

华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化*

第五春荣 刘祥 孙勇

DIWU ChunRong, LIU Xiang and SUN Yong

大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069, China

2017-11-01 收稿, 2018-02-07 改回.

Diwu CR, Liu X and Sun Y. 2018. The composition and evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4):999–1018

Abstract The Taihua Complex is widely exposed in the southern North China Craton (NCC) and records almost all the important geological events in the Early Precambrian, thus it is vital important to reveal the generation and evolution of continental crust of the NCC as well as the earth. Moreover, due to its important geographic location, which makes the Taihua Complex serve as an excellent area for investigating a variety of models for the tectonic subdivision and amalgamation of the NCC. In this paper, we present a synthetic overview of the Taihua Complex based on available stratigraphic, structural, geochemical, metamorphic and geochronologic data, and draw the following conclusions: 1) the Taihua Complex in Lushan area can be divided into two major lithological units along the Dangze River, namely gneisses series and supracrustal rocks; The former is composed of TTG gneisses and amphibolites, and were formed in the period of the Late Mesoarchean to Early Neoarchean, whereas the formation time of the supracrustal rocks can be limited during the Late Palaeoproterozoic. However, the gneisses series of the Taihua Complex in Xiaoqinling area was formed in a large time span from Late Mesoarchean to Early Palaeoproterozoic, whereas the supracrustal rocks were coeval with those in the Lushan area. 2) The Mesoarchean to Early Neoarchean (2.91~2.50Ga) was the major period of continental crust growth in the southern NCC, the Taihua Complex has undergone two marked episodes of continental crust growth during the Archean time. The earlier occurred at 2.85~2.70Ga, and formed TTG gneisses and amphibolites in Lushan area; the later happened at ~2.50Ga, and formed all types of Late Neoarchean granitoid rocks in Huashan and Xiaoshan areas. 3) Available isotope data suggest that the Early Paleoproterozoic magmatic rocks are widespread in the Taihua Complex during the crustal age gap, those rocks were likely generated in an Andean type continental margin arc setting; and probably due to the Early Paleoproterozoic subduction-collision between the southern block with other microcontinents. 4) The Taihua Complex has suffered strong metamorphism and deformation, and experienced high amphibolite to granulite facies metamorphism characterized by clockwise *P-T* paths including ITD process, and record long-lived Palaeoproterozoic metamorphic event may define a slow exhumation process, at least lasted 150Myr. 5) All the complexes in the southern NCC were welded together to form a coherent ancient terrane at the end of the Neoarchean, we named it the "Southern Archean Block". It has experienced five major Precambrian geological events: (1) formation of Hadean-Paleoarchean initial continental nucleus; (2) major continental crust growth during the period of Mesoarchean to Early Neoarchean; (3) hyperactive magmatism between 2.45Ga and 2.20Ga during the global crustal age gap; (4) Paleoproterozoic (2.31~1.97Ga) rifting event; (5) final subduction-accretion-collision process to form the NCC.

Key words North China Craton; Southern Archean Block; Taihua Complex; Archean; Continental crust growth

摘要 太华杂岩位于华北克拉通南部,其组成复杂,记录了几乎所有早前寒武纪各阶段重要的地质事件;此外,由于其所处特殊地理位置,研究太华杂岩对于华北克拉通早前寒武纪地壳形成和演化、构造单元划分和基底拼合等都具有举足轻重的科学价值。本文综合已有的岩石学、变质作用、地球化学以及同位素年代学等诸多研究工作,得到以下阶段性结论和认识: 1) 将鲁山地区太华划分为以深成侵入岩为主的片麻岩系和以变质沉积-火山岩为主的表壳岩系;前者形成于中太古代晚期-新太古代早期,后者形成于古元古代晚期。而小秦岭地区太华杂岩中变质深成侵入岩形成时间跨度较大,为中太古代晚期-古元

* 本文受国家自然科学基金项目(41672188, 41421002, 41272004)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项联合资助。

第一作者简介: 第五春荣,男,1977年生,副教授,从事前寒武纪地质和同位素地质学研究, E-mail: diwuchunrong@nwu.edu.cn

古代早期;而其上覆的火山-沉积岩可与鲁山太华杂岩的表壳岩类比,形成时间亦为古元古代晚期。2)中太古代-新太古代(2.91~2.50Ga)为华北克拉通南部大陆最主要的地壳形成时期。提出太华杂岩在太古宙经历了两期明显的地壳生长时间,一期发生在2.85~2.70Ga,以鲁山太华片麻岩系中的深成侵入岩和斜长角闪岩为代表;另一期发生在~2.50Ga,以小秦岭华山和崤山地区太华杂岩中各类花岗岩质岩石为代表。3)太华杂岩在所谓的全球陆壳生长“沉寂期(2.45~2.20Ga)”岩浆活动异常发育,推测这一时期的岩石形成于古元古代俯冲-汇聚环境,可能是与华北克拉通南部太古宙陆块和其他陆块汇聚-碰撞相关。4)太华杂岩在古元古代晚期普遍遭受了强烈的变质和变形,其变质程度主体为高角闪岩相,局部可达麻粒岩相,且记录了包含近等温降压退变质片段的顺时针变质作用 $P-T$ 轨迹,经历了一个漫长的变质演化过程(1.97~1.80Ga),变质作用的时限跨度可达150Myr。5)提出华北克拉通南部曾经为一个统一基底,称之为“南部太古宙地壳”,此地壳形成时间为新太古代末期(~2.5Ga)。该古老陆块经历了如下5个构造-演化阶段:(1)冥古宙-始太古代初始陆核形成;(2)中太古代-新太古代陆壳快速生长;(3)古元古代早期(~2.3Ga)岩浆活动异常活跃;(4)古元古代(2.30~1.97Ga)陆内拉伸-破裂;和(5)古元古代末期(1.97~1.80Ga)陆块最终拼合。

关键词 华北克拉通;南部太古宙陆块;太华杂岩;太古宙;大陆地壳生长

中图法分类号 P5

华北克拉通是全球的著名克拉通之一,这主要是由于它不仅出露世界上为数不多3.8Ga古老岩石(Liu *et al.*, 1992; Wan *et al.*, 2005, 2012; Wu *et al.*, 2008);而且与全球其他诸多典型克拉通对比,华北地壳的形成演化规律既具有一些一致性,又呈现出明显的特殊性(Zhai and Santosh, 2011, 2013; Zhai, 2014),因此研究华北克拉通早前寒武纪地质对于探讨大陆地壳早期的形成和演化具有十分重要的科学意义。近十多年来,对于华北克拉通早前寒武纪地质的研究取得了许多瞩目的进展,其中最主要进展之一就是对于华北克拉通新太古代-古元古代构造格局划分(Zhai *et al.*, 2000, 2005; Zhao, 2001; Zhao *et al.*, 2005; Kusky and Li, 2003; Kusky *et al.*, 2007; 翟明国, 2011; Wan *et al.*, 2015)(图1a, b),虽然现今对于基底构造单元划分、演化和最终拼合时间等依然存在不同的思考和见解,但是均一致认为华北克拉通是由多个微陆块拼合而成统一的早前寒武纪基底。

研究太华杂岩对于华北克拉通早前寒武纪地质具有重要意义,其重要性主要表现在以下几个方面:第一,太华杂岩位于华北克拉通中部造山带南部(图1c),与北部五台、阜平、吕梁、中条等地区基底杂岩一样是检验和修正华北克拉通早前寒武纪基底各种构造格局划分的重要地段。第二,根据最新的锆石U-Pb年龄测年结果显示:中太古代晚期-新太古代晚期岩石在太华杂岩中均有不同程度的出露,因此研究太华杂岩对于洞悉华北克拉通太古宙地壳生长和演化规律可提供重要素材(Wan *et al.*, 2015; Diwu *et al.*, 2016)。第三,最新研究发现太华杂岩在所谓的全球陆壳生长“沉寂期(2400~2000Ma)”岩浆活动异常发育,从而研究其可对所谓全球构造演化“沉寂期”的观点进行修正(Diwu *et al.*, 2014)。第四,根据最新的离子探针、激光探针U-Pb定年结果显示,太华变质杂岩经历了漫长的变质作用时间(1.97~1.80Ga)(蒋宗胜等, 2011; Lu *et al.*, 2013, 2017; 王国栋等, 2013; Diwu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014a; Chen *et al.*, 2015),表明华北中部造山带的南缘可能与中部及北部均具有不同的构造演化历史(Diwu *et al.*, 2016)。因此研究

太华杂岩对于华北克拉通早前寒武纪大陆地壳形成和演化,构造划分和基底拼合等具有举足轻重的科学价值。

自20世纪70年代以来,诸多研究者对太华杂岩进行了大量地质调查、岩石学、变质作用、地球化学以及同位素年代学等诸多研究工作,取得许多重要研究进展,因此本文已有的资料此讨论太华杂岩的组成;全面地厘定并讨论太华杂岩所经历构造-热事件的时代、期次和性质;总结华北克拉通南缘早前寒武纪地壳形成和演化规律的共性和独特性。

1 称谓由来

太华是指位于陕西省华阴县的西岳华山,由于其西南有少华山,故称“太华”。1956-1958年秦岭区测队在编制1:20万洛南幅和洛宁幅地质图时,首次将出露于太华山脉和灵宝县小秦岭地区不整合于古元古代铁铜沟组、(或)熊耳群及高山河组之下的一套变质岩命名为太华系(陕西省地质矿产局, 1989);阎廉泉(1959)将秦岭区内太古宙地层由下到上划分为太华群、荡泽河群、雁岭沟群和界牌群四个岩群。1962年《河南省地层初稿》(河南省地质局地质研究所, 1962)将出露在东秦岭前寒武基底岩石最下部称做华山群,又分为下部太华组和上部荡泽河组。王曰伦等(1963)将出露在华山大复背斜的核部变质程度较深的花岗片麻岩、斜长角闪片麻岩和各种混合岩组成的古老岩系称作“华山杂岩”。1965年秦岭区测队将太华系改称为太华群,并根据岩性组合和层序关系分为下太华群和上太华群(陕西省地质矿产局, 1989)。

此后,不同的研究单位按照各自认识将鲁山地区和小秦岭地区太华群细分为不同的组或段。但是由于太华群组成在横向和纵向上组成复杂多变,且后期改造强烈,因此诸多划分方案相互之间有时很难对比;而且由于早期同位素年代学测试手段限制,对于太华群的时代归属也存在很大争议。鉴于此,《中国地层典——太古宇》(《中国地层典》编委会, 1996)将太华群改称为太华岩群。

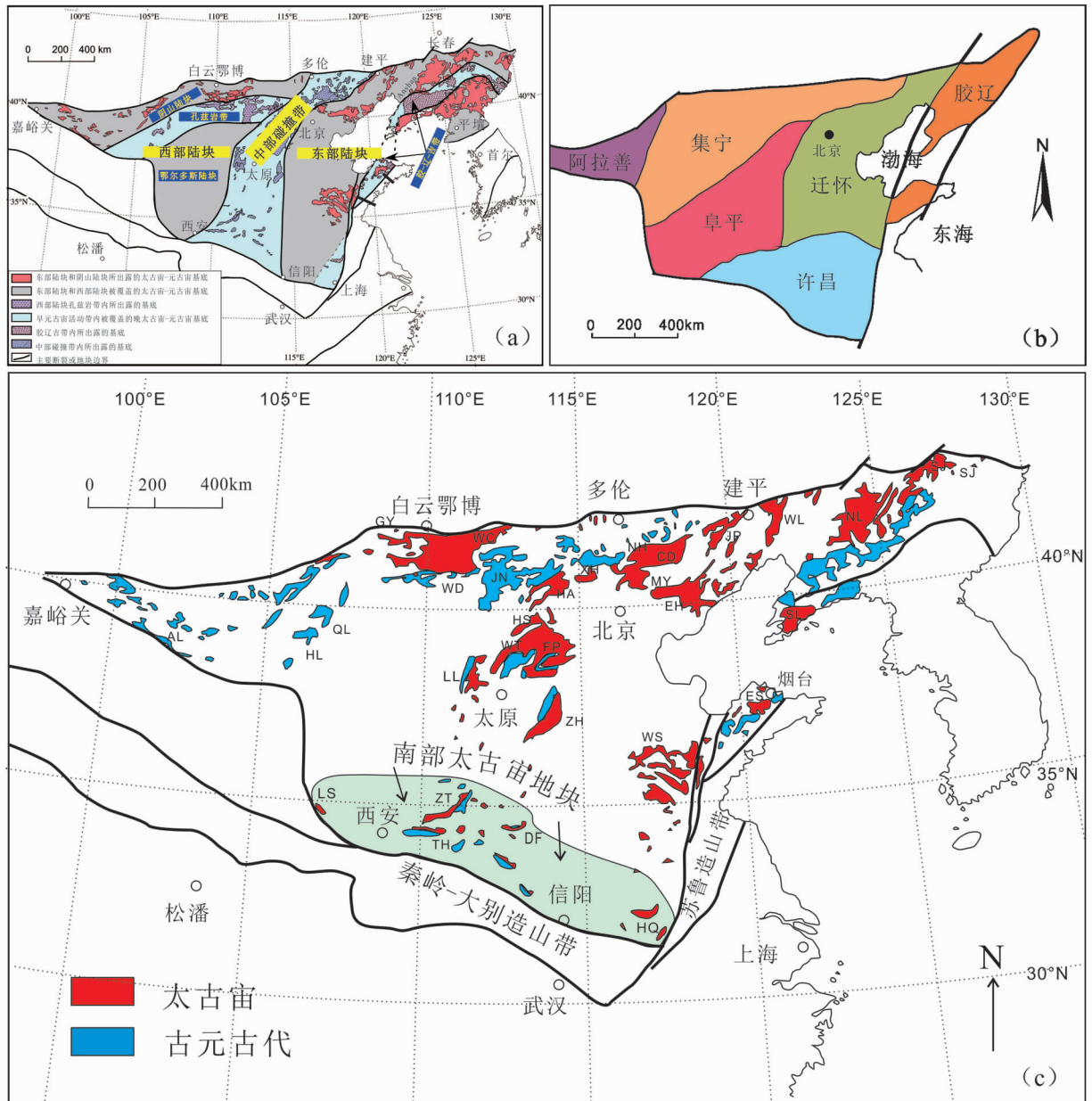


图1 华北克拉通基底构造单元划分图(a,据 Zhao *et al.* , 2005; b,据 Zhai *et al.* , 2000; c,据 Diwu *et al.* , 2016)

AL-阿拉善; CD-承德; DF-登封; EH-冀东; ES-胶东; FP-阜平; GY-固阳; HA-怀安; HL-贺兰山; HQ-霍丘; HS-恒山; JN-集宁; JP-建平; LL-吕梁; LS-隴山; MY-密云; NH-冀北; NL-辽北; QL-千里山; SJ-吉南; SL-辽南; TH-太华; WD-乌拉山-大青山; WL-辽西; WS-鲁西; WT-五台; XH-宣化; ZH-赞皇; ZT-中条山

