

编号: 0258-7106(2011)06-0979-23

洛南-卢氏地区与铁铜多金属矿床有关的中酸性侵入岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义*

胡 浩^{1,2} 李建威^{1,2} 邓晓东^{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 位于华北克拉通南缘的洛南-卢氏地区出露大量与成矿密切相关的中酸性小侵入体, 主要岩性包括石英闪长岩和钾长花岗斑岩, 其中大部分是该区矽卡岩型和斑岩型铁-铜-钼-铅锌多金属矿床的成矿母岩, 但迄今为止对这些岩体的侵位时代及岩浆活动构造背景的研究还很薄弱。文章利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法对该区典型侵入岩(夜长坪、柳关、后瑶峪、圪老湾、蒲阵沟、黑山及杨沟岩体)进行了详细的锆石 U-Pb 定年。结果表明这些岩体的侵位时代介于 158~131 Ma 之间, 是华北克拉通南缘晚侏罗世—早白垩世期间大规模岩浆活动的产物。定年结果还表明, 闪长岩类岩石的侵位时间很短, 主要集中在晚侏罗世末期($(150 \pm 1) \sim (149 \pm 1)$ Ma), 而花岗斑岩侵位则断续持续了近 30 Ma($(158 \pm 2) \sim (131 \pm 1)$ Ma)。锆石 U-Pb 定年还首次为洛南-卢氏地区矽卡岩型和斑岩型铁铜钼多金属矿床的成矿时代提供了准确限定, 表明这些矿床形成于晚侏罗世—早白垩世。综合前人资料, 认为华北克拉通南缘燕山期岩浆活动始于晚侏罗世初, 在早白垩世早期达到顶峰, 并于早白垩世末期结束。华北克拉通南缘洛南-卢氏地区晚侏罗世—早白垩世中酸性侵入岩形成于强烈的伸展构造背景, 是华北克拉通破坏的浅部地质响应, 其空间分布和侵位时代为了解华北克拉通南缘岩石圈减薄的时空分布特征提供了重要依据。

关键词 地质学; 锆石 U-Pb 定年; LA-ICP-MS; 洛南-卢氏; 华北南缘; 克拉通破坏

中图分类号: P618.31; P618.41

文献标志码: A

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granitoid intrusions related to iron-copper polymetallic deposits in Luonan-Lushi area of southern North China Craton and its geological implications

HU Hao^{1,2}, LI JianWei^{1,2} and DENG XiaoDong^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Wuhan 430074, Hubei, China;

2 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

Granitoid intrusions, which are widely distributed in Luonan-Lushi area on the southern margin of the North China Craton, consist mostly of K-feldspar granite porphyry and quartz diorite and are closely related to lots of porphyry and skarn Fe-Cu-Mo-Pb-Zn polymetallic deposits in this area. Nevertheless, precise numerical constraints on the emplacement ages of these intrusions, which are of importance in the understanding of the tectonic setting of regional magmatism, are very insufficient. In this paper, the authors present high-precision zircon U-Pb ages of seven representative granitoid intrusions by using laser ablation inductively coupled plasma mass

* 本文得到国家自然科学基金重大研究计划重点项目(No. 90814004)、中央高校基本科研业务费专项资金(CUG090102)、地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(MSFGPMR201005)的联合资助

第一作者简介 胡 浩,男,1987年生,博士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: haohucug@gmail.com

收稿日期 2011-02-15; 改回日期 2011-08-25。张绮玲编辑。

spectrometry. The results indicate that these intrusions were emplaced in the time interval from (158 ± 2) Ma to (131 ± 1) Ma (2σ), suggesting that they are products of Late Jurassic to Early Cretaceous magmatism. The age data also show that the quartz diorites were emplaced in a short-lived magmatic pulse at the end of late Jurassic [(150 ± 1) Ma \sim (149 ± 1) Ma], whereas the K-feldspar granite porphyries were emplaced in a prolonged period between (158 ± 2) Ma and (131 ± 1) Ma. Zircon U-Pb ages of the granitoid intrusions also pose important constraints, for the first time, on the timing of related porphyry and skarn polymetallic deposits in Luonan-Lushi area. These results, in combination with data available, document an extensive magmatic event at the southern edge of the North China Craton that commenced in the late Jurassic, climaxed in the Early Cretaceous and continued until the end of Late Cretaceous. This magmatic event occurred in an extensional environment related to the lithospheric thinning of North China Craton. Age and distribution of the late Mesozoic intrusions in southern North China Craton have shed light on the timing and extent of the Mesozoic decratonization of North China Craton.

Key words: geology, zircon U-Pb dating, LA-ICP-MS, Luonan-Lushi area, North China Craton, decratonization

东秦岭地区位于华北克拉通南缘,是世界上最大的钼矿带,已发现东沟、金堆城、南泥湖、上房沟等多个世界级钼矿床,钼金属量达500万吨以上(Mao et al., 2011; 陈衍景等, 2009)。除斑岩型钼矿外,本地区还有许多矽卡岩型铁铜多金属矿床(如木龙沟铁矿、黑山铁铜矿、八宝山铁矿、银家沟硫铁金多金属矿、曲里铅锌矿等),这些矿床大多分布于陕西洛南及河南卢氏-灵宝地区。与东秦岭的斑岩型钼矿床相比,这些矽卡岩型铁铜多金属矿床的研究程度还相对较低,而且该区还出露有夜长坪大型斑岩型钼矿床,研究程度也相对较低(肖中军等, 2007)。与这些矿床有关的含矿岩体为各类浅成-超浅成中酸性侵入岩,深入研究这些岩体的侵位时代和岩石成因,不仅有助于对本区矽卡岩-斑岩型多金属矿床成矿作用的全面理解,而且可以为华北克拉通南缘中生代岩浆活动的构造背景及其与华北克拉通破坏的关系提供重要的年代学制约。

前人曾对洛南-卢氏地区众多浅成-超浅成中酸性侵入岩的形成时代开展过大量研究,采用的方法主要是矿物 K-Ar 定年和全岩 Rb-Sr 等时线定年,定年结果为 $202 \sim 103$ Ma^①(张本仁等, 1987; 庞振山, 2006 及其参考文献)。如果这些年龄可靠的话,则说明这些小岩体是晚三叠世—中白垩世时期漫长岩浆作用的产物。由于 K-Ar 及 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度较低,容易受到后期构造-热事件的干扰,因此 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄的可信度较低,尤其是当存在后期热事件干扰的情况下,难以获得岩体形成时

代的准确信息。另外,如果样品中含有过剩氩, K-Ar 定年将给出比岩体实际年龄大得多的“侵位年龄”。如前人利用 K-Ar 法获得银家沟钾长花岗斑岩的“年龄”为 $202 \sim 114$ Ma, 时间跨度近 100 Ma(庞振山, 2006 及其参考文献),这种“年龄”显然无法用于解释岩体的准确侵位时间,也给正确理解岩浆活动的构造背景及其与岩浆有关的多金属成矿作用造成了很大困难。王冬艳等(2005)利用阶段升温的方法对洛南黑山村等4个小岩体进行了黑云母和角闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年,结果介于 (126.6 ± 0.3) Ma 和 (129.2 ± 0.2) Ma 之间,认为它们是早白垩世岩浆活动的产物。与 K-Ar 定年一样,当侵入岩遭受后期热事件干扰时, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果记录的仅是最后一次热事件发生的时间,是岩体的冷却年龄。

从以上分析可知,洛南-卢氏地区众多中酸性小岩体还缺乏系统和精确的年代学研究,这种状况制约了对区域成岩成矿作用时间和构造背景的认识。本文利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)对洛南-卢氏地区7个中酸性侵入岩体进行了精确的锆石 U-Pb 定年,获得了可靠的岩体侵位年龄。

1 区域地质概况

洛南-卢氏地区位于华北克拉通南缘的西段,区内出露地层主要包括以角闪岩和片麻岩为主的太华群中深成变质岩系($2.8 \sim 2.3$ Ga; 薛良伟等, 1995; Kröner et al., 1988; 周汉文等, 1998; Xu X S et al.,

① 河南省地质矿产局科研所, 1985. 洛南-豫西地区燕山期中酸性小岩体与钼矿成矿关系的研究. 1-174.

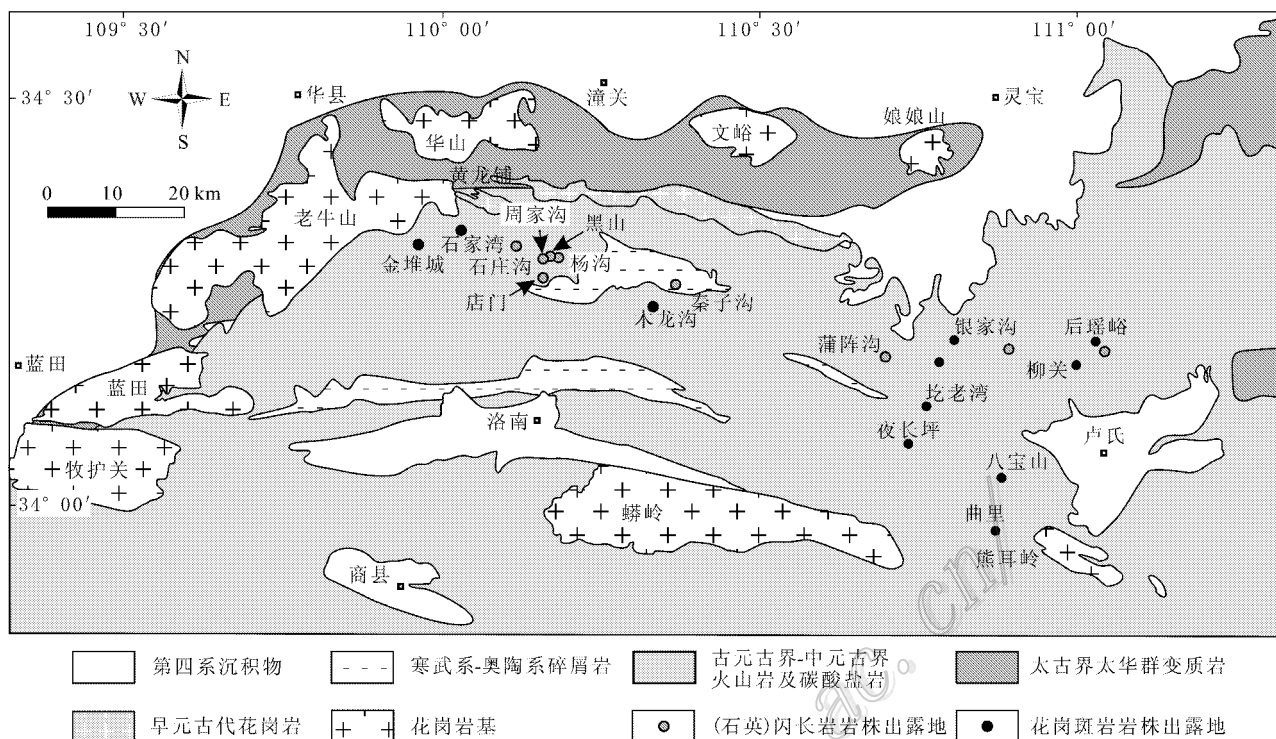


图1 华北克拉通南缘西段洛南-卢氏地区岩浆岩分布简图(据刘廉清等, 1979^① 略有简化和修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Luonan-Lushi area in southern North China Craton, showing the distribution of granitoid intrusions(modified from Liu et al., 1979)

2009),古元古界熊耳群火山岩(~ 1.78 Ga; Peng et al., 2008; He et al., 2009)中元古界浅变质或未变质碳酸盐岩、细碎屑岩夹火山岩,寒武系—奥陶系碎屑岩-碳酸盐岩以及少量中-新生界陆相沉积物和火山岩(图1)。

区内岩浆岩分布广泛(图1)按侵位时间大致分为古元古代花岗岩、印支期花岗岩和燕山期花岗岩。古元古代花岗岩出露于研究区以北的小秦岭地区,呈近东西向侵位于太华群变质地层中,主要有桂家峪岩体和小河岩体,前者的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(1\ 642 \pm 30)$ Ma(王享治, 1987),后者的锆石 U-Pb 年龄为 $(1\ 748 \pm 25)$ Ma(中国人民武装警察部队黄金指挥部, 1997),表明它们的侵位与熊耳群火山岩的喷发时间(Peng et al., 2008; He et al., 2009)基本一致。印支期岩体出露较少,代表性的有黄龙铺碳酸岩、嵩县磨沟正长岩(黄典豪等, 1994; 曾广策, 1990; 胡浩, 2009)和老牛山钾玄质花岗岩类侵入杂岩(图1, 丁丽雪, 2010),其中老牛山岩体的侵

位时间为 $(228 \pm 1) \sim (217 \pm 1)$ Ma(丁丽雪, 2010)。燕山期花岗岩类包括华山、文峪、娘娘山、蓝田、牧护关、蟒岭等花岗岩基及金堆城、石家湾、银家沟、八宝山及夜长坪等浅成、超浅成闪长岩类和花岗斑岩类小岩株(图1)。这些浅成-超浅成中酸性小岩体主要分布在洛南县城以北和卢氏县城以西,其岩性以(石英)闪长岩或二长岩和(钾长)花岗斑岩为主(图1)。

2 岩体地质及样品特征

2.1 岩体地质简介

卢氏地区出露的中酸性小岩体有后瑶峪、柳关、八宝山、银家沟、秦池、圪老湾、夜长坪、蒲阵沟、西沟和郭家河等,侵位于古元古界熊耳群火山岩和中元古界官道口群碳酸盐岩中,空间展布上具有明显的方向性、等距性及分带性,受 NNE 向和近 EW 向的断裂构造控制明显(图2)。这些岩体的岩性以(石

① 刘廉清,李蓝桂,赵树肃. 1979. 陕西洛南黑山-木龙沟一带以铁为主的成矿地质条件综合研究报告. 1-128.

