

doi:10.3799/dqkx.2011.003

华北克拉通南缘小秦岭金矿区基性脉岩时代及地质意义

毕诗健^{1,2}, 李建威^{1,2*}, 李占轲^{1,2}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 产于太古代—古元古代变质地体中的石英脉型金矿是世界上最重要的金矿类型之一, 大多数金矿区内基性脉岩非常发育, 空间上与含金石英脉密切相关, 但目前对基性脉岩与石英脉型金矿的成因联系尚未取得一致认识。以华北克拉通南缘小秦岭金矿区为例, 对典型矿区(东闯、大湖、枪马)采矿巷道内的基性脉岩开展精确的 U-Pb 年代学研究。4 个脉岩样品给出一致的锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $(1\,819 \pm 10\text{ Ma}, 1\sigma)$; 1 个样品中的黑云母给出了略微年轻的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 $(1\,719.0 \pm 21.0\text{ Ma}, 2\sigma)$ 。定年结果表明: (1) 小秦岭金矿区内大量基性脉岩形成于古元古代晚期, 是华北克拉通东西块体在 1.85 Ga 左右发生碰撞后伸展作用的产物; (2) 前人获得的基性脉岩 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄 $(187.6 \sim 75.9\text{ Ma})$ 可能并非脉岩真实侵位年龄, 而是代表这些脉岩遭受中生代构造—热事件影响的扰动年龄(或冷却年龄)。最新的成矿年代学研究结果表明, 小秦岭地区绝大多数金矿床形成于早白垩世 $130 \sim 120\text{ Ma}$, 大大晚于上述古元古代基性脉岩的侵位时代, 因此两者之间没有成因联系(尽管它们的空间关系十分密切)。小秦岭地区是否存在与金矿床同时的晚中生代基性岩浆活动, 对于讨论本区金矿床的矿床成因和成矿构造环境非常重要, 但本文工作尚不能明确回答这一问题, 今后需要对矿区内各期基性脉岩进行系统的同位素定年。

关键词: 基性脉岩; 地质年代学; 石英脉型金矿; 小秦岭金矿区; 岩石学。

中图分类号: P571; P611

文章编号: 1000-2383(2011)01-0017-16

收稿日期: 2010-08-25

Geological Significance and Geochronology of Paleoproterozoic Mafic Dykes of Xiaolinling Gold District, Southern Margin of the North China Craton

BI Shi-jian^{1,2}, LI Jian-wei^{1,2*}, LI Zhan-ke^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Lode gold deposit is the most economically important type of gold deposits worldwide. It commonly occurs in Archean to Paleoproterozoic metamorphic terrains and has close spatial relationship with mafic dykes. However, it is still in dispute whether mafic dykes and gold mineralization are genetically related. In this paper, we present LA-ICPMS zircon U-Pb and biotite $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ages of four mafic dikes samples collected from three major gold deposits (Dongchuang, Dahu and Qiangma deposits) in the Xiaolinling gold district, southern margin of the North China craton. Four samples yielded a consistent zircon LA-ICPMS age ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ $1\,819 \pm 10\text{ Ma}$) and a slightly younger $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age $(1\,719.0 \pm 21.0\text{ Ma})$ of biotite. Our results suggest that: (1) numerous mafic dikes in the Xiaolinling gold district formed in Paleoproterozoic, in an extensional setting after the collision between the eastern and western blocks of the North China craton at ca. 1.85 Ga ; (2) previous whole rock K-Ar and Rb-Sr ages $(187.6 \sim 75.9\text{ Ma})$ which are significantly younger than our ages represent thermal perturbation (or cooling ages) caused by Mesozoic tectonic-thermal event. Recent geochronological studies show that the majority of gold deposits formed in Early Cretaceous ($130 \sim 120\text{ Ma}$) in the Xiaolinling district. Therefore, the mineralization event had no relationship with Paleoproterozoic mafic dykes although they were spatially associated. However, this study does not rule out the possibility of existence of Mesozoic mafic dykes in the Xiaolinling area, which may be very important for the understanding of the metallogeny and regional tectonic setting.

Key words: mafic dikes; geochronology; lode gold deposit; Xiaolinling gold district; lithology.

基金项目: 国家重大科研计划“华北克拉通破坏”(No. 90814004); 国家自然科学基金创新群体基金(No. 40521001).

作者简介: 毕诗健(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学研究. E-mail: Shijianbi_1982@163.com

* 通讯作者: 李建威, E-mail: jwl@cug.edu.cn

石英脉型金矿是世界上最重要的金矿类型之一,主要产在新太古代—古元古代和古生代—中生代的变质地体中(Goldfarb *et al.*, 1998; Huston *et al.*, 2007). 绝大多数石英脉型金矿区内,基性脉岩(煌斑岩、辉绿岩、辉长闪长岩等)十分发育,与含金石英脉空间关系密切(McNeil and Kerrich, 1986; Rock and Groves, 1988). 尽管国内外学者早就认识到基性脉岩与金矿脉的空间关系,但迄今对两者的时间和成因联系尚未取得一致的认识. Rock and Groves(1988)较早系统研究了西澳 Yilgarn 克拉通与金矿化密切共生的煌斑岩,强调煌斑岩在金矿成矿作用中的重要性,认为金主要来自共生的煌斑岩脉. 其他类似的观点还有:(1)基性岩浆释放出 H_2O 、 CO_2 等挥发份可使金发生活化迁移(翟建平, 1996),还可为金成矿作用提供大量 C、S、Cl 等矿化剂(倪师军等, 1994);(2)基性岩浆侵位过程中提供足够的热能促使大气降水发生循环并与岩石交代,从中萃取大量 Au 等成矿物质(涂怀奎, 2000);(3)基性岩脉与金矿脉时空上密切共生的根本原因是两者受同一构造背景控制(李献华和孙贤鉢, 1995; Müller and Groves, 1997). 石英脉型金矿化在成因上是否与基性脉岩有关,很大程度上有赖于对两者形成时代的精确测定(Drew *et al.*, 1996; Durring *et al.*, 2004; Tan *et al.*, 2008).

位于华北克拉通南缘的小秦岭地区,是我国规模仅次于胶东的第二大金矿区,已发现含金石英脉 1 000 余条,金矿储量超过 500 t (Mao *et al.*, 2002). 在小秦岭地区,大多数金矿床矿区内基性脉岩十分发育,空间上与含金石英脉密切伴生(栾世伟等, 1985). 准确限定小秦岭金矿区基性脉岩的侵位时代对全面理解华北克拉通南缘的地质构造演化、金矿床大规模成矿作用的深部构造背景以及基性脉岩与金矿床的成因联系等问题具有重要意义. 但迄今为止对小秦岭地区基性脉岩形成时代的研究还很缺乏,制约了对该区基性岩浆活动与金矿大规模成矿关系的认识. 栾世伟等(1985)和晁援(1989)通过对小秦岭地区与金矿脉空间上密切相关的基性脉岩的全岩 K-Ar 和 Rb-Sr 定年,认为它们形成于 187.6~75.9 Ma; 化学分析结果表明基性脉岩中 Au 的含量很高,据此认为基性脉岩为小秦岭地区金矿大规模成矿作用提供了物质来源. 由于小秦岭地区经历了新太古代、古元古代、早中生代和晚中生代等多期构造—热事件(Zhang *et al.*, 1996),全岩 K-Ar 和 Rb-Sr 定年难以获得早期地质事件形成的

基性脉岩的侵位时代. 笔者对采自小秦岭地区几个主要金矿床(枪马、东闯、大湖)采矿巷道内的基性岩脉进行了精确的锆石 U-Pb 及黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年,发现这些脉岩均形成于古元古代晚期,为重新认识该区基性脉岩与金矿化的关系和华北克拉通南缘古元古代构造演化提供了新的年代学制约.

