

华北克拉通中元古代岩浆事件群

相振群^{1,2,3}, 陆松年^{1,2,3}, 李怀坤^{1,2}, 田辉^{1,2}, 刘欢^{1,2}, 张阔^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170;
3. 中国地质调查局华北科技创新中心, 天津 300170)

摘要: 中元古代(1 800~1 000 Ma)时期, 华北克拉通发育多期与哥伦比亚超大陆裂解有关的岩浆事件群。本文结合区域地质特征、地球化学特点、沉积演化序列, 讨论了各期裂解事件群的性质及特点, 论述了华北克拉通中元古代时期岩浆事件群的大地构造意义。华北克拉通中元古代时期岩浆事件群具有幕式裂解的特点, 约1.80~1.77 Ga岩浆事件群标志着华北克拉通的初始裂解, 在这之后三大裂陷槽逐步打开, 1.72~1.67 Ga, 1.63~1.62 Ga岩浆事件群则是华北克拉通在中元古代早期持续裂解的具体体现, 他们代表了哥伦比亚超大陆早期裂解的岩浆事件记录, 而1.33~1.30 Ga期间以及1.23~1.20 Ga的岩浆事件则可能代表了哥伦比亚超大陆的晚期裂解事件。这些具有全球构造对比意义的岩浆事件群及高于庄组宏观化石生物群、中元古代时期氧化事件的出现, 对一些学者提出的18亿~8亿年间“地球表面持续低氧”、“地球枯燥的10亿年”的认识增添了活力。

关键词: 华北克拉通; 中元古代; 岩浆事件群

中图分类号: P534.3; P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2020)02-0137-16

国际地层委员会提出的地质年表^[1]中将中元古代底界年龄置于1 600 Ma, 但中国地层委员会根据中国地质演化特点, 一直将该界线年龄置于1 800 Ma^[2]。本文依据中国地层委员会的地质年表, 中元古代时限为1 800 Ma至1 000 Ma。

华北克拉通在经历了早前寒武纪前新太古代陆核生长阶段、新太古代大陆地壳快速增生阶段和古元古代与裂解有关的盆地发育和最终拼合阶段以后, 从1.8 Ga开始, 进入中新元古代盖层演化阶段^[3-4]。三大裂陷槽(豫陕裂陷槽、渣尔泰-白云鄂博裂陷槽、燕辽裂陷槽)在这一时期发育, 其中豫陕裂陷槽最先打开, 从1 800 Ma开始接受熊耳群火山-碎屑岩沉积, 以及其后的沉积地层, 燕辽裂陷槽裂开的时间可能略显滞后, 在1 670 Ma后才开始接受常州沟组的碎屑沉积, 而渣尔泰-白云鄂博裂陷槽底部的时限目前还有争议。在沉积地层不断发育的过程中, 华北克拉通之上也发生了一系列与哥伦比亚超大陆裂解相关的岩浆侵入和喷发地质事件^[5-6], 构成广布于整个克拉通范围的裂解岩浆事件群。归纳起

来, 在中元古代时期(1 800~1 000 Ma), 华北克拉通之上先后发育了5期主要岩浆事件群。

1 华北克拉通中元古代岩浆事件群序列

从老到新主要包括5个峰期(图1)。峰期I发生在约1.80~1.77 Ga之间, 以华北克拉通南缘熊耳群火山岩和五台山、恒山地区的基性岩墙群为代表^[7-23]; 峰期II发生于约1.72~1.67 Ga左右, 以AMCG组合(Anorthosite, Mangerite, Charnockite, rapakivi Granite)占统治地位, 包括著名的大庙斜长岩、密云环斑花岗岩、赤城环斑花岗岩、蓝营正长岩、古北口碱性花岗岩、涝洼二长花岗岩、石英二长岩、建平辉长岩、闪长岩、二长岩、石英正长岩、紫苏花岗岩, 包头固阳石英正长岩等^[5-6, 17, 24-33]; 峰期III发生于约1.63~1.62 Ga, 以大红峪富钾火山岩、华南北缘龙王碾碱性花岗岩和鲁西泰山基性岩墙群为代表^[34-39]; 峰期IV发生于约1.33~1.30 Ga期间, 以侵入到下马岭组、雾迷山组的基性岩墙(床)和商都-化德花岗岩、康保二

收稿日期: 2020-04-28

资助项目: 中国地质调查局项目: “华北克拉通与南部非洲卡拉哈里克拉通前寒武纪构造演化及成矿作用对比(1212011120155)”、“华北克拉通西缘‘阿拉善地块’物质组成与构造属性(12120114021701)”、科技部科技基础性工作专项: “中国标准地层建立—中国地层表的完善(2015FY310100)”、泰山风景名胜区管理委员会项目: “泰山世界地质公园地质遗迹资源调查研究项目(SDGP370997202002000007)”

作者简介: 相振群(1977-), 男, 正高级工程师, 毕业于中国地质大学(北京), 现主要从事前寒武纪地质研究、区域地质研究工作, E-mail: 463503839@qq.com。

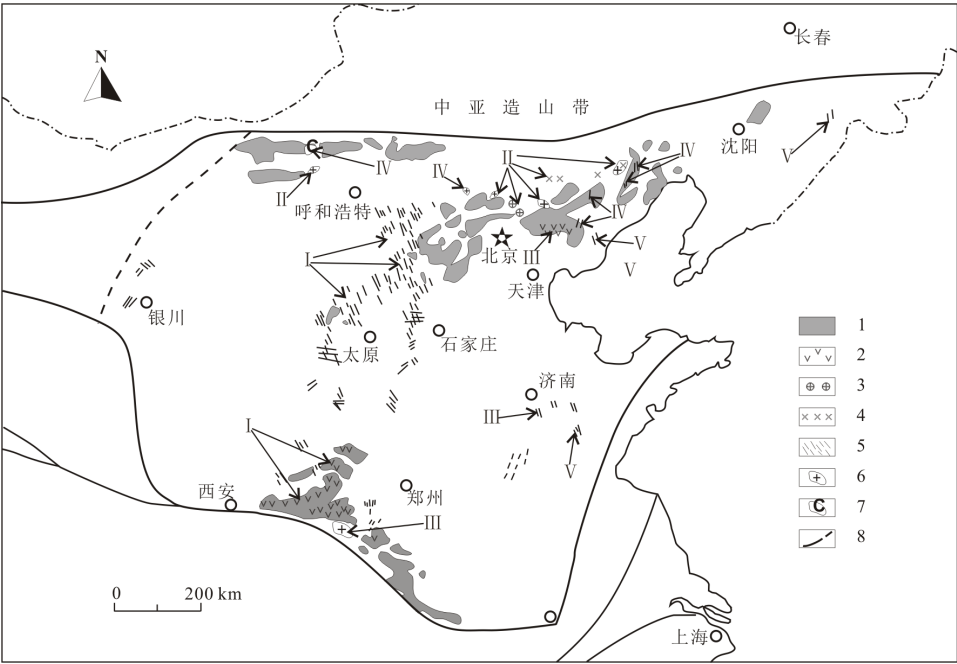


图1 华北克拉通中元古代(1 800 ~ 1 000 Ma)岩浆事件群分布图(据参考文献[36]修改)

Fig. 1 Distribution of Mesoproterozoic (1 800 ~ 1 000 Ma) magmatic event groups in the North China Craton (modified after Lu et al.^[36])

1. 中元古界地层; 2. 火山岩; 3. 环斑花岗岩; 4. 斜长岩、辉长岩; 5. 辉绿岩墙; 6. 碱性花岗岩; 7. 火成碳酸岩; 8. 断裂; I. 第1期岩浆事件群; II. 第2期岩浆事件群; III. 第3期岩浆事件群; IV. 第4期岩浆事件群; V. 第5期岩浆事件群

长花岗岩、白云鄂博火成碳酸岩为主^[33,40-45]; 峰期V发生于约1.23 Ga, 以华北克拉通东缘的通化辉绿岩墙、建平-青龙基性岩墙、滦南第四系覆盖的隐伏基性岩体以及沂水地区的辉长岩等为代表^[33,46-48]。

1.1 1.80 ~ 1.77 Ga 岩浆事件群

该期岩浆事件主要包括了豫陕裂陷槽熊耳群火山岩与晋冀蒙地区大面积出露的基性岩墙群(表1)。

表1 华北克拉通 1.80 ~ 1.77 Ga 岩浆事件群
Tab.1 1.80 ~ 1.77 Ga magmatic events of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
熊耳鸡蛋坪组流纹斑岩	1 800±16	SHRIMP*	赵太平等 ^[7]
熊耳马家河组流纹斑岩	1 776±20	SHRIMP	赵太平等 ^[7]
熊耳许山组火山岩	1 767 ~ 1 783	SHRIMP/ LA-ICPMS	He et al. ^[12]
熊耳鸡蛋坪组火山岩	1 445 ~ 1 778	SHRIMP/ LA-ICPMS	He et al. ^[12]
熊耳马家河组火山岩	1 778±6	LA-ICPMS	He et al. ^[12]
侵入太华群辉绿岩	1 773±37	SHRIMP	赵太平等 ^[7]
侵入熊耳群闪长岩	1 789±26/-20	SHRIMP	赵太平等 ^[7]
太行南段辉长辉绿岩	1 781 ~ 1 765	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	廖超林等 ^[57]
晋北大同辉绿岩	1 778±3	SHRIMP	彭澎等 ^[16]
恒山辉绿岩	1 769±2.5	TIMS	李江海 ^[58]

注: *SHRIMP和SIMS: 二次离子探针质谱法; TIMS: 热电离质谱法; LA-ICPMS: 激光烧蚀电感耦合等离子体质谱法; LA-MC-ICPMS: 激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱法; ³⁹Ar/⁴⁰Ar: 氩-氩法。标注有“斜锆石”者为斜锆石U-Pb年龄, 其他为锆石U-Pb年龄。以下其他表同上。

1.1.1 熊耳群火山岩

吕梁造山运动后, 华北渐渐进入构造的稳定期。在华北克拉通内部发育豫陕、燕辽、渣尔泰-白云鄂博三大裂陷槽。其中位于华北克拉通南缘的豫陕裂陷槽最先裂解, 自下而上发育熊耳群、汝阳群、洛峪群等中元古代早期(1 800 Ma ~ 1 600 Ma)沉积序列。熊耳群横跨豫、晋、陕三省, 出露面积近万平方公里, 厚度为1 000 ~ 7 000 m 不等。以火山熔岩占绝对优势, 火山熔岩以玄武安山质、安山质岩石为主, 次为英安-流纹质岩石, 典型的玄武岩只占极少数^[49-52]。针对熊耳群火山岩系形成的时代, 前人做了大量的研究工作^[7-8,12,23], 获得了诸多的Sm-Nd、Rb-Sr、锆石U-Pb等年龄, 这其中以赵太平等^[7-8]、He et al.^[12]发表的SHRIMP以及LA-ICPMS U-Pb年龄数据最具代表性。赵太平等^[7-8]从熊耳群地层发育完整的外方山地区和熊耳山地区进行采样, 应用SHRIMP U-Pb方法对熊耳群火山岩和同期的次火山-侵入岩共5个样品的锆石进行了精确定年, 获得熊耳群中部鸡蛋坪组流纹斑岩1 800±16 Ma, 熊耳群顶部马家河组流纹斑岩1 776±20 Ma。He et al.^[12]则利用SHRIMP、LA-ICPMS等方法获得许山组火山岩

