

文章编号 1001-8166(2001)06-0777-08

华北燕山地区中新元古代沉积记录及其古气候、古环境特征

吉利明^{1,2}, 陈践发¹, 郑建京¹, 王 杰¹

(1. 中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘 要 大量研究表明大约 1.0 ~0.8 Ga BP 时期, 全球形成统一的 Rodinia 超大陆, 当时华北地块处于中低纬度地区, 与劳伦及西伯利亚地块相连。燕山地区的中上元古界是以大套碳酸盐建造为主的结晶基底之上的第一盖层沉积。元古代地球大气—海洋系统发生了 O₂ 增多、CO₂ 减少的古全球变化, 1.85 Ga BP 开始由还原性转变为氧化性, 随着条带状硅铁沉积在全球的终止, 出现广泛的红土堆积。甾烷、藿烷及类异戊二烯等生物标志物在前寒武纪沉积中的大量检出, 表明早在古元古代地球上就可能已经有真核生物、真菌及光合细菌存在。近年来燕山中元古界长城系、蓟县系发现大量地球早期生物化石, 包括真核藻类、多细胞藻类、颗石藻、藻叠层石及后生动物遗迹等, 对探讨各种生命形式的起源与演化、恢复古环境与古气候变化过程都具有重要的意义。

关 键 词 华北, 中新元古代, 古气候, 古环境
中图分类号 P53 **文献标识码** A

尽管人们早已认识到元古宙是地球生命起源、分化的关键时期, 并且当时特殊的古气候、古环境在促进生命起源、演化中起到了主导性的重要作用。但迄今由于时代久远和地质记录的不完整, 对元古宙地球生物界及其生存环境的认识远未达到较深入的程度, 仅仅停留在一些概念性、轮廓性的认识上, 在一定程度上带有主观臆想的成分。而这些认识主要来源于对包括我国华北、扬子等古地核区在内的世界各地元古宙沉积记录的研究基础上, 这些缺乏系统性的研究成果主要涉及大陆板块的增生与汇聚、地层沉积间断与岩性组合所反映的大规模地壳运动、古气候环境的地球化学标志、古生物化石记录等方面。我国华北燕山地区中上元古界地层发育齐全, 厚度巨大, 并且保存着各种前寒武纪生物类型的化石, 不仅是中上元古界地层单元命名的标准剖面

所在地, 而且也是研究地球早期生命起源与演化的关键地区之一, 因而近年来得到地学界的广泛重视。

1 大地构造与板块运动背景

1.1 中新元古代超大陆的形成

许多学者将地史上大约 10 亿年以前由于大陆相互碰撞对接形成的超大陆称为 Rodinia, 有关中国古大陆(包括华北、塔里木、扬子和华夏地块等)在超大陆中的位置, 李正祥等^[1,2] 有较为深入的研究, 认为从古元古代末期至新元古代末, 华北地块与劳伦及西伯利亚联合在一起, 其南缘和东缘也先后与南美和波罗的克拉通相连, 华夏地块曾经是劳伦大陆的一部分, 而扬子地块则位于劳伦—西伯利亚—华北克拉通和东冈瓦纳之间, 并与华夏地块拼合为华南地块, 华北与华南地块之间可能由巨大的西伯

收稿日期: 2001-02-22, 修改日期: 2001-04-26.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“中国典型叠合盆地优质烃源岩发育环境及控制因素”(编号: G1999043306), 中国科学院兰州地质研究所国家气体地球化学重点实验室创新项目(编号: KFCX04)资助.

作者简介: 吉利明(1963-) 男, 甘肃岷县人, 副研究员, 主要从事古生物学与地球化学研究工作. E-mail: jilm@sina.com

利亚地块相隔离。

多年来建立的东冈瓦纳、劳伦 (Laurentia) 古陆及圣弗朗西斯科 (San Francisco)、刚果 (Congo) 等地块上的古地磁极模拟曲线均支持了大约 1.0 ~ 0.8 Ga BP 之间存在 Rodinia 超级大陆的假说, 华北地块 1.3 ~ 0.5 Ga BP 时期的大部分磁极数据表明, 本地区当时处于中低纬度地区^[3]。也有大量证据表明华北与扬子地块在北秦岭一带新元古代早期可能有过强烈的汇聚, 而晚期 (0.8 或 0.85 Ga BP) 可能由汇聚转变为裂解^[4]。

1.2 华北地台中新元古代构造运动

华北地台北部地区中新元古代的地壳运动经历了两次大的构造旋回, 即燕辽旋回 (1.8 ~ 0.85 Ga) 和满家滩旋回 (0.85 ~ 0.6 Ga BP)^[5]。燕辽旋回为本区中、新元古代拗拉谷发生—发展—消亡阶段, 也就是地台区的第一盖层沉积和地槽区中新元古代洋壳形成阶段。该阶段早期的白云鄂博亚旋回 (1.8 ~ 1.4 Ga BP) 的伸展裂陷作用为拗拉谷的发生、发展期, 形成了长城系, 什干亚旋回的伸展拗陷作用为拗拉谷发展、萎缩期, 形成蓟县系; 风河亚旋回收缩、拗折作用为拗位谷萎缩、消亡期, 沉积了青白口系。地台北缘为被动大陆边缘。满家滩旋回使地槽区向地台俯冲, 导致地台第一次抬升隆起遭受剥蚀, 仅在局部拗陷区域沉积震旦系。