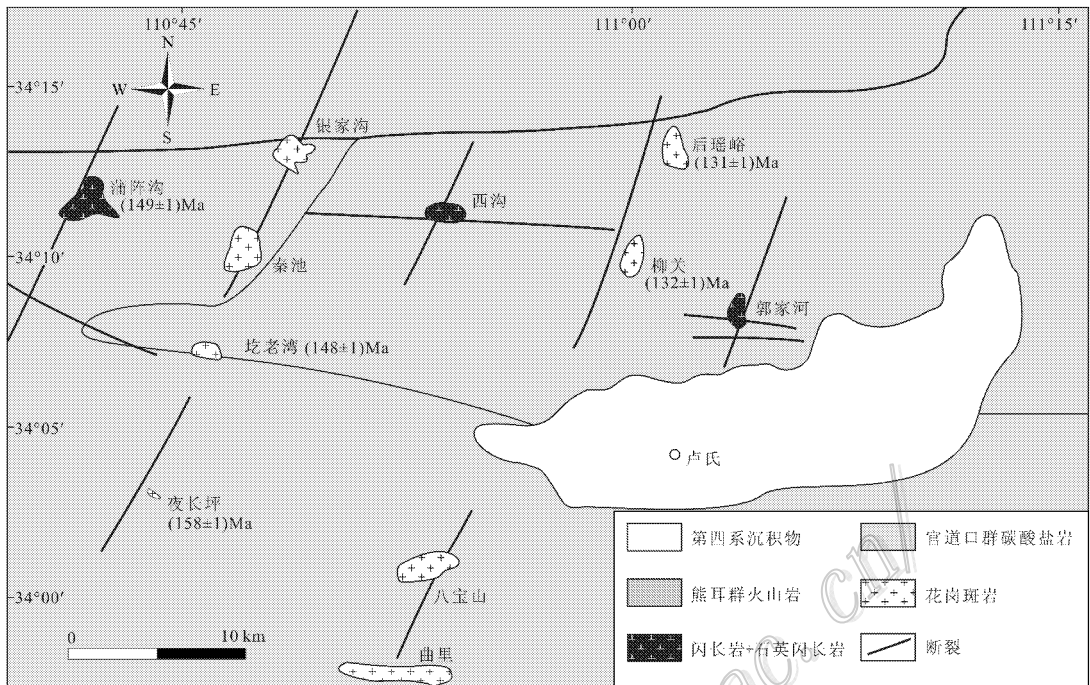


图2 卢氏地区中酸性小岩体分布图(据陈岳龙等,1994略有修改)

Fig. 2 Simplified geological map showing distribution of granitoid intrusions in Lushi area (modified from Chen et al., 1994)

英)闪长岩(如蒲阵沟、西沟、郭家河岩体)及花岗斑岩(如夜长坪、圪老湾等)为主,其中的花岗斑岩往往与成矿关系密切,有关的矿床主要有夜长坪斑岩型钼矿、银家沟硫铁金多金属矿、八宝山铁矿、曲里铁-铜-铅锌矿、后瑶峪铁铜铅锌矿及圪老湾和柳关等多金属矿点,矿化类型以矽卡岩型和斑岩型为主。少量岩体迄今尚未发现工业矿化,如蒲阵沟岩体。

洛南地区出露的中酸性小岩体有黑山、杨沟、石庄沟、木龙沟、秦子沟等(图1、3)。岩性以闪长岩及石英闪长岩和石英二长岩为主,与之有关的矿床有木龙沟矽卡岩型铁矿及黑山矽卡岩型铁矿(赵一鸣等,1982)。除了秦子沟岩体侵位于早古生界海相碎屑岩地层外,其余岩体均侵位于古元古界熊耳群火山岩或中元古界沉积岩中(图1)。本文主要研究了黑山和杨沟岩体,黑山岩体侵位于中元古界龙家园组和巡检司组地层,而杨沟岩体则侵位于巡检司组(图3)。岩体外围断裂构造发育,主要有NE向和近EW向2组。

2.2 岩体特征和样品描述

(1)夜长坪钾长花岗斑岩

夜长坪钾长花岗斑岩出露于卢氏县城西北,侵位于中元古界官道口群白云岩中(图2),岩石类型为

钾长花岗斑岩,是夜长坪大型斑岩钼矿的成矿母岩(肖中军等2007)。岩体内部钾化、硅化及黄铁绢云岩化较普遍(肖中军等2007)。用于锆石U-Pb定年的样品(YCP1;34°03′10.7″N;110°44′44.5″E)采自夜长坪钼矿1040中段蚀变较弱的区域。岩石呈肉红色,斑状结构,块状构造(图4a)。斑晶主要由石英(15%)、钾长石(15%)和斜长石(5%)组成,石英斑晶常呈他形,粒径0.5~3mm,部分钾长石斑晶发生了绢云母化(图5a)。基质主要包括石英(30%)、钾长石(35%)和斜长石(5%)。副矿物有榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。

(2)后瑶峪钾长花岗斑岩

后瑶峪岩体出露于卢氏县东北部,侵位于中元古界龙家园组碳酸盐岩中,出露面积约1km²(图2)。岩体与地层的接触带部位铁铜矿化较强,在接触带以外的碳酸盐地层中形成中型铅锌矿床(叶会寿,2006)。用于锆石U-Pb定年的样品(HYY1;34°12′19.6″N,111°01′11.3″E)采于后瑶峪岩体东缘,岩性为钾长花岗斑岩。岩石呈灰白色,斑状结构,块状构造(图4b);斑晶主要由石英(15%)、钾长石(20%)和斜长石(5%)组成,石英斑晶多被溶蚀呈他形浑圆状,粒径0.5~2mm,钾长石斑晶呈自形-半

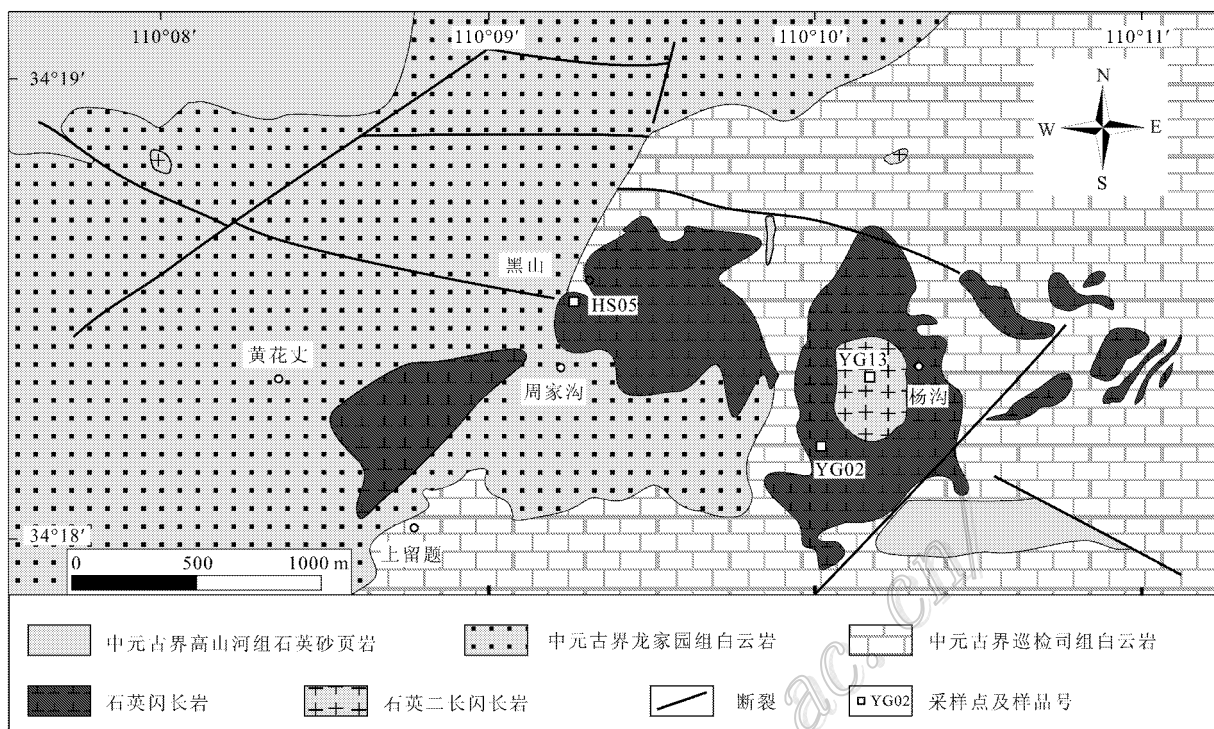


图3 洛南黑山地区地质简图(据陕西省地质局第13地质队,1981^①,略有修改)

Fig. 3 Simplified geological map showing distribution of granitoid intrusions in Heishan area from Luonan (modified from No.13 Geological Party of Shaanxi Province, 1981)

自形状 粒径 0.3~1.5 mm,多发生绢云母化,但仍保留了长石的晶形(图 5b)。基质成分主要由石英(15%)、钾长石(40%)和斜长石(5%)组成,副矿物包括榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。

(3) 柳关钾长花岗岩斑岩

柳关钾长花岗岩斑岩体出露于卢氏县东北部,与后瑶峪岩体相邻(图 2)。用于锆石 U-Pb 定年的样品(LG1; 34°11'04.9" N, 111°00'01.6" E)采于柳关砂卡岩型铁-铅-锌矿点的内接触带。岩石为灰白色,斑状结构,块状构造(图 4c)。斑晶主要由石英(10%)、钾长石(25%)及斜长石(5%)组成,钾长石斑晶多发生绢云母化(图 5c)。岩石中裂隙发育,并被晚期碳酸盐细脉充填(图 5c)。基质主要包括石英(15%)、钾长石(40%)和斜长石(5%)。副矿物包括榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。

(4) 圪老湾钾长花岗岩斑岩

圪老湾岩体位于卢氏县西北部,侵入于熊耳群安山岩和官道口群地层中,出露面积约 0.64 km²(图 2)。用于锆石 U-Pb 定年的钾长花岗岩样品

(GLW3; 34°06'46.5" N, 110°46'10.5" E)采于圪老湾岩体地表新鲜露头。岩石为灰白色,斑状结构,块状构造(图 4d)。斑晶主要由石英(10%)和钾长石(15%)组成,钾长石的简单双晶发育,基质主要由石英(20%)、钾长石(40%)及斜长石(15%)组成(图 5d)。副矿物主要包括榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。

(5) 蒲阵沟石英闪长岩

蒲阵沟岩体出露于卢氏县北部蒲阵沟一带,出露面积约 2 km²(图 2),侵入于中元古界高山河组地层中(图 2)。用于锆石 U-Pb 定年的石英闪长岩样品(PZG2; 34°10'42.6" N, 110°41'19.9" E)采于蒲阵沟岩体西北部。岩石呈灰黑色,等粒结构,块状构造(图 4e),主要造岩矿物有石英(5%)、钾长石(10%)、斜长石(40%)、角闪石(25%)和黑云母(15%)(图 5e),副矿物主要包括榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石等。

(6) 黑山石英闪长岩

黑山岩体也称下斜岩体,位于洛南县黑山村,出露面积 1.1 km²,侵入于中元古界龙家园组及巡检司

① 陕西省地质局第13地质队,1981. 陕西省洛南县黑山铁铜矿详细普查地质报告, 1-80.