Fig. 1 Tectonic subdivision of the North China Craton (a, after Zhao *et al.* , 200; b, after Zhai *et al.* , 2000; c, after Diwu *et al.* , 2016)

AL-Alashan; CD-Chengde; DF-Dengfeng; EH-Eastern Hebei; ES-Eastern Shandong; FP-Fuping; GY-Guyang; HA-Huai'an; HL-Helanshan; HQ-Huoqiu; HS-Henghan; JN-Jining; JP-Jianping; LL-Lvliang; LS-Longshan; MY-Miyun; NH Northern Hebei; NL-Northern Shandong; QL-Qianlishan; SJ-Southern Liaoning; SL-Southern Liaoning; TH-Taihua; WD-Wulashan-Daqingshan; WL-Western Liaoning; WS-Western Shandong; WT-Wutai; XH-Xuanhua; ZH-Zanhuang; ZT-Zhongtiaoshan

近年来,一些研究者考虑到群组的划分只适合于未变形的层状沉积岩,而不应该应用于强烈变形、变质的片麻岩、混合岩和麻粒岩等。虽然这些岩石有时的确呈现层状,但是这并不是沉积层理,而是构造变形作用所致;而杂岩是指由不同类型变质表壳岩和正片麻岩或混合片麻岩组成,由于强烈

混合岩化或花岗质岩浆侵入以及复杂褶皱和变形作用模糊或改变了原岩岩性和原始层序,使之不能按照地层学单位和原则进行细分,且岩石形成时间跨度也较大,因此将太华群改称为太华杂岩(第五春荣等, 2010a 及所引参考文献)。

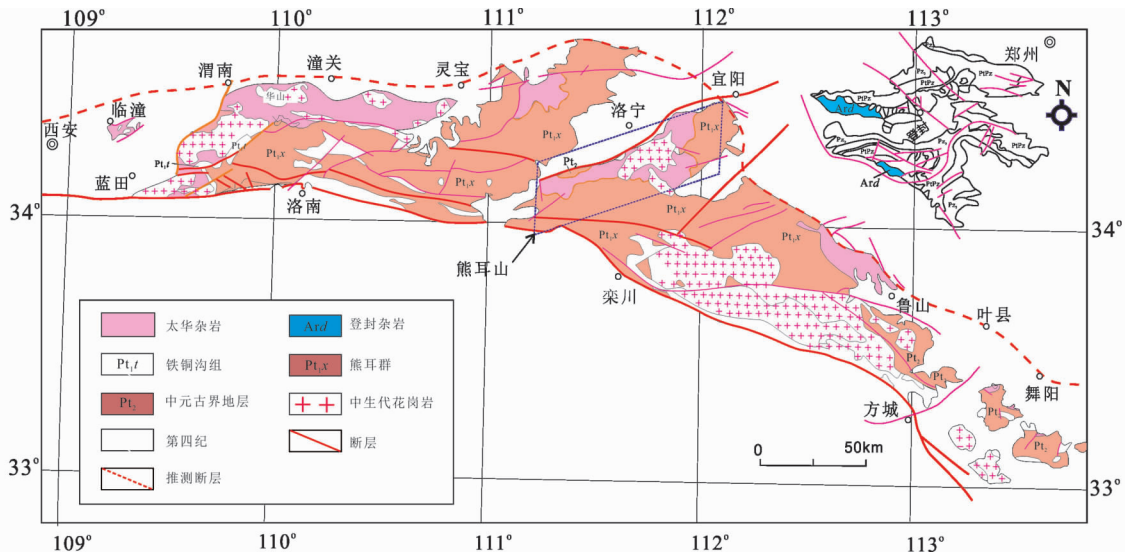


图2 华北南缘太华杂岩分布图(据 Diwu *et al.*, 2014 修改)

Fig. 2 Geological distribution of the Taihua Complex in the southern NCC (revised after Diwu *et al.*, 2014)

2 组成

太华杂岩广泛分布在华北克拉通南缘,总体呈北西-南东向展布,由西向东从骊山,经华山、灵宝、崤山地区,到洛宁县熊耳山地区、鲁山县背孜-马楼地区和叶县辛店-舞阳县铁山庙地区,断续延展上千千米(孙勇, 1982a, b, 1983, 1985; 张国伟等, 1982; Zhang *et al.*, 1985; 孙枢等, 1985; Sun *et al.*, 1994; 第五春荣等, 2010a)(图2),其中以河南鲁山和豫陕交界的小秦岭地区的岩石出露最为典型(Zhang *et al.*, 1985; Sun *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 2009; 第五春荣等, 2010a)。根据区域对比研究,太华杂岩向西可以延伸至甘肃的陇山地区,在那里称之为陇山杂岩(何艳红, 2004)(图1c);向东可以延伸至安徽地区,然而在安徽的霍邱地区无基岩出露,仅有钻孔资料(Wan *et al.*, 2010; 杨晓勇等, 2012; 刘磊和杨晓勇, 2013; Wang *et al.*, 2014b);在蚌埠地区也有零星分布,分别称之为霍邱杂岩和五河群。

2.1 鲁山太华杂岩

鲁山太华杂岩主要呈北西-南东向展布出露于背孜-瓦屋一带,出露面积达300km²,其南北分别被古元古代熊耳群和中元古代汝阳群云梦山组石英岩或寒武系地层所覆盖。早期以传统地层学划分为指导思想,多将鲁山太华杂岩二分,分为下太华群和上太华群,或下太华亚群和上太华亚群,然后在二分基础上再分为多个组(河南省地质矿产局, 1989)。其中西北大学地质学系的划分方案最具代表性(孙勇, 1982a, b; 张国伟等, 1982; Zhang *et al.*, 1985),将鲁山太华杂岩自下而上划分为耐庄组、荡泽河组、铁山岭组、水底

沟组和雪花沟组,前两组划归为下太华亚群,后三组划归为上太华亚群。古构造分析研究表明鲁山地区太华杂岩大致经历了三期构造变形:早期在荡泽河以北片麻岩系中形成近东西向串珠状分布的穹形构造;第二期变形形成遍布全区的北西西向复式背斜和复式向斜褶皱;晚期变形则形成轴近南北宽缓的背形及向形(张国伟等, 1982)。早期一些研究者认为鲁山原太华群下部和上部岩石为断层接触,或者为不整合接触关系(沈福农, 1986);而一些研究者认为二者之间存在一个长期风化剥蚀面,将原太华群下部和上部岩石分别命名为“太华群(或太华杂岩)”和“鲁山群”(涂绍雄, 1996; 沈其韩和宋会侠, 2014),将二者之间沉积间断命名为太华运动(涂绍雄, 1996)。

我们根据原上下太华群岩石组合、构造特征和同位素年龄差异,采用太华杂岩称谓,将鲁山太华杂岩分为下部片麻岩系和上部表壳岩系,二者大致以北西-南东向的荡泽河为界(第五春荣等, 2010a)(图3)。荡泽河以北为片麻岩系,主要以深成侵入岩,即TTG质片麻岩为主,局部夹斜长角闪岩;这些岩石成层性较差,发育近东西向呈串珠状的穹窿构造、无根褶皱、透镜体构造,并出现小型的平卧褶皱,混合岩化强烈。表壳岩系出露于荡泽河以南,岩石类型复杂,主要为富铝质副片麻岩、斜长角闪岩、大理岩、石英岩、磁铁石英岩等,可与孔兹岩系对比,以石墨片麻岩和大理岩为标志层;原岩主要为陆源碎屑岩-碳酸盐岩,夹基性-中酸性火山岩;这些岩石成分发育较好,基本不发育无根褶皱,混合岩化相对较弱(孙勇, 1982a, b; 张国伟等, 1982; Zhang *et al.*, 1985)。这两套岩石变质程度普遍达铁铝榴石角闪岩相,局部达麻粒岩相(孙勇, 1982a, b)。

根据最新已有SIMS和LA-ICPMS锆石U-Pb同位素年龄数据显示:TTG片麻岩侵位年龄为2902~2723Ma(表1和图4),

表1 鲁山太华杂岩同位素年龄汇总

Table 1 Summary of isotopic ages for the Taihua Complex in the Lushan area

样品号	岩性	测试方法	年龄(Ma)	年龄解释	数据来源
表壳岩系(原上太华群)					
XT02	黑云角闪斜长片麻岩	SHRIMP	1936 ± 6	变质年龄	黄道裘等, 2012
15LS-33	黑云斜长片麻岩	LA-ICPMS	1926 ± 10	变质年龄	Sun <i>et al.</i> , 2017
TW0006/1	石墨-石榴子石-夕线石片麻岩	SHRIMP	2.73 ~ 2.26 Ga 1844 ± 66	岩浆锆石 变质锆石	Wan <i>et al.</i> , 2006
15LS-71	夕线石榴角闪片麻岩	SIMS	1939 ± 9		
15LS-17	斜长角闪岩	LA-ICPMS	1939 ± 8	变质年龄	Sun <i>et al.</i> , 2017
15LS-73			1917 ± 13		
XT01	片麻状花岗岩	SHRIMP	2297 ± 16	侵位年龄	黄道裘等, 2012
LS-7	含榴石英二长岩	LA-ICPMS	2132 ± 17	侵位年龄	Zhou <i>et al.</i> , 2015
			1919 ± 11; 1933 ± 11	变质年龄	
TWJ358/1	含榴片麻状花岗岩	SHRIMP	2139 ± 16 1902 ± 120	侵位年龄 变质年龄	Wan <i>et al.</i> , 2006
片麻岩系(原下太华群)					
Lu003	英云闪长片麻岩	²⁰⁷ Pb- ²⁰⁶ Pb 蒸发法	2841 ± 6	侵位年龄	Kröner <i>et al.</i> , 1988
			2806 ± 7		
LSP13	英云闪长片麻岩	LA-ICPMS	2766 ± 14	侵位年龄	林慈鑫, 2006
LS0417-2	片麻状英云闪长岩	SHRIMP	2829 ± 18	岩浆年龄	Liu <i>et al.</i> , 2009
			2772 ± 22	变质年龄	
LS0417-4			2832 ± 11	岩浆年龄	
			2772; 2638	变质年龄	
TH-13	英云闪长片麻岩	LA-ICPMS	2791 ± 7	侵位年龄	第五春荣等, 2010a
THL05-2			2765 ± 13	侵位年龄	
THL05-21	英云闪长片麻岩	SHRIMP	2723 ± 9	侵位年龄	Huang <i>et al.</i> , 2010
			1917 ± 37	变质年龄	
Sh227 Sh228	英云闪长片麻岩	LA-ICPMS	2845 ± 36	侵位年龄	贾晓亮, 2016
			2894 ± 29		
Lu10	奥长花岗片麻岩	²⁰⁷ Pb- ²⁰⁶ Pb 蒸发法	2807 ± 4	侵位年龄	Sun <i>et al.</i> , 1994
LSP07 LSP08	奥长花岗片麻岩	LA-ICPMS	2761 ± 11	侵位年龄	林慈鑫, 2006
			2757 ± 59		
TH-07	奥长花岗片麻岩	LA-ICPMS	2763 ± 4	侵位年龄	第五春荣等, 2010a
Sh226 Sh219	奥长花岗片麻岩 花岗闪长片麻岩	LA-ICPMS	2872 ± 19	侵位年龄	贾晓亮, 2016
			2902 ± 11		
11ZH-13	TTG 片麻岩	LA-ICPMS	2842 ± 29 1920 ± 26	侵位年龄 变质年龄	Zhou <i>et al.</i> , 2014
Lsp26	斑状闪长质片麻岩	LA-ICPMS	2759 ± 52	侵位年龄	林慈鑫, 2006
PLS-37	二长花岗片麻岩	LA-ICPMS	2758 ± 31	侵位年龄	周艳艳, 2011
11ZH-26 PLS-37	花岗岩	LA-ICPMS	2762 ± 20	侵位年龄	Zhou <i>et al.</i> , 2014
			2679 ± 20	变质年龄	
			2758 ± 21	侵位年龄	
11ZH-65	钾质花岗岩		2567 ± 11	侵位年龄	
LS229	钾质花岗片麻岩	LA-ICPMS	2729 ± 18	侵位年龄	贾晓亮, 2016
LS0417-3	石英斜长角闪片麻岩	SHRIMP	2845 ± 23	岩浆年龄	Liu <i>et al.</i> , 2009
			2776; 2671	变质年龄	
Lsx04 Lsx05	斜长角闪岩	LA-ICPMS	2763 ± 13		林慈鑫, 2006
			2812 ± 27	原岩年龄	
Lsp01	斜长角闪岩片麻岩		2755 ± 8		
LS0417-1	条带状斜长角闪岩	SHRIMP	2838 ± 35	岩浆年龄	Liu <i>et al.</i> , 2009
			2792; 2651	变质年龄	
TH-29	斜长角闪岩	LA-ICPMS	2752 ± 5		第五春荣等, 2010a
TH-05			2794 ± 5	原岩年龄	

续表 1

Continued Table 1

样品号	岩性	测试方法	年龄 (Ma)	年龄解释	数据来源
L15			1945 ± 25	变质年龄	
L31	斜长角闪岩	CAMECA	2730 ± 16	原岩年龄	Lu <i>et al.</i> , 2013
L40			1920 ± 12	变质年龄	
L29			1919 ± 8	变质年龄	
L29			2730 ± 16	原岩年龄	
L39	斜长角闪岩	CAMECA	1865 ± 64	变质年龄	卢俊生等, 2014
L49			2887 ± 26	原岩年龄	
LS13			1950 ± 55	变质年龄	
LS13	斜长角闪岩	LA-ICPMS	2750 ± 23	侵位年龄	贾晓亮, 2016
HN1402	角闪斜长片麻岩	SHRIMP	2867 ± 5	原岩年龄	谢士稳等, 2016
HN1405	石榴角闪斜长片麻岩		2775 ± 6	变质年龄	
LS2192			2768 ± 5	原岩年龄	
LS213	深熔白色条带	LA-ICPMS	2775 ± 56	变质年龄	
LS2192			2770 ± 18	形成年龄	贾晓亮, 2016
LS213			2715 ± 17	形成年龄	

注:本表并未引用所有已发表数据. 未引用:1) 岩石原岩交待不明确的数据; 2) 对锆石成因和年龄解释明显不恰当的数据; 3) 对副变质岩石原岩年龄或变质年龄解释明显不妥的数据; 4) 测试结果质量较差的数据. 对部分锆石明显发生铅丢失而发表文章中却采用加权平均年龄的数据进行了重新计算. 对于有效数字保留不符合要求的锆石年龄数据按规范重新进行了取舍. 表 2 同理

而富钾花岗岩侵位年龄略晚一些, 为 2758 ~ 2729Ma; 斜长角闪岩与 TTG 片麻岩多呈层状, 且与 TTG 片麻岩具有一致片麻理, 或者以透镜体状出露于 TTG 片麻岩中, 锆石 U-Pb 年龄显示这些斜长角闪岩形成于 2838 ~ 2730Ma, 与变质深成侵入岩形成时间近乎于同时或者略晚一些, 据此我们将鲁山太华杂岩下部片麻岩系形成时代限定在中古太古代晚期-新太古代早期. 根据在斜长角闪岩中年龄为 3091Ma 捕捞锆石, 推测在鲁山地区可能存在中元古代早期地壳物质 (第五春荣等, 2010a). 此外, 值得注意的是鲁山太华片麻岩系记录两期变质事件, 早期发生在新太古代, 时间为 2792 ~ 2638Ma (Liu *et al.*, 2009); 晚期发生在古元古代晚期, 变质时间为 1945 ~ 1865Ma. 对于鲁山表壳岩, 最早 Wan *et al.* (2006) 根据石墨夕线石片麻岩中最年轻的岩浆碎屑锆石 U-Pb 年龄 (2.25 ~ 2.31Ga) 和侵入原上太华群雪花沟组中花岗岩, 将原太华群的形成时间限定在 2.26 ~ 2.1Ga. 第五春荣等 (2010a) 根据鲁山太华表壳岩中石英岩中最年轻且 U-Pb 年龄谐和的岩浆锆石 (2229Ma 和 2258Ma) 和其中变质锆石年龄, 将表壳岩的形成时间限定在 2.23 ~ 2.0Ga. 结合侵入表壳岩系中各种花岗质岩石侵位时间, 本文将鲁山太华杂岩表壳岩系形成年龄可较精确地限定在 2.23 ~ 2.13Ga, 而且与下部片麻岩系类似, 这些表壳岩以及侵入其中的花岗质岩石也普遍经历了同时期古元古代变质事件, 变质时间为 1950 ~ 1902Ma (表 1 和图 4b).

