触带上产出, 赋矿围岩主要有华力西期或印支期黑云母花岗闪长岩、石英闪长岩和似斑状花岗岩。该类金矿床对于构造环境的选择性不明显, 既可沿不同板块汇聚带或古大陆边缘线状深大断裂分布, 也可在古大陆内部古生代裂陷盆地内产出。与金矿成矿相关的中酸性岩浆活动主要发生在同造山期或造山期后。岩浆岩的岩石类型主要为黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、正长花岗岩等, 以岩基、岩株、岩枝、岩脉、岩脉群等产出, 主要分布在多组断层交会处, 表明北山成矿带受多期构造−岩浆活动影响, 伴随发生多阶段成矿作用。斑岩型金矿床多集中分布在北山的公婆泉岛弧带和狼娃山−金巴山岛弧带内, 金矿化与浅成—超浅成侵入岩株或岩脉群空间关系密切, 主要产出于华力西期中酸性火山−侵入杂岩体内。该类金矿床在北山地区仅发现马庄山一处具工业价值的金矿床, 其他多以矿化点为主。火山岩型金矿床大都产出在马鬃山地区各类断陷盆地内, 容矿围岩以石炭纪或二叠纪安山岩、英安岩、流纹英安岩等为主, 以新金厂、老金厂、210、南金山等金矿床代表, 其中, 新金厂、老金厂和南金山是现已发现同类矿床中规模最大和品位最高的, 现阶段正在开采(陈祖伊等, 1993; 崔惠文等, 1996; 聂凤军等, 1996,2002a,b; 曾长华等, 2002)。

西秦岭造山带的成矿作用可分为 4 个阶段, 中新元古代、早古生代、晚古生代和中生代。中新元古代主要形成与海相火山−沉积作用有关的铁、锰、

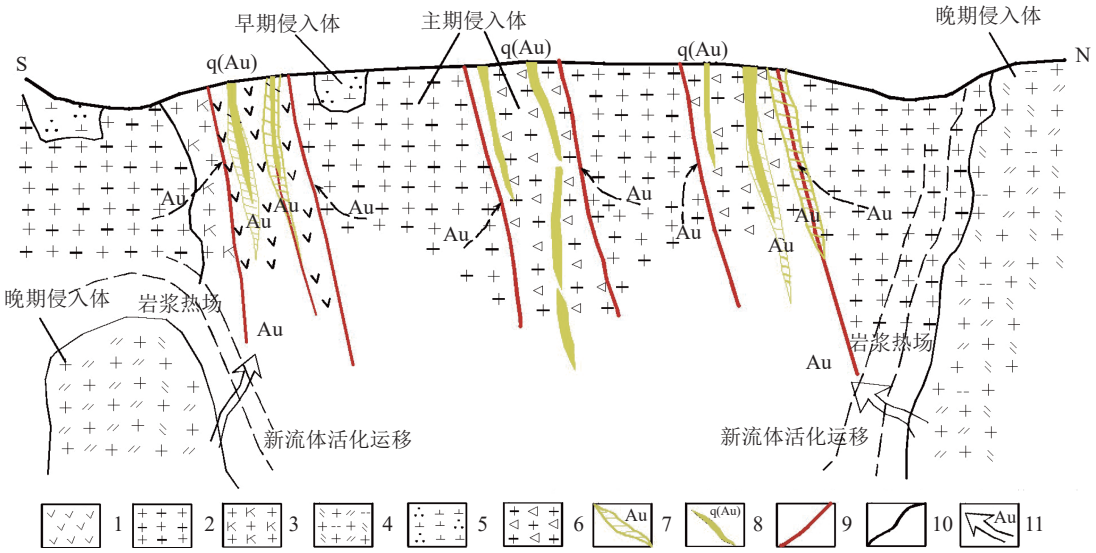


图 11 北山南带岩浆热液型金矿区域成矿模式图 (据王玉玺等, 2019 修改)

Fig. 11 Metallogenic model of magmatic-hydrothermal type gold deposit along the southern belt of Beishan

