

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.565>



扬子陆核北崆岭地区“马槽园群”的新认识

赵小明^{1,2}, 安志辉^{1,2}, 邱啸飞¹, 吴年文¹, 魏运许¹, 胡 昆³, 赵雨溪⁴

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局古生物与生命—环境协同演化重点实验室, 湖北武汉 430205

3. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430047

4. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059

摘要: 扬子陆核北崆岭地区孔子河—樟村坪一带的“马槽园群”被认为是崆岭地区唯一出露的青白口纪沉积记录, 对探讨扬子陆块在 Rodinia 超大陆中的位置及汇聚与裂解过程具有重要意义. 通过对其进行岩石学、沉积学和碎屑锆石年代学研究, 并与紧密伴存的南沱组进行对比, 结果表明: “马槽园群”与南沱组的空间分布、砾石大小、分选、磨圆等特征相似, 都体现了快速混杂堆积特点; 最年轻锆石年龄限定“马槽园群”沉积时代晚于 786 Ma, 南沱组则在 657~635 Ma 之间, 两者具有相似的碎屑锆石年龄谱特征. 由此表明北崆岭地区的这套杂砾岩为新元古代冰碛岩, 可与区域上南沱组对比, 同属 Marinoan 冰期产物, 而不能以马槽园群称之; 其沉积物源来自于邻近崆岭杂岩、黄陵花岗岩和神农架群.

关键词: 马槽园群; 南沱组; 碎屑锆石; 物源; 北崆岭地区; 地层学.

中图分类号: P539

文章编号: 1000-2383(2018)09-3324-13

收稿日期: 2017-12-02

A New Understanding of the “Macaoyuan Group” in North Kongling Area of Yangtze Craton

Zhao Xiaoming^{1,2}, An Zhihui^{1,2}, Qiu Xiaofei¹, Wu Nianwen¹, Wei Yunxu¹, Hu Kun³, Zhao Yuxi⁴

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Key Laboratory for Paleontology and Coevolution of Life and Environment, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The “Macaoyuan Group” in Kongzihe-Zhangcunping area, regarded as the sole sediment of Qingbaikou Period in North Kongling area, plays an important role to understanding the convergence and cracking of Rodinia Supercontinent. Here, new petrology, sedimentology, and detrital zircon chronology studies are conducted on 12 sections in Kongzihe-Zhangcunping area. The “Macaoyuan Group” is similar with the Nantuo Formation in the distribution and gravel features. The U-Pb ages of detrital zircon indicate the “Macaoyuan Group” is younger than 786 Ma, and the Nantuo Formation is constrained between 657 Ma and 635 Ma. The new findings indicate that the diamictite of “Macaoyuan Group” in North Kongling area is Neoproterozoic tillite, most likely time-equivalent to the Nantuo Formation. The sediment provenance is from the Kongling Group, Shennongjia Group and Huangling granite.

Key words: Macaoyuan Group; Nantuo Formation; detrital zircon; sediment provenance; North Kongling area; stratigraphy.

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. 121201009000161427, DD20160029); 国家自然科学基金项目 (No. 41530104).

作者简介: 赵小明 (1970—), 男, 研究员, 主要从事地层古生物学调查和科研工作. ORCID: 0000-0003-2938-8080.

E-mail: zxm20040021@163.com

引用格式: 赵小明, 安志辉, 邱啸飞, 等, 2018. 扬子陆核北崆岭地区“马槽园群”的新认识. 地球科学, 43(9): 3324-3336.

崆岭地区位于湖北宜昌,因新元古代黄陵花岗岩基侵入而分为南北两部分,北崆岭地区主要出露高角闪岩相—麻粒岩相变质岩(TTG 片麻岩、表壳岩系、斜长角闪岩等)及南华纪南沱组以来的沉积地层;南崆岭地区主要出露花岗质片麻岩、混合岩、中新元古代花岗岩和南华纪莲沱组以来的沉积地层(图 1).作为扬子克拉通已知的最古老结晶基底,崆岭地区一直是地学界关注和研究的热点,特别是近

几年来,随着测试方法的不断进步和地质认识的创新,前人在古太古代岩石记录、中太古代地壳特征、太古代板块机制与特征、古元古代和中新元古代的蛇绿岩、雪球地球与早期生命演化等方面取得了全球关注的成果(Zhang *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2011; Peng *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2015; Ye *et al.*, 2015; 彭松柏等, 2016; Han *et al.*, 2017).不过,由于缺乏 1 800~1 000 Ma 的地质记录报道,加

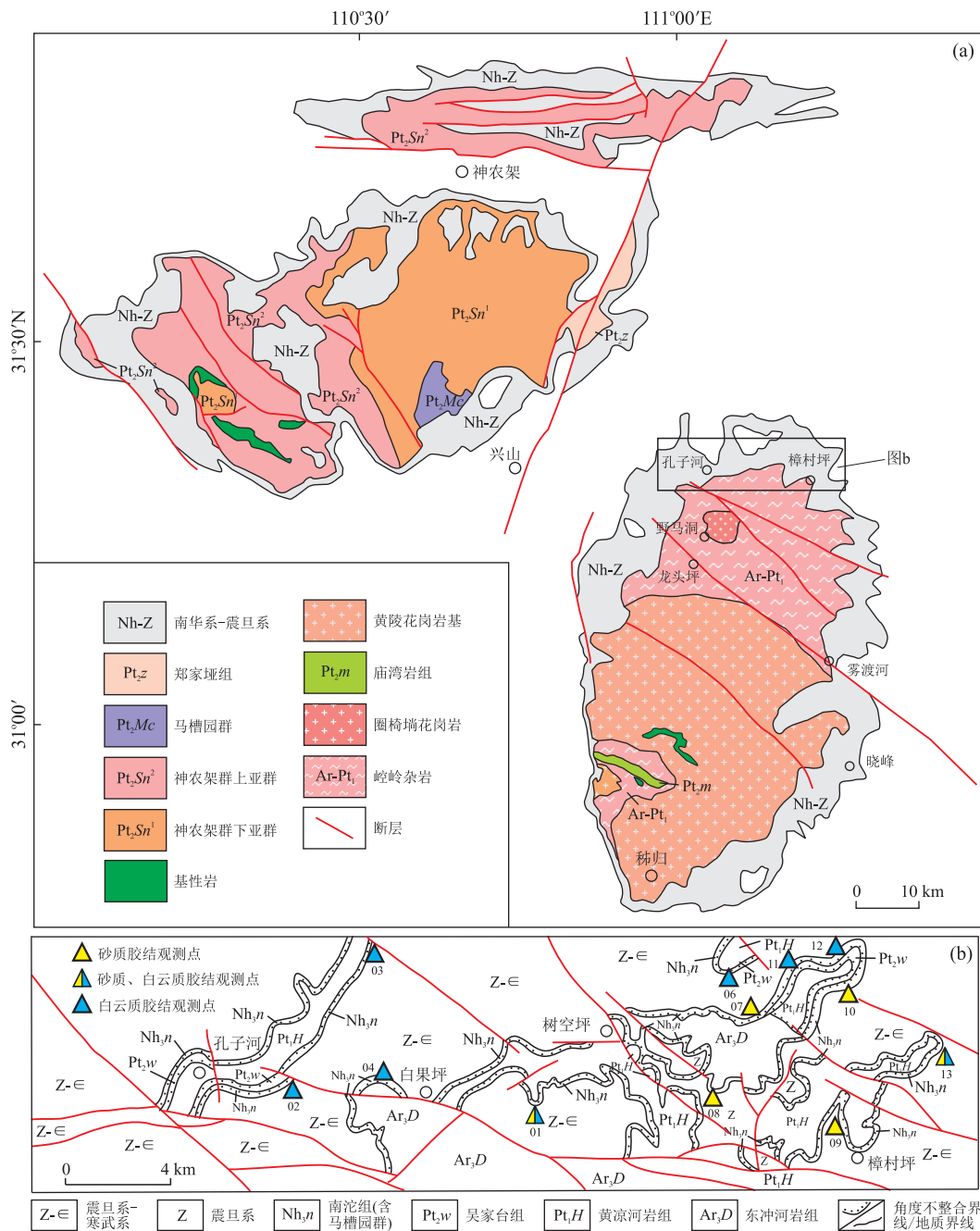


图 1 研究区位置及地质背景简图

Fig.1 Location and regional geological sketch of research area
据熊成云等(2004)、胡正祥等(2012)、徐大良等(2016)修改

