

陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成*

时毓¹ 于津海^{1,2**} 徐夕生¹ 唐红峰³ 邱检生¹ 陈立辉¹

SHI Yu¹, YU JinHai^{1,2**}, XU XiSheng¹, TANG HongFeng³, QIU JianSheng¹ and CHEN LiHui¹

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

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

3. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室, 贵阳 550002

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

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

3. Laboratory for Study of the Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China

2010-06-14 收稿, 2010-08-30 改回.

Shi Y, Yu JH, Xu XS, Tang HF, Qiu JS and Chen LH. 2011. U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons of Taihua Group in Xiaozhiling area, Shaanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):3095–3108

Abstract This paper presents new geochemical, LA-ICPMS U-Pb zircon dating and LA-MC-ICPMS zircon Hf isotopic results for a biotite plagioclase gneiss from the Taihua Group at the South of Huashan pluton, Shaanxi Province. Geochemical results indicate that the protolith is intermediate-acidic calc-alkaline granitic rock, with low REE content ($\sum \text{REE} = 83.13 \times 10^{-6}$) and high Pb and LILE element contents (e.g. Rb, Ba). The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratio of zircons from this sample varies from 0.281258 to 0.281404 with obviously negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ($-6.86 \sim -11.23$). The Hf model ages vary from 2.96 to 3.24 Ga, indicating that the original magma of the protolith derived from Mesoarchean crust. Comparisons show that the biotite plagioclase gneiss of Xiaozhiling area has similar source of Mesoarchean crust with the Taihua Group in Lushan area, but the timing of formation may be different. Structure of zircons, the Th/U ratio and age indicate that the Taihua Group in the Xiaozhiling area experienced an important thermal event at ~ 1.91 Ga, which has relationship with the global collision event during convergence of Columbia Supercontinent. The Taihua Group of Xiaozhiling area is part of the southern margin of North China craton, but the Taihua Group in different area has distinction in composition, timing of formation and metamorphic age. Therefore, the Taihua Group is the complex and may be at least separated into two units with Neoproterozoic and Paleoproterozoic ages, respectively.

Key words Zircon U-Pb dating; Zircon Hf isotope; Columbia supercontinent; Taihua Group; North China craton

摘要 本文对陕西华山岩体南侧一个太华群黑云斜长片麻岩进行了地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析。地球化学分析显示其原岩为中酸性钙碱性花岗质岩石, 稀土含量较低 ($\sum \text{REE} = 83.13 \times 10^{-6}$), 但富集 Pb 和 LILE 元素(如 Rb, Ba)。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化于 0.281258 ~ 0.281404, 具明显负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-6.86 \sim -11.23$)。锆石的 Hf 同位素模式年龄 (2.96 ~ 3.24 Ga) 表明原岩是由中太古代地壳演化而来。对比显示小秦岭太华群黑云斜长片麻岩与鲁山地区的太华群具有相似的中太古代地壳源区, 但它们的形成时代可能不同。锆石内部结构、Th/U 比值以及定年结果显示小秦岭地区的太华群在 ~ 1.91 Ga 经历了一期重要的变质热事件, 该事件与 Columbia 超大陆拼合时的全球性碰撞造山事件相关联。小秦岭太华群为华北克拉通块体南缘的地质单元, 但各地区太华群在原岩组成、形成时代和变质时代上具有不同的特征, 太华群应是一个杂岩体, 至少可以解体为新太古代和古元古代两部分。

关键词 锆石 U-Pb 定年; 锆石 Hf 同位素; Columbia 超大陆; 太华群; 华北克拉通

中图法分类号 P588.345; P597.3

* 本文受国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2006CB403508)和地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(GPMR200802)联合资助。

第一作者简介: 时毓, 女, 1980 年生, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: shiyu_61@163.com

** 通讯作者: 于津海, 男, 教授, 博士生导师, 从事岩石学和地球化学研究, E-mail: jhyu@nju.edu.cn

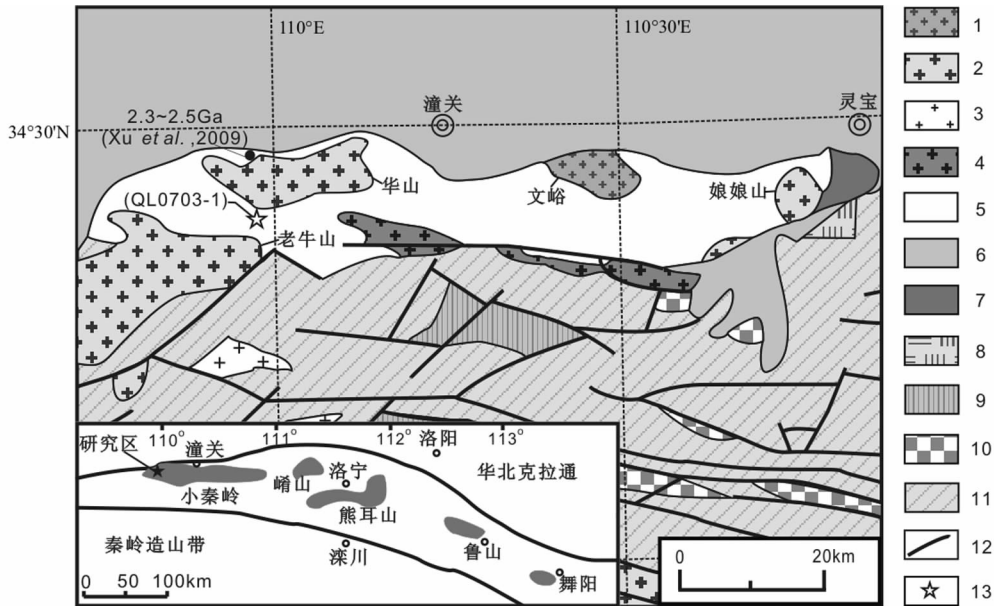


图1 小秦岭地区地质简图(根据马丽芳,2002^①修改)

1-燕山期花岗岩;2-晚加里东-早华力西期花岗岩;3-新元古代花岗岩;4-中元古代花岗岩;5-第四系地层;6-第三系地层;7-白垩系地层;8-寒武系地层;9-震旦与寒武系并层;10-元古界地层;11-太华群;12-断层;13-采样点

Fig. 1 Sketch geological map of Xiaolinling area

1-Yanshanian granite; 2-Late Caledonian-Early Variscan granite; 3-Neoproterozoic granite; 4-Mesoproterozoic granite; 5-Quaternary stratum; 6-Tertiary stratum; 7-Cretaceous stratum; 8-Cambrian stratum; 9-Sinian-Cambrian stratum; 10-Proterozoic stratum; 11-Taihua Group; 12-faults; 13-sample location

1 引言

华北克拉通通常被分为东部陆块、西部陆块和中部造山带,西部陆块与东部陆块沿中部造山带在~1.85Ga发生碰撞拼合而形成现今的华北克拉通统一结晶基底(Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2005; Guo *et al.*, 2002, 2005)。最近,西部陆块又被识别出是由鄂尔多斯陆块和阴山陆块沿东西向孔兹岩带在古元古代(~1.95Ga)碰撞拼合而成(Santosh *et al.*, 2006, 2007; Zhao *et al.*, 2010)。同时在东部陆块的东部也识别出一条早古元古代活动带,即胶-辽-吉带。在此带中发育2.2~2.1Ga的前构造二长花岗岩和1.88~1.85Ga的构造后花岗岩,变质作用发生在~1.90Ga(Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007; Zhou *et al.*, 2008)。本次研究地区位于华北中部造山带南端、秦岭造山带东部,这里露出一套古老的中-高级变质岩,命名为太华群。太华群中含有金、铁、铅、锌、铜等多金属矿产,历来受到重视。但对于不同地区太华群的形成和变质作用时代及其与秦岭造山带的关系等问题依然争议较大。目前,对太华群的形成时代主要有新太古代和古元古代两种认识(周汉文等,1997b,1998b;赵太平等,2004;李厚民等,2007;Xu *et al.*, 2009)。而且近年来逐渐增多的年代学研究显示,不同地区原来定义的太华群的岩石学

和年代学特征也有明显区别(薛良伟等,1995;周汉文等,1998b;张宗清和黎世美,1998;倪志耀等,2003;赵太平等,2004;Wan *et al.*, 2006b;李厚民等,2007;Xu *et al.*, 2009)。本次研究运用锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和 LA-MC-ICPMS Hf 同位素分析技术,对小秦岭地区太华群黑云斜长片麻岩进行了分析,在该岩石中发现了大量形成于~1.91Ga的变质锆石。这是以前在该地区的太华群中没有报道过的一期构造热事件。结合 Hf 同位素特征,对比邻区已有的太华群的研究成果,本文重点讨论了这期重要变质事件的地质意义。

2 地质概况和样品特征

太华群位于华北陆块南缘的陕西华县到河南舞阳一带,断续出露于陕西省小秦岭和河南崤山、熊耳山、鲁山、舞阳地区(图1),分为耐庄组、荡泽河组、铁山岭组、水底沟组和雪花沟组等地层单元(王仁民等,2002;倪志耀等,2003)。小秦岭地区出露的地层不仅有太华群还有元古宇熊耳群、官道口群和新生界地层。区域构造以太华群周边的拆离断层为特征。该区岩浆活动主要是华山、文峪、娘娘山等中生代花岗岩侵入(图1)。在小秦岭地区,太华群是一套经受中深变质的海相中基性火山岩和沉积岩,主要由黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、孔兹岩、黑云母变粒岩以及石英岩、大理岩和磁铁