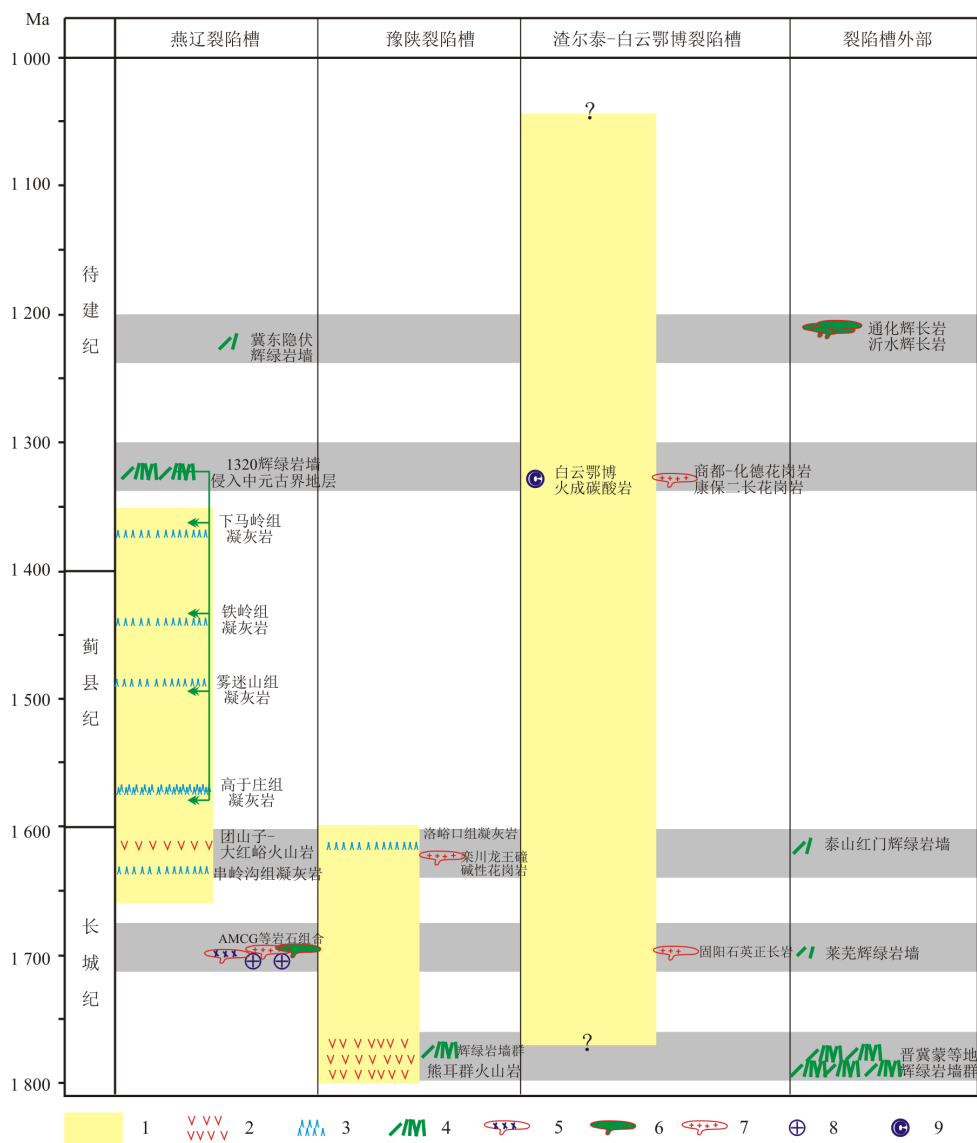


图2 华北克拉通岩浆事件群时空分布图

Fig.2 Spatial and temporal distribution of the magmatic event group in the North China Craton

1.中元古界地层;2.中基性火山岩;3.地层中火山凝灰岩;4.辉绿岩墙;5.斜长岩;
6.辉长岩;7.碱性花岗岩;8.奥长环斑花岗岩;9.火成碳酸岩

1 767~1 783 Ma.鸡蛋坪组火山岩 1 445~1 778 Ma、马家河组火山岩 1 778±6 Ma。这其中鸡蛋坪组火山岩 1 445 Ma 年龄的地质意义值得进一步商榷。侵入熊耳群的深成岩和次火山岩的锆石和斜锆石 U-Pb 年龄介于 1 789~1 644 Ma^[7-8,23],因此熊耳群火山岩的年龄应该集中在 1.77~1.80 Ga 之间。

1.1.2 晋冀蒙等地基性岩墙群

在这一时期,华北克拉通之上也发育了大规模的基性岩墙群。主要分布在燕辽裂陷槽和中条熊耳裂陷槽附近和以西地区,如晋冀蒙交界地区、恒山五台地区、吕梁山地区、太行山地区、中条山地区。其中又以晋冀蒙交界地区、恒山五台地区发育最为广

泛。这些基性岩墙大都侵位于由 TTG 或 GMS 岩石组合构成太古宙结晶基底中,如在晋冀交界、恒山、五台、吕梁等地,基性岩墙群侵入到新太古代到古元古代怀安杂岩、恒山杂岩、五台杂岩、阜平杂岩和丰镇孔兹岩系中。随着基底的隆升和剥蚀,得以出露于地表,在靠近裂陷槽边界的局部地区,可以见到基性岩墙被中上元古界地层不整合覆盖的现象^[16-17,19-22]。岩墙主要呈 NNW 走向,少量 E-W、NE 走向,而且后者切割了 NNW 走向的岩墙^[17,53-54]。岩墙主要是辉绿岩、辉长辉绿岩组成,一般宽约 20 m 左右,有的可达近百米。长度几公里到几十公里规模不一,大部分具有冷凝边结构,表现为斑状结构或者玻

基斑状结构,岩墙中部则具有典型的辉绿辉长结构。造岩矿物组合为单斜辉石和斜长石,另外含有一些角闪石、磷灰石、钛铁矿、磁铁矿等,有的辉绿岩墙中还可以见到橄榄石斑晶。不同走向的岩墙群构成放射状的形态,中心位置在熊耳裂谷系内^[22]。彭澎等^[16]获得大同北北西向辉绿岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1 778±3 Ma,斜锆石 ID-TIMS U-Pb 年龄 1 777±3 Ma、1 789±28 Ma,Halls et al.^[11]获得恒山地区辉绿岩墙锆石 ID-TIMS U-Pb 年龄为 1 769.1±2.5 Ma,赵太平等^[7]获得侵入到太华群的辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1 773±37 Ma,胡俊良^[55-56]获得嵩山地区辉绿岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1 776±35 Ma,廖超林等^[57]获得太行山南段辉长辉绿岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 1 781 ~ 1 765 Ma,李江海^[58]获得了恒山辉绿岩锆石 TIMS 年龄 1 769±2.5 Ma。由以上这些同位素年代学资料可以看出,恒山、五台等地的基性岩墙群主要形成于 1 770 ~ 1 780 Ma。

1.2 1.72 ~ 1.67 Ga 岩浆事件群

华北克拉通 1.72 ~ 1.67 Ga 岩浆事件群,主要出露在华北克拉通北缘辽西、冀东、冀北,并延伸到内蒙包头固阳一带。以 AMCG 组合 (Anorthosite, Mangerite, Charnockite, rapakivi Granite) 占统治地位,包括著名的大庙斜长岩、密云环斑花岗岩、赤城环斑花岗岩、蓝营正长岩、古北口碱性花岗岩、涝洼岩体、固阳石英正长岩、密云花岗斑岩脉,以及建平杂岩体等,直接侵入到太古宙变质基底之中。其中密云花岗斑岩脉直接被常州沟组砂砾岩不整合覆盖,为限定长城系常州沟组地层的沉积时代提供了精准的年代约束。此外,李云等^[59]在山东莱芜地区获得基性岩墙群的斜锆石 SIMS U-Pb 年龄为 1 680.3±5.2 Ma。

1. 2. 1 华北克拉通北缘 AMCG 组合

在这一组岩浆事件群中,AMCG 组合,即斜长岩 (anorthosites) 纹长二长岩 (mangerites) 紫苏花岗岩 (charnockites) 和奥长环斑花岗岩 (rapakivi granites) 深成侵入体组合是进行大陆之间对比的重要证据。这条岩浆岩带中大庙斜长岩套、密云和赤城地区环斑花岗岩、兰营石英正长岩等自上个世纪 60 年代一直被中外地质学家关注^[7, 24-28, 31, 60-75],并开展了大量的岩石学、矿物学、矿床学、地球化学以及地质年代学的研究工作,其形成时代主要集中在 1 720 ~ 1 680 Ma 期间 (表 2)。

表 2 华北克拉通 1.72 ~ 1.67 Ga 岩浆事件群
Tab.2 1.72 ~ 1.67 Ga magmatic events of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
大庙石英纹长二长岩	1 718±26	TIMS	任康绪等 ^[79]
大庙纹长二长岩	1 715±6	TIMS	赵太平等 ^[80]
大庙苏长岩	1 693±7	TIMS	赵太平等 ^[80]
大庙斜长岩	1 726±9	SHRIMP	Zhang et al. ^[75]
平泉西坝辉石正长岩	1 726±12	TIMS	任康绪等 ^[79]
隆化二长岩-石英	1 715±6	TIMS	赵太平等 ^[80]
正长岩	1 718±26	TIMS	任康绪等 ^[79]
崇礼水泉沟碱性正长岩	1 718±65	TIMS	莫测辉等 ^[81]
怀柔兰营石英正长岩	1 697±0.9	TIMS	郁建华等 ^[27]
	1 712±15	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[75]
北京怀柔兰营斜长岩	1 739±43	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[75]
河北赤城环斑花岗岩	1 697±1.8	TIMS	郁建华等 ^[27]
赤城温泉花岗岩	1 697±7	LA-ICPMS	Jiang et al. ^[24]
长稍营正长花岗岩	1 753±23	SHRIMP	Zhang et al. ^[75]
古北口正长花岗岩	1 692±19	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[75]
北京密云环斑花岗岩	1 683±4	TIMS	郁建华等 ^[27]
	1 679 ~ 1 681	LA-ICPMS	杨进辉等 ^[31]
	1 685±15	SHRIMP	高维等 ^[74]
莱芜辉绿岩墙	1 680.3±5.2	SIMS 斜锆石	李云等 ^[59]
密云花岗斑岩脉	1 673±10	LA-MC-ICPMS	李怀坤等 ^[30]
	1 669±20	SHRIMP	
固阳瓦窑石英正长岩	1 702±31	SHRIMP	王惠初等 ^[29]
涝洼岩体	1 695±12	LA-ICPMS	相振群 ^[33]
	1 696±12		
建平辉长岩	1 714.8±3.3	MC-LAICPMS	
建平含矿闪长岩	1 705.7±7.0	SHRIMP	
	1 707.6±9.6	MC-LAICPMS	
建平地区闪长岩	1 711.6±9.1	MC-LAICPMS	
	1 716.6±6.1		
建平角闪黑云母二长岩	1 692±9	SHRIMP	
建平石英正长岩	1 695.5±6.9	SHRIMP	
	1 711.7±3.5	MC-LAICPMS	
石英二长岩	1 712.3±5.1	MC-LAICPMS	
正长花岗岩脉	1 699.4±3.8	SHRIMP	
	1 707.2±6.2	MC-LAICPMS	
建平紫苏花岗岩	1 694 ±12	SHRIMP	Liu et al. ^[77]
建平单斜辉石二长岩	1 719±5	MC-LAICPMS	Wang et al. ^[78]
	1 720±4		
含磁铁矿闪长岩	1 721±4	MC-LAICPMS	
建平石英正长岩	1 715±4	MC-LAICPMS	
	1 696± 4		
建平正长岩	1 702± 4	MC-LAICPMS	