上与相距不到 20 km 的中元古代神农架群之间接触关系不明,崆岭地区中元古代—新元古代青白口系未被深入研究,故而北崆岭地区孔子河和樟村坪一带现划为“马槽园群”的地层记录极为宝贵,对探讨扬子北缘中新元古代地层划分对比和地质构造演化过程有着重要意义。

1 地质背景

马槽园组由湖北区测队 1974 年创名于湖北兴山县古夫镇咸水村西,后李铨和冷坚(1987)将“马槽园组”厘定为“马槽园群”,分为八里垭组和火烧尖组,《湖北省区域地质志》(1990)和《湖北省岩石地层》(陈公信等,1996)沿用了马槽园群,其定义是指不整合于南沱组之下、神农架群之上的一套磨拉石建造,其岩性主要为碳酸盐质砾岩、砂砾岩,夹碳酸盐质板岩、透镜状泥质白云岩和似角砾状白云岩,形成时代为新元古代,第四届全国地层会议将马槽园群的时代划归为新元古代青白口系(王泽九等,2014)。湖北省地质调查院(2006,1:25 万神农架幅区域地质调查)认为马槽园群是神农架群石槽河组中的滑塌事件沉积,称之为“大岩坪岩楔”;Wang *et al.* (2013)、邓奇等(2013)、邱艳生等(2013)分别获得马槽园群八里垭组顶部或火烧尖组底部凝灰岩年龄 $\sim 1\,157\text{ Ma}$ 、 $\sim 1\,165\text{ Ma}$ 、 $\sim 1\,139\text{ Ma}$,认为其形成时代为中元古代而非新元古代,结合沉积学研究,认为其为台缘斜坡—混积陆棚环境下的重力流沉积,从而支持了 1:25 万神农架幅区调划分方案。

马槽园群主要分布于湖北省神农架林区与兴山县交界处,少量出露于北崆岭兴山县孔子河至宜昌市夷陵区樟村坪一带(图 1)。对于孔子河至樟村坪地区这套伏于南沱组或陡山沱组“盖帽白云岩”之下、角度不整合于崆岭杂岩之上的杂砾岩、白云质砾岩,2006 年之前的地质调查与研究将其归属新元古代马槽园群,属磨拉石建造(陈公信等,1996;熊成云等,2004),胡正祥等(2012)将其重新命名为浇园山组,认为其属台内—台缘斜坡相白云质复砾岩,形成于青白口纪。北崆岭地区的“马槽园群”能不能与神农架地区的马槽园群对比?其究竟是新元古代的磨拉石建造,还是中元古代裂谷体系沉积,是目前关注的焦点,研究区“马槽园群”沉积构造背景和形成时代归属的确定,对于扬子北缘中新元古代地层划分,探讨扬子陆块在 Rodinia 超大陆中的位置及汇聚、裂解的过程均具有重要意义。

最近,笔者对该地区的马槽园群及上下层位进行了详细野外追索和沉积学调查,结合碎屑锆石同位素年代学研究,对其沉积环境和时代归属有了新的认识。

2 沉积特征及物源分析

本次研究,对呈带状分布于樟村坪—孔子河地区的“马槽园群”及南沱组进行了详细野外地质研究,测制了 12 条野外剖面(图 1),并在区域上侧向追索对比,对其沉积特征进行了研究。

“马槽园群”主体岩性为杂色—灰色厚层状—块状杂砾岩,岩性组合大致分为 3 类:一为白云质胶结杂砾岩,主要分布在剖面 PM002(对应图 1b 中的 02 观测点,下同)、PM003、PM004、PM006、PM011 和 PM012 上;二为砂质胶结杂砾岩,在 PM007、PM008、PM009 和 PM010 上出露;三为既有白云质胶结杂砾岩,也有砂质胶结杂砾岩,在 PM001 和 PM013 上可见。而且白云质胶结杂砾岩与砂质胶结杂砾岩没有明确的上下关系,例如在 PM001 中砂质胶结杂砾岩在下部层位,而白云质胶结杂砾岩在上部层位;在 PM013 中白云质胶结杂砾岩在下部层位,而砂质胶结杂砾岩在上部层位。“马槽园群”在研究区厚度不大,且侧向变化明显,厚度变化范围在 0.8~7.0 m,与下伏中元古代吴家台组(胡正祥等,2012)变质砂砾岩、硅化白云岩,古元古代黄凉河组千枚岩、石英岩夹大理岩(图 2,图 3a,3c),新太古代东冲河组片麻岩、石英岩(图 2,图 3b)等呈角度不整合接触。与上覆地层接触关系存在两种类型:一是与南沱组岩性渐变,无明显间断界面;二是与陡山沱组“盖帽白云岩”岩性突变,个别剖面界面略为波状起伏(图 3a)。

研究区南沱组与“马槽园群”相伴出现,厚度较小,侧向上在 0~5 m 间变化,主要岩性为黄绿—灰绿色厚层—块状泥—粉砂质胶结杂砾岩,砾石粒径 0.2~20.0 cm 为主,少量达 30~40 cm,砾石成分复杂,泥砂质胶结,与峡东地区青林口剖面南沱组(安志辉等,2014)相似,为典型的冰碛砾岩。

“马槽园群”砾石多呈棱角状—次棱角状,少量次圆状,粒径 0.2~40.0 cm,大小混杂,无分选,无定向,砾石含量 25%~75%,砾石成分复杂,横向变化快。本次研究在 PM001、PM002、PM006、PM007、PM011、PM012 剖面上进行了粒径和砾石成分统计(图 4),粒径统计在断面或层面上进行,每个砾石统

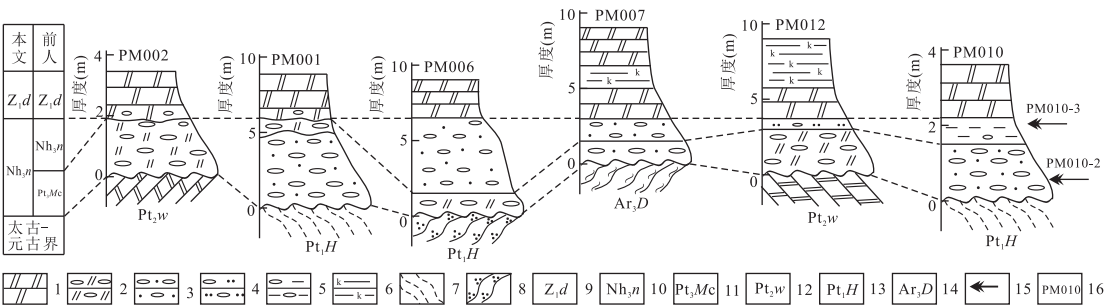


图 2 实测剖面柱状图

Fig.2 The lithological column of section

1.白云岩;2.白云质胶结杂砾岩;3.砂质胶结杂砾岩;4.粉砂质胶结杂砾岩;5.泥质胶结杂砾岩;6.含钾页岩;7.片麻岩;8.石英岩;9.陡山沱组;10.南沱组;11.“马槽园群”;12.吴家台组;13.黄凉河岩组;14.东冲河岩组;15.碎屑锆石采样位置;16.剖面编号