以燕山地区为代表的中上元古界地层为结晶基底上形成的第一期裂谷—地堑式盆地沉积, 是巨厚的裂谷型和被动陆缘沉积^[6]。本区的中新元古代沉积序列以蓟县剖面最为完整, 从长城系上部的高于庄组至整个蓟县系, 主要为大套海相碳酸盐岩建造, 盛产叠层石礁, 推测当时本区位于地势平缓的被动大陆边缘, 处于较低纬度的高温海域。古地磁资料证实, 中新元古代时期蓟县位于中低纬度内, 特别是长城纪高于庄组和蓟县纪雾迷山组沉积时期, 基本处于古赤道附近^[7]。从青白口纪开始, 盆地附近的大陆逐渐隆起, 提供的陆源碎屑增多, 青白口纪末整个盆地隆起。在长城纪和蓟县纪, 燕山区与胶辽徐淮地区可能分属于两个不同的单元, 大约在青白口纪初期, 两个地块逐渐汇聚, 共同接受了相似的青白口纪沉积, 之后的碰撞直接导致燕山区的大面积抬升, 其接合线大体与郯庐断裂带接近。元古宙地球经历了两次全球巨旋回^[8] 2.5 ~ 1.6 Ga BP, 1.6 ~ 0.8 Ga BP, 每一巨旋回都是以泛大陆的解体开始, 以一个新的超级大陆的拼合结束, 两个泛大陆大约分别形成于 2.7 ~ 2.5 Ga BP、1.8 ~ 1.6 Ga BP。

2 沉积物发育特征

根据沉积发育特征和大地构造背景分析, 华北北部地区中新元古代的岩相古地理演变过程可划分为 3 个阶段^[9]。

2.1 长城纪—断陷海槽演化阶段

长城系沉积时期, 华北北部形成了巨大的东北向裂谷带, 经历了强烈升降运动, 形成活动性较强的海槽。海槽北边有内蒙—冀北古陆, 西边是山西古陆, 东南是山海关古陆和鲁西隆起。蒙古外海水经铁岭从东北向西南侵入海槽。高于庄期可能有另一支海水从西北不尚义向东南进入海槽。海槽中沉积物以碎屑岩为主, 碎屑的成分成熟度较低, 地层厚度横向变化较大, 许多地区见有火山岩夹层, 沉积速率较大 (最大沉积速率为 38.28 m/Ma)。说明当时大地构造活动较强烈, 因此形成较大的地形高差及火山活动。长城系沉积时期, 构造活动性较强的另一表现是地壳的频繁升降运动。长城系下部以碎屑岩为主, 上部以白云岩为主, 构成一个较大的沉积旋回, 反映有一次规模较大的升降运动, 旋回的顶底都有不整合界面。长城系可进一步划分成三个次级沉积旋回, 各沉积旋回之间都有不整合界面, 反映这一时期华北北部曾多次发生构造运动, 而这一阶段各时期的岩相古地理就是受这一构造环境所控制。

在北京十三陵中元古界的长城系串岭沟组出现一系列的地震滑塌、砂体液化、层内错断和角砾化构造等宏观标志及火山晶屑、火山玻璃假像等微观标志, 并且出现 Re、Os 元素含量及其同位素和 Ir 含量的异常, 证明在华北大红山谷期大规模火山喷发事件出现之前的串岭沟期就已经有火山、地震等活动存在^[10]。

2.2 蓟县纪—强烈凹陷演化阶段

蓟县系沉积时期, 华北北部又一次凹陷, 海水侵入, 接受沉积。较之长城系沉积时期, 蓟县系沉积时期华北北部地壳活动性明显减弱, 稳定性明显加强。其表现是: 火山活动规模较小, 影响不大; 沉积速率减小, 最大沉积速率 (雾迷山组沉积时期) 是 18.98 m/Ma, 地形高差不大, 沉积物以白云岩和白云质灰岩为主, 区域上地层的岩性比较稳定, 沉积盆地由断陷线型延伸轮廓变为凹陷短轴轮廓。但就其巨大沉降幅度 (蓟县最大, 沉降幅度为 3 416 m) 和较大沉降幅度差异而论, 蓟县系沉积时期华北北部仍可称得上强烈凹陷, 其沉积速率比典型地台区大, 有零星火山活动也是其强烈凹陷的佐证。这一时期华北北

部凹陷海的沉积物由砂泥质白云岩、白云岩构成第一个较大的沉积旋回,其间因地壳升降的微小反复,形成杨庄组砂泥质白云岩到雾迷山组白云岩和洪庄子组页岩到铁岭组白云岩、白云质灰岩两个次级沉积旋回。

天津蓟县中上元古界碳酸盐氧、碳同位素研究表明,本地区中上元古界的白云岩、白云质灰岩等碳酸盐沉积均为陆表海浅潮下带以上原生形成的^[11]。长城纪末期形成的团山子组与蓟县纪早期形成杨庄组白云岩的同位素¹³O及¹⁸O值均出现较大的偏负,可能是由于其形成于潮坪之上,经受了长期的大气淡水淋滤后才胶结成岩。

