

doi: 10.13745/j.esf.2014.02.009

中国前寒武纪地层年代学研究的进展和相关问题

耿元生¹, 陆松年^{2,3}

1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037
2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170
3. 山东科技大学, 山东 青岛 266590

GENG Yuansheng¹, LU Songnian^{2,3}

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

GENG Yuansheng, LU Songnian. Advances in the study of Precambrian chronostratigraphy in China: A review. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 102-118

Abstract: The major advances in the study of Precambrian chronostratigraphy since the 3rd Stratigraphic Congress of China held in 2000 are described in this paper. The major advances in six aspects are listed below: (1) Abundant zircon SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb data obtained in recent years indicate that BIFs and related strata in the North China Craton mainly formed during the late Archean (2.55-2.50 Ga). (2) Some geological bodies and strata (Kangding complex, Sichuan; Erguna group, in Xing'an area) traditionally regarded as of the early Precambrian have demonstrated that these complex and strata were mainly formed during the Neoproterozoic time. (3) A lot of zircon U-Pb ages confirmed that khondalite series in the north margin of the North China Craton mainly formed in the late Paleoproterozoic. (4) The base age of the Changcheng group should be younger than 1670 Ma, probably close to 1650 Ma. (5) The geochronological framework of the Mesoproterozoic strata has been revised by new isotopic ages. (6) Abundant new zircon ages demonstrate that the strata (Banxi group etc.) in South China block traditionally regarded as the Mesoproterozoic were formed during the Neoproterozoic time. As the research progressed, a number of new problems arose. These problems include that (1) whether there was an age gap between 2.45-2.30 Ga? and that (2) where is the bottom strata of the Changcheng system? and that (3) the further perfection of the Qingbaikou system.

Key words: Precambrian; chronostratigraphy; Changcheng group; BIF; khondalites; Neoproterozoic

摘要:总结了我国近十年在前寒武纪年代地层研究方面的主要进展,包括:(1)近年获得的大量锆石 SHRIMP 和 LA-ICPMS U-Pb 年龄,华北克拉通早前寒武纪 BIF 和相关地层主要形成于新太古代;(2)新的同位素年龄表明,一些以往认为是早前寒武纪的地层或地质体(康定岩群、额尔古纳岩群)的主体是新元古代的地质体;(3)大量的锆石原位定年数据表明,华北克拉通北缘的孔兹岩系主要形成于古元古代晚期;(4)长城群的底界年龄应小于 1670 Ma,很可能在 1650 Ma 左右;(5)根据新的同位素年龄对中元古代的年代地层格架进行了重新划分;(6)大量新的同位素年龄数据揭示华南地区以往认为是中元古代的地层(板溪群等)实际应是新元古代的。随着研究深入也提出了需要研究的新问题,这些问题包括:(1)2.5~2.3 Ga 是否存在缺少地质记录的寂静期?(2)长城系下部的地层何在?(3)中元古代上部系级年代地层单位的建立;(4)青白口系岩石地层单位的完善。

关键词:前寒武纪;年代地层;长城群;BIF;孔兹岩系;新元古代

中图分类号:P534.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2014)02-0102-17

收稿日期:2013-11-12;修回日期:2013-12-01

基金项目:中国地质调查局工作项目(1212010811048)

作者简介:耿元生(1950—),男,研究员,主要从事前寒武纪地质和变质地质学研究。E-mail:ys-geng@cags.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2014,21(2)

2000年全国第三届地层会议后的十余年来我国前寒武纪地层研究取得了重要的进展。由于前寒武纪地层中很少含有化石,因此我国大面积分布的前寒武纪地层多为哑地层,其时代主要根据同位素年龄进行确定,随着科技的进步,十余年来锆石原位定年技术的发展(锆石 SHRIMP U-Pb、锆石 LA-ICPMS U-Pb 以及锆石 SIMS U-Pb)使得我们可以更精确地确定锆石的形成年龄和变质年龄,从而更精确地确定前寒武纪地层的形成时代。正是技术的发展使我国的前寒武纪年代地层研究取得了长足的进步,取得了许多重要进展,本文仅就其中在全国或大区域性地层对比方面具有重要意义的进展做一简单介绍,可能有所遗失,敬请谅解。

前寒武纪是指从地球形成(4.5 Ga)到寒武纪之前(0.541 Ga)的一段漫长历史,这一阶段是大陆地壳的主要形成时期,是认识地球发生、发展、演化的重要阶段。根据地质发展演化的特征,前寒武纪可以划分为冥古宙(4.5~3.8 Ga)、太古宙(3.8~2.5 Ga)、元古宙(包括古元古代(2.5~1.8 Ga)、中元古代(1.8~1.0 Ga)和新元古代(1.0~0.541 Ga))。随着原位定年技术的发展,我国前寒武纪地层研究不论是在太古宙还是元古宙都取得了长足进展。

1 早前寒武纪的一些地层时代得到了重新厘定

早前寒武纪是指太古宙到古元古代一个漫长的地史时期。我国早前寒武纪地质体主要分布在华北克拉通,在塔里木克拉通也有一定的分布,在华南只有零星的出露。以往根据 K-Ar 法、全岩 Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法初步建立了早前寒武纪的地层序列和地质演化序列。但是随着锆石原位定年技术的发展,许多早前寒武纪的地层时代发生了重要的变化,这种变化对于认识地壳的形成和演化具有重要的意义,对于建立早前寒武纪的地层序列具有现实意义。

1.1 太古宙含铁建造的地层时代得到了重新厘定

在华北克拉通的前寒武纪基底中存在大量的条带状含铁建造,是我国最重要的铁矿来源。这些条带状含铁建造(BIF)及其相伴的地层广泛分布于华北克拉通的各个地区,主要包括辽北、鞍山、辽西、冀东、固阳、五台山、吕梁、登封、霍邱、鲁西、胶东等地,以鞍山—本溪地区和冀东地区分布的 BIF 规模最大。由于变质程度的不同、受到后期改造程度的不

同、以往全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 定年方法的误差等因素,对其形成时代始终存在不同认识^[1-11]。BIF 本身是一种硅铁的化学沉积,因此很难对 BIF 本身进行测年,但是采用锆石原位定年技术可以对其围岩或夹层的火山岩进行测定,从而限定 BIF 含铁建造及相伴地层的时代。

冀东地区是我国 BIF 发育的地区之一,以往曾划分为古太古代的 BIF(曹庄岩组)、中太古代的 BIF(迁西岩群)、新太古代的 BIF(遵化岩群、滦县岩群)。以往曾根据曹庄岩组中斜长角闪岩 3.5 Ga 左右的全岩 Sm-Nd 等时线年龄^[7,12-13]以及铬云母石英岩中碎屑锆石均大于 3.5 Ga^[14-15]等年龄数据将曹庄岩组划归古太古代^[16-18]。近年通过锆石原位定年技术获得曹庄麻粒岩(样品号 J06/10)的形成年龄为(2 548±7) Ma,变质年龄为(2 506±6) Ma;该区 BIF 围岩变粒岩(样品号 J00/33)的原岩形成年龄为(2 534±8) Ma^[19];该区大量的花岗质片麻岩以及橄榄辉长岩及二长花岗岩脉也都形成于太古宙晚期^[19-20]。该区确实存在少量的中太古代的片麻岩,但它们都以包体形式存在于新太古代的花岗质片麻岩之中^[19]。根据以上数据我们初步认为以往划分的曹庄岩组主体及其中的 BIF 主要形成于新太古代晚期,是否还存在少量的古—中太古代的表壳岩还需进一步深入研究。

迁西岩群主要分布在冀东的水厂—松汀、太平寨、姜子山等地的含 BIF 的变质沉积岩系,以往根据羊崖山顺层侵入到含铁建造的岩席状花岗岩 2 960 Ma 的常规法锆石 U-Pb 年龄、2 980 Ma 的颗粒锆石蒸发法年龄^[21]以及水厂大桥附近紫苏花岗岩中黑云变粒岩包体 3 047 Ma^[22]的年龄将迁西岩群划归到中太古代^[17]。但近年在水厂铁矿夹层的斜长角闪片麻岩中采用锆石 SIMS U-Pb 方法获得的年龄为(2 547±7) Ma^[23],在官店子矿区的马兰庄铁矿与 BIF 互层的花岗质片麻岩获得了(2 484±7) Ma 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄结果^[24],多数锆石具有核边结构,有较明显的铅丢失,一些在具有振荡结构核部的点年龄为 2 623~2 530 Ma,因此我们认为马兰庄铁矿也形成于新太古代晚期。迁西岩群王寺峪条带状铁矿的围岩黑云斜长片麻岩(原岩为英安质火山岩)的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为(2 516±9) Ma^[25]。目前,该区不论是 3.0 Ga 的数据还是 2.5 Ga 左右的数据都还比较少,难以确证迁西岩群及其中 BIF 的形成时代,根据区域铁矿特

征, 我们暂时将其置于新太古代。

冀东地区原划分的新太古代的遵化岩群及其中的 BIF 进一步得到确认, 其形成于新太古代晚期。如赋存在遵化岩群中的石人沟铁矿的围岩角闪斜长片麻岩的形成年龄为 $(2\ 541 \pm 21)$ Ma, 变质时代为 $(2\ 512 \pm 13)$ Ma, 该矿区斜长角闪岩的形成年龄为 $(2\ 553 \pm 31)$ Ma, 变质时代为 $(2\ 510 \pm 21)$ Ma^[26]。而冀东东部的原划归古元古代或太古宙的双山子群和朱杖子群^[6,8,27], 近年通过锆石原位定年在朱杖子岩群(青龙河岩群)的火山岩中获得了 $(2\ 516 \pm 8)$ Ma 和 $(2\ 511 \pm 12)$ Ma 的年龄结果^[28-29]。以上资料表明, 以往在冀东地区划分的不同时代的含 BIF 的变质地层从目前的资料看都是在新太古代晚期形成的。

此外, 山东济宁地区的铁矿层和相关的地质层(济宁岩群)多被埋藏于地下, 地表很少出露, 对其认识多根据地球物理和钻孔的资料, 以往根据 K-Ar 年龄和 Rb-Sr 等时线年龄认为济宁群和其中的 BIF 形成于古元古代^[30]。但是近年的研究在济宁岩群变质长英质火山岩中获得了 $(2\ 561 \pm 24)$ Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果, 在含砾绿泥绢云千枚岩中可靠的最年轻的碎屑锆石年龄为 $(2\ 609 \pm 13)$ Ma, 因此济宁岩群及其中的铁建造形成于 $2.6 \sim 2.5$ Ga^[31-32]。