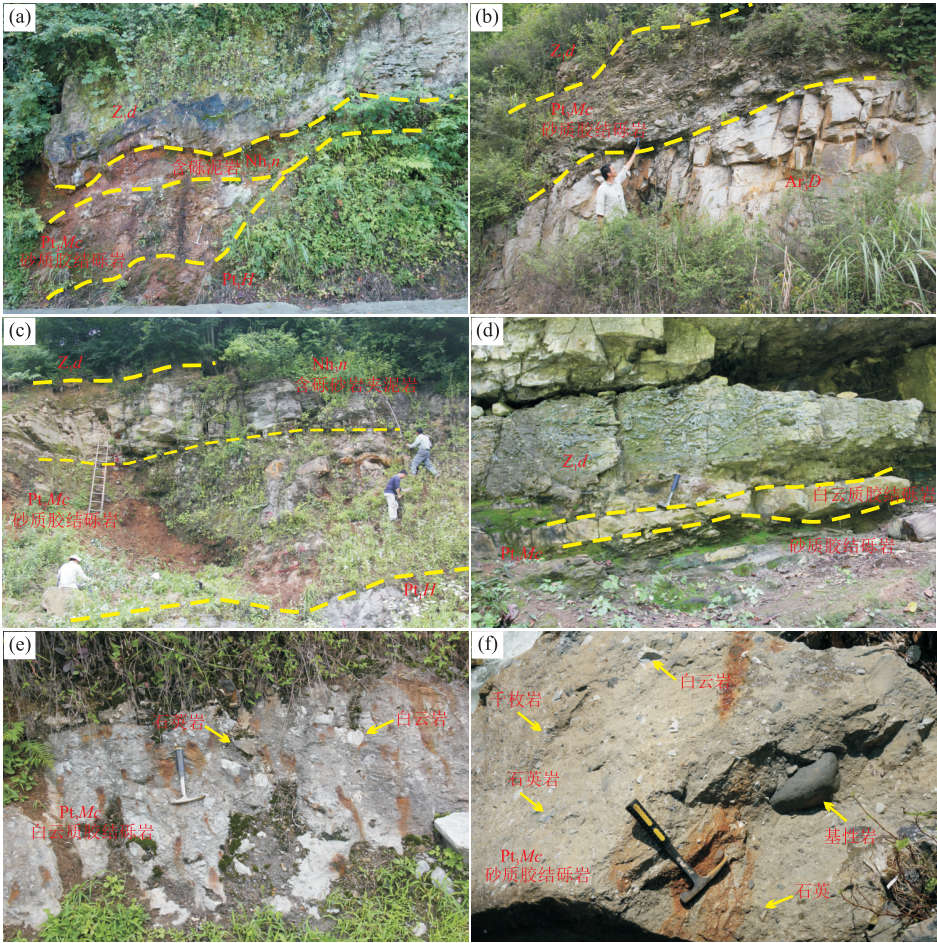


图 3 樟村坪地区“马槽园群”和南沱组野外特征

Fig.3 Outcrop features of Macaoyuan Group and Nantuo Formation in Zhangcunping area

a.PM010 剖面,“马槽园群”(Pt₃Mc)与下伏黄凉河岩组(Pt₁H)角度不整合接触;b.PM008 剖面,“马槽园群”(Pt₃Mc)与上覆陡山沱组(Z₁d)平行不整合,与下伏东冲河岩组(Ar₃D)角度不整合接触;c.PM009 剖面,南沱组(Nh₃n)为黄绿色中厚层状含砾砂岩夹泥岩,“马槽园群”(Pt₃Mc)为灰色块状杂砾岩;d.PM001 剖面,“马槽园群”(Pt₃Mc)与上覆陡山沱组(Z₁d)平行不整合接触,岩性两分,下部为砂质胶结杂砾岩,上部为白云质胶结杂砾岩;e.PM011 剖面,“马槽园群”(Pt₃Mc)为灰色块状白云质胶结杂砾岩,砾石以白云岩和石英岩为主;f.PM008 剖面,“马槽园群”(Pt₃Mc)为泥砂质胶结杂砾岩,砾石成分包括白云岩、基性岩、变质岩、石英等

计长轴和短轴,砾石成分在野外尽量细分,这样更有利于物源分析,如将成分较纯、可能来自石英脉或伟晶岩的石英与成分较杂、由石英砂岩、硅质岩变质而成的石英岩进行了区别统计,将片岩、千枚岩、片麻

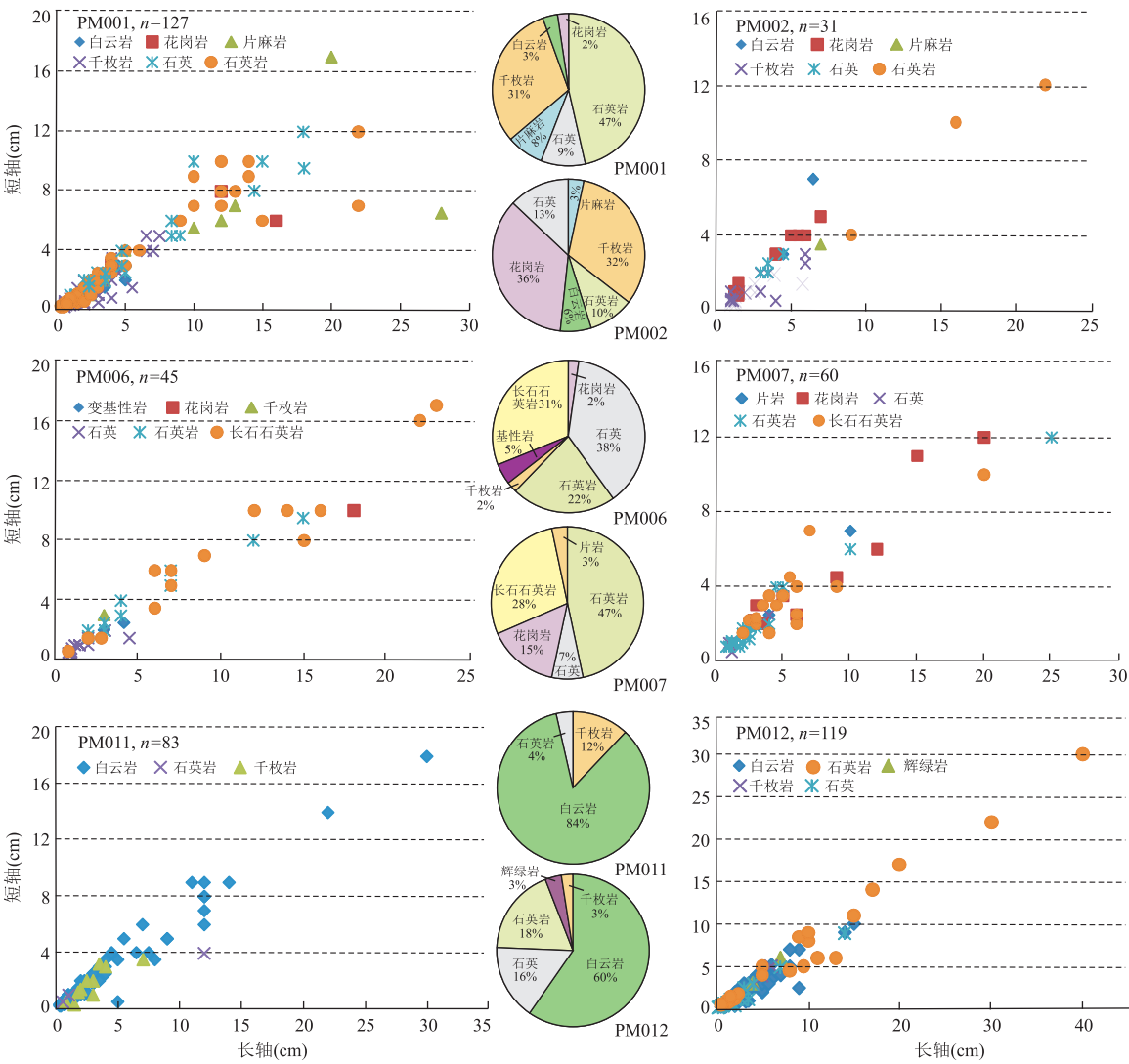


图 4 “马槽园群”砾石成分与粒径统计结果

Fig.4 Statistical results of gravel diameter and gravel composition from Macaoyuan Group