更是被诸多地质学家^[5-6, 25-28, 76]作为典型陆内非造山的岩石组合并将其与东欧克拉通 Fennoscandian 和 Ukrainian 地盾中的变质的斜长岩-环斑花岗岩杂岩体 (ARGCs) 进行对比,也进一步指出这类岩石组合具有全球性,在芬诺斯堪的亚、乌克兰、格陵兰、加拿大、阿尔丹、亚马逊,以及华北克拉通等所有的前寒武纪克拉通中均有出现^[76]。随着研究的深入,这套岩石组合在华北北缘的规模也不断扩大,王惠初等^[29]在

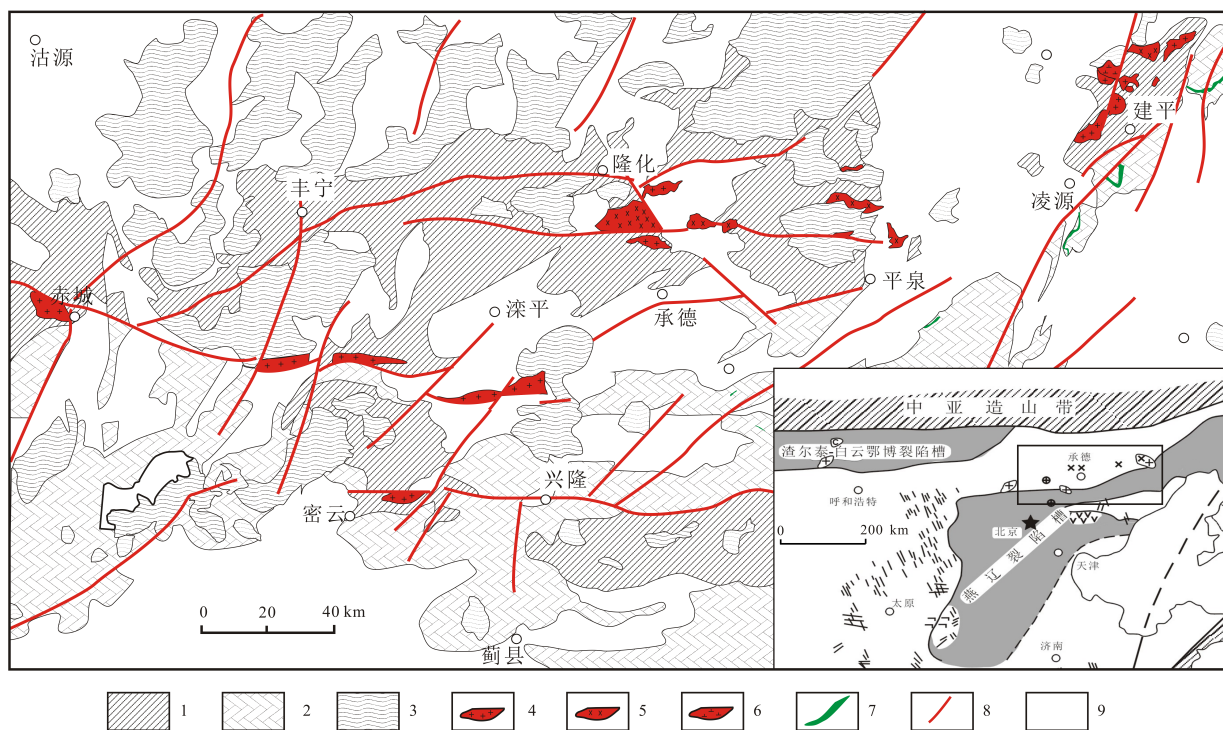


图3 华北克拉通北缘1.72 ~ 1.67 Ga岩浆事件群分布简图(据参考文献[28]修改)

Fig.3 Distribution diagram of 1.72 ~ 1.67 Ga magmatic events in the northern margin of the North China Craton (modified by Yu JH et al.^[28])

1. 早前寒武纪基底; 2. 中新元古代沉积盖层; 3. 古生代以来岩体; 4. ~ 1.7 Ga 环斑花岗岩、石英正长岩等; 5. ~ 1.7 Ga 斜长岩、辉长岩等; 6. ~ 1.7 Ga 闪长岩等; 7. 1.32 Ga 辉绿岩墙; 8. 断层; 9. 古生代以来地层

包头固阳地区发现同期具有相同构造背景的石英正长岩。李怀坤等^[30]在密云获得被常州沟组含砾砂岩不整合覆盖的花岗斑岩脉, LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 不一致线的上交点年龄为 $1\,671 \pm 13$ Ma, SHRIMP 法锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $1\,669 \pm 20$ Ma。

1.2.2 建平杂岩体

建平地区中元古代岩浆岩组合主要出露于建平以北簸箕山、黄花山以及建平西侧的万元店镇两间房、北台子、马杖子村一带。呈近北东向断续出露,长约 50 km,宽约 5 ~ 10 km,出露面积近百平方千米,长轴平行于区域构造线方向。其中簸箕山地区主要出露含矿辉石岩、辉长岩、辉长苏长岩、辉长闪长岩、闪长岩,局部可能还保存一些超基性岩石团块,岩石蚀变强烈。黄花山以及建平西两间房、北台子、马杖子村一带主要以石英正长岩-二长花岗岩为主。这些岩体侵入到新太古代叶柏寿片麻岩中,呈岩株状,近北东向延伸,具有一定的分异现象,出现多种岩石类型,主要有含矿蚀变辉石岩、辉长岩、闪长岩、石英正长岩、正长花岗岩、晶洞花岗岩、紫苏花岗岩等。由于其形成构造位置的特殊性,而具有重要的地质构造意义。

Liu et al.^[77]报道了建平地区紫苏花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $1\,694 \pm 12$ Ma, Wang et al.^[78]获得单斜辉石二长岩、含磁铁矿闪长岩、石英正长岩、正长岩的 MC-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,696 \sim 1\,721$ Ma。相振群^[33]获得辉长岩 MC-LAICPMS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,715 \pm 3$ Ma, 获得含磁铁矿闪长岩 MC-LAICPMS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,708 \pm 10$ Ma, SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $1\,706 \pm 7$ Ma, 闪长岩 MC-LAICPMS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,712 \pm 9$ Ma, $1\,717 \pm 6$ Ma, 角闪黑云母二长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $1\,692 \pm 9$ Ma, 石英正长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $1\,696 \pm 7$ Ma, MC-LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,712 \pm 4$ Ma, 正长花岗岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $1\,699 \pm 4$ Ma, MC-LAICPMS 锆石 U-Pb 年龄 $1\,707 \pm 6$ Ma (表 2)。

1.3 1.63 ~ 1.62 Ga 岩浆事件群

华北克拉通 1.62 Ga 岩浆事件主要出露于燕辽裂陷槽的大红峪火山岩、华北克拉通南缘的龙王碾碱性岩以及鲁西泰山地区的辉绿岩墙。此外,团山子组火山岩以及侵入到串岭沟组的多个闪长玢岩脉也大致在这一时间就位(表 3)。

表3 华北克拉通 1.63 ~ 1.62 Ga 岩浆事件群

Tab.3 1.63 ~ 1.62 Ga magmatic events of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
侵入串岭沟组岩脉	1 620±9	SHRIMP	张健等 ^[39]
侵入串岭沟组闪长玢岩	1 637±9	LA-ICPMS	张栓宏等 ^[86]
团山子组火山岩	1 637±15	LA-ICPMS	张栓宏等 ^[86]
大红峪组高钾火山岩	1 625±6	TIMS	陆松年等 ^[35]
	1 622 ±32	SHRIMP	Lu et al. ^[36]
	1 625.9±8.9	SHRIMP	高林志等 ^[82]
	1 624± 9	SHRIMP	张健等 ^[39]
栾川龙王碛碱性花岗岩	1 625±16	SHRIMP	陆松年等 ^[34]
	1 602.1± 6.6	LA-ICPMS	包志伟等 ^[84]
	1 616± 20	LA-ICPMS	Wang et al. ^[85]
泰山红门辉绿岩墙	1 621.1±8.8	TIMS斜锆石	陆松年等 ^[37]
	1 632.4±4.2	SIMS斜锆石	相振群等 ^[38]

1.3.1 大红峪火山岩

大红峪组火山岩主要见于大红峪组的下段,空间上分布并不均匀,区域上受到东西向深大断裂控制,呈东西向展布,延伸约150 km以上,南北宽5~20 km不等。在北京平谷以北山东庄到大华山、挂甲峪一带厚度最大,最厚可达450 m,并以该地区为中心,向西在密云-古北口一带迅速剪灭,向东往陡子峪、黄崖关、大红峪延伸,一直到宽城、平泉等地,近百余公里,但火山岩地层逐渐变薄。在蓟县-平谷-兴隆一带,大红峪组火山岩主要以溢流火山岩为主,由富钾玄武质熔岩与钾质粗面-响岩质熔岩组成,并以前者为主,在各剖面中,富钾玄武质熔岩能占火山岩系的85%以上,有时甚至可达100%。Lu et al.^[36]从大红峪组火山岩中选出的锆石为不规则状,CL图像显示锆石内部具有弱的不规则分带,锆石SHRIMP年龄1 622±32 Ma,高林志等^[82]获得大红峪组火山岩锆石SHRIMP年龄为1 625.9±8.9 Ma,张健等^[39]获得大红峪组火山岩锆石SHRIMP年龄为1 624 ±9 Ma,都与之前陆松年和李惠民^[35]报道的ID-TIMS年龄几乎完全一致。

