

华北克拉通南缘中-新元古代沉积地层对比研究及其地质意义*

胡国辉^{1,2} 赵太平^{1,3**} 周艳艳⁴ 王世炎⁵

HU GuoHui^{1,2}, ZHAO TaiPing^{1,3**}, ZHOU YanYan⁴ and WANG ShiYan⁵

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

5. 河南省地质调查院, 郑州 450001

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

5. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China

2013-04-01 收稿, 2013-06-13 改回.

Hu GH, Zhao TP, Zhou YY and Wang SY. 2013. Meso-Neoproterozoic sedimentary formation in the southern margin of the North China Craton and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(7): 2491–2507

Abstract Meso-Neoproterozoic terrigenous clastic and carbonate rocks cover the metamorphic crystalline basement with angular unconformity in the southern margin of the North China Craton (NCC), which can be divided into Songshan-Jishan, Mianchi-Queshan and Xiong'er shan stratigraphic provinces. The Songshan-Jishan stratigraphic province, in the northeast of the Xiong'er basin, is composed of siliceous clastic rocks. The Mianchi-Queshan province, in the northern margin of the Xiong'er basin, consists of the transitional facies of siliceous clastic-carbonate rocks. The Xiong'er shan province, in the southern margin of the basin, is mainly composed of carbonate rocks. Based on their stratigraphic and petrologic characteristics, these sedimentary sequences formed in typical fluvial-marine environment with water depth shallowing from south to north. They can be divided into low sea depth, transgression and high sea depth depositional system accordingly. The petrologic and geochemical signatures show that these sedimentary rocks sourced from post-Archean felsic components with minor basic rocks and formed in a passive continental margin during Mesoproterozoic. However, the Neoproterozoic sequences formed in sedimentary basin related to a continental arc. It implies that more crustal activities and distinct changes in tectonic settings from passive to active continental margin from Mesoproterozoic to Neoproterozoic, a possible effect of the early tectonic events of the Qinling Orogenic Belt. Laser ablation ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons from these sedimentary sequences yields ages ranging from ca. 1.50Ga to 2.70Ga with most Paleoproterozoic ages (1.70~2.40Ga) and minor Archean ages, indicating the detritus mainly sourced from Paleoproterozoic geologic bodies. The youngest ages at the bottom of the sequences of ~1600Ma can constrain the maximum age of deposition. The pronounced age peak at ~1.93Ga corresponds to the significant Early Precambrian metamorphic event of the NCC. All detrital zircons have obvious negative to moderately positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -20 to +6, indicating the contribution of juvenile materials with positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and reworking of Archean crustal materials with negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values. The Hf model ages (t_{DM}^{c}) range from 3.8Ga to 2.3Ga and cluster between 3.0Ga and 2.6Ga with a peak at ~2.75Ga, implying the major crustal growth occurred at Late Archean.

* 本文受国家基础研究发展计划(973项目)(2012CB416606)和西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费联合资助.

第一作者简介: 胡国辉,男,1984年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: huguohui1984@126.com

** 通讯作者: 赵太平,男,1963年生,研究员,岩石学专业, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn

Key words North China Craton; Wufoshan Group; Ruyang Group; Guandaokou Group; Stratigraphic comparison; Provenance

摘要 华北克拉通南缘新太古代-古元古代变质结晶基底之上不整合覆盖着巨厚的中-新元古代陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积盖层,根据沉积建造特征,将其划分为三个不同的地层分布小区,分别为嵩箕地层小区、浞池-确山地层小区和熊耳山地层小区。嵩箕小区位于熊耳裂谷盆地东北缘,以硅质碎屑岩(砂岩)为主,浞池-确山地层小区位于熊耳裂谷盆地北缘,以硅质碎屑岩-碳酸盐岩(白云岩)过渡相为主,熊耳山地层小区位于熊耳裂谷盆地南缘,以碳酸盐岩为主。本文通过对三个地层小区的沉积地层剖面和岩石学特征进行研究,认为华北南缘从中元古代开始处于河流相-浅海相的沉积环境,从南向北,海水由深变浅。根据地层的岩性、沉积构造及其组合特征,将其划分为低水位、海侵和高水位沉积体系,最大海侵时期为青白口系早期。通过对熊耳山地区的官道口群的岩相学和地球化学分析,并结合其已有的碎屑锆石年龄和另外两个地层小区的五佛山群和汝阳群的碎屑锆石年龄以及它们的地球化学特征,表明三个地层区的沉积地层在中元古代均处于被动大陆边缘环境,而新元古代则可能处于与大陆岛弧相关的沉积盆地,这一结果表明从中元古代到新元古代华北南缘可能受到秦岭造山带早期微陆块俯冲碰撞的影响,由被动大陆边缘向活动大陆边缘过渡的过程。三套地层最年轻的碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄基本上在1600Ma左右,从而限定了其最大沉积时代不早于1600Ma。其锆石年龄大多数都分布于古元古代(1700~2400Ma),太古代的年龄极少,说明其物源区以古元古代的地质体为主,且碎屑锆石年龄峰值为~1.93Ga,反映了华北南缘在~1.93Ga发生过重要的构造-热事件,与华北克拉通古元古代中期发生的变质作用时间(~1.91Ga)一致。三套沉积地层的碎屑锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大(-20~+6),表明既有新生地壳物质的加入,也有古老地壳物质的再循环。Hf两阶段模式年龄分布于2.3~3.8Ga之间,明显大于其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,大部分锆石的Hf同位素组成集中于2.6Ga和3.0Ga地壳演化线区域内,峰值为2.75Ga,表明2.75Ga左右是华北克拉通南缘重要的陆壳生长期。

关键词 华北克拉通;五佛山群;汝阳群;官道口群;地层对比;物源区
中图法分类号 P534.3

华北克拉通太古宙-古元古代变质结晶基底之上不整合覆盖着中-新元古代沉积盖层,主要沿着三条古元古代晚期的裂谷带(渣尔泰-白云鄂博裂谷、燕辽裂谷和熊耳裂谷)发育,包括北部的狼山-渣尔泰山群、化德群和白云鄂博群(王楫等,1992; Lu *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2007; 胡波等, 2009),中部和东部的长城系、蓟县系和青白口系(高林志和乔秀夫,1992; 李怀坤等,1995; Wan *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2008; 高林志等,2008),南部的熊耳群火山-沉积岩系及其上的中-新元古代沉积地层(关保德等,1988; 河南省地质矿产厅,1989; 劳子强等,1996; 周洪瑞等,1998; 左景勋,2002; 赵太平等,2002,2004; Zhu *et al.*, 2011)。最近在华北克拉通中-新元古界地层中获得了较多的高精度定年数据(李怀坤等,1995,2009; 万渝生等,2009; 高林志等,2007,2008; Lu *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2009; 彭澎等,2011; 苏文博等,2012),使得人们对其形成时代和划分出现争议。而且华北南缘不同地区沉积地层的岩石类型不同,通过其岩石学、地球化学和碎屑锆石年龄的对比研究,能够为地层层序的厘定和划分提供依据。

华北克拉通南缘结晶基底之上不整合覆盖着巨厚的熊耳群火山-沉积地层(1.80~1.75Ga,赵太平等,2004),主要分布在熊耳山、外方山和崞山地区。研究表明,其形成于被动大陆边缘的裂谷环境,代表了古元古代末华北克拉通伸展-裂解事件的开始(Lu *et al.*, 2002; 赵太平等,2002,2004; 徐宇航等,2008; Zhao *et al.*, 2009)。熊耳裂谷之后,华北克拉通南缘开始进入稳定的沉积盖层发育阶段,主要形成中-新元古代陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积序列(关保德等,1988; 周洪瑞,1998; 高林志,2002)。根据地层的发育特

征,前人将其划分为三个不同的地层小区:嵩箕地层小区、浞池-确山地层小区和熊耳山地层小区(图1)(关保德等,1988; 河南省地质矿产厅,1989)。由于前寒武纪地层缺少古生物化石,且之前的同位素年龄和地球化学资料尚不完整,不同地层小区中-新元古代地层的对比和划分存在一定的争议(关保德等,1988; 河南省地质矿产厅,1989; 周洪瑞,1999),而且其岩相古地理特征和碎屑物质来源尚不清楚。

本文选择华北克拉通南缘嵩箕地层小区、浞池-确山地层小区和熊耳山地层小区的中-新元古代沉积岩为研究对象,从地层发育和岩石组合特征入手,并结合已有的层序地层研究结果,对比分析其沉积相和沉积古地理环境,为建立华北克拉通南缘中-新元古代地层框架提供依据。同时,利用碳酸盐岩(主要为白云岩)的地球化学组成反映沉积盆地的有关沉积条件(如Mg/Ca比、盐度、氧化还原条件等)。结合碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素组成及其地球化学特征,探讨华北南缘中-新元古代沉积盖层的沉积古地理环境、物质来源和构造环境以及记录的重要地质事件,试图为研究华北克拉通前寒武纪地壳演化提供信息(Dickinson, 1970, 1985; Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986, 1988; Andersen, 2005)。