综上所述, 可以看出鲁山地区的太华杂岩由中-新太古代和古元古代早期两个不同阶段形成的地质体组成, 其中以变质深成侵入岩和斜长角闪岩为主的片麻岩系形成于中太古代晚期-新太古代早期, 而表壳岩系形成于古元古代晚期.

2.2 小秦岭太华杂岩

小秦岭地区位于豫陕交界, 西起陕西临潼骊山、经老牛山-太华山、潼关, 向东进入河南灵宝、崤山、延伸至熊耳山. 北以太要-故县断裂与渭河地堑相接, 南以小河-巡马道 (铁炉子-黑沟) 断裂与北秦岭造山带相邻, 东西两侧均被新生代裂陷盆地所围限, 形成突起山地. 小秦岭地区虽然属于华北克拉通南缘前寒武纪基底重要组成部分, 具有与华北其他地方基本相同的基底和盖层, 但是在后期卷入秦岭造山带中, 遭受了晚古-新生代强烈的构造变形、岩浆活动和成矿作用, 成为现今秦岭造山带的北缘 (张国伟等, 2001).

早期前人多以地层学为指导, 将豫陕地区的原太华群划分为不同组, 可是陕西省与河南省区调单位所划分的组名不仅有别, 且岩石组合也不尽相同, 因此很难建立对应关系 (蔡乃仲和苏振邦, 1985; 阎竹斌, 1985; 沈福农, 1986; 河南省地质矿产局, 1989; 陕西省地质矿产局, 1989; 丁莲芳, 1996). 有时即使研究同一区域, 对于原太华群也提出不同划分方案, 甚至对各组新老关系还存在很大争议. 比如对于陕西境内小秦岭原太华群, 陕西区调队最早将老牛山-华山-潼关的太华群自下而上分为大月坪组、板石山组、洞沟组、三关庙组、秦仓沟组和桃峪组六个组; 后又分为下、中、上亚群 (陕西省地质矿产局, 1989). 沈福农 (1986) 则将其分为下太华群和上太华群, 其中下太华群包含秦仓口组和三关庙组, 上太华群自下而上分为洞沟组、板石山组和大月坪组. 这主要是由于小秦岭地区的太华杂岩经历了多期岩浆-变质和复杂构造变形作用, 加之中生代-新生代花岗岩侵入, 导致

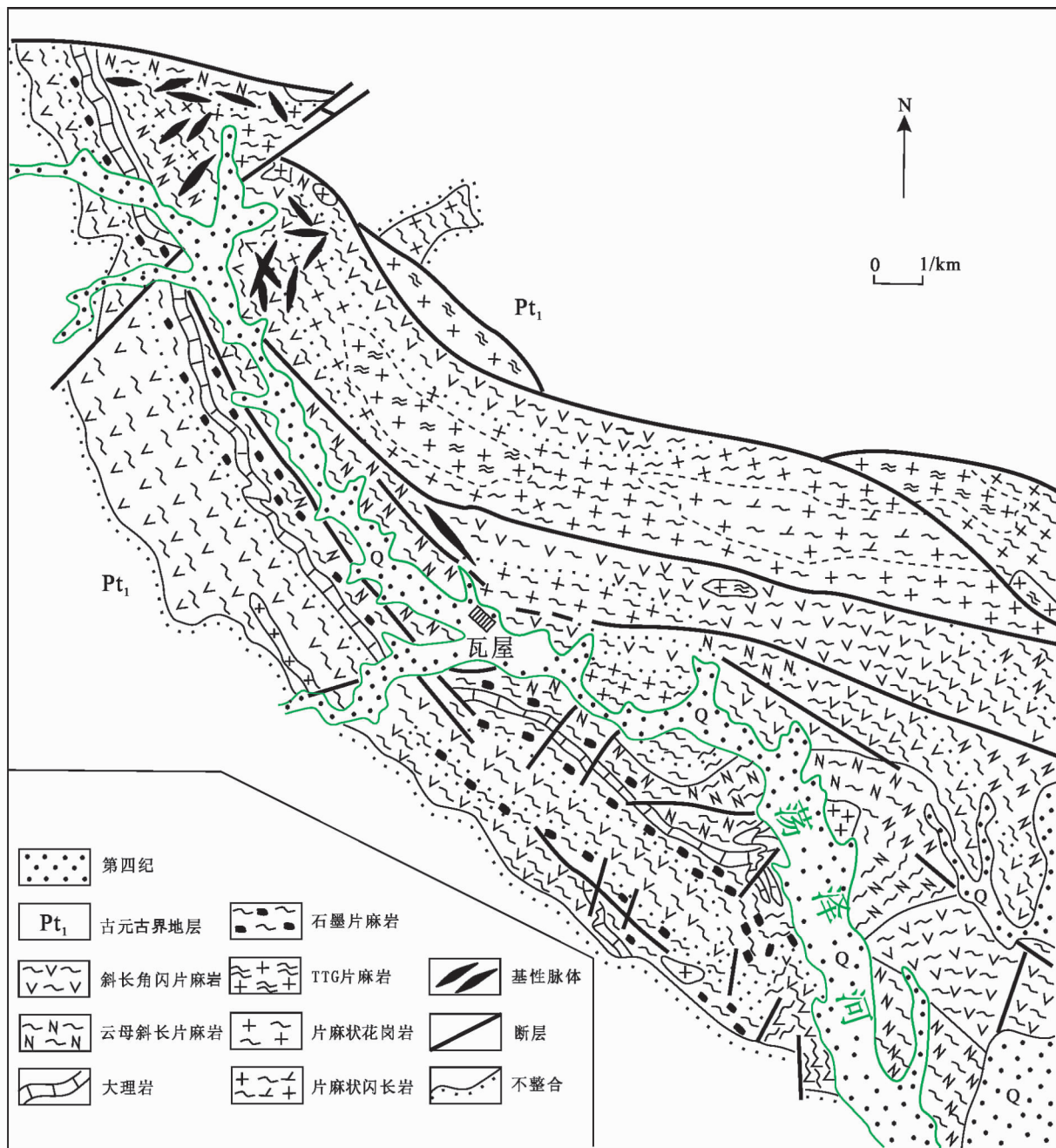


图3 鲁山太华杂岩地质简图(据 Sun *et al.* , 1994 修改)

Fig. 3 Simplified geological map of the Taihua Complex in the Lushan area (modified after Sun *et al.* , 1994)

研究区岩石变质变形更加强烈,使得各类岩石组合、原始构造和接触关系等很难识别。

2.2.1 蓝田-华山-潼关太华杂岩

该研究区太华杂岩呈现多期构造叠加形态,主体为倾向向北,以大月坪为轴部近东西向复式倒转褶皱(沈福农, 1986)。在临潼骊山、太华山和老牛山南坡以及蓝田灞塬等地太华杂岩以北被第四系覆盖,南部多被古元古代沉积年龄为 1.91 ~ 1.80Ga 铁铜沟组(第五春荣等, 2013)或被古元古代高山河群或熊耳群所覆盖,而古元古代熊耳群又不整合覆

盖在铁铜沟组之上。其中铁铜沟组岩性单一,主要由石英岩、含砾石英岩、白云母石英岩组成,原岩为一套成熟度较高的陆源碎屑岩。石英岩中发育对称波痕、斜层理等原生沉积构造,属滨海相沉积。

根据已有的资料以及野外地质观察,我们将老牛山-华山-潼关的太华杂岩大致也分为深成侵入岩系以及表壳岩系两大类。深成侵入岩系主体出露在华县小夫峪和华阴蒲峪,类似前人所划分的秦苍口组(桃峪组)和三关庙组(阎竹斌, 1985),主要由黑云角闪片麻岩、角闪斜长片麻岩和斜长角闪

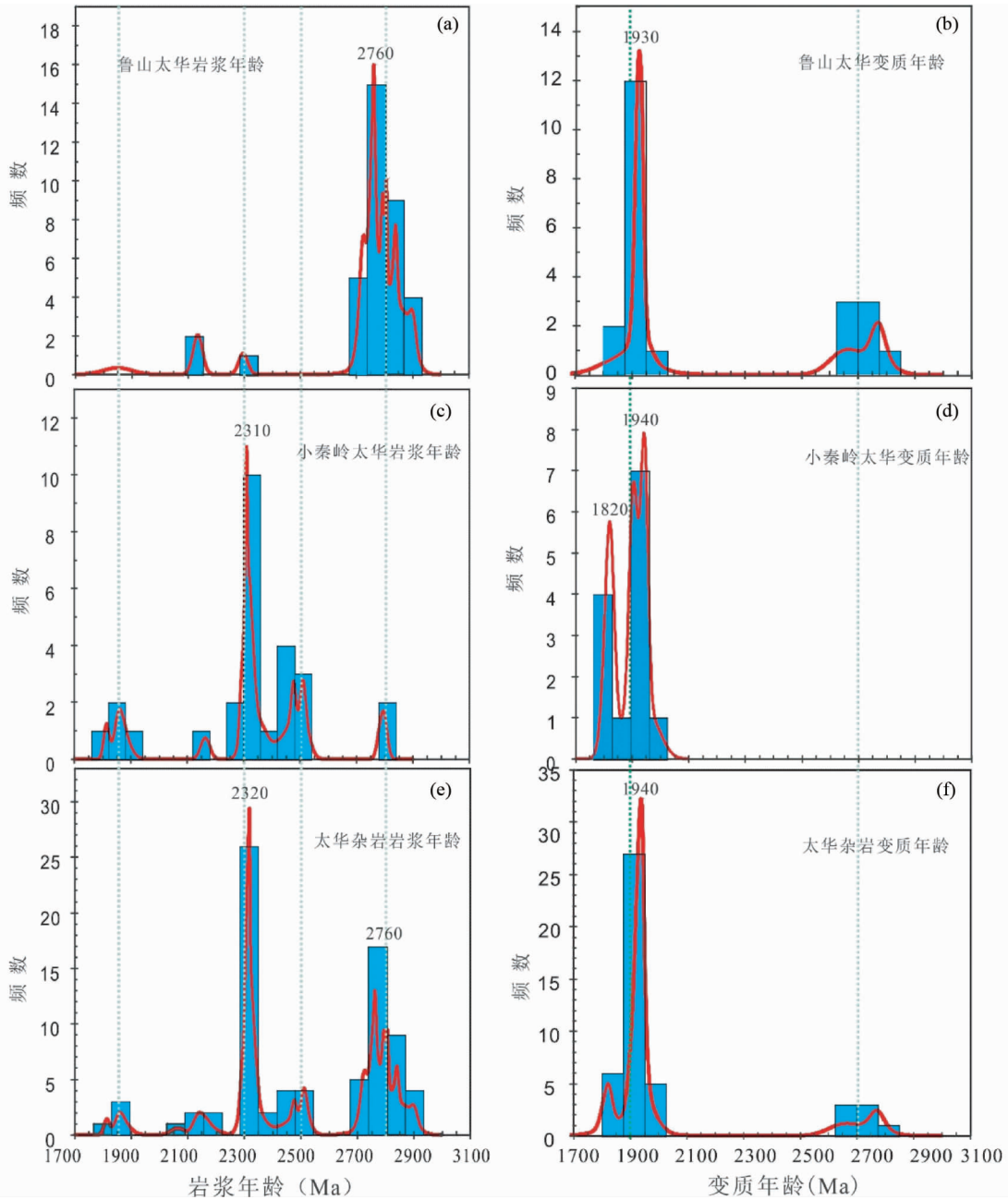


图4 太华杂岩年龄频率分布图(据表1和表2)

Fig. 4 Relative probability plots of the ages of rocks from the Taihua Complex (data from Table 1 and Table 2)

岩组成,且这些岩石普遍经历强烈混合岩化作用;其原岩主要为以 TTG 为主的各种变质花岗岩岩石。而表壳岩系主要出露在潼关以南,大致等同于前人所划分的洞沟组、板石山组和大月坪组(沈福农, 1986),其中洞沟组以黑云斜长(二长)片麻岩夹角闪斜长岩或斜长角闪岩为主,夹较多磁铁矿石英岩,局部富集成小型铁矿;板石山组主要由石英岩、长石石英岩、黑云斜长片麻岩夹斜长角闪片麻岩和大理岩组成,其中石英岩作为此组典型标志层,且局部可以看到波痕等原始沉积层理;而大理岩可形成优质玉石矿床。大月坪组主要由

混合岩化黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩组成,其中夹石英磁铁矿。表壳岩原岩以陆源碎屑岩-碳酸盐岩为主,夹中性火山岩。实际上对于大月坪组的归属问题存在争议,也有研究者认为该组可能是以深成侵入岩占主体(阎竹斌, 1985)。

根据表1中的锆石 U-Pb 年龄显示,与鲁山太华下部片麻岩系形成年龄明显不同的是蓝田-华山-潼关太华杂岩,其主体形成年龄为 ~ 2.31 Ga。现已知出露最古老的岩石年龄为 2801 Ma 的花岗闪长片麻岩和年龄为 2786 Ma 的奥长花岗岩片麻岩。此外,亦有少量新太古代晚期年龄为 2511 ~

2506Ma 的英云闪长片麻岩和奥长花岗片麻岩出露。据此蓝田-华山-潼关太华杂岩以深成侵入岩为片麻岩系的形成时间跨度较大,为中太古代-古元古代早期(2801 ~ 2293Ma)。根据渭南罗敷副变质片麻岩中最年轻岩浆锆石年龄(2128Ma)和变质锆石年龄(1928Ma) (Diwu *et al.*, 2014),我们将此研究区表壳岩形成年龄限定在 2128 ~ 1928Ma,为古元古代晚期。同时我们注意到蓝田-华山-潼关太华杂岩中岩石也普遍经历了古元古代 1977 ~ 1818Ma 变质。