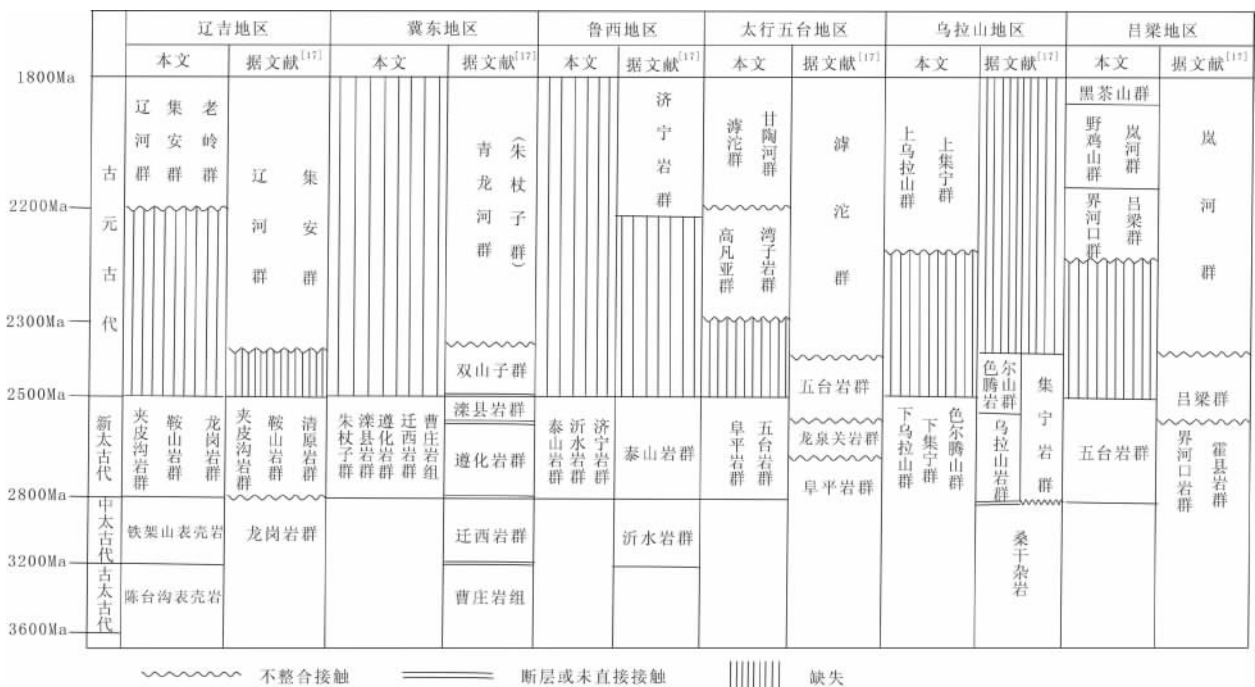
内蒙古固阳地区出露许多条带状铁建造, 包括公益明、三合明、汗海子、东五分子、苏计沟、耳居图

等矿床, 它们属于绿岩带型铁矿, 都产于色尔腾山岩群。关于这套含铁建造的形成时代一直存在争议, 有的研究者认为其形成于太古宙^[33], 有的研究者认为其形成于古元古代^[34], 但是都缺少可靠的同位素年龄数据。最近在该绿岩带的玄武岩中获得 $(2\ 516 \pm 10)$ Ma 的锆石 LA-ICPMS 的年龄^[35]、 $(2\ 562 \pm 14)$ Ma 的锆石 Cameca U-Pb 年龄^[36]; 在绿岩带安山岩中获得 $(2\ 510 \pm 7)$ Ma 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^[37], 在英安岩中获得 $(2\ 515 \pm 10)$ Ma 的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄^[35], 在高镁安山岩中获得 $(2\ 533 \pm 5)$ Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^[37]。这些数据表明色尔腾山绿岩带中的火山岩主要形成于新太古代的晚期。

华北克拉通条带状铁建造及相关地质年代的调整综合于表 1。通过对照可以看出以下变化: 一些原来认为是中太古代含铁建造的地层现在资料表明是新元古代的; 原来认为是古元古代含铁建造及其相关地层现在的资料表明它们亦属于新太古代; 在多数地区古元古代的地层与新太古代的地层之间常有较大的缺失。这些太古宙及古元古代地层时代的调整具有以下意义。(1)对于认识华北克拉通铁矿的形成时代和形成环境具有重要的意义。以往认为华北克拉通的 BIF 是多阶段成矿, 并基于这一认识讨论铁矿的形成环境。现在的研究表明, 华北克拉通的 BIF

表 1 华北克拉通主要地区早前寒武纪地层对比表

Table 1 Stratigraphic division and correlation of the Early Precambrian strata in the North China Craton



<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2014, 21(2)

主要形成于新太古代晚期, 该阶段大规模的成矿必然有其特定的原因和环境, 因此为研究新太古代大规模的成矿作用提供了更加广阔的研究内容。(2) 对认识新太古代晚期大规模的地壳增生作用具有重要意义。目前的研究表明新太古代晚期是华北克拉通地壳形成的重要阶段, 其形成方式和增生规模, 都是需要进一步深入探讨的问题。(3) 对于认识 2.5~2.3 Ga 地球演化具有较重要的意义。从表中可以看出, 原来新太古代与古元古代的事件是连续的, 表现在地层是连续的。但是目前的研究表明在华北克拉通, 多数地区 2.5~2.3 Ga 期间的地层缺失, 这与国际地层表中将 2.5~2.3 Ga 定义为成铁纪(Siderian)存在很大矛盾。因此华北克拉通含铁建造的形成时代和形成背景等还需要与世界典型克拉通进行对比研究。

1.2 以往一些划归早前寒武纪地层的时代和内涵都进行了重大调整

以往根据当时的测试手段和条件, 把一些变质地层都划归早前寒武纪, 如在扬子克拉通西缘分布的变质岩系, 称为康定群, 认为形成于太古宙—古元古代^[38-41]。但是近年的大量的研究表明, 原来划分的康定群或康定杂岩主要由新元古代的变形花岗岩类组成^[42-48]。康定杂岩中除大量的新元古代的火成杂岩之外, 还存在部分变质的火山—沉积岩系。它们或者以具有一定规模的独立地质体存在, 或者以规模不等的残留体、包裹体存在于深成片麻杂岩之中。目前的年代学表明, 它们并不是形成于古元古代, 而是主要形成于新元古代^[48-49]。将在康定杂岩中新获得的同位素年龄资料综合于图 1, 可以清楚地看出, 原来划分的太古宙—古元古代的康定杂岩不论是岩浆杂岩还是变质地层都形成于新元古代。

除扬子克拉通西缘原来划分为太古宙—古元古代的变质岩系在内涵和形成时代有了重要变化之外, 大兴安岭北部额尔古纳地块变质基底形成时代也发生了重大的变化。以往认为额尔古纳地块主要组成部分兴华渡口群主要形成于太古宙—古元古代^[52-54]。但是近些年的深入研究和锆石原位定年表明, 兴华渡口群其中一部分是新元古代的岩浆岩, 如(843±6) Ma 的片麻岩、(795±13) Ma 的碱性长石花岗岩、(792±5) Ma 的花岗闪长岩、(927±13) Ma 的碱性长石花岗岩、(817±6) Ma 的二长花岗岩^[55]等。兴华渡口群中夕线石榴片麻岩中碎屑锆石的年龄主要在 600~850 Ma, 其中的变质锆石年龄约为 500 Ma^[56]。有的研究者在兴华渡口群的火山

岩中获得了(506±10)~(547±46) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 并认为该套岩石代表了寒武纪或新元古代活动大陆边缘的火山—沉积岩系^[57]。最近报道, 在十七站地区兴华渡口群的条带状片麻岩和眼球状片麻岩中分别获得了(1 741±30) Ma 的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄和(1 837±5) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^[58]。综合以上数据, 可以认为原来划分的太古宙—古元古代的兴华渡口群尽管有一些古元古代的地质体, 但是范围有限。其主要由新元古代的岩浆杂岩和新元古代的表壳岩组成。

2 华北克拉通北缘孔兹岩系的形成时代确认属于古元古代

在华北克拉通的北缘分布一套含石榴子石、夕线石的富铝片麻岩, 称为孔兹岩系^[59]。所谓的孔兹岩系, 是指一套含石榴石英岩、石榴夕线片(麻)岩、石墨片岩和大理岩组成的富铝变质岩系^[60], 相应的原岩为一套砂岩、砂质页岩和碳酸盐组成的沉积岩。孔兹岩一词不是单一的岩石名称而是集合性的岩石学术语。在华北克拉通北部广泛出露这套变质泥质碎屑沉积岩系, 按地层划归为太古宙的上集宁群或乌拉山岩群^[61-63], 并认为孔兹岩系不整合在高级变质地体之上^[64]。另一些学者则认为, 高级片麻岩和麻粒岩表壳岩是被改造的太古宙陆壳、洋壳和弧体, 孔兹岩是被带入造山带根部的古元古代沉积岩系, 孔兹岩系和高级片麻岩是由于构造叠置而产生在一起的^[65-68]。由于孔兹岩是一套高级变质的泥砂质沉积岩, 对其定年存在很大的技术上的困难, 所以这种构造上的分析缺少同位素年龄的证据。吴昌华等^[69]利用 LA-ICPMS 技术首先对乌拉山—集宁地区的孔兹岩系中的碎屑锆石进行了原位定年, 乌拉山地区三个孔兹岩样品中最大的碎屑锆石年龄分别为 2 275 Ma、2 215 Ma 和 2 251 Ma, 这 3 个样品的变质年龄分别为 1 801 Ma、1 814 Ma 和 1 821 Ma, 黄土窑地区一个夕线石榴片麻岩样品中一颗具岩浆环带的碎屑锆石的年龄为 2 288 Ma, 该样品中变质锆石的年龄为 1 894 Ma。作者根据这些数据认为, 华北克拉通北部的孔兹岩系形成于 2.2~2.0 Ga, 属于古元古代。之后, 众多地质学家对华北克拉通北缘的孔兹岩系进行了锆石原位定年(表 2), 所得结果均认为华北克拉通北缘的孔兹岩系形成于古元古代, 而不是太古宙。

