

中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评

陆松年 李怀坤 相振群

(中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 本文较全面地总结了自 2000 年第三届全国地层大会以来, 中国中元古代地层和热-构造事件同位素地质年代学研究工作所取得的主要进展, 讨论了这些进展所具有的重要意义, 指出确立中国中元古代上部地层标准剖面, 重新厘定中元古界地质年表, 是当前最迫切需要解决的课题。

关键词: 中元古代; 年代地层; 热-构造事件年代; 进展与问题

中图分类号: P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-1002-12

元古宙是指寒武纪(542 Ma)以前至 2500 Ma 之间的一段地质历史。这一段漫长的地质历史被划分为三大时间段, 即古元古代(界)、中元古代(界)和新元古代(界)。国际地层表^[1]中的中元古界系指 1600 Ma 至 1000 Ma 之间的地层系统, 包括盖层系(Calymmian, 1600~1400 Ma)、延展系(Ectasian, 1400~1200 Ma)和狭带系(Stenian, 1200~1000 Ma), 而中国区域年代地层表^[2]中则将中元古界的底界下延至 1800 Ma, 因此, 包括了国际地层表古元古界的固结系(Statherian, 1800~1600 Ma)。中元古代在长达近 2.0 Ga 的元古宙 3 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。根据全球演化的阶段性特征, 古元古代末哥伦比亚超大陆基本形成^[3-4], 进入中元古代早期时该超大陆逐步裂解, 经过中元古代的长期演化, 到中元古代末期又一个超大陆——罗迪尼亚逐步汇聚, 至新元古代初最终形成。因此, 中元古代是超大陆破裂和演化历史占据主导地位的时期。有学者认为^[5], 与超大陆破裂有关的盆地和岩浆岩及其共生的巨大的矿产资源潜力与中元古代从 1800~1000 Ma 具有行星规模的裂谷事件相联系(planetary-scale rifting events)。

2001 年中国地层委员会曾根据第三届全国地

层大会决议和多年来的传统习惯, 以中国北方天津蓟县城北中元古界剖面为标准, 将中元古界划分为长城系和蓟县系, 时限分别为 1800~1400 Ma 和 1400~1000 Ma。标准剖面中的长城系自下而上包括常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组和高于庄组; 蓟县系则包括杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组。蓟县系之上为新元古界青白口系, 其底部地层下马岭组平行不整合覆于蓟县系之上。

多年来, 许多地质学家如王曰伦、陈晋镛、钟富道、张学琪、王松山等对天津蓟县剖面同位素地质年代学做了大量探索性研究, 取得了众多以 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄为主的测试数据, 并以这些数据为依据, 建立了蓟县剖面中元古界年代格架(表 1)^[6]。但受当时同位素测试水平的限制, 许多测年数据的可靠性近年来受到质疑, 因此又一批地质工作者对标准剖面在众多中元古代地层系统运用新的测试方法和对象, 开展了新一轮的探索和研究, 并取得了令人瞩目的进展。与此同时, 对中元古代岩浆事件的年代学研究也取得不菲的成果, 本文重点介绍自 2000 年第三届全国地层大会召开以来的 10 年时间里, 中国开展中元古代同位素地质年代学研究所取得的主要进展, 并讨论这些进展的地质意义。

收稿日期: 2010-05-14; 改回日期: 2010-05-26

基金项目: 中国地质调查局“全国多重地层表”(1212010811057)及“中国与亚洲地区关键地层划分与对比研究”项目(1212010611802)资助。

作者简介: 陆松年, 男, 1940 年生, 研究员, 长期从事中国前寒武纪地质研究; E-mail: 156923044@qq.com。

表 1 早年建立的中元古代地质年代格架^[6]Table 1 Previously-established Mesoproterozoic geochronologic framework of China^[6]

代	纪	组	年龄/Ma	界线年龄/Ma
新元古代	青白口纪	景儿峪组	853、862、899 (K)	800—850 —
		下马岭组	956 (Ar)	
中元古代	蓟县纪	铁岭组	1046、1161 (K)	1000 —
		洪水庄组	1221 (Ar)、1241 (Rb)	
		雾迷山组		
		杨庄组		
		高于庄组	1376 (Pb)	
	长城纪	大红峪组	1625 (U)、1487 (Pb)、1495 (Rb) 1624、1660 (K)	1600 —
		团山子组	1606 (Rb)	
		串岭沟组	1705 (Pb)	
		常州沟组	1744 (Ar-Ar)	
				1800 —

注:K:海绿石 K-Ar 法;Ar:伊利石 K-Ar 法;Rb:铷-锶全岩法;Pb:铅模式年龄;Pb-Pb:铅-铅全岩法;U:单颗粒锆石 U-Pb 法;U-Pb:微量锆石法;Ar-Ar:⁴⁰Ar/³⁹Ar 法。

1 华北克拉通中元古代地质年代学的主要进展

华北克拉通是中国中元古界最发育的地质构造单元,又是中国中元古界长城系和蓟县系标准剖面所在地,同位素地质研究工作历来受到高度重视。近 10 年来华北克拉通中元古代地质年代学的研究主要集中在两方面:一是年代地层学,二是以岩浆岩为主的事件地质学,现分别予以简述。

1.1 中元古代同位素年代地层学

近年来一批中青年地质学家对中国华北克拉通燕辽拗拉槽中元古界的同位素地质年代学进行了探索性研究,其中高林志^[7]首先取得重要突破,并于 2007 年报道原划为新元古界下马岭组第三段的凝灰岩(斑脱岩)夹层中测得(1368±12)Ma 的数据。对此,乔秀夫等^[8]撰文高度评价了这一成果的意义。嗣后,苏文博、高林志、李怀坤等又报道了一批新的数据,如下马岭组中凝灰岩夹层 (1379±12) Ma、(1380±36)Ma^[9]和(1366±9) Ma、(1370±11) Ma^[10]的数据,侵入下马岭组的辉绿岩斜锆石 U-Pb 年龄为(1320±6) Ma^[11]等,因而,下马岭组地层的时限大致