① 马丽芳. 2002. 中国地质图集:1/200万秦岭-大巴山地区地质图

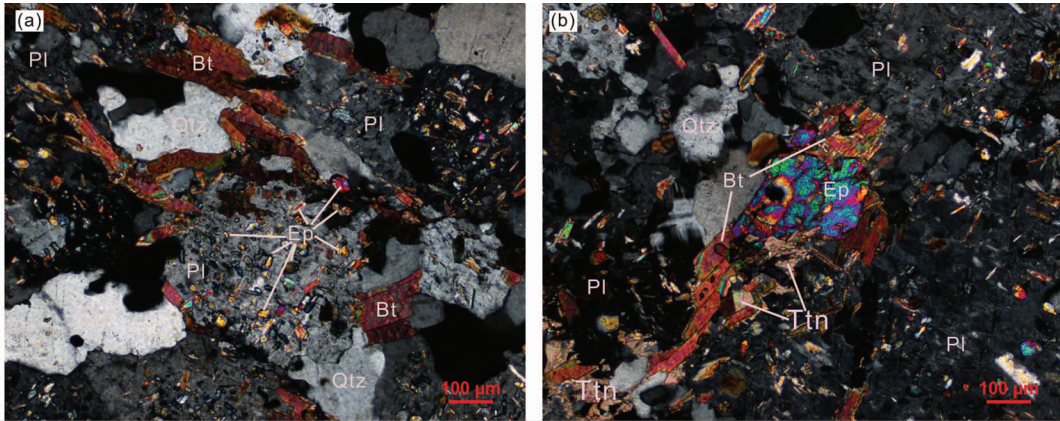


图2 太华群黑云斜长片麻岩显微照片(正交偏光)

Bt-黑云母;Ep-绿帘石;Pl-斜长石;Qtz-石英;Ttn-榍石

Fig.2 Photomicrographs of biotite plagioclase gneiss from the Taihua Group (crossed nicols)

Bt-biotite;Ep-epidote;Pl- plagioclase;Qtz-quartz;Ttn-titanite

石英岩等组成(林宝钦和陶铁镞,1989)。熊耳群以火山熔岩为主,还含有沉积夹层和火山碎屑岩,火山熔岩主要为玄武安山质、安山质岩石;喷发环境早期以陆相为主,中晚期基本为海相(赵太平等,2001)。地层自下而上分为大古石组、许山组、鸡蛋坪组和马家河组;形成时代为古元古代晚期(1.80~1.75Ga)(赵太平等,2001,2004)。官道口群相当于蓟县系(1400~1000Ma),通常呈角度不整合于熊耳群之上。自下而上分为高山河、龙家园、巡检司、杜关和冯家湾五个岩性组,其原岩建造为碳酸盐岩、碎屑岩、硅质岩建造。熊耳群和官道口群基本未变质,只是在接近栾川断裂带附近经历了绿片岩相变质作用(胡受奚等,1988;陈衍景等,2003)。

本次研究的样品(QL0703-1)为黑云斜长片麻岩,采自陕西省华阴市华山岩体的南侧(GPS:109°58'05"E,34°25'41"N),岩石主要由斜长石(63%±)、石英(15%±)、黑云母(10%±)和绿帘石(6%±)、钾长石(5%±)组成,另含有少量榍石(1%±)。绿帘石多呈小颗粒出现,分布于斜长石中或粒间(图2a),有时呈较大的颗粒(图2b)。根据变质矿物组合可判定该岩石的变质程度为低角闪岩相。利用西蒙尼的Si-(al+fm)-(c+alk)判别图解判别其原岩为火山岩(图略),利用Shaw(1972)的判别式计算的DF值表明其为正变质岩,这些与岩相学观察结果一致。Xu *et al.* (2009)曾对华山岩体北侧(109°57'21"E,34°30'33"N)的一个太华群岩石进行过研究,岩石同为黑云母片麻岩,矿物组合为斜长石(60%~65%)+石英(10%~15%)+黑云母(15%~20%)+角闪石(5%~10%)和少量钾长石。采用上述两种方法对其进行原岩恢复显示其也为正变质岩。

3 分析方法和锆石 CL 特征

本次研究的主量元素成分在南京大学现代分析中心用XRF测定,微量元素成分在南京大学内生金属矿床成矿机制

研究国家重点实验室采用 Finnigan Element II ICP-MS 测定。锆石阴极发光(CL)成像分析在地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学(武汉))进行。锆石 U-Pb 定年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。定年是在 7500a 型 ICP-MS 与 Merchantek/New Wave Research 213nm 激光溶蚀探针联机上进行。各组分析前后都进行两次标样 GJ 分析,每组包含 10~12 个样品点,各组分析均包含了标样 Muk Tank 的分析,检查分析结果的可靠性。锆石 ICP-MS 的分析数据通过分析软件 GLITTER 计算,获得同位素比值、年龄和误差。实验原理类似于 Jackson *et al.* (2004) 的描述,普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法,校正后的结果用 ISOPLOT 程序(ver. 2.49)(Ludwig, 1991)完成年龄计算和谐和图的绘制。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在中国科学院地球化学研究所(贵阳)带有 Merchantek/ New Wave Research 213nm 激光溶蚀探针的 Nu Plasma MC-ICP-MS 机上进行,激光束斑直径为 60 μm,溶蚀时间为 80s,溶蚀深度约为 40 μm,剥蚀频率为 10Hz,剥蚀能量为 3.52~5.27 J·cm⁻²,实验采用 91500 作为外部标样。本次实验期间获得的 91500 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282310 ± 25 (n = 24)。ε_{Hf}(t) 计算采用的 ¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 1.865 × 10⁻¹¹ (Scherer *et al.*, 2001),球粒陨石 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0332 (Blichert-Toft and Albarede, 1997)。亏损地幔 Hf 模式年龄(t_{DM1})采用 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283251, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0384 计算 (Vervoort and Blichert-Toft, 1999),二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})采用平均大陆壳 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.015 计算 (Griffin *et al.*, 2002)。

样品 QL0703-1 中的锆石多为浑圆-椭圆状(图 3a, b, c, e, f),但大都具强金刚光泽,不同于受磨损的沉积锆石,这种浑圆-椭圆状为多晶面造成的假象,且这些锆石内部显示宽的环带,不同于岩浆成因的柱状+锥形的紧闭振荡环带(时毓等,2009)。少量锆石呈柱状自形-半自形晶(图 3d, g, h)。

表1 太华群黑云斜长片麻岩(QL0703-1)的主量元素和微量元素分析结果

Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) element composition of biotite plagioclase gneiss (QL0703-1) of Taihua Group

主量	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM	Mg [#]	A/CNK	ALK	DF
QL0703-1	67.77	0.50	15.57	3.39	0.06	1.40	4.34	4.17	1.66	0.14	1.18	100.17	0.29	0.94	5.83	3.13
微量	Li	Be	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr
QL0703-1	10.42	0.87	10.63	3022	111	78.06	382	11.28	26.97	5.37	61.56	21.24	58.26	660	9.58	136.21
微量	Nb	Mo	Cd	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
QL0703-1	4.57	6.97	0.14	1.26	31.57	751.72	18.38	36.07	3.77	14.42	2.57	0.79	2.30	0.30	1.91	0.38
微量	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Pb	Bi	Th	U	ΣREE	L/H	(La/Yb) _N	δEu	
QL0703-1	1.05	0.14	0.90	0.14	3.96	0.59	0.48	30.79	0.06	4.44	0.35	83.13	10.67	13.8	0.98	

注:DF-原岩判别因子(Shaw, 1972);Mg[#] = MgO/(MgO + Fe₂O₃^T);A/CNK(铝饱和度) = Al/(Ca + Na + K)(原子数);ALK(全碱) = Na₂O + K₂O;ΣREE-稀土元素总量;L/H-轻稀土元素总量与重稀土元素总量比值;δEu(Eu异常值) = Eu_N × 2/(Sm_N + Gd_N);下角N为球粒陨石标准化值

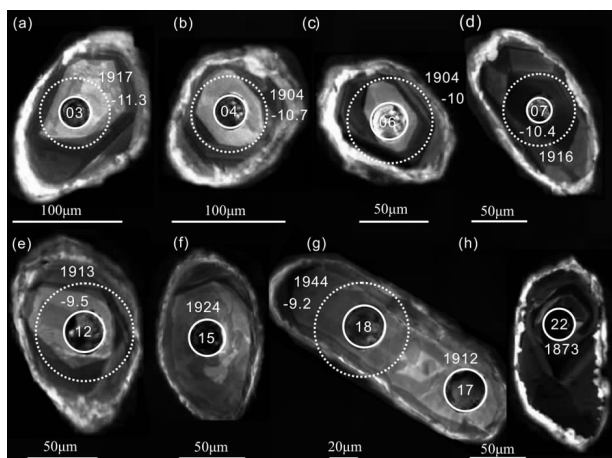


图3 太华群变质岩中锆石的 CL 图像

小圈为 U-Pb 分析点,内部数字为分析点号;大圈为 Hf 同位素分析点,外部数字为年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 3 CL images of zircons from the metamorphic rock in the Taihua Group

Small circles are dating spots, inner numbers are spot number, and big circles are Hf-isotope analysis spots; outer numbers are ages (Ma) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

这些锆石的 Th/U 比大多小于 0.1,平均为 0.11,明显小于岩浆成因锆石 (>0.4)。结合其形态和 CL 图像特征,它们大多为变质成因(Claoué-Long *et al.*, 1991; Rubatto, 2002; Bingen *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2005)。从样品 QL0703-1 中含有大量的变质锆石来看(极少继承锆石),该岩石曾达到很高变质级,现在的矿物组合显然是退变质的产物。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学特征

样品 QL0703-1 的 SiO₂ 含量为 67.77% (表 1),全碱含量为 5.83%,铝饱和指数为 0.94,在 TAS 图解(Le Maitre *et*

al., 1989)上投影于英安岩区域(图略),在 K₂O-SiO₂ 图解(Peccerillo and Taylor, 1976)上投影于钙碱性系列范围。样品的稀土总量不高(ΣREE = 83.13 × 10⁻⁶),LREE/HREE 为 10.67,轻重稀土分馏中等((La/Yb)_N = 13.8),没有明显 Eu 异常(δEu = 0.98)(表 1;图 4a)。华山岩体北侧一个太华群黑云母片麻岩的稀土总量为 63.12 × 10⁻⁶(Xu *et al.*, 2009), (La/Yb)_N 为 42.98,其轻重稀土分馏明显(图 4a)。在微量元素蛛网图上(图 4b),本文样品(QL0703-1)与华山岩体北侧的太华群片麻岩(Xu *et al.*, 2009)显示了相似的特征,除了后者较低的 HREE。岩石都明显富集 Pb 和 LILE 元素(如 Rb, Ba),指示原始岩浆的源区主要是陆壳组分。

