

地球轨道参数在前寒武纪地层中的记录及研究进展

马晴, 周瑶琪, 曹梦春, 尹兴城

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580



www.
geojournals.cn/georev

内容提要:前寒武纪(4.6 Ga~541 Ma)占据约90%的地球发展历史。该时期大气成分、海洋氧化还原条件、全球气候和生命演化历程等均发生极大程度的改变,为现在的地球系统奠定了基础。地球轨道参数是描述地球系统演化过程的重要指标,对于研究日地系统、地月系统及地球本身演化具有重要意义。近年来一些学者在全球范围内2650~550 Ma地层中成功识别出大量可靠的地球轨道参数。本文通过总结前寒武纪地球轨道参数,分析了地球外动力系统和地球深部动力对于地球轨道参数的影响;并以前寒武纪重大地质事件为基础,进一步阐述了地球轨道参数对于地球表生环境的影响。

关键词:前寒武纪;地球轨道参数;地球外动力;地球深部动力;地球表生环境

地球具有4.6 Ga的地质演化历史,且地球气候在这漫长的演化过程中发生过极其剧烈的变化。前寒武纪占据约90%的地球发展历史,在这段时期,地球经历了大气氧含量增加、海洋氧化还原条件演变、全球性冰期事件、生命起源及演化、超大陆演化及重组、地壳及地幔演化等重大地质事件(Young, 2013; Knoll et al., 2016)。明确前寒武纪的演变历史,是地球科学领域的研究难题和热门课题。

尽管地质、地球化学、古生物学、古环境和古气候等证据针对前寒武纪重大地质事件给出了一定解释,但是关于该时期地球演变历程的研究,大多考虑的是地球内部圈层演化,对于天体运动造成的地球轨道参数变化的影响研究相对较少。日地系统准周期振荡(即米兰科维奇旋回)对于古气候存在明显影响(Hinnov and Hilgen, 2012),这些受地球轨道参数影响而产生的地球环境变化被记录于气候敏感型沉积物中。由于宇宙膨胀以及天体相互作用的影响,地球轨道参数是不断变化的(Carey, 1975; Tomasella et al., 1996; Feulner, 2012; 周瑶琪等, 2013; 周瑶琪, 2018)。在地质历史各时期,由于太阳系、地月系统及地球本身自转的变化,导致了地球轨道参数(偏心率、岁差、黄赤交角等)不断的变化,引起年长、地月距离、日长的变化(周瑶琪,

2018)。这些变化的地球轨道参数信息,通过影响地球接收的日照量和地球气候系统,可以有效地被记录在地球各个时期地层序列中的各类沉积韵律中,如潮汐束、叠层石、条带状硅质岩以及连续的海相沉积序列(徐道一等, 1982; 吴智勇, 1996; 周瑶琪等, 2002, 2005; 伊海生等, 2010; Yao Xu et al., 2015)。恢复前寒武纪地球轨道参数,对于研究地球膨胀假说、地球演化、早期地球表生环境演变均具有重要的科学价值与意义。本文将阐述地球所受到的天文作用力(地球外动力)以及地球深部动力(地球内动力)系统对地球轨道参数的影响,并介绍地球轨道参数对地球表生环境的影响。

1 地球轨道参数简介

由于地球的轴向进动和其他行星运动引起的变化轨道之间的相互作用,地球相对于太阳的方向经历了准周期性的变化,这些变化就被称为地球轨道参数周期性变化(图1)。地球轨道参数周期性变化主要涉及3个参数:轨道偏心率(e)、黄赤交角(ε)和岁差(p)(Milankovitch, 1941)。

地球轨道偏心率(e)是指地球轨道的形状偏离一个完美圆形的程度,其计算公式如下:

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41772190)和中国石油大学(华东)创新工程项目(编号:YCX2021006)的成果。

收稿日期:2021-06-10;改回日期:2021-12-02;网络首发:2021-12-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.061

作者简介:马晴,女,1994年生,博士研究生,地球化学专业;Email:qingma_ac@163.com。通讯作者:周瑶琪,男,1963年生,教授,主要从事地球起源与早期演化及地球动力学等方面的研究;Email:zhouyq@upc.edu.cn。

略呈隆起状态。由于存在黄赤交角,隆起的地区除黄赤交点外均不在黄道面上,因此,太阳和月球均会对地球产生力矩,并将地球自转轴倾角逐渐拉小。在地质历史时期,由于受到地月系统的影响,海洋潮汐作用引起的摩擦力将逐步减缓地球的自转速度并增大月地距离。变缓的自转速度减小了地球赤道隆起幅度,与地月距离增大造成的潮汐势能降低形成完整反馈,最终使得地质历史时期中斜率和岁差周期逐渐变大的趋势。而偏心率周期则不受地球自转及地月距离的影响(刘光泓等, 2020)。

由于前寒武纪距今时间较长,因此准确认识前寒武纪地球轨道参数变化周期对于了解天体系统对于地球环境影响的研究至关重要。Laskar 等(2004)通过对行星运动的近似解析对地球轨道参数进行量化,综合相对论效应、地球扁率、日月系统、地球潮汐作用减缓、气候摩擦等因素建立 La 2004 模型,获得 40 Ma 之内的精确轨道偏心模型。该模型在之后的研究中得到修改,并将时限拓展至 60 Ma (Laskar et al., 2011)。目前学者使用现代大量观测值运用三角级数近似、引力方程数值积分等方法确定了地球轨道偏心率、黄赤交角和岁差等地球轨道参数 (Vernekar, 1972; Berger et al., 1984; Laskar, 2004; Laskar et al., 2011)。但是,50 Ma 之前的轨道周期由于受到天体运动混沌效应影响而难以计算,需要通过旋回地层记录提取与理论建模计算互相矫正获得 (Hinnov, 2013)。

前寒武纪旋回地层研究显示了明显的轨道周期性信号。通过对连续露头或岩芯岩性的观察,识别出相似的沉积岩石或不同层级间的样式组合特征,其中常见的研究岩层包括条带状铁矿 (BIF)、叠层石构造、硅质岩条带韵律层、白云岩潮汐韵律层以及部分生物的生长纹层。如果岩性的演变与当时的各天文周期比例相当,则认为该变化受到天文驱动的影响。如果肉眼无法识别岩性变化,可通过气候环境替代性指标得到定量或半定量数值变化趋势,从而建立变化序列。针对于前寒武纪天文轨道周期提取,最理想的方式是通过测定精确年龄锚点限定岩层沉积速率及周期匹配方式。

2 前寒武纪地球轨道参数的研究进展

前寒武纪时期地质历史久远、地层记录信息复杂,研究难度较大。但是,从现代至古生代都发现了大量证据证明天文旋回的稳定存在,这为前寒武纪地球轨道参数研究打下了基础 (Hilgen et al.,

2007; Batenburg et al., 2014; Fang Qiang et al., 2017)。地球轨道参数对于前寒武纪的地层存在明显控制,尤其是 2.2 Ga 年前的地层 (Mei Mingxiang et al., 2001; Minguéz et al., 2015; Zhang Shuichang et al., 2015; Gong Zheng et al., 2017; Minguéz and Kodama, 2017)。

2.1 地球外动力系统对于地球轨道参数的影响

2.1.1 太阳对于地球轨道参数的影响

太阳是太阳系的中心天体,地球围绕太阳公转,太阳系围绕银河系中心公转。太阳形成于约 4.57 Ga 前,其前身是一个坍缩的氢分子云。随着太阳的演化,太阳光度在太阳生命周期中缓慢增加。经研究,3.8 Ga 前的太阳通量比现代水平低 25% (Newman and Rood, 1977; Gough, 1981)。这是因为氢与氦的聚变增加了太阳核心的平均分子量,氢核心为抵抗引力而收缩,同时变热;紧挨核心的氢包层因温度上升而加速聚变,使得产生的热量传导到外层,并向外膨胀。由于恒星风的作用,太阳在膨胀的过程中不断流失质量,最终导致地球轨道向外移动 (Feulner, 2012)。

地球跟随太阳围绕银河系中心做椭圆运动,这种运动类似于地球绕太阳的公转运动。太阳系绕银心运行一周,称为银河年或宇宙年,时间约为 0.29 Ga。当太阳系绕银心运动到近银心点附近时,太阳系将进入天体密集区,由于天体之间的挤压作用,太阳系将出现一定程度的收缩,日地距离将减小,地球公转速度将增大;相反,当太阳系运行到轨道上的远银心点附近时,太阳系将浮到银河系浅层天体较为稀疏的区域,太阳系受到的挤压力减小,日地距离将增大,地球公转速度将减小。

以上地球轨道参数的变化周期可能与地层记录的部分冰期事件、超大陆聚散事件和撞击事件相关联。根据显生宙主要冰期事件记录发现,主要冰期的时间约为 0.28 ~ 0.3 Ga,该时间与银河年时间接近。Columbia 超大陆和 Rodinia 超大陆的聚集和离散时间也基本约为 0.3 Ga,与银河年时间接近 (Rogers and Santosh, 2003)。此外,现代的银河系天文理论,即密度波理论 (Bertin et al., 1997) 提出,太阳系旋臂处质量密度相对较大,其形成的引力场对太阳系产生影响,易诱发撞击事件。地球多处 2.3 Ga 左右陨落的大量消溶型铁质宇宙尘表明该时期地球可能经历了由地外因素引起的灾变;而 Sadbury 撞击事件发生时间约为 1.8 Ga。两次地外灾变事件发生的事件间隔约为 0.5 ~ 0.6 Ga,该时

间与双银河年接近,同时也符合太阳系扫过银河系主旋臂一次所用的时间 (Zhang Weijia et al., 2010)。但是,以上地质事件时间间隔和银河年长度的接近是巧合,还是确有内在联系,目前仍不清楚。

2.1.2 月球对于地球轨道参数的影响

关于月球起源有诸多说法,其中最流行的理论是大碰撞说。太阳系演化早期,太阳系内出现大量星子,星子通过相互碰撞、吸积而形成原始行星 (Williams and Cieza, 2011; Andrews et al., 2016)。随着原始行星的增长,其引力范围增大,并造成原始行星之间的吸引和碰撞 (Norman, 2019)。原始行星之间的碰撞释放出巨大的能量,确保了行星广泛融化、核心的形成,以及早期行星地质学和地球化学的岩浆叠印 (Rubie et al., 2015)。原始地球就是原始行星之一。原始地球和其他原始行星之间的碰撞可能形成了月球。目前针对大碰撞事件的解释已经出现多种动态模型 (Canup and Asphaug, 2001; Canup, 2012, 2014; Ćuk and Stewart, 2012; Asphaug, 2014; Jacobson and Morbidelli, 2014; Rufu et al., 2017),但是各个模型之间都存在一个共同点,即一个大致火星大小的行星胚胎与原始地球在原始吸积末期发生碰撞。在碰撞过程中,月球的高速吸积导致了大规模的早期融化。岩浆洋的结晶形成了富含斜长石的地壳和超镁铁质堆积的地壳,最终产生了一个高度分化的月球 (Norman, 2019)。