2.3 青白口纪—稳定陆表海演化阶段

铁岭组沉积末期,华北北部虽上升成陆地,但地形高差不大,气候温暖潮湿,形成大面积的古风化壳。青白口系沉积时期,华北北部稳定下降,海水侵入并逐渐扩大,形成广阔陆表海。沉积物是稳定型的石英砂岩、页岩和灰岩,地层厚度不大,区域岩相稳定,沉积速率2~3 m/Ma,无火山岩夹层,是典型地台盖层,这充分表明华北北部当时已进入典型的地台稳定阶段。下马岭组沉积时期,沉积中心在宣化一带。地层厚度较大,向东下马岭组地层变薄。而龙山组和景儿峪组沉积时期,沉积中心不明显,并有向山海关古陆超覆的趋势,表明这一时期地壳升降运动的差异已不明显,其升降运动的整体性则明显反映出来,这是当时华北北部地壳相对稳定的又一标志。龙山组和景儿峪组是连续海侵形成的一个统一的沉积旋回,龙山组沉积时期,地形比较复杂,区域上岩相变化比较明显,景儿峪沉积时期,地形很平坦,岩相在区域上的分异则不明显。

3 古大气圈与生物标志物

3.1 元古宙大气特性及其演变

早期地球的大气圈普遍认为是由 N_2 、 CO_2 、 H_2O 和微量 H_2 、CO、HCl等组成的弱还原性混合物,早期海洋中也较均衡地溶解有这些成分,而显酸性^[12],当时上地幔的分异有助于保持大气的还原性,这种环境和物质条件有利于前生物体的合成。3.8~2.3 Ga BP,大气圈由弱还原状态转变为弱氧化状态,浮游植物光合作用的增强,使大气中 O_2 不断增多, CO_2 含量不断减少, CO_2 的减少增强了太阳光的透度性,进一步促进了生物的发展。1.85 Ga BP左右,在大约0.02个大气压的古大气中, O_2 含量迅速增加,促使真核生物快速演化。0.6~0.9 Ga BP大

气圈已进入复杂化阶段,大气分压进一步提高,导致晚震旦—早寒武世动物群的爆发式演化^[13]。

全球条带状硅铁沉积的时间、空间分布在一定程度上间接反映了元古宙不同时期大气环境的演变过程。大约90%以上的铁矿产自前寒武纪条带状硅铁建造,而且呈全球性分布,其规模与时代分布特性代表了当时沉积环境的特殊性,成矿年代为2.6~1.9 Ga BP,它的发生、发展和终结是地球早期岩石圈、大气圈、水圈和生物圈交互作用的结果,而且恰好发生在古大气由贫 O_2 到富 O_2 全球性转变之前^[14]。2.4 Ga BP以前大气—海洋系统整体上缺氧,只是海面表层水蒸汽的光解作用形成局部的“ O_2 绿洲”和太古宙叠层石内部存在的显微富氧环境,这些局部的“ O_2 绿洲”可能使 O_2 含量达到现代大气水平的10%,从而维持了整个湖盆或海盆的弱氧化条件,并导致 Fe^{2+} 的氧化和促使条带状硅铁沉积的发生。随着晚太古代—古元古代大气和海盆还原性物质的减少和 O_2 的增多,2.4~1.85 Ga BP全球性浅层海水普遍含 O_2 ,生物光合作用速率增大,产生的 O_2 超过大气圈还原性气体的总量,并促使 O_2 的含量大幅度升高。1.85 Ga BP以后大气 O_2 含量达到前所未有的水平,海水由还原性转变为氧化性,全球性红土堆积出现及真核生物大量繁盛的同时,条带状硅铁沉积也在全球终止。

华北地台前寒武系同样反映了这一演变里程,在早太古代、中晚太古代及早元古代沉积中均出现条带状硅铁质建造,至中元古代以后主要的含铁质沉积演变为含铁质碳酸盐岩建造,而且在碎屑岩中开始出现赤铁矿沉积。本地区典型的条带状硅铁质沉积为广泛发育在上太古界的著名的鞍山式铁矿床,见于辽宁本溪地区鞍山群、北京密云地区密云群及河北迁安地区迁西群^[15,16]。

前寒武纪地质记录表明太古宙—元古宙早期全球具有陆少洋多和大气富 CO_2 、贫 O_2 的特征,元古宙早中期(2.2~1.8 Ga BP)大气—海洋系统发生了 O_2 增多和 CO_2 减少的古全球变化,导致大气平流层古臭氧层的形成,从而大幅度减弱了日光—紫外线对地表的辐射,不仅使全球性产生 Fe^{2+} 非生物—缺氧氧化过程消失,而且也保证了生命演化的延续和生物进入多样性分化阶段,并伴随着中、新元古代全球性巨厚碳酸盐建造的发育。

前寒武纪有机质同位素研究也证实前寒武纪是大气中 CO_2 含量逐步减少, O_2 含量逐步增加的过程^[17],这是当时全球性广泛分布的碳酸盐的形成与

有机质不断脱离外生碳循环被埋藏的结果。人们还发现了前寒武纪有机质埋藏速率显著增加的若干时期,曾认为这是由于生物演化过程中的变革事件所致,后来意识到可能是全球性构造运动发展,提高了风化剥蚀速度,为生物量的增加提供了丰富营养,同时增大了有机质的埋藏速度所致^[18]。有机碳含量的两个明显增大高峰期(2.5 ~1.8 Ga BP, 1.3 ~0.7 Ga BP)恰好与地质历史上两个主要的构造活动期相符,有机质和碳酸盐同位素分析证明这一时期全球生物量曾发生多次剧增与骤减^[19]。这一结果与该时期所保存的真核浮游藻类及后生动物形成化石的记录相吻合。