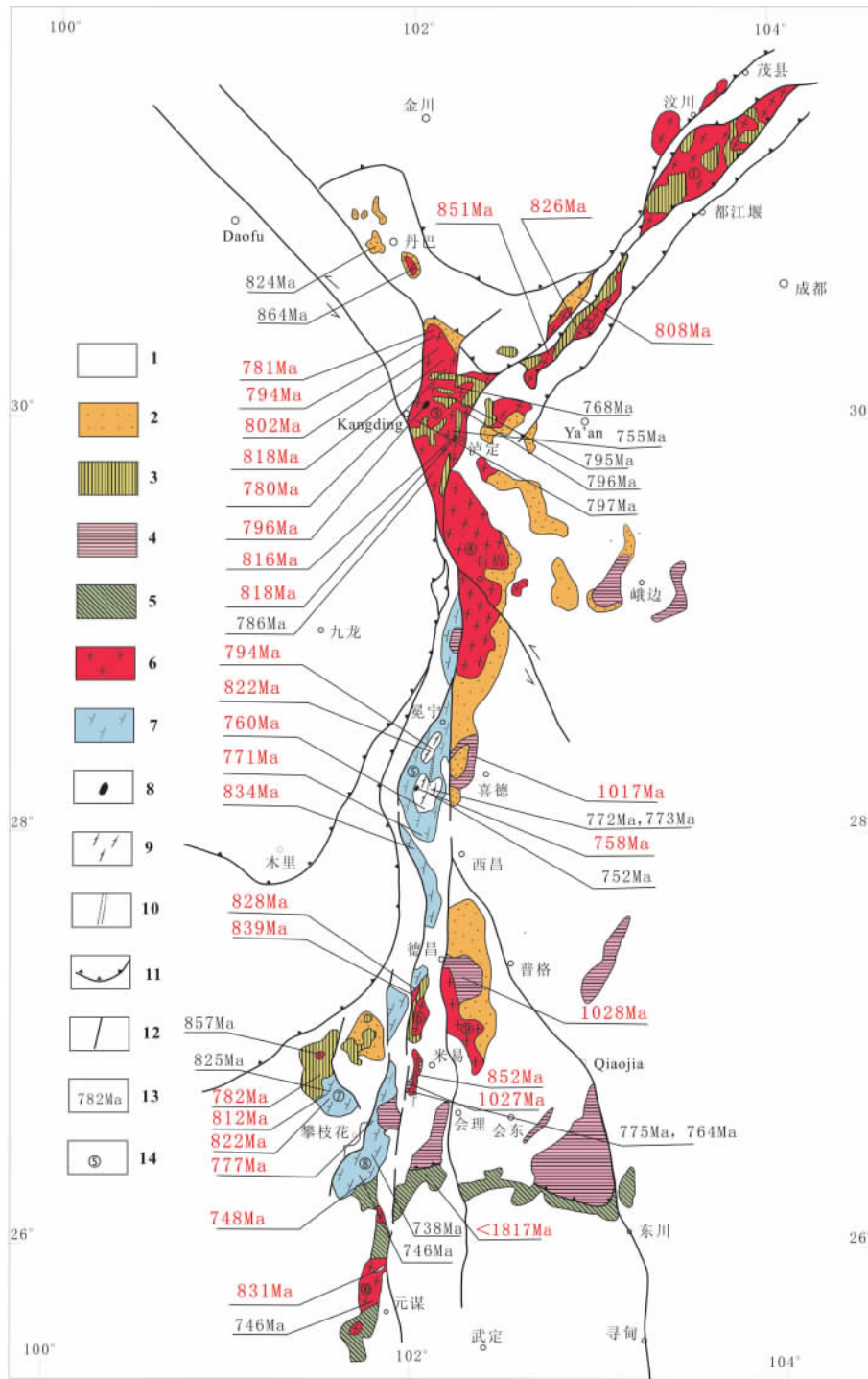


图 1 扬子地块西缘基底岩系分布及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig. 1 Distribution of lithological complex in the western basement of Yangtze terrane and obtained zircon U-Pb age by SHRIMP dating method

1—震旦系以后地质体; 2—震旦系; 3—新元古代地层; 4—中元古代晚期地层; 5—中元古代早期地层; 6—新元古代花岗岩; 7—新元古代中-基性侵入体; 8—超基性岩; 9—片麻状二辉石岩; 10—韧性剪切带; 11—逆冲断层; 12—断层; 13—锆石 SHRIMP U-Pb 年龄; 14—岩浆杂岩体编号: ①—彭灌岩浆杂岩, ②—宝兴岩浆杂岩, ③—下索子—康定岩浆杂岩, ④—石棉岩浆杂岩, ⑤—冕宁岩浆杂岩, ⑥—磨盘山—米易岩浆杂岩, ⑦—同德岩浆杂岩, ⑧—大田岩浆杂岩, ⑨—摩攀岩浆杂岩, ⑩—龙川江岩浆杂岩。图中红色年龄引自文献[48], 黑色表示的年龄引自文献[44-46, 50-51]。

表 2 华北克拉通北部孔兹岩系锆石原位定年数据

Table 2 Zircon site dating data of khondalites in northern margin of North China Craton

样品号	采样位置或 GPS 点位	岩性	测年方法	碎屑锆石 年龄/Ma	变质锆石 年龄/Ma	资料来源
WL007	内蒙古包头哈德门沟石墨矿区	石榴长石石英岩	LA-ICPMS	2 275±53	1 801±42	吴昌华等 ^[69]
WL011	包白铁路桃儿湾站南	夕线石榴片麻岩	LA-ICPMS	2 215±110	1 814±36	吴昌华等 ^[69]
WL020	包银公路忽鸡沟东 4 km	含石榴泥质片麻岩	LA-ICPMS	2 251±43	1 821±36	吴昌华等 ^[69]
G084	内蒙古兴和黄土窑	夕线石榴片麻岩	LA-ICPMS	2 288±50	1 894±59	吴昌华等 ^[69]
01M020	河北怀安(N:40°22' 41.4"; E:114°28'10.4")	夕线石榴斜长片麻岩	LA-ICPMS	1 902±16	1 811±23	Xia 等 ^[70]
01M038	内蒙古兴和(N:40°34' 24.9"; E:113°57'46.3")	夕线石榴斜长片麻岩	LA-ICPMS	2 031~1 882	1 857±73	Xia 等 ^[70]
01M041	内蒙古集宁(N:40°43' 36.6"; E:113°17'34.6")	夕线石榴片麻岩	LA-ICPMS	2 196±57		Xia 等 ^[70]
01M053	内蒙古卓资(N:40°55' 46.5"; E:112°21'55.7")	堇青石榴夕线片麻岩	LA-ICPMS	1 945±71		Xia 等 ^[71]
WL007	内蒙古包头(N:40°45' 19.6"; E:109°37'31.7")	含石榴片麻岩	LA-ICPMS	2 562~2 299		Xia 等 ^[71]
WL011	内蒙古包头(N:40°47' 56.5"; E:109°48'08.5")	夕线石榴黑云片麻岩	LA-ICPMS	2 097~1 858		Xia 等 ^[71]
WL016	内蒙古固阳(N:40°45' 59.4"; E:110°05'03.6")	变质石英岩	LA-ICPMS	2 095~1 930		Xia 等 ^[71]
WL020	内蒙古固阳(N:40°51' 10.4"; E:110°06'12.8")	含石榴泥质片麻岩	LA-ICPMS	2 502~1 954		Xia 等 ^[71]
SDT0104	山西大同北赵家窑	含石墨夕线黑云片麻岩	SHRIMP	2 019±25	1 873±6	Wan 等 ^[72]
JS0102	内蒙古兴和下白窑	夕线石榴片麻岩	SHRIMP	约 2 300	1 861±19	Wan 等 ^[72]
HD01TW1	内蒙古贺兰山(N:39°23'20"; E:105°30'49")	石榴云母二长片麻岩	SHRIMP	2 871~1 978		董春艳等 ^[73]
NM0606	内蒙古包头(N:40°44'08"; E:109°38'06")	黑云二长片麻岩	SHRIMP	2 582~2 200	1 853±10	董春艳等 ^[74]
85-2	内蒙古乌海(N:39°51'35.0"; E:106°56'36.7")	石榴夕线黑云斜长片麻岩	LA-ICPMS	2 035~1 999	1 920±17	Yin 等 ^[75]
87-1	内蒙古乌海(N:39°58'07.4"; E:106°59'03.6")	石榴夕线堇青片麻岩	LA-ICPMS	2 082~2 021	1 950±13	Yin 等 ^[75]
91-3	内蒙古乌海(N:39°51'36.9"; E:106°58'21.8")	石榴长石石英片麻岩	LA-ICPMS	2 035±22	1 954±22	Yin 等 ^[75]
93-6	内蒙古乌海(N:39°42'52.8"; E:106°59'08.4")	石榴夕线黑云片麻岩	LA-ICPMS	2 253~2 028	1 941±24	Yin 等 ^[71]
95-9	内蒙古乌海(N:39°39'43.6"; E:107°00'09.4")	石榴长石石英岩	LA-ICPMS	2 028±18	1 955±21	Yin 等 ^[75]
86-1	内蒙古乌海(N:39°52'35.4"; E:106°56'11.3")	石榴夕线浅色泥质岩	LA-ICPMS	2 275~2 010	1 953±14	Yin 等 ^[75]
NM0413	内蒙古乌拉山(N:40°48'32"; E:110°15'27")	石榴黑云片麻岩	SHRIMP	2 513±19		Wan 等 ^[76]
NM0405	内蒙古乌拉山(N:40°45'37"; E:110°19'02")	石榴黑云片麻岩	SHRIMP	2 060±15	1 856±17	Wan 等 ^[76]
NM0414	内蒙古石拐(N:40°37'19"; E:109°35'02")	长石石英岩	SHRIMP	2 480~1 999		Wan 等 ^[76]
NM0619	内蒙古乌拉山(N:40°51'55"; E:110°04'38")	石英岩	SHRIMP	2 506~2 250	1 872±8	董春艳等 ^[77]
NM0617-1	内蒙古乌拉山(N:40°51'53"; E:110°17'03")	石榴黑云片麻岩	SHRIMP	2 211~2 043	1 882±11	董春艳等 ^[77]
NM0621-1	内蒙古乌拉山(N:40°47'01"; E:110°04'48")	夕线石榴黑云片麻岩	SHRIMP	2 557~2 206	1 958±10	董春艳等 ^[77]
NM0604	内蒙古乌拉山(N:40°45'24"; E:109°37'35")	含石墨长石石英岩	SHRIMP	2 514~2 096	1 838±4	董春艳等 ^[77]
NM0916	内蒙古乌拉山(N:40°48'16"; E:110°12'25")	石榴黑云片麻岩	SHRIMP	2 494~2 462	1 875±15	董春艳等 ^[77]
NM0933	内蒙古乌拉山(N:40°48'27"; E:110°38'52")	变长石砂岩	SHRIMP	2 475~2 399	1 834±11	董春艳等 ^[77]
P40b14-1	内蒙古乌拉山(N:41°04'13"; E:112°35'26")	黑云二长片麻岩	LA-ICPMS	2 452~2 091	1 852±15	徐仲元等 ^[78]