尽管大碰撞说在许多方面都是令人满意的,但是仍存在一些争议,尤其是在 Roche 界限附近尘埃盘增生形成月球的动力学模拟方面,例如地月系统极早期演化过程的时间框架结构、碰撞行星的大小,以及地球与月球之间的钾同位素组成几乎没有分馏的现象等。Darwin (1879)提出分裂说,指出在地球演化极早期自由脉动的同时,由于太阳引力的巨大潮汐作用而形成共振将月球分裂出去。Jeffreys (1930)指出这一假设的致命缺陷在于摩擦力会阻止潮汐瘤从地球上分裂出去。周瑶琪等 (2002)通过建立了关于“绝热压缩”、“重力分异”、“相变”和“热传递”的 EISEM 地球内部结构演化动力学模型,以及地球内部角动量传递模型 (IAMTM),并模拟了原始地球绝热压缩过程、地球内部角动量由里向外的转移、自转角速度分布以及抛射月球的动力学过程。该模型模拟结果表明,月球起源并不必须依靠大碰撞来补充额外的角动量。地球本身的角动量足以抛射外层物质以形成尘埃盘而增生形成月球

(见 2.2)。另外,针对于月岩及地幔岩的相关研究表明,月球起源与地核的形成几乎同时形成于 4.5 Ga 前 (Kleine et al., 2005; Bottke et al., 2015; 李三忠等, 2015; Yuan Qian et al., 2021)。本模型不仅解决了老的“分裂”模型的角动量不足的问题,而且解决了“巨型碰撞”模型中的钾同位素没有分馏的矛盾。在数值模拟中,地球的表面平均温度总在 1000 K 以下,这样就不会出现钾同位素分馏。

除了大碰撞说和分裂说,还有学者认为俘获说和同源说。俘获说假设月球本来是太阳系一颗月球大小的小行星,在运行到地球附近的时候,被地球的引力所俘获 (Urey, 1966; Singer, 1968)。但月球被地球捕获并使月球成为地球卫星的概率非常低。同源说假设地球和月球都是太阳系中弥散的星云物质,在同一区域经过旋转和吸积,形成大小不同的天体 (Ruskol, 1972; Harris and Kaula, 1975)。但地球和月球的平均化学成分差异很大,因此,两者不可能是同源的。

不同的月球起源过程对地球轨道参数存在不同的影响 (周瑶琪等, 2013)。大撞击说理论中,当原始地球遭受相同方向的撞击时,地球的斜率将增大 (Agnor et al., 1999)。Hartmann 和 Vail (1986)指出,大碰撞事件中,撞击体使原始地球的斜率从低角度增大至 70°以上。在百万年尺度上,地球斜率可以在 60°~90°大幅度改变,也证明了早期地球的高斜率状态 (Laskar et al., 1993)。Eriksson 等 (2013)通过总结前寒武纪古地磁数据发现,早于 635 Ma 的冰川沉积记录的古纬度均小于 20°,且该地层同时记录了强季节性气候变化特征,从而提出“高地球倾角假说”。Williams 等 (2016, 2019)对比高度倾斜的火星上的低纬度冰川地貌指出行星高角度倾斜将形成低纬度冰川事件。相关计算模型也已经证明,约 4.51 Ga 前,火星大小的星体与地球发生撞击,从而形成月球,同时造成高度倾斜的早期地球。分裂说理论 (Ringwood, 1960; Wise, 1963)指出,早期地球核幔分异后,由于地球表面质量重新分布,造成地球转动惯量减小,转速加快,从而出现分裂现象;当早期地球完成物质抛射后,地球的质量和半径减小,角速度增加,最终影响日地距离和地球自转过程。但由于月球形成时间过早,且该时期形成的潮汐记录难以保存,因此对于月球起源对地球轨道参数的影响多集中于模型研究。

月球和太阳对地球的引力会造成海水周期性涨落以及固体地球的弹性—塑性形变,称为潮汐和固

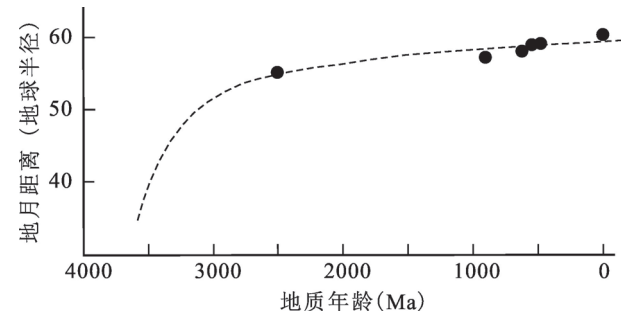


图 2 地月距离随地质年代变化趋势简图
(修改自周瑶琪等, 2013)

Fig. 2 Variation trend of the Moon—Earth distance with geological time (modified after Zhou Yaoqi et al., 2013&)

体潮,其中以月球对地球的引力占据重要地位。潮汐对于地球轨道参数也存在一定程度的影响(周瑶琪等, 2013)。由于潮汐作用产生的摩擦力,地球自转速率在不断减小,日长变长,地月距离日益增大(Williams, 2000; 高懿和萧耐园, 2007; Bowers and Roberts, 2019; 图 2)。由于偏心率的周期性不受地球自转及地月距离的影响,因此,前寒武纪时期偏心率保持相对稳定。但地月距离和地球自转速度对于斜率和岁差的周期性存在明显影响,最终造成前寒武纪早期的斜率和岁差周期明显比晚期的短。

2.1.3 小行星碰撞

太阳系除了太阳、八大行星和环绕行星运转的卫星外,还包括许多小天体,如小行星、彗星、流星和陨石等。小行星分布于火星和木星之间,形成小行星带。小行星围绕太阳进行公转运动,但其轨道性质在时间上很不稳定。受多种因素的影响,变化的小行星轨道可能穿越地球的轨道;穿越过程中,可能发生碰撞事件。撞击事件可能造成地层记录出现磁异常现象(Muondjua et al., 2007);诱发地球发生核反应;改变地球动力系统,造成地球板块运动和裂解(周瑶琪, 2013);对全球环境带来剧烈扰动(Young and Williams, 2020)。

地质历史时期,地球经历过多次小行星撞击事件(Davatzes et al., 2019)。始太古代至古元古代时期,地球经历至少 13 次小行星撞击事件(Simonson et al., 2009; Hassler et al., 2011; Lowe et al., 2014; Glikson et al., 2016; Young et al., 2016),其中 Vredefort 撞击事件(Muondjua et al., 2007)和 Sudbury 撞击事件(Cannon et al., 2010)规模较大(图 3)。这两次撞击事件会导致全球地

表水酸化、剧烈地震、最高达 100 m 的海啸以及世界各地内陆 20 km 的洪水;撞击事件使得大气中灰尘、烟雾和硫酸盐增多,降低光照水平,从而导致全球变冷(Young and Williams, 2020)。此外,Acraman 撞击事件(~580 Ma)导致尘埃喷射到大气中,使光照水平无法满足光合作用。次生的地震活动会引发广泛海啸(Young and Williams, 2020)。微体古生物学调查显示 Acraman 撞击事件也引起了重要的生物变化(Grey et al., 2003)。

2.1.4 太阳系行星对于地球轨道参数的影响

太阳系行星基本参数对地球轨道参数也存在一定程度的影响,该基本参数包括基本频率(g, s)和岁差常数(k)(Lasker et al., 2004, 2011)。

太阳系活动是混沌的,因此已有模型难以分析和预测 50 Ma 之前的地球轨道参数(Lasker, 1989; Lasker et al., 2004; Ma Chao et al., 2017, 2019)。地球的混沌运动主要是由长期共振的行星控制的,其中最重要的是涉及到地球和火星基本频率的天体物理参数 $(s_4 - s_3) - 2(g_4 - g_3)$ 和 $(s_4 - s_3) - (g_4 - g_3)$ 。目前, $(s_4 - s_3) = 2(g_4 - g_3)$ 表示为偏心率为 2.4 Ma 和斜率为 1.2 Ma 的地球轨道参数循环,即大周期(Hinnov, 2013)。太阳系动力学模型预测了地质历史时期 $(s_4 - s_3) - 2(g_4 - g_3)$ 共振时间,并建立了新的 $(s_4 - s_3) - (g_4 - g_3)$ 共振模型(偏心率为 1.2 Ma; 斜率为 1.2 Ma)。但是,共振时间对于模型假定的条件非常敏感,目前仍未得到较为准确的结果。建立准确的共振时间可以验证太阳混沌模型,并得到准确的太阳系动力模型(Lasker et al., 2004, 2011; Hinnov, 2013)。Ma Chao 等(2017)通过分析北美洲白垩纪内陆盆地 Niobrara 组地层记录的放射同位素和天文物理参数信息证实了太阳系的混沌动力学行为,并为日照量的具体数值设定了限制条件,提高了地质时间尺度的精度;此外,该研究还可能为气候的地球轨道驱动作用和主要的古海洋/生物地球化学事件之间的演化机制提供支持。Ma Chao 等(2019)通过对北美洲内陆盆地晚白垩世地层的高精度年龄、碳同位素组成以及地球轨道参数进行研究,进一步证实了太阳系混沌效应的存在。

通过岁差常数可以计算地月距离和一日时长(Berger et al., 1992)。计算表明随着地质历史的演化,地月距离增大且一日时长变长,此现象也造成了斜率和气候岁差周期的缩短。在近 500 Ma 内,以上参数已经发生了不同程度的改变,斜率周期由 54 ka 和 41 ka 减小为 35 ka 和 29 ka;岁差周期由 23 ka