岩进行了区别.统计结果如图 4 所示:PM001 剖面上粒径以 0.2~12.0 cm 为主,少量超过 25 cm,下部为砂质胶结、上部为白云质胶结(图 2),粒石成分包括千枚岩(31%)、石英(47%)、石英岩(9%)、片麻岩(8%)、花岗岩(2%)和白云岩(3%),以石英岩和千枚岩为主,占 78%;PM002 剖面上粒径以 0.2~6.0 cm 为主,少量超过 20 cm,白云质胶结,粒石成分包括千枚岩(32%)、花岗岩(36%)、石英(13%)、石英岩(10%)、片麻岩(3%)和白云岩(6%),以花岗岩和千枚岩为主,占 68%;PM006 剖面上粒径以 0.2~7.0 cm 为主,少量超过 20 cm,白云质胶结,砾石成分包括石英(38%)、长石石英岩(31%)、石英岩(22%)、变基性岩(5%)、千枚岩(2%)、花岗岩(2%),以石英和(长石)石英岩为主,占 91%;PM007 剖面上粒径以 0.2~6.0 cm 为主,少量 20 cm

左右,砂质胶结,砾石成分包括石英(7%)、长石石英岩(28%)、石英岩(47%)、片岩(3%)、花岗岩(15%),以(长石)石英岩为主,占 75%;PM011 剖面上粒径以 0.2~9.0 cm 为主,少量超过 30 cm,白云质胶结,砾石成分包括白云岩(84%)、石英(4%)、千枚岩(12%),白云岩占绝对优势;PM012 剖面上粒径以 0.2~11.0 cm 为主,少量超过 40 cm,白云质胶结,砾石成分包括白云岩(60%)、千枚岩(3%)、石英岩(18%)、石英(16%)和辉绿岩(3%),亦是以白云岩为主,其次为石英和石英岩。

“典型的”南沱组呈灰绿色—紫红色,少量灰—深灰色,厚层至块状砾岩、砂砾岩,层理不明显,砾石大小不一、分选性差、成分混杂、多棱角状—次棱角状、排列杂乱无序,岩层中具落石构造,砾石中可见冰川擦痕、灯盏石、马鞍石等.本次野外追索和砾石

统计结果表明研究区“马槽园群”与南沱组具有相似的分布和砾石特征.空间上,北崆岭地区的“马槽园群”伏于震旦纪陡山沱组或南华纪南沱组之下、角度不整合于崆岭杂岩之上,即“马槽园群”往往与南沱组相伴产出;岩性上,“马槽园群”主体为灰色厚层一块状杂砾岩、白云质砾岩,与南沱组岩性相似、两者无明显界限;从砾石成分和特征看,两者几乎没有差别,均表现为砾石大小混杂、分选磨圆较差、泥砂质或白云质胶结,也与区域上“典型的”南沱组相似,都体现了快速混杂堆积特点,虽然没有发现落石构造、冰川擦痕、马鞍石等直接的冰碛岩证据,基于上述产出特点和岩性组合特征,笔者认为其属冰期产物.结合崆岭和神农架地区地质背景来看,其物源可能较近,其中石英岩、片麻岩、千枚岩、石英、花岗岩等砾石可能来自崆岭地区太古代—元古代变质岩系、TTG 岩系、圈椅淌岩体或新元古代黄陵花岗岩;而白云岩砾石可能来自中元古代神农架群和吴家台组,且愈往北西方向,白云岩砾石愈多.

3 沉积时代

3.1 采样位置及分析方法

沉积岩碎屑锆石记录的年龄信息不仅可以用来约束地层沉积时代上限,还可以进行区域岩石—构造单元对比研究,以及构造古地理格局恢复(胡蓉等,2016;徐大良等,2016; Han *et al.*, 2017).本文选择北崆岭樟村坪地区 PM010 剖面,采集了“马槽园群”和南沱组 2 件砾岩样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定,通过分析其年龄特征,为探讨马槽园群的时代、物源及与南沱组的对比提供依据.PM010-2 采自“马槽园群”下部,距底界 50 cm,野外采集细砾岩或泥砂质胶结物进行锆石挑选;PM010-3 采自南沱组上部,距顶界 15 cm,岩性为含砾泥岩或粉砂质砂岩(样品具体位置见图 2 中 PM010 剖面).

锆石单矿物分选工作由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成.锆石阴极发光(CL)图像在中国冶金地质总局山东局测试中心的 JXA8230 型电子显微镜和联动的日本 JEOL 公司 XM-209013TP 型阴极发光探头分析仪器上拍摄完成.锆石 U-Pb 定年分析在中国地质科学院资源所实验室进行,测试仪器为准分子激光剥蚀系统 193 nm GeoLas 2005 和电感耦合等离子体质谱仪 Agilent 7500a,激光剥蚀束斑直径为 32 μm,采用标准锆石 91500 作为外标进行同位素分馏校正.元素

含量采用美国国家标准物质局研制的人工合成硅酸盐玻璃 NIST 610 作为外标,²⁹Si 为内标元素进行校正.数据处理采用软件 ICP MS DataCal(ver8.3)完成,年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 2.7 软件完成.在讨论中,对于²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄小于 1 Ga 的颗粒采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄;而对于²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄大于 1 Ga 的颗粒采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄.不谐和度大于 5% 的数据不参加讨论.

3.2 分析结果及年代约束

两个样品中所分选出的锆石主要呈无色或浅黄色自形、半自形晶体,部分受到破碎作用而晶型不完整.形态上多呈柱状或浑圆状,粒径一般为 60~100 μm,长宽比为 1:1~2:1,多具一定程度的磨圆,呈现出碎屑锆石的形貌特征.锆石 CL 图像亮度强弱不等(图 5),可能反映不同锆石颗粒间 Th、U 等元素含量差异.锆石内部结构多具有明显的振荡环带,显示岩浆锆石特征,少部分锆石具有残留核或均质结构,表明锆石来源复杂.

对样品 PM010-2 的 80 粒锆石进行年代学测试,其中谐和度大于 95% 的点为 49 个,其 Th/U 比值介于 0.28~6.21,绝大多数大于 0.4,为岩浆成因.年龄结果(表 1)表明样品中谐和的碎屑锆石年龄大致分为 4 组,由新至老依次为 786~881 Ma,1 898~1 991 Ma,2 416~2 679 Ma,2 724~2 997 Ma(图 6a).该样品中获得的最年轻碎屑锆石年龄为 786 Ma,表明樟村坪地区的“马槽园群”沉积时代不早于 786 Ma,由于该套砾岩被震旦纪陡山沱组盖帽白云岩覆盖,且近期在盖帽白云岩中获得了 635 Ma 的年龄(Condon *et al.*, 2005),因此其沉积时代限定在 786~635 Ma 间,属南华纪.