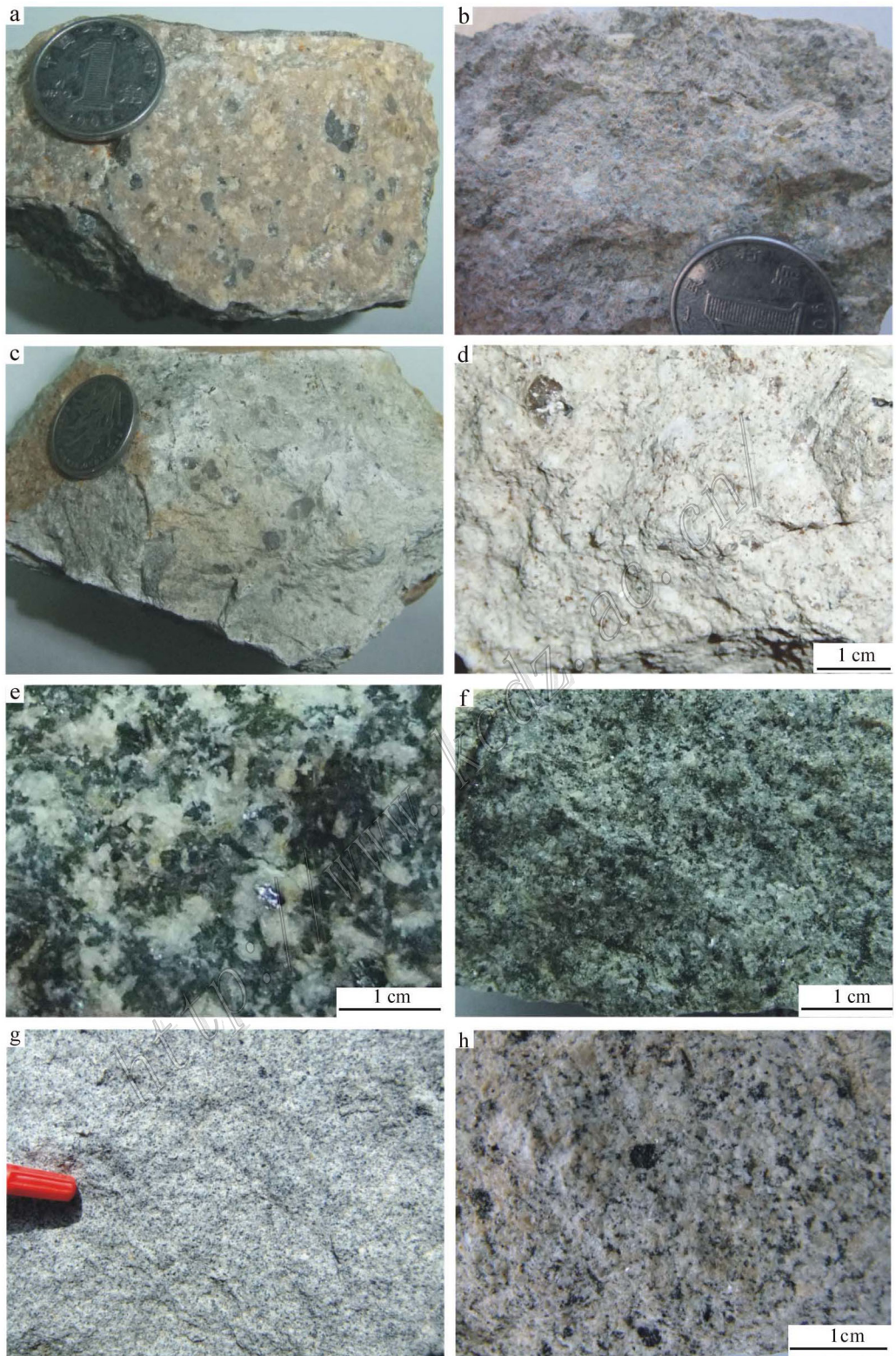


图 4 洛南-卢氏地区中酸性小岩体手标本照片

a~d 分别为夜长坪、后瑶峪、柳关、圪老湾钾长花岗斑岩的手标本照片，它们常具斑状结构，块状构造；e~h 分别为蒲阵沟、黑山、杨沟石英闪长岩及杨沟石英二长岩的手标本照片，它们常呈半自形粒状结构，块状构造

Fig. 4 Photographs showing textures of granitoid intrusions in Luonan-Lushi area

a~d Hand specimens of Yechangping, Houyaoyu, Liuguang and Gelaowang granite porphyry, e~h Hand specimens of Puzhengou, Heishan, Yanggou quartz diorite and Yanggou quartz monzonite

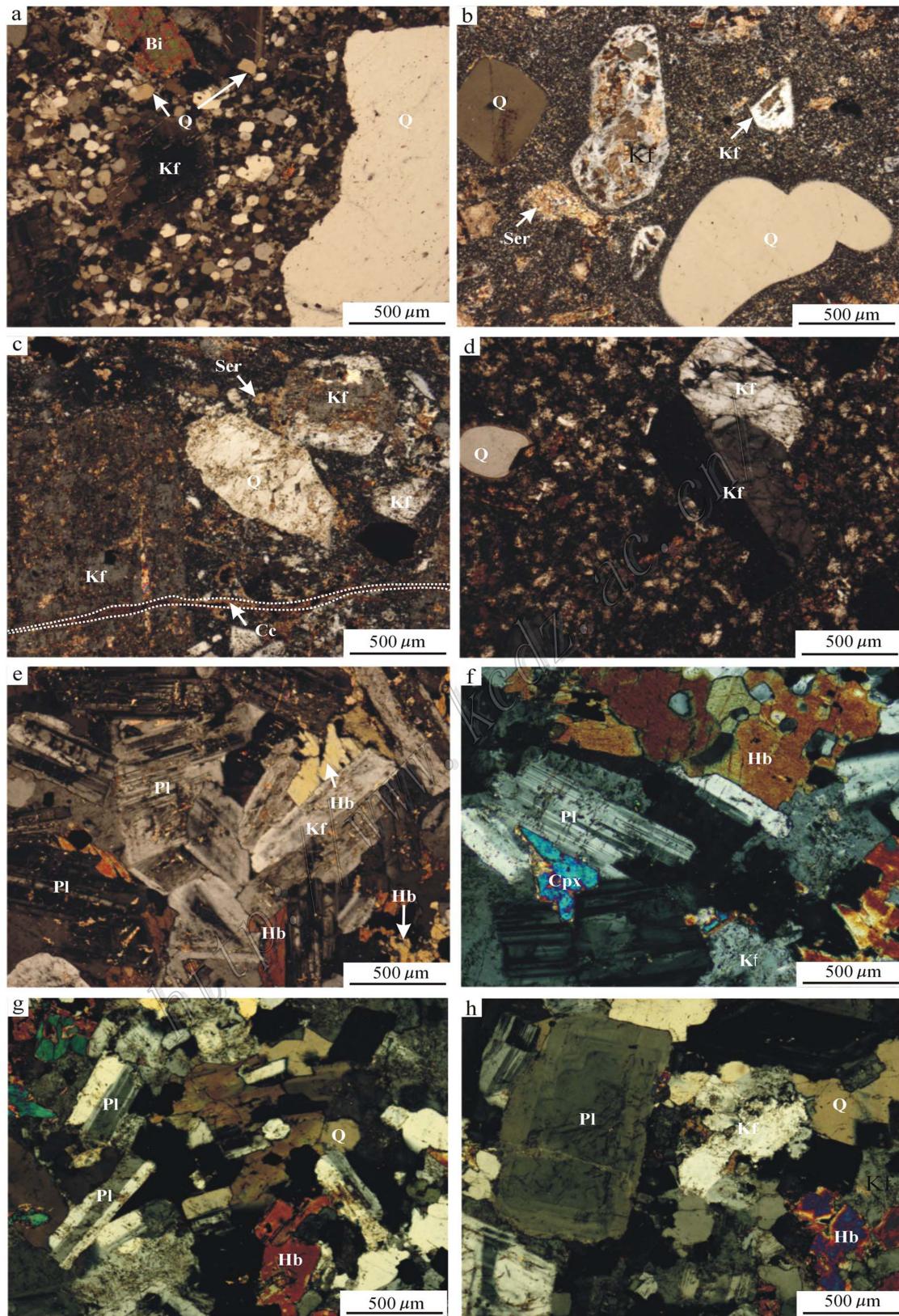


图 5 卢氏-灵宝地区中酸性小岩体显微照片(正交偏光)

a~d. 分别为夜长坪、后瑶峪、柳关、圪老湾钾长花岗斑岩的显微照片,它们常具斑状结构,斑晶主要为石英和钾长石,钾长石发育简单双晶;
e~h. 分别为蒲阵沟、黑山、杨沟石英闪长岩及杨沟石英二长岩的显微照片,它们常呈半自形粒状结构,造岩矿物常有斜长石、钾长石、石英、角
闪石及黑云母等。Bi—黑云母;Q—石英;Kf—钾长石;Ser—绢云母;Pl—斜长石;Hb—角闪石;Cpx—单斜辉石;Cc—方解石

Fig. 5 Photomicrographs showing mineralogy and textures of selected granioid intrusions in Luonan-Lushi area, southern North China Craton.

a~d. Micrographs show the porphyritic texture of Yechangping, Houyaoyu, Liuguang and Gelaowang granite porphyry; e~h. Micrographs show the euguigranular texture of Puzhengou, Heishan, Yanggou quartz diorite and Yanggou quartz monzonite; Bi—Biotite; Q—Quartz; Kf—K-feldspar; Ser—Sericite; Pl—plagioclase; Hb—hornblende; Cpx—Clinopyroxene; Cc—Calcite

组碳酸盐岩地层中(图3)。用于锆石 U-Pb 定年的石英闪长岩样品(HS5; 34° 18' 23.1" N, 110° 09' 05.0" E)采于黑山岩体西部。岩石为灰黑色,等粒结构,块状构造(图4f),主要由石英(5%)、钾长石(10%)、斜长石(55%)、角闪石(15%)及黑云母(15%)组成(图5f)。副矿物有榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石,可见褐帘石。

(7) 杨沟岩体

杨沟岩体位于洛南县西北部的黑山村,出露面积 1.5 km²,侵入于中元古界巡检司组碳酸盐岩地层中(图3)。岩体为两次侵位的复式岩体,中心部位为石英二长岩,边缘为石英闪长岩。用于锆石 U-Pb 定年的石英闪长岩样品(YG2; 34° 18' 09.1" N, 110° 10' 13.2" E)采于杨沟岩体西南部,石英二长岩样品(YG13; 34° 18' 14.2" N, 110° 10' 25.6" E)采于岩体中部(图3)。石英闪长岩样品为灰黑色,等粒结构,块状构造(图4g),主要由石英(10%)、钾长石(15%)、斜长石(50%)、角闪石(15%)和黑云母(10%)组成(图5g),副矿物主要有榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石。石英二长岩样品为浅肉红色,半自形粒状结构,块状构造(图4h),主要由石英(15%)、钾长石(25%)、斜长石(35%)、角闪石(15%)和黑云母(15%)组成(图5h)。副矿物主要有榍石、磷灰石、磁铁矿、锆石。

3 分析方法

锆石单矿物分选在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。样品采用常规方法粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选。将分选出的样品在双目镜下挑选出透明、无裂隙、无包裹体、粒径较大的锆石颗粒作为测定对象。将待测的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,并抛光至锆石出露 1/2 左右。锆石的阴极发光(CL)图像分析在北京离子探针中心利用配有 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头的 HITACHI

S3000-N 型扫描电子显微镜完成。U-Pb 同位素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利用 LA-ICP-MS 方法完成,仪器型号为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005。实验过程中采用氦气作为载气,氩气作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。在等离子体中心气流(Ar + He)中加入少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精度(Hu et al., 2008)。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。详细的仪器操作流程见参考文献(Liu et al., 2008)。对所测数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算)采用 ICPMS-DataCal 软件(Liu et al., 2008; 2010)完成。普通铅校正采用 Andersen(2002)方法,锆石加权平均年龄的计算及谐和图的绘制利用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2001)完成。

4 结果

4.1 夜长坪钾长花岗斑岩(样品 YCP1)

其中的锆石呈棕色-棕褐色,透明至半透明,多数为自形柱状,粒径 50~200 μm,长宽比约为 1:1~1:3。大部分锆石的 CL 图像呈深黑色或灰黑色,无明显环带,少数锆石呈浅灰色并发育清晰的岩浆振荡环带(图6a)。18 颗锆石的 U-Pb 同位素分析结果如表 1 和图 7a 所示。锆石的 $w(\text{Th})$ 、 $w(\text{U})$ 很高(分别为 $203 \times 10^{-6} \sim 2.929 \times 10^{-6}$ 和 $430 \times 10^{-6} \sim 16.214 \times 10^{-6}$),Th/U 比值为 0.13~0.85。锆石的 U-Pb 年龄可以分为 3 组(图 7a):多数锆石($n=11$)给出了基本一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄,加权平均年龄为 $(158 \pm 2) \text{Ma}$ (MSWD = 1.09),可能代表了夜长坪岩体的侵位年龄;4 颗较年轻的锆石位于谐和线及以上谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(145 \pm 2) \text{Ma}$ (MSWD = 2.3),可能反映了晚期热事件导致部

表1 华北南缘洛南-卢氏地区中酸性小岩体锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP MS zircon U-Pb dating data of granitoid intrusions from Luonan-Lushi area, southern North China Craton