1 区域地质背景

华北克拉通南缘早前寒武纪(>1.80Ga)岩石序列发育较为完整,主要有新太古代登封群表壳岩、TTG片麻岩(2.6

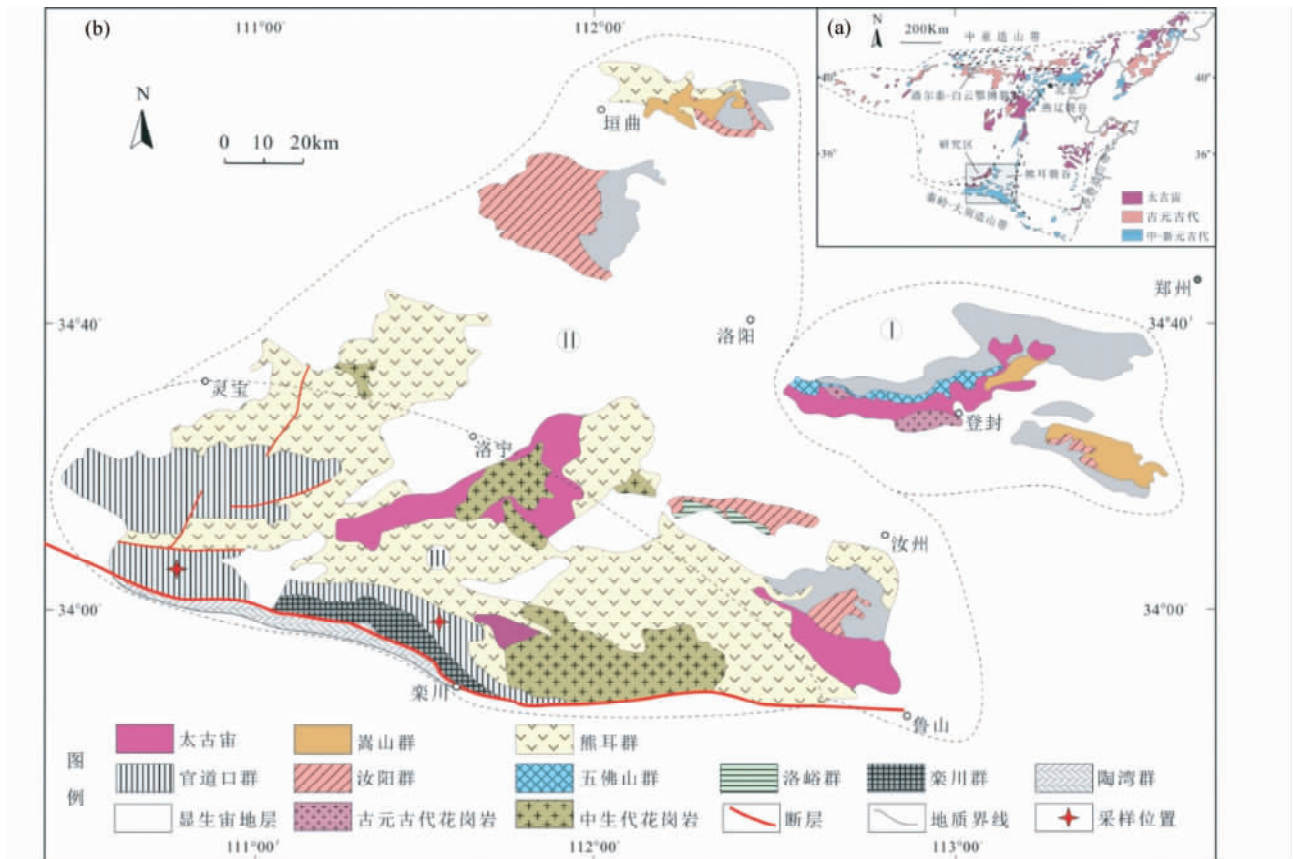


图1 华北克拉通南缘豫西地区中-新元古代地层分布简图

(a) 华北克拉通前寒武纪主要地层分布(据 Peng et al., 2007); (b) 华北克拉通南缘中-新元古代地层分区图(据关保德等, 1988; 河南省地质矿产厅, 1989). I-嵩箕地层小区; II-澠池-确山地层小区; III-熊耳山地层小区

Fig.1 Simplified geological map of Meso-Neoproterozoic sedimentary sequences in the southern margin of the North China Craton (NCC)

(a) -major Precambrian geological distributions of the NCC (modified after Peng et al., 2007); (b) -Meso-Neoproterozoic stratigraphic provinces of the southern NCC (after Guan et al., 1988; BGMRH, 1989). I-the stratigraphic province of Songji; II-the stratigraphic province of Mianchi-Queshan; III-the stratigraphic province of Xiong'er shan

~2.5Ga)、古元古代嵩山群石英岩(2.45~2.0Ga)、镁铁质-超镁铁质侵入岩和富钾花岗岩(~2.5Ga)、以及太华群变质中基性火山-沉积岩系(太古宙-古元古代)等,它们共同构成华北克拉通南缘前寒武纪结晶基底,其上被古元古代末-新元古代沉积盖层角度不整合覆盖。沉积盖层主要由古元古代末熊耳群火山-沉积岩系(赵太平等, 2002, 2004; Zhao et al., 2009; He et al., 2009)和上覆的中-新元古界汝阳群、洛峪群及与其相当的官道口群、栾川群、陶湾群,以及嵩山地区的五佛山群等组成(图1)。古元古代末期,华南北缘处于伸展体制的熊耳三叉裂谷盆地(Lu et al., 2002; 赵太平等, 2002, 2004),中元古代开始进入稳定的沉积盖层发育阶段。根据地层发育特征,将其划分为三个地层分布小区,分别为嵩箕地层小区、澠池-确山地层小区和熊耳山地层小区。各小区的地层分布和发育特点如下:


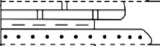
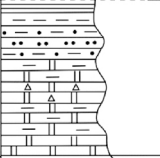


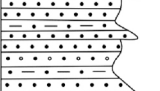
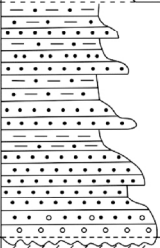

嵩箕地层小区: 主要分布在河南偃师、登封、临汝等地的嵩山-箕山地区,主要由五佛山群沉积地层组成,还有中元古

代早期兵马沟组和新元古代晚期红岭组。五佛山群岩石类型主要为陆源碎屑岩,包括砾岩、砂岩、粉砂岩和泥质岩,还有少量的白云岩夹层,自下而上分为马鞍山组、葡峪组、骆驼畔组和何家寨组。此外,还有角度不整合覆盖在登封群之上的古元古代末兵马沟组(砂)砾岩和砂岩,以及平行不整合覆盖在何家寨组的南华系红岭组钙质石英砂岩和(白云质)灰岩。其岩性变化如表1。

澠池-确山地层小区: 该地层区位于豫西澠池、汝阳、鲁山、确山等地,区内的沉积地层主要包括中元古界蓟县系汝阳群、新元古界青白口系洛峪群和震旦系地层。底部的汝阳群主要由砾岩、砂岩和白云岩组成,表现为陆源碎屑岩-碳酸盐岩过渡的沉积序列,自下而上分为小沟背组、云梦山组、白草坪组和北大尖组。洛峪群主要由泥(页)岩、砂岩和(泥质)白云岩组成,自下而上分为崔庄组、三教堂组和洛峪口组,与下伏汝阳群和上覆震旦系地层均呈平行不整合接触。此外,震旦系地层包括黄连垛组、董家组和罗圈组,岩性主要

表1 华北克拉通南缘嵩箕地层小区中-新元古代地层柱状图(据关保德等,1988;河南省地质矿产厅,1989)

Table 1 Schematic stratigraphic section of Meso-Neoproterozoic sequences in the Songji area of the southern margin of the NCC, with lithologic descriptions and interpreted paleoenvironments according to our field investigations (after Guan *et al.*, 1988; BGMRH, 1989)

界	系	组	岩性柱状图	岩性描述	沉积环境
古生界	寒武系			主要为粉砂岩,和细砾岩	
新元古界	南华系	红岭组		下部为钙质石英砂岩 上部为白云质灰岩	海相沉积
		五佛山群	何家寨组		
	骆驼畔组			紫红色砂岩和砂砾岩	过渡带
	葡峪组			粉砂岩和炭质泥岩	海泛期沉积
	马鞍山组			主要为灰紫色石英砂岩, 下部夹砾岩和页岩	临滨,前滨海 河流沉积
	中元古界	蓟县系	兵马沟组		中上部为长石石英砂岩 夹紫红色泥岩 下部为紫红色砾岩、砂砾岩和长石石英砂岩
太古宇			登封群		斜长角闪岩,中-基性火山沉积岩

为砂岩、硅质条带白云岩、泥质白云岩和粉砂岩等。其岩性变化如表2。

熊耳山地层小区:主要分布于豫西卢氏、洛宁、栾川、方城等地,包括中元古代官道口群和新元古代栾川群、陶湾群等沉积地层。官道口群以石英砂岩和白云岩为主,为一套陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积序列,自下而上分为高山河组、龙家园组、巡检司组、杜关组和冯家湾组。新元古代栾川群自下而上主要分为白术沟组、三川组、南泥湖组和煤窑沟组,岩性主要为千枚岩、变质长石石英岩、白云石大理岩、绢云(钙质)片岩等。新元古代陶湾群由浅海相碎屑岩和碳酸盐岩组成,主要包括钙质砾岩、千枚岩和片状大理岩,平行不整合覆盖于栾川群之上,是一套变质程度和构造变形较复杂的地层。其岩性变化如表3。

2 岩相学和地球化学特征

2.1 分析方法

本次研究工作在卢氏县官道口群高山河组和龙家园组采取11件岩石样品,主要包括砂岩和硅质白云岩。主量元素测试是在中国科学院广州地球化学研究所完成,采用X射线荧光光谱法(XRF)测试,XRF分析精度为2%,分析方法见参考文献(Li *et al.*, 2006)。微量元素测试是在贵州省拓

谱资源环境分析检测中心进行,采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)进行测试,分析精度优于5%,RSD% < 5%,分析流程见Qi *et al.* (2000)。

2.2 岩相学特征

官道口群下部高山河组的砂岩样品Hu-21的碎屑成分主要为石英(图2a),其分选性好,磨圆度差,多为次棱角状、尖棱状,少数为次圆状,碎屑颗粒粒径为100~300 μm ,多为硅质胶结,边界轮廓清晰,少数石英颗粒间隙中的硅质岩发生重结晶,形成新生的石英增生边。石英粉砂岩样品Hu-11主要由石英和杂基组成(图2b),石英颗粒粒径为60~130 μm ,石英磨圆度较差,杂基成分主要为云母和其它粘土质矿物,由于粘土质、铁质胶结物的溶蚀,碎屑石英具有典型的棱角状。

白云岩样品主要由微粒(<20 μm)晶体组成,为微-细晶白云岩,碎屑成分以石英为主,含有少量的粘土矿物。镜下颗粒结构不明显,几乎不见生物碎屑,但样品GSH12-43可见大量黄铁矿颗粒(图2c),说明其形成于较深水的还原环境,黄铁矿粒径为3~10 μm ,大多数黄铁矿边缘被氧化,少数黄铁矿呈现较好的形态,镜下呈现浅黄铜色金属光泽。白云岩样品GSH12-7具有鲕状结构(图2d),鲕粒粒径为50~150 μm 。

表2 华北克拉通南缘滏池-确山地区中-新元古代地层柱状图(据关保德等,1988;河南省地质矿产厅,1989)

Table 2 Schematic stratigraphic section of Meso-Neoproterozoic sequences in the Mianchi-Queshan area of the southern margin of the NCC (after Guan *et al.*, 1988; BGMRH, 1989)

界	系	群	组	岩性柱状图	岩性描述	沉积环境
新元界	寒武系	震旦系	辛集组		主要为石英砂岩和细砂岩	浅海相 (冰碛岩)
			罗圈组		底部为杂砂岩,其上为粉砂岩	临滨带
			董家组		灰色粉砂质泥岩夹薄层细砂岩,顶部为纹层状泥质白云岩	
古元界	青白口系	洛峪群	黄莲垛组		主要有石英砂岩,页岩和硅质白云岩	潮坪相
			洛峪口组		砂质、泥质白云岩和灰黑色页岩	过渡带,内陆棚
			三教堂组		主要为浅红色石英砂岩	临滨-前滨相
			崔庄组		灰黑色炭质泥岩,页岩 底部为石英砂岩和粉砂岩	深海沉积 (海泛期)
			北大尖组		上部为砾屑白云岩,砂屑(粉屑)白云岩和白云质砂岩,叠层石发育 下部为浅红色石英砂岩,沙泥岩和粘土质页岩	
中元界	蓟县系	汝阳群	白草坪组		上部为石英砂岩,沙泥岩和泥页岩 下部为浅灰色沙泥岩和炭质泥岩	过渡带-浅海相 潮坪/海滩
			云梦山组		上部主要为浅红色(石英)砂岩,粉砂岩,泥页岩组成,有风化壳存在。 下部主要为紫红色石英砂岩。 底部为砾岩和含砾粗砂岩,有约20m厚的玄武质安山岩夹层。	临滨-前滨相 (泥裂、雨痕) 河流相沉积 (板状、楔状交错层理)
			小沟背组		主要为砾岩,上部有一些含砾砂岩	山间盆地 (泥石流-坡积物)
			熊耳群		主要为(玄武)安山岩和玄武岩,上部有沉积岩夹层	大陆裂谷 起源于俯冲改造的岩石圈地幔

