

密云岩墙群的时代及其对长城系底界年龄的制约

彭澎, 刘富, 翟明国, 郭敬辉

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

E-mail: pengpengwj@mail.iggcas.ac.cn

2011-05-19 收稿, 2011-08-01 接受

国家重点基础研究发展计划(2009CB219305)和国家自然科学基金(41072146)资助项目

摘要 北京市密云水库附近分布着一些北-东走向, 个体宽度达 40 m 以上, 长度达 8000 m 的岩墙, 本文称之为密云岩墙群. 从一条宽约 40 m 的岩墙中分选出了大量斜锆石, 同位素稀释法获得其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1731\pm 4\text{ Ma}$ ($n=4$; $1731\pm 1\text{ Ma}$, $n=3$). 该岩墙被长城群底部常州沟组底砾岩不整合覆盖, 这一年龄限定常州沟组沉积起始时代晚于 1731 Ma. 由于长城群是长城系的标准剖面, 因此, 这一年龄指示长城系的起始时代应晚于 1731 Ma. 本区斜长岩杂岩体及环斑花岗岩(1730~1680 Ma)被认为与长城群所在的燕辽裂谷有成因联系. 但是, 密云岩墙群的成因与上述岩体并不相同, 指示不同的地质事件. 长城群是我国地质时代单元长城纪时代划分的重要依据之一, 考虑到 1731 Ma 前后地质事件性质可能发生了变化, 建议将长城纪起始时代定为 1730 Ma 或者稍晚.

关键词

华北克拉通
中元古代
长城系
燕辽裂谷系
基性岩墙群
熊耳群

华北克拉通燕辽裂谷系长城群是长城系的标准剖面, 也是地质单元长城纪时代划分的重要依据, 是我国长城纪起始时代和早元古、中元古代界限划分的重要依据. 然而, 对于长城群的沉积起始时代, 还存在争议: 一种观点认为时代为 $>1800\text{ Ma}$, 或者 $\sim 1950\text{ Ma}$ ^[1,2]; 一种观点认为, 时代为 $\sim 1800\text{ Ma}$ 或者在 $1800\sim 1750\text{ Ma}$ 之间^[3-6]; 也有少数学者提出, 时代可能在 1700 Ma 前后^[7]. 目前, 接受 $1800\sim 1750\text{ Ma}$ 开始沉积的观点较多. 我国以 1800 Ma 作为早元古、中元古代的界限, 与国际上的 1600 Ma 方案存在较大差异^[8]. 因此, 对长城群沉积时代的准确厘定非常重要. 本文报道了密云岩墙群的形成时代及主要特征, 通过对岩墙精确定年来限定不整合其上的长城群的起始沉积时代.

1 区域地质概况和岩墙产状

研究区位于华北克拉通北缘中段, 燕辽裂谷系中心, 北京市密云水库附近(图 1). 该区出露太古宙岩石单元(密云群和四合堂群, 本文通称密云杂岩,

主要组成为表壳岩系列, 经历麻粒岩相变质), 中元古代长城群(系)(常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组: 岩性组合为底砾岩、砾岩、砂岩、石英岩、页岩、白云岩, 以及少量高钾火山岩系)和蓟县群(系)(主体为碳酸盐岩系列)(标准剖面位于紧邻密云的蓟县盆地), 侏罗系沉积-火山岩系, 以及环斑花岗岩侵入体和白垩纪花岗质侵入体^[9](图 1). 这其中, 沙厂环斑花岗岩的时代为 $\sim 1680\text{ Ma}$ ^[10,11], 团山子组火山岩系(辉绿岩床)的时代为 $\sim 1640\text{ Ma}$ ^[5], 大红峪组火山岩系的时代为 $\sim 1620\text{ Ma}$ ^[4,12], 它们和研究区以北位于承德的大庙斜长岩杂岩体(时代为约 $1730\sim 1690\text{ Ma}$ ^[13]), 以及其他一些斜长岩-正长岩-碱性岩体^[14]一起, 组成了华北北缘典型的非造山岩浆活动带^[10-14]. 构造区划上, 研究区属于冀东早前寒武纪出露区西缘^[9], 或者属于 Zhao 等人^[15]划分的东部陆块, 或者属于李江海等人^[16]和 Kusky 等人^[17]划分的中部造山带.