可限制在 1400~1320 (1350)Ma。由于这一进展,蓟县剖面原划中元古代地层时代的归属产生了新问题:第一,从长城系常州沟组至蓟县系的 9 个组的地层时限被限制在 1800~1400 Ma 之间的 400 Ma 时段内,而不是原先认为的从 1800~1000 Ma 之间的 800 Ma 的连续沉积地层;第二,下马岭组不应划为新元古界,而属中元古界;第三,按传统认识,下马岭组之上原属青白口系的长龙山组和景儿峪组的沉积时限在 900~800 Ma 之间,则蓟县剖面缺失从 1320 Ma 至 900 Ma 之间长达 420 Ma 的地层系统。因而,根据蓟县剖面所确定的中国中元古界年代地层单位不得不重新划分和界定。

最近,苏文博、李怀坤等^[12]从雾迷山组获得 (1437±21) Ma 数据,结合前人已报到的成果,标准剖面及邻区中元古代地层的年代格架重新修订如下(表 2)。

1.2 热事件(火山和侵入事件)年代学

中国地层表中的中元古界,时限从 1800~1000 Ma。在这一段时限的早期,哥伦比亚超大陆逐步破裂,不但形成众多的裂谷盆地和被动大陆边缘盆地,而且也形成了与哥伦比亚超大陆破裂相对应的岩浆事件,其中特别引人注目的是以斜长岩-奥长环斑

表 2 蓟县及邻区中元古代地层的年代格架(修订)

Table 2 A revised geochronologic framework of Mesoproterozoic strata in Jixian and adjacent areas

国际地层表			中国年代地层			
界	系	年龄/Ma	界	系	组	年龄/Ma
中元古界	窄带系	1000~1200	中元古界	待建		1368±12
						1379±12
						1380±36
	延展系			待建	下马岭组	1366±9
						1370±11
		1400				1320±6*
					铁岭组	1437±21
					洪水压组	
					雾迷山组	
					杨庄组	
古元古界	盖层系	1600	中元古界	蓟县系	高于庄组	
					大红峪组	1625.3±6.2
						1622±23
					团山子组	1683±67
					串岭沟组	
	固结系	1800		长城系	常州沟组	~1.9~1.8Ga**
						资料来源

注: * 为侵入下马岭组辉绿岩斜长岩 U-Pb 年龄; ** 为常州沟组石英砂岩中最年轻一组的碎屑锆石年龄。

花岗岩为主的岩浆岩组合,国际上称为 AMCG 组合。在华北克拉通上,极好地保存了 1.8~1.6 Ga 的一系列非造山裂解事件的岩浆活动记录,可按时间顺序分为 3 期:早期以发育于五台山—恒山一带的基性岩墙群为代表,侵位时间约 1.77 Ga;中期以斜长岩—奥长环斑花岗岩,即 AMCG 组合为代表,典型的岩石组合包括斜长岩(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,侵位时代在 1.70 Ga 左右;晚期以超钾质火山活动为特色,喷出时代近 1.62 Ga。三期非造山岩浆活动的岩石组成及同位素年龄资料可参见图 1 及表 3。

此外,在 1320~1350 Ma 华北北部还发育了辉绿岩侵入事件^[11,13],断续延伸逾 300 余千米,其地质意义将在下文进一步探索。

2 扬子中元古代地质年代学的主要进展

中国南方扬子克拉通上的中元古代盆地规模较

小,各个盆地演化时间较短,除个别盆地,如神农架盆地延续时间可能较长,保留的神农架群时间跨度较大外,其他沉积地层时限均较短。同时,中元古界不同时段的地层彼此互不相关,既没有连续的地层关系,也没有不整合的显示,因此中元古界完整层序的建立颇为困难。根据目前所获得的有价值的同位素资料,扬子克拉通上的中元古界大致可分为三部分:下部以大红山群为代表,是一套与后造山大陆伸展有关的火山—沉积地层,时限约从 1800 Ma 至 1600 Ma。中部以东川群为代表,形成一套从砾岩、砂岩、页岩到碳酸盐岩的地层序列,时限为 1600~(1350±50) Ma。上部则以昆阳群为代表,也形成从碎屑岩到碳酸盐岩的以浅海相为主的地层序列,时限推断为(1350±50)~1000 Ma。有证据表明,扬子克拉通卷进了与形成罗迪尼亚超大陆有关的汇聚事件中,晋宁(四堡)期造山带即是该汇聚事件的产物。但与格林威尔造山带(1300~1100 Ma)相比,晋宁造山带形成时代(~900 Ma)明显滞后。因而,在扬子克拉通上岛弧火山岩及与弧有关的沉积地层的时代不是