4.2 锆石 U-Pb 年龄

对太华群黑云斜长片麻岩(QL0703-1)中 43 个锆石进行的 U-Pb 定年分析结果列于表 2。这些锆石的年龄均大于 1.8Ga,除了一颗锆石(点号 31, 2997 ± 44Ma),其余 42 个分析点年龄变化于 1826 ~ 2068Ma,且大多具有很好的谐和性(图 5)。其中有 5 颗锆石虽也谐和,但明显偏离其他锆石,年龄在 ~2.0Ga。对这 5 个分析点以外的其余 37 个分析点进行拟合(图 5),产生的不一致曲线的上交点年龄为 1912 ± 13Ma,这与其中谐和度 95% 以上的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄平均值(1909 ± 13Ma)在误差范围内一致,这一年龄应该代表了这些变质锆石的形成年龄。5 颗稍老的锆石(~2.0Ga)有可能是稍早变质的产物,也可能是原岩锆石受这期变质作用影响发生强烈 Pb 丢失的结果,而那颗中太古代锆石应为原岩捕获或继承的。

4.3 锆石 Hf 同位素组成

本文对样品 QL0703-1 中 16 颗定年过的锆石进行的 Hf 同位素分析结果表明,变质锆石的 Hf 同位素非常均匀,其 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.281258 ~ 0.281404, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 都为明显的负值(-6.86 ~ -11.23),单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 变化于 2.56 ~ 2.74Ga,二阶段模式年龄(t_{DM2})值变化于 2.96 ~

表 2 小秦岭太华群黑云斜长片麻岩中锆石 LA-ICP-MS 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS dating results of zircons from the biotite plagioclase gneiss of the Taihua Group, Xiaolinling area

测点号	同位素比值			定年结果 (Ma)			谐和度	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ $\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ $\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma$				
01	0.1170 ± 0.0014	5.6110 ± 0.0701	0.3480 ± 0.0039	1911 ± 22	1918 ± 11	1925 ± 19	101	463	1779	0.26
02	0.1163 ± 0.0015	5.3518 ± 0.0717	0.3338 ± 0.0038	1900 ± 24	1877 ± 11	1857 ± 18	98	16.7	335.6	0.05
03	0.1174 ± 0.0016	5.5382 ± 0.0773	0.3423 ± 0.0039	1917 ± 25	1907 ± 12	1898 ± 19	99	18.8	281	0.07
04	0.1166 ± 0.0015	5.5093 ± 0.0736	0.3429 ± 0.0040	1904 ± 23	1902 ± 11	1900 ± 19	100	15.1	287	0.05
05	0.1236 ± 0.0033	6.2697 ± 0.1676	0.3681 ± 0.0064	2008 ± 49	2014 ± 23	2020 ± 30	101	3.0	43.1	0.07
06	0.1166 ± 0.0018	5.4363 ± 0.0881	0.3383 ± 0.0044	1904 ± 28	1891 ± 14	1879 ± 21	99	29.0	410	0.07
07	0.1173 ± 0.0016	5.5032 ± 0.0762	0.3403 ± 0.0039	1916 ± 25	1901 ± 12	1888 ± 19	99	57.6	548	0.11
08	0.1173 ± 0.0017	5.4964 ± 0.0831	0.3399 ± 0.0041	1915 ± 27	1900 ± 13	1886 ± 20	98	344	1745	0.20
09	0.1164 ± 0.0015	5.4578 ± 0.0759	0.3403 ± 0.0040	1901 ± 24	1894 ± 12	1888 ± 19	99	142	1156	0.12
10	0.1173 ± 0.0016	5.4491 ± 0.0790	0.3369 ± 0.0040	1916 ± 25	1893 ± 12	1872 ± 19	98	29.3	432	0.07
11	0.1236 ± 0.0030	6.2404 ± 0.1461	0.3662 ± 0.0055	2009 ± 44	2010 ± 20	2011 ± 26	100	1.7	21.8	0.08
12	0.1172 ± 0.0015	5.4510 ± 0.0740	0.3375 ± 0.0041	1913 ± 23	1893 ± 12	1874 ± 20	98	24.4	502	0.05
13	0.1177 ± 0.0014	5.6114 ± 0.0713	0.3457 ± 0.0040	1922 ± 22	1918 ± 11	1914 ± 19	100	458	1759	0.26
14	0.1178 ± 0.0014	5.5726 ± 0.0715	0.3431 ± 0.0040	1923 ± 22	1912 ± 11	1901 ± 19	99	411	2332	0.18
15	0.1178 ± 0.0015	5.5426 ± 0.0740	0.3412 ± 0.0039	1924 ± 23	1907 ± 11	1892 ± 19	98	24.6	387	0.06
16	0.1185 ± 0.0016	5.6267 ± 0.0758	0.3444 ± 0.0039	1934 ± 24	1920 ± 12	1908 ± 19	99	24.7	491	0.05
17	0.1171 ± 0.0016	5.5567 ± 0.0778	0.3443 ± 0.0040	1912 ± 25	1909 ± 12	1908 ± 19	100	25.1	408	0.06
18	0.1192 ± 0.0016	5.4101 ± 0.0746	0.3292 ± 0.0038	1944 ± 24	1886 ± 12	1835 ± 18	94	32.8	467	0.07
19	0.1186 ± 0.0016	5.5104 ± 0.0756	0.3372 ± 0.0039	1934 ± 24	1902 ± 12	1873 ± 19	97	91.2	879	0.10
20	0.1226 ± 0.0023	6.1599 ± 0.1111	0.3645 ± 0.0043	1994 ± 34	1999 ± 16	2003 ± 20	100	84.8	613	0.14
21	0.1179 ± 0.0016	5.6371 ± 0.0794	0.3468 ± 0.0040	1925 ± 25	1922 ± 12	1919 ± 19	100	244	1723	0.14
22	0.1145 ± 0.0013	5.4054 ± 0.0713	0.3423 ± 0.0043	1873 ± 21	1886 ± 11	1898 ± 21	101	420	968	0.43
23	0.1148 ± 0.0014	5.0860 ± 0.0707	0.3213 ± 0.0041	1877 ± 23	1834 ± 12	1796 ± 20	96	11.1	142	0.08
24	0.1131 ± 0.0013	5.1939 ± 0.0699	0.3330 ± 0.0042	1850 ± 22	1852 ± 11	1853 ± 20	100	92.7	350	0.26
25	0.1170 ± 0.0016	5.1323 ± 0.0777	0.3182 ± 0.0042	1911 ± 25	1841 ± 13	1781 ± 20	93	2.7	57.0	0.05
26	0.1222 ± 0.0067	5.4337 ± 0.2811	0.3229 ± 0.0092	1988 ± 100	1890 ± 44	1804 ± 45	91	0.3	4.5	0.07
27	0.1153 ± 0.0015	5.2081 ± 0.0748	0.3276 ± 0.0042	1885 ± 24	1854 ± 12	1827 ± 20	97	23.8	248	0.10
28	0.1159 ± 0.0015	5.2496 ± 0.0764	0.3286 ± 0.0042	1894 ± 24	1861 ± 12	1832 ± 20	97	16.2	202	0.08
29	0.1178 ± 0.0018	5.6603 ± 0.0907	0.3485 ± 0.0047	1924 ± 27	1925 ± 14	1927 ± 22	100	2.0	44.0	0.05
30	0.1141 ± 0.0016	4.8320 ± 0.0749	0.3073 ± 0.0041	1866 ± 26	1790 ± 13	1727 ± 20	93	14.0	145	0.10
31	0.2222 ± 0.0060	18.1087 ± 0.4698	0.5912 ± 0.0121	2997 ± 44	2996 ± 25	2994 ± 49	100	0.4	2.2	0.18
32	0.1175 ± 0.0019	5.4956 ± 0.0936	0.3393 ± 0.0046	1919 ± 30	1900 ± 15	1883 ± 22	98	3.5	29.7	0.12
33	0.1164 ± 0.0015	5.3598 ± 0.0771	0.3342 ± 0.0042	1901 ± 24	1878 ± 12	1858 ± 20	98	8.0	119	0.07
34	0.1224 ± 0.0038	5.9697 ± 0.1789	0.3536 ± 0.0069	1992 ± 56	1971 ± 26	1952 ± 33	98	0.8	19.8	0.04
35	0.1167 ± 0.0018	5.2435 ± 0.0858	0.3258 ± 0.0045	1907 ± 28	1860 ± 14	1818 ± 22	95	3.2	62.9	0.05
36	0.1116 ± 0.0020	5.4319 ± 0.1019	0.3529 ± 0.0052	1826 ± 33	1890 ± 16	1948 ± 25	107	26.1	185	0.14
37	0.1154 ± 0.0015	5.3557 ± 0.0777	0.3367 ± 0.0043	1886 ± 24	1878 ± 12	1871 ± 20	99	24.3	399	0.06
38	0.1164 ± 0.0015	5.1251 ± 0.0739	0.3194 ± 0.0041	1902 ± 24	1840 ± 12	1787 ± 20	94	21.3	263	0.08
39	0.1158 ± 0.0016	5.2778 ± 0.0801	0.3305 ± 0.0042	1893 ± 26	1865 ± 13	1841 ± 20	97	12.0	163	0.07
40	0.1187 ± 0.0018	5.0969 ± 0.0845	0.3114 ± 0.0043	1937 ± 28	1836 ± 14	1747 ± 21	90	5.6	77.9	0.07
41	0.1165 ± 0.0016	5.6029 ± 0.0851	0.3489 ± 0.0045	1903 ± 25	1917 ± 13	1929 ± 21	101	173	721	0.24
42	0.1278 ± 0.0027	6.6654 ± 0.1435	0.3782 ± 0.0059	2068 ± 39	2068 ± 19	2068 ± 28	100	2.5	15.6	0.16
43	0.1165 ± 0.0016	5.3862 ± 0.0837	0.3355 ± 0.0043	1903 ± 26	1883 ± 13	1865 ± 21	98	116	743	0.16

3. 24Ga (表 3), 说明该变质岩的原岩很可能是由中太古代地壳演化而来。Xu *et al.* (2009) 曾对研究区华山岩体北侧一个太华群片麻岩 (QL0701) 中的 25 颗锆石进行了 Hf 同位素