1.3.2 龙王碛碱性花岗岩

龙王碛岩体位于华北克拉通南缘栾川东庙子、合峪、大青沟之间的龙王碛、上河村、东地一带,近椭圆状岩株产出,面积近120 km²。侵入到太古宙片麻岩中,并被后期中生代黑云母二长花岗岩侵入,主要由中粗粒钠铁闪石正长花岗岩、中粗粒正长花岗岩,以钠铁闪石正长花岗岩占主体,与中粗粒正长花岗岩脉动接触^[34],此外,局部可见晚期脉岩,如辉长辉绿岩和碱性黑云母正长岩脉、霓石正长岩脉、花岗斑岩

脉、石英二长岩脉等。陆松年等^[34]、卢欣祥等^[83]、包志伟等^[84]、Wang XL et al.^[85]对龙王碛碱性花岗岩做了详细的研究。陆松年等^[34]针对龙王碛碱性花岗岩开展SHRIMP锆石U-Pb法测试工作,获得锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄平均值1 625±16 Ma,是与华北燕辽裂陷槽内大红峪火山岩同期的岩浆事件。表征了华北克拉通南缘长城纪期间发生的大规模裂解事件群中最晚期的一次碱性岩浆活动。包志伟等^[84]和Wang et al.^[85]以LA-ICP-MS锆石U-Pb法分别获得龙王碛碱性花岗岩形成时代为1 602±6 Ma和1 616±20 Ma,与陆松年等^[34]获得的SHRIMP锆石U-Pb年龄在误差范围内基本一致。

1.3.3 泰山红门辉绿岩墙

红门期辉绿岩墙出露于泰山风景名胜区红门景区内。红门景区发育两条辉绿岩墙,一条走向NE,出露长度15 km以上,另一条走向近NNW(N偏W10°左右),出露长度10 km以上,宽20~40 m,直立,走向上平直,切穿了中天门期英云闪长岩、石英闪长岩和二长花岗岩等。辉绿岩墙新鲜表面暗绿色,风化面褐黄色,在泰山红门一带宽约40 m,而且形成比较罕见的“桶状构造”,被称之为“醉心石”,并成为泰山地质旅游的著名景点之一。岩石具有辉长辉绿结构、块状构造,由蚀变斜长石(55%~60%)、辉石(40%±)和少量石英(<5%)组成,副矿物主要为磁铁矿和磷灰石。矿物粒径0.2~4 mm。斜长石呈半自形-自形板状、长板状,具较强帘石、绢云母化。辉石呈浅褐色柱状,有的被阳起石交代,分布于斜长石格架间。石英呈它形粒状充填斜长石和辉石粒间。陆松年等^[37]对从该辉绿岩中分选出的斜锆石开展了同位素稀释热电离质谱(ID-TIMS)法U-Pb同位素测年,获得了全部5个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均值为1 621.1±8.8 Ma。相振群等^[38]利用二次离子探针质谱(SIMS)开展了斜锆石U-Pb同位素测年,全部28个点的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄加权平均值为1 632.4±4.2 Ma(95%置信度,MSWD=1.02,2σ),而谐和度相对较好的26个点(不包括谐和度分别为114和115的两个点)的谐和年龄为1 632.7±8.6 Ma(95%置信度,MSWD=0.061,2σ),二者在误差范围内完全一致。SIMS法结果与前述ID-TIMS法结果在误差范围内完全一致。

1.4 1.33 ~ 1.30 Ga 岩浆事件群

目前在华北克拉通之上发现的1.33~1.30 Ga岩

浆事件主要为燕辽裂陷槽东段侵入到下马岭组、铁岭组、雾迷山组与高于庄组的辉绿岩墙、岩床^[40-42,87-88],商都-化德花岗岩^[41],康保二长花岗岩^[33],以及白云鄂博火成碳酸岩^[43-45](表4)。

表4 华北克拉通 1.33~1.30 Ga 岩浆事件群
Tab.4 1.33~1.30 Ga magmatic events
of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
侵入下马岭组 辉绿岩墙	1 320±6	TIMS 斜锆石	李怀坤等 ^[40]
	1 325±5	SIMS 斜锆石	Zhang et al. ^[41]
	1 320±4	SIMS 斜锆石	Zhang et al. ^[41]
侵入雾迷山组 辉绿岩墙	1 324±5	SIMS 斜锆石	Zhang et al. ^[41]
	1 321±19	SHRIMP	Zhang et al. ^[41]
	1 323±11	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[41]
	~ 1 350	SHRIMP	Zhang et al. ^[42]
侵入铁岭组辉绿岩墙	1 316±37	SIMS 斜锆石	Zhang et al. ^[41]
侵入下马岭-高于庄组 地层辉绿岩墙	1 305 ~ 1 330	SIMS 斜锆石	Zhang et al. ^[87]
侵入铁岭组辉绿岩墙	1 319 ~ 1 323	SIMS 斜锆石	Zhu YS et al. ^[88]
康保二长花岗岩	1 335±4	MC-LAICPMS	相振群 ^[33]
	1 313±17	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[41]
	1 324±14	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[41]
	1 330±12	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[41]
	1 331±11	LA-ICPMS	Zhang et al. ^[41]
白云鄂博火成碳酸岩	1 301±12	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb (²⁰⁸ Pb/ ²³² Th)	Zhang et al. ^[44]

1.4.1 燕辽裂陷槽东段侵入到中元古界地层中的辉绿岩墙

该期辉绿岩墙在冀东、辽西等地的下马岭组、铁岭组、雾迷山组与高于庄组地层里分布比较广泛^[40-42,87-88],一般顺层面侵入,辉绿岩墙出露宽度不一,小的一般1 m以下,宽的十几米到几十米。辉绿岩墙岩石球形风化特征明显,粗中粒辉绿结构,块状构造,风化面成土黄色,新鲜面灰绿色。李怀坤等^[40]首先在宽城获得侵入下马岭组基性岩床斜锆石 ID-TIMS U-Pb 同位素年龄 1 320±6 Ma。随后,Zhang et al.^[41-42,87];Zhu et al.^[88]先后在宽城、下板城、平泉、凌源、朝阳、义县等地获得 10 余组侵入到下马岭组、铁岭组、雾迷山组与高于庄组辉绿岩墙年龄数据,主要集中在 1 330~1 300 Ma 之间(表4)。

1.4.2 康保-商都-化德花岗岩

康保-商都-化德花岗岩主要出露在康保-商都-化德交界地区玻璃忽镜、牛家坊、芦家营、小英图、吴家地等地出露。出露规模不大,一般在低缓的山坡上突兀出现,地形上便于观察,岩石具明显的球状风化特征,略具片麻理。岩石中有微粒暗色包体出现,并被后期的中细粒花岗质脉体侵入。Zhang et al.^[41]报道

了化德-商都之间玻璃忽镜与牛家坊 1 320~1 335 Ma 花岗岩,相振群^[33]获得小英图、吴家地附近二长花岗岩锆石 MC-LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 1 335±4 Ma。

1.4.3 白云鄂博火成碳酸岩

白云鄂博火成碳酸岩侵位于白云鄂博群各层位以及基底杂岩中,并主要围绕矿区的主、东矿分布,西矿也有零星出露,其规模普遍不大,出露最长的约 200 m 左右,最短的只有 5.5 m,出露宽度为 0.5~4.44 m 不等,多数岩墙的倾角近于直立^[89]。王凯怡等^[90]将碳酸岩墙分为白云石型和白云石-方解石共存型和方解石型等三种类型,还认为白云石型和白云石-方解石共存型对应于早期岩浆阶段,方解石型对应于碳酸岩浆演化的晚期热液阶段,稀土含量很高的方解石型岩墙与白云鄂博主要稀土矿化期有关。针对白云鄂博火成碳酸岩侵位与矿化时代,前人开展了诸多的同位素年代学工作^[89-101],最新的同位素年代学资料表明,白云鄂博火成碳酸岩可能形成于 1.30 Ga 前后^[43-45]。

朱祥坤等^[43]结合区域地质、矿床特征,系统地分析了前人的年代学研究成果,尤其对白云鄂博矿床的 Sm-Nd 同位素体系进行了深入的分析和讨论,认为白云鄂博碳酸岩墙的形成时间约为 1.30 Ga。Zhang et al.^[44]则成功地从白云鄂博矿区东部富稀土铈的火成碳酸岩中分选出大量的同岩浆期结晶的锆石,LA-ICP-MS U-Pb 定年获得的均—²⁰⁸Pb/²³²Th 年龄为 1 301±12 Ma,进一步说明白云鄂博火成碳酸岩形成于 1.30 Ga 左右。

1.5 1.23~1.20 Ga 岩浆事件

近年来,诸多学者^[102-105]相继在华北克拉通东缘的榆树砬子群、蓬莱群、土门群沉积地层发现约 1.3~1.0 Ga 的碎屑锆石。除此之外,裴福萍等^[46]报道了吉林通化地区辉绿岩墙 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄为 1 244±28 Ma, Wang et al.^[47]报道了建平-青龙等地的基性岩墙年龄为 1 208~1 231 Ma, Peng et al.^[48]报道山东沂水辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1 209±6 Ma,我们获得了滦南杜蒿坨一带的第四系覆盖区的基性辉长辉绿岩体斜锆石 SIMS 法 Pb-Pb 同位素年龄为 1 228.3±4.0 Ma^[33]。证实了在华北克拉通东部地区约 1 230 Ma 时期的岩浆事件分布规模进一步扩大。最近,李怀坤获得沂水牛心官庄附近的辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为 1 216±5 Ma,斜锆石 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄加权平均值为

表5 华北克拉通 1.23 ~ 1.20 Ga 岩浆事件群

Tab.5 1.23 ~ 1.20 Ga magmatic events of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
冀东杜嵩垵辉长辉绿岩	1 228.3±4.0	SIMS 斜锆石	相振群 ^[33]
通化辉绿岩墙	1 244±28	LA-ICPMS	裴福萍等 ^[46]
建平-青龙基性岩墙	1 208 ~ 1231	LA-ICPMS	Wang et al. ^[47]
冀东茆家沟岩墙	1 236.4±7.3	SIMS 斜锆石	Wang et al. ^[47]
沂水辉长岩	1 209±6	SHRIMP	Peng et al. ^[48]
	1 219.5±4.4	SIMS 斜锆石	李怀坤等 ^①
	1 216±5	SHRIMP 锆石	李怀坤等 ^①

1 219.5±4.4 Ma^①。进一步扩大了这一时期的岩浆事件群的分布范围。

2 华北克拉通中元古代岩浆事件群相关问题讨论

前人针对这些中元古代岩浆事件群,开展了岩石学、矿物学、地球化学、同位素示踪、地球物理等各方面的研究工作,对这些事件群相关问题进行了讨论,目前争论较大的主要集中在以下几个问题上,对这些问题认识的不同,直接影响着对华北克拉通中元古代早期岩浆事件群性质与构造属性的判别。

