



引文格式: 秦志军, 汪兴韦, 周豹, 等. 大别造山带双庙关金矿床成矿时代与成矿背景[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 207-218. DOI: 10.12401/j.nwg.2023125

Citation: QIN Zhijun, WANG Xingwei, ZHOU Bao, et al. Geochronology and Geodynamic Setting of the Shuangmiaoguan Gold Deposit, Dabie Orogen[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 207-218. DOI: 10.12401/j.nwg.2023125

大别造山带双庙关金矿床成矿时代与成矿背景

秦志军^{1,2}, 汪兴韦^{3,*}, 周豹^{1,2}, 刘嘉^{1,2}, 杜文洋^{1,2}, 曾小华^{1,2}, 李奥冰³, 张维康³

(1. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 2. 湖北省地质勘查工程技术研究中心, 湖北 武汉 430034;
3. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 湖北省麻城市双庙关金矿床隶属于秦岭-大别成矿带, 近年来找矿进展显著, 但成矿时代和成矿背景尚不清楚。矿区广泛发育新元古代片麻状二长花岗岩和变辉长岩, 沿 NE-NNE 向和 NW 向断裂产出 11 条金矿(化)体。基于详细野外调查发现, 矿区北部钾长花岗岩体、花岗斑岩体均被 NE 向含矿断裂穿切, 为成矿前岩浆活动产物, 矿区中部的闪长岩脉则穿切矿体, 晚于成矿事件。钾长花岗岩体、花岗斑岩体和闪长岩脉的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 (133.6±1.1) Ma、(127.9±1.6) Ma 和 (126.6±1.3) Ma。因此, 双庙关金矿床应形成于 128~126 Ma, 与小秦岭、熊耳山、桐柏等矿集区金爆发式成矿的时间一致, 与中国东部岩石圈破坏导致的构造-岩浆事件密切相关。

关键词: 双庙关; 金矿床; 大别造山带; 成矿时代; 岩石圈破坏

中图分类号: P618.67

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0207-12

Geochronology and Geodynamic Setting of the Shuangmiaoguan Gold Deposit, Dabie Orogen

QIN Zhijun^{1,2}, WANG Xingwei^{3,*}, ZHOU Bao^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, DU Wenyang^{1,2},
ZENG Xiaohua^{1,2}, LI Aobing³, ZHANG Weikang³

(1. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China; 2. Hubei Research Center of Geological Exploration and Engineering Technology, Wuhan 430034, Hubei, China; 3. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The Shuangmiaoguan gold deposit from the Macheng City, Hubei Province is in the Dabie orogenic belt. Significant prospecting progress for this gold deposit has been achieved in recent years. However, the ore-forming age and geodynamic setting of this deposit remain unclear. The Neoproterozoic gneissic monzogranite and meta-gabbro are pervasive in the mining area. Eleven gold orebodies have been discovered in the NE, NNE and NNW-trending faults. The field investigations show that the intrusions of K-feldspar granite and granite porphyry in the north of Shuangmiaoguan gold deposit were cut by NE-trending ore-bearing faults, and

收稿日期: 2022-12-10; 修回日期: 2023-10-15; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: “湖北省麻城市双庙关矿区金矿普查项目”(2019-16), “湖北省重要成矿区成矿地质条件及控矿因素研究”(KJ2022-10), “湖北省麻城西张店-罗田三里畈地区金银成矿预测及靶区优选”(KJ2022-47), “鄂东南铜绿山矿田三维地质建模与找矿预测数字化系统开发应用”联合资助。

作者简介: 秦志军(1978-), 男, 正高级工程师, 主要从事矿产地质调查与研究。E-mail: 45577893@qq.com。

* 通讯作者: 汪兴韦(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事成矿规律与成矿预测研究。E-mail: xwwang142857@163.com。

the diorite dikes from the middle section of gold deposit interpenetrate across the ore bodies. suggests. Zircon U-Pb ages of the K-feldspar granite, granitic porphyry and diorite dikes are (133.6±1.1) Ma, (127.9±1.6) Ma and (126.6±1.3) Ma, respectively. Additionally, field investigations show that the intrusions of K-feldspar granite and granite porphyry in the north of Shuangmiaoguan gold deposit were cut by ore-bearing faults, and the diorite dikes from the middle section of gold deposit interpenetrate across the ore bodies. This suggests that the Shuangmiaoguan gold deposit should be formed between 128 and 126 Ma. This time is broadly similar to that time of gold mineralization of the Xiaoqinling, Xiong'ershan and Tongbai gold districts. These deposits were coeval with the early Cretaceous widespread gold mineralization. They should be the result of tectonism and Magmatism arised from lithosphere destruction in the eastern China.

Keywords: Shuangmiaoguan; gold deposit; Dabie orogenic belt; metallogenic epoch; lithospheric destruction

秦岭-桐柏-大别造山带是扬子和华北克拉通在晚三叠世碰撞拼合的产物,经历了造山期SN向挤压和造山后的伸展作用(赵新福等,2019)。自侏罗纪以来,该区受古太平洋板块俯冲的影响,和整个中国东部一起经历了强烈的岩石圈改造和破坏(张国伟等,1995;毛景文,2003;马宏卫,2008)。与复杂的构造演化相对应,区域上构造-岩浆活动强烈,矿产种类丰富,形成了小秦岭、熊耳山、桐柏、大别等系列多金属矿集区(张国伟等,2001;马骁等,2016;高峰等,2017;朱雪丽等,2021)。造山带东部的大别地区因产出汤家坪、沙坪沟等世界级的斑岩型钼矿床而闻名于世(曾小华等,2021),金多金属矿床(点)也广泛发育(徐江熹等,2020;曾小华等,2020)。20世纪末,鄂东北地质队等勘查单位先后在大别地区发现东湾、熊家坳等一批金矿点,并探获白云、陈林沟等中小型脉型金矿床。2010年以来,笔者所在团队先后在该区开展了1:5万矿产地质调查和金多金属矿调查评价工作,新发现郑家塘、大松树岗、大河铺、双庙关等一批金矿点(图1)。2017~2020年,笔者所在团队重点对该区双庙关地区开展了金矿普查工作,并在双庙关金矿区探获11条金矿(化)体,初步估算金推断资源量为1558 kg,伴生银推断资源量为16565 kg。双庙关金矿床作为大别地区脉状金矿床的典型代表,但其成矿时代和成矿背景尚不清楚,这不仅限制了对该矿床成因的准确认识,更在一定程度上阻碍了区域上同类矿床的找矿勘查工作部署。鉴于此,笔者所在团队于2021年对双庙关矿区相关地质体与金矿化的时空关系进行了系统野外调查,利用LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄间接限定了矿床的成矿时代,进一步与区域上金矿床成矿时代和构造-岩浆活动时代进行对比研究,分析了金的成矿构造背景。以研究成果为指导,团队还于近

期在双庙关地区新发现多处具有高Au、Ag品位矿化的找矿靶区,指示该区具有寻找中-大型金矿床的潜力。

1 区域地质背景

大别造山带地处秦岭-桐柏-大别造山带东部,其东部以北北东向郟-庐断裂带为界,北部和南部分别以NW-NNW向的明港-六安断裂带、襄樊-广济断裂带与华北克拉通、扬子克拉通相接(图1)。大别造山带主要由原岩性质不同的各类变质岩和侵入其中的花岗岩类及镁铁质-超镁铁质岩类组成(曹正琦等,2023),整体构成核部为中深变质杂岩体、南北两侧分布浅变质岩及未变质盖层的格局。根据断裂构造及地质单元岩性的差异,通常将大别造山带划分为5个单元,从北至南依次为北淮阳低温低压绿片岩相带(BHYZ)、北大别高温超高压构造带(NDZ)、中大别中温超高压榴辉岩相带(CDZ)、南大别低温超高压榴辉岩相带(SDZ)及宿松低温高压蓝片岩相带(SZ)(吴皓然等,2020),双庙关金矿床即位于中大别中温超高压榴辉岩相带内(图1)。