3.2 地球早期的生物标志物

北澳大利亚麦克阿瑟盆地^[20]和北美中大陆断裂带老页岩组^[21]由于具有温和的地热历史和丰富的保存完好的原生有机质,其中发现了大量可靠的元古宙生物标志化合物,甾烷、藿烷及长链无环类异戊二烯烷烃的出现分别表明真核生物、真细菌和古细菌在古元古代至中元古代的存在。而这两个地区不同时代源岩在烃类分布上具有很强的相似性,则反映了当时生物类型与生物生存环境在全球范围内有较大相似相与继承性。近年来对我国北京十三陵、河北蓟县前寒纪剖面的研究^[22]显示,正构烷烃、规则类异戊二烯烷和规则甾烷在所有样品中均有分布,且随年代变新丰度明显增高,进一步证明在古元古代(2.5 ~2.0 Ga BP)地球上已有了水生细菌和真菌,到蓟县纪—青白口纪(1.3 ~0.85 Ga BP)大量繁盛。类异戊二烯主要来自光合细菌合成的植醇,说明在 2.5 Ga 以前的太古宙就已经出现了光合作用。甾类是真核生物细胞膜中脂类的组成物质,它的普遍出现表明真核生物在古元古代早期可能就已经出现,近年来大量宏观多细胞藻类化石在本地区的发现,也证实真核生物出现的年代大致可提前到 2.3 ~2.5 Ga BP。在蓟县团子山组(1.7 Ga BP)发现了伽马蜡烷^[23]。这一发现将原生动物的最早出现时间从前人报道的 0.85 Ga BP 提前到了 1.7 Ga BP。河北张家口高于庄组(1.4 Ga BP)黑色燧石中还检测到了芳构化的松香结构化合物^[24],表明这种标志物的来源不仅是高等植物,也可能来自某些藻类或细菌等低等生物的输入。此外,东燕山地区下马岭组(0.76 Ga BP)沥青砂岩中还检出了规则三环萜烷系列与具有 (n - 烷基)侧链的三环萜烷^[25]。

燕山及国内外其它地区的研究表明新元古代最

为明显的特征是甾烷组成与分布上趋于复杂化, C_{26} - C_{30} 甾烷及 4-甲基甾烷均有出现,但分布极不平衡^[26]。到新元古代末则出现均衡分布的局面,可能与当时的新生生物类型(如后生动物)的大量加入有关。生物标志化合物研究表明元古宙是一个生物发生巨大变革的时期,有些生物类型大量减少或绝灭,而另一些生物得到高度发展,这与该时段形成的形态化石记录的研究结果是一致的。生物标志化合物组成与分布上体现出相当的复杂性,如高丰度 12 - 和 13 - 单甲基 C_{24} - C_{30} 烷烃的出现^[27]等,可能代表着前寒武纪结束后已灭绝的某一类生物形式的曾经存在。

4 古生物化石分布特征

早在太古宙早期(3.5 ~3.8 Ga BP)地球生命可能就实现了由非细胞至细胞形式的飞跃,而出现最原始的原核生物,之后由于当时自然环境极为恶劣,生命进化几乎处于漫长的停滞阶段,直到进入元古宙(2.5 ~0.54 Ga BP)随着大气 O_2 增加等一系列环境因素的改变,生命迎来了空前发展的新阶段,先后完成了由原核生物到真核生物,由单细胞藻类到多细胞藻类,由无性繁殖到有性繁殖,由原生动物的后生动物以及由不具外壳类型到具外壳类型等突破性的演化。

目前普遍认为元古宙超大陆的边缘是最早动物形成的“摇篮”,由于新元古代 Rodinia 超大型的聚集和离散,使地球从其内部释放出大量的能量,从而引起地球岩石圈、大气圈和水圈发生相应的重大变化,所提供的大气、海洋环境使生物界在全球几乎同时出现了微古植物、宏观藻类和后生动物的迅速辐射,尤其是大型具刺疑源类的出现对地球生物界以后的发展将起到关键性的作用。

我国华北燕山地区元古宙地层不仅发育完整、连续,而且在许多层段保存有地球早期生命的化石证据,对探讨生命起源、演化以及古环境具有重要的价值。大量资料显示化石的产出层位多集中在中元古界长城系和蓟县系,生物类型包括真核藻类、颗石藻、藻叠层石及后生动物遗迹化合物等。

4.1 真核藻类

最早发现并得到公认的真核生物化石,是大量分布于燕山地区长城系下部常州沟组至串岭沟组(1.8 ~1.7 Ga BP)中的微古植物^[28-32],这些单细胞真核浮游生物不仅个体大、形态多样,而且有些化石具有双被膜结构,已呈现出相对较高级、复杂的演化

程度。之后在华北五台山地区中元石界溥沱群也先后发现了大量的单细胞浮游生物化石^[33,34],其中底部的豆村亚群大石岭组、青石村组板岩中发现的化石不仅类型丰富,而且形态多样,包括球状球形、三角形、多角形及船形,可能是迄今已知最古老的单细胞真核生物类型,这一发现可能将真核生物的地质记录提前到2.5~2.4 Ga BP。90年代早期在华北燕山南麓的蓟县长城群团山子组下部层位(约1.7 Ga BP)中发现大量以叶状形态为主的碳质宏观化石,推测为多细胞褐藻类的压膜^[35,36]。近年来在燕山中段与蓟县相邻的河北兴隆—宽城等地的长城群底部常州沟组(约1.8 Ga BP)发现了极其丰富的 *Chuarina*、*Shouhsenia* 和 *Tawuia* 状的碳质宏观压型化石^[37-39],初步的组织学研究揭示出最古老的群体状、假薄壁组织状和薄壁组织状等相对复杂的多细胞组织类型。同时还发现了代表性分化的生殖器官,从而使具有类组织分化和有性生殖结构的多细胞生物的地质记录从大约0.6 Ga BP提前到了1.8 Ga BP。这一发现不仅为探讨地球早期多细胞生物的出现和演化提供了新的化石依据,而且也说明较原始、简单的单细胞真核生物至少在中元古代长城纪以前就应该出现。