分析点号	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
夜长坪钾长花岗斑岩体(样品 YCP1)													
YCP1-01	964	1175	0.64	0.05527	0.00208	0.19065	0.00802	0.02502	0.0002	423	81	177	7
YCP1-02	858	1627	0.82	0.05576	0.00247	0.17473	0.00836	0.02273	0.00018	443	95	164	7
YCP1-03	1978	11675	0.53	0.04929	0.00065	0.16803	0.00251	0.02463	0.00017	161	30	158	2
YCP1-04	2136	13316	0.17	0.04869	0.00063	0.16582	0.00238	0.02461	0.00016	133	29	156	2
YCP1-05	802	3093	0.16	0.05312	0.00104	0.18161	0.00397	0.02477	0.00024	334	43	169	3
YCP1-06	1789	10241	0.26	0.05094	0.00077	0.17566	0.00297	0.02492	0.00019	238	34	164	3
YCP1-07	1193	4394	0.17	0.05067	0.001	0.18666	0.00416	0.02689	0.00028	226	44	174	4
YCP1-08	1623	12203	0.27	0.04966	0.00081	0.17008	0.0032	0.0247	0.00023	179	37	159	3
YCP1-09	1711	10319	0.13	0.04963	0.00071	0.16937	0.00268	0.02466	0.00017	178	32	159	2
YCP1-10	2929	16214	0.17	0.04805	0.00062	0.16439	0.00239	0.02474	0.00016	102	29	155	2
YCP1-11	2061	13025	0.18	0.04772	0.00069	0.1637	0.00269	0.02481	0.00019	85	33	154	2
YCP1-12	939	2254	0.16	0.04853	0.00104	0.18227	0.00438	0.02719	0.0003	125	48	170	4
YCP1-13	439	701	0.42	0.04607	0.00174	0.14803	0.00618	0.0233	0.00024	1	73	140	5
YCP1-14	339	584	0.63	0.04889	0.00225	0.15519	0.00795	0.02302	0.00026	143	101	146	7
YCP1-15	357	496	0.58	0.0522	0.00173	0.1774	0.00616	0.02464	0.00025	294	74	166	5
YCP1-16	1012	1192	0.72	0.04987	0.00219	0.18282	0.00889	0.02659	0.00023	189	98	170	8
YCP1-17	203	430	0.85	0.05038	0.00174	0.15559	0.00559	0.02248	0.00023	212	78	147	5
YCP1-18	997	1748	0.47	0.05419	0.0019	0.18833	0.00737	0.02521	0.00021	379	77	175	6
后瑶峪钾长花岗斑岩体(样品 HYY1)													
HYY1-01	397	911	0.44	0.05919	0.00211	0.21118	0.00824	0.02588	0.00021	574	76	195	7
HYY1-02	131	404	0.32	0.04699	0.002	0.1302	0.00574	0.02035	0.00023	49	88	124	5
HYY1-03	360	241	1.49	0.04948	0.00246	0.13819	0.00708	0.02042	0.00026	171	110	131	6
HYY1-04	123	116	1.06	0.06066	0.004	0.16326	0.01118	0.02029	0.00038	627	140	154	10
HYY1-05	237	745	0.32	0.05145	0.00168	0.14691	0.00502	0.02082	0.00021	261	73	139	4
HYY1-06	508	1562	0.33	0.05354	0.00149	0.15401	0.00481	0.02086	0.00018	352	61	145	4
HYY1-07	673	865	0.78	0.05315	0.00161	0.15324	0.00481	0.02105	0.00018	335	67	145	4
HYY1-08	229	804	0.29	0.0547	0.00193	0.1848	0.00677	0.02455	0.00024	400	77	172	6
HYY1-09	562	1111	0.51	0.04955	0.00161	0.14173	0.00475	0.02085	0.00017	174	72	135	4
HYY1-10	217	559	0.39	0.05058	0.00205	0.14333	0.00604	0.02048	0.00023	222	90	136	5
HYY1-11	95.9	240	0.40	0.17963	0.00259	12.88981	0.21275	0.51853	0.00416	2649	23	2672	16
HYY1-12	339	555	0.61	0.04613	0.00254	0.12895	0.00753	0.02027	0.00021	4	111	123	7
HYY1-13	355	476	0.75	0.04883	0.00196	0.13736	0.00563	0.02042	0.00018	140	89	131	5
HYY1-14	141	266	0.53	0.05016	0.00362	0.13923	0.01123	0.02013	0.00039	202	156	132	10
HYY1-15	293	726	0.40	0.05743	0.00156	0.17461	0.00499	0.02216	0.00019	508	58	163	4

续表 1-1
Cont. Table 1-1

分析点号	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{235}\text{U}/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
柳关钾长花岗斑岩体(样品 LG1)															
LG1-01	274	876	0.31	0.16308	0.002	10.65865	0.14765	0.47211	0.00305	2488	20	2494	13	2493	13
LG1-02	125	508	0.31	0.05041	0.00219	0.1436	0.00669	0.02066	0.00022	214	97	136	6	132	1
LG1-03	205	321	0.25	0.04988	0.00234	0.16038	0.00777	0.02338	0.00029	189	104	151	7	149	2
LG1-04	602	820	0.64	0.0491	0.00139	0.13889	0.00407	0.02052	0.00016	153	64	132	4	131	1
LG1-05	70.2	327	0.73	0.05268	0.00203	0.14795	0.00599	0.0206	0.00026	315	85	140	5	131	2
LG1-06	312	457	0.21	0.04733	0.0025	0.13611	0.00799	0.02086	0.00026	66	109	130	7	133	2
LG1-07	299	304	0.68	0.05435	0.00274	0.15768	0.00821	0.02119	0.00028	385	110	149	7	135	2
LG1-08	95.7	257	0.98	0.1087	0.00163	4.8396	0.09251	0.32209	0.00382	1778	26	1792	16	1800	19
LG1-09	59.3	354	0.37	0.04856	0.0021	0.14104	0.00643	0.02107	0.00022	126	94	134	6	134	1
LG1-10	49.6	159.0	0.17	0.05524	0.00523	0.15877	0.01622	0.02085	0.00046	422	207	150	14	133	3
LG1-11	127	298	0.31	0.04982	0.00273	0.14287	0.00804	0.02091	0.00027	187	121	136	7	133	2
LG1-12	131	204	0.43	0.05405	0.00441	0.15584	0.01422	0.02091	0.00041	373	179	147	12	133	3
LG1-13	657	611	0.64	0.06311	0.00239	0.17983	0.00711	0.02061	0.00023	712	78	168	6	131	1
LG1-14	252	331	1.08	0.0473	0.00234	0.13389	0.00732	0.02053	0.00025	64	102	128	7	131	2
LG1-15	849	755	0.76	0.05188	0.00156	0.14967	0.00468	0.02091	0.00018	280	67	142	4	133	1
LG1-16	174	430	1.12	0.0523	0.00189	0.14982	0.00571	0.02097	0.00026	298	80	142	5	134	2
LG1-17	263	275	0.40	0.05318	0.00243	0.1513	0.00721	0.02065	0.00028	336	100	143	6	132	2
LG1-18	314	186	0.96	0.05534	0.00587	0.15828	0.0188	0.02074	0.0004	426	228	149	16	132	3
坵老湾钾长花岗斑岩体(样品 GLW3)															
GLW3-01	528	628	0.84	0.0499	0.0018	0.1615	0.0059	0.0235	0.0002	191	116	152	5	150	1
GLW3-02	482	639	0.84	0.0533	0.0017	0.1703	0.0057	0.0231	0.0002	343	40	160	5	147	1
GLW3-03	436	627	0.75	0.0541	0.0021	0.1743	0.0066	0.0234	0.0002	376	87	163	6	149	1
GLW3-04	487	679	0.69	0.0505	0.0017	0.1602	0.0053	0.0230	0.0002	220	76	151	5	147	1
GLW3-05	463	613	0.72	0.0530	0.0019	0.1714	0.0059	0.0236	0.0003	332	77	161	5	150	2
GLW3-06	280	350	0.75	0.0466	0.0022	0.1473	0.0069	0.0231	0.0003	33	167	140	6	147	2
GLW3-07	84.3	324	0.80	0.1644	0.0026	11.2802	0.1889	0.4964	0.0039	2502	26	2547	16	2598	17
GLW3-08	309	564	0.26	0.0548	0.0020	0.1747	0.0064	0.0232	0.0002	467	83	163	5	148	1
GLW3-09	559	879	0.55	0.0491	0.0014	0.1571	0.0044	0.0232	0.0002	150	65	148	4	148	1
GLW3-10	512	876	0.64	0.0485	0.0016	0.1577	0.0052	0.0236	0.0002	124	71	149	5	150	2
GLW3-11	479	840	0.65	0.0498	0.0015	0.1592	0.0047	0.0232	0.0002	187	68	150	4	148	1
GLW3-12	701	947	0.57	0.0533	0.0016	0.1715	0.0049	0.0234	0.0002	339	38	161	4	149	1
GLW3-13	843	776	0.74	0.0476	0.0015	0.1536	0.0048	0.0234	0.0002	80	74	145	4	149	1
GLW3-14	H688	788	1.09	0.0519	0.0017	0.1664	0.0053	0.0233	0.0002	280	71	156	5	148	1
GLW3-15	436	702	0.87	0.0500	0.0016	0.1602	0.0051	0.0232	0.0002	195	106	151	4	148	1
GLW3-16	544	713	0.62	0.0531	0.0017	0.1713	0.0054	0.0234	0.0003	332	74	161	5	149	2
GLW3-17	590	690	0.76	0.0479	0.0016	0.1513	0.0049	0.0229	0.0002	95	80	143	4	146	1
GLW3-18	425	666	0.85	0.0497	0.0017	0.1559	0.0051	0.0227	0.0002	189	78	147	5	145	1

续表 1-2
Cont. Table 1-2

分析点号	$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	$\omega(\text{U})/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
蒲陈沟石英闪长岩体(样品 PZG2)															
PZG2-01	254	92.9	2.73	0.06308	0.00471	0.20105	0.01558	0.02389	0.0005	711	154	186	13	152	3
PZG2-02	464	136	3.41	0.06548	0.00434	0.21727	0.01487	0.0241	0.0004	790	136	200	12	153	3
PZG2-03	848	294	2.88	0.04964	0.00231	0.16084	0.00774	0.02369	0.0003	178	102	151	7	151	2
PZG2-04	484	157	3.08	0.06728	0.00344	0.21351	0.01139	0.02377	0.00036	846	104	196	10	151	2
PZG2-05	1654	354	4.67	0.04673	0.00217	0.15029	0.00718	0.02344	0.00026	35	95	142	6	149	2
PZG2-06	707	226	3.13	0.04645	0.00544	0.14693	0.01903	0.02294	0.00041	21	219	139	17	146	3
PZG2-07	1005	294	3.42	0.05156	0.00222	0.1652	0.00741	0.02359	0.0003	266	96	155	6	150	2
PZG2-08	690	207	3.34	0.05554	0.00233	0.17431	0.00762	0.02313	0.00029	434	91	163	7	147	2
PZG2-09	392	130	3.01	0.04608	0.00531	0.14903	0.01913	0.02346	0.00047	2	214	141	17	149	3
PZG2-10	443	193	2.30	0.05171	0.00299	0.16556	0.00985	0.02347	0.00032	273	127	156	9	150	2
PZG2-11	720	218	3.29	0.04881	0.00265	0.15241	0.00857	0.02322	0.00034	139	117	144	8	148	2
PZG2-12	727	210	3.46	0.05212	0.00257	0.16364	0.00833	0.023	0.0003	291	108	154	7	147	2
PZG2-13	629	203	3.09	0.0527	0.00604	0.17435	0.02266	0.024	0.00047	316	240	163	20	153	3
PZG2-14	694	209	3.32	0.05636	0.0028	0.18085	0.00926	0.02326	0.00029	466	106	169	8	148	2
PZG2-15	432	182	2.37	0.05347	0.00296	0.17171	0.00985	0.02349	0.00035	349	122	161	9	150	2
黑山石英闪长岩体(样品 HS05)															
HS5-01	105	113	0.93	0.05673	0.00372	0.18436	0.01248	0.02357	0.00039	481	142	172	11	150	2
HS5-02	278	247	1.12	0.0469	0.00263	0.15223	0.00952	0.02354	0.00032	44	114	144	8	150	2
HS5-03	19.7	22.5	0.87	0.11208	0.00379	4.76084	0.17351	0.30844	0.00421	1833	59	1778	31	1733	21
HS5-04	66.5	103	0.65	0.05301	0.00425	0.16987	0.01482	0.02324	0.00039	329	173	159	13	148	2
HS5-05	89.4	130	0.69	0.05204	0.00521	0.16156	0.01768	0.02252	0.0005	287	213	152	15	144	3
HS5-06	186	222	0.84	0.05292	0.00273	0.16574	0.00882	0.02283	0.00029	325	112	156	8	145	2
HS5-07	228	244	0.93	0.0513	0.0032	0.16491	0.01151	0.02332	0.00032	254	136	155	10	149	2
HS5-08	122	189	0.65	0.05076	0.00312	0.16562	0.01129	0.02366	0.00034	230	135	156	10	151	2
HS5-09	85.2	131	0.65	0.0551	0.00329	0.1798	0.01107	0.02377	0.00036	416	130	168	10	151	2
HS5-10	119	144	0.83	0.04806	0.00533	0.15786	0.01975	0.02382	0.0006	102	221	149	17	152	4
HS5-11	84.7	115	0.73	0.05058	0.00367	0.16253	0.01333	0.0233	0.00043	222	157	153	12	149	3
HS5-12	109	123	0.88	0.05499	0.0057	0.17815	0.02007	0.0235	0.00043	412	224	166	17	150	3
HS5-13	196	198	0.99	0.05239	0.0049	0.16383	0.01678	0.02268	0.00039	302	202	154	15	145	2
HS5-14	92.0	146	0.63	0.05509	0.00336	0.17784	0.01114	0.02375	0.00034	416	132	166	10	151	2
HS5-15	148	212	0.70	0.05449	0.00256	0.17454	0.00852	0.0232	0.00031	392	102	163	7	148	2
HS5-16	98.5	132	0.75	0.05346	0.00428	0.17124	0.01507	0.02323	0.0004	348	176	160	13	148	3
杨沟石英闪长岩体(样品 YG2)															
YG2-1	74.6	84.8	0.88	0.15587	0.00335	9.30581	0.31389	0.43299	0.00754	2411	35	2369	31	2319	34
YG2-2	124	171	0.73	0.06346	0.00315	0.20214	0.01041	0.02318	0.00032	724	102	187	9	148	2
YG2-3	110	141	0.78	0.04924	0.00301	0.16115	0.01019	0.02408	0.00039	159	133	152	9	153	2
YG2-4	136	191	0.71	0.06332	0.00719	0.20305	0.0248	0.02326	0.00044	719	242	188	21	148	3