区域上地层出露时代跨度较大,从新太古界至新生界均有出露,主要由(自北向南)栾川群、宽坪群、二郎坪群、秦岭群、梅山群、信阳群、苏家河群、佛子岭群、庐镇关群、红安群、大别/桐柏杂岩群、随县群等组成。区域内构造发育,以NW向、NNE、近SN向断裂为主,NW向为区域性大断裂,往往控制该区矿床的分布,如信阳-舒城断裂、桐柏-桐城断裂等;NNE、近SN向断裂以郟庐断裂带为代表,次级断裂主要有商城-麻城断裂、浠水-桐城断裂等;NE向、NW向和近EW向等次级断裂也较为发育,总体构造格局呈棋盘格子状。区域内岩浆岩活动频繁,在多个地质时期

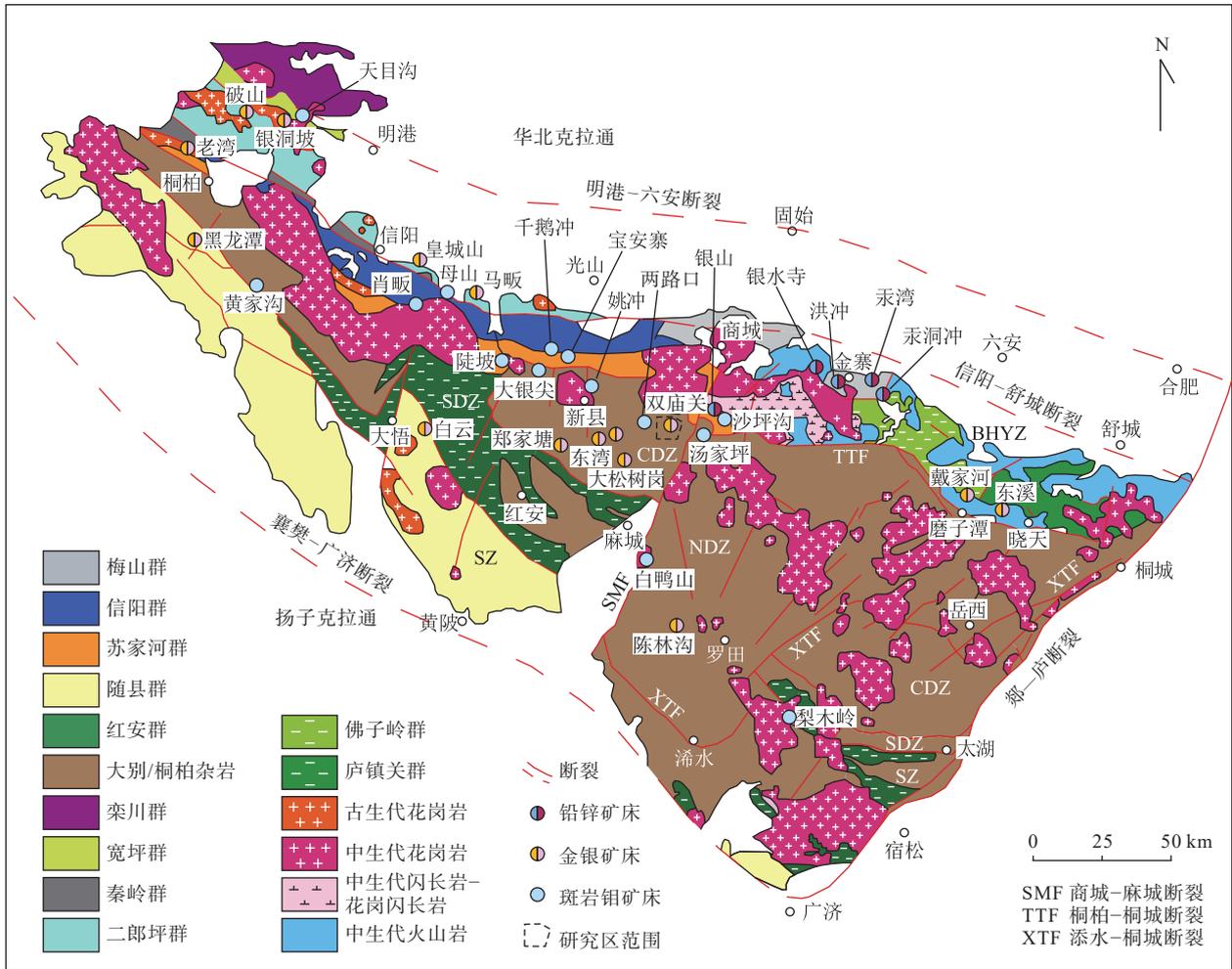


图1 桐柏-大别造山带地质简图(据吴皓然等, 2020 修)

Fig. 1 Geological sketch of the Tongbai-Dabie orogenic belt

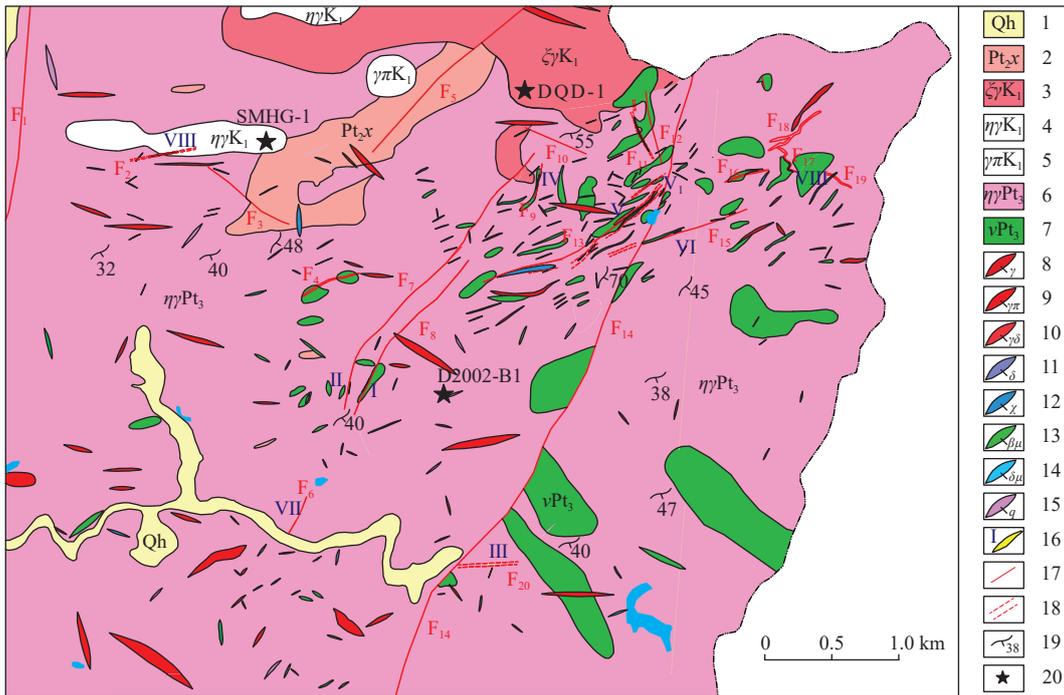
均有不同程度的岩浆活动, 包括了古生代花岗岩, 中生代闪长岩-花岗闪长岩、花岗岩及中生代火山岩等。

区域上矿产种类丰富, 广泛发育金、银、铅、锌、钼等多金属矿床(点), 空间上这些矿床(点)主要沿北西向的区域深大断裂分布, 代表性矿床有破山、银洞坡、老湾等大型金银多金属矿床; 银山、银水寺、汞湾、汞洞冲等铅锌多金属矿床; 汤家坪、沙坪沟等斑岩型钼矿床。成矿年代学研究表明, 这些矿床主要形成于晚泥盆世(380~370 Ma)和早白垩世(140~120 Ma), 矿床成因类型包括岩浆热液型金银钼矿床、与火山-次火山作用有关金银铅锌矿床和斑岩-矽卡岩型钼多金属矿床等(徐江嫵等, 2020; 曾小华等, 2020, 2021; 金伟衍, 2021; 柴明春, 2021)。