4.2 颗石藻

颗石藻也称钙结超微浮游生物,是现代海洋广泛分布的一类低等藻类,古代颗石藻多发现于中、晚新生代的深海、半深海沉积物中。在燕山地区河北赤城县中元古界长城系串岭沟组近年来也发现了可靠的颗石藻化石证据^[40]。

颗石藻的生命活动中,将Ca、CO₂和水通过光合作用转变为O₂、有机质和碳酸钙,它不仅是海洋最基本的初级生产者,而且也是海洋碳酸盐沉积和烃类形成的主要物质来源。估计现代海洋中,由颗石藻形成的钙质软泥的覆盖面积达海洋总面积的35.6%。颗石藻又是海洋有孔虫的主要食物来源,由这两类生物壳形成的碳酸盐占现代海洋沉积碳酸盐的80%^[41]。此外,由于颗石藻极其微小且容易被其它生物所食,在沉积过程大量溶解,而成为化学沉积浅水碳酸盐的重要物质来源。

4.3 叠层石

北京十三陵中元古界地层剖面碳酸盐沉积中,自下而上发育叠层石的见有:大红峪组、高于庄组、雾迷山组和铁岭组,尤以雾迷山组最为突出,4个岩性段在整个燕山西段普遍发育叠层岩^[42]。元古代时期,海洋中的蓝绿藻类可能是当时最主要的生命

形式之一,它对叠层石的形成起着重要作用,也包括一些细菌的作用,藻叠层的亮暗基本层理构造是生物化学与化学作用周期性交替沉积的结果,主要受季节变化所控制。蓝绿藻在各种沉积环境中广泛分布,且适应各种水介质条件,其生存的必要条件是光合作用所需的阳光,因此藻叠层主要发育在波基面以上的透光带。由于不同环境水动力条件的差异,在滨浅海的不同部位所形成的叠层石具有不同的形态,由潮上低能带至潮下高能带,依次出现层纹状藻白云岩—波纹和密波纹藻白云岩—大波纹藻白云岩—藻屑白云岩—藻鲕及藻团白云岩—锥状、柱状白云岩。潮下泻湖或闭塞潮下低能带,由于水体停滞,能量显著降低,阳光仍较充足,形成发育的密纹层—密波纹状及小柱状藻叠层云岩,富含沥青质,主要显示藻纤维、凝块结构,沉积厚度一般也较大,因而潮间泻湖与潮下泻湖都是良好的生油环境。潮下低能带藻叠层云岩见于十三陵雾迷山组第一段。潮间泻湖藻叠层云岩则为含沥青质密纹或小柱状藻叠层云岩,具隐晶、斑点、小凝块、纤维状等各种显微结构,形成于潮间低能带,如十三陵高于庄组顶部的白云岩。在华北太行山中北段高于庄组和雾迷山组中藻白云岩可占60%^[43],其中的暗色层富含泥及有机质(碳质、沥青质),常显清晰的藻迹微结构,如丝状、线状、带状、纤维状、凝块状、葡萄状及斑点状等。

4.4 后生动物

北京十三陵中元古代早期形成的常州沟组上部曾发现有后生动物的遗迹化石^[44],由于其地质年代比埃迪卡拉(*Edicara*)动物群的出现还要早1.0 Ga,令人难以置信,而同时代的后生动物化石近年来也在印度被发现^[45],进一步证明了其可靠性。在之后的中元古代至新元古代漫长时期的地质记录中动物遗迹化石并没有被大量发现,甚至发现很少,可能是因为地球环境进入一个新的动荡时期,大规模火山爆发,全球性气候变冷等使较为原始、低等的后生动物难以普遍发展。直到元古宙末全球生物“适宜期”的到来,才迎来后生动物的全面发展阶段。如晚震旦世几乎全球性分布的伊迪卡拉动物群、我国三峡地区的庙河生物群、黔中地区的瓮安生物群及陕南地区的高家山生物群等,都显示出了这种特征。在生物演化上新元古代可划分为新元古代早—中期和新元古代晚期两个阶段,新元古代早期的青白口纪(拉伸纪)和早震旦世(成冰纪)古生物群面貌可以说是中元古代的延续,发现的化石以微古植物为主,已报道的超过30属60种^[46],且以球形占主导