2.3 分析结果

2.3.1 主量元素

官道口群砂岩和白云岩样品的主、微量分析结果见表4。

官道口群下部的砂岩样品 SiO₂ 含量为 49.19% ~ 91.16% (平均为 65.60%), 具有较高的 Al₂O₃ (4.01% ~ 20.10%) 和 K₂O 含量(1.86% ~ 8.65%) 以及中等 Fe₂O₃ 含量(0.98% ~ 19.62%) 而 MgO (0.36% ~ 2.83%) 和 CaO 含量(0.09% ~ 0.35%) 相对较低,样品的 LOI = 0.32% ~ 3.87%。其中 样品 Hu-14 和 Hu-21 的 Fe₂O₃ + MgO 含量(分别为 17.72% 和 20.71%) 比其它砂岩样品高,说明其含有较多的基性组分。岩石 Al₂O₃ / (CaO + K₂O) 比值可以用来反映样品中稳定组分与不稳定组分的相对含量(Bhatia, 1983; Fedo *et al.*, 1995) 大多数砂岩样品的 Al₂O₃ 和 K₂O 含量较高,其 Al₂O₃ / (CaO + K₂O) 比值为 17.6 ~ 42.6,表明砂岩样品中稳定组分含量相对较高。

官道口群下部的三个白云岩样品 SiO₂ 含量分别为 40.36%、62.42% 和 38.35%, 具有较高的 MgO (5.87% ~ 11.46%) 和 CaO 含量(9.37% ~ 18.48%), Mg²⁺ / Ca²⁺ 比值(摩尔比)为 0.87 ~ 1.20。一般认为控制白云石生成的两个主要因素是 Mg/Ca 比值和盐度(Folk and Land, 1975), 官道口群白云岩样品的 Mg/Ca 比值可能反映了当时海水的条件。样品 Hu-13 具有较高的 Al₂O₃ (9.05%)、MgO (10.27%) 和 CaO (11.98%) 含量,可能与其含有较多的粘土矿物有关,如伊利石和高岭石等。

2.3.2 微量元素

在球粒陨石标准化蛛网图中(图3),官道口群所有样品均表现为右倾斜的 REE 配分模式,呈中等程度的轻稀土(LREE)富集和相对平坦的重稀土(HREE)配分模式(LREE/HREE = 3.72 ~ 22.1)。所有样品具有明显的 Eu 负异常(0.47 ~ 0.75)和轻微 Ce 负异常(0.75 ~ 0.93)。砂岩样品中等轻、重稀土分异和明显 Eu 负异常的特征与后太古宙沉积岩样品相似(Taylor and McLennan, 1985),其碎屑锆石

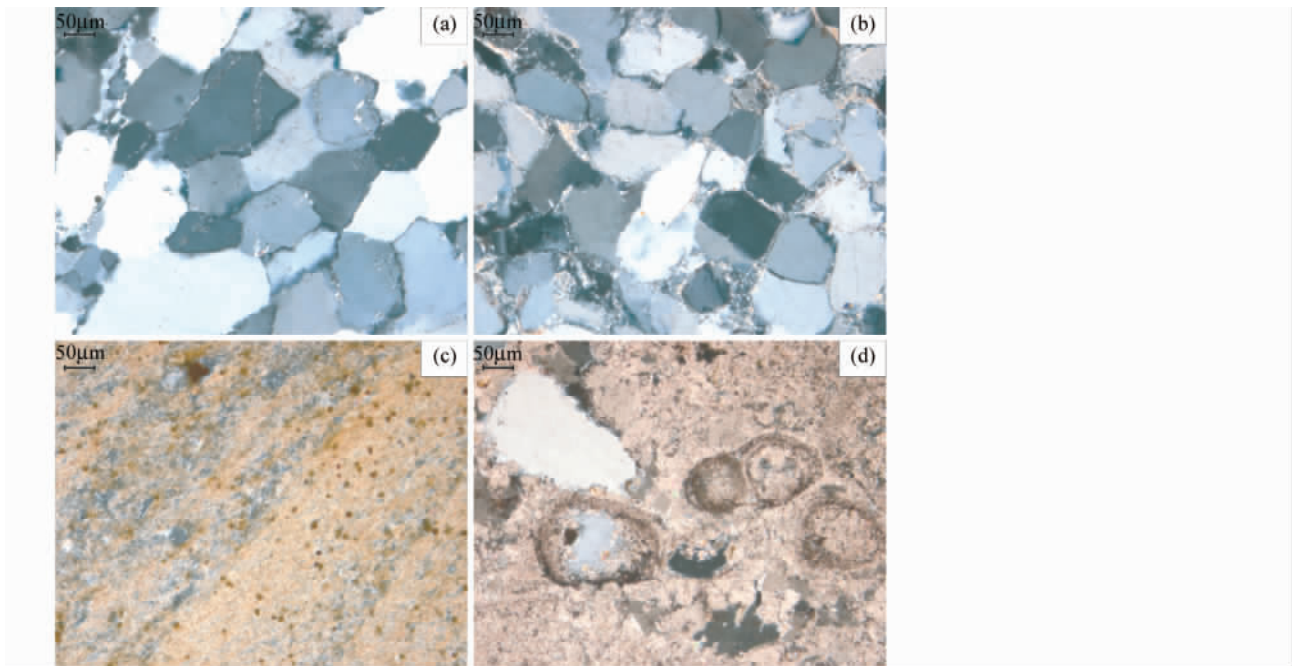


图2 华北克拉通南缘豫西地区官道口群砂岩(a,b)和白云岩(c,d)正交偏光显微照片

(a,b,c和d)分别对应样品Hu-21、Hu-11、GSH12-13和GSH12-7

Fig. 2 The micrographs of sandstones (a,b) and dolomites (c,d) from the Guandaokou Group in the southern margin of the NCC (cross polarized light)

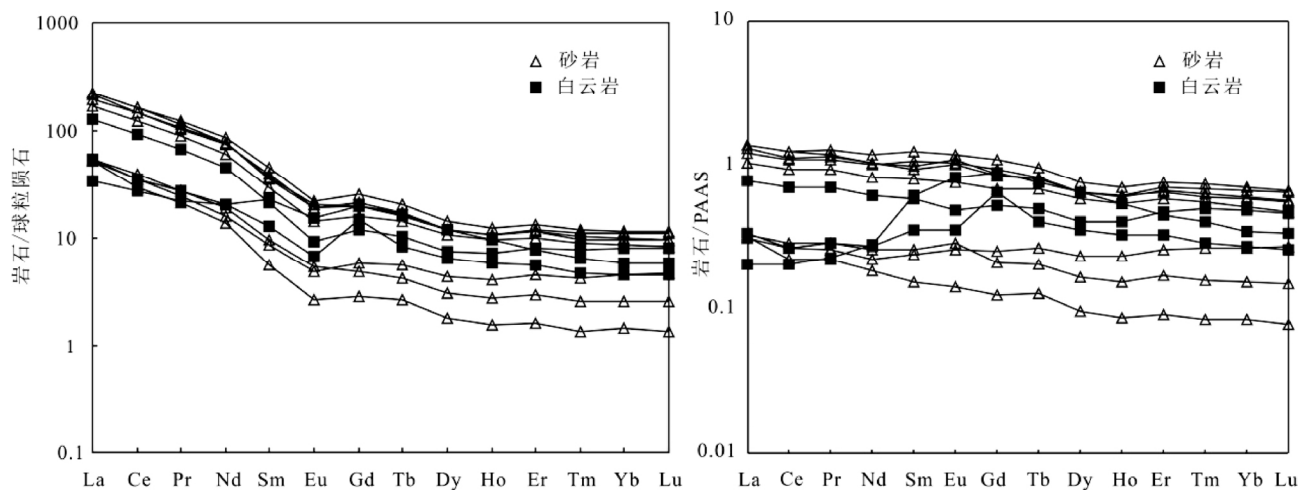


图3 华北克拉通南缘豫西地区官道口群沉积岩稀土元素球粒陨石和澳大利亚后太古代页岩(PAAS)标准化配分型式图(球粒陨石标准化值据Sun and McDonough, 1989; 澳大利亚后太古代页岩标准化值据McLennan, 1989)

Fig. 3 Chondrite- and typical post-Archean shales from Australia (PAAS)-normalized REE patterns of sedimentary rocks of the Guandaokou Group (chondrite and PAAS data after Sun and McDonough, 1989; McLennan, 1989)

表3 华北克拉通南缘熊耳山地区中-新元古代地层柱状图(据关保德等,1988;河南省地质矿产厅,1989)

Table 3 Schematic stratigraphic section of Meso-Neoproterozoic sequences in the Xiong'er shan area of the southern margin of the NCC (after Guan *et al.*, 1988; BGMHRH, 1989)

界	系	群	组	岩性柱状图	岩性描述	沉积环境
新元古界	震旦系	陶湾群	秋木沟组		主要为片状大理岩	滨海相
			风脉庙组		主要为千枚岩和片岩	浅海相
			三岔口组		灰黑色变质钙质砾岩夹细晶大理岩	
	南华系		鱼库组		主要为石英大理岩和黑云白云片岩	临滨海相
			大红口组		以变质粗面岩,粗面安山岩为主,夹绢云石英片岩和白云石大理岩	
	青白口系	栾川群	煤窑沟组		主要为大理岩和绢云千枚岩(石煤层)	深水还原环境
			南泥湖组		主要为片岩,大理岩,底部有石英砂岩	滨海-浅海 (海泛期沉积)
			三川组		下部为变质砂岩,上部为绢云大理岩	
			白术沟组		灰黑色炭质板岩和绢云石英板岩	
			冯家湾组		纹层状细晶白云岩,泥质粉晶白云岩	潮下-潮上带
中元古界	蓟县系	官道口群	杜关组		碎屑细晶白云岩和泥质白云岩	潮间带
			巡检司组		纹层状泥晶白云岩夹燧石条带	碳酸盐潮坪相
			龙家园组		主要为(砾屑,砂屑,粉屑)白云岩,冲刷面有少量灰白色薄层砾岩,潮间带出现有半球状叠层石。	下临滨-过渡带
			高山河组		主要为紫红色石英砂岩,夹泥岩和泥质粉砂岩,底部有火山岩夹层。	临滨-前滨沉积 (板状交错层理)
			长城系	熊耳群		主要为(玄武)安山岩和玄武岩,上部有沉积岩夹层

年龄结果也主要为古元古代(Zhu *et al.*, 2011)。三个白云岩样品的 $\log(Ce/Ce^*)$ 值为 -0.033、-0.090 和 -0.035,均大于 -0.1,指示还原环境(Wright *et al.*, 1987)。

砂岩样品的 ΣREE 含量为 $41.8 \times 10^{-6} \sim 226 \times 10^{-6}$,白云岩样品的 ΣREE 含量为 $51.3 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ 。所有样品的稀土含量变化较大,其中 5 个石英砂岩样品(Hu-18, 19, 20 和 GSH12-5, 11)的 ΣREE 总量($166 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$)和白云岩样品(Hu-13)的 ΣREE 总量较高,可能和其含有较多的碎屑组分有关(McLennan and Taylor, 1991),因为细粒沉积物中较高含量的粘土矿物对稀土元素具有较强的吸附作用(Condie, 1991)。澳大利亚后太古代页岩(PAAS)标准化稀土元素配分模式(图3)显示,所有砂岩样品表现出近似平坦的分布,且五个 ΣREE 含量较高的砂岩与 PAAS 的元素组成很相近(比值为 1 左右),而三个白云岩样品含量均较低。

