

华北中部古元古代末期构造-热事件性质及其构造成因模式

李江海 刘守偈 侯贵廷

(教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

提要:古元古代末期为华北克拉通演化的重大转折时期,但这一时期重大构造热事件序列及其构造格局的研究较薄弱。笔者在区域构造分析基础上,结合最新的同位素年龄制约,探讨古元古代末期区域构造演化过程及其成因模式。太行山—恒山基性岩墙群对应于燕辽坳拉谷与太行坳拉谷的夭折支,它们共同构成非对称的三叉坳拉谷系。非造山的岩浆活动序次依次为:花岗岩、伟晶岩(1.85~1.80 Ga)、基性岩墙群侵位(1.80~1.77 Ga)、斜长岩、碱性花岗岩、环斑花岗岩(1.71~1.70 Ga)、火山岩喷发(1.68 Ga)等。下伏基底性质对比及其同位素年龄表明,18 亿年前后燕辽—太行山地区发生大规模隆升,隆升范围达上千千米,核心区处于燕辽—太行山坳拉谷系中心位置。基底隆升事件与浅表层伸展构造—非造山岩浆活动在时空上相吻合,表明地幔柱模式可以合理解释上述区域隆升及其伸展裂解事件。

关键词:古元古代;中元古代;碰撞造山;伸展作用;地幔柱;华北

中图分类号:P597 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)06-1256-11

随着同位素年龄数据积累,不断证明 18 亿年左右构造热事件(传统的“吕梁运动”)对华北克拉通区域构造演化有重要影响。这一事件在变质基底中有普遍的同位素年代记录,由于缺乏区域构造格局的严格制约,对其性质形成不同的认识及争论^[1-9],焦点在于这一事件发生于碰撞造山带还是板内伸展环境。可以概括为以下问题:(1)19~18 亿年前构造热事件的组成、序列、构造性质;(2)构造热事件的空间影响范围,是带状还是面状,对应的区域构造格局及构造边界;(3)早期碰撞造山、再造与后期区域伸展的空间叠加关系;(4)不同层次上构造热事件的耦合关系。

由于变质基底经历长期构造演化,构造格局与构造热事件的对应关系的研究非常薄弱,仅从同位素年龄数据本身难于获得构造热事件性质及其构造背景的系统认识,需要区域构造格局的制约。为此,笔者从华北中部的燕辽—太行山—恒山—五台山等地古元古代末期区域构造入手,在区域构造编图及若干地点的地质剖面野外研究基础上,结合新近的同位素年代学制约,通过这一时期变质基底构造热事件、岩浆活动、浅表层构造环境综合分析对比,探讨 18 亿年左右构造热事件性质及其构造成因模式。

1 华北中部古元古代末期构造格局(1.80 Ga)

华北克拉通基底主要形成于新太古代活动陆缘环境,通过大规模俯冲、增生及微陆块碰撞拼合,在太古宙末期发生大陆克拉通化。古元古代初期开始伸展裂解发育早期盖层,在古元古代末期,华北再次与其他陆块碰撞形成更大尺度克拉通陆块,因造山带出现于克拉通西北缘,使克拉通西北部被强烈改造,形成内蒙古南部—吕梁山区北部—北东东向构造格局^[7]。

中元古代初,华北克拉通开始以伸展构造为特征,出现大规模的网络状坳拉谷—裂谷系、基性岩墙群、非造山花岗岩带等^[3,5,8-11](图 1),这一时期的构造活动形成华北克拉通的主体构造轮廓。华北克拉通现保留的区域构造显示,克拉通北部及南部均以中元古代裂谷——坳拉谷为边界,在坳拉谷轴部及其附近出现非造山花岗岩类,裂谷系之间的基底区出现大面积的恒山—太行山基性岩墙群侵位。在克拉通东部地区除燕辽地区外,裂谷系并不发育。

华北克拉通中部的燕辽—太行山坳拉谷,较好保留了 3 个分支,从(长城系)厚度等值线轮廓判断,东北支较长(燕

收稿日期:2006-04-19;改回日期:2006-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40472097)资助。

作者简介:李江海,男,1965 年生,博士,教授,博士生导师,主要从事大陆基底构造与克拉通盆地研究与教学;E-mail: jhli@pku.edu.cn。

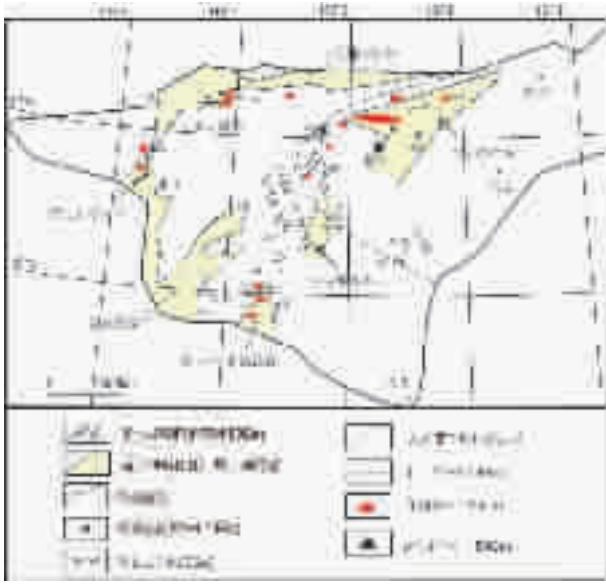


图 1 华北克拉通中元古代初构造格局略图(1.80 Ga)

Fig.1 Geological sketch map showing the tectonic framework of the North China craton in the early Mesoproterozoic(1.80 Ga)

山—辽西地区)、NE—NEE 向展布,南支 NNE 向延伸(太行山区)。长城系沉积盖层与变质基底之间不整合面清楚,值得注意的是,底部沉积地层不整合于新太古代—古元古代变质基底上(25~18 亿年),东部地区(如密云—冀东地区)界面上下地层年代间隔较大,下伏基底出现麻粒岩相变质岩,地质年代间隔可达 7 亿年以上(图 2),与伸展造成的断块掀斜剥蚀有关。燕辽—太行山拗拉谷向南变窄,与熊耳—中条裂谷

构造关系不明。

拗拉谷系底部地层(长城系)常具有双重结构,发育上下两个区域不整合面,分别对应早期断陷作用和晚期拗陷作用。早期不整合面具有分隔性强、被正断层截切等特点,具有较长时间间断,常为异岩不整合,与断陷盆地掀斜作用。晚期不整合面为披盖式,常超覆于断陷盆地两侧时代差别较大的基底之上,展布面积巨大,与晚期拗陷沉降相关。

2 华北中部古元古代末期基性岩墙群与非造山岩浆活动(1.70~1.80 Ga)

在古元古代末期伴随拗拉谷系的发育,华北中部发生多种类型的非岩浆活动及基性岩墙群侵位,包括斜长岩、辉长岩、闪长岩、花岗岩、环斑花岗岩、碱性岩等,涉及超基性—酸性侵入岩。其中,太行山—恒山基性岩墙群和冀北—密云非造山岩浆岩带规模较大,分别出现于拗拉谷之间及拗拉谷内部及边缘的高级变质基底内。

2.1 基性岩墙群

大规模的太行山—恒山基性岩墙群主要分布于燕辽与太行拗拉谷分支交汇部位(图 1),对应于拗拉谷系的北西向夭折支,岩墙群以北西向为主(走向为 330°~340°),区域分布范围的长度约 350 余千米,宽度范围约 100 km,在尺度上与其他两个拗拉谷系分支接近,共同构成三叉形态,代表伸张裂隙系统尺度的大小。它们侵位于新太古代—古元古代变质基底,局部侵位于长城系底部地层,被长城系上部地层不整合覆盖。但考虑到基性岩墙群侵位于一定地壳深处,这种地质关系为基性岩墙群被剥蚀抬升后的记录,仅能说明基性岩墙群的形成早于上覆地层,并不能说明其具体时代差异的大小。