1—中酸性火山岩; 2—斑状花岗岩; 3—正长花岗岩; 4—黑云母二长花岗岩; 5—石英闪长岩; 6—蚀变碎裂花岗岩; 7—破碎蚀变岩型金矿体; 8—含金石英脉; 9—断层; 10—侵入界线; 11—含矿热液来源及运移方向

金、钴等多金属矿床, 以文县筏子坝铜-金矿床较具代表性。早古生代主要在还原环境中沉积了一套含碳硅质建造, 发育有钒磷锰银矿床, 尤以拉尔玛金矿为代表, 产出于具有生物沉积作用的黑色炭硅质岩系。晚古生代和中新生代, 在西秦岭地区发育大量中酸性岩浆侵入和陆内断陷盆地火山活动, 形成了一系列金矿床, 礼县一带的“五朵金花”、夏河—合作一带近东西向分布的闪长玢岩、玛曲-忠曲多个岩体等岩浆岩集中分布区均与金矿成矿密切相关, 现已发现的百吨以上金矿床有 5 个。因此, 西秦岭地区不同金矿床的成矿地质背景、成矿时代、物质来源可能存在一定差异, 但其形成大都经历了晚古生代—中生代西秦岭强烈的造山作用, 这一阶段的构造-岩浆活动对金矿成矿作用具有重要意义。

甘南地区主要金、铜、铅锌、银矿为一套与印支期中酸性侵入岩有关的多金属矿成矿系统。斑岩、矽卡岩型金铜矿和低温热液金矿南北分布的差异性特征, 可能是由于产于成矿地质体不同位置造成的。

矿化样式由浅部到深部为远程低温热液构造蚀变岩型(加甘滩金矿, 远离成矿地质体, 受区域断裂控制)→低温热液构造蚀变岩型(早子沟金矿, 与成矿地质体上部早期岩脉(体)相伴产出的蚀变岩型, 构造+脉岩)→直立水压裂隙石英脉型(完安囊金矿, 岩体顶部)→爆破角砾岩-热液脉型(老豆金矿, 年木耳铜矿, 岩体顶部)→接触交代矽卡岩型(德乌鲁铜矿)→斑岩型(年木耳铜矿、龙德岗铜矿)(图 12)。

7 结 论

(1)甘肃省分布 10 个构造岩浆岩带, 也是金矿床主要分布区, 岩浆作用金矿床类型有岩浆型矿床、接触交代型矿床、斑岩型矿床、岩浆热液型矿床和火山岩型矿床五大类。与岩浆作用金矿有成因联系的中酸性侵入岩, 其岩浆源区岩石变质程度往往相对较高, 多显示壳源重熔型或壳幔混熔型特征。这类花岗岩的分布受深大断裂带控制, 围岩岩性和时代变化较大, 金矿类型有构造蚀变岩、热变质晕、斑(玢)岩、石英脉、矽卡岩型等。

(2)岩浆作用金矿床的不同成矿类型, 均与构造-岩浆活动有必然的成因或相关关系, 许多金矿床尤其是大型金矿床的形成与中酸性侵入岩有密切的空间关系, 岩体的侵位方式、规模、形态、热场范围等均影响金矿床的分布位置、距离、规模、矿体形态、矿石质量等。

(3)结合金矿成矿作用与岩浆活动密切关系, 在开展系统找矿工作的前期或同期, 加强中酸性侵入岩的含矿性或成矿作用研究必然对地质找矿工作具有重要指导意义。例如利用“岩浆热场”理论开展泥盆纪以来覆盖区隐伏岩体找矿, 镜质反射率大于 1 的, 是寻找岩体的有利区域, 结合气体多组分地球化