3 讨论

3.1 华北克拉通南缘中-新元古代沉积地层对比

华北克拉通南缘在古元古代晚期(1.80 ~ 1.75Ga,赵太平等,2004)发育熊耳群火山岩,主要分布在熊耳山小区和澠池-确山小区,之前在嵩箕地区一直没有发现典型的熊耳

群火山岩地层。周洪瑞等(1998)认为是其所处的构造部位所决定的,因为嵩山-箕山地区兵马沟组和马鞍山组的下伏地层为新太古界登封群和古元古代嵩山群,反映其位于华北南缘熊耳裂谷之外,故缺失熊耳群火山岩。但是,劳子强等(1996)发现嵩山地区兵马沟组底部有大量熊耳群火山岩砾石,本文作者和所在课题组在河南箕山地区野外考察时发现,在汝风穴寺存在有熊耳期的杏仁状安山岩(GPS 点位: N 34° 13' 43.9", E 112° 53' 34.9"; 赵太平等,2012)。这说明嵩箕地区位于华北克拉通南部熊耳裂谷的边缘,也有熊耳群岩浆活动的记录,所以三个地层小区的沉积地层都是在熊耳群火山作用之后形成的。根据嵩箕小区、澠池-确山小区和熊耳山小区的地质发育特征、上下地层的接触关系、沉积相类型和岩相古地理环境,并结合地球化学特征和碎屑锆石年龄资料等,可以将三个地层小区的沉积序列进行对比(图4)。

关保德等(1988)根据岩石组合和沉积特征认为嵩箕地层小区可以和澠池-确山地区进行对比。王屋山地区的小沟背组砾岩角度不整合于熊耳群之上,并被汝阳群云梦山组不整合覆盖。嵩山地区兵马沟组砾岩直接角度不整合覆盖于新太古代片麻岩之上,其上被五佛山群马鞍山组不整合覆盖,兵马沟组砾岩中发现有大量熊耳群安山岩砾石,说明其形成于熊耳群之后,与小沟背组时代相当。这两套砾岩层

表4 华北南缘熊耳山地区官道口群砂岩和白云岩的主量(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)地球化学数据Table 4 Major (wt%) and trace elemental ($\times 10^{-6}$) data of sandstones and dolomites from the Guandaokou Group in the Xiong'er shan area of the southern margin of the NCC

样品号	Hu-11	Hu-14	Hu-18	Hu-20	Hu-21	GSH12-2	GSH12-5	GSH12-11	Hu-13	GSH12-1	GSH12-7
岩性	砂岩						硅质白云岩				
SiO ₂	91.16	49.19	68.13	58.80	57.21	85.00	60.50	54.78	40.36	62.42	38.35
TiO ₂	0.06	0.71	0.54	0.55	0.81	0.21	0.58	0.69	0.38	0.18	0.05
Al ₂ O ₃	4.01	20.1	14.9	15.8	15.1	6.19	16.1	18.4	9.05	2.77	1.34
Fe ₂ O ₃	0.98	15.2	3.16	9.86	19.6	2.98	8.67	9.66	1.84	4.31	1.44
MnO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.03	0.27	0.46
MgO	0.36	2.51	1.69	2.67	1.09	0.83	2.46	2.83	10.3	5.87	11.5
CaO	0.13	0.35	0.30	0.32	0.17	0.09	0.34	0.34	12.0	9.37	18.5
Na ₂ O	0.10	0.12	0.12	0.47	0.18	0.05	0.10	0.25	0.08	0.10	0.14
K ₂ O	1.86	8.57	6.79	7.50	4.89	2.41	7.46	8.65	4.58	0.96	0.44
P ₂ O ₅	0.02	0.23	0.20	0.13	0.04	0.06	0.22	0.23	0.05	0.10	0.58
LOI	0.79	2.55	3.87	3.46	0.32	1.70	3.19	3.76	21.5	13.8	27.0
Total	99.47	99.54	99.65	99.61	99.46	99.53	99.59	99.64	100.08	100.19	99.69
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	22.7	2.4	4.6	3.7	3.8	13.7	3.8	3.0			
K ₂ O/Na ₂ O	18.8	71.1	57.3	15.9	27.1	44.3	74.3	34.8			
Al ₂ O ₃ / (CaO + K ₂ O)	17.6	42.6	35.6	19.9	42.4	41.8	36.6	31.3			
Sc	2.58	15.2	10.2	12.8	1.21	6.44	14.4	16.6	7.63	5.15	3.84
V	10.0	223	68.4	81.7	7.30	45.2	66.8	72.1	45.7	43.9	45.7
Cr	20.4	116	81.6	75.6	19.8	38.8	86.3	96.9	66.3	33.6	31.0
Co	0.96	14.1	5.16	12.3	0.85	3.96	13.7	15.5	4.67	7.98	11.2
Ni	5.37	41.7	22.4	39.3	3.68	14.4	41.5	45.7	21.5	15.3	16.5
Cu	2.91	5.72	4.89	4.06	2.95	32.9	33.6	12.1	51.3	6.32	4.25
Zn	18.2	56.9	51.9	93.1	24.9	463	76.9	87.3	38.1	47.4	39.3
Ga	4.40	27.9	19.1	22.3	1.09	8.35	23.3	25.9	13.4	3.74	2.31
Rb	38.8	263	192	234	6.32	76.1	230	261	118	31.4	18.0
Sr	36.0	24.9	59.5	15.1	11.1	9.20	22.7	19.4	23.1	99.6	45.1
Y	5.43	18.3	19.1	18.0	3.84	7.77	18.4	20.7	13.3	11.4	19.0
Zr	63.1	145	218	117	81.9	148	119	127	115	83.4	49.2
Nb	0.57	11.6	9.84	9.80	0.24	3.15	10.4	12.1	9.77	2.06	0.94
Ba	193	495	1270	255	122	144	468	332	188	8340	475
Hf	1.41	3.21	4.83	2.61	1.11	3.33	2.93	3.22	2.81	1.83	1.07
Ta	0.03	0.72	0.57	0.61	0.01	0.20	0.76	0.68	0.67	0.14	0.08
Pb	42.2	13.4	17.5	15.4	12.6	708	10.9	15.9	31.7	12.7	6.27
Th	1.86	9.72	8.42	8.83	0.91	4.03	11.6	13.6	8.45	2.46	1.91
U	0.51	2.52	1.74	1.10	0.31	0.94	1.35	1.72	1.29	0.88	0.62
La	12.8	53.4	50.6	39.6	12.4	12.1	46.2	52.8	29.8	12.9	7.88
Ce	23.5	99.1	90.6	75.0	18.1	21.4	87.9	99.0	56.0	21.4	16.4
Pr	2.60	10.6	10.2	8.27	1.98	2.30	9.76	11.4	6.26	2.56	2.07
Nd	8.98	35.1	35.1	27.9	6.46	7.56	34.7	40.0	20.9	9.48	9.67
Sm	1.48	5.27	5.47	4.42	0.87	1.34	5.99	6.88	3.24	1.99	3.49
Eu	0.32	1.09	1.18	0.84	0.16	0.28	1.11	1.29	0.54	0.39	0.90
Gd	1.01	4.00	4.04	3.22	0.59	1.20	4.42	5.16	2.48	3.09	4.11
Tb	0.16	0.63	0.62	0.54	0.10	0.21	0.64	0.75	0.39	0.32	0.60
Dy	0.79	3.06	3.04	2.75	0.46	1.12	3.09	3.60	1.92	1.68	3.04
Ho	0.16	0.62	0.61	0.54	0.09	0.24	0.61	0.71	0.41	0.33	0.54
Er	0.49	1.99	1.92	1.68	0.27	0.75	1.88	2.20	1.36	0.94	1.30
Tm	0.07	0.28	0.26	0.23	0.04	0.11	0.25	0.31	0.20	0.12	0.16
Yb	0.44	1.87	1.71	1.46	0.24	0.76	1.67	1.98	1.37	0.78	0.99
Lu	0.07	0.28	0.25	0.21	0.04	0.12	0.25	0.29	0.20	0.11	0.15
ΣREE	52.8	217.3	205.6	166.6	41.8	49.5	198.5	226.4	125.1	56.1	51.3
LREE/HREE	15.7	16.1	15.5	14.7	22.1	10.0	14.5	14.1	14.0	6.6	3.7
δEu	0.75	0.70	0.73	0.65	0.63	0.66	0.63	0.63	0.56	0.47	0.72
Ce/Ce*									0.93	0.81	0.92
log(Ce/Ce*)									-0.033	-0.090	-0.035

注: $\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* = 3\text{Ce}_N / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N)$, $\log(\text{Ce}/\text{Ce}^*) > -0.1$ 为正常, 指示还原环境; $\log(\text{Ce}/\text{Ce}^*) < -0.1$ 为异常, 指示氧化环境(Wright *et al.*, 1987)

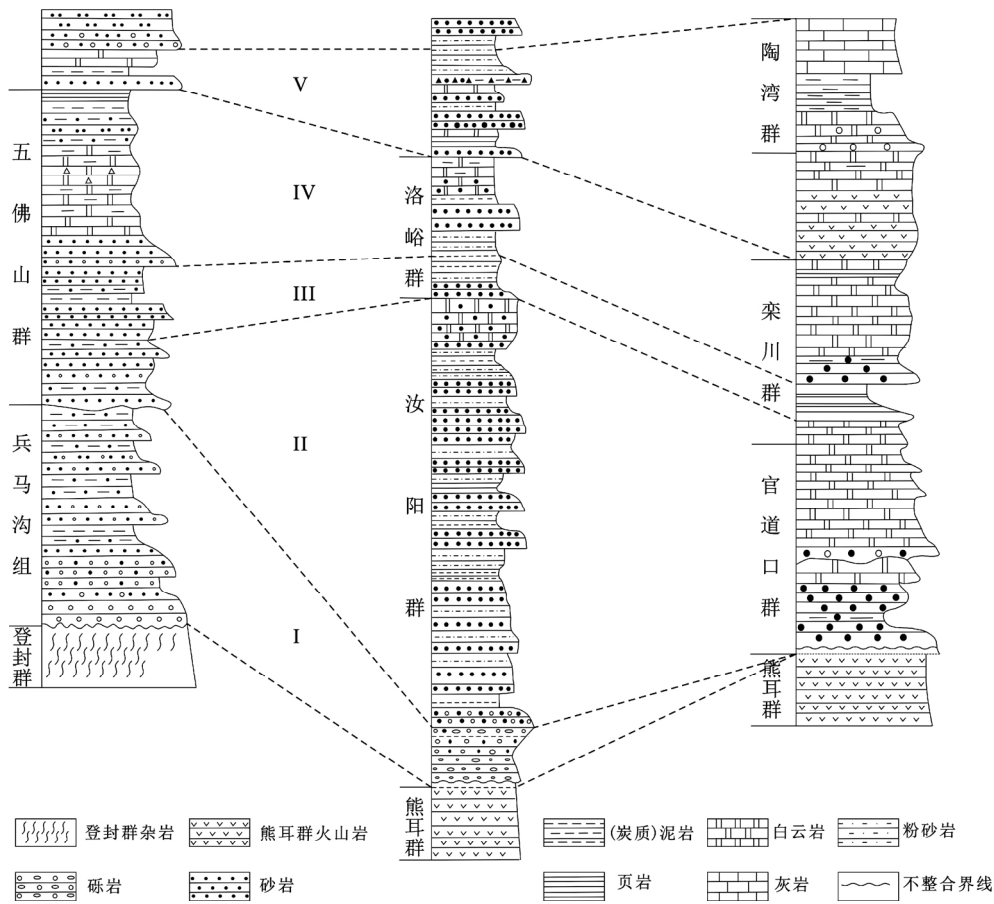


图4 华北克拉通南缘豫西地区中-新元古代地层对比

I-低水位沉积体系, 河流相沉积; II-海侵沉积体系, 河流、潮坪-滨海相沉积; III-最大海泛期的浅海相沉积; IV-高水位沉积体系, 滨海-浅海相沉积; V-河流-浅海相沉积, 为一海侵海退沉积过程