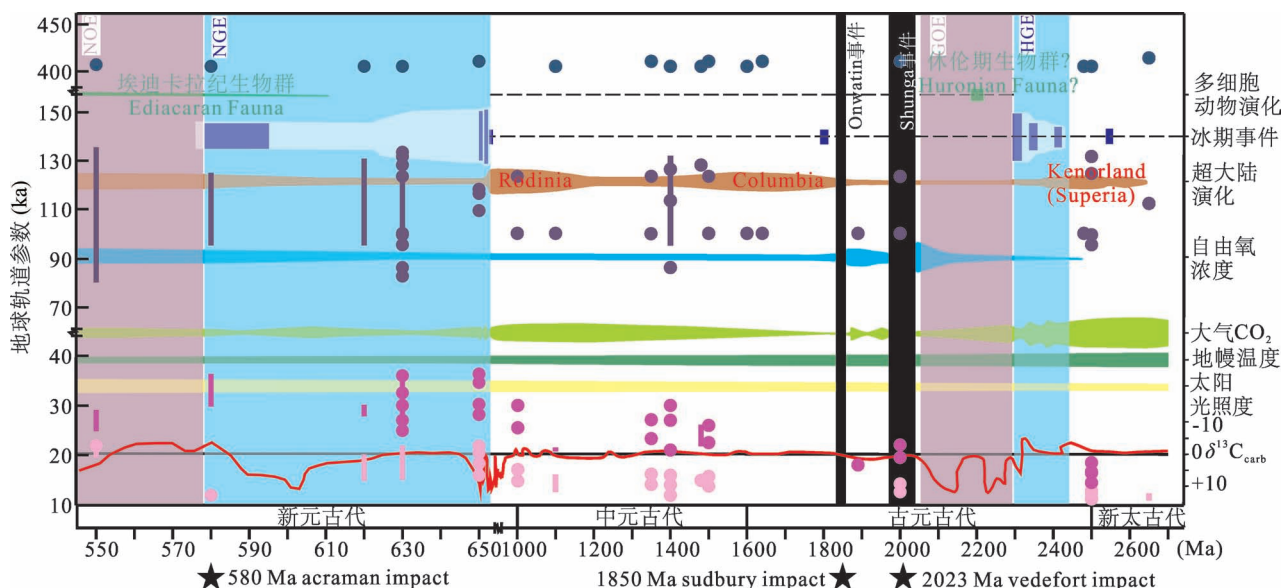


图3 前寒武纪地球轨道参数与重要地质事件汇总

Fig. 3 Summary of the Earth's orbital parameters and important geological events in the Precambrian

圆点代表地球轨道参数米兰科维奇周期谱峰;线段表示米兰科维奇周期值范围。蓝色表示长偏心率;紫色表示短偏心率;

深粉色表示斜率;浅粉色表示岁差 (修改自 Young, 2013)

The dots represent the peak of the earth's orbit parameter Milankovitch's period. The lines represent the range of Milankovitch's period value.

Blue means long eccentricity; purple means short eccentricity; dark pink means slope; light pink means precession. Modified after Young, 2013

和 19 ka 减小为 19.2 ka 和 16.3 ka。

2.2 地球深部系统与地球轨道参数的响应

地球膨胀说认为早期地球被完整的硅铝层覆盖,地球膨胀造成地球表面硅铝层的破裂和离散,从而逐渐形成独立陆块;随着地球进一步膨胀,地球发生大陆漂移现象;地幔的铁镁物质进入各个陆块之间的裂缝,从而形成洋盆 (Lindemann, 1927; Hilgenberg, 1933)。

1620 年,英国科学家培根提出地球膨胀概念。之后不同学者从大地构造学、大地测量学、地球物理学、古生物学、古地磁学、地球轨道参数计算等多方面开展研究,进一步证实了地球膨胀学说。Halm (1935) 根据恒星等天体演化理论,推论地球的原始半径为 5430 km,现在为 6371 km。Egyed (1956) 根据显生宙古地理图的资料得出了地球表面积增加的结论。Carey (1958) 提出地球膨胀模式,指出地球膨胀相对赤道平面来说是非对称的,南半球比北半球膨胀程度高。张朝文 (1981) 利用地球膨胀学说解释全球大陆边界的相似性和吻合性。陈志耕 (1992, 2013) 提出非对称的膨胀模型,他认为地球膨胀破裂开始于地球南极某一区域,且南半球较北半球膨胀得更加厉害的情况,必将造成若干倒三角

形态的陆块,并向北半球集中。Owen (1992) 估算了侏罗纪以来海底扩张新增洋壳与俯冲进入地幔板块的相对比值,指出侏罗纪时期地球半径为当前地球半径的 80%,同时该学者还通过横贯太平洋的卫星激光测距结果证明其论证。Kremp (1992) 通过对比核幔边界外核温度和地幔底部 D' 层温度,得出地球在近 200 Ma 期间存在快速膨胀的可能性。王鸿祯 (1997) 提出了地球节律的重要理论构想,并初步讨论了地球阶段性有限膨胀的可能。陈志耕 (1999) 建立了地球有限膨胀演化模型。周瑶琪 (2005) 根据奥陶纪以来生物贝壳生长纹层与地月轨道的演化进行计算,得出了地月系统膨胀的结论。陈廷愚 (2005) 探讨了地球外圈相对于内圈转动较慢,指出地球旋转膨胀是板块运动的地球动力学基础。袁立新 (2008, 2011) 通过引力常数减小对天体运动所产生的重要作用,以此为基础建立了地核超速自转的形成机制。袁学诚等 (2015) 认为地球内的暗能量推动了地球构造演化,并使地球膨胀。

通过对天体测量数据及古日食记录的研究表明,地球自转速率在人类世持续减慢 (李启斌等, 1973),这与古生物钟研究结果一致 (陈志耕, 1992),同时也证明了人类世期间地球膨胀对地球

自转速率可能存在影响。陈志耕等(1985)对太阳系类地行星的平均半径和反映行星内部物质分布状态的行星相对自转轴旋转的转动惯量系数进行相关性分析,得到明显的负相关关系。因此,地球膨胀造成地球内部物质相对向心集中,转动惯量增大,最终造成地球自转速率减慢。迄今为止,针对地球膨胀对地球轨道参数的研究多集中于模型分析,仍需进一步地层证据的发现。

目前,地球膨胀速率存在两种估计值,一部分学者根据古生代以来的资料求出膨胀速率为 10 mm/a ;另一部分学者根据前寒武纪和早古生代的资料得到膨胀速率为 0.6 mm/a (周瑶琪, 2018)。Steiner (1967) 认为可以通过万有引力常数 G 值在银河年中的变化来解释预测地球膨胀速率之间的差异。在古生代之后,太阳经过远银心点, G 值迅速减小,地球膨胀速率迅速增大;相反,古生代以前,地球膨胀速率减小。此外, G 值的变化也造成了地球质量的变化(Steiner, 1967)。

除了地球膨胀过程,地幔翻转也将造成地球质量的重新分布(Herzberg, 2014; Johnson et al., 2014; 孙卫东等, 2021)。早期地球岩浆海固化期间;绝热线和岩浆液相线在地幔底部相交(Elkins-Tankon, 2008, 2012),因此岩浆海自下而上发生固化。下部地幔优先结晶分离出富 Mg 的硅酸盐矿物,从而产出富 Fe 的剩余岩浆;这一过程造成残余熔体密度不断增大,最终导致地幔翻转(孙卫东等, 2021)。

地球质量的重新分布可能是造成月球分裂的条件之一。早期地球旋转周期为 2.6 d ,这个旋转速度使地球表面物质集中,并处于分裂的临界点;当地球核幔分异后,由于质量的重新分布,地球的转动惯量变小,地球的转速加快,旋转周期变为 2.1 d ,这导致地球开始发生分裂。当地球几何变形最大,连接最薄弱的地方发生断裂,月球形成(许英奎等, 2012)。形成的月球进而对地球轨道参数造成进一步影响。

2.3 地球轨道参数对于地球表生系统的影响

地球轨道周期(米兰科维奇旋回)控制着地球上日照量的“ $10 \text{ ka} \sim 100 \text{ ka}$ ”时间尺度的周期性变化。以研究米兰科维奇旋回为主的旋回地层学显示,长偏心率、短偏心率、斜率、岁差共同控制着地球气候的周期性变化(Hays et al., 1976; Zhang Shuichang et al., 2015; Gong Zheng et al., 2017),但是前寒武纪的地球轨道参数研究仍需进一步开

展,气候周期性特征也没有得到广泛关注。下文以重大地质事件为单元介绍前寒武纪地球轨道参数研究,具体参数可见表 1。

2.3.1 地球宜居性

地球轨道与太阳的合适距离,是适合生命存在的必要条件之一。相对于地球轨道内侧的行星来说,地球离太阳较远,因此,被吸附到地球上的水,没有被太阳的高温蒸发;同时由于地球磁场的保护,水也没有被强劲的太阳风吹到太空中;相反,离太阳较近的水星和金星的表面就没有水。相对于地球轨道外侧的行星来说,地球离太阳较近,因此,地球可以接收到更多的太阳光,使地球保持温暖,利于生命的繁衍;而在太阳系外边缘的海王星、天王星非常寒冷,未发现生命存在。太阳、月球以及其它星球与地球的相互作用造成地球轨道的变化以及接受太阳辐射差异变化,表现为地球轨道尺度的气候变化,并被沉积地层记录下来。

2.3.2 碳同位素漂移事件

埃迪卡拉纪($635 \sim 541 \text{ Ma}$)出现地质历史时期最大规模的碳同位素负漂移事件之一,即 Shuram Excursion (SE; Grotzinger et al., 2011)。该事件表现为明显的轻碳同位素亏损, $\delta^{13}\text{C}$ 可达到 -12‰ ,该特征被记录于全球同时期地层之中。关于 SE 碳同位素负漂移的形成机制存在诸多假说(Fike et al., 2006; Derry, 2010; Bjerrum and Canfield, 2011; Schrag et al., 2013; Cui Huan et al., 2017),但仍无法确定 SE 事件代表埃迪卡拉纪碳循环过程,还是代表成岩过程的二次蚀变过程。各假说分别强调氧化剂来源、硫酸盐库和碳库大小等不同的控制因素,因而预测了该事件不同的持续时间。因此,通过建立高精度地层年代框架来对比 SE 碳同位素负漂移事件与其它事件之间的关系极为重要。在此研究过程中,学者针对北美、澳大利亚和华南地区重点层位开展了大量旋回地层学研究,并得到了很多地球轨道参数数据(Minguez et al., 2015; Gong Zheng et al., 2017; Minguez and Kodama, 2017; Sui Yu et al., 2018, 2019; 图 3)。

Minguez 等(2015)选取北美地区 Nohah Range 和 Winters Pass Hills 两个剖面的 Johnnie 组 Rainstorm 段地层进行研究,通过磁性地层学的方法成功提取出短偏心率($94.93 \sim 123.95 \text{ ka}$)、斜率(约 32 ka)与岁差(约 12 ka)米兰科维奇旋回信号,得出 SE 事件发生时长约 $8.2 \pm 1.2 \text{ Ma}$,并提出该段地层地球轨道参数变化主要是由于大陆硅质碎屑

