

全球冥古宙的研究进展和存在问题

沈其韩, 耿元生, 宋会侠

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:冥古宙是地球上最老的一个地质历史时期, 由于缺少可靠的岩石记录一直没有得到国际地学界的重视和承认, 到 2004 年才在建议的国际地层表中使用了冥古宙这一术语, 定义从地球形成到出现地球最老岩石这段地球历史。但冥古宙与太古宙没有明确的地质界线, 一些研究者提出了不同的年代界线(3.85Ga, 4.0Ga, 4.03Ga), 目前还存在较大分歧。目前已知残存的冥古宙岩石只有两处, 一处是加拿大的阿卡斯塔片麻岩(Acasta gneiss)中两个英云闪长岩和一个变质花岗岩闪长岩。前者锆石 U-Pb 年龄为 4002 ± 4 Ma 和 4012 ± 6 Ma, 后者为 4031 ± 1 Ma。另一处是东南极索尼山(Mount Sones)的麻粒岩相英云闪长质片麻岩, 已获得 U-Pb 年龄为 3927 ± 10 Ma。世界上最老的表壳岩(≥ 3870 Ma)出露在格陵兰。冥古宙年代久远, 地球形成最初的 600~700Ma 的初始岩石经历了陨石撞击、地壳再循环、重熔等改造, 甚至再循环到地幔, 几乎已经消失殆尽。目前主要以年轻岩石中的碎屑锆石或继承锆石作为桥梁, 来追索这些古老锆石原来母岩的类型、特征及成因。 >3800 Ma 的碎屑锆石已在全球十多个地区发现, 而以西澳伊尔岗克拉通的杰克山最多最全, 从 >3800 Ma 到 4404Ma 都有, 在 3840Ma, 3900~3920Ma, 4000~4200Ma, 4260~4300Ma 和 4404Ma 显示峰值, 其中以 3900~4200Ma 最为发育, 4404Ma 是目前世界公认的最老碎屑锆石。此外在北美克拉通、南非克拉通、华北克拉通等古老克拉通以及一些年轻造山带中都发现有冥古宙的碎屑锆石, 这些锆石是追索冥古宙地质事件的重要桥梁。通过对冥古宙碎屑锆石的研究提出了很多值得重视和进一步研究的课题和内容。包括早期地壳的性质, 一些锆石具有与太古宙之后岩浆锆石特征相似的环带结构, 因此这些碎屑锆石的母岩大部分被认为相当花岗岩质, 来自老地壳的重熔。冥古宙碎屑锆石的 Hf 同位素等综合分析表明这些碎屑锆石来源于中性熔岩的结晶, 或许表明早期地壳具有中性成分特征。冥古宙锆石的成因也是一个重要的课题, 根据锆石中钍的含量、锆石 Ti 饱和温度计计算的温度以及锆石的一些结构特征, 有的研究者提出冥古宙相当一部分碎屑锆石是陨石撞击导致的岩石熔融结晶产生的, 是追溯地球早期撞击事件的重要手段。在 4300Ma 的碎屑锆石中包裹有金刚石和石墨晶体, 前者表明锆石的母岩曾处于高压条件, 而后者石墨的碳同位素接近有机碳, 有人认为可能为生命起源的迹象。多个地区的碎屑锆石的边部 Th/U 比值低, U-Pb 年龄为 4000Ma 左右, 属于变质作用的产物, 表明当时地壳已具有一定厚度。冥古宙碎屑锆石的研究提出了很多重要的问题, 但是由于资料有限, 有些认识还存在矛盾, 还需要获得更多实际资料, 才能对冥古宙的地质事件过程取得更可靠的科学认识。因此今后应加强可能赋存古老碎屑锆石地区的寻找, 并发现更多古老碎屑锆石。对现有的古老碎屑锆石加强综合研究以及各地区的对比研究。

关键词:冥古宙; 阿科斯塔片麻岩; 碎屑锆石; 撞击事件; 原始地壳

根据地球上原始地幔的样品以及太阳系其它星球陨石的定年, 推测地球形成年龄大约为 45.6~46 亿年。地质工作者习惯上把地球岩石根据其形成时代和地质特征, 以 5.4 亿年为界划分为两大部分: 5.4 亿年以来的地层和岩石由于在地层和沉积岩中有大量的古生物化石存在被称为显生宙, 它占整个地球历史的 10%。5.4 亿年至 46 亿年的漫长地质

时代称为前寒武纪或称隐生宙, 约占整个地球历史的 90%。根据地质特征, 从新至老前寒武纪依次划分为元古宙、太古宙和冥古宙。冥古宙(Hadean Eon)是太古宙之前地球形成和发展的最古老的一个时期。

冥古宙由于年代久远而古老, 经历多次(多为特殊的)地质作用, 原始岩石已经被重熔改造并经过再

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号: 41203025)、中国地质调查局工作项目(编号: 1212010811048)和中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号: J1615)资助成果。

收稿日期: 2016-08-10; 改回日期: 2016-08-20; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 沈其韩, 男, 1922 年生。研究员, 中国科学院资深院士, 主要从事变质岩和早前寒武纪地质研究。电话 010-68999660, Email: huixiasong@cags.ac.cn。

循环重新进入地幔而几乎消耗殆尽。在地球上只有少数几个地点,例如加拿大斯拉夫克拉通和西南格陵兰,有少量保存。目前研究冥古宙岩石主要依靠残存于较新岩石中的残余碎屑锆石作为桥梁,用来研究冥古宙岩石的性质和特征。研究手段主要依据碎屑锆石的形态特征、内部环带发育程度及环带类型、稀土和 Lu-Hf 等地球化学特征、锆石内部的矿物包裹体、氧同位素特征等数据,综合判断或推断其原始母岩的性质和形成环境。目前这方面已积累了一些研究成果,大大推动了冥古宙岩石的研究。但由于后期改造的复杂性,不少推断仍然存在很大的多解性和不确定性。

本文主要介绍当前世界上冥古宙的研究现状、存在问题,并提出进一步研究和探索的建议。由于冥古宙与太古宙紧密相连密不可分,将涉及到太古宙,特别是始太古代,有关岩石和年龄的特征,以及同位素地球化学特征等,本文适当予以介绍。

1 冥古宙的命名和上下界线

冥古宙(Hadean Eon)这一名词最早由 Cloud (1972)提出,他将漫长的前寒武纪划分为四个大阶段(宙),即冥古宙、太古宙、元古宙和元动宙。太古

宙和冥古宙的分界放在 35 亿年,冥古宙的底界为 46 亿年。尽管这一方案当时并未得到国际地层委员会的采纳(Plumb and James,1986),国内多数研究者也未采纳(Shen and Qian,1995)。但是对于地球早期历史的研究始终没有停止。Clord P(1987)再次提出了冥古宙,将太古宙与冥古宙的界限定位为折线,最低为 4.0Ga,最高为 3.82Ga,冥古宙的底界为 4.56Ga。之前的时期称为前太阳系历史(Pre-Solar history),将冥古宙定为 Pre-biotie。

由于冥古宙在地球上缺乏岩石出露的有关资料,国际地层委员会前寒武纪分会一直到 2004 年仍未批准在国际地层表中使用这一名词。Gradstein 等(2004)建议的国际地层表(2004~2008)中,将太古宙四分,由新到老依次为新太古代(2500~2850Ma)、中太古代(2850~3100Ma)、古太古代(3100~3500Ma)和始太古代(3500~3850Ma),在太古宙之下列出了冥古宙,将冥古宙与始太古代的界线定为 3850Ma。这一界限的确定主要依据地球上出露的最老表壳岩形成于 3850Ma,并可与月球地质历史中雨海纪的撞击事件相对应。同时根据月球的地质系统将冥古宙的下界定在 4510Ma。陆松年等(2005)曾对这一方案做了全面介绍。

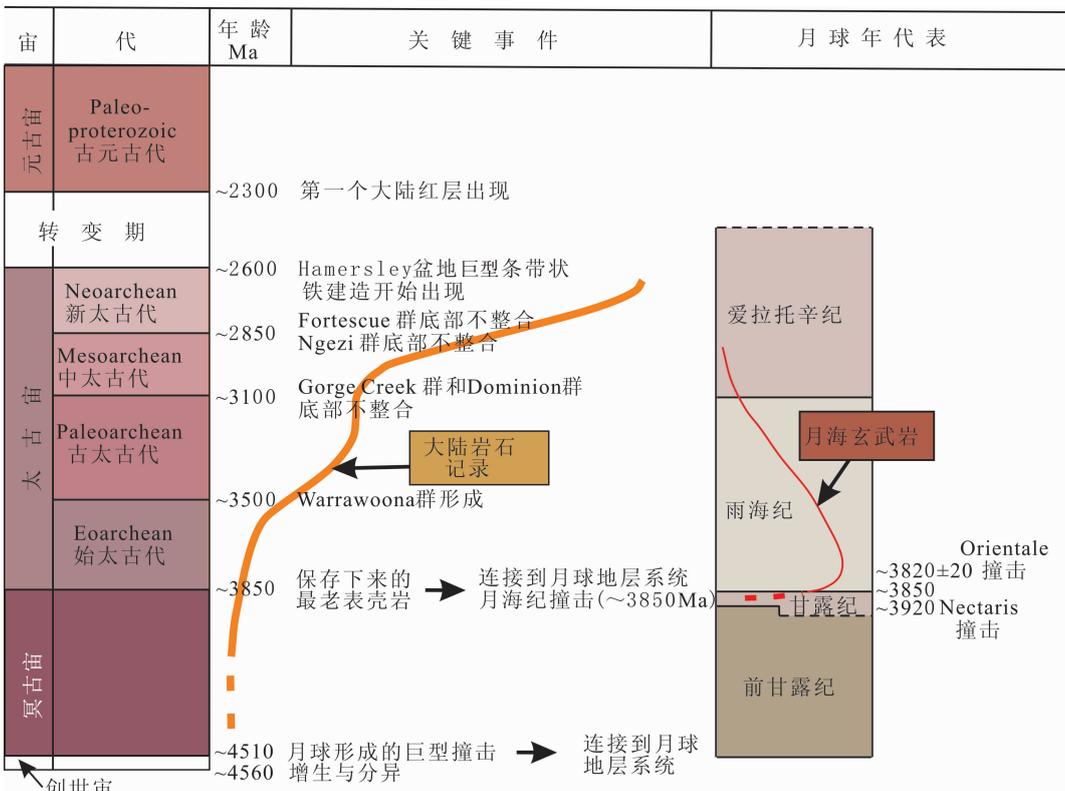


图1 Bleeker (2004a) 建议的自然的前寒武纪地层表(太古宙和冥古宙部分)

Fig. 1 "Natural" Precambrian time scale (included Archean and Hadean) Proposed by Bleeker(2004a)

Bleeker(2004a, 2004b)提出了以地质事件为标志的“自然的”前寒武纪地层划分方案(图 1)。在这一方案中他将 2600~2300Ma 之间的一段地质历史作为太古宙与元古宙的转变期(Transition),以地质事件为标志将太古宙划分为四个代。并以地球上最老的表壳岩(3850Ma)为标志作为太古宙与冥古宙的界限,冥古宙时限从 3850Ma 到 4510Ma,这一阶段的地质事件可与月球的甘露纪和前甘露纪的撞击事件相对应。同时,在冥古宙之下还建立了一个创世宙(Genesis Eon),时代从 4510Ma 到 4560Ma。