1 地质背景和岩脉特征

华北克拉通由东部陆块、西部陆块和两者夹持的中部造山带构成(Zhao *et al.*, 2002)(图 1a). 其中中部造山带被认为是一条古元古代的陆—陆碰撞带,华北东、西陆块沿此碰撞带拼合形成统一的克拉通基底,拼合时间大约为新太古代末期(约 2.5 Ga; 李江海等, 2000; Kusky and Li, 2003)或古元古代末期(约 1.87 Ga; Zhao *et al.*, 2002). 稍后,华北克拉通发育了大规模的伸展作用和基性岩浆活动(Zhao *et al.*, 2002; Kusky and Li, 2003; Zhai and Liu, 2003),形成大量基性岩墙群(Halls *et al.*, 2000; Wilde *et al.*, 2002; Kröner *et al.*, 2006; Peng *et al.*, 2008). 这些基性岩墙群主要分布在西部陆块和中部造山带(图 1b),其次在东部陆块的鲁西地区(Chen and Shi, 1984; Hou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

小秦岭金矿区位于华北克拉通南缘、小秦岭—熊耳山地体中西部;具体的大地构造位置属于华北克拉通中部造山带的南端(图 1a);其地理位置西起陕西华山,东至河南灵宝娘娘山,南北分别以小河断裂及太要断裂为界(图 2). 区内地层主要为晚太古代—古元古代太华群片麻岩系(2.6~2.2 Ga, 周汉文等, 1998). 出露面积较大的岩浆岩有中元古代桂家峪角闪二长花岗岩(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 1557 ± 30 Ma; 黎世美等, 1996)和小河花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 1748 ± 25 Ma; 王亨治, 1987)以及几个中生代中酸性侵入岩,包括华山黑云母二长花岗岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 146 ± 15 Ma; 于和平和崔海峰, 2003)、文峪和娘娘山花岗岩体(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 138 ± 2.4 Ma 和 141.7 ± 2.5 Ma; 李永峰, 2005). 构造主要由轴向近东西的复式褶皱和走向近东西的区域性小河、太要断裂组成,它们控制了小秦岭地区近千条含金石英脉的产出. 研究区代表性金矿床有文峪、东闯、杨砦峪、枪马等,其容矿围岩为太华群闫家峪组斜长角闪岩和斜长片麻岩. 含金石英脉多沿背斜轴部呈单脉

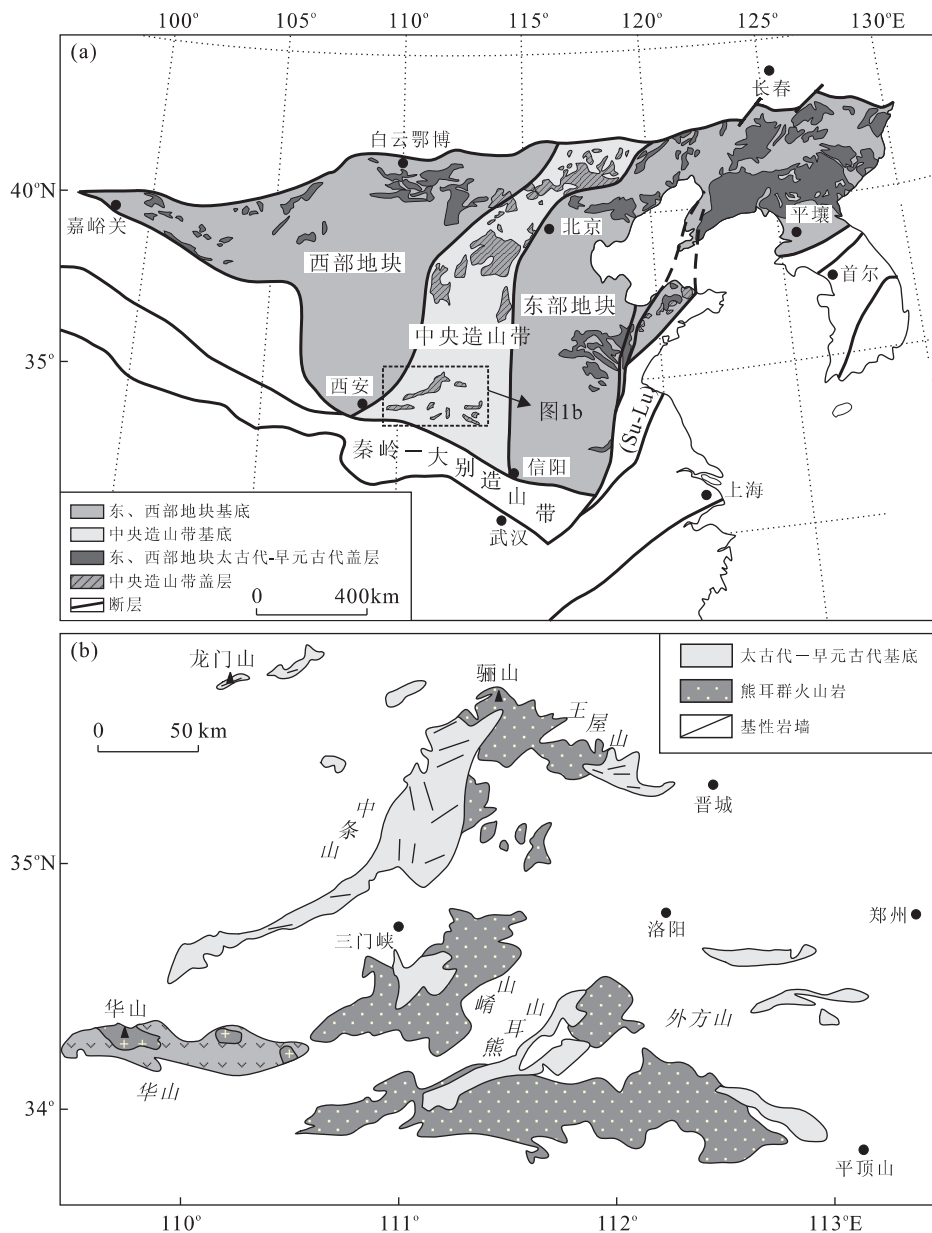


图 1 华北克拉通古元古代构造单元简图(a)(据 Zhao *et al.*, 2002)及中部造山带基性岩墙群分布(b)(据 Peng *et al.*, 2008)

Fig. 1 (a) Schematic illustration of Paleoproterozoic tectonic units for the North China craton (after Zhao *et al.*, 2002); (b) Distribution of the ca. 1.8 Ga mafic dyke swarms in the Trans-North China orogen (after Peng *et al.*, 2008)

产出,矿脉的展布形态和规模受韧—脆性断裂构造控制。基性岩脉在金矿区内广泛发育,许多金矿区均见到含金石英脉切割辉绿岩脉(图 3,图 4)或彼此平行展布,也存在岩脉切割金矿脉的现象(倪师军等, 1994),或侵入太古代变质岩系(图 3,图 4),主要岩石类型为辉绿岩、辉长岩、辉绿玢岩及煌斑岩等。

本次研究样品采自于东闯(XQL-DC)、枪马(XQL-QM)及大湖(XQL-DH)金矿区(图 4)的采矿巷道内,岩性主要为辉绿岩、煌斑岩。脉岩以岩墙、岩脉形式产出,侵位于太古界太华群变质岩系,有的被

含金石英脉穿插(图 4)。脉岩主要呈近 EW、SN、NE 及 NW 走向展布,倾向变化大,倾角大多较陡($60^{\circ}\sim 85^{\circ}$)。脉岩宽者达 10~60 余米,薄者仅几十毫米,延伸一般较远,从数十米至数千米不等。野外观察脉岩主要呈灰黑、深灰色,暗色矿物含量较高。显微镜下岩石可见辉绿结构、煌斑结构等,矿物普遍显示强烈的热液蚀变作用,多数已绿泥石化、钠黝帘石化,原生矿物难以辨认;蚀变较弱的样品显微镜下可见辉石、角闪石、黑云母、石英等原生矿物,暗色矿物自形,副矿物见锆石、磁铁矿及长针状磷灰石。