表 1 前寒武纪地球轨道参数统计表

Table 1 Earth’s orbital parameters in Precambrian

研究区域/地层/地层年代	短偏心率 (ka)	长偏心率 (ka)	斜率 (ka)	岁差 (ka)	参考文献
美国死亡山谷地区 Johnnie 组 560~580 Ma	94. 93~123. 95		29. 89~36. 25	12	Minguez et al. , 2015
澳大利亚南部 Wonoka 组	95~124	405			Minguez and Kodama, 2017
华南板块云南陡山沱三段~551Ma	80~135	405. 6	25~29	22	Gong Zheng et al. , 2017
			25. 9~28. 9	19. 7~20. 8	
华南板块宜昌陡山沱组~630 Ma	82,86,100,128,133	405	25,30,36		Sui Yu et al. , 2018, 2019
南澳大利亚~620 Ma	95~130	405	28~30	15~20	Williams, 2000
~630 Ma 理论研究	95,99,123,131	405	27. 1,32. 6,36	15. 4,18. 2	Berger and Loutre, 1994
~630 Ma 理论研究	95~131	405	26. 3~35. 5	15. 2~21. 8	Waltham, 2015
华南板块贵州松涛大塘坡组 ~650 Ma	109,118	405	28. 2~30. 3	16~21. 8	Bao Xiujuan et al. , 2018
	116		28. 2,30. 3, 34. 6,36. 4	16,18. 4, 20. 5,21. 8	包秀娟, 2020
1000 Ma 理论研究	100,123	410	25. 5,30	14. 8,17. 1	Berger and Loutre, 1994
华北本溪地区南芬组 1. 1 Ga	~100	405	20. 9~21. 4	12. 7~16	包秀娟, 2020
下马岭组 1350 Ma 理论值	100,123	410	23. 4,27. 2	14. 1,16. 2	范文博, 2014
华北板块下马岭组 1400 Ma	86,113,126	405	21,27,30	12,14,16	Zhang Shuichang et al. , 2015
华北板块下马岭组 1400 Ma	95~131	405		12. 5~14. 4	Meyers and Malinverno, 2018
蓟县洪水庄组 1480 Ma	128	405	22~26	15	任传真等, 2019
华北雾迷山组~1. 5 Ga	100	410			Mei Mingxiang et al. , 2001
1500 Ma 理论研究	100,123	410	22. 5,26	13. 8,15. 8	龚一鸣等, 2008
1500 Ma 理论研究				13. 765~15. 750	Berger and Loutre, 1994
华北雾迷山组 1. 6 Ga	100	405			Mei Mingxiang et al. , 2001; 郑斌嵩, 2014
华北团山子组~1. 64 Ga	100	410			梅冥相, 1998
加拿大西北地区 Rocknest 组 1. 89 Ga	100		18		Grotzinger, 1986
2000 Ma 理论研究	100,123	410	19. 6,22. 1	12. 6,14. 3	龚一鸣等, 2008
南非 Kuruman 组 2. 48 Ga	100	405			Lantink et al. , 2019
西澳大利亚 BIF Dales Gorge 段	95,99,124,131	405	14. 5,16. 5, 16. 7,18. 5	11. 3,11. 4, 12. 5,12. 9	Oliveira Carvalho Rodrigues et al. , 2019
2500 Ma 理论研究			16. 7,18. 5	11. 3,12. 7	Berger and Loutre, 1994
津巴布韦 Cheshire 组 2. 65 Ga	112	413		11~12. 2	Hofmann et al. , 2004

岩周期性或准周期性振荡输入造成的,而陆源碎屑的振荡性输入是由于受天文气候周期性变化影响的径流(降雨强度)对大陆表层物质的冲刷作用造成的(Summa, 1993)。Minguez 和 Kodama (2017)选取澳大利亚 Bunyerroo Gorge 剖面 Wonoka 组地层进行研究,得到短偏心率(95 ~ 124 ka)和长偏心率(405 ka)米兰科维奇旋回信号。该组地层沉积循环同样受控于天文气候周期性影响的降雨量变化对大陆硅质碎屑的周期性冲刷作用。华南地区也记录了 SE 事件(Condon et al. , 2005; Cui Huan et al. , 2017)。Gong Zheng 等(2017)通过对云南东部东大河剖面陡山沱三段碳酸盐岩进行研究得到短偏心率(80 ~ 135 ka)、长偏心率(405. 6 ka)、斜率(25 ~ 29 ka)和岁差(19. 7 ~ 22 ka);并指出该段地层记录了地球轨道参数影响下的埃迪卡拉纪气候循环。Sui Yu 等(2018, 2019)通过对湖北秭归九龙

湾剖面陡山沱组地层进行研究得到~630 Ma 和 570 ~ 550 Ma 地层的长偏心率、短偏心率、斜率和岁差,也提出地球轨道参数旋回对于埃迪卡拉纪气候演变存在重要影响。Gong Zheng 等(2019)对于贵州省松桃市黄连坝剖面陡山沱组地层研究也验证了以上结论。

除了 SE 事件,古元古代 2. 0 Ga 时期也发生了一次重大碳同位素漂移事件,即 Shunga 事件(Melezhik et al. , 1999)。Shunga 事件时期,地层记录了古元古代巨厚的碳质沉积,其碳同位素组成指示碳质物质为生物成因(Melezhik et al. , 1999)。Moser 等(2011)提出 Shunga 事件可能和 Vredefort 撞击事件(2023 Ma)有关。Young (2013)认为 Shunga 事件应该是一次重大的生物灭绝事件,且比白垩纪—第三纪生物灭绝事件严重得多。与大氧化事件有关的有机物质爆发在 Vredefort 撞击事件后

突然终止,并造成 Shunga 事件。Chadwick 等 (2001) 在格陵兰岛南部地区同时期地层中也发现了砂状硅酸盐球粒,并将其归因于 Vredefort 撞击事件。Buseck 等 (1992) 在 Shunga 事件沉积物中发现富勒烯,将其归因于 Sudbery 撞击事件 (1850 Ma)。尽管对 Shunga 事件生物成因的碳质物质起源尚未完全了解,但该事件与撞击事件的联系为类似解释提供了间接证据 (Young, 2013)。

2.3.3 条带状铁建造

条带状铁建造 (BIF) 是前寒武纪沉积序列中的富铁沉积岩层,主要分布在古太古代—古元古代 (2.8 ~ 1.85 Ga),具有全球对比意义 (Young and Williams, 2020)。BIF 是世界上最重要的铁矿类型和资源,也记录了前寒武纪时期丰富的地质、环境和生物演化的信息,因此,一直都是前寒武纪研究的重要课题 (赵振华, 2010; 张连昌等, 2012)。

Franco 和 Hinnov (2008) 对西澳大利亚 Hamersley 群 Brockman Iron 组岩心照片的高分辨灰度数据进行了时频分析,在约 2.50 ~ 2.46 Ga 的条带状铁建造 (BIF) 中,识别出米兰科维奇至亚轨道周期信号。Lantink 等 (2019) 通过旋回地层学、高精度 CA-ID-TIMS、U-Pb 定年方法对南非 2.48 Ga Griqualand 盆地西部古元古代 Kuruman 组 BIF 地层进行研究,提出 2.48 Ga 前 BIF 形成及同时期气候条件受控于米兰科维奇长周期调谐,主要周期为 405 ka、1.4 ~ 1.6 Ma。Oliveira Carvalho Rodrigues 等 (2019) 对西澳大利亚 2.5 Ga Dales Gorge 段 BIF 进行研究,在米级尺度上得到与海平面升降旋回相关的长偏心率周期 (405 ka),在厘米级尺度上分析出岁差、斜率和长短偏心率的优势谱峰,并指出在该时期缓慢变化的环境条件下,BIF 系统且剧烈的变化,可能和 Hamersley 盆地低频海平面变化和/或构造演化有关。

2.3.4 氧化事件

前寒武纪主要发生两次大氧化事件 (图 3)。太古宙时期 (约 2.3 Ga 之前),地球大气氧含量低于现代大气水平的 0.001% (Pavlov and Kasting, 2002; Canfield, 2014)。2.4 ~ 2.1 Ga 时期,地球大气圈发生氧化事件,这一事件被称为大氧化事件 (GOE) (Holland, 2002; Bekker et al., 2004; Guo Qingjun et al., 2009; 赵振华, 2010)。目前针对 GOE 发生时期形成的地层,尚无高质量地球轨道参数研究成果。但大氧化事件和地球轨道参数变化可能存在间接联系。目前认为,GOE 的形成除了与该

时期微生物有氧呼吸活动有关 (Lepot, 2020),可能还与地球内部未知氧源的释放有关。Gradstein 等 (2012) 指出约 2.5 Ga,地球开始冷却,地球内部温度降低且快速膨胀。该时期内大陆壳组成开始发生变化,其形成的岩浆由镁铁质转变为长英质;长英质地壳的形成减少了地幔源还原剂向地球表面和大气圈输送的通量,从而促进了大气圈氧气的积累 (Lee et al., 2016)。此外,该时期大陆壳可能存在岩石相变,地球内部物理条件的变化使得岩石中大量硅氧键发生断裂,从而形成游离氧;小行星撞击事件使得地层中的游离氧得以释放,最终提升大气圈氧气含量。

GOE 事件之后,1.85 ~ 0.85 Ga 期间,地球环境基本维持不变,因此这段时间也被称为 Boring Billion (Buick et al., 1995; Holland, 2006)。0.8 ~ 0.54 Ga 的前寒武纪—寒武纪过渡时期发生了第二次大氧化事件,即新元古代氧化事件 (NOE; Shields-Zhou and Och, 2011)。新元古代氧化事件前后一直被认为是地质历史中的关键转折时期,是地表环境从低氧到富氧、生物种群从原核类到真核类再到真核类的进化辐射期 (汪建国等, 2009; 朱茂炎, 2010; Yuan Xunlai et al., 2013; 张兴亮等, 2014; 叶云涛等, 2017; Young and Williams, 2020)。

2.3.5 冰期事件

前寒武纪发生的 3 次重大冰期事件均集中于元古宙 (图 3)。元古宙的地球气候以重大冰期事件为标志,整体上是温暖、稳定的气候环境 (包秀娟, 2020)。2.45 ~ 2.1 Ga 期间,地球出现全球性冰期事件,被称为古元古代冰期事件 (Young, 2013)。Boring Billion 时期 (1.8 ~ 0.8 Ga),沉积岩中缺少重要冰期事件的记录 (Young and Williams, 2020),但古元古代晚期到中元古代的地层中出现少量区域性冰期事件的记录 (Williams, 2005)。新元古代后,地球再次发生冰期事件 (Sturtian 冰期,717 ~ 659 Ma) (Preiss et al., 2011)。在经历短暂的成冰系间冰期之后,地球发生第三次雪球地球事件 (Elatina/Marinoan 冰期,639 ~ 635 Ma) (Young and Williams, 2020)。

Bao Xiujuan 等 (2018) 通过分析华南板块大塘坡组磁化率测量值,得到长偏心率 (405 ka)、短偏心率 (109 ~ 118 ka)、斜率 (41 ka) 和岁差 (18 ~ 24 ka)。包秀娟 (2020) 更新了以上研究结果,得到短偏心率 (116 ka)、斜率 (28.2, 30.3, 34.6, 36.4

ka) 和岁差 (16, 18.4, 20.5, 21.8 ka); 并结合 ~659 Ma Sturtian 冰期的结束时间, 判断 Marinoan 冰期的开始时间约为 649 Ma。