2 矿床地质特征

矿区出露地层主要为中元古界西张店基性火山岩

组和第四系(图 2)。西张店基性火山岩组出露于矿区西北部, 呈透镜状、孤岛状及不规则状分布。岩性为绿帘黑云斜长角闪(片)岩、斜长角闪岩、含石英绿帘角闪岩、黑云斜长变粒岩夹黑云二长变粒岩、条带状石英绿帘岩、白云钠长片麻岩、浅粒岩等。其原岩为一套基性火山岩为主夹陆源碎屑沉积建造, 显示断裂谷环境沉积特征。第四系仅小规模出露于矿区西南部河流、沟谷地带。以坡积物及河流冲积物为主, 其成分多为石英岩、花岗岩、浅粒岩、斜长角闪岩、片麻岩等。按照空间展布特征, 可将矿区断裂构造划分为 NE-NNE 向、NW 向以及近 EW 向 3 组, 其中 NE-NNE 向断裂在矿区占主导地位, 如延伸较长的断裂 F₇、F₈ 和贯穿矿区南北的断裂 F₁₄ 等; NW 向断裂规模较小, 如断裂 F₁₀、F₁₇ 等; 近 EW 向断裂数量最少, 仅有断裂 F₂、F₂₀ 等寥寥几条小规模出露。矿区岩浆岩分布广泛, 按时代可将区内侵入岩分为新元古代片麻状二长花岗岩、变辉长岩和中生代细粒钾长花岗岩、中粒二长花岗岩、



1: 第四系; 2: 中元古界西张店基性火山岩(岩)组; 3: 早白垩世细粒钾长花岗岩; 4: 早白垩世中粒二长花岗岩; 5: 早白垩世花岗岩斑岩; 6: 新元古代片麻状二长花岗岩; 7: 新元古代变辉长(绿)岩; 8: 花岗岩脉; 9: 花岗斑岩脉; 10: 花岗闪长岩脉; 11: 闪长岩脉; 12: 煌斑岩脉; 13: 辉长(绿)岩脉; 14: 闪长玢岩脉; 15: 石英脉; 16: 金矿(化)体及编号; 17: 断裂; 18: 破碎蚀变带; 19: 片麻理产状; 20: 采样位置

图2 双庙关金矿床地质图(据杜文洋等, 2022)

Fig. 2 Geological Map of the Shuangmiaoguan gold deposit

花岗斑岩。矿区内岩脉主要有变辉长(绿)岩脉、闪长岩脉等,产状较为复杂,主要呈NW、NE、EW向展布。

截至目前,矿区内已发现11条金矿(化)体,其中I、II、IV、V、V₁、VI、VII号矿体产于NE-NNE向破碎蚀变带中,III、VIII号矿体产于近EW向的石英脉中,IX、X号矿体产于NNW向破碎蚀变带中。单条矿体

长可达360 m,斜深可达290 m,估算推断金金属量为1 558 kg,伴生银金属量为16 565 kg, Au的平均品位为6.3~17.1 g/t, Ag的平均品位为30.4~185 g/t,为该区域少有的高品位金多金属矿床。区内X矿体较为典型,该矿体位于矿区东北部16#线北端,地表由探槽TC29和TC31控制,深部由ZKS04孔控制(图3)。矿

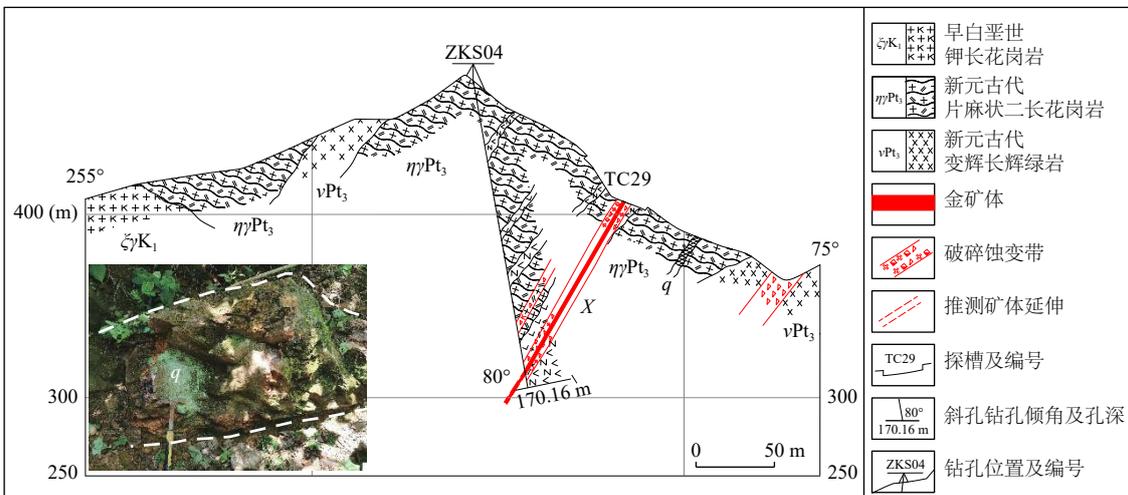


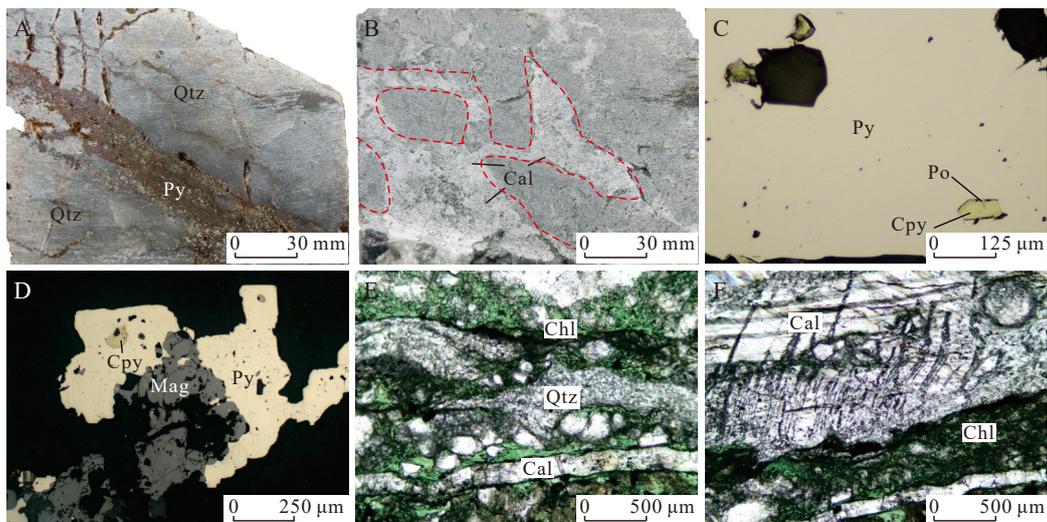
图3 双庙关矿区PM11 勘查线剖面图及野外露头特征图(据杜文洋等, 2022)

Fig. 3 Cross-section of PM11 in the Shuangmiaoguan gold deposit and characteristics of field outcrops

体呈脉状产于 NNW 向的破碎带中, 倾向为 $251^{\circ}\sim 258^{\circ}$, 倾角为 $42^{\circ}\sim 63^{\circ}$, 平均倾角为 60° ; 矿体长约为 260 m, 斜深为 110 m, 赋存标高为 297~406 m。矿体厚度为 0.80~1.13 m, 平均为 0.98 m, 厚度变化系数为 30%。矿体 Au 品位为 7.31~38.00 g/t, 平均为 17.10 g/t, 品位变化系数为 91%, 伴生 Ag 平均品位为 185.16 g/t。

矿区矿石中金属矿物主要有黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等; 非金属

矿物主要有石英、钾长石、绢云母、绿泥石、绿帘石、方解石。矿石构造类型以脉状-网脉状构造、浸染状构造为主, 次为细小团块状构造、角砾状构造等。矿石结构类型主要有粒状结构、填隙结构、包含结构、交代残余结构、环带结构等。常见的蚀变有钾化、硅化、黄铁绢英岩化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等, 其中绿泥石化与成矿关系密切, 而碳酸盐化往往意味着成矿作用的结束(图 4)。



a.早期石英被黄铁矿细脉穿插; b.晚期碳酸盐化; c.黄铜矿充填于黄铁矿裂隙, 并伴生磁黄铁矿; d.黄铁矿裂隙间被磁铁矿交代, 另见黄铁矿包裹黄铜矿; e.方解石细脉切穿早期石英周围发育绿泥石; f.方解石脉边缘发育绿泥石化; Qtz: 石英; Py: 黄铁矿; Cpy: 黄铁矿; Po: 磁黄铁矿; Mag: 磁铁矿; Cal: 方解石; Chl: 绿泥石

图4 双庙关金矿床典型矿石特征图

Fig. 4 Typical ores in the Shuangmiaoguan gold deposit.

