

徐宿弧安徽北段地区矽卡岩型 Au-Fe-Cu 矿床以及有关的中酸性侵入岩年代学研究

韦 帅^{1,2,3}, 杨 治⁴, 邓宇峰^{1,2,3}, 程培生⁵, 产思维⁵, 毛思斌⁵, 卢新哲⁶, 袁 峰^{1,2,3}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 矿床成因与勘查技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009; 4. 江西省地质矿产勘查开发局 九一六大队, 江西 九江 332100; 5. 安徽省勘查技术院, 安徽 合肥 230009; 6. 自然资源部平原区农用地生态评价与修复工程技术创新中心, 浙江 杭州 311200)

摘 要: 徐宿弧安徽北段地区中酸性岩体由多期次岩浆活动形成, 部分岩体中发育一系列矽卡岩型 (Fe)-Au-Cu-(Mo) 和 Fe 矿床。对该区域内王场矽卡岩型铁矿床成矿岩体 (闪长玢岩) 和区内最大的矽卡岩型金矿床 (杨桥孜 Au-Cu 矿床) 中的辉钼矿进行了测年研究, 获得王场闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄为 132.1 ± 1.9 Ma, 杨桥孜矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 130.0 ± 3.2 Ma。系统分析了区内成岩年代、矿化类型及成矿规律, 认为区内的岩浆岩可分为 4 期, 矿床分为 4 种类型, 具体为: 第 1 期岩浆岩为新元古代早期的浅成基性侵入岩 (辉绿岩), 与原生金刚石矿床有关; 第 2 期岩浆岩为侏罗纪早期的中酸性侵入岩; 第 3 期岩浆岩为早白垩世早期的中酸性侵入岩, 与矽卡岩型 Fe 矿床和矽卡岩型 (Fe)-Au-Cu-(Mo) 矿床有关; 第 4 期为早白垩世晚期的酸性侵入岩。研究区还发现了与深成基性侵入岩有关的岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床, 但尚无年代学研究报道。矿化以与中酸性侵入岩有关的 Fe、Au-Cu 矿化为主, 与基性侵入岩有关的 Cu-Ni 及金刚石矿化较少。研究区各期次岩浆岩都形成于华北克拉通伸展的构造环境, 但受不同的地质事件控制。区内大规模的成岩成矿时代集中分布在早白垩世, 可能与同时期华北克拉通岩石圈破坏有关。成岩成矿年代学与地球化学数据表明, 徐宿弧地区深部可能存在与胶东地区相类似的热液金多金属矿床, 为该区今后的找矿方向提供了参考。

关键词: 徐宿弧; 锆石 U-Pb 定年; 辉钼矿 Re-Os 定年; 中酸性侵入岩; 杨桥孜金铜矿床

中图分类号: P597⁺.3; P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0395-16

Geochronology of skarn type Au-Fe-Cu deposits and related intermediate-acid intrusive rocks in the northern Anhui section, Xu-Su arcuate structural area

WEI Shuai^{1,2,3}, YANG Zhi⁴, DENG Yu-feng^{1,2,3}, CHENG Pei-sheng⁵, CHAN Si-wei⁵, MAO Si-bin⁵,
LU Xin-zhe⁶ and YUAN Feng^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Ore Deposit and Exploration Center (ODEC), Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Provincial Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China; 4. No. 916 Geological Party, Jiangxi Bureau of Geology & Mineral Exploration, Jiujiang 332100, China; 5. Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei 230009, China; 6. Technical Innovation Center of Agricultural Land Ecological Evaluation and Restoration Project in Plain Area, MNR, Hangzhou 311200, China)

收稿日期: 2020-09-22; 接受日期: 2021-01-08; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1803113); 中国地质调查局项目 (DD20190043); 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0708); 安徽省自然资源科技项目 (2020-K-14); 浙江省地勘资金项目 (2019007, 2020006)

作者简介: 韦 帅 (1996-), 男, 硕士研究生, 矿物学、矿床学、岩石学专业, E-mail: 854007574@qq.com; 通讯作者: 邓宇峰 (1983-), 男, 副教授, 主要从事岩石学与矿床地球化学研究, E-mail: dyfeng_214@sina.com。

Abstract: The intermediate-acid intrusions in northern Anhui Province of Xu-Su arc were formed by multi-stage magma, and a series of skarn (Fe)-Au-Cu-(Mo) and Fe-Cu deposits related to these intermediate-acid intrusive rocks have been developed. In this paper, the authors studied the zircon U-Pb age of diorite porphyrite which hosts the Wangchang skarn-type iron deposit and Re-Os isotopic age of the molybdenite in the largest skarn-type gold deposit (Yangqiaozi Au-Cu deposit) in this area. The LA-ICP-MS U-Pb weighted age of the Wangchang diorite porphyrite zircon is 132.1 ± 1.9 Ma, and the Re-Os isochron age of the molybdenite in the Yangqiaozi deposit is 130.0 ± 3.2 Ma. The authors systematically summarized the diagenetic age, mineralization type and metallogenic regularity in this area. It is considered that the magmatic rocks in this area can be divided into four stages, and the deposits can be divided into four types. Specifically, the first stage magmatic rocks are early Neoproterozoic mafic intrusive rocks (diabase), which are related to the diamond deposits. The second stage magmatic rocks are intermediate acid intrusive rocks formed in the early Jurassic. The third stage magmatic rocks are the Early Cretaceous intermediate-acid intrusive rocks, which are related to skarn type Fe deposits and skarn type (Fe)-Au-Cu-(Mo) deposits. The fourth stage is late Early Cretaceous acid intrusive rocks. The magmatic Cu-Ni deposits related to mafic intrusive rocks were discovered, but there has been no chronological research reported yet. The Fe and Au-Cu mineralization related to intermediate acid intrusive rocks have been widely developed, but just a few Cu-Ni and diamond mineralizations related to mafic intrusive rocks have been discovered in the northern Anhui Province of Xu-Su arc. The magmatic rocks in the study area were formed in the extensional structural environment of the North China Craton, but were controlled by different geological events. The large-scale diagenesis and mineralization ages in the area are concentrated in the Early Cretaceous, which was probably related to the destruction of the lithosphere of the North China Craton. The chronological and geochemical data of magmatic rocks and mineralization indicate that there may be a hydrothermal gold polymetallic deposit similar to the Jiaodong area in the deep Xu-Su arc area, which provides a reference for future prospecting in this area.

Key words: Xu-Su arcuate structural region; zircon U-Pb dating; Re-Os dating of molybdenite; intermediate-acid intrusive rocks; Yangqiaozi Au-Cu deposit

Fund support: National Natural Science Foundation of China (U1803113); China Geological Survey Project (DD20190043); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (2019QZKK0708); Natural Resources Science and Technology Project of Anhui Province (2020-K-14); Zhejiang Provincial Geological Exploration Fund Project (2019007, 2020006)

徐宿弧安徽北段地区位于华北克拉通内徐宿弧形构造东南缘,区内发育一系列的NNE-EW向弧形构造(陈富伦, 1987; 马公伟, 1992; 舒良树等, 1994; 王陆超等, 2011)。区内岩浆活动强烈,期次多,地层比较齐全,碳酸盐岩丰富,具有良好的成矿条件。区内矿产资源丰富,如铁、铜、金等,多与中生代燕山期岩浆活动有关,以矽卡岩型矿床为主(汪青松, 2010; Xu *et al.*, 2010; 张喜, 2017),是安徽省北部重要的矿产资源产区。研究区已发现中小型矽卡岩型多金属矿床10多处,主要分布在淮北濉溪县秦楼、前常、前常东、王场、旗杆楼、石楼等地区(产思维等, 2016; 费存才, 2016; 杜宏伟, 2016; 徐干干, 2017; 涂爱华, 2017),以矽卡岩型铁矿床(王场、徐楼、邹楼等矿床)和矽卡岩型金铜矿床(杨桥孜、前常、秦楼等矿床)为主(赵一鸣等, 1997; 产思维等,

2020),同时也存在有与基性侵入岩有关的铜镍矿床和金刚石矿床(王振强, 2018; 赵丽丽等, 2018; Wang *et al.*, 2020)。前人研究表明研究区内侵入岩体与矿床形成密切相关,徐宿弧地区大量的定年工作表明区内岩浆岩大都形成于燕山期,少量岩体形成于晋宁期(林景仟等, 2000; Xu *et al.*, 2004a, 2004b, 2006a, 2006b; Gao *et al.*, 2004; 纪伟强等, 2005; 杨德彬等, 2008; 王清海等, 2011; 吴维平等, 2013; 张喜, 2017; 马玉广等, 2018)。但是,并没有对区内侵入岩体的成岩期次做出较为详细的划分,对区域成矿规律和成矿岩体所处构造背景的工作程度还较低。此外,杨桥孜矿床是徐宿弧安徽北段地区目前发现的最大的矽卡岩型金矿床(汪青松等, 2015),但目前还未对该矿床开展精确的成岩成矿时代研究。

基于此,本文拟通过对区内典型矽卡岩型铁矿床(王场矿床)成矿岩体闪长玢岩进行锆石 U-Pb 定年工作,对杨桥孜金铜矿床进行辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究,结合前人研究成果梳理出研究区内岩浆岩的形成时代,划分出区内岩浆活动期次及其构造背景,总结区域成矿规律。本次研究根据矿床的构造环境-岩浆岩性质-成岩成矿年代等特点,将研究区岩浆岩划分为4个期次,梳理各成岩期次的构造背景,将区内矿床分为4种成因类型,通过对区内岩浆岩与矿床的时空关系、成因关系的分析整理,以期深化该地区矿床的成岩成矿规律研究,对区内进一步勘查找矿工作具有指导意义。

1 区域地质背景

徐宿弧安徽省北段大地构造位置属于华北克拉通东南缘(图1a)。区内地层分布较为复杂,除缺失上奥陶统至下石炭统外,自上元古界以后的其余地层均有分布,地层岩性主要为灰岩、白云岩、砂岩及泥岩等。区内构造活动强烈,断裂构造主要为东西向断裂构造、北北东向断裂构造、徐(州)-宿(州)弧形断裂构造,其次为北东向断裂构造(图1b)。