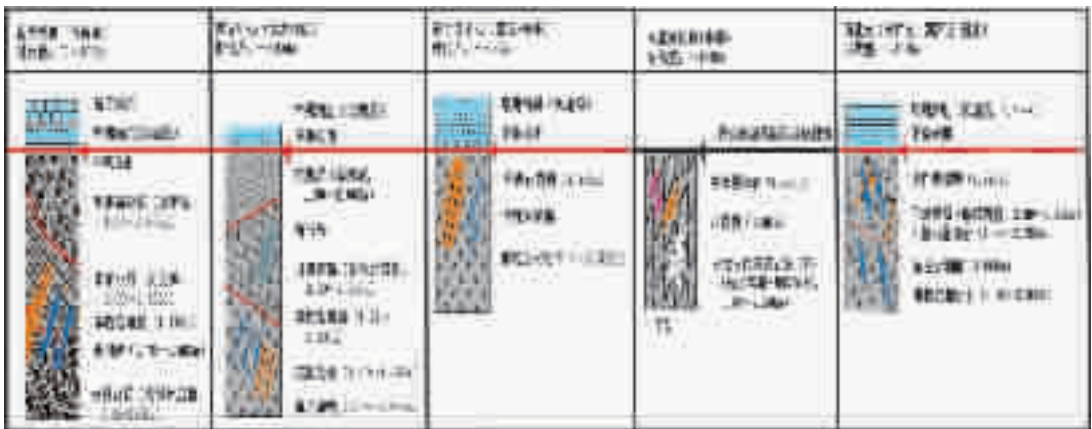


图 2 燕辽—太行山拗拉谷系沉积盖层—基底不整合面区域对比图

1—五台山区;2—北太行山区;3—冀东地区;4—冀北承德地区;5—冀西北—晋北地区

Fig.2 Diagram showing the correlation of basal unconformity between the sedimentary cover and basement of the Yanliao-Taihang aulacogen system

1-Wutai Mountain;2-Northern Taihang Mountain;3-Eastern Hebei;4-Chengde area, Northern Hebei;5-Northwestern Hebei-Northern Shanxi

恒山东部、冀西北等地 NW 向基性岩墙群获得了 1.77~1.78 Ga 的锆石 SHRIMP 及 Ar-Ar 同位素年龄(表 1), 侵位于非常短的时限内(约 10 Ma 的时间间隔内), 指示巨量基性岩浆在短期内的爆发过程, 与世界典型基性岩墙群侵位时限类似, 这些基性岩墙群的时代略滞后于燕辽—太行坳拉谷系初始伸展时间, 侵位过程明显受周围坳拉谷发育相关的伸展构造应力场控制。上述证据支持基性岩墙群为坳拉谷系早期夭亡支的构造解释, 代表区域性伸展裂解事件。在燕辽坳拉谷与太行坳拉谷交汇部位, 还出现侵位于古元古代地层内的辉长岩体及东西向基性岩墙群, 在冀东—密云地区发育北东向基性岩墙群。基性岩墙群构造方位、流动方向及磁组构研究均支持岩浆活动中心大致处于燕辽坳拉谷与太行坳拉谷交汇部位^[9]。另外, 鲁西花岗岩—绿岩带也出现 NNW 向的基性岩墙群^[10], 地质时代早于恒山—太行山区基性岩墙群(表 1)。

恒山—太行山基性岩墙群近于直交克拉通基底构造线(太古宙片麻岩穹隆及古元古代孔兹岩系—S 型花岗岩带), 并不是古元古代造山带分布, 表明它们不是古元古代造山带伸展垮塌的产物。它们处于坳拉谷系之间, 走向近于平行克拉通的西南伸展边缘, 表明区域伸展对基性岩墙群侵位的控制。伸展率估算结果^[11]表明, 基性岩墙群表现为极有限的脆性破裂伸展, 平均伸展率为 0.25%~0.48%。

2.2 非造山深成岩带

非造山深成岩带主要分布于华北中西部及北部边缘地区。中元古代初期, 燕辽—太行山坳拉谷内部及其边缘深成岩浆活动(1.70~1.85 Ga)(表 2), 主要受坳拉谷相关的区域断裂控制, 岩浆岩类包括环斑花岗岩、碱性杂岩、斜长岩杂岩等, 出现于典型的克拉通内伸展环境。沿尚义—赤城—古北口断裂出现石英正长岩、花岗岩、辉长岩、超基性岩等。北部兴隆地区出现大庙斜长岩—辉长岩体, 南部为密云环斑花岗岩体, 这一条深成岩带近东西向展布, 与燕辽坳拉谷东支构造演化关系密切。在太行山坳拉谷近南北向的辉长岩—辉绿岩岩脉或岩墙、岩床, 侵位于古元古代地层内, 并被长城系地

层不整合覆盖。同期非造山花岗岩、闪长岩体还见坳拉谷边缘的北太行山区、五台山区、吕梁山、恒山及辽西等地(表 2)。在晋北—冀西北高级变质区还有超基性岩活动(煌斑岩、金伯利岩)(1837±57 Ma), 标志着克拉通岩石圈根带的形成。

根据大量同位素年龄制约(表 2), 燕辽坳拉谷及其周围非造山岩浆活动事件序列如下: 1) 新太古代高级变质基底内花岗岩、伟晶岩侵位, 这些岩浆活动多邻近内蒙古南北古元古代再造区出现, 与冀北造山带造山后岩浆活动(1.90 Ga 左右)在时间上接近, 滞后于冀北造山带内造山后岩浆活动 1 亿年左右, 记录造山活动改造的异常地壳向正常地壳的转变过程。另外, 还发生晋北金伯利岩喷发(1.85~1.80 Ga)。2) 太行山—恒山基性岩墙群侵位(1.80~1.77 Ga)于坳拉谷北西向夭亡支内, 受克拉通伸展产生的裂隙系统控制。3) 碱性杂岩—环斑花岗岩—斜长岩侵位(1.71~1.70 Ga)。4) 团山子—大红峪组火山岩的沉积(1.68 Ga)。

上述岩浆活动主体发生于坳拉谷发育初期(1.85~1.70 Ga)的伸展构造背景下。古元古代末期华北西北部北缘发生碰撞造山、陆壳构造加厚, 孔兹岩系重熔形成 S 型花岗岩(另文讨论)。随后克拉通地壳在区域伸展下减薄, 又重熔形成广泛分布的花岗岩及伟晶岩。在坳拉谷发育初期, 上地幔基性岩浆沿裂隙上升到中地壳内, 沿裂隙近水平运移、侵位, 沿北西向的夭亡支形成大规模的恒山—太行山基性岩墙群^[10-11]。随着地壳持续伸展和减薄, 坳拉谷深部基性岩浆结晶分异后, 形成斜长质岩浆^[9], 并在燕辽坳拉谷边缘侵位和结晶。在坳拉谷轴部地壳强烈减薄, 太古宙下地壳减压重熔形成花岗岩—环斑花岗岩^[9], 它们滞后于基性岩墙群侵位约 60 Ma, 代表陆壳持续减薄、酸性岩浆侵位结晶的产物。燕辽坳拉谷内火山喷发活动有限, 并且滞后于深成岩浆活动, 与其残留于克拉通内部相一致, 表明伸展规模有限。而保存于陆块边缘的中条山—熊耳裂谷在发育初期就伴随强烈火山喷发活动, 是强烈伸展作用的产物, 并因此发生超大陆裂解和北秦岭洋盆的形成。