在 Moorbaths(2005)提出的前寒武纪地层表中,在太古宙与冥古宙之间划分出 3.85Ga~3.82Ga 的过渡带,冥古宙的底界为 4.45Ga,其地质标志是地幔分异作用开始的时间(图 2)。在该表中列出了不同阶段的地质环境和地质事件,可以看出地球演化的历史。

Goldblatt 等(2009a)等提出了一个完全修正后的前寒武纪地层表的建议方案,其中太古宙分为三个代、六个纪。新太古代与古元古代的分界年龄为 2420Ma,地质标志是冰川沉积首次出现。新太古代分为两个纪,上部为成铁纪,该阶段沉积了大量的 BIF,大陆地壳生长速率减缓。下部为甲烷纪,该阶段是大陆地壳的主要生长和循环期。中太古代时限为 2780Ma 到 3490Ma,中太古代上部为庞格兰纪,地质特征是在稳定大陆上出现盆地沉积。下部为瓦尔巴拉纪,地质特征是稳定大陆核的生长,并且出现了最老生命的宏观证据。古太古代的时限为 3490Ma 到 4030Ma,上部为伊苏阿纪,地质特征是在沉积岩中首次保留有具有生命痕迹的地球化学特征,下部为阿克斯塔纪,地质特征是保留有大陆地壳最古老的碎片。在太古宙之下为冥古宙,时限从 4030Ma 到 4568Ma,并划分出两个纪。上部为杰克山纪或锆石纪,下部位浑沌纪,二者的界限年龄为 4404Ma。各地质时代的主要特征和划分的地质标志可见图 3。这一方案不仅对冥古宙和太古宙根据地质特征进行了划分,对元古宙也进行了重大调整,由于不在本文讨论范围本文未予介绍(可参见苏文博,2012)。2012 年国际地层表基本采用了该方案,并进行了详细论述(Van Kranendonk et al., 2012),国内也对这一方案进行了介绍(苏文博,2012;梅冥相,2016)。

国内对于冥古宙的研究相对较少,翟明国(2013)编制了一个太古宙和冥古宙的地质简表,太古宙与冥古宙的界限年龄采用的也是前述几位作者

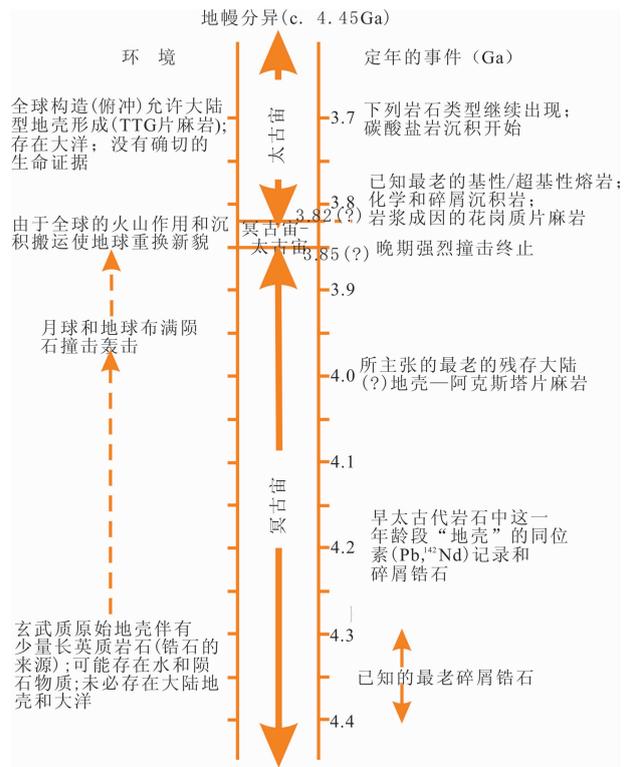


图 2 地球早期地层划分表(据 Moorbath, 2005)

Fig. 2 Suggested time scale for early Earth (after Moorbath, 2005)

提出的 3850Ma。认为冥古宙属于前板块构造体制,处于还原环境。并对冥古宙的地质概况作了简要论述。我国全国地层委员会主编的中国地层表(2014 版)将太古宙四分,分界年龄与 2004 年版的国际地层表一致。在始太古代之下划分出冥古宙,冥古宙与太古宙的界限年龄为 4.0Ga(王泽九等, 2014)。

从上述介绍可以看出,近些年很多学者建议将冥古宙作为地层表中最老的年代地层单位,说明其必要性和重要性。

关于太古宙与冥古宙的分界主要有两种意见,一种意见(Moorbath, 2005)是以世界最老沉积表壳岩的出现(3850Ma)作为分界标志,另外一种意见(Goldblatt et al., 2009)是以地球上出现最老岩石作为划分标志,分界年龄在 4030Ma 左右。

将太古宙与冥古宙界限年龄定在 3850Ma 的一个主要依据是西格陵兰古老变质火山沉积岩曾测定年龄为 3820Ma(Nutman et al., 1999)。后续的研究表明该变质岩系被 3870Ma 的英云闪长岩所侵入,其时代应大于 3870Ma,或至少与之同时(Nutman et al., 2009)。因此原将 3850Ma 作为太古宙与冥古宙的界限年龄与现有年龄测定结果尚存

宙代纪		特征事件	重要事件的首现及时间(Ma)	
古元古代	哥伦比亚纪 Columbian	形成超大陆 (Columbia/Nuna)	1780 T 首次出现硫化物的沉积	
	耶杜里纪 Jatulian	Lomagundi-Jatuli 同位素漂移	2060 T LJE的结束/古煤开始沉积	
	成氧纪 Oxygenian	冰川作用和大气圈氧含量上升	2250 T 首次出现 $\delta^{13}\text{C}$ 正值异常, 及/或岩浆作用爆发	
太古宙	新太古代	成铁纪 Siderian	BIF的沉积, 大陆地壳生长速度的衰减	
		甲烷纪 Methane	地壳生长和再循环主要阶段	
	中太古代	庞格兰纪 Pongolan	稳定大陆上的盆地沉积	2420 T 冰川作用首次出现
		瓦尔巴拉纪 Vaalbar	稳定大陆核的生长; 最古老的宏观生物证据	2630 T Hamersley型BIF首次出现
				2780 T 大陆溢流玄武岩首次出现, 和/或干酪根碳同位素异常
		伊苏阿纪 Isua	具有生命化学痕迹的沉积岩的首次保存	3020 T 陆源盆地的首次出现
阿克斯塔纪 Acasta	保存最古老的大陆地壳岩片	3490 T 宏观化石(叠层石)的首次出现		
冥古宙	杰克山代 或锆石代	地壳快速形成和循环, 继续剧烈的陨石撞击事件	3810 (J) 地球上最古老的表壳岩	
			4030 (J) 地球上最老的岩石 (Acasta 片麻岩)	
	混沌代	形成月球的巨大撞击事件导致的增生	4404 (J) 地球上最老的地壳物质 (碎屑锆石)	
			4568 (J) 太阳系形成	

图3 Goldblett等(2009)提出的修正了的前寒武纪地质年表

Fig. 3 Proposed scheme for a bully revised Precambrian time scale by Goldbette et al., 2009

图中时钟代表计时性的界限, 钉子符号代表可识别为可能的 GSSP 界线

clock symbols=chronometric boundaries; spikes=boundaries where possible GSSPs are recognized

矛盾。另外一种意见是以地球上最老岩石的年龄结果 4030Ma(Iizuka et al., 2007)作为太古宙与冥古宙的分界标志。由于 4030Ma 是目前已经获得的最古老的岩石年龄, 但是能否代表 TTG 片麻岩在地球的首现时间尚无证据。因此我们建议将冥古宙与太古宙的分界年龄暂置于 3.9Ga, 3.9Ga~3.85Ga 为冥古宙与太古宙的过渡期。这样有利于讨论地球早期的演化过程。这样太古宙与冥古宙的过渡期大致相当于月球上强烈陨石撞击的甘露纪, 地球上的冥古宙大致相当于月球的前甘露纪(参见图 1)。

2 目前已发现的冥古宙岩石

冥古宙岩石由于形成的年代过于久远, 曾经历了复杂的改造而年轻化, 或者经再造作用而回归地

幔, 原来岩石几乎消失殆尽。即使在地球表层保留有很少量的冥古宙岩石一时也难以发现。迄今为止在全球仅发现两处。一处位于加拿大斯拉夫省斯拉卡克拉通的阿卡斯塔片麻岩(Acasta gneiss)中。在该片麻岩中分布有两个变质英云闪长岩和一个变质花岗闪长岩露头, 总面积大于 40km²。变质英云闪长岩成灰色弱片麻状, 已获得 4002±4Ma 和 4012±6Ma 的锆石 U-Pb 年龄。变质花岗闪长岩呈叶片状, 获得了 4031±1Ma 的精确锆石 U-Pb 年龄。测定的岩石中还保留了 3.75Ga~3.6Ga 和 1.7Ga 的变质事件的年龄记录(Bowring et al., 1989; Bowring and Williams, 1999; Muller et al., 1992)。前人在阿卡斯塔片麻岩中也曾获得 3900±28Ma 的片麻岩原岩结晶年龄, 在该片麻岩中还获得了 4.2Ga 的捕虏晶(Iizuka et al., 2006)。尽管

这一处的冥古宙岩石已得到世界的公认,但从已获得的片麻岩形成年龄看可能存在多期的岩浆作用。

另一处冥古宙岩石出露在东南极 Enderby Land 的纳皮尔杂岩 (Napier Complex) 中索尼山 (Mount Sones) 麻粒岩相正片麻岩 (成分相当英云闪长岩),在该正片麻岩中已获得 3936Ma (实测值为 3927 ± 10 Ma) 的结晶年龄,在该岩石中的锆石受到 2948Ma、2479Ma 和 1000Ma 等多期变质作用的叠加 (Black et al., 1986)。由于其结晶年龄已大于 3.9Ga 故将其归入冥古宙。

3 太古宙岩石和年轻造山带中残余的冥古宙碎屑锆石年龄

在岩石或地层中发现冥古宙残余碎屑锆石是研究和追踪冥古宙残存岩石的重要途径。目前已在全球十多个地区发现有冥古宙碎屑锆石,这些碎屑锆石主要发现于古老克拉通及其相邻地区及其中较年轻地层的岩石中,在一些年轻造山带的沉积岩中也有发现。

3.1 西澳伊尔岗克拉通及邻近地区

由于冥古宙与始、古太古代紧密相连,在介绍冥古宙残余碎屑锆石年代之前,有必要论述当地的太古代岩石的展布情况。

伊尔岗克拉通 (Yilgarn Craton) 的太古宙岩石赋存于纳里尔地体 (Narriyer terrane) 中,其主要产地是杰克山 (Jack Hills) 和纳里尔山 (Mt. Narryer),这两个地区也是发现冥古宙残余锆石最多的地区。