地位,多为纹饰简单的单个或多细胞集合体。宏体多细胞藻类迅速发育,可以燕山地区青白口系“龙凤山生物群”为代表,计有 8 属 15 种。后生动物遗迹化石也有零星报道。而晚震旦世随着冰川融化和大面积海侵的到来,无论在生物大的类群组合、门类属种的数量上,还是在生物结构的复杂程度及进化水平上都有明显的发展,表现出生命演化进程中的质变与飞跃,从而为寒武纪生物的大爆发奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] Li Z X, Zhang L, Powell C Mc A. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23(5): 407-410.
- [2] Li Z X, Zhang L, Powell C Mc A. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia [J]. *Australian Journal of Earth Science*, 1996, 43: 593-604.
- [3] Zhang Shihong. A study of restructured of the global palaeocontinent of the Middle-Upper Proterozoic [J]. *Geoscience*, 1999, 13(2): 222-223. [张世红. 中新元古代全球古大陆再造的古地磁研究 [J]. *现代地质*, 1999, 13(2): 222-223.]
- [4] Lu Songnian, Liu Huaike, Yu Haifeng, et al. Great geologic event and chronologic frame of new orogenic of the Neoproterozoic in the Middle China [J]. *Geoscience*, 1999, 13(2): 223-224. [陆松年, 李怀坤, 于海峰, 等. 中国中部长年轻造山带内的新元古代重大地质事件及年代框架 [J]. *现代地质*, 1999, 13(2): 223-224.]
- [5] Hong Zuoming. Crustal movements and structures on the Northern Margin of North China Platform in the Middle to Late Proterozoic Period [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 1994, 16(3): 145-154. [洪作民. 华北地台北缘中晚元古代地壳运动与地壳构造 [J]. *化工地质*, 1994, 16(3): 145-153.]
- [6] Cao Ruiji. Discussion on some problems in the Mesoproterozoic and Neoproterozoic stratigraphical study in China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2000, 24(1): 1-7. [曹瑞骥. 我国中新元古代地层研究中若干问题的探讨 [J]. *地层学杂志*, 2000, 24(1): 1-7.]
- [7] Chen Jinbiao, Zhang Huiming, Zhu Shixing, et al. Study of the Sinian in Jixian area [A]. *The Sinian of China* [C]. Tianjing: Science and Technology Press, 1980. 56-111. [陈晋鏊, 张惠民, 朱士兴, 等. 蓟县震旦界的研究 [A]. 见: *中国震旦界* [C]. 天津: 天津科学技术出版社, 1980. 56-111.]
- [8] Nikishin A M, Lobkovsky L I. Global evolution of the Earth [J]. Wang Liadiang trans. *World Geology*, 1993, 12(1): 6. [Nikishin A M, Lobkovsky L I. 地球的全球演化: 可能模型. 王瞭亮译 [J]. *世界地质*, 1993, 12(1): 6.]
- [9] Wen Xiande. Lithofacies-palaeogeography and their evolution of the middle-upper Proterozoic in North China [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1989, 13(2): 13-21. [温献德. 华北北部中晚元古代岩相古地理及其演化 [J]. *石油大学学报 (自然科学版)*, 1989, 13(2): 13-21.]
- [10] Song Tianrui, He Zhenjun, Ding Xiaozhong, et al. A study of geological event record in the Proterozoic Chunlinggou Formation of the Ming Tombs District, Beijing [J]. *Geological Review*, 2000, 46(4): 400-406. [宋天锐, 和政军, 丁孝忠, 等. 北京十三陵中元古代串岭沟期地质事件的探索 [J]. *地质评论*, 2000, 46(4): 400-406.]
- [11] Zhao Zhen. Characteristics of Proterozoic carbonate rocks in Jixian by means of the oxygen and carbon isotope composition [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(3): 46-53. [赵震. 从氧、碳同位素组成看蓟县元古宙碳酸盐岩特征 [J]. *沉积学报*, 1995, 13(3): 46-53.]
- [12] Condie K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. Zhang wenhua, Li Liang trans. Beijing: Science Press, 1986. 260-296. [K.C. 康迪著. 板块构造与地壳演化 [M]. 张雯华, 李继亮译. 北京: 科学出版社, 1986. 260-296.]
- [13] Heinrich D H. Main direction of atmospheric evolution of the Precambrian [J]. Zeng Zhigang trans. *World Geology*, 1993, 12(1): 4-5. [Heinrich D H. 前寒武纪大气演化的主要方向 [J]. 曾志刚译. *世界地质*, 1993, 12(1): 4-5.]
- [14] Li Weiyan. The past global environment and changes in relationship with the unperiodic rhythmic deposition and the cease from forming Precambrian banded iron formations [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1-2): 101-114. [李伟源. 古全球变化与非等时韵律沉积及前寒武纪条带状铁矿建造形成与终止 [J]. *地学前缘*, 1997, 4(1-2): 101-114.]
- [15] Yao Peihui, Li Zhanqia. On the metallogenic generation and material sources of iron deposits of China [A]. Wang Yuantian, et al. *Collected Works of International Interchanges of Geology 4* [C]. Beijing: Geology Press, 1985. 289-297. [姚培慧, 李章大. 中国铁矿床的成矿世代及其物质来源 [A]. 见王元田, 等著. *国际交流地质学论文集 4* [C]. 北京: 地质出版社, 1985. 289-297.]
- [16] Cheng Yuqi, Xu Huifen. Certain characteristics of the Precambrian mineralogenesis in China [A]. In: Wang Yuantian, et al. *Collected Works of International Interchanges of Geology 4* [C]. Beijing: Geology Press, 1985. 311-319. [程裕淇, 徐惠芬. 前寒武纪矿床及成矿的某些特征的探讨 [A]. 见王元田, 等著. *国际交流地质学论文集 4* [C]. 北京: 地质出版社, 1985. 311-319.]
- [17] Des Marais D J, Strauss H, Summons R E, et al. Carbon isotope evidence for the stepwise oxidation of the Proterozoic environment [J]. *Nature*, 1992, 359: 605-609.
- [18] Des Marais D J. Isotopic evolution of the biogeochemical carbon cycle during the Proterozoic Eon [J]. *Organic Chemistry*, 1997, 27: 185-193.
- [19] Knoll A H, Hayes J M, Kaufman A J, et al. Secular variation in carbon isotope ratios from upper Proterozoic successions of Svalbard and east Greenland [J]. *Nature*, 1986, 321: 832-838.
- [20] Summons R E, Powell T G, Breham C J. Petroleum geology and geochemistry of the middle Proterozoic McArthur basin, Northern Australia: Composition of extractable hydrocarbons [J].

- Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52, 1747-1763.
- [21] Pratt L M, Summons R E, Hieshima G B, Sterane and triterpane biomarkers in the Precambrian Nonesuch formation, North American mid-continent Rift [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55, 911-916.
- [22] Shi Jiyang, Xiang Mingju, Xu Shiping. Biomarkers and evolution of life in Precambrian [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 634-638. [史继扬, 向明菊, 徐世平. 前寒武纪地层中的生物标志物与生命演化[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 634-638.]
- [23] Peng P A, Sheng G Y, Fu J M, et al. Biological markers in 1.7 billion year old rock from the Tuanshanzi Formation, Jixian strata section, North China [J]. Organic Geochemistry, 1998, 29: 1321-1329.
- [24] Wu Qingyu, Liu Zhili, Sheng Guoying, et al. Biomarker originated from Precambrian algae [A]. In: Institute of Geochemistry Academia Sinica. Annual Research Reports of Organic Geochemistry Laboratory 1986 [C]. Guiyang: Guizhou Peoples Publishing House, 1986. 111-121. [吴庆余, 刘志礼, 盛国英, 等. 前寒武纪富藻礁石层中的生物标志化合物[A]. 见: 中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放实验室研究年报(生物标志物和干酪根)[C]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1986. 111-121.]
- [25] Wang T G, Simonei B R T. Tricyclic terpanes in Precambrian bituminous sandstone from the eastern Yanshan region, North China [J]. Chemical Geology, 1995, 120, 155-170.
- [26] Li Chao, Ben Pingan, Sheng Guoying, et al. The progress of studies of the organic matter from the Precambrian [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(21): 2251-2261. [李超, 彭平安, 盛国英, 等. 前寒武纪有机质研究进展[J]. 科学通报, 1999, 44(21): 2251-2261.]
- [27] Bazhenova O K, Arefiev O A. Geochemical peculiarities of Precambrian source rocks in the East European platform [J]. Organic Geochemistry, 1996, 25, 341-351.
- [28] Liu Zhili. A discuss about the evidence of eucaryotic algae fossils from the Precambrian [A]. In: Fossil Algae Committee, Palaeontological Society of China. The Collected Works of Forst Nationwide Congress of Fossil Phycology [C]. Beijing: Geology Press, 1985. 187-194. [刘志礼. 关于前寒武纪真核藻类化石证据的讨论[A]. 见: 中国古生物学会化石藻类专业委员会编. 第一届全国化石藻类学术会议论文集[C]. 北京: 地质出版社, 1985. 187-194.]
- [29] Luo Qing. Sun Shufen. Eucaryote fossils from bottom of the Changcheng System in Yanshan Area [J]. Acta Geologica Sinica, 1985, 59(1): 12-16. [罗其玲, 孙淑芬. 燕山地区长城系底部的真核生物化石[J]. 地质学报, 1985, 59(1): 12-16.]
- [30] Sun Shufen. Micropalaeobotany from the lower Changcheng series in Kuancheng, Hebei [J]. Scientia Geologica Sinica, 1989, (1): 235-243. [孙淑芬. 河北宽城长城系下统微古植物群[J]. 地质科学, 1989, (1): 235-243.]
- [31] Yan Yuzhong. Micropalaeobotany in shale facies from the Changzhougou Formation in Pangjiahu, Hebei [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1991, 8(2): 183-195. [闫玉忠. 河北宽城宽城组州沟组页岩相微古植物[J]. 微体古生物学报, 1991, 8(2): 183-195.]
- [32] Hofmann H J, Chen Jnbiao. Carbonaceous megafossils from the Precambrian (1800 Ma) near Jixian, northern China [J]. Canadian Journal of Earth Science, 1983(3): 443-447.
- [33] Zhu Shixing, Sun Shufen. New progress of study on the great events of life evolution in the Precambrian [A]. Geologic Society of China ed. Paper Collection of Academic Interchange Congress of Great Achievements on Geologic Science and Technology during 1990-1995 [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 3-6. [朱士兴, 孙淑芬. 前寒武纪生命演化重大事件研究的新进展[A]. 见: 中国地质学会编. "八五"地质科技重要成果学术交流会议论文集[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 3-6.]
- [34] Sun Shufen, Zhu Shixing. New discovery of micropalaeobotany from the Doucun Subgroup of the Hutuo Group (~2.4 Ga) in Wutaishan, China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1998, 15(3): 286-294. [孙淑芬, 朱士兴. 中国五台山滹沱群豆村亚群(约2.4亿年)微体古生物新发现[J]. 微体古生物学报, 1998, 15(3): 286-294.]
- [35] Zhu Shixing, Chen Huineng. The discovery and its significance of macroscopic fossils from the Tuanshanzi Formation of the Changcheng Group in Jixian, North China [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40(12): 122-125. [朱士兴, 陈辉能. 华北蓟县长城群团山子组叶状宏观化石的发现和意义[J]. 科学通报, 1995, 40(12): 122-125.]
- [36] Zhu Shixing, Chen Huineng. Megascope multicellular organisms from the 1700 million year old Tuanshanzi formation in the Jixian area, North China [J]. Science, 1995, 270, 620-623.
- [37] Zhu Shixing, Sun Shufen, Huang Xueguang, et al. Discoveries of macroscopic fossils and multicellular organizations from the Changzhougou Formation (1800 Ma) in Yanshan Area [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(4): 552-557. [朱士兴, 孙淑芬, 黄学光, 等. 燕山常州沟组(约1800Ma)碳质压型化石及其多细胞组织的发现[J]. 科学通报, 1999, 44(4): 552-557.]
- [38] Sun Shufen, Zhu Shixing. Palaeoproterozoic eucaryotic fossils from North China [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(2): 116-122. [孙淑芬, 朱士兴. 华北地区元古代真核生物化石[J]. 地质学报, 2000, 74(2): 116-122.]
- [39] Zhu Shixing. New progress of studies on the Precambrian biostratigraphy of China [J]. Geoscience, 1999, 13(2): 206-207. [朱士兴. 中国前寒武纪生物地层学研究的新进展[J]. 现代地质, 1999, 13(2): 206-207.]
- [40] Hou Kui, Chen Zhendong, Chen Yancheng. Coccolith, oceans and the environment [J]. Geology of Chemical Minerals, 1999, 21(1): 31-39. [侯奎, 陈镇东, 陈延成. 颗石藻与海洋环境关系之探讨[J]. 化工矿产地质, 1999, 21(1): 31-39.]
- [41] Liu Zhili. Fossil Phycology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 35-60. [刘志礼. 化石藻类学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990. 35-60.]