区内岩浆岩活动强烈,分布范围较广泛,岩体规模较大。区内岩浆岩均为中-浅成侵入体,以中性闪长岩类为主,其次是酸性花岗岩类及基性辉绿岩(安徽省勘查技术院,2019^①)。研究区内北北东向褶皱、断裂和东西向断裂控制了岩浆岩的分布,形成了一条东西向的岩浆岩带和4条北北东向的岩浆岩带。东西向岩浆岩带分布在符离集断裂带附近,自西往东有谢庙、吕庄、柴洼、岳集、邹楼、陈老家、百善、大何家、三铺岩体。北北东向岩浆岩带自西往东分为4个岩浆岩带(图2)。中性侵入岩主要类型为石英闪长(玢)岩、石英二长(玢)岩、花岗闪长斑岩以及闪长斑岩等;酸性侵入岩主要类型为细粒花岗岩、花岗斑岩以及二长花岗岩;基性侵入岩主要为辉绿岩。区内矿产众多,多与中酸性侵入岩有关,如邹楼(费存才,2016)、徐楼(杜宏伟,2016)、王场以及旗杆楼铁矿床(徐干干,2017)等,前常(涂爱华,2017)、刘楼、杨桥孜以及秦楼金铜多金属矿床(黄海燕等,2017)等。研究区还发育少量与基性侵入岩有关的矿床,如后马场铜镍矿(王振强,2018)以及

栏杆地区金刚石矿床(蔡逸涛等,2014;赵丽丽等,2018;Wang *et al.*, 2020)。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

杨桥孜金铜矿床已探明的金金属储量8.71 t,金平均品位3.69 g/t,铜金属储量3.51万吨,铜平均品位0.85%,金储量达到中型矿床规模(汪青松等,2015)。矿区处于宿徐弧形褶皱构造与符离集东西向区域性断裂构造(宿北断裂)交汇部位,被较厚的第四系覆盖,围岩以寒武纪富镁碳酸盐岩类地层为主(图3)。含矿岩石为三铺岩体石英二长闪长(玢)岩,矿体产于石英二长闪长(玢)岩与寒武系毛庄组和徐庄组灰岩接触带(图4)。岩体接触带向外矿化呈规律性变化,可依次划分为4个矿化带,其中勘探3线可见I、II、III共3个矿化带(图4)。矿体主要呈似层状或透镜状,矿体走向为NW向,倾向NE,矿体埋深100~700 m。围岩蚀变主要为矽卡岩化,其次为蛇纹石化、金云母化、透辉石化等。矿石主要以浸染状构造和块状构造为主。主要金属矿物为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、自然金等。脉石矿物以石榴子石、透辉石为主,为典型的矽卡岩型矿床(汪青松,2010;汪青松等,2015;产思维等,2016)。

王场铁矿床铁金属储量2 015万吨,为中型铁矿,赋矿围岩为下奥陶统萧县组灰岩,矿体产于闪长玢岩岩体外接触带,由11个矿体组成。岩体钠长石化明显,围岩蚀变主要为矽卡岩化,其次为蛇纹石化和绿泥石化等。矿石以块状为主,主要金属矿物为磁铁矿,其次为黄铁矿等。脉石矿物以透辉石、蛇纹石为主,其次为金云母、阳起石、透闪石等,为典型的矽卡岩型铁矿床(汪青松,2010;产思维等,2020)。

前人研究认为区内主要矿床类型为矽卡岩型杨桥孜式金(铜铁)矿(杨桥孜、秦楼、前常等)和徐楼式铁矿(徐楼、王场、邹楼等)(赵一鸣等,1997;汪青松,2010,汪青松等,2015;产思维等,2020;王伟等,2020)。本文采集了与王场铁矿床矿化相关的中性闪长岩体进行锆石 U-Pb 定年工作,采集了杨桥孜金铜矿区不同深度的6件辉钼矿进行 Re-Os 同位素定年工作(图2),以查明研究区内具代表性的两种不同类型矽卡岩矿床的形成时代。

① 安徽省勘查技术院. 2019. 徐宿弧(安徽段)金多金属矿成矿背景调查工作总结报告.

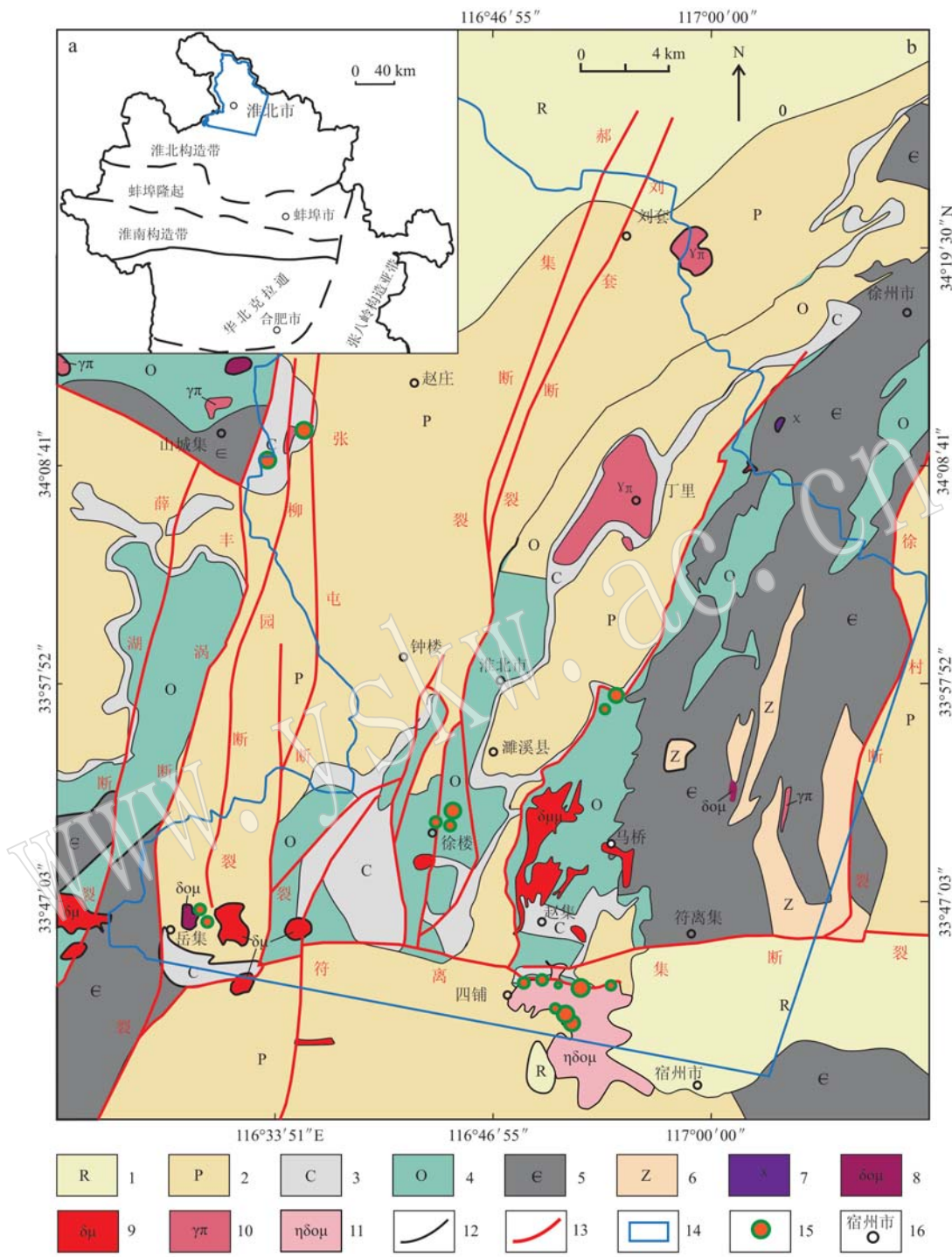


图 1 皖北地区构造纲要图(a)和徐宿弧安徽北段地区地质简图(b) (据汪青松, 2010 修改)
Fig. 1 Structural outline map of northern Anhui area (a) and geological sketch map of the northern Anhui section, Xu-Su arcuate structural area (b) (modified after Wang Qingsong *et al.*, 2010)
1—第三系; 2—二叠系; 3—石炭系; 4—奥陶系; 5—寒武系; 6—震旦系; 7—煌斑岩; 8—石英闪长玢岩; 9—闪长玢岩; 10—花岗岩; 11—石英二长闪长岩; 12—地层界线; 13—断层线; 14—研究区; 15—矿床; 16—地名
1—Tertiary; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Ordovician; 5—Cambrian; 6—Sinian; 7—lamprophyre; 8—quartz diorite porphyrite; 9—diorite porphyrite; 10—granite porphyry; 11—quartz monzodiorite; 12—stratigraphic boundary; 13—fault line; 14—study area; 15—deposit; 16—place name