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2014, 21(2)

从表 2 可以看出, 华北克拉通北缘孔兹岩系的碎屑锆石中只有少量的锆石来源于太古宙的蚀源区, 大部分锆石则来自古元古代的蚀源区, 其中最年轻的碎屑锆石在 2.0 Ga 左右, 这些新的资料表明, 孔兹岩系沉积应该在古元古代的晚期。另外这套孔兹岩系经历了 1.95~1.80 Ga 变质事件的改造, 根据碎屑锆石和变质锆石的年龄资料, 可以初步认为华北克拉通北缘的孔兹岩系形成于 2.0~1.90 Ga 这样一个很短的时间范围之内。

华北克拉通北缘孔兹岩系时代的重大改变具有以下几方面的意义: (1) 改变了变质程度愈深变质岩系形成时代愈老的传统认识。华北克拉通北缘的变质岩系经历了较高级的变质改造, 达到高角闪岩相-麻粒岩相, 甚至出现了超高温变质^[79-80]。以往根据变质程度深, 认为它们形成时代较早, 划归到太古宙。但是新的年代学资料显示即使变质程度很深, 它们的形成时代并不一定很老。(2) 改变了一套深变质地层形成的时代几乎是完全同时的认识。从碎屑锆石可以看出, 不同地区、不同层位的碎屑锆石年龄峰值并不完全一致, 有的地区和层位的碎屑锆石的年龄峰值并不相同, 有的以古元古代早期的碎屑锆石为主, 有的以 2.0 Ga 左右的碎屑锆石为主。这种差异除了说明不同地区、不同层位碎屑锆石的蚀源区有差异之外, 还可能与沉积的时代不完全一致有关, 因此它们形成于一个时间段而不是一个时间点^[68]。(3) 孔兹岩系时代的改变带动了对华北克拉通形成过程、构造模式的重新认识。以往根据孔兹岩系以富铝片麻岩为主, 认为它们是稳定大陆边缘沉积的产物^[81]。而孔兹岩系形成时代到了古元古代的中晚期, 并且它们集中分布在华北克拉通的北缘或围绕鄂尔多斯分布, 因此一些研究者提出了华北克拉通形成的新模式, 不论吴昌华等^[69]提出的华北陆台是吕梁运动碰撞拼合大陆的构造模型, 还是 Santosh 等^[82]提出的河北北部造山带, 还是赵国春等^[83]认为的孔兹岩带是拼合鄂尔多斯陆块和阴山陆块的古元古代造山带, 非常重要的依据就是对孔兹岩系的形成时代进行了重新厘定。

3 中元古代的地层年代进行了重新划分

以蓟县剖面为标志的中—新元古代地层自下而上划分为长城系、蓟县系和青白口系, 相应的岩石地

层为长城群(常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组、高于庄组)、蓟县群(包括杨庄组、雾迷山组、洪水庄组、铁岭组)和青白口群(下马岭组、长龙山组、景儿峪组), 一直认为它们是华北克拉通结晶基底之上第一套稳定的盖层型沉积, 其中的长城系和蓟县系时限分别为 1.8~1.4 Ga 和 1.4~1.0 Ga。蓟县剖面作为我国前寒武纪的经典剖面已成为我国年代地层表的标准剖面和重要的年代地层单位^[84-85]。但是近年的研究不论是长城群的底界年龄还是中元古代内部划分都发生了重大改变。

3.1 长城群底界年龄的重大变化

长城群作为华北克拉通形成后第一套盖层型沉积始终受到人们的关注^[86-89]。早期曾根据串岭沟组(长城群下部的第二个组)页岩 1 922 Ma 的全岩 Pb 同位素年龄^[90-91]及下伏相关区域太古宇片麻岩等地质体的地质年代资料, 推测常州沟组底界, 即长城群的底界年龄为 1 950 Ma 左右。此后采用当时的技术手段对长城群底界及下伏地层进行了大量的同位素年代学研究, 获得了一批年龄数据。如在长城群底部的常州沟组页岩中获得了(1 848±39) Ma 的全岩 Pb-Pb 等时线年龄, 在蓟县长城群中下部的串岭沟组的黑色页岩中获得了(1 757+109/-117) Ma 的全岩 Pb-Pb 等时线年龄, 在河北井陘被长城群不整合覆盖的东焦群的含磷层位中获得(1 802±68) Ma 的磷灰石 Pb-Pb 等时线年龄, 在河北井陘被长城群不整合覆盖的甘陶河群安山岩中获得了(1 868±175) Ma 的全岩 Rb-Sr 等时线年龄^[92]。根据这些数据, 全国地层委员会经过多次讨论, 中国地层表采用 1 800 Ma 作为长城群/长城系的底界年龄, 并作为古元古代与中元古代的界线年龄^[85]。1 800 Ma 与目前国际上的固结系的底界年龄一致, 但是与国际地层表中古元古代与中元古代的界线年龄 1 600 Ma^[93]有较大的差距。

近年的研究表明以往认为与长城系对应的长城群的底界并不是 1 800 Ma。2011 年几名学者分别发表了有价值的同位素年龄数据, 如和政军在北京密云地区发现在密云环斑花岗岩(脉)上存在古风化壳, 并被长城群常州沟组砂岩所覆盖。风化壳物质主要来自环斑花岗岩的原地风化残留物和粗碎屑岩屑组成, 采用锆石 SHRIMP 和 LA-ICPMS U-Pb 定年技术分别获得环斑花岗岩古风化壳碎屑岩中的碎屑锆石年龄分别为(1 682±20) Ma 和(1 708±6) Ma, 因此判断长城群底界年龄应小于 1 862 Ma^[94-95]。同

时李怀坤等在北京密云地区发现一条花岗斑岩岩脉, 该岩脉侵入到新太古代密云岩群的角闪斜长片麻岩当中, 其顶部则与片麻岩一起被长城群底部常州沟组含砾砂岩沉积不整合覆盖。采用 LA-ICPMS 方法获得 $(1\ 673 \pm 10)$ Ma 的岩脉侵位年龄。从而认为常州沟组底界 (即长城群的底界) 年龄小于 1 670 Ma, 很可能接近 1 650 Ma^[96]。此后, 全国地层委员会组织有关专家对上述两个点进行了实地考察, 专家们认为地质关系基本清晰, 两个不同地点、采用不同的技术方法获得的年龄结果基本一致, 可以相互印证, 数据是可靠的。全国地层委员会前寒武纪分委员会经过讨论建议, 作为年代地层的长城系仍保留, 其时限仍为 1.8~1.6 Ga; 而燕辽地区岩石地层单位长城群 (建议另命名) 底界年龄则为 1 650 Ma。新编纂的中国地层年表基本采用了这一方案。至于长城系和长城群重名的问题, 以及长城系下部所缺失的地层的寻找和岩石地层单位的建立等问题留待今后研究。

长城群底界年龄的修正对于我国的区域地层划分和对比具有重要的意义。首先便于与国际古、中元古代划分的对比。长期以来我国以 1 800 Ma 长城群/系的底界作为古元古代与中元古代划分的界线, 但是这种划分与国际以 1 600 Ma 作为古、中元古代的界线年龄有较大的差距。目前以 1 650 Ma 作为长城群的底界, 与国际的划分更加接近, 更便于与国际地层进行对比。其次, 对于全国中元古代底部地层的对比具有重要的影响, 以往各地的中元古代下部的地层都与长城群进行对比, 由于长城群底界年龄的修订, 与其对比地层的底界年龄都需要进一步研究, 为我们的进一步研究提供方向。另外长城群底界年龄的修订为研究华北克拉通古元古代晚期的演化提供了更广的空间。近些年在华北克拉通结晶基底中获得了一批 1 800 Ma 左右的变质年龄和岩浆侵位年龄^[97-103], 由于这些年龄与长城群的底界年龄一致, 所以在地质事件的演化和构造环境解释上容易产生矛盾。由于长城群底界年龄的调整, 为研究华北克拉通结晶基底在古元古代晚期的演化提供了更大的空间。

3.2 中元古代地层的划分发生了重大调整

近些年对中元古代的研究, 除了长城群底界的时代进行了重大修正之外, 对整个中元古代的划分都提出了新的方案。长期以来我国一直以天津蓟县剖面作为中—新元古代的标准剖面, 自下而

上分为长城系 (1 800~1 400 Ma)、蓟县系 (1 400~1 000 Ma) 和青白口系 (1 000~800 Ma), 并作为正式的年代地层单位^[84-85]。其中的长城系和蓟县系属于中元古代。但是近年的研究表明, 原来与长城系对应的长城群底部的年龄在 1 650 Ma 左右, 而与蓟县系对应的蓟县群的年龄不超过 1.4 Ga, 下马岭组的形成时间为 1.38~1.36 Ga, 这样中元古代的地层划分发生了重要的变化。这种变化主要表现在以下几个方面:

(1) 通过沉积间断和年代学的研究将原划归长城群的高于庄组划归到蓟县群。以往长城群自下而上划分为常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组和高于庄组, 蓟县群自下而上划分为杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组, 青白口群自下而上划分为下马岭组、长龙山组和景儿峪组。近年根据详细的野外关系研究发现并确认在这套地层中存在 5~6 个沉积间断和不整合界面, 其中高于庄组与下伏地层既有连续沉积, 又存在平行不整合接触, 一些地区还出现高于庄组超覆在下伏不同地层之上的现象, 据此将高于庄组划归到蓟县群^[104]。此外, 常州沟组、串岭沟组和团山子组的年龄均大于 1.6 Ga, 而高于庄组的年龄小于 1.6 Ga, 因此从年代上高于庄组也与下伏的 3 个组存在差异。因此目前的研究多将高于庄组划归蓟县群。