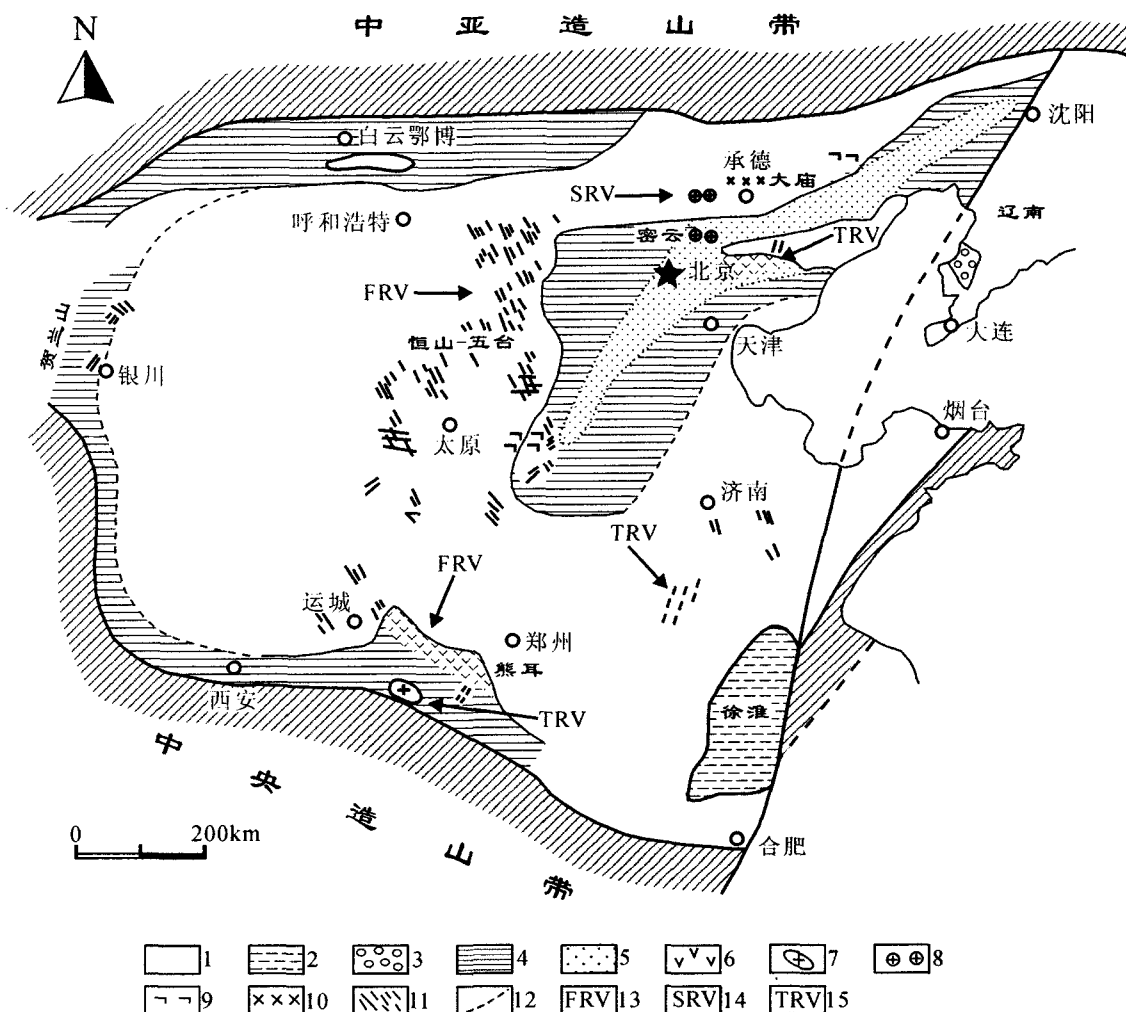


图 1 华北克拉通中元古代沉积盆地及热-构造地质事件

1—显生宇;2—新元古界;3—新元古代永宁群;4—中元古代蓟县系;5—中元古代长城系沉积岩;6—中元古代长城系火山岩;
7—A 型花岗岩;8—环斑花岗岩;9—辉长岩;10—斜长岩;11—岩墙群;12—断层;
13—第一期裂解事件;14—第二期裂解事件;15—第三期裂解事件

Fig.1 Sketch map showing Mesoproterozoic rift basins and thermo-tectonic events in the North China Craton

1—Phanerozoic sediments;2—Neoproterozoic strata;3—Neoproterozoic Yongning Group;4—Middle Proterozoic strata;5—Paleoproterozoic strata;
6—Paleoproterozoic volcanics;7—A-type granite;8—Rapakivi granite;9—Gabbro;10—Anorthosite;11—Dyke;12—Fault;13—First rifting events;
14—Second rifting events;15—Third rifting events

中元古代晚期,而是新元古代早期。

中国南方元古宙下部地层主要发育于扬子克拉通西缘,该区构造格局复杂,出露的变质地层包括哀牢山群、底巴都组和大红山群,均含有基性火山岩。哀牢山群的地球化学特征表明是古元古代大洋板块向古扬子板块俯冲形成的大陆边缘弧,代表了扬子板块西界。底巴都组为弧后盆地形成的基性火山岩,而大红山群为弧后盆地进一步拉张而形成的过渡型板内玄武岩。在哀牢山群的东北部发育的底巴都组与其上覆岩系大红山群,二者均为基性火山岩-沉积

碳酸盐岩建造,其中底巴都组可能代表扬子古陆西部古元古代变质基底,其 U-Pb 年龄约为 1900 Ma,而大红山群 SHRIMP U-Pb 年龄数据则落在长城纪时限范围内。

中国南方相当于固结系或长城系的地层以云南大红山群为代表,由于大红山群遭受高绿片岩相变质,因此,前人一般将该群的时代置于古元古代。但同位素年龄资料表明它的时代应为中元古代早期。胡露琴等^[14]获得大红山群红山组变钠质熔岩锆石 ID-TIMS U-Pb 年龄为 $1655.55 \pm 10.86 / -13.56$ Ma,

表 3 固结纪(长城纪)裂解事件群及同位素年龄
Table 3 Rifting-related lithologies in the North
China Craton and their isotopic ages

与裂解有关的岩浆事件	年龄/Ma	测年方法	资料来源
熊耳群火山岩	1776±20	SHRIMP /U-Pb	[16]
熊耳群火山岩	1778±5.5	LA-ICPMS/U-Pb	[17]
	1778±6.5	SHRIMP/U-Pb	
五台山基性岩墙	1769±2.5	SHRIMP /U-Pb	[18]
丰镇辉绿岩墙	1778±3	SHRIMP /U-Pb	[19]
白云鄂博群富钾火山岩	1728±5	TIMS/U-Pb	[20]
大庙斜长岩	1715±6	TIMS/U-Pb	[21]
	1693±7		
冀北石英正长岩	1697.3±0.9	U-Pb	[22]
密云环斑花岗岩	1715.8±31	TIMS/U-Pb	
	1683±4		
赤城环斑花岗岩	1702±104	TIMS/U-Pb	
赤城富钾花岗岩	1696.7±1.8	TIMS/U-Pb	
蓝营石英正长岩	1697±1	TIMS/U-Pb	[23]
团山子组超钾值火山岩	1683±27	TIMS/U-Pb	
大红峪组超钾质火山岩	1625±6	TIMS/U-Pb	[24]
	1622±23	SHRIMP /U-Pb	[25]
龙王幢 A 型花岗岩	1625±16	SHRIMP/U-Pb	[26]
泰山红门辉绿岩墙	1621.1±8.8	TIMS/ U-Pb 斜锆石	[27]