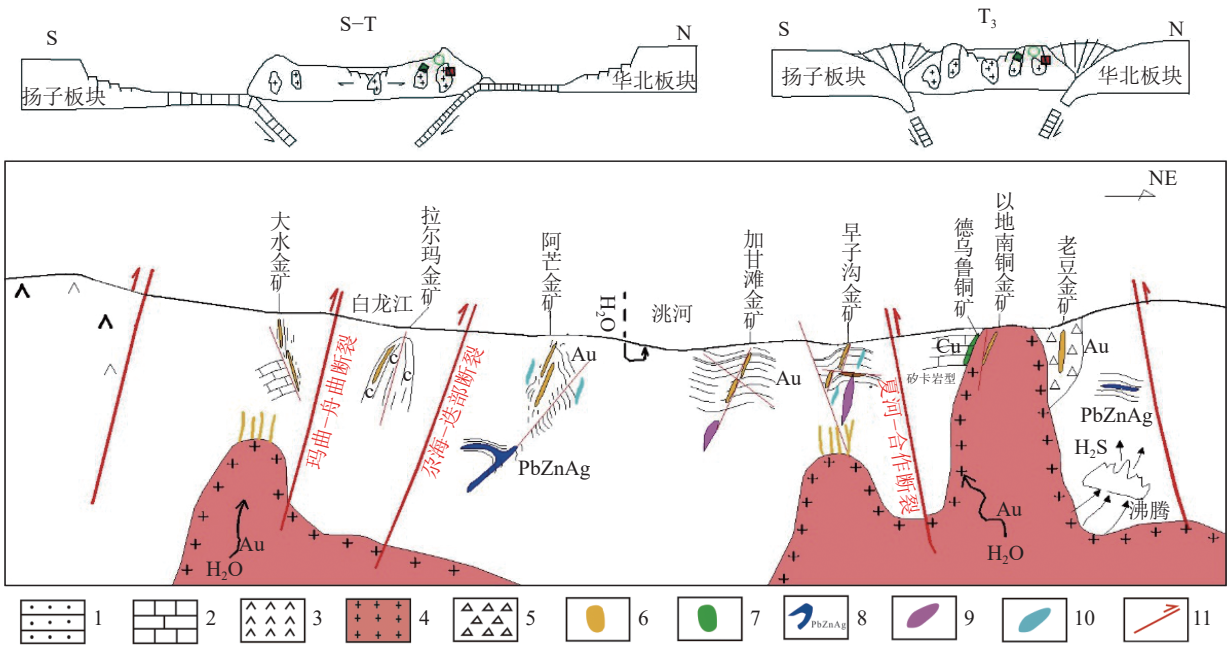


图 12　西秦岭金矿区域成矿模式图

Fig. 12　Regional metallogenic model of the gold deposit of West Qinling

1—砂岩; 2—灰岩; 3—超基性岩; 4—花岗岩; 5—角砾岩; 6—金矿; 7—铜矿; 8—铅锌银矿体; 9—石英脉; 10—闪长岩脉; 11—断层

学测量开展覆盖区金矿找矿, 既可以确定构造蚀变带的规模和蚀变强度, 又可确定与岩体相关矿化蚀变的范围。

参考文献

Duuring P, Cassidy K F, Hagemann S G. 2007. Granitoid-associated orogenic, intrusion-related, and porphyry style metal deposits in the Archean Yilgarn Craton, Western Australia[J]. Ore Geology Reviews, 32: 157−186.

Faure Q. 1986. Principles of isotope geology (second edition)[M]. New York: John Wiley & Sons Press.

Han J S, Yao J M, Chen Y J. 2014. Geochronology and geochemistry of the Dashui adakitic granitoids in the western Qinling Orogen, central China: implications for Triassic tectonic setting[J]. Geological Journal, 49(4/5): 383−401.

Li N, Chen Y J, Fletcher I R, et al. 2011. Triassic mineralization with Cretaceous overprint in the Dahu Au−Mo deposit, Xiaoqinling gold province: Constraints from SHRIMP monazite U−Th−Pb geochronology[J]. Gondwana Research, 20: 543−552.

Mao J W, Wang Y T, Li H M, et al. 2008. The relationship of mantle−derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D−O−C−S isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 33: 361−381.