(2) 将长城系/群的顶界年龄调整为 1 600 Ma。团山子组中的火山岩曾经获得过 $(1\ 683 \pm 67)$ Ma 的颗粒锆石化学法的年龄结果^[105], 串岭沟组辉绿岩床获得了 $(1\ 638 \pm 14)$ Ma 的年龄^[106], 长城系上部大红峪组火山岩曾获得 $(1\ 625 \pm 6)$ Ma 的锆石 TIMS 年龄^[107], 后采用锆石 SHRIMP U-Pb 方法分别获得了 $(1\ 622 \pm 23)$ Ma 和 $(1\ 626 \pm 9)$ Ma 的年龄结果^[108-109], 这些数据都表明长城群的形成年代不会小于 1.6 Ga。因此将长城群的形成时限限定在 1.65~1.60 Ga。

(3) 将蓟县系/群的形成时限从 1.4~1.0 Ga 调整为 1.6~1.4 Ga。高于庄组调整到蓟县群之后, 蓟县群由 5 个组组成。下部的高于庄组第三段凝灰岩中获得了 $(1\ 559 \pm 12)$ Ma (SHRIMP) 和 $(1\ 560 \pm 5)$ Ma (LA-MC-ICPMS) 的年龄结果^[110], 蓟县群上部铁岭组钾质斑脱岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(1\ 437 \pm 21)$ Ma^[111]。侵入到蓟县群雾迷山组中的辉绿岩岩床年龄为 $(1\ 345 \pm 12)$ Ma 和 $(1\ 353 \pm 14)$ Ma^[112], 表明蓟县群必然形成于 1.35 Ga 之前。

这些数据可以将蓟县系/群的形成时代限定为 1.60~1.40 Ga。

(4) 将原划归新元古代青白口系/群中的下马岭组调整为中元古代。近年来一批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, 其中高林志等^[113] 首先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(1368±12) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据。嗣后, 在不同地点的下马岭组凝灰岩中先后获得(1379±12) Ma、(1380±36) Ma^[114]、(1366±9) Ma、(1370±11) Ma^[115] 的年龄数据, 侵入下马岭组的辉绿岩斜锆石 U-Pb 年龄为(1320±6) Ma^[116] 等, 因而, 下马岭组地层的时限大致可限制在 1400~1320(1350) Ma^[117]。

根据以上新的资料, 全国地层委员会前寒武纪分委员会提出了新的中元古代的划分方案。作为年代地层单位的长城系时限为 1800~1600 Ma, 但是作为岩石地层单位的长城群底界则为 1650 Ma 左右, 其中只包含常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪四个组。岩石地层单位的底界与年代地层的底界不一致, 今后需要进一步工作, 寻找 1650~1800 Ma 的岩石地层单位进行补充。把蓟县系的年代范围调整为 1600~1400 Ma, 相应的岩石地层单位蓟县群包括 5 个组(表 3)。由于 1400~1000 Ma 目前确

定的地层单元只有 1400~1360 Ma 的下马岭组, 大部分缺失, 所以提出 1400~1000 Ma 作为待建系, 需要今后深入工作寻找合适的地层单元。中元古代地层时代的调整具有以下几方面的意义: (1) 俄罗斯里菲系底界的年龄与燕辽地区长城群底界年龄更接近于一致, 有利于国际对比; (2) 打破了从长城群到青白口群近于连续沉积(只有平行不整合, 没有大的沉积间断)的传统认识, 目前在下马岭组与新元古代青白口系之间存在将近 3 亿 a 的沉积间断; (3) 在中元古代上部建立的待建系为寻找中元古代晚期的沉积记录开拓了广阔的空间。

4 我国南方新元古代的地层划分发生了重大变化

在华南的江南带(江南古陆)中分布大量的新元古代早—中期地质体, 除一些花岗岩类的侵入体之外, 主要由一套巨厚的火山沉积岩系组成。这套火山沉积岩系往往具有双层结构, 其中下构造层在不同省分别称为四堡群(广西)、梵净山群(贵州)、冷家溪群(湖南)、溪口群(安徽)、双溪坞群(浙江)、平水群(浙江), 上构造层在不同省分别称为丹州群(广西)、下江群(贵州)、板溪群(湖南)、历口群(安徽)、河上镇群(浙江)。在以往的文献中, 通常把下构造

表 3 中元古代年代地层划分对比表

Table 3 Stratigraphic division and correlation of Mesoproterozoic strata in the North China Craton

国际地层表 ^[118]		中国地层表 ^[85]		新中国地层表调整方案		
中元古界	窄带系	中元系	铁岭组	待建系	下马岭组	
	延展系		洪水庄组		铁岭组	1320Ma ^[116]
			雾迷山组		洪水庄组	1366~1368Ma ^[113, 115]
	盖层系	杨庄组	雾迷山组	380Ma ^[114, 111]	440Ma ^[116]	
高于庄组		古长城系	高于庄组	1560Ma ^[110]		
固结系	大红峪组		大红峪组	625 ^[107]		
	团山子组		团山子组	1622Ma ^[108]		
	串岭沟组	串岭沟组	1683Ma ^[105]			
常州沟组	常州沟组	常州沟组	1670Ma ^[96]			
			?	1682Ma ^[94]		
				1708Ma ^[94]		

层作为中元古代的地层^[119-125],但是近年大量的锆石原位(包括 SHRIMP 和 LA-ICPMS)U-Pb 数据表明这些岩群形成于新元古代早期。上构造层不整合于下构造层之上,造成两者不整合关系的构造事件称为武陵运动。其中湖南临湘陆城可以清楚地看出上构造层的板溪群不整合在产状陡立的冷家溪群之上,该处冷家溪群凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(822±10) Ma,上覆的板溪群凝灰岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(803±8) Ma^[126],表明武陵运动发生在 820~803 Ma。下构造层以发育高角度的紧闭直立(倒转)褶皱、尖棱褶皱为特点,上构造层则以发育宽缓的褶皱为特点。上构造层(丹州群、下江群、板溪群等)的底部常发育砾岩,其中的砾石有

石英岩(脉石英)、千枚岩、板岩、花岗岩等。江南带中不同地区新元古代早—中期的地层对比关系和主要同位素年龄数据如表 4 所示。

需要说明的是,表 4 主要反映了近年来在华南中新元古代研究中取得的年代学研究进展,但是其中还存在一些不同认识。例如该区的板溪群及相当地层是置于青白口系还是置于南华系就存在不同认识^[155-158],有的研究者提出以板溪群为代表的这套地层应单独建立“扬子系”^[159]或板溪系^[160]。由于对板溪群的归属不同,因此对南华系的底界年龄也存在很大分歧,有的研究者提出南华系的底界年龄应在 740 Ma 左右^[160],有的则认为南华系的底界年龄应在 820 Ma 左右^[158],我们根据地层委员会的建议目

表 4 华南地区新元古代地层对比表

Table 4 Stratigraphic division and correlation of Neoproterozoic strata in the South China

	桂北 North Guangxi	黔东南 Northeast Guizhou	湖南地区 Hunan	赣西北 Northwest Jiangxi	皖南 South Anhui	赣东北 Northeast Jiangxi	浙西南 Southwest Zhejiang		
Paleozoic	Cambrian	Cambrian	Cambrian	Cambrian	Cambrian	Cambrian	Cambrian		
Neoproterozoic E.	Sinian P.	Laopu F.	Liuchapo F.	Liuchapo F.	Dengying F.	Piyuancun F.	dengying F.	541Ma	
		Doushantuo F.	Doushantuo F.	Jinjiadong F.	Doushantuo F.	Lantian F.	Xifengsi F.	Doushantuo F.	635Ma
	Nanhua P.	Nantuo F. Fulu F.	Nantuo F. Datangpo F. Tiesiao F.	Nantuo F. Datangpo F. Dongshanfeng F.	Nantuo F.	Leigongwu F.	Nantuo F.	Leigongwu F. Yang'an F. Xiayabu F.	
		Chang'an F.	Liangjijie F.	Xieshuihe F.	Dongmen F.	Xiuning F.	Xiuning F.	Zhitang F.	
	Qingbaikou P.	Danzhou Group	Xiajiang Group	Banxi Group	Xiushui Group	Likou Group	Heshangzhen G.	Likou G.	780Ma (760Ma)
		Sibao Group	Fanjingshan G.	Lengjiaxi Group	Shuangqishan G.	Xikou Group	Shuangxiwu G.	Shangxi G.	820Ma
		765±14 ⁽⁶⁾	780±9 ⁽¹⁷⁾ 782±8 ⁽¹⁶⁾ 785±8 ⁽¹⁵⁾ 814±6 ⁽¹⁴⁾	780±28 ⁽²⁶⁾ 803±8 ⁽²⁵⁾ 809±8 ⁽²⁴⁾ 814±12 ⁽²³⁾		777±9 ⁽⁴⁵⁾ 783±8 ⁽⁴⁴⁾ 773±7 ⁽⁴³⁾ 779±7 ⁽⁴²⁾ 820±16 ⁽⁴¹⁾	767±5 ⁽⁵⁷⁾		
		823±4 ⁽⁵⁾ 824±13 ⁽⁴⁾ 827±6 ⁽³⁾ 836±3 ⁽²⁾ 842±6 ⁽¹⁾	821±4 ⁽¹³⁾ 823±2 ⁽¹²⁾ 838±2 ⁽¹¹⁾ 814±6 ⁽¹⁰⁾ 827±24 ⁽⁹⁾ 831±6 ⁽⁸⁾ 840±10 ⁽⁷⁾	806±5 ⁽²²⁾ 816±5 ⁽²¹⁾ 822±10 ⁽²⁰⁾ 828±10 ⁽¹⁹⁾ 855±5 ⁽¹⁸⁾	801±4 ⁽³³⁾ 818±10 ⁽³²⁾ 819±9 ⁽³¹⁾ 829±5 ⁽³⁰⁾ 831±5 ⁽²⁹⁾ 878±4 ⁽²⁸⁾ 879±5 ⁽²⁷⁾	823±8 ⁽⁴⁰⁾ 825±7 ⁽³⁹⁾ 826±6 ⁽³⁸⁾ 827±7 ⁽³⁷⁾ 837±14 ⁽³⁶⁾ 827±9 ⁽³⁵⁾ 848±12 ⁽³⁴⁾	818±6 ⁽⁵⁶⁾ 844±3 ⁽⁵⁵⁾ 902±5 ⁽⁵⁴⁾ 905±14 ⁽⁵³⁾ 916±6 ⁽⁵¹⁾ 913±5 ⁽⁵²⁾ 932±7 ⁽⁵⁰⁾ 891±21 ⁽⁴⁸⁾ 926±15 ⁽⁴⁷⁾ 968±23 ⁽⁴⁶⁾		
									1000Ma