王场闪长玢岩, 手标本呈灰黑色, 具斑状结构, 基质由长英质矿物组成; 镜下特征为: 石英呈它形粒状, 单偏光镜下为无色, 低正突起, 正交偏光下具一

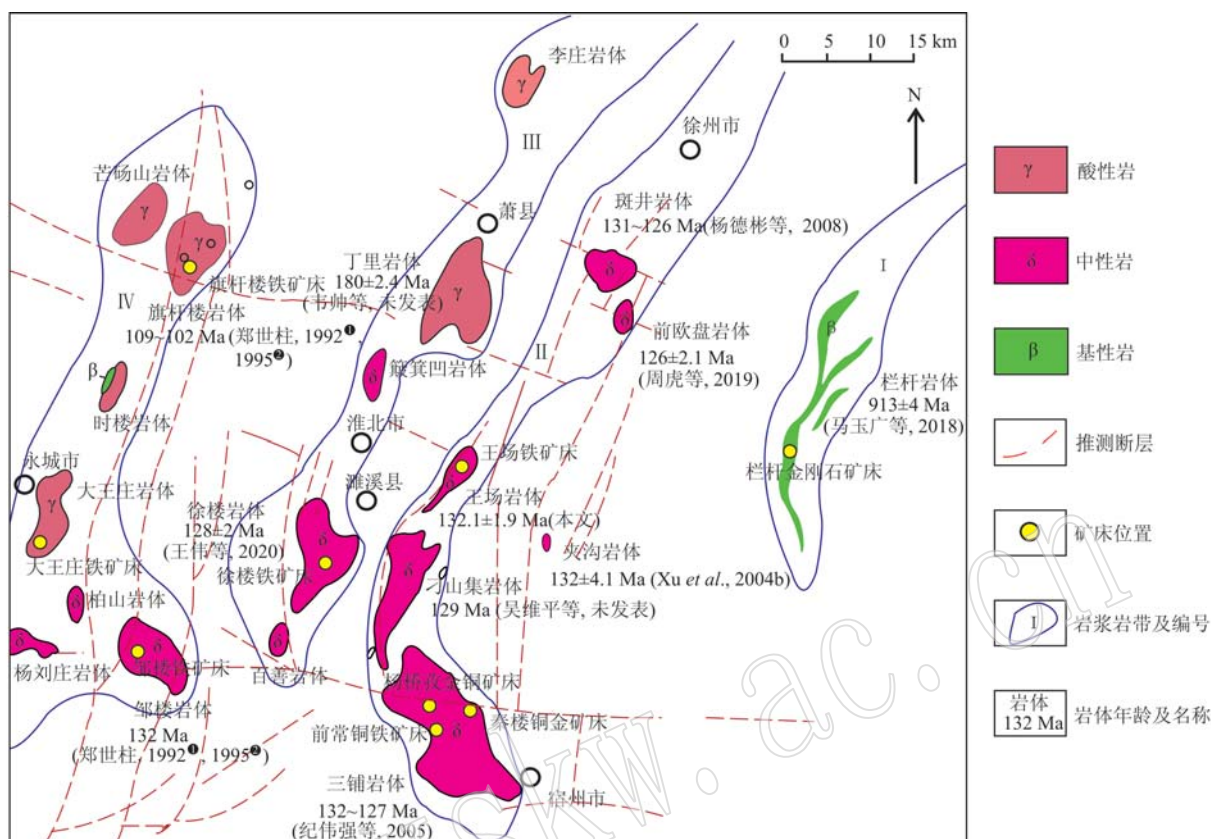


图2 徐宿弧安徽北段地区岩浆岩带及矿床分布图(据王伟等, 2020 修改)

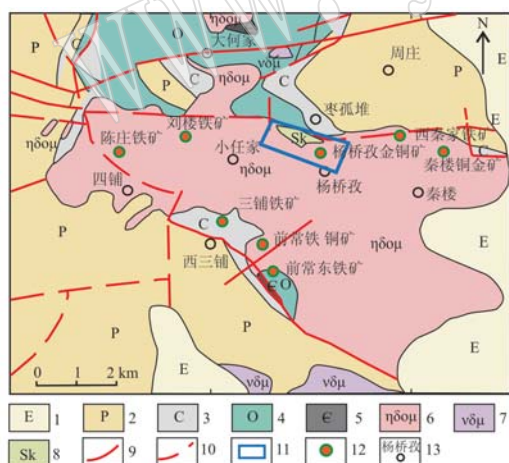
Fig. 2 Distribution of magmatic rocks and deposits in Wanbei area, Xu-Su arc (modified after Wang Wei *et al.*, 2020)

图3 杨桥孜矿区地质图(据汪青松等, 2015 修改)

Fig. 3 Geological map of the Yangqiaozi area (modified after Wang Qingsong *et al.*, 2015)

- 1—古近系; 2—二叠系; 3—石炭系; 4—奥陶系; 5—寒武系;
6—石英二长闪长玢岩; 7—辉长闪长玢岩; 8—矽卡岩; 9—实测
断层; 10—推测断层; 11—研究区; 12—矿床; 13—地名
1—Paleogene; 2—Permian; 3—Carboniferous; 4—Ordovician;
5—Cambrian; 6—quartz monzodiorite porphyrite; 7—gabbro
diorite porphyrite; 8—skarn; 9—measured fault; 10—inferred
fault; 11—study area; 12—deposit; 13—place name

级白干涉色, 平行消光, 粒径 0.05~0.10 mm 左右, 体积含量约 15%; 斜长石为半自形-自形板条状矿物, 单偏光下无色, 低正突起, 正交偏光下具一级白干涉色, 斜消光, 具条纹双晶, 粒径 1~2 mm, 含量约 25%, 发生高岭土化; 角闪石为柱状矿物, 单偏光下为黄绿色-绿色多色性, 具角闪石式解理, 中正突起, 正交偏光下具二级干涉色, 斜消光, 粒径约 0.05~0.20 mm, 含量约 15%, 发生绿泥石化; 黑云母为板片状矿物, 单偏光下为棕色, 中正突起, 正交偏光下具二级干涉色, 平行消光, 粒径约 0.5~1.0 mm, 含量约 10%, 发生绿泥石化; 隐晶质矿物集合体含量约 35% (图 5a~5c)。

杨桥孜矿床 6 件样品分别采自 ZK301、ZK305、ZK407 钻孔中不同深度的辉钼矿 (图 4)。辉钼矿呈星点状和细脉以裂隙面的形式赋存于矽卡岩中, 或以团块状、薄层状发育在岩体与围岩的接触面上, 在反射光镜下表现为灰白色的反射色, 晶型呈鸡肋状, 集合体为片状矿物 (图 5d~5f)。

① 郑世柱. 1992. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.

② 郑世柱. 1995. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.

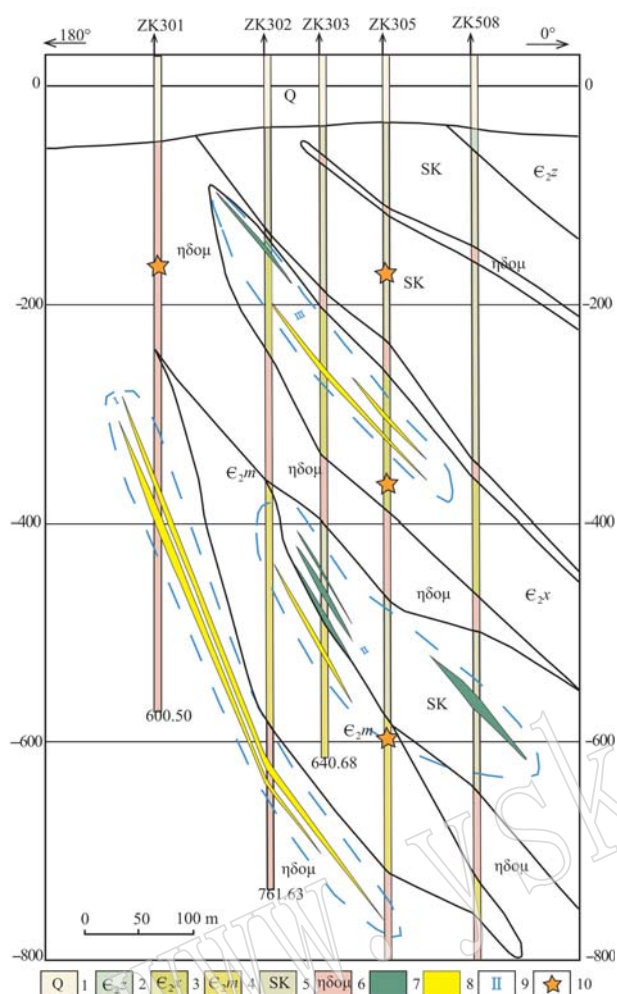


图4 杨桥孜矿床3线地质剖面图(据汪青松等, 2015 修改)

Fig. 4 Geological section along No. 3 exploration line in the Yangqiaozi deposit (modified after Wang Qingsong *et al.*, 2015)
1—第四系; 2—寒武系张夏组; 3—寒武系徐庄组; 4—寒武系毛庄组; 5—矽卡岩; 6—石英二长闪长玢岩; 7—铜矿体; 8—金矿体; 9—矿带编号; 10—辉钼矿部分采样位置

1—Quaternary; 2—Cambrian Zhangxia Formation; 3—Cambrian Xuzhuang Formation; 4—Cambrian Maozhuang Formation; 5—skarn; 6—quartz monzodiorite porphyrite; 7—copper orebody; 8—gold orebody; 9—serial number of ore belt; 10—sampling site of molybdenite

2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 定年在合肥工业大学资源与环境工程学院矿床成因与勘查技术研究中心(OEDC)矿物微区分析实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。分析测试前分别用酒精和稀硝酸(5%)轻擦样品表面,以除去可能的污染。激光剥蚀系统为 CetacAnalyte HE, ICP-MS 为 Agilent 7900。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨率分析数据包括大约 20 s 的空白信号和 40~50 s 的样品

信号。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 ICPMSDataCal 使用说明灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同宁思远等(2017)、汪方跃等(2017)。锆石微量元素含量利用玻璃(NIST610)作为外标、Si 作内标的方法进行定量计算(Liu *et al.*, 2008)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。分析期间,用 Plesovice 锆石(Sláma *et al.*, 2008)作为质量监控样。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行校正(Liu *et al.*, 2008)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等(1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 IsoPlot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)完成,实验过程中误差为 σ 。

2.3 辉钼矿 Re-Os 同位素定年

用刀片等工具直接从手标本上剥离辉钼矿后在显微镜下做进一步的检查与选纯至纯度达 99% 以上。辉钼矿 Re-Os 同位素测定是在中国科学院广州地球化学研究所实验测试中心完成,主要过程包括碎样、溶样、分离萃取、纯化、上机测试及校正等。准确称取 0.3~0.5 g 辉钼矿样品;加入适量的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 稀释剂;在冷冻的条件下分别加入一定量 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HNO}_3$ 溶液;利用煤气和氧气火焰将管口封闭。将封闭的 Carius 管放入不锈钢套管中,然后放入电热烘箱中,升温到 220 °C 加热 24 h 溶样。样品分解以及 Re 和 Os 的分离等化学处理过程参见 Sun 等(2010)。Os 同位素的测定利用中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 Triton 型热电离质谱仪(美国 Thermo-Fisher 仪器公司)完成。该仪器装配有微量气体控制阀,配备 9 个法拉第杯(Faraday Cup)、4 个离子计数器(Ion Counting)和 1 个二次电子倍增器(SEM),并带有强峰拖尾干扰过滤器(RPQ)。Re 同位素的测定利用中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 X-series 2 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo-Fisher)完成,具体步骤见尹露等(2015)。采用 Ir 和 Os 天然丰度进行在线监测和校正仪器测试过程中的 Re 和 Os 同位素分馏。