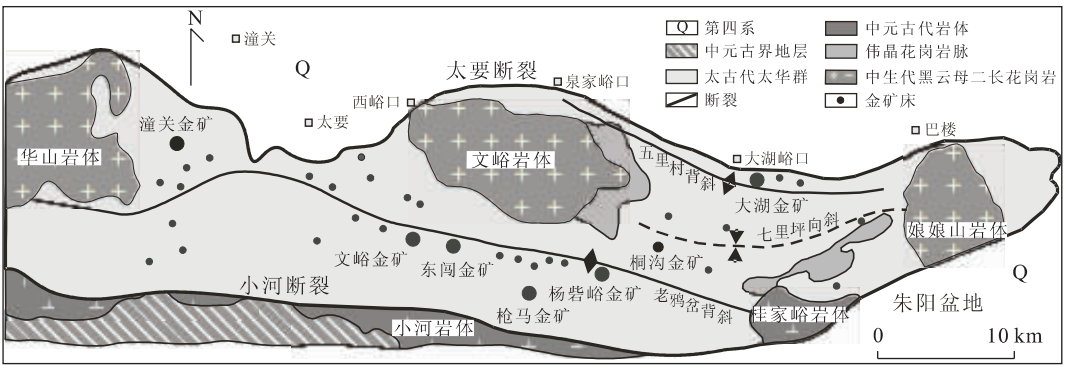


图 2 华北克拉通南缘小秦岭金矿区域地质和金矿床分布

Fig. 2 Map showing the simplified geology and distribution of gold deposits in the Xiaolinling region, southern North China craton

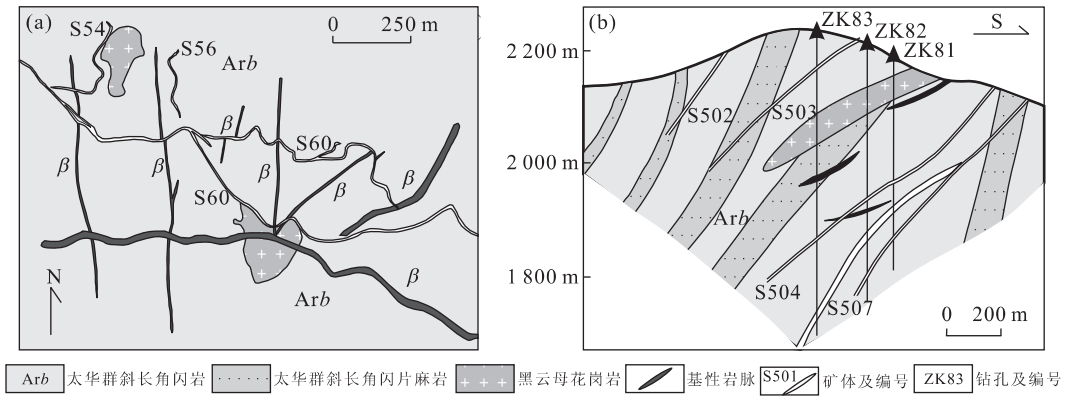


图 3 小秦岭地区杨砦峪金矿床平面(a)及东闯金矿床剖面(b)

Fig. 3 Geological plan and section from typical gold deposits in the Xiaolinling gold district, showing spatial relationship between mafic dykes (a) and auriferous quartz veins (b)

2 样品处理及分析方法

2.1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 法

岩石样品采用常规方法粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象.将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石核心暴露.锆石的阴极发光(CL)显微照相在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的电子探针实验室完成.锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行.分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器,激光剥蚀斑束直径为 24 μm 与 32 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm .锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含

量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正.样品的同位素比值及元素含量数据处理采用 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008),详细分析流程和原理参见 Yuan *et al.* (2004).获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响.锆石加权平均年龄计算(采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄,误差为 1 σ)及谐和图绘制采用 ISOPLOT(2.49 版)软件完成.

2.2 黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 法

在小秦岭枪马金矿区采集新鲜的煌斑岩样品(XQL-QM)进行破碎,在超声波清洗器中振荡、清洗 1 h 以上,干燥后在双目显微镜下挑选出 40 多颗纯净的黑云母单矿物颗粒(约 0.3 mm).将黑云母与用于中子通量监测的标准样品 ZBH-2506(荷兰自由大学标样,132 Ma)装入照射碟中,送往北京核反应堆照射 54 h.样品照射后冷却两个月,在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重

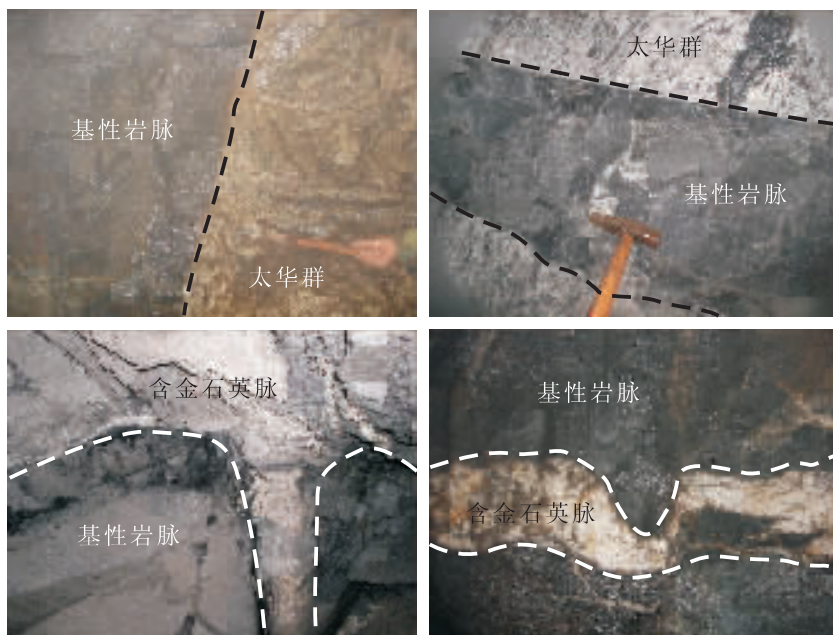


图 4 小秦岭金矿区基性岩脉与围岩野外穿插关系

Fig. 4 Field photographs in the mining tunnel of the Xiaolinling gold district, showing intercalating relationship between dykes and Taihua Group, and gold-bearing veins

点实验室的 GV5400 质谱仪上进行氩同位素测定。Ar-Ar 数据处理及年龄制图采用 ArArCALC 软件进行(ver. 2. 2c; Koppers, 2002). 详细的分析流程以及数据处理见邱华宁(2006). 文中报道的年龄数据为 95% 信度水平(2σ).

3 分析结果

3.1 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄

部分锆石的阴极发光 CL 图像(图 5)显示锆石有 3 种类型:(1)发育典型岩浆成因的生长振荡环带,无增生边与继承锆石核(如 DH1-6、14;QM2-5、11);(2)岩浆环带依稀可见,中间局部位置似补丁状结构,边部存在窄的增生边(如 QM2-13、18);(3)无环带或环带不明显,边部被溶蚀成圆滑状或近等轴状(如 QM-11). 锆石 U-Th-Pb 含量、同位素比值及表观年龄列于表 1,锆石 U-Pb 年龄谐和曲线如图 6 所示.