注:表中同位素年龄数据单位为 Ma。表中年龄资料来源:(1)—四堡群凝灰岩^[127];(2)—寨滚花岗岩^[128];(3)—摩天岭花岗岩^[127];(4)—洞马花岗岩^[128];(5)一本洞花岗岩^[128];(6)—丹州群三门街组凝灰岩^[129];(7)—梵净山群凝灰岩^[127];(8)—梵净山群茴香坪组玄武岩^[130];(9)—梵净山群茴香坪组玄武岩^[130];(10)—梵净山群肖家河组玄武岩^[130];(11)—侵入梵净山群被下江群覆盖的白云母花岗岩^[131];(12)—被下江群不整合覆盖的刚边花岗岩^[132];(13)—侵入梵净山群辉长岩^[133];(14)—下江群红子溪组凝灰岩^[134];(15)~(17)—鹤家坳组凝灰岩^[135];(18)—湘东北仓西岩群凝灰岩^[136];(19)—冷家溪群云均里组二长片岩^[137];(20)—临湘冷家溪群斑脱岩^[126];(21)—湘东北张邦源花岗岩^[138];(22)—湖南步城叶溪江花岗闪长岩^[137];(23)—板溪群沧水铺组英安质集块岩^[139];(24)—古丈板溪群五强溪组凝灰岩^[140];(25)—临湘板溪群张家湾组斑脱岩^[126];(26)—侵入板溪群被南华系所覆盖的粗玄武岩^[129];(27)—双桥山群横涌组流纹质凝灰岩^[141];(28)—双桥山群横涌组石英角闪岩^[141];(29)—双桥山群横涌组凝灰岩^[142];(30)—双桥山群安乐林组凝灰岩^[142];(31)—侵入双桥山群九岭含盖青石花岗闪长岩^[143];(32)—九岭含盖青石花岗闪长岩^[144];(33)—侵入双桥山群辉长岩^[141];(34)—皖南蛇绿岩中的辉长岩^[145];(35)—皖南蛇绿岩中易剥橄榄岩^[145];(36)—歙县岩体^[146];(37)—许村岩体^[147];(38)—休宁岩体^[146];(39)—休宁岩体^[147];(40)—许村岩体^[143];(41)—井潭组火山凝灰岩^[148];(42),(43)—井潭组英安岩^[148];(44),(45)—石耳山花岗岩^[146,149];(46)—西湾硬玉蓝闪石化斜长岩^[150];(47)—双溪坞群北坞组流纹岩^[151];(48)—双溪坞群张村组流纹岩^[151];(49)—上溪群牛屋组英安岩^[106];(50)—侵入双溪坞群高镁闪长岩^[152];(51)—侵入双溪坞群玄武岩^[152];(52)—侵入双溪坞群桃红花岗岩^[153];(53)—侵入双溪坞群西表花岗岩^[153];(54)—侵入双溪坞群斜长花岗岩^[152];(55)—角闪辉石岩^[154];(56)—石英闪长岩^[154];(57)—河上镇群凝灰岩^[142]。

前置于 780 Ma。再如我们根据在湖南、广西、江西等地的考察,基本同意在板溪群及相当地层与下伏的冷家溪群及相当地层之间存在不整合关系,但不同地区在时间上可能有一定差异,但目前还缺少确切的年龄数据,因此大致放到了 820 Ma 左右。有的研究者认为板溪群及相当地层是裂解盆地沉积的楔状地层,其底界是不等时的,最早的沉积时限在 820 Ma 左右^[158]。因此表 4 中的界线是示意性的,详细的划分还需进一步工作。近些年在该区研究的最大进展是根据锆石的原位定年将原来认为是中元古代的地层(如四堡群、梵净山群、冷家溪群、双桥山群、双溪坞群等)的形成时代调整为新元古代。这种调整具有以下几方面的意义:(1)华南地区中一新元古代的地层格架发生了重大变化,以往认为的中元古代地层都形成于新元古代;(2)对于认识晋宁运动的时限具有重要意义,以往根据该区下构造层形成于中元古代而下构造层形成于新元古代,因此将晋宁运动的时限定义在 1.0 Ga 左右,目前地层时代的调整必然使我们重新考虑晋宁运动的时限;(3)对于认识江南构造带(江南造山带、江南古陆)的性质和形成演化方式产生重要的影响,以往根据晋宁运动大体相当于 1.0 Ga 的格林威尔造山运动,对它的性质和演化方式可以与格林威尔运动相对比,现在晋宁运动的时限明显与格林威尔运动的时限不同,需要对其构造带的性质和形成方式进行更深入的研究。

5 需要进一步研究的问题

近些年在前寒武纪地层学研究中取得了长足的进步,但是也提出了一些新的问题需要深入研究。

5.1 2.5(2.45)~2.3 Ga 的地质事件和地层记录何在

国际地层表将 2.5~2.3 Ga 一段的地质时期称为成铁纪,但是华北克拉通的含铁建造主要形成于新太古代,而在华北早前寒武纪地层表中(表 1)绝大多数地区这一段地层是缺失的。一些研究者通过全球地质事件的研究提出,新太古代末的全球克拉通化之后,地球的演化历史上出现了长达 0.15~0.2 Ga 的静寂期,没有火山活动,没有构造活动,因此将这一地质历史时期称为静寂期(inactive period)^[161-163]。尽管有的研究者根据碎屑锆石的研究提出原来五台岩群的上亚群—高凡群形成于新太古

代五台花岗-绿岩带之后,为华北克拉通古元古代(2.14~2.47 Ga)最古老的地层之一,可能是这段地质历史的地层记录^[164],但是由于只有碎屑锆石的定年,还缺少更可靠的年龄依据。有的研究者根据鲁西地区原柳杭组上部混合花岗岩(2.469±0.034) Ma 的年龄结果,认为属于古元古代早期,似乎可以填补全球地质演化的静寂期地质事件^[165]。但这只是一个混合花岗岩的年龄结果,还缺少完整的地层记录和地质事件记录。这一地质历史时期究竟是成铁的重要时期还是缺少地质记录的静寂期?华北克拉通这一地质历史时期的地质和地层记录有哪些表现?到何处去寻找这一地质历史时期的地质记录?这些问题都需要我们去研究,去探索,去发现。

5.2 长城群的底界和归属

最新的研究表明长城群的底界不超过 1.68 Ga,很可能在 1.65 Ga 左右(见本文 3.1)。全国地层委员会前寒武纪分委员会认真研究了上述进展,提出作为年代地层的长城系的时限为 1.8~1.6 Ga,与国际上的固结系(Statherian)相对应。考虑到我国长期的使用情况,仍把长城系作为中元古代最下部的一个系级年代地层单位。但是作为岩石地层单位的长城群底界则暂时置于 1.65 Ga,其顶界年龄为 1.60 Ga。这只是根据新的研究进展提出的一个暂时处理办法,其中还有一些问题需要研究。比如年代地层单位长城系和岩石地层单位长城群仍有重名的情况,与国际地层指南的要求不符。再如我们把长城系对应于国际的固结系,但是国际的固结系是古元古代最晚的一个系级年代地层单位,而我们的长城系则作为中元古代最下部的年代地层单位,两者仍存在矛盾。另外岩石地层单位的长城群目前底界年龄在 1.65 Ga 左右,也就是说 1.8~1.65 Ga 的岩石地层单位还缺失,需要寻找合适的地层剖面进行补充。这些问题都需要进一步深入研究。

5.3 待建系需要进一步补充完善

根据下马岭组凝灰岩中所获得的原位锆石年龄 1.380~1.370 Ma 的研究成果,全国地层委员会提出在下马岭组与新元古代青白口系之间暂时按待建系处理。同时启动了中元古代晚期待建系的预研究项目。通过项目组对待选剖面的筛分和工作,在湖北神农架地区初步建立了中元古代晚期神农架群的岩石序列,将神农架群分为下神农架群(自下而上包括鹰窝洞组、大岩坪组、乱石沟组、大窝坑组和矿石山组)和上神农架亚群(自下而上包括台子组、野马河

组、温水河组、石槽河组、送子园组、瓦岗溪组和郑家垭组)。在神农架上亚群最上部的郑家垭组火山岩中获得了(1 103±8) Ma 的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄结果^[166], 在侵入到石槽河组的辉绿辉长岩中获得了(1 083±5) Ma 的锆石 U-Pb 年龄和(1 115±9) Ma 的斜锆石 U-Pb 年龄, 上亚群野马河组的凝灰岩中获得了(1 216±2) Ma 的锆石 U-Pb 年龄, 在下神农架群的大坪组砂屑硅质白云岩中最年轻一组的碎屑锆石的峰值为(1 398±20) Ma^[167]。但是神农架下亚群目前还没有获得可靠的年龄资料。另外王剑等^[168]最近在马槽园群的凝灰岩中获得了(1 157±19) Ma 的年龄结果, 据此认为马槽园群与神农架群之间并不存在不整合接触关系。可见, 神农架地区的马槽园群和神农架群为我们研究和建立中元古代上部的地层剖面提供了很好的条件, 但是距离待建系的要求还相差很远, 还需进行深入的岩石地层、年代地层、层序地层等的综合研究。同时也需要扩展视野, 在其他地区寻找中元古代中晚期较连续的地层剖面进行深入研究。