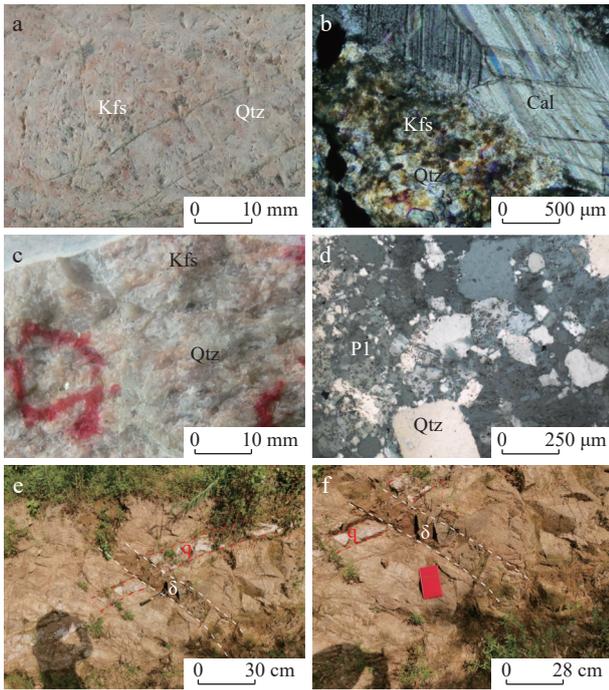
3 矿区岩浆岩与金成矿的时间关系

前已述及, 区内中生代岩浆岩主要包括细粒钾长花岗岩、中粒二长花岗岩、花岗斑岩及各类脉岩。其中, 细粒钾长花岗岩主要分布于矿区北部, 岩石呈肉红色, 细粒花岗结构、局部具交代结构, 块状构造, 主要组成矿物为钾长石(50%~60%)、斜长石(15%~20%)、石英(20%~30%)及少量黑云母(5%), 常见副矿物有榍石、磷灰石等。该岩体被区内北东向含矿构造切割(图 2), 局部可见明显钾化、碳酸盐化(图 5a、图 5b), 表明其侵位早于区内金成矿作用。

早白垩世花岗斑岩主要分布于矿区北部, 岩石呈浅肉红色, 具斑状结构, 块状构造, 斑晶含量约为 60%, 主要组成矿物为钾长石(20%~30%)、斜长石(10%~20%)、石英(15%)、黑云母(5%)。其中, 钾

长石斑晶以半自形板状为主, 粒径为 0.5~2 mm, 具卡式双晶; 斜长石斑晶以半自形板状为主, 粒径为 0.3~2.5 mm, 具聚片双晶; 石英斑晶多为他形粒状, 无色透明, 粒径为 0.2~2 mm; 黑云母斑晶呈自形板状, 粒径为 0.5~1.5 mm; 岩石基质含量约为 40%, 多为隐晶质, 矿物成分与基质相同。副矿物主要为磷灰石、锆石和磁铁矿等(图 5c、图 5d)。在前期野外构造调查中, 可见成矿后节理穿切花岗斑岩脉, 表明其侵位早于区内金成矿作用。

闪长岩脉零散分布于矿区中部, 岩石呈深灰-辉绿色, 细粒半自形粒状结构, 块状构造, 主要组成矿物为斜长石(50%~60%)、普通角闪石(10%~15%)、石英(5%~10%)、斜方辉石(10%)、黑云母(5%), 可见少量锆石和磷灰石等副矿物。局部有硫化物产出, 区内也可见闪长岩脉穿切早期含石英英脉(图 5e、图 5f), 表明其侵位晚于区内金成矿作用。



a.早白垩世细粒钾长花岗岩; b.图A正交镜下照片; c.早白垩世花岗岩斑岩; d.图C反光镜下照片; e、f.成矿后闪长岩脉切穿石英英脉; Qtz: 石英; Pl: 斜长石; Cal: 方解石; q: 含黄铁矿石英脉; δ: 成矿后闪长岩脉

图5 早白垩世细粒钾长花岗岩、花岗斑岩及闪长岩脉特征图

Fig. 5 Characteristics of early Cretaceous fine-grained K-feldspar granite, granite porphyry and diorite dikes

4 样品采集及分析方法

在野外和室内观察的基础上,选取双庙关金矿区出露的3类具有代表性的岩体开展U-Pb定年工作,即成矿前钾长花岗岩(DQD-1)、成矿前花岗斑岩(SMHG-1)和成矿后闪长岩(D2002-B1),具体采样位置见图2。

样品的破碎、分选、挑选、制靶工作及锆石阴极发光(CL)显微照相均在中国科学院广州地球化学研究所完成。按照标准程序破碎、用浮选和电磁法进行单矿物分选,并在双目镜下挑选透明度较好、具有良好晶形、无明显裂隙和包裹体的锆石制靶,将锆石靶打磨抛光,拍摄锆石透射光、反射光照片和阴极发光(CL)照片。

锆石U-Pb同位素定年和微量元素含量测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪

(LA-ICP-MS)进行微区原位U-Pb同位素测定。本次分析的激光束斑为32 μm,仪器配置和实验流程见有关文献(Zong et al., 2017),U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用国际标准锆石91500作外标进行同位素分馏校正,以玻璃标准物质NIST610作外标进行微量元素分馏校正,以GJ-1作为监控样进行分析。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal(Liu et al., 2008, 2010)完成。锆石样品的U-Pb年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用Isoplot/Ex_ver3完成。

5 分析结果

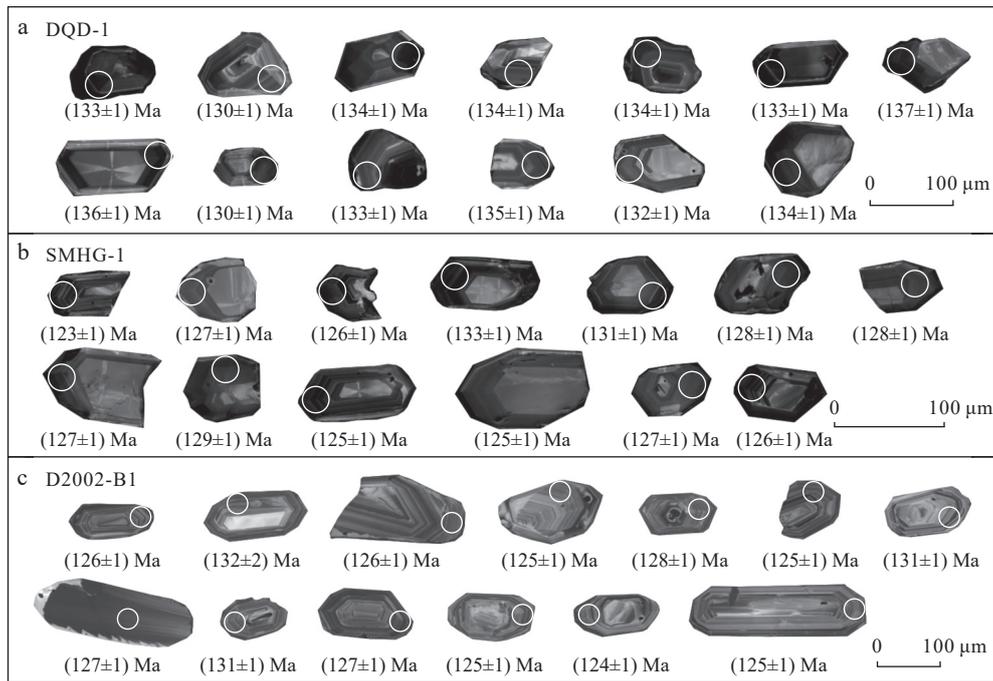
3个样品的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分析结果见表1。钾长花岗岩(DQD-1)的锆石颗粒的阴极发光(CL)特征如图6a,锆石颗粒主要呈柱状,无色透明,锆石晶体大小为80~200 μm,长宽比为1:1~2:1。锆石Th含量为 $400 \times 10^{-6} \sim 3693 \times 10^{-6}$,U含量为 $357 \times 10^{-6} \sim 2066 \times 10^{-6}$,阴极发光图像显示锆石具有明显的核幔结构,幔部均显示明显的震荡环带,且锆石微量元素Th/U值(0.92~1.97)均大于0.4,指示锆石为岩浆成因(Rubatto, 2002; GrantMatthew, 2009; 王梓桐等, 2022; 柳永正等, 2023; 杨济远等, 2023)。本次研究对钾长花岗岩的锆石颗粒共分析22个锆石测点,锆石测点数据高度集中,在锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据谱和图上(图7a),数据点均落在谱和线上或其附近,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄群为138~130 Ma,加权平均年龄为(133.6±1.1)Ma(MSWD=2.9),该年龄代表了钾长花岗岩岩体的侵位年龄,表明钾长花岗岩形成时间约为133 Ma。

