

华北克拉通南缘官道口群龙家园组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究 SHRIMP Zircon U-Pb dating of tuff from the Longjiayuan Formation of the Guandaokou Group, southern margin of North China Craton

张健^{1,2,3}, 李怀坤^{1,2,3}, 田辉^{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. 华北地质科技创新中心, 天津 300170)

ZHANG Jian^{1,2,3}, LI Huai-kun^{1,2,3}, TIAN Hui^{1,2,3}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Precambrian Geological Research Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China)

中图分类号: P597⁺.3; P588

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2021)04-0001-04

熊耳群火山岩(1.80~1.75 Ga)广泛出露于华北克拉通南缘(图1a),是变质结晶基底形成以后最早接受沉积的中元古代盖层单元;之后有厚度近万米、由硅质陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成的沉积序列不整合覆盖在熊耳火山岩群之上,属于河流-滨浅海相环境,其上被罗圈组冰碛岩覆盖。学者普遍认可其发育时限为中-新元古界,是哥伦比亚超大陆裂解过程的地质响应。但是,由于缺乏充分、可靠的年龄约束,不同盆地之间的地层对比只能依靠地层结构、沉积相序和碎屑锆石年龄记录等手段。苏文博等^[1]在《地质调查与研究》(本刊的前身)率先报道洛峪群洛峪口组中部凝灰岩锆石的高精度年代学结果($1\ 611 \pm 8\text{ Ma}$, LA-MC-ICPMS),将汝阳群和洛峪群明确划归为长城纪,也由此掀起重新认识华北克拉通南缘中-新元古代地层系统的热潮。本文厘定栾川地区官道口群龙家园组下部凝灰岩层的年龄,新增标定地层格架的年龄“锚点”,为探讨哥伦比亚超大陆裂解过程以及地球早期生命起源与环境协同演化规律提供时间维基础。

1 地质背景和样品采集

吕梁(中条)运动以后,熊耳、渣尔泰-白云鄂博

和燕辽三大裂谷盆地沿华北克拉通南、北两侧相继发育^[2-3]。熊耳裂谷(又称“豫陕裂谷”,图1b)主要分布于豫-陕-晋交界地区。熊耳群上覆的中-新元古带地层,自东北向西南包括嵩山-箕山地区的五佛山群,渑池-确山地区的汝阳群和洛峪群以及卢氏-栾川地区的高山河群、管道口群和栾川群等。本文官道口群龙家园组凝灰岩样品采自河南省栾川县祖师庙-白土镇公路旁(地理坐标 $34^{\circ}01'13.28''\text{N}$, $111^{\circ}22'12.43''\text{E}$),该地区中-新元古界地层由老到新依次为熊耳群火山-沉积岩系、高山河群、官道口群(龙家园组、巡检司组、杜关组、冯家湾组、白术沟组)、栾川群(三川组、南泥湖组、煤窑沟组、大红口组和鱼库组)。官道口群下与高山河群,上与栾川群平行不整合或角度不整合接触,为一套碳酸盐岩沉积建造,叠层石发育。龙家园组位于官道口群的最下部,厚度>850 m,主体为浅灰-灰色中厚层白云岩夹燧石条带。底部以紫红色含铁砾岩与高山河组平行不整合接触,下部为紫红色白云岩,中上部为燧石条带白云岩和厚层白云岩,顶部以燧石层及含砾的褐铁矿风化壳与巡检司组整合接触。张恒等^[4]在龙家园组底部和下部分别获得深灰绿色和紫红色凝灰岩夹层的年龄为 $1\ 594 \pm 12\text{ Ma}$ 和 $1\ 541 \pm 8\text{ Ma}$ 。本文分析的凝灰

收稿日期:2021-11-20

资助项目:中国地质调查局项目“中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制(DD20190359)”

作者简介:张健(1982-),男,硕士,高级工程师,毕业于中国地质大学(北京),专业方向为岩石地球化学,现从事同位素年代学研究,Email:zhangjian91011@126.com。