Fig. 4 Stratigraphic comparison of Meso-Neoproterozoic sedimentary sequences in the southern margin of the NCC

的成分和结构成熟度均较低, 表现为山间盆地或泥石流-坡积物沉积特征, 代表华北克拉通南缘沉积盖层形成之前的一次地壳抬升, 为低水位沉积体系域。

澠池-确山小区的汝阳群和熊耳山小区的官道口群均不整合于熊耳群之上, 且在两套地层的底部均发育有一层与熊耳群火山岩岩性和地球化学特征相似的火山岩夹层(河南省地质矿产厅, 1989; 关保德等, 1993), 二者很可能是同一期岩浆活动的产物。汝阳群底部云梦山组最年轻的碎屑锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 1565Ma (Hu *et al.*, 未发表), 说明汝阳群形成于中元古代, 与蓟县系相当。汝阳群和官道口群底部均为红色中-厚层石英砂岩, 为河流相沉积, 而上部表现为陆源碎屑岩-碳酸盐岩过渡的发育特征, 为滨海-浅海相沉积。官道口群上部白云岩样品的 $\log(Ce/Ce^*)$ 值均大于 -0.1, 指示还原环境(Wright *et al.*, 1987), 反映了一个较深水的沉积特征。嵩山地区五佛山群底部马鞍山组最年轻的碎屑锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 1655Ma (胡国辉等, 2012a), 形成于中元古代, 其岩性主要为(长石)石英砂岩, 形成于河流相-滨海相。因此, 中元古代汝阳群、官道口群和五佛山群马鞍山组

可以作为一个海侵沉积体系域, 均伏于层状黑色炭质泥岩(葡峪组、崔庄组和白术沟组)之下。

洛峪群洛峪口组和嵩山地区五佛山群何家寨组均发现有叠层石, 虽然叠层石的类型不同, 但从组合来看, 可与我国蓟县中-新元古代叠层石组合对比, 应属蓟县青白口纪叠层石组合的主要分子, 从生物地层角度看, 汝阳群微古植物面貌更接近新元古代(尹崇玉和高林志, 2000)。这和高林志等(2002)根据西阳河群(熊耳群)顶部古风化壳的确立、汝阳群底部小沟背组下切河谷特征、白草坪组大型具刺源类、洛峪口组宏观藻类的发现以及罗圈组冰碛岩在地层柱中的对比位置将洛峪群归入新元古界(1000~542Ma)的结果一致。因此, 洛峪群可以与嵩山地区五佛山群上部地层进行对比。新元古代早期, 华北克拉通南缘普遍发育深水沉积的细粒陆源碎屑岩, 嵩山地区五佛山群葡峪组、澠池-确山小区洛峪群崔庄组和熊耳山小区栾川群白术沟组的底部均有一层黑色炭质泥(板)页岩, 属于同一次海平面变化旋回的最大海泛期沉积。

嵩箕地区五佛山群上部骆驼畔组和何家寨组主要为滨

海相石英砂岩和较深水环境下形成的薄层条带状灰岩、钙质页岩,顶部被南华系红岭组和寒武系关口组平行不整合覆盖;滉池-确山地区洛峪群三教堂组主要为前滨-临滨石英砂岩,平行不整合覆盖于崔庄组海相炭质页岩之上,局部地区可以看到残留的古风化壳,三教堂组顶部也发现有一层厚约数米的浅海相灰黑色泥岩,而洛峪口组主要为钙质砂岩和泥质(叠层石)白云岩,整体上表现为滨海-浅海过渡的沉积环境;熊耳山地区洛峪群中上部三川组大理岩之上覆盖着南泥湖组中厚层石英砂岩,说明沉积环境发生了明显变化,标志着一个新的沉积旋回的开始,南泥湖组和煤窑沟组主要由片岩和大理岩(原岩为碳酸盐岩)组成,反映一个较深水的沉积环境。因此,这三个地区的三套地层可以进行对比,均形成于较深水的浅海相环境,为高水位沉积体系域。

嵩箕地区震旦系(635~542Ma)红岭组与五佛山群何家寨组呈平行不整合接触,其底部主要为长石石英砂岩,向上迅速变化为过渡带-浅海相的粉砂岩和灰黑色炭质泥岩以及白云质灰岩,表现为最大海泛期的沉积,反映较深水的沉积环境,而寒武系关口组则为砂岩和细砾(砂)岩,表现为河流-滨海相沉积,反映了海退过程;滉池-确山地区的震旦系地层平行不整合覆盖于洛峪群之上,底部主要为滨海相石英砂岩,上部为(叠层石、硅质)白云岩,局部地层界面上下碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)变化明显且有机碳含量较高(周洪瑞等,1999),黄莲垌组顶部含有一层厚约5m的浅海相纹层状硅质岩,其上为粉砂质泥(页)岩夹薄层含海绿石细砂岩等,反映海平面相对下降的特征;熊耳山地区震旦系底部大红口组主要为一套火山岩夹沉积岩组合,其上鱼库组主要为厚层石英大理岩,反映海进过程,上部的深灰色黑白云片岩可能是最大海泛期的沉积,其上的白云石大理岩也反映较深水的沉积环境,而震旦系陶湾群底部为变质钙质砾岩,表现为快速沉积的河流相特征,反映了海水变浅,沉积环境发生了变化,陶湾群上部主要为(变质)碳酸盐岩,可能相当于海进体系,代表高水位沉积环境。综上所述,华北南缘三个地层小区的震旦系地层可能表现为河流-浅海相沉积环境,代表了一个海侵海退过程,反映该时期海平面发生了快速变化。

3.2 物源区分析

碎屑锆石 U-Pb 年龄和地球化学数据能够为沉积岩的物源区提供相关信息(Taylor and McLennan, 1985; Roser and Korsch, 1988; Floyd *et al.*, 1989; McLennan *et al.*, 1995, 2001; Fedo *et al.*, 2003)。华北克拉通南缘三个地层小区的五佛山群、汝阳群和官道口群碎屑锆石年龄主要为 1.60~2.50Ga(胡国辉等, 2012a; Zhu *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 未发表),太古宙的年龄相对很少,表明这三套地层的物源区主要为古元古代的地质体,华北南缘广泛分布的古元古代太华杂岩(1.90~2.45Ga, 第五春荣等, 2008; 万渝生等, 2009; Xu *et al.*, 2009; 时毓等, 2011)、嵩山群石英岩(2.00~2.45Ga, 第五春荣等, 2008; 万渝生等, 2009)、熊耳群火山

岩(赵太平等, 2002, 2004; Zhao *et al.*, 2009)、富钾花岗岩($2399 \pm 24\text{Ma}$, Zhou *et al.*, 2011; $1797 \pm 14\text{Ma}$ 和 $1743 \pm 14\text{Ma}$, Zhao and Zhou, 2009)和基性岩墙(程胜利等, 2003; 胡国辉等, 2010)等均可为中-新元古代沉积岩提供物源,而太古宙的物源可能来自于登封杂岩、TTG 质片麻岩和富钾花岗岩等(Kröner *et al.*, 1988; 万渝生等, 2009; 周艳艳等, 2009; Huang *et al.*, 2010; Diwu *et al.*, 2011)。

官道口群砂岩样品 Hu-11 和 GSH12-2 具有较高的 SiO_2 含量(91.2%和 85.0%)和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值(分别为 22.7 和 13.7),镜下观察可以看到其主要是由石英组成,说明成熟度较高(Roser and Korsch, 1986),而且其 Fe_2O_3 和 MgO 含量都很低,表明其来自于长英质物源区。其它砂岩样品的 SiO_2 含量为 49.2%~68.1%, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值也较低(2.4~4.6),但 Fe_2O_3 和 MgO 含量较高,说明其基性组分含量相对较高。嵩箕地区的五佛山群碎屑沉积岩主要来源于古元古代中酸性组分,有少量基性组分的加入(胡国辉等, 2012b),而滉池-确山地区汝阳群的物源主要也是以长英质物质为主,有少量的中性物质(Hu *et al.*, 未发表)。官道口群砂岩稀土元素表现为相似的右倾斜球粒陨石标准化配分模式,具有明显的 Eu 负异常和较低的 HREE 含量,与嵩箕地区五佛山群和滉池-确山地区汝阳群沉积岩的地球化学特征相似,类似于后太古宙克拉通起源的平均上地壳物质(Taylor and McLennan, 1985)。

因此,华北克拉通南缘三个地区的中元古代沉积岩物源区主要为古元古代形成的长英质物源区,有少量中性和基性物质的加入,这些物质来源于古元古代结晶基底,而太古宙基底提供的物源相对极少。

3.3 华北南缘中-新元古代时期的构造演化

碎屑沉积岩的地球化学特征可以作为判别构造环境的标识(Bhatia 1983; McLennan and Taylor, 1991)。例如,活动大陆边缘以低 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (2.00%~5.00%) 和 TiO_2 (0.25%~0.45%) 为特征, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比率 ≈ 1 ; 从大洋岛弧到被动大陆边缘的砂岩,其 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 、 TiO_2 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比值降低,而 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值增加,并且被动大陆边缘的砂岩一般富含 SiO_2 , 亏损 Na_2O , CaO 和 TiO_2 (Bhatia 1983)。官道口群砂岩样品具有中等的 SiO_2 含量(49.19%~91.16%, 平均为 65.60%), 而 Na_2O (0.05%~0.47%)、 CaO (0.09%~0.35%) 和 TiO_2 (0.06%~0.81%) 含量均较低, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(15.9~74.3) 较高, 远大于 1, 不同于岛弧的砂岩特征(图 5a), 与被动大陆边缘环境相似。在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 构造环境判别图解中, 官道口群砂岩样品显示为被动大陆边缘环境的特征(图 5a)。

地球化学特征表明,嵩山地区五佛山群底部马鞍山组(中元古代)砂岩形成于被动大陆边缘环境,而上部的泥质岩石(新元古代)形成于岛弧环境(图 5a)(胡国辉等, 2012b),滉池-确山地区洛峪群的中元古代汝阳群形成于稳定的被动大