续表 1-3
Cont. Table 1-3

分析点号	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
杨沟石英闪长岩体(样品 YG2)															
YG2-5	233	184	1.26	0.07991	0.01425	0.25849	0.04626	0.02375	0.00037	1195	368	233	37	151	2
YG2-6	163	178	0.92	0.14669	0.00235	7.89516	0.14689	0.38873	0.00366	2308	27	2219	17	2117	17
YG2-7	100	127	0.79	0.05149	0.00432	0.16798	0.01557	0.02366	0.00044	263	183	158	14	151	3
YG2-8	226	188	1.20	0.04609	0.00407	0.14944	0.01426	0.02351	0.00036	3	176	141	13	150	2
YG2-9	86.9	119	0.73	0.05634	0.00408	0.18423	0.01371	0.02392	0.00042	466	159	172	12	152	3
YG2-10	112	117	0.96	0.05016	0.00423	0.16056	0.01503	0.02321	0.00044	203	183	151	13	148	3
YG2-11	95.3	152	0.63	0.05351	0.00432	0.17192	0.01517	0.0233	0.0004	351	177	161	13	148	3
YG2-12	129	140	0.92	0.06134	0.00449	0.19398	0.01516	0.02403	0.00066	651	154	180	13	153	4
YG2-13	138	154	0.90	0.04961	0.00393	0.15742	0.01403	0.02302	0.00044	177	170	148	12	147	3
YG2-14	134	147	0.91	0.05046	0.0061	0.1672	0.02203	0.02403	0.00048	216	248	157	19	153	3
YG2-15	196	166	1.18	0.05251	0.00307	0.1716	0.01038	0.024	0.00038	307	128	161	9	153	2
YG2-16	76.2	108	0.71	0.0575	0.00764	0.18394	0.02681	0.0232	0.00056	511	283	171	23	148	4
YG2-17	95.8	151	0.64	0.04679	0.00487	0.14838	0.01672	0.023	0.00044	39	204	140	15	147	3
YG2-18	121	168	0.72	0.05484	0.00332	0.16899	0.01054	0.02308	0.00035	406	131	159	9	147	2
杨沟石英二长岩体(样品 YG13)															
YG13-01	102	229	0.45	0.04298	0.00268	0.13805	0.00893	0.02386	0.00041	-124	125	131	8	152	3
YG13-02	142	115	1.23	0.04965	0.00524	0.16226	0.01973	0.0237	0.00064	179	215	153	17	151	4
YG13-03	140	87.9	1.59	0.05587	0.00636	0.18257	0.0212	0.02328	0.00053	447	242	170	18	148	3
YG13-04	121	100.1	1.21	0.05967	0.01081	0.19027	0.03681	0.02313	0.00061	592	377	177	31	147	4
YG13-05	250	206	1.22	0.04985	0.00254	0.16231	0.00864	0.02377	0.00036	188	112	153	8	151	2
YG13-06	129	145	0.89	0.0869	0.00296	2.93492	0.13756	0.24495	0.00429	1358	63	1391	35	1412	22
YG13-07	247	218	1.13	0.05106	0.00291	0.16004	0.00943	0.02309	0.00034	243	126	151	8	147	2
YG13-08	230	142	1.62	0.05151	0.00292	0.16308	0.00965	0.02346	0.00039	264	125	153	8	149	2
YG13-09	433	278	1.56	0.0523	0.00286	0.16467	0.00932	0.02285	0.00033	298	122	155	8	146	2
YG13-10	205	167	1.23	0.04888	0.00404	0.15979	0.01494	0.02371	0.00044	142	175	151	13	151	3
YG13-11	204	139	1.47	0.05831	0.00404	0.17534	0.01274	0.02325	0.0005	541	150	164	11	148	3
YG13-12	217	160	1.36	0.05971	0.00373	0.19016	0.0124	0.02318	0.00044	593	133	177	11	148	3
YG13-13	204	206	0.99	0.05538	0.00351	0.18365	0.01207	0.02413	0.00042	428	137	171	10	154	3
YG13-14	204	135	1.51	0.04607	0.00446	0.14839	0.01653	0.02336	0.0006	2	188	140	15	149	4
YG13-15	110	91.7	1.20	0.05816	0.00506	0.17645	0.01578	0.02324	0.00049	536	188	165	14	148	3



图 6 华北克拉通南缘洛南-卢氏地区中酸性侵入岩体锆石 CL 图像

Fig. 6 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircon grains from selected granitoid intrusions in Luonan-Lushi area, southern North China Craton

分锆石发生 U-Pb 同位素丢失。还有 3 颗 CL 图像呈灰色、具有明显岩浆环带的锆石给出了较老的 U-Pb 年龄,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(170.0 \pm 4.6)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=7.0$),很可能是岩浆侵位过程中捕获的早期岩浆锆石。

4.2 后瑶峪钾长花岗斑岩(样品 HYY1)

锆石均无色透明,自形长柱状,粒径 $50\sim 200\ \mu\text{m}$,长宽比 $1:2\sim 1:4$ 。多数锆石发育明显的岩浆振荡环带(图 6b)。对 15 颗锆石进行了 U-Pb 同位素分析,结果如表 1 和图 7b 所示。该样品中锆石的 $\alpha(\text{U})$ 较高且变化较大($116\times 10^{-6}\sim 1\ 562\times 10^{-6}$),Th/U 比为 $0.29\sim 1.49$,属于典型的岩浆锆石。大部分锆石年龄($n=11$)位于谐和线上或谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 $128\sim 134\ \text{Ma}$ 之间,加权平均值为 $(131\pm 1)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=2.8$),该年龄代表后瑶峪岩体的侵位年龄。一个锆石颗粒(HYY1-11)具有明显的核幔结构,其中幔部的阴极发光图像为灰色并具有明显的振荡环带,而核部的阴极发光图像为灰白色且不发育振荡环带,核部的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄值为 $2\ 649\ \text{Ma}$,反映岩浆侵位过程中捕获了太华群变质岩中的锆石(薛良伟等,1995; Xu X S et al., 2009)。另外 3 个点(HYY1-01、08、15)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏大,且偏离谐和线,可能是一些捕获锆石发生 Pb 丢失的结果。

4.3 柳关钾长花岗斑岩(样品 LG1)

锆石均无色透明,自形长柱状,粒径 $50\sim 200\ \mu\text{m}$,长宽比为 $1:2\sim 1:3$,多数锆石发育明显的岩浆振荡环带(图 6c)。18 颗锆石的 U-Pb 同位素分析结果如表 1 和图 7c 所示。15 个锆石分析点均位于谐和线上或谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(132\pm 1)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.76$) (图 7c),代表柳关花岗斑岩的结晶年龄。两个锆石分析点(LG1-01, 08)的年龄较老,其 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄分别为 $(1\ 778\pm 26)\text{Ma}$ 和 $(2\ 488\pm 20)\text{Ma}$,与熊耳群火山岩(Peng, 2008; He et al., 2009)和太华群变质岩(Xu X S et al., 2009)的年龄相当,很可能是岩浆侵位过程中捕获的熊耳群火山岩和太华群变质岩中的锆石。另一个分析点 LG1-03 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $(149\pm 2)\text{Ma}$,与圪老湾和蒲阵沟斑岩的侵位年龄完全一致(见后),这说明柳关岩体在侵位过程中可能捕获了早期岩浆岩中的锆石,同时暗示柳关岩体深部可能存在与圪老湾和蒲阵沟岩体同期侵位的隐伏岩体。

4.4 圪老湾钾长花岗斑岩(样品 GLW3)

锆石无色透明且多为自形-半自形长柱状,粒径 $50\sim 150\ \mu\text{m}$,长宽比为 $1:2\sim 1:4$,大多数锆石具有明显的岩浆振荡环带(图 6d)。对 18 颗锆石进行了 U-Pb 同位素分析,结果见表 1 和图 7d。多数锆石具有较高的 $\alpha(\text{U})$ ($324\times 10^{-6}\sim 947\times 10^{-6}$),Th/U 比值为 $0.26\sim 1.09$,属于典型的岩浆锆石。除一个分析点(GLW3-07)具有较老的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄值 $[(2\ 502\pm 26)\text{Ma}]$ 以外,其余 17 个分析点均位于谐和线上或谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(148\pm 1)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.12$) (图 7d),代表了圪老湾岩体的结晶年龄。

4.5 蒲阵沟石英闪长岩(样品 PZG2)

锆石均无色透明,自形柱状,粒径 $50\sim 250\ \mu\text{m}$,长宽比为 $1:2\sim 1:3$ 。从锆石的 CL 图像来看,多数锆石具有弱的面状环带(图 6e)。对 15 颗锆石进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。从表 1 可知,多数锆石 $\alpha(\text{U})$ ($92.9\times 10^{-6}\sim 354\times 10^{-6}$) 较低,Th/U 比值($2.37\sim 4.67$) 较高。15 个锆石分析点均位于谐和线上或谐和线附近(图 7e),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(149\pm 1)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.74$) (图 7e),该年龄代表蒲阵沟岩体的结晶年龄。

4.6 黑山石英闪长岩(样品 HS05)

锆石无色透明,呈自形-半自形柱状,粒径为 $50\sim 250\ \mu\text{m}$,长宽比 $1:2\sim 1:3$ 。锆石 CL 图像显示有弱的宽缓环带(图 6f)。对 16 颗锆石进行的 U-Pb 同位素分析结果列于表 1,其 $\alpha(\text{U})$ 为 $(103\times 10^{-6}\sim 247\times 10^{-6})$,Th/U 比值为 $0.63\sim 1.12$,与典型的岩浆锆石一致。一个锆石分析点(HS05-03)的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄为 $(1\ 833\pm 59)\text{Ma}$,可能为捕获的熊耳群火山岩锆石,其余 15 个分析点位于谐和线上及其附近。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(149\pm 1)\text{Ma}$ ($\text{MSWD}=1.09$) (图 7f),它代表石英闪长岩的结晶年龄。

4.7 杨沟石英闪长岩(样品 YG02)

锆石为无色透明,呈自形-半自形柱状,粒径 $100\sim 350\ \mu\text{m}$,长宽比 $1:2\sim 1:4$ 。锆石 CL 图像显示弱的岩浆振荡环带(图 6g)。对 17 颗锆石进行了 18 个点的 U-Pb 年龄分析,结果如表 1 所示。锆石的 $\alpha(\text{U})$ 较低($84.8\times 10^{-6}\sim 191\times 10^{-6}$),Th/U 比值 $0.64\sim 1.26$ 。两个点(YG02-2、4)给出了较老的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄,分别为 $(2\ 411\pm 35)\text{Ma}$ 和 $(2\ 308$