表 1 基性岩墙群同位素年龄

Table 1 Isotopic ages of the mafic dyke swarms of the North China craton

采样地点	地质特征	侵位时代及定年方法	资料来源
恒山辉绿岩墙群	北西向, 围岩为新太古代片麻岩	1769±2.5 Ma(锆石)	李江海等 ^[12]
大同辉绿岩墙群	北西向, 围岩为新太古代片麻岩及古元古代孔兹岩系	1778±3 Ma(SHRIMP)	彭澎等 ^[13]
南太行山辉绿岩墙群	北西向及北东向, 围岩为新太古代片麻岩	1780.7±0.5 Ma(全岩 Ar-Ar)	廖超林等 ^[14]
		1765.3±1.1(全岩 Ar-Ar)	
		1774.7±0.7(全岩 Ar-Ar)	
鲁西辉绿岩墙群	北西向, 围岩为新太古代片麻岩及绿岩带	1844.3±8.9(SHRIMP)	侯贵廷等 ^[10]
		1830±17 Ma(SHRIMP)	
		1790Ma(SHRIMP)	

表 2 非造山深成岩带同位素年龄

Table 2 Isotopic ages of anorogenic plutonic rocks in the North China craton

地质单元	围岩	岩体侵位时代及测年方法	资料来源
冀北—辽西和怀柔碱性杂岩	新太古代片麻岩	(1726±12)Ma TIMS 锆石 U—Pb	任康绪等 ^[5]
		(1717.9±24)Ma TIMS 锆石 U—Pb	郁建华等 ^[6]
		(1836±27)Ma TIMS 锆石 U—Pb	
大庙斜长岩杂岩	古元古代片麻岩	(1697.3±09)Ma 锆石 U—Pb	
		(1715±6)Ma 锆石 U—Pb; (1693±7)Ma 锆石 U—Pb	赵太平等 ^[7]
		(1730±16)Ma 锆石 U—Pb	
北京密云环斑花岗岩	新太古代片麻岩	(1706±15)Ma 锆石 U—Pb;	宋彪等 ^[8]
		(1691±2)Ma 锆石 U—Pb;	
五台山凤凰山非造山钾质花岗岩	新太古代片麻岩	(1697±2)Ma 锆石 U—Pb; (1683±4)Ma 锆石 U—Pb	郁建华等 ^[9]
芦芽山石英二长岩、紫苏花岗岩	古元古代片麻岩	(1758±13)Ma 单颗粒锆石 U—Pb	李惠民等 ^[2]
团山子组和大红峪组钾火山岩		(1794±13)Ma SHRIMP	耿元生等 ^[21]
		(1800±7)Ma 锆石 U—Pb	耿元生等 ^[22]
		(1683±67)Ma	陆松年等 ^[23]
康保二长花岗岩		(1625±6)Ma 单颗粒锆石 U—Pb	李怀坤等 ^[24]
		(1854±5)Ma、(1808±14)Ma(结晶年龄)单颗粒锆石 U—Pb	李承东等 ^[25]
		(1872±19)Ma SHRIMP(结晶年龄)	李基宏等 ^[26]
阜平花岗质伟晶岩脉	新太古代片麻岩	(1885±38)Ma SHRIMP(结晶年龄)	
		(1850±9.6)Ma (结晶年龄)	Wilde et al ^[27]
		(1790±8)Ma SHRIMP(结晶年龄)	Liu et al ^[28]
恒山花岗伟晶岩脉	高压麻粒岩包体间	(1799±7)Ma 单颗粒锆石 U—Pb 年龄(结晶年龄)	
		(1859±4)Ma 单颗粒锆石 U—Pb 年龄	Kroner ^[1]

3 区域隆升作用与变质基底退变质作用

3.1 不整合面与下伏基底的地质年代间隔与隆升剥蚀范围

燕辽—太行山坳拉谷沉积地层(长城系)不整合于新太古代—古元古代变质基底上,值得注意的是,其沉积盖层与变质基底之间的年龄差较大,并且下伏基底的地质组成和时代也变化较大(图 2)。在冀东—密云、冀西北、恒山等地区,长城系不整合于新太古代麻粒岩相变质基底上,不整合面上缺失地层时代跨度达 7 亿年之久,向该坳拉谷外围的五台山、南太行等地,长城系底部不整合于古元古代末期弱变质地层上(以五台山郭家寨亚群和太行山甘陶河群为代表),不整合面上缺失地层的时代跨度也明显减小,缺失地层时代范围仅为 2~3 亿年。在燕辽坳拉谷核心区及周边的密云—冀东、辽西、鲁西等地,古元古代沉积盖层因强烈隆升而被剥蚀,出露新太古代花岗片麻岩—绿岩带或麻粒岩基底(大于 2.50 Ga)组成,并且完好保留新太古代构造格局。无论麻粒岩区还是低级区普遍获得老于 2.50 Ga 的锆石 U—Pb 同位素年龄,很少记录古元古代晚期构造热事件。而在中南部的五台、南太行等地,变质基底内仍保留古元古代弱变质地层,表明隆升幅度非常有限。

依据中元古代坳拉谷底部沉积地层不整合面的区域对比,可以大致圈出新太古代基底杂岩到古元古代末期的隆升出露范围(图 1),即隆起区以燕辽—太行山坳拉谷为中心(冀东—密云地区)向外,基底隆升幅度及剥蚀量逐渐减小。若参照五台山区残留的古元古代地层厚度(东冶亚群、郭家寨亚群)推断,中心区域隆升幅度超过 4.6 km。华北古元古代末期

隆升剥蚀区分布范围的直径超过 1 000 km,为世界古大陆所罕见。由燕辽—太行山坳拉谷中心区向外,恒山—太行基性岩墙群所侵位的围岩也有明显的区域变化,由新太古代麻粒岩相—角闪岩相区(密云、辽西、冀东、恒山、太行山、内蒙古南部)渐变为低级变质岩区或古元古代地层区(五台山西南部、中条山、吕梁山)。为此,燕辽坳拉谷发育初期,涉及大范围地壳大幅度隆升及风化剥蚀作用。

长城系底部发育有近千米厚的石英岩巨砾岩层,长城系之下的不整合面是至少代表整个古元古代的间断,在此期间可能发生过许多地质事件,包括沉积了由基底侵蚀而再停积的分选完好的石英岩层,其后又遭破坏而构成了长城系底砾岩的石英砾石源区。

由上述中元古代地层底部不整合区域对比及其分布形式判断,在燕辽—太行山坳拉谷发育前,下伏基底伸展破裂前后经历大规模的隆升事件,裂谷中心区(冀东、鲁西、辽西、密云、恒山)基本上未保留大范围古元古代地层,而外围(五台、吕梁)广泛保留古元古代地层,记录了核心区与外围差异性的剥蚀作用,中心部位剥蚀地层的时代间隔可达 6~7 亿年,累计剥蚀厚度可能超过 10 km,涉及范围可达上千千米的直径(图 1),并以冀东为中心地区隆升规模较大,造成太古宙基底杂岩强烈隆升剥蚀而最终出露地表,而向外隆升幅度减小,仅出露中低级变质岩区或古元古代地层。以地幔柱活动可以较好地解释上述区域规模的隆升及其随后的大陆伸展裂解事件^[9]。