包秀娟 (2020) 通过对华南板块大塘坡组进行磁化率研究, 发现下部磁化率逐渐增加, 体现海洋水体从还原到氧化条件的转化过程; 上部磁化率继续增加, 且伴随沉积颗粒粒度的增大, 该现象可能是由于海平面抬升引起的; 大塘坡组的旋回特征显示了类似“中更新世气候转型”的特征。此外, 包秀娟 (2020) 分析了华北板块南芬组地层记录的地球轨道参数, 发现该段缺乏短偏心率 (~100 ka) 周期, 认为可能是无冰期的气候特征, 提出极地冰期会加强短偏心率对气候的影响。

此外, 高地球倾角假说 (High-Obliquity Hypothesis, HOH) 为元古宙雪球地球事件 (Snowball Earth Hypothesis, SEH) 提供了一个合理的解释 (Williams, 2008)。经古地磁研究表明, 元古宙冰期事件是在低古纬度地区形成的 (Schmidt et al., 2009; Williams et al., 2016); 且大多数沉积于古纬度小于 20° 的地区。Jenkins (2000, 2004) 提出元古宙地球具有高黄道倾角 (即地球自转轴的倾斜度, 目前为 23.4°), 倾角 > 54°, 以此来模拟低古纬度冰期事件与季节性气候的演化。在此模型下, 夏至时的高纬度地区炎热, 以至于积雪无法在高纬度地区产生冰盖; 低纬度 (<30°) 的大陆地区比两极凉爽, 因此优先被冰期化; 在陆地上, 包括低纬度地区, 会出现很大的季节性气温范围 ($\geq 40^{\circ}\text{C}$); 由于极端季节性温度变化所施加的压力, 复杂的生命形式无法生存。

综上所述, 约 550 Ma 至 2650 Ma 的地层中成功提取出可靠的旋回周期信号, 使得前寒武纪地球轨道参数定量化研究快速发展 (图 3)。前寒武纪地层中记录的长偏心率和短偏心率信号基本保持稳定; 斜率和岁差的变化与理论预测一致, 表现为随着地层年龄的减小逐渐增大, 但仍存在一定程度的波动。前寒武纪时期, 地球表生系统发生多起重大地质事件, 如大氧化事件、冰期事件和生物起源及演化事件。地球轨道参数的改变可能会影响地球表生环境系统的光照度、海平面升降以及降雨量, 但针对该地质事件与地球轨道参数演变之间的具体关系尚未明确, 需要进一步研究。此外, 前寒武纪地球轨道参数的确定仍需进一步细化, 尤其是 550 ~ 620 Ma, 1000 ~ 1400 Ma 和 1600 ~ 2500 Ma 地层记录中, 提取的参数相对匮乏, 亟待后续研究者的补充。

3 前寒武纪地球轨道参数研究面临的主要挑战和展望

上述研究实例表明地球内外动力系统对于地球轨道参数存在影响, 同时, 地球轨道参数对于地球表生环境也存在一定程度的影响, 但各个系统之间的协和演化关系研究仍存在很大的挑战。

首先, 前寒武纪地层形成年代久远。地壳隆升和地层剥蚀等过程使得地层记录缺失; 除了要考虑该时期地层的完整性, 由于前寒武纪沉积地层大多经历了变质作用和构造作用的破坏, 还要考虑长时间后期地质作用对于前寒武纪地层的改造和影响。

其次, 现有计算地球轨道参数的模型大多以年代较新的地球轨道参数为基础建立, 该参数可能与前寒武纪情况不同, 因此, 针对前寒武纪地球轨道参数计算的模拟模型仍需进一步研究; 太阳系是混沌的, 太阳系星体初始条件的不确定, 将使地球轨道参数的计算产生误差。

最后, 地球表生环境演变受到地球外动力系统、地球深部动力系统等地球内外驱动机制的影响。如, 前寒武纪两次冰期事件的发生机制可能和地球倾角、地球所接收的日照量有关; 生物的起源和演化可能和日地距离、小行星撞击事件有关, 但其中关系仍未明确。另外, 超大陆演化改变了地球表生环境的地质地貌, 从而进一步影响地球表生环境的风化过程、气候条件等; 而地球轨道参数变化和超大陆演化存在的耦合关系至今也尚不明确。因此, 深入研究早期地球气候演变机制和地球轨道参数演变模型的关系需要明确不同时间和空间尺度下地球各圈层与地球内外影响因素的响应。

致谢: 感谢审稿专家和编辑提出的宝贵意见和建议!

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 包秀娟. 2020. 元古代晚期无冰期气候条件下的旋回地层研究. 导师: 张世红. 北京: 中国地质大学 (北京) 博士学位论文: 1 ~ 111.
- 陈廷恩. 2005. 地球旋转膨胀与冈瓦纳古陆裂解. 地球学报, 26 (3): 195 ~ 202.
- 陈志耕. 1992. 地球膨胀说提出、发展及其主要事实依据. 河北地质学院学报, 15(6): 586 ~ 594.
- 陈志耕. 1999. 地球有限膨胀演化模型. 科学通报, 44(9): 912 ~ 920.
- 陈志耕. 2013. 软流层的地球膨胀成因及其形成时间. 地球科学进

- 展, 28(7): 834~846.
- 陈志耕, 万明华. 1985. 类地行星半径与转动惯量系数相关关系及其地球动力学意义. 天体物理学报, 5(4): 73 ~ 82.
- 范文博. 2014. 河北怀来赵家山下马岭组高分辨率旋回地层初步研究. 导师: 苏文博. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1 ~ 83.
- 高懿, 萧耐园. 2007. 地月系潮汐演化长期趋势的估计. 天文学报, 48(4): 456 ~ 462.
- 龚一鸣, 杜远生, 童金南, 张克信, 冯庆来, 谢树成, 胡斌, 齐永安, 张国成. 2008. 旋回地层学: 地层学解读时间的第三里程碑. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4): 443 ~ 457.
- 李启斌, 肖兴华, 李致森. 1973. 中国大陆强地震与地球自转角速度长期变化关系的初步分析. 地球物理学报, 16(1): 71 ~ 80.
- 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(中国地质大学(北京); 北京大学), 22(6): 10 ~ 26.
- 刘光泓, 张世红, 吴怀春. 2020. 前寒武纪旋回地层学研究的进展与挑战. 地层学杂志, 44(3): 239 ~ 249.
- 梅冥相, 白志达, 徐德斌, 孙立新. 1998. 河北兴隆团山子组旋回层序特征及地层格架. 桂林学院学报, 18(1): 35 ~ 40.
- 任传真, 褚润建, 吴怀春, 房强. 2019. 天津蓟县剖面前寒武系洪庄组——铁岭组米兰科维奇旋回. 现代地质, 33(5): 979 ~ 989.
- 孙卫东, 谢国治, 张丽鹏, 刘鹤, 李聪颖, 孙塞军. 2021. 板块俯冲起始与大陆地壳演化. 地质学报, 95(1): 32 ~ 41.
- 王鸿祯. 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考. 地学前缘, 4(3): 1 ~ 12.
- 汪建国, 陈代钊, 严德天. 2009. 重大地质转折期的碳、硫循环与环境演变. 地学前缘, 16(6): 33 ~ 47.
- 吴智勇. 1996. 潮汐韵律层的研究进展及其天文地质意义. 地球物理学进展, 114(4): 100 ~ 111.
- 徐道一, 张勤文, 杨正宗, 孙亦因. 1982. 天文地质学的几个基本问题探讨. 地质科技情报, S1: 182 ~ 184.
- 许英奎, 朱丹, 王世杰, 刘耘. 2012. 月球起源研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 31(5): 516 ~ 521.
- 伊海生, 时志强, 杨伟, 惠博. 2010. 湖相叠层石纹层生长节律记录的天文周期信号. 沉积学报, 28(3): 405 ~ 411.
- 叶云涛, 王华建, 翟丽娜, 周文喜, 王晓梅, 张水昌, 吴朝东. 2017. 新元古代重大地质事件及其与生物演化的耦合关系. 沉积学报, 35(2): 203 ~ 216.
- 袁立新. 2008. 引力常数变化的地、月系统证据分析及天体膨胀和光谱的非宇宙学红移. 云南大学学报: 自然科学版, 30(S1): 309 ~ 319.
- 袁立新. 2011. 核、幔非均匀膨胀过程中的地核超速自转. 吉林师范大学学报(自然科学版), 32(1): 101 ~ 109.
- 袁学诚, 姜枚, 耿树方. 2015. 暗物质暗能量与地球动力学. 地质学报, 89(12): 2213 ~ 2224.
- 张朝文. 1981. 大地构造理论的对立统一和发展(二)——地球收缩说和膨胀说之争. 地震, 2: 1 ~ 3.
- 张连昌, 翟明国, 王渝生, 郭敬辉, 代堰鎔, 王长乐, 刘利. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431 ~ 3445.
- 张兴亮, 舒德干. 2014. 寒武纪大爆发的因果关系. 中国科学: 地球科学, 44(6): 1155 ~ 1170.
- 赵振华. 2010. 条带状铁建造(BIF)与地球大氧化事件. 地学前缘, 17(2): 1 ~ 12.
- 郑斌嵩. 2014. 雾迷山旋回层: 米级旋回的一个特例. 现代地质, 28(2): 292 ~ 297.
- 周瑶琪. 2018. 地球节律, 中国石油大学(华东)出版社.
- 周瑶琪, 陈海云, 冀国盛. 2002. 华北寒武、奥陶系灰岩潮汐韵律与地月轨道参数的演化. 地球科学——中国地质大学学报, 27(6): 671 ~ 675.
- 周瑶琪, 章大港, 吴智平, 颜世勇, 冀国盛. 2013. 地球动力系统及演化. 北京: 科学出版社.
- 周瑶琪, 赵振宇, 冀国盛. 2005. 奥陶纪以来生物贝壳生长纹层与地月轨道参数的演化. 生态环境学报, 14(5): 625 ~ 630.
- 朱茂炎. 2010. 动物的起源和寒武纪大爆发: 来自中国的化石证据. 古生物学报, 49(3): 269~287.
- Agnor C B, Canup R M, Levison H F. 1999. On the character and consequences of large impacts in the late stage of terrestrial planet formation. Icarus, 142: 219 ~ 237.
- Andrews S M, Wilner D J, Zhu Zhaohuan, Birnstiel T, Carpenter J M, Pérez L M, Bai Xuening, Öberg K I, Hughes A M, Isella A. 2016. Ringed substructure and a gap at 1 AU in the nearest protoplanetary disk. The Astrophysical Journal Letters, 820(2): L40.
- Asphaug E. 2014. Impact origin of the Moon? Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 42: 551 ~ 578.
- Bao Xiujian. 2020. Cyclostratigraphic Study in Late Proterozoic Ice-free Climate. Supervisor: Zhang Shihong. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1 ~ 111.
- Bao Xiujian, Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Wu Huaichun, Li Haiyan, Wang Xinqiang, An Zhengze, Yang Tianshui. 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China. Earth and Planetary Science Letters, 483(2018): 52 ~ 63.
- Batenburg S J, Gale A S, Sprovieri M, Hilgen F, Thibault N, Boussaha M, Orue-Etxebarria X. 2014. An astronomical time scale for the Maastrichtian based on the Zumaia and Sopelana sections (Basque country, northern Spain). Journal of the Geological Society, 171(2): 165 ~ 180.
- Bekker A, Holland H D, Wang P L, Ili D R, Stein H J, Hannah J L, Coetsee L L, Beukes N J. 2004. Dating the rise of atmospheric oxygen. Nature, 427: 117 ~ 120.
- Berger A, Imbrie J, Hays J, Kukla G, Saltzman B. 1984. Milankovitch and climate: understanding the response to astronomical forcing. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Palisades, 1982. Two volumes. Springer Netherlands.
- Berger A, Loutre M F. 1994. Astronomical forcing through geological time. Orbital Forcing and Cyclic Sequences: International Association of Sedimentologists Special Publication, 19: 15 ~ 24.
- Berger A, Loutre M F, Lasker J. 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. Science, 255: 560 ~ 568.
- Bertin G, Lin C C, Elmegreen B G. 1997. Spiral structure in galaxies: a density wave theory. Physics Today, 50(4): 66, 68.
- Bjerrum C J, Canfield D E. 2011. Towards a quantitative understanding of the Late Neoproterozoic carbon cycle. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(14): 5542 ~ 5547.
- Botke W F, Vokrouhlicky D, Marchi S, Swindle T, Scott E R D, Weirich J R, Levison H. 2015. Dating the Moon-forming impact event with asteroidal meteorites. Science, 348(6232): 321 ~ 323.
- Bowers D G, Roberts E M. 2019. Tides: A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press: 18 ~ 31.
- Buick R, Des Marais D J, Knoll A H. 1995. Stable isotopic compositions of carbonates from the Mesoproterozoic Bangemall