在纳里尔山地体中出露最老的岩石为 Meeberrie 片麻岩 (结晶年龄为 3600~3730Ma) (Nutman et al., 1991)。在靠近 Moichison 约 70km 和杰克山北几千米处的同类岩石已获得 3730Ma, 3680Ma, 3620Ma 和 3100Ma 多期 U-Pb 年龄 (Kinny and Nutman, 1996; Pidgeon et al., 1990; Nutman et al., 1991)。杰克山南部的 Meeberrie 片麻岩也具有从古太古代到新太古代连续多期岩浆演化的特点 (Kinny et al., 1990; Pidgeon, 1992; Pidgeon and Wilde 1998)。在靠近杰克山和纳里尔山地区规模不等的层状基性侵入体被称为 Momfrel 杂岩 (Myers, 1988),也获得了 3730 ± 6 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,与 Meeberrie 片麻岩属同一时代。

伊尔岗克拉通有三个地点产有 >4.0 Ga 的碎屑锆石,分别是杰克山、纳里尔山和 Barlee 地体的 Maynagd 地区,此外在 Corprism 造山带也曾有过报

道,主要产于新太古代的花岗质片麻岩中。

在杰克山 >4000 Ma 的碎屑锆石主要产于 3.0Ga 的变质表壳岩内的石英岩和含石英砾的砾岩中。截止到 2004 年,伊尔岗克拉通共测得 3800~4404Ma 的冥古宙残余碎屑锆石 88 个 (图 4)。其中 Jack Hills 共 78 组数据,分别来自 Cavosie et al., 2004 ($n=41$), Compston and Pidgeon, 1986 ($n=17$), Wilde et al., 2001 ($n=1$), Peck et al., 2001 ($n=3$), Mojzsis et al., 2001 ($n=4$), Maas et al., 1992 ($n=10$), Nelson, 2000 ($N=2$); Mt. Narryer 共 8 组数据,分别来自 Froude et al., 1983 ($n=4$), Nutman et al., 1991 ($n=4$); Barlee Terrene 共 3 组数据,来自 Wyche et al., (2004) ($n=3$)。显示 3840Ma, 3900~3920Ma, 4000~4200Ma, 4260~4300Ma 和 4404Ma 的年龄峰。

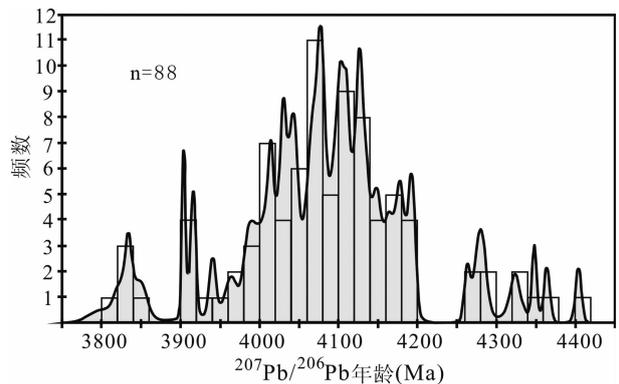


图 4 西澳伊尔岗克拉通 88 个大于 3800Ma 的碎屑锆石 U-Pb SHRIMP 年龄直方图 (据 Cavosie et al., 2004)

Fig. 4 Histogram of detrital zircons with U-Pb SHRIMP ages 88 >3800 Ma from the Yilgarn Craton, western Australia (after Cavosie et al., 2004)

3.2 西南格陵兰的太古宙岩石和太古宙—冥古宙的碎屑锆石

西南格陵兰出露世界上最古老的伊苏亚表壳岩带 (Isua Supracrust belt) 和始太古代—晚太古代的石英闪长质、英云闪长质、奥长花岗质以及花岗质片麻岩各类岩体。详细的研究表明,西格陵兰的始太古代岩石包括两套组合,即 3810~3800Ma 的表壳岩及同时代的英云闪长岩和 3710~3690 Ma 的表壳岩及 3720~3690Ma 的英云闪长质岩石 (Nutman et al., 1996, 2002, 2007, 2009)。表壳岩中的主要岩石有层状角闪岩、长英质火山岩、BIF、石英岩以及少量超基性岩 (包括科马提岩)。因此有的研究者认为这是世界最古老的绿岩带—变质火山沉积岩系,其中还赋存世界最古老的 BIF。

表壳岩带中的铬云母石英岩中含有丰富的浑圆状碎屑锆石,曾测得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄有三个组合:3600~3700Ma(最多)、3600Ma(其次)和3850~3900Ma(少),后者相当于始太古代与冥古宙晚期的过渡年龄(Nutman and Heiss, 2009; Nutman et al., 2009)。对变质沉积岩的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 值分析表明, ^{142}Nd 具有异常,其平均值为 $15\pm 4\text{ppm}$,用初始 $\epsilon^{143}\text{Nd}$ 计算的 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 值证明在 $4460\pm 115\text{Ma}$ 时存在地幔分异(Caro et al., 2003)。这是最早的Sm/Nd分馏,可能反映了地球最早阶段地幔的分异。

3.3 加拿大苏必利尔省 Nuvvuagittuq 带的太古宙岩石及冥古宙信息

一个小型的始太古代或者可能属于冥古宙的上地壳岩石碎片(Nuvvuagittuq 上地壳带),保存在加拿大 Superior 省的东北部。这个孤立的褶皱带主要为铁镁质的角闪岩,其中偶尔见到长英质片岩、富氧化物和石英的铁建造,以及可能的砾岩单元和变质了的辉长岩和超镁铁质岩床(O'Neil et al., 2008, 2011; David et al., 2009)。该带中长英质片岩的 U-Pb 年龄为 $3817\pm 16\text{Ma}$,周围的英云闪长岩年龄为 $3661\pm 4\text{Ma}$,Nd 相对亏损地幔的模式年龄约为 3.9Ga(David et al., 2009),该带中镁铁闪石-角闪石具有低的 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值, ($\epsilon^{142}\text{Nd} = -0.07$ 到 -0.15),且 $^{146}\text{Sm}-^{142}\text{Nd}$ 等时线年龄为 $4280_{-81}^{+53}\text{Ma}$ 。据此,有的研究者认为这个带可能是地球上保存最古老的地壳碎片(O'Neil et al., 2008)。

3.4 南非林波波带的太古宙和冥古宙的残余碎屑锆石

南非林波波带(Limpopo Belt)中央带的彼特桥(Beit Bridge)群石英岩中的碎屑锆石通过离子探针 U-Pb 定年获得许多 3.33~3.15Ga 和少许 3.15~2.51Ga 的年龄,另外一些介于 3.4Ga~3.6Ga 之间。另外有 2 颗锆石获得 U-Pb 年龄为 $3881\pm 11\text{Ma}$ 和 $3909\pm 26\text{Ma}$,已达到始太古代-冥古宙晚期的过渡年龄。Hf 同位素测定表明,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(3.9\text{Ga}) = -6.3$, $\epsilon_{\text{Hf}}(3.1\text{Ga}) = -0.2$,其模式年龄为 4.45~4.36Ga,表明 3.9Ga 和 3.1Ga 代表的岩浆事件是由冥古宙古老地壳重熔年轻化所致(Zeh et al., 2008)。

3.5 华北克拉通的太古宙地体和冥古宙碎屑锆石的年龄信息

华北克拉通的鞍山-本溪地区和冀东地区都出

露有大量的太古宙岩石,并在碎屑锆石中有冥古宙的信息。在信阳中生代火山岩的麻粒岩捕虏体中获得了始太古代-古太古代的年龄信息,锆石中也含有冥古宙的信息。

大量研究表明鞍山及附近存在 $> 3.8\text{Ga} \sim 2.5\text{Ga}$ 多次岩浆事件,其中夹有 3.3Ga 和 3.0Ga 的变质表壳岩(Liu et al., 1992; 刘敦一等, 1994; Song et al., 1996; 万渝生等, 1999)。其中鞍山地区东山 3.8Ga 变石英闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 3.79Ga, 锆石 Hf 同位素的模式年龄为 4.15Ga,显示了冥古宙的信息。通过锆石 U-Pb 年龄与锆石 Hf 同位素模式年龄的对比(表 1)可以看到许多始太古代-古太古代的岩浆杂岩的 Hf 的模式年龄多略大于锆石 U-Pb 年龄,部分样品的 Hf 模式年龄大于 4.0Ga,属于冥古宙范围。3.8Ga 的锆石年龄和大于 4.0Ga 的 Hf 模式年龄意味着在该区可能存在更老的岩石,并表明应有一部分岩体来自 3.9~4.0Ga 古老地壳的重熔(万渝生等, 2015)。

表 1 鞍山地区太古宙片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和锆石 Hf 模式年龄(据 Liu et al., 2008)

Table 1 Zircon U-Pb ages and Hf model ages of Archean gneiss in the Anshan area (after Liu et al., 2008)

样品编号	产地	岩石类型	U-Pb 年龄(Ma)	Hf 模式年龄(Ma)
Ch28	白家坟	条带状奥长花岗质片麻岩	3811 ± 4	3464~4052 (平均 3921)
A9011	白家坟	糜棱岩化奥长花岗岩	3804 ± 5	
A0518	白家坟	细粒奥长花岗片麻岩	3800 ± 5 3752 ± 8	
A9604	东山	变石英闪长岩	3794 ± 4	3732~4021 (平均 3917)
A0507	东山	条带状奥长花岗片麻岩	3791 ± 9 3700 ± 8	3605~4100 (平均 3855)
A0512	深沟寺	条带状奥长花岗片麻岩	3777 ± 13	
A0403	白家坟	黑云母片岩	3723 ± 17	3443~4002
A0423	深沟寺	条带状奥长花岗片麻岩	3680 ± 19	3783~4264 (平均 3949)
A0404	白家坟	奥长花岗质岩墙	3620 ± 29	
A0405	白家坟	灰色奥长花岗质片麻岩	3573 ± 21	

鞍山锅底山约 3.81Ga 的奥长花岗质片麻岩呈包体状包裹于主体为 3.36~3.13Ga 的混合杂岩中。3.81Ga 的锆石基本保留了赋存岩石的原始同位素特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -0.7 \sim 6.2$, $\delta^{18}\text{O} = 5.3 \sim 7.0\text{‰}$ 。高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 6.2$ 值超过了典型的地幔源,表明其从玄武岩原岩演化而来。鞍山地区可能存在始太古代-冥古宙的亏损地幔源(Wang et al., 2015)。

在本溪歪头山与条带状铁矿(BIF)互层的块状

细粒斜长角闪岩中发现一粒残余锆石,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $4174\pm 19\text{Ma}$,斜长角闪岩的原岩年龄为 $2523\pm 13\text{Ma}$,变质年龄为 $2481\pm 19\text{Ma}$ (Cui et al., 2013)。尽管这一冥古宙锆石年龄的精度尚需进一步确定,但是综合上述资料,可以说明鞍山本溪地区存在冥古宙的信息,并有可能发现更古老的岩石。