3.1.1 东闯金矿(XQL-DC) 从测年样品中选取的锆石为无色透明半截锥状、等粒状晶体,粒度多为 30~60 μm 之间. 其 Th/U 比值介于 0.04~0.24 之间,锆石具有较高的 Th 含量(平均 377.6 $\mu\text{g/g}$)、U 含量(平均 3 629 $\mu\text{g/g}$). 所有 6 个测点给出了很好的谐和年龄(表 1),在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄图

解上位于谐和线上(图 6),6 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\,822 \pm 16$ Ma(MSWD=0.34).

3.1.2 大湖金矿(XQL-DH) 锆石为无色透明柱状、等粒状晶体,粒度主要介于 20~70 μm 之间. 共分析 16 个点,其 Th/U 比值高,介于 0.24~3.95 之间. 两个分析点 DH-11 和 DH-16 的 Th、U 含量高、Th/U<0.5,与 DH-6、DH-10 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄近一致,加权的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 平均年龄为 $2\,462 \pm 32$ Ma (4 点),表明它们是捕获的新太古代末或古元古代初岩浆锆石. 另外 12 个测点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄图上显示一致的谐和性(图 6), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\,816 \pm 14$ Ma (MSWD=0.53),代表了大湖金矿基性岩脉(XQL-DH)的结晶年龄.

3.1.3 枪马金矿(XQL-QM) 锆石为无色透明柱状、半截锥状晶体,粒度多为 30~80 μm 之间. 共分析 13 个点,其 Th/U 比值介于 0.24~2.7 之间,锆石具有较高 Th、U 含量(平均含量分别为 301.3 $\mu\text{g/g}$ 和 223.7 $\mu\text{g/g}$),具有岩浆锆石特征. 其中 9 个测点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄图上显示一致的谐和性(图 6), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\,824 \pm 22$ Ma(MSWD=0.51),代表枪马金矿基性岩脉的结晶年龄. 两个测点 QM1-01 和 QM1-04 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别约为 2 413 Ma 和的 2 221 Ma,表明捕获锆石的存在. 另外两个点 QM-5 和 QM-6 偏离谐和线,

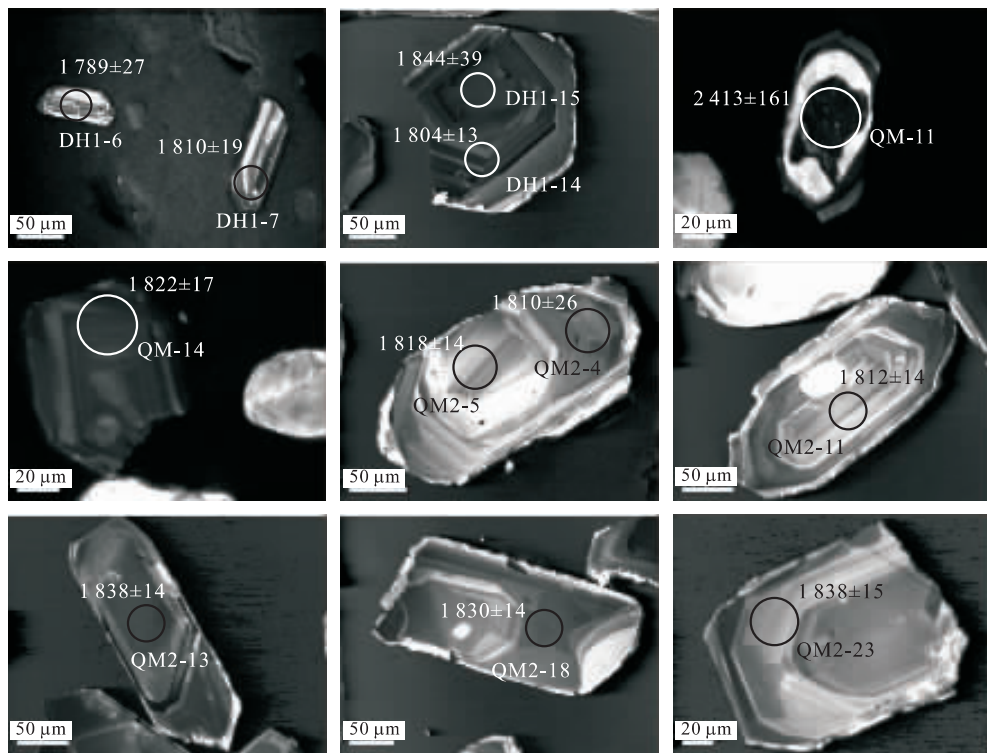


图 5 小秦岭地区基性岩脉中锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 CL images of zircons for the dykes from Xiaolinling gold district

圆圈标准为分析点位置及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,圆圈直径为 24 μm 或 32 μm

是铅丢失的反映。

从测年样品中(XQL-QM2)选取的锆石为无色透明中长柱状、双锥柱状自形晶体,粒度多为 80~200 μm 之间。共分析 23 个点, Th/U 比值介于 0.35~1.65 之间。其中 22 个测点位于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图 6), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 1819.4 ± 6.3 Ma (MSWD=0.76), 代表枪马金矿基性岩脉(XQL-QM2)的结晶年龄。测点 QM2-21 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2165 Ma, 表明捕获锆石的存在。

3.2 黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄

对枪马金矿区煌斑岩样品(XQL-QM)中的黑云母进行激光阶段加热分析,样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素分析结果见表 2, 相应的表观年龄谱及坪年龄、总气体年龄如图 7 所示。样品给出了很好的坪年龄, 年龄值为 1719.0 ± 21.0 Ma。构成年龄坪的 7 个连续加热所产生的表观年龄在误差范围内基本一致, 所释放的 ^{39}Ar 占总量的 78.83%, 总气体年龄为 1718.8 ± 4.0 Ma, 在误差范围内与坪年龄完全一致。几个低温阶段的表观年龄明显低于坪年龄和总气体年龄, 可能是岩脉局部遭受后期热事件干扰导致黑云母晶体外缘少量氩同位素丢失的结果。该样

品的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄(1719.0 ± 21.0 Ma)比同一脉岩锆石 U-Pb 年龄(1819.4 ± 6.3 Ma)年轻近 100 Ma, 可能代表岩脉冷却至 350 $^{\circ}\text{C}$ 黑云母氩同位素的封闭温度。

4 讨论

4.1 小秦岭地区基性脉岩的形成时代

迄今为止对小秦岭地区基性脉岩的年代学研究仍然很薄弱。根据早期少数几个基性脉岩的全岩 K-Ar 和 Rb-Sr 定年结果(187.6~75.9 Ma), 栾世伟等(1985)和晁援(1989)认为小秦岭地区的基性脉岩主要形成于晚中生代。由于小秦岭及邻区自太古代以来经历了多期次构造-岩浆活动(Zhang *et al.*, 1996), 区内许多脉岩都遭受了不同程度的变形、变质和蚀变作用。后期热事件必然使早期基性脉岩的同位素体系发生扰动或重置, 其 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄难以反映脉岩岩浆结晶的真实年龄。研究表明, 小秦岭东沟(XQL-DC)、枪马(XQL-QM、XQL-QM2)及大湖(XQL-DH)金矿区 4 条基性脉岩的侵位时代均为 1819 ± 10 Ma 左右($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄)。这与近期王团华等(2008a)对该区若干基性脉