- Group, northwestern Australia. *Chemical Geology*, 123 (1 ~ 4): 153 ~ 171.
- Buseck P R, Tsipursky S J, Hettich R. 1992. Fullerenes from the geological environment. *Science*, 257: 215 ~ 216.
- Canfield D E. 2014. Proterozoic Atmospheric Oxyge. *Treatise on Geochemistry*, 197 ~ 216.
- Cannon W, Schulz K J, Wright Horton Jr J, Kring D A. 2010. The Sudbury impact layer in the Paleoproterozoic iron~ranges of northern Michigan. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 50 ~ 75.
- Canup R M. 2012. Forming a Moon with an Earth~like composition via a giant impact. *Science*, 338(6110): 1052 ~ 1055.
- Canup R M. 2014. Lunar-forming impacts: processes and alternatives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372 (2024): 20130175.
- Canup R M, Asphaug E. 2001. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature*, 412: 708~712.
- Carey S W. 1958. A tectonic approach to continental drift Syrup *Continental Drift*. Hobart, 177~355.
- Carey S W. 1975. The expanding Earth—An essay review. *Earth Science Reviews*, 11(1975): 105 ~ 143.
- Chadwick B, Claeys P, Simonson B. 2001. New evidence for a large Palaeoproterozoic impact: spherules in a dolomite layer in the Ketilidian orogen, South Greenland. *Journal of the Geological Society, London*, 158: 331 ~ 340.
- Chen Tingyu. 2005&. The expansion of the rotating Earth and the breakup of gondwanaland. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(3): 195 ~ 202.
- Chen Zhigeng. 1992&. On the Earth expansion. *Journal of Hebei College of Geology*, 15(6): 586 ~ 594.
- Chen Zhigeng. 1999#. The finite expansion evolution model of the earth. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 912 ~ 920.
- Chen Zhigeng. 2013&. The Earth expansion generated the asthenosphere and its formation time. *Advances in Earth Science*, 28(7): 834 ~ 846.
- Chen Zhigeng, Wan Minghua. 1985&. The correlation between the radii and the rotational inertia coefficients of the terrestrial planets and its geodynamical implication. *Acta Astrophysica Sinica*, 5(4): 73 ~ 82.
- Condon D, Zhu Maoyan, Bowring S, Wang Wei, Yang Aihua, Jin Yugan. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308(5718): 95 ~ 98.
- Cui Huan, Kaufman A J, Xiao Shuhai, Zhou Chuanming, Liu Xiaoming. 2017. Was the Ediacaran Shuram Excursion a globally synchronized early diagenetic event? Insights from methane-derived authigenic carbonates in the uppermost Doushantuo Formation, South China. *Chemical Geology*, 450: 59 ~ 80.
- Ćuk M, Stewart S T. 2012. Making the Moon from a fast-spinning Earth: a giant impact followed by resonant despinning. *Science*, 338 (6110): 1047 ~ 1052.
- Davatzes A K, Goderis S, Simonson B M. 2019. Archean asteroid impacts on earth. *Earth's Oldest Rocks (Second Edition)*, 169 ~ 185.
- Darwin G H. 1879. On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, part 2, 170: 447 ~ 530.
- Derry L A. 2010. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram—Wonoka carbon isotope anomaly. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1 ~ 2): 152 ~ 162.
- Egyed L. 1956. The change of the Earth's dimensions determined from palaeogeographical data. *Geofisica pura e applicata*, 33: 42 ~ 48.
- Elkins-Tanton L T. 2008. Linked magma ocean solidification and atmospheric growth for Earth and Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1): 181 ~ 191.
- Elkins-Tanton L T. 2012. Magma oceans in the inner Solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1): 113 ~ 139.
- Eriksson P G, Banerjee S, Catuneanu O, Corcoran P L, Eriksson K A, Hiatt E E, Laflamme M, Lenhardt N, Long D G F, Miall A D, Mints M V, Puffahl P K, Sarkar S, Simpson E L, Williams G E. 2013. Secular changes in sedimentation systems and sequence stratigraphy. In: Kusky T, Stern R, Dewey J. *Secular Changes in Geologic and Tectonic Processes*. *Gondwana Research*, 24(2): 468 ~ 489.
- Fan Wenbo. 2014&. Preliminary study of high-resolution cyclostratigraphic sequences of Zhaojiashan section of Xiamaling Formation, Huailai county, Hebei Province. Supervisor: Su Wenbo. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1 ~ 83.
- Fang Qiang, Wu Huaichun, Hinnov L A, Jing Xiuchun, Wang Xunlian, Yang Tianshui, Li Haiyan, Zhang Shuichang. 2017. Astronomical cycles of Middle Permian Maokou Formation in South China and their implications for sequence stratigraphy and paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 130 ~ 139.
- Feulner G. 2012. The faint young Sun problem. *Reviews of Geophysics*, 50: RG2006/2012.
- Fike D A, Grotzinger J P, Pratt L M, Summons R E. 2006. Oxidation of the Ediacaran Ocean. *Nature*, 444(7120): 744 ~ 747.
- Franco D R, Hinnov L A. 2008. Strong rhythmicity in the ~2.46~2.50 Ga banded iron formation of the Hamersley Group (W. Australia): Evidence for sub-orbital to Milankovitch scale cycles.
- Gao Yi, Xiao Yiyuan. 2007&. An estimation on the long-period tendency of the tidal evolution of the Earth—lunar system. *Acta Astronomica Sinica*, 48(4): 456 ~ 462.
- Glikson A, Hickman A, Evans N J, Kirkland C L, Park J W, Rapp R, Romano S. 2016. A new 3.46 Ga asteroid impact ejecta unit at Marble Bar, Pilbara Craton, Western Australia: a petrological, microprobe and laser ablation ICPMS study. *Precambrian Research*, 279: 103 ~ 122.
- Gong Yiming, Du Yuansheng, Tong Jinnan, Zhang Kexin, Feng Qinglai, Xie Shucheng, Hu Bin, Qi Yongan, Zhang Guocheng. 2008&. Cyclostratigraphy: The third milestone of Stratigraphy on understanding time. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 443 ~ 457.
- Gong Zheng, Kodama K P, Li Yongxiang. 2017. Rock magnetic cyclostratigraphy of the Doushantuo Formation, South China and its implications for the duration of the Shuram carbon isotope excursion. *Precambrian Research*, 289: 62 ~ 74.
- Gong Zheng, Kodama K P, Li Yongxiang. 2019. Paleomagnetism and rock magnetic cyclostratigraphy of the Ediacaran Doushantuo Formation, South China: Constraints on the remagnetization mechanism and the encoding process of Milankovitch cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 528: 232 ~ 246.
- Gough D. 1981. Solar interior structure and luminosity variations. *Solar Physics*, 74: 21 ~ 34.
- Gradstein F M, Ogg J G, Hilgen F J. 2012. On the geological time scale. *Newsletters on Stratigraphy*, 45(2): 171 ~ 181.
- Grey K, Walter M R, Calver C R. 2003. Neoproterozoic biotic diversification: “Snowball Earth” or aftermath of the Acraman