对样品 PM010-3 的 72 粒锆石进行年代学测

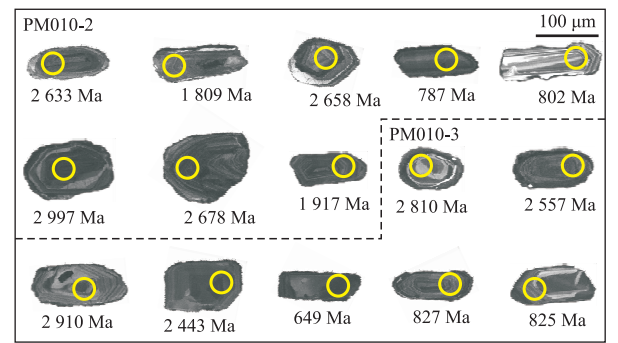


图 5 “马槽园群”和南沱组代表性锆石阴极发光照片及其 U-Pb 年龄

Fig.5 Typical CL images with U-Pb ages for zircons from Macaooyuan Group and Nantuo Formation

表 1 樟村坪地区 PM010“马槽园群”和南沱组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄
Table 1 Zircon U-Pb isotope data obtained by LA-ICP-MS from Macaoyuan Group and Nantuo Formation in Zhangcunping area

测点	含量(10 ⁻⁶)			Th/ U	同位素比值				同位素年龄(Ma)				谐和度 (%)		
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		σ	
PM010-2															
02	184.8	164.7	507.2	0.32	5.120	0.217	0.324	0.005	1.936.1	48	1839.5	36	1807.5	23	98
03	169.7	140.6	451.5	0.31	5.337	0.203	0.341	0.005	1.922.2	11	1874.8	33	1891.6	23	99
04	63.8	46.3	86.1	0.54	16.165	0.569	0.586	0.008	2.871.3	38	2.886.6	34	2.974.1	34	97
06	61.5	285.9	396.2	0.72	1.180	0.039	0.132	0.002	809.3	57	791.3	18	801.8	9	98
07	63.2	189.7	439.4	0.43	1.126	0.036	0.132	0.001	701.9	62	765.7	17	800.7	8	95
08	29.5	354.2	125.1	2.83	1.134	0.047	0.132	0.002	705.6	77	769.4	22	800.2	10	96
10	44.7	69.6	99.1	0.70	6.027	0.159	0.372	0.004	1.938.9	46	1.979.8	23	2.039.8	20	97
12	189.9	234.7	356.6	0.66	9.627	0.187	0.444	0.005	2.428.1	30	2.399.7	18	2.366.9	21	98
13	21.6	103.4	136.1	0.76	1.200	0.050	0.130	0.002	861.1	87	800.8	23	786.9	11	98
15	132.3	138.1	240.3	0.57	9.731	0.175	0.447	0.006	2.438.9	28	2.409.7	17	2.381.3	24	98
17	17.3	52.0	104.8	0.50	1.396	0.050	0.146	0.002	931.5	79	887.4	21	880.7	12	99
19	41.9	138.1	275.2	0.50	1.227	0.036	0.132	0.001	847.8	59	813.0	16	798.8	8	98
20	79.7	47.2	103.3	0.46	18.487	0.330	0.602	0.006	2.997.2	28	3.015.4	17	3.037.8	24	99
23	29.7	99.6	190.8	0.52	1.231	0.039	0.132	0.002	866.4	36	814.5	18	798.0	9	97
24	107.1	119.8	174.2	0.69	12.293	0.218	0.475	0.006	2.724.1	28	2.627.0	17	2.506.9	26	95
25	13.5	49.5	86.5	0.57	1.230	0.060	0.132	0.002	927.8	11	814.3	27	799.1	13	98
26	11.9	25.9	23.6	1.09	5.823	0.250	0.368	0.008	1.917.0	83	1.949.8	37	2.020.6	37	96
27	91.1	68.9	162.1	0.42	9.890	0.177	0.460	0.005	2.416.7	31	2.424.5	17	2.437.8	22	99
29	187.5	103.0	362.8	0.28	9.502	0.159	0.432	0.004	2.447.2	26	2.387.7	15	2.313.9	17	96
30	86.1	205.4	166.3	1.23	6.335	0.141	0.354	0.004	2.098.2	39	2.023.4	20	1.952.7	17	96
31	87.5	212.7	171.1	1.24	5.951	0.122	0.353	0.003	1.991.1	37	1.968.7	18	1.949.1	16	98
32	95.9	55.2	179.6	0.30	9.610	0.164	0.447	0.004	2.416.7	34	2.398.1	16	2.380.3	18	99
33	154.9	132.1	206.0	0.64	16.668	0.267	0.567	0.005	2.929.3	24	2.915.9	15	2.893.7	19	99
35	73.4	87.4	179.5	0.49	5.777	0.105	0.345	0.003	1.979.3	33	1.942.9	16	1.909.0	14	98
36	44.1	169.9	292.1	0.58	1.180	0.031	0.131	0.001	787.0	56	791.5	14	795.4	8	99
37	17.2	47.5	37.6	1.26	5.165	0.201	0.326	0.005	1.898.2	68	1.846.8	33	1.818.4	25	98
38	59.0	186.5	120.9	1.54	5.678	0.118	0.337	0.003	1.991.1	37	1.928.1	18	1.871.0	16	96
39	14.0	75.6	83.0	0.91	1.1436	0.116	0.130	0.003	753.7	28	774.2	55	786.7	28	98
40	16.9	113.8	96.1	1.18	1.186	0.056	0.132	0.002	790.7	11	793.9	26	799.2	11	99
41	49.0	208.8	296.8	0.70	1.327	0.038	0.136	0.001	964.8	63	857.8	16	820.4	7	95
42	68.6	39.0	111.6	0.35	12.936	0.247	0.513	0.005	2.678.7	31	2.675.0	18	2.668.6	22	99
43	110.3	222.0	189.2	1.17	9.122	0.156	0.417	0.004	2.438.9	29	2.350.3	16	2.247.2	16	95
45	30.7	150.1	192.4	0.78	1.199	0.036	0.132	0.001	813.0	66	800.1	17	799.1	8	99
48	269.0	290.0	373.7	0.78	15.790	0.224	0.546	0.004	2.896.0	24	2.864.2	14	2.810.2	16	98
49	174.7	136.3	283.0	0.48	12.196	0.185	0.495	0.004	2.633.0	25	2.619.6	14	2.593.6	17	98
53	96.9	166.0	167.5	0.99	10.822	0.420	0.464	0.015	2.561.1	61	2.508.0	36	2.457.2	68	97
55	62.6	46.4	104.0	0.45	11.726	0.385	0.499	0.023	2.628.1	59	2.582.8	31	2.607.4	11	99
60	82.6	51.5	146.1	0.35	11.362	0.516	0.471	0.009	2.594.8	54	2.553.3	42	2.485.7	41	97
61	83.8	72.6	139.8	0.52	11.476	0.253	0.480	0.005	2.592.3	37	2.562.6	21	2.525.8	23	98
63	86.0	62.7	146.1	0.43	11.881	0.235	0.490	0.005	2.610.8	40	2.595.0	19	2.572.7	23	99
64	99.5	67.3	175.1	0.38	11.349	0.252	0.480	0.007	2.569.4	41	2.552.3	21	2.527.0	28	99
66	85.6	950.7	153.1	6.21	11.025	0.217	0.469	0.005	2.557.7	34	2.525.2	18	2.479.7	23	98
68	120.1	156.2	215.8	0.72	11.141	0.212	0.468	0.004	2.577.5	32	2.535.0	18	2.474.2	18	97
69	81.0	55.8	142.4	0.39	11.552	0.214	0.485	0.004	2.579.9	30	2.568.8	17	2.547.5	18	99
76	121.3	83.5	206.4	0.40	11.908	0.217	0.485	0.005	2.627.5	27	2.597.2	17	2.550.2	22	98
77	53.4	40.5	90.1	0.45	12.197	0.494	0.492	0.013	2.659.0	63	2.619.7	38	2.578.0	57	98
80	90.1	76.1	157.5	0.48	11.341	0.183	0.466	0.005	2.618.2	31	2.551.6	15	2.466.2	22	96
82	180.4	195.0	304.5	0.64	11.506	0.161	0.470	0.006	2.633.3	16	2.565.1	13	2.483.3	24	96