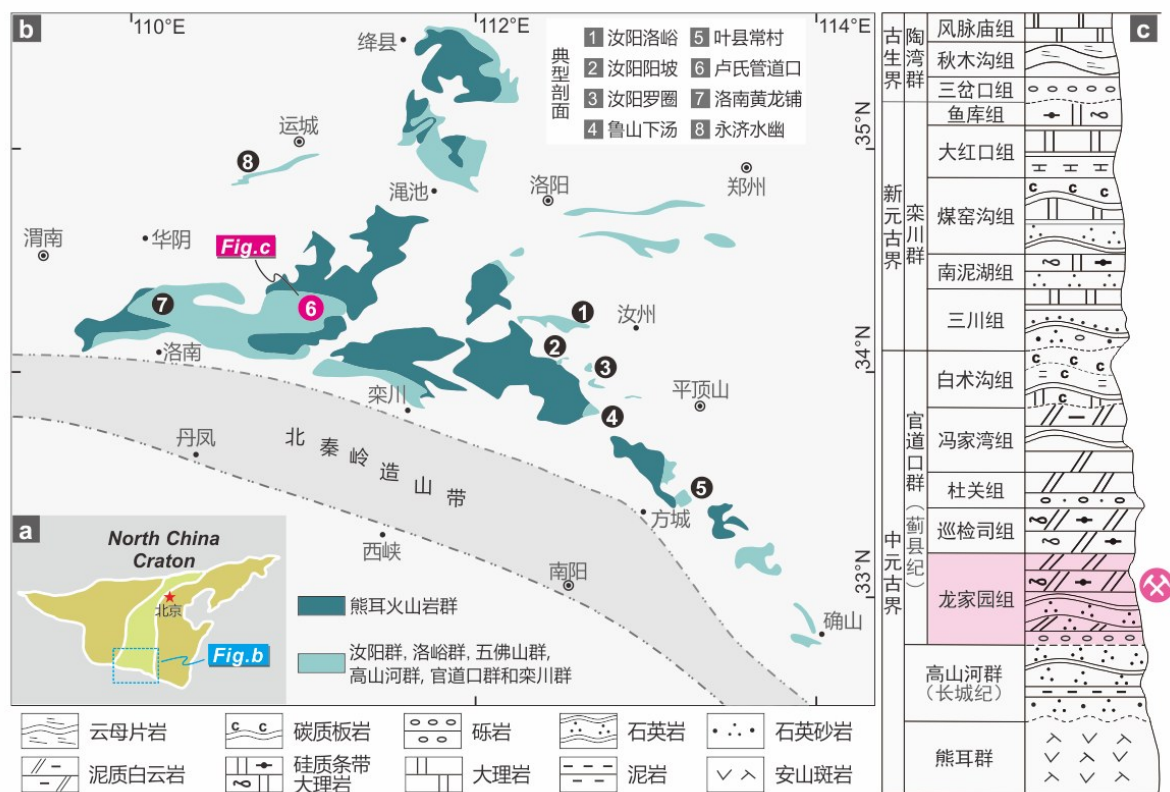


图1 华北克拉通前寒武纪地质简图(a,据参考文献[5]);熊耳裂谷中-新元古代地层分布(b,据参考文献[1])和卢氏-栾川地区中新元古代-地层序列(c,据参考文献[6])

Fig.1 Precambrian tectonic sketch map of the North China Craton (a); Sketch map showing the distribution of the Meso- Neoproterozoic strata in the Xiong'er rift, southern North China Craton (b) and Meso-Neoproterozoic stratigraphic sequences in Lushi-Luanchuan area (c)

岩样品层位与其后者样品(样品编号20180726-7)类似,为晶屑凝灰岩呈流纹构造,岩石由晶屑、玻屑、火山尘组成,其晶屑和玻屑主要由斜长石和石英组成,占50%以上,火山尘混杂其中。

2 锆石 U-Pb 测年分析方法

锆石分选由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,样品经破碎、淘洗和分选出重矿物后,在双目镜下挑出锆石。将待测锆石样品和标样颗粒浇铸在环氧树脂靶上,待环氧树脂固化以后将样品靶打磨、抛光至锆石的核部。通过透、反射光显微照相和阴极发光图像分析,对锆石内部结构进行研究,选择合适的测定点位。锆石 U-Th-Pb 同位素测定在北京离子探针中心的 SHRIMP 二次离子探针质谱仪上完成,测试流程见文献^[7]。采用标准锆石 TEM 和 M257 进行同位素分馏校正和标定待测锆石中的 U、Th 和 Pb 含量。数据处理采用 Isoplot 程序^[8],利用实测的 ^{204}Pb 进行普通铅校正。