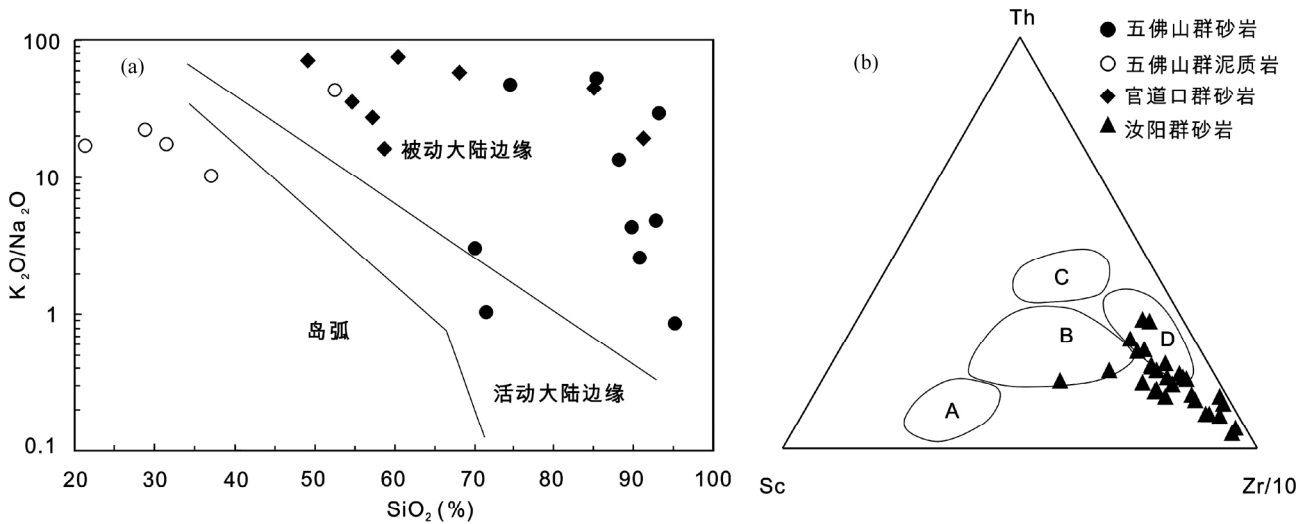


图5 华北克拉通南缘中-新元古代沉积岩构造环境判别图解

图 a 据 Roser and Korsch (1986); 图 b 据 Bhatia and Crook (1986), A-大洋岛弧, B-大陆岛弧, C-活动大陆边缘, D-被动大陆边缘. 五佛山群数据据胡国辉等 (2012b), 汝阳群数据据 Hu *et al.* (未发表)

Fig. 5 Discrimination diagrams of various tectonic settings for Meso-Neoproterozoic sedimentary rocks in the southern margin of the NCC

Fig. 5a after Roser and Korsch (1986); Fig. 5b after Bhatia and Crook (1986): A-oceanic island arc, B-continental arc, C-active continental margin, D-passive continental margin. Geochemical data of Wufoshan and Ruyang groups after Hu *et al.* (2012b) and Hu *et al.* (unpublished)

陆边缘沉积环境 (图 5b) (Hu *et al.*, 未发表), 而且, 五佛山群底部马鞍山组、汝阳群和官道口群底部的砂岩的碎屑锆石年龄都集中分布于 1.70~2.30Ga 之间 (图 6, 数据引自 Zhu *et al.*, 2011; 胡国辉等, 2012a; Hu *et al.*, 未发表), 大于其沉积时代 (中元古代) 表现为稳定的被动大陆边缘环境下形成的沉积岩碎屑锆石年龄分布特征 (Goodge *et al.*, 2002), 明显不同于岛弧和活动大陆边缘环境的碎屑沉积岩的锆石年龄特征 (大多与其沉积时代相近; Degraaff-Surplless *et al.*, 2002)。所以, 华北南缘中元古代为一个稳定的被动大陆边缘沉积盆地, 延续了熊耳群顶部硅质岩的稳定型沉积环境的特征 (徐勇航等, 2008), 随着熊耳三叉裂谷的不断拉张裂解, 华北陆块南缘逐渐处于海陆交互环境, 它们共同表明了熊耳群之后华北克拉通南缘开始进入了一个稳定的沉积阶段, 在此基础上发育了中-新元古代陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积 (孙枢等, 1981, 1982)。但是, 新元古代早期地壳活动性增强, “秦岭”微陆块开始碰撞拼合, 华北南缘位于弧后盆地边缘靠陆一侧, 发育有弧后盆地 (华北南缘和北秦岭) 陆源炭质、炭泥质、泥钙质复理石沉积和碱性、偏碱性岩墙群 (Zhang *et al.*, 1996; 张国伟等, 2001; 陆松年等, 2003), 而五佛山群上部形成于弧后盆地的泥质岩石也说明了华北克拉通南缘受到了秦岭造山带初期的构造活动影响, 发生了沉积环境的转变。

3.4 华北南缘早前寒武纪地质事件

碎屑沉积岩是区域范围内大陆地壳出露的最有代表性

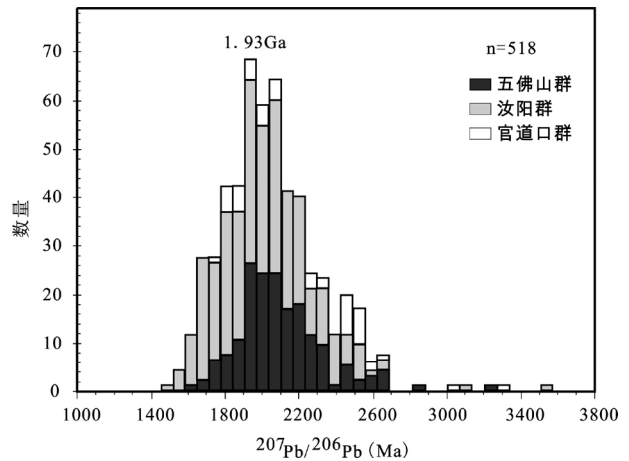


图6 华北克拉通南缘中-新元古代沉积岩碎屑锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分布直方图

五佛山群碎屑锆石年龄数据据胡国辉等 (2012a); 官道口群数据据 Zhu *et al.* (2011); 汝阳群数据据 Hu *et al.* (未发表)

Fig. 6 Histogram of zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of Meso-Neoproterozoic sedimentary rocks in the southern margin of the NCC

Zircon ages of the Wufoshan and Guandaokou groups after Hu *et al.* (2012a) and Zhu *et al.* (2011); Zircon ages of the Ruyang Group after Hu *et al.* (unpublished)

的岩石类型之一, 能够记录一定时期和范围内大陆地壳演化的信息, 是研究大陆地壳形成、演化和化学组分的理想物质

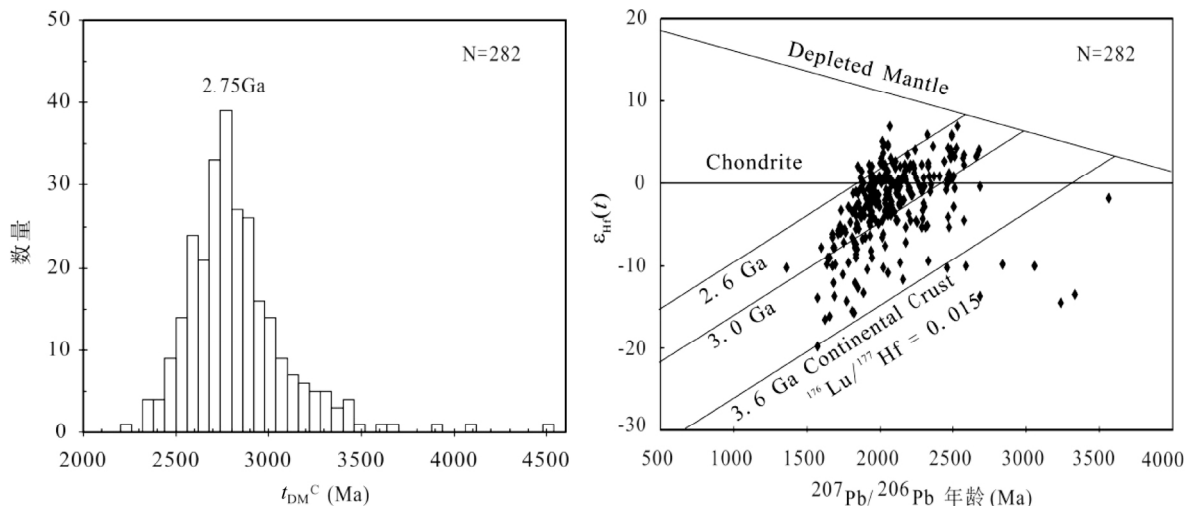


图7 华北克拉通南缘中-新元古代沉积岩碎屑锆石 Hf 同位素组成特征

五佛山群锆石 Hf 同位素数据据胡国辉等(2012a), 官道口群数据据 Zhu *et al.* (2011), 汝阳群数据据 Hu *et al.* (未发表)

Fig.7 Zircon Hf isotopic compositions of Meso-Neoproterozoic sedimentary rocks in the southern margin of the NCC

Zircon Hf isotopic compositions of the Wufoshan and Guandaokou groups after Hu *et al.* (2012a) and Zhu *et al.* (2011). Those of the Ruyang Group after Hu *et al.* (unpublished)

(如 Taylor and McLennan, 1985, 1995; Bhatia and Crook, 1986; McLennan and Taylor, 1982, 1991; Rudnick and Gao, 2003)。记录前寒武纪重大地质事件的岩浆岩和变质岩可能会经历后期的构造运动和风化剥蚀作用而在地表缺失,但是它们的碎屑物质(锆石)能够携带源区的信息保存在前寒武纪的沉积盆地中。碎屑锆石因其稳定的物理化学性质、较高的 U-Th-Pb 和 Hf 同位素封闭温度,能够保留其形成时的特征,用来探讨沉积物源区的物质组成和陆壳演化历史等(Belousova *et al.*, 2010; Condie and Aster, 2010)。

华北南缘三个地层小区中元古代砂岩的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄大多数为古元古代,太古宙的年龄相对很少,最年轻的锆石年龄都在 1.60Ga 左右(Zhu *et al.*, 2011; 胡国辉等, 2012a; Hu *et al.* 未发表)。五佛山群马鞍山组、汝阳群云梦山组和官道口群高山河组的碎屑锆石年龄,主要集中于 1.70~2.30Ga, 峰值为 1.93Ga(图6),而且大多数古元古代的碎屑锆石具有变质锆石的特征。华北克拉通其它地区也发现有该时期的变质作用,如燕山和鄂尔多斯地块的麻粒岩相变质作用事件(2.0~1.9Ga; Zhao *et al.*, 2006)、内蒙古凉城集宁杂岩体中的麻粒岩(SHRIMP U-Pb 定年结果为 $1919 \pm 10\text{Ma}$, Santosh *et al.*, 2009)、内蒙古千里山片麻岩(1.92~1.95Ga, Yin *et al.*, 2009)、熊耳山-小秦岭地区的太华群片麻岩在~1.91Ga 经历了一期变质热事件(时毓等, 2011; 黄道衰等, 2012)。翟明国(2009)总结了华北克拉通元古宙麻粒岩的变质期次和年代,指出高峰期变质作用和退变麻粒岩相-高级角闪岩相的时代分别为~1.91Ga 和 1.84Ga,华北克拉通南缘 1.93±0.01Ga 的碎屑锆石年龄峰值与~1.91Ga 的高峰变质作用的时代基本一致,说明华北南缘该时期发生了一期大范围的变质事件。

已有研究表明,华北克拉通可能为哥伦比亚超大陆的一部分,响应了早期全球超大陆的聚合与裂解(Lu *et al.*, 2002; Wilde *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2003a, b, 2009)。华北克拉通在 1.85Ga 前后发生大规模碰撞拼合,之后发生伸展裂解并且可能一直延续到 1.2Ga,分别对应了哥伦比亚超大陆的汇聚(2.1~1.8Ga)和裂解事件(1.8~1.2Ga)(Zhao *et al.*, 2003b; Hou *et al.*, 2008a, b; Zhang *et al.*, 2009)。华北克拉通南缘中-新元古代沉积地层中发现的大量 2.1~1.8Ga 的碎屑锆石说明了这一时期地壳活跃,发生了强烈的地质事件,尤其是~1.93Ga 的变质事件,可能与哥伦比亚超大陆的碰撞拼合有关。