岩墙产出于早前寒武纪变质杂岩之中, 呈 NE 向($\sim 30^\circ$)延伸(图 1). 岩墙个体宽度达 40 m 以上, 长度达 8000 m. 岩石主要矿物组成为基性斜长石和单斜

辉石, 辉长-辉绿结构. 这些岩墙岩相学特征和磁化率值稳定, 且产状一致, 应为同一岩墙群, 本文称之为密云岩墙群. 用于年龄测定的岩墙位于桑园村附近(样品 07MY07), 该岩墙宽约 40 m, 北东方向出露末端见古风化面, 并见被长城系常州沟组底部砾岩不整合覆盖(图 1).

2 分析方法

斜锆石分选在瑞典 Lund (隆德)大学地质学系完成, 流程基于重力分选原理, 使用摇床完成^[18]. 斜锆石为浅棕黄色、透明, 粒径 150 μm 左右, 扁平长柱

状(图 2). 本次测试选取 10~15 颗斜锆石为一组, 共选取了 4 组斜锆石进行 U-Pb 同位素分析.

测试工作在加拿大地质调查局年代学实验室完成, 采用同位素稀释热电离质谱法(ID-TIMS), 使用 Triton TI 型质谱仪进行分析. 斜锆石质量通过数字化称重程序估测^[19]. 使用 3 mol L⁻¹ 的 HNO₃ 清洗斜锆石; 采用 ²⁰⁵Pb-²³³U-²³⁵U 混合稀释剂; 用 48% 的 HF 和 16 mol L⁻¹ 的 HNO₃ 在 240~245 °C 下溶解斜锆石; 用 3.1 mol L⁻¹ 的 HCl 在 210 °C 蒸煮驱除溶液中剩余的酸; 过柱分离 Pb 和 U; 测试前将样品溶液装载到预置了 Si 胶的 Re 带上; 数据处理使用 Davis^[20] 的程序