3.2 古元古代末期同位素年龄记录与构造热事件性质

大量的锆石 SHRIMP 测年研究揭示了 1.87~1.80 Ga 的

表3 基底杂岩的最晚期同位素年龄

Table 3 Latest isotopic ages of the of North China craton basement complexes

地质单元	测年方法及年龄	地质含义	资料来源
恒山条带状片麻岩	(1872±17) Ma SHRIMP(结晶年龄: 2520±15 Ma)	变质年龄	王凯怡等 ^[31]
恒山石榴石英岩	(1872±17) Ma SHRIMP(结晶年龄 2527±10 Ma)	变质年龄	Zhao et al ^[32]
恒山基性高压麻粒岩	(1827±10) Ma SHRIMP	变质年龄	王凯怡等 ^[31]
恒山基性高压麻粒岩	(1850±0.5) Ma 锆石 Pb-Pb 蒸发法	变质年龄	Kroner et al ^[1]
恒山雁门关含石榴石片麻岩	(1895±17) Ma SHRIMP(结晶年龄 2525±11 Ma)	变质年龄	Kroner et al ^[1]
恒山大石峪闪长质条带片麻岩	(1881±8) Ma SHRIMP(结晶年龄 2455±2 Ma)	变质年龄	Kroner et al ^[1]
恒山灰色片麻岩	1820 Ma (下交点)(结晶年龄 2520 Ma, 上交点)	变质年龄	王仁民等 ^[33]
恒山基性岩	1818 Ma Ar-Ar		王仁民等 ^[33]
恒山基性麻粒岩	(1850±2) Ma 锆石 U-Pb		常向阳等 ^[34]
	(1718±22) Ma Pl Ar-Ar		Wang et al ^[35]
五台山斜长角闪岩	(1756±90) Ma Hb Ar-Ar		Wang et al ^[35]
	(1781±20) Ma Hb Ar-Ar		Wang et al ^[35]
阜平英云闪长片麻岩	(1805±48) Ma SHRIMP(结晶年龄: 2514±11 Ma)	变质年龄	Zhao et al ^[32]
阜平坊里片麻岩	(1817±26) Ma SHRIMP	变质年龄	Guan et al ^[36]
阜平奥长花岗岩片麻岩	(1861±20) Ma SHRIMP(结晶年龄 2499±6 Ma)	变质年龄	Zhao et al ^[32]
阜平花岗闪长质片麻岩	(1824±9) Ma SHRIMP(结晶年龄, 2485±9 Ma)	变质年龄	Zhao et al ^[32]
	(1826±12) Ma SHRIMP(结晶年龄 2084±12 Ma)		
阜平南岗 monzon-花岗岩闪长片麻岩	(1850±11) Ma SHRIMP (结晶年龄 2023±24 Ma)	变质年龄	Zhao et al ^[32]
宣化西望山基性麻粒岩	(1834±4) Ma (SHRIMP), (1852±8) Ma (Ar-Ar)		郭敬辉等 ^[37]
怀安高压基性麻粒岩	(1824±18) Ma 单矿物内部等时线(1833±23) Ma, 变质锆石 U-Pb	角闪岩相退变质年龄	郭敬辉等 ^[38]
怀安高压基性麻粒岩	(1817±120) Ma (SHRIMP)	变质年龄	
宣化西望山高压基性麻粒岩	(1803±9) Ma (SHRIMP), (1819±16) Ma (SHRIMP)		Guo et al ^[39]
石榴石花岗岩	(1836±18) Ma 锆石 U-Pb		郭敬辉等 ^[40]
宣化张全庄花岗闪长质片麻岩	1850 Ma SHRIMP		刘敦一等 ^[41]
包头石片沟斑状角闪花岗岩	(1820±8) Ma 单颗粒		王惠初等 ^[42]
包头腮忽洞角闪二长花岗岩	(1819±10) Ma 单颗粒		王惠初等 ^[42]
包头大老虎店细粒二长花岗岩	(1853±10) Ma 单颗粒		王惠初等 ^[42]
承德高压麻粒岩	(1831±4) Ma 单颗粒	变质年龄	钟长汀等 ^[43]
承德高压麻粒岩	(1817±170) Ma 锆石 U-Pb	变质年龄	毛德宝等 ^[44]
建平安台沟磁铁矿英岩	下交点年龄(1806±16) Ma (变质年龄 2487±1 Ma, 碎屑年龄约 2600 Ma)		Kroner et al ^[45]
密云变质性岩墙	(1801±57) Ma 矿物等 Sm-Nd 等时线, (1717±34) Ma 全岩-矿物等时线		贺高品等 ^[46]
			陈能松等 ^[47]
南太行黑云斜长片麻岩	黑云母等时线年龄(1826±27) Ma、坪年龄(1793±2.3) Ma(不同单元)		王岳军等 ^[48]

同位素年龄, 它们主要由锆石边缘或后期结晶锆石获得, 与锆石普遍发生再生、重结晶或铅丢失相关。而相同锆石内核或相同地质体的其他组锆石年龄分布于 2.65~2.10 Ga (常为结晶年龄)(表 3)^[1-2, 32, 36], 或在锆石 U-Pb 年龄谐和图上, 1.87~1.80 Ga 表现为下交点年龄。它们在地质上对应于角闪岩相变质重熔作用或花岗岩侵位(图 3)。变质岩的 Ar-Ar 同位素年龄普遍获得 1.90~1.80 Ga, 记录后期构造热事件对基底杂岩的叠加改造或升降退变质作用^[1-2, 32]。

恒山—太行山—冀西北—内蒙古南部等地高级变质区不同岩石单元(包括高压麻粒岩、孔兹岩系、TTG 片麻岩、古元古代侵入体等)中的锆石, 均获得 1 850~1 820 Ma 的变质年龄(表 2)。这些同位素年龄普遍年轻于冀北造山带变质事件及造山后花岗岩年龄 1 900~2 000 Ma。受不同测年矿物同位素封闭温度的限制, 新太古代变质基底的冷却年龄可以持续到 1 750~1 720 Ma。上述年龄记录在空间分布上与北西向的恒山—太行山基性岩墙群相一致, 记录坳拉谷系北西向夭亡高级变质基底的热扰动事件, 它们在时间上略早或同步于

北西向的恒山—太行山基性岩墙群的侵位年龄, 表明构造热事件与伸展初期构造活动相关, 而非所谓的古元古代碰撞造山事件的记录^[49]。

恒山、密云等高级变质岩区普遍发现角闪岩—麻粒岩岩相变基性岩墙, 它们在古元古代末期经历高级变质, 并显示特征的“石榴石红眼圈结构”, 常解释为 IBC 型 PTt 轨迹, 与高级变质岩区伸展隆升、长期等压冷却相对应, 抬升冷却持续时间达 1~2 亿年 (1.85~1.70 Ga)^[47, 50-51]。高级变质基底获得大量变质矿物的 Ar-Ar 年龄表明, 它们在 1.85~1.82 Ga 前后开始大规模冷却, 时间上滞后早期花岗岩侵位, 但早于恒山—太行山基性岩墙群侵位。另外, 高级变质基底的晚期同位素年龄均比低级区年轻, 记录持续时间较长的隆升过程, 较大的抬升幅度造成大陆深层次地壳出露地表。与高级区不同的是, 低级区(特别是在五台山、南太行)很少保存 18 亿年左右的锆石变质年龄记录^[52], 但获得了 17~18 亿年的变质矿物 Ar-Ar 同位素年龄^[35], 以及非造山花岗岩 18 亿年左右的侵位年龄。这些资料表明低级变质区这一时期发生有限幅度