分析, 这些锆石的年龄与本文不同, 其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化也更大 (0.281216 ~ 0.281489), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -4.37 ~ 9.13, 平均为 2.78 ± 0.53 , 单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 变化于 2.37 ~

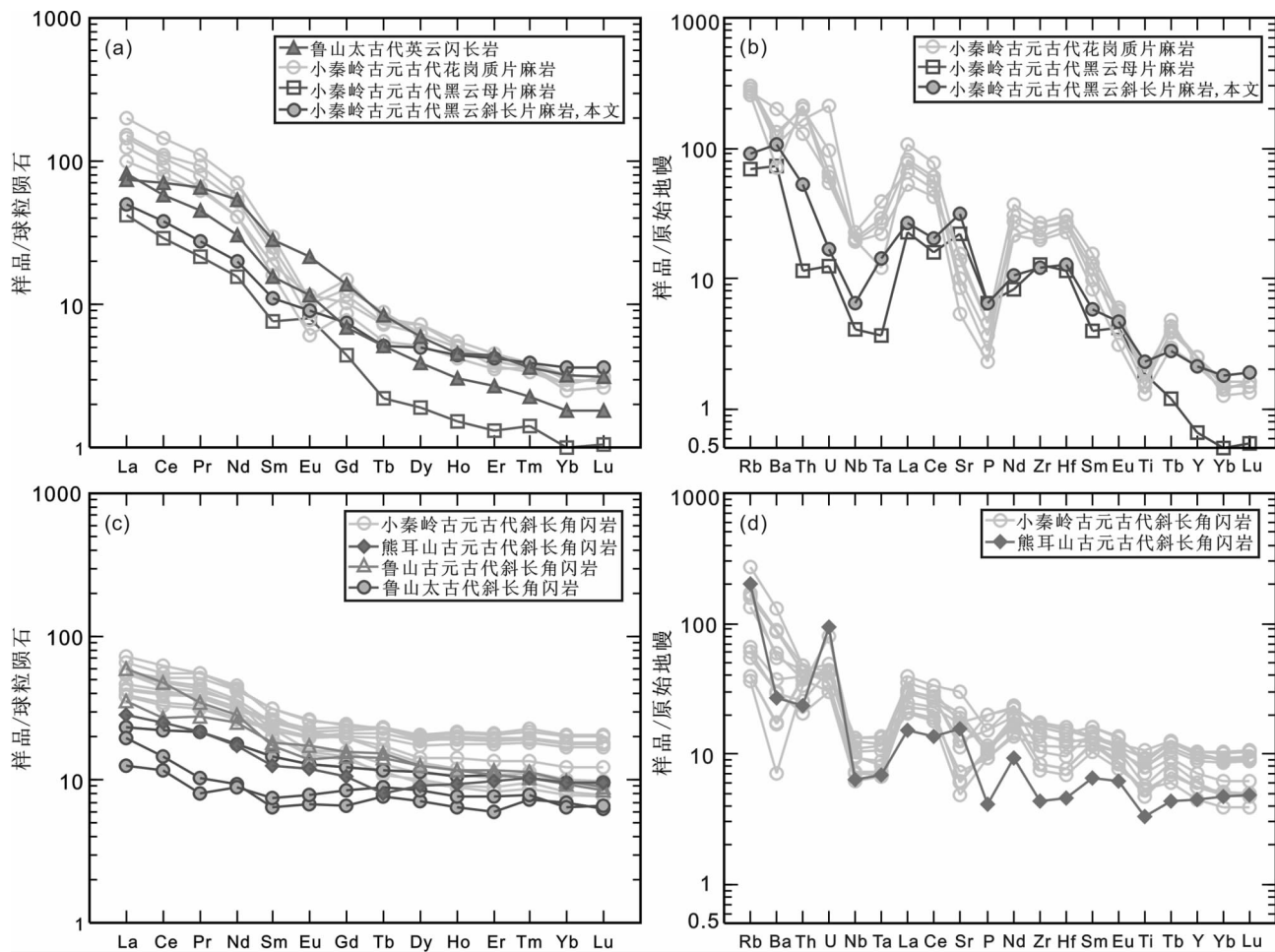


图4 太华群中酸性岩(a,b)和基性岩(c,d)稀土模式和微量元素含量蛛网图

球粒陨石标准值引自 Taylor and McLennan (1985); 原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough (1989); 鲁山太古代英云闪长岩稀土元素数据引自 Liu *et al.* (2009); 小秦岭花岗岩质片麻岩稀土、微量元素数据引自周汉文等(1998a); 小秦岭古元古代黑云母片麻岩和熊耳山古元古代斜长角闪岩稀土、微量元素数据引自 Xu *et al.* (2009); 小秦岭古元古代斜长角闪岩稀土、微量元素数据引自周汉文等(1997a); 鲁山古元古代、太古代斜长角闪岩稀土元素数据引自 Liu *et al.* (2009) 和涂绍雄(1998)

Fig. 4 REE patterns and spider diagram of trace element abundances of intermediate-acidic rocks (a, b) and basic rocks (c, d) from Taihua Group

Chondrite normalized factors after Taylor and McLennan (1985); Primitive mantle-normalized factors after Sun and McDonough (1989); REE data of Archean tonalites from Lushan area after Liu *et al.* (2009); REE and trace element data of granitic gneisses from Xiaoqingling area after Zhou *et al.* (1998a); REE and trace element data of Paleoproterozoic biotite gneiss from Xiaoqingling and Paleoproterozoic amphibolite from Xiong'er shan after Xu *et al.* (2009); REE and trace element data of Paleoproterozoic amphibolites from Xiaoqingling area after Zhou *et al.* (1997a); REE data of Paleoproterozoic and Archean amphibolites from Lushan area after Liu *et al.* (2009) and Tu (1998)

2.86Ga,与本文的相当,而二阶段模式年龄(t_{DM2})值变化于2.36~3.00Ga,小于本文研究的样品。

5 讨论

5.1 太华群的形成和变质作用时代

太华群主要分布于陕西省小秦岭和河南崤山、熊耳山、鲁山、舞阳一带。前人曾对小秦岭、熊耳山和鲁山地区的太华群进行过大量的定年工作(表4)。这些年龄主要集中在

新太古代(2.98~2.62Ga)和古元古代(2.50~1.93Ga)。其中,鲁山地区的太华群年龄集中在新太古代(2845~2620Ma),少量为1975~1932Ma,相对其它地区的太华群具有较多老的年龄,而熊耳山和小秦岭地区的太华群年龄集中在古元古代(2.5~2.3Ga),少量2.7~2.5Ga年龄。可见不同地区、不同岩性的太华群岩石年龄值差异较大(表4)。排除不同同位素年代学方法的误差,还可能和太华群经历的多期构造事件使不同地区的太华群受到了不同程度的改造有关。倪志耀等(2003)认为华北克拉通南缘的小秦岭、崤山、

表 3 小秦岭太华群黑云斜长片麻岩中锆石的 Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotope data of zircons from the biotite plagioclase gneiss of Taihua Group, Xiaoqinling area

测点号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	t_{DM1} (Ga)	1σ	t_{DM2} (Ga)
3	1917	0.281258	0.000014	0.000335	0.013901	0.281246	-11.23	0.50	2.74	0.02	3.24
4	1904	0.281287	0.000012	0.000429	0.018390	0.281271	-10.62	0.43	2.70	0.02	3.19
5	2008	0.281308	0.000015	0.000262	0.011025	0.281298	-7.28	0.53	2.66	0.02	3.07
6	1904	0.281304	0.000013	0.000349	0.015150	0.281291	-9.91	0.46	2.67	0.02	3.15
7	1916	0.281289	0.000011	0.000485	0.022141	0.281271	-10.35	0.39	2.70	0.01	3.19
9	1901	0.281401	0.000010	0.000602	0.031128	0.281379	-6.86	0.36	2.56	0.01	2.96
12	1913	0.281315	0.000011	0.000441	0.019603	0.281299	-9.43	0.39	2.67	0.01	3.13
13	1922	0.281358	0.000010	0.000417	0.020087	0.281343	-7.67	0.36	2.61	0.01	3.03
18	1944	0.281302	0.000014	0.000376	0.018851	0.281288	-9.10	0.50	2.68	0.02	3.13
22	1873	0.281404	0.000017	0.000896	0.045269	0.281372	-7.76	0.60	2.58	0.02	3.00
23	1877	0.281295	0.000010	0.000289	0.012230	0.281285	-10.77	0.36	2.68	0.01	3.18
24	1850	0.281393	0.000011	0.000702	0.031783	0.281368	-8.42	0.40	2.58	0.02	3.02
29	1924	0.281320	0.000014	0.000346	0.016093	0.281307	-8.88	0.50	2.65	0.02	3.10
30	1866	0.281317	0.000012	0.000180	0.008035	0.281311	-10.10	0.43	2.65	0.02	3.13
37	1886	0.281283	0.000012	0.000288	0.013117	0.281273	-10.99	0.43	2.70	0.02	3.20
40	1937	0.281293	0.000012	0.000307	0.013768	0.281282	-9.49	0.43	2.69	0.02	3.15

注： $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1000 \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$ ；