3 锆石 U-Pb 年代学

龙家园组凝灰岩(20HN15)的锆石多呈无色或褐色透明,长柱状,自形-半自形,粒径 $100 \sim 150 \mu\text{m}$,长宽比 $3/1 \sim 2/1$ 。阴极发光图像(CL image)显示振荡环带,呈现岩浆锆石的特点(图2a)。选择20颗锆石进行年代学分析,测试结果见表1。锆石 U 和 Th 含量分别为 $(113 \sim 355) \times 10^{-6}$ 和 $(66 \sim 454) \times 10^{-6}$, Th/U 比值 $0.6 \sim 1.9$,整体远高于岩浆锆石经验值(0.4)(图2b)。此外,锆石 Th/U 比值和结晶温度具有正相关的关系,暗示其形成于高温岩浆过程。锆石 U-Pb 谐和度高(除 spot 3.1 为 94%,其余颗粒均大于 97%)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表面年龄范围 $1502 \sim 1622 \text{ Ma}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的表面年龄分布范围一致 $1494 \sim 1562 \text{ Ma}$,加权平均值为 $1533 \pm 8 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.75, N = 20,图2b)。与不一致线上交点年龄 $1532.8 \pm 7.9 \text{ Ma}$ 结果一致(图2a),因此,锆石结晶年龄 $\sim 1.53 \text{ Ga}$ 可以代表凝灰岩地层的沉积年龄。

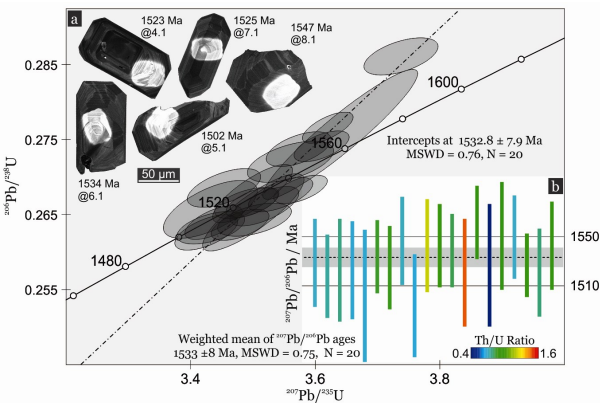


图2 龙家园组凝灰岩锆石阴极发光和SHRIMP U-Pb年龄谐和图(a)和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄加权平均(b)

Fig.2 Zircon CL images and SHRIMP U-Pb concordia diagram of tuff in the Longjiayuan Formation(a) and ²⁰⁷Pb / ²⁰⁶Pb age weighted mean plots (b)

4 地层年代学格架和意义

由于长期缺乏精确可靠的同位素测年数据,以往对于熊耳裂谷地层格架的认识主要依赖于地层结构、沉积序列,遗迹化石和大型宏观多细胞藻类化石对比以及部分层位海绿石、粘土矿物、碳酸盐岩和燧石等矿物/岩石的K-Ar、Rb-Sr、Pb-Pb和Ar-Ar年龄。由于上述方法具有较大的局限性,地层的划分和对比仍未形成共识。如前所述,随着苏文博等^[1]获得洛浴群洛峪口组上部“沉凝灰岩”的锆石U-Pb年龄,结合下伏地层熊耳火山岩群的时代(1.80~1.75 Ga),将

汝阳-洛峪群明确划归为长城纪,该年龄结果得到汪校锋(1 662 ± 20 Ma和1 640 ± 16 Ma, LA-ICPMS)^[9]、李承东等(1 638 ± 9 Ma和1 634 ± 10 Ma, LA-MC-ICPMS)^[10]、彭楠等(1 639 ± 3 Ma, SHRIMP)^[11]和张恒等(1 596~1 620 Ma, SHRIMP)^[4]的验证。此外,高山河组和白术沟组的凝灰岩夹层被相继发现,其锆石U-Pb年龄分别为1 759 ± 17 Ma^[12]和~1 330 Ma^[13],使得地层年代格架得到有效约束。龙家园组底部凝灰岩的年龄为1 594 ± 12 Ma^[4],侵入龙家园组下部的洛南麻坪碱性正长岩的年龄为1 598 ± 9 Ma^[14-15],以及龙家园组底部砂岩碎屑锆石最小年龄峰1 616 Ma (N = 28)^[16],共同限定官道口群最下部地层龙家园组的起始沉积时间为~1 600 Ma,代表华北克拉通西南缘蓟县纪的最底部层位。