的抬升和退变质。

大量锆石 U-Pb 年龄表明, 基底变质事件持续时间为 1.85~1.82 Ga (表 3), 略早于的非造山岩浆活动, 变质事件的年龄记录面状分布于坳拉谷系内及其边部的隆升区域, 并非集中于所谓的华北中部 18 亿年碰撞构造带内^[1-2,4,9]。华北中西部及东北部早期的岩性构造单元, 在 18 亿年前后普遍经历构造热事件的叠加改造作用, 应代表一个超级的(伸展)构造热事件在大范围内的强烈影响, 而非简单的中部线状碰撞造山带的影响。它们与地表坳拉谷系及基性岩墙群密切相关, 支持地幔柱模式^[9], 而非线状的碰撞造山活动。同位素年龄表明, 基底隆升核心区构造热事件时代为 1.80~1.83 Ga, 外围(太行山—五台山)区低级变质的古元古代地层记录的构造热事件时代为 1.85~1.88 Ga, 表明从核心区相外围隆升结束时间及隆升幅度的差异性。核心区隆升结束时间较晚, 造成高级变质岩被大幅度抬升而出露地表。另外, 北西向夭亡支基底的同位素年龄老于燕辽和太行坳拉谷分支的基底, 表明外围基底隆升结束时间较早。

燕辽坳拉谷周围基底 18 亿年左右的伸展构造热事件与冀北造山带 20~19 亿年事件时间上近于连续分布, 空间上也有重叠。18 亿年左右的伸展构造热事件影响到华北克拉通广大范围, 而 20~19 亿年的构造热事件影响范围非常局限, 主要涉及克拉通西北部, 特别是北部边缘地区。在克拉通东部基底, 18 亿年的同位素年龄记录较少, 表明当时东部已完全克拉通化, 而西北部则涉及了从造山带前陆改造区向区域伸展构造环境的转化, 冀北古元古代造山带直接开始伸展垮塌。因此, 华北克拉通 18 亿年左右的这一超级构造热事件, 具有面状分布的区域影响和对前期不同区域构造背景及其地质单元的强烈改造, 特别是造成克拉通高级变质基底的抬升冷却, 并由此造成华北克拉通基底的最终形成和构造稳定, 开始发育沉积盖层。

4 构造成因模式

燕辽—太行山坳拉谷主体处于克拉通内部区域隆升范围的核心区, 使其相对完整保留了三叉裂谷特征。而外围区主要残留坳拉谷分支, 其他裂谷分支已随超大陆裂解、洋盆扩展而未保留下来。因此, 中元古代初期华北主体的构造格局表现为以燕辽地区为核心、具有不完整的向外放射状坳拉谷分支, 坳拉谷的尖端指向克拉通巨幅隆起核心区。燕辽—太行山切过整个克拉通基底, 基底发生巨幅度隆升判断, 支持地幔柱面状隆升相关的裂解过程, 而非简单的造山后伸展垮塌作用。燕辽—太行山坳拉谷内火山岩喷发不发育或相对滞后(大红峪组火山岩), 表明它未发生强烈伸展构造活动。同期形成的熊耳—中条山坳拉谷残遗留于克拉通南缘, 伸展及火山活动非常强烈, 其他两个分支已扩张为洋盆而消亡, 并造成克拉通南缘的伸展裂解边界。华北克拉通这一时期表现为坳拉谷—裂谷系网络及基性岩墙群发育, 其北部及西南部边界为伸展形成的开放边界, 并在克拉通西北部形成独特

的锐角形态及伸展裂解边缘, 指示华北克拉通从超大陆腹地发生构造裂解。

燕辽—太行山坳拉谷 3 个分支夹角有明显差, 为非对称的三叉裂谷平面形态。另外, 其南支、东支相对发育, 两者之间的连续性也较差。西北夭亡支以同时代基性岩墙群形式出现, 伸展规模也非常有限。燕辽—太行山坳拉谷的非对称性, 难以简单地解释为地幔柱垂向活动的产物, 还应考虑其他因素的影响。由于燕辽—太行山坳拉谷与下伏基底构造不完全一致, 基底构造格局对其形态的影响可能非常有限。太行山—恒山基性岩墙群以北西向为主, 并处于各坳拉谷之间, 切过基底构造线, 与陆块边缘的冀北古元古代造山带垂直或以大角度相交。太行山—恒山基性岩墙群在区域上近平行克拉通西南伸展边缘(中元古代被动大陆边缘), 表明它们并非造山伸展垮塌的产物, 侵位过程受克拉通尺度的伸展构造应力场控制^[9]。

古元古代末期华北陆块北缘出现 NEE 向造山带, 与其他陆块碰撞拼合(2.10~1.90 Ga), 陆块规模、厚度显著增加。在华北西北部裂谷系的形成还受邻近的冀北造山带及其再造区构造控制, 陆块边缘再造活动与板内伸展的时间间隔极短。即深层地壳尚处于强烈挤压背景下, 浅层次地壳已开始伸展, 克拉通非造山岩浆活动与造山后岩浆活动在时间(1.90~1.85 Ga)和空间上渐变过渡。

大量岩浆活动使中下地壳发生强烈热扰动, 伴随基底伸展抬升冷却, 基底岩石同位素体系重新计时。从年龄统计结果分析(图 3), 基底抬升冷却与区域伸展在时间上相重叠, 以恒山—太行山基性岩墙群侵位为标志, 区域伸展构造活动至少在 1.80 Ga 已强烈活动, 它们与基底构造热事件在时间上同步和连续, 空间分布上叠合。因此, 古元古代—中元古代初, 华北中北部构造热事件涉及了伸展背景下, 不同岩浆活动、基底退变质—抬升及地表地壳系的发育过程。

华北克拉通在古元古代晚期主要经历西北部的碰撞造山作用(2 000~1 900 Ma 之前), 克拉通北部被动陆缘沉积俯冲碰撞形成孔兹岩系及 S 型花岗岩带, 在此背景下开始了中元古代初地幔柱主导的区域性伸展活动。以燕辽—太行山坳拉谷为例, 根据已有同位素年龄、区域构造及其构造热事件, 区域伸展构造演化可以划分为以下 4 个阶段(图 4):

- (1) 隆升阶段(1 900~1 850 Ma), 地幔柱开始活动, 造成区域性穹状隆起, 变质基底开始逐渐被抬升冷却;
- (2) 伸展阶段(1 850~1 800 Ma), 克拉通不均匀张裂, 形成燕辽—太行山坳拉谷的南支和东北两个分支, 局部伴随超镁铁质火山喷发, 这也是区域隆起的高峰期。
- (3) 燕辽—太行山坳拉谷的西北分支夭折, 基底内发生恒山—太行山基性岩墙群侵位(1 770~1 780 Ma), 其他两个分支持续伸展, 发生非造山花岗岩—斜长岩杂岩侵位(1 720~1 700 Ma)。
- (4) 裂谷沉降衰亡阶段(1 700~1 500 Ma), 坳拉谷大面积沉降, 沉积大红峪—高于庄组, 并向外围超覆。