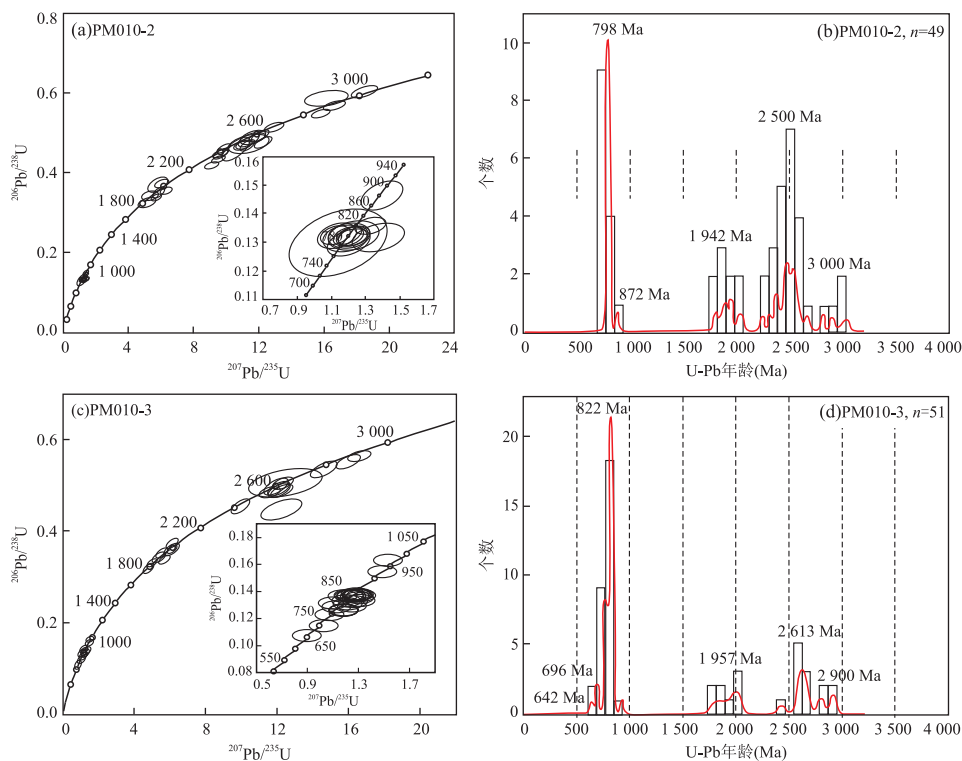


图 6 樟村坪地区“马槽园群”和南沱组锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方分布
Fig.6 Zircon U-Pb and histogram of zircon ages for the Macaoyuan Group and Nantuo Formation

试,其中谐和度大于 95%的点为 51 个,其 Th/U 比值介于 0.36~2.24,均大于 0.4,同样显示为岩浆成因锆石.其谐和锆石的年龄组成(表 1)大致分为 4 组,由新至老依次为 657~975 Ma,1 810~2 021 Ma,2 444~2 677 Ma,2 809~2 928 Ma(图 6c).该样品中获得的最年轻碎屑锆石年龄为 657 Ma,表明樟村坪地区的南沱组沉积时代不早于 657 Ma,加之该套砾岩被震旦纪陡山沱组盖帽白云岩覆盖,且近期在盖帽白云岩中获得了 635 Ma 的年龄(Condon *et al.*, 2005),因此其沉积时代限定在 657~635 Ma 之间,属 Marinoan 冰期产物(Zhang *et al.*, 2008;赵彦彦和郑永飞,2011;Liu *et al.*, 2015).

值得注意的是,两个样品的年龄谱特征基本一致,与胡蓉等(2016)在峡东地区南沱组冰碛岩得出的碎屑锆石年龄谱特征也极其相似,暗示两套地层之间可以对比.

3.3 物源分析

对比碎屑锆石 U-Pb 年龄频率直方图(图 6b, 6d),两件样品表现出基本相同的分布特征,整体上显示出新元古代(657~900 Ma)、古元古代(1 800~2 000 Ma)、古元古代-新太古代(2 360~2 600 Ma)、中太古代(2 724~2 997 Ma)这 4 个年龄区间.

中太古代年龄区间存在~2 900 Ma 和~3 000 Ma

两个年龄峰值,对应扬子古陆核形成阶段,该年龄信息在崆岭杂岩中被广泛报道(表 2),Zhang *et al.* (2006)报道了北崆岭野马洞一带混合岩年龄为 2 930~3 242 Ma;Qiu *et al.*(2000)报道了北崆岭龙头坪-野马洞地区奥长花岗片麻岩年龄为 2 903~2 947 Ma;魏君奇和王建雄(2012)报道了同一地区斜长角闪岩包体年龄为 3 000 Ma.

两个样品中新太古代年龄区间存在~2 500 Ma 和~2 613 Ma 两个年龄峰值,这一时代的地质体近年来在崆岭杂岩中被屡次报道,Chen *et al.*(2013)在崆岭地区发现了 2.7~2.6 Ga 的花岗片麻岩(表 2),因此,样品中该组碎屑锆石年龄信息可能对应了区域上古元古代-新太古代的构造-岩浆事件,代表了扬子陆核早期地壳的生长过程(Chen *et al.*, 2013;Guo *et al.*, 2015;Li *et al.*, 2016).

样品中古元古代年龄集中在 1 800~2 000 Ma 之间,且存在明显的~1 950 Ma 的年龄峰值,这与全球范围内 Columbia 超大陆的聚合事件时间相吻合.近年来,人们在崆岭地区不同岩石中发现了古元古代构造-岩浆事件的年代学记录(表 2).例如,在圈椅淌正长花岗岩岩体中获得了~1.85 Ga 的侵入年龄(Peng *et al.*, 2012),发现部分辉绿岩脉形成于~1.8 Ga(Peng *et al.*, 2012),以及最近报道的崆岭地

表 2 崆岭及神农架地区主要岩浆热事件年龄

Table 2 Main magmatic thermal events ages in the Kongling and Shengnongjia terrain

地点	岩石类型	年龄 (Ma)	成因解释	方法	资料来源
北崆岭雾渡河—殷家坪	奥长花岗岩片麻岩	2 007±48~2 023±51	变质	LA-ICP-MS	Chen <i>et al.</i> (2013)
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 733±20	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 901±18~2 908±21	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		3 233±32~3 255±44	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	花岗岩片麻岩	2 601±29~2 735±40	岩浆	LA-ICP-MS	Qiu <i>et al.</i> (2000)
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 901±27	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		3 231±34	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		1 995±45	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	英云闪长岩	2 957±17	岩浆	LA-ICP-MS	Zhang <i>et al.</i> (2006)
北崆岭雾渡河—殷家坪	奥长花岗岩片麻岩	2 903±10, 2 947±5	SHRIMP	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	混合岩	1 980±72	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 930±44~2 947±28	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	片麻岩	3 182±175~3 242±20	岩浆	LA-ICP-MS	Jiao <i>et al.</i> (2009)
北崆岭雾渡河—殷家坪		3 218±13	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		1 981±16	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 950±15	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	花岗岩片麻岩	3 262±27~3 302±8	岩浆	LA-ICP-MS	Gao <i>et al.</i> (2011)
北崆岭雾渡河—殷家坪		3 000±24	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 715±9	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 558±40	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	斜长角闪岩包体	3 292±33~3 313±20	变质改造	LA-ICP-MS	魏君奇和王建雄 (2012)
北崆岭雾渡河—殷家坪	奥长花岗岩	1 951±35~2 040	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 662±20~2 810±49	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 888±18~3 367±17	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	二云母花岗岩	1 924±61~2 031±50	继承	LA-ICP-MS	Guo <i>et al.</i> (2015)
北崆岭雾渡河—殷家坪		2 418±52~2 695±23	变质	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		3 227±11~3 402±12	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		~2 000	继承	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	黑云石榴片麻岩	2 200~2 210	变质	LA-ICP-MS	Li <i>et al.</i> (2016)
北崆岭雾渡河—殷家坪	玄武岩	2 400~2 200, >2 500	继承	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		1 103±8	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪		819±7	火山	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	奥长花岗岩	837±7	岩浆	SHRIMP	Qiu <i>et al.</i> (2011)
北崆岭雾渡河—殷家坪	花岗岩	724±12	岩浆	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	莲花组凝灰岩	2 000~2 009, 2 131~2 244, 2 595~2 849	火山	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	片麻岩, 大理岩	842~863	变质	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	英云闪长岩, 二长花岗岩	800~820	岩浆	SHRIMP	Yin <i>et al.</i> (2013)
北崆岭雾渡河—殷家坪	花岗岩	978±12, 1 001±16	岩浆	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉长岩	1 063±12	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩	654.2±4.7	岩浆	LA-ICP-MS	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	邱峰等 (2015)
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	Liu <i>et al.</i> (2015)
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	
北崆岭雾渡河—殷家坪	辉绿岩		Sm-Nd	SHRIMP	

区零星出露少量 S 型含石榴石花岗岩 (Yin *et al.*, 2013; Guo *et al.*, 2015). 因此, 本次采集的两套样品中碎屑锆石年龄信息可能反映扬子陆块是 Columbia 超大陆的重要组成部分 (Zhang *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2013).