冀东地区出露的主要是新太古代的岩浆片麻岩和变质表壳岩(Geng et al., 2006; Nutman et al., 2011)。曹庄地区的铬云母石英岩含有大量的碎屑锆石,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄具有 $3838\sim 3820\text{Ma}$, $3800\sim 3780\text{Ma}$, $3720\sim 3700\text{Ma}$ 和 $3680\sim 3660\text{Ma}$ 四组年龄峰值,其中最老的一粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 3851Ma (刘敦一等,1994)。铬云母石英岩中碎屑锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值呈现随时间的线性变化,其斜率与锆石的 Lu/Hf 同位素比值($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$)一致。表明这些锆石在后期的地质历史中基本保持封闭,所有的60个分析点给出的Hf模式年龄平均值为 3779Ma ,与最老的U-Pb年龄一致。其中4个具有 3794Ma 的谐和年龄的锆石的Hf模式年龄为 $3940\sim 3777\text{Ma}$,3个具有 3733Ma 的谐和年龄的锆石的Hf模式年龄为 $3880\sim 3766\text{Ma}$,2个具有 3652Ma 的谐和年龄的锆石的Hf模式年龄分别为 3881 和 3770Ma 。以上三组数据相一致,因此他们推测上述三组年龄的锆石均来自 3.8Ga 左右的地壳物质(吴福元等,2005)。此外4个年龄为 3794Ma 的锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $1.8\sim 3.7$,具有陨石类似的Hf地球化学特征,进而推论 3.8Ga 左右的地壳来自未发生显著分异的地幔部分熔融(吴福元等,2005)。年龄为 3.85Ga 的碎屑锆石的Hf模式年龄,平均值为 3.94Ga ,已达到始太古代和冥古宙的过渡范围,或冥古宙的晚期(万渝生等,2009)。铬云母石英岩中碎屑锆石的SHRIMP U-Pb年龄和氧同位素分析表明,碎屑锆石的U-Pb年龄可达 $3860\pm 3\text{Ma}\sim 3832\pm 4\text{Ma}$,30个碎屑锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 6.5% ,比杰克山和Borteeraton地区锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高出 0.3% 。明显高于正常岩浆岩中 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Wilde et al., 2008)。

曹庄地区除铬云母石英岩中碎屑锆石记录了冥古宙的信息之外,在角闪斜长片麻岩的碎屑锆石中获得了 3782Ma 和 $3684\sim 3354\text{Ma}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄,在石榴黑云片麻岩的碎屑锆石中也获得了 $3838\sim 3342\text{Ma}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,锆石Hf同位素分析获得 $4.0\sim 3.3\text{Ga}$ 的模式年龄。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值从

-3.6 到 $+4.8$,指示该区地壳演化包括多相年轻地壳物质的添加和较老地壳岩石的再造(Liu et al., 2013)。

河南信阳附近中生代火山岩中麻粒岩捕虏体内继承锆石研究表明,该岩石形成于 3.6Ga 左右,锆石的Hf同位素比值低于鞍山和冀东地区古老锆石的Hf同位素比值,其模式年龄接近 4.0Ga 。10个年龄大于 3.0Ga 的锆石Hf模式年龄为 $3946\sim 4110\text{Ma}$,二阶段Hf模式年龄为 $4070\sim 4280\text{Ma}$ (Zheng et al., 2004),较之鞍山和冀东曹庄地区更有希望找到更老的地壳物质(Wu et al., 2005)。

3.6 中国华南克拉通太古宙岩石和冥古宙锆石的信息

华南克拉通由西北部的扬子陆块和东南部的华夏陆块组成。华南克拉通古老的岩石仅在湖北黄陵背斜北部的崆岭地区出露,主要由TTG片麻岩组成,形成时代在 $2.9\sim 3.3\text{Ga}$ (Qiu et al., 2000; Gao et al., 2001; Zhang et al., 2006; Guo et al., 2014; Li et al., 2014; Guo et al., 2015)。尽管华南没有发现如华北鞍山地区 3.8Ga 左右的岩石,但是不论是岩浆岩的锆石还是年轻沉积岩中的碎屑锆石都揭示了冥古宙的信息。

在湖北宜昌地区的南华系莲沱组砂岩中发现一颗碎屑锆石,其SHRIMP U-Pb年龄为 3.8Ga ,相当于始太古代,其Hf模式年龄为 $3.96\sim 4.0\text{Ga}$,说明该锆石是从更古老的冥古宙地壳岩石演化而来(Zhang et al., 2006)。在粤北南雄地区的潭溪片麻岩中发现残余锆石,其LA-ICP-MS U-Pb年龄为 3755Ma ,其Hf同位素模式年龄为 4.07Ga (Yu et al., 2007)。在赣南奥陶纪砂岩中发现多颗古老的残余锆石,其中一颗锆石的LA-ICP-MS U-Pb年龄为 3.96Ga ,另一较老锆石的年龄为 3435Ma ,其Hf(t)模式年龄为 4202Ma 。说明这些太古宙的岩浆锆石所代表的岩浆岩均是从冥古宙地壳岩石演变而来(Yao et al., 2011)。在广西大明山早寒武世砂岩中发现一颗古老残余碎屑锆石,其LA-ICP-MS U-Pb年龄为 4107Ma ,Hf的单阶段模式年龄为 $4102\pm 42\text{Ma}$,两阶段模式年龄为 $4098\pm 63\text{Ma}$ (Xu et al., 2012)。在华夏地块武夷山龙泉地区龙泉岩群云母石英片岩中发现两粒年龄约 4100Ma 的碎屑锆石。其中一粒锆石的内部结构简单,具有正常的岩浆环带,其SHRIMP $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $4127\pm 4\text{Ma}$,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值平均 7.2% ,与西澳杰克山冥古宙岩浆成因锆石中的最高值相似,且高于幔源岩浆锆石

值。另外一颗锆石发育核幔边结构,核部的岩浆锆石年龄为 $4148 \pm 8\text{Ma}$, 锆石幔部的 Th/U 比值 ≤ 0.05 属于变质成因,其中一个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $4063 \pm 15\text{Ma}$ (Th/U=0.05), 这是我国最古老变质作用的年代学记录(Xing et al., 2014; 邢光福等, 2015)。此外, Li et al. (2014) 也报道了在华夏陆块存在冥古宙残留锆石的年龄。

3.7 中国及邻区年轻造山带中的冥古宙碎屑锆石

在北秦岭造山带西部奥陶纪草滩沟群火山碎屑熔岩中先后发现捕获的冥古宙锆石,其 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $4079 \pm 5\text{Ma}$ (王洪亮等, 2007), SHRIMP U-Pb 年龄为 $4080 \pm 9\text{Ma}$ (第五春荣等, 2010), 并获得两颗冥古宙的残余锆石,其年龄分别为 $4007 \pm 29\text{Ma}$ 和 $3908 \pm 45\text{Ma}$, 属变质成因(第五春荣等, 2010; Diwu et al., 2013)。在上述火山岩附近的凝灰岩中发现有 3.5Ga 的捕获锆石,其 Hf 模式年龄为 4.1Ga 左右(Sun et al., 2008)。

在河西走廊地区晚泥盆世中宁组岩石中发现了 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 $3611 \pm 17\text{Ma}$ 、 $3891 \pm 17\text{Ma}$ 和 $4022 \pm 16\text{Ma}$ 的古老碎屑锆石。前二者的时代相当于始太古代,后者相当冥古宙晚期。年龄为 $3611 \pm 17\text{Ma}$ 的锆石的 Th/U 比值为 0.14, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.280196$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.3$, $T_{\text{DM}} = 4113\text{Ma}$, $T_{\text{ND}}^{\text{C}} = 4464\text{Ma}$; 年龄为 $3891 \pm 17\text{Ma}$ 的锆石未见有振荡环带,具有变质增生边, Th/U = 1.01, 没有显示负 Eu 异常, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i = 0.280169$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.6$, $T_{\text{DM}} = 4139\text{Ma}$, $T_{\text{ND}}^{\text{C}} = 4319\text{Ma}$ (袁伟等, 2012)。这两颗锆石的原位 Hf 同位素与华北克拉通 3.8Ga 左右的锆石 Hf 同位素数据明显不同(吴福元等, 2005; Zheng et al., 2004), 而与西澳伊尔岗克拉通杰克山 $>4.0\text{Ga}$ 锆石的 Hf 同位素特征非常接近(Harrison et al., 2008; Kemp et al., 2010), 说明河西走廊在晚泥盆世时与澳大利亚西北部表壳岩的沉积源区可能具有一定联系。

在西藏雅鲁藏布江造山带西段的普兰石英岩中发现了残余的冥古宙碎屑锆石,其中一颗锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 $4106 \pm 4\text{Ma}$, 并发育有 3600Ma 的变质增生边(温春齐等, 2010; Dujji et al., 2007)。

西伯利亚南缘中亚造山带东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂岩的沉积岩系中曾获得一颗 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 4040Ma 的碎屑锆石,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -5.2$, 两阶段模式年龄为 4471Ma , 表明在地下深处存在

冥古宙古老地壳(Huang et al., 2013)。在中亚造山带西段哈萨克斯坦 Stepuyat 古生代斑状闪长岩中一个继承锆石核部获得 $3888 \pm 1.5\text{Ma}$ 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,与中亚造山带中段东准噶尔阿尔曼泰蛇绿混杂岩中发现的古老碎屑锆石年龄相近,可能代表始太古代—冥古宙的过渡岩石(Kröner et al., 2008)。

3.8 南美冥古宙碎屑锆石年龄信息

南美巴西东北部 Sao Francisco 克拉通 Ibotira-Ubinaga 层的石榴云母片岩中出现一个残余的碎屑锆石,具有核边结构。核部为岩浆成因,其 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 4100Ma , 核部被 1900Ma 的次生锆石所包绕(Paquetttte, 2015)。此外在 Guinea 地盾也有冥古宙碎屑锆石(锆石 U-Pb 年龄为 $4279 \pm 19\text{Ma}$)的报道(Nadeau et al., 2013)。

此外,在地球上另外一些地区也发现了 $\geq 3.8\text{Ga}$ 的碎屑锆石,例如德国巴伐利亚东北(Gebauer et al., 1989)、美国怀俄明北部(Mueller et al., 1998)、巴西圣弗朗西斯科克拉通(Hartmann et al., 2006)、尼泊尔西部高喜马拉雅地区等,这些地区都有可能存在冥古宙的碎屑锆石。

以上介绍了世界各地出露的冥古宙岩石和碎屑锆石的情况,由于出露零星,对于冥古宙有关资料的总结还很薄弱。值得注意的是,Griffin et al. (2014)总结了记录全球演化早期的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素、微量元素、硫化物和贱金属矿物 Re-Os 模式年龄、氧同位素、撞击事件等资料(Griffin et al., 2014), 从中可以看出从 4.5Ga 到 3.5Ga 的地壳基本处于呆滞(stagnant)状态,此期间的地壳以镁铁质为主,而这一阶段的锆石主要是由于岩浆分异或撞击熔融形成的中性岩浆中结晶出来的。这一宁静状态被 4.2Ga 、 3.8Ga 和 $3.4\sim 3.3\text{Ga}$ 的脉动式岩浆活动所打破,这几次脉动式的岩浆活动或者代表了地幔的反转或者代表了早期的地幔柱。

4 冥古宙碎屑锆石提供的地球早期演化信息与启示

在地球上出露的冥古宙岩石非常少,因此追索冥古宙地质演化的信息主要通过冥古宙的碎屑锆石或继承锆石。冥古宙锆石尽管提供了一些有价值有意义的信息,但是由于资料和数据有限,所以对于冥古宙锆石所提供的一些信息及其意义还存在争议。本文列出一些冥古宙锆石所提供的信息目的在于引起地质学家对冥古宙研究的更多关注,对这些有争