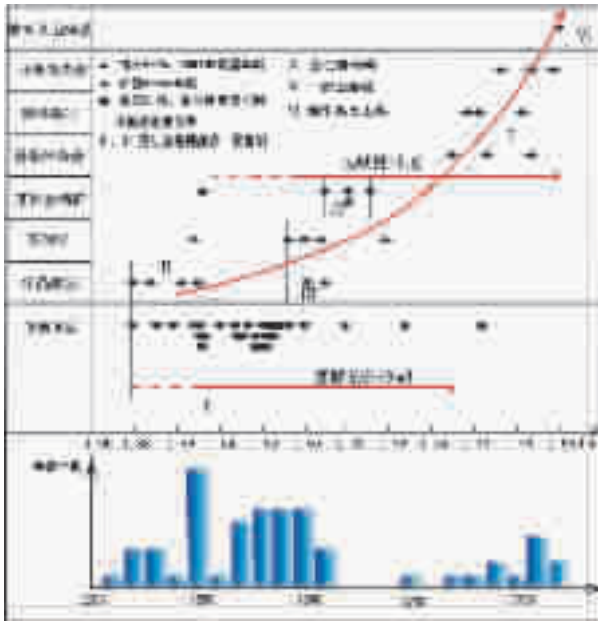


图3 燕辽—太行山坳拉谷及其周边基底构造热事件序列
Fig.3 Major tectono-thermal events of the basement in the Yanliao-Taihang aulacogen system and its surrounding areas

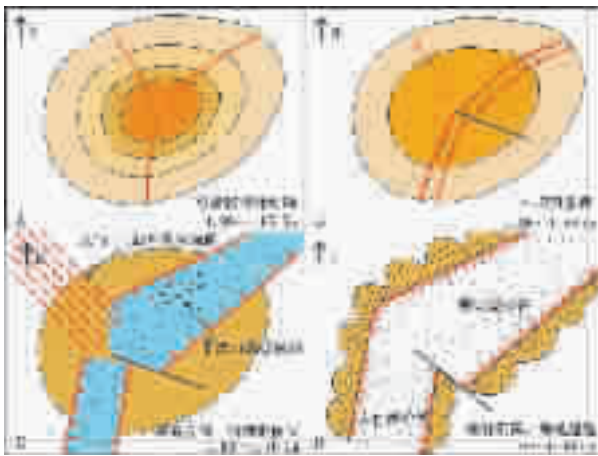


图4 燕辽—太行山坳拉谷构造演化模式

Fig.4 Tectonic evolution model of the Yanliao-Taihang aulacogen system

5 讨论与结论

5.1 讨论

- (1) 华北中部造山带最终碰撞的事件是太古代末期还是古元古代末期。
- (2) 古元古代造山带是以中部的南北向造山带为主还是以北部的冀北造山带为主。

(3) 18 亿年的构造热事件在空间上的影响, 它的构造性质是什么? 变质、岩浆、基底隆升之间的构造关系是什么? 它发生于伸展还是碰撞环境? 如何建立同位素年龄数据与地质背景之间的联系。

对上述问题的探讨, 需要对这一时期构造热事件的时空影响、同位素年龄数据地质含义、构造制约、构造演化阶段的准确划分、构造热事件性质、不同层次构造热事件的耦合关系等的综合研究。

5.2 结论

(1) 燕辽—太行非造山岩浆活动(1.80~1.60 Ga) 主要出现于基底强烈隆升区核部, 根据已有的同位素年龄资料, 岩浆活动侵入的序次依次为: 花岗岩、伟晶岩及超镁铁岩侵入(1.85~1.80 Ga)、基性岩墙群侵入(1.80~1.77 Ga)、碱性花岗岩、环斑花岗岩(1.71~1.70 Ga)、火山岩喷发(1.68 Ga) 等。向外围的低幅隆升区, 岩浆活动明显减弱。

(2) 自燕辽三叉裂谷中心向外围, 不整合面上覆地层时代变年轻, 下伏基底也由新太古代片麻岩和麻粒岩变为古元古代中低级变质地层(五台山—太行山), 记录了裂谷发育前的穹状隆升作用的空间影响。华北中元古代初期坳拉谷基底组成具有明显差异, 东部地区新太古代基底杂岩在坳拉谷发育前经历大规模隆升(18~19 亿年), 穹状隆起的范围可达上千千米。燕辽—太行山—恒山等地在伸展构造背景下的大范围隆升, 造成基底强烈抬升和风化剥蚀, 深部地壳因抬升发生冷却(角闪岩相退变质作用), 叠加 IBC 型 $P-t$ 轨迹, 变质岩系普遍记录 1.80 Ga 退变质年龄(锆石 U-Pb 年龄、矿物 Ar-Ar 年龄等)。

(3) 随着克拉通刚性程度增强, 发育坳拉谷, 大规模基性岩墙群侵入(1.80~1.77 Ga)。燕辽—太行山坳拉谷系—基性岩墙群与下伏基底构造没有直接关系。它们的形成受区域构造应力场及深部构造过程(地幔柱) 所控制, 形成以隆起核心区为中心的放射状坳拉谷系。基底隆升事件与浅表层伸展构造事件在时空上相吻合, 表明 1.80~1.77 Ga 年前后构造热事件为伸展构造环境产物, 而非所谓的中部碰撞造山事件。

(4) 华北中部古元古代末期经历多个构造热事件在时空上的叠加改造。在前期(2 000~1 900 Ma) 克拉通西北部碰撞造山再造的基础上, 开始了伸展构造背景下的长期构造活动(1 850 Ma, 持续时间达上亿年), 影响整个华北克拉通陆块, 涉及基底穹状抬升冷却(退变质)、裂谷系发育、非造山岩浆活动等方面。古元古代—中元古代初的构造热事件标志着华北克拉通化的最终完成和华北早期构造演化的重大转折, 开始具备典型板块的刚性特征。

致谢: 本文完成过程中得到加拿大多伦多大学 H.C. Halls、德国美因茨大学 A.Kroner 教授、美国圣路易斯大学 T. Kusky、加拿大温莎大学 A.Polat 教授、日本高知大学 Santosh 教授的帮助和指导。

参考文献(References):