2.1 哥伦比亚超大陆裂解时限

华北克拉通属于哥伦比亚超大陆的组成部分^[6, 17, 32, 36, 41, 106-112],在古元古代造山及中元古代裂解事件群的性质、特点和时代等特征上,华北克拉通与北美、西伯利亚和西北欧的古老克拉通有更大的相似性。Zhao et al.^[106]、Roger and Santosh^[107]、Ernst et al.^[108]等认为哥伦比亚超大陆的裂解可能开始于16亿年,但大规模裂解发生在14~12亿年;陆松年等^[6]、翟明国等^[118]为代表的学者认为1.77 Ga前后的基性岩墙群、熊耳地区火山岩为华北克拉通化以后的初始裂解的标志;侯贵廷^[17]甚至认为1.85 Ga的时候,华北克拉通已经开始裂解。华北、澳大利亚、劳伦、刚果-圣弗朗西斯科等克拉通的初始裂解时间比其他块体要早^[111-114],在东欧克拉通 Fennoscandian 和 Ukrainian 地盾中的的斜长岩-环斑花岗岩杂岩体等非造山岩浆组合则比华北克拉通出现的晚^[107]。因此,哥伦比亚超大陆裂解事件在不同的克拉通之上启动的时间有先后,岩浆事件群的发育具有穿时性,而关于超大陆最终裂解的时间,Zhang et al.^[42]曾认为1.32~1.32 Ga的基性岩墙与花岗岩代表了哥伦比亚

超大陆末次裂解的时间,后来,张拴宏和赵越^[45]、Zhang et al.^[87]提出燕辽裂陷槽1.33~1.30 Ga的基性岩墙构成基性大火成岩省,与其他同期的岩浆事件一起,代表了哥伦比亚超大陆裂解过程中的一次重要事件。侯贵廷等^[17]认为1.30~1.20 Ga哥伦比亚超大陆最终裂解事件,Wang et al.^[115]认为西澳伊尔岗地块之上的1.21 Ga基性岩墙指示了哥伦比亚超大陆末次裂解事件,随后,Pisarevsky et al.^[116]发表文章认为1.30~1.05 Ga是哥伦比亚超大陆末次裂解到罗迪尼亚超大陆汇聚的过渡时间(Transitional time)。Ernst et al.^[108]将1.30~0.90 Ga划归为罗迪尼亚超大陆的汇聚时限。翟明国等^[30]华北克拉通自1 800 Ma至新元古代时期,一直处于“一拉到底”的构造环境。综合以上,我们认为,华北克拉通之上发育的1.33~1.30 Ga、1.23 Ga的岩浆事件群代表了哥伦比亚超大陆晚期裂解事件记录。至少在1.20 Ga以后,全球才进入下一个超大陆汇聚的时期。

2.2 熊耳群火山岩的性质及构造属性

熊耳群火山岩与同时期的基性岩墙一起,构成华北克拉通中元古代早期规模最大,分布最广的岩浆事件群。尽管有地质学家提出其产出于造山后或者同造山的构造环境^[12, 117-119],但是更多的学者认为其产出于陆内非造山环境^[6, 18, 21, 32, 36, 120-123]。

熊耳群在华北克拉通南缘,从熊耳山、确山、浍池、一直到山西中条、陕西蓝田、霸源等地都有分布,南北宽度最大超过300 km,东西出露长度近400 km,分布规模巨大,沉积的火山岩地层厚度达几千米,火山岩系中具有河湖相沉积夹层,而且其上又被连续、整齐、厚层的汝阳群、洛峪群覆盖,几乎未遭受变质变形。尽管Zhao GC et al.^[118]根据火山岩地球化学特点认为熊耳群火山岩具有钙碱性特点,形成于大陆边缘弧环境,不具板内裂解特点。但赵太平等^[123]认为“熊耳群火山岩表现出的岛弧型地球化学亲缘性是继承于其陆下岩石圈富集地幔,反映的是早期俯冲带组分的改造,熊耳群火山岩是在大陆基底上的拉张背景下喷溢形成的”。同时华北克拉通中部晋冀蒙岩墙群具有放射状几何学形态,岩墙个体的特征也不同于造山带岩墙的特征,与熊耳群火山岩系构成了一个大火成岩省^[16, 18, 20]。因此,熊耳群火山岩与同时期的基性岩墙群,是陆内非造山岩浆活动的产物^[6, 18, 21, 32, 36, 120-123],为华北克拉通化以后的初始裂解

①李怀坤,张健,田辉,等.中国及邻区中、新元古代地层格架和大地构造研究子项目成果报告,天津地质调查中心,2019.

的标志,华北克拉通之上三大裂陷槽在这之后逐步打开,并接受了巨厚层的中-新元古代沉积。

2.3 华北克拉通 AMCG 及相关岩石构造环境

中元古代 AMCG 岩石组合在全球广泛分布,主要呈线状在古老克拉通的边缘或内部发育。具有张性的大陆裂谷环境,是诱发玄武质岩浆产生底侵作用的最佳地质背景。Sharkov^[124]认为东欧克拉通的斜长岩-环斑花岗岩杂岩体形成于造山带稳定以后,是增厚地壳板内岩浆活动的产物,提出由于地幔柱头部热源引起的上地壳的双层岩浆房,岩浆房内基性和酸性岩浆层的长期共存导致:(1)一些由于地壳混染的基性岩浆富 SiO_2 和 Al_2O_3 ,导致了斜长石和斜长岩堆晶体的形成;(2)Na 扩散进入基性岩浆,K 扩散进入硅质岩浆,导致了富钾花岗岩的出现;(3)均一的同位素组成;(4)花岗岩中特殊的环斑结构。解广轰^[24]对大庙斜长岩-密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学特征进行了详细总结和论述,并且认为华北克拉通之上以斜长岩-环斑花岗岩为主的 AMCG 岩石组合与大陆地壳在伸展-裂解构造体制下导致的底侵作用有关系。一些学者^[5-6,14,25-28,32,51,73,80,124]也认为华北克拉通北缘以 AMCG 岩石组合为代表的 1.72 ~ 1.67 Ga 岩浆事件群,产出与陆内非造山环境,并与哥伦比亚超大陆聚合后的裂解相联系^[36]。

Zhang et al.^[75], Liu et al.^[77], Wang et al.^[78]认为华北北缘的 AMCG 岩石组合产出后碰撞或后造山的伸展环境,主要的依据来自地球化学数据所显示的 Nb-Ta 等高场强元素的亏损和大离子亲石元素的富集等“岛弧地球化学特征”,并认为该期岩浆活动与古元古代末期华北克拉通西部陆块向东部陆块俯冲有关。但是,越来越多的资料表明,AMCG 岩石组合在华北克拉通上不仅仅局限于密云、赤城、承德大庙几个地区,区域上,在华北北缘由东往西,从建平、经平泉、大庙、涉洼、密云、赤城等地一直到包头固阳地区,区域上存在一条长约 1 000 km 的 1.70 Ma 左右的非造山岩浆岩带,这条非造山岩浆岩带是横穿了赵国春等所划分的“东部陆块、中央造山带、西部陆块”,因此,华北北缘的 AMCG 岩石组合也就不可能是“古元古代末期华北克拉通西部陆块向东部陆块俯冲”的产物。除此之外,越来越多的同期辉绿岩墙等也在华北克拉通内部被发现,该期岩浆事件群的分布范围越来越大,因此,华北克拉通北缘以 AMCG 岩石组合为代表的 1.72 ~ 1.67 Ga 岩浆事件群,是陆内非

造山环境下,哥伦比亚超大陆裂解作用的产物。

2.4 大红峪组火山岩的构造环境

针对 1.62 ~ 1.63 Ga 的岩浆事件的性质,很多地质学家进行了讨论。大红峪组火山岩发育于燕辽裂陷槽中,该裂陷槽是吕梁运动之后在华北克拉通基底拉张作用下产生的裂谷系统(王鸿祯等,1985)。根据大红峪火山岩喷发不整合覆于海相沉积物之上,说明该区裂谷从常州沟期就已开始出现了。还有在团山子组白云岩层面发育的大型冲刷面,其上常见的白云岩砾石叠瓦状的排列,并构成单向斜层理,进而表明在古风化壳上有陆相的单向水系存在,也是裂谷发育的标志之一,据此可以推断该裂谷发育早于地幔上隆和火山喷溢作用,同时表明该裂谷属被动型裂谷或属于夭折裂谷系。大红峪火山岩属夭折的、被动裂谷型弱火山作用的产物,形成于陆内裂谷构造环境。Lu et al.^[5,36]、陆松年等^[6,37]、郁建华等^[28]也一直把大红峪组火山岩与同期发育的华北克拉通南缘龙王碾碱性花岗岩、鲁西泰山红门辉绿岩墙等视为华北克拉通长城纪的第三次裂解事件群。

最近,Wang et al.^[125]根据地球化学特征认为大红峪火山岩可能与后造山环境下的陆壳物质的拆沉作用有关。但是胡俊良等^[126]也曾针对大红峪组火山岩开展地球化学工作,认为尽管大红峪组火山岩在地球化学特征上显示富集轻稀土(LREE)和大离子亲石元素(LILE)(如 Rb、Ba、K 等)、贫高场强元素(HFSE)Th、Zr、Hf、HREE 等和弱的 Nb、Ta 亏损等微量元素特征,只是说明火山岩继承了受俯冲交代作用改造的源区特征,并不指示火山岩的形成环境为岛弧环境,源区岩浆中有部分 OIB 相似地幔源成分加入,其深部地球动力学过程可能与地幔柱作用有关,结合区域地质背景以及岩石组合类型,大红峪组火山岩的构造环境仍形成于板内裂谷环境。张健等^[39]也通过长城系大红峪组、团山子组碱性玄武质岩和侵入串岭沟组基性岩脉岩浆起源与源区特征、动力学背景与构造含义的分析,提出岩浆事件应与哥伦比亚超大陆裂解有关。我们赞同并支持这样的认识,地球化学特征不能作为构造环境判别的唯一标准,而更应该尊重区域地质背景、地质产状、岩石类型、矿物组合特点,以及沉积盆地内沉积演化的特点。

2.5 中元古代晚期岩浆事件群构造环境

从已有的资料看,1.33 ~ 1.30 Ga 岩浆事件群、

1.23 ~ 1.20 Ga 的岩浆事件群在华北克拉通分布范围较大、但是规模都相对较小,这些岩浆事件群具有板内构造环境特征,都是拉张背景下的产物。侯贵廷等^[17]曾认为 1.30 ~ 1.20 Ga 是哥伦比亚超大陆最终裂解时期。华北克拉通之上发育的 1.23 ~ 1.20 Ga 的岩浆事件群代表了哥伦比亚超大陆末次裂解事件记录。至少在 1.20 Ga 以后,全球构造体制又发生变化,进入下一个超大陆汇聚的时期。