曼岗河组及红山组的全岩与矿物的 Sm-Nd 等时线年龄为 (1657±82) Ma, 因此将该群归属于中元古界。最近 Greentree et al^[19]报道从大红山群曼岗河组变质凝灰岩中获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (1675±8) Ma, 该年龄值与胡霁琴用单颗粒锆石测得的 U-Pb 年龄在误差范围内一致, 验证了前人资料的准确性。因此, 根据这两个年龄数据, 有理由相信大红山群的地层时代应归属固结系或长城系。

扬子克拉通中元古代同位素年代地层学研究进展当数云南原“昆阳群”。众所周知, 过去由于对因民角砾岩的成因存在分歧意见, 导致对康滇地区中元古界昆阳群地层层序存在不同认识, 使昆阳群层序成为一个长期悬而未决的问题。在地层层序上存在着多种划分方案: 正八组, 倒置八组, 正十二组及倒置十二组等。2009 年 1 月中国地层委员会组织包括云南、四川在内的全国有关专家进行了现场考察和讨论, 建议将原昆阳群解体为上部的昆阳群和下部的东川群。昆阳群标准剖面位于云南省昆明市西南的易门一带, 自下而上分为黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组, 时代暂推定为 (1350±50)~1000 Ma; 东川群的标准剖面位于云南省东川铜矿周边, 包括因民组、落雪组、黑山组和青龙山组, 时代暂定为 1600~(1350±50) Ma。因此, 厘定后的“昆阳

群”可作为南方中元古界上部地层代表, 而东川群则归属蓟县系(表 4)。

限定地层时代的同位素年龄数据主要为:

1) 采自昆阳群上覆地层柳坝塘组石英砂岩中最年轻的一组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (968±15) Ma^[15], 因此, 柳坝塘组最大沉积年龄不会超过该值。同时, 该年龄数据也制约了昆阳群的上限年龄, 昆阳群的地层时代应大于 (968±15) Ma;

2) 昆阳群富良棚组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: (1032±9) Ma^[29]。

3) 被 Greentree et al^[15]命名为老伍山组(相当于昆阳群黑山头组)凝灰岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: (1142±16) Ma。

4) 孙志明等^[30]从云南东川市因民镇黑山大坪子与二风口一带采集的东川群上部黑山组沉凝灰岩中获得的 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 (1503±17) Ma, 表明黑山组形成于中元古代早期。

最近, 李怀坤等(2010, 待刊)从玉溪塔甸昆阳群富良棚组凝灰岩锆石中测得 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄为 (1042.7±6.5) Ma、从东川落雪二风口东川群黑山组火山岩中锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄分别为 (1499.1±6.9) Ma、(1499.9±3.8) Ma, 测试数据与前人成果基本吻合, 支持上述中国地层委员会

表 4 云南中元古界地层序列及同位素年龄
Table 4 Mesoproterozoic stratigraphic sequence and isotopic ages in Yunnan Province

滇中地区				东川地区			综合地层
地层层序		年龄 (Ma)	资料来源	地层层序		年龄 (Ma)	资料来源
上覆地层	柳坝塘群	968±15*	Greentree et al	上覆地层	观音崖组		
昆阳群	美党组				麻地组		美党组
	大龙口组						大龙口组
	富良棚组	1032±9 1043±7	[29] (笔者, 待刊)		小河口组		富良棚组
	黑山头组						黑山头组
	黄草岭组				大营盘组		黄草岭组
	绿汁江组			东川群	青龙山组		青龙山组
	鹅头厂组				黑山组	1503±17 1499±7 1450±4	[30] (笔者, 待刊) 黑山组
	“落雪组”				落雪组		落雪组
	“因民组”				因民组		因民组

注: * 为碎屑锆石年龄。

对原“昆阳群”解体的建议。

3 秦—祁—昆造山系中元古界同位素地质年代学新信息

在秦—祁—昆造山带中保留了前寒武纪不同时期的地层记录,其中北祁连的北大河岩群、中祁连山的湟源岩群、南祁连山的化隆岩群、柴达木的金水口岩群及东秦岭的陡岭岩群和秦岭岩群,其时代均被前人置于古元古代,被认为是造山带中古老变质基底的残留。为验证前人的结论,并获得有关地层时代和副变质岩层蚀源区的地质信息,笔者等^[29]曾对上述 6 个岩群中的副变质岩层进行了碎屑锆石年龄谱研究。资料表明 2000~1400 Ma 的碎屑锆石在全部碎屑锆石中占有较大的比重。从而给出中元古代 1750 Ma 和 1446 Ma 两个高频区段(图 2),表明中元古代早期的锆石为碎屑的主要供给区。

除碎屑锆石的测定外,笔者还对这些地层中的侵入体进行了定年,由于这些地层被新元古代早—中期花岗岩侵入(表 5)^[32],被研究的上述 6 个岩群的时代较好地限定在中元古代晚期至新元古代初期。需要强调的是造山带中地层时代的确定是十分复杂的,尽管这些研究成果只能限定在被研究的样品,而不能否定 6 个岩群中可能存在古元古代的年代信息。但毫无疑问,笔者的资料不支持前人将 6 个岩群的时代全置于古元古代的认识。

4 地质意义讨论

近 10 年来中国中元古代同位素地质年代学的进展对提高中元古代地层和事件地质学的研究水平无疑起到了重要作用,它主要表现在下列几方面:

第一,包括中元古代在内的不同盆地的前寒武纪地层对比方法历来受到地质学家的关注。20 世纪 80 年代初期国际地质对比计划曾设 179 项目专门研究国际晚前寒武纪地层对比方法的有效性,嗣后又设立了有关“叠层石”和“冰碛岩”的专题研究,力图通过“叠层石”和标志层的研究,寻找到不同盆地的前寒武纪地层对比最有效的方法。研究结果表明,这两种方法都有相当的局限性。随着同位素测年技术,特别是 SHRIMP 和 LA-ICPMS U-Pb 测年方法的广泛应用和地层中斑脱岩及碎屑锆石等测年对象的逐步推广,获得了越来越多有价值的同位素年代学资料,不仅为盆地内地层时代的正确厘定,而且为大范围内不同盆地中地层对比提供了科学基础。