新元古代锆石年龄在两个样品中所占比例最高, 且存在明显的年龄峰值 ~ 798 Ma 和 ~ 822 Ma, 这些年龄信息的地质体在整个扬子克拉通范围内大量出露 (表 2), 被认为可能代表了 Rodinia 超大陆汇聚与裂解的构造—岩浆事件的年代学记录 (马国干等, 1984; 高维和张传恒, 2009; Zhang *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2012).

值得注意的是, 本研究未获得 $1\,000\sim 1\,600$ Ma 的中元古代年龄信息, 这与崆岭地区缺乏中元古代地质记录以及邻近的神农架地区中元古代以碳酸盐岩为主, 仅夹少量中—基性火山岩 (Qiu *et al.*, 2011, 2015; 李怀坤等, 2013) 而相对缺乏岩浆锆石的地质背景吻合。

综合来看, 北崆岭地区“马槽园群”和南沱组样品的碎屑锆石形态上多呈自形一半自形特点, 其碎屑锆石年龄结构特征与扬子陆核基底岩石时代接近, 结合其近源堆积的沉积特点, 初步判断“马槽园群”和南沱组的沉积物源为扬子陆核基底的崆岭杂岩体和神农架群。

4 结论

(1) 北崆岭地区孔子河—樟村坪一带的“马槽园群”与上覆南沱组之间没有明显间断, 而且两套砾岩在区域展布、砾石分选、磨圆及成分上差别不大, 仅胶结物类型存在差别。砂质胶结的“马槽园群”砾岩可能为陆地或滨岸环境下的冰水沉积, 而部分地段白云质胶结的砾岩可能是离岸较远的滨外或陆棚环境下的冰筏沉积, 并且随着海平面的升降, 砂质胶结砾岩和白云质胶结砾岩可以在同一剖面上出现。故笔者认为北崆岭地区的“马槽园群”既不是磨拉石建造, 也不是斜坡相滑塌堆积, 而与区域上南沱组一样, 为一套冰碛岩, 主张将两者统称为南沱组。

(2) 北崆岭地区“马槽园群”和南沱组碎屑锆石中最年轻锆石年龄分别为 786 Ma, 657 Ma, 结合该套砾岩被震旦纪陡山沱组盖帽白云岩覆盖的地质事实, 将其沉积时代限定在 786~635 Ma 间, 同属南华纪沉积。

(3) 研究区“马槽园群”和南沱组碎屑锆石表现出基本相同的频谱特征, 整体上显示出 649~

900 Ma, $1\,800\sim 2\,000$ Ma, $2\,360\sim 2\,600$ Ma, $2\,724\sim 2\,997$ Ma 这 4 个年龄区间, 存在 ~ 800 Ma、 $\sim 1\,950$ Ma、 $\sim 2\,500$ Ma、 $\sim 2\,600$ Ma、 $\sim 2\,900$ Ma、 $\sim 3\,000$ Ma 的年龄峰值, 对比崆岭及神农架地区已获得的年代学数据, 结合“马槽园群”砾石特征和成分统计分析结果, 认为沉积物源主要来自邻近的崆岭和神农架地区, 包括崆岭地区太古代—元古代变质岩系、TTG 岩系、圈椅淌岩体、新元古代黄陵花岗岩和中元古代吴家台组, 神农架地区中元古代神农架群。不论神农架群地区马槽园群归属中元古代神农架群, 还是划归为神农架群之上青白口系磨拉石建造, 都远远老于北崆岭地区“马槽园群”最年轻的锆石年龄 786 Ma, 因此北崆岭地区“马槽园群”肯定不同于神农架地区马槽园群。另外, 砾石统计和碎屑锆石示踪分析亦表明北崆岭地区孔子河—樟村坪一带的“马槽园群”为神农架群成岩之后的沉积记录, 而不是神农架群内部的楔状沉积体, 不能以神农架地区的马槽园群称之, 建议统一归属南沱组。

致谢: 感谢侯可军博士对样品测试和数据分析的帮助和指导, 感谢胡正祥、张权绪、牛志军就有关沉积和构造问题的讨论。感谢两位审稿人提出的宝贵意见!

References

- An, Z. H., Tong, J. N., Ye, Q., et al., 2014. Neoproterozoic Stratigraphic Sequence and Sedimentary Evolution at Qinglinkou Section, East Yangtze Gorges Area. *Earth Science*, 39(7): 795–806 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.075>
- Chen, G. X., Jing, J. W., Wu, X. S., et al., 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Hubei Province, China. University of Geosciences Press, Wuhan, 50–52 (in Chinese).
- Chen, K., Gao, S., Wu, Y. B., et al., 2013. 2.6–2.7 Ga Crustal Growth in Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 224: 472–490. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.10.017>
- Condon, D., Zhu, M., Bowring, S., et al., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308(5718): 95–98. <https://doi.org/10.1126/science.1107765>
- Deng, Q., Wang, J., Wang, Z. J., 2013. New Evidence for the Age of the Macaoyuan Group on the Northern Margin of the Yangtze Block, South China—Implications for Stratigraphic Correlation and Palaeogeographic Framework. *Geological Bulletin of China*, 32(4): 631–638 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Yang, J., Zhou, L., et al., 2011. Age and Growth of the Archean Kongling Terrain, South China, with Emphasis on