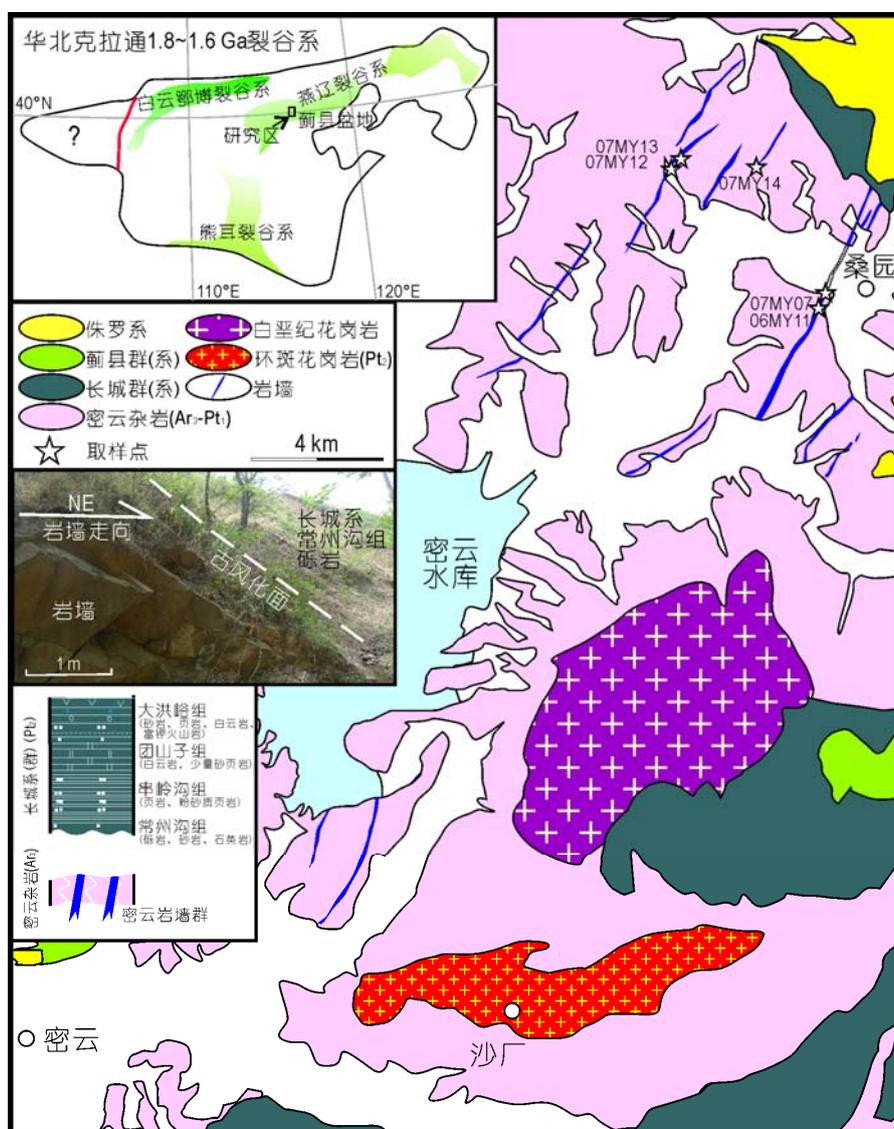


图 1 北京市密云水库地区地质简图

插图为华北克拉通 1.8~1.6 Ga 裂谷系分布图、密云岩墙与长城系地层不整合接触的野外照片和长城系地层剖面简图

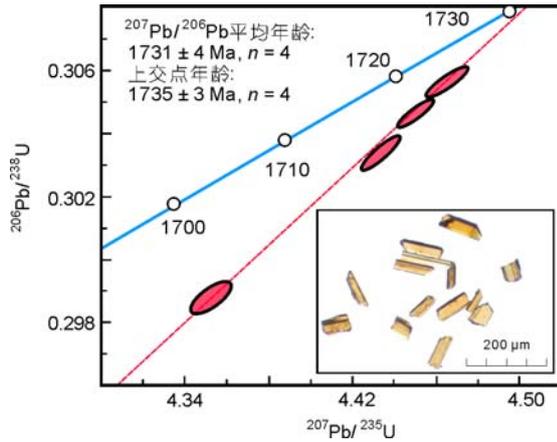


图2 样品07MY07斜锆石U-Pb年龄谐和图
插图为代表性斜锆石透射光照片

和 Isoplot 软件^[21]. 结果见表1. 本次实验, U的本底 ≤ 0.1 Pg, Pb本底0.5~2 Pg.

主量和微量元素成分分析在岩石圈演化国家重点实验室完成. 主成分分析使用X荧光光谱法(XRF), 测试所用仪器型号为 Shimadzu XRF-1700/1500, 标样为 GBW07101-07114(玄武岩), 分析结果在误差范围内优于0.2%(质量分数, 余同). 烧失量(或灼烧减量)设定为粉末样品在1000℃下灼烧1h后的质量减少. 微量元素成分通过ELEMENT型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 使用HNO₃+HF混合酸溶解样品, 测试的准确性和重现性通过标准样品GSR3(玄武岩)检验或校正, 分析误差在检出限之上优于5%. Sr-Nd同位素分析在Finnigan MAT 262型质谱仪上完成, 测定偏差使用NBS987(Sr标准)和Ames(Nd标准)参考物质监测. Sr和Nd同位素测定的流程背景值分别优于100和50 Pg. ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr和¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd比值的外部精度都优于0.5%(2 σ). 详细流程参考文献[22].