笔者曾经根据早年研究成果,认为华北蓟县剖面是从约 1800 Ma 至 800 Ma 连续 1000 Ma 的沉积地层,是中国中元古界长城系(1800~1400 Ma)、蓟县系(1400~1000 Ma)和新元古代青白口系(1000~800 Ma)的标准剖面。然而新的研究成果表明,蓟县剖面从长城系的常州沟组至原青白口系下马岭组等 9 个组约 9000 m 的地层被限定在约 1800 Ma 至 1320

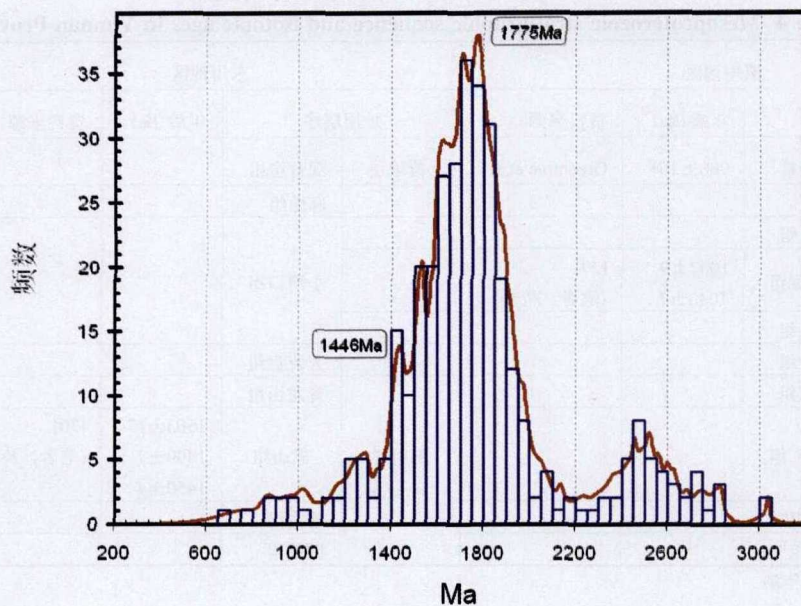


图2 秦-祁-昆造山带“中元古界”5个样品碎屑锆石 U-Pb 年龄频率分布直方图
(资料来源见[31],统计资料未包括时代偏新的陡岭岩群样品)

Fig.2 Frequency plot of detrital zircon SHRIMP U-Pb ages of 5 samples from the Qinling-Qilian-Kunlun Orogenic belt

表5 侵入北大河岩群等地层中侵入体的时代^[31]

Table 5 Ages of plutons that intruded into the Beidahe Complex Group and other studied strata^[31]

被侵入的地层名称	侵入体	同位素年龄/Ma	测试方法	资料来源
北大河岩群	黑云母花岗片麻岩	757±8	SHRIMP	[31]
湟源岩群	花岗闪长片麻岩	917±21	ID-TIMS	[32]
		985±22	LA-ICPMS	笔者(未刊)
化隆岩群	钾长花岗片麻岩	903.6±7.3	SHRIMP	[31]
金水口岩群	二长花岗片麻岩	817±10	LA-ICPMS	[33]
陡岭岩群	霓辉石花岗岩	725±39	ID-TIMS	[34]
秦岭岩群	花岗闪长片麻岩*	937±21	SHRIMP	[31]

注: * 侵入秦岭岩群的多个新元古代花岗岩体已获得多组 U-Pb 同位素年龄数据,此处列举的为河南西峡李家庄岩体,详情可参考文献[33-34]。

(1350?) Ma 的时段内。这一新成果对于重新界定蓟县剖面的地层时限,提高标准剖面的研究水平无疑是至关重要的。

新的研究资料表明,燕辽拗拉槽中迄今保存的从常州沟组至下马岭组至多是从 1800 Ma 至 1320 Ma 期间基本连续的地层序列,而 1320~1000 Ma 期间的中元古代地层在拗拉槽中是缺失的。这一期间的地层可能保留在华北南缘豫陕裂谷盆地中,洛峪

口群可能填补这一时间的地层空缺,但目前尚缺少有价值的同位素年龄资料支持这一推断。就华北克拉通而言,是什么原因造成燕辽拗拉槽中 1320~1000 Ma 期间的地层缺失,即下马岭组沉积后燕辽拗拉槽封闭和抬升的原因,以及华北克拉通上是否存在 1320~1000 Ma 期间的沉积作用和哪套地层能够代表这一时期的标准剖面将是地质工作者所面临的重要课题。

第二,中国地层表中的中元古界,时限从 1800~1000 Ma。在这一段时限的早期,哥伦比亚超大陆逐步破裂,形成众多的裂谷盆地和被动大陆边缘盆地,沉积了厚度较大的包含碎屑岩和碳酸盐岩层及少量火山岩的层序,形成著名的俄罗斯的下—中里非系^[36-37]、印度的下温地亚群^[38-40]、北美的贝尔特超群^[41-42]等中元古代地层。由于中国中元古界地质年代学的进展,以及国际上一些著名的中元古代地层单位所取得的相应进展,使我们有可能对这些发育在不同盆地中的地层进行比较准确的地层对比(表 6),表明迄今为止同位素地质年代学研究是进行前寒武纪“哑地层”对比最有效的方法。