2.2.2 崤山太华杂岩

崤山太华杂岩四周主要被古元古代熊耳群所覆盖,局部被放牛山石英岩所覆盖。放牛山石英岩由石英岩夹绢云石英片岩组成,底部发育厚达 20 余米的底砾岩,为经历低绿片岩相变质的粗陆源碎屑岩;其上被熊耳群大古组砂砾岩或许山组安山岩呈角度不整合覆盖。一些研究者认为放牛山石英岩可以与嵩山罗汉洞组石英岩对比,直接称之为罗汉洞组石英岩(庞振山和梁天佑, 1997; 庞振山等, 2000)。根据区域地质对比、岩石组合、岩石沉积环境等,我们认为放牛山石英岩与陕西蓝田铁铜沟组石英岩可类比,其原岩沉积年龄亦很有可能为 1.91 ~ 1.80Ga(第五春荣等, 2013)。

相对陕西小秦岭蓝田-华山-潼关地区的太华杂岩,崤山太华杂岩岩石单元划分比较容易。崤山太华杂岩以变质深成侵入岩为主,所占比例为该区太华杂岩出露面积的 80% 以上。这些深成侵入岩以奥长花岗片麻岩占主体,其次为富钾花岗片麻岩以及石英闪长片麻岩、英云闪长片麻岩和花岗闪长片麻岩(喻积贤, 1998; 庞振山等, 2000)。根据我们未发表数据显示这些岩石主要形成于 2521 ~ 2500Ma,少量花岗闪长岩和石英闪长岩侵位年龄为 2322 ~ 2312Ma。此外,在崤山地区广泛分布浅变质辉长辉绿岩,呈岩墙、岩脉或小型侵入体产出。在弱变质的区段,在野外露头可以观察到这些变基性侵入岩具有明显的辉长辉绿结构,而在强变质区域则呈斜长角闪岩产出。我们未发表的斜锆石年龄数据显示这些变质基性侵入岩侵位年龄为 2100 ~ 2071Ma。

崤山地区表壳岩分为兰树沟岩组和杨树沟岩组(喻积贤, 1998; 庞振山等, 2000)。兰树沟岩组呈残块产于 TTG 片麻岩中,主要由灰白色绢云石英片岩夹灰绿色绿泥石英片岩及黑云斜长片岩和灰绿色黑云斜长片岩、斜长角闪片岩组成,可见具变余斑状结构、交织结构及变余杏仁状构造,推测其原岩为主要为基性-中性火山岩。杨树沟岩组主要由含黑云浅粒岩夹黑云变粒岩及白云石英片岩和黑云变粒岩、黑云斜长变粒岩夹浅粒岩组成,岩石多呈残存变余砂状结构,具成分-粒序层,反映原岩的沉积韵律和沉积层纹特征,表明其原岩为泥砂质沉积岩(喻积贤, 1998; 庞振山等, 2000)。

2.2.3 熊耳山太华杂岩

熊耳山太华杂岩出露于洛宁南部的上宫、程子以西,张舞-穆册(木柴关)一带,其西北被第四纪沉积物所覆盖,南部和东部被古元古代熊耳群火山岩所覆盖,中部被中生代燕山期花岗岩(五丈山、蒿坪、花山、金山庙等岩体)所侵入。1982

年河南省地调一队在绘制洛宁县南熊耳山地区 1:5 万地质图时将该区原太华群自下而上划分为草沟组、石板沟组、龙潭沟组、龙门店组和段沟组 5 个组,后将龙潭沟组和龙门店组归并至石板沟组(王西午等, 1986)。草沟组主要为黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩,其次为角闪斜长岩和斜长角闪岩,其中可见超镁铁质岩体(团块)。石板沟组在该区分布最广,占本区太华杂岩出露面积的 70% ~ 80% 以上,主要以角闪斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩夹斜长角闪岩,其次为黑云斜长片麻岩和黑云斜长变粒岩等;局部可以见磁铁矿石岩、大理岩、磁铁变粒岩等典型沉积变质岩夹层或者透镜体。段沟组出露面积甚少,主要由含石榴石或者夕线石黑云斜长片麻岩,黑云斜长变粒岩和石榴黑云斜长变粒岩等组成,变余碎屑结构和纹层结构常见。一些研究者认为草沟组和石板沟组呈整合接触,石板沟组与段沟组为不整合接触(王西午等, 1986)。根据上述岩石组合和已有的资料,我们认为草沟组和龙潭沟组是以变质深成侵入岩即 TTG 质岩石占主体,只是龙潭沟组局部夹变质火山岩和碳酸盐岩;而段沟组是以表壳岩为主体,原岩可能是以泥质-碎屑沉积岩为主,局部夹基性火山岩。这些岩石普遍经历了强烈的混合岩化作用,片麻岩多呈条带状,其变质程度可达高角闪岩相(蒋宗胜等, 2011; Chen *et al.*, 2015)。

根据已有可靠年龄显示(表 2),熊耳山地区太华杂岩截止目前未发现年龄为太古宙的岩石,TTG 片麻岩包括相关的斜长角闪岩主体形成于 2336 ~ 2305Ma,仅有 1 个英云闪长片麻岩和 1 个钾长花岗片麻岩报道的侵位年龄稍晚一些,分别为 2188Ma 和 2065Ma(Huang *et al.*, 2012),由于原文中缺少详细野外岩石侵位接触关系描述,我们推测这两个岩石可能为侵位至太华杂岩片麻岩系中晚期的花岗岩。根据表壳岩中变质泥质片麻岩中岩浆锆石和变质锆石年龄,可将熊耳山表壳岩形成年龄限定在 2305 ~ 1970Ma(Diwu *et al.*, 2014)。此外,注意到有意思的现象,虽然该区太华杂岩中的 TTG 片麻岩和斜长角闪岩以及表壳岩中的变泥质片麻岩均记录古元古代晚期(1969 ~ 1937Ma)变质年龄,可是截止目前未见有 1.85Ga 左右变质年龄的报道(表 2)。

3 讨论

3.1 太华杂岩形成和演化

3.1.1 中太古代-古元古代(2.9 ~ 2.5Ga)地壳生长

研究地壳生长和演化的关键之一就是确定地壳形成时间(Hawkesworth *et al.*, 2010, 2013; Kemp and Hawkesworth, 2013)。确定地壳生长时间通常有两种方法:一种方法是利用以亏损地幔为参考源区计算得到的全岩 Nd 同位素或者锆石的 Hf 模式年龄;另一种方法根据锆石结晶年龄、锆石结晶年龄计算得到 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及模式年龄来综合判断(第五春荣等, 2012, 2013)。如果锆石具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且锆石 Hf 模式年龄与结晶年龄接近(<200 ~ 300Ma),那么此锆石结晶年

表2 小秦岭太华杂岩同位素年龄

Table 2 Summary of isotopic ages for the Taihua Complex in the Xiaoqinling area

样品号	岩性	采样地点	测试方法	年龄/Ma	年龄解释	数据来源
01LSTH40	奥长花岗片麻岩	临潼	LA-ICPMS	2316 ± 14	侵位年龄	Diwu <i>et al.</i> , 2014
01LSTH39	眼球状花岗片麻岩			2321 ± 9		
THB05-103	英云闪长片麻岩	霸塬	SHRIMP	2164 ± 16	侵位年龄	Huang <i>et al.</i> , 2013
01TT04	英云闪长片麻岩	霸塬	LA-ICPMS	2313 ± 12	侵位年龄	Diwu <i>et al.</i> , 2014
08LF10	黑云斜长片麻岩(副变质)			罗敷	1928 ± 31	
S3	斜长角闪片麻岩	华山	LA-ICPMS	2293 ± 7	原岩年龄	王国栋等, 2013
S33	斜长角闪片麻岩			1890 ± 19	变质年龄	
S7	泥质麻粒岩	华山	CAMECA	1824 ± 13	变质年龄	Wang <i>et al.</i> , 2017
S18	泥质麻粒岩			1818 ± 22		
Sh7102	花岗闪长片麻岩	少华山	LA-ICPMS	2801 ± 11	侵位年龄	贾晓亮, 2016
Sh7107	奥长花岗片麻岩			1946 ± 12	变质年龄	
				2786 ± 12	侵位年龄	
Sh751	花岗闪长岩			1946 ± 12	变质年龄	
				2523 ± 19	侵位年龄	
Sh755	英云闪长岩			1899 ± 11	变质年龄	
				2506 ± 17	侵位年龄	
Sh7108	奥长花岗岩			2511 ± 9	侵位年龄	
				2316 ± 8	侵位年龄	
Sh16	花岗闪长岩			1977 ± 35	变质年龄	
				2334 ± 10	侵位年龄	
Sh12	花岗片麻岩			1811 ± 16	变质年龄	
				2359 ± 29	侵位年龄	
Sh13	花岗片麻岩			2298 ± 16	原岩年龄	
				1829 ± 17	变质年龄	
Sh29	斜长角闪岩			1814 ± 10	侵位年龄	
				1856 ± 14	侵位年龄	
Sh14	花岗岩			1814 ± 10	侵位年龄	
				1856 ± 14	侵位年龄	
Sh1119	花岗岩	1856 ± 14	侵位年龄			
		1856 ± 14	侵位年龄			
THH05-97	英云闪长片麻岩	草滩	SHRIMP	2477 ± 8	侵位年龄	Huang <i>et al.</i> , 2013
THH08-62	花岗片麻岩	草滩	CAMECA	1912 ± 12	变质年龄	
				2477 ± 28	侵位年龄	
THQ08-76	英云闪长片麻岩	侯家村	CAMECA	1918 ± 17	变质年龄	Huang <i>et al.</i> , 2013
				2311 ± 3	侵位年龄	
THQ08-82	花岗片麻岩	侯家村	CAMECA	2307 ± 5	侵位年龄	
04TY-09	花岗片麻岩	潼关	LA-ICPMS	2428 ± 24	侵位年龄	Diwu <i>et al.</i> , 2014
01TH-10	花岗片麻岩			2362 ± 27		
01TH-17	闪长质片麻岩			2467 ± 19		
xql0909-1	花岗质片麻岩			2346 ± 28		
xql0905-1	花岗岩	洛南南	LA-ICPMS	2328 ± 14	侵位年龄	Yu <i>et al.</i> , 2013
xql0912-2	片麻状伟晶花岗岩	潼关		1866 ± 19		
xql0915-2	花岗质脉	潼关		1881 ± 24		
MC-12	英云闪长片麻岩	宜阳	LA-ICPMS	2336 ± 13	侵位年龄	第五春荣等, 2007
MC-19	英云闪长片麻岩			2316 ± 16		
04MC10	闪长质片麻岩	宜阳	LA-ICPMS	2315 ± 17	侵位年龄	Diwu <i>et al.</i> , 2014
04MC14	斜长角闪片麻岩			2330 ± 19	原岩年龄	
HN804	斜长角闪片麻岩	洛宁	CAMECA	2304 ± 12	原岩年龄	蒋宗胜等, 2011
Yu21	斜长角闪片麻岩		CAMECA	1939 ± 19	变质年龄	
			LA-ICPMS	2321 ± 8	原岩年龄	
Yu19	斜长角闪片麻岩(变泥质片麻岩)		LA-ICPMS	1958 ± 32	变质年龄	
			LA-ICPMS	2336 ± 10	岩浆年龄	
Yu23	斜长角闪片麻岩(变泥质片麻岩)		LA-ICPMS	2336 ± 10	变质年龄	
			LA-ICPMS	1967 ± 32	变质年龄	
Yu23	斜长角闪片麻岩(变泥质片麻岩)	LA-ICPMS	2305 ± 4	岩浆年龄		
		LA-ICPMS	1938 ± 9	变质年龄		

续表 2

Continued Table 2

样品号	岩性	采样地点	测试方法	年龄/Ma	年龄解释	数据来源
C21	含榴斜长角闪岩			2317 ± 3	原岩年龄	
				1940 ± 10	变质年龄	
C24	含榴斜长角闪岩	洛宁	CAMECA	2315 ± 3	原岩年龄	Chen <i>et al.</i> , 2015
				2319 ± 2	原岩年龄	
C20	含榴斜长角闪岩			1944 ± 5	变质年龄	
C23	变泥质岩			1937 ± 11	变质年龄	
C15	含榴斜长角闪片麻岩	洛宁	CAMECA	2327 ± 25	原岩年龄	陈泓旭等, 2016
				1951 ± 14	变质年龄	
C31	含榴斜长角闪片麻岩			1942 ± 10	变质年龄	
C14	含榴长英质片麻岩			1937 ± 11	变质年龄	
THX08-57	花岗闪长片麻岩	熊耳山	SHRIMP	2318 ± 8	侵位年龄	Huang <i>et al.</i> , 2012
THX08-54	闪长质片麻岩			2305 ± 23		
THX05-45	钾长花岗片麻岩			2188 ± 26		
THX05-41	英云闪长片麻岩			2065 ± 23		

龄就近似等于新生地壳的形成时间。但是此种情况下,不适用模式年龄来获得新生地壳形成时间,因为所谓的模式年龄是基于大陆地壳从地幔中派生的基本假设和模型假设,计算获得的一个地壳样品从地幔源区分离至今的时间,可是这个年龄并不能像 U-Pb 年龄那样提供精确的时间信息,通常有 200 ~ 300Ma 的不确定性 (Hawkesworth *et al.*, 2010, 2013; 第五春荣等, 2012; Kemp and Hawkesworth, 2013)。如果锆石具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,表明它结晶自古老地壳或者源区以古老地壳物质为主体,锆石 Hf 模式年龄可以定性地判断地壳生长时间。

根据已有的研究显示:华北克拉通地壳生长随着地质演化历史变化呈阶段性特点,尤其在中太古代中期-新太古代末期 (3.0 ~ 2.5Ga) 地壳生长速率较快,至太古宙末期 (~2.5Ga) 大约 60% 现今大陆地壳形成。此后,陆壳呈较缓慢速率增长,至新元古代晚期 (600Ma) 现今的华北克拉通大陆地壳已基本形成,这表明华北克拉通大陆地壳主要形成于太古宙和元古宙,而显生宙的增生量几乎可以忽略不计 (第五春荣等, 2012)。

就目前所知,中太古宙的岩石主要出露在鲁山太华杂岩的片麻岩系中,为英云闪长-花岗闪长片麻岩,年龄为 2902 ~ 2894Ma (贾晓亮, 2016)。我们也在鲁山太华片麻岩系发现年龄为 2914 ± 10Ma (MSWD = 1.5) 含榴黑云角闪斜长片麻岩,其中的锆石均具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (1.1 ~ 5.6), 其对应两阶段模式年龄为 3001 ~ 3219Ma (未发表数据), 表明此岩石具有新生地壳性质。在鲁山地区发现片麻岩系中的 TTG 岩石和与其伴生的斜长角闪岩都记录了 2792 ~ 2772Ma 和 2671 ~ 2638Ma 两期变质事件 (Liu *et al.*, 2009), 前一期的变质年龄可解释为晚期形成岩石对已有岩石破坏和改造,实际上是反映了随着地质历史演化陆核在逐步增长扩大;而对于后一期变质事件仍需要再思索其实际的地质意义。