- 3.3 Ga Granitoid Gneisses, *American Journal of Science*, 311 (2): 153—182. <https://doi.org/10.2475/02.2011.03>
- Gao, W., Zhang, C. H., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Hnangling Granite and the Tuff Beds from Liantuo Formation in the Three Gorges Area of Yangtze River, China and Its Geological Significance, *Geological Bulletin of China*, 28(1): 45—50 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. L., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3—2.0 Ga) Granitoid Magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for Late Archean Tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246—266. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.007>
- Han, P. Y., Guo, J. L., Chen, K., et al., 2017. Widespread Neoproterozoic (~2.7—2.6 Ga) Magmatism of the Yangtze Craton, South China, as Revealed by Modern River Detrital Zircons. *Gondwana Research*, 42: 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.006>
- Hu, R., Li, S. Q., Wang, W., 2016. Source Characteristics of Tillite the Nantuo Formation in Three Gorges, Northern Yangtze Block: Evidences from Zircon Ages and Geochemical Composition. *Earth Science*, 41(10): 1630—1654 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.121>
- Hu, Z. X., Liu, Z. X., Zhang, Y. L., 2012. Determination of the Bottom Boundary of Shennongjia Gr in Pre-Nanhuan Period about the Northern Margin of Yangtze Massif and Its Geological Significance. *Resources Environment and Engineering*, 26(3): 201—208 (in Chinese with English abstract).
- Hubei Geological Bureau, 1990. Regional Geology of Hubei Province. Geological Publishing House, Beijing, 5—43 (in Chinese).
- Jiao, W. F., Wu, Y. B., Yang, S. H., et al., 2009. The Oldest Basement Rock in the Yangtze Craton Revealed by Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Composition. *Science China Earth Sciences*, 52(9): 1393—1399. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0135-7>
- Li, H. K., Zhang, C. L., Xiang, Z. Q., et al., 2013. Zircon and Baddeleyite U-Pb Geochronology of the Shennongjia Group in the Yangtze Craton and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 673—697 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Leng, J., 1987. The Upper Precambrian in the Shennongjia Region. Tianjin Science and Technology Publishing House, Tianjin (in Chinese).
- Li, Y. H., Zheng, J. P., Xiong, Q., et al., 2016. Petrogenesis and Tectonic Implications of Paleoproterozoic Metapelitic Rocks in the Archean Kongling Complex from the Northern Yangtze Craton, South China. *Precambrian Research*, 276: 158—177. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.01.028>
- Liu, C. X., Mao, X. W., Wei, Y. X., et al., 2004. A Preliminary Research on Stratigraphic Sequence of Shennongjia Group. *Resources Environment & Engineering*, 18 (Z1): 5—16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P. J., Li, X. H., Chen, S. M., et al., 2015. New SIMS U-Pb Zircon Age and Its Constraint on the Beginning of the Nantuo Glaciation. *Chinese Science Bulletin*, 60(10): 958—963. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0790-3>
- Ma, G. G., Li, H. Q., Zhang, Z. C., 1984. An Investigation of the Age Limits of the Sinian System in South China. *Bulletin of Yichang Institute Geology and Mineral Resources of Chinese Academy of Geological Sciences*, 8: 1—29 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B., Han, Q. S., Ali, P., et al., 2016. Discovery of the Paleoproterozoic Ophiolitic Melange in the North Part of Huangling Dome, Yangtze Craton. *Earth Science*, 41 (12): 2117—2118.
- Peng, S. B., Kusky, T. M., Jiang, X. F., et al., 2012. Geology, Geochemistry, and Geochronology of the Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Implications for South China's Amalgamation History with the Rodinian Supercontinent. *Gondwana Research*, 21(2—3): 577—594. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.010>
- Qiu, X. F., Ling, W. L., Liu, X. M., et al., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3—4): 101—119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.011>
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Zhang, L. G., et al., 2015. Geochronology of Serpentinized Harzburgite in Miaowan Ophiolite, Yangtze Block and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 40(7): 1121—1128 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.094>
- Qiu, Y. M., Gao, S., McNaughton, N. J., et al., 2000. First Evidence of >3.2 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of South China and Its Implications for Archean Crustal Evolution and Phanerozoic Tectonics. *Geology*, 28(1): 11—14. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)028<0011:feogcc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)028<0011:feogcc>2.3.co;2)
- Qiu, Y. S., Hu, Z. X., Yang, Q. X., et al., 2013. LA-ICP-MS U-Pb Dating for the Macaoayan Group in South China and Its Stratigraphic Significance. *Resources Environment and Engineering*, 27(3): 328—334 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Deng, Q., Wang, Z. J., et al., 2013. New Evidences for Sedimentary Attributes and Timing of the “Macaoayan Conglomerates” on the Northern Margin of the Yangtze Block in

- Southern China. *Precambrian Research*, 235: 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.06.003>
- Wang, Z. J., Huang, Z. G., Yao, J. X., et al., 2014. Characteristics and Main Progress of the Stratigraphic Chart of China and Directions. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 271–276.
- Wei, J. Q., Wang, J. X., 2012. Zircon Age and Hf Isotope Compositions of Amphibolite Enclaves from the Kongling Complex. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 589–600.
- Wei, Y. X., Peng, S. B., Jiang, X. F., et al., 2012. SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Geochemical Characteristics of the Neoproterozoic Granitoids in the Huangling Anticline and Its Tectonic Setting. *Journal of Earth Science*, 23(5): 659–676. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0284-z>
- Xiong, C. Y., Wei, C. S., Jin, G. F., et al., 2004. Pre-Sinian Paleogeographical Framework and Major Geological Events in the Huangling Anticline, western Hubei. *Journal of Geomechanics*, 10(2): 97–112 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. L., Liu, H., Wei, Y. X., et al., 2016. Detrital Zircon U-Pb Dating of Zhengjiaya Formation from the Shennongjia Area in the Northern Yangtze Block and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2648–2660 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Tong, J. N., Xiao, S. H., et al., 2015. The Survival of Benthic Macroscopic Phototrophs on a Neoproterozoic Snowball Earth. *Geology*, 43(6): 507–510. <https://doi.org/10.1130/g36640.1>
- Yin, C. Q., Lin, S. F., Davis, D. W., et al., 2013. 2.1–1.85 Ga Tectonic Events in the Yangtze Block, South China: Petrological and Geochronological Evidence from the Kongling Complex and Implications for the Reconstruction of Supercontinent Columbia. *Lithos*, 182–183: 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.012>
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon Isotope Evidence for ≥ 3.5 Ga Continental Crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146(1–2): 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.002>
- Zhang, S. B., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., et al., 2009. Origin of TTG-Like Rocks from Anatexis of Ancient Lower Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Granitoids in South China. *Lithos*, 113(3–4): 347–368. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.024>
- Zhang, S. H., Jiang, G. Q., Han, Y. G., 2008. The Age of the Nantuo Formation and Nantuo Glaciation in South China. *Terra Nova*, 20(4): 289–294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2008.00819.x>
- Zhao, Y. Y., Zheng, Y. F., 2011. Record and Time of Neoproterozoic Glaciations on Earth. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 545–565.
- ### 附中文参考文献
- 安志辉, 童金南, 叶琴, 等, 2014. 峡东青林口地区新元古代地层序列及沉积演变. *地球科学*, 39(7): 795–806.
- 陈公信, 金经炜, 吴细松, 等, 1996. 湖北省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 50–52.
- 邓奇, 王剑, 汪正江, 等, 2013. 扬子北缘元古宇马槽园群时代归属新证据——对地层对比和古地理格局的启示. *地质通报*, 32(4): 631–638.
- 高维, 张传恒, 2009. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地层意义. *地质通报*, 28(1): 45–50.
- 胡蓉, 李双庆, 五伟, 等, 2016. 扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征: 锆石年龄和地球化学证据. *地球科学*, 41(10): 1630–1654.
- 胡正祥, 刘早学, 张焱林, 等, 2012. 扬子地块北缘前南华纪神农架群底界的厘定及其地质意义. *资源环境与工程*, 26(3): 201–208.
- 湖北省地质局, 1990. 湖北省区域地质志. 北京: 地质出版社, 5–43.
- 李怀坤, 张传林, 相振群, 等, 2013. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义. *岩石学报*, 29(2): 673–697.
- 李铨, 冷坚, 1987. 前寒武纪地质研究——神农架上前寒武系. 天津: 天津科学技术出版社.
- 刘成新, 毛新武, 魏运许, 等, 2004. 神农架地层层序初探. *资源环境与工程*, 18(Z1): 5–16.
- 马国干, 李华芹, 张自超, 等, 1984. 华南震旦纪时限范围的研究. *中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊*, 8: 1–29.
- 彭松柏, 韩庆森, Ali, P., 等, 2016. 扬子克拉通黄陵穹隆北部发现古元古代蛇绿混杂岩. *地球科学*, 41(12): 2117–2118.
- 邱啸飞, 杨红梅, 张利国, 等, 2015. 扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义. *地球科学*, 40(7): 1121–1128.
- 邱艳生, 胡正祥, 杨青雄, 等, 2013. 华南“马槽园群”年代及其地层学意义. *资源环境与工程*, 27(3): 328–334.
- 王泽九, 黄枝高, 姚建新, 等, 2014. 中国地层表及说明书的特点与主要进展. *地球学报*, 35(3): 271–276.
- 魏君奇, 王建雄, 2012. 崆岭杂岩中斜长角闪岩包体的锆石年龄和 Hf 同位素组成. *高校地质学报*, 18(4): 589–600.
- 熊成云, 韦昌山, 金光富, 等, 2004. 鄂西黄陵背斜地区前南华纪古构造格架及主要地质事件. *地质力学学报*, 10(2): 97–112.
- 徐大良, 刘浩, 魏运许, 等, 2016. 扬子北缘神农架地区郑家垭组碎屑锆石年代学及其构造意义. *地质学报*, 90(10): 2648–2660.
- 赵彦彦, 郑永飞, 2011. 全球新元古代冰期的记录和时限. *岩石学报*, 27(2): 545–565.