本文和张恒等^[4]分别获得龙家园组下部凝灰岩夹层的年龄1 533 ± 8 Ma和1 541 ± 8 Ma,指示龙家园组与燕辽裂谷的蓟县纪高于庄组的上部层位相当^[17-18]。地球化学信息显示该时期地球表层系统大气-海洋的幕式增氧事件^[19],大气含氧量高达4% PAL,为真核生物的出现提供物质基础。熊耳裂谷区域内,与龙家园组凝灰岩同期的岩浆事件有豫-陕交界处的张家坪1.53 Ga A₁-型花岗岩^[20],又称铁质花岗岩,形成于高温、无水的伸展环境,是典型克拉通背景下非造山的岩浆活动。实际上,沿华北克拉通南缘分布近东-西方向偏碱性的花岗岩带(1.84~1.47

表1 龙家园组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年分析结果

Table 1 SHRIMP U-Th-Pb isotopic results of zircon from tuff in the Longjiayuan Formation

No.	²⁰⁶ Pb _c %	含量/×10 ⁻⁶		Th/U 比值	年龄(Ma)								Dis. %	同位素比值								rho
		U	Th		²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb		²⁰⁸ Pb		²⁰⁷ Pb			²⁰⁷ Pb		²⁰⁶ Pb						
					²³⁸ U	σ	²⁰⁶ Pb	σ	²³² Th	σ	²⁰⁶ Pb	%		²³⁵ U	%	²³⁸ U	%					
1.1	0.16	181	138	0.79	1 521.8	8.7	1 529	18	1 519	17	0	0.095 04	0.97	3.489	1.2	0.266 3	0.64	0.550				
2.1	0.16	196	156	0.82	1 508.7	9.6	1 518	17	1 489	16	1	0.094 50	0.88	3.436	1.1	0.263 7	0.71	0.631				
3.1	0.15	157	128	0.84	1 622	10	1 523	21	1 579	24	-6	0.094 80	1.1	3.738	1.3	0.286 1	0.71	0.536				
4.1	0.15	163	121	0.77	1 558.8	9.7	1 523	20	1 565	21	-2	0.094 74	1.0	3.573	1.2	0.273 6	0.70	0.559				
5.1	0.29	122	91	0.77	1 518	16	1 502	27	1 470	26	-1	0.093 70	1.4	3.431	1.8	0.265 5	1.2	0.638				
6.1	0.04	188	163	0.90	1 522.4	8.4	1 534	15	1 549	14	1	0.095 28	0.80	3.499	1.0	0.266 4	0.62	0.610				
7.1	0.13	256	225	0.91	1 528	17	1 525	17	1 522	35	0	0.094 84	0.90	3.499	1.5	0.267 6	1.2	0.807				
8.1	0.09	149	115	0.80	1 520	11	1 547	18	1 506	18	2	0.095 96	0.95	3.518	1.3	0.265 9	0.82	0.655				
9.1	0.10	130	97	0.77	1 533	11	1 494	21	1 514	22	-2	0.093 30	1.1	3.453	1.4	0.268 4	0.79	0.579				
10.1	0.12	167	186	1.15	1 516	22	1 543	19	1 257	23	2	0.095 76	1.0	3.500	1.9	0.265 1	1.6	0.847				
11.1	0.15	201	179	0.92	1 507.4	8.8	1 543	17	1 477	20	2	0.095 77	0.92	3.479	1.1	0.263 4	0.65	0.579				
12.1	0.11	235	198	0.87	1 561.2	8.4	1 539	15	1 549	24	-1	0.095 54	0.82	3.610	1.0	0.274 0	0.61	0.596				
13.1	0.13	355	454	1.32	1 505.4	9.2	1 521	22	1 460	16	1	0.094 60	1.2	3.432	1.3	0.263 0	0.68	0.510				
14.1	0.11	258	243	0.97	1 531.4	8.0	1 562	15	1 399	13	2	0.096 73	0.80	3.576	0.99	0.268 2	0.59	0.595				
15.1	0.24	113	66	0.61	1 550	12	1 527	25	1 505	26	-1	0.095 00	1.3	3.560	1.6	0.271 9	0.84	0.534				
16.1	0.35	186	170	0.95	1 510.8	9.3	1 551	22	1 484	18	3	0.096 20	1.2	3.502	1.4	0.264 1	0.69	0.504				
17.1	0.12	212	161	0.79	1 528.0	9.8	1 550	17	1 537	17	1	0.096 09	0.90	3.544	1.2	0.267 5	0.72	0.624				
18.1	0.09	304	271	0.92	1 573.8	8.7	1 527	13	1 601	24	-3	0.094 95	0.68	3.620	0.92	0.276 5	0.62	0.677				
19.1	0.16	197	162	0.85	1 502.1	10.0	1 521	18	1 498	17	1	0.094 63	0.98	3.424	1.2	0.262 4	0.74	0.607				
20.1	0.11	173	163	0.97	1 569	36	1 543	18	1 492	58	-2	0.095 75	0.97	3.64	2.8	0.275 6	2.6	0.937				