如图 4e 所示,在太古宙时期,太华杂岩最突出的岩浆年龄集中在 2900 ~ 2700Ma,其峰值年龄为 2760Ma。根据全岩 Nd 同位素和岩石中 Hf 同位素显示 (图 5d 和图 6), 2.90 ~ 2.70Ga 岩石绝大多数具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$, 且具有与岩石形成年龄或者锆石结晶年龄接近的模式年龄 (<200 ~ 300Ma), 揭示 2.91 ~ 2.50Ga 为华北南部太古宙陆块最重要的形成时期。研究表明这一时期的岩石组合以 TTG 为主,此外还有少量斜长角闪岩、闪长质岩石以及花岗岩出露。TTG 片麻多具有高 Al_2O_3 、 $\text{Mg}^\#$, 高的 Cr、Ni 含量以及高 Sr、(La/Yb)_N 和 Sr/Y 比值,指示其具有典型的埃达克岩的地球化学特征,因此一些研究者认为太华杂岩中的 TTG 片麻岩多形成于俯冲的岛弧环境,为洋壳在低角度俯冲环境的部分熔融的产物,形成熔体曾穿过上地幔并受到地幔组分的影响,与现代俯冲带板片熔体穿过地幔楔上升形成埃达克岩过程类似 (林慈釜, 2006; Huang *et al.*, 2010; Zhou *et al.*, 2014)。

~2.50Ga 岩石主要出露在小秦岭地区华山和崞山太华杂岩中,主要岩石类型为 TTG 片麻岩和钾质花岗岩;一些侵入 TTG 片麻岩中因深熔作用形成白色的脉体形成年龄也为 ~2.52Ga (2521Ma) (贾晓亮, 2016; 未发表资料)。此外,在鲁山太华杂岩 TTG 片麻岩中也有少量钾质花岗岩侵入,其侵位年龄为 ~2570Ma。这些 ~2.5Ga 岩石中锆石基本都具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且一些锆石具有都接近于亏损地幔演化线的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的 Hf 同位素特征,表明华北南缘在新太古代晚期 (~2.5Ga) 也经历一次重要的陆壳生长 (图 5b)。

总之,我们认为太华杂岩在太古宙经历了两期明显的地壳生长时间,一期发生在 2.85 ~ 2.70Ga,以鲁山太华片麻岩系中深成侵入岩和斜长角闪岩为代表;另一期发生在 ~2.50Ga,以小秦岭华山和崞山地区太华杂岩中各类花岗质岩石为代表 (Diwu *et al.*, 2014, 2016)。

3.1.2 古元古代早期 (2.31Ga) 岩浆活动

根据对于全球花岗岩和碎屑锆石 U-Pb 年龄统计结果显

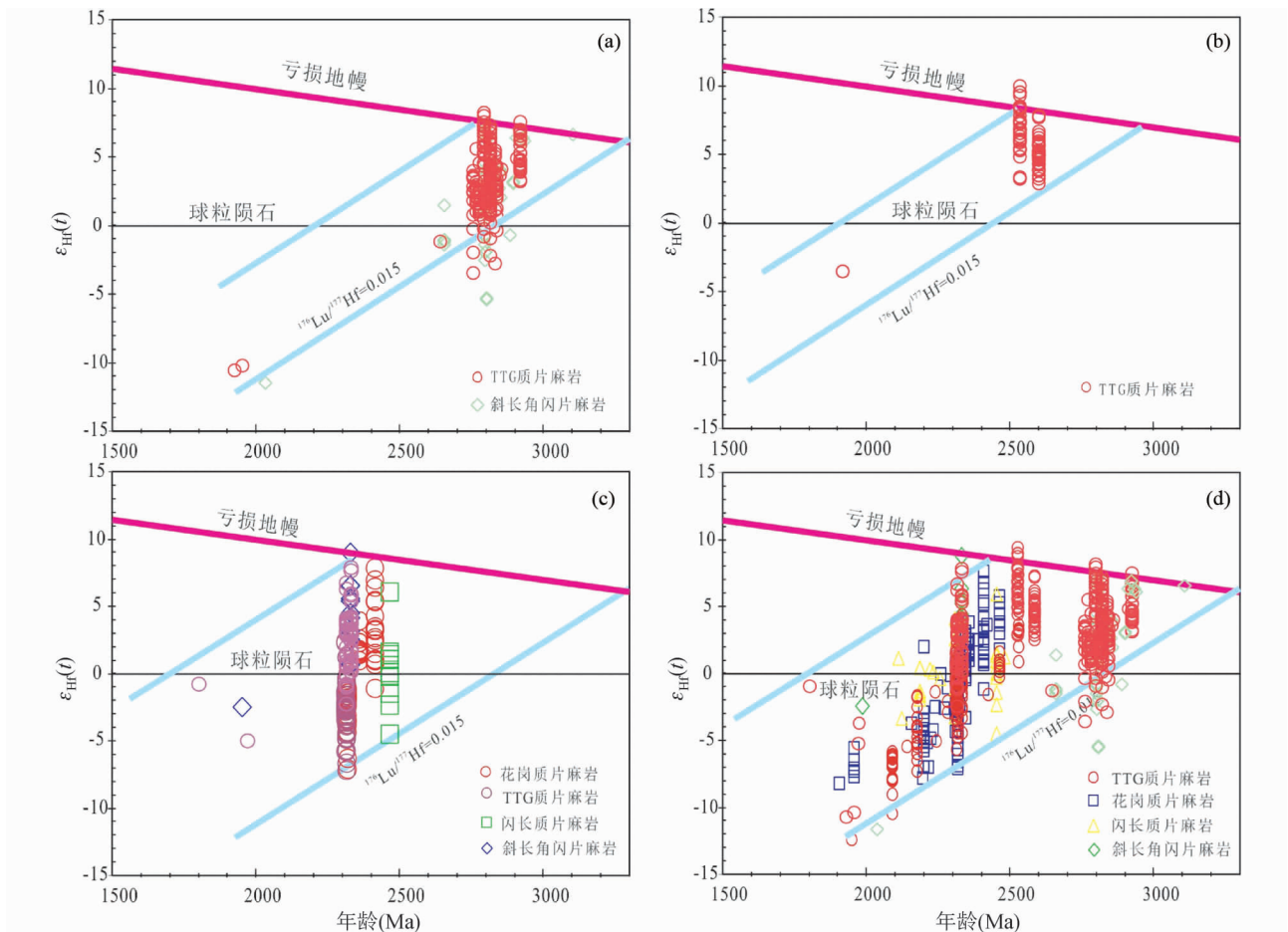


图5 太华杂岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对年龄图

数据来源于 Liu *et al.*, 2009; 第五春荣等, 2010a; Diwu *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2012, 2013; Yu *et al.*, 2013; 贾晓亮, 2016

Fig. 5 Diagrams of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus ages of all zircons from the Taihua Complex

Data from Liu *et al.*, 2009; Diwu *et al.*, 2010a, 2014; Huang *et al.*, 2012, 2013; Yu *et al.*, 2013; Jia, 2016

示, 2.45 ~ 2.20Ga 是全球锆石年龄频率分布非常明显的缺失区 (Condie *et al.*, 2009a, b; Condie and Aster, 2010), 据此 Condie *et al.* (2009b) 将其称为: “地壳年龄缺失期”, 也就是所谓的全球陆壳演化的“沉寂期”。在这一时期, 缺失岛弧型绿岩带和 TTG, 也未有条带状铁建造形成, 没有造山运动, 视极移路径 (polar wander paths) 也保持静止不动。O'Neill *et al.* (2007) 和 Silver and Behn (2008) 认为这是由于全球性的俯冲系统完全停滞所致, 因为火山作用与板块构造有关, 俯冲的停滞必然造成火山作用和地壳生长的暂停。所以 Condie *et al.* (2009b) 认为全球性较大岩浆活动的骤减开始于 2.45Ga, 大约持续了 200 ~ 250Myr。

实际上, 随着近年来研究的工作深入, 在巴西的 Minas 造山带 (Teixeira *et al.*, 2015)、加拿大的 Arrowsmith 造山带 (Partin *et al.*, 2014)、印度德干克拉通的 Karelian 省等地区均 2.45 ~ 2.20Ga 岩石的报道 (French and Heaman, 2010)。此外, 在我国塔里木地块 (Lu *et al.*, 2008)、全吉地块 (Gong *et al.*, 2012)、阿拉善地块, 以及华北克拉通中部造山带 (孙

大中和胡维兴, 1993; 耿元生等, 2006; Kröner *et al.*, 2005a, b; Zhao *et al.*, 2008) 也都陆续发现这一时期岩石。尤其发现在华北克拉通南缘小秦岭太华杂岩在所谓的全球陆壳“沉寂期”的岩浆活动异常发育 (第五春荣等, 2007; Diwu *et al.*, 2014), 从而对所谓全球地壳演化“沉寂期”的观点提出修正。

由图 4c 可知, 小秦岭地区太华杂岩岩浆年龄集中在 2360 ~ 2240Ma, 峰值年龄为 2310Ma, 主要出露的岩石类型为 TTG 片麻岩、闪长质片麻岩、斜长角闪岩以及花岗岩。锆石 Hf 同位素以及全岩 Nd 同位素显示这些 ~ 2.31Ga 的岩石具有变化颇大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (图 5c 和图 6), 表明 2360 ~ 2240Ma 岩浆活动既有古老陆壳物质的再循环, 同时也有一定量的新生幔源地壳物质的添加。根据对 ~ 2.31Ga 岩石全岩两阶段亏损地幔模式年龄和其中锆石地壳模式年龄统计, 其峰值年龄为分别为 ~ 2920Ma 和 ~ 2800Ma, 表明在小秦岭太华杂岩出露的这些 ~ 2.31Ga 的岩石部分是中太古代-新太古代早期地壳物质再循环产物。

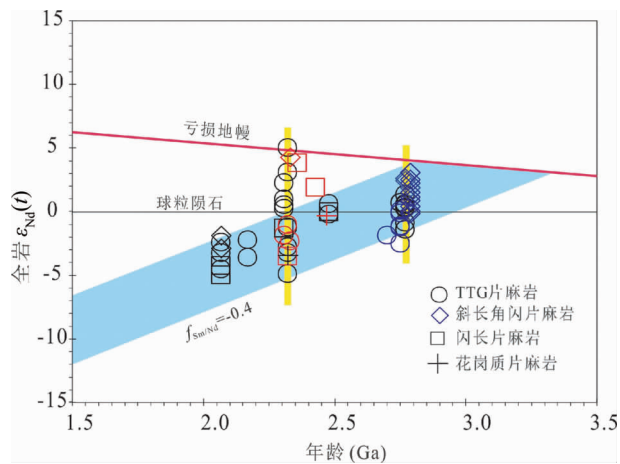


图6 太华杂岩全岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 对年龄图(据 Diwu *et al.*, 2014 修改)

Fig. 6 Diagrams of whole rock $\varepsilon_{Nd}(t)$ versus ages of all zircons from the Taihua Complex(revised after Diwu *et al.*, 2014)

地球化学特征显示小秦岭太华杂岩中 $\sim 2.31\text{Ga}$ 的 TTG 片麻岩具有中等-明显的轻重稀土分异,且具有高 Sr、低 Y 和 Yb 以及 Ta-Nb-Ti 负异常,指示这些岩石原岩可能是由加厚的下地壳部分熔融而成,其源区有石榴子石、角闪石和金红石的残留,并经历了石榴子石和角闪石分异以及斜长石的分离结晶(第五春荣等, 2007; Huang *et al.*, 2012)。此外,从中-新太古代至古元古代,太华杂岩中 TTG 岩石呈规律性变化,中-新太古代 TTG 岩石普遍具有较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 Sr/Y 比值,而古元古代 $\sim 2.31\text{Ga}$ TTG 岩石的这些比值则明显降低,且更多呈现显生宙埃达克岩地球化特征,可能反映:(1)原岩岩浆源区石榴子含量再减少;(2)基性下地壳部分熔融的程度增加;(3)已具有现代板块构造体制下的俯冲、汇聚等构造环境(Diwu *et al.*, 2014)。

对于全球各个地区 $2.45 \sim 2.20\text{Ga}$ 岩浆事件构造背景有两种截然不同的解释:一些研究者认为与俯冲-碰撞背景下的弧岩浆作用相关;另一些研究者认为与稳定大陆形成后的裂解或造山后伸展环境相关。比如有研究者提出 $2.45 \sim 2.20\text{Ga}$ 的岩浆事件并非孤立的地质时间,可能代表一次全球性的构造事件,与全球最早的 $2.7 \sim 2.5\text{Ga}$ Kenorland 超大陆汇聚后裂解有关(Bleeker, 2003)。对于印度德干克拉通 $\sim 2.30\text{Ga}$ 的大火成岩省镁铁质岩浆的成因就解释为与地幔柱相关,使得一个或多个太古宙大陆裂解(French and Heaman, 2010)。加拿大的 Arrowsmith 造山带中 $\sim 2.3\text{Ga}$ 地质事件被解释为与大陆地壳加厚相关,形成于同碰撞或后碰撞的造山环境(Hartlaub *et al.*, 2007)。在华北克拉通中部带中部也有零星 $\sim 2.3\text{Ga}$ 岩浆活动,对这些花岗质岩浆的成因解释也存在很大分歧。比如耿元生等(2006)根据吕梁地区古元古代早期岩浆活动特征,认为年龄为 2364Ma 的盖家

庄花岗片麻岩为华北克拉通早期拉张阶段花岗质岩浆活动的产物。而 Zhao *et al.* (2008) 将盖家庄片麻岩解释为华北克拉通西部陆块向东部陆块俯冲过程中形成的古元古代岛弧岩浆活动产物。

考虑到小秦岭地区 $\sim 2.31\text{Ga}$ 的 TTG 岩石形成于石榴子和角闪石或石榴子石、角闪石和金红石作为残留相的岩浆源区,表明华北克拉通南部在 $\sim 2.31\text{Ga}$ 具有较厚的大陆地壳;此外这些岩石具有较古老的全岩 Nd 同位素两阶段亏损地幔模式年龄(峰值年龄为 $\sim 2920\text{Ma}$)和锆石 Hf 同位素地壳模式年龄($\sim 2800\text{Ma}$)也佐证此推测(图 5c 和图 6)。而这种地壳加厚可归因于造山作用、持续岩浆底侵、大洋内部板块堆叠或者大洋高原汇聚等。由于小秦岭这些 $\sim 2.31\text{Ga}$ 岩石主体为中太古代-新太古代早期地壳物质再循环产物,且在中-下地壳深度有大约 $500 \sim 600\text{Myr}$ 滞留时间,因此不可能形成于大洋环境,更可能是与大陆板块俯冲-汇聚所导致地壳加厚相关,因此第五春荣等(2007)和 Huang *et al.* (2012)认为小秦岭地区尤其是熊耳山地区 $\sim 2.31\text{Ga}$ 的 TTG 质岩石形成于古元古代俯冲-汇聚环境。Huang *et al.* (2012)认为可能是华北克拉通西部地块和东部地块汇聚造山作用结果;我们认为存在另外一种解释,可能是与华北克拉通南部太古宙陆块和其他陆块汇聚-碰撞相关。