$t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$ ；

$t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \} + t$

表 4 前人的太华群岩石的定年结果

Table 4 Ages of rocks from Taihua Group

序号	岩性	采样位置	分析方法	年龄值 (Ma)	文献出处
1	英云闪长片麻岩	鲁山	锆石 Pb-Pb (蒸发法)	2806 ± 7; 2841 ± 6	Kröner <i>et al.</i> (1988)
2	奥长花岗片麻岩	鲁山	锆石 Pb-Pb (蒸发法)	2807 ± 4	Sun <i>et al.</i> (1994)
3	斜长角闪岩	鲁山	全岩 Sm-Nd 等时线	2766 ± 29	薛良伟等 (1995)
4	斜长片麻岩	鲁山	磷灰石 U-Pb	2280	陈好寿等 (1980)
5	斜长角闪片麻岩	鲁山	磷灰石 U-Pb	2658	林保钦和陶铁镛 (1989)
6	角闪斜长片麻岩	鲁山	锆石 U-Pb	2620	河南省地质矿产局 (1989)
7	奥长花岗片麻岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2761 ± 11	林慈莹 (2006)
8	奥长花岗片麻岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2757 ± 59	林慈莹 (2006)
9	英云闪长片麻岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2766 ± 14	林慈莹 (2006)
10	斜长角闪岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2763 ± 13	林慈莹 (2006)
11	斜长角闪片岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2812 ± 27	林慈莹 (2006)
12	斜长角闪岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	1932 ± 48	林慈莹 (2006)
13	斑状石英角闪斜长岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2759 ± 52	林慈莹 (2006)
14	角闪斜长片麻岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2755 ± 8	林慈莹 (2006)
15	石墨石榴石夕线片麻岩	鲁山	锆石 SHRIMP	2260 ~ 2140	Wan <i>et al.</i> (2006b)
16	斜长角闪岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2838 ± 35	Liu <i>et al.</i> (2009)
17	片麻状黑云母英云闪长岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2829 ± 18	Liu <i>et al.</i> (2009)
18	片麻状斜长角闪岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2845 ± 23	Liu <i>et al.</i> (2009)
19	片麻状角闪石黑云母英云闪长岩	鲁山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2832 ± 11	Liu <i>et al.</i> (2009)
20	变质岩	熊耳山	全岩 Sm-Nd 模式年龄	2914 ± 79	张宗清和黎世美 (1998)
21	变质岩	熊耳山	全岩 Sm-Nd 等时线年龄	2351 ± 103	张宗清和黎世美 (1998)
22	斜长角闪岩	熊耳山	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2500 ~ 2300	Xu <i>et al.</i> (2009)
23	斜长角闪岩	洛宁	锆石 Pb-Pb (蒸发法)	2675 ± 2	倪志耀等 (2003)
24	斜长角闪岩	洛宁	角闪石 Ar-Ar 坪年龄	2373 ± 47	倪志耀等 (2003)
25	斜长角闪岩	洛宁	角闪石 Ar-Ar 等时线年龄	2349 ± 47	倪志耀等 (2003)
26	石墨夕线片麻岩	外方山	锆石 SHRIMP	2730 ~ 2500; 2310 ~ 2250	赵太平等 (2004)
27	斜长角闪岩	小秦岭	全岩 Sm-Nd 等时线	2542 ± 57	周汉文等 (1998b)
28	黑云母片麻岩	小秦岭	锆石 U-Pb LA-ICPMS	2500 ~ 2300	Xu <i>et al.</i> (2009)
29	大理岩	小秦岭	全岩 Pb-Pb 等时线	2087 ± 120	周汉文等 (1997b)

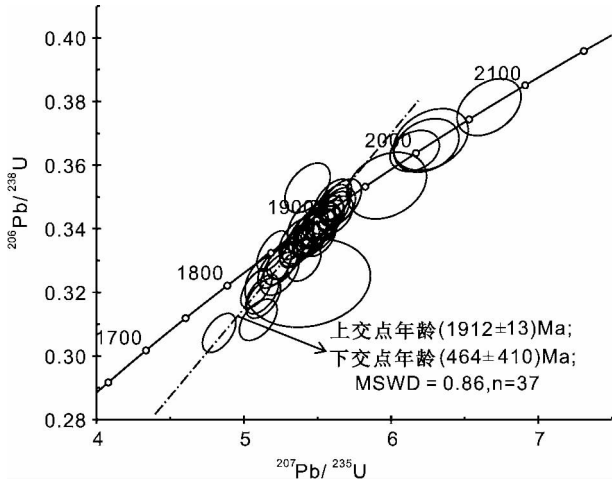


图5 小秦岭太华群黑云斜长片麻岩中锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Concordia plot for zircons from the biotite plagioclase gneiss of the Taihua Group in Xiaoqingling

熊耳山、鲁山和舞阳等地的太华群不是一种简单的形成时代基本一致的地层单元,而是因构造作用拼贴于华北克拉通的

特殊构造单元。

本次研究的样品(QL0703-1)与华山岩体北侧的片麻岩(QL0701, Xu *et al.*, 2009)在矿物组成上相似,前者矿物组合为斜长石+石英+黑云母+绿帘石+钾长石+少量榍石,后者为斜长石+石英+黑云母+角闪石+少量钾长石,只是前者含绿帘石而不含角闪石。二者的主量元素也相似,样品QL0701的SiO₂含量、ALK、A/CNK和Mg[#]分别为66.99%、7.17%、0.96和0.28。在微量元素特征上,二者的大部分微量元素值很相近(如Rb、Ba、U、Nb、La、Ce、Pb、Sr、P、Nd、Zr、Hf、Sm、Eu和Ti等元素)(图4b),除了重稀土元素有差异(如Y、Yb和Lu等)(图4a)。在(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i与锆石U-Pb年龄相关图上(图6),本文样品的锆石在样品QL0701(Xu *et al.*, 2009)的锆石Hf同位素演化线上。这种相关性一种可能是本次研究的样品QL0703-1中的变质锆石为类似于QL0701中原始岩浆锆石重结晶的产物,即锆石U-Pb体系虽然受到高级变质作用影响而发生重置,但其Lu-Hf体系常常可以未受影响或只受到极小的影响(Kinny and Maas 2003; Belousova *et al.*, 2006; Nebel *et al.*, 2007)。这意味着两个样品的原岩为同期同源岩浆活动的产物。另一种可能是华山岩体南北两侧太华群片麻岩的原岩没有成因联系。图6

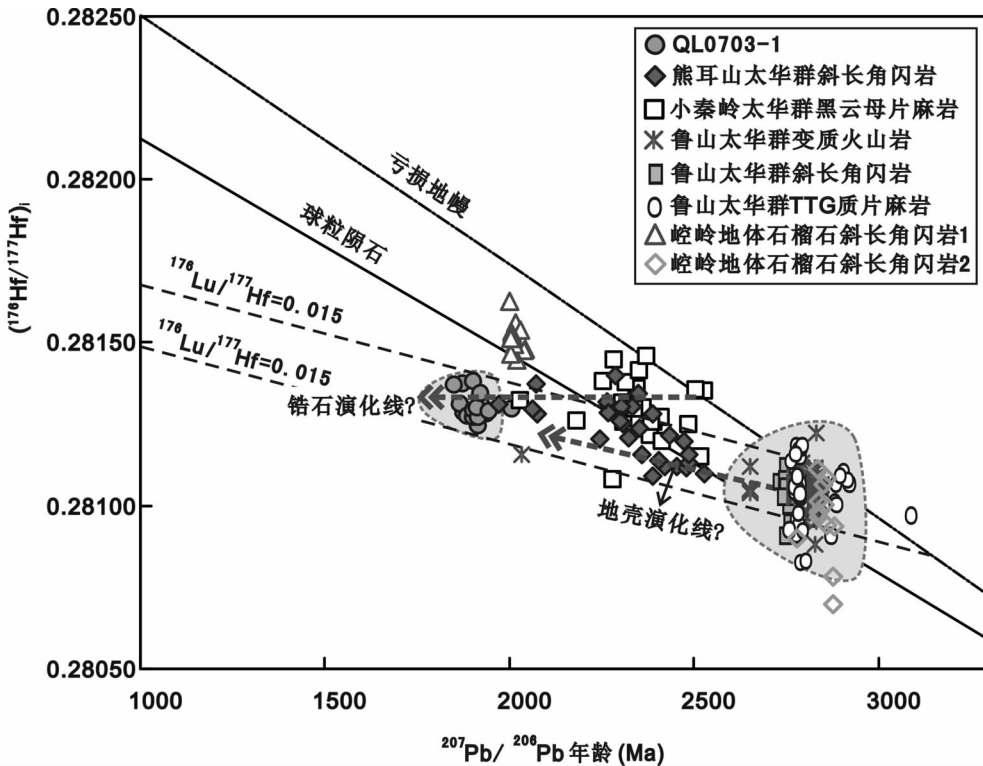


图6 太华群¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf初始值与锆石U-Pb年龄相关图

熊耳山太华群斜长角闪岩和小秦岭太华群黑云母片麻岩数据引自 Xu *et al.* (2009); 鲁山太华群变质火山岩数据引自 Liu *et al.* (2009); 鲁山太华群斜长角闪岩和TTG质片麻岩数据引自第五春荣等(2010); 崆岭地体石榴斜长角闪岩数据引自 Wu *et al.* (2009)

Fig. 6 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i vs. U-Pb age of zircons from Taihua Group

Data sources: amphibolite of Xiong'er Group and biotite gneiss of Taihua Group in Xiaoqingling area (Xu *et al.*, 2009); meta-volcanic rocks of Taihua Group in Lushan area (Liu *et al.*, 2009); amphibolites and TTG gneisses of Taihua Group from Lushan area (Diwu *et al.*, 2010); garnet amphibolite from Kongling terrane (Wu *et al.*, 2009)