碎屑锆石 Hf 同位素组成可以很好地示踪大陆地壳的生长和再造相关的信息(Belousova *et al.*, 2010; Condie and Aster, 2010)。研究表明,华北克拉通大规模陆壳物质的生长发生在新太古代(2.8~2.5Ga),同位素资料显示地壳物质生长的峰期在 2.8~2.7Ga(Wu *et al.*, 2005; Zhai *et al.*, 2011),与全球典型克拉通的地壳生长时间相似(Brown, 1979; Dewey and Windley, 1981; McLennan and Taylor, 1982, 1983)。华北克拉通南缘三个地层小区的砂岩碎屑锆石 Hf 两阶段模式年龄大多集中于 3.0~2.5Ga, 峰值为 2.75Ga(图7a), Hf 同位素组成多数分布于 2.6Ga 和 3.0Ga 的地壳演化线之间(图7b),表明在中太古代晚期-新太古代发生了一期地壳生长,而且在华北南缘也发现有 2.85~2.70Ga 的 TTG 片麻岩(Kröner *et al.*, 1988; Sun *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 2009; 第五春荣, 2010; 周艳艳, 2011),此外在 2.6~2.5Ga 期间也有代表地壳生长的 TTG 存在(劳子强等, 1996; 王泽九等, 2004; 万渝生等, 2009; 周艳艳等, 2009)。华北南缘嵩山群碎屑锆石也记录了大量~2.5Ga 和 2.75~2.80Ga 的

年龄,且以 2.5Ga 的年龄峰值最为明显,研究表明嵩山群石英岩的母岩岩浆以新太古代再造的地壳物质为主(万渝生等,2009;第五春荣等,2008)。本文的碎屑锆石 Hf 同位素研究结果表明 ~2.75Ga 为华北克拉通南缘重要的陆壳生长期。

4 结论

(1) 华北克拉通南缘三个地层小区的中-新元古代陆源碎屑岩-碳酸盐岩地层可以分为低水位、海侵和高水位沉积体系,从北向南海水逐渐加深,熊耳山地层小区是沉积盆地中心。

(2) 熊耳山地区官道口群底部的砂岩和华北南缘其它地区中元古代的沉积岩均形成于稳定的被动大陆边缘环境,而新元古代的沉积岩形成于弧后盆地,表明当时沉积环境发生了转变,可能受到秦岭造山带早期微陆块俯冲碰撞的影响。

(3) 华北南缘中元古代沉积岩的碎屑锆石 Hf 同位素组成集中于 2.6Ga 和 3.0Ga 地壳演化线区域内, Hf 两阶段模式年龄峰值为 2.75Ga,表明 2.75Ga 左右是华北克拉通南缘重要的陆壳生长期。

(4) 华北南缘中-新元古代沉积物质主要来自于古元古代长英质物源区,太古宙的物源相对很少。碎屑锆石年龄主要分布于 1.6~2.3Ga 之间,峰值为 1.93Ga,代表了该时期华北南缘及相邻地区发生了一次重要的变质事件。

致谢 本文野外考察和采样工作得到王汾连和金昌的帮助;实验过程中受到了中国科学院地球化学研究所漆亮研究员和中国科学院广州地球化学研究所刘颖老师的帮助;胡波博士和杨阳博士对本文提出了宝贵的修改意见;在此一并表示衷心感谢!

References

Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology*, 216(3-4): 249-270

Belousova EA, Kostisyn YA, Griffin WL, Begg GC, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2010. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, 119(3-4): 457-466

Bhatia MR. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627

Bhatia MR and Crook KAW. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193

Brown GC. 1979. The changing pattern of batholith emplacement during earth history. In: Atherton MP and Tarney J (eds.). *Origin of Granite Batholiths*. Natwich: Siva, 106-115

Bureau of Geology and Mineral Resources of He'nan Province (BGMRH). 1989. *Regional Geology of He'nan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1-774 (in Chinese)

Cheng SL, Lao ZQ and Zhang Y. 2003. *Introduction to Geology of*

Songshan Area. Beijing: Geological Publishing House, 91-121 (in Chinese)

Condie KC. 1991. Another look at rare Earth elements in shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(9): 2527-2531

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

Degraaff-Surpless K, Graham SA, Wooden JL and McWilliams MO. 2002. Detrital zircon provenance analysis of the Great Valley Group, California: Evolution of an arc-forearc system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 114(12): 1564-1580

Dewey JF and Windley BF. 1981. Growth and differentiation of the continental crust. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 301(1461): 189-206

Dickinson WR. 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(2): 695-707

Dickinson WR. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa GG (ed.). *Provenance of Arenites*. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences. Dordrecht, Boston and Lancaster: D. Reidel Publishing Company, 148: 333-361

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. 2010. The crustal formation and evolution of the southern margin of the North China Craton: Zircon U-Pb chronology and Hf isotopic compositions in the Taihua and Dengfeng complexes. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1-95 (in Chinese)

Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 20(1): 149-170

Fedo CM, Nesbitt HW and Young GM. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921-924

Fedo CM, Sircombe KN and Rainbird RH. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277-303

Floyd PA, Winchester JA and Park RG. 1989. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1-3): 203-214

Folk RT and Land LS. 1975. Mg/Ca ratio and salinity: Two controls over crystallization of dolomite. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 59(1): 60-68

Gao LZ and Qiao XF. 1992. Terminal Precambrian filamentous algae in Hunjiang, Jinlin and their environmental significance. *Geological Review*, (2): 140-148 (in Chinese with English abstract)

Gao LZ, Yin CY and Wang ZQ. 2002. New view of the Neoproterozoic strata on the southern margin of the North China platform. *Geological Bulletin of China*, 21(3): 130-135 (in Chinese with English abstract)

Gao LZ, Zhang CH, Shi XY, Zhou HR and Wang ZQ. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikou System in North China. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 249-255 (in Chinese with English abstract)

Gao LZ, Zhang CH, Yin CY, Shi XY, Wang ZQ, Liu YM, Liu PJ, Tang F and Song B. 2008. SHRIMP zircon ages: Basis for refining the chronostratigraphic classification of the Meso- and Neoproterozoic strata in North China old land. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(3): 366-376 (in Chinese with English abstract)

- Gao LZ, Zhang CH, Liu PJ, Tang F, Song B and Ding XZ. 2009. Reclassification of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphy of North China by SHRIMP zircon ages. *Acta Geologica Sinica*, 83 (6): 1074 – 1084
- Goode JW, Myrow P, Williams IS and Bowring SA. 2002. Age and provenance of the Beardmore Group Antarctica: Constraints on Rodinia supercontinent breakup. *The Journal of Geology*, 110(4): 393 – 406
- Guan BD, Geng WC, Rong ZQ and Du HY. 1988. Middle and Late Proterozoic Strata of the Northern Slope of East Qinling, He'nan Province. Zhengzhou: He'nan Science and Technology Press, 41 – 49 (in Chinese)
- Guan BD, Lü GF and Wang YX. 1993. Evolution of Meso-Neoproterozoic sedimentary basin in He'nan platform. *He'nan Geology*, 11(3): 181 – 191 (in Chinese)
- He YH, Zhao GC, Sun M and Xia XP. 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 168(3–4): 213 – 222
- Hou GT, Santosh M, Qian XL, Lister G and Li JH. 2008a. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms. *Gondwana Research*, 14(3): 395 – 409
- Hou GT, Santosh M, Qian XL, Lister GS and Li JH. 2008b. Tectonic constraints on 1.3 ~ 1.2 Ga final breakup of Columbia supercontinent from a giant radiating dyke swarm. *Gondwana Research*, 14(3): 561 – 566
- Hu B, Zhai MG, Guo JH, Peng P, Liu F and Liu S. 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade Group in the northern margin of the North China Craton and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 193 – 211 (in Chinese with English abstract)
- Hu GH, Hu JL, Chen W and Zhao TP. 2010. Geochemistry and tectonic setting of the 1.78 Ga mafic dyke swarms in the Mt. Zhongtiao and Mt. Song areas, the southern margin of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1563 – 1576 (in Chinese with English abstract)
- Hu GH, Zhao TP, Zhou YY and Yang Y. 2012a. Depositional age and provenance of the Wufoshan Group in the southern margin of the North China Craton: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions. *Geochimica*, 41(4): 326 – 342 (in Chinese with English abstract)
- Hu GH, Zhou YY and Zhao TP. 2012b. Geochemistry of Proterozoic Wufoshan Group sedimentary rocks in the Songshan area, He'nan Province: Implications for provenance and tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3692 – 3704 (in Chinese with English abstract)
- Huang DM, Zhang DQ, Wang SY, Zhang YX, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2012. 2.3 Ga Magmatism and 1.94 Ga 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 – 576 (in Chinese with English abstract)
- Huang XL, Niu YL, Yi GX, 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
- Kröner A, Compston W, Zhang GW, Guo AL and Todt W. 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in He'nan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16(3): 211 – 215
- Lao ZQ, Wang SY, Zhang L, Gong YS and Zhou HW. 1996. The Evolution of Precambrian Tectonic in Songshan Region. Beijing: China Environmental Science Press, 87 – 95 (in Chinese)
- Li HK, Li HM and Lu SN. 1995. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and their geological implications. *Geochimica*, 24(1): 43 – 48 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Lu SN, Li HM, Sun LX, Xiang ZQ, Geng JZ and Zhou HY. 2009. Zircon and beddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1396 – 1404 (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 Asia Earth Sciences*, 30(1): 573 – 590
- Li XH, Li ZX, Wingate MTD, Chung SL, Liu T, Lin GC and Li WX. 2006. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, Northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, 146(1–2): 1 – 15
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Zong KQ and Wang DB. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537 – 571
- Lu SN, Yang CL, Li HK and Li HM. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 5(1): 123 – 131
- Lu SN, Li HK, Chen ZH *et al.* 2003. Meso-Neoproterozoic Geological Evolution in the Qinling Orogeny and its Response to the Supercontinental Events of Rodinia. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 194 (in Chinese)
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160(1–2): 77 – 93
- McLennan SM and Taylor SR. 1982. Geochemical constraints on the growth of the continental crust. *The Journal of Geology*, 90(4): 347 – 361
- McLennan SM and Taylor SR. 1983. Continental freeboard sedimentation rates and growth of continental crust. *Nature*, 306(5939): 169 – 172
- McLennan SM. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169 – 200
- McLennan SM and Taylor SR. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *The Journal of Geology*, 99(1): 1 – 21
- McLennan SM, Compston W, Bock B and Hemming SR. 1995. Age distribution of detrital zircon in North American foreland sedimentary rocks of the Taconian and Acadian orogenies. V. M. Goldschmidt Conference, Program and Abstracts, 72
- McLennan SM, Bock B, Compston W, Hemming SR and McDaniel DK. 2001. Detrital zircon geochronology of Taconian and Acadian foreland sedimentary rocks in New England. *Journal of Sedimentary Research*, 71: 305 – 317
- Peng P, Zhai MG, Guo JH, Kusky T and Zhao TP. 2007. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton. *Gondwana Research*, 12(1–2): 29 – 46
- Peng P, Liu F, Zhai MG and Guo JH. 2012. Age of the Miyun dyke swarm: Constraints on the maximum depositional age of the Changcheng System. *Chinese Science Bulletin*, 57(1): 105 – 110
- Qi L, Jing H and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507 – 513