5.4 青白口系的进一步完善

我国的青白口系的命名地点在北京西山雁翅一带的青白口, 标准剖面位于天津蓟县北骆驼岭到老鹳顶一带, 以往自下而上划分为下马岭组、骆驼岭组和景儿峪组, 时代限定为 1.0~0.8 Ga^[157]。新的中国地层表将青白口系的时限调整为 1.0~0.78 Ga, 并将下马岭组调整到中元古代。这样调整以后我国北方的青白口系只包含两个组, 其底界年龄并没有准确的同位素年龄控制, 顶界年龄调整到 0.78 Ga 之后, 在北方的景儿峪组是否还有相应的地层也需要进一步确定。尽管在华南的双溪坞群下部平水组的角斑岩中获得了(904±3) Ma 和(906±10) Ma 的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄结果^[169], 但是平水组与双溪坞群的其他几个岩组并没有直接接触, 很难建立起完整的地层层序。此外, 在华南青白口系(1.0~0.78 Ga)通常包括了年龄大于 0.83 Ga、强烈褶皱的下构造层(包括广西的四堡群、贵州的梵净山群、湖南的冷家溪群、江西的双桥山群、安徽的溪口群和浙江的双溪坞群等)和年龄通常小于 0.83 Ga、褶皱轻微的上构造层(包括广西的丹州群、贵州的下江群、湖南的板溪群、江西的修水群、安徽的历口群和浙江的河上镇群等), 两者之间有较明显的不整合接触关系^[126], 因此有的研究者已经提出在青白口系之上建立板溪系^[159]。在青白口系中包括两套不连

续的地层沉积与系的定义并不一致, 因此青白口系是否还需要进一步划分也需要进一步研究。

6 结语

自第三届全国地层大会以来的 13 年间, 我国前寒武纪地层研究工作在全国地层委员会积极推动下, 通过众多地学部门和地质工作者的努力, 已取得令国内、外地学界瞩目的进展, 本文只是集中在年代地层学方面做了简略回顾与小结, 与 13 年来所取得的整个前寒武纪地层学研究进展相比, 只是冰山一角。此外, 我们还看到在取得众多进展的同时, 有一些长期遗留的地层学问题尚未解决, 且又出现了一些新的难题, 需要我们不断努力, 不断前进。

本文撰写过程中, 得到沈其韩院士、王泽九研究员的指导与帮助, 在此深表谢意。文中涉及众多参考资料, 虽已列入百余篇, 但仍难免遗漏, 敬请读者谅解。

参考文献

- [1] 王松山, 胡世玲, 翟明国. 应用⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年技术研究清原花岗岩-绿岩地体的形成时代[J]. 岩石学报, 1987, 4: 55-62.
- [2] 沈保丰, 骆辉, 李双保. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-201.
- [3] 沈保丰, 翟安民, 杨春亮, 等. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化规律[J]. 地质调查与研究, 2005, 28: 196-206.
- [4] 沈其韩. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征及形成的地质背景[G]//程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1998: 1-30.
- [5] 孙大中. 冀东早前寒武纪地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984: 1-273.
- [6] 钱祥麟, 崔文元, 王时麒, 等. 冀东前寒武纪铁矿地质[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1985: 1-273.
- [7] Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei province, China: Field occurrence, Petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. Precambrian Research, 1987, 34: 311-346.
- [8] 白瑾. 中国太古宇与元古宇的界限何在[C]//《第三届全国地层会议论文集》编委会. 第三届全国地层会议论文集. 北京: 地质出版社, 2000: 6-9.
- [9] 李树勋, 冀树楷, 马志红, 等. 五台山区变质沉积铁矿地质[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986: 1-299.
- [10] 白瑾. 五台山早前寒武纪地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1986: 1-435.
- [11] 元润章. 霍邱群 BIF 成因讨论[J]. 中国地质科学院南京地质

- 矿产研究所刊, 1987, 8: 1-20.
- [12] Huang X, Bai Z, DePaolo D J. Sm-Nd isotope study of early Archean rocks, Qian'an, Hebei Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 625-631.
- [13] 乔广生, 王凯怡, 郭起凤, 等. 冀东早太古岩石 Sm-Nd 同位素年龄测定[J]. *地质科学*, 1987(1): 86-92.
- [14] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 1992, 20: 339-342.
- [15] 吴福元, 杨进辉, 柳小明, 等. 冀东 3.8 Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代[J]. *科学通报*, 2005, 50(18): 1996-2003.
- [16] 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-115.
- [17] 沈其韩, 耿元生, 刘国惠, 等. 中国地层典: 太古宇[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-75.
- [18] 沈保丰. 中国 BIF 型铁矿床地质特征和资源远景[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1376-1395.
- [19] Nutman A P, Wan Y S, Du L L, et al. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei[J]. *Precambrian Research*, 2011, 189: 43-65.
- [20] Li T S, Zhai M G, Peng P, et al. Ca. 2.5 billion year old coeval ultramafic-mafic and syenitic dykes in Eastern Hebei; Implications for cratonization of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2010, 180: 143-155.
- [21] Liu D Y, Shen Q H, Zhang Z Q, et al. Archean crustal evolution in China: U-Pb geochronology of Qianxi complex[J]. *Precambrian Research*, 1990, 48(3): 223-244.
- [22] 尹庆柱. 河北迁安水厂铁矿紫苏花岗岩及围岩的岩石学、地球化学、同位素地质年代学研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1988: 1-87.
- [23] Zhang X J, Zhang L C, Xiang P, et al. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on the ore-forming age and tectonic setting[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 137-148.
- [24] 李延河, 张增杰, 伍家善, 等. 冀东马兰庄条带状硅铁建造的变质时代及地质意义[J]. *矿床地质*, 2011, 30(4): 645-653.
- [25] 曲军峰, 李锦轶, 刘建峰. 冀东地区王寺峪条带状铁矿的形成时代及意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 260-266.
- [26] Zhang L C, Zhai M G, Zhang X J, et al. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 325-338.
- [27] 齐鸿烈, 郝兴华, 张晓冬, 等. 冀东青龙河太古宙花岗岩-绿帘角闪岩带地质特征[J]. *前寒武纪研究进展*, 1999, 22: 1-17.
- [28] 孙会一, 董春艳, 颜炳强, 等. 冀东青龙地区新太古代朱杖子群和单塔子群形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *地质论评*, 2010, 56: 888-898.
- [29] Lü B, Zhai M G, Li T S, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Qinglong volcano-sedimentary rock series in Eastern Hebei: Implication for ~ 2500 Ma intra-continental rifting in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2012, 208-211: 145-160.
- [30] 曹国权. 鲁西早前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-210.
- [31] 王伟, 王世进, 刘敦一, 等. 鲁西新太古代济宁群含铁岩系形成时代: SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1175-1181.
- [32] 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代: SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1445-1478.
- [33] 陈志勇, 郑翻身, 王忠, 等. 内蒙古中西部色尔腾山岩群的厘定及其地质意义[J]. *地质与资源*, 2007, 17(1): 1-6.
- [34] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-725.
- [35] 陈亮. 固阳绿岩带的地球化学和年代学[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2007: 1-40.
- [36] 刘利, 张连昌, 代堰锴, 等. 内蒙古固阳绿岩带三合明 BIF 型铁矿的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3623-3637.
- [37] Jian P, Kröner A, Windley B F, et al. Episodic mantle melting-crustal reworking in the Late Neoproterozoic of the northwestern North China Craton: Zircon ages of magmatic and metamorphic rocks from the Yinshan Block[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223: 230-254.
- [38] 袁海华, 张树发, 张平. 渡口市同德混合片麻岩初获太古宙年龄信息[J]. *成都地质学院学报*, 1985(3): 79-84.
- [39] 李复汉, 覃嘉铭, 申玉连, 等. 康滇地区的前震旦系[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 1-396.
- [40] 冯本智. 康滇地区前震旦纪地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1-202.
- [41] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-730.
- [42] 沈渭洲, 李惠民, 徐士进, 等. 扬子板块西缘黄草山和下索子花岗岩体锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 412-416.
- [43] Sinclair J A. A re-examination of the "Yanbian ophiolite suite": Evidence for western extension of the Mesoproterozoic Sibao orogen in South China[J]. *Geological Society of Australia, Abstract*, 2001, 65: 99-100.
- [44] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 51-67.
- [45] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South

- China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 85-109.
- [46] 陈岳龙, 罗照华, 赵俊香, 等. 从锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征论四川冕宁康定杂岩的成因[J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(8): 687-697.
- [47] 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(4): 273-281.
- [48] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-215.
- [49] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的年代[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 429-441.
- [50] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2002, 113: 135-154.
- [51] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [52] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 5-25.
- [53] 李述靖, 张维杰, 耿明山, 等. 蒙古弧地质构造特征及形成演化概论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 13-20.
- [54] 表尚虎, 李仰春, 何晓华, 等. 黑龙江省塔河绿林林场一带兴华渡口群岩石地球化学特征[J]. *中国区域地质*, 1999, 18(1): 28-33.
- [55] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 1-30.
- [56] 周建波, 张兴洲, Simon A W, 等. 中国东北~500 Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1235-1245.
- [57] 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 2007, 52(5): 591-601.
- [58] 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 内蒙古额尔古纳地块古元古代末期的岩浆记录: 来自花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 341-352.
- [59] 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社, 1996: 1-276.
- [60] Bares R L, Jackson J A. *Glossary of Geology*[M]. 2nd ed. Virginia: American Geological Institute, 1980: 1-340.
- [61] 沈其韩, 张荫芳, 高吉凤, 等. 内蒙古中南部太古宙变质岩[J]. *中国地质科学院地质研究所所刊*, 1990, 21: 1-194.
- [62] 王楦, 陆松年, 李惠民, 等. 内蒙古中部变质岩同位素年龄构造格架[J]. *天津地质矿产研究所所刊*, 1995, 29: 1-68.
- [63] 杨振升, 徐仲元, 刘正宏. 孔兹岩系事件与太古宙地壳构造演化[J]. *前寒武纪研究进展*, 2000, 23(4): 206-211.
- [64] 钱祥麟, 李江海. 华北克拉通新太古代不整合事件的确定及其大陆克拉通构造演化意义[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(1): 1-8.
- [65] Zhang J S, Dirkes P H G M, Passchier C W. Extensional collapse and uplift of a poly-metamorphic granulite terrain in the Archean of north China [J]. *Precambrian Research*, 1994, 67: 37-57.
- [66] 吴昌华, 高亚东, 梅华林, 等. 内蒙古黄土窑地区孔兹岩系与麻粒岩套的构造特征及不整合接触关系的论证[M]//钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994: 145-156.
- [67] 金巍, 李树勋. 内蒙古大青山地区早元古造山带的岩石组成及特征[M]//钱祥麟, 王仁民. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 1994: 32-42.
- [68] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2000, 103: 55-88.
- [69] 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等. 乌拉山—集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICPMS)年龄: 孔兹岩沉积时限的年代学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11): 2639-2654.
- [70] Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Jining Complex, North China Craton and its tectonic significance[J]. *Precambrian Research*, 2006, 144: 199-212.
- [71] Xia X P, Sun M, Zhao G C, et al. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Wulashan khondalites: Constraints on the evolution of the Ordos Terrane, Western Block of the North China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241: 581-593.
- [72] Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event [J]. *Precambrian Research*, 2006, 149: 249-271.
- [73] 董春艳, 刘敦一, 李俊建, 等. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉—贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成[J]. *科学通报*, 2007, 52: 1913-1922.
- [74] 董春艳, 刘敦一, 万渝生, 等. 内蒙古大青山地区早前寒武纪变质岩的锆石 Hf 同位素组成和稀土模式[J]. *地质论评*, 2009, 55(4): 509-520.
- [75] Yin C Q, Zhao G C, Sun M, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: Constrains on the evolution of the khondalite belt in the western block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2009. doi:10.1016/j.precamres.2009.06.008.
- [76] Wan Y S, Liu D Y, Dong C Y, et al. The Precambrian Khondalite Belt in the Daqingshan area, North China Craton: Evidence for multiple metamorphic events in the Palaeopro-