样品SMHG-1(花岗斑岩)CL特征如图6b,锆石主要呈柱状,无色透明,晶体长轴多为50~250 μm,长宽比为1:1~3:1,锆石的Th含量为 $248 \times 10^{-6} \sim 1963 \times 10^{-6}$,U含量为 $330 \times 10^{-6} \sim 852 \times 10^{-6}$,阴极发光图像显示锆石具有明显的核幔结构,幔部均显示明显的震荡环带,且锆石微量元素Th/U值为0.77~2.54,均大于0.4,指示锆石为岩浆成因。本次研究对花岗斑岩的锆石颗粒共分析14个锆石测点,锆石测点数据高度集中,在锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据谱和图上(图7b),数据点均落在谱和线上或其附近,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄群为135~125 Ma,加权平均年龄为(127.9±1.6)Ma

表 1 双庙关金矿床岩浆岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素数据表

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic of the Shuangmiaoguan gold deposit

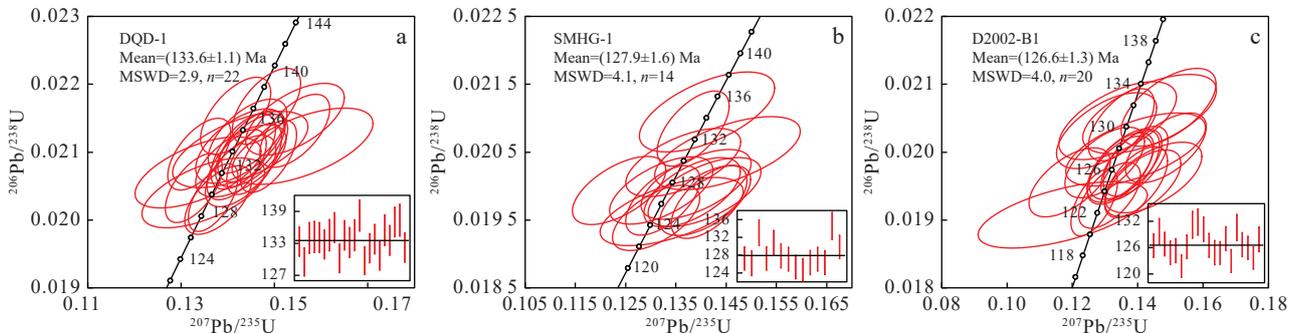
测试点	元素含量 (10 ⁻⁶) 及比值				同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Pb	U	Th	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
DQD.1	51	1834	2914	1.63	0.02090	0.000214	0.14563	0.002406	0.05055	0.000806	133	1	138	2	220	37	96%
DQD.2	23	869	1336	1.58	0.02029	0.000207	0.13799	0.002924	0.04922	0.001005	130	1	131	3	158	48	98%
DQD.3	35	1266	1888	1.53	0.02101	0.000227	0.14333	0.002836	0.04944	0.000912	134	1	136	3	169	43	98%
DQD.4	12	413	796	1.98	0.02104	0.000230	0.14265	0.005918	0.04915	0.001936	134	1	135	6	155	92	99%
DQD.5	20	795	864	1.12	0.02102	0.000218	0.14513	0.003156	0.05002	0.001061	134	1	138	3	196	49	97%
DQD.6	37	1420	1808	1.31	0.02082	0.000211	0.14194	0.002597	0.04946	0.000879	133	1	135	2	170	42	98%
DQD.7	10	390	400	1.05	0.02109	0.000229	0.15605	0.006170	0.05346	0.002033	135	1	147	6	349	86	90%
DQD.8	28	971	1423	1.50	0.02131	0.000219	0.15439	0.003059	0.05249	0.001007	136	1	146	3	307	44	93%
DQD.9	9	357	509	1.46	0.02040	0.000210	0.13477	0.005367	0.04781	0.001888	130	1	128	5	90	94	98%
DQD.10	27	1053	1092	1.06	0.02109	0.000214	0.14512	0.002947	0.04988	0.000985	135	1	138	3	190	46	97%
DQD.11	14	583	524	0.92	0.02087	0.000218	0.14280	0.003967	0.04973	0.001365	133	1	136	4	182	64	98%
DQD.12	15	606	642	1.09	0.02109	0.000224	0.14260	0.003867	0.04878	0.001256	135	1	135	4	137	60	99%
DQD.13	24	923	977	1.09	0.02167	0.000229	0.14831	0.002985	0.04958	0.000948	138	1	140	3	175	45	98%
DQD.14	58	2066	3693	1.83	0.02033	0.000204	0.13688	0.002191	0.04883	0.000752	130	1	130	2	140	36	99%
DQD.15	11	431	445	1.06	0.02070	0.000213	0.13362	0.005517	0.04682	0.002011	132	1	127	5	40	103	96%
DQD.16	28	1104	1262	1.17	0.02097	0.000215	0.13391	0.002752	0.04634	0.000924	134	1	128	3	16	48	95%
DQD.17	34	1269	1852	1.50	0.02047	0.000207	0.13270	0.002497	0.04702	0.000859	131	1	127	2	50	44	96%
DQD.18	17	679	613	0.93	0.02123	0.000224	0.14425	0.003441	0.04925	0.001131	135	1	137	3	160	54	98%
DQD.19	57	1940	3589	1.90	0.02094	0.000217	0.14868	0.002479	0.05148	0.000810	134	1	141	2	262	36	94%
DQD.20	14	563	578	1.05	0.02148	0.000216	0.15441	0.004297	0.05208	0.001416	137	1	146	4	289	62	93%
DQD.21	27	945	1532	1.66	0.02154	0.000233	0.14171	0.003082	0.04766	0.000979	137	1	135	3	83	49	97%
DQD.22	23	955	959	1.03	0.02072	0.000215	0.14278	0.003080	0.04988	0.001020	132	1	136	3	189	48	97%
SMHG.1	11	494	393	0.82	0.01994	0.000203	0.13208	0.004193	0.04808	0.001519	127	1	126	4	103	75	98%
SMHG.2	25	791	1963	2.55	0.01977	0.000218	0.14156	0.003072	0.05200	0.001091	126	1	134	3	286	48	93%
SMHG.3	26	852	1714	2.06	0.02085	0.000226	0.13842	0.002923	0.04813	0.000968	133	1	132	3	106	48	98%
SMHG.4	12	504	532	1.08	0.01993	0.000205	0.12367	0.003795	0.04511	0.001384	127	1	118	4	-	-	92%
SMHG.5	8	330	248	0.77	0.02049	0.000219	0.14524	0.005920	0.05152	0.002078	131	1	138	6	264	93	94%
SMHG.6	10	448	350	0.80	0.02003	0.000210	0.13900	0.004480	0.05036	0.001613	128	1	132	4	212	74	96%
SMHG.7	13	525	650	1.27	0.01991	0.000209	0.13825	0.003915	0.05029	0.001383	127	1	131	4	209	64	96%
SMHG.8	9	331	621	1.93	0.01963	0.000205	0.13415	0.005827	0.04965	0.002127	125	1	128	6	178	100	98%
SMHG.9	14	584	698	1.23	0.01953	0.000197	0.13106	0.003544	0.04859	0.001294	125	1	125	3	128	63	99%
SMHG.10	15	594	790	1.36	0.01979	0.000212	0.14083	0.003701	0.05144	0.001305	126	1	134	4	260	58	94%
SMHG.11	10	435	386	0.91	0.01991	0.000209	0.14070	0.004586	0.05106	0.001630	127	1	134	4	244	74	94%
SMHG.12	20	709	1393	2.01	0.01979	0.000210	0.13245	0.003027	0.04857	0.001080	126	1	126	3	127	52	99%
SMHG.13	9	391	320	0.84	0.02109	0.000240	0.14117	0.005497	0.04842	0.001815	135	2	134	5	120	88	99%
SMHG.14	10	434	399	0.94	0.02035	0.000205	0.13649	0.004670	0.04860	0.001658	130	1	130	4	129	80	99%
D2002-B1.1	15	642	530	0.85	0.01981	0.000208	0.13769	0.003671	0.05051	0.001346	126	1	131	3	218	62	96%
D2002-B1.2	9	372	289	0.80	0.02032	0.000228	0.13047	0.006265	0.04640	0.002120	130	1	125	6	19	110	95%
D2002-B1.3	16	502	1297	2.65	0.01987	0.000209	0.13940	0.004045	0.05084	0.001448	127	1	133	4	234	66	95%
D2002-B1.4	10	422	379	0.92	0.01956	0.000207	0.11916	0.005076	0.04435	0.001856	125	1	114	5	-91	103	91%
D2002-B1.5	7	321	200	0.64	0.01963	0.000213	0.14484	0.006047	0.05344	0.002191	125	1	137	6	347	93	90%
D2002-B1.6	5	195	315	1.66	0.01908	0.000199	0.11703	0.010597	0.04381	0.004059	122	1	112	10	-	-	91%
D2002-B1.7	11	477	451	0.97	0.01977	0.000209	0.13473	0.004159	0.04937	0.001497	126	1	128	4	166	71	98%
D2002-B1.8	6	256	252	1.01	0.02056	0.000237	0.14370	0.008356	0.05065	0.002827	131	2	136	8	225	129	96%
D2002-B1.9	9	390	324	0.85	0.02066	0.000234	0.14941	0.005934	0.05231	0.001991	132	1	141	6	299	87	92%
D2002-B1.10	13	549	466	0.87	0.02040	0.000217	0.13500	0.004125	0.04800	0.001420	130	1	129	4	99	70	98%
D2002-B1.11	11	481	353	0.75	0.01982	0.000212	0.13625	0.004554	0.04993	0.001624	127	1	130	4	192	76	97%
D2002-B1.12	17	758	688	0.93	0.01956	0.000214	0.13953	0.003941	0.05154	0.001350	125	1	133	4	265	60	93%
D2002-B1.13	9	420	329	0.80	0.01954	0.000201	0.14158	0.004753	0.05252	0.001729	125	1	134	5	308	75	92%
D2002-B1.14	10	415	404	1.00	0.02006	0.000210	0.14861	0.005042	0.05369	0.001770	128	1	141	5	358	74	90%
D2002-B1.15	17	766	628	0.84	0.01926	0.000202	0.12670	0.002916	0.04763	0.001053	123	1	121	3	81	52	98%
D2002-B1.16	6	269	185	0.70	0.02046	0.000233	0.13383	0.007355	0.04739	0.002536	131	1	128	7	69	127	97%
D2002-B1.17	9	368	340	0.95	0.01985	0.000212	0.12990	0.004988	0.04759	0.001814	127	1	124	5	79	90	97%
D2002-B1.18	12	531	430	0.83	0.01974	0.000204	0.13454	0.004091	0.04941	0.001468	126	1	128	4	167	69	98%
D2002-B1.19	13	565	536	0.97	0.01937	0.000198	0.13136	0.003851	0.04904	0.001400	124	1	125	4	150	67	98%
D2002-B1.20	5	208	195	0.96	0.02004	0.000219	0.13937	0.008753	0.05048	0.003103	128	1	132	8	217	142	96%