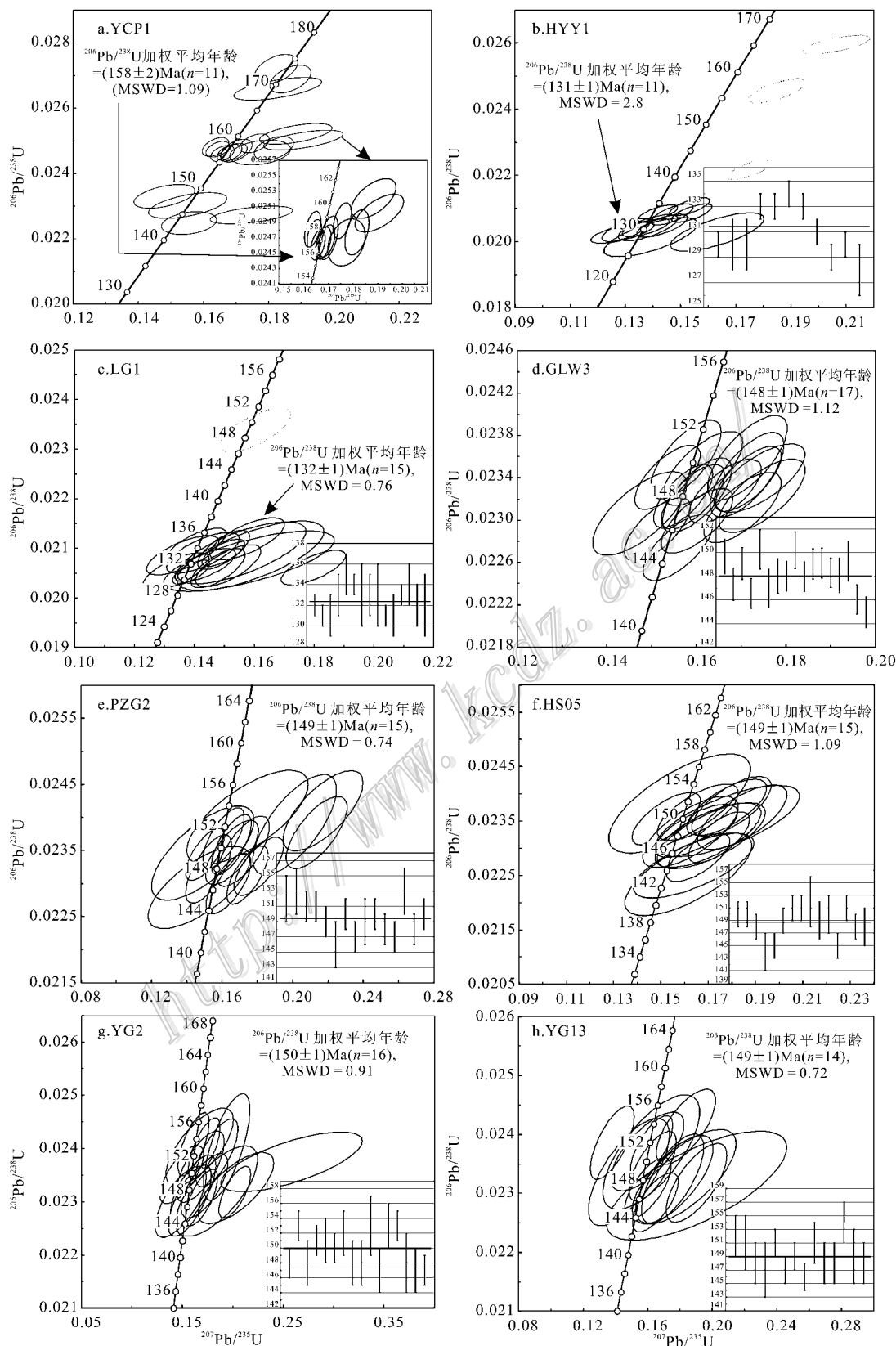


图 7 华北克拉通南缘洛南-卢氏地区中酸性侵入体的锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of selected granitoid intrusions in Luonan-Lushi area, southern North China Craton

± 27) Ma, 可能为岩浆侵位过程中捕获的基底太华群变质岩锆石。其余 16 个点均位于谐和线上及其附近。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 (150 ± 1) Ma (MSWD=0.91) (图 7g), 它代表石英闪长岩的结晶年龄。

4.8 杨沟石英二长岩(样品 YG13)

锆石为无色透明, 呈自形-半自形柱状, 粒径为 $100 \sim 250 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1:2 \sim 1:3$ 。锆石 CL 图像显示有明显的岩浆振荡环带(图 6h)。对 15 颗锆石进行了 15 个点的 U-Pb 同位素分析。锆石 $w(\text{U})$ 为 $87.9 \times 10^{-6} \sim 278 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.45 \sim 1.62$ 。一个分析点(YG13-06)给出了较老的 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 年龄为 (1358 ± 63) Ma, 其余 14 个分析点均位于谐和线及其附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (149 ± 1) Ma (MSWD=0.72) (图 7h), 它代表石英二长岩的结晶年龄。

5 讨论

5.1 华北克拉通南缘晚中生代岩浆活动

本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法首次对洛南-卢氏地区中酸性小岩体的侵位年龄进行了准确测定, 结果表明这些岩体侵位于 $158 \sim 131$ Ma, 是晚侏罗世—早白垩世岩浆活动的产物。其中, 夜长坪钾长花岗斑岩侵位于 (158 ± 2) Ma, 与夜长坪岩体以东的南泥湖花岗斑岩 (157 ± 3) Ma 和上房沟花岗斑岩 (158 ± 3) Ma 的侵位时间相同(Mao et al., 2010), 是迄今为止华北克拉通南缘厘定的最老的燕山期侵入岩, 代表该区燕山期岩浆活动的开始。圪老湾钾长花岗斑岩的侵位年龄为 (148 ± 1) Ma, 而后瑶峪和柳关钾长花岗斑岩则分别侵位于 (131 ± 1) Ma 和 (132 ± 1) Ma, 是洛南-卢氏地区最年轻的燕山期中酸性侵入岩。卢氏地区的蒲阵沟石英闪长岩和洛南地区的黑山石英闪长岩及杨沟石英闪长岩和石英二长岩形成于晚侏罗世末期, 侵位年龄分别为 (149 ± 1) Ma, (149 ± 1) Ma, (150 ± 1) Ma 和 (149 ± 1) Ma。研究表明, 与侵入岩有关的热液系统持续的时间一般 ≤ 1 Ma (Cathles et al., 1997; Quadt et al., 2011)。东秦岭地区金堆城钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄为 (138.9 ± 0.5) Ma (Mao et al., 2008), 与其斑

岩体的年龄 (140.95 ± 0.45) Ma (朱赖民等, 2008) 在误差范围内一致。如前所述, 洛南-卢氏地区的中酸性小岩体大多已矿化, 矿化类型为斑岩型和矽卡岩型, 与花岗斑岩有关的矿床如夜长坪斑岩型钼矿床(肖中军等, 2007), 后瑶峪矽卡岩型铁-铜-铅锌多金属矿床(叶会寿, 2006) 与闪长岩类有关的矿床如黑山村铁矿床及木龙沟铁(钼)矽卡岩型矿床等(赵一鸣等, 1982), 因此本文所获得的锆石 U-Pb 年龄不仅代表上述中酸性侵入岩的侵位时代, 而且可以近似限定有关矿床的成矿年龄, 说明该区多金属矿床也可能形成于晚侏罗世—早白垩世。

华北克拉通南缘晚中生代侵入岩十分发育, 除本文所研究的中酸性小岩体外, 还分布有大量花岗岩类岩基(图 1)和中基性岩脉。在小秦岭地区, 自西向东依次发育有华山、文峪和娘娘山 3 个花岗岩岩基(图 1), 其侵位年龄分别为 134 Ma, 138 Ma 和 142 Ma (Mao et al., 2010)。丁丽雪等(2010)最近测定了蓝田和牧户关二长花岗岩(图 1)的锆石 U-Pb 年龄, 结果分别为 (154 ± 1) Ma 和 (152 ± 2) Ma, 表明他们侵位于晚侏罗世中期。位于洛南县城东南部的蟒岭花岗岩基的侵位年龄为 149 Ma^①, 即晚侏罗世末期。Mao 等(2010)报道了熊耳山地区的花山和五丈山岩体及外方山地区的合峪及太山庙等花岗岩基的侵位年龄, 其中五丈山岩体侵位于晚侏罗世初期(157 Ma), 与本文获得的夜长坪钾长花岗斑岩侵位年龄一致, 而花山岩体和合峪岩体则侵位于早白垩世早期(132~127 Ma), 太山庙岩体的侵位时间为早白垩世末期(115 Ma), 标志着华北克拉通南缘晚中生代岩浆活动的结束。

最近一些学者还发现大量闪长玢岩、角闪辉长岩、辉绿岩、煌斑岩等中基性岩脉侵位于蓝田、牧护关、老牛山及文峪岩体等花岗岩基内, 其侵位时代为 $152 \sim 126$ Ma (丁丽雪, 2010; 王团华等, 2008; 李建威, 未发表资料)。在华北克拉通南缘西段的金矿及铅锌矿区内也发育大量中基性岩脉, 其形成时代主要包括古元古代和晚中生代, 其中, 晚中生代岩脉的侵位时间为 $148 \sim 130$ Ma (任志媛等, 未发表资料; 包志伟等, 2009b)。从以上分析可知, 华北克拉通南缘晚中生代岩浆活动强烈, 岩体侵位始于晚侏罗世(158 Ma), 并分别在晚侏罗世末(149~147 Ma)

① 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 李舫. 2010. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义. 2010 全国岩石学与地球动力学研讨会会议摘要. 105-106.

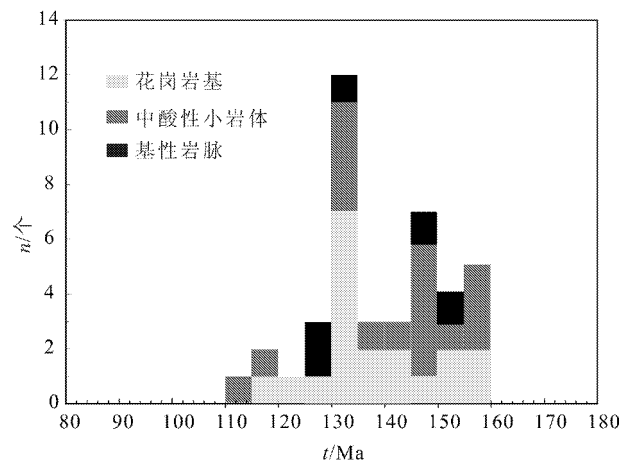


图8 华北克拉通南缘燕山期侵入岩年龄分布直方图

数据来源于本文及王晓霞等, 2010^①; 胡建等, 2010^②; 齐秋菊等, 2010^③; Mao et al., 2010; 赵海杰等, 2010; 姚建军等, 2009; 周红升等, 2008; 朱赖民等, 2008; 王团华等, 2008; 叶会寿等, 2008; 戴宝章等, 2009; 包志伟等, 2009a; 2009b; 郭波等, 2009; 丁丽雪等, 2010

Fig. 8 Age histograms of late Mesozoic intrusions on the southern margin of the North China Craton

Data from this study and Wang et al., 2010^①; Hu et al., 2010^②; Qi et al., 2010^③; Mao et al., 2010; Zhao et al., 2010; Yao et al., 2009; Zhou et al., 2008; Zhu et al., 2008; Wang et al., 2008; Ye et al., 2008; Dai et al., 2009; Bao et al., 2009a; 2009b; Guo et al., 2009; Ding et al., 2010

和早白垩世早期(约 132 Ma)达到高峰,至早白垩世末期(约 115 Ma)趋于结束(图 8)。

5.2 华北克拉通南缘晚中生代岩浆作用的构造背景及与华北克拉通破坏的关系

如前所述,华北克拉通南缘晚中生代的岩浆活动具有双峰式的特点。与花岗岩岩基相比,虽然基性岩的出露面积要小得多,但如果考虑到本区壳幔岩浆混合的广泛存在,可以认为,晚中生代时期华北克拉通南缘的岩石圈地幔发生了较大程度的部分熔融。华北克拉通南缘许多花岗岩岩基都含有较丰富的暗色微粒包体,如蓝田岩体^④和麟岭岩体(胡浩,未发表资料)等,这些包体是幔源岩浆与壳源岩浆混

合的结果。这一认识得到了一些花岗岩基全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素的支持,如蓝田岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}} = -9.3 \sim -23.9$ ^⑤,东沟斑岩体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.4 \sim -18.7$ (戴宝章等, 2009)麟岭岩体的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.1$ (张宗清等, 2006),显示上述岩体中有较多幔源组分的加入。对金堆城、石家湾、东沟及三道庄等与花岗斑岩体有关的大型、特大型斑岩型钼矿床的硫化物稀有气体同位素的研究也显示有幔源组分的加入(Zhu et al., 2009)。以上资料表明,华北克拉通南缘晚侏罗—早白垩世时期区域岩浆活动受岩石圈伸展的构造背景控制。最近 Han 等(2007)对五丈山及合峪岩体的热年代学研究结果表明,这些岩体可能经历了与岩石圈伸展有关的快速隆升剥蚀过程。这与张进江等(2000)对小秦岭变质核杂岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究结果一致。岩石圈伸展为大面积岩浆作用提供了充足的热源,部分幔源岩浆还加入到壳源岩浆中参与中酸性侵入岩类的形成。

由于华北克拉通南缘紧邻秦岭造山带并卷入了三叠纪秦岭造山作用的影响(Ding et al., 2011),上述伸展构造背景究竟是秦岭造山带的造山作用有关,还是属于另外一个独立的动力学体制,目前还存在较大争议。一些研究者认为,华北克拉通南缘的晚中生代侵入岩是秦岭造山带造山作用的产物,形成于造山后期构造体制从挤压向伸展的转变阶段或造山后伸展环境(陈衍景等, 1992; 2000; 2009; 包志伟等, 2009a)。但大量资料表明,秦岭造山带在晚三叠世时期就已经进入造山后伸展阶段。西秦岭地区大量印支期花岗岩体含有丰富的闪长质暗色微粒包体,包体结构显示其为岩浆混合作用的结果,表明在这些花岗岩体的形成过程中曾有幔源基性岩浆物质的注入(王晓霞等, 2003; Qin et al., 2009)。Wang 等(2007)还在沙河湾环斑花岗岩体及商丹断裂带附近发现若干煌斑岩脉,其侵位年龄为(219 ± 2)Ma。笔者(未发表资料)最近获得甘肃李坝金矿区煌斑岩的锆石 U-Pb 年龄也为 219 Ma。这些基性岩的侵位年龄与秦岭造山带印支期环斑花岗岩的年

① 王晓霞,王涛,齐秋菊,李舫. 2010. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义. 2010 全国岩石学与地球动力学研讨会会议摘要, 105-106.