需要注意的是,不论 1.33 ~ 1.30 Ga 岩浆事件群,还是 1.23 ~ 1.20 Ga 的岩浆事件群,都具有全球对比性,Zhang et al.^[87]提出燕辽裂陷槽 1.33 ~ 1.30 Ga 的基性岩墙构成基性大火成岩省,并且认为与北澳大利亚 McArthur 盆地内 1.32 Ga Derim Galiwinku 基性大火成岩省有明显的相似性,提出华北克拉通东北部与北澳大利亚克拉通北部曾经相邻。同样华北克拉通之上 1.23 ~ 1.20 Ga 的基性岩墙与西澳伊尔岗地块之上的 1.21 Ga 基性岩墙^[115]也具有可比性。

3 中元古代岩浆事件群重大地质意义

中元古代在长达近 2.0 Ga 的元古宙三个“代”中是承上启下的一个时代,它的演化历史既有别于古元古代,又有别于新元古代。Cawood and Hawkesworth^[127]将这一段时期称为“地球中年期”(Earth's middle age)。从全球构造演化看,这一时期没有大规模的造山作用,没有与汇聚作用有关的大规模的热-构造活动,也没有反映“雪球事件”的大规模冰成岩的发育,但是与哥伦比亚超大陆裂解作用相关的多期岩浆事件大量存在(图4)。

中元古代时期,华北克拉通至少有五期与超大陆裂解作用有关的侵入岩浆事件群,以及多期的火山作用记录,多期侵入岩浆事件群与火山作用记录都具有全球构造对比意义。中元古代伊始,随着哥伦比亚超大陆的逐步裂解,在华北、劳伦、澳大利亚、刚果-圣弗朗西斯科、西伯利亚、东欧等全球主要的克拉通内部除了发育了大量的裂陷盆地,接受巨量沉积之外,还都发育了一系列陆内裂解火山岩、非造山花岗岩和基性岩墙群等与超大陆裂解有关的岩浆事件群,意味着这一阶段的拉张裂解事件是全球性的,并具有相当的强度。并已被越来越多的证据证实^[5-6,10,87,111,113]。

也曾经因为少有被动大陆边缘的岩石记录^[128]、

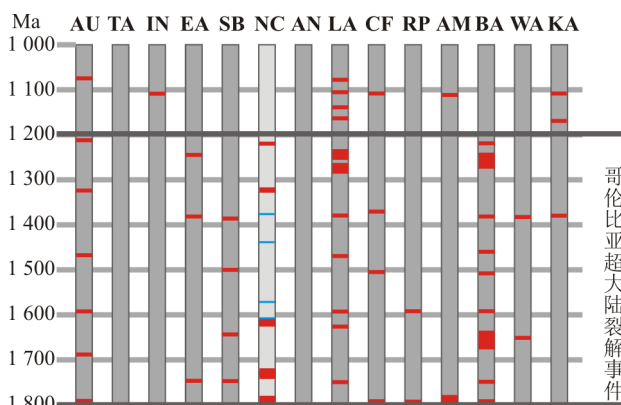


图4 哥伦比亚超大陆裂解事件群在主要古老克拉通上的分布柱状图(据参考文献[113])

Fig.4 Histogram of the distribution of the Columbia supercontinent breakup events on the ancient Cratons, modified after Ernst et al.

红色为与岩浆事件群,蓝色为华北克拉通中元古界地层中的火山凝灰岩夹层位置,AU:澳大利亚;TA:塔里木;IN:印度;EA:东南极;SB:西伯利亚;NC:华北;AN:阿拉伯-努比亚;LA:劳伦;CF:刚果-圣弗朗西斯科;RP:拉普拉塔;AM:亚马逊;BA:波罗地;WA:西非;KA:卡拉哈里

冰川沉积记录^[129]、铁建造记录^[130]、磷酸盐沉积,以及海水中的Sr同位素^[131]与碎屑锆石中的 $\epsilon^{\text{Hf}}(t)$ ^[132]无明显异常等原因,一些地质学家将包括中元古代(1.80 ~ 1.00 Ga)在内的1.85 ~ 0.85 Ga阶段称为大气氧的“boring”时期。但实际上,除上述岩浆事件之外,近年来,诸多研究者又分别在华北克拉通燕辽裂陷槽、豫陕裂陷槽、渣尔泰山-白云鄂博裂陷槽的中元古界地层中的多个层位发现了大量的斑脱岩或者凝灰岩的夹层,并获得多个精确的同位素年代学数据^[133-142](表6),这为重新厘定华北克拉通中元古界年代地层格架提供了进一步约束。华北克拉通在中元古代时期也是叠层石生长发育的最繁盛的古老克拉通之一。最近,燕辽裂陷槽中元古代高于庄组中的多细胞真核生物群^[143]的发现、距今约15.7亿年前地球发生的氧化事件^[144]以及中元古代高于庄期碳同位素多期次负漂移、雾迷山组底部碳同位素正漂移等化学地层研究报道^[145],则改变了以往的认识,华北克拉通具有全球对比意义的岩浆事件群与碳质宏观化石生物群、中元古代氧化事件进一步证明了中元古代时期不是枯燥的、无趣的。

4 结论

(1)从全球构造演化看,中元古代时期,没有大规模的造山作用,没有与汇聚作用有关的大规模的

表6 华北克拉通中元古界地层中的凝灰岩夹层

Tab.6 Tuff intercalations in the Mesoproterozoic strata of the North China Craton

岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源	岩浆期次
延庆高于庄组凝灰岩	1 559±12	SHRIMP	李怀坤等 ^[133]	高于庄期火山作用
	1 560±5	LA-MC-ICPMS	李怀坤等 ^[133]	
蓟县高于庄组凝灰岩	1 577±12	LA-MC-ICPMS	田辉等 ^[134]	铁岭期火山作用
蓟县铁岭组凝灰岩	1 439 ±11	SHRIMP	李怀坤等 ^[135]	
蓟县铁岭组凝灰岩	1 445±12	LA-MC-ICPMS	郭文琳等 ^[136]	铁岭期火山作用
	1 442±10			
平泉双洞铁岭组凝灰岩	1 437±21	SHRIMP	苏文博等 ^[137]	
	1 443±21	LA-MC-ICPMS	苏文博等 ^[137]	
下马岭组斑脱岩	1 372±18	SHRIMP	Su et al. ^[138]	下马岭期火山作用
	1 380±36	SHRIMP	Su et al. ^[139]	
	1 379±12	SHRIMP	Su et al. ^[139]	
	1 368±12	SHRIMP	高林志等 ^[140]	
	1 370±11	SHRIMP	高林志等 ^[141]	
	1 366±9	SHRIMP	高林志等 ^[141]	

热-构造活动,也没有反映“雪球事件”的大规模冰成岩的发育,但是与哥伦比亚超大陆裂解作用相关
的多期岩浆事件大量存在,华北克拉通在这一时期发育了5期岩浆事件群。

(2)华北克拉通中元古代时期岩浆事件群具有幕式裂解的特点,约1.80~1.77 Ga岩浆事件群标志着华北克拉通的初始裂解,在这之后华北克拉通三大裂陷槽逐步打开;1.72~1.67 Ga,1.63~1.62 Ga岩浆事件群则是华北克拉通在中元古代早期持续裂解的具体体现,它们代表了哥伦比亚超大陆早期裂解的岩浆事件记录;1.33~1.30 Ga期间以及1.23~1.20 Ga的岩浆事件群则可能代表了哥伦比亚超大陆的晚期裂解事件。

(3)华北克拉通具有全球对比意义的岩浆事件群与碳质宏观化石生物群、中元古代氧化事件、碳同位素的漂移,进一步证明了中元古代时期地球演化的多样性,中元古代时期不再是枯燥的、无趣的。

致谢:本文第一作者作为陆松年先生的学生与其一起工作多年,在工作、学习过程中一直得到先生的教导,对先生的感激之情无以言表。在陆先生80寿诞之际,谨祝先生身体健康,福寿绵长。感谢张健在成文过程中的帮助!

参考文献:

[1] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS International Chrono-stratigraphic Chart[J]. Episodes ,2013, 36: 199– 204. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart> .

[2] 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版)[M]. 北京:地质出版社,2013.

[3] 陆松年,郝国杰,王惠初,等. 中国变质岩大地构造图(1/250万)说明书[M].2015,北京:地质出版社,1–92.

[4] 陆松年,相振群,王惠初,等. 泰山新太古代地质演化史(上)[M]. 2019,济南:山东人民出版社,1–267.

[5] Lu SN, Yang CL, Li HK, et al. A Group of Rifting Events in the Terminal Paleoproterozoic in the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2002, 5 (1): 123–131.

[6] 陆松年,杨春亮,李怀坤,等. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. 地学前缘,2002,9(4): 225–233.

[7] 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.

[8] 赵太平,周美夫,金成伟,等. 华北陆块南缘熊耳群形成时代讨论[J]. 地质科学,2001,36(3):326–334.

[9] 赵太平,庞岚尹,仇一凡,等. 古/中元古代界线:1.8Ga[J]. 岩石学报, 2019,35(08):2281–2298.

[10] 耿元生,旷红伟,杜利林,等. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代的界限[J]. 岩石学报, 2019, 35 (08): 2299–2324.

[11] Halls H C, Campal N, Davis DW, et al. Magnetic studies and U–Pb geochronology of the Uruguayan dyke swarm, Rio de la Plata craton, Uruguay: Paleomagnetic and economic implications[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2001, 14: 349–361.

[12] He YH, Zhao GC, Sun M., et al. SHRIMP and LA–ICP–MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: implications for the Paleo– Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2009, 168 (3–4): 213–222.

[13] Hou G T, Li J H, Yang M H, et al. Geochemical constraints on the tectonic environment of the late Paleoproterozoic mafic dyke swarms in the North China craton[J].Gondwana Research, 2008, 13: 103–116.

[14] Hou GT, Santosh M, Qian XL, et al. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms[J]. Gondwana Research, 2008, 14: 395–409.

[15] Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760Ma volcanic rocks of the Xiong’er Group, southern margin of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2010, 182: 204–216.

[16] 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. 岩石学报, 2004,20(3): 439–456.

[17] 侯贵廷. 华北基性岩墙群[M]. 北京:科学出版社,2012.