DQD-1. 成矿前钾长花岗岩; SMHG-1. 成矿前花岗斑岩; D2002-B1. 成矿后闪长岩

图6 双庙关金矿床火成岩锆石 CL 图像

Fig. 6 Zircon CL images of plutons in the Shuangmiaoguan gold deposit



DQD-1. 成矿前钾长花岗岩; SMHG-1. 成矿前花岗斑岩; D2002-B1. 成矿后闪长岩; Mean. 加权平均年龄

图7 双庙关金矿床岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb ages of plutons in the Shuangmiaoguan gold deposit

(MSWD=4.1), 该年龄代表了花岗斑岩的结晶年龄, 表明花岗斑岩形成时间约为 128 Ma。

样品 D2002-B1(闪长岩)CL 特征如图 6c, 锆石主要呈柱状, 无色透明, 锆石晶体大小为 80~400 μm, 长宽比为 2:1~4:1。锆石 Th 含量为 $185 \times 10^{-6} \sim 1297 \times 10^{-6}$, U 含量为 $195 \times 10^{-6} \sim 766 \times 10^{-6}$ 。阴极发光图像显示锆石具有明显的核幔结构, 幔部均显示明显的震荡环带, 锆石微量元素 Th/U 值(0.63~2.65)均大于 0.4, 指示锆石为岩浆成因。本次研究对闪长岩的锆石颗粒共分析 20 个锆石测点, 锆石测点数据高度集中, 在锆石

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 数据谐和图上(图 7c), 数据点均落在谐和线上或其附近, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄群为 132~122 Ma, 加权平均年龄为 $(126.6 \pm 1.3)\text{Ma}$ (MSWD=4.0), 该年龄代表了闪长岩的结晶年龄, 表明闪长岩形成时间约为 126 Ma。

6 讨论

6.1 成岩成矿时代

根据前述分析结果不难看出, 双庙关金矿床成矿

前钾长花岗岩和花岗斑岩年龄分别为(133.6±1.1)Ma、(127.9±1.6)Ma, 成矿后闪长岩年龄为(126.6±1.3)Ma。因此, 双庙关金矿床的成矿作用应发生于早白垩世(128~126 Ma)。前人研究表明, 秦岭-桐柏-大别造山带发育了强烈的燕山期岩浆作用及其相关的成矿作用(刘巍等, 2021)。笔直整理收集了小秦岭、熊耳

山、桐柏矿集区的一系列与岩浆活动有关的金矿成矿年龄(图 8a), 发现在小秦岭矿集区内, 东桐峪、樊岔、东闯、文峪、陈耳、枪马、杨砦峪等系列金矿床的成矿时间非常集中, 其⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄为 132~118 Ma(Li et al., 2012)。在熊耳山矿集区内, 唐克非(2014)对公峪金矿蚀变岩矿石中绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年, 获得了