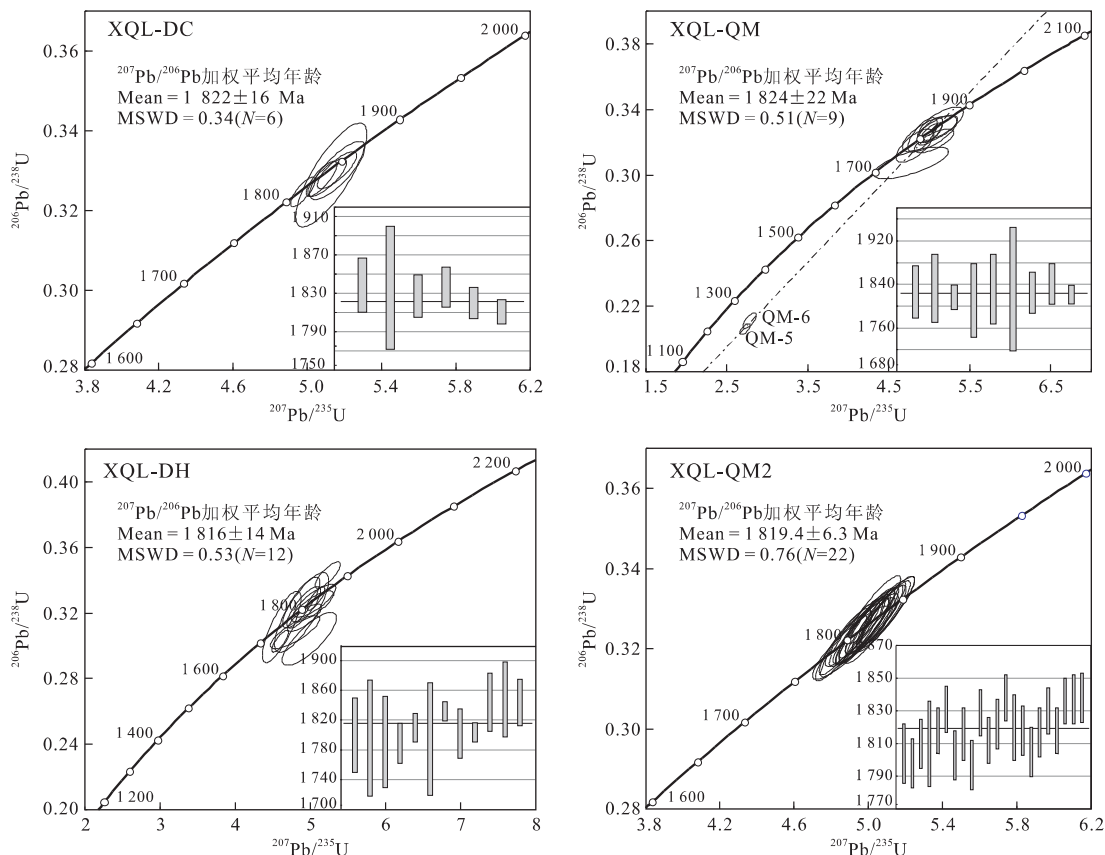


图 6 小秦岭地区基性岩脉中锆石 U-Pb 谐和曲线(加权平均年龄 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)

Fig. 6 Concordia diagrams of LA-ICPMS zircon U-Pb data for the dykes from Xiaolinling area

岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果一致(绝大多数集中于 1.85 Ga 左右). 充分证明小秦岭金矿区大量基性脉岩岩浆侵位于古元古代晚期, 约 1.82 Ga.

尽管本文获得的年龄均为古元古代, 但据此还不能排除小秦岭地区存在中生代尤其是晚中生代基性脉岩的可能性. 大量地质事实表明, 晚中生代时期华北克拉通南缘处于岩石圈伸展的构造环境, 形成小秦岭、崤山、熊耳山等中生代变质核杂岩. 对小秦岭变质核杂岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究表明, 区域伸展的时间为 135~123 Ma(张进江等, 1998). 熊耳山地区太山庙等铝质 A 型花岗岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 115 Ma; 叶会寿等, 2008)和嵩县—宝丰一带早白垩世中基性火山岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 117 ± 2 Ma; 谢桂青等, 2007)的发育也证明华北南缘在白垩世早期受伸展的构造背景控制. 华北克拉通南缘大量斑岩型钼矿(如东沟、雷门沟、竹园沟等)和隐爆角砾岩型(如祁雨沟金矿)、蚀变岩型(如公峪金矿)、石英脉型金矿(如杨砦峪、东闯金矿)均形成于 130~110 Ma(徐启东等, 1998; Han *et al.*, 2007; 叶会寿等, 2008; Li *et al.*, submit-

ted). 上述变质核杂岩、中基性火山岩、斑岩型钼矿和隐爆角砾岩型、蚀变岩型及石英脉型金矿的年龄与目前认为的华北克拉通大规模减薄作用的时间(Mao *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005)基本一致, 暗示华北南缘在早白垩世时期很可能也发生了强烈的岩石圈减薄作用. 岩石圈减薄和伸展可为基性岩浆活动和基性脉岩的侵位提供有利的构造条件. 位于华北中部造山带的太行山南段辉长岩就是这一时期岩石圈伸展和基性岩浆作用的产物(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 125.2 ± 4.5 Ma; Wang *et al.*, 2006). 实际上, 早白垩世的中基性岩脉在与小秦岭地区相邻的东秦岭和大别山地区广泛发育(Tsai *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2005); 在华北克拉通东部, 我国最大的金矿集区—胶东地区的金矿区也大量出现中基性脉岩, 其侵位时代为早白垩世 120 Ma 左右(Tan *et al.*, 2008), 并与胶东地区金矿床大规模成矿作用的时间(Yang and Zhou, 2001; Li *et al.*, 2003, 2006)一致. 以上综合分析表明, 小秦岭地区在早白垩世时期很可能也发育了强烈的基性岩浆活动并形成大量基性脉岩. 对这一认识的确定有赖于今

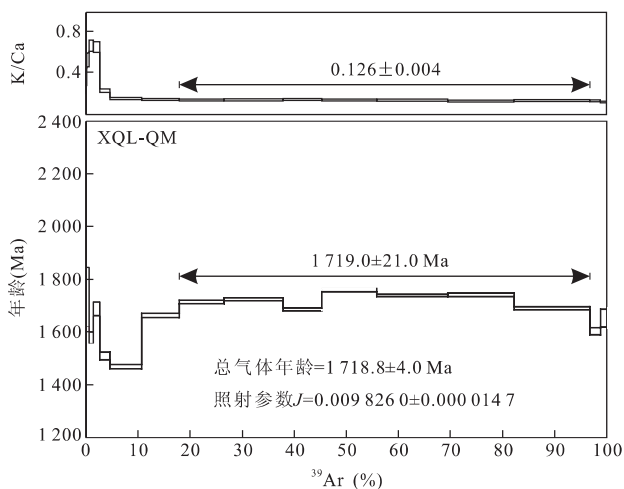


图 7 XQL-QM 黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱

Fig. 7 Step-heating spectra of biotite sample (XQL-QM), showing $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ spectrum age and total fusion age

后对小秦岭众多金矿区大量基性脉岩的系统采样和精确的同位素定年. 最近 Li *et al.* (submitted) 获得小秦岭杨砦峪金矿区一条辉绿岩脉的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 134 Ma, 暗示本区存在早白垩世基性岩浆活动.

4.2 基性脉岩与金矿成矿的关系

基性脉岩与石英脉型金矿的关系是矿床学界一个长期争论的问题. 对基性岩浆活动与金成矿作用相互关系的认识, 很大程度上有赖于对基性脉岩和金矿床形成时代的准确限定. 澳大利亚 Tarmoola 金矿区大量基性脉岩的侵位时代为 2667 ± 8 Ma, 金矿床的成矿时代为 $2657 \sim 2630$ Ma, 表明基性岩浆活动与金成矿作用具有时间、空间上成因联系 (Durring *et al.*, 2004). 胶东金矿集区基性脉岩侵位于 120 Ma 左右 (Tan *et al.*, 2008), 与大规模金成矿作用的形成时代 (120 ± 10 Ma, Yang and Zhou, 2001; Li *et al.*, 2003, 2006) 完全一致; 脉岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征显示为幔源与下地壳岩浆混合作用的产物 (Yang *et al.*, 2004), 认为与华北克拉通中生代强烈的壳幔作用引发的大规模金成矿构造背景一致 (Yang and Zhou, 2001; Li *et al.*, 2003, 2006; Tan *et al.*, 2008).