第三,中元古代除地层系统外,热—构造事件的地质记录也反映了中国大陆这一时期地史演化的特点。随着哥伦比亚超大陆的裂解,形成了与裂解有关的一系列热—构造事件群,华北是全球这一时期热—构造事件群最发育的克拉通之一。根据目前积累的资料,该事件群大致可分为三幕:早期基性岩墙群发育于~1.77 Ga,同期还有豫陕裂谷底部西阳河群/熊耳群火山岩的喷发;中期以 AMCS 组合为特色,形成于~1.70 Ga;晚期则以燕辽拗拉槽中平谷至蓟县一带大红峪组超钾质火山岩为代表,同时还有华南北缘龙王庙 A 型花岗岩及泰山红门辉绿岩墙的侵位,它们均形成于~1.62 Ga。在这三幕与裂解有关的热—构造事件群中,已在其他大陆有所发现,它们明确指示了与哥伦比亚超大陆有关的中元古代早期的裂解。例如在瑞芬陆块上发育了四幕裂解事件群^[43]:早期在芬兰东南部和 Estonia 地区 Wiborg 岩基及基性岩墙群的侵入时代从 1.67 Ga 至 1.62 Ga;第二幕为 1.59~1.54 Ga 在芬兰东南部和瑞典中西部发育的巨型 Riga 岩基;第三幕是 1.56~1.53 Ga 俄罗斯卡累利阿的 Salmi 杂岩;瑞典中部环斑花岗岩形成最晚,时代为 1.53~1.47 Ga,与华北克拉通相比,它们形成的时间略显滞后。然而,格陵兰岛南部的奥长环斑花岗岩侵入时代与华北接近,为 1.75~1.72 Ga^[44],是哥伦比亚超大陆裂解过程中较早的奥长环斑花岗岩侵入体。

第四,除上述热事件外,华北大马岭组斑脱岩(凝灰岩)的来源和 1320~1350 Ma 基性岩侵入事件的构造性质也是值得探索的问题。

对于华北大马岭组斑脱岩(凝灰岩)的来源,乔秀夫等^[8]认为在冀西北可能存在过岛弧,燕辽拗拉

槽下马岭组当时处于弧后盆地的位置,其中的凝灰岩来自其北侧的岛弧火山岩。但目前我们尚不能够获得 13 亿年前在华北克拉通冀西北存在岛弧的直接证据。

笔者注意到在下马岭组斑脱岩形成期间,北美劳伦大陆和波罗的大陆存在重要的花岗岩—流纹岩事件(A. Davidson, 2008),在 Davidson^[45]称为中元古代花岗岩—流纹岩地体内获得了 3 组热事件年龄:早期形成于 1380~1370 Ma,主期时代介于 1360~1350 Ma,而晚期岩浆活动时代为 1338 Ma(Texds)和 1330 Ma(New Mexico)。因此,下马岭组斑脱岩形成的时代与北美花岗岩—流纹岩地体内早期—主期岩浆活动大致相当,不排除其火山物质来源于北美或波罗的大陆的可能性。值得注意的是,Pei Junling et al^[46]在蓟县系杨庄组测定的古地磁资料提供了华北克拉通在中元古时期与北美及波罗的大陆古地理位置相近的证据。

1320~1350 Ma 辉绿岩(床)侵入事件可能是华北克拉通北部一次裂解事件的产物。根据全球演化的阶段性特征,古元古代末哥伦比亚超大陆基本形成,进入中元古代早期该超大陆逐步裂解,经过中元古代的长期演化,到中元古代末期又一个超大陆—罗迪尼亚逐步汇聚,至新元古代初最终形成。因此,中元古代是超大陆破裂和演化历史占据主导地位的时期。华北北部辉绿岩侵入时代接近上述北美花岗岩—流纹岩地体晚期岩浆事件的形成时代,略早于北美格林威尔造山带启动前最末一次基性岩墙群,即 1270 Ma 岩墙群形成时代^[47-48]。笔者倾向华北大马岭组及辉绿岩侵入的构造背景是处于伸展构造背景,而不是汇聚板块边缘的挤压背景。因此,下马岭组与上覆长龙山组之间“蔚县运动”的性质不属于“造山运动”,而是主要由于海平面下降引起的“造陆运动”的产物。

由于热—构造事件地质年代的精确标定,使我们有可能探索发生在中国大陆与其他大陆中元古时期热—构造事件的性质、时间的异同,并进而研究不同大陆或不同构造单元的联系与亲疏关系,为探索全球中元古代地质演化提供了年代学制约。有关这方面的认识,笔者将另文详细阐述。

5 结 语

从 2000 年第三届全国地层大会召开以来的 10

表 6 依据同位素年龄不同盆地中元古界对比
Table 6 Correlation of the Mesoproterozoic strata in different basins according to isotopic ages

国际地层表 系	中国华北燕辽		印度中部		美国 (Idaho & W. Montana)		俄罗斯西伯利亚	
	群	组	年龄/Ma	群或超群	组	年龄/Ma	超群	群
窄带系 (1200~1000Ma)	待建							Uy Gp 974±7* 1005±4*
延展系 (1400~1200Ma)	待建	下马岭组	1368±12 1379±12 1380±36 1366±9 1370±11 1320±6*				中里非 (1400~1000)	Kerpyl Gp 1300±5** Aimehan Gp
盖层系 (1600~1400Ma)	刘良系(群)	铁岭组 凉水江组 穿塔山组 烧庄组 高子庄组	1437±21 1601±48 1631±5 ~1700	下温迪业超群	Libby Fm. Bonner Qt. Mt. Shields Fm. Shepard Fm. Snowslip Fm. Wallace Fm. St. Regis Fm. Revett Fm. Burke Fm. Prichard Fm.	~1400 1443±5		
网结系 (1800~1600Ma)	长城系(群)	大红峪组 团山子组 中峪沟组 常州沟组	1625±6 1683±67 1.9~1.8Ga**				下里非 (1650~1400)	Uchur Gp 1717±32**

注：* 为侵入体时代，* 为碎屑岩中最年轻一组碎屑锆石年龄，未标注 * 者为地层中火山岩或凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄。
表中印度资料据 Jyotirajan et al (2002)和 Banerjee et al (2006)资料,Upper Vindhyan 底部含有金伯利岩砾石，据 Anil Kumar et al (2007)资料，金伯利岩形成时代约 1.1Ga，因此将 Upper Vindhyan 的时代置于新元古代，因而在表中列入；俄罗斯资料据 Kovalenko et al (2004)和 Pisarevsky et al (2008)，美国资料据 James(2001)和 Elston et al (2002)。