注:普通Pb校正采用²⁰⁴Pb法;所有U-Th-Pb比值均采用普通Pb校正后的结果

Ga)^[21-22],其时空分布规律与熊耳裂谷的发育高度耦合,成因可能与幔源岩浆底侵加热导致古老壳源基底物质部分熔融作用有关,暗示大陆岩石圈减薄和哥伦比亚超大陆裂解。与此同时,沉积学支持超大陆裂解的过程,由河流-滨浅海相碎屑岩沉积环境(高山河群石英砂岩)向陆表海碳酸盐岩台地(官道口群)沉积环境过渡,指示明显的海侵体系沉积。

参考文献:

- [1] 苏文博,李怀坤,徐莉,等.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[J].地质调查与研究,2012,35(2):96-108.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张恒,高林志,周洪瑞,等.华北克拉通南缘官道口群和洛峪群的年代学研究新进展——来自凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的新证据[J].岩石学报,2019,35:2470-2486.
- [5] ZHAO G C, SUN M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup[J]. Earth-Science Reviews, 2004, 67(1-2):91-123.
- [6] 左鹏飞,李雨,刘思聪,等.华北克拉通南缘中-新元古代沉积演化:以豫西地区黄连垛组和董家组为例[J].岩石学报,2019,35(8):2545-2572
- [7] COMPSTON W, WILLIAMS I S, KRISCHVINK J L. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. Journal of the Geological Society of London, 1992, 149: 171-184.
- [8] LUDWIG K R. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-70.
- [9] 汪校锋.华北南缘中-新元古代地层年代学研究及其地质意义[D].博士学位论文.武汉:中国地质大学,2015,1-120.
- [10] 李承东,赵利刚,常青松,等.豫西洛峪口组凝灰岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及地层归属讨论[J].中国地质,2017,44(3):511-525.
- [11] 彭楠,旷红伟,柳永清,等.华北克拉通南缘汝阳群大型具刺疑源类时代再厘定及早期真核生物群演化意义[J].古地学报,2018,20(4):595-608.
- [12] 谭聪,卢远征,宋昊南,等.华北克拉通西南缘高山河组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质学报,2019,93(5):1113-1124.
- [13] 祝禧艳,王世炎,苏文博,等.华北克拉通南缘白术沟组归属中元古界“待建系”——来自凝灰岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的约束[J].中国科学:地球科学,2020,50(11):1569-1581.
- [14] 柳晓艳.华北克拉通南缘古-中元古代碱性岩岩石地球化学与年代学研究及其地质意义[D].硕士学位论文.北京:中国地质科学院,2011,1-84.
- [15] 邓小芹,赵太平,彭头平,等.华北克拉通南缘 1 600 Ma 麻坪 A 型花岗岩的成因及其地质意义[J].岩石学报,2015,31(6): 1621-1635.
- [16] 曾令君,包志伟,赵太平,等.华北克拉通南缘潘河~1.5 Ga 正长岩的厘定及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(7):2425-2436.
- [17] 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.
- [18] 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.地球学报[J],2015,36(5): 647-658.
- [19] ZHANG S C, WANG H J, WANG X M, et al. The Mesoproterozoic Oxygenation Event[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64: 2043-2068.
- [20] DENG X Q, ZHAO T P, PENG T P. Age and geochemistry of the Early Mesoproterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton: Constraints on their petrogenesis and tectonic implications[J]. Precambrian Research, 2016, 283: 68-88.
- [21] 邓小芹,彭头平,赵太平,等.华北克拉通南缘古元古代末(~1.84 Ga)垣头 A-型花岗岩成因及其构造意义[J].岩石学报,2019,35(8):2455-2469.
- [22] 曾令君,包志伟,赵太平,等.华北克拉通南缘潘河~1.5 Ga 正长岩的厘定及其构造意义[J].岩石学报,2013,29(7): 2425-2436.