自 20 世纪 80 年代以来, 前人对小秦岭地区金矿床进行了大量的同位素年代学研究, 获得一大批成矿年代数据, 这些年龄数据至少可分为 4 组: (1) 古元古代成矿年龄 (薛良伟等, 1996; 陆松年等, 1997); (2) 新元古代成矿年龄 (陆松年等, 1997); (3) 早中生代成矿年龄 (李诺等, 2008); (4) 晚中生

代白垩纪成矿年龄 (徐启东等, 1998; 王义天等, 2002; Li *et al.*, submitted). 小秦岭地区桐沟金矿 (薛良伟等, 1996)、驾鹿金矿和金碛岔金矿 (陆松年等, 1997) 给出了 1.91~1.77 Ga 的成矿年龄, 与本文获得的基性脉岩侵位时代基本一致. 如果上述成矿年龄可信, 则有理由相信小秦岭地区古元古代基性脉岩与金矿床的形成具有密切的时空关联和成因联系. 然而, 最近的高精度同位素定年结果表明, 前人获得的前中生代成矿年龄数据大部分并不可靠, 不能代表金矿床的成矿时代; 如笔者最近对桐沟金矿进行了系统的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 获得的成矿年龄为 110 Ma 左右 (Li *et al.*, submitted), 而不是前人认为的古元古代成矿时代. 早期年龄结果的不可靠性反映了前人所用测年方法或测年对象的局限性 (基本上为 K-Ar 法和石英流体包裹体的 Ar-Ar 和 Rb-Sr 法). 徐启东等 (1998)、王义天等 (2002) 和 Li *et al.* (submitted) 利用阶段加热技术对小秦岭地区主要金矿床的蚀变绢云母 (或白云母) 进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定, 获得很好的坪年龄, 证明这些金矿床主要形成于 130~120 Ma, 与小秦岭东侧熊耳山地区金成矿作用时间一致 (Han *et al.*, 2007; 叶会寿等, 2008), 对应于华北克拉通岩石圈大规模减薄事件的峰期 (Mao *et al.*, 2002). 显然, 金矿床的最新年龄结果排除了小秦岭地区古元古代基性脉岩与大规模金成矿作用的关系.

但另一方面, 区域地质和构造背景分析又支持小秦岭地区存在晚中生代时期的基性脉岩, 它们可能为成矿作用提供热能或为成矿流体系统补给大量 C、S、Cl 等矿化剂 (倪师军等, 1994). 对小秦岭若干含金石英脉的 C、He-Ar 同位素的分析表明, 大量地幔流体参与了小秦岭地区的金成矿作用 (王义天等, 2002; 卢欣祥等, 2008), 这种地幔流体可能直接来自地幔岩石圈的脱气 (Trull *et al.*, 1993), 也可能来自成矿时期的基性岩浆活动 (翟建平, 1996). 要详细讨论该区基性脉岩与金矿床的成因联系, 还需要对更多的基性脉岩开展精确的同位素年龄测定.

4.3 古元古代基性脉岩的地质意义

小秦岭地处华北克拉通中部造山带南缘, 金矿区内大量古元古代基性脉岩的侵位年龄对于讨论华北克拉通东、西地块拼合的时间及克拉通的早期构造演化具有重要意义. 目前关于华北克拉通东、西地块俯冲、碰撞和拼合的时间仍然存在争议. Zhao *et al.* (2002) 及 Wang *et al.* (2007) 认为华北东、西地块在古元古代晚期约 1.85 Ga 拼合, 并形成中部造

山带和华北克拉通的统一基底. 然而, 李江海等 (2000) 和 Kusky and Li (2003) 等则认为华北东、西地块拼合的时间为 2.5 Ga 左右, 他们将 1.8 Ga 前后出现的基性岩浆活动解释为地幔柱主导下陆内裂谷作用的产物.

近年来对大量基性脉岩锆石年龄的测定为精确约束华北克拉通基性岩浆的年代学格架和讨论华北克拉通的早期构造演化提供了可靠资料. Kröner *et al.* (2006) 获得中部造山带恒山地区辉长岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1.91 Ga, 认为该期岩脉代表了华北克拉通东、西地块拼合之前的基性岩浆产物. 华北中部造山带内太行山—恒山—中条山及西部地块大同地区基性脉岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 及 SHRIMP 锆石年龄一致显示, 基性岩脉侵位于 1.77~1.78 Ma (Halls *et al.*, 2000; 李江海等, 2000; Wilde *et al.*, 2002; Peng *et al.*, 2008; 侯贵廷等, 2009), 而东部陆块鲁西地区基性脉岩的锆石 U-Pb 年龄则为 1.82~1.84 Ma (Hou *et al.*, 2006; 王岳军等, 2007). 据此 Wang *et al.* (2007) 认为华北中部造山带的基性岩浆活动时间为 1.76~1.78 Ga, 而华北东部的基性岩浆活动为 1.82~1.84 Ga. 综合本文和前人的数据可知, 华北中部造山带至少存在 3 期基性岩浆活动 (1.91 Ga、1.82~1.84 Ga 和 1.78~1.77 Ga), 1.82 Ga 左右的基性岩浆活动不只在华北东部地块才存在.

小秦岭金矿区基性脉岩是华北克拉通东、西地块碰撞后伸展事件的产物, 而与地幔柱活动无关. 小秦岭地区 1.82 Ga 的基性脉岩起源于岩石圈地幔 (王团华等, 2008b), 基性脉岩的地球化学特征显示其地幔源区受到了俯冲流体的交代作用 (Wang *et al.*, 2007). 根据华北克拉通的区域构造特征和年代学数据, Wang *et al.* (2007) 提出华北克拉通在 1870~1765 Ma 期间发生了俯冲—碰撞—碰撞后伸展的全过程. 因此小秦岭地区大量 1.82 Ga 左右基性脉岩的产出与华北克拉通中央造山带的碰撞后伸展作用密切相关, 这为认识华北克拉通古元古代拉张性岩浆作用时空分布特点提供了新的证据.

5 结论

(1) 小秦岭东闯、枪马和大湖金矿区 4 个基性脉岩样品的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为 1819 ± 10 Ma, 1 个样品的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 1719.0 ± 21.0 Ma, 说明小秦岭地区大量基性脉岩

形成于古元古代晚期. 相反, 该区多数金矿床是中生代晚期成矿作用的产物, 因此这些基性脉岩与金矿床之间不存在时间和成因上的联系. 但另一方面, 区域地质和构造背景分析支持小秦岭地区存在晚中生代时期的基性脉岩, 理论上它们对金矿床的形成具有积极作用. 显然, 小秦岭地区基性岩浆活动与金成矿作用的关系仍需进一步研究, 首要任务是对各金矿区与金矿脉空间关系密切的基性脉岩进行系统采样和精确的同位素定年.

(2) 华北中部造山带至少存在 3 期基性岩浆活动 (1.91 Ga、1.82~1.84 Ga 和 1.78~1.77 Ga), 1.82 Ga 左右的基性岩浆活动不只在华北东部地块才存在. 小秦岭地区大量 1.8 Ga 左右基性脉岩的产出与华北克拉通中部造山带的碰撞后伸展作用有关, 这为认识华北克拉通古元古代拉张性岩浆作用时空分布特点提供了新的思路.

致谢: 赵新福博士对文章提出了宝贵的修改建议, LA-ICPMS U-Pb 和⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学测试分析分别得到胡兆初、邓晓东和陈蕾的大力支持, 特此一并致谢.