② 胡建,张遵忠,蒋少涌,戴宝章,王艳芬,肖娥,李海勇. 2010. 陕西华山中生代高 Ba-Sr 花岗岩成因及其构造意义. 2010 全国岩石学与地球动力学研讨会会议摘要, 51-52.

③ 齐秋菊,王晓霞,李舫. 2010. 华北陆块南缘蓝田花岗岩体的成因-地球化学和 Sr, Nd, Hf 同位素证据. 2010. 全国岩石学与地球动力学研讨会会议摘要, 91.

龄(卢欣祥等,1996;1999;王晓霞等,2002;2003)一致。位于华北克拉通南缘嵩县地区的磨沟碱性正长岩(曾广策,1990;胡浩,2009)和黄龙铺碳酸岩(黄典豪等,1994)也是晚三叠世岩浆作用的产物。以上事实证明,秦岭造山带于晚三叠世时期已经进入造山后伸展阶段,从而表明华北克拉通南缘晚中生代的伸展构造体制与秦岭造山带的演化无关。换句话说,洛南-卢氏地区晚侏罗世—早白垩世岩浆作用与秦岭造山带的演化已经没有成因关系,而是受控于另一完全不同的构造体制,这种构造体制可能与华北克拉通的破坏有关。

华北克拉通太古宙岩石圈地幔在中-新生代发生了强烈的破坏和减薄已成为地学界的共识(Menzies et al.,1993;Xu,2001;Gao et al.,2004;Yang et al.,2008),但目前对克拉通破坏的时空分布特征和动力学机制的认识还存在不同意见。克拉通破坏的时空分布是克拉通破坏的重要研究内容和正确理解克拉通破坏动力学机制的关键问题之一(吴福元等,2008)。目前对华北克拉通破坏时空分布特征的认识主要来自于岩浆作用的研究,这是因为岩浆活动是克拉通破坏最重要的标志和浅表地质响应之一(徐义刚等,2009;Xu Y G et al.,2009)。一些学者通过对华北克拉通东部若干地区岩浆岩(尤其是高镁安山岩和埃达克岩)的研究认为,华北克拉通破坏可能始于中-晚侏罗世(Gao et al.,2004;姜耀辉等,2005),并在早白垩世(Wu et al.,2005)或晚白垩世(Xu,2001;闫峻等,2003)达到高潮。相反,另外一些学者基于华北克拉通东部和北缘出露印支期碱性岩及基性岩这一事实认为,华北克拉通破坏可能起始于晚三叠世,并在晚侏罗世—早白垩世或晚白垩世—早第三纪达到高峰(韩宝福等,2004;许文良等,2006;Yang et al.,2008;2009;2010;徐义刚等,2009;杨进辉等,2009)。路凤香等(2006)则通过对晚白垩世—新生代玄武岩的研究认为克拉通破坏始于晚白垩世,并在新生代达到高峰。针对以上争论,一些学者提出华北克拉通破坏可能不是一蹴而就的,相反,它是一个漫长的过程并具有时空不均一性(徐义刚,2004;Xu,2007)。

华北克拉通南缘也存在三叠纪侵入岩,如老牛山复式岩体和磨沟碱性正长岩,其侵位时代分别为228~217 Ma(丁丽雪,2010)和236~214 Ma(胡浩,2009)。笔者认为这些三叠纪侵入岩是秦岭造山带造山后伸展环境下岩浆活动的产物,与华北克拉通

破坏可能没有直接的成因联系。这与Ding等(2011)最近的研究结论一致。综合本文研究及前人的年代学资料(Mao et al.,2010)表明,华北南缘的晚中生代岩浆活动始于晚侏罗世早期(158 Ma;以夜长坪钾长花岗斑岩为代表),并于晚侏罗世末期和早白垩世早期出现2个年龄峰值(图8)。但进一步的分析发现,晚侏罗世的年龄主要来自中基性脉岩和中酸性小岩株(丁丽雪,2010;李建威,未发表资料;任志媛等,未发表资料;包志伟等,2009b及本文),而这一时期侵位的岩体仅蓝田-牧户关二长花岗岩(丁丽雪等,2010)和五丈山二长花岗岩(Mao et al.,2010)的出露面积较大(图1、图2,Mao et al.,2010)。相反,早白垩世早期侵位的岩体以花岗岩类岩基为主,岩体出露面积大(普遍大于100~1000 km²;图1、图2;Mao et al.,2010)。因此,与晚侏罗世末期相比,早白垩世早期的岩浆活动强度要大得多。基于此,笔者认为华北南缘克拉通破坏始于晚侏罗世,并在早白垩世早期达到高潮;早白垩世晚期约120 Ma以后,华北克拉通南缘的岩浆活动已明显减弱并在115 Ma左右结束(图8、图17;Mao et al.,2010),标志着克拉通破坏的结束。这与姜耀辉等(2005)对辽东半岛煌斑岩和Hou等(2007)对胶东地区埃达克岩的研究得出的结论一致。但需要指出的是,尽管华北克拉通南缘的三叠纪侵入岩可能与克拉通破坏没有直接的成因联系,但三叠纪时期扬子板块向华北克拉通的俯冲和随后的陆-陆碰撞以及碰撞后伸展阶段的岩浆活动对该区晚中生代时期的克拉通岩石圈破坏可能产生了重要影响。

华北克拉通南缘的晚中生代侵入岩主要出露在蓝田以东的广大地区(图1),而克拉通西部迄今为止尚未有确切的晚中生代岩浆活动的报道。这一观察说明华北克拉通南缘破坏的西界可能不超过蓝田—华县一带(图1)。这一位置与NNE向大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带的位置基本一致,因此,笔者支持前人关于克拉通破坏主要发生在上述重力梯度带以东的认识(如Xu,2007)。

6 结 论

(1)洛南-卢氏地区中酸性侵入岩(石英闪长岩类和花岗斑岩类)的侵位年龄为158~131 Ma,是华北克拉通南缘晚侏罗世—早白垩世岩浆活动的产物。其中石英闪长岩类岩石的侵位持续时间很短,

主要集中在晚侏罗世末期约 1 Ma 的时间内(150 ± 1)Ma~(149 ± 1)Ma), 而花岗斑岩类侵位则断续持续了近 30 Ma(158 ± 2)Ma~(131 ± 1)Ma)。锆石 U-Pb 定年也为该区砂卡岩型和斑岩型铁铜钼多金属成矿作用的时间提供了重要信息, 表明该区砂卡岩和斑岩型铁铜铅锌多金属矿床形成于晚侏罗世—早白垩世。

(2) 结合本次研究及前人资料认为, 华北克拉通南缘晚中生代岩浆活动强烈, 岩体侵位始于晚侏罗世(158 Ma), 并分别在晚侏罗世末(149~147 Ma)和早白垩世早期(约 132 Ma)达到高峰, 至早白垩世末期(约 115 Ma)趋于结束。

(3) 华北克拉通南缘大规模岩浆活动与华北克拉通的破坏有关, 晚中生代华北克拉通南缘破坏始于晚侏罗世, 并在早白垩世早期达到高潮。陕西蓝田—华县一带可能代表了华北克拉通破坏的西界。

志谢 野外工作和锆石 U-Pb 定年得到研究生隋吉祥、黄广环、毕诗健和李占轲的大力帮助; 锆石阴极发光照相得到中国地质科学院杨淳老师的指导; 成文过程中还得到刘锐博士和丁丽雪硕士的帮助; 两位审稿专家对论文进行了详细的评审并提出了中肯的修改意见。在此表示衷心感谢。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 193(1-2): 59-79.

Bao Z W, Zeng Q S, Zhao T P and Yuan Z L. 2009a. Geochemistry and petrogenesis of the ore-related Nannihu and Shangfanggou granite porphyries from east Qinling belt and their constraints on the molybdenum mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2523-2536 (in Chinese with English abstract).

Bao Z W, Li C J and Qi J P. 2009b. SHRIMP zircon U-Pb age of the gabbro dyke in the Luanchuan Pb-Zn-Ag orefield, east Qinling orogen and its constraint on mineralization time[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2951-2956 (in Chinese with English abstract).

Cathles L M, Erendi A and Barrie T. 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event[J]? *Econ. Geol.*, 92(7-8): 766.

Chen Y J and Fu S G. 1992. Mineralization of gold deposits in west Henan, China[M]. Beijing: Seismological Press. 1-46 (in Chinese with English abstract).

Chen Y L and Zhang B R. 1994. Pb, Sr and Nd isotope geochemistry of Yanshanian and granitoids on southern margin of North China Cra-

ton in western Henan Province[J]. *Earth Science*, 19(3): 375-382 (in Chinese with English abstract).

Chen Y J, Li C, Zhang J, Li Z and Wang H H. 2000. Sr and O isotopic characteristics of porphyries in the Qinling molybdenum deposit belt and their implication to genetic mechanism and type[J]. *Science in China(Series D)*, 43(Suppl.): 82-94.

Chen Y J, Zhai M G and Jiang S Y. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2695-2726 (in Chinese with English abstract).

Dai B Z, Jiang S Y and Wang X L. 2009. Petrogenesis of the granitic porphyry related to the giant molybdenum deposit in Donggou, Henan Province, China: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2889-2901 (in Chinese with English abstract).

Ding L X. 2010. Petrogenesis and tectonic implication of the Laoniushan complex batholith, southern margin of the North China Craton: Petrological, geochronological and geochemical constraints[D]. Wuhan: China University of Geosciences. 1-93 (in Chinese with English abstract).

Ding L X, Ma C Q, Li J W, Wang L X, Chen L and She Z B. 2010. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. *Geochimica*, 39(5): 401-413 (in Chinese with English abstract).

Ding L X, Ma C Q, Li J W, Robinson P T, Deng X D, Zhang C and Xu W C. 2011. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen[J]. *Lithos*, 126(3-4): 212-232.

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C and Wang Q H. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432(7019): 892-897.

Gold Command of Chinese People's Armed Police Force. 1997. Geology of Jinlongshan microscopic disseminated gold deposit in Shanxi Province[M]. Beijing: Earthquake Publishing House. 5-114 (in Chinese with English abstract).

Guo B, Zhu L M, Li B, Gong H J and Wang J Q. 2009. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 265-281 (in Chinese with English abstract).

Han Y G, Zhang S H, Pirajno F and Zhang Y H. 2007. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong'er-shan-Waifangshan Region, western Henan Province, China, and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 253-265.