3.1.3 古元古代晚期变质事件

古元古代晚期华北克拉通最终拼合形成统一结晶基底。可是,各家对于华北拼合方案存在很大差异,其中以赵国春和翟明国的划分方案最具代表性和影响力。Zhao *et al.* (2001, 2005)将华北克拉通基底划分为东部陆块、阴山陆块和鄂尔多斯地块 3 个太古宙-早元古代陆块,以及孔兹岩带、中部造山带和胶-辽-吉 3 个古元古代活动带(造山带)。1.95Ga 的麻粒岩相变质事件是阴山陆块与鄂尔多斯陆块碰撞拼合形成西部陆块的年龄纪录,而 1.85Ga 的变质作用事件是华北克拉通西部陆块和东部陆块沿华北中部造山带最终碰撞形成统一基底的结果。翟明国(2011)将华北克拉通划分为胶辽、迁怀、鄂尔多斯、集宁、许昌、徐淮、阿拉善 6 个微陆块。认为华北克拉通经历了两期克拉通化事件:提出第一期克拉通化微陆块拼合发生在新太古代末期($\sim 2.5\text{Ga}$)已经形成现今规模的华北古陆,以花岗质岩石侵入、岩墙群和裂谷型火山-沉积盖层为标准;第二期克拉通化发生在 $1.95 \sim 1.82\text{Ga}$ 期间,以 3 个类似于现代陆-陆碰撞型的活动带,经历一系列裂谷-俯冲-增生-碰撞事件最终完成了华北陆块的稳定化。上述对于华北克拉通构造单元以及构造演化划分主要根据岩石学、变质作用轨迹以及同位素年代学等资料,尤其是变质作用 $P-T(t)$ 轨迹与特定的大地构造环境之间的对应关系(Zhao *et al.*, 2001, 2005; 赵国春, 2009)。

在华北南缘太华杂岩中,最早孙勇(1983)报道在河南鲁山存在基性麻粒岩以及变质达麻粒岩相的泥质变质岩,估算得到变质温压条件为 $680 \sim 720^\circ\text{C}/800 \sim 1000\text{kbar}$ 。Lu *et al.* (2013)利用传统温度和压力计算表明,鲁山片麻岩系和表壳

岩中斜长角闪岩类三个阶段的矿物组合形成的温度压力条件分别为: 650 ~ 730°C/4.9 ~ 8.1 kbar; 720 ~ 810°C/8.2 ~ 11.7 kbar 和 730 ~ 760°C/3.5 ~ 7.7 kbar, 变质峰期程度达角闪岩相-高角闪岩相和麻粒岩相过渡区, 且都记录了包含近等温降压退变质片段 (ITD) 的西阿尔卑斯型顺时针型变质作用 $P-T-t$ 轨迹; 并认为鲁山太华杂岩记录了古元古代晚期 1.95 ~ 1.75 Ga 变质年龄 (Lu *et al.*, 2013)。

Wang *et al.* (2014a) 利用传统温度计与压力计计算获得小秦岭华山地区太华杂岩中斜长角闪片麻岩进变质、峰期变质和退变质阶段的温压条件分别为: 660 ~ 760°C/5.7 ~ 6.0 kbar, 700 ~ 820°C/6.6 ~ 7.7 kbar 和 720 ~ 760°C/4.5 ~ 6.7 kbar, 且记录了含近等温降压过程 (ITD) 的顺时针 $P-T$ 轨迹, 变质峰期程度达高角闪岩相-麻粒岩相。锆石 U-Pb 年龄测试显示这些斜长角闪片麻岩原岩年龄为 ~2.31 Ga, 变质锆石记录变质作用的时间发生在 1.87 ~ 1.85 Ga (Wang *et al.*, 2014a)。2 个斜长角闪片麻岩样品中变质角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄记录 ~1.80 Ga 的构造-热事件 (王国栋等, 2013)。此外, 利用传统温度计和压力计与相平衡剖面图计算获得研究区泥质麻粒岩 3 期变质温压条件分别为 520 ~ 530°C/4 ~ 5 kbar, 730 ~ 810°C/6.8 ~ 8.6 kbar 和 570 ~ 740°C/4.1 ~ 6.4 kbar/, 同样记录了含近等温降压过程 (ITD) 的顺时针 $P-T$ 轨迹, 变质峰期属于高角闪岩相-麻粒岩相; 并利用 SIMS 方法获得变质锆石 U-Pb 年龄为 1.85 ~ 1.82 Ga (Wang *et al.*, 2014a)。

蒋宗胜等 (2011) 利用传统温度计与压力计计算获得小秦岭熊耳山地区太华杂岩中斜长角闪片麻岩进变质、峰期变质和退变质阶段的温压条件分别为: 600 ~ 680°C/7.0 ~ 7.6 kbar, 680 ~ 790°C/9.5 ~ 10.7 kbar 和 580 ~ 720°C/6.5 ~ 7.6 kbar; 岩石同样记录了含近等温降压过程 (ITD) 的顺时

针 $P-T$ 轨迹, 变质峰期属于高角闪岩相-高角闪岩相与麻粒岩相过渡。由于泥质片麻岩中缺少后期退变质的反应结构, 只保留了早期进变质和峰期变质两个阶段的 $P-T$ 条件, 估算结果分别为: 620 ~ 710°C/4.9 ~ 5.6 kbar 和 710 ~ 760°C/7.3 ~ 8.3 kbar。Chen *et al.* (2015) 利用传统矿物温度和压力计获得类似结果, 认为熊耳山地区太华杂岩经历了近等温降压过程 (ITD) 的顺时针 $P-T$ 轨迹, 变质 $P-T$ 轨迹从 630 ~ 790°C/5.3 ~ 8.9 kbar 到 720 ~ 820°C/8.9 ~ 10.7 kbar 再到 690 ~ 740°C/7.1 ~ 7.7 kbar, 大多数岩石主体变质峰期达高角闪岩相, 局部达麻粒岩相。SIMS 锆石 U-Pb 测试显示斜长角闪岩原岩年龄为 ~2.31 Ga, 经历了 1.97 ~ 1.94 Ga 变质作用年龄 (蒋宗胜等, 2011; Chen *et al.*, 2015)。

鉴于不同大地构造环境下地质体的变质作用演化对应相应的 $P-T-t$ 轨迹特征的认识: 比如包含近等温降压 (ITD) 顺时针的 $P-T$ 变质轨迹对应于陆-陆碰撞造山带或者俯冲环境; 而包含近等温降压片段 (IBC) 的逆时针的 $P-T$ 轨迹一般与大量地幔岩浆侵位和板底垫托有关, 对应于岛弧、大陆裂谷、地幔柱等构造环境 (赵国春, 2009 及所引参考文献)。据此, 和华北克拉通的其他典型杂岩一样, 可采用板块构造的俯冲-碰撞模式来解释华北克拉通南缘太华变质杂岩所记录的包含近等温降压退变质片段顺时的针变质作用 $P-T$ 轨迹 (图 7), 因此一些研究者也将此解释为东部陆块与西部陆块碰撞拼合的结果 (蒋宗胜等, 2011; Lu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014a; Chen *et al.*, 2015)。但是, 我们认为也可能有另一种解释, 此变质作用 $P-T$ 轨迹可能与华北克拉通南部太古宙陆块与其他陆块俯冲-碰撞有关。且此过程和华北克拉通中部恒山-五台-阜平变质杂岩类似 (Qian *et al.*, 2017), 经历了一个漫长的变质演化过程, 时限跨度至少达 150 Myr。

虽然近年来在太华杂岩变质峰期温度压力估算以及变

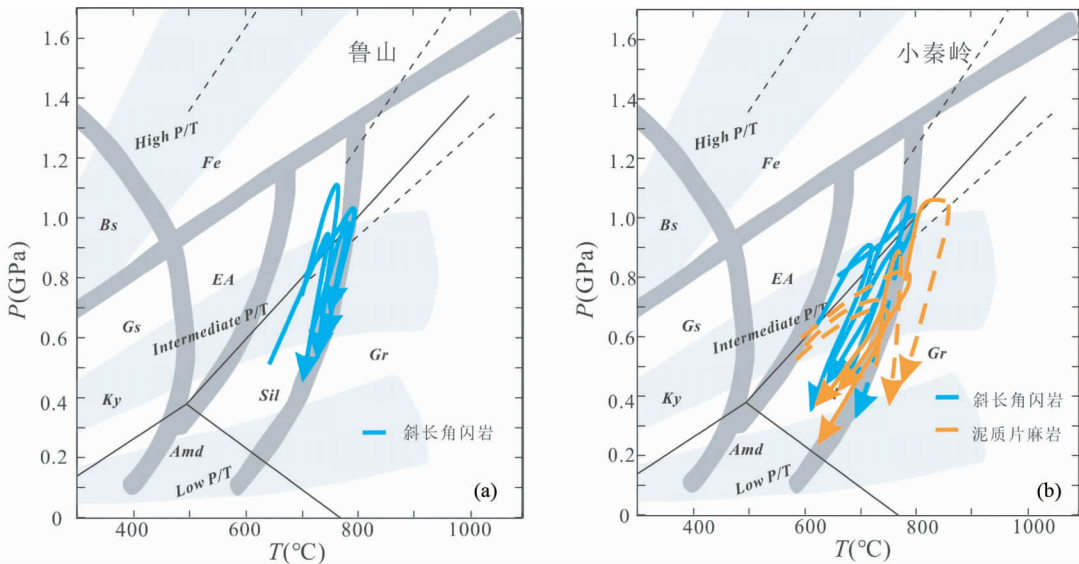


图 7 太华杂岩区变质作用 $P-T$ 轨迹 (引自蒋宗胜等, 2011; Lu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014a; Chen *et al.*, 2015)

Fig. 7 The $P-T$ paths of the Taihua Complex (after Jiang *et al.*, 2011; Lu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014a; Chen *et al.*, 2015)

质 $P-T-t$ 轨迹限定等变质作用方面取得很大进展,但是仍然存在一些问题需要再研究和讨论。比如近年来对于鲁山地区太华杂岩计算获得变质岩石峰期变质普遍达高角闪岩相或高角闪岩相与麻粒岩相过渡区域,未达到麻粒岩相变质条件(图7),这可能是由于岩石发生强烈退变和风化,与未获得变质达麻粒岩相样品有关。因为早期的研究者,诸如孙勇(1982a, 1983)、沈其韩(1992)和卢良兆等(1996)通过变质作用研究均认为鲁山太华杂岩变质作用程度最高可达麻粒岩相,甚至可能存在高压麻粒岩(王仁民, 2009)。此外,对于太华杂岩中变质锆石年龄的解释建议尽量配套锆石内部包裹体和锆石微量元素地球化学特征等,这样可以更好地进一步约束和解释所获得的年龄对应于变质岩石所经历的具体变质阶段,比如哪些年龄对于岩石峰期变质年龄,反映陆-陆碰撞地壳加厚造山过程? 哪些年龄对应岩石后期退变年龄,与造山作用后续发生缓慢的抬升和冷却过程相关?

3.2 南部太古宙地块提出及演化

华北克拉通南部基底岩石主要由山西省境内的涑水杂岩、河南省境内的登封杂岩和太华杂岩以及陕西省境内的太华杂岩共同组成。伍家善等(1998)将其部分划归为晋冀陆块,部分划归豫皖陆块。Zhao *et al.* (2001, 2005)将华北南部基底归化为中部碰撞带的南部。Zhai *et al.* (2000, 2005)将其划归为许昌地块。

最近,Wan *et al.* (2015)根据 $\geq 2.6\text{Ga}$ 岩石空间分布以及对早期构造-热事件系统解析,将华北克拉通划分为3个古陆块($>2.6\text{Ga}$),即东部古陆块、南部古陆核和中部古陆块。南部基底岩石归属南部古陆核。Diwu *et al.* (2016)也提出华北克拉通南部曾经为一个统一基底,称之为“南部太古宙地块”,并认为此古老地块形成时间为新太古代末期($\sim 2.5\text{Ga}$)。南部太古宙地块西起甘肃陇山地区,经骊山、华山、崤山、熊耳山,东至安徽的霍邱和蚌埠地区,呈北西-南东向断续展布可达上千千米。需要注意的是:不管是“南部古陆核”,还是“南部太古宙陆块”都明显跨越赵国春等(Zhao *et al.*, 2001, 2005)提出的“中部造山带”,亦明显超越了翟明国等(翟明国和卞爱国, 2000; Zhai *et al.*, 2005)所划分的“许昌地块”。

按照传统经典的地质观点:北秦岭造山带为早古生代华北克拉通南部的活动大陆边缘(张国伟等, 2001),因此在北秦岭构造带西段甘肃张家庄地区奥陶纪火山碎屑岩中发现的年龄为4079Ma和4007Ma冥古宙捕获锆石应来自于华北克拉通南部基底(第五春荣等, 2010b; Diwu *et al.*, 2013)。此外,研究发现这些冥古宙-始太古代锆石具有较负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,且模式年龄显示其源区年龄可至地球形成的最初期($\sim 4.45\text{Ga}$),表明在华北克拉通南部太古宙陆块的演化历史可追溯至地球形成最初期(Diwu *et al.*, 2013)。此外,在华北克拉通东南缘信阳地区的中生代火山岩内的长英质麻粒岩捕虏体中获得年龄为3659Ma的捕获锆石,Hf同

位素亏损地幔模式年龄可达4.0~3.9Ga,也佐证在华北克拉通南部陆块可能存在冥古宙和始太古代的地壳物质(Zheng *et al.*, 2004)。

中太古代-新太古代(2.91~2.50Ga)为华北克拉通南部太古宙地块最主要的形成时期(图5d),中条山的涑水杂岩、登封地区的登封杂岩和安沟群、鲁山地区太华杂岩片麻岩系以及小秦岭地区华山和崤山地区部分深成侵入岩都形成于这一时间段(Diwu *et al.*, 2016及所引参考文献)。这一时期花岗岩呈现规律性变化:中太古代晚期至新太古代早期(2.9~2.7Ga)TTG岩石主要以英云闪长岩占主导;而至新太古代末期(2.6~2.5Ga)花岗闪长岩大规模出现,同时伴有壳熔富钾壳源花岗岩,如二长花岗岩和正长花岗岩也广泛分布,反映至新太古代末期陆壳已有相当厚度,其成熟度也日益增加(万渝生等, 2017)。此外,南部 $\sim 2.5\text{Ga}$ 变质事件识别以及以及深熔作用的发生都标志着南部太古宙陆块于太古宙末期已经基本形成。大规模陆壳形成使得类似现今板块构造体制的在华北克拉通可能已经启动(Zhao, 2007; 万渝生等, 2017)。