年时间内,中国中元古代同位素地质年代学研究无疑已取得令世人瞩目的进展,但仍然存在若干亟待解决的问题。其中最重要的有三大问题:一是中元古界上部地层“系”级地层单位的重新建立和标准剖面的确定;二是中国中元古代地质表年的重新厘定,包括底部年代界线及其他各系顶、底年代界线的精确标定;三是中国三大克拉通和造山带中元古代地层划分和精确对比的年代学依据。我们期盼能够取得更多扎实和有价值的同位素年龄资料,支撑中国中元古代地质研究水平的进一步提高。

中国中元古代地层和事件地质学的研究曾长期在老一辈地质学家如已故程裕淇院士、王曰伦院士和王鸿祯院士领导与关怀下开展工作。李廷栋院士也给予了极大的支持,他经常亲临指点、提出具体要求和建议。值此李院士 80 华诞之际,作者撰写此短文,一方面总结中国中元古代同位素地质年代学所取得的进展,另一方面表达笔者对李院士的感激之情,并祝愿他对我国地质工作,特别是对基础地质研究工作发挥更大的作用,做出更突出的贡献。

致谢:成文过程中与王泽九、耿元生、邢裕盛、朱士兴等进行过深入讨论,在此表示诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1] IUGS, International Commission Stratigraphy. International Stratigraphic Chart, 2008, 1.
- [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, 2001:1-59.
Stratigraphy Commission of China. Guide Book and Explanation of China Stratigraphy (Revises) [M]. Beijing:Geological Publishshing House, 2001:1-59 (in Chinese).
- [3] Rogers J J W, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent [J]. Gondwana Research, 2002, 5 (1): 5-22.
- [4] Rogers J J W, Santosh M. Tectonics and surface effects of the supercontinent Columbia [J]. Gondwana Research 15, 2009:373-380.
- [5] Franco Pirajno, Leon Bagasa. A review of Australia's Proterozoic mineral systems and genetic models [J]. Precambrian Research, 2008, 166:54-80.
- [6] 陆松年. 蓟县中-上元古界剖面同位素地质年代学进展 [C]//李清波, 戴金星, 刘如琦, 等主编. 现代地质学研究文集. 南京:南京大学出版社, 1992:122-129.
Lu Songnian. Chronology of Jixian Section of Middle -Upper Proterozoic strata [C]//Li Qinbo, Daijinxing, Liu Ruqi, et al(eds.). Symposium of Research on Modern Geology. Nanjing :Nanjing University Press, 1992 :122-129(in Chinese with English abstract).
- [7] 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.
Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, et al. SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(3):249-255(in Chinese with English abstract).
- [8] 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 2007, 26(5):503-509.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Zhang Chuanheng. New idea of the Meso -and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Dino -Korean Plate [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(5):503-509 (in Chinese with English abstract).
- [9] Su Wenbo, Zhang Shihong, 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.
- [10] Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, et al. Mesoproterozoic age for Xiamaling Formation in North China Plate indicated by zircon SHRIMP dating [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(17):2665-2671.
- [11] 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.
Li Huai Kun, Lu Songnian, Li Huiming, et al. Zircon and beddeleyite U -Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10):1396-1404 (in Chinese with English abstract).
- [12] 苏文博, 李怀坤, Warren D. Huff, et al. 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 (印刷中).
Su Wenbo, Li Huaikun, Warren D. Huff, et al. Zircon SHRIMP U-Pb ages of tuff in the Tieling Formation and their geological significance[J]. Chin. Sci. Bull., 2010(in press).
- [13] Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Yang Zhenyu, 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.
- [14] Hu Aiqin, Zhu Bingqu, Mao Cunxiao, et al. Geochronology of the Dahongshan Group [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1991, 10 (3): 195-203.
- [15] Greentree M R, Li Zhengxiang. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 33: 289-302.
- [16] 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49(22):2342-2349.
Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, et al. SHRIMP ages of volcanics of the Xionger Group [J]. Chin. Sci. Bull. 2004, 49:

- 2342–2349 (in Chinese).
- [17] He Yanhong, Zhao Guochun, Sun Min, 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, 168:213–222.
- [18] 侯贵廷, 李江海, 刘玉琳, 等. 华北克拉通元古代末的伸展事件: 拗拉谷与岩墙群[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(11):1366–1373. Hou Guitin, Li Jianghai, Liu Yulin, et al. Extensive events of the terminal Paleoproterozoic in North China Craton: Aulacogen and Dyke swarms[J]. *Advance of Nature Science*, 2005, 15(11):1366–1373 (in Chinese with English abstract).
- [19] Peng P, Zhai M, Zhang H. Geochronological constraints on the paleoproterozoic evolution of the North China craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes [J]. *Int. Geol. Rev.* 2005:492–508.
- [20] 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. *地质前缘*, 2002, 9(4):225–233. Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, et al. North China continent and Columbia supercontinent[J]. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(4):225–233 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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, 20(3):685–690. Zhao Taiping, Cheng Fukun, Zhai Mingguo. Zircon U-Pb ages of Damiao Anorthosite in Hebei Province and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3):685–690 (in Chinese with English abstract).
- [22] 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[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996:1–182. Yu Jianhua, Fu Huiqin, Zhang Fenglan, et al. Anorogenic Rapakivi Granites and Related Rocks in the Northern of North China Craton [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1996: 1–182 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 长城系团山子组火山岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. *地球化学*, 1995, 24:43–48. Li Huaikun, Li Huimin, Lu Songnian. Grain zircon U-Pb age for volcanic rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and their geological implication [J]. *Geochimica*, 1995, 24: 43–48 (Chinese with English abstract).
- [24] 陆松年, 李惠民. 蔚县长城系大洪峪组火山岩中锆石精确定年[J]. *中国地质科学院院报*, 1991, 22:137–145. Lu Songnian, Li Huimin. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of the Dahongyu Formation, Changcheng System in Jinxian [J]. *Bull. Chin. Acad. Geol. Sci.* 1991, 22:137–145 (Chinese with English abstract).
- [25] Lu Songnian, Zhao Guochun, Wang Huichu, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160:77–93.
- [26] 陆松年, 李怀坤, 李惠民, 等. 华北克拉通南缘龙王庙碱性花岗岩 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2003, 22 (12):762–768. Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin, et al. U-Pb isotopic ages and their significance of alkaline granite in the southern margin of the North China craton [J]. *Geol. Bull. Chin.*, 2003, 22: 762–768 (in Chinese with English abstract).
- [27] 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. Lu Songnian, Chen Zhihong, Xiang Zhenqun. Geochronology framework of Early Precambrian intrusive rocks in Taishan Globe Geopark [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008:1–90 (in Chinese).
- [28] 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 [J]. *科学通报*, 2003, 48(18):1970–1975. Wan Yusheng, Zhang Qiaoda, Song Tianrui. Detrital zircon SHRIMP ages of the Chenggou Formation, Changcheng System in the Ming Tombs, Beijing: Material source of covering strata in the North China Craton and control on the oldest sedimentary time[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, 48(18):1970–1975 (in Chinese).
- [29] 张传恒, 高林志, 武振杰. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据 [J]. *科学通报*, 2007, 52 (7):818–824. Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie. Zircon SHRIMP U-Pb ages of tuff in the Kunyang Group in Central Yunnan Province: orogenic evidence for Grenville period in South China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, 52 (7):818–824 (in Chinese).
- [30] 孙志明, 尹福光, 关俊雷, 等. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质学意义 [J]. *地质通报*, 2009, 28(7):896–900. Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, et al. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(7):896–900 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9):2195–2208. Lu Songnian, Li Huaikun, Wang Huichu, et al. Detrital zircon population of Proterozoic meta-sedimentary strata in the Qinling-Qilian-Kunlun Orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(9): 2195–2208 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. 中央造山带(中—西部)前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 2009:1–203. Lu Songnian, Yu Haifeng, Li Huaikun, et al. Precambrian Geology in the Central China Orogen (western part) (M). Beijing: Geological Publishing House, 2009:1–203 (in Chinese).
- [33] 郭进京, 赵凤清, 李怀坤. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(1):26–31. Guo Jinjing, Zhao Fengqing, Li Huaikun. New chronological evidence of the age of Huangyuan Group in the eastern segment of Mid-Qilian massif and its geological significance [J]. *Regional*