References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Chao, Y., 1989. The metallogenetic epoch of the Xiaolingling gold deposit. *Geology of Shanxi*, 7(1): 52-55 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. D., Shi, L. B., 1984. Preliminary study on diabase dike swarm in Wutai-Taihang Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 29(6): 812-816.
- Drew, L. J., Berger, B. R., Kurbanov, N. K., 1996. Geology and structural evolution of the Muruntau gold deposit, Kyzylkum desert, Uzbekistan. *Ore Geology Reviews*, 11(4): 175-196. doi: 10.1016/0169-1368(95)00033-X
- Durring, P., Hagemann, S. G., Cassidy, K. F., et al., 2004. Hydrothermal alteration, ore fluid characteristics, and gold depositional processes along a trondhjemite-komatiite contact at Tarmoola, western Australia. *Economic Geology*, 99(3): 423-451. doi: 10.2113/gsecongeo.99.3.423
- Goldfarb, R. J., Phillips, G. N., Nokleberg, W. J., 1998. Tectonic setting of synorogenic gold deposits of the Pacific rim. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5): 185-218. doi: 10.1016/S0169-1368(97)00018-8
- Halls, H. C., Li, J. H., Davis, D., et al., 2000. A precisely

- dated Proterozoic paleomagnetic pole from the North China craton, and its relevance to palaeocontinental reconstruction. *Geophysical Journal International*, 143 (1): 185—203. doi: 10. 1046/j. 1365—246x. 2000. 00231. x
- Han, Y. G. , Li, X. H. , Zhang, S. H. , et al. , 2007. Single grain Rb-Sr dating of euhedral and cataclastic pyrite from the Qiyugou deposit in western Henan, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 52(13): 1820—1826. doi: 10. 1007/s11434—007—0248—3
- Hou, G. T. , Halls, H. , Davis, D. , et al. , 2009. Paleomagnetic poles of mafic dyke swarms from the North China craton and their relevance to the reconstruction of the supercontinent Columbia. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (3): 650—658 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G. T. , Liu, Y. L. , Li, J. H. , 2006. Evidence for ~1. 8 Ga extension of the eastern block of the North China craton from SHRIMP U-Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(4): 392—401. doi: 10. 1016/j. jseas. 2005. 05. 001
- Huston, D. L. , Vandenberg, L. , Wygralak, A. S. , et al. , 2007. Lode-gold mineralization in the Tanami region, northern Australia. *Mineralium Deposita*, 42 (1—2): 175—204. doi: 10. 1007/s00126—006—0106—2
- Koppers, A. A. P. , 2002. ArArCALC-software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Computers and Geosciences*, 28(5): 605—619. doi: 10. 1016/S0098—3004(01)00095—4
- Kröner, A. , Wilde, S. A. , Zhao, G. C. , et al. , 2006. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan complex of northern China; evidence for Late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China craton. *Precambrian Research*, 146(1—2): 45—67. doi: 10. 1016/j. precamres. 2006. 01. 008
- Kusky, T. M. , Li, J. H. , 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383—397. doi: 10. 1016/S1367—9120(03)00071—3
- Li, J. H. , Qian, X. L. , Huang, X. N. , et al. , 2000. Tectonic framework of North China block and its cratonization in the Early Precambrian. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W. , Li, Z. K. , Zhou, M. F. , et al. , 2010. The Cretaceous Yangzhaiyu lode gold deposit, North China craton; a link between craton reactivation and gold veining. *Submitted to Economic Geology*.
- Li, J. W. , Vasconcelos, P. , Zhou, M. F. , et al. , 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China; implications for regional mineralization and geodynamic setting. *Economic Geology*, 101(5): 1023—1038. doi: 10. 2113/gsecongeo. 101. 5. 1023
- Li, J. W. , Vasconcelos, P. M. , Zhang, J. , et al. , 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints on a temporal link between gold mineralization, magmatism, and continental margin transtension in the Jiaodong gold province, eastern China. *The Journal of Geology*, 111(6): 741—751. doi: 10. 1086/378486
- Li, N. , Sun, Y. L. , Li, J. , et al. , 2008. Molybdenite Re-Os isotope age of the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling and the Indosinian mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 810—816 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M. , Qu, L. Q. , Su, Z. B. , et al. , 1996. The geology and metallogenic prediction of the gold deposit in Xiaoqinling. Geological Publishing House, Beijing, 39—53 (in Chinese).
- Li, X. H. , Sun, X. S. , 1995. Lamprophyre and gold mineralization; an assessment of observations and theories. *Geological Review*, 41(3): 252—260 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. F. , 2005. The temporal-spatial evolution of Mesozoic granitoids in the Xiong'er shan area and their relationships to molybdenum-gold mineralization (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 15—17 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S. , Hu, Z. C. , Gao, S. , et al. , 2008. In situ analysis of major and trace elements of an hydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10. 1016/j. chemgeo. 2008. 08. 004
- Lu, S. N. , Li, H. Q. , Li, H. M. , et al. , 1997. The basement characteristics and metallogenesis of the gold congestion areas—as exemplified for Xiaoqinling, Jinbei and Jiaobei gold districts, China. Geological Publishing House, Beijing, 34—39 (in Chinese).
- Lu, X. X. , Li, M. L. , Wang, W. , et al. , 2008. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt. *Mineral Deposits*, 27(6): 762—773 (in Chinese with English abstract).
- Luan, S. W. , Cao, D. C. , Fang, Y. K. , et al. , 1985. Geochemistry of Xiaoqinling gold deposits. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 5(2): 1—133 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W. , Goldfarb, R. J. , Zhang, Z. W. , et al. , 2002. Gold deposits in the Xiaoqinling-Xiong'er shan region, Qinling

- Mountains, Central China. *Mineralium Deposita*, 37(3—4): 306—325. doi: 10. 1007/s00126—001—0248—1
- McNeil, A. M., Kerrich, R., 1986. Archean lamprophyre dykes and gold mineralization, Matheson, Ontario; the conjunction of LILE-enriched mafic magmas, deep crustal structures, and Au concentration. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(3): 324—343. doi: 10. 1139/e86—035
- Müller, D., Groves, D. I., 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Springer, London, 85—157.
- Ni, S. J., Li, C. Y., Zhang, C., et al., 1994. Contributions of meso-basic dyke rocks to gold mineralization—as exemplified for Xiaolinling, China. *Journal of Chengdu University of Technology*, 21(3): 70—78 (in Chinese with English abstract).
- Peng, P., Zhai, M. G., Ernst, R. E., et al., 2008. A 1. 78 Ga large igneous province in the North China craton; the Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm. *Lithos*, 101(3—4): 260—280. doi: 10. 1016/j. lithos. 2007. 07. 006
- Qiu, H. N., 2006. Construction and development of new Ar-Ar laboratories in China; insight from GV-5400 Ar-Ar laboratory in Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. *Geochimica*, 35(2): 133—140 (in Chinese with English abstract).
- Rock, N. M. S., Groves, D. I., 1988. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds? *Nature*, 332: 253—255. doi: 10. 1038/332253a0
- Tan, J., Wei, J. H., Guo, L. L., et al., 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and phenocryst EPMA of dikes, Guocheng, Jiaodong Peninsula; implications for North China craton lithosphere evolution. *Science in China (Ser. D)*, 51(10): 1483—1500. doi: 10. 1007/s11430—008—0079—3
- Trull, T., Nadeau, S., Pineau, F., et al., 1993. C-He systematics in hotspot xenoliths; implications for mantle carbon contents and carbon recycling. *Earth and Planetary Science Letter*, 118(1—4): 43—64. doi: 10. 1016/0012—821X(93)90158—6
- Tsai, C. H., Lo, C. H., Liou, J. C., et al., 2000. Evidence against subduction-related magmatism for the Jiaoziyang gabbro, northern Dabieshan, China. *Geology*, 28(10): 943—946. doi: 10. 1130/0091—7613
- Tu, H. K., 2000. Discovery and gold preconcentration study of the lamprophyre alteration-type gold deposits in the Qinling area. *Geological Review*, 46(5): 543—548 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., 1987. Geological characteristics and ore genesis of the Xiaolinling gold field. *Mineral Deposits*, 6(1): 57—67 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. H., Mao, J. W., Wang, Y. B., 2008a. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaolinling Xiong'ershan area; the evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273—1287 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T. H., Mao, J. W., Xie, G. Q., 2008b. Sr, Nd, Pb isotopic composition of the Meso-basic dykes in the Xiaolinling-Xiong'ershan area, Henan Province, Central China and its tectonic significance. *Acta Geological Sinica*, 82(11): 1580—1591 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, H. F., et al., 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains; implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the Central North China craton. *Lithos*, 86(3—4): 281—302. doi: 10. 1016/j. lithos. 2005. 07. 001
- Wang, Y. J., Peng, T. P., Fan, W. M., et al., 2007. Early proterozoic mafic dikes in the North China craton and their tectonic implications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dykes from western Shandong Province; implications for back-arc basin magmatism in the eastern block, North China craton. *Precambrian Research*, (1—2): 107—124. doi: 10. 1016/j. precamres. 2006. 12. 010
- Wang, Y. T., Mao, J. W., Lu, X. X., et al., 2002. ⁴⁰Ar—³⁹Ar dating and geological implication of auriferous altered rocks from the middle-deep section of Q875 gold-quartz vein in Xiaolinling area, Henan, China. *Chinese Science Bulletin*, 47(20): 1750—1755. doi: 10. 1360/02tb9383
- Wilde, S. A., Zhao, G. C., Sun, M., 2002. Development of the North China craton during the Late Archean and its final amalgamation at 1. 8 Ga; some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 85—94. doi: 10. 1016/S1342—937X(05)70892—3
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2): 103—119. doi: 10. 1016/j. epsl. 2005. 02. 019
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Li, R. L., et al., 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Daying For-