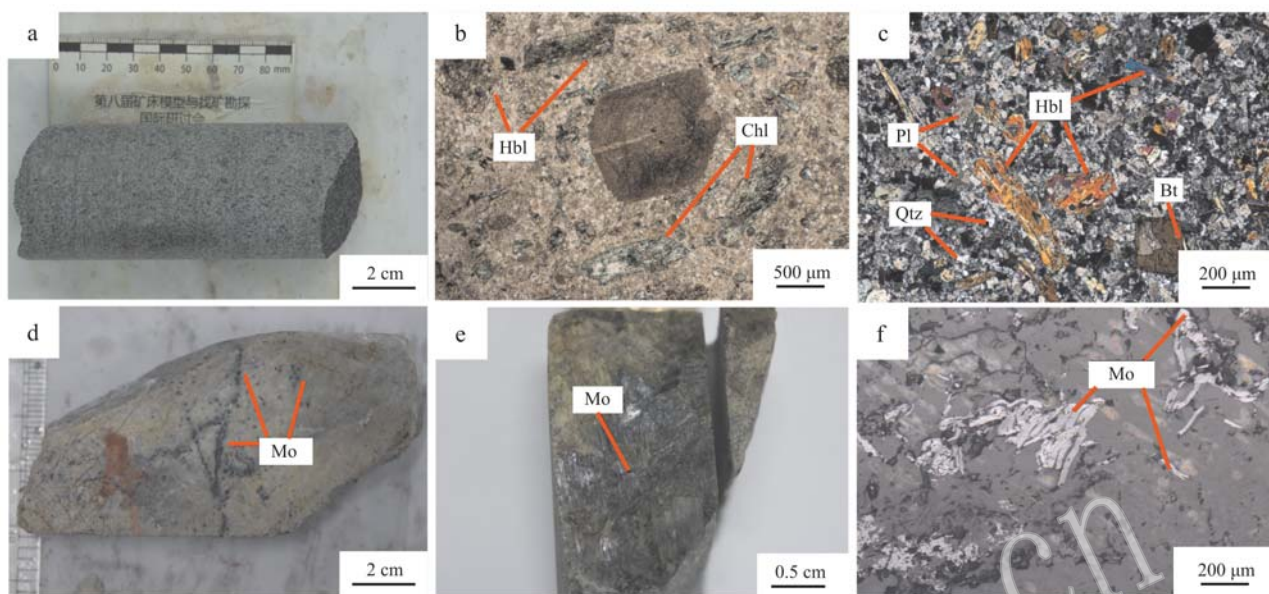


图5 测试样品手标本及显微镜下照片

Fig. 5 Hand specimens and microscopic images of samples

a—王场闪长玢岩手标本照片; b—王场闪长玢岩显微照片(+); c—王场闪长玢岩显微照片(-); d—星点状辉钼矿及细脉; e—沿裂隙面分布的辉钼矿; f—辉钼矿镜下照片(反射光); Qtz—石英; Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Chl—绿泥石; Bt—黑云母; Mo—辉钼矿(矿物缩写据沈其韩, 2009)

a—hand specimen photos of Wangchang diorite porphyrite; b—microphotograph of Wangchang diorite porphyrite (+); c—microphotograph of Wangchang diorite porphyrite (-); d—star-like molybdenite and veinlets; e—molybdenite distributed along fracture surface; f—microscopic photos of molybdenite (reflected light); Qtz—quartz; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Chl—chlorite; Bt—biotite; Mo—molybdenite (mineral abbreviations after Shen Qihan, 2009)

3 分析结果

王场闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表1。如锆石 CL图(6a)所示, 锆石具有明显的韵律环带。锆石中 Th/U 值可以指示锆石的成因, 岩浆锆石的 Th/U 值一般大于 0.1, 而变质老锆石的 Th/U 值一般小于 0.1 (Rubatto *et al.*, 1999; Hoskin and Black, 2000; Sun *et al.*, 2002)。王场岩体的锆石中 Th/U 值在 0.47~1.33 之间, 属典型的岩浆成因锆石, 且锆石基本为柱状, 为岩浆结晶形成, 能代表侵入岩的形成年龄。本次研究测试了 25 颗锆石 U-Pb 同位素, 除去谐和度低于 90% 的锆石年龄 (10 个), 有效的测试数据为 15 个 (图 6b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较集中 ($139.0 \pm 4.4 \text{ Ma} \sim 129.0 \pm 3.7 \text{ Ma}$), 且谐和度也较高, 加权平均年龄为 $132.1 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($n=15$), $\text{MSWD}=0.59$, 表明王场岩体形成于早白垩世早期。

杨桥孜金铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素组成见表

2, 辉钼矿 Re 含量在 $164.157 \times 10^{-6} \sim 826.955 \times 10^{-6}$ 之间, 采用 ISOPLLOT 软件对所获得的数据进行等时线年龄计算, 取 ^{187}Re 衰变常数 $1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Smo-liar *et al.*, 1996), 获得 Re-Os 等时线年龄为 $130.0 \pm 3.2 \text{ Ma}$, $\text{MSWD}=2.9$ 。辉钼矿样品同位素组成具很好的线性关系 (图 7), Re-Os 模式年龄在 131~126 Ma 之间, 加权平均值为 $128.0 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=3.6$) (图 7), 与其等时线年龄基本一致。

4 讨论

4.1 成岩成矿时代

研究区内发育较多的矽卡岩型铁矿床, 本次研究采集了王场铁矿床的赋矿岩体进行定年工作, 因此岩体年龄可大致代表矿床的形成年龄。杨桥孜金铜矿床辉钼矿等时线年龄 ($130.0 \pm 3.2 \text{ Ma}$) 和样品的模式年龄 (131~126 Ma) 基本一致, 表明杨桥孜矿床形成于早白垩世早期, 杨桥孜矿床含矿岩体石英二长闪长岩的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $128.0 \pm 1.1 \text{ Ma}$

表 1 王场岩体锆石 LA-ICP-MS 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Wanchang intrusive rock

点号	$w_B/10^{-6}$				Th/U				同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
WC18-4-1	12	197	225	1.14	0.133 1	0.006 6	0.020 4	0.000 6	0.047 4	0.002 3	127	5.9	130	3.7	78	5.9
WC18-4-2	175	376	335	0.89	5.614 4	0.341 6	0.266 5	0.015 3	0.149 6	0.004 5	1 918	52.5	1 523	77.7	2 343	52.5
WC18-4-3	7	320	426	1.33	0.137 6	0.006 1	0.020 4	0.000 6	0.049 2	0.002 2	131	5.5	130	3.7	167	5.5
WC18-4-4	42	289	295	1.02	0.684 1	0.040 5	0.051 0	0.002 3	0.091 3	0.003 7	529	24.4	321	13.9	1 454	24.4
WC18-4-5	17	396	412	1.04	0.143 8	0.005 9	0.020 6	0.000 6	0.050 9	0.002 1	136	5.2	131	3.7	235	5.2
WC18-4-6	4	250	193	0.77	0.139 3	0.005 6	0.020 7	0.000 6	0.049 4	0.002 1	132	5.0	132	3.9	165	5.0
WC18-4-7	50	285	257	0.90	0.905 4	0.071 3	0.050 5	0.003 0	0.112 4	0.005 5	655	38.0	317	18.3	1 839	38.0
WC18-4-8	7	287	281	0.98	0.140 6	0.007 4	0.020 7	0.000 6	0.048 7	0.002 5	134	6.6	132	3.9	200	6.6
WC18-4-9	26	334	404	1.21	0.124 9	0.006 6	0.020 3	0.000 6	0.044 5	0.002 4	119	5.9	129	3.8	168	5.9
WC18-4-10	35	192	156	0.81	0.486 3	0.037 2	0.036 5	0.001 9	0.085 9	0.004 1	402	25.4	231	11.7	1 400	25.4
WC18-4-11	5	279	365	1.31	0.142 7	0.006 2	0.020 6	0.000 6	0.050 0	0.002 2	135	5.5	131	3.7	195	5.5
WC18-4-12	13	256	238	0.93	0.132 8	0.006 7	0.021 3	0.000 6	0.045 4	0.002 4	127	6.0	136	4.0	159	6.0
WC18-4-13	14	153	145	0.95	0.134 1	0.005 7	0.020 3	0.000 6	0.047 7	0.002 0	128	5.1	130	3.8	83	5.1
WC18-4-14	16	247	294	1.19	0.129 7	0.006 3	0.020 2	0.000 6	0.046 4	0.002 2	124	5.7	129	3.7	21	5.7
WC18-4-15	26	130	120	0.92	0.137 8	0.005 8	0.020 6	0.000 6	0.048 5	0.002 1	131	5.2	132	3.8	124	5.2
WC18-4-16	68	254	180	0.71	1.179 7	0.064 9	0.076 2	0.003 9	0.110 0	0.003 9	791	30.3	474	23.4	1 799	30.3
WC18-4-17	14	231	252	1.09	0.156 6	0.006 4	0.021 8	0.000 6	0.052 6	0.002 2	148	5.6	139	4.0	322	5.6
WC18-4-18	21	225	194	0.86	2.298 7	0.196 4	0.121 9	0.008 6	0.118 7	0.004 9	1 212	60.4	742	49.2	1 936	60.4
WC18-4-19	8	214	171	0.80	0.147 5	0.006 9	0.020 7	0.000 6	0.050 7	0.002 4	140	6.1	132	3.9	228	6.1
WC18-4-20	7	295	162	0.55	0.145 5	0.007 1	0.020 8	0.000 6	0.051 1	0.002 5	138	6.3	133	4.0	256	6.3
WC18-4-21	56	321	250	0.78	1.044 0	0.089 6	0.081 8	0.006 2	0.081 2	0.003 3	726	44.5	507	36.9	1 228	44.5
WC18-4-22	12	335	201	0.60	0.142 3	0.006 4	0.020 3	0.000 6	0.050 9	0.002 4	135	5.7	130	3.8	239	5.7
WC18-4-23	18	214	178	0.83	0.142 2	0.005 7	0.021 2	0.000 6	0.048 8	0.002 0	135	5.1	135	4.0	200	5.1
WC18-4-24	6	389	183	0.47	0.145 8	0.008 3	0.021 8	0.000 7	0.049 1	0.002 8	138	7.4	139	4.4	154	7.4
WC18-4-25	25	235	132	0.56	0.260 2	0.013 6	0.026 9	0.001 0	0.066 9	0.003 0	235	10.9	171	6.2	835	10.9