和全球其他典型克拉通一样,华北克拉通除南部地块外,其他地方也经历了2.45~2.20Ga岩浆-构造演化的静寂期(翟明国, 2011)。如图5c和图6所示,华北克拉通南缘尤其是小秦岭地区2.45~2.20Ga(峰期 $\sim 2.31\text{Ga}$)岩石以及同时期相伴生的岩石具有从较正至较负的变化颇大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明2360~2240Ma的岩浆活动既有古老陆壳物质的再循环,同时也有一定量的新生幔源地壳物质的添加,而具有此类同位素地球化学特征的岩石往往形成于安第斯大陆边缘弧环境或者岛弧环境,如前所述,我们推测可能是与华北克拉通南部太古宙陆块和其他陆块汇聚-碰撞相关。

孙勇(1982a, 1985)最早提出鲁山太华杂岩的表壳岩系(原上太华群)原岩以碳酸盐岩、碎屑岩、半粘土岩为主的沉积岩为主,夹有基性-中酸性火山岩,具有典型孔兹岩建造特征;推测其形成于较稳定陆缘浅海区陆壳内拗陷或裂陷带中(孙勇, 1982a; 卢良兆等, 1996)。根据之前所述,现今我们可以将鲁山太华杂岩表壳岩系形成年龄可较精确地限定在2.23~2.13Ga。Diwu *et al.* (2014)根据对小秦岭地区和鲁山太华杂岩上部岩石组合对比、年代学以及构造地质学等综合分析,提出华北克拉通南部在古元古代(2300~1970Ga)曾为一个呈东西向展布的孔兹岩带。且太华表壳岩系可与其北部中条地区绛县群、中条群、登封地区的嵩山群对比(孙大中和胡维兴, 1993; 第五春荣等, 2008; 万渝生等, 2009; 刘玄等, 2015)。

至古元古代晚期(1.97~1.80Ga),如表1和表2所示,无论是鲁山地区,还是小秦岭地区的太华杂岩中的深成侵入岩,还是其表壳岩,都发生了强烈的变质和变形,其变质作用为高角闪岩相,局部为麻粒岩相,并伴随壳熔花岗岩形成和强烈的混合岩化。此外,这些基底杂岩均记录了包含近等温

降压退变质片段的顺时针变质 $P-T$ 轨迹,且此过程和华北克拉通中部恒山-五台-阜平变质杂岩类似(Qian *et al.*, 2017), 经历了一个漫长的变质演化过程,时限跨度至少达 150Ma。其结果使得华北完成最终的克拉通化,形成现今的基本构造格局。

综上所述,我们将华北克拉通南部太古宙陆块形成和演化划分为 5 个重要的阶段:1)冥古宙-始太古代初始陆核形成时期;2)中太古代-新太古代陆壳快速形成时期;3)古元古代早期(~2.31Ga)岩浆作用异常活跃时期;4)古元古代(2.30~1.97Ga)陆内拉伸-破裂时期;5)古元古代末期(1.97~1.80Ga)南部太古宙陆块与华北克拉通其他陆块最终拼合时期。

致谢 衷心感谢万渝生研究员、吴春明教授、张华锋副教授和杜利林研究员审阅本文并给予了宝贵的修改意见。

谨以此文祝著名前寒武纪地质与变质地质学家沈其韩先生 96 华诞及从事地学研究 75 周年。第五有幸曾与先生谋面,先生当面谬夸我们撰写的鲁山太华杂岩文章,使我深受鼓励,谨记着先生的谆谆教导。

References

- Bleeker W. 2003. The late Archean record: A puzzle in ca. 35 pieces. *Lithos*, 71(2-4): 99-134
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. 1962. The Stratigraphy of Henan Province. Zhengzhou: Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province, 1-133 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. 1989. Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-772 (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. 1989. Regional Geology of Shaanxi Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-698 (in Chinese)
- Cai NZ and Su ZB. 1985. Stratigraphic subdivision and distinction of primary rock-types of the Taihua Group in the Xiao Qinling mountains. *Regional Geology of China*, 13(4): 35-44 (in Chinese with English abstract)
- Chen HX, Wang J, Wang H, Wang GD, Peng T, Shi YH, Zhang Q and Wu CM. 2015. Metamorphism and geochronology of the Luoning metamorphic terrane, southern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen, North China Craton. *Precambrian Research*, 264: 156-178
- Chen HX, Wang H, Peng T, Zhang H and Wu CM. 2016. SIMS U-Pb ages of zircon and tectonic significance of Taihua Metamorphic complex in the eastern Luoning, the southern Terminal of Trans-North China Orogen. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(6): 822-834 (in Chinese with English abstract)
- Committee of the Chinese stratigraphy. 1996. Dictionary of Chinese Stratigraphy: Archean. Beijing: Geological Publishing House, 1-75 (in Chinese)
- Condie KC, Belousova E, Griffin WL and Sircombe KN. 2009a. Granitoid events in space and time: Constraints from igneous and detrital zircon age spectra. *Gondwana Research*, 15(3-4): 228-242
- Condie KC, O'Neill C and Aster RC. 2009b. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250My on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1-4): 294-298
- Condie KC and Aster RC. 2010. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: The supercontinent connection and continental growth. *Precambrian Research*, 180(3-4): 227-236
- Ding LF. 1996. New recognition to Taihua Group in the Small Qinling mountain in the west of Henan Province. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(4): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253-262 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Yuan HL, Wang HL, Zhong XP and Liu XM. 2008. U-Pb ages and Hf isotopes for detrital zircons from quartzite in the Paleoproterozoic Songshan Group on the southwestern margin of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2828-2839
- Diwu CR, Sun Y, Lin CL and Wang HL. 2010a. 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
- Diwu CR, Sun Y, Dong ZC, Wang HL, Chen DL, Chen L and Zhang H. 2010b. In situ U-Pb geochronology of Hadean zircon xenocryst (4.1~3.9Ga) from the western of the Northern Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1171-1174 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y and Wang Q. 2012. The crustal growth and evolution of North China Craton: Revealed by Hf isotopes in detrital zircons from modern rivers. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3520-3530 (in Chinese with English abstract)
- Diwu CR, Sun Y, Wilde SA, Wang HL, Dong ZC, Zhang H and Wang Q. 2013. New evidence for ~4.45Ga terrestrial crust from zircon xenocrysts in Ordovician ignimbrite in the North Qinling Orogenic Belt, China. *Gondwana Research*, 23(4): 1484-1490
- Diwu CR, Sun Y, Gao JF and Fan LG. 2013. Early Precambrian tectonothermal events of the North China Craton: Constraints from in situ detrital zircon U-Pb, Hf and O isotopic compositions in Tietonggou Formation. *Chinese Science Bulletin*, 58(31): 3760-3770
- Diwu CR, Sun Y, Zhao Y and Lai SC. 2014. Early Paleoproterozoic (2.45~2.20Ga) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for the crustal evolution of the southern North China Craton. *Precambrian Research*, 255: 627-640
- Diwu CR, Zhang CL and Sun Y. 2016. Archean continental crust in the Southern North China craton. In: Zhai MG, Zhao Y and Zhao TP (eds.). *Main Tectonic Events and Metallogeny of the North China Craton*. Singapore: Springer, 29-44
- French JE and Heaman LM. 2010. Precise U-Pb dating of Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Dharwar craton, India: Implications for the existence of the Neoproterozoic supercraton Selavia. *Precambrian Research*, 183(3): 416-441
- Geng YS, Yang CH and Wan YS. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lüliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305-314 (in Chinese with English abstract)
- Gong SL, Chen NS, Wang QY, Kusky TM, Wang L, Zhang L, Ba J and Liao FX. 2012. Early Paleoproterozoic magmatism in the Qianji Massif, northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance: LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Research*, 21(1): 152-166
- Hartlaub RP, Heaman LM, Chacko T and Ashton KE. 2007. Circa 2.3Ga magmatism of the Arrowsmith Orogeny, Uranium City Region, Western Churchill Craton, Canada. *The Journal of Geology*, 115(2): 181-195
- Hawkesworth CJ, Dhuime B, Pietranik AB, Cawood PA, Kemp AIS and Storey CD. 2010. The generation and evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society*, 167(2): 229-248
- Hawkesworth CJ, Cawood PA and Dhuime B. 2013. Continental growth

- and the crustal record. *Tectonophysics*, 609: 651–660
- He YH. 2004. The study of geochemistry and chronology of Longshan Complex. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University, 1–50 (in Chinese)
- Huang DM, Zhang DH, Wang SY, Zhang YX, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2012. 2.3Ga magmatism and 1.94Ga metamorphism in the Xiatang area, southern margin of the North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon geochronology and Hf isotope. *Geological Review*, 58(3): 565–573 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Niu YL, Xu YG, Yang QJ and Zhong JW. 2010. Geochemistry of TTG and TTG-like gneisses from Lushan-Taihua complex in the southern North China Craton: Implications for Late Archean crustal accretion. *Precambrian Research*, 182(1–2): 43–56
- Huang XL, Wilde SA, Yang QJ and Zhong JW. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. *Lithos*, 134–135: 236–252
- Huang XL, Wilde SA and Zhong JW. 2013. Episodic crustal growth in the southern segment of the Trans-North China Orogen across the Archean-Proterozoic boundary. *Precambrian Research*, 233: 337–357
- Jia XL. 2016. Research for Taihua complex in Xiaoqinling and Lushan areas: Implications for the evolution of the crystalline basement in southern North China Craton. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1–190 (in Chinese with English summary)
- Jiang ZS, Wang GD, Xiao LL, Diwu CR, Lu JS and Wu CM. 2011. Paleoproterozoic metamorphic *P-T-t* path and tectonic significance of the Luoning metamorphic complex at the southern terminal of the Trans-North China Orogen, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3701–3717 (in Chinese with English abstract)
- Kemp AIS and Hawkesworth CJ. 2013. Growth and differentiation of the continental crust from isotope studies of accessory minerals. *Treatise on Geochemistry*, 4: 379–421
- 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. 2005a. 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
- Kröner A, Wilde SA, O'Brien PJ, Passchier CW and Walte NP. 2005b. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of northern China. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 605–632
- Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383–397
- Kusky TM, Windley BF and Zhai MG. 2007. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen. In: Zhai MG, Windley BF, Kusky TM and Meng QR (eds.). *Mesozoic Subcontinental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia*. Geological Society, London, Special Publication, 280(1): 1–34
- Lin CL. 2006. Geochemistry, geochronology and tectonic settings of Archean gneisses in Lushan, Henan Province. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University, 1–82 (in Chinese with English summary)
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339–342
- 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. *Chemical Geology*, 261(1–2): 140–154
- Liu L and Yang XY. 2013. Geochemical characteristics of the Huoqiu BIF ore deposit in Anhui Province and their metallogenic significance: Taking the Bantaizi and Zhouyoufang deposits as examples. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2551–2566 (in Chinese with English abstract)
- Liu X, Fan HR, Qiu ZJ, Yang KF, Hu FF, Guo SL and Zhao FC. 2015. Formation ages of the Jiangxian and Zhongtiao groups in the Zhongtiao Mountain region, North China Craton: Insights from SIMS U-Pb dating on zircons of intercalated plagioclase amphibolites. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1564–1572 (in Chinese with English abstract)
- Lu JS, Wang GD, Wang H, Chen HX and Wu CM. 2013. Metamorphic *P-T-t* paths retrieved from the amphibolites, Lushan terrane, Henan Province and reappraisal of the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 238: 61–77
- Lu JS, Wang GD, Wang H, Chen HX and Wu CM. 2014. Metamorphic evolution of the Lushan terrane in the Lushan Precambrian Taihua Complex, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 3062–3074 (in Chinese with English abstract)
- Lu JS, Zhai MG, Lu LS, Wang H, Chen HX, Peng T, Wu CM and Zhao TP. 2017. Metamorphic *P-T-t* path retrieved from metapelites in the southeastern Taihua metamorphic complex, and the Paleoproterozoic tectonic evolution of the southern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 352–364
- Lu LZ, Xu XC and Liu FL. 1996. The Precambrian Khondalite Series in the North of China, Changchun: Changchun Publishing House, 1–276 (in Chinese)
- Lu SN, Li HK, Zhang CL and Niu GH. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160(1–2): 94–107
- O'Neill C, Lenardic A, Moresi L, Torsvik TH and Lee CTA. 2007. Episodic Precambrian subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 552–562
- Pang ZS and Liang TY. 1997. Geo-geochemical characteristics of the Archeozoic metamorphic granite in Xiaoshan Mts. region. *Henan Geology*, 15(4): 278–282 (in Chinese with English abstract)
- Pang ZS, Liang TY and Xiao ZJ. 2000. The geologic characteristics of the Archean granite-greenstone terrains in Xiaoshan mountains region. *Henan Geology*, 18(1): 32–37 (in Chinese with English abstract)
- Partin CA, Bekker A, Sylvester PJ, Wodicka N, Stern RA, Chacko T and Heaman LM. 2014. Filling in the juvenile magmatic gap: Evidence for uninterrupted Paleoproterozoic plate tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 123–133
- Qian JH, Wei CJ and Yin CQ. 2017. Paleoproterozoic *P-T-t* evolution in the Hengshan-Wutai-Fuping area, North China Craton: Evidence from petrological and geochronological data. *Precambrian Research*, 303: 91–104
- Shen FN. 1986. Discussion on the relational questions of Taihua Group in Minor Qinling range. *Journal of Northwest University*, 16(2): 43–51 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH. 1992. Chinese Early Precambrian Granulite. Beijing: Geological Publishing House, 1–237 (in Chinese)
- Shen QH and Song HX. 2014. Redefinition of the Taihua Group, Lushan, Henan. *Journal of Stratigraphy*, 38(1): 1–7 (in Chinese)
- Silver PG and Behn MD. 2008. Intermittent plate tectonics? *Science*, 319(5859): 85–88
- Sun DZ and Hu WX. 1993. The Geochronological Framework and Crustal Structures of Precambrian Basement in the Zhongtiao Area. Beijing: Geological Publishing House, 1–180 (in Chinese)
- Sun QY, Zhou YY, Wang W, Li CD and Zhao TP. 2017. Formation and evolution of the Paleoproterozoic meta-mafic and associated supracrustal rocks from the Lushan Taihua Complex, southern North China Craton: Insights from zircon U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry. *Precambrian Research*, 303: 428–444