3 年代学结果

表1给出了样品07MY07斜锆石U和Pb含量、U和Pb同位素比值和U-Pb同位素年龄计算值. 4组斜锆石质量为2.0~4.0 μ g, U含量为142~218 ppm, 放射性成因Pb含量为41~58 ppm, 普通Pb含量为2~5 Pg. 图2为U-Pb年龄谐和图. 可以看出, 4个分析点稍稍偏离谐和线. 斜锆石同位素稀释法分析结果常在1%~2%范围内偏离谐和线, 可能是由于锆石颗粒外缘生长非常少的钛锆钽矿或者锆石造成, 这种情

况一般采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄^[23,24]. 4组分析中, 3组的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄为~1731 Ma, 另一组为1725 \pm 3 Ma. 4组²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄平均值为1731 \pm 4 Ma(n=4, MSWD=4.8), 3组比较接近的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄平均值为1731 \pm 1 Ma(n=3, MSWD=0.04). 另外, 4组年龄的上交点年龄为1735 \pm 3 Ma(n=4, MSWD=1.12). 斜锆石往往能够明确指示岩浆结晶年龄^[23], 这一年龄结果说明岩墙的侵位结晶年龄在1731 Ma前后.

4 岩石地球化学特征

岩石属于拉斑玄武岩系列, SiO₂含量为48.8%~50.4%, TiO₂含量1.07%~2.50%, Al₂O₃含量12.9%~14.5%, MgO含量5.4%~8.2%, FeO_t(全铁)含量13.4%~14.7%, CaO含量9.0%~10.3%, Na₂O含量1.8%~2.2%, K₂O含量0.2%~1.0%, P₂O₅含量0.1%~0.3%, 镁指数(Mg#=(Mg²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺)))为51~60(表2). 微量元素显示轻微的轻稀土富集(La/Yb_N=0.8~2.8; 表2), Eu异常不明显(Eu/Eu*= \sim 1.0, Eu/Eu*=Eu_N/[(Sm_N)*(Gd_N)]^{1/2})(球粒陨石标准化^[25]). 样品显示明显的Ba正异常, 高场强元素(如: Nb和Ta)轻微负异常(图3(a)). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr($t=1731$ Ma)值为0.7025~0.7032, $\epsilon_{Nd}(t)$ ($t=1731$ Ma)为+2~+5(分析点在误差范围内基本一致)(表3, 图3(b)).

5 地质意义

密云岩墙群与紧随其后就位的大庙斜长岩(1730~1690 Ma)和沙厂环斑花岗岩(~1680 Ma)相比, 其地球化学特征存在明显差异, 如蛛网图上高场强元素相对亏损程度很弱, Sr-Nd相关图上的同位素比值明显不在同一区域(图3). 相对地, 这一特征和华北中部北台岩墙群(~1760 Ma, 北台岩墙的产状和特征参考文献[25,26])相似. 同时, 密云岩墙群的走向, 与华北中部北台岩墙群的发散状几何学特征一致^[27], 而不同于斜长岩杂岩体-环斑花岗岩东西向延伸的几何学形态^[28-30]. 即与后者相比, 具有不同的岩浆源区, 且形成于不同应力场. 这可能指示在岩石成因和构造背景下, 这一岩墙群不同于斜长岩杂岩体-环斑花岗岩, 而与北台岩墙群更接近, 甚至可能是同一个岩墙群——密云-北台岩墙群.

由于长城群常州沟组底部砾岩不整合在本文定年的岩墙之上, 明确指示常州沟组的起始沉积时代晚于1731 Ma. 长城群是长城系的标准剖面^[1-7], 因

表1 斜锆石 U-Pb 同位素分析数据^{a)}

组名	质量 (μg)	U (ppm)	Pb ^{b)} (ppm)	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^{c)}	Pb ^{d)} (Pg)	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±1σ	相关系数	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄	±2σ	²⁰⁷ Pb- ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄	±2σ	不谐和度(%)
B1	3.0	204	60	1845	5	0.020	4.4645	0.0061	0.30552	0.00030	0.87	0.10598	0.00008	1718.6	2.9	1724.4	2.3	1731.4	2.6	0.8
B2	2.0	218	64	4834	2	0.020	4.4333	0.0053	0.30335	0.00030	0.88	0.10599	0.00006	1707.9	3.0	1718.6	2.0	1731.6	2.1	1.6
B3	4.0	142	41	1753	5	0.020	4.3517	0.0061	0.29877	0.00029	0.83	0.10564	0.00008	1685.2	2.9	1703.2	2.3	1725.4	2.9	2.7
B4	3.0	165	48	3833	2	0.010	4.4505	0.0053	0.30459	0.00027	0.91	0.10597	0.00006	1714.1	2.7	1721.8	2.0	1731.2	1.9	1.1