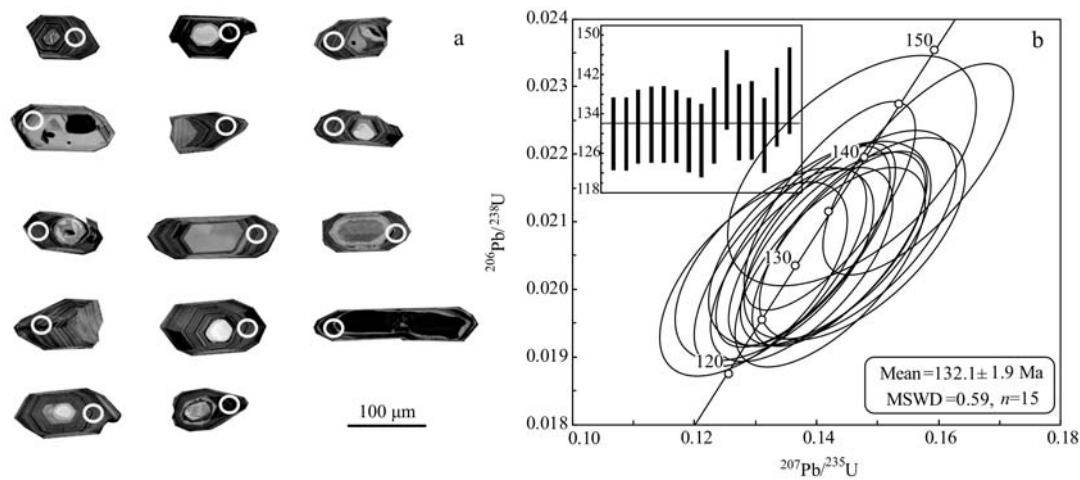


图6 王场岩体锆石 CL 图(a)和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 6 Zircon CL diagrams (a) and zircon LA-ICP-MS U-Pb age concordia (b) of the Wangchang intrusion rocks

表2 杨桥孜金铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotopic composition of molybdenite in the Yangqiaozi gold-copper deposit

样号	样重/g	$w(\text{Re})/10^{-6}$	$\pm\sigma$	$w(^{187}\text{Re})/10^{-6}$	$\pm\sigma$	$w(^{187}\text{Os})/10^{-9}$	$\pm\sigma$	$t_{\text{model}}/\text{Ma}$	$\Delta t_{\text{model}}/\text{Ma}$
ZK301-2	0.010 9	164.157	0.80	103.179	0.50	219.695	0.85	127.67	0.79
ZK305-3	0.010 7	199.155	0.74	125.176	0.46	263.281	1.16	126.11	0.73
ZK305-2	0.011 0	522.759	1.68	328.574	1.06	695.831	3.29	126.98	0.73
ZK305-1	0.011 0	465.996	1.64	292.897	1.03	631.492	3.36	129.27	0.82
ZK407-1	0.012 2	826.955	4.26	519.774	2.68	1 123.254	5.50	129.57	0.92
ZK407-2	0.011 2	647.617	2.84	407.053	1.79	884.462	6.91	130.28	1.17

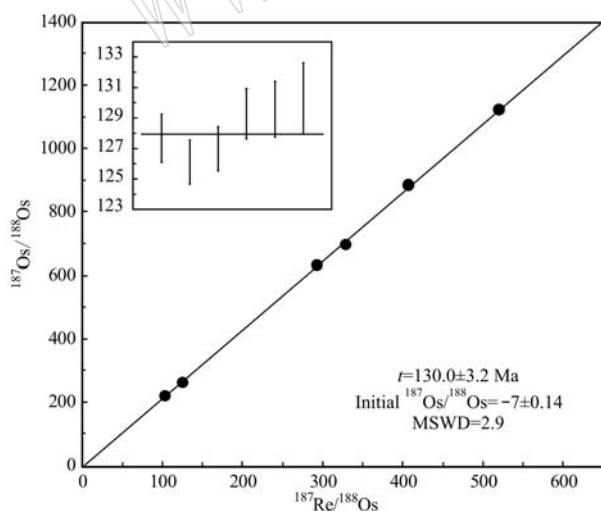


图7 杨桥孜金铜矿床 Re-Os 同位素等时线年龄

Fig. 7 Re-Os isotopic age of the Yangqiaozi gold-copper deposit

(数据另外发表), 与辉钼矿 Re-Os 同位素年龄吻合。

本文统计了研究区主要的中酸性侵入岩成岩年龄(表3), 认为区内岩浆岩可以分为4个期次。第1期为新元古代早期的基性侵入岩辉绿岩(王清海等, 2011; 马玉广等, 2018), 形成与原生金刚石有关的矿床; 第2期为侏罗纪早期的中酸性侵入岩石英二长闪长岩(191.3 ± 0.5 Ma, 林景仟等, 2000)、细粒花岗岩(180.0 ± 2.4 Ma, 数据另外发表); 第3期为早白垩世早期的以中性侵入岩闪长岩类($145 \pm 2.2 \sim 121 \pm 1$ Ma, Xu *et al.*, 2004b; 纪伟强等, 2005; 杨德彬等, 2008; 吴维平等, 2013; 张喜, 2017), 主要发育与中性侵入岩类有关的矽卡岩型 Fe、Cu-Au-(Fe) 矿床; 第4期为早白垩世晚期的酸性侵入岩花岗岩类(郑世柱, 1992^①, 1995^②)。

① 郑世柱. 1992. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.

② 郑世柱. 1995. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.

表 3 徐宿弧安徽北段侵入岩的同位素年龄统计表
Table 3 Statistics of isotope ages of intrusive rocks in the study area

地质时代		岩体名称	岩性	年龄/Ma	测定方法	
早白垩世晚期	第 4 期	旗杆楼	二长花岗岩	102.1 ^①	全岩 K-Ar	
		旗杆楼	二长花岗岩	108 ^①	长石 K-Ar	
			利国	闪长玢岩	130.8±1.8 ^②	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
			利国	闪长岩	131±3 ^③	锆石 SHRIMP U-Pb
			利国	闪长玢岩	131.1±3.4 ^④	锆石 SHRIMP U-Pb
			班井	闪长玢岩	131±1 ^④	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
			班井	(角闪) 闪长斑岩	127±1 ^④	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
			班井	角闪闪长玢岩	126.4±2.1 ^⑤	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
			纱帽山	石英闪长玢岩	137.34±4.22 ^①	全岩 K-Ar
	燕山期	早白垩世早期	第 3 期	夹沟	闪长斑岩	132 ^⑥
刁山集				二长闪长岩	129.4 ^⑥	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
夹沟				二长闪长斑岩	132±4.1 ^⑧	锆石 SHRIMP U-Pb
夹沟				花岗闪长斑岩	145.07±2.28 ^①	全岩 K-Ar
夹沟				石英闪长玢岩	133.5±2.4 ^①	角闪石 K-Ar
丰山				二长闪长斑岩	129±2 ^④	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
蔡山				石英闪长斑岩	131±1 ^④	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
徐楼				闪长玢岩	127.9±2.0 ^③	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
王场				闪长玢岩	132.1±1.9 ^⑦	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
					丁里	微粒花岗岩
侏罗纪早期	第 2 期	班井	石英二长闪长岩	191.3±0.5 ^⑥	角闪石 Ar-Ar	
晋宁期	新元古代早期	第 1 期	栏杆	辉绿岩	890 ^⑧	锆石 LA-ICP-MS U-Pb
			栏杆	辉绿岩	913±4 ^⑧	斜锆石 SIMS Pb-Pb

数据来源: ① 郑世柱 (1992^①, 1995^②); ② 张喜 (2017); ③ Xu *et al.* (2004b); ④ 杨德彬等 (2008); ⑤ 纪伟强等 (2005); ⑥ 吴维平等 2013; ⑦ 本文数据; ⑧ 数据另外发表; ⑨ 林景仟等 (2000); ⑩ 王清海等 (2011); ⑪ 马玉广等 (2018); ⑫ 周虎等 (2019); ⑬ 王伟等 (2020)。

4.2 区域成矿规律

徐宿弧 (安徽北段) 地区主要矿床特征如表 4 所示, 矿床的成因类型可分为 4 类: 与中性侵入岩和奥陶系有关的矽卡岩型 Fe 矿床、与中酸性侵入岩和寒武系有关的矽卡岩型 (Fe)-Au-Cu-(Mo) 矿床、与基性深成侵入岩有关的岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床、与

表 4 研究区矿床类型划分表
Table 4 Classification of deposit types in the study area

形成时代	矿床类型	矿床名称	围岩	岩体类型
燕山期	矽卡岩 Fe 矿床	石楼、双庄、史小楼、殷庄、邹楼、旗杆楼、王场、徐楼	下奥陶统 萧县组	二长花岗岩闪长岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩
	矽卡岩 (Fe)-Cu-Au-(Mo) 矿床	刘楼、陈庄、前常、前常东、秦楼、杨桥孜	中上寒武统	石英二长闪长玢岩、花岗闪长斑岩、石英二长闪长岩
晋宁期	原生金刚石矿床	栏杆	震旦系	辉绿岩
暂无年龄数据报道	岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床	后马场	下奥陶统	辉长岩、橄长岩、辉长闪长岩

① 郑世柱. 1992. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.
② 郑世柱. 1995. 区域地质调查区调报告. 合肥: 安徽省地质矿产局 325 地质队.