- Roser BP and Korsch RJ. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650
- Roser BP and Korsch RJ. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. New York: Elsevier, 3, 1–64
- 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
- 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 Xiaoqinling area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3095–3108 (in Chinese with English abstract)
- Su WB, Li HK, Xu L, Jia SH, Geng JZ, Zhong HY, Wang ZH and Pu HY. 2012. Luoyu and Ruyang Group at the south margin of the North China Craton (NCC) should belong in the Mesoproterozoic Changchengian System: Direct constraints from the LA-MC-ICPMS U-Pb age of the Tuffite in the Luoyukou Formation, Ruzhou, He'nan, China. *Geological Survey and Research*, 35(2): 96–108 (in Chinese with English abstract)
- Sun S, Cong BL and Li JL. 1981. Evolution of the Henan-Shaanxi sedimentary basin of the Middle and Late Proterozoic age (Part I). *Scientia Geologica Sinica*, 16(4): 314–322 (in Chinese with English abstract)
- Sun S, Chen ZM and Wang QC. 1982. Evolution of He'nan-Shaanxi sedimentary basin of the Middle and Late Proterozoic age (Part II). *Scientia Geologica Sinica*, 17(1): 5–12 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42(1): 313–345
- Sun Y, Yu ZP and Kröner A. 1994. Geochemistry and single zircon geochronology of Archaean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China. *Journal of South Asian Earth Sciences*, 10(3–4): 227–233
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–312
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265
- Wan YS, Zhang QD and Song TR. 2003. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changcheng System in the Ming Tombs area, Beijing: Constraints on the protolith nature and maximum depositional age of the Mesoproterozoic cover of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2500–2506
- Wan YS, Liu DY, Wang SY, Zhao X, Dong CY, Zhou HY, Yin Y, Yang CX and Gao LZ. 2009. Early Precambrian crustal evolution in the Dengfeng area, He'nan Province (eastern China): Constraints from geochemistry and SHRIMP U-Pb zircon dating. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 982–999 (in Chinese with English abstract)
- Wang J, Li SQ, Wang SB *et al.* 1992. The Langshan-Bayan Obo Rift System. Beijing: Peking University Press, 1–132 (in Chinese)
- Wang ZJ, Shen QH and Wan YS. 2004. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Shipaihe "Metadiorite Mass" from Dengfeng County, He'nan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(3): 295–298 (in Chinese with English abstract)
- Wilde SA, Zhao GC and Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the Late Archaean and its final amalgamation at 1.8Ga: Some speculation on its position within a global Paleoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 85–94
- Wright J, Schraer H and Holser WT. 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 631–644
- 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
- 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. *Mineralogy and Petrology*, 97(1–2): 43–59
- Xu YH, Zhao TP, Zhang YX and Chen W. 2008. Geochemical characteristics and geological significances of the Dagushi Formation siliciclastic rocks, the Paleoproterozoic Xiong'er Group from the southern North China Craton. *Geological Review*, 54(3): 316–326 (in Chinese with English abstract)
- Yin CQ, Zhao GC, Sun M, Xia XP, Wei CJ, Zhou XW and Leung WH. 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
- Yin CY and Gao LZ. 2000. Discovery of macroscopic algal fossils in the Luoyukou Formation Lushan County, western He'nan, and its stratigraphic significance. *Acta Geologica Sinica*, 74(4): 339–343 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2009. Two kinds of granulites (HT-HP and HT-UHT) in North China Craton: Their genetic relation and geotectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1753–1771 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP, Sun Y, Zhou DW and Guo AL. 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen. *Science in China (Ser. D)*, 39(3): 225–234
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 1–863 (in Chinese)
- Zhang SH, Zhao Y, Yang ZY, He ZF and Wu H. 2009. The 1.35Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3–4): 588–600
- Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2003a. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly. *Science in China (Series D)*, 46(1): 23–38
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2003b. 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, Li SZ, Liu SW and Zhang J. 2006. Composite nature of the North China granulite-facies belt: Tectonothermal and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 9(3): 337–348
- Zhao GC, He YH and Sun M. 2009. The Xiong'er volcanic belt at the southern margin of the North China Craton: Petrographic and geochemical evidence for its outboard position in the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent. *Gondwana Research*, 16(2): 170–181
- Zhao TP, Jing CW, Zhai MG, Xia B and Zhou MF. 2002. Geochemistry and petrogenesis of the Xiong'er Group in the southern regions of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 59–69 (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
- Zhao TP and Zhou MF. 2009. Geochemical constraints on the tectonic setting of Paleoproterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2-3): 183-195
- Zhao TP, Zhang ZH, Zhou YY *et al.* 2012. Precambrian Geology of the Songshan Area, Henan Province, China. Beijing: Geological Publishing House, 1-206 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HR, Wang ZQ, Cui XS, Lei ZY and Dong WM. 1998. Study on sedimentology and sequence stratigraphy of the Mesoproterozoic and Neoproterozoic in the west of He'nan Province. *Geosciences*, 12(1): 17-24 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HR. 1999. Mesoproterozoic and Neoproterozoic sequence stratigraphy of western Henan and its regional correlation. *Geosciences*, 13(2): 221-222 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HR, Wang ZQ, Cui XS *et al.* 1999. The Meso-Neoproterozoic Stratigraphic Study of Southern North China Platform. Beijing: Geological Publishing House, 5-8 (in Chinese)
- Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 331-347 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Zhou YY, Zhao TP, Wang CY and Hu GH. 2011. Geochronology and geochemistry of 2.5 to 2.4 Ga granitic plutons in the southern margin of the North China Craton: Implications for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Gondwana Research*, 20(1): 171-183
- Zhu XY, Chen FK, Li SQ, Yang YZ, Nie H, Siebel W and Zhai MG. 2011. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition. *Gondwana Research*, 20(1): 194-204
- Zuo JX. 2002. Characteristic of lithofacies palaeogeography and sedimentary environment of the Middle Proterozoic Wufushan Group in Jishan Area, He'nan Province, China. *Geological Science and Technology Information*, 21(3): 1-34 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 程胜利, 劳子强, 张翼. 2003. 嵩山地质博览. 北京: 地质出版社, 91-121
- 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. 2010. 华北克拉通南缘早前寒武纪地壳的形成和演化——太华、登封杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1-95
- 高林志, 乔秀夫. 1992. 浑江末前寒武纪丝状藻类及其环境意义. *地质论评*, (2): 140-148
- 高林志, 尹崇玉, 王自强. 2002. 华北地台南缘新元古代地层的新认识. *地质通报*, 21(3): 130-135
- 高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 26(3): 249-255
- 高林志, 张传恒, 尹崇玉, 史晓颖, 王自强, 刘耀明, 刘鹏举, 唐峰, 宋彪. 2008. 华北古陆中、新元古代年代地层框架 SHRIMP 锆石年龄新依据. *地球学报*, 29(3): 366-376
- 关保德, 耿午辰, 戎治权, 杜慧英. 1988. 河南东秦岭北坡中-上元古界. 郑州: 河南科学技术出版社, 41-49
- 关保德, 吕国芳, 王耀霞. 1993. 河南省地台区中-晚元古代构造沉积盆地演化分析. *河南地质*, 11(3): 181-191
- 河南省地质矿产厅. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-774
- 胡波, 翟明国, 郭进辉, 彭彭, 刘富, 刘爽. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义. *岩石学报*, 25(1): 193-211
- 胡国辉, 胡俊良, 陈伟, 赵太平. 2010. 华北克拉通南缘中条山-嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境. *岩石学报*, 26(5): 1563-1576
- 胡国辉, 赵太平, 周艳艳, 杨阳. 2012a. 华北克拉通南缘五佛山群沉积时代和物源区分析: 碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据. *地球化学*, 41(4): 326-342
- 胡国辉, 周艳艳, 赵太平. 2012b. 河南嵩山地区元古宙五佛山群沉积岩的地球化学特征及其对物源区和构造环境的制约. *岩石学报*, 28(11): 3692-3704
- 黄道衰, 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. *地质论评*, 58(3): 565-576
- 劳子强, 王世炎, 张良, 官银山, 周汉文. 1996. 嵩山地区前寒武纪地质构造特征及演化. 北京: 中国环境科学出版社, 87-95
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 24(1): 43-48
- 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 28(10): 1396-1404
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏等. 2003. 秦岭中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社, 1-194
- 彭彭, 刘富, 翟明国, 郭敬辉. 2011. 密云岩墙群的时代及其对长城系底界年龄的制约. *科学通报*, 56(35): 2975-2980
- 时毓, 于津海, 徐夕生, 唐红峰, 邱检生, 陈立辉. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. *岩石学报*, 27(10): 3095-3108
- 苏文博, 李怀坤, 徐莉, 贾松海, 耿建珍, 周红英, 王志宏, 蒲含勇. 2012. 华北克拉通南缘洛峪群-汝阳群属于中元古界长城系——河南汝州洛峪口组层凝灰岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的直接约束. *地质调查与研究*, 35(2): 96-108
- 孙枢, 从柏林, 李继亮. 1981. 豫陕中-晚元古代沉积盆地(一). *地质科学*, 16(4): 314-322
- 孙枢, 陈志明, 王清晨. 1982. 豫陕中-晚元古代沉积盆地(二). *地质科学*, 17(1): 5-12
- 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
- 王楫, 李双庆, 王宝良等. 1992. 狼山-白云鄂博裂谷系. 北京: 北京大学出版社: 1-132
- 王泽九, 沈其韩, 万渝生. 2004. 河南登封石牌河“变闪长岩体”的锆石 SHRIMP 年代学研究. 地球学报, 25(3): 295-298
- 徐勇航, 赵太平, 张玉修, 陈伟. 2008. 华北克拉通南部古元古界熊耳群大古石组碎屑岩的地球化学特征及其地质意义. 地质论评 54(3): 316-326
- 尹崇玉, 高林志. 2000. 豫西鲁山洛峪口组宏观藻类的发现及地质意义. 地质学报, 74(4): 339-343
- 翟明国. 2009. 华北克拉通两类早前寒武纪麻粒岩(HT-HP 和 HT-UHT) 及其相关问题. 岩石学报, 25(8): 1753-1771
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1-863
- 赵太平, 金成伟, 翟明国, 夏斌, 周美夫. 2002. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因. 岩石学报, 18(1): 59-69
- 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间的制约. 科学通报, 49(22): 2342-2349
- 赵太平, 张忠慧, 周艳艳等. 2012. 中国嵩山前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1-206
- 周洪瑞, 王自强, 崔新省, 雷振宇, 董文明. 1998. 豫西地区中-新元古代地层沉积特征及层序地层学研究. 现代地质, 12(1): 17-24
- 周洪瑞. 1999. 豫西地区中-新元古界层序地层研究及其区域地层对比意义. 现代地质, 13(2): 221-222
- 周洪瑞, 王自强, 崔新省等. 1999. 华北地台南部中新元古界层序地层研究. 北京: 地质出版社, 5-8
- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑锋. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331-347
- 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——以嵩山和鲁山为例. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所
- 左景勋. 2002. 河南箕山地区中元古界五佛山群沉积环境及岩相古地理特征. 地质科技情报, 21(3): 1-34