- impact? *Geology*, 31: 459 ~ 462.
- Grotzinger J P. 1986. Cyclicity and paleoenvironmental dynamics, Rocknest Platform, Northwest Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 97(10): 1208 ~ 1231.
- Grotzinger J P, Fike D A, Fischer W W. 2011. Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history. *Nature Geoscience*, 4: 285 ~ 292.
- Guo Qingjun, Strauss H, Kaufman A J, Schröder S, Gutzmer J, Wing B, Baker M A, Bekker A, Jin Qusheng, Kim S T, Farquhar J. 2009. Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean—Proterozoic transition. *Geology*, 37(5): 399 ~ 402.
- Halm J K E. 1935. An astronomical aspect of the evolution of the earth. *The Journal of Astronomical Society of South Africa*, IV (1): 1 ~ 28.
- Hartmann W K, Vail S M. 1986. Giant impactors: plausible sizes and populations, in *Origin of the Moon* (eds W. K. Hartmann, R. J. Phillips and G. J. Taylor). Houston: Lunar and Planetary Institute, 551 ~ 566.
- Hassler S W, Simonson B M, Sumner D Y, Bodin L. 2011. Paraburdoo spherule layer (Hamersley Basin, Western Australia): distal ejecta from a fourth large impact near the Archean—Proterozoic boundary. *Geology*, 39: 307 ~ 310.
- Harris A W, Kaula W M. 1975. Co-accretion model of satellite formation. *Icarus*, 24(4): 516 ~ 524.
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. 1976. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194: 1121 ~ 1132.
- Herzberg C. 2014. Archean drips. *Nature Geosciences*, 7(1): 7 ~ 8.
- Hilgen F, Kuiper K, Krijgsman W, Snel E, Laan E V D. 2007. Astronomical tuning as the basis for high resolution chronostratigraphy: the intricate history of the Messinian Salinity Crisis. *Stratigraphy*, 4(2 ~ 3): 231 ~ 238.
- Hilgenberg O C. 1933. *Vom wachsenden Erdball* Berlin, 56.
- Hinnov L A. 2013. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences. *Geological Society of America Bulletin*, 125(11 ~ 12): 1703 ~ 1734.
- Hinnov L A, Hilgen F J. 2012. Cyclostratigraphy and astrochronology. *The Geologic Time Scale*, 63.
- Hofmann A, Dirks P, Jelsma H A. 2004. Shallowing-upward carbonate cycles in the Belingwe Greenstone Belt, Zimbabwe: A record of Archean sea-level oscillations. *Journal of Sedimentary Research*, 74(1): 64 ~ 81.
- Holland H D. 2002. Volcanic gases, black smokers, and the Great Oxidation Event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 3811 ~ 3826.
- Holland H D. 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Science*, 361: 903 ~ 915.
- Jacobson S A, Morbidelli A. 2014. Lunar and terrestrial planet formation in the Grand Tack scenario. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 372 (2024): 20130174.
- Jeffreys H. 1930. The resonance theory of the origin of the moon (Second paper). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 130, 91(1): 169 ~ 173.
- Jenkins G S. 2000. Global climate model high-obliquity solutions to the ancient climate puzzles of the Faint—Young Sun Paradox and low-latitude Proterozoic glaciation. *Journal of Geophysical Research*, 105: 7357 ~ 7370.
- Jenkins G S. 2004. High obliquity as an alternative hypothesis to early and late Proterozoic extreme climate conditions. In: Jenkins G S, McMenamin M A S, McKay C P, and Sohl L (eds.) *The Extreme Proterozoic: Geology, Geochemistry and Climate*, 183 ~ 192.
- American Geophysical Union *Geophysical Monograph* 146.
- Johnson T E, Brown M, Kaus B J P, Vantongeren J A. 2014. Delamination and recycling of Archean crust caused by gravitational instabilities. *Nature Geosciences*, 7(1): 47 ~ 52.
- Kleine T, Palme H, Mezger K, Halliday A N. 2005. Hf—W chronometry of lunar metals and the age and early differentiation of the moon. *Science*, 310(5754): 1671 ~ 1674.
- Knoll A H, Bergmann K D, Strauss J V. 2016. Life: the first two billion years. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371 (1707): 20150493.
- Kremp G O W. 1992. Earth expansion theory versus static Earth assumption // Chatterjee S et al. eds. *New concepts in global tectonics*. Lubbock: Texas Tech Univ. Press.
- Lantink M L, Davies J H F L, Mason P R D, Schaltegger U, Hilgen F. 2019. Climate control on banded iron formations linked to orbital eccentricity. *Nature Geoscience*, 12(5): 369 ~ 374.
- Laskar J. 1989. A numerical experiment on the chaotic behavior of the Solar System. *Nature*, 338: 237 ~ 238.
- Laskar J. 2006. Long-term solution for the insolation quantities of the earth. *Proceedings of the International Astronomical Union*.
- Laskar J, Fienga A, Gastineau M, Manche H. 2011. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the earth. *Astronomy and Astrophysics*, 532 (2): 784 ~ 785.
- Laskar J, Joutel F, Robutel P. 1993. Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon. *Nature*, 361: 615 ~ 617.
- Laskar J, Robutel P, Joutel F, Gastineau M, Correia A, Levrard B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428 (1): 261 ~ 285.
- Lee C T A, Yeung L Y, McKenzie N R, Yokoyama Y, Ozaki K, Lenardic A. 2016. Two-step rise of atmospheric oxygen linked to the growth of continents. *Nature Geoscience*, 9(6): 1 ~ 10.
- Lepot K. 2020. Signatures of early microbial life from the Archean (4 to 2.5 Ga) eon. *Earth Science Review*, 209(2020): 103296.
- Li Qibin, Xiao Xinghua, Li Zhisen, 1973&. A preliminary study on the relation between the great earthquakes of China and the secular variation of the angular velocity of rotation of the Earth. *Acta Geophysica Sinica*, 16(1): 71 ~ 80.
- Li Sanzhong, Xu Lingqing, Zhang Zhen, Sun Wenjun, Dai Liming, Guo Lingli, Cao Huahua, Zhang Guowei. 2015&. Precambrian geodynamics (II): Early Earth. *Earth Science Frontiers*, 22 (6): 10 ~ 26.
- Lindemann, B. 1927. Kettengeblüge, kontinentale Zerspaltung und Erdexpansion. *Gustav Fischer Publ, Jena*, pp186.
- Liu Guanghong, Zhang Shihong, Wu Huaichun. 2020&. Progress and challenges in Precambrian cyclostratigraphy research. *Journal of Stratigraphy*, 44(3): 239 ~ 249.
- Lowe D R, Byerly G R, Kyte F T. 2014. Recently discovered 3.42~3.23 Ga impact layers, Barberton Belt, South Africa: 3.8 Ga detrital zircons, Archean impact history, and tectonic implications. *Geology*, 42(9): 747 ~ 750.
- Ma Chao, Meyers S R, Sageman B B. 2017. Theory of chaotic orbital variations confirmed by Cretaceous geological evidence. *Nature*, 542: 468 ~ 470.
- Ma Chao, Meyers S R, Sageman B B. 2019. Testing Late Cretaceous astronomical solutions in a 15 million year astrochronologic record from North America. *Earth and Planetary Science Letters*, 513 (2019): 1 ~ 11.
- Mei Mingxiang, Bai Zhida, Xu Debin, Sun Lixin. 1998&. Cyclic-sequences and stratigraphic framework of Ruanshanzi Formation of middle Proterozoic, Xinlong, Hebei. *Journal of Guilin Institute of*

- Technology, 18(1): 35 ~ 40.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Guo Qingyin. 2001. Basic lithofacies—succession model for the Wumishan cyclothems; their Markov Chain analysis and regularly vertical stacking patterns in the third-order sequences. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 75: 421 ~ 431.
- Melezhik V A, Fallick A E, Fillipov M M, Larsen O. 1999. Karelian shungite: an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil shale and generation of petroleum; geology, lithology and geochemistry. *Earth-Science Reviews*, 47(1): 1 ~ 40.
- Meyers S R, Malinverno A. 2018. Proterozoic Milankovitch cycles and the history of the solar system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(25): 6363 ~ 6368.
- Milankovitch M. 1941. Canon of insolation and the ice-age problem; Belgrade. Serbian Academy of Sciences and Arts, Section of Mathematical and Natural Sciences, 634.
- Minguez D, Kodama K P. 2017. Rock magnetic chronostratigraphy of the Shuram carbon isotope excursion; Wonoka Formation, Australia. *Geology*, 45(6): 567 ~ 570.
- Minguez D, Kodama K P, Hillhouse J W. 2015. Paleomagnetic and cyclostratigraphic constraints on the synchronicity and duration of the Shuram carbon isotope excursion, Johnnie Formation, Death Valley Region, CA. *Precambrian Research*, 266: 395 ~ 408.
- Moser D E, Cupelli C L, Barker I R, Flowers R M, Bowman J R, Wooden J, Hart J R. 2011. New zircon shock phenomena and their use for dating and reconstruction of large impact structures revealed by electron nanobeam (EBSD, CL, EDS) and isotopic U-Pb and (U—Th)/He analysis of the Vredefort dome. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48: 117 ~ 139.
- Muondjua M, Hart R J, Gilder S A, Carporzen L, Galdeano A. 2007. Magnetic imaging of the Vredefort impact crater, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(2007): 456 ~ 468.
- Newman M J, Rood R T. 1977. Implications of Solar Evolution for the Earth's Early Atmosphere. *Science*, 198 (4321): 1035 ~ 1037.
- Norman M D. 2019. Origin of the Earth and the Late Heavy Bombardment. *Earth's Oldest Rocks*, 27 ~ 47.
- Oliveira Carvalho Rodrigues P, Hinnov L A, Franco D R. 2019. A new appraisal of depositional cyclicity in the Neoproterozoic—Paleoproterozoic Dales Gorge Member (Brockman Iron Formation, Hamersley Basin, Australia). *Precambrian Research*, 328: 27 ~ 47.
- Owen H G. 1992. Has the Earth increased in size. *New Concepts in Global Tectonics*. Lubbock; Texas Tech University Press.
- Pavlov A A, Kasting J F. 2002. Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in Archean sediments; strong evidence for an anoxic Archean atmosphere. *Astrobiology*, 2(1): 27.
- Preiss W V, Gostin V A, McKirdy D M, Ashley P M, Williams G E, Schmidt P. 2011. The glacial succession of Sturtian age in South Australia; The Yudnamutana Subgroup. In: *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*, pp. 701 ~ 712. Geological Society of London Memoir 36.
- Ren Chuanzhen, Chu Runjian, Wu Huaichun, Fang Qiang. 2019. Milankovitch Cycles of the Precambrian Hongshuizhuang—Tieliang Formations at Jixian Section in Tianjin. *Geoscience*, 33(5): 979 ~ 989.
- Ringwood A E. 1960. Some aspects of the thermal evolution of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 20(3—4): 241 ~ 259.
- Rogers J J W, Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth History. *Gondwana Research*, 6(3): 357 ~ 368.
- Rubie D C, Jacobson S A, Morbidelli A, O'Brien D P, Young E D, de Vries J, Nimmo F, Palme H, Frost D J. 2015. Accretion and differentiation of the terrestrial planets with implications for the compositions of early-formed solar system bodies and accretion of water. *Icarus*, 248: 89 ~ 108.
- Rufu R, Aharonson O, Perets H B. 2017. A multiple-impact origin for the Moon. *Nature Geoscience*, 10(2): 89 ~ 94.
- Ruskol E L. 1972. Origin of Moon 3: Some aspects of dynamics of circumterrestrial swarm. *Soviet. Astronomy A J Ussr.*, 15(4): 646 ~ 654.
- Schmidt P W, Williams G E, McWilliams M O. 2009. Palaeomagnetism and magnetic anisotropy of late Neoproterozoic strata, South Australia; Implications for the palaeolatitude of late Cryogenian glaciation, cap carbonate and the Ediacaran system. *Precambrian Research*, 174: 34 ~ 52.
- Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, Johnston D T. 2013. Authigenic carbonate and history of the global carbon cycle. *Science*, 339(6119): 540 ~ 543.
- Shields-Zhou G, Och L. 2011. The case for a Neoproterozoic oxygenation event; geochemical evidence and biological consequences. *GSA Today*, 21(3): 4 ~ 11.
- Simonson B M, Sumner D Y, Beukes N J, Johnson S, Gutzmer J. 2009. Correlating multiple Neoproterozoic impact spherule layers between South Africa and Western Australia. *Precambrian Research*, 169: 100 ~ 111.
- Singer S F. 1968. Origin of moon and geophysical consequences. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 15(1 ~ 2): 205 ~ 226.
- Steiner J. 1967. The sequence of geological events and the dynamics of the Milky Way galaxy. *Geol Soc Aust J*, 14 (1): 99 ~ 131.
- Summa C L. 1993. Sedimentologic, stratigraphic, and tectonic controls of a mixed carbonate—siliciclastic succession; Neoproterozoic Johnnie Formation, southeast California. Supervisor: Southard J B. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology: 1 ~ 616.
- Sun Weidong, Xie Guozhi, Zhang Lipeng, Liu He, Li Congying, Sun Saijun. 2021. The onset of plate subduction and the evolution of continental crust. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 32 ~ 41.
- Sui Yu, Huang Chunju, Zhang Rui, Wang Zhixiang, Ogg J, Kemp D B. 2018. Astronomical time scale for the lower Doushantuo Formation of early Ediacaran, South China. *Science Bulletin*, 63(22): 1485 ~ 1494.
- Sui Yu, Huang Chunju, Zhang Rui, Wang Zhixiang, Ogg J. 2019. Astronomical time scale for the middle—upper Doushantuo Formation of Ediacaran in South China; Implications for the duration of the Shuram/ Wonoka negative $\delta^{13}\text{C}$ excursion. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 532 (2019): 109273.
- Tomasella L, Marzari F, Vanzani V. 1996. Evolution of the Earth obliquity after the tidal expansion of the Moon orbit. *Planet Space Science*, 44 (5): 427 ~ 430.
- Urey H C. 1966. The capture hypothesis of the origin of the moon. // Marsden B G, Cameron A G W. *The earth ~ moon system*. New York: Plenum.
- Waltham D. 2015. Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy. *Journal of Sedimentary Research*, 85(8): 990 ~ 998.
- Wang Hongzhen. 1997. Speculations on Earth's rhythms and continental dynamics. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 4(3): 1 ~ 12.
- Wang Jianguo, Chen Daizhao, Yan Detian. 2009. Variation in carbon and sulphur isotopes and environments during the critical geological