基性浅成侵入岩有关的原生金刚石矿床。

第1类为矽卡岩型铁矿床,主要有石楼、双庄、史小楼、殷庄、邹楼、旗杆楼、王场、徐楼铁矿床等,赋矿岩体集中形成于早白垩世(132~101 Ma),有学者将研究区该类矿床称为“徐楼式”铁矿床,与华北邯邢式铁矿床极为类似(汪青松, 2010; 黄海燕等, 2017),是研究区主要的铁矿床类型。第2类为矽卡岩型金铜矿床,主要有杨桥孜、刘楼、陈庄、前常、前常东、秦楼等金铜矿床,成矿与三铺岩体密切相关,成矿成岩时代集中于早白垩世(130 Ma 左右),前人将该类矿床称为“杨桥孜式”金铜矿床,与大冶式铁铜矿床较为类似(汪青松, 2010; 产思维等, 2020),为本区域主要的铜金矿化类型。第3类为与碱性基性岩相关的金刚石矿床(蔡逸涛等, 2014; 赵丽丽等, 2018),赋矿岩体形成于新元古代(913~890 Ma),显示该地区有金刚石矿床的找矿潜力。第4类为岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床,该矿床的形成与基性岩辉长岩、橄长岩、辉长闪长岩密切相关(王振强, 2018),后马场是目前研究区内发现的唯一基性岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床,该矿床的发现不仅丰富了区内矿床类型,也暗示区内具有岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床的成矿潜力。

由前文可知,研究区矿化普遍,成矿岩体种类复杂,矿床形成时代广泛,区内成矿时代集中分布在中生代早白垩世早期,其次是新元古代。

4.3 徐宿弧安徽北段构造背景讨论与找矿方向

徐宿弧安徽北段位于华北克拉通东南缘,区内岩浆活动期次与华北克拉通构造演化活动密切相关,本次研究将区内岩浆岩共分为4个期次,主要构造阶段主要处于新元古代晋宁期和中生代燕山期这两个阶段。

第1期次岩浆岩为晋宁期新元古代早期的基性侵入岩辉绿岩(913±4 Ma)(蔡逸涛等, 2014)。Cawood 等(2014)认为,1.8~0.8 Ga 期间,全球始终处于伸展构造环境,进入了“地球中年调整期”,处于“一拉到底”的构造背景和地质状态,华北克拉通从1.78 Ga 开始到新元古代经历了多期裂谷事件,一直处于拉张的构造环境(翟明国等, 2014; 翟明国, 2019)。耿元生等(2020)认为新元古代早期(0.94~0.89 Ga)华北克拉通徐宿弧地区的岩浆活动,以出露的基性岩床和岩墙(Liu *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2020)为代表,该阶段的基性岩墙主要形成于大陆的拉张环境(Wang *et al.*, 2012)。蔡

逸涛等(2014)对徐宿弧栏杆地区与新元古代辉绿岩有关的金刚石矿床研究认为,其形成于华北克拉通东南缘的板内陆缘环境,结合辉绿岩的锆石 U-Pb 定年结果,证明了徐宿弧地区新元古代早期处于大陆伸展环境,并存在新元古代早期的构造热岩浆事件,为该区辉绿岩将上地幔的金刚石带到地表创造了条件(王清海等, 2011; 蔡逸涛等, 2014)。

本次划分的第2~4期岩浆岩均为中生代燕山期中酸性侵入岩,按构造背景分为中生代华北克拉通与扬子克拉通俯冲碰撞后折返环境下的早侏罗世岩浆岩和中生代华北克拉通破坏与岩石圈减薄作用强烈环境下的早白垩世岩浆岩。杨德彬等(2008)在华北克拉通东南缘深部地壳中发现有扬子克拉通基底物质的存在,认为扬子克拉通与华北克拉通的俯冲碰撞首先发生在两个陆块的东部,导致华北克拉通东南缘转化为活动陆缘。同时,有学者通过对华北克拉通徐宿弧地区班井岩体以及位于秦岭-大别造山带的新县岩体的地化分析,认为它们的物质来源不仅与华北克拉通相关,也有与扬子克拉通类似的成分,所以认为华北克拉通东南缘的岩浆岩形成于扬子-华北克拉通碰撞造山后的陆内伸展环境(林景仟等, 2000; Fyhn *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2010; 刘清泉等, 2016),因此研究区域内第2期次的岩浆岩也可能形成于造山后的陆内伸展环境。

中生代白垩纪华北克拉通发生了大规模的构造转折和岩石圈的减薄,造成克拉通的破坏与重建(高山等, 2009; 张旗等, 2009; 翟明国, 2010; 吴福元等, 2014),前人认为这次构造转折的时间大致为150~100 Ma,是西太平洋板块俯冲主要构造演化的主要因素(Zhu *et al.*, 2012, 2015),在此期间的构造演化与岩浆活动和成矿作用密切相关(毛景文等, 2003, 2005),在早白垩世早期(135~120 Ma)达到构造活动峰期同时也是岩浆活动与成矿峰期(翟明国, 2010),与研究区域内第3、4期次的岩浆岩形成时间大致一致。在此时期华北克拉通构造转折过程中,大体上是由挤压构造体制转化为伸展构造体制(高山等, 2009; 翟明国, 2010; Zhu *et al.*, 2015)。白垩纪华北克拉通岩浆活动剧烈,形成了与中酸性岩浆活动有关的热液多金属矿床,包括铜、铁、金、铅、锌、钼矿床等,以及与基底重熔和深成侵位花岗质岩体有关的爆发式大规模金成矿作用(翟明国, 2010)。研究区域内早白垩世发育的大量矽卡岩矿床符合华北克拉通整体在早白垩世的成矿规律。

根据本次测得与收集的研究区资料,得出徐宿弧地区与成矿有关中生代的岩浆岩集中于 145~101 Ma,胶东地区和成矿有关的岩浆岩活动集中于 160~110 Ma(宋英昕等, 2019),两者大致处于同一时代范围。近期有学者报道了在徐宿弧地区发现古元古代变质基底(彭凌日等, 2017; 李振生等, 2018),前人对华北克拉通东南缘徐宿弧地区夹沟岩体中镁铁质变质包体,进行了年代学和变质演化过程研究,指示它们形成于晚古元古代板片俯冲或弧-陆碰撞的构造环境,属于胶-辽-吉带的西南延并共同构成了华北东部一条古元古代碰撞造山带(Luo *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006b; 聂佳珍等, 2018)。

同时,Liu 等(2015)对蚌埠石门山变形花岗岩开展了年代学工作,认为蚌埠地区古元古代岩浆作用及部分熔融作用与胶-辽-吉带一致,王程程等(2018)通过对蚌埠五河杂岩的变质演化研究,认为五河地区杂岩的变质演化过程也类似于胶北地体,表明徐宿-蚌埠古元古代活动带可能是胶-辽-吉古元古代活动带的西南延伸(郭素淑等, 2009)。研究区早白垩世早期发育较多的矽卡岩型 Fe-Au-Cu 矿床,而胶东地区早白垩世早期也发育有大量斑岩-矽卡岩型矿床(宋英昕等, 2019),因此徐宿弧地区与胶东地区可能有相似的古元古代变质基底和中生代岩浆活动。前人认为华北克拉通基底普遍由变质程度较深的岩石组成,这些岩石金含量较高,是金矿床形成的主要物质基础(蔡瑞清, 2012)。目前,胶东地区在古元古代变质基底中发育大量热液金多金属矿床,暗示徐宿弧地区除了在岩体与奥陶纪和寒武纪地层接触带中发现较多的矽卡岩型多金属矿床以外,在徐宿弧地区深部的古元古代变质基底可能也存在与胶东地区相类似的热液金多金属矿床(杨立强等, 2014; 范宏瑞等, 2016)。

5 结论

(1) 测得王场闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 132.1 ± 1.9 Ma,形成于早白垩世早期;杨桥孜 Au-Cu 矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 128.0 ± 1.6 Ma,杨桥孜 Cu-Au 矿床是燕山期早白垩世形成的。

(2) 区内的岩浆岩分为 4 个期次,矿床分为 4 种类型:第 1 期岩浆岩为新元古代早期的浅成基性侵入岩(辉绿岩),与原生金刚石矿床有关;第 2 期岩浆岩为侏罗纪早期的中酸性侵入岩;第 3 期岩浆岩为早白

垩世早期的中酸性侵入岩类,与矽卡岩型 Fe 矿床和矽卡岩型(Fe)-Cu-Au-(Mo)矿床有关;第 4 期为早白垩世晚期的酸性侵入岩。研究区还发育与深成基性侵入岩有关的岩浆熔离型 Cu-Ni 矿床,但尚无年代学研究报道。4 个期次的岩浆岩均形成于华北克拉通伸展的构造环境,但受不同的地质事件影响。