Han B F, Kagami H and Li H M. 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province,

- China: Implications for early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1375-1388 (in Chinese with English abstract).
- He Y H, Zhao G C, Sun M and Xia P X. 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 168(3-4): 213-222.
- Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F and Zhao K D. 2007. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the north-western Jiaodong Peninsula, east China: Implications for crustal thickening to delamination [J]. *Geological Magazine*, 144(4): 619-631.
- Hu H. 2009. U-Pb geochronology and elemental geochemistry of the Mogou alkaline complex, southern margin of the North China Craton: Implications for post-collisional extension [D]. Wuhan: China University of Geosciences. 1-53 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z C, Gao S, Liu Y S, Hu S H, Chen H H and Yuan H L. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093-1101.
- Huang D H and Wu C Y. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance [J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-229 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D, Ni P, Ling H F and Liu D Y. 2005. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(22): 2612-2620.
- Kröner A, Compston W, Zhang G W, Guo A L and Wolfgang T. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating [J]. *Geology*, 16(3): 211-215.
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication. 1: 55.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J and Chen H H. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- Lu F X, Zheng J P, Shao J A, Zhang R S, Cheng M H and Yu C M. 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 86-92 (in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Dong Y, Chang Q L, Xiao Q H, Li X H, Wang X X and Zhang G W. 1996. Indosinian Shahewan rapakivi granite in Qinling and its dynamic significance [J]. *Science in China (Series D)*, 39(3): 266-272.
- Lu X X, Wei X D, Xiao Q H, Zhang Z, Li H M and Wang W. 1999. Geochronological studies of rapakivi granites in Qinling and its geological implications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 372-377 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607-4626.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajno F, Ye H S, Wang Y B, Li Y F, Xiang J F and Zhao H J. 2010. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 57(1): 51-78.
- Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F and Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings [J]. *Ore Geology Reviews*. (in press).
- Menzies M A, Fan W and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China [J]. *Geological Society London Special Publications*, 76(1): 71.
- Pang Z S. 2006. Geological characteristics and genesis of the Mesozoic granitoids in Western Henan (dissertation for doctor degree [D]). Supervisor: Du Y S. Beijing: China University of Geoscience. 131p (in Chinese with English abstract).
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, Guo J H, Liu F and Hu B. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke Swarm [J]. *Lithos*, 101(3-4): 260-280.
- Qin J F, Lai S C, Grapes R, Diwu C R, Ju Y J and Li Y. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China) [J]. *Lithos*, 112(3-4): 259-276.
- Quadt A, Erni M, Martinek K, Moll M, Peytcheva I and Heinrich C A. 2011. Zircon crystallization and the lifetimes of ore-forming magmatic-hydrothermal systems [J]. *Geology*, 39(8): 731-734.
- Wang D Y, Pei F P, Xu W L, Wang Q H and Yang D B. 2005. Chronology of mesozoic granitoids in the southern margin of the north china block: Evidence from ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of hornblende and biotite [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(2): 262-268 (in Chinese with English abstract).
- Wang H Z. 1987. Geological characteristics and ore genesis of the Xiaoningling gold field [J]. *Mineral Deposits*, 6(1): 57-67 (in Chinese with English abstract).

- Wang T H, Mao J W and Wag Y B. 2008. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaoqingling-Xionger 'shan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1273-1287 (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T and Lu X X. 2002. The rapakivi texture of Mesozoic Shahewan granite in the northern Qinling Mountains, Shaanxi, China and some related problems [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(1): 30-36 (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T, Lu X X and Xiao Q H. 2003. The Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granites in the northern Qinling Mountains, China, and their tectonic setting: A possible orogenic-type rapakivi granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 650-660 (in Chinese with English abstract).
- Wang X X, Wang T, Jahn B M, Hu N G and Chen W. 2007. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains (China) [J]. *Geological Magazine*, 144(5): 837-848.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, Zhang X O and Yang J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1-2): 103-119.
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S and Zheng J P. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Z J and Sun W Z. 2007. Ore-forming conditions and prospecting of the Yechangping Mo-W deposit in Lushi County, Henan Province [J]. *Geological Survey and Research*, 30(2): 141-148 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Yang C H, Yang D B, Pei F P, Wang Q H and Ji W. 2006. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton: Constraints on the mechanism of lithospheric thinning [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 120-129 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Griffin W L, Ma X, O'Reilly S Y, He Z Y and Zhang C L. 2009. The Taihua group on the southern margin of the North China Craton: Further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons [J]. *Mineralogy and Petrology*, 97(1): 43-59.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9-10): 747-757.
- Xu Y G. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: A temporal and spatial perspective [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 324-331 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament [J]. *Lithos*, 96(1-2): 281-298.
- Xu Y G, Li H Y, Pang C J and He B. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3379-3396.
- Xue L W, Yuan Z L, Zhang Y S and Qiang L Z. 1995. The Sm-Nd isotope age of Taihua group in Lushan area and their implications [J]. *Geochimica*, 24(Suppl.): 92-97 (in Chinese with English abstract).
- Yan J, Chen J, Xie Z, Zhou T. 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalt in eastern Shandong Province: New constraint on the timing of lithospheric thinning in eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2139-2144.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Belousova E and Griffin W L. 2008. Mesozoic decratonization of the North China block [J]. *Geology*, 36(6): 467.
- Yang J H and Wu F Y. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(9): 1319-1330.
- Yang J H, O'Reilly S, Walker R J, Griffin W, Wu F Y, Zhang M and Pearson N. 2010. Diachronous decratonization of the Sino-Korean craton: Geochemistry of mantle xenoliths from North Korea [J]. *Geology*, 38(9): 799.
- Yao J M, Zhao T P, Li J, Sun Y L, Yuan Z L, Chen W and Han J. 2009. Molybdenite Re-Os age and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 374-384 (in Chinese with English abstract).
- Ye H S. 2006. The mesozoic tectonic evolution and Pb-Zn-Ag metallogeny in the south margin of North China Craton [D]. Institute of Geology Chinese Academy (in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao G W, Xu L G, Gao J J, Xie G Q, Li X Q and He C F. 2008. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry of the Taishanmia Aluminous A-type granite in western Henan Province [J]. *Geological Review*, 54(5): 699-711 (in Chinese with English abstract).
- Zeng G C. 1990. Petrological characteristics and tectonic environment of alkali-syenites in the south of Songxian, Henan [J]. *Earth Science*, 15(6): 635-641 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B R. 1987. Regional geochemical study of Lushi-Linghao district, western Henan [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-285 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J J, Zheng Y D and Liu S W. 2000. Application of general shear theory to the study of formation mechanism for the metamorphic core complex: A case of Xiaoqingling in central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 19-28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Q, Zhang G W, Liu D Y, Wang Z Q, Tang S H, Wang J H. 2006. Geochronology and geochemistry of ophiolites, granitoids and clastic rocks in Qinling orogen [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-348 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H J, Mao J W, Ye H S, Hou K J and Liang H S. 2010. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shanxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf iso-

- topic compositions[J]. Mineral Deposits, 29(1): 143-147 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Wu S S, Han F and Luo Z K. 1982. Mineralization, alteration and ore guides of the iron deposits of magnesium-skarn type in Lonan, Shaanx[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, (3): 29-50 (in Chinese with English abstract).
- Zhou H S, Ma C Q, Zhang C, Chen L, Zhang J Y and She Z B. 2008. Yanshanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(1): 49-64 (in Chinese with English abstract).
- Zhou H W, Zhong Z Q, Lin W L, Zhong G L and Xu Q D. 1998. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiaoginling area, western Henan and its geological implications[J]. Geochimica, 4(27): 367-372 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L M, Zhang G W, Guo B and Li B. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the east Qinling, China, and its metallogenetic geodynamical setting[J]. Acta Geologica Sinica, 82(2): 204-220 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L M, Zhang G W, Guo B and Lee B. 2009. He-Ar isotopic system of fluid inclusions in pyrite from the molybdenum deposits in south margin of North China Block and its trace to metallogenetic and geodynamic background[J]. Chinese Science Bulletin, 54(14): 2479-2492.
- ### 附中文参考文献
- 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 原振雷. 2009a. 东秦岭钼矿带南泥湖-上房沟花岗岩斑岩成因及其对钼成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 25(10): 2523-2536.
- 包志伟, 李剑举, 祁进平. 2009b. 东秦岭栾川铅锌银矿田辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及成矿时代[J]. 岩石学报, 25(11): 2951-2956.
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社. 1-46.
- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锶同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 中国科学(D 辑), 30(S1): 67-72.
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 25(11): 2695-2726.
- 陈岳龙, 张本仁. 1994. 华北克拉通南缘豫西燕山期花岗岩类的 Pb、Sr、Nd 同位素地球化学特征[J]. 地球科学, 19(3): 375-382.
- 戴宝章, 蒋少涌, 王孝磊. 2009. 河南东沟钼矿花岗岩斑岩成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 25(11): 2889-2901.
- 丁丽雪. 2010. 华北克拉通南缘老牛山复式花岗岩体的成因及其构造意义: 岩石学、年代学及地球化学制约[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 丁丽雪, 马昌前, 李建威, 王连训, 陈玲, 余振兵. 2010. 华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 39(5): 401-413.
- 郭波, 朱赖民, 李华, 弓虎军, 王建其. 2009. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄, Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. 岩石学报, 25(2): 265-281.
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代, Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的含义[J]. 岩石学报, 20(6): 1375-1388.
- 胡浩. 2009. 华北克拉通南缘磨沟碱性杂岩体形成时代、岩石成因及构造意义[D]. 武汉: 中国地质大学. 53 页.
- 黄典豪, 杜安道. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221-230.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 倪培, 凌洪飞, 刘敦一. 2005. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约[J]. 科学通报, 50(19): 2161-2168.
- 路凤香, 郑建平, 邵济安, 张瑞生, 陈美华, 余淳梅. 2006. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 13(2): 86-92.
- 卢欣祥, 董有, 常秋岭, 肖庆辉, 李晓波, 王晓霞. 1996. 秦岭印支期沙河湾奥长环斑花岗岩及其动力学意义[J]. 中国科学(D 辑), 26(03): 244-248.
- 卢欣祥, 尉向东, 肖庆辉, 张宗清, 李惠民, 王卫. 1999. 秦岭环斑花岗岩的年代学研究及其意义[J]. 高校地质学报, 5(4): 372-377.
- 庞振山. 2006. 河南省西部地区中生代花岗岩类地质特征及成因[D]. 导师: 杜杨松. 北京: 中国地质大学. 131 页.
- 王冬艳, 裴福萍, 许文良, 王清海, 杨德彬. 2005. 华北地块南缘中段中生代花岗岩类岩石的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 29(2): 262-268.
- 王享治. 1987. 小秦岭金矿地质特征及矿床成因[J]. 矿床地质, 6(1): 57-67.
- 王团华, 毛景文, 王彦斌. 2008. 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[J]. 岩石学报, 24(6): 1273-1287.
- 王晓霞, 王涛. 2002. 北秦岭中生代沙河湾岩体环斑结构特征及有关问题的讨论[J]. 地球学报, 23(1): 30-36.
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 肖庆辉. 2003. 北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境: 一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. 岩石学报, 19(4): 650-660.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 肖中军, 孙卫志. 2007. 河南卢氏夜长坪钼矿床成矿条件及找矿远景分析[J]. 地质调查与研究, 30(2): 141-148.
- 许文良, 杨承海, 杨德彬, 裴福萍, 王清海, 纪伟强. 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约[J]. 地学前缘, 13(2): 120-129.

- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征[J]. 高校地质学报, 10(3): 324-331.
- 徐义刚, 李洪颜, 庞崇进, 何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限[J]. 科学通报, 54(14): 1974-1989.
- 薛良伟, 原振雷, 张荫树, 强立志. 1995. 鲁山太华群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义[J]. 地球化学, 24(增刊): 92-97.
- 闫峻, 陈江峰, 谢智, 周泰禧. 2003. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据[J]. 科学通报, 48(14): 1570-1574.
- 杨进辉, 吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. 中国科学(D辑), (7): 910-921.
- 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 2009. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 25(2): 374-384.
- 叶会寿. 2006. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院. 1-217.
- 叶会寿, 毛景文, 徐林刚, 高建京, 谢桂清, 李向前, 何春芬. 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[J]. 地质论评, 54(5): 699-711.
- 张本仁, 瞿伦全, 李泽九, 冯俊杰, 谷晓明, 晁盈宽, 张维探, 骆庭川. 1987. 豫西卢氏-灵宝地区区域地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社. 1-285.
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 2000. 应用剪切作用类型理论判别变质核杂岩的形成机制——以小秦岭变质核杂岩研究为例[J]. 地质学报, 74(1): 19-28.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 王宗起, 唐索寒, 王进辉. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-348.
- 曾广策. 1990. 河南高县南部碱性正长岩类的岩石特征及构造环境[J]. 地球科学, 15(6): 635-642.
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 侯可军, 梁慧山. 2010. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. 矿床地质, 29(1): 143-157.
- 赵一鸣, 伍家善, 韩发, 罗镇宽. 1982. 陕西洛南地区镁矽卡岩型铁矿床的矿化蚀变特征和找矿标志[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所文集(3): 29-50.
- 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 1997. 陕西省金龙山微细浸染型金矿地质[M]. 北京: 地震出版社. 5-114.
- 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 2008. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩类: 年代学, 地球化学及其启示[J]. 岩石学报, 24(1): 49-64.
- 周汉文, 钟增球. 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[J]. 地球化学, 27(4): 367-372.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 李军. 2008. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 82(2): 204-220.

<http://www.kcmu.com>