- transitions. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 33 ~ 47.
- Williams G E. 2000. Geological constraints on the Precambrian history of Earth's rotation and the Moon's orbit. *Reviews of Geophysics*, 38: 37 ~ 60.
- Williams G E. 2005. Subglacial meltwater channels and glaciofluvial deposits in the Kimberley basin, Western Australia: 1.8 Ga low-latitude glaciation coeval with continental assembly. *Journal of the Geological Society, London*, 162: 111 ~ 124.
- Williams G E. 2008. Proterozoic (pre-Ediacaran) glaciation and the high obliquity, low-latitude ice, strong seasonality (HOLIST) hypothesis: Principles and tests. *Earth-Science Reviews*, 87: 61 ~ 93.
- Williams G E, Schmidt P W, Young G M. 2016. Strongly seasonal Proterozoic glacial climate in low palaeolatitudes: Radically different climate system on the pre-Ediacaran Earth. *Geoscience Frontiers*, 7: 555 ~ 571.
- Williams G E, Schmidt P W, Young G M. 2019. A different angle on earth's climate history. *Australasian Science*, 40(4): 12 ~ 15.
- Williams J P, Cieza L A. 2011. Protoplanetary disks and their evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49: 67 ~ 117.
- Wise D U. 1963. An origin of moon by rotational fission during formation of earth's core. *Journal of Geophysical Research*, 68(5): 1547 ~ 1554.
- Wu Zhiyong. 1996#. Advance in the tidal rhythmites and its implications for the astro—geology. *Progress in Geophysics*, 114(4): 100 ~ 111.
- Vernekaz A D. 1972. Long-period global variations of incoming solar radiation. In: Long-period global variations of incoming solar radiation. *Meteorological Monographs*, vol 12. Boston: American Meteorological Society, MA, 1 ~ 128.
- Xu Daoyi, Zhang Qinwen, Yang Zhengzong, Sun Yiyin. 1982#. Discussion on some basic problems of astronomical geology. *Geological Science and Technology Information*, S1:182 ~ 184.
- Xu Yingkui, Zhu Dan, Wang Shijie, Liu Yun. 2012#. Recent advances of Lunar Formation Theories. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(5): 516 ~ 521.
- Yao Xu, Zhou Yaoqi, Hinnov L A. 2015. Astronomical forcing of a Middle Permian chert sequence in Chaohu, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 422 (2015): 206 ~ 221.
- Ye Yuntao, Wang Huajian, Zhai Lina, Zhou Wenxi, Wang Xiaomei, Zhang Shuichang, Wu Chaodong. 2017#. Geological Events and Their Biological Responses During the Neoproterozoic Era. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35 (2): 203 ~ 216.
- Yi Haisheng, Shi Zhiqiang, Yang Wei, Hui Bo. 2010#. Astronomical periodicity signals from lamina growth rhythm records of lacustrine stromatolites. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(3): 405 ~ 411.
- Young E D, Kohl I E, Warren P H, Rubie D C, Jacobsen S A, Morbidelli A. 2016. Oxygen isotopic evidence for vigorous mixing during the Moon-forming giant impact. *Science*, 351: 493 ~ 496.
- Young G M. 2013. Precambrian supercontinents, glaciations, atmospheric oxygenation, metazoan evolution and an impact that may have changed the second half of Earth history. *Geoscience Frontiers*, 4 (2013): 247 ~ 261.
- Young G M, Williams G E. 2020. Proterozoic Climates. In: Scott E, David A (2nd eds) *Encyclopedia of Geology*. Academic Press: 1 ~ 36.
- Yuan Lixin. 2008#. The gravitational constant decreasing and inflation of the Solar system and the planets, the non-cosmology red shift, and the quasi-stellar object. *Journal of Yunnan University*, 30 (S1): 309 ~ 319.
- Yuan Lixin. 2011#. Exceed speed rotation of the Earth's inner core in the course of non-uniform expansion for the inner core and mantle inertia. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 32(1):101 ~ 109.
- Yuan Qian, Li Mingming, Desch S J, Ko B. 2021. Giant impact origin for the large low shear velocity provinces. 52nd Lunar and Planetary Science Conference (virtually) (LPI Contribution No. 2548, id. 1980).
- Yuan Xuecheng, Jiang Mei, Geng Shufang. 2015#. Dark matter dark energy and geodynamics. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2213 ~ 2224.
- Yuan Xunlai, Chen Zhe, Xiao Shuhai, Wan Bin, Guan Chengguo, Wang Wei, Zhou Chuanming, Hua Hong. 2013. The Lantian biota: A new window onto the origin and early evolution of multicellular organisms. *Chinese Science Bulletin*, 58(7):701 ~ 707.
- Zhang Chaowen. 1981#. Tectonics theory (II): the debate between the theory of Earth contraction and expansion. *Seismology*, 2: 1 ~ 3.
- Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Wan Yusheng, Guo Jinghui, Dai Yanpei, Wang Changle, Liu Li. 2012#. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431 ~ 3445.
- Zhang Shuichang, Wang Xiaomei, Hammarlund E U. Wang Huajian, Costa M M, Bjerrum C J. Connelly J N. Zhang Baomin, Bian Lizeng, Canfield D E. 2015. Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(12): 1406 ~ 1413.
- Zhang Weijia, Connelly D P, Yu Hangjie. 2010. Possible impact at Precambrian—Cambrian boundary and its influence on biosphere. *Geological Survey and Research*, 33(3): 167 ~ 179.
- Zhang Xingliang, Shu Degan. 2014#. Causes and consequences of the Cambrian explosion. *Science China: Earth Sciences*, 57: 930 ~ 942.
- Zhao Zhenhua. 2010#. Banded iron formation and related great oxidation event. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 1 ~ 12.
- Zheng Binsong. 2014#. Wumishan Cyclothem: A typical example of meter-scale cycle. *Geoscience*, 28(2): 292~299.
- Zhou Yaoqi. 2018#. *Earth Rhythms*. China University of Petroleum Press.
- Zhou Yaoqi, Chen Haiyun, Ji Guosheng. 2002#. Tidal rhythmites in Cambrian—Ordovician, North China and evolution of orbit parameters. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 671 ~ 675.
- Zhou Yaoqi, Zhang Dagang, Wu Zhiping, Yan Shiyong, Ji Guosheng. 2013#. *Geodynamic systems and their evolution*. Beijing: Science Press.
- Zhou Yaoqi, Zhao Zhenyu, Ji Guosheng. 2005#. The growth laminates of biological shell and the evolution of orbital parameters of the Earth—Moon from Ordovician to Quaternary. *Ecology and Environment*, 14(5): 625 ~ 630.
- Zhu Maoyan. 2010#. The origin and Cambrian explosion of animals: fossil evidences from China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 49(3): 269~287.

Records and Research Progress of Earth's Orbital Parameters in Precambrian Strata

MA Qing, ZHOU Yaoqi, CAO Mengchun, YIN Xingcheng

School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580

Abstract: The Precambrian (4.6 Ga ~ 541 Ma) occupies about 90% of the earth's development history. During this period, the atmospheric composition, ocean redox conditions, global climate, and life evolution process all changed to a great extent, laying the foundation for the current earth system. Earth orbit parameters are important indicators to describe the evolution of the earth system, and are of great significance to the study of the solar—earth system, the earth—moon system, and the evolution of the earth itself. In recent years, scholars have successfully identified many reliable earth orbit parameters in the 2650 ~ 550 Ma strata on a global scale. This article summarizes the Earth's orbital parameters of the Precambrian and analyzes the influence of the extraterrestrial dynamic system and the deep-earth dynamic system on the Earth's orbital parameters. Based on the major geological events of the Precambrian, it further elaborates the influence of the Earth's orbital parameters on the surface environmental impact.

Keywords: Precambrian; earth's orbital parameters; extraterrestrial dynamics; deep earth dynamics; earth's surface environment

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41772190) and China University of Petroleum (East China) innovation engineering project (No. YCX2021006).

First author: MA Qing, female, PhD student; Email: qingma_ac@163.com

Corresponding author: ZHOU Yaoqi, male, professor, mainly working on Earth's origin and early evolution, geodynamics; Email: zhoyuq@upc.edu.cn

Manuscript received on: 2021-06-10; Accepted on: 2021-12-02; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.061

Edited by: LIU Zhiqiang

周健研究员、刘志强高级工程师获得中国科学技术协会优秀编辑称号

根据中国科学技术协会《关于申报 2021 年度中国科技期刊卓越行动计划选育高水平办刊人才项目——优秀编辑、优秀审稿人案例遴选汇编项目的通知》及《中国科技期刊卓越行动计划实施细则》有关规定,经公开申报、资格审查、专家评审、结果公示,确定了 2021 年度中国科技期刊卓越行动计划选育高水平办刊人才项目——优秀编辑(177 人)、优秀审稿人(156 人)。《地质学报》常务副主编周健研究员、

《地质论评》编辑部主任刘志强高级工程师获得了“优秀编辑”称号。同时,中石油勘探开发研究院张水昌研究员和中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员获得了“优秀审稿人”称号。

Prof. ZHOU Jian and Senior engineer LIU Zhiqiang were awarded the title of “Excellent Editors” by China Association for Science and Technology