References

- Cai Ruiqing. 2012. A brief talk on the origin of gold deposits in old metamorphic rocks in the margin of North China[J]. Western Resources, (5): 94~95(in Chinese with English abstract).
- Cai Yitao and Zhang Jie. 2014. Petrology of diamond-bearing mother rocks in railings of Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 33(s1): 363~364(in Chinese with English abstract).
- Cawood Peter A and Hawkesworth C J. 2014. Earth's middle age[J]. Geology, 42(6): 503~506.
- Chan Siwei and Yang Zhi. 2020. Metallogenic series and regularity of skarn-type deposits in Huaibei area of Anhui Province[J]. Geological Survey of China, 7(3): 38~44(in Chinese with English abstract).
- Chan Siwei, Zhang Shunlin and Zhang Jiajia. 2016. Occurrence and enrichment regularities of gold in the Yangqiaozi copper-gold deposit in Suixi County of Anhui Province[J]. Journal of Geology, 40(1): 64~69(in Chinese with English abstract).
- Chen Fulun. 1987. Controls of endogenic ore localization by the Xuzhou-Suxian Vortex structure[J]. Geological Review, 33(2): 148~157(in Chinese with English abstract).
- Du Hongwei. 2016. Analysis of geological characteristics and metallogenic control factors of Xulou iron deposit in Suixi County, Anhui Province[J]. The Earth, (7): 80~80(in Chinese with English abstract).
- Fan Hongrui, Feng Kai, Li Xinghui, *et al.* 2016. Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong and Korean peninsulas[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(10): 3 225~3 238(in Chinese with English abstract).
- Fei Cuncai. 2016. Analysis of ore-forming and ore-controlling conditions of Zoulou ore deposit, Lixi County, Anhui Province[J]. The Earth, (6): 95~95(in Chinese with English abstract).
- Fyhn M B W, Nielsen L H, Boldreel L O, *et al.* 2009. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the northwest Phu Khanh Basin, offshore Central Vietnam[J]. Marine & Petroleum Geology, 26(1): 1~24.
- Gao Sally, Rudnick R L, Yuan Honglin, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust: Evidence from high Mg andesites in the North China Craton[J]. Nature, 432: 892~897.
- Gao Shan, Zhang Junfeng, Xu Wenliang, *et al.* 2009. Delamination and

- destruction of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 54(14): 1 962~1 973 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Du Lilin, *et al.* 2020. The characteristics of Meso-Neoproterozoic magmatic rocks in North China, South China and Tarim blocks and their significance of geological correlation [J]. Acta Petrologica Sinica, 36(8): 2 276~2 312 (in Chinese with English abstract).
- Guo Sushu and Li Shuguang. 2009. SHRIMP zircon U-Pb ages for the Paleoproterozoic metamorphic-magmatic events in the southeast margin of the North China Craton[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 39(6): 694~699 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. J. Metamorph. Geol., 18: 423~439.
- Huang Haiyan and Tu Aihua. 2017. Sanpu intrusive body characteristics, genesis and metallogenic model of surrounding metal deposits in Suixi County, Anhui Province[J]. Western Resources, (4): 18~20 (in Chinese with English abstract).
- Ji Weiqiang, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2005. Amphiboles in eclogite xenoliths from Xuzhou-Suzhou area, central China—Texture, mineral chemistry and their tectonic implications[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 25(4): 11~16 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhensheng, Zhao Zhuoya, Li Jianxun, *et al.* 2018. Provenance analysis of the black clastic rock series at the Cambrian-Base in the Southeastern margin of North China Craton and its constraints on the Late Precambrian geologic evolution [J]. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1 803~1 828 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Li Jianhua, *et al.* 2000. Early Jurassic Banjing intrusive complex of southern marginal zone of north China block Xuzhou[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 30(3): 209~214 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingquan, Shao Yongjun, Chen Xinmeng, *et al.* 2016. Petrogeochemistry, geochronology and Hf isotopes of the Monzogranite from Xinxian, Southern region in Henan Province[J]. Earth Science, 41(8): 1 275~1 294 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Hu Z, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chem. Geol., 257: 34~43.
- Liu Yican, Deng Liangpeng, Gu Xiaofeng, *et al.* 2015. Application of Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers to constrain high-temperature metamorphism in eclogites from the Dabie Orogen, Central China [J]. Gondwana Research, 27(1): 410~423.
- Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, *et al.* 2006. Zircon U-Pb dating for the earliest Neoproterozoic mafic magmatism in the southern margin of the North China Block [J]. Chinese Science Bulletin, 51(19): 2 375~2 382.
- Luo Yan, Sun Min, Zhao Guochun, *et al.* 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt [J]. Precambrian Res., 134(3~4): 349~371.
- Luwig K R. 2003. Isoplot 3.0—A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Berkeley.
- Ma Gongwei. 1992. New recognition on the genesis of the Xuzhou-Suxian Arcuate structure [J]. Regional Geology of China, (1): 83~87 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yuguang and Wan Caiyu. 2018. Comparison of diamond from basal conglomerate of the Jinshanzhai formation of the simian and that from diabase in the Langan area, Suzhou, Anhui Province [J]. Geology of Anhui, 28(1): 31~33 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, *et al.* 2003. Geodynamics of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Enlightenment from precise dating of metal deposits [J]. Science in China Series D—Earth Sciences, 33(4): 289~299 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding tectonic settings [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169~188 (in Chinese with English abstract).
- Nie Jiazhen, Liu Yican and Yang Yang. 2018. Metamorphic evolution and *p-t* paths of the precambrian lower-crust mafic xenoliths from jiagou area at the southeastern margin of the North China Craton [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 38(1): 65~79 (in Chinese with English abstract).
- Ning Siyuan, Wang Fangyue, Xue Weidong, *et al.* 2017. Geochemistry of the Baoshan pluton in the Tongling region of the Lower Yangtze River Belt [J]. Geochimica, 46(5): 397~412 (in Chinese with English abstract).
- Peng Lingri, Shu Liangshu and Zhang Yuwei. 2017. Study of the features of structural deformation for the Xuhuai thrust and fold belt, SE North China Block [J]. Geological Journal of China Universities, 23(2): 337~349 (in Chinese with English abstract).
- Rubatto D, Gebauer D and Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: The age of Alpine metamorphism in the Sosia-Lanzo Zone (Western Alps) [J]. Earth Planet Sci. Lett., 167: 141~158.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Wu Junqi and Liu Daozhong. 1994. Thrust tectonics of Xuzhou-Suzhou region, eastern China [J]. Journal of Nanjing University, 30(4): 638~646 (in Chinese with English abstract).

- Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A, and IV B iron meteorites[J]. *Science*, 271(5 252): 1 099~1 102.
- Song Yingxin, Song Chunming, Li Shiyong, *et al.* 2019. The discovery of three-stage Late Mesozoic metallogenic bodies and 3. 5 Ga zircon in the Jiaodong Terrane and their metallogenetic geodynamical setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 440~457(in Chinese with English abstract).
- Su Xiangdong, Peng Peng, Zhu Renzhi, *et al.* 2020. Multistage evolution of the Xuhuai rift: Insights from the occurrence and compositional profiles of doleritic sills in the southeastern margin of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 82: 221~240.
- Sun Weidong, Williams I S and Li Shuguang. 2002. Carboniferous and Triassic eclogites in the western Dabie Mountains, East-central China: Evidence for protracted convergence of the North and South China Blocks[J]. *J. Metamorph Geology*, 20: 873~886.
- Sun Yali, Xu Peng, Li Jing, *et al.* 2010. A practical method for determination of molybdenite Re-Os age by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with Carius tube-HNO₃ digestion[J]. *Analytical Methods*, 2(5): 575~581.
- Tu Aihua. 2017. Geological characteristics and ore-controlling factors of Qianchang copper iron mine in Suixi County, Anhui Province[J]. *Modern Mining*, 33(6): 51~52(in Chinese with English abstract).
- Wang Chengcheng, Liu Yican, Yang Yang, *et al.* 2018. Metamorphic evolution of mafic granulites from the Wuhe complex at the Southeastern margin of the North China Craton[J]. *Earth Science*, 43(1): 296~316(in Chinese with English abstract).
- Wang Dongbing, Sun Zhiming, Yin Fuguang, *et al.* 2012. Geochronology of the Hekou group on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rocks[J]. *Journal of Stratigraphy*, 36(3): 630~635.
- Wang Luchao, Wang Jilin and Li Lei. 2011. Tectonic characteristics and their evolution in Xu-Su area[J]. *Journal of Geology*, 35(3): 248~250(in Chinese with English abstract).
- Wang Qinghai, Yang Debin and Xu Wenliang. 2011. Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic study of zircons from diabase swarms in the Xuzhou-HuaiBei area[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(6): 796~815(in Chinese with English abstract).
- Wang Wei and Chan Siwei. 2020. LA-ICP-MS U-Pb chronologic and geochemical characteristics of zircons from the Xulou rock mass in the Huaibei area, Anhui province[J]. *Geology of Anhui*, 30(1): 7~13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Xiao Yilin, Sun He, *et al.* 2020. Initiation of the North China Craton destruction: Constraints from the diamond-bearing alkaline basalts from Lan'gan, China[J]. *Gondwana Research*, 80: 228~243.
- Wang Zhenqiang. 2018. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Houmachang copper-nickel deposit, Suixi County, Anhui Province[J]. *Western Resources*, 85(4): 44~45, 47(in Chinese with English abstract).
- Wang Fangyue, Ge Can, Ning Siyuan, *et al.* 2017. A new approach to LA-ICP-MS mapping and application in geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(11): 3 422~3 436 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingsong. 2010. Analysis on ore-controlling conditions and metallogenic model of skarn type Fe and Cu deposits in Huaibai area[J]. *Resources Survey and Environment*, 31(2): 103~111(in Chinese with English abstract).
- Wang Qingsong, Zhang Shunlin and Chan Siwei. 2015. Discovery and geological of the Yangqiaozi copper-gold deposit in Suixi County, norther Anhui Province[J]. *Resources Survey and Environment*, 36(4): 285~290(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1~23.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Zhu Rixiang, *et al.* 2014. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(12): 2 878~2 890.
- Wu Weiping, Li Wenqing, Liu Chun, *et al.* 2013. Geological and geochemical characteristics of Houmachang granitic intrusion, Lixi, Anhui Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 63~63(in Chinese with English abstract).
- Xu Gangan. 2017. Study on metallogenic characteristics of Qiganlou iron mine, Xiaoxian County, Anhui Province[J]. *Western Resources*, (1): 56~58(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Gao Shan, Wang Haiqing, *et al.* 2006b. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications[J]. *Geology*, 34(9): 721~724.
- Xu Wenliang, Liu Xiaochun, Wang Haiqing, *et al.* 2004a. Garnet exsolution in garnet clinopyroxene xenoliths in Earely Cretaceous intrusions from the Xuzhou region, eastern China[J]. *Mineralogical Magazine*, 68(3): 443~453.
- Xu Wenliang, Liu Xiaochun, Wang Haiqing, *et al.* 2004b. Chronology and source of Mesozoic intrusive complex in Xui-Huai region, central China: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 96~106.
- Xu Wenliang, Wang Haiqing, Wang Dongyan, *et al.* 2006a. Mesozoic

- adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 454~464.
- Xu Wenliang, Yang Debin, Gao Shan, *et al.* 2010. Geochemistry of peridotite xenoliths in Early Cretaceous high Mg[#] diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The nature of Mesozoic lithospheric mantle and constraints on lithospheric thinning [J]. *Chemical Geology*, 270(1~4): 257~273.
- Yang Debin, Xu Wenliang, Pei Fuping, *et al.* 2008. Chronology and Pb isotope compositions of early Cretaceous adakitic rocks in Xuzhou-Huai area China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1 745~1 758 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, *et al.* 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2 447~2 467 (in Chinese with English abstract).
- Yin Lu, Li Jie, Zhao Peipei, *et al.* 2015. A new method for analysis of Re-Os isotopic system in organic-rich sediments[J]. *Geochimica*, 44(3): 225~237 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24~36 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2019. Tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722~745 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, *et al.* 2014. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21~51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xi. 2017. Geochemical Studies on Yanshan Magmatic Rock and Fe (Cu-Au) Deposit in the Southeastern of NCC: Take the Case of Liguao Deposit, Xuhuai Area[D]. Hefei: University of Science and Technology of China (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lili, Lu Sanming, Ma Yuguang, *et al.* 2018. Geological conditions and genesis of diamond mineralization in Suzhou railing area, Anhui Province[J]. *Modern Mining*, 34(9): 67~72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, *et al.* 1997. The distribution and geological characteristics of auriferous skarn deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 16(3): 2~12 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hu, Shang Defeng and Chan Siwei. 2019. Zircon U-Pb dating, petrogenesis and geological significance of the Banjing pluton in Xuhuai area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 39(3): 9~16 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Xie Chenglong, Chen Wen, *et al.* 2010. Evolution of the Hongzhen metamorphic core complex: Evidence for Early Cretaceous extension in the eastern Yangtze craton, eastern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3~4): 506~516.
- Zhu Renzhi, Ni Pei, Wang Guoguang, *et al.* 2019. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Laozhaishan dolerite sills in the southeastern margin of the North China Craton and their geological implication[J]. *Gondwana Research*, 67: 131~146.
- Zhu Rixiang, Fan Hongrui, Li Jianwei, *et al.* 2015. Decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1 523~1 537.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton [J]. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1 565~1 587.

附中文参考文献

- 蔡瑞清. 2012. 浅谈华北地台北缘老变质岩中金矿的成因[J]. *西部资源*, (5): 94~95.
- 蔡逸涛, 张 洁. 2014. 安徽栏杆含金金刚石母岩岩石学研究[J]. *矿床地质*, 33(s1): 363~364.
- 产思维, 杨 治. 2020. 安徽省淮北地区矽卡岩型矿床成矿系列及成矿规律[J]. *中国地质调查*, 7(3): 38~44.
- 产思维, 张顺林, 张家嘉. 2016. 安徽濉溪杨桥孜铜金矿金的赋存状态及富集规律[J]. *地质学刊*, 40(1): 64~69.
- 陈富伦. 1987. 徐宿旋卷构造对内生矿产的控制作用[J]. *地质论评*, 33(2): 148~157.
- 杜宏伟. 2016. 安徽省濉溪县徐楼铁矿的矿床地质特征、成矿控制因素分析[J]. *地球*, (7): 80~80.
- 范宏瑞, 冯 凯, 李兴辉, 等. 2016. 胶东-朝鲜半岛中生代金成矿作用[J]. *岩石学报*, 32(10): 3 225~3 238.
- 费存才. 2016. 安徽省濉溪县邹楼矿区矿床成矿控矿条件分析[J]. *地球*, (6): 95~95.
- 高山, 章军锋, 许文良, 等. 2009. 拆沉作用与华北克拉通破坏[J]. *科学通报*, 54(14): 1 962~1 973.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 2020. 华北、华南、塔里木三大陆块中新元古代岩浆岩的特征及其地质对比意义[J]. *岩石学报*, 36(8): 2 276~2 312.
- 郭素淑, 李曙光. 2009. 华北克拉通东南缘古元古代变质和岩浆事件的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *中国科学: 地球科学*, 39(6):

- 694~699.
- 黄海燕, 涂爱华. 2017 安徽省濉溪县三铺岩体特征及周围金属矿床成因、成矿模式简介[J]. 西部资源, (4): 18~20.
- 纪伟强, 许文良, 王清海, 等. 2005. 徐州-宿州地区榴辉岩类捕虏体中角闪石的结构、矿物化学及成因意义[J]. 矿物岩石, 25(4): 11~16.
- 李振生, 赵卓娅, 李建勋, 等. 2018. 华北克拉通东南缘寒武系底部黑色碎屑岩系的物源分析及其对晚前寒武纪地质演化的约束[J]. 地质学报, 92(9): 1 803~1 828.
- 林景任, 谭东娟, 厉建华, 等. 2000. 华北陆块南缘带早侏罗纪徐州班井侵入杂岩体[J]. 长春科技大学学报, 30(3): 209~214.
- 刘清泉, 邵拥军, 陈昕梦, 等. 2016. 豫南新县岩体地球化学、年代学和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 41(8): 1 275~1 294.
- 马公伟. 1992. 对徐宿弧形构造成因的新认识[J]. 中国区域地质, (1): 83~87.
- 马玉广, 万才宇. 2018. 安徽省宿州栏杆地区震旦系金山寨组底砾岩与辉绿岩中金刚石对比[J]. 安徽地质, 28(1): 31~33.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33(4): 289~299.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169~188.
- 聂佳珍, 刘贻灿, 杨 阳. 2018. 华北东南缘夹沟前寒武纪镁铁质下地壳包体的变质演化和 P-T 轨迹[J]. 矿物岩石, 38(1): 65~79.
- 宁思远, 汪方跃, 薛伟栋, 等. 2017. 长江中下游铜陵地区宝山岩体地球化学研究[J]. 地球化学, 46(5): 397~412.
- 彭凌日, 舒良树, 张育伟. 2017. 华北陆块东南缘徐淮推覆-褶皱带构造变形特征研究[J]. 高校地质学报, 23(2): 337~349.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 38(5): 495~500.
- 舒良树, 吴俊奇, 刘道忠. 1994. 徐宿地区推覆构造[J]. 南京大学学报, 30(4): 638~646.
- 宋英昕, 宋明春, 李世勇, 等. 2019. 胶东晚中生代三期成矿岩体 3.5 Ga 锆石的发现及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 93(2): 440~457.
- 涂爱华. 2017. 安徽省濉溪县前常铜铁矿地质特征及控矿因素[J]. 现代矿业, 33(6): 51~52.
- 王程程, 刘贻灿, 杨 阳, 等. 2018. 华北东南缘五河杂岩中镁铁质麻粒岩的变质演化[J]. 地球科学, 43(1): 296~316.
- 王陆超, 汪吉林, 李 磊. 2011. 徐宿地区构造特征及其演化[J]. 地质学刊, 35(3): 248~250.
- 王清海, 杨德彬, 许文良. 2011. 华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动: 徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和 Hf 同位素证据[J]. 中国科学: 地球科学, 41(6): 796~815.
- 王 伟, 产思维. 2020. 安徽淮北地区徐楼岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、地球化学特征[J]. 安徽地质, 30(1): 7~13.
- 王振强. 2018. 安徽省濉溪县后马场铜镍矿矿床地质特征及成矿机制浅析[J]. 西部资源, 85(4): 44~45, 47.
- 汪方跃, 葛 繁, 宁思远, 等. 2017. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用[J]. 岩石学报, 33(11): 3 422~3 436.
- 汪青松. 2010. 淮北地区矽卡岩型铁铜矿床控矿条件分析与成矿模式[J]. 资源调查与环境, 31(2): 103~111.
- 汪青松, 张顺林, 产思维. 2015. 皖北濉溪县杨桥孜铜金矿床的发现及其地质意义[J]. 资源调查与环境, 36(4): 285~290.
- 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 44(11): 2 358~2 372.
- 吴维平, 李文庆, 刘 春, 等. 2013. 安徽濉溪后马场花岗岩体地质地球化学特征[J]. 矿物学报, 33(S2): 63~63.
- 徐干干. 2017. 安徽省萧县旗杆楼铁矿成矿特征研究[J]. 西部资源, (1): 56~58.
- 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等. 2008. 徐淮地区早白垩纪 adakitic 岩石的年代学和 Pb 同位素组成: 对岩浆源区与华北克拉通东部构造深化的制约[J]. 岩石学报, 24(8): 1 745~1 758.
- 杨立强, 邓 军, 王中亮, 等. 2014. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报, 30(9): 2 447~2 467.
- 尹 露, 李 杰, 赵佩佩, 等. 2015. 一种新的适合富有机质沉积岩的 Re-Os 同位素分析方法初探[J]. 地球化学, 44(3): 225~237.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 29(1): 24~36.
- 翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 25(5): 722~745.
- 翟明国, 胡 波, 彭 澎, 等. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 张 旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 21~51.
- 张 喜. 2017. 华北克拉通东南缘燕山期岩浆岩与铁(铜金)矿床地球化学研究[D]. 安徽合肥: 中国科学技术大学.
- 赵丽丽, 陆三明, 马玉广, 等. 2018. 安徽宿州栏杆地区金刚石成矿地质条件及成因[J]. 现代矿业, 34(9): 67~72.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 1997. 中国含金夕卡岩矿床的分布和主要地质特征[J]. 矿床地质, 16(3): 2~12.
- 周 虎, 尚德锋, 产思维, 等. 2019. 徐淮地区斑岩体锆石 U-Pb 测年、岩石成因及其地质意义[J]. 矿物岩石, 39(3): 9~16.