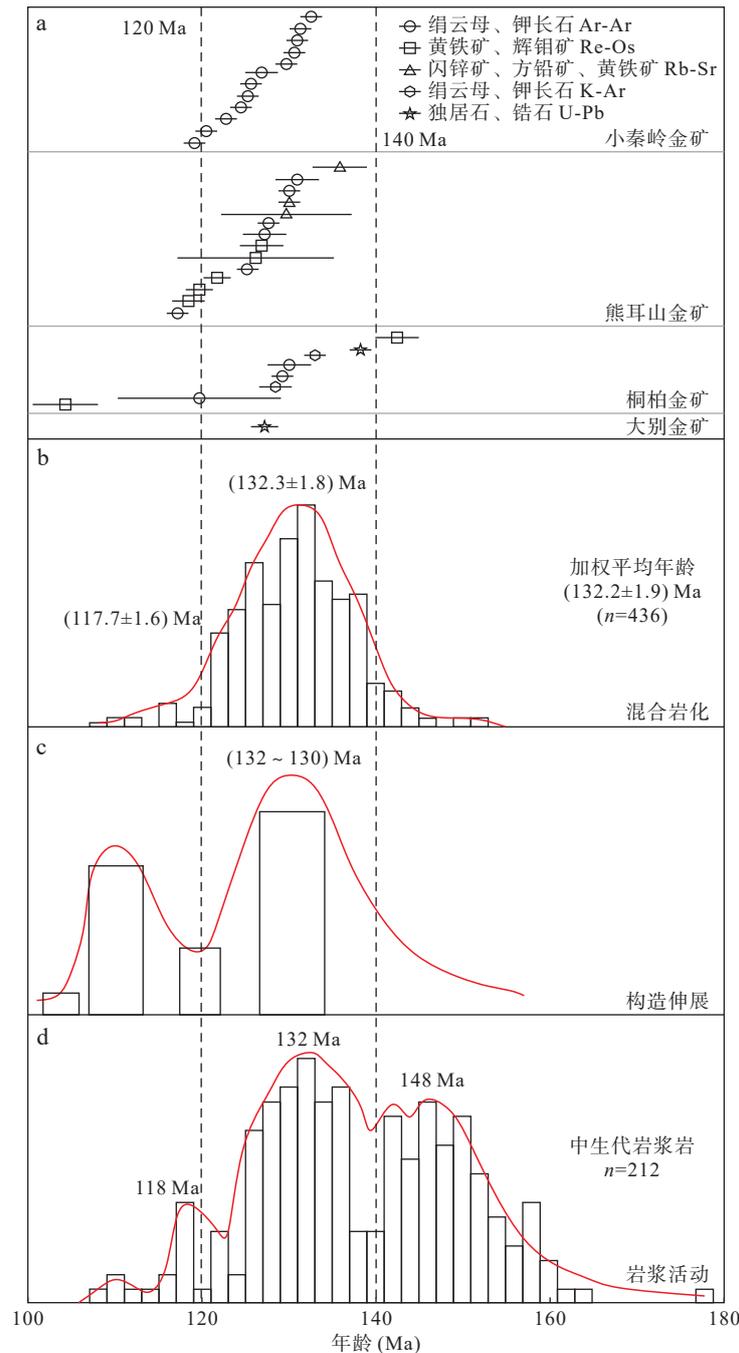


图 8 秦岭-大别造山带金矿床成矿作用、混合岩化、构造伸展、岩浆活动时代(据 Keay et al., 2001; Li et al., 2012; 唐克非, 2014; Ji et al., 2017; 王勇生等, 2018; 张哲坤, 2020)

Fig. 8 Age of mineralization, mixed mineralization, tectonic extension and magmatic activity of gold deposits in Qinling-Dabie orogenic belt

(129.8±1.0)Ma的成矿年龄; Wang等(2019)对松里沟金矿黄铁矿 Rb-Sr 定年, 获得了(126.6±2.3)Ma的成矿年龄, 整个矿集区成矿年龄集中在 135~118 Ma (图 8a)。在桐柏矿集区内, 梁涛等(2020)对高庄金矿黄铁矿 Rb-Sr 定年, 获得了(129.8±1.4)Ma的成矿年龄; 向祥辉等(2021)对黑龙潭金矿蚀变岩矿石中绢云母 K-Ar 定年, 获得了 128.24~130.58 Ma 的成矿年龄, 整个矿集区的主体成矿年龄集中在 142~119 Ma (图 8a)。因此, 双庙关金矿床成矿年龄为 128~126 Ma, 表明大别地区的金矿化时间与华北克拉通南缘的小秦岭、熊耳山、桐柏等矿集区内的金成矿作用峰期基本一致。

6.2 成岩成矿构造背景

对小秦岭、熊耳山、桐柏、大别等矿集区内金矿床的成矿时代进行进一步统计发现, 区域上金矿成矿时间多集中在 140~120 Ma (Li et al., 2012; 唐克非, 2014; Ji et al., 2017), 峰期约为 130 Ma (图 8a)。该期金成矿作用与区域上斑岩-矽卡岩型钼多金属矿床、火山-次火山作用有关金银铅锌矿床成矿作用基本同时(刘欢, 2016; 赵新福等, 2019; 赵宇洁, 2021), 与秦岭-桐柏-大别地区早白垩世构造热事件关系密切, 可能为深部岩石圈破坏的产物。

Ji 等(2017)认为桐柏-大别造山带在 145 Ma 可能已开始伸展垮塌作用, 随之混合岩化和壳内拆离, 130 Ma 到达伸展作用峰期, 以山根拆沉为标志, 随后发生穹窿作用和大量岩浆活动(图 8c)。造山带伸展作用开始时会引起与地壳减薄相关的热流的显著增强, 并通常表现为地壳熔融、混合岩化和花岗岩侵入 (Keay et al., 2001), 对大别造山带区域上的混合岩锆石年龄进行统计可得(图 8B), 区域上混合岩锆石年龄主要为 145~120 Ma, 介于 145~120 Ma 的年龄数据连续分布, 其中尤以 140~128 Ma 的数据分布最为密集。这些数据的加权平均年龄为(132.2±1.9) Ma (n=436), 该年龄应代表了混合岩化峰期的时间(王勇生等, 2018)。研究表明, 在造山带造山后伸展垮塌过程中同时会伴随有明显的岩浆活动。秦岭-大别造山带内岩浆岩 U-Pb 年代学统计结果显示(张哲坤, 2020) (图 8d), 中生代岩浆活动大概有~148 Ma、~132 Ma、~118 Ma 等 3 个峰期。马昌前等(2003)认为 130~120 Ma 是岩浆作用最为强烈的一个时期。因此, 双庙关金矿床的成矿时代与区域构造伸展、岩浆作用峰期年龄高度吻合, 是秦岭-桐柏-大别地区早白垩世伸展

构造-岩浆热事件产物, 与深部岩石圈改造、破坏紧密相关。

7 结论

(1) 双庙关金矿床的钾长花岗岩、花岗斑岩和闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为(133.6±1.1)Ma、(127.9±1.6)Ma、(126.6±1.3)Ma。结合地质体穿插关系, 可以限定双庙关金矿床形成于早白垩世 128~126 Ma。

(2) 双庙关金矿床的成矿时代与区域构造伸展、岩浆作用峰期年龄高度吻合, 系华北克拉通南缘早白垩世伸展构造-岩浆热事件产物, 与深部岩石圈破坏紧密相关。

参考文献(References):

- 柴明春. 桐柏地区古-中生代多金属矿床成矿作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- CHAI Mingchun. The Paleozoic-Mesozoic metallogenesis in the Tongbai area, Central China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- 曹正琦, 蔡逸涛, 周向辉, 等. 西大别大悟地区闪长玢岩岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 318-328.
- CAO Zhengqi, CAI Yitao, ZHOU Xianghui, et al. Geochemical Characteristics of Diorite Porphyrite in Dawu Area, Western Dabie and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 318-328.
- 杜文洋, 刘嘉, 付乐兵, 等. 大别造山带中段双庙关-西张店地区含金构造演化与金矿成矿制约成果报告[R]. 湖北省地质调查院, 2022.
- 高峰, 裴先治, 李瑞保, 等. 东秦岭商丹地区武关岩群斜长角闪片岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 198-211.
- GAO Feng, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of the Plagioclase-Amphibole Schist from the Wuguan Group in Shangdan Area, East Qingling, and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 198-211.
- 金伟衍. 豫西西峡-桐柏金矿床地质与地球化学特征及找矿意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- JIN Weikan. Geological-geochemical characteristics and prospecting significance of gold deposits in Xixia-Tongbai district, Western Henan [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- 梁涛, 卢仁, 杨楠, 等. 河南省西峡县高庄金矿 Rb-Sr 等时线年龄和 H、O、S、Pb 同位素特征: 北秦岭板内造山成矿作用的识别[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 406-425.