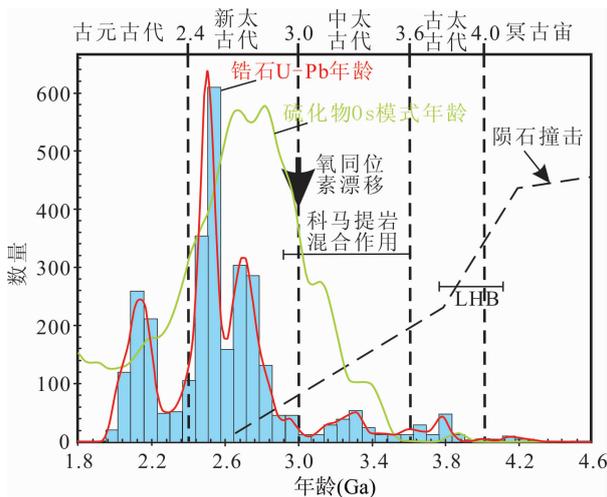


图5 地球早期壳—幔演化的总结(据 Griffin et al., 2014)

Fig. 5 Summary of crust-mantle evolution

(after Griffin et al., 2014)

浅蓝色直方图为所有锆石年龄直方图,红线是锆石年龄的概率曲线,浅绿色线为 Re-Os T_{RD} 模式年龄概率曲线,波折线为陨石撞击强度(Bottke et al., 2012), LHB 为晚期强烈撞击事件(Bottke et al., 2012),科马提岩的混合,3.5~2.9Ga 期间科马提岩中 PGE 含量的均一化(Maier et al., 2010), O 同位素漂移引自(Dhuime et al., 2012)

Blue histogram shows distribution of all zircons in the database; red line shows the probability distribution of these ages; green line shows distribution of Re-Os T_{RD} model age; the revised distribution of meteorite bombardment intensity (Bottke et al., 2012) and generalized summary of older interpretations of the "Late heavy bombardment" are shown as LHB; from 3.5 – 2.9Ga, the PGE contents in komatiites homogenized; the O-isotope shift noted by Dhuime et al. (2012)

议的问题加强研究,以更深刻地认识地球早期发展演化的历史。

4.1 冥古宙期间大陆地壳成分与壳幔分异

已发现的冥古宙碎屑或继承锆石很多具有与太古宙以来岩浆锆石类似的环带状构造(Iizuka et al., 2006; Nemchin et al., 2006; Ushikubo et al., 2008),在西澳 Jacks Hills 地区碎屑锆石中见有石英+斜长石+白云母的包裹体(Hopkins et al., 2010)。由于这些特征有的学者推断冥古宙的锆石主要来自长英质岩浆岩(Harrison et al., 2005, 2008; Valley et al., 2006; Pietranik et al., 2008)。如果这些锆石来自酸性岩浆岩就意味着在冥古宙就已经存在壳幔的分异作用。但是也有的研究者通过微量元素分析提出西澳 Jack Hills 地区的碎屑锆石只有 10%来自酸性岩石,而 75%的碎屑锆石来源于中性熔体的结晶(Cavosie et al., 2006)。也有的学

者提出 Jack Hills 地区碎屑锆石中石英+斜长石+白云母包裹体是早期磷灰石+斜长石包裹体在 2.6~0.8Ga 期间变质的产物(Rasmussen et al., 2011),因此石英+斜长石+白云母包裹体并不代表早期的产物,而是晚期变质改造的产物,因此早期地壳成分以中性成分为主。如前所述,Griffin 等(2014)通过资料的综合认为地球早期的地壳以镁铁质为主,由于地幔柱或陨石的撞击形成一些中性的岩浆,冥古宙的锆石主要结晶自这些中性的岩浆。Harrison 等(2008)根据 Jack Hills 地区冥古宙—古太古代碎屑锆石的 Lu-Hf 同位素等资料的综合分析认为,地球在 4.5~4.2Ga 期间通过地幔再循环和壳内再造不断的作用,从地幔中衍生出新生地壳,到 4.35Ga 左右地壳已经具有大陆地壳的特征。Ushikubo et al. (2008)通过 Jack Hills 地区冥古宙—古太古代碎屑锆石 Li 同位素分析认为,在地球形成的最初的 250Ma 地球处于原始状态,到 4.3Ga 左右已经存在大陆性的地壳,同时在早太古代已经存在风化作用。由此可见对于地球早期地壳的成分、地壳/地幔分异的时间和过程还存在不同的认识。有的研究者(Rizo et al., 2012)认为,45.8~45.4 亿年期间还是均匀的地球增生阶段,45.4~45.3 亿年期间为金属地核与硅酸盐地幔形成,45.3~44.7 亿年分馏出现早期亏损和富集地幔储库,44.7 亿年以后出现基性的冥古宙地壳。这些可能是大撞击后残留的大撞击前的原始地球演化信息。而且,地球 44.7~40 亿年前的原始地壳没有陆壳和洋壳之分,其成分迄今仍存在巨大争论(李三忠等,2015)。

4.2 冥古宙锆石的成因与陨石撞击的记录

冥古宙,特别是冥古宙晚期对应于月球的甘露纪和前甘露纪,这一阶段是月球强烈的陨石撞击阶段,形成了月球表面的陨石坑。由于地壳表面没有保留冥古宙的大量岩石,很难从地球表面追索冥古宙的陨石撞击事件。如果这一阶段发生了强烈的陨石撞击地球事件,必然在地球上留下蛛丝马迹。于是人们开始对冥古宙的锆石与世界上最大、最老的 Sudbury 陨石撞击构造形成的锆石进行比较。Sudbury 陨石撞击坑大约形成于 1.85Ga(Krogh et al., 1982),在撞击过程中形成了大量的熔体,体积可达 8000 km³(Grieve and Cintala, 1992),这些熔体结晶后在下部形成苏长岩、中部形成石英辉长岩及上部的花岗斑岩等(Kenny et al., 2016)。一些研究者从锆石 Ti 含量和锆石 Ti 饱和温度计的结果对 Sudbury 陨石撞击形成的熔体中的锆石与西澳

Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石进行了比较, Darling et al. (2009)通过 LA-ICP-MS 分析计算了 Sudbury 陨石撞击熔岩中锆石的形成温度,其温度较 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石的形成温度高,与一般岩浆岩形成的温度相近,因此他提出 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石主体不可能来源于陨石撞击作用形成的熔岩。之后 Wielicki et al. (2012)采用同样的技术分析计算了 Sudbury 陨石撞击熔岩中锆石的形成温度,其峰值在 720°C,比 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石的形成温度略高,低于太古宙和显生宙花岗岩类的形成温度,因此他们认为 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石至少有一部分来源于陨石撞击作用。Kenny et al. (2016)采用 SIMS 技术再次对 Sudbury 陨石撞击熔岩中锆石的 Ti 含量进行了测定,并计算了其形成温度,其中苏长岩的形成温度在 650°C 左右,花斑岩形成温度在 680°C 左右,与 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石的形成温度基本一致,低于太古宙与元古宙花岗岩类的结晶温度。因此他们认为,尽管不是所有具有低温特点的冥古宙碎屑锆石都来源于陨石撞击作用,但是至少其中的一些是由于陨石撞击产生的熔体结晶所产生的。如果这种对比是可靠的,那么 Jack Hills 地区的冥古宙碎屑锆石至少有一部分来源于陨石撞击作用,也就是说一些冥古宙锆石记录了地球早期陨石撞击作用,可以通过冥古宙锆石 Ti 含量低,结晶温度低的特点追溯地球早期的撞击作用。此外,在冥古宙的碎屑锆石中还发现有金刚石的包体(Menneken et al., 2007),金刚石形成于超高压条件,由于冥古宙不具备大陆深俯冲的条件,且一些冥古宙金刚石具有撞击结构(Haggerty, 1999; Menneken et al., 2007),因此这种超高压矿物的形成很可能与陨石的撞击作用有关。但是如前所述,对于 Sudbury 陨石撞击熔岩中锆石温度的测定和计算还有不同的结果,因此冥古宙的碎屑锆石低 Ti 含量和低温结晶是否与陨石撞击有关还存在不同认识(Hopkins et al., 2008),因此还需要更深入的研究。

4.3 冥古宙锆石中有机碳包体与冥古宙的生命记录

地球上的生物是何时起源的一直是科学家不断探索的问题,到目前为止比较公认的地球早期的生命出现在 3.8Ga 左右,一个证据是在西格陵兰 Isua 表壳岩和 Akilia 表壳岩的碎屑锆石中发现了有机碳(Mojzsis et al., 1996; McKeegan et al., 2007),

另外在 Isua 表壳岩中有条带状铁建造(BIF),通常认为条带状硅铁建造是在有生物参与氧化环境形成的化学沉积岩,因此说明在 3.8Ga 前已有水和生物的存在并在地质过程中发挥着重要作用(翟明国, 2013)。3.8Ga 之前地球上是否有生命记录是科学家探索的目标。Menneken et al. (2007)在西澳 Jack Hills 地区冥古宙的碎屑锆石中发现了石墨包裹体,其¹³C 同位素接近于有机碳,由此推断冥古宙晚期地球上已有生命迹象。Bell et al. (2015)在对 Jack Hills 地区 656 粒 >3.8Ga 碎屑锆石分析的基础上,在一颗年龄为 4.1Ga 的碎屑锆石中发现了石墨,并进行了详细的碳同位素分析,其中两个包裹体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在误差范围内一致, $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-24 \pm 5\%$ 。碳同位素的这一特征与西格陵兰地区沉积岩中有机碳的特征基本一致,都在 Schopf and Kudryavtsev(2014)总结的太古宙有机碳分布范围(图 6)。由此认为锆石中石墨包裹体¹²C 富集的特点说明 4.1Ga 左右地球上可能已经存在生物成因的碳。这些资料表明在冥古宙晚期地球上可能已经存在生物。但是由于碳同位素分析的精度要求极高干扰因素较复杂,且获得的数据很少,因此冥古宙是否已经存在生命还需做更多更深入的研究。

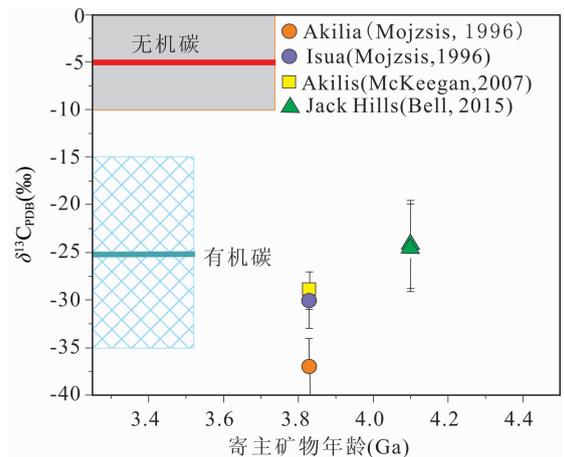


图 6 始太古代—冥古宙锆石中碳包裹体的 $\delta^{13}\text{C}$ 对赋存碳包体锆石的年龄图(据 Bell et al., 2015)

Fig. 6 $\delta^{13}\text{C}$ for Eoarchean-Hadean carbon samples and host mineral age compared with inorganic and organic carbon (after Bell et al., 2015)

除上述地质信息之外,冥古宙的碎屑锆石还可能提供一些地质信息。如在一些冥古宙的碎屑锆石边部发育有冥古宙晚期的变质锆石(Xing et al., 2014; Diwu et al., 2013),通过对变质边 U-Pb 同