Mao S, Chen Y J, Zhou Z, et al. 2014. Zircon geochronology and Hf isotope geochemistry of the granitoids in the Yangshan gold field, western Qinling, China: implications for Petrogenesis, ore genesis and tectonic stting[J]. Geological Journal, 49(4/5): 359−382.

Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation[J]. Geology, 27: 1−96.

Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 323: 183−196.

Pirajno F, Bagas L. 2008. A review of Australia's Proterozoic mineral systems and genetic models[J]. Precambrian Research, 166(1/4): 54−80.

Qin J F, Lai S C, Rodney G, et al. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China)[J]. Lithos, 112: 259−276.

Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, et al. 2002. Nature, age, and tectonic setting of granitoid−hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China[J]. Mineralium Deposita, 37: 283−305.

Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two−stage model[J]. Earth and Planetary Science Letters, 26: 207−221.

Sun W D, Li S G, Chen Y D, et al. 2002. Timing of synorogenic granotoids in the south Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling−Dabie Orogenic Belt[J]. Journal of Geology, 110: 457−468.

Wang Y X, Wang X W, Luo J M, et al. 2019. The quantitative classification of granites and their metallogenetic relations in West Qinling, Gansu Province, China[J]. Big Earth Data, 3(1): 56−66.

Yang T, Zhu L M, Zhang G W, et al. 2012. Geological and geochemical constraints on genesis of the Liziyuan gold−dominated polymetal deposit, western Qinling orogen, central China[J]. International Geology Review, 54(16): 1944−1966.

Zeng Q T, McCuaig T C, Hart J R C, et al. 2012. Structural and geochronological studies on the Liba goldfield of the West Qinling Orogen, Central China[J]. Mineralium Deposita, 47(7): 799−819.

Zhang Y, Karrech A, Schaubs P M, et al. 2012. Modelling of deformation around magmatic intrusions with application to gold−related structures in the Yilgarn Craton, Western Australia[J]. Tectonophysics, 526: 133−146.

Zhu L M, Zhang G W, Ding Z J, et al. 2011. Zircon U−Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo−bearing granitioids in Western Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit[J]. Ore Geology Review, 39: 46−62.

安国堡. 2006. 甘肃北山拾金坡金矿床地质特征及成因分析[J]. 矿床地质, 25(4): 483−490.

陈富文, 李华芹, 蔡红, 等. 1999. 新疆东部金窝子金矿成因讨论-同位素地质年代学证据[J]. 地质论评, 45(3): 247−254.

陈祖伊, 张学权, 张昭明, 等. 1993. 北山区域地质发展史和金矿区域成矿模式[J]. 铀矿地质, 9(2): 65−75.

崔惠文, 陈祖伊. 1996. 甘肃北山地区金矿地质[M]. 北京: 地质出版社: 1−20.

冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 2003. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因[J]. 矿床地质, 3: 257−263.

郭俊华, 齐金忠, 孙彬, 等. 2002. 甘肃阳山特大型金矿床地质特征及成因[J]. 黄金地质, 8(2): 15−19.

胡霭琴, 张积斌. 1982. 据天山东段 K−Ar 年龄测定结果对天山地槽热历史的探讨[J]. 中国科学 (B 辑), 4(4): 345−353.

胡霭琴, 张积斌, 刘菊英, 等. 1986. 天山东段中天山隆起带前寒武系变质时代及演化——据 U−Pb 年代学研究[J]. 地球化学, (l): 23−35.

胡朋. 2007. 北山南带构造岩浆演化与金的成矿作用[D]. 中国地质科学院博士学位论文.

江思宏, 聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 22(11): 2719−2732.

金维浚, 张旗, 何登发, 等. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 959−966.

李华芹, 陈富文, 蔡红, 等. 1999. 新疆东部马庄山金矿成矿作用同位素年代学研究[J]. 地质科学, 34(2): 251−256.

李金祥, 邓军, 吴文根, 等. 2004. 山东招远金矿集中区矿床及围岩中硫和铅同位素的研究[J]. 现代地质, 18(2): 187−192.