a) 同位素比值都经过了校正和普通铅扣除; b) 放射性成因 Pb; c) 测试值, 进行了稀释剂和分馏校正; d) 测得的普通 Pb 值。1 ppm= 1 μg/g, 余同

表2 代表性样品全岩主量(%)和微量(ppm)元素含量数据

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _t ^{a)}	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI ^{b)}	总计	Mg# ^{c)}
06MY11	50.38	1.08	12.85	14.2	0.21	8.19	10.31	1.84	0.27	0.09	0.40	99.77	60
07MY07	50.02	1.07	13.57	13.4	0.19	6.64	10.10	1.85	0.23	0.09	2.96	100.06	57
07MY12	49.05	2.50	13.40	14.7	0.19	6.05	9.32	2.18	0.80	0.26	1.46	99.92	52
07MY13	49.58	2.22	14.49	13.8	0.17	5.41	9.15	2.24	0.97	0.28	1.70	100.02	51
07MY14	48.80	2.28	13.62	14.2	0.19	6.47	9.02	2.05	0.99	0.25	2.02	99.85	54
	Rb	Sr	Ba	Th	U	Pb	Zr	Hf	Nb	Ta	Sc	V	Cr
07MY07	6.89	126	88.6	0.85	0.19	2.01	66.3	1.92	4.47	0.28	46.2	297	168
07MY12	16.2	364	318	2.15	0.50	4.72	143	4.00	16.5	1.13	38.5	380	178
	Co	Ni	Cu	Be	Ga	Cs	Bi	Li	La	Ce	Pr	Nd	Sm
07MY07	52.9	82	109	0.45	15.3	0.28	0.03	4.54	6.39	14.4	2.00	9.25	2.72
07MY12	45.4	82	128	1.05	17.3	0.47	0.64	7.67	21.5	47.7	6.29	26.0	5.86
	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	La/Yb _N ^{d)}	Eu* ^{e)}
07MY07	0.91	3.03	0.54	3.53	0.75	2.15	0.32	2.09	0.32	18.9	67.2	0.8	0.97
07MY12	2.02	5.16	0.76	4.37	0.84	2.15	0.31	1.90	0.27	19.7	145	2.8	1.12