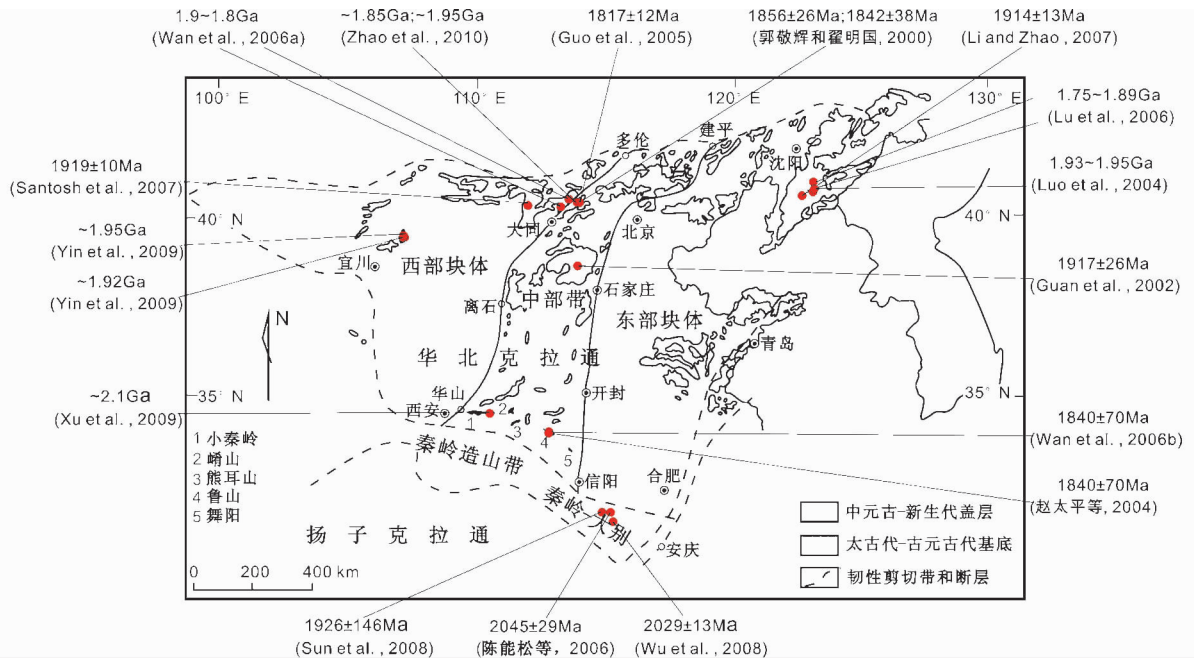


图7 华北克拉通早前寒武岩石分布图(据 Zhao *et al.*, 2002a, b; Wan *et al.*, 2006b)和古元古代构造事件

Fig.7 Distribution of Early Precambrian rocks in the North China Craton (after Zhao *et al.*, 2002a,b; Wan *et al.*, 2006b) and the Paleoproterozoic tectonic events

显示华山北侧太华群黑云母片麻岩(Q10701)的锆石具有更宽的变化和更小的模式年龄,不同于本文的样品,暗示二者的原岩可能没有直接成因联系。

图6显示本次研究的锆石落在鲁山地区太华群斜长角闪岩、TTG质片麻岩和变质火山岩(斜长角闪岩和英云闪长岩)锆石地壳成分演化线上,可能说明小秦岭地区华山岩体南侧太华群的源岩与北侧的不同而与鲁山地区的太华群存在一定的成因联系,即它们都具有中太古代的Hf模式年龄,暗示研究区片麻岩原岩与鲁山地区新太古代早期的变质火山岩都起源于中太古代地壳的部分熔融,而另一些地区的太华群变质岩可能是由新太古代地壳演化而成。

在地球化学组成上,鲁山地区太华群的基性变质岩的稀土元素也存在明显差别(图4c),两类地球化学不同的岩石分别形成于太古代和古元古代(涂绍雄,1998;第五春荣等,2010)。而小秦岭地区基性变质岩的地球化学与鲁山地区的古元古代基性岩相似。另外,小秦岭地区太华群的酸性变质岩的稀土和其他微量元素组成也明显分为两类(图4a, b)。因此,根据已有的地球化学和年代学资料以及上述的分析,原来的太华群大致可以解体为两部分,一部分形成于新太古代,主要分布于鲁山地区,少量小秦岭等其他地区;而另一部分形成于古元古代早期,主要分布于熊耳山和小秦岭地区,少量鲁山地区。

前人研究认为太华群共经历了两次主要的构造-热事件,分别为新太古代(薛良伟等,1995;周汉文等,1998b;李厚民等,2007)和古元古代(张宗清和黎世美,1998;倪志耀等,2003;赵太平等,2004;Wan *et al.*, 2006b; Xu *et al.*, 2009)。

鲁山太华群经历了~2.8Ga和1.87~1.84Ga的构造-热事件(薛良伟等,1995;赵太平等,2004;Wan *et al.*, 2006b);小秦岭太华群在2.7~2.6Ga、~2.5Ga、~2.1Ga和2.0~1.9Ga分别经历了构造-热事件(周汉文等,1998b;李厚民等,2007;Xu *et al.*, 2009);熊耳山太华群经历了~2.3Ga和~2.1Ga的变质热事件(倪志耀等,2003;Xu *et al.*, 2009)。可见前人报道的不同地区的太华群经历了不同时期的构造事件。本文研究显示小秦岭地区的太华群经历了~1.91Ga的变质事件,指示华北中央造山带的南端存在~1.91Ga的一期重要构造-热事件。该变质年龄在研究区还未曾有报道。

5.2 华北克拉通古元古代碰撞造山事件

Rogers and Santosh (2002)和 Zhao *et al.* (2002a, 2003)对南美陆块、西非陆块、劳伦(Laurentia)陆块、波罗的陆块、西伯利亚陆块、南非卡普沃(Kaapvaal)和津巴布韦(Zimbabwe)克拉通、西澳耶尔岗(Yilgarn)和皮尔巴拉(Pilbara)克拉通、南北印度克拉通和河北克拉通等全球太古代-古元古代克拉通进行分析,提出了在2.1~1.8Ga期间有一个全球规模的造山运动,认为这期造山运动导致了这些克拉通的拼合,形成古元古代Columbia超级大陆。华北东部陆块和西部陆块在~1.85Ga最终拼合形成统一的华北克拉通,在其之间形成中央造山带(Guo *et al.*, 2005; Kröner *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005)。很多文献记载了华北克拉通及其南部的古元古代构造-热事件,如在华北克拉通西部带(Wan *et al.*, 2006a; Santosh *et al.*, 2007;

表5 华北克拉通及其南部晚古元古代变质年龄

Table 5 Paleoproterozoic metamorphic ages of North China Craton

序号	岩性	采样位置	分析方法	变质年龄 (Ma)	文献出处
1	石榴石-硅线石-黑云母斜长片麻岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1950 ± 13	Yin <i>et al.</i> (2009)
2	石榴石-硅线石-堇青石片麻岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1953 ± 14	Yin <i>et al.</i> (2009)
3	石榴石长英质片麻岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1954 ± 22	Yin <i>et al.</i> (2009)
4	石榴石-硅线石-黑云母片麻岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1920 ± 17	Yin <i>et al.</i> (2009)
5	石榴石长石石英岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1941 ± 24	Yin <i>et al.</i> (2009)
6	石榴石-硅线石浅粒岩	内蒙古千里山	锆石 LA-ICPMS	1955 ± 21	Yin <i>et al.</i> (2009)
7	假蓝宝石-斜方辉石-硅线石麻粒岩	内蒙古凉城	锆石 SHRIMP	1919 ± 10	Santosh <i>et al.</i> (2007)
8	片麻岩	山西大同	锆石 SHRIMP	~ 1900	Wan <i>et al.</i> (2006a)
9	硅线石-石榴石片麻岩	山西大同	锆石 SHRIMP	1873 ± 6	Wan <i>et al.</i> (2006a)
10	含石墨硅线石-黑云母片麻岩	山西大同	锆石 SHRIMP	1861 ± 19	Wan <i>et al.</i> (2006a)
11	石墨-石榴石-硅线石片麻岩	河北省怀安蔓菁沟	锆石 SHRIMP	1850 ± 15	Zhao <i>et al.</i> (2010)
12	堇青石-石榴石-钾长石麻粒岩	河北省怀安蔓菁沟	锆石 SHRIMP	1857 ± 16	Zhao <i>et al.</i> (2010)
13	石墨-石榴石-硅线石片麻岩	河北省怀安蔓菁沟	锆石 SHRIMP	1946 ± 26	Zhao <i>et al.</i> (2010)
14	堇青石-石榴石-钾长石泥质麻粒岩	河北省怀安蔓菁沟	锆石 SHRIMP	1947 ± 22	Zhao <i>et al.</i> (2010)
15	高压麻粒岩	山西省恒山	全岩 Sm-Nd 同位素	1856 ± 26	郭敬辉和翟明国(2000)
16	高压麻粒岩	山西省恒山	单矿物 Sm-Nd 同位素	1842 ± 38	郭敬辉和翟明国(2000)
17	高压麻粒岩	山西省桑干	锆石 SHRIMP	1817 ± 12	Guo <i>et al.</i> (2005)
18	黑云母片麻岩	河北太行山	锆石 SHRIMP	1817 ± 26	Guan <i>et al.</i> (2002)
19	含石墨石榴夕线片麻岩	河南鲁山	锆石 SHRIMP	1840 ± 70	Wan <i>et al.</i> (2006b)
20	石墨夕线片麻岩	河南鲁山	锆石 SHRIMP	1840 ± 70	赵太平等 (2004)
21	角闪岩	河南熊耳山	锆石 LA-ICPMS	~ 2100	Xu <i>et al.</i> (2009)
22	黑云母片麻岩	陕西小秦岭	锆石 LA-ICPMS	~ 2100	Xu <i>et al.</i> (2009)
23	磁铁矿-二长花岗岩片麻岩	吉林省通化	锆石 SHRIMP	1914 ± 13	Li and Zhao (2007)
24	片麻岩	吉林省通化	锆石 LA-ICPMS	1754 ± 13	Lu <i>et al.</i> (2006)
25	含透辉石片麻岩	吉林省通化	锆石 LA-ICPMS	1827 ± 20	Lu <i>et al.</i> (2006)
26	含石墨片麻岩	吉林省通化	锆石 LA-ICPMS	1838 ± 35	Lu <i>et al.</i> (2006)
27	角闪岩	吉林省通化	锆石 LA-ICPMS	1847 ± 8	Lu <i>et al.</i> (2006)
28	变质砂岩	吉林省通化	锆石 SHRIMP	1886 ± 16	Lu <i>et al.</i> (2006)
29	泥质片岩	吉林辽河	锆石 LA-ICPMS	1929 ± 38	Luo <i>et al.</i> (2004)
30	含石墨云母片岩	吉林辽河	锆石 LA-ICPMS	1955 ± 130	Luo <i>et al.</i> (2004)
31	长英质片麻岩	北大别黄土岭	锆石 LA-ICPMS	2029 ± 13	Wu <i>et al.</i> (2008)
32	长英质麻粒岩	北大别黄土岭	锆石 LA-ICPMS	2045 ± 29	陈能松等(2006)
33	长英质麻粒岩	北大别黄土岭	Sm-Nd 同位素	1926 ± 146	Sun <i>et al.</i> (2008)

Yin *et al.*, 2009)、中部造山带(郭敬辉和翟明国,2000; Guan *et al.*, 2002; 赵太平等, 2004; Guo *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2006b; Xu *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010)、东部带(Luo *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007)以及扬子克拉通北部北大别地区(陈能松等, 2006; Sun *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008)(表5、图7)。因此华北和扬子很可能都是 Columbia 超大陆聚合过程中造山运动的一部分。