李通国, 黄增宝, 甄红旭, 等. 2021. 中国矿产地质志甘肃卷金矿[M]. 北京: 地质出版社: 602−620.

刘长江. 2016. 甘肃省肃北县金场沟金矿地质特征及找矿标志[J]. 甘肃科技, 31(20): 44−48.

刘伟, 潘小菲. 2006. 新疆-甘肃北山金矿南带的成矿流体和成矿机制. 岩石学报, 22(1): 171−188.

聂凤军, 江思宏, 赵省民, 等. 2000. 北山地区金矿床类型和生成演化[J]. 长春科技大学学报, 30(增刊): 21−26.

聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2002a. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社.

聂凤军, 江思宏, 赵省民, 等. 2002b. 北山地区照壁山金矿床地质特征及成因[J]. 地质科学, 37(2): 207−218.

聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2003. 北山中南带海西-印支期岩浆活动与金的成矿作用[J]. 地球学报, 24(5): 415−422.

潘小菲. 2006. 甘肃-新疆北山地区典型金矿床成矿流体及其成矿机制探讨[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文.

邵世才, 汪东波. 2001. 南秦岭三个典型金矿床的 Ar−Ar 年代及其地质意义[J]. 地质学报, 75: 106−110.

汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3): 237−243.

汤中立, 巴恩斯. 1998. 岩浆硫化物矿床成矿机制[M]. 北京: 地质出版社: 1−150.

王琦. 2006. 甘肃北山拾金坡金矿床矿物学特征[J]. 甘肃科技, 22(6): 85−89.

王玉玺, 曹海龙, 刘杰. 2012. 甘肃北山地区拾金坡式岩浆热液型金矿成矿模式建立[J]. 甘肃地质, 21(1): 12−18.

王玉玺, 张渊, 张丹青, 等. 2019. 北山拾金坡−金场沟金成矿带岩浆热液型金矿区域成矿模式的建立[J]. 甘肃地质, 28(1/2): 16−23.

闫海卿, 贺宝林, 刘巧峰, 等. 2014. 西秦岭大水金矿岩浆岩年代学、地球化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 36(1): 98−110.

殷先明, 杜玉良, 殷勇. 2005. 甘肃花岗岩类成矿作用研究与找矿方向[J]. 西北地质, 38(4): 26−31.

殷勇, 殷先明. 2009. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用[J]. 岩石学报, 25(5): 1239−1252.

殷勇. 2011. 西秦岭地区脉岩与金矿化的关系[J]. 甘肃地质, 20(1): 28−51.

袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1985. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社.

曾长华, 吴大江, 夏文彬, 等. 2002. 北山成矿带金矿成矿规律与远景[J]. 新疆地质, 20(3): 219−223.

张帆, 刘树文, 李秋根, 等. 2009. 秦岭西坝花岗岩 LA−ICP−MS 锆石 U−Pb 年代学及其地质意义[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 45(5): 833−840.

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1−855.

张旗, 殷先明, 殷勇, 等. 2009, 西秦岭与埃达克和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, 25(12): 3103−3122.

张旗, 金维浚, 李承东, 等. 2015. 利用镜质体反射率方法寻找隐伏岩体——岩浆热场应用的一个实例[J]. 大地构造与成矿学, 39(6): 1094−1107.

张翔, 戴霜, 刘建宏, 等. 2017. 甘肃西秦岭金矿成矿与找矿研究[M]. 北京: 地质出版社.

张翔, 戴霜, 黄万堂, 等. 2019. 甘肃省玛曲县大水金矿原生金矿石的发现及意义[J]. 地质与勘探, 55(2): 484−495.

张新虎, 刘建宏, 梁明宏, 等. 2013. 甘肃省区域成矿与找矿[M]. 北京: 地质出版社: 214−371.

郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.

朱赖民, 丁振举, 姚书振, 等. 2009. 西秦岭甘肃温泉钼矿床成矿地质事件及其成矿构造背景[J]. 科学通报, 54(16): 2337−2347.