a) FeO_t为全铁; b) LOI为烧减量; c) Mg#为镁指数; d) 球粒陨石标准化^[25]; e) Eu/Eu*为Eu异常, 计算方法见正文

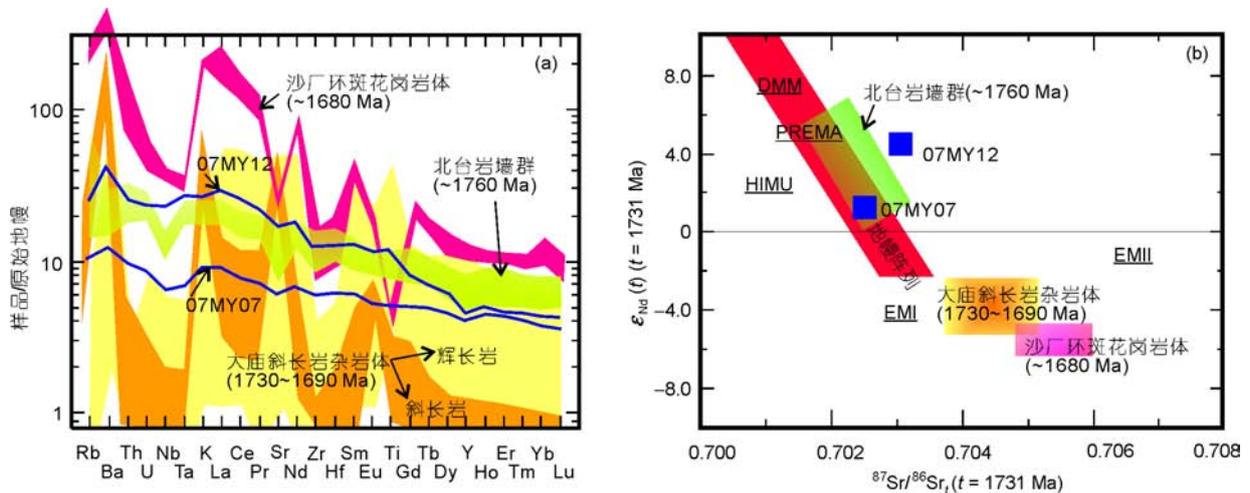


图3 原始地幔标准化元素蛛网图(a)和 Sr-Nd 同位素相关图(b)

DMM, 亏损地幔; PREMA, 常规地幔; HIMU, 高 U/Pb 值地幔; EM I, I 型富集地幔; EM II, II 型富集地幔。原始地幔标准值、OIB(洋岛玄武岩)、N-MORB(正常的大洋中脊玄武岩)和 E-MORB(富集的大洋中脊玄武岩)值^[25], 以及北台岩墙^[26,27]和沙厂环斑花岗岩体-大庙斜长岩杂岩体(辉长岩和斜长岩)^[28-30]数据均引自文献。元素蛛网图上, 环斑花岗岩体和斜长岩杂岩体都只分别标示了主体成分环斑花岗岩和辉长岩、斜长岩的数据, 没有标示其他分异组分的成分范围

表 3 代表性样品全岩 Sr-Nd 同位素数据

样品号	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ^{a)}	2σ	Sm (ppm)	Nd (ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd(t)} ^{a)}	2σ	f _{Sm/Nd}	T _{DM}
07MY07	7.81	129.4	0.1747	0.706828	0.000010	0.70248	0.00059	2.671	9.483	0.1703	0.512420	0.000012	1.6	1.9	-0.13	2.6
07MY12	17.6	394.6	0.1264	0.706308	0.000010	0.70316	0.00054	5.876	27.54	0.1290	0.512116	0.000011	4.9	1.5	-0.34	1.9

a) 同位素初始比值按照 1731 Ma 回算

此, 长城系的起始时代应晚于 1731 Ma. 同时, 我国中元古代地质单元的第一个纪——长城纪, 划分的主要依据之一就是长城群及相关地质事件^[1-7]. 由于密云岩墙群的成因可能不同于与长城群所在裂谷有成因联系的斜长岩-环斑花岗岩杂岩体, 指示不同的地质背景. 因此, 本文提出是否可以考虑将长城纪的起始时代定在 1730 Ma 前后或者稍晚(如~1700 Ma^[7]).

另外, 最近的年龄结果显示, 华北南缘熊耳裂谷系熊耳群火山岩系的岩浆作用时代为~1780 Ma^[31,32], 侵入到其顶部马家河组火山岩之中的辉长闪长岩次火山岩相侵入体年龄限定其火山作用时代在年代学测定误差范围内接近 1780 Ma^[33]. 因此, 熊耳群与长城群不属于同一个时代. 熊耳群和长城群分别是熊耳裂谷系和燕辽裂谷系最早的沉积(火山)岩系, 因此, 熊耳裂谷系的活动时代要早于燕辽裂谷系.

致谢 感谢德隆大学 U Söderlund, 卡尔顿大学 R Ernst, 加拿大地质调查局 V McNicoll, W Bleeker, W David 博士等在年代学测试和/或相关讨论中的帮助; 感谢中国地质科学院地质研究所万渝生研究员和中国科学院地质与地球物理研究所吴福元研究员等的有益建议; 感谢中国地质科学院地质力学研究所张栓宏研究员的意见和建议.