Santosh *et al.* (2007)应用锆石 SHRIMP U-Pb 和独居石电子探针测年技术对内蒙古凉城集宁杂岩体中假蓝宝石-斜方辉石-硅线石麻粒岩进行了定年,得到了 1919 ± 10Ma 的变质年龄,认为西部地块孔兹岩带超高温变质作用是阴山陆块和鄂尔多斯陆块发生碰撞而导致地壳增厚的结果,~1.92Ga 代表了两陆块碰撞拼合形成西部块体的时间。但是,Zhao *et al.* (2003, 2005, 2010)和 Yin *et al.* (2009)等认为两陆块碰撞拼合形成西部陆块的时间在 ~1.95Ga,而 ~1.92Ga 超高温

变质事件应是碰撞后拉伸构造背景下地幔岩浆上涌加热的结果,因此,~1.92Ga 是后造山伸展构造的时间。

本次研究确定了中央造山带南段小秦岭地区存在 ~1.91Ga 的变质事件,早于中央造山带的主碰撞变质事件的时代(~1.85Ga)。可能有两种解释:第一是阴山陆块和鄂尔多斯陆块在 ~1.95Ga 碰撞形成了西部陆块,并于 ~1.91Ga 开始与东部陆块发生碰撞,而碰撞首先从华北克拉通的南部开始,并逐渐向北发展。东、西陆块大规模碰撞拼合形成中部造山带的时间(即中部带峰期变质作用时间)为 ~1.85Ga。第二种解释是在阴山陆块和鄂尔多斯陆块碰撞后发生的造山后伸展构造也影响到了华北克拉通南缘的本研究区。对比西部块体中阴山陆块、鄂尔多斯陆块及孔兹岩带内部分岩石的锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值(Xia *et al.*, 2006; 董春燕等, 2007; Li *et al.*, 2007; Santosh *et al.*, 2009),可以发现本研究样品及熊耳山太华群斜长角闪岩、小秦岭太华群黑云母片

麻岩(Xu *et al.*, 2009)和鲁山太华群变质火山岩(Liu *et al.*, 2009)中的锆石相似,其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值绝大部分大于0.0003, $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 大于0.01,不同于那些与石榴子石平衡的较高压力条件下形成的锆石,说明这期变质作用很可能不是在挤压碰撞构造背景下发生的,而同样是在拉张背景下发生。因此,华北克拉通南缘~1.91Ga的这期变质作用很可能与北部阴山陆块和鄂尔多斯陆块碰撞后的伸展事件相关联。结合东部地块胶-辽-吉古元古代构造带也在~1.9Ga发生与伸展构造有关的变质作用(Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007; Zhou *et al.*, 2008),表明整个华北克拉通的各个陆块在这个时期可能都处于碰撞造山后的伸展阶段。

5.3 太华群的归属问题

关于太华群的归属,长期以来都把其视为华北克拉通南缘的岩石地层单元(徐启东等,1994;薛良伟等,1995;涂绍雄,1998)。Xu *et al.* (2009)认为太华群是卷入秦岭造山带的华北克拉通南缘的古老岩石地层单元。王仁民等(2002)认为华北克拉通南缘的小秦岭、崆山、熊耳山、鲁山和舞阳等地的太华群不是一种简单的、形成时代基本一致的地层单元,而是因构造作用拼贴于华北克拉通的特殊构造单元。张宗清等(2001)对采自河南省洛宁县熊耳山北侧的太华群岩石的Nd同位素进行分析表明,其特征不同于华北太古宙岩石,而和扬子克拉通鱼洞子群、崆岭群一致,认为它很可能是扬子克拉通中太古代形成的基底的一部分。在($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄相关图上(图6),本文样品均落在Liu *et al.* (2009)和第五春荣(2010)的样品范围内,而且与鲁山地区的太华群具有相同的源区,均由太古代地壳演化而来。但与扬子克拉通北缘崆岭地体中的古元古代变质岩进行的Hf同位素对比显示(图6),其Hf同位素模式年龄虽有交叉,但后者大部分具有较小的模式年龄值,且其变化范围较大,明显不同于本研究样品。因此,小秦岭的太华群与其他地区的太华群更可能隶属于华北克拉通。

6 结论

华北克拉通南缘的太华群可以解体为新太古代和古元古代两部分,前者主要分布于鲁山地区而后者主要分布于小秦岭和熊耳山等地区。小秦岭的太华群在~1.91Ga经历了一期高级变质作用。这次变质热事件为Columbia超级大陆聚合时发生的2.1~1.8Ga全球性碰撞造山事件的一部分。高的Lu/Hf和Yb/Hf比值暗示该期变质作用很可能是在后造山的拉张背景下发生的,与华北地块其他地区同时代的伸展事件相关联,暗示华北克拉通一些地区在该时期处于碰撞造山后的伸展阶段。华北克拉通块体南缘不同地区的太华群虽在原岩组成、形成时代和变质时代上具有不同的特征,但在Hf同位素等组成都不同于扬子地块,暗示它们是华北地块的组成部分。

致谢 感谢内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室张文兰老师、武兵老师和地质过程与矿产资源国家重点实验室(武汉)郑曙老师在锆石成像和锆石定年工作给予的协助;感谢南京大学现代分析中心张孟群老师、南京大学成矿作用国家重点实验室杨涛老师在主、微量元素测定工作上给予的帮助;感谢李晓伟同学在野外工作上给予的帮助!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Belousova EA, Griffin WL and O'Reilly SY. 2006. Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: Examples from Eastern Australian granitoids. *J. Petrology*, 47(2): 329-353
- Bingen B, Austrheim H, Whitehouse MJ and Davis WJ. 2004. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arcs, Caledonides of W Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147(6): 671-683
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148(1-2): 243-258
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Henan Province. 1989. *Geology and Mineral Resources Geological Memoirs of Henan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1-772 (in Chinese)
- Chen HS, Zhou HF, Li HQ, Huang B, Ye BD, Li CZ, Bai YB and Liu SL. 1980. Geochronological investigation of the Late Archean iron-bearing metamorphic rocks from central Henan. *Bull. Chinese Acad. Geol. Sci.*, 1(2): 88-102 (in Chinese with English abstract)
- Chen NS, Liu R, Sun M, Li HM, He L, Wang QY and Zhang HF. 2006. LA-ICPMS U-Pb zircon dating for felsic granulite, Huangtuling area, North Dabieshan: Constraints on timing of its protolith and granulite-facies metamorphism, and thermal events in its provenance. *Earth Science*, 31(3): 294-300 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Sui YH and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposits, East Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 551-568 (in Chinese with English abstract)
- Claué-Long JC, Sobolev NV, Shatsky VS and Sobolev AV. 1991. Zircon response to diamond-pressure metamorphism in the Kokchetav massif, USSR. *Geology*, 19(7): 710-713
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL and Wang HL. 2010. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua complex on the southern margin of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 55(23): 2557-2571
- Dong CY, Liu DY, Li JJ, Wan YS, Zhou HY, Li CD, Yang YH and Xie LW. 2007. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: New evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area. *Chinese Science Bulletin*, 52(21): 2984-2994
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3-4): 237-269
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou XH and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 113(1-2): 1-18
- Guo JH and Zhai MG. 2001. Sm-Nd age dating of high-pressure

- granulites and amphibolites from Sanggan area, North China craton. Chinese Science Bulletin, 46(2): 106–111
- Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton; Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. Journal of Metamorphic Geology, 20(8): 741–756
- Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton; Timing of Paleoproterozoic continental collision. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 629–642
- Hu SX, Lin QL, Chen ZM and Li SM. 1988. Geology and Metallogeny of the Collision Belt between North China and South China Plates. Nanjing: Nanjing University Press, 1–558 (in Chinese with English abstract)
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. Chem. Geol., 211(1–2): 47–69
- Kinny PD and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 327–341
- Kröner A, Compston W, Zhang GW, Guo AL and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. Geology, 16(3): 211–215
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 577–595
- Le Maitre RW, Baktaman P, Dudek A and Keller J. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–193
- Li HM, Chen YC, Wang DH, Ye HS, Wang YB, Zhang CQ and Dai JZ. 2007. SHRIMP U-Pb zircon ages of metamorphic rocks and veins in the Xiaoqinling area, Henan, and their geological significance. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2504–2512 (in Chinese with English abstract)
- Li QL, Chen FK, Guo JH, Li XH, Yang YH and Siebel W. 2007. Zircon ages and Nd-Hf isotopic composition of the Zhaertai Group (Inner Mongolia): Evidence for Early Proterozoic evolution of the northern North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 30(3–4): 573–590
- Li SZ and Zhao GC. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids; Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. Precambrian Research, 158(1–2): 1–16
- Lin BQ and Tao TY. 1989. Study of the main gold-bearing strata of Archean in Xiaoqinling area, Henan and Shanxi. In: Lin BQ (ed.). The Regional Metallogenic Conditions of Gold Deposits in Xiaoqinling area, China (No. 3). Beijing: Geological Publishing House, 1–46 (in Chinese)
- Lin CL. 2006. Geochemistry, geochronology and tectonic settings of Archean gneisses in Lushan, Henan Province. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwestern University. 1–89 (in Chinese with English summary)
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wang SY, Valley JW, Kita N, Dong CY, Xie HQ, Yang CX, Zhang YX and Gao LZ. 2009. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic. Chem. Geol., 261(1–2): 140–154
- Lu XP, Wu FY, Guo JH, Wilde SA, Yang JH, Liu XM and Zhang XO. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. Precambrian Research, 146(3–4): 138–164
- Ludwig KR. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic isotope data, version 2.56. U. S. Geological Survey Open-file Report, 91–445: 39
- Luo Y, Sun M, Zhao GC, Li SZ, Xu P, Ye K and Xia XP. 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. Precambrian Research, 134(3–4): 349–371
- Nebel O, Nebel-Jacobsen Y, Mezger K and Berndt J. 2007. Initial Hf isotope compositions in magmatic zircon from Early Proterozoic rocks from the Gawler Craton, Australia: A test for zircon model ages. Chem. Geol., 241(1–2): 23–37
- Ni ZY, Wang RM, Tong Y, Yang C and Dai TM. 2003. ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of zircon and ⁴⁰Ar/³⁹Ar of amphibole from plagioclase amphibolite in the Taihua Group, Luoning, Henan, China. Geological Review, 49(4): 361–366 (in Chinese with English abstract)
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contrib. Mineral. Petrol., 58(1): 63–81
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. Gondwana Research, 5(1): 5–22
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chem. Geol., 184(1–2): 123–138
- Santosh M, Sajeew K and Li JH. 2006. Extreme crustal metamorphism during Columbia supercontinent assembly: Evidence from North China Craton. Gondwana Research, 10(3–4): 256–266
- Santosh M, Wilde SA and Li JH. 2007. Timing of Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism in the North China Craton: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. Precambrian Research, 159(3–4): 178–196
- Santosh M, Wan YS, Liu DY, Dong CY and Li JH. 2009. Anatomy of zircons from an Ultrahot Orogen: The amalgamation of the North China Craton within the Supercontinent Columbia. The Journal of Geology, 117(4): 429–443
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. Science, 293(5530): 683–687
- Shaw DM. 1972. The origin of the Apsley gneiss, Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, 9(1): 18–35
- Shi Y, Yu JH, Xu XS, Qiu JS and Chen LH. 2009. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the eastern Qinling orogen. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2651–2670 (in Chinese with English abstract)
- Sun M, Chen NS, Zhao GC, Wilde SA, Ye K, Guo JH, Chen Y and Yuan C. 2008. U-Pb zircon and Sm-Nd isotopic study of the Huangtuling granulite, Dabie-Sulu belt, China; Implication for the Paleoproterozoic tectonic history of the Yangtze craton. American Journal of Science, 308(4): 469–483
- Sun SS and McDonough WE. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313–345
- Sun Y, Yu ZP and Kröner A. 1994. Geochemistry and single zircon geochronology of Archean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 10(3–4): 227–233
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. New York: Blackwell Scientific Publications, 1–328
- Tu SX. 1998. Geochemical comparing of two types of amphibolites within Taihua Group in Lushan County, Henan Province and their tectonic settings. Geochimica, 27(5): 412–421 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. Geochim. Cosmochim. Acta, 63(3–4): 533–556
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006a. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. Precambrian Research, 149(3–4): 249–271
- Wan YS, Wilde SA, Liu DY, Yang CX, Song B and Yin XY. 2006b.