- mation from Baofeng basin in eastern Qinling, China and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2387—2396 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. D., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., et al., 1998. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Xiaolinling gold area in Henan Province. *Geological Review*, 44(3): 323—327 (in Chinese with English abstract).
- Xue, L. W., Zhou, C. M., Pang, J. Q., et al., 1996. Inversion tectonics and prospecting mineralogy of Tonggou gold deposit in Xiaolinling region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 50—57 (in Chinese).
- Yang, J. H., Chung, S. L., Zhai, M. G., et al., 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China; evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3—4): 145—160. doi: 10. 1016/j. lithos. 2003. 12. 003
- Yang, J. H., Zhou, X. H., 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: implications for the age and genesis of lode gold deposits. *Geology*, 29(8): 711—714. doi: 10. 1130/0091—7613
- Ye, H. S., Mao, J. W., Xu, L. G., et al., 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmiao aluminous A-type granite in western Henan Province. *Geological Review*, 54(5): 699—711 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. P., Cui, H. F., 2003. Orogeny and orogenic types and process of the Qinling Mountains. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 33(1): 65—69 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10. 1111/j. 1751—908X. 2004. tb00755. x
- Zhai, J. P., Hu, K., Lu, J. J., 1996. A discussion on the new genetic model for lamprophyres and gold mineralization. *Mineral Deposits*, 15(1): 80—86 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Liu, W. J., 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton; a review. *Precambrian Research*, 122(1—4): 183—199. doi: 10. 1016/S0301—9268(02)00211—5
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China (Ser. D)*, 39(3): 225—234.
- Zhang, J. J., Zheng, Y. D., Liu, S. W., 1998. The Xiaolinling metamorphic core complex: structure, genetic mechanism and evolution. Ocean Press, Beijing, 17—63 (in Chinese).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2002. Review of global 2. 1—1. 8 Ga orogens; implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1—4): 125—162. doi: 10. 1016/S0012—8252(02)00073—9
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in East-Central China. *Lithos*, 83(1—2): 1—28. doi: 10. 1016/j. lithos. 2004. 12. 014
- Zhou, H. W., Zhong, Z. Q., Ling, W. L., et al., 1998. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiaolinling area, western Henan, and its geological implications. *Geochimica*, 27(4): 367—372 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 晁援, 1989. 关于小秦岭金矿的成矿时代探讨. 陕西地质, 7(1): 52—55.
- 侯贵廷, Halls, H., Davis, D., 等, 2009. 华北基性岩墙群的古地质磁极及其哥伦比亚超大陆重建意义. 岩石学报, 25(3): 650—658.
- 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等, 2000. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. 岩石学报, 16(1): 1—10.
- 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等, 2008. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼锇同位素年龄及印支期成矿事件. 岩石学报, 24(4): 810—816.
- 黎世美, 瞿伦全, 苏振邦, 等, 1996. 小秦岭金矿地质和成矿预测. 北京: 地质出版社, 39—53.
- 李献华, 孙贤鉢, 1995. “煌斑岩”与金矿的实际观察与理论评述. 地质论评, 41(3): 252—260.
- 李永峰, 2005. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用(学位论文). 北京: 中国地质大学, 15—17.
- 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 等, 1997. 金矿密集区的基底特征与成矿作用研究——以小秦岭、冀北和胶北金矿密集区为例. 北京: 地质出版社, 34—39.
- 卢欣祥, 李明立, 王卫, 等, 2008. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用. 矿床地质, 27(6): 762—773.
- 栾世伟, 曹殿春, 方耀奎, 等, 1985. 小秦岭金矿床地球化学. 矿物岩石, 5(2): 1—133.
- 倪师军, 李朝阳, 张诚, 等, 1994. 中基性脉岩对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例. 成都理工学院学报, 21(3): 70—78.
- 邱华宁, 2006. 新一代 Ar-Ar 实验室建设与发展趋势: 以中国

- 科学院广州地球化学研究所 Ar-Ar 实验室为例. 地球化学, 35(2): 133—140.
- 涂怀奎, 2000. 秦岭地区蚀变煌斑岩型金矿的发现及金的预富集研究. 地质论评, 46(5): 543—548.
- 王亨治, 1987. 小秦岭金矿田地质特征及矿床成因. 矿床地质, 6(1): 57—67.
- 王团华, 毛景文, 王彦斌, 等, 2008a. 小秦岭—熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究——秦岭造山带岩石圈拆沉的证据. 岩石学报, 24(6): 1273—1287.
- 王团华, 毛景文, 谢桂青, 等, 2008b. 小秦岭—熊耳山地区中基性岩墙的 Sr、Nd、Pb 同位素组成及其大地构造意义. 地质学报, 82(11): 1580—1591.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥, 等, 2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其意义. 科学通报, 47(18): 1427—1431.
- 王岳军, 彭头平, 范蔚茗, 等, 2007. 华北陆块早元古代基性岩墙群及其构造意义. 矿物岩石地球化学通报, 26(1): 1—9.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等, 2007. 东秦岭宝丰盆地大营组火山岩 SHRIMP 定年及其意义. 岩石学报, 23(10): 2387—2396.
- 徐启东, 钟增球, 周汉文, 等, 1998. 豫西小秦岭金矿区的一组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年数据. 地质论评, 44(3): 323—327.
- 薛良伟, 周长命, 庞继群, 等, 1996. 小秦岭桐沟金矿反转构造及找矿矿物学. 武汉: 中国地质大学出版社, 50—57.
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 等, 2008. 豫西太山庙铝质 A 型花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征. 地质论评, 54(5): 699—711.
- 于在平, 崔海峰, 2003. 造山运动与秦岭造山. 西北大学学报(自然科学版), 33(1): 65—69.
- 翟建平, 胡凯, 陆建军, 1996. 有关煌斑岩与金矿化新成因模式的讨论. 矿床地质, 15(1): 80—86.
- 张进江, 郑亚东, 刘树文, 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化. 北京: 海洋出版社, 17—63.
- 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 等, 1998. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 地球化学, 27(4): 367—372.