- Geology of China, 2000, 19 (1):26–31 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):303–310.
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Xiang Zhenqun, et al. U–Pb Ages of Detrital Zircons from the Para–metamorphic Rocks of the Qinling Group and their geological significance [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6):303–310 (in Chinese with English abstract).
- [35] 卢欣祥. 秦岭造山带花岗岩与构造演化[C]//河南地质矿产与环境文集. 北京: 中国环境科学出版社, 1996:19–23.
- Lu Xinxiang. Granitoids and Tectonic Evolution of Qinling Orogenic Belt [C]//Henan Geology Minieral Resources and Environment. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 19–23 (in Chinese).
- [36] Kovalenko V I, Yarmolyuka V V, Kovach V P, et al. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23:605–627.
- [37] Pisarevsky S A, Natapov L M, Donskaya T V, et al. Proterozoic Siberia: A promontory of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2008, 160:66–76.
- [38] Jyotiranjan S. Ray, Mark W. Martin, Ja'n Veizer, et al. U–Pb zircon dating and Sr isotope systematics of the Vindhyan Supergroup, India [J]. Geological Society of America, 2002, 30(2): 131–134.
- [39] Banerjee S, Dutta S, Paikaray S, et al. Stratigraphy, sedimentology and bulk organic geochemistry of black shales from the Proterozoic Vindhyan Supergroup (central India) [J]. J. Earth Syst. Sci., 2006, 115(1): 37–47.
- [40] Anil Kumar, Larry M. Heaman, C. Manikyamba. Mesoproterozoic kimberlites in south India: A possible link to ~1.1 Ga global magmatism[J]. Precambrian Research, 2007, 154:192–204.
- [41] James J. Luepke, Timothy W. Lyons. Pre–Rodinian (Mesoproterozoic) supercontinental rifting along the western margin of Laurentia: geochemical evidence from the Belt–Purcell Supergroup[J]. Precambrian Research, 2001, 111:79–90.
- [42] Elston D P, Enkin R J, Baker J D, et al. Tightening the Belt: Paleomagnetic–stratigraphic constraints on deposition, correlation, and deformation of the Middle Proterozoic (ca. 1.4 Ga) Belt–Purcell Supergroup, United States and Canada [J]. Geological Society of America, 2002, 114(5):619–638.
- [43] Bogdanova S V, Bingen B, Gorbatshev R, et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2008, 160:23–45.
- [44] Niels Henriksen. Geological History of Greenland—Four Billion Years of Earth Evolution [M]. Geological Survey of Denmark and Greenland, 2005:1–272.
- [45] Davidson A. Late Paleoproterozoic to mid–Neoproterozoic history of northern Laurentia: An overview of central Rodinia [J]. Precambrian Research, 2008, 160:5–22.
- [46] Pei Junling, Yang Zhenyu, Zhao Yue. A Mesoproterozoic paleomagnetic pole from the Yangzhuang Formation, North China and its tectonics implications [J]. Precambrian Research, 2006, 151: 1–13.
- [47] 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.
- [48] Robin A. Mackie, James S. Scoates, Dominique Weis. Age and Nd–Hf isotopic constraints on the origin of marginal rocks from the Muskox layered intrusion (Nunavut, Canada) and implications for the evolution of the 1.27 Ga Mackenzie large igneous province [J]. Precambrian Research, 2009, 172:46–66.

Advances in the study of Mesoproterozoic geochronology in China: a review

LU Song–nian, LI Huai–kun, XIANG Zhen–qun

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The major advances in the study of Mesoproterozoic isotopic geochronology in the aspects of stratigraphy and thermo–tectonic events as well as their geological significance since the 3rd Stratigraphic Congress of China held in 2000 are described in this paper. It is pointed out that the establishment of a type stratigraphic section of the upper Mesoproterozoic and the revision of the Mesoproterozoic time scale of China are the main new key problems at present.

Key words: Mesoproterozoic; time stratigraphy; ages of thermo–tectonic events; advance and existent problem

About the first author: LU Song–nian, male, born in 1940, senior researcher, mainly engages in the study of Precambrian geology; E–mail: 156923044@qq.com.