- Further evidence for ~1.85Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9(1-2): 189-197
- Wang RM, Ni ZY and Tong Y. 2002. Stratigraphic unit or tectonic unit? *Geology in China*, 29(3): 281-285 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523-545
- Wu YB, Zheng YF, Gao S, Jiao WF and Liu YS. 2008. Zircon U-Pb age and trace element evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal rocks in the Dabie Orogen. *Lithos*, 101(3-4): 308-322
- Wu YB, Gao S, Gong HJ, Xiang H, Jiao WF, Yang SH, Liu YS and Yuan HL. 2009. Zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition of Kongling terrane in the Yangtze Craton: Refining the timing of Palaeoproterozoic high-grade metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(6): 461-477
- Xia XP, Sun M, Zhao GC and Luo Y. 2006. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance. *Precambrian Research*, 144(3-4): 199-212
- Xu QD, Gao S and Liu QS. 1994. Geochemical constraints of granulite facies rocks in Taihua Group, Lushan County, Henan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 13(3): 214-226 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, William L, Griffin XM, O'Reilly SY, He ZY and Zhang CL. 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. *Mineral. Petrol.*, 97(1-2): 43-59
- Xue LW, Yuan ZL, Zhang YS and Qiang LZ. 1995. The Sm-Nd isotope age of Taihua Group in Lushan area and their implications. *Geochimica*, 24(Suppl.): 92-97 (in Chinese with English abstract)
- Yin CQ, Zhao GC, Sun M, Xia XP, Wei CJ, Zhou XW and Leung W. 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 174(1-2): 78-94
- Zhang ZQ and Li SM. 1998. Sm-Nd, Rb-Sr ages of Archean metamorphic rocks of Taihua Group and its geological implications in Xiong'er shan area, western Henan Province. In: Cheng YQ (ed.). *Study of Early Precambrian Geology in North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House, 1-149 (in Chinese)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Tang SH and Wang JH. 2001. On the age of metamorphic rocks of the Yudongzi Group and the Archean crystalline basement of the Qinling Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 198-204 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M and Lu LZ. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(34): 55-88
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1-2): 45-73
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002a. Review of global 2.1-1.8Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1-4): 125-162
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002b. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302(3): 191-226
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2003. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: Records in the North China Craton. *Gondwana Research*, 6(3): 417-434
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202
- Zhao GC, Wilde SA, Guo JH, Cawood PA, Sun M and Li XP. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. *Precambrian Research*, 177(3-4): 266-276
- Zhao TP, Zhou MF, Jin CW, Guan H and Li HM. 2001. Discussion on age of the Xiong'er Group in southern margin of North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 326-334 (in Chinese with English abstract)
- Zhao TP, Zhai MG, Xia B, Li HM, Zhang YX and Wan YS. 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2495-2502
- Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Zhang SB, Xu P and Wu FY. 2005. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240(2): 378-400
- Zhou HW, Li XH, Zhong ZQ, Liu Y and Xu QD. 1997a. Geochemistry of amphibolites within the Taihua complex from the Xiao Qinling area, western Henan and its tectonic implication. *Geochimica*, 26(2): 87-100 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HW, Li XH, Zhong ZQ, Tu XL and Liu Y. 1997b. Pb-Pb dating of marbles within the Taojia Complex from Xiao Qinling area and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(Suppl.): 49-51 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HW, Zhong GL, Zhong ZQ and Xu QD. 1998a. Geochemistry of granitic gneisses within Taihua complex from Xiao Qinling area, western Henan Province and its tectonic implication. *Earth Science*, 23(6): 553-556 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HW, Zhong ZQ, Ling WL, Zhong GL and Xu QD. 1998b. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiao Qinling area, western Henan and its geological implications. *Geochimica*, 27(4): 367-372 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XW, Zhao GC, Wei CJ, Geng YS and Sun M. 2008. Metamorphic evolution and Th-U-Pb zircon and monazite geochronology of high-pressure pelitic granulites in the Jiaobei massif of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 328-350

附中文参考文献

- 陈好寿, 周慧芳, 李华芹, 黄斌, 叶伯丹, 李志昌, 白云彬, 刘树林. 1980. 豫中地区晚太古代含铁变质岩系同位素地质年代学研究. *中国地质科学院院报*, 1(2): 88-102
- 陈能松, 刘嵘, 孙敏, 李惠民, 何蕾, 王勤燕, 张宏飞. 2006. 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束. *地球科学*, 31(3): 294-300
- 陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性依据和造山型银矿实例: 东秦岭铁炉坪银矿同位素地球化学. *岩石学报*, 19(3): 551-568
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 王洪亮. 2010. 河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. *科学通报*, 55(21): 2112-2123
- 董春艳, 刘敦一, 李俊建, 万渝生, 周红英, 李承东, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉-贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成. *科学通报*, 52(16): 1913-1922
- 郭敬辉, 翟明国. 2000. 华北克拉通桑干地区高压麻粒岩变质作用的 Sm-Nd 年代学. *科学通报*, 45(19): 2055-2061
- 河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1

- 772

- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 黎世美. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿. 南京: 南京大学出版社, 1-558
- 李厚民, 陈毓川, 王登红, 叶会寿, 王彦斌, 张长青, 代军治. 2007. 小秦岭变质岩及脉体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 23(10): 2504-2512
- 林宝钦, 陶铁镛. 1989. 豫陕小秦岭地区太古代主要含金地层特征研究. 见: 林宝钦主编. 中国金矿类型区域成矿条件文集(3)—小秦岭地区. 北京: 地质出版社, 1-46
- 林慈鑫. 2006. 河南鲁山地区太古代片麻岩系的地球化学、锆石年代学及其构造环境. 硕士学位论文, 西安: 西北大学, 1-89
- 倪志耀, 王仁民, 童英, 杨淳, 戴潼漠. 2003. 河南洛宁太华岩群斜长角闪岩的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄. 地质论评, 49(4): 361-366
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 邱检生, 陈立辉. 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. 岩石学报, 25(10): 2651-2670
- 涂绍雄. 1998. 河南鲁山太华群两类斜长角闪岩地球化学对比及其构造环境. 地球化学, 27(5): 412-421
- 王仁民, 倪志耀, 童英. 2002. 是地层单元还是构造单元? 中国地质, 29(3): 281-285
- 徐启东, 高山, 刘庆生. 1994. 鲁山太华群麻粒岩相岩石形成的地球化学限制. 岩石矿物学杂志, 13(3): 214-226
- 薛良伟, 原振雷, 张萌树, 强立志. 1995. 鲁山太华群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义. 地球化学, 24(增刊): 92-97
- 张宗清, 黎世美. 1998. 河南省西部熊耳山地区太古宙太华群变质岩的 Sm-Nd, Rb-Sr 年龄及其地质意义. 见: 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1-149
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 王进辉. 2001. 鱼洞子群变质岩年龄及秦岭造山带太古宙基底. 地质学报, 75(2): 198-204
- 赵太平, 周美夫, 金成伟, 关鸿, 李惠民. 2001. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论. 地质科学, 36(3): 326-334
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 李惠民, 张毅星, 万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. 科学通报, 49(22): 2342-2349
- 周汉文, 李献华, 钟增球, 刘颖, 徐启东. 1997a. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩地球化学及其大地构造意义. 地球化学, 26(2): 87-100
- 周汉文, 李献华, 钟增球, 涂湘林, 刘颖. 1997b. 小秦岭太华杂岩中大理岩、Pb-Pb 等时线年龄及地质意义. 地球学报, 18(增刊): 49-51
- 周汉文, 钟国楼, 钟增球, 徐启东. 1998a. 豫西小秦岭地区太华杂岩中花岗质片麻岩的元素地球化学及其构造意义. 地球科学, 23(6): 553-556
- 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 钟国楼, 徐启东. 1998b. 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