- Sun S, Zhang GW and Chen ZM. 1985. Precambrian Evolution of the Southern North China Block. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1 – 215 (in Chinese)
- Sun Y. 1982a. Polymetamorphism of the Taihua Group at the Lushan, Henan. Journal of Northwest University (Special Issue for Precambrian Geology), 44 – 65 (in Chinese)
- Sun Y. 1982b. Petrochemical features of the Early Precambrian metavolcanic series in the Lushan region, Henan. Journal of Northwest University (Special Issue for Precambrian Geology), 31 – 43 (in Chinese)
- Sun Y. 1983. Rocks in the granulite facies of the Taihua Group at Lushan, Henan. Journal of Northwest University, (1): 89 – 95 (in Chinese with English abstract)
- Sun Y. 1985. Origin of metamorphic rocks and tectonic setting of the Archean Taihua high-grade belt along the S-W margin of the North China Craton. Journal of Northwest University, (1): 73 – 80 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Teixeira W, Ávila CA, Dussin IA, Corrêa Neto AV, Bongioiolo EM, Santos JO and Barbosa NS. 2015. A juvenile accretion episode (2.35 ~ 2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. Precambrian Research, 256: 148 – 169
- Tu SX. 1996. A new idea on the protolith formations and the dismembering into two eras of Taihua metamorphic complex in Lushan region, Henan Province. Geology and Mineral Resources of South China, (4): 22 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Song B, Wu JS, Yang CH, Zhang ZQ and Geng YS. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 563 – 575
- Wan YS, Wilde SA, Liu DY, Yang CX, Song B and Yin XY. 2006. Further evidence for ~1.85 Ga 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
- Wan YS, Liu DY, Wang SY, Zhao X, Dong CY, Zhou HY, Yin XY, Yang CX and Gao LZ. 2009. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng area, Henan Province (eastern China): Constraints from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating. Acta Geologica Sinica, 83(7): 982 – 999 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Dong CY, Wang W, Xie HQ and Liu DY. 2010. Archean basement and a Paleoproterozoic collision orogen in the Huoqiu area at the southeastern margin of North China Craton: Evidence from sensitive high resolution ion micro-probe U-Pb zircon geochronology. Acta Geologica Sinica, 84(1): 91 – 104
- Wan YS, Liu DY, Nutman A, Zhou HY, Dong CY, Yin XY and Ma MZ. 2012. Multiple 3.8 ~ 3.1 Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengouxi Complex), Anshan, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 54 – 55: 18 – 30
- Wan YS, Liu DY, Dong CY, Xie HQ, Kröner A, Ma MZ, Liu SJ, Xie SW and Ren P. 2015. Formation and evolution of Archean continental crust of the North China Craton. In: Zhai MG (ed.). Precambrian Geology of China. Berlin, Heidelberg: Springer, 59 – 136
- Wan YS, Dong CY, Ren P, Bai WQ, Xie HQ, Liu SJ, Xie SW and Liu DY. 2017. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: A synthesis. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1405 – 1419 (in Chinese with English abstract)
- Wang GD, Lu JS, Wang H, Chen HX, Xiao LL, Diwu CR, Ji JQ and Wu CM. 2013. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of amphiboles of the Taihua Metamorphic Complex, Mt. Huangshan, southern terminal of the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen. Acta Petrologica Sinica, 86(9): 3099 – 3114 (in Chinese with English abstract)
- Wang GD, Wang H, Chen HX, Lu JS and Wu CM. 2014a. Metamorphic evolution and zircon U-Pb geochronology of the Mts. Huashan amphibolites: Insights into the Palaeoproterozoic amalgamation of the North China Craton. Precambrian Research, 245: 100 – 114
- Wang GD, Wang H, Chen HX, Lu JS, Zhang B, Pham VT, Zhang JJ, Zhang Q and Wu CM. 2017. Metamorphic *P-T-t* paths of pelitic granulites of the Taihua metamorphic complex in the Mts. Huashan area and tectonothermal implications for the Palaeoproterozoic Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 290: 147 – 162
- Wang QY, Zheng JP, Pan YM, Dong YJ, Liao FX, Zhang Y, Zhang L, Zhao G and Tu ZB. 2014b. Archean crustal evolution in the southeastern North China Craton: New data from the Huoqiu Complex. Precambrian Research, 255: 294 – 315
- Wang RM. 2009. Exploring the Secrets of the Ancient Rocks. Beijing: Earthquake Publishing House, 142 – 146 (in Chinese)
- Wang XW, Wang CW and Wang JY. 1986. The formation time and characteristics of the Taihua Group in southern Luoning. Geology in Western Henan, 2: 32 – 44 (in Chinese)
- Wang YL, Liu CA, Liang YZ, Wang ZJ and Lin WX. 1963. Preliminary study of the Precambrian geology in eastern region of Northern Qinling. Geological Journal (Special Issue of Precambrian Geology), (1): 160 – 187 (in Chinese)
- Wu FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. Precambrian Research, 167(3–4): 339 – 362
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-Continent. Beijing: Geological Publishing House, 192 – 211 (in Chinese)
- Xie SW, Xie HQ, Liu SJ and Dong CY. 2016. Archean crustal formation and evolution of the Lushan area in the southern margin of the North China Craton. Geology in China, 43(6): 1884 – 1893 (in Chinese with English abstract)
- Yan LQ. 1959. Achievements of geological survey in Qinling region. Geological Monthly, (11): 32 – 35 (in Chinese)
- Yan ZB. 1985. Stratigraphical division and correlation of the Early Precambrian strata in the Lesser Qinling Mountains area. Geological Review, 31(2): 101 – 110 (in Chinese with English abstract)
- Yang XY, Wang BH, Du ZB, Wang QC, Wang YX, Tu ZB, Zhang WL and Sun WD. 2012. On the metamorphism of the Huoqiu Group, forming ages and mechanism of BIF and iron deposit in the Huoqiu region, southern margin of North China craton. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3476 – 3496 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Liu JL, Li CL, Chen SQ and Dai YP. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis on the Taihua Complex: Constraints on the formation and evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 230: 31 – 44
- Yu JX. 1998. Division and correlation of Late Archeozoic basement metamorphic rock series in Xiaoshan and Xiaoqinling regions. Henan Geology, 16(2): 106 – 113 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of Neo-Archean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. Science in China (Series D), 43(Suppl. 1): 219 – 232
- Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 547 – 561
- Zhai MG. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review. Science China (Earth Sciences), 54(8): 1110 – 1120
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Research, 20(1): 6 – 25
- Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton:

- Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24(1): 275–297
- Zhai MG. 2014. Multi-stage crustal growth and cratonization of the North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 457–469
- Zhang GW, Zhou DW, Zhang TA and Bai YB. 1982. Correlation of tectonic sequence of Dengfeng Group with Taihua Group in the central part of Henan. *Journal of Northwest University (Special Issue for Precambrian Geology)*, 1–10 (in Chinese)
- Zhang GW, Bai YB, Sun Y, Guo AL, Zhou DW and Li TH. 1985. Composition and evolution of the Archaean crust in central Henan, China. *Precambrian Research*, 27(1–3): 7–35
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–855 (in Chinese)
- 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, 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. 2007. When did plate tectonics begin on the North China Craton? Insights from metamorphism. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 19–32
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3–4): 213–226
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772–1792 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Griffin WL, O'Reilly SY, Lu FX, Wang CY, Zhang M, Wang FZ and Li HM. 2004. 3.6Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China craton. *Geology*, 32(3): 229–232
- Zhou YY. 2011. The early precambrian magmatism and crustal evolution in the southern margin of the North China Craton: A case study on the Songshan and Lushan Areas. Ph. D. Dissertation. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–183 (in Chinese with English summary)
- Zhou YY, Zhao TP, Zhai MG, Gao JH and Sun QY. 2014. Petrogenesis of the archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and granites in the Lushan area, southern margin of the North China Craton: Implications for crustal accretion and transformation. *Precambrian Research*, 255: 514–537
- Zhou YY, Zhao TP, Zhai MG, Gao JF, Lan ZW and Sun QY. 2015. Petrogenesis of the 2.1Ga Lushan garnet-bearing quartz monzonite on the southern margin of the North China Craton and its tectonic implications. *Precambrian Research*, 256: 241–255
- 附中文参考文献**
- 蔡乃仲, 苏振邦. 1985. 小秦岭太华群层序划分与原岩判别. *中国区域地质*, 13(3): 35–44
- 陈泓旭, 王浩, 彭涛, 张慧, 吴春明. 2016. 华北中部造山带南缘洛宁东部太华变质杂岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球科学与环境学报*, 38(6): 822–834
- 丁莲芳. 1996. 对豫西小秦岭太华群的重新认识. *西安工程学院学报*, 18(4): 1–8
- 第五春荣, 孙勇, 林慈銮, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253–262
- 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 王洪亮, 钟兴平, 柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *科学通报*, 53(16): 1923–1934
- 第五春荣, 孙勇, 林慈銮, 王洪亮. 2010a. 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
- 第五春荣, 孙勇, 董增产, 王洪亮, 陈丹玲, 陈亮, 张红. 2010b. 北秦岭西段冥古宙锆石 (4.1~3.9Ga) 年代学新进展. *岩石学报*, 26(4): 1171–1174
- 第五春荣, 孙勇, 王倩. 2012. 华北克拉通地壳生长和演化: 来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示. *岩石学报*, 28(11): 3520–3530
- 第五春荣, 孙勇, 高剑峰, 樊龙刚. 2013. 华北克拉通早前寒武纪构造-热事件性质探索: 铁铜沟组石英岩中碎屑锆石 U-Pb-Hf-O 同位素组成. *科学通报*, 58(28–29): 2946–2957
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用—来自同位素年代学的证据. *岩石学报*, 22(2): 305–314
- 河南省地质局地质研究所. 1962. 河南地层(初稿). 郑州: 河南省地质局地质研究所, 1–133
- 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
- 何艳红. 2004. 陇山杂岩的地球化学特征以及年代学研究. 硕士学位论文. 西安: 西北大学, 1–50
- 黄道裘, 张德会, 王世炎, 张毅星, 董春艳, 刘敦一, 万渝生. 2012. 华北克拉通南缘豫西下汤地区 2.3Ga 岩浆作用和 1.94Ga 变质作用——锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成及全岩地球化学研究. *地质评论*, 58(3): 565–573
- 贾晓亮. 2016. 小秦岭和鲁山地区太华杂岩的研究: 对华北南缘基底演化的意义. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1–190
- 蒋宗胜, 王国栋, 肖玲玲, 第五春荣, 卢俊生, 吴春明. 2011. 河南洛宁太华变质杂岩区早元古代变质作用 *P-T-t* 轨迹及其大地构造意义. *岩石学报*, 27(12): 3701–3717
- 林慈銮. 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, 1–82
- 刘磊, 杨晓勇. 2013. 安徽霍邱 BIF 铁矿地球化学特征及其成矿意义: 以班台子和周油坊矿床为例. *岩石学报*, 29(7): 2551–2566
- 刘玄, 范宏瑞, 邱正杰, 杨奎锋, 胡芳芳, 郭双龙, 赵凤春. 2015. 中条山地区绛县群和中条群沉积时限: 夹层斜长角闪岩 SIMS 锆石 U-Pb 年代学证据. *岩石学报*, 31(6): 1564–1572
- 卢俊生, 王国栋, 王浩, 陈泓旭, 吴春明. 2014. 河南鲁山太华变质杂岩前寒武纪变质作用. *岩石学报*, 30(10): 3062–3074
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1–276
- 庞振山, 梁天佑. 1997. 崆山地区太古代变质花岗岩地质地球化学特征. *河南地质*, 15(4): 278–282
- 庞振山, 梁天佑, 肖中军. 2000. 崆山太古宙花岗-绿岩地体的地质特征. *河南地质*, 18(1): 32–37
- 陕西省地质矿产局. 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–698
- 沈福农. 1986. 小秦岭太华群有关问题探讨. *西北大学学报*, 16(2): 43–51

- 沈其韩. 1992. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1-237
- 沈其韩, 宋会侠. 2014. 河南鲁山原“太华岩群”的重新厘定. 地层学杂志, 38(1): 1-7
- 孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社, 1-180
- 孙枢, 张国伟, 陈志明. 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1-215
- 孙勇. 1982a. 河南鲁山太华群的多期变质作用. 西北大学学报(前寒武纪地质专辑), 44-65
- 孙勇. 1982b. 河南鲁山地区早前寒武纪变质火山岩系的岩石化学特征. 西北大学学报(前寒武纪地质专辑), 31-43
- 孙勇. 1983. 河南鲁山太华群的麻粒岩相变质岩. 西北大学学报, (1): 89-95
- 孙勇. 1985. 华北地块西南部太华高级变质带原岩恢复及其构造环境探讨. 西北大学学报, (1): 73-80
- 涂绍雄. 1996. 河南鲁山太华变质杂岩原岩建造及时代二分的新认识. 华南地质与矿产, (4): 22-31
- 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 赵逊, 董春艳, 周红英, 殷小艳, 杨长秀, 高林志. 2009. 登封地区早前寒武纪地壳演化——地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约. 地质学报, 83(7): 982-999
- 万渝生, 董春艳, 任鹏, 白文倩, 颜炳强, 刘守偈, 谢士稳, 刘敦一. 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述. 岩石学报, 33(5): 1405-1419
- 王国栋, 卢俊生, 王浩, 陈泓旭, 肖玲玲, 第五春荣, 季建清, 吴春明. 2013. 华山太华变质杂岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年. 岩石学报, 86(9): 3099-3114
- 王仁民. 2009. 古岩求索录. 北京: 地震出版社, 142-146
- 王西午, 王灿文, 王建宇. 1986. 洛宁南部太华群地层特征及其时代归属. 豫西地质, 2: 32-44
- 王曰伦, 刘长安, 梁玉左, 王泽九, 林蔚兴. 1963. 北秦岭东段前寒武纪地层初步观察. 地质丛刊·甲种前寒武纪专号, (1): 160-187
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 192-211
- 谢士稳, 颜炳强, 刘守偈, 董春艳. 2016. 华北克拉通南缘鲁山太古宙基底的形成和演化. 中国地质, 43(6): 1884-1893
- 阎竹斌. 1985. 小秦岭地区早前寒武纪地层划分与对比. 地质评论, 31(2): 101-110
- 閻廉泉. 1959. 秦嶺区域地質測量及普查工作的基本成就. 地質月刊, (11): 32-35
- 杨晓勇, 王波华, 杜贞保, 王启才, 王玉贤, 涂政标, 张文利, 孙卫东. 2012. 论华北克拉通南缘霍邱群变质作用、形成时代及霍邱 BIF 铁矿成矿机制. 岩石学报, 28(11): 3476-3496
- 喻积贤. 1998. 小秦岭崮山地区晚太古代基底变质岩系划分与对比. 河南地质, 16(2): 106-133
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊): 129-137
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. 中国科学(地球科学), 41(8): 1037-1046
- 张国伟, 周鼎武, 张延安, 白玉宝. 1982. 河南中部登封群-太华群构造序列对比. 西北大学学报(前寒武纪地质专辑), 1-10
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1-855
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772-1792
- 中国地层典编委会. 1996. 中国地层典——太古宇. 北京: 地质出版社, 1-75
- 周艳艳. 2011. 华北克拉通南缘早前寒武纪岩浆作用与地壳演化——以嵩山和鲁山地区为例. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1-183