位素的分析和年龄测定,可以确认这些变质边是冥古宙晚期形成的,尽管变质边中缺少矿物包体难以确定变质作用的条件,但至少说明冥古宙晚期已存在变质作用,地壳已经具有一定的厚度。再如通过锆石氧同位素的测定,有的研究者认为锆石结晶于水饱和的地壳岩石类型(Harrison et al., 2008),有的研究者则推断当时已存在地表水(Mojzsis et al., 2001),有的研究者甚至推断可能已经存在洋壳(Peck et al., 2001)。锆石中氧同位素的解释不确定因素较多,因此不单独进行介绍。

5 结论

通过对冥古宙岩石和碎屑锆石研究的介绍,本文可以得到以下结论:

(1)近年的研究表明,在地质年代表中把冥古宙单独划分出来已成为一个趋势,对于冥古宙与始太古代的界限年龄目前主要有三种认识,一种以 4.0Ga 为界,一种以 3.82Ga 为界,从 3.82~3.90Ga 为过渡阶段,另一种以 3.9Ga 为界,3.85~3.9Ga 为过渡阶段。

(2)目前已获得确切年龄的冥古宙岩石仅见两处,一处是加拿大西北阿卡斯塔片麻岩中的英云闪长岩(4002±4Ma 和 4012±6Ma)和变质花岗闪长岩(4031±11Ma),一处是东南极 Enderby Land 松山地区的英云闪长质正片麻岩(3927±16Ma);

(3)在西澳伊尔岗克拉通、北美克拉通、南美克拉通、格陵兰地盾、华北克拉通等古老克拉通及一些年轻造山带中都陆续发现了冥古宙的碎屑锆石或继承锆石,其中西澳伊尔岗克拉通的 Jack Hills 地区发现的冥古宙碎屑锆石最多,研究最深入,从锆石年代学、锆石的 Hf 同位素、O 同位素、锆石 Ti 含量及锆石结晶温度等都进行了研究。

(4)通过冥古宙碎屑锆石的研究提出了一些关于地球早期演化的重要信息,如早期地壳的性质、锆石的成因与陨石撞击作用的联系、锆石中石墨包体揭示的早期生命迹象、冥古宙期间氧化还原条件、冥古宙的变质事件等。由于目前资料所限,这些认识还存在争议,需要更深入的研究以便提供充分的证据。

总之,冥古宙的研究对于认识地球早期的演化具有重要的意义。冥古宙碎屑锆石的研究是了解和认识冥古宙地质演化过程十分重要的环节和手段,是早前寒武纪研究中重要的基础性工作,应放在重要、关键位置,不能忽视。今后应加强新地区及已经

发现冥古宙碎屑锆石地区寻找和发现冥古宙碎屑锆石的工作,同时对已经获得的冥古宙碎屑锆石应加强年代学、矿物成因、矿物包裹体、矿物同位素组成等的综合研究,以获得地球早期历史的更多信息。只有这样不断积累资料,才能获得对冥古宙时期地球演化的更多新认识。

References

- Bell E A, Boehnke P, Harrison T M, Mao W L. 2015. Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon. *Earth, Atmospheric and Planetary Sciences*, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1517557112.
- Black L P, Willian L S, Compston W. 1986. Four zircon ages from one rock: the history of a 3930Ma old granulite from Mount Sones, Enderby Land Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94: 427~437.
- Bleeker W. 2004a. Towards a "natural" Precambrian time scale. In: Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G (Eds.): *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge: Cambridge University Press, 141~146.
- Bleeker W. 2004b. Towards a "natural" time scale for the Precambrian: A proposal. *Lethaia*, 37: 1~4.
- Bottke W F, Vokrouhlicky D, Minton D, Nesvorny D, Morbidelli A, Brasser R, Simonson B, Levison H F. 2012. An Archean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature*, 485: 78~81.
- Bowring S A, King J E, Housh T B, Isachsen C E, Podsek F A. 1989. Neodymium and lead isotope evidence for enriched early Archean crust in North America. *Nature*, 340: 222~225.
- Bowring S A and Williams I S. 1999. Prisocan (4.00~4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134: 3~16.
- Caro G, Bourdon B, Birck J L. 2003. ¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd evidence from Isua metamorphosed sediments for early differentiation of the Earth's mantle. *Nature*, 423: 428~431.
- Cavosie A J, Wilde S A, Liu D Y, Weiblen P W, Valley J W. 2004. Internal zoning and U-Th-Pb chemistry of Jack Hills detrital zircons: a mineral record of early Archean to Mesoproterozoic (4348~1576 Ma) magmatism. *Precambrian Research*, 135: 251~279.
- Cavosie A J, Valley J W, Wilde S A, E. I. M. F. 2006. Correlated microanalysis of zircon: trace element, $\delta^{18}\text{O}$ and U-Th-Pb isotopic constraints on the igneous origin of complex >3900 Ma detrital grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5601~5616.
- Cloud P. 1972. A working model of the primitive earth. *American Journal of Science*, 272: 537~548.
- Cloud P. 1987. Trends, transitions, and events in cryptozoic history and their calibration: Apropos recommendations by the submission on Precambrian stratigraphy. *Precambrian Research*, 37: 257~264.

- Compston W and Pidgeon R T. 1986. Jack Hills, evidence of more very old detrital zircons in Western Australia. *Nature*, 321: 766~769.
- Cui P L, Sun J G, Sha D M, Wang X J, Zhang P, Gu A L, Wang Z Y. 2013. Oldest zircon xenocryst (4.17 Ga) from the North China Craton. *International Geology Review*, 55(15): 1902~1908.
- Darling J R, Storey C D, Hawkesworth C J. 2009. Impact melt sheet zircons and their implications for the Hadean crust. *Geology*, 37: 927~930.
- David J, Godin L, Stevenson R, O'Neil J, Francis D. 2009. U-Pb ages (3.8~2.7 Ga) and Nd isotope data from the newly identified Eoarchean Nuvvuagittuq supracrustal belt, Superior Craton, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 150~163.
- Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, Storey C D. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago. *Science*, 335: 1334~1336.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Dong Zengchan, Wang Hongliang, Chen Danling, Zhang Hong. 2010. In situ U-Pb geochronology of Hadean zircon xenocryst (4.1~3.9Ga) from the western of the Northern Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1171~1174(in Chinese with English abstract).
- Diwu C R, Sun Y, Wilde S A, Wang H L, Dong Z, Zhang H, Wang Q. 2013. New evidence for ~4.45 Ga terrestrial crust from zircon xenocrysts in Ordovician ignimbrite in the North Qinling Orogenic Belt, China. *Gondwana Research*, 23: 1484~1490.
- Duo J, Wen C Q, Guo J C, Fan X P, Li X W. 2007. 4.1 Ga old detrital zircon in western Tibet of China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 23~26.
- Froude D O, Ireland T R, Kinny P D, Williams I S, Compston W, Williams I R, Myers J S. 1983. Ion microprobe identification of 4100~4200 Myr-old terrestrial zircons. *Nature*, 304: 616~618.
- Gao S, Qiu Y M, Ling W L, McNaughton N J, Groves D I. 2001. Single zircon U-Pb dating of the Kongling high-grade metamorphic terrain; evidence for >3.2 Ga old continental crust in the Yangtze craton. *Science China (Ser. D)*, 44: 326~335.
- Gebauer D, Williams I S, Compston W, Grünfelder M. 1989. The development of the Central European Continental crust since the Early Archaean based on conventional and ion-microprobe dating of up to 3.84 Ga old detrital zircons. *Tectonophysics*, 157: 81~96.
- Geng Y S, Liu F L, Yang C H. 2006. Magmatic event at the end of the Archean in eastern Hebei Province and its geological implication. *Acta Geologica Sinica (English Version)*, 80: 819~833.
- Goldblatt C, Zahnle K J, Sleep N H, Nisbet E G. 2009. The Eons of Chaos and Hades. *Solid Earth Discussion*, 1: 47~53.
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. 2004. *A Geologic Time Scale*. 2004. Cambridge: Cambridge University Press.
- Grieve R A F and Cintala M J. 1992. An analysis of differential impact-melt crater-scaling and implications for the terrestrial impact record. *Meteoritics*, 27: 526~538.
- Griffin W L, Belousova E A, O'Neill C, O'Reilly S Y, Malkovets V, Pearson N J, Spetsius S, Wilde S A. 2014. The world turns over; Hadean-Archean crust-mantle evolution. *Lithos*, 189: 2~15.
- Guo J L, Gao S, Wu Y B, Li M, Chen K, Hu Z C, Liang Z W, Liu Y S, Zhou L, Zong K Q, Zhang W, Chen H H. 2014. 3.4 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for early Archean crustal growth. *Precambrian Research*, 242: 82~95.
- Guo J L, Wu Y B, Gao S, Jin Z M, Zong K Q, Hu Z C, Chen K, Chen H H, Liu Y S. 2015. Episodic Paleoproterozoic (3.3~2.0Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archean tectonics. *Precambrian Research*, 270: 246~266.
- Haggerty S E. 1999. A diamond trilogy: superplumes, supercontinents, and supernovae. *Science*, 285: 851~860.
- Harrison T M, Blichert-Toft J, Muller W, Albarede F, Holden P, Mojzsis S J. 2005. Heterogeneous Hadean hafnium; Evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga. *Science*, 310: 1947.
- Harrison T M, Schmitt A K, McCulloch M T, Lovera O M. 2008. Early (≥ 4.5 Ga) formation of terrestrial crust: Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$, and Ti thermometry results for Hadean zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 476~486.
- Hartmann L A, Endo I, Suita M T F, Santos J O S, Frorfg J C, Cazneiro M, McNaughton N J, Barly M E. 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South America Earth Science*, 20: 273~285.
- Hopkins M, Harrison T M, Manning C E. 2008. Low heat flow inferred from >4 Gyr zircons suggests Hadean plate boundary interactions. *Nature*, 456: 493~496.
- Hopkins M, Harrison T M, Manning C E. 2010. Constraints on Hadean geodynamics from mineral inclusions in >4 Ga zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 298(3): 367~376.
- Huang G, Niu G Z, Zhang Z W, Wang X L, Xu X Y, Guo J, Yu F. 2013. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Aermantai ophiolitic mélangé, East Junggar, northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 58(30): 3645~3663.
- Iizuka T, Horie K, Komiya T, Maruyama S, Hirata T, Hidaka H, Windley B F. 2006. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34(4): 245~248.
- Iizuka T, Komiya T, Ueno Y, Katayama I, Uehara Y, Maruyama S, Hirata T, Johnson S P, Dunkley D J. 2007. Geology and geochronology of the Acasta Gneiss Complex, northwest Canada: New constraints on its tectonothermal history. *Precambrian Research*, 153: 179~208.
- Kemp A I S, Wilde S A, Hawkesworth C J, Coath C D, Nemchin A,