参考文献

- 1 钟富道. 从燕山地区震旦地层同位素年龄论中国震旦地质年表. 中国科学 B 辑, 1977, 2: 151-161
- 2 王日伦, 陆宗斌, 邢裕盛, 等. 中国上前寒武系的划分和对比. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所, 编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980. 1-30
- 3 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. 中国地质科学院院报, 1991, 2: 137-145
- 4 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. 地球化学, 1995, 24: 43-48
- 5 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定. 科学通报, 2003, 48: 1969-1975
- 6 Wan Y S, Liu D Y, Wang W, et al. Provenance of Meso- to Neoproterozoic cover sediments at the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: An integrated study of U-Pb dating and Hf isotopic measurement of detrital zircons and whole-rock geochemistry. Gondwana Res, 2011, 20: 219-242
- 7 王松山, 桑海清, 裘冀, 等. 京津地区长城系下伏变质岩系变质年龄及长城系底界年龄的厘定. 地质科学, 1995, 30: 348-354
- 8 章森桂, 张允白, 严惠君. “国际地层表”(2008)简介. 地层学杂志, 2009, 33: 1-10
- 9 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 10 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 同位素及其地质意义. 岩石学报, 2005, 21: 1633-1644
- 11 高维, 张传恒, 高林志, 等. 北京密云环斑花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 地质通报, 2008, 27: 25-30
- 12 Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. Precambrian Res, 2008, 160: 77-93
- 13 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. 岩石学报, 2004, 20: 685-690
- 14 Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, et al. The 1.75-1.68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen. Precambrian Res, 2007, 155: 287-312
- 15 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res, 2005, 136: 177-202
- 16 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. 岩石学报, 2000, 16: 1-10
- 17 Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. J Asian Earth Sci, 2003, 22: 383-397
- 18 Söderlund U, Johansson L. A simple way to extract baddeleyite (ZrO₂). Geochim Geophys Geosys, 2002, 3, doi: 10.1029/2001GC000212

- 19 Matthews W, Davis W J. A practical image analysis technique for estimating the weight of abraded mineral fractions used in U-Pb dating. In: Radiogenic Age and Isotopic Studies: Geological Survey of Canada. Curr Res 1999-F, 1999, Report 12. 1-7
- 20 Davis D W. Optimum linear regression and error estimation applied to U-Pb data. Can J Earth Sci, 1982, 19: 2141-2149
- 21 Ludwig K R. User's Manual for Isoplot/EX Version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Cent Spec Publ, 2003, 4: 1-71
- 22 Peng P, Guo J H, Zhai M G, et al. Paleoproterozoic gabbroitic and granitic magmatism in the northern margin of the North China craton: Evidence of crust-mantle interaction. Precambrian Res, 2010, 183: 635-659
- 23 Heaman L M, LeCheminant A N. Paragenesis and U-Pb systematics of baddelyite (ZrO₂). Chem Geol, 1993, 110: 95-126
- 24 Heaman L M, LeCheminant A N. Anomalous U-Pb systematics in mantle-derived baddeleyite xenocrysts from Île Bizard: Evidence for high temperature radon diffusion? Chem Geol, 2001, 172: 77-93
- 25 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts implications for mantle composition and process. In: Saunders A D, Nony M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geol Soc Spec Publ, 1989, 42: 313-354
- 26 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. London: Geological Society Special Publications, 2010. 163-178
- 27 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. Gondwana Res, 2007, 12: 29-46
- 28 郁建华, 傅会芹, 张凤兰, 等. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. 1-96
- 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. 北京: 科学出版社, 2005
- 30 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. Lithos, 2009, 113: 673-690
- 31 He Y H, Zhao G C, 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. Precambrian Res, 2009, 168: 213-222
- 32 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. 科学通报, 2004, 49: 2342-2349
- 33 崔敏利, 张宝林, 彭澎, 等. 豫西崆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. 岩石学报, 2010, 26: 1541-1549