- [1] Kröner A, Wilde S, Li J, et al. Age and evolution of a late Archean to early Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005,24:577~595.
- [2] Kroner A, Wilde S A, Obrien P J, et al. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a late Archean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan terrain of Northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005,79:605~629.
- [3] Kusky T, Li J. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003,22(4):383~397.
- [4] Zhao Guochun, Sun Min, Simon A. et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 2005,136(2):177~202.
- [5] 李江海, 钱祥麟, 侯贵廷, 等. “吕梁运动”新认识 [J]. *地球科学*, 2000,25(1):15~20.
Li Jianghai, Qian Xianglin, Hou Guiting, et al. Late Palaeoproterozoic to early Mesoproterozoic tectonic framework and major tectono-thermal episodes of North China: new interpretation of “Lüliang orogeny” [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2001, 25(1):15~20(in Chinese with English abstract).
- [6] 翟明国. 华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J]. *岩石学报*, 2004,20(6):1343~1354.
Zhai Minguo. 2.1—1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004,20 (6): 1343~1354(in Chinese with English abstract).
- [7] 李江海, 牛向龙, 程素华, 等. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨: 以华北为例[J]. *地球科学*, 2006,31(3):285~293.
Li Jianghai, Niu Xianglong, Cheng Suhua, et al. The Early Precambrian Tectonic Evolution of Continental Craton: A Case Study from North China [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2006,31 (3):285~293 (in Chinese with English abstract).
- [8] Peng P, Zhai M G, Zhang H F, et al. Geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dykes [J]. *Int. Geol. Rev.* 2005,47,492~508.
- [9] 侯贵廷, 李江海, Halls, 等. 华北晚前寒武纪镁铁质岩墙群的流动构造及侵位机制[J]. *地质学报*, 2003,77(2):210~216
Hou Guiting, Li Jianghai, Halls H, et al. The flow structures and mechanics of Later Precambrian mafic dike swarms in North China craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003,77 (2):210~216 (in Chinese with English abstract).
- [10] 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 等. 鲁西前寒武纪基性岩墙群[J]. *地质学报*, 2005,79(2):190~199.
Hou Guiting, Li Jianghai, Jin Aiwen, et al. The Precambrian basic dyke swarms in Western Shandong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005,79(2):190~199(in Chinese with English abstract).
- [11] 侯贵廷, 李江海, 刘玉琳, 等. 华北克拉通古元古代末伸展构造: 坳拉谷和基性岩墙群[J]. *自然科学进展*, 2005,15(11):1366~1373.
Hou Guiting, Li Jianghai, Liu Yulin, et al. The latest Paleoproterozoic extensional episodes: aulacogen and mafic dike warm in North China Craton [J]. *Progress in Natural Sciences*, 2005,15:1366~1373.
- [12] 李江海, 侯贵廷, 钱祥麟, 等. 恒山中元古代早期基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义[J]. *地质论评*, 2001,47(3):234~238.
Li Jianghai, Hou Guiting, Qian Xianglin, et al. Single -zircon U-Pb age of the initial Mesoproterozoic basic dike swarms in Hengshan mountain and its implication for the tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Geological Review*, 2001,47 (3): 234~238(in Chinese with English abstract).
- [13] 彭澎, 翟明国, 张华锋, 等. 华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义: 以晋冀蒙交界地区为例[J]. *岩石学报*, 2004,20(3):439~456
Peng Peng, Zhai Minguo, Zhang Huafeng, et al. Geochemistry and geological significance of the 1.8 Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: an example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004,20(3): 439~456(in Chinese with English abstract).
- [14] 廖超林, 王岳军, 彭头平, 等. 太行山南段早元古代基性岩脉的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学及其构造意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003,354~359.
Liao Chaolin, Wang Yuejun, Peng Touping. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronology of Paleoproterozoic mafic dykes from southern Taihang mountains and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003,354~359(in Chinese with English abstract).
- [15] 任康绪, 阎国翰, 蔡剑辉, 等. 华北克拉通北部地区古-中元古代富碱侵入岩年代学及意义[J]. *岩石学报*, 2006,22:377~386.
Ren Kangxu, Yan Guohan, Cai Jianhui, et al. Chronology and geological implication of the Paleo-Mesoproterozoic alkaline-rich intrusion belt from the northern part in the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006,22(2):377~386 (in Chinese with English abstract).
- [16] 郁建华, 付会芹, 张凤兰, 等. 环斑花岗岩套的赤城—古北口深成岩带及元古代裂谷作用[J]. *华北地质矿产杂志*, 1994,9(1):34~46.
Yu Jianhua, Fu Huiqin, Zhang Fenglan, et al. The Chicheng-Gubeikou plutonic rock belt of rapakivi suite and Proterozoic rifting[J]. *Journal of Geology and Mineral Deposits in North China*, 1994,9(1):34~46(in Chinese).
- [17] 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约 [J]. *科学通报*, 2004,49(22):2342~2349.
Zhao Taiping, Zhai Minguo, Xia Bin. Research on zircon SHRIMP age of volcanic rocks in Xionger Group: constraint on the initial of the cover of North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004,49(22):2342~2349(in Chinese).
- [18] 宋彪. 密云环斑花岗岩的同位素地质年代学、稀土地球化学特征

- 及成因讨论 [J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1992,(20): 137~156.
- Song Biao. Isotope geochronology, REE geochemical character and formation of Miyun rapakivi, Beijing [J]. Bulletin of Geology Research Institute, Chin Acad Geol Sci, 1992, (20):137~156 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郁建华, 傅会芹, 张凤兰, 等. 元古代北京裂谷槽中钾质碱性火山-深成作用[J]. 中国区域地质, 1994,(2):115~122.
- Yu Jianhua, Fu Huiqin, Zhang Fenglan, et al. Petrogenesis of potassic alkaline volcanism and plutonism in a Proterozoic rift trough near Beijing[J]. Regional Geology of China, 1994,(2):115~122(in Chinese with English abstract).
- [20] 李惠民, 王汝铮. 单颗粒锆石 U-Pb 法判断的凤凰山花岗岩的年龄[J]. 前寒武纪研究进展, 1997,20:56~61
- Li Huimin, Wang Ruzheng. The age the Fenghuangshan granite resolved by U-Pb single zircon [J]. Progress in Precambrian Research, 1997,20:56~61(in Chinese with English abstract).
- [21] 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 吕梁地区前寒武纪主要地质事件的年代框架[J]. 地质学报, 2000,74(3):216~223.
- Geng Yuansheng, Wan Yusheng, Shen Qihan, et al. Chronological framework of the Early Precambrian important events in the Luliang area, Shanxi Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2000,74(3) 216~223(in Chinese with English abstract).
- [22] 耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩的同位素年代和地球化学制约[J]. 高校地质学报, 2004,10:477~487.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Song Biao, et al. Post-orogenic granites with an age of 1800 Ma in Luliang area, North China Craton; Constraints from isotopic geochronology and geochemistry [J]. Geological Journal of China Universities, 2004,10:477~487 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩中锆石精确定年 [J]. 中国地质科学院院报, 1991,22:137~145.
- Lu Songnian, Li Huimin. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of the Dahongyu Formation, Changchen System in Jixian[J]. Bull Chin Acad Geol Sci, 1991,22: 137~145(in Chinese with English abstract).
- [24] 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 长城系团山子组火山岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地球化学, 1995,24:43~48
- Li Huaikun, Li Huimin, Lu Songnian. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi formation of Changcheng system and their geological implications[J]. Geochimica, 1995,24:43~48(in Chinese with English abstract).
- [25] 李承东, 郑建民, 张英利, 等. 化德群的重新厘定及其大地构造意义[J]. 中国地质, 2005,32:353~362
- Li Chengdong, Zheng Jianmin, Zhang Yingli, et al. Redefinition of the Huade Group and its tectonic significance [J]. Chinese Geology in China, 2005,32:353~362 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李基宏, 杨崇辉, 杜利林. 河北平山深熔伟晶岩锆石成因及 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 自然科学进展, 2004,14:774~781.
- Li Jihong, Yang Chonghui, Du Lilin. Origin of anatectic pegmatite zircon and U-Pb age [J]. Progress in Natural Sciences, 2004,14: 774~781(in Chinese with English abstract).
- [27] Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan - Wutaishan area: implications for the timing of crustal growth in the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 1998,43,144~145.
- [28] Liu SW, Pan YM, Li JH, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton [J]. Precambrian Research, 2002, 117 (1-2): 41~56.
- [29] 解广轰. 大庙斜长岩和密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学-兼论全球岩体型斜长岩和环斑花岗岩类的时空分布及其意义 [M]. 科学出版社, 2005,156~176.
- Xie Guanghong. Petrology and geochemistry of the anorthosite in Damiao and the rapakivi granite in Miyun: a review on the global distribution and signification of the rock mass type anorthosite and rapakivi granite on the time and space [M]. Beijing: Science Press, 2005,156~176(in Chinese with English abstract).
- [30] 杨进辉, 吴福元, 柳小明. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 2005,21:1633~1644.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaomin, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005,21(6):1633~1644(in Chinese with English abstract).
- [31] 王凯怡, 郝杰, Wilde S, 等. 山西五台山-恒山地区晚太古代-早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约[J]. 地质科学, 2000, 35(2):175~184.
- Wang Kaiyi, Hao Jie, Simon Wilde, et al. Reconsideration of some key geological problems of Late Archaean-Early Proterozoic in the Wutaishan -Hengshan area: constraints from SHRIMP U-Pb zircon data[J]. Chinese Journal of Geology, 2000, 35(2):175~184(in Chinese with English abstract).
- [32] Zhao, G. C., Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton[J]. Geol. Mag., 2001,138:89~91.
- [33] 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义[J]. 岩石学报, 1991,7(4):36~45.
- Wang Renmin, Chen Zhenzhen, Chen Fei. Grey tonalitic gneiss and high -pressure granulite inclusions in Hengshan, Shanxi Province, and their geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 1991,7(4):36~45(in Chinese with English abstract).
- [34] 常向阳, 陈亚东, 朱炳泉. 恒山灰色片麻岩中变基性岩锆石 U-Pb 定年[J]. 矿物学报, 1999,19:262~266.
- Chang Xiangyang, Chen Yadong, Zhu Bingquan. U-Pb zircon isotope age of metabasites from Hengshan grey gneiss [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999,19:262~266 (in Chinese with English abstract).
- [35] Wang K Y, Li J L, Hao J, et al. The Wutaishan orogenic belt within the Shanxi Province, Northern China: a record of late Archean collision tectonics [J]. Precambrian Research, 1996,78:

- 95~103.
- [36] Guan H, Sun M, Wide S A. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping complex: implications for formation and assembly of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2001, 113: 1~18.
- [37] 郭敬辉, 王松山, 桑海清, 等. 变斑晶石榴石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄的含义与华北高压麻粒岩变质时代[J]. *岩石学报*, 2001, 17: 436~442. Guo Jinghui, Wang Songshan, Sang Haiqing, et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar age spectra of garnet porphyroblast: Implications for metamorphic age of high-pressure granulite in the North China craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17: 436~442 (in Chinese with English abstract).
- [38] 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学 [J]. *岩石学报*, 1993, 9(4): 329~341. Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Zhang Yigang, et al. Early Precambrian Manjinggou high-pressure granulite melange belt on the South edge of the Huaian complex, North China Craton. Geological features, petrology and isotopic geochronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(4): 329~341 (in Chinese with English abstract).
- [39] Guo J, Sun M, Chen F, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China: timing of Paleoproterozoic continental collision [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 629~642 (in Chinese with English abstract).
- [40] 郭敬辉, 翟明国, 李永刚, 等. 恒山西段石榴石角闪岩和麻粒岩的变质作用、PT 轨迹及构造意义[J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 311~325. Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Li Yonggang, et al. Metamorphism, PT paths and tectonic significance of garnet amphibolite and granulite from Hengshan, North China Craton [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1999, 34(3): 311~325 (in Chinese with English abstract).
- [41] 刘敦一, 耿元生, 宋彪. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造-同位素年代学证据[J]. *地球学报*, 1997, 18: 226~232. Liu Dunyi, Geng Yuansheng, Song Biao. Late Archean crustal accretion and reworking in northwestern Hebei Province: isochronology evidence [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18: 226~232.
- [42] 王惠初, 陆松年, 赵凤清, 等. 华北克拉通古元古代地质记录及其构造意义[J]. *地质调查与研究*, 2005, 28: 129~143. Wang Huichu, Lu Songnian, Zhao Fengqing, et al. The Paleoproterozoic geological records in North China Craton and their tectonic significance [J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28: 129~143 (in Chinese with English abstract).
- [43] 钟长汀, 毛德宝, 赵凤清, 等. 冀北高压麻粒岩带岩石组合性质、同位素特征及其演化[J]. *前寒武纪研究进展*, 2001, 24: 175~183. Zhong Changting, Mao Debao, Zhao Fengqing, et al. Rock units of the high-pressure granulite belt in the northern Hebei Province, North China: Their properties, isotopic and evolution [J]. *Progress in Precambrian Research*, 2001, 24: 175~183 (in Chinese with English abstract).
- [44] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15(4): 524~531. Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. The isotope ages and their geological implications of high-pressure basic granulites in north region to Chengde, Hebei province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15 (4): 524~531 (in Chinese with English abstract).
- [45] Krner A, Cui W Y, Wang C Q, et al. Single zircon ages from high-grade rocks of the Jianping Complex, Liaoning Province, NE China [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 1998, 16, 519~532.
- [46] 贺高品, 叶慧文, 夏胜利. 北京密云地区变质基性岩墙的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 1993, 9: 312~317. He Gaopin, Ye Huiwen, Xia Shengli. Sm-Nd isotopic age of the metamorphic basic dykes in Miyun, Beijing and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9: 312~317 (in Chinese with English abstract).
- [47] 陈能松, 王人镜, 单文琅, 等. 密云杂岩西段等压冷却 PTT 归咎确定及地球动力学成因. *地质科学*, 1994, 29: 355~365. Chen Nengsong, Wang Renjing, Shan Wenrang, et al. Isobaric cooling (ibc) P-T-T path for the western portion of Archean Miyun Complex, Beijing: constraints and its geodynamic genesis [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1994, 29: 355~365 (in Chinese with English abstract).
- [48] 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 等. 赞皇变质穹隆黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究及其对构造热事件的约束[J]. *岩石学报*, 2003, 19: 131~140. Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, et al. Biotite ^{40}Ar / ^{39}Ar geochronology of the deformational rocks from Zanhuang metamorphic domain in south Taihang mountains and their tectonothermal overprinting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19: 131~140 (in Chinese with English abstract).
- [49] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 2002, 302: 191~226.
- [50] 李江海, A. Kroner, 黄雄南, 等. 恒山地区变基性岩墙群的发现及“五台群”绿岩带地层的解体[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(11): 902~909. Li Jianghai, A. Kroner, Huang Xiongnan, et al. Discovery of mafic dyke swarms in Hengshan area and the break-up of greenstone in Wutai Group [J]. *Science in China (D)*, 2001, 31 (11): 902~909 (in Chinese).
- [51] O'Brien P J, Walte N, Li J H. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 615~627.
- [52] Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, et al. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 597~613.
- [53] Hou G T, Wang C C, Li J H, et al. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton [J]. *Tectonophysics*, 2006, 422: 89~98.

Nature of the latest Paleoproterozoic tectono–magmatic event in central North China and its tectonic genetic model

LI Jian–ghai, LIU Shou–jie, HOU Gui–ting

(*Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The latest Paleoproterozoic Period represents one of the most important transition stages of the evolution of the North China craton, but its relevant tectonothermal episodes and tectonic framework are rarely documented in detail. In this paper, the tectonic evolution and genetic model are discussed based on the regional tectonic analysis, combined with the latest isotopic age dating. The NW–trending Taihang–Hengshan mafic dike swarms (1.80–1.77 Ga) correspond to failed arms of the Yanliao and Taihang aulacogens, which formed an asymmetric aulacogen system with triple arms. The relevant anorogenic magmatism consists (in order of time) of granite and pegmatite intrusion (1.85–1.80 Ga), injection of basic dike swarms (1.80–1.77 Ga), anorthosite, alkaline granite and rapakivi granite intrusion (1.71–1.70 Ga) and volcanic eruption (1.68 Ga). As indicated by the regional correlation of the underlying basement complexes and isotopic age dating, large–scale domal uplift took place in the Yanliao–Taihang area at ~1.80 Ga, with an uplift diameter up to 1000 km. The core area of the domal uplift is located at the center of the Yaoliao–Taihang aulacogen system. The uplift of the basement coincided with the supracrustal extension structures and anorogenic magmatism in time and space, which supports the mantle plume model for a rational interpretation of the above–mentioned regional uplift and extensional break–up event in the latest Paleoproterozoic episodes of the North China craton.

Key words: Paleoproterozoic; Mesoproterozoic; collisional orogeny; extension; mantle plume; North China

About the first author: LI Jiang–hai, male, born in 1965, PhD and professor, now mainly engages in the research of Precambrian geology and Tectonics; E–mail: jhli@pku.edu.cn.