- Pidgeon R T, Vervoort J D, DuFrane S A. 2010. Hadean crustal evolution revisited; New constraints from Pb-Hf isotope systematics of the Jack Hills zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 296: 45~56.
- Kenny G G, Whitehouse M J, Kamber B S. 2016. Differentiated impact melt sheets may be a potential source of Hadean detrital zircon. *Geology*, 44(6): 435~438.
- Kinny P D, Wijbrans J R, Froude D O, Williams I S, Compston W. 1990. Age constraints on the geological evolution of the Narryer Gneiss Complex, Western Australia. *Australia Journal of Earth Science*, 37: 51~69.
- Kinny P D and Nutman A P. 1996. Zirconology of the Meeberrie gneiss, Yilgarn Craton, Western Australia; An early Archaean migmatite. *Precambrian Research*, 78: 165~178.
- Krogh T E, McNutt R H, Davis G L. 1982. Two high precision U-Pb ages for the Sudbury Nickel Irruptive. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19: 723~728.
- Kröner A, Hegner E, Lehmann B, Jeinhorst J, Wingote H T G, Liu D Y, Eimulov P. 2008. Palaeozoic arc magmatism in the Central Asian Orogenic Belt of Kazakhstan; SHRIMP zircon ages and whole-rock Nd isotopic systematics. *Journal of Asian Earth Science*, 32: 118~130.
- Li L M, Lin S F, Davis D W, Xiao W J, Xing G F, Yin C Q. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 255: 30~47.
- Li S Z, Xu L Q, Zhang Z, Sun W J, Dai L M, Guo L L, Cao H H, Zhang G W. 2015. Precambrian geodynamics(II): early Earth. *Earth Science Frontiers*, 22(6): 10~26 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li Z X, Li W X. 2014. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the generation and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China; A synthesis. *Gondwana Research*, 25: 1202~1215.
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, Wu J S, Shen Q H. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339~342.
- Liu Duni, Nutman A P, Williams J S, Compston W, Wu Jiashan, Shen Qihuan. 1994. The remnants of ≥ 3800 Ma crust in Sino-Korean Craton; The evidence from Ion Microprobe U-Pb dating of zircons. *Acta Geoscientia Sinica*, (1~2): 2~13 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, Wu J S, Zhou H Y, Dong C Y, Yin X Y. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 200~231.
- Liu S J, Wan Y S, Sun H Y, Nutman A P, Xie H Q, Dong C Y, Ma M Z, Liu D Y, Jahn B M. 2013. Paleo-to Eoarchean crustal evolution in eastern Hebei, North China Craton; New evidence from SHRIMP U-Pb dating and in-situ Hf isotopic study of detrital zircons from paragneisses. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 4~17.
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun. 2005. Unscramble the ISC 2004 and special reference to Precambrian from 2004 to 2008. *Journal of Stratigraphy*, 29(2): 180~187 (in Chinese with English abstract).
- Maas R, Kinny P D, Williams I S, Froude D O, Compston W. 1992. The Earth's oldest known crust: a geochronological and geochemical study of 3900~4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 1281~1300.
- Maier W D, Barnes S J, Campbell I H, Fiorentini M L, Peltonen P, Barnes S J, Smithies H. 2010. Progressive mixing of meteoritic veneer into the early Earth's deep mantle. *Nature*, 460: 620~623.
- McKeegan K D, Kudryavtsev A B, Schopf J W. 2007. Raman and ion microscopic imagery of graphitic inclusions in apatite from older than 3830 Ma Akilia supracrustal rocks, West Greenland. *Geology*, 35(7): 591~594.
- Mei Mingxiang. 2016. System-level division of the Archean Eonothem; An important advancement and a bold proposal of Precambrian chronostratigraphical division. *Journal of Stratigraphy*, 40(2): 186~208 (in Chinese with English abstract).
- Menneken M, Nemchin A A, Geisler T, Pidgeon R T, Wilde S A. 2007. Hadean diamonds in zircon from Jack Hills, Western Australia. *Nature*, 448: 917~920.
- Mojzsis S J, Arrhenius G, McKeegan K D, Harrison T M, Nutman A P, Friend C R L. 1996. Evidence for life on earth before 3800 million years ago. *Nature*, 384: 55~59.
- Mojzsis S J, Harrison T M, Pidgeon R T. 2001. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4300 Myr ago. *Nature*, 409: 178~181.
- Moorbath S. 2005. Oldest rocks, earliest life, heaviest impacts, and the Hadean-Archaean transition. *Applied Geochemistry*, 20: 819~824.
- Mueller P A, Wooden J L, Nutman A P. 1992. 3.96 Ga zircons from an Archean quartzite, Neartooth Mountains, Montana. *Geology*, 20: 327~330.
- Mueller P A, Wooden J L, Nutman A P, Mock V W. 1998. Early Archean crust in the northern Wyoming province evidence from U-Pb ages of detrital zircons. *Precambrian Research*, 91: 295~307.
- Myers J S. 1988. Early Archaean Narryer Gneiss Complex, Yilgarn craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 38: 297~307.
- Nadeau S, Chen W, Reece J, Lachhman D, Ault R, Faraco M T L, Fraga L M, Reis N J, Bettiolo L M. 2013. Guyana; the lost Hadean crust of South America? *Brazil Journal of Geology*, 43: 601~606.
- Nelson D R, Robinson B W, Myers J S. 2000. Complex geological histories extending ≥ 4.0 Ga deciphered from xenocryst zircon microstructures. *Earth and Planetary Science Letters*, 181: 89

~102.

- Nemchin A A, Pidgeon R T, Whitehouse M J. 2006. Re-evaluation of the origin and evolution of >4.2 Ga zircons from the Jack Hills metasedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 244: 218~233.
- Nutman A P, Kinny P D, Compston W, Williams I S. 1991. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Narryer Gneiss Complex, west Australia. *Precambrian Research*, 52: 275~300.
- Nutman A P, McGregor V R, Friend C R L, Bennett V C, Kinny P D. 1996. The Itsaq gneiss complex of southern West Greenland: The world's most extensive record of early crustal evolution. *Precambrian Research*, 78: 1~39.
- Nutman A P, Bennett V C, Friend C R L, Norman C D. 1999. Metagneous (non-gneissic) tonalites and quartz-diorites from an extensive ca. 3800 Ma terrain south of the Isua supracrustal belt, southern West Greenland: Constraints on early crust formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137: 364~388.
- Nutman A P, Friend C R L, Bennett V C. 2002. Evidence for 3650~3600 Ma assembly of the northern end of the Itsaq Gneiss complex, Greenland; Implications for early Archean tectonics. *Tectonics*, (21):28.
- Nutman A P, Friend C R L, Horie K, Hidaka H. 2007. The Itsaq Gneiss Complex of southern West Greenland and the construction of Eoarchean crust at convergent plate boundaries. In: Van Kranendonk M J, Smithies R H, Bennett V (Eds.), *Earth's Oldest Rocks. Developments in Precambrian Geology*, 15. Amsterdam: Elsevier, 187~218.
- Nutman A P and Heiss J. 2009. A granitic inclusion suite within igneous zircons from a 3.81 Ga tonalite (W. Greenland): Restrictions for Hadean crustal evolution studies using detrital zircons. *Chemical Geology*, 261:76~81.
- Nutman A P, Friend C R L, Paxton S. 2009. Detrital zircon sedimentary provenance ages for the Eoarchean Isua supracrustal belt southern West Greenland; Juxtaposition of an imbricated ca. 3700 Ma juvenile arc against an older complex with 3920~3760 Ma components. *Precambrian Research*, 172: 212~233.
- Nutman A P, Wan Y S, Du L L, Friend C R L, Dong C Y, Xie H Q, Wang W, Sun H Y, Liu D Y. 2011. Multistage late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189: 43~65.
- O'Neil J, Carlson R W, Francis D, Stevenson R K. 2008. Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust. *Science*, 321: 1828~1831.
- O'Neil J, Francis D, Carlson R. 2011. Implications of the Nuvvuagittuq greenstone belt for the formation of Earth's early crust. *Journal of Petrology*, 52: 985~1009.
- Paquette J L, Barbosa J F S, Rohais S, Cruz S C P, Goncalves P, Peucat J J, Leal A B M, Santos-Pinto M, Martin H. 2015. The geological roots of South America; 4.1Ga and 3.7Ga zircon crystals discovered in NE Brazil and NW Argentine. *Precambrian Research*, 211: 49~55.
- Peck W H, Valley J W, Wilde S A, Graham C M. 2001. Oxygen isotope ratios and rare earth elements in 3.3 to 4.4 Ga zircons: ion microprobe evidence for high $\delta^{18}\text{O}$ continental crust and oceans in the Early Archean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 4215~4229.
- Pidgeon R T and Wilde S A. 1998. The interpretation of complex zircon U-Pb systems in Archean granitoids and gneisses from the Jack Hills, Narryer Gneiss Terrane, Western Australia. *Precambrian Research*, 91: 309~332.
- Pidgeon R T, Wilde S A, Compston W. 1990. U-Pb ages of zircons from conglomerate clasts in the Jack Hills Metasedimentary Belt, Yilgarn Craton, Western Australia. 7th International ICOG Conference, Abstracts, p. 78.
- Pidgeon R T. 1992. Recrystallisation of oscillatory zoned zircon: some geochronological and petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 463~472.
- Pietranik A B, Hawkesworth C J, Storey C D, Kemp A I S, Sircombe K N, Whitehouse M J, Bleeker W. 2008. Episodic mafic crust formation from 4.5~2.8 Ga; new evidence from detrital zircons, Slave Craton, Canada. *Geology*, 36: 875~878.
- Plumb K A and James H L. 1986. Subdivision of Precambrian time: Recommendations and suggestions by the subcommission on Precambrian stratigraphy. *Precambrian Research*, 32: 65~92.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, Groves D I, Ling W L. 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.
- Rasmussen B, Fletcher I R, Muhling J R, Gregory C J, Wilde S A. 2011. Metamorphic replacement of mineral inclusions in detrital zircon from Jack Hills, Australia; implications for the Hadean Earth. *Geology*, 39: 1143~1146.
- Rizo H, Boyet M, Blichert-Toft J, et al. 2012. The elusive Hadean enriched reservoir revealed by 142 Nd deficits in Isua Archean rocks. *Nature*, 491: 96~100.
- Schopf J W and Kudryavtsev A B. 2014. Biogenicity of Earth's earliest fossils: Evolution of Archean Crust and Early Life. In: Dilek Y, Furnes H Modern eds. *Approaches in Solid Earth Sciences*. Springer, Dordrecht, The Netherlands), 7: 333~349.
- Shen Q H and Qian X L. 1995. Assemblages episodes and tectonic evolution in the Archean of China. *Episode*, 18(1~2): 44~48.
- Song B, Nutman A P, Liu D Y, Wu J S. 1996. 3800 to 2500Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1~3): 79~94.
- Su Wenbo. 2014. A review of the revised Precambrian Time Scale (GTS2012) and the research of the Mesoproterozoic chronostratigraphy of China. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 119~138 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Diwu C R, Wang H L et al. 2008. Paleoproterozoic crustal