- LIANG Tao, LU Ren, YANG Nan, et al. Rb-Sr isochron age and isotopic compositions of H, O, S and Pb of the Gaozhuang gold deposit, Xixia County, Henan Province: Identification of intra-plate orogenic metallogenesis in northern Qinling Mountain[J]. *Geology in China*, 2020, 47(2): 406–425.
- 刘欢. 桐柏—大别造山带剪切带构造与年代学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- LIU Huan. The structure and geochronology of the shear zones in the Tongbai-Dabie orogenic belt [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- 刘巍, 郭震, 陈永顺, 等. 地球物理综合观测揭示秦岭-桐柏-大别复合造山带地壳及上地幔结构[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(9): 3179–3193.
- LIU Wei, GUO Zhen, CHEN Yongshun, et al. The crustal and upper-mantle structure of the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt from integrated geophysical observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3179–3193.
- 柳永正, 张海平, 张永清, 等. 内蒙古中东部玛尼吐组火山岩形成时代及其大地构造环境[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 46–60.
- LIU Yongzheng, ZHANG Haiping, ZHANG Yongqing, et al. Zircon U-Pb Age and Tectonic Setting of the Manitu Formation in the Middle-East Inner Mongolia, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 46–60.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2003, 33(9): 817–827.
- MA Changqian, YANG Kunguang, MING Houli, et al. The time when the earth's crust changed from compression to extension in Mesozoic in Dabie Mountain: The proof of granites[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(9): 817–827.
- 马宏卫. 东秦岭大别山段斑岩型钨(钼、铜)矿床地质特征[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(1): 50–54.
- MA Hongwei. Geology of Porphyry Molybdenum(Tungsten Copper) Deposits in the Dabieshan, Eastern Qinling[J]. *Geology and Exploration*, 2008, 44(1): 50–54.
- 马骁, 李玮, 杨源祯, 等. 北秦岭东部及华南北缘古生代以来花岗岩时空分布及其构造意义[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(3): 9–16.
- MA Xiao, LI Wei, YANG Yuanzhen, et al. Spatial and temporal distribution of granitoids since Paleozoic in southern Margin of the North China and east part of the North Qinling, and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(3): 9–16.
- 毛景文, 李晓峰, 张作衡, 等. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 620–637.
- MAO Jingwen, LI Xiaofeng, ZHANG Zuoheng, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic epithermal gold deposits in East China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 620–637.
- 唐克非. 华北克拉通南缘熊耳山地区金矿床时空演化、矿床成因及成矿构造背景[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- TANG Kefei. Characteristics, Genesis, and geodynamic setting of representative gold deposits in the Xiongershan District, southern Margin of the North China Craton [D]. China University of Geosciences, 2014.
- 王勇生, 白桥, 杨秉飞. 北大别单元混合岩的变形及锆石年代学特征: 对混合岩变形时间的限定[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 48(8): 980–996.
- WANG Yongsheng, BAI Qiao, YANG Binfei. Structural characteristics and geochronology of migmatites in the North Dabie Complex unit: Timing of postcollisional deformation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(8): 980–996.
- 王梓桐, 王根厚, 张维杰, 等. 阿拉善地块南缘志留纪花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(5): 586–600.
- WANG Zitong, WANG Genhou, ZHANG Weijie, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Silurian granodiorite in the southern margin of Alxa Block, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(5): 586–600.
- 吴皓然, 谢玉玲, 王莹. 大别造山带汞洞冲铅锌矿床矿物学特征和铅同位素研究[J]. *地质通报*, 2020, 39(S1): 338–352.
- WU Haoran, XIE Yuling, WANG Ying. Mineralogical characteristics and Pb isotopes of Gongdongchong lead-zinc polymetallic deposit, Dabie orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(S1): 338–352.
- 向祥辉, 肖宝珠, 张战. 桐柏山南坡金矿床(点)地质特征、成因及找矿前景[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(6): 794–801.
- XIANG Xianghui, XIAO Baozhu, ZHANG Zhan. Geological characteristics, genesis and prospecting potential of gold deposit (point) in southern slope of Tongbai Mountain[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(6): 794–801.
- 徐江熾, 曾小华, 刘嘉, 等. 桐柏-大别造山带麻城地区金矿成矿地质背景及空间展布特征[J]. *资源环境与工程*, 2020, 34(2): 180–183.
- XU Jiangyan, ZENG Xiaohua, LIU Jia, et al. Geological background and spatial distribution of gold deposits in Macheng area of Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2020, 34(2): 180–183.
- 杨济远, 李杰, 白春东, 等. 冀西北宣化盆地侏罗纪九龙山组凝灰岩形成时代、构造环境及地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 314–328.
- YANG Jiyuan, LI Jie, BAI Chundong, et al. Formation Age, Tectonic Setting and Geological Significance of The Jurassic Jiulong-

- shan Formation Tuff in Xuanhua Basin, Northwest Hebei[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 314–328.
- 曾小华, 刘嘉, 杜文洋, 等. 湖北省麻城市两路口钨矿地质特征、成因及找矿前景探讨[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(3): 301–307.
- ZENG Xiaohua, LIU Jia, DU Wenyang, et al. Discussion on geological characteristics and genesis of tungsten deposit in Lianglukou, Macheng City, Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(3): 301–307.
- 曾小华, 刘嘉, 徐江熾, 等. 湖北麻城双庙关金矿床地质特征及找矿方向[J]. *矿产勘查*, 2020, 11(9): 1845–1852.
- ZENG Xiaohua, LIU Jia, XU Jiangyan, et al. Geological characteristics and prospecting direction of Shuangmiaoguan gold deposit, Macheng city, Hubei Province[J]. *Mineral Exploration*, 2020, 11(9): 1845–1852.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 造山带与造山作用及其研究的新起点[J]. *西北地质*, 2001, 34(1): 1–9.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, YAO Anping. Review on the development of studies on the tectonic and orogen process of orogenic belt, and discussing on some new key problems[J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(1): 1–9.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. *中国科学(B辑)*, 1995, (9): 994–1003.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, LAI Shaocong. Structural Structure of Qinling Orogenic Belt Science[J]. *Science in China (Series B)*, 1995, (9): 994–1003.
- 张哲坤. 古太平洋俯冲对华北克拉通陆内变形及岩浆作用的制约[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2020.
- ZHANG Zhekun. Intracontinental deformation and Magmatism of the North China Craton induced by subduction of the paleo-Pacific plate [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS), 2020.
- 赵新福, 李占轲, 赵少瑞, 等. 华北克拉通南缘早白垩世区域大规模岩浆-热液成矿系统[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 550.
- ZHAO Xinfu, LI Zhanke, ZHAO Shaorui, et al. Early Cretaceous Regional-Scale Magmatic-Hydrothermal Metallogenic System at the Southern Margin of the North China Carton[J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 550.
- 赵宇洁. 桐柏-大别混合岩的成因及其地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- ZHAO Yujie. Migmatites in the Tongbai-Dabie orogen: pertogenesis and implications[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- 朱雪丽, 董王仓, 李维成等. 陕南秦岭造山带侵入岩的控矿作用及其找矿意义[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 163–173.
- ZHU Xueli, DONG Wangcang, LI Weicheng, et al. Ore-controlling Factors and Prospecting Significance of Intrusive Rocks in South Shaanxi Qinling Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 163–173.
- Grant Matthew L, Wilde Simon A, Wu Fuyuan, et al. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th–U–Pb chemistry and U–Pb ages in interpreting discrete Magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary[J]. *Chemical Geology*, 2009, 261(1–2): 155–171.
- Ji Wenbin, Lin Wei, Faure Michel, et al. The early Cretaceous orogenic-scale Dabieshan metamorphic core complex: implications for extensional collapse of the Triassic HP–UHP orogenic belt in east-central China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(4): 1311–1340.
- Keay Sue, Lister Gordon, Buick Ian, et al. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece[J]. *Tectonophysics*, 2001, 342(3–4): 275–312.
- Li Jianwei, Bi Shijian, Selby David, et al. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 349–350: 26–37.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1–2): 537–571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, et al. In situ analysis of Major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1–2): 34–43.
- Rubatto D. Zircon trace element geochemistry; partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1–2): 123–138.
- Wang Peng, Jian Wei, Mao Jingwen, et al. Geochronology and fluid source constraints of the Songligou gold - telluride deposit, western Henan Province, China: Analysis of genetic implications[J]. *Resource Geology*, 2019, 70(2): 169–187.
- Zong Keqing, Klemd Reiner, Yuan Yu, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 2017, 290: 32–48.