- [18] Peng P, Zhai MG, Ernst RE, et al. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm[J]. *Lithos*, 2008, 101: 260–280.
- [19] Peng P, Zhai M G, Guo J H, et al. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 29–46.
- [20] 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 dikes[J]. *International Geology Review*, 2005, 47: 492–508.
- [21] Peng P. Reconstruction and interpretation of giant mafic dyke swarms: a case study of 1.78 Ga magmatism in the North China craton. In: Kusky T, Zhai M–G, Xiao W–J, eds. *The Evolving Continents: Understanding Processes of Continental Growth*[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2010, 338: 163–178.
- [22] Peng P, Zhai M G, Guo J H. 1.80–1.75 Ga mafic dyke swarms in the central North China craton: implications for a plume-related break-up event. In: Hanski E, Mertanen S, Rämö T, Vuollo J, eds. *Dyke Swarms – Time Markers of Crustal Evolution*[J]. London: Taylor & Francis, 2006, 99–112.
- [23] 崔敏利, 张宝林, 彭澎, 等. 豫西崤山早元古代中酸性侵入岩锆石/斜锆石 U–Pb 测年及其对熊耳火山岩系时限的约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(05):1541–1549.
- [24] Jiang N, Guo J H, Zhai M G. Nature and origin of the Wen-quang granite: Implications for the provenance of Proterozoic A-type granites in the North China craton[J]. *Journal of Asia Earth Science*, 2011, 42: 76–82.
- [25] Rämö O T, Haapala I, Vaasjoki M, et al. 1700 Ma Shachang complex, northeast China: Proterozoic rapakivi granite not associated with Paleoproterozoic orogenic crust [J]. *Geology*, 1995, 23 (9):815–818.
- [26] 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——兼论全球岩体斜长岩和环斑花岗岩类的时空分布及其意义[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [27] 郁建华, 付会芹, I. 哈巴拉, 等. 华北克拉通北部 1.70 Ga 非造山环斑花岗岩岩套[J]. *华北地质矿产杂志*, 1996, 11 (3):9–18.
- [28] 郁建华, 付会芹, 张凤兰, 等. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石[J]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996, 1–182.
- [29] 王惠初, 相振群, 赵凤清, 等. 内蒙古固阳东部碱性侵入岩: 年代学、成因与地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2843–2854.
- [30] 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1 670 Ma——来自北京密云花岗斑岩岩脉锆石 LA–MC–ICPMS U–Pb 年龄的约束[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3):108–120.
- [31] 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 北京密云环斑花岗岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素及地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(6):1633–1644.
- [32] 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 华北中–新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. *地学前缘*, 2014, 21(1):100–119.
- [33] 相振群. 华北克拉通中元古代岩浆事件群与成矿作用 [D]. 中国地质大学, 2014.
- [34] 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 等. 华北克拉通南缘龙王–碱性花岗岩 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2003, 22 (10):762–768.
- [35] 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.
- [36] Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 77–93.
- [37] 陆松年, 陈志宏, 相振群. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社, 2008, 1–90.
- [38] 相振群, 李怀坤, 陆松年, 等. 泰山地区古元古代末期基性岩墙形成时代厘定——斜锆石 U–Pb 精确定年[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9):2831–2842.
- [39] 张健, 田辉, 李怀坤, 等. 华北克拉通北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 来自燕辽裂陷槽中部长城系碱性火山岩的地球化学、锆石 U–Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2015, 31(10):3129–3146.
- [40] 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 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[J]. *地质通报*, 2009, 28 (10):1396–1404.
- [41] Zhang S H, Zhao Y, Santosh M. Mid–Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222–223: 339–367.
- [42] Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, et al. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288: 588–600.
- [43] 朱祥坤, 孙剑. 内蒙古白云鄂博矿床的稀土矿化时代与期次[J]. *地球学报*, 2012, 33(6):845–855.
- [44] Zhang S H, Zhao Y, Liu Y S. A precise zircon Th–Pb age of carbonatite sills from the world's largest Bayan Obo deposit: Implications for timing and genesis of REE–Nb mineralization[J]. *Precambrian Research*, 2017, 291, 202–219.
- [45] 张拴宏, 赵越. 华北克拉通北部 13.3 ~ 13.0 亿年基性大火成岩省与稀土–铌成矿事件[J]. *地学前缘*, 2018, 25(05): 34–50.

- [46] 裴福萍, 叶轶凡, 王枫, 等. 吉林通化地区中元古代辉绿岩墙的发现及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(1):100–108.
- [47] Wang W, Liu S W, Santosh M, et al. 1.23 Ga mafic dykes in the North China Craton and their implications for the re-construction of the Columbia supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2014, 2.
- [48] Peng T P, Wilde S A, Fan W M, et al. Mesoproterozoic high Fe–Ti mafic magmatism in western Shandong, North China Craton: petrogenesis and implications for the final breakup of the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 190–207.
- [49] 赵太平, 庄建敏, 原振雷. 华北板块南缘熊耳群火山岩岩石类型及火山岩系列[J]. 华北地质矿产杂志, 1996, (04): 114–121.
- [50] 赵太平, 金成伟. 熊耳群研究四十年[J]. 华北地质矿产杂志, 1999, (01):19–27.
- [51] 赵太平. 华北陆块元古宙熊耳群火山岩、大庙斜长岩杂岩体的年代学、岩石地球化学与构造环境研究[D]. 中国科学院广州地球化学研究所博士后出站报告, 2003.
- [52] 赵太平, 金成伟, 翟明国, 等. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 59–69.
- [53] 张臣, 侯贵廷, 钱祥麟. 吕梁–晋北地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群侵位方式的磁组构证据[J]. 地质论评, 1994, (03):245–251.
- [54] 陈亚平, 钱祥麟. 山西吕梁山地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群的古地磁学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1987, 02:87–97.
- [55] 胡俊良, 赵太平, 陈伟, 等. 华北克拉通 1.75 Ga 基性岩墙群特征及其研究进展[J]. 大地构造与成矿学, 2007(04): 457–470.
- [56] 胡俊良. 中条山–嵩山地区 ca. 1.75 Ga 基性岩墙群的成因与构造环境[D]. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2007.
- [57] 廖超林, 王岳军, 彭头平. 太行山南段早元古代基性脉岩的 $\sim(40)\text{Ar} - \sim(39)\text{Ar}$ 年代学及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2003(04):354–361.
- [58] 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.
- [59] 李云, 彭澎, 王欣平. 华北莱芜地区 1680 Ma 基性岩墙群的特征及其地质意义[J]. 2013 年全国岩石学与地球动力学研讨会(摘要), 2013, 136.
- [60] 赵崇贺. 北京密云斜长环斑花岗岩地质学和岩石学研究[J]. 第一届矿物岩石地球化学学术会议论文集——岩石部分. 北京: 科学出版社, 1964, 124–143.
- [61] 翟裕生. 某斜长岩的岩石特征及成因[J]. 地质论评, 1965, 23(3):186–195.
- [62] 洪大卫. 密云沙场环斑花岗岩的岩石学研究[D]. 北京大学研究生毕业论文, 1965.
- [63] 钟富道, 解广轰. 斜长岩事件年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 1978, (3):202–208.
- [64] 王关玉. 河北承德地区斜长岩体的岩石及矿床成矿特征[J]. 河北地质情报, 1994, (4):1–28.
- [65] 解广轰. 大庙斜长岩杂岩体的岩石学特征[J]. 地球化学, 1980, (3):263–280.
- [66] 解广轰, 王俊文. 大庙斜长岩杂岩体侵位年龄的初步研究[J]. 地球化学, 1988, (1):13–17.
- [67] 阎国翰, 郭立鹤, 钱彬. 承德黑山苏长岩中斜长石研究[M]. 北京大学地质系“研究生论文集”, 北京:北京大学出版社, 1985, 106–114.
- [68] 阎国翰, 牟保磊. 承德黑山斜长杂岩体辉石特征及其形成温度条件[J]. 岩石学报, 1993, 9(3):300–307.
- [69] 周永昶, 袁朝. 大庙斜长岩杂岩体及铁磷矿的稀土元素地球化学研究[J]. 长春地质学院学报, 1989, 19(1):43–53.
- [70] 郁建华. 北京及附近元古宙裂谷槽中球斑花岗岩套的地球化学[J]. 地质学报, 1990, 64(4):322–336.
- [71] 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讨论[J]. 中国地质科学院地质研究所刊, 1992, 25:137–156.
- [72] 万方晓. 北京密云沙厂环斑花岗岩球斑结构的特征及成因探讨[J]. 北京地质, 1994, (3):17–23.
- [73] Zhao T P, Chen W, Zhou M F. Geochemical and Nd–Hf isotopic constraints on the origin of the ~ 1.74 Ga Damiao anorthosite complex, North China Craton[J]. *Lithos*, 2009, 113(3–4):673–690.
- [74] 高维, 张传恒, 高林志, 等. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2008, 27(6):793–798.
- [75] Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, et al. The 1.75 $\sim$ 1.68 Ga anorthosite–mangerite–alkali granitoid–rapakivi granite suite from the northern North China Craton: magmatism related to a Paleoproterozoic orogen[J]. *Precambrian Research*, 2007, 155: 287–312.
- [76] Haapala I and Ramo OT. Rapakivi granites and related rocks: An introduction[J]. *Precambrian Research*, 1999, 95(1–2):1–7.
- [77] Liu S W, Santosh M, Wang W, et al. Zircon U–Pb chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 48–63.
- [78] Wang W, Liu S W, Bai X, et al. Geochemistry and zircon U–Pb–Hf isotopes of the late Paleoproterozoic Jianping diorite–monzonite–syenite suite of the North China Craton: Implications for petrogenesis and geodynamic setting[J]. *Lithos*, 2013, 175–194.
- [79] 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, (02):377-386.
- [80] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, (03): 685-690.
- [81] 莫测辉, 梁华英, 王秀璋, 等. 冀西北水泉沟碱性杂岩体锆石 U-Pb 定年[J]. 科学通报, 1997, (01):75-78.
- [82] 高林志, 张传恒, 尹崇玉, 等. 华北古陆中-新元古代年代地层框架 SHRIMP 锆石年龄新依据[J]. 地球学报, 2008, (03):366-376.
- [83] 卢欣祥. 龙王-A 型花岗岩地质矿化特征[J]. 岩石学报, 1989, (01):67-77.
- [84] 包志伟, 王强, 资锋, 等. 龙王-A 型花岗岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 地球化学, 2009, 38(6):509-522.
- [85] Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Lithospheric thinning and reworking of Late Archean juvenile crust on the southern margin of the North China Craton: evidence from the Longwangzhuang Paleoproterozoic A-type granites and their surrounding Cretaceous adakite-like granites[J]. *Geological Journal*, 2013, 48(5): 498-515.
- [86] 张拴宏, 赵越, 叶浩, 等. 燕辽地区长城系串岭沟组及团山子组沉积时代的新制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(07): 2481-2490.
- [87] Zhang S H, Zhao Y, Li X H, et al. The 1.33 ~ 1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*. 2017, 465, 112-125.
- [88] Zhu Y S, Yang J H, Wang H, et al. Mesoproterozoic (~ 1.32 Ga) modification of lithospheric mantle beneath the North China craton caused by break-up of the Columbia supercontinent[J]. *Precambrian Research*. 10.1016/j. precamres. 2020. 105674.
- [89] 范宏瑞, 陈福坤, 王凯怡, 等. 白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床酸岩墙锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(3):363-368.
- [90] 王凯怡, 范宏瑞, 谢奕汉. 白云鄂博碳酸岩墙的稀土和微量元素地球化学及对其成因的启示[J]. 岩石学报, 2002, (03):340-348.
- [91] 任英忱, 张英臣, 张宗清. 白云鄂博稀土超大型矿床的成矿时代及其主要地质热事件[J]. 地球学报, 1994, 15(S1): 95-101.
- [92] 范宏瑞, 胡芳芳, 陈福坤, 等. 白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿区碳酸岩墙的侵位年龄—兼答 Le Bas 博士的质疑[J]. 岩石学报, 2006, 22(2):519-520.
- [93] 范宏瑞, 杨奎峰, 胡芳芳, 等. 内蒙古白云鄂博地区基底岩石锆石年代学及对构造背景的指示[J]. 岩石学报, 2010, 26(5):1342-1350.
- [94] 王凯怡, 范宏瑞, 谢奕汉, 等. 白云鄂博超大型 REE-Fe-Nb 矿产基底杂岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2001, 46(16):1390-1394.
- [95] 王凯怡, 杨奎峰, 范宏瑞, 等. 白云鄂博矿床研究若干问题的探讨[J]. 地质学报, 2012, 86(5):683-686.
- [96] 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 等. 白云鄂博矿床年龄和地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003.
- [97] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2):172-175.
- [98] Le Bas M J, Yang X M, Taylor R N, et al. New evidence from a calcite-dolomite carbonatite dyke for the magmatic origin of the massive Bayan Obo ore-bearing dolomite marble, Inner Mongolia, China[J]. *Mineralogy and Petrology*. 2007, 90(3-4):223-248.
- [99] 杨岳衡, 孙金凤, 谢烈文, 等. 地质样品 Nd 同位素激光原位等离子体质谱 (LA-MC-ICPMS) 测定[J]. 科学通报, 2008, 53(5):568-576.
- [100] Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. Mesoproterozoic mafic and carbonatitic dykes from the northern margin of the North China Craton: implications for the final breakup of Columbia supercontinent[J]. *Tectonophysics*, 2011, 498(1-4): 1-10.
- [101] Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China: Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 40(1): 122-131.
- [102] 胡波, 翟明国, 郭敬辉, 等. 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[J]. 岩石学报, 2009, 25(1):193-211.
- [103] Luo Y, Sun M, Zhao G C. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Yushulazi Group in the Eastern Block, North China Craton[J]. *International Geology Review*, 2006, 48: 828-840.
- [104] 初航, 陆松年, 王惠初, 等. 山东长岛地区辅子乔组碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4):1017-1028.
- [105] 陆松年, 相振群, 李怀坤, 等. 华北克拉通对罗迪尼亚超大陆事件的响应——GOSEN 连接假设[J]. 地质学报, 2012, 86(9):1396-1406.
- [106] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup[J]. *Earth Sci. Rev.* 2004, 67: 91-123.
- [107] Rogers J J W and Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5(1):5-22.
- [108] Ernst R E, Wingate M T D, Buchan K L, et al. Global