- [42] Zhao Chenglin. Characteristic of petrology and sedimentary facies of The Sinian strata in west Yanshan Area [A]. In: Collection of Sediment-Geology of Zhao Chenglin [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 60-191. [赵澄林·燕山西段震旦界地层岩石学特征及沉积相[A].见:赵澄林沉积—储层地质文集[C].北京:石油工业出版社,2000.60-191.]
- [43] Zhao Chenglin. Phase analysis and sedimental character of the Gaoyuzhuang Wumishan formations in middle-North Taihang mountain [A]. In: Collection of Sediment-Geology of Zhao Chenglin [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 60-159. [赵澄林·太行山中北段高于庄组—雾迷山组的沉积特征及其相分析[A].见:赵澄林沉积— O_2 储层地质文集[C].北京:石油工业出版社,2000.60-159.]
- [44] Song Tianrui, Gao Jian. Are these the oldest trace fossils in China? [J]. Chinese Science Bulletin, 1985, (12): 925-928. [宋天锐, 高健·这些是中国发现的最古老的痕迹化石吗? [J]. 科学通报, 1985, (12): 925-928.]
- [45] Seilacher A, Boese P K, Flugel F. Tripliclastic animals more than billion years ago: Trace fossil evidence from India [J]. Science, 1998, 282: 80-83.
- [46] Li Yong, Ding Lianfang, Qian Zhuangzhi. Neoproterozoic biological diversity and non-enclature of the Terminal Proterozoic System [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4): 45-49. [李勇, 丁莲芳, 钱壮志·新元古代生物多样性及上元古界的命名[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 45-49.]

SEDIMENTAL RECORDS AND CHARACTERISTICS OF PALAEOCLIMATE AND PALAEOENVIRONMENT IN THE YANSHAN AREA, NORTH CHINA IN THE MESOPRO- TEROZOIC AND THE NEOPROTEROZOIC

JI Li-ming^{1,2}, CHEN Jian-fa¹, ZHENG Jian-jing¹, WANG Jie¹

(1 State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Proterozoic is one of critical periods. Environment of the Earth's surface tended to stabilization by degrees in the period. Various forms of living beings in the Earth began to occur and develop. A lot of studies indicated that the Rodinia supercontinent had been formed in the whole Earth at 1.0 ~ 0.8 Ga BP. Then North China located in middle or low latitude region connected with Laurentia Platform and Siberia Platform. The Mesoproterozoic and the Neoproterozoic in Yanshan area were deposited during the Yanshan - Liaohé Tectonic Cycle (1.8 ~ 0.85 Ga BP), and the aulacogen underwent an evolution from initiation through development to consumption in Changchen period, Jixian period and Qinbeikou period respectively. The first cover upper the platform crystalline basement was formed mainly by the thick carbonate formation. A series of palaeoenvironment variance took place on the Earth in the Proterozoic, such as O_2 level increased and CO_2 level reduced of the atmosphere-ocean system, and it began to turn into oxidation from reduction 1.85 Ga BP ago. Wide-ranging red earth pile occurred with the ceasing of the banded silica-iron formations in the Earth's history. A large number of steranes, hopanes and isoprenoid were identified from the Precambrian samples. Those show that eucaryotes, eubacteria and photoautotrophs on the Earth might have appeared in the Palaeoproterozoic time. A lot of organisms fossils of early stage of the Earth were found from the Mesoproterozoic Changchen system and Jixian system in Yanshan area. They include eucaryotic algae, multicellular algae, coccolith, algal stromatolite, metazoan trace fossil and so on. Especially the large-scale unicellular algae and macroscopic multicellular algae fossils found from Changzhougou Formation, Chuanlinggou Formation and Tuanshanzi Formation (1.8 ~ 1.6 Ga BP) of Changchen system. Those discoveries are of important significance to explore the origin and evolution of different kinds of living things and recover palaeoclimate and palaeoenvironment.

Key words: North China; The Mesoproterozoic and the Neoproterozoic; Palaeoclimate; Palaeoenvironment.