- remnants in the western North Qinling Orogenic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(12): A916.
- Ushikubo T, Kita N T, Cavosie A J, Wilde S A, Rudnick R L, Valley J W. 2008. Lithium in Jack Hills zircons: Evidence for extensive weathering of Earth's earliest crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 272: 666~676.
- Valley J W, Cavosie A J, Wilde S A. 2006. What have we learned from pre-4 Ga zircons? *Goldschmidt Conference Abstracts*, p. A664.
- Van Kranendonk M J, Altermann W, Beard B L, Hoffman P F, Johnson C M, Kasting J F, Melezhik V A, Nutman A P, Papineau D, Pirajno F. 2012. A Chronostratigraphic division of the Precambrian. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M. *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam: Elsevier. 299~392.
- Wan Yusheng, Song Biao, Wu Jiashan, Zhang Zongqing, Liu Dunyi. 1999. Geochemical and Nd and Sr isotopic compositions of 3.8 Ga trondhjemitic rocks from the Anshan area and their significance. *Acta geologica Sinica*, 73(1): 25~36 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Liu Dunyi, Dong Chunyan, Nutman A, Wilde S A, Wang Wei, Xie Hangqiang, Yin Xiaoyan, Zhou Hongying. 2009. The oldest rocks and zircons in China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1793~1807 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Liu Shoujie, Ma Mingzhu, Xie Shiwen, Ren Peng, Sun Huiyi, Liu Dunyi. 2015. Some progress in the study of Archean basement of the North China Craton. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(6): 685~700 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongliang, Chen Liang, Sun Yong, Liu Xiaoming, Xu Xueyi, Chen Juanlu, Zhang Hong, Diwu Chunrong. 2007. ~ 4.1 Ga xenocrystal zircon from Ordovician volcanic rocks in western part of North Qinling Orogenic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 52(21): 3002~3010.
- Wang Y F, Li X H, Jin W, Zhang J H. 2015. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton. *Precambrian Research*, 263: 88~107.
- Wang Zejiu, Huang Zhigao, Yao Jianxin, Ma Xiulan. 2014. Characteristics and main progress of the Stratigraphic Chart of China and directions. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 271~276 (in Chinese with English abstract).
- Wen Chunqi, Duo Ji, Fan Xiaoping, Guo Jianci, Ni Zhiyao, Li Xiaowen, Shi Yuruo, Wen Quan. 2006. Detrital Zircon of 4100 Ma in Quartzite in Burang, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1249~1261 (in Chinese with English abstract).
- Wielicki M M, Harrison T M, Schmitt A K. 2012. Geochemical signatures and magmatic stability of terrestrial impact produced zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 321: 20~31.
- Wilde S A, Valley J W, Peck W H, Graham C M. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409: 175~178.
- Wilde S A, Valley J W, Kita N T, Cavosie A J, Liu D Y. 2008. SHRIMP U-Pb and CAMECA 1280 Oxygen isotope results from ancient detrital zircons in the Caozhuang Quartzite, Eastern Hebei, North China Craton: evidence for crustal reworking 3.8 Ga ago. *American Journal of Science*, 308: 185~199.
- Wu F Y, Yang J H, Liu X M, Li T S, Xie L W, Yang Y H. 2005. Hf isotopes of the 3.8 Ga zircons in eastern Hebei Province, China: implications for early crustal evolution of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2473~2480.
- Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, Sun D Y. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 523~545.
- Wyche S, Nelson D, Riganti A. 2004. 4350 ~ 3130 Ma detrital zircons in the Southern Cross Granite-Greenstone terrane, Western Australia: Implications for the early evolution of the Yilgarn Craton. *Australian Journal of Earth Sciences*, 51: 31~45.
- Xing G F, Wang X L, Wan Y S, Chen Z H, Jiang Y, Kitajima K, Ushikubo T, Gopon P. 2014. Diversity in early crustal evolution: 4100 Ma zircons in the Cathaysia Block of southern China. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep05143.
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Chen Zhihong, Jiang Yang, Hong Wentao, Jin Guodong, Yu Minggang, Zhao Xilin, Duan Zheng. 2015. The Discovery of the Asian Oldest Zircons in Longquan, Cathaysia Block. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(4): 395~402 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y J, Du Y S, Huang H W, Huang Z Q, Hu L S, Zhu Y H, Yu W C. 2012. Detrital zircon of 4.1 Ga in South China. *Chinese Science Bulletin*, 57(33): 4356~4362.
- Yao J L, Shu L S, Santosh M. 2011. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry: New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China. *Gondwana Research*, 20: 553~567.
- Yu J H, O'Reilly Y S, Wang L J, Griffin W L, Jiang S Y, Wang R C, Xu X S. 2007. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 13~22.
- Yuan Wei, Yang Zhenyu, Yang Jinhui. 2012. The discovery of Hadean detrital zircon in Late Devonian strata in Hexi Corridor, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1029~1036 (in Chinese with English abstract).
- Zeh A, Gerdes A, Klemd R, Barton Jr J M. 2008. U-Pb and Lu-Hf isotope record of detrital zircon grains from the Limpopo Belt - Evidence for crustal recycling at the Hadean to early-Archean transition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 5304~5329.
- Zhai Mingguo. 2013. Secular changes of metallogenic systems link with continental evolving of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1759~1773 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao Z F, Gao S, Wu F Y. 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze Craton of China. *Precambrian Research*, 146: 16~34.

Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y. 2004. 3.6Ga lower crust in central China: New evidence on the assembly of the North China Craton. *Geology*, 32(3): 229~232.

参 考 文 献

第五春荣, 孙勇, 董增产, 王洪亮, 陈丹玲, 陈亮, 张红. 2010. 北秦岭西段冥古宙锆石(4.1~3.9 Ga)年代学新进展. *岩石学报*, 26(4): 1171~1174.

李三忠, 许立青, 张臻, 孙文军, 戴黎明, 郭玲莉, 曹花花, 张国伟. 2015. 前寒武纪地球动力学(II): 早期地球. *地学前缘*, 22(6): 10~26.

刘敦一, Nutman A P, Williams J S, Compston W, 伍家善, 沈其韩. 1994. 中朝克拉通老于 38 亿年的残余陆壳: 离子探针质谱锆石微区 U-Pb 年代学. *地球学报*, (1-2): 2~13.

陆松年, 王惠初, 李怀坤. 2005. 解读国际地层委员会 2004 年前寒武纪地层表及 2004-2008 参考方案. *地层学杂志*, 29(2): 180~187.

梅冥相. 2016. 太古宇的建系: 前寒武纪年代地层划分大胆的尝试和重要的进展. *地层学杂志*, 40(2): 186~208.

苏文博. 2014. 2012 年全球前寒武纪新年表与中国中元古代年代地层学研究. *地学前缘*, 21(2): 119~138.

万渝生, 宋彪, 伍家善, 张宗清, 刘敦一. 1999. 鞍山 3.8Ga 奥长花岗岩的地球化学和 Nd-Sr 同位素组成及其意义. *地质学报*, 73(1): 25~36.

万渝生, 刘敦一, 董春艳, Nutman A, Wilde S A, 王伟, 颜炳强, 殷小艳, 周红英. 2009. 中国最老的岩石和锆石. *岩石学报*, 25(8): 1793~1807.

万渝生, 董春艳, 颜炳强, 刘守偈, 马铭株, 谢士稳, 任鹏, 孙会一, 刘敦一. 2015. 华北克拉通太古宙研究若干进展. *地球学报*, 36(6): 685~700.

王洪亮, 陈亮, 孙勇, 柳小明, 徐学义, 陈隽璐, 张红, 第五春荣. 2007. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1Ga 的捕虏锆石. *科学通报*, 52(14): 1685~1693.

王泽九, 黄枝高, 姚建新, 马秀兰. 2014. 中国地层表及说明书的特点及主要进展. *地球学报*, 35(3): 271~276.

温春齐, 多吉, 范小平, 郭建慈, 倪志耀, 李小文, 石玉若, 温泉. 2006. 西藏普兰石英岩中发现 41 亿年碎屑锆石. *地质学报*, 80(9): 1249~1261.

吴福元, 杨进辉, 柳小明, 李铁胜, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 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. *科学通报*, 50(18): 1996~2003.

邢光福, 杨祝良, 陈志洪, 姜杨, 洪文涛, 靳国栋, 余明刚, 赵希林, 段政. 2015. 华夏地块龙泉地区发现亚洲最古老的锆石. *地球学报*, 36(4): 395~402.

袁伟, 杨振宇, 杨进辉. 2012. 河西走廊晚泥盆世地层中冥古宙碎屑锆石的发现. *岩石学报*, 28(4): 1029~1036.

翟明国. 2013. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系. *岩石学报*, 29(5): 1759~1773.

Progress and Problems in the Hadean Research of the Globe

SHEN Qihan, GENG Yuansheng, SONG Huixia

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China

Abstract

Hadean is the oldest period of the Earth history, but it doesn't get enough attention or recognition from the worldwide geologists due to the lack of reliable rock records. The term Hadean, which is used to define the period from the formation of the Earth to the appearance of the oldest rocks, was used in the suggested International Geological Time Scale in 2004AD. At present, the boundary of Hadean and Archaean is not definite. Geologists have different opinions on it (3.85Ga, 4.0Ga, 4.03Ga).

Now, the Hadean rocks are discovered in two places of the world. One is Acasta, Canada, where two tonalities and one metamorphic granodiorite were found. The zircon U-Pb ages of the former are 4002 ± 4 Ma and 4012 ± 6 Ma while the later is 4031 ± 1 Ma. Another place is Mount Sones, East Antarctica, where granulite facies tonalitic gneiss was found and its U-Pb age is 3927 ± 10 Ma. The oldest supracrustal rock (≥ 3870 Ma) of the World was found in Greenland.

In the antique Hadean, the rocks, formed in the earliest 600~700 Ma. of the Earth history, experienced meteorite impact, crust recirculation and remelting, had disappeared mostly. At present, the Hadean is mainly recorded in the detrital or inherited zircons of the late rocks.

>3800 Ma detrital zircons have been found in more than ten areas in the world. The Jack Hills in Yilgarn Craton, western Australia, is the place which has the complete time spectrum of zircons. The ages of zircons in Jack hill are between 3800~4404Ma (most of them are between 3900~4200Ma) and the peak

ages are 3840Ma, 3900~3920Ma, 4000~4200Ma, 4260~4300Ma, 4404Ma. Up to now, the accepted oldest detrital zircon age is 4404Ma. In addition, the Hadean detrital zircons are found in North America Craton, South Africa Craton, North China Craton and some young orogenic belts. These zircons are important media to study the Hadean geological events.

According to studying on the Hadean detrital zircons, researchers raise many valuable questions that are worthy of further study. The first is the nature of the earliest crust. Some of the Hadean detrital zircons have compositional zoning similar to magmatic zircons after Archean, so the protolith of the detrital zircons are considered to be granitic rocks derived from remelting of the previous crust. Integrated analyses of the Hf isotopic characteristics of the detrital zircons indicate that they are derived from intermediate magma, so we can infer that the Hadean crust had intermediate composition. The genesis of the Hadean zircons is also an important subject. Basing on the study on content of Ti element in zircons, the crystallization temperature calculated through the Ti geothermometer and certain structural feature of zircons, some researchers insist that a large number of Hadean zircons are formed from the melting and crystallization caused by the meteoritic impact. Studying on the Hadean zircons is an important mean of retrospecting the impact events of the Earth. Diamonds and graphites are found in the 4300Ma detrital zircons. The diamonds indicate that the protolith experienced high pressure environment. The isotopic composition of graphite is similar to that of the organic carbon, so some researchers think it's the sign of life. Some detrital zircons aged 4000Ma in several areas have a low Th/U ratio, which is the character of metamorphism, indicating the crust is considerable thick then.

A number of important problems have been proposed by researching on Hadean detrital zircons. However, if we want to get credible and scientific understanding to the Hadean geology events and processes, more data should be obtained. So we should find more geological bodies and detrital zircons related to the Hadean, and strengthen the research on detrital zircons that have been found.

Key words: Hadean; Acasta gneiss; detrital zircon; meteoritic impact; primitive crust