- record of 1600–700 Ma Large Igneous Provinces (LIPs): Implications for the reconstruction of the proposed Nuna (Columbia) and Rodinia supercontinents[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 159–178.
- [109] 翟明国. 华北克拉通 2.1 ~ 1.7Ga 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.
- [110] Zhai M G, Hu B, Zhao T P, et al. Late Paleoproterozoic–Neoproterozoic multi–rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review[J]. *Tectonophysics*, 2015, 662:153–166.
- [111] Peterson T D, Scott J M J, Le Cheminant A N, et al., The Kivalliq Igneous Suite: An orogenic bimodal magmatism at 1.75 Ga in the western Churchill Province, Canada[J]. *Precambrian Research*, 2015, 262:101–119.
- [112] Zhao G C, Li S Z, Sun M, et al. Assembly, accretion, and break–up of the Palaeo–Mesoproterozoic Columbia super–continent: records in the North China Craton revisited[J]. *International Geology Review*, 2011, 53:1331–1356.
- [113] Ernst R E, Bleeker W, Söderlund U, et al. Large Igneous Provinces and supercontinents: toward completing the plate tectonic revolution [J]. *Lithos*, 2013, 174:1–14.
- [114] 陆松年, 郝国杰, 相振群. 前寒武纪重大地质事件[J]. *地学前缘*, 2016, 23(6):140–155.
- [115] Wang X C, Li Z X, Li J, et al. Genesis of the 1.21 Ga Marnda Moorn large igneous province by plume – lithosphere interaction[J]. *Precambrian Research*, 2014, 241: 85–103.
- [116] Pisarevsky S A, Wingate M T D, Li Z X, et al. Age and paleomagnetism of the 1210 Ma Gnowangerup – Fraser dyke swarm, Western Australia, and implications for late Mesoproterozoic paleogeography[J]. *Precambrian Res.* 2014, 246: 1–15.
- [117] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo–Mesoproterozoic Columbia Super–continent: records in the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2003, 6: 417–434.
- [118] Zhao G C, He Y H, Sun M. Xiong’er volcanic belt in the North China Craton: implications for the outward accretion of the Paleo–Mesoproterozoic Columbia (Nuna) Supercontinent[J]. *Gondwana Research*. 2009, 16: 170–181.
- [119] He Y H, Zhao G C, Sun M. Geochemical and isotopic study of the Xiong’er volcanic rocks at the southern margin of the North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *the Journal of Geology*, 2010, 118(4): 417–433.
- [120] Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo–Archaean and its breakup during late palaeoproterozoic and Meso–Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 2000, 43: 219–232.
- [121] Zhao T P, Zhou M F, Zhai M G, et al. Paleoproterozoic rift – related volcanism of the Xiong’er group, North China craton: implications for the breakup of Columbia[J]. *International Geology Review*, 2002, 44: 336–351.
- [122] Hou G T, Li J H, Qian X L. The palaeo–magnetism and geological significance of Mesoproterozoic dyke swarms in the central North China Craton[J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(2):185–192.
- [123] 赵太平, 徐勇航, 翟明国. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩的成因与构造环境: 事实与争议[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2):191–206.
- [124] Sharkov. E.V. Middle–proterozoic anorthosite – rapakivi granite complexes: An example of within–plate magmatism in abnormally thick crust: Evidence from the East European Craton[J]. *Precambrian Research*, 2010, 183(4). DOI: 10.1016/j.precamres.
- [125] Wang W, Liu S W, Santosh M, et al. Late Paleoproterozoic geodynamics of the North China Craton: Geochemical and zircon U–Pb–Hf records from a volcanic suite in the Yan–liao rift[J]. *Gondwana Research*, 2013, 27(1):300–325.
- [126] 胡俊良, 赵太平, 徐勇航, 等. 华北克拉通大红峪组高钾火山岩的地球化学特征及其岩石成因[J]. *矿物岩石*, 2007, 27(4):70–77.
- [127] Cawood P A, Hawkesworth C J. Earth’s middle age[J]. *Geology*, 2014, 42(6):503–506.
- [128] Bradley D C. Passive margins through earth history[J]. *Earth Science Reviews*, 2008, 91(1):1–26.
- [129] Bradley D C. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle[J]. *Earth–Science Reviews*, 2011, 108(1):16–33.
- [130] Bekker A, Slack J F, Planavsky N. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes [J]. *Economic Geology*. 2010, DOI: 10.2113/gsecongeo.105(3):467.
- [131] Shields G A. A normalised seawater strontium isotope curve: possible implications for Neoproterozoic–Cambrian weathering rates and the further oxygenation of the Earth [J]. 2007, 35–42.
- [132] Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, et al. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf–isotope data[J]. *LITHOS*, 2010, 119(3):457–466.
- [133] 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U–Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7):2131–2140.
- [134] 田辉, 张健, 李怀坤, 等. 蓟县中元古代高于庄组凝灰岩锆石 LA–MC–ICPMS U–Pb 定年及其地质意义[J]. *地球学报*, 2015, 36(05):647–658.
- [135] 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 中–新元古界标准剖面蓟

- 县系首获高精度年龄制约——蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(10):2999-3012.
- [136] 郭文琳, 苏文博, 张健, 等. 天津蓟县铁岭组新剖面钾质斑脱岩锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(08):2433-2454.
- [137] 苏文博, 李怀坤, Huff WD, 等. 铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 55(22):2197-2206.
- [138] Su W B, Li H K, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 3312-3323.
- [139] Su W B, Zhang S H, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2008, 14: 543-553.
- [140] 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2007, 26(3): 249-255.
- [141] 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北古陆下马岭组归属中元古界的 SHRIMP 锆石新证据[J]. 科学通报, 2008, 53(11):2617-2623.
- [142] 李怀坤, 张健, 田辉, 等. 华北克拉通燕辽裂陷槽中-新元古代地层年代学研究进展[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(2):127-136.
- [143] Zhu S X, Zhu M Y, Knoll A H, et al., Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China[J]. Nature communications, 2016, 7. DOI:10.1038/ncomms11500.
- [144] Zhang K, Zhu XK, Wood RA, et al., Oxygenation of the Mesoproterozoic ocean and the evolution of complex eukaryotes[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(5):345-350.
- [145] 田辉, 李怀坤, 相振群, 等. 蓟县中-新元古界团山子组-景儿峪组碳氧同位素演化特征及其沉积环境-构造意义[J]. 地质调查与研究, 待刊.

Mesoproterozoic magmatic events in the North China Craton

XIANG Zhen-qun^{1,2,3}, LU Song-nian^{1,2,3}, LI Huai-kun^{1,2,3},

TIAN Hui^{1,2,3}, LIU Huan^{1,2,3}, ZHANG Kuo^{1,2,3}

(1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Precambrian Geological Research Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. North China Center for Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: Multistage magmatic events related to the breakup of supercontinent Columbia occurred throughout the Mesoproterozoic (1 800 ~ 1 000 Ma). The properties and characteristics of the breakup event groups in each stage and the tectonic significance of the magmatic event groups in the Mesoproterozoic of the North China Craton are discussed according to their regional geological features, geochemical characteristics, and sedimentary evolution sequences. The magmatic event groups of the North China Craton in the Mesoproterozoic are considered to be episodic. The magmatic event groups of 1.80 ~ 1.77 Ga, 1.72 ~ 1.67 Ga, 1.63 ~ 1.62 Ga represent the record of the primary breakup of the supercontinent Columbia, while the magmatic event groups of 1.33 ~ 1.30 Ga and ~ 1.23 Ga represent the record of late breakup period. These magmatic event groups with global correlation significance, the macrofossil biota of the Gaoyuzhuang Formation and the oxidation event in the Mesoproterozoic could possibly add vitality to the Mesoproterozoic stereotypes of “sustained low oxygen on the surface of the earth during 1.8 ~ 0.8 Ga” and “the boring billion” hold by predecessors.

Key words: North China Craton; Meso-proterozoic; Magmatic events