- erozoic[M]//Reddy S M, Mazumder R, Evans D A D, et al. Palaeoproterozoic Supercontinents and Global Evolution. London: Geological Society, London, Special Publications, 2009, 323: 73-97.
- [77] 董春艳, 万渝生, 徐仲元, 等. 华北克拉通大青山地区古元古代晚期孔兹岩系: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1851-1862.
- [78] 徐仲元, 范志伟, 刘正宏, 等. 内蒙古集宁地区孔兹岩系中大理岩的形成时代: 长英质片麻岩中 ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的证据[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(3): 809-819.
- [79] 刘守偈, 李江海. 超高温变质作用: 以华北内蒙古土贵乌拉地区为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 131-137.
- [80] Santosh M, Tsunogae T, Li J H, et al. Discovery of sapphire-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Palaeoproterozoic ultrahigh temperature metamorphism[J]. Gondwana Research, 2007, 11: 263-285.
- [81] Condie K C, Boryta M D, Liu J Z, et al. The origin of khondalites: Geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China craton[J]. Precambrian Research, 1992, 59: 207-223.
- [82] Santosh M, Zhao D P, Kusky T M. Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A perspective based on seismic tomography[J]. Journal of Geodynamics, 2010, 49: 39-53.
- [83] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136: 177-202.
- [84] 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.
- [85] 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-72.
- [86] Kao C J, Hsiung Y H, Kao P. Preliminary notes on Sinian stratigraphy of North China[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1934, 13: 243-276.
- [87] 程裕淇. 中国的前寒武系[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 1-80.
- [88] 王鸿祯, 李光岑. 国际地层时代对比表[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [89] 刘本培, 全秋琦. 地史学教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-275.
- [90] 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[J]. 中国科学: D 辑, 1977, 6(2): 151-161.
- [91] 陈毓蔚, 钟富道, 刘菊英, 等. 我国北方前寒武岩系锆石同位素年龄测定: 兼论中国前寒武地质年表[J]. 地球化学, 1981, 10(3): 209-219.
- [92] 地质矿产部中国同位素地质年表工作组. 中国同位素地质年表[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-146.
- [93] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27: 83-100.
- [94] 和政军, 牛宝贵, 张新元, 等. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄[J]. 地质通报, 2011, 30(5): 798-802.
- [95] 和政军, 张新元, 牛宝贵, 等. 北京密云元古宙环斑花岗岩古风化壳及其与长城系常州沟组的关系[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 123-130.
- [96] 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: 来自北京密云花岗岩斑岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的约束[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 108-120.
- [97] 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等. 胶东地块西部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1063-1086.
- [98] Guo J H, Sun M, Chen F K, et al. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton, timing of Paleoproterozoic continental collision[J]. Journal of Asian Earth Science, 2005, 24: 629-642.
- [99] Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2006, 146: 138-164.
- [100] 张华锋, 翟明国, 彭澎. 华北克拉通桑干地区高压麻粒岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 190-199.
- [101] 耿元生, 杨崇辉, 宋彪, 等. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩: 同位素年代和地球化学制约[J]. 高校地质学报, 2004, 10(4): 477-487.
- [102] 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用: 来自同位素年代学的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 305-314.
- [103] Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Luliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 2008, 160: 213-226.
- [104] 曲永强, 孟庆任, 马收先, 等. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 112-127.
- [105] 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.
- [106] 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 等. 华北—江南地区中、新元古代地层格架的新认识[J]. 地球学报, 2009, 30(4): 433-446.
- [107] 陆松年, 李惠民. 蓟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.
- [108] 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.

- [109] 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, 29(3): 366-376.
- [110] 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.
- [111] 苏文博, 李怀坤, Huff W D, 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.
- [112] 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.
- [113] 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.
- [114] 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.
- [115] 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.
- [116] 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.
- [117] 陆松年, 李怀坤, 相振群. 中国中元古代同位素地质年代学研究进展述评[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1002-1013.
- [118] Cowie J W, Bassett M. Global stratigraphic chart with geochronometric and magneto stratigraphic calibration[J]. Episodes, 1989, 12(Suppl): 24.
- [119] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-517.
- [120] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 1-853.
- [121] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-698.
- [122] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-718.
- [123] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-921.
- [124] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-688.
- [125] 徐有华, 吴新华, 楼法生. 江南古陆中元古代地层的划分与对比[J]. 资源调查与环境, 2008, 29(1): 1-11.
- [126] 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 2011, 30(7): 1001-1008.
- [127] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 黔东南—桂北地区四堡群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 地质通报, 2010, 29(9): 1259-1267.
- [128] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2006, 145: 111-130.
- [129] Zhou J B, Li X H, Ge W C, et al. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia[J]. Gondwana Research, 2007, 12: 184-197.
- [130] Zhou J C, Wang X L, Qiu J S. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation[J]. Precambrian Research, 2009, 170: 27-42.
- [131] 王敏, 戴传固, 王雪华, 等. 贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、铪同位素及对华南地壳生长的制约[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 213-223.
- [132] 陈文西, 王剑, 付修根, 等. 黔东南新元古界下江群甲路组沉积特征及其下伏岩体的锆石 U-Pb 年龄意义[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 126-131.
- [133] 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 江南造山带西南段梵净山地区镁铁质超镁铁质岩: 形成时代、地球化学特征与构造环境[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 3015-3030.
- [134] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 黔东南地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1071-1080.
- [135] Wang Z J, Wang J, Duan T Z, et al. Geochronology of middle Neoproterozoic volcanic deposits in Yangtze Craton interior of South China and its implications to tectonic settings[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(9): 1307-1315.
- [136] 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 等. 湘东北前寒武纪冷家溪群变凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1479-1484.
- [137] 柏道远, 贾宝华, 刘伟, 等. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1715-1726.
- [138] 马铁球, 陈立新, 柏道远, 等. 湘东北新元古代花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 65-72.
- [139] Wang J, Li X H, Duan T Z, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating for the Cangshuipu volcanic rocks and its implications for the lower boundary age of the Nanhua strata in South China[J]. China Science Bulletin, 2003, 48: 1663-1669.
- [140] 张世红, 蒋干清, 董进, 等. 华南板溪群五强溪组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学新结果及其构造地层学意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2008, 38(12): 1496-1503.
- [141] Wang X L, Zhao G, Zhou J C, et al. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic

- tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14: 355-367.
- [142] 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 对江南新元古代造山带演化的制约[J]. *地质通报*, 2008, 27(10): 1744-1751.
- [143] Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca 825 Ma[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 45-83.
- [144] 李献华, 李正祥, 葛文春, 等. 华南新元古代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 271-273.
- [145] 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 等. 江南造山带存在新元古代 (~850 Ma) 俯冲作用: 来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(5): 375-388.
- [146] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3215-3244.
- [147] Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China [J]. *Precambrian Research*, 2006, 146: 179-212.
- [148] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南新元古代井潭组火山岩锆石 U-Pb 定年和同位素地球化学研究[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(2): 282-296.
- [149] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 新元古代石耳山花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 364-382.
- [150] 李献华, 周国庆, 赵建新, 等. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地球化学*, 1994, 23(2): 125-131.
- [151] Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 2009, 174: 117-128.
- [152] Chen Z H, Guo K Y, Dong Y G, et al. Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2009, 52(7): 925-939.
- [153] Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 144-156.
- [154] 王孝磊, 舒徐洁, 邢光福, 等. 浙江诸暨地区石角—璜山侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对超镁铁质球状岩成因的启示[J]. *地质通报*, 2012, 31(1): 75-81.
- [155] 邢裕盛, 高振家, 王自强, 等. 中国地层典: 新元古界[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-24.
- [156] 高林志, 丁孝忠, 曹茜, 等. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1014-1020.
- [157] 王剑. 华南“南华系”研究新进展: 论南华系地层划分与对比[J]. *地质通报*, 2005, 24(6): 491-495.
- [158] 王剑, 潘桂棠. 中国南方古大陆研究进展与问题评述[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 818-825.
- [159] 郝杰, 翟明国. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 139-152.
- [160] 汪正江. 关于建立“板溪系”的建议及其基础的讨论: 以黔东南地区为例[J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 296-306.
- [161] Condie K C, Des Marais D J, Abbot D. Precambrian superplumes and supercontinents: A record in black shales, carbon isotopes and paleoclimates[J]. *Precambrian Research*, 2001, 106: 239-260.
- [162] Condie K C, Kröner A. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record[J]. *Geological Society, America, Special Papers*, 2008, 440: 281-294.
- [163] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(8): 1037-1046.
- [164] 万渝生, 苗培森, 刘敦一, 等. 华北克拉通高凡群、溁沱群和东焦群的形成时代和物质来源: 碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学制约[J]. *科学通报*, 2010, 55(7): 572-578.
- [165] 赖小东, 杨晓勇. 鲁西杨庄条带状铁建造特征及锆石年代学研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3612-3622.
- [166] Qiu X M, Ling W L, Liu X M, et al. Recognition of Grenvillian volcanic suite in the Shennongjia region and its tectonic significance for the South China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2011, 191(3/4): 101-119.
- [167] 李怀坤, 张传林, 相振群, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 673-697.
- [168] Wang J, Deng Q, Wang Z J, et al. New evidences for sedimentary attributes and timing of the “Macaoyuan conglomerates” on the northern margin of the Yangtze block in southern China[J]. *Precambrian Research*, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2013.06.003>.
- [169] 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 等. 江山—绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(7): 994-1008.